ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 4, с. 58–66

_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ _____ ТЕХНИКА

УДК 534.612.3

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОМПОНЕНТОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ¹

© 2020 г. А. А. Власов^{*a*,*}, М. Ю. Плотников^{*a*}, А. Н. Аширов^{*a*}, А. С. Алейник^{*a*}, А. Н. Никитенко^{*a*}

^а Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) Россия, 197101, С.-Петербург, Кронверкский просп., 49

*e-mail: salusnetklim@yandex.ru Поступила в редакцию 03.03.2020 г. После доработки 11.03.2020 г. Принята к публикации 12.03.2020 г.

Приведены результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований характеристик акустического испытательного сигнала при применении акустического оформления типа "открытый экран". Обогащение спектра тестового акустического сигнала за счет применения разработанного оформления составило до +30 дБ в области частот до 500 Гц, в диапазоне частот 1500–5000 Гц – от +4 до +20 дБ по сравнению с динамиком без оформления. Проведены исследования влияния характеристик помещения на акустический сигнал в точке измерения и предложен способ компенсации этого влияния, в результате применения которого неравномерность амплитудно-частотной характеристики акустического сигнала в точке измерения с 7 до 1.5 дБ, а также устранены наклоны его спектральной характеристики.

DOI: 10.31857/S0032816220040345

введение

На сегодняшний день наиболее совершенными с точки зрения точностных, массогабаритных и эксплуатационных параметров являются волоконно-оптические измерительные системы [1–3]. Отсутствие механических и токопроводящих частей, высокая помехозащищенность и возможность мультиплексирования большого количества датчиков на одном оптическом волокне привели к широкому развитию таких систем, годовой оборот рынка которых исчисляется миллиардами долларов [3]. Спрос на такие системы стремительно увеличивается в таких отраслях промышленности, как нефтегазовая и горнодобывающая промышленность, военно-промышленный комплекс, а также многих других [3].

Наряду с неоспоримыми достоинствами высокоточным волоконно-оптическим измерительным системам присущ также и ряд недостатков, одним из которых является чувствительность волоконно-оптических компонентов к акустическим и вибрационным воздействиям за счет проявления эффекта фотоупругости и физического изменения длины оптического волокна под действием внешнего давления [4]. Помимо применения в волоконно-оптических датчиках давления (в том числе акустического и гидроакустического) и вибрации, данные эффекты носят нежелательный характер в других видах волоконно-оптических датчиков и таких волоконно-оптических компонентах, как волоконно-оптические интерферометры и волоконные лазеры.

Таким образом, при их работе в реальных условиях наблюдается снижение точностных параметров за счет повышения уровня шума в выходном сигнале. Ввиду высокого значения несущей частоты колебаний световой волны (как правило, в диапазоне сотен терагерц), их отклик носит практически безынерционный характер по сравнению с механическими воздействиями звукового диапазона, почему задача подавления либо компенсации шумовых воздействий является актуальной.

Данной проблеме посвящено большое количество исследований — для устранения нежелательной чувствительности волоконно-оптических компонентов в мировой практике применяют различные покрытия [5–11] и защитные конструкции [11, 12], снижающие вариации длины оптическо-

¹ Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на третьей международной конференции "Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2020" (http://or-2020.permsc.ru/, 22–24 сентября, Россия, Пермь).



Рис. 1. Схема измерений импендансно-частотной характеристики динамического преобразователя. *1* – генератор сигналов; *2* – балластный резистор (1000 Ом); *3* – динамический преобразователь; *4* – цифровой осциллограф.

го пути на участке оптического волокна. Также находят применение дополнительные опорные датчики, для которых также применимы методы акустической изоляции [13].

Для экспериментальной проверки эффективности мер по защите чувствительных волоконнооптических компонентов от механических шумовых воздействий, а также для исследования их чувствительности и калибровки волоконно-оптических датчиков акустического давления необходимо наличие экспериментальной установки, позволяющей осуществлять озвучивание испытываемых образцов различными акустическими сигналами с изменяемыми амплитудными, временными и частотными параметрами, причем вибрационное взаимодействие должно быть максимально исключено.

