
УДК 621.396.6:621.391.827

Повышение энергоэффективности системы электропитания космического аппарата за счет использования энергии электростатического заряда поверхности космического аппарата в орбитальных условиях эксплуатации

Дорофеев Р. Ю.

*«Российские космические системы»,
ул. Авиамоторная, 53, Москва, 111250, Россия
e-mail: myhavkedah@mail.ru*

Аннотация

В статье приведено описание повышения энергоэффективности системы электропитания космического аппарата за счет использования энергии электростатического заряда поверхности КА с целью повышения надежности и как следствие увеличения сроков активного существования.

Ключевые слова: энергоэффективность, солнечная батарея, система электропитания, энергия электростатических зарядов, заряжающий электрод, срок активного существования, надежность

На космический аппарат (КА) за время вывода на орбиту и эксплуатации воздействует в различной мере множество факторов окружающего пространства. Среди внешних воздействующих факторов особенно выделяются: горячая магнитосферная плазма, электроны и ионы радиационных поясов Земли (РПЗ), протоны солнечных вспышек, потоки ядер высоких энергий. Такого рода факторы вызывают деградацию солнечных батарей – снижение ресурса работы солнечных элементов (фотопреобразователей). Деградацию солнечных батареи (СБ) принято делить на два основных вида:

- радиационную;
- оптическую деградацию под воздействием собственной внешней атмосферы КА.

Радиационной деградации в фотоэлементе подвергаются в первую очередь защитное стекло, просветляющее покрытие и сам полупроводник. Под действием УФ-излучения и

плазмы космоса происходит радиационное объёмное окрашивание кварцевого защитного стекла, что приводит к снижению его прозрачности и фото-ЭДС. Протоны создают в кремниевых фотоэлектрических преобразователях (ФЭП) радиационные дефекты, сильно ухудшающие электрические параметры фотоэлементов.

Оптическая деградация под воздействием собственной внешней атмосферы (СВА), окружающей КА, преимущественно образованной испарением неметаллических материалов: клеев, полимерных плёнок и покрытий, а так же продуктами распыления материалов внешних поверхностей КА при попадании на них ускоренных ионов, формируемых при работе электроракетных двигателей (ЭРД). Конденсирующиеся вещества из СВА образуют на поверхности СБ загрязняющую плёнку и снижают коэффициент пропускания защитного стекла.

Анализ статистики отказов КА [1,2] свидетельствует о том, что частыми нештатными ситуациями в ходе их эксплуатации являются отказы системы электропитания. По системе электропитания наиболее типичными нештатными ситуациями являются:

- дефекты в солнечных батареях, образовавшиеся при их изготовлении и не обнаруженные при подготовке КА к запуску;
- деградация элементов солнечных батарей с течением времени;
- нераскрытие или частичное раскрытие панелей солнечных батарей после выведения КА на орбиту.

Деградация солнечных батарей с течением времени ведет к снижению КПД фотоэлементов, что чаще всего проявляется на КА, такими событиями как:

- потеря линеек, повреждение СБ;
- частичная потеря мощности СБ;
- короткие замыкания в СБ;
- энергетические аномалии.

В некоторых случаях, невозстановливаемая потеря мощности на СБ приводит к потере КА. К современным КА предъявляются требования о доведении сроков активного существования до ~10-15 лет и более. Наряду с проблемой деградации солнечных батарей, существует и проблема электризации поверхности КА, которая остро встала с началом создания и интенсивного использования спутниковых систем широкого спектра применения.

С повышением сроков жизни, изменяются и конструкции КА, которые теперь лишены герметичного термостатируемого контейнера, представлявшего собой существенный барьер для космических излучений. Воздействие статического электричества на КА приводит к его зарядке до потенциалов ~1–20 кВ. Время электризации КА,

имеющего размеры шара с радиусом 2м, до потенциала 10 кВ составляет всего 5 мс. Таким образом, накопление заряда происходит практически мгновенно. Вследствие электризации возникают электрические разряды, создающие интенсивные электромагнитные помехи, а в некоторых случаях приводящие к повреждению и разрушению элементов аппаратуры. В результате длительного воздействия зарядов на КА наблюдается большое количество аномалий в работе бортовой аппаратуры и оборудования: происходит самопроизвольное включение и выключение различных устройств, изменяется ориентация антенн, прекращается подача электроэнергии от солнечных батарей.

