

УДК 534.2

Г.И. Сокол, И.С. Омелюшко, С. Ю. Кириченко, О.А. Колесник

Днепровский национальный университет имени Олеса Гончара

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ ШУМА ВИНТА БПЛА В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATHCAD

З плином часу в світі з'являються все більше сучасних технологій в різних областях діяльності людини, що сприяє технічному прогресу. Авіаційна галузь не стала винятком і також з кожним роком зазнає технологічного вдосконалення, в свою чергу призвело до значного технологічного прориву. Одним з таких технологічних проривів став початок переходу до безпілотної авіації. Метою даної роботи є розрахунок акустичного поля гвинтів безпілотної літального апарату з метою зменшення шуму. Математичні розрахунки були виконані за допомогою пакету MathCad 2015, що дозволило розрахувати звуковий тиск, який виникає при терті гвинтів в повітрі і показати залежність зміни звукового тиску при видаленні від джерела звуку.

Ключові слова: шум, гвинт, БПЛА, методика розрахунку, програмний пакет MathCad 2015.

С течением времени в мире появляются все больше современных технологий в различных областях деятельности человека, что способствует техническому прогрессу. Авиационная отрасль не стала исключением, она с каждым годом испытывает технологическое совершенствование, что, в свою очередь, привело к значительному техническому прорыву. Одним из таких прорывов стало начало перехода к беспилотной авиации. Целью данной работы является расчет акустического поля винтов беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с целью уменьшения шума. Математические расчеты были выполнены с помощью пакета MathCad 2015, что позволило рассчитать звуковое давление, которое возникает при трении винтов в воздухе и показать зависимость изменения звукового давления при удалении от источника звука.

Ключевые слова: шум, винт, БПЛА, методика расчета, программный пакет MathCad 2015.

Over time, more and more modern technologies in various fields of human activity appear in the world, which contributes to technological progress. The aviation industry was no exception, it is experiencing technological improvement every year, which, in turn, led to a significant technical breakthrough. One of these breakthroughs was the beginning of the transition to unmanned aircraft. The aim of this work is to calculate the acoustic field of the propellers of an unmanned aerial vehicle (UAV) in order to reduce noise. Mathematical calculations were performed using the MathCad 2015 package, which allowed us to calculate the sound pressure that occurs when the screws rotate in air and show the dependence of the sound pressure change with distance from the sound source.

Keywords: noise, screw, UAV, calculation method, MathCad 2015 software package.

Введение. В последние несколько десятилетий в развитии авиационной техники существенное место занимают разработки беспилотных летательных

аппаратов (БПЛА). С каждым годом количество БПЛА, их модификаций появляется все больше [1].

БПЛА применяются службами спасения и отрядами МЧС при проведении работ по поиску и спасению людей, в том числе заблудившихся в лесных массивах, для фиксирования очагов возгорания и мониторинга местности с целью предотвращения и предупреждения чрезвычайных ситуаций, для доставки почты [1]. Они применяются в области геодезии и топографии при геолокации, при измерениях аэрофотосъёмкой местности, для создания топографических карт. БПЛА сообщают об особенностях рельефа местности, на которой будут проводиться строительные работы. Широко используются БПЛА в сельском хозяйстве для эффективного анализа сельскохозяйственных угодий, контроля посева и уборки урожая [2].

БПЛА осуществляет мониторинг инфраструктур для оценки технического состояния линий электропередач, железнодорожных путей, дорог общего назначения. Обследование состояния нефте- и газотрубопроводов[2]. Применяют БПЛА в охране государственных границ, охране объектов и людей, а также для обнаружения нежелательных лиц на охраняемой территории [2].

