

УДК 629.7.02.62-51:321.311.1

## **Разработка системы дистанционного энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов**

Богушевская В.А., Заяц О. В., Масляков Я.Н., Мацак И. С., Никонов А.А, Савельев В.В,  
Шептунов А.А.

### **Аннотация**

Ведущие высокотехнологичные страны нацелены на создание систем дистанционного беспроводного энергоснабжения космических и летательных аппаратов, различных устройств, а также объектов инфраструктуры. Наиболее перспективным для авиации и космонавтики является применение технологии беспроводной передачи электрической энергии (БПЭЭ) лазерным излучением. В работе рассматриваются особенности создания системы дистанционного энергоснабжения (СДЭ) беспилотных летательных аппаратов (БЛА) на основе технологии БПЭЭ посредством узконаправленного пучка монохроматического инфракрасного излучения. Проведенные исследования показали перспективность разработки и возможность ее реализации в ближайшем будущем. Запланирован демонстрационный эксперимент.

### **Ключевые слова:**

дистанционное энергоснабжение; беспроводная передача энергии; беспилотный летательный аппарат; инфракрасное излучение.

### **Введение**

Целью исследований является теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение характеристик компонентов системы БПЭЭ для использования в дистанционном энергоснабжении БЛА. И в процессе работы были рассмотрены теоретические аспекты реализации системы, выполнены расчеты и оценки рабочих характеристик компонентов системы, получены экспериментальные данные и проведен их анализ, предложены варианты реализации системы, а также проанализированы возможные

области применения разрабатываемой технологии и оценены перспективы ее коммерциализации. В ходе исследований особое внимание уделялось системам излучения, формирования пучка и приема излучения для создания тракта передачи с высоким КПД. Также рассмотрены некоторые аспекты реализации системы наведения и хранения энергии.

В последние годы беспилотные летательные аппараты для промышленных применений получили существенное развитие. Количество приложений БЛА, определяемых наличием датчиков физических величин или фото- и видео аппаратуры в качестве полезной нагрузки, довольно велико:

- мониторинг лесных массивов при пожарах или пожароопасных ситуациях;
- контроль состояния инфраструктуры промышленных объектов;
- получение данных о состоянии высотных конструкций;
- исследование параметров протяженных трубопроводов, электросетей;
- мониторинг потенциально опасных производств;
- и т.д.

С развитием аппаратной и программной частей летательных аппаратов растет количество их приложений, поэтому с каждым годом увеличивается рынок беспилотной летательной техники. Наибольшее распространение получили микро- и мини-БЛА ближнего радиуса действия с массой до 5 кг и дальностью полета до 25-40 км, а также легкие БЛА малого радиуса действия с массой до 50 кг и дальностью полета до 10-70 км ввиду невысокой стоимости как самого аппарата, так и его полета для получения различного рода данных.

Для практических применений важны грузоподъемность и время полета аппарата. Грузоподъемность определяет массу полезной нагрузки в виде различной аппаратуры, определяющей функциональное назначение, и для указанного класса БЛА может находиться в пределах 0,1-7 кг. Время полета для конкретного аппарата определяются емкостью аккумуляторных батарей или объемом горючего топлива. В обоих случаях время нахождения в воздухе не может быть значительно увеличено стандартными средствами.

Разрабатываемая технология дистанционного беспроводного энергоснабжения позволит увеличить время полета БЛА, работающих от аккумуляторов, вплоть до нахождения в воздухе 24 часа в сутки без посадки. Это позволит повысить эффективность использования БЛА для существующих приложений, а также найти принципиально новые. Для реализации технологии потребуется создание станции энергоснабжения (мобильной или стационарной), а для некоторых приложений сети таких станций.

В настоящий момент развиваются несколько направлений технологии беспроводного энергоснабжения, но наиболее перспективной для беспилотной летательной техники является технология беспроводной передачи электрической энергии инфракрасным излучением. Основные преимущества – высокая эффективность тракта передачи энергии (до 40%), возможность использования небольших по размерам приемников (до 100 мм в диаметре), масса которых может не превышать 0,1 кг.

Для создания эффективной системы энергоснабжения требуется не только детальная проработка и исследования по каждому из компонентов системы, но и решение вопросов согласования компонентов для максимального использования их характеристик.

