

doi: 10.32620/oikit.2020.88.06

УДК 629.7.014-519:534:621.313.13

В. В. Руденко, В. П. Чернолихова

## **Акустическая заметность беспилотных летательных аппаратов с силовой установкой, включающей в себя электродвигатель и воздушный винт**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,  
Украина*

Наличие в эксплуатации множества прототипов БПЛА с винтовыми двигателями, применение таких аппаратов на относительно низких высотах и скоростях полета делают актуальной проблему снижения шума, производимого при полётах БПЛА как с точки зрения акустической заметности, так и экологии.

Основным источником акустической заметности БПЛА является его силовая установка, включающая двигатель и воздушный винт.

В задачи настоящей работы, решение которых требует выполнения экспериментальных исследований, входит определение силовых, пространственных и спектральных характеристик акустических полей винтомоторных силовых установок БПЛА с электроприводом. Воздушный винт один из главных источников акустического излучения, производимого силовой установкой. Исследовано влияние на акустические характеристики силовой установки: изменений диаметра воздушных винтов при постоянном шаге, изменений количества лопастей и числа оборотов (окружных скоростей винта). Рассмотрена возможность уменьшения шума, производимого воздушным винтом путем изменения характера спектра шума. Шум вращения винта, особенно пяти его первых гармоник, – одна из наиболее заметных частей в спектре шума винтомоторной установки. Поэтому была рассмотрена и внедрена на практике гипотеза, связанная с уменьшением акустической заметности БПЛА путём уменьшения шума этих составляющих за счёт смещения их в область более высоких частот, на которых звуковые колебания в воздухе затухают быстрее. Предложена методика сравнения. Измерения проводили в статических условиях в безэховой камере ХАИ. Отметим, что воздушные винты, задействованные при проведении экспериментов, работали при числах Рейнольдса ( $Re_{0,75} < 1 \cdot 10^5$ ), что существенным образом может влиять на его аэродинамические и акустические характеристики. Эмпирически получена формула для винта 11×6" «Aero-naut», дающая возможность при проектировании оценить шум, производимый данным винтом, при заданном режиме полёта в данном направлении. Исследована возможность в дальнейшем иметь банк данных по часто применяемым винтам. Рассмотрен вклад гармонических составляющих шума воздушного винта в направленность его излучения.

Определён вклад бесколлекторного электродвигателя в интенсивность акустического излучения силовой установки БПЛА. Отмечено, что основной вклад в шум силовой установки с бесколлекторным электродвигателем вносит воздушный винт. Вместе с тем шум бесколлекторного электродвигателя может значительно возрасти в диапазоне 2...3 кГц при износе подшипников качения.

**Ключевые слова:** акустическая заметность, воздушный винт, спектральная характеристика, направленность, безэховая камера, частота, бесколлекторный электродвигатель.

### **1. Описание оборудования**

Исследования проводили в безэховой камере ХАИ (рис. 1). Ее рабочий диапазон частот – 160...10000 Гц, отклонения от условий свободного поля – не более 1,5 дБ.

Частотный анализ проводили с помощью шумомера 00 017 RFT в качестве усилителя на входе звуковой карты ПК. Микрофон – 1/2" МК 202. Частота дискретизации – 48 кГц, 24 бита.

Координатное устройство – на базе поворотного стола RFT 02012.



Рис. 1. Безэховая камера ХАИ

## 2. Шум бесколлекторного электродвигателя

В состав силовой установки входит бесколлекторный электродвигатель «TURNIGY» G25 870 kv.

Шум, создаваемый бесколлекторным электродвигателем (БкЭД), подразделяют на три категории: аэродинамический, магнитный и механический. Аэродинамический шум БкЭД возникает в результате движения воздуха при вращении ротора и в данном случае набегающего потока воздуха от воздушного винта. Этот шум широкополосный, но может иметь и дискретные составляющие. Магнитный шум вызывается электромагнитными силами, действующими в магнитном зазоре между ротором и статором. Это функция плотности магнитного потока, количества и формы полюсов, пазов и геометрии воздушного зазора. В двигателях постоянного тока появление периодических электромагнитных сил вызывается периодическим изменением магнитной проводимости воздушного зазора под полюсами при вращении зубчатого ротора. Частота магнитного шума [1], Гц:

$$f_m = \frac{z \cdot n}{60} \cdot i, \quad (1)$$

где  $z$  – число зубцов ротора;

$n$  – число оборотов ротора в минуту;

$i = 1, 2, 3, \dots$  номер гармоники.

Механический шум является результатом действия многих факторов. Наиболее типичные: несбалансированные узлы ротора, шум подшипников качения, жесткость конструкции. Уровень дебалансной составляющей шума БкЭД почти полностью зависит от процесса уравнивания ротора. Дебалансный шум проявляется на частоте вращения.

Шум шариковых подшипников с их многочисленными компонентами, имеющими взаимное перемещение, создает шум на многих частотах  $f_\tau$ , пропорциональных частоте вращения кольца подшипника:

$$f_\tau = \frac{k_\tau \cdot n}{60}, \quad (2)$$

где  $k_\tau$  – коэффициент пропорциональности для  $\tau$ -й возмущающей гармоники, зависящей от микрогеометрии поверхности и конструкции подшипника;

$n$  – частота вращения вала.

С увеличением частоты вращения происходит сдвиг частот шума в высокочастотную область. Изменение амплитуд шума зависит от близости частот возмущающих сил к собственным частотам, т.е. возможности возникновения резонансных явлений.

На рис. 2 показан совмещённый график спектров шума силовой установки (СУ) с воздушным винтом фиксированного шага (диаметр 10", шаг 6") и шума бесколлекторного электродвигателя «TURNIGY» G25 870 kv (без нагрузки). Микрофон находился в плоскости вращения воздушного винта (угол наблюдения  $\varphi = 90^\circ$ ) на расстоянии 1,6 м от оси двигателя. Число оборотов ротора  $n = 7200$  об/мин ( $n_c = 120$  об/с) [2].

