

УДК 621.315.61

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРЕТНЫХ ПРИЕМНЫХ
ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ*Щелко Н.С., Таиров В.Н.*

Рассматривается работа электретного приемного электроакустического (электромеханического) преобразователя на резистивно-емкостную нагрузку. Получено выражение для выходного электрического сигнала. В качестве примера на основе предлагаемой методики произведен расчет чувствительности электретного микрофона.

В связи с возрастающим интересом к использованию электретов в технике [1] разрабатываются применительно к конкретным преобразователям на электретах методики их расчета [2–9].

В работах [2–4, 7] приведены расчеты электретных приемных преобразователей («генераторов»), с помощью которых неэлектрические, например акустические или механические, воздействия преобразуются в электрические сигналы; в [8, 9] — расчеты электретных «двигателей», электретных телефонов [8], электретных реле [9] и т. п.

Вместе с тем разработка большого числа электретных преобразователей новых типов требует построения некоторой обобщенной методики их расчета. Попытка построения такой методики была предпринята в [4] при рассмотрении работы электретного преобразователя на резистивно-емкостную нагрузку. Однако предложенная в [4] методика обладает рядом существенных недостатков. Во-первых, полученные в [4] соотношения затруднительно применять в инженерной практике, так как они достаточно сложны, а алгоритм использования численных методов вычислений не приведен. Во-вторых, рассмотрены практически только некоторые частные случаи. В-третьих, не указан способ определения смещения мембраны под влиянием действующих на нее сил, которое фигурирует в полученных соотношениях. Кроме того, расчеты в цитируемых работах не выходят за рамки «поршневого» приближения. Однако использование в настоящее время электретов с большими поверхностными потенциалами может приводить к значительным прогибам мембран под действием электростатических сил, когда использование «поршневого» приближения не обеспечивает приемлемой точности расчетов [5].

В настоящей работе предлагается обобщенная методика расчета электретных приемных преобразователей, свободная от указанных выше недостатков. Эта методика может оказаться удобной в инженерной практике, так как может быть реализована с помощью современных программируемых микрокалькуляторов.

Конструкция электретного преобразователя показана на фиг. 1. Элементы R и C являются соответственно электрическими сопротивлением и емкостью нагрузки. Отметим, что если используется конструкция, в которой электрет нанесен непосредственно на массивный электрод, а мембрана является неэлектретной, то предлагаемая методика расчета остается справедливой.

Положим, что внешняя сила, вызывающая колебания мембраны, известна. Тогда можно считать известным вид колебательного процесса. Поэтому показанную на фиг. 1 систему с распределенными параметрами (с элементами массы, упругости, механического сопротивления) можно заменить при расчете эквивалентными эффективными сосредоточенными параметрами [6]. Уравнение движения центра мембраны при этом имеет