### **Основные компоненты системы дистанционного энергоснабжения БЛА**

В общем виде система дистанционного энергоснабжения реализуется, как показано на рисунке 1. Монохроматическое излучение источника формируется в малорасходящийся пучок, который наводится на приемник-преобразователь, закрепленный на летательном аппарате и подключенный к аккумуляторному блоку для его зарядки. Основными подсистемами СДЭ являются блок излучения и блок приема и хранения энергии. Таким образом, основанная на технологии БПЭЭ система энергоснабжения будет обладать характеристиками, которые будут определяться базовыми компонентами:

- Источник излучения;
- Система формирования пучка;
- Система наведения;
- Приемник-преобразователь;

– Аккумуляторный блок.

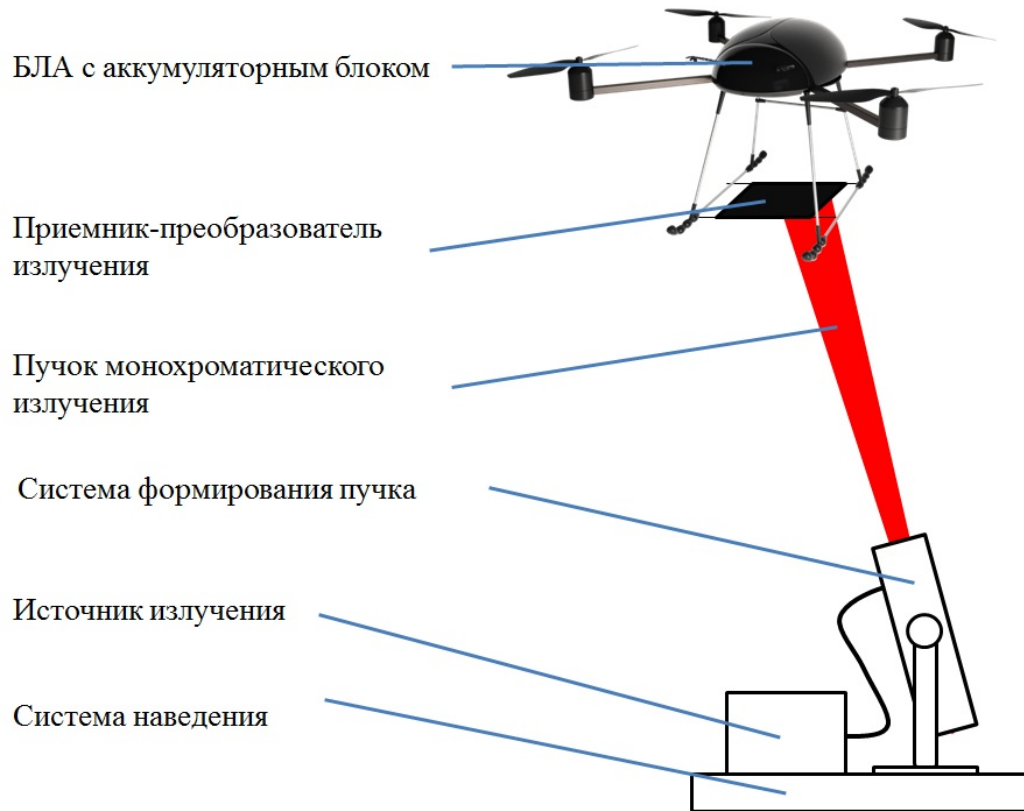


Рисунок 1 Схема дистанционного энергоснабжения БЛА

### *Коэффициент полезного действия*

Важнейшей характеристикой технологии БПЭЭ является ее коэффициент полезного действия. В настоящее время развитие полупроводниковых лазеров и фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) привело к значительному росту их КПД, что дает возможность развития технологии беспроводной передачи энергии лазерным излучением. Коэффициенты отражения/пропускания оптических компонентов системы формирования пучка также могут достигать более 99%, что обеспечивает высокий КПД в этой части. Благодаря бурному развитию в области аккумуляторов их КПД также значительно повысился. Система наведения при корректной работе не приводит к снижению эффективности системы. В табл.

2 приведены характерные КПД компонентов СДЭ на текущем этапе развития промышленности.

