

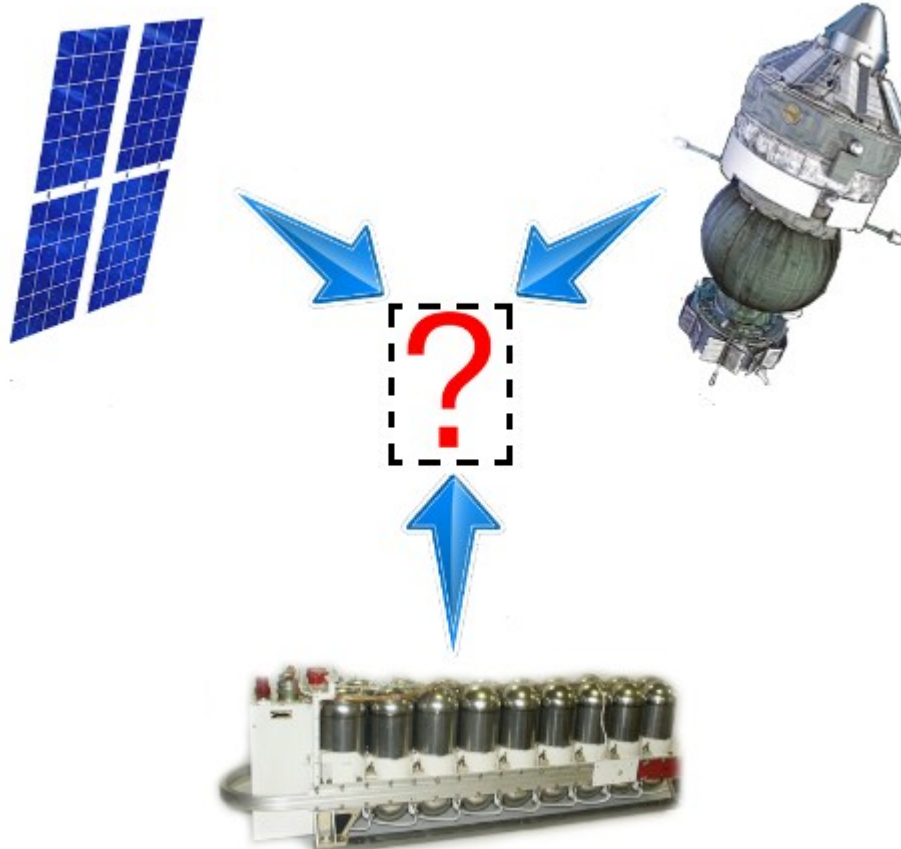
Министерство образования и науки Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники

**А. С. Аникин**

# **ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Учебное пособие



Томск, 2014

## Содержание

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....   | <b>4</b>  |
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....  | <b>5</b>  |
| <b>1. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ РЭА: ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ</b> .....                  | <b>6</b>  |
| 1.1. Источники напряжения и тока .....                                 | 6         |
| 1.2. Источники первичного электропитания.....                          | 14        |
| 1.3. Источники вторичного электропитания.....                          | 17        |
| 1.4. Параметры сети питания электроэнергией .....                      | 18        |
| 1.5. Параметры источников вторичного электропитания.....               | 18        |
| 1.6. Линейные и импульсные источники вторичного электропитания.....    | 20        |
| 1.7. Сравнение импульсных и линейных ИП.....                           | 21        |
| 1.8. Элементная база источников питания .....                          | 22        |
| <b>2. ЛИНЕЙНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ</b> .....                             | <b>24</b> |
| 2.1. Гаситель переходных процессов в линейных источниках питания ..... | 24        |
| 2.2. Фильтры линейных источников питания .....                         | 24        |
| 2.3. Стабилизаторы .....   | 25        |
| 2.4. Силовой трансформатор .....                                       | 25        |
| 2.5. Блок выпрямления .....  | 27        |
| 2.6. Предохранители.....   | 27        |
| 2.6.1. Нагрузка.....   | 28        |
| 2.6.2. Неуправляемые выпрямители.....                                  | 28        |
| 2.6.2.1. Основные схемы неуправляемых выпрямителей.....                | 28        |
| 2.6.2.2. Фильтры неуправляемых выпрямителей .....                      | 33        |
| 2.6.2.3. Силовые трансформаторы неуправляемых выпрямителей.....        | 36        |
| 2.7. Управляемые выпрямители .....                                     | 37        |
| 2.8. Стабилизаторы напряжения .....                                    | 42        |
| 2.8.1. Основные параметры стабилизаторов .....                         | 43        |
| 2.8.2. Требования, предъявляемые к стабилизаторам .....                | 44        |
| 2.8.3. Параметрические стабилизаторы .....                             | 44        |
| 2.8.4. Компенсационные стабилизаторы .....                             | 48        |
| 2.8.5. Параллельные и последовательные стабилизаторы .....             | 49        |
| 2.8.6. Реализация компенсационных стабилизаторов на транзисторах.....  | 51        |
| 2.8.7. Стабилизаторы напряжения на интегральных микросхемах .....      | 57        |
| 2.8.8. Интегральные стабилизаторы: принципы построения. ....           | 60        |
| <b>3. ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ РЭА</b> .....                       | <b>73</b> |
| 3.1. Общие сведения .....  | 73        |
| 3.2. Управление регулирующим элементом в импульсных ИП. ....           | 73        |
| 3.3. Обратноходовые и прямоходовые импульсные ИП .....                 | 76        |
| 3.4. Импульсные источники питания с несколькими выходами .....         | 78        |
| 3.5. Импульсные стабилизаторы напряжения постоянного тока.....         | 79        |
| <b>4. ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА</b> .....                              | <b>86</b> |
| 4.1. Гальванические элементы и батареи .....                           | 86        |
| 4.1.1. Угольно-цинковые элементы.....                                  | 87        |
| 4.1.2. Хлористо-цинковый элемент Лекланше.....                         | 89        |
| 4.1.3. Щелочные марганцево-цинковые элементы .....                     | 91        |
| 4.1.4. Ртутно-цинковые элементы и батареи .....                        | 93        |
| 4.1.5. Серебряно-цинковые элементы .....                               | 95        |
| 4.1.6. Литиевые элементы и батареи .....                               | 96        |
| 4.2. Резервные химические источники тока.....                          | 99        |
| 4.3. Аммиачные резервные батареи .....                                 | 101       |
| 4.4. Аккумуляторы.....   | 101       |
| 4.5. Кислотные аккумуляторы.....                                       | 101       |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 4.6.      | Щелочные аккумуляторы .....  | 103        |
| 4.7.      | Герметичные щелочные аккумуляторы .....                                    | 103        |
| 4.8.      | Серебряно-цинковые аккумуляторы .....                                      | 107        |
| 4.9.      | Эксплуатация химических источников тока.....                               | 108        |
| 4.10.     | Эксплуатация аккумуляторов .....   | 109        |
| <b>5.</b> | <b>СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ .....</b>   | <b>112</b> |
| 5.1.      | Устройство солнечного элемента и принцип его работы.....                   | 113        |
| 5.2.      | Конструкция солнечных элементов.....                                       | 116        |
| 5.3.      | Солнечные элементы с двухсторонней чувствительностью .....                 | 117        |
| 5.4.      | Аналитическое описание вольт-амперных характеристик солнечных батарей..... | 119        |
| 5.5.      | Модули солнечных элементов .....   | 121        |
| 5.6.      | Конструкция солнечной батареи.....   | 123        |
| <b>6.</b> | <b>ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ .....</b>  | <b>126</b> |
| 6.1.      | Принцип действия и классификация топливных элементов.....                  | 126        |
| 6.2.      | Характеристики топливных элементов .....                                   | 127        |
| <b>7.</b> | <b>ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ .....</b>                            | <b>131</b> |
| 7.1.      | Принцип действия термоэлектрических преобразователей.....                  | 131        |
| 7.2.      | Материалы для термоэлектрических преобразователей .....                    | 132        |
| <b>8.</b> | <b>ТРОСОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....</b>                    | <b>134</b> |
| 8.1.      | Космические тросовые системы .....   | 134        |
| 8.2.      | Тросовые системы с токопроводящим тросом .....                             | 136        |
| 8.3.      | Ядерные энергетические установки .....                                     | 137        |
| <b>9.</b> | <b>СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....</b>                   | <b>140</b> |
| 9.1.      | Общие положения .....  | 140        |
| 9.2.      | Поколения систем электропитания космических аппаратов .....                | 144        |
| 9.2.1.    | Системы электропитания первого поколения.....                              | 144        |
| 9.2.2.    | Системы электропитания второго поколения.....                              | 148        |
| 9.2.3.    | Системы электропитания третьего поколения.....                             | 153        |
| 9.3.      | Общие схемы построения систем электропитания космических аппаратов.....    | 169        |
| 9.4.      | Принципы построения систем электропитания космических аппаратов .....      | 171        |
|           | <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>   | <b>176</b> |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из главных достижений человечества является освоение околоземного пространства, сопровождаемое бурным развитием электротехники и радиоэлектронных устройств, для решения задачи навигации и беспроводной передачи информации. Важным узлом любой радиоэлектронной аппаратуры является источник электропитания, который поддерживает требуемые значения тока и напряжения питания входящих в неё электронных устройств. Надёжность источника электропитания влияет на качество функционирования радиоэлектронной аппаратуры в целом.

Источник электропитания разрабатывается отдельно для каждого сложного радиоэлектронного устройства, что связано с особенностями его устройства, а также среды, в которой должна работать аппаратура. Так, применение негерметичных аппаратных платформ в новейших спутниках «ГЛОНАСС» вынуждает учитывать температурное и радиационное влияние на аппаратуру, в частности, на систему электропитания. С другой стороны, усложнение радиоэлектронной аппаратуры, устанавливаемой на современные спутники, требует более энергоёмких и высоковольтных систем электропитания, разработка которых сопряжена с конструктивными ограничениями при обеспечении допустимой массы и габаритных размеров космического аппарата.

В данном учебном пособии показаны общие структурные схемы систем электропитания космических аппаратов и краткие сведения входящих в них, элементах, а также о применяемых в них источниках электроэнергии.

Содержание глав 1-4 составлено по материалам книг Попова В.П. «Основы теории цепей», Ефимова И.П. «Источники питания РЭА», а также книги «Датчики: справочное пособие» под ред. В.М. Шарапова.

Материалы глав 5-7 заимствованы из книги М.В. Лукьяненко «Источники энергии систем электроснабжения космических аппаратов».

Глава 8 составлена по материалам книги Гущина В.Н. «Основы устройства космических аппаратов», а в главе 9 упомянуты материалы книги А.Н. Кириллина «Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и монографии «Системы электропитания космических аппаратов» под редакцией М.Ф. Решетнёва.

Учебное пособие предназначено для студентов радиотехнических специальностей с целью формирования у них общих сведений о построении и функционировании систем электропитания космических аппаратов.

\* На обложке: солнечная батарея спутника «ГЛОНАСС-М» ([http://vestnik-glonass.ru/news/tech/rossiya\\_vyvedet\\_na\\_orbitu\\_15\\_sputnikov\\_glonass\\_m\\_k\\_2017\\_godu/](http://vestnik-glonass.ru/news/tech/rossiya_vyvedet_na_orbitu_15_sputnikov_glonass_m_k_2017_godu/)), космический аппарат «ФОТОН-М» (<http://ria56.ru/posts/65467667546754.htm>), и аккумуляторная батарея спутника «ЯМАЛ-200» (<http://www.federalspace.ru/2011/>).

## ВВЕДЕНИЕ

Бортовое радиоэлектронное оборудование космического аппарата предназначено для решения многих задач: определения местоположения и параметров движения для наземных, водных и воздушных объектов, дистанционного зондирования поверхности Земли, оценка параметров атмосферы, передача информации для абонентской связи. Ясно, что космический аппарат лишён возможности подключения к наземной электрической сети и для обеспечения электротехнических устройств электрическим током на борту спутникового аппарата необходима система электропитания.

*Система электропитания космического аппарата* – совокупность первичного и вторичного источников, а также накопителей и преобразователей электроэнергии, зарядных устройств и автоматики, взаимосвязанных между собой для обеспечения электрической энергией бортовых электро- и радиотехнических устройств космического аппарата. Система электропитания космического аппарата влияет на его внешний вид, конструкцию, массу, срок активного существования.

В современных космических аппаратах системы электропитания содержат следующие основные элементы: *источник энергии* (в основном, солнечная батарея), *накопитель энергии* (как правило, аккумуляторные батареи), *согласующие устройства* (регуляторы и стабилизаторы напряжения и тока), а также *устройство автоматического управления* указанными блоками для поддержания необходимого качества электроснабжения бортовой аппаратуры.

Принципиальными элементами системы электропитания являются:

- аккумуляторные и солнечные батареи;
- датчики электрической ёмкости батареи;
- комплекс автоматики, обеспечивающий совместную работу солнечной батареи и аккумуляторной батареи на бортовую нагрузку;
- устройства заряда аккумуляторных батарей от солнечной батареи;
- бортовой комплекс управления с бортовой электронной вычислительной машиной, осуществляющий коррекцию режима работы космического аппарата в зависимости от глубины разряда аккумуляторных батарей.

Комплекс автоматики и стабилизации (КАС) напряжения, в свою очередь, состоит из стабилизатора напряжения и автоматики (СНА), зарядных устройств (ЗУ) и разрядных устройств (РУ), образующих зарядно-разрядные устройства (ЗРУ). Количество ЗРУ равно количеству аккумуляторных батарей.

Основными задачами системы электропитания являются:

- стабилизация тока и входного напряжения;
- обеспечение заряда аккумуляторной батареи;
- стабилизация выходного напряжения;
- обеспечение защиты аккумулятора от перезаряда и переразряда.

Таким образом, система электропитания космических аппаратов является сложным устройством, которое состоит из подсистем и обеспечивает стабилизированным током и напряжением различные бортовые электро- и радиотехнические устройства космического аппарата.

Для построения систем электропитания космического аппарата необходимо знать режимы работы, а также энергетические параметры входящих в него устройств.

# 1. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ РЭА: ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Рассмотрим сначала источники питания (ИП) радиоэлектронной аппаратуры. Для работы большинства электронных устройств необходимо наличие одного или нескольких источников питания постоянного тока [1].

Все ИП можно разделить на две группы: источники первичного электропитания и источники вторичного электропитания. Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) может иметь в своём составе: ИП первой группы; ИП второй группы; ИП первой и второй групп одновременно [1]. Как первичные, так и вторичные источники питания могут являться источниками тока или источниками напряжения. Рассмотрим понятия источников напряжения и тока подробнее.

## 1.1. Источники напряжения и тока

Рассмотрим сначала идеализированные источники тока и напряжения первичного электропитания.

*Источник первичного электропитания*<sup>1</sup> – это устройство, которое отдаёт запасённую энергию для обеспечения работы подключённых к ним устройств или участков электрической цепи [2]. С точки зрения теории цепей источники питания – активные элементы.

*Идеализированный источник напряжения* (источник напряжения, источник э.д.с.) представляет собой идеализированный активный элемент, напряжение на зажимах которого не зависит от протекающего через него тока или сопротивления подключённого устройства или электрической цепи (рисунок 1.1). Напряжение на зажимах идеализированного источника напряжения равно электродвижущей силе и может быть произвольной функцией времени (например, быть постоянной во времени) [2].

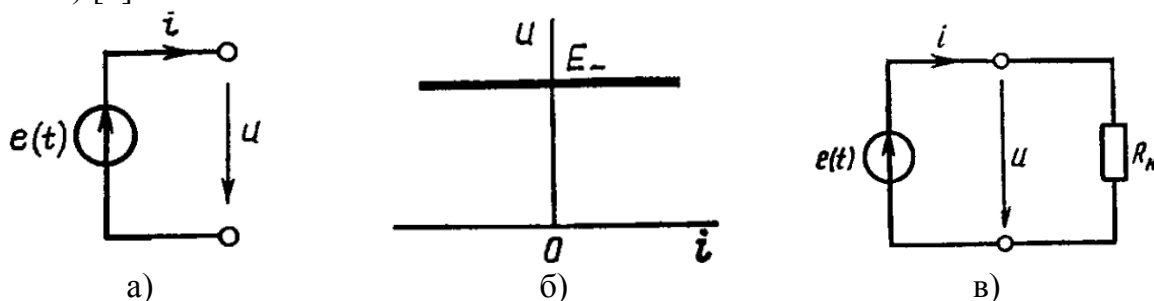


Рисунок 1.1. Условное графическое изображение источника напряжения (а), внешняя характеристика источника постоянного напряжения (б), идеальный источник напряжения с нагрузкой (в) [2]

В условном графическом изображении идеального источника напряжения стрелка внутри кружка указывает направление э.д.с. и для источников постоянного напряжения она направлена от зажима с меньшим потенциалом к зажиму с более высоким потенциалом. Напряжение на внешних зажимах направлено от зажима с более высоким потенциалом к зажиму с меньшим потенциалом [2].

*Внешней характеристикой* источника электрической энергии называется зависимость напряжения на его зажимах от тока источника тока. В частности, для источника постоянного напряжения внешняя характеристика является прямой линией, параллельной оси токов [2].

<sup>1</sup> Более подробную информацию об источниках тока и напряжения можно найти в [2]

Если подключить к источнику э.д.с. сопротивление нагрузки  $R_n$ , то согласно закону Ома, ток, протекающий через нагрузку  $R_n$  и выделяемая в нагрузке мгновенная мощность окажутся равными [2]:

$$i = u/R_n = e(t)/R_n,$$

и

$$p = \frac{1}{R_n} u^2 = \left( \frac{1}{R_n} \right) e^2(t).$$

С уменьшением сопротивления нагрузки  $R_n$  ток  $i$  и выделяемая в ней мгновенная мощность неограниченно возрастают. Из-за этого идеальный источник напряжения иногда называют источником бесконечной мощности (случай  $R_n = 0$  не рассматривается, так как возникает противоречие).

*Идеальный источник тока* – это идеализированный активный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах или сопротивления подключённого устройства или электрической цепи (рисунок 1.2). Ток источника тока может быть произвольной функцией времени, в частности, не зависеть от времени.

Двойная стрелка на условном графическом изображении источника тока показывает направление тока внутри источника и совпадает с направлением перемещения положительных зарядов внутри источника, т.е. с направлением от зажима с меньшим потенциалом к зажиму с большим потенциалом [2].

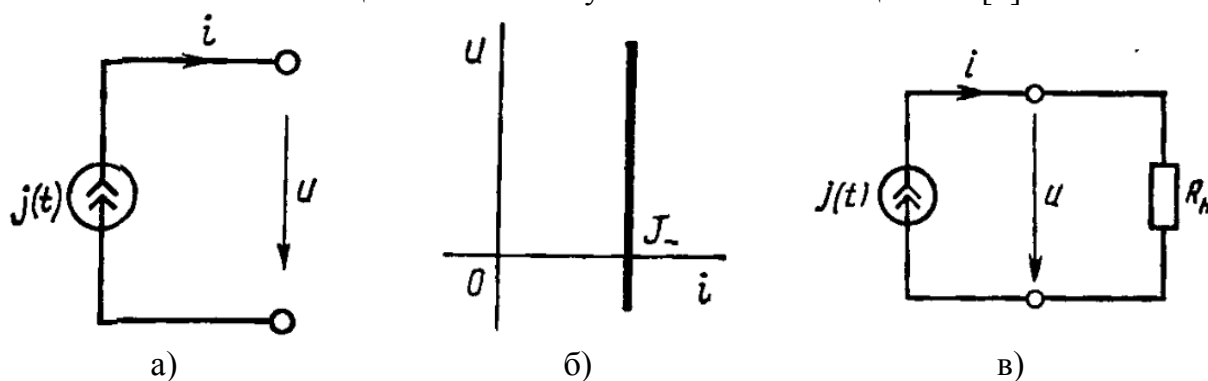


Рисунок 1.2. Условное графическое изображение источника тока (а), внешняя характеристика источника постоянного тока (б), идеальный источник тока с нагрузкой (в) [2]

Если подключить к внешним зажимам источника тока сопротивление нагрузки  $R_n$ , то напряжение на сопротивлении нагрузки и выделяемая в нагрузке мгновенная мощность будут равны [2]:

$$u = i \cdot R_n = j(t) \cdot R_n,$$

и

$$p = i^2 \cdot R_n = j^2(t) \cdot R_n.$$

С увеличением  $R_n$  напряжение на нагрузке и выделяемая в ней мгновенная мощность неограниченно увеличиваются, поэтому источник тока является источником бесконечной мощности (случай  $R_n \rightarrow \infty$  не рассматривается, так как возникает противоречие).

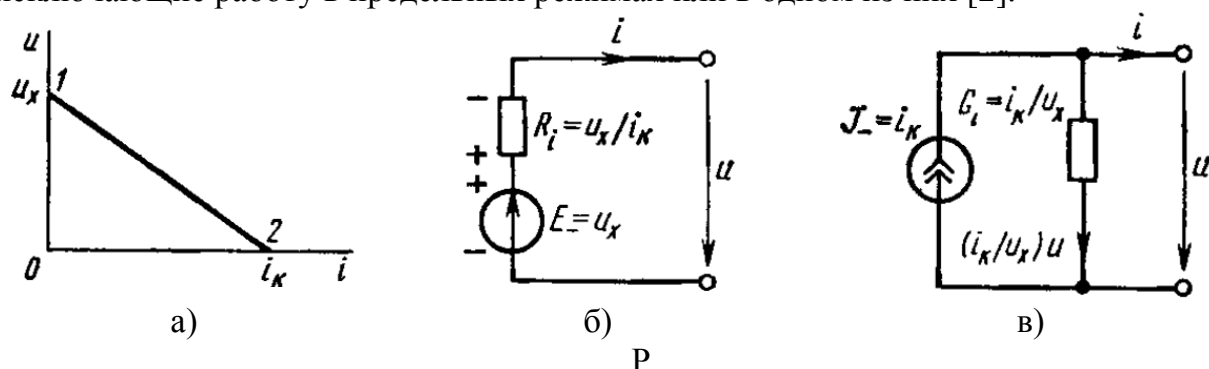
Идеализированные источники тока и напряжения рассматриваются как упрощённые модели реальных источников энергии. При определённых условиях, в достаточно узком диапазоне токов и напряжений, внешние характеристики ряда

реальных источников энергии могут приближаться к характеристикам идеализированных активных элементов [2].

Внешняя характеристика гальванического элемента в области малых токов имеет вид, близкий к внешней характеристике источника напряжения, а внешняя характеристика выходного каскада на транзисторе в определённом диапазоне напряжений приближается к внешней характеристике источника тока [2].

В то же время свойства реальных источников энергии значительно отличаются от свойств идеализированных активных элементов. Реальные источники энергии обладают конечной мощностью. В реальных источниках напряжения ток короткого замыкания имеет конечное значение, а в реальных источниках тока конечное значение имеет напряжение холостого хода [2].

Внешняя характеристика реальных источников энергии, как правило, не параллельна оси токов или оси напряжений (рисунок 1.3), а пересекает эти оси в двух характерных точках, соответствующих режимам холостого хода и короткого замыкания. Иногда в источниках энергии применяют специальные виды защиты, исключающие работу в предельных режимах или в одном из них [2].



исунок 1.3. Внешняя характеристика линеаризованного источника энергии (а), последовательная схема замещения источника энергии (б), параллельная схема замещения источника энергии (в) [2]

Реальные источники энергии, имеющие линейную внешнюю характеристику, называют линеаризованными источниками энергии. Линеаризованный источник энергии может быть представлен цепью, состоящей из идеализированного источника напряжения  $E$  и внутреннего сопротивления  $R_i$  или идеализированного источника тока  $J$  и внутренней проводимостью  $G_i$ . Напряжение на выходе реального источника энергии как функция тока может быть записана как [2]:

$$u = u_x - i \cdot \left( \frac{u_x}{i_k} \right) = u_x - i \cdot R_i,$$

где  $u_x$  – напряжение реального источника энергии в режиме холостого хода (сопротивление нагрузки стремится к бесконечности);

$i_k$  – ток реального источника энергии в режиме короткого замыкания (сопротивление нагрузки стремится к нулю).

Из этого выражения видно, что напряжение линеаризованного источника энергии состоит из двух составляющих. Первая  $u_x$  имеет размерность напряжения и не зависит от тока, протекающего через источник. Её можно интерпретировать как напряжение некоторого идеального источника напряжения с э.д.с равной  $u_x$ . Вторая составляющая  $R_i = (u_x / i_k)$  прямо пропорциональна току. Её можно рассматривать как падение напряжения на некотором сопротивлении, через которое протекает ток



источника. Предыдущей схеме можно поставить в соответствие последовательную схему замещения [2].

Величину  $R_i$  называют внутренним сопротивлением реального источника энергии. С уменьшением  $R_i$  внешняя характеристика линеаризованного источника приближается к внешней характеристике идеального источника напряжения. *Идеальный источник напряжения можно рассматривать как источник энергии, внутреннее сопротивление которого равно нулю* [2].

Выразим ток реального источника энергии как функцию напряжения [2]:

$$i = i_k - u \cdot \left( \frac{i_x}{u_x} \right) = i_k - i \cdot G_i.$$

Первая составляющая тока линеаризованного реального источника тока представляет собой ток некоторого идеального источника тока  $J = i_k$ . Вторая составляющая  $G_i = (i_x/u_x)$  прямо пропорциональна напряжению на зажимах реального источника тока. Её можно интерпретировать как ток, протекающий внутри источника через некоторую внутреннюю проводимость, к которой приложено напряжение  $u$ . Предыдущему выражению можно поставить в соответствие схему параллельную замещения [2].

С уменьшением внутренней проводимости реального источника тока  $G_i$  внешняя характеристика линеаризованного источника энергии приближается к внешней характеристике идеального источника тока. Идеальный источник тока можно рассматривать как источник энергии с бесконечно малой внутренней проводимостью либо с бесконечно большим внутренним сопротивлением [2].

От последовательной к параллельной схеме замещения реального источника энергии можно переходить при конечном значении внутреннего сопротивления.

Для реальных источников, в которых напряжение и ток являются производными функциями времени, представленные выше выкладки аналогичны.

Внутреннее сопротивление реального источника энергии является лишь параметром абстрактной модели двухполюсника, то есть физического «резистора» как электронного компонента внутри двухполюсников обычно нет.

Формально, в реальных гальванических элементах внутреннее сопротивление представляет собой суммарное сопротивление плюсового стержня (углерода, стали), самого корпуса (цинка и никеля), а также самого электролита (соли) и поглотителя водорода (в солевых элементах).

В иных источниках внутреннее сопротивление обусловлено сопротивлением обмоток и контактов.

Контактные разности потенциалов имеют иную природу возникновения напряжения и являются неомическими, то есть здесь затраты энергии идут на работу выхода носителей заряда.

*Реальным источником тока* можно назвать источник энергии, внутреннее сопротивление которого значительно превышает сопротивление нагрузки.

*Реальным источником напряжения* является источник энергии, внутреннее сопротивление которого значительно меньше сопротивления нагрузки.

Примеры реальных источников тока и напряжения приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Примеры реальных источников напряжения и тока

| Источник энергии с малым внутренним сопротивлением   | Источник энергии с большим внутренним сопротивлением   |
|--|--|
| <p>1. Автомобильная свинцово-кислотная стартерная аккумуляторная батарея имеет внутреннее сопротивление около 0,01 Ом. Благодаря столь низкому внутреннему сопротивлению ток, отдаваемый батареей при запуске двигателя, достигает 250 ампер и более (для легковых автомобилей).</p> <p>2. Гальванический элемент (батарейка) имеет сопротивление от 0,2 Ом до 0,8 Ом.</p> <p>3. Бытовая сеть электроснабжения переменного тока в жилых помещениях имеет внутреннее сопротивление от 0,05 Ом до 1 Ом и более (зависит от качества электропроводки). Сопротивление 1 Ом и более соответствует плохой проводке: при подключении мощных нагрузок (например, утюга) напряжение падает, при этом заметно уменьшается яркость лампосвещения, подключенных к той же ветви сети. Повышается пожароопасность, поскольку на сопротивлении проводов выделяется значительная мощность. И наоборот, в хорошей сети с низким сопротивлением напряжение падает от допустимых нагрузок лишь незначительно. Ток при коротком замыкании в хорошей бытовой электросети может достигать 3 тысяч ампер, что требует применения автоматических предохранителей, выдерживающих подобные токовые удары.</p> <p>4. Используя отрицательную обратную связь в электронных схемах, можно искусственно создавать источники, обладающие (при определенных условиях) очень низким внутренним сопротивлением. Такими свойствами обладают современные</p> | <p>1. Источником тока является катушка индуктивности, по которой шёл ток от внешнего источника, в течение некоторого времени (<math>t \ll L/R</math>) после отключения источника. Этим объясняется искрение контактов при быстром отключении индуктивной нагрузки: стремление к сохранению тока при резком возрастании сопротивления (появление воздушного зазора) ведёт к пробое зазора.</p> <p>2. Вторичная обмотка трансформатора тока, первичная обмотка которого последовательно включена в мощную линию переменного тока, может рассматриваться как почти идеальный источник тока, только не постоянного, а переменного.</p> <p>3. Конденсаторные микрофоны, пьезоэлектрические и пироэлектрические датчики, а также все остальные «конденсаторо-подобные» устройства имеют реактивное внутреннее сопротивление, модуль которого может достигать десятков и сотен мегаом. Поэтому такие источники требуют обязательного использования буферного усилителя для достижения согласования по напряжению. Конденсаторные микрофоны, как правило, уже содержат встроенный буферный усилитель, собранный на полевом транзисторе.</p> <p>4. Для измерения электрических потенциалов внутри живых клеток применяются электроды, представляющие собой стеклянный капилляр, заполненный проводящей жидкостью. Толщина такого проводника может быть порядка сотен ангстрем. Вследствие чрезвычайно малой толщины проводника такой «двухполюсник» (клетка с присоединёнными электродами) имеет внутреннее сопротивление порядка 100 мегаом. Высокое сопротивление и малое</p> |

Продолжение таблицы 1.1

| Источник энергии с малым внутренним сопротивлением   | Источник энергии с большим внутренним сопротивлением   |
|--|--|
| <p>электронные стабилизаторы напряжения. Например, интегральный стабилизатор напряжения 7805 (выходное напряжение 5 В) имеет типичное выходное сопротивление менее 0,0009 Ом. Однако это вовсе не означает, что такой стабилизатор может отдать в нагрузку ток до 5500 А или мощность до 13 кВт при правильном согласовании.</p> | <p>напряжение делают измерение напряжений внутри клетки непростой задачей.</p> <p>5. Большим внутренним сопротивлением обладают фотодиоды, которые генерируют электрический ток, пропорциональный падающему свету . Так, у высокочастотных [3] фотодиодов на основе халькогенидов свинца при температуре 77 К и нулевом смещении при площадке величиной 0,14 мм<sup>2</sup> имеют сопротивление <math>5 \cdot 10^9</math> Ом.</p> <p>6. Внутреннее сопротивление солнечных батарей более чем на порядок отличаются от внутреннего сопротивления аккумуляторов.</p> |

На рисунке 1.4 приведены типовые значения внутреннего сопротивления батареек бытового применения [4].

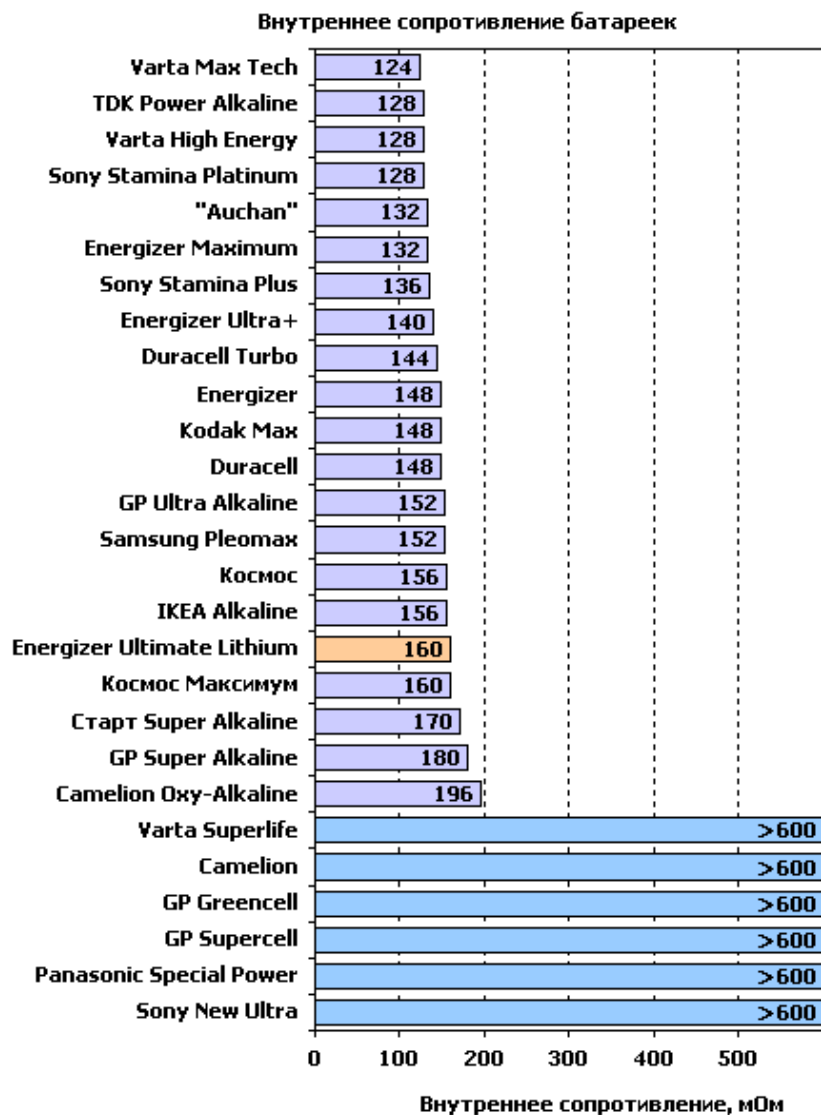


Рисунок 1.4. Внутреннее сопротивление батареек [4]

Среди вторичных источников питания также встречаются реальные источники тока и напряжения. Так, стабилизаторы чаще всего являются вторичным источником напряжения, а вторичные источники тока представлены различными вариантами построения токового зеркала.

Рассмотрим простейший вариант токового зеркала, состоящего из двух транзисторов. Схема «токовое зеркало» получило название в связи с тем, что ток нагрузки является равным по величине управляющему (опорному) току. Другое название схемы – «генератор стабильного тока».

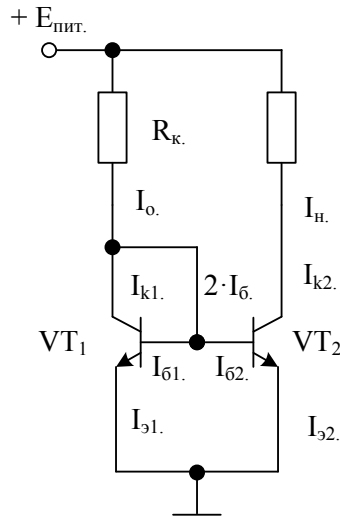


Рисунок 1.5. Простейшая схема токового зеркала

Приведём основные соотношения, связывающие токи и напряжения в ключевых точках схемы. Простейший вариант токового зеркала, приведённого на рисунке 1.5 позволяет установить неизменным ток нагрузки  $I_n$  от сопротивления нагрузки и равным управляющему (опорному) току  $I_o$ .

Пусть токи коллекторов  $I_{k1}$  и  $I_{k2}$  транзисторов  $VT_1$  и  $VT_2$  будут равными между собой. Тогда одинаковыми должны быть и токи базы  $I_{б1}$  и  $I_{б2}$ . Тогда опорный ток  $I_o$  можно представить как:

$$I_o = I_{k1} + 2 \cdot (I_{б1} + I_{б2}) = I_{k1} + 2 \cdot I_{б}.$$

Поскольку токи базы обоих транзисторов одинаковы и равными  $I_{б}$ , то одинаковыми должны быть и напряжения переходов база-эмиттер  $U_{бэ}$  транзисторов  $VT_1$  и  $VT_2$ :

$$I_{б} = I_{б1} = I_{б2} \text{ и } U_{бэ} = U_{бэ1} = U_{бэ2}.$$

Токи в цепи эмиттеров первого  $VT_1$  и второго  $VT_2$  транзисторов могут быть представлены как:

$$I_{э1} = I_{k1} + I_{б1} \text{ и } I_{э2} = I_{k2} + I_{б2} = I_n + I_{б2}.$$

Выражение составлено в том предположении, что ток коллектора второго транзистора равен току нагрузки, т.е.  $I_{k2} = I_n$ .

Ток в цепи коллектора каждого транзистора связан с током базы через коэффициент передачи тока базы  $\beta$ :

$$I_{k1} = I_{k2} = I_n = \beta \cdot I_{б}.$$

Согласно представленным выше выражениям, опорный (управляющий) ток можно расписать как:

$$I_o = I_n + 2 \cdot I_{б} = \beta \cdot I_{б} + 2 \cdot I_{б} = I_{б} (\beta + 2).$$

Тогда ток базы может быть выражен через опорный ток как:

$$I_{б} = \frac{I_o}{(\beta + 2)}.$$

Отсюда, ток нагрузки связан с опорным током через коэффициент передачи тока базы  $\beta$  как:

$$I_n = \frac{\beta (E_{пит.} - U_{бэ})}{R_1 (\beta + 2)} \Big|_{\beta \gg 1} \approx I_o.$$

Для выбора сопротивления в цепи коллектора рассмотрим следующее выражение:

$$E_{num} = U_{Rk} + U_{\sigma\sigma} = U_{Rk} + U_{\sigma\sigma}.$$

Тогда напряжение на сопротивлении в цепи коллектора равно:

$$U_{Rk} = E_{num} - U_{\sigma\sigma}.$$

Отсюда, сопротивление в цепи коллектора связано с напряжением питания, напряжением на переходе «база-эмиттер», опорным током и током базы следующим соотношением:

$$R_k = \frac{E_{num} - U_{\sigma\sigma}}{I_o} = \frac{E_{num} - U_{\sigma\sigma}}{I_o (\beta + 2)}.$$

Таким образом, зная параметры транзистора, напряжение питания, значение опорного тока и напряжение «база-эмиттер» можно определить сопротивление в цепи коллектора первого транзистора. Напряжение «база-эмиттер» выбирается по входной вольт-амперной характеристике транзистора в соответствии с заданным током базы.

Выходное сопротивление представленного выше токового зеркала равно:

$$R_{\text{вых}} = \frac{1 + \beta r_{\Sigma}}{R_1 + r_b + r_{\Sigma}}.$$

При малых токах выходное сопротивление токового зеркала составляет десятки-сотни кОм. Недостаток представленной выше схемы токового зеркала: относительно низкое выходное сопротивление.

## 1.2. Источники первичного электропитания

К данной группе ИП относятся [1]:

- химические источники тока (гальванические элементы, батареи и аккумуляторы);
- термобатареи;
- термоэлектронные преобразователи;
- фотоэлектрические преобразователи (солнечные батареи);
- топливные элементы;
- биохимические источники тока;
- атомные элементы;
- электромашинные генераторы.

*Химические источники тока (ХИТ)* широко используются для питания маломощных устройств и аппаратуры, требующей автономного питания. Батареи и аккумуляторы являются также вспомогательными и (или) резервными источниками энергии в устройствах, питающихся от сети переменного тока. Выходное напряжение таких источников практически не содержит переменной составляющей (пульсаций), но в значительной степени зависит от величины тока, отдаваемого в нагрузку, и степени разряда. Поэтому в устройствах, критичных к напряжению питания, химические источники тока используются совместно со стабилизаторами напряжения [1]. Термобатареи состоят из последовательно соединенных термопар.

*Термобатареи* используются в качестве ИП малой мощности, например для питания радиоприемников [1].

В простейшем виде термоэлектрический генератор представляет собой батарею термопар, у которых одни концы спаев нагреваются, а другие имеют достаточно низкую температуру, благодаря чему создается термо-ЭДС и во

внешней цепи протекает ток. Каждая термопара может состоять из двух разнородных полупроводников или из проводника и полупроводника [1].

Большая теплопроводность металлических термопар не позволяет создавать значительную разность температур спаев, а следовательно, не дает возможность получить большую термо-ЭДС. Лучшие результаты дает использование в термогенераторах полупроводниковых термопар, или комбинированных, состоящих из проводника и полупроводника [1].

В термопаре, состоящей из полупроводников с n- и p- проводимостями, при нагревании спая количество электронов в полупроводнике n-типа и число дырок в полупроводнике p-типа увеличивается. Электроны и дырки вследствие диффузии в полупроводниках движутся от горячего слоя термопары к холодному. Перемещение дырок приводит к тому, что горячий конец полупроводника p-типа заряжается отрицательно, а холодный конец - положительно. В полупроводнике n-типа электроны, переходя от горячего конца к холодному, так же как, и в металле, заряжают горячий конец положительно, а холодный конец - отрицательно. Термо-ЭДС полупроводниковой термопары значительно больше термо-ЭДС металлической пары [1].

*Термоэлектронные преобразователи* представляют собой вакуумные или газовые приборы с твердыми нагреваемыми катодами. Преобразование тепловой энергии в электрическую осуществляется за счет использования термоэлектронной эмиссии нагретых тел. Эмитированные катодом электроны движутся к аноду под действием разности температур. Для обеспечения этой разности температур необходимо охлаждение анода. В зависимости от температуры нагрева катода термоэлектронные преобразователи делятся на низкотемпературные (1200 - 1600°C) и среднетемпературные (1900 - 2000°C). У среднетемпературных преобразователей КПД достигает 20%, что более чем в 2 раза превышает КПД термобатарей [1].

*Фотоэлектрические преобразователи* осуществляют преобразование тепловой и световой энергии солнечных лучей в электрическую. Солнечные батареи представляют собой ряд фотоэлементов, соединенных между собой определенным образом. Фотоэлектрические преобразователи используются в качестве источника электрической энергии для питания маломощной радиоаппаратуры, а также для питания радиотехнической и телеметрической аппаратуры на спутниках Земли и на автоматических межпланетных станциях. Солнечные батареи просты, имеют очень большой срок службы и работают в большом диапазоне изменения температур [1].

*Топливные элементы* осуществляют непосредственное преобразование энергии химических реакций в электрическую энергию. Действие таких элементов основано на электрическом окислении вещества (топлива), которое подобно реакции горения топлива. Однако в отличие от горения в этих элементах окисление топлива и восстановление кислорода происходит на разных электродах. Поэтому энергия выделяется в нагрузку без промежуточного преобразования в энергию иного вида, что обеспечивает высокий КПД преобразователя. В топливных элементах химическая реакция протекает при взаимодействии активных веществ, которые в твердом, жидком или газообразном состоянии непрерывно поступают к электродам [1].

*Биохимические источники* тока можно рассматривать как разновидность топливных элементов, так как в них протекают подобные окислительно-восстановительные процессы. Отличие биохимических элементов от топливных

состоит в том, что активные вещества (или одно из них) создаются с помощью бактерий или ферментов из различных углеводов и углеродов [1].

*Атомные элементы* применяются для питания маломощных устройств. Конструкция таких ИП различна в зависимости от принципа их действия. В элементах, использующих  $\beta$ -излучение, на внутреннем электроде размещается радиоактивный изотоп стронция 90. Вторым электродом является металлическая оболочка. Между электродами находится твердый диэлектрик или вакуум. Под действием  $\beta$ -лучей на электродах создаются заряды. Напряжение в таких элементах может достигать нескольких кило-13 вольт, а внутреннее сопротивление очень велико (порядка  $10^{13}$  Ом). Разрядный ток не превышает одного миллиампера. Достоинством таких элементов является очень большой срок службы [1].

В элементах, использующих контактную разность потенциалов, применяются электроды в виде пластинок из различных материалов. Одна из пластин покрыта двуокисью свинца, другая изготовлена из алюминия. Между электродами находится смесь инертного газа и радиоактивного трития. Под действием излучения происходит образование ионных пар. Напряжение между электродами определяется контактной разностью потенциалов. Под действием этого напряжения положительно и отрицательно заряженные ионы перемещаются к электродам [1].

В элементах с облучаемыми полупроводниками радиоактивное вещество наносится на поверхность полупроводника (кремния). Излучаемые электроны, имеющие большую скорость, выбивают из атомов полупроводника большое количество электронов. В результате односторонней проводимости между полупроводником и коллектором, приваренным к нему, возникает ЭДС величиной нескольких десятых долей вольта. Внутреннее сопротивление таких элементов 100 - 1000 Ом, КПД может достигать нескольких процентов. Недостатком является малый срок службы вследствие разрушения полупроводника под действием радиации [1].

*Электромашинные генераторы* преобразуют механическую энергию в электрическую. Они делятся на генераторы постоянного и переменного тока. Машины переменного тока могут быть как однофазными, так и многофазными. Наиболее широкое применение нашли трехфазные синхронные и асинхронные генераторы, действие которых основано на использовании вращающегося магнитного поля. В синхронных машинах процесс преобразования энергии происходит при синхронной частоте, то есть когда частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля. В асинхронных машинах процесс преобразования энергии происходит при асинхронной частоте, то есть когда частота вращения ротора отличается от частоты вращения магнитного поля [1].



### 1.3. Источники вторичного электропитания

Источники вторичного электропитания представляют собой функциональные узлы РЭА или законченные устройства, использующие энергию, получаемую от системы электроснабжения или источника первичного электропитания и предназначенные для вторичного электропитания радиоаппаратуры [1].

*Классификация источников вторичного электропитания.* Источники вторичного электропитания можно классифицировать по следующим параметрам:

1. По типу питающей цепи [1]:
  - 1.1. ИП, использующие электрическую энергию, получаемую от однофазной сети переменного тока;
  - 1.2. ИП, использующие электрическую энергию, получаемую от трехфазной сети переменного тока;
  - 1.3. ИП, использующие электрическую энергию автономного источника постоянного тока.
2. По напряжению на нагрузке:
  - 2.1. ИП низкого (до 100 В) напряжения;
  - 2.2. ИП среднего (от 100 до 1000 В) напряжения;
  - 2.3. ИП высокого (свыше 1000 В) напряжения.
3. По мощности нагрузки:
  - 3.1. ИП малой мощности (до 100 Вт);
  - 3.2. ИП средней мощности (от 100 до 1000 Вт);
  - 3.3. ИП большой мощности (свыше 1000 Вт).
4. По роду тока нагрузки:
  - 4.1. ИП с выходом на переменном токе;
  - 4.2. ИП с выходом на постоянном токе;
  - 4.3. ИП с выходом на переменном и постоянном токе.
5. По числу выходов:
  - 5.1. одноканальные ИП, имеющие один выход постоянного или переменного тока;
  - 5.2. многоканальные ИП, имеющие два или более выходных напряжений.
6. По стабильности напряжения на нагрузке:
  - 6.1. стабилизированные ИП;
  - 6.2. нестабилизированные ИП.

Стабилизированные источники питания имеют в своем составе, по крайней мере, один стабилизатор напряжения (тока) и могут быть разделены [1]:

- a) по характеру стабилизации напряжения:
  - ИП с непрерывным регулированием;
  - ИП с импульсным регулированием.
- b) по характеру обратной связи:
  - параметрические; компенсационные;
  - комбинированные;
- c) по точности стабилизации выходного напряжения:
  - ИП с низкой стабильностью выходного напряжения (суммарная нестабильность выходного напряжения более 2 - 5%);
  - ИП со средней стабильностью выходного напряжения (суммарная нестабильность не более 0,5 - 2%);
  - ИП с высокой нестабильностью выходного напряжения (суммарная нестабильность до 0,1 - 0,5%);

- Прецизионные ИП (суммарная нестабильность менее 0,1%).

Примечание: к вторичным источникам питания (вторичным элементам) принято относить также аккумуляторы, хотя деление ХИТ на первичные и вторичные условно (аккумуляторы могут использоваться и для однократного разряда).

#### 1.4. Параметры сети питания электроэнергией

Основные электрические параметры сети электропитания следующие [1]:

1. Номинальное значение питающего напряжения  $U_{П.НОМ}$ .
2. Относительная нестабильность питающего напряжения, характеризующая возможные пределы изменения его значения относительно номинального: верхний предел

$$\delta U_{ПВ} = \frac{U_{П.МАКС} - U_{П.НОМ}}{U_{П.НОМ}} \cdot 100\%$$

и нижний предел

$$\delta U_{ПН} = \frac{U_{П.НОМ} - U_{П.МИН}}{U_{П.НОМ}} \cdot 100\%$$

где  $U_{П.МАКС}$  и  $U_{П.МИН}$  - максимальное и минимальное значение напряжения питающей сети.

3. Внутреннее сопротивление первичного источника питания электроэнергией и питающей сети [1].
4. Уровень пульсаций питающего напряжения на выходе источника вторичного электропитания (для сети постоянного тока), который характеризует амплитуду (или эффективное значение) переменной составляющей напряжения, приложенного к ИП. Уровень пульсаций может также определяться отношением значения амплитуды (или эффективного значения) переменной составляющей питающего напряжения к его номинальному значению [1].
5. Частота, возможные искажения формы кривой питающего напряжения и возможная асимметрия по фазам питающей сети [1].

#### 1.5. Параметры источников вторичного электропитания

1. Номинальные выходные напряжения и токи [1].
2. Нестабильность выходных напряжений в процессе эксплуатации [1].
3. Максимальная, минимальная и номинальная мощность по каждой из выходных цепей ИП. Для источников питания с выходом на переменном токе задаются максимальное, минимальное и номинальное значения полной мощности (в вольт-амперах)  $S = U/Z$  (где  $U$  - действующее значение напряжения на нагрузке,  $Z$  - модуль полного сопротивления нагрузки) и соответствующие значения коэффициентов мощности нагрузки  $\cos(\varphi) = R/Z$ , где  $R$  - активное сопротивление нагрузки [1].
4. Номинальное значение тока, потребляемого ИП от сети электропитания или первичного источника питания электроэнергией. Для ИП, работающего в режиме изменяющейся нагрузки, задаются номинальное, максимальное и минимальное значения мощности, потребляемой от первичного ИП [1].
5. Для ИП, питающихся от сети (или источника) переменного тока, коэффициент мощности  $\cos(\varphi) = P/S$ , где  $P$  - активная составляющая полной

мощности, потребляемой ИП от первичной сети. Для нагрузок постоянного тока  $\cos(\varphi) = 1$ , так как  $P = S$  [1].

6. Коэффициент полезного действия в номинальном режиме [1]:

$$\eta = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n P_{ni.ном}}{P_{п.ном}}$$

где  $n$  - число выходов (выходных цепей) ИП.

$P_{ni.ном}$  - номинальная мощность, передаваемая в нагрузку по  $i$ -му выходу,

$P_{п.ном}$  - номинальная потребляемая мощность.

7. Внутреннее сопротивление ИП, равное численному значению отношения изменения выходного напряжения  $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$  к вызвавшему его изменению тока нагрузки (выходного тока)  $\Delta I_{\text{ВЫХ}}$  (рисунок 1.6).

8. Уровень пульсаций выходного напряжения  $U_{\text{П}}$  и/или коэффициент пульсаций  $K_{\text{П}}$  (рисунок 1.7) [1]:

$$K_{\text{П}} = U_{\text{П}}/U_0,$$

где

$U_{\text{П}}$ ,  $U_0$  - переменная и постоянная составляющие выходного напряжения.

Иногда определяют  $K_{\text{П}}$  как отношение удвоенного значения  $U_{\text{П}}$  к  $U_0$ .

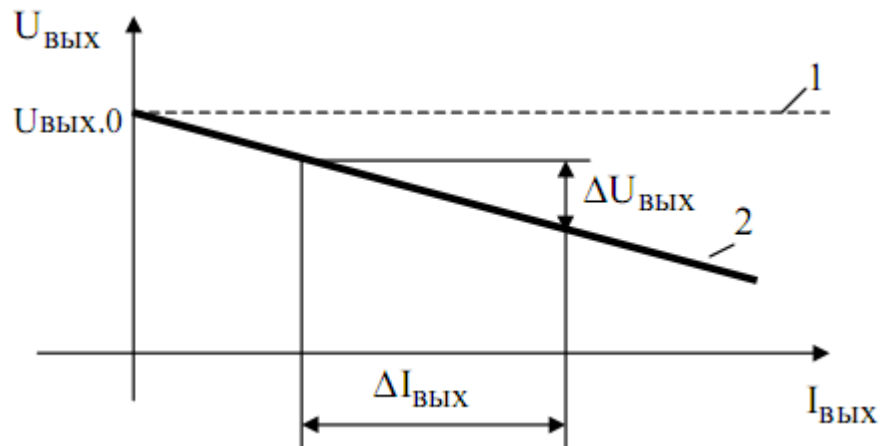


Рисунок 1.6. Нагрузочная характеристика идеального источника питания 1 и реального источника питания 2 [1]

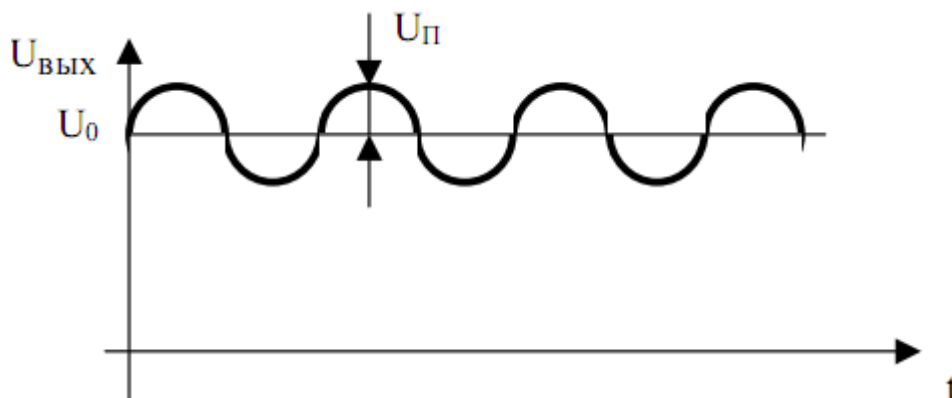


Рисунок 1.7. Временная диаграмма выходного напряжения источника питания с выходом на постоянном токе [1]

## 1.6. Линейные и импульсные источники вторичного электропитания

Как отмечалось выше, стабилизированные ИП по характеру стабилизации напряжения делятся на источники с непрерывным (линейным) и импульсным регулированием. Аналогично любые (стабилизированные или нестабилизированные) ИП принято делить на линейные и импульсные [1].

В линейных ИП переменное напряжение питающей сети преобразуется трансформатором, выпрямляется, подвергается низкочастотной фильтрации и стабилизируется (рисунок 1.8). В нестабилизированных ИП нагрузка подключается непосредственно к выходу фильтра низкой частоты. В стабилизаторах линейных ИП осуществляется непрерывное регулирование: последовательно или параллельно с нагрузкой включается регулирующий элемент (транзистор), управляемый сигналом обратной связи, за счет чего выходное напряжение поддерживается на постоянном уровне [1].

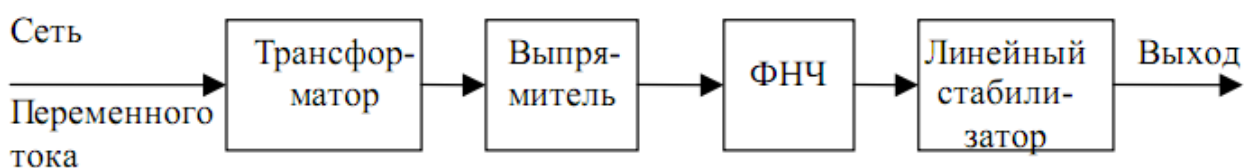


Рисунок 1.8. Упрощенная функциональная схема линейного стабилизированного источника питания [1]

Отличительная особенность линейных стабилизаторов напряжения заключается в том, что их выходное напряжение всегда ниже нестабилизированного входного напряжения. Кроме этого выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  всегда имеет одинаковую полярность с входным напряжением  $U_{\text{вх}}$ , а сам стабилизатор непрерывно рассеивает мощность  $P_{\text{рас}} \approx I_{\text{вых}} (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})$ , где  $I_{\text{вых}}$  - выходной ток (ток нагрузки) [1].

Импульсные ИП непосредственно выпрямляют и фильтруют напряжение питающей сети переменного тока без использования первичного силового трансформатора, который для частоты 50 Гц имеет значительные вес и габариты. Выпрямленный и отфильтрованный постоянный ток коммутируется мощным электронным ключом, затем преобразуется высокочастотным трансформатором, снова выпрямляется и фильтруется (рисунок 1.9) [1].

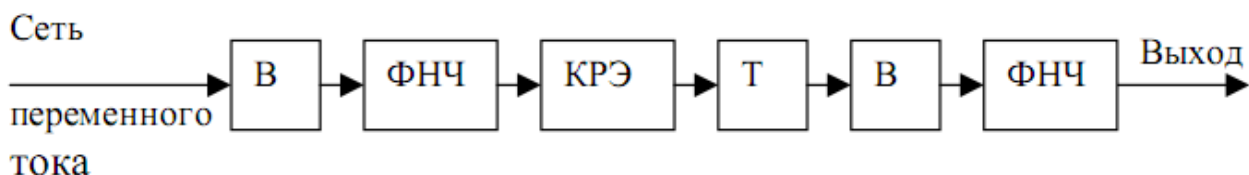


Рисунок 1.9. Упрощенная функциональная схема импульсного источника питания

На рисунке В – Выпрямитель, ФНЧ - фильтр низкой частоты, КРЭ - ключевой регулирующий элемент, Т – трансформатор [1].

Электронный ключ управляется специальным сигналом, формируемым схемой управления. В устройстве может быть обратная связь по напряжению, благодаря которой стабилизируется выходное напряжение (управляющий сигнал формируется в зависимости от разности напряжений выходного и опорного). Из-за высокой частоты переключения (от 20 кГц и выше), трансформаторы и

конденсаторы фильтров имеют намного меньшие размеры, чем их низкочастотные (50 Гц) эквиваленты. Достоинством импульсных ИП является высокий КПД - 60 - 80% (КПД линейных ИП, как правило, не превышает 40 - 50%) [1].

Для питания РЭА используются три типа импульсных электронных устройств, использующихся в качестве ИП: преобразователь - переменный ток/постоянный ток (АС-DC конверторы), преобразователь - постоянный ток/постоянный ток (DC-DC конвертор) и преобразователь - постоянный ток/переменный ток (DC-AC преобразователь или инвертор). Каждый тип устройств имеет собственные определенные области применения [1].

Импульсные стабилизаторы (DC-DC конверторы), в отличие от аналогичных линейных устройств могут [1]:

1. обеспечивать выходное напряжение, превышающее по величине входное напряжение;
2. инвертировать входное напряжение (полярность выходного напряжения становится противоположной полярности входного напряжения).

DC-DC конверторы используют принцип действия импульсных ИП, но применяются для того, чтобы преобразовывать одно постоянное напряжение в другое, обычно хорошо стабилизированное. Такие преобразователи используются, большей частью, там, где РЭА должна питаться от химического источника тока или другого автономного источника постоянного тока [1].

Интегральные DC-DC конверторы широко используются для преобразования и распределения постоянного напряжения питания, поступающего в систему от сетевого ИП или батареи [1].

Другое распространенное применение для DC-DC конверторов, это преобразование напряжения батареи (1.5, 3.0, 4.5, 9, 12, 24 В) в напряжение другого номинала. При этом выходное напряжение может оставаться достаточно стабильным при значительных колебаниях напряжения батареи. Например, напряжение 12-ти вольтовой автомобильной аккумуляторной батареи в процессе работы может изменяться в пределах от 6 до 15 В [1].

### **1.7. Сравнение импульсных и линейных ИП**

Несмотря на то, что линейные ИП имеют много достоинств, таких как простота, малые уровни пульсаций выходного напряжения и шума, отличные значения нестабильности по напряжению и току, малое время восстановления нормативного уровня выходного напряжения после скачкообразного изменения тока нагрузки, главными их недостатками, ограничивающими их применение являются: низкий КПД, значительные масса и габариты [1].

Импульсные ИП находят широкое применение главным образом благодаря их значительно большей удельной мощности и большой эффективности. Важным достоинством импульсных ИП является большое время удержания, то есть время, в течение которого выходное напряжение ИП остается в допустимых пределах при пропадании входного напряжения. Особую актуальность это приобретает в цифровых вычислителях и компьютерах [1].

Обобщенные результаты сравнения линейных и импульсных ИП представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Сравнение импульсных и линейных ИП [1]

| Параметр (Возможность)  | Линейный ИП           | Импульсный ИП               |
|---|-----------------------|-----------------------------|
| КПД   | 40-55%                | 60 - 80%                    |
| Средняя удельная мощность   | 30 Вт/дм <sup>3</sup> | 130 - 150Вт/дм <sup>3</sup> |
| Нестабильность по входному на пряжению                                  | 0,02 – 0,05%          | 0,05-1%                     |
| Нестабильность по току нагрузки   | 0,02 – 0,1 %          | 0,1 - 1%                    |
| Пульсации выходного напряжения  | 0,5 - 2 мВ            | 25- 100 мВ                  |
| Время восстановления  | 50 мкс                | 300 мкс                     |
| Время удержания   | 2 мс                  | 30 - 35 мс                  |
| Возможность инвертирования (из менения полярности) входного на пряжения | нет                   | есть                        |
| Возможность увеличения входного напряжения в DC-DC преобразователях     | нет                   | есть                        |

### 1.8. Элементная база источников питания

В качестве базовых электрорадиоэлементов ИП используются [1]:

1. электровакуумные приборы (диоды, триоды и многосеточные лампы);
2. полупроводниковые диоды, стабилитроны и стабисторы, тиристоры, транзисторы;
3. трансформаторы и дроссели (низкочастотные и высокочастотные);
4. конденсаторы (в основном оксидные, имеющие большую удельную емкость);
5. линейные интегральные микросхемы (операционные усилители, усилители низкой частоты);
6. интегральные стабилизаторы напряжения и тока (линейные и импульсные);
7. интегральные микросхемы, входящие в состав импульсных ИП (AC-DC и DC-DC конвертеры, однотактные и двухтактные ШИМ - контроллеры, корректоры коэффициента мощности, специализированные схемы управления импульсными источниками вторичного электропитания);
8. элементы (устройства) индикации (лампы накаливания и светодиоды, аналоговые и цифровые индикаторы);
9. предохранители (плавкие, биметаллические, электронные).

Современная тенденция развития ИП такова, что они строятся в основном с применением интегральных микросхем, а доля дискретных активных элементов в них постоянно уменьшается. Уже в 1967 была разработана микросхема линейного интегрального стабилизатора  $\mu A723$ , представляющая собой настоящий блок питания. Микросхема 723 содержит температурно-компенсированный источник

опорного напряжения, дифференциальный усилитель, последовательно включенный проходной транзистор и схему защиты, обеспечивающую ограничение выходного тока - временные стабилизаторы имеют лучшие электрические параметры, имеют широкий спектр функциональных возможностей, но построены на тех же принципах, что и  $\mu A723$  [1].

Отечественной и зарубежной промышленностью выпускается большое число линейных интегральных стабилизаторов, рассчитанных как на фиксированное значение напряжения, так и предназначенных для регулирования величины, выходного напряжения в достаточно широких пределах. Например, выходное напряжение недорогой отечественной микросхемы КР142ЕН12А может изменяться в пределах от +1,25 до +36 В. При этом она может отдавать ток в нагрузку до 1,5 А [1].

Ряд линейных стабилизаторов, помимо своей основной функции, способны:

1. следить за значением входного напряжения и формировать контрольный сигнал, предназначенный для предупреждения об аварийной просадке напряжения на входе;
2. изменять выходное напряжение и выходной ток под действием управляющего сигнала;
3. совместно с резервным источником питания (аккумулятором или батареей) обеспечивать бесперебойное питание устройства, что особенно важно для микропроцессорных систем.

Интегральные АС-DC преобразователи представляют собой, по сути дела, готовые источники питания. Например, преобразователь HV-2405E фирмы Harris semiconductor осуществляет прямое преобразование переменного тока (18 - 264 В) в постоянный (5 - 24 В). Выходной ток HV-2405E может достигать 50 мА. Для превращения микросхемы в компактный, легкий, дешевый и эффективный ИП необходимо только несколько недорогих внешних компонентов (не требуется никаких дополнительных трансформаторов и дросселей). HV-2405E заменяет собой трансформатор, выпрямитель и стабилизатор напряжения [1].

Мощные АС-DC конвертеры способны отдавать ток в нагрузку значительно больший. Так отечественная микросхема 1182ЕМ3 обеспечивает выходной ток до 1,7 А и имеет встроенную защиту по току и встроенную защиту от перегрева. Правда для работы такой микросхемы потребуется подключение внешнего трансформатора или дросселя [1].

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 1) Что такое система электропитания космического аппарата?
- 2) Чем отличается источник тока от источника напряжения?
- 3) Что такое источник первичного электропитания? Приведите примеры.
- 4) Что такое источник вторичного электропитания? Приведите примеры.
- 5) Чем отличаются импульсный источник вторичного питания от линейного?

## 2. ЛИНЕЙНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Обобщённая структурная схема линейного источника питания<sup>2</sup> представлена на рисунке 2.1 [1].

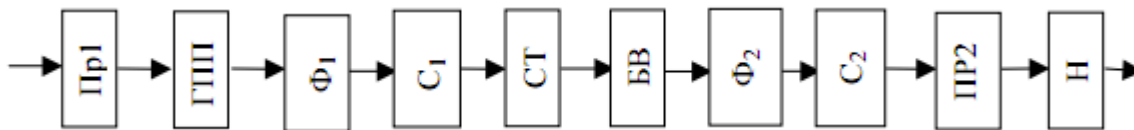


Рисунок 2.1. Обобщенная структурная схема линейного источника питания

На рисунке: Пр – предохранители, ГПП - гаситель переходных процессов, Ф – фильтры, С – стабилизаторы, СТ - силовой трансформатор, БВ - блок выпрямления, Н – нагрузка [1].

Основными элементами устройства являются: силовой трансформатор, блок выпрямления, фильтр низкой частоты  $\Phi_2$  и стабилизатор постоянного напряжения  $C_2$ . Остальные функциональные узлы улучшают характеристики ИП и обеспечивают безопасность его эксплуатации. Рассмотрим элементы вышеприведённой структуры [1].

### 2.1. Гаситель переходных процессов в линейных источниках питания

ГПП - это устройство, которое проводит ток как только напряжение на его выходах превосходит определённый предел (действует как двухсторонний высоковольтный стабилитрон). ГПП компактны, дешёвы и способны гасить опасные импульсы тока в десятки и сотни ампер. Например ГПП фирмы Siemens S07K130 и S20K130 рассчитаны на пиковый ток 500 и 4000 А соответственно и переходят в проводящее состояние в случае, если действующее значение напряжения на их выводах превышает 130 В [1].

### 2.2. Фильтры линейных источников питания

В качестве фильтра  $\Phi_1$  используется простой линейный LC-фильтр. Часто в ИП фильтр  $\Phi_1$  препятствует возможному радиоизлучению из силовых проводов и снижает уровень сетевых помех во входных цепях ИП. Фильтр  $\Phi_1$  и ГПП довольно успешно противостоят импульсным перенапряжениям, возникающим в питающей сети переменного тока. Практика показывает, что в сетях 110 и 220 В 50 Гц возможны кратковременные выбросы напряжения до 1-5 кВ. Типовая схема фильтра  $\Phi_1$  показана на (рисунке 2.2) [1].

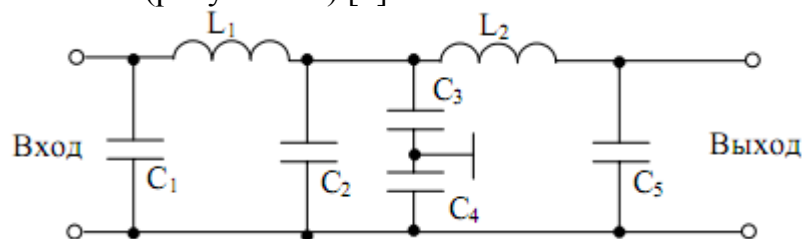


Рисунок 2.2. Линейный сетевой фильтр фирмы Согsom[1]

Обычно такие фильтры рассчитаны на ток величиной несколько ампер и подавление помех порядка десятков децибел. Фильтр 3EDSC2-2 фирмы Согsom подавляет помехи на 30-40 дБ и через него может проходить ток величиной до 3А.

<sup>2</sup> Более подробную информацию о линейных источниках питания можно найти в [1]



Фильтр 200JM6-2 фирмы Sprague рассчитан на ток до 6А, но подавляет помехи хуже (12 - 25 дБ).

Фильтр низкой частоты  $\Phi_2$  предназначен для подавления пульсаций постоянного напряжения. Обычно это самый простой RC-фильтр с частотой среза порядка единиц герц. Чем ниже частота среза, тем эффективнее фильтр [1].

### 2.3. Стабилизаторы

Стабилизатор  $C_1$  предназначен для стабилизации переменного напряжения и в реальных ИП используется редко. Стабилизатор  $C_2$  используется для стабилизации постоянного выходного напряжения. Самыми простыми устройствами являются параметрические стабилизаторы, выполненные на нелинейных элементах (чаще всего стабилитронах). Лучшими параметрами обладают компенсационные стабилизаторы. Как уже отмечалось, в качестве таких стабилизаторов часто используются интегральные схемы с очень хорошими параметрами [1].

### 2.4. Силовой трансформатор

В большинстве ИП используют один или несколько трансформаторов. Силовой трансформатор (СТ) в источнике питания решает две основные задачи: преобразование переменных напряжений и обеспечение гальванической развязки между питающей сетью и нагрузкой. В бестрансформаторных источниках питания схема находится под высоким напряжением по отношению к внешнему заземлению, например, водопроводным трубам и системам центрального отопления. Это создает потенциальную опасность, главным образом, для человека, эксплуатирующего устройство. При проектировании ИП целесообразно выбирать готовые унифицированные трансформаторы. Отечественной промышленностью выпускаются следующие основные типы трансформаторов питания [1]:

- 1) анодные (ТА) и накальные (ТН);
- 2) анодно-накальные (ТАН);
- 3) для питания устройств на полупроводниковых (ТПП);
- 4) силовые (ТС).

Можно приобрести готовые трансформаторы и зарубежных фирм, например, Signal Transformer Company.

Принципиальная электрическая схема широко используемых трансформаторов ТПП приведена на рисунке 2.3 [1].

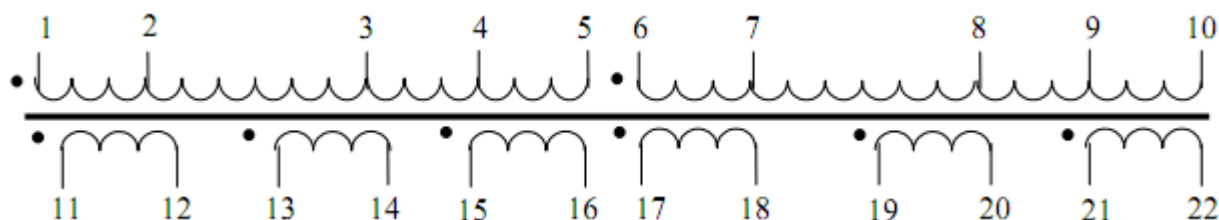


Рисунок 2.3. Принципиальная электрическая схема трансформаторов ТПП на напряжения 127 В и 220 В

Как следует из принципиальной схемы, трансформаторы имеют шесть вторичных обмоток: четыре рабочих (11-12, 13-14, 15-16, 17-18) и две компенсационных (19-20, 21-22). Первичная обмотка разделена на две секции, каждая из которых имеет по пять выводов. Подключение первичной обмотки

трансформатора к сети переменного тока напряжением 220 В показано на рисунке 2.4. Как видно из представленных схем, часть витков первичной обмотки остается незадействованной. Дополнительные витки могут использоваться для изменения коэффициента трансформации. Увеличивая число витков первичной обмотки (повышая коэффициент трансформации) можно в небольших пределах уменьшить напряжения вторичных обмоток [1].

Несмотря на достаточное число типонаименований трансформаторов (более двухсот для ТПП) при разработке ИП нередко используют последовательное и параллельное включение вторичных обмоток. Увеличение напряжения достигается согласным включением обмоток (рисунок 2.5).

