

ТЕЛЕФОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА

ИГОРЬ НАБЕЛЕК (Igor Nabělek), Братислава

1. Введение

При конструировании различного вида акустических устройств, например, громкоговорителей, шпиков громкоговорителей, рупоров телефонов, и т. п., необходимо знать их акустический импеданс в соответствующем диапазоне частот. Для акустического оформления пространства также необходимо знать акустический импеданс материалов, которые нужны для этих целей. Для акустического исследования слуховых деффектов и для правильной градуировки телефонов с помощью искусственного уха необходимо знать акустическую нагрузку использованных телефонов, т. е. входной акустический импеданс среднего человеческого уха, который меняется в зависимости от того, с какой силой прижимается телефон к уху.

Прямое измерение акустического импеданса затруднительно. Акустический импеданс обычно определяется косвенным образом по величинам, измерение которых не представляет особых трудностей. В зависимости от того, какие величины измеряются, можно разделить методы измерения для определения акустического импеданса на три основные группы. К первой группе можно отнести методы, которые используют данные, полученные на поверхности исследуемого объекта, или непосредственно вблизи поверхности. В этих методах измеряются одновременно в одной точке акустическое давление и акустическая скорость и по их отношению и фазе определяется импеданс. Ко второй группе относятся методы, в которых акустический импеданс определяется из анализа стоячих волн в рупоре. Соотношения, которые действительны для цилиндрического рупора, аналогичны соотношениям, вытекающим из телеграфного уравнения для электрической цепи, и подобно тому, как определяется электрическое сопротивление нагрузке по измерениям в электрической цепи, можно аналогичным путем определить также и акустический импеданс в конце цилиндрического рупора. К третьей группе относятся методы, которые используют для определения неизвестного импеданса метод сравнения с каким-нибудь известным импедансом с помощью мостов, или путем воздействия этого импеданса на источник звука.

Из вышеупомянутых способов измерения приходится рассчитывать при определении акустического импеданса уха в зависимости от силы прижатия только на метод, использующий влияние акустической нагрузки на входной акустический импеданс источника звука. При этом методе можно использовать для измерений в качестве источника звука телефон. Это позволяет сравнительно легко изменить силу прижатия телефона к уху. Остальные методы, использующие или стоячие волны (при которых трубка имеет относительно большие размеры), или мосты, не дают эту возможность. Но метод определения акустического импеданса нагрузки по измерениям входного электрического импеданса источника звука также не является подходящим для измерений, которые надо осуществлять в сравнительно широком диапазоне частот; этот метод имеет некоторые недостатки. Он требует относительно сложную вычислительную обработку, и что наиболее важно, для достаточно точного определения импеданса механический импеданс источника на соответствующей частоте должен быть минимальным. Этого можно добиться обычно только вблизи резонанса телефона а, точное измерение импеданса в широком диапазоне частот с помощью только одного телефона нормальной конструкции невозможно.

Ввиду этих причин нами создано измерительное устройство, которое лишено упомянутых недостатков; в принципе оно относится к первой группе методов. Наше устройство — телефонный измеритель акустического импеданса (в дальнейшем только измеритель) — имеет форму телефона. Поверхность измерителя, которая прижимается к ушной раковине, совпадает по форме со стандартной чехословацкой раковиной.

2. Принцип и описание измерений

При поверхностных методах основной проблемой является измерение акустической скорости. Для ее определения используются скоростные микрофоны, которые однако, из-за своих размеров, деформируют звуковое поле на более высоких частотах. Чтобы избежать этого затруднения, а также потому что скоростной микрофон, обыкновенной конструкции оказался невозможным разместить (из-за его размеров) у входа измеряемого объекта — человеческого уха, определялась на входе измеряемого импеданса объемная скорость. Принципиальная схема измерителя показана на рис. 1.

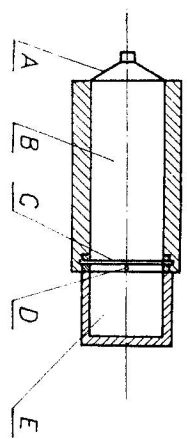


Рис. 1. Принципиальный состав измерителя акустического импеданса: А — источник звука, В — трубка, С — мембрана, D — устье зонда, E — измеряемый объект.

