

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

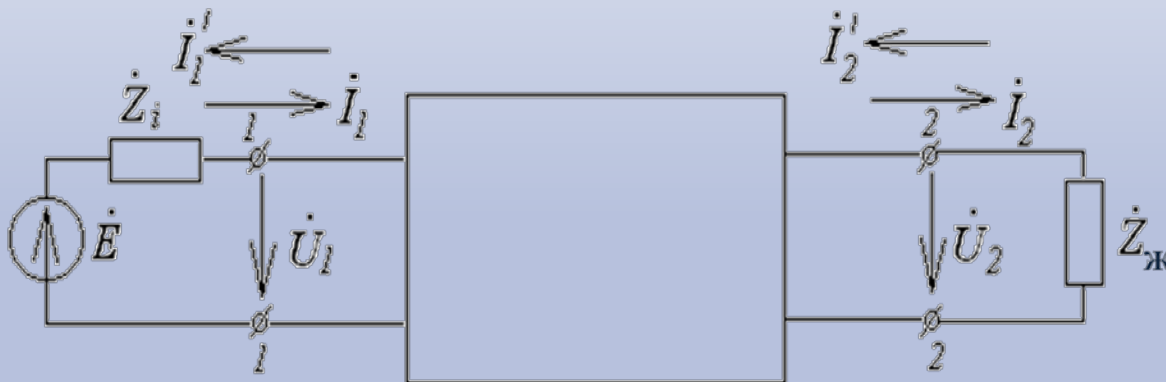
Лектор:
к.ф.-м.н., асс. профессор Алимгазинова Назгуль Шакаримовна

8 лекция. Четырехполюсники

Во многих случаях для анализа и синтеза электрических цепей важно знать токи только в некоторых ветвях и напряжения только между некоторыми узлами.

В этом случае расчёт цепи упрощается, если цепь разделить на отдельные части, каждая из которых соединена с остальными двумя, тремя, четырьмя или большим числом выводов – полюсов.

*Для передачи информации с помощью электромагнитной энергии (волн, сигналов в электрических схемах) применяются различные устройства, имеющие два входных (первичных) зажима и два выходных (вторичных). К входным зажимам подключается источник электрической энергии, к выходным присоединяется нагрузка. Такие устройства называются **четырёхполюсниками**.*

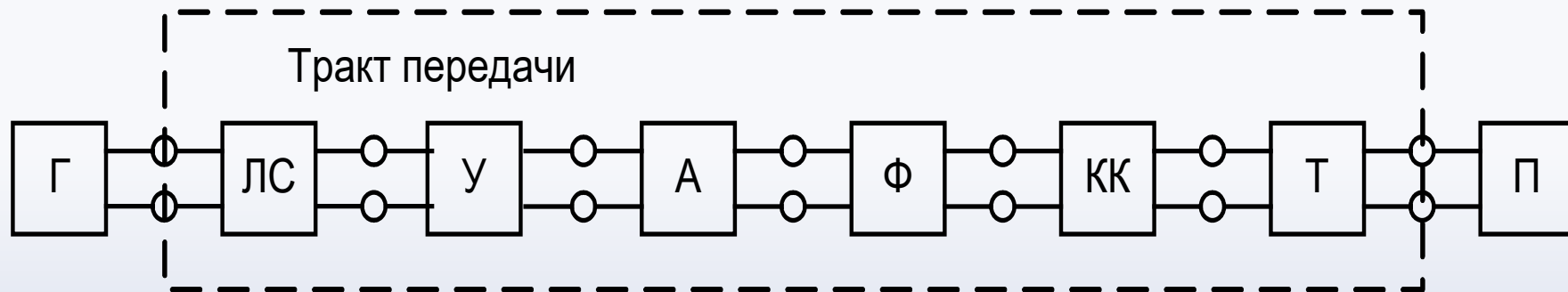


1 \equiv вход

2 \equiv выход

КАНАЛ СВЯЗИ

как ряд четырёхполюсников



В тракт передачи обычно входят:

- линии связи (ЛС) генератора и приемника, находящихся на значительных расстояниях один от другого;
- усилители (У), в которых увеличивается мощность (уровень сигналов);
- фильтры (Ф) для разделения сигналов;
- корректирующие контуры (КК), включаемые для устранения искажений сигналов;
- трансформаторы (Т), при помощи которых устраняется гальваническая связь между входной и выходной цепями.

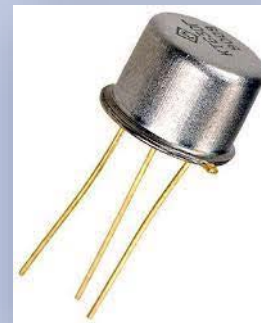
К четырёхполюсникам можно отнести различные по назначению технические устройства:

двухпроводную линию;

двухобмоточный трансформатор;

фильтры частот;

- усилители сигналов;
- участки линий передачи электрической энергии;
- транзисторы и многие другие устройства.



Теория четырехполюсников позволяет:

- 1) единым методом анализировать различные по структуре и назначению электрические цепи, которые могут быть отнесены к классу четырехполюсников;
- 2) получить аналитическую зависимость между током и напряжением на входе и током и напряжением на выходе четырехполюсника, не производя расчетов токов и напряжений внутри его схемы.

Основной смысл теории четырёхполюсников

закключаются в том, что с помощью некоторых обобщенных параметров, называемых коэффициентами четырехполюсника, и основных уравнений четырехполюсника можно находить токи и напряжения на входе и выходе четырехполюсника.

Теория четырехполюсников применяется в тех случаях, когда ставится задача определения напряжений и токов только на входе и на выходе четырехполюсника, а в определении токов и напряжений на различных элементах цепи внутри четырехполюсника нет необходимости.

