

*Д.В. ГРЕЦКИХ, канд. техн. наук, А.В. ГОМОЗОВ, канд. техн. наук,
Ш.Ф.А. АЛЬ-САМАРАЙ, Д.Ю. ГОРЕЛОВ, канд. техн. наук, А.А. СТОРОЖЕВ*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЕМНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕКТЕНН СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ К ТРУДНОДОСТУПНЫМ ОБЪЕКТАМ

Введение

Данная статья является продолжением работ [1 – 5], в которых рассмотрены варианты построения и технической реализации систем беспроводной передачи энергии (БПЭ) между наземными объектами на дальностях прямой видимости и систем БПЭ для повышения энергоснабжения низкоорбитальных малогабаритных космических аппаратов (НМ КА), а также аварийной зарядки батареи химической НМ КА в случае нештатной ситуации. В [2, 3] предложены варианты построения систем БПЭ малой дальности к труднодоступным объектам, расположенным в горах, на островах морей и крупных озер на дальностях прямой видимости. Предложенные системы БПЭ состоят из передающей подсистемы, построенной на основе многопозиционной системы излучения (МСИ) с фокусировкой одноступенчатых дискретных V-образных многочастотных сигналов и приемной подсистемы – ректенны. В данных работах достаточно подробно рассмотрены вопросы технической реализации и особенностях функционирования передающей подсистемы БПЭ и недостаточно рассмотрены эти вопросы для приемной подсистемы, а именно, к ее основному функциональному узлу – ректенне.

Цель статьи – частичное устранение этих пробелов. В [3] обоснованы основные требования к предложенным системам БПЭ, в которых, одним из важных конструктивных требований к ректенне, является обеспечение, как можно меньших ее массогабаритных показателей, для обеспечения требуемой повышенной устойчивости к ветровой нагрузке. Для обеспечения выполнения этого требования, необходимо решить задачу по выбору варианта конструктивного исполнения ректенны, позволяющего достичь максимально возможного значения удельной мощности, снимаемой с 1 м^2 апертуры с использованием современной элементной базы.

Такую задачу возможно решить либо увеличением рабочей частоты, либо с помощью ректенн, принимающих поле на ортогональных поляризациях. Актуальными также являются вопросы, связанные и с повышением надежности ректенны за счет применения схемных решений, ослабляющих влияние выхода из строя выпрямительных диодов на эффективность преобразования микроволнового излучения в постоянный ток.

В [1 – 5] предложено использовать в качестве излучателей МСИ передающей подсистемы БПЭ к труднодоступным наземным объектам – РЛС наведения ракет зенитно-ракетного комплекса (ЗРК) «ТОР-М1» (частота излучения – $4,3 \text{ ГГц}$), либо РЛС станции обнаружения целей ЗРК «Оса-АКМ» (частота излучения – 10 ГГц), а для систем БПЭ НМ КА – РЛС типа «Обзор-3» (РЛ141), входящей в состав радиовысотомера ПРВ-17 украинской разработки (частота излучения – $2,45 \text{ ГГц}$). В связи с этим, учитывая перечисленные выше требования, в работе проведены исследования направленные на поиск оптимальных конфигураций приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ) ректенн принимающих поле на ортогональных поляризациях на различных частотах ($2,45$, $4,3$ и 10 ГГц).

1. Оценка потенциальных характеристик ПВЭ

Согласно описанному в [6] подходу для анализа ректенн, на первоначальном этапе исследований были оценены потенциальные возможности ПВЭ с различными типами выпрямительных диодов, параметры которых приведены в табл. 1. Далее на основании получен-

ных результатов проведен выбор выпрямительного диода, по критерию обеспечения максимально достижимого КПД выпрямления.