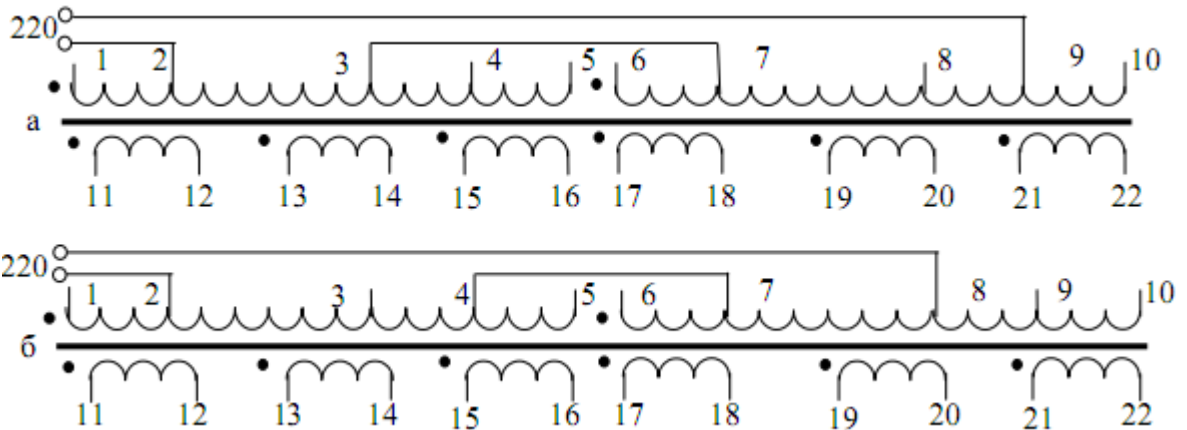


Рисунок 2.4. Подключение трансформаторов ТПП к сети переменного тока напряжением 220 В, первый вариант (а), второй вариант (б)

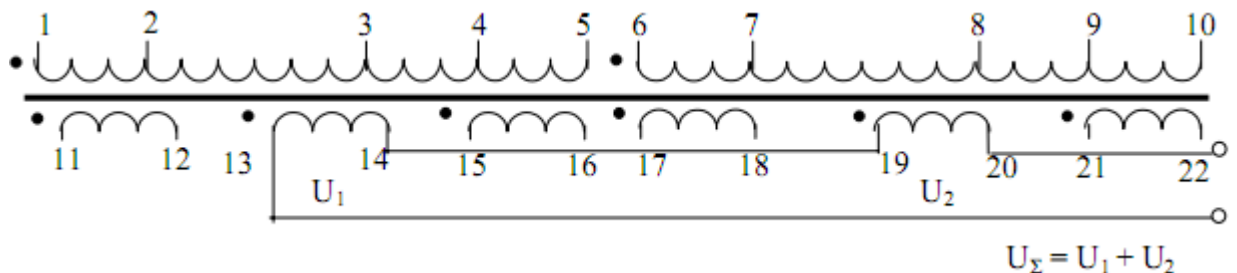


Рисунок 2.5. Последовательное согласное включение рабочей и компенсационной обмоток трансформатора ТПП

При согласном включении начало последующей обмотки (обозначается точкой) соединяется с концом предыдущей. При встречном включении обмоток происходит вычитание напряжений.

Для увеличения тока допускается параллельное включение обмоток, имеющих одинаковое напряжение [1].

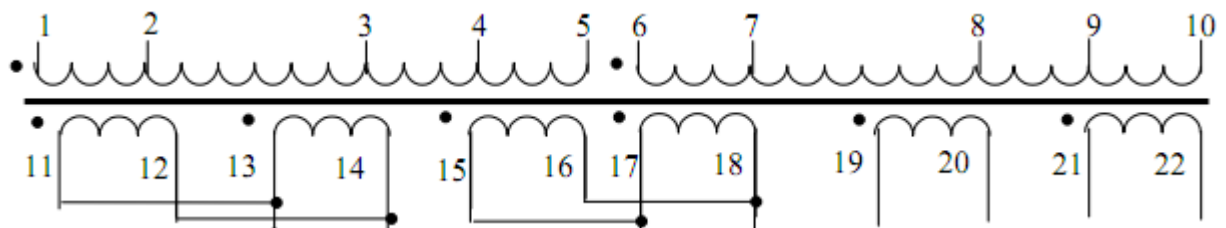


Рисунок 2.6 Параллельное включение обмоток трансформатора

У большинства трансформаторов ТПП все три пары вторичных обмоток (11-12, 13-14, 15-16, 17-18, 19-20, 21-22) могут быть включены параллельно (попарно).

При выборе СТ необходимо учитывать следующие основные моменты [1]:

- 1) мощность СТ должна быть не менее мощности, потребляемой нагрузкой (необходимо предусмотреть некоторый запас);
- 2) напряжение первичной обмотки (с учетом подключения ее выводов) должно соответствовать напряжению питающей сети;
- 3) в стабилизированных ИП напряжение вторичной обмотки должно быть таким, чтобы на входе стабилизатора  $C_2$  минимальное значение постоянного напряжения превышало значение выходного напряжения (минимум на 3-5 В). Это связано с тем, что, во-первых, на линейном стабилизаторе должно быть падение напряжения 0,6 - 3 В, во-вторых, возможны периодические «просадки» напряжения питающей сети. В тоже время запас по напряжению не должен быть большим, так как в этом случае уменьшается КПД источника питания за счет увеличения бесполезно рассеиваемой мощности линейным стабилизатором;
- 4) при необходимости регулирования выходного напряжения можно использовать СТ с несколькими вторичными обмотками (рисунок 2.7).

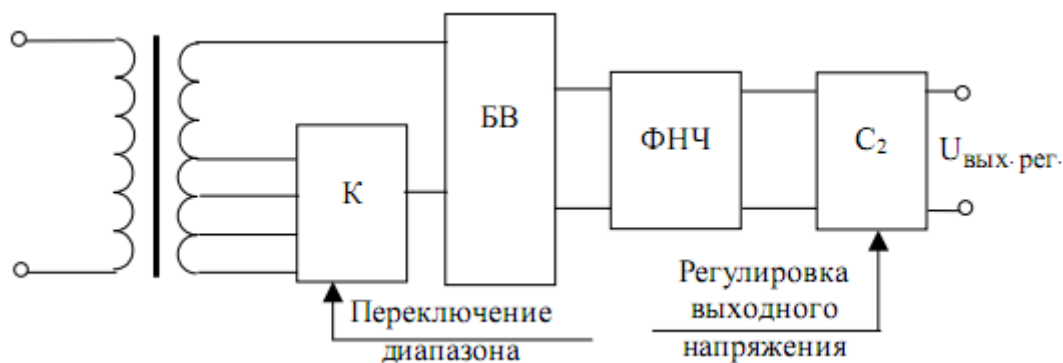


Рисунок 2.7. Источник питания с дискретно изменяемым напряжением на входе блока выпрямления

Как следует из структурной схемы, на вход блока выпрямления БВ подается дискретно изменяемое напряжение вторичной обмотки. Переключение напряжения производится коммутатором К, который может управляться как вручную, так и сигналами, формируемыми специальной схемой управления в зависимости от требуемого уровня выходного напряжения [1].

## 2.5. Блок выпрямления

В качестве выпрямителей используются вентили-устройства, пропускающие ток в одном направлении. Наибольшее распространение в качестве вентилях получили полупроводниковые диоды [1].

## 2.6. Предохранители

Защищают ИП и подключенную к нему нагрузку от сильных токов, появление которых возможно при выходе из строя как самого ИП, так и нагрузки. В качестве предохранителей используются плавкие вставки (одноразовые), биметаллические и электронные (многократные) [1].

Одной из самых распространенных неисправностей ИП является пробой конденсатора фильтра Ф2. При этом ток в первичной обмотке трансформатора может достичь нескольких ампер (вместо 0,1 — 0,5 А в нормальном режиме). При этом СТ, включенный в сеть переменного тока 220 В, будут рассеивать мощность соизмеримую с мощностью бытового электронагревателя [1].

Наибольшее распространение в качестве предохранителей получили плавкие вставки. Целесообразно выбирать предохранитель на ток, превышающий номинальный примерно на 50%. Это связано, во-первых, с периодически возникающими бросками токов переходных процессов при включении (заряд конденсатора фильтра Ф2), во вторых с «усталостью» предохранителя [1].

### 2.6.1. Нагрузка

В состав ИП не входит. Однако определяет большинство требований, предъявляемых к нему, и в первую очередь:

- выходное (-ые) напряжение (напряжения);
- выходной (-ые) ток (токи);
- стабильность и пульсации выходного (-ых) напряжения (напряжений);
- вид защиты выхода источника питания [1].

### 2.6.2. Неуправляемые выпрямители

Выпрямители - это электротехнические устройства, предназначенные для преобразования переменного напряжения в постоянное [1].

Основными элементами выпрямителя являются трансформатор и вентили, с помощью которых обеспечивается однонаправленное протекание тока в цепи нагрузки, в результате чего переменное напряжение преобразуется в однополярное пульсирующее напряжение [1].

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения используется фильтр. Для регулирования и (или) стабилизации выпрямленного напряжения к выходу выпрямителя подключают регулятор или стабилизатор.

Структурная схема выпрямителя без регулировки выходного напряжения приведена на рисунке 2.8 [1].

Такие выпрямители используются [1]:

- для питания электронных устройств не критичных к колебаниям питающего напряжения и уровню пульсаций;
- как функциональные силовые узлы стабилизированных источников питания, в том числе достаточно сложных и дорогих.

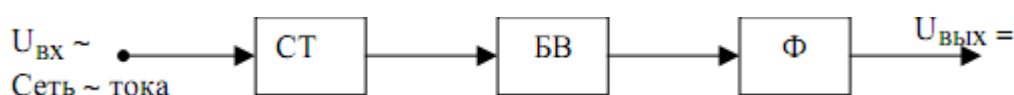


Рисунок 2.8. Структурная схема неуправляемого выпрямителя

На рисунке СТ - силовой трансформатор, БВ - блок выпрямителя, Ф – фильтр.

#### 2.6.2.1. Основные схемы неуправляемых выпрямителей

В зависимости от числа фаз питающего источника переменного напряжения различают однофазные и трех фазные схемы выпрямителей. Основные схемы

однофазных выпрямителей, получивших наиболее широкое практическое применение, следующие [1]:

- 1) однополупериодная с одним диодом (рисунок 2.9) применяются в основном при мощностях в нагрузке до 10 — 25 Вт и тогда, когда не требуется малый коэффициент пульсаций. Достоинства схемы - минимальное число элементов, малая стоимость. Недостатки - низкая частота пульсаций (равна частоте питающей сети), плохое использование трансформатора, подмагничивание его магнитопровода постоянным током;

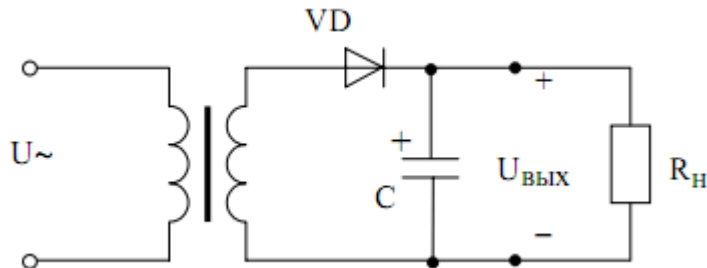


Рисунок 2.9. Однополупериодная схема выпрямителя

- 2) двухполупериодная со средней точкой (рисунок 2.10) применяется чаще всего при мощностях до 100 Вт. Выпрямители, выполненные по данной схеме, характеризуются повышенной частотой пульсаций, возможностью использования диодов с общим катодом или анодом, что является очень удобным при установке обоих диодов на общий радиатор.

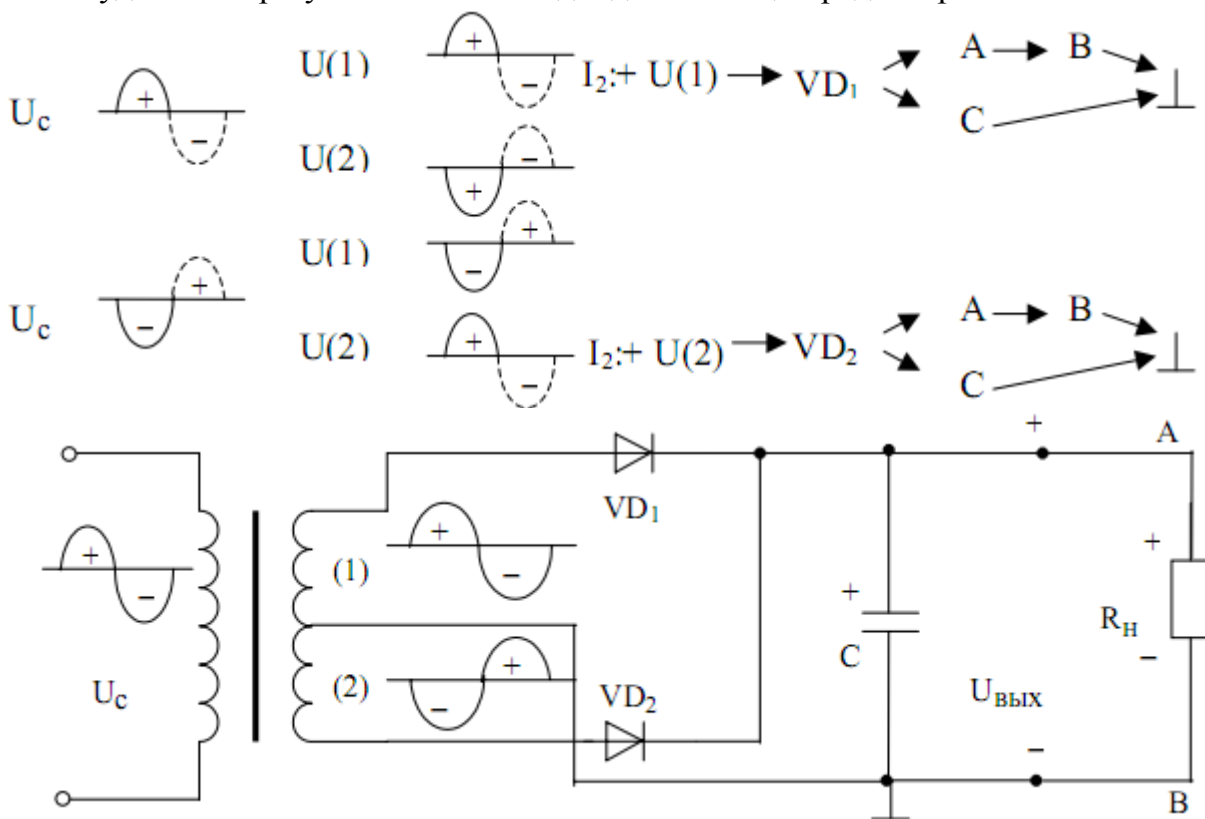


Рисунок 2.10. Двухполупериодная схема со средней точкой

Выпрямление переменного тока показано ниже. Относительно средней точки вторичной обмотки трансформатора напряжение сдвинуто на  $180^\circ$ . То есть в любой полупериод изменения напряжения питающей сети напряжения в первой и второй секциях вторичной обмотки трансформатора находятся в противофазе [1].

В положительный полупериод сетевого напряжения  $U_C$  диод  $VD_1$  открыт (на его аноде положительный потенциал), а диод  $VD_2$  закрыт. При смене полярности сетевого напряжения (отрицательная полуволна) открывается диод  $VD_2$ , а диод  $VD_1$  закрывается. Схематично протекание тока вторичной обмотки  $I_2$  в схеме представлено следующим образом [1].

В каждый полупериод сетевого напряжения ток через нагрузку протекает в одном направлении и только через один диод. Потери мощности на вентильном комплекте примерно в два раза меньше по сравнению с мостовой выпрямительной схемой, в которой ток нагрузки в каждый полупериод сетевого напряжения протекает через два последовательно включенных диода. К недостатку схемы можно отнести обязательное наличие средней точки у вторичной обмотки трансформатора. При необходимости среднюю точку можно получить, если у трансформатора есть две одинаковые вторичные обмотки (рисунок 2.11) [1];

3) мостовая двухполупериодная схема характеризуется хорошим использованием мощности трансформатора, применяется при мощностях в нагрузке до 1 кВт и более (рисунок 2.12). Достоинства выпрямителей, выполненных по этой схеме - повышенная частота пульсаций, меньшее обратное напряжение на выпрямляющих диодах. Недостатки - повышенное падение напряжения на выпрямительном блоке, невозможность установки однотипных диодов на общем радиаторе без электроизоляционных прокладок [1].

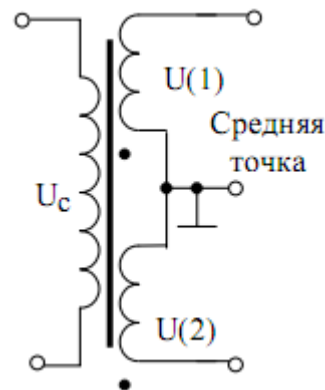


Рисунок 2.11. Получение средней точки вторичной обмотки трансформатора

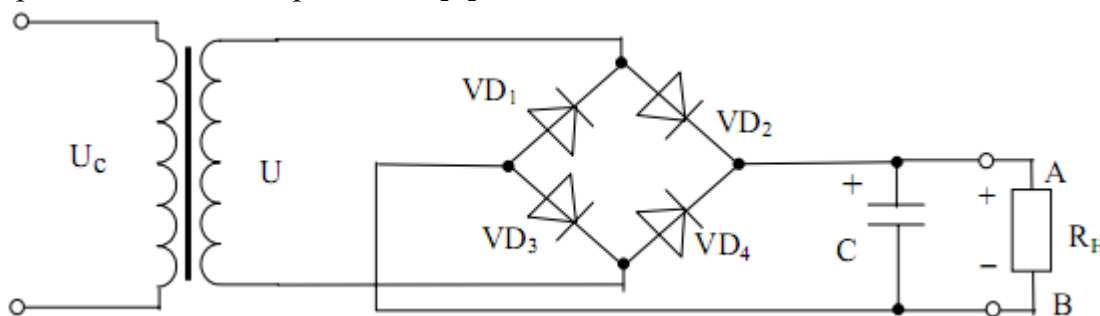
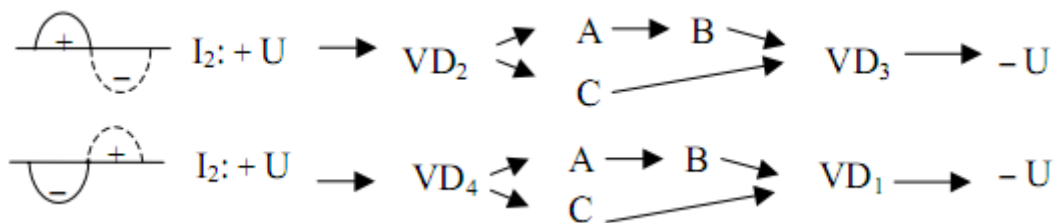


Рисунок 2.12. Мостовая двухполупериодная схема выпрямителя

В положительный полупериод напряжения вторичной обмотки  $U$  (положительный потенциал на верхнем по схеме выводе) диод  $VD_2$  открыт (на его аноде положительный потенциал). Ток вторичной обмотки протекает через  $VD_2$ , конденсатор  $C$  и нагрузку, возвращаясь ко вторичной обмотке через диод  $VD_3$ . В отрицательный полупериод напряжения  $U$  (положительный потенциал на нижнем по схеме выводе) ток протекает через  $VD_4$ ,  $C$  и  $R_H$ , возвращаясь к вторичной обмотке через диод  $VD_1$ . Схематично протекание тока вторичной обмотки  $I_2$  в схеме можно представить следующим образом [1]:



Последнее наглядно показывает, что в любой полупериод напряжения вторичной обмотки, ток через нагрузку протекает в одном направлении (от точки А к точке В).

4) двухполярная выпрямительная схема позволяет получить два выпрямительных напряжения разной полярности (рисунок 2.13) [1].

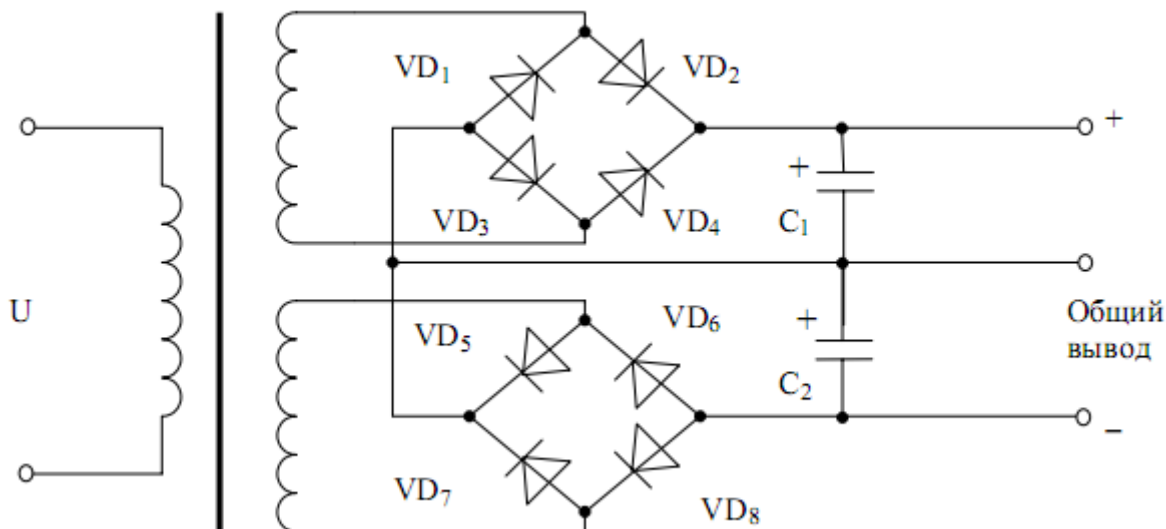


Рисунок 2.13. Двухполярная выпрямительная схема

Особенностью схемы является то, что на ее выходе присутствуют два напряжения разной полярности относительно общего вывода (земли). Данную схему можно рассматривать как два мостовых двухполупериодных выпрямителя, включенных особым образом. схема используется при построении двухполярных (расщепленных) источников питания, в том числе и стабилизированных [1].

Симметричная схема с удвоением напряжения (рисунок 2.14) применяется в основном для питания маломощных устройств, требующих повышенного напряжения питания и потребляющих ток в несколько единиц или десятков миллиампер. К таким устройствам можно отнести рентгеновские трубки, варикапные матрицы, электронные лампы и электронно-лучевые трубки [1].

Принцип работы схемы (как и других аналогичных умножителей напряжения) основан на использовании нескольких конденсаторов, каждый из которых заряжается от одной и той же обмотки трансформатора через соответствующий вентиль (диод). По отношению к нагрузке конденсаторы оказываются включенными последовательно, и их напряжение суммируется [1].

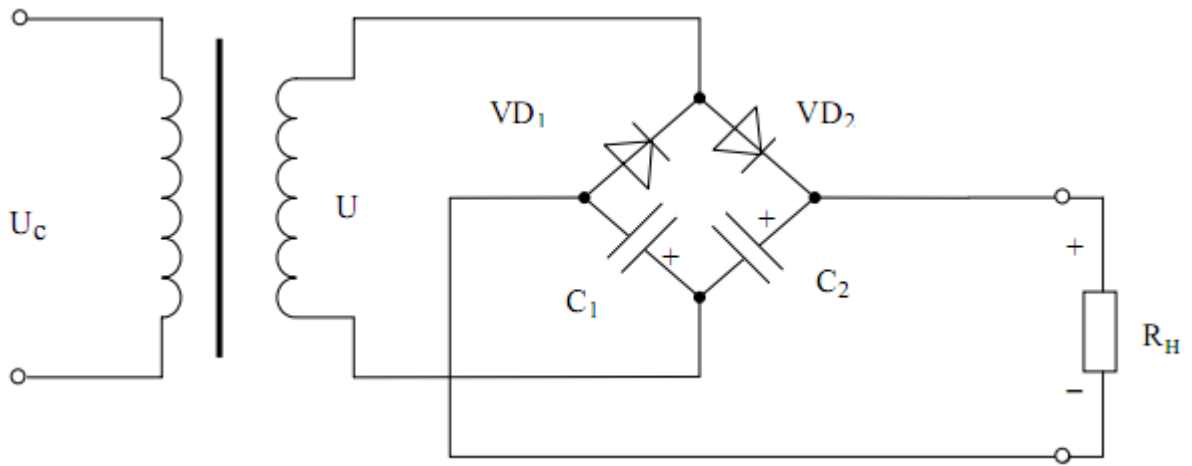
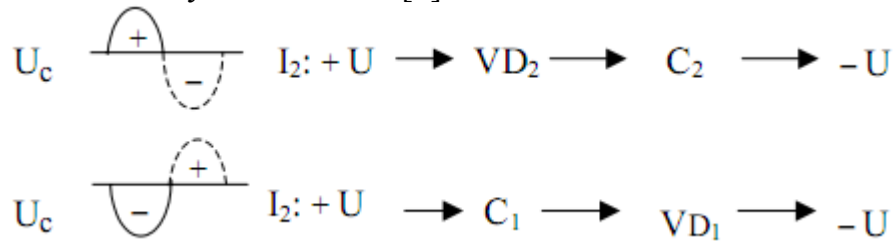


Рисунок 2.14. Симметричная схема с удвоением напряжением (схема Латура)

Рассматриваемая схема (рисунок 2.14) состоит из 2-х однополупериодных выпрямителей. Протекание тока, вторичной обмотки трансформатора  $I_2$  можно представить в виде следующей схемы [1]:



Таким образом, напряжение на нагрузке равно сумме напряжений на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$ , каждый из которых заряжается до напряжения  $U_{C1} = U_{C2} = U_m - U_{пр} \approx U_m$ , где  $U_m$  - амплитудное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора,  $U_{пр}$  - прямое напряжение на выпрямляющем диоде. При  $R_H \rightarrow \infty$  да выходное напряжение схемы практически равно  $2U_m$ . Реальное сопротивление нагрузки имеет конечное значение, поэтому заряд одного конденсатора сопровождается одновременным разрядом другого через  $R_H$  и выходное напряжение становится меньше  $2U_m$ . Для того, чтобы напряжение на выходе было максимально приближено к  $2U_m$  необходимо выбирать емкости конденсаторов, удовлетворяющих  $2 U_m$ , неравенствам.  $R_H C_1 \gg T, R_H C_2 \gg T$ , где  $T$ -период напряжения сети. несимметричная схема с удвоением напряжения показана на рисунок 2.15.

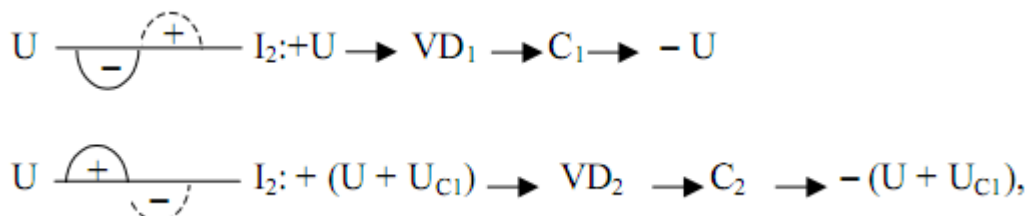


Рисунок 2.15. Несимметричная схема удвоения напряжения

Как видно из рисунка 2.15, два однополупериодных выпрямителя питаются от разных по величине напряжений. В отрицательный полупериод изменения напряжения  $U$  конденсатор  $C_1$  заряжается через открытый диод  $VD_1$ . При смене полярности напряжения  $U$  на противоположную (положительный полупериод) заряжается конденсатор  $C_2$  через открытый диод  $VD_2$ , причем до напряжения примерно равного удвоенному амплитудному значению напряжения вторичной обмотки  $2U_m$ . Как следует из рисунка 2.15, конденсатор  $C_2$  заряжается под



действием суммы напряжений вторичной обмотки и конденсатора  $C_1$ , который в течении предыдущего полупериода был заряжен до напряжения примерно равного  $U_m$ . Протекание тока вторичной обмотки трансформатора в выпрямителе можно представить следующей схемой [1].

При выборе конденсаторов необходимо иметь в виду, что рабочее напряжение конденсатора  $C_2$  должно быть в два раза больше, чем рабочее напряжение  $C_1$ .

Достоинством схемы является то, что один из выводов вторичной обмотки трансформатора соединен с отрицательным полюсом нагрузки и его можно заземлить [1].

### 2.6.2.2. Фильтры неуправляемых выпрямителей

Предназначены для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения до величины, приемлемой по условиям эксплуатации данного устройства (нагрузки). Важным показателем фильтра является коэффициент сглаживания [1]:

$$K_{CF} = \frac{K_{\Pi(1)BX}}{K_{\Pi(1)ВЫХ}} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} \cdot \frac{U_{m(1)вх}}{U_{m(1)ввых}} = \lambda \cdot K_{\Phi},$$

где  $K_{\Pi(1)вх}$ ,  $K_{\Pi(1)ввых}$  - коэффициенты пульсаций входного и выходного напряжений (по первой гармонике);

$U_{вх}$ ,  $U_{ввых}$  - постоянные составляющие входного и выходного напряжений;

$U_{m(1)вх}$ ,  $U_{m(1)ввых}$  - амплитуды первой гармоники входного и выходного напряжений;

$\lambda = U_{ввых}/U_{вх}$  - коэффициент передачи постоянной составляющей напряжения фильтра;

$K_{\Phi} = U_{m(1)вх}/U_{m(1)ввых}$  - коэффициент фильтрации.

Если пренебречь потерями в фильтре и считать, что среднее значение выпрямленного напряжения до и после фильтра равны ( $U_{вх} = U_{ввых}$ ), коэффициент сглаживания будет равен коэффициенту фильтрации [1].

Диапазон требуемых коэффициентов пульсаций выходного напряжения  $K_{пвых}$  (условимся пропускать в дальнейшем индекс (1) подразумевая основную гармонику) для различного рода устройств колеблется от 0,001 до 0,2 - 0,5.

При выборе схемы и параметров фильтра, кроме  $K_{CF}$ , необходимо также учитывать характер нагрузки и условия ее работы. Так, например, если выпрямитель служит для питания коллекторных цепей усилителя низкой частоты, работающего в режиме В или АВ, необходимо предусмотреть, чтобы выходное сопротивление фильтра было минимальным для токов частот в пределах частотного диапазона усилителя. В противном случае в усиливаемом сигнале появятся искажения. Необходимо также исключить возможные перенапряжения и броски тока, обусловленные переходными процессами в фильтре при изменениях нагрузки [1].

Все фильтры делятся на две группы: фильтры с пассивными RLC-элементами и фильтры с активными элементами. RLC-фильтры простые и надежные в эксплуатации, однако, их вес и габариты при питании РЭА могут существенно сказываться на общем весе и габаритах выпрямителя, а также питаемой аппаратуры. Это объясняется тем, что габариты реактивных элементов конденсаторов и дросселей резко возрастают. При этом в результате насыщения сердечника дросселя постоянной составляющей выпрямленного тока индуктивность его уменьшается, и фильтрующие свойства фильтра ухудшаются.

Отрицательное влияние на РЭА могут оказывать магнитные поля рассеяния дросселя, выполненного с воздушным зазором [1].

Фильтры с активными элементами (транзисторами) не содержат сглаживающих дросселей и поэтому не имеют перечисленных недостатков. Кроме этого в транзисторных фильтрах применяются конденсаторы значительно меньшей емкости, чем емкости конденсаторов в аналогичных по параметрам фильтрах с пассивными элементами [1].

В настоящее время фильтры с активными элементами как самостоятельные функциональные узлы встречаются редко. Это обусловлено тем, что задачу сглаживания пульсаций успешно решают стабилизаторы напряжения, выполненные на активных элементах. Рассмотрим основные типы пассивных фильтров (рисунок 2.16) [1].

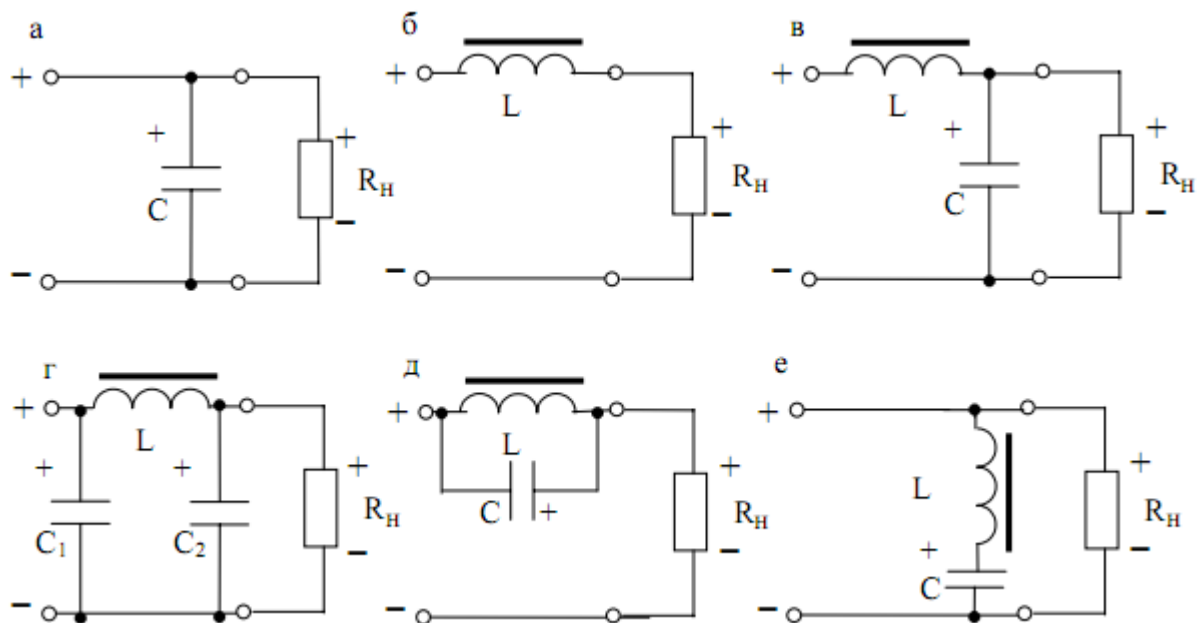


Рисунок 2.16. Основные типы пассивных сглаживающих фильтров: емкостной (а), индуктивный (б), Г-образный (в), «П-образный» (г), «пробка» (д), режекторный (е)

Действие емкостного фильтра в виде конденсатора, шунтирующего сопротивление нагрузки  $R_H$  иллюстрирует рисунке 2.17 [1].

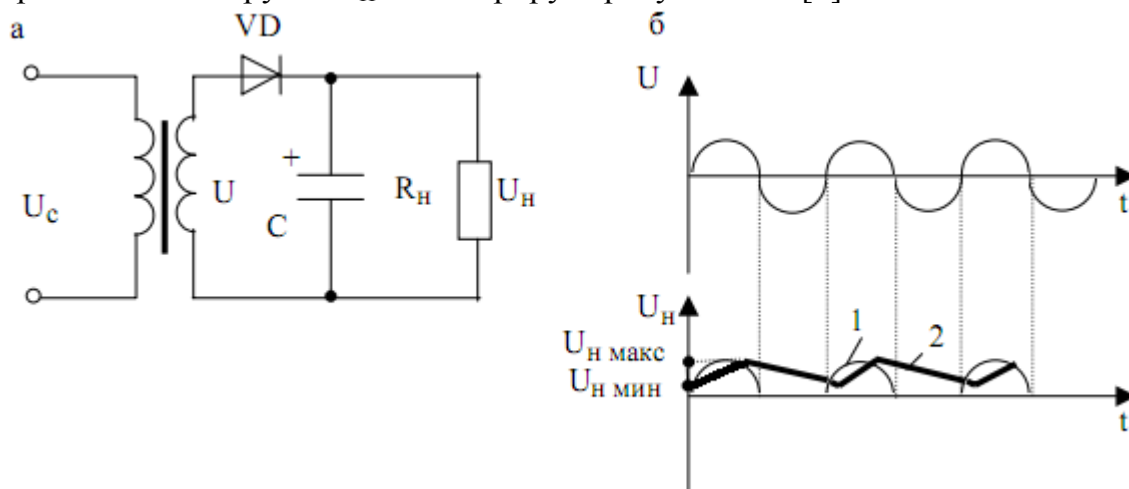


Рисунок 2.17. Емкостной фильтр с активной нагрузкой. Схема выпрямителя (а), временная диаграмма работы (б)

Выпрямленное напряжение вторичной обмотки представляет собой последовательность импульсов (полуволн) положительной полярности (кривая 1 рисунок 2.17). Действие конденсатора С заключается в том, что он в положительные полупериоды напряжения вторичной обмотки запасает энергию и отдает ее в нагрузку в промежутках между импульсами (кривая 2, рисунок 2.17). В результате пульсации напряжения на нагрузке значительно уменьшаются (изменение напряжения нагрузки ин происходит в пределах от ин мин до ин макс вместо от 0 до  $U_m$  при отсутствии сглаживающего конденсатора) [1].

Емкостной фильтр наиболее эффективен при малых нагрузках ( $R_H$  большие). Индуктивный фильтр напротив эффективен при больших нагрузках ( $R_H$  малые). В отличие от емкостного в индуктивном фильтре выпрямленный ток протекает не импульсами, а непрерывно, что облегчает режим работы диодов и трансформатора.

С целью обеспечения заданного коэффициента пульсаций  $K_{II}$  при однополупериодном выпрямлении величину емкости конденсатора емкостного фильтра определяют из соотношения [1]:

$$C = \frac{2}{\omega R_H} \cdot \frac{100}{K_{II}},$$

где

$\omega$  - круговая частота напряжения сети, питающей выпрямитель.

Для двухполупериодных выпрямителей емкость может быть почти в четыре раза меньше за счет уменьшения амплитуды основной гармонической составляющей пульсаций примерно в два раза и увеличения частоты ее в два раза, то есть [1]:

$$C = \frac{1}{2\omega R_H} \cdot \frac{100}{K_{II}}.$$

Для индуктивного фильтра однофазного двухполупериодного выпрямителя:

$$L = \frac{R_H}{3\omega K_{II}}.$$

В случае, когда расчетные значения С и L получаются слишком большими, применяют Г и П-образные фильтры (рисунок 2.16 в, г).

В Г-образном фильтре емкость конденсатора выбирают из условия  $1/(\omega C) \ll R_H$ . При этом:

$$K_{CG} = \omega^2 LC \text{ и } LC = \frac{K_{CG} + 1}{\omega^2}.$$

П-образный фильтр дает еще более высокий коэффициент сглаживания, равный произведению коэффициентов сглаживания двух его звеньев, представленных емкостью  $C_1$  и Г-образной цепочкой  $LC_2$  [1].

В выпрямителях большой мощности применение П-образного фильтра нерационально, так как в этом случае выпрямитель работает на емкость, что ухудшает условия работы диодов и трансформатора [1].

Для получения высокого коэффициента сглаживания в мощных выпрямителях целесообразно применять каскадное включение Г-образных фильтров. Результирующий коэффициент сглаживания при этом равен произведению коэффициентов сглаживания отдельных звеньев [1].

При высоких значениях выпрямленного напряжения (5-10 кВ) или при малых значениях выпрямленного тока (до 10-20 мА) применяются Г-образные RC-фильтры, в которых вместо индуктивности L включается активное сопротивление  $R_{\phi}$ . Параметры элементов таких фильтров определяются по формулам [1]:

$$R_{\phi} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}, C = \frac{K_{\text{сз}} (R_{\phi} + R_{\text{н}})}{\omega R_{\phi} R_{\text{н}}},$$

где  $U_{\text{вх}}$ ,  $U_{\text{н}}$  - напряжение на входе фильтра и на нагрузке;  
 $I_{\text{н}}$  - ток нагрузки.

Такие фильтры имеют малые габаритные размеры и низкую стоимость.

Резонансные фильтры (рисунок 2.16, д, е) содержат LC-контур, настроенный на частоту первой гармоники. Если включить параллельный резонансный контур, в котором используется явление резонанса токов, последовательно с нагрузкой (фильтр-пробка), первая гармоника в цепь нагрузки не пойдет, так как сопротивление резонансного контура для этого тока очень велико. Такой фильтр эффективен при больших сопротивлениях нагрузки [1].

Для низкоомных нагрузок применяют последовательный резонансный контур (режекторный фильтр), включенный параллельно нагрузке. В режекторном фильтре используется явление резонанса напряжений. При этом фильтр шунтирует сопротивление нагрузки и через него проходит первая гармоника выпрямленного тока [1].

Для фильтрации выпрямленного тока по нескольким гармоническим составляющим используют многосвязные фильтры с последовательно-параллельным включением элементарных резонансных звеньев, каждое из которых настроено на определенную резонансную частоту [1].

### 2.6.2.3. Силовые трансформаторы неуправляемых выпрямителей

Выше были рассмотрены основные виды трансформаторов питания. Следует иметь в виду, что в справочниках указываются действующие значения токов и напряжений, в то время как конденсатор фильтра (рисунок 2.16 а) заряжается до амплитудного значения напряжения. На рисунке 2.18 приведена зависимость напряжения на конденсаторе фильтра от тока нагрузки (при емкости конденсатора не менее 200 мкФ) [1].

Как следует из рисунка 2.18, в режиме холостого хода (ток нагрузки  $I_{\text{н}}$  равен нулю) напряжение на конденсаторе равно амплитудному значению напряжения вторичной обмотки  $U_m = U \cdot \sqrt{2}$  (без учета падения напряжения на выпрямляющих диодах). При увеличении тока нагрузки  $U_{\text{н}}$  падает и становится равным действующему напряжению вторичной обмотки  $U$  при токе нагрузки равному номинальному (справочному) значению [1].

Рассмотрим пример. В справочнике на трансформатор указаны номинальные действующие значения напряжения и тока ( $U=24$  В,  $I_{\text{ном}} = 1$  А). Требуется определить напряжение на конденсаторе фильтра, если ток нагрузки равен 0,5А. Амплитудное значение напряжения вторичной обмотки  $U_m = 1,4 \cdot 24 = 34$  В. В соответствии с графиком (рисунок 2.18) при  $I_{\text{ном}}=0,5$  А ( $I_{\text{н}}/I_{\text{ном}} = 0,5$ ) получаем  $U_{\text{н}} = 0,85 \cdot 34 = 29$  В [1].

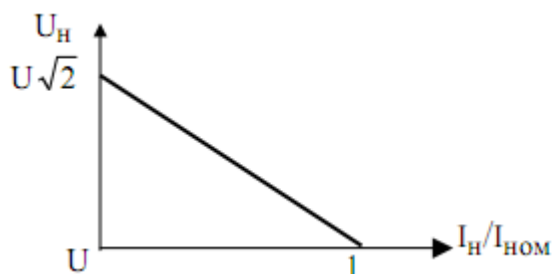


Рисунок 2.18. Зависимость выходного напряжения емкостного фильтра от тока нагрузки

## 2.7. Управляемые выпрямители

Ряд полупроводниковых выпрямительных устройств имеет системы автоматического регулирования выходных электрических параметров (стабилизация напряжения и тока, дистанционное и программное изменение выходных электрических параметров и тому подобное) [1].

**Способы регулирования напряжений выпрямителей.** Выпрямленное напряжение выпрямителя с неуправляемыми вентилями можно регулировать: на стороне постоянного тока – при помощи реостата или потенциометра; на стороне переменного тока – путем изменения подведенного к выпрямителю переменного напряжения.

**Регулирование с помощью трансформатора или автотрансформатора с отводами обмотки.** Данный способ регулирования напряжения является наиболее экономичным, так как при регулировании на всех ступенях сохраняется наиболее высокий коэффициент мощности. Принцип действия выпрямителя, в котором реализуется данный способ, иллюстрирует рисунок 2.19 [1].

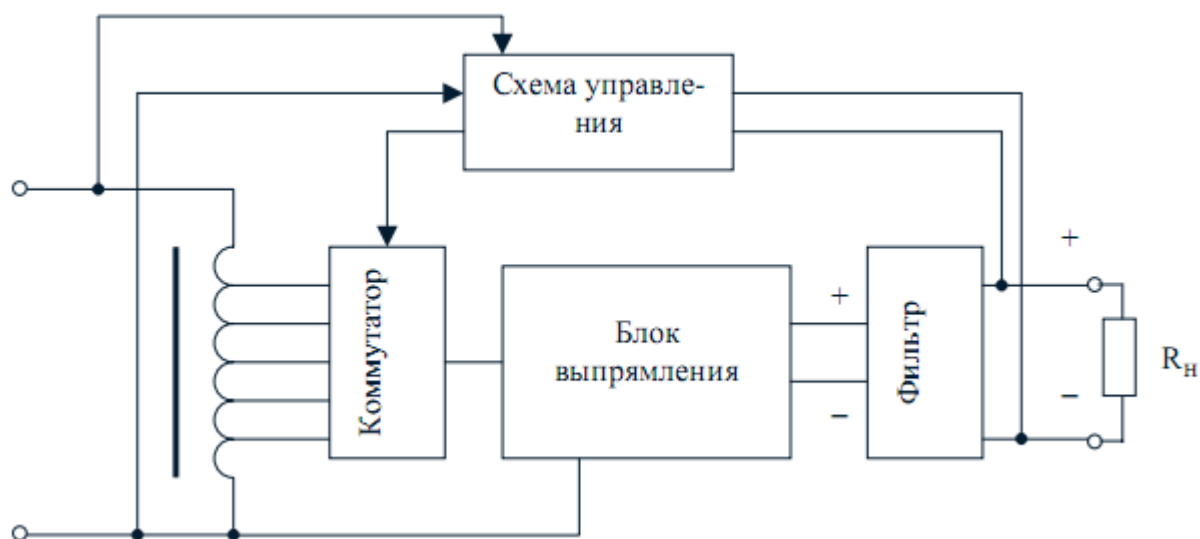


Рисунок 2.19. Структурная схема управляемого выпрямителя, использующего авто-трансформатор с отводами обмотки

Напряжение питающей сети понижается автотрансформатором, на отводах обмотки которого формируется различные по величине напряжения. Вместо автотрансформатора может использоваться трансформатор, обеспечивающий гальваническую развязку схемы от питающей сети. Коммутатор, управляемый сигналами схемы управления подключает тот или иной отвод обмотки к входу блока выпрямления, собранного на полупроводниковых диодах. Коммутация отводов может осуществляться либо коммутационными аппаратами механического типа, либо тиристорными переключателями. Регулирование с помощью коммутаторов механического типа характеризуется рядом принципиальных недостатков (регулирование не плавное, а ступенчатое, инерционность, малая надежность, низкий КПД, искрение). Регулирование с помощью тиристорных переключателей свободно от указанных недостатков и позволяет осуществлять плавное регулирование напряжения между ступенями [1].

В представленном на рисунке 2.19 выпрямителе реализуется функция стабилизации выходного напряжения. Схема управления вырабатывает сигналы

управления тиристорным коммутатором в зависимости от значения выходного напряжения и фазового угла переменного напряжения на входе блока выпрямления. Регулирование выходного напряжения может осуществляться подачей на схему управления дополнительного управляющего сигнала (изменяющегося сопротивления или напряжения). Регулирование с помощью дросселей насыщения. Дроссели насыщения могут быть включены последовательно либо с первичной обмоткой силового трансформатора, либо с вторичной его обмоткой. На рисунке 2.20 представлен выпрямитель, в котором дроссель насыщения включен последовательно с первичной обмоткой силового трансформатора [1].

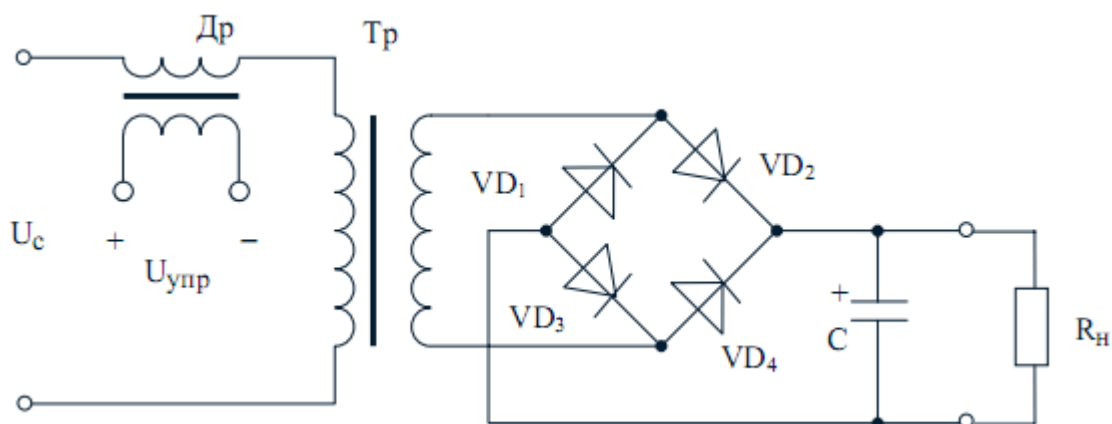


Рисунок 2.20. Управляемый выпрямитель с дросселем насыщения

Принцип действия выпрямителя заключается в том, что рабочая обмотка дросселя насыщения Др и первичная обмотка силового трансформатора Тр образуют делитель напряжения питающей сети  $U_c$ , причем сопротивление обоих плеч этого делителя имеет преимущественно индуктивный характер. Напряжение первичной обмотки трансформатора Тр и, следовательно, выходное напряжение выпрямителя зависят от величины индуктивного сопротивления дросселя Др, которое может регулироваться за счет изменения напряжения на управляющей обмотке. Чем больше величина постоянного напряжения  $U_{упр}$ , приложенного к обмотке управления, тем меньше сопротивление дросселя и, следовательно, больше выходное напряжение выпрямителя [1].

Регулирование напряжения с помощью управляемых вентилях (тиристоров) может быть осуществлено несколькими способами: путем изменения параметров вентилях, входящих непосредственно в выпрямитель; изменением параметров вентилях, включенных в первичную обмотку трансформатора (фазовое регулирование на стороне переменного тока); изменением ширины импульсов (широтно-импульсное регулирование на стороне постоянного тока).

На рисунке 2.21 показана структура выпрямителя, в котором выходное напряжение регулируется за счет изменения параметров вентилях, входящих непосредственно в выпрямитель [1].

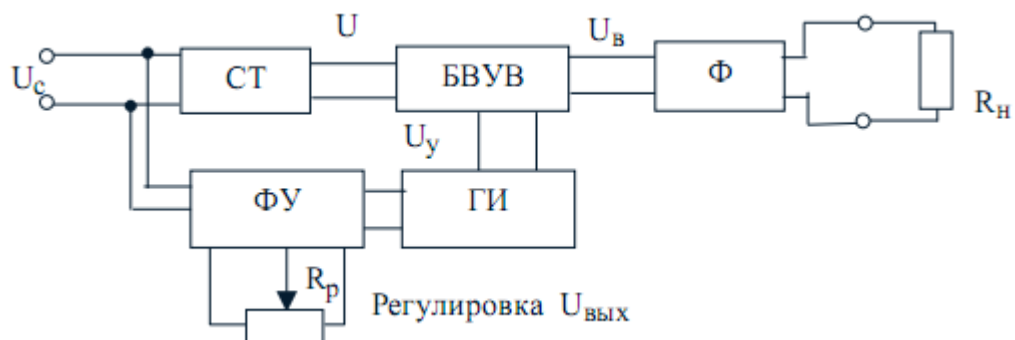


Рисунок 2.21. Регулируемый выпрямитель с управляемыми вентилями

На рисунке СТ – силовой трансформатор, БВУВ – блок выпрямления с управляемыми вентилями, Ф – сглаживающий фильтр, ГИ – генератор импульсов, ФУ – фазосдвигающее устройство

ГИ вырабатывает импульсы напряжения  $U_y$ , которые подаются на управляющие электроды тиристоров (в рассматриваемом выпрямителе используются два тиристора, управляемых по отдельным каналам напряжениями  $U_{y1}$  и  $U_{y2}$ ) [1].

Управляющие импульсы синхронизируются с изменением сетевого напряжения  $U_c$  и сдвинуты относительно нулевых значений напряжения вторичной обмотки  $U$  на угол  $\alpha$  ( $\alpha = 0 - \pi$ ). Изменяя фазовый угол  $\alpha$ , например, с помощью потенциометра  $R_p$ , можно управлять моментами перехода вентилей в проводящее состояние, то есть режимами работы силовой части выпрямителя. В результате выпрямленное напряжение  $U_В$  изменяется по форме, а, следовательно, изменяется и величина средне выпрямленного напряжения (рисунок 2.22) [1].

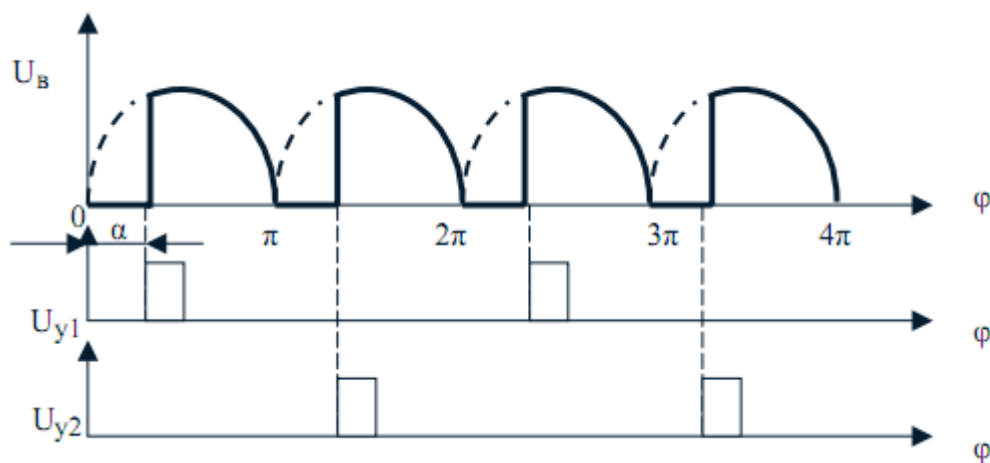


Рисунок 2.22. Временные диаграммы работы выпрямителя на рисунке 2.21

С увеличением угла  $\alpha$  выходное напряжение уменьшается, но при этом увеличиваются пульсации выпрямленного напряжения и ухудшается коэффициент мощности выпрямителя, что является основным недостатком всех обычных управляемых выпрямителей [1].

Принципиальное исполнение основных элементов системы управления ФУ и ГИ зависят от мощности выпрямителя, от глубины диапазона регулирования выходного напряжения, от частоты напряжения питающей сети и т.д. [1].

## Реализация регулируемых выпрямителей с управляемыми вентилями

Простейшие схемы регулируемых выпрямителей образуются из соответствующих схем, нерегулируемых выпрямителей при полной или частичной замене полупроводниковых выпрямительных диодов тиристорами [1].

Один из вариантов реализации управляемого выпрямителя представлен на рисунке 2.23, а временная диаграмма его работы на рисунке 2.24 [1].

Пусть в начальный произвольно выбранный момент времени к началу первичной обмотки силового трансформатора  $T_p$  оказался приложенным положительный потенциал, к ее концу - отрицательный (напряжение гармонически изменяется от нулевого значения). Несмотря на наличие положительного напряжения на аноде тиристора  $VD_1$  он находится в закрытом состоянии, так как на его управляющем электроде отсутствует открывающее напряжение. Импульс управляющего напряжения подается на тиристор в момент времени, когда фазовый угол  $U_c$  изменится на величину  $\alpha$  (рисунок 2.24) [1].

Тиристор  $VD_1$  открывается, через него начинает протекать ток нагрузки, а элементы сглаживающего фильтра - дроссель  $D_p$  с индуктивностью  $L$  и конденсатор  $C$  - запасают электрическую энергию из питающей сети. После смены полярности напряжения питания тиристор  $VD_1$  закрывается. В течение последующего интервала времени (до момента подачи импульса напряжения на управляющий электрод тиристора  $VD_2$ ) нагрузка отключена от сети, но через нее протекает ток дросселя, который возвращается через диод  $VD_3$  [1].

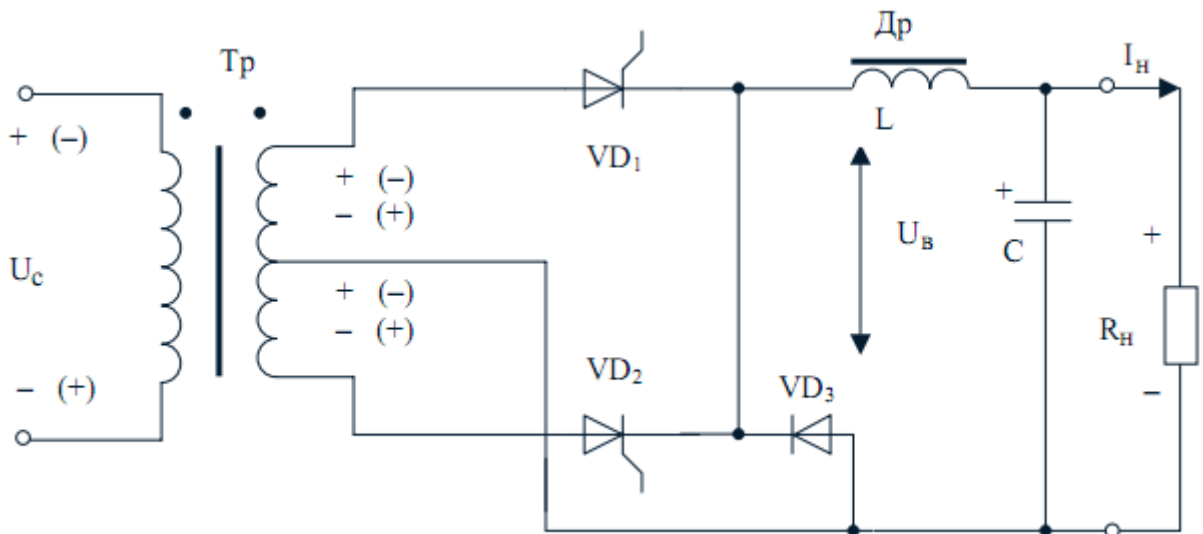


Рисунок 2.23. Управляемый выпрямитель с трансформатором, имеющим средний отвод вторичной обмотки

После подачи импульса управляющего напряжения на тиристор  $VD_2$  он открывается и начинает проводить ток нагрузки. При этом диод  $VD_3$  закрывается (на его катод положительный потенциал). Тиристор  $VD_2$  проводит ток до очередной смены полярности напряжения  $U_c$ . В дальнейшем процессы в схеме регулируемого выпрямителя (рисунок 2.24) повторяются [1].

Очевидно, что, изменяя во времени момент открывания тиристоров  $VD_1$  и  $VD_2$  относительно момента прохождения питающего напряжения через свое нулевое значение, можно осуществлять регулирование эффективного значения напряжения на нагрузке. Частным случаем такого регулирования является



стабилизация выходного напряжения, когда его значение с определенной точностью поддерживается неизменным во всех условиях и режимах работы выпрямителя [1].

Электромагнитные процессы, имеющие место в схеме (рисунок 2.25), полностью идентичны рассмотренным выше (рисунок 2.24), за исключением того, что одновременно с открыванием тиристора  $VD_2$  открывается диод  $VD_3$ , а при открывании тиристора  $VD_4$  открывается диод  $VD_1$  [1].

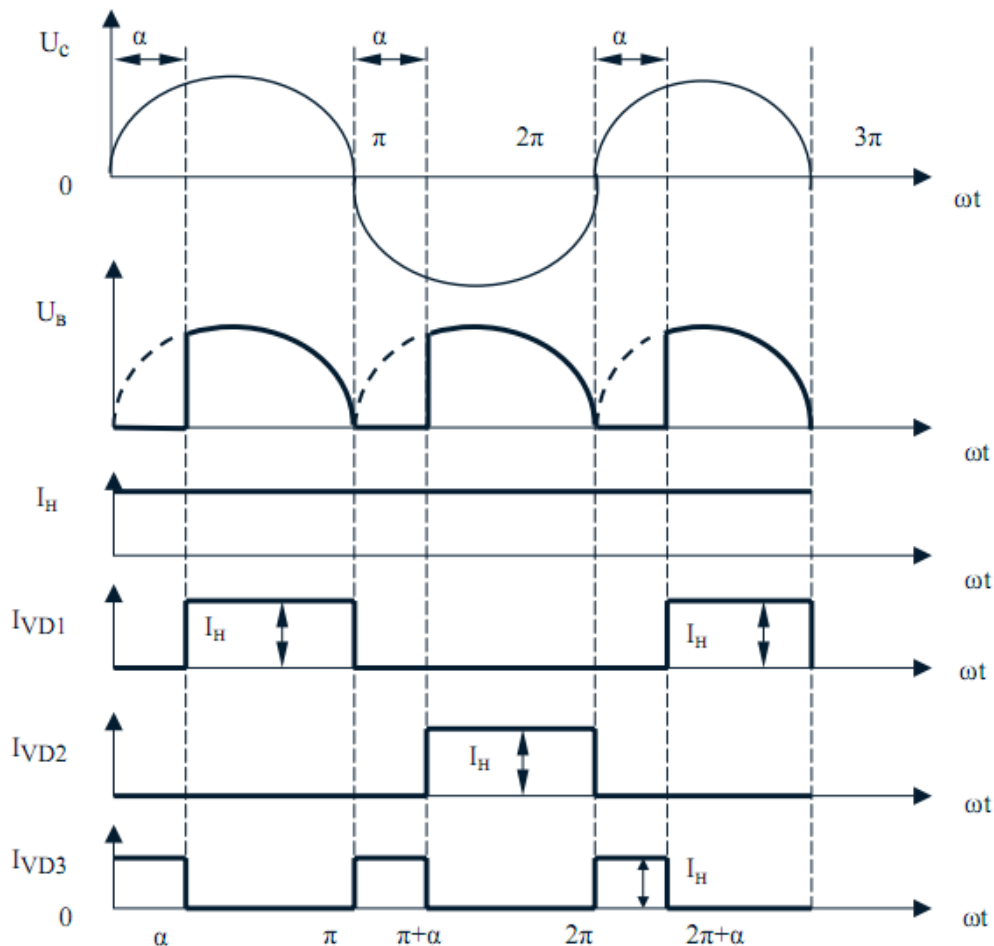


Рисунок 2.24. Временные диаграммы, поясняющие работу регулируемого выпрямителя

Другой вариант регулируемого выпрямителя представлен на рисунке 2.25 [1].

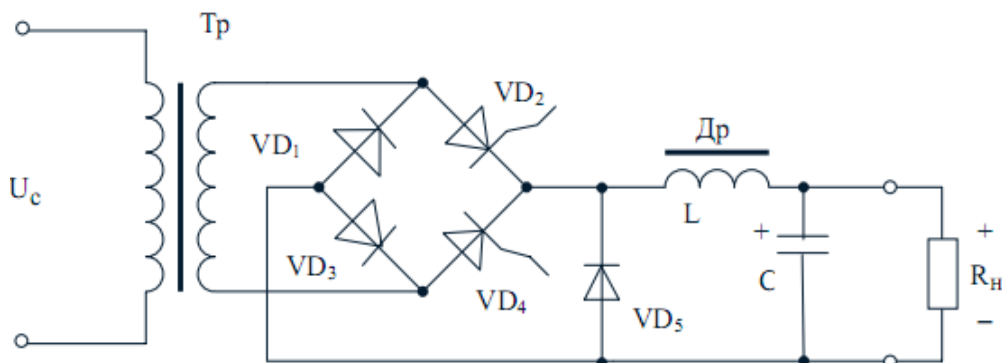


Рисунок 2.25. Управляемый выпрямитель с трансформатором без вывода средней точки

## 2.8. Стабилизаторы напряжения

Для нормального функционирования большинства электронных устройств необходимо обеспечить их стабильным напряжением питания. Основными факторами, вызывающими колебания напряжения являются: колебания напряжения питающей сети, изменения частоты питающего напряжения, колебания сопротивления нагрузки, изменения температуры [1].

В зависимости от типа питаемого устройства относительное изменение напряжения питания  $(\Delta U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВЫХ.НОМ}}) \cdot 100\%$  может измениться в пределах от 0,005 до 3% и более.

Устройства, автоматически поддерживающие неизменным напряжение (ток) на своем выходе, называются стабилизаторами напряжения (тока). Используемые в ИП стабилизаторы напряжения делятся на две группы: параметрические и компенсационные. Параметрические стабилизаторы строятся на основе нелинейных элементов (стабилитронов, варисторов и др.), параметры которых изменяются непосредственно под воздействием дестабилизирующих факторов (рисунок 2.26) [1].

Компенсаторные стабилизаторы имеют обратную связь по напряжению, благодаря которой выходное сопротивление стабилизатора существенно уменьшается и выходное напряжение остается более стабильным (рисунок 2.27) [1].

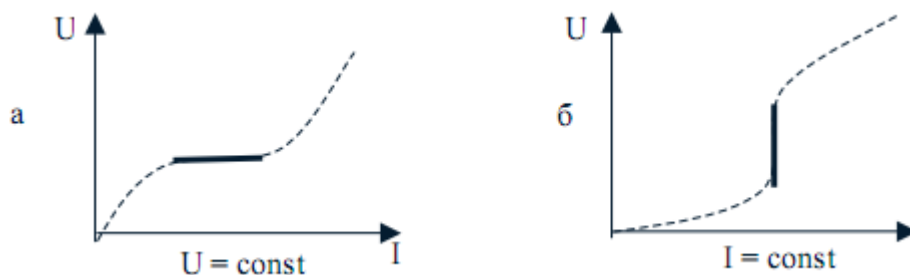


Рисунок 2.26. Вольтамперные характеристики нелинейных элементов. Стабилизатор напряжения (а), Стабилизатор тока (б)

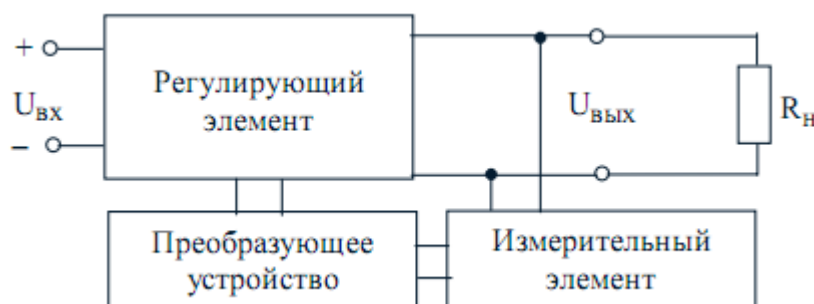


Рисунок 2.27. Функциональная схема компенсационного стабилизатора

Стабилизатор работает следующим образом. В измерительном элементе происходит сравнение выходного напряжения с опорным и вырабатывается сигнал рассогласования. В преобразующем устройстве сигнал рассогласования усиливается и преобразуется в управляющий сигнал для регулирующего элемента. Под действием этого управляющего сигнала изменяется внутреннее состояние регулирующего элемента так, чтобы поддерживать выходное напряжение равное опорному [1].

## 2.8.1. Основные параметры стабилизаторов

Наиболее важными электрическими параметрами стабилизаторов напряжения являются [1]:

1) Коэффициент стабилизации:

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{BX}}{U_{BX}} : \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{BX} \cdot U_{ВЫХ}}{U_{BX} \cdot \Delta U_{ВЫХ}},$$

где  $U_{ВЫХ}$ ,  $U_{ВЫХ}$  - входное и выходное напряжения;

$\Delta U_{ВЫХ}$  - приращение выходного напряжения обусловленное изменением напряжения на входе  $\Delta U_{ВХ}$ .

В общем случае коэффициентом стабилизации напряжения называют частное от деления относительного изменения напряжения на входе на относительное изменение напряжения на выходе стабилизатора.

Различают интегральный и дифференциальный коэффициенты стабилизации. Интегральный  $K_{CT}$  определяет стабилизацию в заданном диапазоне изменения дестабилизирующего фактора (входного напряжения) (рисунок 2.28), дифференциальный  $K_{CT}$  в бесконечно малом диапазоне изменения этой величины [1].

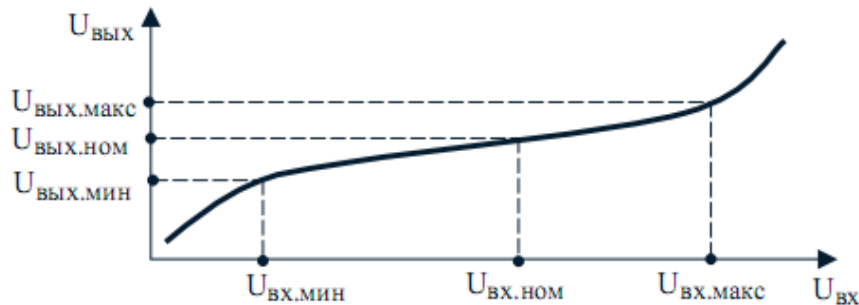


Рисунок 2.2.8 К определению интегрального коэффициента стабилизации

Практическое значение имеет интегральный коэффициент стабилизации  $K_{CT}$ :

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{BX}}{U_{ВХ.НОМ}} : \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ.НОМ}} = \lambda_H \cdot \frac{\Delta U_{BX}}{\Delta U_{ВЫХ}},$$

где  $\lambda_H = \frac{U_{ВЫХ.НОМ}}{U_{ВХ.НОМ}}$  - коэффициент передачи напряжения в номинальном  $U_{ВХ.НОМ}$

режиме;

2) Коэффициент неустойчивости по напряжению:

$$K_{НУ} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta U_{ВХ}} \cdot \frac{1}{U_{ВЫХ}} \cdot 100\%,$$

$K_{НУ}$  определяется как отношение производной выходного напряжения по входному напряжению к выходному напряжению;

3) Коэффициент неустойчивости по току:

$$K_{НТ} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ}} \cdot 100\% \Big|_{\Delta I_{Зад}}$$

$K_{НТ}$  определяется как относительное изменение выходного напряжения при изменении выходного тока в заданном интервале значений;

4) *Выходное сопротивление:*

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВЫХ}}},$$

Выходным сопротивлением стабилизатора называется отношение изменения напряжения на выходе стабилизатора к вызвавшему его изменению тока нагрузки при постоянном входном напряжении;

5) *Коэффициент подавления (сглаживания) пульсаций* – отношение напряжения пульсаций на входе стабилизатора к напряжению пульсаций на его выходе.

Для некоторых стабилизаторов коэффициент подавления пульсаций примерно равен коэффициенту стабилизации напряжения;

б) *Коэффициент полезного действия КПД* определяется как отношение мощности отдаваемой стабилизатором в нагрузку к мощности, потребляемой самим стабилизатором [1].

### 2.8.2. Требования, предъявляемые к стабилизаторам

В зависимости от назначения ИП и вида нагрузки к стабилизаторам предъявляются следующие требования [1]:

- 1) высокий КПД;
- 2) высокий коэффициент стабилизации  $K_{\text{ст}}$ ;
- 3) возможность плавной или ступенчатой регулировки выходного напряжения (тока);
- 4) минимальные габариты и вес;
- 5) минимальные пульсации выходного напряжения.

### 2.8.3. Параметрические стабилизаторы

Основными особенностями таких стабилизаторов являются: простота, невысокий КПД (особенно при переменном сопротивлении нагрузки), малый коэффициент стабилизации, трудность получения точного значения выходного напряжения и регулирования его без использования дополнительного проходного транзистора [1].

Схемы простейшего параметрического стабилизатора напряжения, собранного на стабилитроне представлены на рисунке 2.29 [1].

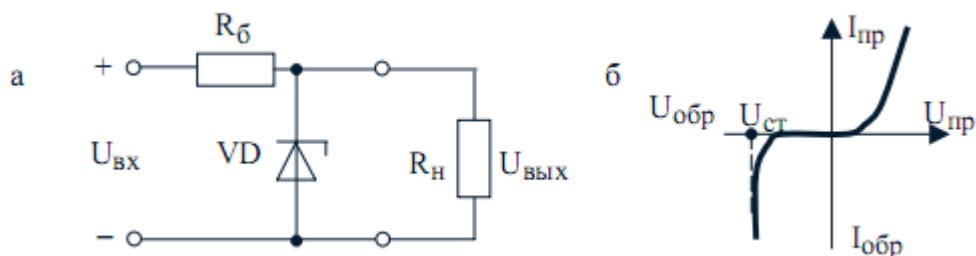


Рисунок 2.29. Параметрический стабилизатор напряжения на стабилитроне. Принципиальная схема (а), вольтамперная характеристика стабилитрона (б)

Для стабилизации напряжения используется участок вольтамперной характеристики с неизменным обратным напряжением при изменении обратного тока в интервале от  $I_{\text{ст мин}}$  до  $I_{\text{ст макс}}$ . Минимальное и максимальное значение тока

стабилизации  $I_{\text{ст мин.}}$ ,  $I_{\text{ст макс.}}$  определяются типоминалом стабилитрона. Типовые значения предельных токов стабилизации для маломощных стабилитронов:  $I_{\text{ст мин.}} = 3-5 \text{ мА}$ ,  $I_{\text{ст макс.}} = 20 - 45 \text{ мА}$  [1].

