ГЛАВА 7. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

7.1. Основные определения. Уравнения и параметры четырехполюсника

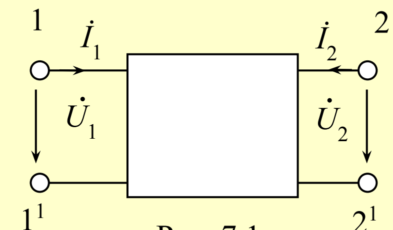

Рис. 7.1

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

При анализе четырехполюсник рассматриваю 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.

$$Y_1 = f_1(X_1, X_2) = L_{11} X_1 + L_{12} X_2;$$

$$Y_2 = f_2(X_1, X_2) = L_{21} X_1 + L_{22} X_2.$$

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) $X1$, $X2$ и что откликом (функциями) $Y1$, $Y2$ (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.

А-параметры четырехполюсника.

Для А- параметров за воздействия принимают $\underline{U}2$, $\underline{I}2$, а откликами считают $\underline{U}2$, $\underline{I}2$ причем $\dot{I}'_2 = -\underline{I}_2$:

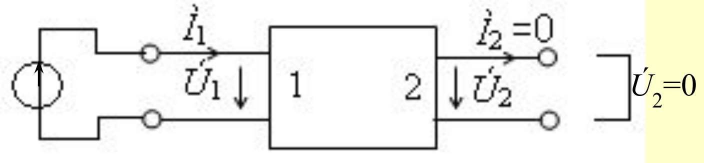

Рис. 5.2. Схема четырехполюсника для определения А-параметров

$$\begin{cases} \underline{U}1 = f(\underline{U}_2, \underline{I}_2), \\ \underline{I}1 = f(\underline{U}_2, \underline{I}_2); \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{A}_{11}\cdot\underline{U}_2 + \underline{A}_{12}\cdot\underline{I}_2, \\ \underline{I}_1 = \underline{A}_{21}\cdot\underline{U}_2 + \underline{A}_{22}\cdot\underline{I}_2; \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \underline{U}1 = \underline{A}\cdot\underline{U}2 + \underline{B}\cdot\underline{I}_2, \\ \underline{I}1 = \underline{C}\cdot\underline{U}2 + \underline{D}\cdot\underline{I}_2. \end{cases}$$

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

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

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

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

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

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

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

– 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 А вида называются передаточными, так как по физическому смыслу они являются передаточными

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

$A_{11} = \left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{I}_2=0} = 1\Big/\left.\left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}\right)\right|_{\dot{I}_2=0}$ – величина, обратная коэффициенту передачи по напряжению в прямом направлении в режиме холостого хода на выходе;

$A_{12} = \left.\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2}\right|_{\dot{U}_2=0} = 1\Big/\left.\left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}\right)\right|_{\dot{U}_2=0}$ – величина с размерностью сопротивления, обратная взаимной проводимости между выходными и входными полюсами в режиме короткого замыкания на выходе;

$A_{21} = \left.\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2}\right|_{\dot{I}_2=0} = 1\Big/\left.\left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}\right)\right|_{\dot{I}_2=0}$ – величина с размерностью проводимости, обратная взаимному сопротивлению между выходными и входными полюсами в режиме холостого хода на выходе;

$A_{22} = \left.\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2}\right|_{\dot{U}_2=0} = 1\Big/\left.\left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}\right)\right|_{\dot{U}_2=0}$ – 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*1, то уравнения связи имеют вид:
- *U*1 = *f*1(*I*1, *I*2),
- *U*2 = *f*2(*I*1, *I*2).

$$\dot{U}_1 = f(\dot{I}_1, \dot{I}_2) = \underline{Z}_{11}\dot{I}_1 + \underline{Z}_{12}\dot{I}_2;$$

$$\dot{U}_2 = f(\dot{I}_1, \dot{I}_2) = \underline{Z}_{21}\dot{I}_1 + \underline{Z}_{22}\dot{I}_2.$$

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;
- $\underline{Z}_{21} = \left.\frac{U_2}{I_1}\right|_{I_2=0}$ –сопротивление прямой передачи при холостом ходе на выходе;
- $\underline{Z}_{22} = \left.\frac{U_2}{I_2}\right|_{I_1=0}$ – выходное сопротивление при холостом ходе на входе.
- Систему уравнений в Z-параметрах можно записать в матричной форме: **(*U*) = (*Z*) (*I*)**,
- где **(*I*)** = (*I*1,*I*2)ᵀ – матрица-столбец заданных токов, **(*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**.**

$A_{11} = Z_{11}/Z_{21}$; $A_{12} = \Delta_Z/Z_{21}$; $A_{21} = 1/Z_{21}$; $A_{22} = Z_{22}/Z_{21}$.

