

Лекция 19. ЦЕПИ С ДИОДАМИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

План

1. Анализ цепей с диодами.
2. Источники вторичного электропитания.
3. Выпрямители.
4. Сглаживающие фильтры.
5. Стабилизаторы напряжения.
6. Выводы.

1. Анализ цепей с диодами

Основная трудность, возникающая при анализе цепей с диодами, заключается в том, что вольт-амперная характеристика этих приборов нелинейна в середине рабочей области.

При ручных расчетах цепей с диодами используют графические методы или кусочно-линейное представление ВАХ диода. Рассмотрим аналитический метод расчета цепей с диодами, основанный на кусочно-линейном представлении их характеристик. ВАХ диода представляют набором линейных отрезков, каждый из которых заменяет реальную ВАХ в определенном диапазоне изменения напряжений и токов.

Прямой ток диода имеет достаточно большую величину уже при незначительном прямом напряжении, а обратный ток диода ничтожно мал даже при достаточно большой величине обратного напряжения. Если включить диод в цепь, в которой напряжения значительно больше, чем прямое напряжение диода, а токи значительно больше обратного тока диода, то простейшую модель диода можно получить, полагая прямое напряжение и обратный ток равными нулю. Такой элемент называют *идеальным диодом*. Поведение идеального диода описывается уравнениями:

$$U = 0, \quad I > 0;$$

$$I = 0, \quad U < 0.$$

Вольт-амперная характеристика идеального диода показана на рис. 19.1. Она образована двумя отрезками прямых, совпадающих с полуосями координат U, I .

Когда диод смещен в прямом направлении, он эквивалентен короткому замыканию. При обратном напряжении идеальный диод подобен разрыву. Очевидно, что мощность идеального диода при любой полярности приложенного напряжения равна нулю:

$$p = ui = 0.$$

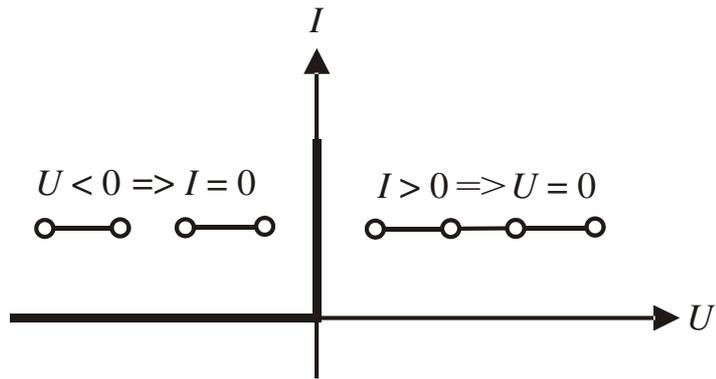


Рис. 19.1

Более точная модель диода, учитывающая ненулевое напряжение на открытом $p-n$ -переходе, показана на рис. 19.2.

При анализе цепей с идеальными диодами можно использовать следующую процедуру.

1. На первом шаге полагаем, что все диоды смещены в прямом направлении, и заменяем их короткими замыканиями.

2. Анализируем полученную схему и определяем направления токов через диоды. Если направление тока, полученное в результате расчета, совпадает с прямым током диода, оставляем короткое замыкание, если нет – заменяем его разрывом.

3. Анализируем цепь, полученную на втором шаге, и находим фактические значения напряжений и токов.

