УДК 532.5.011 + 006.013

КАЛИБРОВКА РЕКОРДЕРА ПОДВОДНОГО ЗВУКА И ВОПРОСЫ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ СОЗДАВАЕМЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ К ПЕРВИЧНЫМ ЭТАЛОНАМ

А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, А.М. Поликарпов

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
isaev@vniiftri.ru
akustika@vniiftri.ru

Ничего не сделано, если что-то осталось недоделанным.
Иоганн Карл Фридрих Гаусс

Обсуждаются вопросы калибровки рекордера подводного звука в рамках решения проблемы прослеживаемости создаваемых средств измерений к первичным эталонам. Подчёркивается актуальность задачи включения разработанных российских методов в международные стандарты.

The issues of calibration of the underwater sound recorder are discussed in addressing the traceability of the developed measuring instruments to the primary standards. The necessity of the task to include the developed Russian methods into the international standards is emphasized.

Ключевые слова: калибровка, прослеживаемость к первичным эталонам, рекордер подводного звука.

Key words: calibration, traceability to primary standards, underwater sound recorder.

При создании средства измерений (СИ) обязательным условием является обеспечение прослеживаемости к первичным эталонам. Типична ситуация, когда исследователи считают, что задача использования прибора в качестве СИ сводится к калибровке прибора, не заботясь о мерах, обеспечивающих прослеживаемость результатов калибровки. Ниже на примере рекордера подводного звука обсуждаются проблемы, возникающие при попытке использовать для измерений средство, разработанное для регистрации звуков.

Создание устройств для регистрации тех или иных данных — логичный начальный этап научных работ. По мере накопления данных формируется набор параметров, которые имеют значение для решения проблемы, и возникает желание получать количественные оценки параметров накопленных данных, поскольку численные значения сравнивать удобнее. Как только исследования выходят за рамки одной лаборатории, возникает необходимость сопоставлять количественные данные, полученные разными лабораториями. Когда проблема перерастает из научной в инженерную, необходимость сопоставления результатов вынуждает получать количественные оценки с помощью измерений.

По каждому параметру, подлежащему количественному представлению, возникает дилемма: либо пользоваться одной из существующих измеряемых величин, либо вводить собственную (уникальную) измеряемую величину, включая её определение, методы воспроизведения и передачи, методики измерения, оценки неопределённости и т.п. Чаще стараются подобрать одну из существующих измеряемых величин. При этом, оставляя величину в рамках её определения, модифицируют либо конкретизируют методы, способы и условия получения численных оценок — результатов измерений. В воздушной акустике для оценки громкости звуков пришлось вместо октавного спектрального анализа выполнять 1/3-октавный, который более адекватен работе слухового аппарата человека. Нечувствительность гидроакустического векторного приёмника к изотропной помехе делает его предпочтительным для измерений шума, локализованного в пространстве источника, однако это же преимущество не позволяет использовать векторный приёмник для измерений окружающего шума.

На этапе перехода от накопления (регистрации) к измерениям типична ситуация, когда устройство регистрации данных оказывается непригодным для измерений. Например, если не известна стабильность регистрирующего прибора. Поясним на примере микрофонов, применяемых для студийных записей. При выборе средства регистрации данных звукорежиссёр выбирает микрофон исходя из своих собственных субъективных предпочтений, навыков, опыта и т.д. При этом его совершенно не волнует, например, проблема стабильности чувствительности микрофона — изменение чувствительности всегда можно скомпенсировать регулировкой усиления. Частотную характеристику микрофона звукорежиссёр выбирает не исходя из желания записать неискажённый спектр голоса певца, а чаще всего, наоборот, из стремления таким образом исказить спектр, чтобы убрать как можно больше дефектов исполнения. Очевидно, что такой способ регистрации не имеет ничего общего с проблемой измерения голоса певца. Измерения становятся для вас актуальными, когда голос певца доносится из-за стены глубокой ночью. Для таких измерений используют прибор шумомер, метрологические характеристики которого жёстко нормированы и постоянно контролируются при поверке. При этом оказывается важным, что голос из-за стенки распространяют звуковые волны, один из параметров которых — звуковое давление, которое и воспринимает шумомер, выдавая численную оценку звукового давления особенным образом.

В отличие от микрофона звукорежиссёра шумомер — средство измерений (СИ). Основополагающее требование, которое предъявляют к любому СИ, — его стабильность. Требование стабильности влечёт за собой не только необходимость стабильной работы прибора, но прибор должен иметь возможность контроля стабильности. Например, если возникнет желание сделать СИ индикатор уровня записи магнитофона, то для контроля его ста-

бильности необходимо предусмотреть электрический вход, потому что звукозаписывающий микрофон не обладает стабильностью. К прибору, который планируется к использованию в качестве СИ, кроме выполнения им функции регистрации и получения численной оценки, предъявляются специфические метрологические требования. Например, кроме стабильности и возможности её контроля, прибор обязан обеспечивать возможность его градуировки.

