

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

М. А. ПЕТРОВИЧЕВ, А. С. ГУРТОВ

СИСТЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 629.78.05
ББК 39.62
ПЗ06



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и геоинформационных технологий"**

Рецензенты: доктор технических наук А. Н. К о п т е в,
зам. начальника отдела ГНП РКЦ «ЦСКБ - Прогресс» С. И.
М и н е н к о

ПЗ06 **Петровичев М.А.**
**Система энергоснабжения бортового комплекса космиче-
ских аппаратов:** учеб. пособие / М.А. Петровичев, А.С. Гуртов. –
Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 88 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-0608-7

Рассматривается роль и значение системы электроснабжения для космического аппарата, составные элементы этой системы, особое внимание уделяется рассмотрению принципов действия и устройства источников питания, особенностям их использования для космической техники. Пособие дает достаточно обширный справочный материал, который может использоваться при курсовом и дипломном проектировании студентами неэлектрических специальностей.

Учебное пособие предназначено студентам специальности 160802 «Космические аппараты и разгонные блоки». Оно также может быть полезно молодым специалистам ракетно-космической отрасли.

Подготовлено на кафедре летательных аппаратов.

УДК 629.78.05
ББК 39.62

ISBN 978-5-7883-0608-7

© Петровичев М. А., Гуртов АС, 2007
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

Система электроснабжения бортового комплекса космических аппаратов

Из всех видов энергии электрическая является наиболее универсальной. По сравнению с другими видами энергии она имеет ряд преимуществ:

- электрическая энергия легко преобразуется в другие виды энергии,
- КПД электрических установок значительно выше КПД установок, работающих на других видах энергии,
- электрическую энергию легко передавать по проводам к потребителю,
- электрическая энергия легко распределяется между потребителями.

Автоматизация процессов управления полетом любых космических аппаратов (КА) немыслима без электрической энергии. Электрическая энергия используется для приведения в действие всех элементов устройств и оборудования КА (двигательная группа, органов управления, систем связи, приборного комплекса, отопления и т. д.).

Система электроснабжения (СЭС) КА является одной из важнейших систем, обеспечивающих работоспособность КА.

Основные требования, предъявляемые к СЭС:

- необходимый запас энергии для совершения всего полета,
- надежная работа в условиях невесомости,
- необходимая надежность, обеспечиваемая резервированием (по мощности) основного источника и буфера,
- отсутствие выделений и потребления газов,
- способность работать в любом положении в пространстве,
- минимальная масса,
- минимальная стоимость.

Вся электроэнергия, необходимая для выполнения программы полета (для штатного режима, а также для некоторых нештатных), должна находиться на борту КА, поскольку восполнение ее возможно только для обитаемых станций. Надежность СЭС во многом определяется

резервированием всех видов источников, преобразователей, коммутационной аппаратуры и сети.

Невесомость оказывает существенное влияние на жидкости и газы, заставляя использовать источники, не содержащие жидкости в свободном состоянии. Это обеспечивает также работоспособность аппаратуры при изменении положения в пространстве.

Учитывая малый внутренний объем КА, даже небольшое количество газа, попадая в него, существенно меняют состав атмосферы. Газы, выделяемые из источников несут с собой пары щелочей или кислот, которые приводят к коррозии и отказам, в первую очередь, БЦВМ и радиоаппаратуры. Использование таких источников на борту КА нежелательно.

1. Структура системы электроснабжения КА

Основной системой электроснабжения КА является система постоянного тока. Это определено тем, что большинство источников, которые могут использоваться на борту, являются источниками постоянного тока. Сеть переменного тока является вспомогательной, используется для питания ограниченного числа потребителей, например, системы управления движением.

Первичный источник (рис.1.1) преобразует какую-либо энергию (химическую, световую, ядерную) в электрическую и должен обеспечить работу потребителей во все время полета.

Потребление электроэнергии во время полета неравномерно: бывают пики нагрузки (обычно во время работы полезной нагрузки, спуска с орбиты и т.д.) и моменты, когда нагрузка мала. Для парирования пиков нагрузки используют буферный источник.

Впервые на многоразовом КА «Шаттл» использована безбуферная система электроснабжения. Это объясняется тем, что на летательном аппарате используются три первичных источника на основе топливных элементов, что позволяет варьировать генерируемой ими мощностью.

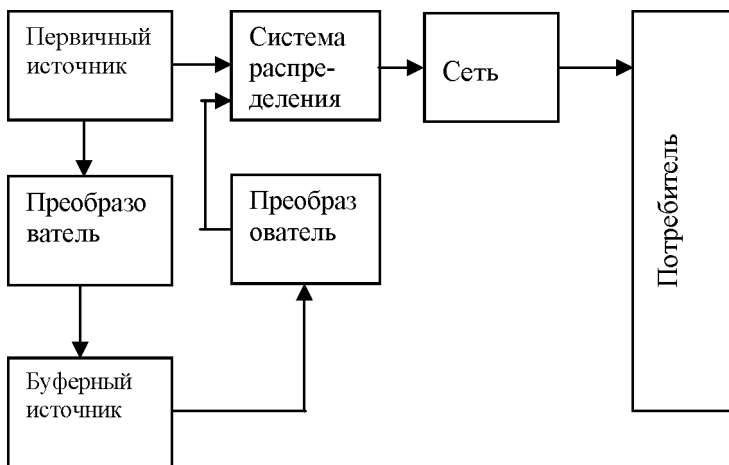


Рис.1.1. Структура системы электроснабжения космического аппарата

Буферный источник характеризуется тем, что суммарная производимая им энергия равна нулю. Он заряжается во время малой нагрузки на сеть и отдает энергию во время пиков. Обычно в качестве буфера используют аккумуляторы. Для согласования характеристик аккумулятора с первичным источником и сетью используют преобразователи (рис.1.1.). В первом случае это зарядное устройство, во втором – стабилизатор напряжения, обеспечивающий стабильность напряжения в сети.

Произведенная электроэнергия должна быть доставлена потребителю в нужном количестве, в заданное время, с необходимым качеством. Этими задачами занимаются система распределения и электрическая сеть. Система распределения подключает потребитель к соответствующему источнику, обеспечивает резервирование (если это необходимо) и выключает, если потребитель неисправен. Техническая реализация этих процессов осуществляется с помощью коммутационной и защитной аппаратуры.

Доставкой электроэнергии потребителю занимается электрическая сеть. Она должна быть минимальна по массе, но в то же время иметь

малые потери электроэнергии и обеспечивать надежное соединение потребителя и источник.

2. Классификация первичных источников



Рис.2.1. Способы получения электрической энергии на борту КА

На борту космического аппарата может использоваться в качестве первичной только три вида энергии: химическая, ядерная и солнечная. Причем химическая и ядерная забираются с Земли, а солнечная поступает непосредственно во время полета.

Возможны три способа преобразования химической энергии непосредственно в электрическую, так называемый прямой способ преобразования. В этом случае получаем источники с достаточно высоким КПД (около 70%): гальванические элементы, аккумуляторы и топливные элементы (рис.2.1).

Гальванические элементы запасают химическую энергию прямо в корпусе, и по мере ее расходования заканчивается цикл работы.

В аккумуляторах возможно двойное преобразование: при зарядке накапливается химическая энергия, при разряде химическая преобразуется в электрическую (стрелки на рис.2.1 показывают направление преобразования энергии). Впервые на борту использовался серебряно-цинковый щелочной аккумулятор (СЦА) в силу того, что он самый легкий, может работать в любом положении и не выделяет и не потребляет газы. СЦА дали толчок к развитию целого ряда аккумуляторов. В настоящее время аккумуляторы имеют наибольшее распространение в качестве основных и буферных источников.

В топливных элементах химическая энергия непрерывно пополняется извне. Наиболее разработанными являются топливные элементы, у которых в качестве «топлива» используется H_2 и O_2 . Химическая реакция окисления водорода разнесена на два электрода. В результате получаем электрическую энергию, тепло и воду. Этот источник достаточно сложен в эксплуатации, но имеет малую массу, достаточно большой срок работы (до 5000 часов) и хороший КПД. В сочетании с устройством, разлагающим воду на H_2 и O_2 , может обеспечить полный цикл буферного источника с большим сроком службы, легче самого хорошего аккумулятора и имеет достаточно высокий КПД.

Все первичные источники энергии (химическая, ядерная и световая) могут использоваться для получения тепла. Преобразование тепловой энергии в электрическую возможно тремя путями: термоэлектрический генератор, термоэлектронный (термоионный) генератор и магнитогидродинамический генератор (МГД).

Термоэлектрические генераторы первоначально имели КПД 0,7% и использовались как измерители температуры под названием «термопара». Использование полупроводников позволило повысить КПД до 7-10%. Термоэлектрические генераторы в сочетании с изотопными источниками тепла образуют чрезвычайно надежные и продолжительно работающие источники электрической энергии небольшой мощности. Используются на борту в качестве сверх- аварийных источников.

Термоэлектронный генератор устроен по принципу электронной лампы. Имеет КПД несколько больше, но наличие высокой температуры ставит его использование на борту нерациональным.

В 80-е годы прошлого столетия конструктора космической техники обратили свое внимание на машинные генераторы, широко применяемые

в земных условиях, несмотря на тройное преобразование энергии, наличие вибраций, сложность работы в условиях вакуума. Эти генераторы оказались самыми дешевыми, детально изученными, имеющими хорошие характеристики и КПД немного ниже 40% и дающими большую мощность в небольшом объеме («Шаттл»). При использовании электромашинных генераторов приходится решать проблемы их работы в условиях вакуума, привода и обеспечения стабильности частоты.

Солнечные батареи (СБ) используют прямое преобразование солнечной энергии с помощью полупроводниковых преобразователей в электрическую. СБ имеют КПД до 30%, но ухудшают маневренность КА, имеют небольшой срок службы и не работают на теневом участке орбиты. В последние годы СБ привлекают пристальное внимание ученых всего мира, поскольку удалось получить КПД более 40%. Использование арсенида галлия позволяет получать сверхтонкие СБ, малой массы, с большим сроком службы. Рационально использовать на околоземных орбитах для снабжения электроэнергией обитаемых космических станций.

Все перечисленные выше источники электрической энергии чрезвычайно дороги, так стоимость 1 кВт-час, получаемого от солнечных батарей, достигает 40\$.

3. ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА (ХИТ)

3.1. Общие сведения о химических источниках тока (ХИТ)

Химический источник тока (ХИТ) - это устройство, в котором энергия химической реакции непосредственно превращается в электрическую энергию и наоборот.

Большое разнообразие ХИТ, отличающихся размерами, конструктивными особенностями и природой протекающих в них токообразующей реакции, обусловлено широким использованием их в различных условиях и отраслях техники.

По принципу работы ХИТ делятся на следующие группы:

гальванические элементы (элементы однократного действия), в этих элементах заложен определенный запас реагентов, после израсходования которых они теряют свою работоспособность;

аккумуляторы (элементы многократного действия, перезаряжаемые или обратимые). Аккумуляторы после разряда допускают повторный заряд путем пропуска тока от внешней цепи в обратном

направлении, при этом из продуктов реакции восстанавливаются исходные вещества. Большинство аккумуляторов допускает проведение большого числа циклов заряд-разряд;

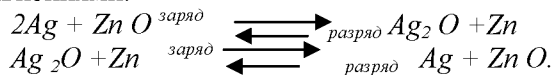
топливные элементы. В топливные элементы в процессе работы непрерывно подводятся новые порции реагентов и одновременно удаляются продукты реакции, поэтому они могут работать непрерывно в течение длительного времени.

Поскольку наиболее широкое применение получили аккумуляторы, то настоящая работа ставит своей задачей ознакомление с наиболее распространенными их типами.

3.2 Серебряно-цинковые аккумуляторы

Серебряно-цинковые (СЦ) аккумуляторы представляют собой вариант щелочного аккумулятора с отрицательным цинковым электродом и положительным - серебряным. Электролитом служит раствор химически чистого едкого кали концентрации около 560 г/л (плотность электролита около 1.4).

Токообразующая реакция может быть представлена следующими уравнениями:



При заряде аккумулятора на положительных электродах происходит окисление металлического серебра Ag сначала до полуокиси Ag_2O , а потом - до окиси Ag_2O , на отрицательных восстановление окиси цинка (ZnO) до металлического цинка (Zn).

Наличие двух стадий химической реакции обуславливает две ступени заряда и разряда СЦ аккумуляторов (см. рис. 3.3-3.4).

Помимо основных реакций при работе и хранении СЦ аккумуляторов возможно протекание ряда побочных реакций.

Одна из побочных реакций - саморастворение металлического цинка (коррозия), сопровождающееся выделением газообразного водорода. При температуре 20°C выделяется 0,3-0,4 мл водорода в сутки с одного ампер-часа емкости аккумулятора, при температуре 0°C - 0,13 мл, при температуре 40°C - 2 мл.

Условное обозначение серебряно-цинковых аккумуляторов состоит из букв СЦ, определяющих их принадлежность, буквы, характеризующей конструктивную разновидность и время разряда:

К - короткий (от 15-минутного до 1-часового);

С - средний (от 1-часового до 10-часового);

Д - длительный (от 10-часового и более);

К - средний, многоцикловой;

Б - буферный, многоцикловой,

и числа, условно показывающего емкость аккумулятора. Через дробную черту к условному обозначению аккумулятора указывается четырехзначный или пятизначный номер технологического варианта исполнения.

Соединенные последовательно аккумуляторы составляют батареи и образуют блок питания.

3.2.1 Основные технико-эксплуатационные характеристики:

Удельная энергия - ≤ 130 Вт-ч/кг.

Ресурс - до 100 зарядно-разрядных циклов.

Срок службы - до 0.5 – 1 год.

Диапазон рабочих температур - от 0 до 40 С.

В чем причина установки серебряно-цинковых аккумуляторов на борт космических аппаратов?

1. Аккумулятор самый легкий из всех существующих. Удельная энергия СЦ до 130 Вт-ч/кг, а у свинцового всего - 22. Это объясняется тем, что у СЦ аккумуляторов используются пористые электроды, в которых работает вся масса электрода, а в свинцовых – сплошные, и реакция в них происходит только в поверхностном слое.
2. Как видно из уравнения химической реакции в СЦ аккумуляторе реакция происходит без выделения и поглощения газов, что позволяет делать аккумуляторы герметизированными. Это особенно важно для космических аппаратов с их малым свободным объемом. Если бы происходило выделение или поглощение газов, то атмосфера КА наполнялась парами щелочи, что отрицательно сказалось на работе электронной аппаратуры, особенно БЦВМ.
3. В процессе работы аккумулятора не расходуется электролит, что позволяет использовать небольшие количества электролита, который находится в пластинах электродов и сепараторе.

Отсутствие «свободного» электролита позволяет использовать аккумулятор в любом пространственном положении.

К недостаткам аккумулятора можно отнести:

1. Малый срок службы.
2. Двухступенчатость зарядно-разрядных характеристик, что усложняет и удорожает зарядное устройство, и неудобно для потребителей электроэнергии.
3. Высокая стоимость аккумулятора (серебра).

3.2.2. Устройство серебряно-цинковых аккумуляторов

Положительный электрод серебряно-цинкового аккумулятора изготавливается из серебра. Характерной особенностью серебра является легкость его восстановления до металла из соединений. Благодаря этому и хорошей электропроводности на основе его соединений можно конструировать разные химические источники тока.

Положительные электроды аккумуляторов изготавливаются из порошка серебра, который прессуется на каркас из серебряной проволоки, отрицательный электрод изготавливается из цинка. В серебряно-цинковых аккумуляторах используется нерастворимый отрицательный электрод. В этом электроде, благодаря применению высокопористого цинкового электрода и малого количества электролита, который в основном находится в порах электрода и сепараторного материала, обеспечиваются значительно лучшие условия для работы цинкового электрода. В отечественных аккумуляторах отрицательные электроды изготавливаются так называемым намазным способом - паста из порошка цинка намазывается на каркас из освинцованной медной проволоки, затем осуществляется подпрессовка и прокатка.

Использование пористых электродов позволяет значительно снизить массу аккумулятора (увеличить удельную энергию), поскольку в процессе образования тока участвует весь объем электродов. Для того, чтобы ионы успевали проникать внутрь электродов, их приходится делать тонкими, поэтому в одном корпусе (банке) располагается большое количество положительных Ag и отрицательных Zn электродов, разделенных изолирующим материалом - сепаратором.

В ходе разработки серебряно-цинковых аккумуляторов одной из основных проблем явилась проблема сепарации, при малом электрическом сопротивлении и хорошей химической стойкости в щелочи, сепарация

должна препятствовать продвижению через нее частиц серебра и дендритов цинка.

В настоящее время в серебряно-цинковых аккумуляторах получила применение сепарация из целлюлозы, в которую «одевается» отрицательный электрод (рис. 3.2). Эта сепарация не имеет сквозных пор, через которые электролит мог бы свободно диффундировать от одного электрода к другому.

Целлофановая сепарация после помещения ее в раствор щелочи впитывает в себя электролит, набухает и увеличивает свою толщину в 2-5 раза. Перенос ионов через такую сепарацию происходит принудительно (под влиянием электрического поля, возникающего в работающем аккумуляторе).

Целлофановая пленка довольно легко подвергается окислению окислами серебра и кислородом, выделяющимся на серебряном электроде при *перезаряде* (заряд свыше номинальной емкости) аккумулятора. Для уменьшения окисления сепаратора на положительный электрод одевается дополнительная сепарация из капроновой ткани – «капроновый чулок».

Сборка аккумуляторных блоков в сосуде производится с таким расчетом, что набухающая сепарация создает достаточное давление, препятствующее сползанию активной массы отрицательного электрода и уменьшению роста дендритов цинка.

Следует отметить, что целлофановая пленка не отвечает в полной мере требованиям, предъявляемым к сепарации серебряно-цинковых аккумуляторов. При определенных условиях дендриты цинка могут прорасти через целлофан за счет восстановления цинка в толще сепарации, замыкая пластины аккумулятора - основная причина малого срока аккумулятора.

Постепенное химическое разрушение сепаратной пленки за счет окисления является другой причиной, ограничивающей в настоящее время срок службы серебряно-цинковых аккумуляторов.

Практически электролит в аккумуляторе не расходуется, поэтому общее количество его обычно невелико - в порах активных масс и сепарации. При неплотно закрытых пробках он начинает поглощать углекислый газ из воздуха, что ведет к увеличению внутреннего сопротивления аккумулятора.

С ростом числа разрядно-зарядных циклов уровень электролита начинает понижаться за счет разложения воды в конце заряда.

Сосуды для аккумуляторов (банки) (рис.3.1,поз.1), в которых размещаются пакеты электродов, и крышки (рис.3.1,поз.2)

изготавливаются из полистирола или полиамида методом штамповки или литья под давлением. В крышке аккумулятора имеется отверстие для заливки электролита и вентиляции. Заливочное отверстие закрывается газоотводной пробкой (см. рис.3.1 поз. 4).

В пробке предусматри-

вается отверстие с клапаном для выпуска скопившихся газов. Пробки водонепроницаемы и открываются только при определенном избыточном давлении внутри аккумуляторного суда.

Сборка аккумуляторного блока (рис.3.2) производится следующим образом: две отрицательные пластины 1 заворачиваются в целлофановую пленку 2, а затем сгибаются по линии 3.

