

УДК 629.07.54

Генератор аэродинамического шума в наземных испытательных комплексах КА

В. В. Карачун, А. В. Петрик

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Надійшла до редакції 15.12.97

Здійснюється аналіз роботи генератора аеродинамічного шуму на базі роторної пневматичної сирени в системі наземних випробувальних комплексів літальних апаратів.

В практике исследований свойств механических конструкций КА, в том числе бортовой аппаратуры, работающих в условиях акустического воздействия высокой интенсивности и широкого частотного диапазона, отечественными и зарубежными учеными и инженерами достигнуты определенные успехи. Разработаны методики расчета приближенных (бесконечных по протяженности) механических моделей и некоторых типов уточненных (конечных размеров) моделей. Однако эти расчеты носят оценочный характер с большой долей случайности и не могут обрисовать действительной картины влияния акустического воздействия на материал конструкций и элементы бортовой аппаратуры. Определяющим и окончательным по достоверности в настоящее время все же остается экспериментальное исследование акустической выносливости изделий в специально оборудованных наземных испытательных комплексах.

При их проектировании прежде всего встает вопрос выбора источника акустического излучения, который обладал бы высоким коэффициентом полезного действия, был простым в наладке и эксплуатации и имел достаточные возможности формирования звукового поля заданного состава. Большинству этих требований, особенно по первому, и главному, параметру, удовлетворяют сирены.

До настоящего времени не выполнены в достаточном объеме расчеты сирен, доведенные до инже-

нерных исполнений. Не проведен сравнительный анализ свойств однороторных и многороторных конструкций, не решены представляющие практический интерес задачи оптимизации. Совсем не освещен в литературе вопрос влияния на работу сирены кинематического возмущения со стороны основания.

Обобщению уже имеющихся сведений, систематизации методики расчета и проектирования сирен, раскрытию их новых особенностей и свойств посвящена настоящая статья. Вместе с тем здесь не ставилась задача проблемного решения вопроса создания звукового поля с помощью сирен, а лишь рассмотрены некоторые аспекты теории и практики, которые, по мнению авторов, либо нуждаются в серьезной доработке, либо до сих пор вообще не нашли отражения в исследованиях.

Основными особенностями нагружения конструкций КА в акустическом поле реактивных двигателей и турбулентного пограничного слоя является широкополосный частотный спектр и случайный характер изменения величины акустического давления. Это приводит к тому, что в тонкостенных элементах конструкции генерируется множество форм колебаний, которые могут совпадать с собственными. Сравнивая результаты экспериментальных исследований, можно сделать вывод о том, что наиболее опасным с точки зрения возникновения акустической усталости в материале конструкции

КА является широкополосное частотное нагружение, имеющее место, например, при работе реактивной струи, при возникновении турбулентности от срыва воздушного потока и др. Для реактивных двигателей наибольшее количество звуковой энергии передается остронаправленными интенсивными волнами Маха и сферическими звуковыми волнами [5].

В настоящее время нашли применение такие мощные источники шума, как воздушные струи, аэродинамические трубы, реактивные струи двигателей, воздушные винты, громкоговорители, сирены.

Спектр шума реактивных струй (горячих и холодных) наиболее полно воспроизводит натуральный спектр двигателей, а уровень шума, создаваемый ими, составляет 150—170 дБ [8]. Недостатком этого метода является низкий КПД — около 1 %.

Аэродинамические трубы дают наибольшее приближение к условиям возбуждения конструкций от турбулентного пограничного слоя (КПД \approx 1—2 %) [6].

Громкоговорители (КПД \approx 5—20 %) имеют широкий частотный диапазон (до 20 Гц) и уровень звукового давления не более 150 дБ в небольших камерах [9]. В реверберационных камерах они могут сами повреждаться от генерируемого ими шума.

Наибольшее распространение среди других типов источников шума получили сирены. Они позволяют генерировать звуковое давление 160—180 дБ с частотным диапазоном 50—5000 Гц. При этом коэффициент полезного действия у них самый высокий и составляет 4—40 %.

