

## ВЛИЯНИЕ ОКОНЕЧНОЙ НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ЩЕЛЕЙ В ЭКРАНЕ КОАКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ

### Введение

Коаксиально-щелевые антенны широко применяются в различных областях науки и техники, так как являются малогабаритными системами, удобно размещаемыми на движущихся объектах, в подземных сооружениях различного назначения. Щели, прорезанные в экранах сверхминиатюрных коаксиальных линий, используют в биомедицинской практике и при разработке диагностической аппаратуры. В литературе часто описывается применение коаксиально-щелевых излучателей в лечебной гипертермии – локальном внутреннем нагреве тканей и органов человека [1 – 4].

Теория и электродинамические методы расчета таких систем при произвольных параметрах излучателей и фидерных трактов, а также в случаях излучения в различные материальные среды, окружающие антенные системы, практически отсутствуют. В известных нам работах по использованию коаксиально-щелевых систем в медицине и биологии применяются в основном методы компьютерного моделирования [1 – 3]. При таком подходе невозможно выяснять особенности и закономерности физических процессов излучения и создавать конструкции антенных систем с параметрами, близкими к оптимальным или заданным.

В настоящей статье рассматриваются системы из произвольного числа поперечных щелей в экране коаксиальной линии с произвольной оконечной комплексной нагрузкой. Для создания коаксиально-щелевой антенны с заданными энергетическими характеристиками предлагается варьировать коэффициент отражения от нагрузки  $\dot{R}$ , например с целью уменьшения отражения от коаксиально-щелевой системы до уровня порядка 1 % по мощности при заданном коэффициенте излучения.

Следует отметить, что управляемую оконечную нагрузку с коэффициентом отражения  $\dot{R}$  использовали авторы работ [5, 6], в которых показано, что подбором амплитуды и фазы коэффициента  $\dot{R}$  при изучении системы крестообразных щелей в стенке прямоугольного волновода можно получить излучение с поляризацией, близкой к круговой.

### Постановка задачи и ее решение

В данной работе методом магнитодвижущих сил (МДС) [7] исследуются электродинамические характеристики систем из  $N$  узких ( $d < \lambda$ ,  $d < l$ ) поперечных щелей разной по отношению ко внешнему периметру  $L$  коаксиальной линии длины  $l$  и ширины  $d$ . Излучатели прорезаются на различных расстояниях  $D_z$  друг относительно друга в бесконечно тонких и идеально проводящих экранах коаксиальной линии с различными значениями радиусов внутренних и внешних проводников  $a_1$  и  $a_2$  соответственно. На торце коаксиальной линии располагается оконечная нагрузка с управляемым коэффициентом отражения  $\dot{R}$  на расстоянии  $D_{sh}$  от центра ближайшего к ней щелевого излучателя. Область внутри фидера ( $v^i$ ) заполнена диэлектриком без потерь с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon^i$ . Пространство вне фидера ( $v^e$ ) в общем случае заполнено неидеальным диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon^e$  и тангенсом угла потерь  $tg \delta \geq 0$ .

Рассмотрим возбуждение системы поперечных щелей длины  $l \leq L$ , расположенных на цилиндрической поверхности. Источники поля находятся внутри фидера. Щели, возбуждаемые этими источниками, излучают электромагнитные волны во внешнее пространство и изменяют поле в коаксиальной линии. Для нахождения касательной составляющей электриче-

ского вектора  $\vec{E}$  в щелях воспользуемся условием непрерывности магнитных составляющих поля на поверхности щелей:

$$\vec{H}_\tau^e\{\vec{E}\} - \vec{H}_\tau^i\{\vec{E}\} = \vec{H}_\tau^0, \quad (1)$$

где  $\vec{H}_\tau^e\{\vec{E}\}$ ,  $\vec{H}_\tau^i\{\vec{E}\}$  – поля, возбуждаемые щелями в области  $v^e$  и  $v^i$  соответственно;  $\vec{H}_\tau^0$  – поле источников;  $\vec{E}$  – искомое значение касательной составляющей электрического поля в раскрыве многощелевой антенны.

Для решения уравнения (1) применим метод Галеркина, т. е. поле на поверхности системы щелей представим в виде ряда

$$\vec{E} = \sum_{s=1}^M \sum_{p=1}^N V_{ps} \vec{E}_{ps}, \quad (2)$$

где  $\vec{E}_{ps}$  – заданные на поверхностях щелей линейно-независимые вектор-функции, удовлетворяющие на контуре щели краевым условиям (собственные функции отверстия);  $V_{ps}$  – неизвестные комплексные амплитуды;  $s$  – номер щели;  $p$  – номер собственной функции отверстия.

