

УДК [534.6+550.388](574.13)

ДИНАМИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА КАНАЛОВ ИНФРАЗВУКОВОЙ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ IS31-АКТЮБИНСК

¹⁾Кунаков В.Г., ²⁾Мартысевич П.Н.

¹⁾Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²⁾Дивизион Международной системы мониторинга ОДВЗЯИ, Вена, Австрия

В статье приводится описание и результаты применения двух методик динамической калибровки микробарометров, используемых при мониторинге геофизических явлений в инфразвуковом диапазоне. Дается их сравнительный анализ. Показаны возможности динамической калибровки в практике обслуживания акустических систем на примере станции IS31-Актюбинск, входящей в состав Международной системы мониторинга ОДВЗЯИ.

ВВЕДЕНИЕ

В 2001 г. в районе с. Тасай Актюбинской области построена инфразвуковая станция в составе Международной системы мониторинга (МСМ) ядерных испытаний IS31- Актюбинск (регистрационный код I31KZ). Станция состоит из 8 элементов - четырех высокочастотных Н- и четырех низкочастотных L элементов [1]. Каждый из элементов представляет микробарометр с подключенной к его входу системой шумоподавления ветровых помех, различной конструкции для каждого из типов элементов Н и L.

В октябре 2002 г. на станции проведен комплекс работ по проверке и настройке узлов системы. Была

выполнена стандартная для инфразвуковых станций МСМ статическая калибровка микробарометров с использованием высокоточного микробарометра Keller и цифрового мультиметра, а также динамическая калибровка сквозного тракта «микробарометр MB2000 - дигитайзер Aubrac». При статической калибровке определялось соответствие между давлением на входе микробарометра и величиной напряжения на его выходе при постоянном статическом давлении. Результаты статической калибровки представлены в нижеследующей таблице.

Таблица. Результаты статической калибровки микробарометров MB2000. Инфразвуковая станция I31KZ, 8 –9 октября 2002 г.

№ микробарометра	Элемент	Положение нуля		Напряжение на контрольной точке		Диапазон	Погрешность, %
		начальное	подстроенное	+10 кПа	-10 кПа		
1	2	3	4	5	6	7	8
1148	H1	-0.779	-0.050	-10.13	9.93	20.06	0.3
1186	H2	-1.777	-0.071	-10.00	10.19	20.19	0.95
1187	H3	-0.453	0.0540	-9.93	10.11	20.04	0.2
1191	H4	-1.130	-0.084	-9.96	9.98	19.94	-0.3
1193	L1	-1.600	-0.062	-10.02	9.98	20.00	0
1190	L2	-1.791	-0.063	-10.08	10.01	20.09	0.45
1199	L3	-0.338	-0.143	-9.99	9.85	19.84	0.8
1192	L4	-1.541	-0.070	-10.03	10.02	20.05	0.25
1188	SPARE	-2.141	-0.138	-10.14	9.89	20.03	0.15

В колонках таблицы 3, 4 приведены значения начального (“нулевого”) уровня сигнала на выходе микробарометра (в точке TP 9) до и после его подстройки. Отклонение от нулевого уровня величины сигнала (колонки 3,4) свидетельствует, о том, что атмосферное давление в момент проведения измерений отличалось от условий предыдущей калибровки, проведенной в октябре 2001 г., когда величина нулевого уровня на выходе микробарометров выставлялась близкой к нулю. В 5 колонке таблицы дана величина напряжения преобразователя сигнала на выходе датчика при изменении давления на его входе. В 8 колонке таблицы приведена погрешность статических параметров микробарометров MB2000, которая оказалась меньше 5%, что, в соответствии с требованиями Международной системы мониторинга, позволяет использовать все исследованные микробарометры в системе Международного мониторинга. Настоящая работа посвящена разработке и

реализации на практике методики динамической калибровки сквозного тракта инфразвуковых каналов. Ниже описана суть методики и полученные результаты.

Динамическая калибровка позволяет выявить соответствие между давлением на входе микробарометра и цифровой величиной, отражающей это давление, на выходе дигитайзера в полосе частот изменения давления, т.е. характеристику измерительного тракта.