В целом, вредное влияние электризации КА ухудшает надежность его бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА), солнечных батарей и снижает гарантийный ресурс КА в целом, что обуславливает необходимость принятия мер, снижающих это влияние. Такие меры в настоящее время принимаются, хотя они не носят системного характера и характеризуются недостаточной эффективностью.

В этой связи возникает интересное и очень актуальное, технически обоснованное предложение, связанное с возможностью накопления энергии статического электричества и ее использования для дополнительной подзарядки батарей КА, что позволит, с одной стороны, повысить их ресурс и энергоэффективность системы питания в целом, а с другой снизить вредное влияние электризации.

Кроме того, важность реализации данного предложения повышает то, что малые КА (аппараты нано-класса), создаваемые и эксплуатируемые в рамках экспериментов имеют малые сроки активного существования ввиду невозможности иметь источники пополнения энергии извне, а заряженных АКБ хватает как правило на 1-2 недели использования малого КА. Небольшие сроки активного существования тормозят развитие малых КА.

Следовательно, использование энергии электростатических зарядов позволит получить новый источник энергии на КА любого класса и компенсировать снижение КПД (деградация от ВВФ) кремниевых солнечных элементов.

Механизм накопления заряда на поверхности КА

В большинстве случаев значительная часть поверхности современных КА покрыта диэлектрическими материалами - терморегулирующими покрытиями, которые в подавляющем большинстве являются непроводящими, защитными стеклами солнечных батарей и т.д. Исходя из этого, потенциалы освещенных и неосвещенных поверхностей КА не выравниваются. Происходит так называемая дифференциальная зарядка поверхности, в отличие от которой зарядка КА, как единого проводящего тела, называется общей зарядкой.

Неосвещенная сторона КА заряжается отрицательно электронами плазмы. Если величина отрицательного потенциала на неосвещенной стороне значительна, т.е. зарядка происходит в достаточно горячей плазме, потенциал освещенной стороны КА также может оказаться в отрицательной области. При этом в районе терминатора (граница "свет-тьнь") на поверхности КА может возникнуть значительный градиент потенциала. Дифференциальная зарядка поверхности КА возникает также за счет различия вторично-эмиссионных характеристик материалов, находящихся на поверхности, различия условий попадания плазмы на отдельные участки поверхности и наличия конструктивных неоднородностей.

Характерное время общей зарядки КА обычно не превышает 0,3с, а время дифференциальной зарядки может составлять единицы и даже десятки минут, что обусловлено медленным перераспределением зарядов на диэлектрических поверхностях и зарядкой емкостей, образованных этими поверхностями с металлическим корпусом.

Снятие электростатического заряда с поверхности КА оказывает совокупность положительных эффектов:

- использования электростатического заряда как дополнительного источника энергии КА;
- минимизации губительного воздействия электризации на бортовые системы и радиоэлектронику.

Таким образом, очевидно, что использование в системе электропитания накопленного статического электричества позволит с одной стороны повысить энергоэффективность КА, а кроме того, будет способствовать снижению вредного влияния на работу БРЭА электромагнитных полей, образующихся в результате накопления ЭСР [3].

Техническая реализация повышения энергоэффективности системы электропитания космического аппарата за счет накопления и использования статического электричества

Технические аспекты реализации возможности использования энергии ЭСР в качестве дополнительного источника энергии для КА могут быть представлены в следующем виде. На первом этапе для определения наиболее подверженных ЭСР областей поверхности КА создается электрофизическая модель (рис.1). В электрофизическую модель вносятся параметры КА: тип и свойства конструкционных материалов КА, материалы покрытий, геофизические условия. На основе электрофизической модели определяются места расположения, на поверхности КА, устройств переноса электростатических зарядов [4,5].

