

ДИСЦИПЛИНА	<b>Схемотехника электронных устройств. Часть 2</b> полное название дисциплины без аббревиатуры
ИНСТИТУТ	<b>радиоэлектроники и информатики</b>
КАФЕДРА	<b>радиоволновых процессов и технологий</b> полное название кафедры
ГРУППЫ	<b>РИБО-01, 02, 03, 04-19, РРБО-01, 02-19, РССО-01, 02, 03-19</b> номер групп/ы, для которых предназначены материалы
ВИД УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА	<b>Лекции</b> лекция; материал к практическим занятиям; контрольно-измерительные материалы к практическим занятиям; руководство к КР/КП, практикам
ПРЕПОДАВАТЕЛЬ	<b>Битюков Владимир Ксенофонович</b> фамилия, имя, отчество
СЕМЕСТР	<b>6</b> указать номер семестра обучения

## ЛЕКЦИЯ 1

Дисциплина «Схемотехника электронных устройств. Часть 2» изучается студентами направлений 11.03.01 Радиотехника и 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, а также специальности 11.05.01 Радиоэлектронные системы и комплексы в 6 семестре в следующем объеме: лекции (16 часов), практические занятия (32 часа) и лабораторные занятия (16 часов).

Студенты направления 11.03.01 Радиотехника выполняют курсовую работу.

Отчетность по дисциплине – экзамен.

### Основная литература

1. Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. Источники вторичного электропитания: учебник. 4-е изд., перераб. и доп. Вологда: Инфра-Инженерия. 2020. 376 с. <https://library.mirea.ru/books/54527>
2. Миловзоров О.В., Панков И.Г. Электроника. Учебник для бакалавров. М.: Юрайт. 2013. 407 с. <https://library.mirea.ru/books/45561>
3. Тепляков А.П., Битюков В.К. Схемотехника электронных устройств: учебное пособие. М.: МИРЭА – Российский технологический университет. 2021. – 187 с. <https://library.mirea.ru/books/55369>

### Дополнительная литература

1. Бабенко В.П., Битюков В.К. Линейные стабилизаторы напряжения и тока. Учебное пособие. М.: МИРЭА – Российский технологический университет. 2018. 148 с. <https://library.mirea.ru/books/53806>
2. Бабенко В.П., Битюков В.К. Схемотехника источников вторичного питания

[Электронный ресурс]: практикум. М.: РТУ МИРЭА. 2019. Электрон. опт. диск (ISO) ФГУП НТЦ Информрегистр 07.08.2019 №0321902505. <https://library.mirea.ru/share/3376>

### **Фундаментальная литература**

- Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: в 2-х т. Т. 1. Пер. с англ. – Изд. 3-е, стереотип. – М.: Мир. 1986. – 598 с.
- Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: в 2-х т. Т. 2. Пер. с англ. – Изд. 3-е, стереотип. – М.: Мир. 1986. – 590 с.
- Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: в 2-х т. Т. 1. Пер. с нем. - М.: Додэка-XXI. 2008. – 832 с.
- Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: в 2-х т. Т. 2. Пер. с нем. - М.: Додэка-XXI. 2008. – 942 с.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Дисциплина «Схемотехника электронных устройств. Часть 2» рассматривает физику и схемотехнику устройств для преобразования электрической энергии одного рода тока в электрическую энергию того же или другого рода тока требуемых параметров и качества. Такие устройства называют электропреобразовательными устройствами (ЭПУ) либо источниками вторичного электропитания (ИВЭ).

Надо отметить, что первичные источники электрической энергии (ПИЭ) – это устройства и системы, преобразующие неэлектрическую энергию в электрическую энергию.

К ЭПУ относятся преобразователи, стабилизаторы напряжения и тока, инверторы, управляемые и неуправляемые выпрямительные устройства, сглаживающие и помехоподавляющие фильтры и другие устройства силовой электроники. Электропреобразовательные устройства представляют собой композицию различных преобразователей электрической энергии, выполняющих соответствующие преобразования: выпрямление, фильтрацию, инвертирование, стабилизацию, защиту, управление, сигнализацию и так далее.

Значимость ЭПУ определяется тем, что итоговой функцией любой технической системы (информационной, радиотехнической, инфокоммуникационной, технологической и других) является преобразование энергии устройства электропитания в энергию выходного сигнала соответствующей системы.

Улучшение тактико-технических характеристик ЭПУ, в том числе снижение их массогабаритных параметров, достигается решением комплекса технических вопросов. Например, выбором принципа действия, структуры построения, схемы реализации, режима работы, элементной базы и конструкции. Основная тенденция совершенствования современных ЭПУ связана с использованием импульсного режима силовых транзисторов. Это в значительной степени позволило уменьшить массогабаритные параметры ЭПУ и повысить их КПД.

ЭПУ в значительной степени определяют эксплуатационные,

массогабаритные и энергетические показатели всей системы, а также надежность ее функционирования на всех этапах ее жизненного цикла.

## **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

### **1.1. Виды неэлектрической энергии и устройства для ее преобразования в электрическую энергию**

Известно, что ведущая роль в экономическом развитии всех стран принадлежит энергетике. Существует прямо пропорциональная связь между национальным доходом страны и потреблением энергии на душу населения. Потребление электрической энергии в мире за каждые 10 лет удваивается.

В 2019 году ежегодное потребление энергии в мире составило  $0,3 Q$  ( $Q=10^{21}$  Дж), а за всю историю существования человечества израсходовано около  $10 Q$  энергии, причем примерно  $4 Q$  за последние 100 лет. Предполагается, что в середине нашего века с учетом роста народонаселения потребление энергии в мире стабилизируется на уровне  $8...10 Q$ .

Интересно сравнить энергоемкость различных источников энергии. Энергетической базой на протяжении многих веков служили водяные колеса. Они работали под напором воды  $\sim 10$  м. Это значит, что 1 кг воды, как энергоносителя, содержал  $\sim 100$  Дж энергии. Переход к химическому топливу с энергоемкостью  $30 \cdot 10^6$  Дж/кг означал скачок почти в  $10^6$  раз. Переход к ядерному топливу, реализуемый с середины 20 века, дал скачок еще примерно в  $2 \cdot 10^6$  раз.

В настоящее время для выработки электрической энергии, как наиболее удобного вида энергии для производства и транспортировки, используются два метода: с промежуточным преобразованием энергии и с прямым преобразованием энергии (рисунок 1.1).

При промежуточном преобразовании (цикл 1) внутренняя энергия топлива (химическая, ядерная, солнечная и другая энергия) преобразуются в тепловую энергию, которая затем уже с помощью турбогенераторов трансформируется в механическую и затем в электрическую энергию.

При прямом преобразовании (циклы 2 и 3) исключается преобразование тепловой энергии в механическую.

По циклу 2 (рисунок 1.1), реализующему прямое преобразование неэлектрической энергии в электрическую, осуществляется преобразование химической, ядерной и солнечной энергии в электрическую энергию с помощью химических источников тока (ХИТ), ядерных преобразователей и фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), соответственно, (рисунок 1.2).

По циклу 3 (рисунок 1.1), также реализующему прямое преобразование неэлектрической энергии в электрическую, осуществляется преобразование тепловой энергии в электрическую энергию с помощью термоэлектрических генераторов (ТЭГ) и термоэмиссионных преобразователей (ТЭП),

соответственно, (рисунок 1.2).