В мировой научно-технической практике подобные измерения проводят в специализированных заглушенных камерах, которые позволяют исключить внешние вибрационные воздействия с помощью развязки исследуемого объекта от пола и стен камеры и акустические воздействия посредством покрытия стен камеры звукопоглощающими покрытиями. Однако постройка такой камеры сопряжена со значительными технологическими трудностями — так, например, акустическое изолирующее покрытие стенок камеры обычно рассчитано на определенный акустический диапазон частот, что делает комнату непригодной для широкого спектра акустических измерений [14, 15].

Целью данной работы является разработка экспериментальной установки, предназначенной для проведения акустических исследований компонентов волоконно-оптических измерительных систем и оценки их основных акустических характеристик (рабочего диапазона частот и чувствительности) в широком диапазоне частот, позволяющей имитировать акустическое воздействие на исследуемые образцы различных факторов техногенного и антропогенного характера в зависимости от условий предполагаемой эксплуатации измерительных систем без использования вспомогательных звукопоглощающих покрытий и других методов акустической подготовки помещения.

Для достижения цели необходимо комплексное рассмотрение вопросов, связанных с источником акустических колебаний, влиянием акустического оформления и помещения на амплитудные и частотные характеристики испытательного акустического сигнала в точке измерения, а также поиск способов коррекции данного влияния для линеаризации указанных характеристик.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО ОФОРМЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

Под акустическим воздействием на исследуемые образцы в рамках данной работы понимается излучение звуковой волны в воздушной среде в направлении исследуемого объекта. Таким образом, исследуемые образцы подвергаются воздействию переменного акустического давления, временные, амплитудные и спектральные параметры которого должны быть регулируемыми для обеспечения различных режимов исследований.

Источником звуковых колебаний в экспериментальной установке служит электродинамический громкоговоритель. При отсутствии акустического оформления (корпуса) динамической головки по причине взаимодействия волн, создаваемых фронтальной и тыльной поверхностями диффузора, происходит процесс так называемого акустического короткого замыкания и результирующее звуковое давление в окружающем пространстве значительно ослабляется.

Для исключения этого негативного явления динамическую головку помещают в акустическое оформление. Известны различные конструкции акустического оформления, такие как закрытый ящик, рупорный корпус, корпус с фазоинвертором, корпус с лабиринтным волноводом [16–19], однако только акустическое оформление типа "открытый экран" оказывает наименьшее влияние на полную добротность встраиваемого электродинамического преобразователя, а значит, не повышает (а в некоторых конфигурациях снижает) его резонансную частоту и, соответственно, не сужает частотный диапазон его работы [19]. По этой причине именно данный тип акустического оформления динамика был выбран для разрабатываемой экспериментальной установки.

Для эффективной работы в области нижних частот данный экран должен иметь линейные размеры, сопоставимые с длиной акустической волны на резонансной частоте динамика.

Необходимая площадь акустического оформления типа "открытый экран" для конкретного динамического громкоговорителя может быть найдена по формуле [19]

$$S_{\text{ideal}} = 0.125 \left(\frac{c}{F_r Q_{ls}}\right)^2, \qquad (1)$$

где c, м/с – скорость звука, F_r , Гц – резонансная частота динамического громкоговорителя, Q_{ts} – полная добротность динамического громкоговорителя. Данная формула применима при значениях Q_{ts} , меньших 1.93. При других значениях Q_{ts} заменяется функциональной зависимостью от Q_{ts} [19].

При наличии у акустического экрана боковых стенок наблюдается снижение резонансной частоты F_r динамика, обусловленное присоединением части массы воздуха внутри оформления к массе подвижной системы головки и вычисляемое при помощи выражения [19]

$$F_r' = \frac{F_r}{\sqrt{1 + \frac{\rho h S_{\text{ideal}}}{m_0}}},\tag{2}$$

где ρ , кг/м³ – плотность воздуха; h, м – высота боковых стенок; m_0 , кг – масса подвижной системы динамического преобразователя.