В 1998 г. динамическая калибровка инфразвуковых акустических каналов, включавших российские микробарометры K-301, микробарометры Globe, подключенные к 16-битному дигитайзеру IASPEI, проводилась на станции «Курчатов» с использованием установки МТУ-3 (синусоидальный сигнал) [2]. Динамические калибровки инфразвуковых каналов на станциях «Боровое» и «Курчатов», осуществлены в мае-июле 2002 г. с использованием МТУ-3 и “ступеньки” давления на входе микробарометров

МТУ-3 не единственная установка для динамической калибровки акустических систем. В качестве примера можно привести устройство UAF [3], существуют также установки, в которых в качестве источника звука используется акустический динамик.

Динамическая калибровка станции I31KZ проведена для канала микробарометр-дигитайзер. Использовано два метода – калибровка синусоидальным давлением воздуха на входе микробарометра и калибровка подачей на его вход “ступеньки” давления воздуха.

КАЛИБРОВКА СИНУСОИДАЛЬНЫМ ДАВЛЕНИЕМ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ МИКРОБАРОМЕТРА

Для калибровки использовалось малогабаритное устройство МТУ-3 [2] с демпфирующим объемом, равным 50 л. Внешний вид установки МТУ-3 показан на рисунке 1, блок-схема динамической калибровки дана на рисунке 2.

Устройство МТУ-3 представляет собой насос с тремя рабочими цилиндрами, имеющими калиброванные объемы 0.96, 1.92 и 3.84 см³. Поршни в цилиндрах движутся по закону, близкому к синусоидальному, при этом изменение давления воздуха на выходе цилиндров изменяется по такому же закону. Выходы цилиндров в различных комбинациях подсоединяются к демпфирующему объему.



Рисунок 1. Внешний вид установки МТУ-3

Выход демпфирующего объема подсоединяется к входу микробарометра. Все соединения осуществляются толстостенными резиновыми вакуумными шлангами, что обеспечивает стабильность хода изменения давления воздуха. Период колебаний давления задается сменой шестерен и изменяется от 4.65 до 170 с (0.006 – 0.215 Гц).

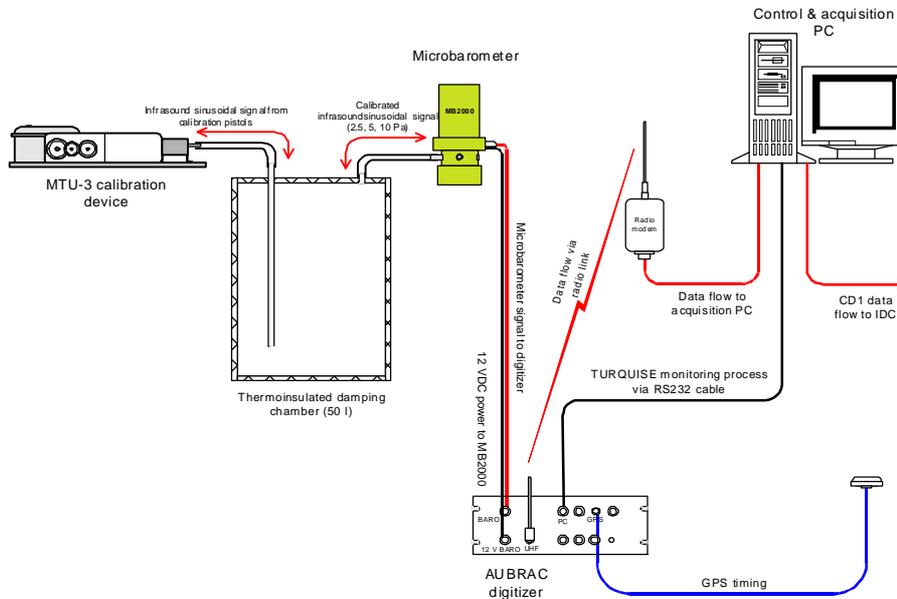


Рисунок 2. Блок-схема динамической калибровки системы с использованием установки МТУ-3