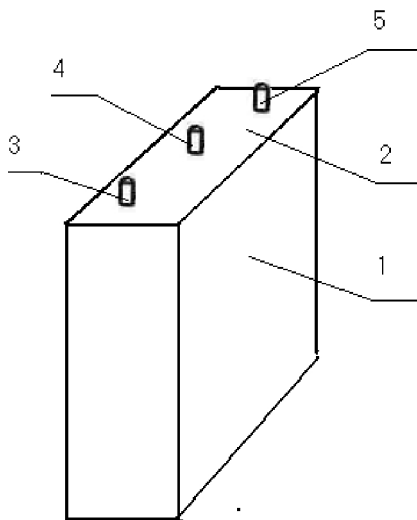


Рис.3.1. Внешний вид аккумулятора

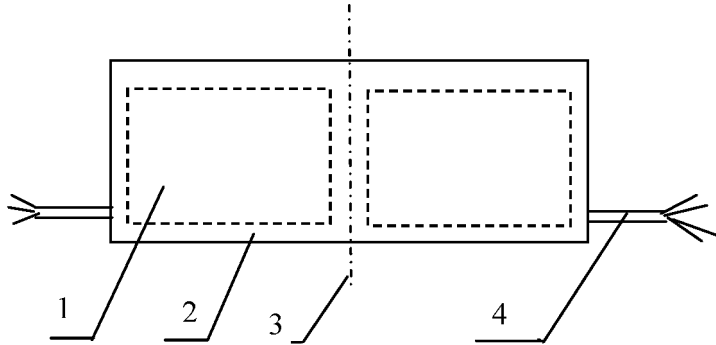


Рис.3.2. Сборка электродов в аккумуляторный блок:

- 1-отрицательный электроды,
- 2-целлофан,
- 3- линия сгиба,
- 4- выводы отрицательных электродов.

Между ними помещается положительный электрод, на который надет капроновый мешок.

3.2.3. Основные рабочие характеристики серебряно-цинкового аккумулятора:

а) Приведение в действие. Для этого необходимо выполнить три операции: заливку и пропитку его электролитом, формирование электродов, рабочий заряд. Процесс формирования электродов серебряно-цинковых аккумуляторов сложен и занимает длительное время ~ от 70 до 100 часов, поэтому в последние годы разработаны и выпускаются сухозаряженные аккумуляторы, способные работать непосредственно после заливки электролитом и пропитки им сепарации и электродов;

Заряжаются обычно аккумуляторы номинальным током. Для большинства серебряно-цинковых аккумуляторов им является ток 10-20 часового заряда.

б) Зарядно-разрядные характеристики.

На рис. 3.3. представлены зарядные характеристика аккумулятора.

Первая ступень (напряжение 1,62-1,65В) соответствует образованию полуоксида серебра и составляет около 25-50% от общей длительности заряда. Вторая ступень (напряжение 1,92-1,95В) соответствует образованию окиси серебра, и заряд на этой ступени занимает около 70% времени.

Когда зарядное напряжение достигает 2В, начинается разложение воды и выделение кислорода на положительном электроде. Продолжение заряда аккумулятора не только бесполезно, но и вредно, поскольку при этом происходит только разложение воды, выделяющийся на серебряных электродах кислород окисляет целлофан, уменьшая его механическую прочность.

Пологие участки зарядной характеристики имеют очень малый наклон. Это объясняется тем, что потери в СЦ аккумуляторе малы. Зарядная характеристика СЦ аккумулятора чрезвычайно неудобна в работе:

а) зарядное устройство должно обеспечивать скачок напряжения. Это должен быть источник тока (внутреннее сопротивление источника должно быть большим, чтобы ток не зависел от сопротивления нагрузки);

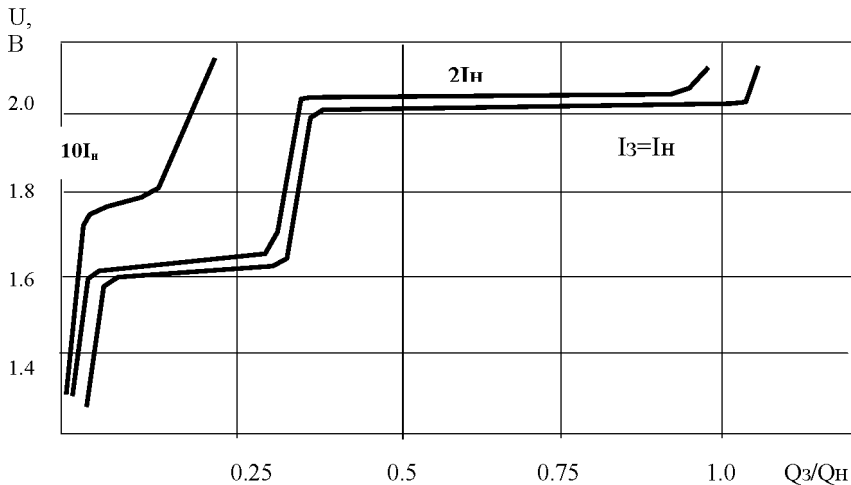


Рис.3.3. Зарядные характеристики при различных токах заряда

б) в силу пологости характеристик нельзя определить заряжен аккумулятор или нет;

в) категорически запрещено включать на зарядку аккумуляторы параллельно, поскольку у одного аккумулятора можно «высушить» электролит, разлагая воду.

Заряд аккумулятора токами больше чем номинальный приводит к тому, что он принимает меньший заряд (рис. 3.3), поскольку при

увеличении тока заряда химические процессы происходят только на поверхности электродов, что приводит к уменьшению емкости аккумулятора.

в) **Разряд** (разрядные кривые представлены на рис. 3.4.) **аккумулятора.**

По оси аргументов использована относительная координата: отношение отдаваемой емкости Q_p (а-час) к емкости разряда при номинальном разрядном токе Q_n . С ростом разрядного тока величина напряжения на клеммах аккумулятора падает, уменьшается также отдаваемая емкость (рис.3.4).

При разряде аккумулятора небольшими токами ($I_{раз} < I_n$) также четко выражены две ступени (рис. 3.4, $I_p = I_n$).

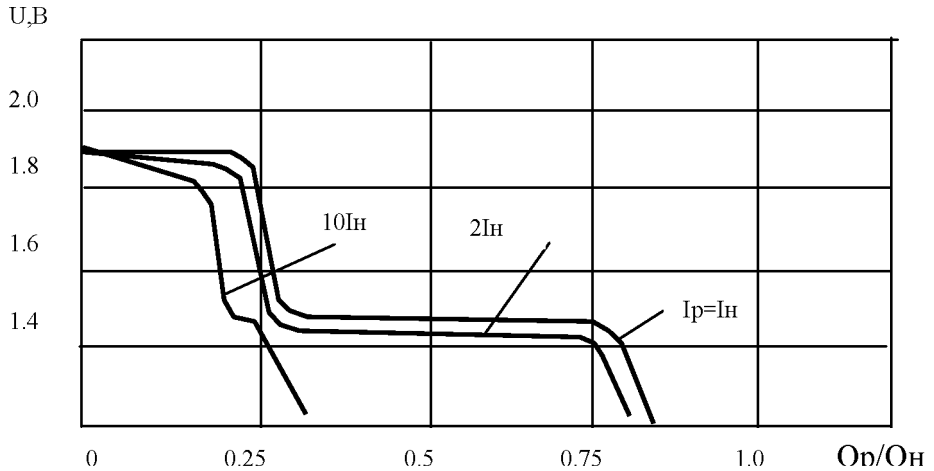
Повышенное напряжение вначале разряда обуславливается протеканием процесса восстановления образовавшейся при заряде окиси серебра до полуокиси. Время разряда с более низким и стабильным напряжением (1,55-1,58) составляет 70-75%.

Время стабильного напряжения обусловлено процессом восстановления полуокиси серебра до металлического серебра.

Разрядная характеристика также не соответствует требованиям потребителей. Наличие двух пологих участков заставляет пользователей расширять диапазон рабочих напряжений потребителей. Бортовое напряжение в этом случае выбирают 27^{+5}_{-4} В, т.е. напряжение бортовой сети может колебаться от 32В до 23. Мощность, потребляемая бортовой аппаратурой

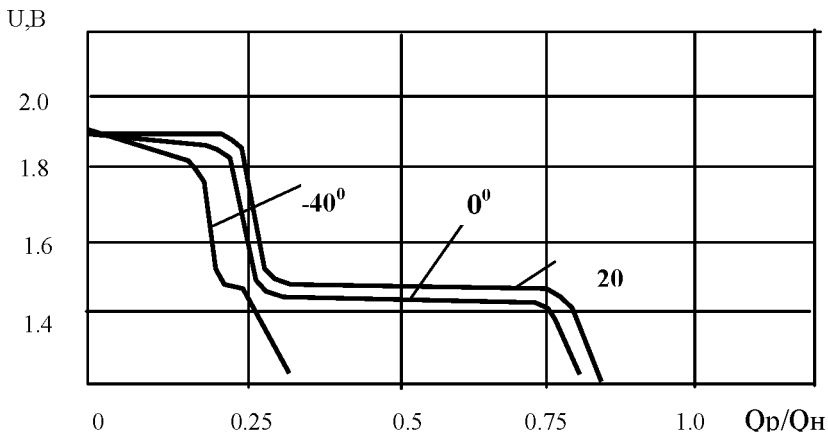
$$P = U_c^2 / R_{потр}$$

колеблется почти в два раза.



Р и с. 3.4. Разрядные характеристики при различных токах разряда

г) Работа на холоде. На рис. 3.5. приведены разрядные кривые серебряно-цинковых аккумуляторов при различных температурах, все кривые получены при 10-часовом режиме разряда. Понижение температуры от $+20$ до $0^\circ С$ мало влияет на форму разрядной кривой и величину отдаваемой емкости, при температуре $-10^\circ С$ аккумулятор отдает примерно 50%. Дальнейшее понижение



Р и с. 3.5. Разрядные характеристики при различных температурах

температуры ведет к более резкому падению емкости.

Серебряно-цинковые аккумуляторы были первыми, установленными на борт КА. Они и до сих пор остаются самыми легкими и послужили толчком к развитию щелочных аккумуляторов.

Недостатки аккумулятора определяются:

- Серебро делает характеристики двухступенчатыми, аккумулятор дорогим;
- Цинк, восстанавливаясь из окисла, образует иглы (дендриты), которые прокалывают сепаратор, уменьшая срок службы;
- Целлофан имеет малую механическую прочность, что определяет малый срок службы аккумулятора.

Дальнейшая работа по созданию аккумуляторов велась в направлении поисков замены серебра и цинку и созданию принципиально нового сепаратора. В результате появился целый ряд щелочных аккумуляторов, имеющих большой срок службы, хорошие характеристики, но все таки тяжелее серебряно-цинковых.

Ниже представлены характеристики некоторых представителей, принцип работы которых во многом определен СЦ аккумуляторами.

3.2.4 Характеристики некоторых промышленных серебряно-цинковых аккумуляторов



Рис.3.6.Серебряно-цинковые аккумуляторы, внешний вид

ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА:

высокая удельная энергия;
высокая удельная мощность при разряде;
малая величина саморазряда;
высокая механическая прочность.

ОБЛАСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ:

силовые энергоустановки;
портативные радиостанции,
компьютеры, теле-, кино-, фото-,

видеоаппаратура;

приборы и оборудование для авиационной, космической, морской, медицинской, поисково-спасательной и другой техники.

УСТРОЙСТВО. Аккумуляторы изготавливаются в полиамидных сосудах прямоугольной формы. Аккумуляторы имеют клапан, препятствующий выливаю электролита, но стравливающий давление при газовыделении внутри аккумулятора.

Активная масса положительного электрода представляет собой серебряный порошок. Отрицательный электрод состоит из оксида цинка, цинкового порошка и добавок. Электроды изготавливаются методом прессования или прокатки. Основой электрода является проволока или сетка. Сепаратор - капроновая ткань и гидратцеллюлозная пленка. Электролит - водный раствор гидро-ксида калия с добавками.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРЕБРЯНО-ЦИНКОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

	СЦ-25С	СЦ-350С	СЦ-40К
Номинальная емкость (А·ч)	25	350	40
Номинальное напряжение (В)	1,5	1,5	1,5
Конечное разрядное напряжение (В)	1,3	1,2	1,16 - 1,2
Ток разряда (А)			
номинальный	5,0	70	
максимальный	45,0	800	420
Температура разряда (°С)	-40...+50	-2...+35	-2...+40
Ток заряда (А)	1,5	20	ступенчатый
Время заряда (ориентировочно) (ч)	20	24	11
Конечное зарядное напряжение (В)	2,05	2,05	2,02-2,05
Габаритные размеры (мм)	40,5x36x113	139x57x256	60x43,8x176,5
Масса с электролитом (кг)	0,3	4,2	0,9
Технический ресурс (циклы)	60	30	8

Срок службы (мес)	12	12	5
-------------------	----	----	---

	СЦ-80К	СЦ-110К
Номинальная емкость (А·ч)	80	110
Номинальное напряжение (В)	1,5	1,5
Конечное разрядное напряжение (В)	Не менее 1,07	Не менее 1,07
Ток разряда (А)		
номинальный		870
максимальный	560	1100
Температура разряда (°С)	-5...+50	+5...+50
Ток заряда (А)	ступенчатый	ступенчатый
Время заряда (ориентировочно) (ч)	17	24
Конечное зарядное напряжение (В)	2,05	2,05
Габаритные размеры (мм)	60x43,8x247	80x50x237
Масса с электролитом (кг)	1,3	2,1
Технический ресурс (циклы)	8 - 12	6 - 8
Срок службы (мес.)	8	7,5

Напряжение, В

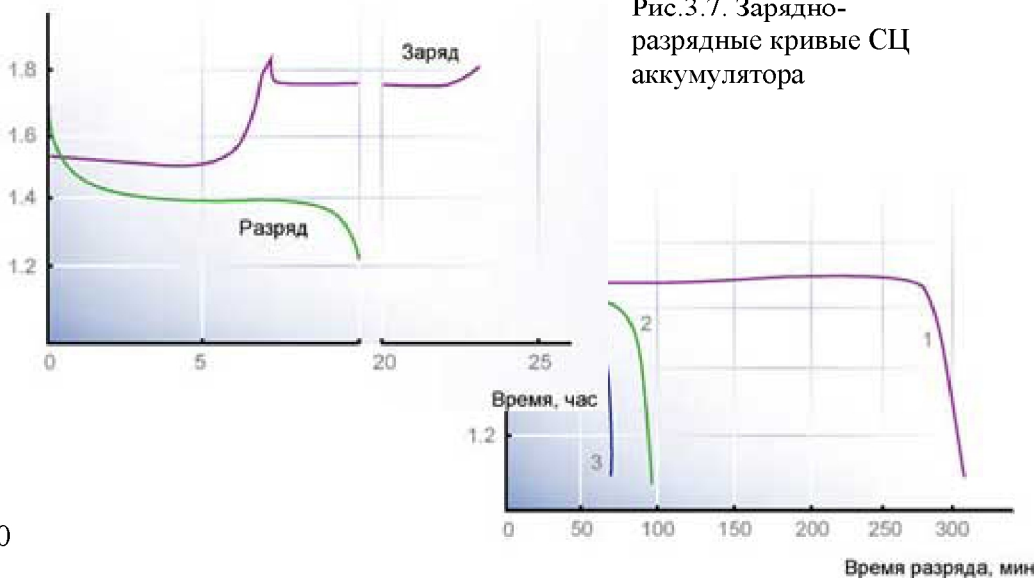


Рис.3.7. Зарядно-разрядные кривые СЦ аккумулятора

Рис. 3.8. Разрядные кривые СЦ аккумуляторов при разных режимах разряда

1 - $0,3C_n$, 2 - $1,2C_n$, 3 - $1C_n$

(C_n - номинальная емкость при 5-часовом режиме разряда)

3.3. НИКЕЛЬ-ЦИНКОВЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ



Рис. 3.9. Никель-цинковые аккумуляторы

ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА:

большая мощность;

высокие объемные и весовые удельные характеристики;

максимальное для щелочных аккумуляторов разрядное напряжение, стабильное в широком диапазоне токовых нагрузок;

возможность продолжительного хранения с электролитом при любой степени заряженности;

допускают длительные перерывы в процессе разряда;

допускают переплюсовку;

пожаробезопасны при коротком замыкании;

устойчивы к механическим нагрузкам.

ОБЛАСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ:

радио- и телеаппаратура;

аэрокосмическая техника;

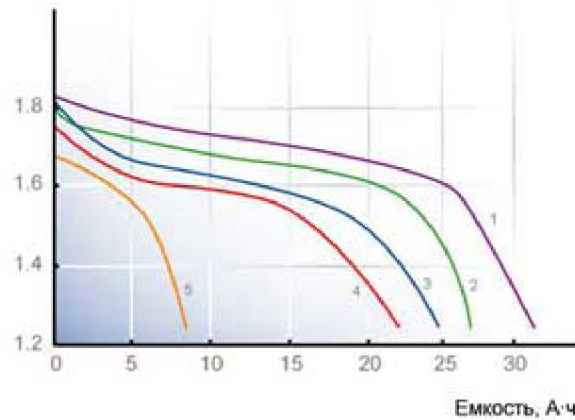
электромобили;

подводные аппараты для буксировки водолазов, поиска и разработки полезных ископаемых в прибрежных шельфах и др.