Необходимые для данного расчета электроакустические параметры Тилля—Смолла определяют поведение динамической головки в области низких частот (в двухоктавной области до и после резонансной частоты) при ее работе в поршневом режиме [20, 21].

Как правило, значения необходимых для расчета площади акустического оформления параметров указаны в сопроводительной документации динамического преобразователя. Однако в случае отсутствия информации от производителя, а также для устранения последствий неизбежного технологического разброса параметров при производстве динамиков необходимо проводить измерение и расчет параметров конкретного образца по предлагаемой методике.

Для нахождения параметров Тилля—Смолла динамика необходимо провести измерение его импедансно-частотной характеристики. Для этого была собрана измерительная схема (рис. 1), а сам динамик без акустического оформления был жестко закреплен. Генератор синусоидальных сигналов включен в режим сканирования частоты (sweep mode) в пределах от 1 до 1000 Гц. Напряжение на динамике, подключенном через балластный резистор (1000 Ом), непрерывно измеряется и сохраняется в файл цифровым осциллографом. Сопротивление постоянному току R_e измеряется мультиметром.

Реактивное электрическое сопротивление динамика X_L измеряется на частоте 1000 Гц. Таким образом, результатом измерения является импе-



Рис. 2. Результат экспериментального исследования динамического преобразователя: 1 – импедансно-частотная характеристика, 2 – резонансная частота F_r , 3 – частота F_1 при импедансе R_x , 4 – частота F_2 при импедансе R_x .

дансно-частотная характеристика динамического громкоговорителя (рис. 2).

Из данного графика были получены пиковое значение R_{max} и его частота F_r (резонансная частота, при которой импеданс максимален). Далее были вычислены значения частот F_1 и F_2 , при которых импеданс динамика равен значению, найденному при помощи выражения

$$R_x = \sqrt{R_{\max}R_e} \,. \tag{3}$$

Затем были вычислены значения механической (Q_{ms}), электрической (Q_{es}) и полной (Q_{ts}) добротностей динамического громкоговорителя при помощи системы уравнений:

$$\begin{cases}
Q_{ms} = \frac{F_r \sqrt{(R_{max}/R_e)}}{F_2 - F_1}, \\
Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{(R_{max}/R_e) - 1}, \\
Q_{ts} = \frac{Q_{ms}}{(R_{max}/R_e)}.
\end{cases}$$
(4)

Таким образом, были определены параметры применяемого динамического преобразователя SENON DYP820D и требуемая площадь акустического оформления типа "открытый экран" S_{ideal} для него: диаметр динамика 18 см; резонансная частота динамика $F_r = 55.3$ Гц; импеданс динамика на резонансной частоте – 32.6 Ом; сопротивление динамика постоянному току $R_e = 7.5$ Ом; импеданс динамика на частоте 1000 Гц $X_L = 6.5$ Ом; импеданс R_x (слева от F_r) 42.4 Гц; частота F_2 при импедансе R_x (справа от F_r) 72.6 Гц; механическая, электрическая и полная добротности динамика соответ-



Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки для проведения акустических исследований компонентов волоконно-оптических измерительных систем. ПК – персональный компьютер с разработанным управляющим программным обеспечением, *ЦАП/АЦП* – двухканальный блок цифроаналогового/аналого-цифрового преобразователя, У - усилитель, Д – динамический преобразователь, V – вольтметр переменного тока, Дм – блок демодуляции фазовых сигналов; 1 – акустическое оформление типа "открытый экран"; 2 – акустическое воздействие; 3 – измерительный микрофон; 4 – сетчатая платформа для размещения исследуемых образцов; 5 – эластичные растяжки; 6 – опоры эластичных растяжек; 7 – вибродемпфирующие прокладки; 8 – исследуемый образец.

ственно 3.8, 1.2 и 0.9; площадь акустического экрана S_{ideal} : оптимальная 6.3 м², выбранная 4.1 м²; ослабление уровня акустического давления за счет снижения площади экрана $\Delta S = -1.9$ дБ.

