УДК 681.883

DOI: 10.37102/1992-4429 2021 36 02 06

К ВОПРОСУ О СОПРОТИВЛЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ **ДВУХСТОРОННИХ ДИСКОВЫХ** ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ **НА ФОНЕ АКУСТИЧЕСКОГО ЭКРАНА**

И.Р. Бирюков, М.Н. Петухова

Необходимость расширения полосы рабочих частот для решения задач обнаружения подводных объектов при учете физических основ построения электроакустических преобразователей и антенной техники вынуждает рассматривать варианты использования электроакустических приемных преобразователей вплоть до частоты резонанса их механической колебательной системы и выполнять плотную компоновку преобразователей внутри антенны. При реализации подобного рода технических решений влияние взаимодействия преобразователей друг с другом на конечные параметры антенны становится значительным, что обусловливает необходимость учета этого взаимодействия при проектировании антенной решетки.

Учет взаимного влияния преобразователей на полевые характеристики антенной решетки в общем случае происходит посредством расчета полного механического сопротивления каждого преобразователя, для получения которого необходимы собственные и взаимные сопротивления излучения.

В статье рассчитана и проанализирована частотная зависимость собственного и взаимного сопротивлений излучения двух преобразователей в зависимости от моды колебаний, расстояния между ними (для взаимного сопротивления излучения), расстояния до экрана и типа тыльного экрана. Результаты расчета показывают существенное влияние межэлементного расстояния и типа импедансного экрана на взаимное сопротивление излучения. Можно сделать вывод о необходимости учета взаимодействия преобразователей на фоне импедансного экрана при межэлементном расстоянии менее 0,5\ldots...0,6\ldots и при работе вблизи резонанса вне зависимости от моды колебаний.

Ключевые слова: сопротивление излучения, акустический импедансный экран.

Существенная функциональная нагруженность современных гидроакустических станций (ГАС) обусловливает тенденцию к усложнению антенной техники и прочих судовых устройств. В частности, для обнаружения маломерных объектов потребовалось включение в состав ГАС антенн, способных излучать и принимать в диапазоне частот, ранее не востребованном. Стремление понизить уровень собственных шумов обусловило модернизацию функциональных узлов судна, таких как система охлаждения, двигатели, гребные винты, насосы балластных цистерн и т.д., однако при этом спектр шумов, порождаемых ими, сместился в область более низких частот. Таким образом, изменился общий «шумовой профиль» современных подводных лодок и надводных судов. В связи с этим требования к гидроакустическим антен-

нам, касающиеся их рабочей полосы частот, также подверглись пересмотру в сторону расширения частотного диапазона. Физические принципы построения электроакустических преобразователей (ЭАП), входящих в антенные решетки, таковы, что расширение полосы рабочих частот путем повышения частоты резонанса приводит к уходу взаимосвязанных с частотной характеристикой чувствительности параметров, и в таком случае не всегда возможно обеспечить требования технического задания. Поэтому возможным вариантом решения задачи является обеспечение работы ЭАП вплоть до частоты резонанса, что требует учета межэлементного взаимодействия преобразователей в антенне. Кроме того, при разработке антенных решеток часто существует необходимость достаточно близкого расположения элементов

решетки, возникновение при этом сильной взаимной связи между элементами может критически сказаться на характеристиках всей антенны.

Как правило, большинство методов расчета взаимной связи основаны на нахождении матрицы связи, которая может быть вычислена исходя из значений собственного и взаимного сопротивлений между преобразователями [1].

История исследования вопроса межэлементного взаимодействия в антенне началась в начале XX в. с выхода монографии лорда Рэлея «Теория звука», в которой впервые были приведены выражения, позволяющие количественно определять акустическое поле давлений идеализированной поршневой диафрагмы и ее собственное сопротивление излучения. По приведенному Рэлеем алгоритму расчета впервые можно было количественно оценить уровень межэлементного взаимодействия.

Несмотря на успехи в развитии теоретической акустики, практический расчет акустических параметров поля с помощью полученных выражений оказался невыполним в силу ограниченных возможностей вычислительной техники того времени. По этой причине в XX в. усилия ученых были в основном направлены на поиски приближенных решений для нахождения собственного и взаимного сопротивлений излучения элементарных составляющих антенны.

