

*В. М. ШОКАЛО*, канд. техн. наук

**АНАЛИЗ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМ СБОРА МОЩНОСТИ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА РЕКТЕНН. СООБЩЕНИЕ 1. КПД СХЕМ СБОРА  
С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ИЛИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ  
ПРИЕМНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ**

---

Эффективность используемых на практике ректенн во многом определяется величиной КПД  $\eta$ , который, как показано в [1], является произведением трех величин: КПД перехвата энергии СВЧ пучка апертурой ректенны  $\eta_n$ , КПД выпрямления  $\eta_v$  и КПД сбора мощности постоянного тока  $\eta_o$ . Вопросы максимизации КПД перехвата рассмотрены в работе [2]. Достаточно полно (см., например, [3]) отражены в публикациях и вопросы повышения КПД выпрямления. Наряду с этим, изучению КПД сбора мощности постоянного тока посвящено всего две работы [1; 4]. Причем результаты этих публикаций практически не содержат рекомендаций по проектированию схем сбора ректенн с высоким значением  $\eta_o$ . Цель работы — изучение факторов, влияющих на КПД сбора мощности постоянного тока ректенн и разработка на основе этих данных способов максимизации величины  $\eta_o$ .

Для выяснения причин потерь мощности в схемах сбора целесообразно рассмотреть порознь схемы с параллельным и последовательным соединением приемно-выпрямительных элементов по постоянному току. При проведении этих исследований предполагается следующее.

1. Ректенна представляет собой эквидистантную плоскую решетку с апертурой круглой или квадратной формы, в узлах которой расположены  $M$  однотипных по схеме и конструкции приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ), объединенных с нагрузкой ректенны  $R_n$  схемой сбора мощности постоянного тока. Шаг решетки по координатам  $x$  и  $y$  одинаков ( $d_x = d_y = d$ ).

2. С целью обеспечения максимального перехвата энергии СВЧ из свободного пространства апертура ректенны облучается неравномерно по закону Гаусса [2]:  $\Pi_i = \Pi_{\max} \exp[-2\tau(r_i/L)^2]$  (1), где  $\Pi_{\max}$  — плотность потока мощности в центре апертуры;  $r_i$  — расстояние от центра ректенны до  $i$ -го ПВЭ;  $L$  — характерный размер ректенны ( $2L$  — величина диагонали в случае квадратной апертуры или диаметр в случае круглой апертуры);  $\tau = \sqrt{S_R S_T} / \lambda D$  — волновой параметр;  $S_T, S_R$  — площади апертур передающей антенны и ректенны;  $D$  — расстояние между апертурами,  $\lambda$  — рабочая длина волны.

$\lambda$  — рабочая длина волны.

3. Каждый приемно-выпрямительный элемент представляет собой слабонаправленную антенну, объединенную с выпрямительной схемой на диодах Шоттки. Решетку ПВЭ при расчете схемы сбора мощности постоянного тока, аналогично работе [5], можно представить в виде совокупности из  $M$  зависимых эквивалентных генераторов постоянного тока. Значения ЭДС  $E_i$  (эквивалентных токов  $I_i$ ) этих генераторов и их внутренних сопротивлений  $R_i$  зависят от плотности потока мощности  $\Pi_i$  в месте расположения ПВЭ.

Под КПД схемы сбора будем понимать величину  $\eta = P_n / P_{\max}$ , где  $P_n$  — мощность постоянного тока в нагрузке ректенны  $R_n$ ,  $P_{\max}$  — максимальная мощность постоянного тока, которая равна сумме мощностей постоянного тока  $M$  приемно-выпрямительных элементов, при подключении к каждому из них нагрузки  $R_{ni}$ , равной выходному сопротивлению данного ПВЭ по постоянному току  $R_i$ .

При этом получают следующие выражения для КПД сбора:

$$\eta = \frac{R_n \left[ \sum_{i=1}^M E_i \left( \sum_{i=1}^M R_i + R_n \right) \right]^2}{\sum_{i=1}^M (E_i^2 / 4R_i)} \quad (2)$$

— при последовательном соединении;

$$\eta_0 = \frac{R_n \left( \sum_{i=1}^M \frac{E_i}{R_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^M \frac{E_i^2}{4R_i} \left[ \sum_{i=1}^M \frac{1}{R_i} \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^M \frac{1}{R_i}} + R_n \right) \right]^2} \quad (3)$$

— при параллельном соединении.