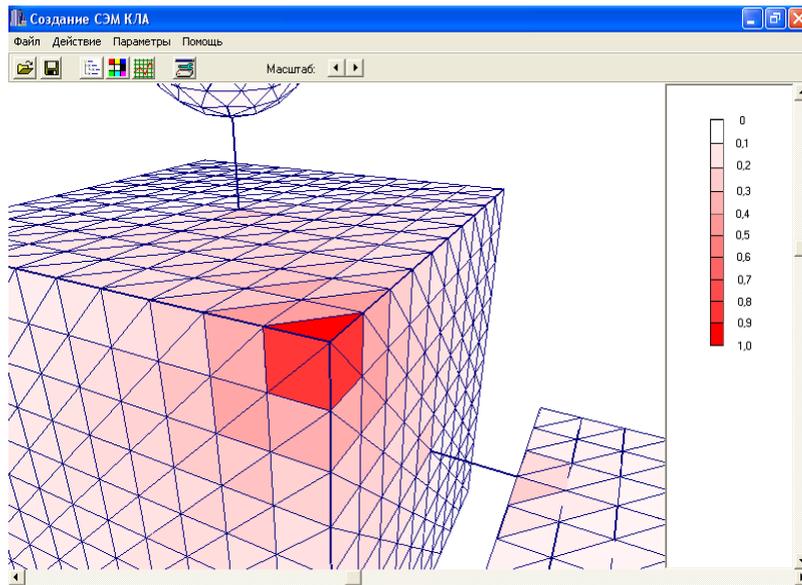


Рис.1. Пример визуализации структурной электрофизической модели КА с аномальными местами возникновения ЭСР

Среда вокруг КА выполняет роль электростатического генератора, осаждая на поверхности космического аппарата заряженные частицы. Устройством переноса заряда на аккумуляторные батареи (АКБ) космического аппарата могут служить специальные зарядные системы, состоящие из расположенных по поверхности заряжающих электродов (рис.2.). Зарядный электрод минимальных размеров представляет собой универсальное устройство для подачи напряжения питания до сотен кВ, допускающий большое напряжение. Потенциал с поверхности КА переносится посредством кабельной сети на АКБ.

Накопление электростатической энергии на АКБ КА, необходимо, обеспечить таким образом, чтобы использовать штатные батареи КА, предназначенные для сохранения полученной солнечной энергии.

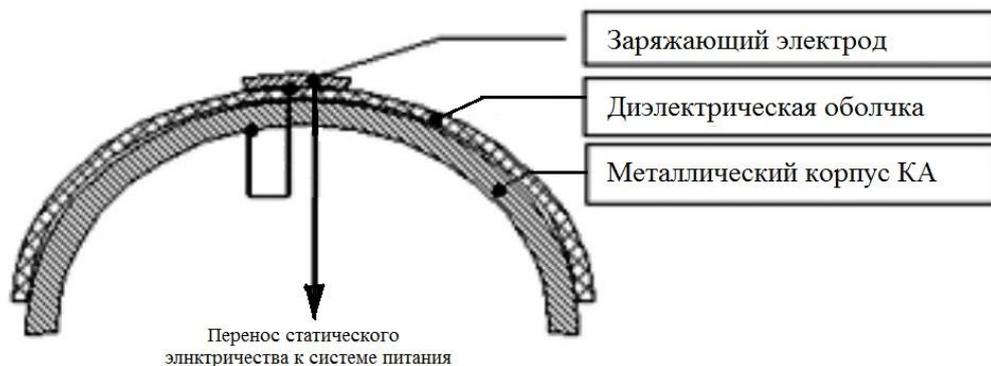


Рис.2.Заряжающий электрод на поверхности КА

В большинстве космических аппаратов система электропитания устроена так, как показано на рис.3. Солнечные панели преобразуют солнечную энергию в электрическую. Электрическая энергия преобразуется, накапливается, стабилизируется и распределяется по электронным нагрузкам, которые представлены, главным образом аналоговыми и цифровыми приборами, широкополосными радиоэлектронными схемами. Далее энергию получают преобразователи от шины питания КА, которая для большинства схем хорошо стабилизирована.