Звук, возбуждаемый преобразователем А (в нашем случае рупорным громкоговорителем) распространяется по трубке В и попадает на мембрану С следующего преобразователя (в нашем случае электромагнитного). Объем воздуха, входящего (или выходящего) в измеряемый объект Е за единицу времени, т. е. объемная скорость, равен объему, вытесненному мембраной С преобразователя за единицу времени. Движение мембраны возбуждает в катушке преобразователя электродвижущую силу, значение которой (абсолютная величина и фаза) соответствует величине и фазе объемной скорости.

Акустическое давление на входе измеряемого объекта определяется с помощью измерительного конденсаторного микрофона с зондом: один конец зонда помещается за мембраной, которая служит для измерения объемной скорости (точка D); второй конец зонда находится перед мембраной измерительного микрофона. Определив отношение акустического давления к объемной скорости и фазовой угол между ними мы получим акустический импеданс объекта. Измеритель изображен на рис. 2. Рис. 3 показывает измерение акустического импеданса человеческого уха.

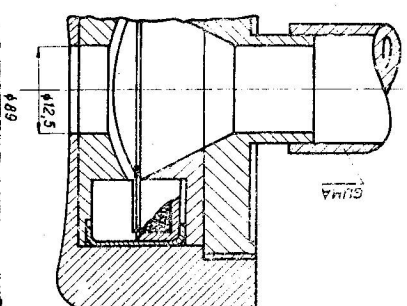


Рис. 2. Чертеж (сечение) телефонного измерителя акустического импеданса.

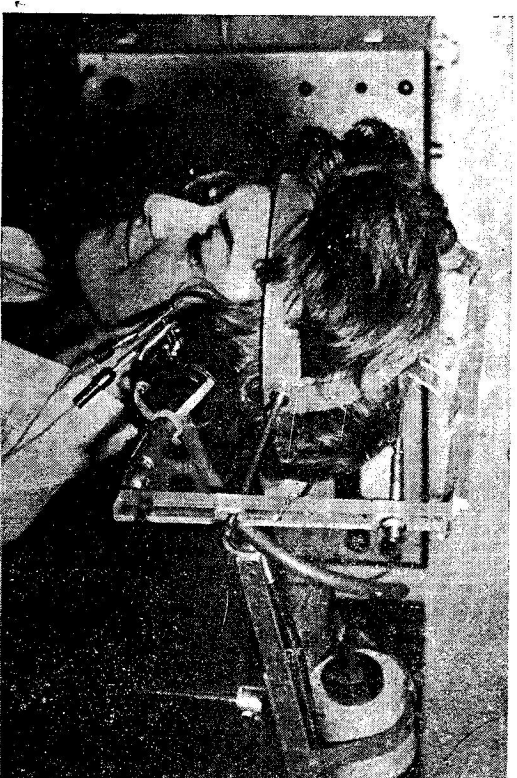


Рис. 3. Измерение акустического импеданса человеческого уха.

Блок-схема для измерения акустического импеданса с помощью телефонного измерителя импеданса приведена на рис. 4.

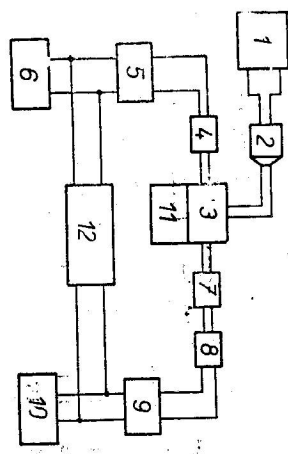


Рис. 4. Блок-схема для измерения акустического импеданса. 1 — генератор тональной частоты, 2 — прекомпонователь, 3 — измеритель частоты, 4 — усилитель, 5 — усилитель, 6 — усилитель, 7 — усилитель, 8 — микрофон, 9 — усилитель, 10 — усилитель, 11 — измерительный объект, 12 — фазометр.

Сигнал от генератора тональной частоты поступает по резиновой трубке на заднюю сторону мембраны измерителя. Напряжение, индуцированное в катушке измерителя, усиливается предусилителем I и усилителем I и подается на вольтметр I и на первый вход фазометра. Напряжение из измерительного конденсаторного микрофона (соответствующее акустическому давлению на его мембране) после усиления предусилителем II и усилителем II поступает на вольтметр II и на второй вход фазометра. Вольтметры I и II определяют абсолютное значение напряжений, соответствующих акустическому давлению на микрофон, или же скорости движения мембраны телефона. Разность фаз между обоими напряжениями после поправки с учетом фазовых сдвигов в обоих трансляционных каналах соответствует фазовому углу между акустическим давлением и объемной скоростью.

