

УДК 621.396.677.001.5

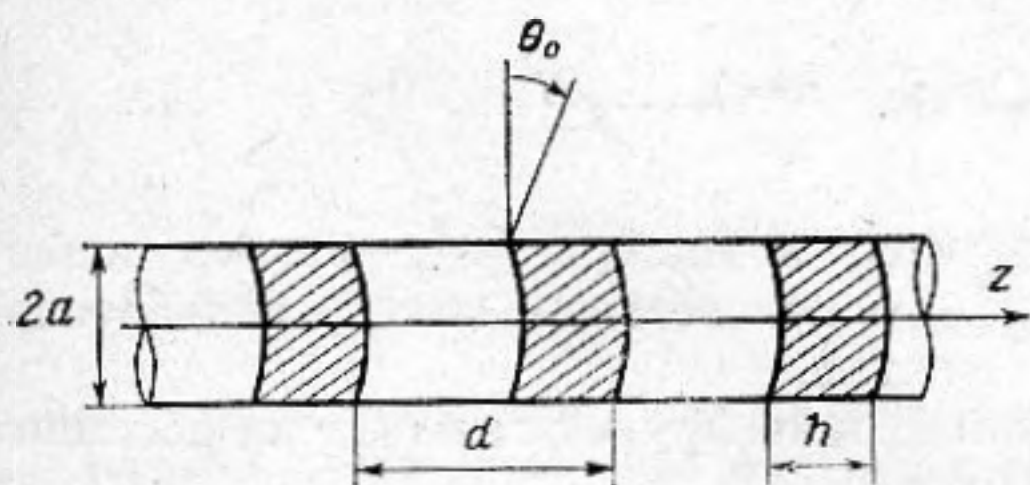
О ВЛИЯНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Добровольский Ю. Ю., Кудашева О. А., Рубанов И. Л.

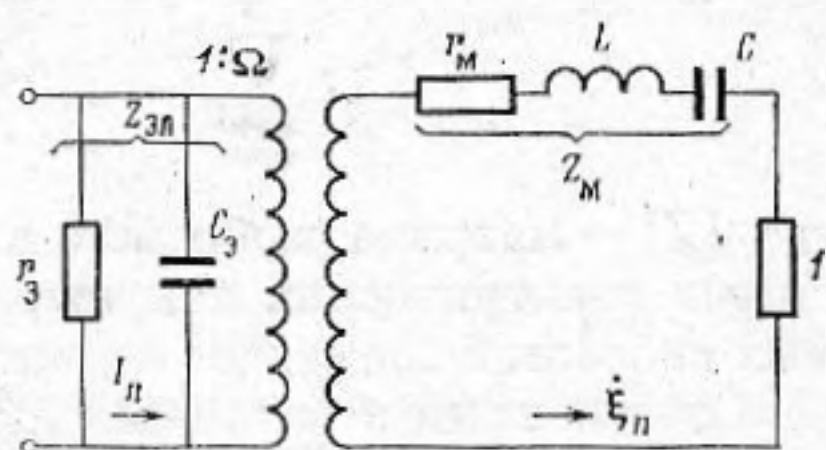
На основании метода поэлементного перебора в терминах взаимных импедансов излучения исследуется влияние взаимодействия по полю резонансных электроакустических преобразователей на параметры, характеризующие эффективность излучающей линейной антенной решетки.

В работе [1] методом бесконечной решетки исследованы параметры акустической эквидистантной линейной антенны, элементами которой являлись пульсирующие кольца в бесконечном абсолютно жестком цилиндрическом экране.

Использованный в этой работе метод предполагает, что все элементы антенной решетки — электроакустические преобразователи — колеблются с заданной колебательной скоростью и испытывают одинаковую реакцию



Фиг. 1. Геометрия задачи



Фиг. 2. Эквивалентная схема резонансного преобразователя. $1 - Z_s = r_s + jx_s$

со стороны внешней среды, численно равную импедансу излучения элемента в бесконечной решетке. Эти предположения вполне обоснованы для центральных элементов протяженных антенных решеток, но не позволяют оценить влияние акустического взаимодействия на возникновение краевых эффектов в подобных решетках, а также на зависимость параметров отдельных элементов от их местоположения в антенных решетках, составленных из относительно малого числа элементов.

Рассмотрим влияние акустического взаимодействия элементов в излучающей системе, рассмотренной в работе [1], на распределение колебательных скоростей по преобразователям при заданном распределении подводимых к ним возбуждающих электрических напряжений, а также зависимость от местоположения элементов параметров преобразователей, характеризующих их энергетическую эффективность и согласование с выходными цепями возбуждающего генератора: входное электрическое сопротивление преобразователя R_w ; косинус угла между током, протекающим в преобразователе, и напряжением на нем $\cos \varphi$; коэффициент полезного действия решетки η_0 .