УСТРОЙСТВО: Аккумуляторный блок состоит из оксидно-никелевых и цинковых электродов. Корпус аккумулятора выполнен из полимерного материала и имеет клапан, тарированный на определенное давление открытия. Электролит - раствор гидроксида калия.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИКЕЛЬ-ЦИНКОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

	НЦ-25	НЦ-50	НЦ-180	НЦ-200
Номинальная емкость (А·ч)	25	50	180	200
Напряжение разомкнутой цепи (В)	1,8	1,85	1,85	1,8
Номинальное напряжение (В)	1,6	1,6	1,6	1,6
Токи разряда (А)				
номинальный	6	40	60	50
допустимый	4-12	2-40	15-300	15-150
максимальный импульсный	200	500	1000	1000
Температура разряда (°С)	-40...+50	-3...+32	-20...+40	-4...+25
Габаритные размеры (мм)	80x40x139,5	109x52x168	123x81x246	123x69x253
Масса (кг)				
без электролита	0,640	1,45	3,65	3,65
с электролитом	0,780	1,75	4,6	4,3



Емкость, А·ч

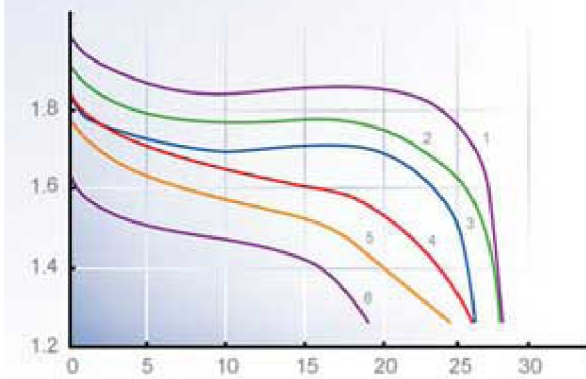
Технический ресурс (циклы)	400	100	300	100
Срок хранения (годы)				
без электролита	5	5	5	3
с электролитом	2	2	2	2

ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рис. 3.10. Разрядные кривые аккумулятора НЦ-25 при различных токах разряда, (А)

- 1 - 0,08 Сн
- 2 - 0,24 Сн
- 3 - 0,6 Сн
- 4 - 1 Сн
- 5 - 1,4 Сн
- 6 - 2 Сн

Напряжение, В



Емкость, А·ч

(Сн - емкость при 5 часовом режиме разряда)

Рис. 3.11. Разрядные кривые аккумулятора НЦ-25 при различных температурах

- 1 - (+) 25°C
- 2 - (+) 5°C
- 3 - (-) 10°C

4 - (-) 20°C
5 - (-) 40°C

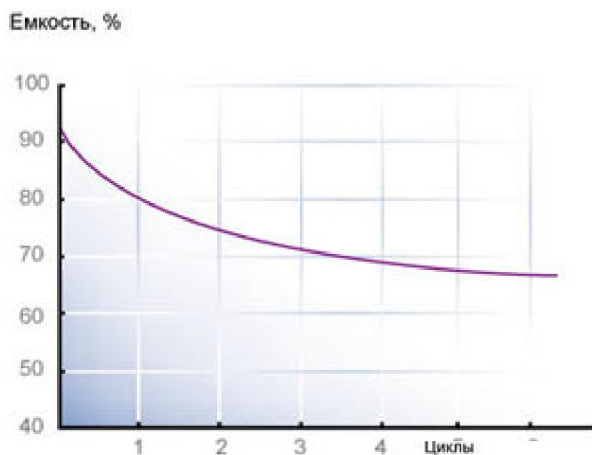
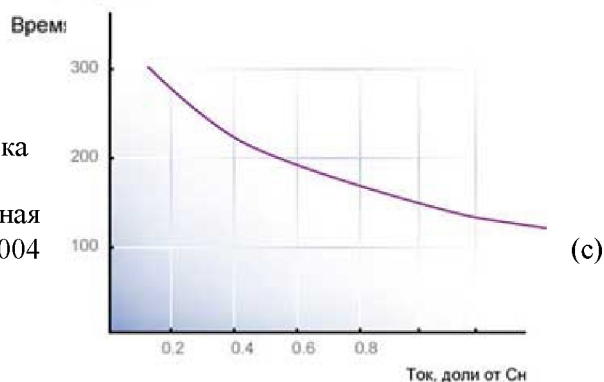


Рис.3.12. Изменение емкости аккумулятора НЦ-25 в зависимости от срока хранения в заряженном состоянии

Рис. 3.13. Зависимость технического ресурса аккумулятора НЦ-25 от тока разряда.
(2004 (с) Аккумуляторная компания "РИГЕЛЬ" 2004



3.4. ЛИТИЙ-ИОННЫЕ ГЕРМЕТИЧНЫЕ ПРИЗМАТИЧЕСКИЕ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ АККУМУЛЯТОРЫ И БАТАРЕИ НА ИХ ОСНОВЕ



Рис.3.14. Общий вид литий-ионных аккумуляторов и батарей

ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА:

высокое разрядное напряжение;
высокая удельная энергия по массе и объему;
герметичность;
отсутствие необходимости обслуживания;
длительный срок службы (до 10 лет);
высокая цикличность (до 1000 циклов);
работоспособность в широком диапазоне температур (от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$);
высокая механическая прочность;
высокая надежность в эксплуатации;
работоспособность в любом положении.

ОБЛАСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Автономное электропитание приборов и электрооборудования, в том числе средств связи, осветительной аппаратуры, гарантированного электропитания (охранная и пожарная сигнализация).

Литий-ионные аккумуляторы призматической (ЛИКГП-0,9; ЛИКГП-1,3; ЛИКГП-10) и цилиндрической (ЛИКГЦ-1,5С) формы изготавливаются в стальных корпусах. Корпус аккумулятора изолирован с помощью термоусадочной пленки.

Аккумуляторы снабжены предохранительным клапаном.

Литий-ионные батареи 8ЛИКГП-10 изготавливаются в алюминиевых корпусах.

Литий-ионные батареи 2x4ЛИКГП-0,9; 6x4 ЛИКГЦ-1,5С и 10x4 ЛИКГЦ-

1,5С изготавливаются в корпусах из полиамида. Батареи снабжены системой контроля управления зарядом и разрядом.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

	ЛИКГП-0,9 ICR 063450	ЛИКГП-1,3 ICR 103450	ЛИКГП-10 ICR 325582	ЛИКГЦ- 1,5С ICR 18650
Номинальная емкость (А·ч)	0,9	1,3	10,0	1,5
Номинальное напряжение (В)	3,6			
Токи разряда (А)				
номинальный	0,2Сн			
максимальный	2Сн			
Температура разряда (°С)	- 40... + 50			
Габаритные размеры (мм)	34,5x6,5x50	34,5x10,5x50	56,5x32,5x82	d18,2x65,5
Масса аккумулятора (г)	0,03	0,04	0,35	0,05
Технический ресурс (циклы)	до 1000			
Срок службы (годы)	10			

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЙ

Характеристики	2x4ЛИКГП- 0,9	8ЛИКГП-10	6x4ЛИКГЦ-1,5С	10x4ЛИКГЦ- 1,5С
Номинальная	1,8	10	9,0	15,0

емкость (А·ч)				
Номинальное напряжение (В)	13,5	28,8	13,5	13,5
Токи разряда (А)				
номинальный	0,2Сн			
максимальный	0,5Сн		1,0Сн	
Температура разряда (°С)	- 40... + 50			
Габаритные размеры (мм)	67,5x40x57	252,5x82,5x120,5	176,5x72,5x69	176,5x72,5x99
Масса аккумулятора (г)	0,28	4,0	1,4	2,3
Технический ресурс (циклы)	до 1000			
Срок службы (годы)	10			

ХАРАКТЕРИСТИКИ

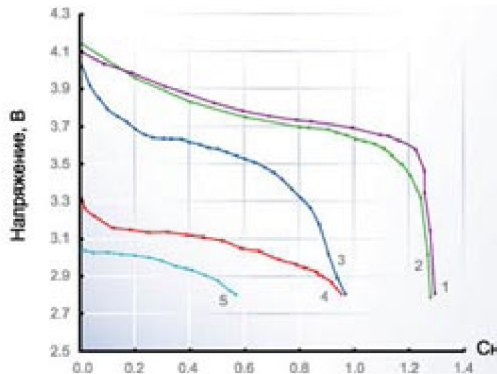


Рис. 3.15. Разрядные кривые литий-ионных

1 - (+)50°C

2 - (+)20°C

3 - (-)20°C

4 - (-)30°C

5 - (-)40°C

Ток разряда - 0,2Сн (кривые 1-4), 0,1Сн (кривая 5)

аккумуляторов при различных температурах. (Сн - номинальная емкость при 5-часовом режиме разряда)

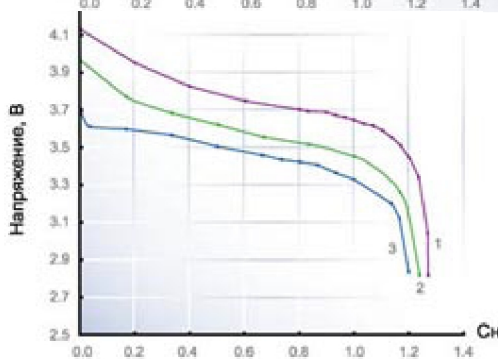


Рис. 3.16. Разрядные кривые литий-ионных аккумуляторов при токе разряда

0,2Сн (кривая 1)

1Сн (кривая 2)

2Сн (кривая 3)

Температура разряда 15 - 25°C (Сн - номинальная емкость при 5-часовом режиме разряда)

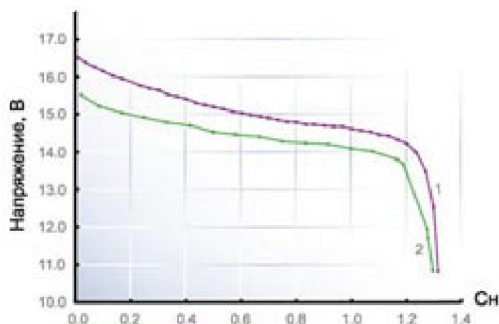


Рис. 3.18 Разрядные кривые литий-ионных батарей при различных температурах разряда

1 - (+)50°C 2 - (+)20°C 3 - (-)30°C

Ток разряда - 0,2 Сн

Рис. 3.17. Разрядные кривые литий-ионных батарей

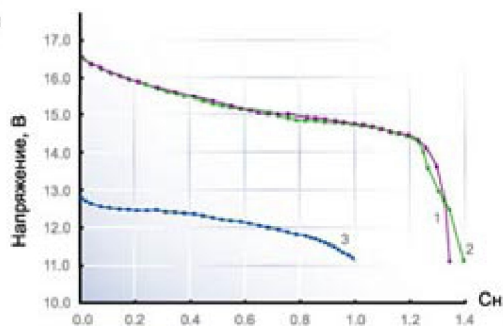
0,2Сн (кривая 1)

1Сн (кривая 2)

Температура разряда 15 - 25°C

1 - (+)50°C 2 - (+)20°C 3 - (-)30°C

Ток разряда - 0,2 Сн



(Сн - номинальная емкость при 5-часовом режиме разряда)

3.5. Топливные элементы

Топливный элемент - устройство, обеспечивающее прямое преобразование химической энергии в электрическую. Хотя то же самое происходит в электрических аккумуляторах, топливные элементы имеют два важных отличия:

1) они функционируют до тех пор, пока топливо (горючее и окислитель) поступают из внешнего источника;

2) химический состав электролита в процессе работы не изменяется, т.е. топливный элемент не нуждается в перезарядке.

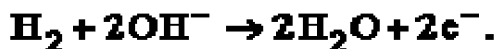
Принцип действия ТЭ был запатентован в 1836 году. Однако его реализация осуществилась только в 60-е годы 20 столетия. Объясняется это тем, что для работы ТЭ необходимо наличие и согласованная работа нескольких обслуживающих систем.

В настоящее время энергосистема на базе ТЭ используется на Шаттлах, имеет ресурс приближающийся к 5000 часов и легче многих аккумуляторов.

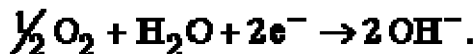
3.5.1. Принцип действия

Топливный элемент (рис. 3.19) состоит из двух электродов, разделенных электролитом, и систем подвода горючего на один электрод и окислителя на другой, а также системы для удаления продуктов реакции. В большинстве случаев для ускорения химической реакции используются катализаторы. Внешней электрической цепью топливный элемент соединен с нагрузкой, которая потребляет электроэнергию.

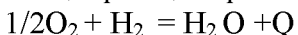
В топливных элементах со щелочным электролитом (обычно это концентрированные гидроксиды натрия или калия) протекают химические реакции: ионы гидроксильной группы OH^- диффундируют к водородному электроду, водород проходит через анод и реагирует в присутствии катализатора с имеющимися в электролите ионами гидроксила (OH^-), образуются две молекулы воды, два электрона и тепло:



Подаваемый на катод кислород переходит в электролит и также реагирует на поверхности электрода с участием катализатора. На катоде кислород вступает в реакцию с водой, содержащейся в электролите, и электронами из внешней цепи, образуются ионы гидроксила. Результирующую реакцию на катоде можно записать в виде:



Общая реакция протекает



без потребления электролита и выделения/потребления газов, что позволяет делать ТЭ с малым количеством электролита и герметизированными.

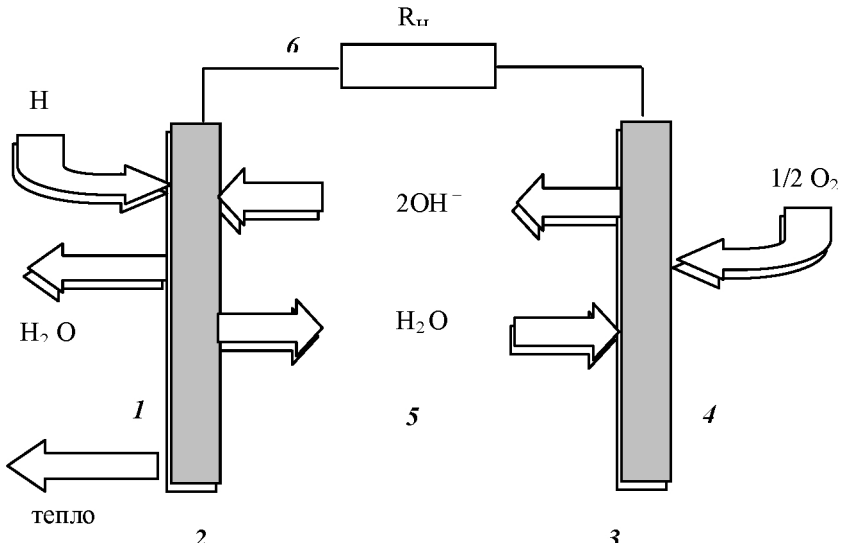


Рис. 3.19. Принцип действия топливного элемента

- 1 – газоводородная камера;
- 2,3 – электроды;
- 4 – газокислородная камера;
- 5 – электролит;
- 6 – нагрузка.

Поток электронов и ионов поддерживает баланс заряда и вещества в электролите.

Образующаяся в результате реакции вода, которая частично разбавляет электролит, необходимо убрать. В любом топливном элементе часть энергии химической реакции превращается в тепло. Поток электронов во внешней цепи представляет собой постоянный ток, который используется для совершения работы.

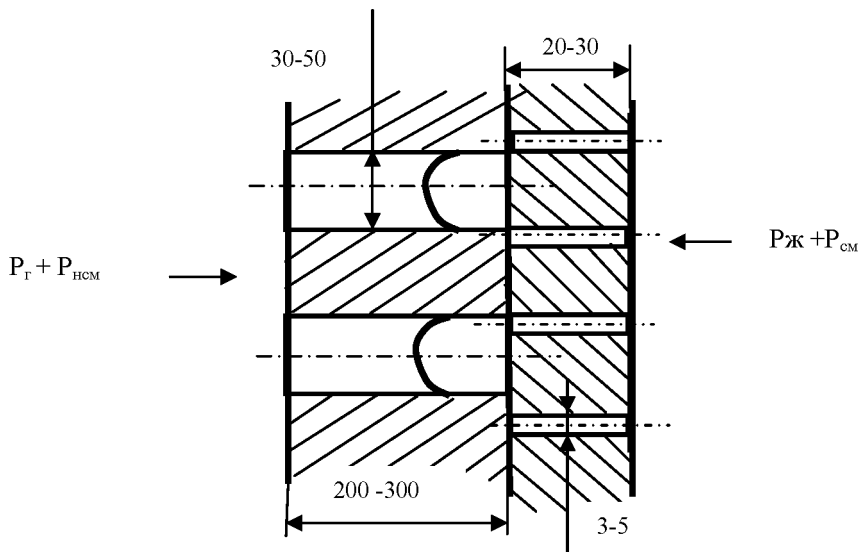


Рис. 3.20. Электрод топливного элемента
(размеры указаны в микрометрах)

Большинство реакций в топливных элементах обеспечивают ЭДС около 1 В. Размыкание цепи или прекращение движения ионов останавливает работу топливного элемента. Процесс, происходящий в водородно-кислородном топливном элементе, по своей природе является обратным хорошо известному процессу электролиза, в котором происходит диссоциация воды при прохождении через электролит электрического тока.

Реакция может протекать только внутри электрода, поскольку при рабочих температурах топливных элементов реакции могут протекать только в присутствии катализатора. Катализатором, работающим при всех температурах, является платина Pt, при $t > 200^\circ\text{C}$ – никель Ni.

Чтобы обеспечить нормальную работу топливных элементов, требуются специальные электроды (рис.3.20).

Такой толщины пластины хватает на обеспечение разности давлений между жидкостью и газом $\pm 0,5$ атм. Электрод должен быть двухслойным. Первый тонкий слой с малыми отверстиями покрыт смачивающим веществом, которое создает капиллярную силу, выталкивающую жидкость в сторону газа. Вторая, более толстая часть электрода имеет отверстия 30-50 мкм, которые покрыты

несмачивающим веществом, что стремится вытолкнуть жидкость в сторону электролита.

Например, давление в жидкости повысилось. За счет этого жидкость продвигается в сторону газа, несмачивающая сила увеличивается, компенсируя избыток давления.

В настоящее время электроды делаются из проволоки по методу технологии «метало-резина».

Теоретически размеры топливного элемента могут быть сколь угодно большими. Однако на практике несколько элементов объединяются в небольшие модули или батареи, которые соединяются либо последовательно, либо параллельно.

3.5.2. Классификация топливных элементов

Существуют различные типы топливных элементов. Их можно классифицировать, например, по используемому топливу, рабочему давлению и температуре, по способу удаления воды.

а) по виду топлива:

- на основе H_2 и O_2 . Продукт реакции – тепло, электрическая энергия и вода. Для КА это самый удобный тип топлива, поскольку вода и кислород могут использоваться в системе жизнеобеспечения (СОЖ).

- в принципе ТЭ могут работать на любом топливе.

б) по рабочей температуре:

- низкотемпературные – до $100^\circ C$ («Шаттл», «Джемини»). Выделение низкотемпературной группы ТЭ объясняется способами сбора воды, поскольку для этих ТЭ она находится в жидком состоянии;

- среднетемпературные – до $260^\circ\text{--}300^\circ C$ («Аполлон»). Для этих ТЭ характерна максимальная скорость реакции.

- высокотемпературные – $1000^\circ C$. Применение на КА таких ТЭ проблематично из-за высокой температуры и сложностью отвода тепла. Ведутся интенсивные работы по созданию ТЭ для земных нужд, работающему на природном газе и кислороде воздуха при температуре $500\text{--}700^\circ C$ с КПД около 70%.

в) по способу сбора воды:

- фитильный (как в керосиновой лампе). Использовался на «Джемини», очень медленная приспособляемость;

- испарительный, характерен для среднетемпературных ТЭ, где вода находится в газообразном состоянии;
 - динамический: используется камера с низким парциальным давлением воды, соединяемая с водородной газовой камерой с помощью мембраны с односторонней проводимостью воды.
- г) по виду электролита:
- жидкий, используется расплав КОН при температуре около 250°C ;
 - твердый (ионно-обменная мембрана), носитель заряда - ион водорода;
 - матричный, используется материал с микропорами – асбест, в который заливают жидкий электролит.

3.5.3. ВАХ топливного элемента

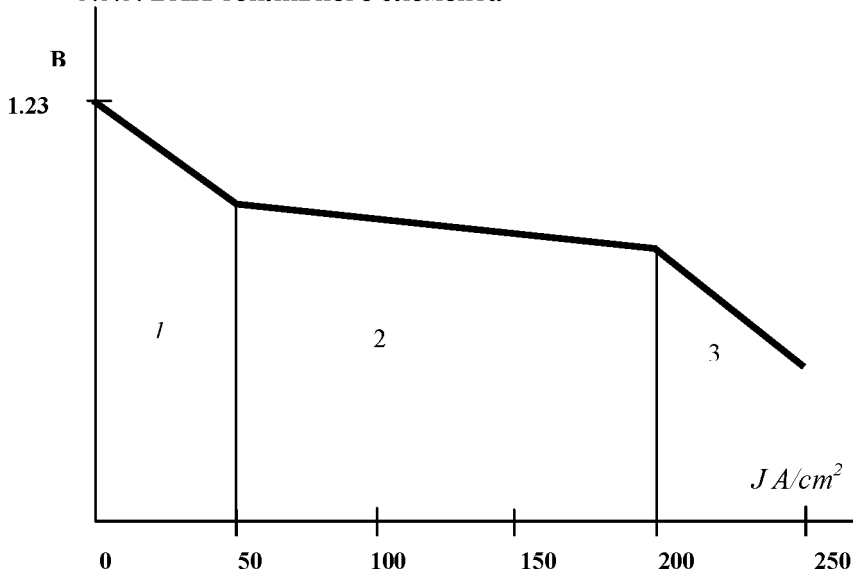


Рис.3.21. Вольтамперная характеристика ТЭ

Вольтамперная характеристика ТЭ на кислороде – водороде (рис.3.21.) может быть разделена на три участка в зависимости от процесса, определяющего падение напряжения. ЭДС такого ТЭ составляет 1.23 В.

