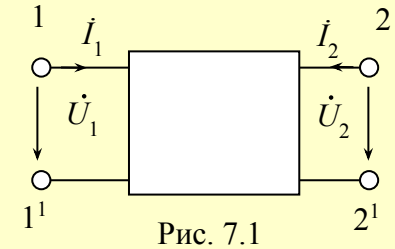


ГЛАВА 7. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

7.1. Основные определения. Уравнения и параметры четырехполюсника

Четырехполюсник – это устройство с четырьмя выводами два из которых являются входными (1, 1¹), а два других – выходными (2, 2¹).

При анализе четырехполюсник рассматривают в виде «черного ящика», т.е. в виде устройства схема которого неизвестна.



Теория четырехполюсников позволяет устанавливать связи между выходными и входными значениями напряжений и токов, не рассчитывая токи и напряжения на элементах внутри цепи.

Электрическое состояние линейного четырехполюсника задается входными и выходными напряжениями \dot{U}_1 и \dot{U}_2 и токами \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , по ним можно рассчитать все параметры цепи.

Из четырех величин любые две могут рассматриваться как воздействие - X_1, X_2 (независимые величины или аргументы), а две другие откликом - Y_1, Y_2 (это зависимые переменные, т.е. функции).

Уравнения, устанавливающие связь между откликами и воздействиями, называют *основными уравнениями четырехполюсника*. В общем виде их можно записать как две некоторые функции f_1 и f_2 от (X_1 и X_2), однако для линейных цепей в соответствии с принципом суперпозиции запись упрощается.

Коэффициенты $L_{11}, L_{12}, L_{21}, L_{22}$, входящие в основные уравнения четырехполюсника, называются параметрами четырехполюсника.

$$X_1 = Xf_1(L, X) = L_{11}X_1 + L_{12}X_2;$$

$$X_2 = Xf_2(L, X) = L_{21}X_1 + L_{22}X_2.$$

Параметры четырехполюсника

- Коэффициенты L_{11} , L_{12} , L_{21} , L_{22} , входящие в основные уравнения четырехполюсника, называются параметрами четырехполюсника.
- В зависимости от того, что считать воздействием (аргументами) X_1 , X_2 и что откликом (функциями) Y_1 , Y_2 (см. таблица), можно записать шесть пар основных уравнений четырехполюсника.

Варианты	1	2	3	4	5	6
Воздействие	\dot{I}_1, \dot{I}_2	U_2, U_1	U_2, \dot{I}_2	U_1, \dot{I}_1	\dot{I}_1, U_2	\dot{I}_2, U_1
Отклик	U_1, U_2	\dot{I}_1, \dot{I}_2	U_1, \dot{I}_1	U_2, \dot{I}_2	\dot{I}_2, U_1	\dot{I}_1, U_2
Параметры	\underline{Z}	\underline{Y}	\underline{A}	\underline{B}	\underline{H}	\underline{G}

Четырёхполюсник может быть охарактеризован одним из следующих способов:

- а) параметрами одной из форм основных уравнений;
- б) характеристическими параметрами;
- в) Т- или П-схемой замещения;
- г) сопротивлениями холостого хода и короткого замыкания.

Существуют формулы однозначного эквивалентного перехода от одного способа описания к любому другому.

A-параметры четырехполюсника.

Для A- параметров за воздействия принимают $\underline{U}_2, \underline{I}_2$, а откликами

считают $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ причем $\underline{I}_2 = -I_{2'}$:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = f(\underline{U}_2, \underline{I}_2), \\ \underline{I}_1 = f(\underline{U}_2, \underline{I}_2); \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \underline{U}_1 = A_{11} \cdot \underline{U}_2 + A_{12} \cdot \underline{I}_2, \\ \underline{I}_1 = A_{21} \cdot \underline{U}_2 + A_{22} \cdot \underline{I}_2; \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2, \\ \underline{I}_1 = \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2. \end{cases}$$

$$A_{11} = \left. \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} \right|_{\underline{I}_2=0} = 1 / \left(\left. \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \right) \right|_{\underline{I}_2=0}$$

– величина, обратная коэффициенту передачи по напряжению в прямом направлении в режиме холостого хода на выходе;

$$A_{12} = \left. \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_2} \right|_{\underline{U}_2=0} = 1 / \left(\left. \frac{\underline{I}_2}{\underline{U}_1} \right) \right|_{\underline{U}_2=0}$$

– величина с размерностью сопротивления, обратная взаимной проводимости между выходными и входными полюсами в режиме короткого замыкания на выходе;

$$A_{21} = \left. \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_2} \right|_{\underline{I}_2=0} = 1 / \left(\left. \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_1} \right) \right|_{\underline{I}_2=0}$$

– величина с размерностью проводимости, обратная взаимному сопротивлению между выходными и входными полюсами в режиме холостого хода на выходе;

$$A_{22} = \left. \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} \right|_{\underline{U}_2=0} = 1 / \left(\left. \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} \right) \right|_{\underline{U}_2=0}$$

– величина, обратная коэффициенту передачи по току в прямом направлении в режиме короткого замыкания на выходе.

Каждый коэффициент уравнения имеет конкретный физический смысл. Так из уравнений следует, что A_{11} и A_{21} можно определить в режиме холостого хода на выходе, а A_{12} и A_{22} – в режиме короткого замыкания на выходе.