Пусть число колец — N , их радиус — a , высота — h , период решетки — d (фиг. 1). При анализе сопоставим каждому преобразователю одноконтурную эквивалентную электромеханическую схему (фиг. 2), где Z_s — импеданс излучения, Z_m — механический импеданс, Ω — коэффициент электро-механической трансформации, Z_3 — внутреннее электрическое сопротивление, r_s — сопротивление электрических потерь, C_3 — электрическая емкость,

C и L — эквивалентные гибкость и масса, I_n — ток в преобразователе, ξ_n — колебательная скорость излучающей поверхности n -го преобразователя.

Выразим элементы электрической и механической ветвей эквивалентной системы электроакустического преобразователя через параметры, описывающие элемент антенной решетки как резонансный преобразователь энергии: акустико-механический коэффициент полезного действия η , механическую и электрическую добротность Q и Q_0 , коэффициент электромеханической связи $k_{эфф}^2$ и относительную частоту $F = \omega/\omega_p$, где ω_p — частота механического резонанса [2]:

$$Z_M = r_M + i \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = \frac{r}{F} \cdot \frac{1-\eta}{\eta} + i \frac{Q \cdot r}{\eta} \left(F - \frac{1}{F} \right); \quad C_0 = \frac{1-k_{эфф}^2}{k_{эфф}^2} \cdot \Omega^2 \cdot C;$$

$$r_0 = \frac{k_{эфф}^2}{1-k_{эфф}^2} \cdot \frac{Q_0}{\Omega^2} \cdot \frac{1}{\omega_p \cdot C \cdot F}.$$

Здесь используются значения величин r , η , Q , Q_0 преобразователя в бесконечной синфазной решетке. Они могут быть легко вычислены, так как значение акустической нагрузки преобразователя в бесконечной решетке известно [1].

Для исследования влияния акустического взаимодействия электроакустических преобразователей на параметры излучающей антенной решетки воспользуемся методом поэлементного перебора в терминах взаимных импедансов излучения [3]:

$$\sum_{m=1}^N Z_{nm} \xi_m + Z_M \xi_n \Omega u_n; \quad n=1, \dots, N, \quad (1)$$

где $[Z]$ — матрица взаимных импедансов излучения; $[u]$ — вектор подводимых электрических напряжений; $[\xi]$ — неизвестный вектор колебательных скоростей элементов антенной решетки.

Собственный и взаимный импедансы пульсирующих колец на абсолютно жестком цилиндре определены в работе [4]:

$$Z_{nm} = r_{nm} + i x_{nm}; \quad r_{nn} = \frac{8}{\pi^2 k a k h} \int_0^{\pi/2} A(\varphi) d\varphi;$$

$$x_{nn} = \frac{4}{\pi k h} \left[\int_0^{\pi/2} B(\varphi) d\varphi + \int_0^{\infty} C(\psi) d\psi \right];$$

$$r_{nm} = \frac{8}{\pi^2 k a k h} \int_0^{\pi/2} A(\varphi) \cos(k l_{nm} \sin \varphi) d\varphi;$$

$$x_{nm} = \frac{4}{\pi k h} \left[\int_0^{\pi/2} B(\varphi) \cos(k l_{nm} \sin \varphi) d\varphi + \int_0^{\infty} C(\psi) \cos(k l_{nm} \operatorname{ch} \psi) d\psi \right];$$

$$A(\varphi) = \frac{\sin^2(k h \sin \varphi)}{\sin \varphi \cos \varphi [J_1^2(k a \cos \varphi) + N_1^2(k a \cos \varphi)]}.$$

$$B(\varphi) =$$

$$\frac{\sin^2 \left(k h \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right) [J_0(k a \cos \varphi) J_1(k a \cos \varphi) + N_0(k a \cos \varphi) N_1(k a \cos \varphi)]}{\sin^2 \varphi \cdot [J_1^2(k a \cos \varphi) + N_1^2(k a \cos \varphi)]};$$

$$C(\psi) = \frac{K_0(k a \operatorname{sh} \psi) \cdot \sin \left(k h \cdot \operatorname{ch} \frac{\psi}{2} \right)}{\operatorname{ch}^2 \psi \cdot K_1(k a \cdot \operatorname{sh} \psi)};$$

$J_n(x)$, $N_n(x)$, $K_n(x)$ — функции Бесселя, Неймана и Макдональда соответственно.