3. Теория

Акустическое давление на входе зонда, которому соответствует определенное выходное напряжение на вольтметре, можно определить градуировкой в полости, в которой возбуждается акустическое давление, например, телефоном. Величину давления в полости показывает градуированный измерительный конденсаторный микрофон.

Объемную скорость на входе измеряемого импеданса можно получить из напряжения на выходе второго канала с помощью вычислений, дополненных некоторыми измерениями. У преобразователя, электромагнитного типа, который использовался в нашем измерителе, выходное напряжение катушки пропорционально скорости мембраны и равно

$$U = k_{st} \cdot v, \quad (1)$$

где

$$k_{st} = \frac{2\pi\Phi_0}{d}; \quad (2)$$

Φ_0 — постоянный магнитный поток в зазоре, n — число витков катушки, d — ширина зазора между мембраной и полусным наконечником. Константу k_{st} можно определить, измерив ток, протекающий по катушке, который необходим для компенсации отклонения мембраны, наружной определенной силой. Сила F и ток i связаны соотношением

$$F = k_{st} \cdot i. \quad (3)$$

Скорость v равна производной отклонения w по времени, т. е. при гармонических колебаниях мембраны на одной частоте

$$v = \frac{dw}{dt} = j\omega w. \quad (4)$$

Отклонение $w(r, \varphi, t)$ круглой мембраны определяется в полярных координатах r и φ [3] как решение дифференциального уравнения

$$\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} - \frac{\rho}{S} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0,$$

где ρ — поверхностная плотность материала мембраны, S — радиальное напряжение.

Для колебаний мембраны на одной частоте можно рассматривать решение в виде

$$w = \xi(r, \varphi) \cdot e^{j\omega t},$$

откуда дальше вытекает, что функция $\xi(r, \varphi)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \xi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial \varphi^2} + \mu^2 \xi = 0,$$

где

$$\mu^2 = \frac{\rho}{S} \cdot \omega^2.$$

Поскольку ξ должно быть из соображений симметрии периодической функцией по φ , можно ее записать в виде:

$$\xi = y(r) \cdot e^{jn\varphi}.$$

Подстановкой в (4) при $n = 0$ мы получаем для $y(r)$, т. е. для отклонения w при гармонических колебаниях мембраны в основном типе колебаний, дифференциальное уравнение Бесселя

$$\frac{d^2 y}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dy}{dr} + \mu^2 y = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения

$$\frac{d^2 y}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dy}{dr} + \mu^2 y = p \cos \nu t \quad (5')$$

для случая нашей мембраны, изображенной на рис. 5, т. е. для мембраны радиуса a с твердым диском радиуса b , который находится в центре мембраны и имеет массу M , при воздействии периодического давления p частоты ν [1] дается в виде

$$y = \frac{\cos \nu t}{\pi S} \sum_s \frac{\Phi_s \mu_s(r)}{\left(1 - \frac{\nu^2}{n_s^2}\right) (\mu_s a)^2 T_s}, \quad (6)$$

где $u_s(r) = J_0(\mu_s r) - RN_0(\mu_s r)$,
примем с учетом краевых условий мы имеем

$$R = \frac{J_0(\mu_s a)}{N_0(\mu_s a)}.$$

Далее, если обозначить $\delta = b/a$, то для Φ_s получаем

$$\Phi_s = a^2 \pi r \left(\delta^2 [J_0(\mu_s b) - RN_0(\mu_s b)] + \frac{2}{\mu_s a} \{ J_1(\mu_s a) - RN_1(\mu_s a) \} - \delta [J_1(\mu_s b) - RN_1(\mu_s b)] \right)$$

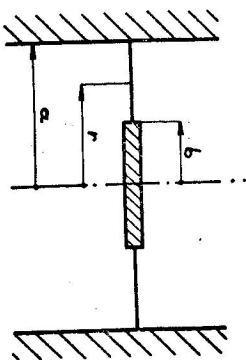


Рис. 5. Чертеж мембраны с твердым диском, расположенным в центре; a — радиус мембраны, b — радиус диска.

и для T_s

$$T_s = [J_1(\mu_s a) - RN_1(\mu_s a)]^2 - \delta^2 \left\{ [J_1(\mu_s b) - RN_1(\mu_s b)]^2 + \left(1 + \frac{M}{\rho b^2 \pi}\right) [J_0(\mu_s b) - RN_0(\mu_s b)]^2 \right\};$$

$$n_s^2 = \frac{(\mu_s a)^2}{a^2} \cdot \frac{s}{\varrho},$$

где n_s — частота собственных колебаний мембраны

J_n — функции Бесселя n -ного порядка, где $n = 0, 1$.