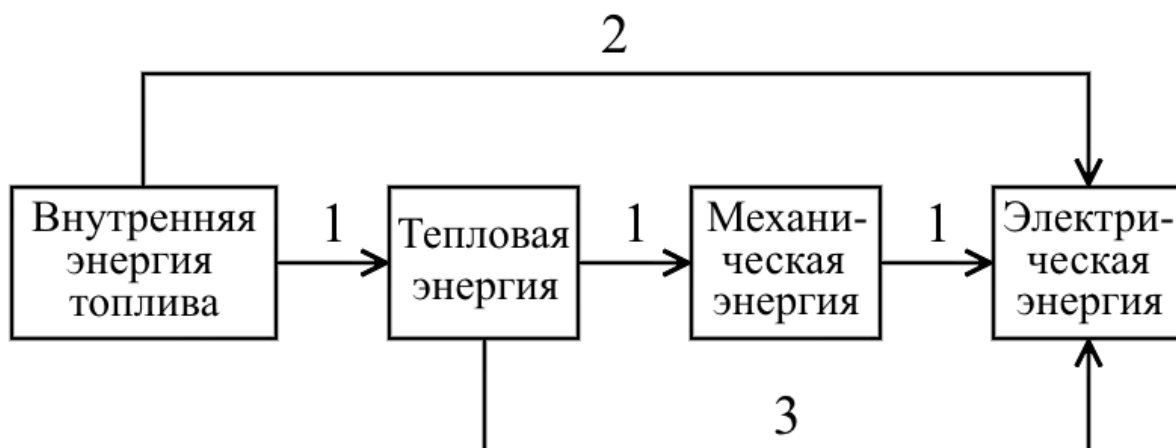


Рисунок 1.1 - Методы преобразования внутренней энергии топлива в электрическую энергию

На рисунке 1.2 показаны виды неэлектрической энергии и устройства для ее преобразования в электрическую энергию.

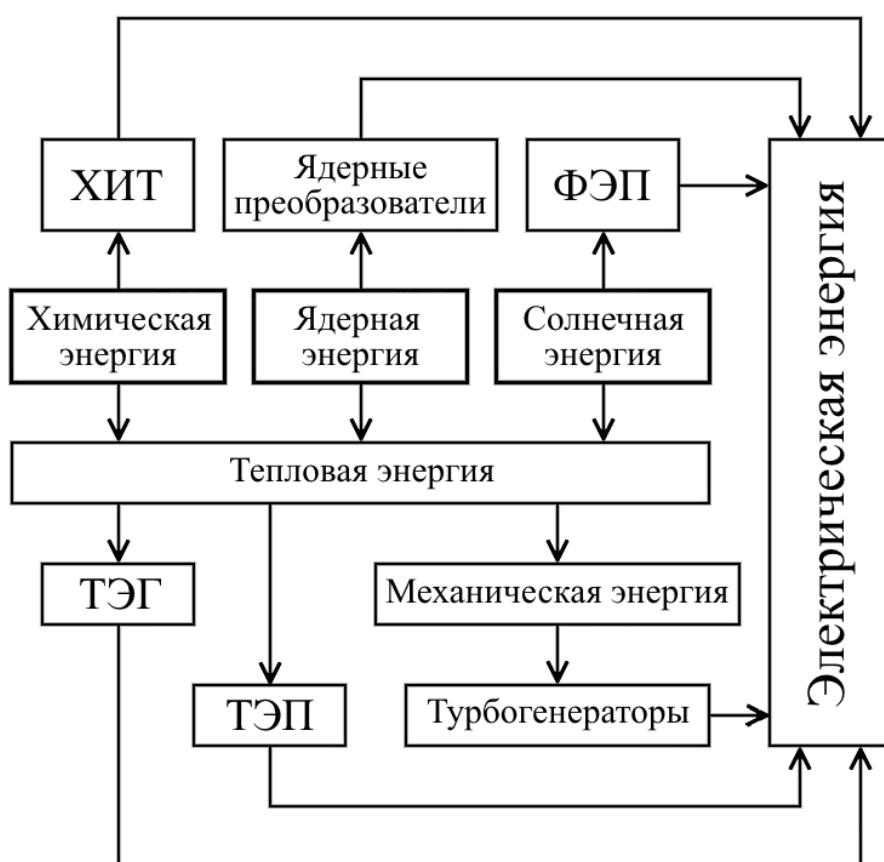


Рисунок 1.2 - Виды неэлектрической энергии и траектории ее преобразования в электрическую энергию и устройства, реализующие эти преобразования

## 1.2. Структурная схема электропреобразовательных устройств

Электропреобразовательные устройства преобразуют электрическую энергию одного рода тока в электрическую энергию другого рода тока или в энергию того же рода тока, но другого количества и/или качества (таблица 1.1).

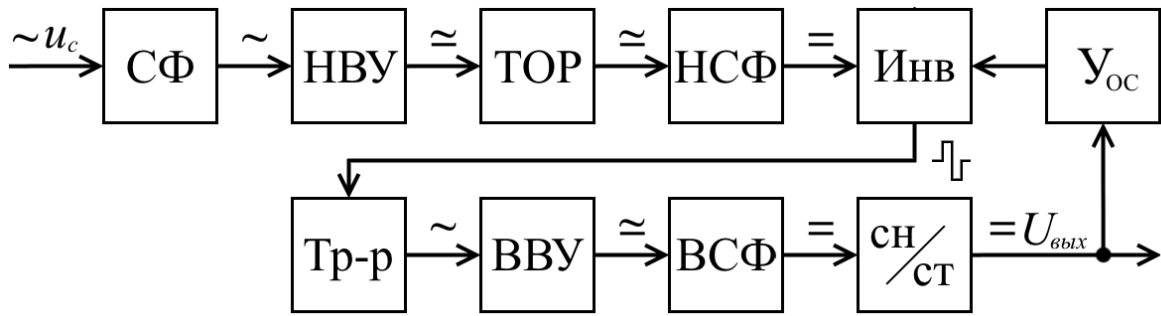
*Таблица 1.1 - Виды преобразований энергии постоянного и переменного токов и устройства для их реализации*

№ п.п.	Род тока, из энергии которого выполняется преобразование	Род тока, в энергию которого выполняется преобразование	Название процесса	Устройства, осуществляющие преобразование
1	Переменный	Постоянный	Выпрямление	Выпрямительные устройства (преобразователи AC/DC (англ. - Alternating Current / Direct Current Converter))
2	Постоянный	Постоянный	Преобразование постоянного тока в постоянный (стабилизация, преобразование)	Стабилизаторы и преобразователи DC/DC (англ. - Direct Current / Direct Current Converter)
3	Постоянный	Переменный	Инвертирование	Инверторы (преобразователи DC/AC (англ. - Direct Current / Alternating Current Converter))
4	Переменный	Переменный	Преобразование переменного тока в переменный (стабилизация, трансформация)	Трансформаторы, стабилизаторы и преобразователи AC/AC (англ. - Alternating Current / Alternating Current Converter)

На рисунке 1.3 показана структурная схема современного электропреобразовательного устройства, работающего от однофазной промышленной сети переменного тока.

Напряжение  $u_c$  переменного тока питающей промышленной сети (как правило, напряжением 220 В и частотой  $f = 50$  Гц) подвергается последовательно соответствующим преобразованиям в сетевом фильтре (СФ), низкочастотном выпрямительном устройстве (НВУ), токоограничивающем резисторе (ТОР) и низкочастотном сглаживающем фильтре (НСФ).

Сетевой фильтр выполняет две функции. Во-первых, он защищает сеть от помех, создаваемым самим ЭПУ. Во-вторых, защищает ЭПУ от помех, создаваемых сетью.