Расчет величины давления на входе микробарометра при использовании установки МТУ-3 проведен исходя из следующего. В замкнутом объеме, состоящем из суммы объемов демпфирующего бака, акустического устройства, подводящих вакуумных шлангов и переменного объема цилиндр-поршень, создаются синусоидальные колебательные изменения давления. Величина изменения давления определяется в основном соотношением между величиной объема воздуха, вытесняемого поршнем, и величиной объема демпфирующего резервуара, поскольку остальные объемы гораздо меньше объема резервуара. Учитывая, что процессы, происходящие в демпфирующем резервуаре

близки к адиабатическим, использовано уравнение адиабатического процесса:

$$PV^\gamma = \text{const}, \text{ где } \gamma = C_p/C_v \cong 1.4 \text{ для воздуха,}$$

из которого следует:

$$P_0 V_0^\gamma = (P_0 + \Delta P)(V_0 + \Delta V)^\gamma,$$

где ΔV – изменяемый объем, V_0 – объем демпфирующего устройства.

С учетом того, что $\Delta V \ll V_0$, можно получить соотношение, определяющее изменение давления на выходе устройства:

$$\Delta P \cong \gamma P_0 \Delta V / V_0, (1)$$

где $P_0 = 10^6$ дин/см² – среднее атмосферное давление (10^5 Па); ΔV – половина объема, вытесняемого штоком;

$V_0 = 50$ л – объем демпфирующего резервуара (0.05 м^3);
 ΔP – амплитуда выходных колебаний давления.

Экспериментально определено, что коэффициент γ в реальных условиях имеет значение 1.3, а не 1.4, как следует из соотношения удельных теплоемкостей C_p/C_v . Это связано с тем, что часть воздуха у стенок резервуара успевает принять температуру окружающей среды в процессе сжатия-разрежения. Соответственно, процесс не является чисто адиабатическим.

Подставляя в формулу (1) значения γ , P_0 , V_0 , а также ΔV , которое для установки МТУ-3 имеет значения 0.96, 1.92 и 3.84 см^3 , получим соответственно:

$$\Delta P_1 = 1.3 \times 10^5 \times 0.96 \times 10^{-6} / 5 \times 10^{-2} = 2.496 \text{ Па};$$

$$\Delta P_2 = 4.992 \text{ Па};$$

$$\Delta P_3 = 9.984 \text{ Па}.$$

Для $\Delta V = 0.96 \text{ см}^3$ двойная амплитуда будет равна примерно 5 Па. Этот режим и использовался для проведения калибровок.

Для расчета амплитудных характеристик сквозного канала «микробарометр – дигитайзер» во всем рабочем диапазоне частот проводился следующий эксперимент: в демпфирующую емкость, подключенную к микробарометру, резко вдвухался и через некоторое время, зависящее от низкочастотных характеристик датчика, выдувался воздух объемом 1 см^3 . Таким образом, на вход микробарометра подавалась «ступенька» давления. Из расчетов, приведенных выше, можно оценить, что величина этой «ступеньки» равна примерно 2.5 Па. В процессе обработки отклик системы на «ступеньку» давления дифференцировался, далее рассчитывался спектр мощности.

Результаты динамической калибровки сквозных каналов элементов станции устройством МТУ-3 показаны на рисунке 3. Обозначение характеристик, принятое на рисунке 3, соответствует номерам элементов на пунктах станции I31KZ.