В СССР существовал порядок: при создании СИ либо принимают меры, обеспечивающие возможность его калибровки с помощью существующей эталонной базы, либо, если это невозможно, обязательно создают специальные эталонные средства, которые обеспечивают прослеживаемость создаваемого СИ к первичным эталонам.

В последние годы большое внимание уделяют мониторингу окружающей среды. Для мониторинга экологической обстановки в океане широко используют рекордеры — автономные устройства, записывающие шум моря в течение продолжительного времени. По мере накопления данных возникло желание нормировать допустимый уровень акустического загрязнения моря. К сожалению, рекордер создавали для регистрации подводного звукового сигнала, но не как СИ подводного звука. Это существенно затрудняет его калибровку.

Зачастую рекордер создан как «чёрный ящик», на входе которого — акустический сигнал, а на выходе — цифровая запись акустического сигнала, обработанного электронными устройствами рекордера. «Чёрный ящик» обеспечивает полную защиту от несанкционированного доступа, что можно рассматривать как преимущество с точки зрения законодательной метрологии. К сожалению, на этом преимущества такого подхода к конструированию рекордера заканчиваются:

- отсутствует возможность доступа к входным электрическим цепям рекордера, к которым подключён гидроакустический преобразователь;
- отсутствует возможность контроля характеристик электрических трактов рекордера;
- отсутствует возможность непосредственного доступа к аналоговому сигналу на входе АЦП, что многократно затрудняет калибровку, например, из-за невозможности наблюдать регистрируемый сигнал при настройке режимов работы излучающего и приёмного трактов эталонной установки;
- отсутствует возможность обнаружить искажения сигнала вследствие перегрузки какого-либо элемента регистрирующего тракта.

Отдельного упоминания заслуживают рекордеры, которые накапливают оценки измеряемого сигнала вместо либо дополнительно к самому сигналу. Чтобы проверить правильность выполняемых рекордером оценок, должна быть обеспечена возможность подавать на электрический вход рекордера разнообразные тестовые сигналы. Дело в том, что параметры таких тестовых

сигналов должны задаваться и контролироваться с большей точностью, чем это возможно для акустических сигналов. Во многих случаях требуемый акустический сигнал создать невозможно, например, из-за отражений звука.

Особенность калибровочных и поверочных работ состоит в том, что оценки, выдаваемые рекордером, необходимо получать в процессе измерений, для чего у рекордера должен быть соответствующий выход. Рекордер должен иметь возможность получать оценки, позволяющие выполнить его калибровку методами, реализуемыми в эталонных установках. Например, если в эталоне используют тонально-импульсный метод измерений, то рекордер должен обеспечивать процедуру измерений тонально-импульсным методом, включая алгоритм стробирования.

Таким образом, чтобы обеспечить прослеживаемость результатов калибровки, рекордер должен быть дополнен специальными аппаратными средствами и программным обеспечением, которые не нужны при регистрации сигналов.

Рассмотрим, как эти проблемы решались на примере рекордера, созданного в Pacific Northwest National Laboratory [1]. Рекордер был создан для изучения воздействия звуков, создаваемых при подводных взрывных работах и забивке свай, на популяции лосося и радужной форели, а также для записи звуков, излучаемых судами, и вокализаций, используемых морскими млекопитающими для общения.

Разработчики понимали, что рекордер должен быть универсальным и обеспечивать анализ различных сигналов и измерение большого количества параметров, характеризующих воздействие звука на подводных обитателей как известных, так и тех, которые могут появиться в процессе исследований. Для проверки качества работы рекордера разработчики выполнили разносторонние испытания, для которых применяли различные тестовые сигналы и методы оценки их параметров.

Преимуществом разработанного рекордера для его использования в качестве СИ является возможность поэлементной проверки характеристик электронного узла, отвечающего за обработку сигнала гидрофона, и регистратора данных (АЦП). Для этих проверок использовали две различные серийно выпускаемые известной фирмой карты сбора данных, содержащих ЦАП и АЦП.

Для комплектной проверки использовали гидроакустический бассейн, в котором излучали и принимали записи реальных звуков (подводный взрыв и крик кита).

Испытания аналоговой части

Критериями испытаний платы обработки сигналов гидрофона были: близость измеренного значения коэффициента усиления и частоты среза фильтра нижних частот к расчётным значениям. Применённый авторами подход

даёт информацию, ценную для разработчика, но практически бесполезную для метролога. Так, полученное отличие коэффициента усиления от расчётного значения 0,35 дБ можно просто учесть введением соответствующей поправки. Граничная частота, определённая по уровню –3 дБ, ничего не говорит о неравномерности частотной характеристики в нормированном рабочем диапазоне частот.

