

*В. М. ШОКАЛО, д-р техн. наук, А. А. КОНОВАЛЬЦЕВ, канд. техн. наук,  
М. А. ОМАРОВ, канд. техн. наук, Ю. А. ЛУЧАНИНОВ, Д. В. ГРЕЦКИХ*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ МИКРОВОЛНОВЫМ ЛУЧОМ С МАКСИМАЛЬНЫМ КПД

Идея создания космических энергокомплексов на базе систем беспроводной передачи энергии (БПЭ) микроволновым лучом не нова. Однако ее воплощение пока сдерживается слабым развитием экспериментальной базы и отсутствием хорошо отработанных узлов систем БПЭ, пригодных для применения в космосе. В частности, до настоящего времени еще не проведены демонстрационные эксперименты по беспроводной передаче энергии в космосе, что явилось бы существенным шагом в развитии исследований по космической энергетике. В связи с вводом в эксплуатацию Международной космической станции "Альфа", решение задачи проведения демонстрационных экспериментов по БПЭ становится реальным.

Цель данной работы состоит в разработке возможных сценариев проведения демонстрационных экспериментов по БПЭ и изложении результатов наземных испытаний масштабной модели космической энергосистемы.

Базой для этих исследований является ранее проведенный в Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ) в рамках Национальной космической программы Украины цикл работ, направленный на развитие теории и техники систем БПЭ. Один из результатов данных работ – это проведение первых в Украине наземных экспериментов по беспроводной передаче энергии. При этом удалось создать на частоте 2,45 ГГц экспериментальный образец системы БПЭ с суммарным КПД 44% при плотности потока мощности СВЧ-луча в плоскости расположения ректенны  $185 \text{ Вт/м}^2$  [1].

Дальнейшим развитием исследований в области БПЭ является переход к экспериментам по беспроводной передаче энергии в космосе в условиях, максимально приближенных к тем, в которых будут функционировать реально действующие гелиоэнергетические системы будущего.

Предварительные работы в данном направлении были проведены в ХНУРЭ по госконтракту с НКАУ №6-128/98. В результате предложен один из возможных сценариев проведения первых опытов по БПЭ на борту исследовательского модуля Международной космической станции «Альфа» с помощью масштабной модели космической энергосистемы.

Экспериментальные исследования масштабной модели системы БПЭ СВЧ-лучом на борту исследовательского модуля преследуют следующие цели:

- поднять престиж Украины как космической державы;
- изучение комплексного воздействия условий космоса на работоспособность всей системы БПЭ и отдельных ее элементов;
- выявление степени воздействия СВЧ-излучения на работоспособность штатных радиоэлектронных средств, установленных на модуле.

Состав и краткие расчетные характеристики узлов экспериментальной системы БПЭ приведены в таблице. Планируемая схема эксперимента по беспроводной передаче энергии СВЧ-лучом изображена на рис. 1. В данном случае, в силу конструктивных особенностей модуля, расстояние между передающей антенной и ректенной должно быть фиксированным.

Предлагается следующая процедура выполнения эксперимента:

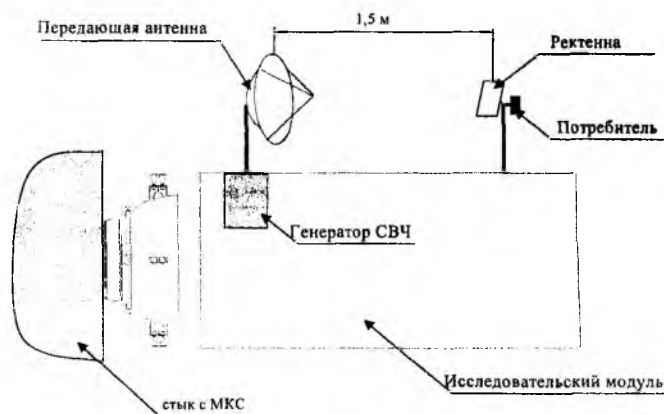


Рис. 1

1. Установка с помощью манипулятора на внешней поверхности модуля на рабочее место передающей антенны в свернутом виде и ректенны, вместе с потребителем, жестко прикрепленным к ее задней части.