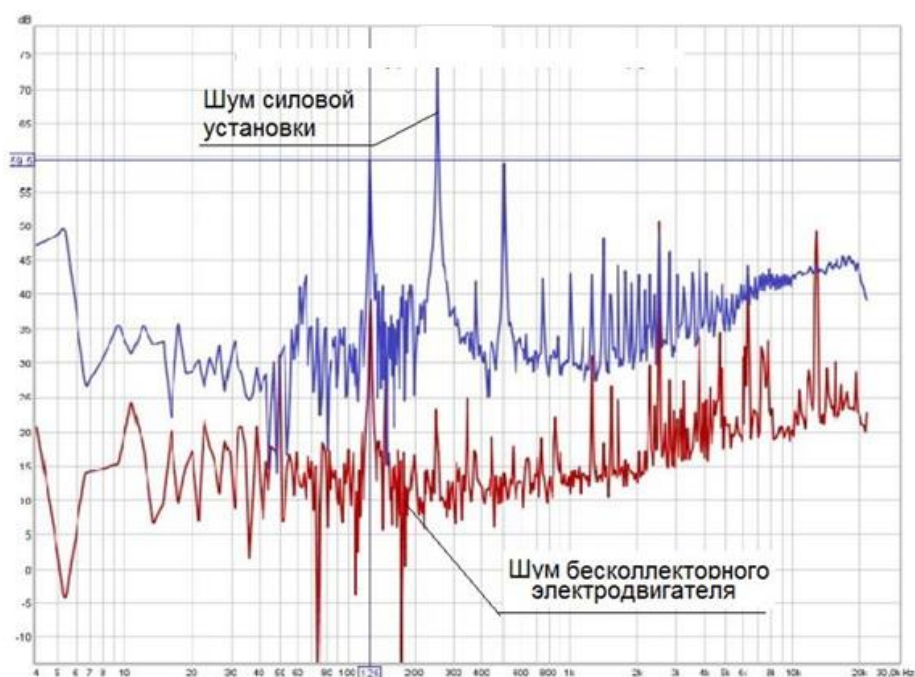


Рис. 2. Графики спектров шума СУ с воздушным винтом фиксированного шага 10×6" (верхний график) и шума бесколлекторного электродвигателя «TURNIGY» G25 870 kv (без нагрузки). Угол наблюдения  $\varphi = 90^\circ$ . Число оборотов ротора  $n = 7200$  об/мин ( $n_c = 120$  об/с)

На спектре ненагруженного двигателя выделяются гармоники на роторной частоте 120 Гц (дебаланс ротора), шум подшипников качения – на частоте 2400 Гц (20 шариков) и магнитный шум – на частоте 1200 Гц. С ростом числа оборотов происходило уменьшение уровней интенсивности излучения шума ненагруженного двигателя за счёт уменьшения шума подшипников на роторной частоте.

Можно отметить, что шум силовой установки с бесколлекторным двигателем в основном определяется шумом, производимым воздушным винтом.

### 3. Генерация шума воздушным винтом. Методика измерений

Лопasti винта оказывают периодическое силовое воздействие на окружающую среду, приводящее к возникновению шума, названному *шумом вращения* [3,4]. Шум вращения делят на две составляющие. Одна из них – след-

ствии воздействия на среду стационарных и нестационарных относительно лопастей аэродинамических нагрузок. Стационарные нагрузки обусловлены постоянным перепадом статического давления на поверхности лопасти. Нестационарные силы возникают при взаимодействии лопастей винта с неоднородным потоком и служат источником как гармонического, так и широкополосного шума. Вторая составляющая *шума вращения* связана с конечной толщиной лопасти. Лопасть при вращении вытесняет из окружающей среды объем, равный объему лопасти, который затем вновь заполняется средой. Таким образом, элементарные объемы в каждой точке пространства в области диска винта пульсируют с той же частотой, что и частота шума вращения. Эту составляющую шума вращения называют *шумом вытеснения*. Интенсивность шума вытеснения зависит от толщины лопасти, числа лопастей и от относительной скорости потока, обтекающего лопасть. Частоты отдельных гармоник шума вращения винта:

$$f_m = m \cdot n \cdot z, \quad (3)$$

где  $f_m$  – частота  $m$ -й гармоники;

$m = 1, 2, 3 \dots$  – гармоники;

$n$  – частоты вращения винта, об/с;

$z$  – число лопастей.

С лопастей винта по всей их длине происходит срыв потока. Образующаяся за лопастями сплошная вихревая пелена служит источником *широкополосного (вихревого) шума*.

Широкополосный шум, образующийся в результате пульсаций аэродинамического давления на поверхности лопасти, турбулентных пульсаций скорости набегающего на диск винта потока и потока в вихревой пелене за лопастями винта, имеет сплошной спектр, поскольку пульсации давления и скорости носят случайный характер, а их распределение по частоте является непрерывным.

Если доминирующим источником широкополосного шума является вихревая пелена за лопастями винта [4], то ожидаемая частота шума наибольшей интенсивности  $f_b$  будет определяться соотношением

$$f_b = St \cdot \frac{U}{L}, \quad (4)$$

где  $St$  – число Струхала, равное 0,2;

$U$  – характерная скорость обтекания профиля лопасти;

$L = b \sin\alpha + \delta \cos\alpha$  – эффективная толщина профиля лопасти ( $b$  – хорда лопасти,  $\delta$  – толщина лопасти,  $\alpha$  – угол атаки).

Лопастей винта при его вращении могут периодически проходить вблизи каких-либо элементов конструкции или же попадать в турбулентный след за этими элементами. При этом генерируются импульсы давления, которым соответствует гармонический спектр.

Соотношения между уровнями гармонических составляющих и широкополосного шума зависят от геометрических и аэродинамических характеристик винта, режима его работы, от степени неоднородности потока перед винтом.

За основное условие сравнения акустических характеристик двух винтов принято равенство их тяг [4]. Измерения проводили в статических условиях. В случае сохранения аэродинамического подобия винтов коэффициенты тяг у них равны. Тогда можно записать равенство:

$$n_{s1}^2 \cdot D_1^4 = n_{s2}^2 \cdot D_2^4, \quad (5)$$

где  $n_s$  – число оборотов сравниваемых воздушных винтов в секунду;

$D$  – диаметры сравниваемых воздушных винтов.