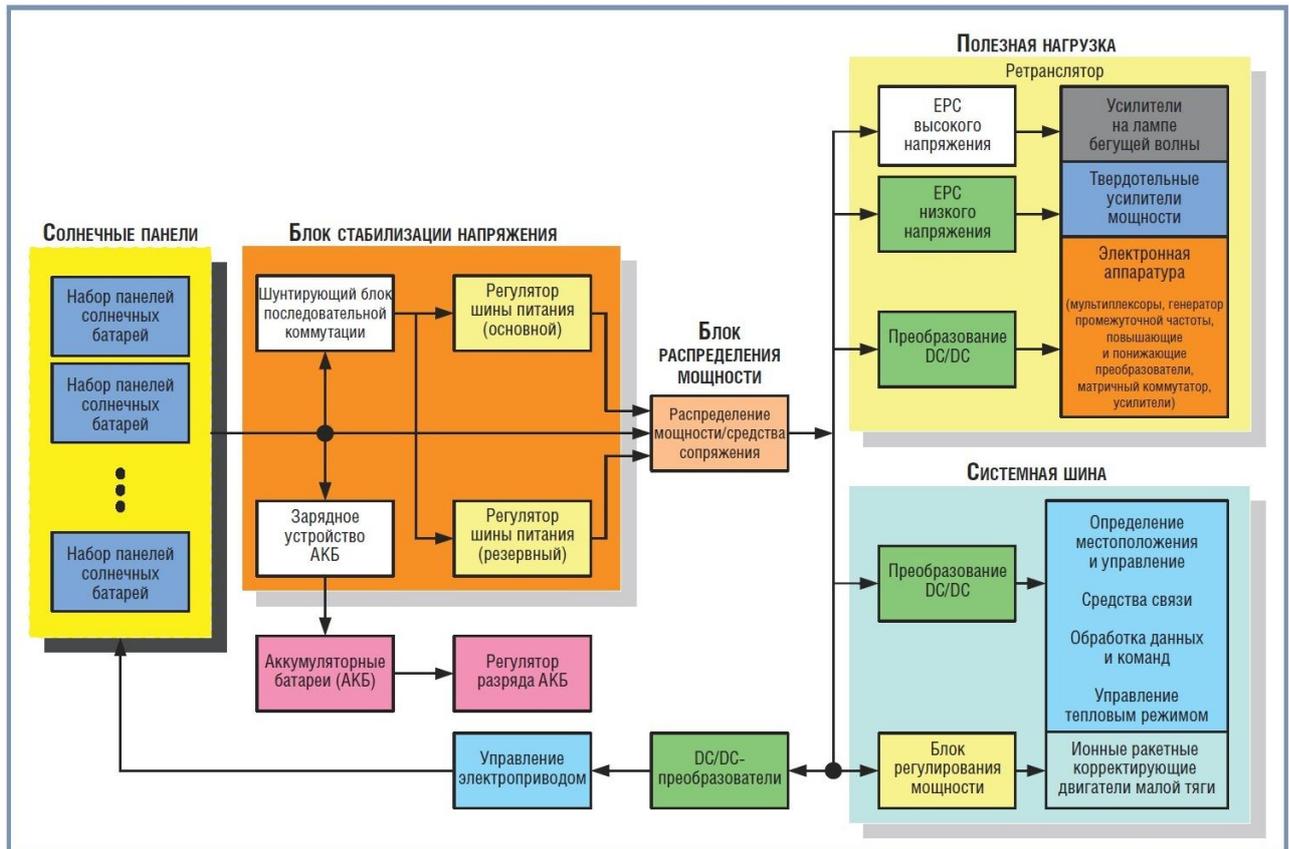


Рис.3. Схема электропитания КА

Из анализа схемы электропитания следует, что внедрение аппаратуры накопления заряда не внесет коррективов в существующую схему питания КА (рис.4.), т.к. электростатический потенциал точно так же, как энергия, полученная от солнечных батарей, будет задействовать штатные блоки стабилизации напряжения и АКБ. Следовательно, внедрение зарядной системы внесет минимальные конструктивные дополнения в КА, а впоследствии, может стать неотъемлемой его частью.

