

Чемерязева Ксения Денисовна

Санкт-Петербургского университета Гражданской авиации им. А.А.Новикова

Пименова Карина Алексеевна

Санкт-Петербургского университета Гражданской авиации им. А.А.Новикова

Сагитов Дамир Ильдарович

Санкт-Петербургского университета Гражданской авиации им. А.А.Новикова

Экономическая эффективность применения технологий бесконтактной передачи энергии (bpt) для питания бортовых датчиков и систем мониторинга

Аннотация. В публикации представлен детальный технико-экономический разбор трёх конкурирующих подходов к организации питания бортовых датчиков: классической проводной разводки, автономных химических источников тока и систем на базе бесконтактной передачи энергии (BPT). Оценка выполнялась через совокупную стоимость владения на горизонте десяти лет с обязательным дисконтированием денежных потоков, что позволило корректно сопоставить разновременные затраты. Полученные расчёты показали, что бесконтактная технология, требуя заметно больших стартовых капиталовложений, в конечном счёте уменьшает общие расходы на 30–35 % относительно проводного исполнения и на 18–22 % по сравнению с батарейным питанием. Ключевым источником этой экономии выступает практически полное исключение затрат на сервисное обслуживание контактных соединений и экстренную замену выработавших ресурс элементов питания, которые в традиционных схемах формируют ощутимую нагрузку на эксплуатационные бюджеты. Дополнительный вклад даёт сокращение времени монтажа и снижение вероятности ошибок персонала. В завершающей части работы сформулированы практические рекомендации по выбору объектов для первоочередного внедрения BPT, где выгода проявляется максимально быстро, и намечены перспективные направления дальнейших исследований, затрагивающие как компонентную базу, так и методики оценки надёжности.

Ключевые слова: бесконтактная передача энергии, BPT, бортовые датчики, системы мониторинга, экономическая эффективность, совокупная стоимость владения, надёжность, техническое обслуживание.

Chemeryazeva Ksenia Denisovna

St. Petersburg University of Civil Aviation named after A.A.Novikov

Pimenova Karina Alekseevna

St. Petersburg University of Civil Aviation named after A.A.Novikov

Sagitov Damir Ildarovich

St. Petersburg University of Civil Aviation named after A.A.Novikov

Cost-effectiveness of contactless energy transfer (bpt) technologies for powering on-board sensors and monitoring systems

Abstract. The publication presents a detailed technical and economic analysis of three competing approaches to powering onboard sensors: classical wiring, autonomous chemical power sources, and systems based on contactless energy transmission (BPT). The assessment was carried out through the total cost of ownership over a ten-year horizon with mandatory discounting of cash flows, which made it possible to correctly compare non-recurring costs. The calculations obtained showed that contactless technology, requiring noticeably large initial investments, ultimately reduces overall costs by 30-35% relative to the wired version and by 18-22% compared to battery

power. The key source of these savings is the almost complete elimination of the cost of maintenance of contact connections and emergency replacement of expired batteries, which in traditional schemes form a significant burden on operating budgets. An additional contribution is a reduction in installation time and a reduction in the likelihood of personnel errors. In the final part of the work, practical recommendations are formulated on the selection of facilities for the priority implementation of BPT, where the benefits manifest themselves as quickly as possible, and promising areas of further research are outlined, affecting both the component base and reliability assessment methods.

Keywords: contactless power transmission, BPT, on-board sensors, monitoring systems, economic efficiency, total cost of ownership, reliability, maintenance.

Вопрос энергоснабжения бортовых сенсоров и диагностических модулей напрямую влияет на совокупную стоимость владения техническими системами. В авиации, на транспорте и в промышленном оборудовании замена батарей или ремонт проводных линий нередко сопряжена с длительным простоем и необходимостью частичной разборки узлов, что формирует скрытые эксплуатационные расходы. Отказ от физических разъемов и кабелей выглядит привлекательным решением, однако внедрение технологий бесконтактной передачи энергии (BPT) тормозится неопределенностью относительно их окупаемости в реальных сценариях использования. Именно экономический аспект, а не только технические параметры, определяет скорость перехода от экспериментальных образцов к серийным продуктам.

