

УДК 621.372.8+519.6

## КОМПЕНСАЦИЯ ОТРАЖЕНИЯ $H_{01}$ -ВОЛНЫ ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОКНА НА АПЕРТУРЕ РУПОРА

О.И. НАРАНОВИЧ, А.К. СИНИЦЫН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 10 февраля 2010*

С использованием разработанных ранее методов расчета симметричных  $H$ -волн в нерегулярном круглом волноводе с диэлектрическими вставками выполнены расчеты коэффициента отражения рупора с диэлектрическим окном на апертуре. Найдены условия, при которых за счет правильного выбора параметров рупора реализуется полная компенсация отражения.

*Ключевые слова:* рупор, диэлектрическое окно, коэффициент отражения, математическая модель.

### Введение

Обычно из генератора большой мощности СВЧ-излучение выводят через рупор, основное назначение которого согласование волновода с открытым пространством, обеспечение минимального отражения при выводе энергии, а также реализация требуемой диаграммы направленности. Для изоляции вакуумного пространства мощного источника СВЧ на апертуре рупора помещается диэлектрическая диафрагма, наличие которой приводит к дополнительному рассогласованию, если ее толщина не подобрана соответствующим образом. Не всегда удается подобрать толщину диафрагмы имеющей диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$ , соответствующую минимальному отражению СВЧ-волны заданной частоты. В этом случае актуальной является задача исследования возможности подбора таких параметров рупора, при которых реализовалась бы компенсация отражения от диафрагмы. Исследование физических особенностей такой компенсации является задачей данной статьи.

### Постановка задачи

На рис. 1 представлена геометрия решаемой задачи. Входной радиус рупора  $b_0$ , радиус апертуры  $b_L$ . На вход рупора подается симметричная  $H_{01}$ -волна мощности  $P_0^+$ , на выходе ставится условие согласования ( $P_L^- = 0$ ). Коэффициент отражения по мощности  $H_{01}$ -волны определяется соотношением  $K = P_0^- / P_0^+ = 1 - P_L^+ / P_0^+$ , где  $P_0^-$ ,  $P_L^+$  — отраженная и проходящая мощности. Образующая монотонного рупора на участке  $z_1 < z < z_2$  задавалась в виде параболы, имеющей гладкое сопряжение с отрезками регулярных волноводов на входе  $(0, z_1)$  и апертуре  $(z_2, L)$

$$b(z) = b_0 + (b_L - b_0)P_5[(z - z_1)/(z_2 - z_1)]; P_5[T] = T^3(10 - 15T + 6T^2); 0 \leq T \leq 1. \quad (1)$$

Параметры рупора  $L_v = z_2 - z_1$  и  $b_L$  подбирались из условия минимального коэффициента отражения при наличии диэлектрического окна толщиной  $D_\epsilon$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ .

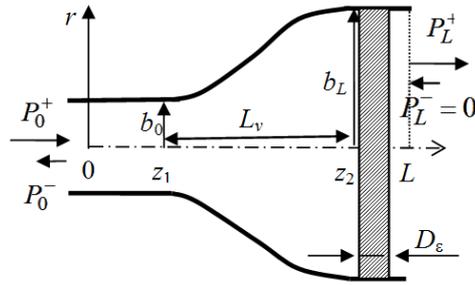


Рис. 1. Рупор с диэлектрическим окном

Для выполнения расчетов была создана компьютерная программа, реализующая математическую модель и методы, разработанные ранее для подобных задач [1, 2]. Все геометрические размеры ниже приводятся в единицах  $\lambda/2\pi$  ( $\lambda$  — длина волны СВЧ излучения в свободном пространстве).

### Исследование отражения $H_{01}$ -волны от диафрагмы без рупора

Для выяснения особенностей отражения диэлектрической диафрагмы без рупора были выполнены расчеты зависимостей коэффициента отражения  $H_{01}$  симметричной волны в круглом регулярном волноводе радиуса  $b$  от диэлектрического окна толщиной  $D_\epsilon$  (рис. 2).

