Коваленко В.Е. октябрь 2021г.

ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ.

Классификация четырехполюсников.
Основные уравнения и первичные параметры четырехполюсников.
Схемы замещения четырехполюсников.
Характеристические параметры четырехполюсников.

Классификация четырехполюсников.

Устройство, прибор или часть цепи, имеющие две пары зажимов, служащих для подключения источников энергии и нагрузки, называются *четырехполюсниками.*

Примерами четырехполюсников могут служить усилители и трансформаторы, электрические фильтры и линии электропередачи. К исследованию проходных четырехполюсников сводятся задачи определения комплексных частотных и операторных характеристик произвольных цепей.

Четырехполюсники подразделяют на линейные и нелинейные, активные и пассивные, автономные и неавтономные, симметричные и несимметричные.

Активный четырехполюсник имеет в своем составе источники энергии, и напряжение на его разомкнутых зажимах отлично от нуля. *Пассивный* четырехполюсник не содержит источников энергии. В общем случае активный четырехполюсник обозначают буквой А (рис.1), пассивный - буквой П.

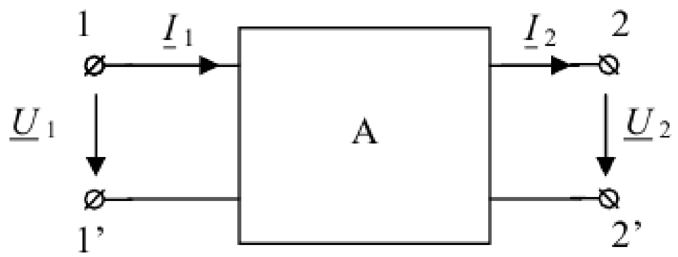

Рис. 1

Активные четырехполюсники подразделяют на автономные и неавтономные. Если внутри четырехполюсника имеются некомпенсированные источники энергии, то он — автономный. Если источники внутри четырехполюсника являются зависимыми (транзисторы, операционные усилители), то четырехполюсник — неавтономный.

Будем называть четырехполюсник *симметричным*, если перемена местами входных и выходных зажимов не приводит к изменению токов и напряжений цепи, к которой он подключен.
Еще один признак деления четырехполюсников — на взаимные и невзаимные. Взаимным называют четырехполюсник, для которого справедлива теорема взаимности (обратимости). Все пассивные четырехполюсники — взаимные.
И наконец, четырехполюсники делят на линейные (связь токов и напряжений на их зажимах описывается линейными зависимостями) и нелинейные. Ниже будут рассматриваться только линейные пассивные четырехполюсники.

Основные уравнения и первичные параметры четырехполюсников

Основные уравнения проходных четырехполюсников составляются относительно токов и напряжений внешних ветвей, подключенных к зажимам 1 – 1' и 2 – 2'. Их число равно числу независимых сторон четырехполюсника, т. е. двум. Вид этих уравнений зависит от того, какие две величины из четырех токов и напряжений являются зависимыми, а какие — независимыми. Учитывая, что число сочетаний из четырех по два равно шести, приходим к заключению, что основные уравнения четырехполюсника могут быть записаны в шести различных формах.

Четыре наиболее важные в практическом отношении формы записи уравнений четырехполюсника приведены ниже.

A-форма, где $\underline{U}_1$ и $\underline{I}_1$ — зависимые от $\underline{U}_2$ и $\underline{I}_2$:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}_{11}\underline{U}_2 + \underline{A}_{12}\underline{I}_2;$$

$$\underline{I}_1 = \underline{A}_{21}\underline{U}_2 + \underline{A}_{22}\underline{I}_2.$$

В матричной форме $\begin{bmatrix}\underline{U}_1\\ \underline{I}_1\end{bmatrix} = \mathbf{A}\begin{bmatrix}\underline{U}_2\\ \underline{I}_2\end{bmatrix}$. (6.1)

