

ЭНЕРГОПИТАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАЗЕМНЫМИ МИКРОВОЛНОВЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

Г. А. Аскаръян, Г. М. Батанов, Ю. М. Еськов, И. А. Косый

Институт общей физики РАН, Москва, Россия

Рассмотрены некоторые аспекты дистанционной системы энергоснабжения низкоорбитальных космических аппаратов с помощью наземных СВЧ-источников. Дано описание работы плазменно-факельного преобразователя электромеханической энергии в квазипостоянный ток, приведены оценки энергетических, массовых и габаритных параметров бортовых и наземных систем. Проведено сравнение с альтернативными техническими разработками.

В настоящее время интенсивно разрабатываются и изготавливаются серийные образцы СВЧ-сверхмощных приборов (СМП), выходная импульсная мощность вакуумных СВЧ-СМП достигает 15 ГВт. Предполагается, что к 2010 г. она составит 100 ГВт. Очень мощные СВЧ-приборы могут найти применение в системах направленной передачи энергии между наземной станцией и космическими аппаратами. Уже сейчас нет принципиальных преград в построении мощных наземных излучателей, способных осуществлять генерацию микроволнового излучения в диапазоне длин волн 0,8—16 см с полной мощностью до 500 МВт в режиме импульсно-периодических посылок. Хотя проекты и технологии изготовления СВЧ-СМП для направленной передачи энергии и систем ее приема еще далеки от совершенства,

но в данном обзоре мы кратко осветим некоторые перспективы существующих и разрабатываемых систем энергоснабжения летательных (ЛА) и низкоорбитальных космических аппаратов (КА) от наземных энергетических комплексов. Энергоснабжение низкоорбитальных КА с умеренным энергопотреблением 1—2 кВт достаточно эффективно и осуществляется с помощью традиционных бортовых систем энергоснабжения на основе солнечных планарных фотоэлектрических преобразователей и накопителей на основе химических аккумуляторных батарей. Однако при повышении энергопотребления до десятков киловатт, возрастании габаритных размеров, площади и стоимости фотопреобразователей этот способ становится малоэффективным.

Наиболее эффективными в данном диапазоне энергопотребления по энергомасштабам и экономическим показателям являются ядерные установки, однако по соображениям радиационной безопасности использование их возможно лишь на высотах не менее 800 км, что регламентируется международными соглашениями в рамках ООН.

Приведенные соображения указывают на необходимость поисков нетрадиционных способов энергоснабжения КА. В частности, бесконтактная передача энергии с помощью электромагнитного излучения возможна либо в оптическом (лазерном), либо в СВЧ-диапазоне. В лазерном диапазоне возможно формирование достаточно узкого пучка излучения с большой плотностью потока энергии. Однако прохождение оптического излучения через околоземный участок сильно зависит от локальных погодных условий. К тому же, существующие приемники излучения в этом диапазоне рассчитаны на довольно низкие плотности мощности, так что приемная часть должна быть достаточно большой по габаритам и содержать очень много оптических преобразователей.

Более предпочтительным представляется СВЧ-диапазон. В работе [1] рассматривались сверхмощные геостационарные КЭС с мощностями $P_{эл} = 5-10$ ГВт, в [2] — низкоорбитальные КЭС ($H = 1000$ км) с $P_{эл} = 500$ МВт. Исходя из ограничения по современным носителям (с возможностью стыковки), рассмотрены средневысотные КЭС с мощностью $P_{эл} = 10$ МВт [3] и низкоорбитальные КЭС ($H = 1000$ км) на носителях типа "Энергия" с $P_{эл} = 1-2$ МВт.

В США [4] предложена схема запитки с помощью СВЧ-излучения космических систем, состоящих из значительного числа низкоорбитальных КА (до 100—250 шт.) при достаточно высоком энергопотреблении (до 100 кВт). Система включает семь наземных антенн типа фазированных антенных решеток (ФАР) с уровнем СВЧ-излучения в сотни мегаватт, формирующих узкий ($\Delta\varphi = 0,04$ рад) пучок, передаваемый за короткое (100 с) время на пролетающие последовательно КА. В качестве приемника предлагается использовать антенну (ректенну), состоящую из большого ($\approx 10^8$ шт.) числа маломощных твердотельных полупроводниковых преобразователей, через которую запитывается бортовой накопитель.

Достоинством этой схемы является размещение наиболее сложных и крупногабаритных (диаметр излучающей антенны 500 м) элементов на Земле. Слабым звеном является приемник излучения. Большое энерговыделение на витке, связанное с относительно малым временем пролета КА над ФАР, требует весьма высокой мощности падающего на ректенну излучения, и допустимая плотность излучения, связанная с тепловой стойкостью полупроводников, определяет площадь и массу ректенны (а также габаритные размеры в сложенном состоянии), которые оказываются значительными.