Цель работы состояла в построении расчетной модели, позволяющей сопоставить полные затраты на питание бортовых датчиков по трем схемам: традиционная проводная разводка, автономные химические источники тока и BPT-системы. Параллельно ставились задачи по сбору статистики отказов контактных групп на ряде эксплуатируемых объектов, определению пороговой наработки, при которой бесконтактная технология становится экономически оправданной, и формулировке рекомендаций для проектных организаций. Основное внимание уделялось мониторинговым узлам, размещённым там, куда трудно добраться: даже однократное сервисное обслуживание в таких точках обходится многократно дороже самого чувствительного элемента.

Разбор существующих схем электропитания выявил их слабые стороны. У проводных линий главные проблемы — износ от вибраций, коррозия контактов и обрывы; особенно остро это проявляется на подвижных сочленениях, и в смету ремонта почти всегда закладывают солидные транспортно-логистические расходы. Автономные батареи жёстко ограничены допустимыми температурами и скоростью саморазряда, а массовая плановая замена на масштабных объектах сама по себе превращается в ресурсоёмкую логистическую задачу. Системы, собирающие микроэнергию из окружающей среды, не могут гарантировать устойчивого питания при нестабильных внешних параметрах, что недопустимо для измерительных цепей, к которым предъявляются повышенные требования по надёжности. На этом фоне BPT, допускающая герметизацию приемного модуля и передачу энергии сквозь конструкционные материалы, выглядит не просто альтернативой, а потенциальным инструментом снижения незапланированных издержек при условии грамотного технико-экономического обоснования.

Под бесконтактной передачей энергии понимают способ доставки электрической мощности к потребителю без использования проводных линий и разъемных соединителей. В отличие от привычных схем с металлическими проводниками, здесь энергия переносится полем - электромагнитным, электрическим либо световым, а преобразование происходит непосредственно на стороне приемника. Принципиально схема выглядит так: первичный источник формирует переменное поле, это поле наводит ток или напряжение в приемном элементе, после чего вторичный преобразователь доводит параметры до уровня, требуемого нагрузке. В случае резонансных систем добротность передающего и приемного контуров стараются делать высокой, чтобы компенсировать быстрое падение плотности

потока с расстоянием. Рабочая частота, топология катушек или антенн, а также среда, разделяющая источник и приемник, определяют достижимые КПД и дальность. Физический смысл ВРТ остается тем же, что и в трансформаторе, только между обмотками появляется не ферритовый сердечник, а воздух, диэлектрическая стенка, вода или конструкционный материал корпуса. [1]

Исторически первой и на сегодня самой отработанной считается индуктивная передача на магнитном поле. Две катушки располагаются на небольшом удалении, часто в пределах нескольких миллиметров или сантиметров. КПД здесь может превышать 90 % при жесткой соосности и малом зазоре. Для ослабления требования к точности позиционирования применяют многообмоточные структуры, резонансную настройку и системы подстройки импеданса. Эта технология легла в основу стандартов Qi и близких к ним решений, а также промышленных вращающихся трансформаторов. [2]

Радиочастотный перенос использует электромагнитное излучение в диапазоне от десятков мегагерц до единиц гигагерц. Передатчик формирует направленный или слабонаправленный пучок, а приемная антенна вместе с выпрямителем (ректенной) преобразует его обратно в постоянный ток. Дальность здесь может исчисляться метрами и даже десятками метров, однако КПД резко падает с расстоянием, а плотность мощности ограничена санитарными нормами и рассеянием. Чаще всего радиочастотные системы применяют для питания маломощных датчиков, когда главным требованием выступает свобода размещения, а не высокий КПД.

Лазерная передача - по сути, оптический аналог радиочастотной. Узкий луч направляется на фотоэлектрический преобразователь. Такой подход дает большую плотность энергии на приемнике и позволяет передавать мощность на сотни метров, но требует прямой видимости, систем точного наведения и защиты от случайного перекрытия луча. В бортовых системах мониторинга лазерные линии электропитания пока остаются скорее экзотикой, хотя при обсуждении специализированных задач упоминания о них звучат всё чаще [3].

Отдельного рассмотрения заслуживает ёмкостная передача, использующая переменное электрическое поле между обкладками. Рабочий зазор здесь предельно мал, зато схема проста и дешева, особенно на киловольтных напряжениях при ничтожно малых токах. В приложении к датчикам к такому решению обращаются редко — преимущественно в микроэлектромеханических устройствах [4].