Y-параметры четырехполюсника

- Основные уравнения четырехполюсника
- в *Y*-параметрах записываются так:

$$\underline{I}_1 = f(U_1, U_2) = \underline{Y}_{11}U_1 + \underline{Y}_{12}U_2;$$

$$\underline{I}_2 = f(U_1, U_2) = \underline{Y}_{21}U_1 + \underline{Y}_{22}U_2$$

- ***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 $\underline{Z}_{вх}$, K_u, K_I, $\underline{Z}_{вых}$.

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

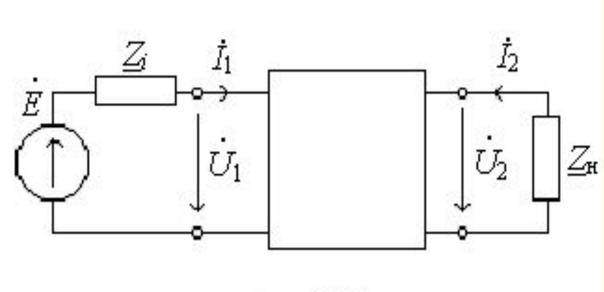

Рис. 7.2

1) Запишем основные уравнения в Z-параметрах и закон Ома для $\underline{Z}н$ 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) - $\dot{U}_2 = -\underline{Z}_н \dot{I}_2$

Подставим (7.3) → (7.2). Получим

$$-\underline{Z}_н \dot{I}_2 = \underline{Z}_{21}\dot{I}_1 \underline{Z}_{22}\dot{I}_2 \qquad (7.4)$$

Подставим (7.4) → (7.1), получим

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

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

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

если Zн → ∞, то Zвх = Z11

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

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

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

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

5. Получим выходное сопротивление

$$\underline{Z}_{вых} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = \underline{Z}_{22} - \frac{\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_i}$$

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).

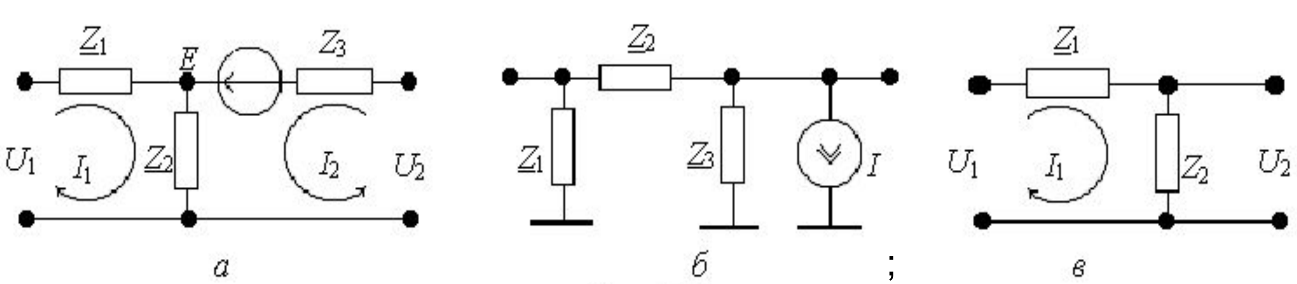

Рис. 7.3

$$(\underline{Z}_1+\underline{Z}_2)I_1+\underline{Z}_2I_2=U_1$$

$$\underline{Z}_2I_1+(\underline{Z}_2+\underline{Z}_3)I_2=U_2+E$$

- 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 или определитель матрицы пассивного **|A|=1**

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

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**.