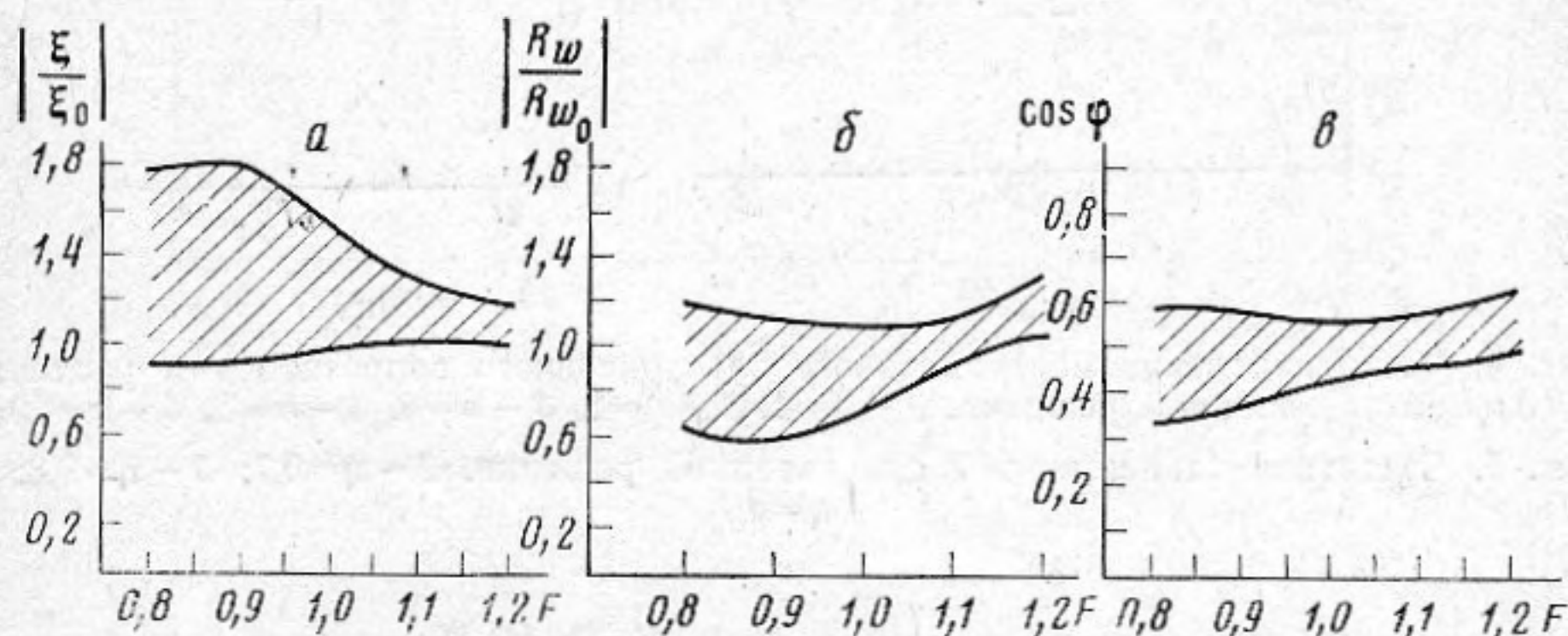
Определив из системы (1) распределение колебательных скоростей по элементам антенной решетки $\{\xi\}$, можно вычислить параметры, характеризующие эффективность излучающей антенны, в частности сопротивление излучения n -го преобразователя:

$$Z_s(n) = \sum_{m=1}^N Z_{nm} \frac{\xi_m}{\xi_n}; \quad n \in [1, N], \quad (2)$$

его полный входной электрический импеданс в параллельной схеме замещения и косинус угла между током в n -м преобразователе и напряжением на нем:

$$Z_w = R_w + iX_w = \frac{r_s \cdot |Z_d|^2}{r_s \cdot \Omega^2 r_d + |Z_d|^2} + \frac{|Z_d|^2}{x_d \Omega^2 - |Z_d|^2 \omega C_s};$$

$$\cos \varphi = [1 + (R_w/X_w)^2]^{-1/2}; \quad Z_d = r_d + ix_d = Z_M + Z_s, \quad (3)$$



Фиг. 3. Частотные зависимости границ изменения параметров электроакустических преобразователей в антенной решетке. a — колебательная скорость, b — входное электрическое сопротивление, v — косинус угла между током и напряжением

а также коэффициент полезного действия антенной решетки:

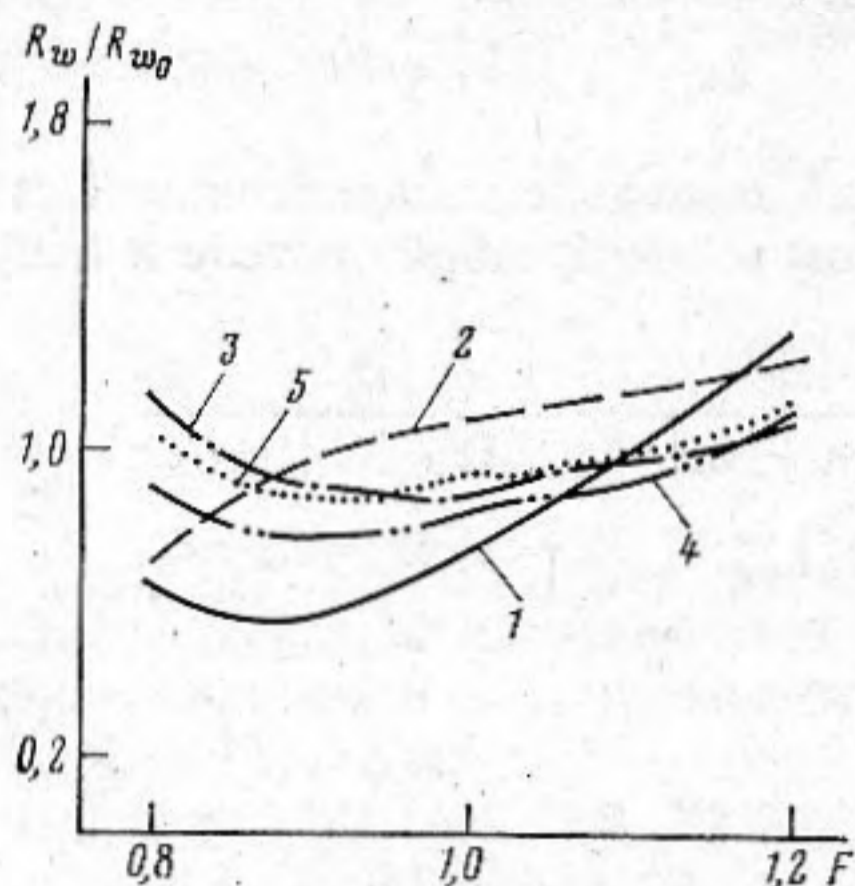
$$\eta_0 = \frac{\sum_{m=1}^N r_s(m) |\xi_m|^2}{\sum_{m=1}^N \frac{|u_m|^2}{R_w(m)}}. \quad (4)$$

Ниже приведены результаты численного эксперимента для линейной антенной решетки с преобразователями малых волновых размеров, для которых, как известно [5], характерно сильное взаимодействие по полю. В расчетах принималось $h/\lambda=0,09$; $d/\lambda=0,125$; $a/\lambda=0,4$, где λ — длина звуковой волны в жидкости; $Q=0,9$; $Q_s=30$; $k_{эф}^2=0,3$; $N=20$.

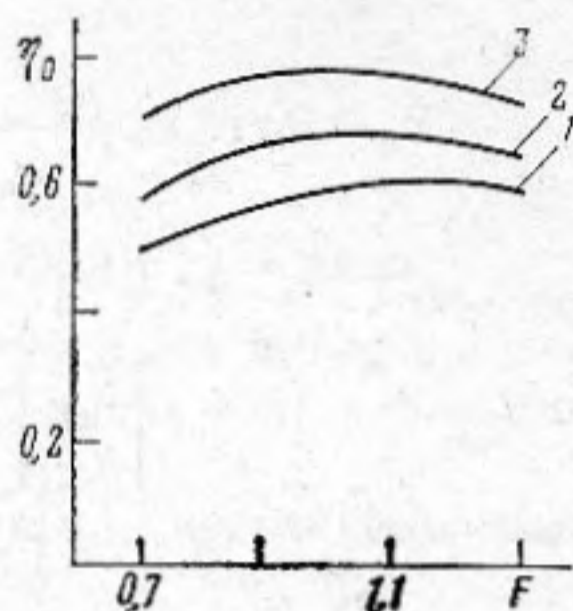
На фиг. 3 приведены частотные зависимости границ изменения величины R_w/R_{w0} ; $|\xi/\xi_0|$ и $\cos \varphi$ элементов исследуемой антенной решетки при синфазном возбуждении и $\eta=0,85$, где R_{w0} и ξ_0 — входное электрическое сопротивление и колебательная скорость преобразователя в бесконечной решетке при $F=1$. Подобная нормировка позволяет определить влияние краевого эффекта; на одной и той же частоте параметры преобразователей отличаются вследствие краевого эффекта. Видно, что максимальные изменения исследуемых величин происходят на частотах ниже резонансной. Так, в частности, R_w изменяется в 1,8 раза при $F=0,8$; в 1,4 при $F=1,0$ и в 1,2 при $F=1,2$, а $\cos \varphi$ — в 1,9; 1,3 и 1,2 раза соответственно.