В ИОФ РАН предложена схема [5] энергоснабжения КА, основанная на использовании на борту плазменно-факельного преобразователя (ПФП), допускающего работу при исключительно высоких плотностях мощности излучения (на несколько порядков выше, чем для ректенны). Диаметр приемной антенны существенно

уменьшается, она может быть выполнена в виде обычного зеркального (параболического) отражателя с весьма мягкими технологическими требованиями, в фокусе которой располагается простой по конструкции преобразователь. В лабораторных экспериментах реализован КПД преобразователя $\chi = 0,2$, теоретически достижим $\chi = 0,4-0,5$ [6].

Таким образом, применение ПФП устраняет один из наиболее серьезных недостатков СВЧ-энергоснабжения — большие габаритные размеры и технологическую сложность бортовых приемных устройств.

Принцип работы ПФП основан на явлении, открытом в ИОФ РАН [7]. Оно заключается в том, что при взаимодействии в вакууме мощного микроволнового излучения с твердой диэлектрической поверхностью происходит частичная сублимация последней, испаренное вещество ионизируется в сильном поле, и вблизи поверхности образуется плазма — СВЧ-факел. Если в центральную область факела ввести электрод-штырь, а все плазменное образование окружить по периферии вторым (цилиндрическим или сферическим) электродом, то в цепи штырь — плазма факела — внешний электрод — нагрузочное сопротивление — штырь без приложения какого-либо внешнего напряжения начинает протекать квазистационарный ток I . Коэффициент преобразования $\chi_{\text{пфп}}$ можно определить как отношение мощности, рассеиваемой на нагрузочном сопротивлении R_1 , к мощности падающего СВЧ-излучения P

$$\chi_{\text{пфп}} = \frac{I^2 R_1}{P}.$$

При $R_1 = R_p$, где R_p — сопротивление плазменного участка цепи преобразователя, коэффициент $\chi_{\text{пфп}}$ имеет максимальное значение.

Порог образования плазмы, являющийся нижним уровнем преобразуемой плотности потока мощности СВЧ-излучения, составляет $I_{\text{тр}} = 10^5$ Вт/см². На специально разработанных композиционных металлодиэлектрических мишенях порог плазмообразования удается снизить до $I_{\text{тр}} = 10^3$ Вт/см².

Были проведены экспериментальные исследования в широком диапазоне длин волн ($\lambda = 0,8-16$ см), мощности излучения до 5 МВт и длительности импульсного воздействия до 100 мкс. Осуществлен также цикл измерений на установке с мощностью до 1 ГВт и длительностью 10 нс. Максимальный КПД получен для длинноволнового излучения и достигает 25%. Теоретическое рассмотрение [6] приводит к следующей зависимости χ от условий облучения

$$\chi_{\text{пфп}} = 3 \cdot 10^{-2} \frac{I^{1/3} A_s^{4/3} \lambda^{2/3}}{R_p},$$

где I — интенсивность микроволнового излучения, Вт/см²;

A_s — коэффициент поглощения микроволнового излучения созданным им же факелом ($A_s = 0,4-0,5$);

λ — длина волны излучения, см;

R_p — внутреннее сопротивление факела (1—10 Ом в условиях эксперимента).

Относительно слабая зависимость $\chi_{\text{пфп}}$ от мощности I , предсказываемая теоретическим анализом, наблюдалась вплоть до максимальных использованных в эксперименте величин мощности, равных 300 МВт. Что касается коэффициента поглощения излучения A_s , то существуют реальные возможности сделать его близким к единице (в частности, за счет геометрии внешнего электрода [8]).

Конструкция бортового ПФП весьма проста и состоит из следующих элементов: металлического зеркала, перехватывающего формируемый наземной антенной СВЧ-луч и фокусирующего его на мишень преобразователя; мишени, служащей источником плазмы; центрального электрода, погруженного в факел (электрод — это цилиндрический штырь с размерами, много меньшими размеров факела); внешнего электрода, охватывающего факел по периферии (цилиндрический или сферический).

Размер зеркала соответствует поперечному размеру луча.

Размер мишени d_m определяется из соотношения:

$$\lambda \leq d_m \leq \sqrt{\frac{P}{I_{\text{пор}}}}$$

Размер d_m оказывается порядка 10 см, диаметр внешнего электрода — порядка диаметра мишени, внутреннего электрода — много меньше.

Расход вещества мишени не превосходит 10^{20} молек/см²·с.

Таким образом, расход диэлектрика не превышает 100 кг/год. Примерно такого же порядка оказывается расход вещества внутреннего металлического электрода.