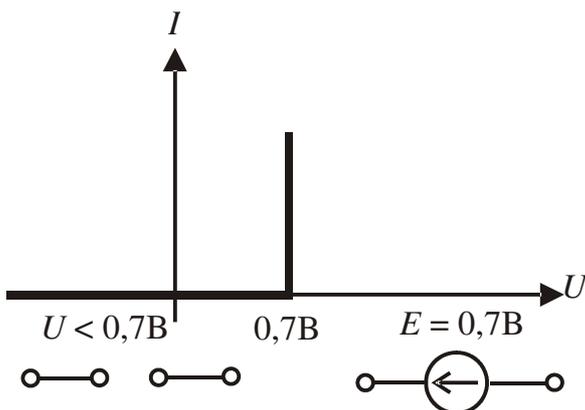


Рис. 19.2

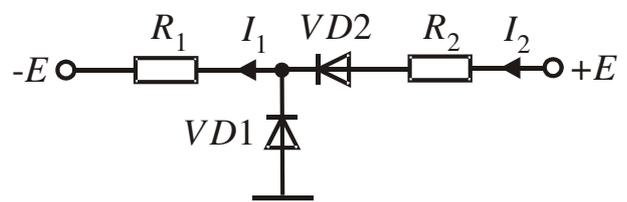


Рис. 19.3

Пример 19.1. Рассчитать токи в схеме на рис. 19.3, если $R_1 = 10 \text{ кОм}$, $R_2 = 5 \text{ кОм}$, $E = 10 \text{ В}$. Диоды идеальные.

Решение. Сначала полагаем, что диоды смещены в прямом направлении, и заменяем их короткими замыканиями (рис. 19.4, а).

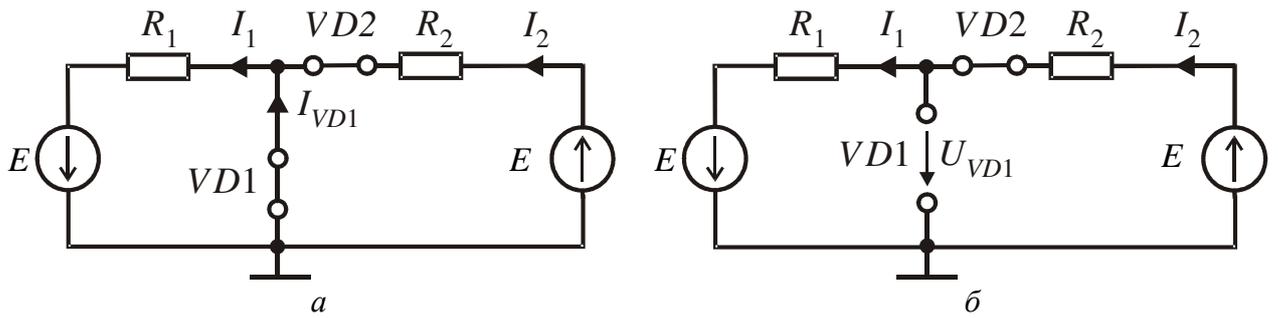


Рис. 19.4

Из уравнения для левого контура следует, что

$$I_1 = \frac{E}{R_1} = 1 \text{ мА}.$$

Ток I_2 найдем из уравнения для правого контура:

$$I_2 = \frac{E}{R_2} = \frac{10}{5} = 2 \text{ мА}.$$

Ток диода

$$I_{D1} = I_1 - I_2 = 1 - 2 = -1 \text{ мА}.$$

Расчеты показывают, что диод $VD1$ закрыт. Заменяя $VD1$ разрывом, получаем расчетную схему, показанную на рис. 19.4, б.

Токи

$$I_1 = I_2 = \frac{2E}{R_1 + R_2} = \frac{2 \cdot 10}{10 + 5} = 1.33 \text{ мА}.$$

Напряжение на закрытом диоде:

$$U_{VD1} = E - R_2 I_2 = 10 - 5 \cdot 1.33 = 3.33 \text{ В}.$$

Рассмотренная модель диода является приближенной. Однако она вполне пригодна для анализа таких цепей, как выпрямители или ограничители напряжения.

2. Источники вторичного электропитания

Источники вторичного электропитания (ИВЭП) предназначены для получения напряжения, необходимо для питания различных электронных устройств. Как известно, действующее значение напряжения сети переменного тока составляет 220 В. В то же время для работы электронных приборов необходимо постоянное напряжение, величина которого обычно не превышает нескольких вольт. Вторичные источники получают энергию от первичных источников: сети переменного тока, аккумуляторов и т. д.