Таблица 1 КПД компонентов системы

Компонент	КПД
Диодные лазеры	50...70%
Система формирования пучка	95...99%
Система наведения	100%
Приемник-преобразователь	40...60%
Аккумуляторный блок	80...95%
Общий КПД СДЭ	15,2...39,5%

Таким образом, общий КПД может достигать ~40%. В качестве достижимой уже в настоящее время можно принять цифру 20%. Это значение будет использоваться для всех дальнейших расчетов.

#### *Требования к системе дистанционного энергоснабжения*

Для выдвижения конкретных требований к параметрам СДЭ в качестве базовой модели выбран квадрокоптер «Майский жук», разработанный в НИЯУ МИФИ, основные характеристики которого приведены в табл.1. Схема квадрокоптера получила широкое распространение ввиду сравнительной низкой стоимости и простоты реализации. Для демонстрационного эксперимента планируется использовать именно этот тип БЛА.

Таблица 2 Основные параметры квадрокоптера «Майский жук»

Параметр	Значение	
	Грузоподъемность/Время полета	250 гр / 17 мин
Масса аппарата	2 кг	2 кг

Потребляемая мощность	~260 Вт	~110 Вт
-----------------------	---------	---------

Для оценки параметров мощности лазера, необходимого для системы энергоснабжения предлагается пользоваться упрощенной формулой:

$$P_{\text{ист}} = k \cdot P_{\text{потр}} / \eta, \quad (1)$$

где  $\eta = 0,2$  – КПД СДЭ,

$P_{\text{потр}}$  – мощность потребляемая БЛА,

$k = 1 \div 10$  – коэффициент, определяемый режимом энергоснабжения.

При необходимости только поддерживать заряд аккумулятора  $k=1$  – режим непрерывного энергоснабжения.

Для быстрой зарядки в зависимости от параметров аккумулятора  $k$  может достигать 5...10 – режим периодического энергоснабжения.

Таким образом, для непрерывного энергоснабжения нам необходима номинальная мощность лазера  $P \approx 0,55 \dots 1,30$  кВт, в то время как для периодического -  $P \approx 2,75 \dots 6,50$  кВт. Для отработки технологии энергоснабжения предлагается передавать энергию на расстояния до 300 метров с перспективой увеличения расстояния до 1-1,5 км путем модернизации системы формирования пучка, о которой будет сказано ниже.

## **Особенности создания системы дистанционного энергоснабжения**

### *Аккумуляторный блок*

При непрерывном энергоснабжении аккумулятор не играет большой роли, так как может выступать в качестве источника резервного питания, тогда как для быстрой зарядки параметры аккумулятора имеет решающее значение и будут определять возможность реализации системы. Общая грузоподъемность рассматриваемого БЛА не превышает 0,5 кг. Поэтому при необходимости нахождения в воздухе длительное время масса

аккумуляторного блока должна расти, что приводит к снижению функциональных возможностей, в связи с необходимостью снижать массу аппаратуры на борту. Даже при максимальном увеличении массы аккумуляторного блока время нахождения в воздухе ограничено и обычно не превышает 1 часа.

При использовании разных типов дистанционного энергоснабжения – непрерывного или периодического – можно добиться существенного увеличения характерных значений времени полета.

При непрерывном энергоснабжении массу аккумулятора можно снизить до минимума, увеличив массу полезной нагрузки. В этом случае можно использовать стандартные аккумуляторы, и они будут использоваться как аварийный источник питания для посадки или поддержания в воздухе БЛА до нескольких минут. Периодическое энергоснабжение потребуется при использовании БЛА для приложений, в которых летательный аппарат необходимо удаляться на расстояние более 1 км от зарядной станции или он может уходить за пределы прямой видимости от станции. Для периодической зарядки требуется другой тип аккумуляторов – быстрозаряжаемые, скорость зарядки которых составляет 4-10С.

В настоящее время, благодаря разработкам Массачусетского технологического института (MIT), на рынке появились быстрозаряжаемые аккумуляторы с использованием литий-фосфатов  $\text{LiFePO}_4$  в качестве покрытия для катода. Скорость их зарядки может достигать 20С, а это значит, что БЛА со временем полета 1 час можно зарядить за 3 минуты. Их удельная энергоемкость несколько ниже литий-ионных батарей, но стоит ожидать повышения этого значения, так как этот тип батарей быстро развивается в связи с их использованием для гибридных автомобилей и электромобилей, а в эту промышленность за рубежом сейчас вкладываются большие средства, в том числе в научные исследования в области аккумуляторов.