Таблица 1

Тип диода	I_s, A	C_0, Φ	$R_{п}, Ом$	$P_{д}, Вт$	α
SMS7630	$5 \cdot 10^{-6}$	$0,14 \cdot 10^{-12}$	20	0,1	28,25
SMS7621	$4 \cdot 10^{-8}$	$0,1 \cdot 10^{-12}$	12	0,1	28,25
SMS3928	$9 \cdot 10^{-13}$	$0,39 \cdot 10^{-12}$	4	0,1	28,25
BB914	$130 \cdot 10^{-15}$	$260 \cdot 10^{-15}$	4,5	0,1	28,25
3A149A-3	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$0,1 \cdot 10^{-12}$	6	0,1	23,026
3A208A	$2,94 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-12}$	8	0,5	3,69

В табл. 1 приняты следующие обозначения: I_s – ток насыщения; C_0 – емкость перехода при нулевом напряжении на $p-n$ -переходе; $R_{п}$ – сопротивление потерь; $P_{д}$ – допустимая входная мощность; α – показатель неидеальности ВАХ диода

$$i(u) = I_s (e^{\alpha u} - 1).$$

Результаты расчета зависимостей КПД выпрямления (при входной мощности $P_{вх}$ равной допустимой мощности диода $P_{д}$) ПВЭ с различными диодами от его входного сопротивления на различных частотах представлены на рис 1.