Ослабление уровня акустического давления при площади экрана S_{shield} , меньшей оптимальной S_{ideal} , вычислено по формуле [19]

$$\Delta S, \ \mathrm{\pi B} = 10 \mathrm{lg} \left(\frac{S_{\mathrm{shield}}}{S_{\mathrm{ideal}}} \right).$$
 (5)

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для данного динамика расчетная площадь акустического экрана S_{ideal} составила 6.3 м². В качестве материала для изготовления акустического экрана был выбран лист ламинированной древесно-стружечной плиты толщиной 25 мм размерами 2.7 × 1.8 м из соображений возможности прохода данного экрана в стандартный дверной проем и, следовательно, обеспечения возможности транспортировки готового изделия.

Таким образом, S_{shield} составила 4.1 м². Значит, ослабление акустического давления ΔS в точке измерения на расстоянии 1 м вдоль оси динамика составляет согласно (5) — 1.9 дБ. Углы акустического экрана были закруглены с радиусом 0.5 м для минимизации влияния краевых эффектов [22]. Динамический громкоговоритель был установлен в акустический экран в соответствии с ГОСТ 16122-87.

Для размещения испытываемых образцов над источником акустического воздействия была установлена сетчатая платформа площадью 1 м². Для минимизации передачи вибрации от колеблющегося диффузора через материал акустического экрана и строительные конструкции помещения лаборатории сетчатая корзина выполнена подвесной на эластичных растяжках с развязанными от акустического экрана опорами, выполненными из хромированных труб и держателей стандарта JOKER.

На ножки этих опор, как и на ножки акустического экрана, был нанесен вибродемпфирующий материал. Внутренний объем опор заполнен вспененным материалом для минимизации влияния резонансов воздушного столба внутри труб и передачи вибрационного воздействия.

В качестве источника тестового сигнала в установке применен двухканальный цифроаналоговый/аналого-цифровой преобразователь (ЦАП/АЦП) Веhringer UMC202hd с частотой дискретизации F_s до 192 кГц и разрядностью 24 бит, управляемый с персонального компьютера. Описываемые в данной работе измерения проведены с частотой дискретизации F_s 100000 Гц. Для контроля уровня акустического давления в точке измерения при помощи держателя-пантографа и виброзащитного крепления типа "паук" размещен измерительный конденсаторный микрофон Behringer ECM8000, сигнал с которого поступает на AЦП и, соответственно, на персональный компьютер.

Структурная схема установки представлена на рис. 3. Состав, описание и принцип действия оптической схемы и схемы демодуляции оптических сигналов данной установки подробно рассмотрен в работах [9–11, 23, 24]. Для обеспечения безопасной работы динамика при различных режимах работы усилителя установка была дополнена быстродействующим вольтметром переменного тока, чтобы не превышать максимально допустимую мощность, выделяемую на динамике.

Измерение амплитудно-частотной характеристики (а.ч.х.) результирующей акустической системы проводилось путем посылки на динамический громкоговоритель сигнала белого шума (white gaussian noise, длительность 20 с) с одновременным приемом данного звукового сигнала измерительным микрофоном и построением функции спектральной плотности мощности. Результат данного измерения для акустического экрана площадью 4.1 м², а также результаты для динамика без акустического оформления и акустического экрана площадью $0.36 \text{ m}^2 (60 \times 60 \text{ см})$ представлены на рис. 4. Там же приведены функция спектральной плотности мощности исходного тестового сигнала и кривая зависимости чувствительности измерительного микрофона от частоты. Результаты представлены в относительных единицах и нормированы на кривую чувствительности микрофона.

Из результатов эксперимента видно, что применение акустического оформления типа "открытый экран" с указанными размерами существенно расширяет частотный лиапазон работы динамика и делает его более равномерным, сглаживая узкие резонансные пики. В диапазоне частот 1500-5000 Гц обогащение спектра акустического сигнала составило от +4 до +20 дБ, в диапазоне 20-500 Гц – до +30 дБ. В целом, за счет применения данного типа акустического оформления динамика становится возможным его применение в качестве излучателя испытательного акустического сигнала в диапазоне частот 1-5000 Гц. Данный частотный диапазон позволяет осуществлять исследования влияний различных шумовых факторов техногенного и антропогенного характера на работу компонентов волоконно-оптических измерительных систем (табл. 1, [22, 25-30]).