После некоторых преобразований получим систему алгебраических уравнений относительно  $V_{ps}$ :

$$\sum_{p=1}^N \sum_{s=1}^M V_{ps} Y_{pq,rs} = F_{qr}, \quad q = 1, 2, 3, \dots, N, \quad r = 1, 2, 3, \dots, M, \quad (3)$$

где  $N$  – количество щелей;  $M$  – количество аппроксимирующих вектор-функций;  $Y_{pq,rs} = Y_{pq,rs}^e + Y_{pq,rs}^i$  – собственные при  $p = q$ ,  $r = s$ , взаимные по гармоникам при  $p \neq q$ ,  $r = s$  и взаимные по щелям при  $r \neq s$  частичные проводимости  $p$ -й и  $q$ -й гармоник функции распределения между  $r$ -й и  $s$ -й щелью,

$$Y_{pq,rs}^i = - \int_s [\vec{E}_{q,s} \vec{H}_\tau^i\{\vec{E}_{p,r}\}] d\vec{s}, \quad Y_{pq,rs}^e = \int_s [\vec{E}_{q,s} \vec{H}_\tau^e\{\vec{E}_{p,r}\}] d\vec{s}. \quad (4)$$

$$F_{q,r} = \int [\vec{E}_{q,r} \vec{H}_\tau^0] d\vec{s} \quad (5)$$

– магнитодвижущая сила;  $d\vec{s} = \vec{n} ds$ ;  $\vec{n}$  – единичная нормаль к поверхности щели  $s$ , направленная внутрь области  $v^e$ .

Таким образом, для решения системы (3) и, следовательно, нахождения поля в раскрыве антенны (2) необходимо определить в явном виде внутренние  $Y_{pq,rs}^i$  и внешние  $Y_{pq,rs}^e$  частичные проводимости, а также магнитодвижущие силы  $F_{qr}$ .

В такой постановке задачи система щелей может возбуждаться любым типом волны (в том числе и высшим), который будет распространяться в коаксиальной линии. Если система возбуждается основной волной ( $T$ -тип), тогда распределение поля вдоль кольцевой щели будет постоянным, а в дуговой – симметричным относительно центра щели вследствие центральной симметрии структуры поля волны  $T$ -типа, т. е. для описания поля в выражении (2) достаточно ограничиться одной вектор-функцией как для кольцевой, так и для дуговой щели [8] соответственно:

$$\vec{E}_s = \vec{z}^0 \frac{1}{d}, \quad \vec{E}_s = \vec{z}^0 \frac{1}{d} \cos\left(\pi \frac{u}{l}\right). \quad (6)$$

Здесь  $\vec{z}^0$  – единичный орт, направленный поперек щели,  $u$  – криволинейная координата, направленная вдоль щели. При таком выборе собственных функций коэффициент  $V_s$  в (2) и (3) приобретает смысл амплитуды напряжения на щели (здесь и далее индексы по гармоникам опущены).

Выражения, описывающие внутренние и внешние, собственные и взаимные проводимости щелевых излучателей, а также магнитодвижущие силы в случае как бесконечной, так и полубесконечной коаксиальных линий в явном виде были представлены в работах [9, 10].

Отличие в формулах для проводимостей и магнитодвижущих сил в настоящем случае будет заключаться во введении в них дополнительного слагаемого, обусловленного отражением от произвольной комплексной нагрузки с коэффициентом отражения  $\dot{R}$ .

### Полученные результаты и их анализ

Как уже упоминалось, интересным направлением является использование коаксиально-щелевых систем в медицинской практике. Как правило, коаксиально-щелевые системы применяются для медицинской гипертермии [1 – 4]. Однако в указанных работах не приводятся электродинамические характеристики используемых антенных систем и не обосновывается выбор их конструкций. При этом использование высоких подводимых мощностей (порядка 100 Вт в некоторых работах [3]) говорит о низкой эффективности используемых антенн. В настоящей работе описан способ настройки и управления характеристиками коаксиально-щелевой системы с помощью комплексной оконечной нагрузки в коаксиальном фидере. В рамках поставленной задачи о гипертермии антенная система должна быть помещена в биологический объект, что накладывает жесткие условия на ее массогабаритные параметры. Поэтому при проведении расчетов выбирались небольшие значения радиусов коаксиальных линий  $a_2$  и количество излучателей  $N$ . Некоторые результаты расчетов энергетических характеристик щелевых систем, прорезанных в экране сверхминиатюрной коаксиальной линии с  $a_1 = 0,2$  мм,  $a_2 = 0,6$  мм и излучающих в среду с величиной относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon^e = 43,03$  ( $\epsilon^i = 2$ ) и значением диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta = 0,8$ , что соответствует параметрам биологических сред, представлены на рис. 1 – 6.

При исследовании характеристик коаксиально-щелевой системы удобно представить коэффициент отражения от оконечной нагрузки в виде  $-\dot{R} = R \cdot e^{j(\psi+\pi)}$ , где  $j$  – мнимая единица,  $R$  – абсолютная величина,  $\psi$  – фаза коэффициента отражения,  $\pi$  – сдвиг фазы, соответствующий оконечной нагрузке в случае идеальной торцевой стенки.