*Рисунок 1.3 - Структурная схема современного одноканального электропреобразовательного устройства, построенного по бестрансформаторной схеме и использующего энергию промышленной сети переменного тока*

Затем выпрямленное и сглаженное сетевое напряжение подается на инвертор (ИНВ), на выходе которого формируется, как правило, напряжение высокой частоты ( $f = 10 \dots 4000$  кГц) прямоугольной формы, которое преобразуется трансформатором (Тр-р). Трансформатор осуществляет не только преобразование напряжения, сформированного инвертором, но и гальваническую развязку нагрузки и сети. Напряжение с выхода трансформатора подается на последовательно включенные высокочастотное выпрямительное устройство (ВВУ), высокочастотный сглаживающий фильтр (ВСФ) и стабилизатор напряжения (СН) и/или стабилизатор тока (СТ). На рисунке 1.3 показано, что в ЭПУ на выходе может быть использован либо СН, либо СТ, либо одновременно стабилизатор напряжения и стабилизатор тока (СН/СТ). На выходе ЭПУ формируется стабилизированное выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  постоянного тока. Устройство  $Y_{\text{oc}}$  реализует обратную связь в ЭПУ.

Основными устройствами ЭПУ, на которых теряется значительная мощность и от которых зависит КПД, масса и объем электропреобразовательного устройства, являются стабилизатор напряжения или тока, низкочастотный сглаживающий фильтр и сетевой низкочастотный трансформатор. КПД стабилизатора главным образом определяется мощностью, рассеиваемой на его регулирующем элементе. Величина этой мощности зависит как от пределов изменения входного напряжения, так и от диапазонов регулирования выходного напряжения и тока нагрузки.

При низких уровнях выходного напряжения ЭПУ КПД стабилизатора мал, а на его регулирующем элементе рассеивается значительная мощность, часто превышающая полезную мощность, отдаваемую им в нагрузку. При повышении уровня выходного напряжения КПД стабилизатора возрастает.

В ЭПУ включают и устройство защиты и диагностики, связанное со всеми его функциональными блоками. Для этого в ЭПУ вводят дополнительные устройства, воздействующие своими сигналами на соответствующие узлы при аварийных режимах работы ЭПУ. Устройство защиты и диагностики выполняет широкую гамму вспомогательных функций в ЭПУ. Например, индикация состояния всего ЭПУ и его отдельных блоков,

защита от короткого замыкания в нагрузке и от превышения тока нагрузки, защита от превышения выходного напряжения и от понижения выходного напряжения. Все это существенно упрощает взаимодействие человека и электропреобразовательных устройств.

Инвертор осуществляет преобразование энергии постоянного тока в энергию переменного тока высокой частоты, равной  $10 \dots 2000$  кГц, значительно превышающей частоту питающей сети, равной  $50 \dots 800$  Гц. За счёт повышения частоты преобразуемого тока трансформатор современного ЭПУ имеет массу и объём значительно меньшие, нежели сетевой низкочастотный трансформатор той же мощности.

Функцию регулятора выходного напряжения ЭПУ часто выполняет инвертор, выходе которого имеется трансформатор. При изменении выходного напряжения ЭПУ сигнал обратной связи через устройство обратной связи воздействует на регулируемый инвертор, что приводит к изменению длительности импульсов на его выходе.

В настоящее время значительное число технических и медицинских систем использует батарейное питание.

Если первичным источником энергии является батарея, то в схеме ЭПУ отсутствует сетевой низкочастотный выпрямитель и низкочастотный сглаживающий фильтр (рисунок 1.4).

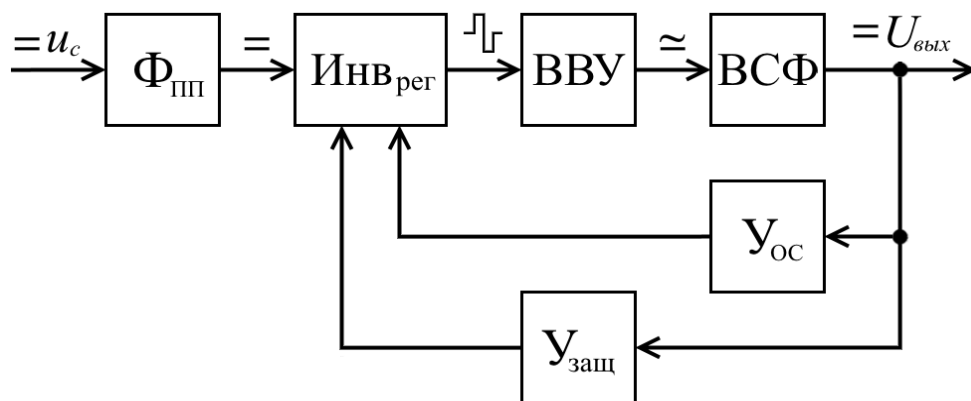


Рисунок 1.4 - Структурная схема современного ЭПУ, питающегося от источника постоянного тока

Энергообеспечение ряда современных радиоэлектронных средств (РЭС), например, радиотехнических и инфокоммуникационных автономных систем, строится по децентрализованному принципу. При этом к печатным платам или функционально законченным блокам подводится нестабилизированное напряжение постоянного тока, а индивидуальный стабилизатор напряжения устанавливается на каждой плате или блоке (рисунок 1.5).

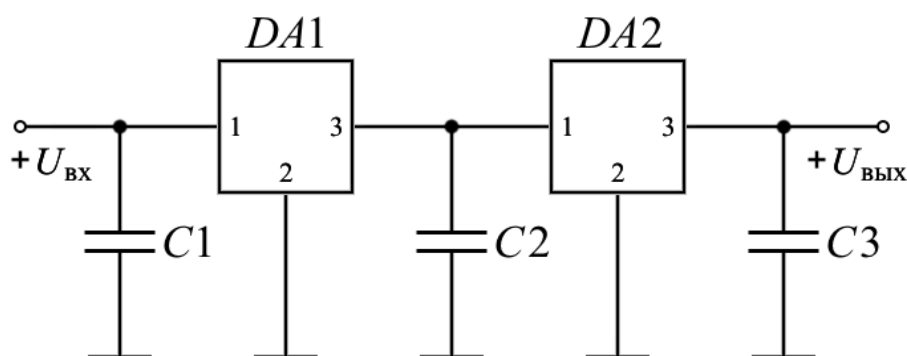


Рисунок 1.5 - Схема современного ЭПУ, использующего энергию постоянного тока и реализующего децентрализованный принцип электропитания РЭС

Стабилизаторы напряжения реализуются на интегральных микросхемах (ИМС)  $DA1$  и  $DA2$ . Причем ИМС  $DA1$ , как правило, представляет собой импульсный стабилизатор напряжения, на выходе которого имеются значительные пульсации напряжения. Конденсатор  $C2$  не может их существенно подавить. Поэтому дополнительно установлена ИМС  $DA2$ , представляющая собой линейный стабилизатор напряжения и выполняющая роль активного сглаживающего фильтра. Выбор емкости конденсаторов  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$  осуществляется по рекомендациям производителей микросхем. Обычно в качестве конденсаторов  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$  используются керамические конденсаторы емкостью из диапазона от 0,1 мкФ до 1 мкФ.

Приборы, работающие в автономном (полевом) режиме в качестве первичных источников электрической энергии используют литий-ионные аккумуляторы. Современные инновационные решения в области электропитания портативных устройств направлены на увеличение продолжительности работы между очередными циклами зарядки за счет более полного использования энергии разряда. Согласно кривой разряда литий-ионных аккумуляторов типичного портативного устройства, приведенной на рисунке 1.6, ожидается, что при выбранной нагрузке аккумулятор прослужит пять часов, но при этом напряжение  $U$  одного элемента по данным Texas Instruments изменяется от 4,2 В при полной зарядке, снижаясь в конце разряда до 3,0 В. При непосредственном питании логических элементов со стандартным напряжением 3,3 В при том же токе нагрузки заряда аккумулятора хватит на время  $t$  чуть более трех часов (вместо пяти часов, рассчитанных исходя из его номинальной емкости).





