

# Постояннотоков режим в линейни електрически вериги

(лекция **27.09.2022г.**)

Преподавател: проф. д-р Илона Ячева

*кат. “Теоретична Електротехника”,  
Технически университет - София*



# Теоретична Електротехника

## Преподавател:

- проф. д-р **Илона Ячева**,  
каб. 12 514, e-mail: **iiach@tu-sofia.bg**

## Приемно време:

вторник  
11.30 – 12.30  
сряда  
10.30– 11.30

## Занятия:

- лекции
- семинарни упражнения
- лабораторни упражнения
- курсова задача

# Предмет на ТЕ - анализ на електромагнитни процеси и явления



## Теория на ЕМП

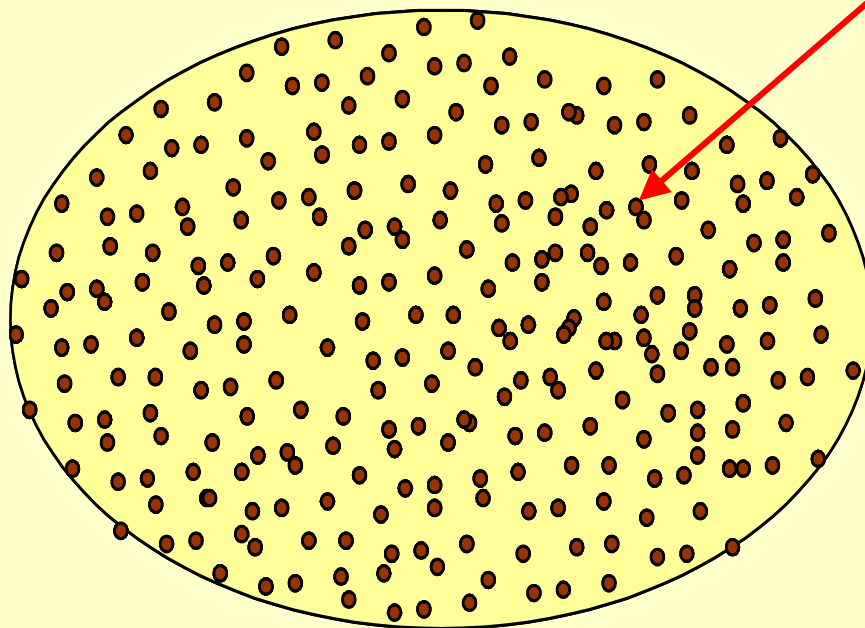
диференциални характеристики

## Теория на ел. вериги

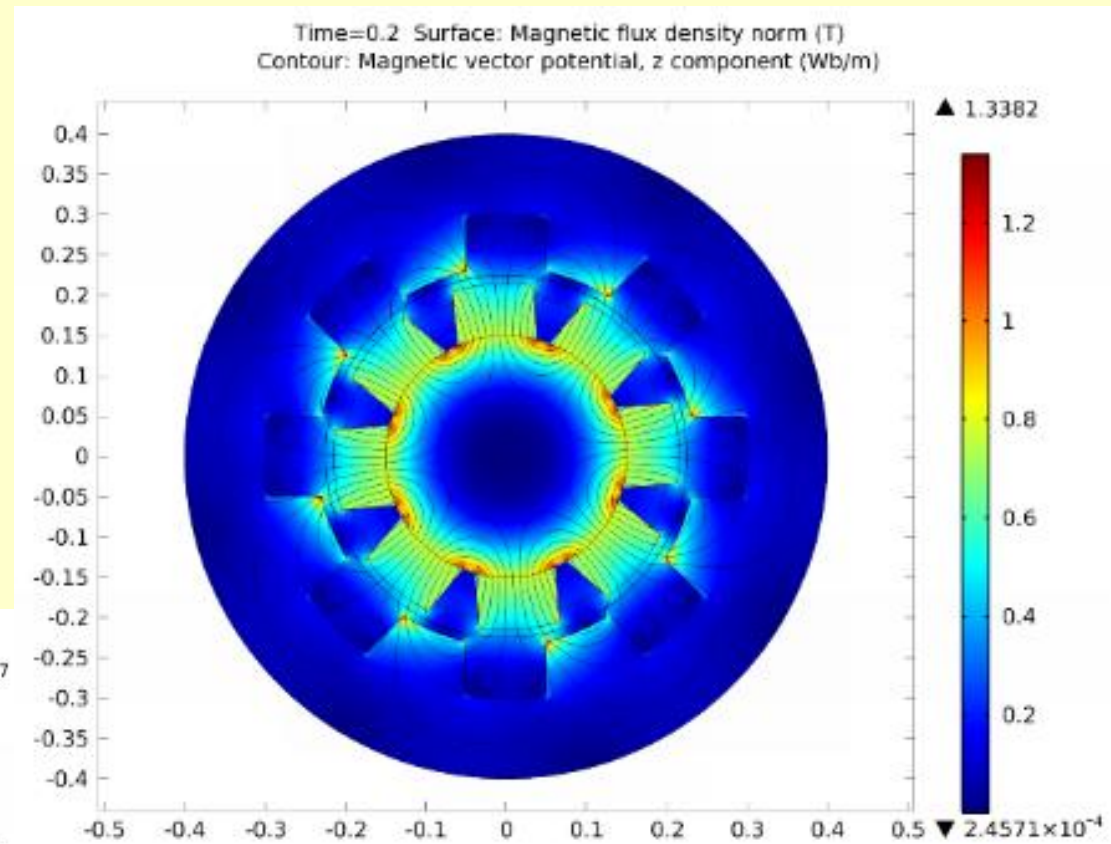
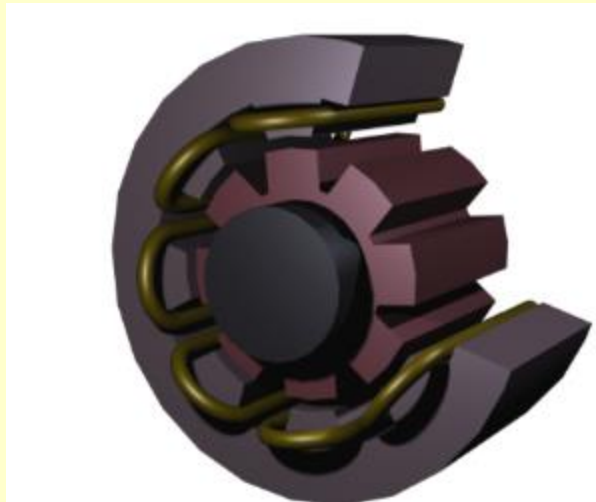
интегрални характеристики

# Теория на ЕМП

Електромагнитните процеси се анализират във всяка точка от изследваната област, като се взимат в предвид особеностите и специфичните характеристики на средата

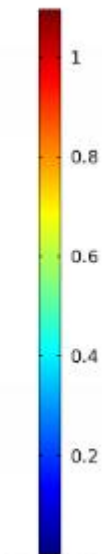


Използват се диференциални (точкови) характеристики – векторите на ел. и магнитното поле  $\mathbf{H}, \mathbf{B}, \mathbf{E}, \mathbf{D}$



Slice: Magnetic flux density norm (T) Streamline: Magnetic flux density

▲ 1.0937



▼  $3.5664 \times 10^{-4}$

# Теория на Електрическите Вериги - електромагнитните процеси се анализират на базата на **интегрални** характеристики и параметри

## Интегрални характеристики

Ток -  $i$

Напрежение -  $U$

Магнитен поток -  $\Psi$

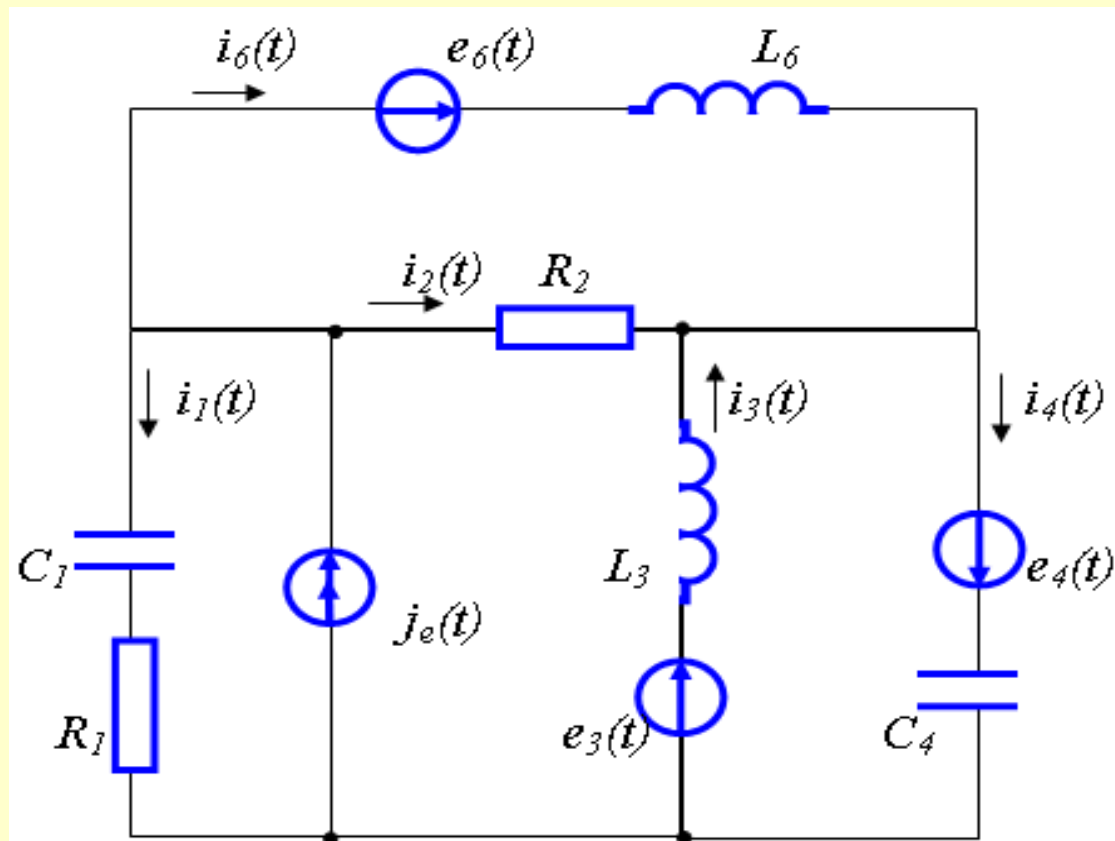
Ел. заряд -  $q$

## Интегрални параметри:

Съпротивление -  $R$

Индуктивност -  $L, M$

Капацитет -  $C$



# Електрически вериги –определения, класификации

## Електрическа

**верига:** Устройство или съвкупност от устройства за съсредоточено преобразуване, разпределение и пренасяне на електромагнитна енергия или информация **посредством електрически ток.**

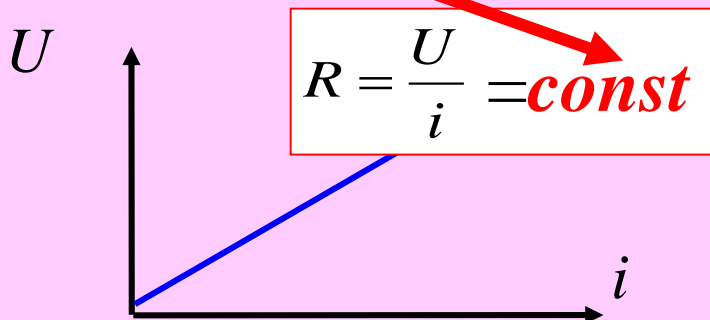
При това електромагнитните процеси допускат описание с използване на интегралните характеристики **ток и напрежение** и интегралните параметри – **съпротивление, индуктивност и капацитет**

# Класификации

## Линейни

### Съдържат само линейни елементи:

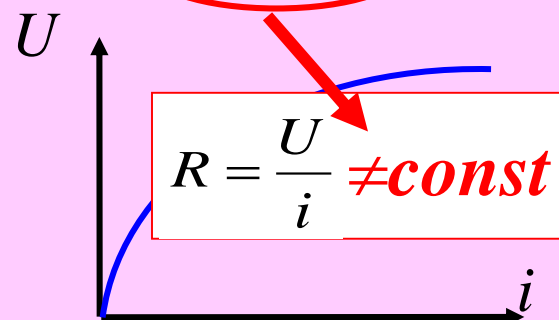
- такива, чиито V/A характеристики са прави линии.
- Процесите в тях се описват със системи линейни уравнения



## Нелинейни

### Съдържат поне 1 НЕ.

- Нелинейни елементи - такива, чиито V/A характеристики са нелинейни.
- Процесите в тях се описват със системи нелинейни уравнения





# Класификации

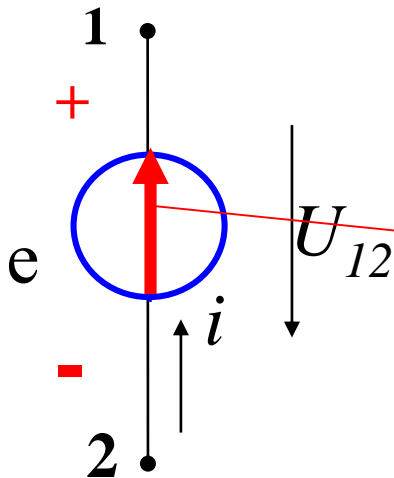
- **Вериги със съсредоточени параметри** - Допуска се, че енергийните процеси са съсредоточени в краен брой елементи с краен брой параметри.
- **Вериги с разпределени параметри** – Отчита се непрекъснатата структура на ЕМП. Електромагнитните процеси се анализират по протежение на цялата линия.
- **Разклонени и неразклонени**
- **Прости и сложни**
- **Други**

# Елементи на ел. верига

1. **Източник на напрежение** - Характеризира се с напрежение на изводите и вътрешно съпротивление.

а) идеален източник на напрежение – такъв източник на ел. маг. енергия, за който напрежението на изводите не зависи от големината на преминалия през него ток.

$$U_{12} = e$$

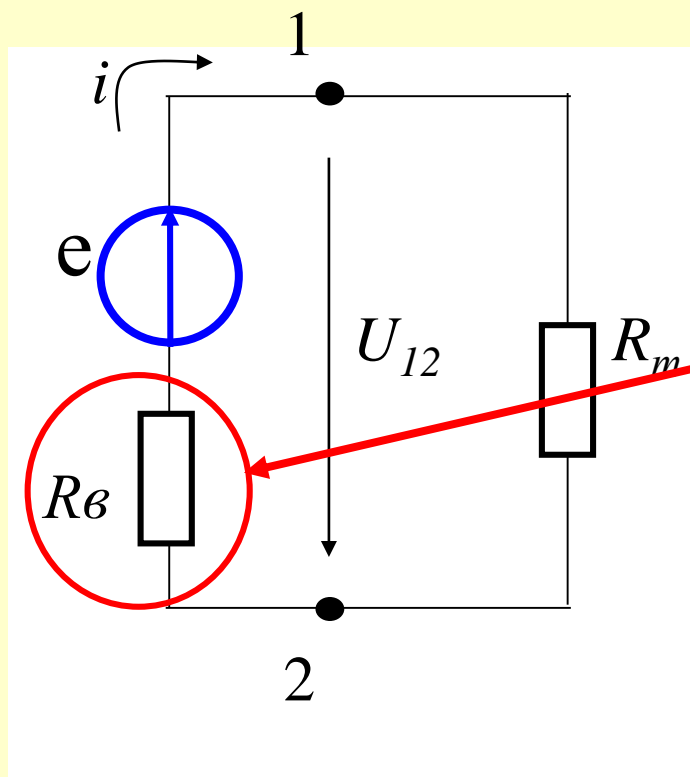


- Вътрешното съпротивление на такъв източник е нула ( $R_B = 0$ ).

- В означението на източника, стрелката сочи точката с по-висок потенциал (т.е. т.1 има по-висок потенциал от т.2 и напрежението на източника  $U_{12}$  е насочено от т.1 към т.2 и има големина  $e$  ).

## Елементи на ел. верига

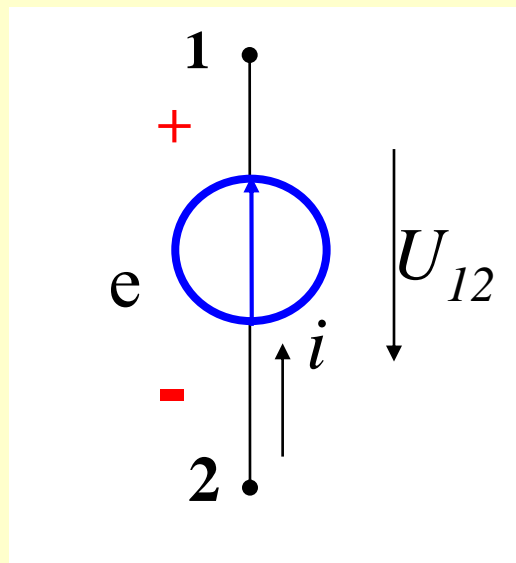
б) реален източник на напрежение – комбинация от идеален източник на напрежение и изнесен извън него резистор  $R_B$ .