Структурная схема ИВЭП, получающего энергию от сети переменного тока, показана на рис. 19.5. Трансформатор предназначен для изменения уровня переменного напряжения и гальванической развязки выпрямителя и питающей сети. Выпрямитель преобразует переменное напряжение синусоидальной формы в пульсирующее напряжение одной полярности. Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации напряжения на выходе выпрямителя. Стабилизатор уменьшает колебания напряжения на нагрузке.

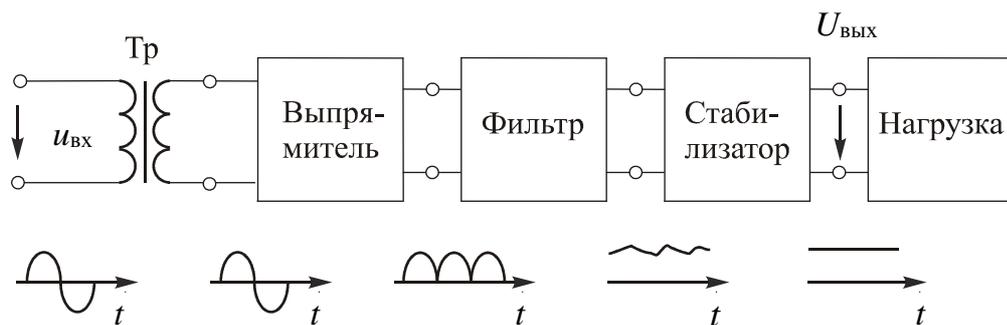


Рис. 19.5

Рассмотренный источник питания имеет большие вес и габариты, определяемые прежде всего размерами трансформатора и сглаживающего фильтра. В настоящее время такие ИВЭП вытесняются преобразовательными устройствами, работающими на частотах, составляющих десятки и сотни килогерц. При этом удастся значительно уменьшить размеры и вес устройства.

3. Выпрямители

Выпрямители служат для преобразования переменного напряжения питающей сети в постоянное. Основными компонентами выпрямителей служат вентили – элементы с явно выраженной нелинейной вольт-амперной характеристикой. В качестве таких элементов используют кремниевые диоды.

Рассмотрим выпрямители, которые используют в маломощных (до нескольких сотен ватт) источниках питания.

Простейшим является однополупериодный выпрямитель. Его схема дана на рис. 19.6. Напряжение и ток нагрузки имеют форму, показанную на рис. 19.7. Выходное напряжение меньше входного на величину падения напряжения на открытом диоде.

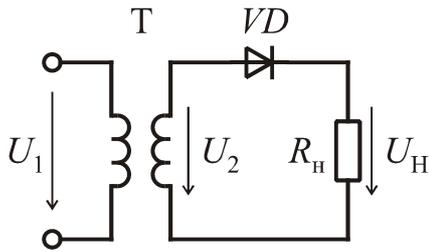


Рис. 19.6

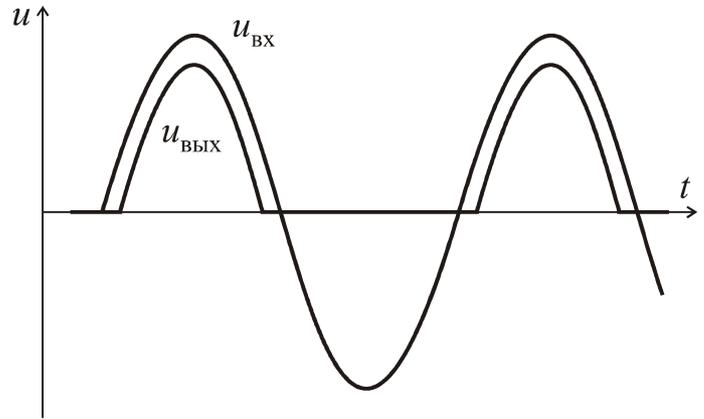


Рис. 19.7

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{вх}}}{\pi} \approx 0.45U_{\text{вх}}. \quad (19.1)$$

Здесь $U_{\text{вх}}$ – действующее значение входного напряжения. С помощью формулы (19.1) по заданному значению напряжения $U_{\text{вых}}$ можно найти входное напряжение выпрямителя.