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

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:

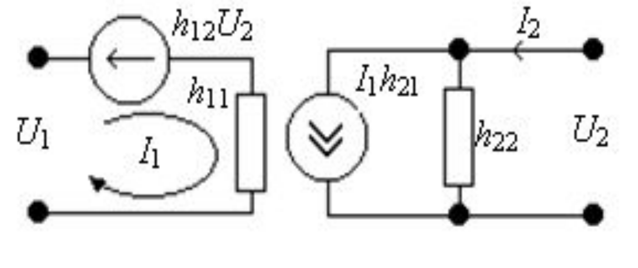

Рис. 7.4

•;
$$U_1 = f(I_1, U_2) = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \quad (7.6)$$
•
$$I_2 = f(I_1, U_2) = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \quad (7.7).$$
•.

- 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.

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.

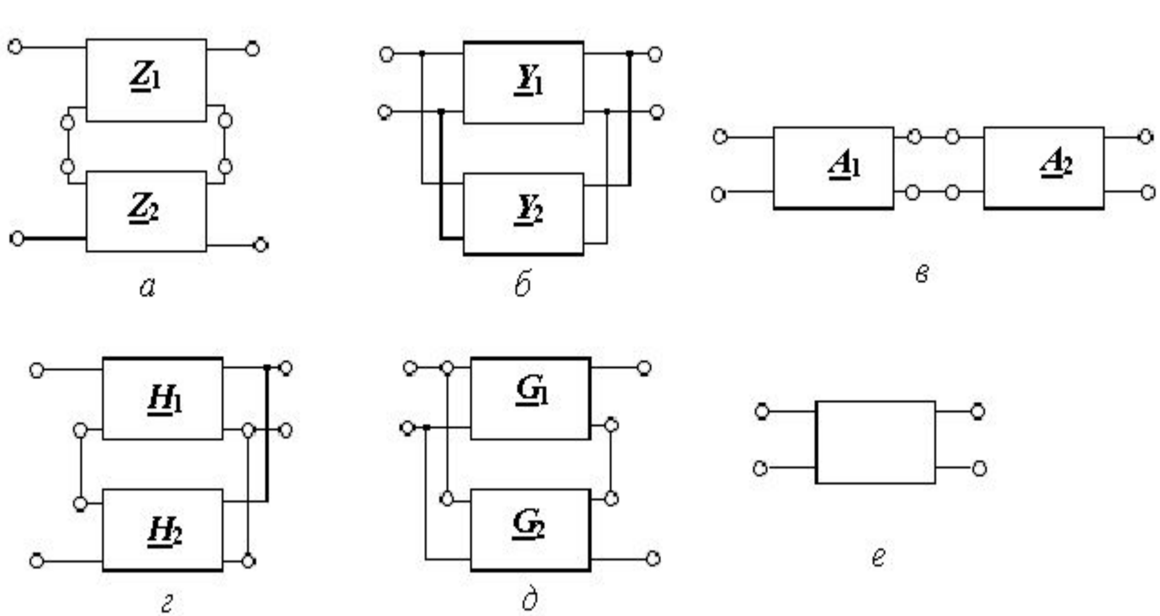

Рис. 7.6

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

$$(\underline{Z}) = (\underline{Z}1) + (\underline{Z}2).$$

2) Параллельно-параллельное соединение (рис. 7.6, *б*). :

$$(\underline{Y}) = (\underline{Y}1) + (\underline{Y}2).$$

3) Каскадном соединении (рис. 7.6, *в*) (иногда такое соединение называют последовательным)

$$(\underline{A}) = (\underline{A}1)(\underline{A}2).$$

4) Последовательно-параллельное соединении (рис. 7.6. *г*)

$(\underline{H}) = (\underline{H}1)+(\underline{H}2).$

5) Параллельно-последовательное соединении (рис. 7.6, *д*)

$(\underline{G}) = (\underline{G}1) + (\underline{G}2).$

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.

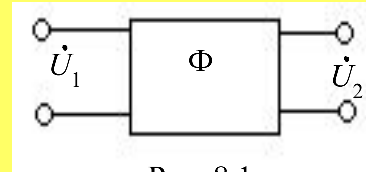

Рис. 8.1

- Обычно фильтр – это четырехполюсник (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):

$Ku(\omega) = U2m/U1m.$

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

- 2) Коэффициентом затухания по напряжению:

$\alpha(j\omega) = U_{1m} / U_{2m} = 1/ Ku(j\omega)$; $\alpha(\omega) = U_{1m} / U_{2m}$, α[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*(ω) = 1, α = 1.