*Рисунок 1.6 - Кривая разряда литий-ионного аккумулятора*

Традиционные системы электропитания батарейных устройств состоят из набора микросхем, каждая из которых выполняет несколько специализированных функций - защиту устройства от повышенного напряжения питания, заряд аккумулятора, формирование нескольких стабилизированных напряжений для питания микроконтроллера и периферийных устройств и так далее. Все чаще в структуру систем электропитания батарейных устройств добавляется конверторный преобразователь (иногда называют комбинированный или понижающе-повышающий), который особенно полезен, когда начальное напряжение выше, а к концу разряда первичного источника электропитания становится ниже требуемого стабилизированного выходного напряжения.

#### **4. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА (DC/DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ)**

Технические системы различного назначения требуют для своей работы одного или нескольких стабильных источников постоянного тока, к которым предъявляются определенные требования, среди которых важнейшими являются стабильность напряжения и/или тока на выходе, низкий уровень пульсаций и др.

Качество выходного напряжения ИВЭ легко может быть улучшено с помощью стабилизаторов. Стабилизатор обеспечивает автоматическое поддержание (стабилизацию) напряжения (СН) и/или тока (СТ) на стороне нагрузки с заданной точностью и поэтому является неотъемлемой частью практически всех источников вторичного электропитания РЭС.

##### **4.1. Классификация стабилизаторов напряжения и тока**

Классификация СН и СТ постоянного тока показана на рисунке 4.1. По

физическому принципу работы стабилизаторы напряжения и тока разделяются на параметрические и компенсационные.

Параметрическими называются стабилизаторы напряжения и тока, у которых стабилизация выходного напряжения и/или тока нагрузки осуществляется за счет нелинейного изменения характеристики, а значит и параметра (например, вольт-амперной характеристики) соответствующего электрорадиоэлемента (как правило, стабилитронов, стабилиторов, стабилиток, транзисторов (биполярных или полевых)).

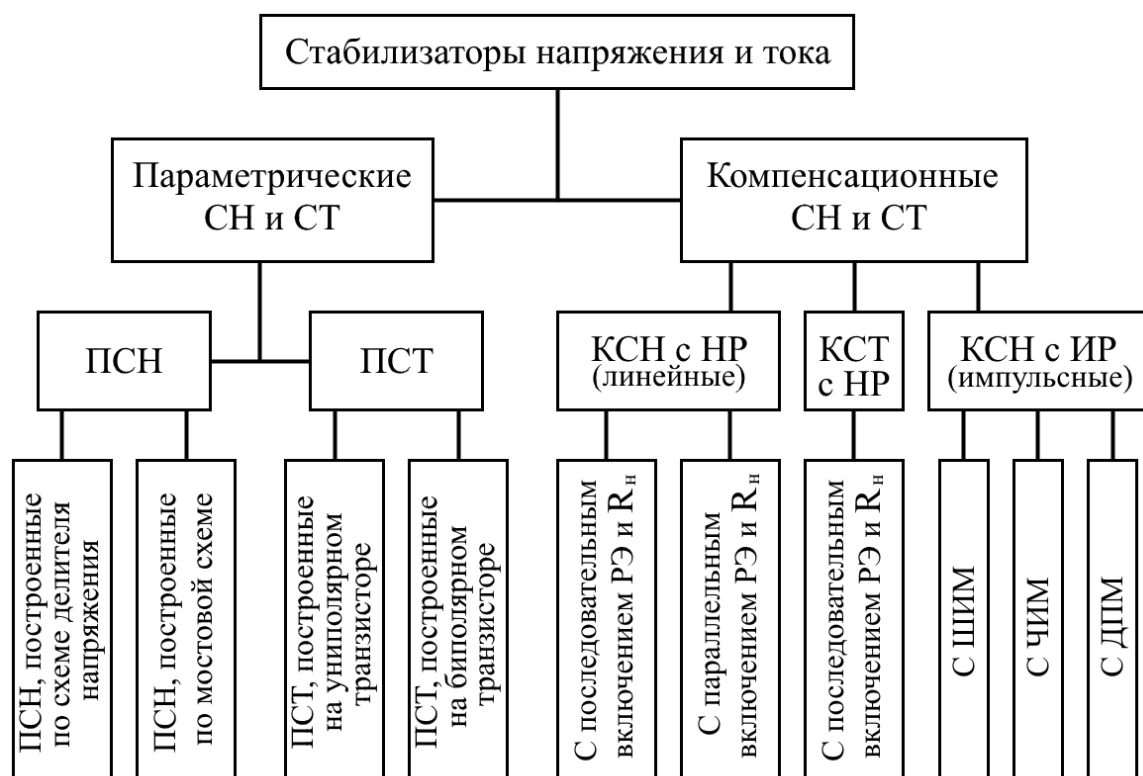


Рисунок 4.1. Классификация стабилизаторов напряжения и тока

Компенсационными называются стабилизаторы, у которых стабилизация выходного напряжения или тока нагрузки осуществляется за счет изменения параметров управляемого прибора, называемого регулирующим элементом, за счет воздействия на него сигнала обратной связи. Таким образом, компенсационные стабилизаторы выходного напряжения или тока нагрузки представляют собой замкнутую систему автоматического регулирования с отрицательной обратной связью (ООС). В компенсационных стабилизаторах напряжения сигнал обратной связи является функцией выходного напряжения, а компенсационных стабилизаторах тока - функцией тока нагрузки.

По временному режиму работы регулирующего элемента компенсационного стабилизатора последние подразделяются на компенсационные стабилизаторы напряжения с непрерывным регулированием и компенсационные стабилизаторы напряжения с импульсным регулированием.

В КСН с НР рабочая точка регулирующего биполярного транзистора находится на линейном участке его коллекторной характеристики

(рисунок 4.2). Поэтому КСН с ИР часто называют линейными стабилизаторами напряжения.

В КСН с ИР регулирующий транзистор работает в импульсном (ключевом) режиме, то есть рабочая точка регулирующего транзистора перемещается из режима насыщения в режим отсечки и обратно. Причем большую часть времени рабочая точка регулирующего транзистора находится в режиме насыщения и режиме отсечки.

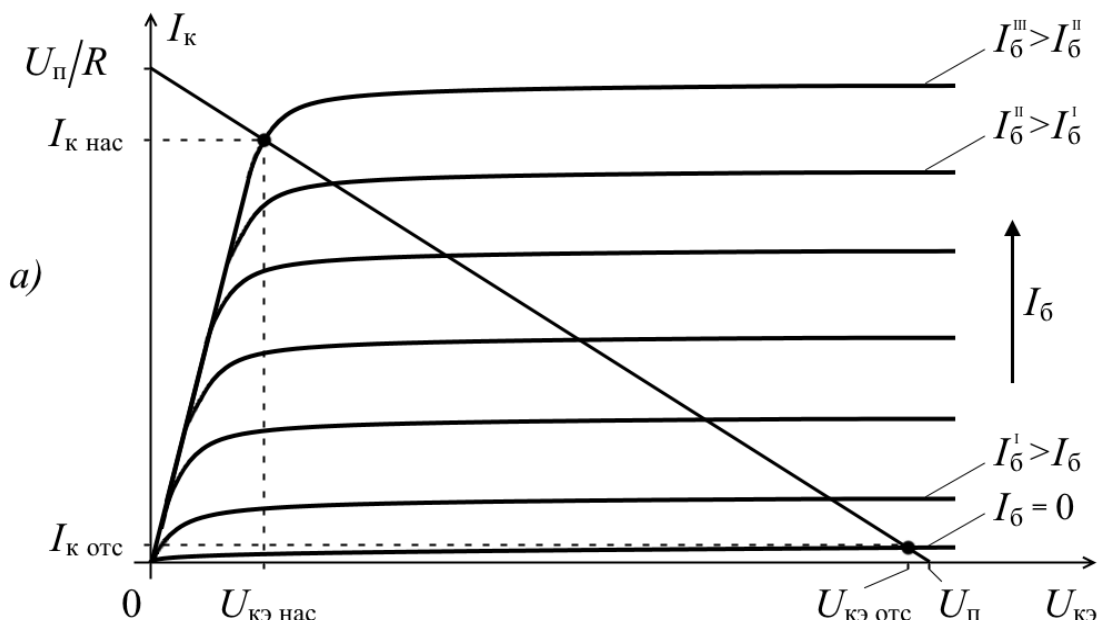


Рисунок 4.2 – Коллекторная характеристика биполярного транзистора

Различают три временных режима управления силовым (регулирующим) транзистором: широтно-импульсная модуляция (ШИМ), частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) и двухпозиционная (релейная) модуляция (ДПМ). Частота переключения (преобразования)  $f_n$  транзистора, выполняющего роль регулирующего элемента в КСН с ИР, выбирают из диапазона от 50 кГц до 2 МГц.