В ряде работ [2–4] были получены аналитические выражения расчета реальной и мнимой частей собственного и взаимного сопротивлений излучения поршней различной формы в жестком экране. Исследование влияния распределения колебательной скорости вдоль поверхности диска, заключенного в бесконечный жесткий экран, на собственное и взаимное сопротивления излучения впервые исследовалось Д.Т. Портером в работе [5]. Перечисленные работы имеют общую черту, в них выражения для расчета межэлементного взаимодействия получены в предположении идеальности граничных условий: источники/приемники колебаний работают одной стороной, поскольку заключены в бесконечный жесткий экран.

Для решения ряда практических задач представляет интерес расчет сопротивлений излучения реальных преобразователей, нагруженных с обеих сторон, в их фактических условиях эксплуатации. В качестве такого преобразователя рассмотрим конструкцию из двух круглых пластин (дисков), расположенных вблизи акустического экрана.

Рассмотрим два преобразователя, лежащих в плоскости, параллельной плоскости бесконечного акустического экрана на расстоянии h от него. Пусть (x', y', z') — координаты точки наблюдения, (x_i, y_i) — координаты преобразователя (элемента) площадью S_i в плоскости $x \theta y$. Давление, развиваемое преобразователем в точке наблюдения, будет результатом сложения давлений, создаваемых прямой волной $p(r)_i$, и волной $p(r)_i$, отраженной от экрана [6].

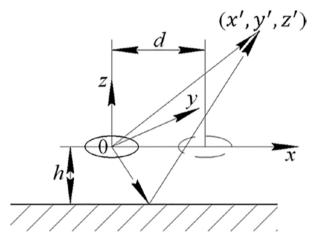
$$p(r) = p(r)_{d} + p(r)_{r},$$

$$p(r)_{d} = \frac{ik\rho cw_{1}}{2\pi} \int_{S_{i}} \frac{A_{i}e^{ikr_{i}}}{r_{i}} dS_{i},$$

$$p(\overline{r})_{r} = \frac{ik\rho cw_{1}}{2\pi} \int_{S} \frac{A_{i}e^{ikr_{ir}}}{r_{ir}} dS_{i},$$

$$(1)$$

 r_i — расстояние от центра преобразователя до точки наблюдения, w_1 — колебательная скорость преобразователя, A_i — коэффициент амплитудно-фазового распределения, ρc — волновое сопротивление среды, k — волновое число, S_i — площадь поверхности преобразователя.



Puc. 1. Схема модели

С учетом разложения сферических волн по плоским и записи характеристики направленности преобразователя $R_e(\theta)$, лежащего в плоскости $x\theta y$, через интеграл от давления по площади поверхности преобразователя [6] выражение (1) примет вид:

$$p(\overline{r}) = K \int_0^{\frac{\pi}{2} - i\infty} \int_0^{2\pi} D(\theta, \varphi) E'(\theta, \varphi) \sin\theta d\varphi d\theta,$$

где θ , ϕ — углы, определяющие направление в пространстве в сферической системе координат,

$$\begin{split} D(\theta,\varphi) &= R_{e}(\theta) \Big[V(\theta,\varphi) e^{H'(\theta)} + 1 \Big], \\ H'(\theta) &= ik \big[2h\cos\theta \big], \quad E'(\theta,\varphi) = e^{XYZ'(\theta,\varphi)}, \\ XYZ'(\theta,\varphi) &= ik \Big[\big(x' \big) sin\theta cos\varphi + \big(y' \big) sin\theta sin\varphi + \big(z' \big) cos\theta \Big], \\ K &= \frac{-k^{2}\rho cw_{1} \cdot S_{ef}}{4\pi^{2}}, S_{ef} = \int_{S_{i}} a \big(x,y \big) dS_{i}, \end{split}$$

где a(x, y) — амплитудное распределение вдоль поверхности преобразователя, $V(\theta, \varphi)$ — коэффициент отражения от экрана,

отражения от экрана,
$$V\left(\theta,\varphi\right)=\frac{Z_{e}\left(\theta,\varphi\right)-Z_{sr}}{Z_{e}\left(\theta,\varphi\right)+Z_{sr}},\,Z_{e}\left(\theta,\varphi\right)-$$
 импеданс экрана, Z_{e} — импеданс среды.

