

Радиотехнические цепи и сигналы

Сочава Александр Андреевич

2018 год, весенний семестр

1 Литература

Основная:

Атабеков: Теоретические основы электроники. Линейные электрические цепи, главы "Четырёх-полюсники" и далее.

Зернов, Карпов: Теория радиотехнических цепей.

Дополнительная:

Манаев: Основы радиоэлектроники (устарела).

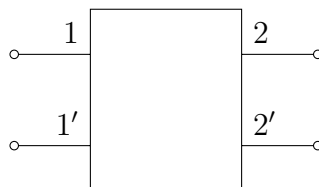
Титце, Шек: Полупроводниковая схемотехника.

Алексеев: Применение прецизионных полупроводниковых микросхем.

2 Четырёхполюсники

2.1 Основные определения. Классификация четырёхполюсников.

Четырёхполюсник - некоторое устройство, которое имеет 4 вывода и внутренняя структура которого не важна. Как правило, входные выводы изображаются слева, а выходные - справа.



Все устройства, как правило, имеют одну общую точку. Часто заземляют один входной и один выходной выводы. Таким образом, они будут иметь одинаковый нулевой потенциал.

(картинка)

Это регулярный четырёхполюсник, в такой схеме 3 независимых вывода.

Четырёхполюсники бывают линейные и нелинейные (по признаку входящих в него элементов).

Эквивалентные схемы четырёхполюсников:

(картинка)

Активный четырёхполюсник - четырёхполюсник, содержащий в себе зависимые или независимые источники энергии. Эти источники могут компенсировать друг друга так, чтобы напряжение на незапитанном четырёхполюснике было равно 0, тогда четырёхполюсник называется **неавтономным**, в противном случае - **автономным**.

(Не)зависимый источник энергии - источник, параметры которого (не) зависят от внешнего питания.

Пассивный четырёхполюсник - четырёхполюсник, не содержащий в себе источники электрической энергии, или эти источники взаимно компенсируются для любого внешнего напряжения (иначе говоря, четырёхполюсник эквивалентен пассивному без источников энергии).

Эквивалентность нескольких четырёхполюсников - возможность взаимной замены их в электрической цепи без изменений токов и напряжений в остальной её части.

Симметричный четырёхполюсник - четырёхполюсник, перемена местами входных и выходных выводов в котором не меняет токов и напряжений в его цепи. В противном случае четырёхполюсник называется **несимметричным**.

Обратимый четырёхполюсник - четырёхполюсник, для которого напряжение на входе к току на выходе (=передаточное сопротивление) не зависит от того, какая пара выводов является входом, а какая - выходом (то есть, для него выполняется теорема обратимости). В противном случае четырёхполюсник называется **необратимым**.

Из симметричности четырёхполюсника следует его обратимость, обратное неверно.

Смысл теории четырёхполосников - найти токи и напряжения на входе и выходе четырёхполосника по его обобщённым параметрам.

2.2 Система уравнений четырёхполосника

Обозначим токи и напряжения на входе и выходе четырёхполосника следующим образом: (картинка)

Вариант с токами I_1 и I_2 называется прямой передачей (для формы $||\mathbf{A}||$), с токами I'_1 и I'_2 - обратной передачей (для формы $||\mathbf{B}||$). Также часто используется третий вариант - токи I_1 и I'_2 (для форм $||\mathbf{H}||$, $||\mathbf{G}||$, $||\mathbf{Y}||$, $||\mathbf{Z}||$).

Соотношение между напряжениями и токами на входе и выходе может быть записано в виде одной из следующих систем уравнений:

1. Форма $||\mathbf{Y}||$ (токи втекают, выражаем токи через напряжения), коэффициенты - проводимости:

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 \\ I'_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 \end{cases}$$

2. Форма $||\mathbf{Z}||$ (токи втекают, выражаем напряжения через токи), коэффициенты - сопротивления:

$$\begin{cases} U_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I'_2 \\ U_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I'_2 \end{cases}$$

Для обратимого четырёхполосника $Z_{21} = Z_{12}$.

Для симметричного четырёхполосника $Z_{11} = Z_{22}$.