Надо отметить, что параметрические стабилизаторы и компенсационные стабилизаторы с непрерывным регулированием фактически являются DC/DC преобразователями.

## 4.2. Физика и схемотехника параметрических стабилизаторов напряжения

Принцип действия параметрических стабилизаторов напряжения и тока основан на использовании для достижения конечного эффекта нелинейности ВАХ стабилитронов, стабилиторов, стабилиток и транзисторов. Это предопределяет достаточно простую физику и схемотехнику ПСН и ПСТ.

Наиболее часто в качестве нелинейного электрорадиоэлемента в параметрических стабилизаторах напряжения постоянного тока применяются стабилитроны и стабилиторы, представляющие собой разновидности полупроводниковых приборов с одним  $p-n$  переходом, предназначенные для стабилизации напряжения на определенном уровне.

Стабилитроном называют полупроводниковый диод, у которого для стабилизации напряжения используется участок пробоя.

Стабистором называют полупроводниковый диод, у которого для стабилизации напряжения используется прямая ветвь его ВАХ.

Работа стабилитрона основана на использовании явления электрического пробоя  $p$ - $n$  перехода при включении диода в обратном направлении. Механизм пробоя может быть туннельным, лавинным или смешанным. У низковольтных стабилитронов (с низким сопротивлением базы) более вероятен туннельный пробой. У стабилитронов со сравнительно высокоомной базой пробой носит лавинный характер. Материалы, используемые для создания  $p$ - $n$  перехода стабилитронов, имеют высокую концентрацию примесей. При этом напряженность электрического поля в  $p$ - $n$  переходе значительно выше, чем у обычных диодов. При относительно небольших обратных напряжениях в  $p$ - $n$  переходе возникает сильное электрическое поле, вызывающее его электрический пробой. В этом режиме нагрев диода не носит лавинообразного характера. Поэтому электрический пробой не переходит в тепловой.

Стабилитроны используют обратную ветвь ВАХ  $p$ - $n$  перехода (3-й квадрант на рисунке 4.3) и при этом обладают малым напряжением пробоя и поддерживают регламентированное напряжение от  $\sim 2$  В до 300 В на одном уровне при значительном изменении обратного тока.

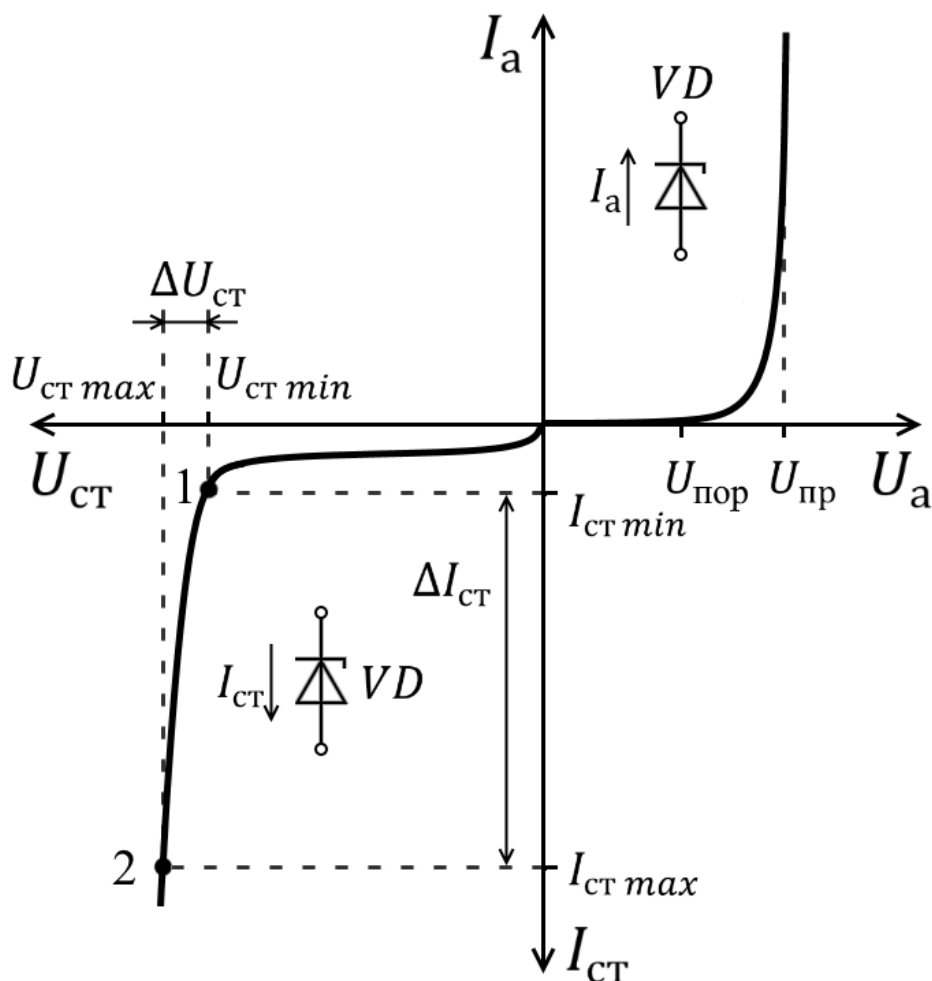


Рисунок 4.3 – Вольт-амперная характеристика стабилитрона

Стабисторы, как и диоды, используют прямую ветвь ВАХ (1-й квадрант на рисунке 4.3) и поддерживают на заданном уровне напряжение от  $\sim 0,6$  В до 2,1 В. Но их ВАХ располагается почти параллельно оси токов.

На рисунке 4.3 представлена ВАХ стабилитрона, у которого область 1-2 характеристики является рабочей. Стабилитроны работают на обратной ветви вольт-амперной характеристики  $p$ - $n$ -перехода в области пробоя.

При включении стабилитрона в прямом направлении он обладает ВАХ, практически совпадающей с ВАХ диода (1-й квадрант на рисунке 4.3). ВАХ стабилитрона, включенного в обратном направлении, существенно отличается от ВАХ диода (3-й квадрант на рисунке 4.3).