В Украине разработкой БПЛА занимаются компании:

- общество с ограниченной ответственностью "Производственно-инновационная компания "DeViRo". Производственно-Инновационная компания "DeViRo" основана в Украине в 2014 году в городе Днепр. Специализируется на проектировании, разработке и производстве беспилотных летательных аппаратов гражданского и военного назначения.
- ВАТ "Меридиан" имени С.П. Королева. Завод «Радиоприбор» был основан в 1953 году. Перед заводом была поставлена задача разработки и серийного выпуска радиоизмерительной аппаратуры в диапазоне до 40 ГГц для обеспечения метрологии летательных аппаратов. К 1974 году завод освоил и производил 149 видов продукции, превратившись в одно из ведущих предприятий Министерства промышленности средств связи.
- УКРСПЕЦСИСТЕМС, ТОВ Производят беспилотные летательные аппараты и мультироторные дроны, которые являются наиболее функциональными, рентабельными и экономичными на рынке.

Проблема обеспечения пониженного уровня акустических шумов актуальна для всех видов летательных аппаратов. Поэтому исследование акустических характеристик БПЛА и разработка методов прогнозирования шума на местности перспективных беспилотных самолетов является весьма актуальной задачей.

Нормы воздействия шумов при воздушных полетах самолетов вблизи аэропортов и вдоль трасс известны [9]. В настоящее время нормы шумового воздействия на население при полете БПЛА еще не разработаны.

Актуальность выбранной темы определяется необходимостью анализа шумов БПЛА, разработкой мероприятий и применением конструктивных решений, которые позволяют существенно снизить уровень шумов.

При анализе шумов БПЛА необходимо руководствоваться составом их конструктивной схемы.

Шум воздушного винта образуется, в основном, в результате силового взаимодействия лопастей с окружающей средой в процессе создания тяги и при вытеснении воздуха из фиксированного объема среды лопастями. Генерация акустического излучения может происходить, также, и при аэродинамическом взаимодействии лопастей с турбулентными образованиями в набегающем потоке. В соответствии с этим шум малонагруженного винта обычно подразделяют на шум вращения и широкополосный шум [9].

Так с целью снижения уровня шума, создаваемого винтами БПЛА, компания Amazon запатентовала технологии, позволяющие уменьшать шум винтов мультикоптеров и передавать с их помощью короткие сообщения [11]. На патент обратило внимание издание The Register [11]. В первой части документа описывается система уменьшения шума, использующая дополнительные винты. Технология измерений предполагает установку микрофонов у основных винтов. Система шумоподавления анализирует данные с микрофонов и активирует вторичные винты, исходя из зафиксированного уровня шума. Вторичные винты вращаются таким образом, чтобы создавать «антишум» — подобный подход называют «активным шумоподавлением». Представители Amazon отмечают, что возможен положительный побочный эффект от вторичных винтов в виде дополнительной тяги, однако основная задача системы состоит именно в уменьшении шума.

На рис. 1 показана принципиальная схема уменьшения шума, использующая дополнительные винты

