

По способности проводить электрический ток все вещества можно разделить на проводники, полупроводники и изоляторы. Проводниками являются металлы из-за присутствия свободных электронов ($n = 10^{19}$ э/см³). У изоляторов эта концентрация мала ($n = 10^{-2}$ э/см³). В полупроводниках эта величина сильно зависит от температуры. Для изготовления полупроводниковых приборов используют кремний (Si 14) и германий (Ge 32) – элементы IV группы периодической таблицы Менделеева, а также арсенид галлия (GaAs). Структура материала должна быть монокристаллической. При температуре 0К кремний и германий – идеальные изоляторы, так как заряд ядра атома (+4) уравнивается зарядами четырёх электронов на внешней оболочке. Связи ковалентные. В отличие от металлов с ростом температуры удельное сопротивление чистых полупроводников падает. Для получения проводимостей разных типов в полупроводники добавляют примеси. Примеси бывают донорные и акцепторные. Донорные примеси – фосфор, мышьяк, сурьма (элементы V группы). Акцепторные примеси это бор, галлий, индий (элементы III группы). Донорные примеси добавляют свободные электроны и образуют полупроводники с проводимостью типа «n». Акцепторные примеси вызывают появление «дырок» и образуют полупроводники с проводимостью типа «р».

Диодами называют полупроводниковые приборы, которые изготовлены по такой технологии, что ток через этот элемент проходит в одну сторону гораздо лучше, чем в другую. Слово диод образовано от греческих слов «ди» - два и сокращенного «электрод». Для создания диода нужно два полупроводника с разным типом проводимости. Возникающий в месте контакта р-n переход как раз и обеспечивает свойство односторонней проводимости. Условное графическое обозначение диода представлено на рис.1.

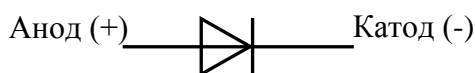


Рис. 1. Условное графическое обозначение диода.

Если к диоду прикладывается напряжение как изображено на рис. 2, то говорят, что диод смещён в прямом направлении или что к диоду приложено отпирающее напряжение. При таком включении через диод может протекать прямой ток. Если к диоду прикладывается напряжение как показано на рис. 3, то говорят, что диод смещён в обратном направлении или что к диоду приложено запирающее напряжение. При таком включении через диод протекает небольшой обратный ток, величина которого значительно меньше, чем величина прямого тока.

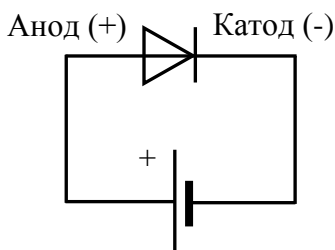


Рис. 2. Прямое включение диода.

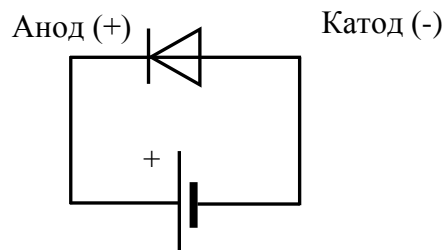


Рис. 3. Обратное включение диода.

Зависимость величины тока, протекающего через диод, от напряжения, приложенного к диоду, носит нелинейный характер, поэтому диод классифицируют как нелинейный элемент. Зависимость тока через диод от напряжения на диоде принято

изображать в виде вольтамперных характеристик (ВАХ). Пример вида ВАХ диода изображён на рис. 4. Напряжение открытия кремниевого диода 0,6 – 0,7 Вольт, германиевого диода 0,25 Вольт. Уравнение (1) достаточно хорошо описывает работу реального диода, при небольших прямых токах, когда мало падение напряжения на диоде.

$$I_D = I_0 \cdot (e^{\frac{U_D}{m \cdot \phi_T}} - 1), \quad (1)$$

где I_D ток через диод, I_0 теоретический обратный тепловой ток (реальный много больше), U_D падение напряжения на диоде, $m = 1 - 2$ коэффициент, учитывающий свойства диода (для идеальной модели $m = 1$), ϕ_T температурный потенциал.

$$\phi_T = \frac{k \cdot T}{q}$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-24}$ Дж/К (постоянная Больцмана), $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл (заряд электрона), T термодинамическая температура (Кельвин). При комнатной температуре $\phi_T = 25,5$ милливольт.

