

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИМЕТРИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ЧАСТЬ 2

В. Я. Геча, М. Ю. Либерман, А. В. Шматков

*Представлены результаты экспериментальных исследований метрологических возможностей метода акустической интенсиметрии при определении акустических характеристик электродвигателей общего и специального назначения. На первом этапе работы проведено тестирование помещений, в которых проводятся испытания изделий предприятия, с использованием образцового источника шума, откалиброванного в заглушённой акустической камере. На основании анализа результатов интенсиметрических измерений, проведённых в рамках акустических испытаний двух электродвигателей (общего и специального назначения) выявлены основные источники систематических погрешностей интенсиметрического метода измерений в диапазоне низких частот. Согласно результатам оценки сравнительной эффективности метода акустической интенсиметрии (по сравнению с методами, основанными на измерении уровней звукового давления), установлено, что интенсиметрические измерения обеспечивают возможность повышения точности акустических измерений.*

***Ключевые слова:** активная и реактивная компоненты интенсивности звука, псевдозвуковые пульсации давления, уровни звуковой мощности, реактивное акустическое поле стоячих волн, двухмикрофонный интенсиметрический зонд, измерительная поверхность, систематические погрешности измерений.*

### Анализ результатов измерений акустических характеристик электродвигателей с использованием метода акустической интенсиметрии

Для проведения экспериментальных исследований метрологических возможностей метода акустической интенсиметрии была разработана специальная программа, предусматривающая проведение интенсиметрических измерений в различных помещениях. В рамках этой программы на первом этапе исследований предусмотрено проведение тестовых интенсиметрических измерений акустических характеристик образцового источника шума (типа ОИШ-МВ-1) в полузаглушённой акустической камере и в двух производственных помещениях с жёсткими ограждающими конструкциями.

На втором этапе исследований программа предусматривает проведение интенсиметрических измерений акустических характеристик электродвигателей специального и общего назначения в полузаглушённой акустической камере и в двух производственных помещениях с жёсткими ограждающими конструкциями.

**Анализ результатов тестовых измерений характеристик образцового источника шума.** Основные результаты экспериментальных исследований эффективности применения метода акустической интенсиметрии для измерения акустических характеристик электродвигателей содер-

жатся в отчёте [5]. На основе анализа результатов этих измерений можно оценить метрологические возможности метода акустической интенсиметрии при определении акустических характеристик электродвигателей.

Как отмечено выше, интенсиметрический метод предусматривает измерение энергетических характеристик акустического поля (в отличие от методов [1, 2], основанных на измерении уровней звукового давления в специализированных измерительных помещениях). В связи с этим было проведено экспериментальное исследование влияния характеристик помещения на результаты интенсиметрических измерений (при определении акустических характеристик образцового источника шума).

Для экспериментальной оценки метрологических возможностей метода акустической интенсиметрии при определении акустических характеристик изделий на первом этапе были проведены тестовые измерения акустических характеристик источника звука в трёх помещениях с различными акустическими характеристиками. При проведении измерений в качестве источника звука был использован образцовый источник шума (типа ОИШ-МВ-1), откалиброванный в аттестованной заглушённой акустической камере ФГУП «ВНИИФТРИ» в треть-октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 50 до 10000 Гц. На основании результатов акустической калибровки оформлен «Сертификат о калибровке» № 340/31 от 01.06.2006.

Образцовый источник шума типа ОИШ-МВ-1 выполнен на базе серийного центробежного вентилятора типа ВЦ-14-46-2,5 (без спирального корпуса), излучающего чисто аэродинамический шум. Генерация широкополосного аэродинамического шума обусловлена вихреобразованием вследствие отрыва пограничного слоя при прохождении воздушного потока через межлопаточные каналы рабочего колеса с 32 лопатками (вперёд загнутыми). Диаметр рабочего колеса вентилятора равен 0,3 м.

Результаты акустической калибровки позволяют использовать данный источник шума для аттестационных измерений в камере и для оценки точности акустических измерений в соответствии с методом сравнения на месте установки этого источника шума [6]. Источник шума типа ОИШ-МВ-1 был использован для тестирования акустических характеристик помещений, в одном из которых на втором этапе проводились измерения акустических характеристик электродвигателей.

Тестовые интенсивметрические измерения проводились в трёх помещениях: в полузаглушённой акустической камере (со звукоотражающим полом) и в двух производственных помещениях с жёсткими ограждающими конструкциями. Все три помещения выполнены в форме прямоугольного параллелепипеда.

Габаритные размеры акустической камеры равны:  $10,0 \times 8,0 \times 5,0$  м, внутренний объём камеры – 400 куб. м. На стенах и потолке размещено звукопоглощающее покрытие (минераловатные плиты марки «ППМ-80»), общая толщина покрытия ( $\Delta d_{з.п}$ ) равна:  $\Delta d_{з.п} = 0,16$  м. Причём покрытие расположено на расстоянии 0,15 м от поверхности стен и потолка. Камера установлена на виброизолирующих элементах, чтобы ослабить передачу вибрации фундамента здания на ограждающие конструкции камеры. Камере присвоено обозначение: «помещение № 1-АК».

Для оценки точности интенсивметрических измерений в измерительном помещении, в котором при работе источника звука формируется квазидиффузное акустическое поле, дополнительные акустические измерения были проведены в несоразмерном помещении испытательного центра отдела 45 (лаборатория № 451) АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Габаритные размеры этого производственного помещения (с жёсткими ограждающими конструкциями), которому присвоено обозначение: «помещение № 2-Д», равны:  $15,5 \times 12,6 \times 30$  м (объём – 6000 куб. м.). В помещении № 2-Д квазидиффузное поле формируется на расстоянии от источника зву-

ка («r»), превышающем размер зоны «прямого» акустического поля (когда  $r \geq r_{\text{прям}}$ ).

Кроме того, интенсивметрические измерения были проведены в несоразмерном производственном помещении отдела 18 АО «Корпорация «ВНИИЭМ». Габаритные размеры этого помещения (с жёсткими ограждающими конструкциями) равны:  $7,0 \times 6,0 \times 11,0$  м (объём 464 куб. м.), помещение обозначается как «помещение № 3-Д». В помещении № 3-Д квазидиффузное поле также формируется за пределами зоны «прямого» поля, когда расстояние «r» до точки измерения превышает  $r_{\text{прям}}$ .

В рамках программы проведено исследование характеристик акустического поля, формирующегося при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1, как в дальней, так и в ближней зоне этого поля. Поэтому, при выборе размеров измерительной поверхности, расстояние  $r_{\text{изм}}$  (от источника звука до точки измерения) варьировалось таким образом, чтобы интенсивметрический зонд, в зависимости от частотного диапазона, располагался как в дальней, так и в ближней зоне акустического поля.

Исходя из габаритных размеров источника звука (типа ОИШ-МВ-1), при проведении интенсивметрических измерений использовались две измерительные поверхности, имеющие форму прямоугольного параллелепипеда, центр которого расположен на оси рабочего колеса вентилятора. Измерительная поверхность № 1 имеет габаритные размеры  $1,0 \times 1,0 \times 1,0$  м, при этом расстояние  $r_{\text{изм}}$  от источника звука до измерительной поверхности равно 0,35 м. Следовательно, в диапазоне частот  $f \leq 1000$  Гц интенсивметрический зонд расположен в ближней зоне акустического поля (поскольку расстояние  $r_{\text{изм}}$  от источника звука до зонда в этом диапазоне частот не превышает длину звуковой волны в воздухе:  $\lambda_s \geq 0,34$  м).

Измерительная поверхность № 2 имеет габаритные размеры  $2,0 \times 2,0 \times 2,0$  м, расстояние от источника звука (межлопаточных каналов колеса вентилятора) до зонда составляет 0,85 м. При этом в диапазоне частот  $400 \leq f \leq 4000$  Гц зонд расположен в дальней зоне акустического поля, поскольку расстояние  $r_{\text{изм}}$  от источника звука до измерительной поверхности превышает длину звуковой волны.

В табл. 1 представлены результаты интенсивметрических измерений [5] акустических характеристик источника шума типа ОИШ-МВ-1, проведённых в трёх помещениях: № 1-АК (акустическая камера); № 2-Д; № 3-Д. Измерительные точки располагались на измерительной поверхности № 2. В зонде при проведении измерений использовались две «проставки» (длиной  $\Delta_m^1 = 100$  мм и  $\Delta_m^2 = 50$  мм), которые устанавливались между микрофонами для фиксации расстояния между ними.

Из сопоставления результатов измерений следует, что в третьоктавных полосах частот в диапазоне от 50 до 800 Гц значения разности уровней звуковой мощности  $[\Delta L_w]_1^3$  ( $[\Delta L_w]_1^3 = L_w^{AK} - L_w^{3Д}$ ), измеренных в помещениях №№ 1-АК и 3-Д, варьируются в пределах от 0 до 1,5 дБ. Причём разность уровней  $[\Delta L_w]_1^3$  не превышает 1,0 дБ во всех третьоктавах за исключением двух третьоктавов (со среднегеометрическими частотами 63 и 80 Гц).

Из сопоставления результатов измерений в помещениях №№ 1-АК и 2-Д следует, что в третьоктавных полосах частот в диапазоне от 50 до 800 Гц разность уровней мощности звука  $[\Delta L_w]_1^2$  ( $[\Delta L_w]_1^2 = L_w^{AK} - L_w^{2Д}$ ), варьируется в пределах от 0,1 до 2,0 дБ. Причём разность уровней мощности звука не превышает 1,0 дБ во всех третьоктавных полосах частот, за исключением двух полос (50 и 315 Гц).

Кроме того, при использовании в зонде проставки длиной 50 мм (столбец № 7 в табл. 1) разность уровней мощности звука  $[\Delta L_w]_2^3$ , измерен-

ных в помещениях № 2-Д и № 3-Д, в диапазоне частот от 40 до 800 Гц варьируется в пределах от 0 до 2,5 дБ. Причём во всех полосах частот, за исключением третьоктавов со среднегеометрическими частотами 50 и 80 Гц, разность уровней  $\Delta L_w^3$  не превышает 1,0 дБ. В отчёте [5] представлены также результаты аналогичных измерений, проведённых на измерительной поверхности № 1.

Таким образом, при проведении интенсивметрических измерений в 3-х помещениях (с различными акустическими характеристиками) на измерительной поверхности № 2 влияние помещения на результаты измерений акустических характеристик образцового источника шума типа ОИШ-МВ-1 во всём диапазоне частот измерений (от 50 до 800 Гц) оказалось незначительным.

В соответствии со стандартом [3], при проведении интенсивметрических измерений предельно допустимая величина погрешности в диапазоне частот от 50 до 160 Гц (в котором длина звуковой волны в воздухе  $\lambda_z$  варьируется в пределах:  $2,1 \div 6,8$  м) составляет 3 дБ.

Таблица 1

**Результаты измерений акустических характеристик образцового источника шума типа ОИШ-МВ-1 в помещениях №№ 1-АК; 2-Д и 3-Д**

Частота $f$ , Гц	Усреднённые значения уровней мощности звука ( $L_w$ , дБ), измеренные на измерительной поверхности № 2 в помещениях:			Паспортные значения уровней мощности звука $L_w^{насп}$ , дБ	Разность уровней звуковой мощности ( $\Delta L_w$ , дБ), измеренных на измерительной поверхности № 2 в помещениях:			Разность уровней звуковой мощности (дБ), измеренных на измерительных поверхностях №№ 1 и 2 в помещениях:	
	№ 1-АК $L_w^1 [\Delta_m^1]$	№ 2-Д $L_w^2 [\Delta_m^2]$	№ 3-Д $L_w^3 [\Delta_m^3]$		№ 1-АК и № 3-Д $[\Delta L_w]_1^3$	№ 1-АК и № 2-Д $[\Delta L_w]_1^2$	№ 2-Д и № 3-Д $[\Delta L_w]_2^3$	№ 1-АК $[\Delta L_w]_1^{ИП}$	№ 3-Д $[\Delta L_w]_3^{ИП}$
№№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
31,5	93,5	95,0	91,0		2,0	1,5	3,5	5,5	6,0
40	75,0	78,0	79,0		4,0	3,0	1,0	26,0	15,0
50	79,0	81,0	79,5	84,5	0,5	2,0	1,5	4,0	9,0
63	83,5	83,0	82,0	86,0	1,5	0,5	1,0	7,5	10,0
80	86,5	87,5	85,0	89,5	1,5	1,0	2,5	2,0	4,0
100	91,0	91,0	91,0	92,0	0,0	0,0	0,0	6,0	4,0
125	90,5	90,5	89,5	92,0	1,0	0,0	1,0	2,5	1,5
160	89,0	89,5	89,0	89,5	0,0	0,5	0,5	0,6	0,2
200	88,0	88,0	88,0	88,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,3
250	86,5	87,5	87,5	87,5	1,0	1,0	0,0	0,3	0,7
315	85,5	87,0	86,5	87,5	1,0	1,5	0,5	0,9	0,5
400	85,5	86,5	86,0	88,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,2
500	86,0	86,0	86,0	88,5	0,0	0,0	0,0	0,3	0,5
630	88,5	89,0	88,0	90,5	0,5	0,5	1,0	0,6	0,2
800	89,5	90,5	90,0	90,5	0,5	1,0	1,0	0,9	0,8
1000	–	90,0	–	89,5	–	–	–	–	–
1250	–	89,5	–	90,0	–	–	–	–	–

Следует отметить, что длина волны ( $\lambda_s$ ) в этом диапазоне частот превышает 2,1 м, а измерительные точки расположены на расстоянии ( $r_{\text{изм}}$ ) от источника звука, равном 0,85 м. Следовательно, измерительное расстояние  $r_{\text{изм}} \ll \lambda_s$ . Таким образом, при проведении измерений в диапазоне низких частот (50 ÷ 160 Гц) зонд располагался в ближней зоне акустического поля, поскольку размер ближней зоны не превышает длины волны звука  $\lambda_s$ .

В то же время, согласно результатам интенсивметрических измерений [5], даже в диапазоне низких частот (50 ÷ 160 Гц) при проведении измерений в трёх помещениях (№№ 1-АК; 2-Д; 3-Д) разность значений уровней мощности звука ( $[\Delta L_w]_1^2; [\Delta L_w]_1^3; [\Delta L_w]_2^3$ ) не превышает 2,5 дБ. Следовательно, при проведении интенсивметрических измерений в трёх производственных помещениях с различными акустическими характеристиками величина систематической погрешности измерений, обусловленной влиянием помещения на результаты измерений, не превышает допустимого значения погрешности (3 дБ), которое установлено стандартом [3].