Однако результаты данного эксперимента свидетельствуют и о том, что результирующая а.ч.х. акустического сигнала в точке измерения подвергается влиянию передаточных характеристик составных частей электроакустического тракта, а также передаточной характеристики помещения, в котором размещено оборудование:

$$AFR'_{(f)} = AFR_{sig(f)}T_{DAC(f)}T_{amp(f)} \times$$

$$\times T_{sp(f)}T_{room(f)}T_{mic(f)}T_{ADC(f)},$$
(6)

где AFR, AFR_{sig}, T_{DAC} , T_{amp} , T_{sp} , T_{room} , T_{mic} , T_{ADC} – а.ч.х. акустического сигнала в точке измерения, а.ч.х. исходного сигнала, передаточные характеристики ЦАП, усилителя, динамического преобразователя, помещения лаборатории, измерительного

Спектральная плотность мощности, дБ



Рис. 4. Результат экспериментального исследования а.ч.х. динамического преобразователя в зависимости от площади акустического экрана: 1 - 6ез акустического оформления, 2 - в акустическом экране с площадью 0.36 м² (60 × 60 см), 3 - с площадью 4.1 м² (270 × 180 см), 4 - частотная характеристики чувствительности измерительного микрофона, 5 -а.ч.х. исходного тестового сигнала.

микрофона и АЩП соответственно. Индекс *f* означает, что данный сигнал представлен в частотной области, а штрих (') — что данный сигнал зарегистрирован микрофоном, размещенным в точке измерения. Влияние передаточных характеристик составных частей электроакустического тракта в большей степени может быть устранено введением электромеханической обратной связи за счет регистрации сигнала с измерительного микрофона в точке измерения с учетом его собственной передаточной характеристики [30]:

$$AFR'_{\text{\tiny HCT}(f)} = \frac{AFR'_{(f)}}{T_{mic(f)}},\tag{7}$$

где *AFR*[']_{ист} – истинная а.ч.х. акустического испытательного сигнала в точке измерения.

УСТРАНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОМЕЩЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Каждому помещению присущи акустические резонансы или, иначе, комнатные моды. В идеально прямоугольных комнатах с идеально ров-

Таблица 1. Полоса частот различных акустических воздействий

Тип воздействия	Полоса частот, Гц
Совокупный шум всех систем работающего двигателя при 800-5000 об/мин	13-5000
Голосовой сигнал (при применении в телефонии)	300-3400
Голосовой сигнал (высокое качество, одноканальное воспроизведение)	30-5000
Производственный шум (более 90% спектральной плотности мощности)	30-5000
Музыкальный сигнал (около 80% спектральной плотности мощности)	20-3200

ные размеры 8.8 × 5.9 × 2.9 м. Результаты расчета собственных мод помещения и моделирования позволяют сделать вывод о том, что распределение пучностей и узлов зон акустического давления в воздушном объеме помещения даже в условиях работы в линейном режиме звукоизлучения [22] носит весьма сложный характер за счет многократных переотражений от поверхностей стен, пола, потолка, а также предметов, находящихся в помещении, и влияние помещения на уровень акустического давления и его спектр принципиально не может быть устранено без акустической полготовки помешения.

ными и отражающими поверхностями (стенами, полом и потолком) резонансные частоты могут

 $F_{(k,m,n)} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{k}{r}\right)^2 + \left(\frac{m}{p}\right)^2 + \left(\frac{n}{rr}\right)^2},$

где k, m, n – целые числа; L, B, H[M] – длина, ширина и высота помешения соответственно.

торой выполняется ланная работа. имеет линей-

Помещение акустической лаборатории, в ко-

быть вычислены по формуле [22, 32]:

Однако для решения большей части задач акустических исследований компонентов волоконнооптических измерительных систем достаточно устранить влияние помещения на мощностные и спектральные параметры акустического испытательного сигнала в точке измерения. Данное условие может быть выполнено методом компенсации влияния помешения и нелинейных характеристик электроакустического тракта. Суть метода состоит во внесении в исходный акустический сигнал предыскажений (preemphasis), передаточная характеристика которых является обратной функцией от совокупной передаточной характеристики помещения и электроакустического тракта [30].

