

УДК 621.311.21.001.4

Е.В. ЮРЕВИЧ, С.В. ГУБИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПРИМЕНЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КОНЦЕНТРАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГИБРИДНОМ СОЛНЕЧНОМ ПРИЕМНИКЕ

Рассмотрены существующие виды концентраторов, их преимущества и недостатки, принцип их работы. Приведена классификация концентраторов, по разным параметрам. Предложен гибридный гелиоприемник как решение повышения эффективности солнечного элемента и как вариант автономного энергоснабжения потребителя. Обосновано основное назначение концентратора солнечного излучения и преимущества его использования в гибридном солнечном приемнике. Изучен принцип работы голографического концентратора. Сделаны выводы о совместной работе голографического концентратора и гибридного солнечного приемника.

Ключевые слова: концентраторы солнечного излучения, плотность солнечного потока, комбинированный гелиоприемник, голографический концентратор солнечного излучения, автономное энергоснабжение.

Введение

Солнечное излучение представляет собой практически неисчерпаемый источник энергии. Оно поступает во все уголки околоземного пространства и Земли. По сравнению с другими видами энергетики солнечная энергетика в целом является одним из наиболее чистых в экологическом отношении видов энергии в космосе и на земле. Существенный недостаток солнечной энергетики связан с малой плотностью солнечного излучения, что в сочетании с относительно высокой стоимостью полупроводниковых солнечных элементов (СЭ) приводит к значительным затратам при изготовлении солнечных энергоустановок. Применение концентраторов солнечного излучения позволяет во много раз уменьшить требуемую для получения заданной электрической мощности площадь полупроводниковых фотоэлементов, повысить их устойчивость к действию внешних факторов и в результате значительно снизить стоимость получаемой электроэнергии.

Применение комбинированного гелиоприемника с фотоэлектрическими преобразователями и гелиоколлектором позволяет реализовать на борту космического аппарата как повышенную энергоотдачу так и организовать терморегулирование внутренних объектов космического аппарата. Наземное применение является конверсией комбинированного гелиоприемника и создает ряд дополнительных эффектов в энергоснабжении автономных объектов. Это характеризуется особенностями наземной солнечной энергетики.

В настоящее время такие особенности заключаются в том, что практически во всех развитых

странах формируются и реализуются программы развития возобновляемых источников энергии, причем интерес к этой проблеме связан с экологией, осознанием того факта, что быстрый экспоненциальный рост негативных антропогенных воздействий на окружающую среду ведет к существенному ухудшению среды обитания человека.

Истощение ископаемых энергоресурсов и нарастающие трудности решения экологических проблем развития энергетики приводят к необходимости поиска новых, нетрадиционных методов получения энергии, среди которых одним из наиболее перспективных является фотоэлектрический метод преобразования солнечной энергии.

Целью статьи является показать преимущество использования голографического концентратора в гибридном солнечном приемнике наземного и космического применения.

Постановка задачи

Серьезным препятствием на пути эффективной реализации высоко энергетического потенциала солнечного излучения является его низкая плотность, обусловленная большой удаленностью Земли от Солнца. Преодолеть это можно путем концентрации излучения. Применение концентраторов позволяет не только поднять энергетическую эффективность солнечных фотоэлектрических установок, но также улучшить их энерго-экономические и эксплуатационные показатели за счет уменьшения расхода дефицитных материалов, снижения стоимости и массы, повышения устойчивости к действию внешних факторов. При этом, однако, возникает

необходимость оптимального согласования параметров концентраторов и фотопреобразователей, в связи с чем повышаются требования к точности расчетных оценок характеристик концентрирующих систем.

