

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИМЕТРИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ЧАСТЬ 1

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

Представлены результаты экспериментальных исследований метрологических возможностей метода акустической интенсивности 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 интенсивметрических измерений, проведённых в рамках акустических испытаний двух электродвигателей (общего и специального назначения) выявлены основные источники систематических погрешностей интенсивметрического метода измерений в диапазоне низких частот. Согласно результатам оценки сравнительной эффективности метода акустической интенсивности 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 интенсивметрический зонд, измерительная поверхность, систематические погрешности измерений.

Введение

Как известно, для проведения приёмо-сдаточных измерений акустических характеристик электродвигателей общего назначения (в частности, для определения паспортной акустической характеристики при проведении испытаний головного образца электродвигателя) обычно используются международные стандарты [1, 2]. Эти стандарты устанавливают правила проведения измерений акустических характеристик электродвигателя с заданной степенью точности (а именно точный [1] и инженерный [2] методы измерений). В соответствии с этими стандартами [1, 2], измеряемой величиной является звуковое давление, а в качестве шумовой характеристики электродвигателя используется спектр звуковой мощности акустического излучения. Этот спектр вычисляется (исходя из результатов измерения уровней звукового давления) с помощью методики расчёта, приведённой в [1, 2].

Кроме того, для проведения испытаний электродвигателей специального назначения (в частности, морских электродвигателей типа ДА 37-2К) разработаны эксклюзивные отраслевые методики измерений. В соответствии с этими методиками, измеряемой величиной, которая нормируется в ТУ, являются спектральные уровни звукового давления, в отличие от стандартов [1, 2], которыми установлено, что в качестве акустической характеристики машины (электродвигателя) следует определять спектральные уровни звуковой мощности акустического шума, излучаемого машиной.

Точный метод акустических измерений [1] может быть реализован на практике в заглушённых акустических камерах и на открытых площадках. Инженерный метод измерений [2] реализуется в помещениях, в которых при работе электродвигателя формируется «существенно свободное» акустическое поле. Такое «существенно свободное» поле формируется, в частности, в полузаглушённых акустических камерах со звукоотражающим полом (либо в практически пустых помещениях с большими габаритными размерами).

Таким образом, при использовании стандартных методов измерений [1, 2] высокая точность измерений может быть обеспечена только в специализированных помещениях, которые проектируются для проведения измерений. Практическая реализация этих методов [1, 2] сопряжена с существенными материальными затратами.

В качестве альтернативного метода акустических измерений для определения акустических характеристик машин (а именно спектра звуковой мощности акустического шума, излучаемого машиной) может быть использован метод акустической интенсивности. Этот метод заключается в измерении уровней интенсивности звука (вместо измерения уровней звукового давления [1, 2] в волне, распространяющейся в объёме измерительного помещения).

При измерении уровней интенсивности звука определяются энергетические характеристики акустического поля (вместо волновых характеристик,

которые измеряются при использовании стандартных методов [1, 2]). Интенсиметрические измерения в дискретных точках измерительной поверхности (на основе технического метода измерений) проводятся в соответствии с русифицированной версией международного стандарта ISO 9614 [3], введённого в действие в РФ с 01.01.1999.

Однако, спустя 18 лет после введения в действие международного стандарта [3], метод акустической интенсиметрии так и не получил широкого распространения в РФ (в зарубежных странах применение этого метода в практике инженерных акустических измерений также ограничено). По-видимому, широкому применению этого метода в инженерной практике препятствуют, прежде всего, два его основных недостатка. Этот метод более трудоёмок (по сравнению с методами [1, 2], основанными на измерении давления звука); а также для корректного измерения интенсивности звука необходима существенно более высокая квалификация специалистов в области прикладной акустики.

В то же время, согласно результатам теоретического анализа и экспериментальных исследований [4, 5] (с использованием современной интенсиметрической аппаратуры), применение метода акустической интенсиметрии позволяет существенно увеличить объём информации о характеристиках акустических полей, формирующихся при работе испытываемых машин. С помощью этого метода можно, в частности, исследовать характеристики направленности акустического излучения машин, а также структуру комплексных акустических полей в области не только дальнего, но и ближнего акустического поля (в области гидродинамического и геометрического ближнего поля).