С точки зрения метролога, следует сначала нормировать рабочий диапазон частот рекордера и допустимую неравномерность частотной характеристики в этом диапазоне, а затем выполнить измерения неравномерности частотной характеристики в нормированном диапазоне частот с нормированной погрешностью.

Для измерений коэффициента усиления использовали карту сбора данных с 16-разрядными ЦАП и АЦП. С помощью ЦАП формировали тестовое напряжение в виде 1000 периодов гармонического сигнала на различных частотах, которое подавали на вход платы обработки сигналов гидрофона. С помощью АЦП входной и выходной сигналы платы преобразовывали в цифровые отсчёты, по которым рассчитывали средние квадратические значения напряжений (СКЗ).

В метрологии применение СКЗ в качестве измеряемого параметра напряжения является предпочтительным в сравнении, например, с пиковым значением. Использование 1000 периодов гармонического сигнала позволяет минимизировать погрешность вычислений СКЗ. Однако для измерений СКЗ с нормированной погрешностью необходимо применять вольтметр или другое устройство с известной погрешностью измерения СКЗ.

Испытания цифрового регистратора данных

При испытаниях регистратора данных определяли коэффициент усиления и частоту среза регистратора. В результате испытаний установили, что среднее квадратическое отклонение (СКО) значений коэффициентов усиления испытанных регистраторов составляет 0,25 дБ, а средняя частота среза составляет 44,3 кГц при СКО 6 Гц. Так же, как и при испытаниях платы обработки сигналов, полученная информация может представлять интерес для изготовителя, но бесполезна для метролога.

Как и в предыдущем испытании, вместо вольтметра использовали карту сбора данных с 16-разрядным АЦП для проверки регистратора с 24-разрядным АЦП. Вместо измерений неравномерности коэффициента усиления в нормированном частотном диапазоне определяли частоту среза регистратора, которая обязана быть близкой к частоте Найквиста. По СКО коэффициента усиления можно судить о повторяемости при изготовлении регистраторов, но не о метрологических свойствах конкретного изделия.

Испытания электрического тракта в целом

Как и следовало ожидать, усиление всего электрического тракта оказалось очень близким к сумме усилений двух его составных частей, а частота среза на 0,5 кГц меньше, чем у платы обработки сигналов гидрофона.

Кроме подтверждения результатов, полученных для каждой части тракта, никакой новой полезной метрологической информации не было получено. За рамками испытаний электрического тракта остались важнейшие для СИ характеристики: входной импеданс, уровень собственных шумов, верхний предел динамического диапазона, линейность амплитудной характеристики.

Одной из заявленных разработчиками целей создания рекордера был мониторинг потенциально опасных для подводных обитателей воздействий звука. Рамочной директивой ЕС по морской стратегии частоты от 63 до 125 Гц признаны наиболее опасными для морской фауны [2, 3]. Рекордер предназначен в том числе и для регистрации взрывов и ударов при забивке свай, то есть сигналов, в спектре которых преобладают низкочастотные компоненты; при этом характеристика рекордера в низкочастотной области имеет важное, иногда решающее значение для получения достоверных данных. Однако все испытания были выполнены на частотах 100 Гц и выше.

Отметим, что отсутствие индикатора выходного сигнала либо возможности передачи зарегистрированной информации в ЭВМ в режиме «онлайн» существенно затрудняет процесс испытаний. При использовании рекордера в качестве СИ аппаратные и программные средства, применённые разработчиками при испытаниях, необходимо ввести в состав СИ в качестве неотъемлемой его части, обеспечивающей поверку.

Критерием испытаний электрического тракта рекордера было совпадение результатов, полученных при генерации тестовых сигналов двумя различными ЦАП. Для метролога такое «совпадение» — ничего не значащий факт.

Испытания в гидроакустическом бассейне

Казалось бы, испытания в бассейне — это основной способ проверки метрологических характеристик приёмника подводного звука. Испытания разработанного рекордера были выполнены следующим образом. В бассейн помещали излучатель и гидрофон. Излучали два акустических сигнала: подводный взрыв и крик кита. Для каждого входа четырёх испытываемых рекордеров записывали каждый тестовый сигнал по меньшей мере пять раз при всех возможных коэффициентах усиления. Помимо этого, эти же сигналы гидрофона записывали с помощью АЦП карты сбора данных, которую использовали при испытаниях электрического тракта.

Используя БПФ, получали и сравнивали спектры записей каждого тестового сигнала. Критерием испытаний служила близость спектров. Весь этот

объём работы был выполнен с помощью гидрофона B&K 8104, который не является штатным гидрофоном рекордера. При этом гидрофон подключали поочерёдно ко входу рекордера либо к усилителю на входе АЦП.