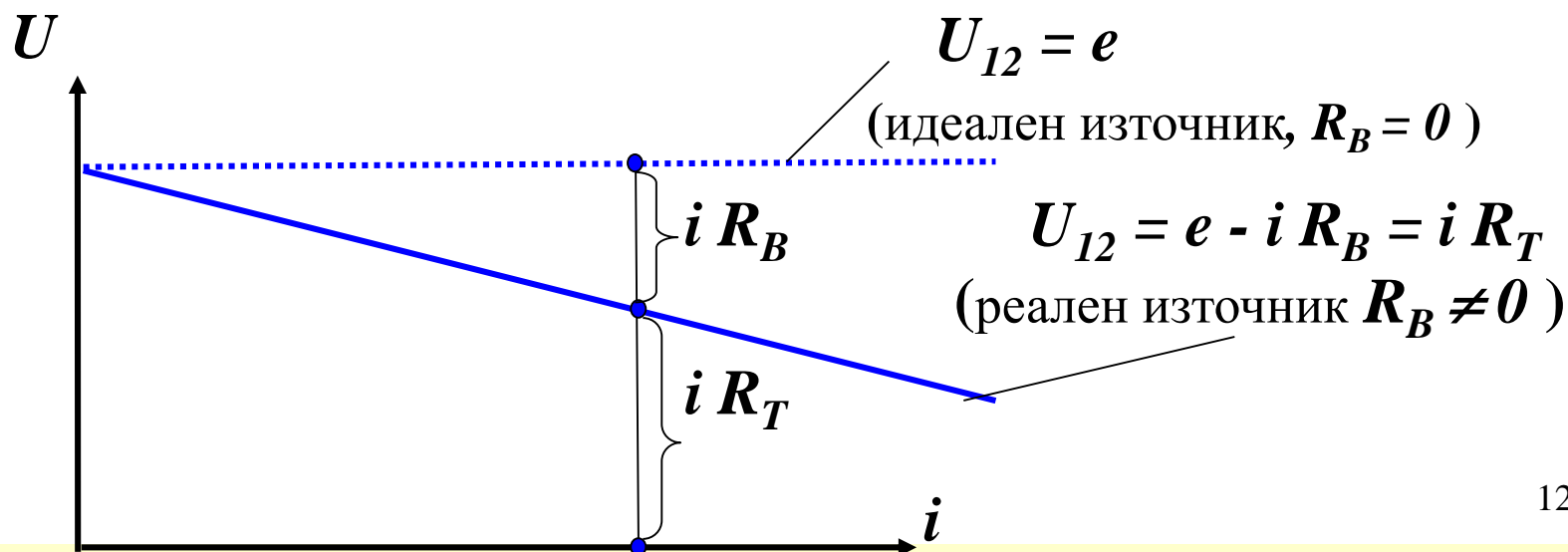
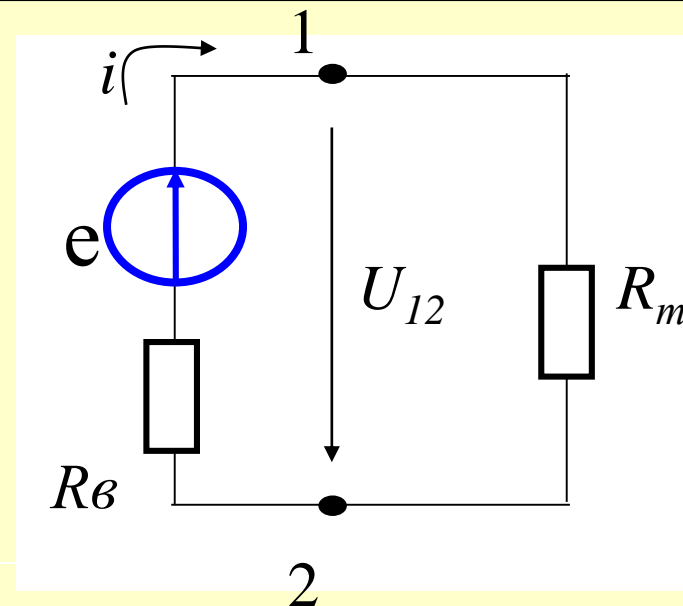
- Вътрешното съпротивление на такъв източник е различно от нула ( $R_B \neq 0$ ) и отразява наличието на загуби в него.
- С нарастване на тока  $i$ , преминаващ през източника напрежението на изводите му намалява

$$U_{12} = e - i \cdot R_B$$

## Идеален източник на е.д.н.



## Реален източник на е.д.н.

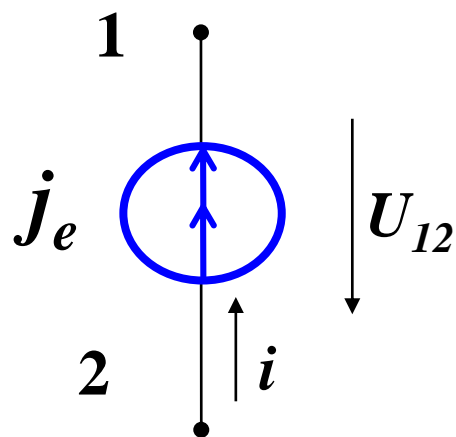


# Елементи на ел. верига

## 2.Източник на ток

а) идеален източник на ток – такъв източник на ел.маг. енергия, за който токът който, преминава през него не зависи от големината на приложеното напрежение

$$i = j_e$$

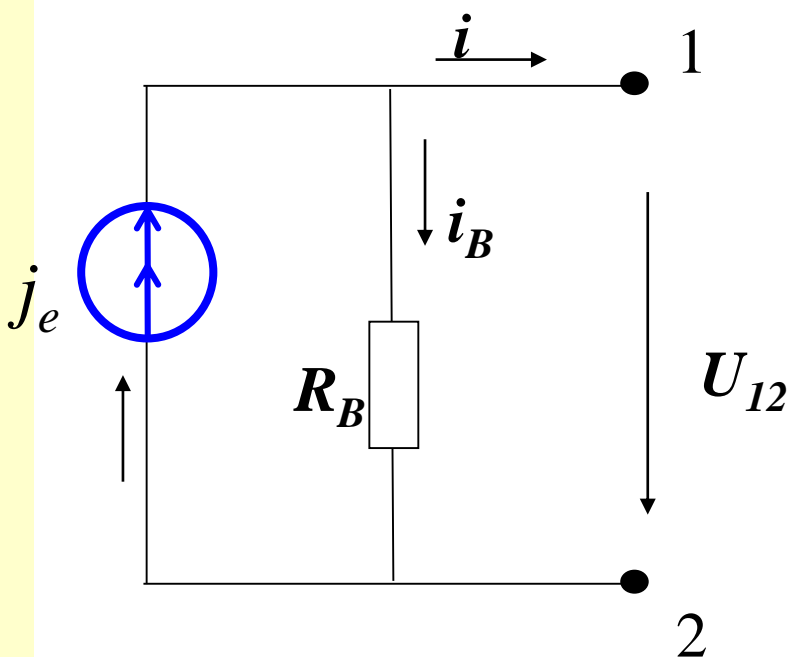


- Вътрешното съпротивление на такъв източник е безкрайно голямо ( $R_B \rightarrow \infty$ ).
- Токът  $i$  през клон с идеален източник на ток е  $i = j_e$ , независимо от това какви елементи са включени в клона.

# Елементи на ел. верига

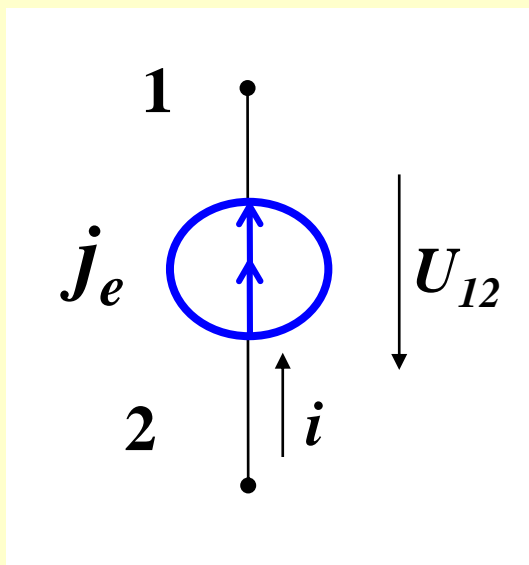
## 2.Източник на ток

б) реален източник на ток – комбинация от идеален източник на ток и паралелно свързан резистор  $R_B$ .

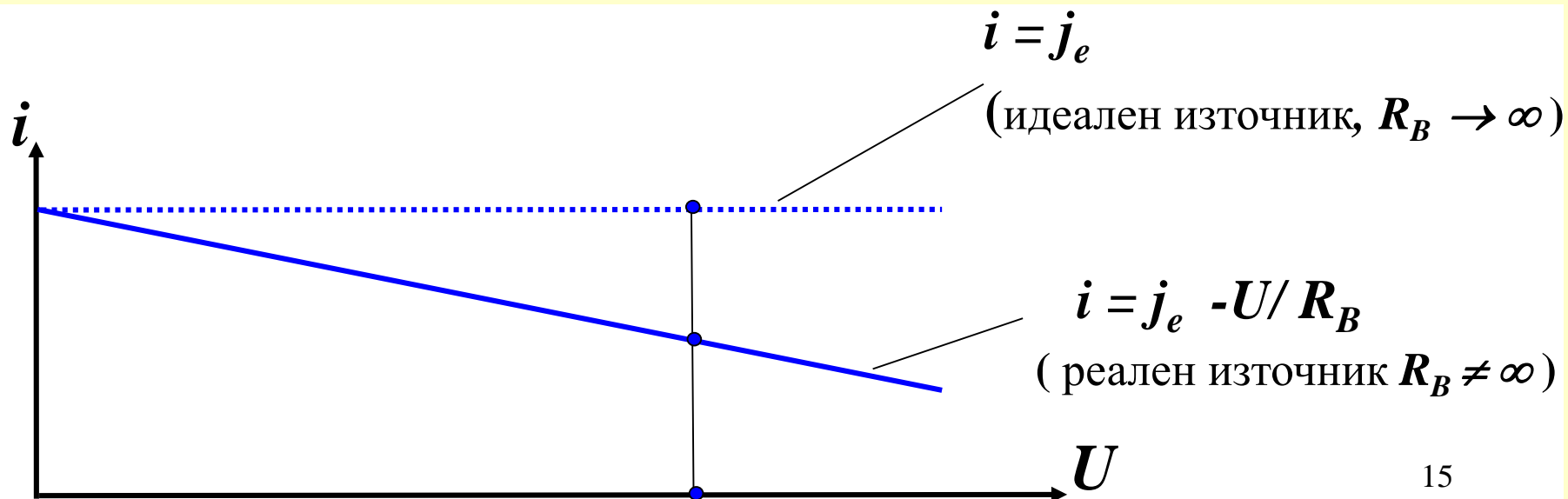
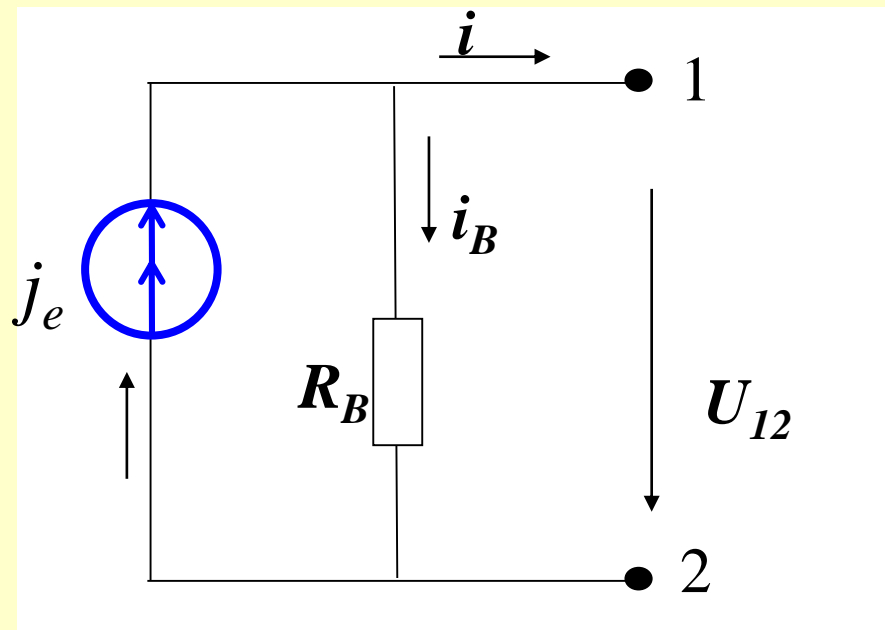


- Вътрешното съпротивление на такъв източник е различно от безкрайност ( $R_B \neq \infty$ ) и отразява наличието на загуби в него.
- С нарастване на напрежението  $U$  на изводите 1 и 2 на източника токът на изводите му  $i$ , намалява ( $i = j_e - U_{12} / R_B$ ).

## Идеален източник на ток



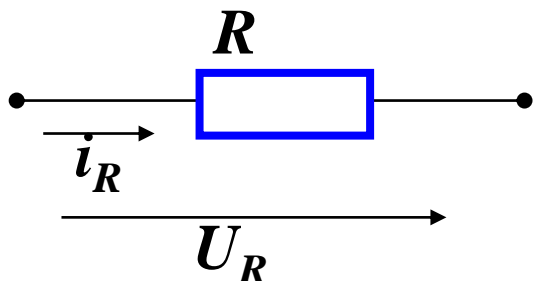
## Реален източник на ток



# Елементи на ел. верига

## 3. Резистор

Идеализиран приемник на енергия. В схемите на ел. вериги той отразява превръщането на ел. маг. енергия в загуби.



$$R.G = 1$$

$$[R] = \Omega ; \quad [G] = S$$

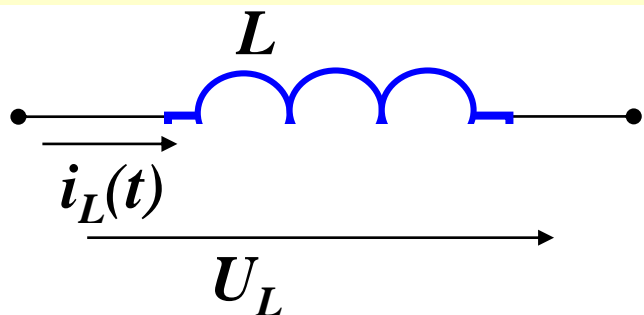
- Характеризира се със съпротивление  $R$  и проводимост  $G$
- В схемите на линейните вериги има постоянна стойност (  $R = \text{const}$ , не зависи от напрежението или тока)



# Елементи на ел. верига

## 4. Бобина

Идеализирана бобина - приемник на енергия. В схемите на ел. вериги отразява наличието на магнитно поле.



- Характеризира се с индуктивност  $L$

$$L = \frac{\Psi(t)}{i(t)} \quad [L] = \text{H}$$

( $\psi = w\Phi$  - пълният магнитен поток,  
 $\Phi$  - магнитния поток за една навивка)

- За линейни вериги  $L = \text{const}$  (не зависи от напрежението или тока)

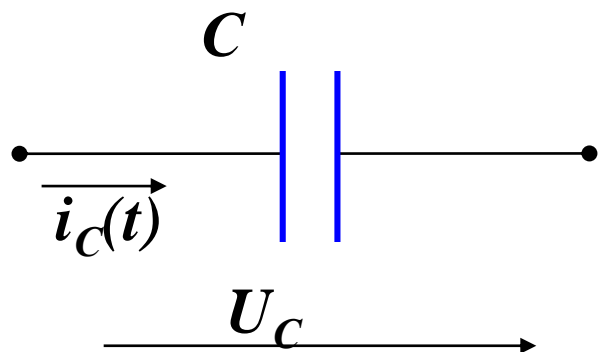
$$U_L = \frac{\partial \Psi}{\partial t} = L \frac{\partial i}{\partial t}$$

- При наличието на променлив във времето ток  $i(t)$ , напрежението  $U_L(t)$  на бобината съгласно се определя съгласно закона за електромагнитната индукция.

# Елементи на ел. верига

## 5. Кондензатор

Идеализиран кондензатор - приемник на енергия. В схемите на ел. вериги отразява наличието на електрическо поле.