Результаты расчета частотных зависимостей входного электрического

сопротивления R_w различных преобразователей в той же антенной решетке приведены на фиг. 4. Видно, что вследствие взаимодействия преобразователей по полю в решетке конечных размеров имеет место краевой эффект, который заключается в том, что ход кривых различен для различных преобразователей. Интересно, что вследствие взаимодействия минимум величины входного электрического сопротивления, соответствующий резонансу преобразователя, сдвинут в область низких частот $F < 1$, причем



Фиг. 4

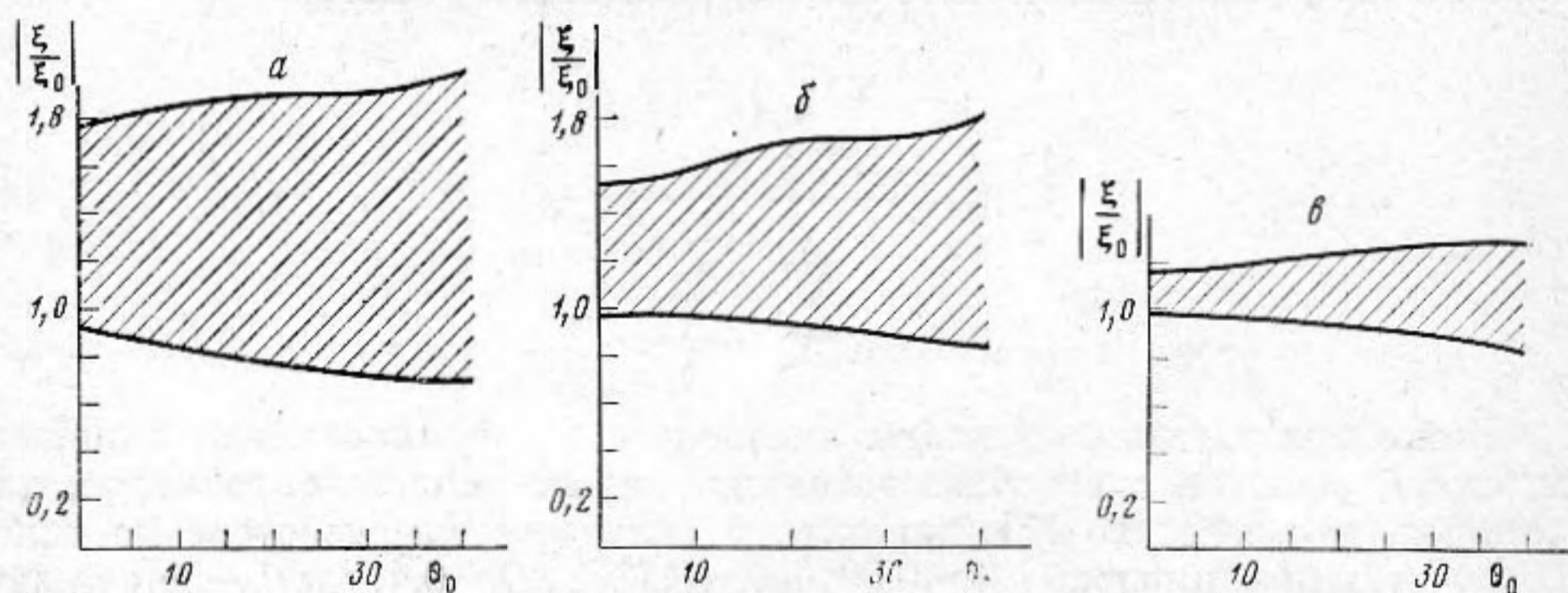


Фиг. 5

Фиг. 4. Частотная зависимость входного электрического сопротивления различных элементов антенной решетки. 1 — $n=1$, 2 — $n=2$, 3 — $n=4$, 4 — $n=6$, 5 — $n=10$

Фиг. 5. Частотная зависимость к.п.д. антенной решетки. 1 — $\eta=0,7$; 2 — $\eta=0,8$; 3 — $\eta=0,9$