Для сохранения равенства тяг, уменьшая диаметр винта, необходимо увеличивать число оборотов, поддерживая его постоянным для каждого режима. Выдерживалось геометрическое подобие. Определялись акустические характеристики винтов (фирма-изготовитель – «Aero-naut Modellbau mbH» Power-Prop), двухлопастных, диаметрами 9", 10", 11", 12", 13", шаг 6" и GWS 10×6" с тремя лопастями. Установочный угол на относительном радиусе  $r_{0,75} =$

0,09525 равен  $10^\circ 54'$ . Относительная хорда  $\overline{b_{0,75}b_{0,75}} = \frac{b}{D} = 0,067$  ( $b_{0,75} = 16,6$  мм).

Зависимость тяги от числа оборотов воздушных винтов (получена на основе экспериментов [2]) показана на рис. 3.

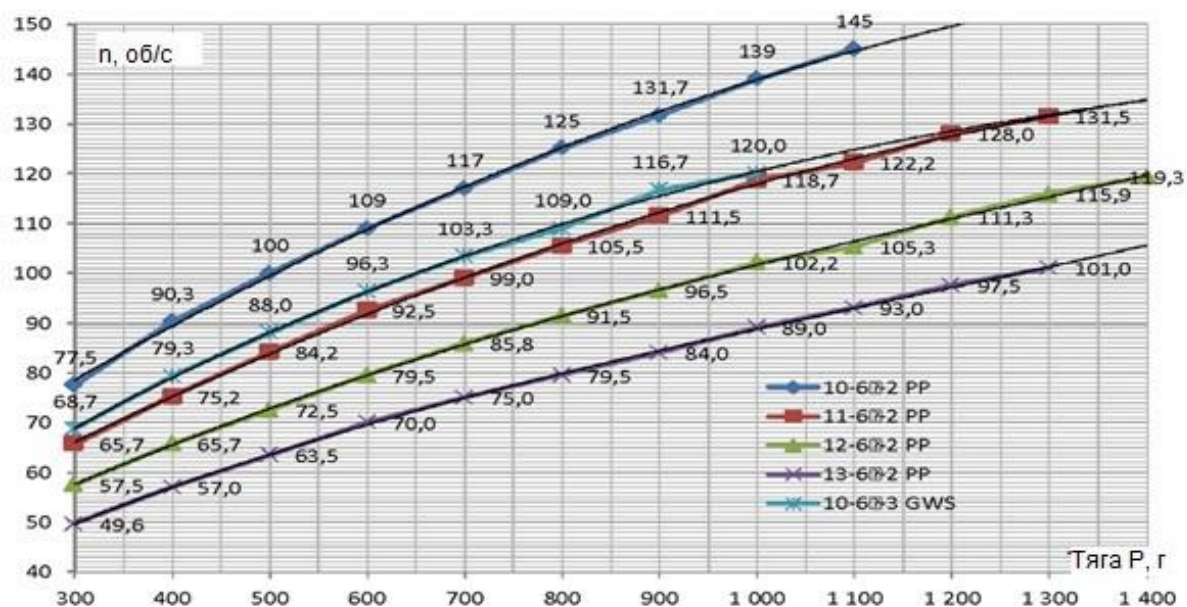


Рис. 3. Зависимость тяги двухлопастных винтов PP 9,10,11,12×6" и GWS 10×6" с тремя лопастями от частоты вращения

На аэродинамические характеристики воздушных винтов, а следовательно, и акустические, влияет режим обтекания лопасти, определяемый числом Рейнольдса. Автомодельным считается режим работы винта при числах  $Re > 10^6$ . Малоразмерные воздушные винты, используемые в беспилотной авиации, работают при существенно меньших числах Рейнольдса. Измерения проводили при числах  $Re_{0,75} < 0,87 \cdot 10^5$ .

В существующих работах о винтах больших размеров [4, 5] показано, что основными факторами, влияющими на шум винта, являются: окружная скорость –  $M_u$  и число лопастей –  $z$ . Таким образом, скорость вращения, диаметр и число лопастей винта – параметры, которые нужно контролировать.

#### 4. Воздушный винт. Экспериментальная часть

Интенсивность излучения шума двухлопастными малоразмерными воздушными винтами при постоянной тяге. Диаметр переменный (число оборотов разное). Угол наблюдения  $\varphi = 90^\circ$ .

Измерения проводили при постоянной тяге  $P = 1100$  г. Шаг винта постоянный – 6", диаметр: 10", 11", 12", 13".

Спектр интенсивности излучения шума воздушным винтом «Aero-naut Modellbau mbH» Power-Prop 11× 6" показан на рис. 4. Видны первые пять гармоник шума вращения винта на частотах: 240, 480, 720, 960, 1200 Гц, шум подшипников качения на роторной частоте 120 Гц и частоте 2400 Гц (20 шариков), магнитный шум – на частоте 1600 Гц.