Y-форма, где $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_2$ — зависимые от $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$:

$$\underline{I}_1 = \underline{Y}_{11}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{12}\underline{U}_2; \quad \underline{I}_2 = \underline{Y}_{21}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{22}\underline{U}_2; \qquad \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Y}\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix}. \tag{6.2}$$

Z-форма, где $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$ — зависимые от $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_2$:

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{11}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{12}\underline{I}_2; \quad \underline{U}_2 = \underline{Z}_{21}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{22}\underline{I}_2; \qquad \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Z}\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}. \tag{6.3}$$

H-форма, где $\underline{U}_1$ и $\underline{I}_2$ — зависимые от $\underline{I}_1$ и $\underline{U}_2$:

$$\underline{U}_1 = \underline{H}_{11}\underline{I}_1 + \underline{H}_{12}\underline{U}_2; \quad \underline{I}_2 = \underline{H}_{21}\underline{I}_1 + \underline{H}_{22}\underline{U}_2; \qquad \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{H}\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix}. \tag{6.4}$$

Коэффициенты основных уравнений (6.1) — (6.4) называются соответственно A-, Y-, Z- и H-параметрами четырехполюсника. Каждый из этих параметров имеет физический смысл какой-либо комплексной частотной характеристики проходного четырехполюсника. Например, параметр $\underline{Y}_{11} = \left.\dfrac{\underline{I}_1}{\underline{U}_1}\right|_{\underline{U}_2=0}$ имеет смысл комплексной входной проводимости четырехполюсника со стороны зажимов 1 – 1’ при коротком замыкании на зажимах 2 – 2’, а параметр $\underline{H}_{12} = \left.\dfrac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}\right|_{\underline{I}_1=0}$ — величины, обратной комплексному коэффициенту передачи по напряжению от зажимов 1 – 1’ к зажимам 2 – 2’ в режиме холостого хода на зажимах 1 – 1’.

Математически системы уравнений (6.1) — (6.4) являются равносильными, поэтому коэффициенты уравнений должны быть связаны элементарными алгебраическими соотношениями. Для определения этих соотношений соответствующие системы уравнений должны быть решены относительно одних и тех же переменных. Например, система уравнений (6.2) может быть решена относительно напряжений $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$:

$$\underline{U}_1 = \frac{\underline{Y}_{22}\underline{I}_1 - \underline{Y}_{12}\underline{I}_2}{\Delta_Y};\ \ \underline{U}_2 = \frac{-\underline{Y}_{21}\underline{I}_1 + \underline{Y}_{11}\underline{I}_2}{\Delta_Y}, \qquad (6.5)$$

где $\Delta_Y = \underline{Y}_{21}\underline{Y}_{12} - \underline{Y}_{12}\underline{Y}_{21}$ — определитель основной системы в Y-форме.

Сравнивая коэффициенты уравнений (6.3) и (6.5), Z-параметры неавтономного четырехполюсника можно выразить через Y-параметры того же четырехполюсника:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{22} & -\underline{Y}_{12} \\ -\underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{11} \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta_Y}. \qquad (6.6)$$

Соотношения (6.6) называют *формулами перехода*.

Для обратимых четырехполюсников справедливы равенства $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$, $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}$, $\underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{12}\underline{A}_{21} = 1$, означающие, что из четырех параметров независимыми являются только три. В симметричном обратимом четырехполюснике всего два независимых параметра.

Пример 6.1. Определить A-параметры Г-образного четырехполюсника (рис. 6.2, а) методом холостого хода и короткого замыкания.

Решение. Воспользуемся основными уравнениями четырехполюсника в A-форме (6.1).