4П

```
graph LR; A[4П] --- B[ ]; B --- C[Активные и пассивные]; B --- D[Линейные и нелинейные]; B --- E[Симметричные и несимметричные]; B --- F[Уравновешанные и неуравновешанные]; B --- G[Автономные и неавтономные]; B --- H[Обратимые и необратимые];
```

Активные и пассивные

Линейные и нелинейные

**Симметричные и
несимметричные**

**Уравновешанные и
неуравновешанные**

Автономные и неавтономные

Обратимые и необратимые

В **активном** четырехполюснике есть источники энергии, в **пассивном** – источников энергии нет. Примерами активных четырехполюсников являются усилители, каскады радиопередатчиков и радиоприемников и др. Примером пассивного четырехполюсника может служить кабельная или воздушная линия связи, электрический фильтр и др.

Четырехполюсники делятся на **линейные** и **нелинейные**. Четырехполюсник является линейным, если напряжение и ток на его выходных зажимах линейно зависят от напряжения и тока на входных зажимах. Примерами линейных четырехполюсников являются линии связи, фильтры, примерами нелинейного – выпрямитель, детектор, преобразователь частоты в радиоприемнике.

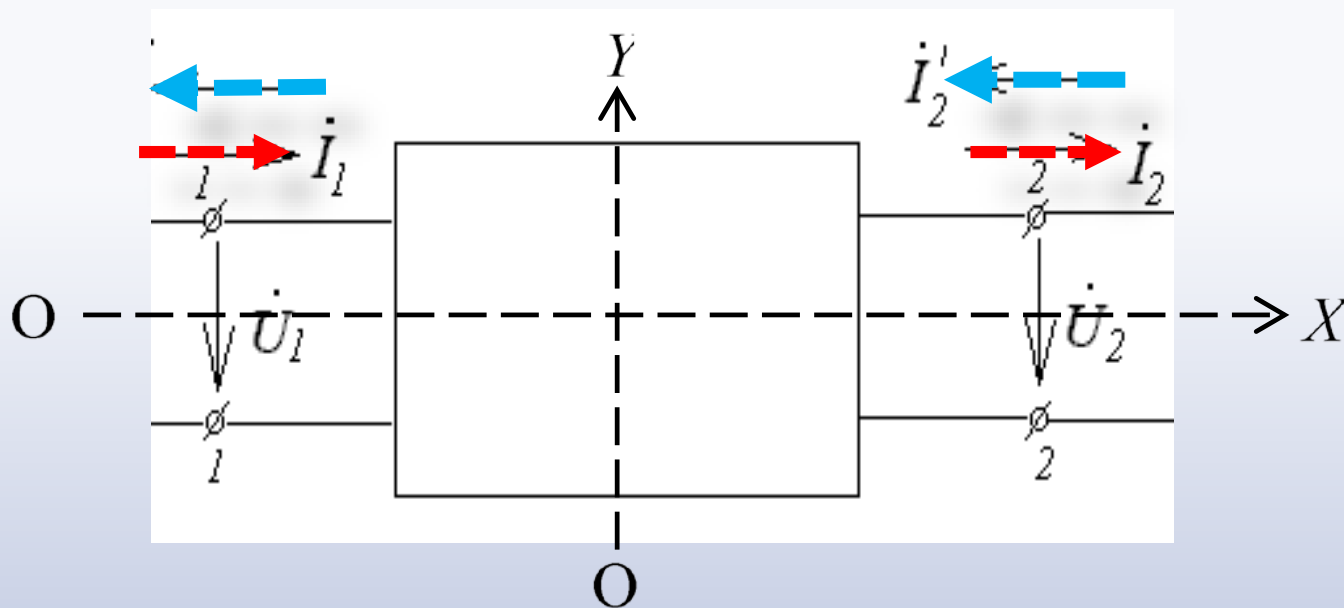
Четырехполюсники могут быть **симметричными** и **несимметричными**. Четырехполюсник симметричен, если перемена местами входных и выходных зажимов не изменяет токов и напряжений в цепи, с которой четырехполюсник соединен. В противном случае четырехполюсник несимметричен.

Если относительно оси OX сохраняются свойства симметрии четырехполюсника, тогда он является **уравновешанным**. В противном случае четырехполюсник **неуравновешанный**.

Четырехполюсники бывают **автономными** и **неавтономными**. На зажимах автономного четырехполюсника остается напряжение, обусловленное наличием внутренних источников, т. е. такой четырехполюсник обязательно является активным. В противном случае четырехполюсник пассивен.

Различают также **обратимые** и **необратимые** четырехполюсники. В обратимых четырехполюсниках отношение напряжения на входе к току на выходе (передаточное сопротивление) не зависит от того, какая пара зажимов является входной, а какая выходной. В противном случае четырехполюсник необратим.

Основной задачей теории четырехполюсников является установление соотношений между напряжениями на входе и выходе и токами, протекающими через входные и выходные зажимы.



$$I_1 = -I_1', I_2 = -I_2'.$$

Вариант с токами I_1, I_2 называют *прямой передачей*, а I_1', I_2' — *обратной*.