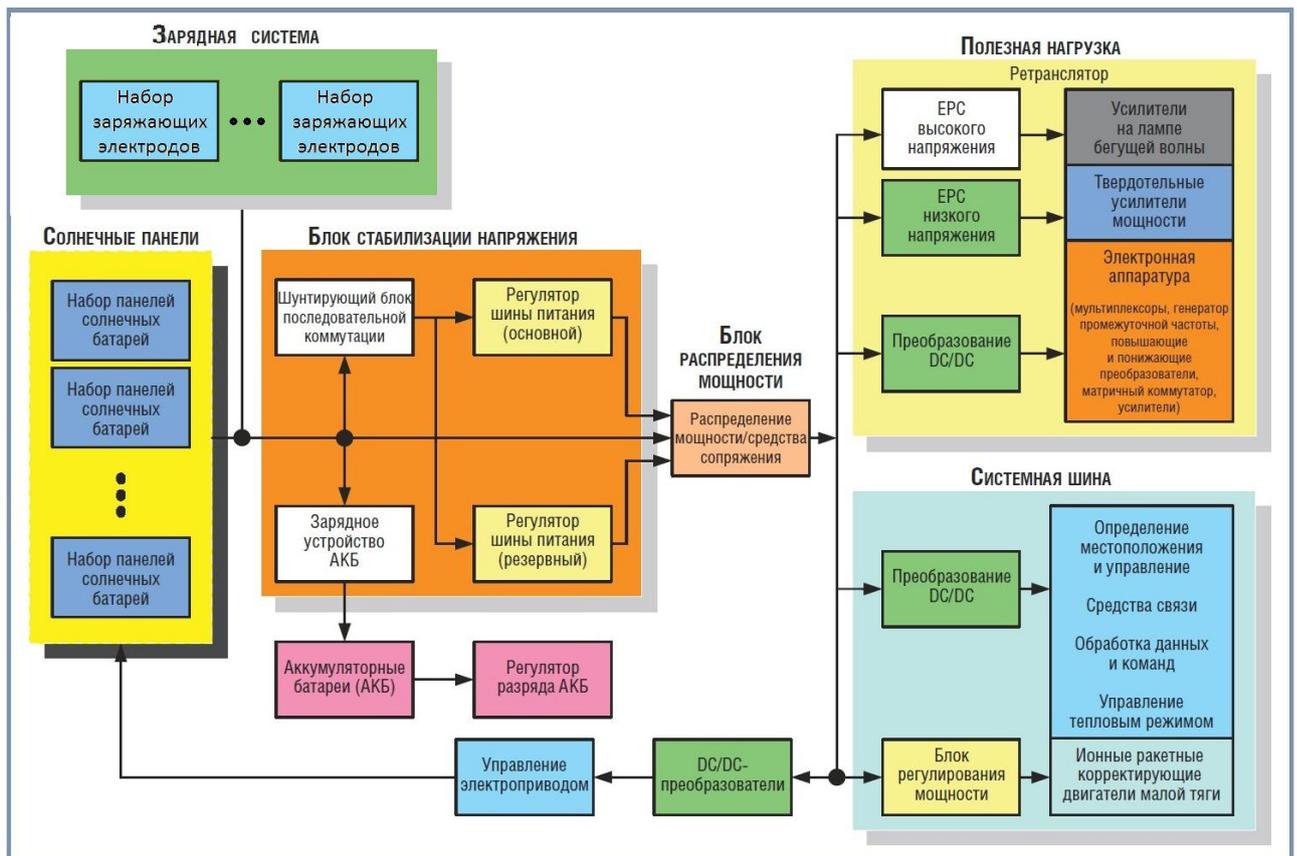


Рис.4. Схема электроснабжения КА с внедрением аппаратуры накопления заряда

Совокупность данных организационно-технических мероприятий по повышению энергоэффективности системы электропитания на КА на этапе разработки позволит существенно повысить срок активного существования (САС) космических аппаратов в орбитальных условиях эксплуатации.

Продуманное использование энергии электростатического заряда, образующейся вследствие электризации поверхности КА, дает следующие очевидные качественные и экономические преимущества:

- устойчивое и бесперебойное снабжение энергией потребителей на КА;
- повышение числа потребителей энергии на КА;
- минимизация неисправностей за счет уменьшения степени воздействия электризации на БРЭА;
- повышение эффективности системы электропитания;
- снижение суммарных затрат за счет увеличения продолжительности сроков активной работы КА;
- повышение гарантийных сроков орбитальной эксплуатации за счет повышения надежности БРЭА и других специальных систем КА.

