

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-47-53>



УДК 537.5

Беспроводная передача электрической энергии

В.И. Каганов[@],
Буй Хыу Чык

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: kaganovwil@yandex.ru

Электрическая энергия от электростанций к промышленным объектам и населенным пунктам в большинстве случаев передается по проводным воздушным или подземным линиям, охватывающим территории значительного размера. Однако иногда возникает необходимость в беспроводной передаче электрической энергии на объекты, расположенные в труднодоступных районах. С развитием космической электроэнергетики, основанной на размещении солнечных электростанций в космическом пространстве, проблема беспроводной передачи электрической энергии станет особенно актуальной. В этой связи в некоторых странах проводятся исследования в области беспроводной передачи электрической энергии с помощью как лазерного, так и СВЧ-излучения.

Рассмотрены основы построения систем беспроводной передачи электрической энергии на небольшие расстояния с помощью СВЧ-излучения. Анализируются и рассчитываются два варианта построения подобных систем: с применением параболических антенн, и с помощью фазированных антенных решеток (ФАР). Для обоих вариантов рассчитаны основные параметры систем при беспроводной передаче электрической энергии на 200 м. В первом случае используются мощные электровакуумные приборы – магнетрон или прямопролетный клистрон, во втором – мощные СВЧ-полевые транзисторы. Для второго варианта предлагается суммирование мощностей СВЧ-генераторов путем их взаимной синхронизации.

Ключевые слова: электрическая энергия, параболическая антенна, фазированная антенная решетка, СВЧ-генератор.

Для цитирования: Каганов В.И., Буй Хыу Чык. Беспроводная передача электрической энергии. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):47-53. <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-47-53>

Wireless power transmission

William I. Kaganov[@],
Bui Huu Chuc

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author, e-mail: kaganovwil@yandex.ru

Electrical energy from power plants to industrial facilities and settlements is mostly transmitted by wire-connected air or underground lines covering vast territories. However, in some rare cases there is a need for wireless transmission of electrical power to objects located in hard-to-reach areas. The problem of wireless transmission of electrical energy will become especially urgent as space electric power industry based on the placement of solar power plants in outer space is being developed. In this regard, several countries are conducting studies on the problem of electrical energy transmission using both laser and microwave radiation. The fundamentals of building systems for wireless transmission of electrical energy over short distances using microwave radiation are considered. Two options for constructing such systems are analyzed and calculated: using parabolic antennas and using phased array antennas. For both options the main parameters of systems for wireless transmission of electrical energy at 200 m were calculated. In the first case, powerful microwave devices are used: a magnetron or a direct-flight klystron; in the second case, microwave powerful field-effect transistors. For the second option the summation of the powers of microwave generators by means of their mutual synchronization is proposed.

Keywords: electrical energy, parabolic antenna, phased array antenna, microwave generator.

For citation: Kaganov W.I., Bui Huu Chuc. Wireless power transmission. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):47-53 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-47-53>

Сущность проблемы

Электрическая энергия от электростанций к промышленным объектам и населенным пунктам в подавляющем числе случаев передается по проводным воздушным или подземным линиям, охватывающим территории значительного размера. Однако в некоторых случаях возникает необходимость в беспроводной передаче электрической энергии на объекты, расположенные в труднодоступных районах, на современные летательные аппараты типа квадрокоптера или иные транспортные средства.

С развитием космической электроэнергетики, основанной на размещении солнечных электростанций в космическом пространстве [1], проблема беспроводной передачи электрической энергии станет особенно актуальной. В связи с этим в некоторых странах проводятся исследования по проблеме беспроводной передачи электрической энергии с помощью как лазерного, так и СВЧ-излучения. Приведем несколько примеров по второму направлению.

Первый пример. Во Франции с помощью СВЧ-излучения (частота 2450 МГц) осуществлена передача энергии мощностью 10 кВт на остров, удаленный от берега на расстояние 700 м [2].

Второй пример. В Японии компания JAXA создала установку по передаче СВЧ-излучения (частота 5.8 ГГц) мощностью 1.8 кВт. При этом на расстоянии 55 м от передающего устройства мощность принятого СВЧ-сигнала составила 340 Вт [3].

Установки по передаче электрической энергии посредством СВЧ-излучения

Структура системы передачи электрической энергии включает два терминала: передающий и принимающий (рис. 1).

