Električni krugovi

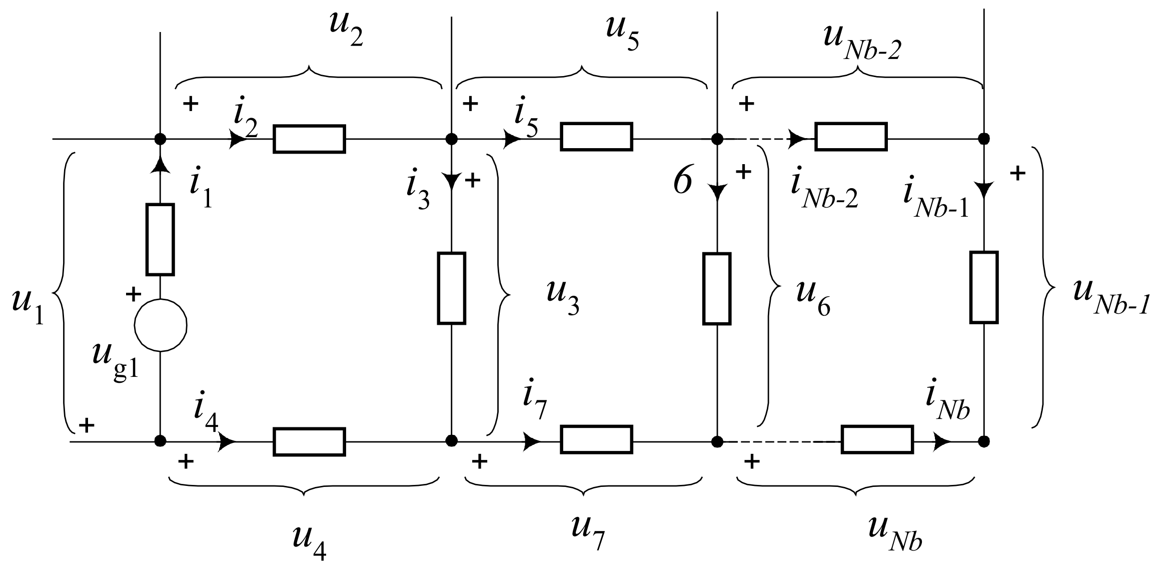
Jednadžbe krugova

Lit.: V. Naglić: Osnovi teorije mreža, p.3.1-3.3

Jednadžbe krugova

- Polazište u formuliranju jednadžbi električnih krugova su:
  - **Kirchhoffovi zakoni**:
    - međusobni odnosi struja grana prema KZS
    - međusobni odnosi napona grana prema KZN,
  - **Odnosi napona i struje u svakoj grani mreže.**

- Cilj analize: **odrediti napone i struje u granama**.



- Za analizu mreže potrebno je znati :
- **topološku konfiguraciju mreže**:
  - broj čvorišta N_v
  - broj grana N_b
  - kako su one međusobno povezane
- **elemente u granama**
- **pobudne funkcije neovisnih izvora**
- **početni naponi na svim kapacitetima ($u_C(0)$) i struje u induktivitetima ($i_L(0)$).**

- Koliko je nepoznanica u krugu s N_b grana i N_v čvorišta?
- Svaka grana ima
  - nepoznatu struju i
  - nepoznati napon
  - → broj nepoznanica je $2N_b$.
- Potrebno je formulirati $2N_b$ jednadžbi.