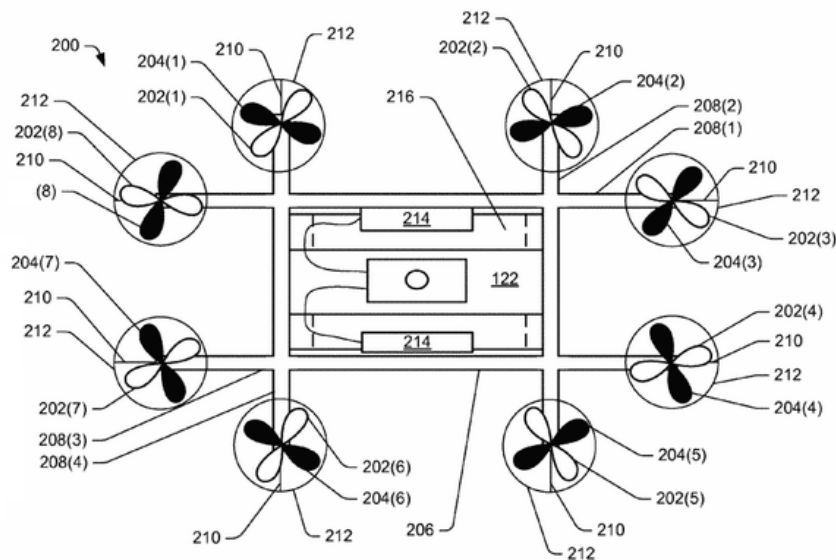


Рис. 1. Принципиальная схема уменьшения шума, использующая дополнительные винты

Целью настоящей работы является разработка методики расчета шума винта БПЛА.

Обзор работ по шумам винтов

В [12] предложен эмпирический метод прогноза шума авиационных бензиновых двигателей с внешним смесеобразованием, применяемых в малой и беспилотной авиации. Этот метод основан на классических подходах авиационной акустики к расчёту шума на местности от различных источников.

В [13] рассмотрена проблема шума на местности легких винтовых самолетов (ЛВС), дан краткий обзор механизмов генерации шума винтом и двигателем внутреннего сгорания (ДВС), существующих математических моделей шума воздушного винта. Представлены основные результаты экспериментального исследования акустических характеристик легкого винтового самолета типа Як-18Т в статических условиях.

В приведенных работах не представлены методики расчета шума винта БПЛА.

Основная часть

Для разработки методики расчета шума винта БПЛА используем работу Л.Я. Гутина «О звуковом поле воздушного винта самолета» [9].

Физическая модель звукообразования одинакова для винтов самолета и винтов БПЛА, так как конструктивно винты в обоих приведенных случаях имеют одинаковое исполнение. При периодическом воздействии на среду вращающихся лопастей винта в ней генерируется звуковое поле. На каждый элемент лопасти винта действуют две силы: аэродинамическая сила и сопротивление вращательному движению. Этот элемент, в свою очередь, воздействует на среду с равными по величине и противоположно направленными силами. Точки приложения этих сил будем считать сосредоточенными в одной плоскости, так как осевое протяжение лопасти ничтожно мало в сравнении с длинами волн первых гармоник. Назовем ее плоскостью вращения.

Силы, с которыми элемент воздействует на среду, обозначим: $A(R)dR$ (параллельна оси и направлена обратно направлению оси винта, ось винта считаем совпадающей с осью ротора мотора, ее положительное направление - от точки крепления винта в пространство) и $B(R)dR$ направлена обратно вращательному движению винта.

$$n \int_0^{R_0} A(R)dR = n \int_0^{R_0} dP = P,$$

$$n \int_0^{R_0} B(R)dR = n \int_0^{R_0} dM = M$$

где n – число лопастей; R_0 – длина лопасти; P – аэродинамическая сила; M – момент во вращательном движении лопасти.

Допустим, что силы равномерно распределены по ширине лопасти.

Если прохождение лопасти началось в момент времени $t = 0$, то оно будет закончено во время τ . Периодически повторяющиеся с периодом T силы разложим в ряд Фурье

$$F_1(t) = \begin{cases} A(R) \frac{R}{a} dR d\theta & \dots (0 < t < \tau) = \\ 0 & \dots (\tau < t < T) \end{cases};$$

$$\sum_1^{\infty} A_m \cos(mnat - \varepsilon_m) + A_0$$

$$F_2(t) = \begin{cases} B(R) \frac{R}{a} dR d\theta & \dots (0 < t < \tau) = \\ 0 & \dots (\tau < t < T) \end{cases}.$$

$$\sum_1^{\infty} B_m \cos(mnat - \mu_m) + B_0$$

где θ - угол, $d\theta$ - элементарный угол в плоскости вращения, ε_m, μ_m - фазы, A_m, B_m - амплитуды гармоник, m - номер гармоники.