Для несимметричного нагрева тканей относительно оси фидера, то есть направленного нагрева, излучающая коаксиально-щелевая антенна выполняется в виде небольшого количества дуговых щелей. Рассмотрим коэффициенты излучения и отражения системы из  $N = 3$  дуговых щелей при различных коэффициентах отражения  $R$  (рис. 1 – 2).

На рис. 1 показаны зависимости коэффициентов излучения  $|\Gamma_\Sigma|^2$  и отражения  $|\Gamma_1|$  системы из трех дуговых щелей от фазы оконечной нагрузки  $\psi$  при различных величинах модуля ее коэффициента отражения  $R$ . Длина щелей была близкой к периметру коаксиальной линии  $L$  ( $l = 0,98L$ ), ширина –  $d = 0,3$  мм. Расчеты проводились при длине волны  $\lambda = 43$  мм (щели оставались электрически узкими –  $d < l$ ,  $d \ll \lambda$ ). Излучатели прорезались на расстоянии  $D_z = 10$  мм друг относительно друга. Произвольная нагрузка располагалась на расстоянии  $D_{sh} = 10,5$  мм от ближайшей щели. Внешний диэлектрик предполагался идеальным ( $\text{tg } \delta = 0$ ). Кривые 1 – 6 на рис. 1 соответствуют случаям коэффициента отражения  $R = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  и 1. При этом кривая 1 ( $R = 0$ ) соответствует случаю помещения в коаксиально-щелевую линию согласованной нагрузки (бесконечная линия), а кривая 6 ( $R = 1$ ) – случаю расположения в линии идеально отражающей торцевой стенки (полубесконечная линия).

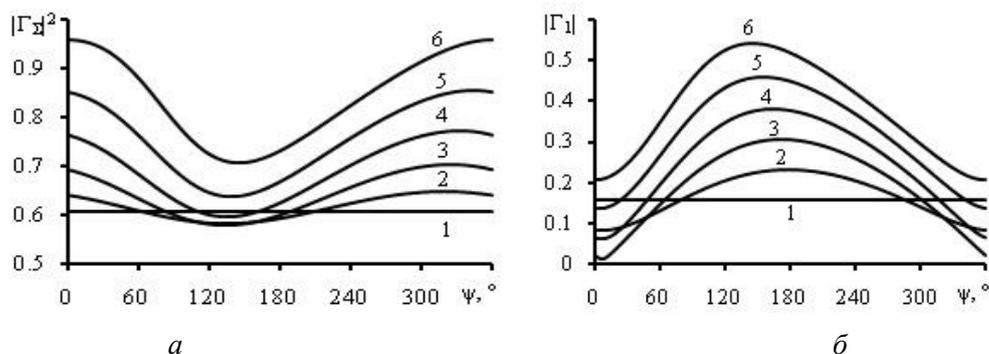


Рис. 1. Зависимости от фазы оконечной нагрузки коэффициентов излучения  $|\Gamma_\Sigma|^2 = f(\psi)$  (а) и отражения  $|\Gamma_1| = f(\psi)$  (б) системы из трех дуговых щелей, расположенных в экране коаксиальной линии

Из рис. 1, *a* видно, что наибольший коэффициент излучения  $|\Gamma_{\Sigma}|^2 = 0,96$  будет достигаться в случае полубесконечной коаксиальной линии при  $R = 1$ ,  $\psi = 0$  (кривая 6), однако коэффициент отражения в данном случае равен  $|\Gamma_1| = 0,21$  (рис. 1, *б*). Заметим, что изменение  $|\Gamma_1|$  при увеличении  $R$  не носит монотонного характера, и видно, что при помещении в данную коаксиальную линию нагрузки с  $R = 0,4$ ,  $\psi = 7^\circ$  удастся уменьшить коэффициент отражения до уровня  $|\Gamma_1| = 0,01$ , но при этом снижается и излучение из системы щелей –  $|\Gamma_{\Sigma}|^2 = 0,69$  (рис. 1, кривые 3).

Подобрав параметры конечной нагрузки, проанализируем частотные свойства полученной системы дуговых щелей в экране коаксиальной линии. При этом параметры конечной нагрузки в указанном диапазоне длин волн условно считаем постоянными.