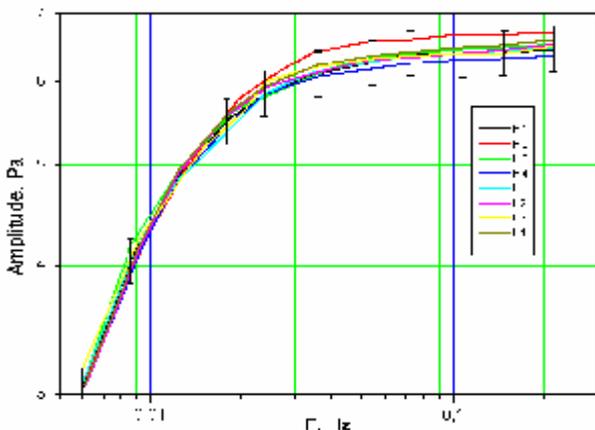


Рисунок 3. Результаты динамической калибровки каналов MB2000-Aubrac устройством МТУ-3. Показаны границы 5% разброса значений H1

Из рисунка видно, что микробарометр H2 является наиболее чувствительным, а микробарометр H4 – наименее чувствительным. Это согласуется с результатом статической калибровки (см. таблицу). Большой, чем при статической калибровке, разброс значений величин давления вызван, вероятно, различием в характеристиках электронных цепей микробарометров.

КАЛИБРОВКА ПОДАЧЕЙ «СТУПЕНЬКИ» ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА

Амплитудные и фазовые характеристики, рассчитанные по отклику системы на «ступеньку» давления для высокочастотных элементов, показаны на рисунке 4.

Амплитудные и фазовые характеристики, рассчитанные по отклику системы на «ступеньку» давления для низкочастотных элементов, показаны на рисунке 4.

Из рисунков 4, 5 видно, что амплитудно-частотные характеристики микробарометров достаточно хорошо совпадают между собой. Индивидуальность каждого из каналов определяется собственными характеристиками фильтров микробарометров и дигитайзеров.

Дополнительно была проведена калибровка «ступенькой» давления с использованием дигитайзера ORION-3 (Nanometrics). ORION-3 позволяет менять частоту оцифровки сигнала. Кроме того, его амплитудная и фазовая характеристики линейны в полосе частот. Результаты обработки откликов показаны на рисунках 6 (а–в).

На рисунках 6 а,б виден подъем кривой амплитудной характеристики микробарометра MB2000 и пик на частоте 8 Гц. Поскольку частотная характеристика ORION-3 линейная, можно предположить, что на рисунках 6 представлена реальная характеристика микробарометров MB2000. Пологие в высокочастотной части характеристики каналов «микробарометр MB2000–дигитайзер Aubrac» (рисунки 4, 5) сформированы частотной характеристикой дигитайзера Aubrac. Таким образом, микробарометры MB2000, используемые на акустической станции I31KZ, имеют линейную амплитудно-частотную характеристику в диапазоне 0.01-10 Гц. Можно отметить, что ход амплитудно-частотной характеристики микробарометра не менялся при подаче на его вход «ступеньки» с амплитудой от 2.5 до 25 Па (с дигитайзером ORION-3).

