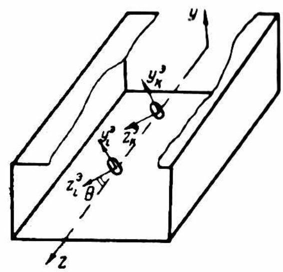
УДК 621.317.784

А. И. СИРОТНИКОВ;
В. С. ЖИЛКОВ, канд. техн. наук;
Н. А. ХИЖНЯК, д-р физ.-мат. наук

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЭКВИДИСТАНТНОГО ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДАТЧИКА СВЧ-МОЩНОСТИ

В последнее время был весьма эффективно решен ряд прикладных задач техники СВЧ с помощью метода интегродифференциальных уравнений, развитого в работах [1—4]. Рассматривались особенности распространения электромагнитных волн в волноводах прямоугольного и круглого сечений при наличии эллипсоидальных неоднородностей. На основе полученных результатов разработана методика расчета трансформаторов полных сопротивлений, экспериментальная проверка которой дала хорошие результаты. Проводился также анализ характеристик пондеромоторных датчиков простейшего типа [5—9]. Имеются сообщения о разработке переходных устройств с широкополосными характеристиками, согласование которых выполнено с помощью цепочки неоднородностей. Таким образом, очевиден интерес исследователей и разработчиков к этому методу анализа характеристик волноводов, нагруженных эллипсоидальными неоднородностями, и возможным приложением результатов.



В настоящей работе рассматривается поведение многоэлементного пондеромоторного датчика СВЧ-мощности с учетом рассеянных элементами датчика полей.

Суммарный момент, действующий на решетку из N одинаковых элементов (см. рисунок), ищем в виде

$$\vec{T}^{\Sigma}=\sum_{k=1}^{N}\vec{T}_k, \tag{1}$$

где момент, действующий на k-й элемент в приближении квазистатики $a \ll \lambda$ [7]:

$$\vec{T}_k=\frac{V}{2}\operatorname{Re}[\vec{P}_k, \vec{E}_k^*]. \tag{2}$$

Соответственно

$\vec{P}_k$— вектор поляризации k-го элемента с учетом взаимного влияния;

$\vec{E}_k$— напряженность электрического поля в точке k в отсутствие k-го эллипсоида.

Вектор поляризации

$$\vec{P}_k=\frac{\varepsilon-1}{4\pi}\vec{E}_{\text{вн}\,k}. \tag{3}$$

Здесь $\vec{E}_{\text{вн}_k}$ — внутреннее поле k-го эллипсоида, выраженное в волноводной системе координат.

В системе, связанной с k-м эллипсоидом, $\vec{E}^{э}_{\text{вн}_k}$ можно определить через поле $\vec{E}_k^э$ [7]

$$\vec{E}^{э}_{\text{вн}_k}=\widehat{Q}\,\vec{E}_k^{э}, \tag{4}$$

где

$$\hat{Q} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{zz} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Для эллипсоидов вида

$$\frac{x_э^2 + y_э^2}{a^2} + \frac{z_э^2}{c^2} = 1 \tag{6}$$

компоненты матрицы $\hat{Q}$

$$Q_{xx} = Q_{yy} = [1 - (\varepsilon - 1) J_0^{200}]^{-1}; \tag{7}$$

$$Q_{zz} = [1 - (\varepsilon - 1) J_0^{002}]^{-1}.$$

Так как поля $\vec{E}_k$ обычно известны в волноводной системе координат, то

$$\vec{E}^э_{вн_k} = \hat{Q}\,\hat{C}\,\vec{E}_k, \tag{8}$$

при этом

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} C_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & C_{yy} & C_{yz} \\ 0 & C_{zy} & C_{zz} \end{bmatrix} - \tag{9}$$

