

УДК 621.3.051

Проектирование функциональных подсистем систем электроснабжения автономных электротехнических комплексов повышенной эффективности

Н. Б. Жирнова*, В. Г. Еременко, С. А. Грузков,
Д. О. Варламов, Р. И. Журавлев

Изложен опыт проектирования систем электроснабжения автономных электротехнических комплексов с возобновляемыми источниками энергии. Показаны общие подходы оптимизационного проектирования, методики расчета первичных источников энергии и накопительных подсистем.

Системные задачи проектирования объединяют собой задачи синтеза и анализа структур, соединения агрегативных элементов, выбора оптимального варианта для реализации технического задания. В результате их грамотного решения возможно значительное увеличение генерируемой мощности источников энергии без повышения установленной мощности источников и создание структур с повышенными удельными энергетическими, ресурсными и надежностными показателями.

Параметрические задачи проектирования охватывают проблемы выбора уровней напряжений источников, накопителей, преобразователей и регуляторов; рода токов и уровней стабильности выходных напряжений; расчета базовых параметров и размеров элементов, обеспечивающих лучшие массоэнергетические показатели системы в целом.

Эксплуатационно-технические задачи проектирования имеют особенно важное значение для обеспечения работоспособности, надежности и ресурса.

Представлены примеры работ по схемам выравнивания емкостных характеристик аккумуляторов в составе батарей, по моделям схемотехнических решений для проектирования автономных систем повышенной эффективности и долговечности.

Ключевые слова: оптимизационное проектирование, система электроснабжения, возобновляемые источники энергии.

Введение

Изначально научные работы и подготовка специалистов в области авиационного и автотракторного электрооборудования в МЭИ велись на Электромеханическом факультете, который образовался еще в недрах

нынешнего МГТУ им. Н. Э. Баумана в 1905 г. (поэтому, до 1985 г. годом образования МЭИ считался именно 1905 г.). Научные работы на кафедре ЭКАО и ЭТ (ранее ААТЭ – ЭСА – ЭЭЛА – ЭКАО) в области авиационного и автотракторного электрооборудования интенсивно проводились с 1940-х гг. Среди первых выпускников по специальности авиационного электрооборудования был Борис Евсеевич Черток — член-корреспондент АН СССР (1968), Герой Социалистического Труда

* ZhirnovaNB@mpei.ru

(1961), член КПСС с 1932 г., лауреат Ленинской (1957) и Государственной (1976) премий СССР, награжден 2 орденами Ленина, орденом Октябрьской Революции, другими орденами и медалями. Научным руководителем у него был Андрей Николаевич Ларионов — член-корреспондент АН СССР, один из авторитетнейших ученых в области авиационного и автотракторного электрооборудования, крупный специалист в области общих и специальных электрических машин, теории и практики применения постоянных магнитов в электромеханике, заведующий кафедрой ААТЭ – ЭСА (1941 — 1943 гг., 1950 — 1963 гг.).

Научные работы в области систем электроснабжения (СЭС) космических летательных аппаратов (КЛА) велись на кафедре с 1960-х гг. В них активно участвовали Г. М. Веденеев, А. Б. Токарев, В. Г. Еременко, А. Н. Зенченко, Н. Б. Жирнова, С. П. Шпаков, Ф. Ф. Галтеев, Б. В. Захаровский, С. А. Грузков, А. В. Лысенко, В. А. Рогоза, А. В. Сукманов, А. Н. Воронцов, В. В. Михальчук, В. Н. Брешков, О. Б. Щукина, М. Ю. Васильев, С. Ю. Поморин, А. Е. Дочкин и др. Работы проводились по договорам с ведущими предприятиями космической отрасли: НИИ приборостроения (ныне ОАО «Авиационная электроника и коммуникационные системы»), РКК «Энергия», ЦСКБ машиностроения (г. Самара), НПО Машиностроения (г. Реутов), НПО прикладной механики (г. Железногорск), ВНИ Аккумуляторный институт (г. Санкт-Петербург), НПО «Квант», ВНИИЭМ (г. Истра) и др.