- Характеризира се с капацитет  $C$

$$C = \frac{q(t)}{U_C(t)} \quad [C] = F$$

- За линейни вериги  $C = \text{const}$  (не зависи от напрежението или тока)

$$i_C = \frac{\partial q}{\partial t} = C \frac{\partial U_C}{\partial t}$$

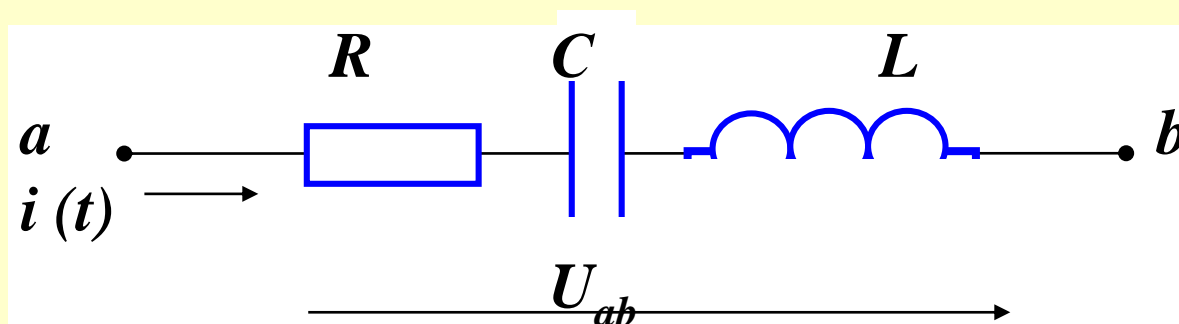
- При наличието на променливо във времето напрежение токът  $i(t)$  се определя като:

**Всяка схема на ел. верига се състои от съчетание на клони и възли.**

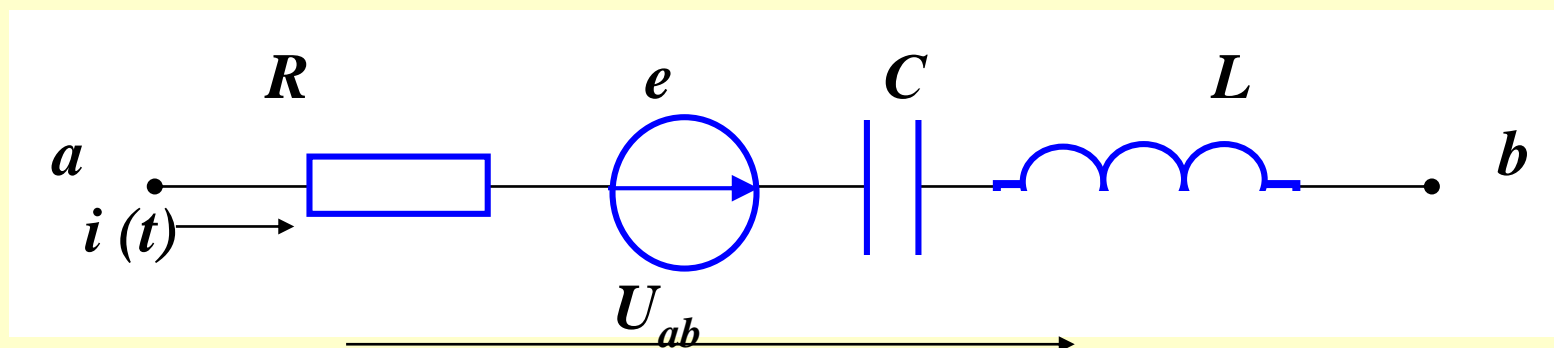
**1. Клон** – Участък от ел. верига от последователно съединени елементи, през които тече един и същи ток.

**Пример:**

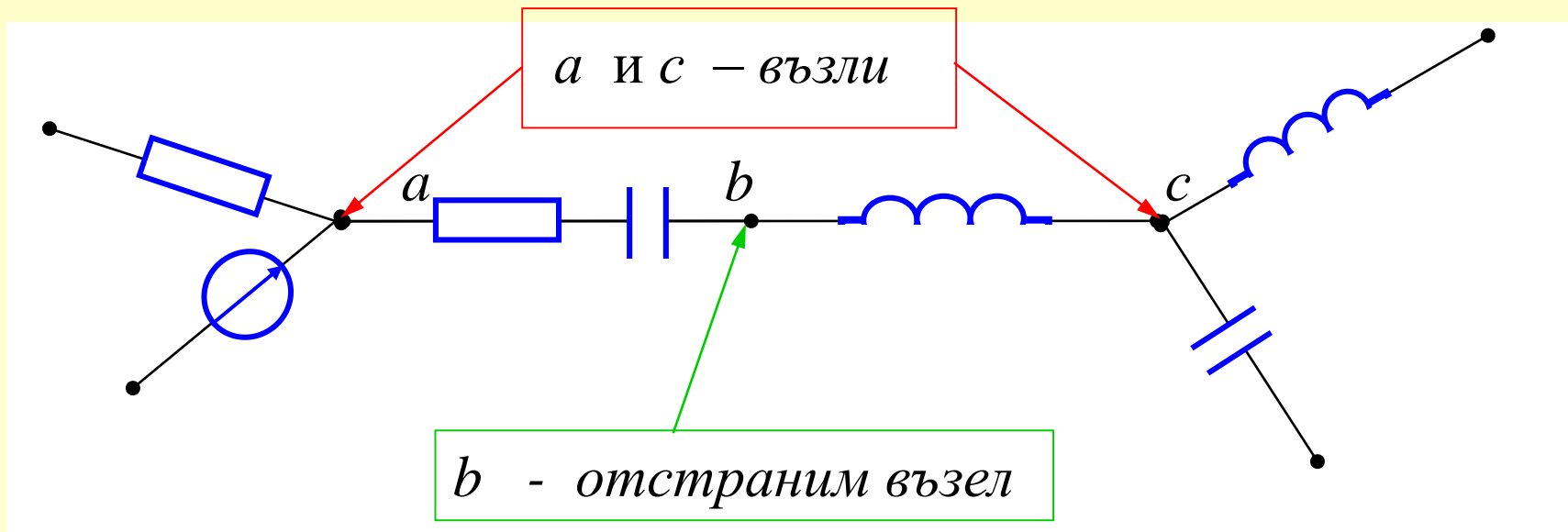
Пасивен клон



Активен клон (има източник на е.д.н.)

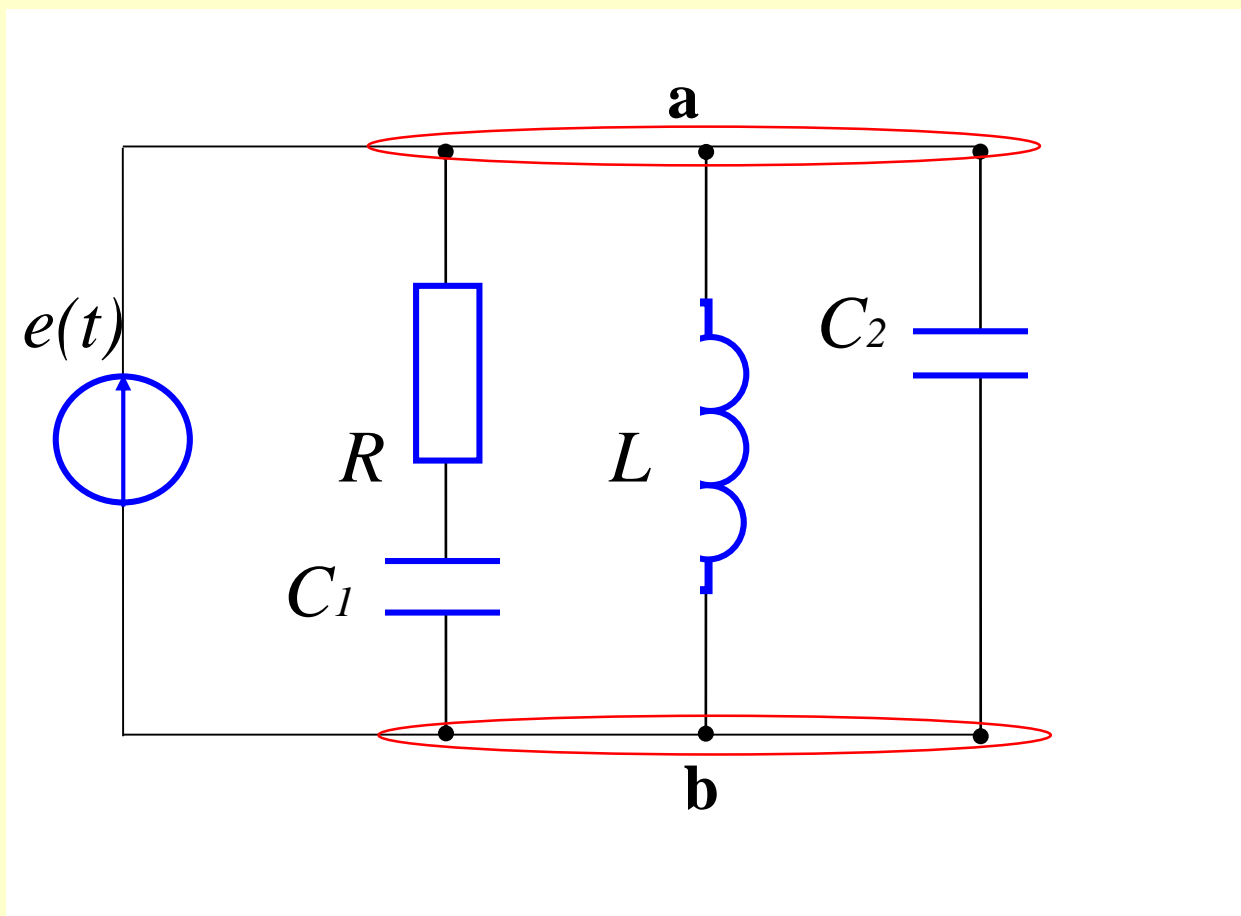


**Възел** – Точка от схемата на ел. верига, в която се събират 3 или повече клона.



- Ако има само 2 клона, то единият е продължение на другия и възелът е отстраним

**Паралелно** свързани са клонове, които се опират на едни и същи възли



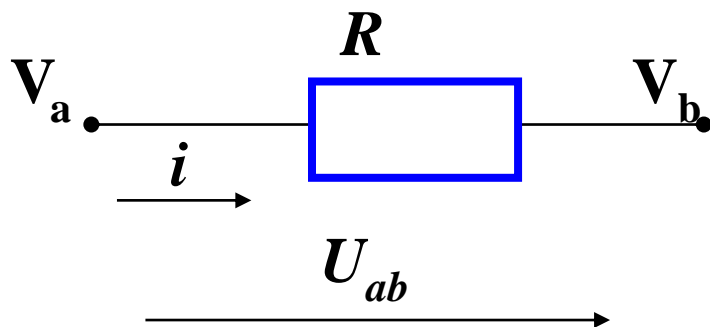
*Веригата има 2 възела и 4 клона*

## Основни закони за електрически вериги.

- Закон на Ом.
- Закони на Кирхоф. Метод с клонови токове.

### 1 Закон на Ом

#### а) Закон на Ом за част от ел. верига

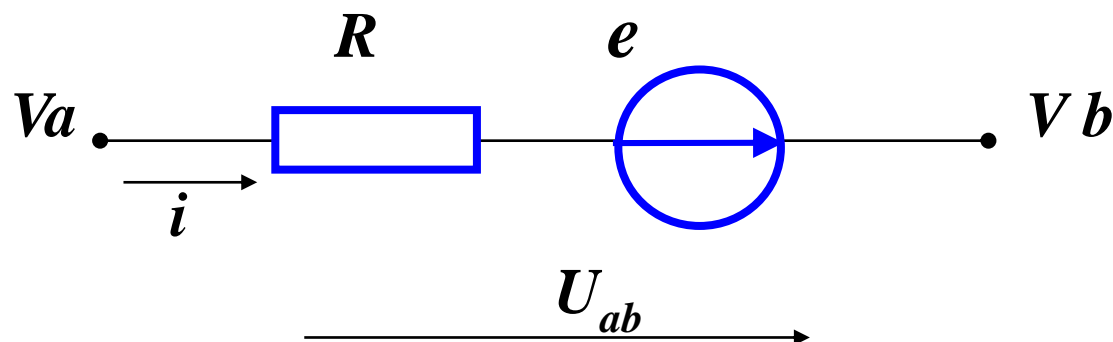


$$i = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{V_a - V_b}{R}$$

## Основни закони за електрически вериги.

- Закон на Ом.
- Закони на Кирхоф. Метод с клонови токове.

### б) Обобщен закон на Ом .

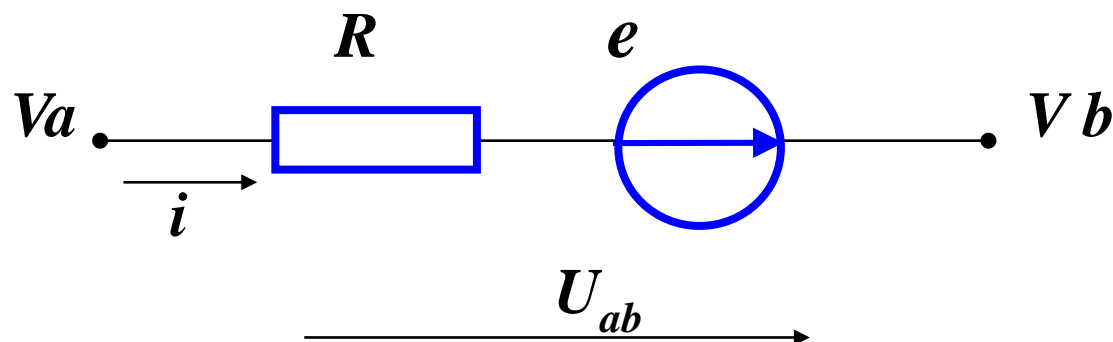


$$i = \frac{U_{ab} + e}{R} = \frac{V_a - V_b + e}{R}$$

## Основни закони за електрически вериги.

- Закон на Ом.
- Закони на Кирхоф. Метод с клонови токове.

### б) Обобщен закон на Ом .



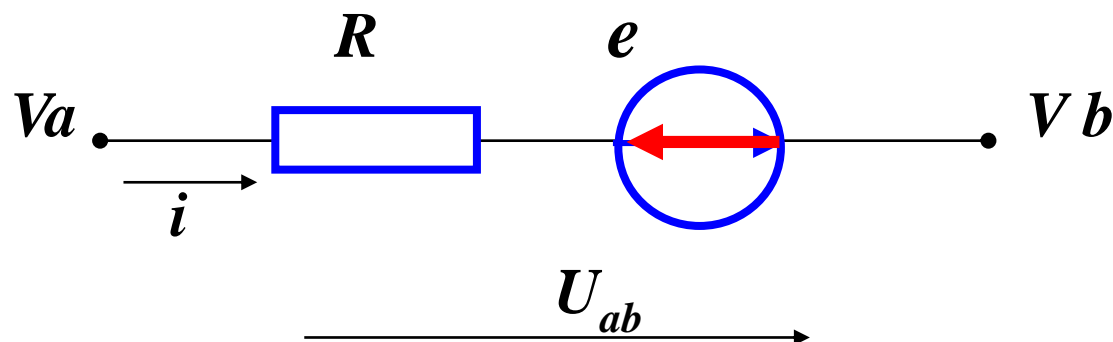
$$i = \frac{U_{ab} + e}{R} = \frac{V_a - V_b + e}{R}$$



## Основни закони за електрически вериги.

- Закон на Ом.
- Закони на Кирхоф. Метод с клонови токове.

### б) Обобщен закон на Ом .

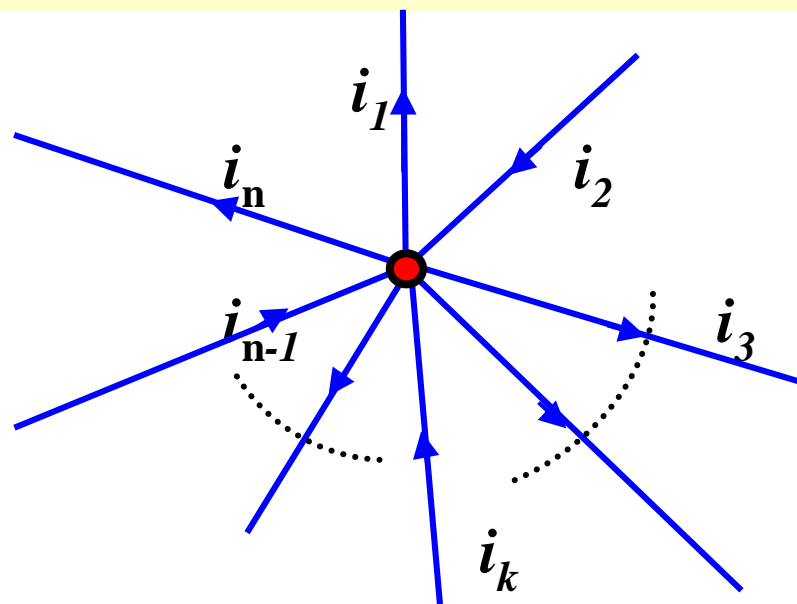


$$i = \frac{U_{ab} \ominus e}{R} = \frac{V_a - V_b \oplus e}{R}$$

# Закони на Кирхоф -- Всички електрически вериги (линейни и нелинейни), при произволен характер на изменение на токовете и напреженията се подчиняват на законите на Кирхоф.