Основное функциональное назначение концентрирующей системы в общем случае – повышение плотности потока солнечного излучения до уровня, обеспечивающего его эффективное и экономичное преобразование в энергию требуемого вида [1]. Интегральным показателем, характеризующим эту функцию системы, является средний коэффициент концентрации:

$$K_C = \frac{E_{КСР}}{E_{\Pi}}, \quad (1)$$

где $E_{КСР}$ – среднее значение плотности сконцентрированного лучистого потока на приемник;

E_{Π} – плотность солнечного излучения в плоскости, перпендикулярной направлению его распространения.

Характерные для солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ) значения K_C лежат в диапазоне от единиц до сотен крат.

При концентрации солнечного излучения увеличивается тепловая нагрузка на солнечный элемент, что требует создания эффективной системы теплоотвода, так как с повышением рабочей температуры фотопреобразователя уменьшается его эффективность. Такая система может быть реализована в гибридном солнечном приемнике.

Гибридный солнечный приемник представляет собой систему, в которой объединены фотоэлектрический преобразователь солнечного излучения и гелиоколлектор. При концентрации солнечного излучения рабочая температура солнечного элемента значительно увеличивается, расположенный с тыльной стороны абсорбер поглощает тепло от фотопреобразователей, тем самым не допуская падения эффективности фотопреобразователей.

Фотоэлектрический преобразователь содержит множество последовательно и параллельно соединенных солнечных элементов, которые должны работать в одинаковых условиях, с целью уменьшения схемных потерь необходимо обеспечивать равномерное облучение всех элементов.

Таким образом задача заключается в выборе концентратора солнечного излучения для гибридного приемника солнечного излучения.

Решение задачи

При концентрации солнечного излучения не только повышается его плотность, но изменяется распределение в пространстве, а следовательно, и на

лучевоспринимающих поверхностях элементов преобразователя. Поверхностная облученность $E_{\text{ПОВ}}$ в общем случае характеризуется функцией вида:

$$E_{\text{ПОВ}} = E_{\Pi}(x_n, y_n, z_n), \quad (2)$$

где x_n, y_n, z_n – координаты точки приемника, либо соответствующим распределением значений локального коэффициента концентрации солнечного излучения:

$$K_{\text{Л}} = \frac{E_{\text{ПОВ}}}{E_{\Pi}} = K_{\text{Л}}(x_n, y_n, z_n). \quad (3)$$

Это распределение является основной энергетической характеристикой концентрирующей системы.

Требования к распределению плотности сконцентрированного излучения существенно зависят от типа преобразователя, особенностей организации рабочих процессов в его элементах и их конструкции.

Системы концентрирования солнечного излучения (КСИ) предназначенные в общем случае для повышения плотности потока лучистой энергии при его одновременном пространственном и спектральном перераспределении. По уровню повышения плотности солнечного излучения или степени его концентрирования, характеризуемой значением K_C , системы КСИ с определенной условностью можно разделить на слабоконцентрирующие ($K_C < 100$) и сильноконцентрирующие ($K_C > 100$) системы.

Дополнительным классификационным признаком здесь может служить степень равномерности распределения плотности сконцентрированного излучения E_K или локального коэффициента концентрации $K_{\text{Л}}$ на приемнике, которая характеризуется соответствующими производными по направлениям (dE_K/dx , $dK_{\text{Л}}/dx$ и т. п.). По этому признаку различают системы КСИ, обеспечивающие равномерную и неравномерную облученность СЭ.

Из существующих концентраторов солнечного излучения можно выделить следующие:

1. Отражающие:

- зеркальные (отражают весь или большинство падающего спектра солнечного излучения);
- линзовые (преломляют и отражают падающий спектр солнечного излучения);

2. Поглощающие:

- селективные (отражают избирательный спектр);
- диспергирующие (концентрируют весь поток и затем разлагают его на спектральные составляющие);

Концентраторы могут обеспечивать не только интегральное, но и спектральное перераспределе-

