

УДК 534.6.08

**О КАЛИБРОВКЕ ПРИЁМНИКОВ ВЕКТОРНЫХ ВЕЛИЧИН
ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В УСЛОВИЯХ
ОТРАЖАЮЩЕГО БАССЕЙНА. РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ
НА ОСНОВЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ СЛИЧЕНИЙ ЭТАЛОНОВ**

А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, Г.С. Некрич

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

isaev@vniiftri.ru,

matveev@vniiftri.ru

В статье говорится о разработке во ВНИИФТРИ способа калибровки приёмников векторных величин гидроакустического поля в условиях отражающего бассейна.

Приведены итоги сличений результатов калибровок приёмников колебательной скорости частиц водной среды в диапазоне частот от 5 Гц до 10 кГц, в которых приняли участие Научно-исследовательский институт прикладной акустики Ханчжоу — лаборатория пилот, и Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений. Для оценки измерительных и калибровочных возможностей в области измерений векторных величин гидроакустического поля помимо установок, реализующих калибровку в поле стоячей звуковой волны акустической камеры, участники сличений впервые использовали установки для абсолютной калибровки векторных приёмников по полю в реверберационном звуковом поле бассейна. Подтверждена согласованность результатов калибровок для трёх опорных приёмников, значимых несоответствий не выявлено ни для одной из 34 третьоктавных частот, на которых выполнили сличения.

Ключевые слова: метрология, подводная акустика, пилотные сличения, колебательная скорость частиц водной среды, калибровка по полю, калибровка по давлению.

**ABOUT THE CALIBRATION OF VECTOR QUANTITY
RECEIVERS OF HYDRO-ACOUSTIC FIELD
IN THE CONDITIONS OF REFLECTIVE WATER TANK.
RESULTS, CONCLUSIONS BASED
ON INTERNATIONAL STANDARDS**

A.E. Isaev, A.N. Matveev, G.S. Nekrich

FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region

isaev@vniiftri.ru,

matveev@vniiftri.ru

The article talks about the development of a method for calibrating receivers of vector quantities of a hydroacoustic field in a reflective water tank at VNIIFTRI.

The results of comparison of the calibration results of oscillation velocity receivers of particles in the aquatic environment in the frequency range from 5 Hz to 10 kHz are presented. The Research Institute of Applied Acoustics in Hangzhou — pilot laboratory, and Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering participated in comparison. To evaluate

measuring and calibration capabilities in the field of measuring the hydroacoustic field vector quantities except for installations implementing calibration in the standing sound wave field of the acoustic chamber, the participants of comparisons for the first time have used installations for absolute calibration of vector receivers across the field in the reverberation sound field of the water tank. The consistency of the calibration results for the three reference receivers was confirmed; no significant discrepancies were found for any of the 34 one-third octave frequencies at which the comparisons have been performed.

Key words: metrology, underwater acoustics, pilot comparisons, oscillation velocity of particles in the aquatic environment, field calibration, pressure calibration.

Введение

Калибровку приёмников колебательной скорости частиц водной среды (ПКС) традиционно выполняют методом колеблющегося столба воды в измерительных камерах на частотах не выше 2 кГц [1, 2]. Метод не позволяет выполнить калибровку современного широкополосного ПКС во всём его частотном диапазоне, достигающем десятков килогерц. Более того, реализуемый метод сравнения является относительным, поскольку основан на использовании приёмника звукового давления — гидрофона с известной чувствительностью, поэтому сличения результатов калибровок ПКС в камере не представляли существенного интереса. С разработкой во ВНИИФТРИ способа калибровки приёмников векторных величин гидроакустического поля в условиях отражающего бассейна появилась возможность создать эталоны для калибровки ПКС на частотах до 10 кГц включительно [3, 4]. Разработанный способ основан на измерениях по методу взаимности и является абсолютным, при этом корректность результатов калибровки нуждается в подтверждении сличениями.

Первые в мировой метрологической практике сличения национальных эталонов колебательной скорости частиц водной среды (колебательной скорости) проведены между Научно-исследовательским институтом прикладной акустики Ханчжоу (НААРИ, Китай) и Всероссийским научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ, Россия) в целях предоставления технических данных, подтверждающих возможности калибровки приёмников векторных величин, и расширения калибровочных и измерительных возможностей эталонов в области подводной акустики. Сличения были организованы ТК 1.2 «Акустика, ультразвук, вибрация» КОOMET в частотном диапазоне от 5 Гц до 4 кГц, им присвоен идентификатор 646/RU/14, а функции лаборатории-пилота принял на себя НААРИ. На этапе подготовки к сличениям было принято решение расширить частотный диапазон калибровок до 10 кГц.

Опорные приёмники, использованные в сличениях

В качестве опорных использовали три приёмника колебательной скорости: VHS56 и VHS90, которые представил НААРИ, и КГП-10 производства

Альманах современной метрологии, 2019, № 3 (19)

ВНИИФТРИ. Опорный приёмник представляет собой трёхкомпонентный преобразователь, внутри шарообразного корпуса которого по взаимно ортогональным осям расположены три акселерометра, выполненные в виде металлической массы, опирающейся на шесть двойных пьезоэлементов. Схема включения акселерометров позволяет получить три независимых канала приёма, выходное электрическое напряжение каждого канала пропорционально проекции вектора колебательной скорости на соответствующую ортогональную ось: X, Y или Z.

Чувствительный элемент приёмника обладает нейтральной плавучестью. При калибровках ПКС подвешивали на резиновых амортизаторах внутри стального крепёжного кольца диаметром 170 мм (показано на рис. 1) так, чтобы опорное направление калибруемого канала было перпендикулярным плоскости кольца и ориентировано на излучатель.

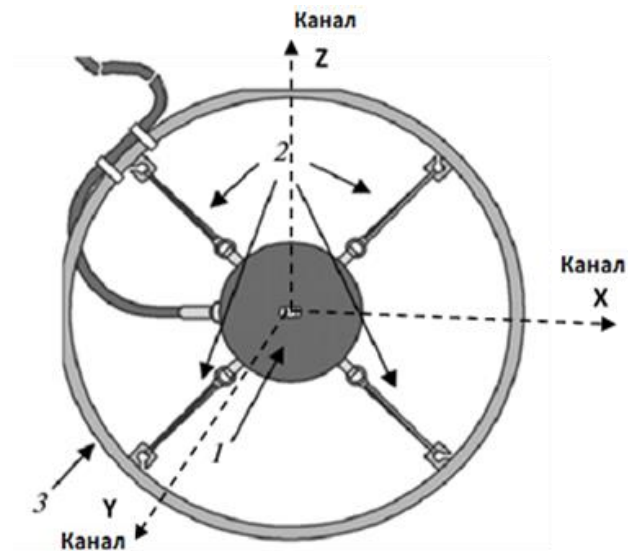


Рис. 1. Векторный приёмник: 1 — трёхкомпонентный преобразователь; 2 — резиновые амортизаторы; 3 — крепёжное кольцо

В техническом протоколе сличений 646/RU/14 была предусмотрена возможность расширения частотного диапазона сличений по результатам исследования долговременной стабильности ПКС в их рабочем диапазоне частот. При подготовке к сличениям была подтверждена долговременная стабильность приёмника VHS90 на частотах до 4 кГц, приёмников КГП-10 и VHS56 на частотах до 10 кГц включительно. Это дало возможность расширить частотный диапазон сличений.

Технические данные опорных ПКС приведены в таблице 1. Внешний вид приёмников представлен на рис. 2.

Таблица 1

Технические данные опорных приёмников

Тип приёмника	Изготовитель	Частотный диапазон, Гц	Длина встроенного кабеля, м	Диаметр преобразователя, мм	Напряжение питания постоянного тока, В
КГП-10	ВНИИФТРИ	500–10000	6	53	±12
VHS90	HAARI	5–4000	6	90	±12
VHS56	HAARI	500–10000	6	56	±12



Рис. 2. Опорные ПКС: КГП-10 в крепёжном кольце (слева), VHS56 (посередине), VHS90 (справа)

На сличениях участники выполнили калибровку каждого канала X, Y, Z низкочастотного приёмника VHS90 на частотах третьоктавного ряда в диапазоне от 5 до 4000 Гц, каналы высокочастотных приёмников VHS56 и КГП10 калибровали на частотах третьоктавного ряда в диапазоне от 500 до 10000 Гц.

Методы калибровки

В практике гидроакустических измерений принято определять чувствительность гидрофона по полю, поэтому калибровка гидрофона по давлению в поле стоячей звуковой волны камеры малого объёма — это мера вынужденная и выполняется только на низких частотах, на которых выполнить измерения по полю в бассейне не удаётся. С калибровкой ПКС ситуация аналогичная, более того, до недавнего времени методы калибровки ПКС по полю в бассейне отсутствовали. Наличие обратимого преобразователя звукового давления позволяет реализовать абсолютную калибровку гидрофона методом взаимности как в условиях камеры, так и в бассейне. Из-за отсутствия обратимого приёмника колебательной скорости калибровку ПКС ме-

тодом взаимности в камере реализовать не удалось. В то же время, используя в качестве обратимого преобразователя гидрофон, измерительную процедуру метода взаимности удалось применить для абсолютной калибровки ПКС по полю в бассейне [4, 5].

Методы калибровки, применённые в HAARI

В частотном диапазоне от 5 до 500 Гц калибровки выполняли методом колеблющегося столба воды в открытой сверху цилиндрической камере из нержавеющей стали. Звуковое поле в камере создавали излучателем, установленным на дне камеры. Чувствительность ПКС получали методом сравнения с эталонным гидрофоном [1].

Калибровку по полю выполняли на двух эталонных установках в заглушенном бассейне, применяя измерительную процедуру метода взаимности с тремя преобразователями в свободном поле бегущей сферической волны [6]. В диапазоне от 500 Гц до 4 кГц излучали линейно частотно-модулированные (ЛЧМ) сигналы, условия свободного поля обеспечивали методом скользящего комплексного взвешенного усреднения СКВУ [7]. На частотах от 1,6 до 10 кГц излучали тонально-импульсные сигналы, прямую волну излучателя выделяли методом временной селекции [6].

Методы калибровки, применённые во ВНИИФТРИ

На частотах от 5 до 500 Гц калибровку выполняли методом колеблющегося столба воды. Стоячую звуковую волну создавали в измерительной акустической камере — расположенной вертикально и открытой сверху трубы.

На частотах от 500 до 10000 Гц калибровки выполняли в незаглушенном гидроакустическом бассейне методом взаимности с тремя преобразователями. В качестве обратимого преобразователя применяли преобразователь звукового давления — обратимый гидрофон [5]. Излучали ЛЧМ сигналы, по длительности в несколько раз превышающие время реверберации звука в бассейне. Влияние отражённых звуковых волн подавляли методом скользящего комплексного взвешенного усреднения СКВУ.

