

## ДО РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ ГВИНТІВ КВАДРОКОПТЕРУ

Г.І. Сокол, В.Є. Некрасов, В.С. Жмурко

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна 72, м. Дніпро,  
49010 Україна, e-mail: nekrasov.valery97@gmail.com, gsokol@ukr.net, zhmurkovlad@ukr.net

**Анотація.** У роботі визначена область використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) типу квадрокоптер та зроблений розрахунок акустичного поля гвинтів як джерел шуму. Зроблений переніс теорії звукового поля повітряного гвинта літака, яку запропонував Л.Я. Гутін, на моделювання шуму від кожного з чотирьох гвинтів квадрокоптеру. Створено математичну модель розрахунку сукупного акустичного поля від усіх чотирьох гвинтів.

**Ключові слова:** БПЛА, КВАДРОКОПТЕР, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, РОЗРАХУНКИ, ШУМ ГВИНТІВ, MATHCAD.

**Аннотация.** В работе определена область использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) типа квадрокоптер и выполнен расчет акустического поля винтов как источников шума. Проведен перенос теории звукового поля воздушного винта самолета, которую предложил Л.Я. Гутин, на моделирование шума от каждого из четырех винтов квадрокоптера. Создана математическая модель расчета совокупного акустического поля от всех четырех винтов.

**Ключевые слова:** БПЛА, КВАДРОКОПТЕР, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, РАСЧЕТЫ, ШУМ ВИНТОВ, MATHCAD.

**Abstract.** The work defines the area of use of unmanned aerial vehicles (UAVs) of the type of quadcopter and calculated the acoustic field of propellers in order to reduce the level of noise at some distance. The main sources of noise, which are the hubs of the quadcopter, are considered. The first samples of UAVs appeared in the middle of the last century as a separate type of promising weapons, but now quadcopter, began to be actively used in the civilian sphere. The theory of the sound field of the aircraft's air propeller, which was proposed by L. Gutin to simulate the noise from each of the chochire screws of the quadcopter, was carried out. A mathematical model has been created for calculating the total acoustic field all the of quadcopter screws. The analysis and the defined area of use of UAVs of type quadcopter and the calculation of acoustic field of screws is given in order to reduce the noise level at some distance. The authors conducted an analytical review of the existing models of UAVs and quadcopters, considered general examples of use of quadcopters, their purpose and scope of application. On the basis of analytical review of constructions the fundamental scheme of quadcopter for researches is given. The article is driven by the principal scheme of the chosen quadcopter with the description of its main nodes. Based on the results of calculations, the noise distribution schedules of different frequencies in the space are constructed. The results from sound pressure levels for each of the five harmonics. Description of direction of acoustic fields on separate frequencies each of harmonics is constructed using the Besselyu function. Mathematical calculations have been performed in MathCad 2015. There are two forces on each screw element: thrust and resistance of the rotary motion. From the Basic Law of mechanics it follows that this element, in its turn, influences the environment with equal magnitude and opposable directed forces.

**Keywords:** UAVs, QUADROCOPTER, MATHEMATICAL MODEL, CALCULATIONS, SCREW NOISE, MATHCAD.

### Вступ

Одним з напрямів розвитку сучасної авіації є розробка безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з найбільш розповсюдженим типом є квадрокоптер [1, 3-7]. Перші зразки БПЛА з'явилися ще в середині минулого століття, як окремий вид перспективного озброєння, але зараз квадрокоптери почали активно

використовуватися в цивільній сфері. Компанія PricewaterhouseCoopers оцінює ринок БПЛА в 2020 році в 127 мільярдів доларів. Слід відмітити, що при використанні БПЛА, квадрокоптерів теж вони являються джерелом шуму, який впливає на людину і тому з'являється необхідність в методиці розрахунку характеристик акустичного поля гвинтів

квадрокоптера. Тим визначається актуальність вибраної теми досліджень.

У відомій роботі [1] розглянуто проблему шуму на місцевості легких гвинтових літаків, приведено огляд механізмів генерації шуму гвинтом та двигуном внутрішнього згоряння, також розглянуто аналітичні моделі шуму повітряного гвинта. Проведено вимірювання акустичних характеристик гвинтового літака ЯК-18Т в горизонтальній площині в ближньому полі гвинта і на окружності радіусом 30м. Але розрахунки шуму гвинта не проведено.