Параметры четырехполюсника в режиме холостого хода, $\underline{I}_2 = 0$ (рис. 6.2, б):

$$\underline{A}_{11} = \frac{\underline{U}_{1\text{Х}}}{\underline{U}_{2\text{Х}}};\ \ \underline{A}_{21} = \frac{\underline{I}_{1\text{Х}}}{\underline{U}_{2\text{Х}}}.$$

В режиме короткого замыкания, $\underline{U}_2 = 0$ (рис. 6.2, в):

$$\underline{A}_{12} = \frac{\underline{U}_{1\text{К}}}{\underline{I}_{2\text{К}}};\ \ \underline{A}_{22} = \frac{\underline{I}_{1\text{К}}}{\underline{I}_{2\text{К}}}.$$

Из схем (рис. 6.2, б, в) видно, что в режиме холостого хода $\underline{U}_2 = \underline{U}_1 = \underline{E}_1$, $\underline{I}_1 = \dfrac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_a}$, а в режиме короткого замыкания

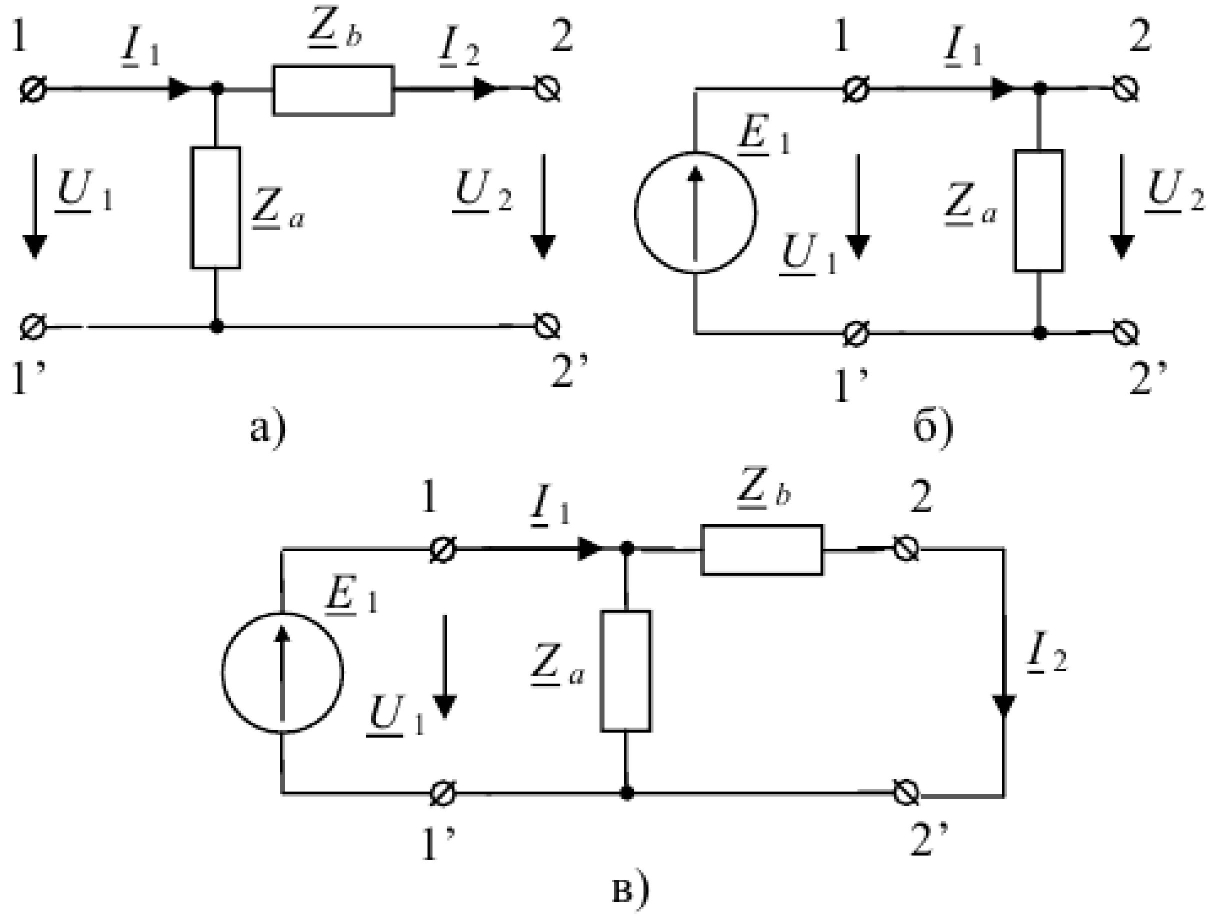

Рис. 6.2

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_b} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_b}, \; \underline{I}_1 = \underline{E}_1 \frac{\underline{Z}_a \underline{Z}_b}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_b}.$$