Эталонные установки

Установка HAARI для калибровки в поле стоячей звуковой волны

Функциональная схема установки приведена на рис. 3. При измерениях эталонный гидрофон и калибруемый ПКС устанавливали в измерительной камере с помощью системы позиционирования. Генератором под управлением компьютера создавали непрерывный гармонический сигнал, которым через усилитель возбуждали излучатель камеры. Выходные электрические сигналы эталонного гидрофона и векторного приёмника усиливали и подвергали узкополосной фильтрации. Амплитуды сигналов измеряли с помощью вольтметра.

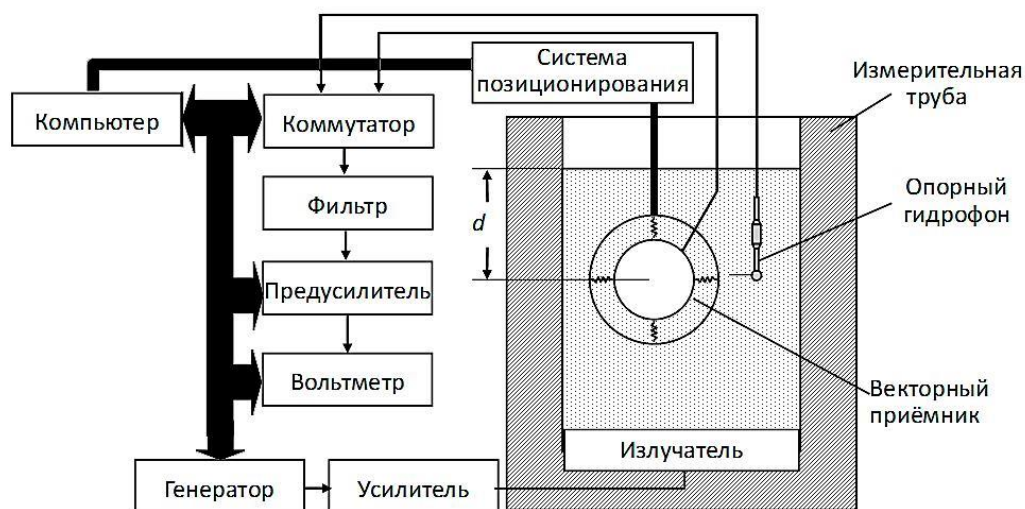


Рис. 3. Функциональная схема установки HAARI для калибровки в поле стоячей звуковой волны

Расширенная неопределённость (при $k = 2$) калибровки ПКС в частотном диапазоне от 5 до 500 Гц была оценена не превосходящей 1,0 дБ.

Температура воды составила 26,0 °С при калибровке КГП-10 и 17,0 °С при калибровке приёмников VHS90 и VHS56.

Установки HAARI для калибровки по полю

Калибровки по полю выполняли на двух установках в заглушенном бассейне длиной 50 м, шириной 15 м и глубиной 10 м. На рис. 4 приведена функциональная схема установки HAARI для калибровки на частотах от 500 Гц до 4 кГц. Калибруемый приёмник и пару вспомогательных преобразователей (излучатель и обратимый преобразователь) устанавливали на глубине 5 м на одной горизонтальной линии, проходящей через акустические центры преобразователей, с помощью специальных штанг из углеродного волокна. Штангу калибруемого приёмника размещали в центре между вспомогательными гидрофонами, ориентируя с помощью системы спуска-подъёма и вращения опорным направлением калибруемого канала на излучатель либо на обратимый преобразователь. При калибровке расстояние между излучателем и обратимым преобразователем составляло 2 м, расстояние между калибруемым приёмником и излучателем (обратимым преобразователем) — 1 м.

В качестве излучателя и обратимого преобразователя использовали сферические ненаправленные преобразователи типа D11 производства компании Gearing & Watson Electronics Ltd, Великобритания. Расширенная не-

определённость (при $k = 2$) калибровки ПКС на частотах от 500 Гц до 4 кГц была оценена не превосходящей 0,7 дБ.

Температура воды составила 15,8 °С при калибровке приёмника КГП-10 и 13,5 °С при калибровке VHS90 и VHS56.

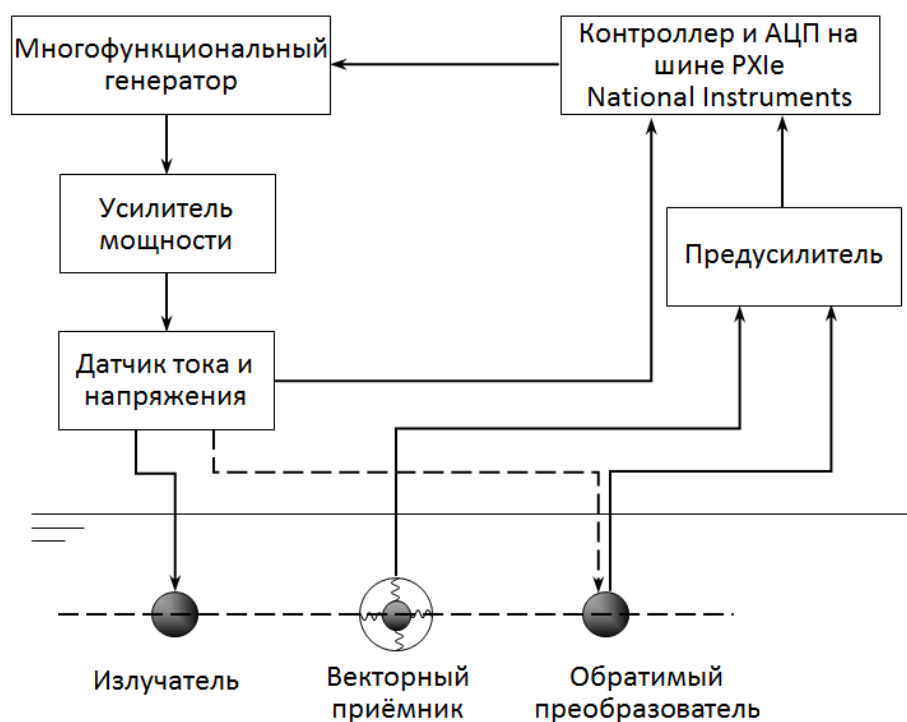


Рис. 4. Функциональная схема установки HAARI для калибровки методом взаимности в свободном поле в диапазоне частот от 500 Гц до 4 кГц

На рис. 5 приведена функциональная схема установки для калибровки по полю на частотах от 1,6 до 10 кГц. При калибровке выполняли поочерёдное измерение передаточных импедансов трёх пар излучатель — приёмник: излучатель — обратимый преобразователь; излучатель — ПКС; обратимый преобразователь — ПКС. Перед каждым измерением соответствующую пару переустанавливали на специальных штангах из углеродного волокна, которые погружали на глубину 5 м. Для каждой пары расстояние между излучателем и приёмником составляло 0,4 м. В качестве излучателя и обратимого преобразователя применяли гидрофоны типа RNS30, изготовленные в HAARI. Расширенная неопределённость (при $k = 2$) калибровки ПКС в частотном диапазоне от 1,6 до 10 кГц была оценена не превосходящей 0,7 дБ.

Температура воды составила 15,8 °С при калибровке приёмника КГП-10 и 13,5 °С при калибровке VHS90 и VHS56.

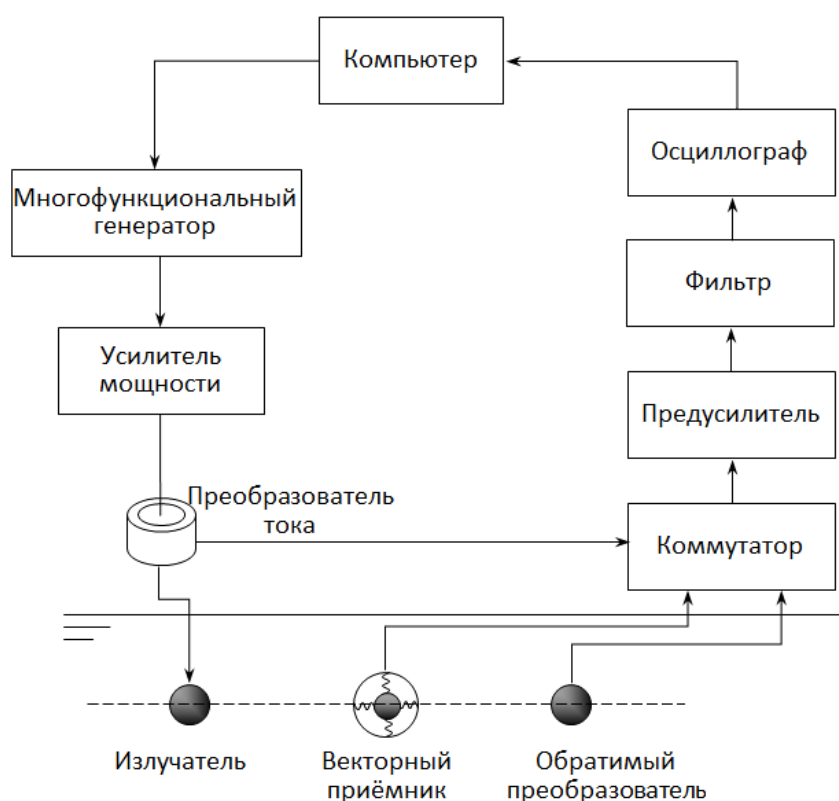


Рис. 5. Функциональная схема установки НААРИ для калибровки по полю на частотах от 1,6 до 10 кГц

Установка ВНИИФТРИ для калибровки методом колеблющегося столба воды

На рис. 6 приведена функциональная схема установки из состава ГЭТ 55-2017, реализующей процедуру калибровки методом сравнения в колеблющемся столбе воды [3]. В качестве эталонного преобразователя использовали предварительно откалиброванный гидрофон типа 8103 производства компании Brüel&Kjær (Дания). С помощью устройства позиционирования калибруемый приёмник и эталонный гидрофон устанавливали в измерительной камере высотой 0,7 м, внутренним диаметром 0,2 м и внешним диаметром 0,3 м так, чтобы акустические центры преобразователей были расположены на глубине 0,15 м. Для оценки амплитуд выходных электрических напряжений калибруемого приёмника и эталонного гидрофона применяли дискретное преобразование Фурье. Расширенная неопределённость (при $k = 2$) калибровки ПКС в частотном диапазоне от 5 до 500 Гц была оценена не превосходящей 0,8 дБ.

Температура воды при калибровке составила 20,0 °С.