В табл. 1 использованы следующие условные обозначения:  $f$  – среднегеометрические частоты третьоктавных частотных полос (Гц);  $L_w^1; L_w^2; L_w^3$  – усреднённые значения уровней звуковой мощности (дБ) источника звука типа ОИШ-МВ-1, измеренные при размещении зонда на измерительной поверхности № 2, соответственно, в помещениях №№ 1-АК, 2-Д и 3-Д;  $L_w^{\text{пасп}}$  – паспортные значения уровней звуковой мощности источника звука типа ОИШ-МВ-1, измеренные в акустической камере ФГУП «ВНИИФТРИ»;  $[\Delta L_w]_1^{\text{III}}; [\Delta L_w]_3^{\text{III}}$  – соответственно, разность уровней звуковой мощности, измеренных на двух измерительных поверхностях (№№ 1 и 2), в помещениях № 1-АК и № 3-Д;  $[\Delta L_w]_1^2; [\Delta L_w]_1^3$  – разность уровней мощности звука, измеренных, соответственно, в помещениях №1-АК и № 2-Д и в помещениях № 1-АК и № 3-Д;  $[\Delta L_w]_2^3$  – разность уровней мощности звука, измеренных в помещениях № 2-Д и № 3-Д;  $\Delta_m^1; \Delta_m^2$  – длина проставки между двумя микрофонами в зонде;  $\Delta_m^1 = 100$  мм;  $\Delta_m^2 = 50$  мм.

В табл. 1 также приведена паспортная характеристика (спектральные уровни мощности звука) образцового источника звука типа ОИШ-МВ-1, определённая в результате акустической калибровки.

Из сопоставления паспортной характеристики образцового источника с результатами интенсивметрических измерений в трёх помещениях следует, что уровни мощности звука в помещениях №№ 1-АК; 2-Д и 3-Д ( $L_w^{\text{изм}}$ ) в нормируемом диапазоне частот не превышают паспортных значений уровней мощности:  $L_w^{\text{изм}} \leq L_w^{\text{пасп}}$ .

Из сопоставления результатов интенсивметрических измерений акустической характеристики источника звука типа ОИШ-МВ-1 в помещении № 2-Д с паспортной характеристикой следует, что в диапазоне частот от 100 до 1250 Гц превышение паспортных значений уровней мощности звука  $L_w^{\text{пасп}}$  (по сравнению со значениями, измеренными в этом помещении), варьируется в пределах от 0 до 1,5 дБ. Только в третьоктаве со среднегеометрической частотой 500 Гц превышение паспортного значения  $L_w^{\text{пасп}}$  (по сравнению с результатами измерений в трёх помещениях) равно 2,5 дБ.

Однако, в низкочастотном диапазоне (в частотных полосах со среднегеометрическими частотами 50; 63 и 80 Гц) паспортные значения уровней мощности звука превышают значения, измеренные в помещении № 2-Д, соответственно, на 3,5; 3,0 и 2,0 дБ.

Аналогичный результат получен при проведении интенсивметрических измерений (в этих же полосах частот: 50; 63; 80 Гц) в помещении № 1-АК, причём паспортные значения превысили значения уровней мощности звука, измеренные в помещении № 1-АК, соответственно, на 5,5; 2,5 и 3,0 дБ.

В помещении № 3-Д паспортные значения превысили значения уровней мощности, измеренные в помещении (в этих же полосах частот), соответственно, на 5,0; 4,0; 4,5 дБ.

В помещениях № 1-АК и № 3-Д в диапазоне частот от 100 до 800 Гц превышение паспортных значений уровней мощности звука (по сравнению со значениями, измеренными в помещениях № 1-АК и № 3-Д) варьируется в пределах от 0 до 2,5 дБ.

Таким образом, паспортные значения уровней мощности звука оказались существенно завышенными (по сравнению с результатами интенсивметрических измерений в помещениях №№ 1-АК; 2-Д и 3-Д) в диапазоне низких частот (ниже 100 Гц).

Для определения паспортной характеристики образцового источника шума типа ОИШ-МВ-1 измерения уровней звукового давления проводились (в акустической камере ФГУП «ВНИИФТРИ») в соответствии со стандартом [1]. В диапазоне самых низких частот (ниже 100 Гц) длина звуковой волны



в воздухе больше 3,5 м, следовательно, измерительная поверхность (полусфера с радиусом 2 м) расположена в ближней зоне акустического поля, формирующегося при работе источника звука.

В низкочастотном диапазоне при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1 в ближней зоне акустического поля формируются: активное поле звуковых пульсаций давления и реактивное поле гидродинамических пульсаций давления. Кроме того, в объёме помещения № 1-АК на первых собственных частотах формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн, поскольку на низких частотах (ниже 100 Гц) обеспечить эффективное поглощение звуковых волн в этом помещении невозможно, так как толщина звукопоглощающего покрытия составляет менее 0,1 от длины звуковой волны.

Следовательно, в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) в ближней зоне источника звука формируется комплексное акустическое поле. В этом поле имеются две компоненты (активная и реактивная) с принципиально различной физической природой. Кроме того, во всём объёме камеры формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн.

В то же время при измерении уровней звукового давления в акустическом поле (в соответствии со стандартом [1]), в области низких частот (ниже 100 Гц) измерительный микрофон не может различить (дифференцировать) две компоненты акустического поля (активную и реактивную).

В комплексном акустическом поле на мембрану микрофона одновременно оказывают динамическое воздействие гидродинамические (псевдозвуковые) пульсации давления и звуковые пульсации давления. Несмотря на принципиальные различия в физической природе этих пульсаций, на аномально низких частотах микрофон не может отличить гидродинамические пульсации давления от звуковых пульсаций. Поэтому результаты измерения соответствуют воздействию на микрофон суммарного давления, обусловленного двумя видами пульсаций (гидродинамическими и акустическими).

При проведении измерений на низких частотах в ближней зоне (в непосредственной близости от источника звука) колебания частиц среды оказывают на микрофон одинаковое воздействие независимо от физической природы этих колебаний. По мере удаления от источника звука псевдозвуковые пульсации давления быстро затухают (в отличие от звуковых пульсаций, распространяющихся в среде в виде волны звука).

Таким образом, при проведении низкочастотных измерений в ближней зоне комплексного аку-

стического поля, нет характерных признаков, по которым мембрана микрофона может отличить активную компоненту этого поля от реактивной компоненты.

При работе источника звука типа ОИШ-МВ-1 генерируется широкополосный «вихревой» акустический шум аэродинамического происхождения. В помещении формируется акустическое поле, экспериментальное исследование структуры которого в низкочастотной области сопряжено с существенными трудностями.

Как отмечено выше, в области низких частот, вследствие вихреобразования, обусловленного отрывом пограничного слоя, в межлопаточных каналах рабочего колеса вентилятора (источника звука типа ОИШ-МВ-1) возбуждается поле неоднородных акустических волн (псевдозвуковых пульсаций давления).

Физический механизм формирования поля пульсаций давления в межлопаточных каналах колеса и зависимость размера зон отрыва пограничного слоя от конструкции колеса вентилятора подробно описаны в работах [7, 8]. В кратком изложении возбуждение неоднородных акустических волн в межлопаточных каналах обусловлено следующими физическими процессами.

При прохождении воздушного потока через межлопаточные каналы колеса вентилятора скорость потока уменьшается. Этот процесс торможения (деселерации) потока обусловлен поворотом потока на  $90^\circ$  (при прохождении потока через межлопаточные каналы) и трением в межлопаточных каналах.

Причём степень торможения потока зависит от формы лопаток и, в частности, максимальное торможение потока (и максимальный размер зон отрыва потока) обеспечивается в межлопаточных каналах колеса с вперёд загнутыми лопатками. Кроме того, зоны интенсивного вихреобразования образуются на входе в рабочее колесо.

В межлопаточных каналах колеса, вследствие торможения воздушного потока, градиент скорости потока становится отрицательным, а градиент давления в направлении распространения потока — положительным (в соответствии с принципом Бернулли). Вследствие торможения потока величина плотности энергии течения в вязком пограничном слое существенно уменьшается и в точке отрыва пограничного слоя (в которой градиент скорости потока становится равным 0) скорость течения в пограничном слое уменьшается до нулевого значения.

Зоны отрыва пограничного слоя всегда образуются на выходе из межлопаточных каналов колеса с вперёд загнутыми лопатками. Отрыв погранично-

го слоя приводит к интенсивному вихреобразованию в межлопаточных каналах рабочего колеса вентилятора, при этом в межлопаточных каналах формируется поле звуковых пульсаций давления. Энергия звуковых пульсаций давления трансформируется в энергию звуковых волн (волн сжатия/разрежения), которые излучаются при истечении турбулентного потока из межлопаточных каналов (преимущественно в дальней зоне акустического поля). Это поле звуковых волн, формирующееся в дальней зоне, называют «вихревым» шумом.

В то же время, согласно [9], процесс вихреобразования в межлопаточных каналах сопровождается формированием дополнительного поля псевдозвуковых пульсаций давления, причём энергия этого поля не может трансформироваться в энергию звуковых волн. Физическая природа гидродинамических пульсаций давления принципиально отлична от физической природы акустических пульсаций давления. Поэтому для описания поля псевдозвуковых пульсаций давления, в отличие от поля звуковых пульсаций давления (звуковых волн), не может быть использовано волновое уравнение.

Процесс перемещения вихревых структур в турбулентном потоке квалифицируется как процесс формирования поля псевдозвуковых пульсаций давления, поскольку скорость перемещения этих структур значительно меньше скорости распространения звуковых волн. В результате перемещения вихрей в турбулентном потоке формируется реактивное поле гидродинамических (псевдозвуковых) пульсаций давления [9] в виде распределения гидродинамических давлений. Это реактивное поле локализовано преимущественно в объёме турбулентного потока (а именно в каждом межлопаточном канале колеса и непосредственно на выходе из канала). Термин «псевдозвуковые» пульсации давления [9] используется для обозначения гидродинамических пульсаций давления, энергия которых не может трансформироваться в энергию поля звуковых волн. По отношению к этим псевдозвуковым пульсациям среда ведёт себя как несжимаемая.

Таким образом, в результате вихреобразования в турбулентном потоке в межлопаточных каналах колеса формируется комплексное акустическое поле, в котором, наряду с активной (звуковой) компонентой поля давлений, формируется реактивная компонента. В соответствии с [4], в качестве основной характеристики этого комплексного акустического поля используется величина комплексной интенсивности звука  $\vec{I}_c$ , которая вычис-

ляется с помощью выражения:  $\vec{I}_c = \vec{I}_{act} + \vec{J}_{react}$ ,

где  $\vec{I}_{act}; \vec{J}_{react}$  – соответственно, активная и реактивная компоненты комплексной интенсивности звука.

Реактивная компонента поля возбуждается вследствие формирования в межлопаточных каналах чисто реактивного поля гидродинамических (псевдозвуковых) пульсаций давления. Согласно [4, 5], реактивная компонента акустических полей доминирует (по сравнению с активной компонентой) в ближней зоне акустического поля. Реактивная компонента интенсивности используется, главным образом, при анализе двух типов акустических полей: поля стоячих звуковых волн (в замкнутом объёме) и поля, формирующегося в ближней зоне источника звука (в низкочастотном диапазоне).

Для вычисления активной  $\vec{I}_{act}(\omega)$  и реактивной  $\vec{J}_{react}(\omega)$  компонент интенсивности звука используются известные выражения [10]:

$$\vec{I}_{act}(\omega) = P^2 \nabla \phi / (2\rho_0 \omega), \quad (7, a)$$

$$\vec{J}_{react}(\omega) = -P \nabla P / (2\rho_0 \omega), \quad (7, б)$$

где  $P, \nabla P$  – соответственно, амплитуда и градиент давления в акустическом поле;  $\nabla \phi$  – градиент фазы;  $\omega$  – частота колебаний;  $\rho_0$  – плотность воздуха. Согласно формуле (7), значения активной и реактивной компонент комплексной интенсивности звука определяются значениями, соответственно, градиентов фазы и давления.

Таким образом, при проведении интенсивметрических измерений обеспечивается возможность отдельного вычисления значений активной и реактивной компонент комплексного акустического поля. Результаты измерения фазы и амплитуды давления в двух точках поля (с помощью зонда) используются для вычисления значений градиентов фазы и давления, а затем значений двух компонент интенсивности: активной и реактивной. Зависимость активной и реактивной компонент интенсивности звука от значений градиентов, соответственно, фазы ( $\nabla \phi$ ) и давления ( $\nabla P$ ) описывается выражением (7).

В соответствии с результатами измерений [5] и теоретического анализа, на низких частотах (при проведении измерений в ближней зоне комплексного акустического поля) значения градиента дав-

ления ( $\nabla P$ ) существенно возрастают. Увеличение значений  $\nabla P$  на низких частотах обусловлено значительным повышением степени неоднородности структуры реактивного поля неоднородных акустических волн (т. е., псевдозвуковых пульсаций давления) на низких частотах. Это реактивное поле формируется в ближней зоне акустического поля в непосредственной близости от источника звука. Согласно (7, б), значения реактивной компоненты интенсивности ( $\vec{J}_{react}$ ) увеличиваются (и достигают больших значений) именно в том случае, когда в поле растёт градиент давления (благодаря повышению степени неоднородности этого поля).

В то же время, на низких частотах (ниже 100 Гц) в ближней зоне акустического поля значения градиента фазы уменьшаются при понижении частоты, поскольку в этом диапазоне частот длина звуковой волны во много раз больше расстояния между микрофонами (в двухмикрофонном зонде). В зонде расстояние ( $d_m$ ) между двумя микрофонами не превышает 0,1 м, а для длины звуковой волны выполняется соотношение:  $\lambda_s \geq 3,4$  мм (если  $f \leq 100$  Гц). Таким образом, длина волны звука, по крайней мере, в 34 раза больше величины расстояния ( $d_m$ ), поэтому разность фаз, соответствующая расстоянию ( $d_m$ ), также невелика. Следовательно, согласно выражению (7, а), на низких частотах (при проведении измерений в ближней зоне комплексного акустического поля) значения активной составляющей интенсивности звука ( $\vec{I}_{act}$ ) значительно меньше, чем значения реактивной составляющей интенсивности звука.

Таким образом, в ближней зоне поля в низкочастотном диапазоне значения реактивной компоненты интенсивности звука существенно превышают значения активной компоненты интенсивности звука. С ростом частоты колебаний, значения градиента фазы увеличиваются (поскольку уменьшается длина волны звука), а значения градиента давления уменьшаются (благодаря повышению степени однородности акустического поля). При этом значения активной компоненты интенсивности звука увеличиваются, а значения реактивной компоненты интенсивности звука уменьшаются. Поэтому соотношение между значениями активной и реактивной составляющих интенсивности звука меняется: в диапазоне средних и высоких частот значения активной компоненты интенсивности звука превышают значения реактивной компоненты интенсивности звука.

