

УДК 534.83:629.7

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВИНТОМОТОРНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

П. А. Мошков

p_moshkov@scac.ru

АО «Гражданские самолеты Сухого» (АО «ГСС»)

Поступила в редакцию 03.10.2019

Аннотация. Дан краткий обзор механизмов генерации шума винтовыми двигателями и поршневыми двигателями. Рассмотрены спектральные характеристики акустического поля винтомоторных силовых установок. Представлено описание спектров шума одиночных и соосных воздушных винтов, а также поршневых двигателей. Рассмотрено влияние полетных условий на спектр шума винтомоторной силовой установки. Описаны особенности спектральных характеристик многоцилиндровых двигателей в зависимости от способа организации выхлопа. Рассмотрены особенности спектральных характеристик малоразмерных воздушных винтов.

Ключевые слова: воздушный винт; шум воздушного винта; шум самолетов; шум силовых установок; аэроакустика; авиационный двигатель; акустические измерения; спектр излучения; соосные винты.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое развитие и использование беспилотных авиационных систем в военных и гражданских целях приводит к возрастанию конкуренции в этом сегменте промышленности. Одним из конкурентных преимуществ винтового беспилотного летательного аппарата (БПЛА) является его малошумность в сравнении с аналогичными аппаратами.

В настоящее время норм, регламентирующих предельно допустимые уровни шума на местности винтовых БПЛА гражданского назначения, не разработано, однако в перспективе такие нормы могут быть разработаны по аналогии с нормами ИКАО для гражданских легких винтовых самолетов.

Для БПЛА военного назначения важна проблема слышимости и акустической заметности, которая в настоящее время является достаточно актуальной [1–3]. Необходимо обеспечивать неслышимость и незаметность отечественных БПЛА на заданной пространственно-временной траектории по-

лета и в то же время обладать технологиями обнаружения, идентификации и регистрации в режиме реального времени траектории полета БПЛА противника.

В спектрах шума винтовых двигателей и поршневых двигателей присутствуют тональные составляющие на частотах, кратных частоте следования лопастей, на частотах шума взаимодействия и на частотах, кратных частоте следования вспышек в цилиндрах двигателя. Наличие этих характерных тональных частот в спектре шума может позволять идентифицировать тип винтового летательного аппарата (мультикоптер, вертолет одновинтовой схемы, БПЛА самолетного типа с поршневым двигателем и т.д.).

Целью работы является обобщение спектральных характеристик акустического поля винтомоторных силовых установок (СУ) и факторов, влияющих на них. Ранее автором было выполнено обобщение энергетических и пространственных характеристик акустического поля винтомоторных СУ [4, 5].

СПЕКТР ШУМА ОДИНОЧНОГО ВОЗДУШНОГО ВИНТА

При рассмотрении шум изолированных воздушных винтов обычно подразделяют на шум вращения и вихревой шум [6]. Шум вращения обусловлен периодическим воздействием на среду стационарных и нестационарных относительно лопастей аэродинамических нагрузок, а также периодическим вытеснением из среды объема, равного объему лопасти (шум вытеснения). Шум от аэродинамической нагрузки эквивалентен простому акустическому источнику – диполью, а шум вытеснения – монополю.

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.

Основными источниками вихревого шума воздушных винтов являются флуктуирующие силы (подъемная сила и сила сопротивления), связанные с пульсациями давления на поверхности лопасти, и пульсации давления в вихревом следе. Вихревой шум эквивалентен диполью, а его спектр является непрерывным по частоте.

Частоту максимума вихревого (широкополосного) шума можно определить в соответствии с выражением:

$$f = \frac{uSt}{a}, \quad (2)$$

где u – характерная скорость обтекания профиля лопасти, a – характерный размер (для воздушных винтов $a = b \sin \alpha + c \cos \alpha$, где b, c, α – хорда, толщина и угол атаки лопасти на относительном радиусе $\bar{r} = 0,75$), St – число Струхала, равное 0,2.