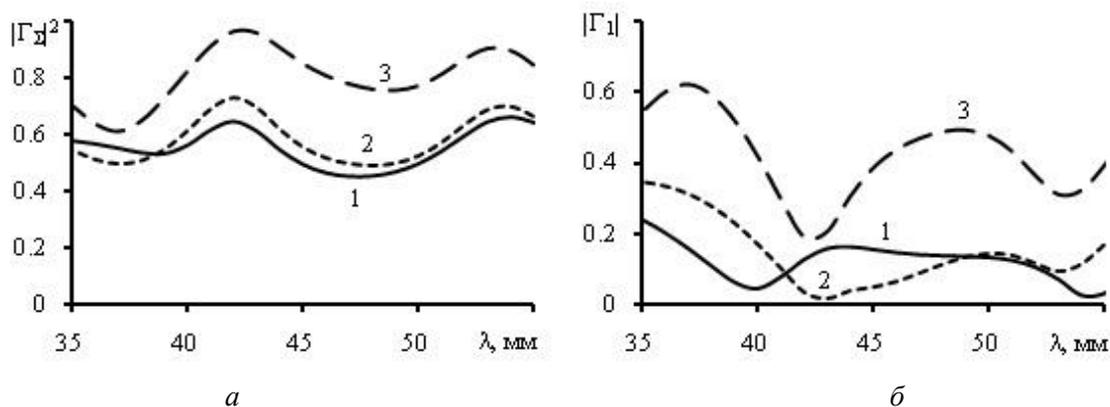


Рис. 2. Зависимости коэффициентов излучения  $|\Gamma_{\Sigma}|^2 = f(\lambda)$  (*a*) и отражения  $|\Gamma_1| = f(\lambda)$  (*б*) системы из трех дуговых щелей для случаев бесконечной (кривая 1), нагруженной на нагрузку с  $R = 0,4$ ,  $\psi = 7^\circ$  (кривая 2) и полубесконечной (кривая 3) коаксиальной линии

На рис. 2 представлены зависимости от длины волны энергетических коэффициентов рассматриваемой коаксиально-щелевой системы для случаев бесконечной (кривые 1), нагруженной (кривые 2) и полубесконечной (кривые 3) коаксиальной линии. Видно, что в сравнении со случаями бесконечной и полубесконечной коаксиальных линий настройка с помощью указанной конечной нагрузки позволяет резко снизить отражение в коаксиально-щелевой решетке в диапазоне длин волн порядка 13 % в окрестности  $\lambda = 43$  мм (кривые 2).

Для равномерного локального нагрева тканей в некотором объеме, окружающем коаксиально-щелевую антенну, следует использовать системы кольцевых щелей, расположенных в экране сверхминиатюрного фидера. В отличие от дуговых кольцевые щели имеют постоянное распределение поля вдоль излучателя, что обуславливает равномерность облучения рассматриваемого объема.

Рассмотрим характеристики системы кольцевых щелей, расположенных в экране сверхминиатюрного коаксиального фидера и излучающих в материальную среду (рис. 3 – 6).

На рис. 3 представлены зависимости энергетических характеристик  $|\Gamma_{\Sigma}|^2 = f(\psi)$  и  $|\Gamma_1| = f(\psi)$  системы, состоящей из  $N = 2$  кольцевых щелей, расположенных в экране коаксиальной линии, от фазы конечной нагрузки  $\psi$  при различных значениях модулей коэффициента отражения  $R = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$  (кривые 1 – 6 соответственно). Ширина каждой щели равнялась  $d = 0,3$  мм. Расстояния между щелевыми элементами  $D_z = 7$  мм, а до конечной отражающей нагрузки –  $D_{sh} = 6,5$  мм. Длина волны в свободном пространстве равнялась  $\lambda = 98$  мм. Диэлектрики внутри и вне фидера считались идеальными, то есть  $tg \delta = 0$ .

Из сравнения кривых 1 – 6 видно, что минимальный коэффициент отражения рассматриваемой системы кольцевых щелей достигается только в случае расположения в коаксиальной линии идеально отражающей торцевой стенки –  $R = 1$ ,  $\psi = 0$  (рис. 3 *б*, кривая 6). Заметим, что скачок фазы на идеально отражающей стенке, равный  $\pi$ , учтен в коэффициенте отражения  $\tilde{R}$ . С ростом величины коэффициента отражения от конечной нагрузки  $R$  коэффи-

коэффициент излучения  $|\Gamma_{\Sigma}|^2$  возрастает, а отражения  $|\Gamma_1|$  – убывает монотонно. Из этого следует, что для данной системы щелей размещение в коаксиальной линии оконечной нагрузки с  $R$  отличным от единицы не является целесообразным.