Для исследования импульсной характеристики помещения оно было озвучено синтезированной тестовой последовательностью, включающей в себя переходы между граничными состояниями мембраны диффузора (из состояния покоя "0" в крайнее верхнее положение "1", из положения "1" – в "0", из положения "0" в крайнее нижнее положение "–1" и обратно. Результаты данного анализа представлены на рис. 5.

Из данных результатов следует, что среднее время реверберации τ_{rev} данного помещения составляет не более 0.4 с, что является удовлетворительным значением для работы со звуком в данном помещении [22]. По спектру принятого акустического сигнала стало возможно вычислить пространственные моды помещения, имеющие наиболее сильное влияние в точке измерения. Таковыми оказались рассчитанные при помощи выражения (8) моды (1,0,0) – 20 Гц, (0,0,1) – 59 Гц и (0,4,0) — 117 Гц.

выражением: $T_{sc} > (F_{stop} - F_{start})\tau_{rev}$ Последнее условие было введено для сниже-

ния влияния задержки, вносимой реверберацией звуковых волн в помещении, на результат измерений. Индекс (t) означает, что данный сигнал представлен во временной области. При озвучивании исследуемого помещения

данным испытательным сигналом в точке измерения при помощи измерительного микрофона регистрировался временной отклик системы, результатом действия которого являлось применение амплитудной модуляции AFR' к исходному сигналу $TSS_{(t)}$:

$$TSS'_{(t)} = AFR'_{(t)}\sin(2\pi F_{inst}t).$$
(13)

Далее при помощи преобразования Гильберта *H*(*TSS*'_(*t*)) данного сигнала была найдена его огибающая в соответствии с выражениями

$$H(TSS'_{(t)}) = AFR'_{(t)}\cos(2\pi F_{inst}t), \qquad (14)$$

$$AFR'_{(t)} = \sqrt{((TSS'_{(t)})^2 + (H(TSS'_{(t)}))^2)},$$
(15)

$$(ISS_{(t)})^{2} + (H(ISS_{(t)}))^{2} =$$
(16)

$$= (AFR'_{(t)})^{2} (\sin^{2}(2\pi F_{inst}t) + \cos^{2}(2\pi F_{inst}t)).$$

Инвертированное значение огибающей применяется для корректировки исходного испытательного сигнала путем внесения в него предыскажений, являющихся обратной функцией от $AFR'_{(f)}$.

Принимая во внимание линейное нарастание частоты сигнала от времени и выражения (10) и (11), становится возможным найти представле-

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА 2020 № 4

(8)

(12)

Далее был синтезирован испытательный сигнал TSS для сканирования характеристик помещения, представляющий собой синусоидальный сигнал единичной амплитуды с перестраиваемой в диапазоне от $F_{\text{start}} = 1$ Гц до $F_{\text{stop}} = 5000$ Гц частотой в соответствии с выражениями:

$$TSS_{(t)} = \sin(2\pi F_{inst}t), \tag{9}$$

где *F_{inst}*, Гц – мгновенное значение частоты сканирования, равное

$$F_{inst} = F_{inc}t + F_{start},\tag{10}$$

где F_{inc} , $\Gamma \mu^2$ – инкремент нарастания частоты, равный

$$F_{inc} = \frac{F_{\text{stop}} - F_{\text{start}}}{T_{sc}},\tag{11}$$

где T_{sc} , с — полная продолжительность временного интервала сканирования.

частоте должно быть больше τ_{rev} в соответствии с

При этом время излучения сигнала на каждой



Рис. 5. Результат экспериментального исследования импульсной характеристики помещения: *1* – исходная тестовая последовательность; *2* – отклик системы на тестовую последовательность *1*; *3* – нахождение времени реверберации τ_{rev} в помещении: увеличенный участок кривой отклика *2*; *4* – нахождение действующих в точке измерения пространственных мод помещения: спектр по данным кривой отклика *2*.

