

Кубанский государственный технологический университет
Институт информационных технологий и безопасности
Кафедра компьютерных технологий и информационной безопасности

Учебная дисциплина

Электротехника и электроника

Лекция № 13

**Основы теории
четырёхполюсников**

Учебные вопросы:

1. Общие положения. Классификация четырехполюсников.
2. Параметры четырехполюсников и их взаимозависимости.
3. Входные и передаточные функции четырехполюсника.
4. Характеристические параметры четырехполюсника.

Литература:

1. Зевеке Г.В., Ионкин А.В., Нетушил А.В., Страков С.В. Основы теории цепей: Учебник для вузов, - М.: Энергоатомиздат, 1999 г, с. 190 –207.
2. Бакалов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники: Учебник для вузов, - М.: Радио и связь, 1999 г, с. 170 –201.
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учебник для вузов, - М.: Высшая школа, 2003 г, с. 114 –122.
4. Фрикс В.В. Основы теории цепей: Учебное пособие, - М.: ИП Радио Софт, 2002 г, с. 193 –214.

1. Общие положения. Классификация четырехполюсников. Под **четырёхполюсником** принято понимать электрическую цепь (или часть ее) любой сложности, имеющую две пары выводов (зажимов) для подключения к источнику и приемнику электрической энергии. Выводы, к которым подключается источник электрической энергии, называются *входными*, а выводы, к которым подключается приемник электрической энергии называются *выходными*.

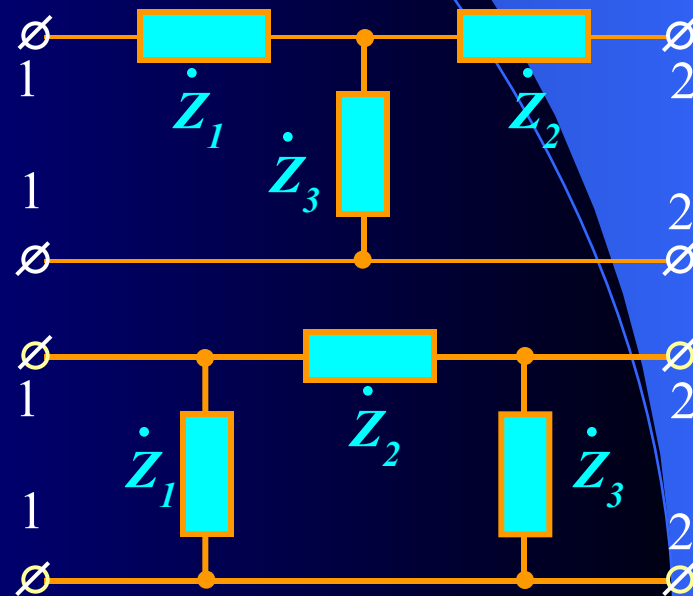
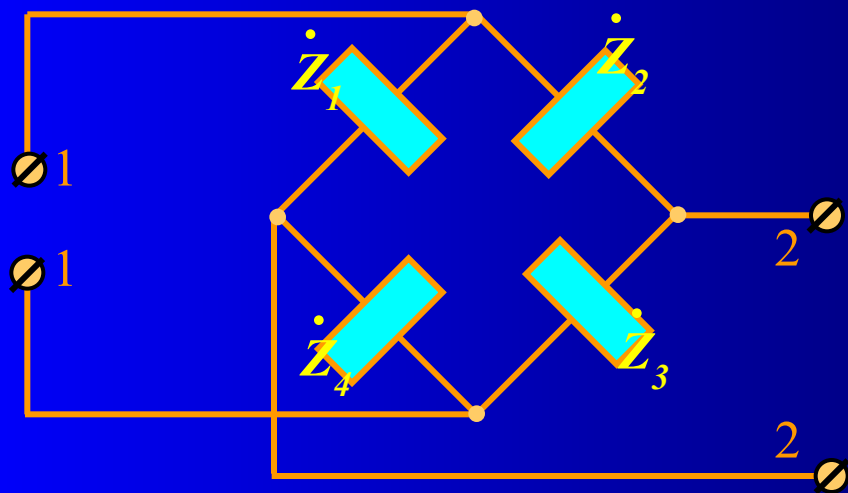


Две из четырех величин, определяющих режим работы четырехполюсника считаются известными – они задаются *воздействием*. Требуется найти две оставшиеся величины, т.е. *отклик (реакцию)*.

