

УДК 677.025.6 : 537.311.4

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА  
УСРЕДНЕННЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ  
ДЛЯ РАСЧЕТА РАДИООТРАЖАЮЩИХ СВОЙСТВ  
МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КУЛИРНОГО ТРИКОТАЖА**

*Л. А. КУДРЯВИН, О. Ф. БЕЛЯЕВ, В. В. БОРОВКОВ, В. А. ЗАВАРУЕВ,  
А. В. ТИМАШЕВ*

(Московская государственная текстильная академия им. А. Н. Косыгина)

Во многих устройствах антенной техники радиоотражающими поверхностями служат металлические трикотажные сетки, для проектирования которых с оптимальными радиоотражающими свойствами необходима теоретическая оценка влияния различных факторов на эти свойства. Однако вследствие сложной в основном петельной структуры сеток такая оценка весьма затруднительна.

С учетом изложенного ограничимся рассмотрением наиболее простого случая — кулирного металлического трикотажа переплетения гладь, геометрическая модель которого с включением электросопротивлений элементов петельной структуры приведена на рис. 1, а на рис. 2 — упрощенная эквивалентная электрическая схема [1]. Повторяющийся элемент структуры (петля) выделен на рис. 2 штриховым прямоугольником:  $R_d$ ,  $R_{np}$ ,  $R_{пп}$  — электросопротивления элементов соответственно петли — игольной дуги, протяжки, петельной палочки;  $R_k$  — контактное сопротивление между элементами петельной структуры.

Расчеты радиоотражающих свойств металлических трикотажных

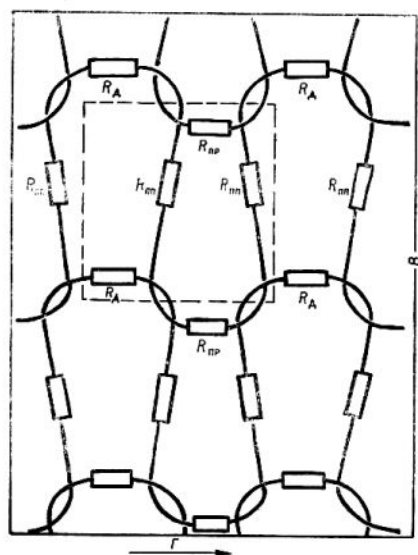


Рис. 1.

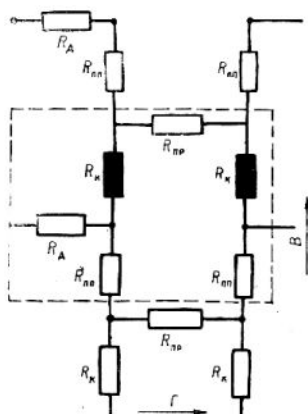


Рис. 2.

полотен отсутствуют, а разработка новой теории или совершенствование известной довольно трудоемко. Более простой путь заключается в модификации поставленной задачи с целью сведения ее к известному решению, например, формальному рассмотрению кулирного трикотажа как системы взаимно перпендикулярных параллельных проводников (ветвей), расстояния  $a$  и  $b$  (рис. 3) между которыми соответствуют размерам ячеек трикотажа (рис. 1), причем диаметры проводников  $d$  в обоих случаях одинаковы. Контактное сопротивление между взаимно перпендикулярными проводниками можно считать равным нулю, а между элементами структуры кулирного трикотажа учесть в сопротивлении отдельных ветвей.

Согласно [1] нетрудно показать, что структура, изображенная на рис. 3, по электрическим свойствам эквивалентна сетке из кулирного трикотажа, если в ней каждый метр длины проводников, параллельных осям  $Y$  и  $X$ , имеет сопротивление соответственно

$$R_{1Y} = (R_K + R_{\text{шт}}) / b,$$

$$R_{1X} = [R_{\text{пр}} + R_d + 2R_K R_{\text{шт}} / (R_K + R_{\text{шт}})] / (2a).$$

Размеры ячеек  $a$  и  $b$  удобно выразить через плотность трикотажа по горизонтали  $\Pi_{\Gamma}$  и по вертикали  $\Pi_{\text{в}}$  (число петель на длине 0,1 м):

$$a = 0,1 / (\Pi_{\Gamma}); \quad b = 0,1 / \Pi_{\text{в}}.$$

Обозначая сопротивление 1 м проводника сетки через  $R_0$  и учитывая, что

$$R_{\text{шт}} = R_0 b, \quad \text{а} \quad R_{\text{пр}} + R_d = R_0 \cdot 2a,$$