Используя полученные соотношения, находим:

$$\underline{A}_{11} = 1; \quad \underline{A}_{12} = \frac{\underline{E}_1 \underline{Z}_b}{\underline{E}_1} = \underline{Z}_b; \quad \underline{A}_{21} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{E}_1 \underline{Z}_a} = \frac{1}{\underline{Z}_a};$$

$$\underline{A}_{22} = \frac{\underline{E}_1 \underline{Z}_b \left(\underline{Z}_a + \underline{Z}_b\right)}{\underline{E}_1 \underline{Z}_a \underline{Z}_b} = 1 + \frac{\underline{Z}_b}{\underline{Z}_a};$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \underline{Z}_b \\ \dfrac{1}{\underline{Z}_a} & 1 + \dfrac{\underline{Z}_b}{\underline{Z}_a} \end{bmatrix}.$$

Схемы замещения четырехполюсников

Каждому линейному автономному четырехполюснику может быть поставлена в соответствие эквивалентная схема, содержащая не более четырех элементов. Так как только три параметра четырехполюсника являются независимыми, то минимальное число элементов в схеме замещения, обеспечивающей заданные свойства, равняется трем.

Для каждого четырехполюсника можно построить несколько эквивалентных схем, имеющих различную топологию и различных по типам и значениям входящих в нее элементов. Широкое распространение на практике получили Т- и П-образные схемы с соединениями звездой (рис. 6.3, а) и треугольником (рис. 6.3, б)

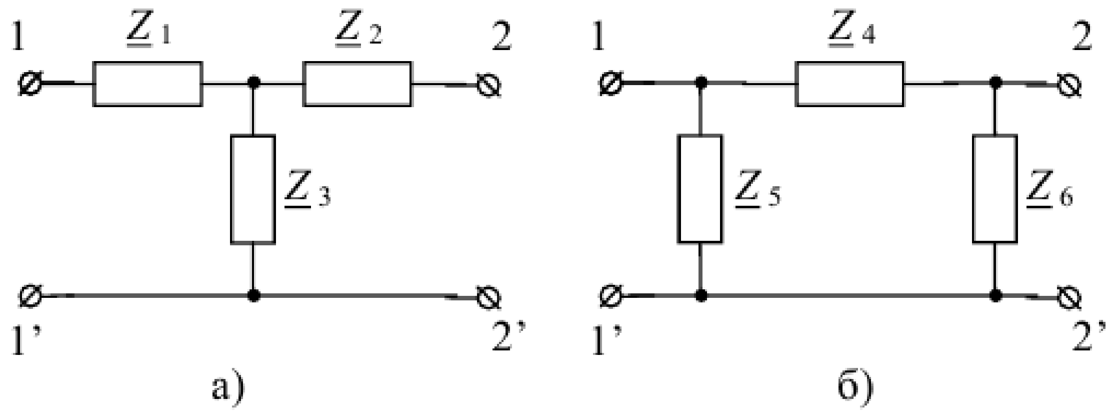

Рис. 6.3

Сопротивления $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$, а также $\underline{Z}_4$, $\underline{Z}_5$, $\underline{Z}_6$ могут быть выражены через коэффициенты уравнений любой формы. В свою очередь, коэффициенты уравнений четырехполюсника могут быть выражены через эти сопротивления.