В случае уменьшения обратного тока стабилизации ниже  $I_{\text{ст мин.}}$  режим стабилизации нарушается. При превышении обратным током значения  $I_{\text{ст макс.}}$  обратимый пробой стабилитрона переходит в необратимый тепловой пробой [1].

Ограничение тока стабилизации осуществляется с помощью балластного резистора  $R_B$ . На этом же сопротивлении падает излишек напряжения  $\Delta U = U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}$ . Выбор значения сопротивления  $R_B$  производится с учетом диапазонов изменения: тока нагрузки, входного напряжения и тока стабилизации выбранного стабилитрона [1].

Коэффициент стабилизации по напряжению стабилизатора (рисунок 2.29) приблизительно может быть определен как отношение значений сопротивлений балластного резистора  $R_B$  и дифференциального сопротивления стабилитрона  $r_d$  ( $K_{\text{ст}} \approx R_B / r_d$ ). Для повышения  $K_{\text{ст}}$  целесообразно повышать значение сопротивления  $R_B$  и выбирать стабилитрон с малым изменением напряжения стабилизации во всем диапазоне изменения  $U_{\text{ст}}$ . Типовые значения  $K_{\text{ст}}$  схемы (рисунок 2.29) находятся в интервале от 20 до 40 единиц. Одним из недостатков простейших стабилизаторов является зависимость величины выходного напряжения от температуры. Температурные изменения  $U_{\text{вых}}$  могут быть уменьшены за счет применения прецизионных стабилитронов с малым температурным коэффициентом напряжения или использованием схемы термокомпенсации [1].

На рисунке 2.30 представлена улучшенная схема параметрического стабилизатора с термокомпенсацией. Диоды  $VD_2, VD_3, VD_4$  предназначены для термокомпенсации напряжения на опорном диоде  $VD_1$ .

Для схемы (рисунок 2.30)  $U_{\text{вых}} = U_{VD1} + U_{VD2} + U_{VD3} + U_{VD4}$ , где  $U_{VD1}$  - опорное напряжение на кремниевом стабилитроне,  $U_{VD2}, U_{VD3}, U_{VD4}$  - прямые напряжения на термокомпенсирующих германиевых диодах (или стабилитронах, включённых в обратном направлении).

Количество термокомпенсирующих диодов выбирается в зависимости от типа и количества кремниевых стабилитронов, включенных в обратном направлении [1].

При включении термокомпенсирующих диодов  $K_{\text{ст}}$  уменьшается примерно в 2-4 раза. Дополнительные диоды так же увеличивают выходное сопротивление схемы [1].

Повысить коэффициент стабилизации устройств с термокомпенсирующими диодами можно применив двухкаскадную схему (рисунок 2.31) [1].

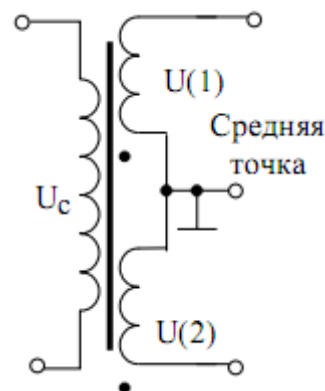


Рисунок 2.30. Параметрический стабилизатор с термокомпенсацией

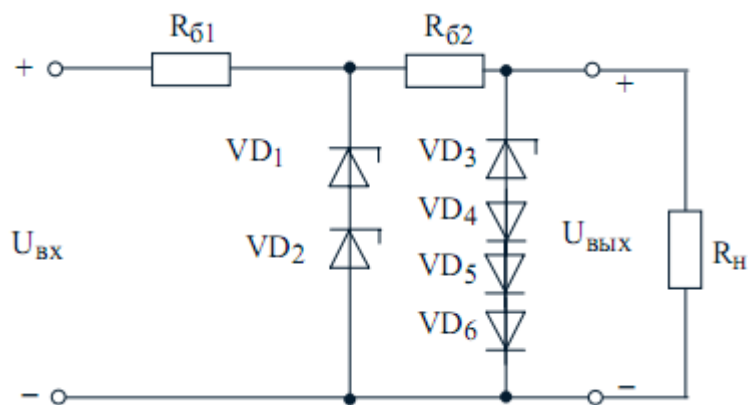


Рисунок 2.31. Двухкаскадный стабилизатор с термокомпенсацией

Результирующий коэффициент стабилизации схемы равен произведению коэффициентов стабилизации каскадов ( $K_{ст} = K_{ст1} \cdot K_{ст2}$ ). Выходное сопротивление определяется выходным сопротивлением 2-го каскада. Термокомпенсацию целесообразно использовать только во втором каскаде, чтобы первый каскад имел максимальный коэффициент стабилизации [1].

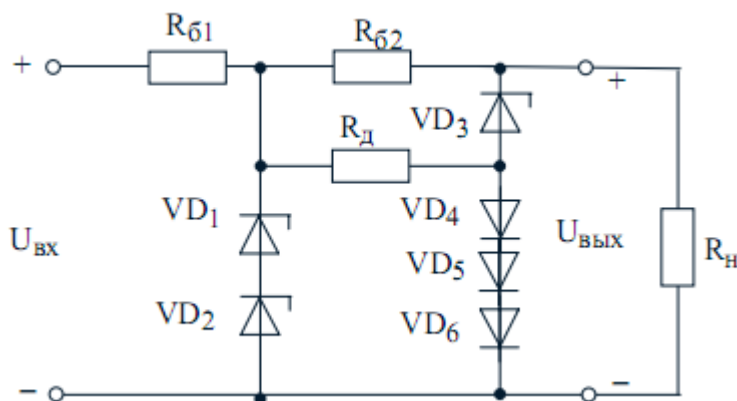


Рисунок 2.32. Двухкаскадный параметрический стабилизатор с уменьшенным выходным сопротивлением

В стабилизаторе (рисунок 2.32) через диоды  $VD_4 - VD_6$  пропускается дополнительный ток, протекающий через дополнительное сопротивление  $R_Д$ . При этом уменьшается динамическое сопротивление термокомпенсирующих диодов и, следовательно, выходное сопротивление схемы. Другой особенностью схемы (рисунок 2.32) является возможность плавной регулировки термокомпенсации путем изменения величины сопротивления  $R_Д$ . Недостатком стабилизатора (рисунок 2.32) является пониженный коэффициент полезного действия вследствие увеличения тока протекающего через термокомпенсирующие диоды [1].

*Повышение нагрузочной способности параметрических стабилизаторов.* Особенностью всех рассмотренных выше схем параметрических стабилизаторов является то, что в случае переменной нагрузки максимальный выходной ток не может превышать максимальный ток стабилизации стабилитрона. Увеличить выходной ток стабилизатора можно с помощью транзистора, включенного по схеме общий коллектор (рисунок 2.33) [1].

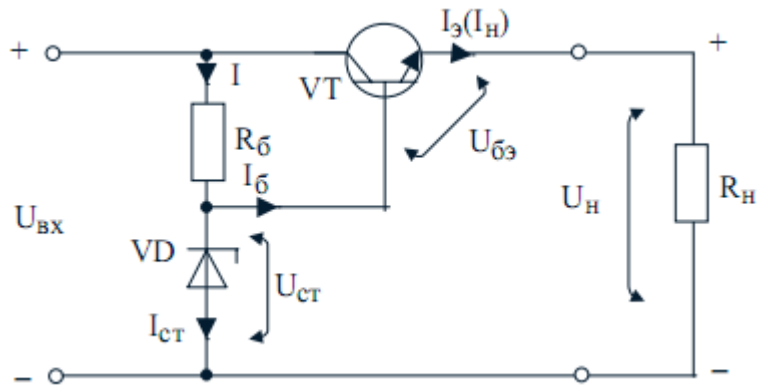


Рисунок 2.33. Параметрический стабилизатор с повышенной нагрузочной способностью

Элементы  $R_{б}$  и диод VD образуют обычный параметрический стабилизатор, нагрузкой которого является база транзистора VT. Транзистор в рассматриваемой схеме является усилителем тока нагрузки  $I_{н} = \beta \cdot I_{б}$ , где  $\beta$  - коэффициент передачи тока транзистора. Учитывая, что падение напряжения на переходе база-эмиттер величина практически постоянная и относительно небольшая (до 0,5 В для германиевых и до 1,0 В для кремниевых транзисторов), можно считать, что напряжение на нагрузке примерно равно напряжению стабилизации опорного диода VD (рисунок 2.33):  $U_{н} = U_{сг} - U_{бэ} \approx U_{сг}$  [1].

Для нормального функционирования устройства необходимо чтобы выполнялось следующее неравенство:  $I_{н} / \beta \leq (I_{ст.макс} - I_{ст.мин})$  где  $I_{ст.макс}$ ,  $I_{ст.мин}$  - максимальное и минимальное значение тока стабилизации стабилитрона. При выборе транзистора следует иметь в виду, что чем меньше ток отбираемый транзистором от стабилитрона, тем больше  $K_{сг}$  [1].

Мощные транзисторы имеют, как правило, малый коэффициент усиления тока от 10 до 40). Поэтому для получения больших токов нагрузки можно использовать два и более транзисторов, включенных по схеме Дарлингтона [1].

Стабилизатор (рисунок 2.33) можно рассматривать и как простейший компенсационный стабилизатор, так как в нем реализуется отрицательная обратная связь по напряжению. Нетрудно заметить, что в качестве регулирующего элемента выступает транзистор, для управления которым необходимы малые напряжения (около 0,2 - 0,6), что позволяет обойтись без измерительного элемента и преобразующего устройства [1].

Работа стабилизатора заключается в том, что при нормальном режиме (отсутствие дестабилизирующих факторов) на стабилитроне создается опорное напряжение  $U_{сг}$ , которое распределяется между переходом база-эмиттер транзистора и нагрузкой  $U_{сг} = U_{бэ} + U_{н}$ , то есть устанавливается некоторое значение  $U_{бэ} = U_{сг} - U_{н}$ , определяющее степень открытия транзистора VT (сопротивление перехода коллектор-эмиттер  $R_{кэ}$ ). Предположим, что изменяется сопротивление нагрузки, что приводит к изменению тока нагрузки. То есть данный дестабилизирующий фактор стремится изменить значение выходного напряжения в сторону увеличения или уменьшения. Процесс стабилизации схематично можно изобразить следующим образом [1]:

$$U_H \uparrow \rightarrow U_{\text{бэ}} \downarrow \rightarrow R_{\text{кэ}} \uparrow \rightarrow U_{\text{кэ}} \uparrow \rightarrow (U_H = U_{\text{вх}} - U_{\text{кэ}}) \downarrow$$

$$U_H \downarrow \rightarrow U_{\text{бэ}} \uparrow \rightarrow R_{\text{кэ}} \downarrow \rightarrow U_{\text{кэ}} \downarrow \rightarrow (U_H = U_{\text{вх}} - U_{\text{кэ}}) \uparrow.$$

Введение в схему (рисунок 2.33) потенциометра, подключенного параллельно стабилитрону, позволяет плавно регулировать выходное напряжение (рисунок 2.34).

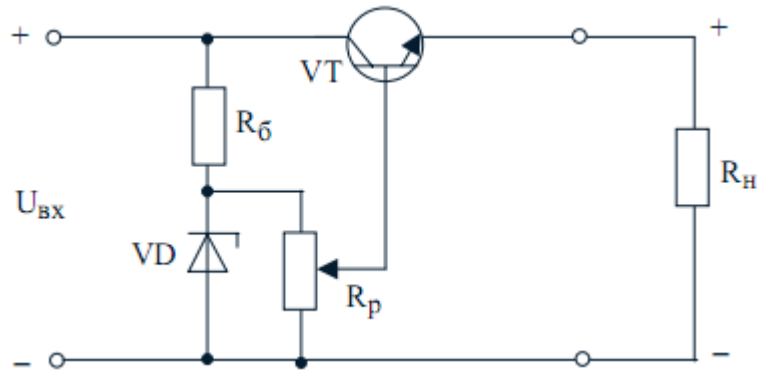


Рисунок 2.34. Параметрический стабилизатор с регулировкой выходного напряжения

При расчете схемы с регулировкой выходного напряжения необходимо учитывать, что для нормальной работы стабилизатора необходимо обеспечить протекание тока через  $R_p$  большего по величине тока базы транзистора не менее чем в 3 раза [1].

#### 2.8.4. Компенсационные стабилизаторы

Компенсационные стабилизаторы обладают более лучшими параметрами, чем параметрические стабилизаторы. Принцип их действия основан на том, что последовательно или параллельно с нагрузкой включается некоторое компенсационное сопротивление  $R_k$  (рисунок 2.35) [1].

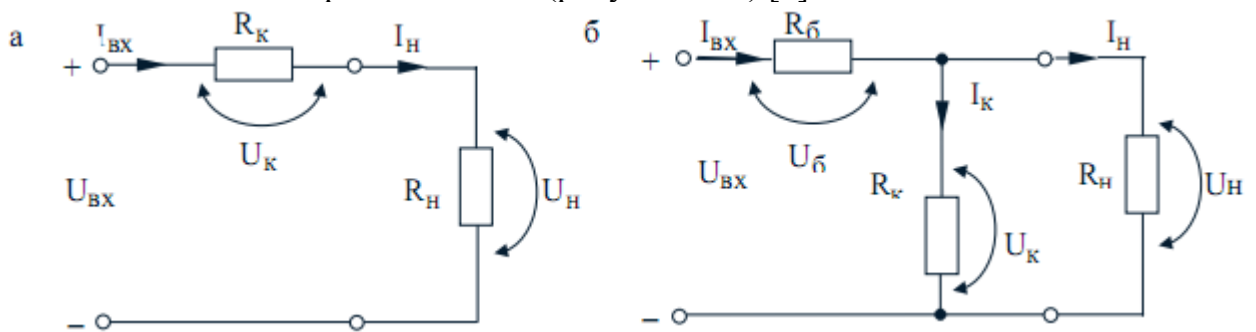


Рисунок 2.35. Компенсационные стабилизаторы: последовательный (а), параллельный (б)

В зависимости от вида подключения  $R_k$  компенсационные стабилизаторы делятся на последовательные и параллельные. В схеме последовательного стабилизатора входное напряжение  $U_{\text{вх}}$  распределяется между  $R_k$  и  $R_n$ :  $U_{\text{вх}} = U_k - U_n$ . Стабилизация напряжения на нагрузке достигается за счет изменения  $R_k$ , а следовательно и падения напряжения на  $R_k$  в соответствии с принципом [1]:



$$U_H \uparrow \rightarrow R_K \uparrow \rightarrow (U_K = U_{BX} - U_H) \uparrow \rightarrow U_H \downarrow$$

$$U_H \downarrow \rightarrow R_K \downarrow \rightarrow (U_K = U_{BX} - U_H) \downarrow \rightarrow U_H \uparrow$$

При параллельном соединении компенсационного резистора и нагрузки  $U_{BX}$  подается на делитель напряжения, образованный балластным резистором  $R_6$  и параллельно включенными  $R_K$  и  $R_H$ . Стабилизация напряжения  $U_H$  осуществляется за счет изменения  $R_K$ . При этом изменяется ток  $I_{BX} = I_K - I_H$ . Изменение  $I_{BX}$  приводит к изменению падения напряжения на балластном сопротивлении  $U_6$  и напряжение на нагрузке поддерживается постоянным [1]:

$$U_H \uparrow \rightarrow R_K \downarrow \rightarrow I_K \uparrow \rightarrow (I_{BX} = I_K + I_H) \uparrow \rightarrow U_6 \uparrow \rightarrow U_H \downarrow$$

$$U_H \downarrow \rightarrow R_K \uparrow \rightarrow I_K \downarrow \rightarrow (I_{BX} = I_K + I_H) \downarrow \rightarrow U_6 \downarrow \rightarrow U_H \uparrow$$

Изменение сопротивления  $R_K$  в стабилизаторах происходит автоматически в зависимости от текущих значений  $I_H$ ,  $U_{BX}$  и  $U_H$ .

Чаще всего в качестве  $R_K$  используются транзисторы (рисунок 2.36). При использовании биполярного транзистора  $R_K$  представляет собой сопротивление перехода коллектор-эмиттер ( $R_K = R_{KЭ}$ ). Управляющим электродом является база транзистора. Для полевого транзистора  $R_K$  - сопротивление канала между стоком и истоком ( $R_K = R_{СИ}$ ). Управляющим электродом является затвор [1].

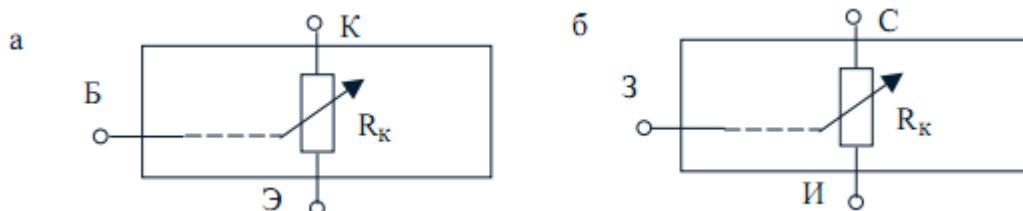


Рисунок 2.36. Транзисторы в качестве компенсационных сопротивлений: Биполярный (а), полевой (б)

### 2.8.5. Параллельные и последовательные стабилизаторы

Параллельные стабилизаторы имеют меньший КПД и применяются реже. Для стабилизации повышенных напряжений и токов при переменных нагрузках обычно используют стабилизаторы напряжения последовательного типа. Однако данные устройства необходимо защищать от короткого замыкания выходной цепи и выбирать транзистор с допустимым напряжением  $U_{КЭ} > U_{BX}$ . Структурные схемы компенсационных стабилизаторов представлены на рисунке 2.37 [1].

Регулирующим элементом является транзистор. На схему сравнения поступает два напряжения: опорное и выходное. Разность этих напряжений  $\Delta U = U_{вых} - U_{оп}$ , усиленная усилителем постоянного тока является управляющим напряжением  $U_{упр}$ , задающим необходимое внутреннее сопротивление  $R_Э$ .

Рассматриваемые устройства, в отличие от параметрических стабилизаторов, имеют меньшее выходное сопротивление за счет наличия отрицательной обратной связи по напряжению, а следовательно, и лучшие стабилизирующие свойства.

Источник опорного напряжения (ИОН) обычно представляет собой однокаскадный параметрический стабилизатор на кремниевом стабилитроне. От качества ИОН существенно зависит качество работы стабилизатора. Если по какой-либо причине изменяется напряжение стабилизации стабилитрона, то изменяется и напряжение на выходе компенсационного стабилизатора. Это следует учитывать при выборе стабилитрона. Прежде всего необходимо обращать внимание на [1]:

1. разброс значений напряжения стабилизации, который, в среднем составляет от 0,1 до 0,4 В;
2. температурный коэффициент напряжения стабилизации;
3. допустимый диапазон изменения тока стабилизации.

Назначение схемы сравнения - определять отклонение выходного напряжения (или его части) от заданного (опорного) напряжения  $U_{оп}$  и передавать это отклонение на схему УПТ по цепи обратной связи. Схема сравнения может быть выполнена на одном или нескольких транзисторах. В стабилизаторах напряжения ее обычно совмещают с УПТ (усилителем сигнала рассогласования) и источником опорного напряжения.

Измерительный элемент обычно представляет собой резистивный делитель напряжения подключенный к выходу стабилизатора. Основное требование к ИЭ - постоянство коэффициента деления. В цепи ИЭ может быть включен переменный или подстроечный резистор, что позволяет в определенных пределах изменять выходное напряжение [1].

Назначение схемы сравнения - определять отклонение выходного напряжения (или его части) от заданного (опорного) напряжения  $U_{оп}$  и передавать это отклонение на схему УПТ по цепи обратной связи. Схема сравнения может быть выполнена на одном или нескольких транзисторах. В стабилизаторах напряжения ее обычно совмещают с УПТ (усилителем сигнала рассогласования) и источником опорного напряжения [1].

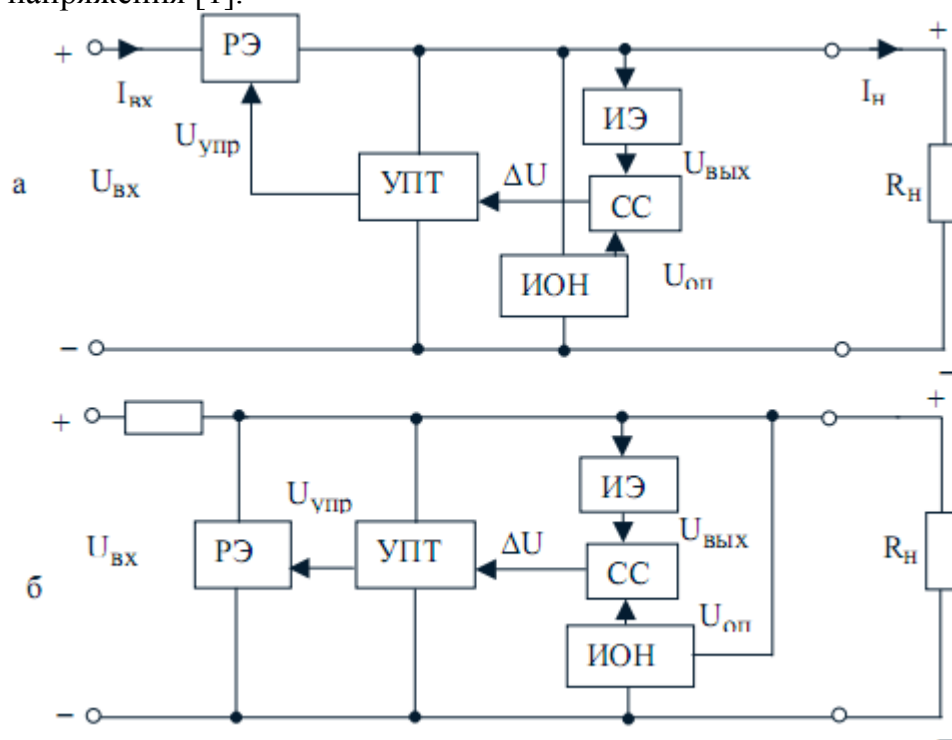


Рисунок 2.37. Структурные схемы компенсационных стабилизаторов

На рисунке РЭ – регулирующий элемент, УПТ – усилитель постоянного тока, ИЭ – измерительный элемент, ИОН – источник опорного напряжения, СС – схема сравнения,  $R_n$  – сопротивление нагрузки,  $R_b$  – балластный резистор.

Измерительный элемент обычно представляет собой резистивный делитель напряжения подключенный к выходу стабилизатора. Основное требование к ИЭ - постоянство коэффициента деления. В цепи ИЭ может быть включен переменный

или подстроечный резистор, что позволяет в определенных пределах изменять выходное напряжение [1].

УПТ в обычных стабилизаторах совмещается со СС. Для увеличения коэффициента стабилизации и уменьшения погрешностей, вызванных изменением температуры и разбросами параметров элементов применяют дифференциальные схемы УПТ. Еще более лучшими характеристиками обладают стабилизаторы с многокаскадными УПТ или УПТ, выполненными на операционных усилителях (ОУ).

В качестве регулирующего элемента используется один или несколько транзисторов включенных по схеме Дарлингтона. Коэффициент усиления по току РЭ определяется необходимым током нагрузки и мощностью УПТ. При токах нагрузки более 300 — 500 мА регулирующий транзистор устанавливается на теплоотвод (радиатор), геометрические параметры которого определяются, в основном, рассеиваемой мощностью РЭ и условиями теплообмена между радиатором и окружающей средой [1].

Изменение выходного напряжения в компенсационных стабилизаторах может осуществляться [1]:

1. делителем выходного напряжения,
2. делителем опорного напряжения,
3. одновременным делением опорного и выходного напряжения.

### Реализация компенсационных стабилизаторов на транзисторах

Принципиальная схема простого компенсационного стабилизатора напряжения представлена на рисунке 2.38 [1].

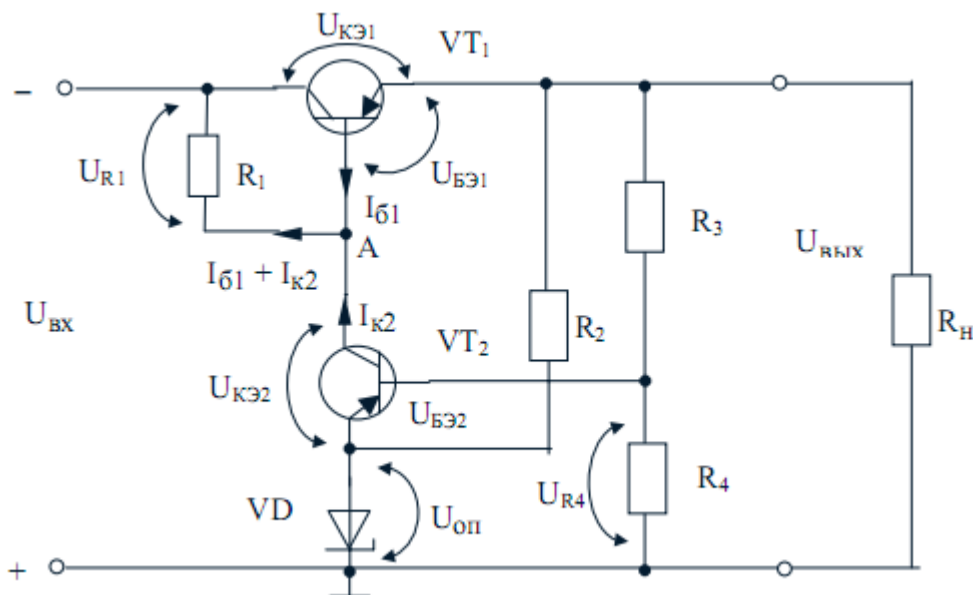


Рисунок 2.38. Последовательный компенсационный стабилизатор на двух транзисторах

Регулирующим элементом является транзистор  $VT_1$  ( $R_K = R_{KЭ1}$ ). Резистор  $R_2$  со стабилитроном  $VD$  образуют параметрический стабилизатор напряжения (источник опорного напряжения). Резисторы  $R_3$  и  $R_4$  являются делителем

выходного напряжения (ИЭ). На транзисторе  $VT_2$  выполнена схема сравнения и УПТ [1].

Потенциал точки А относительно земли  $U_A$  зависит от входного напряжения  $U_{BX}$  и состояния транзистора  $VT_2$ , переход коллектор-эмиттер, которого можно рассматривать как нижнее по схеме плечо делителя напряжения  $U_{BX} - U_{OT}$  (верхнее плечо - резистор  $R_1$ ). Очевидно, что  $U_{BX} = U_{OP} + U_{KЭ2} + U_{R1}$  и  $U_A = U_{BX} - U_{R1} = U_{KЭ2} + U_{OP}$ .

Учитывая, что транзистор  $VT_1$  включен по схеме повторителя напряжения (коллектор является общим электродом, а выходное напряжение снимается с эмиттера), и принимая во внимание малость падения напряжения  $U_{БЭ1}$  по сравнению с  $U_{ВЫХ}$ , можно считать, что  $U_{ВЫХ} \approx U_A$ . Следовательно задача стабилизации выходного напряжения заключается в поддержании постоянной величины  $U_A = U_{ВЫХ} - U_{R1}$  [1].

Пусть под действием дестабилизирующих факторов напряжение на нагрузке увеличилось. Это приведет к возрастанию напряжения  $U_{БЭ2} = U_{R4} - U_{OP}$  ( $U_{R4}$  увеличивается, а  $U_{OP} = \text{const}$ ), следствием чего станет увеличение коллекторного тока транзистора  $VT_2$ . В результате роста  $I_{K2}$  увеличивается падение напряжения на резисторе  $R_1$ , потенциал точки А уменьшается, а следовательно, и выходное напряжение [1].

При уменьшении выходного напряжения уменьшается напряжение  $U_{БЭ2} = U_{R4} - U_{OP}$ . Сопротивление перехода коллектор-эмиттер  $VT_2$  увеличивается, а  $I_{K2}$  уменьшается, следствием чего становится уменьшение  $U_{R1} = R_1(I_{K2} + I_{Б2})$ . Потенциал точки А, а следовательно, и выходное напряжение увеличивается.

В символьной форме механизм стабилизации напряжения можно представить следующим образом [1]:

$$U_{ВЫХ} \uparrow \rightarrow U_{R4} \uparrow \rightarrow (U_{БЭ2} = U_{R4} - U_{OP}) \uparrow \rightarrow R_{KЭ2} \downarrow \rightarrow I_{K2} \uparrow \rightarrow [U_{R1} = R_1(I_{K2} + I_{Б2})] \uparrow \rightarrow U_A \downarrow \rightarrow U_{ВЫХ} \downarrow$$

$$U_{ВЫХ} \downarrow \rightarrow U_{R4} \downarrow \rightarrow (U_{БЭ2} = U_{R4} - U_{OP}) \downarrow \rightarrow R_{KЭ2} \uparrow \rightarrow I_{K2} \downarrow \rightarrow [U_{R1} = R_1(I_{K2} + I_{Б2})] \downarrow \rightarrow U_A \uparrow \rightarrow U_{ВЫХ} \uparrow$$

Схема последовательного стабилизатора с дифференциальным УПТ представлена на рисунке 2.39. В этой схеме транзистор  $VT_3$  используется как обычный УПТ. На его базу подается часть выходного напряжения, снимаемого с резистора  $R_4$  делителя выходного напряжения, состоящего из резисторов  $R_3$  и  $R_4$ . На эмиттер  $VT_3$  подается опорное напряжение, но не прямо со стабилитрона  $VD$ , а через эмиттерный повторитель на транзисторе  $VT_2$ , в эмиттерную цепь которого включен резистор  $R_5$ . Падение напряжения на этом резисторе и используется в качестве опорного [1].

Схема простого параллельного стабилизатора показана на рисунке 2.40. Назначение элементов схемы (рисунок 2.40) аналогично рассмотренным выше компенсационным стабилизаторам последовательного типа. Регулирующим элементом является транзистор  $VT_1$ , усилителя постоянного тока -  $VT_2$ . Измерительный элемент образован резисторами  $R_3$  и  $R_4$ . Источником опорного напряжения является однокаскадный параметрический стабилизатор (элементы  $R_2$ ,  $VD$ ).

Напряжение на базе  $VT_2$  равно разности между частью выходного напряжения, снимаемого с резисторов  $R_3$  и  $R_4$  и опорным напряжением. Ток базы

регулирующего транзистора  $VT_1$  протекает через переход коллектор - эмиттер  $VT_2$  и зависит от разности указанных выше напряжений [1].

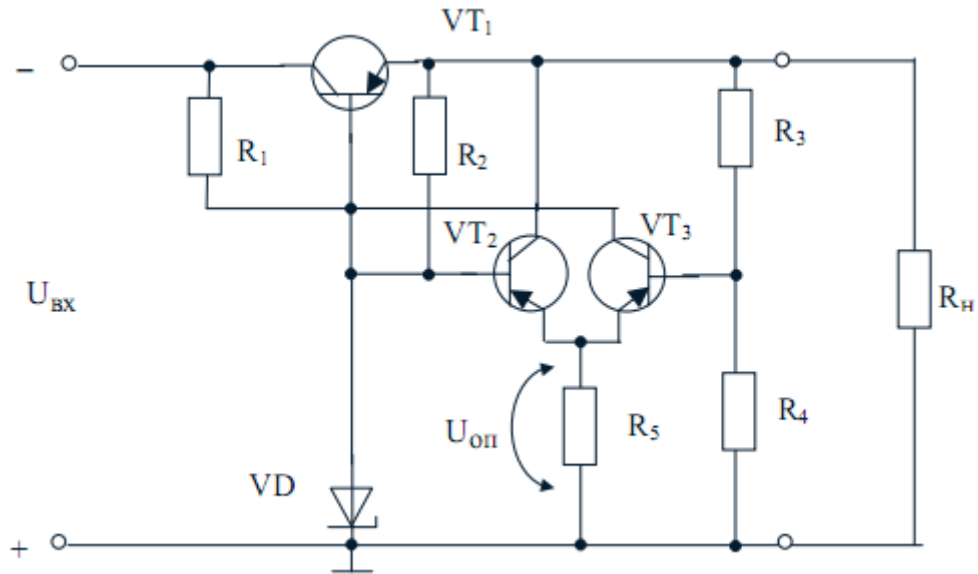


Рисунок 2.39. Последовательный компенсирующий стабилизатор с дифференциальным УПТ

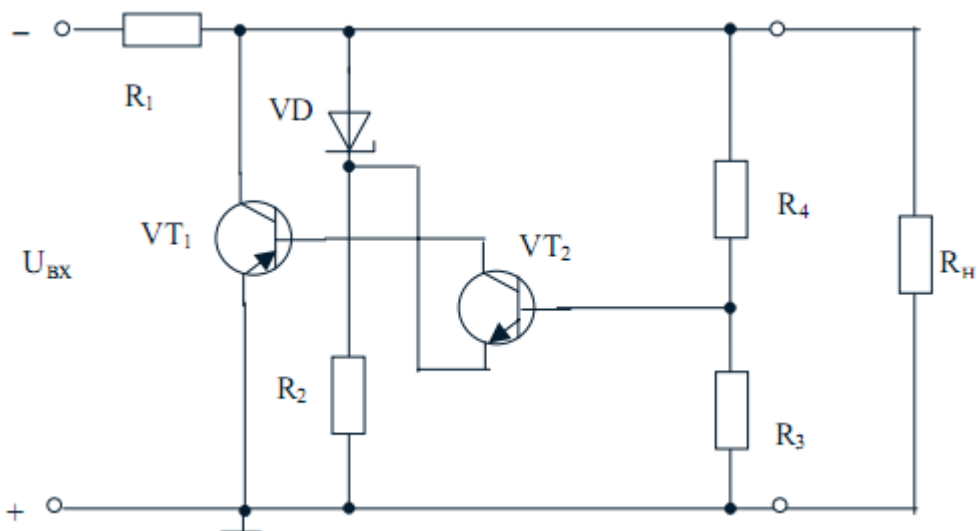


Рисунок 2.40. Параллельный компенсационный стабилизатор

При увеличении выходного напряжения под действием дестабилизирующих факторов транзистор  $VT_2$  открывается в большей степени, его коллекторный ток возрастает, что приводит к возрастанию тока коллектора  $VT_1$  и увеличению падения напряжения на резисторе  $R_1$ . Последнее компенсирует увеличение выходного напряжения. При уменьшении выходного напряжения, напротив, транзисторы  $VT_1$  и  $VT_2$  в большей степени закрываются, что приводит к уменьшению падения напряжения на резисторе  $R_1$  и компенсации уменьшения выходного напряжения [1].

## Защита транзисторных стабилизаторов от короткого замыкания в нагрузке

Короткое замыкание выхода является самым тяжелым режимом работы последовательного стабилизатора, так как в этом случае через регулирующий (проходной) транзистор протекает наибольший ток при наибольшем падении напряжения на нем ( $U_{КЭ} = U_{ВХ}$ ). Для предотвращения повреждения стабилизатора применяют ряд схемотехнических решений. Рассмотрим некоторые из них.

Довольно часто используется метод ограничения выходного тока в случае короткого замыкания в нагрузке (рисунок 2.41). Схема может быть использована как регулирующий транзистор практически в любом транзисторном стабилизаторе напряжения. Транзисторы  $VT_1$  и  $VT_3$ , включенные по схеме Дарлингтона, образуют непосредственно сам регулирующий (проходной) транзистор. Элементы  $VT_1$  и  $R_1$  составляют схему защиты. Резистор  $R_1$  выполняет функцию датчика тока (напряжение на нем пропорционально току нагрузки). Падение напряжения на  $R_1$  приложено к переходу база-эмиттер транзистора  $VT_1$  и является прямым для этого перехода [1].

При допустимых токах нагрузки падение напряжения на  $R_1$  недостаточно для открывания транзистора  $VT_1$  (менее 0,6 В для кремниевого транзистора), и схема защиты на работу проходного транзистора не оказывает никакого влияния.

В случае увеличения значения выходного тока (более заданного уровня) падение напряжения на  $R_1$  достигает величины, достаточной для перевода  $VT_1$  в открытое состояние. При открывании транзистора схемы защиты его открытый переход коллектор-эмиттер шунтирует переход база-эмиттер составного регулирующего транзистора, ток базы которого значительно уменьшается, а следовательно, уменьшается и ток нагрузки [1].

Порог срабатывания защиты задается сопротивлением резистора  $R_1$ . Если в качестве  $R_1$  использовать переменный резистор или набор дискретно переключаемых сопротивлений, можно в требуемых пределах изменять максимальное значение выходного тока. Ограничение выходного тока стабилизатора не только защищает его от повреждения, но в ряде случаев позволяет избежать и повреждения самой нагрузки, например, при неправильном ее подключении. Требуемое значение сопротивления  $R_1$  определяется по закону Ома:  $R_1 = U_{БЭ} / I_{ПОР}$ , где  $U_{БЭ}$  - напряжение на переходе база-эмиттер  $VT_1$ , при котором он открывается,  $I_{ПОР}$  - порог срабатывание токовой защиты [1].

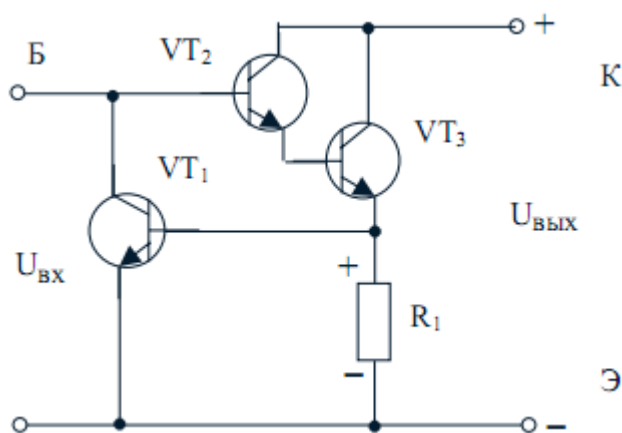


Рисунок 2.41. Защита от короткого замыкания в нагрузке составного проходного транзистора ( $VT_2, VT_3$ )

Недостатком схемы на рисунке 2.41 является относительно высокое напряжение, требуемое для открывания транзистора  $VT_1$ . При больших токах нагрузки резистор  $R_1$  должен иметь большую мощность рассеивания [1].

Пусть  $I_{ПОР}=10A$ , тогда в случае короткого замыкания выхода резистор  $R_1$  будет рассеивать мощность 6 Вт. С другой стороны, резистор  $R_1$  увеличивает выходное сопротивление устройства, а падение напряжения на нем уменьшает напряжение нагрузки. Другим недостатком данного схемотехнического решения является трудность установки точного значения порога срабатывания защиты [1].

Схема (рисунок 2.42) иллюстрирует несколько другой подход. Защита срабатывает при напряжении на резисторе-датчике тока  $R_3$  не в 0,6 В (как в схеме рисунка 2.41), а всего лишь несколько милливольт. Транзисторы  $VT_4$  и  $VT_5$  образуют составной проходной транзистор, остальные элементы относятся к схеме защиты.

Принцип действия основан на известном соотношении [1]:

$$\Delta U = \varphi_T I_n \frac{I_{K1}}{I_{K2}},$$

где  $\Delta U$  - разность падений напряжений на эмиттерных переходах согласованной пары транзисторов;

$\varphi_T$  - термический потенциал, равный  $\sim 26$  мВ при температуре  $+20^\circ C$ ;

$I_{K1}, I_{K2}$  - коллекторные токи соответствующих транзисторов ( $VT_1$  и  $VT_2$ ).

Коллекторный ток  $VT_1: I_{K1} = (U_{ПИТ} - U_{\text{бэ}1}) / R_1$  где  $U_{ПИТ}$  - напряжение питания схемы защиты.

Если через  $R_3$  протекает ток меньший порогового  $I_{ПОР}$ , то на нем падает напряжение не более нескольких милливольт, то есть к эмиттерному переходу транзистора  $VT_2$  приложено практически такое же напряжение, что и к одноименному переходу транзистора  $VT_1$  ( $U_{\text{бэ}1} \approx U_{\text{бэ}2}$ ). Так как  $VT_1$  и  $VT_2$  идентичные по параметрам транзисторы, их коллекторные токи примерно одинаковы ( $I_{K1} \approx I_{K2}$ ). Однако из-за того, что  $R_2 > R_1$  (обычно  $R_2 = 10 R_1$ ) транзистор  $VT_2$  оказывается насыщенным, падение напряжения на переходе база-эмиттер  $VT_3$  минимальна, и он закрыт. Закрытый транзистор  $VT_3$  на работу регулирующего составного транзистора влияния не оказывает [1].

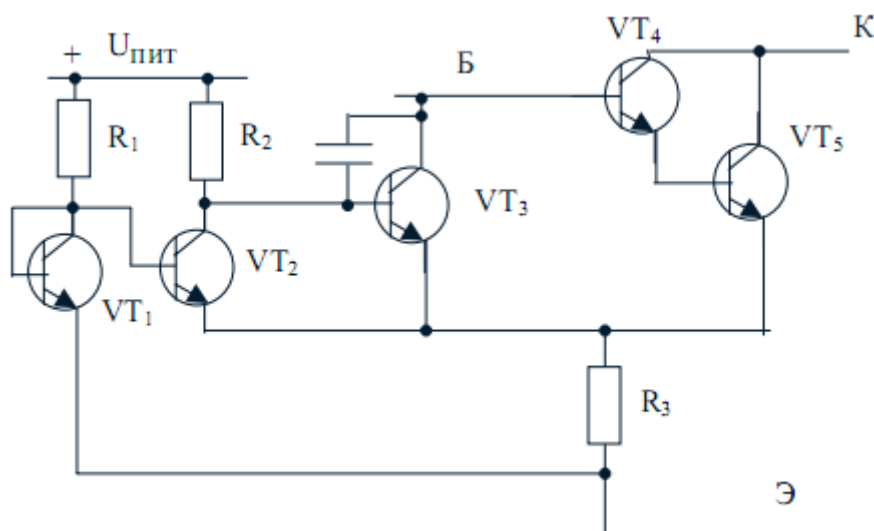


Рисунок 2.42. Уменьшение падения напряжения на резисторе-датчике тока

Если ток нагрузки превысит  $I_{\text{ПОР}}$  падение напряжения на  $R_3$  увеличится настолько, что согласно выражению  $\Delta U = \varphi_m \cdot \ln(I_{\kappa 1} / I_{\kappa 2})$  приведет к уменьшению  $I_{\kappa 2}$ , запираанию транзистора  $VT_2$  и открытию  $VT_3$ . Переход коллектор-эмиттер  $VT_3$  при этом шунтирует управляющий эмиттерный переход составного регулирующего транзистора. Таким образом, выходной ток стабилизатора ограничивается [1].

Предположим, что на  $R_3$  падает напряжение  $\approx 60$  мВ. Тогда по отношению к напряжениям эмиттерных переходов транзисторов и напряжению питания схемы защиты  $U_{\text{пит}}$  им можно пренебречь. При этом величина коллекторного тока транзистора  $VT_2$ :  $I_{\kappa 2} \approx (U_{\text{пит}} - U_{\text{бэ3}}) / R_2$ . Подставив со отношения, определяющие токи  $I_{\kappa 1}$  и  $I_{\kappa 2}$ , в вышеприведенное выражение для  $\Delta U$  получим [1]:

$$\Delta U = \varphi_m I_n \frac{R_2}{R_1},$$

так как  $U_{\text{бэ1}} \approx U_{\text{бэ2}}$ . Из последнего следует, что  $\Delta U$  не зависит от напряжения питания схемы. При  $R_2/R_1 = 10$ , величина  $\Delta U = 60 \pm (1 - 3)$  мВ, то есть порог срабатывания можно задавать с высокой точностью без какой-либо последующей подгонки, в то время как в схеме (рисунок 2.41) порог срабатывания защиты может колебаться в пределах  $\pm (10 - 20)\%$ .

Так как величина термического потенциала  $\varphi_m$  линейно зависит от температуры,  $R_3$  желательно изготавливать из медной проволоки или другого материала с температурным коэффициентом близким к температурному коэффициенту  $\varphi_m$  ( $+0,33\%/^{\circ}\text{C}$ ).

Конденсатор  $C$  служит для предотвращения открывания транзистора  $VT_3$  при переходных процессах в схеме (рекомендуемое значение емкости конденсатора  $C=0,005 - 0,015$  мкФ) [1].

Если  $R_1=15$  кОм,  $R_2=150$  кОм,  $R_3=0,6$  Ом, то величина порогового тока равна  $0,1$  А. Для другого значения  $I_{\text{ПОР}}$  сопротивление резисторов  $R_1$  и  $R_2$  рассчитываются так. Исходя из максимального входного тока защищаемого проходного транзистора  $I_{\text{вх}}$ , определяют ток короткого замыкания  $I_{\kappa 3}$ , который может протекать через транзистор  $VT_3$  в момент срабатывания защиты [1]:

$$I_{\kappa 3} = I_{\text{вх}} - \frac{I_{\text{нор}}}{h_{21\text{э}45}},$$

где  $h_{21\text{э}45}$  – коэффициент передачи тока составного регулирующего транзистора.

Затем рассчитывают ток базы  $VT_3$   $I_{\text{б3}} = I_{\kappa 3} / h_{21\text{э}45}$  и выбирают сопротивление  $R_2$  таким образом, чтобы  $I_{\kappa 2}$  в 5–10 раз превышал величину  $I_{\text{б3}}$ . Сопротивление резистора  $R_1$  выбирают из соотношения  $R_1=0,1 \cdot R_2$ . Следует отметить, что соотношение сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  может быть и иным. При этом порог срабатывания защиты (напряжения на  $R_3$ ) может изменяться от единиц до сотен милливольт [1].

Транзистор  $VT_3$  может быть, и не согласован с транзисторами  $VT_1$  и  $VT_2$ . Сами же транзисторы  $VT_1$  и  $VT_2$  должны быть согласованы. Поэтому в качестве  $VT_1$  и  $VT_2$  крайне нежелательно использовать отдельные транзисторы. Целесообразно использовать транзисторные сборки, представляющие собой наборы транзисторов, выполненных в едином кристалле [1].

На рисунке 2.43 представлена схема стабилизатора, у которого в случае короткого замыкания на выходе шунтируется источник опорного напряжения



(стабилитрон  $VD_3$ ) и потенциал базы составного регулирующего транзистора падает практически до потенциала земли (0 В).

К базе транзистора  $VT_1$  приложено напряжение смещения  $\sim 1,5$  В с диодов  $VD_1$  и  $VD_2$ , которые совместно с резистором  $R_1$  образуют делитель входного напряжения. Опорное напряжение создается параметрическим стабилизатором ( $R_2, VD_3$ ) и с делителя напряжения (переменное сопротивление  $R_3$ ) подается на базу составного регулирующего транзистора ( $VT_2, VT_3$ ).

В нормальных условиях (отсутствие короткого замыкания на выходе) транзистор  $VT_1$  закрыт, так как его переход база-эмиттер смещен в обратном направлении. Транзистор  $VT_1$  на работу стабилизатора влияния не оказывает [1].

При коротком замыкании выхода эмиттер  $VT_1$  замыкается на землю (общий «+»). Потенциал базы  $VT_1$  относительно эмиттера становится отрицательным, и транзистор открывается, шунтируя своим переходом коллектор-эмиттер стабилитрон  $VD_1$ . Коллекторный ток  $VT_1$  проходит через резистор  $R_2$ , падение напряжения на нем возрастает и уменьшается отрицательное смещение на базе составного проходного транзистора. Это приводит к закрытию регулирующего транзистора и резкому уменьшению выходного тока [1].

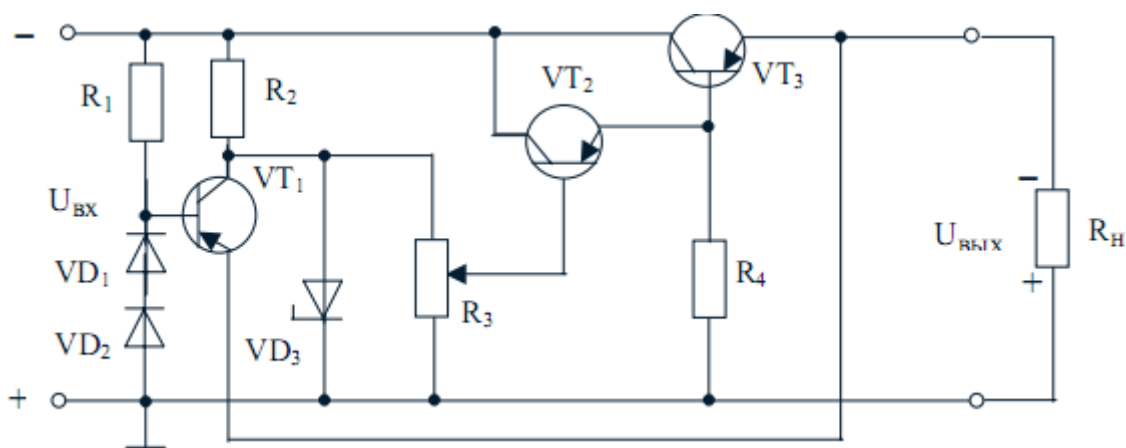


Рисунок 2.43. Последовательный стабилизатор с защитой от короткого замыкания в нагрузке

### 2.8.6. Стабилизаторы напряжения на интегральных микросхемах

Применение ИМС существенно улучшает параметры стабилизаторов напряжения и упрощает их проектирование. Как отмечалось выше, компенсационный стабилизатор представляет собой следящую систему, которая автоматически поддерживает постоянное значение выходного напряжения [1].

Снижая до минимума сигнал рассогласования  $\Delta U = K_1 U_{\text{вых}} - K_2 U_{\text{оп}}$ , где  $K_1$  и  $K_2$  — коэффициенты пропорциональности (в частном случае  $K_1 = K_2 = 1$ , если не осуществляется деление соответствующих напряжений). Качество стабилизации зависит от параметров усилителя сигнала рассогласования  $\Delta U$ . Поэтому применение ИМС, например, операционных усилителей в качестве устройств формирования сигналов управления проходными транзисторами, увеличивает коэффициент стабилизации стабилизаторов и снижает их выходное сопротивление. Кроме этого для построения ИП широко используются интегральные стабилизаторы напряжения [1].

**Стабилизатор напряжения с регулирующим ОУ.** Схема простого стабилизатора напряжения с регулируемым ОУ представлена на рисунке 2.44.

Схема состоит из ОУ, включенного по схеме неинвертирующего усилителя (для опорного напряжения  $U_{оп}$ ) с отрицательной обратной связью по напряжению. Сигнал обратной связи снимается с положительного полюса нагрузки  $R_H$  и ОУ таким образом «отрабатывает» выходное напряжение в соответствии с зависимостью:  $U_{вых} = U_{оп}(1 + R_2/R_1)$ . Необходимый при этом значении  $U_{вых}$  ток нагрузки обеспечивается проходным транзистором VT, включенным по схеме эмиттерного повторителя. При больших токах нагрузки этот транзистор может быть составным. Питание ОУ осуществляется не симметричными относительно земли напряжениями, а положительным однополярным напряжением. Это накладывает ограничение на полярность входного и опорного напряжений, которая может быть только положительной. ОУ будучи достаточно хорошим усилителем напряжения, поддерживает величину выходного напряжения практически постоянной. При этом стабилизатор эффективно подавляет пульсации  $U_{вх}$ , оставшиеся после выпрямления и низкочастотной фильтрации пониженного напряжения питающей сети. Колебания  $U_{вх}$  практически не влияют на стабильность  $U_{вых}$ , так как дрейф выходного напряжения ОУ, вызванный изменением напряжения питания крайне мал [1].

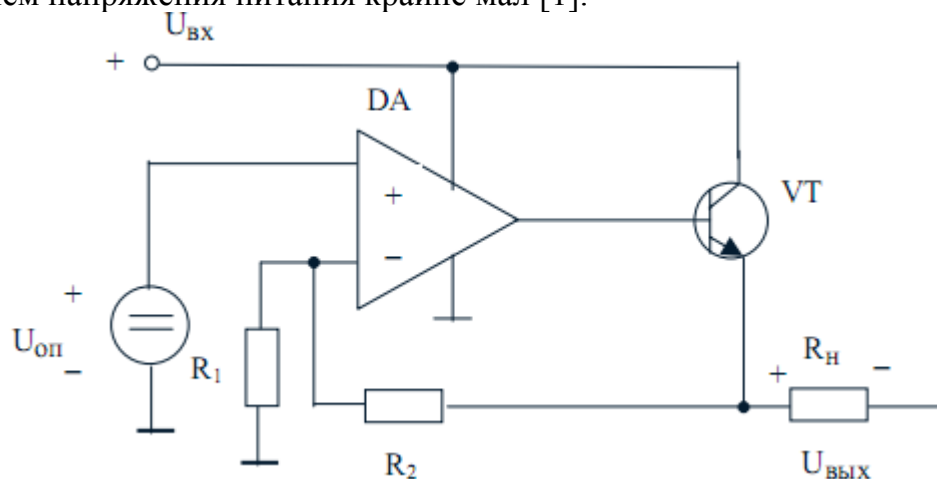


Рисунок 2.44. Базовая схема компенсационного стабилизатора напряжения с регулирующим ОУ

Учитывая, что ОУ получает однополярное питание, положительное напряжение питания ОУ можно увеличить примерно в два раза. Таким образом, стандартные ОУ, рассчитанные на питание  $\pm 15$  В, можно использовать в схемах с  $U_{вх}$  до 30 В [1].

Многие интегральные ОУ имеют внутренние схемы ограничения выходного тока (типовое значение 7 - 20 мА), благодаря чему устанавливается некоторое предельное значение тока базы проходного транзистора  $I_b$  [1].

На рисунке 2.45 представлена улучшенная схема стабилизатора. Ток нагрузки проходит через датчик тока (резистор  $R_3$ ), величина которого выбирается в зависимости от величины заданного максимального выходного тока. Если падение напряжения на  $R_3$  достигает примерно 0,6 В (прямое напряжение эмиттерного перехода открытого кремниевого транзистора), VT<sub>1</sub> открывается и шунтирует эмиттерный переход проходного транзистора VT<sub>2</sub>. Таким образом максимальный ток нагрузки  $I_{нмакс} \approx 0,6 / R_3$  [1].

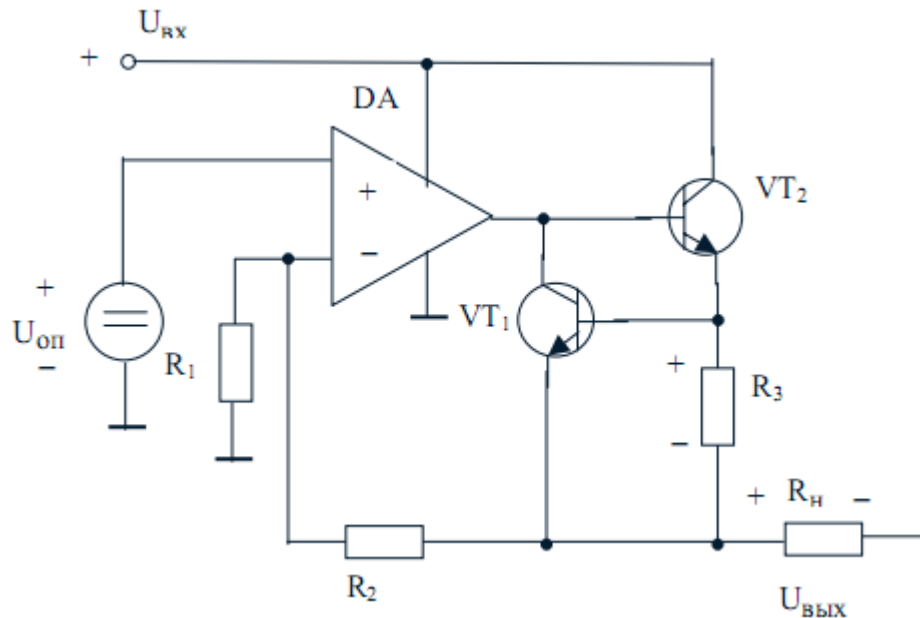


Рисунок 2.45. Стабилизатор со схемой ограничения тока нагрузки

Мощность, рассеиваемая проходным транзистором  $P_{VT2} = I_H (U_{ВХ} - U_{ВЫХ})$ , достигает максимального значения в режиме короткого замыкания выхода:  $P_{VT2КЗ} = I_{Hмакс} U_{ВХ}$ . Поэтому в режиме короткого замыкания мощность, рассеиваемая проходным транзистором, может превышать максимально допустимую. Чтобы сохранить стабилизатор от повреждения в данном режиме необходимо одновременно с уменьшением выходного напряжения уменьшить уровень ограничения выходного тока. В этом случае получается так называемая «падающая» характеристика стабилизатора (рисунок 2.46) [1].

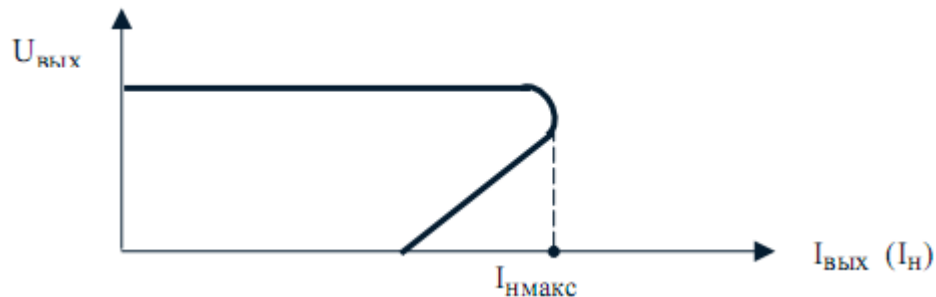


Рисунок 2.46. Характеристика стабилизатора напряжения

Увеличение рассеиваемой мощности  $P_{VT2}$  может произойти не только вследствие значительного уменьшения  $U_{ВЫХ}$ . Защита проходного транзистора от превышения максимально допустимой рассеиваемой мощности в этом случае достигается тем, что уровень ограничения максимального тока нагрузки делает зависимым разность напряжений  $U_{ВХ} - U_{ВЫХ}$  (рисунок 2.47).

В стабилизаторе осуществляется коррекция области безопасной работы транзистора  $I_{Hмакс} = F(U_{ВХ} - U_{ВЫХ})$ . Стабилитрон VD находится под разностью напряжений вход-выход [1].

Если эта разность меньше напряжения стабилизации стабилитрона  $U_{СТ}$ , он заперт и цепочка элементов VD,  $R_5$  не влияет на величину выходного тока. В случае, если  $(U_{ВХ} - U_{ВЫХ}) > U_{СТ}$  стабилитрон начинает проводить ток, величина которого определяется  $U_{ВХ}$ ,  $U_{СТ}$ ,  $R_5$  и  $R_4$ . При этом на резисторах  $R_3$  и  $R_4$  создается дополнительное падение напряжения, являющиеся для эмиттерного перехода VT<sub>1</sub>

прямым. Таким образом,  $VT_1$  открывается при меньших значениях нагрузочного тока [1].

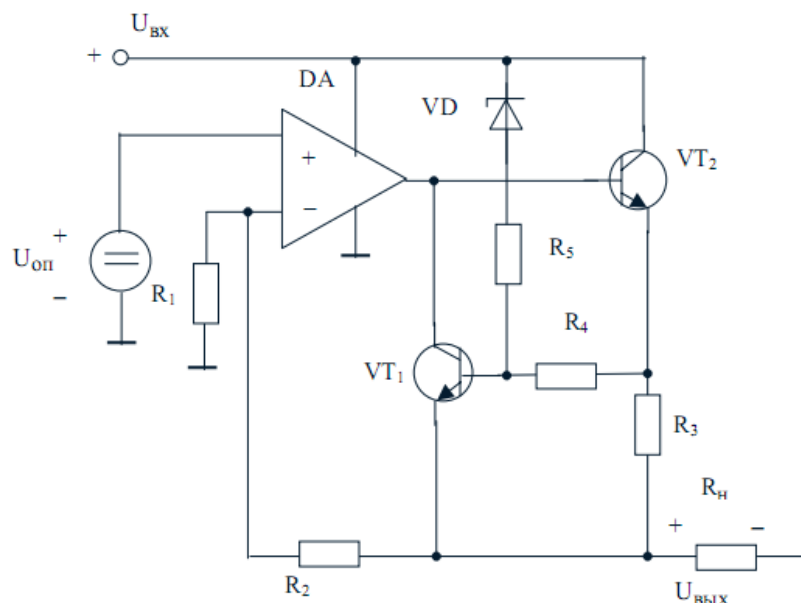


Рисунок 2.47. Стабилизатор с коррекцией области безопасной работы проходного транзистора

### 2.8.7. Интегральные стабилизаторы: принципы построения.

Интегральные стабилизаторы напряжения - широко распространенные ИМС. Они дешевы, удобны в использовании, надежны. Практически все интегральные стабилизаторы имеют встроенные цепи защиты [1]:

1. от короткого замыкания в нагрузке;
2. от перегрева;
3. коррекцию области безопасной работы проходного транзистора.

Однако не всегда все эти три вида защиты имеются в конкретном интегральном стабилизаторе. Наиболее широкое распространение получила защита выхода от короткого замыкания в нагрузке.

Интегральный стабилизатор может быть сделан на основе схемы с регулирующим ОУ. Для чего необходимо выполнить в едином кристалле стабилизатор (рисунок 2.47) и вывести наружу минимум три вывода (рисунок 2.48) [1].

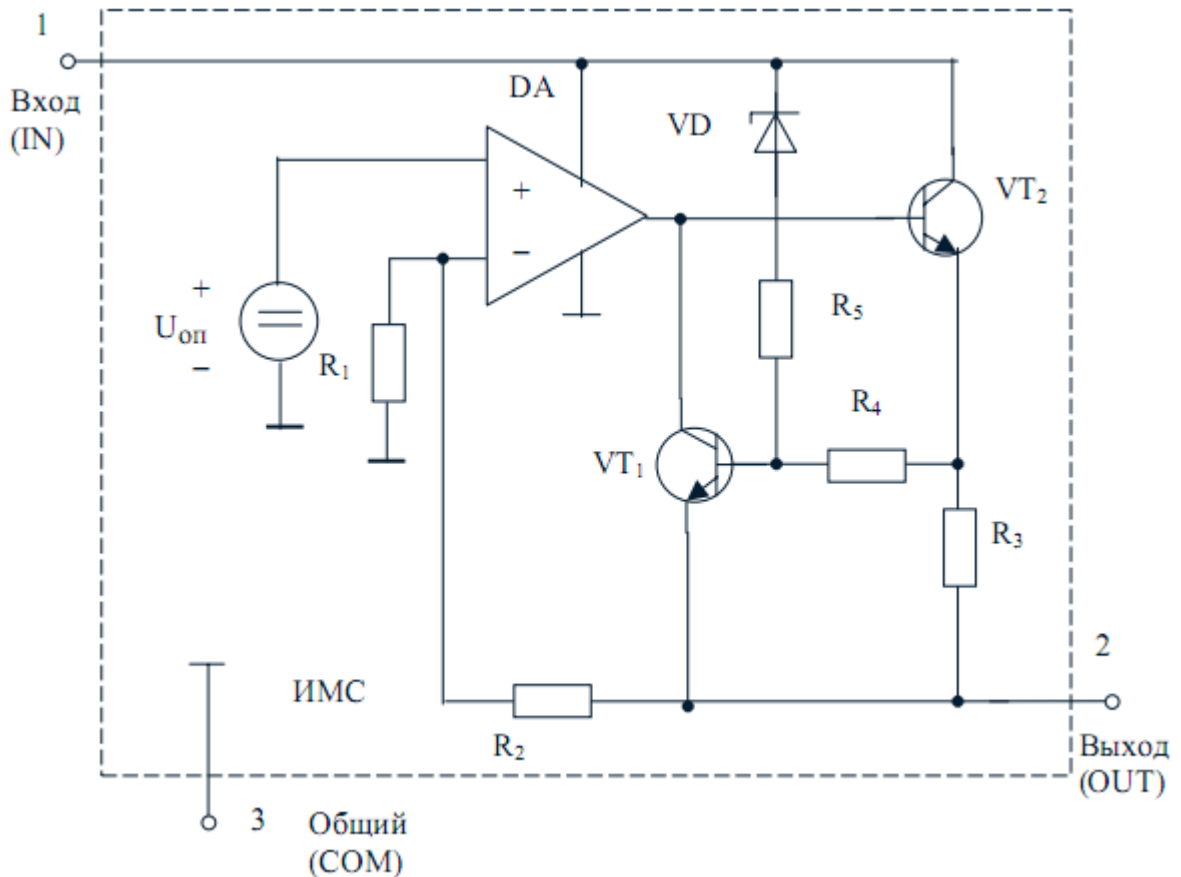


Рисунок 2.48. Интегральный стабилизатор напряжения

Микросхему (рисунок 2.48) называют стабилизатором положительного напряжения, так как относительно общего вывода (COM) на его входном и выходном выводах положительный потенциал. Выпускаются также стабилизаторы отрицательного напряжения, двуполярные стабилизаторы (симметричные положительное и отрицательное напряжения относительно общего вывода), многоканальные стабилизаторы (обеспечивают несколько различных по величине выходных напряжений) [1].

Трехвыводные стабилизаторы выпускаются на фиксированные значения выходного напряжения, большей частью от 5 до 24 В. Применение интегральных стабилизаторов значительно упрощает задачу построения стабилизированных источников питания. На вход ИМС стабилизатора подается выпрямленное напряжение несколько большее по величине выходного напряжения (минимальный перепад от 0,5 - 3В с учетом пульсаций и возможных просадок). К выходу микросхемы подключается нагрузка (рисунок 2.49). Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  гасят броски напряжения, вызванные переходными процессами, и предотвращают возбуждение ИМС [1].

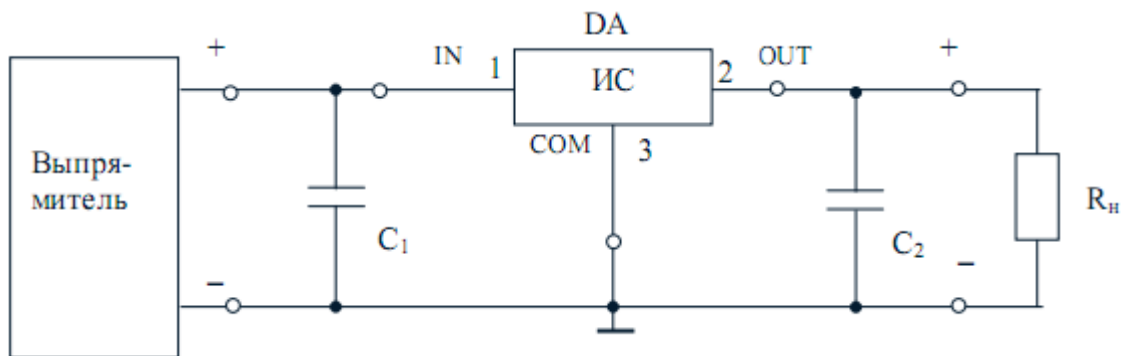


Рисунок 2.49. Включение трехвыводной ИМС для стабилизации напряжения

Для каждого стабилизатора в справочниках указывается рекомендуемый тип конденсаторов и значения их емкостей. Иногда вместо  $C_1$  и (или)  $C_2$  используют два параллельно включенных конденсатора: оксидный емкостью несколько мкФ и керамический емкостью около 0,1 мкФ.

Наряду с трехвыводными стабилизаторами, рассчитанными на фиксированное значение выходного напряжения, промышленностью выпускается четырех - и более выводные микросхемы, в которых по крайней мере реализуется функция изменения выходного напряжения. Такие стабилизаторы называются регулируемыми. Следует отметить, что и среди трехвыводных микросхем есть регулируемые стабилизаторы - с малым фиксированным значением выходного напряжения (порядка 1,2 В). При этом изменение напряжения на нагрузке осуществляется за счет искусственного изменения потенциала вывода COM стабилизатора относительно общего (заземленного) полюса нагрузки [1].

Простейший четырехвыводной стабилизатор, как и трехвыводной может быть получен из схемы (рисунок 2.47), если наряду с выводами IN, OUT и COM осуществить отвод от кристалла четвертого вывода - регулировки (ADJ) (рисунок 2.49). Регулировка выходного напряжения осуществляется за счет изменения величин теперь уже внешних по отношению к ИМС сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  (рисунок 2.50) [1].

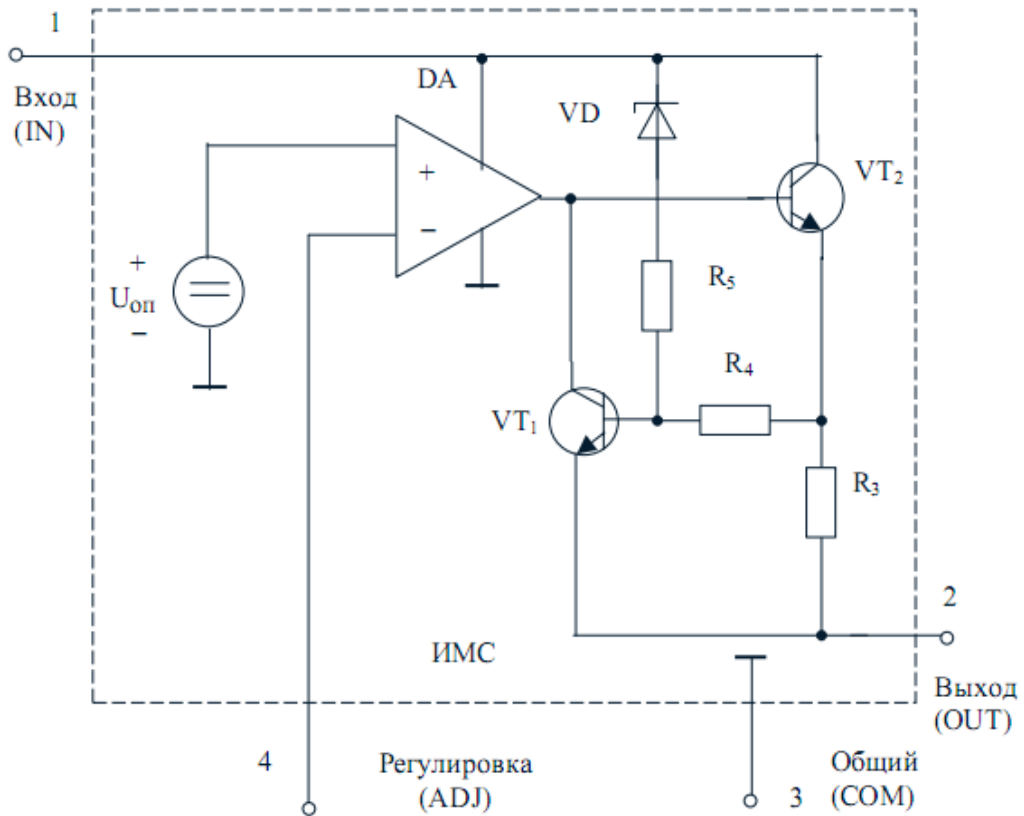


Рисунок 2.49. Четырёхвыводной регулируемый стабилизатор напряжения

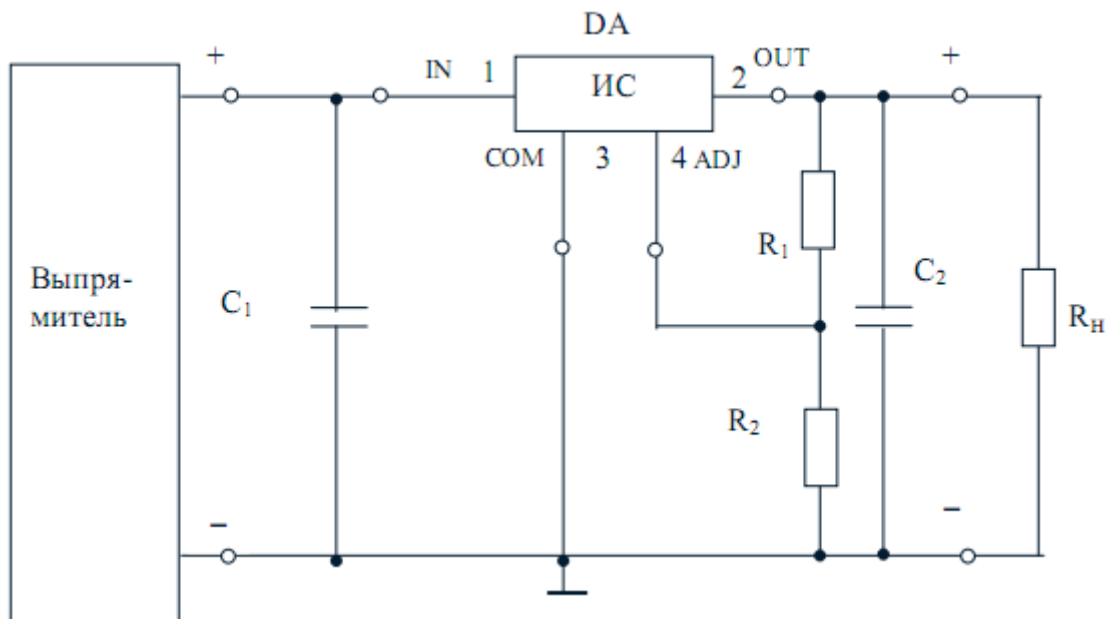


Рисунок 2.50. Включение четырёх выводной ИМС для стабилизации напряжения

Для рассматриваемой схемы  $U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}} (1 + R_2 / R_1)$ . Если в качестве резистора  $R_2$  использовать потенциометр, можно плавно изменять выходное напряжение. Учитывая, что для  $U_{\text{оп}}$  ОУ является усилителем напряжения, с целью расширения диапазона регулирования выходного напряжения величину  $U_{\text{оп}}$  не следует задавать более 1,0 - 1,5 В [1].

