

УДК 534.83:629.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМА АВИАЦИОННОГО ДВУХТАКТНОГО ДВУХЦИЛИНДРОВОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

П. А. Мошков

[p\\_moshkov@ssj.irkut.com](mailto:p_moshkov@ssj.irkut.com)

Филиал ПАО «Корпорация «Иркут» «Региональные самолеты»

*Поступила в редакцию 11.12.2020*

**Аннотация.** Представлены результаты исследования структуры дальнего звукового поля двухцилиндрового двухтактного рядного двигателя внутреннего сгорания типа ROTAX-582UL. Акустические испытания двигателя выполнены при его работе в составе силовой установки легкого винтового самолета МАИ-890 в статических условиях на аэродроме Московского авиационного института. Выделены тональные составляющие, обусловленные работой двигателя. Получены пространственные, спектральные и энергетические характеристики звукового поля двигателя. Звуковая мощность суммарного тонального излучения исследуемого двигателя пропорциональна частоте вращения коленвала в степени 8,4. Представленные факторы направленности и энергетические зависимости могут быть использованы в рамках эмпирической модели для оценки уровней шума на местности летательных аппаратов с аналогичными поршневыми двигателями.

**Ключевые слова:** авиационный двигатель; легкий винтовой самолет; акустические измерения; аэроакустика; шум на местности.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время легкие винтовые летательные аппараты самолетного типа находят широкое применение как в гражданской, так и в военной сферах [1]. В состав силовой установки (СУ) таких аппаратов входят одиночные воздушные винты различной конструкции и компоновки и двигатели (поршневые, электрические или гибридные).

При этом уровни шума поршневых двигателей могут быть выше уровней шума воздушных винтов в зависимости от режима работы, направления излучения, конструктивных особенностей, наличия глушителей в трактах впуска и выхлопа, а также капотов и метрики, в которой оцениваются акустические характеристики летательного аппарата.

Целью настоящей работы является исследование структуры звукового поля двухтактного двухцилиндрового рядного двигателя внутреннего сгорания, применяемого в составе силовой установки самолета МАИ-890.

Полученные в работе результаты (факторы направленности и энергетические зависимости) могут быть использованы при оценках шума на местности летательных аппаратов с аналогичными поршневыми двигателями [2, 3]. Данная работа дополняет ранее опубликованные автором статьи, где представлены обобщенные спектральные [4], энергетические [5] и пространственные [6] характеристики винтомоторных силовых установок.



а



б

Рис. 1. Общий вид самолета МАИ-890 (а) и его СУ со стороны глушителя шума выхлопа (б)

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Объектом исследования является двухцилиндровый, двухтактный, рядный, двигатель ROTAX-582UL, устанавливаемый, в частности, на одноместном самолете МАИ-890. Общий вид самолета и его силовой установки представлен на рис. 1. Максимальная взлетная масса самолета составляет 400 кг. В состав силовой установки входит трехлопастной воздушный винт фиксированного шага. Располагаемая мощность двигателя составляет 48 кВт при частоте вращения коленвала 6500 об/мин. Передаточное число редуктора – 2,62. На двигателе установлены штатные глушители шума впуска и выхлопа и отсутствует капот.

Испытания были выполнены на аэродроме Московского авиационного института. Звуковое давление при испытаниях самолетов измерялось в 12-ти точках, расположенных на дуге окружности радиусом 30 метров и с шагом  $15^\circ$  (рис. 2). Центр дуги совпадал с проекцией втулки винта на земную поверхность. Направление ( $\varphi$ )  $0^\circ$  соответствовало излучению в переднюю полусферу в плоскости, проходящей через ось коленвала, а направление  $90^\circ$  соответствовало направлению излучения в плоскости диска винта. Измерительные микрофоны располагались на уровне земной поверхности.