2. Выдвижение штанг, на которых закреплена передающая антенна и ректенна. Разворачивание антенны. В результате выполнения этой процедуры расстояние между плоскостями апертур передающей антенны и ректенны должно установиться приблизительно равным 1,5 м (точное значение будет выяснено на этапе непосредственной подготовки эксперимента). При этом апертуры передающей антенны и ректенны должны быть параллельными друг другу.

3. Включение генератора, СВЧ-нагрузкой которого является передающая антенна. Энергия с помощью СВЧ-луча передается на апертуру ректенны. За счет выпрямления ректенной энергии СВЧ-луча на ее выходе образуется напряжение постоянного тока. Этим напряжением запитывается потребитель.

4. Сворачивание передающей антенны. Стягивание в исходное положение выдвижных штанг, на которых укреплены передающая антенна и ректенна.

5. Перемещение с помощью манипулятора передающей антенны в свернутом виде и ректенны внутрь модуля на исходное положение.

Таблица

№ п/п	Название	Функциональное назначение	Технические характеристики
1	Генератор СВЧ	Генерирование электрических колебаний СВЧ диапазона	Рабочая частота - 2,45 ГГц; выходная мощность - 20 Вт; потребляемая мощность - 35 Вт; масса - до 3 кг.
2	Передающая антенна	Излучение и фокусировка СВЧ пучка	Форма – параболическая раскрывающаяся конструкция; диаметр апертуры - 0,9 м; масса - 2 кг
3	Ректенна	Извлечение СВЧ энергии из свободного пространства и преобразование ее в постоянный ток	Выходная мощность – не менее 8 Вт; выпрямительные элементы – диоды Шоттки с предельной мощностью 0,5 Вт; способ установки – устанавливается на штанге на расстоянии 1,5 м от передающей антенны, масса - около 2 кг; габариты - 0,25x0,25 м <sup>2</sup>
4	Потребитель	Передачик, сообщающий информацию о срабатывании системы	Объем - 1 дм <sup>3</sup> ; вес - 1 кг

В процессе проведения эксперимента необходим оперативный контроль космонавтов за его ходом. Помощь космонавтов может потребоваться при разворачивании и сворачивании оборудования, устанавливаемого на внешней стороне модуля.

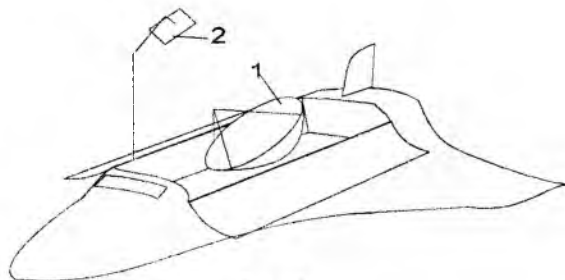


Рис. 2

Для объективности оценки состояния подготовки демонстрационных экспериментов по БПЭ в космосе следует отметить, что существуют проекты, предложенные исследователями других стран. Так, например, в США планируется демонстрация передачи с помощью системы БПЭ, установленной в грузовом отсеке космического транспортного корабля многоцелевого использования, изображенной на рис. 2, на котором показаны передающая антенна (1) и ректенна (2). Расстояние передачи 10-20 м на частоте 2,45 ГГц

при мощности передатчика 250 Вт и КПД всей системы 60 % [2].

Опираясь на этот проект, нетрудно предложить более совершенный второй сценарий эксперимента по БПЭ с переменным расстоянием между передающей антенной и ректенной. Конструкция и

габариты грузового отсека корабля многоразового использования допускают установку дополнительных механизмов и приспособлений для этих целей. Выполнение экспериментов по второму сценарию приводит, по сравнению с первым сценарием, к большим затратам, однако позволяет провести моделирование реальной ситуации изменения дальности передачи энергии, свойственной мощным космическим энергокомплексам, снабжающих космические аппараты, которые не имеют собственных энергоустановок.