Шесть форм записи уравнений 4П

Y – форма

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

Z – форма

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

A – форма

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{A}_{11}\dot{U}_2 + \dot{A}_{12}\dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 = \dot{A}_{21}\dot{U}_2 + \dot{A}_{22}\dot{I}_2. \end{cases}$$

B – форма

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = \dot{B}_{11}\dot{U}_1 + \dot{B}_{12}\dot{I}'_1, \\ \dot{I}'_2 = \dot{B}_{21}\dot{U}_1 + \dot{B}_{22}\dot{I}'_1. \end{cases}$$

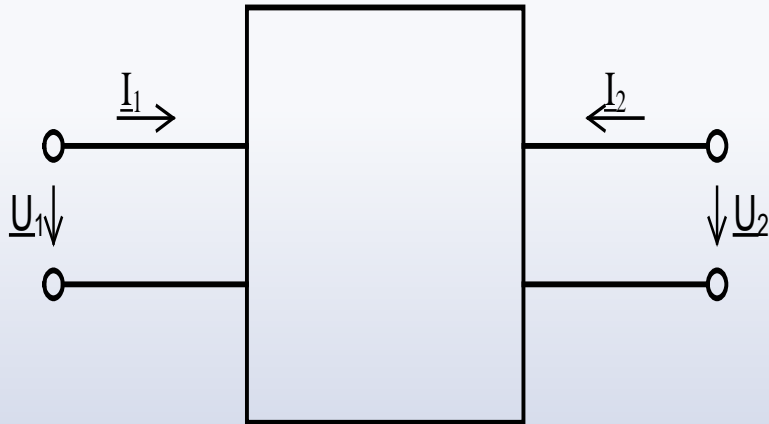
H – форма

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{H}_{11}\dot{I}_1 + \dot{H}_{12}\dot{U}_2, \\ \dot{I}'_2 = \dot{H}_{21}\dot{I}_1 + \dot{H}_{22}\dot{U}_2. \end{cases}$$

G – форма

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \dot{G}_{11}\dot{U}_1 + \dot{G}_{12}\dot{I}'_2, \\ \dot{U}_2 = \dot{G}_{21}\dot{U}_1 + \dot{G}_{22}\dot{I}'_2. \end{cases}$$

Уравнения четырехполюсника через **Y-ПАРАМЕТРЫ**



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

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = [\dot{Y}] \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}$$

Физический смысл Y-параметров

$$\dot{Y}_{11} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$$

– комплексная входная проводимость со стороны зажимов 1-1' в режиме короткого замыкания на зажимах 2-2';

$$\underline{Y}_{12} = \left. \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_2} \right|_{\underline{U}_1=0}$$

– комплексная передаточная проводимость обратной передачи от зажимов 2-2' к зажимам 1-1' в режиме короткого замыкания на зажимах 1-1';

$$\underline{Y}_{21} = \left. \frac{\underline{I}_2}{\underline{U}_1} \right|_{\underline{U}_2=0}$$

– комплексная передаточная проводимость прямой передачи от зажимов 1-1' к зажимам 2-2' в режиме короткого замыкания на зажимах 2-2';

$$\underline{Y}_{22} = \left. \frac{\underline{I}_2}{\underline{U}_2} \right|_{\underline{U}_1=0}$$

– комплексная входная проводимость со стороны зажимов 2-2' в режиме короткого замыкания на зажимах 1-1'.

	Y	Z	A	H
Y	—	$\begin{array}{cc} \underline{\underline{Z}}_{22} & - \underline{\underline{Z}}_{12} \\ \underline{\Delta_Z} & \underline{\Delta_Z} \\ - \underline{\underline{Z}}_{21} & \underline{\underline{Z}}_{11} \\ \underline{\Delta_Z} & \underline{\Delta_Z} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \underline{\underline{A}}_{22} & - \underline{\Delta_A} \\ \underline{\underline{A}}_{12} & \underline{\underline{A}}_{12} \\ 1 & - \underline{\underline{A}}_{11} \\ \underline{\underline{A}}_{12} & \underline{\underline{A}}_{12} \end{array}$	$\begin{array}{cc} 1 & - \underline{\underline{H}}_{12} \\ \underline{\underline{H}}_{11} & \underline{\underline{H}}_{11} \\ \underline{\underline{H}}_{21} & \underline{\Delta_H} \\ \underline{\underline{H}}_{11} & \underline{\underline{H}}_{11} \end{array}$
Z	$\begin{array}{cc} \underline{\underline{Y}}_{22} & - \underline{\underline{Y}}_{12} \\ \underline{\Delta_Y} & \underline{\Delta_Y} \\ - \underline{\underline{Y}}_{21} & \underline{\underline{Y}}_{11} \\ \underline{\Delta_Y} & \underline{\Delta_Y} \end{array}$	—	$\begin{array}{cc} \underline{\underline{A}}_{11} & - \underline{\Delta_A} \\ \underline{\underline{A}}_{21} & \underline{\underline{A}}_{21} \\ 1 & - \underline{\underline{A}}_{22} \\ \underline{\underline{A}}_{21} & \underline{\underline{A}}_{21} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \underline{\Delta_H} & - \underline{\underline{H}}_{12} \\ \underline{\underline{H}}_{22} & \underline{\underline{H}}_{22} \\ \underline{\underline{H}}_{21} & 1 \\ \underline{\underline{H}}_{22} & \underline{\underline{H}}_{22} \end{array}$
A	$\begin{array}{cc} - \underline{\underline{Y}}_{22} & 1 \\ \underline{\underline{Y}}_{21} & \underline{\underline{Y}}_{21} \\ - \underline{\Delta_Y} & \underline{\underline{Y}}_{11} \\ \underline{\underline{Y}}_{21} & \underline{\underline{Y}}_{21} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \underline{\underline{Z}}_{11} & - \underline{\Delta_Z} \\ \underline{\underline{Z}}_{21} & \underline{\underline{Z}}_{21} \\ 1 & - \underline{\underline{Z}}_{22} \\ \underline{\underline{Z}}_{21} & \underline{\underline{Z}}_{21} \end{array}$	—	$\begin{array}{cc} - \underline{\Delta_H} & \underline{\underline{H}}_{11} \\ \underline{\underline{H}}_{21} & \underline{\underline{H}}_{21} \\ - \underline{\underline{H}}_{22} & 1 \\ \underline{\underline{H}}_{21} & \underline{\underline{H}}_{21} \end{array}$
H	$\begin{array}{cc} 1 & - \underline{\underline{Y}}_{12} \\ \underline{\underline{Y}}_{11} & \underline{\underline{Y}}_{11} \\ \underline{\underline{Y}}_{21} & \underline{\Delta_Y} \\ \underline{\underline{Y}}_{11} & \underline{\underline{Y}}_{11} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \underline{\Delta_Z} & \underline{\underline{Z}}_{12} \\ \underline{\underline{Z}}_{22} & \underline{\underline{Z}}_{22} \\ - \underline{\underline{Z}}_{21} & 1 \\ \underline{\underline{Z}}_{22} & \underline{\underline{Z}}_{22} \end{array}$	$\begin{array}{cc} \underline{\underline{A}}_{12} & \underline{\Delta_A} \\ \underline{\underline{A}}_{22} & \underline{\underline{A}}_{22} \\ 1 & - \underline{\underline{A}}_{21} \\ \underline{\underline{A}}_{22} & \underline{\underline{A}}_{22} \end{array}$	—