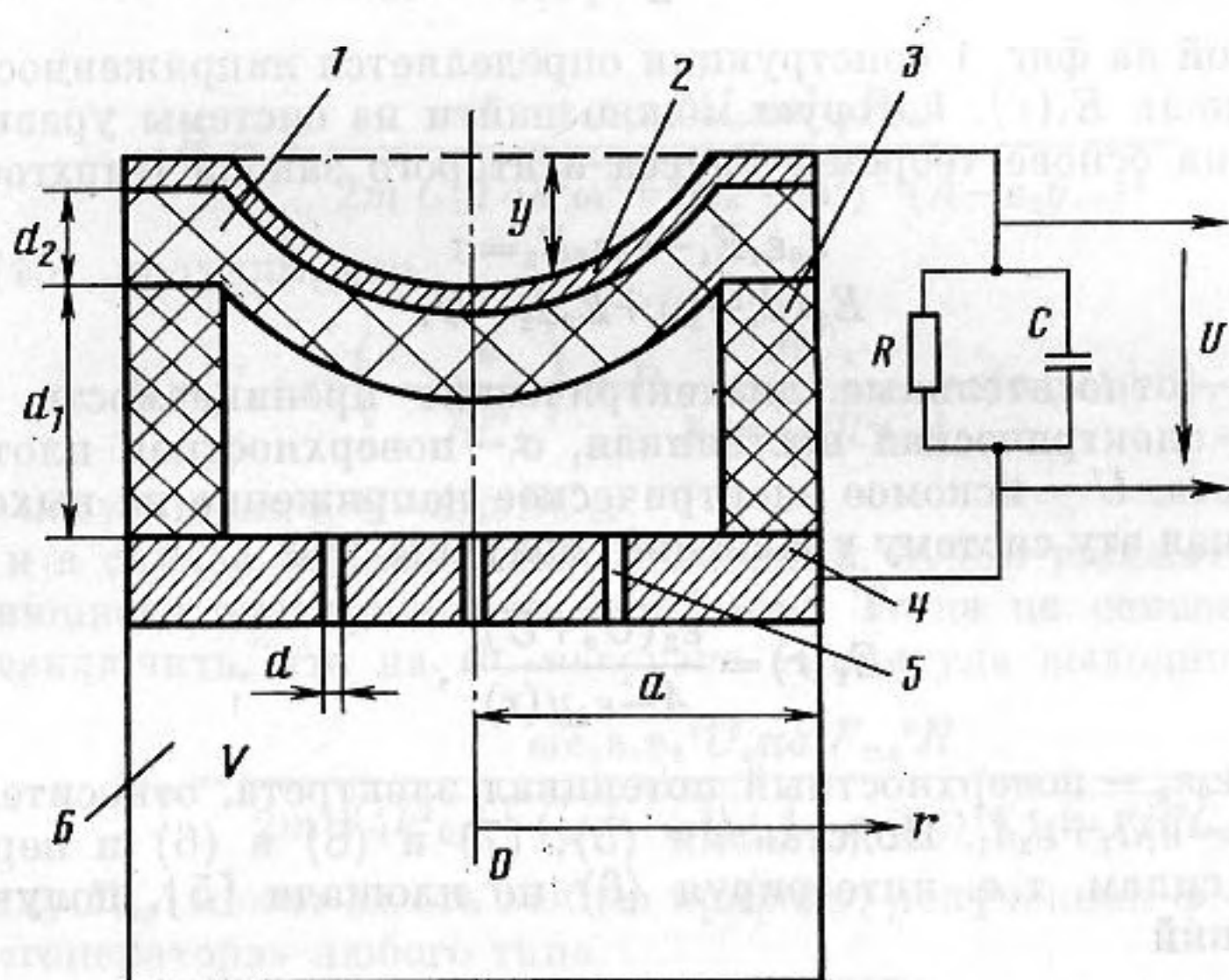
вид [6]

$$\frac{d^2 y_0}{dt^2} + 2k \frac{dy_0}{dt} + \omega_0^2 y_0 = \frac{F^*}{m^*}, \quad (1)$$

где y_0 — прогиб мембраны в центре, k — показатель затухания, ω_0 — собственная частота колебаний мембраны, F^* — эффективная сила, действующая на мембрану, m^* — ее эффективная масса. Пусть

$$F^* = F_{\pi}^* + F_{mb}^* \sin \omega t, \quad (2)$$

где F_{π}^* — эффективная пондеромоторная сила, действующая на мембрану, вследствие существования значительного внешнего электрического поля электрета, F_{mb}^* — амплитуда эффективной внешней силы, возбуждающей колебания, ω — частота возбуждающей силы.



Фиг. 1. Принципиальная схема электретного преобразователя: 1 — полимерная мембрана с поверхностной плотностью заряда σ , относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , объемной плотностью ρ_v и напряженностью электрического поля в ней $E_2 = E_2(r)$; 2 — слой металлизации; 3 — прокладка для обеспечения рабочего зазора с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_1 и напряженностью электрического поля в нем $E_1 = E_1(r)$; 4 — противоэлектрод; 5 — отверстия в противоэлектроде для увеличения эффективного подмембранного объема, $d \ll a$; б — полость, ограничивающая эффективный подмембранный объем

Тогда, совместно решая (1) и (2), получим для $k < \omega_0$ (что реально и имеет место):

$$y_0 = C_1 e^{-kt} \sin(\Omega t + \varphi_1) + \frac{F_{mb}^*}{m^* \sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \sin(\omega t + \varphi_2) + \frac{F_{\pi}^*}{m^* \omega_0^2}, \quad (3)$$

где C_1 и φ_1 — постоянные, $\Omega = (\omega_0^2 - k^2)^{1/2}$, $\tan \varphi_2 = 2k\omega / (\omega_0^2 - \omega^2)$. Собственная частота колебаний механической системы $\omega_0 = (k_{упр}^* / m^*)^{1/2}$, где $k_{упр}^*$ — эффективный коэффициент упругости. Поэтому последнее слагаемое в (3) может быть представлено в виде $F_{\pi}^* / k_{упр}^*$. Очевидно, эта величина в рамках закона Гука представляет собой статический прогиб $y_{ост}$ центра мембраны под действием пондеромоторных и упругих сил. В настоящей работе не будем исследовать переходные процессы. Поэтому не будем искать постоянные C_1 и φ_1 , так как в установившемся режиме первое слагаемое в (3) исчезнет. Учитывая это, перепишем (3) в виде

$$y_0 = y_{ост} + \frac{F_{mb}^*}{m^* \sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \sin(\omega t + \varphi_2). \quad (4)$$