В роботах [1, 5, 7] проведено оцінку впливу на шум повітряного гвинта числа лопатей і діаметра. В результаті виконаного дослідження встановлено наступне. Айроакустична оптимізація повітряного гвинта шляхом збільшення числа лопатей та зміни їх діаметра досягається за рахунок зниження шуму від аеродинамічного навантаження при збільшенні числа лопатей. Експериментально встановлено, що збільшення числа лопатей призводить до зниження акустичного ККД гвинтомоторних силових установок. У даній роботі наведені формули для розрахунку шуму, але не проведені розрахунки. Експериментальні виміри проводилися для літаків а не для БПЛА.

Робота [3] присвячена чисельному дослідженню шуму гвинта в кільці. Для чисельного рішення задачі використовувалася неявна кінцево-об'ємна ТВД схема типу С.К. Годунова на обертових сітках. Було проведено розрахунок однієї з варіацій гвинта АВ-112 як з кільцем, так і без нього. Діаметр гвинта становив 0,3 метра, діаметр валу 0,1 метр. Розрахункова область представляла собою два циліндри. Перший циліндр мав довжину 5м і діаметр 4,2м і був нерухомою частиною сітки. У другому випадку гвинт і кільце знаходилися всередині циліндра, що обертається з діаметром і довжиною рівними 0,6м. У цій роботі проводяться розрахунки для гвинта в кільці, а БПЛА в більшості випадків використовують гвинти без кільця.

У пропелера літака основна частота шуму приблизно 100 Гц, вслід чого шум обертання є домінуючим. Причиною випромінювання шуму обертання є періодичний силовий вплив лопотів на повітря у кожній фіксованій точці диску гвинта з-за обертання підйомної сили та сили опору разом із лопатями. Дійсність високочастотних гармонік підйомної сили веде до появи високочастотних компонент у складі шуму обертання гвинта гелікоптеру [7].

У наведених роботах характеристики акустичного поля гвинтів квадрокоптеру не розглядалися.

Тому метою дійсної роботи стала розробка методики та проведення розрахунків характеристик акустичного поля гвинтів квадрокоптеру.

### **Постановка задачі**

Розглядається задача створення математичної моделі, що дозволяє провести розрахунки рівнів акустичних шумів від чотирьох гвинтів квадрокоптеру в час здійснення ним польоту над місцевістю.

### **Рішення завдання**

**Теоретичні відомості.** Теорія, яка описує звукове поле повітряного гвинта, була запропонована Л.Я. Гутіним [2]. На кожен елемент гвинта діють дві сили: тяга та опір обертальному руху. З основного закону механіки випливає, що цей елемент, у свою чергу, впливає на середовище з рівними за величиною та протилежно направленими силами. Точки прикладання цих сил слід вважати зосередженими у одній площині, оскільки осьове тяжіння гвинта мізерно у порівнянні з довжинами хвиль перших гармонік; назовемо її площиною обертання.

Розглянемо елемент гвинта, відстань якого від вісі  $R$ ; нехай  $dR$  – радіальна довжина його та  $a$  – ширина, яка вимірюється у проекції на площину обертання. Сили, з якими елемент впливає на середовище, позначимо:  $A(R)dR$  (паралельна вісі та напрямлена зворотно до

напрямку польоту) и  $B(R)dR$  (напрявлена зворотно до обертального руху).

Очевидно,

$$\begin{aligned} n \int_0^{R_0} A(R) dR &= n \int_0^{R_0} dP = P \\ n \int_0^{R_0} B(R) dR &= n \int_0^{R_0} dM = M, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $n$  – число лопотів;  $R_0$  – довжина лопаті. Для початку, допустимо, що сили рівномірно розподілені по усій ширині лопаті.

$$F_1(t) = \begin{cases} A(R) \frac{R}{a} dR d\theta & \dots & (0 < t < \tau) \\ 0 & \dots & (\tau < t < T) \end{cases} = \sum_1^{\infty} A_m \cos(mnat - \varepsilon_m) + A_0, \quad (2)$$

$$F_2(t) = \begin{cases} B(R) \frac{R}{a} dR d\theta & \dots & (0 < t < \tau) \\ 0 & \dots & (\tau < t < U) \end{cases} = \sum_1^{\infty} B_m \cos(mnat - \mu_m) + B_0. \quad (3)$$

При цьому отримаємо

$$A_m = \frac{2}{m\pi} A(R) \cdot \frac{R}{a} \sin\left(m\pi \frac{\tau}{T}\right) dR d\theta. \quad (4)$$

$$B_m = \frac{2}{m\pi} B(R) \cdot \frac{R}{a} \sin\left(m\pi \frac{\tau}{T}\right) dR d\theta. \quad (5)$$