окончательно получаем

$$R_{1Y} = 10R_K \Pi_{\text{в}} + R_0,$$

$$R_{1X} = [1 + 2R_K \Pi_{\Gamma} / (R_K \Pi_{\text{в}} + 0,1R_0)] R_0.$$

Пусть на сетку (рис. 3) падает электромагнитная волна, в которой колеблются векторы напряженностей электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей. Переменные токи, возникающие в проводниках сетки под действием падающей на сетку электромагнитной волны, являются источником прямой и обратной электромагнитных волн, распространяющихся в обе стороны от сетки. Обратная волна образует отраженную электромагнитную волну. Отношение амплитудного значения вектора  $E$  в отраженной волне к его амплитудному значению в падающей волне называется коэффициентом отражения (иногда под коэффициентом отражения понимают отношение интенсивностей отраженной и падающей электромагнитных волн, поскольку интенсивность волны прямо пропорциональна квадрату амплитуды, этот коэффициент получается путем возведения предыдущего коэффициента в квадрат).

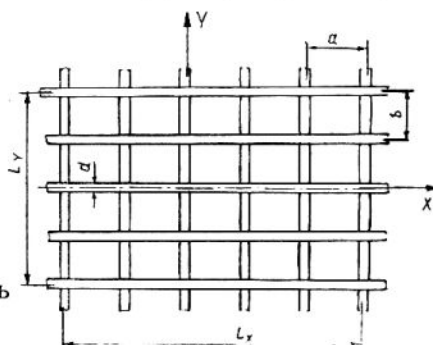


Рис. 3.

Коэффициенты отражения рассчитывают обычно только в двух случаях — при так называемых  $E$ - и  $H$ -поляризациях. При  $E$ -поляризации падающей волны вектор  $E$  колеблется в плоскости падения волны, а при  $H$  — в плоскости, перпендикулярной последней (в плоскости падения расположены вектор направления распространения волны и перпендикуляр к сетке).

Для расчета коэффициентов отражения от проводящих сеток часто используют метод усредненных граничных условий (метод УГРУ) [2, 3], сущность которого заключается в замене сетчатой поверхности с реальными токами и зарядами сплошной металлической поверхностью с непрерывным распределением токов и зарядов («сглаженные» токи и заряды, значения которых зависят от структуры сетки), создающих во внешнем пространстве поля  $E$  и  $H$  («сглаженные» поля), обеспечивающие на некотором расстоянии от сетки равенство сглаженных и реальных полей. При этом полагается, что размеры ячеек  $a$  и  $b$  много больше диаметра  $d$  проводников, но значительно меньше длины  $\lambda$  волны. Формулы [2, 3] для расчета коэффициентов  $R$  отражения от сеток, аналогичных изображенной на рис. 3, выведены при условии, что провода, расположенные параллельно осям  $X$  и  $Y$ , имеют одинаковые сопротивления. В случае контактных сопротивлений между взаимно перпендикулярными проводниками сетки, равных нулю, формулы принимают вид

$$R_{\parallel}^e = \{\cos\Theta + i\cos^2\Theta[\kappa_2\cos^2\varphi + \kappa_1\sin^2\varphi + (\delta_1 + \delta_2)\sin\varphi\cos\varphi]\}I^{-1},$$

$$R_{\perp}^e = i\cos\Theta[\delta_2\cos^2\varphi - \delta_1\sin^2\varphi + (\kappa_1 - \kappa_2)\sin\varphi\cos\varphi]I^{-1},$$

$$R_{\perp}^h = -i\cos\Theta[\delta_1\cos^2\varphi - \delta_2\sin^2\varphi + (\kappa_1 - \kappa_2)\sin\varphi\cos\varphi]I^{-1},$$

$$R_{\parallel}^h = -\{\cos\Theta + i[\kappa_2\sin^2\varphi + \kappa_1\cos^2\varphi - (\delta_1 + \delta_2)\sin\varphi\cos\varphi]\}I^{-1},$$