## Применение интегральных стабилизаторов

Как отмечалось ранее, применение ИС упрощает проектирование ИП и позволяет улучшить их электрические параметры. Даже самые простые и дешевые ИС стоимостью до 60 центов имеют достаточно хорошие электрические параметры: коэффициент подавления пульсаций от 40 до 80 дБ, выходное сопротивление от 15 до 30 мОм [1].

*Источники питания на трехвыводных ИС.* На рисунках 2.51 и 2.52 представлены схемы простейших стабилизированных ИП на трехвыводных ИС.

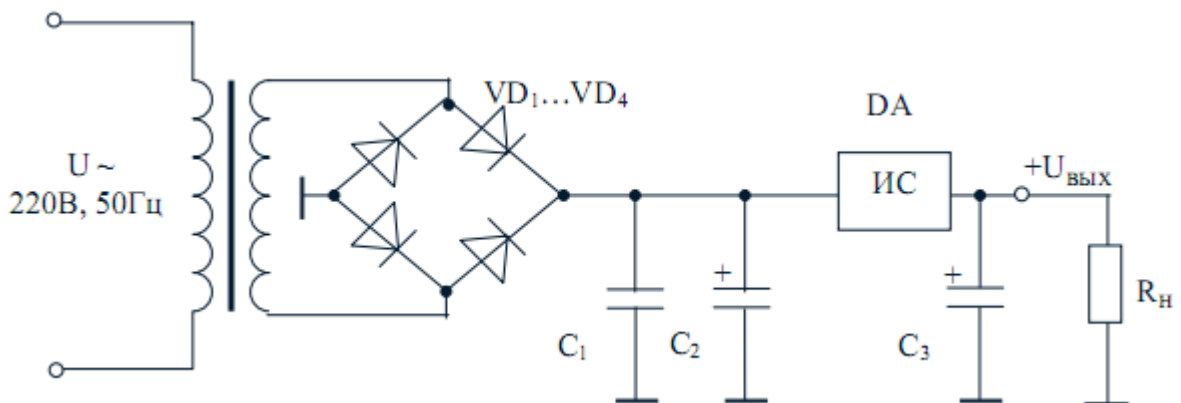


Рисунок 2.51. Источник питания со стабилизатором положительного напряжения

Конденсатор  $C_1$  емкостью несколько сотен мкФ служит для сглаживания выпрямленного напряжения. Конденсаторы  $C_2$  и  $C_3$  емкостью несколько мкФ способствуют стабильной работе ИС. Они должны располагаться как можно ближе к выводам ИС, а лучше припаиваться непосредственно к ним. В указаниях по использованию для большинства стабилизаторов отмечается, что если длина проводников соединяющих конденсатор фильтра  $C_1$  с ИС не превышает 70 мм, то необходимости в использовании конденсатора на входе стабилизатора  $C_2$  нет [1].

Отечественной и зарубежной промышленностью выпускаются сотни разновидностей трехвыводных ИС, рассчитанных на выходные напряжения от 5 до 24 В и отдаваемый ток от 0,1 до 2,0 и более ампер. Для реализации ИП (рисунки 2.51 и 2.52) с выходным током до 1 А часто используются классические ИС стабилизаторов положительного  $\mu A78xx$  и отрицательного  $\mu A79xx$  напряжений (две последние цифры указывают на величину выходного напряжения).

Используя два трехвыводных стабилизатора, можно построить двухполярный источник питания (рисунки 2.53, 2.54).

Аналогично рисунку 2.54 может быть построен двухполярный ИП на стабилизаторах отрицательного напряжения [1].

*Изменение выходного напряжения в ИП на интегральных стабилизаторах.* Как отмечалось выше при использовании четырехвыводных стабилизаторов, регулировка выходного напряжения осуществляется изменением соотношения величин сопротивлений  $R_2/R_1$  (коэффициента передачи напряжения делителя  $U_{\text{ВЫХ}}$ ). Другим способом регулирования выходного напряжения является изменение опорного напряжения, если ИС позволяет такое изменение осуществлять.



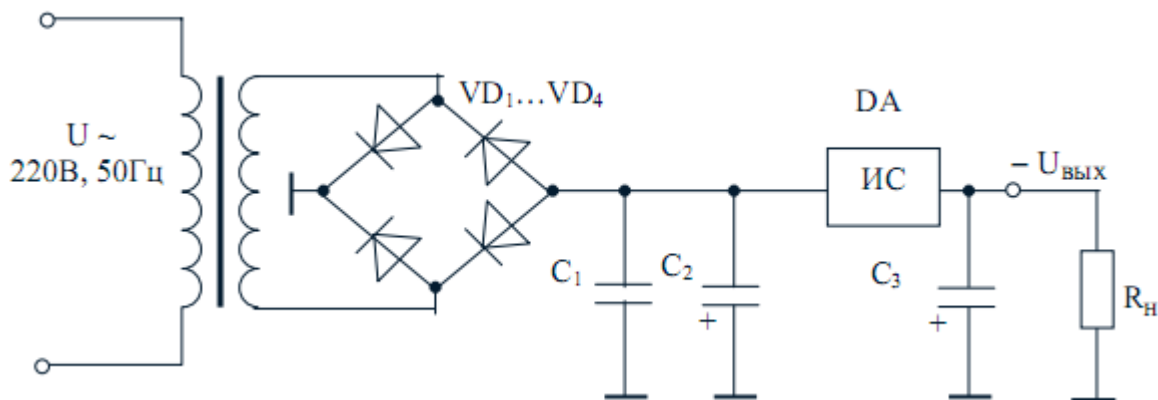


Рисунок 2.52. Источник питания со стабилизатором отрицательного напряжения

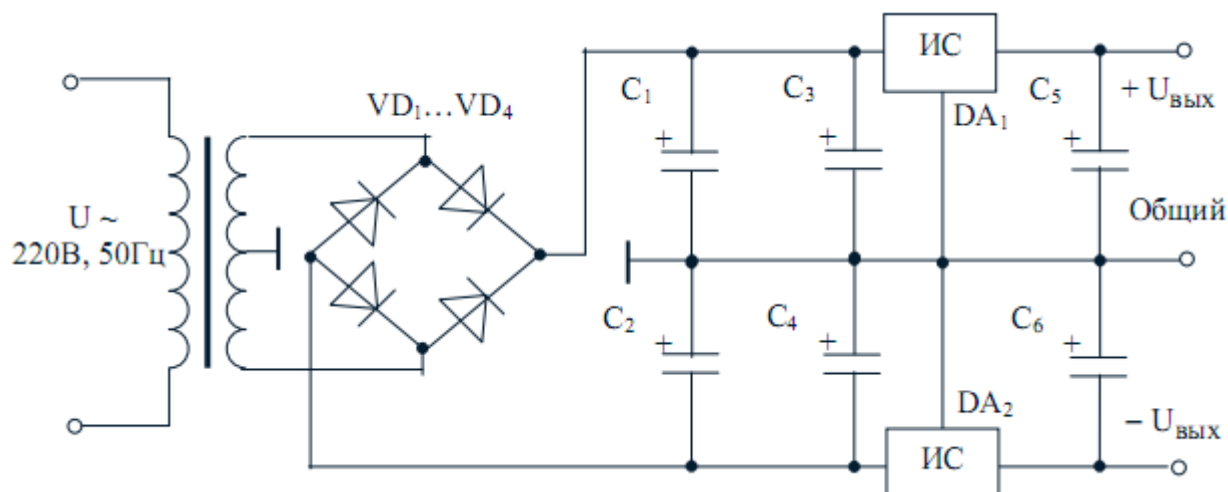
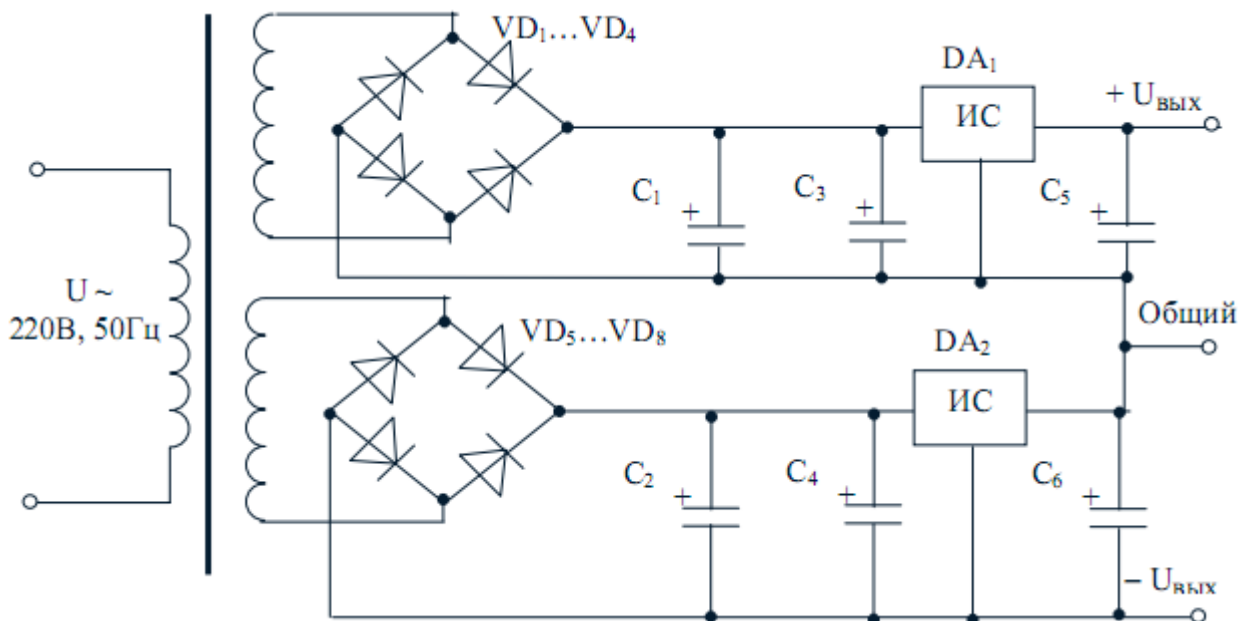


Рисунок 2.53. Двуполярный источник питания на стабилизаторах положительного и отрицательного напряжений

На рисунке 2.55 показана внутренняя структура ИС  $\mu A723$  (фирма Fairchild, 1967) и схема его включения [1].

Как видно из рисунка 2.55, у стабилизатора имеется вывод опорного напряжения, которое может быть уменьшено с помощью внешнего резистивного делителя (на схеме не показан) в требуемое число раз. Кроме этого имеется возможность изменения величины максимального выходного тока (резистор  $R_2$ ). Резисторы  $R_3$ ,  $R_4$  задают коэффициент усиления дифференциального усилителя для поданного на его неинвертирующий вход «внешнего» опорного напряжения. Конденсаторы  $C_1$  (емкостью около 100 пФ) и  $C_2$  (10 мкФ) необходимы для устойчивой работы ИС.



Рисунки 2.54. Двухполярный источник питания на стабилизаторах положительного напряжения

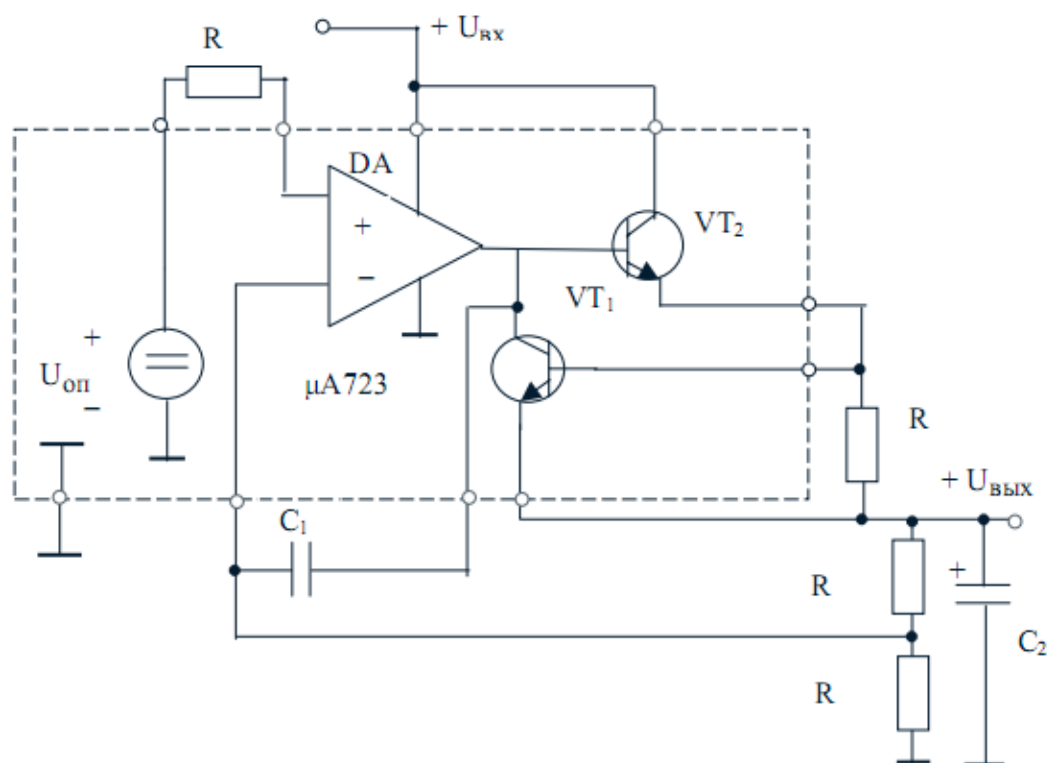


Рисунок 2.55. ИС  $\mu A723$  и ее включение для стабилизации напряжения

Регулирование  $U_{\text{вых}}$  в схеме (рисунок 2.55) возможно [1]:

1. делением напряжения  $U_{\text{оп}}$  или подачей на неинвертирующий вход дифференциального усилителя внешнего опорного напряжения;
2. изменением отношения сопротивлений  $R_3/R_4$ ;
3. одновременным изменением как опорного напряжения на «+» входе усилителя, так и отношения сопротивлений  $R_3/R_4$ .

Следует отметить, что в аналогичных схемах (рисунок 2.55) на глубину регулировки  $U_{\text{вых}}$  может оказывать ограничение возможное минимальное значение

опорного напряжения. Так (по заявлению фирмы разработчика) для стабилизатора  $\mu A723$  минимальное значение  $U_{оп}$ , поданного на вход усилителя, равно 2 В. Это означает, что выходное напряжение не может быть меньше двух вольт.

При необходимости возможно изменение  $U_{вых}$  в схемах с трехвыводными стабилизаторами. Одним из способов коррекции (подрегулировки) выходного напряжения является включение стабилитрона (или нескольких стабилитронов) в цепь общего вывода ИС (рисунок 2.56) [1].

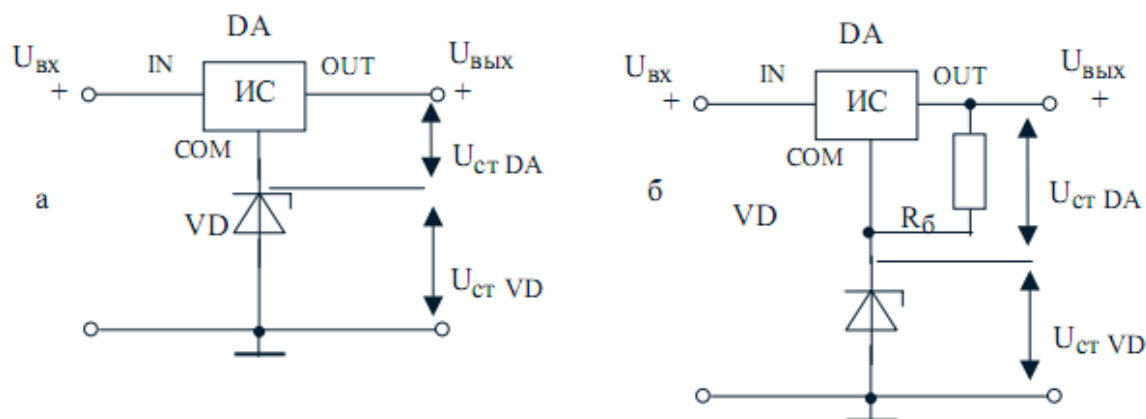


Рисунок 2.56. Включение стабилитрона в цепь вывода COM стабилизатора с током стабилизации, равным току потерь ИС (а), с увеличенным током стабилизации (б)

Общим для обеих схем (рисунок 2.56) является то, что вывод COM ИС подключен к искусственной (виртуальной) земле, «сдвинутой» относительно действительной земли на величину напряжения стабилизации стабилитрона  $U_{cmVD}$ . Выходное напряжение при этом равно сумме напряжений  $U_{cmVD} + U_{cmDA}$ . Сам ИС даже «не имеет понятия» об истинном значении  $U_{вых}$ . Его задачей является обеспечение постоянного напряжения между выводами OUT и COM, чем ИС и «занимается» [1].

В схеме (рисунок 2.56, а) величина обратного тока, протекающего через стабилитрон VD, определяется током потребления ИС, который называют так же током потерь. Величина этого тока в общем случае единицы мА и может изменяться в зависимости от режима работы ИС. В схеме (рисунок 2.56, б) через стабилитрон протекает дополнительный ток стабилизации, определяемый величиной сопротивления балластного резистора  $U_{cmVD}/R_b$  - Благодаря этому повышается качество стабилизации напряжения  $U_{cmVD}$ , а следовательно, и выходного напряжения [1].

В схеме (рисунок 2.57) осуществляется ступенчатое изменение выходного напряжения. В качестве примера взято три стабилитрона, хотя их количество может быть и другим.

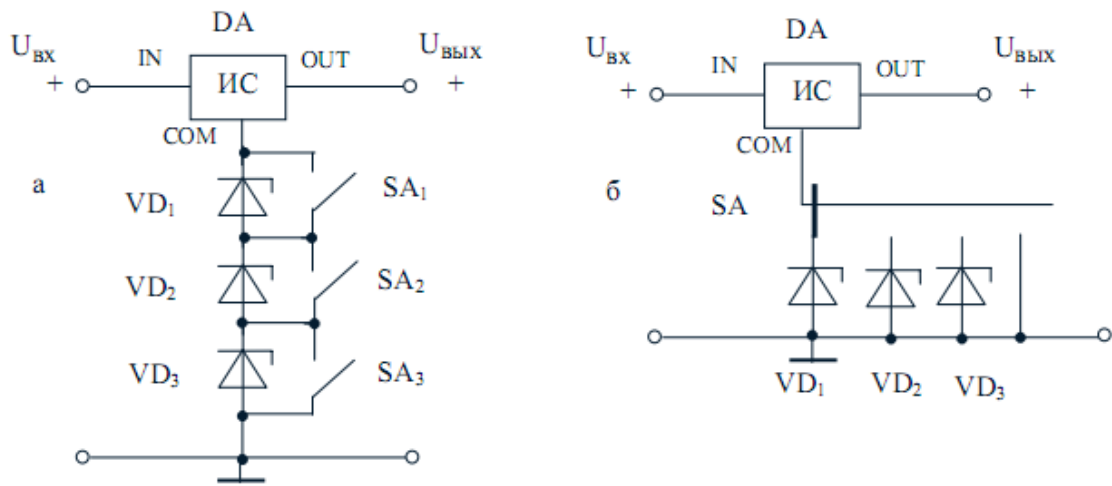


Рисунок 2.57. Ступенчатое изменение выходного напряжения при последовательном включении стабилитронов (а), при параллельном включении стабилитронов (б)

В общем случае выходное напряжение может иметь восемь значений (см. таблицу 2.1). В частности, если все стабилитроны одинаковы, то число возможных значений  $U_{\text{ВЫХ}}$  сокращается до четырех [1].

Таблица 2.1. Возможные значения напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  в схеме (рисунок 2.57, а)

| $U_{\text{ВЫХ}}$   | $SA_1$    | $SA_2$    | $SA_3$    |
|--|-----------|-----------|-----------|
| $U_{\text{стDA}}$  | замкнут   | замкнут   | замкнут   |
| $U_{\text{стDA}} + U_{\text{стVD1}}$                                       | разомкнут | замкнут   | замкнут   |
| $U_{\text{стDA}} + U_{\text{стVD2}}$                                       | замкнут   | разомкнут | замкнут   |
| $U_{\text{стDA}} + U_{\text{стVD3}}$                                       | замкнут   | замкнут   | разомкнут |
| $U_{\text{стDA}} + U_{\text{стVD1}} + U_{\text{стVD2}}$                    | разомкнут | разомкнут | замкнут   |
| $U_{\text{стDA}} + U_{\text{стVD2}} + U_{\text{стVD3}}$                    | замкнут   | разомкнут | разомкнут |
| $U_{\text{стDA}} + U_{\text{стVD1}} + U_{\text{стVD3}}$                    | разомкнут | замкнут   | разомкнут |
| $U_{\text{стDA}} + U_{\text{стVD1}} + U_{\text{стVD2}} + U_{\text{стVD3}}$ | разомкнут | разомкнут | разомкнут |

В схеме (рисунок 2.57, б) «сдвиг» потенциала виртуальной земли относительно общей шины изменяется благодаря подключению стабилитронов с разными значениями напряжения стабилизации. Как и в схеме (рисунок 2.57, а) возможно получение  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{стDA}}$  (крайнее правое положение переключателя SA). При реализации схемы (рисунок 2.57, б) необходимо иметь в виду, что при коммутации переключателя не должно быть промежутков времени, когда вывод COM ИС не соединен с минусовым проводом, так как не все ИС выдерживают такой режим.

На рисунке 2.58 представлена схема источника питания с плавной регулировкой выходного напряжения в интервале от  $U_{\text{стDA}}$  до  $U_{\text{стDA}} + U_{\text{стVD}}$ . Элементы  $R_1$ , VD,  $R_2$  образуют параметрический стабилизатор с регулируемым выходным напряжением.  $U_{\text{ВЫХ}}$  отличается от  $U_{\text{стDA}}$  на величину этого напряжения [1].

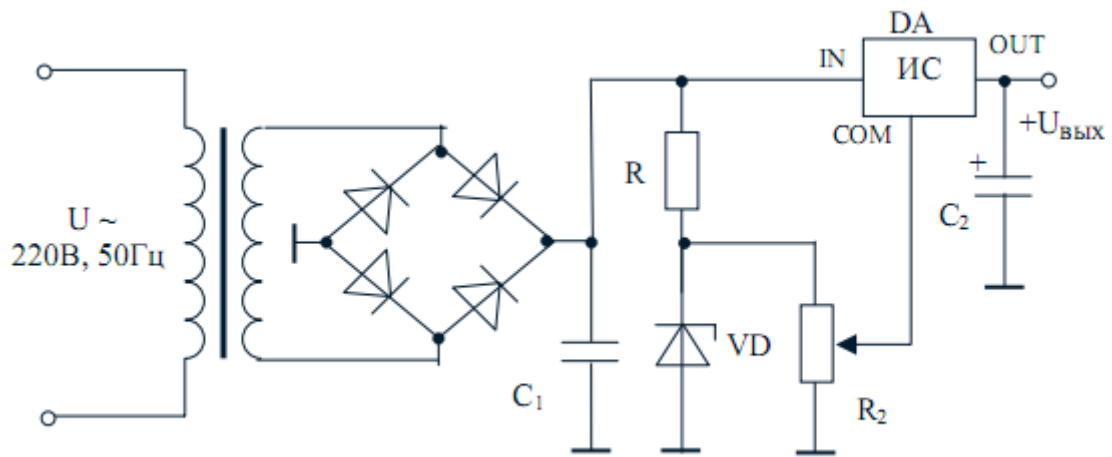


Рисунок 2.58. Источник питания на трехвыводном стабилизаторе с регулируемым выходным напряжением

Другим способом регулирования  $U_{\text{вых}}$  является использование резистивного делителя напряжения (рисунок 2.59) [1].

Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  образуют делитель выходного напряжения. К выходу этого делителя подключается вывод COM ИС. Выходное напряжение схемы:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{стДА}} + I_{\text{д}} \cdot R_2$$

где  $I_{\text{д}}$  - ток, протекающий через делитель напряжения.

Расчет сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$  целесообразно производить в следующем порядке [1]:

- 1) задаться током, протекающим через делитель напряжения  $I_{\text{д}} \geq (3-5)I_{\text{п}}$ , где  $I_{\text{п}}$  – ток потерь (ток потребления) ИС;
- 2) определить сопротивление резистора  $R_1 \approx U_{\text{стДА}}/I_{\text{д}}$ ;
- 3) проверить, попадает ли значение  $R_1$  в диапазон, оговоренный в рекомендациях по использованию конкретного ИС (для отечественных ИС серии 142ЕН  $R_1 = 100 - 300 \text{ Ом}$ );
- 4) в случае, если сопротивление  $R_1$  выходит за рамки рекомендуемых значений, задаться новым значением  $I_{\text{д}}$ ;
- 5) рассчитать сопротивление резистора  $R_2$  по формуле:  $R_2 = (U_{\text{вых}} - U_{\text{стДА}})/I_{\text{д}}$ ;

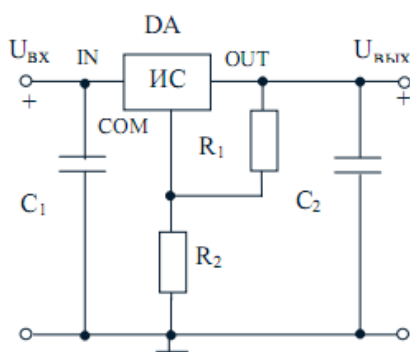


Рисунок 2.59.  
Регулирование  $U_{\text{вых}}$  с помощью делителя напряжения

В расчетных соотношениях не учитывается  $I_{\text{п}}$ , точную величину которого определить сложно в силу разброса значений данного параметра для ИС одного и того же типоминимала, и зависимости  $I_{\text{п}}$  от режима работы стабилизатора. Поэтому для повышения точности расчетов  $I_{\text{д}}$  берется в несколько раз больше  $I_{\text{п}}$ . Однако даже при значительном преобладании  $I_{\text{д}}$  над  $I_{\text{п}}$  для установки точного значения  $U_{\text{вых}}$  может понадобиться подрегулировка (например, подбор резистора  $R_2$ ), так как имеет место разброс значений  $R_1$ ,  $R_2$  и  $U_{\text{стДА}}$  (например, напряжение стабилизации отечественной микросхемы К142ЕН8Е равно  $15 \pm 0,60 \text{ В}$ ).

Рассмотрим конкретный пример. Пусть необходимо рассчитать сопротивление резисторов  $R_1$  и  $R_2$  схемы (рисунок 2.63) для ИС 142ЕН5А при

$U_{\text{ВЫХ}}=10 \text{ В}$  ( $I_{\text{п}} \approx 10 \text{ мА}$ ,  $U_{\text{СТ DA}} = 5 \text{ В}$ ). Задавшись  $I_{\text{д}} = 40 \text{ мА}$ , получим:  $R_1=5 \text{ В}/40 \text{ мА}=125 \text{ Ом}$  и  $R_2=(10 \text{ В} - 5 \text{ В})/40 \text{ мА}=125 \text{ Ом}$ . При этом допустимая рассеиваемая мощность обоих резисторов должна быть не менее  $0,25 \text{ Вт}$ .

Более сложная схема регулирования  $U_{\text{ВЫХ}}$  показана на рисунке 2.60.

На вход DA поступает нестабилизированное выпрямленное напряжение, а на вывод COM ИС подается сигнал с выхода схемы регулируемый переменным резистором  $R_2$  и усиленный по току транзистором VT [1].

Падение напряжения на резисторе  $R_1$ :  $U_{R1} = U_{\text{CTDA}} + U_{\text{бэVT}}$  а ток, протекающий через него:  $I_{R1} = U_{R1}/R_1$ . Учитывая, что:  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{R1} + U_{R2}$  получим:

$$U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{CTDA}} + U_{\text{бэVT}}) \frac{R_1 + R_2}{R_1},$$

Таким образом, минимальное выходное напряжение схемы равно  $U_{\text{CTDA}} + U_{\text{бэVT}}$ , а максимальное определяется сопротивлением  $R_2$   $U_{\text{ВЫХ}} \leq U_{\text{ВХ}} - \Delta U$ , где  $\Delta U$  - необходимый минимальный перепад напряжений вход-выход для данного ИС).

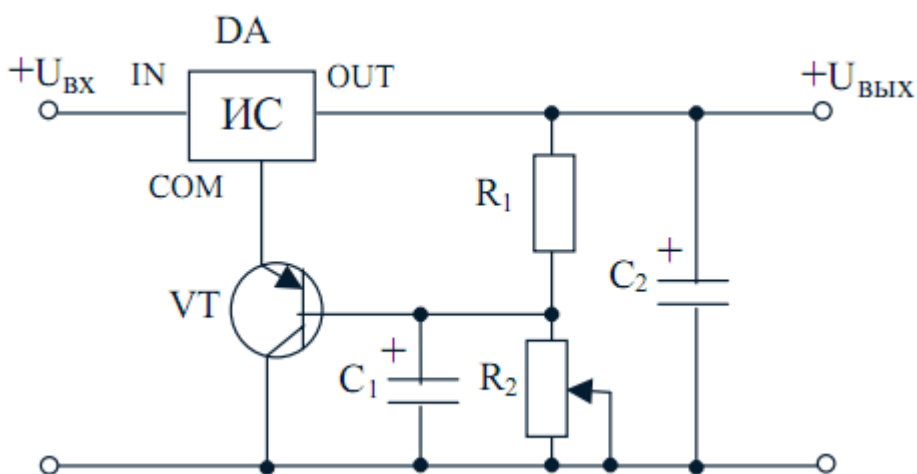


Рисунок 2.60. Регулирование  $U_{\text{ВЫХ}}$  с использованием транзистора

Во всех схемах с трехвыводными стабилизаторами выходное напряжение не могло быть ниже напряжения стабилизации самого ИС. Если необходимо получить  $U_{\text{ВЫХ}} \leq U_{\text{CTDA}}$ , то можно поменять полярность напряжения в цепи вывода COM ИС (рисунок 2.61). Для схемы (рисунок 2.61)  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{CTDA}} - U_{\text{оп}}$ .

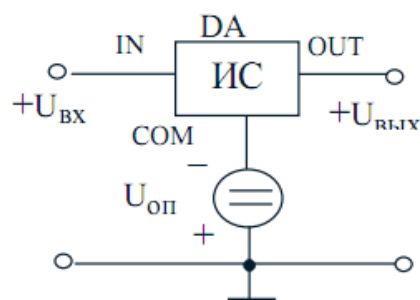


Рисунок 2.61. Получение  $U_{\text{ВЫХ}} \leq U_{\text{CTDA}}$  в схеме с трехвыводным стабилизатором

### Функциональное изменение выходного напряжения

Если по определенному закону изменять потенциал вывода COM ИС относительно общего провода схемы, можно осуществлять функциональное управление выходным напряжением. В качестве примера рассмотрим схему (рисунок 2.62). Выходное напряжение в момент включения схемы равно  $U_{\text{CTDA}} + U_{\text{КЭ нас}}$ , где  $U_{\text{КЭ нас}}$  - напряжение между коллектором и эмиттером транзистора VT в режиме насыщения. В момент включения схемы конденсатор  $C_2$  начинает заряжаться через резистор  $R_3$ , падение напряжения на котором является прямым для эмиттерного перехода транзистора.

Транзистор VT открывается и шунтирует резистор  $R_2$ . Затем по мере заряда конденсатора  $C_2$  сопротивление перехода коллектор-эмиттер транзистора увеличивается, и выходное напряжение возрастает (рисунок 2.63) [1].

Максимальное выходное напряжение задается резисторами  $R_1$  и  $R_2$ . Время «установления» выходного напряжения  $t_{уст}$  задается величинами сопротивления  $R_3$  и емкости  $C_2$ . Стабилизатор (рисунок 2.62) может использоваться для «щадящего» включения нагрузки с плавным выходом на рабочее напряжение [1].

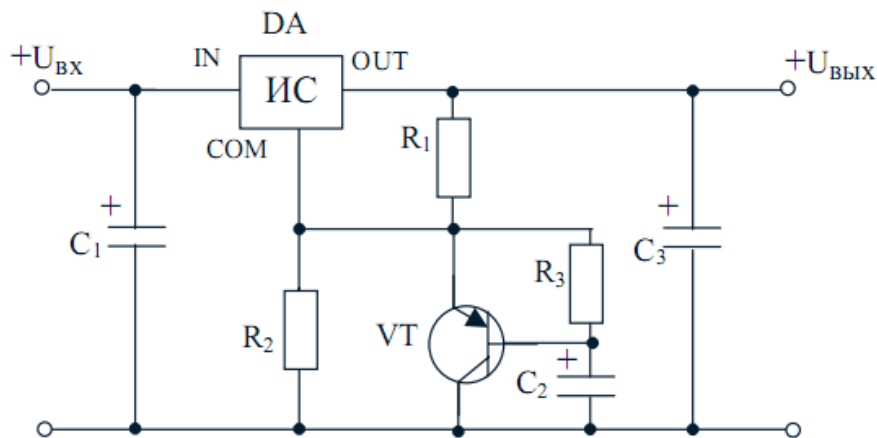


Рисунок 2.62. Функциональное изменение выходного напряжения

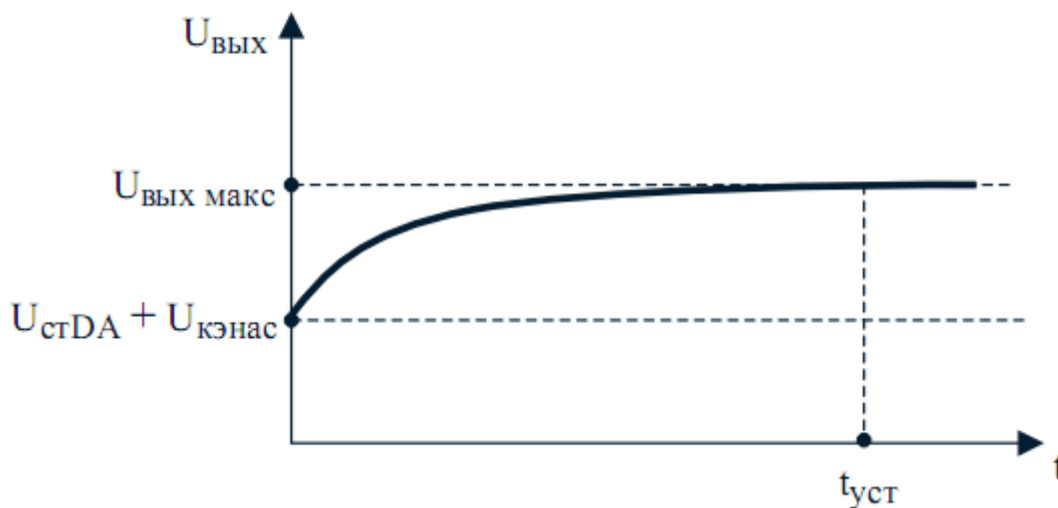


Рисунок 2.63. Временная диаграмма изменения выходного напряжения схемы

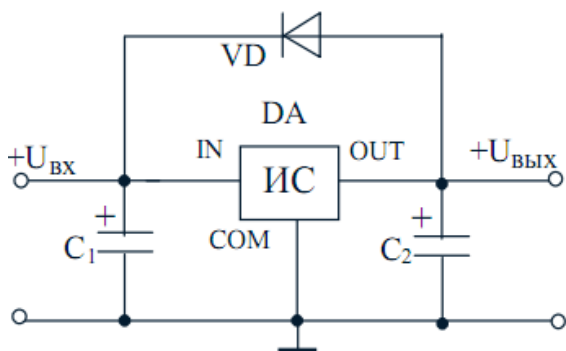


Рисунок 2.64. Диодная защита

### Диодная защита ИС.

При наличии в выходной цепи ИС конденсатора емкостью не менее 5-10 мкФ и коротком замыкании на входе стабилизатора, наблюдается кратковременный бросок тока большой силы. Происходит это вследствие разряда выходного конденсатора через цепи ИС в направлении от вывода OUT к выводу IN. Величина этого импульса тока может достигать единиц и десятков ампер, что приводит к повреждению ИС. С целью защиты ИС от выхода из строя в

подобной ситуации, его шунтируют диодом (рисунок 2.64). В случае короткого замыкания на входе выходной конденсатор  $C_2$  разряжается через шунтирующий диод VD [1].

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 1) Какие блоки входят в структурную схему линейного источника питания?
- 2) Какие фильтры применяются в линейных источниках питания?
- 3) Что такое стабилизатор напряжения и как он работает?
- 4) Для чего служит выпрямитель в линейном источнике питания и как он работает?
- 5) Какие требования предъявляются к стабилизаторам напряжения?



### 3. ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ РЭА

#### 3.1. Общие сведения

Как уже отмечалось ранее, линейные стабилизированные ИП имеют низкий КПД, значительные габариты и вес. Экономичность линейных стабилизированных ИП (линейных стабилизаторов) оказывается особенно низкой в случае изменения величины выходного напряжения в широких пределах, так как на регулирующем (проходном) транзисторе, работающем в непрерывном режиме и являющимся активным своеобразным гасящим резистором, рассеивается значительная мощность [1].

Коэффициент полезного действия стабилизаторов повышается, если регулирующий элемент работает в ключевом (импульсном) режиме<sup>3</sup>. При этом за счет увеличения частоты переключения (до 20 - 50 кГц вместо 50 Гц) значительно уменьшаются массы и габариты трансформаторов и конденсаторов фильтра импульсного ИП.

Сравним, например, два источника питания фирмы Power-one: линейный F5-25 (5 В, 25 А) и импульсный SPL130-1005 (5 В, 26 А). Модель F5-25 весит более 7 кг, в то время как вес импульсного ИП равен примерно 1 кг. При этом объем модели SPL130-1005 в четыре раза меньше чем объем линейного ИП. Модель SPL130-1005 практически не нагревается, а линейный источник при максимальном выходном токе рассеивает мощность порядка 75 Вт [1].

#### 3.2. Управление регулирующим элементом в импульсных ИП.

Несмотря на большое разнообразие схем импульсных источников питания, все они разделяются по способу управления регулирующим элементом на две группы: ИП с широтно-импульсной (или частотной модуляцией) и ИП с релейным управлением регулирующим элементом [1].

Принцип действия ИП с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) заключается в следующем (рисунок 3.1) [1]:

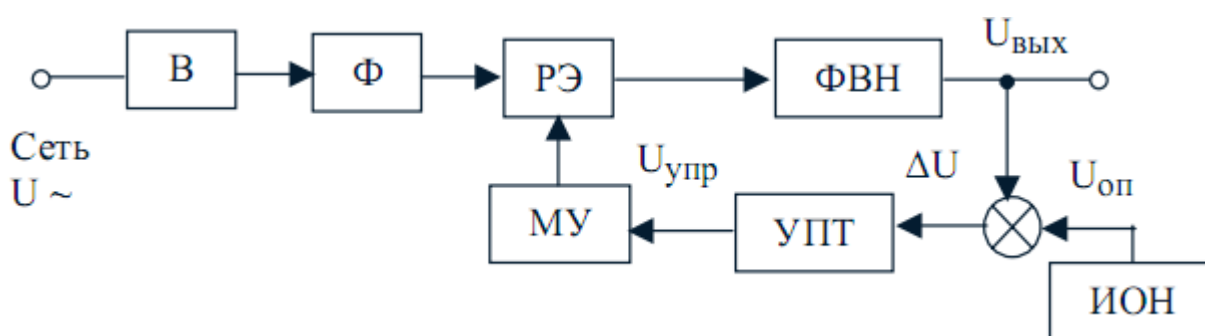


Рисунок 3.1. Импульсный источник питания с ШИМ

На рисунке В – выпрямитель, Ф – низкочастотный сглаживающий фильтр, РЭ – регулирующий элемент, ФВН – формирователь выходного напряжения, МУ – модулирующее устройство, УПТ – усилитель постоянного тока, ИОН – источник постоянного напряжения.

<sup>3</sup> Более подробную информацию об импульсных источниках питания можно найти в [1]

Выпрямление напряжения питающей сети переменного тока сглаживается фильтром низкой частоты и передается в формирователь выходного напряжения через электронный ключ (регулирующий элемент), в качестве которого в подавляющем большинстве случаев используется транзистор. Выходное напряжение зависит от энергии, передаваемой в ФВН в единицу времени и нагрузки ИП [1].

Регулирующий элемент осуществляет управление процессом передачи энергии от питающей сети к ФВН. Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  сравнивается с опорным напряжением  $U_{\text{оп}}$  и сигнал разности  $\Delta U = U_{\text{вых}} - U_{\text{оп}}$  через УПТ поступает на модулирующее устройство, преобразующее сигнал постоянного тока в импульсы с различной длительностью и постоянным периодом. Длительность импульсов управляющего напряжения  $U_{\text{упр}}$  функционально связана с разностью напряжений  $\Delta U$ . С МУ сигнал поступает на РЭ, который периодически переключается. Таким образом, выходное напряжение ИП зависит, при неизменном периоде, от длительности управляющих импульсов. Процесс широтно-импульсной модуляции поясняется на рисунке 3.2 [1].

При изменении мощности, отдаваемой ИП в нагрузку, изменяется соотношение длительности импульса  $t_{\text{и}}$  и периода следования импульсов  $U_{\text{упр}}$ . На рисунке 3.2 показаны диаграммы для различных значений мощности, отдаваемой в нагрузку  $P_{\text{н}}$ : рисунок 3.2,а соответствует самому малому значению  $P_{\text{н}}$ , рисунок 3.2,б среднему  $P_{\text{н}}$ , рисунок 3.2,в - большему значению  $P_{\text{н}}$ . Один из широко используемых способов изменения ширины импульсов поясняется на рисунке 3.3. Схема управления регулирующим элементом содержит генератор вспомогательного линейно-изменяющегося напряжения  $U_{\text{лин}}$ . Это напряжение сравнивается с  $U_{\text{вых}}$ . Независимо от вида вспомогательного напряжения (линейно-нарастающее или линейно-спадающее) переключение уровня напряжения  $U_{\text{упр}}$  осуществляется в момент времени, когда  $U_{\text{лин}} = U_{\text{вых}}$ . Причем в любом случае, когда  $U_{\text{вых}} < U_{\text{лин}}$ , формируется сигнал  $U_{\text{упр}}$ , открывающий регулирующий элемент. В противном случае ( $U_{\text{вых}} > U_{\text{лин}}$ )  $U_{\text{упр}} = 0$  и регулирующий элемент закрыт [1].

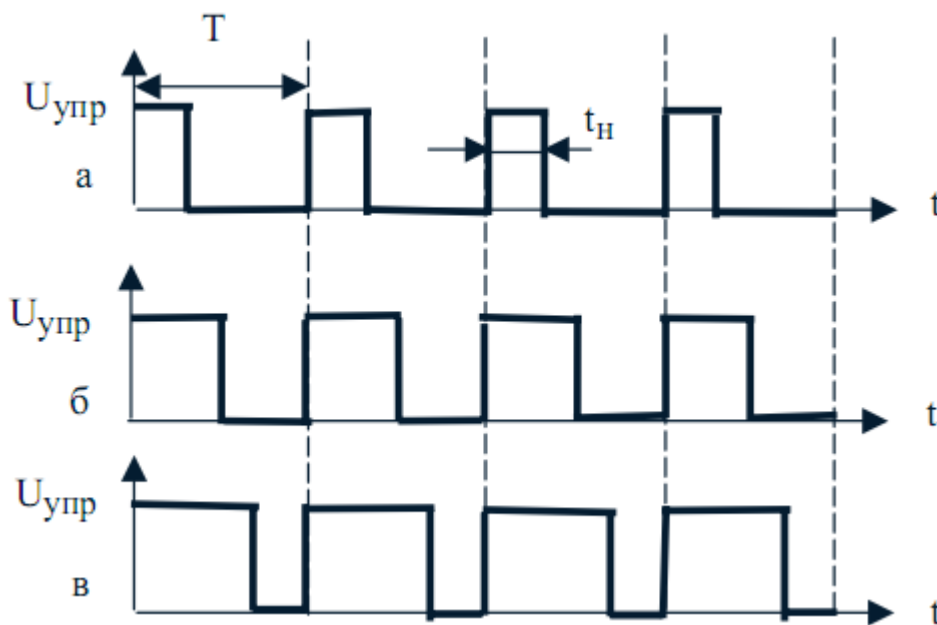


Рисунок 3.2. Иллюстрация процесса ШИМ-модуляции  $t_{\text{и}}=0,25T$  (а),  $t_{\text{и}}=0,50T$  (б)  $t_{\text{и}}=0,75T$  (в) [1]

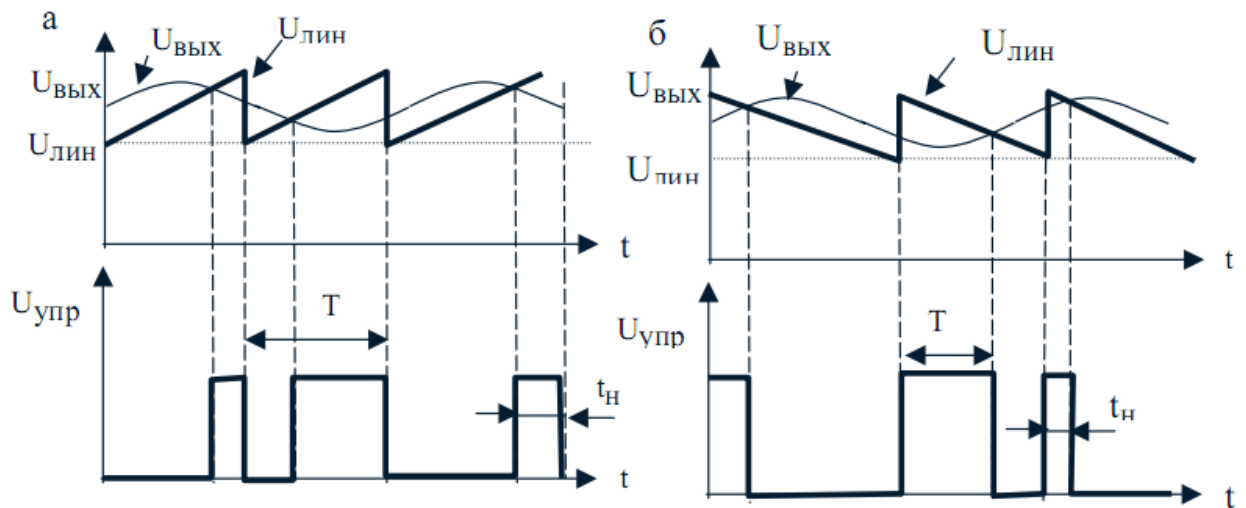


Рисунок 3.3. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу ШИМ-модулятора при линейно-нарастающем вспомогательном напряжении (а), при линейно-спадающем вспомогательном напряжении (б) [1]

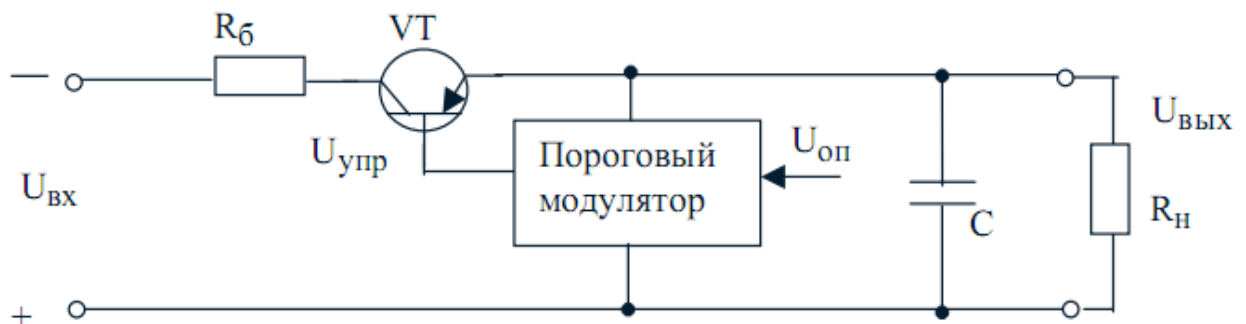


Рисунок 3.4. Релейное управление регулирующим элементом [1]

Упрощённая схема ИП (стабилизатора) с релейным управлением регулирующим элементом представлена на рисунке 3.4 [1].

Как и в схеме (рисунок 3.1), регулирующий элемент (транзистор VT) открывается управляющим напряжением  $U_{упр}$ , формируемым модулятором.

Различие заключается в способе формирования  $U_{упр}$ . Для схемы (рисунок 3.4) процесс формирования управляющих импульсов поясняет рисунок 3.5. Когда транзистор VT открыт, конденсатор C заряжается через токоограничивающий (балластный) резистор  $R_б$ . Как только напряжение на конденсаторе C достигнет заданного верхнего значения  $U_{вых.макс}$ , пороговый модулятор запирает регулирующий транзистор и напряжение на конденсаторе C уменьшается вследствие его разряда через нагрузку ( $R_н$ ). При уменьшении  $U_{упр}$  до величины нижнего порога срабатывания  $U_{вых.мин}$  пороговый модулятор открывает регулирующий транзистор, смещая его эмиттерный переход в прямом направлении напряжением  $U_{упр}$ . Частота переключения в процессе работы меняется зависит прежде всего от  $R_б$ ,  $R_н$  [1].

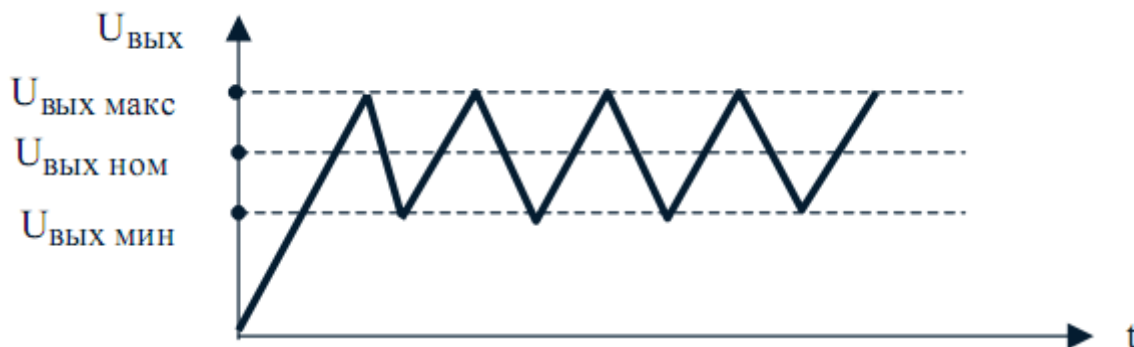


Рисунок 3.5. Временная диаграмма выходного напряжения схемы на рисунке 3.4 [1]

Емкость конденсатора  $C$  и гистерезис схемы  $U$  не должны быть очень малыми во избежание высокой частоты переключения регулирующего транзистора  $VT$ , так как с увеличением частоты возрастают потери в регулирующем транзисторе [1].

### 3.3. Обратноходовые и прямоходовые импульсные ИП

На рисунке 3.6 представлена упрощенная схема обратноходового преобразователя напряжения питающей сети переменного тока в постоянное выходное напряжение (AC-DC конвертора). Диоды  $VD_1 - VD_4$  и конденсатор  $C_1$  образуют выпрямитель сетевого напряжения [1].

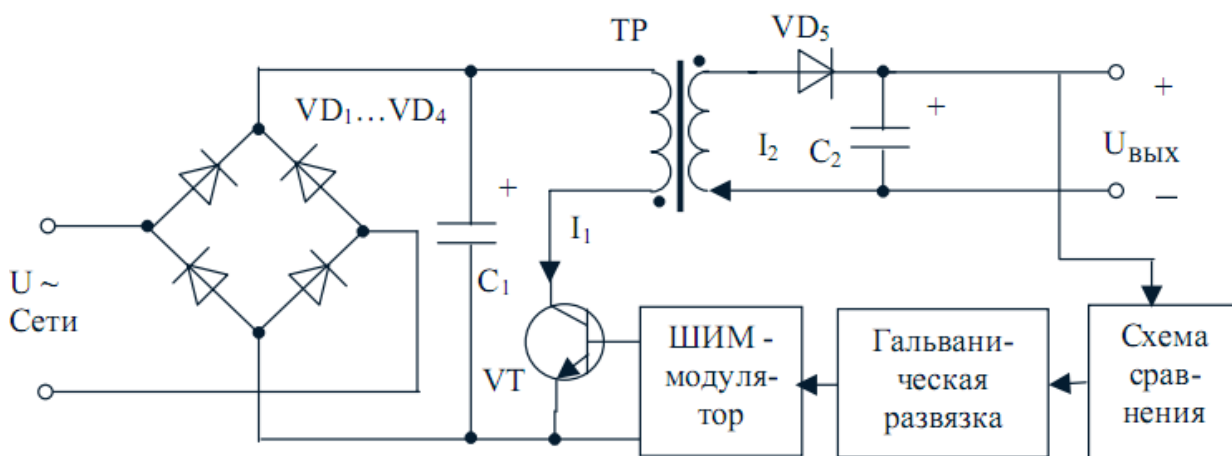


Рисунок 3.6. Обратноходовый импульсный источник питания

Так как понижающий трансформатор отсутствует, конденсатор  $C_1$  заряжается до амплитудного значения переменного напряжения сети (1,4·220 В). Поэтому конденсатор  $C_1$  должен иметь значение рабочего напряжения не менее 350 - 400 В. Петля обратной связи, по которой сигнал от выхода передается назад на ключевой транзистор, имеет гальваническую развязку (маломощный сигнальный трансформатор или оптопара) для того, чтобы выходная линия постоянного тока не имела эклектрической связи с питающей сетью переменного тока [1].

Работу обратноходового преобразователя поясняет рисунок 3.7 [1].

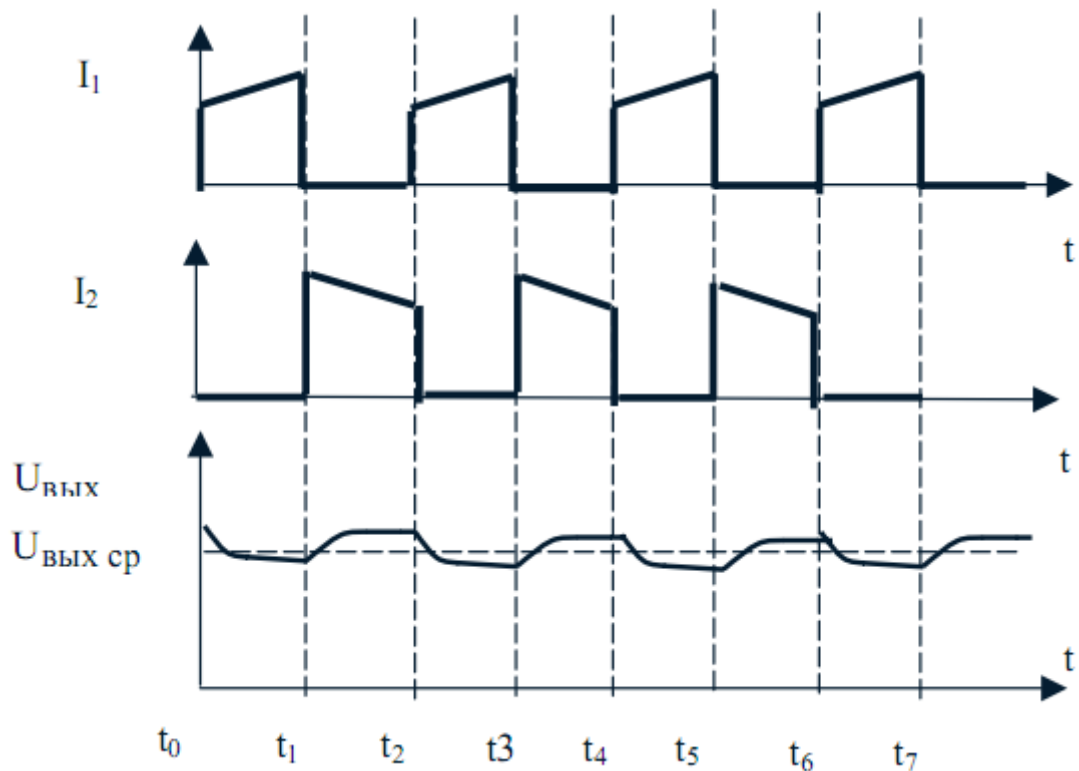


Рисунок 3.7. Временные диаграммы, поясняющие работу обратноходового импульсного преобразователя [1]

Регулирующий транзистор управляется схемой ШИМ-модулятора. Когда транзистор открыт (интервалы времени  $t_0-t_1$ ,  $t_2-t_3$ ,  $t_4-t_5$ ,  $t_6-t_7$ ), ток в первичной обмотке трансформатора увеличивается по линейному закону. Этот трансформатор является фактически дросселем с вторичной обмоткой, и в отличие от обычного трансформатора, накапливает в себе значительную энергию [1].

Когда транзистор закрывается ( $t_1-t_2$ ,  $t_3-t_4$ ,  $t_5-t_6$ ), магнитный поток в сердечнике трансформатора начинает уменьшаться, что вызывает ток  $I_2$ , текущий в цепи вторичной обмотки. Ток  $I_2$  протекает через нагрузку и конденсатор  $C_2$ , заряжая последний [1].

Если нагрузка источника питания увеличивается, то для поддержания постоянного значения  $U_{\text{вых}}$ , необходимо только увеличить длительность включенного состояния транзистора, во время которого ток  $I_1$  достигает более высокого значения, что создает в результате более высокий ток  $I_2$  во вторичной обмотке во время выключенного состояния. И, наоборот, при уменьшении нагрузки длительность открытого состояния транзистора следует уменьшить [1].

Нетрудно заметить, что в схеме (рисунок 3.6) отсутствуют потери энергии, так как в любой момент времени один из сомножителей произведения  $I_k \cdot U_{k3}$  (выражающего мощность, рассеиваемую ключевым транзистором) равен нулю. Реальная схема имеет некоторые потери, основными составляющими которых являются: потери переключения, мощность, рассеиваемая транзистором в режиме насыщения из-за неравенства нулю напряжения  $U_{k3}$ , потери в трансформаторе, диодах и конденсаторах [1].

На рисунке 3.8 показана упрощенная схема прямоходового импульсного ИП.

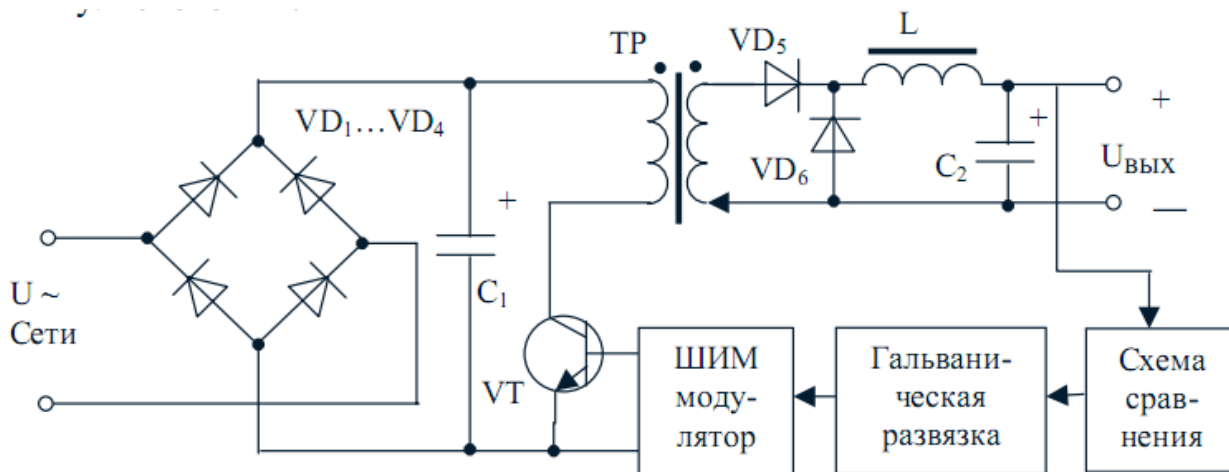


Рисунок 3.8. Прямоходовый импульсный источник питания [1]

В отличие от обратногоходового ИП прямоходовый преобразователь накапливает энергию не в трансформаторе, а в выходной катушке индуктивности  $L$  (дресселе). Когда ключевой трансформатор открыт, ток вторичной обмотки протекает через диод  $VD_5$ , дроссель, конденсатор  $C_2$  и нагрузку. Диод  $VD_6$  при этом закрыт (на его катод положительный потенциал). Когда ключевой транзистор закрывается, ток дросселя протекает через конденсатор  $C_2$ , заряжая его, и возвращается через диод  $VD_6$ . Таким образом, в отличие от обратногоходовой схемы, ток реактивного элемента, запасующего энергию, течет во время обеих частей цикла (периода) переключения транзистора. Поэтому прямоходовый преобразователь имеет более низкое напряжение выходных пульсаций, чем обратногоходовый ИП при те же самых выходных параметрах [1].

### 3.4. Импульсные источники питания с несколькими выходами

Большинство импульсных ИП имеют более одного выхода. Например, в источниках питания цифровых устройств в дополнение к напряжению  $+5$  В могут быть выходы на напряжения  $+12$ ,  $-12$ ,  $+24$  и  $-5$  В. Эти выходы используются для питания различных устройств типа контроллеров, накопителей на жестких и гибких магнитных дисках, принтеров, интерфейсов (RS-232) и различных аналоговых схем. На рисунке 3.9 представлена схема импульсного ИП с несколькими выходами.

Из схемы видно, что напряжение питания обратной связи снимается только с одного выхода (обычно  $+5$  В) и подается на ШИМ-модулятор. Таким образом, осуществляется стабилизация всех напряжений. Очевидно, что вспомогательные выходы не стабилизируются в той же мере, как главный выход  $+5$  В. Поэтому в случае критичности нагрузок к напряжению питания на соответствующие выходы устанавливают дополнительные линейные интегральные стабилизаторы. Для рассматриваемой схемы (рисунок 3.9) с помощью линейного ИС стабилизируется напряжение  $U_{\text{вых}1}$  [1].

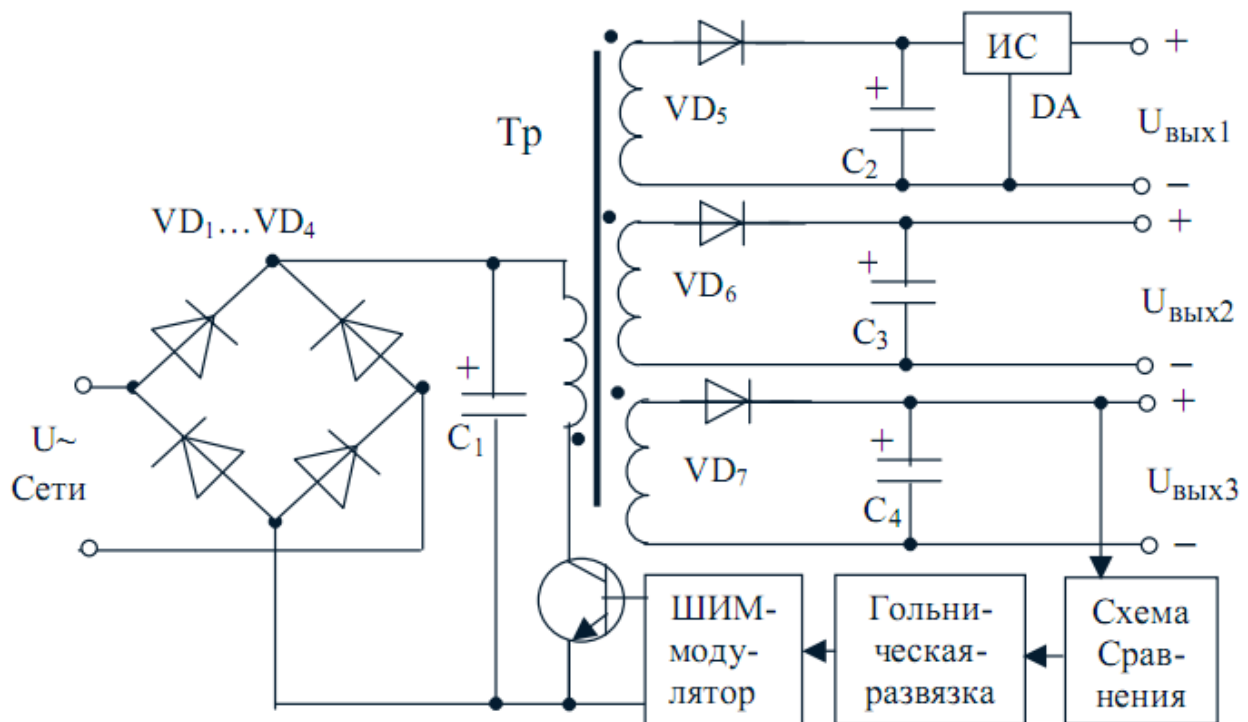


Рисунок 3.9. Импульсный источник питания с тремя выходными напряжениями [1]

### 3.5. Импульсные стабилизаторы напряжения постоянного тока

Из рассмотрения принципа действия импульсных ИП, произведенного в предыдущем разделе, следует, что они являются по сути преобразователями (конвертерами) одного постоянного напряжения в другое (или в несколько других напряжений). В самом деле, на входе любого импульсного ИП переменное напряжение питающей сети выпрямляется, его пульсации сглаживаются конденсатором фильтра и только затем осуществляется преобразование этого постоянного напряжения импульсной схемой. В связи с этим рассмотрим более подробно импульсные преобразователи типа DC-DC [1].

#### Понижающий стабилизатор

Типовая схема импульсного стабилизатора понижающего типа представлена на рисунке 3.10. На вход регулирующего транзистора подается импульсный сигнал от схемы управления. Изменение скважности управляющих импульсов (отношения периода следования импульсов к длительности импульса) происходит автоматически таким образом, чтобы выходное напряжение поддерживалось на заданном уровне с допустимой точностью. Дроссель  $L$  и конденсатор  $C$  преобразуют однополярные импульсы переменной скважности, поступающие с коллектора регулирующего транзистора, в напряжение постоянного тока. Диод  $VD$  обеспечивает протекание тока в дросселе, когда регулирующий транзистор находится в закрытом состоянии. Работа стабилизатора поясняется временными диаграммами (рисунок 3.11). В промежутки времени, когда регулирующий транзистор открыт ( $t_0-t_1, t_2-t_3, t_4-t_5$ ), на вход фильтра LC-типа прикладывается напряжение питания. Диод  $VD$  при этом закрыт. Ток в дросселе в эти промежутки времени  $I_L$  возрастает по линейному закону достигая своего максимального значения к моменту выключения транзистора. В промежутки времени, когда регулирующий транзистор закрыт ( $t_1-t_2, t_3-t_4, t_5-t_6$ ), энергия, накопленная в элементах

фильтра, передается в нагрузку. Ток дросселя  $I_L$  протекает через открытый диод VD [1].

Уровень пульсаций выходного напряжения во многом определяется индуктивностью дросселя и емкостью конденсатора фильтра. При уменьшении индуктивности дросселя фильтра в нем увеличиваются пульсации тока. При весьма малой индуктивности  $L$  в схеме стабилизатора может наступить режим прерывистого тока в дросселе фильтра, при котором ухудшается нагрузочная характеристика стабилизатора [1].

### Повышающий стабилизатор

Рассмотрим схему импульсного стабилизатора с регулирующим транзистором, подключенным параллельно нагрузке (рисунок 3.12). В рассматриваемом стабилизаторе регулирующий транзистор отделен от нагрузки диодом. При открывании транзистора через дроссель протекает коллекторный ток VT, который увеличивается по линейному закону, достигая своего максимального значения к моменту закрытия транзистора. Дроссель при этом запасает электромагнитную энергию, диод VD закрыт (на его катоде положительный потенциал) [1].