Сравнение с проводной разводкой и автономными батареями однозначно подчёркивает сильные стороны бесконтактных технологий. Главное преимущество — отсутствие изнашивающихся контактов и кабельных вводов, а значит, появляется возможность полностью герметизировать приёмный узел, надёжно изолировав его от влаги, пыли и агрессивных сред. Для датчиков, установленных в труднодоступных местах или на вращающихся элементах, это оборачивается резким падением числа отказов, связанных с соединителями. Вторая значимая черта — упрощённый монтаж: пропадает нужда в жгутах, сверлении отверстий, учёте радиусов изгиба проводов. Как итог — монтаж ускоряется, а риск ошибок по вине персонала снижается.

Однако у бесконтактной передачи энергии есть и теневая сторона. С ростом расстояния КПД падает, и это заставляет искать золотую середину между удобным расположением приёмника и неизбежными потерями. Индуктивные схемы чувствительны к смещению, радиочастотные и лазерные — к затенению и переотражённым сигналам. Вдобавок на ряде частот вступают в силу требования электромагнитной совместимости: мощное высокочастотное поле способно наводить помехи в измерительных цепях, так что порой приходится вводить дополнительное экранирование или разносить рабочие частоты. Наконец, цена передающей и приёмной электроники для ВРТ пока заметно выше, чем у простой клеммной колодки или батарейного отсека, — и это вынуждает каждый раз просчитывать, оправдает ли экономия на обслуживании первоначальные затраты. В тех

сценариях, где отказы проводки или замена батарей обходятся дорого, чаша весов все чаще склоняется в пользу бесконтактного питания.

Бесконтактное питание востребовано везде, где проводное соединение затруднено либо ненадежно. В авиации ВРТ рассматривают для датчиков, размещенных на подвижных элементах механизации крыла, стойках шасси и внутри топливных баков, - любое нарушение герметичности здесь недопустимо, а вибрации быстро разрушают контактные пары. В автомобилях технологию применяют в датчиках давления шин и подрулевых модулях — там, где шлейфы со временем перетираются. В промышленности ВРТ используют на вращающихся валах, захватах роботов и в подводных конструкциях: под напором воды герметичный разъем превращается в постоянный очаг отказов. Все три сферы роднит одна цель — свести к минимуму плановые и аварийные простои, вызванные заменой батарей или восстановлением кабельных линий.

Серийно выпускаемые образцы подтверждают жизнеспособность концепции. Так, вертолётная система мониторинга редуктора с индуктивной передачей энергии сквозь герметичную переборку избавила от необходимости периодически менять батареи и исключила пропадание сигнала из-за окисленных контактов. В грузовом транспорте реализовали питание тензодатчиков карданного вала через вращающийся трансформатор с зазором 5 мм — измерительный тракт стабильно отработал 200 тыс. км, ни разу не потребовав выезда сервиса. В энергетике на подшипниках турбин разместили радиочастотные передатчики для термодатчиков: расстояние между излучателем и приёмником составило около метра, а энергия накапливалась в суперконденсаторе и расходовалась короткими всплесками во время сеансов связи. Эти примеры указывают на прямую связь между внедрением ВРТ и сокращением эксплуатационных издержек при условии корректного инжиниринга. [5]

Функционально ВРТ-системы способны предоставить ровно те же параметры питания, что и проводка, - необходимые напряжения и токи достигаются подбором топологии приемника и вторичного стабилизатора. Слабым звеном остается зависимость КПД от взаимного положения передатчика и приемника: в вибронагруженных узлах даже небольшое смещение может снизить отбираемую мощность ниже допустимого порога, поэтому проектировщики либо закладывают запас по мощности, либо применяют адаптивную подстройку частоты. Надежность узлов ВРТ, согласно статистике отказов, смещается из области механического износа в область деградации электронных компонентов - паяных соединений и полупроводников, что при грамотном терморегиме дает на порядок более высокую наработку на отказ в сравнении с контактными разъемами. Важно и то, что полная гальваническая развязка резко снижает риск повреждения измерительных цепей при ударах молнии или коротких замыканиях в силовой проводке. Ограничением выступает чувствительность к электромагнитным помехам: вблизи мощных инверторов или радиопередатчиков приходится увеличивать напряженность поля ВРТ, что не всегда допустимо. Тем не менее опыт эксплуатации показывает, что для распределенных систем мониторинга с числом датчиков более десятка бесконтактное питание уже на горизонте трех-пяти лет демонстрирует преимущество как по коэффициенту готовности, так и по удельным затратам на одно измерение.