Измерения акустического сигнала выполнялись параллельно с 12-ти измеритель-

ных каналов с частотой дискретизации 51200 Гц в течение 30 секунд. Постобработка сигнала в рамках задач настоящей работы включала в себя получение узкополосных спектров уровней звукового давления с шириной полосы 1,56 Гц в диапазоне частот 0,1–10000 Гц. Уровни фонового шума при испытаниях были ниже уровней шума силовой установки во всем исследуемом частотном диапазоне не менее чем на 15–20 дБ [7].

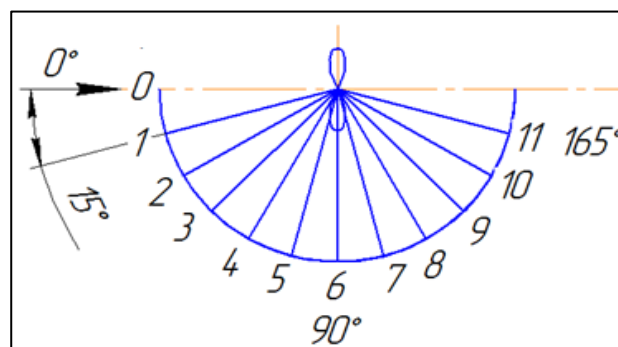


Рис. 2. Схема расположения точек измерения шума на дуге окружности радиусом 30 м

Данные о режимах работы силовой установки, характеризуемых частотой вращения коленвала двигателя, представлены в табл. 1. Это фактические частоты вращения коленвала, полученные по результатам анализа измеренных узкополосных спектров уровней звукового давления. Далее в работе под пониженным режимом работы двигателя будем подразумевать режим 1, а под повышенным – режим 6 (табл. 1).

Таблица 1

**Режимы работы двигателя ROTAX-582UL  
при испытаниях**

№ режима	$n_{кв}$ , об/мин
1	4762
2	4969
3	5164
4	5369
5	5438
6	5611

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ЗВУКОВОГО ПОЛЯ**

Спектр шума винтомоторной силовой установки включает в себя тональные и широкополосные составляющие шума воздушного винта и поршневого двигателя.

Дискретные частоты в спектре шума воздушного винта определяются в соответствии с выражением:

$$f_v = knz, \quad (1)$$

где  $k$  – номер гармоники;  $n$  – частота вращения винта (об/с);  $z$  – число лопастей.

Частоты цилиндрических ( $f_{ц}$ ) и двигательных ( $f_{д}$ ) гармоник в спектре шума двигателя определяются соотношениями:

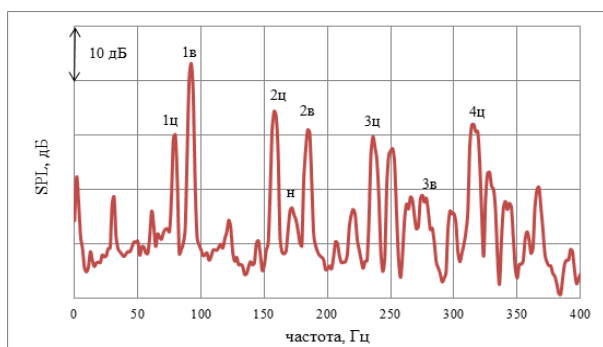
$$f_{ц} = \frac{kn_{кв}}{30\tau}, \quad (2)$$

$$f_{д} = kf_{ц}i, \quad (3)$$

где  $k$  – номер гармоники;  $n_{кв}$  – частота вращения коленвала двигателя (об/мин);  $i$  – число цилиндров в двигателе;  $\tau$  – тактность двигателя.

