

соотношения (3) можно оценить частотный промежуток $\Delta = f_{\text{прод}} - f_{\text{изг}}$, в котором нежелательные колебания ослаблены более чем на 40 дБ. Если окажется, что этот промежуток мал, то его можно увеличить, несколько уменьшив соотношение размеров пьезоэлемента b/l . Тогда, согласно фиг. 1, уменьшится N' . При этом, правда, надо учесть возрастание динамической индуктивности резонатора и смещение экстремума его ТЧХ θ_0 (см. фиг. 2, 4 и формулу (2)).

В заключение отметим, что при описанных выше экспериментальных работах погрешность измерения частоты колебаний не превосходила $\pm 5 \cdot 10^{-6}$, а погрешность поддержания температуры при всех измерениях была не более $\pm 0,5^\circ \text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оное М. Применение танталата лития в пьезотехнике. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1977, т. 41, № 4, с. 715–720.
2. Волкова Н. В., Грузиненко В. Б., Яковлева А. Н., Ярославский М. И. Миниатюрные танталатолитиевые пьезоэлектрические резонаторы с колебаниями изгиба. — Электрон. техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1983, № 1(50), с. 75–76.
3. Грузиненко В. Б., Дмитриев В. В., Кочетков Ю. А., Ярославский М. И. О параметрах танталатолитиевых резонаторов с пьезоэлементами, совершающими колебания изгиба в плоскости XU' . — Матер. XII Всесоюз. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике, ч. II. Саратов.: СГУ. 1983, с. 249.
4. Смагин А. Г., Ярославский М. И. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. М.: Энергия, 1970.
5. Кочетков Ю. А., Стасевич В. Н., Ярославский М. И., Грузиненко В. Б., Дзыба С. И. Танталатолитиевые резонаторы с колебаниями сжатия — растяжения по длине. — Электрон. техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1983, № 4(53), с. 56–60.

Поступило в редакцию
16.II.1984

УДК 534.232

ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ ИМИТИРУЕМОЙ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Жданов А. П., Кондратьев В. И.

В последнее время внимание исследователей привлекают имитаторы свободного акустического поля в замкнутом объеме [1, 2] в связи с возможностью их использования для калибровки акустических датчиков. Ранее аналогичные устройства использовались для градуировки гидрофонов методом взаимности в трубах с активным нагружением на более высоких частотах [3].

В работе [1] авторы рассмотрели способ моделирования бегущей волны низкой частоты в отрезке короткой по сравнению с длиной волны трубы, на противоположных концах которой установлены поршни, колеблющиеся со сдвигом фаз α , и получили условие создания бегущей волны $\text{tg } \alpha = -kL$, где k — волновое число, а L — расстояние между поршнями, причем $kL \ll 1$.

Цель настоящей работы — исследование влияния ошибок возбуждения поршней по амплитуде и по фазе на параметры имитируемого акустического поля в отрезке трубы произвольной длины.

Рассмотрим отрезок трубы без потерь с абсолютно твердыми стенками, на концах которого установлены абсолютно жесткие поршни, колеблющиеся со скоростями $V_1 e^{-j\omega t}$ и $V_2 e^{j\alpha} e^{-j\omega t}$. Как известно [4], решение волнового уравнения можно найти в виде потенциала Φ : $\Phi = (A e^{ikx} + B e^{-ikx}) e^{-i\omega t}$, где x — координата, отсчитываемая от первого поршня, ω — круговая частота, а постоянные A и B определяются из граничных условий: $A = (V_1 e^{-jkL} - V_2) / 2k \sin kL$; $B = (V_1 e^{jkL} - V_2) / 2k \sin kL$.

Коэффициент отражения r будет равен

$$r = (V_1 - V_2 e^{jkL}) / (V_1 - V_2 e^{-jkL}) \quad (1)$$

Отсюда непосредственно следует, что необходимым и достаточным условием получения бегущей волны вправо или влево является равенство $V_2 = V_1 e^{\mp jkL}$, т. е. $|V_2| = |V_1|$ и $\alpha = \mp kL$ без ограничения на длину камеры.

На практике указанные условия могут быть выдержаны лишь в пределах точности измерения амплитуды колебательной скорости поршней и сдвига фаз между ними.

Рассмотрим влияние погрешностей возбуждения поршней на параметры имитируемого поля бегущей волны.