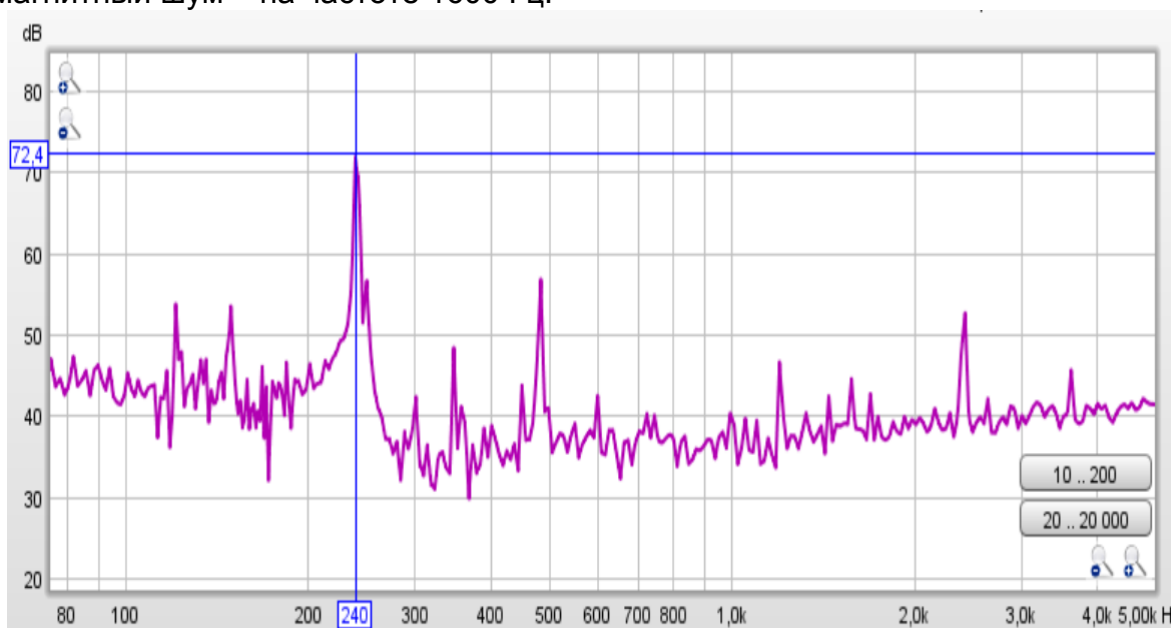


Рис. 4. Спектр интенсивности излучения шума двухлопастным воздушным винтом «Aero-naut Modellbau mbH» Power-Prop 11× 6".  
Частота вращения  $n_c \approx 120$  об/с

В таблице 1 и на рис. 5 представлены суммарные уровни интенсивности излучения шума и уровни пяти первых гармоник для каждого из четырёх винтов при сохранении тяги.

Таблица 1

Суммарные уровни интенсивности излучения шума и уровни пяти первых гармоник для винтов диаметр: 10", 11", 12", 13" (шаг – 6") при сохранении тяги

Винт	L, дБ					L $\Sigma$ , дБ
	Номер гармоники					
	1	2	3	4	5	
10× 6"	75,30	63,20	47,20	46,25	45,28	76,50
11× 6"	73,70	57,55	42,00	37,90	30,00	73,80
12× 6"	73,10	52,60	44,90	35,20	30,00	73,10
13× 6"	73,40	48,28	45,97	41,77	40,00	73,40



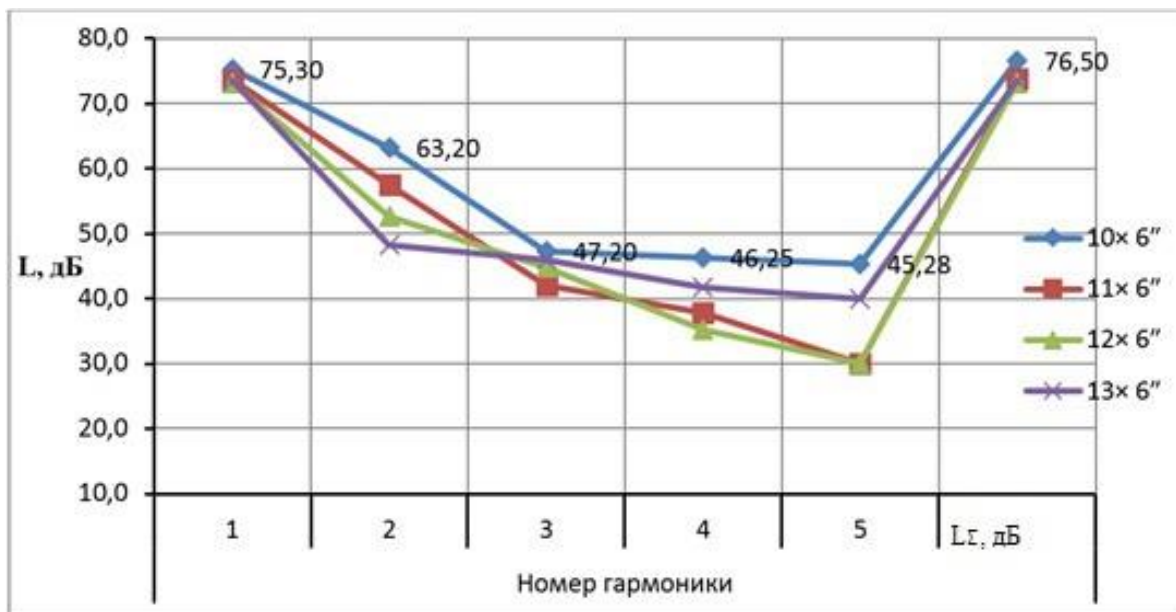


Рис. 5. Спектральный состав и соответствующие изменения уровней при сохранении тяги, для двухлопастных винтов «Aero-naut Modellbau mbH» Power-Prop: 10",11",12",13"(шаг – 6")

Видно, что увеличение диаметра в пределах 3" (76,2 мм) при сохранении постоянной тяги (рис. 4), привело к уменьшению суммарной интенсивности излучения до 3 дБ как следствие уменьшения частоты вращения винта (окружной скорости). Основной вклад здесь принадлежит первым двум гармоникам шума вращения. Вихревой шум выражен слабо.

Сравнение двухлопастных винтов 11× 6" и 12× 6", при одинаковой частоте вращения  $n_c \approx 107$  об/с показало (таблица 2, рис. 6), что в этом случае больше шумит винт большего диаметра. Опять же к этому привело действие больших по величине аэродинамических сил, создающих большую тягу.