Для
симметричного
4П

$$\dot{Y}_{11} = \dot{Y}_{22}$$

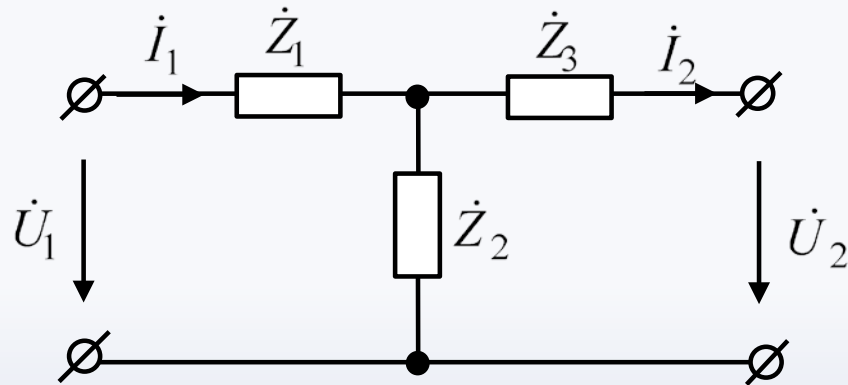
$$\dot{Z}_{22} = \dot{Z}_{11}$$

Для
обратимого
4П

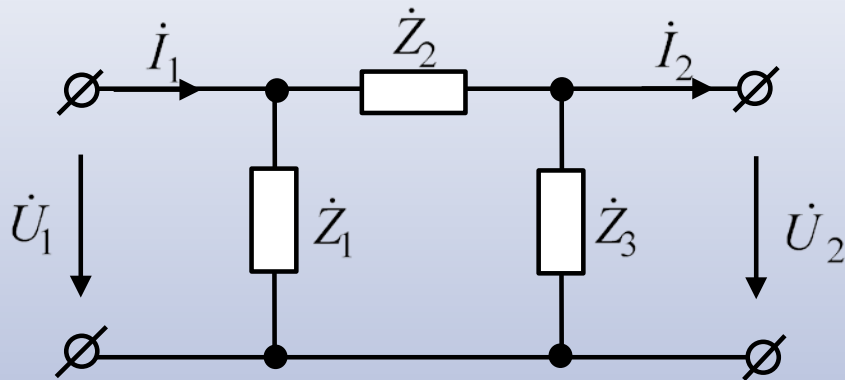
$$\dot{Y}_{12} = \dot{Y}_{21}$$

$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21}.$$

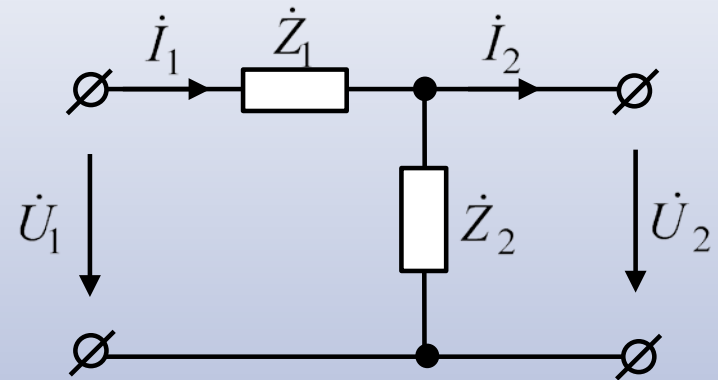
Эквивалентные схемы 4П



а) Т-тәріздес схема



б) П-тәріздес схема



в) Г-тәріздес схема

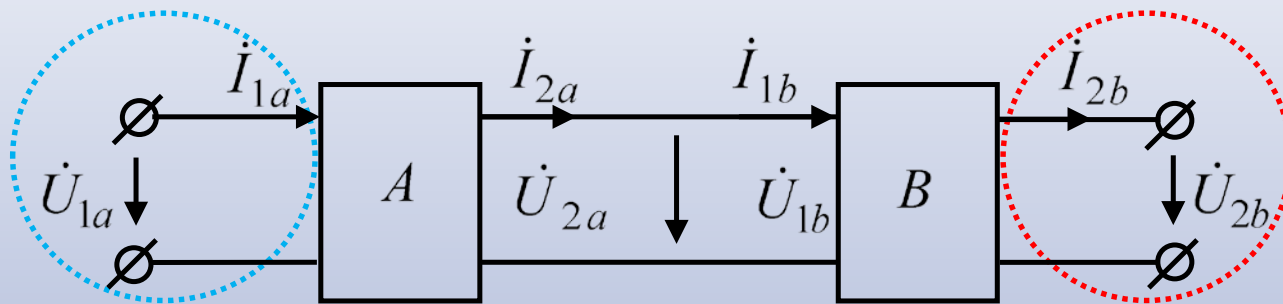
Сложные 4П

Четырехполюсник может быть **сложным**, т.к. **образован в результате соединения между собой нескольких**, в частности двух, **четырехполюсников**. Параметры сложного четырехполюсника могут быть рассчитаны, если известны параметры каждого из составляющих четырехполюсников. В зависимости от схемы соединения четырехполюсников расчет параметров результирующего (эквивалентного) проводят, используя соответствующие уравнения в матричной форме.



