

*Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей, Н. С. Гоза*

## МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ СВОЙСТВ ПЕТЛЕВЫХ РАМОЧНЫХ АНТЕНН ПРЯМОУГОЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

*На основе развитого авторами теоретического подхода проведены модельные исследования направленных свойств петлевых рамочных антенн прямоугольной конфигурации при различном соотношении длин сторон. Проведено сравнение полученных результатов с известными экспериментальными значениями исследованных параметров для петлевого вибратора Пистолькорса, которое показало, что теоретический подход, заложенный в основу модельных исследований, является адекватным и может быть распространен на любую проволочную антенную систему замкнутого типа.*

*Model evaluation of the directed properties of rectangular loops with different form coefficient is carried out on the basis of theoretical approach, developed by authors. Comparison of the received results with known experimental values of the studied parameters for Pistolcors's loopback vibrator is carried out. Comparison showed that theoretical approach in the basis of model researches is adequate and can be used for any wire antenna system of self-contained type.*

**Ключевые слова:** диаграмма направленности, петлевая рамочная антенна, действующая длина, коэффициент направленного действия, сопротивление излучения.

**Key words:** field pattern, loop, effective length, directivity, radiation resistance.

Анализ ряда научно-технических источников [1–8], проведенный авторами, показал, что петлевые рамочные антенны находят широкое применение при решении задач радиопеленгации, измерения индустриальных радиопомех в ультракоротковолновом диапазоне (УКВ), приема телевизионных сигналов, приема в цифровых сетях 3G, Wi-Fi, при организации беспроводной высокочастотной связи малого радиуса действия (NFC). До настоящего времени разработка рамочных антенн



производилась применительно к решению конкретных радиотехнических задач на основе экспериментальных данных. Таким образом, отсутствовала стройная теория, позволяющая проводить системный анализ основных параметров петлевых рамочных антенн на стадии их проектирования и эксплуатации.

Известен общий теоретический подход [9] в оценке поля излучения системы линейных излучателей в дальней зоне, который описывается выражениями следующего вида:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{m\theta} &= -\frac{je^{-jkr_0}}{2\lambda r_0} \rho (N_x \cos \theta \cos \varphi + N_y \cos \theta \sin \varphi - N_z \sin \theta), \\ \dot{E}_{m\varphi} &= \frac{je^{-jkr_0}}{2\lambda r_0} \rho (N_x \sin \varphi - N_y \cos \varphi), \end{aligned}$$

где  $j$  – мнимая единица;  $k$  – волновое число;  $r_0$  – расстояние от начала системы координат до точки наблюдения в дальней зоне;  $\lambda$  – длина волны;  $\rho = 120\pi$  Ом – волновое сопротивление вакуума. В выражениях введены обозначения:

$$\begin{aligned} N_x &= \int_{\xi} I_m(\xi) \exp(jk\Delta r) \cos(\xi, x) d\xi, \quad N_y = \int_{\xi} I_m(\xi) \exp(jk\Delta r) \cos(\xi, y) d\xi, \\ N_z &= \int_{\xi} I_m(\xi) \exp(jk\Delta r) \cos(\xi, z) d\xi, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $I_m(\xi)$  – амплитудное распределение тока в элементах антенной системы;  $\Delta r$  – разность хода лучей до точки наблюдения из начала системы координат и от элемента тока на поверхности проводника, а  $\cos(\xi, x)$ ,  $\cos(\xi, y)$  и  $\cos(\xi, z)$  – направляющие косинусы для оси  $\xi$ , направленной вдоль проводника с током.

В данной работе рассмотрено применение указанного подхода к исследованию направленных свойств петлевых прямоугольных рамочных антенн (рис. 1) с различным соотношением длин сторон рамки в условии тонкопроволочного приближения с косинусоидальным законом распределения амплитуды тока вдоль нее:

$$I_m(z) = I_{mn} \cos\left(k\left[2(l_{np} + l_{nop}) - \xi\right]\right), \tag{2}$$

где  $I_{mn}$  – амплитуда тока в пучности;  $2l_{np}$  и  $2l_{nop}$  – продольный и поперечный размеры рамки.