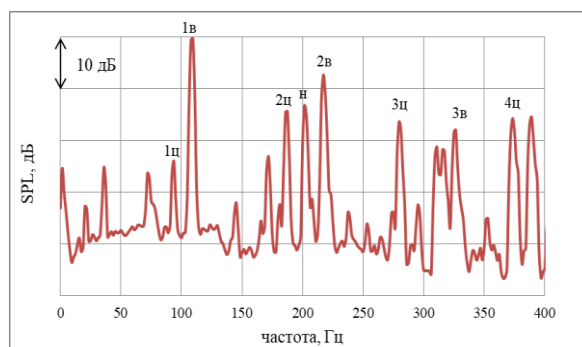
На гармониках шума, относящихся к работе двигателя в целом, проявляются все составляющие шума двигателя – шум впуска, выхлопа и структурный шум, однако соотношение этих источников будет зависеть от многих факторов, таких как режим работы, направление излучения, расположение и наличие глушителей и капотов и т.д. [8].

На рис. 3 представлены измеренные в направлении  $105^\circ$  узкополосные спектры уровней звукового давления для пониженного (1-го) и повышенного (6-го) режимов работы силовой установки самолета МАИ-890 (см. табл. 1). На графиках цифрами с индексами «в» и «ц» обозначены первые три гармоники шума винта и первые четыре гармоники шума цилиндра. Дополнительно на графиках отмечена неидентифицированная гармоника («н»).



$$n_{кв} = 4761,7 \text{ об/мин}$$

а



$$n_{кв} = 5611,4 \text{ об/мин}$$

б

**Рис. 3.** Узкополосные спектры уровней звукового давления (0,1–400 Гц), измеренные при работе силовой установки самолета МАИ-890 (в направлении  $105^\circ$  на расстоянии 30 м) при пониженном (а) и повышенном (б) режимах работы силовой установки

Частота неидентифицированной гармоники в 2,16 раза больше частоты вращения коленвала, и она проявляется на всех рассматриваемых режимах работы, что свидетельствует о том, что источником этого излучения является агрегат, приводимый от коленвала двигателя с передаточным числом 2,16. Вероятными источниками излучения на данной частоте могут быть вращающийся дисковый золотник управления впуском свежего заряда, топливный и масляный насосы. Частота работы этих агрегатов должна быть чуть больше, чем в 2 раза частоты вращения коленвала для обеспечения более высоких характеристик высокооборотных двухтактных двигателей. В то же время ввиду отсутствия данных о передаточных числах приводов агрегатов зарубежного двигателя и отсутствия информации о том, какой из этих агрегатов доминирует на данной частоте, сложно однозначно идентифицировать эту гармонику. Поэтому далее будем считать эту гармонику неидентифицированной, однако, связанной с работой агрегатов двигателя.

Можно видеть, что на повышенном режиме работы уровень звукового давления на частоте неидентифицированной гармоники сопоставим с уровнями звукового давления цилиндрических гармоник. Поэтому при анализе суммарного тонального излучения ДВС будем учитывать первые четыре цилиндрические гармоники и неидентифицированную гармонику.

Отметим также, что шум поршневого двигателя включает в себя не только тональные, но и широкополосные составляющие, обусловленные вихревой составляющей шума впуска и выхлопа и широкополосной составляющей структурного шума. Но в рамках настоящей работы при использовании в качестве нагрузки воздушного винта, однозначно определить в каких диапазонах частот доминирует широкополосный шум двигателя над вихревой составляющей шума винта не представлялось возможным. Поэтому широкополосная составляющая шума силовой установки не рассматривается в рамках настоящей рабо-

ты. Но стоит отметить, что уровни широкополосного шума (рис. 3) существенно ниже тональных составляющих, и не могут оказывать влияния на суммарные уровни шума, как в единицах дБ, так и в дБА.

#### ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

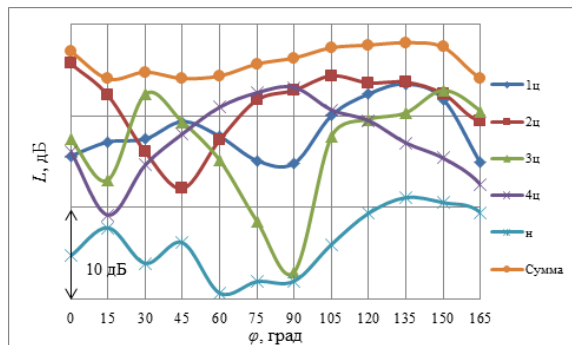
Характеристики направленности первых четырех цилиндрических гармоник, неидентифицированной гармоники и их энергетической суммы представлены на рис. 4 для пониженного (режим 1) и повышенного (режим 6) режимов работы силовой установки. Можно видеть существенное влияние режима работы на характеристики направленности тональных составляющих шума двигателя, что свидетельствует о различном соотношении доминирующих источников в рассматриваемых направлениях излучения звука. Интересны характерные минимумы в направлении  $90^\circ$  для 1-й и 3-й цилиндрических гармоник, что свидетельствует о схожих механизмах генерации шума, доминирующих на этих гармониках. Возможно, что на этих гармониках доминирует шум выхлопа, который эффективно экранируется крылом самолета в направлении излучения  $90^\circ$  (рис. 1).

Для оценки влияния режима работы на характеристики направленности шума двигателя результаты измерений были приведены к нормализованному виду согласно выражению:

$$\Delta L = L_\varphi - L_0, \quad (4)$$

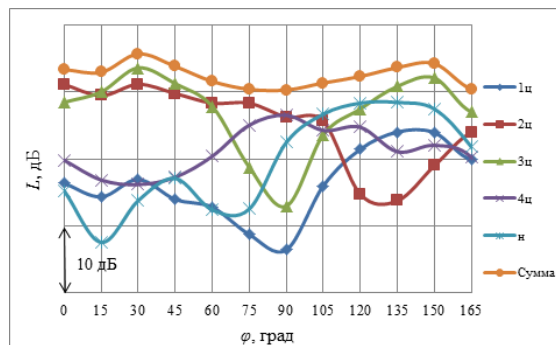
где  $L_\varphi$  – уровень звукового давления, измеренный в направлении  $\varphi$ ;  $L_0$  – уровень звукового давления, измеренный в направлении  $\varphi = 0^\circ$ .

Нормализованные характеристики направленности суммарного тонального излучения для шести режимов работы двигателя ROTAX-582UL представлены на рис. 5. Нормализованные диаграммы направленности отдельных составляющих излучения ДВС для 1, 2, 3 и 4-й цилиндрических гармоник и неидентифицированной гармоники представлены на рис. 6.



$n_{\text{кв}} = 4761,7$  об/мин

*a*



$n_{\text{кв}} = 5611,4$  об/мин

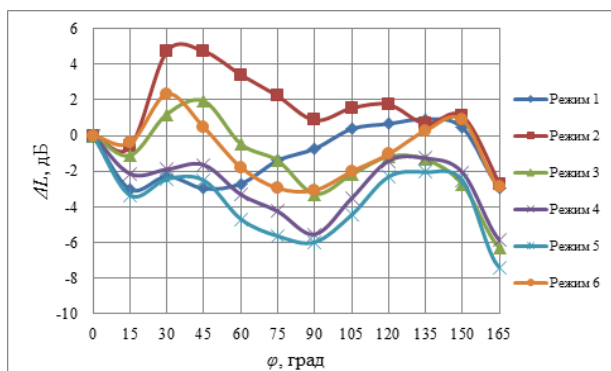
*б*

**Рис. 4.** Характеристики направленности отдельных тональных составляющих шума двигателя и суммарного тонального излучения для пониженного (*a*) и повышенного (*б*) режимов работы

Характерные максимумы суммарного излучения имеют место в задней полусфере в направлениях  $120\text{--}150^\circ$  в зависимости от режима работы, и в передней полусфере в направлениях  $30\text{--}45^\circ$ . За исключением режима 1 в направлении  $90^\circ$  наблюдаются минимумы диаграммы направленности. Минимумы в направлении  $90^\circ$  обусловлены влиянием 1-й и 3-й гармоник шума цилиндра (рис. 6, *a* и *в*) на направленность суммарного тонального излучения.

