

# 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 энергетики" [1].

В то же время известный специалист в области СВЧ-электроники Вильям Браун (William C. Brown) проводил в США

В.Ванке, д.ф.-м.н.  
vanke@orc.ru

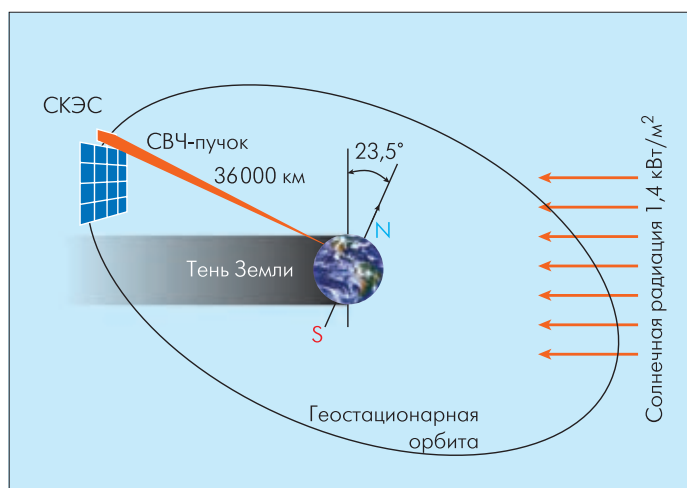
(Raytheon Co.) эксперименты по созданию трактов передачи энергии СВЧ-пучком (Wireless Power Transmission – WPT). Было впервые испытано устройство, способное принимать и преобразовывать энергию СВЧ-пучка в энергию постоянного тока. Это устройство – антенная решетка, состоящая из полуволновых диполей, независимо 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. Исключение составляют лишь небольшие периоды времени вблизи дней весеннего и осеннего равноденствия, когда спутник попадает в тень Земли. Эти 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 про-

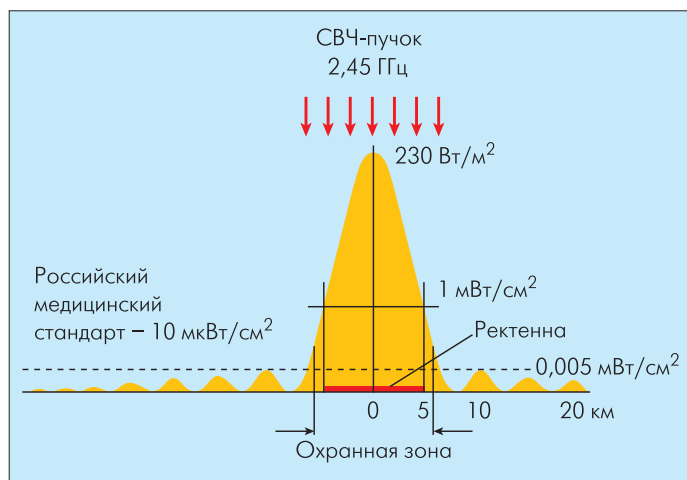


**Рис. 1. Общая схема СКЭС**

мышленных 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/м², а в центре приемной – 230 Вт/м² (рис.2).

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



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

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.

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].



**Рис.3. Эскиз общего вида ректенны**

### 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-исследова-



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

тельная 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.Нагатоми (Makoto Nagatomo) и С.Сакаки (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.

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. Чтобы 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).

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-системы" должны быть подробно изучены. Это особенно актуально для диапазона 5,8 ГГц, которому соответствует меньший диаметр антенны и более высокая плотность мощности СВЧ-пучка.

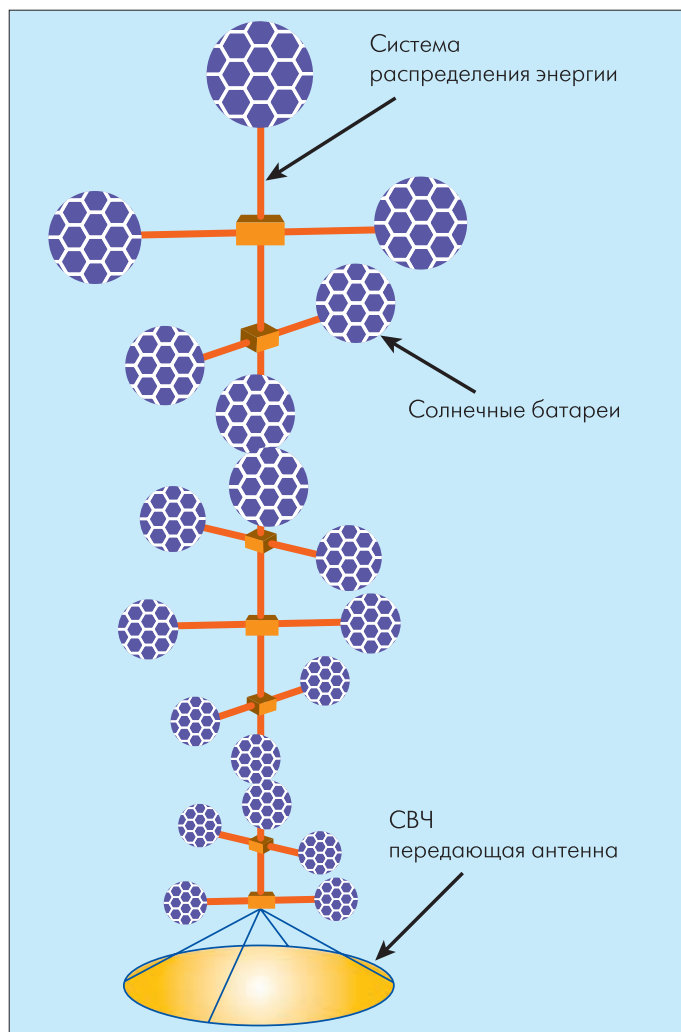


Рис.5. Схема СКЭС с гравитационной стабилизацией (Япония)