Известно, что максимальная мощность в нагрузке при заданных  $E_i$  и  $R_i$  будет в том случае, когда величина  $R_n$  равна выходному сопротивлению всей ректенны по постоянному току. При этом соотношения (2), (3) принимают вид

$$\eta_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^M E_i\right)^2}{\sum_{i=1}^M R_i \sum_{i=1}^M (E_i^2/R_i)} = \frac{\left(\sum_{i=1}^M I_i R_i\right)^2}{\sum_{i=1}^M R_i \sum_{i=1}^M I_i^2 R_i} \quad (4)$$

— для последовательной схемы сбора;

$$\eta_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^M \frac{E_i}{R_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^M \frac{1}{R_i} \sum_{i=1}^M \frac{E_i^2}{R_i}} \quad (5)$$

— для параллельной схемы сбора.

В частном случае, при  $R_i(\Pi_i) = \text{const}$ , КПД обеих схем равны

$$\eta_0 = \frac{1}{M} \cdot \frac{\sum_{i=1}^M E_i^2}{\sum_{i=1}^M E_i^2} \quad (6)$$

и полученный результат совпадает с результатом, приведенным в [4]. Вычисленный согласно (6) КПД при не равных значениях  $E_i$  и  $M > 1$  всегда меньше 100 %, так как выполняется неравенство

$$\left(\sum_{i=1}^M E_i\right)^2 < M \sum_{i=1}^M E_i^2.$$

Отсюда следует, что равенство внутренних сопротивлений  $R_i$  является недостаточным условием для достижения максимальной передачи мощности в схемах сбора ректенн. Избежать потерь энергии, как видно из формул (4), (5), можно лишь при выполнении таких условий:  $E_i(\Pi_i) = \text{const}$  — в параллельной схеме сбора;  $I_i(\Pi_i) = \text{const}$  — в последовательной схеме сбора. Если эти условия не выполняются, то величину мощности постоянного тока, рассеиваемой в виде тепла на внутренних сопротивлениях  $R_i$ , будут определять перепады (разности) значений  $E_i$  или  $I_i$  соседних ПВЭ ректенны, зависящие от степени неравномерности облучения ее апертуры СВЧ пучком (параметр  $\tau$  в выражении (1)). Учтем эту зависимость с помощью соотношений, приведенных в [5]:

$$E_i = b \Pi_{\max}^{\beta} \exp[-2\tau\beta(r_i/L)^2]; \quad (7)$$

$$R_i = a \Pi_{\max}^{-\alpha} \exp[2\tau\alpha(r_i/L)^2], \quad (8)$$

$$I_i = \frac{b}{a} \Pi_{\max}^{(\beta+\alpha)} \exp[-2\tau(\beta+\alpha)(r_i/L)^2], \quad (9)$$

где  $a, b, \alpha, \beta$  — коэффициенты аппроксимации нагрузочных характеристик ПВЭ.

Из сравнения выражений (7), (9) нетрудно видеть, что спадание значений  $I_i$  к краям апертуры ректенны происходит более резко, чем спадание значений ЭДС. Таким образом, при последовательном соединении следует ожидать меньших значений КПД сбора, чем при параллельном.

Оценим величину  $\eta_0$  схем сбора с последовательным и параллельным соединением ПВЭ по постоянному току. С учетом выражений (7—9), расчетные соотношения (4), (5) приобретают следующий вид:

$$\eta_0 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^M e^{-2\tau\beta(r_i/L)^2} \right]^2}{\sum_{i=1}^M e^{-2\tau\alpha(r_i/L)^2} \sum_{i=1}^M e^{-2\tau(r_i/L)^2(2\beta+\alpha)}} \quad (10)$$

— для последовательной схемы сбора;

$$\eta_0 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^M e^{-2\tau(r_i/L)^2(\beta+\alpha)} \right]^2}{\sum_{i=1}^M e^{-2\tau\alpha(r_i/L)^2} \sum_{i=1}^M e^{-2\tau(2\beta+\alpha)(r_i/L)^2}} \quad (11)$$

— для параллельной схемы сбора.

