

**ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕКТЕНН КВЧ-ДИАПАЗОНА**

В данной работе изложены результаты численных исследований потенциальных характеристик ректенны, работающей на частоте 35 ГГц. Излучатели приемно-выпрямительных элементов ректенны представляют собой сеточную микрополосковую структуру, нанесенную на GaAs-подложку и интегрированную с бескорпусными диодами Шоттки (рис. 1).

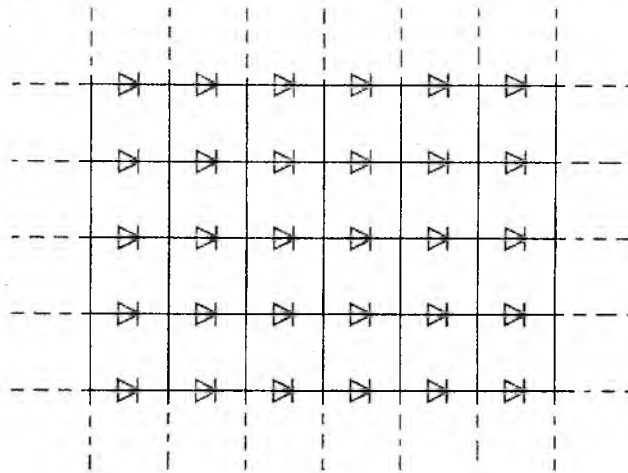


Рис. 1

Подобные ректенны в перспективе могут устанавливаться на космических летательных аппаратах, управляемых микроволновым лучом [1].

При исследованиях применялась методика анализа крупноапертурных ректенн с корпусными диодами, которая детально описана в работах [2, 3]. Согласно этой методике, анализ ректенны в приближении бесконечной антенной решетки был сведен к анализу одной ячейки периодичности (ячейка Флоке). Эквивалентная схема ячейки Флоке приведена на рис. 2 а.

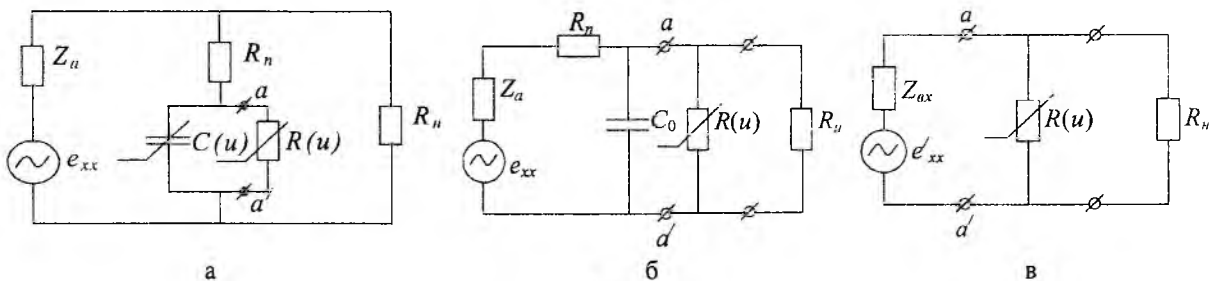


Рис. 2

Здесь:  $e_{xx}$  – ЭДС, наводимая полем плоской волны в точках подключения диода;  $Z_a = R_a + jX_a$  – входное сопротивление излучателя ячейки;  $R(u)$ ,  $C(u)$  – нелинейные сопротивление и емкость диода;  $R_n$  – сопротивление потерь диода;  $R_n$  – сопротивление нагрузки по постоянному току.

Далее, как и в [2], применялись следующие приближения:  $C(u) = C_0 = const$  и  $R_n \ll R(f_1)$ , где  $R(f_1)$  – усредненное сопротивление диода на первой гармонике. Эти приближения позволили перейти к анализу схемы рис. 2 б, а затем и к анализу схемы рис. 2 в. На рис. 2 в под  $Z_{ax}$  и  $e_{xx}$  понимаются такие величины:

$$Z_{ax} = (Z_a + R_n) \frac{1}{j\omega C_0} / (Z_a + R_n + \frac{1}{j\omega C_0}), \tag{1}$$

$$e'_{xx} = e_{xx} / \left( Z_a + R_n + \frac{1}{j\omega C_0} \right) \quad (2)$$

Исследованию подлежали: КПД выпрямления ректенны  $\eta = P_0/P_a$  ( $P_0$  – мощность постоянного тока в нагрузке ячейки,  $P_a$  – максимальная мощность, извлекаемая излучателем ячейки из свободного пространства), а также уровни фильтрации  $n$ -тых гармоник основной частоты  $\zeta_n = 10 \lg(P_n/P_a)$ , где  $P_n$  – мощность излучения ректенны на частоте гармоники с номером  $n$ .