В основе явления плазменно-факельного преобразования, как показали исследования, проведенные в ИОФ РАН, лежат два процесса: нелинейное взаимодействие СВЧ-излучения с созданной им же плазмой в области “резонанса” (области, где циклическая частота излучения совпадает с собственной плазменной частотой, зависящей от концентрации плазмы), а также взрывная эмиссия на контакте штыря с факелом. Физическую картину явлений, приводящих к возникновению квазистационарных токов, можно описать следующим образом. В развитом СВЧ-факеле при превышении концентрации электронов над некоторой критической величиной основную роль начинают играть нелинейные процессы взаимодействия электромагнитной волны с плазмой в области упомянутого выше “резонанса”. Поглощенная здесь энергия с высокой эффективностью трансформируется в энергию электронного компонента, приводя к нагреву электронов и формированию пучков надтепловых сверхэнергичных частиц. В результате резко возрастает потенциал центральной области факела по отношению к периферии. Если в эту высокопотенциальную плазму введен электрод-штырь, соединенный с внешним электродом, то у поверхности первого возникают чрезвычайно высокие квазистационарные электрические поля порядка

$$E = \varphi_p / r_d,$$

где φ_p — плазменный потенциал;

r_d — радиус экранирования, характеризующий тонкую область падения потенциала от плазменного к электродному (дебаевское экранирование).

В характерной плазме СВЧ-факела величина этих полей достигает 10^5 — 10^6 В/см. На микроостриях с размером, меньшим толщины экранирующего слоя, квазистационарные поля усиливаются, что приводит к автоэмиссии с кончиком микроострий. Автоэмиссионные токи быстро разогревают острие, приводя к его взрыву с переходом от твердого состояния к плазменному. Локальная область микровзрыва — это область, обладающая чрезвычайно высокими эмиссионными свойствами.

Как известно, плотность тока в таких “взрывных” точках может достигать 10^7 — 10^8 А/см². Процесс перехода автоэмиссии в термоэмиссию, в основе которого лежит микровзрыв, получил в отечественной литературе название “взрывной эмиссии”. Взрывная эмиссия делает чрезвычайно высокой эмиссионную способность в целом холодного электрода. Поступающие из горячего “взрывного” пятна в

окружающую плазму электроны способны компенсировать уход на стенки нагретого и ускоренного в "резонансе" электронного компонента и, таким образом, приводят к формированию больших квазистационарных токов, регистрируемых во внешней цепи.

Принципиальные преимущества плазменно-факельного способа преобразования перед всеми другими известными способами трансформации энергии микроволн в энергию стационарного тока (твердотельные полупроводниковые детекторы, обращенный магнетрон, "циклотронный" преобразователь и др.) заключаются в следующем:

1. Способ не имеет ограничений по уровню преобразуемой СВЧ-мощности вплоть до использованных в экспериментах гигаваттных уровней. Нижней границей является мощность излучения, превосходящая порог плазмообразования. Эффективность преобразования увеличивается с ростом I .

2. Эффективность трансформации слабо зависит от структуры преобразуемого излучения, что снимает весьма сложную проблему формирования строго определенной "моды" на входе в преобразователь, стоящую практически перед всеми остальными способами решения задачи.

3. Габаритные размеры и масса преобразователя относительно невелики, что весьма существенно в космических приложениях.

4. Конструкция преобразователя чрезвычайно проста и не содержит сколь-нибудь дорогостоящих и технологически сложных деталей.

Как уже упоминалось, эффективность работы ПФП увеличивается с ростом длины волны излучения, однако связанные с λ размеры наземной антенны, эффективность различных элементов системы энергоснабжения и т. д. ограничивают возможный диапазон длин волн излучения сверхвысокочастотным. Использование СВЧ-диапазона связано также с уникально высокой проникаемостью атмосферы для СВЧ-излучения даже в условиях облачности. Например, для $\lambda = 4,2$ см потери вследствие рассеяния составляют 10 % при уровне равномерного осадения дождя 5 мм/ч, 40 % — при 50 мм/ч и 90 % — при сильной грозе [9]. В диапазоне же $\lambda \geq 10$ см даже дождь становится практически прозрачным. Однако вполне удовлетворительные результаты могут быть получены и при $\lambda = 2-5$ см.

Наиболее перспективным генераторным устройством для запитки ФАР принято считать магнетронный генератор [9]. Из отечественных образцов можно упомянуть магнетрон "Баклан" (МИ-389А) ($\lambda = 2,5$ см), позволяющий получать до 1 МВт мощности и допускающий в своей модификации когерентное сложение излучения большого числа приборов.

Приведем некоторые соображения по параметрам схемы запитки КА с использованием ПФП и сравнение ее с другими схемами.