Типовые узкополосные спектры уровней звукового давления, измеренные в дальнем звуковом поле при работе воздушных винтов АВ-72 и СВ-24 при одном уровне потребляемой мощности, представлены на рис. 1.

В зависимости от геометрических параметров, режима работы винта, его компоновки на аппарате роль различных источников в общем уровне шума на местности бу-

дет различной. Для малонагруженных винтов легких самолетов, работающих в статических условиях, доминирующим является шум от аэродинамической нагрузки. В шуме малоразмерных винтов в полетных условиях вихревая составляющая может доминировать в высокочастотной части спектра, определяя при этом суммарные уровни звукового давления в дБА.

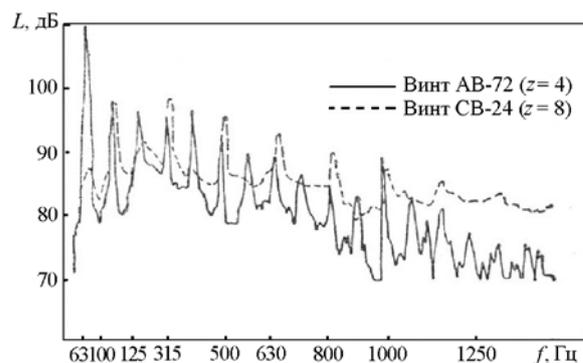


Рис. 1. Узкополосные спектры уровней звукового давления в дальнем поле для воздушных винтов АВ-72 и СВ-24 при одной мощности [7]

В настоящее время существуют методы обработки цифровых сигналов [8, 9], позволяющие разделять тональную и широкополосную составляющие в спектре шума винтовых движителей. Пример такого разделения показан на рис. 2.

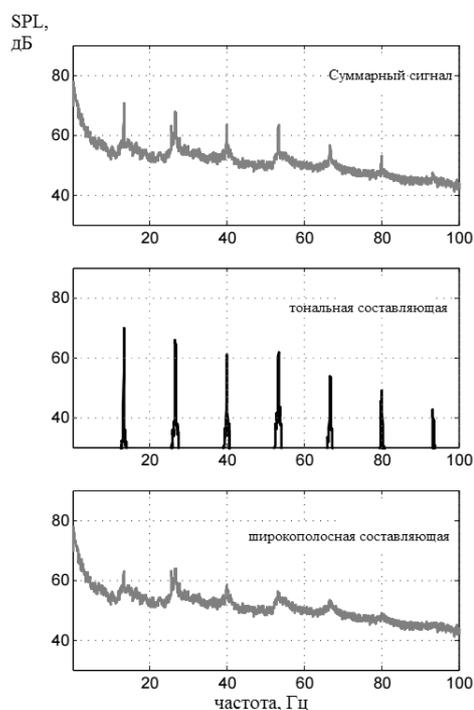


Рис. 2. Разделение тональной и широкополосной составляющих в спектре шума винта [9]

Можно видеть, что широкополосная составляющая шума привносит незначительный вклад в тональные уровни шума. Математически тональные уровни шума наблюдаются во всем частотном диапазоне, однако на высоких частотах тональные уровни шума маскируются широкополосной составляющей.

Отметим, что данные методы [8, 9] применимы для обработки сигналов только в лабораторных испытаниях при наличии квазистационарного сигнала.

Вопросы обработки сигналов являются ключевыми в проблеме акустической заметности беспилотных летательных аппаратов как в части обнаружения аппарата противника, так и в части построения траектории полета аппарата без возможности его обнаружения, но в рамках настоящей работы эти аспекты не рассматриваются.