В соответствии с изложенным, исследования, направленные на разработку инженерной методики применения метода акустической интенсиметрии в инженерной практике, весьма актуальны. Применение метода акустической интенсиметрии позволит, в частности, расширить метрологические возможности предприятия за счёт использования для проведения измерений обычных производственных помещений общего назначения (вместо строительства специализированных акустических камер).

В данной работе рассмотрены возможности эффективного применения метода акустической интенсиметрии в инженерной практике, а именно в случае, когда для проведения измерений акустических характеристик электродвигателей используются производственные помещения с различными акустическими характеристиками. Чтобы оценить метрологические возможности метода акустиче-

ской интенсиметрии для проведения измерений были выбраны пять помещений, которые различались весьма существенно как по габаритным размерам, так и по эквивалентной площади звукопоглощения в них.

Основной целью данной работы является оценка метрологических возможностей метода акустической интенсиметрии в инженерной практике и определение основных источников систематических погрешностей, характерных для этого метода измерений.

Формирование акустических полей машин в помещениях

При проведении приёмо-сдаточных испытаний измерения акустических характеристик электродвигателей (как общепромышленных, так и специального назначения) обычно проводятся в специализированных измерительных помещениях.

При этом результаты измерений акустических характеристик электродвигателей в общем случае зависят как от эффективности излучения акустического шума электродвигателем, так и от метрологических характеристик помещения, в котором проводятся измерения. Поэтому для определения паспортной шумовой характеристики электродвигателя необходимо либо проводить измерения в помещении, влияние которого на результаты измерений незначительно, либо использовать специальные поправки, с помощью которых учитывается влияние данного помещения на результаты измерений. Значения этих поправок определяются расчётным путём на основе теории акустики помещений.

С помощью расчётных формул, выведенных на основе этой теории (акустики помещений) описываются процессы формирования акустического поля в помещениях в зависимости, как от акустической характеристики электродвигателя, так и от параметров помещения [1, 2].

Как известно, при излучении звуковых волн машиной, размещённой в свободном пространстве или в заглушённой акустической камере, формируется свободное акустическое поле. Структура этого свободного поля определяется физическим механизмом формирования поля. При этом акустическое поле подразделяют на ближнюю и дальнюю зоны поля с принципиально различной структурой (т. е. распределением уровней давления в объёме зоны). Структура акустического поля зависит от физических механизмов генерации акустического излучения источниками звука.

Акустический шум может генерироваться источниками звука двух принципиально различных

типов: источниками шума аэродинамического происхождения и источниками структурного («вибрационного») шума.

При работе электродвигателя в принципе генерируется как структурный шум (при изгибных колебаниях корпусной конструкции электродвигателя), так и аэродинамический шум (излучаемый при работе системы воздушного охлаждения обмоток электродвигателя).

В рамках данной работы исследования эффективности интенсиметрических измерений проводились при использовании в качестве испытываемого объекта источников звука обоих типов (излучающих, соответственно, либо шум аэродинамического происхождения, либо структурный шум).

Шум аэродинамического происхождения генерируется вследствие вихреобразования при отрыве пограничного слоя от обтекаемой воздушным потоком поверхности. В частности, вентиляционный шум генерируется при отрыве пограничного слоя от поверхности межлопаточных каналов рабочего колеса вентилятора. Отрыв пограничного слоя сопровождается вихреобразованием, а затем турбулентный вихревой поток генерирует шум аэродинамического происхождения (с широкополосным спектром).

Структурный шум генерируется вследствие передачи колебательной энергии от вибрирующей поверхности источника звука к частицам воздуха, которые непосредственно прилегают к поверхности источника звука. В результате процесса передачи колебательной энергии между соседними частицами воздуха звуковая волна распространяется в пространстве.