Основные параметры полупроводниковых диодов.

Прямой ток диода – ток, протекающий через диод, к которому приложено постоянное напряжение в 1 Вольт.

Обратный ток диода – ток, протекающий через диод, к которому приложено постоянное напряжение, равное наибольшему обратному напряжению. При этом отрицательный полюс источника напряжения присоединён к положительному выводу диода.

Среднее значение выпрямленного тока – значение тока, который может длительно протекать через диод, не вызывая изменения его параметров.

Наибольшее допустимое обратное рабочее напряжение – напряжение, которое может быть приложено к диоду в непропускном (обратном) направлении в течение длительного времени без опасности нарушения нормальной работы диода.

Динамическое сопротивление – отклонение изменения напряжения к изменению тока.

Разновидности диодов.

Стабилитрон – работает в обратном включении, используется для стабилизации напряжения.

Варикап – диод, специально сконструированный для изменения ёмкости изменением запирающего напряжения.

Светодиод – диод, в котором материалы для р-п перехода подобраны таким образом, что при прямом включении возникает световое излучение.

Фотодиод – полупроводниковый прибор, обладающий свойством односторонней фотопроводимости при воздействии оптического излучения. Он может работать в двух режимах – в фотодиодном и фотогенераторном. В фотодиодном режиме используется источник постоянного тока, смещающий р-п переход в обратном направлении. В режиме фотогенератора диод осуществляет прямое преобразование световой энергии в электрическую.

