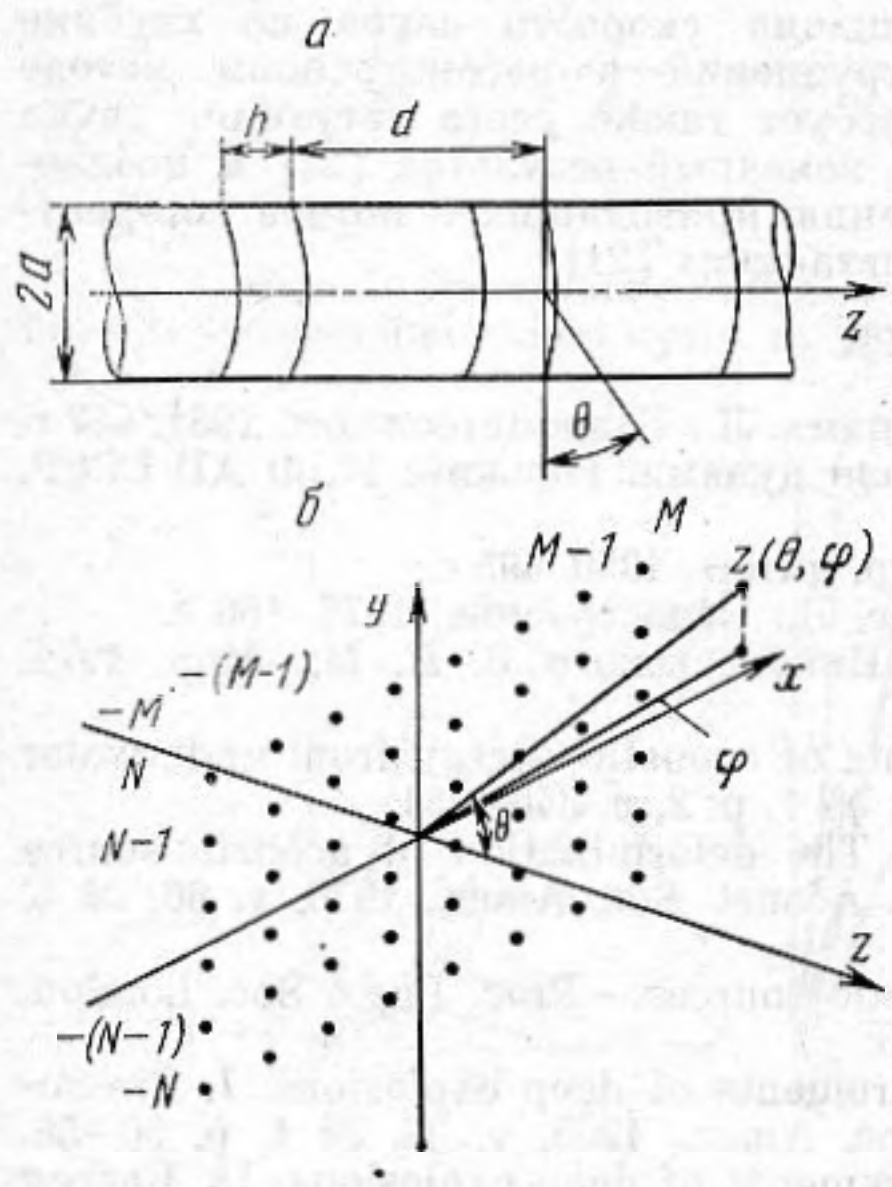
УДК 681.883.67

О ФАЗОВОМ СИНТЕЗЕ СЕКТОРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ МАЛОЭЛЕМЕНТНОЙ РЕШЕТКИ

Рубанов И. Л., Свердлин Г. М.

В работе [1] было исследовано влияние акустического взаимодействия на направленные свойства антенной решетки с линейным фазовым распределением. Представляет существенный практический интерес исследование влияния акустического взаимодействия и ошибок возбуждения на синтезированную секторную характеристику направленности. Антенные решетки с подобными характеристиками направленности применяются при решении некоторых прикладных задач технической акустики. В условиях ограничения механической прочности элемента антенной решетки — электроакустического преобразователя — из множества методов синтеза предпочтительными являются фазовые, при которых амплитуды остаются постоянными. В настоящее время разработано большое число методов фазового синтеза секторных характеристик антенных решеток [2—7].