N_n — функции Неймана n -ного порядка, где $n = 0, 1$.

Значения μ_s вытекают из корней $(\mu_s \cdot a)$ характеристического уравнения, которое с учетом краевых условий имеет вид

$$\frac{J_1(\mu b) K_0(\mu a) - J_0(\mu a) K_1(\mu b)}{J_0(\mu b) K_0(\mu a) - J_0(\mu a) K_0(\mu b)} = \frac{(\mu b) M}{2b^2 \pi \rho}.$$

Для выходного напряжения катушки U (соотношение (1)) решающее значение имеет скорость v , вытекающая из отклонения y для $r = b$, которое можно вычислить по формуле (6) подстановкой $r = b$. Объемную скорость можно получить интегрируя соотношение (6), из которого можно потом определить также и эффективную поверхность мембраны. Но поскольку в выходное отверстие измерителя поступают из отдельных колец мембраны компоненты, которые составляют объемную скорость, не одновременно, а с фазовым сдвигом, необходимо найти результирующий фазовый сдвиг объемной скорости векторным сложением частных объемных скоростей от отдельных колец.

Ввиду того, что для вышеприведенного метода необходимо было знать некоторые константы мембраны, которые известны не совсем точно, и поскольку при данной конструкции измерителя невозможно провести вычисления без определенных идеализаций и упрощающих предположений (например, решая колебания мембраны как закрепленной круглой пластинки с жесткой центральной частью), маловероятно, чтобы было возможно получить на его основе значение измеряемого акустического импеданса с желательной точностью. Поэтому мы выбрали другой способ.

Поскольку для определения акустического импеданса не требуется знать ни абсолютную величину давления и объемной скорости, ни фазовый сдвиг в отдельных трансляционных каналах для каждой величины в отдельности, а только их отношение и разность фаз, мы проградировали измеритель с помощью известного акустического импеданса.

Акустическую цепь измерителя нагруженного акустическим импедансом Z_x можно представить схемой показанной на рис. 6, где

- V_1 — объемная скорость определяемая мембраной измерителя,
- V_2 — объемная скорость, на входе измеряемого объекта,
- Z_M — акустический импеданс мембраны измерителя,
- Z_1 — акустический импеданс зазора между мембраной измерителя и раковины,
- Z_2 — акустический импеданс объема отверстия раковины,
- p_1 — акустическое давление в полости за мембраной,
- p_2 — акустическое давление на входе измеряемого объекта.

Поскольку зазор между мембраной измерителя и раковины мы рассматриваем из-за его размеров как массу и сопротивление, включаем импеданс Z_1 в схему последовательно с импедансом Z_M . Учитывая малые размеры и форму измеряемых объектов, мы рассматриваем объем отверстия раковины как гибкость; поэтому импеданс Z_2 в схеме включаем параллельно импедансу Z_x .

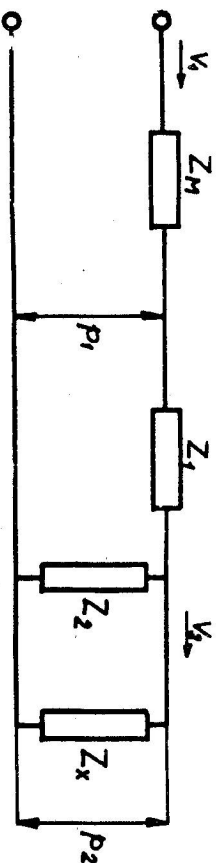


Рис. 6. Запасная схема измерителя. V_1 — объемная скорость определяемая мембраной телефонного измерителя импеданса, V_2 — объемная скорость на входе измеряемого объекта, Z_M — акустический импеданс мембраны телефонного измерителя импеданса, Z_1 — акустический импеданс зазора между мембраной телефонного измерителя импеданса и раковины, Z_2 — акустический импеданс объема отрезка трубки, Z_x — измеряемый акустический импеданс, P_1 — акустическое давление впереди за мембраной, P_2 — акустическое давление на входе измеряемого импеданса.

