

## Predavanja 4

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



(uredio prof.dr.sc. Armin Pavić)

# SLOŽENI KRUGOVI ISTOSMJERNE STRUJE I POSTUPAK SUPERPOZICIJE

Mosni spoj  
Spojevi u trokut i zvijezdu  
El. krugovi s više izvora  
Metoda superpozicije

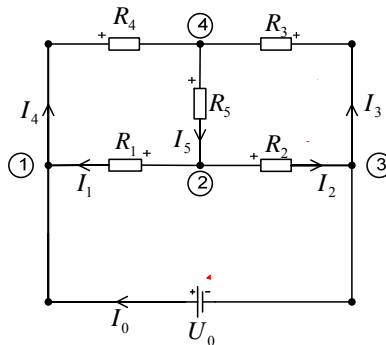
1

## Mosni spoj

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



- ◆ Paralelni spoj dva djelila napona, premošten petim otporom spojenim između srednjih točaka dvaju djelila (kakav je prikazan na slici) naziva se **mosni spoj**.



2

## Mosni spoj - ravnoteža mosta

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE

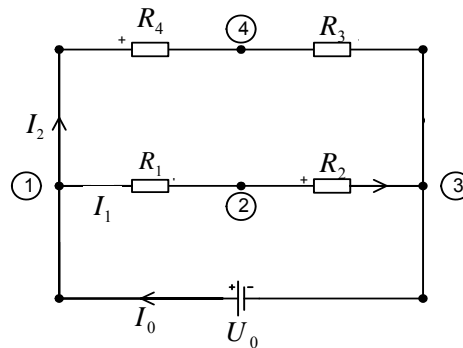


- ♦ Posebno zanimljivo je stanje kad oba djelila dijele napon izvora u istom omjeru - **most je u ravnoteži**.

- ♦ Uvjet ravnoteže:  $\frac{U_{R1}}{U_{R2}} = \frac{U_{R4}}{U_{R3}}$

$$\frac{I_1 R_1}{I_1 R_2} = \frac{I_2 R_4}{I_2 R_3} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$



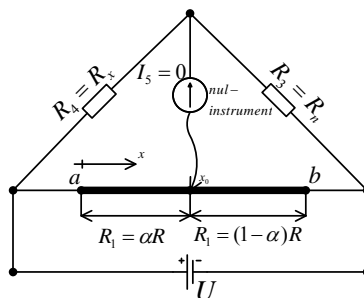
- ♦ U ravnoteži:  $U_{R1} = U_{R4}$  (i  $U_{R2} = U_{R3}$ ) pa je  $\varphi_2 = \varphi_4$  tj.  **$U_{24} = 0$**

- ❖ Što se promijeni kad između točaka 2 i 4 spojimo neki otpor  $R_5$  ?

3

## Primjena mosta: Precizno mjerenje otpora (1)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Sl. 4.2

Ovdje su otpori  $R_1$  i  $R_2$  dijelovi otporne žice duljine  $l$  po kojoj se može pomicati klizač; položaj klizača (udaljenost od točke  $a$ ) može se precizno očitati. Otpor  $R_3$  je referentni otpor, čija je vrijednost stabilna i točno poznata. Otpor  $R_4 = R_x$  je otpor čija se vrijednost mjeri. Ukupni otpor otporne žice  $R_{ab} = R$  također je poznat.

4

## Primjena mosta: Precizno mjerenje otpora (2)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



- Mjerenje se provodi tako da se klizni kontakt pomiče do točke  $x_0$  kada vrlo precizni nul-instrument ne registrira nikakvu struju u mosnoj grani ( $I_5=0$ ). Tada je:

$$R_1 = \frac{x_0}{l} \cdot R = \alpha R, \quad R_2 = \frac{l-x_0}{l} \cdot R = (1-\alpha) \cdot R \quad (4.9)$$

Dobiva se:

$$R_x = R_4 = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 = \frac{x_0}{l-x_0} \cdot R_3 = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot R_n \quad (4.10)$$

Mosni spoj (poznat pod nazivom **Wheatstoneov most**) rabi se za precizno mjerenje nepoznatih otpora.