3. Форма $||\mathbf{H}||$ (токи втекают, выражаем входное напряжение и выходной ток):

$$\begin{cases} U_1 = H_{11}I_1 + H_{12}U_2 \\ I'_2 = H_{21}I_1 + H_{22}U_2 \end{cases}$$

4. Форма $||\mathbf{G}||$ (токи втекают, выражаем входной ток и выходное напряжение):

$$\begin{cases} I_1 = G_{11}U_1 + Y_{12}I'_2 \\ U_2 = G_{21}U_1 + Y_{22}I'_2 \end{cases}$$

5. Форма $||\mathbf{A}||$ (зависимость входных параметров от выходных, прямая передача):

$$\begin{cases} I_1 = A_{11}U_2 + A_{12}I_2 \\ I'_2 = A_{21}U_2 + A_{22}I_2 \end{cases}$$

6. Форма $||\mathbf{B}||$ (зависимость выходных параметров от входных, обратная передача):

$$\begin{cases} U_2 = B_{11}U_1 + B_{12}I'_1 \\ I'_2 = B_{21}U_1 + B_{22}I'_1 \end{cases}$$

Подключение четырёхполюсников.

(вставить картинки)

1. Каскадное: $\|A\| = \|A_1\| * \|A_2\|$
2. Последовательное: $\|Z\| = \|Z_1\| + \|Z_2\|$
3. Параллельное: $\|Y\| = \|Y_1\| + \|Y_2\|$
4. Последовательно-параллельное: $\|H\| = \|H_1\| + \|H_2\|$

Согласованное подключение:

Основные параметры: K_i, K_u, K_p - коэффициенты усиления (передачи). Для системы y -параметров ($Y_n = \frac{1}{Z_n}$):

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 \\ I_2' = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 \\ Y_{\text{вх}} = \frac{I_1}{U_1} = Y_{11} + Y_{12}\frac{U_2}{U_1} = \frac{\Delta_Y + Y_{11}Y_H}{Y_{22} + Y_H} \end{cases} \quad (1)$$

Получим $Y_{\text{вх}}, Y_{\text{вых}}$:

$$\begin{aligned} Y_{\text{вх}} &= \frac{I_1}{U_1} = Y_{11} + Y_{12}\frac{U_2}{U_1} = \frac{\Delta_Y + Y_{11}Y_H}{Y_{22} + Y_H} \\ Y_{\text{вых}} &= \frac{I_2}{U_2} = Y_{22} - Y_{12}\frac{U_2}{U_1} = \frac{\Delta_Y + Y_{11}Y_H}{Y_{22} + Y_H} \end{aligned} \quad (2)$$

2.3 Свойства трёхполюсников.

Для четырёхполюсников выводы $1', 2'$ считаются обычно особыми - разность потенциалов между ними не влияет на параметры передачи. Тогда эту разность потенциалов можно принять равной 0. (картинка)

Матрица неопределённых проводимостей Считаем все токи втекающими, а четырёхполюсник - линейным. Тогда токи зависят от потенциалов линейно - выразим зависимость системой линейных уравнений.

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 + Y_{13}U_3 \\ I_1 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 + Y_{23}U_3 \\ I_1 = Y_{31}U_1 + Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 \end{cases} \quad (3)$$

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{21}Y_{31} \\ Y_{12} & Y_{22}Y_{32} \\ Y_{13} & Y_{23}Y_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Неизвестно 9 параметров. Предположим, что известны $Y_{11} - Y_{22}$, найдём оставшиеся. Т.к. $I_1 + I_2 + I_3 = 0$, то при любых потенциалах:

$$\begin{cases} 0 = Y_{11} + Y_{21} + Y_{31} \\ 0 = Y_{12} + Y_{22} + Y_{32} \\ 0 = Y_{13} + Y_{23} + Y_{33} \end{cases} \quad (5)$$

Скажем, что потенциал точки отсчёта - δ . Тогда все напряжения будут иметь вид $U_i + \delta$. Для каждого I_i придётся заключить, в этом случае, что сумма коэффициентов перед δ будет

равна 0.

$$\begin{cases} 0 = Y_{11} + Y_{12} + Y_{13} \\ 0 = Y_{21} + Y_{22} + Y_{23} \\ 0 = Y_{31} + Y_{32} + Y_{33} \end{cases} \quad (6)$$

Получили 6 уравнений, из них 5 независимых. Значит, в матрице Y можно будет определить все коэффициенты.

Если $U_3 = 0$, то останутся независимые уравнения для $I_1, I_2, I_3 = -(I_1 + I_2)$. Зачеркнём третий столбец и строку.

Для $U_2 = 0$: вход - 3, выход - 1. Тогда:

$$Y' = \begin{pmatrix} Y_{22} & Y_{32} \\ Y_{23} & Y_{33} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Перевернём матрицу, т. к. выход и вход теперь изменены местами.

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{33} & Y_{23} \\ Y_{32} & Y_{22} \end{pmatrix} \quad (8)$$

С помощью матрицы неопределённых проводимостей можно рассчитать Y -параметры в схемах ОК и ОБ для биполярного транзистора (в режиме малого сигнала - поэтому транзистор можно считать линейным четырёхполюсником). Аналогично для полевых транзисторов и ламп.