Согласно результатам, представленным в отчёте [5], при проведении измерений в помещениях № 1-АК и № 3-Д, в низкочастотном диапазоне

(ниже 160 Гц) значения уровней реактивной компоненты интенсивности звука весьма существенно (от 8 до 26 дБ) превышают значения уровней активной компоненты интенсивности. В соответствии с программным обеспечением, при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1 результаты измерений уровней активной компоненты интенсивности звука используются для вычисления, с помощью выражения (5), уровней звуковой мощности этого источника.

Реактивная компонента интенсивности звука в этих расчётах не используется, так как реактивная компонента поля не оказывает влияния на величину мощности звука. Уровни мощности звука зависят только от уровней активной компоненты интенсивности, поскольку величина мощности звука определяется интенсивностью звука в потоке энергии, который распространяется в акустическом поле. В реактивном поле звуковые волны не могут возбуждаться, так как среда утрачивает упругие свойства, поэтому в реактивном поле не может сформироваться поток энергии, распространяющийся в среде.

Однако, согласно [5], реактивная компонента интенсивности оказывает влияние на результаты определения (по формуле (5)) уровней мощности звука (на аномально низких частотах). Когда измерения проводятся в ближней зоне поля, это влияние может быть квалифицировано как систематическая погрешность «сверхнизкочастотных» измерений, появление которой обусловлено формированием в помещении чисто реактивного поля стоячих звуковых волн и реактивной компоненты комплексного акустического поля источника звука. Реактивная компонента комплексного поля формируется в ближней зоне поля псевдозвуковых пульсаций давления (возбуждение этих пульсаций обусловлено процессом вихреобразования в межлопаточных каналах колеса).

Как отмечено выше, при измерении уровней звукового давления (в соответствии с [1]) на самых низких частотах (в особенности, ниже 100 Гц) систематическая погрешность обусловлена динамическим воздействием на мембрану микрофона реактивной компоненты комплексного акустического поля (помимо воздействия, оказываемого активной компонентой поля, то есть полем звуковых волн) и реактивного поля стоячих звуковых волн. При воздействии на мембрану двух «сверхнизкочастотных» акустических полей (активного и реактивного) микрофон не может обнаружить различия в физической природе этих полей. Поэтому измеряется суммарный уровень звукового давления и исходя

из этого суммарного уровня давления вычисляются уровни звуковой мощности.

Таким образом, в низкочастотном диапазоне в межлопаточных каналах и на выходе из этих каналов (в гидродинамической ближней зоне акустического поля источника звука) возбуждается комплексное акустическое поле, представленное двумя составляющими (активной и реактивной). Т. е. формируется активное поле акустических пульсаций давления и реактивное поле псевдозвуковых пульсаций давления. При удалении от источника звука (межлопаточных каналов колеса) реактивное поле гидродинамических пульсаций давления быстро затухает.

Поле гидродинамических пульсаций давления является чисто реактивным полем, поскольку в псевдозвуковом поле отсутствует поток энергии, который является основной отличительной особенностью активного акустического поля (поля звуковых волн). В реактивном поле гидродинамических пульсаций давления энергия не распространяется в пространстве в виде акустических волн, эта энергия сконцентрирована непосредственно около источника звука (в области ближнего поля).

Причём в ближней зоне интенсивность активной компоненты акустического поля (поля акустических пульсаций давления) меньше интенсивности реактивной компоненты поля. Плотность энергии гидродинамических пульсаций давления (в псевдозвуковом поле) больше плотности энергии акустических пульсаций давления (в звуковом поле).

В соответствии с изложенным, для корректного анализа и интерпретации результатов низкочастотных интенсивметрических измерений акустических характеристик источников шума (машин), необходимо учитывать, что при проведении испытаний источника шума типа ОИШ-МВ-1 в измерительном помещении формируется три акустических поля. А именно активная и реактивная компоненты (составляющие) комплексного акустического поля (поля пульсаций давления), а также чисто реактивное поле стоячих звуковых волн.

Комплексное поле пульсаций давления (звуковых и псевдозвуковых) формируется в межлопаточных каналах колеса, а затем энергия поля звуковых пульсаций давления трансформируется в энергию поля звуковых волн, распространяющихся в дальней зоне акустического поля, которое квалифицируется как широкополосный «вихревой» шум.

Несмотря на отсутствие потока энергии в реактивном акустическом поле (поле гидродинамических пульсаций давления), под воздействием этого поля частицы среды совершают колебательные движения. Такие же колебательные движения со-

вершают частицы среды в активном поле звуковых волн, которые распространяются в среде (в том числе в дальней зоне акустического поля источника шума) в виде потока энергии.

Основным отличительным признаком активного поля звуковых волн от реактивного поля псевдозвуковых пульсаций давления является формирование потока энергии в среде. Основными характеристиками активного поля являются амплитуда звукового давления (или колебательной скорости) и фаза волны. В отличие от активного поля, для чисто реактивного поля гидродинамических пульсаций давления определяется только амплитуда звукового давления, а разность фаз, измеренная в любых двух точках такого реактивного поля, равна:  $\Delta\varphi = 0$ .

Как известно [5], разность фаз колебаний вычисляется с помощью выражения:  $\Delta\varphi = (k\Delta r/2\pi)$ , где  $k$ ;  $\Delta r$  – соответственно, волновое число, и расстояние между двумя точками поля, в которых измеряется фазовая характеристика поля. В области самых низких частот расстояние между точками измерения ( $\Delta r$ ) значительно меньше длины волны звука  $\lambda_{зв}$ , поэтому разность фаз  $\Delta\varphi \rightarrow 0$ . Следовательно, на низких частотах (ниже 100 Гц) волновая природа активного поля фактически не проявляется, поскольку в поле звуковых волн разность фаз ( $\Delta\varphi$ ) близка к нулю (как и в реактивном поле). Поэтому, в соответствии с формулой (7, а), на низких частотах значения активной компоненты интенсивности звука  $\vec{I}_{act}(\omega)$ , определённые для поля звуковых волн, также близки к 0.

Именно фазовая характеристика акустического поля является основным признаком, на основании которого можно определить физическую природу этого поля, т. е. дифференцировать активное волновое поле и реактивное поле, в котором нет волнового движения. Реактивное поле формируется в виде поля псевдозвуковых пульсаций давления, поэтому в таком поле сдвиг фаз ( $\Delta\varphi$ ) между точками реактивного поля (поля пульсаций давления), в которых проводят измерения, равен нулю. В то же время значения реактивной компоненты интенсивности звука, в соответствии с формулой (7, б), зависят от значения градиента давления (и не зависят от градиента фазы). Поэтому в области «сверхнизких» частот значения реактивной компоненты интенсивности растут, вследствие увеличения градиента давления в поле неоднородных акустических волн.

В «сверхнизкочастотном» диапазоне (ниже 80 ÷ 100 Гц), независимо от физической природы



акустического поля, колеблющиеся частицы среды оказывают одинаковое динамическое воздействие (давление) на мембрану микрофона. В диапазоне аномально низких частот сдвиг фаз между точками комплексного поля (т. е. как для активной, так и для реактивной компонент поля), в которых проводятся измерения, близок к нулю.

Реактивное поле стоячих звуковых волн формируется во всём объёме помещения на собственных частотах помещения, вследствие возбуждения первых (низкочастотных) мод собственных колебаний объёма помещения. Поскольку в поле стоячих звуковых волн сдвиг фаз между давлением и колебательной скоростью равен  $90^\circ$ , активная компонента интенсивности звука равна 0 во всём объёме камеры (помещения № 1-АК), в котором сформировалось чисто реактивное поле стоячих звуковых волн.

В то же время, в каждой точке чисто реактивного поля стоячих звуковых волн частицы среды колеблются, т. е. это поле можно рассматривать как поле, энергия которого распределена между колеблющимися частицами среды. Причём в реактивном поле стоячих звуковых волн активная компонента интенсивности звука равна 0, реактивная компонента интенсивности звука ( $J_{react}$ ) равна:  $J_{react} = P^2 \sin(2kr) / 4\rho_0 c$ , а кинетическая энергия поля ( $E_{kin}$ ) равна:  $E_{kin} = P^2 \sin^2(kr) / 4\rho_0 c^2$ , где  $P$  – амплитуда звукового давления;  $k$  – волновое число;  $\rho_0$ ,  $c$  – плотность и скорость звука в воздухе;  $r$  – расстояние от ограждающей поверхности помещения до измерительной поверхности.

В чисто реактивном поле стоячих звуковых волн энергия не распространяется в среде, поскольку в объёме, который занимает поле стоячих волн, не может сформироваться поток энергии. Энергия уже распределена между частицами среды, каждая из которых колеблется с постоянной амплитудой. Причём в каждой точке поля амплитуда колебаний зависит от фазы (в пучностях стоячей волны амплитуда максимальна, а в узлах – минимальна). Поэтому в реактивном поле стоячих волн частицы среды оказывают такое же динамическое воздействие на мембрану микрофона, как при колебаниях частиц среды в активном поле звуковых волн.

Таким образом, в низкочастотном диапазоне (ниже 80 – 100 Гц) при проведении измерений уровней звукового давления [1] (в комплексном акустическом поле) невозможно дифференцировать реактивное поле стоячих волн (или псевдозвуковых пульсаций давления) от активного поля звуковых волн, поскольку на аномально низких частотах не существует признаков, по которым микрофон может дифференцировать поля с раз-

личной физической природой. В низкочастотном диапазоне микрофон не может отличить воздействие реактивного поля стоячих волн от воздействия звуковых волн (в активном звуковом поле). И в активном и в реактивном поле колеблющиеся частицы среды оказывают динамическое воздействие (давление) на мембрану микрофона.

Следовательно, в «сверхнизкочастотном» диапазоне, при измерении уровней звукового давления (в соответствии с [1]), измеряются суммарный уровень звукового давления и суммарный уровень интенсивности звука в комплексном акустическом поле.

Основным признаком активного поля (отличающим его от реактивного поля) является формирование звуковых волн, распространяющихся в среде. Чтобы отличить активную компоненту поля от реактивной компоненты необходимо измерить фазовые характеристики акустических полей. Однако при измерении уровней звукового давления (в соответствии с [1]) фазовые характеристики акустического поля не определяются.

В то же время при проведении интенсивметрических измерений можно использовать результаты измерения фазовой характеристики для выявления физической природы акустического поля. При измерении интенсивности звука в двух точках поля определяется не только амплитуда звукового давления, но и фазовая характеристика акустического поля. С помощью фазовой характеристики можно дифференцировать активную и реактивную компоненты акустического поля. Показателем «степени реактивности» акустического поля является индекс «давление – интенсивность» (или «индекс реактивности» поля). В соответствии с [4], большие значения этого индекса ( $F_{pl} \geq 2$ ) характерны именно для реактивного поля.

Согласно результатам экспериментальных исследований [5], даже на самых низких частотах (ниже 100 Гц) при использовании акустической интенсивметрии можно вычислить уровни активной и реактивной компонент интенсивности звука в комплексном акустическом поле. Сначала, исходя из результатов измерений, определяются значения градиентов давления и фазы ( $\nabla P$ ,  $\nabla \phi$ ) в комплексном акустическом поле. Затем, используя программное обеспечение, с помощью выражения (7), исходя из значений градиентов ( $\nabla P$ ,  $\nabla \phi$ ), вычисляются значения активной и реактивной компонент интенсивности звука. При этом колебательная скорость частиц среды подразделяется на две компоненты: активную и реактивную (для которой фаза смещена на  $90^\circ$  относительно колебательного давления). Затем, с помощью выражения (5) вычисляются зна-

чения уровней мощности звука (исходя из вычисленных значений активной компоненты интенсивности звука). Эти значения активной компоненты интенсивности вычисляются с помощью выражения (7, а).

Таким образом, при использовании интенсивметрии можно, исходя из результатов измерений, определить (по отдельности) характеристики активной и реактивной компонент комплексного акустического поля (в частности, уровни активной и реактивной компонент интенсивности звука).

В то же время, в соответствии с [5], на низких частотах чисто реактивное поле стоячих звуковых волн оказывает, по существу, определяющее влияние на результаты измерения характеристик активного звукового поля. Речь идёт, прежде всего, о возбуждении в камере первых собственных мод колебаний объёма помещения. Этим модам соответствуют интенсивные резонансные колебания частиц среды в области пучностей колебаний (в стоячей волне). При возбуждении первых резонансных мод собственных колебаний объёма значительно возрастает степень неоднородности чисто реактивного поля стоячих волн, при этом увеличиваются значения градиентов давления ( $\nabla P$ ) в поле стоячих волн. В то же время в чисто активном поле звуковых волн значения интенсивности звука уменьшаются, поскольку на низких частотах градиент фазы близок к нулю. Таким образом, на низких частотах в комплексном акустическом поле доминирует реактивная компонента акустического поля (поля стоячих звуковых волн), вследствие возбуждения резонансных колебаний объёма на его первых собственных частотах.

В соответствии с изложенным, при проведении интенсивметрических измерений определяются суммарные значения уровней звукового давления в комплексном акустическом поле, состоящем из трёх компонент. А именно чисто реактивного поля стоячих звуковых волн и двух компонент (активной и реактивной) комплексного акустического поля, которое формируется вследствие вихреобразования в межлопаточных каналах источника звука типа ОИШ-МВ-1.

Причём на anomalно низких частотах (ниже 80 – 100 Гц) в ближней зоне акустического поля даже при проведении интенсивметрических измерений невозможно измерить, по отдельности, уровни звукового давления в активном и в реактивном поле. На anomalно низких частотах волновая природа активного поля звуковых волн практически не проявляется, поскольку градиент фазы близок к нулю.

Как отмечено выше, при использовании интенсивметрии на anomalно низких частотах можно

вычислить (по отдельности) значения уровней интенсивности звука в активном и в реактивном поле, используя выражение (7), и значения мощности звука, используя выражение (5).

Таким образом, при использовании акустической интенсивметрии для проведения измерений в комплексном акустическом поле можно определить значения уровней интенсивности звука, соответствующие двум компонентам акустического поля: активной и реактивной, а также уровень мощности звука в активном поле звуковых волн. Однако, в низкочастотном диапазоне (когда  $f \leq 80 \div 100$  Гц), на результаты измерений оказывает весьма существенное (по сути определяющее) влияние систематическая погрешность. Эта погрешность обусловлена влиянием чисто реактивного поля стоячих звуковых волн на результаты определения уровней интенсивности звука в активном поле звуковых волн. При использовании формулы (7, а) для вычисления значений активной компоненты интенсивности звука результаты расчётов оказываются завышенными, поскольку вместо значения амплитуды давления в активном поле для расчёта используется суммарное значение амплитуды давления в комплексном акустическом поле.