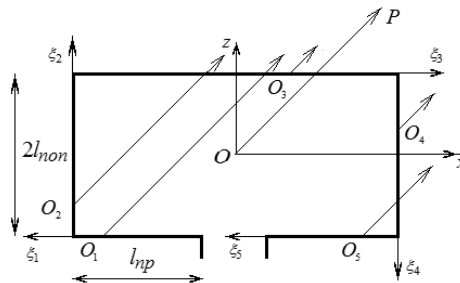


Рис. 1. Петлевая прямоугольная рамочная антенна



Для определения поля излучения антенны в дальней зоне она была разбита на пять прямолинейных проводников с током и проведено вычисление интегралов (1) с учетом амплитудного распределения тока (2). Ненулевые интегралы (1) были определены в виде:

$$N_{x1} = \frac{I_{mn}}{jk} \cdot \frac{\exp(-jkl_{\text{нон}} \cos(\theta))}{1 - \sin^2(\theta) \cos^2(\varphi)} \left\{ [\cos(4kl) \sin(\theta) \cos(\varphi) - j \sin(4kl)] - \right. \\ \left. - \exp(-jkl_{\text{np}} \sin(\theta) \cos(\varphi)) \left\{ \cos[k(4l - l_{\text{np}})] \sin(\theta) \cos(\varphi) - j \sin[k(4l - l_{\text{np}})] \right\} \right\},$$

$$N_{z2} = \frac{I_{mn}}{jk} \cdot \frac{\exp(-jkl_{\text{np}} \sin(\theta) \cos(\varphi))}{\sin^2(\theta)} \times \\ \times \left\{ -\exp(jkl_{\text{нон}} \cos(\theta)) [\cos(kl_{\text{np}}) \cos(\theta) + j \sin(kl_{\text{np}})] + \right. \\ \left. + \exp(-jkl_{\text{нон}} \cos(\theta)) \right\} [\cos[k(4l - l_{\text{np}})] \cos(\theta) + j \sin[k(4l - l_{\text{np}})]] \Big\},$$

$$N_{x3} = \frac{2I_{mn}}{k} \cdot \frac{\exp(jkl_{\text{нон}} \cos(\theta))}{1 - \sin^2(\theta) \cos^2(\varphi)} \left\{ \sin(kl_{\text{np}}) \cos(kl_{\text{np}} \sin(\theta) \cos(\varphi)) - \right. \\ \left. - \cos(kl_{\text{np}}) \sin(kl_{\text{np}} \sin(\theta) \cos(\varphi)) \sin(\theta) \cos(\varphi) \right\},$$

$$N_{z4} = \frac{I_{mn}}{jk} \cdot \frac{\exp(jkl_{\text{np}} \sin(\theta) \cos(\varphi))}{\sin^2(\theta)} \times \\ \times \left\{ -\exp(-jkl_{\text{нон}} \cos(\theta)) [\cos[k(4l - l_{\text{np}})] \cos(\theta) + j \sin[k(4l - l_{\text{np}})]] \right. \\ \left. + \exp(jkl_{\text{нон}} \cos(\theta)) [\cos(kl_{\text{np}}) \cos(\theta) + j \sin(kl_{\text{np}})] \right\},$$

$$N_{x5} = \frac{I_{mn}}{jk} \cdot \frac{\exp(-jkl_{\text{нон}} \cos(\theta))}{1 - \sin^2(\theta) \cos^2(\varphi)} \left\{ \exp(jkl_{\text{np}} \sin(\theta) \cos(\varphi)) \times \right. \\ \times [\cos[k(4l - l_{\text{np}})] \sin(\theta) \cos(\varphi) + j \sin[k(4l - l_{\text{np}})]] + \\ \left. + [\cos(4kl) \sin(\theta) \cos(\varphi) + j \sin(4kl)] \right\},$$

где  $l = (l_{\text{np}} + l_{\text{нон}}) / 2$  — средний размер стороны рамки.

Данные интегралы позволили в аналитическом виде записать меридиональную и азимутальную компоненты электрического поля в виде:

$$\dot{E}_{m\theta} = -\frac{j e^{-jkr_0}}{2\lambda r_0} \rho \left( (N_{x1} + N_{x3} + N_{x5}) \cos \theta \cos \varphi - (N_{z2} + N_{z4}) \sin \theta \right),$$

$$\dot{E}_{m\varphi} = \frac{j e^{-jkr_0}}{2\lambda r_0} \rho (N_{x1} + N_{x3} + N_{x5}) \sin \varphi.$$

Амплитудная характеристика направленности петлевой рамочной антенны была определена как

$$E_m(\theta, \varphi) = \sqrt{|\dot{E}_{m\theta}|^2 + |\dot{E}_{m\varphi}|^2}.$$



На основе полученных аналитических выражений произведены модельные исследования направленных свойств петлевых прямоугольных рамочных антенн с различным соотношением сторон в среде MathCAD. На рисунке 2 слева направо приведены амплитудные нормированные диаграммы направленности (ДН) в вертикальной плоскости, содержащей рамку (а), вертикальной плоскости, перпендикулярной рамке (б) и горизонтальной плоскости (в) для различных значений соотношения длин сторон рамки.

