

Д. ф.-м. н. В. А. ВАНКЕ

Россия, Московский гос. университет им. М. В. Ломоносова  
E-mail: vanke@orc.ru

Перепечатано из журнала  
«Электроника: Наука. Технология. Бизнес»,  
№ 5, 2007

## СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА — ПЕРСПЕКТИВЫ В КОСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

*Проблемы современной энергетики хорошо известны: ограниченность природных ресурсов, вредные выбросы в атмосферу, утилизация радиоактивных отходов АЭС и др. Одно из перспективных направлений в решении этих проблем — использование солнечного излучения как уже существующего, неисчерпаемого и экологически чистого источника энергии. К сожалению, эффективность наземных устройств преобразования солнечной энергии в электрическую во многом зависит от погодных условий, и работают они только в светлое время суток. Поэтому в ряде стран разрабатываются проекты создания солнечных электростанций в космосе, на орбите Земли. Но здесь возникает другая сложность — как передать полученную энергию на Землю? Сейчас наиболее эффективным способом решения этой задачи представляется использование СВЧ-излучения.*

Один из крупнейших российских физиков, лауреат Нобелевской премии, академик Петр Леонидович Капица посвятил немало времени исследованию перспектив использования СВЧ-колебаний и волн для создания новых и высокоэффективных систем передачи энергии. В 1962 году в предисловии к своей монографии он писал «... я хочу напомнить, что электротехника, прежде чем прийти на службу энергетике, в прошлом веке занималась широко только вопросами электросвязи (телеграф, сигнализация и пр.). Вполне вероятно, что история повторится: теперь электроника используется главным образом для целей радиосвязи, но ее будущее лежит в решении крупнейших проблем энергетике» [1].

В то же время известный специалист в области СВЧ-электроники Вильям Браун (William C. Brown) проводил в США (Raytheon Co.) эксперименты по созданию трактов передачи энергии СВЧ-пучком (Wireless Power Transmission — WPT). Было впервые испытано устройство, способное принимать и преобразовывать энергию СВЧ-пучка в энергию постоянного тока. Это устройство — антенная решетка, состоящая из полуволновых диполей, независи-

мо нагруженных на высокоэффективные диоды с барьером Шоттки, — получило название ректенна (от англ. rectify и antenna). Впоследствии ректенны совершенствовались во многих странах. Уже в 1976 году [2] Вильяму Брауну удалось передать СВЧ-пучком мощность 30 кВт на расстояние в 1 милю (1,6 км). КПД ректенны в этом эксперименте превышал 80%.

Одно из возможных применений СВЧ-пучков — передача энергии с солнечных космических электростанций (СКЭС).

### Общая схема СКЭС

В 1968 году американский специалист в области космических исследований Питер Е. Глейзер (Peter E. Glaser) предложил размещать крупные панели солнечных батарей на геостационарной орбите, а вырабатываемую ими энергию (уровня 5—10 ГВт) передавать на поверхность Земли хорошо сфокусированным пучком СВЧ-излучения, преобразовывать в энергию постоянного или переменного тока технической частоты и раздавать потребителям [3]. Такая схема (рис. 1) позволяет использовать интенсивный поток солнечного излучения, существующий на геостационарной орбите (~1,4 кВт/м<sup>2</sup>), и передавать полученную энергию на поверхность Земли непрерывно — вне зависимости от времени суток и погодных условий [3—12]. За счет наклона экваториальной плоскости к плоскости эклиптики под углом 23,5° спутник на геостационарной орбите практически постоянно освещен потоком солнечной радиации. Исключения составляют лишь небольшие периоды времени вблизи дней весеннего и осеннего равноденствия, когда спутник попадает в тень Земли. Эти

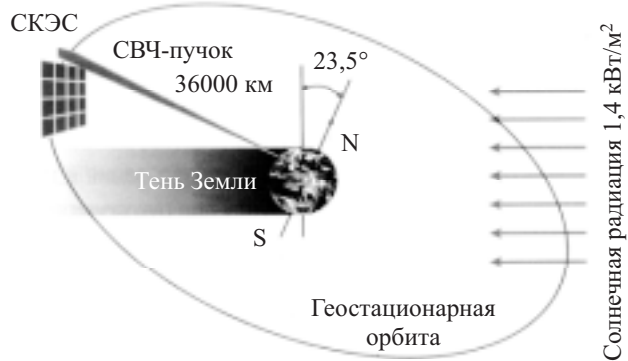


Рис. 1. Общая схема СКЭС

периоды можно точно предсказать, и в сумме они не превышают 1% от общей продолжительности года.