Как было отмечено выше, на anomalно низких частотах невозможно измерить по отдельности уровни давления звука только в активном поле ( $L_p^{act}$ ) и только в реактивном поле ( $L_p^{react}$ ). На низких частотах с помощью интенсивметрического зонда можно измерить только суммарный уровень давления звука ( $L_p^{\Sigma}$ ):  $L_p^{\Sigma} = L_p^{act} + L_p^{react}$ . Исходя из суммарного уровня звукового давления, вычисляются значения уровней интенсивности звука в активном акустическом поле. Таким образом, значения интенсивности звука и звуковой мощности в активном поле звуковых волн оказываются завышенными вследствие влияния низкочастотной систематической погрешности.

В то же время при определении уровней интенсивности в реактивном поле результаты измерений на низких частотах определяются исключительно влиянием чисто реактивного поля стоячих звуковых волн на результаты измерений. На первых собственных частотах уровни интенсивности звука в чисто реактивном поле стоячих звуковых волн значительно превышают уровни интенсивности звука в реактивном поле псевдозвуковых пульсаций давления, которое формируется при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1 (вследствие процесса вихреобразования в межлопаточных каналах колеса). Поэтому на низких частотах измерить уровни ин-

тенсивности звука в реактивном поле псевдозвуковых пульсаций давления невозможно в случае, когда в помещении формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн. В этом случае можно измерить только реактивную компоненту суммарного реактивного поля, которое формируется в помещении (в ближней зоне) вследствие одновременного воздействия на зонд двух реактивных полей. А именно поля стоячих волн (на первых собственных частотах помещения) и поля псевдозвуковых пульсаций давления (при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1). Обычно реактивное поле стоячих волн доминирует в низкочастотном диапазоне, поэтому можно измерить только интенсивность звука в чисто реактивном поле стоячих звуковых волн.

В частности, в третьоктавной полосе со среднегеометрической частотой 31,5 Гц, согласно результатам измерений [5], (в камере, на измерительной поверхности № 1), уровни активной и реактивной компонент интенсивности звука равны, соответственно, 93 и 122 дБ. Причём в спектре обоих компонент интенсивности звука (активной и реактивной) в этой частотной полосе (31,5 Гц) выделяется максимум (тональная составляющая), который возбуждается на одной из первых собственных частот камеры. При проведении измерений на измерительной поверхности № 2 в спектре обоих компонент интенсивности звука в этой полосе частот (31,5 Гц) также выделяется тональная составляющая. Этот максимум (в третьоктаве 31,5 Гц) выявляется и в спектрах уровней звукового давления, измеренных на измерительных поверхностях №№ 1 и 2.

В то же время в спектре комплексного поля акустических пульсаций давления (т. е. звуковых и гидродинамических пульсаций), которое формируется вследствие отрыва пограничного слоя при прохождении воздушного потока через межлопаточные каналы колеса вентилятора (т. е. источника звука типа ОИШ-МВ-1), на низких частотах не могут возбудиться какие-либо тональные составляющие (максимумы). При работе источника звука типа ОИШ-МВ-1, вследствие вихреобразования в межлопаточных каналах (которым сопровождается отрыв пограничного слоя в канале), возбуждается широкополосный «вихревой» шум (т. е. активная компонента акустического поля) со «сплошным» спектром. В соответствии с теорией акустического излучения, в сплошном спектре «вихревого» шума не могут сформироваться низкочастотные максимумы, поскольку в низкочастотном диапазоне уровни звукового давления (и интенсивности звука) плавно уменьшаются.

Кроме того, согласно [9], процесс вихреобразования в межлопаточных каналах сопровождается формированием дополнительного реактивного поля псевдозвуковых (гидродинамических) пульсаций давления. В этом реактивном поле также не могут возбудиться тональные составляющие в низкочастотной области. Таким образом, резонансный максимум в третьоктаве со среднегеометрической частотой 31,5 Гц возбуждается только в чисто реактивном поле стоячих звуковых волн (на одной из собственных частот объёма камеры). Этот максимум соответствует резонансной собственной моде колебаний объёма камеры.

В соответствии с изложенным, максимум (тональная составляющая) в третьоктаве со среднегеометрической частотой 31,5 Гц возбуждается только в чисто реактивном поле стоячих волн. В то же время, согласно результатам измерений [5], в этой третьоктаве максимум зафиксирован и в широкополосном спектре активного акустического поля (формирование которого обусловлено возбуждением «вихревого» шума в результате отрыва пограничного слоя в межлопаточных каналах). Разность между уровнями реактивной и активной компонент комплексного акустического поля, согласно [5], составляет 29 дБ. Причём, согласно [5], уровни мощности звука вычисляются исходя из уровня активной компоненты акустического поля. В спектре уровней звукового давления уровень тональной составляющей (в третьоктаве 31,5 Гц) превышает уровни в соседних третьоктавах (со среднегеометрическими частотами 25 и 40 Гц), соответственно, на 11 и 13 дБ (при измерениях на измерительной поверхности № 1) и на 21 и 20 дБ (на измерительной поверхности № 2).

Появление этого максимума (в частотной полосе 31,5 Гц) обусловлено влиянием чисто реактивного поля стоячих звуковых волн на результаты измерений в активном звуковом поле «вихревого» шума. При измерении уровней активной компоненты комплексного акустического поля на микрофон одновременно оказывают динамическое воздействие обе компоненты комплексного акустического поля (активная и реактивная) и чисто реактивное поле стоячих волн.

При проведении измерений в ближней зоне акустического поля на аномально низкой частоте (длина волны звука на частоте 31,5 Гц составляет около 11 м, а расстояние от источника звука до измерительной поверхности №№ 1 и 2, соответственно, составляет 0,35 и 0,85 м) невозможно устранить влияние реактивного акустического поля на результаты интенсивнострических измерений.

Колебания частиц среды в точках чисто реактивного поля стоячих волн (в которых производятся измерения с помощью двухмикрофонного зонда) оказывают практически такое же динамическое воздействие на мембрану микрофона, как и колебания частиц среды в активном звуковом поле. Поскольку микрофон не может отличить реактивное поле от активного поля, в результате измерений определяется суммарный уровень давления (или интенсивности).

Согласно [5], в результате измерений на самых низких частотах (в частотных полосах от 31,5 до 50 Гц) можно определить уровень интенсивности звука в чисто реактивном поле собственных частот камеры. Причём при проведении низкочастотных измерений (ниже 80 Гц) в ближней зоне акустического поля можно пренебречь влиянием на результаты измерений комплексного поля пульсаций давления (звуковых и псевдозвуковых), поскольку интенсивность звука в этом поле значительно меньше интенсивности звука в реактивном поле стоячих волн на первых собственных резонансных частотах объёма камеры.

При проведении измерений интенсивности звука в чисто реактивном поле стоячих волн (на первых собственных частотах камеры), т. е. в условиях резонанса объёма помещения, значения интенсивности звука определяются выбором расположения точки измерения, в которой установлен интенсиметрический зонд. Дело в том, что в стоячей звуковой волне значения уровней интенсивности звука зависят от фазовых характеристик этого поля и, в частности, от расстояния между точкой измерения и точкой, в которой расположена пучность резонансного реактивного поля стоячих волн (а именно поля стоячих волн, которое формируется на резонансных частотах камеры). Т. е., чем ближе точка измерения к пучности колебаний (на резонансной собственной частоте объёма камеры), тем больше значение уровня интенсивности звука.

Согласно результатам измерений ([5] и табл. 1, столбец 8), разность значений уровня мощности звука  $\Delta L_W$ , определённых при проведении измерений в камере на измерительных поверхностях № 1 и № 2 в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125 Гц, равна, соответственно, 32,0; 48,0; 5,5; 26,0; 4,0; 7,5; 2,0; 6,0; 2,5. На более высоких частотах ( $f \geq 160$  Гц) значения разности уровней  $\Delta L_W$  варьируются в пределах от 0,3 до 1,0 дБ. При определении уровней мощности звука на основании результатов измерений на измерительной поверхности № 1 результаты измерений на частотах 20;

25; 40 Гц определяются возбуждением собственных резонансов объёма камеры. На этих частотах влияние резонансов объёма камеры является определяющим, а комплексное акустическое поле, которое формируется в ближней зоне в результате работы источника звука, практически не влияет на результаты измерений. По сравнению с интенсивностью звука в резонансном поле стоячих волн, которое формируется на первых собственных частотах камеры, влияние комплексного акустического поля источника звука пренебрежимо мало. На самых низких частотах (ниже 80 Гц) некоторое дополнительное влияние на результаты интенсиметрических измерений оказывает воздушный поток, создаваемый вентилятором, даже при использовании ветрозащитной насадки (для защиты зонда от воздействия давления, создаваемого этим потоком).

Таким образом, систематическая погрешность измерений мощности звука (в акустическом поле источника звука) оказывает существенное влияние на результаты измерений в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц): прежде всего, в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами: 20; 25; 31,5; 40; 50; 63 Гц. На более высоких частотах (от 160 Гц) значения погрешности не превышают 1 дБ.

Согласно результатам измерений [5], разность значений уровня активной компоненты интенсивности звука  $\Delta L_I^{act}$ , определённых при проведении измерений на измерительных поверхностях № 1 и № 2 в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125 Гц равна, соответственно, 38,0; 54,0; 12,0; 32,0; 10,0; 13,0; 8,0; 0; 3,0 дБ. На более высоких частотах (от 160 Гц) значения  $\Delta L_I^{act}$  варьируются от 5 до 7 дБ. Поскольку при проведении измерений на измерительных поверхностях № 1 и № 2 расстояние от источника звука до точки измерения (0,35 и 0,85 м) увеличивается в 2,3 раза, расчётное значение разности уровней интенсивности звука:  $\Delta L_I^{act} = 7,2$  дБ. Следовательно, погрешность измерений в этом диапазоне частот не превышает 2 дБ.

Согласно результатам измерений [5], разность значений уровня реактивной компоненты интенсивности звука  $\Delta L_I^{reac}$ , определённых при проведении измерений на измерительных поверхностях № 1 и № 2 в третьоктавах со среднегеометрическими частотами 40; 50; 63; 80; 100; 125 Гц равна, соответственно, 21,0; 19,5; 18,0; 16,5; 11,0; 11,5 дБ. В диапазоне частот от 150 до 315 Гц значения разности  $\Delta L_I^{reac}$  варьируются от 9,5 до 12 дБ. Как из-



вестно, реактивная компонента интенсивности, измеренная в чисто реактивном поле псевдозвуковых пульсаций давления, быстро затухает при увеличении расстояния от источника звука до точки измерения.

Согласно результатам измерений [5], разность значений уровня звукового давления  $\Delta L_p$ , определенных при проведении измерений на измерительных поверхностях № 1 и № 2 в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125 Гц, равна, соответственно, 28,0; 26,0; 16,0; 22,0; 19,0; 16,5; 13,0; 9,5; 8,5 дБ. На более высоких частотах (от 160 Гц) значения  $\Delta L_p$  варьируются от 5,5 до 7,5 дБ.

Таким образом, в низкочастотном диапазоне (ниже 100 ÷ 125 Гц) на результаты измерения уровней звукового давления (в активном поле звуковых волн) оказывает весьма существенное влияние чисто реактивное поле стоячих звуковых волн, которое формируется на собственных резонансных частотах объема камеры (помещения № 1-АК). При проведении измерений на двухмикрофонный зонд оказывают динамическое воздействие как резонансное поле стоячих звуковых волн, так и обе компоненты комплексного акустического поля (активная и реактивная).

Причем при проведении измерений в ближней зоне акустического поля на низких частотах мембрана микрофона не может дифференцировать резонансные составляющие поля стоячих волн, которые возбуждаются на первых собственных частотах объема камеры от двух компонент (активной и реактивной) комплексного акустического поля, которое возбуждается при работе источника звука. С точки зрения метрологии, не существует никаких отличий в эффективности динамического воздействия, которое оказывают на зонд колебания частиц среды в этих трёх акустических полях.

Поэтому в результате измерений определяется суммарный уровень интенсивности звука (в соответствии с результатами суммирования резонансной составляющей поля стоячих звуковых волн с двумя компонентами комплексного акустического поля: активной и реактивной). Следовательно, при проведении интенсивметрических измерений в ближней зоне акустического поля (в области аномально низких частот) на результаты измерений оказывает существенное влияние систематическая погрешность, обусловленная влиянием чисто реактивного резонансного поля стоячих звуковых волн на результаты измерения активной компоненты поля звуковых волн («вихревого» аэродинамического шума).

Таким образом, при проведении низкочастотных измерений (ниже 80 Гц) в ближней зоне акустического поля с помощью зонда фактически измеряется не суммарное значение амплитуды звукового давления в комплексном акустическом поле, а значение амплитуды давления в чисто реактивном поле стоячих звуковых волн. Влиянием комплексного акустического поля пульсаций давления (звуковых и гидродинамических) на результаты измерений обычно можно пренебречь, поскольку на низких частотах уровни интенсивности звука в поле стоячих волн значительно выше, чем в комплексном акустическом поле источника звука типа ОИШ-МВ-1.

Согласно результатам измерений [5], величины индекса «давление – интенсивность» ( $F_{pl}$ ), который квалифицируется как «индекс реактивности» акустического поля, в низкочастотном диапазоне в ближней зоне акустического поля источника звука (на измерительной поверхности № 1) формируется акустическое поле, в котором доминирует реактивная составляющая. В этом диапазоне частот величина индекса  $F_{pl} \geq 2$ , причём на частоте 31,5 Гц значения этого индекса максимальны:  $F_{pl} = 4 \div 5$ , а значение индекса ( $F_4$ ), который является показателем неравномерности поля, достигает 78.

Таким образом, в низкочастотном диапазоне (от 31,5 до 125 Гц) в ближней зоне акустического поля источника звука формируется акустическое поле, в котором доминирует чисто реактивная составляющая интенсивности звука, причём поле характеризуется значительной неравномерностью.

Неравномерность поля обусловлена возбуждением резонансных мод собственных колебаний объема помещения на его первых собственных частотах. Согласно результатам измерений [5], по мере удаления интенсивметрического зонда от источника звука (при проведении измерений на измерительной поверхности № 2) степень реактивности поля (индекс  $F_{pl}$ ) уменьшается, при этом снижается степень неоднородности поля в объеме помещения. А именно уменьшаются значения индекса  $F_4$  по сравнению со значениями этого индекса на измерительной поверхности № 1.

Согласно результатам интенсивметрических измерений [5], проведённых в трёх производственных помещениях, в низкочастотном диапазоне (ниже 250 Гц) значения реактивной компоненты интенсивности существенно выше значений активной компоненты интенсивности звука (особенно в диапазоне частот ниже 100 Гц).

В то же время, согласно результатам измерений [5], в области средних и высоких частот уровни реак-

тивной компоненты акустического поля, формирующегося при работе образцового источника шума типа ОИШ-МВ-1, существенно ниже уровней активной компоненты интенсивности звука.