Стабилитроны характеризуются следующими основными параметрами: минимальным током стабилизации  $I_{\text{ст min}}$ , характеризующим начало рабочего участка ВАХ (точка 1 на рисунке 4.3); максимальным током стабилизации  $I_{\text{ст max}}$  (точка 2 на рисунке 4.3), при котором мощность  $P_{VD}$ , рассеиваемая на стабилитроне, не превышает значения  $P_{VD \text{ max}}$ , где  $P_{VD \text{ max}}$  – максимально допустимая мощность, рассеиваемая стабилитроном, при которой температура его  $p$ - $n$  перехода не превышает предельно допустимого значения; динамическим сопротивлением  $R_{\text{ст i}}$ , определяемым как модуль отношения приращения напряжения стабилизации к соответствующему приращению тока, протекающего через стабилитрон; разбросом напряжения стабилизации  $\Delta U_{\text{ст}}$  от номинального напряжения стабилизации при заданных токе стабилитрона и температуре окружающей среды; температурным коэффициентом стабилизации напряжения  $\gamma_{\text{ст}}$ , определяемым отношением относительного изменения напряжения стабилизации в процентах к абсолютному изменению температуры и вычисляемым по формуле

$$\gamma_{\text{ст}} = \frac{dU_{\text{ст}}/U_{\text{ст}}}{dT} \cdot 100\%, \quad \%/K \quad (4.1)$$

или в конечных разностях

$$\gamma_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}/U_{\text{ст}}}{\Delta T} \cdot 100, \quad \%/K. \quad (4.2)$$

Единицей измерения ТКН является  $\%/K$  (читается процент на Кельвин).

В частности у стабилитрона КС510А минимальное напряжение стабилизации  $U_{\text{ст min}} = 9,9$  В, максимальное напряжение стабилизации  $U_{\text{ст max}} = 10,0$  В, минимальный ток стабилизации  $I_{\text{ст min}} = 5$  мА и максимальный ток стабилизации  $I_{\text{ст max}} = 30$  мА.

Если на катод стабилитрона поступает положительный потенциал входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , а на анод стабилитрона поступает отрицательный потенциал этого напряжения, то такое включение стабилитрона называется рабочим. Пробойный режим в стабилитроне не связан с инжекцией неосновных носителей. В связи с этим инерционные явления в стабилитроне, связанные с накоплением и рассасыванием носителей, при переходе из области пробоя в область запираения и обратно практически отсутствуют. Это позволяет использовать их в импульсных схемах в качестве фиксаторов уровней и ограничителей напряжения.

Динамическое сопротивление стабилитрона, характеризующее его стабилизирующие свойства, при увеличении тока стабилизации уменьшается на 10...20 %. Это объясняется тем, что при увеличении приложенного напряжения увеличивается площадь участков, на которых произошел пробой. При токе, мало отличающемся от номинального, динамическое сопротивление стабилитрона близко к собственному сопротивлению базы.

Известно, что динамическое сопротивление маломощных стабилитронов является нелинейной функцией напряжения и тока стабилизации (рисунок 4.4, а).

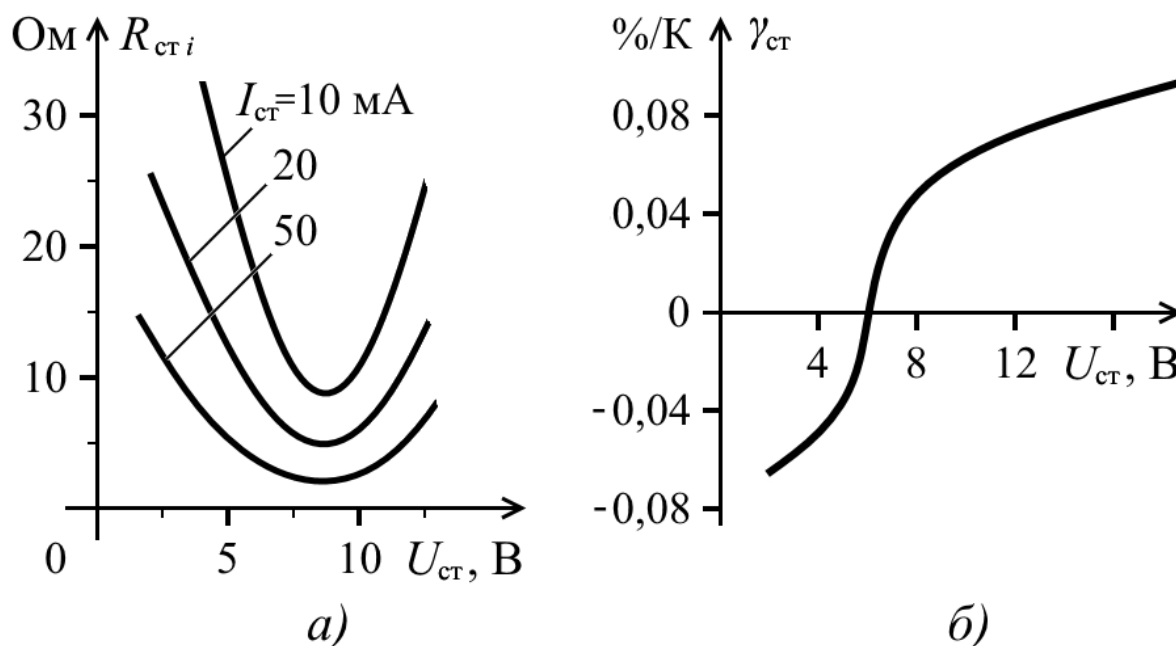


Рисунок 4.4 – Характерные зависимости  $R_{cti}$  и  $\gamma_{ct}$  стабилитронов от напряжения: а – динамического сопротивления стабилитронов; б – температурного коэффициента напряжения стабилизации

Из рисунка 4.4, а видно, что минимальное динамическое сопротивление  $R_{cti}$  имеют маломощные стабилитроны с напряжением стабилизации около 7 В.

Следовательно, если требуется получить напряжение стабилизации порядка 14 В, то с целью уменьшения динамического сопротивления ПСН лучше применить два последовательно соединенных стабилитрона вместо одного высоковольтного.

Параллельное включение стабилитронов не рекомендуется, поскольку в этом случае в схеме стабилизации будет работать только один стабилитрон с наименьшим напряжением стабилизации.

На рисунке 4.4, б показана зависимость температурного коэффициента напряжения  $\gamma_{ct}$  от напряжения стабилизации  $U_{ct}$ .

На рисунке 4.5 приведены типовые вольт-амперные характеристики стабилитронов при температурах 293 К и 333 К.

Стабилитроны и диоды представляют собой полупроводниковые приборы с одним  $p-n$  переходом. Поэтому можно считать, что на рисунке 4.5 приведены типовые вольт-амперные характеристики  $p-n$  перехода.