Полученные по такой методике результаты не имеют ни малейшего отношения к акустическим свойствам рекордера, поскольку корпус рекордера находился вне звукового поля бассейна, что позволяло, не меняя положение гидрофона в бассейне, переключать выход гидрофона с рекордера на усилитель АЦП, но не позволяло учесть искажения принимаемого сигнала корпусом рекордера.

Целью этих испытаний была заявлена проверка качества записи осциллограмм реальных подводных акустических сигналов. Однако сравнивали усреднённые спектры мощности, а не осциллограммы. При использовании спектрального анализа для достижения поставленной цели нужно было сравнивать комплексные не усреднённые спектры. Если при испытаниях сравнивать не спектры, а осциллограммы, то можно было бы оценить погрешность пиковых значений звукового давления, которые измеряли при практическом использовании рекордера.

Принципиальный недостаток методики испытаний — сравнение не излучённого и принятого сигналов, а сигналов, принятых одним гидрофоном в одной точке бассейна. При приёме акустических сигналов в бассейне следует чрезвычайно аккуратно относиться к оценке параметров принятого сигнала. Начальный участок принятого сигнала искажён переходным процессом излучателя. Между начальным участком и моментом прихода первого отражения от стенок бассейна (начало реверберационных искажений) можно выполнять любые измерения. К сожалению, протяжённость этого свободного от искажений участка сигнала не превышает единиц миллисекунд, что не позволяет выполнить необходимые оценки метрологических характеристик рекордера.

Существуют методы, позволяющие преодолевать этот недостаток. Выбор метода зависит от вида испытуемой метрологической характеристики рекордера.

Для измерений частотной характеристики рекордера по полю можно применять спектрометрию временных задержек [4], гомоморфную времяселективную постобработку [5] или метод скользящего комплексного взвешенного усреднения [6]. Для получения комплексного спектра либо осциллограммы сигнала используют передаточную функцию бассейна [7]. Чтобы правильно оценить акустические свойства рекордера, в бассейне должен находиться не гидрофон, а весь рекордер в том виде, в котором его применяют в море.

Отсутствие аналогового выхода принимаемого сигнала не позволяет применить ни один из перечисленных методов. Это требование может показаться излишним, поскольку для сложной обработки, применяемой в каждом из

методов, сигнал оцифровывают для передачи его в ЭВМ. Для повышения отношения сигнал/шум применяют синхронное накопление принятых сигналов. Этот приём требует жёсткой синхронизации излучающего и приёмного трактов, которую невозможно обеспечить, используя АЦП рекордера.

Калибровка рекордера на низких частотах

С уменьшением частоты влияние дифракции звуковой волны на корпусе рекордера уменьшается, и частотная характеристика по полю становится практически идентичной частотной характеристике по давлению.

Ещё одним требованием к рекордеру как к СИ является обеспечение возможности размещать гидрофон либо звукоприёмную часть рекордера в камере малого объёма, которую применяют для калибровки на низких частотах по давлению. Такую калибровку вынужденно используют вместо калибровки по полю на частотах ниже 1 кГц, на которых методы калибровки по полю либо не позволяют выполнить измерения, либо не обеспечивают требуемой точности [8]. На рис. 1 изображена установка для низкочастотной калибровки рекордеров в камере малого объёма, типичное поведение чувствительности рекордеров на низких частотах представлено зависимостями на рис. 2 (НФЛ — Национальная физическая лаборатория Великобритании).

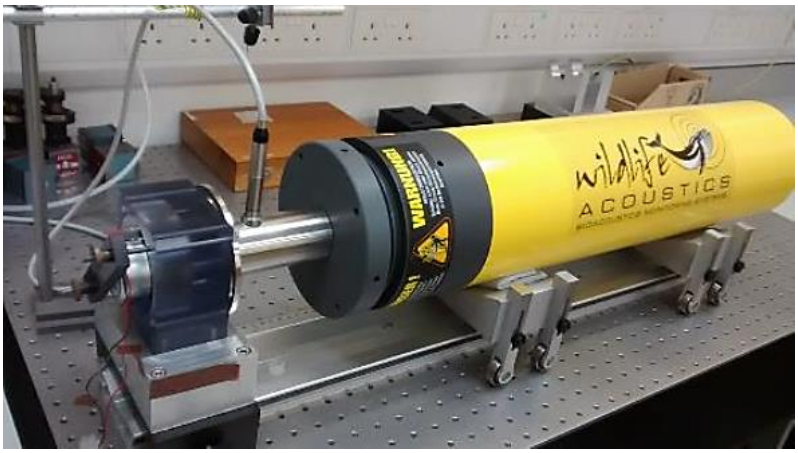

Рис. 1. Установка для низкочастотной калибровки рекордеров (НФЛ, Великобритания)

При испытаниях не была измерена частотная характеристика рекордера как единого целого. Вместе с тем поведение частотной характеристики рекордера на низких частотах определяется соотношением ёмкости гидрофона и входного импеданса рекордера. При испытаниях входной импеданс платы обработки сигнала гидрофона не был определён, а зачастую именно он, а не ёмкость и сопротивление утечки гидрофона, определяет поведение частотной характеристики рекордера на низких частотах.