Частота электромагнитных колебаний СВЧ-пучка должна соответствовать тем диапазонам, которые выделены для промышленных применений, научных исследований и медицины. Если эта частота выбрана равной 2,45 ГГц, то метеорологические условия, включая густую облачность и интенсивные осадки, практически не влияют на КПД передачи энергии. Диапазон 5,8 ГГц весьма привлекателен, поскольку дает возможность уменьшить размеры передающей и приемной антенн. Однако влияние метеорологических условий здесь требует дополнительного изучения.

Современный уровень развития СВЧ-электроники позволяет говорить о довольно высоком значении КПД передачи энергии СВЧ-пучком с геостационарной орбиты на поверхность Земли — порядка 70—75%. При этом диаметр передающей антенны обычно выбирают равным 1 км, а размер наземной ректенны — 10×13 км для широты местности 35°. СКЭС с уровнем выходной мощности 5 ГВт имеет плотность излучаемой мощности в центре передающей антенны 23 кВт/м<sup>2</sup>, а в центре приемной — 230 Вт/м<sup>2</sup> (рис. 2).

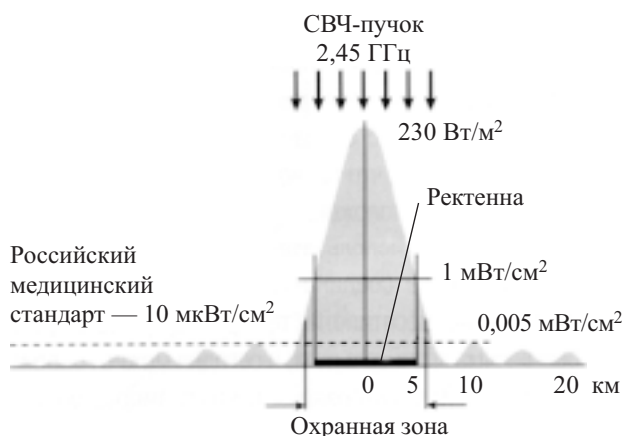


Рис. 2. Распределение плотности СВЧ-мощности на поверхности Земли

Были исследованы различные типы твердотельных и вакуумных СВЧ-генераторов для передающей антенны СКЭС. В частности, Вильям Браун показал, что хорошо освоенные промышленностью магнетроны, предназначенные для СВЧ-печей, можно использовать также и в передающих антенных решетках СКЭС. Для этого каждый из них нужно снабдить собственной цепью отрицательной обратной связи по фазе по отношению к внешнему синхронизирующему сигналу (так называемый Magnetron Directional Amplifier — MDA). Передающая антенна СКЭС в этом случае представляет собой обратно переизлучающую активную антенную решетку на основе щелевых волноводов. Ее грубая ориентация производится механически, а для точного наведения СВЧ-пучка служит пилот-сигнал, излучаемый из центра приемной ректенны и анализируемый на поверхности передающей антенны сетью датчиков.



Рис. 3. Эскиз общего вида ректенны

Ректенна (рис. 3) — высокоэффективная приемно-преобразующая система, однако низковольтность диодов и необходимость их последовательной коммутации может приводить к лавинообразным пробоям. Устранить эту проблему во многом позволяет циклотронный преобразователь энергии [8, 13, 14].

#### Достоинства СКЭС

Вкратце опишем преимущества, которые имеет СКЭС как одна из энергосистем будущего.

— СКЭС использует неистощимую (возобновляемую) энергию Солнца — уже созданного природой термоядерного котла, благодаря которому существует все живое на нашей планете.

— Не расходуются ограниченные и ценные для технологических процессов будущего природные ресурсы Земли (уголь, нефть, газ и др.).

— СКЭС обеспечивает минимальные тепловые потери (КПД ректенны может достигать 85—90%), что довольно существенно — тепловое загрязнение является одной из наиболее крупных глобальных проблем человечества.

— Отсутствуют выбросы, загрязняющие атмосферу.