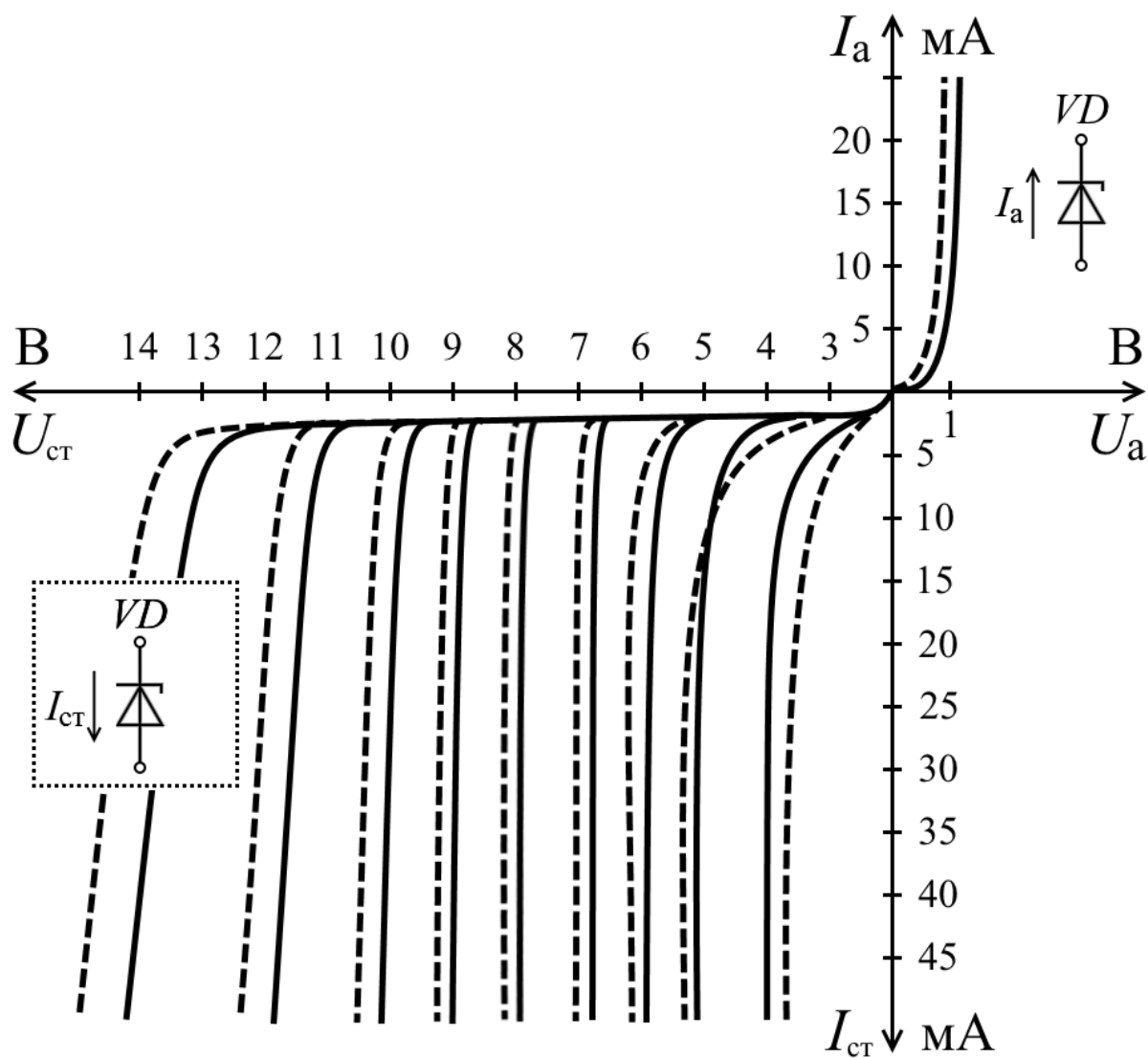


Рисунок 4.5 – Типовые вольт-амперные характеристики стабилитронов при температурах 293 К (сплошные линии) и 333 К (штриховые линии)

Стабилитроны могут быть включены в режиме стабилизации (ВАХ в 3-м квадранте) или в диодном режиме (ВАХ в 1-м квадранте). У диодов, реализующих прямое включение  $p$ - $n$  перехода, и стабилитронов, включенных в диодном режиме, вольт-амперная характеристика представляется собой, как правило, одной обобщенной линией (на рисунке 4.4 она показана в первом квадранте сплошной линией). С повышением температуры полупроводникового прибора его ВАХ смещается влево (на рисунке 4.5 это иллюстрирует штриховая линия 1-го квадранта), то есть диоды и стабилитроны, включенные в диодном режиме, имеют отрицательный ТКН.

Для стабилитронов, реализующих обратное включение  $p$ - $n$  перехода, величина ТКН существенно зависит от напряжения стабилизации. Для значений напряжения стабилизации от 7 В до 13 В сходные ВАХ имеют стабилитроны Д814А...Д814Д, а для  $U_{ст}$  от 3 В до 7 В – стабилитроны 2С133А...2С168А (сплошные линии в 3-ем квадранте рассматриваемого рисунка).

Из рисунка 4.5 видно, что наклон кривых, характеризующих изменение

$U_{\text{ст}}$  при изменении тока  $I_{\text{ст}}$ , протекающего через стабилитрон, для стабилитронов с разными напряжениями стабилизации  $U_{\text{ст}}$  неодинаков, причем этот наклон наименьший в области  $U_{\text{ст}}$  от 7 В до 9 В. При напряжениях стабилизации, превышающих 9 В и меньших 7 В, наклон кривых увеличивается. В области  $U_{\text{ст}} < 6$  В при токах  $I_{\text{ст}} < 5 \dots 10$  мА наклон кривых особенно большой.

Прямое падение напряжения  $U_{\text{пр}}$  на диоде при токах, превышающих 1 мА, равно 0,6...0,7 В и незначительно возрастает при увеличении тока до 20 мА.

Рассматривая вольт-амперные характеристики стабилитронов при температурах 293 К и 333 К можно заметить, что с повышением температуры ВАХ сдвигаются влево при напряжении стабилизации больших ~6 В и вправо при напряжениях стабилизации меньших ~5 В. Из информации, приведенной на рисунке 4.4 видно, что стабилитроны с  $U_{\text{ст}} > 6$  В имеют положительный ТКН, стабилитроны с  $U_{\text{ст}} < 5$  В - отрицательный ТКН, а у стабилитронов с напряжением стабилизации 5...6 В при определенных токах ТКН стремится к нулю.

Информация, представленная на рисунке 4.5, широко используется при разработке параметрических стабилизаторов напряжения с целью уменьшения их ТКН (рисунок 4.6). Так, положительный ТКН стабилитронов с  $U_{\text{ст}} > 6$  В можно скомпенсировать, включив последовательно с ними стабилитроны в прямом направлении имеющие отрицательный ТКН.

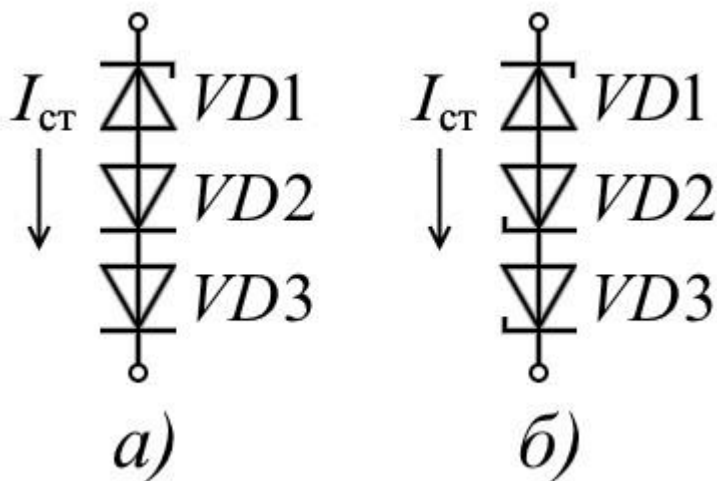


Рисунок 4.6 - Примеры термокомпенсации стабилитронов: а – с использованием дополнительных диодов; б – с использованием дополнительных стабилитронов

Так как при включении в прямом направлении стабилитроны являются обычными  $p-n$  переходами, то принципиально важно, что для термокомпенсации могут быть использованы не только стабилитроны, но и диоды. Комбинируя в одном корпусе последовательное соединение  $p-n$  перехода, включенного в обратном направлении, и одного или нескольких  $p-n$  переходов, включенных в прямом направлении, получают полупроводниковые приборы с приемлемой вольт-амперной характеристикой



и ТКН, приближающемся к нулю.

По такому принципу построены отечественные прецизионные стабилитроны типа Д818 и КС196, где используется последовательное включение в одном корпусе трех  $p-n$  переходов: одного, включенного в обратном направлении, и двух, включенных в прямом направлении.

Если требуется стабилизировать или ограничить короткие импульсы напряжения (длительностью десятки наносекунд – сотни микросекунд), то применяют специально предназначенные для этих целей стабилитроны, например, 2С175Е, КС182Е, 2С211Е и др. Они имеют сниженную барьерную емкость, так что общая емкость составляет от нескольких до двух десятков пикофард, и малую длительность переходного процесса (от долей до нескольких наносекунд).