При этом

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

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

Для первых гармоник имеем

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

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

Потенциал скоростей, обусловленный сосредоточенной силой с компонентами X, Y, Z , определяется согласно [9]. С учетом того, что точка наблюдения лежит в плоскости X, Y на расстоянии r

$$\varphi = \left| \frac{-i}{4\pi \rho k c} X \left(\frac{1}{2r} + \frac{ik}{r} \right) \cdot \frac{e^{-ikr}}{r} x \right|,$$

где ρ - плотность среды, k - волновое число, x - координата.

Выражение для звукового давления в дальнем акустическом поле по [9] имеет вид

$$P_m = Q \frac{\partial \varphi}{\partial t} \approx \frac{mn\omega}{2\pi c_0 L_1} \left[-P_e \cos \vartheta + \frac{c_0 M_{кр}}{\omega R_e} \right] J_{mn} \left(\frac{mn\omega}{c_0} R_e \sin \vartheta \right), \quad (1)$$

где ϑ - угол характеристики направленности, $x/r = \cos \vartheta$ – направление косинуса радиуса-вектора, ω_m – круговая частота каждой из гармоник, r велико в сравнении с длиной волны и диаметром лопасти винта, ω_1 – круговая частота основного тона; $J_{mn}(kR \sin \vartheta)$ - Бесселева функция 1-го рода n порядка, m – номер гармоники, n – число оборотов в минуту на валу двигателя, рад/с, j – число лопастей винта, R – длина лопасти винта, W – мощность, c_0 – скорость звука в воздухе, p_0 – значение атмосферного давления, ρ_v – плотность воздуха.

Для рассматриваемого типа БПЛА с двухлопастным винтом и числом оборотов винта в минуту $n = 6380$ об/мин; $j = 2$; $R = 0.1778$ м; $W = 1350$ Вт, $c_0 = 340$ м/с, $p_0 = 101325$ Па, $\rho_v = 1,29$.

Расчеты выполнены с помощью программного пакета MathCad 2015. В программу внесены вышеуказанные постоянные: $n, j, R, W, c, p_0, \rho_v$.

Создан вектор-столбец m , который содержит пять значений, соответствующие пяти первым номерам гармоник.

Рассчитываем значения:

- угловой скорости: $\omega = \pi n / 30$;
- значение частоты: $f = nj / 60$;
- длины волны, для каждой гармоники: $r = \lambda / m$;
- расстояния, с которого начинается дальнейшее акустическое поле, $\lambda = c / f$ для каждой гармоники и заносим в матрицу r .

Далее рассчитываем значение площади лопасти винта S . Разбиваем поверхность лопасти на два треугольника и прямоугольник.

Проводим расчет скорости потока воздуха V . Считаем, что подъемная сила приложена к лопасти на расстоянии $0,75 R$ от начала лопасти. Эта скорость равна $V = 0,75 R \omega$.

Рассчитываем:

- воздушное давление на лопасти: $p_a = p_0 + \frac{\rho V^2}{2}$;
- аэродинамическую силу: $P = p_a S$;
- вращательный момент на валу: $M = \frac{W}{\omega}$;
- волновое число k для каждой гармоники: $k = \frac{\omega}{c}$.

Аргументом функции, которая вычисляет давление, является угол поворота лопасти в плоскости вращения. Задаем дискретность изменения угла, начальное и конечное значение в радианах.

Все предыдущие значения заносим в (1).

Создаем аналогичную функцию для 4-х других гармоник, изменяя только m и r . Программа для расчета акустических полей винта в среде MathCAD представлена на рис. 2.

В выражение (1) необходимо вставить встроенную функцию Бесселя. Для этого выбираем меню «Вставка» и подменю «Функция». В диалоговом окне категории функции выбираем «Бесселя» и J_n , что и является функцией Бесселя первого типа m -го порядка. Добавленная функция имеет два аргумента: m и z . В первый входит число гармоник, а второй является волновым числом и зависит от длины лопасти и синуса угла поворота винта.