1-й участок: характеризуется расходом энергии на организацию химического процесса (химическая поляризация) (рис.3.21, участок 1);

2-й участок характеризуется преимущественным падением напряжения на «омических» элементах - на электродах и электролите;

3-й участок - ионы не успевают поступать внутрь электродов, нехватка концентрации ионов (концентрационная поляризация).

Увеличение температуры электролита приводит к уменьшению затрат энергии на организацию химического процесса, и при температуре около 2000°C процесс идет самостоятельно. Изменение температуры мало влияет на величину падения напряжения на участке 2.

На участке 3 начальное увеличение температуры ведет к росту энергии ионов – наклон уменьшается. Рост температуры вызывает увеличение колебаний молекул электролита, что затрудняет движение ионов, скорость движения ионов падает.

Таким образом, существует оптимальная температура электролита, при которой падение напряжения на участке 3 будет минимальным. Для электролита КОН с концентрацией 1.8 оптимальная температура составляет около 250°C . Для того, чтобы электролит оставался жидким, необходимо давление порядка 4.5 атм.

Для топливных элементов нет термодинамического ограничения коэффициента использования энергии. В существующих топливных элементах от 60 до 70% энергии топлива непосредственно превращается в электричество.

Топливные элементы могут в недалеком будущем стать широко используемым источником энергии на транспорте, в промышленности и домашнем хозяйстве. Высокая стоимость топливных элементов ограничивала их применение военными и космическими приложениями.

Предполагаемые использования топливных элементов включают их применение в качестве переносных источников энергии для армейских нужд и компактных альтернативных источников энергии для околоземных спутников с солнечными батареями при прохождении ими протяженных теневых участков орбиты. Небольшие размеры и масса топливных элементов позволили использовать их при пилотируемых полетах к Луне. Топливные элементы на борту трехместных кораблей «Аполлон» применялись для питания бортовых компьютеров и систем радиосвязи. Топливные элементы можно использовать в качестве источников питания оборудования в удаленных районах, для внедорожных транспортных средств, например, в строительстве. В сочетании с электродвигателем постоянного тока топливный элемент будет эффективным источником движущей силы автомобиля.

Для широкого применения топливных элементов необходимы значительный технологический прогресс, снижение их стоимости и возможность эффективного использования дешевого топлива. При выполнении этих условий топливные элементы сделают электрическую и механическую энергию широко доступными во всем мире.

3.5.4. Устройство жидкостного топливного элемента

ТЭ с жидким электролитом использовался при полетах на Луну аппаратов «Аполлон». В качестве электролита применялся расплав КОН концентрации 1.8. При температуре ниже 200 градусов этот электролит не проводит электрический ток, поэтому для работы его необходимо предварительно разогреть, используя какой-либо источник. В качестве основного конструкционного материала используется никель, поскольку он хорошо работает при повышенных температурах и является катализатором. Срок службы такого ТЭ около 500 часов.

Основные достоинства:

- возможность получения большой плотности тока – до 250 миллиампер на квадратный сантиметр,
- использование дешевого катализатора и материала конструкции,
- поскольку электролит в реакции не участвует, ТЭ имеет его в малом количестве, поэтому толщина ТЭ составляет несколько миллиметров.

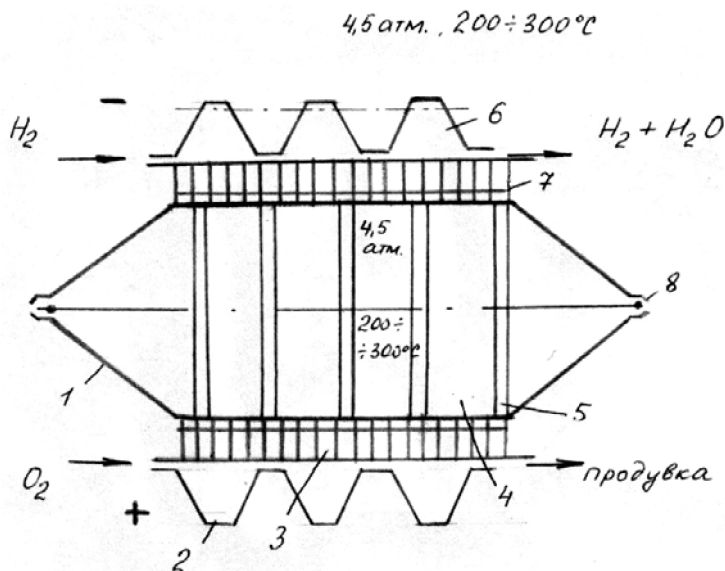


Рис. 3.22. Устройство жидкостного топливного элемента

- 1 – гибкий корпус из Ni,
- 2 – газокислородная камера из Ni,
- 3 – кислородный электрод, Ni-проволока,
- 4 – электролит, расплав KOH,
- 5 – фторопластовый сепаратор,
- 6 – газоводородная камера,
- 7 – отрицательный электрод,
- 8 – изолятор.

Недостатки ТЭ с жидким электролитом:

- для начала работы ТЭ необходимо его разогреть до температуры 200-250⁰ С,
- для поддержания ТЭ в рабочем состоянии необходимо потреблять электрический ток вне зависимости, нужен он в это время или нет,
- малый срок службы,
- нужна хорошая система охлаждения.

Конструктивно ТЭ выполняется в виде двух половинок из никелевого корпуса (рис. 3.22, поз.1), разделенных (электрически) изолятором 8. Электроды двухслойные, выполнены их никелевой

проволоки. Газовые камеры 2 и 6 получают штамповкой из никеля и приваривают в нескольких местах к электродам. Между электродами, для предотвращения замыкания, располагается фторопластовый сепаратор 5.

Для обеспечения давления внутри топливного элемента, его корпус 1 (рис.3.22) делается гибким. Необходимое количество топливных элементов (для получения напряжения 27В ТЭ соединяют последовательно) помещается в цилиндр, где создается внутреннее давление. Так как корпус не соединяется с внешней средой, то внутри него не образуются пузыри воздуха, тем самым обеспечивается надежность топливного элемента.

Для отвода тепла и обеспечения заданной температуры электролита и электрода H_2 используется продувка H_2 через газодородную камеру. Вместе с водородом из газовой камеры выносятся пары H_2O , которые конденсируют путем охлаждения.

Отличительной особенностью топливного элемента является то, что в реакцию вступают только H_2 и O_2 . Все примеси, которые присутствуют в газах, скапливаются в газовых камерах, уменьшая площадь контакта H_2 и O_2 с электролитом, уменьшается ток либо напряжение. Для предотвращения этого периодически производят продувку газовых камер, выбрасывая наружу их содержимое. Потери H_2 и O_2 за счет продувки – 10-14%.

3.5.5. Топливный элемент с ионно-обменной мембраной (ИОМ)

Топливный элемент на основе ИОМ в течение многих лет эксплуатируется на МКА «Шаттл». Эти ТЭ обладают рядом достоинств по сравнению с ТЭ с жидким электролитом:

- большой срок службы (до 5000 часов);
- постоянная готовность к работе;
- при отсутствии потребления энергии не расходуется топливо.

В ИОМ-ах используется самый легкий ион – H^+ (рис.3.23.). Это позволяет затрачивать на его движение минимум энергии и получать высокую скорость движения ионов.

Существуют 2 типа ИОМ:

1. с предельной температурой 42°C;
2. на основе фтора с предельной температурой 82°C.

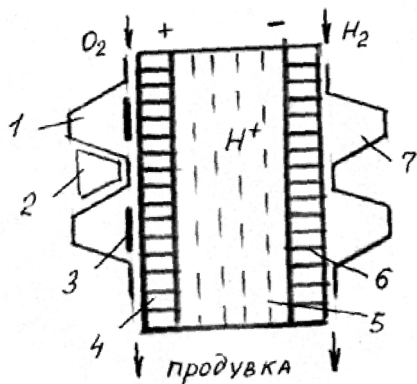


Рис. 3.23. Устройство ТЭ с ионно-обменной мембраной

- 1 – газокислородная камера,
- 2 – СТР,
- 3 – система сбора H_2O ,
- 4 – положительный электрод,
- 5 – твердый электролит – ионно-обменная мембрана,
- 6 – водородный электрод
- 7 – газодородная камера.

Топливные элементы на основе ИОМ – низкотемпературные. Максимальная плотность тока первой ИОМ – $25-30 \text{ мА/см}^2$, второй ИОМ – до 200 мА/см^2 .

В этом ТЭ H_2O образуется на кислородном электроде и выделяется тепло. ИОМы критичны к температуре и влажности. При подсыхании ИОМ растрескиваются (при увеличении температуры), уменьшая отдаваемый ток.

Газовые камеры выполняются из титана Ti , электроды – титановая проволока, покрытая в один – два молекулярных слоя платиной Pt .

Сбор воды на первых ТЭ производился с помощью фитилей, на современных ТЭ – путем использования камеры низкого парциального давления воды и ее динамического отсоса.

Срок службы современного топливный элемент с ИОМ достигает 5000 часов.

3.5.6. Энергетическая система на базе ТЭ

Как отмечалось выше, ТЭ может работать только при наличии обеспечивающих систем. Система хранения и подачи компонентов (СХиП) рабочих тел (рис.3.24.) обеспечивает хранение водорода и кислорода и подачу их в ТЭ при заданных температуре и давлении. Система может строиться на основе газобаллонного и криогенного хранения рабочих тел. Одним из

достоинств водородно-кислородного топлива является его высокая

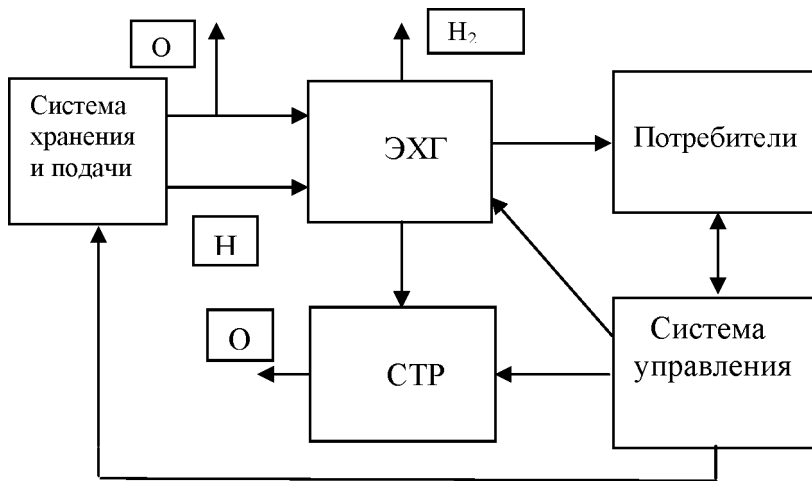


Рис. 3.24. Структура системы электроснабжения на базе топливных элементов

удельная энергия $q=2540$ Вт-час на килограмм массы.

Из таблицы видно, что для водородно-кислородных ТЭ наиболее целесообразно криогенное хранение рабочих тел.

Таблица. Способы хранения и подачи водорода и кислорода

№/№	Способ хранения	Удельная энергия, Вт-ч/кг
1	без систем хранения и подачи	2540
2	баллонная система хранения металлическая	130
3	баллонная система хранения композитная	260
4	криогенная система хранения	1580

Газобаллонная система позволяет хранить запасы топлива достаточно долгое время при больших перерывах в работе, обеспечение и регулирование заданного давления водорода и кислорода осуществляется

просто, но баллоны тяжелы, что значительно снижает удельную энергию СЭ.

Криогенная СХиП обеспечивает высокое значение удельной энергии, но является очень сложной, дорогой и позволяет совершать полет не более 2 недель.

Сохранение компонентов в жидком состоянии осуществляется путем «захолаживания», т.е. испарения компонентов. Поэтому, если нет потребления компонент, расход их продолжается, обеспечивая жидкое состояние за счет теплоты испарения.

Криогенный бак представляет собой две полированные емкости, вставленные одна в другую, пространство между ними вакуумируется. При работе ТЭ необходимое количество кислорода и водорода зависит от потребляемой электроэнергии. Для получения необходимого количества газообразных водорода и кислорода внутри бака имеется нагреватель, управляемый от давления в баке. В баке также имеется вентилятор, обеспечивающий перемешивание жидкости (что особенно важно в условиях невесомости). Защиту от высоких давлений осуществляет дренажный клапан. На выходе криогенного бака стоит насос, обеспечивающий необходимое давление газов в рабочих камерах ТЭ. Учитывая сложность криогенной системы и особые условия ее работы, понятно, почему первая авария с СЭС произошла на «Аполлоне 13», где взорвался кислородный криогенный бак.

Электрохимический генератор (ЭХГ) представляет собой генератор электрической энергии на основе ТЭ, объединенных в батарею. Для получения необходимого напряжения соединяют последовательно до 30 ТЭ, при этом газовые камеры ТЭ находятся под напряжением относительно друг друга, поэтому для подачи водорода и кислорода в ТЭ необходимо использовать трубопроводы, выполненные из изоляционного материала. Обычно подача рабочих тел и продувка обеспечиваются через параллельно соединенные трубопроводы.

В состав ЭХГ входит также подсистемы отвода воды и тепла.

Подсистема сбора воды может быть статической с использованием фитилей или созданием градиента давления водяных паров из зоны электрохимической реакции во влагоотделительную полость или динамической с циркуляцией водорода через осушительные камеры. Вода обычно используется в системе обеспечения жизнедеятельности (СОЖ) экипажа.

Подсистема отвода тепла от ТЭ обеспечивает сбор тепла и передачу его в систему терморегулирования (СТР) КА.

Система управления (СУ) обеспечивает автоматическое управление всеми элементами энергосистемы в зависимости от количества потребляемой электроэнергии

В качестве примера рассмотрим основные параметры энергетической системы многоазового КА «Шаттл» на основе топливных элементов.

Мощность, кВт:	
минимальная	4
максимальная	14
пиковая:	
в течение 60 мин.	20
в течение 2 мин	24
Род тока	Постоянный
Напряжение постоянного тока, В	27.5 – 32.5
Энергоемкость, кВт-ч:	
номинальная	1480
для полезного груза	50
аварийная	120
Вода в СОЖ, вырабатываемая ЭХГ, кг	500
Кислород для СОЖ, хранимый в баках ЭУ, кг	100
Ресурс одного цикла, сут.	7
Число циклов	100
Общий ресурс, час	5000
Время жизни, лет	10
Продолжительность предстартовой подготовки, час	24
Продолжительность поддержания готовности к запуску, час	24

4. Термоэлектрические генераторы

Проблема поиска источников энергии, способных в автономном режиме обеспечивать электропитание, весьма актуальна. Использование принципа прямого преобразования тепловой энергии в электрическую

позволяет решить поставленную задачу. Среди известных систем, использующих этот принцип (термоэмиссионные, термоэлектрические преобразователи и МГД-генераторы), с электрической мощностью до нескольких киловатт, длительным ресурсом (более десяти лет), высокой надежностью, автономностью в настоящее время обладают только системы с термоэлектрическими преобразователями, что делает их наиболее предпочтительными для использования в качестве автономных источников тока.

Принцип действия. При нагревании одного конца проводника носители электричества перемещаются от нагретого конца к холодному, создавая разность потенциалов (рис.4.1а).

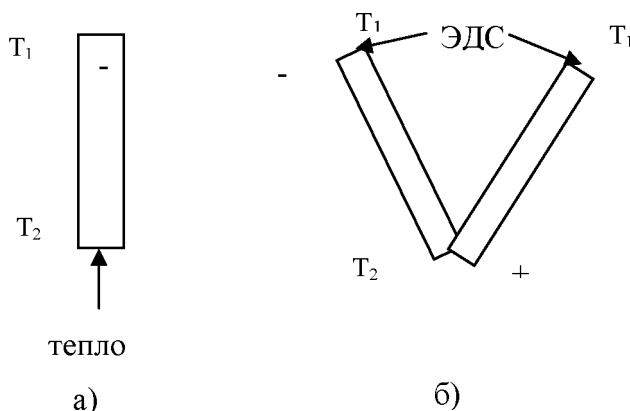


Рис. 4.1. Принцип действия термоэлектрического генератора

Для снятия разности потенциалов потребуется второй проводник, один конец которого также нагреется и в нем создастся разность потенциалов (рис. 4.1б). Если взять проводники из одинакового материала, то суммарная разность потенциалов всегда будет равна нулю. Проводники должны быть из разных материалов. Лучшая пара металлических материалов медь-константан имеет ЭДС 46.3 миллиВольта при разности температур 1000° и КПД около 0.7%.

КПД термоэлектрического преобразователя определяется термическим КПД и КПД преобразования

$$\eta = \eta_r * \eta_{пр}$$

Термический КПД зависит от разности температур горячего T_2 и холодного T_1 концов

$$\eta_r = (T_2 - T_1) / T_2,$$

и для металлического термоэлемента максимум составит около 80%. Следовательно КПД преобразования не превышает 10%. Это объясняется тем, что в металле одинаковые носители – электроны, и разности потенциалов, полученные в каждом проводнике, вычитаются (рис. 4.1б).

Соединение проводников, подвергающееся нагреву носит название «горячий спай», ненагреваемое – «холодный спай». Такой термоэлемент не используется для получения электроэнергии, а применяется для измерения температуры и носит название «термопара».

Для получения электроэнергии необходимо повысить КПД преобразования, что возможно осуществить, используя полупроводники с разными носителями – p и n. В этом случае КПД преобразования становится значительно выше. Однако для наиболее распространенных кремниевых полупроводников предельная температура составляет 150^0 С и общий КПД не превышает 7-10%.

Полупроводниковые материалы, использующиеся в таких генераторах, должны иметь как можно больший коэффициент термо-э.д.с., хорошую электропроводность и малую теплопроводность.

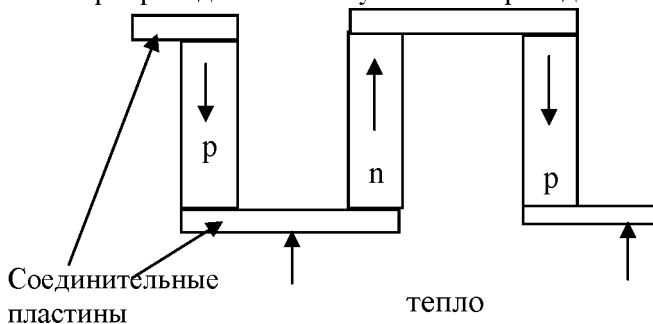


Рис. 4.2. Устройство полупроводникового ТЭГ

Последнее необходимо для того, чтобы получить значительный перепад температуры между холодными и горячими спаями кристаллов. Этим требованиям лучше всего удовлетворяют сильно легированные полупроводниковые материалы (полуметаллы).

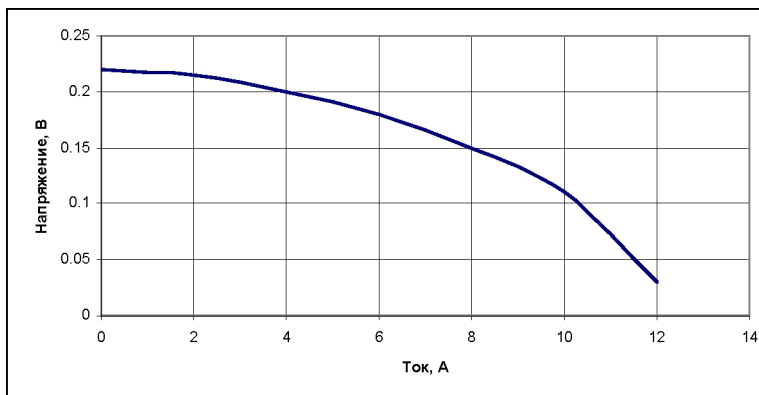


Рис. 4.3. Вольтамперная характеристика ТЭГ

Устройство полупроводникового ТЭГ показано на рис. 4.2. Батарея термоэлементов собирается из кристаллов р и n, размещенных между нагреваемой и охлаждаемой поверхностями (рис.4.2.). Полупроводниковые элементы р и n располагаются поочередно таким образом, чтобы ЭДС суммировались (показаны стрелками). Для соединения полупроводниковых элементов используют металлические пластины.