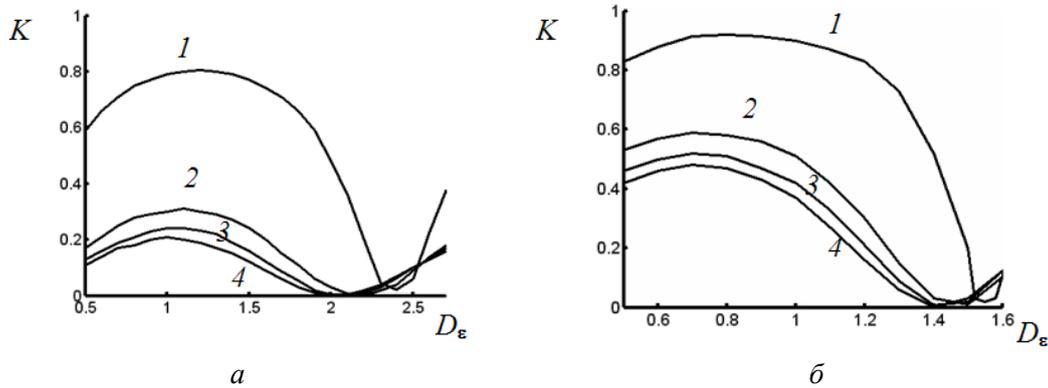


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от ширины диэлектрического окна  
1 —  $b=4$ ; 2 —  $b=6$ ; 3 —  $b=8$ ; 4 —  $b=12$ : а —  $\epsilon=2,5$ ; б —  $\epsilon=5$

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением от нуля толщины диэлектрического окна  $D_\epsilon$  коэффициент отражения  $K$  вначале возрастает до определенного максимального значения, затем проходит нулевой минимум при  $D_\epsilon^1(b, \epsilon)$ , и при дальнейшем увеличении зависимость  $K(D_\epsilon)$  повторяется. Максимум  $K$  приходится на  $D_\epsilon^{0,5} = 0,5D_\epsilon^1$ . С уменьшением  $\epsilon$  толщина диэлектрического окна  $D_\epsilon^1(b, \epsilon)$ , соответствующего отсутствию отражения, возрастает, при увеличении  $b$  — уменьшается в соответствии с формулой для половины длины волны в волноводе, заполненном диэлектриком

$$D_\epsilon^1(b, \epsilon) \approx 0,5\lambda_\epsilon^{H_{01}} = \pi / \sqrt{W^2\epsilon - \mu_{0i}/b^2}. \quad (2)$$

Следует особо отметить тот факт, что максимальное отражение от диафрагмы может достигать 90% даже при небольших значениях  $\epsilon \approx 2,5$ . Хотя при увеличении радиуса волновода значение максимального отражения и уменьшается, однако остается все еще значительным. Например, для  $\epsilon=2,5$  и при радиусе  $b \geq 8$  максимум отражения  $K_{max}=20\%$ , для  $\epsilon=5$ ,  $K_{max}=40\%$ .

Расчеты показали, что прохождение  $H_{01}$ -волны через диэлектрическое окно в регулярном волноводе не сопровождается возбуждением высших парциальных волн  $H_{0i}$   $i>1$ , амплитуды которых  $A_i(z)$ , находились по формуле

$$A_i(z) = \frac{1}{h_{0i}} \int_0^1 u(z, \rho) J_1(\mu_{0i} \rho) d\rho; \quad h_{0i} = \int_0^1 J_1^2(\mu_{0i} \rho) \rho d\rho. \quad (3)$$

Здесь  $\rho = r/b(z)$ ,  $\mu_{0i}$  — корни функции Бесселя  $J_1 x$ ,  $u(z, \rho)$  — рассчитываемое по методу сеток волновое поле [2]. Компонента  $E_\varphi$  симметричной  $H$ -волны нерегулярного волновода в этом случае представляется в виде  $E_\varphi(r, z) = \frac{1}{b} \sum_i A_i(z) J_1\left(\mu_{0i} \frac{r}{b}\right)$ .

Характерное распределение амплитуды  $A_1(z)$   $H_{01}$ -волны в регулярном волноводе радиуса  $b=8$  при прохождении ее через диэлектрическую диафрагму, расположенную между пунктирными линиями, для толщины  $D_\varepsilon^1$ , соответствующей отсутствию отражения и для толщины  $D_\varepsilon^{0,5}$ , соответствующей максимуму отражения, представлено на рис. 3. При наличии отражения перед диафрагмой на графике амплитуды видны характерные для суперпозиции прямой и обратной волн биения. После диафрагмы амплитуда проходящей волны постоянна, что соответствует полному согласованию.