Таблица 2  
Сравнение интенсивности излучения шума винтов 11× 6" и 12× 6" при одинаковой частоте вращения  $n_c \approx 107$  об/с

Винт	Номер гармоники	1	2	3	4	$L_{\Sigma}$ , дБ	$P$ , г
11× 6"	$f$ , Гц	217,2	434,2	651,6	868,8	–	840
	$L$ , дБ	67,8	56,8	40,2	37,4	68,2	
Винт	Номер гармоники	1	2	3	4	$L_{\Sigma}$ , дБ	$P$ , г
12× 6"	$f$ , Гц	214	427	636	856	–	1100
	$L$ , дБ	74,7	55,3	39,6	35	74,7	

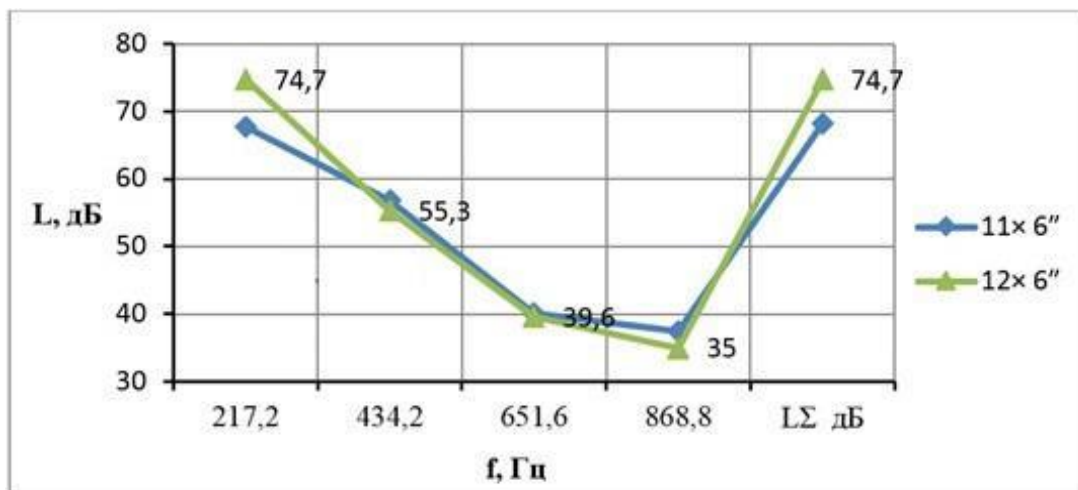


Рис. 6. Сравнение шума винтов 11×6" и 12×6" при одинаковой частоте вращения  $n_c \approx 107$  об/с

### Излучение шума двухлопастным винтом. Тяга переменная

На рис. 7 показано изменение интенсивности шума, излучаемого двухлопастным воздушным винтом на пяти первых гармониках шума вращения с ростом числа оборотов (окружной скорости).

Рост тяги винта происходит при увеличении числа оборотов (окружной скорости вращения винта). Соответственно происходит увеличение силового воздействия на среду от приложенных аэродинамических сил, как следствие – увеличивается интенсивность шума вращения.

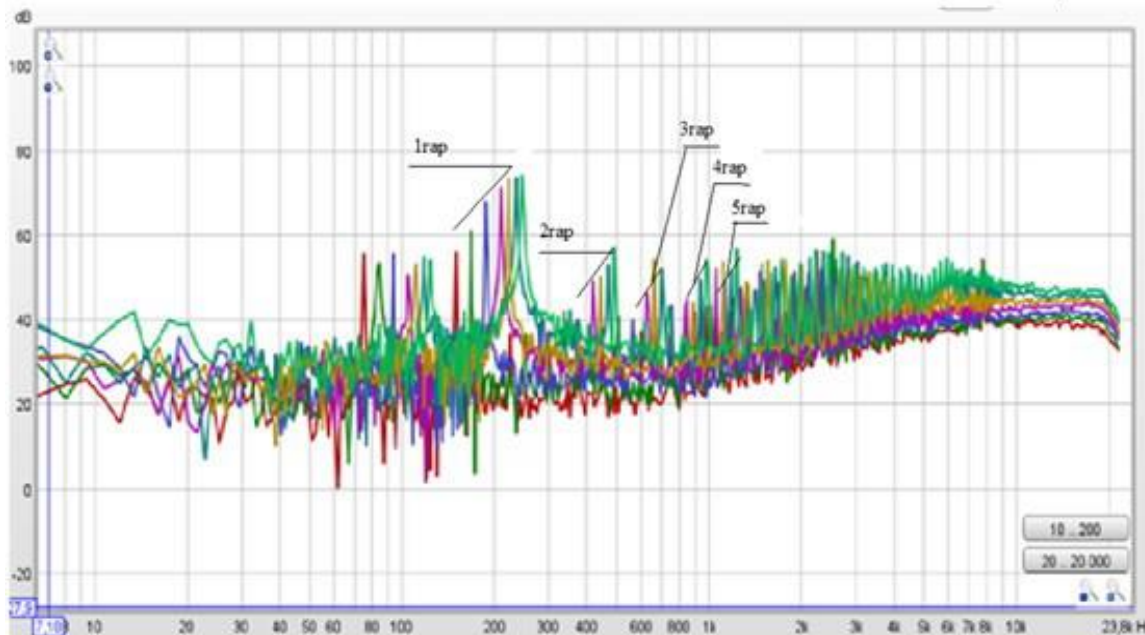


Рис.7. Изменение интенсивности шума воздушного винта с ростом числа оборотов (окружной скорости)

На рис. 8 и в таблице 3 представлена экспериментально полученная зависимость для определения интенсивности суммарного шума винта 11×6" в направлении плоскости вращения.



Таблица 3

Интенсивность суммарного шума винта 11×6", в направлении плоскости его вращения ( $n_c$  – число оборотов винта, об/с)

$n_c$ , об/с	75,5	84	93,5	99,5	106	111	117	121	129	134
$L_{\Sigma 90^\circ}$ , дБ	57,4	62,7	66,5	71	71,3	72,2	72,7	73,8	73,9	76,4