Оценка строилась на расчете совокупной стоимости владения (ТСО) за типовой жизненный цикл системы мониторинга - 10 лет. Рассматривались три варианта питания одних и тех же точек сбора данных: проводная сеть, автономные батареи и ВРТ-модули. Денежные потоки дисконтировались по ставке, принятой в отрасли. Модель учитывает инфляционное удорожание расходных материалов и труда, а также вероятностную природу отказов, для чего использовались статистические распределения на основе данных с эксплуатируемых объектов. Итоговыми метриками служили чистый дисконтированный доход (NPV) от перехода на ВРТ относительно альтернатив, срок окупаемости и удельная стоимость одного часа безотказной работы измерительного канала.

$$TCO = \sum_{t=0}^T \frac{C_{\text{кап}}(t) + C_{\text{опер}}(t) + C_{\text{отказы}}(t)}{(1+r)^t}$$

$T = 10$ лет (горизонт планирования);

$r=0,10$ – ставка дисконтирования;

$C_{\text{кап}}(t)$ – капитальные затраты;

$C_{\text{опер}}(t)$ – ежегодные операционные расходы;

$C_{\text{отказы}}(t)$ – ожидаемые потери от внеплановых отказов.

В состав капитальных вложений по каждому варианту включали стоимость оборудования, монтажа и пусконаладки. Для проводки это цена кабельной продукции, клеммных коробок, источников питания, гермовводов, а также работы по прокладке и маркировке жгутов. Для батарейного варианта - цена самих элементов, держателей и инженерного времени на установку. ВРТ-система требует приобретения передающих модулей, приемных ректенн или катушек, резонансных преобразователей и в ряде случаев - вспомогательных накопителей энергии. По нашим данным, первоначальные затраты на ВРТ на 25–40% выше, чем у проводки, и на 10–15% выше, чем у качественных литиевых батарей. Однако эта разница заметно варьируется в зависимости от расстояния между источником и датчиком: с ростом длины кабельных трасс проводной вариант быстро дорожает, тогда как ВРТ-передатчик остается прежним.

Текущие издержки разделены на плановое обслуживание, внеплановые ремонты и потери от простоев. Для проводки основные расходы связаны с периодическим контролем целостности изоляции, подтяжкой разъемов и заменой окислившихся контактов, что особенно затратно в труднодоступных зонах. Батарейные решения требуют периодической замены элементов, утилизации и логистики, а также страдают от внезапного разряда при низких температурах. ВРТ-системы практически не нуждаются в регламентных работах, так как у них нет движущихся или истирающихся контактов. Электронные компоненты деградируют медленно, и единственной регулярной процедурой может стать визуальный осмотр. Потери от незапланированных остановок, вызванных отказом питания, для ВРТ оказались в несколько раз ниже, чем у конкурирующих решений, что подтвердил анализ статистики отказов за трехлетний период наблюдений.

Сопоставление выполнено на примере условного объекта с 30 точками мониторинга, половина из которых находится на вращающихся элементах или в зонах повышенной вибрации. Результаты сведены в графики NPV(t) и структуры затрат (рис. 1 и 2). Проводная схема демонстрирует низкую стартовую стоимость, но уже на 3-й год ее совокупные расходы обгоняют ВРТ из-за постоянных ремонтов контактной сети. Батарейный вариант сохраняет паритет в первые годы, однако затраты на замену элементов и связанные с ними простои делают его невыгодным на горизонте 5–7 лет. ВРТ-система, несмотря на повышенные капвложения, выходит на положительный NPV к четвертому году, а к концу срока службы экономия относительно проводки достигает 30-35% от TCO.