Одним из первых источников широкополосного шума была предложенная в США фон Гирке и др. многороторная сирена [7]. Наряду с достоинствами — возможность генерировать шум с общим звуковым давлением до 170 дБ и акустической мощностью 50 кВт — многороторные сирены обладают рядом недостатков — ни теоретически, ни экспериментально не установлены оптимальные параметры роторов для получения заданного спектра, имеются сложности в изготовлении, наладке и эксплуатации таких сирен.

Оригинальная конструкция сирены для создания случайного шума предложена сотрудниками Саутгемптонского университета [10]. Модуляция воздушного потока здесь производится с помощью стальной ленты с отверстиями, расположенными по остаточному циклическому квадратичному цепному коду. Протягивая с большой скоростью ленту, прерывают воздушный поток, вследствие чего возникают звуковые колебания, уровень которых до-

стигает 165 дБ. К недостаткам можно отнести сложность эксплуатации стальной ленты.

Таким образом, в настоящее время создано довольно много установок для испытания изделий на акустическую прочность. По частотным характеристикам эти установки могут быть разделены на два класса — дискретные и широкополосные. Причем вторые, как уже отмечалось, наилучшим образом воспроизводят эксплуатационные условия.

В отечественной литературе первые и, по-видимому, самые полные сведения по теории и расчету сирен представлены в работах [1, 2]. Исследована математическая модель роторной сирены, влияние геометрических параметров окон и расстояния между дисками ротора и статора на структуру спектра и интенсивность звука.

Работу однороторной сирены покажем на примере известной ее технической реализации в виде [4]. Механическая модель представляет собой два соосных диска с радиальными окнами, один из которых подвижен (ротор), а другой — неподвижен (статор) и жестко крепится к корпусу сирены. Поток воздуха под давлением поступает в камеру сирены, а затем, проходя через окна, прерывается вращающимся ротором и создает звуковые колебания среды.

Принимая размеры дисков малыми по сравнению с длиной волны, считаем, что акустический процесс подчиняется линейным уравнениям.

При принятой геометрии окон функция модуляции воздушного потока $f(t)$ будет практически повторять геометрию окон ротора, и поэтому может быть представлена в данном случае в виде периодической квазитрапецеидальной функцией (рис. 1) с периодом $T = 2\pi\omega^{-1}$; здесь ω — угловая скорость вращения ротора. Длительность единичного импульса $t_0 + t_1$ определяется равенством $t_0 + t_1 = Tm^{-1}$, а m — число равных участков, на которое разбивается окружность ротора. Таким образом, продолжительность единичного импульса будет оп-

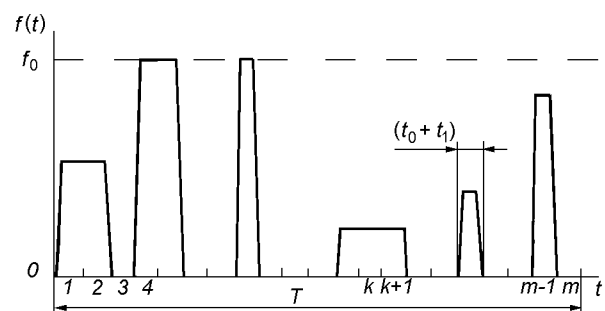


Рис. 1. Функция модуляции однороторной пневматической сирены

ределять минимальный размер окон ротора.

Вообще говоря, форма функции модуляции может быть и несколько иной, определяясь в каждом конкретном случае экспериментально, так как здесь немаловажную роль играют и параметры компрессорной системы [1]. Функция модуляции может иметь форму коммутированной синусоиды, треугольную форму, форму сопряженных дуг парабол и более сложных кривых.

Чтобы получить требуемую форму функции модуляции необходимо обеспечить давление в набегающей струе не менее 2—3 атм, так как дальнейший прирост уровня давления не оказывает решающего влияния на скорость воздуха в выхлопной струе, определяющей в основном звуковую мощность.

С другой стороны, при работе сирены возможен одновременный расход воздуха через несколько окон, что отразится на давлении струи, поэтому, обеспечив двух- или трехкратный запас уровня давления компрессора, можно достичь требуемого постоянства давления нагнетаемого потока среды.