Наибольшее влияние режим работы силовой установки оказывает на направленность второй цилиндровой гармоники. В частности в направлении  $45^\circ$  для режима 1 наблюдаются минимальные уровни звукового давления, а для режимов 2 и 4 – максимальные.

Для неидентифицированной гармоники максимумы характеристики направленности расположены в задней полусфере в направлении  $120\text{--}135^\circ$ .



**Рис. 5.** Нормализованные характеристики направленности суммарного тонального излучения двигателя

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

Учитывая сложную пространственно-временную структуру звукового поля исследуемого ДВС, представляет интерес выполнение энергетического анализа. Для этого на основании измеренных в различных точках акустического поля уровней звукового давления выполнена оценка первых четырех цилиндровых гармоник, а также неидентифицированной гармоники для различных режимов двигателя в соответствии с выражением:

$$L_W = 10 \lg (\pi R^2 \int_0^\pi 10^{L(\varphi)} \sin(\varphi) d\varphi), \quad (5)$$

где  $R$  – расстояние от источника до точки измерения шума;  $\varphi$  – угол направления излучения;  $L(\varphi)$  – функция зависимости уровня звукового давления от азимутального угла. Отметим, что при расчете уровней звуковой мощности акустическое поле ДВС полагалось осесимметричным относительно оси коленвала, а излучение звука осуществляется в полусферу.

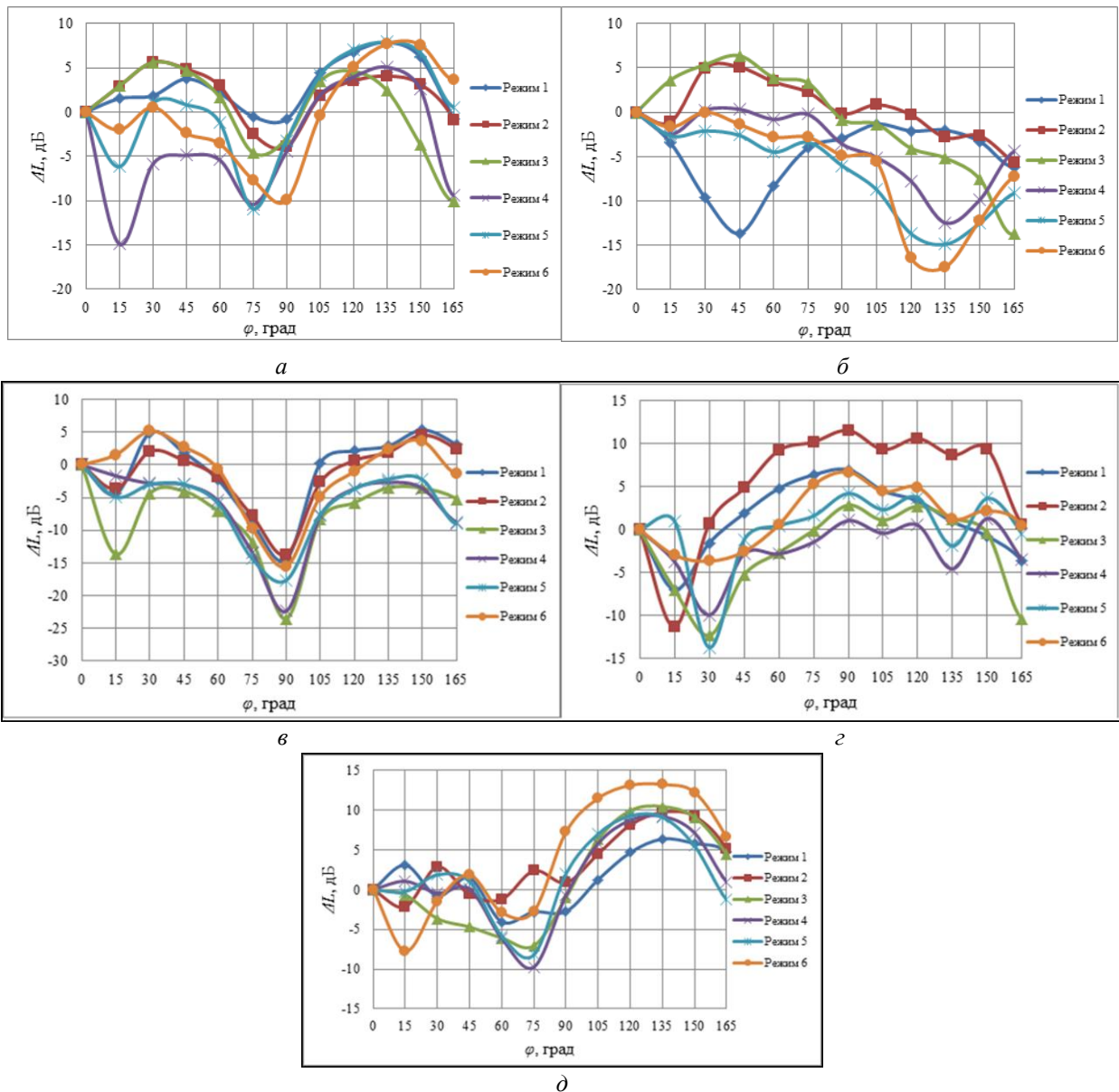
На рис. 7 представлены зависимости уровней звуковой мощности первых четырех гармоник шума цилиндра, не идентифицированной гармоники и их энергетической суммы от частоты вращения коленвала. Можно видеть, что уровни звуковой мощности 1-й цилиндровой гармоники практически не зависят от режима работы. Для режимов 4–6 2-я и 3-я цилиндровые гармоники определяют суммарную звуковую мощность двигателя, в то время как для режимов 1–3 2-я цилиндровая гармоника