- 2) **Полоса задержания (заграждения) (ПЗ)–**это диапазон частот, в котором *K*(ω) = 0, α→∞.

- 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

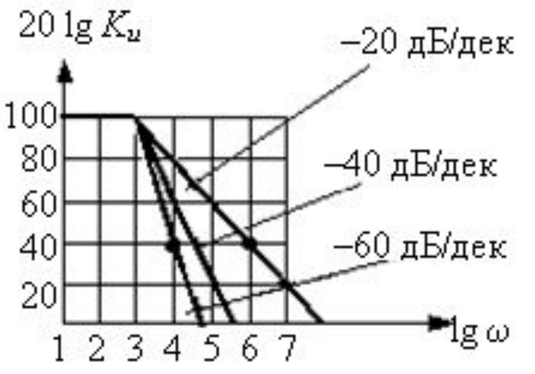

Рис. 8.2

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

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

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

- 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.

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 *Ku* 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.

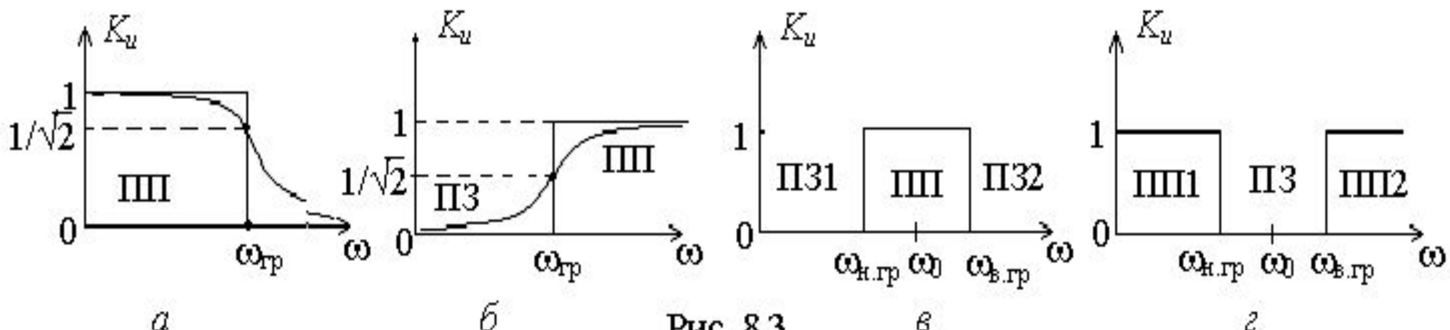

Рис. 8.3

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.

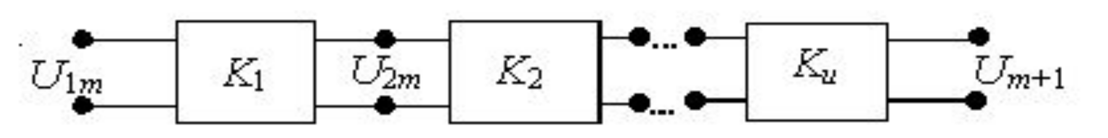

Рис. 8.4

- Если звенья фильтров согласованы по напряжению и удовлетворяют условию *R*вых<< *R*вх, то такие звенья можно считать независимыми, так как они не влияют на коэффициент передачи соседнего звена.

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

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

8.4.1. Схемы звеньев фильтров

1. **Схемы звеньев ФНЧ приведены на рис. 8.5**.