Фиг. 1. Антенная решетка

В данной работе на примере двух моделей излучающей антенной решетки сравнительно малых волновых размеров исследуется влияние указанных факторов на синтезированную характеристику направленности.

Рассмотрим две эквидистантные решетки — линейную, состоящую из 2M колец высоты h, расположенных с периодом d на бесконечно протяженном абсолютно жестком цилиндре радиуса a (фиг. 1, *а*), и плоскую прямолинейную решетку, состоящую из $2N$ горизонтальных рядов, в каждом из которых находится 2M круглых поршней радиуса a (фиг. 1, *б*). К каждому преобразователю подводится возбуждающее гармоническое электрическое напряжение.

Полагая волновые размеры элементов малыми, запишем характеристики направленности исследуемых антенных решеток в виде следующих выражений соответственно [2]:

$$R(\theta)=\left|\sum_{\substack{m=-M\\ m\neq 0}}^{M} v_m e^{ikd\rho_m^x \sin\theta}\right|,$$

$$R(0,\varphi)=\left|\sum_{\substack{m=-M\\ m\neq 0}}^{M}\sum_{\substack{n=-N\\ n\neq 0}}^{N} v_{mn} e^{ikd(\rho_m^x \sin\theta\cos\varphi+\rho_n^y \sin\theta\sin\varphi)}\right|; \qquad (1)$$

где v — колебательная скорость преобразователя, $k=\omega/c$ — волновое число, ω — угловая частота, c — скорость звука в среде,

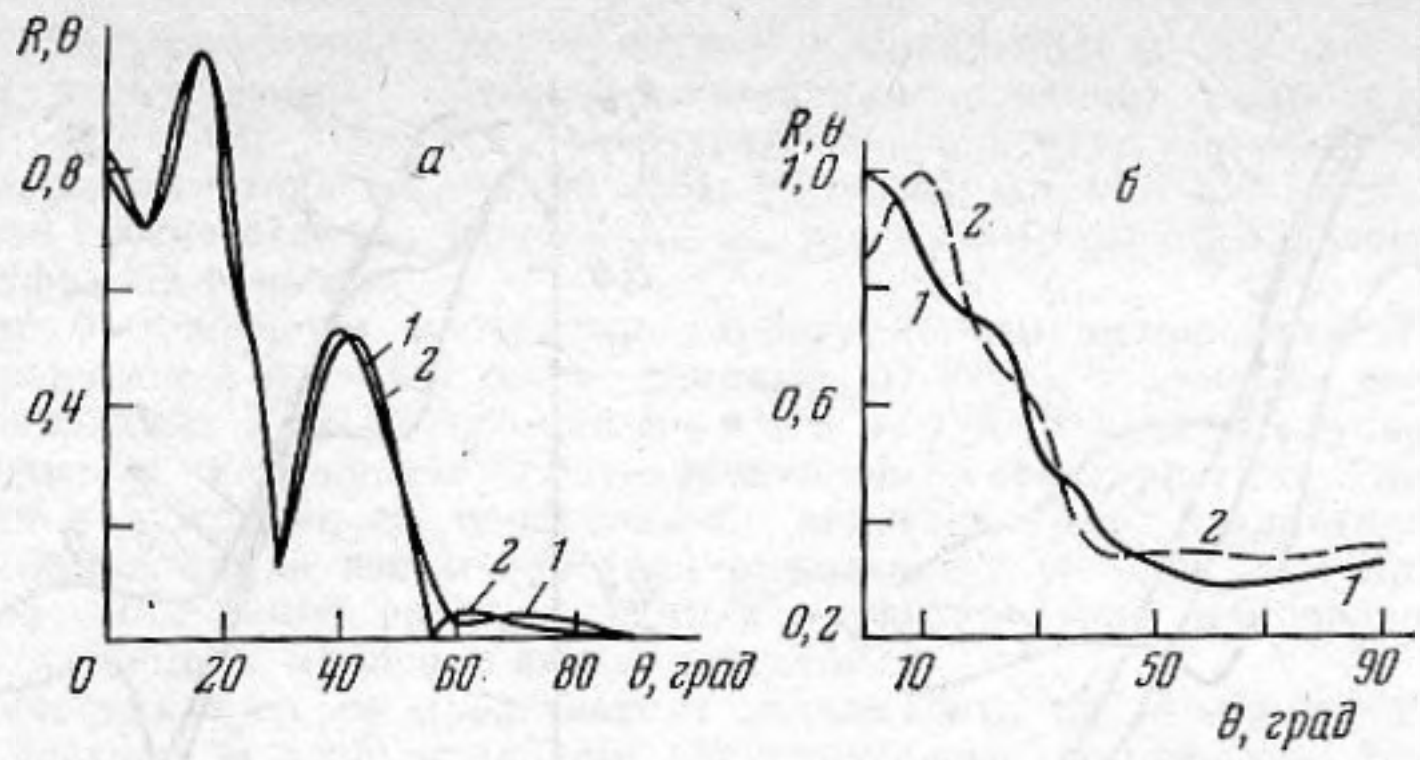
$$\rho_m^x=\begin{cases} m+{}^1/_2; & m<0,\\ m-{}^1/_2; & m>0,\end{cases}\qquad \rho_n^y=\begin{cases} n+{}^1/_2; & n<0,\\ n-{}^1/_2; & n>0.\end{cases}$$