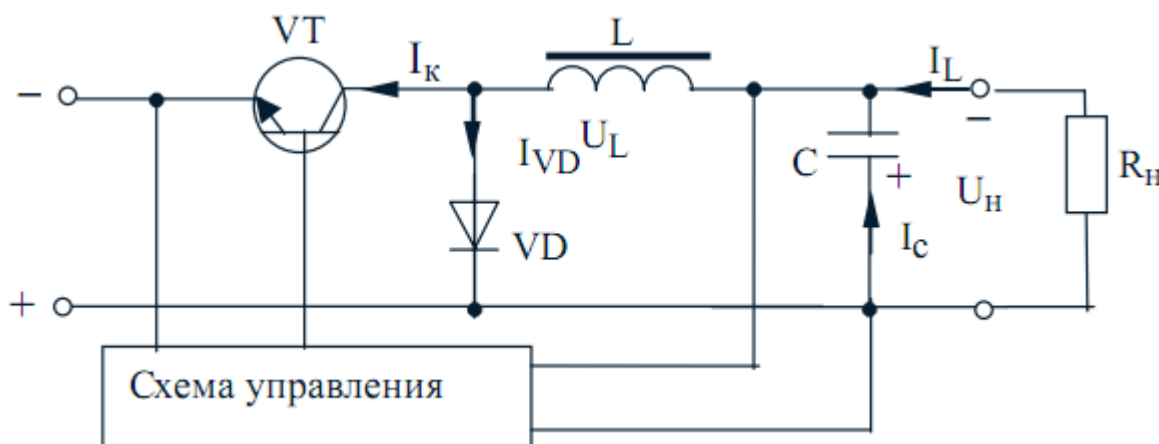


Рисунок 3.10. Понижающий импульсный стабилизатор [1]

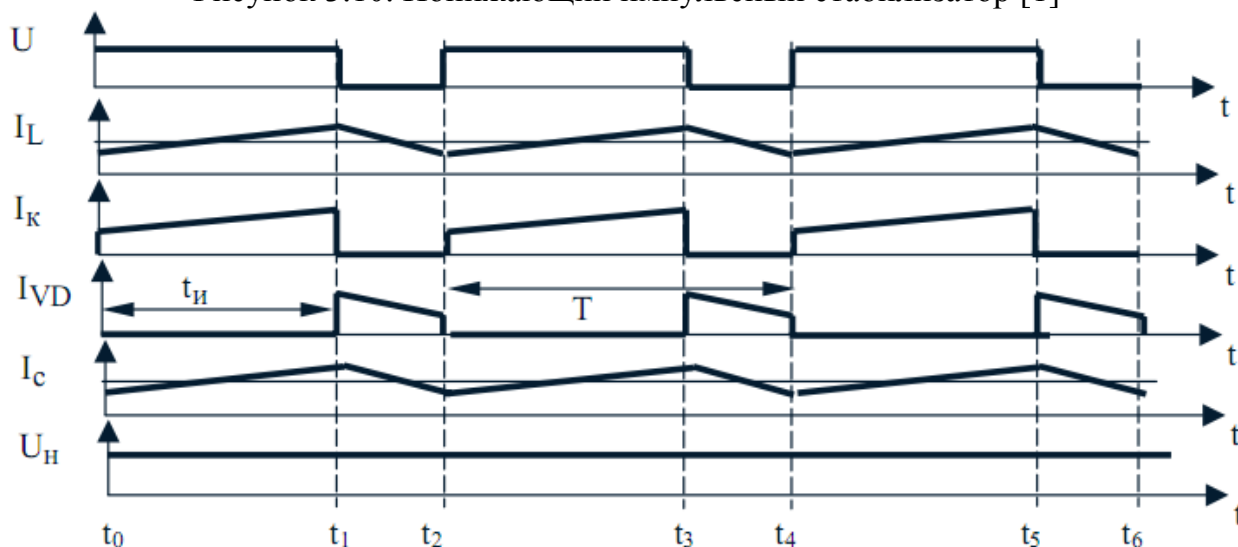


Рисунок 3.11. Временные диаграммы работы понижающего стабилизатора [1]



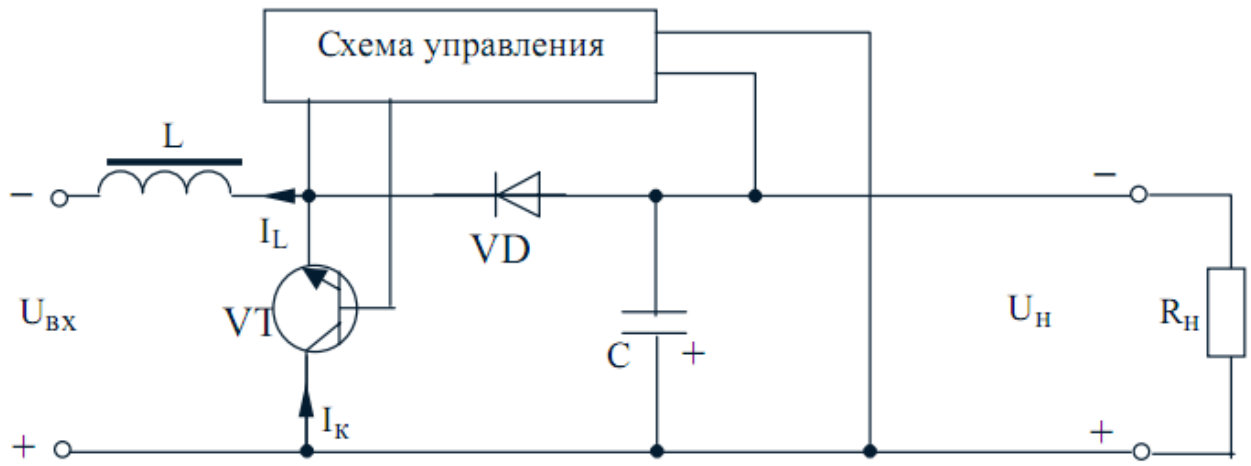


Рисунок 3.12. Повышающий стабилизатор [1]

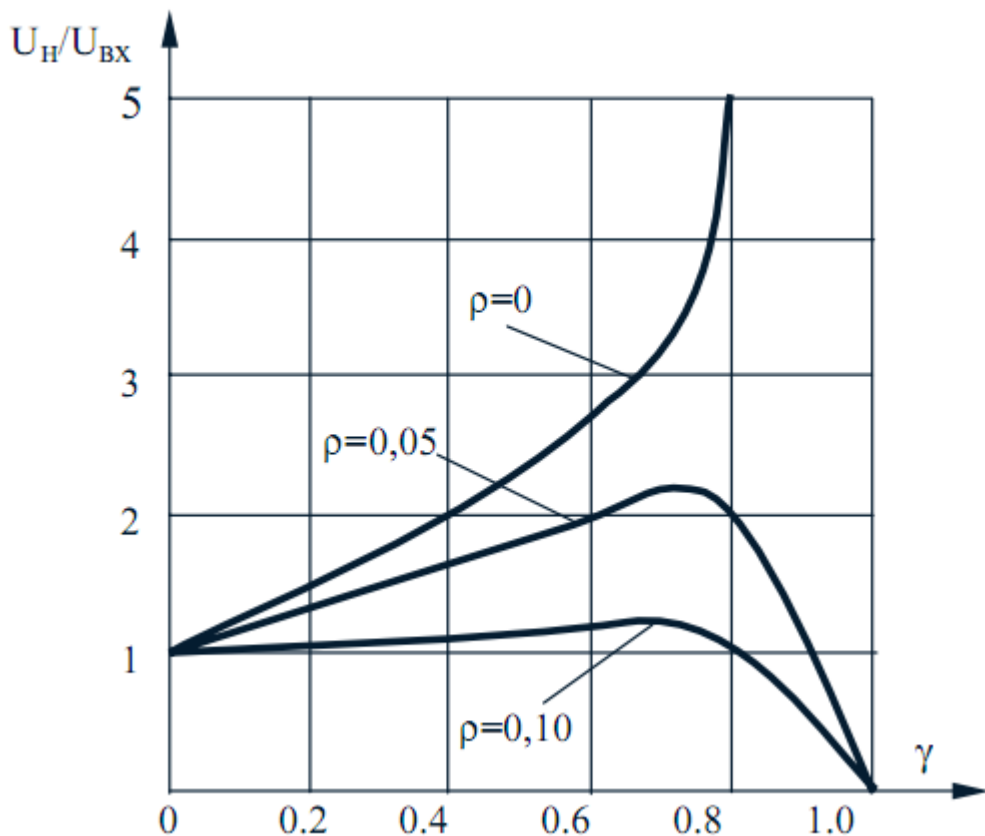


Рисунок 3.13. Регулировочные характеристики стабилизатора, выполненного по схеме на рисунке 3.12 [1]

После закрытия регулирующего транзистора электромагнитная энергия, накопленная в дросселе на предыдущем интервале времени, через открывшийся диод передается в нагрузку и частично сообщается конденсатору. По сравнению с ранее рассмотренной схемой (рисунок 3.10) в параллельном стабилизаторе выходное напряжение может превышать входное. Зависимость выходного напряжения от относительной длительности открытого состояния регулирующего транзистора представлена на рисунке 3.13. На данном рисунке представлены три зависимости отношения выходного напряжения к входному  $U_H/U_{ВХ}$  от коэффициента заполнения управляющих импульсов  $\gamma = t_w/T$  при различных значениях независимого параметра  $\rho = r_L/(r_L + R_H)$ , где  $r_L$  - сопротивление дросселя фильтра,  $R_H$  - сопротивление нагрузки [1].

## Инвертирующий стабилизатор

На рисунке 3.14. представлена схема стабилизатора, который изменяет полярность входного напряжения. При этом, как в схеме (рисунок 3.12), выходное напряжение может превысить по величине напряжение на входе стабилизатора [1].

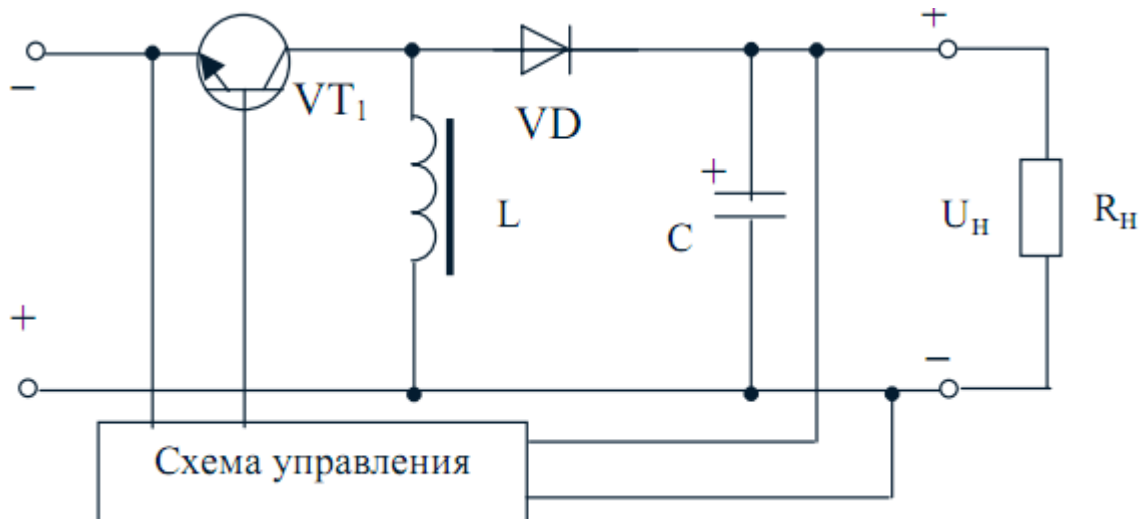


Рисунок 3.14. Инвертирующий стабилизатор [1]

При открытом состоянии регулирующего транзистора дроссель накапливает электромагнитную энергию. Диод VD при этом закрыт, нагрузка вместе с конденсатором фильтра отключена от источника питания. Переключение регулирующего транзистора в закрытое состояние сопровождается открыванием диода VD и переходом энергии, накопленной в дросселе, в конденсатор фильтра C и нагрузку. Полярность выходного напряжения при этом оказывается противоположной полярности входного напряжения [1].

### Защита импульсивных стабилизаторов от перенапряжения на выходе

При работе в режиме холостого хода ( $R_n = \infty$ ) или при малых нагрузках напряжение на выходе импульсного стабилизатора (рисунок 3.10) равно входному напряжению  $U_{вх}$ , тогда как для повышающего (рисунок 3.12) и инвертирующего (рисунок 3.14) стабилизаторов оно может значительно превысить нормативное значение [1].

Один из способов защиты стабилизаторов от перенапряжения на выходе показан на рисунке 3.15. Как видно из рисунка 3.15, параллельно диоду подключается дополнительный транзистор VT<sub>1</sub>, обеспечивающий протекание тока в направлении противоположном току этого диода. Дополнительный транзистор управляется в противофазе с регулирующим транзистором VT<sub>2</sub> и дает возможность протекания тока в дросселе фильтра в противоположном направлении под действием колебательного процесса в фильтре [1].

## Пульсации выходного напряжения

В стабилизаторе (рисунок 3.10) пульсации выходного напряжения обратно пропорциональны произведению индуктивности дросселя фильтра и емкости его конденсатора. Эти пульсации могут быть уменьшены посредством увеличения как  $L$  так и  $C$  [1].

Для стабилизатора (рисунки 3.12 и 3.14) пульсации выходного напряжения пропорциональны току нагрузки и не зависят от индуктивности фильтра и могут быть уменьшены только за счёт увеличения ёмкости конденсатора фильтр [1]:

$$U_{\text{п}} = \frac{I_{\text{H}} \cdot \gamma}{C \cdot f},$$

где

$U_{\text{п}}$  - напряжение пульсаций на выходе стабилизатора;

$f$  - частота преобразования.

Как правило, для достижения одинакового уровня пульсаций выходного напряжения в фильтре стабилизатора (рисунок 3.10) требуется конденсатор существенно меньшей ёмкости, чем в стабилизаторах (рисунки 3.12. и 3.14) [1].

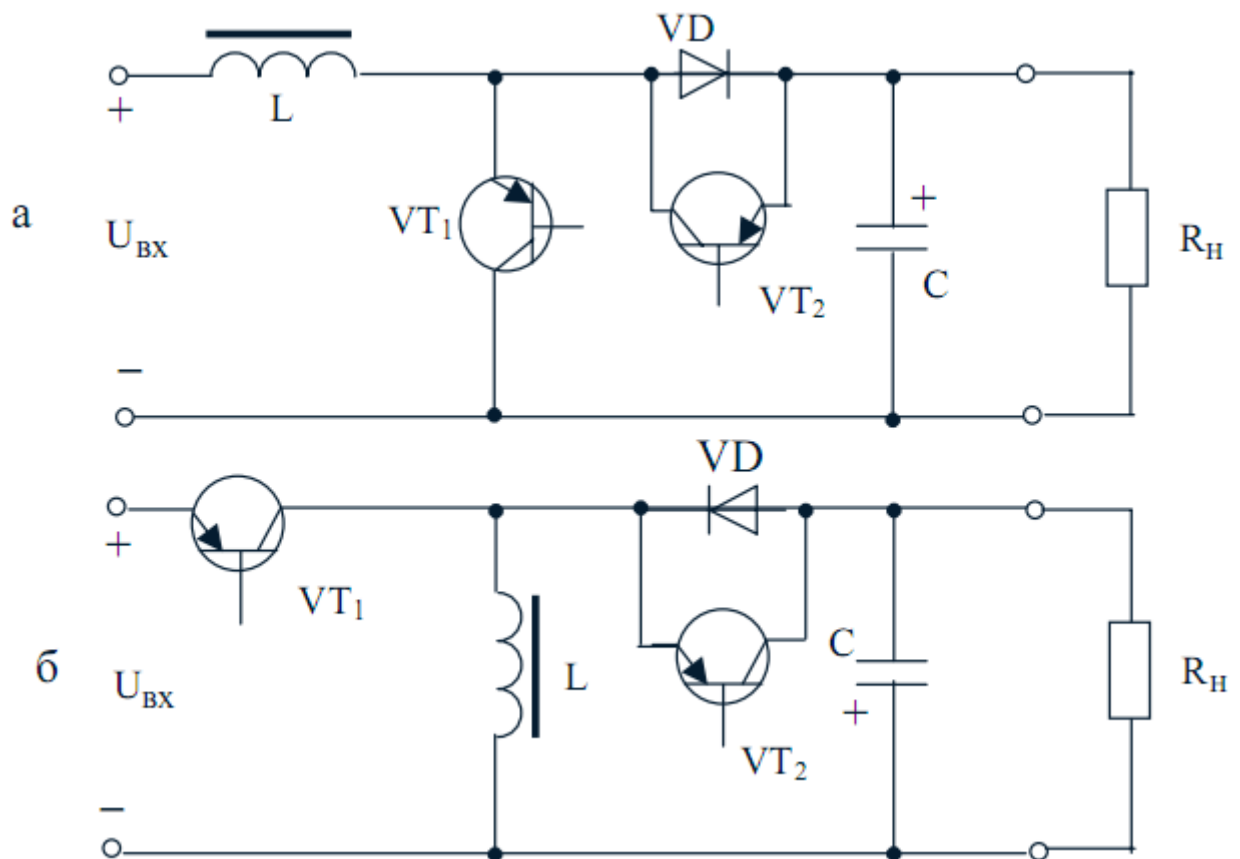


Рисунок 3.15. Импульсные стабилизаторы с защитой от перенапряжения на выходе. Повышающий стабилизатор (а), инвертирующий стабилизатор (б) [1]

## Стабилизатор с частичной модуляцией

Кроме рассмотренных выше импульсных стабилизаторов находят применение стабилизаторы с частичной модуляцией (рисунок 3.16) [1].

В стабилизаторе осуществляется режим частичной модуляции импульсов напряжения на входе сглаживающего фильтра  $U_{\text{ф}}$  (рисунок 3.17) [1].

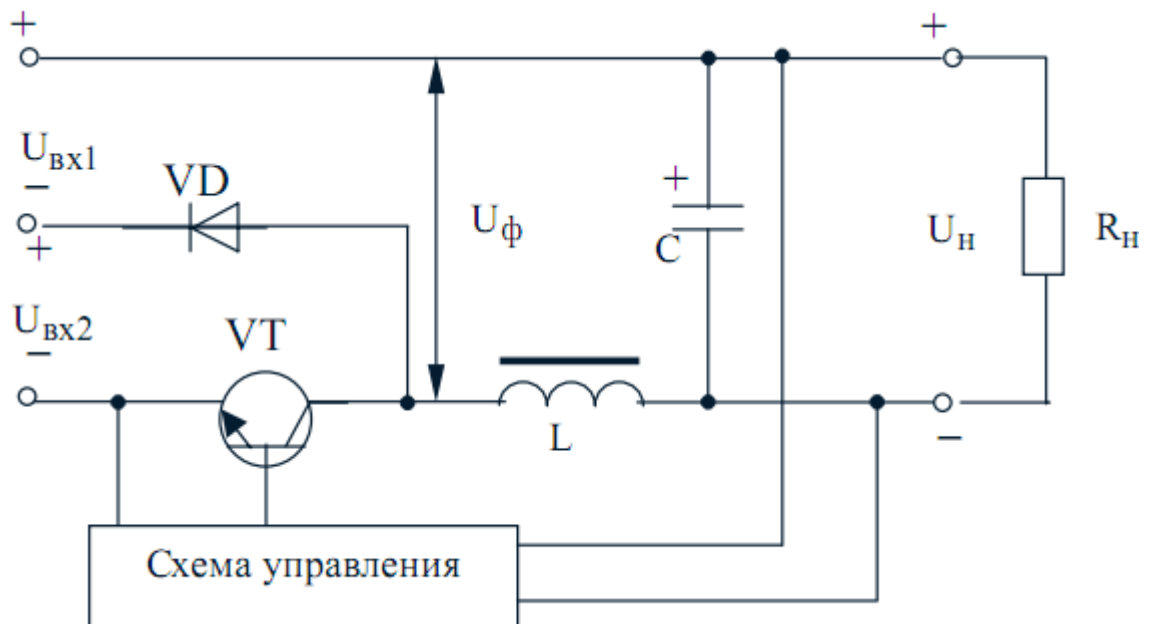


Рисунок 3.16. Импульсный стабилизатор с частичной модуляцией импульсов напряжения на входе сглаживающего фильтра

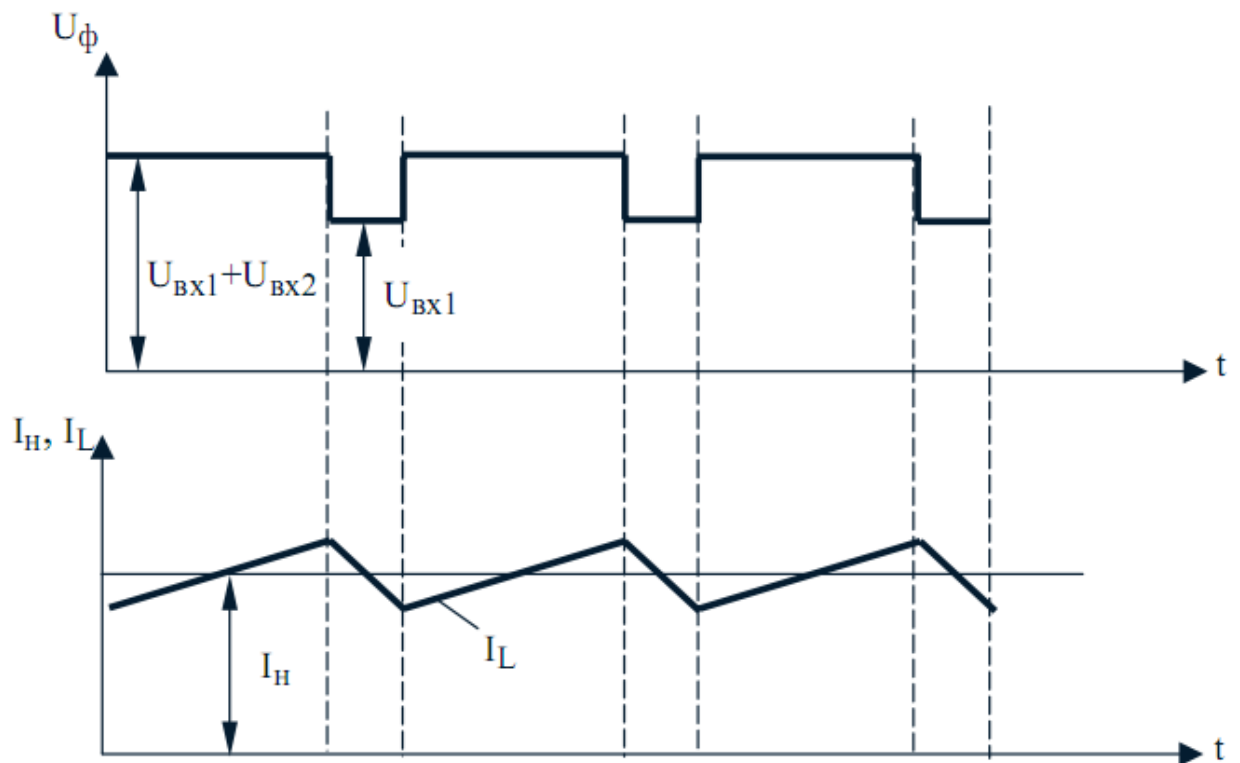


Рисунок 3.17. Временные диаграммы работы схемы на рисунке 3.16

При закрытом состоянии регулирующего транзистора напряжение  $U_\phi$  равно  $U_{вх1}$ , а при его открывании увеличивается до  $U_{вх1} + U_{вх2}$ . Стабилизатор на рисунке 3.16 по сравнению со стабилизатором на рисунке 3.10 характеризуется значительно лучшим использованием сглаживающего фильтра. Для этого стабилизатора требуемые значения произведения LC определяется выражением [1]:

$$LC = \frac{U_{вх2} \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma)}{8 \cdot f^2 U_\Pi}$$

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 1) Каков принцип действия импульсного источника питания с широтно-импульсной модуляцией?
- 2) Чем отличаются обратноходовые и прямоходовые импульсные источники питания?
- 3) Как устроены импульсные источники питания с несколькими выходами?
- 4) Как устроены импульсные стабилизаторы напряжения постоянного тока?
- 5) Каков принцип работы инвертирующего стабилизатора?

## 4. ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА

Химические источники тока<sup>4</sup> (ХИТ) делятся на две группы [1]:

- 1) гальванические элементы и батареи;
- 2) аккумуляторы.

ХИТ первой группы, по сравнению с аккумуляторами, обладают большей удельной электрической емкостью (измеряемой в ампер-часах или миллиампер-часах) и имеют меньшую стоимость. Основным преимуществом аккумуляторов является возможность их многократного использования и вследствие этого значительно меньшая стоимость единицы получаемой энергии. Типовые аккумуляторы, используемые для автономного питания маломощной аппаратуры, гарантированно выдерживают от 200 до 1000 циклов заряд-разряд [1].

При выборе ХИТ для питания конкретной аппаратуры прежде всего обращают внимание на его систему, цену, энергоемкость, долговечность при хранении, постоянство напряжения в течении разряда, внутреннее сопротивление, максимальное значение отдаваемого тока, диапазон рабочих температур и массогабаритные показатели [1].

### 4.1. Гальванические элементы и батареи

Наибольшее распространение получили элементы и батареи следующих систем: угольно-цинковые и хлористо-цинковые; щелочно-марганцевые (щелочные); ртутные (ртутно-цинковые); серебряно-цинковые, литиевые [1].

На рисунке 4.1 представлены кривые разряда элементов различных типов ( $\gamma$  - доля расходуемой емкости).

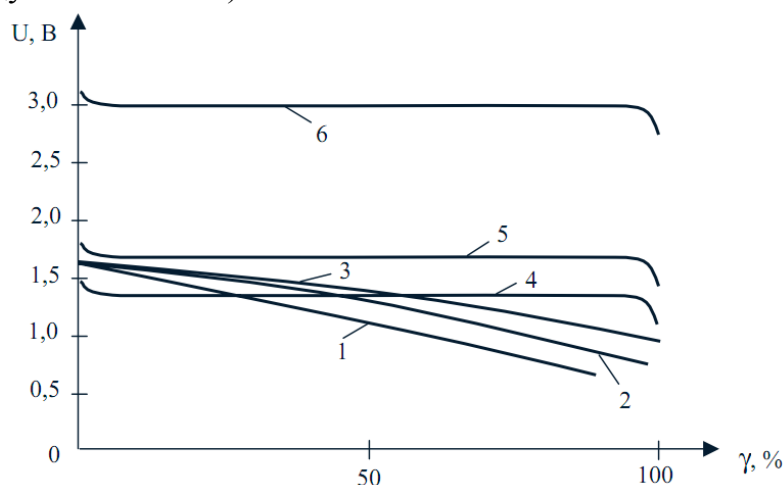


Рисунок 4.1. Кривые разряда гальванических элементов: угольно-цинковые 1, Лекланше 2, хлористо-цинковые Лекланше 3, щелочные 3, ртутные 4, серебряно-цинковые 5, литиевые 6

Типоразмеры цилиндрических сухих элементов питания стандартизованы. Размеры элементов и их обозначения, принятые международной электротехнической комиссией, в России и США (стандарт ANSI) представлены в таблице 4.1 [1].

<sup>4</sup> Более подробную информацию о химических источниках энергии можно найти в [1]

#### 4.1.1. Угольно-цинковые элементы

УЦЭ элементы Лекланше (Le Clanche) являются очень широко распространенными ХИТ благодаря их низкой стоимости и удовлетворительным техническим характеристикам. Элементы и батареи этого типа в различных исполнениях производят многие фирмы, например, Union Carbide, Ever Ready, VARTA, Vidor, Yuasa и другие [1].

Под нагрузкой рабочее напряжение угольно-цинкового элемента по мере его разряда постепенно уменьшается. Чем ниже конечное напряжение (напряжение, до которого питаемое устройство сохраняет работоспособность), тем больше срок службы и время работы элемента. Типичные значения конечных напряжений для элемента с начальным напряжением 1,5 В находятся в интервале от 0,65 до 1,1 В. Целесообразно стремиться к обеспечению меньшего значения этого напряжения, чтобы в наибольшей степени использовать энергию, которую может отдать элемент. Для этого, если позволяет питаемое устройство, применяют батарею с несколько большим напряжением, чем это необходимо для нормальной работы устройства. В этом случае уменьшается конечное напряжение в расчёте на один элемент и обеспечивается более эффективное использование ХИТ [1].

Номинальная рабочая ёмкость угольно-цинковой батареи не является строго определённой величиной, так как отданная батареей ёмкость зависит от условий ее разряда (разрядного тока, режима разряда и конечного напряжения). Отданная ёмкость зависит так же от рабочей температуры и условий хранения батареи до начала эксплуатации [1].

Коэффициент использования активных материалов угольно-цинковой батареи повышается по мере уменьшения плотности тока. По этому при проектировании устройств с питанием от ХИТ желательно выбирать батарею возможно больших размеров.

Отдаваемая ёмкость зависит так же от соотношения длительностей периодов разряда и отдыха. Как правило, угольно-цинковые элементы лучше работают в условиях прерывистого отбора тока. Однако в некоторых случаях они могут оказаться эффективными при работе в условиях непрерывного разряда очень малым током [1].

Угольно-цинковые элементы и батареи, как правило, предназначены для работы при температуре 21 °С. Чем выше температура батареи во время разряда, тем больше отдача энергии. Однако высокая температура приводит к уменьшению срока хранения, а длительное воздействие температуры выше 52°С может привести к повреждению батареи [1].

На рисунке 4.2 представлены характеристики разряда угольно-цинкового элемента типоразмера D, разряжаемого непрерывно на резистор сопротивлением 2,25 Ом при различной температуре [1].

В таблице 4.2 показано как зависимости от температуры изменяется отдаваемая ёмкость угольно-цинкового элемента типоразмера D при его непрерывном разряде на резистор сопротивлением 2,25 Ом до конечного напряжения 0,6 В.

Пониженная температура и даже замораживание не приводит к порче элементов, если их не подвергать многократным циклическим температурным

изменениям (от наиболее низких до более высоких температур). При пониженной температуре увеличивается срок хранения элементов

Рекомендуемая температура хранения угольно-цинковых элементов составляет 4 - 10°C [1].

Таблица 4.1. Унифицированные размеры цилиндрических сухих элементов питания

| Обозначения |        |     | Размеры     |            |
|-------------|--------|-----|-------------|------------|
| МЭК         | Россия | США | Диаметр, мм | Высота, мм |
| R08         | -      | O   | 10,5        | 3          |
| R06         | 283    | -   | 10,5        | 22         |
| R03         | 286    | AAA | 10,5        | 44,5       |
| R4          | 314    | R   | 14,5        | 38         |
| R6          | 316    | AA  | 14,5        | 50,5       |
| R8          | 326    | A   | 16          | 50,5       |
| R10         | 332    | BR  | 21,5        | 37         |
| R12         | 336    | B   | 21,5        | 60         |
| R14         | 343    | C   | 26,5        | 50         |
| R20         | 373    | D   | 34,2        | 61,5       |
| R22         | 374    | E   | 34,2        | 75         |
| R25         | 376    | F   | 34,2        | 91         |
| R26         | -      | G   | 34          | 105        |
| R27         | -      | J   | 34          | 150        |
| -           | 425    | -   | 40          | 100        |
| -           | 465    | -   | 51          | 125        |

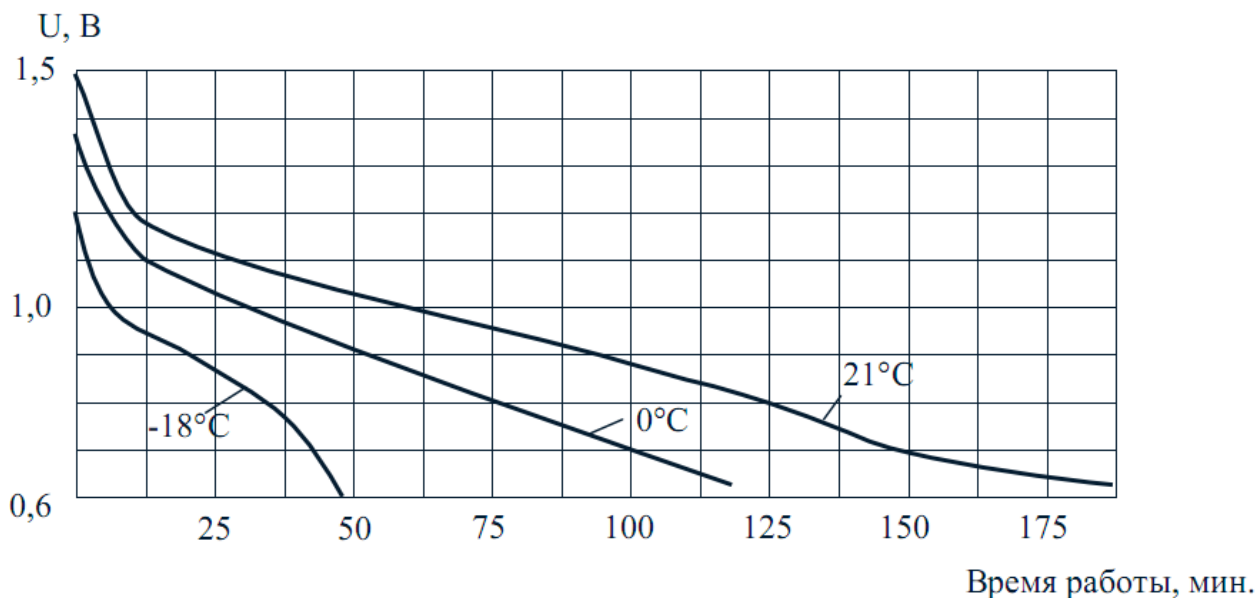


Рисунок 4.2. Характеристики разряда угольно-цинкового элемента типоразмера D, разряжаемого непрерывно при начальном токе 660 мА [1]



Таблица 4.2. Влияние температуры на отдаваемую ёмкость угольно-цинкового элемента типоразмера D

| Температура, °С | Ёмкость в % от номинального значения при 21 °С |
|-----------------|--|
| 37,8            | 140  |
| 26,7            | 110  |
| 21,1            | 100  |
| 15,6            | 90   |
| 4,4             | 70   |
| -6,7            | 45   |
| -17,8           | 25   |
| -28,9           | 0  |

Внутреннее сопротивление элемента или батареи необходимо обязательно учитывать при выборе ХИТ для питания устройств, потребляющих большие токи в течение коротких промежутков времени. Внутреннее сопротивление зависит, помимо всего прочего, от размеров элемента. Следовательно, если внутреннее сопротивление малогабаритного элемента слишком велико, для того чтобы обеспечить требуемый ток можно выбрать элемент больших размеров. Внутреннее сопротивление «свежего» угольно-цинкового элемента достаточно мало. Однако оно заметно возрастает при использовании элемента [1].

Для определения времени наработки или отдаваемой ёмкости сухих угольно-цинковых батарей в конкретном устройстве при заданном режиме разряда (кроме отбора очень малых токов) целесообразно проводить испытания, воспроизводя условия разряда, близкие к тем, в которых будет использоваться данная батарея. Отдаваемая ёмкость батареи, разряжаемой заданным током по 2 часа в день, существенно отличается от отдаваемой ёмкости этой же батареи, разряжаемой таким же током по 10 часов в день. Не существует непосредственной связи между отдаваемой ёмкостью при непрерывном разряде и ёмкостью при прерывистом разряде. Поэтому достаточно трудно оценивать достоинства различных батарей при работе в режиме прерывистого разряда, сравнивая результаты их испытаний в режиме непрерывного разряда [1].

#### 4.1.2. Хлористо-цинковый элемент Лекланше

Является разновидностью угольно-цинкового элемента. Главное различие между ними заключается в электролите. В хлористо-цинковом элементе в качестве электролита применяют только раствор хлористого цинка, тогда как в угольно-цинковом элементе электролит наряду с хлористым цинком содержит раствор хлористого аммония. Отказ от использования хлористого аммония улучшает электрохимические свойства элемента, однако, при этом несколько усложняется конструкция элемента [1].

Электроды хлористо-цинковых элементов способны работать более эффективно и, как следствие, обеспечивать более высокий коэффициент использования активных материалов (большой полезный выход по току), чем электроды угольно-цинковых элементов. Поэтому хлористо-цинковые элементы могут работать в режиме с отбором большего тока в течение более длительного времени, чем угольно-цинковые элементы тех же размеров. Кроме этого, хлористо-

цинковые элементы обеспечивают более высокую стабильность напряжения под нагрузкой. Эти элементы могут выполняться с увеличенными габаритами («мощные» сухие элементы). Конструкция таких элементов предусматривает специальные приспособления для отвода газа, образующегося при разряде [1].

Хлористо-цинковые элементы при понижении температуры теряют меньше емкости, чем угольно-цинковые при тех же самых условиях разряда (таблицы 4.2 и 4.3).

Характеристики некоторых угольно-цинковых и хлористо-цинковых элементов и батарей представлены в таблице 4.4. Данные этой таблицы наглядно демонстрируют зависимость отдаваемой емкости от режима разряда (разрядного тока). Так, например, девятивольтовая батарея 716(F) при разряде с начальным током 80 мА (сопротивление нагрузки 112,5 Ом) до напряжения 7,2 В отдает емкость около 24,8 А·ч. В то же время при разряде током 1,2 А (сопротивление нагрузки 7,5 Ом) до такого же напряжения она способна отдать лишь приблизительно 8,4 А·ч [1].

Таблица 4.3. Влияние температуры на отдаваемую емкость хлористо-цинкового элемента типоразмера D

| Температура, °С | Емкость в % от номинального значения при 21 °С |
|-----------------|--|
| 37,8            | 115  |
| 32,2            | 110  |
| 26,7            | 105  |
| 21,1            | 100  |
| 15,6            | 95   |
| 10,0            | 90   |
| 4,4             | 85   |
| -1,1            | 80   |
| -6,7            | 70   |
| -12,2           | 60   |
| -17,8           | 45   |

Среднее время работы угольно-цинковых и хлористо-цинковых элементов и батареи типа Eveready фирмы Union Carbide при температуре 21 °С.

Таблица 4.4

| Марка элемента (батареи) | Типоразмер согласно стандарту ANSI | Напряжение питания, В | Режим работы, ч/день | Сопротивление нагрузки, Ом | Время работы до конечного напряжения, часов |       |
|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|---|-------|
|                          |                                    |                       |                      |                            | 0,75 В                                      | 0,9 В |
| 1215                     | AA                                 | 1,5                   | 4                    | 40                         | 33  | 31    |
| 1215                     | AA                                 | 1,5                   | 4                    | 25                         | 20  | 18    |
| 1235                     | C                                  | 1,5                   | 4                    | 40                         | 97  | 91    |
| 1235                     | C                                  | 1,5                   | 4                    | 25                         | 59  | 55    |
| 1050                     | D                                  | 1,5                   | 4                    | 83,3                       | 440   | 400   |

Продолжение таблицы 4.4

| Марка элемента (батареи) | Типоразмер согласно стандарту ANSI | Напряжение питания, В | Режим работы, ч/день | Сопротивление нагрузки, Ом | Время работы до конечного напряжения, часов |               |
|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|---|---------------|
|                          |                                    |                       |                      |                            |   |               |
| 742                      | F                                  | 1,5                   | 2                    | 18,75                      | 0,8 В<br>490                                | 1,0 В<br>410  |
| 742                      | F                                  | 1,5                   | 2                    | 1,25                       | 23  | 18            |
| 950                      | D                                  | 1,5                   | 2                    | 150                        | 0,8 В<br>525                                | 1,0 В<br>475  |
| 950                      | D                                  | 1,5                   | 2                    | 5                          | 11  | 7             |
| HS35                     | C                                  | 1,5                   | 2                    | 600                        | 0,8 В<br>900                                | 1,0 В<br>800  |
| HS35                     | C                                  | 1,5                   | 2                    | 6                          | 3,5   | 1,5           |
| 750                      | AA                                 | 3,0                   | 2                    | 600                        | 1,6 В<br>265                                | 2,0 В<br>240  |
| 750                      | AA                                 | 3,0                   | 2                    | 60                         | 14  | 10            |
| 703                      | B                                  | 4,5                   | 2                    | 900                        | 2,4 В<br>420                                | 3,6 В<br>250  |
| 703                      | B                                  | 4,5                   | 2                    | 45                         | 14,5  | 4,5           |
| 724                      | AA                                 | 6,0                   | 2                    | 100                        | 3,6 В<br>17,7                               | 4,4 В<br>14,5 |
| 744                      | F                                  | 6,0                   | 4                    | 100                        | 155   | 115           |
| 706                      | F                                  | 6,0                   | 2                    | 75                         | 3,6 В<br>450                                | 4,0 В<br>410  |
| 706                      | F                                  | 6,0                   | 2                    | 5                          | 20,5  | 18            |
| 773                      | B                                  | 7,5                   | 2                    | 1500                       | 4 В<br>420                                  | 5 В 340<br>9  |
| 773                      | B                                  | 7,5                   | 2                    | 75                         | 14,5  |               |
| 206                      | 109                                | 9,0                   | 2                    | 750                        | 4,2 В<br>40                                 | 5,4 В<br>32   |
| 206                      | 109                                | 9,0                   | 2                    | 560                        | 27  | 21            |
| 2356N                    | 117                                | 9,0                   | 4                    | 600                        | 4,8 В<br>305                                | 6 В<br>290    |
| 2356N                    | 117                                | 9,0                   | 4                    | 250                        | 125   | 115           |
| 716                      | F                                  | 9,0                   | 2                    | 112,5                      | 6,0 В<br>410                                | 7,2 В<br>310  |
| 716                      | F                                  | 9,0                   | 2                    | 7,5                        | 18  | 6,8           |

#### 4.1.3. Щелочные марганцево-цинковые элементы

Основное преимущество щелочных элементов по сравнению с элементами системы Лекланше проявляется при использовании их в качестве мощных источников тока [1].

Щелочные элементы очень хорошо работают в режимах с непрерывным отбором тока и с отбором больших токов и имеют явное преимущество перед угольно-цинковыми элементами по такому параметру, как отношение удельной емкости к стоимости единичного элемента [1].

Стабильность напряжения щелочных элементов и батарей выше, чем у ХИТ системы Лекланше. Они остаются работоспособными в интервале температур от -20 до +70°C, а в определенных случаях и при более высоких температурах [1].

Щелочные ХИТ могут храниться в течение 30 месяцев без существенного уменьшения первоначальной емкости. Например, после годичного хранения при 20°C эти батареи способны обеспечивать более 92% первоначальной емкости. Отдельные элементы и батареи этого типа сохраняют около 80% первоначального значения емкости после четырех лет хранения при 20°C [1].

Как и для ХИТ системы Лекланше, так и для щелочных ХИТ характерно то, что время работы (в часах) тем выше, чем ниже конечное напряжение. Целесообразно добиваться как можно более низкого конечного напряжения, для того чтобы полностью использовать высокую энергию, содержащуюся в элементах этого типа. Разрядная емкость остается относительно постоянной при различных графиках разряда. Изменение величины отбираемого тока меньше влияет на отдаваемую емкость, чем у элементов Лекланше. Элементы и батареи изготавливаются с величиной емкости от нескольких сотен миллиампер-часов до десятков ампер-часов [1].

Щелочные батареи предназначены для использования в устройствах, где требуются источники питания большой мощности или источники, имеющие более длительное время работы по сравнению с угольно-цинковыми батареями. Полный запас энергии щелочных батарей примерно вдвое превышает запас энергии угольно-цинковых батарей тех же размеров. У обычных угольно-цинковых батарей при работе в режиме с отбором большого тока или при непрерывном разряде в тяжелых режимах коэффициент использования активных материалов настолько ухудшается, что только небольшая доля содержащегося в них запаса энергии может быть извлечена и использована. Основное преимущество щелочных батарей заключается именно в высокой мощности при разряде в непрерывном или тяжелом режиме, когда ХИТ системы Лекланше перестают удовлетворять предъявляемым к источнику питания требованиям. При определенных условиях щелочные ХИТ обеспечивают в семь раз большую длительность работы, чем стандартные угольно-цинковые батареи [1].

Хотя щелочные батареи по своим техническим характеристикам превосходят угольно-цинковые в любых режимах работы, в ряде случаев оказывается, что в экономическом отношении они не будут иметь преимуществ в режимах с отбором малого тока, при прерывистом разряде или в комбинированном режиме. Например, при прерывистом разряде токами менее 300 мА щелочной элемент типоразмера Д, хотя и обладает очень хорошими техническими характеристиками, теряет экономические преимущества перед угольно-цинковым элементом [1].

В радиоприемниках и других устройствах с относительно небольшим потреблением тока щелочные ХИТ служат обычно вдвое дольше, чем ХИТ системы Лекланше. В игрушках с батарейным питанием и других устройствах с относительно большим потреблением тока щелочные батареи работают иногда в семь раз дольше, чем ХИТ Лекланше [1].

Щелочные ХИТ являются превосходным источником питания для фотовспышек. Они не только способны отдавать большие токи, но и обладают более большим запасом энергии, чем стандартные угольно-цинковые батареи, предназначенные для питания фотовспышек. В ряде электронных фотовспышек используется преобразователь с транзисторным или механическим прерывателем для преобразования постоянного низкого напряжения в высокое, необходимое для

заряда конденсатора фотовспышки. Отбираемые при этом токи оказываются на пределе возможностей даже для сильноточных батарей, предназначенных для фотовспышек. Щелочные батареи обеспечивают и достаточно короткое время между двумя последовательными разрядами, и увеличение в 2-3 раза количество разрядов фотовспышки по сравнению с угольно-цинковыми батареями, служащими для той же цели, или угольно-цинковыми батареями общего назначения. Такое улучшение характеристик стало возможным благодаря особой конструкции элемента, которая обеспечивает очень низкое внутреннее сопротивление, позволяющее отбирать энергию более интенсивно по сравнению со стандартным элементом Лекланше [1].

#### 4.1.4. Ртутно-цинковые элементы и батареи

Характеризуются постоянством напряжения при разряде и отсутствием необходимости в перерывах между разрядами для «отдыха». Напряжение ртутно-цинкового элемента равно  $1,352 \pm 0,002$  В и мало изменяется при изменении температуры. Поэтому эти элементы иногда используются в технических устройствах в качестве источников опорного напряжения [1].

Характерными чертами ртутно-цинковых ХИТ являются [1]:

- 1) длительный срок службы;
- 2) большое значение удельной емкости;
- 3) плоская кривая разряда;
- 4) сравнительно высокое напряжение под нагрузкой;
- 5) относительно постоянная отдаваемая емкость, практически независимая от условий разряда;
- 6) малое и практически постоянное внутреннее сопротивление;
- 7) сохранение работоспособности при высоких температурах;
- 8) высокая устойчивость к ударам, вибрациям и ускорениям;
- 9) устойчивость к пониженному и повышенному давлению по сравнению с атмосферным.

Рабочая емкость ртутно-цинковых ХИТ после года хранения при температуре 21 °С, как правило, составляет более 90% емкости свежееизготовленной батареи. Рекомендуемый срок хранения для ртутно-цинковых ХИТ до трех лет. В таблице 4.5. представлена типовая зависимость напряжения ртутно-цинкового элемента [1].

Таблица 4.5. Типовая зависимость Э.Д.С. ртутно-цинкового элемента от продолжительности хранения при температуре 21 °С (35°С)

| Время хранения, мес. | ЭДС, В          |
|----------------------|-----------------|
| 0                    | 1,3566 (1,3566) |
| 3                    | 1,3555 (1,3554) |
| 6                    | 1,3536 (1,3510) |
| 9                    | 1,3533 (1,3490) |
| 12                   | 1,3524 (1,3463) |

Ртутно-цинковые элементы и батареи выпускаются в двух вариантах, предназначенных для различных применений: элементы на 1,35 В и батареи на их основе; элементы на 1,4 В и батареи на их основе. В общем случае элементы

напряжением 1,35 В рекомендуются применять в качестве источников опорного напряжения и в устройствах, работающих при повышенных температурах. Элементы напряжения на 1,4 В или батареи, состоящие из этих элементов, могут быть использованы во всех типах промышленно выпускаемых приборов, за исключением измерительной и научной аппаратуры, а также приборов, обеспечивающих разогрев зоны размещения ХИТ до температуры от +65 до +70°C. Эти элементы (по сравнению с 1,35 - вольтовыми) не обеспечивают стабильное напряжение. 1,4- вольтовые ХИТ рекомендуется применять в устройствах, где требуется длительный отбор небольших по величине токов, а высокая стабильность напряжения необязательна [1].

Таблица 4.6. Характеристики ртутно-цинковых элементов и батарей Eveready производства фирм Union Carbide при непрерывном разряде

| Фирменное обозначение | Напряжение, В | Обозначение согласно ANSI | Средний срок службы при температуре 21 °С |                        |                             |
|-----------------------|---------------|---------------------------|---|------------------------|-----------------------------|
|                       |               |                           | Сопrotивление нагрузки, Ом                | Конечное напряжение, В | Подолжителъность работы, ч. |
| 325                   | 1,35          | WM5                       | 13.000                                    | 1,2                    | 540                         |
| E400N                 | 1,35          | M10                       | 1.250                                     | 0,9                    | 75,9                        |
| 343                   | 1,35          | WM10                      | 13.000                                    | 0,9                    | 1200                        |
| 354                   | 1,35          | —                         | 6.500                                     | 0,9                    | 730                         |
|                       |               |                           | 6.500                                     | 1,2                    | 710                         |
| 313                   | 1,35          | WM45                      | 6.500                                     | 1,2                    | 1100                        |
| E625N                 | 1,35          | M20                       | 250                                       | 0,9                    | 50,9                        |
| EPX640                | 1,35          | M30                       | 1.250                                     | 0,9                    | 510                         |
| E401N                 | 1,35          | M35                       | 100                                       | 0,9                    | 68,9                        |
| E1N                   | 1,35          | M40                       | 60  | 0,9                    | 52,6                        |
| E3                    | 1,35          | M60                       | 60  | 0,9                    | 125                         |
| E502                  | 1,35          | M55                       | 83  | 0,9                    | 171                         |
| E12N                  | 1,35          | M70                       | 32  | 0,9                    | 100                         |
| E42N                  | 1,35          | M100                      | 4.4                                       | 0,9                    | 54,7                        |
| E41E                  | 1,40          | M11                       | 1000                                      | 0,9                    | 126                         |
| E401E                 | 1,40          | M35                       | 100                                       | 0,9                    | 69,8                        |
| EP401E                | 1,40          | —                         | 250                                       | 0,9                    | 206                         |
| E502E                 | 1,40          | M55                       | 83  | 0,9                    | 174                         |
| E12                   | 1,40          | M70                       | 32  | 0,9                    | 100                         |
| E42                   | 1,40          | M100                      | 4.4                                       | 0,9                    | 60                          |
| EPX14                 | 2,7           | —                         | 2.750                                     | 1,8                    | 280                         |
| E132N                 | 2,7           | —                         | 120                                       | 1,8                    | 52,6                        |
| E152                  | 2,8           | —                         | 500                                       | 1,8                    | 75,8                        |
| E133N                 | 4,05          | —                         | 180                                       | 2,7                    | 52,6                        |
| E163                  | 4,2           | —                         | 375                                       | 2,7                    | 50,8                        |
| E133                  | 4,2           | —                         | 180                                       | 2,7                    | 55,5                        |
| E233                  | 4,2           | —                         | 180                                       | 2,7                    | 122                         |
| E164N                 | 5,4           | —                         | 500                                       | 3,6                    | 51                          |
| E134N                 | 5,4           | —                         | 240                                       | 3,6                    | 52,6                        |
| EPX32                 | 5,6           | —                         | 500                                       | 3,6                    | 50,8                        |
|                       |               |                           | 200                                       | 3,6                    | 22                          |

Продолжение таблицы 4.6

| Фирменное обозначение | Напряжение, В | Обозначение согласно ANSI | Средний срок службы при температуре 21 °С |                        |                             |
|-----------------------|---------------|---------------------------|---|------------------------|-----------------------------|
|                       |               |                           | Сопротивление нагрузки, Ом                | Конечное напряжение, В | Подолжительность работы, ч. |
| E134                  | 5,6           | —                         | 240                                       | 3,6                    | 55,5                        |
| E135N                 | 6,75          | —                         | 300                                       | 4,5                    | 52,6                        |
| E165                  | 7,0           | —                         | 625                                       | 4,5                    | 50,8                        |
|                       |               |                           | 250                                       | 4,5                    | 22                          |
| E136N                 | 8,1           | —                         | 360                                       | 5,4                    | 52,6                        |
| E136                  | 8,4           | —                         | 360                                       | 5,4                    | 55,5                        |
| E289                  | 12,6          | —                         | 720                                       | 0,9                    | 51,5                        |

Высокие температуры (до +70°C) практически не сказываются на стабильности характеристик ртутно-цинковых ХИТ. В течение нескольких часов такие ХИТ могут работать при температуре порядка +145°C. При низких температурах в общем случае характеристики ртутно-цинковых элементов становятся неудовлетворительными. Однако более поздние разработки элементов значительно лучше работают в условиях пониженных температур. Для ртутно-цинковых элементов, не относящихся к последней группе, при температуре от +3 до +4°C происходит резкое уменьшение отдаваемой емкости, а при 0°C эти элементы имеют очень малую емкость, за исключением режимов с отбором малого тока [1].

Характеристики некоторых ртутно-цинковых ХИТ приведены в таблице 4.6 [1].

#### 4.1.5. Серебряно-цинковые элементы

Обеспечивают более высокое напряжение, чем ртутно-цинковые при сохранении плоской кривой разряда (рисунок 4.1). Серебряно-цинковые ХИТ сохраняют работоспособность при низких температурах [1].

Рабочее напряжение серебряного элемента составляет 1,5 В (напряжение на разомкнутых электродах равно 1,6 В). Одними из ведущих фирм производителей серебряных ХИТ являются Union Carbide и Mallory, выпускающие серебряно-цинковые дисковые элементы со значениями емкости 35-210 мА ч и 36 - 260 мА ч соответственно [1].

Серебряно-цинковые ХИТ используются в качестве источников питания в электронных наручных часах (с аналоговой и цифровой индикацией), калькуляторах, электронных записных книжках, миниатюрных слуховых аппаратах, измерительных приборах, миниатюрных источниках света с автономным питанием (фонариках) и целом ряде других устройств. Также, как и ртутно-цинковые элементы серебряные, ХИТ применяются в качестве источников опорного напряжения [1].

Серебряно-цинковые элементы хорошо сохраняют работоспособность после хранения 1-2 лет (обычно сохраняются более 90% емкости после одного года хранения при температуре 21 °С) [1].

Элементы серебряно-цинковой системы могут иметь как малое, так и большое внутреннее сопротивление. Так, отечественные элементы для наручных электронных часов обладают низким собственным импедансом. В то же время ряд элементов аналогичного назначения, производимых зарубежными фирмами, выпускаются с большим внутренним сопротивлением, что препятствует их взаимозаменяемости в часах с такими функциональными возможностями как подсветка и формирование звукового сигнала. Характеристики некоторых серебряных химических источников тока приведены в таблицах 4.7, 4.8 и 4.9 [1].

#### 4.1.6. Литиевые элементы и батареи

Литиевые ХИТ обеспечивают удельную энергию по массе до 330 Вт·ч/кг, что примерно в три раза выше, чем у ртутных и серебряно-цинковых, и в четыре раза выше чем у щелочных источников тока. Удельная энергия по объему у литиевых батарей на 50% выше, чем у ртутных, и на 100% выше, чем у щелочных. Применение литиевых ХИТ позволяет уменьшить массогабаритные показатели РЭА с автономным питанием. Другим замечательным свойством литиевых элементов и батарей является большой срок сохраняемости, благодаря чему автономность некоторых устройств с литиевым ХИТ достигает 5-10 лет и более [1].

В таблице 4.10 представлены значения равновесных напряжений основных типов литиевых ХИТ [1].

Как видно из данных таблицы 4.10 литиевые элементы обеспечивают более высокое напряжение, по сравнению с рассмотренными ранее элементами других систем (от 2,2 до 3,6 В) [1].

Вследствие неводной природы электролитов, используемых в литиевых системах, электропроводность таких систем при пониженных температурах значительно выше, чем электропроводность ХИТ нелитиевых систем. В таблице 4.11 представлены значения отдаваемой емкости ХИТ различных систем при низких температурах [1].

Таблица 4.7. Характеристики серебряно-цинковых элементов и батарей серии Eveready фирмы Union Carbide при непрерывном разряде

| Марка элемента (батареи) | Напряжение, В | Обозначение согласно ANSI | Средний срок службы при температуре 35°C |                        |                              |
|--------------------------|---------------|---------------------------|--|------------------------|------------------------------|
|                          |               |                           | Сопротивление нагрузки, Ом               | Конечное напряжение, В | Продолжительность работы, ч. |
| 384                      | 1,5           | —                         | 15.000                                   | 0,9                    | 370                          |
| 392                      | 1,5           | —                         | 15.000                                   | 1,3                    | 370                          |
| S312E                    | 1,5           | S4                        | 1.500                                    | 1,3                    | 38                           |
| 309                      | 1,5           | WS5                       | 15.000                                   | 1,3                    | 600                          |
| 393                      | 1,5           | WS5                       | 15.000                                   | 1,3                    | 725                          |
| SH301                    | 1,5           | WS10                      | 150.000                                  | 0,9                    | 9800                         |
|                          |               |                           | 15.000                                   | 1,3                    | 1000                         |
| 386                      | 1,5           | WS10                      | 6.500                                    | 1,3                    | 510                          |
| 303                      | 1,5           | WS16                      | 94.000                                   | 0,9                    | 10,920                       |



Продолжение таблицы 4.7

| Марка элемента (батареи) | Напряжение, В | Обозначение согласно ANSI | Средний срок службы при температуре 35°C |                        |                              |
|--------------------------|---------------|---------------------------|--|------------------------|------------------------------|
|                          |               |                           | Сопротивление нагрузки, Ом               | Конечное напряжение, В | Продолжительность работы, ч. |
|                          |               |                           | 6.500                                    | 0,9                    | 700                          |
| 357                      | 1,5           | SR44                      | 6.500                                    | 1,3                    | 810                          |
| 355                      | 1,5           | —                         | 6.500                                    | 0,9                    | 915                          |
| 544                      | 6,0           | —                         | 2.400                                    | 3,6                    | 60                           |

Таблица 4.8. Характеристики дисковых серебряно-цинковых элементов напряжением 1,5 В фирмы Duracell

| Марка элемента | Емкость при температуре 20°C, мАч | Условия разряда            |                        |          | Объем, см <sup>3</sup> |
|----------------|-----------------------------------|----------------------------|------------------------|----------|------------------------|
|                |                                   | Сопротивление нагрузки, Ом | Конечное напряжение, В | Масса, г |                        |
| D393           | 75                                | 20.000                     | 0,9                    | 0,99     | 0,25                   |
| D386           | 120                               | 15.000                     | 0,9                    | 1,7      | 0,44                   |
| 10L14          | 130                               | 1.500                      | 0,9                    | 2,0      | 0,55                   |
| D391           | 35                                | 6.500                      | 0,9                    | 0,8      | 0,23                   |
| D392           | 38                                | 30.000                     | 0,9                    | 0,8      | 0,16                   |
| D389           | 70                                | 13.000                     | 0,9                    | 0,99     | 0,26                   |

*Длительный срок хранения.* Очень существенным преимуществом систем на основе лития является их способность к длительному хранению в состоянии готовности к работе. Герметизация элементов, возможная в следствие использования систем, не выделяющих газы в процессе разряда, защищает элементы от проникновения загрязнений из окружающей среды и предотвращает утечку электролита из элементов. Эти особенности в сочетании с очень малыми скоростями реакций саморазряда делают возможным сохранение литиевых ХИТ в состоянии готовности к работе в течение 5-10 лет без необходимости создания специальных условий хранения. Следовательно, литиевые элементы могут надежно работать в течение нескольких лет в режиме прерывистого разряда или разряда очень малым током. В таблице 4.12 дано сравнение сроков годности элементов различных систем. Для проведения такого сравнения в качестве приемлемого срока годности принято время хранения, после которого элемент еще способен отдавать 75% своей первоначальной емкости [1].

Таблица 4.9. Характеристики серебряно-цинковых элементов напряжением 1,5 В фирмы VARTA

| Марка элемента | Емкость, мАч | Внутреннее сопротивление, Ом | Размеры, мм |        | Масса, г |
|----------------|--------------|------------------------------|-------------|--------|----------|
|                |              |                              | диаметр     | высота |          |
| V8 GS          | 45           | 20                           | 11,6        | 2,1    | 0,9      |
| V13HS          | 75           | 4,2...6,5                    | 7,9         | 5,4    | 1,1      |
| V10GS          | 85           | 10                           | 11,6        | 3,1    | 1,4      |
| V41 HS         | 120          | 3,2...5,0                    | 11,6        | 4,2    | 1,8      |
| V12GS          | 130          | 6                            | 11,6        | 4,2    | 1,9      |
| V76 HS         | 175          | 3,5...5,5                    | 11,6        | 5,4    | 2,4      |

Таблица 4.10. Равновесные напряжения литиевых элементов различных систем

| Материал   | Напряжение, В |
|--|---------------|
| Литий-тионилхлорид (LiSOCl <sub>2</sub> )                  | 3,6           |
| Литий-пятиокись ванадия (LiV <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 3,4           |
| Литий-двуокись серы (LiSO <sub>2</sub> )                   | 2,9           |
| Литий-трехокись молибдена (LiMoO <sub>3</sub> )            | 2,9           |
| Литий-фторид меди (CuF <sub>2</sub> )                      | 3,4           |
| Литий-хромат серебра (LiAg <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> ) | 3,0           |
| Литий-сульфид меди (LiCuS)                                 | 2,2           |

Таблица 4.11 Отдаваемая ёмкость (в процентах от емкости при температуре +20°C) различных ХИТ при низких температурах

| Температура, °C | Литиевые системы |     | Ртутная система | Щелочно-марганцевая система | Угльно-цинковая система (Лекланше) |
|-----------------|------------------|-----|-----------------|-----------------------------|------------------------------------|
|                 | V2O5             | SO2 |                 |                             |                                    |
| -7              | 88               | 96  | 0               | 15                          | 5                                  |
| -29             | 78               | 85  | 0               | 3                           | 0                                  |
| -40             | 73               | 60  | 0               | 0                           | 0                                  |

Таблица 4.12 Сравнение сроков годности элементов различных систем

| Температура хранения, °C | Литиевая система |          | Ртутная система | Щелочно-марганцево-цинковая система | Угльно-цинковая система (Лекланше) |
|--------------------------|------------------|----------|-----------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 21                       | Более 10 лет     | 3-4 года | 2-3 года        | 1-2 года                            | 21                                 |
| 54                       | Более 12 мес.    | 4 мес.   | 2 мес           | 1,5 мес.                            | 54                                 |

Данные, полученные фирмой Honeywell при испытаниях выпускаемых ею герметичных элементов системы LiSO<sub>2</sub> типоразмера Double - C, показывают, что после 180-дневного хранения при 71 °C элементы могут отдавать 88% емкости,

отдаваемой свежеизготовленными элементами. Некоторые стандарты устанавливают, что 180-дневное хранение при температуре 71 °С примерно эквивалентно хранению в течение периода более 12 лет при комнатной температуре [1].

*Экономическая эффективность.* При массовом производстве системы на основе лития могут непосредственно конкурировать с системами на основе ртути и серебра по такому показателю, как затраты на один ватт-час. Несмотря на то, что элементы литиевой системы по данному показателю не имеют заметного преимущества перед ХИТ других систем, экономия может быть выявлена, если сравнивать затраты в целом на аппаратуру, использующие другие источники питания, с затратами на систему с литиевыми батареями. Более высокая экономическая эффективность последней системы обусловлена тем, что [1]:

- I. аппаратура может содержать большую полезную нагрузку при использовании литиевых батарей в следствие их меньших размеров и (или) массы.
- II. более длительный срок автономной работы может быть достигнут при использовании батарей тех же размеров, но меньшей массы.
- III. становится возможной работа устройств при низких температурах.
- IV. Большой срок годности литиевых ХИТ может привести к уменьшению затрат на обслуживание, связанное с заменой батарей. Особенно это существенно при использовании аппаратуры, расположенной в удаленных местах, а также устройств, замена батарей в которых сопряжена со значительными затратами времени и средств.
- V. уменьшаются затраты на приобретение запасных батарей, так как существенно увеличивается период между заменами батарей или же вообще отпадает необходимость такой замены. Не требуется создание особых условий для хранения батарей.

Даже если первоначальные затраты на литиевые ХИТ окажутся большими, специалисты, ответственные за обеспечение максимальной экономической эффективности эксплуатации аппаратуры, должны рассмотреть условия ее работы в течение всего срока службы и принять во внимание изложенные выше соображения [1].

#### **4.2. Резервные химические источники тока**

Применяются в основном в устройствах, где требуется большая мгновенная мощность, короткое время работы, очень большой срок сохраняемости. Большую часть времени такие элементы и батареи находятся в неактивированном состоянии (режим хранения). Для приведения в действие рассматриваемые ХИТ активируются различными способами (в зависимости от вида системы) [1].

*Высокотемпературные резервные термически-активируемые батареи.* Тепловые батареи содержат электрохимическую систему, которая остается инертной до тех пор, пока не будет активирована при помощи нагрева. Эти ХИТ можно хранить даже подключенными к нагрузке. Используемый в элементе электролит представляет собой смесь безводных солей, которые проводят ток только в расплавленном состоянии. Конструкция батарей предусматривает наличие источника тепла, приводимого в действие при помощи электрического или механического запала. Время активации не превышает нескольких секунд. Продолжительность активного периода тепловой батареи составляет несколько

минут (обычно не менее пяти). Срок сохраняемости достигает двадцати и более лет. Тепловые батареи применяют в основном в военной технике [1].

Тепловые элементы способны разряжаться высокими плотностями тока - более 4 кА/м при напряжении 2,5 - 3 В. Батареи имеют напряжение до 500 В при кратковременных разрядах (менее 1 мин.), удельная мощность тепловых батарей достигает 600 Вт/кг [1].

*Водоактивируемые батареи.* Основными системами таких ХИТ являются: магний-хлористое серебро; цинк-хлористое серебро; магний-хлористая медь. Одной из зарубежных фирм производящих резервные ХИТ системы магний-хлористое серебро является McMurdo Instruments. Данная фирма выпускает серию элементов и батарей Aquacells, которые активируются морской водой. Эти ХИТ широко применяются в качестве источника энергии для предупредительных огней, буйев и маяков практически любых акваторий. Рассматриваемые ХИТ характеризуются большим сроком годности при соблюдении условия хранения в герметичной упаковке. После разгерметизации и заполнения водой они должны быть израсходованы в течение нескольких часов или дней [1].

Батарея L18A фирмы McMurdo Instruments предназначена для питания подводных прожекторов (103×35×25 мм, масса 95 г) и может обеспечивать ток 1 А при напряжении 4 В в течение 90 минут. Батарея L37 этой же фирмы (305×254×72 мм, масса 6,6 кг) служит для освещения аварийного люка подводной лодки и питания аварийных систем рабочим напряжением 24 В. Она может снабжать энергией две лампы напряжением 24 В и мощностью 36 Вт в течение восьми часов. Фирма McMurdo Instruments производит также серию батарей Aquacells, предназначенных для надувных спасательных плотов и спасательных жилетов [1].

Фирма SAFT выпускает различные водоактивируемые батареи на основе системы хлористое-серебро магний, хлористое-серебро цинк и хлористая медь-магний. Первая из этих систем обеспечивает удельную энергию по массе 30 - 120 по объему 40 - 250 Вт·ч / дм<sup>3</sup> (2000 Вт / дм<sup>3</sup>). Рабочие температуры находятся в интервале от -20 до +60 °С [1].

Фирма SAFT производит ХИТ данной системы напряжением 1 - 250 В. Элементы активируются при заполнении пресной или соленой водой и могут отдавать свою энергию в течение периодов времени от нескольких секунд до 20 дней. Эти батареи используются в маяках, торпедах, сигнальных звуковых устройствах, оборудовании шаров-зондов и др. [1].

ХИТ на основе системы цинк-хлористое серебро, изготавливаемые фирмой SAFT, обеспечивают удельную энергию 15-60 Вт·ч / кг (удельная мощность 1000 Вт/кг) или 20 - 150 Вт·ч / дм<sup>3</sup> (удельная мощность по объему 2400 Вт/дм<sup>3</sup>). Рабочий диапазон температур составляет от -30 до +60°С. Элементы активизируются путем заполнения пресной водой или морской водой. Они отличаются большими сроками годности при хранении в неактивированном состоянии, хорошими характеристиками и способностью отдавать энергию в течение длительного срока (до 300 дней) при малых скоростях разряда. Выпускаются батареи напряжением от 1 до 50 В. Их применяют для питания оборудования на воздушных шарах и океанографических буях, аппаратуры связи и устройств военного назначения [1].

ХИТ на основе системы магний-хлористая медь обеспечивают удельную энергию 20 - 80 Вт·ч/кг (18 - 150 Вт·ч/дм<sup>3</sup>). Они работают в интервале температур от -20 до +60°С и обеспечивают мощность до 50 Вт. Фирма SAFT выпускает батареи напряжением 1 - 100 В. Элементы активируются при заполнении пресной или морской водой. Продолжительность разряда лежит в диапазоне от нескольких

секунд до десятков часов. Батареи данного типа используются в аппаратуре шаровозондов, на маяках и океанографическом оборудовании [1].

### **4.3. Аммиачные резервные батареи**

Находят ограниченное применение. Одной из фирм выпускающих такие ХИТ является Honeywell. Как утверждают специалисты данной фирмы, значительно сократились исследования в области разработки аммиачных резервных ХИТ в связи с широким использованием батарей на основе лития [1].

Резервные батареи на основе аммиака в ряде случаев имеют преимущества перед батареями аналогичного назначения на основе лития. Они хороши когда при малой продолжительности работы требуются большие токи, длительный срок годности, интервал рабочих температур от  $-54$  до  $+74^{\circ}\text{C}$ . Аммиачная резервная батарея G2695 фирмы Honeywell предназначена для обеспечения разрядного тока 500 мА в течение 10 минут при напряжении около 7,5В. Она используется для питания таймера типа ХМ-811 ракеты Lance [1].

### **4.4. Аккумуляторы**

В соответствии с принятой в технической литературе терминологией аккумуляторы и аккумуляторные батареи относятся к вторичным ХИТ, предназначенным для производства электрической энергии. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи отдают во внешнюю электрическую цепь энергию, запасенную в процессе заряда. Их использование для питания радиоаппаратуры в ряде случаев более целесообразно, чем использование гальванических элементов и батарей [1].

Аккумуляторы допускают многократный заряд и разряд. При зарядке аккумулятора его положительный полюс подключается к положительному полюсу зарядного устройства. Заряд аккумулятора осуществляется током, идущим в направлении, обратном току разряда [1].

Наиболее широкое распространение получили следующие типы аккумуляторов: кислотные, щелочные, серебряно-цинковые, герметичные никель-кадмиевые и никель-металлгидридные [1].

### **4.5. Кислотные аккумуляторы**

Кислотные аккумуляторы характеризуются следующими параметрами [1]:

- ЭДС заряженного аккумулятора 2,6 - 2,8 В;
- ЭДС разряженного аккумулятора 1,7 - 1,8 В;
- КПД до 80%;
- срок службы (количество циклов заряд-разряд) 300 - 800;
- саморазряд в сутки 1 - 2%.

Кислотные аккумуляторы получили широкое распространение для питания электрооборудования автотранспорта (в этом случае они используются как стартерные) и для питания радио и телефонной аппаратуры. Выпускаются герметичные аккумуляторы, использующиеся, главным образом, в переносной радиоаппаратуре [1].

При эксплуатации кислотных аккумуляторов необходимо иметь в виду их чувствительность к перезарядам и недозарядам, следствием которых является

постепенное разрушение активной массы пластин. Разряд кислотного аккумулятора, после того как напряжение на нем (или на каждом аккумуляторе батареи) достигает 1,8 В, прекращают [1].

Напряжение заряженного аккумулятора равно 2,7 - 2,8 В. В самом начале разряда оно падает до 2 В и поддерживается на этом уровне большую часть времени разряда, а потом начинает постепенно уменьшаться [1].

В зависимости от назначения различают ряд типов кислотных (свинцовых) аккумуляторов. Для снабжения энергией стационарных устройств используют стационарные аккумуляторы, корпус которых выполняют часто из стекла или кислотоупорной пластмассы. Такие ХИТ характеризуются наибольшим сроком службы, который при правильной эксплуатации доходит до 1000 циклов [1].

В зависимости от требуемого напряжения и общей емкости стационарные аккумуляторы собирают в батареи путем последовательного и (или) параллельного соединения [1].

Запуск автомобильных и тракторных двигателей и питание бортового электрооборудования осуществляется от так называемых стартерных аккумуляторов [1].

Стартерные аккумуляторные батареи для автомобилей, тракторов, автобусов, гусеничных машин и моторных катеров имеют напряжение 6 или 12 В. Корпус стартерных аккумуляторов выполняют обычно из эбонита или твердой пластмассы, герметично заливая сверху специальной массой [1].

Срок службы стартерных аккумуляторов превышает 100 циклов заряд-разряд. По времени эксплуатации автомобиля это соответствует примерно 600 ч. Некоторое представление о возможностях и характеристиках стационарных и стартерных аккумуляторных батарей дает таблица 4.13 [1].

Специально для питания РЭА выпускают радиоанодные и радионакальные аккумуляторы. Собирают их в эбонитовых ящиках.

Как следует из данных таблицы 4.13, отдаваемая аккумулятором емкость зависит от величины разрядного тока (сравни с ХИТ системы Лекланше). Для стартерных аккумуляторных батарей на 6 В (ЗСТ) и 12 В (6СТ) в таблице 4.13 приведены значения максимального (пикового) тока, который они способны отдавать в течение нескольких секунд [1].

Таблица 4.13 Технические характеристики кислотных аккумуляторных батарей

| Тип батареи | Режим разряда |        |              |        | Габариты, мм | Масса без электролита, кг |
|-------------|---------------|--------|--------------|--------|--------------|---------------------------|
|             | 10 часов      |        | 1 час        |        |              |                           |
|             | Емкость, А-ч  | Ток, А | Емкость, А-ч | Ток, А |              |                           |
| С-1         | 36            | 3,6    | 18,5         | 18,5   | 80x215x270   | 8,6                       |
| С-2         | 72            | 7,2    | 37           | 37     | 130x215x270  | 14,1                      |
| С-3         | 108           | 10,8   | 55,5         | 55,5   | 180x215x270  | 18,5                      |
| СП-35       | 35            | 3,5    | 15           | 15     | 68x162x280   | 5,2                       |
| СП-70       | 70            | 7,0    | 30           | 30     | 88x162x280   | 8,19                      |
| СП-105      | 105           | 10,5   | 45           | 45     | 135x162x280  | 11,96                     |
| ЗСТ-60      | 60            | 6/180  | —            | —      | 179x178x237  | 12                        |
| ЗСТ-70      | 70            | 7/210  | —            | —      | 257x194x230  | 14,9                      |

Продолжение таблицы 4.13

| Тип батареи | Режим разряда |          |              |        | Габариты, мм | Масса без электролита, кг |
|-------------|---------------|----------|--------------|--------|--------------|---------------------------|
|             | 10 часов      | 1 час    |              |        |              |                           |
|             | Емкость, А-ч  | Ток, А   | Емкость, А-ч | Ток, А |              |                           |
| 3СТ-98      | 98            | 9,8/295  | —            | —      | 308x188x245  | 19,7                      |
| 3СТ-126     | 126           | 12,6/380 | —            | —      | 386x188x245  | 22,9                      |
| 6СТ-54      | 54            | 5,4/160  | —            | —      | 283x182x237  | 19,3                      |
| 6СТ-68      | 68            | 6,8/205  | —            | —      | 358x183x236  | 24,5                      |

#### 4.6. Щелочные аккумуляторы

Наряду с кислотными аккумуляторами широкое распространение получили щелочные аккумуляторы, где электролитом служит едкий кали или едкий натр, а электродами являются железные никелированные рамки, удерживающие пакеты с активной массой. В положительных пластинах кадмиево-никелевых аккумуляторов активной массой является гидрат окиси никеля в смеси с графитом, в отрицательных - кадмий и окись железа. Активная масса железо-никелевых аккумуляторов не содержит кадмия и имеет несколько иной состав [1].

Основные параметры щелочных аккумуляторов следующие [1]:

- ЭДС заряженного аккумулятора 1,75-1,8 В;
- ЭДС разряженного аккумулятора 0,8 - 1,0 В;
- КПД до 60%;
- срок службы (количество циклов заряд-разряд) 500 - 1000;
- саморазряд в сутки 1,5%.