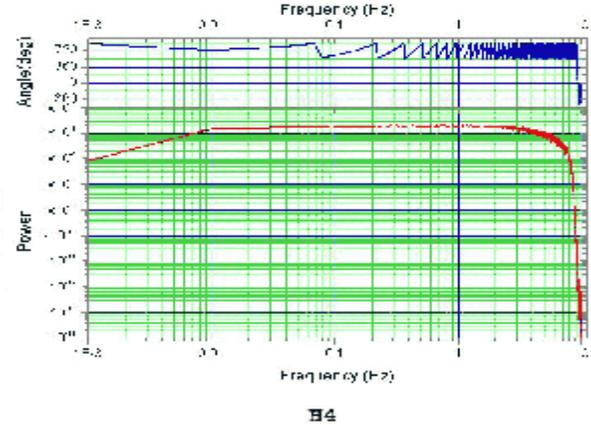
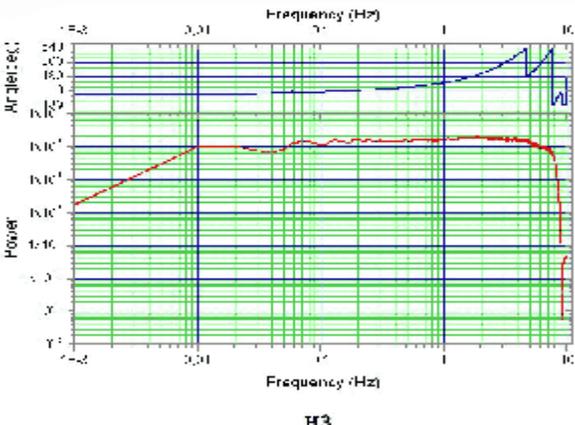
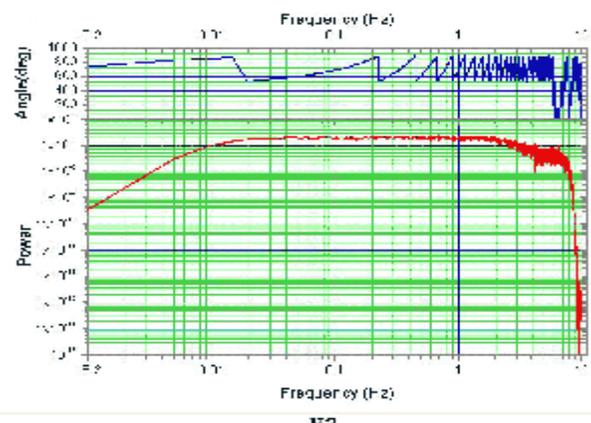
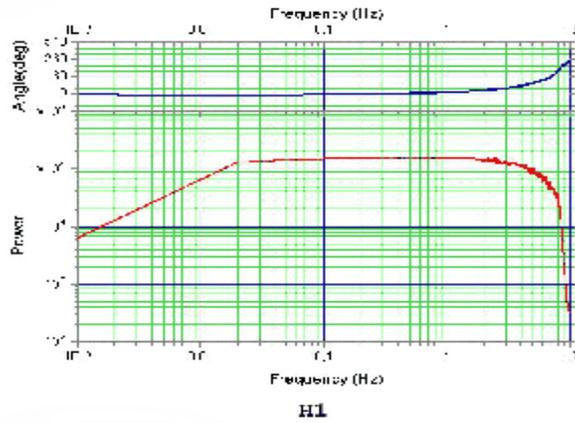


Рисунок 4. Амплитудно-частотные и фазовые характеристики элементов группы "H", рассчитанные по отклику на "ступеньку" давления

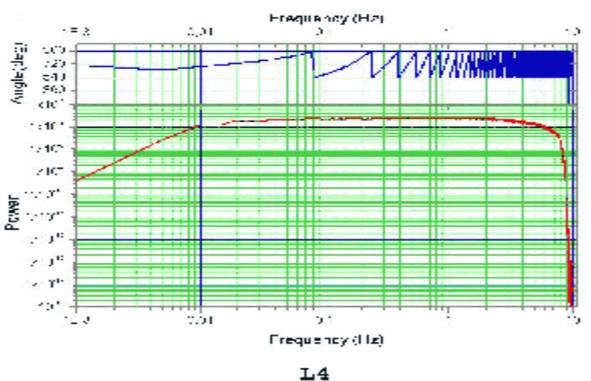
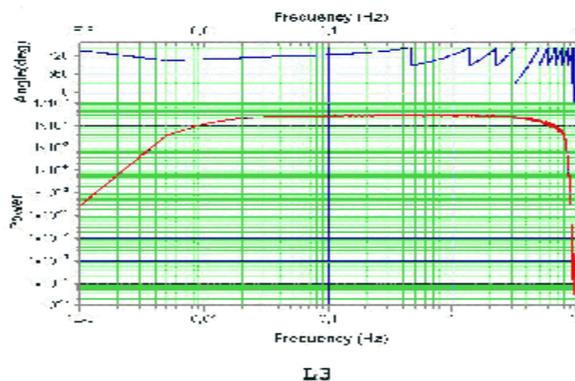
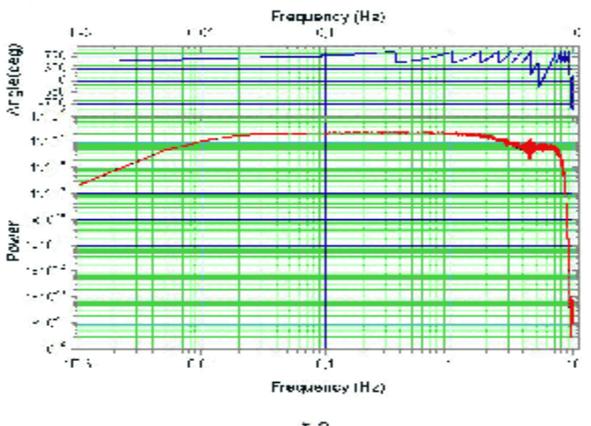
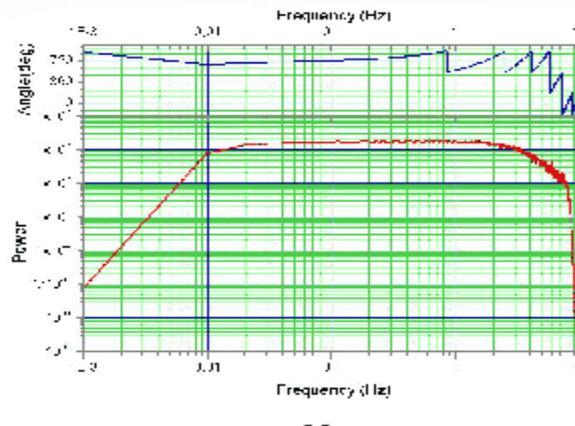


