

МАКРОМОДЕЛЬ ПРИЕМНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА РЕКТЕННЫ ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

Важнейшим параметром расчета ректенн является их КПД. Величина его зависит от эффективности работы отдельных приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ), образующих ректенну, и от того, как организован сбор мощности постоянного тока с выхода этих элементов. При анализе крупноапертурных ректенн удобно рассматривать их как бесконечные периодические системы, состоящие из одиночных ПВЭ. Данный подход при введении ряда упрощающих предположений позволяет разбить сложную задачу анализа параметров крупноапертурной ректенны на две. Цель первой из них — определение энергетических характеристик отдельного ПВЭ в составе бесконечной периодической антенны с нелинейными многополосниками (АНМ). Соответствующие соотношения, полученные для решения этой задачи методом переменных состояния, приведены в работе [1].

В результате решения второй задачи должен быть определен КПД схемы сбора мощности постоянного тока ректенны. Такая задача пока не рассматривалась. Для ее решения целесообразно применить упрощенные модели (макромодели) ПВЭ по постоянному току. Макромоделирование является известным и широко применяемым способом уменьшения вычислительных затрат и позволяет при анализе существенно снизить порядок системы уравнений больших схем (БС) при допустимых потерях точности [2].

В связи с тем, что схемы сбора ректенн функционируют на постоянном токе, то естественно, что макромодель ПВЭ должна характеризовать его как генератор постоянного тока. Цель статьи — определение такой макромодели.

Различают физические и информационные макромодели [2]. Физической макромоделью (упрощенной электрической схемой) ПВЭ по постоянному току является либо эквивалентный генератор ЭДС холостого хода E_s с внутренним сопротивлением R_s , либо эквивалентный генератор тока короткого замыкания I_s . Информационная модель необходима для численного определения параметров E_s , R_s и представляет собой уравнения (по принятой терминологии они именуется уравнениями связи [2]), устанавливающие зависимость величин E_s , R_s от заданных параметров ректенны. КПД выпрямления при заданной структуре ПВЭ ректенны, как известно из работы [3], зависит от уровня плотности потока мощности падающего поля Π и сопротивления нагрузки по постоянному току R_n . Поэтому в качестве уравнений связи информационной макромодели ПВЭ целесообразно принять уравнения вида

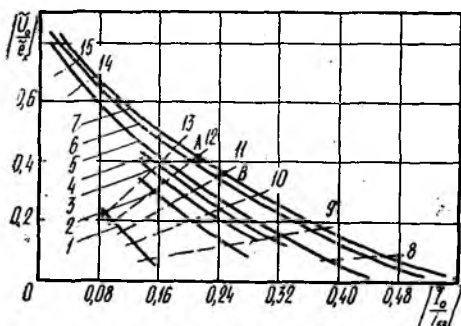
$$E_s = f(\Pi); R_s = f(\Pi), R_n = \text{const}; \quad (1)$$

$$E_s = f(R_n); R_s = f(R_n), \Pi = \text{const}. \quad (2)$$

Далее, для конкретности рассмотрим макромодели описанных в работе [4] типовых двухполупериодных ПВЭ с петлевыми и шунтовыми излучателями.

По общепринятой методике макромоделирования [2], соотношения (1), (2) могут быть найдены в результате аппроксимации табличных или графических данных, полученных при использовании упрощенных моделей. С целью определения искомого макромодели ПВЭ такие данные удобно представлять в виде нагрузочных характеристик (НХ) по постоянному току. Наиболее точно НХ рассчитываются методом переменных состояний [3] при различных значениях R_n и Π и представляют собой семейство кривых $u_0 = f(i_0)$, где i_0 , u_0 — значения постоянного тока в нагрузке ПВЭ и напряжение на этой нагрузке. Заметим, что двухполупериодные ПВЭ являются частным случаем многофазных антенн с нелинейными многополюсниками и расчет их

как показано в работе [3], сводится к расчету эквивалентного однофазного ПВЭ. На рисунке приведены нагрузочные характеристики эквивалентного однофазного петлевого ПВЭ, где 1 — $\Pi = 1$ Вт/м²; 2 — 5,1 Вт/м²; 3 — 10 Вт/м²; 5 — 21 Вт/м²; 6 — 75,5 Вт/м²; 7 — 136,9 Вт/м²; 8 — $R_n = 15$ Ом; 9 — 45 Ом; 10 — 90 Ом; 11 — 135 Ом;



12 — 180 Ом; 13 — 225 Ом; 14 — 500 Ом; 15 — 1000 Ом. Все величины, относящиеся к таким элементам, на рисунке и далее по тексту отмечены знаком «~». Для удобства дальнейшего использования НХ изображаются нормированными, причем под $e_x(f_0)$ и $i_{кз}(f_0)$ понимаются ЭДС холостого хода и ток короткого замыкания на клеммах излучателя ПВЭ. На рабочей частоте f_0 эти параметры связаны соотношением

$$i_{кз}(f_0) = e_x(f_0) / z_a(f_0),$$

где $z_a(f_0)$ — входное сопротивление излучателя ПВЭ. Вычисление приведенных на рисунке НХ проводилось в предположении, что для выпрямления используются диоды Шотки типа 3А208А, рабочая частота антенны $f_0 = 2,45$ ГГц, а резонансные размеры петлевого излучателя принимались такими же, как и в работе [4].