В настоящее время кафедра проводит исследования и осуществляет разработки электротехнических комплексов и систем электроснабжения автономных объектов и электрического транспорта и сотрудничает с ВНИИЭМ (г. Москва), АО ВПК «НПО машиностроения» (г. Реутов), ОАО «Авиационная электроника и коммуникационные системы», ОАО «Аэрэлектромаш», ОАО ГОКБ «ПРОЖЕКТОР», ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» и др. в областях научной работы и подготовки студентов и аспирантов по направлениям работ данных предприятий.

Основные направления педагогической и научной деятельности кафедры по решению задач проектирования функциональных подсистем СЭС с учетом современных тенденций по повышению мощности, ресурса, ужесточению требований к надежности и эффективности в области авиации, космонавтики и автономных объектов: проектирование систем генерирования и распределения электроэнергии, элементов и систем электроснабжения космических аппаратов с солнечными и аккумуляторными батареями, силовая электроника в электрооборудовании самолетов, автомобилей, космических летательных аппаратов и других автономных объектов. С 2016 г. в МЭИ планируются проведения научных работ в рамках Программ инновационного развития (ПИР) Госкорпораций и в интересах компа-

ний, реализующих программы инновационного развития. Поэтому предполагается продолжение работ в области электротехники для создания сложных наукоемких авиационных и ракетно-космических комплексов военного, космического и двойного назначения, разработка в рамках данных работ новых проектно-конструкторских решений с применением современных материалов, прорывных технологий, экологически безопасных энергетических установок, ориентированных на возобновляемые источники энергии.

Потенциальными потребителями и заказчиками развития научных и учебных программ кафедры являются: ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» (создание интеллектуальных систем обнаружения, распознавания объектов, обработки информации, информационно-аналитических и экспертных систем различного назначения), АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей» (исследования современной элементной базы, обеспечивающей разработку приемо-передающих модулей для активных фазированных антенных решеток перспективных РЛС; высокоплотных источников вторичного электропитания; технологий автоматизированного проектирования и испытаний сложных радиоэлектронных систем), ОАО «РКК «Энергия» (эффективная космическая энергетика, автоматизированные средства обеспечения контроля и безопасности в космосе) и др. В последнее время повышенный интерес к исследованиям и подготовке специалистов в области экологически безопасных энергетических установок, ориентированных на возобновляемые источники энергии, проявляет Республика Мьянма. На кафедре прошли обучение и защитили квалификационные работы десятки магистров, аспирантов и докторантов из Республики Союза Мьянмы.

Методика проектирования СЭС автономных электротехнических комплексов

Накопленный опыт проектирования автономных СЭС [3] и современные достижения в области электроники и микропроцессорного управления позволяют подойти к вопросу модернизации существующих и разработке новых СЭС повышенной эффективности и надежности. Такие резервные и автономные СЭС могут найти применение в космической промышленности [2 — 4], в оборонной и военной областях, а также в гражданском строительстве для энергоснабжения отдаленных [5] или высокоответственных потребителей [10], для гибридных электромобилей и беспилотных летательных аппаратов [8].

СЭС — это совокупность источников электроэнергии, систем передачи, преобразования и распределения электрической энергии, защиты, управления и эксплуатации. Существуют различные виды СЭС:

- по типу источника: электрохимические, дизель-электрические и т. д.;
- по конфигурации: централизованные, децентрализованные, комбинированные;

- по назначению: автономного, резервного, аварийного, дежурного электроснабжения;
- по степени мобильности: стационарные, мобильные;
- по роду и частоте тока: постоянного, переменного тока и др;
- по числу фаз: одно- и трехфазные.

Для поддержания качества и бесперебойности электропитания разрабатываются резервные СЭС, выполняющие функции резервных источников для обеспечения надежности, аварийных и автономных источников и дополнительных источников для покрытия пиковых нагрузок.

