

Практическое занятие №1

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНЫХ ЦЕПЕЙ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Теоретические сведения

ПАССИВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В АНАЛОГОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

В схемах электронных усилителей применяются так называемые делители напряжения. На рис. 1, а показан простейший резистивный делитель напряжения. Общее напряжение приложено ко всему делителю и делится между резисторами пропорционально их сопротивлениям, а выходное напряжение снимается лишь с его части.

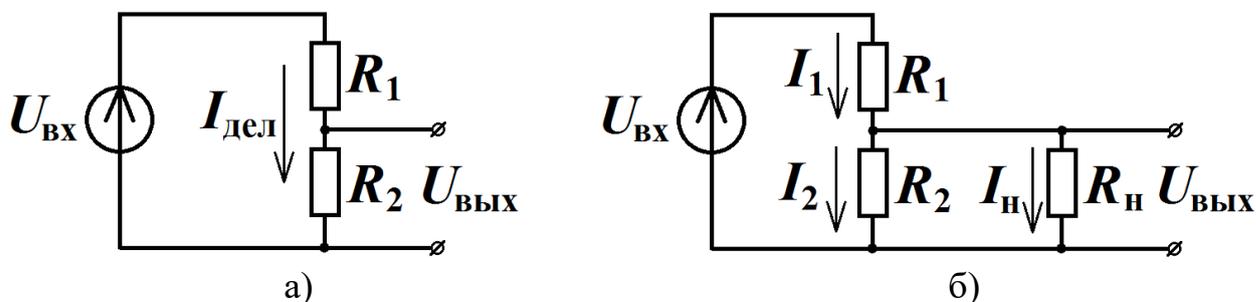


Рис. 1. Простейший резистивный делитель напряжения без нагрузки (а) и с нагрузкой (б)

В схеме на рис. 1, а через все элементы протекает один ток

$$I_{\text{дел}} = U_{\text{вх}} / (R_1 + R_2), \quad (1)$$

а выходное напряжение определяется как падение напряжения, создаваемое этим током на резисторе, с которого выходное напряжение снимается:

$$U_{\text{вых}} = I_{\text{дел}} \cdot R_2 = U_{\text{вх}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2)$$

Если параллельно одному из сопротивлений подключена нагрузка ($R_{\text{н}}$ на рис. 1, б), часть входного тока делителя (I_1 на рисунке) будет ответвляться в нагрузку. В этом случае для определения входного тока делителя и затем выходного напряжения сначала необходимо найти общее сопротивление:

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 \parallel R_{\text{н}} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_{\text{н}}}{R_2 + R_{\text{н}}}, \quad (3)$$

$$I_1 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{общ}}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_{\text{н}}}{R_2 + R_{\text{н}}}}, \quad (4)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} - I_1 R_1 = U_{\text{ВХ}} - \frac{U_{\text{ВХ}} R_1}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_{\text{Н}}}{R_2 + R_{\text{Н}}}}, \quad (5)$$

$$I_2 = U_{\text{ВЫХ}} / R_2, \quad (6)$$

$$I_{\text{Н}} = U_{\text{ВЫХ}} / R_{\text{Н}}. \quad (7)$$

Если в схеме параллельно друг другу включены **три резистора** (рис. 2), R_1 , R_2 и R_3 , то их общее сопротивление будет найдено как

$$R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}. \quad (8)$$

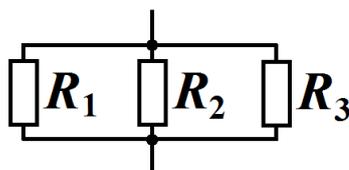
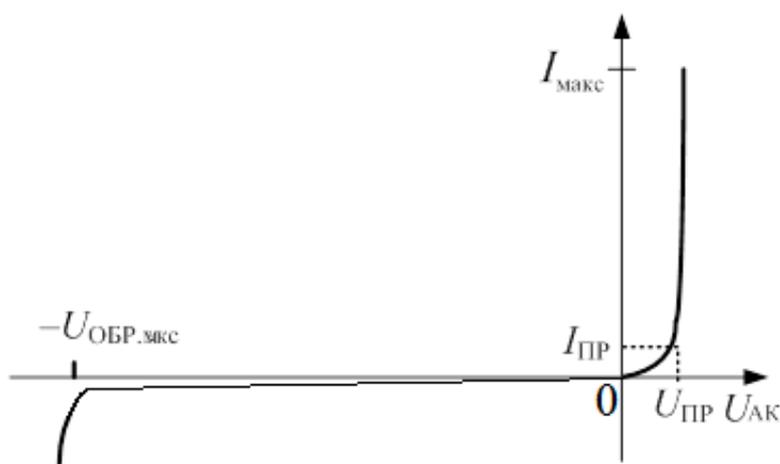
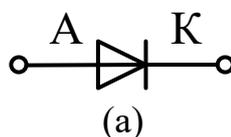