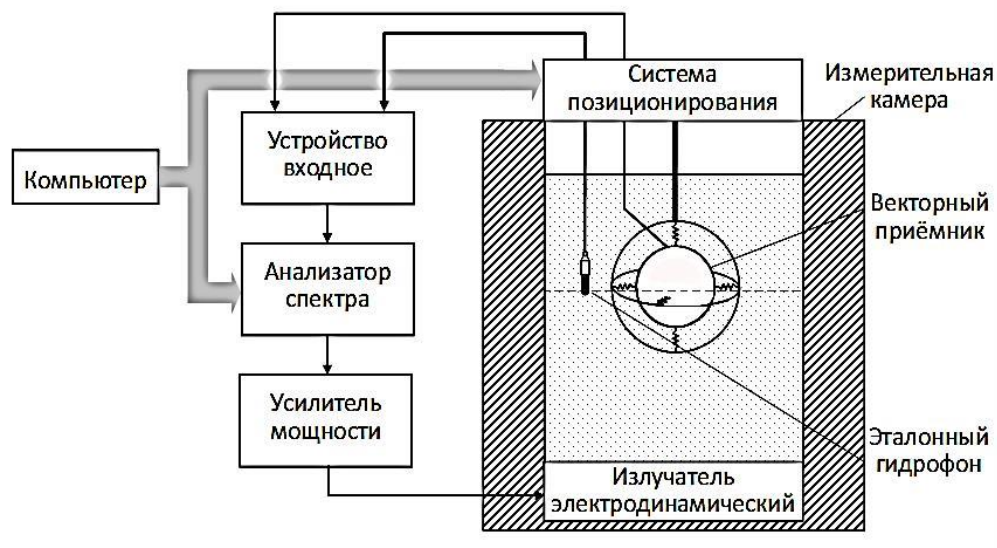


Рис. 6. Функциональная схема установки ВНИИФТРИ для калибровки методом колеблющегося столба воды

Установка ВНИИФТРИ для калибровки по полю методом взаимности

На рис. 7 показана функциональная схема установки ВНИИФТРИ для калибровки по полю методом взаимности. Преобразователи с помощью тонких гибких подвесов из капрона размещали на глубине 3 м в незаглушенном гидроакустическом бассейне длиной 10 м, шириной 6 м и глубиной 6 м. Излучали квадратурно дополненные ЛЧМ сигналы, изменяя частоту от 0 Гц до 14 кГц. Продолжительность сигнала излучения составляла две секунды, что вчетверо превышает время реверберации звука в бассейне. Для улучшения отношения сигнал/шум применяли когерентное накопление. Регистрировали комплексную частотную зависимость передаточного импеданса пары излучатель — приёмник в реверберационном звуковом поле бассейна. Частотную зависимость по полю получали обработкой зарегистрированной зависимости по методу СКВУ [5, 7]. Для уменьшения погрешности измерений на низких частотах экспериментальную частотную зависимость редактировали на основе информации о частотных свойствах излучателя и приёмника [5]. Искажения звукового поля преобразователем, не участвующим в текущем измерении (затенение приёмника, отражение сигнала корпусом и креплением преобразователя), устраняли, оставляя при измерениях на рабочей глубине только соответствующую пару излучатель — приёмник и поднимая третий преобразователь к поверхности воды. Расстояние между излучателем и приёмником в парах менялось при повторных калибровках и составляло от 0,6 до 1,0 м. Чтобы уменьшить погрешности позиционирования по углу и глубине, положения преобразователей контролировали по лучу лазера. Рас-

стояние между приёмником и излучателем измеряли акустическим способом [8]. В качестве излучателя и обратимого преобразователя использовали сферический ненаправленный гидрофон типа ИТС-1001 (International Transducer Corporation, США), активный элемент которого представляет собой пьезоэлектрическую сферу из керамики диаметром 110 мм. Расширенная неопределённость (при $k = 2$) калибровки ПКС в частотном диапазоне от 500 Гц до 10 кГц была оценена не превосходящей 0,8 дБ.

Температура воды составила (17 ± 1) °С при калибровке приёмника КГП-10 и (18 ± 1) °С при калибровке приёмников VHS90 и VHS56.

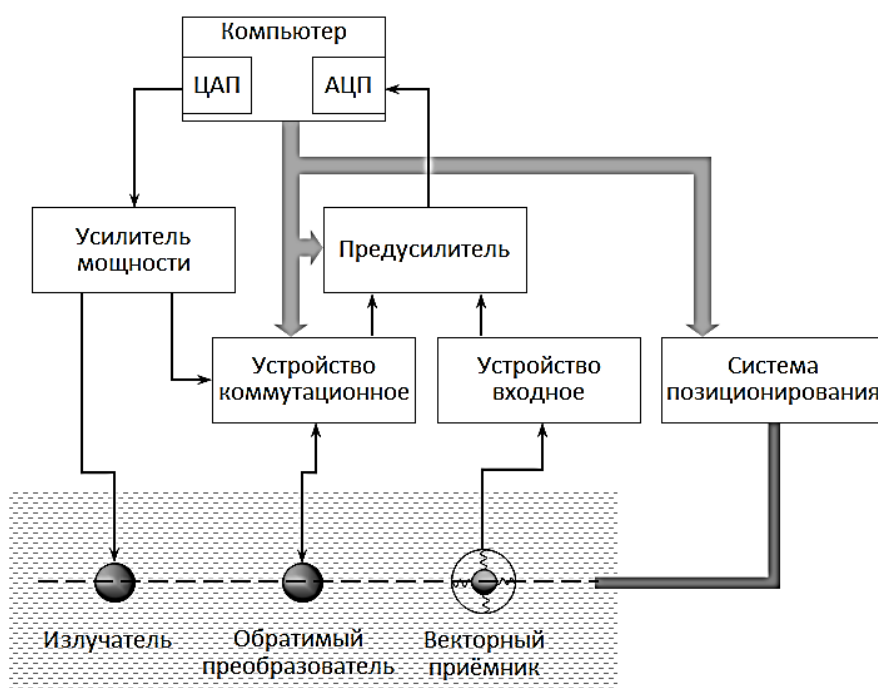


Рис. 7. Функциональная схема установки ВНИИФТРИ для калибровки по полю методом взаимности

Результаты калибровок

Основными задачами пилотных сличений являлись: установление согласованности результатов калибровок, проверка обоснованности заявленных неопределённостей и достоверности представленных участниками бюджетов неопределённостей, подтверждение эквивалентности национальных эталонов.

В соответствии с техническим протоколом сличений результаты калибровок опорных приёмников представляли чувствительностью к звуковому давлению, выраженной в [дБ] относительно 1 В/мкПа.

Три опорных приёмника были откалиброваны в разное время, в разных лабораториях специалистами, использовавшими разные измерительные установки. Температура воды, размеры и акустические свойства гидроакустических бассейнов также отличались. При калибровке гидрофона температура воды может оказывать существенное влияние на его чувствительность. Однако участники сличений не рассматривали влияние температуры воды как отдельный источник неопределённости калибровки ПКС и не применяли поправок на температурную зависимость его чувствительности, основываясь на дифференциальном принципе формирования выходного сигнала опорных ПКС.

Поскольку выполненные сличения результатов калибровок ПКС — первые в метрологической практике, участники представили бюджеты, существенно различающиеся как учтёнными источниками неопределённости, так и оценками вклада совпадающих источников.

Оценки неопределённости калибровок участников сличений

В таблицах 2–6 приведены составляющие бюджетов неопределённостей для каждого метода калибровки, используемого участниками сличений. Оценку неопределённости калибровок участники сличений выполняли в соответствии с [9].

Таблица 2
Оценка неопределённости калибровки ВНИИФТРИ сравнением с эталонным гидрофоном методом колеблющегося столба воды

Источник неопределённости		Величина (дБ)
Тип В	Неопределённость определения плотности воды	0,01
	Неопределённость определения ускорения свободного падения	0,00
	Неопределённость установки частоты излучения	0,01
	Неопределённость позиционирования векторного приёмника по глубине	0,45
	Неопределённость позиционирования эталонного гидрофона по глубине	0,09
	Неопределённость измерения отношения выходных напряжений преобразователей	0,13
	Отношение сигнал/шум	0,26
	Неопределённость калибровки эталонного гидрофона	0,23
	Неопределённость определения скорости звука в измерительной камере	0,45
	Искажение звукового поля в измерительной камере	0,27

Продолжение таблицы 2

Источник неопределённости		Величина (дБ)
Тип А	Стандартная неопределённость измерений чувствительности	0,26
Расширенная неопределённость (коэффициент охвата $k = 2$)		0,80

Таблица 3

Оценка неопределённости калибровки ВНИИФТРИ
по полю методом взаимности

Источник неопределённости		Величина (дБ)
Тип В	Влияние направленности преобразователей	0,09
	Неопределённость получения данных (оцифровки) осциллографом	0,01
	Неопределённость измерения значения сопротивления резистора в цепи обратимого преобразователя	0,04
	Интерференция вследствие остаточного влияния отражений от границ бассейна	0,04
	Интерференция вследствие рассеяния звуковой волны креплением приёмника	0,13
	Влияние синфазной электрической помехи	0,09
	Влияние усреднения частотной зависимости ПИ пары излучатель — приёмник	0,04
	Нарушение критерия взаимности обратимого преобразователя	0,04
	Отличие звукового поля от поля плоской звуковой волны	0,02
	Неопределённость установки уровня генератора	0,04
	Неопределённость установки частоты генератора	0,01
	Неопределённость вычисления значения скорости звука в водной среде	0,01
	Неопределённость вычисления значения плотности воды	0,01
	Неопределённость коэффициента усиления предусилителя	0,31
Неопределённость измерения временной задержки распространения сигнала	0,01	

Продолжение таблицы 3

Источник неопределённости		Величина (дБ)
Тип В	Неопределённость вычисления передаточного импеданса пары излучатель — приёмник в свободном поле	0,18
	Нарушение условий дальнего поля	0,22
Тип А	Стандартная неопределённость измерения чувствительности	0,12
Расширенная неопределённость (коэффициент охвата $k = 2$)		0,80

Таблица 4

Оценка неопределённости калибровки НААRI методом сравнения с эталонным гидрофоном в измерительной трубе в поле стоячей звуковой волны

Источник неопределённости		Величина (дБ)
Тип В	Неопределённость калибровки эталонного гидрофона	0,31
	Неопределённость измерения выходных напряжений приёмников	0,05
	Неопределённость установки частоты генератора	0,00
	Неопределённость позиционирования приёмников по глубине	0,04
	Влияние направленности векторного приёмника	0,05
	Неравномерность звукового поля в измерительной камере при радиальном распределении	0,25
	Несогласованность нагрузки и входного импеданса предусилителя	0,06
	Неопределённость отношения сигнал/шум	0,03
	Неопределённость из-за наличия интерференционной помехи	0,09
Тип А	Стандартная неопределённость измерений чувствительности	0,26
Расширенная неопределённость (коэффициент охвата $k = 2$)		1,00

Таблица 5

Оценка неопределённости калибровки НААРИ по полю методом взаимности с применением техники СКВУ