Рисунок 5. Амплитудно-частотные и фазовые характеристики элементов группы "L", рассчитанные по отклику на "ступеньку" давления

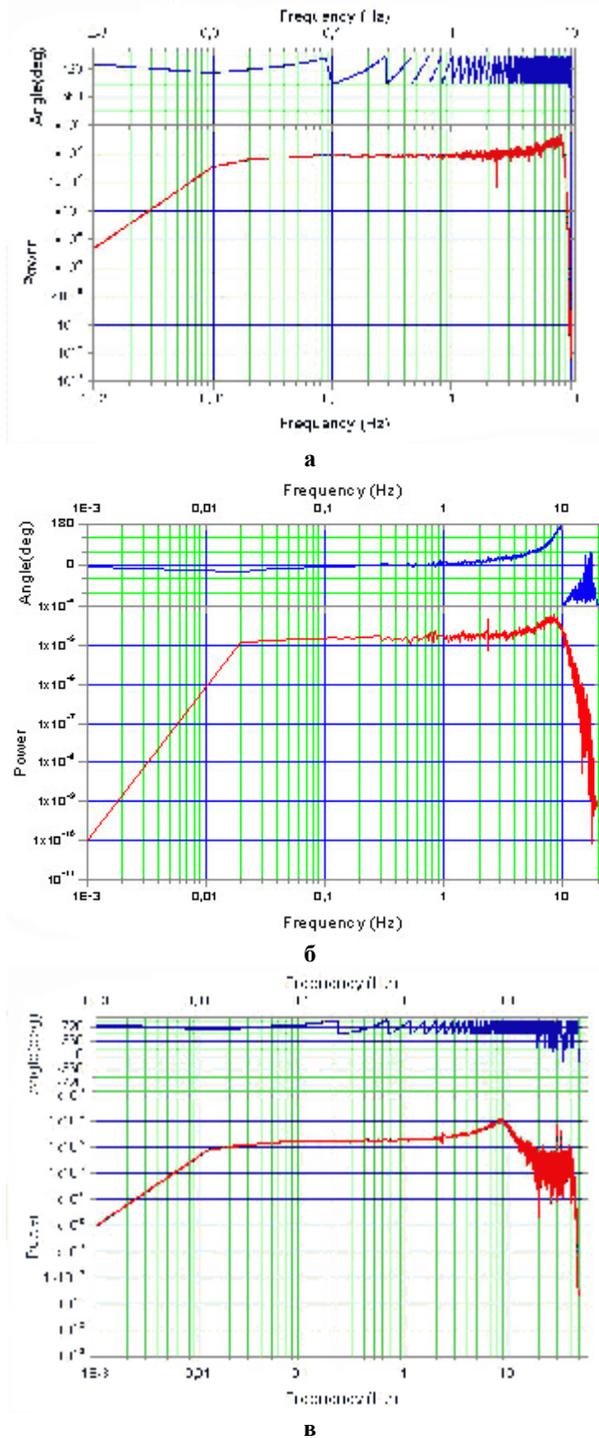


Рисунок 6. Характеристики канала MB2000 + ORION-3: а - 20 оп/с; б - 40 оп/с; в - 100 оп/с