Поскольку для работы в термоэлектрическом генераторе не требуется высокая чистота применяемых материалов, то генераторы получаются относительно дешевыми и успешно работают в условиях проникающей радиации. Для разогрева может использоваться побочное тепло (солнечный свет, стенка разогревающейся при работе установки) и тепло от специального генератора (радиоизотоп, атомный реактор).

Несмотря на малый КПД, не превышающий 10%, термоэлектрические генераторы нашли широкое применение для питания переносных устройств электроники. Объясняется это простотой эксплуатации, высокой надежностью, небольшой стоимостью.

Внешняя характеристика одного из термоэлементов (рис.4.3) достаточно круто спадает, поэтому для такого генератора не опасны

короткие замыкания, но ТЭГ могут использоваться в силу этого как индивидуальные источники.



Рис. 4.4. Внешний вид ТЭБ радиально-кольцевой конструкции

В отечественных промышленных и опытных термоэлектрических генераторах (ТЭГ) на природном газе максимальная единичная электрическая мощность не превышает 150 Вт. Единичная мощность работающих ТЭГ с атомно-реакторным нагревом достигает 5 кВт.

Наиболее рациональным источником тепла для КА являются изотопы. Это сочетание полупроводникового ТЭГ и изотопа позволяют создать источники, работающие надежно много лет. ТЭГ для космической техники имеют небольшую мощность и используются в качестве сверх аварийных источников для целей включения пиросредств. На обитаемых спутниках такой источник получается слишком тяжелым из-за радиационной защиты.

Термоэлектрические батареи (ТЭБ) могут быть как плоской так и радиально-кольцевой формы. Общим недостатком ТЭБ плоской геометрии является существенная деградация электрической мощности и системного КПД при многократном термоциклировании и из-за роста внутреннего электрического сопротивления. Эти недостатки могут быть устранены применением ТЭБ радиально-кольцевой геометрии (рис.4.4.). Она позволяет значительно сократить потери тепла по конструктивным элементам

Цилиндрические элементы с передачей теплоты по радиусу конструктивно хорошо сопрягаются с наиболее распространенными как в ядерной энергетике, так и в теплотехнике трубчатыми конструкциями теплообменников. Это позволяет получить в цилиндрических конструкциях более высокие удельные энергетические характеристики за счет снижения массы конструктивных элементов

В настоящее время ООО "ФОТОН" корпорации НПО "РИФ" осуществляет изготовление и испытания ТЭБ радиально-кольцевой конструкции.

Таблица. 4.1. Некоторые термоэлектрические генераторы, выпускавшиеся в СССР

	Тепловая мощность РИТ, Вт	Электрическая мощность РИТЭГа, Вт	КПД, %	Выходное электрическое напряжение РИТЭГа, В	Масса РИТЭГа, кг	Начало производства
Эфир-МА	720	30	4.2	35	1250	1976
ИЭУ-1	2200	80	3.6	24	2500	1976
Гонг	315	18	5.7	14	600	1983
ИЭУ-1М	2200 (3300)	120 (180)	5.4 5	28	2 (3) x 1050	1990

Принятые в таблице 4.1 сокращения: РИТ- радиоизотопное топливо, РИТЭГ – радиоизотопный термоэлектрический генератор.

Таблица 4.2. Термоэлектрические генераторы, использовавшиеся на спутниках США

Характеристика	SNAP-9A	SNAP-11	IMP	COMSAT
Космический аппарат	Транзит – 4	Сервейер	IMP	COMSAT
Топливо	Pu ²³⁸	Cm ²⁴²	Pu ²³⁸	Sr ⁹⁰
Максимальная электрическая мощность, Вт	25	21-25	25	30
КПД, %		4.8 – 5.2		
Масса, кг.	12.3	13.6	9.6	11.4
Ресурс, месяцы	6	2-6	1-3 года	5-10 лет

5. Солнечные батареи

Преобразование солнечной энергии напрямую в электрическую сулит большие выгоды при использовании на КА. Поэтому уже в 1958 году СССР и США разработали и поставили на борт КА первые солнечные батареи.

Солнечная батарея представляет собой совокупность преобразователей света в электричество (ФЭП) и конструктивные элементы - панели, обеспечивающие механическую прочность, геометрическую неизменяемость и крепление их к конструкции КА.

За небольшой срок произошло бурное развитие теории фотопреобразователей (ФЭП), разработаны новые конструктивные и технологические решения. Так КПД ФЭП увеличился с 7% первых солнечных батарей до 42% в экспериментальных установках. Увеличился размер ФЭП с 10*20 мм до 150*150мм в современных батареях, что позволяет снизить массу за счет коммутационных соединений и уменьшения площади батареи. Увеличен срок службы за счет применения гибкого соединения ФЭП, что уменьшает механические напряжения в преобразователях при переходе с освещенной стороны в тень и обратно.

К основным достоинствам солнечных батарей необходимо отнести: первичная энергия для получения электроэнергии находится в космосе.

Недостатки:

1. небольшой срок службы (вместе с солнечным светом на ФЭП попадают микрочастицы, летящие с Солнца);
2. значительно ухудшается маневренность КА не только за счет значительного увеличения момента инерции КА, а также за счет снижения максимальных угловых скоростей и ускорений, определяемых прочностью панелей солнечных батарей;
3. сложность размещения панелей под обтекателем;
4. высокая стоимость электроэнергии из-за использования большой массы монокристаллического кремния (стоимость 1кВт*ч электроэнергии достигает 40\$);
5. относительно низкий КПД (около 15%);
6. рационально использовать их только на околоземных орбитах и для полета на Марс и Венеру.

5.1. Фотозлектрические преобразователи

Солнечное излучение как первичный источник энергии обладает рядом специфических особенностей, которые необходимо учитывать при определении рациональных путей и способов использования этого

источника. Можно выделить несколько характеристик Солнца как источника энергии в том месте пространства, где проходит траектория полета космического аппарата.

Энергетические характеристики – это зависимость плотности потока солнечного излучения от длины волны и расстояния до Солнца на поверхность перпендикулярную потоку света.

Солнце имеет непрерывный спектр излучения. Распределение энергии в спектре Солнца весьма неравномерно и истинная кривая спектральной плотности имеет довольно сложный вид, однако распределение энергии в спектре Солнца достаточно близко к спектру абсолютно черного тела при температуре 5800^0 K (рис. 5.1.).

Основная часть энергии Солнца приходится на короткую часть спектра - синюю и ультрафиолетовую. Длинная часть спектра, обладая малой энергией, не способна создавать электричество, но ведет к нагреву солнечных батарей, поэтому от нее стараются избавиться. На первых солнечных батареях использовали защитное покрытие синего цвета (не пропускающее красную и инфракрасную часть спектра), в настоящее время фотопреобразователи делаются прозрачными для этой части спектра.

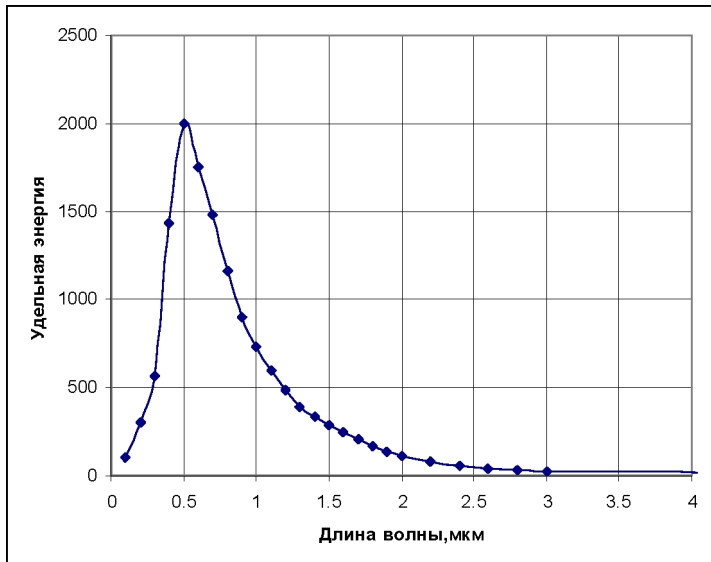


Рис. 5.1 Спектральная характеристика солнечного излучения

Ввиду конечных и достаточно больших размеров Солнца солнечные лучи не параллельны и имеют некоторый угловой параметр. Этот параметр особенно важен, когда концентрируют солнечную энергию.

Таблица. Энергетические и геометрические характеристики солнечного излучения

Параметр	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн
Энергия E , Вт/м ²	9250	2730	1373	610	52	15.4
Угол, угловые сек.	81	44	32	21	7	4

Из таблицы видно, что использовать солнечное излучение рационально в пределах Венера-Марс.

Основными полезными видами энергии, которые используются на борту, являются электрическая, механическая, тепловая и световая. Разнообразная бортовая аппаратура потребляет главным образом электрическую энергию. Необходимо отметить, что солнечное излучение - это единственный первичный источник, энергия которого может быть непосредственно преобразована во все полезные виды энергии (рис. 5.2).

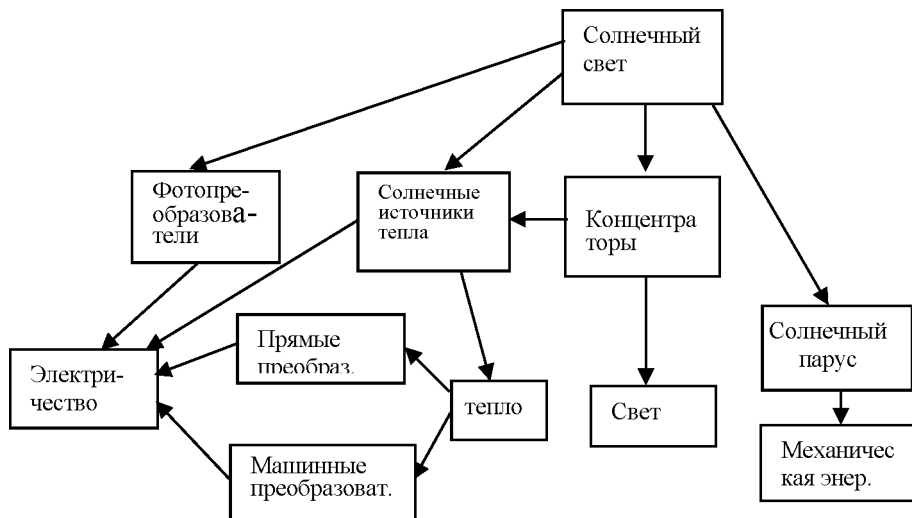


Рис. 5.2. Схема основных путей преобразования солнечной энергии в космосе

В качестве преобразователя свет-электричество наибольшее распространение получили преобразователи на основе рп – перехода, изготавливаемые из кремния и, реже, арсенида галлия. Фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) представляет собой плоскую пластину, размером от 20*10 мм до 180*180 мм. В основе ФЭП лежит рп – переход, образуемый соответствующими полупроводниковыми пластинами (рис. 5.3, поз. 3 и 4).

Сверху ФЭП закрыт защитным покрытием 1.

Защитное покрытие выполняет несколько функций:

а) защищают переход от внедрения примесей в полупроводники (вместе с потоком солнечного света движутся потоки микрочастиц);

б) поверхность защитного покрытия должна иметь малый коэффициент отражения, чтобы энергия солнечных лучей использовалась как можно полнее;

в) до недавнего времени защитное покрытие было синего цвета, для защиты от красной части спектра. В настоящее время защитное покрытие выполняется прозрачным для красной части спектра.

Токоъемник 2 (рис.5.3.) должен, с одной стороны, располагаться по всей поверхности для уменьшения переходного сопротивления. С

другой – его площадь должна как можно меньше закрывать полупроводник. На практике токосъемник 2 выполняется в виде полосок металла, занимающий около 11% площади ФЭП (11% ФЭП не освещены Солнцем и не вырабатывают электроэнергию).

Сам ФЭП чаще всего выполняется из двух полупроводников n и p – типов, причем n полупроводник делается тонким (рис.5.3, поз.3) для того, чтобы свет проходил через него не расходуя свою энергию, и во втором толстом слое (рис.30, поз. 4) отдавал энергию, высвобождая носитель. Толщина p -слоя должна быть больше длины свободного пробега фотона света (около 0.5 мм.). В настоящее время нижний токосъемник 5 делают зеркальным и толщина p -полупроводника уменьшается вдвое.

Нижний токосъемник 5 для солнечных батарей низколетящих спутников делается сплошным и зеркальным с обеих сторон. Выяснилось, что отраженный от земной поверхности свет и тепло разогревают ФЭП и уменьшают его энергию на 20%. В последних разработках ФЭП применяют три слоя полупроводников, используется энергия отраженная от Земли, отдача ФЭП увеличивается соответственно на 20%.

Принцип работы ФЭП основан на том, что фотон света, пройдя через тонкий n – полупроводник, в толстом p - слое отдает свою энергию, создавая пару электрон – дырка, которые переходят в соответствующую область.

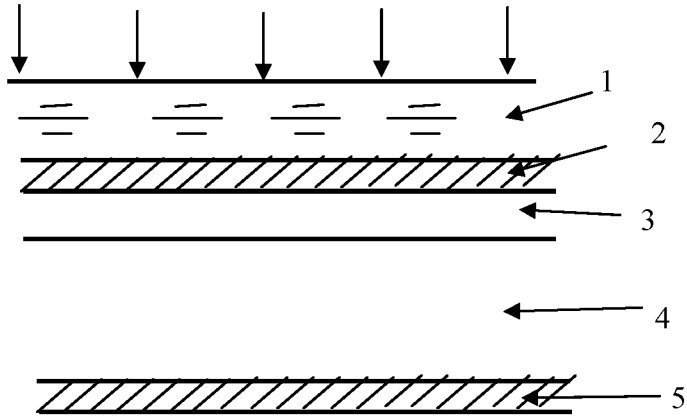


Рис. 5.3 Структура фотоэлектрического преобразователя

- 1 - защитное покрытие,
- 2 - токоотъемник,
- 3 - p-полупроводник,
- 4 - r-полупроводник,
- 5 - токоотъемник и металлическое зеркало.

ЭДС кремниевого ФЭП на уровне орбиты Земли (поток света перпендикулярен пластинке ФЭП) составляет около 0.6 В. Вольтамперная характеристика идеального ФЭП представляет собой совокупность характеристик источника напряжения (величина напряжения не зависит от тока нагрузки) и источника тока (величина тока не зависит от сопротивления нагрузки) (Рис. 5.4. крив. 1).

Падение напряжения с ростом тока нагрузки обусловлено наличием сопротивлений токоотъемников и самого полупроводника. При коротком замыкании ФЭПа ток ограничен, поскольку его величина определяется количеством фотонов.

Такая характеристика ФЭП с одной стороны хороша, поскольку невозможно вывести его из строя даже коротким замыканием. С другой стороны, иногда требуется немного увеличить ток, но ФЭП этого не может сделать и выдает нулевое напряжение, то есть отключает нагрузку.

Фотоэлектрические модули с защитным покрытием из текстурированного закаленного стекла на базе монокристаллических

кремниевых фотоэлектрических элементов имеют высокий КПД преобразования света - 15-20%.

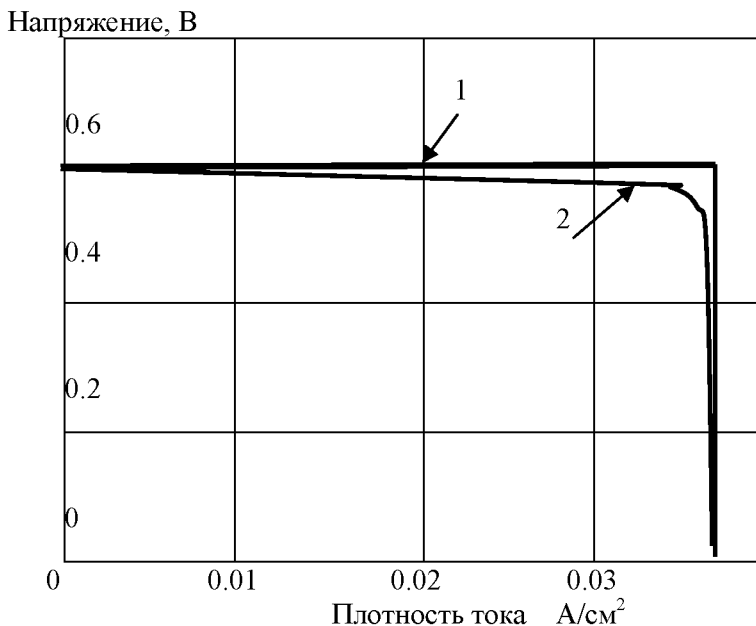


Рис.5.4. Вольтамперная характеристика кремниевого ФЭП
1- идеальный ФЭП, 2 - реальный ФЭП.

КПД солнечных батарей удалось довести до рекордного значения 42,8 процента. Предыдущий рекорд составлял 40,7 процента, но для области, где выигрыш в 0,2 процента — норма, а в один процент — прорыв, это очень значительный шаг.

Для достижения результата понадобились объединенные усилия целого ряда лабораторий, исследовательских центров и коммерческих предприятий.

Конечной целью является создание дешевой портативной солнечной батареи. Перед учеными поставлена задача довести КПД до 50 процентов. В настоящее время запускается следующая стадия проекта: переход от лабораторных исследований к созданию работающего прототипа. Предполагается, что это займет три года и потребует около ста миллионов долларов.

Основные потери энергии в солнечных батареях связаны с отражением части солнечного излучения от поверхности, прохождением части излучения через преобразователь без поглощения, внутренним сопротивлением преобразователя и другими физическими процессами. В кремниевой батарее, созданной университетом Делавэра, для уменьшения потерь солнечный свет расщепляется специальной оптической системой на три области с различным уровнем энергии и направляется на три ячейки разной чувствительности: высокой, средней и низкой.

5.2. Солнечные батареи

Солнечные батареи космических летательных аппаратов представляют собой сложные электромеханические устройства, обеспечивающие электрическое соединение ФЭП, их размещение на единой несущей основе, прочность и устойчивость всей конструкции при вибрации и маневрах, размещение под обтекателем, возможность раскрытия, монтажа и ориентации в условиях космоса.

Солнечные батареи (СБ) бывают ориентируемые и неориентируемые.

Ориентация СБ может осуществляться по одной или двум координатам. Неориентируемые СБ жестко крепятся к корпусу КА или являются составной частью корпуса КА.

В зависимости от механических характеристик несущей опоры, или подложки, СБ разделяют на конструкции с жесткой, полужесткой и гибкой несущими поверхностями. Жесткая несущая конструкция СБ выполняется в виде крыла, на которое накладываются ФЭП, имеет высокие резонансные частоты и малые прогибы панелей. Удельная мощность таких СБ – 20-40 Вт/кг конструкции.

Гибкие солнечные батареи имеют подложку с нулевой жесткостью изгибу, разворачивается и удерживается в рабочем положении с помощью раскладных мачт, балок или пантографов. Конструкция СБ с гибкой несущей поверхностью могут быть двух типов: свертываемые или рулонные, складные или пакетные. Удельная мощность – 40-80 Вт/кг.