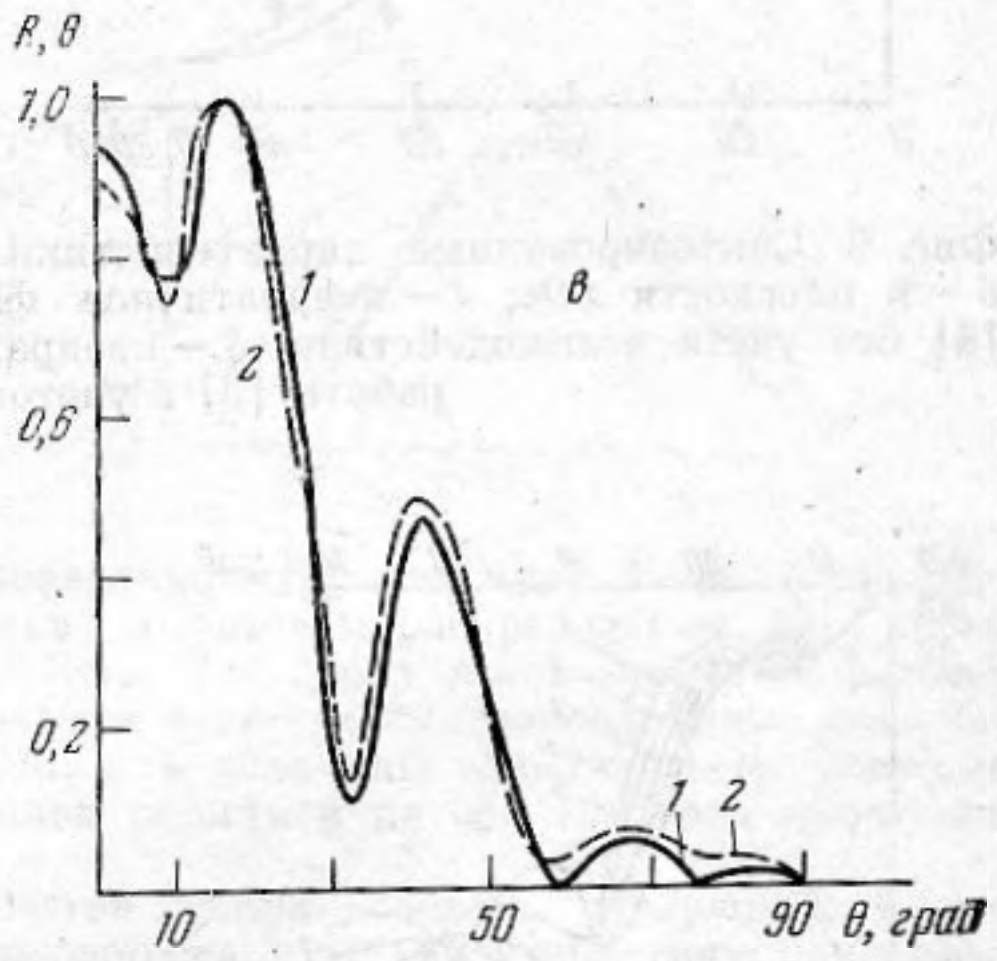
Предположим, что симметричную секторную характеристику направленности требуется синтезировать таким образом, что в плоскости XOZ для плоской антенной решетки она должна приближаться к функциям