— Нет проблем, связанных с захоронением радиоактивных отходов и/или отработавшего ресурс радиоактивного оборудования.

— Наземную приемную систему можно приподнять над поверхностью Земли, при этом ее прозрачность для солнечного излучения может достигать 80—90%. Это позволяет эффективно использовать площадь приемной системы для сельскохозяйственных или промышленных целей.

— Микроволновый пучок СКЭС можно легко перебрасывать с одной приемной системы на другую, тем самым обеспечивая возможность оперативного переключения территориально удаленных потребителей.

#### Из истории исследований в области СКЭС

Первое десятилетие после появления концепции СКЭС характеризовалось постепенным ростом интереса к ней со стороны ведущих аэрокосмических фирм — Boeing Aerospace Co., Grumman Aerospace Corp., Rockwell Inc. и др. Исследования в области СКЭС выполнялись за счет собственных ресурсов этих компаний [2].

В 1978—1979 годах в США под руководством Министерства энергетики (Department of Energy — DOE) и НАСА (NASA) была выполнена первая государственная научно-исследовательская программа, направленная на определение перспектив СКЭС [7]. В 1995—1997 годах НАСА вновь вернулось к обсуждению перспектив СКЭС, опираясь на прогресс технологий, достигнутый к тому времени [9]. Исследования были продолжены в 1999—2000 годах (Space Solar Power (SSP) Strategic Research & Technology Program) [10].

Наиболее активно и планомерно исследования в области СКЭС проводила Япония. В 1981 году под руководством профессоров М. Нагато (Makoto Nagatomo) и С. Сасаки (Susumu Sasaki) в Институте космических исследований Японии были начаты исследования по разработке прототипа СКЭС с уровнем мощности 10 МВт, который мог бы быть создан с использованием существующих ракетносителей. Создание такого прототипа позволяет накопить технологический опыт и подготовить основу для формирования коммерческих систем. Проект был назван СКЭС2000 (SPS2000) [7] (рис. 4) и получил признание во многих странах мира.

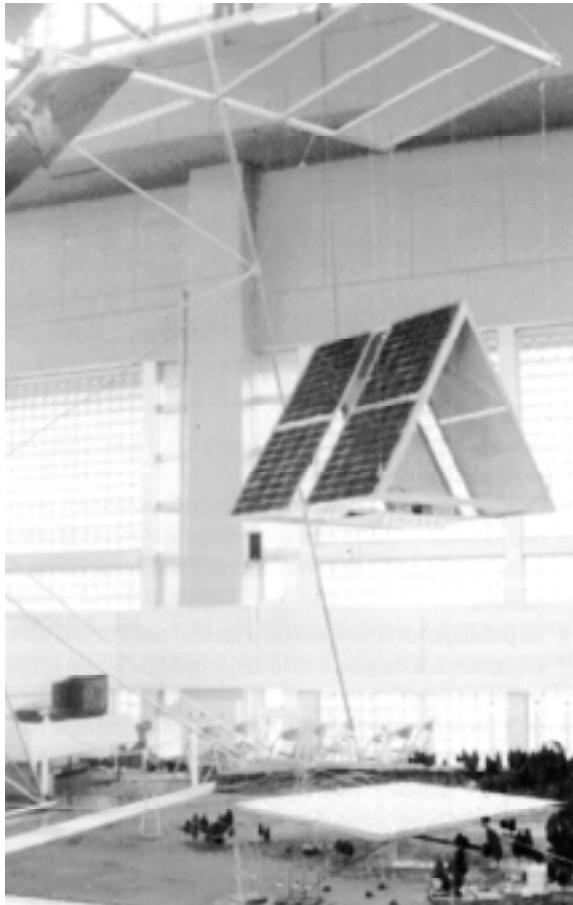


Рис. 4. Действующий макет SPS2000 в выставочном зале Института космических исследований Японии

Более 25 лет регулярно проводится ежегодный всеяпонский симпозиум по космической энергетике [12,15]. Особенно активно в развитии концепции СКЭС участвуют университет Киото — проф.