У іншому елементі площини обертання  $R dR d\theta$ , зміщеному відносно першого на кут  $\Theta$  у напрямку обертання, діють періодичні сили тієї ж величини, але із запізненням на час  $t = \frac{\theta}{\alpha}$ . Відповідні ряди Фур'є будуть:

$$F_1(t) = \sum_1^{\infty} A_m \cos(mnat - mn\theta - \varepsilon_m) + A_0. \quad (6)$$

$$F_2(t) = \sum_1^{\infty} B_m \cos(mnat - mn\theta - \eta_m) + B_0. \quad (7)$$

У елементі  $B(R)d\theta$  площини обертання на середовище діють сили  $A(R) \frac{Rd\theta}{a} dR$  і  $B(R) \frac{Rd\theta}{a} dR$  у проміжку часу, коли над цим елементом проходить проекція елемента лопаті. Якщо це проходження почалось у момент  $t = 0$ , то воно буде закінчено при  $t = \tau = \frac{a}{Rd\alpha}$  та відновиться при  $t = T = \frac{2\pi}{na}$ . Ми можемо ці сили, що періодично повторюються, розкласти за Фур'є:

Для перших гармонік  $m\pi \frac{\tau}{T} = \frac{mna}{2R}$  замало у ефективній частині гвинта (центральна частина гвинта, де  $R$  мале, аеродинамічно неефективна) та може покласти  $\sin\left(m\pi \frac{\tau}{T}\right) \approx m\pi \frac{\tau}{T}$ . Тоді (4) – (7) перепишуться так

$$A_m = \frac{n}{\pi} A(R) dR d\theta, \quad (8)$$

$$B_m = \frac{n}{\pi} B(R) dR d\theta, \quad (9)$$

Покажемо, що ці вирази залишаються вірними й у тому випадку, коли сили розподілені нерівномірно по усій ширині

лопаті. Вважаючи, наприклад для сили тяги

$$A(R)dR = \int_0^a A(R)dR \cdot \frac{f(s)ds}{a}$$

отримуємо для коефіцієнтів ряду Фур'є вираз (де  $S$  підліковується від переднього краю лопаті)

$$A_m = \frac{2}{T} A(R) \cdot \frac{R}{a} dR d\theta \left| \int_0^\tau f\left(\frac{at}{\tau}\right) e^{-i2m\pi \frac{t}{T}} dt \right|, (10)$$

Для перших гармонік:

$$\left| \int_0^\tau f\left(\frac{at}{\tau}\right) e^{-i2m\pi \frac{t}{T}} dt \right| \approx \int_0^\tau f\left(\frac{at}{\tau}\right) dt, (11)$$

$$\text{Далі із } \int_0^\tau f(s)ds = a \text{ слідує, що}$$

$$\int_0^\tau f\left(\frac{at}{\tau}\right) dt = \tau, \text{ звідки}$$

$$A_m = \frac{n}{\pi} A(R) dR d\theta, (12)$$

Для  $\varepsilon_m$  отримаємо:

$$\varepsilon_m = \arctg \frac{\int_0^\tau f\left(\frac{at}{\tau}\right) \sin 2m\pi \frac{t}{T} dt}{\int_0^\tau f\left(\frac{at}{\tau}\right) \cos 2m\pi \frac{t}{T} dt} \leq \arctg \frac{\sin 2m\pi \frac{\tau}{T}}{\cos 2m\pi \frac{\tau}{T}} = 2m\pi \frac{\tau}{T}. (13)$$

Потенціал швидкостей зумовлений сконцентрованою силою з компонентами  $X, Y, Z$ ,  $\epsilon$ :

$$\varphi = -\frac{i}{4\pi r k c} \left( X \frac{\partial}{\partial x} + Y \frac{\partial}{\partial y} + Z \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{e^{-ikr}}{r}. (14)$$

Підставляючи значення для компонент сил та враховуючи, що

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{e^{-ikr}}{r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{e^{-ikr}}{r} \right) \cos \vartheta$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{e^{-ikr}}{r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{e^{-ikr}}{r} \right) \cos \chi, (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{e^{-ikr}}{r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{e^{-ikr}}{r} \right) \cos \psi.$$