Рис. 2. Параллельное соединение трех резисторов

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО ДИОДА

На рис. 3 показы условное графическое обозначение полупроводникового диода (на основе $p-n$ -перехода) и его вольт-амперная характеристика (ВАХ).



(б)

Рис. 3. Условное графическое обозначение диода (а) (А – анод, К – катод) и его вольт-амперная характеристика (б)

Если к диоду (*p-n*-переходу) приложено положительное напряжение $U_{AK} > 0$ (т.е. «+» к аноду, «-» к катоду), то диод работает в прямом направлении. При отрицательном напряжении $U_{AK} < 0$ диод заперт: его обратный ток очень мал (обычно не превышает доли – единицы микроампер). Т.е. диод пропускает ток в прямом направлении и практически не пропускает тока в обратном направлении. Это его свойство применяется для выпрямления переменного тока. Такие диоды, соответственно, называются **выпрямительными**.

ВАХ полупроводникового диода описывается выражением

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad (9, a)$$

или

$$U = \varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_s} + 1 \right), \quad (9, б)$$

где U – напряжение на *p-n*-переходе (диоде); I_s – обратный (тепловой) ток насыщения (s в обозначении от “*saturation*” – насыщение), обычно составляет

наноамперы; $\varphi_T = \frac{kT}{e}$ – тепловой (или температурный) потенциал,

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура в Кельвинах (к температуре в градусах Цельсия прибавить 273 К); $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

В эти уравнения напряжение U подставляется со знаком «плюс» при включении *p-n*-перехода в прямом направлении и со знаком «минус» при обратном включении.

Прямое падение напряжения $U_{пр}$ (рис. 3) на диоде из кремния составляет обычно 0,6–0,8 В, из германия – 0,3–0,5 В.

Реальный обратный ток диода на несколько порядков превышает величину I_s (наноамперы) из-за дополнительной утечки по поверхности полупроводникового кристалла, но все равно остается очень малым (как было указано выше – микроамперы).

При приложении к диоду обратного напряжения, превышающего по модулю величину $U_{обр.макс}$, произойдет электрический пробой – обратный ток диода резко возрастет (рис. 3). Для выпрямительных диодов электрический пробой является нерабочим режимом (так как диод перестает выпрямлять – блокировать обратный ток). В то же время электрический пробой полезно используется именно как основной режим работы в специальном классе полупроводниковых диодов – **стабилитронах**.

К основным параметрам выпрямительного диода, кроме упомянутых выше, относится его дифференциальное сопротивление $r_{диф}$. Это сопротивление не является неизменной величиной, поскольку определяется именно как дифференциал (производная) от изменяющейся функции $u = f(i)$.

Чуть упростим выражение (9, б) – пренебрежем значительно меньшей величиной I_s по сравнению с прямым током I – и продифференцируем его по току:

$$U = \varphi_T \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) = \varphi_T \ln\left(\frac{I + I_s}{I_s}\right) \approx \varphi_T \ln\left(\frac{I}{I_s}\right), \quad (9, в)$$

$$r_{\text{диф}} = \frac{du}{di} = \varphi_T \frac{I_s}{I} \frac{1}{I_s} = \varphi_T \frac{1}{I}. \quad (10)$$

Т.е., как видим, сопротивление $r_{\text{диф}}$ будет зависеть от величины тока в той точке на ВАХ, в которой оно измеряется, и будет тем меньше, чем больше ток.