Причём уровни реактивной компоненты интенсивности звука быстро уменьшаются по мере увеличения расстояния  $[\Delta r]$  между точкой измерения и источником звука. В частности, согласно [5], в диапазоне низких частот (от 40 до 160 Гц) при проведении измерений на измерительной поверхности № 2 (в измерительных точках, расположенных на расстоянии  $[\Delta r]_2 = 0,85$  м от источника звука) уровни реактивной компоненты интенсивности существенно ниже (на  $9 \div 21$  дБ), чем при проведении измерений на измерительной поверхности № 1 (т. е. на расстоянии  $[\Delta r]_1 = 0,35$  м от источника звука).

Следовательно, реактивная компонента комплексного акустического поля формируется преимущественно в низкочастотном диапазоне в ближней зоне акустического поля источника звука.

Причём уровни реактивной компоненты интенсивности звука существенно превышают уровни активной компоненты интенсивности звука.

В то же время, согласно [5], активная компонента интенсивности звука в комплексном акустическом поле доминирует (по сравнению с реактивной компонентой интенсивности звука) в диапазоне средних и высоких частот.

Таким образом, при измерении паспортной акустической характеристики источника звука типа ОИШ-МВ-1 в низкочастотной области (ниже 100 Гц) были получены завышенные значения уровней звуковой мощности за счёт влияния чисто реактивного поля стоячих звуковых волн на результаты измерений в ближней зоне акустического поля. Из сопоставления [5] результатов интенсивметрических измерений акустической характеристики источника звука типа ОИШ-МВ-1 с паспортными значениями уровней звуковой мощности (определёнными в соответствии со стандартом [1]) следует, что, в диапазоне частот (50 ÷ 80 Гц) паспортные значения уровней мощности звука выше значений, измеренных интенсивметрическим методом на измерительной поверхности № 2 ( $2,0 \times 2,0 \times 2,0$  м).

В области средних и высоких частот реверберационная компонента акустического поля, формирующегося в помещении, может оказывать существенное влияние на результаты измерений. Фактически эта реверберационная компонента (т. е. квазидиффузное акустическое поле или поле отражённых волн) может квалифицироваться как один из видов акустического фона, формирующегося в помещении. Таким образом, в результате многократных отраже-

ний звуковых волн, которые излучаются источником звука, от всех ограждающих поверхностей, в камере формируется фоновое активное акустическое поле.

При проведении интенсивметрических измерений значения уровней интенсивности звука усредняются по всем измерительным точкам (расположенным на гранях измерительной поверхности, т. е., прямоугольного параллелепипеда) с учётом фазовых характеристик в реверберационном поле отражённых волн, а именно с учётом сдвига фаз между измерительными точками, расположенными на противоположащих гранях измерительной поверхности.

Ослабление влияния акустического фона на результаты измерений акустической характеристики испытываемой в камере машины обеспечивается за счёт взаимной компенсации энергии в фоновом потоке энергии, который проходит через объём помещения, ограниченный замкнутой измерительной поверхностью.

В соответствии с теоремой Гаусса, когда векторный поток энергии фонового акустического поля (в частности, поля отражённых волн), формирующегося в помещении, пересекает замкнутую измерительную поверхность, результирующий (суммарный по всей замкнутой измерительной поверхности) поток акустической энергии равен 0.

Этот результат обусловлен взаимной компенсацией векторного потока энергии на входе в объём, ограниченный измерительной поверхностью, и на выходе из этого объёма (т. е. при прохождении потока энергии через две противоположащие грани измерительной поверхности). Следует отметить, что полная компенсация фонового поля обеспечивается только в случае, когда нестационарность фонового поля незначительна. Таким образом, в результате усреднения измеренных зондом значений вектора интенсивности звука по всей замкнутой измерительной поверхности обеспечивается существенное ослабление влияния акустического фона на результаты измерений.

Следовательно, при использовании метода интенсивметрии обеспечивается повышение точности акустических измерений за счёт ослабления влияния некоторых систематических погрешностей на результаты измерений.

**Анализ результатов интенсивметрических измерений характеристик акустических полей, формирующихся в помещении при испытаниях электродвигателей общего и специального назначения. Анализ результатов интенсивметрических измерений акустических характеристик электродвигателя типа «SF-56-2B».** На втором

этапе были проведены исследования метрологических возможностей метода акустической интенсивности при определении акустических характеристик электродвигателей специального и общего назначения.

При работе электродвигателя, вследствие изгибных колебаний корпусной конструкции, излучается преимущественно структурный (вибрационный) шум. Дополнительно при работе системы воздушного охлаждения обмоток электродвигателя излучается шум аэродинамического происхождения. Однако, обычно при работе электродвигателей общего назначения уровни аэродинамического шума существенно ниже уровней структурного шума.

Для оценки метрологических возможностей метода акустической интенсивности при определении акустических характеристик электродвигателей, а также перспектив его применения в инженерной практике были проведены интенсивметрические измерения акустической характеристики серийного электродвигателя общего назначения типа «SF-56-2B» в трёх различных производственных помещениях. Все помещения расположены в лаборатории № 182 (отдел 18) АО «Корпорация «ВНИИЭМ». Сначала измерения проводились в помещении № 1-АК (т. е. в аттестованной акустической камере с габаритными размерами  $8,0 \times 10,0 \times 5,0$  м), а затем в двух производственных помещениях с жёсткими ограждающими конструкциями пола, потолка и стен.

В качестве измерительного помещения № 2-П использовалось производственное помещение с жёсткими ограждающими конструкциями. Габаритные размеры помещения:  $8,5 \times 12,0 \times 6,0$  м, объём – 612 куб. м. В качестве измерительного помещения № 3-П также использовалось производственное помещение с жёсткими ограждающими конструкциями. Габаритные размеры помещения:  $3,4 \times 4,7 \times 6,0$  м, объём – 96 куб. м. Измерительные помещения №№ 1-АК и 3-П расположены на первом этаже здания (корпуса № 6), а помещение № 2-П – на втором этаже. Таким образом, для проведения измерений были использованы помещения (в форме прямоугольного параллелепипеда) с существенно различными габаритными размерами и акустическими характеристиками.

При проведении интенсивметрических измерений во всех трёх помещениях в качестве измерительной поверхности № 1-Из использовался прямоугольный параллелепипед с габаритными размерами  $0,5 \times 0,5 \times 0,5$  м, испытываемый электродвигатель располагался в центре этого параллелепипеда на расстоянии 0,175 м от измерительной поверхности. Кроме того, в помещении № 2-П до-

полнительно были проведены интенсивметрические измерения, в ходе которых зонд располагался на измерительной поверхности № 2-Из с существенно уменьшенными габаритными размерами:  $0,25 \times 0,2 \times 0,2$  м.

При проведении измерений в двухмикрофонном зонде между микрофонами была установлена проставка длиной 25 мм.

В табл. 2 представлены результаты измерений акустических характеристик (уровней звуковой мощности) электродвигателя типа «SF-56-2B», полученные при проведении интенсивметрических измерений в производственных помещениях № 1-АК; № 2-П; № 3-П. Согласно результатам интенсивметрических измерений уровней звуковой мощности (в помещениях №№ 1-АК, 2-П и 3-П), представленным в табл. 2, в диапазоне частот от 200 до 3500 Гц разность значений уровней мощности звука в этих трёх помещениях варьируется в пределах  $0,5 \div 2,5$  дБ. В помещениях №№ 1-АК и 2-П разность измеренных значений уровней мощности звука в диапазоне частот от 125 до 3500 Гц варьируется незначительно, в пределах  $0,5 \div 2,0$  дБ.

В помещении № 1-АК результаты интенсивметрических измерений усреднённой (по измерительной поверхности) акустической характеристики электродвигателя соответствуют результатам теоретического анализа процесса генерации акустического шума машин (основанного на теории акустического излучения «структурного» шума при изгибных колебаниях конструктивного элемента машины). Согласно результатам теоретического анализа в области низких частот (когда частота ниже критической частоты:  $f \leq f_{cr}$ ), по мере уменьшения частоты колебаний эффективность акустического излучения снижается вследствие постепенного уменьшения коэффициента излучения структурного звука вибрирующей конструкцией.

Однако, в спектральных характеристиках интенсивности звука, измеренных на гранях измерительной поверхности, на самых низких частотах зафиксированы резонансные максимумы. По-видимому, эти максимумы обусловлены возбуждением собственных мод колебаний объёма помещения № 1-АК.

В то же время в помещении № 2-П, согласно результатам интенсивметрических измерений (табл. 2), в низкочастотном диапазоне в спектре мощности звука выделяются два резонансных максимума: в полосах частот со среднегеометрическими частотами 63 и 100 Гц. Появление этих максимумов, по-видимому, обусловлено возбуждением мод собственных колебаний объёма помещения № 2-П.

Аналогичным образом, в помещении № 3-П в третьоктавных полосах со среднегеометрическими

частотами 63; 80; 100; 160 и 200 Гц также выделяются резонансные максимумы, обусловленные возбуждением мод собственных колебаний объёма помещения № 3-П. Причём в помещении № 3-П, габаритные размеры которого значительно меньше габаритных размеров помещения № 2-П, интенсивность этих низкочастотных резонансов существенно повышается.

Как было отмечено выше, в области низких частот (ниже критической частоты  $f_{cr}$ ) в корпусном конструктивном элементе электродвигателя возбуждаются только «медленные» моды колебаний. В этом диапазоне частот эффективность излучения уменьшается по мере уменьшения частоты колеба-

ний конструкции, поскольку в соответствии с теорией акустического излучения, уменьшается величина коэффициента излучения звука конструктивным элементом. Поэтому в спектре структурного шума, излучаемого корпусной конструкцией электродвигателя, максимум обычно расположен в диапазоне средних частот (от 630 до 2000 Гц), а на низких частотах уровни звуковой мощности плавно уменьшаются (спектральная характеристика «заваливается»). Таким образом, в спектре структурного («вибрационного») шума, излучаемого цилиндрическим корпусом электродвигателя, в общем случае не выделяются тональные составляющие.

Таблица 2

**Результаты измерений спектральных уровней звуковой мощности в акустическом поле, формирующемся в производственных помещениях №№ 1-АК; 2-П; 3-П при работе серийного электродвигателя типа «SF-56-2В»**

Частота $f$ , Гц	Результаты измерений акустических характеристик (уровней звуковой мощности, дБ) электродвигателя «SF-56-2В» (дБ) на измерительной поверхности № 1-Из: в производственных помещениях: №№ 1-АК; 2-П и 3-П										
	Усреднённые (по измерительной поверхности) значения уровней звуковой мощности звука, измеренные в помещениях №№ 1-АК; 2-П и 3-П					Усреднённые (по граням А и Б измерительной поверхности) значения уровней звуковой мощности, измеренные в помещениях №№ 1-АК, 2-П и 3-П на боковых гранях А и Б:					
	Уровни звуковой мощности ( $L_w$ ), дБ			Разность уровней ( $\Delta L_w$ ), дБ		Грань А			Грань Б		
	$L_w^1$	$L_w^2$	$L_w^3$	$\Delta L_w^1$	$\Delta L_w^2$	№ 1А	№ 2А	№ 3А	№ 1Б	№ 2Б	№ 3Б
№№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
63	24,0	31,0	40,0	7,0	16,0	20,5	34,0	40,0	21,5	27,0	25,5
80	26,0	28,5	47,0	2,5	21,0	18,0	28,5	47,0	24,0	25,5	23,5
100	28,0	40,5	41,0	12,5	13,0	17,0	38,0	40,5	24,5	27,0	19,0
125	31,5	31,0	32,0	0,5	0,5	22,5	29,0	25,5	28,0	31,0	28,0
160	33,5	34,0	38,0	0,5	4,5	26,5	28,0	40,0	28,0	28,0	31,5
200	37,0	37,5	39,0	0,5	2,0	29,0	33,0	28,0	32,0	32,0	35,0
250	36,0	37,0	36,5	1,0	0,0	29,0	29,0	28,0	30,0	31,0	32,0
315	38,0	38,5	39,5	0,5	1,5	31,0	31,0	32,5	32,0	32,0	33,0
400	41,0	42,0	41,5	1,0	0,5	34,0	34,0	34,0	34,0	36,0	35,0
500	42,0	43,0	43,0	1,0	1,0	33,0	33,5	34,0	36,0	37,0	36,5
630	44,0	45,5	47,0	1,5	3,0	35,0	36,0	34,5	38,0	39,0	41,5
800	46,0	48,0	47,5	2,0	1,5	37,5	37,0	37,0	39,0	41,5	40,0
1000	47,0	49,0	49,5	2,0	2,5	38,0	36,5	38,0	40,0	43,0	41,5
1250	52,5	53,0	52,5	0,5	0,0	47,0	38,5	43,0	45,0	47,0	44,0
1600	64,0	66,0	66,0	2,0	2,0	58,5	57,0	56,0	59,0	60,5	63,0
2000	52,0	51,5	53,5	0,5	1,5	42,0	41,0	40,0	48,0	46,0	47,5
2500	46,5	46,0	48,5	0,5	2,0	39,0	37,0	42,0	40,0	39,0	42,5
3150	53,5	54,5	55,0	0,5	1,5	46,0	49,0	47,0	45,0	45,0	46,0



Однако, в диапазоне средних и высоких частот в спектре могут присутствовать тональные составляющие, возбуждение которых обусловлено взаимодействием электромагнитных полей статора и ротора, а также дефектами в подшипниковых узлах ротора. Согласно результатам измерений (табл. 2), в этом диапазоне частот во всех трёх помещениях в спектре звуковой мощности электродвигателя выделяются только 2 тональные составляющие в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 1600 и 3150 Гц.

В то же время, в низкочастотном диапазоне, согласно результатам измерений, проведённых в помещениях №№ 2-П и 3-П, в спектре шума выделяются тональные составляющие, соответственно, в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами: 63 и 100 Гц (в помещении № 2-П) и 63; 80; 100 и 160 Гц (в помещении № 3-П). Причём уровни звуковой мощности на этих частотах существенно выше, чем в спектре, измеренном в помещении № 1-АК.

Возбуждение этих низкочастотных спектральных максимумов никак не связано с акустическим излучением корпусной конструкции электродвигателя. Появление низкочастотных максимумов в спектре звуковой мощности обусловлено возбуждением первых мод собственных колебаний объёма помещения, в котором проводятся измерения.