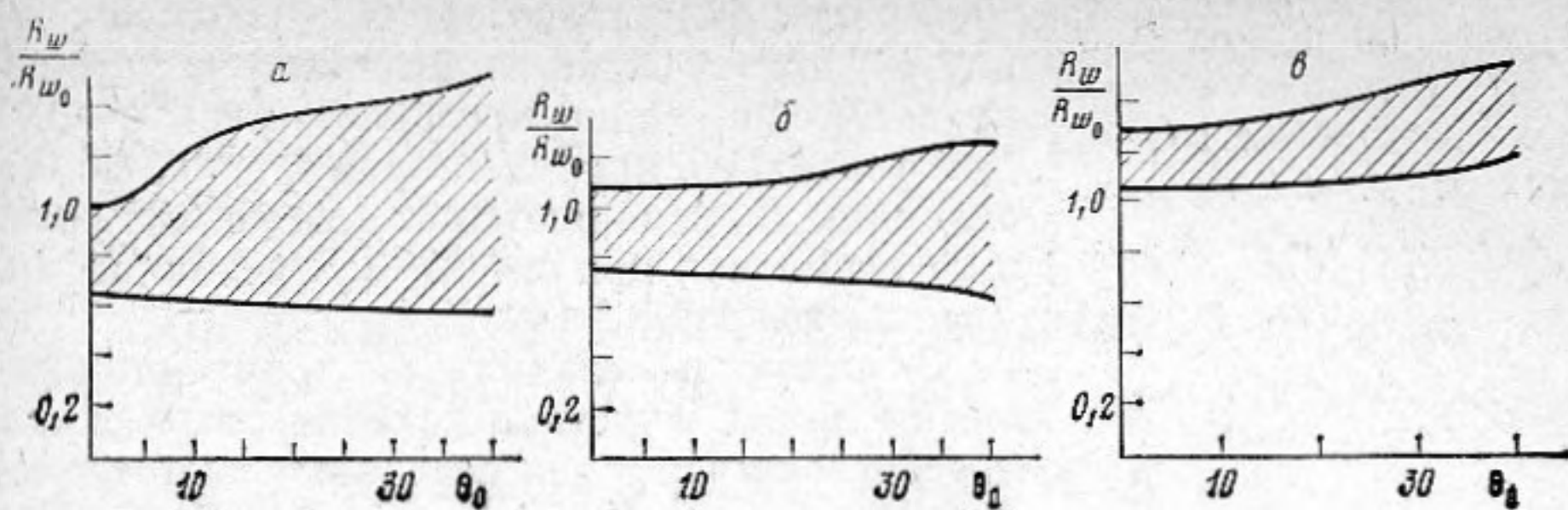
если для преобразователей с номерами $m=4; 6; 10$ этот сдвиг незначителен и их параметры хорошо описываются в приближении бесконечной решетки, то для краевых преобразователей (первого и особенно второго) частотный сдвиг существенен, а их параметры существенно отличаются от параметров центральных преобразователей. В рассматриваемом диапазоне



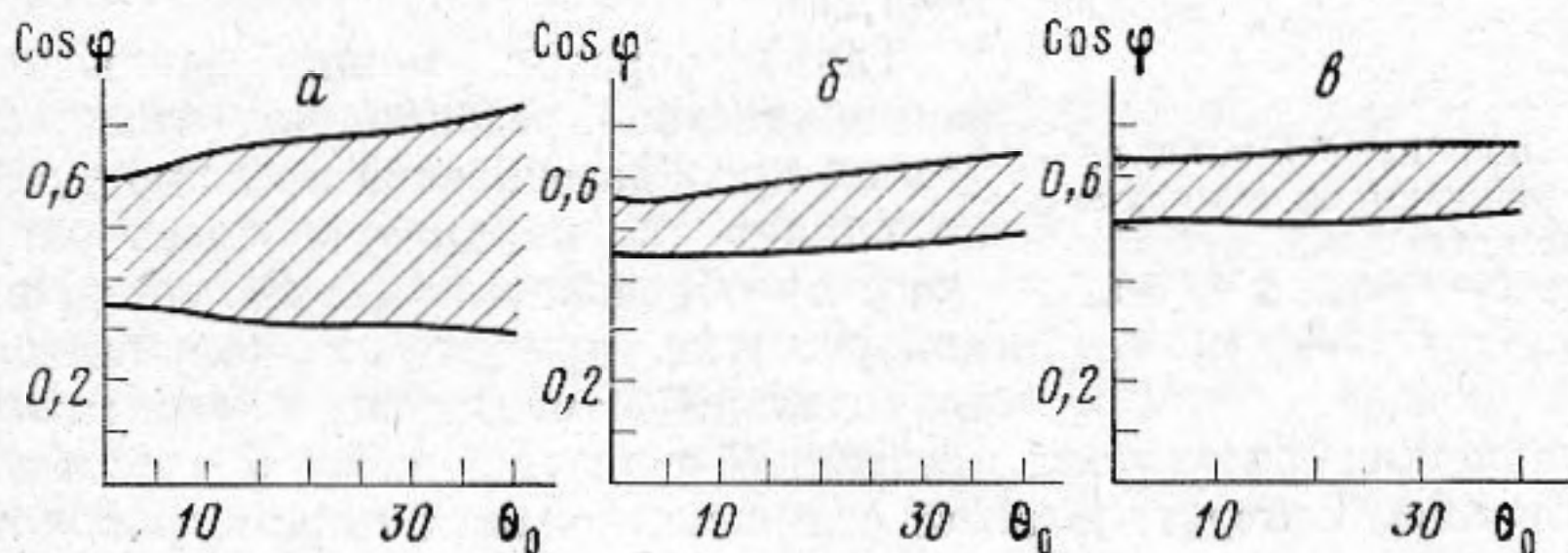
Фиг. 6. Зависимость границ изменения колебательных скоростей элементов антенной решетки от угла сканирования характеристики направленности. а — $F=0,8$; б — $F=1,0$; в — $F=1,2$

частот $F=0,8 \div 1,2$ величина входного электрического сопротивления изменяется в 2,4 раза для преобразователя с номером один; в 1,8 — для второго и существенно меньше — 1,3 ÷ 1,4 раза — для центральных.