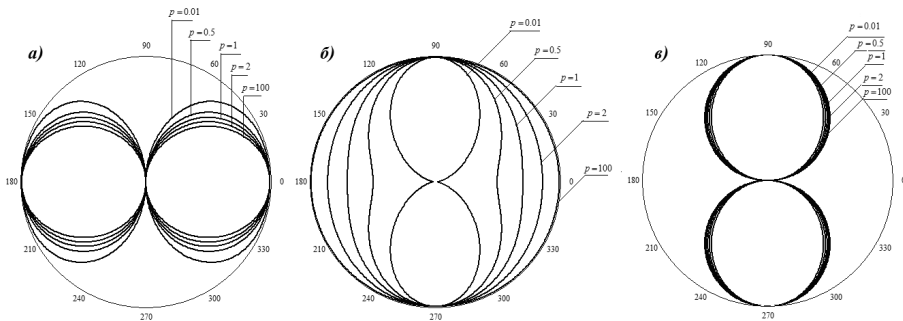


Рис. 2. Амплитудные нормированные диаграммы направленности петлевых волновых прямоугольных рамочных антенн в трех главных плоскостях

Амплитудная ДН в плоскости  $XOZ$  имеет вид восьмерки, ширина которой при увеличении параметра  $p = l_{np} / l_{поп}$  уменьшается. В плоскости  $YOZ$  форма ДН изменяется от вытянутой восьмерки при значении параметра  $p = 0,01$  до окружности при значении параметра  $p = 100$ . Направленные свойства рамочной антенны в плоскости  $XOY$  остаются практически неизменными и при любом соотношении сторон прямоугольной рамочной антенны ДН имеет вид восьмерки с максимумами, приходящимися на направление, перпендикулярное плоскости рамки, и минимумами, лежащими в плоскости рамки.

Действующая длина была определена путем сопоставления амплитуды поля в дальней зоне, создаваемого данной антенной и эквивалентом (элементарным магнитным диполем):

$$L_d = \frac{E_{max} \cdot r_0}{30k \cdot I_{mn}},$$

где  $E_{max}$  — максимальная величина напряженности электрического поля, создаваемого антенной в дальней зоне.

На рисунке 3 приведен график зависимости действующей длины рамочной антенны от параметра  $p$ , анализ которого показывает, что действующая длина увеличивается нелинейно с увеличением параметра  $p$ , а начиная со значения  $p = 10$  — остается практически неизменной и стремится к  $2\lambda/\pi$ , что соответствует действующей длине полу-волнового вибратора Пистолькорса.

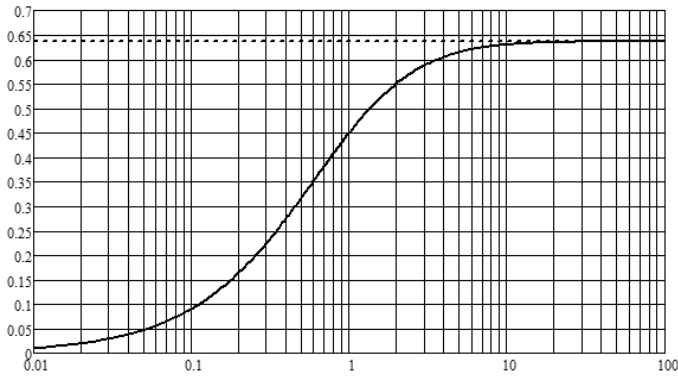


Рис. 3. Зависимость действующей длины от параметра  $p$ : по оси абсцисс отложено значение параметра  $p$ ; по оси ординат — значение действующей длины в единицах длин волн

Коэффициент направленного действия (КНД) был определен как

$$D = \frac{4\pi \cdot E_{max}^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |\dot{E}_m(\theta, \varphi)|^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi}.$$

На рисунке 4 приведен график зависимости КНД антенны от параметра  $p$ , анализ которого показывает, что КНД уменьшается нелинейно с увеличением параметра  $p$ . При значении параметра  $p = 0,01$  КНД максимален, а при значении параметра  $p = 100$  — принимает минимальное значение, в силу того, что в вертикальной плоскости, перпендикулярной рамке, среднее значение интенсивности поля излучения оказывается больше, чем соответствующее значение интенсивности поля при других значениях параметра  $p$ .