При излучении акустического шума электродвигателем, установленным на открытой площадке (или в заглушенной звукомерной камере), структура акустического поля определяется в соответствии с теорией акустического излучения. В частности, при изгибных колебаниях корпусной конструкции электродвигателя излучение «структурного» (или «вибрационного») шума обусловлено трансформацией энергии вибрационных (изгибных) колебаний конструктивного элемента в энергию колебаний частиц воздушной среды, непосредственно прилегающей к корпусной конструкции.

Одной из основных характеристик акустического поля, которое формируется в свободном пространстве, является акустическая энергия: кинетическая и потенциальная. Мгновенные значения плотности кинетической (w_{kin}) и потенциальной (w_{pot}) энергии акустического поля вычисляются с помощью известных выражений:

$$w_{pot} = p^2(t) / (2\rho_0 c_0^2), \quad (1)$$

$$w_{kin} = \rho_0 u^2(t) / 2, \quad (2)$$

где $p(t)$ – звуковое (колебательное) давление; $u(t)$ – колебательная скорость частиц воздуха; ρ_0 , c_0 – плотность и скорость распространения звуковых волн в воздухе.

Энергетическая характеристика акустического поля («уровень звуковой энергии») может быть определена в соответствии со стандартами [1, 2], однако реализация методики, включённой в эти стандарты, в инженерной практике сопряжена с некоторыми метрологическими проблемами. Поэтому на практике предпочтительнее использовать метод акустической интенсиметрии [3] для определения энергетических характеристик акустического поля.

При моделировании процесса излучения «структурного» шума корпусом ГО частотный диапазон разбивается на 2 поддиапазона «критической частотой» (f_C), на которой длина изгибной волны в конструкции равна длине звуковой волны в воздухе.

Критическая частота (f_C) разделяет частотный диапазон на 2 области с принципиально различным характером излучения структурного шума, а именно области «быстрых» и «медленных» акустических мод.

В высокочастотном диапазоне (в области «быстрых акустических мод») длина звуковой волны в воздухе меньше длины изгибной волны в корпусе ГО, поэтому вибрирующий корпус обтекателя эффективно излучает звуковые волны и в дальней зоне акустического поля (зоне дифракции Фраунгофера) формируется поле цилиндрических или сферических звуковых волн. Причём эффективность излучения структурного шума в этом диапазоне частот практически не зависит от частоты (коэффициент излучения звука конструктивным элементом равен примерно 1).

В дальней зоне акустического поля сдвиг фаз между колебательной скоростью частиц воздуха и звуковым давлением равен 0, поэтому частицы воздуха перемещаются по линейной траектории (в направлении распространения звуковых волн).

Как известно, в низкочастотном диапазоне эффективность излучения звуковых волн существенно снижается, поскольку для «медленных мод» длина звуковой волны в воздухе больше, чем длина изгибной волны в конструктивном элементе, который излучает «структурный» шум (звуковые волны). Вследствие этого, за период колебаний происходит взаимная компенсация пульсаций давления, которые возбуждаются смежными участками конструкции, колеблющимися в противофазе. Поэтому

звуковые волны не излучаются, и для однородной безграничной конструкции имеет место так называемое «акустическое или гидродинамическое короткое замыкание». В результате этого явления вибрационная энергия трансформируется не в энергию звуковых волн, а в энергию пульсаций давления (т. е. в колебательную энергию).

В соответствии с теорией акустического излучения [4, 5], акустическое поле подразделяется на ближнюю и дальнюю зоны, кроме того, ближняя зона подразделяется на гидродинамическую и геометрическую ближние зоны. Гидродинамическая ближняя зона непосредственно примыкает к источнику звука, излучающему «структурный» шум, а геометрическая ближняя зона расположена за гидродинамической ближней зоной.

В области низких частот из ближней («безваттной») зоны акустического поля энергия пульсаций давления не передаётся в дальнюю зону акустического поля, а просто плавно перетекает вдоль поверхности конструкции между колеблющимися в противофазе участками конструкции (при этом расстояние между узловыми линиями в источнике структурного звука меньше половины длины звуковой волны в воздухе).