де  $\vartheta, \chi, \psi$  – напрямні косинуси радіуса-вектору  $r$ . Враховуючи (6) – (9), отримаємо для потенціалу, зумовленого усією системою сил

$$\varphi = -\frac{i}{4\pi\rho kc} \cdot \frac{n}{\pi} e^{ikct} \int_0^{R_0} \int_0^{2\pi} \left[ -A(R)e^{-i\varepsilon_m} \cos\vartheta - B(R)e^{-i\eta_m} \sin\theta \cos\chi + \right. \\ \left. + B(R)e^{-i\eta_m} \cos\theta \sin\vartheta \right] \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{e^{-ikr}}{r} \right) e^{-inn\theta} dR d\theta. \quad (16)$$

Покладемо, що точка спостереження лежить у площині  $XY$ , що завжди може бути досягнуто належним вибором осі  $Y$  і  $Z$  у площині обертання, тоді

$$\cos\psi = 0; \cos\chi = \sin\vartheta \quad (17)$$

Вважаючи далі, що  $r$  велике у порівнянні з довжиною хвилі та діаметром гвинта, маємо

$$r = r_1 - R \sin\vartheta \cos\theta;$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{e^{-ikr}}{r} \right) = -ik \frac{e^{-ikr}}{r} - \frac{e^{-ikr}}{r^2} \approx -ik \frac{e^{-ikr}}{r} = -ik \frac{e^{-ikr_1}}{r_1} e^{-ikR} \sin\vartheta \cos\theta. \quad (18)$$

Підставляючи (18) у (16) та проінтегрувавши за  $\theta$ , отримаємо

$$\varphi = -\frac{i^{mn} \cdot n}{2\pi\rho c} \cdot \frac{e^{ik(ct-r_1)}}{r_1} \int_0^{R_0} \left[ -A(R)e^{-i\varepsilon_m} \cos\vartheta J_{mn}(kR \sin\vartheta) + B(R)e^{-i\eta_m} \sin\vartheta \times \right. \\ \left. \times \frac{J_{mn-1}(kR \sin\vartheta) + J_{mn+1}(kR \sin\vartheta)}{2} \right] dR = \\ = -\frac{i^{mn} \cdot n}{2\pi\rho c} \cdot \frac{e^{ik(ct-r_1)}}{r_1} \int_0^{R_0} \left[ -A(R)e^{-i\varepsilon_m} \cos\vartheta + \frac{mn}{kR} e^{-i\eta_m} B(R) \right] J_{mn}(kR \sin\vartheta) dR, \quad (19)$$

$$\text{де} \quad J_n(z) = -\frac{1}{2\pi r^n} \int_0^{2\pi} e^{-iz \cos\theta - in\theta} d\theta$$

Бесселева функція 1-го роду  $n$  порядку.

Легко переконатись, що той же вираз ми отримали б і у випадку оберненого напрямку обертання. Звуковий тиск у дальньому полі повітряного гвинта розраховуємо за формулою для амплітуди звукового тиску, згідно з (19)

$$p = \left| \rho \frac{d\varphi}{dt} \right| = -\frac{kn}{2\pi r} \left| \int_0^R \left[ -A(R)e^{-i\varepsilon_m} \cos\vartheta + \frac{mn}{kR} B(R)e^{-i\eta_m} \right] J_{mn}(kR \sin\vartheta) dR \right|. \quad (20)$$

Підставивши

$$A(R)dR = \frac{dP}{n}; \quad B(R)R dR = \frac{dM}{n};$$

$$k = \frac{m\omega_1}{c}, \quad (21)$$

де  $\omega$  – колова частота основного тону.

Отримаємо

$$p = \frac{m\omega_1}{2\pi cr} \left[ \int_0^{R_0} \left( -\frac{dP}{dR} e^{-i\varepsilon_m} \cos \vartheta + \frac{nc}{\omega_1 R^2} \cdot \frac{dM}{dR} e^{-i\eta_m} \right) J_{mn}(kR \sin \vartheta) dR \right]. \quad (22)$$

Випромінена потужність може розрахуватись за виразом

$$W = - \int_0^\pi \frac{p^2}{2\rho c} 2\pi r^2 \sin \vartheta d\vartheta, \quad (23)$$

Для інтегрування за  $R$ , треба, знати розподілення тяги та моменту вздовж радіуса, що може бути отримано, наприклад, з аеродинамічних випробувань

моделі гвинта, але можна приблизно виконати інтегрування і при менш детальному знанні аеродинамічних

властивостей гвинта. Дійсно, оскільки  $\varepsilon_m$  і

$\eta_m$  малі, а аргументи функцій Бесселя, які входять у підінтегральний вираз, лежать ще й у тій області значень, де функції є монотонно зростаючими, то у силу теореми о середньому

$$p = \frac{m\omega_1}{2\pi cr} \left[ -P \cos \vartheta J_{mn}(kR_1 \sin \vartheta) + \frac{nc}{\omega_1 R_2^2} M J_{mn}(kR_2 \sin \vartheta) \right], \quad (24)$$

де  $R_1$  і  $R_2$  – деякі середні значення.