Сопротивление выпрямительного диода на обратной ветви ВАХ определяется его сопротивлением утечки (сотни килоом – мегаомы), и может быть определено как

$$r_{\text{обр}} \approx r_{\text{ут}} = \frac{U_{\text{обр}}}{I_{\text{обр}}}. \quad (11)$$

Диод, а точнее, его p - n -переход характеризуется также **емкостями**. Емкостные свойства p - n -перехода связаны с наличием по обе стороны от границы электрических зарядов, созданных ионами примеси, а также подвижными носителями, находящимися вблизи границы. Емкость p - n -перехода подразделяется на две составляющие: барьерную и диффузионную. Для обратносмещенного p - n -перехода основную роль играет барьерная емкость (диффузионная емкость просто отсутствует), а для прямосмещенного – диффузионная емкость (она значительно больше барьерной):

$$C_{p-n} = C_{\text{бар}} + C_{\text{диф}} = \begin{cases} C_{\text{бар}}, & U < 0 \text{ – обратное напряжение,} \\ C_{\text{диф}}, & U > 0 \text{ – прямое напряжение.} \end{cases} \quad (12)$$

Диффузионная емкость характеризуется накоплением неосновных носителей зарядов вблизи p - n -перехода при протекании прямого тока (его называют диффузионным из-за того, что он обусловлен диффузией электронов и дырок через переход) и отражает процесс изменения концентрации подвижных носителей заряда, накопленных в областях.

$$C_{\text{диф}} \approx \frac{I}{\varphi_T} \tau_{\text{эфф}}, \quad (13)$$

где $\tau_{\text{эфф}}$ – эффективное время жизни неосновных носителей в области p - n -перехода (справочный параметр).

Как видно из выражения (13), диффузионная емкость пропорциональна протекающему прямому току.

Барьерная емкость отражает перераспределение носителей в p - n -переходе, эта емкость обусловлена нескомпенсированным объемным зарядом, сосредоточенным по обе стороны от границы перехода.

Зависимость барьерной емкости от приложенного напряжения (рис. 4, б)

$$C_{\text{бар}}(U) = C_{\text{бар}}(0) \sqrt[n]{\frac{\Phi_k}{\Phi_k + U_{\text{обр}}}}, \quad (14)$$

где Φ_k – контактная разность потенциалов p - n -перехода (обычно составляет те же 0,6–0,8 В для кремния); $C_{\text{бар}}(0)$ – емкость при $U = 0$ В; $n = 2$ для резких (узких) p - n -переходов, $n = 3$ для плавных (широких). $U_{\text{обр}}$ в формулу (14) следует подставлять по абсолютной величине (без знака «минус»).

Эту зависимость полезно используют в полупроводниковых приборах – варикапах.

ВАРИКАП

Варикап – это полупроводниковый прибор на основе p - n -перехода, емкость которого зависит от величины обратного напряжения (рис. 4).

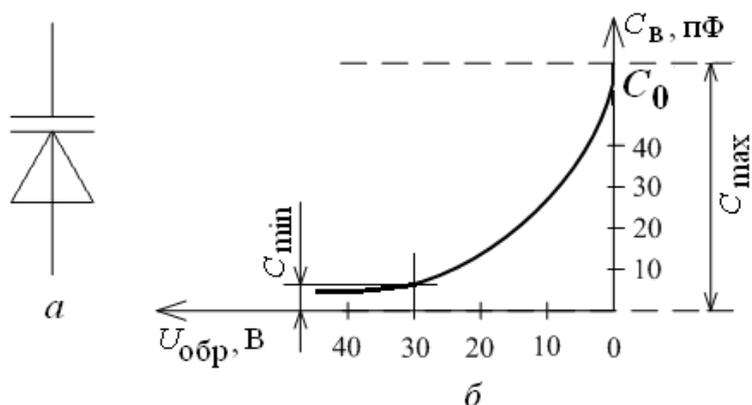


Рис. 4. Варикап: *a* – условное графическое обозначение; *б* – вольт-фарадная характеристика

В варикапе используется показанная в выражении (14) зависимость $C_{\text{бар}}$ от обратного напряжения, поэтому в схемах прибор включают в обратном направлении.

Очевидно, что в соответствии с выражением (14) вольт-фарадная характеристика (ВФХ) имеет нелинейный характер. Рабочий участок ограничен значениями C_{max} (при $U = 0$) и C_{min} (когда C уже мало уменьшается).