ортогональная матрица перехода от волноводной системы координат к системе координат k-го эллипсоида. Когда все эллипсоиды повернуты под одинаковым углом θ,

$$C_{xx} = 1;\ C_{yy} = C_{zz} = \cos\theta;$$

$$-C_{yz} = C_{zy} = \sin\theta. \tag{10}$$

Переводя $\vec{E}^э_{вн_k}$ из системы эллипсоида в систему волновода с помощью обратной матрицы, из (3) получаем

$$\vec{P}_k = \hat{A}\,\vec{E}_k, \tag{11}$$

где

$$\hat{A} \equiv \frac{\varepsilon - 1}{4\pi}\,\hat{C}^{-1}\,\hat{Q}\,\hat{C}. \tag{12}$$

Поскольку $\hat{C}$ — ортогональная матрица

$$\hat{C}^{-1} = \tilde{\hat{C}}, \tag{13}$$

$$\hat{A} = \frac{\varepsilon - 1}{4\pi}\,\tilde{\hat{C}}\,\hat{Q}\,\hat{C} = \begin{bmatrix} A_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & A_{yy} & A_{yz} \\ 0 & A_{zy} & A_{zz} \end{bmatrix}. \tag{14}$$

Поле $\vec{E}_k$ представляет собой сумму поля в точке k в отсутствие всей системы $\vec{E}_{0k}$ и рассеянного от всех эллипсоидов, за исключением k-го $\sum\limits_{i=1}^{N}{}' \vec{E}_{\text{расс}_{ik}}$, где $\vec{E}_{\text{расс}_{ik}}$ — поле, рассеянное i-м эллипсоидом в точке k; штрих означает суммирование по всем элементам кроме k-го. В этом случае

$$\vec{E}_k = \vec{E}_{0k} + \sum_{i=1}^{N}{}' \vec{E}_{\text{расс}_{ik}}, \tag{15}$$

где

$\vec{E}_{0k} = \vec{E}_{\text{пад}_k}[1 + |\Gamma| e_k^{i\psi}]$ (16) — падающее поле в точке k с учетом коэффициента отражения нагрузки;

$\psi_k = \varphi - 2\beta z_k$ — фаза коэффициента отражения нагрузки в точке k;

$\vec{E}_{\text{пад}_k}$ — падающее поле основной волны в точке k.

В системе координат, связанной с i-м эллипсоидом [8],

$$\vec{E}^{\,\text{э}}_{\text{расс}_{ik}} = \widehat{F}_{ik} \vec{E}^{\,\text{э}}_{\text{вн}_i} \tag{17}$$

и для $l \ll \lambda$ можно показать, что

$$\widehat{F}_{ik} = t_{ik} \widehat{F} = t_{ik} \begin{bmatrix} F_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & F_{yy} & F_{yz} \\ 0 & F_{zy} & F_{zz} \end{bmatrix}; \tag{18}$$

$$F_{xx} = -\frac{(\varepsilon - 1)\, V}{4\pi};$$

$$F_{yy} = \frac{(\varepsilon - 1)\, V}{4\pi} (3 \sin^2 \theta - 1); \tag{19}$$

$$F_{yz} = F_{zy} = -\frac{(\varepsilon - 1)\, V}{4\pi} (3 \sin \theta \cos \theta);$$

$$F_{zz} = \frac{(\varepsilon - 1)\, V}{4\pi} (3 \cos^2 \theta - 1).$$

При этом

$$t_{ik} = \frac{1}{|l_{ik}|^3}; \tag{20}$$

$$l_{ik} = z_i - z_k. \tag{21}$$

Тогда

$$\vec{E}^{\text{э}}_{\text{расс}_{lk}} = t_{lk} \hat{F} \vec{E}^{\text{э}}_{\text{вн}_l}. \tag{22}$$

Переводим $\vec{E}^{\text{э}}_{\text{расс}_{lk}}$ в волноводную систему координат

$$\vec{E}_{\text{расс}_{lk}} = t_{lk} \hat{\tilde{C}} \hat{F} \vec{E}^{\text{э}}_{\text{вн}_l} \tag{23}$$