$$R(\theta)\to F_1(\theta)=\begin{cases} 1; & |\theta|\leqslant\alpha,\\ 0; & \alpha<|\theta|\leqslant\pi/2,\end{cases}$$

$$R\left(\theta,\frac{\pi}{2}\right)\to F_2(\theta)=\begin{cases} 1; & |\theta|\leqslant\beta\\ 0; & \beta<|\theta|\leqslant\dfrac{\pi}{2}.\end{cases} \qquad (2)$$

Пусть известно в результате решения задачи синтеза фазовое распределение





Фиг. 2. Синтезированная характеристика направленности: *а* – квадратичное распределение, *б* – распределение, минимизирующее функционал рассогласования, *в* – распределение, максимизирующее энергию; *1* – без учета взаимодействия, *2* – с учетом взаимодействия

по элементам решетки $\{\psi\}$, которое реализует секторную характеристику направленности (2) на резонансной частоте ω_p преобразователя. Тогда на элемент с номером n подается электрическое напряжение

$$u_n=(1+\Delta_n^a)\,ue^{i(\omega t+\psi_n+\delta_n)}, \tag{3}$$

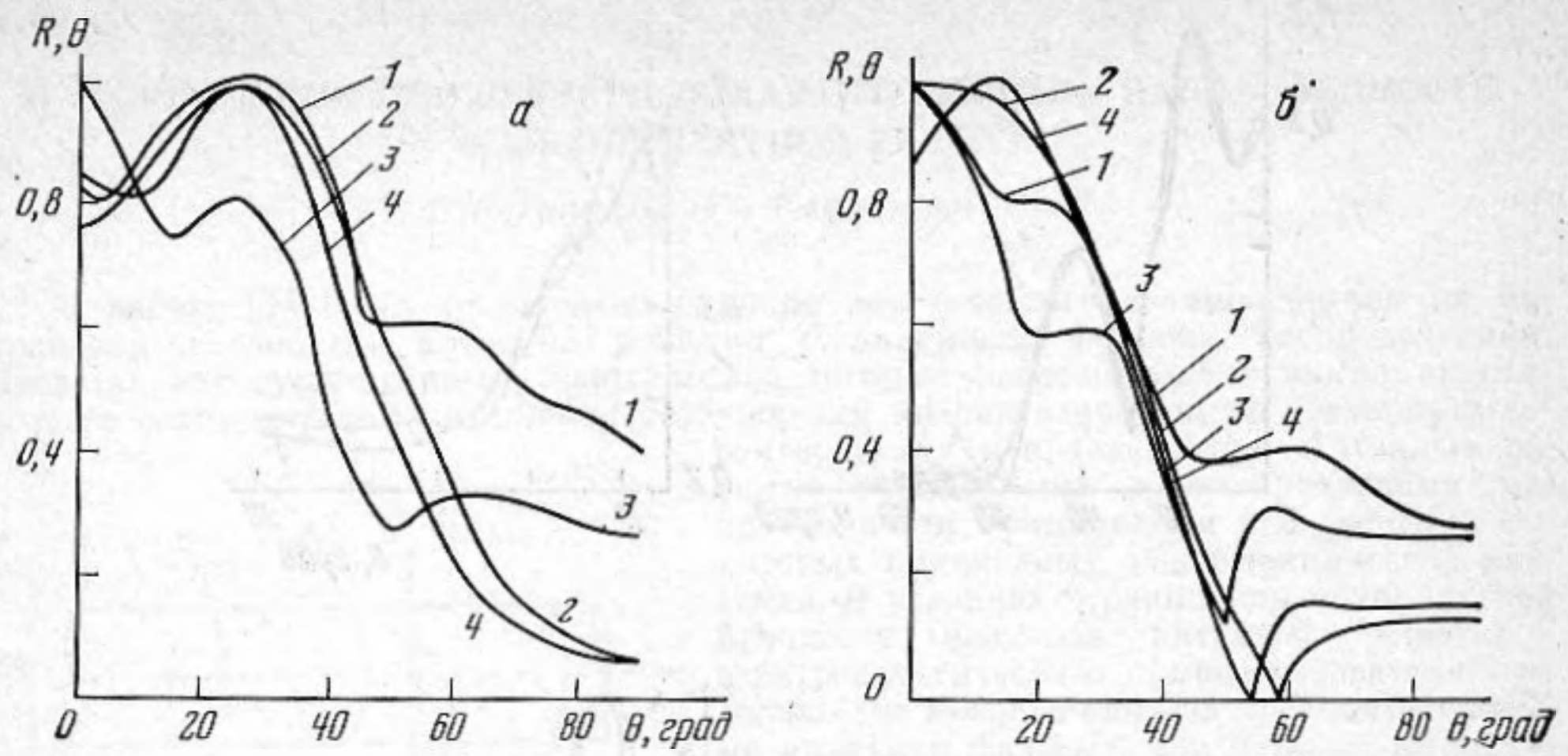
где Δ_n^a и δ_n – амплитудная и фазовая ошибки возбуждения соответственно. Колебательная скорость элемента определяется из системы алгебраических уравнений [8] $[z][v]=\Omega[u]$, где $[z]$ – матрица взаимных импедансов излучения, Ω – коэффициент электромеханической трансформации.