В условиях увеличивающегося потребления электроэнергии требования к качеству электроэнергии, как к фактору, во многом определяющему безотказное функционирование нагрузки, должны соответствовать стандартам и нормативным руководящим документам: Государственным программам (ГП) РФ «Развитие транспортной системы»; ГП РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года»; ГОСТ 13109–97 «Нормы качества электроэнергии в системах общего назначения» (действующий) и ГОСТ Р 54149–2010 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». При этом, дальнейшее проектирование СЭС повышенной эффективности и надежности невозможно без их системной оптимизации.

Впервые в нашей стране задача системной оптимизации автономных СЭС была поставлена академиком В. С. Кулебакиным и позднее развита в работах Г. Супруна, В. Т. Морозовского, И. М. Синдеева, И. А. Лазарева и др. Основные проблемы построения первичных СЭС космических аппаратов (КА) решены в трудах Г. М. Веденева, А. Б. Токарева, Н. Б. Жирновой, В. С. Тарасова и др. Однако, в практическом отношении не все работы в полной мере охватывали ряд конкретных задач проектирования функциональных подсистем СЭС с учетом современных тенденций к повышению мощностей, ресурса, ужесточению требований к надежности и энергоэффективности.

Исходя из выполняемых функций, резервные и автономные СЭС обычно имеют сходную структуру и набор агрегативных элементов: первичный источник (ПИ), накопитель энергии (НЭ) и аппаратуру регулирования и контроля (АРК). Большие наработки по проектированию и эксплуатации автономных СЭС на-

коплены в передовой отрасли промышленности — в космонавтике.

Например, для летательных аппаратов (ЛА) основная задача оптимального проектирования СЭС заключается в таком подборе агрегатов и устройств систем генерирования и преобразования с последующим их структурным и электрическим объединением, при котором все бортовые системы ЛА при минимальной массе СЭС должны гарантировано получать электроэнергию требуемых параметров качества и уровня мощности на всех этапах полета. При этом должны выполняться все требования по поддержанию требуемого уровня надежности и эксплуатационных расходов за все время эксплуатации ЛА.

В самом общем случае процесс проектирования СЭС укрупнено включает следующие этапы (рис. 1): постановка задачи; синтез и анализ возможных вариантов; выбор наилучшего решения.

В настоящее время существует несколько методов поиска оптимальной структуры СЭС: параметрическая и структурная оптимизации, эмпирико-эвристический метод, направленное конструирование СЭС с требуемыми свойствами из элементов располагаемой агрегативной базы.

Требования минимума массы без ущерба для надежности и других технико-экономических показателей имеет для СЭС ЛА первостепенное значение. Важны и энергетические характеристики. К ним относят потери мощности в СЭС и КПД отдельных ее элементов. Однако, КПД часто связано с возрастанием массы и габаритов электромеханических устройств и сети, что приводит к увеличению конструктивной массы СЭС, но к уменьшению полетной массы [7]. Вследствие этого при проектировании системы электроснабжения приходится искать компромиссные решения, при которых полетная масса оставалась бы минимальной. Качество электроэнергии — одна из важнейших характеристик, определяющая возможность и целесообразность использования спроектированной СЭС на борту ЛА (основные показатели качества определены ГОСТ Р 54073–2010). Показатели качества электроэнергии тем выше, чем меньше их отклонения от номинальных значений при работе оборудования и чем быстрее протекают переходные процессы, вызванные сбросом и набросом нагрузки, а также различного рода неисправностями в СЭС.