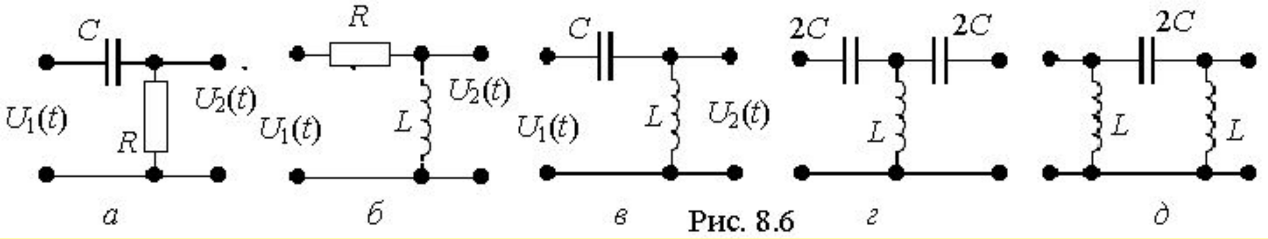

Рис. 8.6

2. **Схемы звеньев ФВЧ приведены на рис. 8.6**

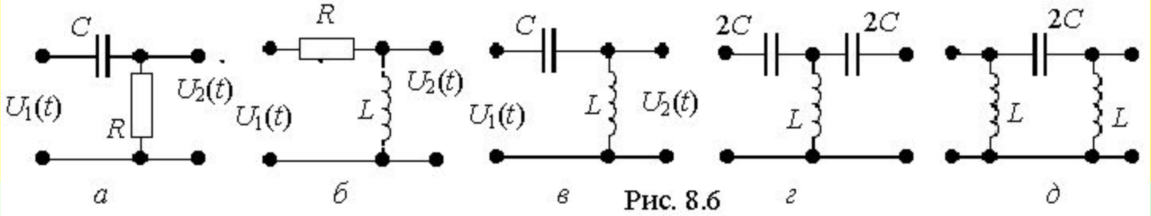

Рис. 8.6

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

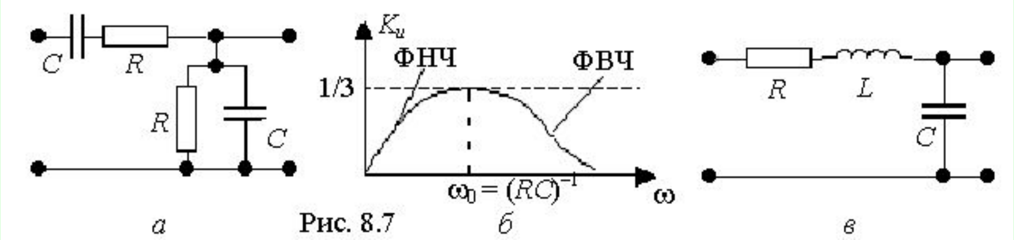

Рис. 8.7

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

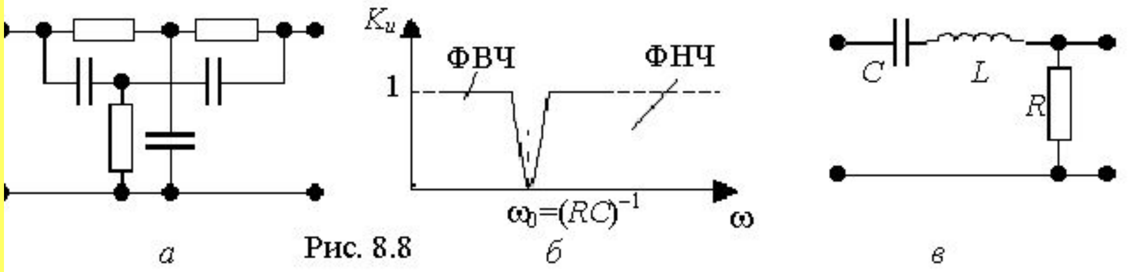

Рис. 8.8

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 [*x*1] имеет большое входное (*R*вх → ∞) и малое выходное (*R*вых → 0) сопротивления, при этом его коэффициент передачи равен единице (*Ku* =1). Это позволяет считать 1-е и 2-е звено независимыми