После переноса точки наблюдения на плоскость $x\partial y$ получим z'=0, $x'=x_i+d$, d – расстояние между элементами, $y'=y_i$ – координаты второго, идентичного первому, преобразователя, тогда давление, создаваемое излучением i-го преобразователя на j-м:

$$\begin{split} p\left(\overline{r}\right) &= K \int_{0}^{\frac{\pi}{2} - i\infty} \int_{0}^{2\pi} D\left(\theta, \varphi\right) E(\theta, \varphi) sin\theta d\varphi d\theta, \\ &\quad E(\theta, \varphi) = e^{XY_{i}(\theta, \varphi)}, \\ XY_{i}(\theta, \varphi) &= ik \Big[\left(x_{i}\right) sin\theta cos\varphi + \left(y_{i}\right) sin\theta sin\varphi \Big] + M(\theta, \varphi), \\ M(\theta, \varphi) &= ik dsin\theta cos\varphi. \end{split}$$

Акустическая мощность, излучаемая преобразователем j в присутствии незаторможенного i-го преобразователя может быть записана [6]:

$$W_{j} = \frac{\left|w_{1}\right|^{2}}{2} \int_{S_{j}} \frac{p(\overline{r})}{w_{1}} A_{j}^{*} dS_{j},$$

сопротивление излучение элемента:

$$Z_{j} = \frac{2W_{j}}{|w_{1}|^{2}} = \int_{S_{j}} \frac{p(\overline{r})}{w_{1}} A_{j}^{*} dS_{j}^{*}$$

где w_1 — колебательная скорость i-го преобразователя, A_j^* — комплексно-сопряженное распределение колебательной скорости на поверхности j-го преобразователя, $p(\overline{r})$ — давление, развиваемое i-м преобразователем на поверхности j-го преобразователя, S_j — площадь j-го преобразователя.

Сопротивление излучения любого из двух идентичных преобразователей симметричной конструкции:

$$Z_{j} = Z_{i} = \frac{2K}{w_{1}} \int_{0}^{\frac{\pi}{2} - i\infty} \int_{0}^{2\pi} D(\theta, \varphi) C(\theta, \varphi) \sin\theta d\varphi d\theta,$$

$$C(\theta, \varphi) = \int_{S_{i}} A_{j}^{*} \cdot E(\theta, \varphi) dS_{j}.$$

С учетом записи характеристики направленности преобразователя через интеграл от давления по площади поверхности преобразователя запишем предыдущее выражение в виде:

$$Z_{j} = Z_{i} = \frac{2KS_{ef}}{w_{1}} \int_{0}^{\frac{\pi}{2} - i\infty} \int_{0}^{2\pi} R_{e}(\theta) D(\theta, \varphi) \cdot e^{M(\theta, \varphi)} sin\theta d\varphi d\theta$$

Так как
$$\int_0^{2\pi} e^{M(\theta,\phi)} d\phi = 2\pi J_0 \left(k d sin\theta\right) = B(\theta),$$

$$J_0(k d sin\theta) - \text{функция Бесселя нулевого порядка, то:}$$

$$Z_j = Z_i = \frac{2K S_{ef}}{w_1} \int_0^{\frac{\pi}{2} - i\infty} \int_0^{2\pi} B(\theta) R_e \left(\theta\right) D \left(\theta,\phi\right) sin\theta d\phi d\theta.$$

Разобьем контур интегрирования по углу θ на два участка: $0 \le \theta \le \frac{\pi}{2}$ и $\frac{\pi}{2} \le \theta \le \frac{\pi}{2} - i\infty$. На втором участке интегрирования $\theta = \frac{\pi}{2} - i\theta'$: $i \cdot sh\theta' = cos\theta$, $ch\theta' = sin\theta$, $-id\theta = d\theta$.