Подробные параметры используемых аккумуляторов в квадрокоптере «Майский жук» приведены во второй колонке табл. 3. В третьей колонке приведены параметры быстрозаряжаемого  $\text{LiFePO}_4$ -аналога этого аккумулятора.

В настоящий момент проведены пробные эксперименты по зарядке стандартных аккумуляторных батарей с помощью макета СДЭ на малых мощностях. На рис.3 приведена схема эксперимента.

Таблица 3 Параметры аккумулятора квадрокоптера

Параметр	Значение	
	Тип	LiPo
Конфигурация	6S1P	7S3P
Емкость	3,3 Ач	3,3 Ач
Масса	535 г	~850 г
Энергоемкость	137 Вт*ч/кг	93 Вт*ч/кг
Номинальное напряжение	22,2 В	23,1 В
Максимальный ток зарядки	6А	30А
Минимальное время зарядки	30 мин	7 мин
Необходимая мощность лазера для быстрой зарядки одного элемента (конфигурация 1S1P)	~110 Вт	~165 Вт

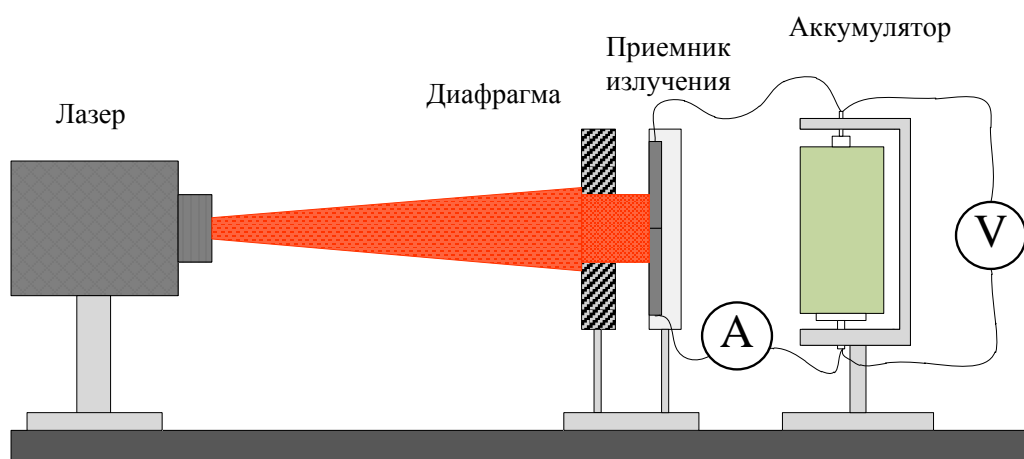


Рисунок 2 Схема эксперимента по зарядке аккумуляторов

Ограниченный диафрагмой размером 2x2 см пучок инфракрасного излучения попадает на приемник, представляющий собой два последовательно включенных арсенид-



галлиевых элемента, выходное напряжение каждого из которых составляет 1 В. В качестве примера на рис. 4 приведен график зарядки разрядки батареи NiMH с номинальным напряжением 1,2 В на 1700 мАч. Плотность излучения на приемнике  $0,9 \text{ Вт/см}^2$ . В течение цикла зарядки-разрядки контролировались ток и напряжение, по которым и был построен график потребляемой, отдаваемой мощности. КПД зарядки для данного аккумулятора оказался  $\sim 70\%$ , что соответствует значению при зарядке с помощью зарядного устройства.