Основной вклад в массу СБ дают ФЭП. Поэтому актуальной является задача уменьшения их толщины и увеличения КПД. Наиболее перспективны в этом отношении ультратонкие ФЭП (до 50мкм), применение ФЭП больших размеров. Ожидается увеличение удельной мощности до 200Вт/кг.

Для получения необходимого напряжения и тока ФЭП приходится соединять последовательно и параллельно. В солнечных батареях старого типа соединялось до нескольких сот тысяч элементов. Это приводило к большому весу соединительных проводов, но при отказе до 80% ФЭП батарея продолжала работать.

Используемые в настоящее время ФЭП имеют большие размеры и создают ток до 6А на один элемент. Для получения напряжения 27 В и тока 200А необходимо последовательно соединить 54-55 элементов и параллельно 34 ветви. Таким образом, солнечная батарея содержит всего 1870 элементов.

При электрическом соединении ФЭП возникает дилемма: делать все соединения (как последовательные, так и параллельные) - получаем высокую надежность СБ, но большую массу, если соединять последовательно все 54-55 ФЭП и эти «веточки» соединять параллельно – получаем минимальную массу, но и низкую надежность, и малый срок службы.

Вторая проблема: при использовании СБ взаимодействие тока, текущего по соединительным проводам СБ и магнитным полем Земли приводит к возникновению силы и момента, что вызывает разворот КА.

Третья проблема связана со статической электризацией панелей СБ. Постепенное накапливание заряда статического электричества на поверхности СБ может вызвать пробой и порчу ФЭП. Для устранения этого явления на панели СБ наклеивают токопроводящие пленки (снижение КПД).

5.3 Космические фотоэлектрические преобразователи и солнечные батареи

Повышение требований к бортовым системам космических аппаратов (КА) приводит к необходимости создания солнечных батарей (СБ), обладающих более высокими энергетическими и эксплуатационными характеристиками с увеличенным ресурсом работы. Наиболее перспективным путем решения этих задач является создание СБ на основе фотоэлектрических преобразователей из арсенида галлия и родственных ему соединений. Солнечные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе арсенида галлия обеспечивают существенное увеличение КПД, удельного энергопотребления и радиационной стойкости космических СБ по сравнению с батареями на основе кремния. ФЭП на основе AsGa обеспечивают:

- Большее значение КПД, достигающее в условиях космоса величины до 25% в ФЭП с одним р-п переходом в GaAs и до 30% в каскадных ФЭП.
- Улучшение радиационной стойкости, обеспечивающее увеличение срока эксплуатации СБ до 15 лет на геостационарных орбитах.
- Возможность работы при высоких степенях концентрирования солнечного излучения при одновременном повышении КПД до значений 30-35%.

За последние десятилетия накоплен большой отечественный и зарубежный опыт эксплуатации космических ФЭП и СБ на основе GaAs и соединений. Показано, что GaAs-ФЭП обеспечивают увеличение КПД, удельного энергопотребления, радиационной стойкости и других параметров по сравнению с кремниевыми СБ. Большой коэффициент поглощения солнечного излучения в арсениде галлия позволяет сохранить высокий КПД при уменьшении толщины структуры ФЭП до величины менее 10 мкм, что обеспечивает снижение более чем на порядок расхода арсенида галлия и, как следствие этого, снижение в 2-3 раза веса солнечных батарей. В таких тонкопленочных ФЭП с толщиной активной области порядка 5 мкм возможно достижение высокой двусторонней чувствительности и повышение на 20-25% энергопотребления в космосе за счет использования аль-бедо Земли.

ФЭП из GaAs наряду с повышением эффективности обеспечивают также улучшение радиационной стойкости, что приблизительно в 2 раза увеличивает ресурсработы космических СБ.

Как показали многолетние исследования по деградации космических СБ под действием радиационного облучения, степень деградации существенно зависит от параметров орбиты космического аппарата (КА). Для низкоорбитальных КА (770 км) деградация СБ на основе кремния и GaAs-GaAlAs составляет соответственно 15% и 5% в течение 5 лет пребывания КА на орбите. Для КА на геостационарных орбитах деградация составляет 31% (Si) и 16% (GaAs) в течение 15 лет пребывания на орбите. Для радиационно-опасных орбит (7400 км при угле наклона 50°), деградация составляет 49% (Si) и 22% (GaAs) в течение 5 лет пребывания на орбите. Поэтому применение для энергоснабжения КА батарей на основе GaAs дает значительный экономический эффект по сравнению с СБ на основе кремния, несмотря на более высокую стоимость таких СБ.

Чрезвычайно важным преимуществом GaAs ФЭП является их

способность эффективно преобразовывать 100-1000-кратно концентрированное солнечное излучение. Это позволяет снизить расход GaAs полупроводниковых материалов пропорционально степени концентрирования и, следовательно, существенно снизить стоимость "солнечной" электроэнергии. Дополнительными преимуществами при переходе к концентраторным СБ в космосе являются:

- возможность организации защиты фотопреобразователя элементами конструкции концентрирующей системы от ионизирующих излучений;
- возможность выбора теплового режима ФЭП, обеспечивающего термический отжиг радиационных дефектов;
- улучшение радиационной стойкости ФЭП, работающих при повышенной плотности фототока, за счет фотонного и инжекционного "отжига" радиационных дефектов.

В каскадных ФЭП может быть достигнуто существенное увеличение КПД до 25-27% и до значений порядка 30-35% при концентрированном облучении.

За последние годы в ФТИ им.А.Ф.Иоффе созданы AlGaAs/GaAs солнечные элементы, в которых благодаря улучшенной фоточувствительности в "фиолетовой" области спектра достигнуты значения КПД 23-25%, близкие к теоретическому пределу для ФЭП с одним р-п переходом. Добавление к этим ФЭП узкозонных материалов на основе InP/InGaAs и AlGaSb/GaSb позволило создать механически стыкованные каскадные ФЭП с КПД до 28%, имеющие не только высокую эффективность, но и повышенную радиационную стойкость, что позволит создавать на их основе космические СБ с повышенным ресурсом работы.

5.4. Солнечные элементы производства завода "Солнечный Ветер"



Рис. 5.5 Внешний вид ФЭП, выпускаемых заводом «Солнечный ветер»
 Завод "Солнечный Ветер" (Краснодар) производит фотоэлектрические элементы на основе монокристаллического кремния, как р-типа, так и n-типа, по собственной технологии (рис.5.6), обеспечивающей высокие параметры элементов и широкий диапазон применения при сравнительно низкой цене.

Элементы имеют структуру:

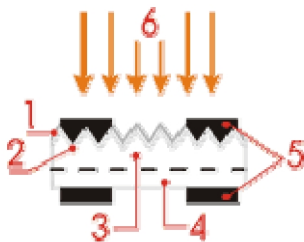
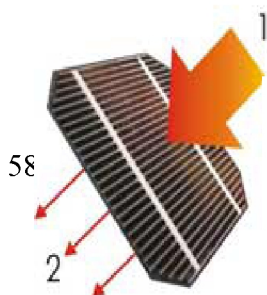


Рис. 5.6. Структура ФЭП

- 1 - текстура с антиотражающим покрытием
- 2 - n^+ (p^+) - Si ,
- 3 - p (n) - Si ,
- 4 - p^+ (n^+) - Si ,
- 5 - металл ,
- 6 - солнечный свет .

Все элементы, как n-, так и p-типа, прозрачны для инфракрасной области спектра, что приводит к меньшей нагреваемости элементов на солнце и соответственно увеличению их эффективности (рис.5.7).



- 1-солнечный свет
- 2 – инфракрасные лучи

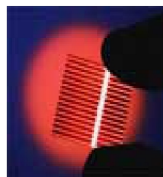


Рис. 5.7. ФЭП со структурой, пропускающей красную часть спектра

Компания «Солнечный Ветер» одна из первых в мире начала промышленный выпуск солнечных элементов с двусторонней чувствительностью на кремнии р- и п-типа.

Фирма производит различные модификации элементов на основе псевдоквадрата (рис. 5.5) с размерами: 103.5x103.5 мм, 125x125 мм, 156x156 мм, а также их части.

Типичные вольт-амперные характеристики: на примере

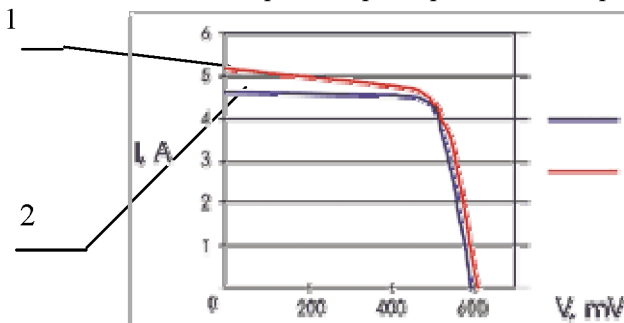


Рис. 5.8. Вольтамперные характеристики ФЭП

солнечного элемента 125x125 из кремния с низким (поз.2) и высоким (поз.1) удельным сопротивлением представлены на рис.5.8

Таблица. Электрические характеристики солнечных элементов:

Размер, мм	Диаметр, мм	Ток КЗ, А	Напряжение XX, В	Max напр., В	Max ток, А	Мощность, Вт

85x85	100	2.1 - 2.4	0.59 0.61	0.49	1.85 2.14	0.9 1.05
102.8x102.8	135	3.2 - 3.6	0.59 0.61	0.49	2.9 3.3	1.4 1.6
103.5x103.5	125	3.2 - 3.6	0.59 0.61	0.49	2.9 3.3	1.4 1.6
125x125	150	4.6 - 5.2	0.59 0.61	0.49	4.1 4.7	2.0 2.3

В настоящее время в основном выпускаются псевдоквадратные фотоэлектрические элементы размером стороны от 100 до 175 мм.

В продаже имеются отдельные фотоэлектрические модули пиковой мощностью от 5 до 160 Вт. Модули большей мощности (до 200 Вт) изготавливаются под заказ.

Все модули имеют осветленное стеклянное покрытие и прочную рамку из алюминия.

В **солнечных батареях** с защитным покрытием из обычного стекла применяются фотоэлектрические элементы с КПД от 12% и выше (в среднем 13-16%).

6. Вторичные источники электроэнергии

Вторичные источники преобразуют напряжение одной величины и частоты в напряжение другой величины и частоты.

Для обеспечения работы различной бортовой аппаратуры необходимо иметь несколько напряжений. Удобнее всего получить их, используя переменное напряжение, поэтому на борту стоит преобразователь постоянного тока в переменный 500(1000)Гц, 40В.

Существует 2 способа преобразования: динамический и статический преобразователи.

Динамический преобразователь представляет собой соединение в одной машине двигателя постоянного тока и генератора переменного. Регулятор напряжения и частоты такой машины представляет сложное устройство и составляет около половины массы самого преобразователя.

Недостатки:

1. не работает в условиях вакуума,
2. создает большие помехи электронной аппаратуре,
3. создает вибрации,
4. требует постоянного обслуживания,
5. большая полетная масса,
6. низкий КПД,
7. недостаточно высокая надежность.

В настоящее время для КА созданы надежные статические транзисторные преобразователи постоянного тока в переменный (инверторы) мощностью в несколько киловатт, превосходящие по основным параметрам электромашинные преобразователи. КПД транзисторных преобразователей может достигать 60-70%.

По сравнению с электромашинными, статические преобразователи обладают следующими преимуществами:

- время выхода на рабочий режим меньше в 5-10 раз и составляет доли секунды;
- в несколько раз меньше пусковые токи;
- лучшее качество переходных процессов;
- отсутствуют акустические шумы, создаваемые при работе преобразователя;
- большой срок службы,
- малые масса и габариты.

К ним предъявляются жесткие требования:

- нестабильность частоты не хуже, чем 10^{-4}
- отклонение амплитуды напряжения не больше $\pm 5\%$
- форма переменного напряжения должна отличаться от гармонического не больше, чем на несколько %.

Применение кремниевых транзисторов позволяет создавать преобразователи, работающие при температурах до $80-100^{\circ}\text{C}$. Полупроводниковые приборы работают в преобразователях в ключевом режиме. Этот режим позволяет с помощью приборов относительно небольшой мощности управлять достаточно большой мощностью в нагрузке.

Возможно дальнейшее улучшение выходных характеристик статических преобразователей, благодаря применению дополнительных фильтров, увеличения числа преобразующих каскадов и т. п.

Надежность работы полупроводниковых преобразователей увеличивают путем дублирования и резервирования элементов, что практически мало сказывается на увеличении их габаритов и массы по сравнению с электромашинными преобразователями.

Технические характеристики преобразователя приведены в таблице 1. Прибор предназначен для питания специальной аппаратуры переменным током стабилизированной частоты 500 Гц и стабилизированным напряжением 40 В.

Таблица 1

№№	Наименование параметра	Численное значение
1	Напряжение питания, В	27^{+4}_{-3}
2	Частота выходных напряжений, Гц	500
3	Выходное напряжение, В: <ul style="list-style-type: none"> • однофазное • трехфазное 	$40^{+1,2}_{-1,2}$ 40^{+2}_{-2}
4	Коэффициент нелинейных искажений, % <ul style="list-style-type: none"> • по однофазному выходу • по трехфазному выходу 	5 10
5	Выходные мощности, ВА: <ul style="list-style-type: none"> • однофазного выхода • трехфазного выхода 	0...65 0...115
6	Коэффициент мощности нагрузок: <ul style="list-style-type: none"> • однофазных (индуктивных) • трехфазных (индуктив.или емкостных) 	0.7 0.8...1
7	КПД, не менее	0.62
8	Масса, кг, не более	12.5
9	Ресурс работы, час	1000

6.1. Структурная схема преобразователя

Принцип построения статического преобразователя основан на разделении функций между отдельными элементами.

На рис. 6.1. приведена функциональная схема статического преобразователя. Она состоит из следующих блоков:

- 1 - кварцевый задающий генератор;
- 2 - предварительный усилитель;
- 3 - фазорасщепитель;
- 4 - предварительный усилитель;
- 5 - усилитель мощности трехфазного напряжения;
- 6 - фильтр выходного трехфазного напряжения;
- 7 - реле;
- 8 - регулятор трехфазного выходного напряжения;
- 9 - схема задержки;
- 10 - усилитель мощности однофазного напряжения;
- 11 - фильтр выходного однофазного напряжения;
- 12 - диодный сумматор;
- 13 - регулятор однофазного выходного напряжения;
- 14 – трехфазный выход;
- 15 – однофазный выход.

Кварцевый задающий генератор 1 (рис.6.1.) предназначен для выработки переменного напряжения стабильной частоты. Он включает в себя (см. блок-схему рис. 6.2) кварцевый возбудитель 1, буфер-формирователь

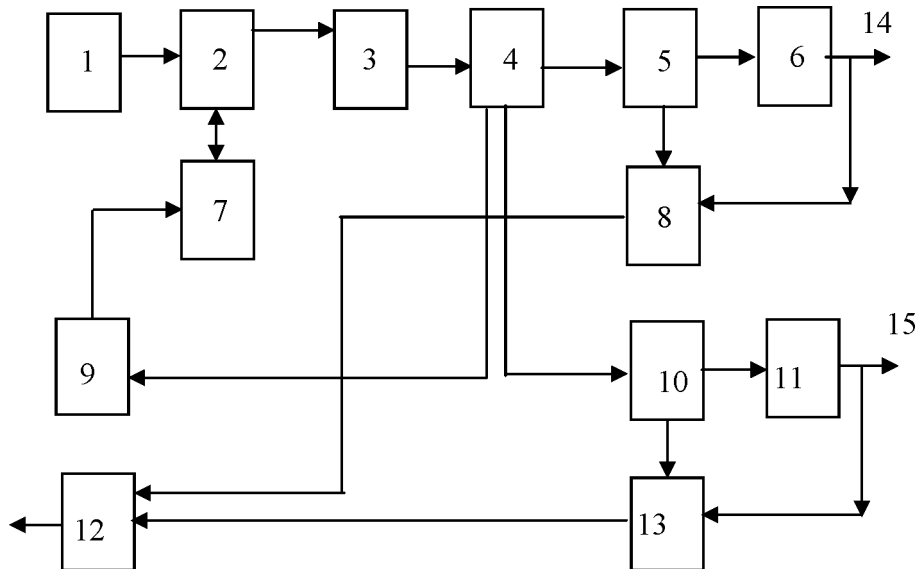


Рис.6.1. Блок-схема статического преобразователя

2, блоки делителей частоты 3 и выходной усилитель 4.

Кварцевый возбуждатель 1 (КЗГ) обеспечивает заданную стабильность выходного напряжения кварцевого задающего генератора по частоте. На выходе кварцевого возбуждателя формируются импульсы произвольной формы с частотой следования 24 кГц, которые поступают на вход буферного каскада.

Буферный каскад 2 (рис.6.2) осуществляет развязку кварцевого возбуждателя с делителем частоты и формирует импульсы с крутым передним фронтом для запуска делителей частоты.

Блок делителей частоты 3 состоит из четырех триггерных делителей частоты с общим коэффициентом деления 16.

С выхода блока делителей частоты прямоугольные

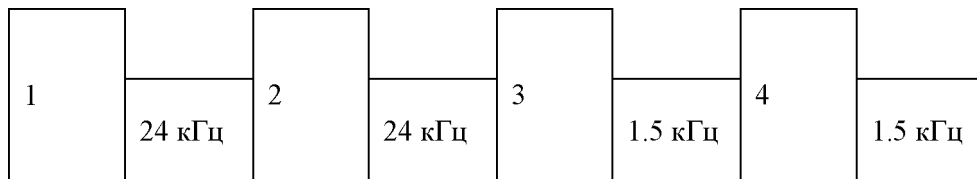


Рис. 6.2. Блок-схема задающего кварцевого генератора.

- 1 - кварцевый возбуждатель,
- 2 - буферный каскад,
- 3 - блок делителей частоты,
- 4 - выходной усилитель.

импульсы с частотой следования 1,5 кГц поступают на вход выходного усилителя 4, где они усиливаются по мощности и поступают на вход фазорасщепителя 3 (рис.6.1.).

Предварительный усилитель 2 (см. рис.6.1) служит для усиления выходного напряжения кварцевого задающего генератора и

исключает реакцию входа фазорасщепителя на выход КЗГ. Работает предварительный усилитель в ключевом режиме.

Фазорасщепитель 3 (рис.6.1) предназначен для получения трех напряжений прямоугольной формы частотой 500 Гц, сдвинутых по фазе на 120 градусов. Стабильность частоты фазорасщепителя обеспечивается синхронизацией его от кварцевого задающего генератора.

Предварительный усилитель 4 (рис.6.1.) предназначен для усиления сигнала фазорасщепителя по мощности и исключения влияния изменения нагрузки прибора на точность угла сдвига фаз и устойчивость синхронизации фазорасщепителя. Он представляет собой делитель на 3.

Усилители мощности 5, 10 предназначены для усиления по мощности однофазного и трехфазного напряжений.

Трехфазный усилитель мощности состоит из трех усилителей на транзисторах, выполненных по двухтактной схеме с трансформаторным выходом. Транзисторы работают в режиме ключа, выходные обмотки трансформаторов соединены по схеме "треугольник". Запуск транзисторов усилителя мощности производится прямоугольными импульсами.

Фильтры выходного однофазного 11 и трехфазного напряжений 6 преобразуют прямоугольные напряжения усилителей мощности в синусоидальные. Они состоят из дросселей и конденсаторов, которые образуют последовательный колебательный контур. Этот контур настраивается в резонанс на основную гармонику.