Чтобы обеспечить случайный характер распределения окон по окружности диска ротора, они наносятся по остаточному циклическому квадратичному цепному коду, вследствие чего на некоторых участках окна могут находиться рядом, а на других — отсутствовать. На тех участках, где окна нанесены, значение функции модуляции определяется выражением $f(t) = \lambda_k f_0$ ($0 \leq \lambda_k \leq 1$, k — номер участка). Там, где окна отсутствуют, функция модуляции равна нулю.

Предположим для простоты, что функция модуляции $f(t)$ является четной и периодической, т. е. $f(t) = f(t + T)$. В этом случае она может быть представлена в виде разложения в тригонометрический ряд

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) \quad (1)$$

с коэффициентами

$$\frac{a_0}{2} = f_0 \frac{t_0 + t_1}{2T},$$

$$a_n = f_0 \frac{t_0 + t_1}{T} \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}} \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}},$$

где n — номер гармоники; f_0 — высота импульса. Суммируя по участкам, где $f(t) \neq 0$ (эти суммы обозначены штрихом), получим

$$\frac{a_0}{2} = \sum_{k=1}^p \lambda_k f_0 \frac{t_0 + t_1}{2T},$$

$$a_n = \sum_{k=1}^p \lambda_k f_0 \frac{t_0 + t_1}{T} \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}} \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}}$$

Здесь p — число единичных импульсов в течение периода T , поэтому $1 < p \leq m$; t_1 — время формирования фронта импульса (рис. 2).

Таким образом, функция модуляции будет иметь вид

$$f(t) = \sum_{k=1}^p \lambda_k f_0 \frac{t_0 + t_1}{2T} + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^p \lambda_k f_0 \frac{t_0 + t_1}{T} \times \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}} \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}} \cos n\omega t. \quad (2)$$

Формула (2) справедлива для случая, когда на статоре имеется только одно окно. Если на статоре будет нанесено s окон одинакового размера, равноудаленных от центра диска статора и сдвинутых относительно базовой оси на угол φ_i (рис. 3), то функция модуляции всего потока среды, проходящего через сирену, будет равна сумме функций

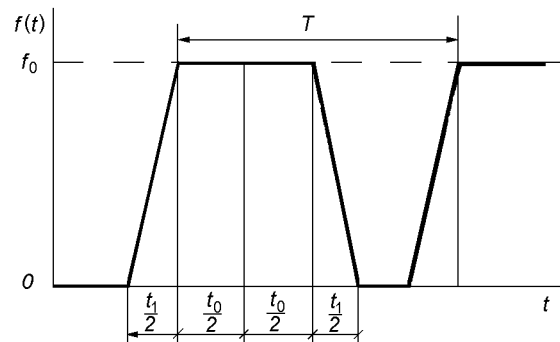


Рис. 2. Функция модуляции однороторной сирены

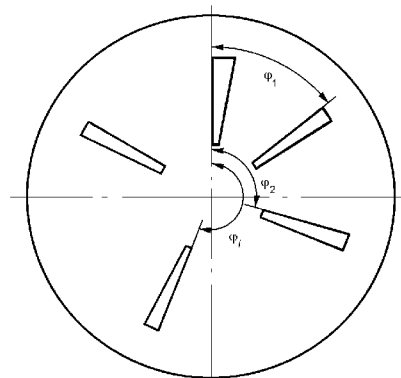


Рис. 3. Схема взаимного расположения окон на диске статора

модуляции каждого из окон [3].

С учетом сказанного, формула (1) преобразуется к виду

$$f(t - t_i) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega(t - t_i), \quad (3)$$

где $t_i = \varphi_i \omega^{-1}$. Тогда суммарная функция модуляции с учетом (3) для всех окон статора будет определяться выражением

$$f_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^s \left[\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega(t - t_i) \right], \quad (4)$$

где s — количество окон. В окончательном виде суммарная функция модуляции может быть представлена в виде

$$f_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^s \left\{ \frac{pf_0}{2m} + \frac{4mpf_0}{\pi |m\omega t_0 - \pi|} \times \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin \left(n \frac{m\omega t_0 - \pi}{2m} \right) \sin \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\omega(t - t_i) \right\}. \quad (5)$$

Обозначив

$$\begin{aligned} \frac{4mpf_0}{\pi |m\omega t_0 - \pi|} \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin \left(\frac{m\omega t_0 - \pi}{2m} \right) \times \\ \times \sin \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i = B_n, \quad (6) \\ \frac{4mpf_0}{\pi |m\omega t_0 - \pi|} \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin \left(\frac{m\omega t_0 - \pi}{2m} \right) \times \\ \times \sin \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \sin n\varphi_i = C_n, \end{aligned}$$

можем вычислить амплитуды A_n гармоник спектра, применив известное равенство Парсеваля:

$$A_n = [B_n^2 + C_n^2]^{1/2} = \frac{4mpf_0}{\pi |m\omega t_0 - \pi|} \times$$

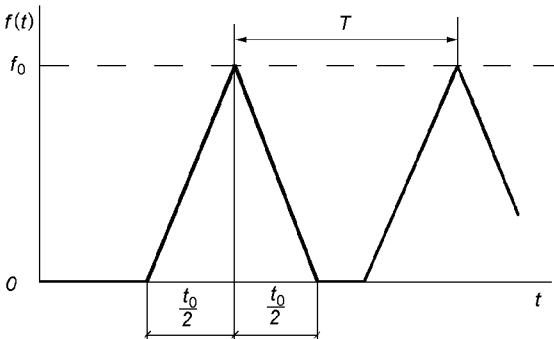


Рис. 4. Функция модуляции однороторной пневматической сирены

$$\times \left\{ \left[\sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin \left(\frac{m\omega t_0 - \pi}{2m} \right) \sin \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin \left(\frac{m\omega t_0 - \pi}{2m} \right) \sin \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \sin n\varphi_i \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

Определим спектр однороторной сирены, положив для конкретности, что на статоре равномерно, через $\pi/4$ рад, нанесены 8 одинаковых радиальных окон, ширина которых равна ширине наименьшего окна ротора, а высота — высоте наибольшего окна (рис. 5, а). Число мест m на роторе примем равным, например, 59.

Окружность диска ротора разбиваем на 59 равных частей (число мест $m = 59$). В промежутке чисел от 0 до 59 вычисляем квадраты простых чисел, а затем определяем остатки от деления их на m . В соответствии с остаточным циклическим квадратичным цепным кодом это обеспечит случайный характер распределения окон на диске ротора. Проведя указанную процедуру, определяем, что окна на диске ротора должны наноситься на интервалах 1, 3, 4, 5, 7, 9, 12, 16, 17, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 28, 29, 35, 36, 41, 45, 46, 48, 49, 51, 53 и 57 (рис. 5, б). Таким образом, число окон на роторе равно 15.

Введем обозначение

$$A_n^0 = \frac{\pi A_n |m\omega t_0 - \pi|}{4mpf_0}$$

и определим спектральный состав генерируемого сиреной шума для следующих числовых значений параметров: $\omega = 300 \text{ с}^{-1}$ ($n = 3 \cdot 10^3$ об/мин), $\varphi_1 = 0$, $t_0 + t_1 = 1.77401 \cdot 10^{-4}$ с. Рассмотрим вначале более простой случай, когда $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_p = 1$, т. е. Высоты всех окон ротора одинаковы.

Спектр сирены, как показывают вычисления, при числе мест $m = 59$ имеет неравномерную частотную

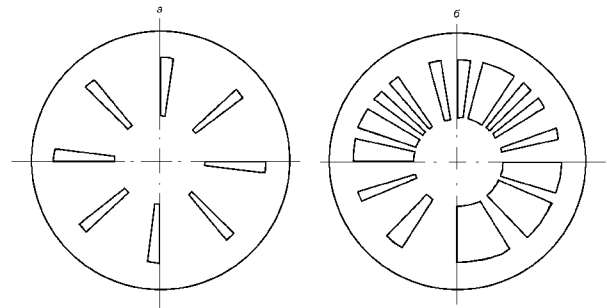


Рис. 5. Пневматическая сирена роторного типа: а — статор, б — ротор ($m = 59$)

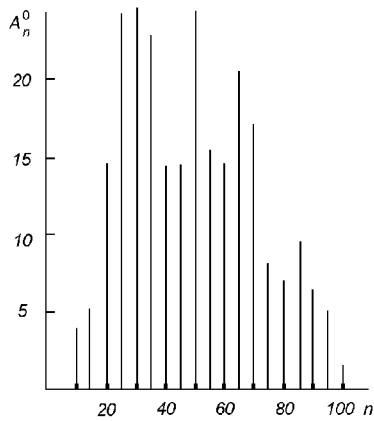


Рис. 6. Спектр сирены при числе мест $m = 59$

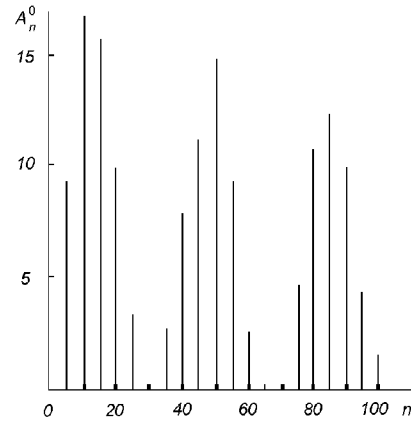


Рис. 7. Спектр сирены с треугольной функцией модуляции при числе мест $m = 18$

характеристику с несколькими «пиками» (рис. 6). Очевидно, что средняя мощность процесса здесь распределяется неравномерно по частоте. Так, две полосы спектра — $n = 25—35$ и $n = 50—55$ имеют амплитуды в два раза больше, чем у спектральных составляющих $n = 35—50$ и $n = 55—65$, и в 3—4 раза больше остальных составляющих спектра. Что же касается форм с номерами выше 95, то они практически отсутствуют в спектре сирены.

Таким образом, использование такой сирены весьма ограничено, так как она генерирует низкие формы ($n \leq 70$) акустического излучения.

Принятые механическая и математическая модели однороторной сирены, как видно, подтверждают возможность получения акустического излучения для выбранной конструкции. Представленные аналитические выражения позволяют исследовать зависимость амплитуд спектра сирены от задаваемых значений параметров конструкции и дают возможность проводить качественные и количественные исследования возможностей сирены.

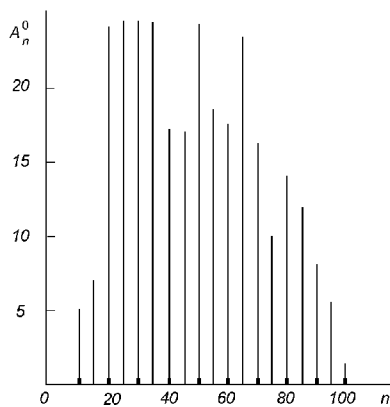


Рис. 8. Спектр сирены с треугольной функцией модуляции при числе мест $m = 59$

Теоретический и практический интерес представляет рассмотрение работы сирены с функцией модуляции, имеющей форму треугольных импульсов (рис. 4). Такая форма функции модуляции может иметь место при абсолютном совпадении геометрии окон ротора и статора. С другой стороны, в форме треугольника или его комбинаций могут быть изготовлены окна дисков ротора и статора.

Суммарная функция модуляции для этого случая будет иметь вид

$$f_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^s \left[\frac{pf_0}{2m} + \frac{2pf_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i \right]. \quad (8)$$

Вводя обозначения

$$\frac{2pf_0}{\pi} \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i = B_n, \quad (9)$$

$$\frac{2pf_0}{\pi} \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \sin n\varphi_i = C_n, \quad A_n^0 = \frac{\pi A_n}{2pf_0},$$

с учетом равенства Парсеваля получаем формулу для вычисления амплитуд гармоник спектра сирены:

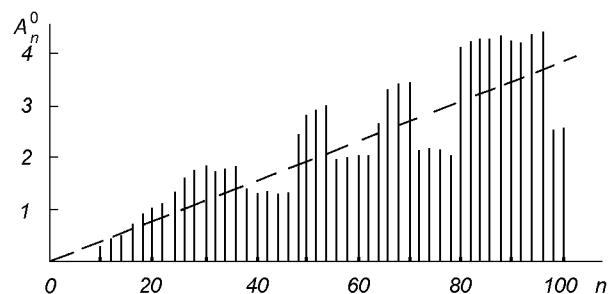


Рис. 9. Спектр сирены с треугольной функцией модуляции при числе мест $m = 276$

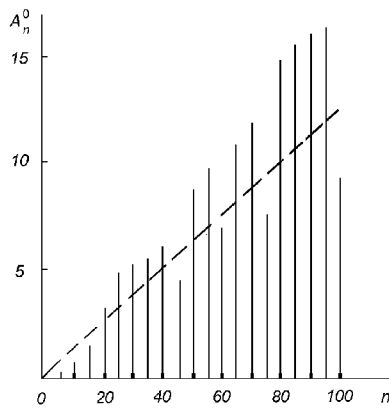


Рис. 10. Спектр сирены с треугольной функцией модуляции при числе мест $m = 1528$

$$A_n = [B_n^2 + C_n^2]^{1/2} = \frac{2pf_0}{\pi} \times \left\{ \left[\sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \sin n\varphi_i \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (10)$$

При числе мест $m = 18$ (рис. 7) в спектре наблюдаются явно выраженные три полосы частот: 0—20, 35—55, 75—95, а на участках 25—35, 55—75 и 95—100 — «провалы». Таким образом, ротор сирены с числом мест $m = 18$ удобно пользоваться для формирования заданных частотных полос спектра. Для значений $m = 59$ (рис. 8) спектр схож с спектром сирены, у которой функция модуляции имеет квазитрапецеидальную форму (рис. 6); они практически совпадают.

При числе мест $m = 276$ (рис. 9) и выше (например, $m = 1528$) (рис. 10) спектр сирены имеет тенденцию к увеличению амплитуд гармоник с увеличением их номера. Это свойство, наряду с белым шумом, очень важно для практики, так как позволяет оценивать акустическую податливость элементов конструкции и бортовой аппаратуры,

собственные частоты которых достаточно высоки. В этом случае сирены с числом мест $m = 59$ непригодны, так как амплитуды гармоник с номерами выше 120 практически отсутствуют, и вся энергия акустического излучения сосредоточена на низких частотах.

С увеличением числа мест m на роторе характеристика спектра располагается более круто относительно оси частот (рис. 10, штриховая линия).

1. Карновский М. И. Теория и расчет сирен // Журн. техн. физики.—1945.—15, вып. 6.—С. 348—364.
2. Карновский М. И. К расчету сирен // Изв. ВУЗов Радиотехника.—1958.—№ 1.—С. 64—68.
3. Квитка В. Е. Исследование условий нагружения элементов конструкций самолетов акустическими нагрузками // Прочность и долговечность самолетных конструкций. — К.: Изд-во КИИГА, 1965.—Вып. 2.
4. Махотнюк Л. Е., Кашталян Ю. А. Однороторная сирена // А. с. 228565 СССР. МПК⁴ G 10 K. Опубл. 08.10.68, Бюл. № 31.
5. Фокс Д. Е. Вильямс. Шум высокоскоростных ракет // Случайные колебания / Под ред. С. Крендела. — М.: Мир, 1967.—С. 45—49.
6. Ailman C. M. Wind tunnel investigation of fluctuating pressures at the surface of 2.75 % Saturn models // Acoustical fatigue in aerospace structures: Proc. of the Second International Conference, Dayton, Ohio, April 29—May 1, 1964. — Syracuse, 1965.—P. 278—286.
7. Cole J., Powell R., Oestreicher H., von Giere H. Acoustical siren for generating wide band noise // J. Amer. Statist. Assoc.—1963.—35, N 2.—P. 173—191/
8. Doolittle R. D., Uberall H. Sound scattering by elastic cylindrical // J. Amer. Statist. Assoc.—1966.—39, N 2.—P. 272—276/
9. Hubbard H. H., Houbolt S. C. Vibration induced by acoustic waves // Shock and vibration handbook / Ed. by C. M. Harris, Ch. E. Grede. — 1961.—P. 321—332.
10. Parks P. C., Mercer C. A. A «Random» siren using cycles chain codes // Reports 5 Congr. International D'Acoustique, 1965.—54.—P. 1072—1076.

GENERATOR OF AERODYNAMIC NOISE IN GROUND COMPLEXES FOR SPACECRAFT TESTING

V. V. Karachun, A. V. Petrik

We analyze the operation of an aerodynamic noise generator based on a pneumatic rotor siren in the system of ground complexes for spacecraft testing.