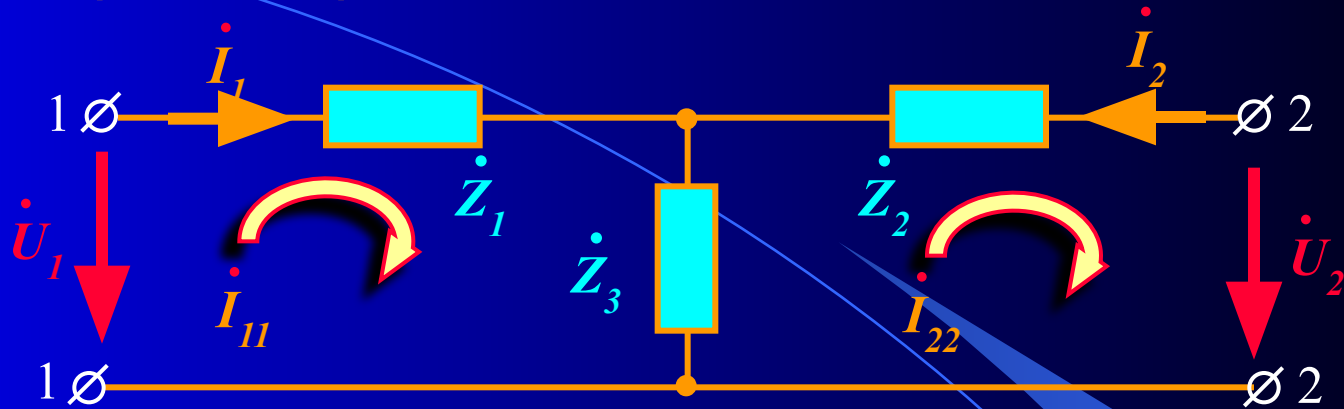
Для решения задачи анализа необходимо составить систему из двух уравнений с двумя неизвестными – **уравнения передачи четырёхполюсника**

	1	2	3	4	5	6
Воздействия (вход)	I_1, I_2	U_2, I_2	U_1, U_2	I_1, U_2	U_1, I_2	U_1, I_1
Реакция (отклик) (выход)	U_1, U_2	U_1, I_1	I_1, I_2	U_1, I_2	I_1, U_2	U_2, I_2
Параметры (обозначения)	Z	A	Y	H	F(G)	B

Четырехполюсник называется *симметричным*, если перемена его входных и выходных зажимов не изменяет токов и напряжений во внешней цепи.



2. Параметры четырехполюсников и их взаимозависимости.



❖ Z - параметры

Используя метод контурных токов, запишем систему уравнений

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_3) \cdot \dot{I}_{11} - \dot{Z}_3 \cdot \dot{I}_{22} \\ \dot{U}_2 = -\dot{Z}_3 \cdot \dot{I}_{11} + (\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3) \cdot \dot{I}_{22} \end{cases}$$

С учетом, что

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} = \dot{I}_1 \\ \dot{I}_{22} = -\dot{I}_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{\dot{Z}_{11}} \cdot \dot{I}_1 + \underline{\dot{Z}_{12}} \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 = \underline{\dot{Z}_{21}} \cdot \dot{I}_1 + \underline{\dot{Z}_{22}} \cdot \dot{I}_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{\dot{Z}_{11}} \cdot \dot{I}_1 + \underline{\dot{Z}_{12}} \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 = \underline{\dot{Z}_{21}} \cdot \dot{I}_1 + \underline{\dot{Z}_{22}} \cdot \dot{I}_2 \end{cases}$$

Коэффициенты

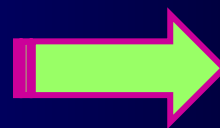
$$\dot{Z}_{11}; \dot{Z}_{12}; \dot{Z}_{21}; \dot{Z}_{22}$$

Z - параметры

Z – параметры имеют размерность сопротивления и могут быть определены в режиме холостого хода (при размыкании входных и выходных зажимов) следующим образом:

Режим холостого хода на выходе

$$\dot{I}_2 = 0$$



$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \underline{\dot{Z}}_{11} \cdot \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 &= \underline{\dot{Z}}_{21} \cdot \dot{I}_1 \end{aligned}$$

$$\dot{Z}_{11} = \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right) / \text{при } \dot{I}_2 = 0$$

Входное сопротивление четырехполюсника (входное сопротивление холостого хода)

$$\dot{Z}_{21} = \left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right) / \text{при } \dot{I}_2 = 0$$

Взаимное (передаточное) сопротивление холостого хода со стороны выхода

Режим холостого хода на входе

$$\dot{I}_1 = 0$$



$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{\dot{Z}}_{12} \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 = \underline{\dot{Z}}_{22} \cdot \dot{I}_2 \end{cases}$$

$$\dot{Z}_{12} = \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right) / \text{при } \dot{I}_1 = 0$$