является основным тоном. Уровни звуковой мощности неидентифицированной гармоники для режимов 4–6 больше, чем уровни звуковой мощности 1-й и 4-й цилиндрических гармоник на пониженных режимах работы (режимы 1–3), вклад неидентифицированной гармоники в суммарную звуковую мощность ДВС незначителен.

Указанные выводы также подтверждают данные табл. 2, где представлены результаты расчетной оценки вклада отдельных тональных составляющих шума двигателя в суммарную звуковую мощность. Вклад неидентифицированной гармоники существенен только на режимах 4–6 и достигает 16,2 %.

На основании данных, представленных на рис. 7, получено, что звуковая мощность суммарного тонального излучения двигателя ROTAX-582UL пропорциональна частоте вращения коленвала в степени 8,4. Известно, что звуковая мощность шума выхлопа двухтактных поршневых двигателей пропорциональна частоте вращения коленвала в степени 4 [9]. Ранее автором при исследовании шума беспилотного воздушного судна с четырехтактным двигателем с низкоэффективным глушителем шума выхлопа [10, 11] была получена зависимость звуковой мощности шума ДВС от частоты вращения коленвала в степени 4,6.



**Рис. 6.** Нормализованные характеристики направленности отдельных тональных составляющих излучения двигателя: а – первая цилиндрическая гармоника; б – вторая цилиндрическая гармоника; в – третья цилиндрическая гармоника; г – четвертая цилиндрическая гармоника; д – неидентифицированная гармоника

Полученный в работе показатель степени, вероятнее всего, свидетельствует о том, что при наличии глушителей в трактах впуска и выхлопа и отсутствии капота [12] вклад структурного шума ДВС в суммарный уровень шума становится существенным, что приводит к повышению показателя степени от 4–5 до более высоких значений, в частности, 8,4 как в данном случае.