Х. Матсумото (Hiroshi Matsumoto), проф. К. Хашимото (Kozo Hashimoto), университет Хоккайдо — проф. К. Ито (Kiyohiko Itoh), университет Кобе — проф. Н. Кайя (Nobuyuki Kaya) и др. В 2003 году университет Киото получил статус перспективного центра исследований в области возобновляемых источников энергии (Center of Excellence on Sustainable Energy System). В 2004 году в том же университете организован научно-исследовательский институт возобновляемой среды обитания человека (Research Institute for Sustainable Humanosphere). Одним из крупных направлений работ этого института являются исследования в сфере СКЭС.

Франция, Канада, Россия, Германия и ряд других стран в той или иной мере также проводили исследования в области СКЭС.

### Варианты конструкции СКЭС

Ранние конструкции СКЭС с уровнем мощности 5 ГВт представляли собой плоскую панель солнечных батарей размером 5×10 км, постоянно ориентированную перпендикулярно потоку солнечной радиации (см. рис. 1). Передающая антенна диаметром 1 км связана с основной панелью сочленением типа карданного подвеса, что позволяет ориентировать ее на приемную ректенну, расположенную на поверхности Земли.

В этих конструкциях использовались Si-фотобатареи или фотобатареи на основе соединения GaAlAs с КПД порядка 12%. За прошедшие десятилетия прогресс в области фотобатарей был весьма значительным, и сегодня можно говорить о КПД порядка 30—40%. Это означает, что размеры, масса и стоимость СКЭС существенно снизятся. В дальнейшем эта тенденция будет, вероятно, продолжаться.

Современные конструкции полномасштабных СКЭС предполагают отказ от технически сложных и недостаточно надежных вращающихся узлов. Что-

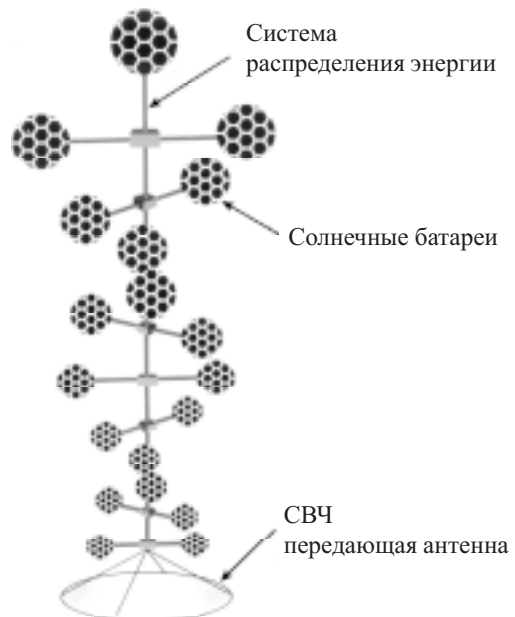


Рис. 5. Схема СКЭС с гравитационной стабилизацией (Япония)

бы стабилизировать СКЭС в пространстве, в таких конструкциях задействуют естественный градиент гравитационного поля Земли. Конструкция длиной 15—20 км (рис. 5) обеспечивает постоянную ориентацию СВЧ-пучка вдоль направления, исходящего из центра земного шара.

Еще один вариант — СКЭС с вращением конструкции (~1 об./ч), которое позволяет стабилизировать ее относительно потока солнечной радиации (рис. 6).



Рис. 6. Схема СКЭС с вращением конструкции (Япония)

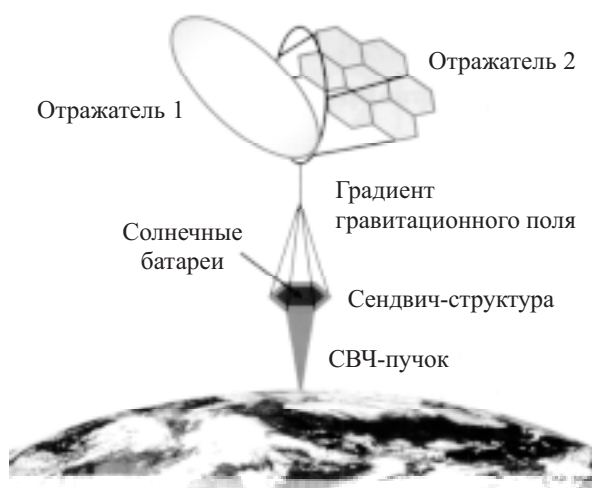


Рис. 7. Схема СКЭС, содержащей «сэндвич-структуру» (Япония)