При проектировании СЭС не следует стремиться к получению экстремальных значений показателей качества, так как увеличение срока службы потребителей,

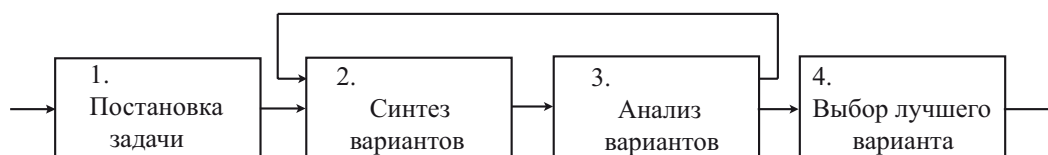


Рис. 1. Основные этапы проектирования СЭС

улучшение их рабочих характеристик, повышение КПД и уменьшение массы системы распределения электроэнергии сопровождаются усложнением устройств регулирования напряжения и частоты, уменьшением их надежности, увеличением массы и стоимости.

Как правило, для оценки качества вырабатываемой СЭС электроэнергии вводится некоторый обобщенный показатель качества K_n , являющийся функцией перечисленных в ГОСТ Р 54073–2010 частных показателей качества.

С учетом всех показателей задача оптимального проектирования СЭС ЛА является многокритериальной и неоднозначной с точки зрения путей и средств достижения желаемого конечного результата. Существует много способов решения многокритериальных задач оптимизации, из которых, применительно к проектированию СЭС, можно выделить три:

1) способ представления обобщенного показателя эффективности в виде «взвешенной» суммы частных показателей, в которую каждый из них входит с каким-то весом, отражающим его значимость;

2) выделение из множества возможных решений подмножества не доминирующих решений по выбранным параметрам оптимизации;

3) способ сведения многокритериальной задачи в однокритериальную путем выделения одного (главного) показателя эффективности и обращения его в максимум (или минимум), а на остальные показатели накладываются ограничения.

Например, при проектировании СЭС ЛА в качестве главного критерия чаще других используется полетная масса.

Во многом процесс проектирования автономных СЭС имеет сходную методику. Процесс начинается с определения установленных мощностей ПИ и НЭ. Для этого строятся циклограммы нагрузок и генерирования энергии ПИ. На рис. 2 — 4 показаны примеры циклограмм нагрузок космического (КЛА) и беспилотного (БЛА) летательных аппаратов и автономного коттеджа.

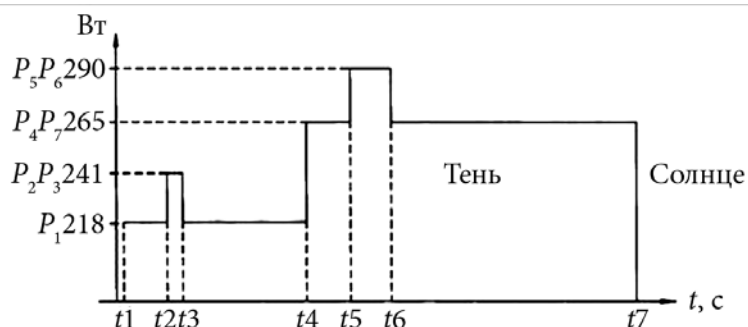


Рис. 2. Циклограмма нагрузок КА на участке выведения:

t_1 — за 60 с до запуска КА система отключается от аэродромного питания; t_0 — t_4 — время выхода КА на орбиту; t_5 — включение электроприводов раскрытия СБ; t_6 — остановка электроприводов раскрытия СБ; t_7 — выход спутника из тени на освещенную часть орбиты

Если в процессе эксплуатации существуют единичные энергоемкие режимы работы, например, режим на этапе выведения на орбиту малого космического спутника, то расчет установленных мощностей ПИ и НЭ осуществляется по этим энергоемким режимам [2]. Часто в качестве ПИ автономной СЭС выступают солнечные батареи (СБ), которые имеют циклический режим генерирования электроэнергии в зависимости от освещенности панелей. Тогда следует построить циклограммы освещенности СБ. Так, на рис. 5 показан пример циклограммы освещенности СБ на КЛА на низкой околоземной орбите, на рис. 6 — циклограмма средней освещенности СБ БЛА в условиях эксплуатации в средних широтах европейской части России, а на рис. 7 — пример циклограммы освещенности панелей СБ на земной поверхности в условиях эксплуатации в экваториальных широтах.