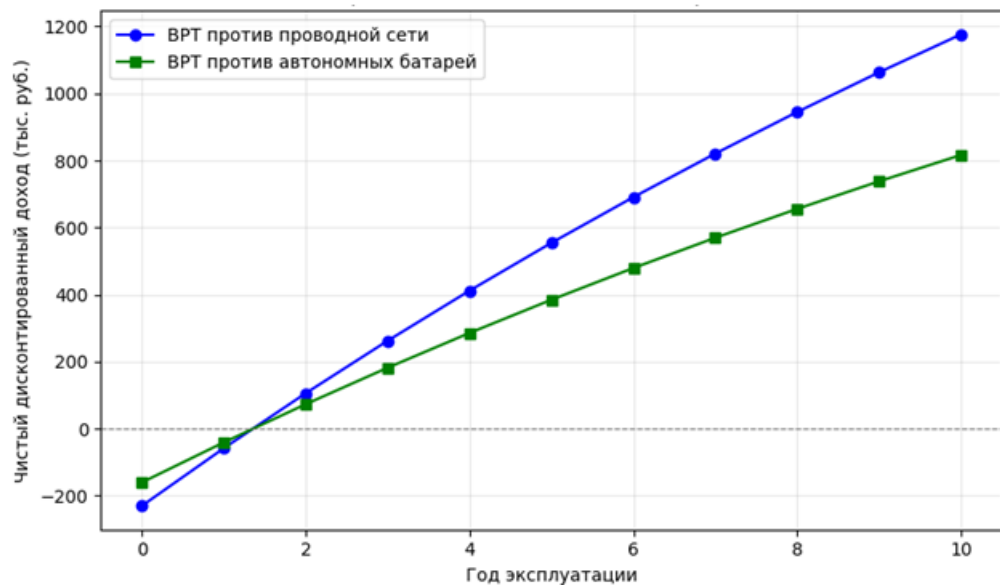


Рисунок 1 – NPV перехода на ВРТ относительно традиционных схем

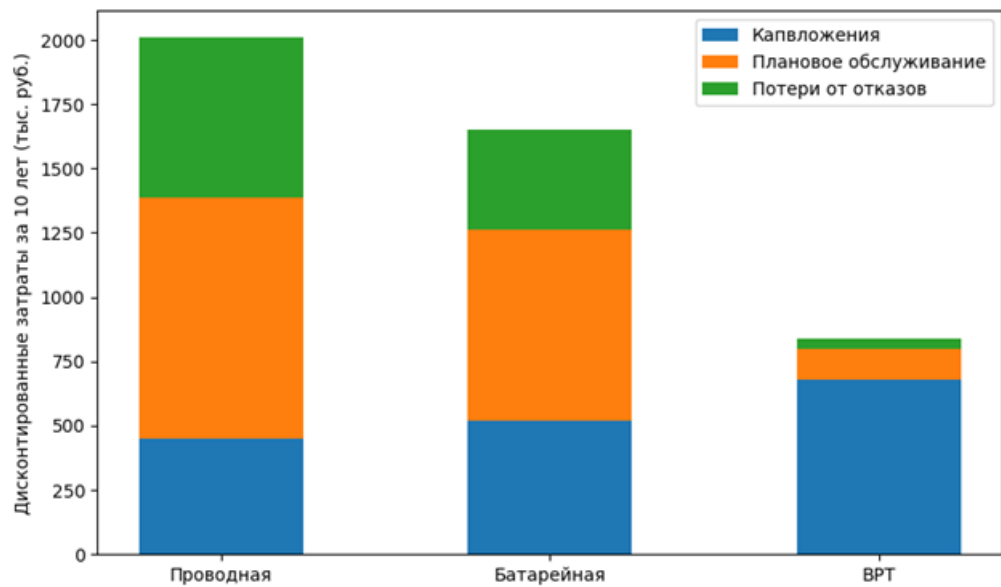


Рисунок 2 – Структура совокупной стоимости владения (ТСО)

Для сценариев с большим числом датчиков и труднодоступным размещением выигрыш еще существеннее, что отражено в семействе кривых на графике чувствительности. (рис. 3)