Например, сопротивления Т-образной схемы и A-параметры связаны соотношениями:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}_{11} - 1}{\underline{A}_{21}};\ \ \underline{Z}_2 = \frac{1}{\underline{A}_{21}};\ \ \underline{Z}_3 = \frac{\underline{A}_{21} - 1}{\underline{A}_{21}};\ \ \underline{A}_{11} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2};$$

$$\underline{A}_{12} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2};\ \ \underline{A}_{21} = \frac{1}{\underline{Z}_2};\ \ \underline{A}_{22} = 1 + \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2}.$$

Для П-образной схемы:

$$\underline{Z}_4 = \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{22} - 1};\ \ \underline{Z}_5 = \underline{A}_{12};\ \ \underline{Z}_6 = \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{11} - 1};\ \ \underline{A}_{11} = 1 + \frac{\underline{Z}_5}{\underline{Z}_6};\ (6.7)$$

$$\underline{A}_{12} = \underline{Z}_5; \;\; \underline{A}_{21} = \frac{\underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6}{\underline{Z}_4 \underline{Z}_6}; \;\; \underline{A}_{22} = 1 + \frac{\underline{Z}_5}{\underline{Z}_4}.$$

Пример 6.2. Четырехполюсник имеет следующие значения A-параметров: $\underline{A}_{11} = 1e^{j90^\circ}$; $\underline{A}_{12} = 10\,e^{j90^\circ}$; $\underline{A}_{21} = 0{,}2\,e^{j90^\circ}$.

Определить сопротивления Т-образной схемы четырехполюсника.

Решение. По формулам (6.7) для Т-образной схемы в случае симметричного четырехполюсника запишем:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}_{11} - 1}{\underline{A}_{21}} = \frac{j-1}{j\,0{,}2} = 5 + j\,5 = 7{,}07\,e^{j45^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{1}{\underline{A}_{21}} = \frac{1}{j\,0{,}2} = 5\,e^{-j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = \underline{Z}_1 = 5 + j\,5 = 7{,}07\,e^{j45^\circ} \text{ Ом}.$$

Характеристические параметры четырехполюсников

Для анализа сложных цепей, составленных из одинаковых четырехполюсников, удобно от рассмотренных выше параметров перейти к характеристическим (вторичным) параметрам, которых в общем случае три: характеристические сопротивления $\underline{Z}_{C1}$ и $\underline{Z}_{C2}$ и характеристическая постоянная (мера) передачи.

Характеристическими сопротивлениями называют пару сопротивлений $\underline{Z}_{C1}$ и $\underline{Z}_{C2}$, выбранных таким образом, что при подключении к зажимам 2 – 2' сопротивления нагрузки $\underline{Z}_{\text{Н}2} = \underline{Z}_{C2}$ (рис. 6.4, а) входное сопротивление со стороны зажимов 1 – 1' равно $\underline{Z}_{C1}$, а при подключении $\underline{Z}_{C1} = \underline{Z}_{\text{Н}1}$ к зажимам 1 – 1' (рис. 6.4, б) входное сопротивление со сторо-