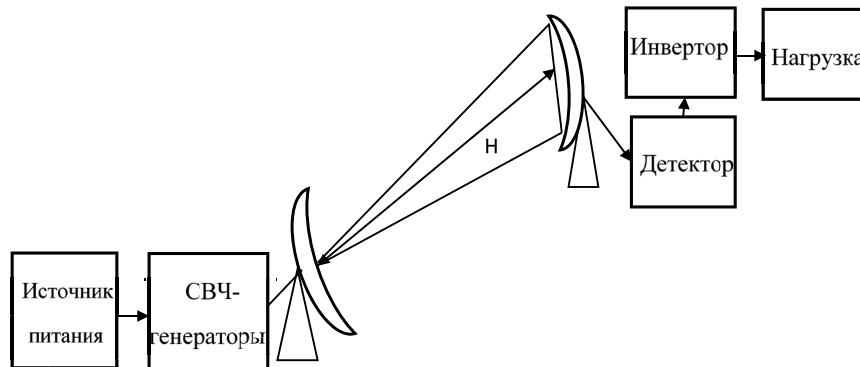


Рис. 1. Структура системы передачи электрической энергии.

С помощью первого терминала осуществляется преобразование электрической энергии первичного источника в СВЧ-излучение, с помощью второго – преобразование мощности принятого СВЧ-излучения в электрическую энергию постоянного тока, которая с помощью инвертора может быть преобразована в электрическую энергию переменного тока частотой 50 Гц. Передача и прием СВЧ-энергии осуществляется с помощью антенн параболического или иного типа.

Общий КПД установки определяется по формуле:

$$\eta = K_1 K_2 K_3 K_4, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент преобразования энергии первичного источника в энергию СВЧ-колебаний, K_2 – коэффициент потерь, связанный непосредственно с излучением, K_3 – коэффициент преобразования СВЧ-энергии принятого сигнала в энергию постоянного тока, K_4 – КПД инвертора, преобразующего постоянный ток с переменной частотой 50 Гц. Значение общего КПД, вычисленное согласно (1), не превышает 20%.

СВЧ-генератор передающего терминала может быть электровакуумного или полупроводникового типа. В первом случае наиболее целесообразно применение магнетрона или прямопролетного клистрона, как имеющих наиболее высокий КПД (не менее 50%).

Во втором случае возможно применение СВЧ-нитрид-галлиевых или арсенид-галлиевых транзисторов, как имеющих наибольшую мощность в СВЧ-диапазоне [4]. Так, например, транзистор типа SGK5867-30А имеет мощность до 30 Вт при частоте до 6 ГГц. В случае увеличения мощности СВЧ-генератора потребуется суммирование мощностей определенного числа СВЧ-транзисторных усилителей.

Антенны обоих терминалов могут быть параболического типа или представлять собой фазированные антенные решетки.

Основные параметры антенн терминалов

Рассмотрим сначала случай с параболической антенной (рис. 2).

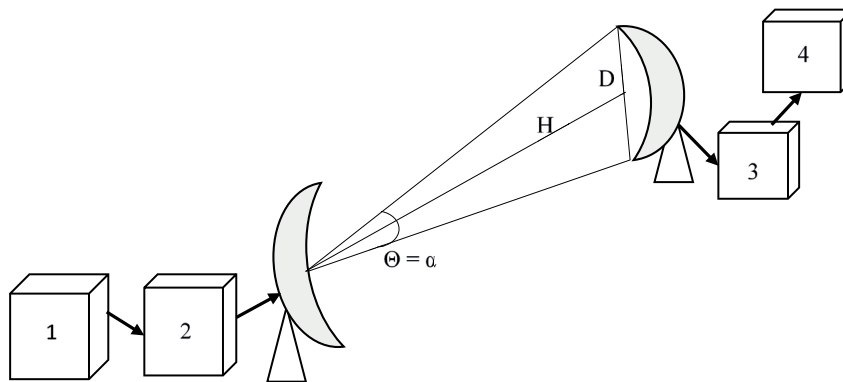


Рис. 2. Система с параболической антенной:
1 – источник питания, 2 – СВЧ-генераторы, 3 – СВЧ-детекторы, 4 – нагрузка.

Вычисления можно провести, используя формулу, связывающую основные параметры параболической антенны [5]:

$$\Theta = 57(\lambda / D), \tag{2}$$

где Θ – ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны (град), λ – длина волны (м), D – диаметр антенны (м)

$$D = \sqrt{(2/3)\lambda H}, \tag{3}$$

H – расстояние между двумя параболическими антеннами с равными диаметрами зеркала (рис. 2).

В случае применения на обоих терминалах фазированных антенных решеток одинакового типа расчет можно провести по формулам 4–7.

Согласно рис. 3 телесный угол раскрытия (в градусах) диаграммы направленности спутниковой антенны следует определить по формуле:

$$\alpha = 2 \frac{180}{\pi} \text{atan}(L / 2H), \tag{4}$$

где H – расстояние между антеннами (м), L – размер ФАР (м).