$$Z_{j} = Z_{i} = \frac{2KS_{ef}}{w_{1}} \int_{0}^{2\pi} \left[T(\varphi) - iT'(\varphi) \right] d\varphi, \tag{2}$$

$$T(\varphi) = \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} B(\theta) R_{e}(\theta) D(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta,$$

$$T'(\varphi) = \int_{0}^{\infty} B(\theta') R_{e}(\theta') D(\theta', \varphi) ch\theta' d\theta' \right].$$

Используя (2), можно рассчитать сопротивление излучения любого преобразователя, работающего в составе плоской антенны на фоне импедансного экрана.

Рассчитаем собственное сопротивление излучения Z_{ii} (при d=0) и взаимные сопротивления излучения Z_{ij} преобразователей для следующих типов колебаний пластин преобразователей:

- 1) поршневых;
- 2) соответствующих диску с опертым краем;
- 3) соответствующих диску с зажатым краем.

Распределение колебательной скорости по поверхности и характеристики направленности пластин указанных мод колебаний приведены в [5]. В качестве тыльного акустического экрана в процессе расчетов будем использовать абсолютно мягкий, абсолютно жесткий и два реальных экрана — поглощающий и отражающий. Абсолютно мягкий и жесткий экраны — математическая абстракция с чисто активными коэффициентами отражения, равными -1 и 1 соответственно. Поглощающий и отражающий экраны имеют комплексные частотно-зависимые коэффициенты отражения. За счет ряда конструктивных решений значительная часть энергии звуковой волны в первом случае рассеивается внутри, а во втором — отражается от его поверхности.

Рассмотрим изменение собственного сопротивления излучения сдвоенной пластины при размещении ее вблизи импедансного экрана. На графиках (рис. 2–4) представлена зависимость отношений активного $r_{ii} = Re(Z_{ii})$ (сплошные линии) и реактивного $x_{ii} = Im(Z_{ii})$ (пунктирные линии) собственных сопротивлений излучения преобразователя вблизи экрана к соответственно активной и реактивной составляющим собственного сопротивления излучения преобразователя в свободном поле, по оси абсцисс – волновое расстояние до экрана.

Рассмотрены случаи поршневого колебания пластин преобразователя (рис. 2), колебания преобразо-

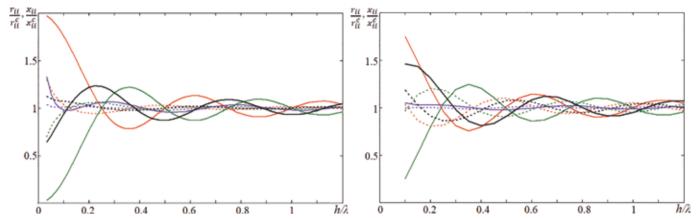


Рис. 2. Относительные активные и реактивные собственные сопротивления излучения преобразователя, находящегося вблизи различных экранов (тип колебаний преобразователя – поршневой)

вателя, соответствующие моде колебаний опертой по контуру пластины (рис. 3) и моде колебаний зажатой по контуру пластины (рис. 4) при расположении преобразователя вблизи различных экранов: абсолютно жесткого (красные линии), абсолютно мягкого (зеленые линии), поглощающего (фиолетовые линии), отражающего (черные линии). Расчеты проводились на частотах $2a/\lambda \approx 0,1$ (левые графики) и $2a/\lambda \approx 0,3$ (правые графики), 2a — диаметр пластинчатого преобразователя. Из графиков следует, что с увеличением волнового расстояния до экрана собственные сопротивления преобразователя вблизи различных экранов

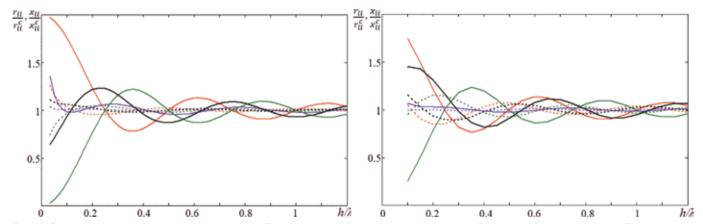


Рис. 3. Относительные активные и реактивные собственные сопротивления излучения преобразователя, находящегося вблизи различных экранов (тип колебаний преобразователя – опертая пластина)