В таблице 4.1 приведены характеристики некоторых отечественных стабилитронов.

*Таблица 4.1 - Характеристики некоторых отечественных стабилитронов*

Тип стабилитрона	$U_{\text{вых min}} \dots U_{\text{вых max}}, \text{ В}$	$I_{\text{ст min}} \dots I_{\text{ст max}}, \text{ мА}$	$R_{\text{ст i}}, \text{ Ом}$
КС133А	3,0...3,7	3...81	65
КС139А	3,5...4,3	3...70	60
КС147А	4,1...5,2	3...58	56
КС156А	5,0...6,3	3...55	28

Маркировка стабилитронов выполняется аналогично маркировке выпрямительных диодов. Маркировка стабилитронов средней и большой мощности выполняется непосредственно на корпусе.

Маркировка предусматривает обозначение стабилитрона, направление прямого тока через стабилитрон, а также приводятся другие обозначения, принятые изготовителем. У маломощных стабилитронов маркировка выполняется с помощью цветowych точек или колец, наносимых на корпус стабилитрона, аналогично тому, как это делается у выпрямительных диодов. Значения цветовой маркировки можно найти либо в справочной литературе, либо в технических условиях на конкретный полупроводниковый прибор.

Разновидностью стабилитронов являются стабисторы, которые также предназначены для стабилизации напряжения. Дело в том, что у стабисторов крутизна  $S$ , определяемая соотношением  $S = di/dU$ , прямой ветви вольт-амперной характеристики больше, чем у диодов и стабилитронов, включенных в диодном режиме. Стабисторы работают при прямом падении напряжения и позволяют стабилизировать малые напряжения (порядка 0,6...2,1 В). По основным параметрам они близки к стабилитронам, но включаются в цепь стабилизации в прямом направлении. В таблице 4.2 приведены характеристики некоторых отечественных стабисторов.

Таблица 4.2. Характеристики некоторых отечественных стабисторов

Тип стабистора	$U_{\text{вых min}} \dots U_{\text{вых max}}, \text{ В}$	$I_{\text{ст min}} \dots I_{\text{ст max}}, \text{ мА}$	$R_{\text{ст i}}, \text{ Ом}$
КС107А	0,63...0,77	1...100	7
КС113А	1,17...1,43	1...100	2
КС119А	1,71...2,09	1...100	15

Стабисторы используются для стабилизации малых напряжений при токах стабилизации до  $\sim 100$  мА, а также в качестве термокомпенсирующих элементов.

Конструкция и маркировка стабисторов выполняются аналогично конструкции и маркировке у стабилитронов.

На рисунке 4.7 показаны структурная и принципиальная электрическая схемы ПСН постоянного тока, построенного по топологии делителя напряжения.

Структурная схема ПСН постоянного тока (рисунок 4.7, а) состоит из двух элементов: линейного (ЛЭ) и нелинейного (НЭ).

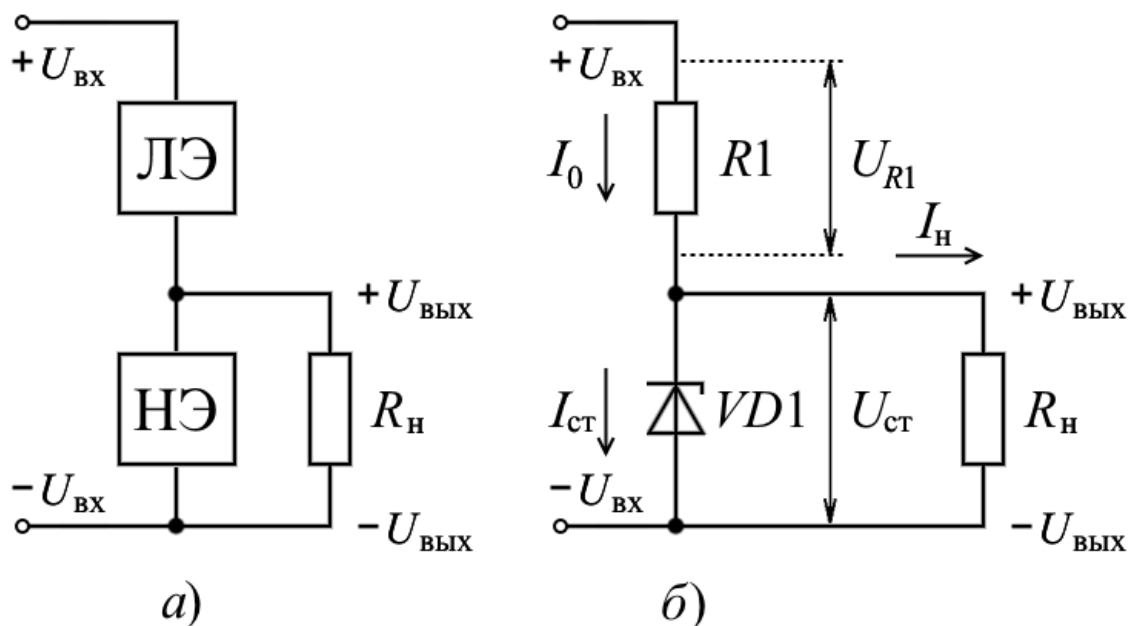


Рисунок 4.7 - Схема параметрического стабилизатора напряжения постоянного тока, построенного по схеме делителя напряжения: а – структурная схема; б – принципиальная электрическая схема

Функцию ЛЭ выполняет либо резистор, либо параметрический стабилизатор тока, а функцию НЭ выполняет либо стабилитрон, либо стабистор.

Нагрузка ПСН включается параллельно нелинейному элементу.

На рисунке 4.7, б показана традиционная схема ПСН постоянного тока, построенного по схеме делителя напряжения, у которого функцию ЛЭ выполняет гасящий (балластный) резистор  $R1$ , а функцию НЭ – стабилитрон  $VD1$ .

Принцип действия ПСН заключается в следующем. Пусть ПСН, подключенный к входному напряжению  $U_{\text{вх}}$ , работает в установившемся режиме: через гасящий резистор  $R1$  протекает ток  $I_0$ , который и формирует ток  $I_{\text{ст}}$ , протекающий через стабилитрон  $VD1$ , и ток  $I_{\text{н}}$ , протекающий через нагрузку  $R_{\text{н}}$ , то есть

$$I_0 = I_{\text{ст}} + I_{\text{н}}. \quad (4.3)$$

При, например, увеличении входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  параметрического стабилизатора напряжения возрастает и ток  $I_0$ , потребляемый ПСН, который согласно уравнению (4.3) равен сумме токов  $I_{\text{ст}}$  и  $I_{\text{н}}$ , которые, естественно, тоже возрастут.

Из-за нелинейности ВАХ стабилитрона даже значительному возрастанию тока  $I_{\text{ст}}$ , протекающего через стабилитрон, соответствует малое увеличение напряжения  $U_{\text{ст}}$  на стабилитроне  $VD1$ . Очевидно, что напряжение  $U_{\text{ст}}$  на стабилитроне  $VD1$  равно выходному напряжению  $U_{\text{вых}}$  ПСН. Следовательно, устройство, схема которого показана на рисунок 4.7, б, выполняет функцию стабилизации выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ . Разность между входным напряжением  $U_{\text{вх}}$  ПСН и падением напряжения на стабилитроне  $VD1$ , равным выходному напряжению  $U_{\text{вых}}$ , приложена к резистору  $R1$ . Таким образом, к резистору  $R1$  приложено избыточное входное напряжение по сравнению с выходным. Поэтому резистор  $R1$  и называют гасящим (балластным).