Определим из нагрузочных характеристик параметры ПВЭ как эквивалентного генератора постоянного тока. На небольшом участке (например, АВ на рисунке) их можно аппроксимировать прямой линией. Применительно к данному участку внутреннее сопротивление эквивалентного генератора \bar{R}_s будет

$$\bar{R}_s = \frac{\Delta \tilde{u}_0}{\Delta \tilde{i}_0} = - \frac{(\tilde{u}_0)_A - (\tilde{u}_0)_B}{\tilde{i}_{0A} - \tilde{i}_{0B}}. \quad (3)$$

Это значение \bar{R}_3 соответствует нагрузке \bar{R}_H , характерной для участка АВ ($R_H \approx 160$ Ом).

Продолжая отрезок прямой АВ до пересечения с осью ординат, найдем ЭДС эквивалентного генератора

$$E_3 = \bar{u}_0 |_{\bar{I}_0, H_{\text{кз}}=0} = \frac{(\bar{i}_0)_A (u_0)_B - (\bar{i}_0)_B (u_0)_A}{(\bar{i}_0)_A - (\bar{i}_0)_B}. \quad (4)$$

Соотношения (3), (4) определяют параметры генератора постоянного тока в случае однофазного ПВЭ. Для двухфазных схем $E_3 \approx \bar{E}_3$, $R_3 = 0,5\bar{R}_3$ в случае петлевых ПВЭ и $E_3 = 2\bar{E}_3$, $R_3 = \bar{R}_3$ в случае шунтовых ПВЭ.

Как следует из сказанного, параметры эквивалентного генератора определяются положением касательной к нагрузочной характеристике в текущей ее точке. Следовательно, они зависят как от величины R_H , так и от уровня плотности потока мощности. Используя нагрузочные характеристики, нетрудно рассчитать по изложенной выше схеме величины \bar{E}_3 и \bar{R}_3 для различных значений Π и \bar{R}_3 .

Многочисленные расчеты, проведенные для двухполупериодных петлевых и шунтовых ПВЭ, показали, что зависимости (1), (2) можно аппроксимировать степенными функциями вида

$$\bar{E}_3 = b\Pi^\beta; \quad \bar{R}_3 = a\Pi^{-\alpha}, \quad \bar{R} = \text{const}; \quad (5)$$

$$\bar{E}_3 = cR_H^\gamma; \quad \bar{R}_3 = dR_H^\delta, \quad \Pi = \text{const}. \quad (6)$$

Постоянные коэффициенты a, b, c, d , входящие в (5), (6), находятся, исходя из тех или иных критериев аппроксимации.

Правомерность использования соотношений (5), (6) для аппроксимации вычисленных по методике [3] зависимостей (1), (2) иллюстрируется данными, приведенными в табл. 1, 2. Эти данные соответствуют ПВЭ, нагрузочные характеристики которого приведены на рисунке.

Таблица 1

Зависимости $\bar{E}_3 = f(\Pi)$, $\bar{R}_3 = f(\Pi)$ при $\bar{R}_H = 125$ Ом

Π , Вт/м ²	20	40	60	80	100	120	Примечание
\bar{E}_3 , В	5,1	7,4	9,5	11,2	12,5	13,8	Расчет по 3
\bar{E}_3 , В	5,5	7,7	9,5	11,3	12,7	14,1	Аппроксимация с коэффициентом: $b = 0,96$; $\beta = 0,56$
\bar{R}_3 , Ом	140	138	137	136	135	134	Расчет по 3
	146	141	138	136	135	134	Аппроксимация с коэффициентом: $a = 170$; $\alpha = 0,05$

Зависимость $\bar{E}_3 = f(\bar{R}_H)$, $\bar{R}_3 = f(\bar{R}_H)$ при $\Pi = 100 \text{ Вт/м}^2$

\bar{R}_H , Ом	100	200	400	600	700	Примечание
\bar{E}_3 , В	11,8	13,0	13,8	14,2	14,3	Расчет по 3
	12,1	12,9	13,7	14,1	14,3	Аппроксимация с коэффициентом: $c = 8,2$; $\gamma = 0,085$
\bar{R}_3 , Ом	123	142	165	183	189	Расчет по 3
	124	142	165	182	188	Аппроксимация с коэффициентом: $d = 44$; $\delta = 0,22$

Полученные соотношения (5), (6) описывают ПВЭ как зависимый от величины Π и \bar{R}_H источник постоянного тока и является его макромоделью. Применяя эту макромодель, можно составить эквивалентную схему цепей постоянного тока ректенны, что позволяет использовать ее для расчета КПД схем сбора линейных электрических цепей.

Список литературы: 1. Лучанинов А. И., Шокало В. М., Щербина А. А. Проектирование крупноапертурных антенных решеток с выпрямительными элементами для систем передачи энергии на СВЧ // Функциональные электродинамические системы и элементы. Саратов, Изд-во Саратов. ун-та. 1988. С. 88—103. 2. Ильин В. Н., Коган В. М. Разработка и применение программ автоматизации схемотехнического проектирования. М., 1984. 368 с. 3. Приемно-выпрямительные элементы ректенных систем / Я. С. Шифрин, А. И. Лучанинов, В. М. Шокало. Х., 1988. 181 с. Деп. в УкрНИИТИ 31.03.89. № 941. 4. Лучанинов А. И., Шокало В. М., Щербина А. А. Двухполупериодные приемно-выпрямительные элементы ректен // Радиотехника. 1989. Вып. 94. С. 53—58.

Поступила в редколлегию 18.12.89

УДК 537.84

А. А. АЛЕКСАНДРОВА, канд. физ.-мат. наук

СТАЦИОНАРНОЕ МГД ОБТЕКАНИЕ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Изучение физических явлений в межпланетном пространстве, в солнечной короне, в лабораторной плазме показало наличие в них неоднородностей [1], которые хорошо моделируются в рамках магнит-