Техническая обоснованность работы заключается в научно обоснованной методологии повышения энергоэффективности системы электропитания КА, апробировании предлагаемых технических принципов и решений по защите от воздействия и использованию ЭСР посредством участия в научно-технических конференциях, международных форумах по тематике конструирования и технологии производства бортовой аппаратуры для современных КА, а также реализации такого рода технических решений на практике в наземных условиях. Перечисленные факторы, а также использование при реализации инновационного предложения современных технологий, в совокупности позволят осуществить практическую реализацию предложения, не влияя существенно на массогабаритные характеристики КА.

Назначение и области применения конкурсной работы

Основным назначением данной работы является возможность повышение энергоэффективности системы электропитания КА, а так же повышение надежности БРА космического аппарата путем обеспечения его защищенности от воздействия отрицательных факторов в орбитальных условиях.

Использование данного предложения в малых космических аппаратах (МКА) позволит поднять интерес к аппаратам такого класса в одном из наиболее перспективных направлений развития ракетно-космической отрасли сегодня.

Кроме того, реализация инновационного предложения на предприятиях Российской космической отрасли позволит более интенсивно развивать и внедрять современные технологии создания устройств накопления электростатического заряда (зарядные электроды) для КА в интересах создания различных КА с повышенными сроками активной эксплуатации.

Областями применения предлагаемой системы контроля электризации являются предприятия и структуры космической отрасли РФ, создающие и использующие спутниковые аппараты, в том числе КА с аппаратурой и оборудованием, производимые предприятиями, которые в настоящее время проводят техническую политику, направленную на повышение ресурса и надежности используемых КА.

Актуальность и значение работы для отрасли

Актуальность и значение для отрасли в целом определяется тем, что применение предлагаемого способа повышения энергоэффективности КА в ракетно-космических отраслях РФ обеспечивает решение задачи высокостабильной эксплуатации КА в орбитальных условиях, предполагающих накопление губительных электростатических потенциалов.

Разработка и применение, в соответствии с представленными выше предложениями, методики использования электростатического заряда, негативно воздействующего на КА, позволит повысить энергоэффективность и обеспечить длительные сроки эксплуатации систем, радиоэлектронных изделий, используемых на космических аппаратах.

Реализация инновационного продукта на предприятии позволит, с одной стороны, ускорить переход на использование новых отечественных космических аппаратов с более длительным сроком жизни, с другой, даст реальную возможность повысить качество и соответственно надежность создаваемого бортового оборудования и аппаратуры, в орбитальных условиях эксплуатации.

В конечном итоге все это скажется на повышении возможностей предприятия, связанных с производством долговечных и высоконадежных КА, росте конкурентоспособности предприятия на российском и международном рынке космических отраслей в части продвижения и сбыта продукции. Что в свою очередь позволит улучшить финансово-экономические характеристики деятельности предприятия.

Новизна, аналоги и существенные отличия от аналогов

Новизна данной инновационной работы заключается в том, что впервые разработана и сформулирована методология повышения энергоэффективности КА в орбитальных условиях за счет использования энергии его электризации, и кроме того, обеспечения реализации дополнительных мер по снижению отрицательного воздействия ЭСР, что в совокупности позволит повысить надежность и сроки активной эксплуатации КА в орбитальных условиях.

При этом, в соответствии с разработанными предложениями, повышение энергоэффективности системы электропитания КА и защиты от губительного воздействия ЭСР в орбитальных условиях обеспечивается решением следующей совокупности задач:

- создание структурной электрофизической модели электризации КА для определения порядка размещения аппаратуры сбора электростатической энергии на поверхности КА;

- разработка дополнительных элементов бортовых зарядных систем, используемых на КА в орбитальных условиях для использования энергии электростатического поля;
- проработка принципов и особенностей функционирования зарядной системы, сопряжения ее с существующей системой электропитания и порядок размещения на конструкции КА.

Проведение патентного поиска выявило лишь некоторые варианты реализации заряжающих электродов, использующихся в различных областях промышленности. Обнаруженные электроды для аккумуляции электростатических зарядов используются только в наземных условиях.