Заряженный щелочной аккумулятор даёт напряжение около 1,7- 1,8 В. После прекращения заряда это напряжение даже без подключения нагрузки быстро падает до 1,4 - 1,45 В. Под нагрузкой напряжение каждого аккумулятора равно 1,2 В. В конце разряда напряжение падает до 1 - 0,95 В. Это говорит о том, что емкость аккумулятора израсходована и его требуется заряжать снова [1].

Щелочные аккумуляторы по сравнению с кислотными обладают рядом преимуществ. Они имеют меньшую массу, не боятся вибраций и толчков, не портятся от кратковременных коротких замыканий и от больших зарядных и разрядных токов, могут оставаться долгое время незаряженными. Однако они дороже свинцовых, дают значительно меньшее напряжение на каждый аккумулятор и имеют меньший КПД [1].

#### 4.7. Герметичные щелочные аккумуляторы

Наибольшее распространение в малогабаритной аппаратуре получили никель-кадмиевые и никель-металлгидридные герметичные аккумуляторы. Они изготавливаются двух типов: дисковые и цилиндрические. Могут иметь два вида электродов: ламельные и безламельные. Дисковые аккумуляторы применяются в малогабаритной приемно-передающей аппаратуре, слуховых аппаратах, микрокалькуляторах, игрушках, электрофонарях и др. Цилиндрические аккумуляторы дешевы, имеют значительные сроки службы и сохранность, хорошо

переносят ударные нагрузки. Все это определяет их широкое применение в медицинской, полевой, геофизической и других видов РЭА [1].

Основные параметры герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов [1]:

- ЭДС заряженного аккумулятора 1,48 - 1,5 В;
- ЭДС разряженного аккумулятора 0,7 - 1,0 В;
- КПД 50 - 60%;
- срок службы (количество циклов заряд-разряд) до 1000;
- разрядный ток - в широких пределах;
- допускается перезаряд и недозаряд.

Безламельные кадмиево-никелевые аккумуляторы имеют малое внутреннее сопротивление и могут работать в стартерных режимах. Сохраняют устойчивую работоспособность в условиях низких температур и при воздействии вибраций и ударов [1].

Напряжение одного заряженного никель-кадмиевого аккумулятора равно 1,3 В, разряженного - 1 В. Емкость аккумулятора при напряжении 1 В, как правило, израсходована не полностью, однако разряжать его дальше не следует. Глубокий разряд никель-кадмиевого аккумулятора (до напряжения 0,4 - 0,5 В) производят только в профилактических или «лечебных» целях. Дело в том, что в процессе эксплуатации никель-кадмиевого аккумулятора происходит постепенное увеличение размера зерен активной массы, следствием которого является снижение рабочей емкости а, в перспективе - выход из строя аккумулятора по причине разрушения межэлектродного сепаратора и катастрофического увеличения утечки (эффект памяти). Увеличение размера зерен активной массы происходит тогда, когда аккумулятор попадает в зарядное устройство будучи не полностью разряженным. Это необходимо учитывать при эксплуатации никель- кадмиевых аккумуляторов и батарей. Для снятия эффекта памяти используют глубокий разряд, в процессе которого происходит уменьшение размера зерен активной массы и восстановление емкости аккумулятора. Таким образом, глубокий периодический разряд является лечебно-профилактическим средством, благотворно сказывающимся на «здоровье» никель- кадмиевого аккумулятора. У никель-металлгидридных аккумуляторов эффект памяти проявляется в незначительной степени и особых проблем не вызывает. Он просто не успевает проявиться в течение срока службы аккумулятора. Хотя по данным некоторых источников и для таких аккумуляторов показан глубокий периодический разряд [1].

В случае нормальной эксплуатации срок службы никель-кадмиевых аккумуляторов находится в пределах 500 - 600 циклов заряд-разряд, после чего емкость аккумулятора снижается примерно на половину. Однако согласно данным ряда исследований, благодаря регулярному глубокому периодическому разряду срок службы аккумуляторов увеличивается до 2000 циклов заряд-разряд и более.

Наибольшее распространение в отечественной аппаратуре получили дисковые аккумуляторы следующих типов: Д-0,01; Д-0,06; Д-0,7; Д-0,12; Д-0,2; Д-0,25 и Д-0,26. Аккумуляторам присвоено условное обозначение, которое используется при заказе и в конструкторской документации новых разрабатываемых изделий. В условном обозначении типа аккумулятора буквы и цифры означают: Д - дисковый аккумулятор; цифры после букв - номинальную емкость аккумулятора в ампер-часах; буквы после цифр - режим разряда: Д - длительный (10 - часов); С - средний (5 - часов). Пример условного обозначения дискового аккумулятора емкостью 60 мА ч для длительного режима разряда: аккумулятор Д-0,06Д ГОСТ 11258-79 [1].



Электрические характеристики отечественных дисковых никель-кадмиевых аккумуляторов даны в таблицах 4.14 и 4.15 [1].

*Батареи из герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов.* Применяются в РЭА, требующей напряжения источника питания превышающего 1,2 - 2,4 В. Батареи состояются как из дисковых, так и из цилиндрических аккумуляторов. Рассмотрим характеристики некоторых отечественных батарей [1].

Батарея 10 КНГ-3,5Д предназначена для питания РЭА, рассчитанных на напряжения питания 12 В при нормальной температуре окружающей среды. Номинальная емкость батареи (2,9 А·ч) и среднее разрядное напряжение (12 В) обеспечивается конструкцией батареи, в составе которой предусмотрено реле минимального напряжения. Масса батареи 2,5 кг, габариты 175x99x78 мм [1].

Таблица 4.14. Электрические характеристики герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов

| Тип аккумулятора | 5-часовой режим разряда |               | 10-часовой режим разряда |               | 15-часовой режим разряда |               |
|------------------|-------------------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------------|---------------|
|                  | Ток, мА                 | Емкость, мА·ч | Ток, мА                  | Емкость, мА·ч | Ток, мА                  | Емкость, мА·ч |
| Д-0,025 Д        | —                       | —             | 2,5                      | 25            | 2,5                      | 37,5          |
| Д-0,06           | 12                      | 60            | —                        | —             | 6                        | 90            |
| Д-0,06 д         | —                       | —             | 6                        | 60            | 6                        | 90            |
| Д-0,1            | 23                      | 115           | —                        | —             | 12                       | 180           |
| Д-0,115 Д        | —                       | —             | 11,5                     | 115           | 11,5                     | 179,2         |
| Д-0,25           | 50                      | 250           | —                        | —             | 25                       | 375           |
| Д-0,26 Д         | —                       | —             | 26                       | 260           | 26                       | 390           |
| Д-0,26 С         | 52                      | 260           | —                        | —             | 26                       | 390           |
| Д-0,55 С         | 110                     | 550           | —                        | —             | 55                       | 825           |

Основные электрические характеристики: номинальный ток заряда 35 А; длительность заряда батареи номинальным током 15 часов; номинальный ток разряда 1,2 А; начальное напряжение при разряде 13,8 В; среднее напряжение при разряде 12 В; конечное напряжение не менее 10 В; емкость батареи после ее заряда 1,9 - 2,4 А ч (в зависимости от температуры); срок службы батареи не менее 400 циклов [1].

Таблица 4.15. Предельные режимы разряда дисковых аккумуляторов

| Тип аккумулятора | Режим разряда |          | Режим разряда |                        |               |
|------------------|---------------|----------|---------------|------------------------|---------------|
|                  | Ток, мА       | Время, ч | Ток, мА       | Конечное напряжение, В | Емкость, мА·ч |
| Д-0,25           | 20            | 19       | 130           | 0,7                    | 130           |
| Д-0,26 С         | 26            | 15       | 130           | 0,9                    | 200           |
| Д-0,55           | 55            | 15       | 160           | 0,9                    | 440           |
| Д-0,55 Д         | 55            | 15       | 260           | 0,9                    | 410           |

Батарея 10 НКГЦ-1Д предназначена для питания РЭА в режиме длительного разряда напряжением 12 В [1].

Батарея обеспечивает устойчивую работу переносных и автомобильных приемников и малогабаритных транзисторных телевизоров при нормальной рабочей температуре окружающей среды, а также после пребывания батареи при температуре окружающей среды до  $-50^{\circ}\text{C}$  с последующей выдержкой в течение 12 часов при температуре  $(25\pm 10)^{\circ}\text{C}$  [1].

Масса аккумуляторной батареи не превышает 710 г, габариты 111x98x45,5. Электрические характеристики батареи при разряде даны в таблице 4.16 [1].

Таблица 4.16. Электрические характеристики батареи 10 НКГЦ-1 Д при разряде до конечного напряжения 10 В

| Разрядный ток, мА | Температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$ | Емкость, А-ч | Продолжительность разряда, ч, не менее |
|-------------------|--|--------------|--|
| 100               | $25\pm 10$                                       | 1,0          | 10                                     |
| 600               | $25\pm 10$                                       | 0,8          | 1 ч 20 мин                             |
| 600               | $25\pm 10$                                       | 0,6          | 1                                      |
| 50                | $-40\pm 2$                                       | 0,4          | 8                                      |
| 600               | $-20\pm 2$                                       | 0,32         | 32 мин                                 |
| 100               | 50   | 1            | 10                                     |

Батарея 7Д-0,115-У1.1 применяется для питания постоянных током малогабаритных переносных радиоприемников, электронных телефонных устройств и других изделий РЭА [1].

Батарея составлена из семи последовательно соединенных герметичных, дисковых аккумуляторов [1].

Электрические характеристики батареи приведены в таблице 4.17

Таблица 4.17. Электрические характеристики батареи 7Д-0,115-У1.1

| Режим  | Ток, мА    | Продолжительность, ч | Емкость, мА-ч | Конечное напряжение, В, не менее |
|--------|------------|----------------------|---------------|----------------------------------|
| Заряд  | 12         | 15                   | 180           | —                                |
| Разряд | 10-часовой | 11,5                 | —             | 7                                |
|        | 5-часовой  | 20                   | —             | 7                                |

Наибольший допустимый ток разряда батареи - 50 мА. При таком токе разряда (если он происходит при нормальной температуре) батарея отдает до 60 - 80% своей номинальной емкости. При понижении температуры емкость батареи значительно уменьшается (таблица 4.18), и практическим температурным пределом эксплуатации батареи можно считать  $-5^{\circ}\text{C}$ . Однако и при более низкой температуре работоспособность батареи еще некоторое время сохраняется. Так, при температуре около  $-15^{\circ}\text{C}$  она отдает почти 50% своей номинальной емкости [1].

Таблица 4.18. Зависимость емкости батареи 7 Д-0,115-У 1.1 от температуры

| Температура, °С | Емкость, % от номинальной, не менее |
|-----------------|-------------------------------------|
| -10±2           | 50                                  |
| -20±2           | 40                                  |
| -30±2           | 20                                  |
| +40±2           | 70                                  |

#### 4.8. Серебряно-цинковые аккумуляторы

Выгодно отличаются от кислотных и щелочных значительно большей удельной емкостью (на единицу массы), которая у них в четыре - пять раз выше, более высоким КПД и сравнительно небольшим саморазрядом. Кроме того, серебряно-цинковые аккумуляторы могут работать при значительном понижении атмосферного давления. Срок службы серебряно-цинковых аккумуляторов исчисляется 300.. .500 циклами заряд-разряд [1].

Серебряно-цинковые аккумуляторы характеризуются следующими основными показателями: ЭДС заряженного аккумулятора 1,75 - 1,8 В. ЭДС разряженного аккумулятора 0,7- 0,6 В; саморазряд в сутки 0,3 - 0,4% [1].

Серебряно-цинковые аккумуляторы собираются в пластмассовых банках. Отрицательным электродом служат пластины из спрессованного порошка цинка и окиси цинка, положительным электродом является пластина из чистого серебра. В качестве электролита используется раствор едкого калия [1].

Напряжение серебряно-цинкового аккумулятора, подключенного к нагрузке, быстро падает до 1,5 В и на этом уровне держится до тех пор, пока не будет израсходована вся емкость аккумулятора. После этого напряжение быстро уменьшается, что является признаком того, что аккумулятор требуется ставить на зарядку. Благодаря высокой стабильности напряжения серебряно-цинковые аккумуляторы могут использоваться в качестве источников опорного напряжения.

Серебряно-цинковые аккумуляторы мало чувствительны к большим разрядным токам. Аккумуляторы типа СЦ можно разряжать в течение 15 минут почти до полного использования емкости. Допускается частый глубокий разряд, возможен быстрый заряд: до 80% емкости за 15 минут. Диапазон рабочих температур от -20 до +60°С, однако возможна их работа и в интервале температур от -60 до +80°С [1].

Аккумуляторы типа СЦ имеют относительно высокую стоимость, но благодаря своим положительным качествам применяются достаточно широко. Основные электрические параметры некоторых отечественных аккумуляторов типа СЦ в прямоугольных корпусах представлены в таблице 4.19 [1].

В зависимости от режима разряда по длительности аккумуляторы изготавливают для короткого до 1 ч (стартерного) режима типа СЦК, среднего (1–5 ч разряда), длительного (10...20 ч разряда) [1]

Таблица 4.19. Основные электрические параметры аккумуляторов типа СЦ

| Тип аккумулятора | Напряжение, В | Емкость, А-ч | Разрядный ток при 5-минутном, разряде, А | Габариты, мм | Масса, г |
|------------------|---------------|--------------|--|--------------|----------|
| СЦ-0,5           | 1,5           | 0,5          | 7  | 30x12x24     | 29,5     |
| СЦ-3             | 1,5           | 3            | 35                                       | 64x19x44     | 110      |
| СЦ-5             | 1,5           | 5            | 70                                       | 69x34x47     | 200      |
| СЦ-11            | 1,5           | 11           | 120                                      | 91x21x41     | 280      |
| СЦ-15            | 1,5           | 15           | 100                                      | 104x35x50    | 360      |
| СЦ-18            | 1,5           | 18           | 120                                      | 104x35x50    | 360      |
| СЦ-25            | 1,5           | 25           | 150                                      | 118x50x50    | 470      |
| СЦ-40            | 1,5           | 40           | 180                                      | 141x52x56    | 825      |
| СЦ-45            | 1,5           | 45           | 700                                      | 140x47x51    | 790      |
| СЦ-50            | 1,5           | 50           | 900                                      | 144x51x66    | 990      |
| СЦ-70            | 1,5           | 70           | 950                                      | 149x52x94    | 1505     |
| СЦ-95            | 1,5           | 95           | 1200                                     | 212x55x71    | 1820     |
| СЦ-100           | 1,5           | 100          | 1200                                     | 140x105x50   | 1950     |
| 5СЦ-5            | 7,5           | 5            | 70                                       | 112x50x94    | 1350     |
| 3СЦ-5            | 4,5           | 5            | 70                                       | 77x45x96     | 590      |
| 8СЦ-45           | 12            | 45           | 700                                      | 160x110x200  | 6480     |
| 15 СЦ-45         | 22,5          | 45           | 700                                      | 170x126x432  | 16000    |

#### 4.9. Эксплуатация химических источников тока

Одно из важных преимуществ первичных ХИТ состоит в простоте их эксплуатации. Большинство таких источников не требуют никакого обслуживания. Подготовка к работе заключается в проверке внешнего вида и срока годности, а иногда и фактических параметров ХИТ (начального разрядного напряжения, реже - внутреннего сопротивления). При подключении ХИТ необходимо следить за соблюдением полярности и надежности контактов. Несоблюдение полярности может привести к выходу из строя аппаратуры, особенно радиоэлектронных схем, содержащих транзисторы, микросхемы и электролитические конденсаторы [1].

Электрический режим работы источников тока определяется графиком нагрузки потребителя. В большинстве случаев ХИТ работают по сложному, часто произвольному графику. Например, мощность отбираемая от батареи транзисторного радиоприемника, изменяется при изменении громкости, а сам приемник включается и выключается произвольно. В электронных часах и кардиостимуляторах ХИТ работают непрерывно, но график разряда импульсный. Случаи непрерывной работы на постоянную нагрузку встречаются довольно редко. Первичные ХИТ, как правило, используют до выработки всей емкости. Однако в ряде случаев следует избегать их полного разряда и особенно длительного хранения в аппаратуре после окончания разряда. Из отдельных элементов, в частности наиболее распространенных угольно-цинковых элементов, после полного разряда вытекает электролит, который может повредить питаемую РЭА. В некоторых случаях происходят взрывы герметичных элементов, в частности

элементов ртутно-цинковой системы и отдельных типов литиевых элементов при хранении в разряженном состоянии. Особенно тщательно необходимо следить за работой батарей из большого числа последовательно включенных элементов. Во избежание переплюсовки отдельных элементов необходимо контролировать рабочее напряжение батарей и своевременно производить их замену [1].

Большинство первичных ХИТ характеризуются значительным внутренним сопротивлением. Поэтому кратковременные внешние короткие замыкания обычно не приводят к большим разрушениям [1].

Некоторые типы первичных ХИТ требуют более сложного обслуживания. Так, перед использованием резервных батарей необходимо провести определенные операции для их активизации. При эксплуатации ХИТ в условиях низких температур в ряде случаев приходится решать вопросы их обогрева [1].

#### 4.10. Эксплуатация аккумуляторов

Аккумуляторы и аккумуляторные батареи требуют более сложного ухода, чем первичные ХИТ, и эти осложнения в значительной степени связаны с процессом заряда. Если режим разряда аккумуляторов определяется особенностью питаемой аппаратуры, то режим заряда зависит в основном от особенностей самих аккумуляторов. Из-за газовыделения при заряде большинство аккумуляторов имеет негерметичную конструкцию, что влечет за собой дополнительные эксплуатационные осложнения по сравнению с первичными ХИТ [1].

**Режимы эксплуатации.** Различают три режима эксплуатации аккумуляторов: переключения, буферный и аварийный. В режиме переключения аккумуляторная батарея разряжается и заряжается поочередно. Это характерно, например, для переносной РЭА, питающейся от герметичных аккумуляторов. В буферном режиме аккумуляторная батарея подключается параллельно другому источнику электроэнергии, при возрастании нагрузки батарея частично разряжается, при снижении нагрузки подзаряжается. В буферном режиме работают стартерные батареи на автомобилях, аккумуляторные батареи космических аппаратов и другие. В аварийном (резервном) режиме аккумуляторная батарея постоянно поддерживается в состоянии готовности к работе, но подключается к цепи только в аварийной ситуации при прекращении подачи энергии от основного источника [1].

Кроме обычных зарядно-разрядных циклов применяются некоторые специальные: формовочные и контрольно-тренировочные циклы.

Формовочные циклы проводят после изготовления пластин или после заправки аккумулятора электролитом для приведения пластин в рабочее состояние (иногда ограничиваются только одним формовочным зарядом) [1].

Контрольно-тренировочные циклы проводят, в основном, в том случае, когда аккумуляторы эксплуатируются нерегулярно или постоянно разряжаются не на полную глубину. Сюда же относится и периодический, глубокий разряд никель-кадмиевых аккумуляторов, проводимый для устранения негативных последствий эффекта памяти. Глубокий разряд предполагает, по крайней мере, один цикл: полный заряд аккумулятора и последующий его разряд до напряжения приблизительно 0,4 В при изменении разрядного тока в соответствии с установленным графиком [1].

**Способы заряда аккумуляторов.** В большинстве случаев зарядные устройства снабжены системами, позволяющими поддерживать постоянным один из электрических параметров: напряжение или ток заряда. В зависимости от того, какой электрический параметр выдерживается, различают два основных способа заряда: при постоянном токе и при постоянном напряжении [1].

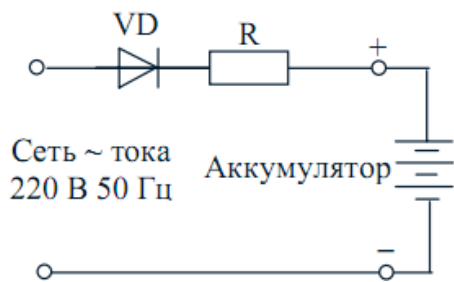


Рисунок 4.3. Базовая схема зарядного устройства с постоянным выходным током

Устройства для заряда при постоянном токе обычно более просты. Так, например, ряд бытовых зарядных устройств для герметичных аккумуляторов выполняются по базовой схеме (рисунок 4.3).

Удобством заряда при постоянном токе является простота расчета количества пропущенного электричества как произведения тока и времени заряда. Однако этот способ заряда имеет и свои недостатки. При малом токе время заряда велико. При большом токе к концу заряда ухудшается заряжаемость, так как неравномерное распределение тока по толщине пористых электродов вызывает в наружных, уже заряженных слоях, значительное газ выделение, в то время как внутренние слои лишь медленно до заряжаются. Особую осторожность необходимо соблюдать при заряде большим током никель-металлгидридных аккумуляторов. Вообще для заряда никель-металлгидридных аккумуляторов целесообразно использовать только специальные устройства, предусматривающие изменение выходного тока в зависимости от текущего состояния аккумуляторов .

Во время заряда при постоянном напряжении начальный ток велик и далее непрерывно уменьшается во времени. К концу заряда ток уменьшается до очень малых значений, из-за чего время полного заряда велико. Большое значение имеет правильный выбор напряжения заряда - чем оно меньше, тем меньше побочные процессы и газ выделение при заряде, но тем больше продолжительность заряда. Оптимальное напряжение зависит от температуры и от состояния батареи, что усложняет применение этого способа. Недостатком этого метода является также перегрев аккумуляторов из-за большого начального тока [1].

Для преодоления недостатков, присущих выше рассмотренным простым способам заряда, используются разнообразные комбинированные способы заряда. Во всех этих способах с целью сокращения газ выделения используют в начальной стадии большие токи заряда, а в конечной - небольшие токи [1].

В некоторых случаях для заряда аккумуляторов (особенно щелочных) используют асимметричный переменный ток, полученный наложением постоянного и переменного токов. Базовая схема такого зарядного устройства представлена на рисунке 4.4.

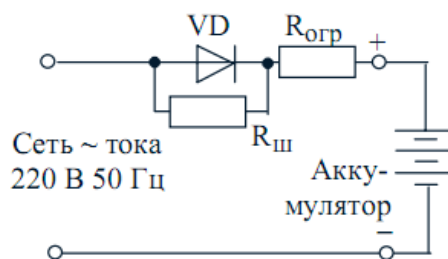


Рисунок 4.4. Устройство для заряда аккумуляторов асимметричным током

Резистор  $R_{огр}$  задает величину «прямого» зарядного тока. Благодаря  $R_{ш}$  через аккумулятор протекает также «обратный» ток (меньший по величине по сравнению с «прямым»). При заряде асимметричным током меняется структура образующихся при заряде активных масс, что сказывается на эксплуатационно-технических характеристиках аккумуляторов: несколько увеличивается разрядная емкость или

стабилизируется напряжение разряда. Заряд асимметричным током полезен для никель-кадмиевых аккумуляторов страдающих эффектом памяти. Наблюдаемые эффекты сильно зависят от соотношения значений переменного и постоянного токов и от частоты переменного тока. При заряде асимметричным током усиливается тепловыделение, а также возможно усиленное газ выделение. Для отдельных типов аккумуляторов (в частности, для некоторых вариантов кислотных аккумуляторов) заряд асимметричным током сокращает их срок службы и поэтому не применяется. Отрицательно влияет на такие аккумуляторы даже пульсирующий (недостаточно сглаженный) постоянный ток выпрямителей [1].

Очень важно при заряде аккумуляторов определять окончание процесса заряда, так как для ряда аккумуляторов не допустимы недозаряды или перезаряды.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 1) Что такое химический источник тока?
- 2) Каков принцип действия гальванических элементов?
- 3) Как устроены резервные химические источники тока?
- 4) Каков принцип работы аккумуляторов?
- 5) Каковы особенности эксплуатации аккумуляторов?

## 5. СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

Фотоэлектрические генераторы для прямого преобразования энергии излучения Солнца в электрическую, собранные из большого числа последовательно соединенных фотопреобразователей - солнечных элементов (СЭ), получили название солнечных батарей<sup>5</sup>. Современные СБ генерируют на свету значительную электрическую мощность и применяются как для питания радиосхем средств связи, счетчиков космических частиц, так и для электроснабжения большинства КА и многих наземных автономных устройств различного назначения [5].

Солнечные батареи современных КА состоят из десятков и сотен тысяч отдельных СЭ, соединенных параллельно-последовательно с целью обеспечения требуемых номиналов тока и напряжения, поэтому необходимо рассмотреть проблемы, которые встают перед разработчиками СБ, поскольку их правильное решение в значительной степени определяет надежность и ресурс работы КА в целом [5].

Соединение солнечных элементов в СБ может выполняться по различным коммутационным схемам, при выборе которых принимают во внимание такие факторы, как предстоящие условия эксплуатации (плотность потока частиц в радиационном поясе Земли, частоту термоциклирования), электромагнитные поля от СБ, оказывающие влияние на работу бортовой аппаратуры, общую компоновку КА, возможность частичных затенений СБ элементами конструкций и т. д. Все эти факторы влияют на темп ресурсной деградации (в общем случае неодинаковый для разных СБ и условий эксплуатации), который необходимо учитывать, чтобы энергии СБ в конце срока активного существования (САС) спутника было достаточно для питания бортовых потребителей [5].

Решение задачи синтеза рациональной СБ должно дать ответ на вопрос, сколько СЭ и каким образом нужно соединить в СБ, чтобы обеспечить ее эффективную работу в конце заданного САС. Для успешного решения такой задачи необходимо располагать следующими математическими моделями [5]:

1. исходной моделью СЭ (СБ), описывающей соответствующие характеристики образцов, не подвергавшихся воздействию факторов космического пространства;
2. ресурсной моделью, описывающей относительные изменения характеристик образцов под действием этих факторов.

При выборе вида модели возможно два подхода.

- 1) От элемента к батарее (на основе теоретической модели). Этот метод позволяет объективно учесть все значимые факторы (через соответствующие дефекты в СЭ) для СБ любой конфигурации и топологии. Однако это задача громоздкая и во многом еще не определенная.
- 2) От батареи к батарее (на основе формализованной статистической модели и телеметрической информации). Этот метод позволяет удовлетворительно решать задачи для однотипных КА.

При очевидном недостатке второго метода он находит преимущественное практическое применение, что обусловлено отсутствием апробированных моделей и методик, позволяющих использовать физически правильный и более информативный первый метод. Разрешить указанное противоречие можно, если установить взаимное соответствие между теоретической и формализованной моделями СЭ, т. е. осуществить их идентификацию [5].

<sup>5</sup> Более подробную информацию о солнечных батареях можно найти в [5]



В данной главе рассмотрена именно исходная теоретическая и формализованная модель СЭ и формализованная модель плоской ориентированной панели СБ, связанная с моделью солнечных элементов аффинным подобием. Эти модели, описывающие вольт-амперные характеристики (ВАХ) при заданной освещенности и температуре, являются базовым для расчета энергии СБ [5].

В условиях штатной эксплуатации или в аварийных ситуациях (например «закрутки» КА) освещенность и температура солнечной батареи изменяются. Методика расчета и программы для тепловых и энергетических процессов с учетом ресурсных изменений электрических характеристик и влияния оптических коэффициентов будут рассмотрены ниже [5].

### 5.1. Устройство солнечного элемента и принцип его работы

Солнечные элементы - это полупроводниковые приборы, которые изготавливаются из исходных базовых пластин  $p$  или  $n$ -типа, с нанесением легирующих слоев, содержащих одну или несколько примесей для образования  $p$ - $n$ -переходов;  $p$ - $n$  переходом называют поверхность раздела между слоями, имеющими проводимость противоположного знака.

Если солнечный элемент (рисунок 5.1) освещается, то фотоны с различной энергией будут поглощаться в полупроводнике на разной глубине. Фотоны А и В выбили электроны из соответствующих атомов полупроводника, так как фотон А имеет большую энергию (меньшую длину волны), чем фотон В. На месте выбитых электронов образовались две электрические вакансии - дырки, т. е. фотоны образовали электронно-дырочные пары. Теперь электроны и дырки могут двигаться по материалу полупроводника под действием электрических полей, образовавшихся в материале под влиянием  $p$ - $n$ -перехода. Электроны притягиваются  $n$ -областью, а дырки -  $p$ -областью. Следовательно, структура солнечного элемента играет роль помпы, как бы перекачивающей электроны в отрицательную область через внешнюю нагрузку и обратно к контакту с  $p$ -областью [5].

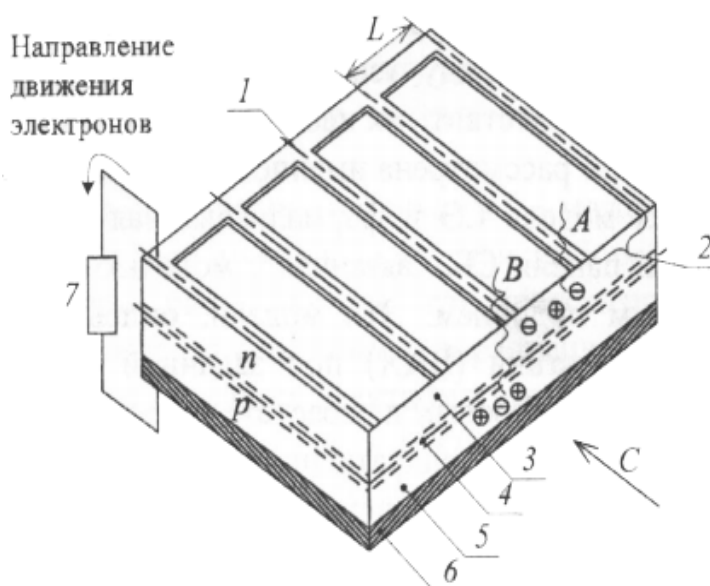


Рисунок 5.1. Геометрия солнечного элемента:  
 контактная секта 1, единичная ячейка 2, эмиттер ( $n$ -тип) 3,  
 $p$ - $n$ -переход 4, база ( $p$ -тип) 5, тыльный контакт 6, цепь загрузки СЭ 7

На поверхности раздела контакт- $p$ —область электроны занимают место дырок, т. е. рекомбинируют, при этом они становятся электрически нейтральными до тех пор, пока новый фотон снова не разделит их на электронно-дырочную пару.

Теоретическая (физическая) модель СЭ, исходящая из эквивалентной схемы замещения (рисунок 5.2), представляет интерес в основном только для исследователей, работавших непосредственно в области разработки СБ, и описывается следующим уравнением [5]:

$$I_H = I_\phi - I_{он} \left\{ \exp \left[ \frac{e(U + I_H R_n)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U}{R_{ш}}, \quad (5.1)$$

где

$I_H$  - ток нагрузки;

$I_\phi$  - фототок или ток короткого замыкания СЭ;

$e$  - заряд электрона;

$U$  - напряжение на СЭ;

$R_n$  - последовательное сопротивление (сопротивление толщи полупроводника и контактной сетки);

$k$  - постоянная Больцмана;

$T$  - температура, К;

$R_{ш}$  - шунтирующее сопротивление;

$A$  - коэффициент, полученный при сравнении теоретической и экспериментальной кривых;

$I_{он}$  - обратный ток насыщения.

Схема замещения с сосредоточенными параметрами, очевидно, является лишь более или менее хорошим приближением к реальному СЭ [5].

Поскольку образование электронно-дырочных пар равновероятно в любом месте каждой единичной ячейки 2, то расстояние от  $i$ -ой пары до проводника контактной сетки может принимать значение от  $L/2$  до 0 [5].

Солнечный элемент невозможно представить схемой замещения с сосредоточенными параметрами.

Удовлетворительная точность модели (5.1) может быть получена при условии, что  $R_n I_H \leq 10 \%$ , однако и в этом случае наблюдаются систематические отклонения теоретической кривой от экспериментальной, являющиеся следствием переменных величин плотностей токов и градиентов напряжений [5].

Одной из задач, стоящих перед разработчиками солнечных элементов, является задача обеспечения оптимальной геометрии, т. е. такой геометрии, при которой удельные характеристики СЭ  $P_{уд}$ , Вт/м<sup>2</sup> достигают максимума (рисунок 5.3).

Геометрия контактной сетки (ширина и количество полос) в зависимости от типоразмера СЭ (расстояния между полосами  $L$ ) (см. рисунок 2.1), занимая на полной поверхности некоторую площадь (обычно 5...7%), влияет на соотношение полной поверхности к полезной (генерирующей фототок). Например, уменьшение количества полос, т. е. увеличение шага  $L$ , увеличит полезную поверхность

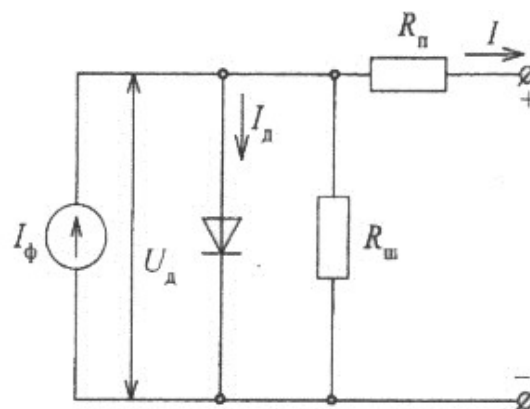


Рисунок 5.2. Эквивалентная схема замещения солнечного элемента

следовательно, увеличится и ток короткого замыкания. Однако возросшее вследствие этого последовательное сопротивление  $R_n$  приведет к уменьшению напряжения в точке максимальной мощности [5].

Качественное влияние  $R_n$  на форму вольт-амперной характеристики показано на рисунке 5.3, при этом кривая 1 соответствует СЭ с меньшим  $R_n$  чем кривая 2. Кривая 3 - это ВАХ идеального диода, без последовательного сопротивления  $R_n$ .

В описан типовой СЭ площадью 2x2 см, для которого достаточно создать один контакт в виде полоски шириной 0,5... 1,0 мм по любой стороне элемента и от шести до двенадцати полос шириной 0,05...0,1 мм, чтобы понизить составляющую легированного слоя в общем последовательном сопротивлении  $R_n$  до значений 0,15...0,2 Ом [5].

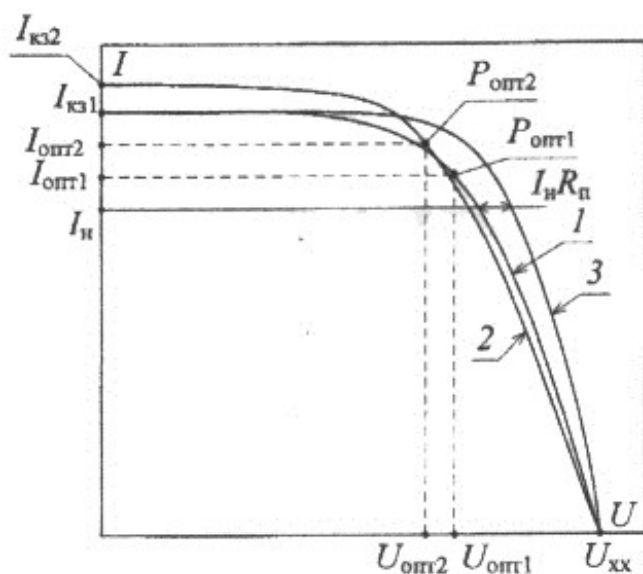


Рисунок 5.3. Влияние геометрии контактной сетки на форму ВАХ СЭ

Несмотря на то, что эмиттерный слой  $p-n$ -перехода СЭ сильно легирован, он обладает значительным сопротивлением из-за малой толщины [5].

Наибольшее внимание в литературе до сих пор уделялось умеренным сопротивлениям слоя  $\approx 10...20$  Ом/см<sup>2</sup>. Для большинства значений сопротивления слоя эквивалентная схема с сосредоточенным последовательным сопротивлением неприменима. При слишком мелко залегающих  $p-n$ -переходах (0,15...0,4 мкм) слоевое сопротивление возрастает до 500 Ом/см<sup>2</sup>, поэтому количество контактных полос СЭ 2x2

необходимо увеличить до 60, что является сложной технологической задачей, так как сама полоса при этом должна быть шириной 15...20 мкм. Однако описание ВАХ СЭ с аномально большим  $R_n$  может представлять интерес, поскольку, по прогнозам специалистов, весьма перспективными считаются СБ рулонной конструкции. Их чрезмерно малая толщина ( $\approx 50$  мкм), обуславливающая гибкость, позволяет сворачивать СБ в рулон, при этом поверхность батареи по отношению к объему рулона и его массе на порядки превосходит традиционную складную конструкцию. И хотя при этом удельная мощность такой СБ  $P_{уд}$ , Вт/м<sup>2</sup>, получается существенно ниже, другой оценочный критерий Вт/кг оказывается намного выше, чем для складной СБ. Учитывая, что для большинства КА после приведения их в рабочее состояние размеры и формы не имеют принципиального значения, становится понятным, почему в России и за рубежом сейчас ведутся интенсивные исследования в этом направлении [5].

Следует отметить, что из дополнительных параметров, входящих в формулу (5.1), существенное влияние на форму ВАХ может оказывать шунтирующее сопротивление  $R_{ш}$ . Поскольку СБ изготавливают из полупроводников более низкого качества по сравнению, например, с теми, что используются для транзисторов и микросхем, количество дефектов в  $p-n$ -переходе значительной площади существенно больше, а плотность тока меньше, чем в вентильных диодах. Попытка уменьшить влияние  $R_{ш}$  используя для изготовления СЭ

высококачественные материалы, считается экономически нецелесообразной, поскольку работа в условиях облучения СБ потоками частиц высоких энергий быстро «сводит на нет» затраты, связанные с повышением качества исходного полупроводника. По этой же причине существенно отличаются и характеристики при обратном смещении  $I_{обр}f(U_{обр})$  для СЭ по сравнению с вентильным диодом (рисунок 5.4) [5].

Кривые на рисунке 5.4 изображены без соблюдения масштаба с целью показать относительно большую величину обратного тока насыщения  $I_{он}$ , крутизну характеристики при обратном смещении  $p-n$ -перехода, которая для СЭ существенно больше, поэтому переход в лавинный пробой и далее, в тепловой, в СЭ наступает при обратном напряжении  $U_{обр} \approx 30...35$  В, в то время как вентильные диоды выдерживают  $U_{обр}$  до нескольких сотен вольт [5].

Такие условия эксплуатации СЭ могут возникнуть в случае частичного затенения СБ элементами конструкции, при этом напряжение незатененных элементов оказывается приложенным с обратным знаком к элементам затененным, поэтому необходима установка шунтирующих диодов, открывающихся при подаче на группы СЭ напряжения обратной полярности [5].

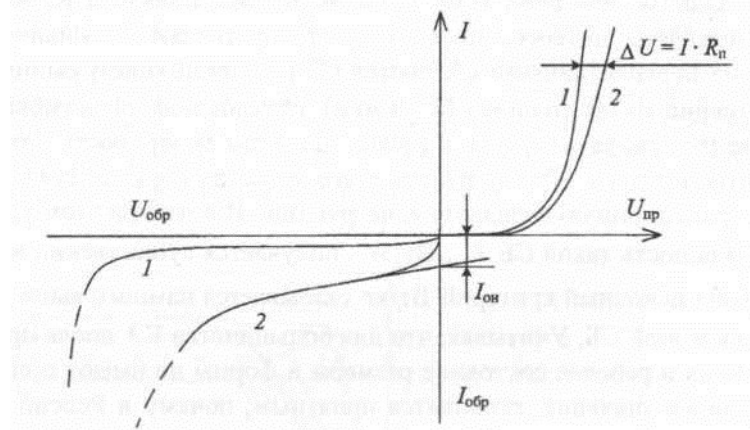


Рисунок 5.4. Сравнение характеристик:  
1 - вентильный диод, 2 - солнечный элемент

## 5.2. Конструкция солнечных элементов

Конструкция современных СЭ, применяемых для целей электроснабжения КА, представляет собой многослойную структуру. В плоскости, перпендикулярной плоскости  $p-n$ -перехода (вид по стрелке С, рисунок 5.1) она схематически изображена на рисунке 5.5 [5].

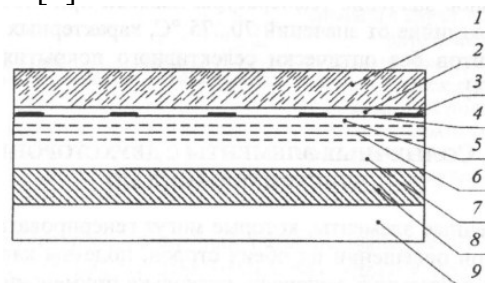


Рисунок 5.5 Конструкция солнечного элемента:  
1 - защитное стекляннное покрытие; 2 - клеящий слой; 5 - контактная сетка;  
4 - просветляющее покрытие; 5 - область эмиттера p (легированный слой);  
6 - p-n-переход; 7 - область базы; 8 - тыльный контакт;  
9 - оптически селективное покрытие тыльной стороны

С помощью стеклянного прозрачного покрытия достигается значительный защитный эффект для солнечных элементов и батарей, работающих в радиационных поясах Земли (РПЗ). Поглощая или ослабляя низкоэнергетическую протонную и частично электронную компоненты радиационных поясов, сравнительно тонкие (0,15...0,5 мм) стеклянные покрытия заметно уменьшают количество частиц, попадающих в солнечный элемент, и тем самым снижают уровень радиационных повреждений, в несколько раз удлинняя СБ в условиях интенсивного корпускулярного облучения [5].

Дополнительная защита от воздействия космической радиации может быть достигнута, если в качестве покрытия стекла, способные накапливать объемный электрический заряд под действием электронов РПЗ. Доза радиации за покрытием, содержащим объемный заряд, может снижаться в зависимости от соотношения между пробегом электронов и толщиной покрытия на 10...40 %. В этом случае эффект ослабления потока электронов достигается за счет их взаимодействия не только с веществом покрытия, но и с его внутренним электрическим полем [5].

Среди диэлектрических материалов, обладающих термостойкостью, радиационно-оптической устойчивостью, способностью образовывать сильные внутренние электрические поля с высоким (до десятков и сотен часов) временем релаксации, наилучшим сочетанием свойств обладают фосфатные неорганические стекла [5].

Клеящий слой для соединения стеклянного покрытия с элементом состоит из прозрачного кремнийорганического каучука, стабильность оптических свойств которого подтверждена в ходе длительных испытаний в космосе.

Назначение просветляющего покрытия - снизить отражение в области спектральной чувствительности за счет эффекта интерференции и увеличить коэффициент собственного теплового излучения, что приводит к достаточно высокому приросту КПД солнечных элементов (до 40%) [5].

С тыльной стороны СЭ (если он не с двухсторонней чувствительностью) наносят светоотражающее покрытие белого цвета либо приклеивают стекла с напылённым на них покрытием из алюминия (зеркальная поверхность). Назначение тыльного оптического покрытия - защита от перегрева солнечных батарей, обусловленного альбедо Земли. Альбедо Земли характеризуется большой неравномерностью и может достигать 0,6 солнечной постоянной при средней величине 0,37, что заметно снижает мощность СБ, особенно устанавливаемых на низколетящих КА (высота орбиты 200...400 км). Максимальное значение температуры панелей при этом снижается на 25 °С в отличие от значений 70...75°С, характерных для солнечных элементов без оптически селективного покрытия с тыльной стороны [5].

### **5.3. Солнечные элементы с двухсторонней чувствительностью**

Солнечные элементы, которые могут генерировать электрический ток при освещении их обеих сторон, полезны как в космических, так и в наземных условиях, поскольку применение таких элементов улучшает удельные характеристики СБ. В космосе солнечная батарея из элементов с двухсторонней чувствительностью (для низколетящих КА) позволяет использовать не только прямое, но и отраженное от Земли солнечное излучение, что может заметно повысить получаемую на борту КА электрическую мощность, поскольку на отдельных участках орбиты альбедо Земли составляет 0,8...0,9 (при сплошном

облачном покрове). Очевидно, что получить увеличение электрической мощности, снимаемой с единицы площади освещаемого с двух сторон элемента (по сравнению с элементом обычной конструкции), в 1,2...1,3 раза можно только в случае, когда базовая область имеет удельное сопротивление  $\rho = 0,1...0,2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и малое сопротивление растекания. Обеспечение таких значений  $\rho$  при условии двухсторонней чувствительности является достаточно сложной технической задачей, поэтому элементы на основе базовых пластин кремния с удельным сопротивлением  $\rho = 0,5...1,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  при всех условиях освещения оказались хуже обычных СЭ с  $p-n$ -переходом на одной стороне. Проблема уменьшения сопротивления растекания на базовом слое была решена путем создания тонкого сетчатого контакта оптимальной геометрии. Конструкция двухстороннего СЭ форма и расположение токосъемных контактов представлены на рисунке 5.6 [5].

Эквивалентная электрическая схема замещения СЭ с двухсторонней чувствительностью изображена на рисунке 5.7 [5].

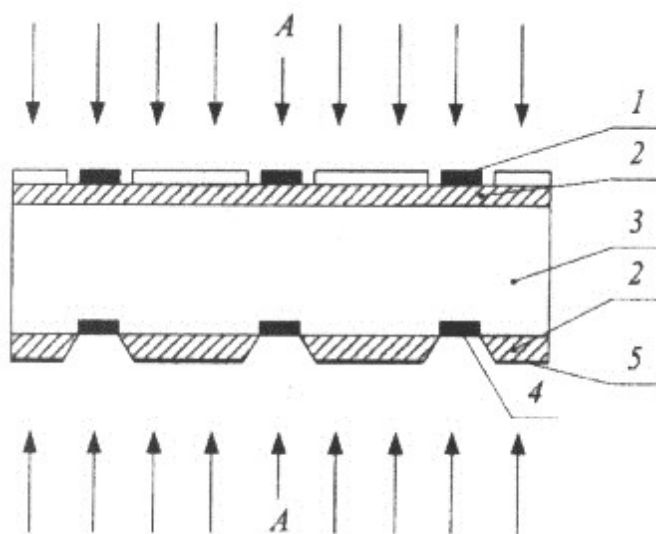


Рисунок 5.6. Конструкция солнечного элемента с двухсторонней чувствительностью: 1 - верхний токосъемный контакт к  $p^+$ -слою; 2 - легированный  $p$ -слой; 3 - базовый слой  $p$ -типа; 4 - контакт к базовому слою  $p$ -типа; 5 - тыльный контакт к  $n$ -слою; А - солнечное излучение

На практике от солнечных батарей, выполненных на основе СЭ с двухсторонней чувствительностью, удается получить приращение мощности, по сравнению с обычными односторонними СЭ, на 15...20 %, хотя приращение тока короткого замыкания достигает в среднем на 30...35 % по ряду причин: 1) температура СЭ с двухсторонней чувствительностью выше вследствие высокого значения коэффициента поглощения тыльной стороны, следовательно, меньше и напряжение в точке максимальной мощности; 2) значительная часть отраженного от Земли солнечного излучения поглощается и рассеивается каштановой сеткой, на которой крепятся модули СЭ. При расчете энергетических возможностей СБ с двухсторонней чувствительностью следует задаваться средним

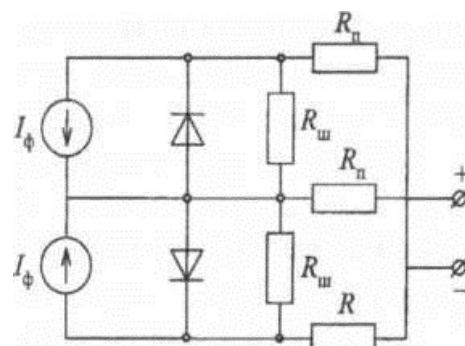


Рисунок 5.7. Эквивалентная электрическая схема замещения солнечного элемента с двухсторонней чувствительностью

значением альbedo, равным 0,37...0,4. Значительные колебания этой величины и непредсказуемость делают задачу моделирования энергетических режимов такой СБ маловероятной [5].

#### 5.4. Аналитическое описание вольт-амперных характеристик солнечных батарей

В настоящее время не существует ни одной модели, точно описывающей существующие СЭ во всех диапазонах изменения температуры, интенсивности освещения и степени радиационного повреждения. Попытка уточнения аналитического описания ВАХ СЭ при переходе от модели с сосредоточенными к модели с распределенными параметрами оказалась малоэффективной, поскольку возросшая громоздкость выражений не окупилась достигнутой точностью по причине зависимости всех параметров от указанных факторов, причём эти параметры очень трудно измерить во всех представляющих интерес диапазонах [5].

Получить аналитическую форму описания ВАХ СБ, обеспечивающую достаточную точность в широком диапазоне значимых факторов, оказалось возможным с помощью формализованного выражения, удовлетворяющего ряду требований, которые всегда имеются для специфически нелинейных кривых подобного вида. Прежде всего встает вопрос о выборе вида аппроксимирующей функции, дающей максимальное приближение к экспериментальным данным. Такая функция называется экспоненциальной, поскольку СБ как полупроводниковый прибор также описывается экспонентой [5].

С точки зрения наглядности и удобства использования, выбрана «характеристическая» форма, т. е. такая форма записи, в которой вся кривая описывается по трем вполне определенным точкам вольт-амперной характеристики СБ: 1 - напряжение холостого хода, 2 - ток короткого замыкания, 3 - точка максимальной мощности, связанная параметрами  $j$  и  $i$  с точками 1 и 2. Параметры  $j$  (относительное оптимальное напряжение) и  $i$  (относительный оптимальный ток) описываются простыми соотношениями [5]:

$$j = \frac{U_{\text{опт}}}{U_{\text{хх}}}; i = \frac{I_{\text{опт}}}{I_{\text{кз}}},$$

где  $U_{\text{опт}}$ ,  $I_{\text{опт}}$  - напряжение и ток в оптимальной точке (точке наибольшей мощности);  $U_{\text{хх}}$  - напряжение холостого хода;

$I_{\text{кз}}$  - ток короткого замыкания.

В общем виде экспоненциальную модель СБ можно записать как [5]:

$$I = I_{\text{кз}} \left[ 1 - e^{f(U)} \right], \quad (5.2)$$

где

$f(U)$  - функция текущего напряжения и параметров характеристической ВАХ, равная [5]:

$$f(U) = \frac{(U - U_{\text{хх}}) \ln(1 - i)}{U_{\text{хх}} (j - 1)} \quad (5.3)$$

Анализ сходимости экспериментальных значений с выражением (2.2) подстановкой формулы (2.3) показал, что имеются систематические отклонения, которые сохраняются во всем диапазоне температур и освещенности. При этом было установлено, что между указанными выражениями и теоретической моделью (2.1) таких отклонений не наблюдается [5].

Данная особенность позволила сделать заключение, что выражение (2.3) было получено из условия прохождения формализованной кривой через указанные характеристические точки теоретической модели [5].

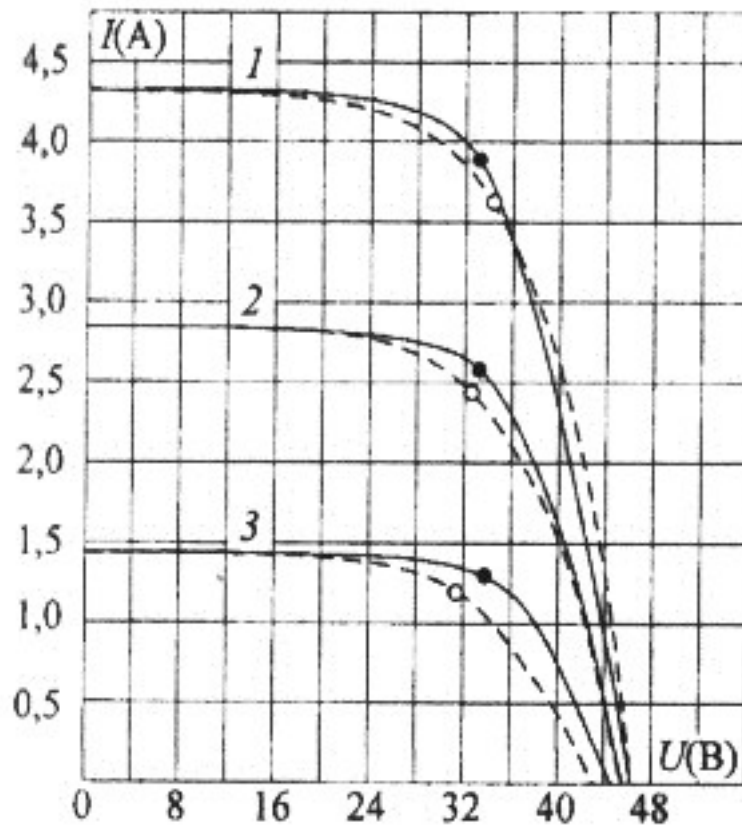


Рисунок 5.8. Семейство ВАХ для кремниевой СБ:

- 1 - кривая для освещенности, равной одной солнечной постоянной  $S = 1\ 360\ \text{Вт/м}^2$ ;
- 2 - кривая для освещенности, равной  $2/3\ S$ ;
- 3 - кривая для освещенности, равной  $1/3\ S$ ;

- ВАХ экспериментальная и положение точки наибольшей мощности;
- ВАХ теоретической модели и соответствующая наибольшей мощности

Подобные систематические отклонения подтверждают непредставимость СЭ схемой с сосредоточенными параметрами. Для повышения точности описания ВАХ формализованным выражением (2.2) было введено одно условие, которому всегда удовлетворяет точка наибольшей мощности [5]:

$$\left. \frac{dP}{dU} \right|_{U=U_{omn}} = 0.$$

Для обеспечения этого условия необходимо изменить показатель степени  $f(U)$ . Не останавливаясь подробно на том, как была получена зависимость  $f(U)$ , приведем окончательный результат [5]:

$$f(U) = \left\{ \left[ \frac{i}{1-i} - \frac{I_n(1-i)}{I_n j} \right] \left( \frac{U}{U_{xx} \cdot j} - 1 \right) + I_n(1-i) \right\} \frac{I_n \frac{U}{U_{xx}}}{I_n j} \quad (5.4)$$

Для использования выражения (5.2) с подстановкой (5.4) необходимо и достаточно иметь аналитические зависимости  $I_{кз} = f_1(t, \text{ }^\circ\text{C})$ ;  $I_{опт} = f_2(t, \text{ }^\circ\text{C})$ ;  $U_{xx} = f_3(t, \text{ }^\circ\text{C})$ ;  $U_{omn} = f_4(t, \text{ }^\circ\text{C})$  [5].



В данной работе приведены лишь зависимости для кремниевых СЭ ( $P_{уд} \approx 120$  Вт/м<sup>2</sup>) в виде графиков (рисунок 5.9 - 5.10) [5].

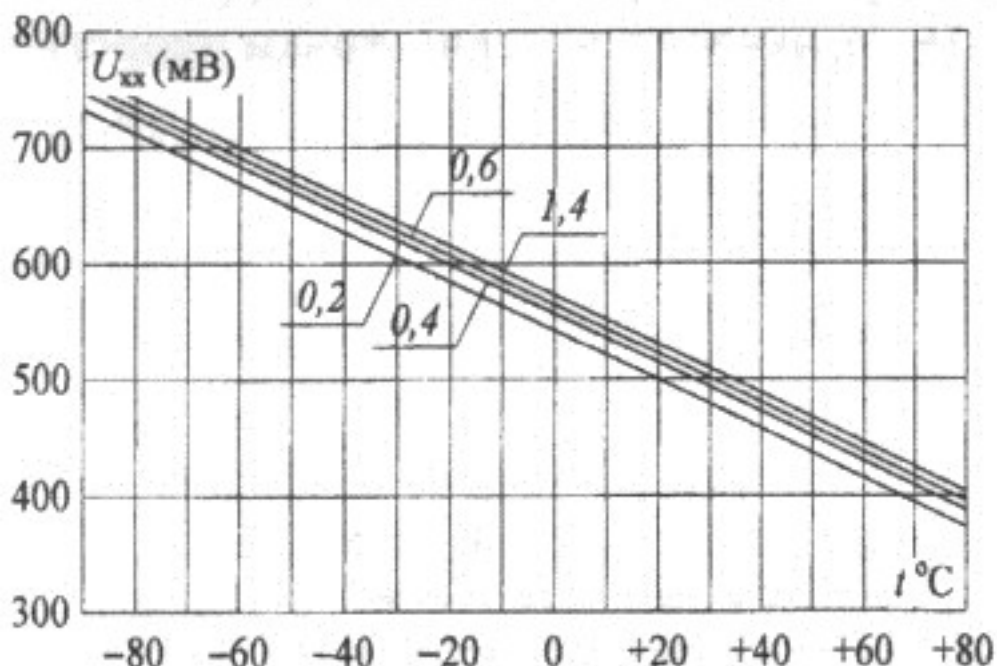


Рисунок 5.9. Зависимость напряжения холостого хода  $U_{ox}$  кремниевых СЭ от температуры и освещенности: 1,4- 1 400 Вт/м<sup>2</sup>; 0,2 - 200 Вт/м<sup>2</sup>

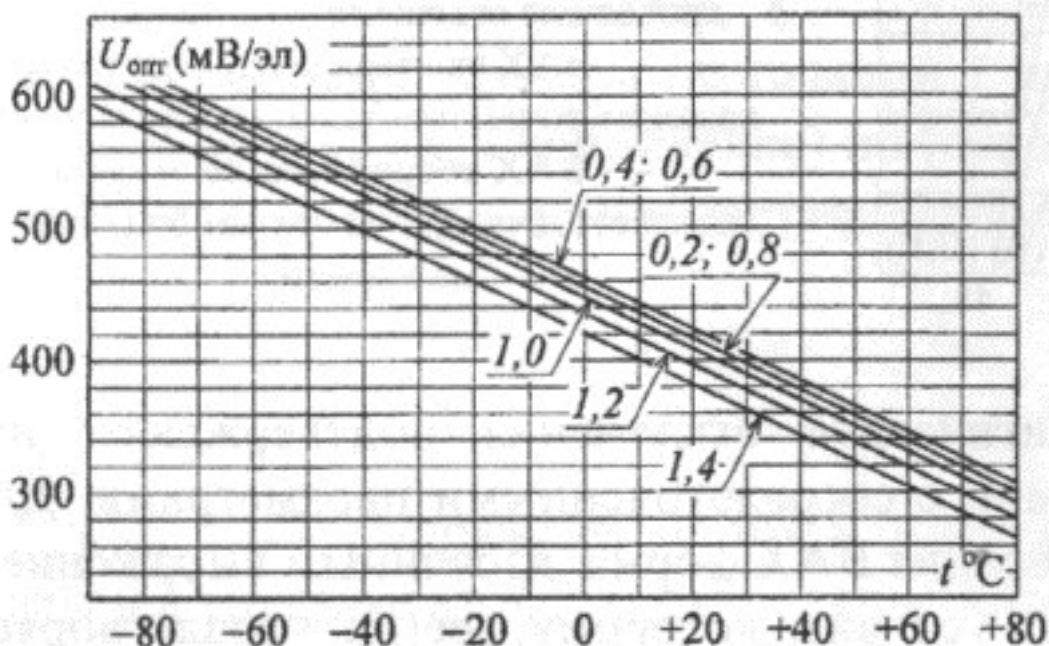


Рисунок 5.10. Зависимость напряжения в точке наибольшей мощности  $U_{om}$  от температуры и освещенности для кремниевых СЭ

### 5.5. Модули солнечных элементов

Солнечные элементы соединяются в группы параллельно-последовательно ( $m-n$ ), при этом  $m$  и  $n$  колеблются от 4...8. Такая группа получила название модуля (наименьшей сборочной единицы), из которой komponуется СБ в целом [5].

Последовательно элементы в модуле соединяются путем припаивания контактной полосы передней поверхности одного элемента к контакту,

расположенному на тыльной стороне соседнего элемента (так называемое соединение внахлест), образуя тем самым жесткую промежуточную сборку, напоминающую черепичную кровлю. Параллельно элементы в модуле соединяются проволочными контактами, припаянными к тыльным сторонам и имеющими петли для крепления к сетке (рисунок 5.11) [5].

При таком соединении солнечных элементов образуются области с высокой концентрацией напряжений в местах межэлементных соединений. Примеры конструктивного заполнения модулей СЭ приведены на рисунке 5.12. При работе солнечных батарей в космосе температурный режим, определяемый теплообменом излучения, характеризуется непосредственно, так как баланс мощностей (падающей на СБ, излучаемой ею и отводимой части преобразованной электрической мощности) в зависимости от соотношения составляющих приводит к повышению либо к понижению текущей температуры СБ, которая в пределе может достигать установившихся равновесных значений. При реально достижимых значениях оптических коэффициентов поверхностей СЭ (для уравнения земных орбит) пределы колебаний температуры панелей СБ  $-70...+55$  °С. Поскольку элементы в модуле являются сложными многослойными сборочными единицами, колебания температуры приводят к соответствующим колебаниям напряжений в СЭ и межэлементных соединениях, т. е. СБ работает в режиме термоциклирования. При эксплуатации СБ на околоземных орбитах указанные напряжения приводят к появлению местных дефектов, распределение которых имеет случайный характер.

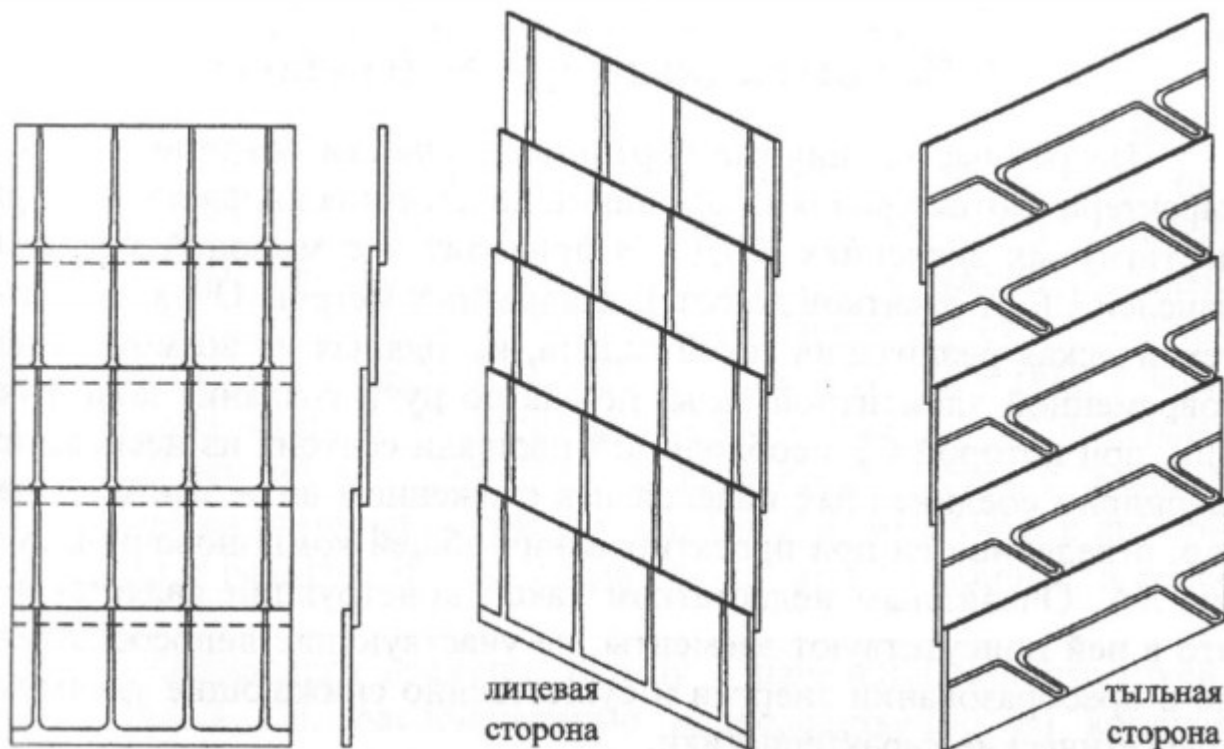


Рисунок 5.11. Жесткое электрическое соединение частично перекрывающихся элементов солнечных батарей [5]

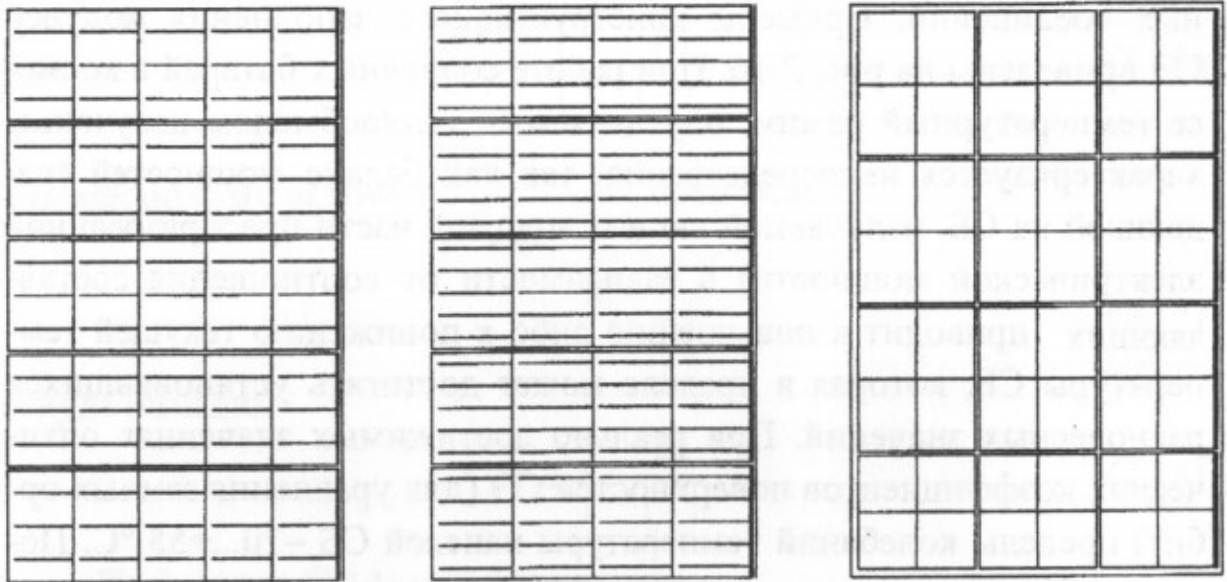


Рисунок 5.12. Примеры конструктивного заполнения модулей солнечных элементов [5]

Такие дефекты (отслоение металлических проводников контактной сетки от кремниевой пластины, трещины в элементах), приводящие к обрыву электрической цепи, влияют на энергетические характеристики СБ (ресурсный спад ее мощности), т. е. внешне дефекты проявляются подобно деградации характеристик СБ под действием радиационных поясов Земли [5].

### 5.6. Конструкция солнечной батареи

Потребные единичные бортовые мощности современных КА характеризуются уровнями от единиц до десятков киловатт, что при достигнутых значениях КПД СЭ приводит к суммарной площади панелей СБ от десятков до сотен квадратных метров. Очевидно, что техническая реализация такой задачи, исходящая из возможностей современной элементной базы, пошла по пути создания конструкции, при которой СБ необходимой площади состоит из нескольких шарнирно соединенных панелей и в сложенном виде занимает место, отведенное ей при проектировании общей компоновочной схемы КА. Очевидным недостатком такой конструкции является то, что в ней присутствуют элементы, не участвующие непосредственно в преобразовании энергии и существенно снижающие удельные энергетические характеристики [5].

Необходимая механическая прочность несущих элементов конструкции, накладывающая ограничения на их массогабариты снизу, обусловлена перегрузками и вибрациями, которые они должны воспринимать на этапе выведения КА на орбиту. Вариантов конкретного конструктивного исполнения может быть достаточно много, поэтому ограничимся вопросами, имеющими отношение непосредственно к энергетическим характеристикам отдельной панели СБ. При ориентировочной оценке влияния массы несущих элементов панельной конструкции можно исходить из следующих величин: удельная мощность серийно выпускаемых СЭ жесткой модульной конструкции с односторонней чувствительностью 120... 140 Вт/м<sup>2</sup> при собственной массе 1,5...2,5 кг вместе с несущей конструкцией и кабельной линией - 5...7 кг/м<sup>2</sup>, т. е. удельные характеристики снижаются в 2...3 раза. Типовая конструкция панели солнечной батареи

приведена на рисунке 5.13. Каптоновая сетка 3 приклеивается к несущей раме 2 в пределах угла (р. Сетка предварительно напряжена, а направление плетения относительно сторон несущей рамы (обычно прямоугольной формы) -  $45^\circ$ . Проволочные петли тыльной стороны модулей пропускаются через каптоновую сетку и загибаются - таким способом осуществляется их крепление на несущей конструкции. Очевидно, что в случае панельной конструкции коэффициент заполнения модулями, имеющими собственные размеры  $C$  и  $D$  меньше единицы, поскольку реально выполнимые зазоры между модулями  $E$  и  $F$  порядка  $0,5...1,5$  мм.

Кроме того, следует различать габаритные размеры панели, к которым следует отнести также размеры смещения осей узлов шарнирных соединений  $G$  и  $H$  и габариты собственно несущей рамы [5].

На рисунке 5.13 не показаны пружины механизма раскрытия, пироболты, ограничители, демпферы, датчики положения панелей, масса которых присоединена к массе панели и снижает удельные характеристики последней (Вт/кг). Соединение модулей в пределах панели батареи осуществляется проводами в соответствии с коммутационной схемой. Панели площадью более  $1,5$  м<sup>2</sup> содержат несколько секций модулей СЭ, которые соединяются с общими шинами через развязывающие диоды. Потери мощности в кабельной линии и развязывающих диодах от 1,5 до 5 % мощности панели СБ [5].

До настоящего времени, наряду с панельной конструкцией, используются СБ, расположенные непосредственно на корпусе К Л, однако вследствие их сравнительно низкой эффективности (в 3-4 раза) из-за неизбежности частичного затенения, они применяются для питания маломощных КА ( $P_n \approx 250...500$  Вт). Возможен комбинированный вариант с расположением элементов как на корпусе, так и на откидных панелях.

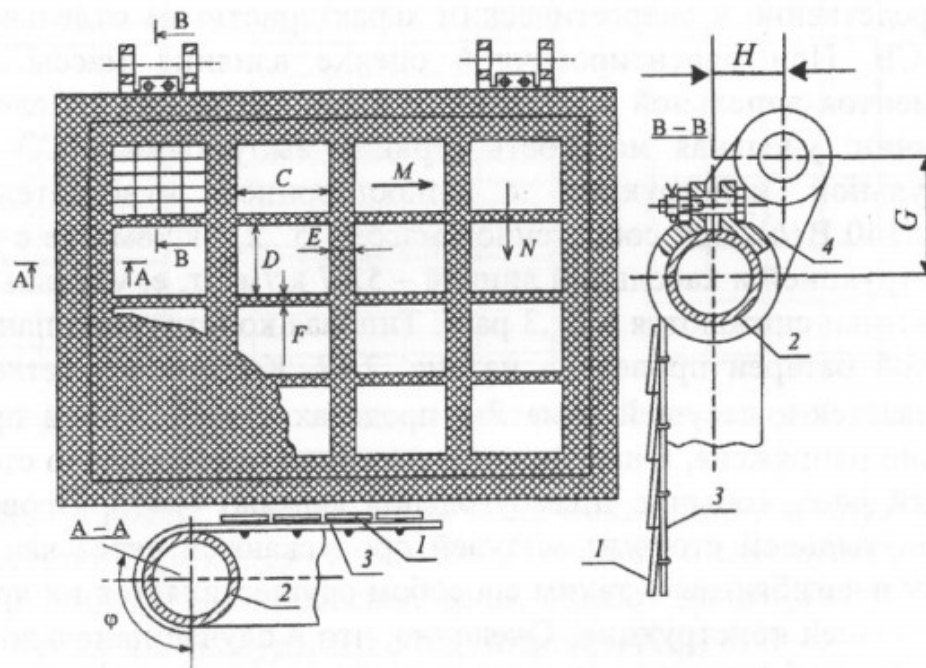


Рисунок 5.13. Конструкция панели солнечной батареи:

- 1 - модули солнечных элементов;
- 2 - несущая конструкция (трубчатая рама); 3 - каптоновая сетка;
- 4 - узел шарнирного соединения (с корпусом КА либо с другой панелью) [5]

Оба варианта применяются на низколетящих КА (высота орбиты  $H$  до 1 500 км,  $P_n \leq 500$  Вт), где нецелесообразна система ориентации СБ на Солнце. Хотя размещение СБ на корпусе считается в настоящее время неперспективным направлением, разработка и изготовление КА с такой компоновкой продолжается. При этом коммутационная схема СБ должна обеспечивать наименьшие потери мощности при частичном затенении ее секции в наиболее вероятном диапазоне углов между продольной осью КА и направлением на Солнце во время полета вне тени Земли. Следует отметить, что в процессе эксплуатации СБ, расположенной на корпусе, ресурсный спад ее характеристик существенно ниже, чем на откидных панелях, так как практически не сказывается влияние термоциклирования [5].