Источник неопределённости		Величина (дБ)
Тип В	Несогласованность нагрузки и входного импеданса предусилителя	0,06
	Неопределённость преобразования сигналов датчиком тока	0,05
	Неопределённость получения данных (оцифровки) АЦП	0,02
	Нарушение критерия взаимности обратимого преобразователя	0,15
	Неопределённость из-за неравномерности частотной характеристики чувствительности преобразователей	0,12
	Влияние направленности преобразователей	0,10
	Неопределённость позиционирования преобразователей по глубине	0,10
	Неопределённость измерения дистанции между преобразователями	0,05
	Неопределённость значения плотности воды	0,02
	Неопределённость установки частоты генератора	0,00
	Неопределённость влияния отражений от границ бассейна	0,17
	Неопределённость влияния электромагнитного шума	0,05
	Неопределённость из-за наличия акустической шумовой помехи	0,06
	Неопределённость из-за нарушения сферичности звукового поля	0,12
Влияние усреднения частотной зависимости ПИ пары излучатель — приёмник	0,23	
Тип А	Стандартная неопределённость измерения чувствительности	0,10
Расширенная неопределённость (коэффициент охвата $k = 2$)		0,70

Таблица 6

Оценка неопределённости калибровки HAARI по полю методом взаимности с применением техники временной селекции тонального импульса

Источник неопределённости		Величина (дБ)
Тип В	Несогласованность нагрузки и входного импеданса предусилителя	0,06
	Неопределённость измерений преобразователя тока	0,05
	Неопределённость получения данных (оцифровки) АЦП	0,06
	Нарушение критерия взаимности обратимого преобразователя	0,15
	Неопределённость из-за неравномерности частотной характеристики чувствительности преобразователей	0,12
	Влияние направленности преобразователей	0,10
	Неопределённость позиционирования преобразователей по глубине	0,10
	Неопределённость измерения дистанции между преобразователями	0,05
	Неопределённость значения плотности воды	0,02
	Неопределённость установки частоты генератора	0,00
	Неопределённость из-за нехватки устоявшейся части тонального сигнала	0,20
	Неопределённость влияния электромагнитного шума	0,05
	Неопределённость из-за наличия акустической шумовой помехи	0,06
Неопределённость из-за нарушения сферичности звукового поля	0,12	
Тип А	Стандартная неопределённость измерения чувствительности	0,07
Расширенная неопределённость (коэффициент охвата $k = 2$)		0,70

Обработка результатов сличений

Для оценки сопоставимости результатов, полученных участниками сличений, выполняли расчёт степеней эквивалентности эталонов. Степень эквивалентности национального эталона — это степень соответствия значений национального эталона опорному значению сличений, количественно выражаемая через отклонение значения, полученного на эталоне, от опорного значения сличения и неопределённость этого отклонения при коэффициенте охвата $k = 2$ [10].

При расчёте степени эквивалентности и связанной с ней неопределённости использовали величины, выраженные в абсолютных единицах.

На каждой частоте опорное значение сличения M_{ref} для соответствующего канала приёмника оценивали как взвешенное среднее представленных участниками результатов калибровок [10] по формуле (1):

$$M_{ref} = \frac{\sum \frac{M_i}{u_i^2}}{\sum \frac{1}{u_i^2}}, \quad (1)$$

где M_i и u_i — соответственно результат калибровки (чувствительность канала) и стандартная суммарная неопределённость результата калибровки (при $k = 1$), заявленные i -м участником, $i = \{CN, RU\}$ — индекс участника сличений (CN — НААРИ, RU — ВНИИФТРИ).

Стандартную неопределённость опорного значения сличения u_{ref} определяли по формуле (2):

$$u_{ref} = \frac{1}{\sqrt{\sum \frac{1}{u_i^2}}}. \quad (2)$$

Отклонение результата каждого национального эталона от опорного значения сличения вычисляли по формуле (3):

$$d_i = M_i - M_{ref}. \quad (3)$$

Неопределённость отклонения при коэффициенте охвата $k = 2$ рассчитывали по формуле (4):

$$U(d_i) = 2 \cdot \sqrt{u_i^2 - u_{ref}^2} \quad (4)$$

Полученные значения степеней эквивалентности и их неопределённости представляли в [дБ] по формулам (5) и (6):

$$d_{i,dB} = 20 \cdot \lg \left(\frac{M_i}{M_{ref}} \right), \quad (5)$$

$$U(d_i)_{dB} = 20 \cdot \lg \left(\frac{U(d_i)}{M_i} + 1 \right). \quad (6)$$

Степень эквивалентности между двумя национальными эталонами количественно выражали как разность между их соответствующими отклонениями от опорного значения сличения и как неопределённость этой разности [10] при коэффициенте охвата $k = 2$ по формулам (7) и (8) в абсолютных единицах или (9) и (10) в относительных, соответственно:

$$d_{CN-RU} = M_{CN} - M_{RU}, \quad (7)$$

$$U(d_{CN-RU}) = 2 \cdot \sqrt{u_{CN}^2 + u_{RU}^2}, \quad (8)$$

$$d_{CN-RU, dB} = 20 \cdot \lg \left(\frac{M_{CN}}{M_{RU}} \right), \quad (9)$$

$$U(d_{CN-RU})_{dB} = 20 \cdot \lg \left(\frac{U(d_{CN-RU})}{M_{ref}} + 1 \right). \quad (10)$$

Результаты калибровки приёмника VHS90

Степени эквивалентности эталонов при калибровке приёмника VHS90 в [дБ] приведены в таблицах 7–9 и представлены графически на рис. 8–10. Результаты калибровки НААРИ и ВНИИФТРИ хорошо согласуются для всех трёх каналов приёмника. Эквивалентность результатов заявленным НААРИ и ВНИИФТРИ неопределённостям не нарушена ни в одной из 30 частотных точек.

Таблица 7

Результаты калибровки канала X приёмника VHS90

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
5	-224,22	1,0	-224,47	0,8	-224,37	0,32	0,15	0,80	-0,09	0,50	0,24	1,26
6,3	-222,46	1,0	-222,82	0,8	-222,69	0,32	0,22	0,81	-0,13	0,49	0,35	1,26
8	-220,53	1,0	-220,02	0,8	-220,22	0,32	-0,30	0,78	0,21	0,52	-0,51	1,26
10	-218,86	1,0	-218,27	0,8	-218,51	0,32	-0,35	0,77	0,24	0,53	-0,59	1,26
12,5	-217,14	1,0	-216,95	0,8	-217,03	0,32	-0,11	0,79	0,07	0,51	-0,19	1,26
16	-215,09	1,0	-214,29	0,8	-214,62	0,32	-0,47	0,77	0,33	0,53	-0,80	1,26
20	-213,23	1,0	-212,92	0,8	-213,04	0,32	-0,19	0,78	0,12	0,52	-0,31	1,26
25	-210,96	1,0	-210,12	0,8	-210,47	0,32	-0,49	0,76	0,36	0,53	-0,85	1,26
31,5	-209,76	1,0	-208,59	0,8	-209,10	0,32	-0,66	0,75	0,51	0,54	-1,17	1,26
40	-207,62	1,0	-206,96	0,8	-207,23	0,32	-0,39	0,77	0,27	0,53	-0,66	1,26
50	-205,42	1,0	-204,39	0,8	-204,83	0,32	-0,59	0,76	0,44	0,54	-1,02	1,26
63	-203,56	1,0	-202,70	0,8	-203,06	0,32	-0,50	0,76	0,36	0,53	-0,86	1,26
80	-201,22	1,0	-200,25	0,8	-200,66	0,32	-0,56	0,76	0,41	0,54	-0,97	1,26
100	-199,25	1,0	-198,42	0,8	-198,77	0,32	-0,48	0,76	0,35	0,53	-0,84	1,26
125	-197,20	1,0	-196,36	0,8	-196,72	0,32	-0,49	0,76	0,35	0,53	-0,84	1,26
160	-195,34	1,0	-194,75	0,8	-194,99	0,32	-0,35	0,77	0,24	0,53	-0,59	1,26
200	-193,27	1,0	-192,18	0,8	-192,65	0,32	-0,62	0,76	0,47	0,54	-1,09	1,26
250	-191,40	1,0	-190,90	0,8	-191,11	0,32	-0,30	0,78	0,20	0,52	-0,50	1,26
315	-189,42	1,0	-188,50	0,8	-188,89	0,32	-0,53	0,76	0,39	0,54	-0,93	1,26
400	-186,54	1,0	-186,29	0,8	-186,39	0,32	-0,15	0,79	0,10	0,51	-0,25	1,26

Продолжение таблицы 7

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
500	-184,84	0,7	-184,51	0,8	-184,70	0,27	-0,14	0,46	0,19	0,62	-0,33	1,05
630	-182,65	0,7	-182,73	0,8	-182,69	0,27	0,04	0,47	-0,05	0,61	0,08	1,05
800	-180,98	0,7	-180,80	0,8	-180,91	0,27	-0,08	0,46	0,11	0,62	-0,18	1,05
1000	-179,09	0,7	-178,94	0,8	-179,03	0,27	-0,07	0,46	0,09	0,61	-0,16	1,05
1250	-177,14	0,7	-177,52	0,8	-177,31	0,27	0,17	0,48	-0,21	0,60	0,38	1,05
1600	-174,99	0,7	-175,29	0,8	-175,12	0,27	0,13	0,47	-0,17	0,60	0,30	1,05
2000	-173,11	0,7	-173,27	0,8	-173,18	0,27	0,07	0,47	-0,09	0,61	0,16	1,05
2500	-171,09	0,7	-171,18	0,8	-171,13	0,27	0,04	0,47	-0,05	0,61	0,09	1,05
3150	-168,83	0,7	-168,95	0,8	-168,88	0,27	0,05	0,47	-0,07	0,61	0,12	1,05
4000	-166,27	0,7	-166,58	0,8	-166,40	0,27	0,14	0,47	-0,17	0,60	0,31	1,05

В этой и последующих таблицах приняты обозначения: f — частота в [Гц]; M_{CN} и M_{RU} — уровни чувствительности в [дБ] относительно 1 В/мкПа, измеренные в НААРИ и во ВНИИФТРИ соответственно; U_{CN} и U_{RU} — расширенные неопределённости ($k = 2$) в [дБ], заявленные НААРИ и ВНИИФТРИ соответственно; M_{ref} и u_{ref} — опорное значение сличений и его неопределённость ($k = 1$) в [дБ]; d_{CN} и d_{RU} — отклонения соответственно результатов НААРИ и ВНИИФТРИ от опорного значения в [дБ]; $U(d_{CN})$ и $U(d_{RU})$ — расширенные неопределённости ($k = 2$) отклонений от опорного значения в [дБ] для НААРИ и ВНИИФТРИ соответственно; d_{CN-RU} — разность результатов НААРИ и ВНИИФТРИ в [дБ]; $U(d_{CN-RU})$ — расширенная неопределённость ($k = 2$) разности в [дБ].