На основании наземных испытаний легкомоторных самолетов автором была получена зависимость относительной спектральной плотности мощности гармонических составляющих шума воздушного винта (W_m) от частоты гармоники (f_m) [4].

$$\bar{S}_m = \frac{W_m}{W_1} = cf_m^{-3}, \quad (3)$$

где W_1 – звуковая мощность первой гармоники, c – эмпирический коэффициент пропорциональности. Соотношение (3) предлагается использовать в рамках полуэмпирической модели шума [10] для оценки уровней звуковой мощности тональных составляющих после оценки уровня звуковой мощности первой гармоники шума винта как суммы излучений от нагрузки и от вытеснения.

Влияние угла атаки и неоднородности набегающего потока. При положительном угле тангажа (при взлете) аппарата уровни шума увеличиваются относительно режима горизонтального полета при одной и той же частоте вращения винта. Причем чем выше угол тангажа, тем выше уровень шума винта [11]. При отрицательном тангаже (при снижении) аппарата наблюдается уменьшение уровней шума при увеличении угла тангажа.

В работе [12] при исследовании вихревого шума при обтекании стационарных

стержней получено, что увеличение степени турбулентности набегающего на тело потока и уменьшение масштаба турбулентности (увеличение характерной частоты вихрей в набегающем потоке выше частоты вихревого звука) приводит к увеличению интенсивности вихревого звука. Для случая воздушного винта можно ожидать, что степень неоднородности и масштаб турбулентности набегающего потока существенным образом могут влиять на спектральные уровни звукового давления тонального и вихревого шума.

Особенности акустики малоразмерных винтов. Малоразмерные воздушные винты, как правило, неизменяемого или фиксированного шага. В отличие от автоматических винтов изменяемого шага, при наличии ветра они не могут поддерживать постоянную частоту вращения.

На рис. 3 представлены узкополосные спектры уровней звукового давления, регистрируемые с шагом 1,5 с при удалении малоразмерного БПЛА самолетного типа с поршневым двигателем от контрольной точки.

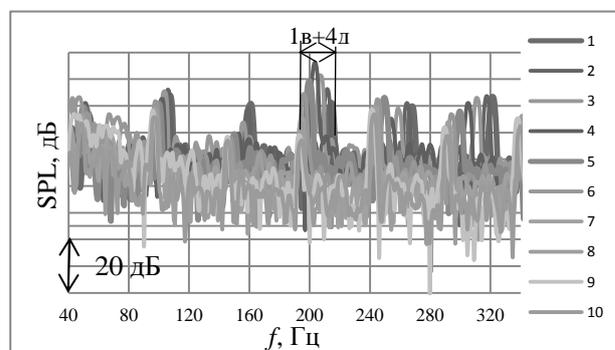


Рис. 3. Узкополосные спектры уровней звукового давления, регистрируемые с шагом 1,5 с при удалении малоразмерного БПЛА от контрольной точки

Можно видеть существенный разброс частот и спектральных уровней звукового давления. Для первой гармоники шума винта, которая в данном случае совпадает с четвертой гармоникой шума одноцилиндрового двигателя, разброс частоты составляет около 20 Гц. Таким образом, можно сделать вывод, что при полете малоразмерного БПЛА на низких высотах в спектре шума воздушного винта доминирует излучение, вызванное нестационарными относи-

тельно лопастей аэродинамическими нагрузками. Данный фактор необходимо учитывать при оценке шума на местности малоразмерных БПЛА при полете в условиях реальной турбулентной атмосферы.

Влияние компоновки винта. При расположении воздушного винта вниз по течению относительно крыла, пилона или хвостового оперения может наблюдаться значительное увеличение интенсивности тональных составляющих в спектре шума винта [13]. Данный эффект называют взаимодействием «лопасть-турбулентный след» (blade-wake interaction). Для снижения негативного влияния толкающей компоновки плоскость вращения винта должна быть отнесена от задней кромки впереди расположенного крыла (пилона или хвостового оперения) на величину одной средней аэродинамической хорды крыла или должна быть осуществлена «продувка», обеспечивающая выравнивание профиля скорости в следе за крылом.