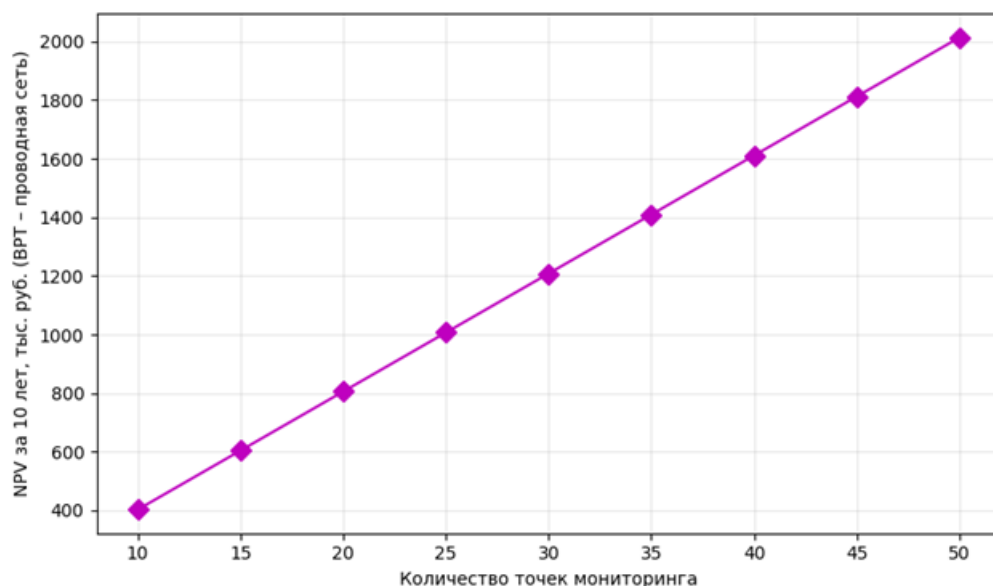


Рисунок 3 – Чувствительность экономического эффекта к числу датчиков

Отказ от разъемов и батарей практически обнуляет статьи расходов на плановую замену контактных групп и элементов питания. Для объектов с периодичностью обслуживания раз в полгода это позволило, по нашим расчетам, высвободить до 200 человеко-часов ежегодно с соответствующим сокращением потребности в квалифицированном персонале. Кроме того, резко падает число внезапных выходов из строя каналов измерения, что исключает авральные выезды бригад и сопутствующие логистические издержки.

Бесконтактное питание устраняет первичный фактор отказов - механический износ контактных пар и усталостное разрушение проводников в зонах перегибов. Герметичные приемные модули без выводов наружу не подвержены коррозии, их деградация определяется исключительно сроком жизни полупроводниковых компонентов, который при выбранных режимах превышает 15 лет. Таким образом, общий ресурс системы мониторинга увеличивается, а накопленный эффект выражается в переносе капитальных ремонтов на более поздние сроки и снижении потребности в запасных частях.

Надежностные показатели BPT-каналов, выраженные в наработке на отказ, оказались на порядок выше, чем у контактных аналогов. Исключение искрообразующих элементов снижает пожароопасность и делает технологию пригодной для взрывоопасных зон без дорогостоящего барьерного оборудования. Гальваническая развязка передатчика и приемника защищает измерительные цепи от перенапряжений, возникающих при коммутациях силового оборудования или грозовых разрядах. В деньгах это оборачивается снижением вероятных потерь от незапланированных простоев и выхода из строя дорогостоящих узлов, что дополнительно улучшает общую экономику проекта.

Основная проблема — быстрое падение КПД с увеличением расстояния и чувствительность индуктивных схем к взаимному смещению. В узлах, подверженных вибрациям, колебания зазора на десятые доли миллиметра сразу сказываются на отбираемой мощности, вынуждая закладывать в проект избыточный энергетический резерв. Радиочастотные системы упираются в жесткие ограничения по напряженности поля, продиктованные санитарными нормами и требованиями электромагнитной совместимости, а любое затенение тракта или переотраженный сигнал оборачиваются провалами питания. Лазерным линиям нужна прямая видимость и прецизионные системы сопровождения луча, что усложняет конструкцию. Общей для всех разновидностей BPT чертой пока остаются высокая удельная стоимость полупроводниковых преобразователей — особенно на повышенных частотах — и ограниченный ассортимент серийных компонентов, способных выдерживать механические и климатические нагрузки.

Нормативная база для ВРТ до сих пор носит разрозненный характер. Индуктивные устройства массового рынка регулируются стандартами вроде Qi, но в авиации и промышленности приходится опираться на отраслевые документы по электромагнитному излучению (МЭК 60601, МЭК 61000, ISO 14117) и правила сертификации бортового оборудования. Отсутствие единых методик измерения КПД и оценки безопасности при передаче энергии сквозь металл тормозит унификацию. Особенно сложно с требованиями по взрывозащите и пожаробезопасности: там, где раньше проблемой было искрение в разъёмах, теперь приходится учитывать нагрев приёмных катушек или оптических элементов, а общепризнанных критериев приёмочных испытаний для таких случаев ещё не выработано.