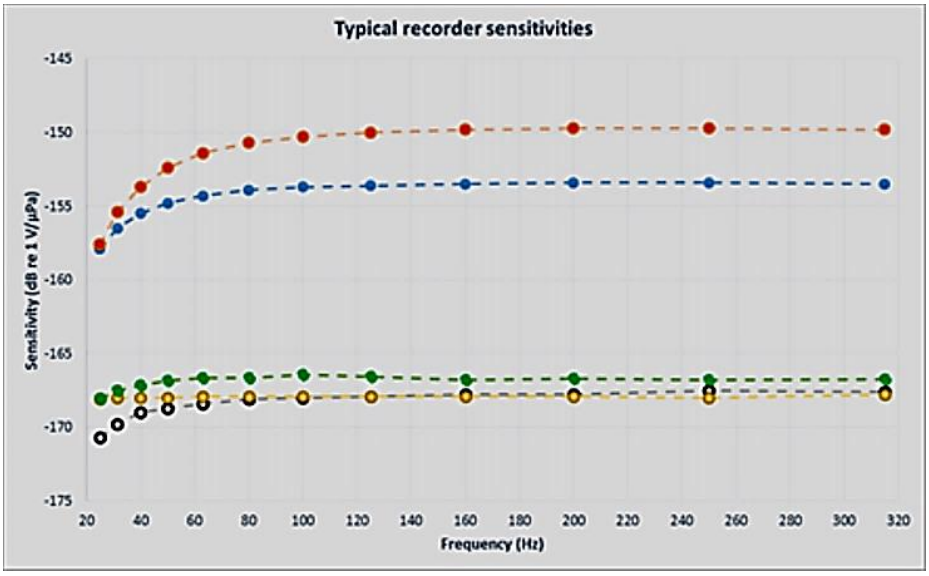

Рис. 2. Зависимости чувствительности рекордеров на низких частотах (НФЛ, Великобритания)

Процедура измерения частотной характеристики рекордера на низких частотах может быть существенно упрощена в случае, если частотная зависимость чувствительности гидрофона известна, а сам гидрофон может быть отсоединён от рекордера. Это даёт возможность применить метод замещения напряжения, при котором сигнал на электрический вход рекордера подаётся через гидрофон (см. схему на рис. 3). Помимо измерения частотной характеристики рекордера на низких частотах метод позволяет учесть влияние ёмкости входной цепи рекордера, которая включена параллельно ёмкости гидрофона и уменьшает сигнал, поступающий с гидрофона.

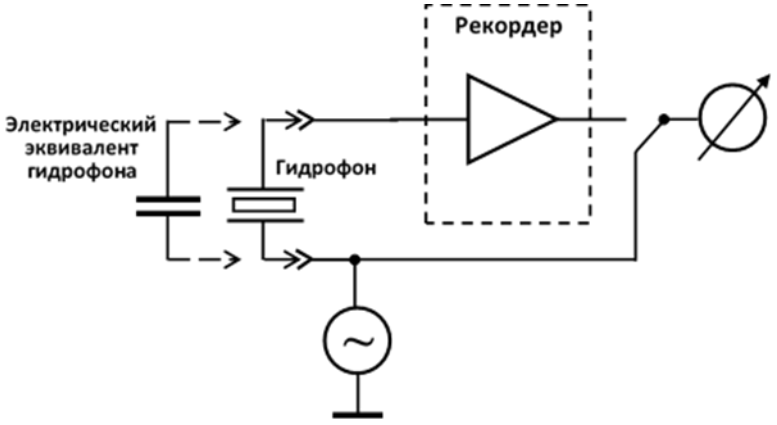

Рис. 3. Схема измерений при калибровке рекордера методом замещения напряжения

При испытаниях было бы корректно подавать сигнал на вход платы обработки сигнала гидрофона через конденсатор, ёмкость которого равна ёмкости гидрофона (электрический эквивалент гидрофона). Это позволило бы довольно точно определить поведение частотной характеристики на низких частотах.