ние солнечного излучения в пространстве при нанесении на их поверхности соответствующим образом подобранных оптических покрытий. В данном случае речь идет о так называемых селективных и диспергирующих концентраторах, первые из которых обеспечивают избирательное (селективное) концентрирование излучения, относящегося к одному или нескольким участкам солнечного спектра, а вторые концентрируют весь падающий на них поток солнечного излучения, но одновременно разлагают (диспергируют) его на спектральные составляющие. Требования к характеристикам распределения сконцентрированного излучения в этом случае зависят от спектральной чувствительности используемых преобразователей солнечной энергии. Такие концентраторы несомненно перспективны для применения в СФЭУ вследствие сильно выраженной селективности полупроводниковых фотоэлементов по отношению к солнечному излучению.

Оптические схемы зеркальных концентрирующих систем различают по следующим признакам:

1) расположению приемника в совпадающем по направлению (проходящем) или встречном по отношению к солнечному потоку сконцентрированного излучения (в первом случае приемник облучается не только отраженным, но и прямым солнечным светом);

2) форме образующей отражающей поверхности (прямая, ломаная, ступенчатая или кривая 2-го порядка);

3) кратности отражения излучения от элементов концентрирующей системы (с одно- и многократным отражением);

4) форме в плане (линейная, многогранная, круглая).

Слабоконцентрирующие системы применяются главным образом для повышения освещенности модулей (групп) или панелей СЭ, в связи с чем важным требованием к их выходным энергетическим характеристикам является обеспечение равномерного распределения плотности лучистого потока на приемной поверхности. С этой точки зрения весьма привлекательными являются концентраторы с плоскими отражающими поверхностями. В группе систем с расположением приемника в проходящем потоке и прямолинейными образующими к их числу относятся двухгранные концентраторы, получившие название плоских фоклинов, и многогранные (преимущественно четырехгранные) системы. При этом, если образующая концентратора является прямой линией, их называют односекционными а если ломаной, то многосекционными.

Основной недостаток пирамидальных концентраторов — неравномерность распределения скон-

центрированного ими излучения по поверхности приемника.

Одно из важных достоинств систем с плоскими отражающими поверхностями связано с возможностью поддержания равномерной облученности приемника при неточной ориентации системы на Солнце и деформации отражающих поверхностей.

Один из основных недостатков односекционных плоских концентраторов связан с тем, что при использовании многократного отражения для достижения более чем трехкратной концентрации излучения существенно возрастают потери на поглощение и соответственно увеличивается требуемая высота (глубина) концентраторов. Более эффективными с этой точки зрения являются многосекционные плоские концентраторы, образующая отражающей поверхности которых представляет собой ломаную линию, где каждый отрезок соответствует одной из секций боковой грани. Угол наклона и ширина секций выбираются таким образом, чтобы отраженные от секции лучи попадали на поверхность приемника после однократного отражения и полностью (равномерно) освещали его.

Использовать конические концентраторы с многоэлементными фотоэлектрическими преобразователями нецелесообразно из-за большой величины схемных потерь. Недостатки, характерные для конических концентраторов, свойственны также и концентраторам с криволинейными образующими и расположением приемника в проходящем потоке излучения. К числу таких концентраторов относятся в первую очередь параболоторические фоконы и параболоцилиндрические фоклины. Одним из недостатков фоконов и фоклинов является их сравнительно большая глубина. Повышение коэффициента концентрации за счет уменьшения параметрического угла приводит одновременно и к быстрому росту глубины отражателей, а следовательно, к увеличению их массы и стоимости, затрудняет изготовление и эксплуатацию. Фоконы и фоклины обладают двумя основными положительными свойствами: они не требуют высокой точности изготовления зеркальной поверхности отражателя и, что особенно важно, сохраняют исходное значение среднего коэффициента концентрации при невысокой точности ориентации оси отражателя на Солнце. В стационарных условиях они могут эффективно работать, оставаясь в течение длительного времени неподвижными по отношению к направлению солнечного излучения. Основным недостатком фоконов и фоклинов с параболической образующей является значительная неравномерность распределения плотности сконцентрированного излучения, усиливающаяся при неточной ориентации отражателя на Солнце.