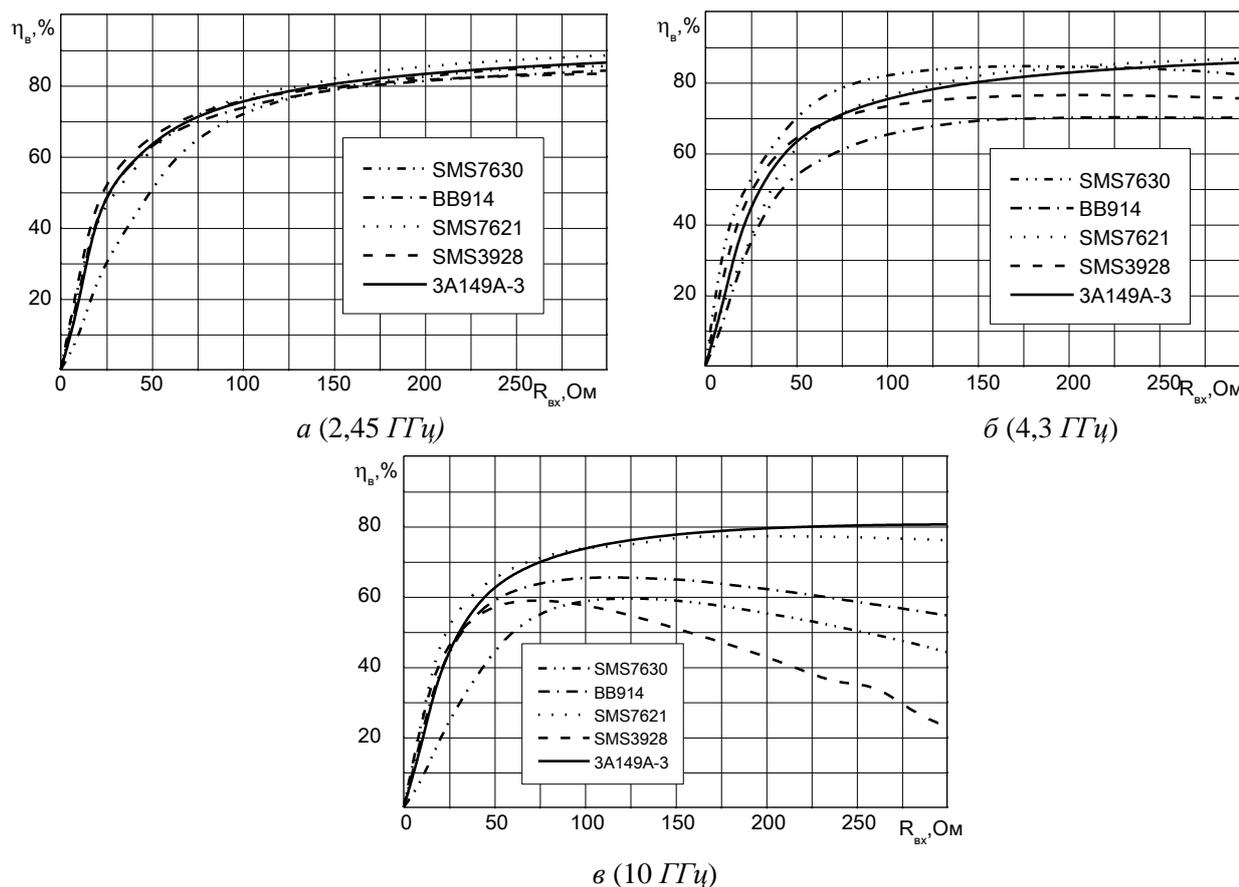


Рис. 1. Зависимость КПД выпрямления ПВЭ от его входного сопротивления

Из рис. 1, в видно, что с ростом частоты КПД выпрямления ПВЭ на диодах BB914, SMS7630, SMS3928 существенно зависит от паразитных элементов этих диодов (см. эквивалентное представление ПВЭ [6, 7]). Поэтому данные диоды были исключены из дальнейшего анализа.

Так как диод 3A208A имеет иную допустимую мощность (см. табл. 1), то характеристики ПВЭ на его основе приведены на отдельном графике, представленном на рис. 2.

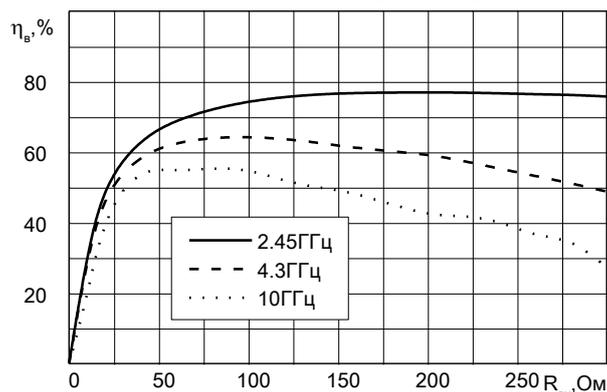


Рис. 2. Зависимость КПД выпрямления ПВЭ от его входного сопротивления

Из приведенных зависимостей видно, что наилучшими характеристиками обладает ПВЭ с бескорпусным диодом Шоттки 3A149A-3, на котором можно достичь КПД выпрямления порядка 85% на частотах 2,45 и 4,3 ГГц, и 80 % на частоте 10 ГГц. И кроме того, паразитные элементы этого диода слабо влияют на КПД выпрямления в диапазоне рассматриваемых частот. Поэтому, на основании проведенного анализа, был выбран данный диод для дальнейших расчетов.

2. Выбор и расчет излучающей структуры ПВЭ

В качестве излучающей структуры ПВЭ выбрана система коллинеарных ленточных микрополосковых проводников, в разрывы которых через равные промежутки включены выпрямительные диоды Шоттки (рис. 3).

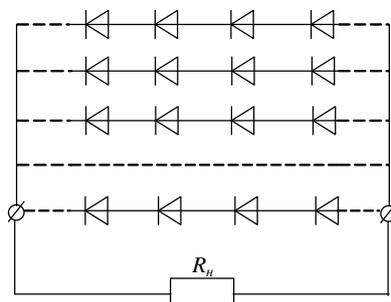


Рис. 3. Излучающая структура типа «коллинеарные провода»

Использование таких излучателей конструктивно выгодно по следующим причинам.

1. Необходимая мощность в нагрузке ректенны достигается объединением ПВЭ, как эквивалентных генераторов ЭДС холостого хода, схемой сбора мощности постоянного тока (рис. 4). Предложенная конфигурация излучающей структуры ПВЭ позволяет легко реализовать последовательно-параллельную схему сбора мощности постоянного тока. Для получения заданной мощности в нагрузке ректенны необходимы определенные значения ЭДС ректенны E_p и сопротивления ректенны R_p по постоянному току. Требуемое значение E_p достигается последовательным соединением ПВЭ в линейке

$$E_p = \sum_{n=1}^N E_m^n,$$

а R_p – параллельным соединением линеек

$$\frac{1}{R_p} = \sum_{m=1}^M \frac{1}{\sum_{n=1}^N R_m^n},$$

где N – число эквивалентных генераторов в линейке, а M – число линеек.