Помимо ПИ в автономных СЭС обычно всегда имеется накопительная подсистема (в основном, это аккумуляторная батарея (АБ)). В этом случае расчет установленных мощностей ПИ и емкостей АБ проводится из условий соблюдения энергобаланса [3— 5], причем как в ручном режиме, так и при использовании специальных программ расчета энергобаланса [4] или программ моделирования циклирования нагрузки, ПИ и НЭ [5]. Проектирование накопительных подсистем (НП) СЭС включает последовательное решение множества взаимосвязанных задач, начиная с согласования технического задания, выпуска рабочих чертежей и заканчивая созданием конструкторской документации. В настоящее время все задачи решаются с применением современных средств вычислительной техники и программных продуктов. При проектировании подобных СЭС нужен системный подход, возникает большое количество сложных задач, обусловленных необходимостью учета взаимосвязи отдельных агрегативных элементов.

Все задачи проектирования подразделяются на системные, параметрические и эксплуатационно-технические. Поэтому рассматривая задачи проектирования отдельных агрегативных элементов СЭС (в том числе и НП) надо учитывать их системные, параметрические и эксплуатационно-технические аспекты.

Системные задачи проектирования НП объединяют собой задачи синтеза и анализа структур соединения агрегативных элементов НП, выбора оптимального варианта НП для реализации технического задания. В результате грамотного решения системных задач возможно значительное увеличение генерируемой мощности источников энергии без повышения установленной мощности источников и создание структур с повышенными удельными энергетическими, ресурсными показателями и показателями надежности.