**а) I Закон на Кирхоф - Алгебричната сума**  
на токовете в даден възел е нула. (Сумата от влизащите е равна на сумата на излизащите от възела токове.)

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$



## Пример

$$-i_1 + i_2 - i_3 + \dots + i_k + \dots + i_{n-1} - i_n = 0$$

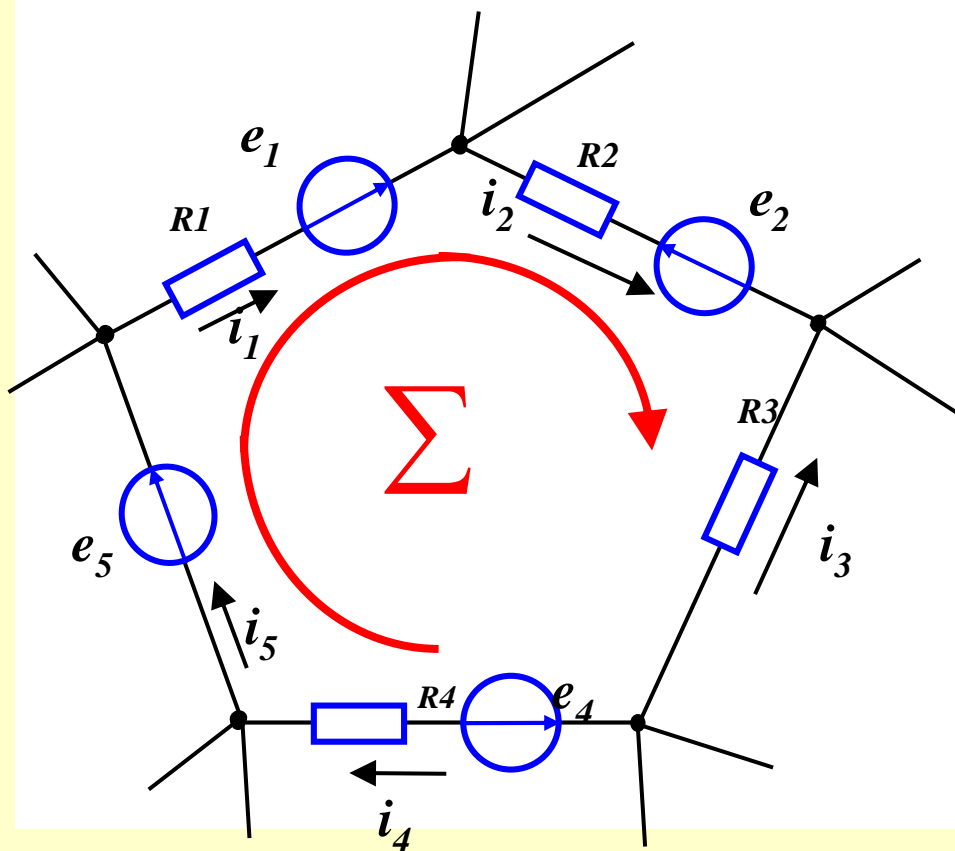
или

$$+ i_2 + \dots + i_k + \dots + i_{n-1} = i_1 + i_3 + \dots + i_n$$

**б) II Закон на Кирхоф - Алгебричната сума** на напреженията за даден контур е равна на **алгебричната сума** на напреженията на източниците на е.д.н. в контура.

$$\sum_{k=1}^m i_k R_k = \sum_{k=1}^m e_k$$

(Алгебричната сума на напреженията в произволен затворен контур е нула.)



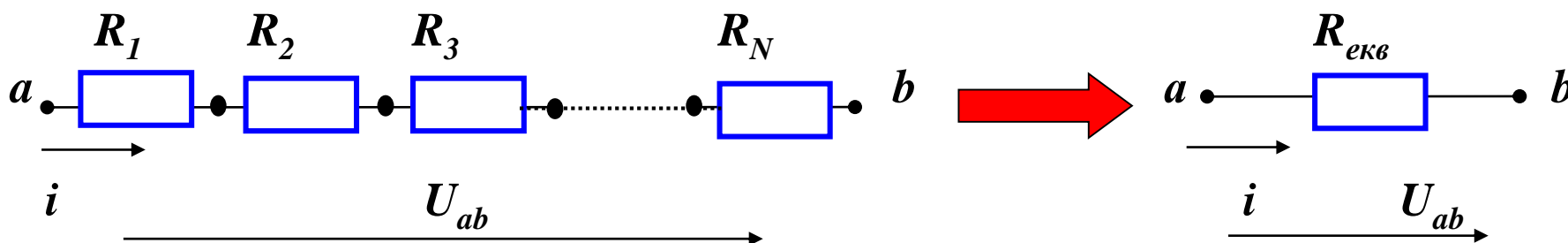
Пример

$$\begin{aligned} i_1 R_1 + i_2 R_2 - i_3 R_3 + i_4 R_4 &= \\ &= e_1 - e_2 - e_4 + e_5 \end{aligned}$$

# Преобразуване на електрически вериги

## 1. Преобразуване на пасивни електрически вериги

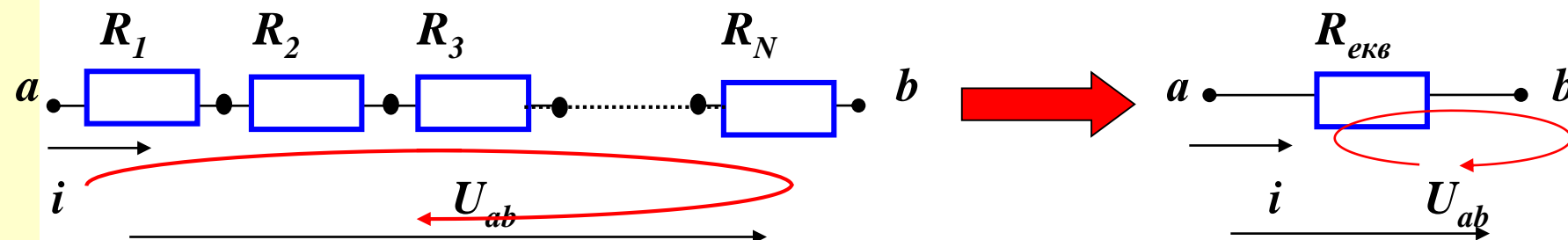
### а) Последователно свързване на пасивни елементи



$$R_{екв} = \sum_{k=1}^N R_k$$

## Последователно свързване на пасивни елементи

$$R_{екв} = \sum_{k=1}^N R_k$$



## Доказателство

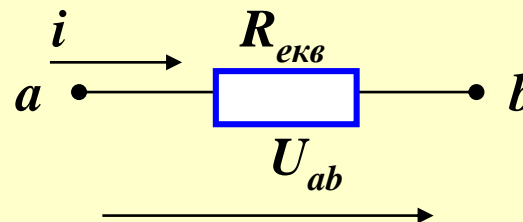
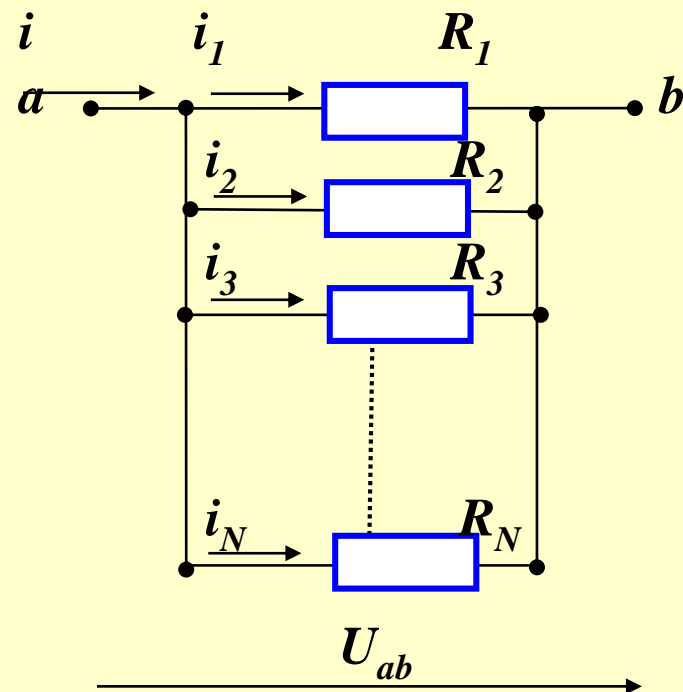
През последователно свързаните  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_k, R_N$  тече един и същи ток  $i$ .

От II закон на Кирхоф:

$$iR_1 + iR_2 + iR_3 + \dots + iR_k + \dots + iR_N - U_{ab} = 0$$

$$\Rightarrow U_{ab} = iR_1 + iR_2 + iR_3 + \dots + iR_k + \dots + iR_N = i(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_k + \dots + R_N) = iR_{екв}$$

Следователно:  $R_{екв} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_k + \dots + R_N$

**б) Паралелно свързване на пасивни елементи**

$$\frac{1}{R_{екв}} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}$$

**Доказателство**

Към паралелно свързаните  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_k, R_N$  е приложено едно и също напрежение  $U_{ab}$ .

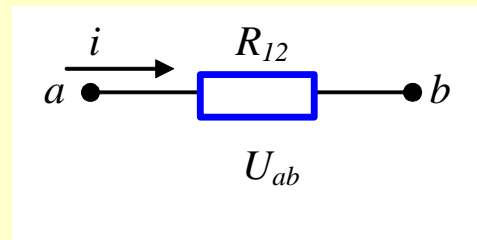
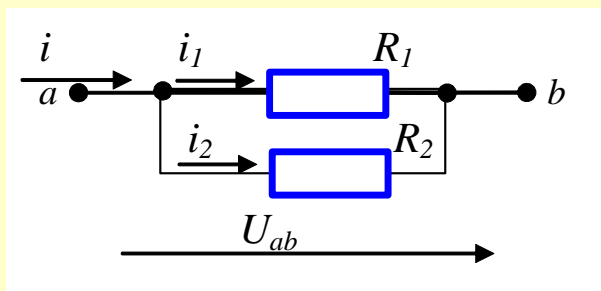
- За всеки клон  $k$  токът  $i_k$  се определя съгласно закона на Ом:  $i_k = U_{ab} / R_k$
- От I закон на Кирхоф за възел  $a$  :

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_k + \dots + i_N = \frac{U_{ab}}{R_1} + \frac{U_{ab}}{R_2} + \frac{U_{ab}}{R_3} + \dots + \frac{U_{ab}}{R_k} + \dots + \frac{U_{ab}}{R_N} = \\ &= U_{ab} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_k} + \dots + \frac{1}{R_N} \right) = \frac{U_{ab}}{R_{екв}} \end{aligned}$$

**Следователно:**

$$\frac{1}{R_{екв}} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}$$

# Паралелно свързване на две съпротивления



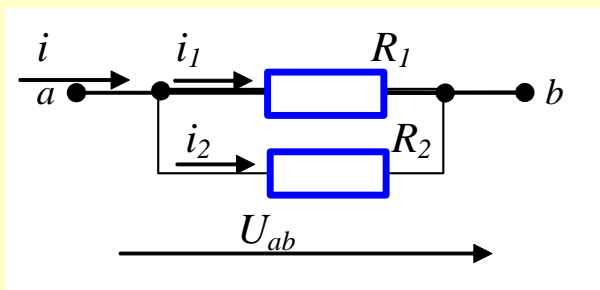
$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

- Токовете през двата паралелни клона се разпределят **обратно пропорционално** на големината на съпротивленията

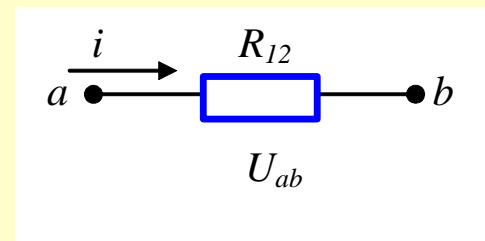
$$i_1 = i \frac{R_2}{R_2 + R_1};$$

$$i_2 = i \frac{R_1}{R_2 + R_1}$$

# Паралелно свързване на две съпротивления



$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



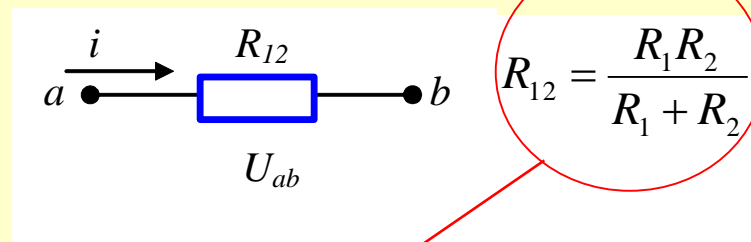
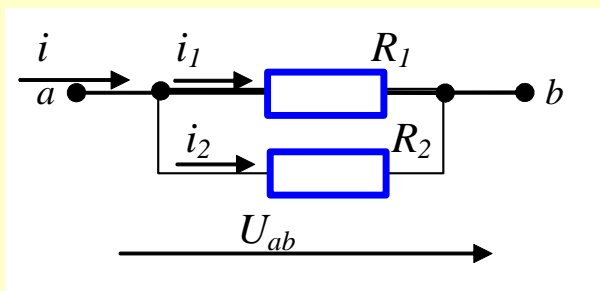
Доказателство:

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}$$

$$\Rightarrow R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_2 + R_1}$$



# Паралелно свързване на две съпротивления



$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

- Токовете през двата паралелни клона се разпределят **обратно пропорционално** на големината на съпротивленията

$$i_1 = i \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2};$$

$$i_2 = i \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

**Доказателство:**

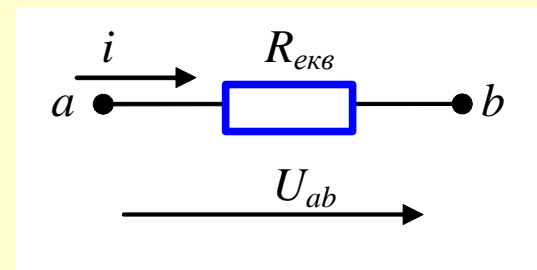
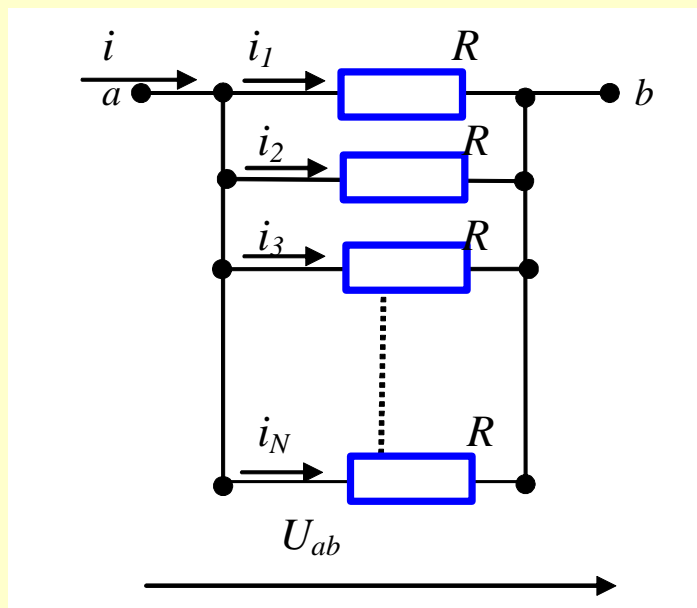
$$i_1 = \frac{U_{ab}}{R_1} = \frac{i \cdot R_{12}}{R_1} = \frac{i \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{R_1} = i \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow i_1 = i \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