Сильноконцентрирующие системы это концентраторы, у которых образующая отражающей поверхности является кривой второго порядка — окружностью, параболой, гиперболой и т. п., а также двухзеркальные концентрирующие системы.

Идеальный параболюидный концентратор фокусирует параллельный пучок лучей в точку, что соответствует бесконечно большой степени концентрирования.

Преимуществом двухзеркальных концентрирующих систем является возможность широкого и относительно независимого варьирования распределением освещенности на выходе оптической системы и соотношением между ее продольными и поперечными габаритными размерами. Двухзеркальные системы позволяют также концентрировать излучение с тыльной стороны зеркал, что упрощает решение задачи отвода тепла от СЭ и обеспечивает ряд других преимуществ. К наиболее распространенным двухзеркальным системам относятся системы, состоящие из соосных поверхностей вращения второго порядка: параболюида и эллипсоида (система Грегори), параболюида и параболюида (система Марсена), параболюида и гиперболюида (система Кассегрена).

Особенностью параболюидоцилиндрического зеркала является то, что солнечный поток концентрируется в фокусной линии. При этом конструкция зеркальной системы оказывается проще, чем у параболического зеркала, однако степень концентрации не превышает 200 – 300 единиц. Системы разделяются на горизонтальнофокусные и эклипикофокусные. Достоинством параболюидоцилиндрических зеркальных систем является простота слежения за Солнцем. Недостаток – неравномерность распределения температуры теплоносителя по фокусной линии. Для того чтобы это устранить, используется схема с эклипическим расположением теплообменника.

Преломляющие системы (различного типа линзы) имеют одно несомненное преимущество перед отражающими концентраторами в том, что приемнике излучения вынесен на тыльную сторону принимающей солнечное излучение поверхности, т.е. не затеняется приемником и его опорами. Линзовые концентраторы [2]:

- концентрические линзы Френеля (КЛФ), выполненные в виде набора концентрических преломляющих элементов с прямыми или кривыми образующими рабочих поверхностей;

- линейные (цилиндрические) линзы Френеля (ЛЛФ) с преломляющими элементами в виде треугольных призм;

- дисперсионные линзы Френеля, главным принципом работы которых является разложение света в спектр, для чего подбирают фотоэлектриче-

ские приемники излучения с соответствующей спектральной чувствительностью;

- голографические линзы Френеля.

Преимущества линз Френеля:

1. Высокая технологичность изготовления линз Френеля (пресовка, прокатка) и относительно низкая стоимость.

2. Высокие конструктивные качества линз как компактных, плоских объектов, удобно монтируемых в несущие конструкции с высокой степенью занимаемой площади.

3. Удобное для эксплуатационных целей взаимное расположение приемника излучения на тыльной стороне концентратора.

4. Возможность формирования облученности фокальной плоскости по необходимому закону, что достигается соответствующим изменением профиля линзы Френеля.

5. Меньшая, чем для зеркальных концентраторов, необходимая точность слежения.

Создание селективных гелиоконцентраторов возможно с использованием голограмм (дифракционных решеток) для выделения и концентрирования заданной области спектра солнечного излучения. Голограмма представляет собой светочувствительный слой, в котором зарегистрирована интерференционная картина от двух когерентных пучков излучения. Один из пучков имеет неискаженный фронт волны, обычно плоский или сферический, и называется опорным пучком. Другой пучок может иметь сложный фронт волны, он отражается от «фотографируемого» предмета или проходит через него, содержит информацию о яркости и рельефе этого предмета и называется предметным. Если полученную голограмму осветить одним из этих пучков, то в точности восстанавливается второй пучок излучения – это основное свойство голограммы. Дифракционную эффективность 100 % -ю для фазовых объемных голограмм можно получить лишь при соблюдении закона Брэгга.

$$2 \cdot d \cdot \sin \theta = \lambda, \quad (4)$$

где d – расстояние между стратами;

θ – дифракционный угол;

λ – длина волны.