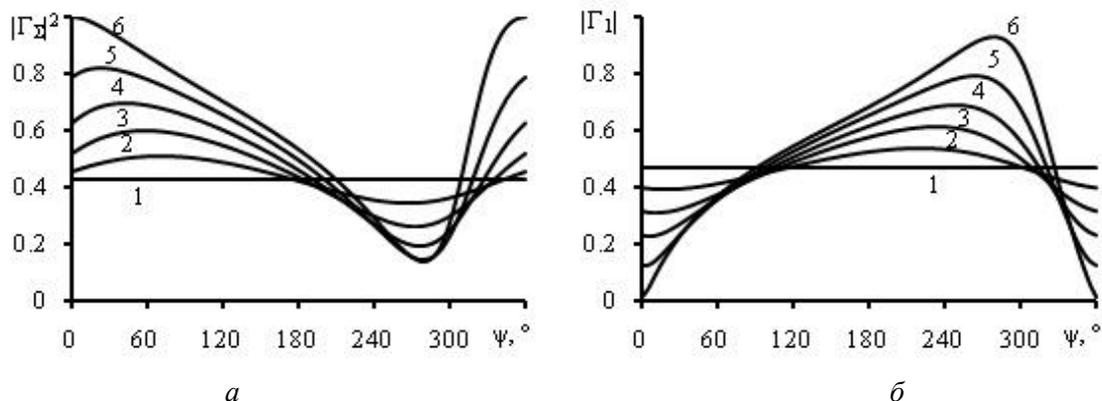


Рис. 3. Зависимости коэффициентов излучения  $|\Gamma_{\Sigma}|^2 = f(\psi)$  (а) и отражения  $|\Gamma_1| = f(\psi)$  (б) системы двух кольцевых щелей от фазы оконечной нагрузки расположенной в коаксиальной линии

Также следует отметить, что на рис. 3, б в окрестности значения фазы  $\psi = 75^\circ$  кривые 1 – 6 пересекаются. Таким образом, можно утверждать, что в случае обеспечения такой фазы оконечной нагрузки в данном коаксиальном фидере коэффициент отражения щелевой системы  $|\Gamma_1|$  становится слабо чувствительным к изменению величины  $R$ . При этом, изменяя  $R$ , сохраняем возможность управления коэффициентом излучения щелевой решетки  $|\Gamma_{\Sigma}|^2$  ( $0.43 \div 0.82$ ).

Из анализа зависимостей, представленных на рис. 3, следует, что для обеспечения наименьшего коэффициента отражения рассматриваемой системы кольцевых щелей следует выбирать оконечную нагрузку в виде идеально отражающей торцевой стенки в коаксиальной линии при  $\lambda = 98$  мм (рис. 3, кривые б).

Рассмотрим диапазонные свойства исследуемой системы кольцевых щелей при  $\lambda_{\text{ср}} = 98$  мм, а также влияние потерь во внешней среде на ее энергетические характеристики. На рис. 4 представлены зависимости энергетических характеристик  $|\Gamma_{\Sigma}|^2 = f(\lambda)$  и  $|\Gamma_1| = f(\lambda)$  рассматриваемой системы кольцевых щелей в экране полубесконечной коаксиальной линии ( $R = 1, \psi = 0$ ) при разных уровнях потерь в окружающем пространстве  $\text{tg } \delta$ . Тангенс угла диэлектрических потерь внешнего диэлектрика принимал значения 0; 0,1; 0,5 и 0,8 – кривые 2 – 5 соответственно. Кривые 1 и 1' соответствуют случаю расположения этой системы в бесконечной коаксиальной линии (согласованная оконечная нагрузка  $R = 0$ ). Из сравнения кривых 1, 1' и 2, 2' видно, что размещение в коаксиальной линии идеально отражающей торцевой стенки позволяет существенно улучшить характеристики излучающей щелевой системы от  $|\Gamma_{\Sigma}|^2 = 0.43, |\Gamma_1| = 0.46$  в случае расположения излучателей в бесконечном до  $|\Gamma_{\Sigma}|^2 = 0.99, |\Gamma_1| = 0.02$  в случае использования щелей в полубесконечном фидере. Также видно, что при увеличении уровня потерь в окружающей среде от  $\text{tg } \delta = 0$  до  $\text{tg } \delta = 0.8$  коэффициент отражения  $|\Gamma_1|$  в окрестности длины волны  $\lambda = 98$  мм возрастает до 0,51, а излучения  $|\Gamma_{\Sigma}|^2$  – падает до 0,74, что ухудшает ее эффективность в случае применения для лечебной гипертермии.

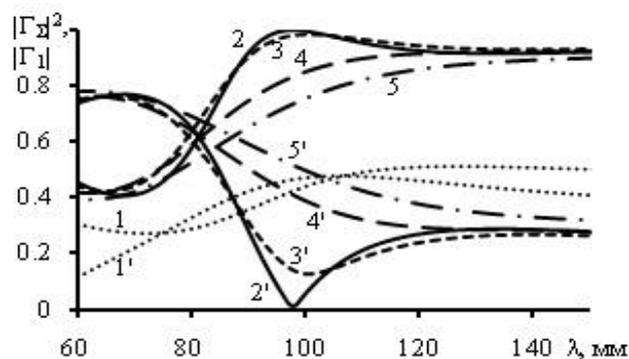


Рис. 4. Зависимости  $|\Gamma_{\Sigma}|^2 = f(\lambda)$  (кривые 1 – 5) и  $|\Gamma_1| = f(\lambda)$  (кривые 1'–5') для системы из двух кольцевых щелей в экране коаксиальной линии. Параметром является уровень диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  во внешней среде

Возникает вопрос о способах улучшения энергетических характеристик излучающей системы в случае ее медицинского применения в биологических средах с высокими уровнями диэлектрических проницаемостей и потерь. Проведенные исследования показывают, что управлением параметрами оконечной нагрузки можно улучшить согласование системы кольцевых щелей с окружающим пространством в случае излучения в материальную среду с потерями. Пример такого управления показан на рис. 5. Обратим внимание на то, что эквивалентом изменению фазы комплексной оконечной нагрузки  $\psi$  можно считать изменение расстояния  $D_{sh}$  от нее до ближней щели.