Взаимный импеданс круглых поршней, расположенных в бесконечном абсолютно жестком экране, определен в работе [9], пульсирующих колец, расположенных на бесконечном круговом цилиндре,– в работе [10]. Здесь при расчетах использовалась предложенная в работе [11] модель электроакустического преобразователя как резонансного преобразователя энергии, в соответствии с которой его механический импеданс определяется через механическую добротность Q и акустикомеханический КПД η. Отметим, что эти параметры могут быть определены на основании результатов работы [2].

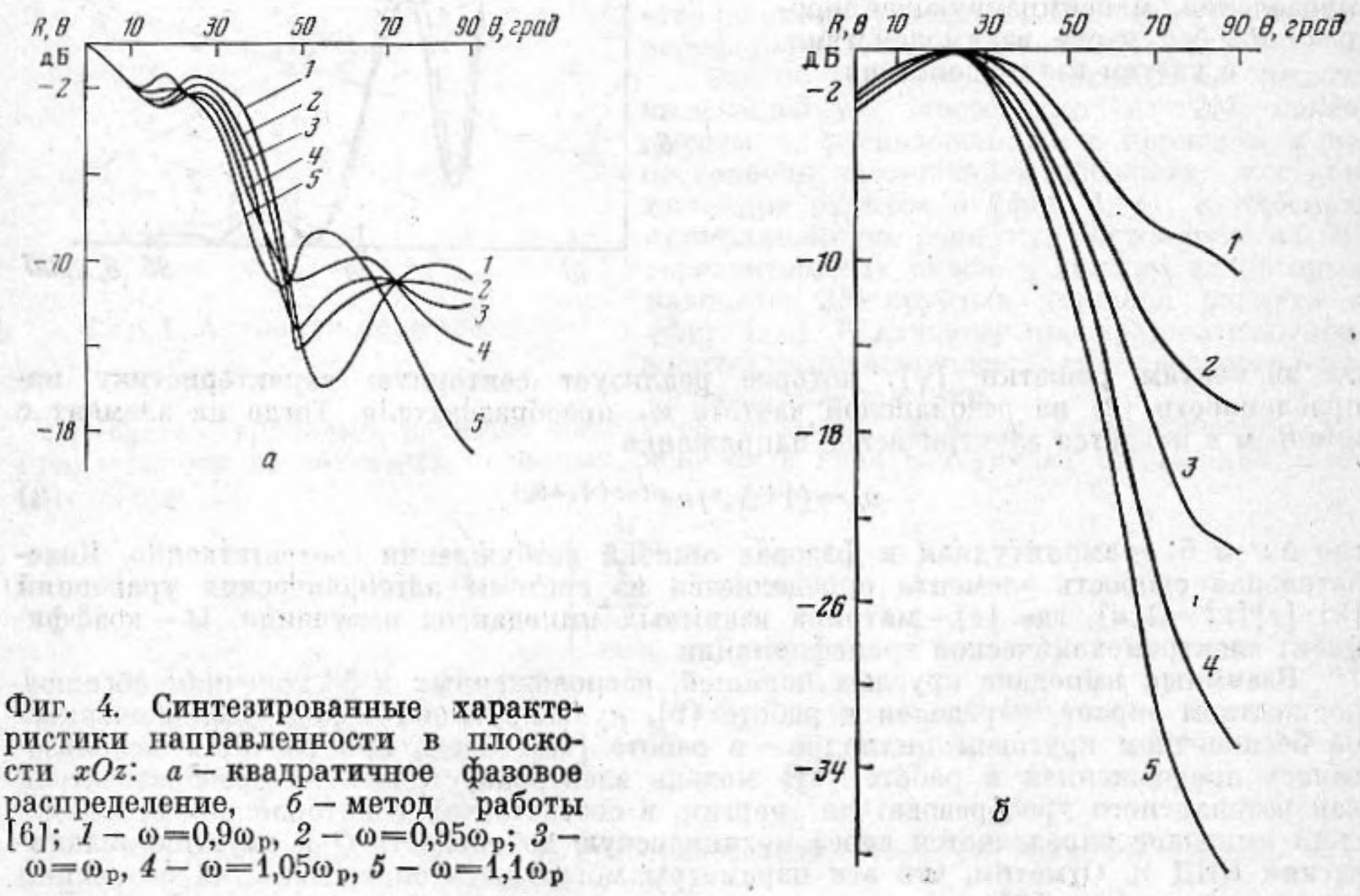
В качестве фазовых распределений, реализующих секторную характеристику направленности, были выбраны для линейной антенной решетки квадратичное [2]; минимизирующее функционал рассогласования между заданной и реализуемой характеристиками направленности [3]; максимизирующее энергию, излученную в заданный угловой сектор [6]; для плоской антенной решетки – квадратичное и распределение, полученное по модифицированному методу парциальных диаграмм [7]. Амплитудные и фазовые ошибки возбуждения Δ^a и δ вводились при помощи датчика случайных чисел, причем для каждого значения $\Delta^a_{\max}=\operatorname*{Max}_{m,n}\Delta^a_{mn}$; $\delta_{\max}=\operatorname*{Max}_{m,n}\delta_{mn}$ проводилось по 30 испытаний; здесь Δ_{mn}^a и δ_{mn} – соответственно амплитудная и фазовая ошибки возбуждения элемента с номером mn.

Результаты численных экспериментов для антенных решеток, состоящих из электроакустических преобразователей малых волновых размеров (характерный размер $l\leqslant 0{,}5\lambda$) с КПД $\eta\geqslant 0{,}7$, расположенных с малыми зазорами и возбуждаемых на частоте резонанса $\omega=\omega_p$ при $\Delta^a_{\max}\leqslant 0{,}1$ и $\delta_{\max}<10°$, показали, что влияние ошибок возбуждения на синтезированную характеристику направленности меньше, чем влияние взаимодействия по полю.