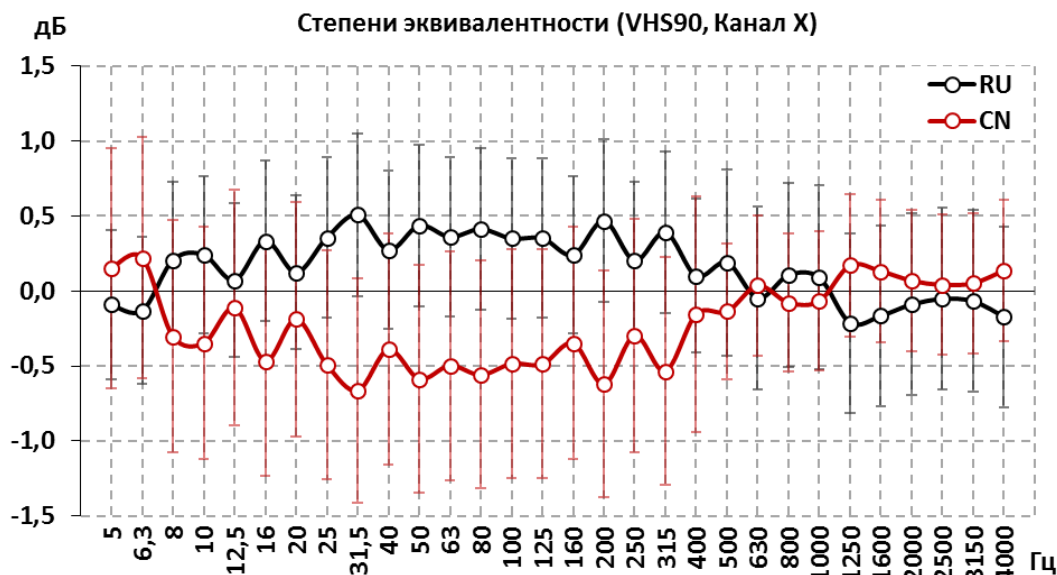


Рис. 8. Степени эквивалентности эталонов при калибровке канала X приёмника VHS90

Таблица 8

Результаты калибровки канала Y приёмника VHS90

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
5	-224,04	1,0	-224,47	0,8	-224,31	0,32	0,27	0,81	-0,16	0,49	0,43	1,26
6,3	-222,28	1,0	-222,83	0,8	-222,63	0,32	0,35	0,81	-0,20	0,49	0,55	1,26
8	-220,55	1,0	-220,00	0,8	-220,22	0,32	-0,32	0,78	0,22	0,52	-0,55	1,26
10	-218,79	1,0	-218,27	0,8	-218,48	0,32	-0,30	0,78	0,21	0,52	-0,51	1,26
12,5	-217,02	1,0	-216,95	0,8	-216,98	0,32	-0,04	0,79	0,02	0,51	-0,06	1,26
16	-214,99	1,0	-214,29	0,8	-214,58	0,32	-0,41	0,77	0,29	0,53	-0,70	1,26
20	-213,19	1,0	-212,92	0,8	-213,03	0,32	-0,17	0,78	0,11	0,51	-0,27	1,26
25	-210,93	1,0	-210,12	0,8	-210,46	0,32	-0,47	0,77	0,34	0,53	-0,82	1,26
31,5	-209,76	1,0	-208,71	0,8	-209,16	0,32	-0,60	0,76	0,45	0,54	-1,06	1,26
40	-207,54	1,0	-206,94	0,8	-207,18	0,32	-0,35	0,77	0,25	0,53	-0,60	1,26
50	-205,26	1,0	-204,38	0,8	-204,75	0,32	-0,51	0,76	0,37	0,53	-0,88	1,26
63	-203,35	1,0	-202,67	0,8	-202,95	0,32	-0,40	0,77	0,28	0,53	-0,68	1,26
80	-201,28	1,0	-200,25	0,8	-200,69	0,32	-0,59	0,76	0,44	0,54	-1,03	1,26
100	-199,17	1,0	-198,42	0,8	-198,73	0,32	-0,44	0,77	0,31	0,53	-0,76	1,26
125	-197,14	1,0	-196,36	0,8	-196,69	0,32	-0,45	0,77	0,32	0,53	-0,78	1,26
160	-195,29	1,0	-194,75	0,8	-194,97	0,32	-0,32	0,78	0,22	0,52	-0,54	1,26
200	-193,23	1,0	-192,15	0,8	-192,61	0,32	-0,62	0,76	0,47	0,54	-1,08	1,26
250	-191,34	1,0	-190,87	0,8	-191,06	0,32	-0,28	0,78	0,19	0,52	-0,47	1,26
315	-189,37	1,0	-188,50	0,8	-188,86	0,32	-0,51	0,76	0,37	0,53	-0,87	1,26
400	-186,39	1,0	-186,32	0,8	-186,35	0,32	-0,04	0,79	0,03	0,51	-0,07	1,26
500	-184,81	0,7	-184,60	0,8	-184,72	0,27	-0,09	0,46	0,12	0,62	-0,21	1,05
630	-182,60	0,7	-182,71	0,8	-182,65	0,27	0,05	0,47	-0,06	0,61	0,11	1,05
800	-180,86	0,7	-180,73	0,8	-180,80	0,27	-0,05	0,46	0,07	0,61	-0,12	1,05
1000	-179,09	0,7	-178,86	0,8	-179,00	0,27	-0,10	0,46	0,13	0,62	-0,23	1,05
1250	-177,02	0,7	-177,27	0,8	-177,13	0,27	0,11	0,47	-0,14	0,60	0,25	1,05
1600	-174,85	0,7	-174,99	0,8	-174,91	0,27	0,06	0,47	-0,08	0,61	0,15	1,05
2000	-172,96	0,7	-172,96	0,8	-172,96	0,27	0,00	0,47	0,00	0,61	0,00	1,05
2500	-170,96	0,7	-170,87	0,8	-170,93	0,27	-0,04	0,46	0,05	0,61	-0,09	1,05
3150	-168,68	0,7	-168,73	0,8	-168,70	0,27	0,02	0,47	-0,03	0,61	0,05	1,05
4000	-166,27	0,7	-166,11	0,8	-166,20	0,27	0,07	0,46	0,09	0,61	-0,16	1,05



Рис. 9. Степени эквивалентности эталонов при калибровке канала Y приёмника VHS90

Таблица 9

Результаты калибровки канала Z приёмника VHS90

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
5	-224,42	1,0	-224,54	0,8	-224,49	0,32	0,07	0,80	-0,04	0,50	0,12	1,26
6,3	-222,46	1,0	-222,66	0,8	-222,59	0,32	0,12	0,80	-0,07	0,50	0,20	1,26
8	-220,73	1,0	-219,83	0,8	-220,21	0,32	-0,52	0,76	0,38	0,54	-0,91	1,26
10	-218,94	1,0	-218,79	0,8	-218,85	0,32	-0,09	0,79	0,06	0,51	-0,15	1,26
12,5	-217,27	1,0	-216,65	0,8	-216,90	0,32	-0,36	0,77	0,25	0,53	-0,61	1,26
16	-214,99	1,0	-214,29	0,8	-214,58	0,32	-0,41	0,77	0,29	0,53	-0,70	1,26
20	-213,31	1,0	-212,29	0,8	-212,73	0,32	-0,59	0,76	0,44	0,54	-1,02	1,26
25	-211,00	1,0	-210,49	0,8	-210,69	0,32	-0,30	0,78	0,21	0,52	-0,51	1,26
31,5	-209,79	1,0	-208,80	0,8	-209,22	0,32	-0,57	0,76	0,42	0,54	-0,99	1,26
40	-207,64	1,0	-206,60	0,8	-207,04	0,32	-0,60	0,76	0,45	0,54	-1,04	1,26
50	-205,61	1,0	-204,81	0,8	-205,14	0,32	-0,47	0,77	0,34	0,53	-0,81	1,26
63	-203,54	1,0	-202,81	0,8	-203,11	0,32	-0,43	0,77	0,31	0,53	-0,74	1,26
80	-201,45	1,0	-200,50	0,8	-200,90	0,32	-0,55	0,76	0,40	0,54	-0,95	1,26
100	-199,25	1,0	-198,71	0,8	-198,93	0,32	-0,32	0,78	0,22	0,52	-0,54	1,26
125	-197,27	1,0	-196,54	0,8	-196,84	0,32	-0,43	0,77	0,30	0,53	-0,73	1,26
160	-195,44	1,0	-194,47	0,8	-194,88	0,32	-0,56	0,76	0,41	0,54	-0,97	1,26
200	-193,31	1,0	-192,43	0,8	-192,80	0,32	-0,51	0,76	0,37	0,53	-0,88	1,26
250	-191,50	1,0	-190,31	0,8	-190,83	0,32	-0,67	0,75	0,52	0,55	-1,19	1,26
315	-189,47	1,0	-188,25	0,8	-188,78	0,32	-0,69	0,75	0,54	0,55	-1,23	1,26
400	-186,63	1,0	-186,74	0,8	-186,70	0,32	0,07	0,80	-0,04	0,50	0,11	1,26
500	-184,90	0,7	-184,63	0,8	-184,78	0,27	-0,11	0,46	0,16	0,62	-0,27	1,05
630	-182,62	0,7	-182,71	0,8	-182,66	0,27	0,04	0,47	-0,05	0,61	0,09	1,05
800	-180,84	0,7	-180,51	0,8	-180,70	0,27	-0,14	0,46	0,19	0,62	-0,33	1,05
1000	-179,17	0,7	-179,09	0,8	-179,14	0,27	-0,03	0,46	0,05	0,61	-0,08	1,05
1250	-177,14	0,7	-177,39	0,8	-177,25	0,27	0,11	0,47	-0,14	0,60	0,25	1,05
1600	-174,99	0,7	-175,14	0,8	-175,06	0,27	0,06	0,47	-0,08	0,61	0,15	1,05
2000	-173,11	0,7	-173,07	0,8	-173,10	0,27	-0,02	0,46	0,02	0,61	-0,04	1,05
2500	-171,09	0,7	-171,06	0,8	-171,07	0,27	-0,01	0,46	0,02	0,61	-0,03	1,05
3150	-169,00	0,7	-168,90	0,8	-168,95	0,27	-0,04	0,46	0,06	0,61	-0,10	1,05
4000	-166,21	0,7	-166,23	0,8	-166,22	0,27	0,01	0,47	-0,01	0,61	0,02	1,05

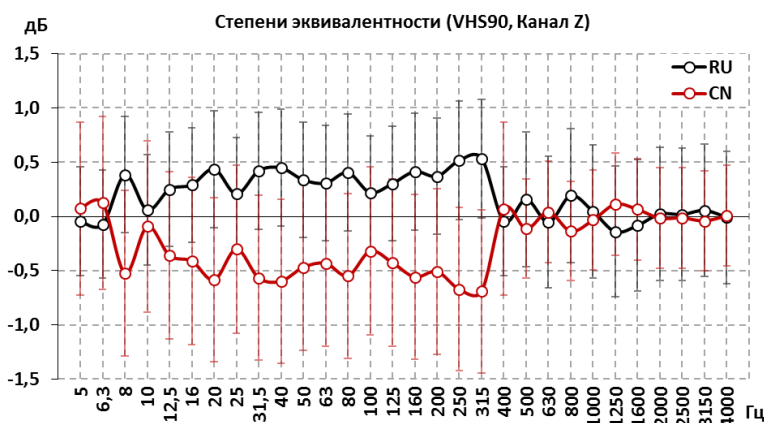


Рис. 10. Степени эквивалентности эталонов при калибровке канала Z приёмника VHS90

Результаты калибровки приёмника VHS56

Результаты калибровки приёмника VHS56 показаны в таблицах 10–12, степени эквивалентности представлены графиками на рис. 11–13. Результаты калибровки НААРИ и ВНИИФТРИ хорошо согласуются для всех трёх каналов приёмника: нарушений эквивалентности не выявлено ни в одной из 14 частотных точек.