и запишем $\vec{E}^{\text{э}}_{\text{вн}_l}$ также в волноводной системе координат с помощью (8). Получаем

$$\vec{E}_{\text{расс}_{lk}} = t_{lk} \hat{B} \vec{E}_l. \tag{24}$$

Подставляя (24) в (16), получаем систему N векторных уравнений для определения полей

$$\vec{E}_k = \vec{E}_{0k} + \hat{B} \sum_{l=1}^{N}{}' t_{lk} \vec{E}_l. \tag{25}$$

Здесь

$$\hat{B} = \hat{\tilde{C}} \hat{F} \hat{Q} \hat{C} = \begin{bmatrix} B_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & B_{yy} & B_{yz} \\ 0 & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix}. \tag{26}$$

Рассмотрим в качестве частного случая систему, состоящую из 2-х элементов и расположенную посередине волновода.

Когда эллипсоиды повернуты под углом $\theta=45°$, компоненты матриц $\hat{A}$ и $\hat{B}$ имеют следующий вид:

$$A_{xx} = \frac{\chi_1 - \chi_2}{2};$$

$$A_{yy} = A_{zz} = \frac{\chi_1}{2}; \tag{27}$$

$$A_{yz} = A_{zy} = \frac{\chi_2}{2};$$

$$B_{xx} = -V \frac{\chi_1 - \chi_2}{2};$$

$$B_{yy} = -V \frac{\chi_1}{2}; \tag{28}$$

$$B_{yz} = -V \frac{\chi_2}{2};$$

$$B_{zy} = V\chi_2;$$

$$B_{zz} = V\chi_1,$$

где

$$\chi_1 = \frac{\varepsilon - 1}{4\pi} \{[1 - (\varepsilon - 1) J_0^{002}]^{-1} + [1 - (\varepsilon - 1) J_0^{200}]^{-1}\};$$
$$\chi_2 = \frac{\varepsilon - 1}{4\pi} \{[1 - (\varepsilon - 1) J_0^{002}]^{-1} - [1 - (\varepsilon - 1) J_0^{200}]^{-1}\}. \tag{29}$$

В случае падения доминантного мода $H_{10}^{\square}$ $\vec{E}_{\text{пад}_k}$, имеет только y-компоненту

$$E_{\text{пад}\,k} = -j \frac{kd}{\pi} H_m e^{j\beta z_k}. \tag{30}$$

Тогда для x-компоненты момента

$$T_{k_x} = -\frac{V}{2} Re \{P_{kz} E_{ky}^*\}, \tag{31}$$

где

$$P_{kz} = A_{zy} E_{ky} + A_{zz} E_{kz}. \tag{32}$$

Из (25) находим y- и z-компоненты:

$$E_{ky} - \sum_{l=1}^{N}{}' t_{lk} (B_{yy} E_{ly} + B_{zy} E_{lz}) = E_{0ky}; \tag{33}$$

$$E_{kz} - \sum_{l=1}^{N}{}' t_{lk} (B_{zy} E_{ly} + B_{zz} E_{lz}) = 0.$$

Для двухэлементной решетки

$$E_{1y} + \frac{Vt}{2} (\chi_1 E_{2y} + \chi_2 E_{2z}) = E_{01y};$$
$$E_{1z} - Vt (\chi_2 E_{2y} + \chi_1 E_{2z}) = 0; \tag{34}$$
$$E_{2y} + \frac{Vt}{2} (\chi_1 E_{1y} + \chi_2 E_{1z}) = E_{02y};$$
$$E_{2z} - Vt (\chi_2 E_{1y} + \chi_1 E_{1z}) = 0,$$

где из (20)—(21)

$$t = t_{12} = t_{21} = \frac{1}{l^3}. \tag{35}$$

Отбрасывая в решении (34) все члены порядка $(Vt)^2$ и выше, получаем

$$E_{1y} = E_{01y} - \frac{Vt\chi_1}{2} E_{02y};$$
$$E_{2y} = E_{02y} - \frac{Vt\chi_1}{2} E_{01y}. \tag{36}$$