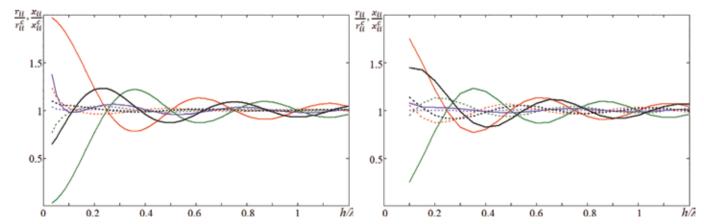


Рис. 4. Относительные активные и реактивные собственные сопротивления излучения преобразователя, находящегося вблизи различных экранов (тип колебаний преобразователя – зажатая пластина)

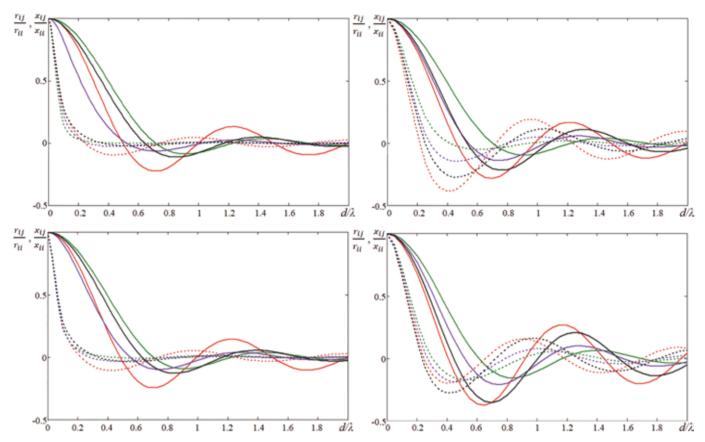


Рис. 5. Нормированные взаимные сопротивления излучения пластинчатых преобразователей при расположении их вблизи различных импедансных экранов (амплитудное распределение соответствует колебаниям поршня), расстояние до экрана $h/\lambda = 0.05$ (верхние графики) и $h/\lambda = 0.1$ (нижние)

стремятся к собственному сопротивлению излучения преобразователя в свободном поле. Чем ближе преобразователь к экрану (меньше волновое расстояние от преобразователя до экрана), тем большее влияние оказывает экран на сопротивление излучения. В присутствии экранов различных типов мода колебания преобразователя практически не оказывает влияния на величину r_{ii} , при этом незначительно влияет на величину x_{ii} во всем диапазоне частот.

Аналогичным образом рассмотрим характер кривых взаимного сопротивления излучения любого из двух идентичных преобразователей, расположенных на фоне акустического экрана. На рис. 5—7 представлена зависимость отношений активного (сплошные линии) и реактивного (пунктирные линии) взаимных сопротивлений излучения преобразователя вблизи экрана соответственно к активной и реактивной составляющим собственного сопротивления излучения (при тех же условиях) от волнового расстояния между преобразователями. Как и ранее, рассмотрены случаи поршневого колебания преобразователя (рис. 5), колебания преобразователя, соответствующие моде ко-

лебаний опертой по контуру пластины (рис. 6) и моде колебаний зажатой по контуру пластины (рис. 7) при расположении преобразователя вблизи различных экранов: абсолютно жесткого (красные линии), абсолютно мягкого (зеленые линии), поглощающего (фиолетовые линии), отражающего (черные линии). Пусть диаметр пластинчатого преобразователя равен 2а и располагается он на расстояниях $h/\lambda \approx 0.05$ (верхние графики) и $2h/\lambda \approx 0.1$ (нижние графики) от экрана. Резонанс механической системы пластинчатых преобразователей наблюдается при $2a/\lambda = 0.3...0.5$. Расчеты проводились на частотах $2a/\lambda \approx 0.1$ (левые графики) и $2a/\lambda \approx 0.3$ (правые графики).