В ряде работ [5–7] было показано, что изменение формы мембраны при

статическом прогибе хорошо аппроксимируется выражением

$$y = y_{\text{ост}} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right). \quad (5)$$

Поэтому величину $y_{\text{ост}}$ можно определить, подставив (5) в уравнение для статического случая:

$$\tau \left(\frac{\partial^2 y}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial y}{\partial r} \right) + p = 0, \quad (6)$$

где τ — натяжение мембраны, p — давление, развиваемое пондеромоторными силами. Это давление

$$p(r) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1^2(r) \quad (7)$$

в приведенной на фиг. 1 конструкции определяется напряженностью электрического поля $E_1(r)$, которую можно найти из системы уравнений, составленной на основе теоремы Гаусса и второго закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1 - \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_2 &= \sigma \\ E_1(d_1 - y) + E_2 d_2 &= U, \end{aligned}$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — относительные диэлектрические проницаемости, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная, σ — поверхностная плотность заряда электрета, U — искомое электрическое напряжение на выходе «генератора». Решая эту систему уравнений, получим, что

$$E_1(r) = \frac{\varepsilon_2 (U_0 + U)}{A - \varepsilon_2 y(r)}, \quad (8)$$

где $U_0 = \sigma d_2 / \varepsilon_0 \varepsilon_2$ — поверхностный потенциал электрета, относительно земли [1], а $A = \varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1$. Подставляя (5), (7) и (8) в (6) и переходя от давлений к силам, т.е. интегрируя (6) по площади [5], получим после преобразований

$$y_{\text{ост}} = [A^2 \pm \sqrt{A^4 + \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^3 (U_0 + U)^2 A a / 2\tau}] / 2\varepsilon_2 A. \quad (9)$$

В (9) меньшее значение $y_{\text{ост}}$ соответствует устойчивому равновесию мембраны, большее — неустойчивому. Поэтому при дальнейшем рассмотрении будем учитывать в (9) только знак «-». Колебания мембраны, описываемые полученными выше выражениями (4), (5) и (9), вызывают изменение величины индуктируемого на противоэлектрете заряда $Q_{\text{инд}} = \pi a^2 \sigma_{\text{инд}}$ ($\sigma_{\text{инд}}$ — поверхностная плотность индуктируемого заряда). Появление заряда избыточного над равновесным приводит к возникновению тока $dQ_{\text{инд}}/dt$. Поэтому с учетом характера нагрузки можно записать:

$$C \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R} = \pi a^2 \frac{d\sigma_{\text{инд}}}{dt}. \quad (10)$$

Величину $\sigma_{\text{инд}}$ можно найти с помощью теоремы Гаусса, воспользовавшись (8) и считая, что средний по площади прогиб мембраны

$$\bar{y} = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a y(r) 2\pi r dr = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a y_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) 2\pi r dr = \frac{y_0}{2}. \quad (11)$$

Тогда

$$\sigma_{\text{инд}} = 0 - \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1 = -\varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_2 (U_0 + U)}{A - \varepsilon_2 \bar{y}}. \quad (12)$$

Учитывая, что $U = U(t)$ и $\bar{y} = \bar{y}(t)$ и подставляя (12) в (10), получим после нахождения производной $d\sigma_{\text{инд}}/dt$ и преобразований следующее уравнение:

$$\left(C + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \pi a^2}{A - \varepsilon_2 \bar{y}} \right) \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R} = - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 (U_0 + U) \pi a^2}{(A - \varepsilon_2 \bar{y})^2} \frac{d\bar{y}}{dt}. \quad (13)$$

Нетрудно убедиться, что входящая в (13) величина $C_c = \epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 \pi a^2 / (A - \epsilon_2 \bar{y})$ представляет собой собственную емкость преобразователя. Учитывая также, что реально $|U| \ll |U_0|$, и обозначив $C + C_c = C_2$, (13) можно переписать в виде

$$\frac{dU}{dt} + \frac{1}{RC_2} U = - \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2^2 U_0 \pi a^2}{(A - \epsilon_2 \bar{y})^2 C_2} \frac{d\bar{y}}{dt}. \quad (14)$$