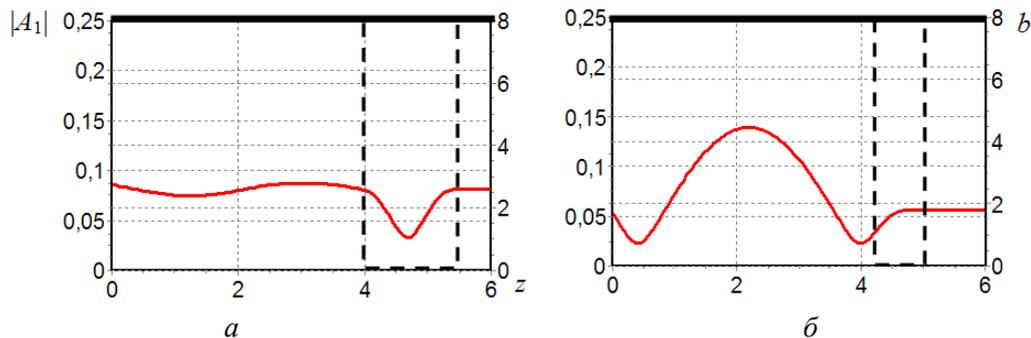


Рис. 3. Прохождение волны через диэлектрическое окно в регулярном волноводе при  $b=8$ ;  $\varepsilon=5$ :  $a$  —  $D_\varepsilon=1,4$ ;  $K=0,007$ ;  $b$  —  $D_\varepsilon=0,7$ ;  $K=0,52$

### Компенсация отражения $H_{01}$ -волны в монотонном рупоре

Для типичного монотонного рупора без диэлектрического окна с входным радиусом  $b_0=5$  было установлено, что при  $b_L = 9 \div 10$  и  $L_v = 10 \div 15$  коэффициент отражения  $K$  не превосходит 0,003. При фиксированном  $b_{L0} = 10$  и увеличении  $L_v \geq 10$  коэффициент отражения колеблется в диапазоне  $K = 0,0023 \div 0,003$ , причем первый минимум  $K=0,0023$  достигается при  $L_v=12,4$ . Из рис. 4 видно, что на выходе рупора величина амплитуд высших парциальных волн  $H_{02}$ ,  $H_{03}$  при этом составляет  $\approx 85\%$  и  $15\%$  от амплитуды основной  $H_{01}$ -волны.

Расчеты показали, что при помещении "прозрачной" для  $H_{01}$ -волны диафрагмы в раскрыве рупора (с толщиной  $D_\varepsilon \approx D_\varepsilon^1$ ) происходит небольшое, примерно в два раза увеличение коэффициента отражения  $K$ , объясняемое отражением от диафрагмы возбуждаемых в рупоре волн с более высоким индексом. При оптимизации параметров  $b_L$ ,  $L_v$  удастся уменьшить коэффициент отражения до значений соответствующих рупору без диэлектрического окна.

На рис. 5 представлено характерное распределение амплитуд  $A_i(z)$  в рупоре при наличии диэлектрического "прозрачного" окна до и после оптимизации.

При наличии отражения перед диафрагмой на амплитудных кривых видны характерные для суперпозиции прямой и обратной волн биения. После диафрагмы амплитуды проходящей волны постоянны, что соответствует полному согласованию.

Естественно, что при помещении в раскрыв рупора "отражающей" диафрагмы ( $D_\varepsilon \neq D_\varepsilon^1$ ) коэффициент отражения рупора будет соответствовать коэффициенту отражения от такой диафрагмы. Расчеты показали, что компенсировать отражение от диэлектрического окна

можно за счет соответствующего выбора параметров  $b_L$ ,  $L_v$  рупора, обеспечивающих минимум коэффициента отражения  $K$ .

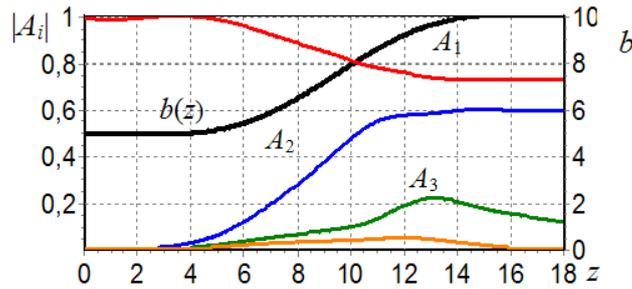


Рис. 4. Амплитуды  $A_i$  волн  $H_{0i}$  в рупоре без диэлектрического окна  $b_0=5$ ;  $b_L=10$ ;  $L_v=12,4$ ;  $K=0,0023$