Вначале были изучены условия достижения максимума КПД выпрямления в предположении, что в ректенне используется диод Шоттки с допустимой входной мощностью  $P_s = 0,06$  Вт, параметрами  $C_0 = 80 \cdot 10^{-15}$  Ф,  $R_n = 7,5$  Ом и вольт-амперной характеристикой

$$I = I_s (e^{\alpha u} - 1) = 44 \cdot 10^{-9} [\exp(37\alpha u) - 1], \text{ А.}$$

Кроме того предполагалось, что генерация гармоник отсутствует ( $P_n = 0$ ) (исследовались потенциальные характеристики диода), а пересчитанное к клеммам  $a-d$  (см. рис. 2 в) через Г-образную цепь  $R_n C_0$  сопротивление антенны  $Z_{ax}$  чисто активное ( $Z_{ax} = R_{ax}$ ), а  $R_n = 2R_{ax}$ . КПД выпрямления представлялся в виде произведения  $\eta = \eta_1 \eta_2$ , где  $\eta_1$  – КПД цепи с элементами  $Z_a$ ,  $R_n$ ,  $C_0$  равно  $\eta_1 = P_{ax}/P_a$  ( $P_{ax}$  – мощность, выделяемая на сопротивлении  $R_{ax}$ ), а  $\eta_2$  – КПД диода, описываемого резистивной нелинейностью  $R(u)$ .

Рассчитанная по методике [4] при  $P_{ax} = P_0$  зависимость  $\eta_2 = F(R_{ax})$  представлена на рис. 3, кривая 1. С ростом величины  $R_{ax}$  растет и значение КПД  $\eta_2$ . Однако зависимость  $\eta_1 = F(R_{ax})$  (рис. 3, кривая 2) имеет максимум. Эта кривая была получена таким образом. В выражении (1) полагалось  $X_{ax} = 0$  и, таким образом, при  $R_{ax} = var$  находились значения  $Z_a$ , при которых входная цепь ректенны настраивалась в резонанс. Далее при известных значениях  $Z_a$ ,  $R_n$ ,  $C_0$  и  $e'_{xx}$  вычислялись значения  $\eta_1$ . Характер зависимости  $\eta_1 = F(R_{ax})$  предопределяет и ход результирующей кривой (см. рис. 3, кривая 3)  $\eta = F(R_{ax})$ .

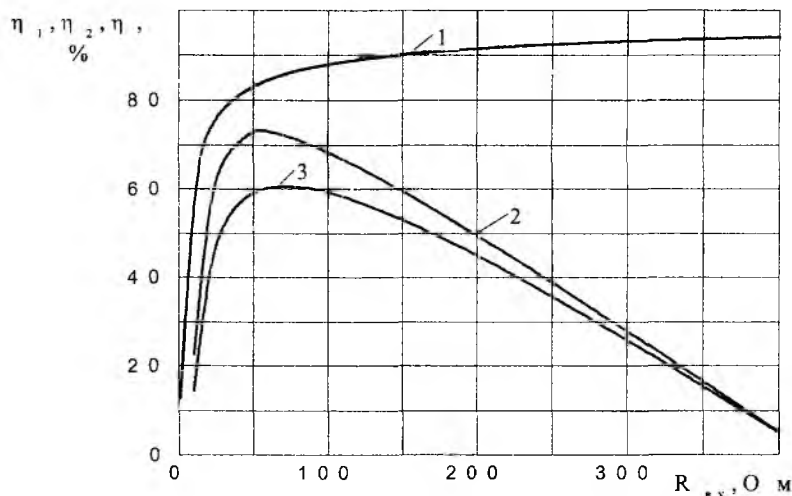


Рис. 3

Из полученных результатов следует, что максимальный КПД около 60% может быть получен, если обеспечить значения  $R_{ax\ opt} \approx 70$  Ом. Дальнейшая задача состояла в поиске таких геометрических размеров излучающей структуры ячеек Флоке, которые имели бы  $R_{ax} = R_{ax\ opt}$ . Данная задача решалась с помощью программы «INFARS-3», реализующей алгоритм, опубликованный в [5]. Результаты расчетов «сетки» квадратной формы с размерами  $L \times L$  и высотой подложки  $H$  с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 13,3$  представле-

ны в табл. 1. Здесь  $Z_{ex}(nf_1) = R_{ex}(nf_1) + jX_{ex}(nf_1)$  – входное сопротивление цепи на частотах гармоник со стороны клемм  $a-a'$  (рис. 2 в). Эти данные получены при  $L_1=L_2=L_3=L/3$  и  $L_4=L_5=L/2$  (рис. 4).