как первый шаг в осуществлении демонстрационных экспериментов в хнурэ проведены наземные испытания масштабной модели космической энергосистемы. При ее создании ставилась цель – достичь максимума результирующего КПД. Известно [3], что максимальный результирующий КПД системы БПЭ, достигается при выполнении следующих условий:

- число френеля системы  $\tau \approx 1,5$ ;
- амплитудное распределение по апертуре передающей антенны должно быть гауссовским, а фазовое – квадратичным;
- нагрузка по постоянному току ректенны должна быть оптимальной.

Схема установки, в которой реализованы перечисленные условия, приведена на рис. 3. Измерения проводились в безэховой камере (1) размером  $6 \times 2,5$  м, выполненной из материала “экран-320”. По сути установка представляет собой экспериментальную систему передачи энергии СВЧ-лучом. Передающая часть системы передачи энергии СВЧ-лучом состоит из генератора СВЧ (2), блока управления (3), который вынесен за пределы безэховой камеры, и передающей антенны (4). Генератор работает на частоте 2,45 ГГц. В качестве генераторного прибора используется магнетрон м-105-1. В применяемой конструкции выходная мощность не регулировалась и ее величина, измеренная с помощью ваттметра (5), равнялась  $550 \pm 50$  Вт. Для изменения плотности потока мощности падающего на ректенну (6) СВЧ-пучка применяется устанавливаемый рядом с передающей антенной поглощающий экран (7) из материала “Экран-320”. Величина затухания в экране от 4,5 до 15 дБ изменялась за счет увеличения его толщины (количество вертикально установленных листов поглощающего материала).

Передающая антенна содержит зеркало и облучатель. Поверхность зеркала имеет параболическую образующую с отношением  $f/2R_1 = 0,38$ , где  $r_1$  – радиус зеркала ( $2r_1=90$  см),  $f$  – фокусное расстояние. Облучатель выполнен в виде вибратора с рефлектором. Питание рефлектора осуществляется жестким коаксиальным фидером. Для выполнения условий осевой симметрии диаграммы направленности плечи вибраторов наклонены к фидеру. Конструкция облучателя допускает его перемещение вдоль фокальной оси зеркала. За счет этого реализовывалось необходимое для фокусировки квадратичное фазовое распределение по апертуре зеркала путем выноса облучателя из фокуса на величину смещения  $\delta$ , которое при заданном расстоянии фокусировки  $d_0$  равно [4]

$$\Delta = \frac{f^2}{D_0} \left[ 1 + \frac{f}{D_0} + \left( \frac{2R_1}{4f} \right)^2 \right].$$

Рассмотрим теперь конструкцию испытываемой ректенны. Она состоит из девяти однотипных модулей (три ряда и три этажа) и имеет квадратную форму с габаритным размером 0,7 м. Топология одного модуля изображена на рис. 4. В состав модуля входит 16 приемно-выпрямительных элементов (пвэ) (восемь параллельно включенных линеек, в каждой из которых последовательно соединены два пвэ). Элементы модуля располагаются в узлах решетки с треугольной сеткой и шагом  $\lambda_0/2$  ( $\lambda_0$  – длина волны). В качестве элемента модуля выбран петлевой вибратор над экраном со встречно включенными в его рассечки диодами 3A208A, имеющими допустимую мощность 0,5 Вт. Вибратор настраивался в резонанс совместно с емкостью диода. Особенность модуля состоит в том, что развязка выпрямительных схем ПВЭ и цепей постоянного тока в нем осуществляется за счет включения проводов схемы сбора мощности постоянного тока в точки нулевого потенциала вибраторов пистолькорса. Плата модуля изготавливалась из фольгированного стеклотекстолита ( $\epsilon_r=6$ ) толщиной 2 мм и раз-