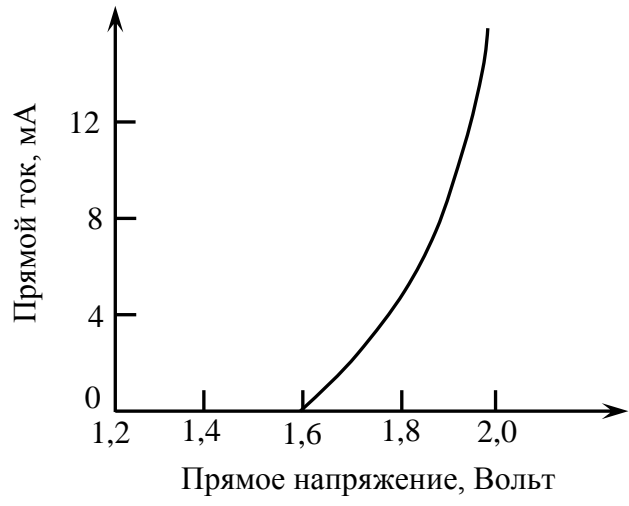


Рис. 4. Характеристика диода АЛ307БМ

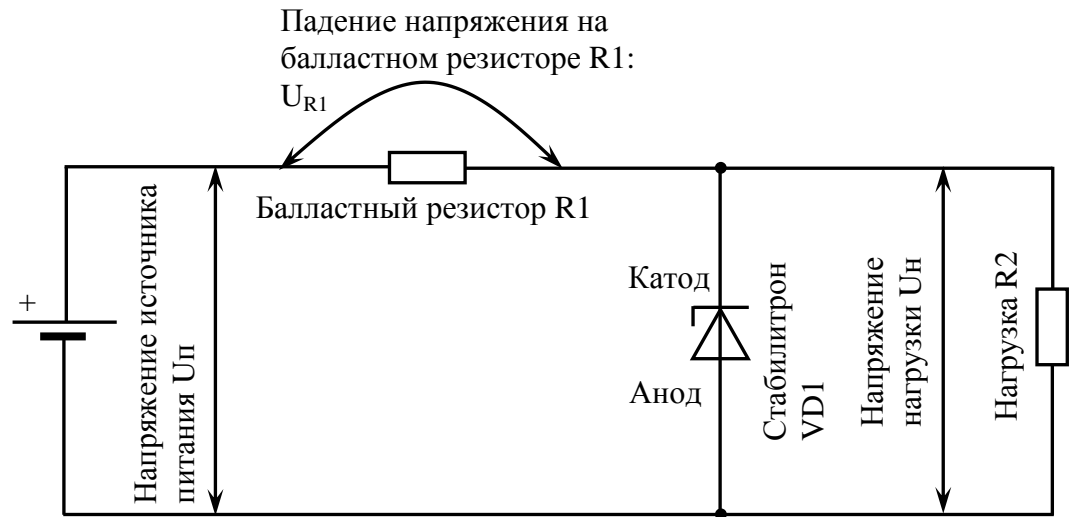


Рис. 5. Схема включения стабилитрона.

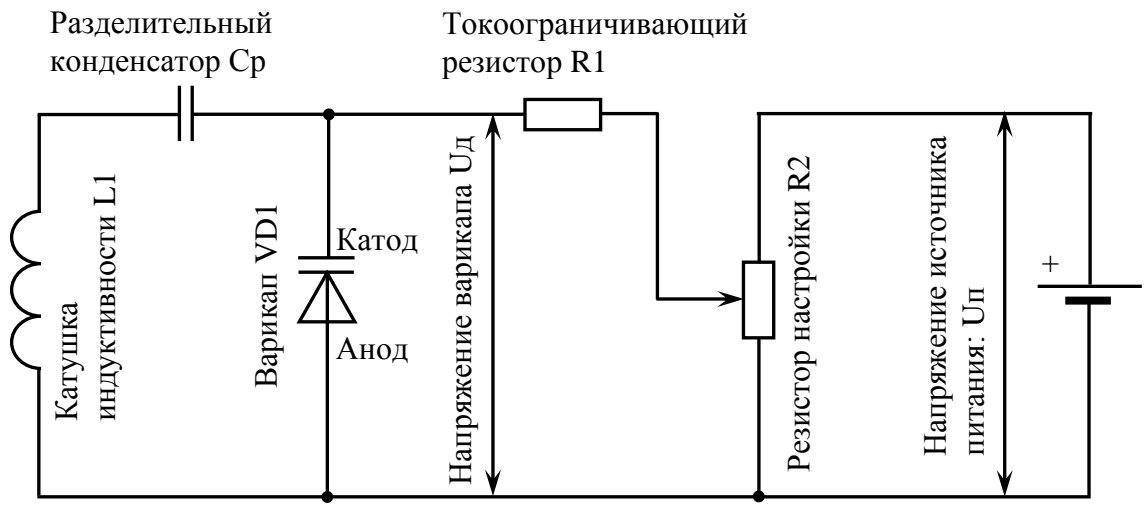


Рис. 6. Схема включения варикапа.