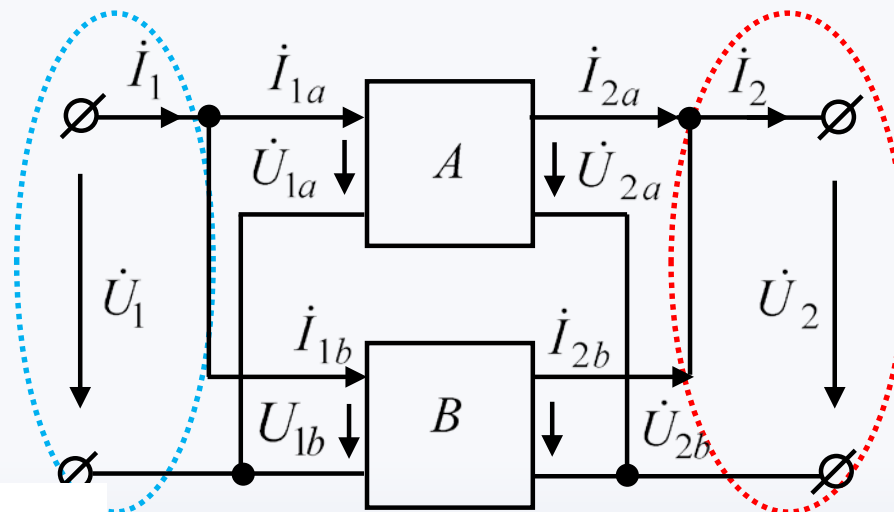
Схемы различных соединений сложных 4П

Для схемы каскадного соединения используют уравнения записанные в A –форме, для схемы последовательного соединения – в Z –форме, для схемы параллельного соединения – в Y –форме, для схемы параллельно-последовательного соединения – в G –форме и для последовательно-параллельного соединения – в H –форме.



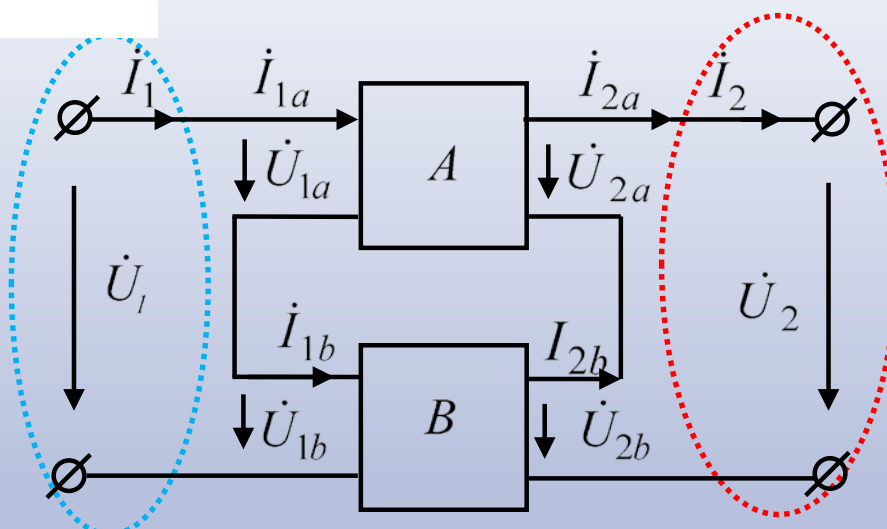
**Каскадное
соединение**

$$: \dot{U}_1 = \dot{U}_{1a}, \dot{U}_{2a} = U_{1b}, \dot{U}_2 = \dot{U}_{2b}, \dot{I}_1 = \dot{I}_{1a}, \dot{I}_{2a} = \dot{I}_{1b}, \dot{I}_2 = \dot{I}_{2b}$$



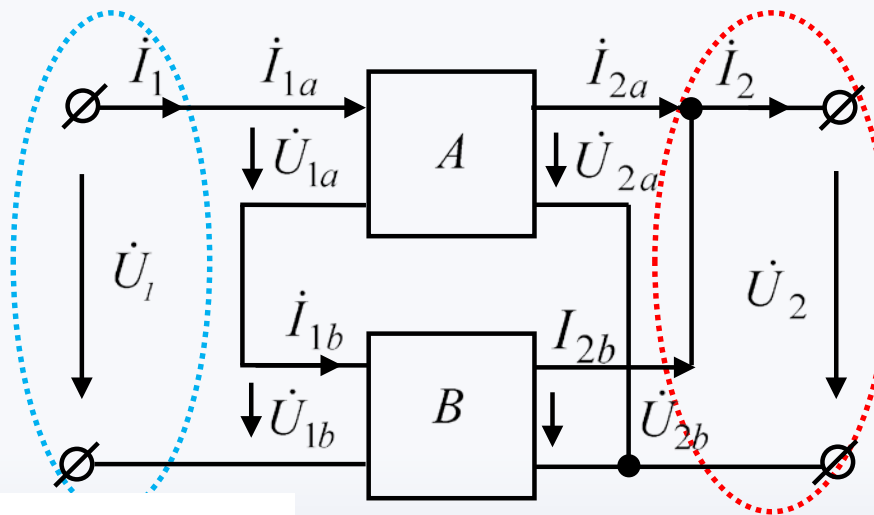
**Параллельное
соединение**

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1a} = \dot{U}_{1b}, \dot{U}_2 = \dot{U}_{2a} = \dot{U}_{2b}, \dot{I}_1 = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{1b}, \dot{I}_2 = \dot{I}_{2a} + \dot{I}_{2b}$$