Ясно, что выбор одного из параметров сужает диапазон возможных значений других параметров. Например, всегда желательно применение минимально достижимой по технологическим соображениям массы антенны на КА. Однако при уменьшении диаметра антенны необходимо увеличивать диаметр ФАР и оптимальным, по-видимому, будет некоторый компромисс.

На диаметр антенны и ФАР влияет выбор длины волны излучения. Однако переход к малым λ , выгодный по условиям минимизации $D_{\text{фар}}$ и $D_{\text{ант}}$, приводит к падению КПД СВЧ-генераторов $\eta_{\text{свч}}$ и $\eta_{\text{пфп}}$ и, как следствие, к росту $P_{\text{фар}}$.

Рассмотрим результаты анализа [9] параметров возможной схемы энергоснабжения космической системы (КС), состоящей из нескольких КА. Принятая в расчетах величина средневитковой мощности $P_{\text{ср}} = 20$ кВт близка к усредненному уровню требований к низкоорбитальным КА достаточно разнообразного назначения (информационные, активного мониторинга атмосферы с помощью лазерного

зондирования, технологические КА для производства в условиях невесомости сверхчистых материалов и др.). Орбитальная высота H принята равной 400 км. Число КА в космической системе не должно быть большим, если иметь в виду возможность достаточно быстрой реализации КС (принятый в [4] масштаб $Z_{ка} = 100-250$ шт. нереален для близкого развертывания). В то же время, малое число $Z_{ка}$ не позволит реализовать экономически эффективное использование сложных и дорогих наземных ФАР. В настоящее время уже ведется развертывание реальных навигационных систем с $Z_{ка} = 18-24$ шт. В данном анализе принято $Z_{ка} = 15$.

Количество ФАР может быть малым, по энергетическим условиям вполне приемлемо $Z_{фар} = 1$, однако большая периодичность запитки в этом случае требует значительной емкости накопителя и, соответственно, его массы. В анализе принято $Z_{фар} = 2$ с расстоянием между ФАР 5000 км.

Длина волны принята равной $\lambda = 1,5$ см, зенитный угол пролета $\theta = 45^\circ$, что при орбитальной скорости $V = 7,7$ км/с приводит к времени запитки накопителя 104 с и обеспечивает средний КПД передачи с ФАР $\chi_{фар} = 0,68$, причем значение $\chi_{фар}$ в зените при $\theta = 90^\circ$ соответствует $\chi_{фар} = 0,95$.

Удельная емкость бортового накопителя $\gamma_{нак}$ принята 100 (Вт·ч)/кг, освоенный к настоящему времени ее диапазон равен 50 (Вт·ч)/кг, в перспективе — 250 (Вт·ч)/кг. Удельная масса бортовой антенны $m_{ант} = 3$ кг/м² (возможный диапазон $m_{ант} = 0,5-5$ кг/м², где нижний предел соответствует надувным конструкциям, а верхний — многоэлементной конструкции из жестких элементов).

Коэффициенты полезного действия приняты равными: $\chi_{свч} = 0,4$; $\chi_{фар} = 0,72$; $\chi_{атм} = 0,8$; $\chi_{пфп} = 0,3$ и $\chi_{нак} = 0,8$. Суммарный КПД $\chi = 0,055$.

Ограничение на плотность мощности СВЧ-излучения на ФАР по [1] составляет $I_{фар} = 150$ Вт/м².

Необходимая емкость бортового накопителя $Q_{нак} = P_{ср} \tau_{разр} / \chi_{нак} = 150$ кВт·ч (540 МДж), что при принятой величине $\gamma_{нак}$ соответствует массе $M_{нак} = 1,5$ т. Пиковая мощность электропитания ФАР в режиме запитки $P_{фар.эл} = 95$ МВт. Излучаемая ФАР СВЧ-мощность $P_{свч} = 38$ МВт, что определяет минимальную площадь ФАР (с учетом ограничения по $I_{фар}$) $F_{фар\min} = 2,5 \cdot 10^5$ м² и $D_{фар\min} = 570$ м.

Минимальный диаметр приемной антенны $D_{ант\min}$, соответствующий $D_{фар\min}$, определяется из выражения:

$$D_{фар\min} D_{ант\min} = 2,3 \lambda H,$$

где 2,3 — волновой параметр; $D_{ант\min} = 24$ м.

В табл. 1 приведены величины $D_{фар}$, массы антенны $M_{ант}$ и общая масса M бортовой системы энергоснабжения (СЭП) для $D_{ант} = 10$ м, $\lambda = 1,5$ см, $H = 400$ км, $m_{ант} = 3$ кг/м², $\gamma_{нак} = 100$ (Вт·ч)/кг, $M_{нак} = 1,5$ т.