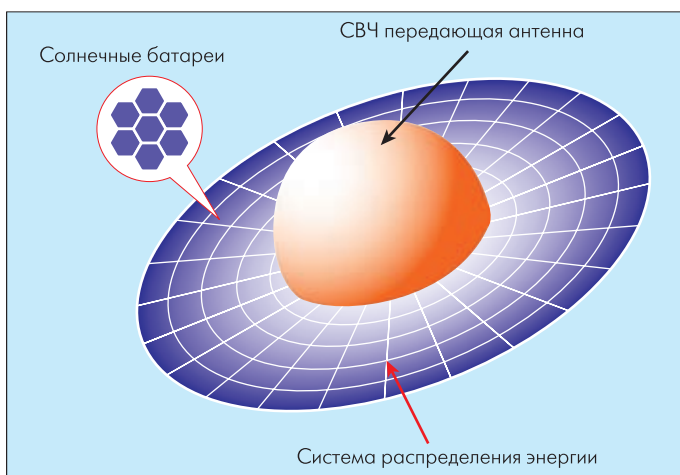


Рис.6. Схема СКЭС с вращением конструкции (Япония)

### МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Уже накоплен определенный позитивный опыт международного сотрудничества в области управляемого 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.

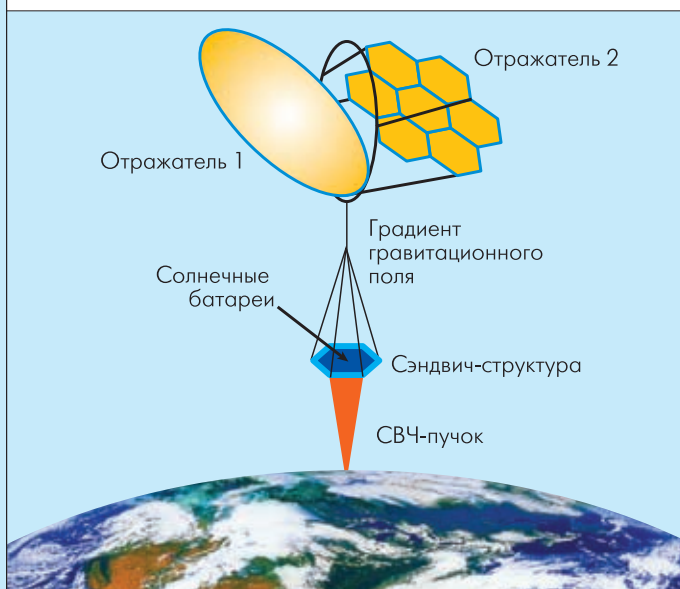


Рис.7. Схема СКЭС, содержащей "сэндвич-структуру" (Япония)

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

1. **Капица П.Л.** Электроника больших мощностей. – М.: Изд. АН СССР, 1962.
2. **Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л.** Проблемы солнечных космических электростанций. – Успехи физических наук, 1977, т. 123, вып. 4, с. 633.
3. **Glaser P.E.** Power from the Sun: its Future. – Science, 1968, vol. 162, p. 857.
4. **Грилихес В.А.** Солнечные космические энергостанции. – Л.: Наука, 1986.
5. **Ванке В.А., Лесков Л.В., Лукьянов А.В.** Космические энергосистемы. – М.: Машиностроение, 1990.
6. **Нариманов Е.А.** Космические солнечные электростанции. – М.: Знание, 1991.
7. **Нагатоми М., Сасаки С., Наруо Й., Ванке В.А.** Работы Института космических исследований Японии области космической энергетики. – Успехи физических наук, 1994, т. 164, с. 631.
8. **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.
9. **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).
10. **Mankins J.C.** The Promise and the Challenge of Space Solar Power. – July 2003, Japan/US Workshop, Kyoto Univ., Japan.
11. **Boswell D.** Whatever happened to solar power satellites? – The Space Review, August 10, 2004, <http://www.thespacereview.com/article/214/1>.
12. The Proceedings of the 8th SPS Symposium. Sept. 2005, Kyoto Univ., Japan.
13. **Будзинский Ю., Быковский С., Ванке В.** Нетрадиционная вакуумная СВЧ-электроника на основе поперечных волн электронного потока. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, № 4, с. 38.
14. **Ванке В.А.** Поперечные волны электронного потока в микроволновой электронике. – Успехи физических наук, 2005, т. 175, № 9, с. 957.
15. The Proceedings of the 25th Space Energy Symposium. March 10, 2006, ISAS/JAXA, Japan.