Взаимное (передаточное) сопротивление холостого хода со стороны входа

$$\dot{Z}_{22} = \left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right) / \text{при } \dot{I}_1 = 0$$

Выходное сопротивление четырехполюсника, измеренное со стороны выходных зажимов при разомкнутых входных зажимах (выходное сопротивление холостого хода)

❖ A - параметры

Коэффициенты, входящие в систему уравнений, связывающую входные величины называются A – параметрами (обобщенными параметрами)

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{A}_{11} \cdot \dot{U}_2 + \dot{A}_{12} \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= \dot{A}_{21} \cdot \dot{U}_2 + \dot{A}_{22} \cdot \dot{I}_2 \end{aligned}$$

Уравнения
передачи
четырёхполюсника

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{A} \cdot \dot{U}_2 + \dot{B} \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= \dot{C} \cdot \dot{U}_2 + \dot{D} \cdot \dot{I}_2 \end{aligned}$$

Физический смысл A – параметров установим из рассмотрения режимов холостого хода и короткого замыкания на выходе четырехполюсника

Режим холостого хода на выходе

$$\dot{I}_2 = 0$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{A}_{11} \cdot \dot{U}_2 \\ \dot{I}_1 &= \dot{A}_{21} \cdot \dot{U}_2 \end{aligned}$$

$$\dot{A}_{11} = \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right) / \text{при } \dot{I}_2 = 0$$

Безразмерный коэффициент, обратный функции передачи по напряжению при разомкнутых выходных зажимах

$$\dot{A}_{21} = \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} / \text{при } \dot{I}_2 = 0$$

Параметр, имеющий размерность проводимости и являющейся величиной, обратной передаточному сопротивлению при разомкнутых выходных зажимах

Режим короткого замыкания на выходе

$$\dot{U}_2 = 0$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{A}_{12} \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= \dot{A}_{22} \cdot \dot{I}_2 \end{aligned}$$

$$\dot{A}_{12} = \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} / \text{при } \dot{U}_2 = 0$$

Параметр, имеющий размерность сопротивления и являющейся величиной, обратной передаточной проводимости при короткозамкнутых выходных зажимах

$$\dot{A}_{22} = \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} / \text{при } \dot{U}_2 = 0$$

Безразмерный коэффициент, обратный функции передачи по току при короткозамкнутых выходных зажимах

❖ H - параметры

Коэффициенты, входящие в систему уравнений, связывающую величины: напряжения U_2 и ток I_1 с выходными величинами: напряжением U_1 и током I_2

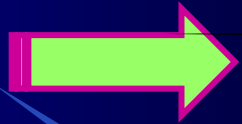
$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{H}_{11} \cdot \dot{I}_1 + \dot{H}_{12} \cdot \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 &= \dot{H}_{21} \cdot \dot{I}_1 + \dot{H}_{22} \cdot \dot{U}_2 \end{aligned}$$

Уравнения передачи четырехполюсника в H - параметрах (анализ транзисторных схем)

Физический смысл H – параметров установим из рассмотрения режимов холостого хода на входе ($I_1 = 0$) и короткого замыкания на выходе ($U_2 = 0$) четырехполюсника

Режим короткого замыкания на выходе

$$\dot{U}_2 = 0$$



$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{\underline{H_{11}}} \cdot \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 = \underline{\underline{H_{21}}} \cdot \dot{I}_1 \end{cases}$$

$$\dot{H}_{11} = \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right) / \text{при } \dot{U}_2 = 0$$

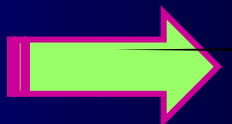
Параметр, характеризующий входное сопротивление при короткозамкнутых выходных зажимах

$$\dot{H}_{21} = \left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right) / \text{при } \dot{U}_2 = 0$$

Безразмерный коэффициент, характеризующий функцию передачи токов при короткозамкнутых выходных зажимах

Режим холостого хода на входе

$$\dot{I}_1 = 0$$



$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{\underline{H_{12}}} \cdot \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = \underline{\underline{H_{22}}} \cdot \dot{U}_2 \end{cases}$$

$$\dot{H}_{12} = \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right) / \text{при } \dot{I}_1 = 0$$

Безразмерный коэффициент, характеризующий функцию обратной связи по напряжению при разомкнутых входных зажимах

$$\dot{H}_{22} = \left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right) / \text{при } \dot{I}_1 = 0$$