В табл. 2 использованы следующие условные обозначения:  $f$  – среднегеометрические частоты третьоктавных частотных полос, Гц;  $L_w^1$ ;  $L_w^2$ ;  $L_w^3$  – усреднённые значения уровней звуковой мощности (дБ) электродвигателя типа «Sf-56-2В», измеренные на измерительной поверхности № 1-Из, соответственно, в помещениях №№ 1-АК, 2-П и 3-П;  $\Delta L_w^1$ ;  $\Delta L_w^2$  – разность уровней звуковой мощности (дБ), измеренных, соответственно, в помещениях №№ 1-АК и 2-П и в помещениях №№ 1-АК и 3-П:  $\Delta L_w^1 = (L_w^1) - (L_w^2)$ ;  $\Delta L_w^2 = (L_w^1) - (L_w^3)$ ;  $L_{w1}^A$ ,  $L_{w2}^A$ ,  $L_{w3}^A$  – усреднённые уровни звуковой мощности (дБ), измеренные на боковой грани А (соответственно, в помещениях №№ 1-АК; 2-П и 3-П);  $L_{w1}^B$ ,  $L_{w2}^B$ ,  $L_{w3}^B$  – усреднённые уровни звуковой мощности (дБ), измеренные на боковой грани Б (соответственно, в помещениях №№ 1-АК; 2-П и 3-П).

Таким образом, в результате резонансного усиления акустического излучения электродвигателя на первых собственных частотах объёма помещения в спектре звуковой мощности появляются ре-

зонансные максимумы. При этом в объёме помещения формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн.

В соответствии с теорией интенсивметрических измерений [3, 4], благодаря использованию этого метода, влияние шумового фона (от внешних дополнительных источников шума) в измерительном помещении на результаты измерения шумовой характеристики испытываемого электродвигателя может быть в значительной степени ослаблено. Однако в двух помещениях (№№ 2-П; 3-П) в области низких частот влияние помещения на результаты измерений обусловлено систематической погрешностью измерений. Эта систематическая погрешность появляется вследствие формирования в объёме помещения чисто реактивного поля стоячих волн (на первых собственных резонансных частотах помещения).

Как было отмечено выше, в качестве основного показателя степени реактивности акустического поля, формирующегося в помещении, используется значение индекса «давление – интенсивность» ( $F_{pl}$ ). Согласно результатам измерений спектральных значений этого индекса ( $F_{pl}$ ) на измерительной поверхности № 1-Из, в помещении № 1-АК в диапазоне третьоктавных полос со среднегеометрическими частотами от 63 до 250 Гц значения индекса варьируются в пределах:  $(F_{pl}) = 3,5 \div 11,5$ . Причём максимальные значения индекса (от 7 до 11,5) зафиксированы на самых низких частотах (в диапазоне от 80 до 160 Гц). Таким образом, согласно результатам измерений в помещении № 1-АК, реактивное акустическое поле высокой интенсивности формируется на первых собственных частотах помещения. На этих собственных (резонансных) частотах в помещении возбуждается чисто реактивное поле стоячих звуковых волн. В то же время, в области средних и высоких частот (от 315 Гц) значения индекса варьируются от 1 до 3, следовательно, чисто реактивное поле гидродинамических пульсаций давления не вносит существенного вклада в суммарное реактивное поле, формирующееся в помещении.

В помещениях с жёсткими ограждающими конструкциями (№№ 2-П и 3-П) интенсивность реактивного акустического поля выше, чем в помещении № 1-АК. В частности, в помещении № 2-П значения «индекса реактивности» поля ( $F_{pl}$ ) в диапазоне частот от 63 до 2500 Гц варьируются в пределах от 3,5 до 11. Причём максимальные значения индекса (от 8 до 11,5) зафиксированы на самых низких частотах (ниже 160 Гц). В помещении № 3-П значения индекса реактивности поля в диапазоне

частот от 63 до 2000 Гц варьируются в пределах от 4 до 13. При этом, максимальные значения индекса (от 7 до 13) зафиксированы на низких частотах (от 63 до 200 Гц).

Таким образом, в помещениях №№ 2-П и 3-П реактивное поле формируется в широком диапазоне частот (до 2000 ÷ 2500 Гц), причём значения индекса «реактивности поля» достигает максимальных значений на низких частотах (ниже 160 ÷ 200 Гц). Чисто реактивное поле стоячих звуковых волн возбуждается на собственных частотах объёма помещения, причём на первых собственных частотах помещения интенсивность этого реактивного поля существенно возрастает.

Согласно результатам измерений, во всех трёх помещениях помимо активного поля звуковых волн возбуждается чисто реактивное поле стоячих звуковых волн, причём наиболее интенсивные компоненты этого поля возбуждаются на низких частотах: а именно на первых собственных частотах объёма помещения. Поле стоячих волн является чисто реактивным полем по своей физической природе. Это поле, в принципе, можно квалифицировать как шумовой фон помещения, который искажает результаты низкочастотных измерений акустической характеристики электродвигателя.

Как было отмечено выше, в области самых низких частот интенсивметрический зонд не может отличить чисто реактивное поле (поле стоячих волн) от активного акустического поля (поля звуковых волн), формирующегося в помещении.

На низких частотах частицы среды, которые колеблются в каждой точке реактивного поля стоячих волн (в том числе и в точках измерения, расположенных на измерительной поверхности), оказывают на мембрану микрофона такое же динамическое воздействие, как и пульсации давления в активном звуковом поле, которое формируется вследствие излучения структурного шума корпусом электродвигателя. Следовательно, реактивное поле стоячих волн, формирующееся в помещении, является источником систематической погрешности, искажающей результаты низкочастотных акустических измерений.

При определении акустической характеристики электродвигателя типа «SF-56-2B» (т. е. усреднённых по всей измерительной поверхности спектров интенсивности и мощности звука) электродвигатель был установлен в центре замкнутой измерительной поверхности № 1-Из (в форме прямоугольного параллелепипеда). При этом зонд устанавливался на расстоянии 0,175 м от цилиндрической корпусной конструкции электродвигателя.

Затем дополнительные измерения были проведены на измерительной поверхности № 2-Из (с габаритными размерами: 0,2 × 0,2 × 0,25 м). В этом случае расстояние от поверхности корпуса электродвигателя до интенсивметрического зонда составляло всего 0,025 м. Из сопоставления результатов измерений на измерительных поверхностях №№ 1-Из и 2-Из следует, что в диапазоне частот от 250 до 3150 Гц разность значений уровней звуковой мощности электродвигателя типа «SF-56-2B» варьируется в пределах от 0 до 2,0 дБ. В диапазоне частот от 63 до 200 Гц (длина волны  $\lambda_{зв}$  варьируется от 5,4 до 1,7 м) разность значений уровней звуковой мощности на этих двух измерительных поверхностях варьируется в пределах от 2 до 6 дБ.

В этом диапазоне частот (ниже 200 Гц) расстояние ( $r_{изм}$ ) от корпуса электродвигателя до измерительной поверхности № 1-Из (0,175 м), по крайней мере, в 10 раз меньше длины волны ( $\lambda_{зв} = 1,7$  м) на частоте 200 Гц, а для расстояния ( $r_{изм}$ ) до измерительной поверхности № 2-Из выполняется соотношение:  $r_{изм} \leq \lambda_{зв}/70$ . Согласно результатам расчётов и измерений, обе измерительные поверхности располагались в ближней зоне активного акустического поля, формирующегося при работе электродвигателя.

Причём, если измерительная поверхность № 1-Из располагалась в геометрической ближней зоне, то измерительная поверхность № 2-Из располагалась в гидродинамической ближней зоне акустического поля. Согласно результатам измерений на измерительных поверхностях №№ 1-Из и 2-Из, уровни звукового давления и интенсивности звука уменьшаются при перемещении зонда с поверхности № 2-Из на поверхность № 1-Из (т. е. при увеличении расстояния  $r_{изм}$  от корпуса электродвигателя до точки измерения с 25 до 175 мм). При этом зонд перемещается из гидродинамической ближней зоны (поверхность № 2-Из) в геометрическую ближнюю зону (поверхность № 1-Из) акустического поля электродвигателя.

Гидродинамическая ближняя зона расположена в непосредственной близости от корпуса электродвигателя. В диапазоне низких частот (ниже 200 Гц) в гидродинамической ближней зоне могут сформироваться поля пульсаций давления двух типов (а именно поле гидродинамических и поле акустических пульсаций давления), которым соответствуют реактивная и активная компоненты акустического поля, формирующегося в ближней зоне. Причём в гидродинамической ближней зоне уровни реактивной компоненты интенсивности существенно выше, чем уровни активной компоненты интенсивности.

При проведении низкочастотных измерений (ниже 100 Гц) уровней звукового давления в гидродинамической ближней зоне, в соответствии с [1], определяется суммарный уровень звукового давления ( $P_{\Sigma}$ ), соответствующий сумме активной и реактивной компонент акустического поля. Т. е. микрофон измеряет суммарную амплитуду давления, которая складывается из амплитуды давления в поле звуковых волн ( $P_S$ ) и из амплитуды пульсаций давления в поле неоднородных волн ( $P_{Pul}$ ):  $P_{\Sigma} = P_S + P_{Pul}$ .

В низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) на мембрану микрофона оказывают одинаковое воздействие как звуковые волны (звуковые колебания), так и гидродинамические (псевдозвуковые) пульсации давления, поэтому разделить активную и реактивную компоненты комплексного акустического поля с помощью стандартной методики измерений [1] невозможно. Именно вследствие существенного влияния систематической погрешности на результаты акустических измерений, в соответствии со стандартом [1], измерения шумовых характеристик машин проводятся только в дальней зоне акустического поля.

Как отмечено выше, для отдельного измерения активной и реактивной составляющих интенсивности звука в комплексном акустическом поле (которое формируется в гидродинамической ближней зоне) следует использовать метод акустической интенсивности. В области средних и высоких частот этот метод позволяет измерять как активную, так и реактивную составляющие интенсивности звука (в отдельности) с помощью специального двухмикрофонного зонда.

Однако, в области самых низких частот (ниже 100 Гц) реактивная компонента поля, представленная полем гидродинамических (псевдозвуковых) пульсаций давления в ближней зоне поля и реактивным полем стоячих звуковых волн (которое формируется во всём объёме помещения), воспринимается интенсивметрическим зондом также, как и активная компонента звукового поля. Поэтому при проведении интенсивметрических измерений в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) в ближней зоне акустического поля, формирующегося при работе электродвигателя, необходимо учитывать влияние на результаты измерений систематической погрешности.

Эта погрешность обусловлена воздействием на зонд реактивной компоненты акустического поля (т. е. поля гидродинамических пульсаций давления и поля стоячих звуковых волн, формирующихся в объёме помещения на первых собственных частотах). На низких частотах микрофон не может отличить динамическое воздействие, оказываемое на

мембрану активной компонентой интенсивности звука, от аналогичного воздействия на зонд, оказываемого реактивной компонентой интенсивности звука.

В диапазоне средних и высоких частот при работе электродвигателя возбуждаются изгибные колебания цилиндрического корпуса. В соответствии с теорией акустического излучения и результатами измерений, энергия этих изгибных колебаний корпуса электродвигателя трансформируется в энергию звуковых волн (структурного шума). Звуковые волны распространяются в дальней зоне акустического поля электродвигателя.

В результате многократных отражений этих волн от ограждающих поверхностей в помещении с жёсткими ограждающими конструкциями (в помещениях №№ 2-П и 3-П) формируется реверберационное (квазидиффузное) акустическое поле.

Согласно результатам интенсивметрических измерений и теоретического анализа процессов формирования акустических полей в помещениях, при проведении измерений акустических характеристик электродвигателя типа «SF-56-2B» в трёх помещениях (№№ 1-АК; 2-П; 3-П) в диапазоне частот от 200 до 3500 Гц разность значений уровней мощности звука в этих помещениях (на измерительной поверхности № 1-Из) варьируется в пределах 0,5 ÷ 2,5 дБ. Причём в камере (помещение № 1-АК) значения уровней звуковой мощности минимальны.

Согласно нормативным требованиям, сформулированным в стандарте [3], в этом случае погрешность измерений не превышает предельно допустимых значений (за исключением третьоктавных полос со среднегеометрическими частотами 630; 1000; 1600 и 2000 Гц, в которых погрешность превышает допустимое значение на 0,5 ÷ 1,0 дБ).

Следовательно, в области средних и высоких частот при измерении интенсивности звука реверберационное поле, формирующееся в помещении в результате отражений звуковых волн от ограждающих поверхностей помещения, не оказывает существенного влияния на результаты измерений, которые проводятся в ближней зоне акустического поля. Согласно результатам расчётов по формуле (3), размер зоны «прямого» поля  $r_{\text{прям}}$  для помещений №№ 1-АК; 2-П; 3-П равен, соответственно, 0,8; 0,85 и 0,45 м.

Следовательно, обе измерительные поверхности (№№ 1-Из и 2-Из) расположены в зоне «прямого» акустического поля. Поэтому результаты, полученные в заглушённой камере и в помещении с жёсткими ограждающими конструкциями и с существенно меньшими габаритными размерами, отличаются незначительно. Таким образом, при

проведении акустических измерений в ближней зоне акустического поля, влияние реверберационной компоненты акустического поля, формирующегося в помещении, незначительно, поскольку обе измерительные поверхности (№ 1-Из и № 2-Из) расположены в зоне «прямого» поля источника звука.

Исключение составляет низкочастотный диапазон, вследствие возбуждения собственных мод колебаний на первых собственных частотах объёма помещения.

В области низких частот (ниже 200 Гц) при проведении измерений необходимо учитывать влияние на результаты измерений систематических погрешностей измерений. Как отмечено выше, при проведении измерений в ближней зоне акустического поля в низкочастотной области систематические погрешности измерений обусловлены влиянием на результаты измерений реактивного поля гидродинамических пульсаций давления (формирующегося в ближней зоне) и чисто реактивного поля стоячих звуковых волн.

Таким образом, в области средних и высоких частот при использовании акустической интенсивиметрии [3] можно проводить измерения в ближней зоне акустического поля, причём влияние параметров помещения, в котором проводятся измерения, на результаты измерений незначительно. В области низких частот необходимо вводить поправки, учитывающие влияние систематических погрешностей на результаты измерений.

**Анализ результатов интенсивметрических измерений акустических характеристик электродвигателя специального назначения типа «ДА-37-2К».** Для оценки метрологических возможностей метода акустической интенсивиметрии при проведении испытаний электродвигателей специального назначения в полузаглушённой акустической камере (помещение № 1-АК) были проведены измерения акустических характеристик электродвигателя типа «ДА-37-2К». При проведении испытаний система водяного охлаждения обмоток электродвигателя типа «ДА-37-2К» не работала, поэтому основными источниками акустического шума, излучаемого при работе электродвигателя, являлись: цилиндрический корпус электродвигателя и подшипниковые узлы. Кроме того, при работе электродвигателя генерируется шум электромагнитного происхождения, обусловленный взаимодействием электромагнитных полей обмоток статора и ротора.

Основным источником шума является структурный («вибрационный» шум), который излучается при изгибных колебаниях корпуса электродви-

гателя. Эти изгибные колебания корпусной конструкции возбуждаются вследствие передачи на корпусную конструкцию динамических нагрузок, обусловленных вибрациями в подшипниковых узлах ротора электродвигателя и взаимодействием электромагнитных полей статора и ротора.