Параметрические задачи проектирования НП СЭС КЛА охватывают проблемы выбора

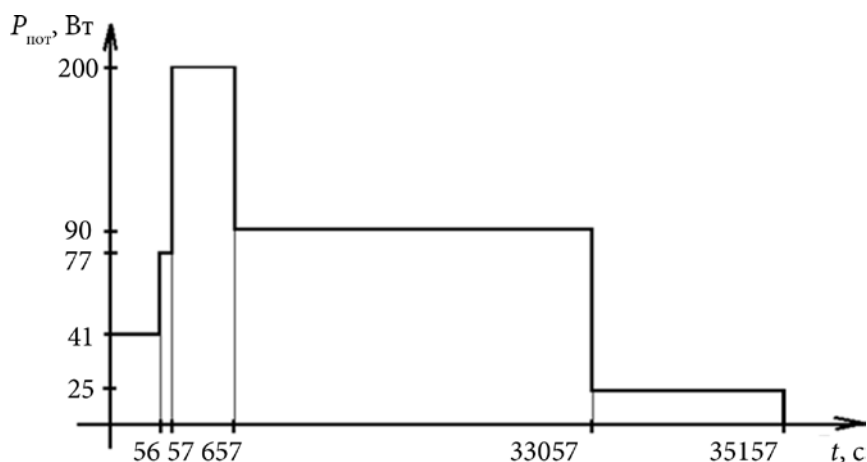


Рис. 3. Циклограмма потребляемой мощности БЛА

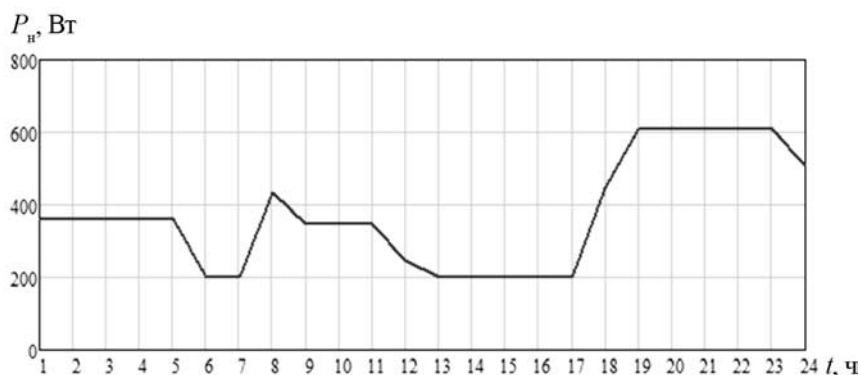


Рис. 4. Циклограмма потребляемой мощности автономного коттеджа от 1 до 24 ч

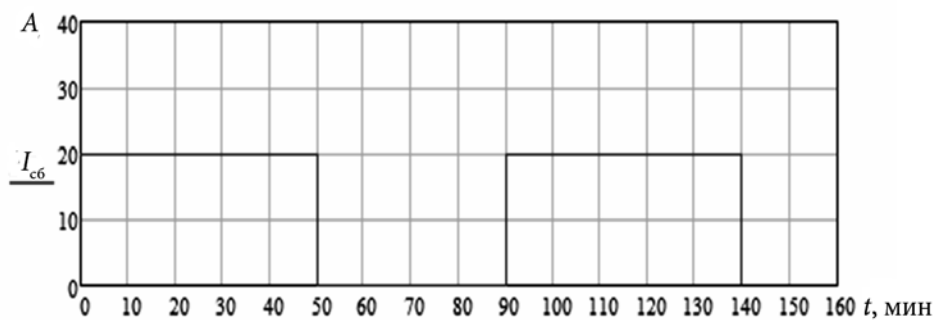


Рис. 5. Ток СБ КЛА на низкой околоземной орбите

уровней напряжений источников, накопителей, сетей и преобразователей и регуляторов; рода токов и уровней стабильности выходных напряжений; расчета базовых параметров и размеров элементов НП, обеспечивающих лучшие массоэнергетические показатели системы в целом.

Решение эксплуатационно-технических задач проектирования НП имеет особенно важное значение для обеспечения работоспособности, надежности и длительного ресурса энергетического обеспечения всего КЛА и эффективности выполнения космической программы. Наличие НП в СЭС обусловлено необходимостью обеспечения сложных циклограмм нагрузки без

существенного увеличения установленной мощности ПИ, выхода из аварийных режимов, энергообеспечения КЛА в специальных режимах, когда работа других источников не возможна.

После установления режима обеспечения энергобаланса проводится перевод расчетных значений мощности ПИ и емкости НЭ в установленные значения. Разница состоит в том, что обычно установленные мощности больше расчетных. Окончательный результат зависит от типов ПИ и НЭ, степени деградации источников и накопителей в конкретных режимах работы, необходимого срока службы СЭС и степени надежности. Например, при многократном циклировании