Формирование акустического поля в гидродинамической ближней зоне обусловлено гидродинамическими пульсациями (флюктуациями) давления около поверхности источника структурного звука. Пульсации давления возбуждаются вследствие изгибных колебаний источника структурного звука на низких частотах. Энергия этих колебаний передаётся прилегающим частицам воздуха. В результате трансформации вибрационной энергии в энергию пульсаций давления в гидродинамической ближней зоне формируется чисто реактивное акустическое поле.

Однако на практике источник структурного шума (пластина или оболочка, в которой возбуждаются изгибные колебания) всегда имеет конечные размеры. Поскольку на краевых участках пластины (оболочки) пульсации давления не компенсируются противофазными колебаниями соседнего участка (так как соседнего участка просто не существует), то краевые участки пластины (оболочки) излучают звуковые волны.

Таким образом, за счёт акустического излучения краевых участков формируется активная компонента акустического поля пластины (оболочки). Следовательно, в реальных условиях энергия изгибных колебаний пластины трансформируется в энергию комплексного акустического поля. В этом комплексном поле акустическая энергия распределена между двумя компонентами (активной и реактивной).

Гидродинамическая ближняя зона формируется в области низких частот, когда источник звука излучает «медленные» акустические моды (у которых частота собственных колебаний ниже критической: $f \leq f_{Cr}$). В диапазоне частот, превышающих критическую частоту f_{Cr} , около вибрирующей поверхности источника звука формируется геометрическая ближняя зона акустического поля (зона дифракции Френеля).

В гидродинамической ближней зоне уравнение Гельмгольца трансформируется в уравнение Лапласа (с помощью которого описываются колебательные процессы в несжимаемой среде): $\Delta\varphi(r) = 0$. Как известно, в несжимаемой среде не могут возбуждаться упругие волны (волны сжатия/разрежения) и звуковое давление $P(r, \omega) = 0$.

В докритическом диапазоне частот около вибрирующей поверхности источника звука амплитуда звукового давления во много раз меньше амплитуды колебательной скорости, причём сдвиг фаз $\Delta\vartheta$ между давлением и колебательной скоростью в гидродинамической ближней зоне составляет:

$\Delta\vartheta \approx 90^\circ$. Вследствие этого сдвига фаз частицы воздуха в гидродинамической ближней зоне перемещаются по эллиптической траектории. При таком сдвиге фаз ($\Delta\vartheta \approx 90^\circ$) колебания частиц среды сопровождаются возбуждением чисто реактивной компоненты акустической энергии, сосредоточенной около поверхности источника структурного звука.

Поскольку звуковая волна (волна сжатия/разрежения) не может сформироваться в несжимаемой среде, почти вся энергия вибрационного поля трансформируется в энергию «неоднородных акустических волн» [4]. Колебательная энергия в неоднородной волне просто перекачивается (в виде пульсаций давления) вдоль поверхности источника звука: от участка среды, прилегающего к одной полуволне пространственной структурной (изгибной) волны, к участку, прилегающему к соседней (противофазной) полуволне изгибной волны и обратно. Источник структурного шума в низкочастотном диапазоне в гидродинамической ближней зоне поля колеблется в режиме «акустического короткого замыкания», в котором излучаются только неоднородные акустические волны.

Таким образом, большая часть колебательной энергии, которая передаётся от вибрирующей поверхности источника звука в прилегающую к ней среду, не излучается (в виде звуковых волн). Эта энергия существует в некотором присоединённом объёме воздушной среды (в присоединённой массе) в виде кинетической энергии частиц среды.

При изгибных колебаниях источника структурного звука колебательная энергия передаётся ча-

стицам среды в слое воздуха, прилегающем к поверхности этого источника. Вследствие этого процесса, изменяется внутренняя энергия частиц воздушной среды, и в результате они приобретают кинетическую энергию. Плотность кинетической энергии, в соответствии с выражением (2), пропорциональна квадрату колебательной скорости $u(t)$ частиц среды около поверхности источника звука.