аналогично

$$\Rightarrow i_2 = i \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

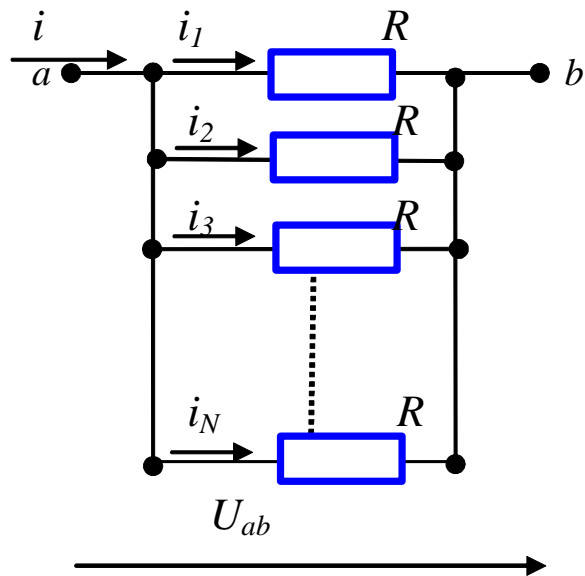
# Паралелно свързване на N на брой еднакви съпротивления



$$R_{екв} = \frac{R}{N};$$

$$i_1 = i_2 = i_3 = \dots = i_k = \frac{i}{N}$$

## Паралелно свързване на N на брой еднакви съпротивления



$$i_1 = i_2 = i_3 = \dots = i_N = \frac{i}{N}$$

### Доказателство:

$$i_1 = \frac{U_{ab}}{R};$$

$$i_2 = \frac{U_{ab}}{R};$$

$$i_3 = \frac{U_{ab}}{R};$$

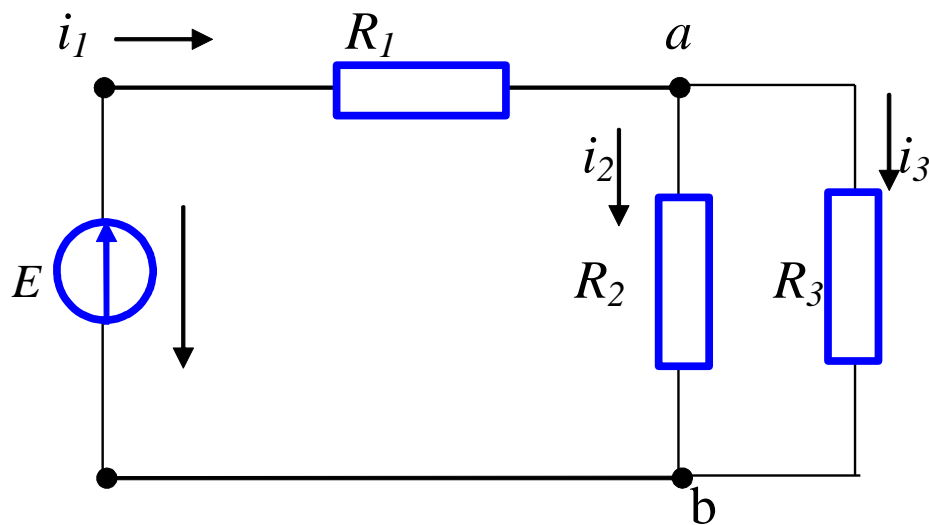
$$i_N = \frac{U_{ab}}{R};$$

$$i_1 = i_2 = i_3 = \dots = i_N = \frac{U_{ab}}{R}$$

НО ОТ ПЪРВИЯ ЗАКОН НА КИРХОФ:

$$i = i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_k + \dots + i_N = N \cdot i_1$$

$$i_1 = i_2 = i_3 = \dots = i_N = \frac{i}{N}$$

**Пример:****Известно**

$$R_1 = 4\Omega, \quad R_2 = 15\Omega, \quad R_3 = 10\Omega$$

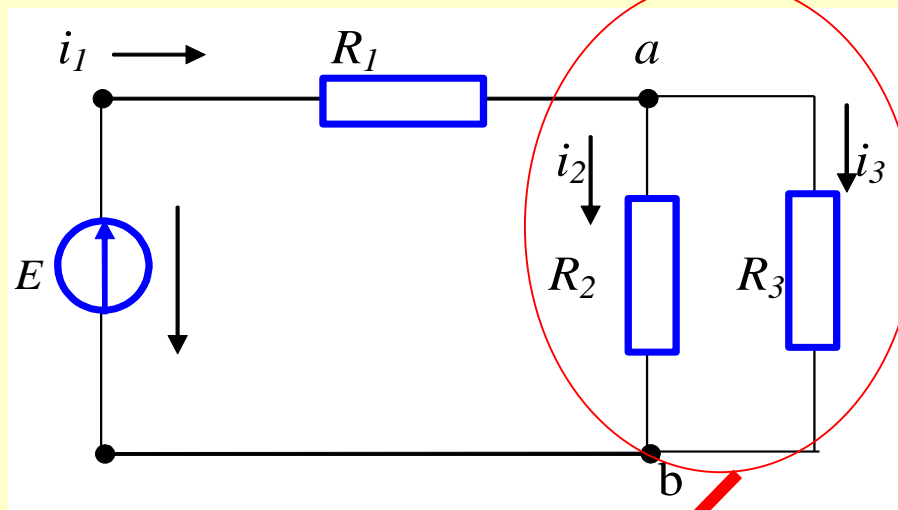
$$E = 100V$$

**Да се определи:**

$$R_{eq} = ?$$

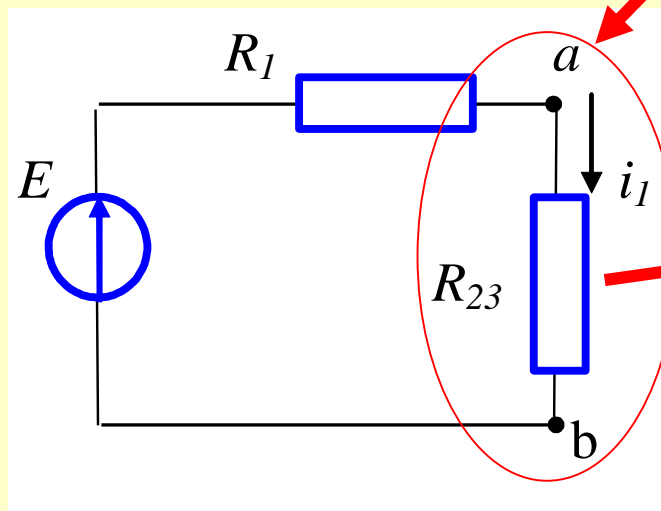
$$i_1 = ?, \quad i_2 = ? \text{ и } i_3 = ?$$

$$U_{ab} = ?$$

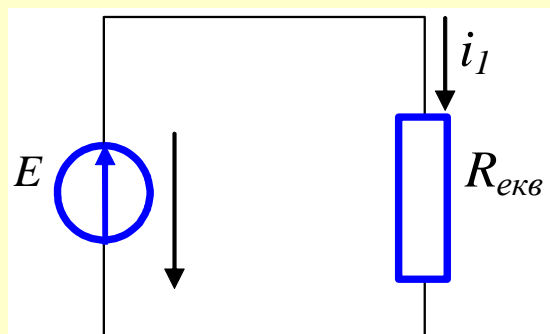
**Известно**

$$R_1 = 4\Omega, \quad R_2 = 15\Omega, \quad R_3 = 10\Omega$$

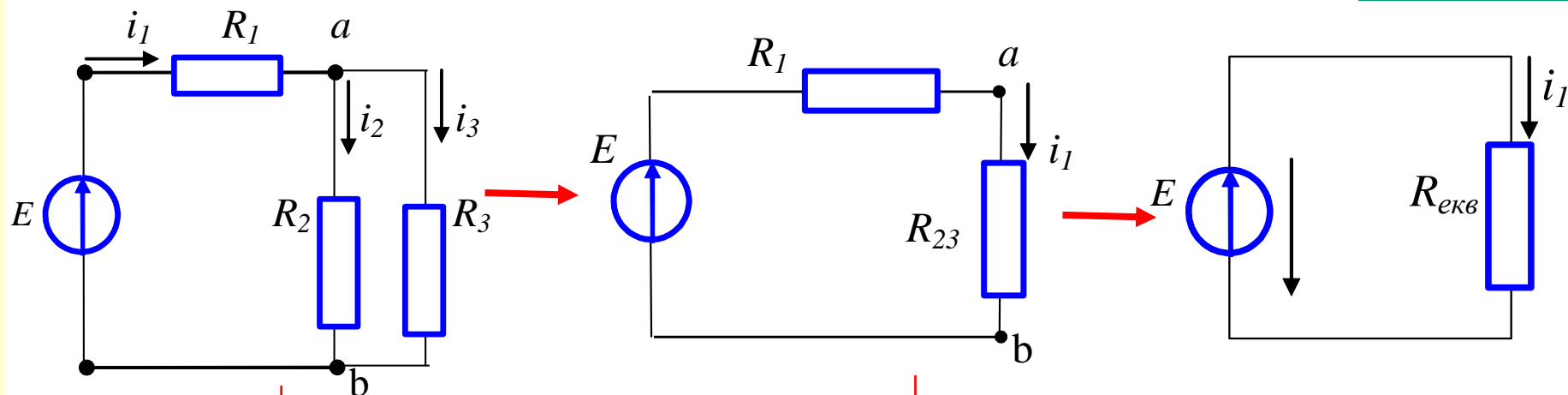
$$E = 100V$$



$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{15 \cdot 10}{25} = 6\Omega$$



$$R_{ekb} = R_1 + R_{23} = 4 + 6 = 10\Omega$$



$$i_2 = i_1 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 10 \cdot \frac{10}{25} = 4A$$

$$i_3 = i_1 - i_2 = 10 - 4 = 6A$$

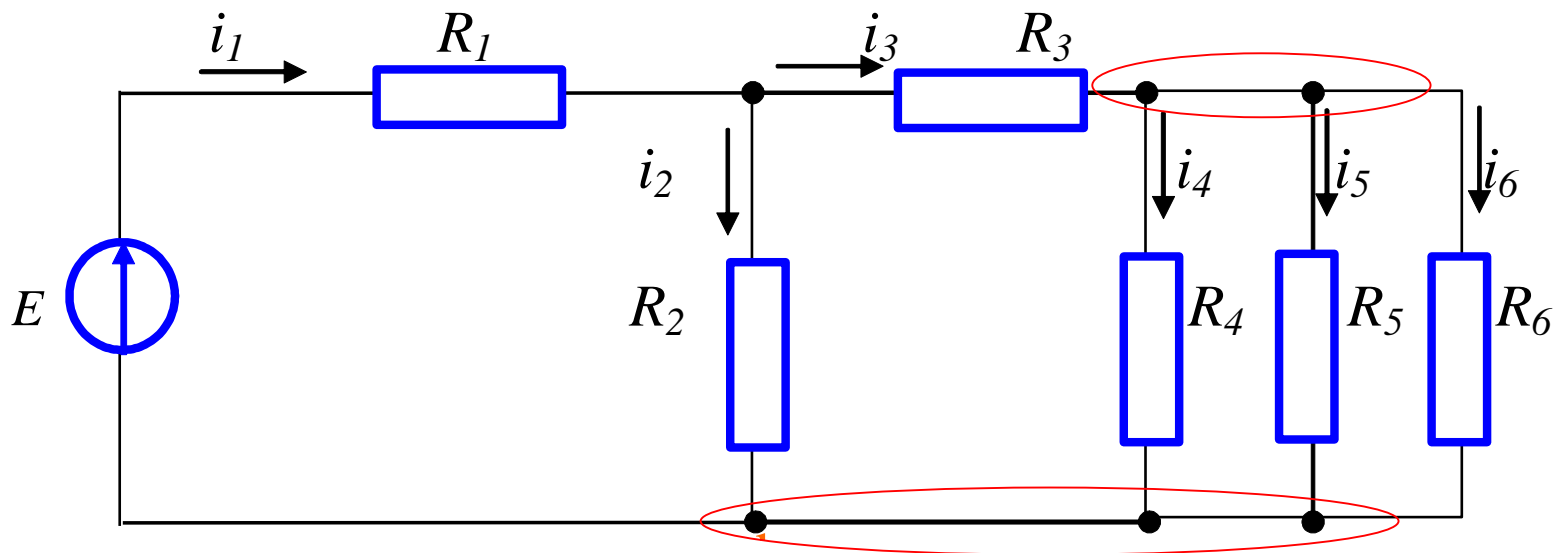
$$U_{ab} = i_1 \cdot R_{23} = 10 \cdot 6 = 60V$$

$$i_1 = \frac{E}{R_{\text{экв}}} = \frac{100}{10} = 10A$$

## Пример:

### Известно

$$R1=5\Omega, \quad R2=10\Omega, \quad R3=5\Omega, \quad R4=R5=R6=30\Omega, \quad E=500V$$

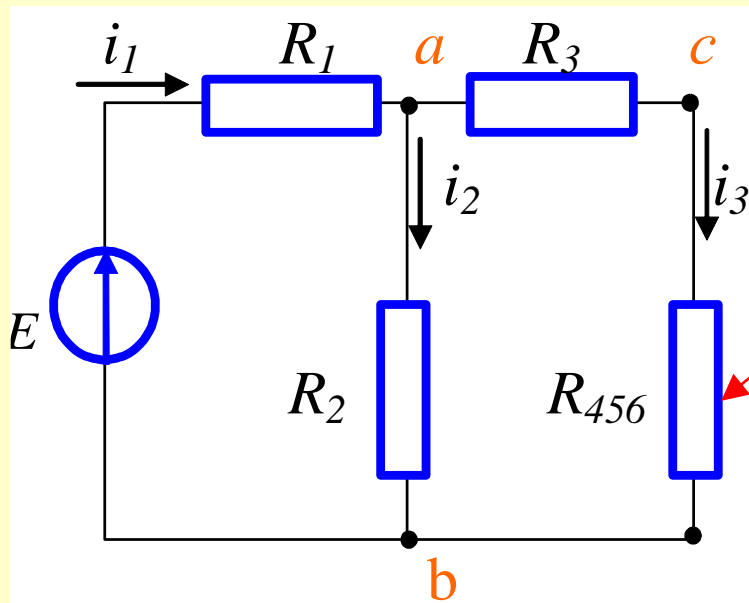
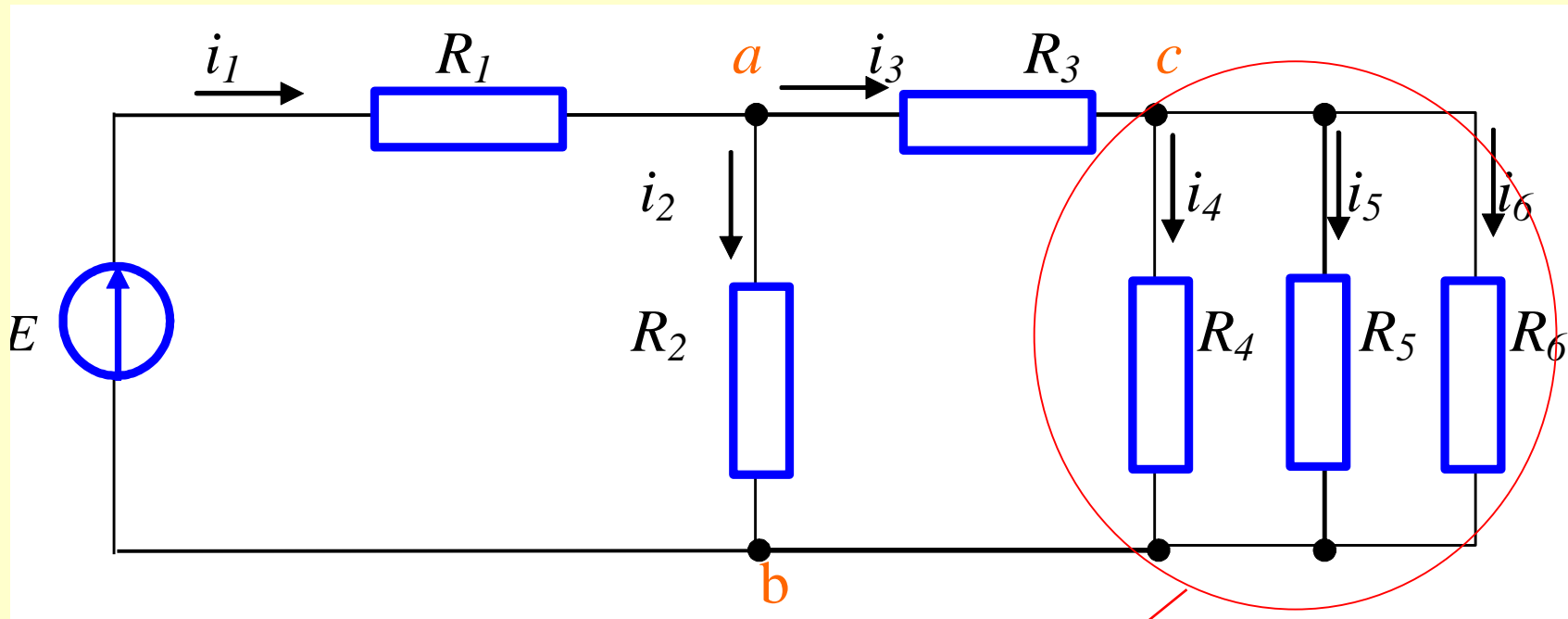