На рис. 5 приведены зависимости от длины волны энергетических характеристик рассматриваемой системы из двух кольцевых щелей, расположенных в экране коаксиальной линии с идеально отражающей стенкой, в случае помещения всей системы в среду с уровнем диэлектрических потерь  $tg \delta = 0,5$ . Кривые 1 и 1' были представлены ранее (рис. 4, кривые 4 и 4' соответственно). При их расчете расстояние до торцевой стенки в коаксиальной линии равнялось  $D_{sh} = 6,5$  мм. В свою очередь, зависимости 2 и 2' были получены для этой системы при условии расположения идеально отражающей нагрузки ( $R = 1, \psi = 0$ ) на расстоянии  $D_{sh} = 34$  мм от ближней к ней щели ( $D_z = 5,5$  мм). Из сравнения кривых 1, 1' и 2, 2' видно, что путем правильного выбора расстояния до идеально отражающей нагрузки можно существенно снизить отражение от щелевой системы, излучающей в среду с высоким уровнем диэлектрических потерь, – с  $|\Gamma_1| = 0,4$  до  $|\Gamma_1| = 0,02$  в окрестности длины волны  $\lambda = 98$  мм, при соответствующем росте коэффициента излучения  $|\Gamma_\Sigma|^2$ . Расстояние  $D_{sh} = 34$  мм существенно увеличивает габаритные характеристики излучающей системы. Изменение расстояния  $D_{sh}$  в сторону уменьшения также приводит к улучшению энергетических характеристик системы в сравнении со случаем излучения

в среду без потерь (кривые 1 и 1'). Так, при расчете энергетических характеристик с  $D_{sh} = 4$  мм (рис. 5, кривые 3 и 3') коэффициент отражения снижается до значения  $|\Gamma_1| = 0,24$ , что составляет менее 6 % по мощности ( $D_z = 5,5$  мм). При таком выборе расстояния существенно уменьшаются габаритные характеристики излучающей системы, что является важным критерием при применении ее в задачах медицинской гипертермии. Подобный эффект также может быть достигнут путем расположения в коаксиальной линии оконечной нагрузки с соответствующим сдвигом фазы  $\psi$ .

Следует обратить внимание на то, что в рассмотренных случаях при значениях расстояний  $D_z = 7$  мм,  $D_{sh} = 6,5$  мм и длине волны  $\lambda = 98$  мм ( $\epsilon^i = 2, \epsilon^e = 43,03$ ) излучатели расположены электрически близко друг ко другу. Это обуславливает высокий уровень взаимодействия между ними. При расчете характеристик указанной системы кольцевых щелей данное взаимодействие было учтено во взаимных проводимостях между щелями по внутреннему и внешнему пространствам (4). Результаты расчета этих проводимостей ( $Y = g + jb$ ) в зависимости от длины волны приведены далее.

На рис. 6 представлены зависимости от длины волны внутренних и внешних, собственных и взаимных проводимостей систем кольцевых щелей, энергетические характеристики которых рассмотрены на рис. 4. Номера 1 и 1' обозначены собственные внутренние, 2 и 2' – собственные внешние, 3 и 3' – взаимные внутренние и 4 и 4' – взаимные внешние проводимости щелевых излучателей. Сплошные кривые обозначают активные  $g^{i,e}$ , а пунктирные – реактивные  $b^{i,e}$  компоненты соответствующих проводимостей. Проводимости на рис. 6 а от-

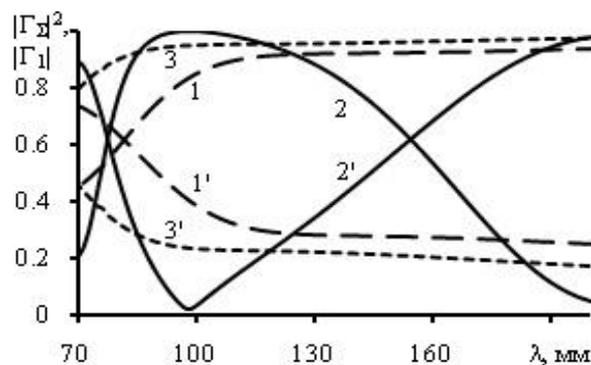


Рис. 5. Зависимости от длины волны коэффициента излучения  $|\Gamma_\Sigma|^2 = f(\lambda)$  (а) и отражения  $|\Gamma_1| = f(\lambda)$  (б) системы из двух кольцевых щелей при разных положениях  $D_{sh}$  идеально отражающей стенки в коаксиальной линии

вечают коаксиально-щелевой системе с энергетическими характеристиками, представленными кривыми 2, 2' на рис. 4, а на рис. 6, б – кривыми 4, 4' соответственно.