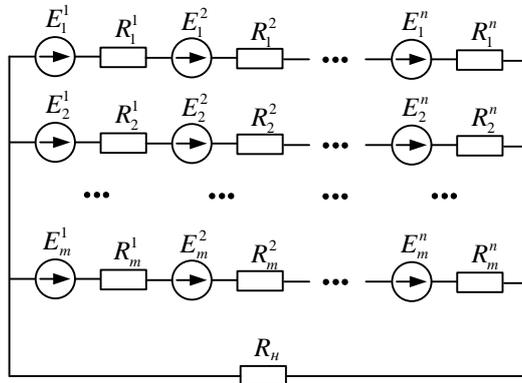


Рис. 4. Схема объединения ПВЭ по постоянному току

На рис. 4 нижний индекс указывает номер линейки, а верхний – номер эквивалентного генератора в линейке.

2. Повышается надежность ректенны, т.к. при выходе из строя ряда линеек, ректенна сохранит свою работоспособность, но естественно с худшими параметрами (это особенно актуально для мощных систем БПЭ).

Для уменьшения габаритных размеров и увеличения удельной мощности постоянного тока, снимаемой с квадратного метра апертуры, предложена двухслойная микрополосковая ректенна (рис. 5). В нижнем слое которой, размещены излучатели, принимающие поле с вертикальной поляризацией, а в верхнем – с горизонтальной.

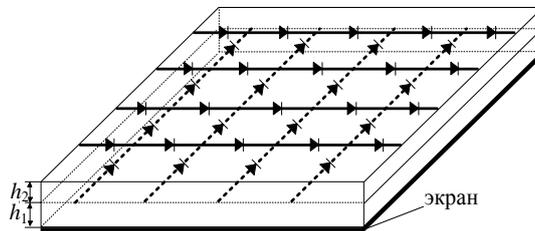


Рис. 5. Фрагмент ректенны работающей на ортогональных поляризациях

Для ячейки периодичности (рис. 6) проведен расчет ее энергетических и электродинамических характеристик в приближении бесконечной решетки [7]. Излучающая структура при фиксированной толщине излучателей d , настраивалась в резонанс совместно с паразитными элементами диода путем варьирования шага решетки и толщиной диэлектрических слоев h_1, h_2 (рис. 5).

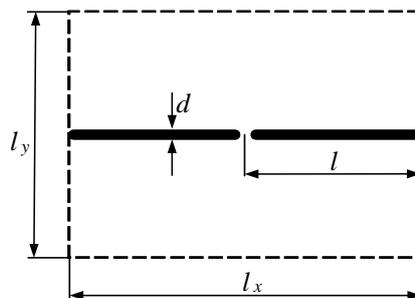


Рис. 6. Топология ячейки периодичности

В таб. 2 приведены результаты расчета геометрических размеров излучающей структуры ПВЭ, его входного сопротивления на основной частоте и частотах гармоник а также уровня гармоник. Уровень гармоник ξ_n определялся по формуле

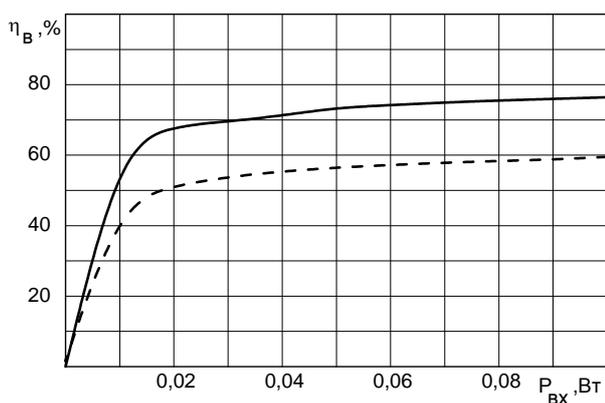
$$\xi_n = 10 \lg \frac{P_{\Sigma n}}{P_{\text{вх}}},$$