### Да се определи:

$$R_{eq}=?$$

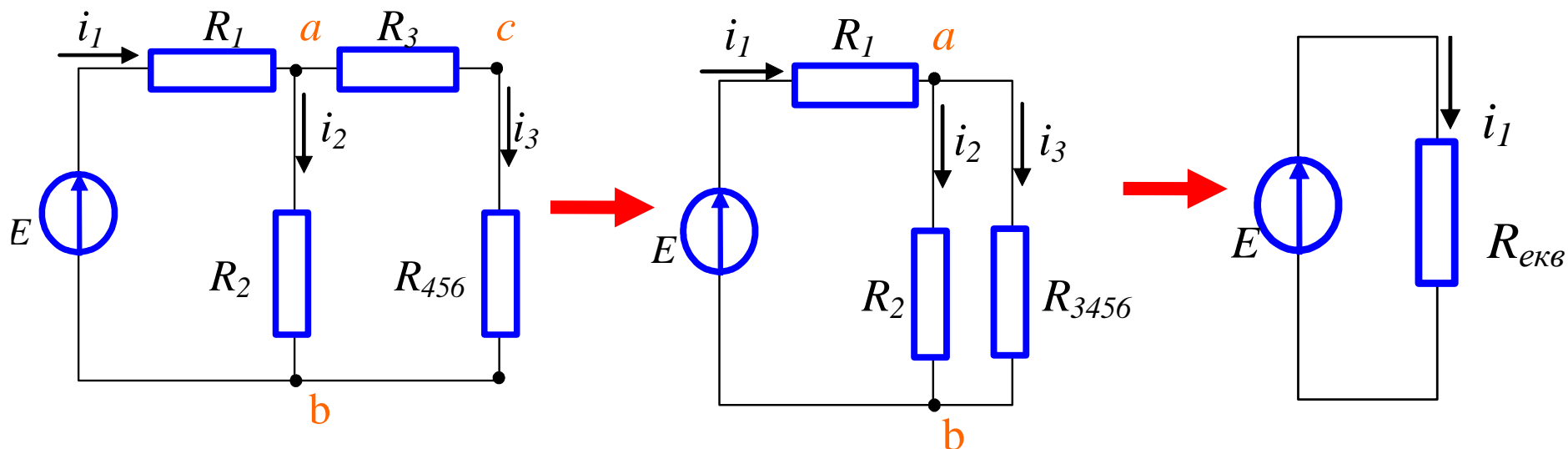
$$i_1=?, \quad i_2=?, \quad i_3=?, \quad i_4=?, \quad i_5=?, \quad i_6=?$$

$$R1=5\Omega, \quad R2=10\Omega, \quad R3=5\Omega, \quad R4=R5=R6=30\Omega, \quad E=500V$$



$$R_{456} = \frac{R_4}{3} = \frac{30}{3} = 10\Omega$$

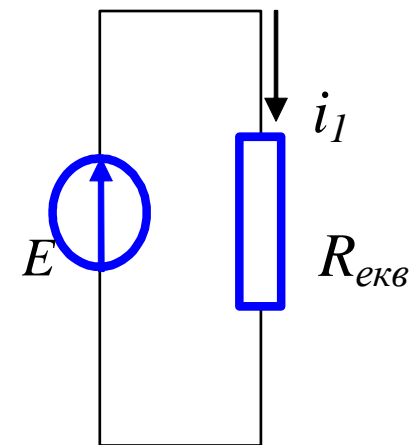
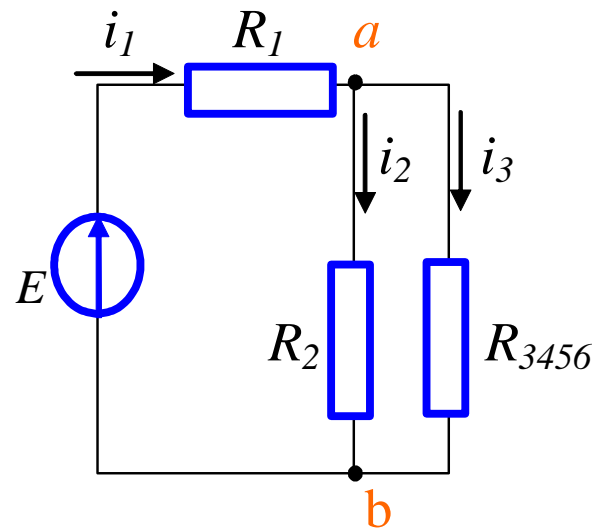
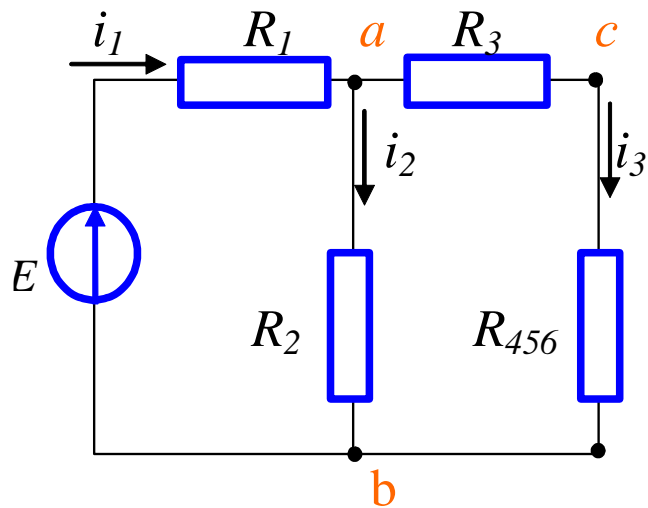




$$R_{456} = \frac{R_4}{3} = \frac{30}{3} = 10\Omega$$

$$R_{3456} = R_3 + R_{456} = 5 + 10 = 15\Omega$$

$$R_{екв} = R_1 + \frac{R_2 R_{3456}}{R_2 + R_{3456}} = 4 + \frac{10 \cdot 15}{25} = 10\Omega$$



$$U_{ab} = i_2 \cdot R_2 = 30 \cdot 10 = 300V$$

$$U_{cb} = i_3 \cdot R_{456} = 20 \cdot 10 = 200V$$

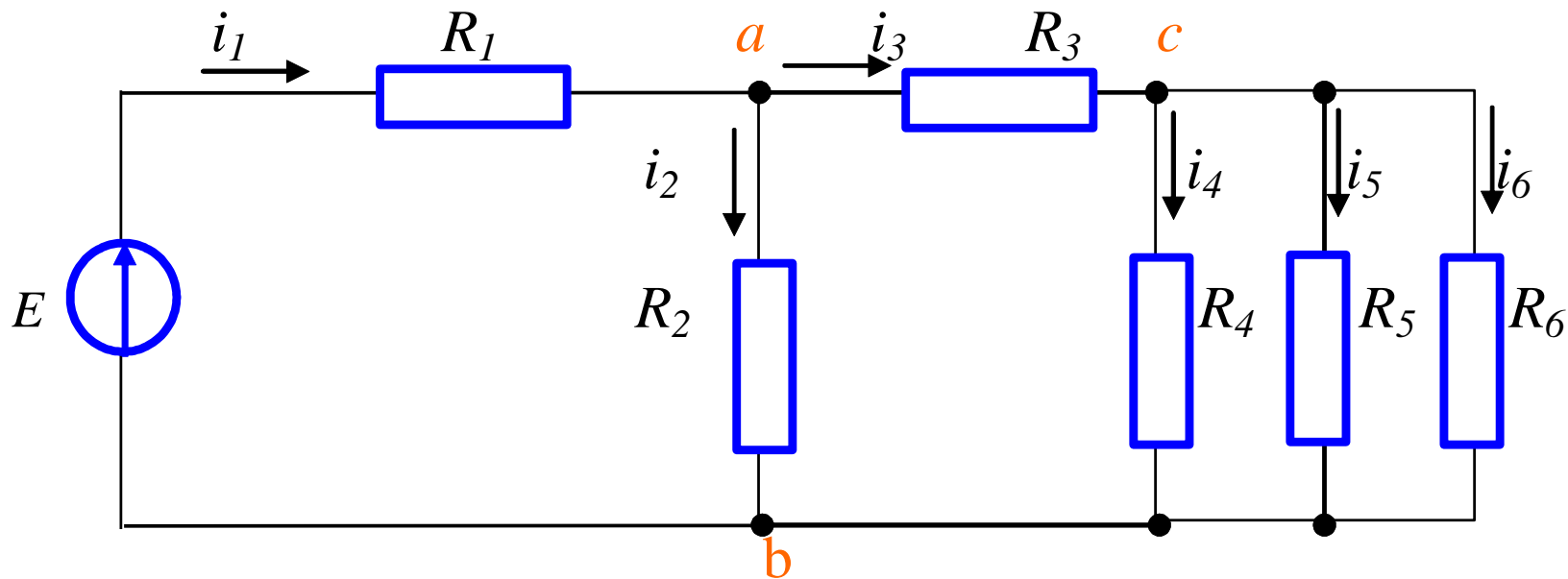
$$U_{ac} = i_3 \cdot R_3 = 20 \cdot 5 = 100V$$

$$\begin{aligned} i_2 &= i_1 \cdot \frac{R_{3456}}{R_2 + R_{3456}} \\ &= 50 \cdot \frac{15}{25} = 30A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_3 &= i_1 - i_2 = \\ 50 - 30 &= 20A \end{aligned}$$

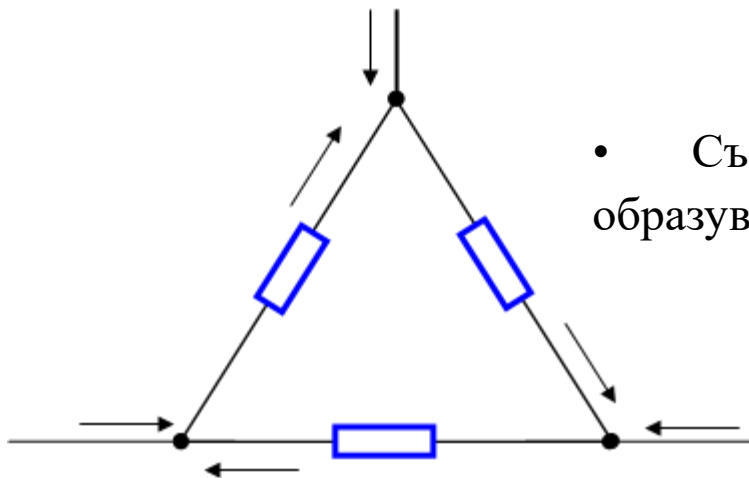
$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{E}{R_{екв}} \\ &= \frac{500}{10} = 50A \end{aligned}$$

$$\dot{i}_3 = 20\text{A}, \quad R_4 = R_5 = R_6 = 30\ \Omega$$
$$\dot{i}_4 = ?, \quad \dot{i}_5 = ?, \quad \dot{i}_6 = ?$$

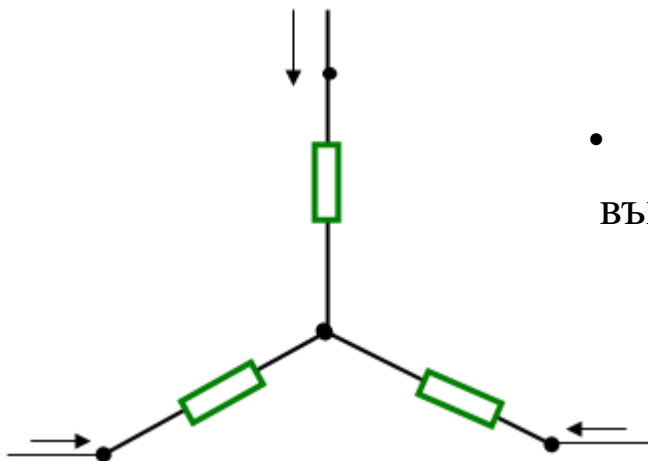


$$i_4 = i_5 = i_6 = \frac{i_3}{3} = \frac{20}{3} = 6.67\text{A}$$

- Еквивалентно преобразуване на съпротивления  
“триъгълник” в свързване “звезда” ( $\Delta \rightarrow Y$ ) и обратно.



- Съединението на 3 съпротивления така че да образуват страни на триъгълник – “триъгълник”.



- Съединението на 3 съпротивления  
във вид на 3-лъчева звезда - “звезда”,

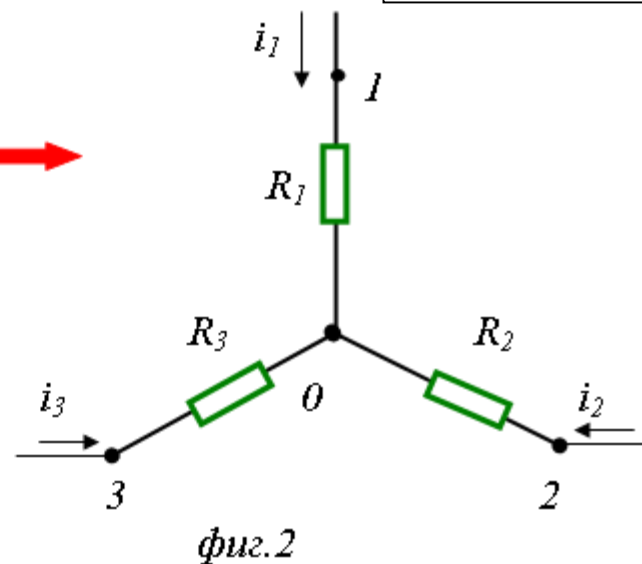
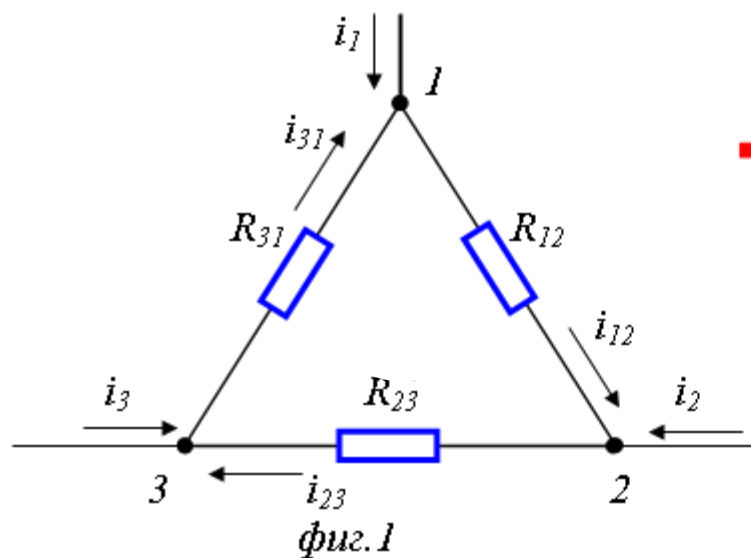
- Еквивалентно преобразуване на съпротивления  
“триъгълник” в свързване “звезда” ( $\Delta \rightarrow Y$ ).