2.4 Принцип усиления.

Усилителем называют устройство, которое служит для преобразования *информационных* сигналов и для которого выполнено условие: мощность сигнала на выходе больше, чем на входе.

Усиление можно определить как непрерывный процесс управления большим количеством энергии с помощью малых затрат энергии. Форма управляющей и управляемой энергий может быть различной: световой, механической, электрической. Будем говорить про усиление и усилители электрических сигналов.

Источник сигнала - управляющий источник энергии.

Входная цепь (вход) - цепь, по которой поступает энергия. Так как мощность выходного сигнала должна быть больше мощности входного, источник дополнительной энергии обязателен по ЗСЭ.

Выходная цепь (выход), нагрузка - потребитель усиленных сигналов.

Источник питания усилителя или **основной источник питания** - источник управляемой энергии, преобразуемый усилителем в энергию усиленных сигналов. Вспомогательные источники могут запитывать усилительные элементы, например.

2.5 Классификация усилителей.

- По характеру усиливаемых сигналов:

а) Усилители гармонических сигналов - для непрерывных квазипериодических сигналов, гармоническая составляющая которых меняется много медленнее нестационарных (переходных) процессов в усилителе.

б) Усилители импульсных сигналов. Нужно максимально сократить длительность нестационарных процессов.

- По ширине полос частот и абсолютным значениям усиливаемых усилителем частот:
 - а) Усилители постоянного (очень низкочастотного) тока
 - б) Усилители переменного тока
 - в) Усилители высоких частот
 - г) ...;
 - д) Усилители низких частот:
- По отношению к полосе усиливаемых частот:
 - а) Широкополосные
 - б) Избирательные и селективные
 - в) Резонансные, с резонансной характеристикой

Если частота на входе и выходе одинаковые - прямое усиление. Если разные - усиление с изменением частоты.
- По типу усиливающего элемента:
 - а) Полупроводниковые.
 - б) Ламповые.

2.6 Нелинейные цепи в режиме постоянного тока

К нелинейным элементам относятся диод (в том числе варикап), трансформатор (катушка с ферромагнитным сердечником).

Рассчитываем рабочую точку либо аналитически (по аппроксимации характеристик нелинейных элементов), либо экспериментально (сняв характеристики опытным путём):

- Графо-аналитический

Смотрим на пересечение графиков функций, полученных аналитическим приближением, или снятых ВАХ, обычно прямой и нелинейной кривой. Находим точки пересечения.
- Графический (современный численный метод)

Можем складывать экспериментально построенные нелинейные графики, смотреть их пересечение.

Для сложных двуполусников (тиристоров, туннельных диодов) решение может получиться неоднозначным (несколько точек пересечения) и неустойчивым (обычно устойчивыми получаются точки на возрастающих кусках ВАХ, с положительным дифференциальным сопротивлением).

Рабочая точка для биполярного транзистора

Зависимости для токов транзистора

$$\begin{aligned} i_1 &= f(U_1, U_2) \\ i_2 &= f(U_1, U_2) \end{aligned} \tag{9}$$

представляют собой поверхность. Можем порезать эту поверхность на сечения плоскостями $U_i = \text{const}$, получим кривые входной и выходной ВАХ.

Для входной ВАХ можем также построить нагрузочную прямую: $i(U_{\text{вх}}) = E_6 - R_{\text{г}} I_1$. Точки определяются параметрами i_1, U_1, U_2 . Вообще графики семейства здесь не сильно отстоят друг от друга, и их можно заменить на один график.

Для выходной - то же самое, только: $i(U_{\text{вых}}) = E_{\text{э}} - R_{\text{н}} \cdot I_1$ i_1, i_2, U_2

Для определения рабочей точки нужно найти пересечение кривых: i_1, U_2

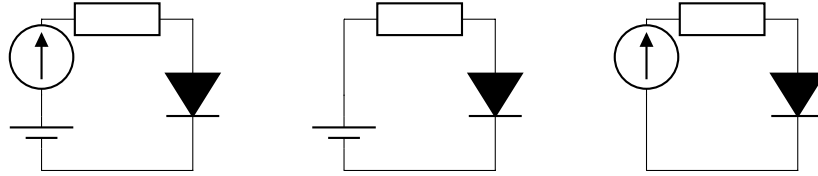
Рабочая точка для полевого транзистора

Для $U_1 < 0$ при $E_1 = 0$ входное сопротивление очень велико, поэтому $U \approx E_2$ Имеет смысл рассматривать только выходные сигналы.