Обсуждение полученных результатов

$$\begin{array}{l}
 m := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix} \\
 r := \begin{pmatrix} \frac{\lambda}{m_0} \\ \frac{\lambda}{m_1} \\ \frac{\lambda}{m_2} \\ \frac{\lambda}{m_3} \\ \frac{\lambda}{m_4} \end{pmatrix}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 n := 6380 \qquad j := 2 \qquad c := 340 \qquad W := 1350 \\
 \omega := \frac{\pi \cdot n}{30} \qquad f := \frac{n \cdot j}{60} \qquad \lambda := \frac{c}{f} \\
 S_1 := \frac{1}{2} \cdot 0.0373 \cdot 0.018 \\
 S_2 := 0.1032 \cdot 0.018 \\
 S := 2 \cdot S_1 + S_2 \\
 R := 0.1778 \\
 V := 0.75 \cdot R \cdot \omega \\
 P_0 := 101325 \qquad \rho := 1.29 \\
 p_a := P_0 + \frac{\rho \cdot V^2}{2} \\
 P := p_a \cdot S \qquad M := \frac{W}{\omega} \qquad k := \frac{\omega}{c}
 \end{array}$$

Рис. 2. Программа для расчета акустических полей винта в среде MathCAD.

На рис. 3 представлена программа для расчета звукового давления акустического поля винта в среде MathCAD (первые пять гармоник).

$$\left(\begin{array}{c} m_3 \\ \lambda \\ m_4 \end{array} \right) \quad p_a := p_{atm} + \frac{\rho \cdot V^2}{2} \quad P := p_a \cdot S \quad M := \frac{W}{\omega}$$

$$k := \frac{\omega}{c} \quad \theta := 0.01745, 0.034906 \dots 6.28319$$

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

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

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

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

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

Рис. 3. Программа для расчета звукового давления акустического поля винта в среде MathCAD (первые пять гармоник)

Результаты вычислений представлены на рис. 4. Каждому цвету соответствует определенный номер гармоники. Красный цвет соответствует 1-й гармонике, синий – 2-й гармонике, зеленый – 3-й гармонике. Значения звукового давления в 4-ой и в 5-ой гармониках очень малы.

Из графика видно, что максимальное звуковое давление, которое создает винт беспилотника, составляет величину $P_1(\theta) = 6,228$ Па.

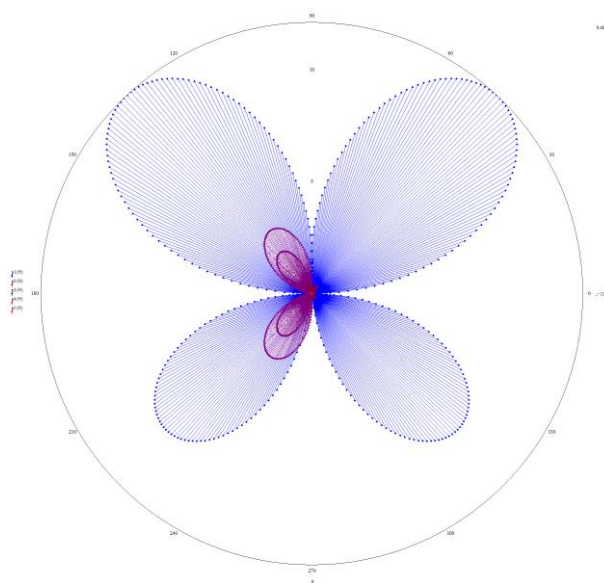


Рис. 4. Характеристики направленности шума винта БПЛА

На рис. 5 показана зависимость изменения звукового давления с удалением от источника звука (винта БПЛА).