При расположении винта над крылом летательного аппарата возникает эффект экранирования шума [14]. В работе [15] при исследовании экранирования шума малоразмерного винта было установлено, что тональному и широкополосному шуму свойственны различные типы экранирования. Экранирование тонального шума носит нерегулярный характер и может привести как к снижению шума тональных гармоник, так и к его усилению в зависимости от номера гармоники, угла наблюдения и расстояния между экраном и законцовкой винта. В отличие от тонального шума, экранирование широкополосного шума имеет достаточно высокую эффективность, которая слабо зависит от расстояния между экраном и законцовкой винта.

В работе [16] показано, что эффект экранирования существенным образом зависит от характеристик источника звука. При использовании реального винта, который является некомпактным источником, аэродинамическая интерференция винта и крыла приводит к дополнительному излучению звука и эффект экранирования в таком случае становится несущественным.

В любом случае вопросы экранирования акустического излучения винтовых двигателей и поршневых двигателей в настоящее время являются малоизученными и требующими значительного количества специальных расчетных и экспериментальных исследований.

СПЕКТР ШУМА СООСНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ

На рис. 4 представлен типовой узкополосный спектр уровней звукового давления, измеренный при работе малоразмерного винтовентилятора в дальнем звуковом поле. Он включает в себя широкополосную и тональную составляющие [17].

Тональная составляющая обусловлена шумом вращения переднего и заднего винтов, а также шумом их аэродинамического взаимодействия. При этом частоты характерных тональных составляющих в спектре можно определить согласно выражению:

$$f_{ij} = iBPF_1 + jBPF_2 \quad (i, j) \in \square_{\geq 0}, \quad (4)$$

где $BPF_1 = k_1 n_1$, $BPF_2 = k_2 n_2$, BPF – частота следования лопастей воздушного винта (Гц), k – число лопастей, n – частота вращения воздушного винта (об/с). Нижние индексы 1 и 2 обозначают передний и задний винт соответственно.

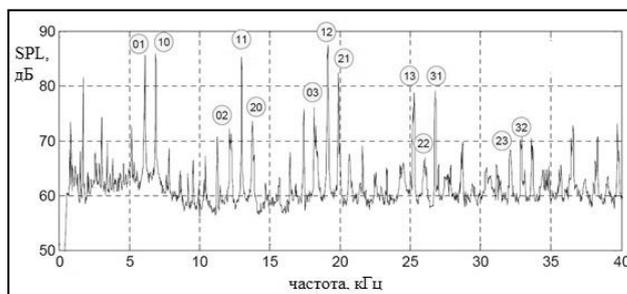


Рис. 4. Типовой узкополосный спектр шума малоразмерного винтовентилятора, измеренный в направлении 94° [18]

Широкополосная составляющая акустического излучения обусловлена так называемым шумом передней и задней кромки обоих винтов, а также их аэродинамической интерференцией. Шум передней кромки вызван нестационарной составляющей аэродинамической силы вследствие турбулентности и неоднородности набегающего

потока или непостоянства частоты вращения. Шум задней кромки обусловлен пульсациями давления на задней кромке лопасти винта вследствие срыва потока, а также пульсациями давления в вихревом следе.

СПЕКТР ШУМА ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Во время работы авиационный поршневой двигатель генерирует шум, который с учетом механизмов образования и распространения разделяют на аэродинамический и структурный [6].

Шум двигателя обусловлен рядом факторов, важнейшими из которых являются:

- аэродинамические процессы, сопровождающие сгорание топливовоздушной смеси в цилиндрах и взаимодействие воздушного и газового потоков в системах впуска и выхлопа двигателя,
- процессы механического взаимодействия между собой движущихся элементов конструкции.

Этот шум распространяется в окружающую среду через системы впуска и выхлопа и через корпус двигателя.

Спектр шума поршневых двигателей включает в себя периодическую и широкополосную составляющие. Типовой узкополосный спектр шума двухтактного поршневого двигателя представлен на рис. 5.