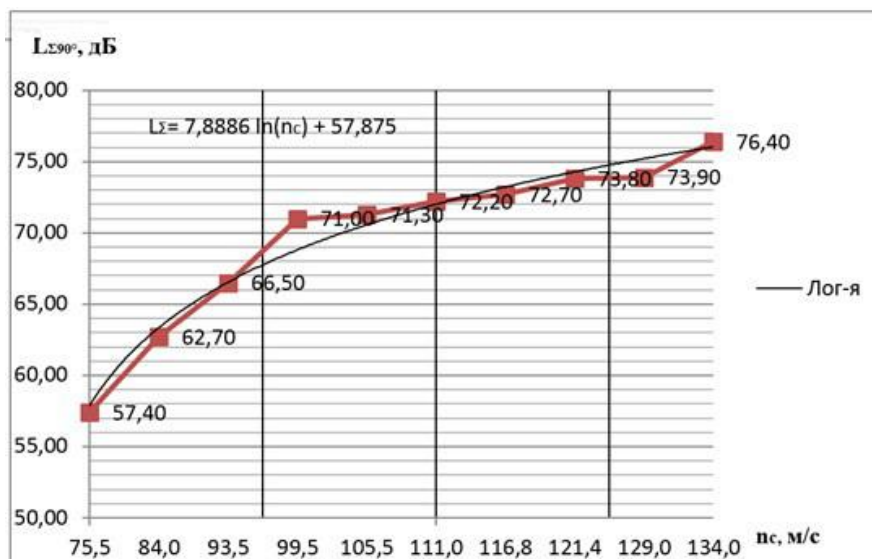


Рис. 8. Интенсивность суммарного шума винта 11×6", в направлении плоскости его вращения ( $n_c$  – число оборотов винта, об/с)

Эмпирически полученная формула для винта 11×6" «Аеро-наут»:

$$L_{\Sigma} = 7,8886 \ln(n_c) + 57,875 \quad (5)$$

даёт возможность при проектировании оценить шум, производимый данным винтом при заданном режиме полёта в данном направлении. В общем случае нужно иметь банк данных по часто применяемым винтам.

### Влияние количества лопастей на интенсивность шума винта

Проводили сравнение винтов, развивавших одинаковую тягу 800 г. Два винта 10×6" GWS с двумя и тремя лопастями имели одинаковые геометрические параметры.

Результаты эксперимента представлены в таблице 4 и на рис. 9 и рис. 10.

Таблица 4

Интенсивность излучения шума винтами 10×6" GWS с двумя и тремя лопастями, в направлении плоскости вращения. Тяга 800 г

Винты	$f$ , Гц	107-130	214-333	428-666	642-999	852-1332	$L_{\Sigma}$ , дБ
10×6"–3л GWS	L, дБ	60	62,3	60	52	52,6	64,8
10×6"–2л GWS		65,5	72,4	62,6	50,3	48,7	72,8

Как видно из графика на рис. 9 и спектров интенсивности излучения шума

(рис. 10, а, б), в отличие от двухлопастного у трёхлопастного винта уменьшена амплитуда первой гармоники шума вращения. Несколько выросла амплитуда второй гармоники. Возрос вихревой шум в диапазоне выше 5000 Гц.

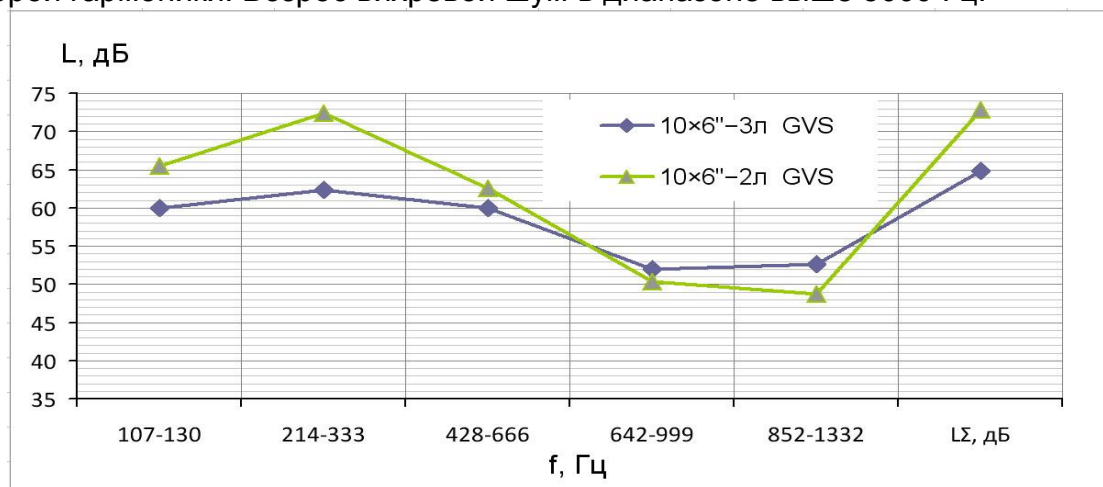
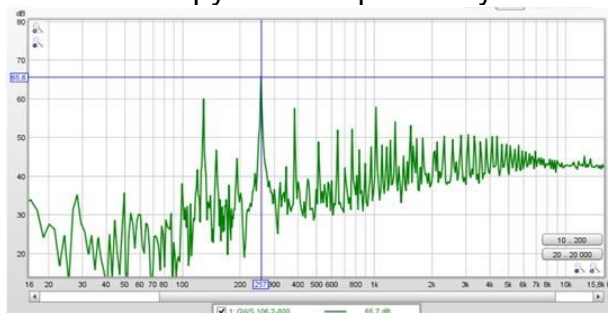


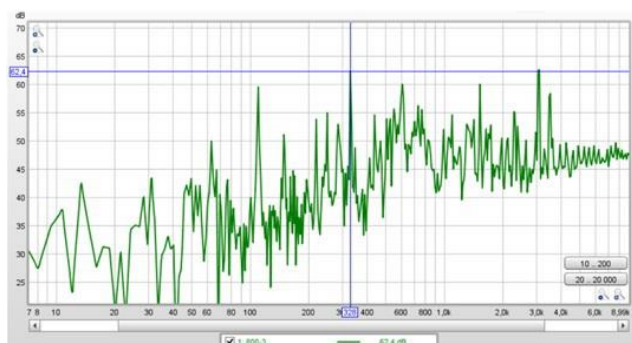
Рис. 9. Интенсивность излучения шума винтами, 10×6" GWS с двумя и тремя лопастями в направлении плоскости вращения. Тяга 800 г

Окружная скорость и число лопастей как количественно, так и качественно изменяют спектр шума. С увеличением окружной скорости повышаются уровни высших гармоник (рис. 10, а, б). С увеличением числа лопастей спектр сдвигается в сторону более высоких частот.

Эти же закономерности свойственны для винтов больших размеров, работающих при числах  $Re > 10^6$ . Уровень шума винта можно значительно снизить [4,5] за счёт уменьшения окружной скорости и увеличения числа лопастей.