В частном случае апертуры квадратной формы формулы (10), (11) трансформируются к такому виду:

$$\eta_0 = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \exp \left[ -2\tau\beta \left( \frac{x_i^2 + y_j^2}{L^2} \right) \right] \right\}^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \exp \left[ 2\tau\alpha \left( \frac{x_i^2 + y_j^2}{L^2} \right) \right] \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \exp \left[ -2\tau(2\beta + \alpha) \left( \frac{x_i^2 + y_j^2}{L^2} \right) \right]} \quad (12)$$

— при последовательном соединении;

$$\eta_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \exp -2\tau(\beta + \alpha) \left( \frac{x_i^2 + y_j^2}{L^2} \right) \right]}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \exp \left[ -2\tau \left( \frac{x_i^2 + y_j^2}{L^2} \right) \right] \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \exp \left[ -2\tau(2\beta + \alpha) \left( \frac{x_i^2 + y_j^2}{L^2} \right) \right]} \quad (13)$$

— при параллельном соединении.

В выражениях (12), (13) приняты такие обозначения:  $N$  — количество ПВЭ, расположенных вдоль стороны квадрата;  $x_i, y_j$  — координаты ПВЭ с номером  $ij$  на апертуре ректенны,  $2L = \sqrt{2(N-1)d}$ .

Результаты расчетов КПД сбора приведены на рис. 1 (сплошные кривые соответствуют параллельному, а штрихпунктирные — последовательному соединению). Здесь 1 —  $\tau=1$ ; 2 —  $\tau=1,5$ ; 3 —  $\tau=2$ . Вычисления проводились для случая апертуры квадрат-

ной формы с шагом  $d = 0,5\lambda$ . При расчетах полагалось, что в ректенне используются двухполупериодные ПВЭ с петлевыми вибраторами, описанные в [6]. Как видно из приведенных результатов, КПД сбора при последовательном соединении ПВЭ меньше, чем при параллельном, что подтверждает справедливость вышеприведенных рассуждений. Кроме того, из рис. 1 видна и сильная зависимость КПД сбора от волнового параметра  $\tau$  (с увеличением  $\tau$  значения  $\eta_0$  уменьшаются). Зато с увеличением  $L/\lambda$  наблюдается рост КПД сбора. При небольших габаритах ректенны с увеличением  $L/\lambda$  КПД сбора растет быстрее, затем рост величины  $\eta_0$  замедляется и при больших значениях  $L/\lambda$  (случай крупноапертурных ректенн) КПД сбора стремится к некоторому максимальному значению. Обусловлено это тем, что при заданном значении  $\tau$  и малых  $L/\lambda$  на величину КПД больше влияют перепады ЭДС или токов между отдельными эквивалентными генераторами. С увеличением  $L/\lambda$  перепады ЭДС и токов уменьшаются и при больших  $L/\lambda$  значения КПД будут определяться лишь характером изменения функций (7—9), зависящих от коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ .

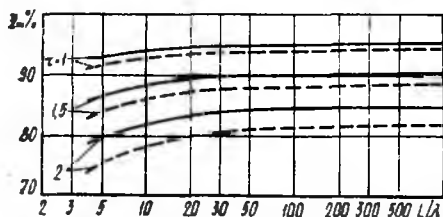


Рис. 1

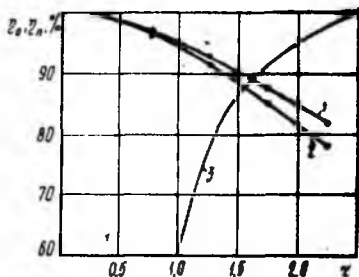


Рис. 2

Значения КПД сбора крупноапертурных ректенн можно получить, осуществляя переход от сумм к интегралам в выражениях (10—13). При этом будем полагать  $M \rightarrow \infty$ , а  $d \rightarrow 0$ . В итоге придем к следующим выражениям для КПД сбора крупноапертурных ректенн:

для ректенн с квадратной апертурой и последовательной схемой сбора

$$\eta_0 = e^{-2\tau\alpha} \frac{\pi\alpha(2\beta + \alpha) [\operatorname{erf}(\sqrt{\beta\tau})]^4}{4\beta^2 F^2 (\sqrt{\alpha\tau}) [\operatorname{erf}(\sqrt{2\beta + \alpha}\tau)]^2}; \quad (14)$$

для ректенн с квадратной апертурой и параллельной схемой сбора

$$\eta_0 = \frac{\alpha(2\beta + \alpha) [\operatorname{erf}(\sqrt{\tau(\beta + \alpha)})]^4}{(\alpha + \beta)^2 [\operatorname{erf}(\sqrt{\alpha\tau})]^2 [\operatorname{erf}(\sqrt{\tau(2\beta + \alpha)})]^2}; \quad (15)$$