Фазовые характеристики на большинстве из представленных рисунков практически не информативны. Это связано с тем, что наклон фазовой характеристики при обработке сигналов с использованием быстрого преобразования Фурье зависит от выбора первой точки отсчета. С другой стороны, амплитудная характеристика чувствительна к потере точек переднего фронта сигнала. Выбор сделан в пользу амплитудной характеристики как более информативной, поэтому был сделан упор на получение достоверной формы этой характеристики.

Интересный результат получен при снятии динамической характеристики одного из микробарометров, оказавшегося неисправным (Н4, № 1191 в таблице). На рисунке 7 показана его амплитудная характеристика совместно с характеристикой исправного прибора.

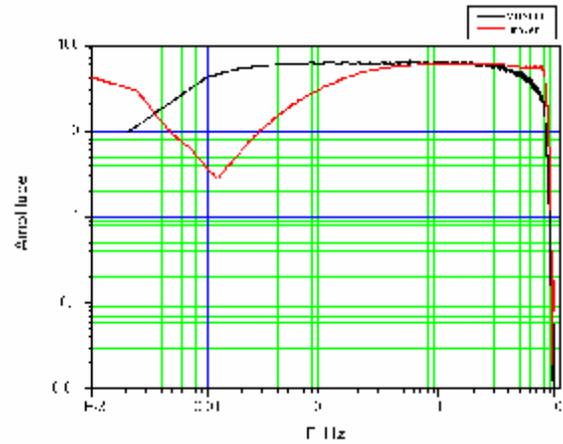


Рисунок 7. Характеристики рабочего (черный) и неисправного (красный) микробарометров

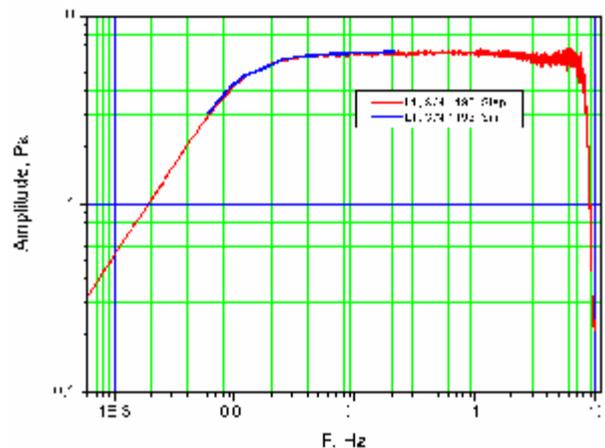


Рисунок 8. Измеренная (синяя) и рассчитанная по отклику (красная) амплитудные характеристики канала «микробарометр MB2000-дигитайзер Aubrac»

Видно, что амплитудная характеристика неисправного прибора сдвинута в сторону более высоких частот. Статическая калибровка этого микробарометра (см. таблицу) не выявила никаких неприятностей.

На рисунке 8 показаны калибровочные характеристики, полученные различными методами – калибровкой синусоидальным сигналом (установка МТУ-3) – синяя кривая, и расчетом по отклику на «ступеньку» давления – красная кривая. Видно, что обе характеристики в пределах частотных параметров установки МТУ-3 совпадают.

Выводы

В октябре 2002 г. на станции акустического мониторинга I31KZ (IS31-Актюбинск, Казахстан) проведена калибровка микробарометров MB2000 и дигитайзера Aubrac.

Процесс калибровки состоял из следующих этапов:

1. Стандартная статическая калибровка микробарометров с использованием прецизионного микробарометра Keller и мультиметра.