Максимальное обратное напряжение на диоде

$$U_{\text{обрmax}} = \sqrt{2}U_{\text{вх}} = \pi U_{\text{ср}}.$$

Максимальный ток диода

$$I_{\text{дmax}} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{вх}}}{R} = \pi I_{\text{ср}}.$$

Важным параметром выпрямителя является коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения, равный отношению амплитуды первой (основной) гармоники выпрямленного напряжения к его среднему значению. Для однополупериодного выпрямителя коэффициент пульсаций

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} \approx 1.57.$$

Выпрямленное напряжение и ток в схеме на рис. 19.6 имеют большой уровень пульсаций. Поэтому на практике такую схему применяют в мало-мощных устройствах в тех случаях, когда не требуется высокая степень сглаживания выпрямленного напряжения.

Двухполупериодные выпрямители. Меньший уровень пульсаций выпрямленного напряжения можно получить в двухполупериодных выпрямителях. На рис. 19.8 показана схема выпрямителя с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора.

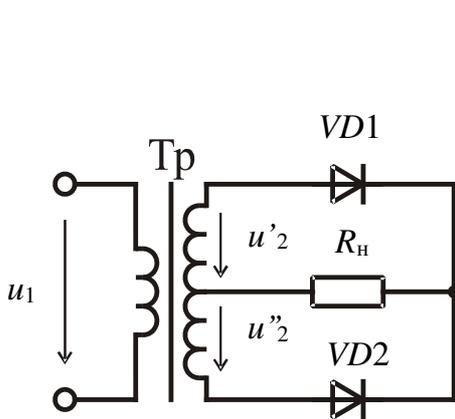


Рис. 19.8

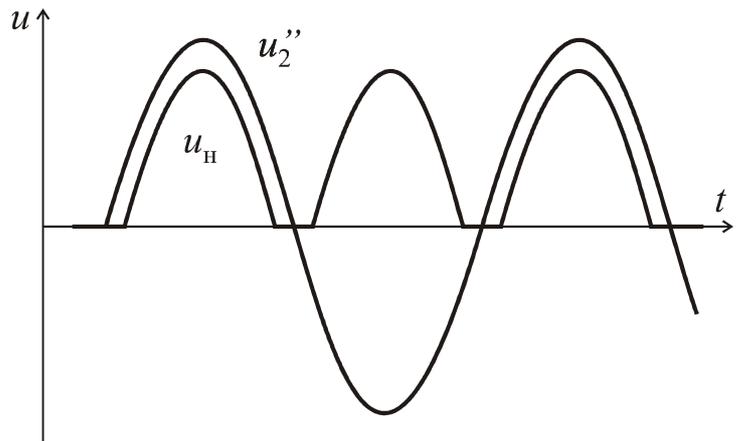


Рис. 19.9

Во вторичной обмотке трансформатора индуцируются напряжения u'_2 и u''_2 , имеющие противоположную полярность. Диоды проводят ток поочередно, каждый в течение полупериода. В положительный полупериод открыт диод $VD1$, а в отрицательный – диод $VD2$. Ток в нагрузке имеет одинаковое направление в оба полупериода, поэтому напряжение на нагрузке имеет форму, показанную на рис. 19.9. Выходное напряжение на рис. 19.9 меньше входного на величину падения напряжения на диоде.