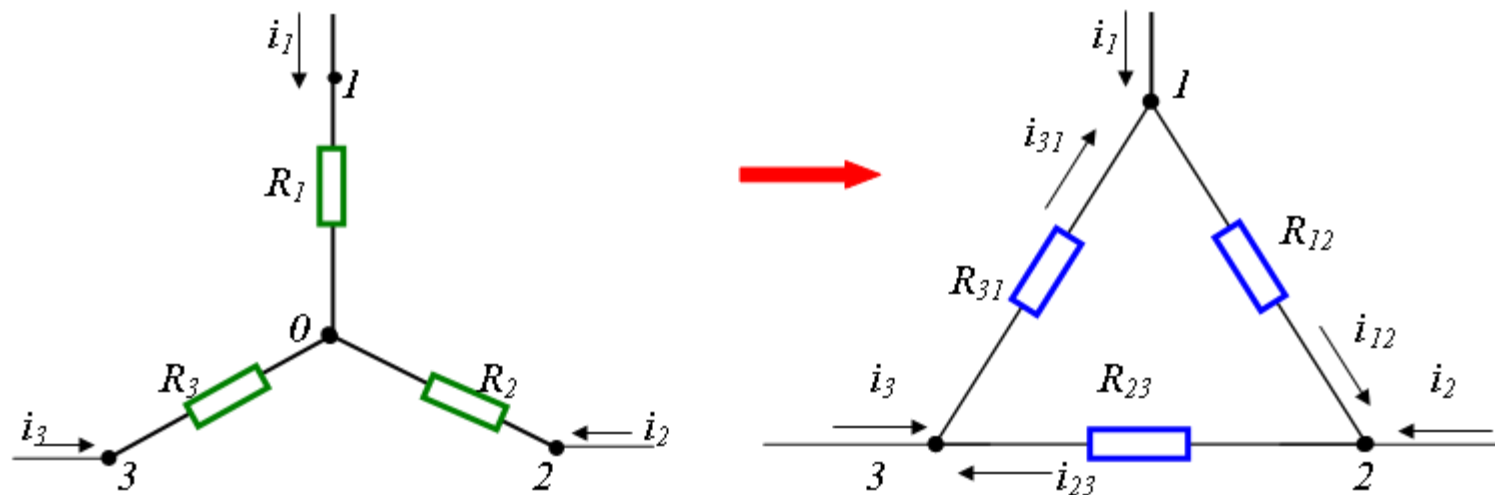
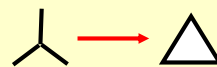
## а) Преобразуване $\Delta \rightarrow Y$

$$R_1 = \frac{R_{31}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

$$R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

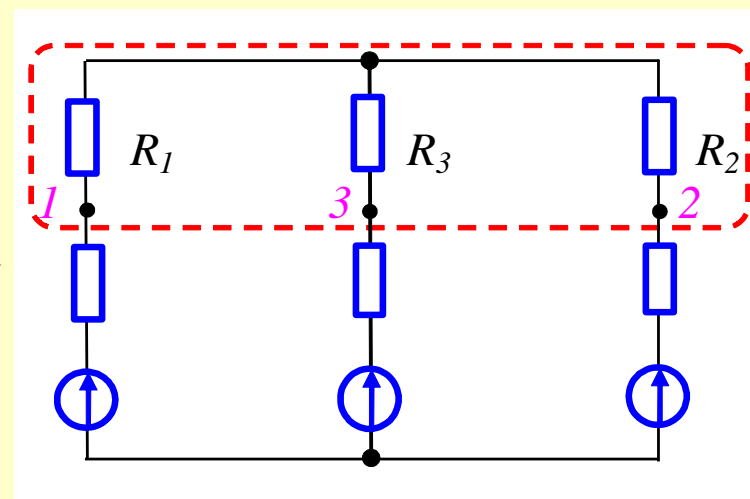
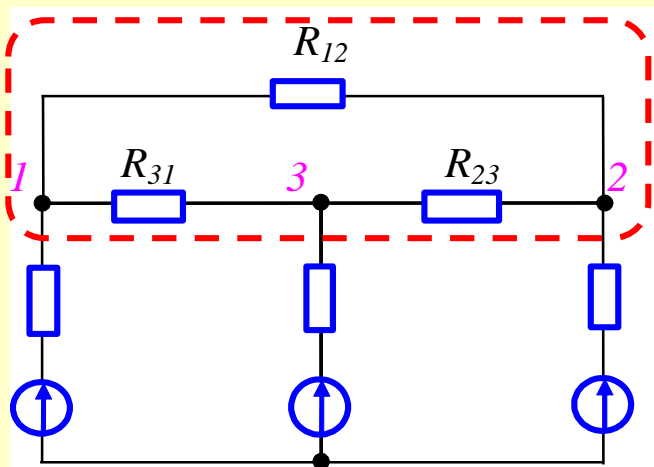
$$R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$



б) Преобразуване

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad R_2 = \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad R_3 = \frac{R_{31}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

# Пример: преобразуване $\triangle \rightarrow \gamma$



- $R_{12}=2\Omega; \quad R_{23}=3\Omega \quad R_{31}=5\Omega$

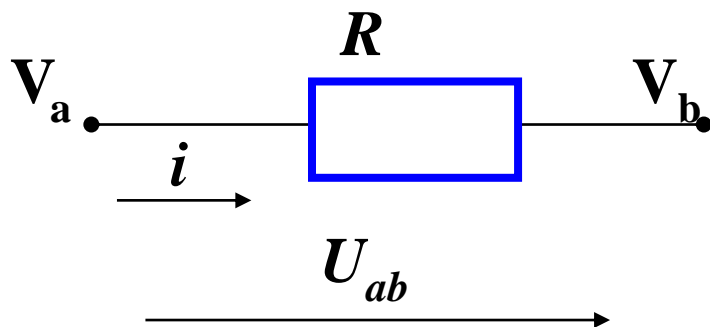
$$\Rightarrow R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} = 1\Omega \quad R_2 = \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} = 0.6\Omega \quad R_3 = \frac{R_{31}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} = 1.5\Omega$$

## Основни закони за електрически вериги.

- Закон на Ом.
- Закони на Кирхоф. Метод с клонови токове.

### 1 Закон на Ом

#### а) Закон на Ом за част от ел. верига



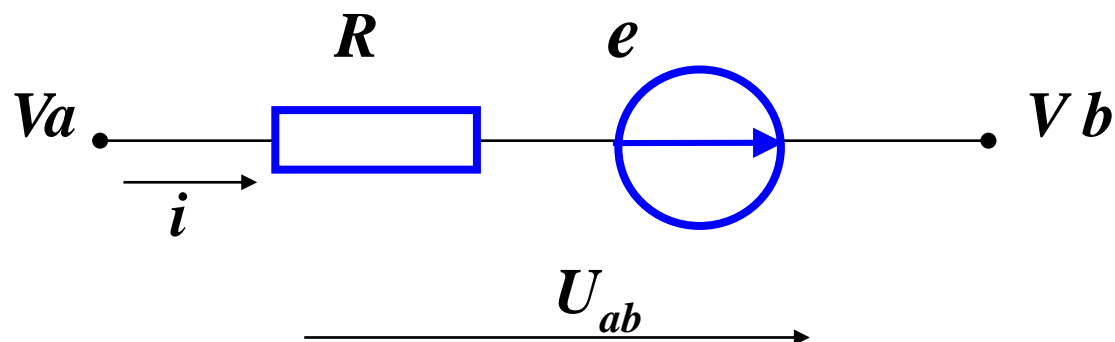
$$i = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{V_a - V_b}{R}$$



## Основни закони за електрически вериги.

- Закон на Ом.
- Закони на Кирхоф. Метод с клонови токове.

### б) Обобщен закон на Ом .

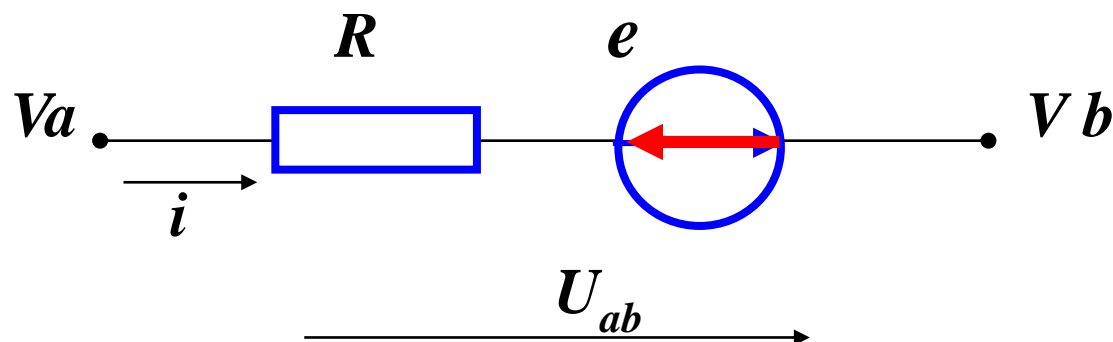


$$i = \frac{U_{ab} + e}{R} = \frac{V_a - V_b + e}{R}$$

## Основни закони за електрически вериги.

- Закон на Ом.
- Закони на Кирхоф. Метод с клонови токове.

### б) Обобщен закон на Ом .

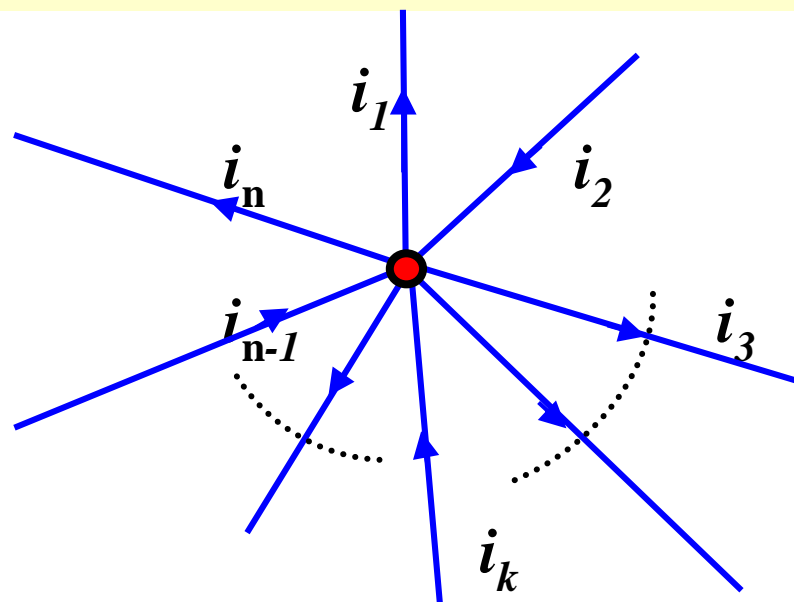


$$i = \frac{U_{ab} - e}{R} = \frac{V_a - V_b + e}{R}$$

**Закони на Кирхоф** -- Всички електрически вериги (линейни и нелинейни), при произволен характер на изменение на токовете и напреженията се подчиняват на законите на Кирхоф.

**а) I Закон на Кирхоф - Алгебричната сума**  
на токовете в даден възел е нула. (Сумата от влизащите е равна на сумата на излизащите от възела токове.)

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$



Пример

$$-i_1 + i_2 - i_3 + \dots + i_k + \dots + i_{n-1} - i_n = 0$$

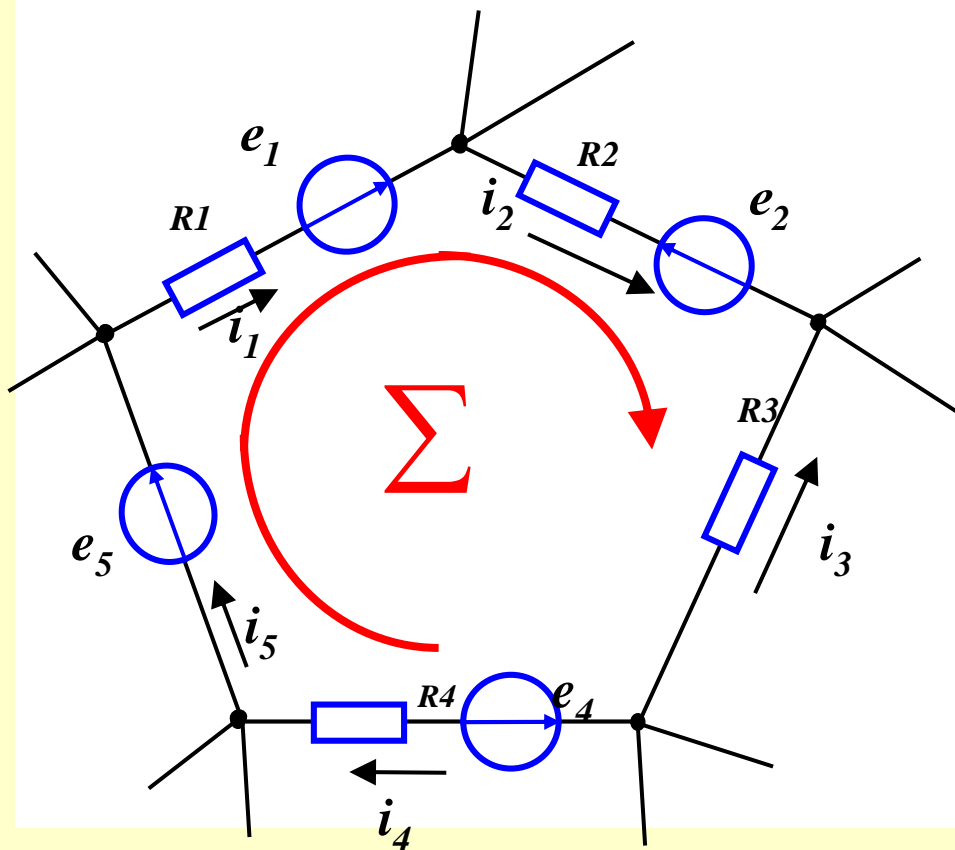
или

$$+ i_2 + \dots + i_k + \dots + i_{n-1} = i_1 + i_3 + \dots + i_n$$

**б) II Закон на Кирхоф - Алгебричната сума** на напреженията за даден контур е равна на **алгебричната сума** на напреженията на източниците на е.д.н. в контура.

$$\sum_{k=1}^m i_k R_k = \sum_{k=1}^m e_k$$

(Алгебричната сума на напреженията в произволен затворен контур е нула.)

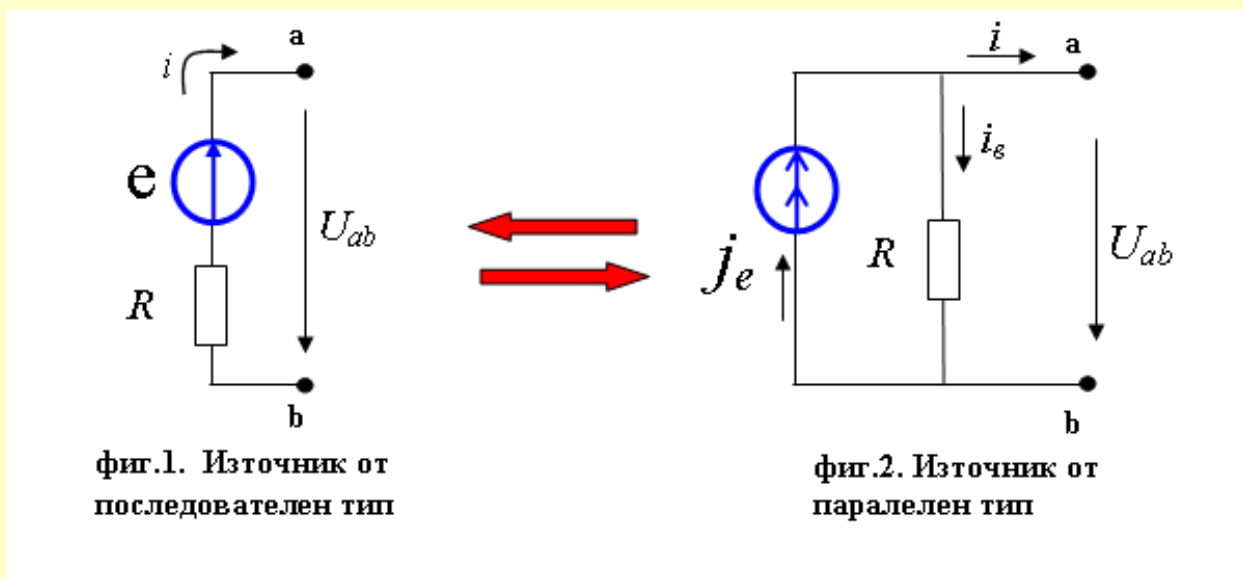


Пример

$$\begin{aligned} i_1 R_1 + i_2 R_2 - i_3 R_3 + i_4 R_4 &= \\ &= e_1 - e_2 - e_4 + e_5 \end{aligned}$$

# Преобразуване на активни участъци от ел. вериги

Еквивалентни схеми на активни двуполюсници от последователен и от паралелен тип. Взаимно преминаване

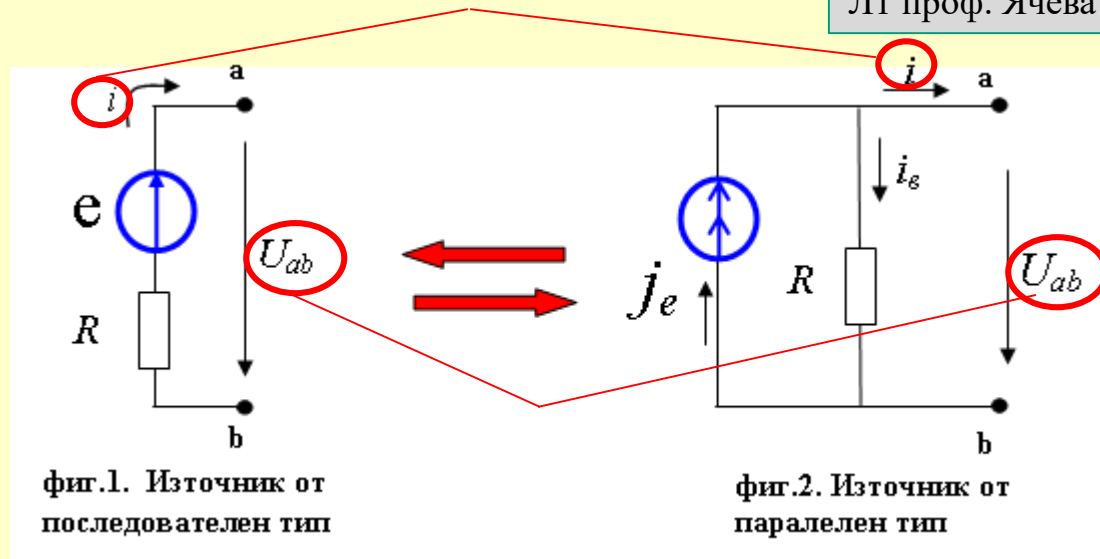


$$e = j_e R$$

$$j_e = \frac{e}{R}$$

## Доказателство

- Двата двуполюсника са еквивалентни.
- Следователно токът  $i$  и напрежението  $U_{ab}$  на изводите им са едни и същи.