Отметим, что для реальных преобразователей переменная составляющая в (4) значительно меньше A . Поэтому можно считать, что $(A - \epsilon_2 \bar{y})^2 \approx (A - \epsilon_2 \bar{y}_{ст})^2$. Учитывая это, подставим (4) и (11) в (14). Тогда для сигнала на выходе «генератора» получим уравнение

$$\frac{dU}{dt} + \frac{1}{RC_2} U = B \cos(\omega t + \varphi_2), \quad (15)$$

где

$$B = - \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2^2 U_0 \pi a^2 \omega F_{мв}^*}{2m^* C_2 \sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2} (A - \epsilon_2 \bar{y}_{ст})^2}. \quad (16)$$

Решая (15), получим, что

$$U = C_2 \exp\left(-\frac{t}{RC_2}\right) + B \frac{RC_2}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C_2^2}} \sin(\omega t + \theta), \quad (17)$$

где C_2 — постоянная, а $\theta = 1/\omega RC_2$.

Как и в случае механических колебаний, будем рассматривать только установившиеся электрические колебания. Тогда на основе (16) и (17) можно заключить, что на RC -нагрузке амплитуда выходного сигнала

$$U_m = \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2^2 U_0 \pi a^2 F_{мв}^* R}{2m^* \sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2} (A - \epsilon_2 \bar{y}_{ст})^2 \sqrt{1 + \omega^2 R^2 C_2^2}}. \quad (18)$$

Поскольку $F_{мв}^*$ может иметь любую природу, полученная формула пригодна для «генератора» любого типа.

Покажем эффективность использования (18) на примере расчета электретного микрофона. Формулу для расчета чувствительности электретного микрофона можно получить из (18), если учесть, что $F_{мв}^* = \sqrt{2} F_v^*$, а при равномерном нагружении мембраны силой F_v , как показано в [6], оказывается, что $F_v^* = F_v/2$, где F_v — реальное действующее значение силы, возбуждающей колебания. В случае микрофона $F_v = p_a \pi a^2$, где p_a — акустическое давление, оказываемое извне на мембрану, т. е.

$$F_{мв}^* = \frac{\sqrt{2}}{2} p_a \pi a^2. \quad (19)$$

Подставляя (19) в (18), найдем, что чувствительность микрофона

$$S = \frac{U_m}{p_{ам}} = \frac{U_m}{\sqrt{2} p_a} = \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2^2 U_0 (\pi a^2)^2 R}{4m^* \sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2} (A - \epsilon_2 \bar{y}_{ст})^2 \sqrt{1 + \omega^2 R^2 C_2^2}}$$