Определенный интерес вызвала и так называемая «сэндвич-конструкция», объединяющая фотобатареи и передающую антенну СКЭС (рис. 7). Тонкопленочные надувные отражатели концентрируют солнечное излучение на той поверхности «сэндвич-структуры», которая содержит фотобатареи. В целом конструкция весьма перспективна, однако вопросы отвода тепла из внутренних частей «сэндвич-систем» должны быть подробно изучены. Это особенно актуально для диапазона 5,8 ГГц, которому соответствует меньший диаметр антенны и более высокая плотность мощности СВЧ-пучка.

#### Международное сотрудничество

Уже накоплен определенный позитивный опыт международного сотрудничества в области управля-

емого термоядерного синтеза (ITER), создания и использования международной космической станции (ISS), разработки и создания пускового ракетного комплекса «Морской старт» (Sea Launch) и др.

Международное сотрудничество подобного типа было бы весьма продуктивным для разработки и создания экспериментального прототипа СКЭС с уровнем мощности 5—10 МВт. Эти работы, вероятно, займут 10—20 лет. В проекте можно задействовать существующие или частично модернизированные ракетно-транспортные системы.

Коммерческое применение СКЭС (5—10 ГВт) станет возможным, скорее всего, не ранее чем через 30—50 лет. Для этого необходимы транспортные средства нового поколения с существенно сниженной удельной стоимостью доставки грузов на орбиту. Такие транспортные средства обязательно появятся в связи с общими тенденциями промышленного освоения космического пространства. Целенаправленные работы по линии СКЭС могут ускорить этот процесс.

СКЭС — одна из наиболее перспективных, экологически чистых энергосистем будущего, которая не только базируется на широкомасштабном использовании средств современной электроники, но и будет эффективно стимулировать ее развитие в дальнейшем.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Капица П. Л. Электроника больших мощностей.— М.: Изд. АН СССР, 1962.
- Ванке В. А., Лопухин В. М., Саввин В. Л. Проблемы солнечных космических электростанций // Успехи физических наук, 1977, т. 123, вып. 4, с. 633.
- Glaser P. E. Power from the Sun: its Future.— Science, 1968, vol. 162, p. 857.
- Гриликес В. А. Солнечные космические энергостанции.— Л.: Наука, 1986.
- Ванке В. А., Лесков Л. В., Лукьянов А. В. Космические энергосистемы.— М.: Машиностроение, 1990.
- Нариманов Е. А. Космические солнечные электростанции.— М.: Знание, 1991.
- Нагатоми М., Сасаки С., Наруо Й., Ванке В. А. Работы Института космических исследований Японии в области космической энергетики // Успехи физических наук, 1994, т. 164, с. 631.
- Vanke V. A., Matsumoto H., Shinohara N., Kita A. Cyclotron Wave Converter of Microwaves into DC.— IEICE Trans, on Electronics (Japan), 1998, vol. E81-C, No. 7, p. 1136.
- Mankins J. C. A Fresh Look at Space Solar Power: New Architectures, Concept and Technologies, 1997 - [http://www.spacefuture.com/archive/a\\_fresh\\_look\\_at\\_space\\_solar\\_power\\_new\\_architectures\\_concepts\\_and\\_technologies.shtml](http://www.spacefuture.com/archive/a_fresh_look_at_space_solar_power_new_architectures_concepts_and_technologies.shtml).
- Mankins J. C. The Promise and the Challenge of Space Solar Power.— July 2003, Japan/US Workshop, Kyoto Univ., Japan.
- Boswell D. Whatever happened to solar power satellites? — The Space Review, August 10, 2004, <http://www.thespacereview.com/article/214/1>.
- The Proceedings of the 8th SPS Symposium. Sept. 2005, Kyoto Univ., Japan.
- Будзинский Ю., Быковский С., Ванке В. Нетрадиционная вакуумная СВЧ-электроника на основе поперечных волн электронного потока.— ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, № 4, с. 38.
- Ванке В. А. Поперечные волны электронного потока в микроволновой электронике // Успехи физических наук, 2005, т. 175, № 9, с. 957.
- The Proceedings of the 25th Space Energy Symposium. March 10, 2006, ISAS/JAXA, Japan.