Таблица 1

Параметры	$D_{ант}, \text{ м}$			
	10	15	20	24
$D_{фар}, \text{ м}$	1370	920	690	570
$M_{ант}, \text{ т}$	0,23	0,53	0,94	1,37
$M, \text{ т}$	1,73	2,03	2,44	2,87

Уменьшение $D_{ант}$ хотя и приводит к снижению $M_{ант}$ и $M_{сэп}$ в целом, однако имеет смысл лишь до определенного предела.

Так, при переходе от предельного $D_{ант} = 24$ м (соответствующего минимальному $D_{фар}$ по условиям $I_{фар}$) к $D_{ант} = 15$ м, $M_{ант}$ снижается почти в 2,5 раза, хотя $M_{сэп}$ уменьшается всего на 30 %, причем $D_{фар}$ увеличивается на 60 % (до 920 м).

Дальнейшее снижение $D_{\text{ант}}$ до 10 м, по-видимому, нецелесообразно, т. к. $M_{\text{сэп}}$ дополнительно снижается всего на 15 %, однако $D_{\text{фар}}$ увеличивается до малопримемлемых значений (1,4 км). Видно также, что величины $M_{\text{сэп}}$ и $D_{\text{ант}}$ вполне технически приемлемы, составляя для $D_{\text{ант}} = 15$ и 20 м, соответственно $M_{\text{сэп}}$ равны 2 и 2,5 т.

Более обоснованно выбор значения $D_{\text{ант}}$ может быть сделан только с учетом допустимых габаритов ФАР с привлечением экономических критериев.

На данном этапе в качестве основного варианта СЭП на базе СВЧ-ПФП для сравнения с альтернативными типами СЭП принят $D_{\text{ант}} = 20$ м, $M_{\text{сэп}} = 2,5$ т и $D_{\text{фар}} = 700$ м.

Оценка величин передаваемой мощности по этапам P_i показывает, что в последовательности ФАР, в главном лепестке, на бортовой антенне и на входе в накопитель она составляет 38, 27, 22 и 6,5 МВт соответственно.

Эти данные позволяют выбрать габариты ПФП и тип накопителя.

Так, при средней плотности мощности на ПФП $I_{\text{пфп}} = 10^5$ и 10^7 Вт/см² диаметр его составит 17 и 1,7 см соответственно. Учитывая трудность фокусировки в пятно с $d = l$ (из-за погрешностей наведения и неточностей изготовления поверхности зеркала антенны с требуемой точностью до 0,1 λ) более предпочтительным представляется вариант с $I_{\text{пфп, ср}} = 10^5$ Вт/см², с пиковыми плотностями по реализуемой, например, импульсно-периодическим режимом при $\tau_f = 10^{-3}$ с со скважностью 100, что требует частоты импульсов 10 Гц.

Выбор типа бортового накопителя в данной работе не проводится. Приведенные значения темпа запитки — 6,5 МВт за 100 с должны рассматриваться как требование (хотя и достаточно жесткое).

Требования по мощности электропитания ФАР весьма жесткие (с учетом КПД наземных накопителей при ФАР $\eta_{\text{наз}} = 0,8$, емкость каждого из них $Q_{\text{нак}} = 12,5$ ГДж).

СРАВНЕНИЕ С АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ ВАРИАНТАМИ

В качестве альтернативных вариантов систем элементов питания (СЭП) рассмотрены:

наземно-космическая система с СВЧ-передачей и приемом на бортовую ректенну;

автономные системы электронного управления (СЭУ) двух типов: традиционные — фотоэлементы питания (ФЭП) и перспективные, разрабатываемые в России и США, — ТЭМП.

Применительно к системе СВЧ-передачи на ректенну отличия от рассмотренной выше системы СВЧ-ПФП заключаются в следующем:

более высокий КПД преобразования СВЧ в ректенне $\chi_{\text{рект}} = 0,8$;

плотность мощности на ректенне ограничена $I_{\text{рект}} = 0,3$ кВт/м² (по данным [4], возможный диапазон $I_{\text{рект}} = 0,16—0,5$ кВт/м²);

удельная масса ректенны принята по [4] $M_{\text{рект}} = 0,2$ кг/м².

Для бортовых СЭП с автономными СЭУ предполагалось, что их масса $M_{\text{сэп}}$ состоит только из собственно массы СЭУ и массы накопителя: $M_{\text{сэп}} = M_{\text{сэу}} + M_{\text{нак}}$.

