

А. И. ЛУЧАНИНОВ, канд. техн. наук, В. В. НАРЫЖНАЯ,
В. М. ШОКАЛО, канд. техн. наук, А. А. ЩЕРБИНА

**АНАЛИЗ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМ СБОРА МОЩНОСТИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА РЕКТЕНН. СООБЩЕНИЕ 2. СПОСОБЫ
ПОВЫШЕНИЯ КПД СХЕМЫ СБОРА, ОСНОВАННЫЕ
НА ВЫРАВНИВАНИИ ПО АПЕРТУРЕ РЕКТЕННЫ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭДС ИЛИ ТОКОВ ПРИЕМНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ**

Как известно, для повышения КПД перехвата энергии СВЧ пучка ректенной, апертура последней должна облучаться неравномерно (по закону Гаусса). При этом плотность потока мощности, падающая на различные приемно-выпрямительные элементы ректенны Π_i , будет различной. Поскольку характеристики ПВЭ как эквивалентного генератора постоянного тока зависят от величины Π_i [1; 2], то это приводит к потерям мощности в схеме сбора мощности постоянного тока ректенны. Исправить это положение можно различными путями. Один из них состоит в том, чтобы используя в ректенне ПВЭ разных типов или управляя их параметрами, добиться оптимальных условий работы каждого из ПВЭ. Иначе говоря, надо оптимизировать структуру каждого ПВЭ под «свойственный» ему уровень Π_i . Рассмотрение данного вопроса и составляет содержание настоящего сообщения.

Считается, что схема сбора представляет собой либо последовательное, либо параллельное соединение ПВЭ по постоянному току, а апертура ректенны облучается по закону Гаусса. Известно [1; 2], что характеристики ПВЭ, как эквивалентного генератора постоянного тока, в зависимости от значения Π_i , определяется высокочастотной ЭДС холостого хода e_x и сопротивлением z_r эквивалентного СВЧ-генератора ПВЭ, воздействующего на выпрямительную схему. В случае двухполупериодных ПВЭ значения e_x и z_r определяются на клеммах излучателя, а в однополупериодных — на выходных клеммах входного фильтра нижних частот. Основываясь на этих данных, можно предложить несколько способов выравнивания распределения токов или ЭДС эквивалентных генераторов постоянного тока ПВЭ по апертуре ректенны.

Первый из них заключается в том, что при разработке компоновочной схемы приемно-выпрямительной апертуры используются несколько типов ПВЭ, отличающихся ходом кривых $E_i = f(\Pi_i)$ и $I_i = f(\Pi_i)$. Поясним идею данного способа на примере ректенны, составленной из шунтовых и петлевых ПВЭ (см. [3]), в которых

используются диоды типа 3A208A (далее такие ректенны будем называть комбинированными).

На рис. 1 изображена схема комбинированной ректенны в виде линейной решетки. Эта ректенна представляет собой размещенную над экраном (на рис. 1 не показан) эквидистантную антенную решетку 1, которая содержит линию сбора постоянного тока 2 и включенные в нее по постоянному току последовательно приемно-выпрямительные элементы 3, 4 с резонансными излучателями 5, 6

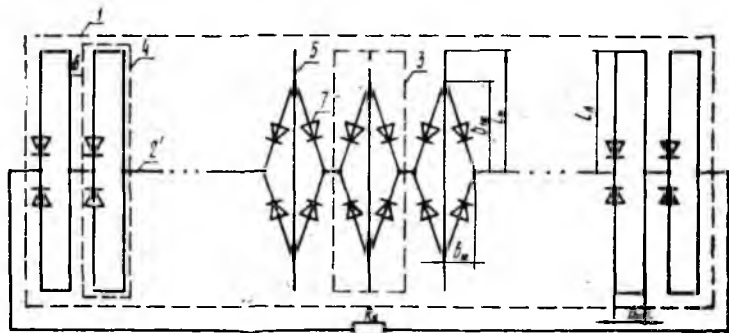


Рис. 1

и двухполупериодные выпрямители на диодах Шоттки. Решетка komponуется из шунтовых 3 и петлевых 4 ПВЭ так, что в центральной части решетки, облучаемой от уровня Π_{\max} до уровня $0,5 \Pi_{\max}$, устанавливаются ПВЭ с шунтовыми вибраторами 5, а в остальной части решетки — ПВЭ с петлевыми вибраторами 6.