Таблица 10

Результаты калибровки канала X приёмника VHS56

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
500	-196,59	0,7	-196,48	0,8	-196,55	0,27	-0,05	0,46	0,07	0,61	-0,12	1,05
630	-194,75	0,7	-195,09	0,8	-194,90	0,27	0,15	0,48	-0,19	0,60	0,34	1,05
800	-192,92	0,7	-193,19	0,8	-193,04	0,27	0,12	0,47	-0,15	0,60	0,27	1,05
1000	-191,18	0,7	-191,24	0,8	-191,21	0,27	0,03	0,47	-0,04	0,61	0,06	1,05
1250	-189,24	0,7	-189,32	0,8	-189,28	0,27	0,03	0,47	-0,04	0,61	0,08	1,05
1600	-187,07	0,7	-187,25	0,8	-187,15	0,27	0,08	0,47	-0,10	0,61	0,18	1,05
2000	-185,27	0,7	-185,29	0,8	-185,28	0,27	0,01	0,47	-0,01	0,61	0,02	1,05
2500	-183,17	0,7	-183,26	0,8	-183,21	0,27	0,04	0,47	-0,05	0,61	0,09	1,05
3150	-181,21	0,7	-181,21	0,8	-181,21	0,27	0,00	0,47	0,00	0,61	0,00	1,05
4000	-179,02	0,7	-179,02	0,8	-179,02	0,27	0,00	0,47	0,00	0,61	0,00	1,05
5000	-176,83	0,7	-177,02	0,8	-176,91	0,27	0,08	0,47	-0,10	0,60	0,18	1,05
6300	-174,75	0,7	-174,94	0,8	-174,84	0,27	0,08	0,47	-0,11	0,60	0,19	1,05
8000	-171,24	0,7	-171,67	0,8	-171,43	0,27	0,19	0,48	-0,23	0,60	0,42	1,05
10000	-168,52	0,7	-167,96	0,8	-168,29	0,27	-0,23	0,45	0,33	0,63	-0,56	1,05

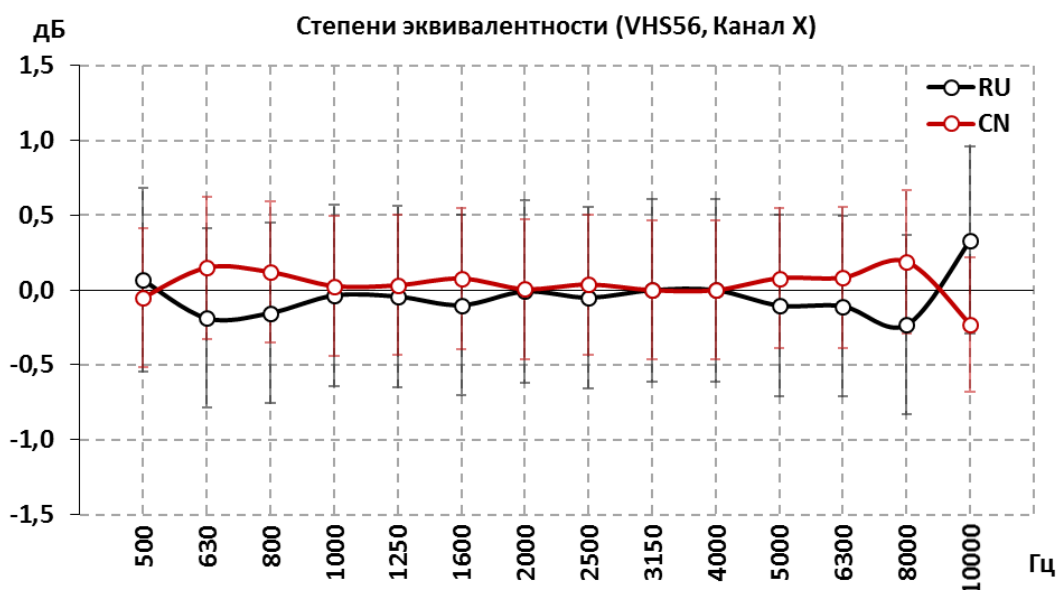


Рис. 11. Степени эквивалентности эталонов при калибровке канала X приёмника VHS56

Таблица 11

Результаты калибровки канала Y приёмника VHS56

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
500	-196,83	0,7	-196,71	0,8	-196,78	0,27	-0,05	0,46	0,07	0,61	-0,12	1,05
630	-194,80	0,7	-195,19	0,8	-194,97	0,27	0,17	0,48	-0,22	0,60	0,39	1,05
800	-193,00	0,7	-193,23	0,8	-193,10	0,27	0,10	0,47	-0,13	0,60	0,24	1,05
1000	-191,28	0,7	-191,28	0,8	-191,28	0,27	0,00	0,47	0,00	0,61	0,00	1,05
1250	-189,37	0,7	-189,37	0,8	-189,37	0,27	0,00	0,47	0,00	0,61	0,00	1,05
1600	-187,19	0,7	-187,31	0,8	-187,24	0,27	0,05	0,47	-0,07	0,61	0,12	1,05
2000	-185,24	0,7	-185,35	0,8	-185,29	0,27	0,05	0,47	-0,06	0,61	0,11	1,05
2500	-183,27	0,7	-183,32	0,8	-183,30	0,27	0,02	0,47	-0,03	0,61	0,05	1,05
3150	-181,25	0,7	-181,23	0,8	-181,24	0,27	-0,01	0,47	0,01	0,61	-0,02	1,05
4000	-179,17	0,7	-179,02	0,8	-179,11	0,27	-0,07	0,46	0,09	0,61	-0,16	1,05
5000	-176,83	0,7	-176,95	0,8	-176,89	0,27	0,05	0,47	-0,07	0,61	0,12	1,05
6300	-174,70	0,7	-174,80	0,8	-174,74	0,27	0,04	0,47	-0,05	0,61	0,09	1,05
8000	-170,84	0,7	-170,46	0,8	-170,68	0,27	-0,16	0,45	0,23	0,62	-0,38	1,05
10000	-168,66	0,7	-168,07	0,8	-168,42	0,27	-0,24	0,45	0,35	0,63	-0,59	1,05

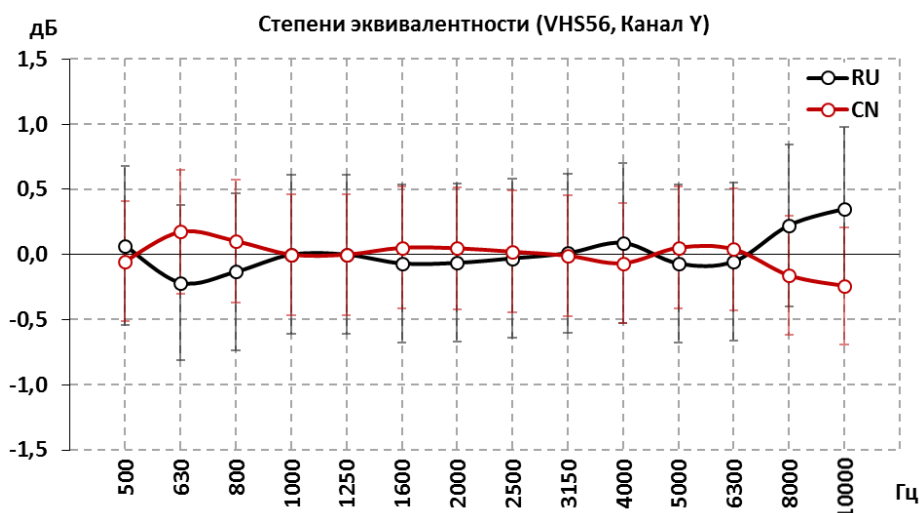


Рис. 12. Степени эквивалентности эталонов при калибровке канала Y приёмника VHS56

Таблица 12

Результаты калибровки канала Z приёмника VHS56

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
500	-196,59	0,7	-196,59	0,8	-196,59	0,27	0,00	0,47	0,00	0,61	0,00	1,05
630	-194,75	0,7	-195,04	0,8	-194,88	0,27	0,13	0,47	-0,16	0,60	0,29	1,05
800	-192,88	0,7	-193,07	0,8	-192,96	0,27	0,08	0,47	-0,11	0,60	0,19	1,05
1000	-191,12	0,7	-191,15	0,8	-191,13	0,27	0,01	0,47	-0,02	0,61	0,03	1,05
1250	-189,29	0,7	-189,22	0,8	-189,26	0,27	-0,03	0,46	0,04	0,61	-0,08	1,05
1600	-187,09	0,7	-187,15	0,8	-187,12	0,27	0,03	0,47	-0,03	0,61	0,06	1,05
2000	-185,11	0,7	-185,18	0,8	-185,14	0,27	0,03	0,47	-0,04	0,61	0,06	1,05

Продолжение таблицы 12

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
2500	-183,15	0,7	-183,16	0,8	-183,15	0,27	0,01	0,47	-0,01	0,61	0,01	1,05
3150	-181,12	0,7	-181,09	0,8	-181,11	0,27	-0,01	0,46	0,02	0,61	-0,03	1,05
4000	-179,02	0,7	-178,86	0,8	-178,95	0,27	-0,07	0,46	0,09	0,61	-0,15	1,05
5000	-176,77	0,7	-176,83	0,8	-176,80	0,27	0,03	0,47	-0,03	0,61	0,06	1,05
6300	-173,98	0,7	-174,24	0,8	-174,10	0,27	0,12	0,47	-0,15	0,60	0,26	1,05
8000	-171,63	0,7	-171,94	0,8	-171,77	0,27	0,13	0,47	-0,17	0,60	0,30	1,05
10000	-167,07	0,7	-166,94	0,8	-167,01	0,27	-0,06	0,46	0,08	0,61	-0,14	1,05