Из сравнения кривых 1, 1' и 3, 3', а также 2, 2' и 4, 4' на рис. 6 видно, что в представленном диапазоне длин волн взаимные проводимости щелевых элементов по величине сравнимы и даже превосходят собственные проводимости излучателей. Это связано с электрически близким расположением щелей друг относительно друга, то есть из анализа зависимостей на рис. 6 следует, что взаимные проводимости между щелевыми элементами вносят существенный вклад в формирование амплитудно-фазового распределения вдоль щелевой решетки, а значит и ее энергетических и пространственных характеристик. Следовательно, взаимодействие между излучателями играет ключевую роль, и пренебрегать им нельзя.

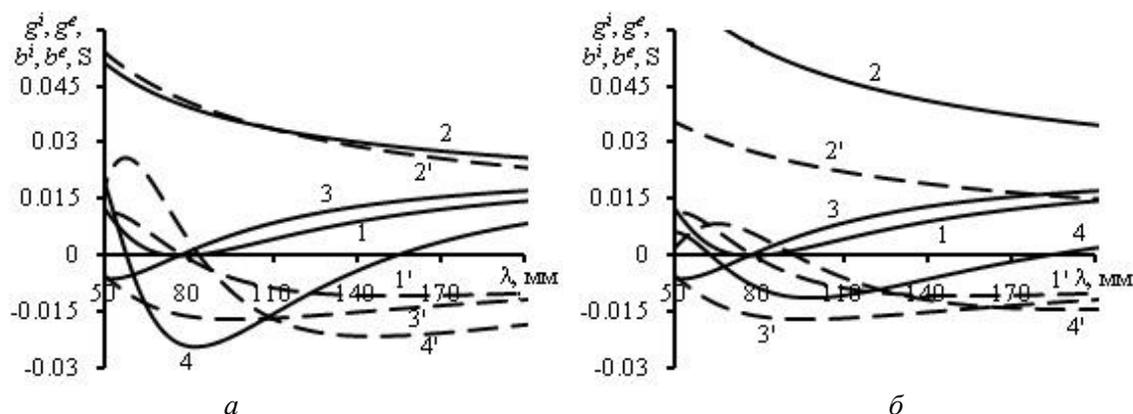


Рис. 6. Зависимости собственных и взаимных проводимостей системы из двух кольцевых щелей от длины волны при уровнях потерь во внешней среде, равных  $tg \delta = 0$  (а) и  $tg \delta = 0.5$  (б)

Из сравнения соответствующих кривых на рис. 6, а, б видно, что с увеличением  $tg \delta$  во внешнем диэлектрике снижаются внешние взаимные проводимости между излучателями и возрастает внешняя активная составляющая собственной проводимости щелей. Таким образом, с ростом  $tg \delta$  от 0 до 0,5 ослабевает взаимодействие между элементами по внешнему пространству и возрастает собственная проводимость каждой щели. Это существенным образом меняет амплитудно-фазовое распределение в системе, что проявляется в росте коэффициента отражения  $|\Gamma_1|$  и падении коэффициента излучения  $|\Gamma_\Sigma|^2$ .

Результаты проведенных исследований о влиянии параметров оконечной нагрузки на энергетические характеристики коаксиально-щелевых систем для различных случаев расположения излучателей и нагрузки ( $\dot{R} = R \cdot e^{j(\psi+\pi)}$ ) в фидере представлены в таблице.