Параметры A вида называются передаточными, так как по физическому смыслу они являются передаточными

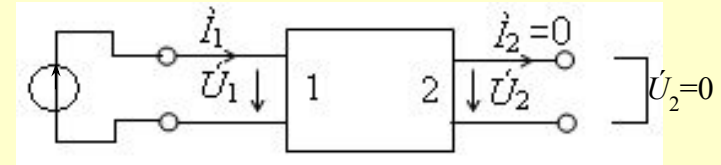


Рис. 5.2. Схема четырехполюсника для определения A-параметров

Коэффициенты обладают свойством $\underline{A} \cdot \underline{B} - \underline{C} \cdot \underline{D} = 1$ – уравнение связи.

$$A_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{I_2=0} = 1 / \left(\left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right) \right|_{I_2=0} - \text{величина, обратная коэффициенту передачи по}$$

напряжению в прямом направлении в режиме холостого хода на выходе;

$$A_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{U}_2=0} = 1 / \left(\left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right) \right|_{\dot{U}_2=0} - \text{величина с размерностью сопротивления,}$$

обратная взаимной проводимости между выходными и входными полюсами в режиме короткого замыкания на выходе;

$$A_{21} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{I_2=0} = 1 / \left(\left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right) \right|_{I_2=0} - \text{величина с размерностью проводимости, обратная}$$

взаимному сопротивлению между выходными и входными полюсами в режиме холостого хода на выходе;

$$A_{22} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{U}_2=0} = 1 / \left(\left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right) \right|_{\dot{U}_2=0} - \text{величина, обратная коэффициенту передачи по}$$

току в прямом направлении в режиме короткого замыкания на выходе.

7.2. Z - параметры четырехполюсника

- Если за воздействия принять токи I_1, I_2 , а откликами считать напряжения U_1, U_2 , то уравнения связи имеют вид:

$$U_1 = f_1(I_1, I_2), \quad U_1 = \underline{Z}_{11} I_1 + \underline{Z}_{12} I_2;$$

$$U_2 = f_2(I_1, I_2), \quad U_2 = \underline{Z}_{21} I_1 + \underline{Z}_{22} I_2.$$

- Коэффициенты, входящие в эти уравнения, имеют размерность сопротивлений и называются Z-параметрами, а сами уравнения – уравнениями четырехполюсника с Z-параметрами.

Z- параметры имеют следующие названия:

$$\underline{Z}_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{I_2=0}$$

– входное сопротивление при холостом ходе (х.х.) на выходе;

$$\underline{Z}_{12} = \left. \frac{U_1}{I_2} \right|_{I_1=0}$$

– сопротивление обратной передачи при холостом ходе на входе;

$$\underline{Z}_{21} = \left. \frac{U_2}{I_1} \right|_{I_2=0}$$

– выходное сопротивление при холостом ходе на входе.

$$\underline{Z}_{22} = \left. \frac{U_2}{I_2} \right|_{I_1=0}$$

- Систему уравнений в Z-параметрах можно записать в матричной форме: $(\mathbf{U}) = (\mathbf{Z})(\mathbf{I})$,
- где $(\mathbf{I}) = (I_1, I_2)^T$ – матрица-столбец заданных токов, $(\mathbf{U}) = (U_1, U_2)^T$ – матрица-столбец напряжений на выводах четырехполюсника;

$$(\mathbf{Z}) = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix}$$

– матрица сопротивлений четырехполюсника.

$$A_{11} = \underline{Z}_{11} / \underline{Z}_{21}; \quad A_{12} = \Delta_Z / \underline{Z}_{21}; \quad A_{21} = 1 / \underline{Z}_{21}; \quad A_{22} = \underline{Z}_{22} / \underline{Z}_{21}.$$

Y-параметры четырехполюсника

- Основные уравнения четырехполюсника

$$I_1 = f(U_1, U_2) = \underline{Y}_{11}U_1 + \underline{Y}_{12}U_2;$$

- в Y-параметрах записываются так:

$$I_2 = f(U_1, U_2) = \underline{Y}_{21}U_1 + \underline{Y}_{22}U_2$$

- **Y-параметры имеют следующие названия:**

- – входная проводимость в режиме короткого замыкания на выходе;

$$\underline{Y}_{11} = \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{U_2=0}$$

- – проводимость обратной передачи в режиме короткого замыкания на входе;

$$\underline{Y}_{12} = \left. \frac{I_1}{U_2} \right|_{U_1=0}$$

- – проводимость прямой передачи при коротком замыкании на выходе;

$$\underline{Y}_{21} = \left. \frac{I_2}{U_1} \right|_{U_2=0}$$

- – выходная проводимость в режиме короткого замыкания на входе.

$$\underline{Y}_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{U_1=0}$$

- Причем, $\underline{Z}_{11} \neq \frac{1}{\underline{Y}_{11}}$ так как они определены при разных режимах.

- Параметры различных систем уравнений, относящиеся к одному четырехполюснику, взаимосвязаны, т.е. любой из параметров одной системы уравнений (например, Z-параметры) может быть выражен через параметры другой системы (например Y, H, G и т.д.).

7.3. Связь между функциями цепи и параметрами четырехполюсника

К основным параметрам (функциям) электрической цепи относят $\underline{Z}_{\text{вх}}$, K_u , K_I , $\underline{Z}_{\text{вых}}$.