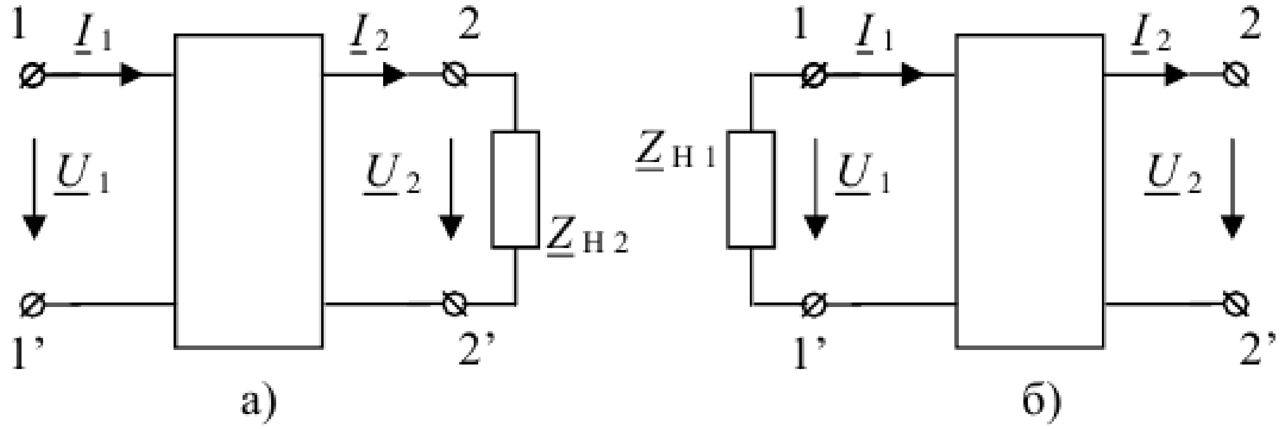

Рис. 6.4

ны зажимов 2 – 2' равно $\underline{Z}_{C2}$. Сопротивление $\underline{Z}_{C1}$ называется характеристическим входным, а $\underline{Z}_{C2}$ — характеристическим выходным сопротивлением.

Характеристические сопротивления, как правило, выражаются через A-параметры или сопротивления четырехполюсника в режимах короткого замыкания ($\underline{Z}_{1К}$, $\underline{Z}_{2К}$) и холостого хода ($\underline{Z}_{1Х}$, $\underline{Z}_{2Х}$):

$$\underline{Z}_{C1} = \sqrt{\frac{\underline{A}_{11}\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{22}\underline{A}_{21}}} = \sqrt{\underline{Z}_{1К}\underline{Z}_{1Х}};$$
$$\underline{Z}_{C2} = \sqrt{\frac{\underline{A}_{22}\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{11}\underline{A}_{21}}} = \sqrt{\underline{Z}_{2К}\underline{Z}_{2Х}}. \tag{6.8}$$

Характеристическую постоянную передачи $\underline{\Gamma}$ определяют по передаточной функции четырехполюсника в режиме согласованной нагрузки, позволяющей оценивать энергетические соотношения:

$$e^{\underline{\Gamma}} = \sqrt{\frac{\underline{U}_1\underline{I}_1}{\underline{U}_2\underline{I}_2}}. \tag{6.9}$$

Если переменные на выводах четырехполюсника выразить через A-параметры, то

$$e^{\underline{\Gamma}} = \sqrt{\underline{A}_{11}\underline{A}_{22}} + \sqrt{\underline{A}_{12}\underline{A}_{21}},$$

откуда

$$\underline{\Gamma} = \ln\left(\sqrt{\underline{A}_{11}\underline{A}_{22}} + \sqrt{\underline{A}_{12}\underline{A}_{21}}\right). \qquad (6.10)$$

С учетом уравнения $\underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{12}\underline{A}_{21} = 1$ справедливы равенства:

$$\mathrm{ch}\underline{\Gamma} = \sqrt{\underline{A}_{11}\underline{A}_{22}}; \;\; \mathrm{sh}\underline{\Gamma} = \sqrt{\underline{A}_{12}\underline{A}_{21}}.$$

Если уравнения (6.9) представить в форме

$$\frac{\underline{Z}_{C1}}{\underline{Z}_{C2}} = \frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{22}}, \;\; \underline{Z}_{C1}\underline{Z}_{C2} = \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21}},$$

то можно выразить A-параметры через характеристические параметры а:

$$\underline{A}_{11} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{C1}}{\underline{Z}_{C2}}}\,\mathrm{ch}\underline{\Gamma}; \;\; \underline{A}_{12} = \sqrt{\underline{Z}_{C1}\underline{Z}_{C2}}\,\mathrm{sh}\underline{\Gamma};$$

$$\underline{A}_{21} = \frac{1}{\sqrt{\underline{Z}_{C1}\underline{Z}_{C2}}}\mathrm{sh}\underline{\Gamma}; \;\; \underline{A}_{22} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{C2}}{\underline{Z}_{C1}}}\,\mathrm{ch}\underline{\Gamma}. \qquad (6.11)$$