Регуляторы однофазного 13 и трехфазного напряжений 8 предназначены для стабилизации выходных однофазного и трехфазного напряжений путем воздействия на напряжения питания однофазного и трехфазного усилителей мощности. Они выполнены по мостовой схеме.

При создании такого преобразователя все эти требования разделяются по различным элементам.

Источником колебаний является кварцевый генератор, который вырабатывает колебания произвольной формы, но стабильной частоты 24кГц. Нестабильность составляет $10^{-4} \dots 10^{-6} \%$. Поскольку изготовить кварц на частоту 500Гц невозможно и с целью уменьшения веса, кварцевый генератор генерирует частоту 24кГц. Потом эта частота делится в 16 раз.

С выхода делителя получаем прямоугольное напряжение с частотой 1500Гц.

С помощью расщепителя фаз напряжение делится в 3 раза и сдвигается на 120° , получаем трехфазное напряжение прямоугольной формы.

Три предварительных усилителя доводят это напряжение до нужной величины, необходимой для управления усилителями мощности. Три усилителя мощности обеспечивают необходимую выходную мощность, и после фильтров получаем напряжение синусоидальной формы.

Измеритель напряжения определяет отклонение напряжения от заданной величины и управляет регулятором напряжения. Если измеряемое напряжение выходит за заданное значение, система контроля и сигнализации (СКИС) выключает этот преобразователь и включает резервный. Кроме того, на СКИС попадает сигнал из кварцевого генератора. Вообще, в составе статического преобразователя используется 2 кварцевых генератора. Если один из них отказал, то СКИС включает другой.

Все процессы в данном преобразователе происходят с напряжениями прямоугольной формы, то-есть транзисторы работают в ключевом режиме, имеют два состояния – включено-выключено. Такой режим характеризуется тем, что мощность, рассеиваемая на транзисторах, мала. Это ведет к увеличению КПД, уменьшению радиаторов, снижению веса всего преобразователя. Кроме того, путем фильтрации из прямоугольного напряжения можно получить гармоническое со значительно меньшими искажениями.

6.2. Способы повышения надежности статического преобразователя

Как правило, преобразователь является источником для питания жизненно важных систем и от его надежности зависит существование КА. Повышение надежности статпреобразователя одна из первейших задач при его проектировании.

Существует 3 способа повышения надежности

1. резервирование изделия целиком,
2. резервирование отдельных блоков,
3. резервирование только ненадежных элементов (транзисторов).

На борту ставят, как правило, два преобразователя: основной и резервный. Переключение с одного на другой происходит автоматически с помощью СКИС.

Использование резервных блоков в составе одного прибора позволяет значительно повысить его надежность. Однако, такое резервирование связано с трудностью определения отказавшего блока, отключением неисправного и включением резервного, поскольку сами коммутирующие элементы могут оказаться менее надежными.

В рассмотренном преобразователе резервируется только кварцевый генератор.

Резервирование ненадежных элементов является самым распространенным и рациональным, поскольку масса прибора увеличивается на небольшую величину, а вероятность отказа уменьшается существенно.

7. Системы распределения электроэнергии

Система распределения электроэнергии включает: электрические провода, монтажное и установочное оборудование, распределительные устройства, коммутационную аппаратуру, устройства защиты от помех и статического электричества, приборы контроля за работой источников и потребителей.

По назначению и количеству входящих элементов система распределения электрической энергии является важнейшей составной частью электрооборудования КА и определяет в значительной степени его технические и эксплуатационные показатели. Важность и сложность функций, осуществляемых системой распределения электрической энергии, а также специфичность условий ее эксплуатации предъявляют к этой системе высокие требования, выполнение которых должно гарантировать надежность и безотказность снабжения электроэнергией потребителей КА.

Существует типа 3 систем распределения: централизованное, децентрализованное и комбинированное.

Централизованная система электроснабжения КА характеризуется тем, что все источники подключаются к одному распределительному устройству (рис. 7.1), называемому центральное распределительное устройство (ЦРУ). На рис. 7.1 два источника электрической энергии И1 и И2 через предохранители F1 и F2 с помощью

выключателей В1 и В2 подключены к центральному распределительному устройству. От ЦРУ получают питание все потребители П₁.

Достоинством такой системы является то, что электроснабжение возможно, пока действует хотя бы один источник электроэнергии.

Недостатков у централизованного распределения значительно больше.

1. Низкое качество электроэнергии, определяемое тем, что все время происходит включение и выключение потребителей. Отсюда скачки напряжений.
2. Тяжелая электрическая сеть, поскольку необходимо тянуть провода от всех источников к ЦРУ, потом от ЦРУ ко всем потребителям.
3. При отказе ЦРУ все потребители оказываются обесточенными.

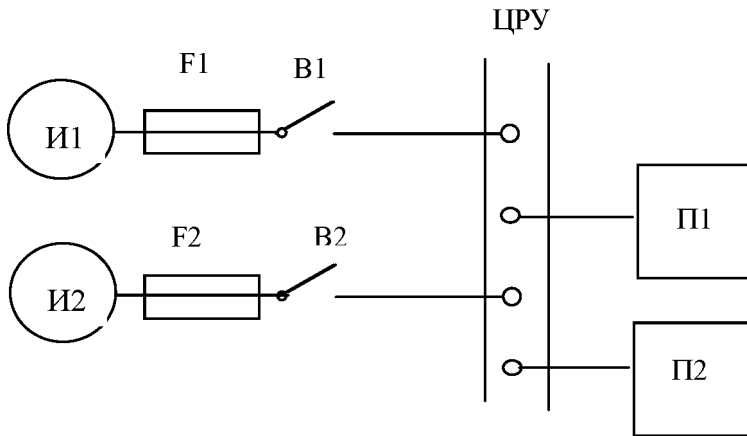


Рис. 7.1. Централизованная система электроснабжения

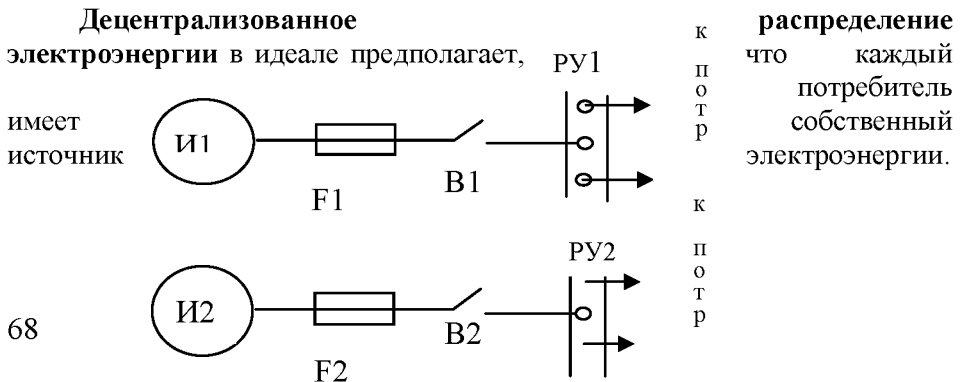


Рис.7.2. Децентрализованная система электроснабжения КА

В реальности в децентрализованной системе распределения один источник обслуживает собственную группу потребителей (рис. 7.2) через собственные распределительные устройства.

Достоинствами такой системы являются несколько лучшее качество электроэнергии (меньше потребителей, меньше скачки напряжения) и уменьшение веса сети (источник и потребители располагаются рядом). Недостаток в этой системе один, но более существенный – при выходе из строя источника все потребители его группы остаются без питания.

Такая система используется в основном при сопутствующих экспериментах, когда эта группа приборов питается от отдельного источника, не связанного с общей сетью КА.

Рассмотренные системы распределения являются предельными. На практике никогда не используются такие системы. Реальные системы, как правило, промежуточные.

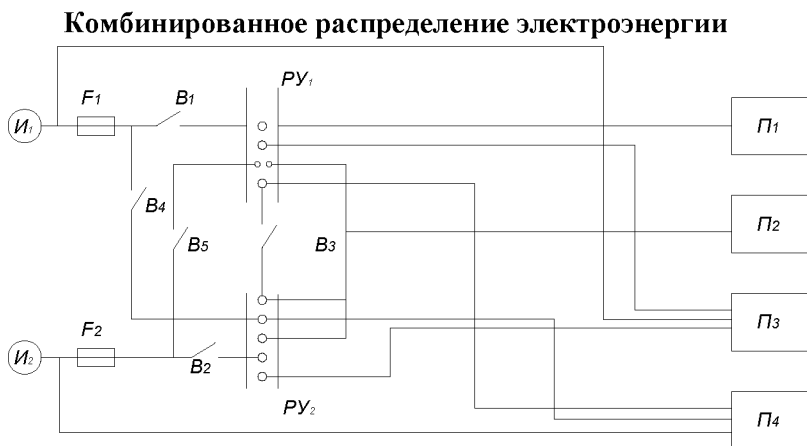


Рис. 7.3. Комбинированная система распределения электроэнергии

Рассмотрим комбинированную систему распределения электроэнергии (рис. 7.3.) на основе двух источников.

Каждый источник электрической энергии имеет в своей цепи защитную аппаратуру, устройство коммутации и распределительное устройство (например, для источника И1 защита F1 и распределительное устройство РУ1). Чаще всего в качестве распределительного устройства используется обыкновенная шина. К каждой шине подключена своя группа потребителей.

При штатном режиме работы система распределения может работать как децентрализованная (включены В1 и В2) и как централизованная (дополнительно включается В3). Последний режим возникает, например, тогда, когда потребителю, включенному на РУ, не хватает электроэнергии от источника И1.

Выключатели В4 и В5 необходимы при нештатных ситуациях. При отказе одного из источников он отключается, а распределительные устройства получают электроэнергию от одного источника. Например, вышел из строя источник И1, В1 и В4 выключаются, а питание РУ1 может получать через В3 или В5.

В случае выхода из строя распределительного устройства это РУ отключается, а оба источника работают на второе устройство. Например, вышло из строя РУ2. Выключаются В2, В3 и В4, включены В1 и В5.

Таким образом, в комбинированной распределительной системе предусмотрено полное резервирование как источников, так и РУ.

Как поступать с потребителями, которые подключены к РУ, вышедшему из строя?

Потребители разбиты на четыре группы (на рис. 7.3. условно не показана аппаратура защиты и коммутации потребителей).

Потребители группы П1 не влияют на продолжение полета и служат для обеспечения, например, комфорта членам экипажа (освещение, отопление и т.д.). Они распределяются между РУ и подключаются к нам с помощью одной линии.

Потребители группы П2 могут подключаться к одному либо другому РУ.

Потребители группы П3 постоянно подключены к обоим РУ, провода от каждого РУ идут до потребителя и в разных кабелях, и, как правило, по разным бортам КА. Кроме того, эти потребители напрямую подключены к какому-нибудь источнику.

Потребители группы П4, помимо указанного для группы П3, имеют свой собственный «сверхаварийный» источник. Это в основном пиротехнические средства. Например, нельзя осуществить спуск спускаемого аппарата, не отделив его от приборно-агрегатного отсека.

Таким образом, система имеет высокую надежность и гибкость работы.

Реально на борту КА таких систем несколько (система постоянного тока первичных источников электроэнергии, система переменного тока, система буферных источников), отличающихся количеством потребителей, степенью их важности для надежности КА и т.д..

8. Электрическая сеть

К электрическим сетям предъявляется ряд специфических требований.

1) Обеспечение надежного и бесперебойного снабжения электроэнергией потребителей в любых условиях эксплуатации. Эта задача решается совместным построением конфигурации сети, системы распределения и защиты.

2) Обеспечение высокого качества электроэнергии, получаемой потребителями. Это вызвано тем, что многие потребители критичны к величине напряжения (особенно снижения) или частоты.

3) Обеспечение защиты оборудования от помех, возникающих при работе электрооборудования и статического электричества. Распространение помех возможно двумя путями. Непосредственно от источника помехи распространяются по проводам сети. Для защиты от этого рода помех в сети ставят фильтры, ограничивающие распространение помех по сети.

Вторым путем возникновения помех являются магнитные и электрические поля, существующие внутри КА. С электрической точки зрения провода сети обладают емкостью и индуктивностью, поэтому поля наводят в них ЭДС помех (в некоторых случаях величины импульсов помех могут достигать больших значений).

Особое внимание приходится обращать на статическое атмосферное электричество. Учитывая большую скорость движения КА, и несмотря на малое количество зарядов, потенциал на частях корпуса КА может достигать больших значений. Поэтому части конструкции КА

должны быть соединены электрически не только за счет контакта, а с **помощью специальных шин металлизации.**

Атмосфера Земли имеет свой потенциал, который изменяется с высотой. Это нужно учитывать при маневрах КА.

Вид электрической сети определяется типом летательного аппарата, его назначением, особенностями требований к системе электроснабжения. Электрическую сеть классифицируют по назначению, основным электрическим параметрам системы электроснабжения, роду тока, напряжению, частоте, конфигурации сети и т.п..

По назначению сети подразделяются на питательные (магистральные) и распределительные (вторичные распределительные). Питательной называется часть электрической сети от источника энергии до распределительного устройства, а также участки между распределительными устройствами. Распределительная сеть служит для передачи и распределения электрической энергии от РУ к потребителям. Участок распределительной сети, питающий группу потребителей от РУ через общий аппарат защиты, называется фидером.

По основным электрическим параметрам сети подразделяются на сети постоянного тока (27 В), трехфазные сети (40 В, 500 или 1000 Гц) и однофазные сети переменного напряжения (40 В, 500 Гц). Сети постоянного тока применяются, как правило, в первичных системах.

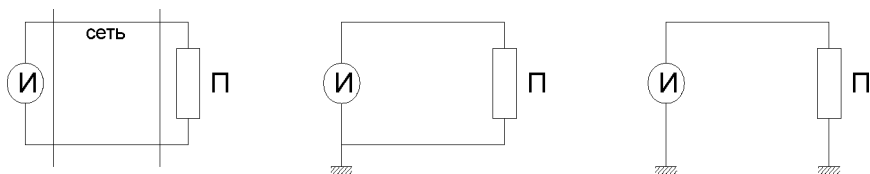
По системе передачи электроэнергии сети подразделяются на двухпроводные незаземленные, двухпроводные заземленные и однопроводные сети постоянного и однофазного переменного тока и трех- и четырехпроводные для трехфазных цепей.

Двухпроводная незаземленная (рис. 8.1. поз.1) сеть имеет важное достоинство – при замыкании одного из проводов на корпус сеть продолжает функционировать, но сеть тяжелая (два провода – прямой «плюс» и обратный «минус»). Обычно в сети в качестве буфера используется аккумулятор, имеющий малое внутреннее сопротивление, поэтому уровень помех в сети (между проводами) невелик. Основные помехи возникают между сетью и корпусом, их уровень достаточно высок.

Коммутационная и защитная аппаратура включается в один плюсовой провод.

Двухпроводная заземленная сеть соединяется с корпусом КА в одной точке. Она также тяжела, но уровень помех в ней значительно ниже. Существенный недостаток этой сети состоит в том, что при замыкании на корпус плюсового провода сеть обесточивает потребитель.

В однопроводной сети (рис.8.1, поз. 3) в качестве обратного провода используется корпус КА. В этом случае сеть почти в два раза легче, качество электроэнергии выше, поскольку электрическое сопротивление корпуса значительно меньше сетевого провода.



Р

ис.8.1. Типы сетей

- 1 – двухпроводная незаземленная сеть;
- 2 – двухпроводная заземленная сеть;
- 3 – однопроводная сеть.

Однопроводная сеть используется во многих транспортных системах и носит название «самолетной». Для ракетно-космической техники (РКТ) характерны процессы расстыковки. Во время медленного раздвижения блоков КА между ними при однопроводной сети будет гореть дуга, поэтому однопроводная сеть до последнего времени не использовалась в РКТ. Многоцветная космическая система «Шаттл» использует однопроводную сеть, получая значительную экономию в массе проводов.

Трехпроводная сеть с нейтралью, соединенной с корпусом КА, позволяет включать потребители как на фазное, так и линейное напряжение.

В зависимости от системы распределения сети классифицируются на централизованные, смешанные, децентрализованные и отдельные.

9. Коммутационная аппаратура

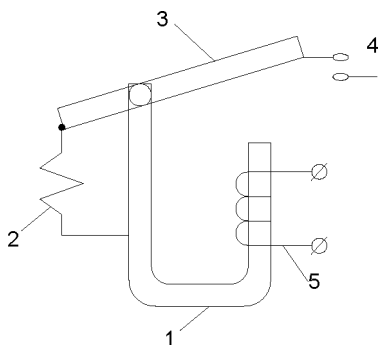
Коммутационная аппаратура служит для управления источниками и потребителями электрической энергии. Она подразделяется на аппаратуру прямого (ручного) и дистанционного действия. Аппаратура прямого действия – кнопки, переключатели, выключатели, концевые и путевые

выключатели – предназначена для управления в цепях небольшой мощности на обитаемых КА.

Выключатели и переключатели бывают трех типов: перекидные, нажимные и поворотные. Они служат для замыкания или размыкания цепей на длительное время. По числу коммутируемых цепей выключатели и переключатели могут быть одноцепевыми, двух- и трехцепевыми.

Концевые выключатели и переключатели принадлежат к аппаратам нажимного действия, только нажатие осуществляется не экипажем, а специальным устройством электрофицированного механизма. Концевые выключатели служат для фиксированного останова механизма при достижении их выходными устройствами крайних положений, блокировки, сигнализации, программного управления механизмами. Концевые выключатели часто используются для сигнализации стыковки КА, отделения каких-либо блоков, закрытия люков и дверей.

Дистанционная аппаратура включает в себя электромагнитные (контактные, реле) и электронные (бесконтактные) устройства.



Основу реле составляет разомкнутая магнитная система 1 (рис.9.1.), подвижный якорек 3, который под действием магнитного поля, создаваемого током катушки 5.

Рис.9.1. Устройство реле

- 1 – магнитный провод
- 2 – возвратная пружина
- 3 – подвижный якорек
- 4 – контактная группа
- 5 – обмотка

поворачивается, замыкая контакты 4. При выключении питания обмотки 5 пружина 2 возвращает якорек в исходное положение.

В космической технике, в связи с особенностями среды существования КА, кроме обычных реле используются специальные. Обычные реле используются в герметичных кабинах, поскольку в условиях вакуума дугу, возникающую при размыкании контактов, погасить невозможно.

○

Для работы в вакууме используются специальные реле, помещаемые в стеклянную колбу, или реле, использующие **герконы**.

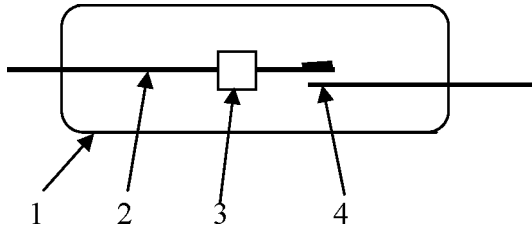


Рис. 9.2. Устройство геркона

1-стеклянный корпус, 2 – подвижный контакт, 3 – магнитик, 4 – неподвижный контакт.