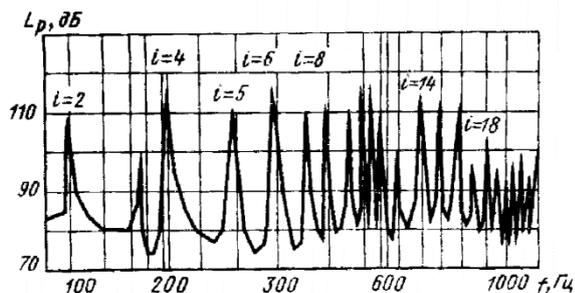


Рис. 5. Типовой узкополосный спектр шума двухтактного двигателя ($n_{кв}=3020$ об/мин) [19]

Гармонические составляющие шума поршневого двигателя кратны частоте следования вспышек в цилиндрах двигателя. В отечественной литературе дискретные составляющие шума поршневого двигателя, как правило, не разделяют на гармоники шума цилиндра и гармоники шума двигателя. Их называют одним общим термином – «двигательные» (или «моторные») гармоники. В свою очередь, очень важно и для по-

нимания механизмов генерации шума многоцилиндровым поршневым двигателем, и для определения методов снижения его интенсивности, определение источника и типа гармоники излучения с максимальной интенсивностью.

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

$$f_{ц} = \frac{kn_{кв}}{30\tau}, \quad (5)$$

$$f_{д} = kf_{ц}i, \quad (6)$$

где k – номер гармоники, $n_{кв}$ – частота вращения коленвала двигателя (об/мин), i – число цилиндров в двигателе, объединенных общим выхлопным коллектором, τ – тактность двигателя.

Влияние способа организации выхлопа на спектр излучения. В соответствии с выражением (6) частота основного тона в спектре шума многоцилиндрового двигателя кратна числу цилиндров, объединенных общим выхлопным коллектором, а не общему числу цилиндров как ошибочно указывают некоторые авторы. Этот момент является принципиальным при расчетной оценке шума поршневых двигателей.

Например, у 9-цилиндрового звездообразного двигателя АШ-62ИР, устанавливаемого на самолете АН-2, выхлоп организован таким образом, что выхлопные газы из цилиндров попадают в кольцевую жаровую трубу и затем в выпускной коллектор (рис. 6). Концы жаровой трубы являются открытыми, и получается, что 7 цилиндров работают вместе на один выхлоп, а два нижних цилиндра работают отдельно и их выхлопные газы идут вниз, не попадая в общий выпускной коллектор.



Рис. 6. Общий вид выхлопной системы двигателя АШ-62ИР на самолете АН-2

Узкополосный спектр уровней звукового давления, измеренный при гонке силовой установки самолета Ан-2, представлен на рис. 7. На нем обозначены первые 10 гармоник на частотах, кратных частоте следования лопастей винта, а также первые 9 гармоник на частотах, кратных частоте следования вспышек в цилиндрах двигателя. Можно видеть, что основным тоном является 7-я цилиндровая гармоника данного двигателя. Если каждый цилиндр имел бы отдельный выхлопной патрубок, то основной тон соответствовал бы первой цилиндровой гармонике.

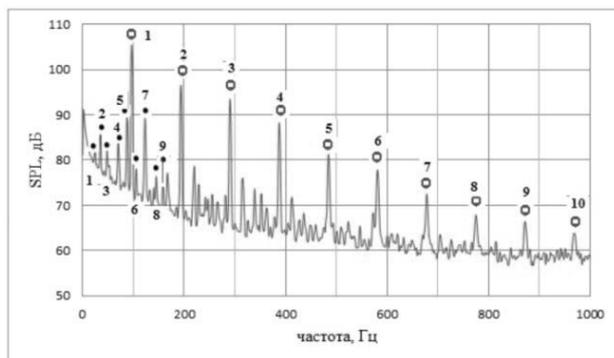


Рис. 7. Узкополосный спектр шума силовой установки самолета Ан-2, измеренный в направлении 120° на расстоянии 30 м на режиме $n_{\text{кв}}=2100$ об/мин [20]

Нахождение основного тона на меньшей частоте дает меньший вклад в суммарный уровень звукового давления в дБА. Поскольку слышимость винтового летательного аппарата характеризуется метрикой дБА [1], то стоит учитывать данную особенность при проектировании БПЛА с поршневыми двигателями, обеспечивая максимально низкую частоту основного тона для меньшей слышимости двигателя и аппарата в целом.