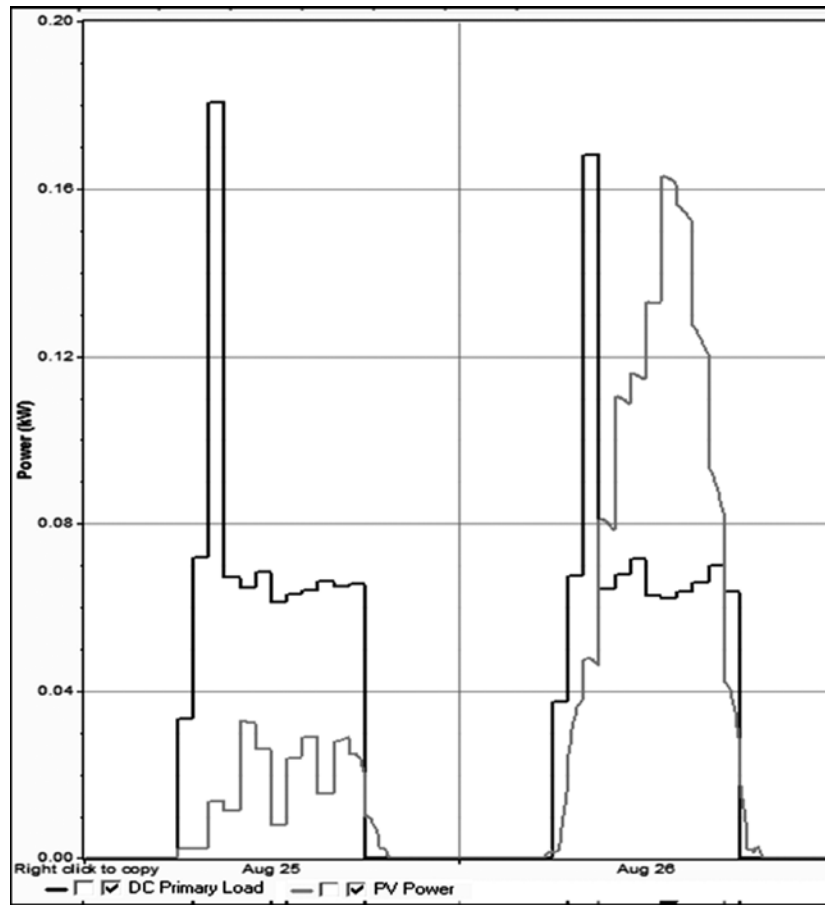


Рис. 6. Циклограммы потребляемой мощности БЛА и генерируемой мощности СБ при средней освещенности

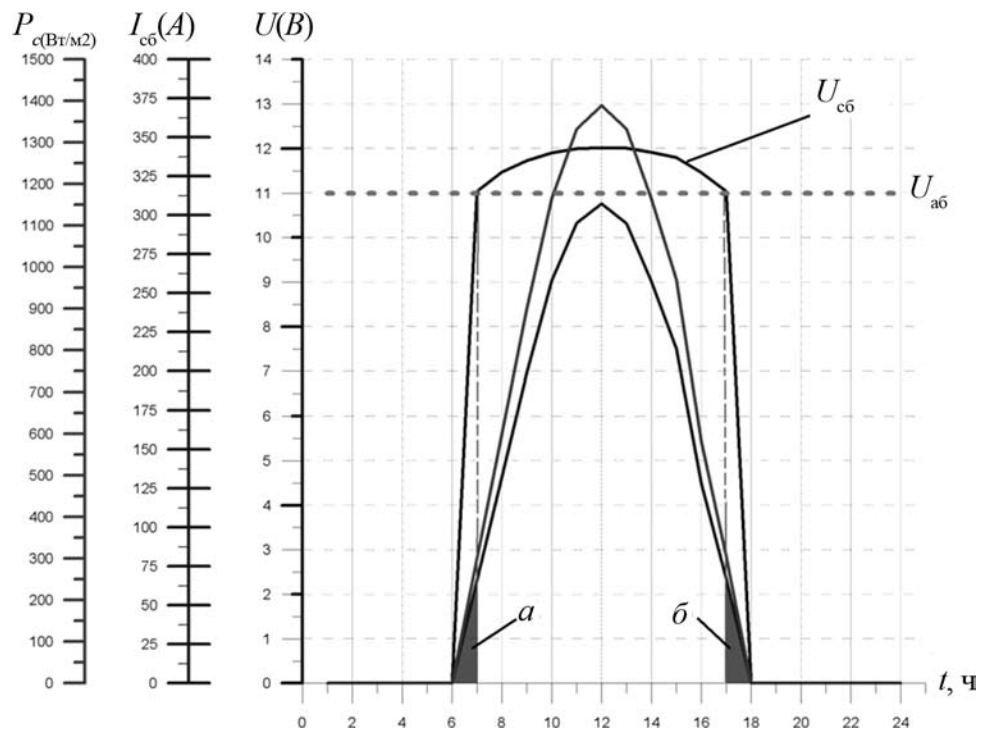


Рис. 7. Согласование характеристик СБ с напряжением АБ в зависимости от освещенности Солнцем