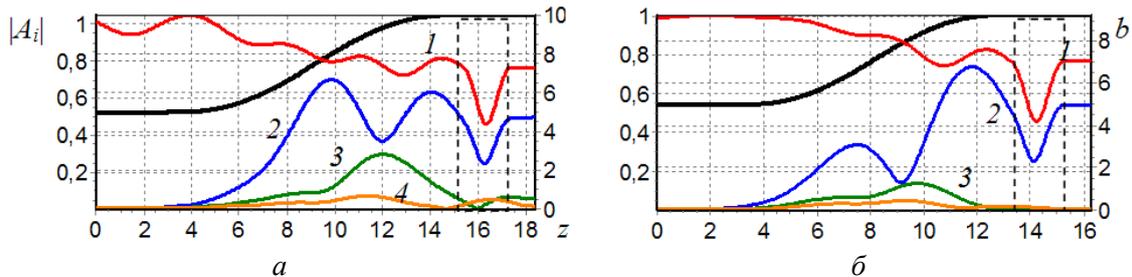


Рис. 5. Рупор с "прозрачным" окном: до оптимизации:  $a$  —  $b_L=10$ ;  $L_v=12,4$ ;  $K=0,0051$ ; после:  $б$  —  $b_L=9,2$ ,  $L_v=10,3$ ;  $K=0,0023$ ;  $b_0=5$ ;  $D_\varepsilon=2$ ,  $\varepsilon=2,5$ ; 1–4 — амплитуды волн, соответственно  $H_{01} \dots H_{04}$

На рис. 6 представлено распределение амплитуд в рупоре с "отражающей" диафрагмой ( $D_\varepsilon \square D_\varepsilon^{0,5}$ ) до и после оптимизации.

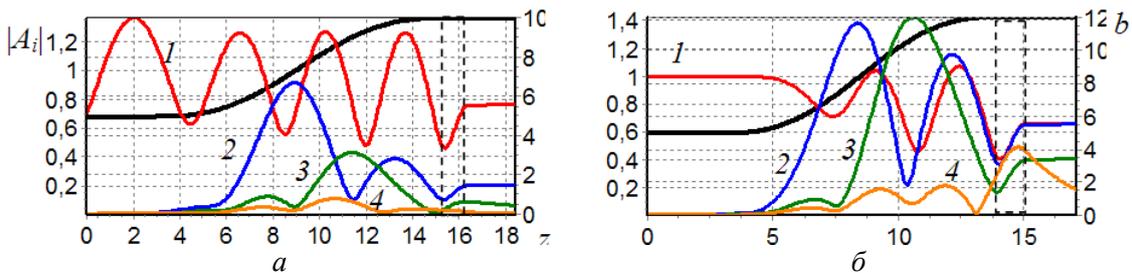


Рис. 6. Рупор с "отражающим" окном: до оптимизации:  $a$  —  $b_L=10$ ;  $L_v=12,4$ ;  $K=0,14$ ; после:  $б$  —  $b_L=12,04$ ;  $L_v=11,09$ ;  $K=0,0023$ ;  $b_0=5$ ;  $D_\varepsilon=1$ ,  $\varepsilon=2,5$ ; 1–4 — амплитуды волн  $H_{01} \dots H_{04}$

Коэффициент отражения волны  $H_{01}$  от такой диафрагмы в регулярном волноводе равен 0,22 (рис. 2). Коэффициент отражения рупора с такой диафрагмой несколько ниже и равен 0,14. Как видно из рис. 6,  $a$ , основное отражение испытывает в этом случае  $H_{01}$ -волна. В результате оптимизации параметров коэффициент отражения оказывается не большим, чем у рупора без диафрагмы. Как видно из рис. 6,  $б$ , в рупоре с такими параметрами происходит переотражение волн между диафрагмой и нерегулярным участком волновода. В результате система "рупор–диафрагма" представляет полуволновой трансформатор, через который волна проходит без отражения.

### Компенсация отражения волны в немонотонном рупоре с диэлектрической диафрагмой при минимизации амплитуд высших мод на апертуре

Как показано в [1], для рупора симметричных  $E$ -волн удается подобрать такой немонотонный профиль, при котором на апертуре отсутствуют высшие моды, что значительно улучшает его коэффициент направленного действия. Выполненные нами расчеты показали, что и

в рупоре симметричных  $H$ -волн также возможно подобрать немонотонный профиль, при котором достигается отсутствие высших мод на апертуре.