Отметим также, что заключение двигателя в капот при наличии глушителя шума выхлопа приводит к снижению интенсивности тональных составляющих за счет снижения интенсивности структурного шума двигателя [21], если при этом не обеспечить вибродемпфирование капота, то уровни спектральных составляющих могут даже увеличиваться [22].

ВЛИЯНИЕ ПОЛЕТНЫХ УСЛОВИЙ НА СПЕКТР ШУМА ВИНТА И ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Влияние полетных условий на спектр шума винтомоторной силовой установки, включающей в себя одноцилиндровый 4-тактный двигатель и 2-лопастной воздушный винт, рассмотрено на рис. 8, где представлены узкополосные спектры уровней звукового давления, измеренные при одной частоте вращения коленвала двигателя в статических условиях и при наличии набегающего потока. Измерения были выполнены в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ [22]. На графике обозначены первые четыре гармоники в спектре. Первые три из них обусловлены излучением двигателя. Четвертая гармоника в спектре соответствует первой гармонике шума вращения винта и 4-й двигательной гармонике.

Можно видеть, что при наличии набегающего потока амплитуды тональных составляющих в спектре уменьшаются. Наибольший эффект наблюдается на частоте второй двигательной гармоники. Заметим, что при наличии потока уровни фонового широкополосного шума существенно увеличиваются, что свидетельствует об их связи с шумом турбулентного набегающего потока.

Полученные результаты можно трактовать следующим образом. При работе воздушного винта в статических условиях развивается максимальная тяга, но тяговая мощность при этом равна нулю. К тому же в полетных условиях масштаб турбулентности набегающего на диск винта потока существенно ниже, чем в статических условиях. И роль шума от неустановившейся аэродинамической нагрузки на лопастях винта существенно ниже в полетных условиях.

В полетных и в статических условиях, несмотря на равенство частот вращения, двигатель работает по различным частично-скоростным характеристикам. При наличии потока двигатель является менее нагруженным, что приводит к снижению интенсивности его излучения.

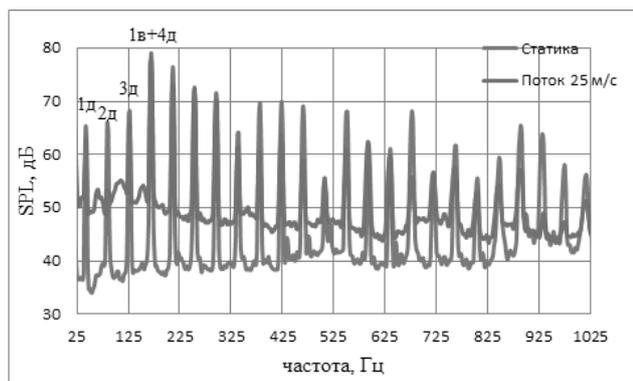


Рис. 8. Влияние набегающего потока на узкополосный спектр уровней звукового давления в направлении 105° на расстоянии 2 м, $n_{\text{кв}}=5070$ об/мин

Также отметим, что в полетных условиях в зависимости от угла наблюдения существенным может оказаться шум обтекания планера [23]. Этот источник необходимо учитывать при оценке шума на местности летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой [24] и принимать меры к снижению его интенсивности.

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

При пересчете результатов трубных или статических акустических испытаний винтов, двигателей или летательных аппаратов в целом на полетные условия необходимо учитывать эффект Доплера.