Параметр, характеризующий выходную проводимость при разомкнутых выходных зажимах

◆ Y - параметры

Коэффициенты, входящие в систему уравнений, связывающую величины: напряжения U_1 и U_2 с величинами: током I_1 и током I_2

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \underline{\dot{Y}}_{11} \cdot \dot{U}_1 + \underline{\dot{Y}}_{12} \cdot \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = \underline{\dot{Y}}_{21} \cdot \dot{U}_1 + \underline{\dot{Y}}_{22} \cdot \dot{U}_2 \end{cases}$$

Уравнения передачи четырехполюсника в Y – параметрах (параметры проводимостей)

Физический смысл Y – параметров установим из рассмотрения режима короткого замыкания на входе ($U_1 = 0$) и выходе ($U_2 = 0$) четырехполюсника

Режим короткого замыкания на выходе

$$\dot{U}_2 = 0$$

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \underline{\dot{Y}}_{11} \cdot \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 = \underline{\dot{Y}}_{21} \cdot \dot{U}_1 \end{cases}$$

$$\dot{Y}_{11} = \left(\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right) / \text{при } \rightarrow \dot{U}_2 = 0$$

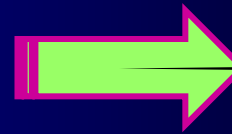
Параметр, характеризующий входную проводимость со стороны входных зажимов при короткозамкнутых выходных зажимах

$$\dot{Y}_{21} = \left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right) / \text{при } \rightarrow \dot{U}_2 = 0$$

Параметр, характеризующий передаточную проводимость со стороны входных зажимов при короткозамкнутых выходных зажимах

Режим короткого замыкания
на входе

$$\dot{U}_1 = 0$$



$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \dot{Y}_{12} \cdot \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = \dot{Y}_{22} \cdot \dot{U}_2 \end{cases}$$

$$\dot{Y}_{12} = \left(\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right) / \text{при } \dot{U}_1 = 0$$

Параметр, характеризующий **передаточную проводимость** при короткозамкнутых входных зажимах

$$\dot{Y}_{22} = \left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right) / \text{при } \dot{U}_1 = 0$$

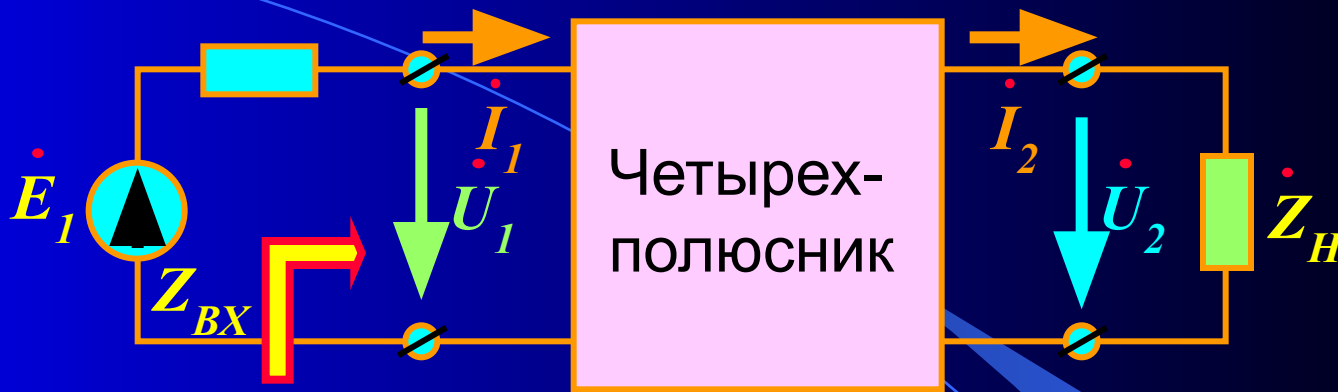
Параметр, характеризующий **выходную проводимость** со стороны выходных зажимов при короткозамкнутых входных зажимах

□ Свойства параметров-коэффициентов

□ Параметры-коэффициенты определяются **только схемой четырехполюсника и ее элементами** и не зависят от внешних цепей, между которыми включен четырехполюсник, т.е. они **характеризуют собственно сам четырехполюсник**.

□ Пассивный четырехполюсник характеризуется, не более чем тремя независимыми параметрами (обратимые, несимметричные). Независимыми параметрами могут быть: $(Y_{11}; Y_{12} = -Y_{21}; Y_{22})$, $(Z_{11}; Z_{12} = -Z_{21}; Z_{22})$, $(H_{11}; H_{12} = H_{21}; H_{22})$, а также тремя любыми параметрами $(A_{11}; A_{12}; A_{21}; A_{22})$,

3. Входные и передаточные функции четырехполюсника.