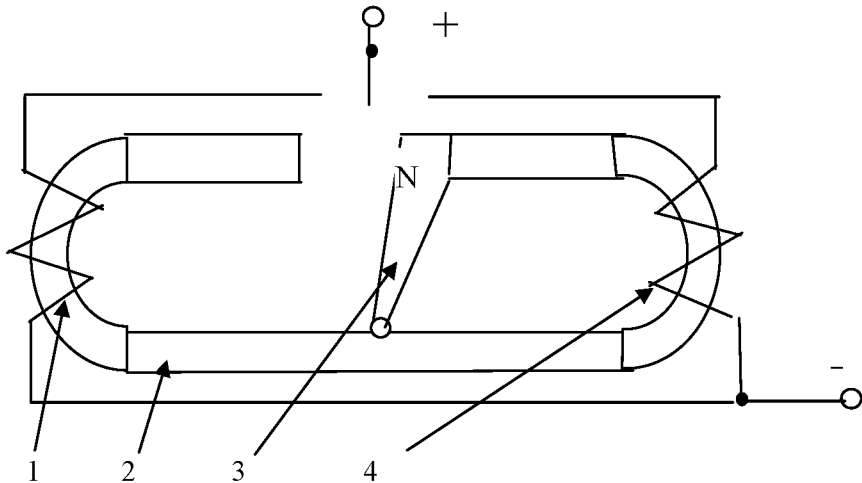


Рис. 9.3. Устройство поляризованного реле

Геркон представляет собой стеклянную трубку (рис.9.2,1), наполненную нейтральным газом, в которой расположена контактная группа 2 и 4. На одном из контактов прикреплен постоянный магнитик 3. Если вокруг геркона создать магнитное поле, то контакт 2 замыкается с контактом 3.

Включенное состояние рассмотренных реле происходит только тогда, когда течет ток по обмотке. Это нерациональный расход электроэнергии и лишнее выделение тепла.

Реле, которое сохраняет одно из двух положений без протекания тока по обмоткам, называется поляризованным.

Поляризованное реле не имеет возвратной пружины, а подвижный якорек является постоянным магнитом (рис.9.3, поз.3).

При подаче питания на левую обмотку 1, магнитный якорек перебрасывается влево, магнитный поток, создаваемый якорьком в магнитной системе 2 удерживает якорек в новом положении после снятия питания с обмотки 1. Сила удержания якорька в одном из положений такова, что для перебрасывания его в другое положение необходима перегрузка свыше 150g.

Пример электронного коммутационного устройства рассмотрен в разделе «Защитная аппаратура».

10. Защитная аппаратура

Повышение надежности системы энергоснабжения КА достигается применением защитной аппаратуры, обеспечивающей отключение (изоляцию) неисправного элемента. Под селективностью защиты понимают ее способность из всех элементов системы выделить неисправный и изолировать его.

Основным классификационным параметром защиты является электрический параметр: ток, напряжение и мощность.

Причиной повышения тока может быть только потребитель, поэтому нужно защитить от неисправного потребителя сеть и источник электроэнергии. Защита источника - новая задача по сравнению с земными источниками. В полет, для его выполнения берется определенное количества энергии. Если она будет расходоваться нерационально (питая неисправный потребитель), ее может не хватить на совершение задач полета.

Защита по напряжению должна быть двойной. Превышение напряжения ведет к тому, что потребители будут перегреваться, поскольку выделяемая мощность пропорциональна квадрату напряжения. Полупроводниковые элементы пробиваются повышенным напряжением. Срок службы большинства электрических устройств обратно пропорционален квадрату напряжения.

Пониженное напряжение приводит к отказу электронной аппаратуры, электрические двигатели перегреваются.

Несмотря на все сказанное защита по напряжению практически не используется на борту КА. Это объясняется тем, что используемые на борту первичные источники электроэнергии в принципе не могут выдать напряжение больше определенного, поэтому ставить защиту от превышения напряжения не имеет смысла.

В настоящее время появилась тенденция увеличения срока службы солнечных батарей за счет избыточности числа элементов, за счет избыточности напряжения в начале эксплуатации с тем, чтобы к концу эксплуатации выдаваемое солнечной батареей напряжение должно быть номинальным. В течение всего времени эксплуатации напряжение поддерживается номинальным с помощью соответствующего преобразователя, в случае отказа которого напряжение может превысить допустимые значения. В этом случае необходима защита от превышения напряжения.

Защита от пониженного напряжения не осуществляется, дистанционная коммутационная аппаратура настраивается на напряжение включения 19 В. Если в сети напряжение ниже этой величины, потребители не включаются.

Защита по мощности практически не применяется, но иногда используют защиту от перегрева.

По количеству срабатываний защита бывает: одноразовая и многоразовая. Одноразовая защита (предохранители) после срабатывания становится негодной для дальнейшего использования. У такой защиты нельзя определить ток срабатывания. Он определяется косвенно. Из партии берут определенный процент, определяют токи срабатывания, если они укладываются в нормы, партия признается годной. В связи с невозможностью определить истинный ток срабатывания каждого прибора, допуск на прибор делают большим +/- 15%.

Одноразовая токовая защита – предохранители.

Предохранитель типа стеклянный СП состоит из стеклянной трубки 2, штампованных металлических наконечников 1 и калиброванной проволоки 3 (рис.10.1).

Ток срабатывания предохранителей $I_{\text{крит}}$ составляет полтора номинального тока, указанного на предохранителе. Если на

предохранителе указан ток 2 А, то предохранитель сработает при токе 3А(+15%...-15%).

$$I_{\text{крит.}} = 1,5 * I_{\text{ном.}}$$

Это объясняется тем, что потребителю «разрешено» потреблять ток на 20% больше номинального. Минимальное значение тока срабатывания

$I_{\text{ср. мин.}} = I_{\text{крит}} * 0,85 = I_{\text{ном.}} * 0,85 * 1,5 = 1,275 I_{\text{ном.}}$, то есть между максимально допустимым током потребителя и минимальным током срабатывания предохранителя зазор в $0,075 I_{\text{ном.}}$ на непредвиденные

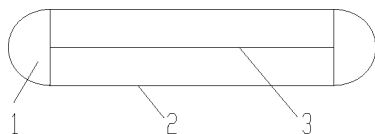


Рис. 10.1. Стекланный предохранитель
1 – металлический штампованный колпачок,
2 – стеклянный корпус,
3 – проволока, которая перегорает.

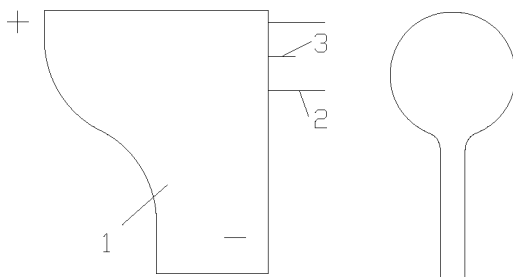


Рис. 10.2. Плавкая вставка

обстоятельства (повышение температуры окружающей среды и т. д.).

Для повышения контакта предохранителя с арматурой его делают в виде «ножа» (рис. 10.2.)

Для больших токов характерны потребители, имеющие большую индуктивную составляющую тока, что затрудняет гашение дуги. Предохранители для таких токов имеют точеные колпачки (для увеличения площади контакта), заполнение (рис.10.3, поз. 4) из материала, выделяющего большой объем газа при нагревании. За счет газа при перегорании проволоки 3 повышается давление, дуга быстрее гаснет.

Сложности возникают при защите потребителей, имеющих большой пусковой ток (рис. 10.4.). Если предохранитель выбрать на пусковой ток, то он не сработает, когда ток превысит номинальный. Если защиту выбирать по номинальному току потребителя, то предохранитель сработает при пуске и такой потребитель не удастся включить.



Рис. 10.3. Предохранитель для больших токов

- 1 – колпачки точеные,
- 2 – корпус сделан из электрокартона,
- 3 – проволока,
- 4 – материал, который при нагревании выделяет большое количество газа.

Для защиты этих потребителей созданы предохранители, состоящие из двух частей: безинерционная и с тепловой инерцией. Таки предохранители называются инерционно-плавкими.

Пружина 5 (рис. 10.4) не обладает тепловой инерцией и срабатывает при токе, превышающем пусковой. Разрыв электрической цепи происходит очень быстро, поэтому дуга быстро гаснет. Спай из двух пластин не успевает прогреться при пуске (за счет большой массы) до расплавления припоя. Только если ток длительное время превышает номинальный, происходит расплавление. За счет пружины 5 верхняя пластина 6 (рис.10.4) начинает скользить по нижней и в момент разрыва приобретает достаточно большую скорость. Дуга быстро гаснет.

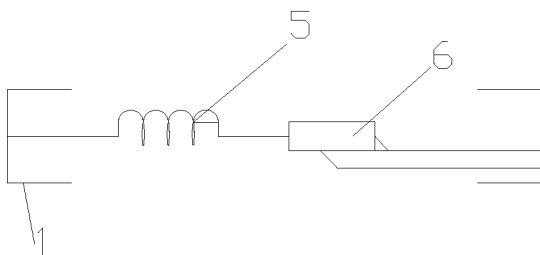


Рис. 10.4. Инерционно-плавкий предохранитель

- 1 – колпачок,
- 5 – пружина,
- 6 - элемент с тепловой инерцией.

Многоразовая токовая защита строится на использовании механических конструкций с использованием биметаллических элементов (автоматы защиты) или на основе электронных схем с тиристорами в качестве силовых элементов.

Электронная защита во многих случаях является и коммутирующей. Поскольку сопротивление выключенных тиристоров чрезвычайно велико (ток утечки составляет от десятков микроампер).

На рис. 10.5. представлена схема, поясняющая принцип работы такой защиты.

В исходном состоянии (рис.10.5.) тиристоры T_v и T_o выключены, ток через Потр равен нулю, конденсатор разряжен.

При подаче управляющего напряжения на T_o тиристор включается и его сопротивление становится равным нулю. (рис. 10.6.). Ток, равный току Потр, течет через T_o и через R_i . По цепи $R_1 - C - R_i$ конденсатор заряжается до напряжения сети.

Если ток Потр превышает допустимое значение, с усилителя УС поступает на управляющий электрод T_v напряжение, достаточное для включения тиристора. Сопротивление T_v

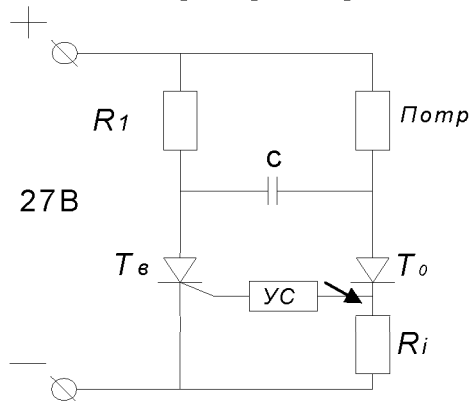


Рис. 10.5. Схема многоразовой тиристорной защиты

Потр – потребитель,

T_0 – тиристор основной,
 R_i – измеритель тока,
 C – конденсатор для выключения T_0 ,
 T_v – вспомогательный тиристор,
 $УС$ – усилитель,
 R_1 – резистор для зарядки конденсатора

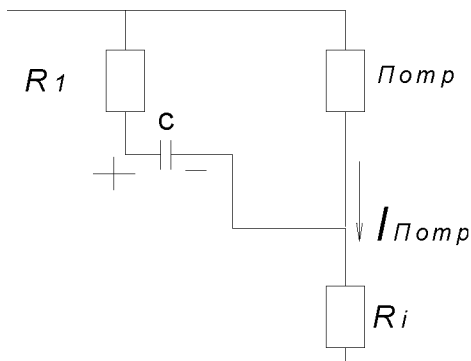


Рис.10.6.

становится равным нулю и конденсатор C разряжается через T_v , R_i и T_0 (сопротивление T_v равно 0, рис.10.7.).

Какое-то время ток конденсатора I_c превышает ток потребителя, тиристор выключается, P_{otr} обесточен. Поскольку R_1 выбрано достаточно большим, протекающий через него ток T_v достаточно мал и T_v выключается. Схема пришла в исходное положение.

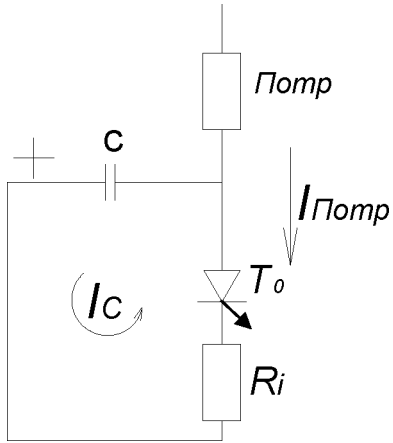


Рис.10.7.

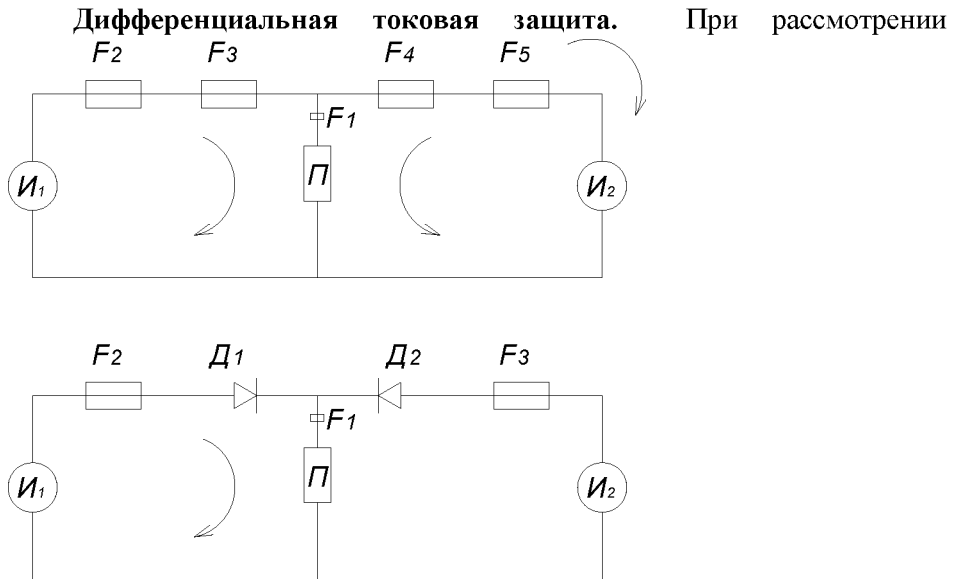


Рис. 10.8. Дифференциальная токовая защита. систем распределения электроэнергии были указаны случаи, когда потребитель получал энергию от двух или нескольких источников.

На рис. 10.8. (верхний) показано включение такого потребителя. Источники И1 и И2 с помощью своих проводов соединены с потребителем П. Последовательно с П включен предохранитель F1. Для исключения возможности замыканий проводов от источников на концах проводов стоят предохранители F2-F3 и F4-F5.

Схема должна работать следующим образом. Например, при замыкании провода на линии от источника И1, должны выгореть предохранители F2 и F3. Потребитель должен питаться от источника И2.

На самом деле, ток короткого замыкания течет от И1 и И2. Поскольку допустимый разброс токов срабатывания предохранителей высок (15%), может сработать предохранитель F4 или F5, отключив потребитель от исправной линии. И только потом сработает предохранитель F2. Потребитель отключается от обоих источников. Защита не обладает селективностью.

Для исключения подобного явления можно применить схему с диодами (нижний рисунок).

В рассмотренном нами случае ток короткого замыкания потечет только от источника И1. Предохранитель F2 сработает и отключит аварийный участок цепи. Потребитель получает энергию от источника И1.

Содержание

Система электроснабжения бортового комплекса космических аппаратов.....	3
1. Структура системы электроснабжения.....	4
2. Классификация первичных источников.....	6

3. Химические источники тока.....	8
3.1. Общие сведения о химических источниках тока (ХИТ).....	8
3.2. Серебряно-цинковые аккумуляторы.....	9
3.2.1. Основные технико-эксплуатационные характеристики.....	10
3.2.2. Устройство серебряно-цинковых аккумуляторов.....	11
3.3.3. Основные рабочие характеристики серебряно-цинкового аккумулятора.....	14
3.2.4. Характеристики некоторых промышленных серебряно-цинковых аккумуляторов.....	18
3.3. Никель-цинковые аккумуляторы.....	21
3.4. Литий-ионные герметичные призматические и цилиндрические аккумуляторы и батареи на их основе.....	25
3.5. Топливные элементы.....	29
3.5.1. Принцип действия.....	29
3.5.2. Классификация топливных элементов.....	32
3.5.3. ВАХ топливного элемента.....	33
3.5.4. Устройство жидкостного топливного элемента..	35
3.5.5. Топливный элемент с ионно-обменной мембраной (ИОМ).....	37
3.5.6. Энергетическая система на базе ТЭ.....	38
4. Термоэлектрические генераторы.....	42
5. Солнечные батареи.....	47
5.1. Фотоэлектрические преобразователи.....	48
5.2. Солнечные батареи.....	54
5.3. Космические фотоэлектрические преобразователи и солнечные батареи.....	55
5.4. Солнечные элементы производства завода "Солнечный Ветер".....	58
6. Вторичные источники электроэнергии.....	61
6.1. Структурная схема преобразователя.....	63
6.2. Способы повышения надежности статического преобразователя.....	67
7. Системы распределения электроэнергии.....	68
8. Электрическая сеть.....	72
9. Коммутационная аппаратура.....	74
10. Защитная аппаратура.....	77
Список литературы.....	87

Список литературы

1. Энергетические установки космических аппаратов./ С.А. Подшивалов, Э.И. Иванов и др.; под общей ред. Д.Д. Невяровского В.С. Викторова. –М.: Энергоиздат, 1981.- 223с.

2. Тузов, В.П. Электротехнические устройства летательных аппаратов; Учеб. пособие для авиац. неэлектрич спец. вузов/ – М.: Высш. шк, 1987. – 152 с.
3. Грилихес, В.А. Солнечная энергия и космические полеты/ В. А. Грилихес, П. П. Орлов, Л. Б. Попов. – М.: Наука, 1984. - 216 с.
4. Колтун, В. М. Солнечные элементы/ В.М. Колтун. – М.: Наука, 1987. - 192 с.
5. Кравец, В. Г. Основы управления космическими полетами/ В. Г. Кравец, В. Е. Любинский. – М.: Машиностроение, 1983.- 224 с.
5. Космические энергосистемы/ В. А. Ванке, Л. В. Лесков, А. В. Лукьянов. – М.: Машиностроение, 1990. – 144 с.
6. Корлисс, У. Источники энергии на радиоактивных изотопах/ У. Корлисс, Д. Харви, – М.: Мир, 1967.- 414 с.
7. Петровичев, М.А Системы оборудования летательных аппаратов. Лабораторный практикум/ М.А.Петровичев, Е. И.Давыдов. - Самара: Изво Сам. гос. аэрокосм. ун-та, 2004. - 80 с.
8. Термоэлектрические генераторы, <http://www.rif.vrn.ru/new/index.html>.
9. Никель-металлгидридные аккумуляторы. 2006, e-battery.ru
10. Лаврус, В.С. Источники энергии/ В.С. Лаврус// НnТ, 1997
11. Твердооксидные топливные элементы; сборник научно-технических статей. – Снежинск; изд - во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003. - 376 с.
12. Солнечные батареи ОАО "Сатурн" в космических программах./ <http://www.saturn.kuban.ru/2.html>
13. Аккумуляторная компания "РИГЕЛЬ" 2004./ <http://www.rigel.ru/rigel/akk/index.html>
14. Солнечные элементы производства завода «Солнечный ветер»./ info2@solarhome.ru info2@solarhome.ru

Учебное издание

*Петровичев Михаил Александрович
Гуртов Александр Сергеевич*

**СИСТЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ**

Учебное пособие

Технический редактор А. Г. Прохоров
Редакторская обработка Т. Ю. Деппова
Компьютерная верстка Т. Ю. Деппова
Доверстка Т. Ю. Деппова

Подписано в печать 22.10.07. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 5,5.

Тираж 120 экз. Заказ . ИП-15/2007

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.