Соотношение между частотой звука движущегося источника и частотой звука, регистрируемой микрофоном в контрольной точке, имеет вид:

$$f = f_0 \left(1 - \frac{V}{c} \cos \theta \right)^{-1}, \quad (7)$$

где V – скорость движения источника, c – скорость звука, θ – угол между вектором скорости перемещения источника и направления прихода звуковой волны в точку наблюдения.

Если источник приближается к контрольной точке, то частота регистрируемого звука уменьшается, оставаясь выше частоты излучения, а при удалении источника от контрольной точки воспринимаемая частота становится меньше частоты излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены спектральные характеристики звукового поля одиночных и соосных винтов и поршневых двигателей. Изучено влияние полетных условий на спектр шума винтомоторной силовой установки. Описаны факторы, влияющие на спектральные характеристики акустического поля воздушных винтов и поршневых двигателей. Рассмотрено влияние способа организации выхлопа двигателя на спектр его излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мошков П. А., Самохин В. Ф., Яковлев А. А. Выбор критерия слышимости беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 2. С. 3–9. [P. A. Moshkov, V. F. Samokhin and A. A. Yakovlev, "Engine-propeller-driven air vehicle audibility criterion selection", (in Russian), in *Izv. vuzov. Aviacionnaya tekhnika*, vol. 61, no. 2, pp. 3-9, 2018.]
2. Moshkov P. A., Samokhin V. F., Yakovlev A. A. Engine-propeller power plant aircraft community noise reduction key methods // J. Eng. Applied Sci. 2017. Vol. 12, No. S9. Pp. 8601-8606.
3. 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. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2019-2514>
4. 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.]
5. 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.]
6. 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.]
7. Самохин В. Ф. Полуэмпирический метод прогноза шума воздушного винта // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85. № 5. С. 1064–1072. [V. F. Samokhin, "Semiempirical method for estimating the noise of a propeller", (in Russian), in *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, vol. 85, no. 5, pp. 1157-1166, 2012.]
8. Sree D., Stephens D. B. Improved Separation of Tone and Broadband Noise Components from Open Rotor Acoustic Data // Aerospace. 2016. Vol. 3, No. 3. 29 p.

9. **Truong A., Papamoschou D.** Harmonic and Broadband Separation of Noise From a Small Ducted Fan // 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference AIAA Paper No. 2015-3282. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2015-3282>

10. **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. 332-338, 2018.]

11. **Kelly J. J., Nguyen L. C.** Influence of Shaft Angle of Attack on Sound Radiation by Subsonic Propellers // Journal of Aircraft. 1997. Vol. 34, No. 4. Pp. 539-544. Available: <https://doi.org/10.2514/2.2206>

12. **Баженова Л. А.** Влияние внешних воздействий на характеристики вихревого звука // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 4. С. 412–418. [L. A. Bazhenova, "Effect of external action on the characteristics of vortex sound", (in Russian), in *Akusticheskij zhurnal*, vol. 58, no. 4, pp. 412-418, 2012.]

13. **Мошков П. А., Самохин В. Ф.** Исследование влияния зазора между толкающим воздушным винтом и крылом на уровень шума легкого самолета на местности // Ученые записки ЦАГИ. 2016. Т. 47. № 6. С. 55–60. [P. A. Moshkov and V. F. Samokhin, "Effect of spacing between pusher propeller and wing on environmental light aircraft noise", (in Russian), in *Uchenye zapiski TsAGI*, vol. 47, no. 6, pp. 55-60, 2016.]

14. **Дмитриев В. Г., Самохин В. Ф., Маслова Н. П.** Влияние компоновки силовой установки на уровни шума на местности дозвукового самолета // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2019. № 8. С. 3–21. [V. G. Dmitriev, V. F. Samokhin, N. P. Maslova, "Effect of Noise Shielding Engines on Community Noise of Subsonic Aircraft", (in Russian), in *Polet. Obshcherossijskij nauchno-tekhnicheskij zhurnal*, no. 8, pp. 3-21, 2019.]