где – $P_{\Sigma n}$ – мощность, излучаемая на частотах гармоник, $P_{\Sigma n} = P_n \eta_1(nf_0)$; P_n – мощность n -й гармоники выделяемая на реальной части входного сопротивления $Z_{\text{вх}}(nf)$ на частотах гармоник рабочей частоты f_0 ; $\eta_1(nf)$ – КПД линейной подсистемы ПВЭ [6, 7] на частотах гармоник; $P_{\text{вх}}$ – входная мощность, принятая в расчетах 0,1 Вт.

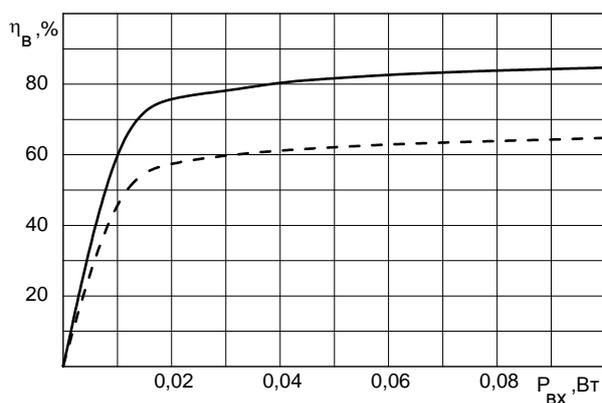
Таблица 2

Номер гармоники	1	2	3	4	5
Частота 2,45 ГГц ($kh_1=0,39, kh_2=0,35, kl=0,5, kl_x \times kl_y=1,0 \times 1,0$)					
$Z_{\text{вх}}(nf_0), \text{ Ом}$	418	310,1 – $j184,0$	165,2 – $j205,1$	92,0 – $j173,0$	56,2 – $j143,1$
$\xi, \text{ дБ}$	-	-9,747	-23,77	-29,289	-30,588
Частота 4,3 ГГц ($kh_1=0,42, kh_2=0,37, kl=0,5, kl_x \times kl_y=1,0 \times 1,0$)					
$Z_{\text{вх}}(nf_0), \text{ Ом}$	514	174,9 – $j244,2$	59,0 – $j67,6$	27,0 – $j116,3$	16,2 – $j89,1$
$\xi, \text{ дБ}$	-	-9,9	-22,69	-31,272	-40,205
Частота 10 ГГц ($kh_1=0,28, kh_2=0,31, kl=0,5, kl_x \times kl_y=1,0 \times 1,0$)					
$Z_{\text{вх}}(nf_0), \text{ Ом}$	956	25,0 – $j154,0$	6,5 – $j78,0$	2,9 – $j52,0$	1,6 – $j39,1$
$\xi, \text{ дБ}$	-	-18,24	-25,95	-30,703	-32,414

На рис. 7. приведены динамические характеристики ПВЭ на различных частотах с идеальными фильтрами (сплошная кривая) и без фильтров (пунктирная кривая). Расчет проводился с учетом пяти частотных гармоник.