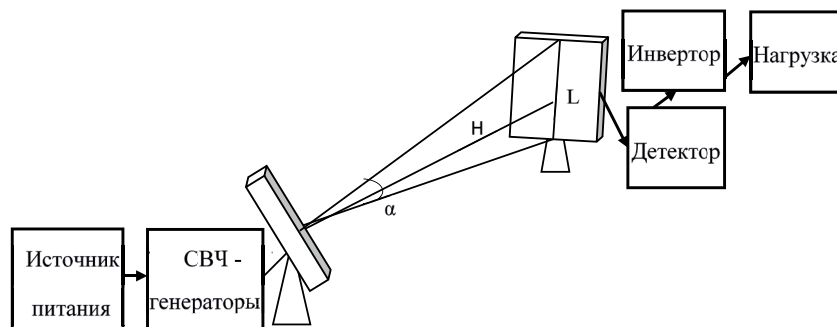


Рис. 3. Система с фазированной антенной решеткой.

Диаграмма направленности такой ФАР в одной плоскости [6,7] имеет вид:

$$E(\Theta) = U_0 \left| \frac{\sin(0,5N\beta)}{\sin(0,5\beta)} \right|, \quad (5)$$

где

$$\beta = (2\pi b / \lambda)(\sin \Theta - \sin \Theta_0), \quad (6)$$

$$\Theta_0 = \arcsin(\Delta\varphi\lambda / 2\pi b), \quad (7)$$

λ – длина волны (см); b – расстояние между двумя соседними излучателями (см); N – число излучателей в одной плоскости, $\Delta\varphi$ – разность фаз сигналов между двумя соседними излучателями.

При вертикальном луче угол $\Theta_0 = 0$ и $\Delta\varphi = 0$.

Рассчитаем по приведенным формулам параметры для обоих типов антенн при длине волны $\lambda = 5$ см (частота 6 ГГц).

Для первого варианта (параболическая антенна) при дистанции $H = 200$ м согласно (3) и (4) получим: $\Theta = 1.10$, $D = 2.58$ м.

Для второго варианта при $b/\lambda = 1$ и $N = 32$ диаграмма направленности ФАР в одной плоскости, рассчитанная по (4)–(7), приведена на рис. 4.

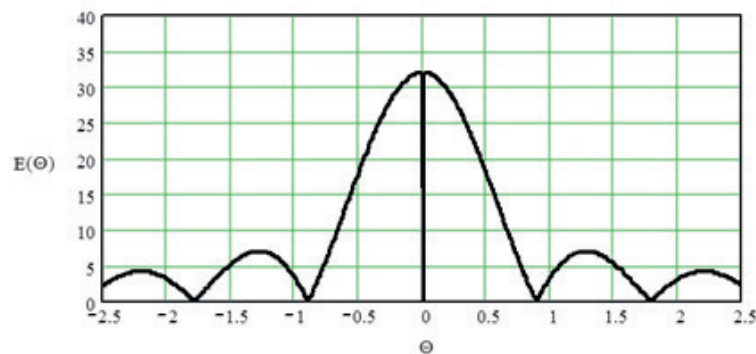


Рис. 4. Диаграмма направленности ФАР в одной плоскости.

Из данного примера следует, что ширина основного лепестка диаграммы направленности, рассчитываемой ФАР по уровню 0.71 от максимума, равна $\Theta = 10$. Общее число излучателей $N^2 = 1024$, общая площадь $S = L^2 = 10.24$ м², где сторона квадрата $L = bN = 0.1 \cdot 32 = 3.2$ м (рис. 3).

Два варианта СВЧ-генераторов

Первый вариант генератора основан на применении в передающем терминале мощного электровакуумного прибора – магнетрона или прямопролетного клистрона непрерывного типа и параболической антенны.

Второй вариант основан на применении мощных СВЧ-полевых транзисторов (их мощность не превышает 50 Вт) и ФАР. Для исключения применения множества делителей-сумматоров мощности наиболее рациональным является построение мощного СВЧ-генератора по принципу взаимной синхронизации множества СВЧ-автоге-

нераторов [9]. Структурная схема такого генератора приведена на рис. 5, в которой каждая ячейка состоит из автогенератора (транзисторного или на основе диода Ганна) и СВЧ-усилителя мощности, подключаемого к одному из излучателей ФАР.