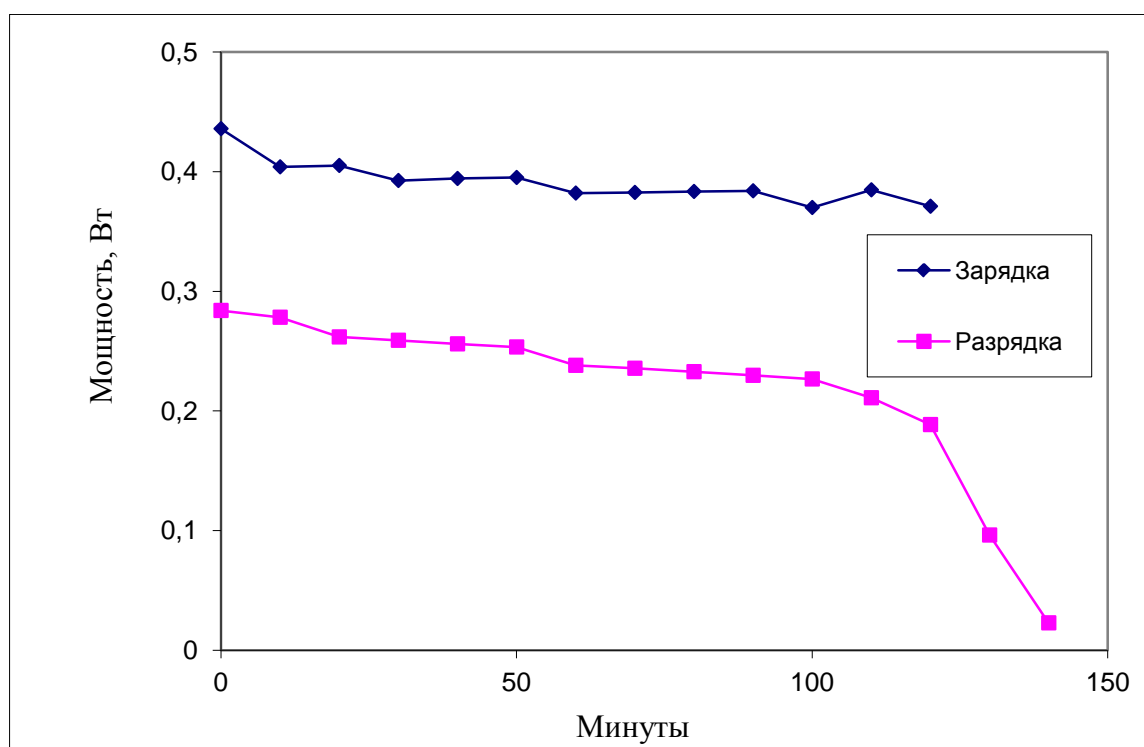


Рисунок 3 Графики зарядки-разрядки АКБ NiMH на 1700 mAh

Эксперимент подтвердил возможность использования предложенной схемы зарядки для быстрозаряжаемых аккумуляторов. Планируется провести аналогичные исследования для  $\text{LiFePO}_4$ -аккумуляторов на больших мощностях ввиду их взрывобезопасности.

#### *Приемник-преобразователь монохроматического излучения*

В рамках подготовки к демонстрационному эксперименту по энергоснабжению БЛА было проведено моделирование структуры каскадных солнечных элементов (КСЭ) под монохроматическое излучение для ближнего ИК-диапазона. Целью являлось определение возможности создания структуры КСЭ с КПД более 40%. Была подобрана пара ИК-лазерного диода с длиной волны 809 нм и 1-каскадного GaAs/Ge солнечного элемента (СЭ),

выращенного на MOCVD установке Veeco таким образом, что максимум поглощения СЭ почти совпадает с длиной волны источника монохроматического излучения.

Каскадные СЭ представляют собой последовательное включение нескольких источников тока; общий ток, протекающий во внешней цепи, будет равен минимальному току, генерируемому каждым р–n-переходом. Наивысшее значение тока СЭ достигается при максимальных величинах фототоков всех каскадов и их согласованности, которые можно достичь, меняя толщины активных слоев каждого из каскадов. Большая часть оптической оптимизации связана с расчетом поглощения солнечного излучения по каскадам.

Для оптимизации структуры с целью получения максимально эффективного перераспределения поглощения излучения между каскадами проводилось варьирование толщин основных слоев структуры. Основными слоями являлись фиксированные каскады: Ge, GaAs и InGaP.

Полученные расчеты позволили определить оптимальные толщины слоев гетероструктуры для максимального поглощения лазерного излучения и оптимальные оптические диапазоны работы отдельных каскадов.

В таблице 4 представлены расчетные данные для идеального оптимизированного однокаскадного, двухкаскадного и трехкаскадного приемников лазерного излучения на основе InGaP/InGaAs/Ge, рассчитанных для приема излучения лазеров с длиной волны 809 нм.

Максимальное значение эффективности для указанной длины волны получилось у однокаскадного СЭ на германиевой подложке с толщиной слоя InGaAs 3500 нм. Такая структура и была выбрана для дальнейших экспериментов. Основной задачей было найти максимальное соответствие полученного экспериментального значения эффективности СЭ с теоретическим.