ние модулирующего воздействия $AFR'_{(t)}$ в частотной области – $AFR'_{(f)}$. В результате данной коррекции происходит линеаризация а.ч.х. акустического сигнала в точке измерения $AFR'_{corr(f)}$ при помощи выражений:

$$AFR'_{\mathrm{HCT}(f)} \xrightarrow{1}{AFR'_{(f)}} \rightarrow 1,$$
 (17)

$$AFR'_{corr(f)} = \frac{AFR'_{\text{ACT}(f)}}{AFR'_{(f)}}.$$
 (18)

При синтезе фильтра с а.ч.х. на основе данной огибающей средствами цифровой обработки сигналов может быть выполнена корректировка испытательного сигнала произвольного вида [30]. Результаты исследования частотной характеристики помещения лаборатории представлены на рис. 6.

Результат работы предлагаемого способа устранения влияния характеристик электроакустического тракта и помещения на результаты акустических измерений представлен на рис. 7.

Видно, что неравномерность а.ч.х. за счет применения компенсации изменяется с 7 до 1.5 дБ. Однако важнейшим следствием применения предлагаемого способа является приведение а.ч.х. испытательного акустического сигнала к ступенчатому виду по сравнению со спектром исходного сигнала, имевшего наклоны спектральной характеристики до 15 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной работы была выполнена разработка экспериментальной установки для проведения акустических исследований компонентов волоконно-оптических измерительных систем. Для расчета акустического оформления типа "открытый экран" были измерены параметры Тилля-Смолла электродинамического громкоговорителя с помощью генератора сигналов со сканированием частоты и цифрового осциллографа. Применение данного акустического оформления динамика привело к расширению частотного диапазона его работы, особенно в области нижних частот до 500 Гц – обогащение спектра гармониками в данной области составило до +30 дБ. В диапазоне частот от 1500 до 5000 Гц обогащение спектра составило от +4 ло +20 лБ.

Для снижения влияния характеристик помещения на результаты акустических измерений и линеаризации а.ч.х. акустического воздействия в



Рис. 6. Исследование частотной характеристики помещения: *1* – спектральная характеристика принятого при озвучивании помещения сигнала, *2* – его огибающая; *3* – результат применения инвертированной огибающей отклика помещения к исходному испытательному сигналу.



Рис. 7. Результат работы предложенного способа компенсации влияния характеристик помещения на результат акустических измерений: *1* – фрагмент временной диаграммы записи результата озвучивания помещения исходным испытательным сигналом, *2* – тот же фрагмент с применением предложенного способа коррекции; *3* – фрагмент временной диаграммы исходного испытательного сигнала, посылаемого на *ЦАП*, *4* – скорректированного сигнала; *5* – спектр по данным, зарегистрированным при озвучивании помещения исходным испытательным сигналом, *6* – скорректированным сигналом.

точке измерения была применена обратная связь при помощи акустического микрофона и частотная коррекция акустического сигнала. Неравномерность а.ч.х. при этом снизилась с 7 до 1.5 дБ.

При использовании поверенного микрофона в цепи обратной связи разработанная установка может применяться при проведении измерений уровня абсолютного акустического давления в точке измерения. Разработанная экспериментальная установка

применялась при проведении работ, описанных в [9–11], а также в ряде других исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-11-2019-026 от 27.11.2019).