Измеряемый импеданс $Z_x = P_2/V_2$ необходимо выразить с помощью давления P_2 и объемной скорости V_1 , поскольку эти величины измеряются. Из схемы вытекает

$$P_1 = V_1 \left(Z_1 + \frac{Z_2 Z_x}{Z_2 + Z_x} \right), \quad (7)$$

$$V_2 = \frac{P_2}{Z_1} = V_1 - \frac{P_2}{Z_2}, \quad (8)$$

$$P_2 = V_1 \frac{Z_2 Z_x}{Z_2 + Z_x}. \quad (9)$$

Для случая $Z_x = \infty, V_2 = 0$ (10)

соответствующее акустическое давление равняется

$$P_{2\infty} = P_{1\infty} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = V_{1\infty} Z_2. \quad (11)$$

Из соотношений (9) и (11) вытекает

$$Z_x = \frac{\frac{P_2}{V_1}}{1 - \frac{P_2}{V_1} \frac{V_{1\infty}}{P_{2\infty}}} \quad (12)$$

Если бы измерялось прямо акустическое давление P_2 и объемная скорость V_1 , то мы могли бы из соотношения (12) вычислить, с помощью дополнительных измерений $V_{1\infty}$ и $P_{2\infty}$ нагрузив измеритель бесконечным импедансом, независимую величину Z_x . Поскольку фактически измеряется выходное напряжение V_1 усилителя I , которое прямо пропорционально объемной скорости V_1 и сдви-

нуто по отношению к ней по фазе на сумму фазовых сдвигов в отдельных частях цепочки, и напряжение U_2 на выходе усилителя II , соответствующее акустическому давлению P_2 на входе зонда, у которого это аналогично

$$\begin{aligned} U_1 &= k_v V_1, \\ U_2 &= k_p P_2, \end{aligned} \quad (13)$$

необходимо для определения комплексных величин k_v и k_p проделать вспомогательные измерения.

Из соотношений (9), (11) и (13) вытекает для теоретически известного импеданса $Z_x = Z_2$

$$\frac{U_2/k_p}{U_1/k_v} = \frac{Z_1 \cdot \frac{U_{2\infty}/k_p}{U_{1\infty}/k_v}}{\frac{U_{2\infty}/k_p}{U_{1\infty}/k_v} + \frac{U_{2\infty}/k_p}{U_{1\infty}/k_v}}. \quad (14)$$

Если обозначить

$$K = \frac{k_v}{k_p}, \quad (15)$$

$$Z_2 = \frac{U_2}{U_1}, \quad (16)$$

$$Z_2' = \frac{U_{2\infty}}{U_{1\infty}}, \quad (17)$$

то получим

$$Z_2' K = \frac{Z_2 Z_2' K}{Z_2 + Z_2' K}$$

и отсюда

$$K = \frac{Z_2 (Z_2' - Z_2)}{Z_2' Z_2}. \quad (18)$$

Из (12) и (13) после этого вытекает

$$Z_x = \frac{\frac{U_2}{U_1} - K}{1 - \frac{U_2}{U_1} \frac{U_{1\infty}}{U_{2\infty}}} \quad (19)$$

4. Градуировка и измерения

Градуировку измерителя мы произвели с одной стороны (кроме нагрузки выходного отверстия бесконечным импедансом) при нагрузке реальным сопротивлением в форме резиновой трубки радиусом в 12,5 мм и длиной в 15 м, а с другой стороны при нагрузке акустической гильзой, которая представляла собой закрытую полость объемом в 3 см³. Значения абсолютных величин $|K|$

и соответствующих фазовых углов φ для обоих случаев очень мало отличались друг от друга. Значения $|K|$ и φ вычисленные по соотношению (18) приведены в диаграммах на рис. 7 и 8.

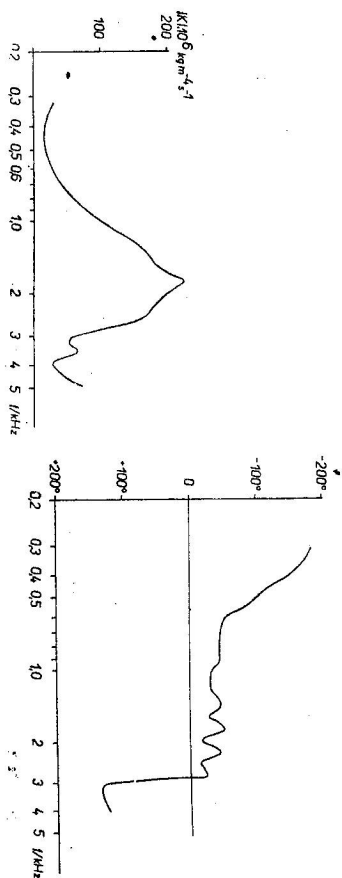


Рис. 7. Зависимость абсолютного значения величины K от частоты.