где  $I_0 = \cos\Theta(1 - \kappa_1\kappa_2 + \delta_1\delta_2) + i\{\kappa_1 + \kappa_2 - \sin^2\Theta[\kappa_2\cos^2\varphi + \kappa_1^2\sin^2\varphi + (\delta_1 + \delta_2)\sin\varphi\cos\varphi]\}$ ;

$$\kappa_1 = \kappa_{10}[1 + F_X - \sin^2\Theta\cos^2\varphi a/(a+b)];$$

$$\kappa_2 = \kappa_{20}[1 + F_Y - \sin^2\Theta\sin^2\varphi b/(a+b)];$$

$$\delta_1 = \kappa_{10}\sin\Theta\sin^2\varphi\cos\varphi a/(a+b);$$

$$\delta_2 = \kappa_{20}\sin^2\Theta\sin\varphi\cos\varphi b/(a+b);$$

$$\kappa_{10} = 2b\lambda^{-1}\ln[b/(\pi d)];$$

$$\kappa_{20} = 2a\lambda^{-1}\ln[a/(\pi d)];$$

$$F_X = \mu f(\rho)/\{4\ln[b/(\pi d)]\};$$

$$F_Y = \mu f(\rho)/\{4\ln[a/(\pi d)]\}.$$

Параметр  $P$ , влияющий на функцию  $f(\rho)$ ,

$$\rho = d/(4\Delta),$$

где  $\Delta = \sqrt{2/(\omega\mu\mu_0\sigma)}$  — толщина скин-слоя;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  — магнитная постоянная, Гн/м;

$\mu$  — относительная магнитная проницаемость;

$\omega$  — циклическая частота падающей электромагнитной волны;

$\sigma$  — удельная проводимость материала проводника сетки.

В предельных случаях сильного и слабого скин-эффекта  $f(p)$  упрощается:

$$f(p) = \begin{cases} 1 - i/p & \text{для малых } p \text{ (слабый скин-эффект);} \\ (1 - i)/p & \text{для больших } p \text{ (сильный скин-эффект);} \\ 0 & \text{при } \sigma = \infty \text{ (идеальный проводник).} \end{cases}$$

В приведенных выражениях  $\Theta$  — угол падения (угол между направлением распространения волны и перпендикуляром к сетке),  $\varphi$  — угол между плоскостью падения и осью  $X$ ;  $e$  и  $h$  при коэффициентах  $R$  приписываются согласно  $E$ - и  $H$ -поляризациям падающей волны, а индексы соответствуют расположению отраженной компоненты вектора  $E$  в плоскости падения или перпендикулярно ей.

Для использования приведенных формул в нашем конкретном случае необходимо внести некоторые изменения, в первую очередь, в отношении толщины скин-слоя.

В этих целях перейдем к эффективной проводимости  $\sigma_{\text{эфф}}$  проводника, определяемой по формуле для обычной проводимости:  $\sigma = 1/(R_1 S)$ , где  $R_1$  — сопротивление единицы длины проводника,  $S$  — площадь поперечного сечения проводника, но здесь  $R_1$  заменяются на  $R_{1Y}$  или  $R_{1X}$ , вычисляемыми по приведенным формулам. Тогда для ветвей, параллельных осям  $Y$  и  $X$ , для толщины скин-слоя получим соответственно

$$\Delta_Y = \sqrt{R_{1Y} \pi d^2 / (2\omega \mu_0)},$$

$$\Delta_X = \sqrt{R_{1X} \pi d^2 / (2\omega \mu_0)}.$$

Поскольку меняются выражения для толщины скин-слоя и последний становится разным для проводников, ориентированных вдоль осей  $X$  и  $Y$ , принимаются различные выражения для параметра  $p$  проводников:  $p_X = d/(4\Delta_X)$ ;  $p_Y = d/(4\Delta_Y)$ , которые используются для расчета соответственно  $F_X$  и  $F_Y$ . Остальные выражения не изменяются.

По полученным формулам рассчитаны зависимости коэффициентов отражения электромагнитной волны от сопротивления материала проводников, из которых изготовлена сетка, от контактного сопротивления между ними, плотности трикотажа по вертикали и горизонтали, диаметра проводников, ориентации плоскости падения волны относительно оси  $X$  и т. д. Результаты расчетов позволяют для конкретного материала построить, например, зависимости коэффициентов отражения от плотности сетки по вертикали и горизонтали и выбрать значения параметров, обеспечивающих заданные коэффициенты отражения и их допустимую анизотропию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявин Л. А. и др. // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. — 1988, № 5.
2. Астрахан М. И. // Радиотехника. — 1968. Т. 23, № 1.
3. Электродинамика сетчатых структур / М. И. Конторович и др. — М.: Радио и связь, 1987.

Рекомендована кафедрой трикотажного производства. Поступила 06.12.96.