Якщо число лопатей мале, то для перших гармонік  $R_1$  і  $R_2$  приблизно дорівнюють радіусу окружності, по якій рухається точка прикладення сили тяги, яка діє на окрему лопать –  $R_c$ . Останній звичайно дорівнює  $0.7 \div 0.75 R_0$ . Таким чином (24) перетворимо у

$$p = \frac{m\omega}{2\pi cr} \left[ -P \cos \vartheta + \frac{jc}{\omega R^2} M \right] J_{mn}(kR \sin \vartheta),$$

$$R \approx R_c. \quad (25)$$

**Алгоритм розрахунку.** Дані, які підставляються у вираз (25) для розрахунку звукового тиску, такі:

-  $m$  – номер гармоніки,

-  $\omega = \frac{\pi * n}{30}$ ,

де  $n$  – кількість оборотів у хвилину на валу двигуна, рад/с,

-  $n = 16,6$  об/с, (1000 об/хв),

-  $j$  – кількість лопатей гвинта. У нашому випадку – 2,

-  $R$  – довжина лопаті гвинта.  $R = 0.1524$  м,

-  $W$  – потужність,  $W = 255$  Вт.

Математичні розрахунки були виконані за допомогою пакету MathCad 2015. Необхідно ввести до програми величини, які застосовуються у формулі (25).

1. Створюємо вектор-стовбець  $m$ , який містить 5 значень, від 1 до 5, що відповідають номерам гармонік.

2. Заносимо у змінну  $n$  значення обертів за секунду, 16,6.

3. Присвоюємо значення 2 змінній  $j$ , яка відповідає за кількість лопатей у гвинті.

4. До змінної  $c$ , яка є швидкістю звуку у повітрі, заносимо значення 340 м/с.

5. Розраховуємо значення кутової швидкості:  $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$ .

6. Розраховуємо значення частоти звуку:  $f = \frac{n \cdot j}{60}$ .

7. Розраховуємо значення довжини хвилі:  $\lambda$

8. Розраховуємо значення відстані, з якої починається дальнє поле  $r = \frac{\lambda}{m}$  та заносимо до матриці  $r$ .

9. Розраховуємо площу лопаті гвинта як суму площин двох трикутників та прямокутника.

10. Розраховуємо швидкість потоку повітря  $V = 0.75 \cdot R \cdot \omega$ .

11. Занесемо у змінну  $p_0$  значення атмосферного тиску 101325.

12. Занесемо у змінну  $\rho$  значення густини повітря 1,29.

13. Розраховуємо повітряний тиск  $p_a = p_0 + \frac{\rho \cdot V^2}{2}$ .

14. Розраховуємо аеродинамічну силу:  $P = p_a \cdot S$ .

15. Розраховуємо обертальний момент на валу:  $M = \frac{W}{\omega}$ .

16. Розраховуємо хвильове число:  $k = \frac{\omega}{c}$ .

17. Аргументом функції, яка розраховує тиск, є кут обертання. Необхідно задати дискретність зміни кута, початкове та кінцеве значення у радіанах.

18. Заносимо усі змінні до формули (25). На рисунку 1 зображений робочий простір програми MathCad, меню вставки, де необхідно вибрати функцію Бесселя.