Эффект Чичен-Ица

При попытке испытаний рекордера на реальных подводных акустических сигналах записи таких сигналов излучали в бассейне и принимали рекордером. К чему может привести такой эксперимент, любой турист может убедиться, хлопнув в ладоши у основания пирамиды Чичен-Ица. На резкий хлопок пирамида ответит «криком» священной у индейцев майя птицы квезаль. На слух — это два совершенно разных звука. На самом деле «крик птицы» — многократно отражённый ступенями пирамиды хлопок, пропущенный через акустический фильтр — башенку на вершине пирамиды. Аналогичные переотражения происходят при излучении звука в бассейне и особенно заметны при излучении резкого звука, например, взрыва. Эффект переотражений можно получить и без бассейна, расположив громкоговоритель и микрофон в обычной комнате.

Вследствие реверберации звука при излучении в бассейне широкополосных продолжительных сигналов спектры сигналов, принятых в различных точках бассейна, разительно различаются. Каждому расположению излучателя и приёмника в бассейне соответствуют свои частоты, на которых бассейн либо усиливает, либо режектирует звуковую волну, подавляя её отражёнными волнами. В зависимости от точки приёма одни и те же спектральные компоненты принятого сигнала могут быть либо полностью подавлены, либо многократно превышать соответствующие спектральные компоненты излучённого сигнала. Не исключено, что в бассейне удастся найти такую точку, при помещении рекордера в которую излучённый крик кита будет воспринят как крик птицы квезаль. Авторам методики испытаний пришлось бы приложить значительные усилия, чтобы по принятому сигналу восстановить форму излучённого сигнала, например, используя передаточную функцию бассейна [7].

Калибровка по полю

В идеале, чтобы зарегистрировать акустический сигнал без искажений, частотная характеристика рекордера должна быть ровной, а характеристика направленности — круговой. Требования к характеристикам измери-

тельного гидрофона установлены в [9]. Не ухудшить характеристики гидрофона современными электронными узлами не составляет большой сложности. Однако ровная частотная характеристика системы гидрофон – электрический тракт рекордера не гарантирует отсутствие искажений при регистрации подводного звука. Проблема создания совершенного прибора для измерений подводного звука кроется в необходимости обеспечить высокое акустическое качество конструкции его корпуса.

Не учтённое при испытаниях влияние корпуса рекордера может быть весьма значительным. Дифракционные искажения падающей на рекордер звуковой волны становятся заметными, начиная с частот в сотни герц, и увеличиваются с частотой (см. зависимости на рис. 4). На частотах выше 10 кГц вызванные дифракцией осцилляции частотной характеристики могут достигать 18–20 дБ (см. зависимости на рис. 5) [10, 11], что ставит под сомнение саму возможность применять рекордер на этих частотах как СИ. Выправить частотную характеристику применением корректирующих электрических цепей невозможно, поскольку размах и форма дифракционных осцилляций существенно зависят от угла падения звуковой волны на рекордер [10, 11].

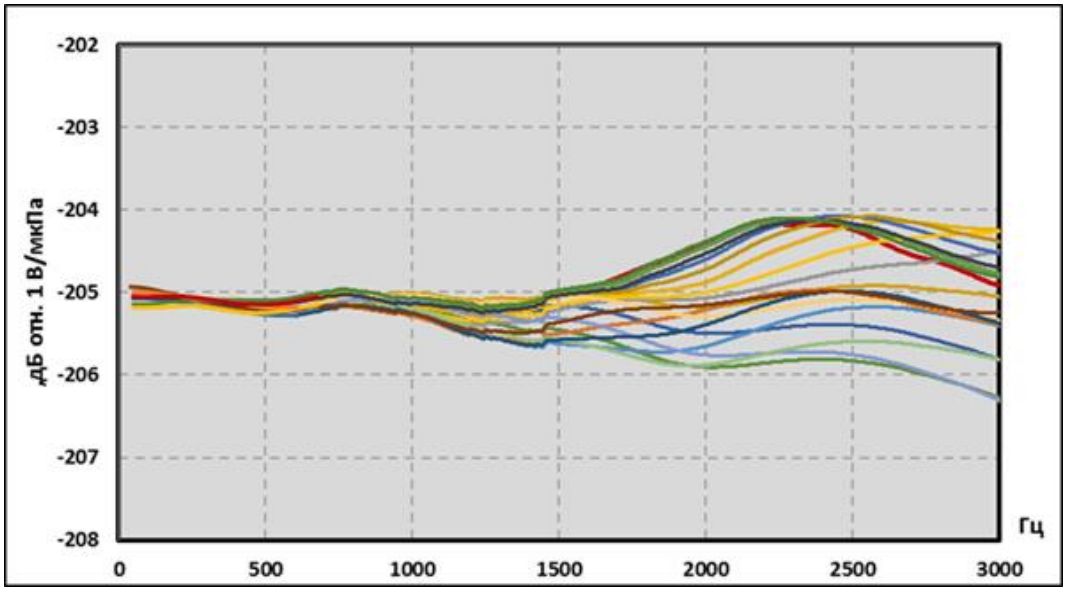

Рис. 4. Частотные зависимости чувствительности рекордера на низких частотах при углах падения звуковой волны от 0° до 90° (ВНИИФТРИ)