Таблица 4 Расчетные параметры ФЭП для излучения с длиной волны 808 нм

Толщина слоя, нм		Измерения
Ge	InGaAs	КПД, %
1 Jc		7,6
	3500	53,2

1 Jc	533	31,9
------	-----	------

### *Обоснование выбора источников излучения*

Для использования в качестве источников излучения были выбраны диодные лазеры с длиной волны  $\lambda = 0,8$  мкм, КПД которых в настоящее время достигает 50-70% [1]. Как было показано выше КПД приемных устройств для данной длины волны также может достигать 50%, что дает возможность их использования для создания высокоэффективного тракта передачи энергии. Ниже будет показано, что при исходном качестве излучения источника 50-200 мм\*мрад дистанция передачи на небольшие приемники может достигать 0,3-1,5 км.

Недостатком диодных 0,8-мкм-лазеров является сравнительно небольшая мощность единичного источника. Она не превосходит 300-600 Вт. Вследствие чего возникает необходимость использовать сумматоры, характеризующихся определенным значением потерь и ухудшающих качество излучения.

Альтернативным вариантом при переходе на высокие мощности является использование оптоволоконных лазеров, например, с длинами волн 1,06 мкм. Их мощности могут достигать 1-10 кВт, а качество излучения 10 мм\*мрад, но КПД не превышает 30-35%. КПД приемников также характеризуется значениями не превосходящими 20-30%.

### *Оценочный расчет параметров оптической системы*

В результате анализа проведенных оценочных расчетов и экспериментов по созданию узконаправленных пучков принято решение использования зеркальных систем минимальным количеством оптических элементов для создания эффективной системы формирования пучка.

Для согласования параметров оптической системы с параметрами излучателя необходимо, чтобы выполнялось соотношение [2]:

$$NA \approx \sigma_u \approx \frac{D}{2f}, \quad (2)$$

где  $NA=0,22$  числовая апертура оптоволоконного лазера,

$\sigma_u$  – полуугол расходимости,

$D$  – диаметр выходной апертуры системы,

$\bar{f}$  – эквивалентный фокус системы.

Тогда оценочная теоретическая расходимость излучения в дальней зоне

$$\alpha_{\text{оц}} \approx \frac{G}{D}, \quad (3)$$

где  $G = d \cdot 2NA$  – качество излучения лазера.

При допустимых размерах  $D < 220$  мм,  $\alpha_{\text{оц}} \approx 0,4$  мрад, при этом эквивалентный фокус системы будет составлять  $\bar{f} = D/2NA = 500$  мм.

Следовательно, на расстояниях порядка 1 км пятно излучения будет порядка  $D_{1\text{км}} = 40$  см. В ближней зоне (менее 500 метров) возможно уменьшение пятна путем фокусировки до 3-10 см без потери эффективности, что дает возможность использовать такую оптическую систему для дистанционного снабжения БЛА, а небольшое фокусное расстояние позволяет сделать компактную систему.

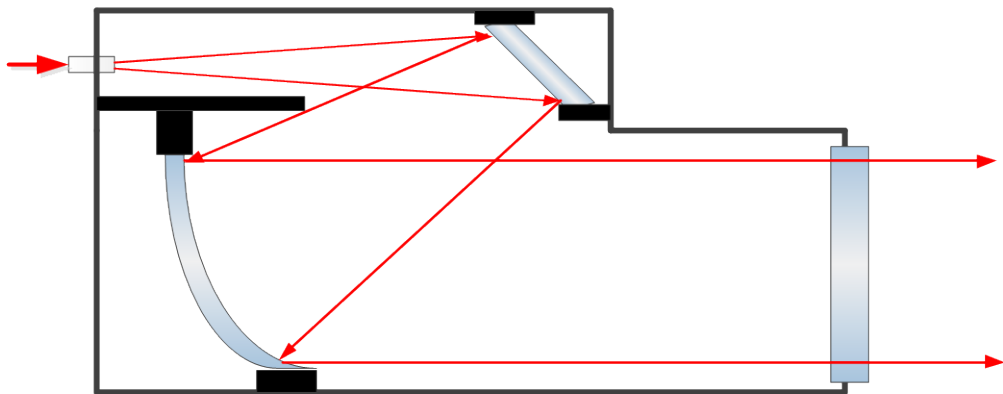


Рисунок 4 Система формирования пучка по схеме Ломоносова-Гершеля

В результате анализа оптических зеркальных схем безальтернативной остается схема Ломоносова-Гершеля (см. рис.5), в которой излучение вводится в виде внеосевого пучка. При таком вводе исключается затенение центральной части пучка поворотным зеркалом. Коэффициент пропускания такой системы для монохроматического излучения может