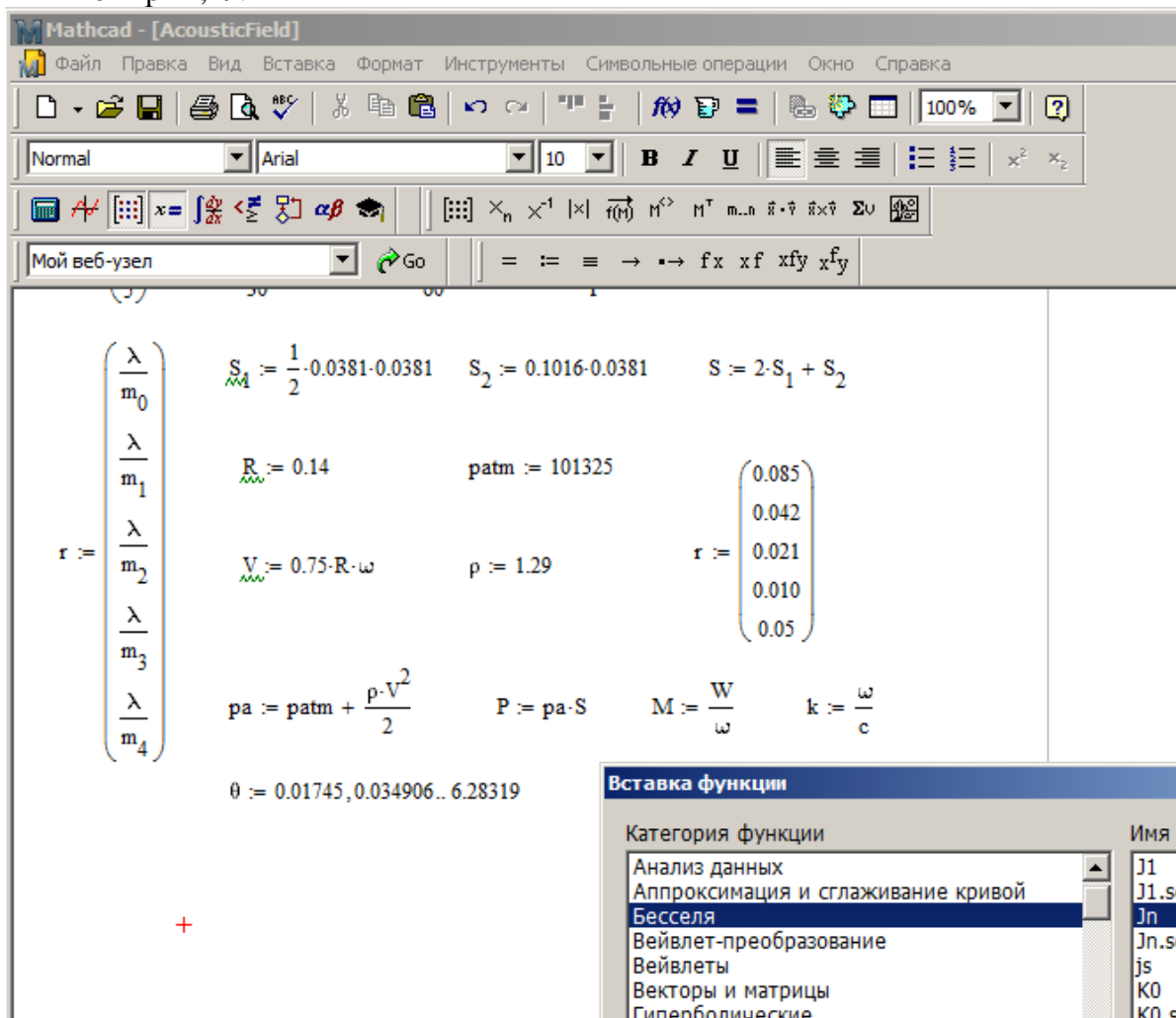


Рисунок 1 – Пояснення щодо вставки функції Бесселя.

Примітка: у формулу необхідно вставити вбудовану функцію Бесселя. Для

цього необхідно вибрати меню «Вставка» та підпункт меню «Функція». Це також можна

виконати за допомогою комбінації клавіш Ctrl + E. У діалоговому вікні необхідно в категорії функції вибрати «Беселя» та вибрати  $J_n$ , що є функцією Беселя першого роду  $m$ -го порядку. Додана функція має два аргументи:  $m$  та  $z$ . У перший заносимо значення гармоніки, у другий – добуток

хвильового числа на довжину лопаті гвинта та синус кута обертання. На рисунку 2 зображений робочий простір програми, де видно занесену формулу (25).

The screenshot shows the Mathcad workspace with the following content:

Top bar: Mathcad - [AcousticField]

Menu bar: Файл, Правка, Вид, Вставка, Формат, Инструменты, Символьные операции, Окно, Справка

Toolbar: Includes icons for file operations, editing, and mathematical functions.