Установка петлевых ПВЭ в периферийной области апертуры с пониженным уровнем плотности потока падающей мощности приводит к выравниванию амплитуд токов I_i в комбинированной решетке. Это связано с тем, что у петлевых ПВЭ предельная мощность Π_d вдвое меньше относительно шунтовых ПВЭ [3], а следовательно, больше и эквивалентный постоянный ток I_i при одном и том же значении Π_i .

В табл. 1 приведены результаты расчета КПД последовательной схемы сбора комбинированной ректенны с квадратной апертурой, функционирующей при $\Pi_{\max} = 200 \text{ Вт/м}^2$, $d = \lambda/2$ и волновом параметре $\tau = 2$. При расчетах использовались следующие значения размеров излучателей (рис. 1): $kl_n = 1,36$; $kb_n = 0,205$; $kl_{ш} = 1,606$; $kb_{ш} = 0,6$; $kb_{1ш} = 0,354$; $k = 2\pi/\lambda$. Расстояние до экрана $kh = 0,95$.

Таблица 1

L/λ	10	20	50	100	200	Тип ректенны
$\eta_0, \%$	89,0	90	91	91,5	91,5	Комбинированная ректенна Ректенна из шунтовых ПВЭ
$\eta_0, \%$	75,0	77,0	78,0	79,0	79,5	

Из приведенных в табл. 1 данных следует, что комбинированная ректенна обеспечивает увеличение КПД схемы сбора относительно ректенны из шунтовых ПВЭ на $(13 \div 14) \%$ в зависимости от габаритного размера ректенны. В рассмотренном примере комбинированной ректенны хотя и достигнут выигрыш в КПД сбора, однако потери мощности постоянного тока в схеме сбора (по табл. 1 — около 8%) остались пока значительными. Это обусловлено тем, что в комбинированной решетке перепады токов I_i имеют еще большую величину. Дальнейшее выравнивание по апертуре распределения эквивалентных ЭДС или токов ПВЭ можно провести за счет управления величиной z_r в однополупериодных или двухполупериодных ПВЭ ректенн.

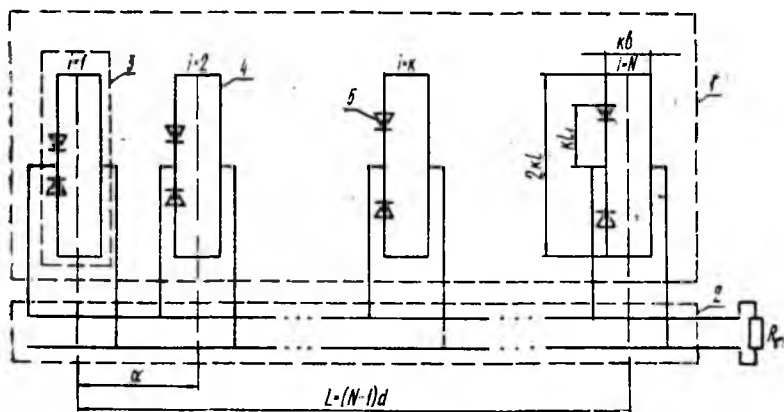


Рис. 2

Вначале рассмотрим ректенну с двухполупериодными ПВЭ (рис. 2). Эта ректенна представляет собой эквидистантную линейную антенную решетку 1, размещенную над экраном, которая содержит линию сбора постоянного тока 2 и подключенные к ней параллельно приемно-выпрямительные элементы 3. ПВЭ выполнены в виде резонансных петлевых вибраторов 4, объединенных с двухполупериодными выпрямителями на двух встречно соединенных диодах Шоттки 5, включенных в расщепки одного из плеч вибраторов симметрично относительно их середины на расстояние kl_1 (k — волновое число).