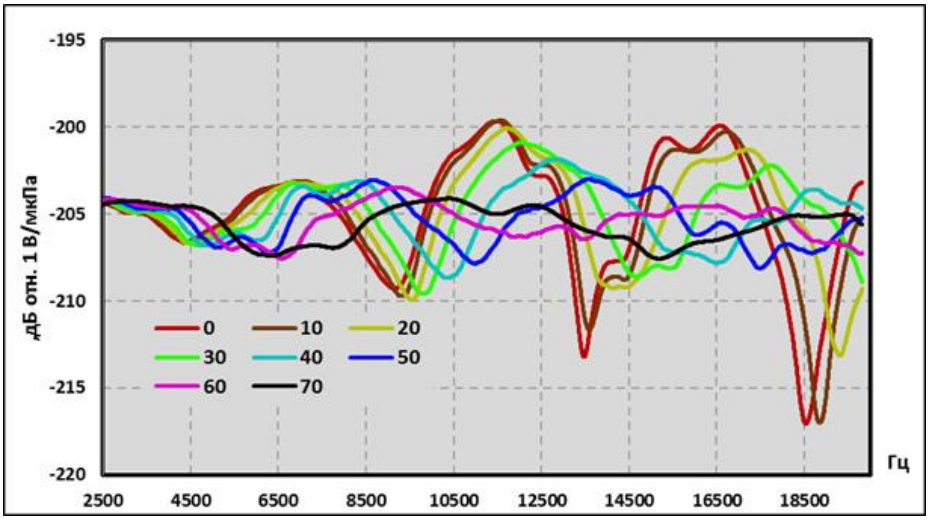

Рис. 5. Зависимости чувствительности рекордера на высоких частотах во фронтальном секторе углов падения звуковой волны от 0° до 70° (ВНИИФТРИ)

Это вынуждает применять меры по совершенствованию акустических свойств корпуса рекордера, например, применяя акустически прозрачные материалы либо улучшая акустическую «обтекаемость» корпуса. Получить представление об акустически «обтекаемой» конструкции корпуса можно по фотографиям современных шумомеров. Решая те же самые проблемы, разработчики шумомеров эмпирическим путём создали форму корпуса, которая имеет обтекаемый вид и даёт минимальное рассеяние звуковой волны в точку расположения микрофона. Простейшее решение для рекордера — уменьшение эффективной площади рассеяния в точку приёма за счёт установки пластиковых конусов на торцевые поверхности цилиндрического корпуса, позволяет уменьшить размах дифракционных осцилляций на 8–10 дБ.

Заключение

Во ВНИИФТРИ разработаны основанные на технике СКВУ методы калибровки, которые позволяют определять чувствительность рекордера по полю в бассейне до частот, на которых влияние дифракции звуковой волны на корпусе рекордера становится пренебрежимым (единицы сотен герц). На этих же частотах чувствительность рекордера по давлению может быть определена упомянутыми выше независимыми методами, что позволяет убедиться в пренебрежимо малом влиянии дифракции. С другой стороны, форму частотной зависимости по давлению можно использовать при построении редактирующей функции в методе СКВУ [10], а саму характери-

стику использовать как характеристику по полю вплоть до самых низких частот.

До настоящего времени на частотах от 1 кГц и ниже методы калибровки рекордеров, прослеживаемые к национальным эталонам, не стандартизованы. Для решения этой проблемы ЕВРОМЕТ инициировал в рамках проекта EMPIR Call 2015 тему 15RPT02 (UNAC-LOW) по разработке стандарта на калибровку гидроакустических рекордеров на частотах от 20 Гц до 1 кГц.

Актуальной задачей сегодня является включение в создаваемые международные стандарты разработанных во ВНИИФТРИ методов. Такая постановка задачи опирается на приоритет ВНИИФТРИ в этой области, признанием которого явилось применение этих методов участниками международных и ключевых сличений МКМВ, а также включение методов в стандарт МЭК на калибровку гидрофонов.

Использование стандарта на гидрофоны при сертификации морских судов недостаточно для обеспечения той сопоставимости результатов, которая может быть достигнута с использованием рекордера. Включение методов ВНИИФТРИ в стандарт на калибровку рекордеров позволит избежать применения устаревших методов частичной калибровки при гармонизации отечественных стандартов с международными. Другими словами, перевести все недостатки международного стандарта на русский язык и включить их в текст российского стандарта. Такая гармонизация — шаг назад отечественной метрологии. Она потребует больших затрат на создание несовершенной эталонной базы, например, специальной камеры малого объёма для калибровки рекордера на низких частотах в воздухе, эталонной установки, позволяющей оперативно считывать и расшифровывать записи тестовых сигналов, хранящиеся в памяти рекордера, не извлекая рекордер из воды, и т.п.