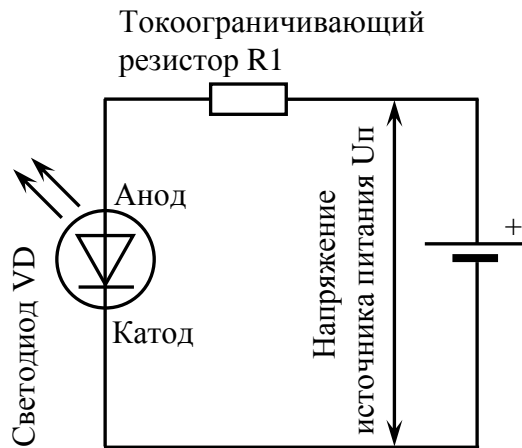


Рис. 7. Схемы включения светодиода

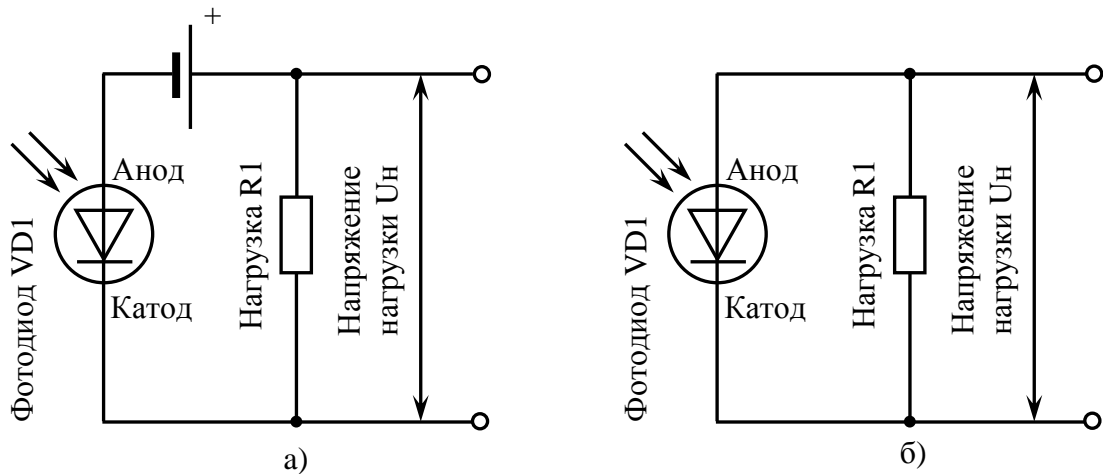


Рис. 8. Схемы включения фотодиода:
а) фотодиодный режим б) фотогенераторный режим.

Эквивалентные схемы диода.

Помимо формулы (1) используют упрощённые эквивалентные схемы диода. Схема идеального ключа (рис. 9а). Если напряжение меньше или равно нулю, ключ разомкнут. Если напряжение больше нуля, то ключ замыкается.

Схема, учитывающая напряжение открывания (рис. 9б). При напряжении меньше напряжения открывания диода ключ разомкнут. При напряжении больше напряжения открывания ключ замкнут, диод представляет собой источник постоянного напряжения с напряжения открывания диода. Этот источник включен в обратной полярности по отношению к источнику напряжения.

Схема, которая учитывает напряжение открывания и динамическое сопротивление диода (рис. 9в). Если напряжение меньше напряжения открывания, то ключ разомкнут. Если напряжение больше напряжения открывания, ключ замкнут и на диоде падает фиксированное напряжение равное напряжению открывания плюс напряжение на последовательном сопротивлении диода. Для кремниевых диодов напряжение открывания около 0,7 Вольт, сопротивление диода порядка нескольких Ом.