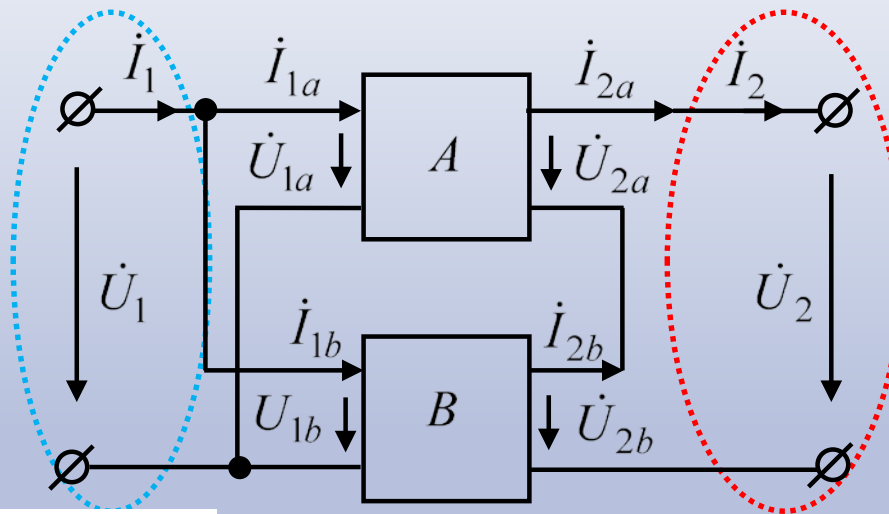
**Последовательное
соединение**

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1a} + \dot{U}_{1b}, \dot{U}_2 = \dot{U}_{2a} + \dot{U}_{2b}, \dot{I}_1 = \dot{I}_{1a} = \dot{I}_{1b}, \dot{I}_2 = \dot{I}_{2a} = \dot{I}_{2b}$$



**Последовательно-
параллельное соединение**

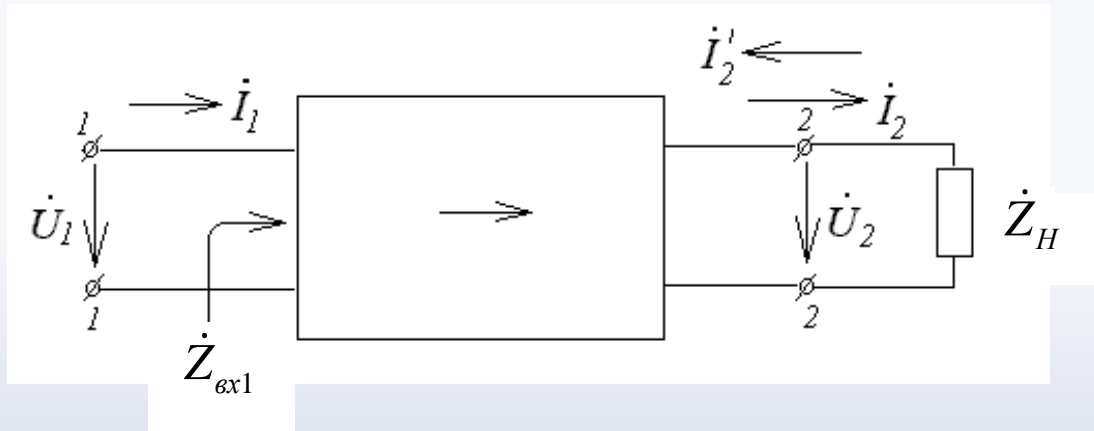
$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1a} + \dot{U}_{1b}, \dot{U}_2 = \dot{U}_{2a} = \dot{U}_{2b}, \dot{I}_1 = \dot{I}_{1a} = \dot{I}_{1b}, \dot{I}_2 = \dot{I}_{2a} + \dot{I}_{2b}$$



**Параллельно-
последовательное
соединение**

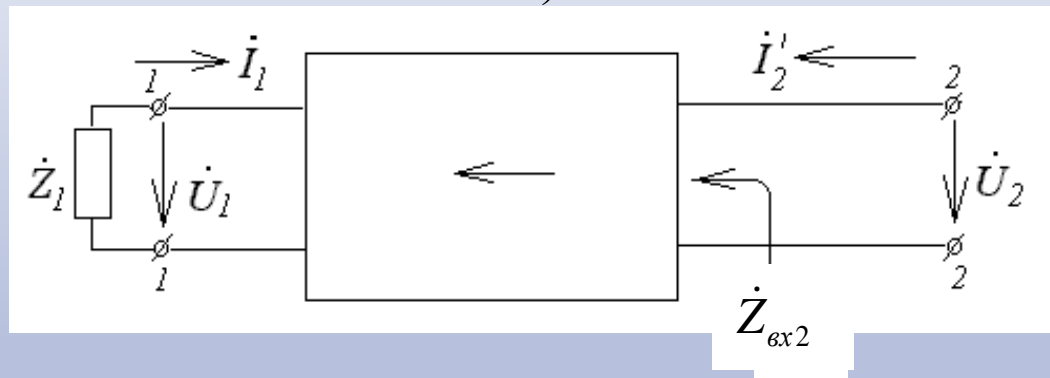
$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1a} = \dot{U}_{1b}, \dot{U}_2 = \dot{U}_{2a} + \dot{U}_{2b}, \dot{I}_1 = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{1b}, \dot{I}_2 = \dot{I}_{2a} = \dot{I}_{2b}$$