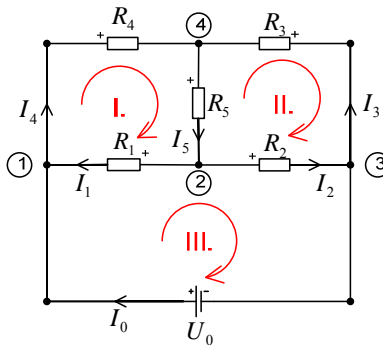
5

## Mosni spoj - opis jednađbama KZ (1)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



- Za odrediti struje u granama mosta koji nije u u ravnoteži, mosni spoj ćemo opisati jednađbama Kirchhoffovih zakona, a u tu svrhu označeni su čvorovi i konture te pojedine struje (i pretpostavljeni referentni smjerovi struja i obilaska kontura) na slici (postaviti jednađbe KZ!)



Sl. 4.1

6

## Mosni spoj - opis jednačbama KZ (2)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



- ♦ Jednačbe Kirchhoffovih zakona:

$$\text{čvor 1: } +I_0 + I_1 - I_4 = 0 \quad (4.1)$$

$$\text{čvor 2: } -I_1 - I_2 + I_5 = 0 \quad (4.2)$$

$$\text{čvor 4: } +I_3 + I_4 - I_5 = 0 \quad (4.3)$$

$$\text{petlja I.: } +R_1 \cdot I_1 + R_4 \cdot I_4 + R_5 \cdot I_5 = 0 \quad (4.4)$$

$$\text{petlja II.: } -R_2 \cdot I_2 - R_3 \cdot I_3 - R_5 \cdot I_5 = 0 \quad (4.5)$$

$$\text{petlja III.: } -R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 = U_0 \quad (4.6)$$

7

## Mosni spoj - opis jednačbama KZ (3)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



- ♦ Rješavanje ovog sustava jednačbi po  $I_5$  daje:

$$I_5 = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4) \cdot \left( \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} + R_5 \right)} \cdot U_0 \quad (4.7)$$

- ♦ Uvjet ravnoteže mosta:

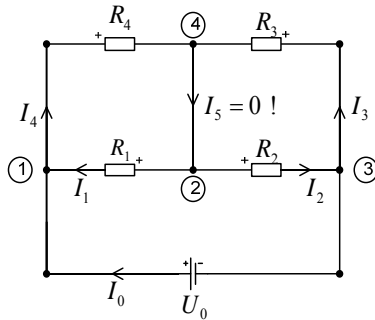
Kada je  $R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4 = 0$ , izraz (4.7) jednak je nuli.

Struja  $I_5$  ne teče pa se sl. 4.1 može nadomjestiti sa sl. 4.1a ili sl. 4.1b.

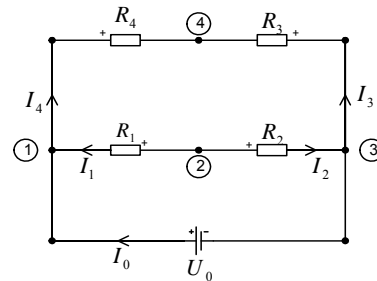
8

## Mosni spoj - opis jednačbama KZ (4)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Sl. 4.1a



Sl. 4.1b

Uz  $I_5 = 0$  jednačbe (4.2) i (4.3) reduciraju se na  
 $-I_1 - I_2 = 0$ , odnosno  $I_3 + I_4 = 0$ , što je iz sl. 4.1a-b očito.