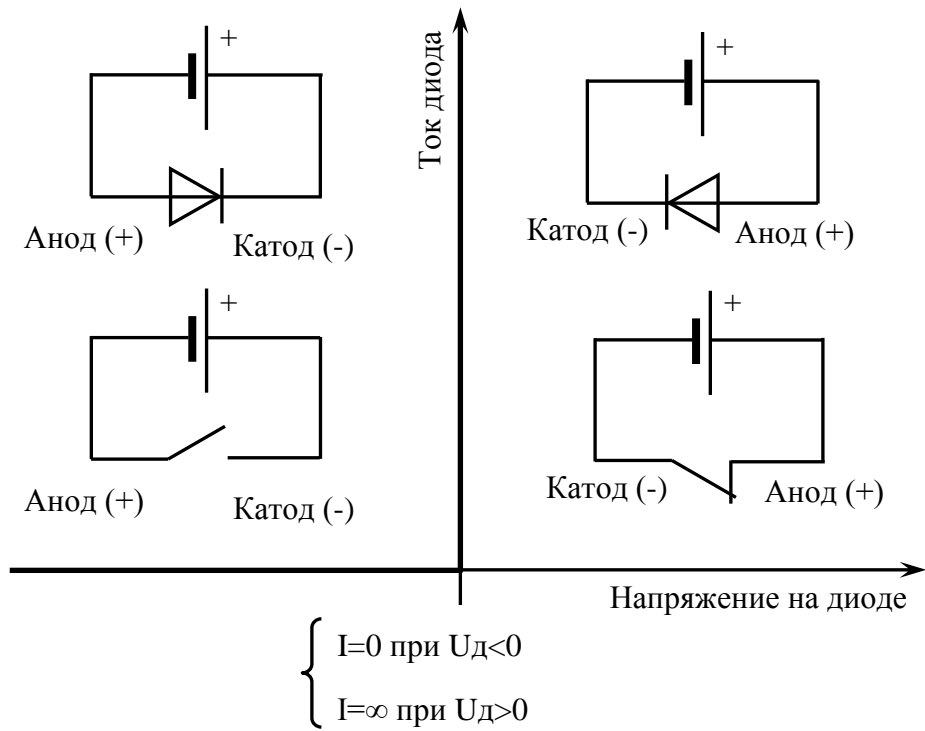


Рис. 9а. Схема идеального ключа

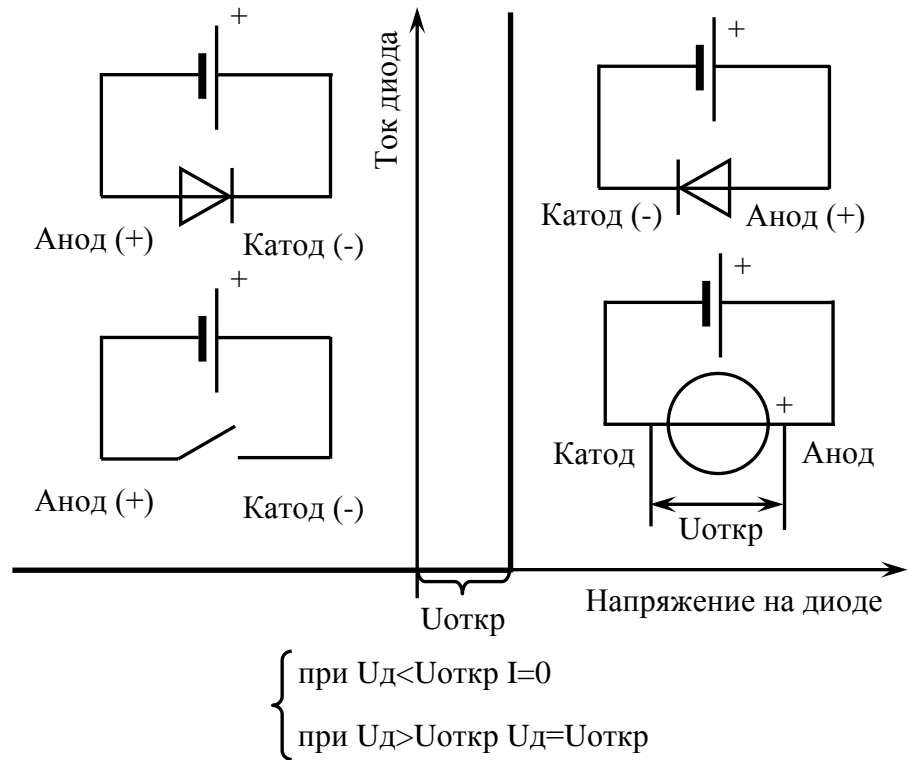


Рис. 9б. Схема, учитывающая напряжение открывания

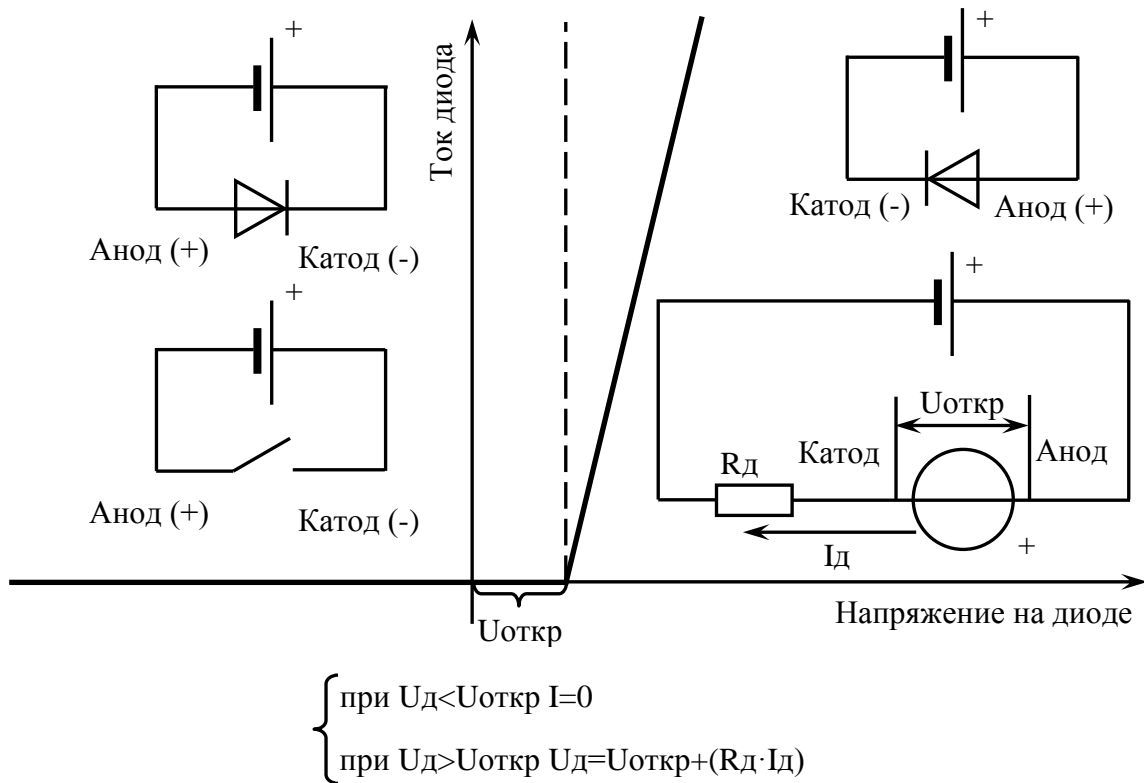


Рис. 9в. Схема, которая учитывает напряжение открывания и динамическое сопротивление диода

Адекватность применения той или иной схемы замещения определяется током, протекающим через диод и напряжением на диоде.

Схемы с диодами. Ограничители и выпрямители.

Схемы диодного ограничителя и выпрямителя приведены на рисунке 10.