Входным сопротивлением четырехполюсника, нагруженного на сопротивление Z_H , называется сопротивление со стороны входных зажимов при отключенном источнике

Входное сопротивление (импеданс) можно выразить как отношение входного напряжения к входному току

$$\dot{Z}_{BX} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}$$

Выразим Z_{BX} через сопротивление нагрузки Z_H и A -параметры

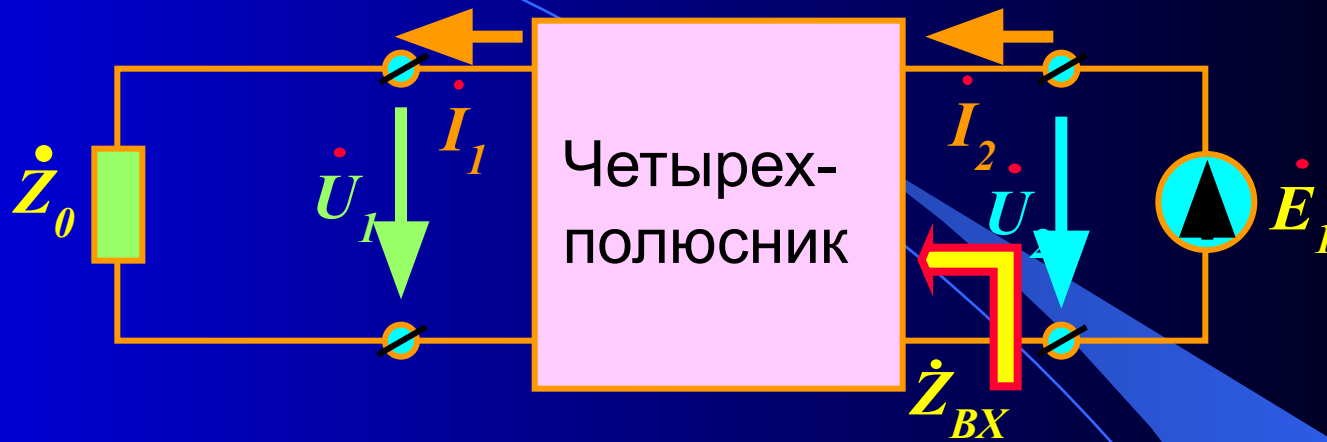
$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{A_{11}} \cdot \dot{U}_2 + \underline{A_{12}} \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = \underline{A_{21}} \cdot \dot{U}_2 + \underline{A_{22}} \cdot \dot{I}_2 \end{cases}$$

с учетом

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \cdot \dot{Z}_H$$

$$\dot{Z}_{BX} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\underline{A_{11}} \cdot \dot{U}_2 + \underline{A_{12}} \cdot \dot{I}_2}{\underline{A_{21}} \cdot \dot{U}_2 + \underline{A_{22}} \cdot \dot{I}_2} = \frac{\underline{A_{11}} \cdot \dot{I}_2 \cdot \dot{Z}_H + \underline{A_{12}} \cdot \dot{I}_2}{\underline{A_{21}} \cdot \dot{I}_2 \cdot \dot{Z}_H + \underline{A_{22}} \cdot \dot{I}_2} = \frac{\underline{A_{11}} \cdot \dot{Z}_H + \underline{A_{12}}}{\underline{A_{21}} \cdot \dot{Z}_H + \underline{A_{22}}}$$

В частном случае: при отключенном или закороченном сопротивлении нагрузки входное сопротивление характеризует только сам четырехполюсник и оно зависит только от его коэффициентов.



Выходным сопротивлением четырехполюсника, нагруженного на сопротивление Z_0 , называется сопротивление со стороны выходных зажимов при отключенном источнике

Выходное сопротивление (импеданс) можно выразить как отношение выходного напряжения к выходному току

$$Z_{ВЫХ} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}$$

$$Z_{ВЫХ} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\underline{A}_{22} \cdot \dot{U}_1 + \underline{A}_{12} \cdot \dot{I}_1}{\underline{A}_{21} \cdot \dot{U}_1 + \underline{A}_{11} \cdot \dot{I}_1} = \frac{\underline{A}_{22} \cdot \dot{I}_1 \cdot Z_0 + \underline{A}_{12} \cdot \dot{I}_1}{\underline{A}_{21} \cdot \dot{I}_1 \cdot Z_0 + \underline{A}_{11} \cdot \dot{I}_1} = \frac{\underline{A}_{22} \cdot Z_0 + \underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21} \cdot Z_0 + \underline{A}_{11}}$$