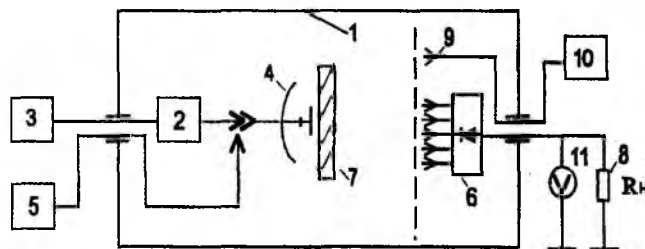


Рис. 3

мещалась над экраном на высоте 9 мм. Всего ректенна содержала 144 элемента. Конструктивно ректенна выполнена таким образом, что модули могут быть соединены между собой по постоянному току последовательно, параллельно или последовательно-параллельно. Кроме того, в ректенне предусмотрена возможность подключения своего сопротивления нагрузки к каждому модулю. Технологически возможно осуществить и подключение нагрузки по постоянному току к любой линейке модуля.

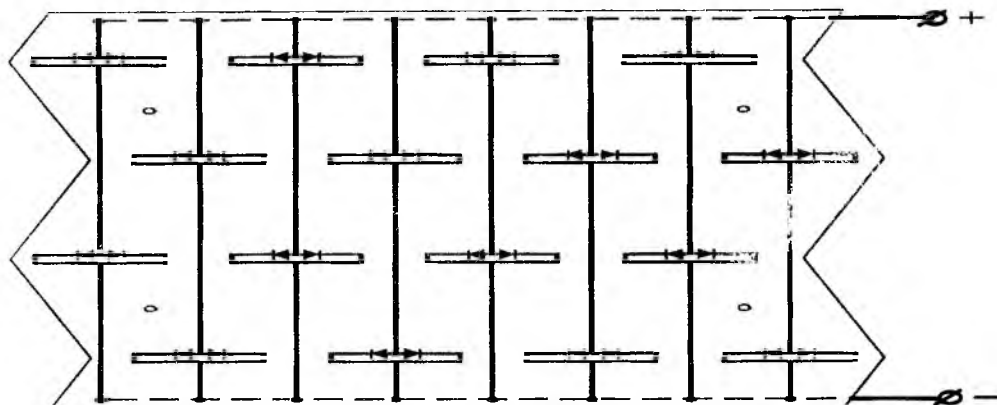


Рис. 4

Рассмотрим методику измерения КПД экспериментальной СПЭСЛ. Эта величина находится как отношения мощности постоянного тока в нагрузке ректенны к мощности излучения передающей антенны с указанием значения плотности потока мощности  $P$  в раскрыве ректенны при котором проводились измерения.

Реально мощность излучения определялась следующим образом. На место ректенны устанавливалась антенна измерителя плотности потока энергии (9), и при включенном СВЧ-генераторе фиксировался на индикаторном блоке (10) измерителя плотности потока энергии значение максимальной плотности потока мощности  $P_{\max}$  в центре апертуры ректенны. Требуемое значение  $P_{\max}$  и распределение поля по сечению пучка устанавливалось за счет выбора расстояния между апертурами передающей антенны и ректенны, а также за счет изменения толщины поглощающего экрана (7). Затем стандартным образом проводились измерения коэффициента затухания  $\alpha$  в поглощающем экране, мощности  $P_r$  на выходе генератора СВЧ и коэффициента стоячей волны передающей антенны (на частоте 2,45 ГГц он равен 1,3). При соединении антенны с генератором использовались короткие отрезки жестких коаксиальных линий, тепловые потери в которых пренебрежимо малы, поэтому мощность излучения рассчитывалась по формуле

$$P_{\Sigma} = P_r (1 - \rho^2) / \alpha,$$

где  $\rho$  – модуль коэффициента отражения передающей антенны.

Мощность постоянного тока в нагрузке  $P_0$  рассчитывалась по результатам измерения вольтметром (11) напряжения  $u_0$  на сопротивлении  $r_n$ , а результирующий КПД  $\eta = P_0 / P_{\Sigma}$ .

Измерения КПД проводились при  $d_0=3$  м, что при указанных габаритах передающей и приемной апертур соответствует  $\tau=1,535$  и  $P_{\max}=80$  Вт/м<sup>2</sup>. На рис. 5 показаны экспериментальные кривые: распределения плотности потока мощности по сечению падающего на апертуру ректенны СВЧ-пучка (рис.5, а), зависимости мощности постоянного тока от сопротивления нагрузки ректенны при последовательном соединении модулей (рис.5, б) и мощности в нагрузке ректенны от дальности передачи (рис. 5, в).