для ректенн с круглой апертурой и последовательной схемой сбора

$$\eta_0 = e^{-2\tau\alpha} \frac{\sqrt{\pi\alpha(2\beta + \alpha)} [\operatorname{erf}(\sqrt{2\beta\tau})]^2}{2\beta F (\sqrt{2\alpha\tau}) \operatorname{erf}(\sqrt{2(2\beta + \alpha)\tau})}; \quad (16)$$

для ректенн с круглой апертурой и параллельной схемой сбора

$$\eta_0 = \frac{|\operatorname{erf}(\sqrt{2\tau(\beta + \alpha)})|^2 \cdot \sqrt{\alpha(2\beta + \alpha)}}{(\beta + \alpha) \operatorname{erf}(\sqrt{2\tau\alpha}) \operatorname{erf}(\sqrt{2\tau(2\beta + \alpha)})}. \quad (17)$$

В выражениях (14)—(17) приняты следующие обозначения:  $\operatorname{erf}(z)$  — интеграл вероятности,  $F(z)$  — интеграл Доссона. Значения КПД сбора, рассчитанные двумя способами по формулам (14), (15) и по формулам (10, 11), практически совпадают при размерах апертуры  $L=500\lambda$  и более. Это подтверждается рис. 2. Здесь приведены результаты расчетов при  $L=500\lambda$  по формулам (14), (15). (кривая 1 для параллельного соединения, кривая 2 — для последовательного соединения) и по формулам (10), (11) (эти данные показаны точками).

Полученные соотношения (14)—(17) позволяют быстро оценить возможности крупноапертурных ректенн по КПД сбора и отражают зависимость  $\eta_0$  от двух основных факторов — степени неравномерности облучения апертуры ректенны СВЧ пучком (параметр  $\tau$ ) и динамических характеристик ПВЭ по постоянному току (коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ ).

Как видно из рис. 2, значения КПД сбора крупноапертурных ректенн порядка 90 % и более имеют место в области небольших значений  $\tau$ . Однако в этой области мало значение КПД перехвата  $\eta_n$  [2], равного отношению мощности СВЧ, извлеченной апертурой ректенны из свободного пространства, к полной мощности СВЧ-пучка (см. кривую 3). Соответственно и эффективность ректенны в целом, определяемая произведением  $\eta_n\eta_0$  оказывается низкой. Отсюда следует необходимость поиска путей преодоления противоречия, обусловленного различным ходом кривых для  $\eta_0$  и  $\eta_n$ . Если «отталкиваться» от кривой, характеризующей поведение КПД перехвата, то для обеспечения  $\eta_n > 90\%$  надо выбрать  $\tau > 1,5$ . При этом апертура ректенны облучается СВЧ-пучком существенно неравномерно. При использовании однотипных приемно-выпрямительных элементов ЭДС эквивалентных генераторов в центре и на краях ректенны сильно различаются, что и приводит к низким значениям  $\eta_0$ . Очевидно, что задача повышения значения  $\eta_0$  должна решаться путем такой компоновки приемно-выпрямительной апертуры ректенны и схем сбора мощности постоянного тока, которые приводят к выравниванию распределения ЭДС или токов эквивалентных генераторов. Пути решения этой задачи рассматриваются в следующем сообщении.

Список литературы: 1. Егоров А. Н. Об эффективности передачи энергии электромагнитным пучком и преобразования его в ректенне // Радиотехника и электроника. 1985. Вып. 4. С. 800—811. 2. Губо, Шверинг. Передача пучков электромагнитных волн в свободном пространстве СВЧ-энергетика / Под ред. Э. Окреса М., 1971. Т. 1 С. 331—350. 3. Шифрин Я. С., Лучанинов А. И., Шокало В. М. Приемно-выпрямительные элементы ректенных систем // Харьк ин-т радиоэлектроники. Х., 1988. 181 с. Деп. в УкрНИИНТИ 31.03.89. № 941-Ук89. 4. Gutman R. J., Borrego J. M. Power combining in array of microwave power rectifiers // IEEE Trans. 1979. Vol. MTT—22. № 12. P. 958—968. 5. Нарыжная В. В., Шокало В. М. Макромодель приемно-выпрямительного элемента ректенны по постоянному

току // Радиотехника. 1991. Вып. 96. С. 79—82. 6. Лучанинов А. И., Шокало В. М., Щербина А. А. Двухполупериодные приемно-выпрямительные элементы ректенн // Радиотехника. 1991. Вып. 94. С. 122—126.

*Поступила в редколлегию 11.04.90*