В рамках стандартных приёмо-сдаточных испытаний измерения акустических характеристик электродвигателя типа ДА-37-2К, в соответствии с требованиями технических условий ТАИК. 526612.002 ТУ, проводятся в акустической камере (т. е. в помещении № 1-АК) с использованием двухканального анализатора типа «SVAN 958». При этом измеряется спектр уровней звукового давления (в третьоктавных полосах частот) на измерительной поверхности, расположенной на расстоянии 1 м от поверхности корпуса электродвигателя. Этот спектр является официальной паспортной акустической характеристикой электродвигателя типа «ДА-37-2К». Исходя из результатов измерений уровней звукового давления, с использованием стандартной методики, приведённой в частности, в стандартах [1, 2], вычисляются уровни звуковой мощности электродвигателя.

Для оценки эффективности применения метода акустической интенсивиметрии для определения акустических характеристик электродвигателей типа «ДА-37-2К» в помещении № 1-АК (в акустической камере, параметры которой приведены в разделе выше) были проведены интенсивметрические измерения.

В результате интенсивметрических измерений с использованием двухмикрофонного интенсивметрического зонда (длина проставки между микрофонами – 25 мм) были определены уровни звукового давления на двух измерительных поверхностях (№ 1-И-ДА и № 2-И-ДА). В качестве измерительных поверхностей был использован прямоугольный параллелепипед с габаритными размерами: 0,75 × 0,75 × 0,9 м (поверхность № 1-И-ДА) и с размерами 1,4 × 1,4 × 1,4 м (поверхность № 2-И-ДА). Диаметр корпуса электродвигателя типа ДА-37-2К равен 0,4 м.

На основании результатов измерений уровней звукового давления в точках акустического поля, расположенных на измерительной поверхности, вычислялись уровни активной и реактивной компонент интенсивности звука, а затем, исходя из результатов расчётов уровней интенсивности звука, вычислялись уровни звуковой мощности. Для вычисления этих акустических характеристик было использовано специальное программное обеспечение, разработанное специалистами фирмы «LMS Siemens Business».

При проведении измерений на измерительной поверхности № 1-И-ДА расстояние от цилиндриче-



ского корпуса до измерительных точек, расположенных на измерительной поверхности, составляет 0,17 м. А при проведении измерений на измерительной поверхности № 2-И-ДА это расстояние составляет 0,5 м. Следовательно, измерительные поверхности (№ 1-И-ДА и № 2-И-ДА) расположены в ближней зоне акустического поля, соответственно, в диапазоне частот:  $f_1 \leq 2000$  Гц и  $f_2 \leq 630$  Гц.

Результаты интенсивметрических измерений акустических характеристик электродвигателя типа «ДА-37-2К» в помещении № 1-АК на измерительных поверхностях №№ 1-И-ДА и 2-И-ДА представлены в табл. 3.

Согласно результатам измерений, в диапазоне частот  $f \geq 160$  Гц разность усреднённых значений

уровней мощности звука ( $\Delta L_W$ ), измеренных на двух поверхностях (№№ 1-И-ДА и 2-И-ДА), не превышает 1 дБ (за исключением двух третьоктав со среднегеометрическими частотами 1000 и 2500 Гц, для которых разность  $\Delta L_W$  равна 3 и 2,5 дБ, соответственно). Однако в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 1000 и 2500 Гц разность значений уровней мощности ( $\Delta L_W$ )<sub>окт</sub> на двух измерительных поверхностях не превышает 1 дБ.

Следует отметить, что разность уровней звуковой мощности [ $(\Delta L_W)^A$ ;  $(\Delta L_W)^B$ ], измеренных на гранях А и Б этих двух измерительных поверхностей в третьоктаве со среднегеометрической частотой 2500 Гц, равна 1 дБ. На грани Б в третьоктаве со среднегеометрической частотой 1000 Гц разность  $(\Delta L_W)^B$  равна 0 дБ.

Таблица 3

**Сравнение результатов определения уровней звуковой мощности шума, излучаемого электродвигателем типа ДА-37-2К, на двух измерительных поверхностях №№ 1-И-ДА и 2-И-ДА**

Частота, $f$ , Гц	Результаты определения уровней звуковой мощности электродвигателя «ДА 37-2К» (дБ) в помещении № 1-АК на двух измерительных поверхностях								
	Уровни звуковой мощности (дБ), усреднённые по измерительной поверхности №№ 1-И-ДА и 2-И-ДА, и разность этих уровней			Уровни звуковой мощности (дБ), усреднённые по боковым граням (А и Б) измерительных поверхностей №№ 1-И-ДА и 2-И-ДА					
				Грань А (перпендикулярна к оси X)			Грань Б (перпендикулярна к оси Y)		
	$L_W^1$	$L_W^2$	$\Delta L_W$	$(L_W^A)_1$	$(L_W^A)_2$	$(\Delta L_W)^A$	$(L_W^B)_1$	$(L_W^B)_2$	$(\Delta L_W)^B$
№№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
63	26,0	23,0	3,0	11,5	22,5	11,0	13,0	19,0	6,0
80	25,5	30,0	4,5	21,0	24,0	3,0	18,0	22,5	4,5
100	43,0	43,0	0,0	37,0	42,0	5,0	38,0	33,5	4,5
125	26,0	30,0	4,0	21,0	21,0	0,0	19,5	14,5	5,0
160	42,0	43,0	1,0	34,0	33,0	1,0	35,5	36,5	1,0
200	48,0	47,5	0,5	42,0	40,0	2,0	44,0	42,5	1,5
250	45,0	45,5	0,5	39,0	39,0	0,0	39,5	39,0	0,5
315	45,0	44,5	0,5	39,0	38,5	0,5	39,0	39,0	0,0
400	52,5	52,5	0,0	43,0	43,5	0,5	43,0	44,5	1,5
500	48,0	48,0	0,0	38,0	39,0	1,0	38,0	41,0	3,0
630	46,0	47,0	1,0	35,5	37,5	2,0	35,0	38,0	3,0
800	46,0	45,5	0,5	40,0	39,0	1,0	37,5	37,5	0,0
1000	50,0	47,0	3,0	41,0	37,0	4,0	40,5	40,5	0,0
1250	49,0	49,5	0,5	43,0	43,0	0,0	40,5	42,0	1,5
1600	44,0	44,0	0,0	39,0	37,0	2,0	35,5	37,0	1,5
2000	48,5	49,5	1,0	44,5	43,0	1,5	39,0	41,0	2,0
2500	51,5	49,0	2,5	42,0	43,0	1,0	40,0	41,5	1,0
3150	38,5	39,0	0,5	31,5	32,0	0,5	29,5	31,0	1,5

На измерительной поверхности № 1-И-ДА (на расстоянии  $\Delta r = 0,17$  м от корпуса электродвигателя) в диапазоне средних частот (от 400 до 1000 Гц) разброс усреднённых значений уровней мощности звука на 5 гранях измерительной поверхности достигает 9 дБ. На измерительной поверхности № 2-И-ДА (на расстоянии  $\Delta r = 0,5$  м от корпуса электродвигателя) разброс усреднённых значений мощности звука не превышает 5,5 дБ.

Таким образом, в ближней зоне акустического поля по мере уменьшения расстояния  $\Delta r$  от корпуса электродвигателя до измерительной поверхности неоднородность поля несколько возрастает.

Согласно результатам измерений спектральных значений индекса «давление – интенсивность» ( $F_{pl}$ ), который квалифицируется как «индекс реактивности» поля, реактивное поле формируется в ближней зоне акустического поля электродвигателя преимущественно в низкочастотном диапазоне (ниже 200 Гц).

В табл. 3 использованы следующие условные обозначения:  $f$  – среднегеометрические частоты третьоктавных частотных полос, Гц;  $L_w^1$ ;  $L_w^2$  – усреднённые значения уровней звуковой мощности электродвигателя типа ДА 37-2К, измеренные, соответственно, на измерительных поверхностях №№ 1-И-ДА и 2-И-ДА;  $\Delta L_w^1$  – разность уровней звуковой мощности, измеренных на двух поверхностях:  $\Delta L_w^1 = L_w^1 - L_w^2$ ;  $(L_w^A)_1$  и  $(L_w^A)_2$ ;  $(L_w^B)_1$  и  $(L_w^B)_2$  – соответственно, усреднённые уровни звуковой мощности, измеренные на боковой грани А и на боковой грани Б поверхностей №№ 1-И-ДА и 2-И-ДА;  $(\Delta L_w^A)^A$  и  $(\Delta L_w^B)^B$  – разность уровней звуковой мощности, измеренных на двух измерительных поверхностях (№№ 1-И-ДА и 2-И-ДА), соответственно, на гранях А и Б этих поверхностей:  $(\Delta L_w^A)^A = (L_w^A)_1 - (L_w^A)_2$ ;  $(\Delta L_w^B)^B = (L_w^B)_1 - (L_w^B)_2$ .

В низкочастотном диапазоне (ниже 160 Гц) на результаты измерения оказывает существенное влияние систематическая погрешность, обусловленная формированием чисто реактивного поля стоячих звуковых волн на первых собственных частотах объёма помещения.

В соответствии с результатами измерений (табл. 3), в диапазоне низких частот (63 ÷ 125 Гц) в третьоктавных спектрах уровней звуковой мощности ( $L_w^1$  и  $L_w^2$ ), определённых в результате измерений на двух измерительных поверхностях, выявлены резонансные максимумы. Эти максимумы соответствуют первым

собственным частотам объёма помещения. Вследствие формирования реактивного поля стоячих звуковых волн в этом диапазоне частот (ниже 125 Гц) величина систематической погрешности при определении уровней мощности звука достигает 4,5 дБ.

Как было отмечено выше на самых низких частотах микрофон не может различить активную и реактивную компоненты акустического поля. Поэтому на низких частотах чисто реактивное поле собственных частот помещения № 1-АК воспринимается интенсивметрическим зондом также, как активная компонента поля. Вследствие этого в спектре мощности звука выделяются низкочастотные резонансные максимумы (в диапазоне частот 63 ÷ 125 Гц), которые воспринимаются зондом как активная компонента акустического поля (несмотря на реактивную физическую природу этих резонансов, которые возбуждаются в чисто реактивном поле стоячих звуковых волн).

Результаты интенсивметрических измерений (с использованием четырёхканального анализатора типа «Scadas Mobile») были сопоставлены с результатами измерений уровней звукового давления с помощью анализатора типа «SVAN 958» (проведённых в соответствии со стандартом [2] и отраслевой методикой измерений). Уровни интенсивности и звуковой мощности электродвигателя типа ДА 37-2К были определены в результате измерений, проведённых на измерительной поверхности № 1-И-ДА.

Из сопоставления результатов определения спектральных уровней звуковой мощности электродвигателя типа ДА 37-2К следует, что при использовании акустической интенсивметрии в диапазоне частот  $f \geq 200$  Гц значения уровней звуковой мощности меньше на 1 ÷ 4 дБ, чем при измерении уровней звукового давления (в соответствии со стандартом [2]). В низкочастотном диапазоне ( $f \leq 160$  Гц) значения уровней звуковой мощности, определённые интенсивметрическим методом [3, 4], на 6 – 22 дБ ниже уровней мощности, измеренных в соответствии со стандартом [2].

Таким образом, уровни звуковой мощности электродвигателя типа ДА 37-2К, которые были определены на основании результатов измерений уровней звукового давления в помещении № 1-АК (на основании стандарта [2]), оказались завышенными (во всем диапазоне частот) по сравнению с уровнями звуковой мощности, определёнными с использованием интенсивметрических измерений (на основании стандарта [3]).

Этот результат обусловлен весьма существенным влиянием акустического поля помещения (по-

ля стоячих звуковых волн), которое формируется при работе электродвигателя, на результаты определения уровней звуковой мощности электродвигателя с использованием стандарта [3]. При проведении интенсивметрических измерений на измерительной поверхности с помощью двухмикрофонного зонда измеряются уровни звукового давления в двух точках комплексного акустического поля, а затем вычисляются спектральные значения градиентов фазы и давления. Затем, с помощью формул (7, а и 7, б) вычисляются значения активной и реактивной компонент интенсивности звука и, исходя из значения активной компоненты интенсивности звука, с помощью формулы (5) вычисляется спектральное значение мощности звука.

Однако при определении уровня звукового давления в активном звуковом поле результат измерений на низких частотах (ниже 100 Гц) искажается, вследствие весьма существенного влияния систематической погрешности на результаты измерений. При проведении измерений в комплексном акустическом поле на микрофон оказывают практически одинаковое динамическое воздействие (давление) и активное звуковое поле (т. е. звуковые волны) и чисто реактивное поле стоячих звуковых волн.

Поэтому микрофон измеряет суммарный уровень звукового давления, обусловленный одновременным воздействием на микрофон этих двух акустических полей: активного звукового поля и чисто реактивного поля стоячих волн. Следовательно, на anomalно низких частотах с помощью интенсивметрии невозможно корректно измерить акустическую характеристику электродвигателя, поскольку результат измерений искажается низкочастотной систематической погрешностью, обусловленной формированием в объёме помещения чисто реактивного поля стоячих звуковых волн.

При работе источника звука (электродвигателя) в помещении № 1-АК в низкочастотном диапазоне (ниже 200 Гц) формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн (на первых собственных частотах помещения), а на более высоких частотах формируется реверберационная компонента акустического поля (за счёт многократных отражений звуковых волн от ограждающих поверхностей помещения). Кроме того, при работе электродвигателя в ближней зоне акустического поля формируется реактивное поле гидродинамических (псевдозвуковых) пульсаций давления. Следует отметить, что размер измерительных поверхностей № 1-И-ДА и № 2-И-ДА меньше размера зоны «прямого» звукового поля в помещении, поэтому реверберационная компонента акустического поля не оказывает существенного влияния на результаты измерений.

В области низких частот (ниже 200 Гц) при проведении измерений необходимо учитывать влияние на результаты измерений систематических погрешностей измерений. Как было отмечено выше, при проведении измерений в ближней зоне акустического поля в низкочастотной области систематические погрешности измерений обусловлены влиянием на результаты измерений реактивного поля гидродинамических пульсаций давления (формирующегося в ближней зоне) и реактивного поля стоячих звуковых волн.

Таким образом, в области средних и высоких частот ( $f \geq 200 \div 250$  Гц) при использовании метода акустической интенсивметрии (в соответствии со стандартом [3]) можно проводить измерения в ближней зоне акустического поля, причём влияние параметров помещения, в котором проводятся измерения, на результаты измерений незначительно. В области низких частот (ниже 100 Гц) необходимо вводить поправки, учитывающие влияние систематических погрешностей на результаты измерений.