2.7 Работа в режиме малого сигнала

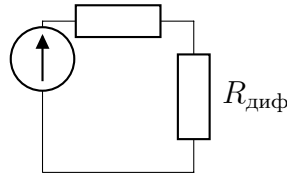
Малый сигнал: величина амплитуды переменного тока (напряжения) пренебрежимо мала по сравнению с постоянными токами и напряжениями в рабочей точке. Если переменные сигналы по своему размаху много меньше токов и напряжений в рабочей точке, то такой сигнал называется малым. Недостаток определения - не работает в 0.

Данную схему можно разбить на цепь постоянного и переменного тока:



Решение для постоянной цепи было получено. Для переменной: можем разложить нелинейную ВАХ в рабочей точке (точке равновесия) в ряд Тейлора: $i = f(U_0) + f'|_{U_0} \Delta U + \dots \Delta i| \approx g \Delta U = \Delta U / R_{\text{диф}}$

То есть, мы рассматриваем эквивалентное сопротивление $R_{\text{диф}} = \frac{dU}{di}$ вместо диода:



То же самое для трёхполюсников:

$$\begin{aligned} i_1 &= f(U_1, U_2) \\ i_2 &= f(U_1, U_2) \end{aligned} \quad (10)$$

Рабочая точка найдена, придадим U_1, U_2 малые приращения:

$$\begin{aligned} i_1 &= f(U_{10}, U_{20}) + \frac{\partial f_1}{\partial U_1} \Delta U_1 + \frac{\partial f_1}{\partial U_2} \Delta U_2 + \dots \\ i_2 &= f(U_{10}, U_{20}) + \frac{\partial f_2}{\partial U_1} \Delta U_1 + \frac{\partial f_2}{\partial U_2} \Delta U_2 + \dots \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{cases} i_1 = g_{11} \Delta U_1 + g_{12} \Delta U_2 \\ i_2 = g_{21} \Delta U_1 + g_{22} \Delta U_2 \end{cases} \quad (12)$$

где $g_{11} = \frac{di_1}{dU_1}|_{U_{10}, U_{20}}$ и так далее - вещественные дифференциальные (малосигнальные) параметры. Параметры вещественные, потому что сигнал в транзисторе не запаздывает, в отличие от реактивных элементов. Но при быстрых изменениях нужно учитывать инерционность транзистора: $g_{ik} \Rightarrow Y_{ik} = g_{ik} + j b_{ik}$. Посчитаем b_{ik} позже.

По-другому записав уравнения четырехполюсника, получим другие параметры (например, H-параметры). Их можно выражать друг через друга.

$$\begin{cases} i_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 \\ i_1 - Y_{12}U_2 = Y_{11}U_1 \\ U_1 = \frac{1}{Y_{11}}i_1 - \frac{Y_{12}}{Y_{11}} \\ h_{11} = \frac{1}{Y_{11}}, h_{12} = -\frac{Y_{12}}{Y_{11}} \end{cases} \quad (13)$$

2.8 Малосигнальные параметры полевых и биполярных транзисторов

Полевой транзистор в схеме с общим истоком

Согласно схеме $U_{3И} < 0, g_{11} = g_{12}, i_2 = 0$

$g_{21} = S \approx (2 - 5)10^{-3}$ См

$g_{22} = g_i \approx 10^{-5}$ См, $R_i \approx 10^5$ Ом

Проходные характеристики: $i_2(U_1)$ при $U_2 = const$. Их производная - крутизна.

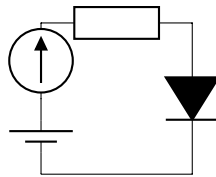
Биполярный транзистор в схеме с общим эмиттером

В отличие от предыдущего случая присутствует входной ток i_b , то есть $g_{11}, g_{12} \neq 0$, но при напряжении питания $\approx 5 - 10$ В характеристики сливаются, и проводимость $g_{12} < 0$ очень мала по сравнению с другими g . Диапазон значения около рабочей точки порядка одного вольта. По входным и выходным ВАХ находим h -параметры, из них по формулам перехода находим Y -параметры.

Тип	БТ	ПТ
g_{11}	0	10^{-3}
g_{12}	0	$10^{-6} \approx 0$
g_{21}	$(2 - 8) * 10^{-3}$	$(50 - 200)10^{-3}$ См
g_{22}	10^{-2}	10^{-3}

3 Классические схемы усилителей

3.1 Усилитель с общим эмиттером (НЧ без инерционности)



На НЧ параметры вещественны, режим установившийся считаем малосигнальным

$$Y = \begin{pmatrix} i_1 = g_{11}\Delta U_1 + g_{12}\Delta U_2 \\ i_2 = g_{21}\Delta U_1 + g_{22}\Delta U_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

— не пишем q_1 , надо g_1

Определение $Y(g)$ аналитическим способом: Тепловой потенциал $V = \frac{kT}{q}$