а (2,45 ГГц)



б (4,3 ГГц)

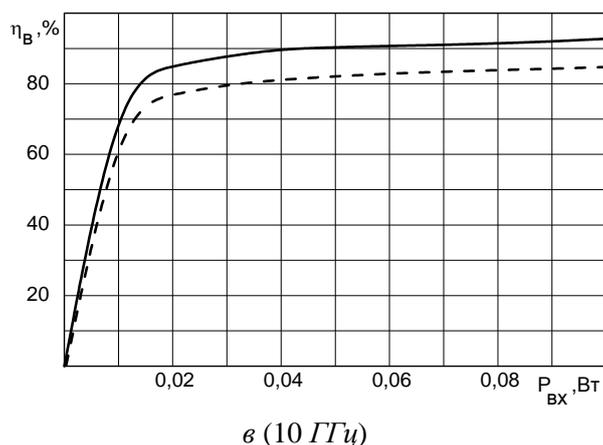


Рис. 7. Динамические характеристики ПВЭ

Из полученных результатов видно, что применение фильтров гармоник в ПВЭ, позволяет значительно увеличить КПД выпрямления. Отметим, что на частоте 10 ГГц, потери энергии за счет переизлучения на частотах гармоник сказывается в меньшей степени, чем на частотах 2,45 и 4,3 ГГц. Это объясняется тем, что для выбранного диода, с ростом номера гармоники, активная часть входного сопротивления $Z_{вх}(nf_0)$ ПВЭ на порядок меньше по сравнению с частотами 2,45 и 4,3 ГГц (см. табл. 2) и это, как показано в работе [7] приводит к улучшению фильтрации гармоник.

Выводы

В ходе проведенных исследований выяснены предельные возможности ПВЭ микроволнового диапазона, выполненных на современных диодах Шоттки, с излучателями принимающими поле на ортогональных поляризациях.

На основании полученных результатов предполагается в дальнейшем провести исследования крупноапертурных ректенн (с предложенной конструкцией ПВЭ) систем БПЭ к труднодоступным объектам с целью оценки отдаваемой мощности постоянного тока потребителю и разработки рекомендаций по улучшению радиотехнических систем данного класса, а также обеспечения экологической безопасности.

Список литературы: 1. Гомозов А.В. Возможность повышения энергоснабжения низкоорбитальных космических аппаратов при использовании беспроводной передачи энергии микроволновым лучом / А.В. Гомозов, Д.В. Грецких, А.В. Губа, А.В. Нарышев, Ш.Ф.А. Аль-Самарай, О.Л. Синько // Технология приборостроения. – 2011. – Вып. 2. – С. 27-33. 2. Гомозов А.В. Передающая подсистема беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на основе многопозиционной системы излучателей с фокусировкой излучения. Ч. 1. / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В. Грецких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Радиотехника. 2011. – Вып. 165. – С. 112-118. 3. Гомозов А.В. Передающая подсистема беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на основе многопозиционной системы излучателей с фокусировкой излучения. Ч. II. / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В. Грецких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Радиотехника. – 2011. – Вып. 167.– С. 18-24. 4. *Gretskih D.V., Gomozov A.V., Shokalo V.M., Al-Sammarraie Sh.F.A., Lukavenko O.S.* Principles of construction and application of modem microwave wireless energy transmission systems // Proceedings of the XIth International Conference "Modern problems of radio engineering telecommunications and computer science" Dedicated to the 60th anniversary of the Radio Department at the Lviv Politechnic National University. Lviv-Slavske, Ukraine, 21-24 February, 2012. Lviv Politechnic National University. – L., 2012. – P. 27–29. 5. Гомозов А.В. Возможные варианты реализации и принципы построения систем беспроводной передачи энергии с фокусировкой излучения для наземных и космических объектов / А.В. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В.Грецких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Технология приборостроения. – 2011. – Вып. 1. – С. 13-21. 6. Грецких Д.В. Методика расчета приемно-выпрямительных элементов ректенн систем беспроводной передачи энергии / Д.В. Грецких, А.В. Гомозов, В.А. Назаренко, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Авіаційно-космічна техніка і технологія: зб. наук. пр., Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – 2011. – Вып. 4(81). – С. 94-105. 7. Шокало В.М. Крупноапертурные антенны-выпрямители систем беспроводной

передачи энергии микроволновым лучем / ВМ. Шокало, А.И. Лучанинов, А.М. Рыбалко, Д.В. Грецих / Под ред. В.М.Шокало. – Х. : Коллегиум, 2006. – 308 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 11.02.2013