Дуговые щели. $\epsilon^e = 43.03$					Кольцевые щели. $N = 2, \epsilon^e = 43.03$				
Параметры	$R$	$\psi, ^\circ$	$ \Gamma_1 $	$ \Gamma_\Sigma ^2$	Параметры	$R$	$\psi, ^\circ$	$ \Gamma_1 $	$ \Gamma_\Sigma ^2$
$D_z = 10 \text{ мм}, D_{sh} = 18 \text{ мм}, \lambda = 43 \text{ мм}, N = 3$	0	-	0.1	0.6	$D_z = 10 \text{ мм}, D_{sh} = 15.5 \text{ мм}, \lambda = 43 \text{ мм}$	0	-	0.12	0.38
	0.5	180	0.02	0.72		0.2	338	0.01	0.4
	0.7	180	0.1	0.8		0.3	0	0.08	0.43
	1	0	0.21	0.96		1	0	0.54	0.71
$D_z = 10 \text{ мм}, D_{sh} = 12.5 \text{ мм}, \lambda = 48 \text{ мм}, N = 3$	0	-	0.14	0.45	$D_z = 50 \text{ мм}, D_{sh} = 16.5 \text{ мм}, \lambda = 145 \text{ мм}$	0	-	0.5	0.3
	0.3	15	0.08	0.48		0.8	355	0.06	0.7
	1	0	0.44	0.8		1	0	0.24	0.94
$D_z = 10 \text{ мм}, D_{sh} = 19 \text{ мм}, \lambda = 43 \text{ мм}, N = 2$	0	-	0.08	0.42	$D_z = 10 \text{ мм}, D_{sh} = 9.5 \text{ мм}, \lambda = 120 \text{ мм}$	0	-	0.54	0.47
	0.3	345	0.09	0.49		1	0	0.2	0.96
	1	0	0.46	0.78	$D_z = 7 \text{ мм}, D_{sh} = 6.5 \text{ мм}, \lambda = 98 \text{ мм}$	0	-	0.47	0.42
					1	0	0.02	0.99	

## Выводы

Методом магнитодвижущих сил решена задача возбуждения и рассеяния системы щелевых излучателей, прорезанных в экране коаксиальной линии с комплексной управляемой оконечной нагрузкой. Проведены численные исследования энергетических коэффициентов, в том числе при излучении в материальную среду. Показано, что размещение комплексной оконечной нагрузки с заданными параметрами ( $R$ ,  $\psi$ ) в коаксиальном фидере с системами поперечных дуговых и кольцевых щелей дает дополнительную возможность управления характеристиками такой антенны. В ряде случаев оконечная нагрузка позволяет снизить коэффициент отражения щелевой системы до уровня 0,1 по полю, уменьшить габаритные размеры излучающей системы, улучшить согласование коаксиально-щелевой системы с внешней средой в виде диэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемости и уровнем потерь в нем.

Метод МДС позволяет дать физическую интерпретацию процессам излучения и научно-обоснованные рекомендации касательно конструкции щелевой антенны в экране нагруженной коаксиальной линии.

**Список литературы:** 1. *Saito, K., Hayashi, Y., Yoshimura, H., Ito, K.* Heating Characteristics of Array Applicator Composed of two Coaxial Slot Antennas for Microwave Coagulation Therapy // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. – 2000. – Vol. 48, No 11. – P. 1800-1806. 2. *Ito, K.* Antenna Technology for Medical Applications // *Int. Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2006)*. – 2006. – P. 1-4. 3. *Nantivatana, P., Tungjikusolmun, S., Phasukkit, P., Sangworasil, M.* 3D Finite Element Analysis for Non-Asymmetry Structure Antenna for Microwave Ablation Therapy // *The 3<sup>rd</sup> Int. Symposium on Biomedical Engineering (ISBME 2008)*. – 2008. – P. 42-47. 4. *Rubio, M., Hernandez A., Salas L., Navarro E., Avila-Navarro E.* Coaxial Slot Antenna Design for Microwave Hyperthermia using Finite-Difference Time Domain and Element Method // *The Open Nanomedicine Journal*. – 2011. –Vol. 3. – P. 2-9. 5. *Блинова, Н. К., Жиронкина, А. В., Яцук, Л. П.* Поляризационные свойства и энергетические параметры системы Х-образных щелей в прямоугольном волноводе с произвольной нагрузкой на конце // *Радиотехника*. – 1998. – Вып. 107. – С. 72-83. 6. *Блинова, Н. К., Яцук, Л. П., Селютин, А. В.* Поляризационные и энергетические характеристики Х-образных щелей в волноводе с комплексной нагрузкой и диэлектрическими вставками // *Вісник Харк. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. «Радіофізика та електроніка»*. – 2011. – Вип. 18, № 966. – С. 77-81. 7. *Фельд Я. Н., Бененсон Л. С.* Антенно-фидерные устройства. Ч. 2. // Москва: Изд. ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1959. – 551 с. 8. *Катрич, В. А., Лященко, В. А., Медведев, Н. В.* Щелевой излучатель в коаксиальной линии // *Радиофизика и электроника*. – 2010. – Т. 15, № 1. – С. 7 – 16. 9. *Катрич, В. А., Лященко, В. А., Медведев, Н. В.* Излучение из системы щелей в экране коаксиальной линии // *Радиофизика и радиоастрономия*. – Харьков : РИ НАНУ. – 2012. – Т. 17, № 2. – С. 146-156. 10. *Катрич, В. А., Лященко, В. А., Медведев, Н. В.* Многоэлементные системы щелевых излучателей в экране полубесконечной коаксиальной линии // *Радиофизика и радиоастрономия*. – Харьков : РИ НАНУ. – 2013. – Т. 18, № 4. – С. 309-322.

*Харьковский национальный университет  
имени В. Н. Каразина*

*Поступила в редколлегию 15.11.2015.*