На фиг. 2 приведены характеристики направленности линейной восьмиэлемент-



Фиг. 3. Синтезированные характеристики направленности: *а* — в плоскости *xOz*, *б* — в плоскости *yOz*; *1* — квадратичное фазовое распределение, *2* — метод работы [6] без учета взаимодействия, *3* — квадратичное фазовое распределение, *4* — метод работы [6] с учетом взаимодействия



Фиг. 4. Синтезированные характеристики направленности в плоскости *xOz*: *а* — квадратичное фазовое распределение, *б* — метод работы [6]; *1* — $\omega=0{,}9\omega_p$, *2* — $\omega=0{,}95\omega_p$; *3* — $\omega=\omega_p$, *4* — $\omega=1{,}05\omega_p$, *5* — $\omega=1{,}1\omega_p$

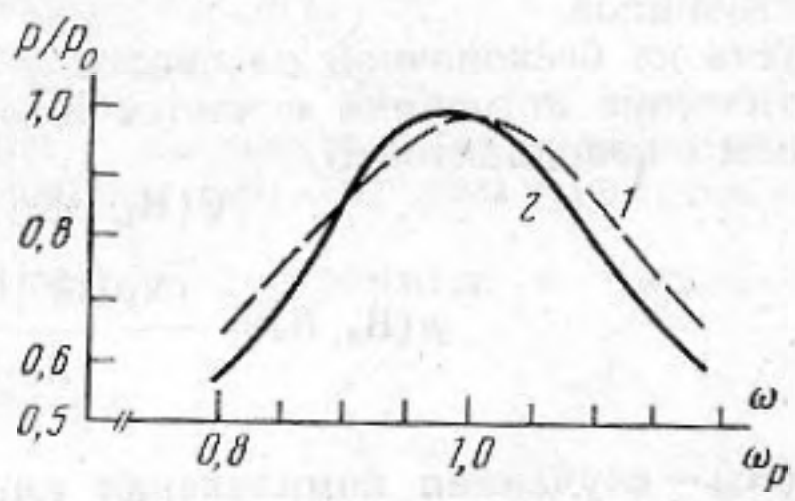
ной антенной решетки, состоящей из колец высоты $h=0{,}375\lambda$ радиуса $a=0{,}25\lambda$, расположенных с периодом $d=0{,}5\lambda$, возбуждаемой на частоте $\omega=\omega_p$ для $\alpha=\pi/8$; $Q=0{,}9$, $\eta=0{,}85$. Видно, что взаимодействие в данном случае приводит к незначительному изменению характеристики направленности как в центральном лепестке, так и вне его, к возрастанию величины максимальных провалов в центральном лепестке $\Delta_{max}\%$ и в направлении $\theta=0$ $\Delta(0)\%$. Так, в частности для квадратичного фазового распределения в отсутствии взаимодействия $\Delta(0)=15\%$, $\Delta_{max}=31\%$, с учетом взаимодействия — $\Delta(0)=19\%$, $\Delta_{max}=32\%$. При использовании метода максимизации излучаемой энергии без взаимодействия $\Delta(0)=5\%$, $\Delta_{max}=22\%$, с учетом взаимодействия — $\Delta(0)=10\%$, $\Delta_{max}=26\%$.

Интересно, что для данного случая все три метода синтеза приводят примерно к одинаковой величине акустического давления p, создаваемого антенной решеткой в направлении максимума характеристики направленности, и одинаковым параметрам, характеризующим режим работы электроакустических преобразователей и согласование их с выходными цепями возбуждающего генераторного устройства — входному электрическому сопротивлению R, колебательной скорости v, потребляемому преобразователем току I. Так, для квадратичного фазового распределения $p/p_0=0{,}48$, для распределения, минимизирующего функционал рассогласования, $p/p_0=0{,}46$, для метода максимизации мощности $p/p_0=0{,}48$, здесь p_0 — давление,

создаваемое в максимуме характеристики направленности той же решеткой при синфазном возбуждении. Границы изменения входного сопротивления $R/R_0=$ $=0{,}91\div1{,}0$; $0{,}89\div1{,}03$; $0{,}9\div1{,}0$; колебательной скорости $v/v_0=1{,}08\div1{,}21$; $1{,}07\div1{,}2$; $1{,}07\div1{,}14$ и полного тока $I/I_0=0{,}956\div0{,}01$; $0{,}96\div1{,}02$; $0{,}96\div1{,}0$ для трех методов фазового синтеза соответственно, причем R_0, v_0, I_0 – параметры преобразователя в бесконечной синфазной решетке.