Профиль немонотонного рупора зададим в виде

$$b(z) = b_0 + (b_L - b_0)P_5[T] + D_v[T]; \quad T = (z - z_1)/(z_2 - z_1). \quad (4)$$

Здесь функция  $D_v[T]$  определяет отклонение профиля от монотонного и задается в виде разложения  $D_v(T) = \sum_{k=1}^K d_k \varphi_3[T(K+3) - k - 1]$  по сдвигам стандартной финитной функции  $\varphi_3(x)$ , представляющей  $B$ -сплайн Шенберга третьей степени:

$$\varphi_3(x) = \begin{cases} 0, & |x| \geq 2; \\ (2-x)^3/6, & 1 \leq x \leq 2; \\ [1 + 3(1-x) + 3(1-x)^2 - 3(1-x)^3]/6, & 0 \leq x \leq 1; \\ \varphi_3(-x), & x \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Такое представление обеспечивает гладкое сопряжение (непрерывность первой и второй производных) с регулярными отрезками волноводов на входе и апертуре рупора. Параметры профиля рупора  $L_v, b_L, d_1 \dots d_5$  подбирались из условия минимума коэффициента отражения при минимуме амплитуд высших мод на апертуре. Для решения этой двухкритериальной задачи была выбрана целевая функция с весовым коэффициентом  $k_{opt}$  в виде

$$F_c = k_{opt} K + (1 - k_{opt}) \frac{\sum_{i=2 \dots m} |A_i(L)|}{|A_1(L)|}. \quad (6)$$

Вначале был найден профиль рупора без диэлектрического окна, обеспечивающий отсутствие высших мод на апертуре при коэффициенте отражения  $K=0,0023$ . Параметры и форма найденного рупора представлены на рис. 7,а. Длина  $L_v$  и раскрыв  $b_L$  рупора такие же, как у монотонного (рис. 4). Подавление высших мод на апертуре обеспечивается двумя периодами гофрировки профиля.

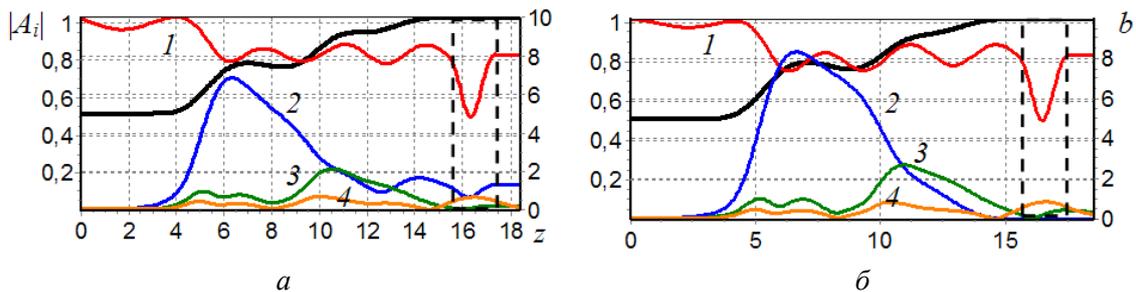


Рис. 7. Немонотонный рупор с "прозрачным" диэлектрическим окном: до оптимизации:  $a$  —  $d_1 \dots d_5 = 2,35; 1,23; -0,30; 0,83; -0,55$ ;  $b_L=10$ ;  $L_v=12,4$ ;  $K=0,0033$ , после:  $b$  —  $d_1 \dots d_5 = 2,54; 1,45; -0,37; 0,54; -0,31$ ;  $b_L=9,90$ ;  $L_v=12,38$ ;  $K=0,0026$ ;  $b_0=5$ ;  $D_\varepsilon=2$ ;  $\varepsilon=2,5$ ; 1-4 — амплитуды волн  $H_{01} \dots H_{04}$

При помещении "прозрачного" диэлектрического окна в такой рупор его коэффициент отражения незначительно возрастает до  $K=0,0033$ , увеличиваются также амплитуды высших мод (рис. 7,а). При небольшой коррекции параметров профиля удается компенсировать рассогласование, вносимое такой диафрагмой. Из рис. 7,б видно, что за счет увеличения первой и уменьшения второй волн гофрировки профиля на апертуре практически отсутствуют высшие моды.