аккумуляторных батарей (АБ) их срок службы определяется как количеством полных зарядно-разрядных (ЗР) циклов, так и количеством частичных ЗР циклов. Поэтому, установленная емкость АБ обычно в 3 раза превышает расчетную емкость циклирования, чтобы обеспечить гарантированную глубину циклирования не более 30% на начальных сроках эксплуатации и не более 50 — 60% к концу срока активного существования (САС). Если существуют другие специальные ограничения (например, по току, температуре и т. д.), то они учитываются дополнительно [4]. После определения установленных мощности и емкости переходят к расчету АРК, аппаратуры выравнивания емкостных характеристик АБ и преобразователей энергии, исследованию помехозащищенности и защите от внешних воздействий.

Например, в [6] предложен новый вариант эквалайзера, а в [9] — новая схема однофазного инвертора. В [10] описан импульсный источник вторичного электропитания и исследовано влияние на него внешних деструктивных воздействий.

Заключение

Коллективом кафедры ЭКАО и ЭТ впервые сформулированы и решены задачи создания оптимальных структур СЭС из различных компонентов. Проведена минимизация массы СЭС, включающей массу ПИ с запасами топлива, системы охлаждения и электротехнических комплексов. Впервые аналитически показана необходимость увеличения КПД и массы ряда преобразователей энергии ради минимизации массы всей системы [4, 7]. Предложены различные сочетания СЭС разных ступеней ракеты носителей и полезной нагрузки, позволяющие более эффективно и с меньшими затратами создавать системы запуска и предстартового обслуживания ракеты. Проведена оптимизация многоэлементных космических станций длительного срока существования (10 — 20 лет) из различных модулей производства разных стран, с разными типами источников энергии и систем электропитания.

В последнее время резко сократилось количество открытых зарубежных публикаций по данной тематике, что говорит о важности решаемых задач. Анализ

доступных источников информации показывает актуальность работы над задачами проектирования автономных электротехнических комплексов с возобновляемыми источниками энергии.

Литература

1. **Куско А., Томпсон М.** Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии / пер. с англ. А.Н. Рабодзея. М.: Додэка-XXI, 2010.
2. **Тарасова В.С.** Система генерирования электроэнергии с увеличенным сроком службы для малого космического аппарата: Материалы дисс. ... канд. техн. наук, 2015.
3. **Грузков С.А. и др.** Электрооборудование летательных аппаратов. Т. 1. Системы электроснабжения. М.: Изд-во МЭИ, 2005.
4. **Жирнова Н.Б.** Методика проектирования аккумуляторных подсистем повышенной эффективности: Материалы дисс. ... канд. техн. наук, 1993.
5. **Нян Линн Аунг** Разработка солнечной фотоэлектрической системы автономного электроснабжения индивидуальных потребителей в тропических условиях: Материалы дисс. ... канд. техн. наук, 2015.
6. **А. с. 1365243 СССР.** Устройство для питания нагрузки постоянным током // Бюлл. изобрет. 1998. №1.
7. **Еременко В.Г.** Аналитическая оптимизация массы полупроводниковых преобразователей с учетом массы автономных первичных источников электроэнергии и системы охлаждения // Труды МЭИ. 1984. Вып. 39.
8. **Тарасов В.С., Лизунов А.А., Журавлев Р.И.** Модификация системы электроснабжения беспилотного летательного аппарата // Труды XXXV Академ. чтений по космонавтике. М.: комиссия РАН, 2011. С. 94 — 95.
9. **Еременко В.Г., Варламов Д.О., Нян Линн Аунг** Однофазный инвертор с интегрированным быстродействующим релейным широтно-импульсным стабилизатором напряжения // Практическая силовая электроника. 2015. № 60. С. 43 — 46.
10. **Еременко В.Г. и др.** Моделирование импульсного источника вторичного электропитания // Практическая силовая электроника. 2005. Вып. 17. С. 12 — 19.

Статья поступила в редакцию 05.04.2016