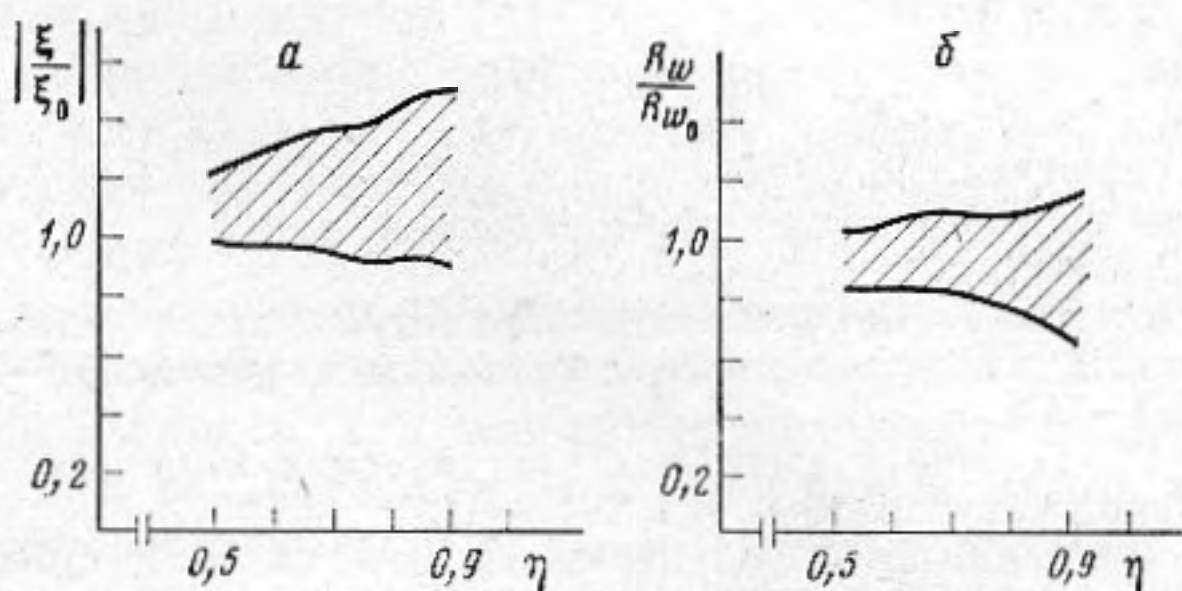
Частотная зависимость величины коэффициента полезного действия антенной решетки η_0 при синфазном возбуждении с равномерным амплитудным распределением $u_n \equiv 1$ для различных значений акустико-механического к.п.д. преобразователя в бесконечной решетке η приведена на



Фиг. 7. Зависимость границ изменения величин входного электрического сопротивления элементов антенной решетки от угла сканирования. *a* — $F=0,8$; *б* — $F=1,0$; *в* — $F=1,2$



Фиг. 8. Зависимость границ изменения величин элементов антенной решетки от угла сканирования. *a* — $F=0,8$; *б* — $F=1$; *в* — $F=1,2$