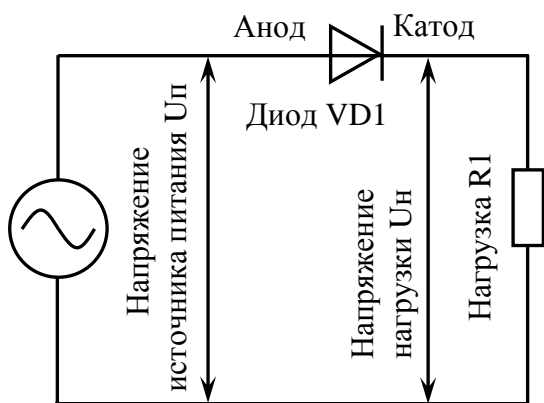


Рис. 10а. Схема диодного ограничителя

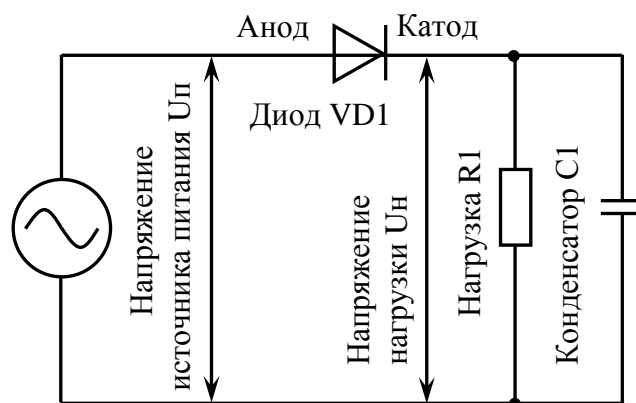


Рис. 10б. Схема диодного выпрямителя

Работа выпрямителя

Выпрямительная схема всегда содержит того или иного устройства фильтр, служащий для ослабления переменной составляющей выпрямленного напряжения. Таким образом, в реальной выпрямительной схеме должны содержаться реактивные сопротивления. Простейшая схема представлена на рис. 112. Найдем выходное напряжение U . Положим для простоты, что характеристика выпрямителя задана в виде следующей зависимости проводимости от напряжения:

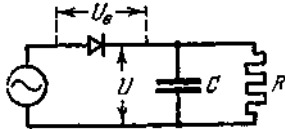


Рис. 112.

$$Y=0 \text{ при } U_B < 0$$

$$Y = \infty \text{ при } U_B > 0$$

В действительности прямая и обратная проводимости конечны, но различаются в хорошем выпрямителе во много раз. Если сопротивление выпрямителя постоянно в некотором интервале напряжений, то это значит, что в пределах этого интервала явления описываются линейным уравнением. В соседнем же интервале может действовать тоже линейная, но уже другая зависимость. В нашем случае работа схемы описывается следующими линейными уравнениями:

$$U = E(U_B > 0), \quad (1)$$

$$U + R \cdot I = 0 (U_B < 0) \quad (2)$$

Напряжение на выпрямителе равно, очевидно,

$$U_B = E - U$$

Беря

$$E = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

и выражая в (2) ток через напряжение, получим:

$$U = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (E > U),$$

Периодическое решение нашей нелинейной задачи мы получим, учитывая, что напряжение U не может измениться скачком; следовательно, мы должны значение напряжения внутри одного интервала (т. е. при $E > U$) приравнять соответствующему значению напряжения внутри другого интервала (т. е. при $E < U$) на общей их границе (т. е. при $E = U$). Это и есть метод сшивания.

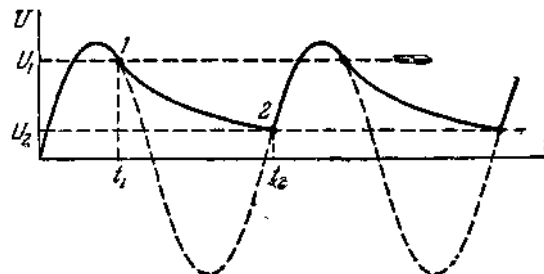


Рис. 113.

Качественная картина явления, совершенно очевидная заранее, представлена на рис. 113. Напряжение изменяется по синусоидальному закону до $t = t_1$, в этот момент скорость убывания напряжения на конденсаторе становится меньше скорости убывания синусоидального напряжения E , выпрямитель запирается, и конденсатор разряжается на

сопротивление R . Процесс разряда продолжается, пока в момент $t = t_2$ U и E не сравняются. В этот момент выпрямитель отпирается, и дальнейшее изменение напряжения происходит по синусоидальному закону вплоть до $t = t_1 + T$.

Процесс разряда происходит по экспоненциальному закону

$$U = U_1 \cdot e^{-\alpha(t-t_2)} \quad (3)$$

где:

$$\alpha = \frac{1}{R \cdot C}$$

Неизвестными являются координаты точек 1 и 2, т. е. величины U_1 , U_2 , t_1 и t_2 . Для их определения мы должны рас полагать четырьмя уравнениями.