### Заключение

1. На основании результатов экспериментальных исследований метрологических возможностей метода акустической интенсивметрии ([3]) установлено, что при проведении акустических испытаний электродвигателей этот метод позволяет получить дополнительную информацию (по сравнению с методами, рассмотренными в стандартах [1, 2]). В частности, с помощью интенсивметрии можно определить спектральные характеристики комплексного акустического поля на основе результатов измерений активной и реактивной компонент интенсивности звука в акустическом поле.

2. В качестве основного критерия метрологических возможностей акустической интенсивметрии используются спектральные значения систематических погрешностей измерений. Для оценки влияния систематических погрешностей на результаты измерений на первом этапе было проведено тестирование трёх помещений (полузаглушённой акустической камеры и двух помещений с жёсткими ограждающими конструкциями) с использованием образцового источника шума типа ОИШ-МВ-1.

3. В соответствии с результатами тестирования при проведении интенсивметрических измерений влияние помещения на результаты измерений акустических характеристик образцового источника шума во всём нормируемом диапазоне частот оказалось незначительным (меньше допустимого значения погрешности измерений, установленного стандартом [3]).

Из сопоставления паспортной характеристики образцового источника шума с результатами измерений в трёх помещениях следует, что в диапазоне частот от 100 до 1250 Гц различия между паспортными значениями и значениями уровней мощности звука, измеренными в трёх помещениях, незначительны.

В низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) паспортные значения уровней звуковой мощности источника звука типа ОИШ-МВ-1 существенно превышают значения уровней мощности, измеренные в трёх помещениях. В соответствии с результатами теоретического анализа физических механизмов формирования низкочастотного акустического поля в помещении, в низкочастотной области при определении паспортной характеристики источника звука (на основе стандарта [1]) систематическая погрешность измерений обусловлена реактивными акустическими полями, которые возбуждаются в объёме помещения. А именно возбуждением чисто реактивного поля стоячих звуковых волн (на первых собственных частотах объёма помещения), а также формированием в ближней зоне источника звука реактивного поля гидродинамических пульсаций давления.

При измерении уровней звукового давления [1] в области низких частот (ниже 100 Гц) измерительный микрофон не может различить (дифференцировать) активную и реактивную компоненты комплексного акустического поля. При формировании обеих этих компонент (независимо от их физической природы) пульсации давления (соответственно звуковые и псевдозвуковые) оказывают давление на мембрану микрофона, размещённого в измерительной точке.

При этом на низких частотах (ниже 100 Гц) в точках измерения, расположенных в ближней зоне комплексного акустического поля, не существует каких-либо признаков, по которым мембрана микрофона может отличить активную компоненту этого комплексного поля от реактивной компоненты.

Поэтому микрофон измеряет суммарную характеристику комплексного акустического поля и измеренные низкочастотные значения уровней звукового давления, соответствующие измерениям только в активном звуковом поле, на самом деле оказываются завышенными, поскольку микрофон измеряет суммарный уровень звукового давления в комплексном акустическом поле.

В то же время при проведении интенсиметрических измерений, благодаря учёту фазовых характеристик акустического поля, можно измерить по отдельности интенсивность звука, соответствующую как активной компоненте комплексного поля,

так и реактивной компоненте поля. Вычисление значений индекса «давление – интенсивность» обеспечивает возможность определения степени реактивности комплексного акустического поля.

Однако на низких частотах (ниже 100 Гц) результаты интенсиметрических измерений искажаются, вследствие весьма существенного влияния на результаты измерений систематической погрешности. Появление этой погрешности обусловлено, прежде всего, формированием в объёме помещения (на его первых собственных частотах) чисто реактивного поля стоячих звуковых волн. При проведении низкочастотных измерений с помощью микрофона можно измерить только суммарный уровень звукового давления, обусловленный одновременным воздействием на мембрану микрофона двух акустических полей: комплексного акустического поля источника звука (электродвигателя) и чисто реактивного поля стоячих звуковых волн. На низких частотах устранить влияние на результаты интенсиметрических измерений поля стоячих волн, оказывающего дополнительное воздействие на микрофон, невозможно.

Влияние шумового фона (который возбуждается посторонними источниками шума) на результаты измерений может быть существенно ослаблено благодаря учёту фазовой характеристики акустического поля при определении усреднённого значения уровней интенсивности звука на измерительной поверхности.

4. Результаты тестирования помещений (с использованием образцового источника шума) были использованы при анализе результатов определения акустических характеристик электродвигателей общего и специального назначения.

Акустические характеристики электродвигателя типа «SF-56-2В» были измерены в трёх помещениях. Согласно результатам измерений, при определении уровней мощности в области средних и высоких частот в этих помещениях различия в результатах незначительны.

В низкочастотном диапазоне (ниже 200 Гц) в спектре звуковой мощности выделяются резонансные максимумы, появление которых обусловлено возбуждением мод собственных колебаний объёма помещения. При этом в помещении формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн.

Кроме того, в диапазоне низких частот в гидродинамической ближней зоне, расположенной в непосредственной близости от корпуса электродвигателя, формируются поля пульсаций давления двух типов, а именно поле гидродинамических и поле акустических пульсаций давления. Этим по-



лям соответствуют реактивная и активная компоненты акустического поля, формирующегося в ближней зоне источника звука. Причём в гидродинамической ближней зоне уровни реактивной компоненты интенсивности существенно выше, чем уровни активной компоненты интенсивности.

В области низких частот необходимо вводить поправки, учитывающие влияние систематических погрешностей на результаты измерений. При проведении измерений в ближней зоне акустического поля в низкочастотной области систематические погрешности измерений обусловлены влиянием на результаты измерений чисто реактивного поля стоячих звуковых волн и реактивного поля гидродинамических пульсаций давления, формирующегося в ближней зоне.

5. Акустические характеристики электродвигателя типа «ДА 37-2К» (специального назначения) были измерены в акустической камере на двух измерительных поверхностях, расположенных в ближней зоне акустического поля. Согласно результатам измерений, в диапазоне частот  $f \geq 160$  Гц разность усреднённых значений уровней мощности звука ( $\Delta L_w$ ), измеренных на двух измерительных поверхностях незначительна.

Согласно результатам измерений спектральных значений индекса «давление – интенсивность» («индекса реактивности» акустического поля), реактивное поле формируется в ближней зоне акустического поля электродвигателя, преимущественно в низкочастотном диапазоне (ниже 200 Гц).

На основании анализа результатов измерений установлено, что в низкочастотном диапазоне (ниже 200 Гц) на результаты измерения оказывает существенное влияние систематическая погрешность, обусловленная формированием в объёме помещения (на первых собственных частотах объёма) чисто реактивного поля стоячих звуковых волн.

Кроме того, в ближней зоне источника звука (электродвигателя) формируется поле пульсаций давления, состоящее из активной и реактивной компонент. При измерении уровней звукового давления анализатор суммирует активную и реактивную компоненты поля, поскольку мембрана не может дифференцировать давление в активном поле и давление в реактивном поле.

Паспортные уровни звуковой мощности шума, излучаемого электродвигателем типа ДА 37-2К, определённые на основании результатов низкочастотных измерений уровней звукового давления (в соответствии со стандартом [2]), оказались завышенными по сравнению с уровнями звуковой мощности, определёнными на основании результатов интенсивметрических измерений.

## Выводы

1. Метод акустической интенсивметрии обеспечивает возможность повышения точности низкочастотных измерений акустических характеристик электродвигателей (по сравнению с методом, установленным стандартом [1]). Метод позволяет измерить по отдельности интенсивность звука, соответствующую активной и реактивной компонентам комплексного акустического поля.

2. При проведении низкочастотных интенсивметрических измерений акустических характеристик электродвигателей в ближней зоне акустического поля основным источником систематических погрешностей являются реактивные акустические поля, формирующиеся в измерительном помещении.

Систематические погрешности обусловлены, прежде всего, формированием реактивного поля стоячих звуковых волн на первых собственных резонансных частотах объёма помещения и, кроме того, формированием чисто реактивного поля гидродинамических (псевдозвуковых) пульсаций давления. Это поле возбуждается в ближней зоне источника звука (электродвигателя), в результате трансформации энергии изгибных колебаний корпуса электродвигателя в энергию колебаний частиц среды.

3. Систематические погрешности измерений оказывают существенное влияние на результаты интенсивметрических измерений в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц). В области средних и высоких частот акустические поля, формирующиеся в помещении, не оказывают существенного влияния на результаты измерений акустических характеристик электродвигателей.

## Литература

1. ГОСТ ISO 3745-2014 Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Точные методы для заглушенных и полузаглушенных камер. – Взамен ГОСТ 31273-2003; введ. 01.11.2015. – М. : Стандартинформ, 2015. – 55 с.
2. ГОСТ Р ИСО 3744-2013 Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Технический метод в существенно свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью. – Взамен ГОСТ Р 51401-99; введ. 01.12.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 60 с.
3. ГОСТ 30457-97 (ИСО 9614-1-93) Акустика. Определение уровней звуковой мощности источников шума на основе интенсивности звука. Измерение в дискретных точках. Технический метод. – Введён впервые; введ. 01.01.1999. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 15 с.
4. Fahy F. J. Sound Intensity. – Second Edition / F. J. Fahy. – London : E&FN Spon, 1995.
5. Разработка отраслевой методики определения акустических характеристик изделий специального назначения с

использованием метода акустической интенсивиметрии. Часть 1. Анализ метрологических возможностей интенсивиметрической аппаратуры при определении акустических характеристик изделия: ТАИК 001226.443 / Захаренко А. Б., Шматков А. В., Зубренков Б. И., Либерман М. Ю. [и др.] // Технический отчет. – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017.

6. ГОСТ 27243-2005 (ИСО 3747: 2000) Шум машин. Определение уровней звуковой мощности по звуковому давлению. Метод сравнения на месте установки. – Взамен ГОСТ 27243-87; введ. 01.01.2007. – М. : Стандартинформ, 2006. – 18 с.

7. Либерман М. Ю. Исследование некоторых механизмов генерации широкополосного шума при работе центробежных вентиляторов // Сборник трудов XVIII сес-

сии Российского акустического общества. Том II. – М. : ГЕОС, 2006. – С. 22 – 25.

8. Либерман М. Ю. Методические основы акустического проектирования систем воздушного охлаждения электрических машин / М. Ю. Либерман // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 110. – № 3. – С. 15 – 24.

9. Смольяков А. В. Шум турбулентных потоков / А. В. Смольяков. – СПб. : ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2005. – 312 с.

10. Mann III J. A., Tichy J. Acoustic intensity analysis: Distinguishing energy propagation and wave front propagation // J. Acoust. Soc. Am. – 1991. – V. 90. – P. 20 – 25.

Поступила в редакцию 22.01.2018

*Владимир Яковлевич Геча, доктор технических наук, заместитель генерального директора, т. (495) 365-26-69.  
Михаил Юдимович Либерман, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 366-21-10.  
Александр Валентинович Шматков, начальник лаборатории, т. (495) 366-21-01.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

## INVESTIGATION OF METROLOGICAL EFFICIENCY OF ACOUSTIC INTENSIMETRY AT DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF COMPLEX ACOUSTIC FIELDS GENERATED IN PRODUCTION FACILITIES DURING ELECTRIC MOTORS TESTING. PART 2

V. Ia. Gecha, M. Iu. Liberman, A. V. Shmatkov

*The article presents the results of experimental investigation of metrological capabilities of the acoustic intensimetry method at determination of acoustic characteristics of general and special-purpose electric motors. At the first stage the check of rooms where enterprise products are tested using a reference noise source calibrated in an acoustic anechoic chamber has been performed. On the basis of the analysis of the results of intensimetric measurements performed within the framework of acoustic testing of two electric motors (of general and special purposes), the main sources of systematic errors of the intensimetric method of measurements in the low-frequency band have been identified. According to the results of evaluation of comparative efficiency of the acoustic intensimetry method (as compared to the methods based on sound pressure level measurements), it has been determined that intensimetric measurements ensure the possibility to enhance the accuracy of acoustic measurements.*

**Key words:** active and reactive components of sound intensity, pseudosonic pressure pulsations, sound power levels, reactive acoustic field of standing waves, two-microphone intensimetric probe, measuring surface, systematic errors of measurements.

### References

1. GOST ISO 3745-2014 Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms. – Instead of GOST 31273-2003; established on 01.11.2015. – М. : Standartinform, 2015. – 55 p.
2. GOST R ISO 3744-2013 Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane. – Instead of GOST R 51401-99; established on 01.12.2014. – М. : Standartinform, 2014. – 60 p.
3. GOST 30457-97 (ISO 9614-1-93) Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity. Measurement at discrete points. Engineering method. – Established for the first time; established on 01.01.1999. – М. : ИПК Publishing House of Standards, 1998. – 15 p.
4. Fahy F. J. Sound Intensity. – Second Edition / F. J. Fahy. – London : E&FN Spon, 1995.
5. Development of industry procedure for determination of acoustic characteristics of special-purpose products using the acoustic intensimetry method. Part 1. Analysis of metrological capabilities of intensimetric equipment at determination of product acoustic characteristics: ТАИК 001226.443 / Zakharenko A. B., Shmatkov A. V., Zubrenkov B. I., Liberman M. Iu. [et al.] // Technical Report. – М. : 'VNIIEM Corporation' JC, 2017.

6. GOST 27243-2005 (ISO 3747: 2000) Noise of machines. Determination of sound power levels using sound pressure. Comparison method at site. – Instead of GOST 27243-87; established on 01.01.2007. – М. : Standartinform, 2006. – 18 p.
7. Liberman M. Iu. Investigation of some mechanisms of broad-band noise generation during the operation of radial fans // Collected proceedings of XVIII<sup>th</sup> session of the Russian Acoustic Society. Volume II. – М. : GEOS Publishing House, 2006. – Pp. 22 – 25.
8. Liberman M. Iu. Methodological principles of acoustic design of air cooling systems for electrical machines / M. Iu. Liberman // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – М. : FSUE 'NPP VNIIEEM', 2009. – V. 110. – No. 3. – Pp. 15 – 24.
9. Smoliakov A. V. Turbulent flow noise / A. V. Smoliakov. – St. Petersburg : Krylov Central Scientific Research Institute, 2005. – 312 p.
10. Mann III J. A., Tichy J. Acoustic intensity analysis: Distinguishing energy propagation and wave front propagation // J. Acoust. Soc. Am. – 1991. – V. 90. – P. 20 – 25.

*Vladimir Iakovlevich Gecha, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Deputy Director General, tel.: +7 (495) 365-26-69.*

*Mikhail Iudimovich Liberman, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, tel.: +7 (495) 366-21-10,*

*Aleksandr Valentinovich Shmatkov, Head of Laboratory, tel.: +7 (495) 366-21-01.*

*(JC «VNIIEEM Corporation»).*