Нормированные взаимные сопротивления излучения на нижней частоте рабочего диапазона ($2a/\lambda \approx 0,1$) практически не зависят от моды колебаний и при $d/\lambda > 0,6$ — от расстояния до экрана. Вблизи резонанса значения нормированного сопротивления излучения, как и ожидалось, превышают значения, полученные для $2a/\lambda \approx 0,1$, активная составляющая взаимного сопротивления излучения практически не зависит от моды колебаний во всем диапазоне частот, реактивная — зависит.

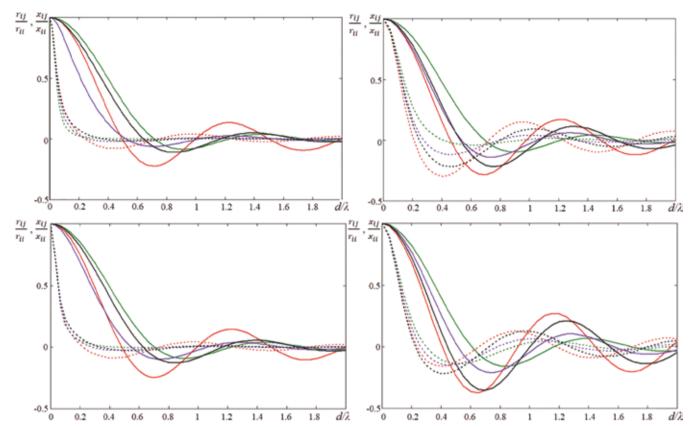
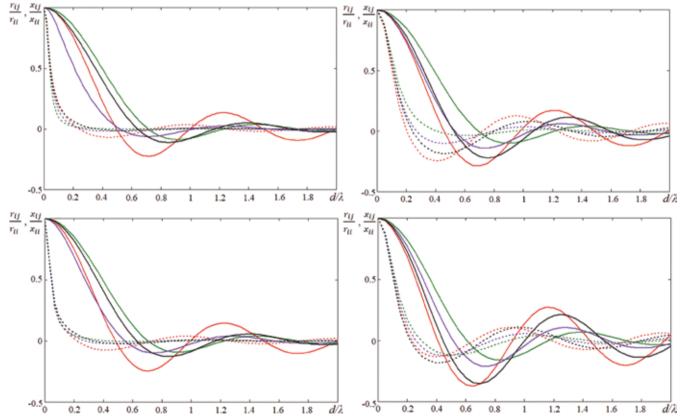
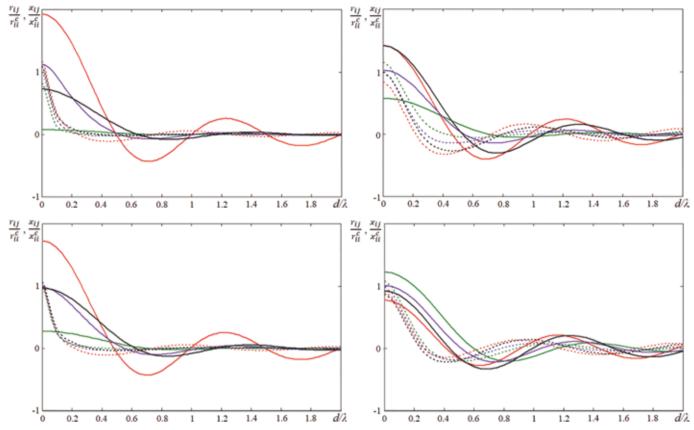


Рис. 6. Нормированные взаимные сопротивления излучения пластинчатых преобразователей при расположении их вблизи различных импедансных экранов (амплитудное распределение соответствует колебаниям опертой по краям пластины), расстояние до экрана $h/\lambda = 0.05$ (верхние графики) и $h/\lambda = 0.1$ (нижние)



Puc. 7. Нормированные взаимные сопротивления излучения пластинчатых преобразователей при расположении их вблизи различных импедансных экранов (амплитудное распределение соответствует колебаниям зажатой пластины), расстояние до экрана h/λ =0,05 (верхние графики) и h/λ =0,1 (нижние)