Параметры холостого хода и короткого замыкания

$$\dot{Z}_{BX} = \dot{Z}_{BX1} = \frac{\dot{A}_{11} \cdot \dot{Z}_H + \dot{A}_{12}}{\dot{A}_{21} \cdot \dot{Z}_H + \dot{A}_{22}}$$

Режим холостого хода
на выходе $\rightarrow \dot{Z}_H = \infty$

$$\dot{Z}_{XX1} = \dot{Z}_{BX} = \dot{Z}_{BX1} = \frac{\dot{A}_{11}}{\dot{A}_{21}} = \dot{Z}_{11}$$

Режим короткого замыкания
на выходе $\rightarrow \dot{Z}_H = 0$

$$\dot{Z}_{K31} = \dot{Z}_{BX} = \dot{Z}_{BX1} = \frac{\dot{A}_{12}}{\dot{A}_{22}} = \frac{1}{\dot{Y}_{11}}$$

Уравнения передачи могут быть составлены,
из параметров ХХ и КЗ. Может быть получена
любая система параметров -коэффициентов

$$\dot{Z}_{BЫX} = \dot{Z}_{BХ2} = \frac{\dot{A}_{22} \cdot \dot{Z}_0 + \dot{A}_{21}}{\dot{A}_{11} \cdot \dot{Z}_0 + \dot{A}_{12}}$$

Режим холостого хода
на входе $\rightarrow \dot{Z}_0 = \infty$

$$\dot{Z}_{XX2} = \dot{Z}_{BЫX} = \dot{Z}_{BХ2} = \frac{\dot{A}_{22}}{\dot{A}_{21}} = \dot{Z}_{22}$$

Режим короткого замыкания
на входе $\rightarrow \dot{Z}_0 = 0$

$$\dot{Z}_{K32} = \dot{Z}_{BЫX} = \dot{Z}_{BХ2} = \frac{\dot{A}_{12}}{\dot{A}_{11}} = \frac{1}{\dot{Y}_{22}}$$

$$\frac{\dot{Z}_{XX1}}{\dot{Z}_{XX2}} = \frac{\dot{Z}_{K31}}{\dot{Z}_{K32}}$$

Передаточные функции нагруженного четырехполюсника

Передаточной функцией нагруженного четырехполюсника называется отношение выходной величины к входной, т.е. отношение реакции к воздействию.

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$$

Комплексный коэффициент передачи по напряжению - для активных четырехполюсников – усилителей, он носит название **коэффициента передачи по напряжению**.

$$\dot{K}_I = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}$$

Комплексный коэффициент передачи по току- для активных четырехполюсников – усилителей, он носит название **коэффициента передачи по току**.

$$\dot{K}_Z = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$$

Комплексное передаточное сопротивление

$$\dot{K}_Y = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}$$

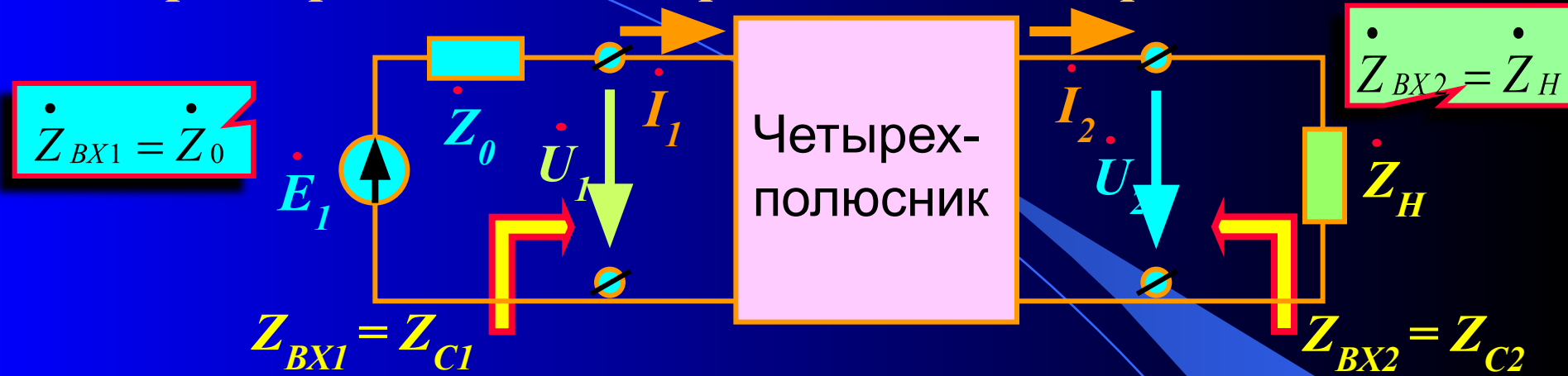
Комплексная передаточная проводимость

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{Z}_H}{\dot{A}_{11} \cdot \dot{Z}_H + \dot{A}_{12}}$$