В двухполупериодном выпрямителе постоянная составляющая тока и напряжения увеличивается вдвое по сравнению с однополупериодной схемой:

$$I_H = \frac{2}{\pi} I_{2m}; \quad U_H = \frac{2U'_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U'_2}{\pi} \approx 0.9U_2.$$

Из последней формулы определим действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора:

$$U'_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_H \approx 1.1U_H.$$

Коэффициент пульсаций в данном случае значительно меньше, чем у однополупериодного выпрямителя:

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \approx 0.67.$$

Так как ток во вторичной обмотке трансформатора двухполупериодного выпрямителя синусоидальный, а не пульсирующий, он не содержит постоянной составляющей. Тепловые потери при этом уменьшаются, что позволяет уменьшить габариты трансформатора.

Существенным недостатком схемы на рис. 19.8 является то, что к запертому диоду приложено обратное напряжение, равное удвоенной амплитуде напряжения одного плеча вторичной обмотки трансформатора:

$$U_{\text{обр}} = 2U_{2m}.$$

Поэтому необходимо выбирать диоды с большим обратным напряжением. Более рационально используются диоды в мостовом выпрямителе. Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя показана на рис. 19.10.

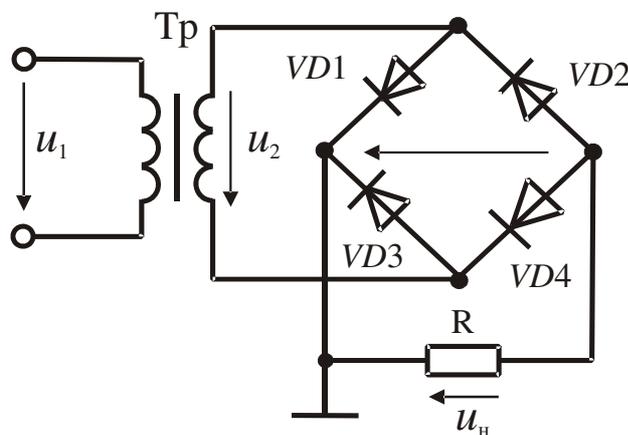


Рис. 19.10

Эта схема имеет такие же значения среднего напряжения и коэффициента пульсаций, что и схема выпрямителя с выводом от средней точки трансформатора. Ее преимущество в том, что обратное напряжения на диодах в два раза меньше. Кроме того, вторичная обмотка трансформатора содержит вдвое меньше витков, чем вторичная обмотка трансформатора в схеме на рис. 19.8. Часто все четыре диода размещают в одном корпусе.

4. Сглаживающие фильтры

Рассмотренные схемы выпрямителей имеют относительно большие значения коэффициента пульсаций. Между тем для питания электронной аппаратуры часто требуется выпрямленное напряжение с коэффициентом пульсаций, не превышающим нескольких процентов. Для уменьшения пульсаций используют специальные устройства – сглаживающие фильтры.

Простейшим является емкостный фильтр (С-фильтр). Рассмотрим его работу на примере однополупериодного выпрямителя (рис. 19.11).

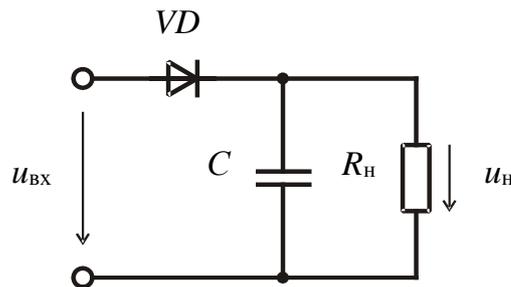


Рис. 19.11

Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения и тока происходит за счет периодической зарядки конденсатора C (когда напряжение на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение на нагрузке) и последующей его разрядки на сопротивление нагрузки.

Временные диаграммы напряжений и токов выпрямителя показаны на рис. 19.12. На интервале времени $t_1 - t_2$ диод открыт и конденсатор заряжается. На интервале $t_2 - t_3$ диод закрыт и конденсатор разряжается через сопротивление R_n . Для уменьшения пульсаций емкость конденсатора должна быть большой, чтобы постоянная времени разряда $R_n C$ была намного больше периода выпрямленного напряжения. Амплитуда пульсаций выпрямленного напряжения U_r определяется приближенной формулой

$$U_r \approx \frac{U_m}{fR_n C}.$$

Здесь f – частота входного напряжения.