В гидродинамической ближней зоне акустического поля формируются два поля (акустическое и гидродинамическое) с принципиально различной физической природой. Вследствие принципиальной взаимосвязанности этих двух полей их нельзя рассматривать отдельно, как независимые поля. Структура поля, формирующегося в гидродинамической ближней зоне, обусловлена процессами взаимодействия между гидродинамическим и акустическим полями. В результате этого взаимодействия формируется нелинейное комплексное поле, для описания которого используется нестационарное трёхмерное уравнение Навье – Стокса.

В геометрической ближней зоне акустического поля взаимосвязанность и взаимодействие между гидродинамическим и акустическим полями существенно ослабляется. В геометрической ближней зоне акустическое поле формируется благодаря интерференции звуковых волн (звуковых лучей), которые излучаются элементарными (точечными) излучателями звука, расположенными на вибрирующей поверхности источника звука. В результате интерференции волн формируется акустическое поле с чередующимися интерференционными максимумами и минимумами амплитуды звукового давления, т. е. с неоднородной структурой. В этой зоне поля распространяются плоские звуковые волны.

Таким образом, в геометрической ближней зоне, которая непосредственно примыкает к гидродинамической ближней зоне, поле имеет неоднородную структуру в виде чередующихся интерференционных максимумов и минимумов. Поэтому, в соответствии с действующими стандартами [1, 2], в ближней зоне поля не допускается проведение акустических измерений (с целью определения акустических характеристик машин).

При размещении измерительного микрофона в ближней зоне поля результат измерения звукового (колебательного) давления практически невозможно предсказать, поскольку этот результат определяется расположением интерференционных максимумов и минимумов в акустическом поле. Интерференционная картина формируется в зависимости от фазовых соотношений в акустическом поле (т. е. от сдвига фаз между звуковыми лучами,

которые возбуждаются на излучающей поверхности источника звука).

В дальней зоне акустического поля источник звука можно считать точечным источником, излучающим сферические (или цилиндрические) волны. Дальняя зона расположена непосредственно за последним интерференционным максимумом, формирующимся в геометрической ближней зоне (на расстоянии r_d от источника звука). В дальней зоне амплитуда звукового давления уменьшается по «закону инверсии», т. е. обратно пропорционально расстоянию (r_d) от источника звука.

В случае, когда в помещении уровень шумового фона на стандартной измерительной поверхности (обычно расположенной на расстоянии 1 м от источника звука) превышает уровень шума, излучаемого машиной, рекомендуется размещать микрофон ближе к источнику звука (шума). Однако, в соответствии с [1, 2], микрофон устанавливается исключительно в дальней зоне, поэтому в помещении с высоким уровнем шумового фона практически невозможно определить акустическую характеристику малошумной машины.

Именно при использовании интенсивметрических измерений [3] можно решить эту проблему, поскольку данный метод основан на измерении характеристик потока звуковой энергии (а именно интенсивности звука), излучаемой источником шума.

Интенсивность звука может быть измерена как в дальней, так и в ближней зоне акустического поля, поскольку интенсивность является энергетической характеристикой источника звука. На энергетическую характеристику поля, в отличие от звукового давления, практически не оказывают влияния интерференционные эффекты, обусловленные взаимодействием акустических волн (лучей) в геометрической ближней зоне акустического поля.

В случае, когда испытываемая машина размещена в производственном помещении с жёсткими ограждающими конструкциями, результаты измерения акустических характеристик машин зависят от акустической характеристики этого помещения. При использовании методов измерений, основанных на измерении уровней звукового давления в дальней зоне акустического поля [1, 2], при проведении измерений необходимо учитывать влияние помещения на результаты измерений. Влияние помещения обусловлено формированием в помещении дополнительной реверберационной компоненты акустического поля вследствие многократных отражений звуковых волн, излучаемых испытываемой машиной, от жёстких ограждающих поверхностей помещения.

В соответствии с изложенным, при проектировании измерительных помещений (в особенности для испытаний электродвигателей специального назначения) необходимо учитывать те ограничения, на основании которых могут быть определены минимально допустимые размеры этих помещений.