Варикапы обычно используют для электронной перестройки резонансной частоты колебательных LC -контуров. На рис. 5 показан для примера параллельный колебательный LC -контур, в котором роль емкости играет варикап, и зависимость полного сопротивления контура от частоты приложенного переменного напряжения. Сопротивление такого контура будет максимальным на резонансной частоте контура

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (15)$$

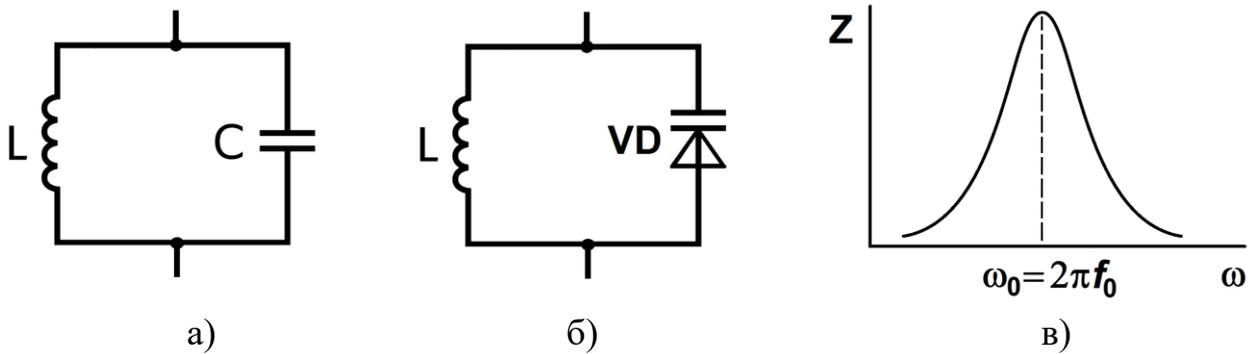


Рис. 5. Параллельный колебательный LC -контур (а и б) и частотная зависимость его полного сопротивления (в)

У последовательного колебательного контура, в котором L и C включены последовательно друг с другом, на резонансной частоте сопротивление, наоборот, минимально, но сама формула для резонансной частоты остается прежней – (15).

Если к вариакпу на рис. 5, б дополнительно приложить постоянное обратное напряжение, то с изменением этого дополнительного напряжения будет меняться барьерная емкость (14), а значит, и резонансная частота контура (15).

Задачи для решения

Задача 1. Определить выходное напряжение делителя на рис. 1, а, если $U_{\text{вх}} = 15 \text{ В}$, $R_1 = 25 \text{ кОм}$, $R_2 = 5 \text{ кОм}$.

Задача 2. Определить выходное напряжение и все токи делителя на рис. 1, б, если $U_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$, $R_1 = 50 \text{ кОм}$, $R_2 = 5 \text{ кОм}$, $R_{\text{н}} = 10 \text{ кОм}$.

Задача 3. Определить общее сопротивление цепи на рис. 2, если $R_1 = 50 \text{ кОм}$, $R_2 = 500 \text{ кОм}$, $R_{\text{н}} = 20 \text{ кОм}$.

Задача 4. Определить ток выпрямительного диода при температуре окружающей среды 25°C , если на нем падает в прямом направлении напряжение $U = 0,6 \text{ В}$. Тепловой ток насыщения p - n -перехода равен $0,1 \text{ нА}$.

Задача 5. Определить падение напряжения на диоде в прямом направлении, если через него протекает ток 200 мА . Тепловой ток насыщения p - n -перехода равен $0,5 \text{ нА}$, температура окружающей среды 30°C .

Задача 6. Определить дифференциальное сопротивление полупроводникового диода при протекании через него прямого тока в 10 мА , 100 мА , 1 А (должно быть три ответа). Температура окружающей среды 20°C .

Задача 7. Определить дифференциальное сопротивление полупроводникового диода при прямом падении напряжения $0,7 \text{ В}$. Тепловой ток насыщения p - n -перехода равен $0,2 \text{ нА}$, температура окружающей среды 300 К .

(Подсказка: сначала следует определить прямой ток диода при указанном напряжении на нем, а затем уже найти $r_{\text{диф}}$.)