Рис. 8. Зависимость фазы величины K от частоты.

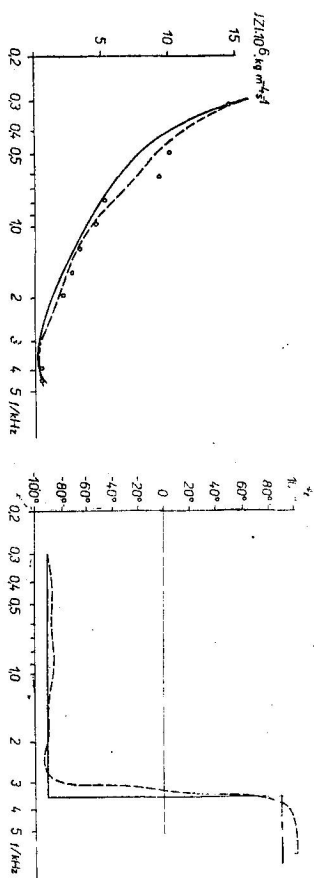


Рис. 9. Абсолютное значение входного акустического импеданса искусственного уха ССПТ; полная кривая — измерение методом стоячих волн, штрихованная кривая — измерение телефонным измерителем.

Рис. 10. Фаза входного акустического импеданса искусственного уха ССПТ (обозначение на рис. 8).

Таким образом проградуированный измеритель использовался например, для измерения входного акустического импеданса искусственного уха ССПТ [4], которое образовано практически только гибкостью. Изменение абсолютной величины и фазы этого импеданса приведено на рис. 9 и 10 соответственно. Из сравнения результатов, полученных телефонным измерителем импеданса, с более ранними измерениями [2] вытекает, что разница между этими измерениями мала и можно ее включить в ошибки измерений.

5. Заключение

Созданный нами телефонный измеритель акустического импеданса позволяет быстро определять акустический импеданс объектов сравнительно небольших размеров в диапазоне частот от 200 до 4500 герц. Благодаря своей форме он особенно удобен для измерений входного акустического импеданса человеческого и искусственного уха и позволяет, в частности, определять этот импеданс при различной силе прижатия.

В заключение я выражаю благодарность дипломированному физiku Владимиру Маернику за помощь при работе, и особенно при измерениях и обработке результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Frank O., *Die Leistung des Schalles im Ohr*, Sitzungsberichte Akad. Wiss., München 1923, 11—77.
- [2] Nábělek I., *Akustická impedancia ľudského ucha a niektorých umelých uší*, Slaboportový obzor, 21 (1960), 210—214.
- [3] McLachlan N. W., *Bessel Functions for Engineers*, Oxford 1955.
- [4] CCIF — 1952/1954 — 4. CE — dokument č. 59.

Получено 17. X. 1962 г.

ČSAV, Výzkumný ústav
Slovenskej akadémie vied v Bratislave

TELEPHONE EQUIPMENT FOR MEASURING ACOUSTIC IMPEDANCE

Igor Nábělek

Summary

This article deals with the equipment suitable for measuring acoustic impedance of small objects. It is convenient also to evaluate the input acoustic impedance of human ears as well as artificial ones.

The measuring device proper consists of suitably adjusted telephone receiver in which the surface coupling in contact with the ear, has the shape of the normal Czechoslovak earphone cap. The earphone cartridge (made by Tesla) is of electromagnetic type.

The input acoustic impedance of a given object is given by the ratio of acoustic pressure to the volume current at the entrance of the object. With this device the acoustic pressure is measured by a probe condenser microphone. The volume current is equal to the volume of air pressed out by the earphone diaphragm in a unit of time. The electromotive force induced in the coil by the motion of the diaphragm is in its magnitude and phase proportional to the volume current. The diaphragm is set in motion by the sound introduced to one of its sides by means of a tube from a loudspeaker.

In the article a theory is put forward by means of which one can estimate the volume current, acoustic pressure and their phase difference from the output voltages of the earphone cartridge and

of the condenser microphone. Difficulties connected with this method are also discussed. The calibration of the device is based on the measurement on some objects of known acoustic impedance. Calibration curves as well as a practical example of measurement are given.

Thanks to its small dimensions this device enables us to measure acoustic impedance of the human ears as a function of the force with which the receiver is applied to the ear.