составлять 98-99% [3]. Такая высокая эффективность достигается путем использования многослойных диэлектрических зеркал, покрытия которых рассчитываются под определенную длину волны. Помимо этого Излом пучка позволяет сделать систему компактной, линейные размеры будут немногим более половины фокусного расстояния, то есть ~30 см.

В предлагаемой схеме помимо пучка ИК-излучения будет также вводиться излучения лазера с длиной волны 532 нм для визуализации пучка при отработке системы наведения и демонстрационных экспериментах.

В настоящее время ведутся работы по расчету и созданию системы.

#### *Предложения по реализации системы наведения*

Система наведения будет представлять собой двухуровневую систему:

1 уровень – грубая наводка путем позиционирования системы формирования пучка посредством шаговых двигателей;

2 уровень – точная наводка путем перемещения торца оптоволокна нанопозиционером.

Два уровня системы обеспечат быстроту и точность наводки. В качестве системы обратной связи используется высокоскоростная цифровая видеокамера с оптико-механическим объективом переменной кратности механически связанная с системой формирования пучка. В видеопотоке распознается образ мишени, на который наводится система.

К настоящему моменту отработано использование системы 1-го уровня на примере электромеханического привода стандартного телескопа на расстояния до 1300 метров. Отработка системы второго уровня, а также отработка совместной работы систем будет производиться после изготовления системы формирования пучка со встроенным нанопозиционером.

#### **Заключение**

В процессе разработки системы дистанционного снабжения были проведены исследования по ее ключевым компонентам, рассмотрены различные варианты, предложены технические решения. Исследования показали возможность реализации системы в ближайшем будущем. Планируется проведение исследование по зарядке LiFePO<sub>4</sub>-аккумуляторов. А после завершения изготовления системы формирования пучка

планируется провести натурные эксперименты по беспроводной передаче энергии на беспилотные летательные аппараты и отработке системы наведения.

### **Библиографический список**

1. Ю.Айхлер, Г.-И. Айхлер. Лазеры. Исполнение, управление, применение. – М.: Техносфера, 2008. – 440 с.
2. Г. Шрёдер, Х. Трайбер. Техническая оптика. – М.: Техносфера, 2006. – 424 с.
3. Дж. Реди. Промышленные применения лазеров. – М.: Мир. – 1981. – 640 с.

### **Сведения об авторах**

Богушевская Валентина Альбертовна, инженер-методист ОАО «НПП «Квант», тел.:89269110037, e-mail: [ankavant@gmail.com](mailto:ankavant@gmail.com)

Заяц Ольга Викторовна, инженер ОАО «РКК «Энергия», аспирант ОАО «РКК «Энергия», тел.:89854207874, e-mail: [radioschtorm@yandex.ru](mailto:radioschtorm@yandex.ru)

Масляков Ярослав Николаевич, ведущий инженер ОАО «НПП «Квант», тел.:89032802231, e-mail: [ankavant@gmail.com](mailto:ankavant@gmail.com)

Мацак Иван Сергеевич, инженер ОАО «РКК «Энергия», аспирант НИЯУ «МИФИ», тел.:89296075618, e-mail: [f.mephi@gmail.com](mailto:f.mephi@gmail.com)

Никонов Андрей Александрович, начальник участка ОАО «НПП «Квант», тел.:89269163181, e-mail: [ankavant@gmail.com](mailto:ankavant@gmail.com)

Савельев Василий Владимирович, студент МГТУ им. Н.Э. Баумана, тел.:89163237086, e-mail: [arhangel-svv@mail.ru](mailto:arhangel-svv@mail.ru)

Шептунов Александр Александрович, студент НИЯУ «МИФИ» тел.:89263295656, e-mail: [alexsheptunov@gmail.com](mailto:alexsheptunov@gmail.com)