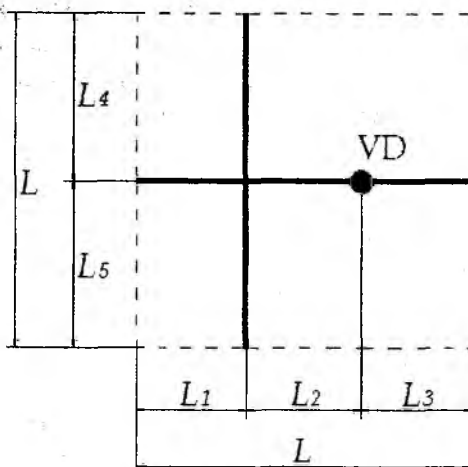


Рис. 4

Таблица 1

$L, \text{ мм}$	0,573	0,614	0,655	0,696
$H, \text{ мм}$	2,104	2,095	2,090	2,094
$Z_{ex}, \text{ Ом}$	32,47-j00,10	37,89-j00,18	45,45-j00,23	63,16+j01,05
$Z_{ex}(2f_1), \text{ Ом}$	03,22-j25,48	02,75-j25,54	02,43-j25,43	02,53-j25,13
$Z_{ex}(3f_1), \text{ Ом}$	01,00-j75,79	00,33-j21,71	00,11-j19,32	00,10-j18,56
$Z_{ex}(4f_1), \text{ Ом}$	00,02-j13,60	00,04-j13,30	00,07-j12,82	00,13-j12,35
$Z_{ex}(5f_1), \text{ Ом}$	00,19-j09,57	00,19-j09,55	00,87-j15,13	00,10-j10,00
$\eta, \%$	54,5	58,3	59,9	62,1
$\zeta_2, \text{ дБ}$	-18,99	-18,01	-18,48	-18,58
$\zeta_3, \text{ дБ}$	-47,28	-35,96	-36,64	-37,25
$\zeta_4, \text{ дБ}$	-54,63	-56,25	-59,66	-84,42
$\zeta_5, \text{ дБ}$	-63,09	-60,21	-54,68	-63,22

Величины  $\eta_1$ , представленные в табл. 1, рассчитывались с учетом влияния пяти гармоник при значении  $P_{ex}=P_d$ . Данные о КПД выпрямления при других значениях  $P_{ex}$  приведены в виде графиков на рис. 5. Уровни подавления пяти гармоник  $\zeta_n$  также приведены в табл. 1.

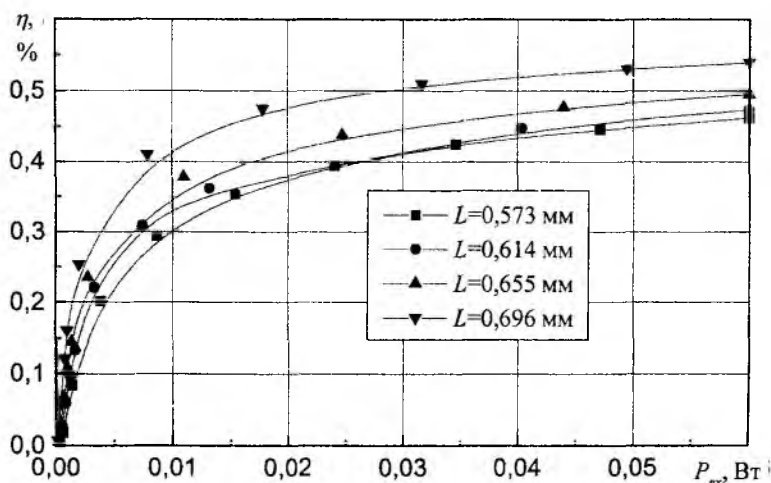


Рис. 5

Обобщая приведенные результаты можно прийти к таким выводам.

1. В ректенне рассматриваемой структуры можно достичь КПД выпрямления более 50%. Для этого необходимо выполнение следующих условий:  $L > 0,6$  мм,  $P_{вх} > 0,03$  Вт.
2. Параметры ЭМС исследованной ректенны являются неудовлетворительными, т.к. уровень подавления второй гармоники равен примерно -18 дБ. Это обстоятельство вызывает необходимость проведения дальнейшего поиска вариантов построения ректенн, снабженных дополнительными фильтрами гармоник, например, частотоселективными поверхностями.

**Список литературы:** 1. Alden A. A. 35 GHz extremely high power rectenna for the microwave lightcraft, CRC Contract Report No. CRC-VPRS-00-03, Ottawa: Communication Research Center, March 2001. 2. Омаров В. А., Грецких Д. В. Приближенная модель расчета КПД выпрямления крупноапертурных ректенн // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. 2002. Вып. 129. С. 43 – 45. 3. Омаров М. А., Грецких Д. В. Потенциальные возможности антенн-выпрямителей миллиметрового диапазона волн // там же. 2002. Вып. 130. С. 24 – 28. 4. Лучанинов А.И. и др. Теоретические и экспериментальные исследования крупноапертурных ректенных решеток // Там же. 1998. Вып. 106. С. 63-72. 5. Лучанинов А.И., Коновальцев А.А., Лучанинов Ю.А., Омаров М.А., Шокало В.М. Алгоритм анализа эквидистантной решетки ленточных микрополосковых излучателей произвольной геометрии, адаптированный к расчету крупноапертурных антенн с нелинейными элементами. 6. Особенности численной реализации алгоритма // Там же. 2001. Вып. 119. С. 199 – 210.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 14.04.2003*