## Mosni spoj - opis jednačbama KZ (5)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



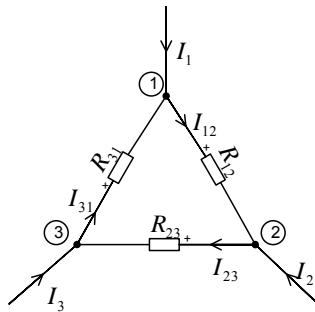
Relacija

$$R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4 = 0; \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (4.8)$$

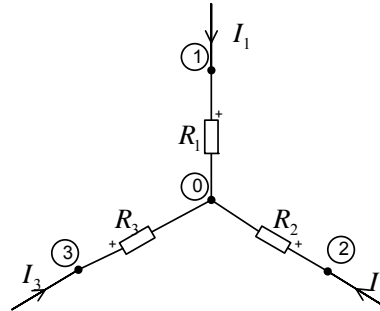
uvjet je ravnoteže mosta. Kada je ona zadovoljena, dopušteno je mosnu granu (grana s  $R_5$ ) kratko spojiti (sl. 4.1a) ili odspojiti (sl. 4.1b), jer navedeni zahvati ne mijenjaju strujno-naponske prilike u krugu, a mreža se pojednostavljuje na serijsko-paralelni spoj otpornika  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  i  $R_4$ .

## Spojevi između 3 točke (trokut i zvijezda)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Sl. 4.3a: Trokut



Sl. 4.3b: Zvijezda

Gledano iz ostatka el. kruga, ovi spojevi su ekvivalentni ako su između tri točke isti naponi te ako u njih ulaze iste struje. Na temelju toga: **pretvorbe trokut-zvijezda!**

11

## Ekvivalentnost spojeva trokuta i zvijezde (1)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Ekvivalentnost trokuta i zvijezde slijedi iz zadovoljenja sljedećih naponskih jednažbi:

$$U_{12} = I_{12} \cdot R_{12} = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2 \quad (4.11a)$$

$$U_{23} = I_{23} \cdot R_{23} = I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3 \quad (4.11b)$$

$$U_{31} = I_{31} \cdot R_{31} = I_3 \cdot R_3 - I_1 \cdot R_1 \quad (4.11c)$$

4.11(a-c) sustav je triju jednažbi s tri nepoznanice ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , odnosno  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$ ) s parametrima (strujama) koje moraju zadovoljavati sljedeće strujne jednažbe:

$$\text{čvor 1:} \quad +I_1 \quad -I_{12} \quad +I_{31} = 0 \quad (4.12a)$$

$$\text{čvor 2:} \quad \quad +I_2 \quad +I_{12} - I_{23} = 0 \quad (4.12b)$$

$$\text{čvor 3:} \quad \quad \quad +I_3 \quad +I_{23} - I_{31} = 0 \quad (4.12c)$$

12

## Ekvivalentnost spojeva trokuta i zvijezde (2)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Iz sustava 4.11(a-c) slijedi:

$$I_{12} \cdot R_{12} + I_{23} \cdot R_{23} + I_{31} \cdot R_{31} = 0 \quad (4.13)$$

Iz sustava 4.12(a-c) slijedi:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (4.14)$$

13

## Pretvorba trokuta u zvijezdu

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



- ♦ Poznanice:  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$
- ♦ Nepoznanice:  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$

U jednađbi 4.12 eliminacijom struja  $I_{31}$  i  $I_{23}$ , i to zamjenom  $I_{31} = I_{12} - I_1$  (4.12a) i  $I_{23} = I_{12} + I_1$  (4.12b), dobiva se:

$$I_{12} = \frac{I_1 \cdot R_{31} - I_2 \cdot R_{23}}{R_{\Delta}} \quad (4.15)$$

gdje je:

$$R_{\Delta} = R_{12} + R_{23} + R_{31} \quad (4.16)$$

14

## Pretvorba trokuta u zvijezdu (2)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Uvrštavanjem struje  $I_{12}$  u jednadžbu 4.11a dobiva se:

$$I_1 \cdot \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_\Delta} - I_2 \cdot \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_\Delta} = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2 \quad (4.17a)$$