С удешевлением широкозонных полупроводников — GaN и SiC — появится возможность поднять рабочие частоты и сделать передающие модули заметно компактнее. Одновременно расширяются исследования метаматериалов и фазированных антенных решёток для фокусировки радиочастотного луча; это позволит увеличить дальность передачи, не выходя за рамки жёстких ограничений по уровню излучения. В области лазерной передачи перспективны многоэлементные фотоэлектрические приемники с распределенным тепловым менеджментом. Для промышленного мониторинга видится переход к комбинированным решениям, где ВРТ дополняется микроэнергосбором и буферными накопителями, обеспечивая бесперебойную работу датчика в любых режимах. Расширение стандартизации и накопление эксплуатационной статистики снизят порог входа, приближая технологию к рутинному инженерному инструменту.

Проведенное моделирование показало, что бесконтактная передача энергии применительно к бортовым сенсорам достигает экономической целесообразности на горизонте четырех–пяти лет. На примере объекта с тремя десятками точек мониторинга дисконтированная совокупная стоимость владения ВРТ-системой за десятилетний период оказалась на 30–35 % ниже проводной и на 18–22 % ниже батарейной альтернатив. Главные источники выигрыша - радикальное сокращение планового обслуживания контактных групп и замена батарей, а также снижение внеплановых простоев, обусловленных отказами разъемов. Надежностные характеристики ВРТ-каналов, выраженные через наработку на отказ, превосходили традиционные решения более чем на порядок.

Первоочередными объектами для перехода следует считать участки с труднодоступными либо подвижными датчиками, где стоимость одного выезда бригады сопоставима с ценой самого измерителя. В авиации это сенсоры механизации и шасси, на транспорте - системы контроля давления в шинах и тензодатчики трансмиссии, в промышленности - вращающиеся валы и подводные элементы. Для расстояний до 5–10 мм оптимальны индуктивные резонансные схемы; при необходимости удаленного питания (десятки сантиметров – метры) оправдано применение направленных радиочастотных систем. Рекомендуется предварять внедрение расчетом ТСО по методике, использованной в настоящей работе, с учетом конкретных статистик отказов и стоимости часа простоя.

Актуальными остаются вопросы поведения ВРТ-модулей в экстремальных климатических режимах, а также их влияние на помеховую обстановку бортовых цифровых шин. Требуется разработка типовых методик испытаний на надежность для бесконтактных питающих трактов и их сертификации во взрывоопасных зонах. Перспективным представляется создание гибридных архитектур, совмещающих ВРТ с локальным микроэнергосбором и буферными суперконденсаторами, что позволит демпфировать провалы энергии и расширить область устойчивой работы.

Список источников

1. Фролова Е. А., Доброскок Н. А. Критический обзор методов электромагнитной бесконтактной передачи энергии // Развивая энергетическую повестку будущего. – 2021. – С. 153-157.

2. Ерещенко Н. Д. и др. Математический анализ энергоэффективности беспроводной передачи энергии в рамках ее применения для зарядки беспилотных летательных аппаратов. – 2026.
3. Пижевский М. К. Беспроводная передача энергии //Иновации. Наука. Образование. – 2020. – №. 23. – С. 183-186.
4. Кечиев Л. Электрофизические основы конструирования электронной аппаратуры. – ЛитРес, 2022.
5. Голованов В. В. и др. Методы и средства диагностики авиационных приводов при эксплуатации по техническому состоянию //ВЕСТНИК Самарского университета. Аэрокосмическая техника. – 2015. – Т. 14. – №. 3-1. – С. 213-221.

Сведения об авторах

Чемерязева Ксения Денисовна, студентка 2 курса Санкт-Петербургского университета Гражданской авиации им. А.А.Новикова, Россия, Санкт-Петербург.

Пименова Карина Алексеевна, студентка 2 курса Санкт-Петербургского университета Гражданской авиации им. А.А.Новикова, Россия, Санкт-Петербург.

Сагитов Дамир Ильдарович, к.т.н., доцент кафедры «Систем автоматизированного управления», ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова.

Information about the author

Chemeryazeva Ksenia Denisovna, 2nd year student of the A.A.Novikov St. Petersburg University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia.

Pimenova Karina Alekseevna, 2nd year student of the St. Petersburg University of Civil Aviation named after A.A.Novikov, Russia, St. Petersburg.

Sagitov Damir Ildarovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automated Control Systems, Novikov St. Petersburg State University.