а



б

Рис. 10. Изменение гармонического состава спектров излучения воздушными винтами: а – GWS10×6" двухлопастный, б – GWS10×6" трёхлопастный

### Направленность излучения шума двухлопастными малоразмерными воздушными винтами (тянущая компоновка) на примере винта 11× 6"-2

Установлено, что направленность излучения малоразмерного винта определяется направленностью излучения на первых двух гармониках частоты следования воздушного винта (таблица 5).

Таблица 5  
Спектральный состав пяти гармоник шума винта 11× 6"-2. Тяга – 1100 г

Номер гармоники	1	2	3	4	5	$L_{\Sigma}$ , дБ
$f$ , Гц	244	488	732	976	1220	
$\varphi^{\circ}$	$L$ , дБ					
0°	63,4	54	60,2	58,1	64,0	68,2
15°	65,5	56,9	59,6	61,1	59,3	68,5
30°	55,8	54,6	46,9	51,0	45,7	59,6
45°	69,7	53,7	56,0	54,3	58,4	70,5
60°	72,4	47,2	51,6	49,8	51,9	72,4
75°	72,4	54	49,8	46,3	49,2	72,5
90°	73,8	58,7	44,8	38,6	38,6	74,0
105°	75,3	56,9	43,9	48,6	48,6	75,4
120°	74,1	6,2	43,3	54,6	56,9	74,1
135°	72,9	60,8	52,5	57,5	52,5	73,3
150°	70,6	55,8	54,0	54,0	58,7	71,1

Максимальные суммарные уровни шума для тянущей компоновки винта (рис. 11) имеют место в задней полусфере в направлениях 90...120°. Минимум шума – в направлениях 30°.

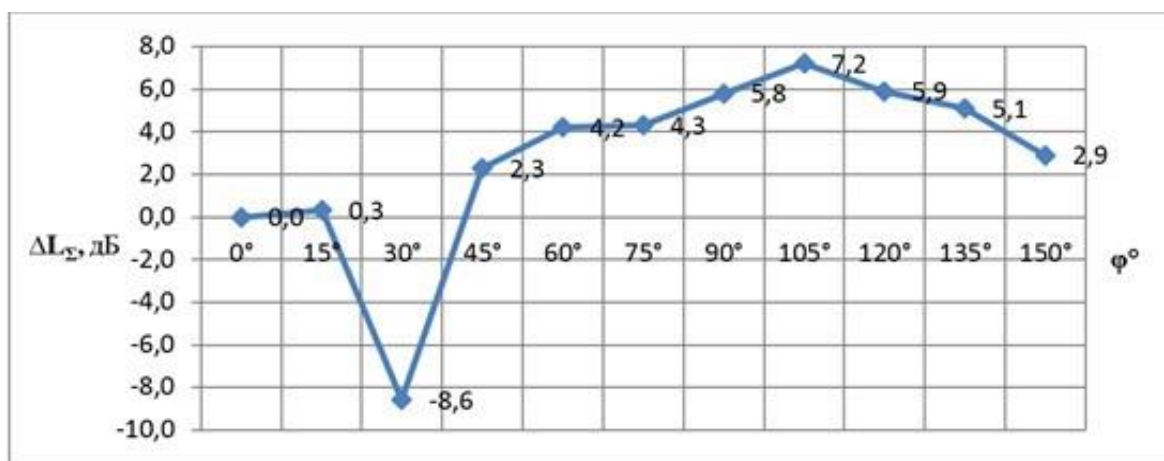


Рис. 11. Характеристика направленности шума вращения винта 11× 6"-2.

$$\text{Тяга} - 1100 \text{ г. } \Delta L_{\Sigma} = \Sigma L_{\varphi} - \Sigma L_{\varphi=0}$$

Представленная характеристика направленности шума вращения винта соответствует источникам дипольного типа, что свидетельствует о доминирующей роли аэродинамической нагрузки.

## Выводы

В случае, когда в качестве привода применяют бесколлекторный электродвигатель, шум силовой установки формируется в основном шумом, производимым воздушным винтом, и для малоразмерных винтов определяется первыми двумя, тремя гармониками шума вращения винта.

Максимальные уровни шума для воздушного винта имеют место в задней полусфере, в направлениях 90...120°.

Необходимо отметить, что шум винта может быть существенно уменьшен при той же тяге путем увеличения диаметра винта (уменьшения окружной скорости) или увеличения числа лопастей.

## Список литературы

1. Юдин Е.Я. Борьба с шумом на производстве. Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
2. Руденко В.В. Глава 5. Акустическая заметность БПЛА «Эко» и «Электра»/Отчёт Д 501-2/2017 П-Исследование характеристик радиолокационной, визуальной, тепловой и звуковой заметности на базе существующих БЛА «Эко» и «Электра». [ Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://library.khai.edu>
3. Гутин Л.Я. О звуковом поле вращающегося винта // ЖТФ. – Т.6. Вып. 5, 1936. – С. 899 – 909
4. Мунин А.Г., Квитка В.Е. Авиационная акустика. – М.: Машиностроение, 1973. 448 с.
5. Chester W., Hicks and Harvey H. Hubbard Comparison of sound emission from two – blade, four – blade and seven – blade propeller, NASA, Technical note № 1354, Washington july 1947. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=a801336> 2018-12-20T 19:20:28+00:00Z

## References

1. Yudin E.Ya., Bor'ba s shumom na proizvodstve. Spravochnik. [Noise control in the workplace]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. – 400 p.
2. Rudenko V.V., Glava5. Akusticheskaja zametnost' BPLA «Jeko» i «Jelektra»/Otchjot D 501-2/2017 P-Issledovanie harakteristik radiolokacionnoj, vizual'noj, teplovoj i zvukovoj zametnosti na baze sushhestvujushhih BLA «Jeko» i «Jelektra». [Acoustic visibility of the UAV «Eco» and «Electra» / Report D 501-2 / 2017 P-Study of the characteristics of radar, visual, thermal and sound visibility based on the existing UAV «Eco» and «Electra»]. [ Electronic resource]. - Access mode: <http://library.khai.edu>
3. Gutin L.Ya., O zvukovom pole vrashchayushchegosya vinta // ZhTF. [About the sound field of a rotary screw], T.6. vol. no 5, 1936. – P. 899 – 909
4. Munin A.G., Kvitka V.E., Aviatsionnaya akustika. [Aviation acoustics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 448 p.
5. Chester W., Hicks and Harvey H. Hubbard, Comparison of sound emission from two – blade, four – blade and seven – blade propeller, NASA, Technical note № 1354, Washington july 1947. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=a801336> 2018-12-20T 19:20:28+00:00Z