Analognim postupkom eliminacije i uvrštavanjem u jednadžbe 4.11b i 4.11c dobiva se:

$$I_2 \cdot \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_\Delta} - I_3 \cdot \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_\Delta} = I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3 \quad (4.17b)$$

$$I_3 \cdot \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_\Delta} - I_1 \cdot \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_\Delta} = I_3 \cdot R_3 - I_1 \cdot R_1 \quad (4.17c)$$

15

## Pretvorba trokuta u zvijezdu (3)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



- ♦ Sustav jednadžbi 4.11(a-c) prelazi u jednakosti kad je:

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_\Delta}; \quad R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_\Delta}; \quad R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_\Delta} \quad (4.18)$$

čije je važno svojstvo:

$$\frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} = \frac{R_{12}^2}{R_\Delta} \quad (4.18a)$$

$$\frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} = \frac{R_{23}^2}{R_\Delta} \quad (4.18b)$$

$$\frac{R_3 \cdot R_1}{R_2} = \frac{R_{31}^2}{R_\Delta} \quad (4.18c)$$

- ♦ Relacije 4.18(a-c) pokazuju kako se iz poznatih otpora trokuta dobivaju otpori ekvivalentne zvijezde.

16



## Pretvorba zvijezde u trokut

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



- ♦ Poznanice:  $R_1, R_2, R_3$
- ♦ Nepoznanice:  $R_{12}, R_{23}, R_{31}$

U jednadžbi 4.11a eliminiraju se struje  $I_1$  i  $I_2$  zamjenom  $I_1 = I_{12} - I_{31}$  i  $I_2 = I_{23} - I_{12}$  (4.12a i b), te se dobiva:

$$U_{12} = I_{12} \cdot R_{12} = I_{12} \cdot (R_1 + R_2) - (I_{23} \cdot R_2 + I_{31} \cdot R_1) \quad (4.19)$$

U drugom dijelu dobivenog izraza zamijeni se

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{\Delta}} \text{ i } R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{\Delta}} \quad (\text{vidi 4.18}), \text{ iskoristi 4.13}$$

u obliku  $I_{12} \cdot R_{12} = -(I_{23} \cdot R_{23} + I_{31} \cdot R_{31})$ , pa se dobiva:

$$I_{23} \cdot R_2 + I_{31} \cdot R_1 = -I_{12} \cdot \frac{R_{12}^2}{R_{\Delta}} = -I_{12} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} \quad (\text{prema 4.18a})$$

17

## Pretvorba zvijezde u trokut (2)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Nakon ovoga sređivanjem 4.19 dobiva se:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} \quad (4.19a)$$

Primjenom analognog postupka na  $U_{23}$  i  $U_{31}$  dobiva se:

$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \quad (4.19b)$$

$$R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2} \quad (4.19c)$$

Relacije 4.19(a-c) pokazuju kako se iz poznatih otpora zvijezde dobivaju otpori ekvivalentnog trokuta.

Pretvorbe zvijezde i trokuta omogućuju da se svaki mosni spoj pretvori u serijsko-paralelnu kombinaciju otpora.

18

## Primjer

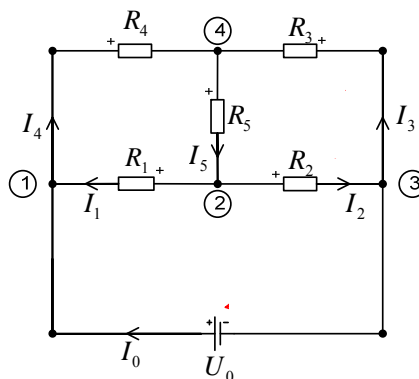
OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



❖ Odredite struje  $I_0$  i  $I_5$  u spoju na slici ako su elementi spoja:

a)  $R_1=R_2=R_5=6\ \Omega$ ;  $R_3=R_4=2\ \Omega$  i  $U_0=4,8\text{ V}$ . (1,6A; 0A)