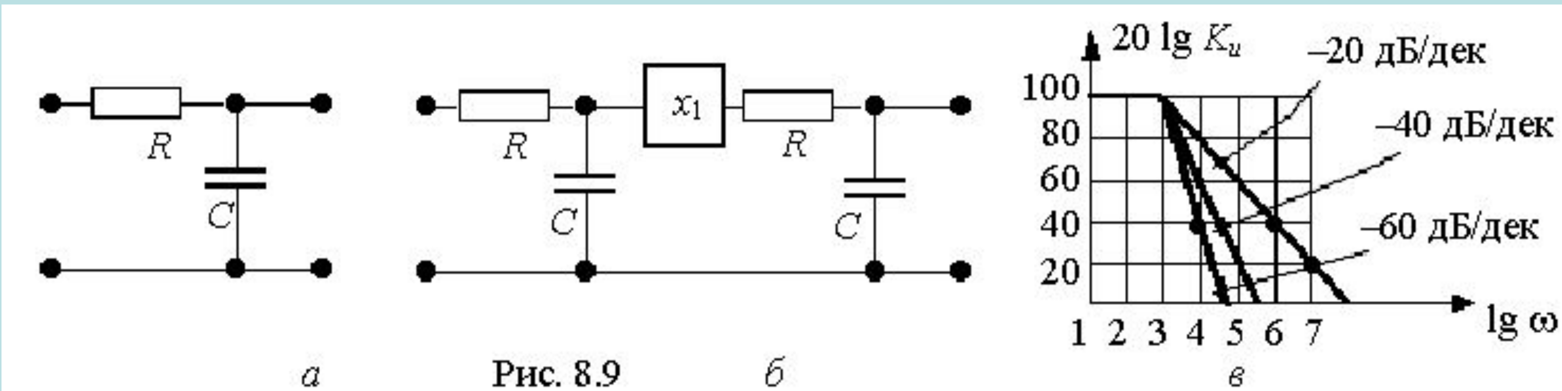

Рис. 8.9

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

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

$$K = K_1 \cdot K_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{гр}}\right)^2}$$

$\omega_{гр} = 1/(RC)$

При ω > ωгр, *Ku*(ω)~1/ω, т.е. *v* = –20 дБ/дек

При $\omega > \omega_{гр}$, *Ku*(ω)~1/ω², т.е. *v* = –40 дБ/дек

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

При независимых звеньях скорость спада составляет *v* = *n*·20 дБ/дек, где *n* – число звеньев.

Характеристические параметры_четырёхполюсника

- включают:
- 1. *Характеристическое* (волновое) *сопротивление* со стороны входных зажимов: $\underline{Z}_{1C}$ ==.
- 2. *Характеристическое* (волновое) *сопротивление* со стороны выходных зажимов: $\underline{Z}_{2C}$ ==.
- 3. *Постоянную передачи* $\underline{Г}$ =ln= ln,
- причём $\underline{Г} = a + jb$ $(\underline{Г} = A + jB,\ \ g = a + jb)$ 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:
- $\underline{U}_1 = \cdot(\underline{U}_2 \cdot ch\underline{Г} + \underline{Z}_{C2} \cdot \underline{I}_2 \cdot sh\underline{Г}) = \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2$;
- $\underline{I}_1 = \cdot(\cdot sh\underline{Г} + \underline{I}_2 \cdot ch\underline{Г}) = \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2$,

Вторичные параметры четырехполюсников

- В качестве вторичных параметров четырехполюсников используют характеристические сопротивления Z_{C1}, Z_{C2} и постоянную передачи g. Для симметричного четырехполюсника $\underline{Z}_{C1}=\underline{Z}_{C2}=\underline{Z}_C$.
- **Характеристическое** сопротивление $\underline{Z}_C$ равно такому сопротивлению нагрузки $\underline{Z}_C=\underline{Z}_H$, при котором входное сопротивление четырехполюсника равно этому сопротивлению $\underline{Z}_{вх}=\underline{z}C$. Поскольку у симметричного четырехполюсника $\underline{A}=\underline{D}$ и то, подставляя $\underline{Z}вх=\underline{Z}_C$ и $\underline{Z}_H=\underline{Z}_C$, 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 $\underline{g}=a+jb$.
- При этом

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2}=\frac{U_1e^{j\varphi_1}}{U_2e^{j\varphi_2}}=\frac{U_1}{U_2}e^{j(\varphi_1-\varphi_2)}=e^ae^{jb}=e^{\underline{g}}.$$

- **Коэффициент фазы** $b=\phi1-\phi2$ измеряют в радианах, а **коэффициент затухания** в неперах (Нп) или беллах (Б). Затуханию в 1 Нп соответствует отношение напряжений $U1/U2=e1=2{,}73$. 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

$$e^{\underline{g}}=\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2}=\frac{\underline{A}\dot{U}_2+\underline{B}\dot{I}_2}{\dot{U}_2}=\underline{A}+\underline{B}\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2}=\underline{A}+\frac{\underline{B}}{\underline{Z}_C}=\underline{A}+\sqrt{\underline{BC}}.$$

- Аналогичным образом можно определить А-коэффициенты четырехполюсника через вторичные параметры $\underline{Z}_C$ и $\underline{g}$.