Поступила в редакцию 05.09.2020, рассмотрена на редколлегии 06.09.2020

## **Акустична помітність безпілотних літальних апаратів з силовою установкою, що містить електродвигун і повітряний гвинт**

Наявність в експлуатації безлічі прототипів БПЛА з гвинтовими рушіями, застосування таких апаратів на відносно низьких висотах і швидкостях польоту робить актуальною проблему зниження шуму, виробленого при польотах БПЛА як з точки зору акустичної помітності, так і екології.

Основним джерелом акустичної помітності БПЛА є його силова установка, що містить двигун і повітряний гвинт.

У завдання цієї роботи, вирішення яких потребує виконання експериментальних досліджень, входить визначення силових, просторових і спектральних характеристик акустичних полів гвинтомоторних силових установок БПЛА з електроприводом. Повітряний гвинт – один із головних джерел акустичного випромінювання виробленою силовою установкою. Досліджено вплив на акустичні характеристики силової установки: змін діаметра повітряних гвинтів при постійному кроці, змін кількості лопатей і числа оборотів (колових швидкостей гвинта). Розглянуто можливість зменшення шуму, виробленого повітряним гвинтом за рахунок зміни характеру спектра шуму. Шум обертання гвинта, особливо п'яти його перших гармонік, – одна з найбільш помітних частин у спектрі шуму гвинтокрилої установки. Тому було розглянуто і впроваджено на практиці гіпотезу щодо зменшення акустичної помітності БПЛА шляхом зменшення шуму цих складових за рахунок зміщення їх в область більш високих частот, на яких звукові коливання в повітрі загасають швидше. Запропоновано методику порівняння. Виміри проводили в статичних умовах в безлунній камері ХАІ. Відзначено, що повітряні гвинти, задіяні при проведенні експериментів, працювали при числах Рейнольдса ( $Re_{0,75} < 1 \cdot 10^5$ ), що істотно може впливати на його аеродинамічні і акустичні характеристики. Емпірично отримана формула для гвинта 11 × 6" «Аеро-naut» дає можливість при проектуванні оцінити шум, вироблений даними гвинтом, при заданому режимі польоту в даному напрямку. Досліджено можливість у подальшому мати банк даних щодо часто вживаних гвинтів. Розглянуто внесок гармонійних складових шуму повітряного гвинта в спрямованість його випромінювання.

Визначено внесок безколекторного електродвигуна в інтенсивність акустичного випромінювання силової установки БПЛА. Відзначено, що основний внесок в шум силової установки з безколекторним електродвигуном здійснює повітряний гвинт. Разом із тим шум безколекторного електродвигуна може значно зростати в діапазоні 2 ... 3 кГц при зносі підшипників кочення.

**Ключові слова:** акустична помітність, повітряний гвинт, спектральна характеристика, спрямованість, безлунна камера, частота, безколекторний електродвигун.

## **Acoustic visibility of unmanned aerial vehicles, with a power plant including an electric motor and propeller**

The presence in operation of many prototypes of UAVs with propeller propellers, the use of such devices at relatively low altitudes and flight speeds makes the problem of reducing the noise generated during UAV flights urgent both from the point of view of acoustic visibility and ecology.

The main source of the UAV's acoustic signature is its power plant, which includes the engine and propeller.

The tasks of this work, the solution of which requires the implementation of experimental studies, include the determination of the power, spatial and spectral characteristics of the acoustic fields of propeller driven power plants of UAVs with an electric drive. The propeller is one of the main sources of acoustic radiation produced by the power plant. The influence on the acoustic characteristics of the power plant was investigated: changes in the diameter of the propellers with a constant pitch, changes in the number of blades and the number of revolutions (peripheral speeds of the propeller). The possibility of reducing the noise produced by the propeller by changing the nature of the noise spectrum was considered. The rotor rotation noise, especially of its five first harmonics, is one of the most noticeable parts in the noise spectrum of a propeller engine installation. Therefore, a hypothesis was considered and put into practice to reduce the acoustic signature of UAVs by reducing the noise of these components due to their shift to the region of higher frequencies, at which sound vibrations in the air decay faster. A comparison technique is proposed. The measurements were carried out under static conditions, in the KhAI anechoic chamber. Note that the propellers involved in the experiments operated at Reynolds numbers ( $Re_{0.75} < 1 \cdot 10^5$ ), which can significantly affect its aerodynamic and acoustic characteristics. An empirical formula was obtained for the 11 × 6" «Aero-naut» propeller, which makes it possible to estimate the noise produced by this propeller when designing for a given flight mode in a given direction. The possibility was considered in the future to have a database of frequently used propellers. The contribution of harmonic noise components was considered propeller in the direction of its radiation.

The contribution of the brushless electric motor to the intensity of acoustic radiation of the UAV power plant is determined. It is noted that the main contribution to the noise of a power plant with a brushless electric motor is made by the propeller. At the same time, the noise of a brushless electric motor can significantly increase in the range of 2 ... 3 kHz with wear of rolling bearings.

**Key words:** acoustic signature, propeller, spectral characteristic, directivity, anechoic chamber, frequency, brushless electric motor.

#### **About the Authors:**

**Rudenko Valery Vladimirovich** – Researcher, National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky «KhAI», Kharkov, Ukraine

**Chernolikhova Victoria Petrovna** – Junior Researcher, National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky «KhAI», Kharkov, Ukraine

#### **Сведения об авторах:**

**Руденко Валерий Владимирович** – научный сотрудник, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

**Чернолихова Виктория Петровна** – младший научный сотрудник, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина