

УДК 534.6.08

Измерение азимутальных мод тональных компонент шума в канале воздухозаборника

И.В. Беляев^{1,2,3}, Ю.В. Берсенева³, Р.В. Бурдаков³, Т.А. Вискова³, В.В. Пальчиковский³

¹Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Вентилятор авиационного двигателя является доминирующим источником шума современного магистрального самолета [1], поэтому снижение шума вентилятора представляет собой одно из необходимых условий удовлетворения самолетом норм по шуму на местности. Шум вентилятора распространяется по каналам авиадвигателя в виде совокупности так называемых вращающихся азимутальных мод, при этом каждая такая мода излучается из открытого конца канала в окружающее пространство с индивидуальной амплитудой и диаграммой направленности. Для снижения шума вентилятора каналы двигателя частично облицовывают звукопоглощающими конструкциями (ЗПК), параметры которых выбираются на основе азимутального состава шума в канале. Таким образом, измерение амплитуд азимутальных мод шума в воздухозаборном канале авиадвигателя является важным шагом на пути разработки методов его снижения.

Одной из важнейших составляющих шума вентилятора являются тональные компоненты. Данная работа посвящена измерению азимутальной структуры тональных компонент шума, создаваемых в натурном воздухозаборнике авиационного двигателя специально разработанным генератором азимутальных мод. Измерения азимутальной структуры проводились с помощью кольцевой микрофонной решетки Bruel & Kjaer из 100 микрофонов 1/4" В&К 4944, расположенных вдоль окружности радиусом 1.783 м. Положения микрофонов были оптимизированы таким образом, чтобы обеспечить максимальный динамический диапазон решетки для азимутальных мод с номерами от -72 до +72 [2]. До настоящего времени непосредственные измерения азимутального состава шума в воздухозаборном канале авиадвигателя в России не проводились.

Испытания выполнялись в заглушенной камере, где был помещен полноразмерный воздухозаборник авиационного двигателя с установленной кольцевой решеткой микрофонов (рис. 1). Моды в воздухозаборнике на тональных частотах и их комбинациях создавались специально разработанным для этой цели 34-канальным генератором мод на базе генераторов анализатора PULSE фирмы Bruel & Kjaer, усилителей В&К 2716 и динамических излучателей JBL 2451H.

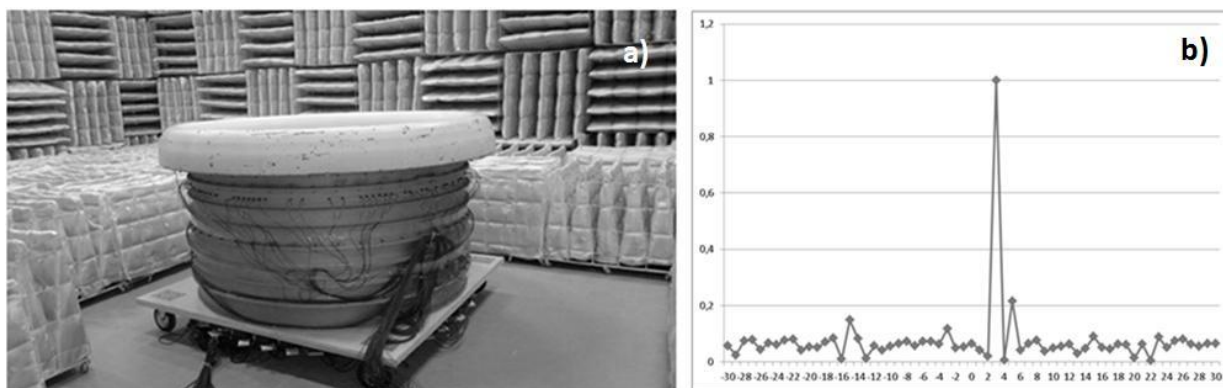


Рис. 1. а) Воздухозаборник с кольцевой решеткой микрофонов, установленный в заглушенной камере; б) Пример результатов измерения азимутального состава шума в воздухозаборнике (генерируемая мода $m=3$ на частоте 1000 Гц).

Синхронные сигналы с микрофонов регистрировались и обрабатывались системой Briel & Kjaer PULSE. Для получения азимутальных мод из измерений решетки использовался метод взаимных корреляций с базовым сигналом [3], который может быть сформулирован следующим образом.

Пусть цилиндрическая система координат (r, θ, x) связана с осью цилиндрического канала; N -микрофонная решетка расположена в $x = x_0$ и имеет радиус $r = r_0$, угловая координата n -ого микрофона θ_n . Преобразование Фурье по времени уровней давления в точках измерения дает:

$$p(x_0, r_0, \theta_n, t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} P_k(\theta_n) e^{i 2\pi f_k t} \quad (1)$$

где $f_k = k/T$, T – длина временной реализации. Для заданной частоты f_k комплексный коэффициент $P_k(\theta_n)$ вычисляется с помощью функции частотного отклика H_1 между базовым микрофоном 1 и микрофоном n :

$$P_k(\theta_n) = H_1^{(n)}(f_k) = \frac{G_{1n}(f_k)}{G_{11}(f_k)} \quad (2)$$

Здесь G_{1n} – взаимный спектр для микрофонов 1 и n , усредненный по числу временных реализаций; G_{11} – усредненный автоспектр для базового микрофона 1.

Пусть $P_k(\theta_n)$ дальше раскладывается в ряд Фурье по θ :

$$P_k(\theta_n) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \tilde{P}_m e^{-im\theta_n} \quad (3)$$

где m – порядок азимутальной моды и \tilde{P}_m – амплитуда m -ой азимутальной моды. Амплитуды мод \tilde{P}_m могут, таким образом, быть получены из $P_k(\theta_n)$ с помощью

$$\tilde{P}_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P_k(\theta_n) e^{im\theta_n} \quad (4)$$

Набор коэффициентов \tilde{P}_m составляет азимутальную структуру звукового поля для заданной частоты f_k и является основной целью измерений.

Важно отметить, что проведенные измерения азимутальной структуры шума для частоты f_k могут зависеть от разрешения по частоте $df = 1/T$, т.к. при недостаточно малых значениях df азимутальные моды на близких частотах (разность между которыми меньше df) могут создаваться разными механизмами (тональная и широкополосная компоненты шума) и, как следствие, амплитуды измеряемых азимутальных мод будут зависеть от величины df . В данной работе проведено специальное исследование влияния параметра df на амплитуды азимутальных мод для тональных компонент шума, измеряемых с помощью кольцевой решетки микрофонов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований № 16-41-590250 p_a.

Литература

1. Peak N., Parry A.B. Modern Challenges Facing Turbomachinery Aeroacoustics // Ann. Rev. Fluid Mech. 2012. V. 44, P. 227.
2. Rademaker E.R., Sijtsma P., Tester B.J. Mode detection with an optimized array in a model turbofan engine intake at varying shaft speeds // AIAA Paper 2001-2181.
3. Sijtsma P., Zillmann J. In-Duct and Far-Field Mode Detection Techniques for Engine Exhaust Noise Measurements // AIAA Paper 2007-3439.