Пусть на линейку ректенны длиной $2L = 2(N - 1)d$, где N — количество ПВЭ в половине решетки, падает СВЧ-пучок с гауссовым распределением плотности потока мощности при $P_{\max} = 200 \text{ Вт/м}^2$ и $\tau = 2$ (см. рис. 3, кривую 1 для $N = 21$). В этом случае перепад между значениями P_{\max} и P_{\min} составляет более 10 дБ, что приводит к существенным перепадам ЭДС постоянного тока ПВЭ (рис. 3, кривая 2), если в каждом из них значения kl_1 равны. Расчетная кривая 2 соответствует случаю, когда в ПВЭ используется диод с такими параметрами: допустимая входная мощность

$P_{вх} = 1$ Вт, допустимое обратное напряжение $U_{обр} = 40$ В, емкость перехода $C_d = 0,25$ пФ, а размеры вибратора имели следующие величины: $kl = 1,36$; $kb = 0,205$; расстояние до экрана $kh = 0,95$; $kl_1 = 0,092$. Так как ЭДС ПВЭ не равны, то часть энергии выделяется не в нагрузке ректенны, а на внутренних сопротивлениях эквивалентных генераторов постоянного тока ПВЭ, что существенно снижает КПД сбора (табл. 2).

Таблица 2

L/λ	10	20	50	100	200	500	Тип ректенны
$\eta_0, \%$	85,5	86,5	87	87,3	87,4	87,5	Ректенна при $kl_1 = \text{const}$
$\eta_0, \%$	97,0	97,5	98	98,2	98,3	98,3	Ректенна при $kl_1 = \text{var}$

На основании результатов [4] применим для управления по требуемому закону величинами ЭДС E_i смещение точек включения диодов, т. е. положим, что размер $kl_1 = \text{var}$ вдоль апертуры ректенны. Возможность такого управления физически обусловлена тем, что с увеличением смещения kl_1 увеличивается входное сопротивление излучателя и он извлекает из пространства большую входную мощность, что приводит к увеличению ЭДС E_i ПВЭ.

Зависимости $E_i = f(\Pi_i)$ петлевого ПВЭ с различными значениями kl_1 представлены на рис. 4. Расчеты проводились для случая диодов Шоттки с $P_{вх} = 1$ Вт. Из приведенных на рис. 4 кривых следует, что при изменении плотности потока мощности в интервале $[\Pi_{\min}, \Pi_{\max}] = [30, 200]$ Вт/м² возможно выравнивание ЭДС постоянного тока ПВЭ на уровне 31 В.

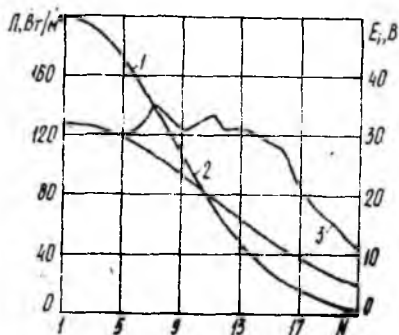


Рис. 3

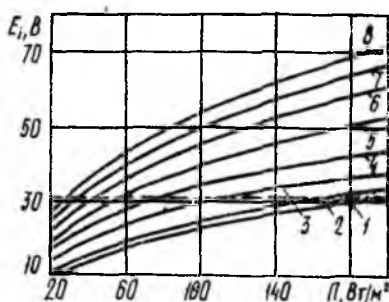


Рис. 4

Рассмотрим пример ректенны, у которой в зависимости от значения Π_i размер kl_1 ПВЭ изменяется дискретно по следующему закону (кривые на рис. 4):

$$kl_1 = 0,092\sqrt{\Pi_i/\Pi_{\max}} \in [1; 0,85], \text{ кривая } 1;$$

$$kl_1 = 0,3\sqrt{\Pi_i/\Pi_{\max}} \in [0,849; 0,7], \text{ кривая } 2;$$

$$kl_1 = 0,4\sqrt{P_i/P_{\max}} \{ [0,699; 0,5], \text{ кривая 3;} \\
kl_1 = 0,5\sqrt{P_i/P_{\max}} \{ [0,499; 0,375], \text{ кривая 4.} \\
kl_1 = 0,6\sqrt{P_i/P_{\max}} \{ [0,374; 0,25], \text{ кривая 5;} \\
kl_1 = 0,65\sqrt{P_i/P_{\max}} \{ [0,249; 0,2], \text{ кривая 6;} \\
kl_1 = 0,675\sqrt{P_i/P_{\max}} \{ [0,199; 0,16], \text{ кривая 7;} \\
kl_1 = 0,7\sqrt{P_i/P_{\max}} \{ [0,16; P_{\min}/P_{\max}], \text{ кривая 8.}$$

Для данного примера распределение ЭДС E_i по апертуре при $N=21$ показано на рис. 3, кривая 3. Как видно из представленных данных, дискретное изменение размера kl_1 позволяет добиться существенного выравнивания распределения ЭДС, особенно в центральной области апертуры ректенны. Благодаря этому, реализуется значительный выигрыш в КПД сбора (см. табл. 2) и потери мощности в схемах сбора ректенн большой электрической длины ($L/\lambda > 100$) составляют всего 2 %.