Очевидно, что амплитуда пульсаций напряжения на выходе двухполупериодного выпрямителя оказывается в два раза меньше:

$$U_r \approx \frac{U_m}{2fR_n C}.$$

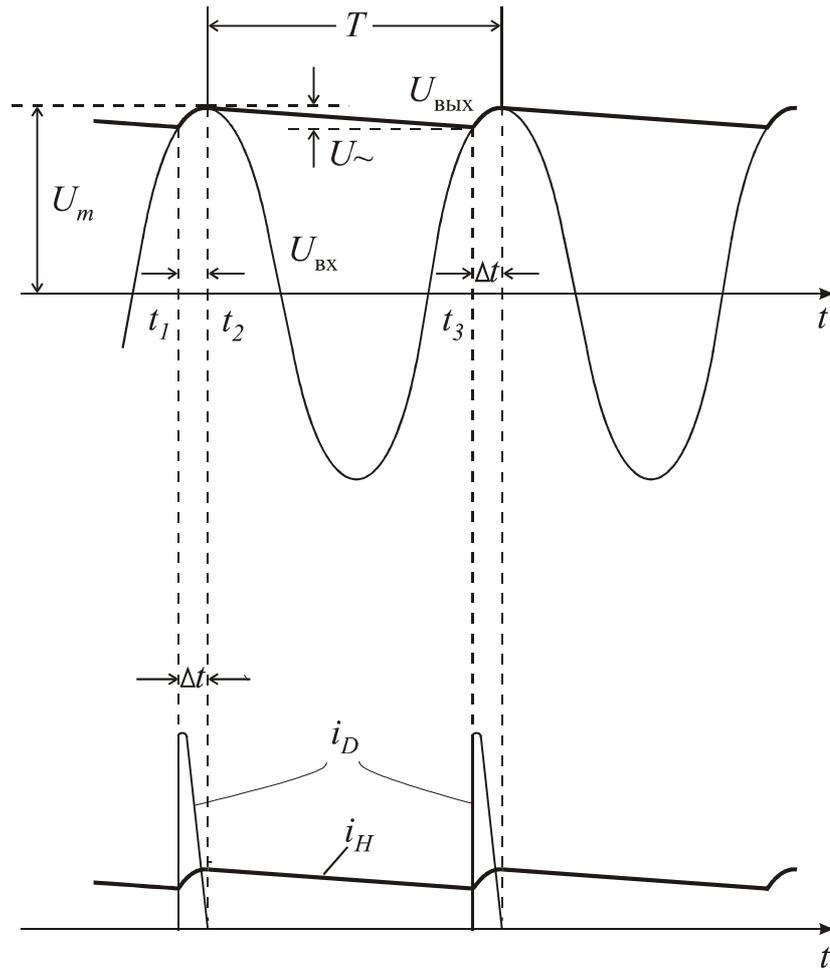


Рис. 19.12

Как следует из рис. 19.12, диод открыт только на интервале $t_1 - t_2$. Чем короче этот интервал, тем больше амплитуда тока через диод. Режим работы диода в схеме выпрямителя с фильтром оказывается достаточно тяжелым.