При нарушении этих ограничений структура поля в помещении не будет соответствовать требованиям государственных стандартов, поэтому помещение не может быть аттестовано как измерительное помещение, предназначенное для проведения измерений определённых типов изделий специального назначения.

В общем случае в измерительном помещении структура поля принципиально различна в трёх разных областях поля (в ближней зоне, в области прямого поля и в области реверберационного поля). В непосредственной близости от источника звука доминирует акустическое поле, которое формируется вследствие «прямого» излучения звуковых волн, источником звука. Влиянием волн, отражённых от ограждающих поверхностей помещения, в этой области поля можно пренебречь.

По мере удаления от источника звука (в дальней зоне акустического поля) «прямое» поле ослабляется (вследствие «расхождения» сферических или цилиндрических звуковых волн), в то же время возрастает уровень звукового давления в поле отражённых волн, которое формируется вследствие отражения звуковых волн от ограждающих поверхностей помещения.

На расстоянии $r_{\text{прям}}$ от источника звука уровни звукового давления в прямом поле и в поле отражённых волн одинаковы (т. е. плотность акустической энергии в прямом поле равна плотности энергии в поле отражённых волн), это расстояние вычисляется с помощью известного выражения:

$$r_{\text{прям}} = (B / 16\pi)^{1/2}, \quad (3)$$

где B – акустическая постоянная испытательного помещения; $B = A / (1 - \alpha_{\text{ср}})$, м; A – эквивалентная площадь звукопоглощения в помещении $A = S_{\text{общ}} \alpha_{\text{ср}}$, м; $\alpha_{\text{ср}}$ – среднее значение коэффициента звукопоглощения в помещении; $S_{\text{общ}}$ – общая площадь ограждающих поверхностей помещения. На основании выражения (3) весь объём помещения делится на 2 зоны: зону «прямого» поля и зону реверберационного поля.

Структура поля в измерительном помещении характеризуется акустической постоянной помещения (B), Постоянная B зависит от эквивалентной

площади звукопоглощения (A) в этом помещении. Наиболее благоприятные условия для проведения акустических измерений обеспечиваются в той части «прямого поля», в которой формируется чисто свободное поле расходящихся (сферических или цилиндрических) звуковых волн. Это «прямое» поле формируется в дальней зоне поля, а именно в области дальнего поля, расположенной между ближней зоной прямого поля и областью реверберационного (т. е. диффузного) акустического поля.

В области низких частот (ниже 150 – 200 Гц) весьма существенное влияние на результаты акустических измерений характеристик электродвигателя оказывают первые собственные моды колебаний измерительного помещения. Именно возбуждением собственных мод колебаний объёма помещения обусловлена существенная неоднородность структуры акустического поля в низкочастотной области.

Методические основы применения метода акустической интенсивности для проведения инженерных измерений

Физические основы методики интенсивнострических измерений, основанной на использовании в качестве измерительного преобразователя двухмикрофонного интенсивнострического зонда, рассмотрены в [5, 6]. Используя результаты измерений уровней звукового давления в двух точках акустического поля (на фиксированном расстоянии, которое варьируется в пределах от 12 до 100 мм) можно вычислить значения колебательной скорости $\vec{V}(t)$, а затем определить величину интенсивности звука в соответствии с известным выражением:

$$\vec{I}(t) = p(t)\vec{u}(t), \quad (4)$$

где $p(t) = P \cos(\omega \cdot t)$; $\vec{u}(t) = \vec{V} \cos(\omega \cdot t + \theta)$; P ; \vec{V} – соответственно, амплитуды колебательного давления и колебательной скорости; ω ; θ – соответственно, частота колебаний и фазовый угол между давлением и скоростью.

Уровни интенсивности звука, в соответствии с выражением (4), вычисляются исходя из результатов измерения уровней звукового давления в двух точках акустического поля (с помощью зонда), а уровни мощности звука вычисляются с помощью выражения:

$$L_w = L_I + 10 \lg(S / S_0). \quad (5)$$

где L_I – усреднённые по измерительной поверхности уровни интенсивности звука; S – площадь измерительной поверхности; опорное значение $S_0 = 1$ кв. м.