Отклонение от угла Брэгга снижает дифракционную эффективность. Для солнечных концентраторов максимальное отклонение от угла Брэгга определяется половиной углового размера Солнца (около 16 минут). При таком отклонении от угла Брэгга дифракционная эффективность снижается незначительно (80%). Закон Брэгга определяет однозначную связь между периодом следования страт, длиной волны излучения и углом падения восстанавливающего пучка лучей. Отсюда следует, что голо-

граммы, свойства которых описываются законом Брэгга, являются селективными по отношению к параметрам восстанавливающего пучка лучей. Энергетическая эффективность определяется из отношения энергии сконцентрированного излучения (в одной или нескольких областях спектра) к энергии солнечного излучения на его приемной поверхности. Коэффициент концентрации можно выразить как отношение площади концентратора к площади, занимаемой фотопреобразователями:

$$k_k = \frac{S_k}{S_{ФЭП}}, \quad (5)$$

где k_k – коэффициент концентрации;
 S_k – площадь концентратора;
 $S_{ФЭП}$ – площадь фотопреобразователей.

Голограммы регистрируются в светочувствительном материале. Когда толщина слоя намного превышает расстояние между изофазными поверхностями интерференционной картины (характерные значения толщины 10-15 мкм), то получается объемная голограмма.

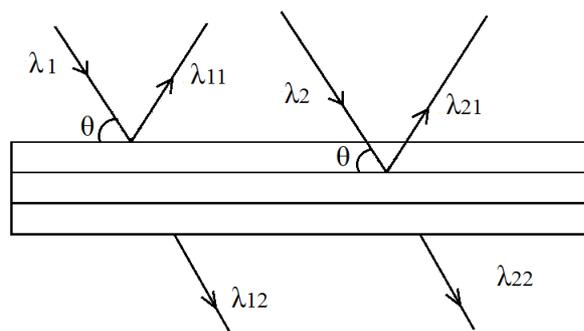


Рис. 1. Схема работы голографического концентратора

При поступлении солнечного излучения λ_1 и λ_2 на голографический концентратор под углом Брэгга (угол, при котором происходила запись голографического концентратора) происходит разложение луча на спектры: видимый (λ_{11} и λ_{21}), который отражается и длинноволновой (λ_{12} и λ_{22}), который проходит сквозь концентратор.

В объеме регистрирующей среды образуется большое количество частично отражающих излучение поверхностей, называемых стратами, действующих подобно отражательному интерференционному фильтру. Большое число содержащихся в голограмме частично отражающих поверхностей обуславливает их высокую спектральную селективность, позволяющую восстанавливать записанное на них изображение в белом свете.

Объемная голограмма будет только тогда восстанавливать изображение с высокой дифракционной эффективностью, когда она освещается под

соответствующим углом светом с длиной волны, использованной при записи.

Данный голографический концентратор [3] размещается между фотопреобразователями и абсорбером гелиоколлектора, причем полосы голограммы и полосы фотопреобразователей будут чередоваться. Когда солнечный свет падает на установку, его видимый спектр после многократного отражения от голографической пленки попадает на фотопреобразователи, длинноволновое излучение проходит сквозь голографический концентратор на абсорбер гелиоколлектора.

Выводы

При применении концентраторов повышаются требования к точности ориентации установок на Солнце, усложняются их конструкция и эксплуатация, возникает необходимость в специальных мероприятиях для интенсификации отвода тепла от СЭ, чтобы не допустить повышения их рабочей температуры до уровня, приводящего к существенному снижению КПД. Все это в свою очередь приводит к увеличению массы и стоимости СФЭУ, затрудняет достижение требуемого уровня надежности установок и т. п.