Puc.~8.~ Нормированные взаимные сопротивления излучения пластинчатых преобразователей при расположении их вблизи различных импедансных экранов (амплитудное распределение соответствует колебаниям поршня), расстояние до экрана $h/\lambda=0.05$ (верхние графики) и $h/\lambda=0.1$ (нижние)

На рис. 8 представлены графики взаимного сопротивления излучения, аналогичные приведенным на рис. 5–7 для случая поршневых колебаний пластин, нормирование производилось к активной и реактивной составляющим собственного сопротивления излучения преобразователя в свободном поле. Как и ожидалось, из графиков следует, что по мере удаления от экрана собственное сопротивление излучения преобразователя (при d/λ =0) приближается к значению собственного сопротивления излучения в свободном поле. При колебаниях на других модах характер кривых идентичный.

Из анализа графиков рис. 5-8 следует, что взаимное сопротивление излучения вдали от резонанса при расстояниях между преобразователями $d/\lambda > 0,6$ стремится к нулю (за исключением случая расположения преобразователя вблизи жесткого экрана), вблизи резонанса такое наблюдается при гораздо больших расстояниях между преобразователями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведено выражение, позволяющее получить собственное и взаимное сопротивление излучения элемента на фоне акустического экрана. Из анализа результатов расчета по полученному выражению следует, что проектирование акустических антенн, расположенных вблизи реально используемых акустических покрытий, имеющих «плотную» решетку преобразователей (d/ $\lambda < 0.5...0,6$) и работающих на частотах вплоть до частоты резонанса входящих в нее преобразователей, требует учета межэлементного взаимодействия. Для антенн, расположенных вблизи покрытия, по свойствам приближающегося к абсолютно жесткому, учет взаимодействия преобразователей при расчете полевых характеристик необходим всегда в практически реализуемых конструкциях, вне зависимости от рабочих частот и расстояний между элементами антенны. Приведенное в статье выражение для сопротивления излучения может быть использовано для получения колебательных скоростей преобразователей для последующего расчета полевых характеристик антенн.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Вендик О.Г., Козлов Д.С. Универсальный метод расчета взаимного импеданса между элементами антенной решетки // III Всерос. науч.-техн. конф. «Микроэлектроника СВЧ»: сб. тр. СПб, 2014. С. 263–267.
 - 2. Pritchard H.L. Mutual acoustic impedance between radiators in an infinite rigid plane // JASA. 1960. Vol. 32, No. 6. P. 730-737.
 - 3. Klapman S.J. Interaction impedance of a system of circular pistons // JASA. 1940. Vol. 11. P. 289–295.
 - 4. Arase E. Mutual radiation impedance of square and rectangular pistons in a rigid infinite baffle // JASA. 1964. Vol. 36, No. 8. P. 1521–1525.
 - 5. Porter D.T. Self- and mutual radiation impedance and beam patterns for flexural disks in a rigid plane // JASA. 1964. Vol. 36, No. 6. P. 1154–1161.
 - 6. Смарышев М.Д. Элементы теории направленности гидроакустических антенн: учеб. пособие. СПб.: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 144 с.

Об авторах

БИРЮКОВ Игорь Романович, начальник Акустического научно-исследовательского отделения

АО «Концерн «Океанприбор»

Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., д. 46 Область научных интересов: разработка гидроакустических преобразователей и антенн, гидроакустические измерения

Тел.: +7 (812) 499-99-52 **E-mail:** i698@yandex.ru

ПЕТУХОВА Марина Николаевна, ведущий инженер

АО «Концерн «Океанприбор»

Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., д. 46 Область научных интересов: расчет полевых характеристик гидроакустических преобразователей и антенн

Тел.: +7 (812) 499-74-11 **E-mail:** mpn0@yandex.ru

Для цитирования:

Бирюков И.Р., Петухова М.Н. К ВОПРОСУ О СОПРОТИВЛЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУХСТОРОННИХ ДИСКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕ-ЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ФОНЕ АКУСТИЧЕСКОГО ЭКРАНА // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 2 (36). С. 57–65. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_06.