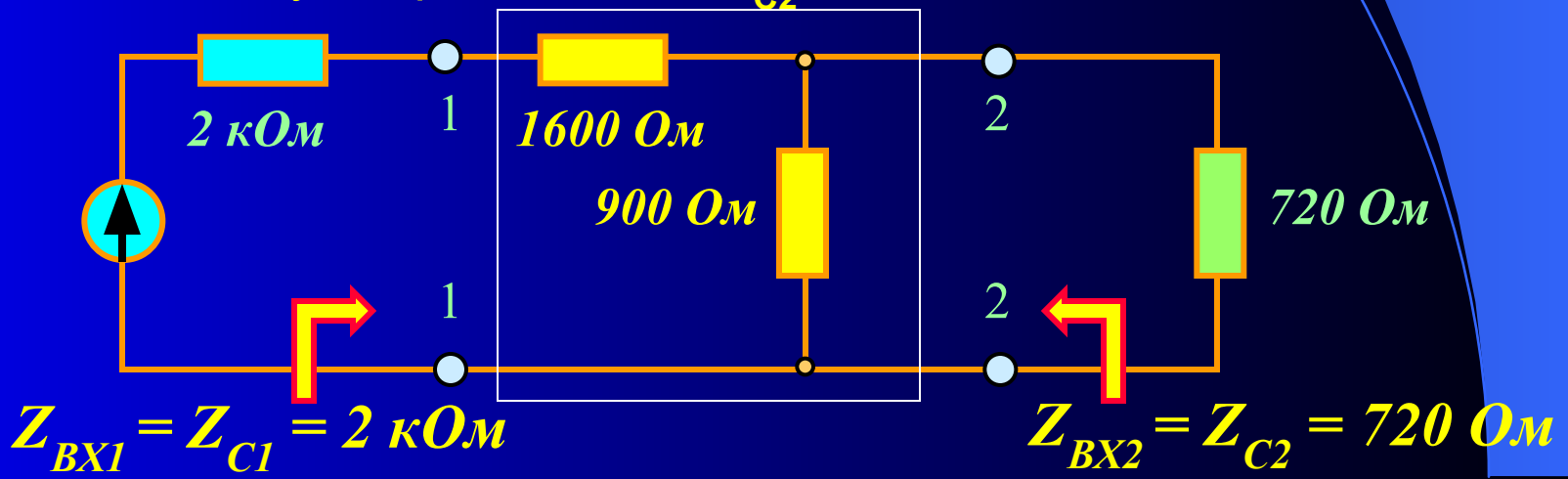
$$\dot{K}_I = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{1}{\dot{A}_{11} \cdot \dot{Z}_H + \dot{A}_{12}}$$

4. Характеристические параметры четырехполюсника.

□ Характеристическое сопротивление четырехполюсника



Режимом согласованного включения четырехполюсника называется такой режим его работы, когда *внутреннее сопротивление генератора* выбрано равным *характеристическому (собственному) сопротивлению* четырехполюсника Z_{C1} , а *сопротивление нагрузки* равным *характеристическому сопротивлению* Z_{C2} .



Характеристические сопротивления можно выразить через параметры холостого хода и короткого замыкания.

$$\dot{Z}_{C1} = \sqrt{\dot{Z}_{XX1} \cdot \dot{Z}_{K31}}$$



$$\dot{Z}_{C2} = \sqrt{\dot{Z}_{XX2} \cdot \dot{Z}_{K32}}$$

□ **Характеристическая постоянная передачи** четырехполюсника При согласованном включении в четырехполюсник и нагрузку будут отданы максимальные полные мощности и, следовательно, на стыках «генератор – четырехполюсник» и «четыреполюсник – нагрузка» энергия теряться не будет. Потери энергии будут иметь место только в самом четырехполюснике.