Equations defined:

$$\theta := 0.01745, 0.034906.. 6.28319$$

$$p1(\theta) := \frac{m_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r_0} \left( \frac{j \cdot c}{\omega R^2} \cdot M - P \cdot \cos(\theta) \right) \cdot J_n(m_0, k \cdot R \cdot \sin(\theta))$$

$$p2(\theta) := \frac{m_1 \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r_1} \left( \frac{j \cdot c}{\omega R^2} \cdot M - P \cdot \cos(\theta) \right) \cdot J_n(m_1, k \cdot R \cdot \sin(\theta))$$

$$p3(\theta) := \frac{m_2 \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r_2} \left( \frac{j \cdot c}{\omega R^2} \cdot M - P \cdot \cos(\theta) \right) \cdot J_n(m_2, k \cdot R \cdot \sin(\theta))$$

$$p4(\theta) := \frac{m_3 \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r_3} \left( \frac{j \cdot c}{\omega R^2} \cdot M - P \cdot \cos(\theta) \right) \cdot J_n(m_3, k \cdot R \cdot \sin(\theta))$$

$$p5(\theta) := \frac{m_4 \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r_4} \left( \frac{j \cdot c}{\omega R^2} \cdot M - P \cdot \cos(\theta) \right) \cdot J_n(m_4, k \cdot R \cdot \sin(\theta))$$

Decibel values:

$$pdB1(\theta) := 20 \cdot \log \left[ \frac{\left[ \frac{m_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r_0} \left( \frac{j \cdot c}{\omega R^2} \cdot M - P \cdot \cos(\theta) \right) \cdot J_n(m_0, k \cdot R \cdot \sin(\theta)) \right]}{2 \cdot 10^{-5}} \right]$$

$$pdB2(\theta) := 20 \cdot \log \left[ \frac{\left[ \frac{m_1 \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r_1} \left( \frac{j \cdot c}{\omega R^2} \cdot M - P \cdot \cos(\theta) \right) \cdot J_n(m_1, k \cdot R \cdot \sin(\theta)) \right]}{2 \cdot 10^{-5}} \right]$$

**Рисунок 2 – Робочий простір програми MathCad**

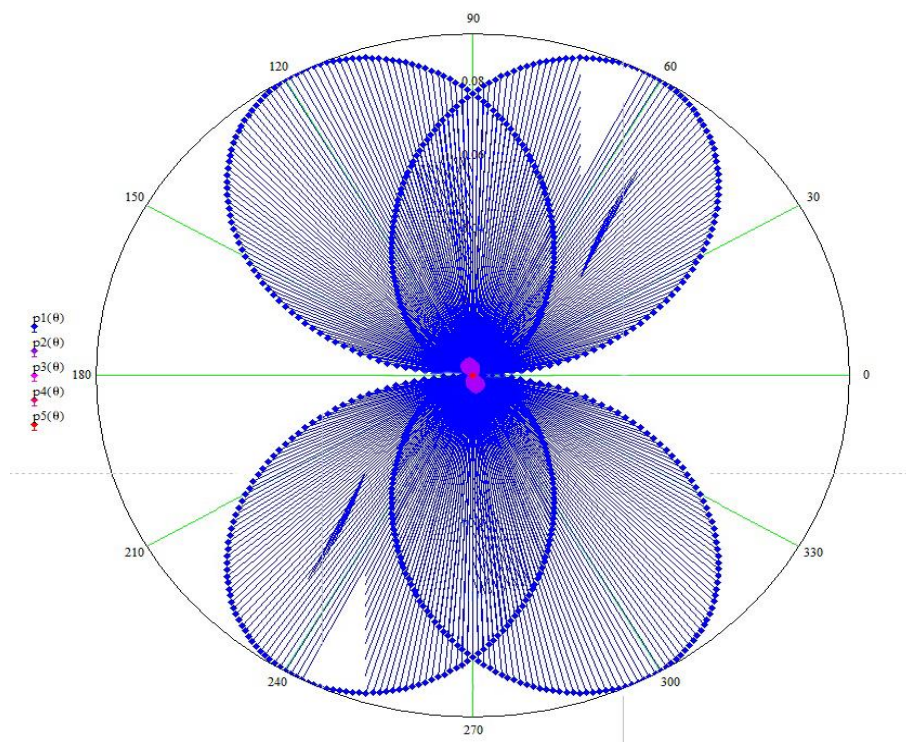
19. Створимо ще 4 аналогічні функції для 4х інших гармонік, змінюючи лише  $m$  та  $r$ .

20. Вставимо полярний графік у документ. За віссю абсциси відкладається значення звукового тиску, а за віссю ординат – кут повороту.

На рис. 3 розраховані характеристики спрямованості звукового

поля гвинта, що має дві лопаті. Кожному кольору відповідає свій номер гармоніки. Таким чином, синій колір – 1 гармоніка, фіолетовий – 2 гармоніка, бордовий – 3 гармоніка, малиновий – 4 гармоніка. Величина звукового тиску 5-ї гармоніки дуже мала.