Первое уравнение связывает U_1 и t_1 :

$$U_1 = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t_1) \quad (4)$$

Второе уравнение получим, приравняв в этой же точке производные экспоненты (3) и синусоиды (2). Это дает

$$-\alpha \cdot U_1 = \omega \cdot E_m \cdot \cos(\omega \cdot t_1) \quad (5)$$

Далее имеем, с одной стороны,

$$U_2 = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t_2) \quad (6)$$

с другой же стороны, должно быть

$$U_2 = U_1 \cdot e^{-\alpha(t_2-t_1)} \quad (7)$$

Система уравнений (4) – (7) определяет искомые величины. Из (4) и (5) находим

$$\operatorname{tg}(\omega \cdot t_1) = -\frac{\omega}{\alpha}$$

Выражая \sin через tg и подставляя в (4), получаем

$$U_1 = \frac{E_m}{\sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\omega^2}}}$$

Для t_2 приравняв правые части (6) и (7), получим аналитически неразрешимое трансцендентное уравнение. Но графически это уравнение разрешается очень просто: из точки 1 с уже известными координатами U_1 , t_1 нужно провести экспоненту (3) до пересечения с синусоидой в точке 2. Координаты этой точки и дают искомые значения U_2 и t_2 . В зависимости от значения постоянной времени

$$\frac{1}{\alpha} = R \cdot C$$

будем иметь ход напряжения в пределах, указанных на рис. 114.

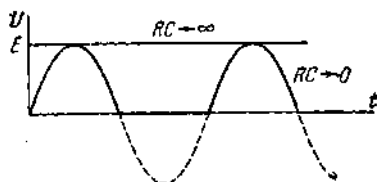


Рис. 114.

Построим диаграмму напряжения в координатах U, U' . Изображением синусоиды на плоскости U, U' является окружность (при согласованных масштабах). Изображение экспоненты мы получим, продифференцировав (3)

$$U' = -\alpha \cdot U_1 \cdot e^{-\alpha(t-t_1)} \quad (8)$$

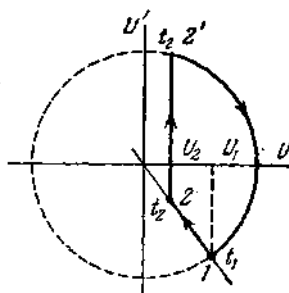


Рис. 115.

Разделив (8) на (3), найдем

$$\frac{U'}{U} = -\alpha$$

Таким образом, экспоненциальный закон изменения напряжения в координатах U, U' представляется прямой, проходящей через начало координат с наклоном $-\alpha$.

Диаграмма имеет вид, показанный на рис. 115. Отрезок 1 – 2 соответствует экспоненте. В точке 2 происходит скачок производной; изображающая точка мгновенно перебрасывается из положения 2 в положение 2'. Далее изображающая точка движется по дуге окружности 2' – 1, соответствующей во времени синусоидальному закону изменения напряжения. Предельные случаи, представленные на рис. 114, изобразятся на диаграмме так: при $RC \rightarrow 0$ наклонная прямая займет вертикальное положение и диаграмма выродится в полуокружность; при $RC \rightarrow \infty$ прямая расположится горизонтально, и диаграмма стянется в одну точку на оси с координатой $U = E_m$. Режим $RC \rightarrow \infty$ употребляется, в частности, при построении пик-вольтметров – приборов, измеряющих максимальное значение напряжения.

Список литературы:

Е. И. Манаев «Основы радиоэлектроники, М.: «Радио и связь», 1985

В. К. Захаров, Ю. И. Лыпарь «Электронные устройства автоматики и телемеханики», Л.: «Энергоатомиздат», 1984

Ю. С. Забродин «Промышленная электроника», М.: «Высшая школа», 1982

А. А. Харкевич «Нелинейные и параметрические явления в радиотехнике», М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956

Жан-Франсуа Машу «Путеводитель по электронным компонентам», М.: Издательский дом «Додэка – XXI», 2001