15. **Остриков Н. Н., Денисов С. Л., Медведский А. Л.** Экспериментальное изучение эффекта экранирования авиационных источников шума на маломасштабных моделях // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2016. № 45. С. 152–174. [N. N. Ostrikov, S. L. Denisov, A. L. Medvedskiy, "Small scale experimental investigations of shielding aviation noise sources", (in Russian), in *Vestnik PNIPIU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, vol. 21, no. 45, pp. 152-174, 2016.]

16. **Experimental** study of shielding of propeller noise by a wing and comparison with model predictions / A. Viera, et. al. // *Euronoise-2018*. 2018. Pp. 237-244.

17. **Мошков П. А., Самохин В. Ф., Яковлев А. А.** Проблемы снижения шума, создаваемого на местности самолетами с турбовинтовентиляторными двигателями // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 126–128. [P. A. Moshkov, V. F. Samokhin and A. A. Yakovlev, "Problem of the community noise reduction for aircraft with open rotor engines", (in Russian), in *Izv. vuzov. Aviacionnaya tekhnika*, no. 4, pp. 126-128, 2018.]

18. **Truong A., Papamoschou D.** Aeroacoustic Testing of Open Rotors at Very Small Scale // 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2013. No. AIAA 2013-0217. 15 p.

19. **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.]

20. **Самохин В. Ф., Мошков П. А.** Экспериментальное исследование акустических характеристик силовой установки самолета «Ан-2» в статических условиях // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: http://mai.ru/upload/iblock/3cb/samokhin_moshkov_rus.pdf (дата публикации 26.06.2015). [V. F. Samokhin and P. A. Moshkov, "Experimental study of the acoustic characteristics of the power plant of the aircraft "An-2" in static conditions," (in Russian), in *Trudy MAI*, no. 82, 2015. Available: http://mai.ru/upload/iblock/3cb/samokhin_moshkov_rus.pdf]

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

22. **Исследование** акустических характеристик беспилотного летательного аппарата «Птеро-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.]

23. **Копьев В. Ф., Зайцев М. Ю., Беляев И. В.** Исследование шума обтекания крупномасштабной модели крыла с механизацией // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 1. С. 95–105. [V. F. Kopyev, M. Y. Zaytsev and I. V. Belyaev, "Investigation of airframe noise for a large-scale wing model with high-lift devices", (in Russian), in *Akusticheskij zhurnal*, vol. 62, no. 1, pp. 95-105, 2016.]

24. **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 and V. F. Samokhin, "Complex of algorithms and programs for calculation of aircraft noise", (in Russian), in *Uchenye zapiski TsAGI*, vol. 45, no. 3-4, pp. 367-388, 2014.]

ОБ АВТОРЕ

МОШКОВ Петр Александрович, ведущий конструктор, дипл. инженер (МАИ, 2012). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов (МАИ, 2015). Иссл. в обл. аэроакустики.

METADATA

Title: The spectral characteristics of the acoustic field propeller-engine power plant.

Author: P. A. Moshkov

Affiliation:

Joint Stock Company «Sukhoi Civil Aircraft» (JSC «SCA»), Russia.

Email: moshkov89@bk.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 4 (86), pp. 93-101, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: A brief review of the mechanisms of noise generation by the propellers and piston engines is presented. The spectral characteristics of the acoustic field of propeller power plants are considered. The spectrums of single and contra-rotating propellers as well as piston engines are described. The effect of flight conditions on the noise spectrum of the propeller power plant is considered. The features of spectral characteristics of multi-cylinder engines depending on the method of exhaust organization are described. Features of spectral characteristics of small-sized propellers are considered.

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 designer. Dipl. engineer (MAI, 2012), Cand of Tech. Sci. (MAI, 2015).