Покажем, что все они могут быть выражены через Z-параметры четырехполюсника: \underline{Z}_{11} , \underline{Z}_{12} , \underline{Z}_{21} , \underline{Z}_{22} .

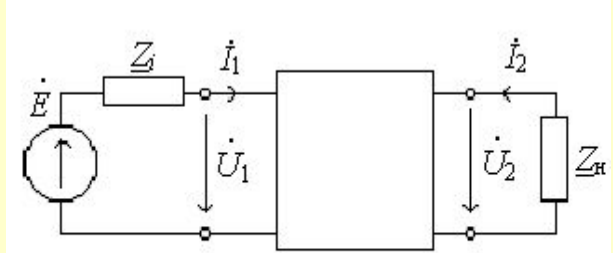


Рис. 7.2

1) Запишем основные уравнения в Z-параметрах и закон Ома для \underline{Z}_H и обозначим, записанные уравнения как (7.1) $-\dot{U}_1 = \underline{Z}_{11}\dot{I}_1 + \underline{Z}_{12}\dot{I}_2$, (7.2) $\dot{U}_2 = \underline{Z}_{21}\dot{I}_1 + \underline{Z}_{22}\dot{I}_2$ (7.3) $\dot{U}_2 = -\underline{Z}_H \dot{I}_2$

Подставим (7.3) \rightarrow (7.2). Получим

$$-\underline{Z}_H \dot{I}_2 = \underline{Z}_{21} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{22} \dot{I}_2 \quad (7.4)$$

Подставим (7.4) \rightarrow (7.1), получим

$$\dot{U}_1 = \underline{Z}_{11} \dot{I}_1 - \frac{\underline{Z}_{12} \underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_H} \dot{I}_1 \quad (7.5)$$

2) Используя определение входного сопротивления и (7.5), получим

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \underline{Z}_{11} - \frac{\underline{Z}_{12} \underline{Z}_H}{\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_H}$$

если $\underline{Z}_H \rightarrow \infty$, то $\underline{Z}_{\text{вх}} = \underline{Z}_{11}$

3. Используя определение коэффициента передачи тока и (7.4), получим

$$K_I = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = -\frac{\underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_H}$$

4) Используя определение коэффициента передачи напряжения (7.3) и (7.5), получим

$$K_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\dot{I}_2 \underline{Z}_H}{\dot{I}_1 \underline{Z}_{\text{вх}}} = -K_I \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{\text{вх}}} = -\frac{\underline{Z}_{12} \underline{Z}_H}{\underline{Z}_{11} \underline{Z}_{21} + \underline{Z}_{11} \underline{Z}_H + \underline{Z}_{12} \underline{Z}_{21}}$$

5. Получим выходное сопротивление

$$\underline{Z}_{\text{вых}} = \frac{U_2}{I_2} = \underline{Z}_{22} - \frac{\underline{Z}_{12} \underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_i}$$

7.4. Эквивалентные схемы четырехполюсника

- Электрическая схема реального четырехполюсника может быть сложной или даже недоступной, например, транзистор. Поэтому представляет интерес замены схемы реальной электрической цепи некоторой простой эквивалентной схемой.
- Схемы называются *эквивалентными*, если при их взаимной замене входные и выходные токи и напряжения не изменяются.
- Эквивалентные схемы можно составлять разными способами:
 - 1) по заданной топологии (по расположению элементов) электрической цепи;
 - 2) по основным уравнениям четырехполюсника. Такие схемы называют формальными схемами замещения;
 - 3) по физической модели. Это физическая схема замещения.

7.4.1. Схемы замещения по заданной топологии

- Обычно в качестве эквивалентных схем выбирают схемы с минимальным числом элементов. Наиболее распространены Т-, П- и Г-образные схемы замещения (рис. 7.3).

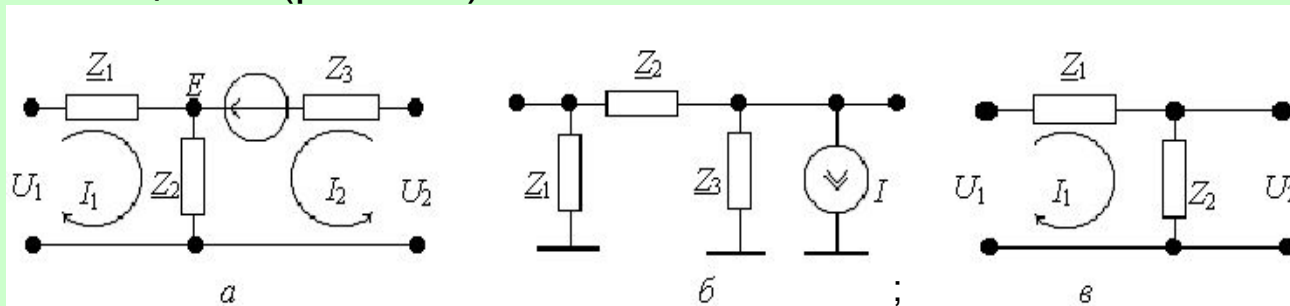


Рис. 7.3

$$\begin{aligned} (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)I_1 + \underline{Z}_2I_2 &= U_1 \\ \underline{Z}_2I_1 + (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)I_2 &= U_2 + E \end{aligned}$$