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 1) Опишите принцип работы и устройство солнечного элемента питания?
- 2) Какова конструкция солнечных элементов питания?
- 3) Каковы параметры солнечных элементов питания?
- 4) Как аналитически описываются солнечные элементы?
- 5) Как работают солнечные элементы с двухсторонней чувствительностью?

## 6. ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Топливные элементы<sup>6</sup>, или, как их иногда называют, электрохимические генераторы (ЭХГ), относятся к числу прямых преобразователей химической энергии топлива в электрическую. Это означает, что энергия химических связей молекул и атомов топлива непосредственно, минуя стадию получения тепла, превращается в электрическую энергию. Такое превращение возможно благодаря тому, что химическая энергия имеет электрическую природу. Отсюда следует, что в большинстве случаев химическая реакция между горючим элементом и окислителем заключается в отдаче или приобретении их атомами определенного количества электронов. Подобная реакция сопровождается соответствующим тепловым эффектом [5].

### 6.1. Принцип действия и классификация топливных элементов

Рассмотрим принцип действия топливного элемента на примере использования топливной пары водород-кислород (рисунок 6.1) [5].

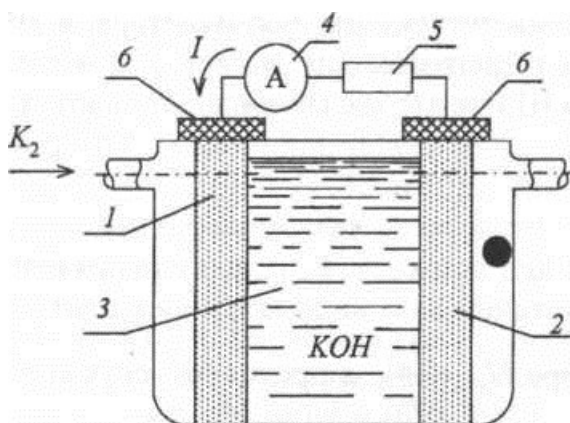
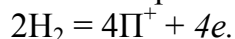


Рисунок 6.1. Схема топливного элемента:  
1 - анод; 2 - катод; 3 - раствор электролита;  
4 - амперметр; 5 - внешняя нагрузка; 6 - клеммы [5]

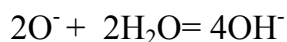
Под действием каталитических свойств электрода (анода) и соответствующих температурных условий молекула водорода распадается на два атома, которые, в свою очередь, подвергаются ионизации с образованием определенного количества протонов и электронов [5]:



Электроны по внешней цепи поступают к катоду, где происходит следующая реакция [5]:



Поскольку в водной среде ион кислорода неустойчив, он переходит в ион гидроокисла [5]:



Ионы гидроокисла с помощью электролита перемещаются к аноду, где происходит заключительная реакция [5]:



<sup>6</sup> Более подробную информацию о топливных элементах можно найти в [5]

Образовавшаяся вода разбавляет электролит, и если не принять специальных мер к ее удалению, то концентрация электролита снизится ниже допустимой нормы [5].

При замыкании цепи между анодом и катодом возникает электрический ток  $I$ , который совершает работу на внешней нагрузке. Теоретическая разность потенциалов разомкнутой цепи или ЭДС водородно-кислородного топливного элемента составляет при нормальных условиях около 1,23...1,25 В [5].

Назначение электролита состоит в обеспечении эффективного переноса ионов окислителя (гидроокисла) в межэлектродном зазоре (среде). Иногда водный раствор электролита может отсутствовать, и его роль выполняет так называемая ионообменная мембрана или твердый электролит [5].

В настоящее время известно большое количество различных типов элементов. Они разделяются по роду применяемого топлива, роду и состоянию электролита, температуре и давлению рабочего процесса, виду используемых электродов и т. д. Авторы считают целесообразным ограничить классификацию топливных элементов по роду применяемого топлива, а также разновидности и температуре электролита. В соответствии с этим следует рассматривать [5]:

- 1) газообразные, жидкие и твердые горючие (например, водород, гидразин, углерод или алюминий) электролиты; газообразные и жидкие окислители (например, кислород, перекись водорода, азотная кислота);
- 2) кислотные, щелочные, жидкие и твердые электролиты, элементы без электролита (с ионообменными мембранами);
- 3) низкотемпературные ( $T_p < 100...150^\circ\text{C}$ ), среднетемпературные ( $T_p < 200...300^\circ\text{C}$ ), высокотемпературные ( $T_p > 300^\circ\text{C}$ ).

В настоящее время в космической энергетике используются водородно-кислородные, низко- и среднетемпературные топливные элементы со щелочным электролитом и ионообменными мембранами [5].

## 6.2. Характеристики топливных элементов

На примере низкотемпературных  $\text{H}_2\text{-O}_2$ -топливных элементов рассмотрим влияние температуры и давления на вольт-амперную характеристику топливных элементов (рисунок 6.2 и 6.3) [5].

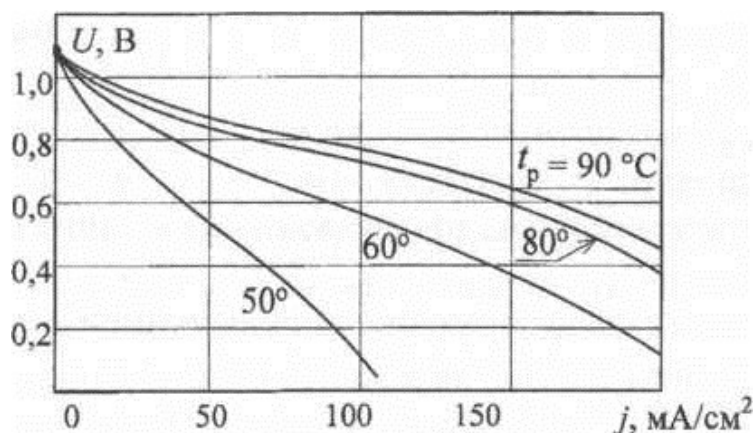


Рисунок 6.2. Зависимость вольт-амперных характеристик  $\text{H}_2\text{-O}_2$ -топливных элементов от температур [5]

Повышение температуры сказывается в первую очередь на химической поляризации. Однако одновременно снижается омическая и концентрационная

поляризация, поскольку увеличивается удельная электропроводность электролита и возрастает предельный ток  $j_{\text{диф max}}$  - ЭДС разомкнутой цепи, как это следует из теории, при уменьшении температуры увеличивается, хотя и не значительно. Начиная с некоторых значений температур ( $T_p = 80...85$  °С), смещение вольт-амперной характеристики в сторону больших напряжений прекращается. Эти температуры принимаются в качестве расчетных [5].

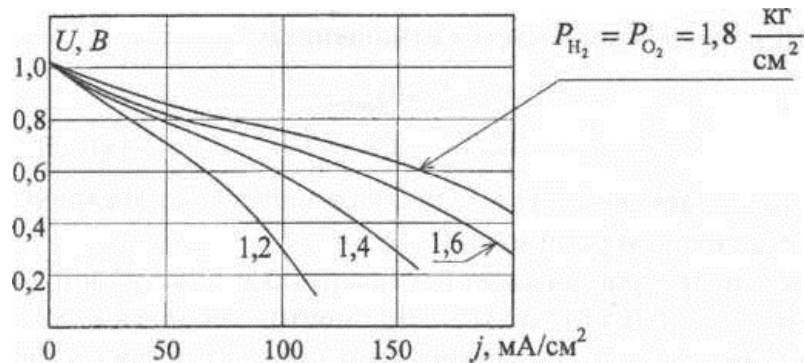


Рисунок 6.3. Зависимость вольт-амперных характеристик Нг-Ог-топливных элементов от давления [5]

Увеличение давления влияет, главным образом, на участок концентрационной поляризации. Отсюда наблюдается сильное расхождение кривых в области больших плотностей тока. Снижение концентрационных поляризационных потерь при увеличении давления (несмотря на уменьшение коэффициента диффузии) объясняется возрастанием количества пор, в которых протекает электрохимическая реакция. Это эквивалентно увеличению эффективной поверхности электродов и возрастанию соответствующей плотности тока. Как следует из графика (рисунок 6.3), желательно повышать давление подачи газа, однако, начиная с давлений  $p = 1,6... 1,8$  кг/см<sup>2</sup>, смещение вольт-амперных характеристик в сторону больших напряжений и токов заметно снижается. Вместе с тем возникает диффузия нейтральных молекул топлива через поры электродов непосредственно в электролит, так называемое явление «пробулькивания» газа. Это явление крайне нежелательно, так как снижается количество реагентов, принимающих активное участие в электрохимической реакции, и появляется возможность образования взрывоопасного «гремучего газа». Таким образом, в качестве расчетных давлений подачи топливных компонентов в элементах с газодиффузионными электродами принимаются  $P_{H_2} = P_{O_2} = 1,6...1,8$  кг/см<sup>2</sup> [5].

Далее рассмотрим основные энергетические показатели топливных элементов, работающих под нагрузкой: КПД, мощность и удельный расход реагентов. Сравнивая эффективность различных элементов, обычно рассматривают несколько коэффициентов полезного действия: КПД по току, КПД по напряжению, общий эффективный КПД [5].

КПД по току определяется отношением [5]:

$$\eta_{\text{ТОК}} = \frac{(Z_{\phi})_{\text{ДЕЙСТВ}}}{Z_{\phi}},$$

где

$(Z_{\phi})_{\text{действ}}$  - фактически полученное количество электричества на один моль реагентов реакции.



Обычно при рациональной конструкции электродов непроизводительные утечки топливных компонентов сводятся к минимуму. Одновременно с этим, использование соответствующих катализаторов в сочетании с правильным выбором материала электродов позволяет значительно снизить относительную долю побочных электродных реакций. В итоге, КПД по току для  $H_2-O_2$ -топливных элементов с газодиффузионными электродами (без учета затрат на продувку) может быть весьма значительным и с достаточным основанием приниматься равным  $\mu_{max} = 0,95...0,98$  [5].

В топливных элементах, работающих под нагрузкой, рабочее напряжение становится меньше теоретически возможного (т.е. ЭДС разомкнутой цепи) на величину суммарных поляризационных потерь. Относя полезную энергию к теоретически возможной при обратимом процессе в топливном элементе, мы получим так называемый КПД по напряжению [5]:

$$\eta_{НАПР} = \frac{Z\Phi U}{Z\Phi U} = \frac{U}{E}.$$

Этот коэффициент характеризует степень падения суммарного обратимого потенциала электродов (анода и катода) за счет наличия поляризационных потерь.

Общий КПД топливного элемента, работающего под нагрузкой, определяется отношением фактически полученной электрической энергии к тепловому эффекту на один моль данной электрохимической реакции [5]:

$$\eta_{ОБЩ} = \frac{(Z\Phi U)_{ДЕЙСТВ}}{\sum_i n_i j_i} = \eta_{ТОК} \cdot \eta_{НАПР} \cdot \eta_{ИД}.$$

Зависимость удельной мощности топливного элемента от плотности тока приведена на рисунке 6.4. Рабочую точку на вольт-амперной характеристике рекомендуется выбирать в диапазоне между режимом холостого хода ( $U=E$ ) и режимом максимальной удельной мощности ( $U - U_{Hmax}$ ) [5].

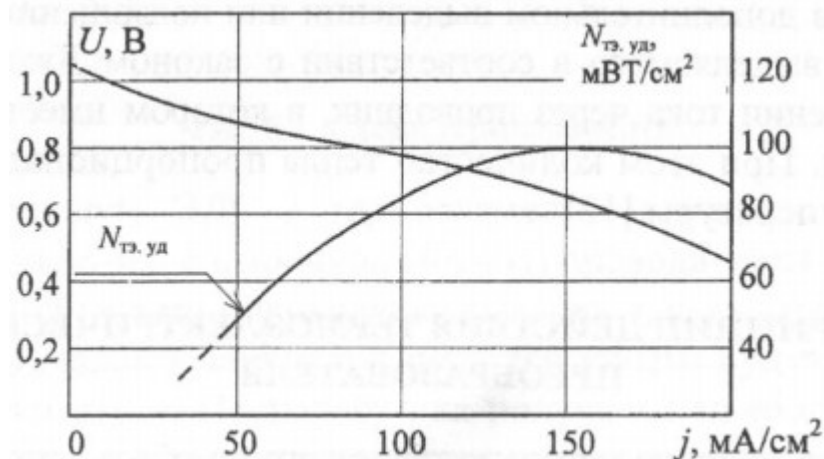


Рисунок 6.4. Зависимость удельной мощности топливного элемента от плотности тока [5]

Общий КПД топливных элементов позволяет определить такой важный параметр, как потребляемый удельный расход реагентов на единицу полезной электрической мощности [5]:

$$C_{уд} = \frac{G}{\eta_{ОБЩ}},$$

где  $G$  - вес исходных реагентов.

Рассмотренные зависимости дают возможность производить выбор расчетной точки на вольт-амперной характеристике топливного элемента.

На сегодняшний день топливные элементы в космической энергетике, несмотря на достаточно высокий КПД, не получили широкого распространения [5].

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 1) Что такое топливный элемент и в чём его отличие от химического источника энергии?
- 2) Опишите принцип действия топливного элемента?
- 3) Какие характеристики имеют топливные элементы?

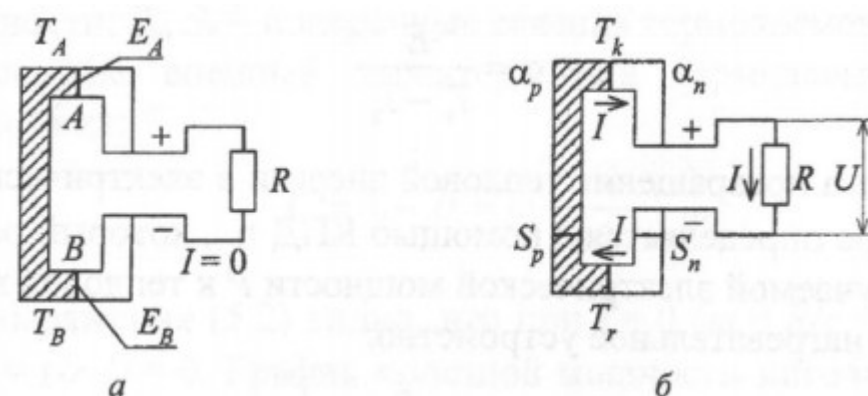
## 7. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Явление термоэлектрического преобразования<sup>7</sup> было открыто в 1821 г. А. Зеебеком. Эффект Зеебека заключается в возникновении термо-ЭДС как функции температур горячих и холодных спаев и свойств материалов электродов термопары. Эффект Пельтье, обнаруженный в 1834 г., заключается в выделении или поглощении тепла в месте соединения двух разнородных проводников при прохождении через него тока. Эффект Томсона, установленный в 1856 г., заключается в дополнительном выделении или поглощении тепла (помимо тепла, выделяемого в соответствии с законом Джоуля-Ленца) при прохождении тока через проводник, в котором имеется перепад температуры. При этом количество тепла пропорционально току и перепаду температуры [5].

### 7.1. Принцип действия термоэлектрических преобразователей

Принцип действия термоэлектрического преобразователя (рисунок 7.1) основан на явлении возникновения контактной разности потенциалов - термо-ЭДС в электрической цепи, составленной из двух термоэлектродов: разнородных проводников или разнородных полупроводников либо проводника и полупроводника. Если внешняя цепь элементов термопары замкнута и температуры обоих контактных соединений (спаев)  $A$  и  $B$  (рисунок 7.1,  $a$ ) одинаковы ( $T_A = T_B$ ), то контактные разности потенциалов  $E_A$  и  $E_B$  уравновесят друг друга ( $E_A = E_B$ ) и ток в цепи будет отсутствовать. Если же спаи термопары находятся при разных температурах ( $T_A \neq T_B$ ), то в цепи возникает результирующая термо-ЭДС  $E$  и по цепи течет ток. Если оба разнородных электрода термопары имеют электронную ( $n$ -типа) проводимость, то повышаются концентрации и скорости электронов в горячих концах электродов. В результате возникает поток электронов от горячих концов к холодным, вследствие чего холодные концы приобретают отрицательные потенциалы по отношению к горячим [5].

ЭДС термопары возникает из-за неравенства указанных разностей потенциалов в двух разнородных термоэлектродах. Совершенно аналогично протекают процессы при применении в качестве термоэлектродов двух полупроводников с дырочной ( $p$ -типа) проводимостью, с той лишь разницей, что от горячего спаю к холодному происходит перемещение не электронов, а положительных носителей зарядов дырок. В этом случае холодные концы термоэлектродов приобретают положительные по отношению к горячим [5].



<sup>7</sup> Более подробную информацию о термоэлектрических преобразователях можно найти в [5]

Наибольшую ЭДС в термоэлементе можно получить, если взять один электрод с дырочной ( $p$ -типа) проводимостью, а другой - с электронной ( $n$ -типа) проводимостью, так как их контактные разности потенциалов в замкнутой цепи термопары будут складываться, а не вычитаться. Поскольку для получения наибольшей термо-ЭДС в современных термогенераторах для обоих электродов применяются материалы с разными типами проводимостей, то в дальнейшем для всех выводов будет предполагаться, что один электрод термоэлемента имеет проводимость  $p$ -типа, а другой -  $n$ -типа [5].

## 7.2. Материалы для термоэлектрических преобразователей

Качество материалов для термоэлементов определяется коэффициентом термо-ЭДС, тепло- и электропроводностью. Чем выше коэффициент термо-ЭДС и электропроводность и ниже теплопроводность материала, тем большую мощность может развивать в данных условиях термоэлемент и тем выше его КПД [5].

Наибольшее распространение в качестве термоэлектрических материалов получили, так называемые интерметаллические соединения, имеющие не полупроводниковый, а металлический температурный вид электропроводности. Для них наиболее типичным коэффициентом термо-ЭДС считается  $|\alpha_p| = |\alpha_n| \approx 200$  МКВ/К. Термоэлектрические материалы должны также обладать достаточной радиационной стойкостью в случаях, когда в качестве источников тепла в термогенераторах используются ядерные реакторы и изотопные источники [5].

Современные термоэлектрические материалы можно разделить на низко-, средне- и высокотемпературные. Низкотемпературный интервал охватывает рабочие температуры в пределах 400...600 К. К термоэлектрическим низкотемпературным материалам относят: теллурид висмута  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  ( $p$ - и  $n$ -типа), системы твердых растворов  $\text{Bi}$ ,  $\text{Te}$  и  $\text{Se}$ :  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Bi}_2\text{Se}_3$   $n$ -типа) и системы твердых растворов  $\text{BiSb}$  ( $n$ -типа). Условия работы термоэлектрических материалов в этой группе весьма благоприятны из-за сравнительно низких абсолютных температур, снижающих действия таких отрицательных явлений, как окисление, улетучивание примесей и основного вещества [5].

Среднетемпературный интервал охватывает рабочие температуры в пределах 600...950 К и имеет простые условия сброса тепла с холодных спаев. В этом интервале имеется большое количество высокоэффективных термоэлектрических материалов, в число которых входят: теллуристый свинец  $\text{PbSe}$  ( $p$ - и  $n$ -типа), селенистый свинец  $\text{PbSe}$  ( $p$ -типа), соединение  $\text{AgSbTe}$  ( $p$ -типа), теллурид германия  $\text{GeTe}$  ( $p$ -типа) и твердые растворы на основе этих четырех веществ [5].

Высокотемпературный интервал является естественным продолжением среднетемпературного и имеет нижнюю границу в области 950 К. Верхняя граница интервала не установлена, так как при температурах выше 1600...1800 К выгодным и удобным является термоэмиссионный цикл генерирования электроэнергии, хотя в настоящее время уже существуют термоэлектрические материалы (на основе соединений бора), пригодные для использования при температуре выше 1800 К.

Работа в области высоких температур ставит термоэлектрические материалы в особенно тяжелые условия из-за их окисляемости, летучести и диффузии примесей. Однако простота сброса тепла, наличие достаточно компактных источников тепла, например ядерных, делает высокотемпературный интервал весьма перспективным, особенно для космической энергетики [5].

К термоэлектрическим высокотемпературным материалам относятся следующие системы: кремний-германий SiGe (*n*-типа), теллурид марганца MnTe (*p*-типа) и арсенид индия InAs (*n*-типа) [5].

Проведенные исследования показывают, что термоэлектрические преобразователи могут быть использованы только на малых космических аппаратах [5].

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 1) Что такое термоэлектрический преобразователь?
- 2) Опишите принцип действия термоэлектрического преобразователя?
- 3) Какие материалы применяются для изготовления термоэлектрических преобразователей?

## 8. ТРОСОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Тросовые системы<sup>8</sup> (ТС) - новое и очень перспективное направление развития космической техники. Основа концепции тросового спутника была предложена К. Э. Циолковским в 1895 г. и более подробно разработана итальянским ученым Д. Коломбо в 1974 г. Работы профессора Д. Коломбо нашли применение в совместной итало-американской программе тросовой системы TSS. Особенный интерес представляют электродинамические тросовые системы, которые являются альтернативным источником электроэнергии в околоземном пространстве. Это система космических объектов, соединенных между собой токопроводящим тросом. На сегодняшний день остаются малоизученными их энергетические и динамические характеристики [5].

### 8.1. Космические тросовые системы

При пересечении силовых линий геомагнитного поля токопроводящим тросом, развернутым с орбитальной станции вдоль местной вертикали, в нем наводится ЭДС, и при замыкании контура в тросе начинает течь ток. Со стороны магнитного поля Земли на трос, по которому течет ток, действует распределенная сила Ампера, которая тормозит движение станции. Вся система представляет собой глобальный виток, вырабатывающий электроэнергию за счет торможения в магнитном поле Земли [5].

Проводящий трос может быть использован как генератор электроэнергии. При движении троса, снабженного на концах устройствами контакта с плазмой, в магнитном поле в тросе будет индуцироваться ЭДС (рисунок 8.1) [5].

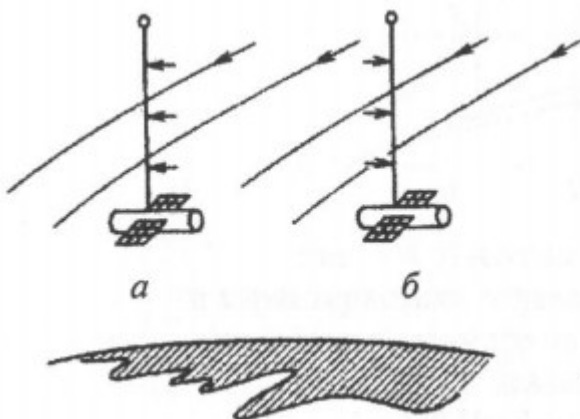


Рисунок 8.1. Схема работы тросовой системы.

Взаимодействие электрического тока в тросе с геомагнитным полем, создающим малую тягу (а), Возникающая в тросе ЭДС индукции, используемая для электроснабжения станции (б) [5]

Если между тросом и одним из устройств контакта с плазмой поместить электрическую нагрузку, то на ней будет производиться полезная работа. Сила, действующая на трос со стороны магнитного поля, в этом случае будет тормозить движение станции [5].

Концепция тросовых систем представляет уникальные возможности [5]:

<sup>8</sup> Более подробную информацию о тросовых системах энергоснабжения можно найти в [5]

- 1) сматывание троса может заменить сложный и дорогостоящий процесс стыковки (рисунок 8.2);
- 2) по тросу возможна передача энергии или каких-либо данных;
- 3) на платформе, соединенной тросом с орбитальной станцией, можно проводить научные эксперименты, изолированные от электромагнитной интерференции и динамических турбуленций, обычно исходящих от работающей космической станции;
- 4) развернутый вниз трос дает возможность изучать верхние слои атмосферы Земли (рисунок 8.3);
- 5) с помощью тросовых систем можно регулировать траекторию;
- 6) вращающиеся тросовые системы могут создавать на платформе искусственную тяжесть, которую можно регулировать, изменяя расстояние от центра масс системы.

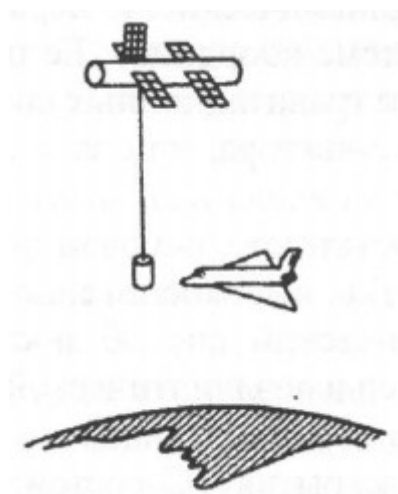


Рисунок 8.2. Пристыковка орбитального самолета к выносному стыковочному узлу с последующим подтягиванием к станции [5]

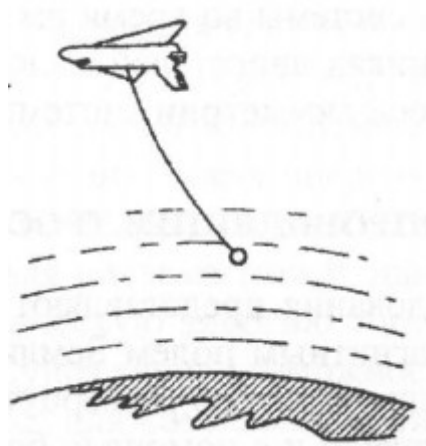


Рисунок 8.3. Привязной зонд опускается с орбитального самолета в атмосферу до высоты 110-130 км [5]

Если один вариант использования тросовой системы с токопроводящим тросом - создание дополнительной тяги, т. е. ее использование в качестве двигателя (рисунок 8.1, *a*) [5].

Применение тросов в космосе было начато еще на заре космической эры. В начале 60-х гг. XX в. на некоторых спутниках, например на американском

спутнике «Транзит-1 В», запущенном 13 апреля 1960 г., для замедления вращения вокруг центра масс применялось устройство, включающее грузы на тросах [5].

В 1972 г. М. Гросси из астрофизической обсерватории Смитсоновского института (США) предложил использовать проводящий трос в космосе как антенну для связи на сверхнизкой частоте. В 1974 г. Д. Коломбо, известный специалист по небесной механике, вместе с М. Гросси и другими сотрудниками обсерватории выдвинул идею создания субспутника, привязанного к орбитальному самолету тросом длиной 100 км, для измерения параметров гравитационного и магнитного полей Земли и атмосферы на низких орбитах [5].

Эти полеты были экспериментальными. Они дали необходимый наблюдательный материал для дальнейшей разработки проектов космических тросовых систем [5].

В настоящее время принята классификация тросовых систем по способу построения - статические или динамические. В первом случае ТС не вращается в орбитальной системе координат. Ее построение осуществляется или за счет градиента гравитационных сил, когда система вытянута вдоль текущего радиус-вектора, или за счет аэродинамических сил, когда система вытянута вдоль направления полета. Второй способ, изученный еще недостаточно, основан на стабилизации системы с помощью закрутки. Для высокоапогейной орбиты с большим эксцентриситетом статический способ построения тросовых систем невозможен, так как на сильноэллиптической орбите гравитационный момент является не стабилизирующим, а возмущающим фактором. Реальный способ раскрытия ТС состоит в поддержании постоянной угловой скорости системы во время раскрытия с помощью установленных на субспутниках двигателей малой тяги, момент тяги которых направлен вдоль оси симметрии системы [5].

## 8.2. Тросовые системы с токопроводящим тросом

Значительный интерес для исследования представляют тросовые системы, взаимодействующие с магнитным полем Земли. Если электропроводящий и изолированный снаружи трос развернуть с орбитальной станции вдоль местной вертикали и с помощью бортовой электроустановки пропустить по нему электрический ток, то со стороны геомагнитного поля на трос будет действовать распределенная сила, ускоряющая движение станции. Трос в этом случае будет действовать как своего рода электромагнитный двигатель. Ток, протекающий по тросу, должен замыкаться через ионосферную плазму. Плазмой называется состояние вещества, характеризующееся высокой степенью ионизации его частиц, достигающей до полной. В плазме газового разряда (например в положительном столбе тлеющего разряда) существует концентрация положительных ионов. Результирующий пространственный заряд в плазме равен нулю, а большая электропроводность приближает ее свойства к свойствам проводников. Случайно возникающие в плазме не подверженные внешним воздействиям разности концентраций заряженных частиц и разности потенциалов сглаживаются, как в проводниках, на которые не действуют внешние ЭДС [5].

По предварительным подсчетам, КПД такого электрогенератора очень высок около 90 %. За счет большой скорости движения троса при его длине 1... 10 км на высоте 400 км ЭДС индукции будет составлять около 200...2 000 В, сила тока будет измеряться десятками ампер, мощность генератора достигнет 2,5...25 кВт.



Большой интерес представляет комбинация режимов тяги и генерации. При входе станции в тень Земли ее солнечные батареи перестают вырабатывать энергию. В этот период движения электроэнергия на борту станции может вырабатываться тросовым генератором за счет уменьшения энергии орбитального движения. При выходе на освещенную сторону Земли часть электроэнергии, вырабатываемой солнечными батареями, нужно будет использовать для работы троса как двигателя с целью восполнения энергии орбитального движения. Если на станции необходима кратковременная генерация пиковой электрической мощности, тогда в течение многих витков трос работает как двигатель, и станция набирает высоту, затем в нужный момент трос переключается на генерацию и за несколько витков переводит запасенную энергию орбитального движения в электроэнергию за счет уменьшения высоты полета [5].

Механическая энергия тросовой системы при этом убывает. Как и во всякой электрической машине, этот процесс обратим, т. е. тросовая система может двигаться, создавая тягу, увеличивающую механическую энергию системы за счет бортового источника питания. Существует возможность использования электродинамического троса для компенсации силы сопротивления, изменения параметров орбиты КА, создания запаса электроэнергии на борту орбитальной станции [5].

За последние 15 лет были проведены поисковые исследования по применению электродинамических ТС для научных экспериментов по космической плазме. Также была рассмотрена возможность применения электродинамической привязной системы с изолированным тросом, с точки зрения генерации сильных токов, для превращения энергии орбитального движения в электрическую мощность [5].

### 8.3. Ядерные энергетические установки

Наиболее перспективной энергетической установкой для КА, рассчитанных на 3...5 и более лет активного существования, является ядерная энергетическая установка<sup>9</sup> (ЯЭУ) типа SNAP. Использование ЯЭУ наиболее целесообразно на ИСЗ со сроком активного существования более одного года и на КА, совершающих полет в областях, где интенсивность солнечного излучения недостаточна для эффективной работы солнечных батарей, а также на больших орбитальных и лунных станциях [6].

На навигационном ИСЗ "Транзит IVA", выведенном на орбиту в 1961 г., была впервые установлена радиоизотопная ЯЭУ SNAP-3A мощностью 2,7 Вт, массой около 2 кг [6].

На ИСЗ "Транзит V", запущенном в 1963 г. и входящем в навигационную систему ВМС США, установлена радиоизотопная ЯЭУ SNAP-9A, являющаяся модификацией ЯЭУ SNAP-3A. Ее мощность 25 Вт, она работала на плутонии-238.

После разработки ЯЭУ SNAP-3A в США было создано более 12 новых ЯЭУ типа ЯЭУ SNAP. В 1965 г. на орбиту вокруг Земли была выведена ЯЭУ SNAP-10A, предназначенная для питания электроэнергией бортовой аппаратуры (в том числе ионного ракетного двигателя). Проектная мощность этой ЯЭУ 500 Вт, масса 440 кг. В качестве делящегося вещества использовался уран-238 (4,75 кг), в качестве замедлителя - гидрид циркония (43 кг). Система преобразования энергии -

---

<sup>9</sup> Более подробную информацию о ядерных энергетических установках можно найти в [6]

термоэлектрическая (2880 германиево-кремниевых термопар) с рабочей температурой 550 °С. ЯЭУ SNAP- 10А проработала всего 43 суток [6].

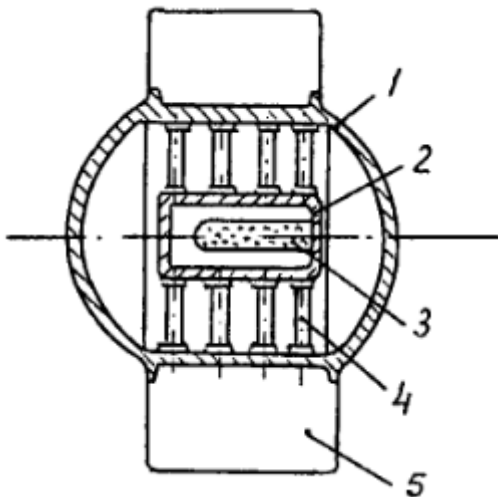


Рисунок 9.1. Изотопный генератор:

1 - внешний корпус; 2- внутренний контейнер; 3 - ампула с изотопом;  
4 - термоэлектрические генераторы; 5 – радиатор [6]

По мнению большинства специалистов, наибольшее применение получают радиоизотопные (рисунок 5.20), а не реакторные ЯЭУ.

Проектировалась для обитаемой орбитальной исследовательской лаборатории MORL ЯЭУ, работающая на плутонии, которая должна была обеспечивать при к.п.д 20 % мощность 10 кВт в течение 5 лет [6].

На лунном КА "Сервейор" (с мягкой посадкой) вначале предполагалось использовать радиоизотопную ЯЭУ SNAP-11 мощностью 25 Вт. Однако позже было принято решение отказаться от ЯЭУ, так как предполагалось, что КА "Сервейор" будет работать только в условиях лунного дня, и необходимая мощность может быть обеспечена солнечными батареями [6].

Для связных ИСЗ разрабатывалась ЯЭУ SNAP-17 мощностью 24 Вт и сроком службы 3...5 лет; радиоизотопный материал - стронций-90.

Для ИСЗ "Нимбус В" была разработана ЯЭУ SNAP-19 мощностью 30 Вт и массой 13,6 кг с расчетной продолжительностью работы пять лет.

Термоэмиссионные (термоионные и термоэлектронные) преобразователи тепловой энергии позволяют получать плотности мощности 2 Вт/см<sup>2</sup>, к.п.д 6 % для преобразователей с вольфрамовым катодом при температуре 1300°С и 2,66 Вт/см<sup>2</sup>; к.п.д 10,5 % для преобразователей с молибденовым катодом при температуре 1350°С [6].

В реакторных ЯЭУ достигнута плотность мощности до 15 Вт/см<sup>2</sup> при температуре 1990 °С и КПД 8 % [6].

Радиоизотопные ЯЭУ, которые способны обеспечить мощность от нескольких ватт до 10 кВт в течение многих лет работы следует рассматривать как перспективные ЯЭУ для ИСЗ и КА, хотя их стоимость гораздо выше, чем стоимость солнечных батарей с буферными химическими элементами [6].

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 1) Опишите принцип действия тросовых источников электроэнергии?
- 2) Какие бывают разновидности тросовых источников энергии?
- 3) Опишите принцип действия ядерного источника электроэнергии?

## 9. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

### 9.1. Общие положения

Анализ развития космической техники от первого спутника Земли до наибольшего на сегодняшний день сооружения в космосе, созданного человеком, международной космической станции (МКС), показывает, что, в зависимости от решаемых задач, космические аппараты используют и нуждаются в различных видах энергии [7]:

- 1) механической для перемещения в пространстве,
- 2) электрической для питания бортовой аппаратуры,
- 3) тепловой для обеспечения условий эксплуатации.

Учитывая свойство энергии трансформироваться из одного вида в другой, разнообразие первичных источников энергии и преобразователей в требуемый вид энергии, следует сказать, что современный космический аппарат - это комплекс энергетических устройств, которые можно структурировать по различным признакам. Одно из предложений по такой классификации приведено на рисунке 10.1.

В своих разработках ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»<sup>10</sup> с момента начала разработки и изготовления космической техники по сегодняшний день рассматривал к применению и использует в настоящее время широкий спектр энергетических устройств [7].

Коротко об основных направлениях.

Сжатые газы использовались на изделиях типа «Зенит» как рабочее тело в двигательных установках ориентации КА. Сегодня, в основном, сжатые газы используются для наддува, баков компонентов топлива двигательных установок, герметизации щели пленочного тракта после отделения спускаемой капсулы, наддува, баллонов пеленга.

Пружинистые механизмы используются для развертывания солнечных батарей, антенн, в толкателях различного назначения.

Маховики в свое время рассматривались в качестве буферных накопителей энергии для сильноточных систем, но практического применения в этом качестве не нашли, однако они нашли хорошее применение в гироскопах системы управления движением КА [7].

Направление источников энергии, использующих химические реакции веществ, можно разделить на источники генерации тепловой энергии и на источники электрохимической генерации электроэнергии.

В свою очередь, тепловая энергия может преобразоваться в механическую энергию движения КА (импульс тяги для перемещения КА в пространстве или изменении своего пространственного положения относительно центра масс) или преобразовываться в электрическую тем или иным способом. Как известно, первое направление широко используется на многих типах КА в виде пороховых ДУ, жидкостно-реактивных ДУ, пирочеках, пиротолкателях, обеспечивающих механическое перемещение центра масс КА или его составных частей относительно друг друга [7].

Применение тепловой энергии для ее преобразования в электрическую с использованием турбогенераторов, двигателей Стирлинга, термопреобразователей

---

<sup>10</sup> Более подробную информацию о разработках ЦСКБ-Прогресс можно найти в [7]

не нашло пока в космосе достойного применения, несмотря на обширные исследования, проводимые, в том числе, в ЦСКБ, а также в СГАУ [7].

Второе направление прямого преобразования химических реакций в электроэнергию представлено широким спектром гальванических элементов, аккумуляторных батарей и некоторыми типами топливных элементов или электрохимических генераторов [7].

В 1970-е годы в ЦСКБ рассматривалась возможность использования топливных элементов ( $H_2+O_2$ ) для КА типа «Янтарь» [7].

Несмотря на приемлемые энергетические параметры электрохимического генератора на кислородно-водородной паре, решить проблему компактного хранения потребного количества кислорода и водорода в течение более 30 суток не удалось, и чаша весов склонилась в пользу солнечных батарей и буферных аккумуляторных накопителей энергии. Основные типы химических источников тока (ХИТ) и солнечных батарей будут рассмотрены ниже [7].



Рисунок 10.1. Виды источников энергии, использование которых возможно для трансформации первичной энергии в требуемые для КА [7]

В части использования ядерных источников энергии можно сказать, что ЦСКБ тоже отдало дань моде, рассматривая для своих КА ДЗЗ возможность применения изотопных генераторов, ядерных реакторов с термоэмиссионным преобразованием энергии, ядерных реакторов с турбомашинным преобразованием тепловой энергии. Следует отметить, что в семидесятые годы анализ возможности использования различных энергоустановок на стадии технического предложения был обязателен, что поддерживало высокий профессиональный уровень сотрудников ЦСКБ [7].

Создание энергоустановок на базе термоядерных устройств или с использованием аннигиляции материи находится в области теоретических исследований и гипотез, но общение сотрудников ЦСКБ с такими выдающимися учеными, как А.П.Александров, Н.Н.Пономарев-Степной, Г.М.Грязнов, В.И.Сербин, показывало престижность работы в космической отрасли, вызывало гордость за предприятие [7].

Весомый вклад в развитие бортовой энергетики для КА нашей разработки внесли А.В.Чечин, В.М.Якунин, В.Н.Катков, А.Д.Сторож, В.Г.Шевельков, В.А.Яхин, В.В.Морев, А.С.Гуртов и другие [7].

В области использования энергии из внешней среды специалисты ЦСКБ остановились на применении фотопреобразователей, собранных в батареи на плоских панелях. Возможности использования других способов забора энергии из внешней среды остались на уровне дискуссий и рассуждений. Хотя по использованию концентраторов солнечной энергии было проведено несколько НИР и серьезных проработок конструктивного использования таких ЭУ [7].

Из всех известных видов энергии электрическая энергия наиболее универсальна. По сравнению с другими видами энергии, она имеет ряд преимуществ:

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

Обеспечение автономного полета космического аппарата (КА) невысказимо без применения электрической энергии. Электрическая энергия вырабатывается системой электропитания и используется для приведения в действие всех приборов, оборудования и механизмов [7].

Система электропитания (СЭП) относится к числу важнейших систем, обеспечивающих надежную работоспособность космических аппаратов [7].

Основными требованиями, предъявляемыми к СЭП, являются:

- 1) необходимый запас энергии для выполнения всей программы полета;
- 2) надежная работа, в том числе, при нештатных ситуациях;
- 3) способность работать в любом положении в пространстве и в условиях невесомости;
- 4) стабильность выходных параметров;
- 5) высокая устойчивость к изменениям потребляемой мощности и помехам, возникающим при работе бортовой аппаратуры;
- 6) минимальная масса и габариты.

Электрическая энергия, необходимая для выполнения программы полета, должна вырабатываться непосредственно на борту космического аппарата. Надежность системы электропитания обеспечивается как высокой надежностью

всех элементов, входящих в состав СЭП, так и их резервированием или дублированием [7].

Невесомость, возникающая в процессе движения КА вокруг Земли, 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 при наземной подготовке КА [7].

Как правило, системы электроснабжения КА являются системами постоянного тока. Это определено тем, что большинство первичных и вторичных источников, которые могут использоваться в космическом пространстве, являются источниками постоянного тока. В настоящее время для электропитания отдельных приборов КА, которые требуют однофазного или многофазного переменного тока, применяются специальные электронные преобразователи [7].

Первичный источник (рис. 10.2) преобразует какую-либо энергию (химическую, световую и т.д.) в электрическую и должен обеспечить работу потребителей во время полета [7].

Потребление электрической энергии в процессе штатной работы космического аппарата неравномерно. Для парирования пиков нагрузки и спадов мощности первичного источника на практике используют вторичные (буферные) источники [7].

Буферный источник характеризуется тем, что суммарная производимая им энергия равна нулю. Он заряжается во время малой нагрузки от сети и отдает энергию в сеть во время пиковой нагрузки. Обычно в качестве буферного источника используют аккумуляторные батареи, а также конденсаторы. При необходимости согласования характеристик аккумуляторной батареи с первичным источником и с сетью используют преобразователи (рисунок 10.2). В первом случае это зарядное устройство, во втором - стабилизатор напряжения, обеспечивающий стабильность напряжения в сети при изменении напряжения аккумулятора [7].

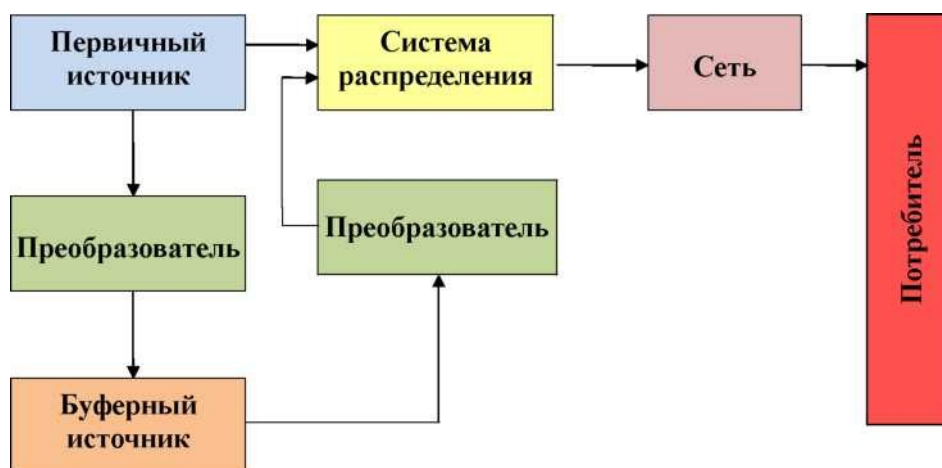


Рисунок 10.2. Типовая структура системы электроснабжения КА [7]

Произведенная электрическая энергия должна быть доставлена потребителю в нужном количестве и в нужное время с необходимым качеством. Эти задачи решаются системой трансляции команд и распределения питания (СТКРП), а также электрической сетью. Система трансляции команд и распределения питания подключает потребитель к соответствующему источнику, обеспечивает резервирование (если это необходимо) и выключает автоматически или по разовым

командам, выдаваемым с наземного комплекса управления, если потребитель неисправен. Техническая реализация этих процессов осуществляется с помощью коммутационной и защитной аппаратуры [7].

Доставка электроэнергии потребителю происходит через электрическую сеть, которая должна быть минимальна по массе, но в то же время иметь малые потери электроэнергии и обеспечивать надежное соединение потребителя и источника. Так как на КА используется низковольтная аппаратура, то бортовая кабельная сеть по причине протекания в ней относительно больших токов имеет значительную массу [7].

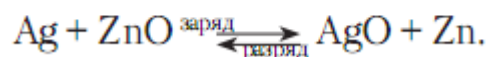
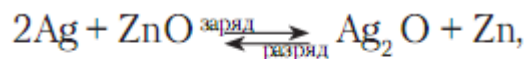
## 9.2. Поколения систем электропитания космических аппаратов

### 9.2.1. Системы электропитания первого поколения

В 60-е годы прошлого столетия Централизованным специализированным конструкторским бюро проводилась разработка КА на малый срок эксплуатации (до 15 суток). В системах электропитания таких КА, как «Зенит», «Бион», «Фотон», «Ресурс-Ф1» и др., в качестве первичного источника энергии применялись химические источники тока, как правило, на основе серебряно-цинковых (СЦ) аккумуляторов [7].

Серебряно-цинковые аккумуляторы относятся к классу щелочных аккумуляторов с отрицательным цинковым электродом. Положительным электродом является окись серебра. Электролитом служит водный раствор химически чистого едкого калия [7].

Токообразующая реакция в серебряно-цинковом аккумуляторе может быть представлена следующими уравнениями [7]:



При заряде аккумуляторов положительные серебряные электроды окисляются до полуокиси ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ) и частично до окиси ( $\text{AgO}$ ), на отрицательных - происходит восстановление окиси цинка ( $\text{ZnO}$ ) до металлического цинка ( $\text{Zn}$ ). При разряде указанные электрохимические процессы идут в обратном направлении. Помимо основных реакций при работе и хранении серебряно-цинковых аккумуляторов, возможно протекание ряда побочных реакций [7].

Одна из побочных реакций - саморастворение металлического цинка (коррозия), сопровождающееся выделением газообразного водорода. Выделение водорода увеличивается с ростом температуры, а именно:

- при температуре  $0^\circ\text{C}$  выделяется 0,13 мл в сутки с одного ампер-часа емкости аккумулятора;
- при температуре  $20^\circ\text{C}$  - (0,3 - 0,4) мл;
- при температуре  $40^\circ\text{C}$  - 2 мл.

СЦ-аккумуляторы обладают замечательным свойством: у них очень малое (порядка 0,05 Ом) внутреннее сопротивление и, как следствие, стабильная (пологая) вольтамперная характеристика (ВАХ) в широком диапазоне токовых нагрузок. Это свойство позволило использовать серебряно-цинковые аккумуляторы наряду с основной функцией в качестве стабилизаторов выходного напряжения СЭП [7].



Другими достоинствами серебряно-цинковых аккумуляторов являются [7]:

- высокая плотность энергии - до 130 Вт·ч/кг;
- возможность разряда большими токами (до 30 А);
- отсутствие выделения и поглощения газов в процессе токообразующей реакции;
- возможность изготовления аккумуляторов в герметичном исполнении;
- незначительное тепловыделение (до 10 Вт).

Подтвержденная при многолетней эксплуатации КА высокая надежность СЦ-батарей обеспечивается строгим соблюдением технологических процессов на всех стадиях изготовления и подготовки батарей к эксплуатации. Подготовка СЦ-батарей для КА осуществляется на зарядноаккумуляторных станциях (ЗАС).

Основная причина, по которой серебряно-цинковые аккумуляторные батареи (СЦАБ) нашли практическое применение в космической технике - это их легкий вес, по сравнению со свинцовыми и другими типами АБ, освоенными на то время в СССР [7].

К недостаткам серебряно-цинковых аккумуляторов относятся малый срок службы (до 180 суток) и высокая стоимость, а также наличие двух стадий протекания химической реакции токообразования. По этой причине ВАХ СЦАБ имеет участок, где происходит скачкообразное изменение напряжения как при заряде, так и при разряде (рисунки 10.3, 10.4) [7].

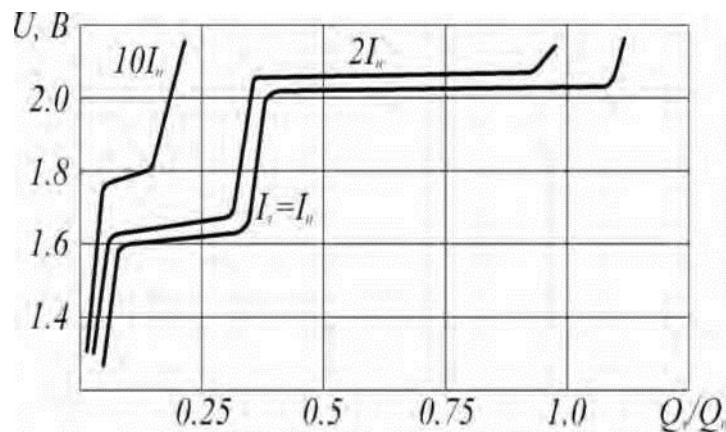


Рисунок 10.3. Зарядные характеристики при различных токах заряда

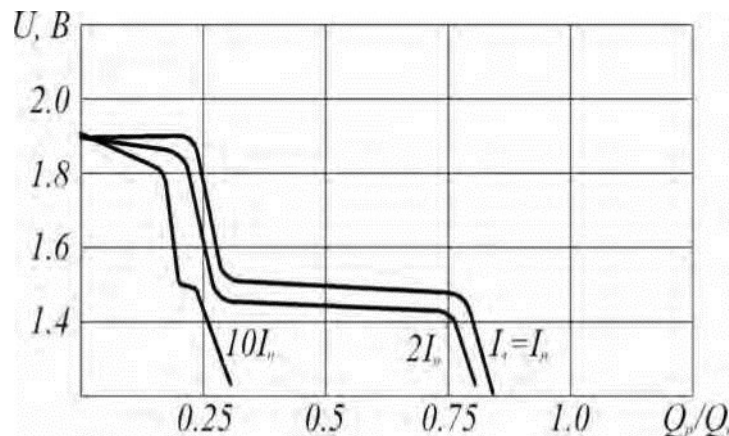


Рисунок 10.4. Разрядные характеристики при различных токах разряда [7]

В составе блоков ХИТ серебряно-цинковые аккумуляторы соединяются последовательно [7].

Предприятием-разработчиком химических источников тока на базе серебряно-цинковых аккумуляторов для КА, изготавливаемых в ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», до настоящего времени является ОАО «НПП «Квант», г. Москва. ХИТ на базе серебряно-цинковых аккумуляторов, применяемые в составе СЭП КА «Бион» и «Фотон», работают только в режиме разряда. Количество блоков ХИТ выбирается в зависимости от величины емкости, потребляемой бортовой аппаратурой (БА), и допустимого тока разряда каждого ХИТ. Структурная схема СЭП первого поколения приведена на рисунке 10.5 [7].

Система электропитания первого поколения отличается простотой и высокой надежностью. Она, как правило, состоит из блока ХИТ 1 и коммутационной аппаратуры 2. Потребители 3 включаются к блоку ХИТ 1 параллельно. Стабилизатор выходного напряжения СЭП является блок ХИТ 1, так как СЦАБ имеют, как было сказано выше, вольтамперную характеристику, удовлетворяющую требованиям по допустимому диапазону изменения выходного напряжения СЭП при заданных токах нагрузки. Срок активного существования КА определяется суммарной начальной емкостью блока ХИТ. Для контроля напряжения ХИТ и токов их разряда применяются датчики напряжения и тока прибора контроля сети (ПКС). Для обеспечения надежности СЭП в ее составе применяются резервные батареи, которые подключаются вместо основных при их глубоком разряде по сигналу датчика минимального напряжения [7].

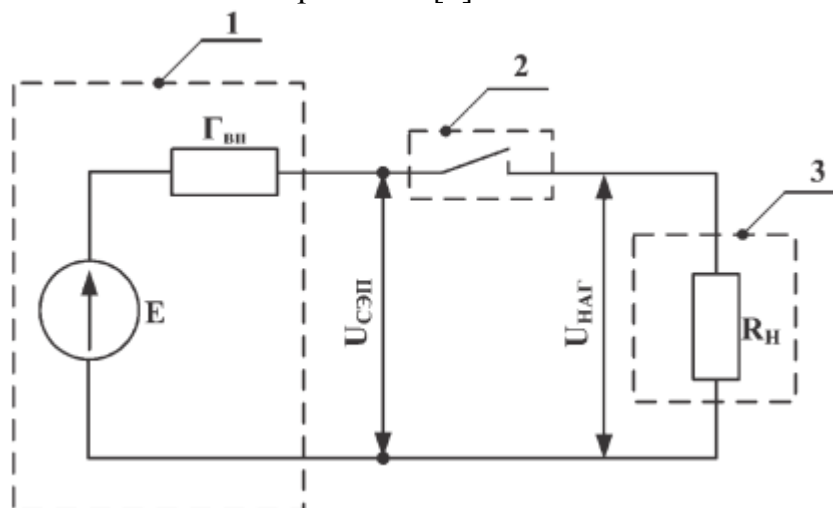


Рисунок 10.5. Упрощенная структурная схема СЭП первого поколения [7]

По конструктивно-компоновочной схеме КА «Бион» и «Фотон» ХИТ устанавливаются в герметичных отсеках. Для обеспечения технологического плана подготовки данных КА к запуску химические источники тока должны устанавливаться на начальном цикле работ. С целью сокращения цикла подготовки данных космических аппаратов были применены серебряно-цинковые батареи, поставляемые в сухозаряженном исполнении (без электролита), т.е. с электродами из окиси серебра, сформированными на заводе-изготовителе. После заливки электролита эти батареи готовы к эксплуатационному разряду без проведения заряда [7].

Понятие емкости аккумуляторной батареи (аккумулятора) введено в электротехнике для оценки потенциальной энергии АБ. Измерение ее в ампер-часах (А-ч) позволяет достаточно удобно определить время работы АБ в режиме

разряда при известных значениях тока и напряжения нагрузки. Размерность емкости АБ в системе СИ есть кулон (Кл), т.е. размерность электрического заряда. В то же время известно, что классическая аккумуляторная батарея заряда на электродах не накапливает. Так как емкость батареи равна емкости одного аккумулятора батареи, то фактически это означает следующее: если по паспорту аккумуляторная батарея имеет номинальную емкость, равную 60 А·ч, то активная часть одного из электродов аккумулятора содержит  $n$  валентных электронов с суммарным зарядом  $Q$ , причем [7]:

$$Q_{\text{сум}} = 3600 \cdot 60 = 2160000 \text{ Кл,}$$

где

3600 - количество секунд в 1 часе,

60 - номинальная емкость АБ в А · ч.

Следовательно, емкость аккумулятора данной аккумуляторной батареи в системе СИ составляет 2,16 МКл. Однако на практике пользоваться такими величинами крайне сложно [7].

Емкость сухозаряженных серебряно-цинковых батарей КА «Зенит», «Бион» и «Фотон» в процессе их постоянной модернизации специалистами ГНПП «Квант» и ОАО «Электроисточник» при участии специалистов ЦСКБ (В.А.Яхина, А.М.Черновой, В.В.Морева и др.) была доведена с 70 до 165 А · ч без увеличения габаритов и массы блоков. За все время производства и эксплуатации изделий «Зенит», «Бион», «Фотон» было изготовлено более 780 систем электропитания 1-го поколения, которые выполнили свою задачу без замечаний, что убедительно подтверждает высокую надежность подобных СЭП. Тем не менее, успешно применяемая система электропитания являлась узким местом, сдерживающим проектирование новых космических аппаратов с длительным сроком активного существования [7].

На многих КА разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» для электропитания автономных систем применялись автономные химические источники тока (АХИТ). В качестве АХИТ на КА типа «Зенит», КС «Ресурс» применялись серебряно-цинковые батареи - сначала наливные, заливаемые электролитом и заряжаемые на зарядной аккумуляторной станции непосредственно перед эксплуатацией, а в последующем - сухозаряженные, требующие только заливки электролита. АХИТ на базе СЦ-батарей имеют ограниченный срок хранения в залитом заряженном состоянии, поэтому с увеличением сроков существования КА с 15 до 30 суток и более потребовались для электропитания автономных систем и АХИТ с большим сроком хранения. В качестве таких АХИТ были разработаны и применены батареи [7]:

- на базе ртутно-цинковых элементов (11М043, 17М039), имеющих срок сохранности от 2,5 до 5 лет. Батарея 11М043 применялась в качестве источника электропитания потенциометров обратной связи приводов БС изделий типа «Янтарь», но с увеличением срока штатной работы КА до 5 лет по весогабаритным характеристикам их применение стало нецелесообразным, и они были заменены на электронные источники питания. Батарея 17М039 была разработана для электропитания средств поиска малогабаритной капсулы (УМСК) и впоследствии заменена на более перспективную литиевую батарею 14М01;
- на базе серебряно-кадмиевых аккумуляторов (батареи 27СКГ-3, 27СКГ-6, 27СКГ-12), имеющих срок сохранности от 100 суток до года, в зависимости от режима работы в составе КА;

- на базе никель-кадмиевых аккумуляторов (26НКМ-1, 26НКМ-5, 24НКМ-7А) постоянной готовности, имеющих срок сохранности до 11 лет;
- на базе литиевых тионил-хлоридных аккумуляторов (батарея 14М01, предназначенная для электропитания средств поиска малогабаритной капсулы;

8ТХЛА-250, а также автономных систем КА «Бион» и «Фотон»; 9ER20PSB-12, используемая для электропитания систем разгонного блока «Волга»), имеющих срок сохранности от 100 суток до 3 лет в залитом электролитом состоянии [7].

В настоящее время рассматривается вопрос по обеспечению электропитания автономных систем с помощью литий-ионных аккумуляторных батарей, имеющих высокие удельные характеристики, большой срок сохранности, а главное, позволяющих восполнять емкость батареи в случае ее израсходования в процессе подготовки КА к штатной работе [7].

### 9.2.2. Системы электропитания второго поколения

В конце 1960-х годов появилась необходимость создания КА со сроками работы 30 суток и более. На таких КА применять в составе СЭП в качестве первичного источника тока блоки ХИТ было нецелесообразно, так как в этом случае пришлось бы резко увеличивать количество блоков ХИТ для обеспечения питания БА в течение относительно длительного срока эксплуатации, а значит, и вес СЭП [7].

Для обеспечения электрической энергией систем КА при длительных сроках эксплуатации в составе СЭП в качестве первичного источника энергии применяются батареи солнечные (БС).

Преобразование энергии Солнца в электрическую энергию осуществляется с помощью полупроводниковых преобразователей. В качестве генерирующих фотопреобразователей (ФП) в составе солнечных батарей многих типов КА применялись кремниевые ФП разработки ОАО «НПП «Квант», г. Москва [7].

Батареи солнечные КА представляют собой сложные электромеханические устройства, обеспечивающие электрическое соединение ФП, их размещение на единой несущей основе, прочность и устойчивость всей конструкции, возможность раскрытия и ориентации в условиях космоса, а при необходимости и отделение БС от КА [7].

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 в том месте пространства, где проходит траектория полета КА [7].

Наибольший практический интерес для разработчиков СЭП КА представляют энергетические характеристики. Энергетические характеристики это зависимость плотности потока солнечного излучения от длины волны и расстояния до Солнца на поверхность, перпендикулярную потоку солнечного света (рис. 10.6).

Основная часть энергии Солнца (более 75 %) приходится на короткую часть спектра - синюю и ультрафиолетовую (0,25-1,0 мкм). Другая (красная и инфракрасная) часть солнечного спектра (1,0-4,0 мкм), обладая малой энергией фотонов, не способна создавать фототок в ФП, но ведет к нагреву солнечных батарей, поэтому от нее стараются избавиться. На первых солнечных батареях, применяемых в качестве первичного источника в составе СЭП серийных КА,

использовалось защитное покрытие синего цвета, не пропускающее красную и инфракрасную части спектра [7].

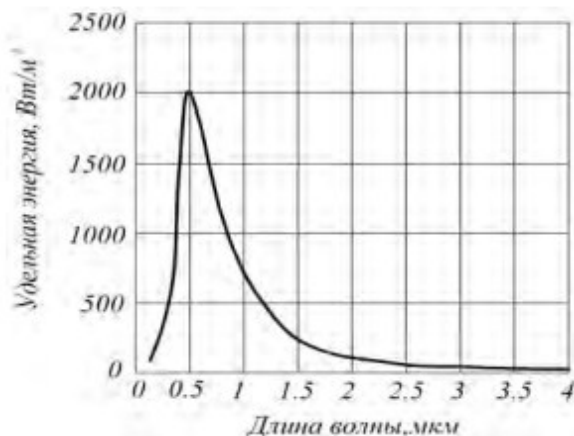


Рисунок 10.6. Спектральная характеристика солнечного излучения

В настоящее время кремниевые фотопреобразователи делаются прозрачными для этой части спектра солнечного света, по крайней мере, для красной части спектра, чтобы уменьшить нагрев ФП [7].

Необходимо отметить, что солнечное излучение - это единственный внешний первичный источник, энергия которого может быть непосредственно преобразована во все полезные виды энергии [7].

В качестве преобразователя световой энергии в электрическую наибольшее распространение получили преобразователи на основе *p-n*-перехода, изготавливаемые из кремния. Фотоэлектрический преобразователь представляет собой плоскую пластину прямоугольной формы. В основе ФП лежит *p-n*-переход, образуемый соответствующими полупроводниковыми пластинами.

На рисунке 10.7 показаны теоретическая (1) и реальная (2) вольтамперные характеристики кремниевого ФП [7].

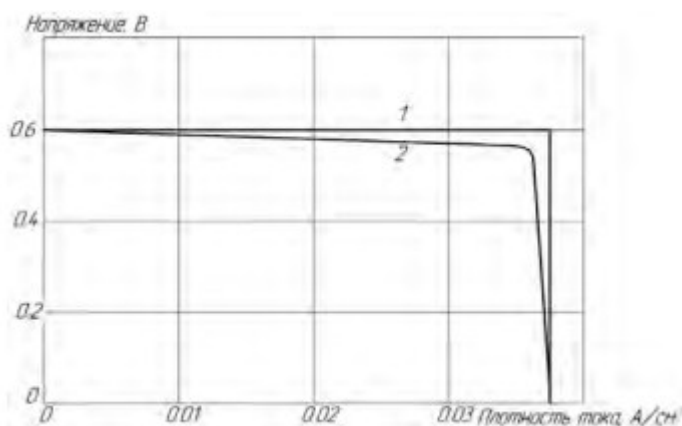


Рисунок 10.7. Вольтамперные характеристики кремниевого ФП

Применительно к системе электропитания КА вместо термина «батарея солнечная» практичнее пользоваться термином «батарея фотоэлектрическая», поскольку термин «батарея солнечная» ближе к классу конструкций и механизмов. В дальнейшем по тексту будет использован в основном термин «батарея фотоэлектрическая» (БФ) [7].

Для питания БА на освещенных участках орбиты используется энергия, получаемая от БФ, а на теневых участках орбиты и при недостатке мощности БФ на световых участках орбиты в составе СЭП используются вторичные источники энергии. Заряд вторичных источников энергии осуществляется от БФ на освещенных участках орбиты [7].

В качестве вторичного источника энергии на КА второго поколения, разрабатываемых в ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», применены серебряно-цинковые аккумуляторные батареи. Благодаря достоинствам СЦ-батарей, приведенным выше, в составе данных СЭП используется простая контрольно-регулирующая аппаратура, отключающая заряд аккумуляторных батарей от БФ по напряжению. Подключение заряда осуществляется либо по временной уставке, либо по заданной величине разрядной емкости, контролируемой счетчиками ампер-часов (САЧ). В настоящее время аналогичные СЭП устанавливаются на КА «Фотон-М», «Бион-М» и др. [7].

На рисунке 10.8 представлена БФ на основе кремниевых ФП. Для обеспечения необходимой энергией на теневых участках орбиты аккумуляторные батареи в составе СЭП подключаются параллельно и работают в буферном режиме [7]:

- АБ разряжаются на теневых участках орбиты или при мощности нагрузки выше мощности БФ на световых участках орбиты;
- АБ заряжаются на световых участках орбиты при мощности БФ выше мощности нагрузки.

При работе АБ в буферном режиме ее напряжение изменяется от значения, характерного для разряда АБ, до значения, характерного для их заряда [7].

Серебряно-цинковые аккумуляторные батареи (СЦАБ) боятся как перезаряда, так и переразряда, поэтому в СЭП предусматривается соответствующая защита по предотвращению этих режимов путем отключения АБ от заряда или уменьшения токов разряда [7].

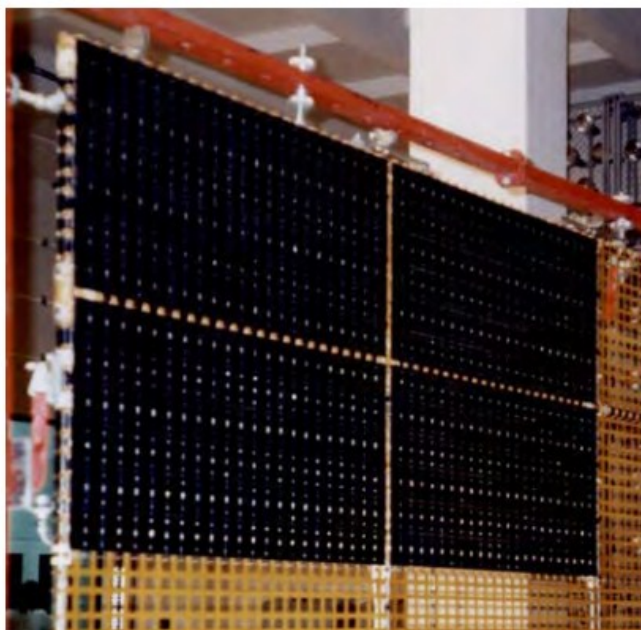


Рисунок 10.8. Батарея фотоэлектрическая на основе кремниевых ФП [7]

Аккумуляторная батарея на основе серебряно-цинковых элементов представлена на рисунке 10.9 [7].



Рисунок 10.9. Блок на основе серебряно-цинковых аккумуляторов

Для обеспечения зарядно-разрядных режимов СЦАБ в составе СЭП применяются приборы автоматики [7]:

- блок контроля источников питания (БКИП);
- счетчик ампер-часов (САЧ);
- блок коммутации системы электропитания (БКСЭП).
- БКИП предназначен для контроля:
- напряжения АБ и выдачи в БКСЭП управляющих сигналов (УС) при определенных (пороговых) значениях напряжения для проведения операций по управлению режимами заряда и разряда АБ;
- телеметрического контроля напряжения на выходе СЭП.
- САЧ предназначен для контроля:
- глубины разряда АБ и выдачи УС в БКСЭП при определенной глубине разряда АБ для проведения операций по управлению режимами заряда и разряда АБ;
- телеметрического контроля глубины разряда АБ.

БКСЭП предназначен [7]:

- для образования шин питания и обеспечения их электрической связи с источниками тока;
- для обеспечения нормальной работы АБ в зарядно-разрядных режимах;
- для обеспечения связей СЭП с СТКРП и выполнения операций по внутренней логике СЭП и командам КИС (командно-измерительной системы);
- для организации телеметрического контроля токов БФ, нагрузки;
- для выдачи сигналов в БВС о состоянии СЭП.

Управление зарядно-разрядными режимами АБ осуществляется по внутренней логике работы СЭП.

Отключение АБ от заряда (от БФ) происходит по сигналу прибора Б КИП при достижении напряжения на выходе АБ порогового значения или по разовой команде [7].

Подключение АБ на заряд (к БФ) осуществляется [7]:

- по временному признаку (по сигналу реле времени прибора БКСЭП через определенное время после отключения АБ от заряда);
- по сигналу прибора САЧ при определенной глубине разряда АБ;
- по сигналу прибора БКИП при достижении напряжения на выходе АБ порогового значения;
- по разовой команде.

Подключение АБ на заряд по одному из перечисленных признаков применяется с целью повышения надежности СЭП [7].

С целью исключения взаимовлияния БА и обеспечения требуемого качества электропитания система электропитания второго поколения выполнена с образованием двух шин питания. К одной шине, как правило, подключаются системы с большими импульсными токами потребления, не требующие высокой стабильности напряжения питания, а к другой шине - потребители, требующие высокого качества электропитания.

На рисунке 10.10 приведена структурная схема СЭП второго поколения [7].

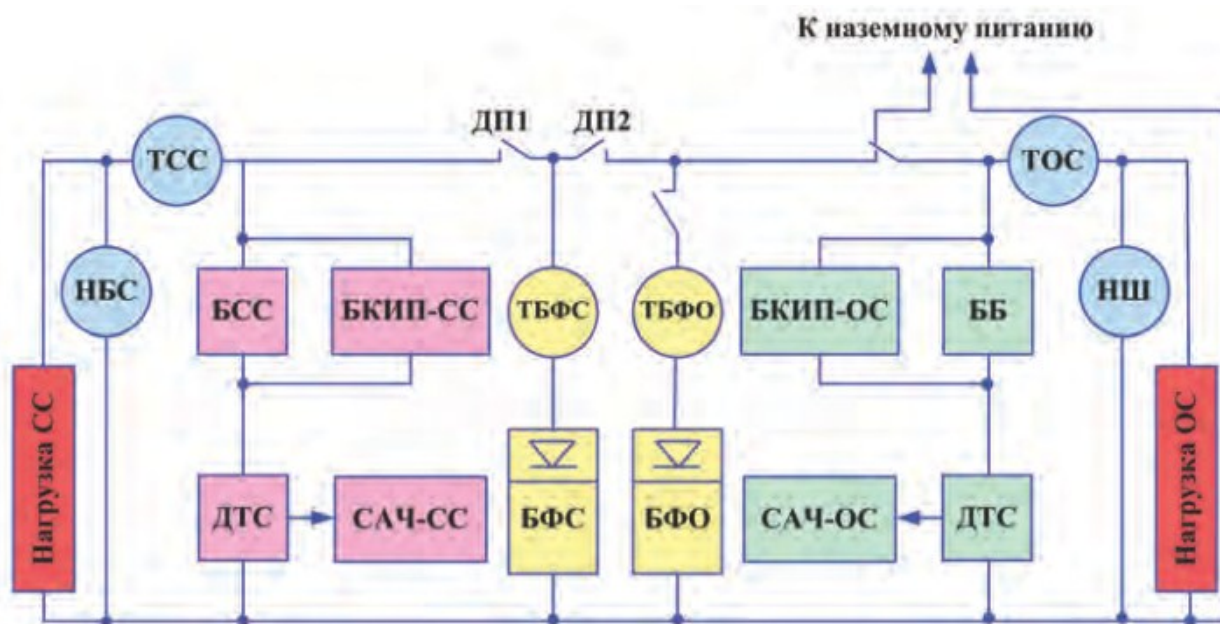


Рисунок 10.10. Структурная схема СЭП второго поколения [7]

В разработке, экспериментальной отработке, испытаниях, при подготовке и штатной эксплуатации данных систем электропитания активное участие принимали А.В.Чечин, В.М.Якунин, В.Ф.Акимов, В.И.Пушкин, Д.Сторож, В.А.Яхин, В.С.Томина, А.С.Гуртов, С.И.Миненко, Н.И.Рябова, С.Молчанов, Н.Г.Бударева, Н.Г.Половнева, С.Н.Морозов и многие другие специалисты отдела разработки СЭП [7].

Для обеспечения высокой надежности электропитания в СЭП могут применяться резервные источники тока. На КА «Ресурс-Ф1» и ряде других в качестве резервных источников тока применяются резервные батареи на базе СЦ-



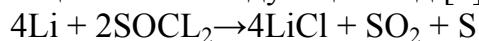
аккумуляторов повышенной емкости. На КА типа «Бион-М» и «Фотон-М» в качестве резервных источников тока применены литиевые батареи однократного разряда [7].

Литиевые химические источники тока обладают наибольшей теоретической удельной энергией среди известных электрохимических систем. Например, батарея на основе гальванических пар литий-фторуглерод имеет удельную теоретическую энергию, равную 2435 Вт-час/кг. Однако практическая удельная энергия литиевых химических источников тока, как и других типов ХИТ, значительно меньше теоретической, поскольку массы конструкции батареи, электролита и сепаратора существенно снижают этот показатель [7].

В космической технике используются литиевые батареи на основе гальванических пар с литиевым анодом-литий-тионилхлорид (SOC1). Практическая удельная энергия этих ХИТ достигает до 400 Вт-час/кг.

Литий относится к щелочным металлам и обладает высочайшей химической активностью. Поэтому все работы с ним проводят в специальных боксах с сухой инертной атмосферой (аргон, углекислый газ) [7].

Токообразующая реакция имеет следующий вид [7]:



Электролиты для работы с литиевым электродом должны готовиться на основе специально подобранных материалов с повышенной химической стабильностью, не вступающих в химическую реакцию с материалами электродов.