Подставив (6.11) в уравнения (6.1), получим:

$$\underline{U}_1 = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{C1}}{\underline{Z}_{C2}}}\left(\underline{U}_2\,\mathrm{ch}\underline{\Gamma} + \underline{Z}_{C2}\underline{I}_2\,\mathrm{sh}\underline{\Gamma}\right);$$

$$\underline{I}_1 = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{C2}}{\underline{Z}_{C1}}}\left(\underline{I}_2\,\mathrm{ch}\underline{\Gamma} + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{C2}}\mathrm{sh}\underline{\Gamma}\right). \qquad (6.12)$$

Если четырехполюсник симметричный, то соотношения (6.10) — (6.12) упрощаются. Так, поскольку $\underline{A}_{11} = \underline{A}_{22}$, то при наличии согласования справедливо:

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \underline{Z}_C; \;\; \underline{\Gamma} = \ln\left(\underline{A}_{11} + \sqrt{\underline{A}_{12}\underline{A}_{21}}\right);$$

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = e^{\underline{\Gamma}}; \;\; \underline{\Gamma} = \alpha + j\beta = \ln\frac{U_1}{U_2} + j\left(\psi_{\underline{U}_1} - \psi_{\underline{U}_2}\right). \qquad (6.13)$$

Из (6.13) видно, что для симметричного четырехполюсника вещественная часть α меры передачи $\underline{\Gamma}$ определяет затухание как напряжения, так и тока. В несимметричном четырехполюснике она определяет ослабление полной мощности, поэтому и называется *постоянной затухания*. Измеряется A обычно в неперах (Нп) либо в децибелах (дБ), причем 1 Нп = 8,68 дБ. Мнимую часть меры передачи β называют *постоянной фазы* и измеряют в радианах или градусах.

Пример 6.3. Определить характеристические параметры четырехполюсника, для которого задана матрица

A-параметров $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3 & j8 \\ -j & 3 \end{bmatrix}$. Элементы главной диагонали этой матрицы безразмерны, а остальные элементы имеют размерности Ом и См.

Решение. Характеристическое сопротивление четырехполюсника

$$\underline{Z}_{C1} = \sqrt{\frac{\underline{A}_{11}\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21}\underline{A}_{22}}} = j2{,}83 \text{ Ом}.$$

Так как для рассматриваемого четырехполюсника $\underline{A}_{11} = \underline{A}_{22} = 3$, то $\underline{Z}_{C2} = \underline{Z}_{C1} = \sqrt{\dfrac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21}}} = j2{,}83$ Ом.

Характеристическая постоянная передачи

$$\underline{\Gamma} = \ln\left(\sqrt{\underline{A}_{11}\underline{A}_{22}} + \sqrt{\underline{A}_{12}\underline{A}_{21}}\right) = \ln\left(3 + 2\sqrt{2}\right) = 1{,}76 .$$

Учитывая, что $\underline{\Gamma} = \alpha + j\beta$, найдем $\alpha = 1{,}76\ \text{Нп} = 15{,}3\ \text{дБ}$, $\beta = 0$.

Пример 6.4 [3]**.** Для несимметричного четырехполюсника (рис. 6.5) определить коэффициенты матрицы **А**, характеристические параметры и комплексный коэффициент передачи по напряжению при условии $X_L = 2X_C = 20$ Ом.