2. Динамическая калибровка синусоидальным сигналом. Для этого использовалась установка МТУ-3 с демпфирующим объемом, равным 50 литров, позволяющая выполнять калибровку в диапазоне 0.006-0.215 Гц.

3. Калибровка “ступенькой” давления. При этом, вместо устройства МТУ-3 использовался генератор “ступеньки” давления.

Обработка данных и анализ результатов показали:

1. По отклику на “ступеньку” давления можно рассчитать точную амплитудно-частотную характеристику тракта микробарометр-дигитайзер, при этом, наклон фазовой характеристики зависит от выбора первой точки отсчета.

2. Калибровка синусоидальным сигналом (установка МТУ-3) позволяет получить зависимость выходного значения от давления на входе микробарометра в абсолютных значениях. Однако частотный диапазон МТУ-3 ограничен. Очевидно, это устройство должно быть предварительно откалибровано прецизионными приборами.

3. Результаты, полученные при обоих методах калибровки - синусоидальным сигналом и “ступенькой” давления, дают достаточно хорошее совпадение.

4. Неожиданным результатом можно считать то, что оба метода динамической калибровки выявили неисправный микробарометр в отличие от стандартной статической калибровки, при которой неисправность этого микробарометра не проявилась.

Таким образом, недорогое простое устройство, состоящее из генератора “ступеньки” давления и демпфирующего объема, позволяет снимать амплитудно-частотные характеристики канала микробарометр-дигитайзер. При использовании калиброванного входного сигнала возможно получение точной характеристики сквозного тракта инфразвуковых станций. Устройство может быть использовано с любыми типами микробарометров, причем не только в лабораторных, но и в полевых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демин В.Н., Кунаков В.Г., Смирнов А.А. Новая инфразвуковая станция международной системы мониторинга в Казахстане IS31 «Актюбинск»//Геофизика и проблемы нераспространения/ Вестник НЯЦ РК. – Курчатов: НЯЦ РК, 2002. - Вып. 2. – С. 14 – 18.
2. Малогабаритная установка МТУ-3. Техническое описание.
3. Charles R. Wilson, John V. Olson. Calibration of the UAF Chaparral microphone calibrator//Infrasound Technology Workshop, De Bilt, The Netherlands, 2002.

ДЕРЕКТЕР ЖИНАУ IS31-АҚТӨБЕ ИНФРАДЫБЫСТЫ КЕШЕНІНІҢ АРНАЛАРЫНЫҢ ДИНАМИКАЛЫҚ КЛИБРЛЕУІ

¹⁾Кунаков В.Г., ²⁾Мартысевич П.Н.

¹⁾ҚР ҰЯО геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

²⁾ЯЖБТШҰ Халықаралық мониторинг жүйесінің дивизионы, Вена, Австрия

Мақалада, инфрадыбысты ауқымында геофизикалық құбылыстарының мониторингісі үшін қолданылатын микробарометрлердің динамикалық калибрлеуінің екі әдістемесінің сипаттамасы және нәтижелері келтірілген. Олардың салыстырма талдауы берілген. ЯЖБТШҰ Халықаралық мониторинг жүйесінің құрамына кіретін IS31-Ақтөбе станциясының үлгісінде акустикалық жүйелеріне қызмет көрсетуінде динамикалық калибрлеуінің мүмкіншіліктері көрсетілген.

DYNAMIC CALIBRATION OF INFRASOUND SYSTEM CHANNELS OF IS31-AKTYUBINSK DATA ACQUISITION

¹⁾V.G. Kunakov, ²⁾P.N. Martysevich

¹⁾Institute of Geophysical Researches, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan

²⁾International Monitoring System Division (IMS), CTBTO, Vienna Austria

This paper represents description and results of the two dynamic calibration methods of microbarometers used to monitor geophysical events within infrasound range. Comparison of the two methods is provided. Dynamic calibration possibilities are shown in practice of acoustic system maintenance as an example of IS31-Aktyubinsk station that is in CTBT International Monitoring System.