Мгновенное значение интенсивности звука вычисляется с помощью выражения:

$$\vec{I}(t) = P\vec{V} \cos^2(\omega \cdot t) \cdot \cos \theta - (P\vec{V} / 2) \sin(2\omega \cdot t) \sin \theta. \quad (6)$$

В этом выражении (6) первый член соответствует активной компоненте интенсивности звука, а второй член – реактивной компоненте интенсивности. Комплексное акустическое поле представлено двумя составляющими (активной и реактивной). Активной компоненте поля соответствует поле звуковых волн, распространяющихся в среде. В активном акустическом поле этими звуковыми волнами переносится акустическая энергия.

Реактивной компоненте поля соответствует поле пульсаций давления, формирующееся в непосредственной близости от источника звука. В реактивном поле не могут возбудиться звуковые волны, поскольку среда утрачивает свои упругие свойства.

Таким образом, процесс формирования активной компоненты поля описывается с помощью первого члена в выражении (6). Мгновенное значение активной компоненты интенсивности звукового поля усредняется и с помощью выражения (5) вычисляются спектральные уровни звуковой мощности.

В реактивном акустическом поле (поле пульсаций давления) усреднённое значение интенсивности равно 0, звуковые волны не возбуждаются. Эта компонента акустического поля не вносит вклад в звуковую мощность источника шума.

В соответствии с программным обеспечением современной интенсивметрической аппаратуры, для вычисления уровней звуковой мощности в акустическом поле, которое формируется в помещении при проведении испытаний, используются результаты вычисления уровней активной компоненты интенсивности звука.

Для проведения интенсивметрических измерений был использован 4-канальный анализатор типа «Scadas Mobile» (производство фирмы «LMS Siemens Business») с двухмикрофонным интенсивметрическим зондом 50AI-L (производство фирмы «G.R.A.S. Sound&Vibration»). Расстояние между двумя микрофонами в зонде фиксируется с помощью специальной цилиндрической «проставки», причём частотный диапазон интенсивметрических измерений зависит от расстояния между микрофонами.

В соответствии с методикой проведения измерений ([3]), интенсивметрический зонд последова-

тельно устанавливается во всех измерительных точках, расположенных на измерительной поверхности. Затем, при обработке результатов измерений вычисляются усреднённые по измерительной поверхности значения уровней звукового давления, активной и реактивной компонент интенсивности звука и звуковой мощности.

Для вычисления спектральных уровней звуковой мощности L_W источника звука (электродвигателя), в соответствии с программным обеспечением анализатора, используется выражение (5).

В соответствии со стандартом [3] на первом этапе экспериментальных исследований акустических характеристик изделия определяются специальные индексы ($F_1 \div F_4$), которые используются для оценки параметров акустического поля [5], формирующегося в помещении. Индекс F_2 является критерием «степени реактивности» комплексного поля.

Выводы

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.

Литература

- 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.
- 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.
- 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.
- Исакович М. А. Общая акустика / М. А. Исакович. – М. : Наука, 1973. – 496 с.
- Fahy F. J. Sound Intensity. Second edition. London : E&FN Spon, 1995.
- Разработка отраслевой методики определения акустических характеристик изделий специального назначения с использованием метода акустической интенсивметрии. Часть 1. Анализ метрологических возможностей интенсивметрической аппаратуры при определении акустиче-

ских характеристик изделия: ТАИК 001226.443 / Захаренко А. Б., Шматков А. В., Зубренков Б. И., Либерман М. Ю. [и др.] // Технический отчёт. – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017.

Поступила в редакцию 21.12.2017

*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 1

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.

List of 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. : IPK Publishing House of Standards, 1998. – 15 p.
4. Isakovich M. A. General acoustics / M. A. Isakovich. – М. : Nauka (Science), 1973. – 496 p.
5. Fahy F. J. Sound Intensity. Second edition. London : E&FN Spon, 1995.
6. 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. : JC «VNIIEEM Corporation», 2017.

*Vladimir Yakovlevich 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»).*