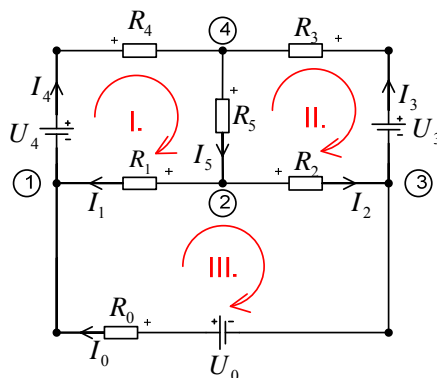
b)  $R_1=R_2=R_4=R_5=6\ \Omega$ ;  $R_3=10\ \Omega$  i  $U_0=13,6\text{ V}$ . (2A; 0,133A)



19

## Električni krugovi s više izvora

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Sl. 4.4

Iako su u krugu sa sl. 4.4 moguće transformacije zvijezde u trokut (npr. zvijezde  $R_1R_2R_5$  ili zvijezde  $R_3R_4R_5$ ), one ne pomažu u rješavanju strujno-naponskih prilika, jer ne eliminiraju izvore u granama (u našem primjeru  $U_4$  i  $U_3$ ).

20

## Primjena Kirchhoffovih zakona (1)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Pri rješavanju krugova s više izvora polazište uvijek mogu biti jednačbe Kirchhoffovih zakona. **Postupak** je sljedeći:

1. Za sve čvorove osim jednog napišu se jednačbe KZS (č-1 jednačbi).
2. Odredi se skup  $n$  neovisnih petlji (kontura) i za svaku od njih napiše se jednačba KZN ( $n=g-č+1$ ).
3. Riješi se tako dobiveni sustav od  $g$  jednačbi s  $g$  nepoznanica.

Primjer za mrežu sa sl. 4.4:

$$\left. \begin{array}{rrrrrr} +I_0 & +I_1 & & -I_4 & & = 0 \\ & -I_1 & -I_2 & & +I_5 & = 0 \\ & & & +I_3 & +I_4 & -I_5 = 0 \end{array} \right\} \text{strujne}$$

$$\left. \begin{array}{rrrrrr} +R_1 \cdot I_1 & & & +R_4 \cdot I_4 + R_5 \cdot I_5 & = & U_4 \\ & -R_2 \cdot I_2 - R_3 \cdot I_3 & & -R_5 \cdot I_5 & = & -U_3 \\ +R_0 \cdot I_0 - R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 & & & & = & U_0 \end{array} \right\} \text{naponske}$$

21

## Primjena Kirchhoffovih zakona (2)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Jednačbe KZ se u matričnom obliku mogu napisati ovako:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 & R_4 & R_5 \\ 0 & 0 & -R_2 & -R_3 & 0 & -R_5 \\ R_0 & -R_1 & R_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_4 \\ -U_3 \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (4.20a)$$

ili

$$\underline{R} \cdot \underline{I} = \underline{U} \quad (4.20b)$$

22

## Primjena Kirchhoffovih zakona (3)



OSNOVE ELEKTROTEHNIKE

Izrazi 4.20(a-b) predstavljaju Ohmov zakon u matričnom obliku.

Struje, a time i odgovor na strujno-naponske prilike u krugu, dobivaju se određivanjem matrice  $\underline{R}^{-1}$ , inverzne matrice matrici  $\underline{R}$ , uz poznate vrijednosti napona izvora ( $U_0$ ,  $U_3$  i  $U_4$ ).

$$\underline{I} = \underline{R}^{-1} \cdot \underline{U} \quad (4.21)$$

U iole složenijim krugovima (već i na primjeru sa sl. 4.4) pri rješavanju je značajna pomoć računala.

23

## Metoda superpozicije



OSNOVE ELEKTROTEHNIKE

### Načelo superpozicije:

u električnom krugu s više izvora ukupno djelovanje svih izvora (tj. napon ili struja) na bilo kojem elementu kruga predstavlja superpoziciju pojedinačnih djelovanja svakog pojedinog izvora.