66

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists / Ed. Udd E., Spillman Jr W.B. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, 2011.
- Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. Т. 254. С. 1.
- 3. Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation / Ed. Cusano A., Cutolo A., Albert J. Sharjah: Bentham Science Publishers, 2011.
- 4. *Hocker G.B.* // Appl. Optics. 1979. V. 18. № 9. P. 1445. https://doi.org/10.1364/AO.18.001445
- McMahon G.W., Cielo P.G. // Appl. Optics. 1979. V. 18. № 22. P. 3720. https://doi.org/10.1364/AO.18.003720
- Lagakos N., Bush I.J., Cole J.H., Bucaro J.A., Skogen J.D., Hocker G.B. // Optics Lett. 1982. V. 7. № 9. P. 460. https://doi.org/10.1364/OL.7.000460
- Yang Y.C., Lee H.L., Chou H.M. // Appl. Optics. 2002. V. 41. № 10. P. 1989. https://doi.org/10.1364/AO.41.001989
- 8. Lagakos N., Hickman T.R., Cole J.H., Bucaro J.A. // Optics Lett. 1981. V. 6. № 9. P. 443. https://doi.org/10.1364/OL.6.000443
- Vlasov A.A., Aleynik A.S., Ashirov A.N., Plotnikov M.Yu., Varlamov A.V. // Technical Phys. Lett. 2019. V. 45. № 8. P. 769.
 https://doi.org/10.1124/\$1062795010080157

https://doi.org/10.1134/S1063785019080157

- Vlasov A.A., Plotnikov M.Y., Ashirov A.N., Aleynik A.S., Varlamov A.V., Stam A.M. // 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). IEEE. 2019. P. 305. https://doi.org/10.1109/EExPolytech.2019.8906889
- Vlasov A.A., Plotnikov M.Y., Aleinik A.S., Varlamov A.V. // J. Phys.: Conference Series. IOP Publishing, 2019. V. 1326. № 1. P. 012010. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1326/1/012010
- 12. Poulsen C.V., Hansen L.V., Sigmund O., Pedersen J.E., Beukema M. Pat. 7809029 USA. 2010.
- Waagaard O.H., Rønnekleiv E., Forbord S., Thingbo D. // 20th International Conference on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2009. V. 7503. P. 75034Q.

- Beranek L.L., Sleeper Jr H.P. // J. Acoustical Society of America. 1946. V. 18. № 1. P. 140. https://doi.org/10.1121/1.1916351
- Kopiev V.F, Palchikovskiy V.V., Belyaev I.V., Bersenev Y.V., Makashov S.Y., Khramtsov I.V., Konin I.A., Sorokin E.V., Kustov O.Y. //Acoust. Phys. 2017. V. 63. № 1. P. 113. https://doi.org/10.1134/S1063771017010043
- 16. Сапожков М.А. Электроакустика. М.: Связь, 1978.
- 17. Дьяконов Б.П. Бытовая аудиотехника. Смоленск: Русич, 1997.
- Бурко Б.Г., Лямин П.М. Бытовые акустические системы: эксплуатация, ремонт. Минск: Беларусь, 1996.
- 19. Иофе В.К., Лизунков М.В. Бытовые акустические системы. М.: Радио и связь, 1984.
- 20. *Thiele N.* // J. Audio Engineering Society. 1971. V. 19. № 5. P. 382.
- Small R.H. // J. Audio Engineering Society. 1973. V. 21. № 5. P. 363.
- 22. Алдошина И.А., Приттс Р. Музыкальная акустика. СПб.: Композитор, 2006.
- Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhrengin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. // IEEE Sensors J. 2017. V. 17. № 13. P. 4143. https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2704287
- Plotnikov M.Y., Lavrov V.S., Dmitraschenko P.Y., Kulikov A.V., Meshkovskiy I.K. // IEEE Sensors J. 2019.
 V. 19. № 9. P. 3376. https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2894323
- 25. Шатров М.Г., Яковенко А.Л., Кричевская Т.Ю. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания. М.: МАДИ, 2014.
- 26. *Васильев А.В.* // Изв. Самарского научного центра РАН. 2004. Т. 6. № 2.
- 27. Грушецкий И.В., Кирпичников В.Ю. // Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1-3.
- 28. Вартанян И.А. Звук слух мозг. Л.: Наука, 1981.
- 29. *Розенберг Л.Д.* //Успехи физ. наук. 1949. Т. 38. № 5. С. 120.
- Смит С. Цифровая обработка сигналов. М.: Додэка-XXI, 2008.
- 31. *Сулима Н.Н.* // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2013. № 4. С. 62.
- Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Защита от шума и вибрации. СПб.: Печатный цех, 2019. ISBN 978-5-60424483-8.