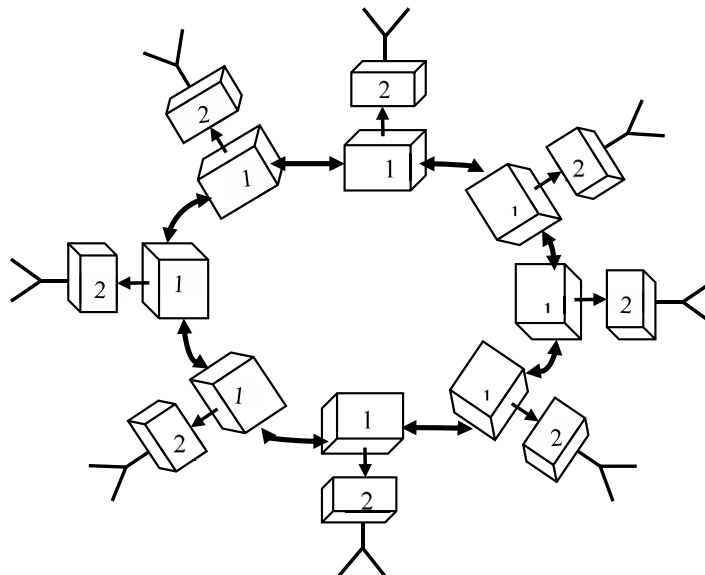


Рис. 5. Структура СВЧ-автогенераторов с взаимной синхронизацией:
1 – СВЧ-автогенераторы, 2 – СВЧ-усилители мощности.

Анализ СВЧ-генератора, основанного на принципе взаимной синхронизации множества автогенераторов приведен в [8]. В этой работе показано, что при расхождении в момент включения колебаний автогенераторов по частоте в пределах 5%, в системе устанавливается единый, одинаковый по частоте, режим работы всех автогенераторов.

Заключение

Проведенный в статье анализ может явиться основой для проектирования систем беспроводной дистанционной передачи электрической энергии не только на небольшие расстояния, но и для проектирования в будущем космических систем солнечной энергетики.

Литература:

1. Каганов В.И., Буй Хыу Чык. Беспроводная передача электрической энергии с наземного терминала на квадрокоптер. *Инженерная физика*. 2019;1:34-38. <https://doi.org/10.25791/infizik.01.2019.391>
2. Lan Sun Luk J.D., Celeste A., Romanacce P., Chane Kuang Sang L., Gatina J.C. Point-to-point wireless power transportation in Reunion Island. In: Proceedings 48th International Astronautical Congress, Turin, Italy, 6-10 October 1997. IAF-97- R.4.08
3. Ground demonstration testing of microwave wireless power transmission. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/ssps/150301.html>
4. Гаврилов В.А. Мощные нитрид-галлиевые транзисторы. *Новости электроники*. 2015;7:5-20.
5. Нефедов Е.И. Электромагнитные поля и волны. М.: Академия, 2014. 359 с. ISBN 978-5-4468-0565-5.
6. Каганов В.И. Радиоэлектронные системы автоматического управления. М.: Горячая линия - Телеком, 2009. 432 с. ISBN 978-5-9912-0058-5
7. Активные фазированные антенные решетки, под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2004. 488 с. ISBN 5-93108-045-7
8. Каганов В.И. Взаимная синхронизация как способ суммирования мощностей сверхвысокочастотных генераторов. *Радиотехника и электроника*. 2019;64(1):51-53. <https://doi.org/10.1134/S0033849419030069>

References:

1. Kaganov W.I., Bui Huu Chuc. Wireless Transmission of Electrical Energy from the Ground Terminal to Quadrocopter. *Inzhenernaya fizika = Engineering Physics*. 2019;1:34-38 (in Russ.). <https://doi.org/10.25791/infizik.01.2019.391>
2. Lan Sun Luk J.D., Celeste A., Romanacce P., Chane Kuang Sang L., Gatina J.C. Point-to-point wireless power transportation in Reunion Island. In: Proceedings 48th International Astronautical Congress, Turin, Italy, 6-10 October 1997. IAF-97- R.4.08
3. Ground demonstration testing of microwave wireless power transmission. [Electronic resource]: URL access mode: <http://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/ssps/150301.html>
4. Gavrilov V.A. Powerful gallium nitride transistors. *Novosti elektroniki = Electronics News*. 2015;7:5-20.
5. Nefedov E.I. *Elektromagnitnye polya i volny (Electromagnetic fields and waves)*. Moscow: Akademiya; 2014. 359 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4468-0565-5
6. Kaganov V.I. *Radioelektronnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya (Radio-electronic automat control systems)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2009. 432 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0058-5
7. *Aktivnye fazirovannye antennye reshetki (Active phased array antennas)*. (Ed.). D.I. Voskresenskii. Moscow: Radiotekhnika; 2004. 488 p. (in Russ.). ISBN 5-93108-045-7
8. Kaganov W.I. Mutual synchronization as a method of summing the power of microwave generators. *Radiotekhnika i elektronika = Radio engineering and electronics*. 2019;64(1):51-53 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0033849419030069>

Об авторах:

Каганов Вильям Ильич, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиотехнических и телекоммуникационных систем, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 57199328762.

Буй Хыу Чык, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиотехнических и телекоммуникационных систем, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

William I. Kaganov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Department of Radioelectronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 57199328762.

Bui Huu Chuc, Graduate Student of the Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Department of Radioelectronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Поступила: 17.02.2020; получена после доработки: 29.07.2020; принята к опубликованию: 06.09.2020.