- Для Т-образной схемы замещения покажем связь между ее параметрами (\underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_3) и Z-параметрами четырехполюсника. Т-образная схема имеет два контура с контурными токами I_1 и I_2 . Используя метод контурных токов, запишем контурные уравнения:
- Если цепь пассивна т.е. $E = 0$, то составленные уравнения совпадают с уравнениями Z-параметров четырехполюсника, отсюда и определим Z-параметры:

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2$$

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_2$$

$$\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3$$

Отсюда получим

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{12}$$

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{12}$$

$$\underline{Z}_3 = \underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{12}$$

Свойства четырехполюсников

- 1. Четырехполюсник называется **пассивным** (не содержит источников), если выполняется условие $\underline{Z}_{21} = \underline{Z}_{12}$ или определитель матрицы пассивного $|\underline{A}|=1$

$$\underline{Z}_{21} = \underline{Z}_{12} \quad \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_{12}$$

Пассивные цепи для своего описания требуют трех параметров, четвертый определяется из условия пассивности .

Коэффициенты обладают свойством $\underline{A} \cdot \underline{B} - \underline{C} \cdot \underline{D} = 1$ – уравнение связи

- 2. Если при перемене местами источника и нагрузки токи в источнике и нагрузке не изменяются, то такой четырехполюсник называют **симметричным**.

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{22} \quad \text{или} \quad A_{11} = A_{22} \quad , \quad (\underline{A} = \underline{D}).$$

Симметричные четырехполюсники называют **взаимными**. Для их описания требуется два параметра, остальные находятся из условия пассивности и симметричности

7.4.2. Формальные схемы замещения

Их составляют по основным уравнениям четырехполюсника.

- Запишем основные уравнения четырехполюсника
- в системе H -параметров:

$$U_1 = f(I_1, U_2) = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \quad (7.6)$$

$$I_2 = f(I_1, U_2) = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \quad (7.7)$$

- Схему замещения входной цепи четырехполюсника составляют по уравнению (7.6), а выходной – по уравнению (7.7). Схема замещения четырехполюсника в системе H -параметров приведена на рис. 7.4.

- Уравнение (7.6) представляет собой второй закон Кирхгофа (закон для контура), поэтому входная цепь изображается в виде контура. При этом первое слагаемое – это падение напряжения от входного тока на входном сопротивлении, т.е. $h_{11}I_1$, а второе слагаемое – это напряжение, возникающее во входном контуре в результате обратной связи. Это учитывается введением во входную цепь зависимого источника ЭДС – .

- Уравнение (7.7) представляет собой первый закон Кирхгофа (закон для узла). Выходной ток I_2 состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое – это, зависимый источник тока, учитывающий передачу входного тока в выходную цепь, а второе слагаемое – это $h_{22}U_2$, ток через проводимость h_{22} .

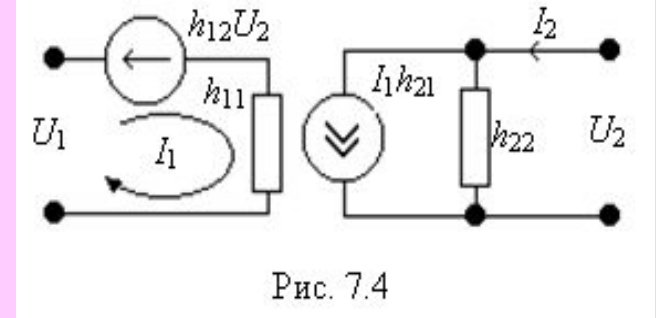


Рис. 7.4

7.6. Согласование четырехполюсников

- Часто четырехполюсники являются передающим (согласующим) звеном между источником сигнала и нагрузкой (см. рис. 7.2). Определим условие, когда четырехполюсник оказывается согласованным, т.е. условие, при котором через четырехполюсник от источника сигнала в нагрузку передается наибольшая мощность.

7.7. Соединение четырехполюсников

- Название составных четырехполюсников обычно состоит из двух слов. Первое слово характеризует способ соединения четырехполюсников на входе (последовательно или параллельно), а второе – на выходе (последовательно или параллельно). Каждую из схем составного четырехполюсника можно заменить на один четырехполюсник (рис. 7.6, е), параметры которого определяются следующим образом.
- При анализе электрических цепей часто возникает задача определения параметров сложных четырехполюсников, которые образованы соединением нескольких простых четырехполюсников, параметры которых известны.