Принималась следующая схема функционирования: при работе на освещенной части витка ($t = 45$ мин) СЭУ работает одновременно на полезную нагрузку с $P_{\text{к}} = P_{\text{ср}} = 20$ кВт и на зарядку накопителя с мощностью

$$P_{\text{зар}} = P_{\text{ср}} / \chi_{\text{зар}} \chi_{\text{разр}} = P_{\text{ср}} / \chi_{\text{нак}}^2;$$

$$\chi_{\text{нак}} = \chi_{\text{зар}} = \chi_{\text{разр}} = 0,8;$$

$$P_{\text{зар}} = 30 \text{ кВт.}$$

Общая установленная электрическая мощность СЭУ $P_{сзу} = P_{ср} + P_{зар} = 50$ кВт. Площадь панелей ФЭП определялась в предположении $\chi_{фэп} = 0,1$; масса СЭУ определялась для $\alpha_{сзу} = 100$ кг/кВт, а емкость накопителя — из условия питания целевой нагрузки в течение всего теневого участка витка ($t = 45$ мин) с мощностью $P = P_{ср} = 20$ кВт.

Масса накопителя определялась при той же удельной энергоемкости, что и для СВЧ-систем: $\gamma_{нак} = 100$ (Вт·ч)/кг.

Применительно к СЭУ-ТЭМП величины установленной мощности и емкость накопителя определялись так же, как и для СЭУ-ФЭП. Площадь и габариты зеркального солнечного концентратора $D_{конц}$ определялись для КПД $\chi_{сзу} = 0,3$, удельная масса СЭУ принималась равной $\alpha_{сзу} = 100$ кг/кВт.

Основные результаты расчета параметров альтернативных СЭП при $Z_{ка} = 15$, $Z_{фар} = 2$, $P_{ср} = 20$ кВт, $H_{орб} = 400$ км, $\lambda_{свч} = 1,5$ см, а также результаты по основному варианту СЭП СВЧ-ПФП приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение вариантов СЭП для КС

Показатели	Вариант СЭП			
	Наземно-космические системы СВЧ-ФАР		Автономные СЭУ	
	ПФП	ректенна	СЭУ-ФЭП	СЭУ-ТЭМП
Наиболее крупногабаритный элемент	Радиоотражающая антенна	Ректенна	Панель ФЭП	Солнечный концентратор
Диаметр элемента, м	20	185	22	13
Мощность СЭУ, кВт	—	—	50	50
Масса СЭП, т	2,5	6,9	5,2	5,2
В том числе, т:				
СЭУ	—	—	5,0	5,0
накопителя	1,5	1,5	0,2	0,2
антенны	1,0	—	—	—
ректенны	—	5,4	—	—
Диаметр ФАР, м	700	340	—	—
Пиковая мощность энергопитания ФАР, МВт	95	35	—	—
Среднесуточная мощность электропитания, кВт	700*	190*	—	—

* Данные приведены для двух ФАР.

По массе бортового комплекса СЭП наилучшие показатели у СВЧ-ПФП (2,5 т), наихудшие — у варианта СВЧ-ректенна, где $M_{сэп}$ примерно в 2,8 раза выше.

Оба варианта с автономными СЭУ равноценны по массе, и вариант с ректенной примерно в 2 раза тяжелей, чем СВЧ-ПФП.

По диаметру наиболее габаритного бортового элемента наихудшие показатели у варианта СВЧ-ректенна — 185 м, что почти на порядок хуже, чем для СВЧ-ПФП. Автономные СЭП близки по габаритам к СВЧ-ПФП.

В то же время по всем характеристикам наземных ФАР — диаметру, пиковой и среднесуточной мощности, составляющих для СВЧ-ПФП 700 м, 95 МВт и 750 кВт соответственно, показатели для варианта СВЧ-ректенна лучше в 2—3,5 раза.

Несмотря на важность энергомассовых и геометрических (габаритных) показателей СЭП, наиболее объективным, обобщенным критерием является сравнительная экономическая эффективность. Строгий экономический анализ может быть проведен лишь на более позднем этапе исследований. Здесь лишь проводятся грубые оценки для отбора наиболее конкурентоспособных вариантов. Такие оценки, сделанные по материалам открытой печати, по данным США, на основании удельных стоимостей ФАР, электроэнергии, выведения на ОИСЗ и бортовых элементов — ректены, антенны и СЭУ, показали, что для обоих вариантов основные затраты (до 85—95 % без учета стоимости разработки ФАР) приходятся на бортовой комплекс СЭП. Стоимость же электроэнергии при 10-летней эксплуатации незначительна (не более 2—3 %).

Учитывая значительную удельную стоимость единицы массы СЭУ-ФЭП, для дальнейшего сравнения оставлены лишь СВЧ-ПФП и СЭУ-ТЭМП.

Строго говоря, рассмотрение и сравнение обеих СЭП, имеющих крупногабаритные бортовые элементы (20 м) — радиотражающую антенну и солнечный параболический концентратор — невозможно вести без привязки к КА с конкретным целевым назначением и требованиям к ориентации, циклограмме и электрическим параметрам полезной нагрузки.