Элементы литиевых батарей изготавливаются как в залитом заряженном исполнении, так и в «сухом» состоянии. Залитые литиевые батареи имеют ограниченные сроки хранения. Не залитые батареи лишены этого недостатка, но требуют специального оборудования для заправки элементов электролитом [7].

В разработке, отработке, эксплуатации литиевых батарей и в создании оборудования для их заправки и проверки активно участвовали А.Д. Сторож, В.И. Пушкин, А.С. Гуртов, И.З. Кочетков, О.Л. Филатова, В.М. Дмитриев, В.А. Яхин и др. [7].

Рассмотренные системы электропитания нашли практическое применение на многих КА разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и подтвердили свою высокую надежность в эксплуатации. За все время штатной эксплуатации серийных более 190 космических аппаратов не было зафиксировано ни одного случая отказа СЭП второго поколения [7].

### 9.2.3. Системы электропитания третьего поколения

Система электропитания современных космических аппаратов значительно отличается от систем электропитания первого и второго поколений, разработанных ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и успешно эксплуатируемых с начала 1970-х годов. Существенное влияние на изменение облика СЭП оказало требование по увеличению срока активного существования вновь разрабатываемых КА до трех и более лет [7].

Действительно, для СЭП со сроком активного существования более одного года в качестве буферных аккумуляторных батарей не могут быть использованы серебряно-цинковые аккумуляторные батареи из-за их малого циклического ресурса работы. Уязвимым местом СЦАБ является сепаратор, который при длительной работе или засоряется, образуя проводящие мостики, или разрушается механически. Из-за этого СЦ-батареи имеют ограниченное количество зарядно-

разрядных циклов. Поэтому в СЭП КА с длительными сроками эксплуатации применяют другие типы аккумуляторных батарей на базе никель-кадмиевых герметичных аккумуляторов или никель-водородных аккумуляторов. Напряжение данных типов аккумуляторных батарей изменяется в широких пределах в процессе их заряда и разряда. Батареи требуют индивидуальных средств контроля и управления зарядом и разрядом, имеют значительное тепловыделение и саморазряд.

В процессе длительной эксплуатации в условиях космического пространства также изменяются и параметры фотопреобразователей батареи фотоэлектрической (БФ) в результате их постепенной деградации от воздействия факторов космического пространства. Это также предъявляет совершенно иные требования в части выбора как проектных параметров БФ, так и логики управления режимом ее работы в составе СЭП КА [7].

Системы электропитания третьего поколения КА обязательно содержат в своем составе комплекс автоматики и стабилизации напряжения (в дальнейшем по тексту КАС) или иной аналогичный электронный прибор. Основной задачей КАС является стабилизация выходного напряжения СЭП, а также управление режимами работы БФ и АБ [7].

В конце 1980-х и начале 1990-х годов, когда в ГНПРКЦ «ЦСКБ- Прогресс» началось проектирование новых космических аппаратов со сроком активного существования более двух лет, в качестве вторичных источников питания можно было рассматривать только никель-кадмиевые или никель-водородные аккумуляторные батареи. Другие типы аккумуляторных батарей по своим техническим характеристикам не обеспечивали выполнения жестких требований, предъявляемых к системам электропитания КА разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» [7].

Никель-кадмиевые аккумуляторы обладают энергетической плотностью 25-40 Вт·ч/кг и относятся к классу щелочных АБ. В качестве электролита, как правило, в них используется щелочной раствор КОН. Они имеют большой ресурс (несколько тысяч зарядно-разрядных циклов), компактны и сравнительно просты в обращении. Отдельные разновидности никель- кадмиевых аккумуляторных батарей (НКАБ) могут разряжаться большими токами, соответствующими значению плотности тока до 5 к А/м<sup>2</sup>, возможно изготовление полностью герметизированных вариантов, допускающих работу в любом положении. Все эти преимущества позволяют использовать НКАБ в космической технике.

К числу недостатков НКАБ следует отнести то, что во время длительной работы электроды «стареют», и их характеристики ухудшаются. Кроме того, у НКАБ ярко выражен «эффект памяти» [7].

На одном из КА, разработка которого велась в 1980-е годы, были применены НКАБ, разработанные в НИИ «Источник» (г. Санкт-Петербург) на базе аккумуляторов НКГ-90СА, фотоэлектрические батареи с арсенид-галлиевыми ФП, разработанными в НПП «Квант», автоматика регулирования и контроля, разработанная в ХЗЭА (г. Харьков). Система электропитания данного КА прошла полный цикл наземной экспериментальной отработки, в процессе которой были выявлены ее достоинства и недостатки [7].

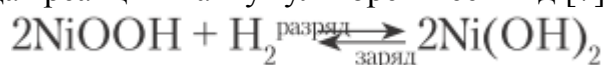
К тому моменту, когда ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» приступил к проектированию совершенно новых космических аппаратов с длительным сроком активного существования, в Советском Союзе уже были разработаны для промышленного использования никель-водородные аккумуляторные батареи

(НВАБ) для космических аппаратов с длительными сроками работы на геостационарных орбитах. Передовые позиции по разработке и изготовлению НВАБ, используемых в космической технике, занимало предприятие «Сатурн» (г. Краснодар). Специалисты нашего предприятия по СЭП отдали предпочтение никель-водородным аккумуляторным батареям и, как показала практика, не ошиблись [7].

По техническому заданию, разработанному специалистами отдела 501, в 1997 году начались интенсивные работы по модернизации и адаптации НВАБ для КА «Ресурс-ДК1», а спустя еще два года приступили к разработке НВАБ для вновь разрабатываемых КА с улучшенными характеристиками [7].

В никель-водородных аккумуляторах используется положительный электрод от никель-кадмиевых аккумуляторов (гидроокись трехвалентного никеля NiOOH), отличающийся хорошей обратимостью. Отрицательным электродом служит водородный электрод на основе платинового катализатора.

Токообразующая реакция в аккумуляторе имеет вид [7]:



Данная химическая реакция обратима, а также окислительно-восстановительная. При заряде выделяется водород, который накапливается под давлением; при разряде водород расходуется, и давление его уменьшается.

Было обнаружено, что водород, даже под давлением, лишь очень медленно взаимодействует с заряженным окисноникелевым электродом, поэтому не требуется принятия специальных мер для пространственного разделения водорода и окисноникелевого электрода, т.е. весь электродный блок может быть помещен в стальной баллон, внутри которого водород накапливается [7].

Стальные баллоны тяжелы, и их масса заметно снижает удельные характеристики НВАБ. Для облегчения доступа и отвода водорода применяется не свободный жидкий, а матричный электролит; 30%-ный раствор KOH находится в порах асбестовой или другой пористой матрицы-электролитоносителя, а также в порах электродов [7].

Особенностью водородного электрода является то, что он работает при переменном давлении газа - в начале разряда оно максимально, а в конце минимально [7].

Никель-водородный аккумулятор допускает перезаряд без опасности выхода из строя. После окончания заряда положительного окисно-никелевого электрода на нем начинается анодный процесс выделения кислорода. Через газовые поры в матрице кислород легко поступает на водородный электрод и там каталитически соединяется с водородом с образованием воды. Единственным результатом такого перезаряда является значительное выделение тепла. Давление водорода достигает некоторого стационарного значения и дальше в результате взаимодействия водорода и кислорода не возрастает [7].

Никель-водородный аккумулятор - один из немногих химических источников тока, которые при эксплуатации в составе батарей не боятся перерезаряда и переполюсовки. Ограничителем емкости при разряде делают положительный электрод; при его полном разряде в баллоне остается некоторое остаточное давление водорода. При перерезаряде положительного электрода на нем начинается катодное выделение водорода и происходит переполюсовка аккумулятора. Количество образующегося на катоде водорода соответствует водороду вступающему в реакцию на аноде; таким образом, давление газа дальше

не меняется. Выделение водорода на окиснони- келевом электроде не вызывает его порчи [7].

Указанные свойства никель-водородных аккумуляторов - нечувствительность к перезаряду и переразряду - имеют большое значение для использования их в системах электропитания космических аппаратов, так как упрощают эксплуатацию аккумуляторных батарей и делают их безопасной.

На КА «Ресурс-ДК1», а также других аппаратах с большим сроком активного существования разработки нашего предприятия применены аккумуляторные батареи типа 28НВ-70; цифра 28 означает количество аккумуляторов, а цифра 70 - номинальную емкость [7].

Среднее напряжение разряда у этих АБ равно 1,24-1,27 В, а конечное напряжение заряда составляет 1,56-1,59 В. Удельная энергия достигает до 70 Вт·ч/кг. Удобным для эксплуатации аккумуляторных батарей является то, что посредством измерения давления газа в баллоне легко определить степень заряженности аккумулятора [7].

Основными преимуществами НВАБ являются герметичность, простота и надежность в эксплуатации, высокий ресурс и срок службы при относительно высоких удельных характеристиках. К числу недостатков следует отнести относительно высокий саморазряд - до 5 % в сутки [7].

У истоков разработки СЭП третьего поколения стояли А.В.Чечин, В.Ф.Акимов, В.И.Пушкин, В.Г.Шевельков, Б.В.Ларюхин, А.Н.Филатов, А.С.Гуртов, С.И.Миненко, В.Н.Фомакин, В.С.Томина и многие другие специалисты. Модернизацией и эксплуатацией СЭП третьего поколения для перспективных космических аппаратов вместе с кадровыми сотрудниками отдела разработки СЭП занимаются и молодые специалисты [7].

В ближайшей перспективе никель-водородные аккумуляторные батареи, используемые в космической технике, постепенно будут вытесняться литий-ионными аккумуляторными батареями (ЛИАБ). Последние привлекательны тем, что имеют высокие удельные характеристики, а, следовательно, малые габариты и массу. Энергетическая плотность ЛИАБ достигает практически до 400 Вт·ч/л или 180-200 Вт·ч/кг. Существенное увеличение энергетической плотности достигается за счет использования в качестве одного из электродов соединения лития, являющегося активным восстановителем - щелочным металлом. При этом во внутренней цепи ЛИАБ электрический ток образуется за счет направленного движения ионов лития, имеющих весьма «малые» размеры. Поэтому в качестве сепаратора достаточно использовать тончайший слой специального твердого материала, равномерно заполняющего пространство между электродами. Сепаратором, как правило, служит тонкая пластмассовая пластинка с микроскопическими отверстиями. В соответствии со своим названием эта пластинка разделяет положительный и отрицательный электроды, но свободно пропускает ионы лития [7].

В качестве активного материала положительного электрода используются оксиды кобальта (кобальтиды). Литерованный кобальтид имеет потенциал около 4 В относительно литиевого электрода, поэтому рабочее напряжение литий-ионного аккумулятора имеет значение 3 В и выше. При разряде литий-ионного аккумулятора происходит уменьшение количества ионов лития в отрицательном электроде и накопление их в положительном электроде. При заряде аккумулятора процессы идут в обратном направлении. Следовательно, во всей системе отсутствует металлический (нуль-валентный) литий, а процессы разряда и

заряда сводятся к переносу ионов лития с одного электрода на другой. Поэтому принцип работы ЛИАБ напоминает принцип работы конденсаторной батареи; этим они существенно отличаются от классических аккумуляторных батарей и в идеале не имеют ограничений по циклическому ресурсу. Отсутствие в ЛИАБ металлического лития позволило создать аккумуляторные батареи, безопасные в работе и по своим техническим характеристикам весьма привлекательные для использования в космической технике [7].

В ЛИАБ отрицательный электрод изготавливается из углеродных материалов, в том числе, из чистого графита, а в качестве катодных материалов все чаще применяются материалы на основе смешанных оксидов или фосфатов, что значительно улучшает их технические характеристики и безопасность эксплуатации. Эти и другие специфические особенности ЛИАБ позволяют располагать электроды очень близко друг к другу. Для этого на медную или алюминиевую фольгу наносят тонкий слой активной массы электродов, т.е. формируют электроды, затем накладывают их друг на друга, размещая между ними сепаратор, после этого собирают элемент в виде многослойной цилиндрической конструкции. По специальной технологии вводят вовнутрь аккумулятора электролит, в качестве которого чаще всего используется тионил хлорида. Благодаря использованию сложнейшей нанотехнологии удается получить сплошные электроды большой площади, следовательно, и большой емкости. Далее варьируя сочетанием последовательно и параллельно соединенных элементов, получают аккумуляторные батареи с заданными параметрами [7].

Литий-ионные аккумуляторные батареи имеют достаточно пологие вольтамперные характеристики как при заряде, так и при разряде. Недостатком ЛИАБ является то, что они очень чувствительны к перезарядам и переразрядам, из-за чего они должны иметь специальную автоматику для контроля и ограничения уровней заряда и разряда. В настоящее время практическое использование ЛИАБ в СЭП планируется на малых космических аппаратах и, скорее всего, в перспективе все КА разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» будут оснащены ими [7].

Для проведения летной квалификации этих аккумуляторных батарей в условиях космического пространства на низких околоземных орбитах на КА «Бион-М», запуск которого планируется в 2012 году, будет установлена экспериментальная система на базе ЛИАБ [7].

Альтернативными вторичными источниками тока являются электромашинные преобразователи, использующие кинетическую энергию вращающихся масс, - маховичные накопители [7].

В рамках выполнения научно-исследовательских работ (НИР) специалистами ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и смежных предприятий были разработаны и испытаны опытные образцы таких накопителей энергии. Однако они не нашли широкого применения в разработках предприятия из-за технологических проблем обеспечения надежности при больших скоростях вращения больших значений масс (подшипники, материалы якоря и др.). Кроме того, большие вращающие моменты маховиков существенно влияют на стабилизацию космического аппарата [7].

Коэффициент полезного действия (КПД) существующих систем электропитания весьма низкий, прежде всего, из-за низкого КПД фотопреобразователей БФ.

Коэффициент полезного действия монокристаллических кремниевых ФП не превышает 13,5 % ( $185 \text{ Вт/м}^2$ ). Относительно малое значение удельной мощности ФП, как было отмечено выше, объясняется тем, что кремниевые ФП эффективно

преобразуют солнечную энергию в электрическую только в узком диапазоне спектра солнечного света [7].

Для повышения эффективности использования энергии солнечных батарей на низкоорбитальных КА дистанционного зондирования Земли, разрабатываемых в ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», широко применяются приводы солнечных батарей, которые позволяют изменять положение нормали к плоскости ФЭП на Солнце. Для обеспечения низких скоростей вращения панелей БС, больших крутящих и удерживающих моментов, большого ресурса работы в условиях космического пространства были разработаны приводы на основе волновых зубчатых передач. Управление приводами осуществляется по сигналам бортового комплекса управления в зависимости от положения КА на орбите [7].

Следует отметить, что кремниевые ФП сыграли огромную роль в космической технике и широко использовались в БФ КА разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Это связано с тем, что долгое время кремниевые ФП оставались единственным источником получения электрической энергии на КА. Кремний - более доступный и освоенный в производстве материал, он широко распространен в природе, и запасы исходного сырья для создания ФП на его основе практически неограниченны. Технология изготовления кремниевых ФП хорошо отработана и непрерывно совершенствуется. Существует реальная перспектива снижения стоимости кремниевых ФП и повышения их КПД за счет внедрения нанотехнологий [7].

На многих космических аппаратах применяются кремниевые фотопреобразователи, разработанные и изготавливаемые в НПП «Квант» и ОАО «Сатурн». Штатная эксплуатация КА «Ресурс-ДК1» и других КА подтвердила высокую надежность БФ на базе кремниевых ФП, а деградация фотоэлементов оказалась намного меньше, чем прогнозировалась. Эти успехи были достигнуты за счет применения специалистами ОАО «Сатурн» особой технологии изготовления ФП и сборки БФ. В ходе проектирования указанных КА проводились работы по совершенствованию конструкции батареи солнечной, в том числе, была успешно освоена технология изготовления БС на углепластиковых каркасах с применением высокопрочных струн для закрепления ФП. В разработку новых конструкций БС большой вклад внесло ОАО «Пластик» (г. Сызрань, Самарская область) [7].

К числу недостатков БФ на базе кремниевых ФП относится, как было отмечено выше, их низкая удельная мощность и, как следствие, большая площадь БФ. Так, для КА «Ресурс-ДК1» площадь БФ составляет 36 м<sup>2</sup>. Поэтому дальнейшее повышение энерговооруженности КА сдерживалось из-за использования в них БФ с кремниевыми ФП [7].

В настоящее время кремниевые ФП постепенно вытесняются многопереходными (гетероструктурными) арсенид-галлиевыми ФП. Коэффициент полезного действия указанных ФП составляет 25-30 %. Повышение удельных характеристик трехкаскадных арсенид-галлиевых ФП достигается путем использования в ФП трех типов материалов (германий-мышьяк-арсенид). Конструктивно ФП состоит из трех тончайших (5-6 мкм) слоев, нанесенных на германиевую подложку с использованием нанотехнологии и прозрачных для определенного диапазона изменения длины волны световой энергии. Каждый слой преобразует солнечную энергию в электрическую в определенном для него диапазоне спектра света. Использование гетероструктуры в ФП позволяет в два раза уменьшить требуемую площадь БФ [7].

Единственным недостатком БФ на базе арсенид-галлиевых ФП является их высокая себестоимость (в три раза дороже по сравнению с кремниевыми ФП той же площади). Однако, учитывая уменьшение требуемой площади БФ в два раза в случае использования арсенид-галлиевых ФП, их применение на КА экономически оправдано.

Фрагмент БФ на основе арсенид-галлиевых ФП представлен на рис. 10.11. Еще одно направление повышения эффективности использования энергии Солнца в СЭП - применение концентраторов солнечного света. В рамках выполнения научно-исследовательских работ (НИР) специалистами ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и смежных предприятий были разработаны и испытаны различные виды концентраторов (доконцентраторов) на базе фоконов, линз Френеля, параболоидных зеркал и других [7].

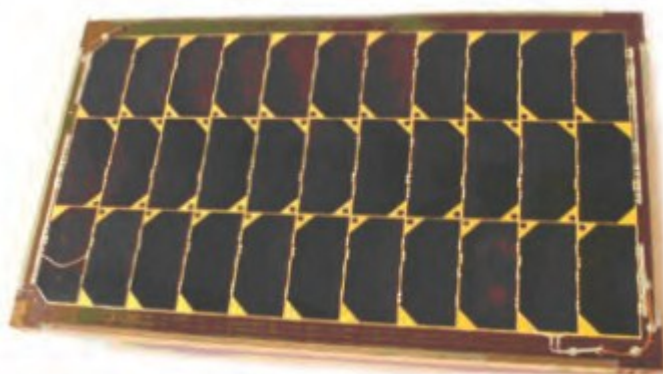


Рисунок 10.11. БФ на основе арсенид-галлиевых ФП [7]

Применительно к СЭП использование концентраторов энергии Солнца позволяет сократить площадь фотопреобразователей, следовательно, и стоимость солнечных батарей. Площадь же солнечной батареи при этом не уменьшается, а для эффективной работы концентраторов требуется высокая точность ориентации солнечных батарей с концентраторами на Солнце, что, как правило, невозможно реализовать на практике в условиях постоянного изменения положения КА (особенно низкоорбитальных КА ДЗЗ) относительно Солнца. [7]

Поиском альтернативных источников первичной энергии Солнца в СЭП также широко занимались и продолжают заниматься специалисты ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». К таким источникам энергии относятся радиоизотопные и ядерные энергоустановки, топливные элементы, твердосолевые химические батареи и другие. Радиоизотопные источники с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую не нашли применения в разработках ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» из-за их ограниченной мощности и низкого КПД (на уровне 2%). Системы электропитания и обеспечения теплового режима с использованием таких источников энергии нашли применение на КА для исследований в дальнем космосе. В настоящее время ведутся работы в рамках НИР по преобразованию тепловой энергии, выделяемой в процессе распада радиоизотопов, в электрическую энергию с использованием термоакустических генераторов. Теоретический КПД такого преобразования может достигать значений от 30 до 60 % [7].

Применение в СЭП низкоорбитальных КА ядерных энергоустановок требует реализации специального комплекса мероприятий по обеспечению безопасности в случае возникновения неисправностей в КА, что для определенного уровня мощности СЭП также нецелесообразно [7].

Для обеспечения высоких требований по качеству электропитания БА на современных КА в составе СЭП, как отмечалось выше, применяются электронные стабилизаторы напряжения. Принцип работы стабилизатора напряжения и его конструктивное исполнение выбираются с учетом динамики изменения токов нагрузки, БФ и АБ в соответствии с их вольтамперными характеристиками.

Поскольку напряжение и ток БФ постоянно изменяются в зависимости от освещенности панелей БФ, режимов работы АБ и потребляемой БА мощности, то стабилизация напряжения на выходных шинах СЭП - сложная техническая задача. В СЭП КА широкое применение нашли стабилизаторы напряжения, а также зарядные и разрядные устройства, работающие в режиме широтноимпульсной модуляции (ШИМ) силовых ключевых транзисторов. Самое простое объяснение принципа работы данного стабилизатора напряжения сводится к следующему. На выходных шинах СЭП устанавливается СЛ-фильтр, причем емкость этого фильтра достаточно большая, чтобы существенно ослабить колебания выходного напряжения. Конденсаторы фильтра постоянно заряжаются от внешнего источника мощности (на световом участке орбиты КА внешним источником является фотоэлектрическая батарея) и одновременно разряжаются на нагрузку. Выбирается номинальное значение выходного напряжения СЭП, например, равное 28,5 В. Этот номинал одновременно является опорным напряжением для осуществления стабилизации выходного напряжения. При появлении разности между фактическим напряжением СЭП и опорным напряжением формируется сигнал обратной связи, который поступает в ШИМ-генератор. Импульсы мощности, формируемые ШИМ-генератором и используемые для заряда конденсаторов фильтра в зависимости от величины и знака сигнала обратной связи, характеризуются длительностью, амплитудой и частотой следования. Между двумя импульсами имеется пауза, при этом период времени, определяемый как сумма длительности импульса мощности и паузы, остается постоянным. При правильной настройке стабилизатора напряжения обнуление сигнала обратной связи происходит, не вызывая заметных колебаний выходного напряжения СЭП. Для улучшения характеристик стабилизатора напряжения между шиной БФ и выходными шинами стабилизатора напряжения также устанавливается емкостный фильтр. По такому же принципу работает стабилизатор напряжения, когда внешним источником питания служат аккумуляторные батареи [7].

Основными принципами работы и управления СЭП являются [7]:

- автономное функционирование при штатной работе по внутренней логике, при этом допускается задание с НКУ минимального объема разовых команд для коррекции режимов работы СЭП;
- стабилизация выходного напряжения СЭП;
- обеспечение защиты АБ от перезаряда и переразряда;
- обеспечение включения, отключения, проверок при проведении испытаний и подготовке КА к штатной работе.

При этом организация согласованной работы БФ и АБ, автономное функционирование СЭП, стабилизация напряжения на выходных соединителях СЭП, информационный обмен с БВС и НКУ осуществляется КАС.

С целью формирования внутренней логики управления СЭП с использованием НВ АБ в КАС предусмотрены [7]:

- пороговый контроль напряжения на выходе СЭП с формированием сигнала «ДМН» (датчик минимального напряжения СЭП) при снижении напряжения до уровня 25 В на время более 1 с;



- пороговый контроль напряжения каждой АБ с формированием сигнала «ДМНБ» (датчик минимального напряжения батареи) для отключения АБ при глубоком разряде;
- пороговый контроль напряжения аккумуляторов каждой АБ с формированием сигнала «ДМНА» (датчик минимального напряжения аккумулятора);
- формирование сигналов «СДНБ» (срабатывание датчика нижнего давления АБ) и «СДВБ» (срабатывание датчика верхнего уровня) для управления режимом работы АБ при заряде;
- формирование сигнала «СДТБ» (срабатывание датчика температуры батареи) для отключения АБ от заряда при превышении температуры АБ 38°C и сформированном на данный момент времени «СДНБ».

На рисунке 10.12 приведена принципиальная схема СЭП КА «Ресурс-ДК1», включающая в себя БФ, пять АБ и КАС [7].

Комплекс автоматики и стабилизации напряжения, в свою очередь, состоит из стабилизатора напряжения и автоматики (СНА), зарядных устройств (ЗУ) и разрядных устройств (РУ), образующих зарядно-разрядные устройства (ЗРУ). Количество ЗРУ равно количеству АБ, поэтому СЭП имеет пять подсистем, образованных путем последовательного соединения каждой АБ с соответствующим зарядно-разрядным устройством [7].

Все подсистемы включены на единую шину питания параллельно между собой.

На рисунке 10.13 представлена фотография комплекса автоматики и стабилизации напряжения КА «Ресурс-ДК1» (один СНА и пять ЗРУ) [7].

Основными функциями, выполняемыми КАС, являются [7]:

- подключение генераторов БФ на единую шину питания нагрузки;
- проведение заряда и разряда каждой АБ через свой регулятор ЗРУ;
- параллельное подключение подсистем на единую шину питания;
- обеспечение коммутации цепей наземного источника питания (НИП) по «плюсу» и «минусу» по соответствующим командам из наземного испытательного комплекса (НИК);
- обеспечение высокой надежности путем дублирования всех элементов коммутации и управления;
- обеспечение контроля заряженности по формированию сигнала «СДВБ» каждой АБ по технологическим цепям, подключаемым к наземному испытательному оборудованию (НАО) КА;
- обеспечение заряда АБ в составе КА на стартовом комплексе.

Последняя функция по обеспечению заряда и разряда АБ, находящихся на борту КА, средствами ЗРУ из состава НАО была оригинально решена за счет подключения шины «минус» ЗРУ НАО к «минусовым» цепям подключения НИП, а шины «плюс» ЗРУ - непосредственно к АБ [7].

Данное техническое решение выполнено на уровне изобретения и защищено патентом РФ. Его внедрение на КА разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ- Прогресс» позволило уменьшить массу СЭП, исключить возможность короткого замыкания при подготовке к штатной эксплуатации КА, повысить надежность СЭП. Зарядно-разрядный цикл НВ АБ в СЭП КА «Ресурс-ДК» происходит в соответствии со следующей логикой [7].

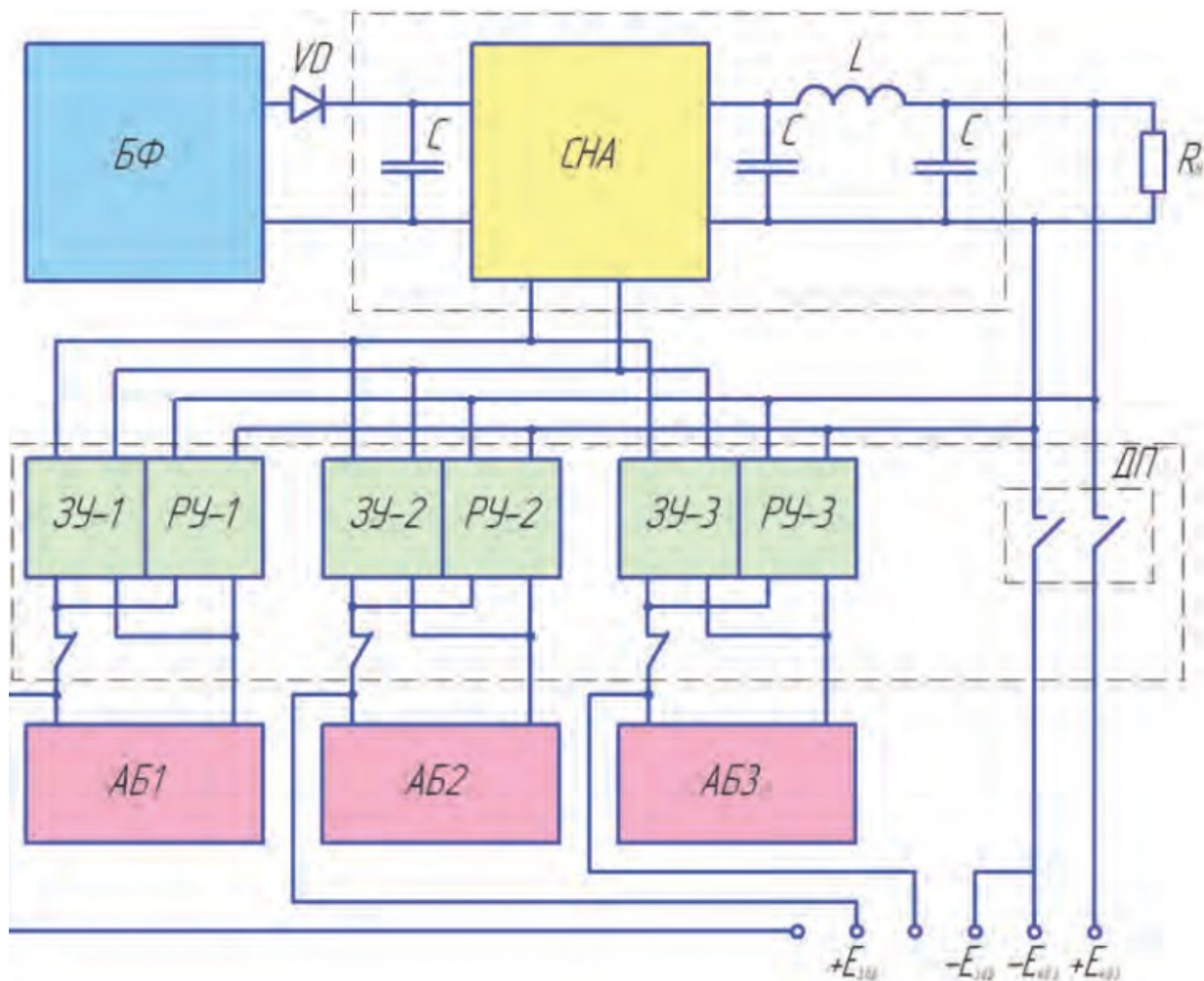


Рисунок 10.12. Принципиальная блок-схема СЭП КА «Ресурс-ДК1»



Рисунок 10.13. Комплекс автоматики и стабилизации напряжения космического аппарата «Ресурс-ДК1» [7]

На освещенном участке орбиты после выхода из теневого участка аккумуляторные батареи включаются в режим заряда. Ток заряда АБ в зависимости от освещенности панелей БФ изменяется от нуля до 15 А. При увеличении давления

при заряде в аккумуляторе, в котором установлен сигнальный датчик, до заданного уровня (примерно 60-65 А·ч) формируется сигнал «СДНБ». Этот сигнал носит информационный характер, поскольку по нему не происходит изменения состояния АБ. При наличии мощности БФ продолжается заряд АБ до тех пор, пока не формируется сигнал «СДВБ». Уровень заряженности АБ, при котором происходит формирование сигнала «СДВБ», составляет примерно 65-70 Ач. Этот сигнал является управляющим, так как после его формирования соответствующая АБ переводится в режим подзаряда током 1 А для компенсации саморазряда аккумуляторов. Режим подзаряда АБ выключается после снятия сигнала «СДНБ» в режиме разряда АБ [7].

При заряде АБ происходит тепловыделение, пропорциональное мощности электрических потерь на внутреннем сопротивлении последовательно соединенных аккумуляторов. Часть этого тепла поглощается эндотермической химической реакцией токообразования в аккумуляторах. При разряде АБ происходит экзотермическая химическая реакция токообразования, поэтому при штатной работе тепловыделение в режиме разряда АБ при прочих равных условиях больше, чем тепловыделение в режиме заряда АБ. Данное утверждение верно только в узком диапазоне температур АБ. Опыт эксплуатации КА «Ресурс-ДК1» показал, что при длительном функционировании АБ при повышенных температурах теплоносителя (25-32°С) тепловыделение АБ в конце заряда значительно превышает тепловыделение при разряде, и чем больше степень заряженности АБ и ее температура, тем больше тепловыделение [7].

Аккумуляторные батареи устанавливаются на термоплаты и охлаждаются жидким теплоносителем. С целью снижения ресурса средств обеспечения теплового режима (СОТР) при испытаниях на КА «Ресурс-ДК1» и др. используется оригинальная технология охлаждения АБ, выполненная на уровне изобретения и защищенная патентом РФ. Новизной данной технологии является то, что в термоплатах, предназначенных для охлаждения АБ, выполнены технологические гидромагистральи (каналы), позволяющие обеспечивать тепловой режим АБ при испытаниях от наземных средств обеспечения теплового режима. В конечном итоге, это позволяет повысить надежность СОТР и КА, в целом, в процессе штатной эксплуатации. На рисунке 10.14 представлена установка НВАБ на изделии.

Аппаратная защита от глубокого разряда каждой АБ осуществляется за счет формирования датчиком минимального напряжения АБ сигнала «ДМНБ» с последующим отключением данной батареи от разряда на период восстановления напряжения до заданной величины. Необходимость защиты АБ от переразряда возникает крайне редко и является аварийным режимом. Система электропитания также защищена от перегрузок. Так, при несанкционированной просадке выходного напряжения СЭП до 25 В и ниже формируется сигнал «Аварийная нагрузка», по которому космический аппарат переводится специальным алгоритмом СЭП через БВС в режим неориентированного полета (НП). В этом режиме происходит отключение от шины питания ряда приборов, тем самым обеспечивается значительное уменьшение тока потребления от СЭП. Переход в этот режим возможен также при глубоком разряде всех аккумуляторных батарей из-за нарушения энергобаланса. Подобная ситуация всего один раз возникла на КА «Ресурс-ДК1», но успешно была парирована и не привела к выходу из строя ни одного прибора [7].

Режим «Аварийная нагрузка» при глубоком разряде всех АБ может быть своевременно парирован специальным алгоритмом СЭП, который постоянно вычисляет суммарную глубину разряда всех АБ и сравнивает ее с допустимыми пороговыми значениями. Пороговых значений может быть несколько, но каждое из них используется для перевода КА или в режим ориентированного дежурного полета, когда вводится запрет на работу части приборов, или в режим неориентированного полета, когда отключаются от питания практически все приборы. Современные космические аппараты разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» оснащены специальными алгоритмами, позволяющими предупредить или замедлить процесс глубокого разряда АБ СЭП. Конфигурация и логика функционирования СЭП и КА, в целом, при возникновении глубокого разряда АБ защищены патентом РФ. Новизной является то, что при внезапном выходе одной АБ из строя алгоритм автоматически учитывает этот факт и переводит КА в другой режим при менее глубоком разряде АБ, тем самым повышая живучесть СЭП, в частности, и КА, в целом [7].



Рисунок 10.14. Установка НВАБ на изделия [7]

Разработку, автономную и комплексную отладку бортового программного обеспечения (БПО), осуществляющего контроль и управление СЭП, обеспечивали А.Б.Черкунов, С.А.Алиппа, А.Н.Лепилов, Л.В.Безбородова и др. [7].

Особенностью НВАБ является то, что при их штатной работе более шести месяцев требуется проведение «лечебных» (формовочных) циклов. Дело в том, что при длительном циклировании АБ на глубину разряда, не превышающую 15% от номинальной емкости (номинальная емкость батареи 28НВ-70 равна 60 А·ч), может возникнуть разбаланс последовательно соединенных аккумуляторов в АБ по степени заряженности и напряжению, и чем дольше АБ функционирует в таком режиме, тем сильнее разбаланс. При этом происходит снижение располагаемой энергии в АБ, увеличивается тепловыделение и др. [7].

Технология проведения формовочных циклов АБ была разработана совместно специалистами ОАО «Сатурн» и ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и защищена патентом РФ. Преимуществом данной технологии проведения формовочного цикла АБ является то, что она не накладывает ограничений на функционирование КА, поскольку АБ разряжается на нагрузку, и ее энергия вся используется для питания БА [7].

Для выполнения формовочного цикла АБ требуется проведение следующих операций [7]:

- оценка состояния АБ и определение его параметров, а именно, напряжение при заряде током 15 А, напряжение разомкнутой цепи (НРЦ), уровень срабатывания датчика давления, при котором формируется сигнал «СДНБ»;
- заряд АБ до формирования сигнала «СДВБ» и определение уровня срабатывания датчика давления по емкости;
- введение запрета заряда формируемой АБ и разряд АБ на нагрузку, которой является БА;
- проведение глубокого разряда АБ, критериями чего служат: срабатывание сигнального датчика минимального напряжения аккумулятора; уменьшение емкости АБ до 10 А-ч и ниже (допускается до 3-5 А-ч); снижение напряжения АБ приблизительно до  $(n+1)$  В, где  $n$  - количество аккумуляторов;
- снятие запрета заряда АБ;
- проведение заряда АБ током нагрузки при штатной работе СЭП;
- оценка состояния СЭП после восполнения АБ (заряд АБ до срабатывания датчика давления с формированием сигнала «СДВБ»)

Практическая апробация данной методики прошла при неоднократном проведении формовочных циклов АБ СЭП КА «Ресурс-ДК1», широко применяется в настоящее время и будет в дальнейшем применяться на других КА с НВАБ разработки нашего предприятия [7].

Для повышения надежности СЭП КА «Ресурс-ДК1» в КАС предусмотрена возможность подключения к одному ЗРУ двух АБ, в случае отказа одного из пяти ЗРУ. Для реализации этой задачи применено оригинальное техническое решение: для объединения плюсовых шин двух аккумуляторов предусмотрены аварийная шина и специальные разовые команды «ВКАС», «ОАБ», «ВАВЗБ», где  $i$  - номер АБ. При выдаче РК «ВКАС» всегда восстанавливается исходное состояние КАС; при выдаче РК «ОАБ»  $i$ -ая АБ отключается от своего ЗРУ, а ЗРУ подключается к аварийной шине. При выдаче РК «ВАВЗБ» ЗРУ отключается от аварийной шины, а АБ подключается к аварийной шине [7].

Используя различные последовательности команд, можно к одному ЗРУ, как было сказано выше, подключить две АБ, соединенные между собой параллельно; к  $i$ -ой ЗРУ подключить  $j$ -ую АБ, отключив при этом от СЭП  $j$ -ое ЗРУ и  $i$ -ую АБ. Возможны и другие конфигурации СЭП [7].

Как показал опыт эксплуатации КА «Ресурс-ДК1», возможность изменения конфигурации СЭП в случае отказа одного ЗРУ позволяет существенно повысить живучесть СЭП, причем изменение конфигурации может быть использовано для различных целей, в том числе, и для снижения температуры АБ, поскольку при подключении двух АБ к одному ЗРУ токи заряда и токи разряда аккумуляторных батарей уменьшаются, при прочих равных условиях, в два раза, и, как следствие, тепловыделение каждой АБ существенно уменьшается.

Без преувеличения можно сказать, что на высоком техническом уровне была решена ОАО «НПЦ «Полус» совместно с нашим предприятием задача правильного выбора параметров БФ и поддержания комплексом автоматики и стабилизации напряжения оптимального режима функционирования БФ. При этом в рабочей точке ВАХ напряжение БФ выбирается для самой высокой степени деградации параметров БФ. Как правило, напряжение в оптимальной точке ВАХ, соответствующей отбору максимальной мощности недеградируемой БФ, выше на 15-20 В. Для обеспечения отбора максимальной мощности БФ при необходимости используется экстремальный регулятор мощности (ЭР). Экстремальный регулятор, принцип работы и устройство которого здесь не рассматриваются, автоматически изменяет напряжение в рабочей точке ВАХ и обеспечивает максимальный отбор мощности от БФ [7].

Опыт эксплуатации КА «Ресурс-ДК1» показал, что заложенная в СЭП логика управления режимом работы БФ весьма эффективна и практична для использования в управлении космическим аппаратом. Действительно, при недостаточной освещенности ФП повышения величины освещенности можно добиться путем переключений панелей БС (ПБС) по углу тангажа. Однако подобные переключения крайне нежелательны, так как оказывают возмущения на КА, а также увеличивают ресурс работы приводов БС. При включенном ЭР необходимость выполнения переключений ПБС по углу тангажа с целью повышения освещенности, как правило, отпадает [7].

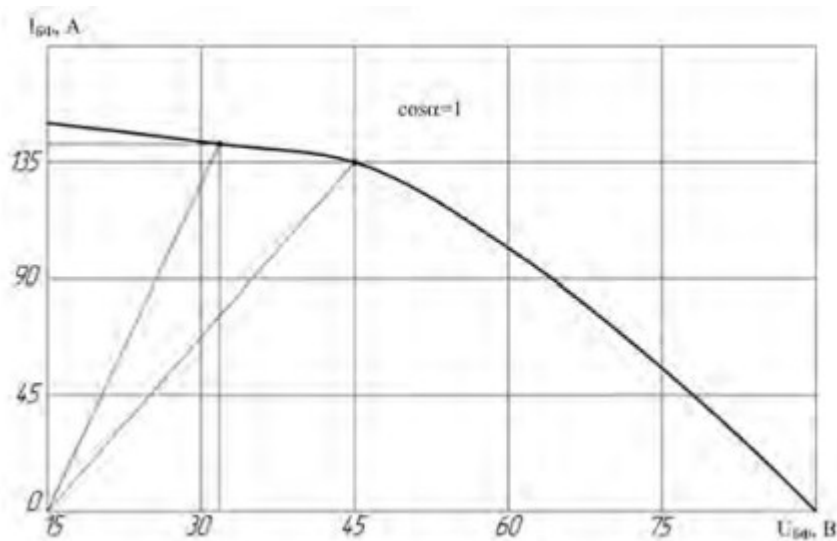


Рисунок 10.15. Вольт-амперная характеристика БФ КА «Ресурс-ДК1» [7]

Экстремальный регулятор может быть использован при штатной эксплуатации и для других целей, например, для ускоренного заряда АБ и т.д.

Изменение режимов функционирования СЭП низкоорбитальных КА происходит очень динамично из-за наличия теневых участков орбиты. Так, на освещенном участке орбиты включены СНА, ЗУ ЗРУ, БФ и АБ в режиме заряда; на теневом участке орбиты - только РУ ЗРУ и АБ в режиме разряда. Постоянное чередование включений и отключений приборов исключает их чрезмерный нагрев, но повышается вероятность выхода из строя приборов при смене режимов работы.

На рисунке 10.16 приведены графики изменения параметров СЭП во времени для СЭП КА «Ресурс-ДК1». Графические зависимости построены для слу-

чая функционирования КА, когда угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце составляет  $\beta \approx 0$  градусов [7].

Ток БФ (параметр ТБФ) возрастает по мере увеличения текущего значения  $\cos(\beta)$  и, достигнув максимального значения (при  $\cos(\beta) = 1$ ), начинает плавно уменьшаться. Можно принять, что ток БФ при наличии потребления мощности БФ в полном объеме подчиняется синусоидальному закону. При некотором значении мощности БФ аккумуляторные батареи ходят в режим заряда. В случае если ток нагрузки (параметр ТН) остается неизменным, то токи заряда АБ (параметр ТЗАБ) по форме повторяют ток БФ. Когда ток АБ равняется 15 А, заряд АБ происходит в режиме токоограничения, т.е. ток заряда АБ остается постоянным, хотя мощность БФ продолжает возрастать. Поскольку вся мощность БФ не расходуется, то режим стабилизации напряжения БФ (параметр НБФ) на уровне 31 В не может быть обеспечен КАС. В соответствии с логикой функционирования СЭП рабочая точка ВАХ БФ скачкообразно переходит на спадающую часть, где генерируемая мощность полностью расходуется на питание БА, заряд АБ, собственное потребление КАС в соответствии с коэффициентами полезных действий приборов СНА, ЗУ ЗРУ и потерями в БКС [7].

Затем происходит срабатывание сигнального датчика «СДВБ» и перевод соответствующей АБ в режим подзаряда током 1 А. На рисунке 10.17 видно, что срабатывание датчиков «СДВБ» произошло во всех пяти АБ (уникальный случай), причем при каждом срабатывании датчика «СДВБ» происходит скачкообразное изменение режима функционирования БФ (изменение напряжения и тока БФ) [7].

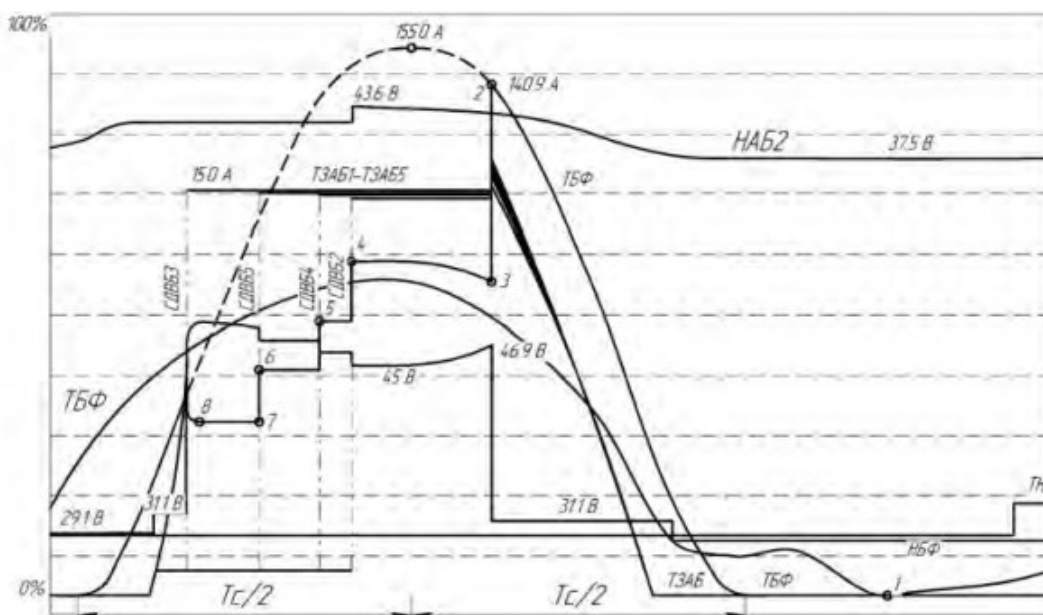


Рисунок 10.16. Зависимости параметров СЭП КА «Ресурс-ДК1» от времени

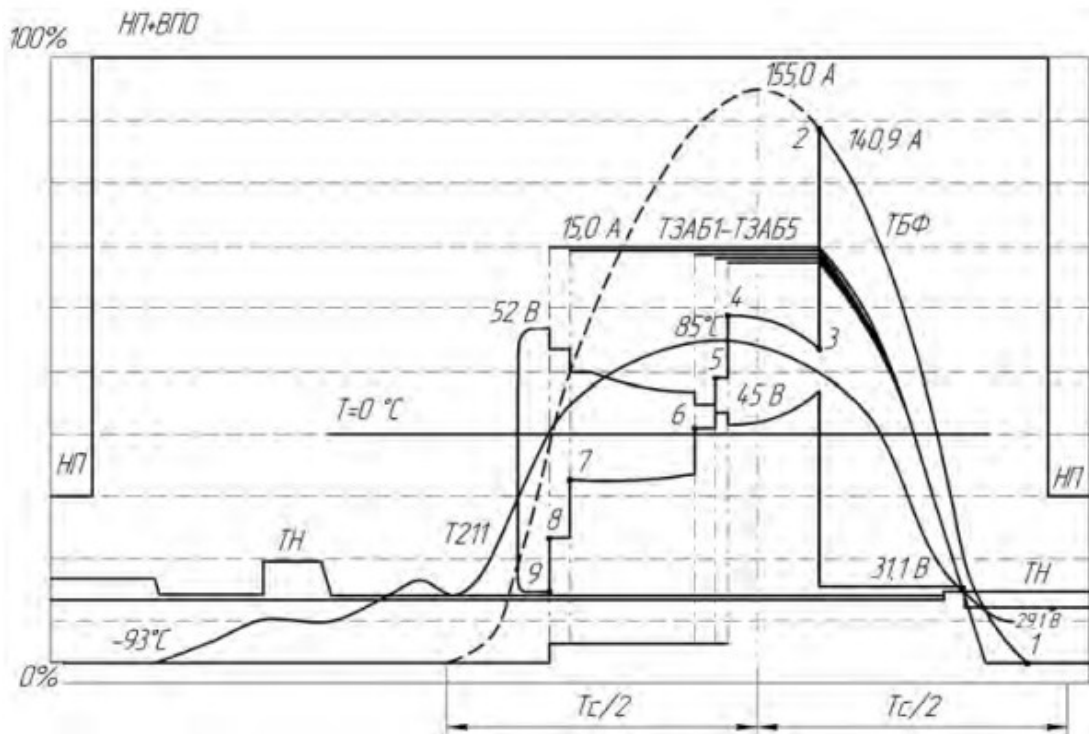


Рисунок 10. 17. Зависимости параметров СЭП КА «Ресурс-ДК1» от времени [7]

Пунктирной линией показано потенциально возможное изменение тока БФ при наличии соответствующей нагрузки. В данном случае, очевидно, что мощность потребления значительно меньше мощности, вырабатываемой БФ [7].

Температура БФ (параметр Т211) меняется динамично, а диапазон ее изменения составляет от «минус» 93° С до «плюс» 80° С. Условия эксплуатации электрических проводов и соединителей выполняются.

Напряжение аккумуляторной батареи (параметр НАБ2) при заряде с ростом тока АБ монотонно возрастает, поскольку возрастает омическое падение напряжения [7].

При достижении зарядного тока до 15 А зарядное напряжение продолжает расти (хотя омическое падение напряжения неизменное), что свидетельствует о наличии поляризационных потерь. После срабатывания сигнального датчика «СДВБ» напряжение АБ уменьшается скачкообразно, незначительно превышая значение напряжения разомкнутой цепи.

Практическая эксплуатация систем электропитания современных КА показала, что выбранная специалистами ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» концепция проектирования СЭП себя полностью оправдала, но позволила и определить пути дальнейшего повышения эффективности и живучести СЭП, а именно [7]:

- обеспечение режима разряда (заряда) всех аккумуляторных батарей одинаковыми токами разряда (заряда);
- выбор оптимального режима функционирования БФ по критерию максимального отбора мощности;
- обеспечение автономного восполнения АБ после их полного разряда в случае аварийной ситуации

Но эти решения находятся уже за рамками этого пособия.



### 9.3. Общие схемы построения систем электропитания космических аппаратов

Бортовая космическая электроэнергетическая система<sup>11</sup> имеет ряд существенных особенностей по сравнению с традиционными автономными энергосистемами наземных транспортных средств, кораблей, самолетов. Прежде всего, это отсутствие электромашинного генерирования энергии. Безусловно, существенным фактором являются и условия эксплуатации в космосе [8].

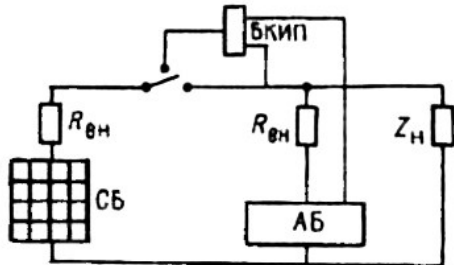


Рисунок 10.18. Структура СЭП с общими шинам СБ-АБ-нагрузка.  
 $R_{вн}$  - внутренне сопротивление,  
 БКИП - блок контроля источников питания

Под системами автономной энергетики космического аппарата понимается совокупность устройств, обеспечивающих генерирование, накопление, распределение электроэнергии. Специальные энергетические системы, обеспечивающие управление параметрами движения и ориентации КА, не рассматриваются [8].

Бортовая электроэнергетика космических аппаратов начала развиваться на основе использования химических источников тока, однако малый ресурс подобных систем определил необходимость включения в состав СЭП активных (первичных) генераторов электрической энергии. На подавляющем большинстве КА отечественного производства в качестве первичных источников используются фотоэлектрические преобразователи — солнечные батареи. Эта же тенденция подтверждается и опытом работы аэрокосмических фирм США. Так, по материалам NASA, из анализа СЭП 228 спутников следует, что на 90% КА принимаются в качестве первичного источника солнечные батареи, на 5 % — топливные элементы с малым сроком активного существования, на 5 % — другие источники энергии [8].

Введение в СЭП солнечных батарей с их специфическими характеристиками (большой разброс по напряжению, наличие внутреннего сопротивления, нелинейность вольт-амперной характеристики) привело к созданию структуры СЭП с общими шинами СБ-АБ-нагрузка (рисунок 10.18).

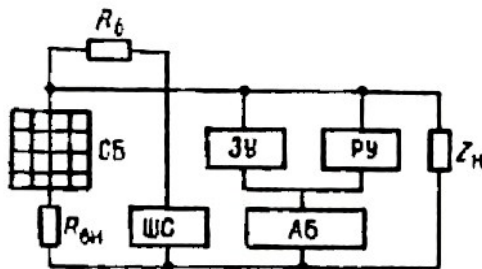


Рисунок 10.19. Параллельная структура СЭП;  
 $R_b$  - балластное сопротивление;  
 ШС - шунтовый стабилизатор

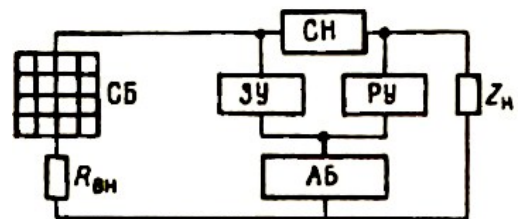


Рисунок 10.20. Параллельно-последовательная структура СЭП

Данная система использует аккумуляторную батарею в буферном режиме, когда при полном заряде АБ даже при наличии энергии со стороны СБ происходит

<sup>11</sup> Более подробную информацию о принципах построения систем электропитания космических аппаратов можно найти в [8]

разряд АБ на нагрузку  $Z$ . Это обусловило широкий диапазон изменения выходных напряжений (23 - 34 В), что требует установки у потребителей специальных стабилизаторов [8].

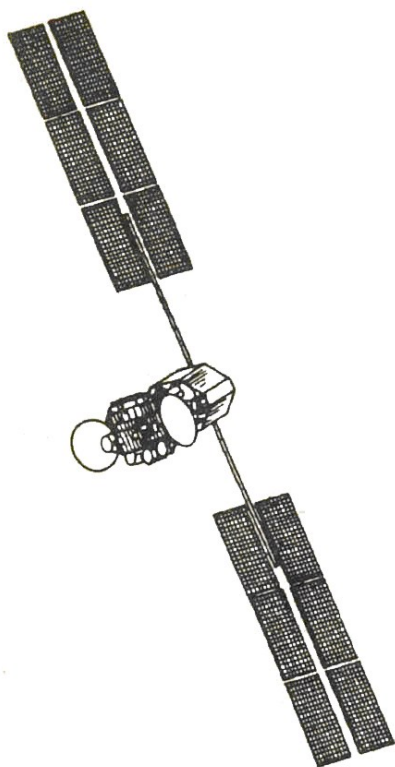


Рисунок 10.21. Телевизионный спутник "Геликон".  
 Масса 2500 кг, мощность СЭП 5,2 кВт, ресурс 10 лет, габаритные размеры на орбите 26 900x6800x6200 мм

Кроме того, большое количество циклов «заряд — разряд» АБ не позволяет без специальных мер увеличить ресурс СЭП на срок более 1,5 лет.

Необходимость повышения ресурса СЭП побудила разработчиков создавать системы с индивидуальными зарядно-разрядными восстановительными циклами, что позволило, несмотря на определенные эксплуатационные неудобства, увеличить срок активного существования КА до двух-трех лет [8].

Задачи повышения гибкости систем, их адаптации к орбитам, учета деградации характеристик СБ были решены в процессе создания систем с активной стабилизацией параметров СЭП [8].

Силовая структура подобных систем строится параллельными (рисунок 10.19) либо параллельно-последовательными (рисунок 10.20) способами, которые различаются исполнением стабилизатора напряжения (СН) солнечной батареи, подключаемого либо параллельно СБ, либо последовательно с ней [8].

Обе структуры содержат устройство заряда (ЗУ) и разряда (РУ) АБ. Энергетические характеристики этих структур близки в случае  $R_0 = 0$ , особенности выбора структуры во многом определяются параметрами орбиты и циклограммами нагрузки [8].

Впервые в отечественной практике СЭП с активным регулированием потоков энергии созданы в НПО ПМ (г. Красноярск) и Сухумском физико-техническом институте и внедрены на геостационарных объектах типа «Экран», «Горизонт». В СЭП применены параллельные стабилизаторы напряжения СБ с дискретным переключением режимов работы в функции физического состояния генератора и накопителя [8].

Большой объем работ по модульным параллельным СН выполнен в Воронежском НИИ электромеханики. Имеется положительный опыт создания и внедрения СЭП с параллельно-последовательными структурами в работах, проводимых в НПО «Полюс» [8].

В то же время даже краткий анализ показывает отсутствие единого подхода к построению СЭП, большое количество вариантов структур, стремление каждого разработчика КА иметь уникальную СЭП и в итоге — широчайшую номенклатуру элементов и блоков СЭП [8].

Все это чрезмерно загружает электротехническую промышленность постоянными разработками СБ, АБ и полупроводниковой регулирующей аппаратуры. Отсутствие унифицированных решений серьезно затрудняет эксплуатацию КА и их применение [8].

Кроме того, представляются весьма актуальными исследования, направленные на синтез структур и параметров элементов СЭП, обеспечивающих в совокупности оптимальные параметры системы, систематизацию принципов контроля и прогнозирования параметров аккумуляторных батарей, создание на этой основе систем, работающих в автоматическом режиме [8].

Геодезический спутник «ГЕО-ИК» выводится на орбиту ракетой-носителем «Циклон», остальные спутники - ракетой-носителем «Протон» с разгонным блоком «Д». Основное назначение телевизионных спутников - обеспечение телевизионного вещания, - спутников связи (СС) - телевизионного вещания, телефонно-телеграфной связи, связи между вычислительными центрами, двустороннего обмена видеoinформацией и связи с транспортными средствами. Эти космические аппараты имеют геостационарную орбиту, на борту установлено от 2 до 12 ретрансляторов с различной диаграммой направленности. Назначение навигационного спутника - определение координат местоположения и скорости воздушных и морских судов. Геодезический спутник обеспечивает геодезическую привязку островов и координатную привязку на шельфе мирового океана, проводит работы по изучению топографии мирового океана (на орбите 1-2 спутника) [8].

#### **9.4. Принципы построения систем электропитания космических аппаратов**

Наличие в структуре СЭП солнечной батареи требует введения стабилизирующих средств, компенсирующих вариации параметров вольт-амперной характеристики. В разработанных системах этим компенсатором (приемником избыточной энергии СБ) является аккумулятор. Блок контроля источников питания при достижении выходным напряжением верхнего порогового уровня отключает СБ от нагрузки и буферной батареи. Затем АБ, обеспечивая потребителей питанием разряжается, уровень ее напряжения снижается, и при достижении нижнего уровня происходит подключение СБ на заряд АБ и питание потребителей. По сути это релейная система регулирования с большим гистерезисом, в которой из-за ограничений по энергетическим показателям невозможно реализовать точные законы регулирования. Разница в порогах срабатывания достигает 30 %, поэтому каких-либо дополнительных исследований, связанных с качеством процессов регулирования, устойчивости систем, не требуется [8].

В структурах с параллельным регулированием требуемое напряжение на нагрузке поддерживается шунтовым стабилизатором или разрядным устройством АБ [8].

Включение и отключение РУ производится пороговым устройством, для которого входным сигналом является значение выходного напряжения.

Напряжения срабатывания и отпускания порогового устройства находятся внутри зоны допуска на изменение номинального значения выходного напряжения. При снижении выходного напряжения до нижнего уровня срабатывания реле отключает напряжение питания от узлов управления ШС и ЗУ и одновременно падает питание на узел управления РУ. При повышении выходного напряжения до

верхнего уровня срабатывания реле отключает РУ и АБ и вновь падает напряжение питания на узлы управления ШС и ЗУ. Подобную систему можно рассматривать как дискретную с малым гистерезисом и стабилизацией выходного параметра в рабочей зоне. Как показал опыт эксплуатации, при указанном способе управления для выхода ШС, ЗУ или РУ на режим необходимо 20...30 мс, что приводит к значительной динамической нестабильности при переходных процессах в момент захода на теневой участок орбиты [8].

Из изложенного следует, что основной недостаток дискретных систем управления — низкое качество выходных параметров при переходе из режима в режим. Устранить этот недостаток можно при непрерывном контроле регулируемых параметров и непрерывном управлении блоками, в том числе и вне рабочей зоны, чтобы при включении блока в работу сигнал управления адекватно соответствовал реально сложившейся обстановке в СЭП в функции отклонения выходного напряжения и степени заряженности АБ [8].

После допуска на выходное напряжение СЭП разделено на зоны, каждая из которых соответствует работе широтно-импульсных модуляторов (ШИМ) схемы управления силовых блоков (зарядного устройства ЗУ, разрядного устройства РУ, стабилизатора напряжения СН) комплекса автоматики и стабилизации КАС (рисунок 10.22) [8].

Положение центра зоны регулирования стабилизатора напряжения СБ считается неизменным, расположенным выше номинального значения выходного напряжения. Верхняя граница зоны регулирования ЗУ находится ниже верхней границы зоны СН на величину расстояния между зонами  $U_5$ , учитывающую температурные изменения и деградацию опорных элементов ШИМ. В пределах каждой зоны напряжение на выходных шинах изменяется не более чем на 0,4 %.

На теневом участке орбиты происходит разряд АБ, выходное напряжение стабилизируется в зоне ШИМ РУ, силовые ключи СН открыты полностью. При появлении тока солнечной батареи энергия СБ через СН подается на выход СЭП, энергия, передаваемая в нагрузку, распределяется между АБ и СБ, при этом возможности СБ используются полностью [8].

Если мощность СБ  $P_{ce}$  равна мощности нагрузки  $P_{н}$ , то напряжение на выходе СЭП выходит за пределы зоны регулирования РУ и силовые транзисторы РУ начинают управляться сигналом с регулятора ШИМ в сторону их закрывания. При дальнейшем увеличении  $P$  выходное напряжение стабилизируется зарядным устройством, зона работы которого находится между зонами СН и РУ, напряжение стабилизируется передачей всего избытка мощности СБ в аккумуляторные батареи. Разрядное устройство при этом закрыто по цепи управления. По мере заряда, когда АБ не способна принять весь избыток мощности СБ, напряжение на нагрузке стабилизируется в зоне СН. Это управление можно определить как непрерывное с непрерывным контролем регулируемой величины [8].

Реализация принципа непрерывного управления сопряжена с необходимостью разработки современных систем регулирования с повышенной точностью. Требуется во многом пересмотреть накопленный задел схемотехнических решений в области импульсных стабилизаторов напряжения и создать на основе современных систем регулирующие узлы, обладающие повышенными прочностными характеристиками при одновременном обеспечении требуемых динамических качеств и характеристик надежности [8].

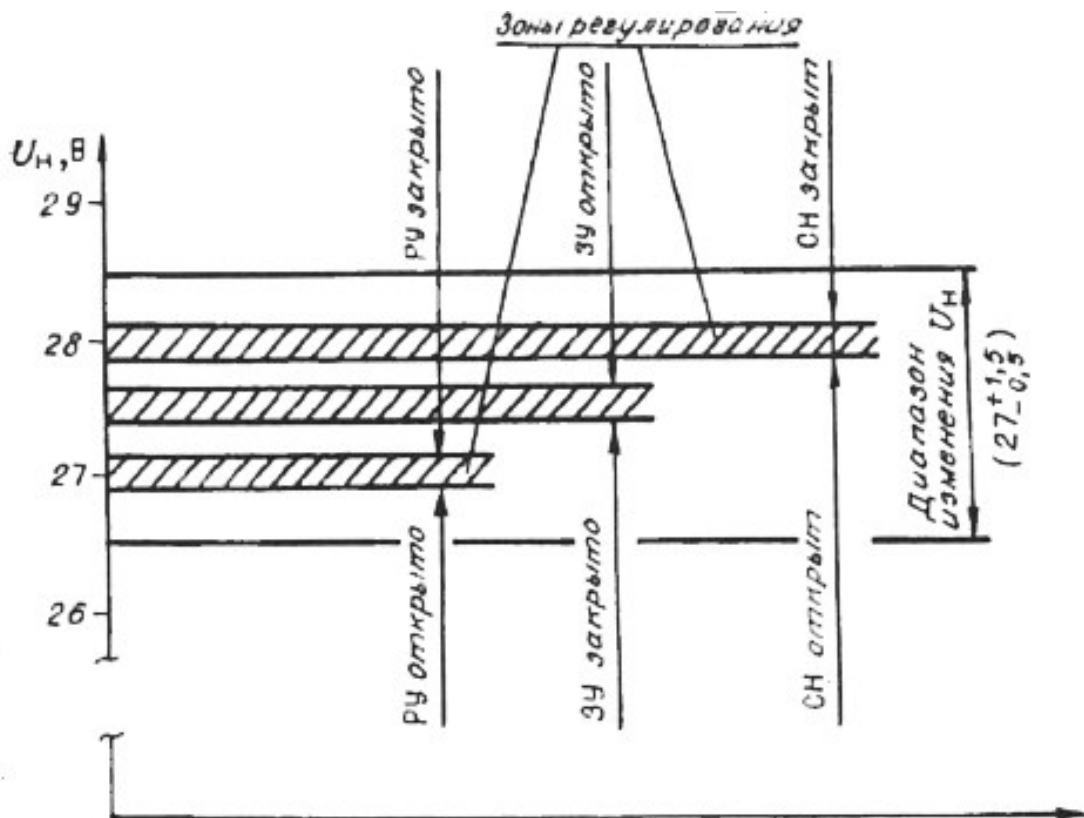


Рисунок 10. 22. Зоны управления в параллельно-последовательной структуре СЭП

В зависимости от освещенности СБ, степени заряженности АБ и знасения нагрузки СЭП работает в режимах, указанных ниже.

Оценка массогабаритных и энергетических характеристик при непрерывном переходе из режима в режим на основе эмпирических отношений и опытных данных (удельных характеристик солнечных батарей, накопителей, преобразователей) показала, что СЭП с компасом автоматики и стабилизации (КАС) имеют на 10-15 % лучшие массогабаритные характеристики. При увеличении срока активного существования КА это преимущество становится более значительным [8].

Как было указано ранее, стабилизация напряжения СБ в КАС производится в существующих системах двумя способами: параллельным или последовательным.

Многих проектировщиков СЭП привлекало то, что параллельные структуры имеют непосредственное соединение СБ с нагрузкой. Следовательно, при сбалансированной нагрузке присутствуют потери на стабилизацию. Однако достичь сбалансированности весьма затруднительно. Установленная мощность ШС должна быть пропорциональна разности  $P_{СБ max} - P_{Н min}$  мощности нагрузки, так и от мощности СБ [8].

В зависимости от орбиты КА и технологии изготовления фотопреобразователей установленная мощность первичного источника для достижения ресурса должна быть увеличена. На основе экспериментальных данных для ряда орбит оптимальная рабочая точка вольт-амперной характеристики СБ за 5 лет ориентировочно снижается на 2—3 В (10-15 %), поэтому ток короткого замыкания СБ при 5-летнем сроке активного существования должен быть не менее  $1.5I_{Н max}$  (максимального тока нагрузки). Тогда установленная мощность параллельного стабилизатора должна быть в 1,5 раза больше, чем у последова-

тельного. Учет динамических параметров СБ, наличие значительной электрической емкости только усиливают эту диспропорцию [8].

Таблица 10.1

| Режим   | Участок орбиты | Состояние системы   |
|---------|----------------|---|
| ЗУ      | Освещенный     | Разряженная АБ, избыток энергии, генерируемой СБ                                    |
| ЗУ и СИ | Освещенный     | Энергия, генерируемая СБ, превышает энергии), передаваемую в нагрузку и на заряд АБ |
| СИ      | Освещенный     | Заряженная АБ в режиме хранения, избыток энергии, генерируемой СБ                   |
| СИ и РУ | Освещенный     | Разряд АБ, компенсирующий недостаток энергии, генерируемой СБ                       |
| РУ      | Теневой        | Разряд АБ на теневом участке  |

Установленная мощность силовых полупроводниковых устройств в структуре с последовательным стабилизатором зависит только от мощности нагрузки. Это не накладывает ограничений на увеличение мощности СБ и, следовательно, позволяет выбрать ее с учетом деградации при различных условиях эксплуатации, т.е. для широкого класса объектов. Структура с последовательным стабилизатором позволяет при необходимости реализовать режим экстремального регулирования мощности СБ (в схемах с ШС это затруднительно) [8].

При соизмеримых массогабаритных и энергетических показателях структура с последовательным стабилизатором напряжения СБ более предпочтительна как обеспечивающая наибольшую универсальность и в большей степени отвечает принципу блочно-модульного построения системы [8].

Принцип зонного управления может быть использован для построения и КАС с параллельными стабилизаторами, при этом процессы управления в обеих системах практически идентичны, что позволяет распространить результаты исследования последовательно-параллельных структур на структуры с параллельными регуляторами мощности СБ [8].

Параллельная структура может быть предпочтительнее для достижения лучших энергетических характеристик в случае геостационарных орбит с постоянной освещенностью при реализации на борту КА равномерного графика нагрузки. При согласовании характеристик СБ и нагрузки ШС может быть отключен [8].

В рамках исследования параллельно-последовательной структуры СЭП с зонным принципом управления необходимо определить основные структуры решения, направленные на уменьшение установленной мощности полупроводниковых преобразователей, снижение потерь при регулировании и преобразовании, а следовательно, и на улучшение массогабаритных характеристик.

К ним относятся: согласование напряжений первичного источника, буферной батареи, нагрузки для исключения излишних преобразований энергии; выбор оптимальных значений частоты преобразования, коэффициентов загрузки электрорадиоэлементов; определение оптимальных параметров напряжения (тока) распределяемого по бортовой кабельной сети при больших мощностях нагрузки.

При проектировании систем электропитания с КАС основное внимание должно быть уделено оптимальной взаимосвязи параметров СБ, АБ и устройству КАС [8].

Число вариантов схем в существующих системах электропитания ограничено тем, что напряжение СБ выбирается всегда выше зоны допуска на

выходное напряжение при номинальной освещенности панелей В этом случае СН для принятой последовательно-параллельной структуры выполняется в виде импульсного понижающего регулятора, имеющего наилучшие массогабаритные и энергетические характеристики [8].

Схемы регуляторов ЗУ и РУ полностью определяются значением номинального напряжения аккумуляторной батареи.

Важная характеристика СЭП — КПД разрядного устройства. Повышение КПД на 1 % дает выигрыш по массе первичного источника и буферной батареи примерно 3 кг/кВт [8].

Расчетная зависимость массы и КПД РУ от напряжения на ЛБ показывает, что наименьшее значение массы и наибольшее значение КПД могут быть получены в СЭП с  $U_{AB} > U_H$  [8].

Дальнейшее повышение эффективности буртовых СЭП КА в основном определяется синтезом оптимальных структур, которые должны обеспечить [8]:

- гибкость и надежность;
- реализацию блочно-модульного принципа конструирования;
- автоматическое управление режимами, в том числе экстремальное регулирование мощности СБ;
- эффективный контроль АБ и использование этого контроля в рабочих режимах КАС.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 1) Какие блоки входят в систему электропитания космических аппаратов?
- 2) Какова структурная схема системы электропитания первого поколения космического аппарата?
- 3) Какова структурная схема системы электропитания второго поколения космического аппарата?
- 4) Какова структурная схема системы электропитания третьего поколения космического аппарата?
- 5) Опишите схемы построения систем электропитания космического аппарата?
- 6) Каковы особенности систем электропитания космического аппарата относительно систем электропитания иного применения?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Источники питания РЭА: Учебное пособие. – 2-е изд., испр. Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 136 с.
- 2) Попов В.П. Основы теории цепей: Учебник для вузов спец. «Радиотехника». – М. : Высш. шк., 1985. – 496 с.
- 3) Датчики: Справочное пособие/Под общ. Ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – М. : Техносфера, 2012. – 642 с.
- 4) <http://fcenter.ru/online/hardarticles/tower/23101>.
- 5) Источники энергии систем электроснабжения космических аппаратов : моногр. / М.В. Лукьяненко; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2008. – 176 с.
- 6) Гущин В.Н. Основы устройства космических аппаратов: Учебник для вузов. – М. : Машиностроение, 2003. – 272 с.
- 7) Кириллин А.Н. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». – Самара: Издательский дом «АГНИ», 2011. – 280 с.
- 8) Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Исляев, отв. ред. М.Ф. Решетнёв. – Новосибирск: ВО «Наука», 1994. – 318 с.

На обложке изображены следующие иллюстрации:

– солнечная батарея спутника «ГЛОНАСС-М»

(<http://vestnik->

[glonass.ru/news/tech/rossiya\\_vyvedet\\_na\\_orbitu\\_15\\_sputnikov\\_glonass\\_m\\_k\\_2017\\_godu/](http://glonass.ru/news/tech/rossiya_vyvedet_na_orbitu_15_sputnikov_glonass_m_k_2017_godu/));

– космический аппарат «ФОТОН-М»

(<http://ria56.ru/posts/65467667546754.htm>);

– аккумуляторная батарея спутника «ЯМАЛ-200» (<http://www.federalspace.ru/2011/>).