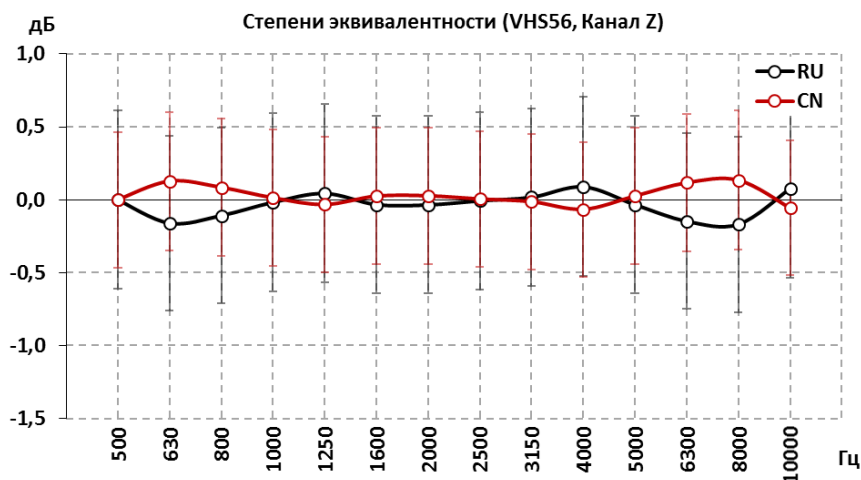


Рис. 13. Степени эквивалентности эталонов при калибровке канала Z приёмника VHS56

Результаты калибровки приёмника КПП-10

Результаты калибровки приёмника КПП-10 и степени эквивалентности приведены в таблицах 13–16 и представлены графически на рис. 14–18. Результаты калибровки НААРИ и ВНИИФТРИ хорошо согласуются для всех трёх каналов приёмника: выявленное на одной из 14 частотных точек (на частоте 1250 Гц для канала Y) нарушение эквивалентности результатов составляет 0,15 дБ и не является существенным в сравнении с заявленными НААРИ и ВНИИФТРИ расширенными неопределённостями 0,7 и 0,8 дБ соответственно.

Таблица 13

Результаты калибровки канала X приёмника КПП-10

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
500	-178,94	0,7	-179,25	0,8	-179,08	0,27	0,14	0,47	-0,17	0,60	0,31	1,05
630	-176,95	0,7	-177,08	0,8	-177,01	0,27	0,05	0,47	-0,07	0,61	0,12	1,05
800	-174,94	0,7	-175,14	0,8	-175,03	0,27	0,09	0,47	-0,11	0,60	0,20	1,05
1000	-173,15	0,7	-172,80	0,8	-173,01	0,27	-0,14	0,46	0,20	0,62	-0,35	1,05
1250	-171,28	0,7	-171,60	0,8	-171,42	0,27	0,14	0,48	-0,18	0,60	0,32	1,05

Продолжение таблицы 13

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
1600	-169,02	0,7	-169,29	0,8	-169,14	0,27	0,12	0,47	-0,15	0,60	0,27	1,05
2000	-167,29	0,7	-167,64	0,8	-167,45	0,27	0,16	0,48	-0,19	0,60	0,35	1,05
2500	-165,26	0,7	-165,70	0,8	-165,45	0,27	0,20	0,48	-0,24	0,60	0,44	1,05
3150	-163,26	0,7	-163,90	0,8	-163,56	0,27	0,29	0,48	-0,35	0,59	0,64	1,05
4000	-161,41	0,7	-161,85	0,8	-161,61	0,27	0,20	0,48	-0,24	0,60	0,44	1,05
5000	-159,66	0,7	-160,11	0,8	-159,86	0,27	0,20	0,48	-0,25	0,60	0,45	1,05
6300	-157,72	0,7	-158,27	0,8	-157,97	0,27	0,25	0,48	-0,30	0,59	0,55	1,05
8000	-155,97	0,7	-155,49	0,8	-155,78	0,27	-0,20	0,45	0,28	0,62	-0,48	1,05
10000	-153,98	0,7	-153,64	0,8	-153,84	0,27	-0,14	0,46	0,20	0,62	-0,34	1,05

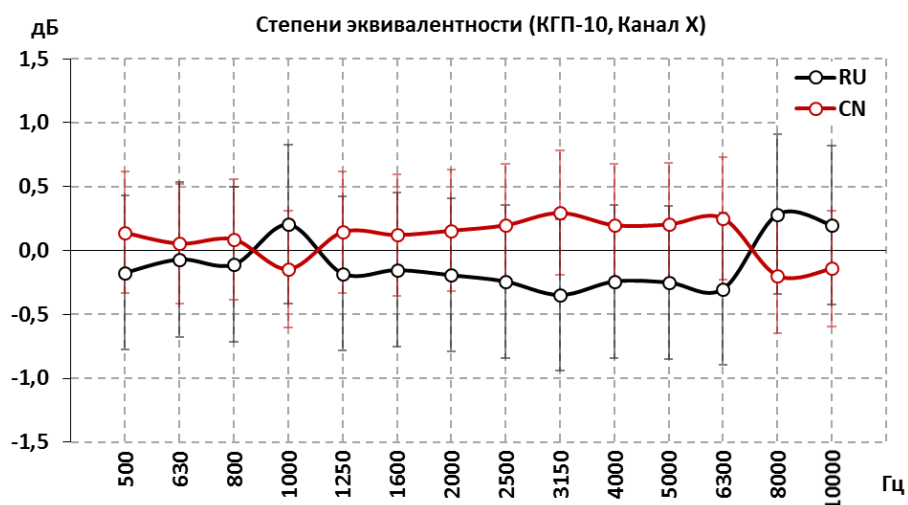


Рис. 14. Степени эквивалентности эталонов при калибровке канала X приёмника КГП-10

Таблица 14

Результаты калибровки канала Y приёмника КГП-10

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
500	-180,03	0,7	-181,07	0,8	-180,53	0,27	0,49	0,50	-0,54	0,58	1,04	1,05
630	-178,06	0,7	-178,94	0,8	-178,47	0,27	0,41	0,49	-0,47	0,58	0,88	1,05
800	-176,08	0,7	-177,08	0,8	-176,55	0,27	0,47	0,49	-0,52	0,58	1,00	1,05
1000	-174,24	0,7	-174,94	0,8	-174,57	0,27	0,32	0,49	-0,38	0,59	0,70	1,05
1250	-172,22	0,7	-173,43	0,8	-172,80	0,27	0,59	0,50	-0,63	0,57	1,22	1,05
1600	-170,34	0,7	-171,28	0,8	-170,78	0,27	0,44	0,49	-0,49	0,58	0,93	1,05
2000	-168,52	0,7	-169,14	0,8	-168,80	0,27	0,29	0,48	-0,34	0,59	0,62	1,05
2500	-166,50	0,7	-167,29	0,8	-166,87	0,27	0,37	0,49	-0,42	0,59	0,79	1,05
3150	-164,36	0,7	-164,81	0,8	-164,56	0,27	0,20	0,48	-0,24	0,60	0,44	1,05
4000	-162,52	0,7	-163,49	0,8	-162,98	0,27	0,46	0,49	-0,51	0,58	0,97	1,05
5000	-160,64	0,7	-161,62	0,8	-161,10	0,27	0,46	0,49	-0,52	0,58	0,98	1,05
6300	-158,64	0,7	-159,58	0,8	-159,08	0,27	0,44	0,49	-0,50	0,58	0,94	1,05
8000	-156,71	0,7	-156,48	0,8	-156,61	0,27	-0,10	0,46	0,14	0,62	-0,23	1,05
10000	-154,61	0,7	-154,56	0,8	-154,59	0,27	-0,02	0,46	0,03	0,61	-0,05	1,05

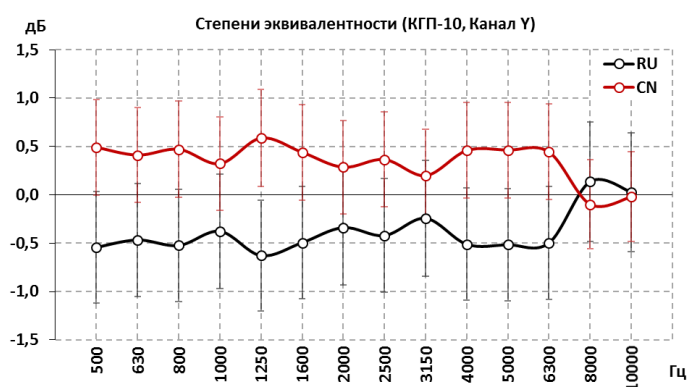


Рис. 15. Степени эквивалентности эталонов при калибровке канала Y приёмника КГП-10

Результаты калибровок канала Z приёмника КГП-10 заслуживают более подробного рассмотрения. Для VHS56 и VHS90 и каналов X и Y КГП-10 чувствительности, измеренные в камере методом колеблющегося столба воды и по полю в бассейне, хорошо согласуются. Конструктивная особенность канала Z состоит в том, что поведение частотных зависимостей чувствительности канала (представлены на рис. 16), измеренных в бассейне в поле бегущей звуковой волны и в камере в поле стоячей звуковой волны, существенно различается и, например, на частоте 500 Гц оно достигает 4,6 дБ. Чтобы подчеркнуть эту особенность, участники расширили диапазон калибровок канала Z в камере до частоты 800 Гц включительно. Несмотря на то, для канала Z характерна значительная зависимость результатов калибровки от уровня принимаемого сигнала, отметим, что результаты обоих участников хорошо согласуются как для измерительных камер, так и для бассейнов, расхождения не превысили соответственно 0,7 и 0,9 дБ. Высокая сопоставимость результатов, полученных при колебательных скоростях в камере, отличающихся на три порядка от создаваемых в бассейне, является хорошим подтверждением квалификации лабораторий, участвовавших в сличениях.