На фиг. 3 приведены расчетные характеристики направленности квадратной антенной решетки $N=M=4$ с соотношениями $d/\lambda=0{,}35$, $a/\lambda=0{,}175$, $\omega=\omega_p$ при $Q=3$, $\eta=0{,}7$ в плоскостях XOZ и YOZ для $\alpha=\pi/4$ и $\beta=\pi/6$. В данном случае взаимодействие приводит к искажению синтезированной характеристики направленности, в частности к сужению ее центрального лепестка. Для квадратичного фазового распределения влияние взаимодействия оказывается сильнее, чем при других распределениях. Чем шире синтезированная характеристика направленности, тем к большим искажениям приводит взаимодействие.

Практический интерес представляет зависимость направленности антенной решетки от частоты ω возбуждающего электрического напряжения. На фиг. 4 пред-



Фиг. 5. Частотная зависимость акустического давления, создаваемого антенной на оси главного максимума характеристики направленности: *1* – квадратичное фазовое распределение, *2* – метод работы [6]

ставлены расчетные характеристики направленности в плоскости XOZ при различных значениях относительной частоты ω/ω_p и фазовом распределении $\{\psi\}$, реализующем характеристику (2) на частоте $\omega=\omega_p$. При обоих использованных фазовых распределениях увеличение частоты вызывает сужение синтезированного лепестка.

На фиг. 5 приведена частотная зависимость величины акустического давления, развиваемого исследуемой плоской антенной решеткой на оси главного максимума характеристики направленности.

Таким образом, по результатам расчетов можно сделать следующий вывод. Влияние взаимодействия по полю на синтезированную характеристику направленности линейной антенной решетки при всех рассмотренных видах фазового распределения и на синтезированную характеристику плоской антенной решетки при фазовом распределении по методу парциальных диаграмм мало и может в первом приближении не учитываться при решении задач синтеза. В случае синтеза плоской антенной решетки методом квадратичного фазового распределения полевое взаимодействие необходимо учитывать, оно сказывается существенно и чем шире синтезированная характеристика направленности, тем ее искажения больше.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рубанов И. Л.* О влиянии взаимодействия резонансных электроакустических преобразователей на характеристику направленности антенной решетки с произвольным амплитудно-фазовым распределением.– Акуст. журн., 1982, т. 28, № 5, с. 681–684.
2. *Смарышев М. Д.* Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.
3. *Иванов Н. М., Милославский Ю. К., Шишкин В. Н., Шукайло В. А.* Некоторые вопросы фазового синтеза акустических антенных решеток.– В кн.: Акустические антенны и преобразователи. Владивосток.: Изд-во ДВПИ, 1978, с. 46–49.
4. *Зелкин Е. Г., Соколов В. Г.* Методы синтеза антенн. М.: Сов. радио, 1980.
5. *Иванов Н. М., Милославский Ю. К.* Фазовый синтез акустических антенных решеток методом динамического программирования.– Вопр. судостроения. Сер. общетехническая, 1980, вып. 52, с. 46–51.
6. *Рубанов И. Л.* О возможном подходе к фазовому синтезу расширенных характеристик направленности малоэлементных антенных решеток.– Вопр. судостроения. Сер. общетехническая, 1981, вып. 60, с. 16–23.
7. *Добровольский Ю. Ю., Рубанов И. Л.* Об одной модификации метода антенных решеток.– Акуст. журн., 1982, т. 28, № 1, с. 42–45.
8. *Карновский М. И.* К расчету взаимных акустических импедансов.– Сб. тр. Киевского ин-та киноинженеров, 1948, вып. 1, с. 95–113.
9. *Pritchard R.* Mutual acoustic impedance between radiators in an infinite rigid plane.– J. Acoust. Soc. Amer., 1960, v. 32, № 6, p. 730–737.
10. *Robey D.* On the radiation impedance of an array of finite cylinders.– J. Acoust. Soc. Amer., 1955, v. 27, № 4, p. 706–710.
11. *Добровольский Ю. Ю.* К определению параметров протяженных акустических антенн, состоящих из резонансных поршневых излучателей.– Акуст. журн., 1975, т. 21, № 4, с. 538–543.

Ленинградский
кораблестроительный институт

Поступило в редакцию
12.VI.1985