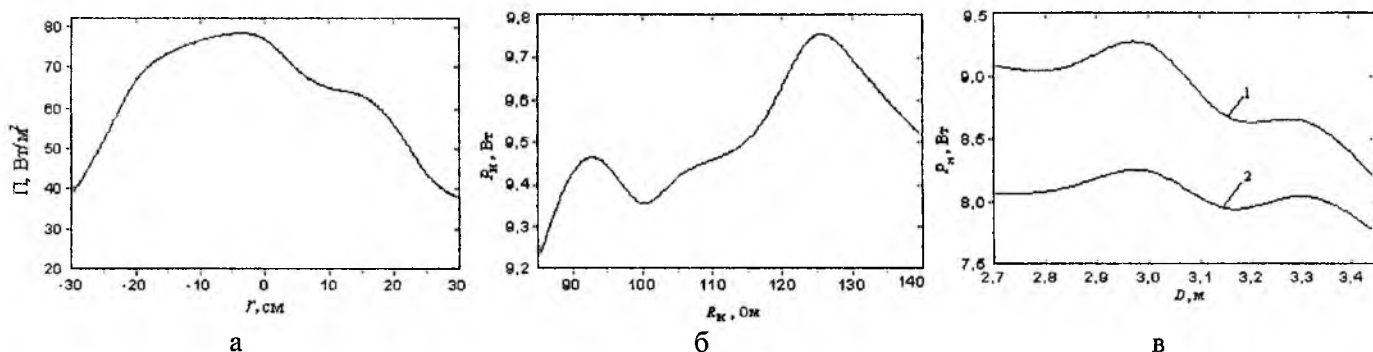


Рис. 5

Как видно из приведенных результатов, в экспериментальной установке удалось реализовать условия максимального результирующего КПД. Во-первых, распределение плотности потока мощности по апертуре ректенны является существенно неравномерным; во-вторых, наблюдается ярко выраженный максимум мощности постоянного тока от сопротивления нагрузки; в-третьих, при расстоянии фокусировки  $d_0=3$  м мощность в нагрузке (т.е. И КПД) максимальна (рис. 5, в, кривая 1). Кривая 2 на рис. 5, в измерена при синфазном облучении апертуры передающей антенны (облучатель находится в фокусе параболы). Из сравнения результатов, отображенных на рис. 5, в, следует, что эффект фокусировки дает существенный выигрыш. При квадратичном фазовом распределении (кривая 1) в точке  $d_0=3$  м измеренный КПД  $\eta=52,5$  %, а при синфазном облучении  $\eta=46$ %.

При проведении опытов выявлена также значительная зависимость мощности в нагрузке от дальности передачи энергии сфокусированным лучом (рис.5, в, кривая 1), в то время как при синфазном облучении апертуры передающей антенны мощность в нагрузке изменяется менее резко (рис.5, в, кривая 2). Последнее обстоятельство может стать определяющим при выборе способа передачи энергии в реальных космических системах БПЭ.

Проведенные экспериментальные исследования позволили отработать конструкции передающей антенны и модулей ректенны, которые могут применяться при демонстрационных экспериментах в космосе.

**Список литературы:** 1. Теоретические и экспериментальные исследования крупноапертурных антенных решеток /А.И. Лучанинов, В.М. Шокало, А.А. Коновальцев и др // Радиотехника. 1998. Вып. 106. С. 63-72. 2. Chang K., Patton A.D., Kennedy M.O. Demonstration of microwave power transmission in space // Int. Symp. On sps, paris, 1991.Р. 343-347. 3. Shifrin V.S., Shokalo V.M., Konovaltsev A.A. Ways of increase of rectenna efficiency / 46-th international Astronauticall Congress, Oslo, Norway. 4. Корниенко Л.Г. Теория и техника направляющих и излучающих систем. Харьков. ХВУ, 1994. 625 с.

Харьковский национальный Университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 10.10.2001