### Postupak superpozicije:

1. Odrede se pojedinačna djelovanja svakog izvora  
(Svi izvori osim jednog se umrtve (ugase) tako da se naponski izvori zamijene kratkim spojem, a strujni prekidom kruga)
2. Odredi se *ukupno djelovanje* kao (algebarski) *zbroj pojedinačnih djelovanja svakog pojedinog izvora*

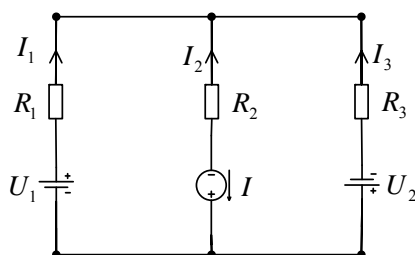
24

## Metoda superpozicije: primjer

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Odredi struje  $I_1$ ,  $I_2$  i  $I_3$  u mreži prema slici.



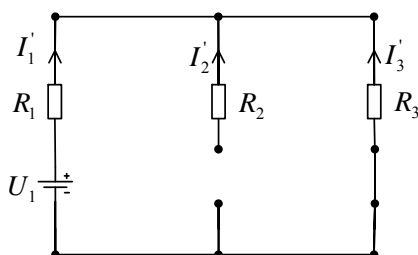
25

## Metoda superpozicije: primjer (2)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



1.a. Djeluje samo naponski izvor  $U_1$



$$I'_1 = \frac{U_1}{R_1 + R_3}$$

$$I'_2 = 0$$

$$I'_3 = -\frac{U_1}{R_1 + R_3}$$

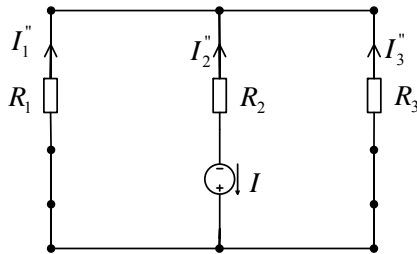
26

## Metoda superpozicije: primjer (3)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



1.b. Djeluje samo strujni izvor  $I$



$$I_1'' = I \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3}$$

$$I_2'' = -I$$

$$I_3'' = I \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_3}$$

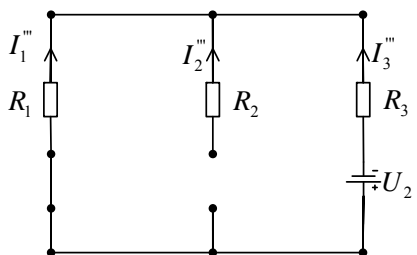
27

## Metoda superpozicije: primjer (4)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



1.c. Djeluje samo naponski izvor  $U_2$



$$I_1''' = \frac{U_2}{R_1 + R_3}$$

$$I_2''' = 0$$

$$I_3''' = -\frac{U_2}{R_1 + R_3}$$

28

## Metoda superpozicije: primjer (5)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



### 2. Završni korak (zbroj pojedinačnih djelovanja)

$$I_1 = I_1' + I_1'' + I_1''' = \frac{U_1 + U_2 + I \cdot R_3}{R_1 + R_3}$$

$$I_2 = I_2' + I_2'' + I_2''' = -I$$

$$I_3 = I_3' + I_3'' + I_3''' = \frac{I \cdot R_1 - U_1 - U_2}{R_1 + R_3}$$

29

## Metoda superpozicije - izvod (1)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Vektor napona  $\underline{U}$  iz jednažbi 4.20 i 4.21 (koje opisuju krug na sl. 4.4) može se pisati i ovako:  $\underline{U} = \underline{U}_0 + \underline{U}_3 + \underline{U}_4$ ,

$$\underline{U}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_0 \end{bmatrix}, \quad \underline{U}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -U_3 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{U}_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Uvrsti li se ova notacija u 4.21, dobiva se:

$$\underline{I} = \underline{R}^{-1} \cdot (\underline{U}_0 + \underline{U}_3 + \underline{U}_4) = \underline{R}^{-1} \cdot \underline{U}_0 + \underline{R}^{-1} \cdot \underline{U}_3 + \underline{R}^{-1} \cdot \underline{U}_4 \quad (4.22)$$