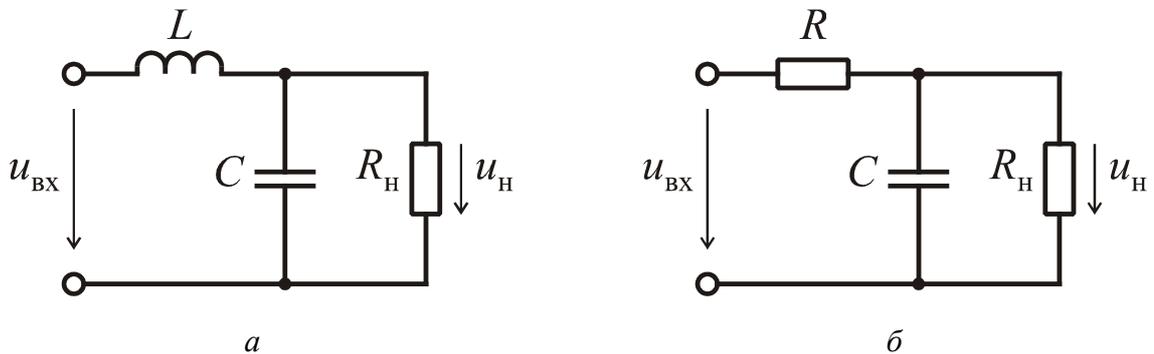


Рис. 19.13

На практике используют и более сложные схемы сглаживающих фильтров. На рис. 19.13, а, б приведены схемы Г-образных LC- и RC-фильтров. Такие фильтры обеспечивают лучшее сглаживание. Их основной недостаток – большие габариты и вес.

5. Стабилизаторы напряжения

В процессе работы ИВЭП напряжение на выходе сглаживающего фильтра может изменяться из-за колебаний сопротивления нагрузки, напряжения первичного источника и других факторов. Если отклонения напряжения превышают допустимую величину, в схему ИВЭП вводят стабилизаторы – устройства, обеспечивающие малые изменения выходного напряжения.

Существуют два типа стабилизаторов: *параметрические* и *компенсационные*. В параметрических стабилизаторах напряжения используют нелинейные элементы, имеющие участок ВАХ, на котором напряжение остается неизменным при изменении тока. Такой участок имеет обратная ветвь ВАХ стабилитрона.

Схема параметрического стабилизатора напряжения на кремниевом стабилитроне показана на рис. 19.14.

Схема представляет делитель напряжения, состоящий из резистора R_0 и стабилитрона VD . Нагрузочный резистор R_H включен параллельно стабилитрону. Поэтому в режиме стабилизации, когда напряжение стабилитрона почти постоянно, постоянным будет и напряжение на нагрузке.