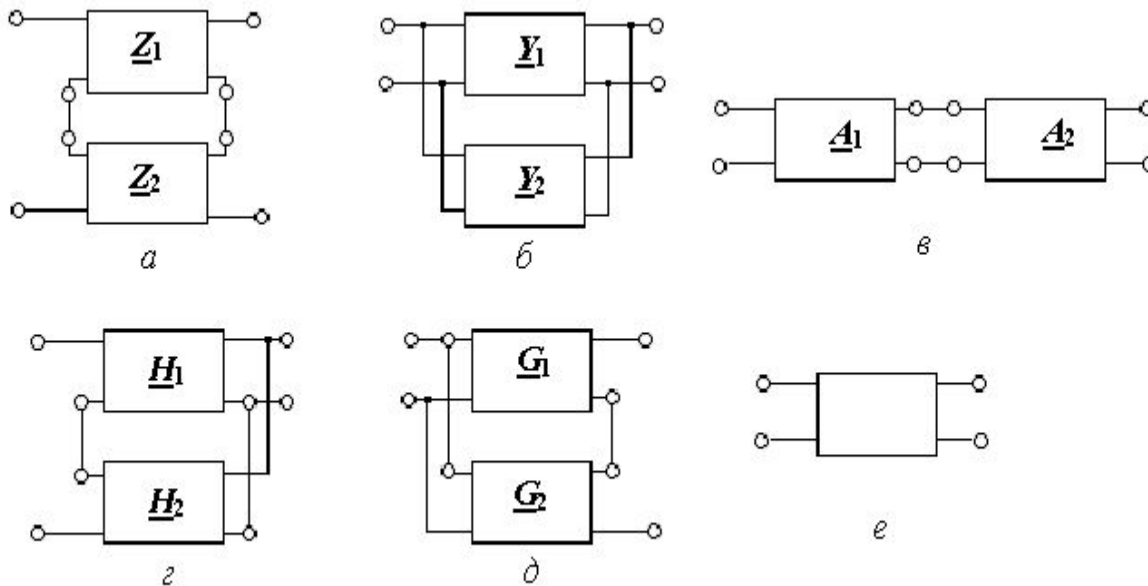


Рис. 7.6

- 1) Последовательно-последовательное соединение (рис. 7.6, а).

$$(\underline{Z}) = (\underline{Z1}) + (\underline{Z2}).$$
- 2) Параллельно-параллельное соединение (рис. 7.6, б). :

$$(\underline{Y}) = (\underline{Y1}) + (\underline{Y2}).$$
- 3) Каскадном соединении (рис. 7.6, в) (иногда такое соединение называют последовательным)

$$(\underline{A}) = (\underline{A1})(\underline{A2}).$$
- 4) Последовательно-параллельное соединении (рис. 7.6. г)

$$(\underline{H}) = (\underline{H1})+(\underline{H2}).$$
- 5) Параллельно-последовательное соединении (рис. 7.6, д)

$$(\underline{G}) = (\underline{G1}) + (\underline{G2}).$$

ГЛАВА 8. ФИЛЬТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

8.1. Основные понятия и определения

- В современных многоканальных системах связи широко используется частотный принцип разделения сигналов. Он состоит в том, что каждому сигналу отводится своя полоса частот. Важнейшую роль при обработке таких сигналов играют фильтры электрических сигналов.
- Фильтры – это устройства, которые предназначены для пропускания сигналов в определенной полосе частот и подавления сигналов за пределами этой полосы частот.
- Обычно фильтр – это четырехполюсник (рис. 8.1.).

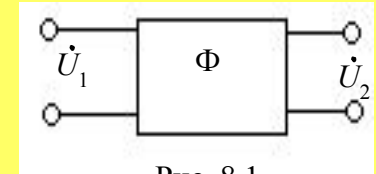


Рис. 8.1

Передача сигнала через фильтр характеризуется двумя способами.

- 1) Комплексным коэффициентом передачи по напряжению:

$$Ku(j\omega) = U_{2m} / U_{1m}$$

или его амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ):

$$Ku(\omega) = U_{2m} / U_{1m}$$

Коэффициент передачи показывает, какая доля входного сигнала проходит через фильтр. Коэффициент передачи – это относительная безразмерная величина. Иногда его характеризуют относительной логарифмической величиной $Ku[\text{дБ}] = 20 \lg Ku$, ее размерностью является децибелл (дБ).

- 2) Коэффициентом затухания по напряжению:

$$\alpha(j\omega) = U_{1m} / U_{2m} = 1 / Ku(j\omega); \quad \alpha(\omega) = U_{1m} / U_{2m}, \quad \alpha[\text{дБ}] = -20 \lg Ku(\omega)$$

Он показывает долю сигнала, которая затухает, проходя через фильтр.

8.2. Основные понятия в теории фильтров

- 1) Полоса пропускания (ПП) – это диапазон частот, в котором $K(\omega) = 1$, $\alpha = 1$.
- 2) Полоса задержания (заграждения) (ПЗ) – это диапазон частот, в котором $K(\omega) = 0$, $\alpha \rightarrow \infty$.

- 3) **Граничная частота**, является границей между полосой пропускания и полосой задержания, называется ($f_{гр}$ или $f_{ср}$). У реальных фильтров нет четкой границы между ПП и ПЗ, поэтому в них за значение граничной частоты $f_{гр}$ принимают частоту, определяемую из соотношения

$$\frac{k(\omega_{гр})}{k_{max}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707.$$

- 4. **Скорость спада АЧХ коэффициента передачи K_u в полосе заграждения** -рассчитывается из выражения

$$V = -20 \lg \frac{K_u(\omega_{гр})}{K(10\omega_{гр})} \Rightarrow \left[\frac{\text{дБ}}{\text{дек}} \right]$$

- Избирательные свойства фильтра тем лучше, чем ближе форма АЧХ к прямоугольной. Идеальный фильтр имеет прямоугольную АЧХ. Его скорость спада бесконечна.

- На рис. 8.2. изображены амплитудно-частотные характеристики фильтра низких частот (ФНЧ) в логарифмическом масштабе при разных скоростях спада.