Рис. 5 Заряжающие электроды, использующиеся в легкой промышленности

Аналогов устройств и систем, обеспечивающих сбор электростатического заряд на КА в орбитальных условиях и реализацию технических мер защиты от его воздействия с предлагаемой в данной инновационной работе аппаратурной реализацией в настоящее время не существует.

Положительный эффект инновационного продукта будет заключаться в повышении сроков активного существования систем и оборудования КА в результате появления дополнительного источника энергии и обеспечения его защищенности от отрицательного воздействия ЭСР, что в свою очередь обеспечивает повышение ресурса КА. Кроме того, нейтрализация воздействия ЭСР на КА повысит стойкость и надежность продукции предприятия.

Высокая потребность на усовершенствование системы электропитания определяется следующими факторами:

- активное развитие спутниковых систем разного рода (навигационные, связные, метеорологические и т.д.) и расширение их функциональных возможностей;
- внедрение малых КА - самого динамичного сегмента космической отрасли, тяготеет к увеличению сроков жизни таких аппаратов, и уже сегодня крупнейшими космическими корпорациями планируется создавать из таких аппаратов целые орбитальные группировки;

- повышение требований к указанным спутниковым системам в плане необходимости обеспечения больших сроков эксплуатации в орбитальных условиях (гарантийного ресурса);
- повышение требований к надежности, качеству, и ресурсу бортовой аппаратуры и оборудования, используемых для КА.

Все выше перечисленные положительные факторы приведут к росту конкурентоспособности продукции и соответственно возможностей предприятий на отечественном рынке, связанного со сбытом продукции космической отрасли, что в конечном итоге позволит повысить доходность (финансово-экономические показатели структурных подразделений, отвечающих за создание БРЭА, и предприятия в целом).

В связи с влиянием указанных факторов, при разработке и производстве продукции космической отрасли будут обеспечены заинтересованность и устойчивый спрос на результаты разработки и внедрения данного продукта по повышению энергоэффективности КА, оказывающие влияние на сроки работы и надежность систем КА, и соответственно их гарантийный ресурс.

Выводы

Результатом проведения совокупности данных мероприятий, на этапе разработки и эксплуатации, является существенное повышение энергоэффективности космических аппаратов и стойкости к воздействию электростатических полей в орбитальных условиях эксплуатации.

Конечным итогом совокупности действий в соответствии с предлагаемой схемой является повышение надежности бортовой аппаратуры, и соответственно ресурса использования КА в орбитальных условиях.

Кроме того, реализация данного метода позволяет развивать и внедрять современные технологии создания микроэлектронных устройств сбора электростатических зарядов для КА. При создании устройств такого типа появляется возможность на их основе модернизировать систему электропитания КА.

Областями применения предлагаемой схемы повышения энергоэффективности КА в интересах повышения надежности являются предприятия и структуры космической отрасли РФ, создающие и использующие спутниковые аппараты, которые в настоящее время проводят техническую политику, направленную на повышение ресурса и надежности применяемых КА.

Библиографический список

1. Соколов А.Б., Саенко В.С. Моделирование изменений радиационной электропроводности полимеров внешней поверхности космических аппаратов при воздействии факторов космического пространства // Технологии электромагнитной совместимости. - Москва, изд-во ООО «Издательский Дом «Технологии». – 2008. - № 2(25), С. 9-11
2. Акишин А.И.. Воздействие электрических разрядов на солнечные батареи ИСЗ// Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ, 2008, №4, с.68-71.
3. Дорофеев Р.Ю., Жуков А.А. Особенности защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от электростатического разряда на этапе ее схемотехнического проектирования. Труды II Всероссийской научно–технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», посвященной 100-летию со дня рождения М.С. Рязанского. 2-4 июня 2009 года. М.: Радиотехника, 2010, С. 140-149.
4. Дорофеев Р.Ю. Алгоритм для моделирования электризации КА в орбитальных условиях эксплуатации. Сборник тезисов IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий».15-17 июня 2011 года М.: Радиотехника, 2011.С.562-567.
5. Комягин С.И., Соколов А. Б. Математическая модель электромагнитной стойкости // Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств. Сборник научных трудов. - Москва, МИЭМ. – 2008. - С. 19-21.