При этом сохранится необходимость поддержания существующей эталонной базы, преимуществами которой являются возможности:

- выполнять калибровку по полю комплектного рекордера на частотах много ниже частот, доступных тонально-импульсному методу [10];
- получать непрерывные частотные зависимости по полю для достоверной оценки неравномерности чувствительности [10];
- определять энергетическую чувствительность рекордера применительно к различным измерительным задачам (шум локализованного источника, окружающий шум, шум движущегося источника) [12];
- восстанавливать при калибровке в бассейне форму излучённого сигнала для оценки погрешности измерении пиковых значений [13];
- учитывать влияние удалённых источников рассеяния звука [14];
- получать информацию о положении и силе источников рассеяния на элементах корпуса рекордера, весьма важную для разработчиков [15].

Создавать стандарт на калибровку рекордера необходимо одновременно и в тесной связи со стандартом на сам рекордер, в который, подобно стандар-

там на шумомеры, были бы включены требования к характеристикам и конструкции рекордера, методы испытаний с нормированными неопределённостями и методы поверки (периодической калибровки). В этот стандарт должны быть включены как упомянутые в статье требования, в том числе необходимость герметичного аналогового выхода, возможность отсоединения гидрофона при поверке, требование определять чувствительность по полю комплектного рекордера, так и требования специфические, обусловленные условиями эксплуатации (например, меры по уменьшению шумов обтекания, меры, препятствующие обрастанию рекордера морскими организмами [16], что нарушает его акустические свойства, и т.п.).

В настоящее время набор параметров для оценки негативного воздействия звука на морских обитателей только формируется. Поэтому используют оценки, понятные физикам: СКЗ, пиковое значение, энергия шума в полосе частот фильтра, аналогично тому, с чего начинали измерения шума в воздушной акустике. С появлением параметров, адекватно описывающих вредное воздействие подводного шума, например, пиковым значением в полосе частот, возникнет необходимость нормирования этой полосы вплоть до указания параметров полюсов формирующих эту полосу фильтров (как регламентировано стандартом на шумомеры).

Литература

1. Martinez J.J., Deng Z., Myers J.R., Rohrer J.S., Carlson T.J., Caviggia K.A. Design and Implementation of an Underwater Sound Recording Device / prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830, September 2011, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington 99352.
2. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine strategy framework directive).
3. Council directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora.
4. Pedersen P.C., Lewin P.A., Bjorno L. Application of time delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers / IEEE Trans. Ultrasonics, ferroelectric and frequency control, 1988. V. 35. N. 2. P. 185–205.
5. Barrera-Figueroa S., Rasmussen K., Jacobsen F. A time-selective technique for free-field reciprocity calibration of condenser microphones // J. Acoust. Soc. Am. 2003. Sept. V. 114 (3). P. 1467–1476.
6. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне // Акуст. журнал. 2009. Т. 55. № 6. С. 727–736.

7. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Черников И.В. Подавление реверберационных искажений сигнала приёмника с использованием передаточной функции бассейна // Акуст. журнал. 2017. Т. 63. № 2. С. 165–174.
8. Can Çorakçi A. Underwater Acoustic Calibration Standards for Frequencies Below 1 kHz UNAC-LOW / TC-AUV Meeting, 14-th May 2018, Teddington.
9. IEC 60500(2017) Гидроакустика. Гидрофоны. Свойства гидрофонов в полосе частот от 1 Гц до 500 кГц.
10. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Лабораторная калибровка гидроакустического приёмника по полю на низких частотах // Измерительная техника. 2018. № 01. С. 54–59.
11. Hayman G., Lepper P., Robinson S. The calibration and characterization of autonomous underwater recorders // Proc. of the 2-nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics UA2014 / ed. J.S. Papadakis, L. Bjorno. Rhodes, Greece, 2014. P. 1103–1108.
12. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Калибровка в лабораторном бассейне рекордера с вынесенным гидрофоном // Измерительная техника. 2018. № 07. С. 62–65.
13. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Черников И.В. Подавление реверберационных искажений сигнала приёмника с использованием передаточной функции бассейна // Акуст. журнал. 2017. Т. 63. № 2. С. 165–174.
14. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Чувствительность приёмника при измерениях подводного шума // Измерительная техника. 2018. № 09. С. 61–65.
15. Isaev A.E., Nikolaenko A.S. Free-field calibration of underwater sound receiver in a laboratory water tank at very low frequencies // CCAUV/15-17. URL: www.bipm.org. 2017.
16. Mathias H. Andersson. Field survey — preparation and Measurements campaign [Electronic resource]. URL: https://biasproject.files.wordpress.com/2016/02/03_field-work_ ma.pdf