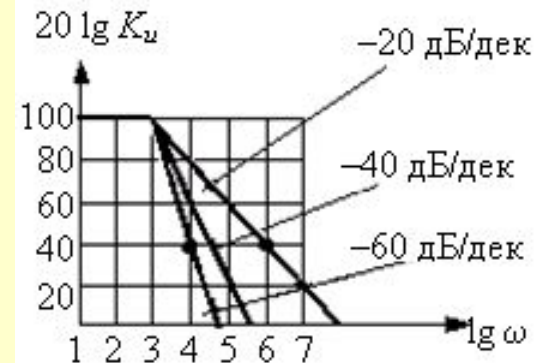


Рис. 8.2

8.3. Классификация фильтров электрических сигналов

- 1) В зависимости от характера входного сигнала фильтры делятся:
 - аналоговые и - цифровые.
- 2) В зависимости от наличия в схеме активных элементов:
 - пассивные и - активные.
- 3) В зависимости от элементов, составляющих фильтр:
 - LC, - RC, - RL-типа, ARC-типа (активные RC-фильтры).
- 4) По названию математического выражения которым аппроксимируется АЧХ фильтра:
 - фильтры Бесселя, - фильтры Баттерворта, - фильтры Золотарева, - фильтры Чебышева и др.
- 5) По расположению полосы пропускания на оси частот фильтры делятся:
 - на фильтры низких частот (ФНЧ). Их АЧХ K_u приведена на рис. 8.3, а. АЧХ идеального фильтра имеет прямоугольный характер, у реального нет четкой границы между полосой пропускания и полосой заграждения.
 - Фильтры высоких частот (ФВЧ). рис. 8.3, б ;
 - Полосно-пропускающие фильтры (ППФ) рис. 8.3, в ;
 - Полосно-заграждающие фильтры (ППЗ) рис. 8.3, г.

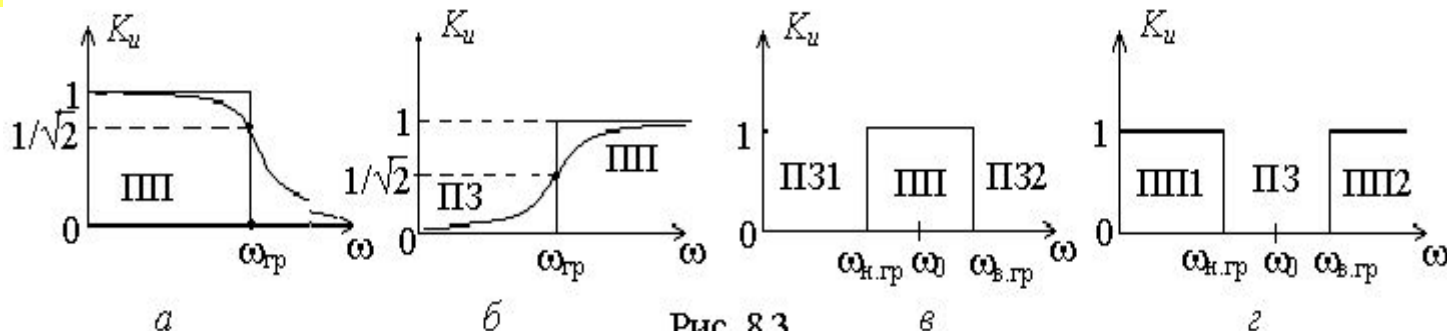
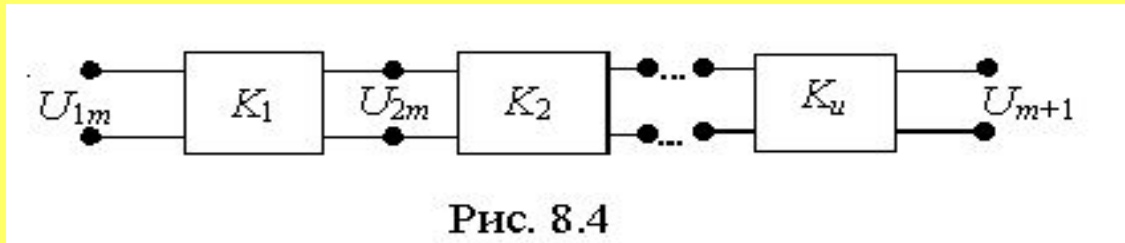


Рис. 8.3

8.4. Схемы электрических фильтров

- Основой для построения фильтров является каскадное (последовательное) соединение Г-, Т- или П-образных четырехполюсников (рис. 8.4).
- Каждый из четырехполюсников в теории фильтров называют звеном фильтра.