за източника от последователен тип:

$$U_{ab} = e - iR$$

за източника от паралелен тип :

$$j_e = i + i_e$$

$$\Rightarrow U_{ab} = i_e R =$$

$$\Rightarrow (j_e - i) R = j_e R - iR$$

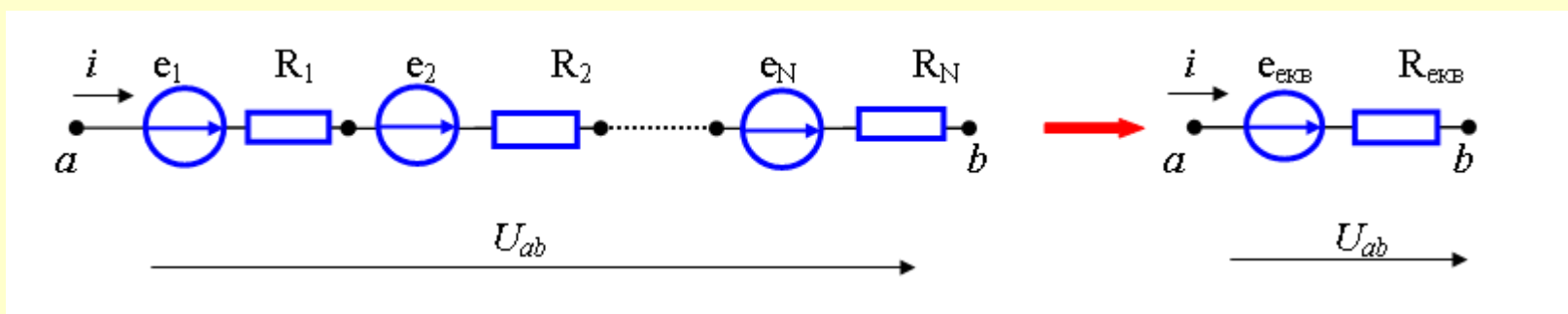
$$\Rightarrow U_{ab} = j_e R - iR$$

но  $U_{ab}$  е едно и също  $\Rightarrow e - iR = j_e R - iR$

$$\Rightarrow e = j_e R$$

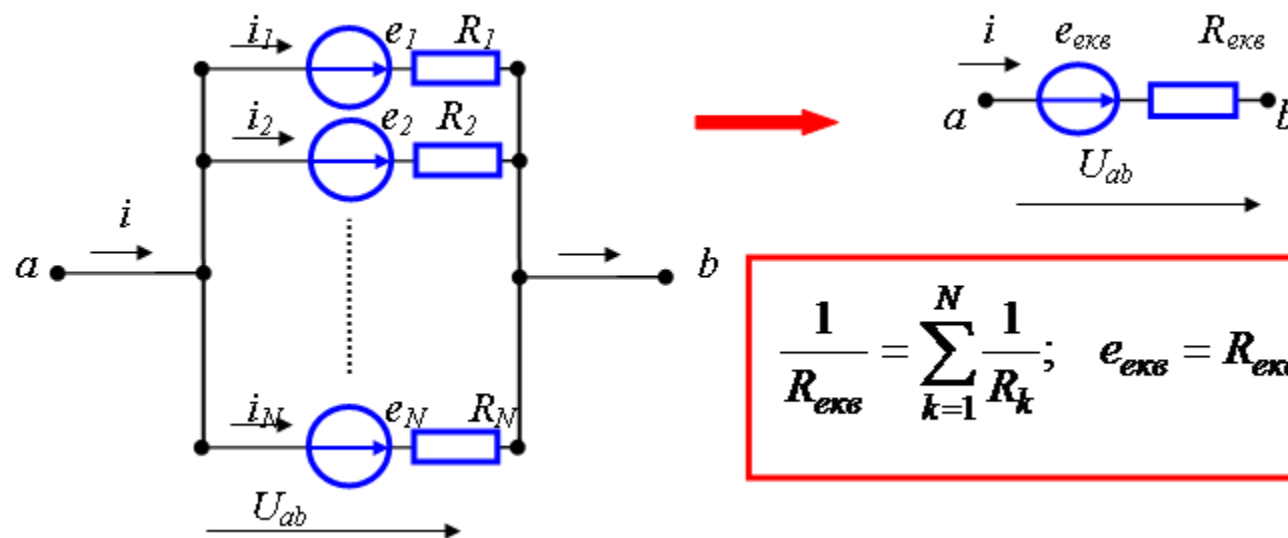
# Преобразуване на съединение от активни двуполусници.

## а) Преобразуване на последователно свързани клонове



$$R_{екв} = \sum_{k=1}^N R_k; \quad e_{екв} = \sum_{k=1}^N e_k$$

## б) Преобразуване на паралелно свързани клонове

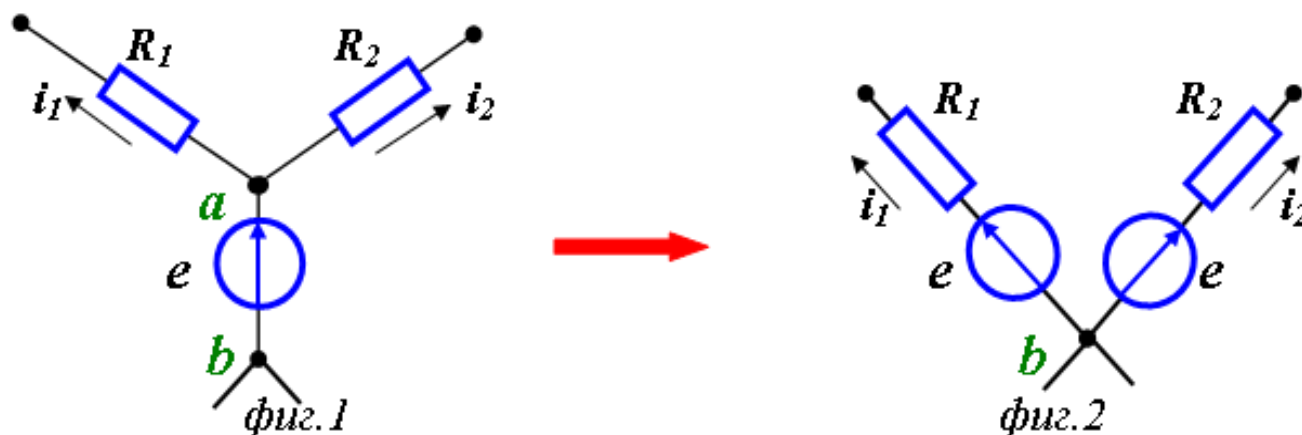


$$\frac{1}{R_{\text{екв}}} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}; \quad e_{\text{екв}} = R_{\text{екв}} \sum_{k=1}^N \frac{e_k}{R_k}$$

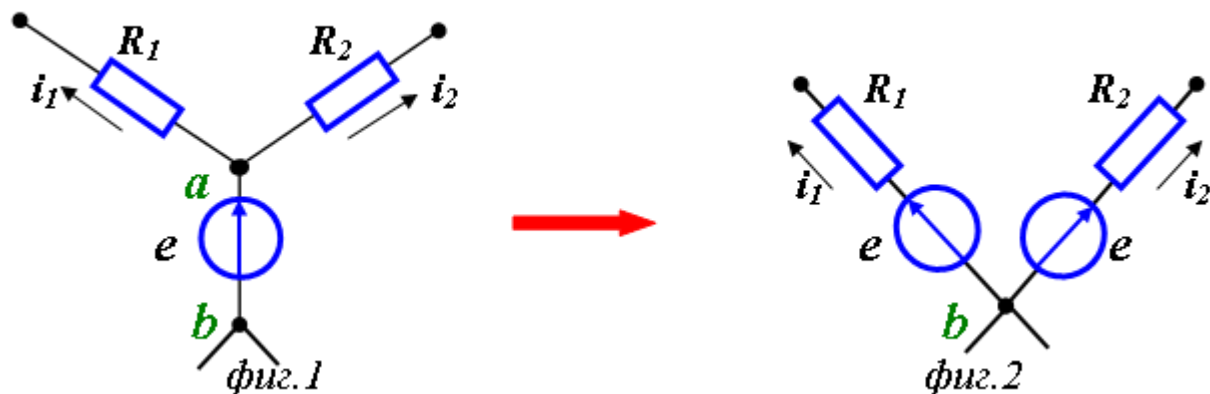


## в) Прехвърляне на източник на е.д.н. през възел

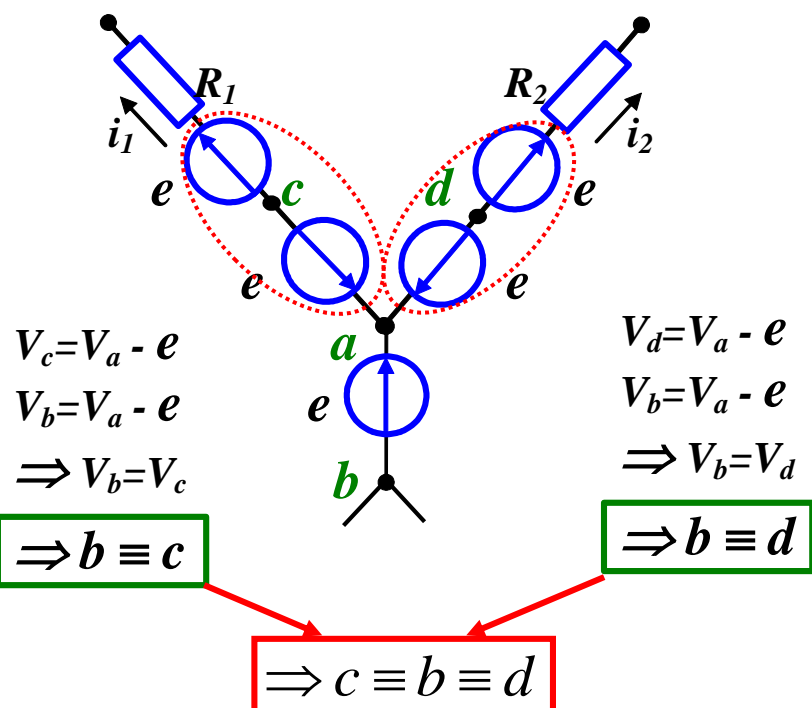
Този тип преобразуване се налага понякога с цел упростиаване на анализа на веригата или за удобство при прилагане на определен метод.



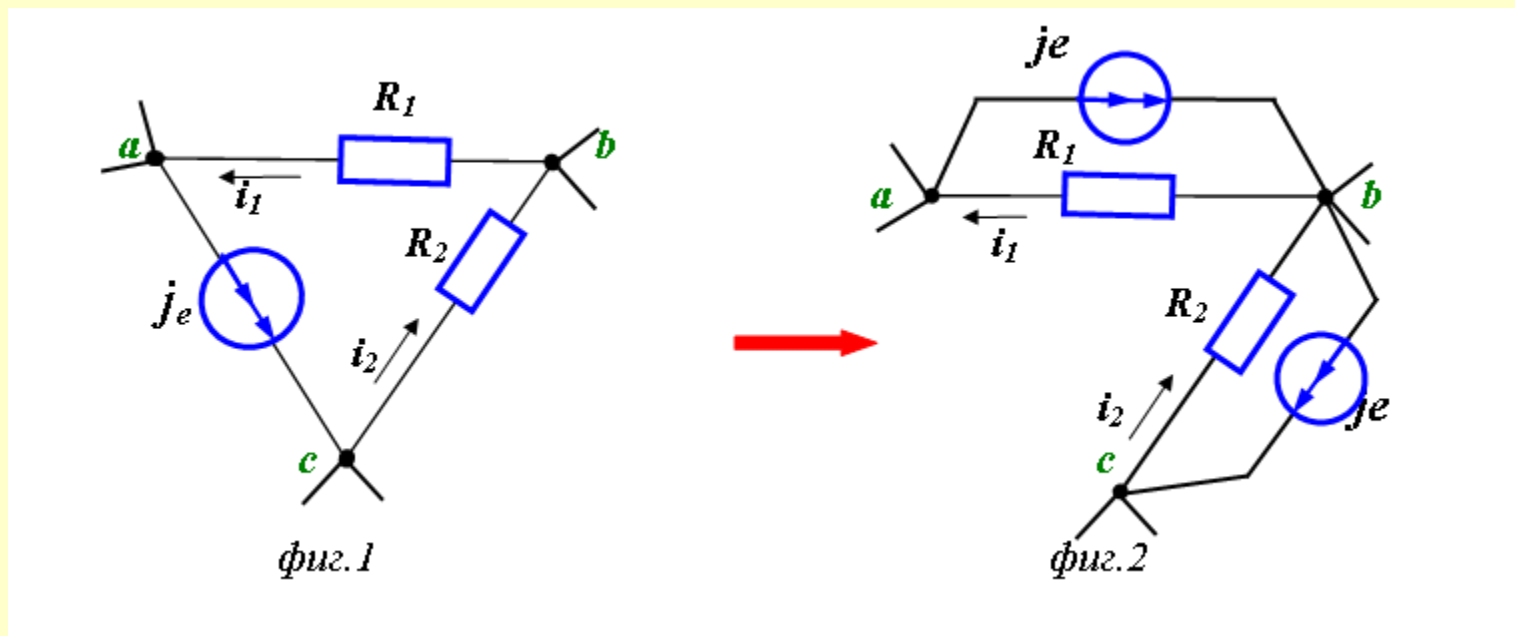
# Прехвърляне на източник на е.д.н. през възел

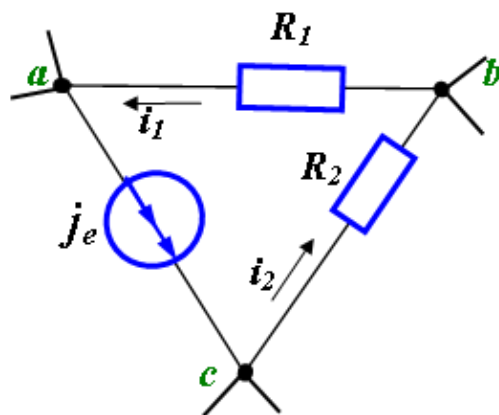


## Доказателство

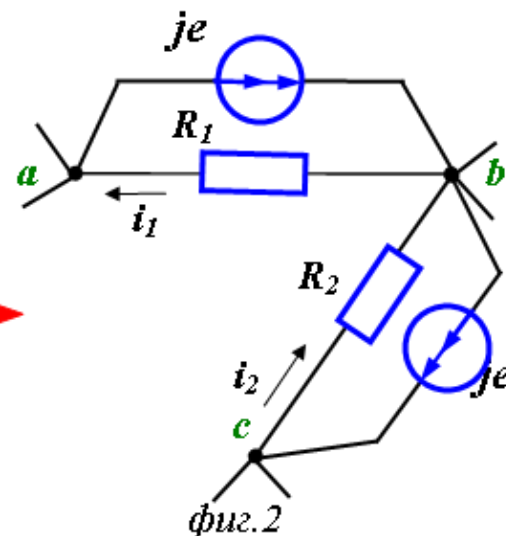


## г) Пренасяне на източник на е.д.т. в контур



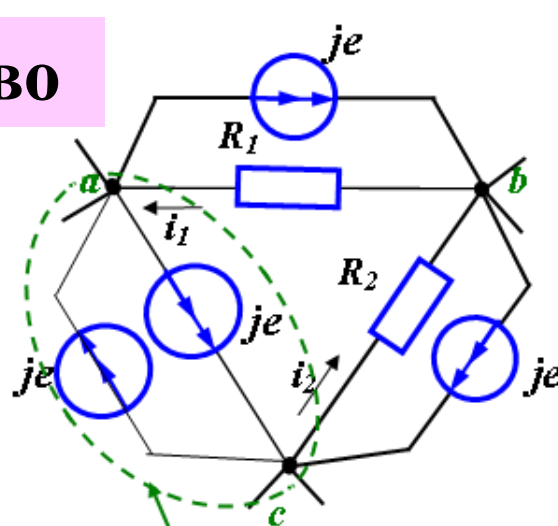


фиг. 1



фиг. 2

## Доказателство



фиг. 3

Еквивалентният ток между възлите **a** и **c** е нула:

$$i_{екв} = j_e - j_e = 0$$



Следователно участъкът между **a** и **c** е прекъснат

*Благодаря за вниманието*

*проф. д-р Илона Ячева*