Помещение "отражающей" диафрагмы в рупор с немонотонным профилем, обеспечивающим подавление высших мод на апертуре, не приводит к увеличению амплитуд высших мод на апертуре, однако при этом коэффициент отражения рупора практически равен коэффициенту отражения диафрагмы  $K=0,2$ . Из рис. 8,а видно, что значительное отражение испытыва-

ет лишь основная волна, распределение высших мод остается таким же, как в рупоре без диафрагмы.

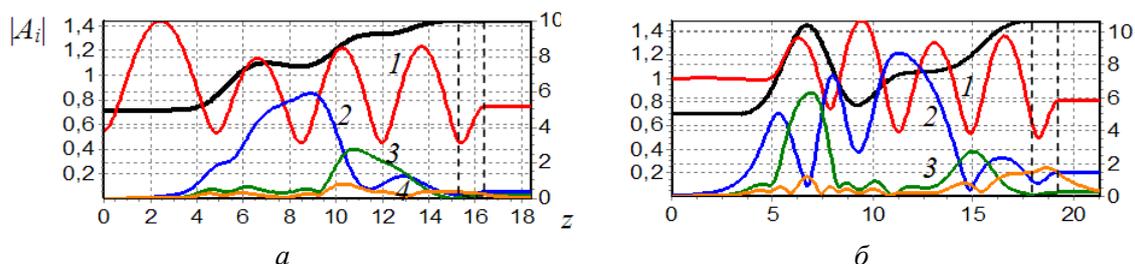


Рис. 8. Преобразование волн в немонотонном рупоре с диэлектриком: до оптимизации:  $a$  —  $a_1 \dots a_5 = 2,35; 1,23; -0,30; 0,83; -0,55$ ;  $b_L = 10$ ;  $L_v = 12,4$ ;  $K = 0,2$ ; после:  $b$  —  $a_1 \dots a_5 = 7,92; -2,93; -0,22; -1,65; -2,44$ ;  $b_L = 10,67$ ;  $L_v = 15,3$ ;  $K = 0,0023$ ;  $b_0 = 5$ ;  $D_\varepsilon = 1$ ;  $\varepsilon = 2,5$ ; 1–4 — амплитуды волн  $H_{01} \dots H_{04}$

Как показали многочисленные расчеты, для компенсации влияния "отражающей" диафрагмы в немонотонном рупоре необходимо введение значительной неоднородности профиля (рис. 8, б). Фактически первый гофр профиля рупора переходит в отражающую канавку, образующую с остальной частью рупора полуволновой трансформатор [3, 4].

### Заключение

Представленные результаты указывают на то, что наличие диэлектрического окна в рупоре симметричных  $H$ -волн может приводить к значительному рассогласованию, причем коэффициент отражения может достигать 20–60% для  $\varepsilon = 2$ –10, если толщина окна не соответствует условию "прозрачности". Однако при этом можно подобрать параметры монотонного рупора таким образом, что за счет переотражений волн в системе рупор–диафрагма коэффициент отражения рупора с диафрагмой останется таким же, как и в рупоре без диафрагмы.

За счет использования немонотонного гофрированного профиля можно обеспечить отсутствие высших мод в раскрыве рупора. Введение "прозрачного" окна практически не изменяет свойств такого рупора. Однако компенсация влияния "отражающего" диэлектрического окна в таком рупоре возможна лишь за счет значительной неоднородности профиля, либо за счет введения рефлектора [2].

## COMPENSATION OF WAVE $H_{01}$ REFLECTION FROM A DIELECTRIC WINDOW ON TO THE HORN APERTURE

O.I. NARANOVICH, A.K. SINITSYN

### Abstract

With use developed before methods and the program of calculation symmetric H waves in an irregular round wave guide with dielectric inserts [3] calculations of factor of reflection of a horn with a dielectric window on the aperture are executed. Conditions at which at the expense of a correct choice of parametres of a horn full indemnification of reflection is realised are found.

### Литература

1. Батура М.П., Кураев А.А., Синицын А.К. Основы теории, расчета и оптимизации современных электронных приборов СВЧ. Минск, 2007.
2. Наранович О.И., Синицын А.К. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 10. С. 57–63.
3. Кураев А.А., Наранович О.И., Синицын А.К. // Докл. БГУИР. № 6 (44) 2009. С. 5–10.
4. Naranovich O.I., Sinitsyn A.K. // IVEC 2009. Rome, Italy. April 28–30, 2009. P. 1.7.