Оценка потерь

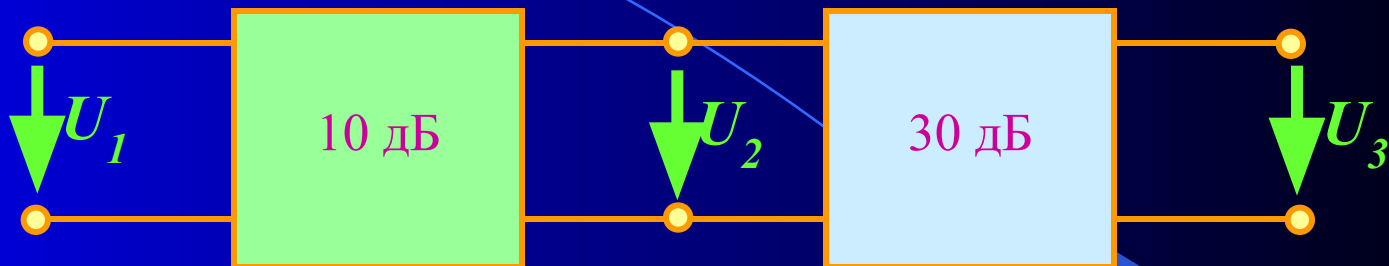
Для учета потерь в четырехполюснике вводят меру передачи энергии – **ослабления** - **характеристическую (собственную) постоянную** передачи четырехполюсника.

$$A_C = B = 10 \lg \frac{U_1 \cdot I_1}{U_2 \cdot I_2} = 10 \lg \frac{S_1}{S_2} = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} = 20 \lg \frac{I_1}{I_2}; [\text{дБ}]$$

При $B > 0$ дБ происходит **ослабление** сигнала

При $B < 0$ дБ происходит **усиление** сигнала

Пример: Пусть напряжение подаваемое на первый четырехполюсник ослабляется на **10 дБ**, а затем на поступает на второй четырехполюсник, в котором ослабляется еще на **30 дБ**. **Найти общее ослабление?**



$$A_C = 20 \lg K_U = 20 \lg (K_{U1} \cdot K_{U2}) = 20 \lg K_{U1} + 20 \lg K_{U2} = A_{C1} + A_{C2} = 10 + 30 = 40 \text{ дБ}$$

A_C , дБ	1	2	3	6	10	20	30	40	50
U_1/U_2	1,11	1,26	1,41	2	3,16	10	31,6	100	316
I_1/I_2	1,11	1,26	1,41	2	3,16	10	31,6	100	316
S_1/S_2	1,26	1,58	2	4	10	100	10^3	10^4	10^5

В технике связи, особенно СВЧ диапазона, широко используется другая единица измерения, называемая децибел относительно уровня 1 мВт (**дБм**). Эта величина показывает отношение мощности **S** к уровню **1 мВт**.

$$S_{\text{дБм}} = 10 \lg \frac{S}{0,001} = 10 \lg \frac{S}{10^{-3}}$$

$$S_{\text{дБм}} = 10 \lg \frac{S}{0,001} = 10 \lg \frac{10 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} = 10 \lg 10 = 10 \text{ дБм}$$

Вместо уровня **1 мВт** может быть выбран другой уровень, например **1 Вт**. В этом случае получаем другую единицу измерения, называемую **децибелом относительно уровня 1 Вт** (**дБВт**).

$$S_{\text{дБВт}} = 10 \lg \frac{S}{1} = 10 \lg S$$

$$S_{\text{дБВт}} = 10 \lg S = 10 \lg 10 \cdot 10^{-3} = 10 \lg 10^{-2} = -20 \text{ дБВт}$$

$$S_{\text{дБм}} = S_{\text{дБВт}} + 30 \rightarrow \text{дБм}$$

Аналогичные единицы измерения можно ввести и для **напряжения U**, децибел относительно уровня **1 мкВ** (**дБмкВ**) и децибел относительно уровня **1 В** (**дБВ**)

$$U_{\text{дБмкВ}} = 20 \lg \frac{U}{10^{-6}} = -120 \lg U$$

$$U_{\text{дБВ}} = 20 \lg U$$

$$U_{\text{дБмкВ}} = U_{\text{дБВ}} + 120 \rightarrow \text{дБмкВ}$$

Задание на самостоятельную работу

Литература:

1. Зевеке Г.В., Ионкин А.В., Нетушил А.В., Страков С.В. Основы теории цепей: Учебник для вузов, - М.: Энергоатомиздат, 1999 г, с. 190 –207.
2. Бакалов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники: Учебник для вузов, - М.: Радио и связь, 1999 г, с. 170 –201.
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учебник для вузов, - М.: Высшая школа, 2003 г, с. 114 –122.
4. Фрикс В.В. Основы теории цепей: Учебное пособие, - М.: ИП Радио Софт, 2002 г, с. 193 –214.