Данный концентратор обладает спектральной селективностью, что дает возможность создать узкополосный фильтр-концентратор. Это свойство голографического концентратора является основным его преимуществом перед остальными существующими концентраторами для применения его в данном гибридном приемнике. Так как он будет разделять поступающее солнечное излучение на две составляющие: видимый спектр, концентрируя его на фотопреобразователи и «тепловой» спектр, который будет направляться на абсорбер гелиоколлектора.

Таким образом нет необходимости в устройстве слежения за Солнцем, так как при перемещении Солнца по небосводу, концентрации излучения падающего на приемник происходит с помощью системы страт записанной в толще голографической пленки.

Такой приемник можно установить как на крышу любого здания, как составляющую солнечной системы энергоснабжения, так и создавать солнечные электростанции.

Литература

1. Андреева, О.В. *Прикладная голография [Текст]: учебн. пособие / О.В. Андреева. – СПб: СПбУИТМО, 2008. – 184 с.*
2. Стребков, Д.С. *Концентраторы солнечного излучения [Текст] / Д.С. Стребков, Э.В. Тверьяно-*

вич; под ред. академика РАСХН Д. С. Стребкова. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 316 с.

3. Iurevych, O. Combined receiver of solar radiation with holographic planar concentrator [Электронный ресурс] / O. Iurevych, S. Gubin, M. Dudeck// IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering. Volume 29. 2012. 1st International Symposium on Electrical Arc and Thermal Plasmas in Africa (ISAPA) 17–22 October 2011, Ouagadougou, Burkina Faso. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/29/1/012016>. – 28.02.2012 г.

Поступила в редакцию 29.02.2012

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., руководитель группы А.П. Моторненко, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, г. Харьков.

ЗАСТОСУВАННЯ ГОЛОГРАФІЧНОГО КОНЦЕНТРАТОРА СОНЯНОГО ВИПРОМІНЕННЯ В ГІБРИДНОМУ СОНЯЧНОМУ ПРИЙМАЧІ

О.В. Юревич, С.В. Губін

Розглянуто існуючі види концентраторів, їх переваги та недоліки, принцип їх роботи. Наведена класифікація концентраторів за різними параметрами. Запропоновано гібридний сонячний приймач як рішення підвищення ефективності сонячного елемента і як варіант автономного енергопостачання споживача. Обґрунтовано основне призначення концентратора сонячного випромінювання та переваги його використання в гібридному сонячному приймачі. Надано принцип роботи голографічного концентратора. Зроблено висновки про спільну роботу голографічного концентратора і гібридного сонячного приймача.

Ключові слова: концентратори сонячного випромінювання, щільність сонячного потоку, комбінований геліоприймач, голографічний концентратор сонячного випромінювання, автономне енергопостачання.

APPLICATION OF HOLOGRAPHIC CONCENTRATOR OF SOLAR RADIATION IN HYBRID SOLAR RECEIVER

O.V. Iurevych, S.V. Gubin

Considered the existent types of concentrators, their advantages and disadvantages, how they work. Presented the classification of concentrators, according to various parameters. We propose a hybrid solar absorber as a solution to improve the efficiency of the solar cell and as a variant of the autonomous power of the consumer. Substantiated the main purpose of the concentrator solar radiation and the benefits of its use in hybrid solar receiver. Studied the principle of holographic concentrator. Made the conclusions of the joint work of a holographic concentrator and hybrid solar receiver.

Key words: solar concentrators, solar flux density, the combined solar absorber, the holographic concentrator solar radiation, independent power supply.

Юревич Елена Валерьевна – аспирант кафедры ракетно-космических двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, аспирант института Jean Le Rond d'Alembert, университета П'ера и Марии Кюри, Париж, Франция, e-mail: yurevi.elena@yandex.ru

Губин Сергей Викторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ракетно-космических двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: gubinsv@d4.khai.edu