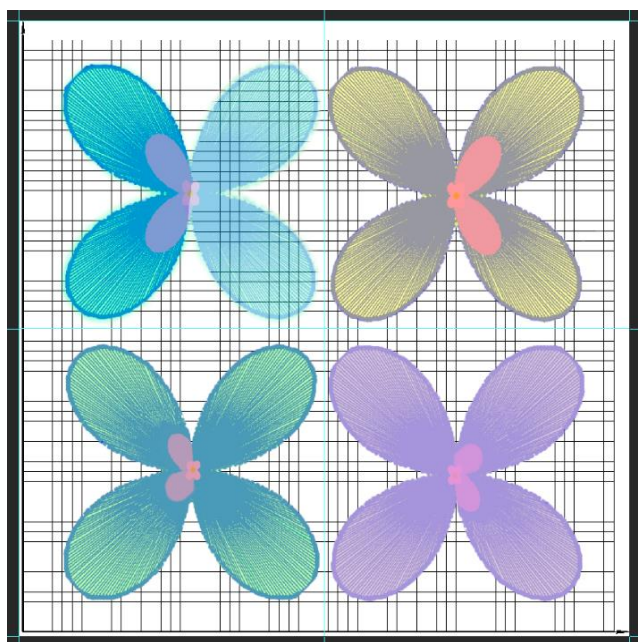




**Рисунок 3 – Графік спрямованості акустичного шуму на відстані 1.5 м**

З виразу (25) видно, що рівень звукового тиску зменшується по мірі віддалення від джерела шуму. При вільному розташуванні для 4-х гвинтів квадрокоптера

це скорочення приблизно дорівнює 6 дБ при кожному подвоєнні відстані від джерела. На рис. 4 наведено сумарне акустичне поле від чотирьох гвинтів.



**Рисунок 4 – Сумарне акустичне поле від чотирьох гвинтів**

### Висновки

1. Проведений аналітичний огляд існуючих моделей БПЛА типу квадрокоптер. Наведено загальні приклади використання квадрокоптерів, їх призначення та сфери застосування.

2. Розглянуті основні джерела шуму, що створюють вузли квадрокоптеру.

3. Зроблений переніс теорії звукового поля повітряного гвинта літака, яку запропонував Л.Я. Гутін, для моделювання шуму гвинтів квадрокоптеру.

4. Створено математичну модель розрахунку сукупного акустичного поля від чотирьох гвинтів квадрокоптеру.

5. Виконано розрахунок для кожної з гармонік, наведені результати розрахунків. Розповсюдження шумів різної частоти у просторі показані на відповідних графіках. Характеристику направленості акустичних полів на окремих частотах кожної з гармонік побудовано з використанням Бесселевої функції.

### Бібліографічні посилання

1. Гаевський О. К. Авиамоделирование. Москва, 1990. 408с.
2. Гутин Л. Я. Избранные труды. Л., 1997. 730 с.
3. Чумак, П. И. Расчет, проектирование и постройка сверхлегких самолетов. Москва: Патриот, 1991. 235с.
4. Корченко А. Г., Ильяш О. С. Обобщённая классификация беспилотных летательных аппаратов: Сборник научных работ. Харьковский университет Воздушных Сил. 2012. № 4 (33). С. 27-36.
5. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18 (2). pp. 1123 – 1152. 11.
6. Villaseñor J. “Drones” and the Future of Domestic Aviation // Proceedings of the IEEE. 2014. Vol. 102. No. 3. pp. 235 – 238. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2302875.

7. Шум при вращении винта  
Энциклопедия по машиностроению  
XXL . 439с. URL: <https://mash-xxl.info/info/550264/>.

*Надійшла до редакції 21.11.2019р.*

### Відомості про авторів



Сокол Галина Іванівна  
Україна. Дніпровський  
національний університет ім.  
Олесея Гончара.  
Доктор технічних наук,  
професор, Сфера інтересів –  
генерування та  
розповсюдження акустичних  
коливань



Некрасов Валерій Євгенович  
Україна. Дніпровський  
національний університет ім.  
Олесея Гончара.  
магістр  
Сфера інтересів – чисельні  
методи у прикладних задачах  
аерогідромеханіки



Жмурко Владислав  
Семенович  
Україна. Дніпровський  
національний університет ім.  
Олесея Гончара.  
Бакалавр  
Сфера інтересів – безпілотні  
літальні апарати