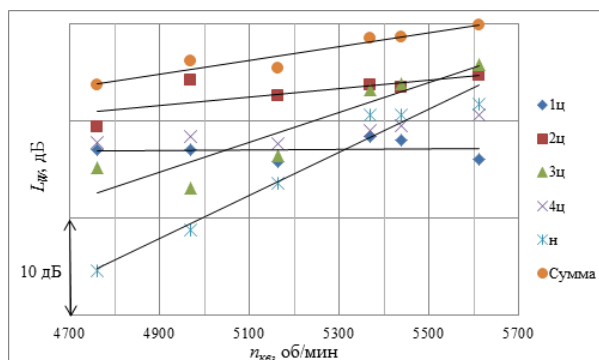


Рис. 7. Зависимости уровней звуковой мощности тональных составляющих шума ДВС и их энергетической суммы

Таблица 2

Вклад (в %) отдельных составляющих тонального излучения в суммарную звуковую мощность двигателя ROTAX-582UL

№ режима	1ц	2ц	3ц	4ц	н
1	21,5	37,3	14,2	25,8	1,2
2	12,4	63,6	5,1	17,1	1,8
3	11,0	52,9	12,7	16,7	6,7
4	9,8	33,2	29,6	11,2	16,2
5	8,7	30,1	33,1	12,3	15,8
6	4,1	29,7	39,1	11,8	15,2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты статических испытаний двигателя двухтактного, рядного, двухцилиндрового двигателя ROTAX-582 UL в составе силовой установки легкого самолета МАИ-890. Получены спектральные, пространственные и энергетические характеристики звукового поля двигателя. Обнаружен дополнительный, неидентифицированный источник шума, обусловленный, вероятнее всего, работой агрегатов силовой установки. Этот источник работает на частоте в 2,16 раза больше частоты вращения коленвала, и его максимальный вклад в суммарную звуковую мощность силовой установки достигает 16,2 %.

Автор статьи выражает благодарность начальнику авиабазы Московского авиационного института Евгению Владимировичу Кожевникову за помощь в организации и проведении акустических испытаний легкого винтового самолета МАИ-890.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мошков П. А.** Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАИ (НИУ), 2015. 143 с. [ P. A. Moshkov, *Prediction and reduction of environmental noise generated by light propeller aircraft: Cand. Diss. Abstr.*, (in Russian). Moscow: MAI (NIU), 2015. ]
2. **Мошков П. А., Самохин В. Ф.** Интегральная модель шума винтомоторной силовой установки // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91, № 2. С. 353–360. [ P. A. Moshkov and V. F. Samokhin, "Integral model of noise of an engine-propeller power plant", (in Russian), in *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, vol. 91, no. 2, pp. 353-360, 2018. ]
3. **Дмитриев В. Г., Самохин В. Ф.** Комплекс алгоритмов и программ для расчета шума самолетов на местности // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV, № 2. С. 137–157. [ V. G. Dmitriev, V. F. Samokhin, "Complex of algorithms and programs for calculation of aircraft noise", (in Russian), in *Uchenye zapiski TsAGI*, vol. XLV, no. 2, pp. 137-157, 2014. ]
4. **Мошков П. А.** Спектральные характеристики акустического поля винтомоторных силовых установок // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23, № 4 (86). С. 93–101. [ P. A. Moshkov, "The spectral characteristics of the acoustic field propeller-engine power plant", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 23, no. 4 (86), pp. 93-101, 2019. ]
5. **Мошков П. А.** Энергетические характеристики акустического поля винтомоторных силовых установок // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22, № 4 (82). С. 87–93. [ P. A. Moshkov, "The energy characteristics of the acoustic field propeller-engine power plant", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 22, no. 4 (82), pp. 87-93, 2018. ]
6. **Мошков П. А.** О направленности акустического излучения винтомоторных силовых установок // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21, № 1 (75). С. 118–127. [ P. A. Moshkov, "About the direction of acoustic radiation of propeller power plant", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 21, no. 1 (75), pp. 118-127, 2017. ]
7. **Кажан В. Г., Мошков П. А., Самохин В. Ф.** Природный фон при проведении акустических испытаний самолетов на аэродроме базирования малой авиации // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2015. № 7. [Электронный ресурс]. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/782827.html> (дата обращения 25.07.2015). [ V. G. Kazhan, P. A. Moshkov, V. F. Samokhin (2015, Jul. 25), "Ambient background noise during acoustic testing of aircraft at the airfield of small aircraft based", (in Russian), in *Nauka i obrazovanie. MG TU im. N. E. Bauman*, no. 7, 2015. [Online]. Available: <http://technomag.bmstu.ru/doc/782827.html> ]
8. **Мошков П. А.** Классификация источников шума легких винтовых самолетов на местности // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 101–106. [ P. A. Moshkov, "Classification of sources of noise light propeller aircraft on the ground", (in Russian), in *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya*, no. 4, pp. 101-106, 2015. ]