Пусть

$$V_2 / V_1 = (1 \pm \delta V) e^{-j(kL \pm \Delta \alpha)}, \quad (2)$$

где δV — относительная погрешность возбуждения поршня по амплитуде, а $\Delta\alpha$ — погрешность возбуждения по фазе.

Подставляя (2) в (1) и проведя необходимые преобразования, получим

$$|r| = \left[\frac{1 + (1 \pm \delta V)^2 - 2(1 \pm \delta V) \cos \Delta\alpha}{1 + (1 \pm \delta V)^2 - 2(1 \pm \delta V) \cos(2kL \pm \Delta\alpha)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Из полученного выражения и исследования решения на устойчивость при $kL \rightarrow n\pi$, где $n=1, 2, 3, \dots$, следует, что при длине отрезка трубы, кратной половине длины волны генерируемого колебания, режим бегущей волны получить невозможно, так как $|r| \rightarrow 1$, а при длине отрезка трубы, кратной четверти длины волны, оказывается наименьшим влияние ошибок возбуждения на режим бегущей волны, при этом $|r| = (\delta V^2 + \Delta\alpha^2)/2$.

Для малых значений $\Delta\alpha \ll kL < 0,8$ выражение (3) можно упростить:

$$|r| = (\delta V^2 + \Delta\alpha^2)^{1/2} / (2kL) \quad (4)$$

и получить оценку наименьшего расстояния между поршнями при заданных погрешностях их возбуждения и приемлемой точности имитации бегущей волны

$$kL > (\delta V^2 + \Delta\alpha^2)^{1/2} / (2|r|). \quad (5)$$

Например, используя для измерения скорости поршней акселерометры с погрешностью $\delta V = \pm 2\%$ и для измерения фазового сдвига фазометр 2971 фирмы Брюль и Кьер с погрешностью $\Delta\alpha = \pm 1^\circ$ и допуская $|r| = 0,05$, получим $kL > 0,35$, что находится на пределе возможности использования формулы $\text{tg } \alpha = -kL$.

При этом нами не учитывались другие погрешности, которые на практике приводят к еще более жесткому ограничению на kL . Вместо измерения колебательных скоростей двух поршней для индикации режима бегущей волны можно использовать предложенную в работе [3] схему. Однако можно показать, что два канала приемников звука в этой схеме должны обладать идентичными амплитудно- и фазочастотными характеристиками с аналогичной погрешностью.

Таким образом, точность имитации свободного поля в замкнутом объеме малых волновых размеров определяется предельными возможностями измерительной техники. Для уменьшения влияния погрешности возбуждения поршней на точность имитации режима бегущей волны расстояние между поршнями рекомендуется брать в пределах $(1/8 \div 3/8) \lambda$, где λ — длина волны.

В заключение авторы выражают благодарность А. Д. Лапину, указавшему на невозможность имитации режима бегущей волны в камере при расстоянии между поршнями, кратном $\lambda/2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бейгель М. З., Портной Ю. В. Об одном способе моделирования бегущей волны низкой частоты в ограниченном объеме. — Акуст. журн., 1982, т. 28, № 3, с. 413—414.
2. Бейгель М. З., Портной Ю. В. Генератор низкочастотных акустических полей. А. с. № 959841. — Оpubл. в Б. И., 1982, № 35.
3. Дмитриевский Н. Н., Павлов Л. Е., Сильвестров С. В. Градуировка гидрофонов в камере с активными нагрузками. — Измерит. техника, 1975, № 7, с. 74—75.
4. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М.: Изд-во МГУ, 1960.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
20.II.1984

УДК 551.463.26

ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ ЗВУКА ОТ НЕОДНОРОДНОГО ПОДВОДНОГО ГРУНТА ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

Ивакин А. И., Лысанов Ю. П.

Рассеяние звука случайными неоднородностями подводного грунта теоретически рассматривалось в ряде работ [1—5]. При этом граница раздела вода — грунт считалась прозрачной (неотражающей). На основе такой модели удалось объяснить наиболее типичные зависимости коэффициента обратного рассеяния звука дном m_v от угла скольжения χ ($m_v \sim \sin \chi$ — закон Ломмеля — Зеелигера) и независимость m_v от частоты, наблюдаемые в мелководных районах при углах $\chi \geq 5^\circ$ и частотах $f \geq 2$ кГц [6]. Экспериментальные данные по рассеянию звука дном при более низких частотах и меньших углах скольжения малочисленны и появление новых результатов вызывает большой интерес. В работе [7] на основе экспериментальных данных по реверберации в мелководных районах с песчаным и алевроито-