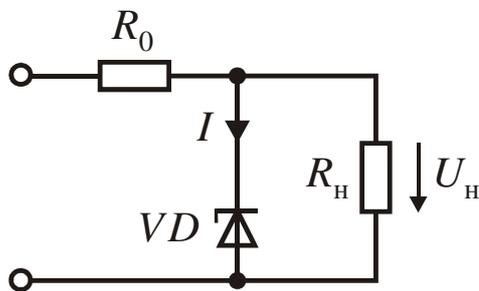


Рис. 19.14

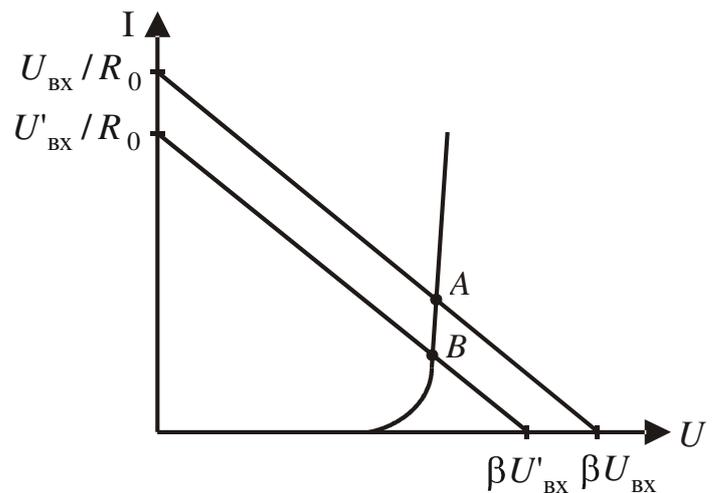


Рис. 19.15

Найдем напряжение и ток стабилитрона графическим способом. ВАХ стабилитрона и линейной части цепи показаны на рис. 19.15. Поскольку $U_H = -U_{ст}$, обратная ветвь ВАХ стабилитрона расположена в первом квадранте. Нагрузочная характеристика линейной подсистемы представляет прямую, проходящую через точки, соответствующие режимам холостого хода $U_{хх} = \beta U_{ВХ}$ и короткого замыкания $I_{кз} = U_{ВХ} / R_0$. Здесь $\beta = R_H / (R_0 + R_H)$. Точка пересечения нагрузочной прямой и ВАХ стабилитрона (точка A на рис. 19.15) является рабочей точкой и определяет ток и напряжение стабилитрона. Если входное напряжение изменится, нагрузочная прямая переместится параллельно самой себе. Изменятся и координаты рабочей точки (точка B на рис. 19.15). При этом изменения выходного напряжения будут невелики до тех пор, пока рабочая точка находится на крутом участке ВАХ стабилитрона.

Для поддержания режима стабилизации сопротивление R_0 обычно рассчитывают так, чтобы рабочая точка располагалась посередине рабочего участка ВАХ. Если входное напряжение изменяется от U_{\max} до U_{\min} , то R_0 можно найти по приближенной формуле

$$R_0 = \frac{U_{\text{ср}} - U_{\text{ст}}}{I_{\text{ср}} + I_{\text{н}}}.$$

Здесь $U_{\text{ср}} = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2}$ – среднее значение напряжения на входе стабилизатора; $I_{\text{ср}} = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}$ – средний ток стабилизатора; $I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{ст}}}{R_{\text{н}}}$ – ток нагрузки.

Если входное напряжение будет изменяться, то будет изменяться и ток стабилизатора, однако напряжение стабилизатора и напряжение нагрузки будут почти постоянными.

Достоинства рассмотренной схемы – простота конструкции и надежность. Параметрические стабилизаторы используют для нагрузок от нескольких единиц до десятков миллиампер. Они не боятся коротких замыканий нагрузки. Недостатки – невысокий КПД (не более 50 %), узкий диапазон регулируемого напряжения.

Основными параметрами, характеризующими качество стабилизатора, являются коэффициент стабилизации $K_{\text{ст}}$, выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$, коэффициент полезного действия.

Коэффициент стабилизации – это отношение относительного изменения входного напряжения к относительному изменению напряжения на выходе:

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta u_{\text{вх}} / u_{\text{вх}}}{\Delta u_{\text{вых}} / u_{\text{вых}}}.$$

Коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора можно определить по приближенной формуле

$$K_{\text{ст}} \approx \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} \frac{r_{\text{д}} + R_0}{r_{\text{д}}}.$$

В последнем выражении $r_{\text{д}}$ – динамическое сопротивление стабилизатора на участке пробоя.

Поскольку $r_{\text{д}} \ll R_0$, выходное сопротивление параметрического стабилизатора $R_{\text{вых}} \approx r_{\text{д}}$.

Коэффициент полезного действия стабилизатора равен отношению мощности, отдаваемой в нагрузку, к мощности, потребляемой от входного источника.

6. Выводы

1. Для расчета цепей с диодами используют графические или аналитические методы.

2. Простейшую модель диода можно получить, полагая прямое напряжение и обратный ток равными нулю. Такой элемент называют *идеальным диодом*. Поведение идеального диода описывается уравнениями:

$$U = 0, \quad I > 0;$$

$$I = 0, \quad U < 0.$$

Вольт-амперная характеристика идеального диода образована двумя отрезками прямых, совпадающих с полуосями координат U, I .

3. Выпрямители служат для преобразования переменного напряжения питающей сети в постоянное. Основными компонентами выпрямителей служат вентили – элементы с явно выраженной нелинейной вольт-амперной характеристикой. В качестве таких элементов используют кремниевые диоды.