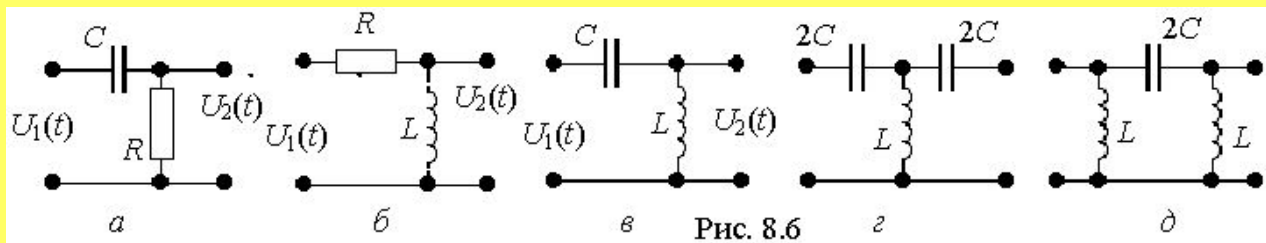
- Если звенья фильтров согласованы по напряжению и удовлетворяют условию $R_{\text{вых}} \ll R_{\text{вх}}$, то такие звенья можно считать независимыми, так как они не влияют на коэффициент передачи соседнего звена.

- В этом случае общий коэффициент передачи фильтра $K_{i \text{ общ}}$ можно записать как произведение коэффициентов передач K_{ui} отдельных звеньев, входящих в фильтр

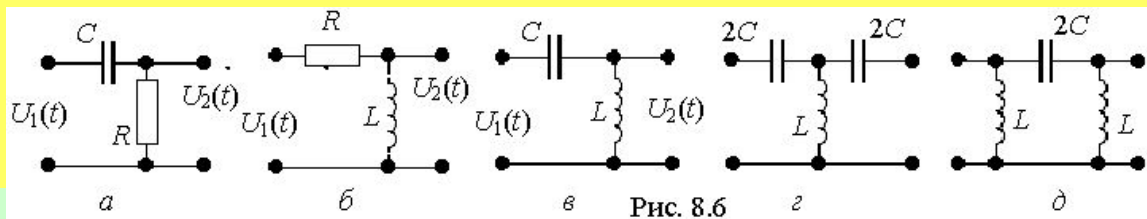
$$K_{i \text{ общ}} = \prod_{i=1}^n K_{ui}$$

8.4.1. Схемы звеньев фильтров

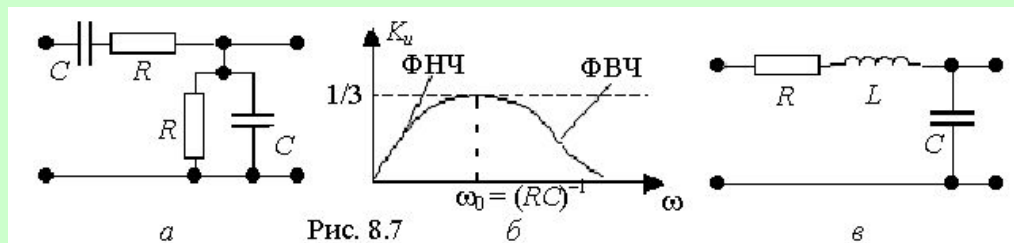
1. Схемы звеньев ФНЧ приведены на рис. 8.5.



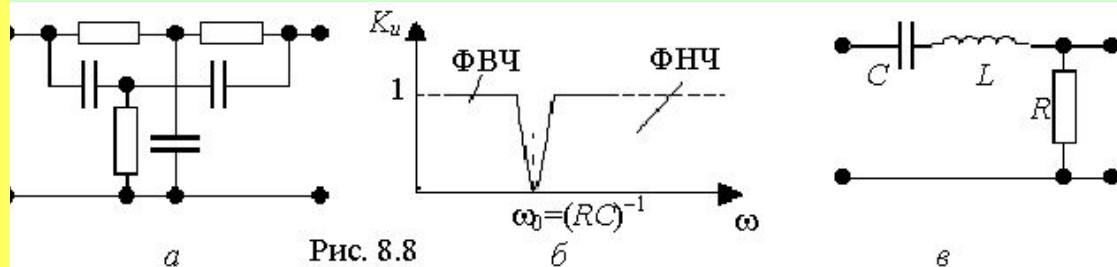
2. Схемы звеньев ФВЧ приведены на рис. 8.6



3. Полосно-пропускающий фильтр можно получить путем последовательного соединения двух звеньев ФНЧ и ФВЧ, подобрав соответствующим образом их граничные частоты.



4. Полосно-заграждающий фильтр (ПЗФ) можно получить путем параллельного соединения ФНЧ и ФВЧ при соответствующем выборе граничных частот.



8.4.2. Влияние числа звеньев фильтра на его характеристики

- Будем считать, что в состав второй схемы (рис. 8.9, б) между звеньями входит устройство согласования звеньев по сопротивлениям. Согласующий каскад [x1] имеет большое входное ($R_{вх} \rightarrow \infty$) и малое выходное ($R_{вых} \rightarrow 0$) сопротивления, при этом его коэффициент передачи равен единице ($K_u = 1$). Это позволяет считать 1-е и 2-е звено независимыми