Dakle, struja  $\underline{I}$  dobiva se kao zbroj struja

$$\underline{I}' = \underline{R}^{-1} \cdot \underline{U}_0; \quad \underline{I}'' = \underline{R}^{-1} \cdot \underline{U}_3; \quad \underline{I}''' = \underline{R}^{-1} \cdot \underline{U}_4 \quad (4.23)$$

30

## Metoda superpozicije - izvod (2)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Kako je vektor struje  $\underline{I}$  vektor bez 0-tih članova, ono što vrijedi za  $\underline{I}'$  vrijedi i za svaki član toga vektora:

$$I_i = I'_i + I''_i + I'''_i, i = 0, \dots, 5$$

gdje su pribrojnici odgovarajući članovi vektora  $\underline{I}', \underline{I}'', \underline{I}'''$ .

Promotrimo  $\underline{I}' = \underline{R}^{-1} \cdot \underline{U}_0$ . Ovom rješenju odgovara jednačba  $\underline{R} \cdot \underline{I}' = \underline{U}_0$ . Navedenoj jednačbi pridružuje se krug sa sl. 4.4 u kojem su izvori  $U_3$  i  $U_4$  ugašeni (sl. 4.5).

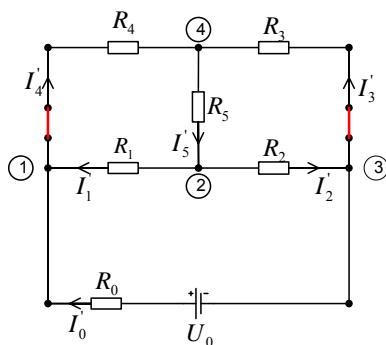
Gašenje naponskoga izvora: kratki spoj na grani izvora.

Gašenje strujnoga izvora: prazni hod u grani izvora.

31

## Metoda superpozicije - izvod (3)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Sl. 4.5

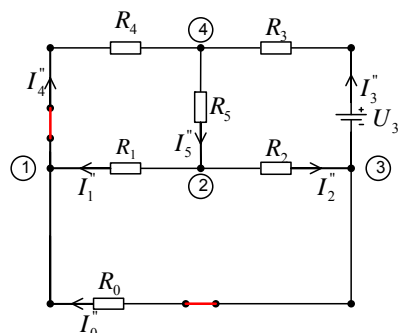
Krug sa sl. 4.5 može se riješiti pretvorbom trokut-zvijezda ili, u slučaju ravnoteže mosta, i jednostavnijim postupkom. Dakle i bez upotrebe matričnog računa dadu se odrediti struje  $I'_i, i = 0, \dots, 5$ , tj. vektor  $\underline{I}'$ .

32



## Metoda superpozicije - izvod (4)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



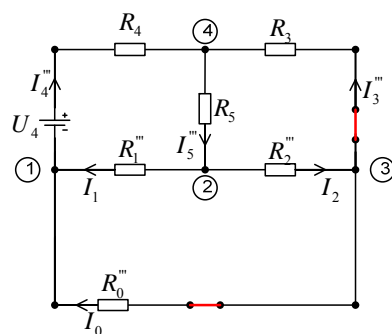
Sl. 4.6

Analogno, promatrajući  $I''$  i  $I'''$ , odnosno krugove koje odgovaraju jednačbama  $\underline{R} \cdot \underline{I}'' = \underline{U}_3$  (sl. 4.6) i  $\underline{R} \cdot \underline{I}''' = \underline{U}_4$  (sl. 4.7), dolazimo do parcijalnih rješenja koja ne traže matrični račun.

33

## Metoda superpozicije - izvod (5)

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE



Sl. 4.7

Smjerovi struja na sl. 4.5 do sl. 4.7 nisu proizvoljni.  
Oni odgovaraju odabranim (referentnim) smjerovima  
struja u izvornom krugu (sl. 4.4).

34