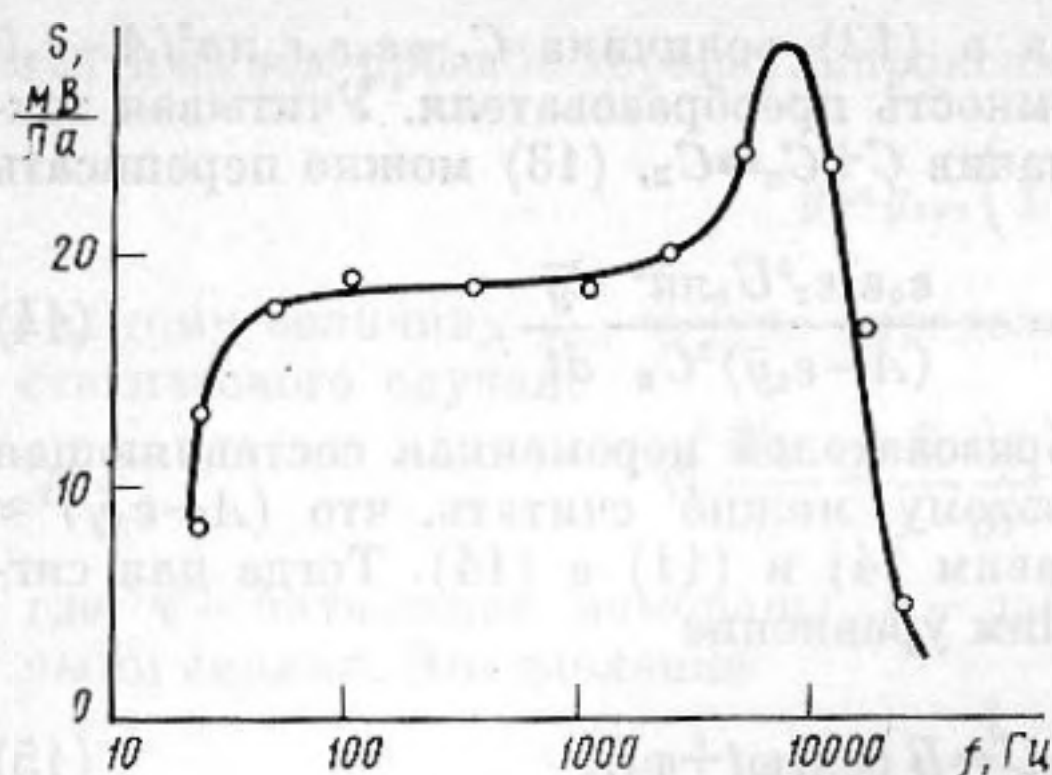
В [6] было показано, что

$$m^* = \frac{1}{3} \rho_v d_2 \pi a^2,$$

где ρ_v — объемная плотность мембраны, а в принятых в настоящей работе обозначениях

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{m^*} \left(2\pi\tau + \frac{\gamma p_0 (\pi a^2)^2}{4V} \right)},$$

где $\gamma = 1,4$ — отношение удельных теплоемкостей c_p/c_v , $p_0 = 10^5$ Па — атмосферное давление, V — величина полости, в которой происходит сжатие воздуха при колебаниях мембраны.



Фиг. 2. Расчетная зависимость чувствительности электретного микрофона от частоты (кривая) и ее экспериментальные значения [10] (точки). $a=1$ см; $\epsilon_1=1$; $\epsilon_2=2,2$; $d_1=35$ мкм; $d_2=10$ мкм; $\alpha=0,35$; $\tau=60$ Н/м; $U_0=80$ В; $\rho_V=2200$ кг/м³; $\gamma=1,4$; $p_0=10^5$ Па; $V=500$ мм³; $R=60$ мОм; $C=25$ пФ

Из данных работы [7] следует, что величина k в электретных преобразователях может составлять около 30% от ω_0 . Поэтому примем, что $k=\alpha\omega_0$, где $\alpha\approx 0,3$. Подчеркнем, что величина α заметно влияет на результаты расчета лишь при частотах, близких к резонансным. Во многих случаях демпфирование вообще не учитывают [4, 7].

Некоторые результаты предлагаемого расчета показаны на фиг. 2. Расчетные значения чувствительности близки к экспериментально наблюдаемым значениям [10].

Таким образом, предлагаемая методика позволяет сравнительно просто производить расчет электретных приемных преобразователей мембранного типа, нагруженных на резистивно-емкостную нагрузку, и анализировать влияние различных параметров преобразователей на их чувствительность [3, 11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Сесслер Г. М. Электреты. М.: Мир, 1983. 486 с.
2. Eisenblatter H., Semskow A. P., Tairow W. N. Electretasterein Bauelement zur Dateneingabe // Nachrichtentechnik // Elektronik. 1982. В. 32. № 4. S. 141-143.
3. Sessler G. M., West J. E. Foil-Electret Microphones // J. Acoust. Soc. Amer. 1966. V. 40. № 6. P. 1433-1440.
4. Sessler G. M. Analysis of the Operation of Electret Transducer Subject to Large Electrode Displacements // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 55. № 2. P. 345-349.
5. Вахитов Я. Ш. К расчету предельных значений поляризующих напряжений электростатических преобразователей звука // Тр. Ленинград. ин-та киноинженеров. 1964. Вып. 10. С. 37-46.
6. Фурдусев В. В. Электроакустика. М.: Гостехиздат, 1948. 515 с.
7. Busch-Vishniac I. J. Response of an edge-supported circular membrane electret earphone // J. Acoust. Soc. Amer. 1984. V. 75. № 3. P. 977-988.
8. Кузьмин Ю. И., Таиров В. Н. Расчет характеристик моноэлектретного телефона // Акуст. журн. 1982. Т. 28. № 1. С. 91-95.
9. Dreyfus G., Lewiner J. Evidence of mechanical instabilities of electrets in electric fields // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. № 10. P. 4357-4360.
10. Горбунова Е. К., Козлова Н. Н., Сейсян Е. Л., Таиров В. Н. Электретный студийный микрофон // Акуст. журн. 1974. Т. 20. № 4. С. 625-627.
11. Кузьмин Ю. И., Таиров В. Н. Прогнозирование стабильности электретного электроакустического преобразователя // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 4. С. 497-501.

Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поступила в редакцию 1.VII.1987