Входные сопротивления четырехполюсника



$$\dot{Z}_{\text{вх1}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{i}_1}$$

а)



$$\dot{Z}_{\text{вх2}} = \dot{Z}_{\text{вх2}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{i}_2'}$$

б)

$$\dot{Z}_{ex1} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{A}_{11}\dot{U}_2 + \dot{A}_{12}\dot{I}_2}{\dot{A}_{21}\dot{U}_2 + \dot{A}_{22}\dot{I}_2} = \frac{\dot{A}_{11}\dot{Z}_H + \dot{A}_{12}}{\dot{A}_{21}\dot{Z}_H + \dot{A}_{22}}, \quad \dot{Z}_H = \dot{U}_2 / \dot{I}_2$$

$$\dot{Z}_{1XX} = \frac{\dot{A}_{11}}{\dot{A}_{21}}, \quad \dot{Z}_{1K3} = \frac{\dot{A}_{12}}{\dot{A}_{22}}$$

$$\dot{Z}_{2XX} = \frac{\dot{A}_{22}}{\dot{A}_{21}}, \quad \dot{Z}_{2K3} = \frac{\dot{A}_{12}}{\dot{A}_{11}}$$

$$\dot{Z}_{ex1} = \frac{\dot{A}_{11}}{\dot{A}_{21}} \frac{\frac{\dot{A}_{12}}{\dot{A}_{11}} + \dot{Z}_H}{\frac{\dot{A}_{22}}{\dot{A}_{21}} + \dot{Z}_H} = \dot{Z}_{1XX} \frac{\dot{Z}_{2K3} + \dot{Z}_H}{\dot{Z}_{2XX} + \dot{Z}_H},$$

$$\dot{Z}_{ex2} = \dot{Z}_{2XX} \frac{\dot{Z}_{1K3} + \dot{Z}_1}{\dot{Z}_{1XX} + \dot{Z}_1}$$

Характеристические параметры

(вторичные)

\dot{Z}_i - внутреннее сопротивление генератора,
 \dot{Z}_H - сопротивление нагрузки

Если $\begin{cases} \dot{Z}_i = \dot{Z}_{ex1} \\ \dot{Z}_{ex2} = \dot{Z}_H \end{cases}$ согласованный режим 4П

$$\dot{Z}_{ex1} = \frac{\dot{A}_{11}\dot{Z}_H + \dot{A}_{12}}{\dot{A}_{21}\dot{Z}_H + \dot{A}_{22}} = \dot{Z}_i, \quad \dot{Z}_{ex2} = \frac{\dot{A}_{22}\dot{Z}_1 + \dot{A}_{12}}{\dot{A}_{21}\dot{Z}_1 + \dot{A}_{11}} = \dot{Z}_H.$$

Характеристические сопротивления

$$\dot{Z}_{ex1} = \dot{Z}_i = \dot{Z}_{1C}$$

$$\dot{Z}_{ex2} = \dot{Z}_H = \dot{Z}_{2C}$$

$$\dot{Z}_{1C} = \frac{\dot{A}_{11}\dot{Z}_{2C} + \dot{A}_{12}}{\dot{A}_{21}\dot{Z}_{2C} + \dot{A}_{22}}, \quad \dot{Z}_{2C} = \frac{\dot{A}_{22}\dot{Z}_{1C} + \dot{A}_{12}}{\dot{A}_{21}\dot{Z}_{1C} + \dot{A}_{11}}.$$

$$\dot{Z}_{1C} = \sqrt{\frac{\dot{A}_{11}\dot{A}_{12}}{\dot{A}_{21}\dot{A}_{22}}}, \quad \dot{Z}_{2C} = \sqrt{\frac{\dot{A}_{22}\dot{A}_{12}}{\dot{A}_{21}\dot{A}_{11}}}.$$

$$\frac{\dot{A}_{11}}{\dot{A}_{21}} = \dot{Z}_{1XX}, \quad \frac{\dot{A}_{12}}{\dot{A}_{22}} = \dot{Z}_{1K3}, \quad \frac{\dot{A}_{22}}{\dot{A}_{21}} = \dot{Z}_{2XX}, \quad \frac{\dot{A}_{12}}{\dot{A}_{11}} = \dot{Z}_{2K3}$$

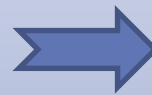
$$\dot{Z}_{1C} = \sqrt{\dot{Z}_{1XX}\dot{Z}_{1K3}}, \quad \dot{Z}_{2C} = \sqrt{\dot{Z}_{2XX}\dot{Z}_{2K3}}.$$

Если 4П согласован с нагрузкой

$$\dot{Z}_H = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = \dot{Z}_{2C} = \sqrt{\frac{\dot{A}_{22}\dot{A}_{12}}{\dot{A}_{21}\dot{A}_{11}}},$$