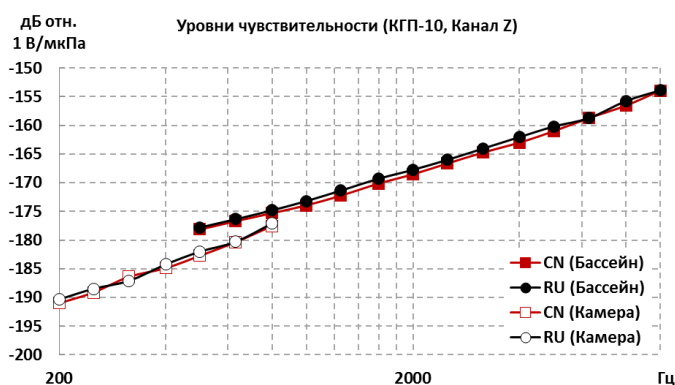


Рис. 16. Результаты калибровок канала Z приёмника КГП-10

Таблица 15

Результаты калибровки канала Z приёмника КГП-10 в камере малого объёма

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
200	-191,00	1,0	-190,34	0,8	-190,6	0,32	-0,38	0,77	0,27	0,53	-0,65	1,26
250	-189,12	1,0	-188,47	0,8	-188,7	0,32	-0,38	0,77	0,27	0,53	-0,65	1,26
315	-186,39	1,0	-187,09	0,8	-186,8	0,32	0,45	0,82	-0,25	0,48	0,70	1,26
400	-184,88	1,0	-184,24	0,8	-184,5	0,32	-0,38	0,77	0,27	0,53	-0,65	1,26
500	-182,72	1,0	-182,00	0,8	-182,3	0,32	-0,42	0,77	0,30	0,53	-0,72	1,26
630	-180,36	1,0	-180,29	0,8	-180,3	0,32	-0,04	0,79	0,03	0,51	-0,07	1,26
800	-177,52	1,0	-177,08	0,8	-177,3	0,32	-0,27	0,78	0,18	0,52	-0,45	1,26

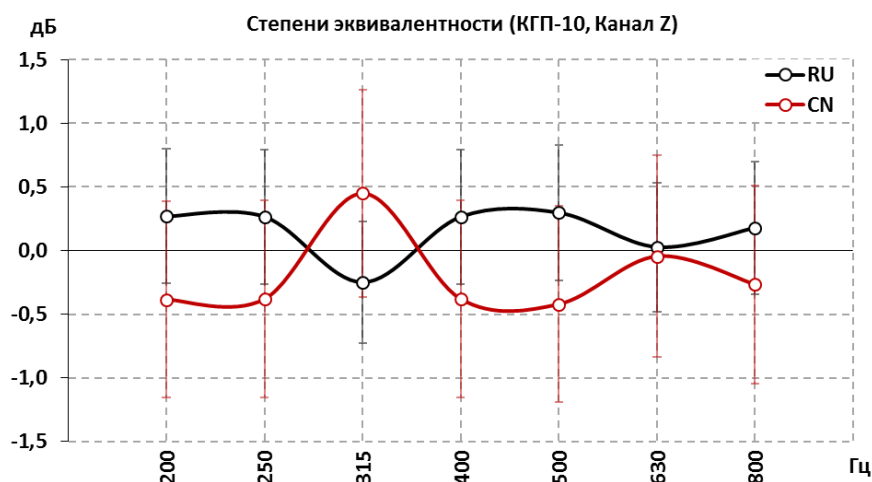


Рис. 17. Степени эквивалентности эталонов при калибровке канала Z приёмника КГП-10 методом колеблющегося столба жидкости в камере малого объёма

Таблица 16

Результаты калибровки канала Z приёмника КГП-10 в свободном поле

f	M_{CN}	U_{CN}	M_{RU}	U_{RU}	M_{ref}	u_{ref}	d_{CN}	$U(d_{CN})$	d_{RU}	$U(d_{RU})$	d_{CN-RU}	$U(d_{CN-RU})$
500	-178,13	0,7	-177,79	0,8	-177,99	0,27	-0,14	0,46	0,20	0,62	-0,34	1,05
630	-176,71	0,7	-176,36	0,8	-176,57	0,27	-0,15	0,46	0,20	0,62	-0,35	1,05
800	-175,29	0,7	-174,80	0,8	-175,09	0,27	-0,20	0,45	0,29	0,62	-0,49	1,05
1000	-173,94	0,7	-173,19	0,8	-173,64	0,27	-0,30	0,44	0,45	0,63	-0,74	1,05
1250	-172,25	0,7	-171,37	0,8	-171,91	0,27	-0,35	0,44	0,53	0,64	-0,88	1,05
1600	-170,14	0,7	-169,29	0,8	-169,81	0,27	-0,34	0,44	0,51	0,63	-0,85	1,05
2000	-168,52	0,7	-167,74	0,8	-168,21	0,27	-0,31	0,44	0,47	0,63	-0,78	1,05
2500	-166,65	0,7	-166,02	0,8	-166,40	0,27	-0,25	0,45	0,38	0,63	-0,63	1,05
3150	-164,75	0,7	-164,05	0,8	-164,47	0,27	-0,28	0,44	0,41	0,63	-0,69	1,05
4000	-163,00	0,7	-162,04	0,8	-162,62	0,27	-0,38	0,44	0,59	0,64	-0,96	1,05
5000	-161,01	0,7	-160,19	0,8	-160,69	0,27	-0,32	0,44	0,49	0,63	-0,82	1,05
6300	-158,71	0,7	-158,71	0,8	-158,71	0,27	0,00	0,47	0,00	0,61	0,00	1,05
8000	-156,54	0,7	-155,76	0,8	-156,23	0,27	-0,31	0,44	0,47	0,63	-0,78	1,05
10000	-153,94	0,7	-153,89	0,8	-153,92	0,27	-0,02	0,46	0,02	0,61	-0,04	1,05

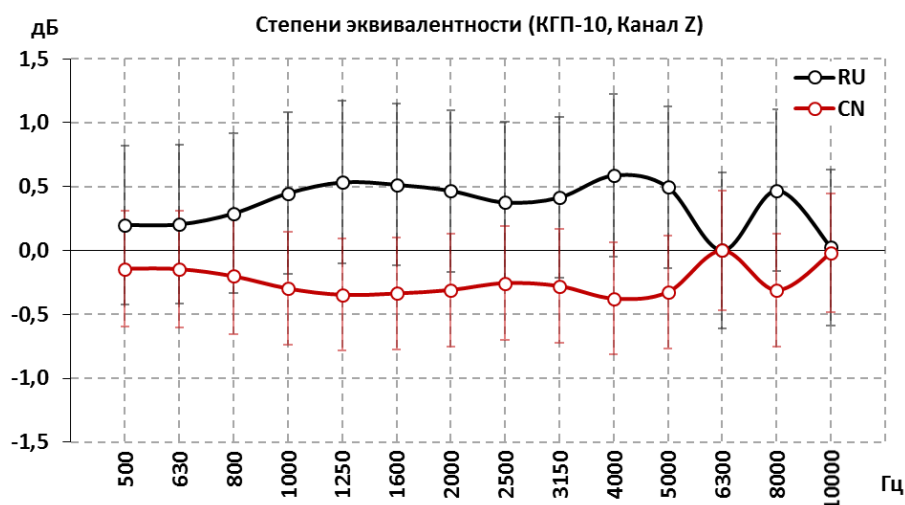


Рис. 18. Степени эквивалентности эталонов при калибровке канала Z приёмника КПП-10 в свободном поле

Заключение

По представленным результатам калибровок можно сделать следующие выводы:

- согласованность результатов калибровки между НААРИ и ВНИИФТРИ подтверждена для всех трёх векторных приёмников, участвовавших в сличениях;
- значимых несоответствий не выявлено ни для одной из частот в диапазоне от 5 Гц до 10 кГц;
- подтверждены и обоснованы эквивалентность национальных эталонов и достоверность представленных участниками бюджетов неопределённостей;
- пилотные сличения между НААРИ и ВНИИФТРИ являются успешными.

Несмотря на то, что участники использовали различные опорные приёмники и измерительные установки, различные методы калибровки и звуковые поля, для всех трёх опорных ПКС достигнута хорошая согласованность результатов.

Сличения подтвердили возможность калибровки векторного приёмника по полю в условиях незаглушенного гидроакустического бассейна, что позволяет расширить частотный диапазон калибровки векторного приёмника в сторону высоких частот с 1–2 кГц (предельная верхняя частота калибровки в поле стоячей звуковой волны камеры) как минимум до 10 кГц и измерять частотную зависимость чувствительности с учётом акустических свойств всех окружающих приёмник конструкций, необходимых для его использования в море.

Высокая сопоставимость результатов калибровки методом СКВУ с результатами, полученными в камере на низких частотах и тонально-импульсным методом на высоких частотах, подтвердила корректность приёмов, разработанных для метода СКВУ, при калибровке приёмников векторных величин в широком диапазоне частот.

Калибровки ПКС выполняли при значениях измеряемой величины, различающихся на три порядка. Полученные результаты подтвердили линейность использованных опорных приёмников и эталонных установок, а также корректность бюджетов неопределённостей в диапазоне, превышающем 60 дБ.

Совпадение результатов калибровки в бассейне и в камере можно рассматривать как подтверждение корректности экстраполяции частотной характеристики чувствительности ПКС методом сравнения с гидрофоном в колеблющемся столбе воды.

Различие температурных условий калибровок, обеспеченных участниками на сличениях, составило 10 °С для КГП-10 и почти 4 °С для приёмников VHS56 и VHS90. При этом результаты сличений показали малую температурную зависимость чувствительности ПКС, использующих дифференциальный принцип формирования выходного сигнала, что является весьма полезной информацией как при разработке приёмников, так и для организации последующих сличений.

Полученные результаты дают основание полагать, что разработанные методы измерений и их аппаратные реализации позволяют не только значительно расширить частотный диапазон калибровки векторного приёмника в сторону высоких частот, но и уменьшить неопределённость калибровки с типичных 2,0–2,5 дБ до значений, соизмеримых с неопределённостью калибровки гидрофонов.

Авторы выражают признательность лаборатории — пилоту сличений и лично профессору Chen Yi, научным сотрудникам Fei Teng и Jia Guanghui за проделанную ими большую работу по организации и проведению сличений, выполнению калибровок, подготовке и обсуждению отчётных материалов сличений, а также за предоставленную ими информацию об эталонных установках и методах калибровки, использованных в HAARI.

Литература

1. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
2. Иванов В.Е., Киршов В.А. Градуировка акустических векторных приёмников // Измерительная техника. 1981. № 9. С. 61–64.
3. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Сильвестров С.В. Эталонные установки для воспроизведения и передачи единицы колебательной скорости водной среды в диапазоне частот от 5 до 10000 Гц // Вестник метролога. 2017. № 1. С. 14–20.

4. Исаев А.Е. Способ определения чувствительности по полю гидроакустического приёмника. Патент № 2563603. Опубликовано: 20.09.2015. Бюл. № 26.
5. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Комплексная градуировка приёмника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности // *Акустический журнал*. 2014. Т. 60. № 1. С. 48–55.
6. IEC 60565(2006). Underwater Acoustics. Hydrophones. Calibration in the frequency range from 0.01 Hz to 1 MHz.
7. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне // *Акустический журнал*. 2009. Т. 55. № 6. С. 727–736.
8. Исаев А.Е. Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. 369 с.
9. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения.
10. COOMET R/GM/11:2017 Рекомендация KOOMET. Положение о сличениях эталонов национальных метрологических институтов KOOMET. [Электронный ресурс]. URL: http://www.coomet.org/DB/isapi/cmt_docs/2017/06/01F711415.pdf.