Особенно это проявляется тогда, когда сама целевая аппаратура КА также крупногабаритная и требует независимой ориентации, например, приемно-передающие антенны РЛС или линий радиосвязи.

В этом смысле оба типа СЭП имеют много общего:

крупногабаритную антенну и соответственно концентратор примерно одинаковых размеров (15—20 м);

систему точной ориентации (с ошибками в $0,5^\circ$);

высоковольтное питание накопителя (10 кВ).

В то же время, подавляющее большинство различий в пользу СВЧ-ПФП, за исключением более легких требований к накопителю СЭУ-ТЭМП, где зарядка ведется с мощностью 30 кВт в течение 45 мин по сравнению с зарядкой при мощности 6 МВт за 1,7 мин для СВЧ-ПФП.

Так, суммарный потребный ресурс системы точной ориентации СЭУ-ТЭМП, где ось концентратора ориентирована на Солнце в течение 50 % времени витка, почти в 100 раз больше, чем для СВЧ-ПФП, где ось приемной СВЧ-антенны ориентирована на ФАР, отрабатывая программный разворот лишь в течение пролета над ФАР, т. е. в течение 1,7 мин за 6-часовой цикл.

Благодаря большей (\approx в 10^4 раза) длины волны СВЧ-излучения по сравнению с солнечным, требование к точности выдерживания формы параболической поверхности (до $\approx 0,1 \lambda$) и к ее качеству для радиоантенны технологически реализуются существенно проще, что, в принципе, позволяет благодаря снижению удельной массы $M_{\text{акт}}$ снизить общую массу $M_{\text{ант}}$ и, следовательно, сэкономить на стоимости выведения.

На КА с СВЧ-ПФП в отличие от КА с СЭУ-ТЭМП благодаря статическому методу преобразования энергии отсутствуют динамические возмущения от ротора и нескомпенсированных кинетических моментов теплоносителя, что важно, например, в технологических КА для производства сверхчистых материалов, качество которых зависит от уровня остаточной микрогравитации.

На КА с СВЧ-ПФП благодаря малому времени загрузки СВЧ-канала имеется потенциальная возможность комплексного использования крупногабаритной СВЧ-антенны и системы наведения не только как элементов СЭП, но и как части целевой аппаратуры КА, например, в составе РЛС или связанных радиолиний, что также уменьшит общую массу КА.

СВЧ-система более адаптивна как к наращиванию мощности в единичном КА, так и к общему повышению числа КА в системе при сохранении единичной мощности на КА.

Приближенные экономические оценки сравнительной стоимости обоих вариантов СЭП сделаны на основании материалов США по удельным стоимостям изготовления, создания и выведения, а также по стоимости электроэнергии при следующих исходных данных (на перспективу):

удельная стоимость ФАР (без стоимости разработки) 250 дол./кВт;

удельная стоимость электроэнергии 0,1 дол./кВт·ч;

удельная стоимость выведения 1000 дол./кг;

масса бортовых элементов СЭП: СВЧ-ПФП — 2500 кг, СЭУ-ТЭМП — 5000 кг (с соответствующими накопителями) — на основе данных табл. 2;

срок эксплуатации ФАР в системе 10 лет с учетом замены всех КА через 5 лет;

удельная стоимость изготовления самих бортовых элементов СЭП, существенно влияющая на общую абсолютную стоимость СЭП (но мало влияющая на результат сравнения), принималась для обоих вариантов СЭП на уровне 1000 и 3000 дол./кг. При принятых исходных данных общая стоимость создания и эксплуатации СЭП с СЭУ-ТЭМП в 1,7 раза выше, чем для СВЧ-ПФП при $C_{изг} = 1000$ дол./кг и в 1,9 раза — при $C_{изг} = 3000$ дол./кг (при значениях $C_{выв} = 10\ 000$ дол./кг — в 2 раза). При этом для СВЧ-ПФП относительная стоимость ФАР и электроэнергии составляет 13 и 3 % для $C_{изг} = 1000$ дол./кг и соответственно 7 и 1,7 % — для $C_{изг} = 3000$ дол./кг.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что по энергомассовым, габаритным и экономическим соображениям, а также с учетом особенностей компоновки и функционирования СЭП в составе КА, дистанционное энергоснабжение системы низкоорбитальных КА с помощью СВЧ-передачи с наземных ФАР на бортовые антенны КА с плазменно-факельными преобразователями имеет преимущество как перед СЭП СВЧ-ректенна, так и традиционными СЭУ-ФЭП и перспективными СЭУ-ТЭМП.