Полученный положительный эффект позволяет рекомендовать рассмотренную ректенну для применения в наземных системах передачи энергии с помощью СВЧ-луча. Такой же эффект может быть получен и при применении в ректенне однополупериодных ПВЭ, у которых входной фильтр нижних частот (ФНЧ) имеет различный коэффициент трансформации сопротивления $K_T = -R_{\text{вых}}/R_{\text{вх}}$, где $R_{\text{вых}}$ — выходное сопротивление ФНЧ со стороны подключения диода Шоттки, $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление ФНЧ со стороны подключения вибратора. Подробно ПВЭ такого типа описаны в работе [1]. В этой публикации описан не только принцип работы ПВЭ с различными значениями величины K_T ФНЧ, но и приводятся конкретные данные по величине элементов схем этих ФНЧ. Используя приведенные в работе [1] данные, можно показать, что ЭДС E_i однополупериодных ПВЭ с полуволновыми вибраторами и ФНЧ с варьируемым значением K_T хорошо аппроксимируется зависимостью $E_i = b\Pi_i^\beta$, где b и β — коэффициенты аппроксимации. Для случая применения в однополупериодных ПВЭ диода Шоттки с $P_{\text{вх}} = 1$ Вт коэффициент $\beta = 0,6$, а значения величины b приведено в табл. 3. Из табл. 4 следует, что величина E_i однополу-

Таблица 3

K_T	0,98	1,16	1,29	1,41	1,53	1,85	2,33
b	1,0	1,28	1,48	1,68	2,40	2,45	3,01

Таблица 4

K_T	0,98	1,16	1,29	1,41	1,53	1,85	2,33
E_i/B	15,9	18,44	23,5	26,7	38,16	39,0	47,9

периодных ПВЭ может существенно изменяться при варьировании значений K_T , т. е. так же, как и в случае двухполупериодных ПВЭ возможно выравнивание распределения ЭДС по апертуре ректенны. Проведенные нами расчеты показали, что при $\tau = 2$, $P_{\max} = 100$ Вт/м², $P_{\text{вх}} = 1$ Вт однополупериодные ПВЭ при $L/\lambda > 100$ обеспечивают КПД сбора не менее 98,5 %.

Предлагаемые способы увеличения КПД сбора позволяют достичь небольших потерь в цепях постоянного тока ректенн, однако технология изготовления ректенны по сравнению со случаем применения однотипных ПВЭ заметно усложняется. Вот почему есть смысл рассмотреть также и другие способы минимизации потерь мощности постоянного тока, в основе которых лежит рациональный выбор схемы сбора. Эти вопросы рассмотрены в следующем сообщении.

Список литературы: 1. Шифрин Я. С., Лучанинов А. И., Шокало В. М. Приемно-выпрямительные элементы ректенных систем / Харьк. ин-т радиоэлектрон. Х., 1988. 181 с. Деп. в УкрНИИНТИ 31.03.89. № 941-Ук89. 2. Нарыжная В. В., Шокало В. М. Макромодель приемно-выпрямительного элемента ректенны по постоянному току // Радиотехника. 1992. Вып. 96. С. 79—82. 3. Лучанинов А. И., Шокало В. М., Щербина А. А. Двухполупериодные приемно-выпрямительные элементы ректенн // Радиотехника. 1991. Вып. 94. С. 122—126. 4. А. с. № 1566437 СССР, МКИ³Н01Q25/00. Приемно-выпрямительный элемент ректенны / А. И. Лучанинов, В. М. Шокало, Я. С. Шифрин, А. А. Щербина // Открытия. Изобретения. 1990. № 19. С. 258.

Поступила в редколлегию 11.04.90