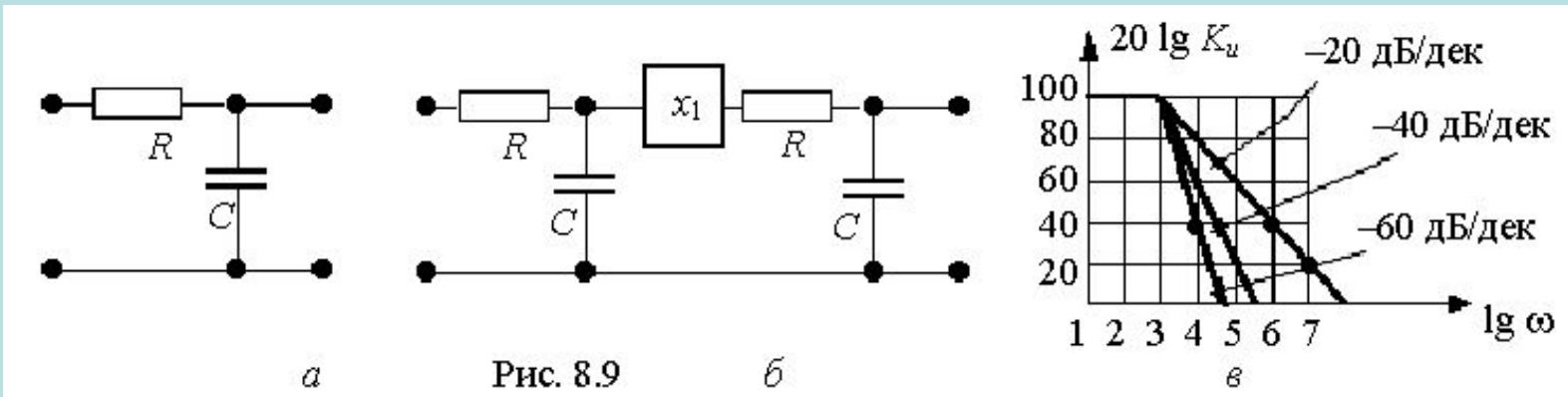


Рис. 8.9

$$K(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

$$\omega_{гр} = 1/(RC)$$

$$\hat{E} = \hat{E}_1 \otimes \hat{E}_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{ад}}\right)^2}$$

При $\omega > \omega_{гр}$, $K_u(\omega) \sim 1/\omega^2$,
т.е. $\nu = -40$ дБ/дек

При $\omega > \omega_{гр}$, $K_u(\omega) \sim 1/\omega$,
т.е. $\nu = -20$ дБ/дек

Вывод. Чем больше звеньев в фильтре, тем выше скорость спада в полосе заграждения (ν) и тем фильтр ближе к идеальному.

При независимых звеньях скорость спада составляет $\nu = n \cdot 20$ дБ/дек, где n – число звеньев.

Характеристические параметры четырёхполюсника

- включают:
- 1. *Характеристическое (волновое) сопротивление со стороны входных зажимов:* $\underline{Z}_{1C} = \dots$.
- 2. *Характеристическое (волновое) сопротивление со стороны выходных зажимов:* $\underline{Z}_{2C} = \dots$.
- 3. *Постоянную передачи* $\underline{\Gamma} = \ln = \ln$,
- причём $\underline{\Gamma} = a + jb$ ($\underline{\Gamma} = A + jB$, $g = a + jb$) и
- *коэффициент затухания* (постоянная ослабления) a измеряется в *неперах* (Нп), а *коэффициент фазы* (постоянная фазы) b – в *рад* или *град*.
- Основные уравнения четырёхполюсника с характеристическими параметрами имеют следующую редакцию:
- $\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \text{ch}\underline{\Gamma} + \underline{Z}_{C2} \cdot \underline{I}_2 \cdot \text{sh}\underline{\Gamma} = \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2$;
- $\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cdot \text{sh}\underline{\Gamma} + \underline{I}_2 \cdot \text{ch}\underline{\Gamma} = \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2$,

Вторичные параметры четырехполюсников

- В качестве вторичных параметров четырехполюсников используют характеристические сопротивления Z_{C1} , Z_{C2} и постоянную передачи g . Для симметричного четырехполюсника $Z_{C1} = Z_{C2} = Z_C$.
- Характеристическое** сопротивление Z_C равно такому сопротивлению нагрузки $Z_C = Z_H$, при котором входное сопротивление четырехполюсника равно этому сопротивлению $Z_{вх} = Z_C$. Поскольку у симметричного четырехполюсника $A = D$ и то, подставляя $Z_{вх} = Z_C$ и $Z_H = Z_C$, получим **Режим работы, при котором сопротивление нагрузки равно характеристическому сопротивлению четырехполюсника, называют согласованным режимом.** В большинстве практических задач он является желательным.
- Постоянная передачи g** является комплексным числом $g = a + jb$.
- При этом

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{U_1 e^{j\varphi_1}}{U_2 e^{j\varphi_2}} = \frac{U_1}{U_2} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} = e^a e^{jb} = e^g.$$

- Коэффициент фазы $b = \varphi_1 - \varphi_2$** измеряют в радианах, а **коэффициент затухания** в неперах (Нп) или беллах (Б). Затуханию в 1 Нп соответствует отношение напряжений $U_1/U_2 = e^1 = 2,73$. При определении затухания в беллах (или децибеллах) используют десятичные логарифмы (дБ). При этом затуханию в 1 Белл соответствует затухание в 1,15 Непера.
- Постоянная передачи может быть определена через А-параметры четырехполюсника

$$e^g = \frac{U_1}{U_2} = \frac{AU_2 + BU_2}{U_2} = A + B \frac{U_2}{U_2} = A + \frac{B}{Z_C} = A + \sqrt{BC}.$$

- Аналогичным образом можно определить А-коэффициенты четырехполюсника через вторичные параметры Z_C и g .