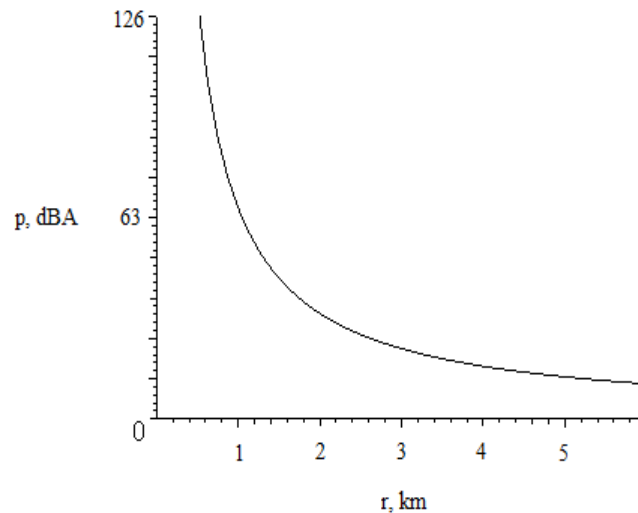


Рис. 5. Зависимость звукового давления от расстояния

Уровень звукового давления уменьшается примерно на 6 дБ при каждом удвоении расстояния r от источника.

Мероприятия по снижению шума винта. Расчет акустического поля винта измененной конструкции

Уровень шума винта может быть частично снижен за счет применения большего количества лопастей или увеличения диаметра винта. В расчете акустического поля винта, изменим количество лопастей до четырех и увеличим их длину. Результаты расчета показали, что изменения конструктивных данных винта снизили уровень звукового давления до 4,351 Па или 106.75 дБ

Заключение

Разработана методика определения уровня звукового давления в дальнем поле воздушного винта самолета для проведения расчетов характеристик акустического поля БПЛА.

Проведены расчеты уровня звукового давления первых звуковых гармоник и построены их характеристики направленности.

Предложены мероприятия по снижению шума от винта БПЛА.

Библиографические ссылки

1. Материалы сайта www.pwc.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://press.pwc.com/>
2. Материалы сайта компании «AgroDrone» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://agrodrones.com.ua>
3. Гутин Л.Я. К теории приемного рупора. Избранные труды [Текст]: книга. / Л. Я. Гутин; Судостроение. – Л., 1977. – 730с.

4. Баженова Л.А., Семенов А.Г. О влиянии числа Рейнольдса на интенсивность вихревого звука при обтекании цилиндрического профиля // Акустический журнал. 2013. Т.59. № 5 С. 586-595.
5. Самохин В.Ф. Полуэмпирический метод прогноза шума воздушного винта // Инженерно-физический журнал, 2012, Т.85, № 5, С. 1064-1072.
6. Ianniello S., Mascio A. D., Salvatore F., Sollo A., Aversano M., and Gennaretti M. Evaluation of Noise Excess for Pushing Propeller Aircraft by CFD Aeroacoustic Calculation, AIAA Paper 2004-3006, May 2004, 17 p.
7. Hanson D.B., Parzych D.J. Theory for noise of propellers in angular inflow with parametric studies and experimental verification. NASA CR, 1993, no. 4499, 108 p.
8. Л.Я. Гутин О звуковом поле вращающегося винта. ЖТФ, 1936, т.6, № 5.
9. Л.Я.Гутин О звуке вращения воздушного винта. ЖТФ, 1942, т.12, вып.2-3
10. Остроухов С.П. Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 328 с.
11. Материалы сайта <https://nplus1.ru/> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nplus1.ru/>
12. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Акустические характеристики легкого винтового самолета с двигателем внутреннего сгорания [Электронный ресурс]. Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 57 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mai.ru/>
13. Мошков П.А., Самохин В.Ф. Оценка влияния числа лопастей и диаметра на шум воздушного винта // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 25-34. Б01: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-25-34
14. Колесник О.А. Сокол Г.И. Акустика винтов беспилотного летательного аппарата/ XIX Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: Збірник тез: – Дніпро: 2017. – С.9.

Надійшла до редколегії 10.11.2019 р.