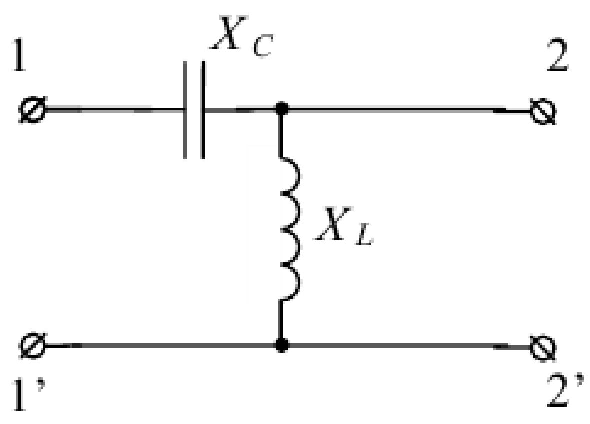

Рис. 6.5

Решение. Коэффициенты матрицы **А** определим по уравнениям (6.1) для режимов короткого замыкания и холостого хода (при $\underline{U}_2 = 0$ и $\underline{I}_2 = 0$ соответственно).

При замкнутых зажимах 2 – 2’:

$$\underline{U}_{1\text{К}} = \underline{A}_{12}\underline{I}_2; \;\; \underline{A}_{12} = \frac{\underline{U}_{1\text{К}}}{\underline{I}_2} = \frac{\underline{U}_{1\text{К}}\left(-jX_C\right)}{\underline{U}_{1\text{К}}} = -j10 \text{ Ом};$$

$$\underline{I}_{1\text{К}} = \underline{A}_{22}\underline{I}_2; \;\; \underline{A}_{22} = \frac{\underline{I}_{1\text{К}}}{\underline{I}_2} = \frac{\underline{U}_{1\text{К}}\left(-jX_C\right)}{-jX_C\underline{U}_{1\text{К}}} = 1.$$

При разомкнутых зажимах 2 – 2’:

$$\underline{U}_{1\text{Х}} = \underline{A}_{11}\underline{U}_2; \;\; \underline{A}_{11} = \frac{\underline{U}_{1\text{Х}}}{\underline{U}_2} = \frac{\underline{U}_{1\text{Х}}\left(jX_L - jX_C\right)}{\underline{U}_{1\text{Х}}\, jX_L} = 0{,}5;$$

$$\underline{I}_{1\text{Х}} = \underline{A}_{21}\underline{U}_2;$$

$$\underline{A}_{21} = \frac{\underline{I}_{1\text{Х}}}{\underline{U}_2} = \frac{\underline{U}_{1\text{Х}}\left(jX_L - jX_C\right)}{\left(jX_L - jX_C\right)\underline{U}_{1\text{Х}}\, jX_L} = -j0{,}05 \text{ См}.$$

По найденным *A*-параметрам с использованием формул (6.8) и (6.10) находим характеристические параметры:

$$\underline{Z}_{C1} = \sqrt{\frac{0{,}5\left(-j10\right)}{-j0{,}05\cdot 1}} = 10 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{C2} = \sqrt{\frac{1\left(-j10\right)}{-j0{,}05\cdot 0{,}5}} = 20 \text{ Ом};$$

$$\underline{\Gamma} = \ln\left(\sqrt{0{,}5\cdot 1} + \sqrt{-j10\cdot\left(-j0{,}05\right)}\right) =$$

$$= \ln\left(0{,}707 + j0{,}707\right) = \ln\left(e^{j45^\circ}\right),$$

откуда $\underline{\Gamma} = \alpha + j\beta = 0 + j\dfrac{\pi}{4}$, т. е. затухание в данном четырехполюснике отсутствует.

Коэффициент передачи по напряжению в режиме согласованной нагрузки ($\underline{Z}_\text{Н} = \underline{Z}_{C2}$, $\underline{U}_2 = \underline{I}_2\underline{Z}_{C2}$):

$$k_U = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{\underline{Z}_{C1}/\underline{Z}_{C2}}}\underline{U}_2\left(ch\,\underline{\Gamma} + sh\,\underline{\Gamma}\right) = \frac{\underline{Z}_{C2}}{\underline{Z}_{C1}}e^{-\underline{\Gamma}} = 0{,}707\, e^{-j45^\circ}.$$