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{A}_{11}\dot{U}_2 + \dot{A}_{12}\frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_{2C}}, \\ \dot{I}_1 = \dot{A}_{21}\dot{Z}_{2C}\dot{I}_2 + \dot{A}_{22}\dot{I}_2. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \left(\dot{A}_{11} + \sqrt{\frac{\dot{A}_{12}\dot{A}_{21}\dot{A}_{11}}{\dot{A}_{22}}} \right), \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \left(\dot{A}_{22} + \sqrt{\frac{\dot{A}_{12}\dot{A}_{21}\dot{A}_{22}}{\dot{A}_{11}}} \right). \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \cdot \sqrt{\frac{\dot{A}_{22}}{\dot{A}_{11}}} = \sqrt{\dot{A}_{11}\dot{A}_{22}} + \sqrt{\dot{A}_{12}\dot{A}_{21}}, \\ \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \cdot \sqrt{\frac{\dot{A}_{11}}{\dot{A}_{22}}} = \sqrt{\dot{A}_{11}\dot{A}_{22}} + \sqrt{\dot{A}_{12}\dot{A}_{21}}. \end{cases}$$



$$\sqrt{\frac{\dot{A}_{11}}{\dot{A}_{22}}} = \sqrt{\frac{\dot{Z}_{1C}}{\dot{Z}_{2C}}} = n_T$$

***Коэффициент
трансформации***

Входное сопротивление согласованного 4П

$$\dot{Z}_{\text{ex1}} = \dot{Z}_{1C} = n_T^2 \dot{Z}_{2C} = n_T^2 \dot{Z}_H,$$

g – постоянная передачи

$$\frac{1}{n_T} \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = n_T \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \sqrt{\dot{A}_{11} \dot{A}_{22}} + \sqrt{\dot{A}_{12} \dot{A}_{21}} = e^{\dot{g}}$$

Для симметричного 4П $\dot{A}_{11} = \dot{A}_{22}$, $\dot{Z}_{1C} = \dot{Z}_{2C}$, $n_T = 1$,

$$\dot{g} = \ln \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \ln \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \ln \left(\sqrt{\dot{A}_{11} \dot{A}_{22}} + \sqrt{\dot{A}_{12} \dot{A}_{21}} \right),$$

В случае согласованности с нагрузкой

$$\begin{cases} \dot{Z}_H = \dot{Z}_{2C}, \\ \dot{Z}_{2C} \dot{I}_2 = \dot{U}_2, \\ ch\dot{g} + sh\dot{g} = e^{\dot{g}} \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{U}_1 = \sqrt{\frac{\dot{Z}_{1C}}{\dot{Z}_{2C}}} \dot{U}_2 e^{\dot{g}}, \\ \dot{I}_1 = \sqrt{\frac{\dot{Z}_{2C}}{\dot{Z}_{1C}}} \dot{I}_2 e^{\dot{g}} \end{cases}$$

Постоянная передачи

$$\dot{g} = a + jb.$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= |\dot{U}_1| e^{j\varphi_{U1}}, & \dot{U}_2 &= |\dot{U}_2| e^{j\varphi_{U2}}, & \dot{Z}_{1C} &= |\dot{Z}_{1C}| e^{j\varphi_{1C}}, \\ \dot{I}_1 &= |\dot{I}_1| e^{j\varphi_{I1}}, & \dot{I}_2 &= |\dot{I}_2| e^{j\varphi_{I2}}, & \dot{Z}_{2C} &= |\dot{Z}_{2C}| e^{j\varphi_{2C}}.\end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{aligned} |\dot{U}_1| e^{j\varphi_{U1}} &= \left[\sqrt{\frac{|\dot{Z}_{1C}|}{|\dot{Z}_{2C}|}} |\dot{U}_2| e^a \right] e^{j\varphi_{U2}} e^{j\frac{1}{2}(\varphi_{1C} - \varphi_{2C})} e^{jb}, \\ |\dot{I}_1| e^{j\varphi_{I1}} &= \left[\sqrt{\frac{|\dot{Z}_{2C}|}{|\dot{Z}_{1C}|}} |\dot{I}_2| e^a \right] e^{j\varphi_{I2}} e^{j\frac{1}{2}(\varphi_{2C} - \varphi_{1C})} e^{jb}. \end{aligned} \right.$$

$$\varphi_{U1} - \varphi_{U2} = \frac{1}{2}(\varphi_{1C} - \varphi_{2C}) + jb, \quad \varphi_{I1} - \varphi_{I2} = \frac{1}{2}(\varphi_{2C} - \varphi_{1C}) + jb.$$

Для симметричного 4П

$$\begin{cases} |\dot{U}_1| e^{j\varphi_{U1}} = |\dot{U}_2| e^a e^{j\varphi_{U2}} e^{jb}, \\ |\dot{I}_1| e^{j\varphi_{I1}} = |\dot{I}_2| e^a e^{j\varphi_{I2}} e^{jb}. \end{cases}$$

b - коэффициент фазы (радиан или градус):

$$b = \varphi_{U1} - \varphi_{U2} = \varphi_{I1} - \varphi_{I2}.$$

a – собственный коэффициент затухания:

$$a = \ln \frac{|\dot{U}_1|}{|\dot{U}_2|} = \ln \frac{|\dot{I}_1|}{|\dot{I}_2|} \quad (\text{непер}).$$

$$a(\text{бел}) = \lg \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} = \lg \frac{S_1}{S_2}.$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{U_1^2}{U_2^2} = \frac{I_1^2}{I_2^2} \quad \longrightarrow \quad a(\text{бел}) = 2 \lg \frac{U_1}{U_2} = 2 \lg \frac{I_1}{I_2}.$$

$$a(\text{дб}) = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} = 20 \lg \frac{I_1}{I_2} = 10 \lg \frac{S_1}{S_2}.$$

$$1 \text{ дб} \approx 0,115 \text{ нел}; \quad 1 \text{ нел} \approx 8,7 \text{ дб}.$$