Прямой нагрев газа сфокусированным СВЧ-излучением, например в турбогенераторной ЭУ, нецелесообразен из-за крайне высокой пиковой мощности и, соответственно, массы ЭУ (при $P_{свч} = 40$ МВт, $\alpha_{эу} = 10$ кг/кВт, $M_{эу} = 40$ т).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено комплексное рассмотрение особенностей, принципиальной схемы, облика, параметров и возможностей технической реализации дистанционного электроснабжения системы низкоорбитальных космических аппаратов с помощью СВЧ-луча, формируемого на наземных фазированных антенных решетках и передаваемого на КА в течение кратковременных сеансов при полете. Прием СВЧ-излучения, предварительно сфокусированного зеркальной антенной, ведется на размещенный в ее фокусе простой по схеме малогабаритный плазменно-факельный преобразователь (ПФИ), предложенный и испытанный в ИОФ РАН, допускающий значительные пиковые мощности и запитывающий бортовой накопитель.

В качестве примера для гипотетической низкоорбитальной пространственной системы из 15 КА, размещенных на приполярных круговых орбитах высотой $H = 400$ км с уровнем средневиткового энергопотребления $P_{ср} = 20$ кВт, питаемых от двух ФАР, расположенных на широте $\varphi = 60^\circ$, разнесенных по долготе на 5000 км и генерирующих луч с углом расходимости $2,3^\circ$ при длине волны $\lambda = 1,5$ см, определены основные характеристики. Проведено сравнение с альтернативными

системами электропитания (СЭП), в результате которого получены следующие данные:

бортовая часть комплекса СЭП единичного КА имеет массу 2,5 т, включает ПФП, с входной мощностью СВЧ = 40 МВт, запитывающий в течение 1,5—2 мин накопитель емкостью 150 кВт·ч (0,5 ГДж), антенну диаметром 20 м с системой наведения на ФАР при ошибках до 0,5°;

диаметр ФАР равен 700 м, мощности пикового электропитания ФАР 100 МВт при общей среднесуточной мощности питания обоих ФАР 700 кВт;

технические возможности быстрого создания СЭП базируются на имеющемся заделе по СВЧ-генераторам, ФАР РЛС, крупногабаритным бортовым антеннам и точным системам наведения, что открывает в перспективе более широкие возможности космической СВЧ-энергетики (передача с низкоорбитальных КЭС мощностью 1 МВт на наземные потребители и через пассивные ретрансляторы гигаваттных мощностей — на расстояния до 10 000 км);

предлагаемая СЭП для принятого уровня средневитковой мощности и числа КА в системе) превосходит по основным техническим показателям как систему СВЧ-передачи с наземных ФАР и приемом на бортовую ректенну, так и автономные СЭП на базе солнечных ЭУ с фотопреобразователями и теплоэлектромашинными преобразователями.

Литература

1. *Glaser P. E.* Energy from sun, Science, 1968.
2. *Евич А. Ф., Нариманов Е. А.*: Тр. 19-х чтений Циолковского. — Калуга, 1984.
3. *Akiba R., Takano T., Yokota H.*//Acta Astronautica. 1987. V. 15. № 11. P. 893—900.
4. *Хофферт М. И., Дж. Миллер и др.*//Аэрокосмическая техника. — М.: Мир. 1990. № 9. С. 82—94.
5. *Аскарьян Г. А., Батанов Г. М., Косый И. А.*: Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 8. С. 18—23.
6. *Анпилов А. М., Бережецкая Н. К., Грицинин С. И.* и др.: Тр. ИОФАН. 1988. Т. 16. С. 16—45.
7. *Аскарьян Г. А., Батанов Г. М., Бережецкая Н. К.* и др.: Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. С. 706—709.
8. *Анпилов А. М., Бережецкая Н. К., Косый И. А.* и др.: Препринт ИОФАН. — М., 1985. № 283. — 11 с.
9. *Brown W. S.* Design Study for the Ground Microwave Power Transmission System for Use with a High Altitude Platform/Roytheon Company. Power Tube Division. — Waltham, MA: Final Report, PT-6052, 1982, USA.

Авторы благодарят И. С. Байкова, В. И. Баринова и С. И. Грицинина за ценные обсуждения.

POWER BEAMING TO SATELLITES FROM EARTH MICROWAVE STATIONS

G. A. Askaryan, G. M. Batanov, Yu. M. Yes'kov, I. A. Kossyi

General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Some aspects of distant system for energy supply of low orbit satellites by means of the ground based microwave sources are considered. The general principles of plasma-flare transformation of microwave energy into the energy of quasisteady current are described. The estimations of energetic and mass parameters as well as overall dimensions of the board and ground based systems are performed. The comparison with alternative technical systems are made.