Тогда из (32) и (27)

$$P_{1z} = \frac{\chi_2}{2} E_{1y};$$
$$P_{2z} = \frac{\chi_2}{2} E_{2y}. \tag{37}$$

Далее путем несложных преобразований получаем

$$T^{\Sigma} = -8\pi \frac{V\chi_2}{vdh} \left(\frac{k\Pi}{\beta}\right) \left\{1 - \frac{V\chi_1}{l^3} \cos\beta l + 2|\Gamma| \left(\cos\beta l - \frac{V\chi_1}{l^3}\right) \times \right.$$
$$\left. \times \cos(\psi_1 + \beta l) + |\Gamma|^2 \left(1 - \frac{V\chi_1}{l^3} \cos\beta l\right)\right\}; \tag{38}$$

а так как $l \ll \lambda$, то

$$T^{\Sigma} = -8\pi \frac{V\chi_2}{sdh} \left(1 - \frac{V\chi_1}{l^3}\right) \left(\frac{k\Pi}{\beta}\right) (1 + 2|\Gamma| \cos\psi_1 + |\Gamma|^2). \tag{39}$$

Следует отметить, что при уменьшении l формулы остаются справедливыми лишь до тех пор, пока $\frac{V\chi}{l_3} < 1$.

Итак, получены общие соотношения, позволяющие рассчитать момент пондеромоторных сил, действующих на датчики с произвольным числом элементов, с учетом рассеянных каждым элементом датчика полей, т. е. взаимного влияния элементов датчика друг на друга.

При увеличении l формула (38) переходит в известное соотношение [6] без учета взаимного влияния.

Метод позволяет учесть влияние высших типов волн, возникающих при рассеянии падающей волны на каждом из элементов датчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хижняк Н. А. Рассеяние электромагнитных волн на малых телах в волноводах. — Сб. «Радиотехника». Вып. 4, Харьков,1967, с. 88—97.
2. Хижняк Н. А. Теория волноводов, нагруженных полубесконечной цепочкой однородных рассеивающих тел. — Сб. «Радиотехника». Вып. 15. Харьков, 1970, с. 93—97.
3. Попов В. А., Хижняк Н. А. Теория резонаторов, нагруженных резонансным возмущающим телами. — Сб. «Радиотехника», Вып. 21. Харьков, 1972, с. 117—130.
4. Украинец Н. И., Хижняк Н. А. Особенности резонансного рассеяния электромагнитных волн на эллипсоидальной неоднородности в прямоугольном волноводе. — Сб. «Радиотехника», Вып. 25, Харьков, 1973, с. 105—113.
5. Жилков В. С., Сиротников А. И., Хижняк Н. А. О погрешности однопластинчатого пондеромоторного ваттметра, обусловленной высшими типами волн. — Сб. «Радиотехника», Вып. 21, Харьков, 1972, с. 165—169.

6. Жилков В. С., Сиротников А. И. О погрешности двухпластинчатого пондеромоторного ваттметра, обусловленной высшими типами волн.— Сб. «Радиотехника», Вып. 22, Харьков, 1972, с. 100—102.

7. Хижняк Н. А. Расчет пондеромоторных сил. Отчет о НИР № 594. ХГУ, 1971. 64 с.

8. Момент пондеромоторных сил, действующих на систему двух жестко связанных тел правильной формы в прямоугольном волноводе. — Сб. «Радиотехника». Вып. 26. Харьков, 1973, с. 105—117. Авт.: Н. А. Хижняк, Л. К. Гал, В. С. Жилков и др.

9. Сиротников А. И., Жилков В. С., Хижняк Н. А. Пондеромоторное действие электромагнитного поля на диэлектрический эллипсоид с потерями. — Сб. «Радиотехника». Вып. 29. Харьков, 1974, с. 146—148.

10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1957, 532 с.