Сопротивление излучения было определено по методу интегрирования вектора Пойнтинга:

$$R_{\Sigma} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{|\dot{E}_m(\theta, \varphi)|^2}{120\pi \cdot I_m^2} \cdot r_0^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi.$$

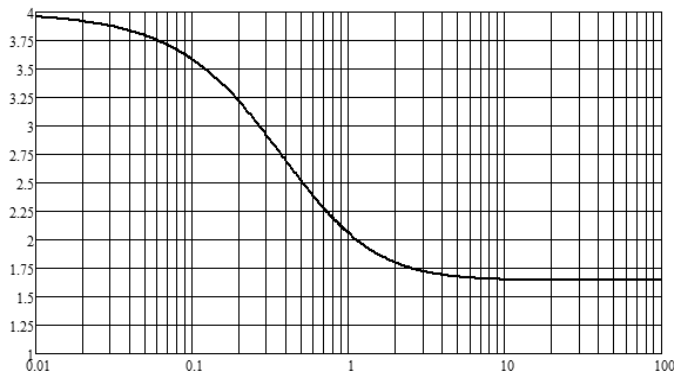


Рис. 4. Зависимость КНД от параметра  $p$ : по оси абсцисс отложено значение параметра  $p$ ; по оси ординат — значение КНД в раз



На рисунке 5 приведен модельный график зависимости сопротивления излучения от параметра  $p$ .

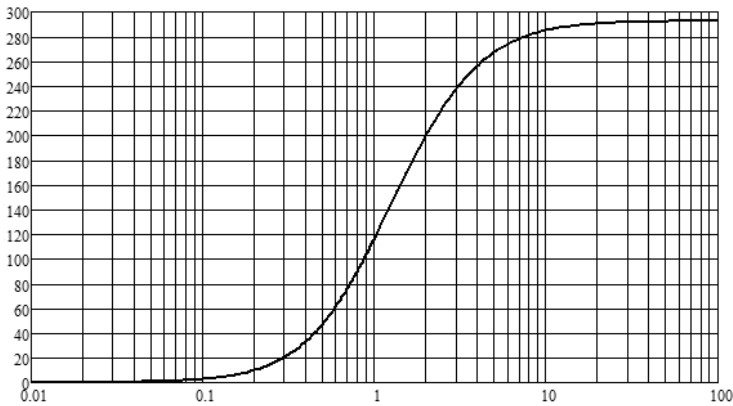


Рис. 5. Зависимость сопротивления излучения от параметра  $p$ :  
по оси абсцисс отложено значение параметра  $p$ ;  
по оси ординат – значение сопротивления излучения (Ом)

Из приведенной графической зависимости следует, что при увеличении параметра  $p$  сопротивление излучения увеличивается и в пределе, при  $p = 100$ , составляет величину  $\approx 290$  Ом, что соответствует сопротивлению излучения петлевого вибратора Пистолькорса.

Таким образом, результаты модельных исследований подтверждают известные экспериментальные значения исследованных параметров, а значит, теоретический подход, заложенный в основу модельных исследований, является адекватным и может быть распространен на любую проволочную антенную систему замкнутого типа.

#### Список литературы

1. Колонтаевский Ю. Ф. Радиотехника : учеб. пособие для СПТУ. М., 1988.
2. Блантер С. Г. Радиотехника и электроника. Л., 1960.
3. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М., 1972.
4. Фастовский И. А. Типовые приборы для измерения промышленных радиопомех. Л., 1958.
5. Сифоров В. И. Радиоприемные устройства. М., 1954.
6. Бриллиантов Д. П., Куликов Б. Н., Роксман М. А. Переносные цветные телевизоры : справ. М., 1996.
7. Сотников С. К. Описание двухэлементных рамочных антенн // Радио. 1959. Вып. 4. С. 31–32.
8. Харченко К. П. УКВ антенны. М., 1969.
9. Дробикин А. Л., Зузенко В. Л. Антенно-фидерные устройства. М., 1961.

#### Об авторах

Елена Вячеславовна Волхонская – д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: volkhonskaya\_e@mail.ru



Евгений Владимирович Коротей – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: eugeny\_korotey@mail.ru

Наталья Сергеевна Гоца – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: zarnicyna1991@mail.ru

#### **About the authors**

Prof. Elena Volkhonskaya – I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: volkhonskaya\_e@mail.ru

Evgeny Korotey – lecturer, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: eugeny\_korotey@mail.ru

Nataliya Goza – undergraduate, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: zarnicyna1991@mail.ru