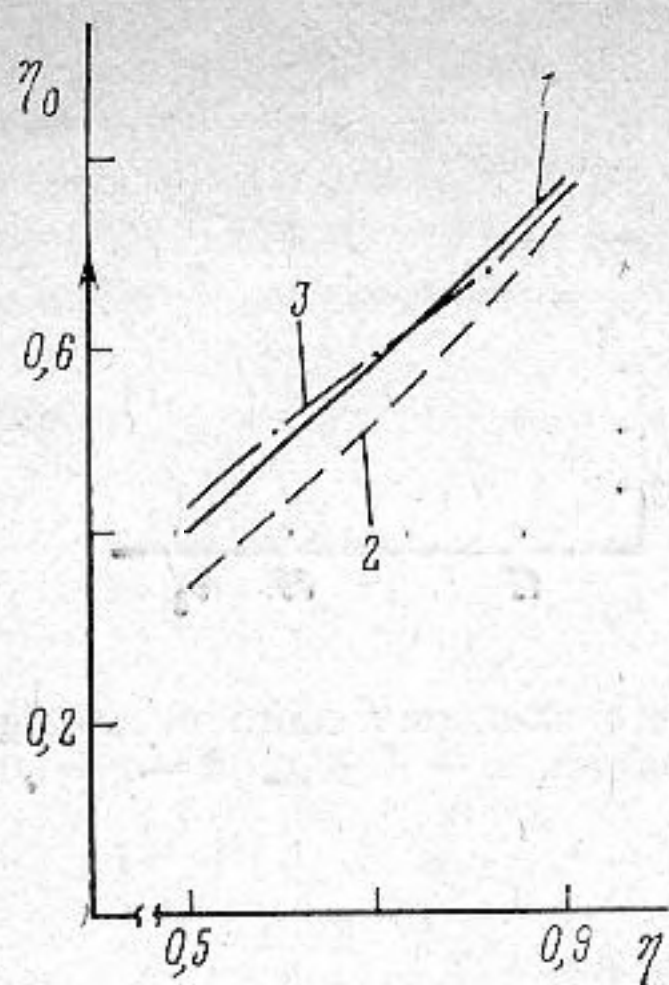


Фиг. 9. Зависимость границ изменения параметров преобразователей от акустико-механического к.п.д. преобразователя, *a* — колебательная скорость, *б* — входное электрическое сопротивление

фиг. 5. Интересно, что при $\eta=0,8$ и $\eta=0,9$ к.п.д. антенной решетки максимален на частоте $F=1$, а при $\eta=0,7$ максимум к.п.д. смещен в область высоких частот $F=1,14$.

На фиг. 6—8 приведены результаты исследования влияния на параметры антенной решетки при $\eta=0,85$ введения по ее элементам линейно изменяющегося фазового распределения, обеспечивающего поворот основного максимума характеристики направленности на угол θ_0 . Видно, что с увеличением угла сканирования θ_0 растет область изменения исследуемых параметров. Так, на частоте $F=0,8$ изменения R_w составляют 1,8 раза при $\theta_0=0^\circ$ и 2,5 при $\theta_0=40^\circ$; на частоте $F=1,0$ —1,4 при $\theta_0=0^\circ$ и 1,7 при $\theta_0=40^\circ$; на частоте $F=1,2$ —1,3 при $\theta_0=0^\circ$ и 1,3 при $\theta_0=40^\circ$.

Зависимость величин колебательных скоростей элементов антенной решетки и входного электрического сопротивления от акустико-механического к.п.д. преобразователя в бесконечной решетке приведена на фиг. 9 для $F=1$ и случая синфазного возбуждения. Видно, что с увеличением η увеличивается область изменения величин колебательных скоростей пре-



Фиг. 10. Зависимость к.п.д. антенной решетки от акустико-механического к.п.д. преобразователя. 1 — $F=1,0$, 2 — $F=0,8$, 3 — $F=1,2$

образователей. Интересно, что условной границей может служить величина акустико-механического к.п.д. преобразователя $\eta=0,7$. Действительно, при изменении η от 0,5 до 0,7 величины R_w изменяются от 1,25 до 1,35 раза, в то время как при $\eta=0,7 \div 0,9$ величины R_w изменяются в 1,8 раза.

Зависимость величины к.п.д. антенной решетки η_0 от акустико-механического к.п.д. преобразователя η для различных частот приведена на фиг. 10. В первом приближении зависимости линейны. Интересно, что при величинах акустико-механического к.п.д. преобразователя $\eta=0,7$ величина к.п.д. антенной решетки максимальна при частоте $F=1,2$.

Таким образом, можно заключить, что взаимодействие резонансных электроакустических преобразователей по полю существенно влияет на параметры электроакустического преобразователя ($\xi; R_w, \cos \varphi$) в антенной решетке, причем их величины могут значительно изменяться в зависимости от положения преобразователя в антенной решетке, рабочей частоты и угла сканирования. Вследствие этого для исследования параметров антенных решеток, состоящих из преобразователей малых волновых размеров, необходимо применять метод поэлементного перебора.

Авторы приносят благодарность В. Я. Лицепия за программирование задачи и проведение расчетов на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляков И. И., Смаришев М. Д. Импеданс излучения и коэффициент концентрации одномерной системы колец на бесконечном жестком цилиндре.— Акуст. ж., 1972, т. 18, № 2, с. 183—191.
2. Добровольский Ю. Ю. К определению параметров протяженных акустических антенн, состоящих из резонансных поршневых излучателей.— Акуст. ж., 1975, т. 21, № 4, с. 538—543.
3. Карновский М. И. К расчету взаимных акустических импедансов.— Сб. тр. Киевского ин-та киноинженеров, 1948, т. 1, с. 95—113.
4. Robey D. H. On the radiation impedance of an array of finite cylinders.— J. Acoust. Soc. America, 1955, v. 27, pt 4, p. 706—710.
5. Смаришев М. Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.

Поступила в редакцию
26.I.1982