9. **Двухтактные** карбюраторные двигатели внутреннего сгорания / В. М. Кондрашов [и др.]. М.: Машиностроение, 1990. 272 с. [ V. M. Kondrashov, *et al.*, *Two-stroke carburetor internal combustion engines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1990. ]

10. **Исследование** акустических характеристик беспилотного летательного аппарата «Ptero-G0» в заглушенной камере АК-2 / И. В. Беляев [и др.] // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24, № 4. С. 52–62. [ I. V. Belyev, *et al.*, “Studying the “Ptero-G0” unmanned flying vehicles acoustic characteristics in AK-2 anechoic chamber”, (in Russian), in *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, vol. 24, no. 4, pp. 52-62, 2017. ]

11. **Study** of Ptero-G0 UAV Noise with Level Flight Conditions / P. Moshkov, et al. // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (Aeroacoustics 2019), 2019. AIAA Paper No. 2019-2514. DOI: 10.2514/6.2019-2514. [ P. Moshkov, *et al.*, “Study of Ptero-G0 UAV Noise with Level Flight Conditions”, in *25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (Aeroacoustics 2019)*, AIAA Paper No. 2019-2514, 2019. DOI: 10.2514/6.2019-2514. ]

12. **Мошков П. А., Яковлев А. А.** Экспериментальное исследование влияния капотирования двигателя на акустические характеристики авиационной поршневой силовой установки // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 271–274. [ P. A. Moshkov, A. A. Yakovlev, “Experimental study of the influence of the engine nosing on the the acoustic characteristics of aviation piston power plant”, (in Russian), in *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya*, no. 6, pp. 271-274, 2014. ]

#### ОБ АВТОРЕ

**МОШКОВ Петр Александрович**, вед. констр. Дипл. инж. (МАИ, 2012). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов (МАИ, 2015). Иссл. в обл. аэроакустики.

#### METADATA

**Title:** Study of the noise of an aircraft two-stroke two-cylinder piston engine.

**Author:** P. A. Moshkov

**Affiliation:**

IRKUT Corporation Regional Aircraft, Moscow, Russia.

**Email:** p\_moshkov@ssj.irkut.com

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 2 (92), pp. 48-55, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The results of studying the structure of the far sound field of a two-cylinder two-stroke in-line internal combustion engine of Rotax-582UL type are presented. Acoustic tests of the engine were performed during its operation as part of the power plant of MAI-890 light propeller aircraft under static conditions at Moscow aviation Institute local aerodrome. The tonal components caused by the engine operation are highlighted. Spatial, spectral, and energy characteristics of the engine sound field are obtained. The sound power of the overall tonal radiation of the engine is proportional to the engine speed in degree of 8.4. The presented directional factors and energy dependences can be used in the framework of an empirical model to estimate the community noise levels with similar piston engines.

**Key words:** propeller; propeller noise; aircrafts noise; power plant noise; aeroacoustics; aviation engine; acoustic measurements, radiation spectrum, open rotor.

**About author:**

**MOSHKOV, Petr Aleksandrovich**, Leading constr. Dipl. engineer (MAI, 2012). Cand of Tech. Sci. (MAI, 2015).