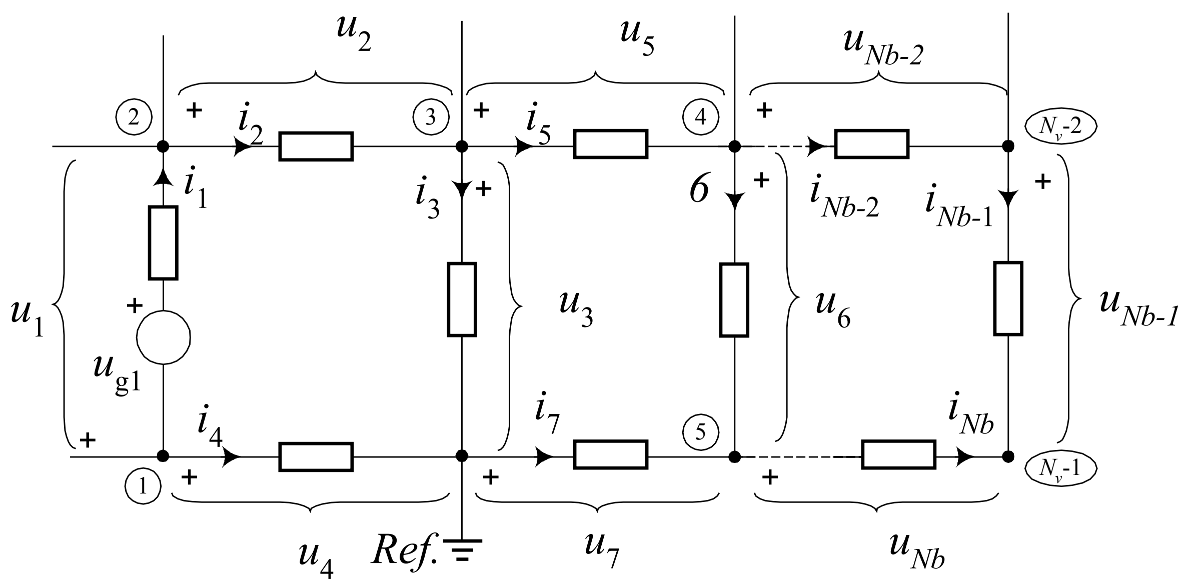
- Koje su to jednadžbe?
- Svaka grana ima definiran odnos napona i struje:
- N_b grana $\rightarrow$ N_b jednadžbi.
- Primjena Kirchhoffovih zakona $\rightarrow$ N_b jednadžbi.
  - $\rightarrow$ N_v-1 linearno nezavisnih jednadžbi KZS
  - $\rightarrow$ N_b-N_v+1 linearno nezavisnih jednadžbi KZN
- Ukupno: $N_b + (N_v-1) + (N_b-N_v+1) = 2\,N_b$ jednadžbi.

- 2 N_b je veliki broj jednadžbi.
- Redukcija toga broja → uvođenjem novih varijabli.
- Najpoznatiji postupci :
  - **jednadžbe petlji** i
  - **jednadžbe čvorišta**
- Nove nepoznanice:
  - **struje petlji** i
  - **naponi čvorišta**.

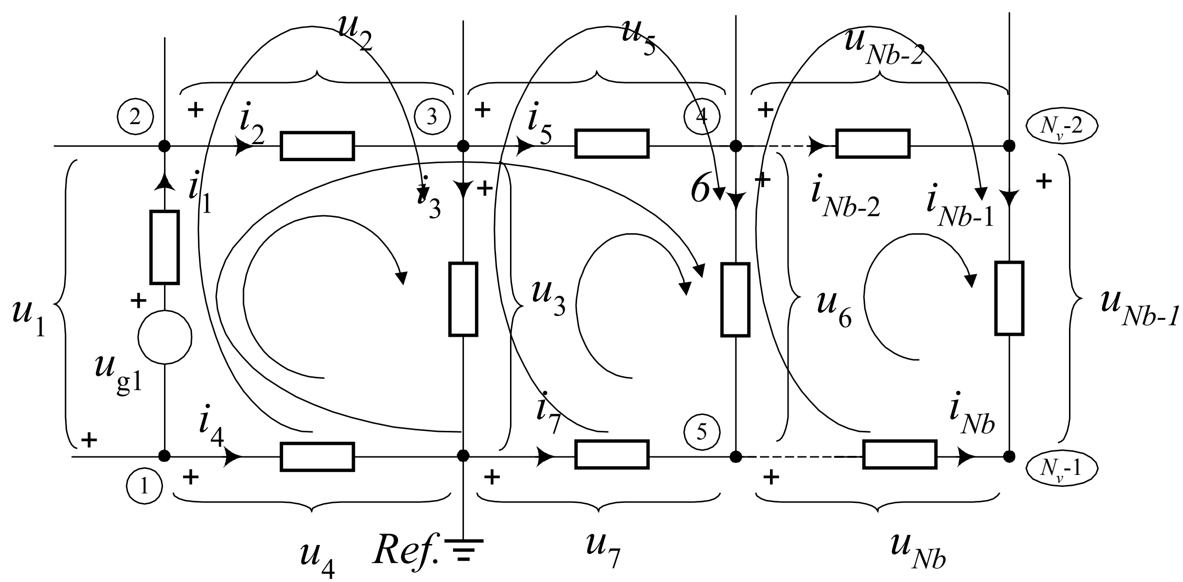
▪Jednadžbe petlji

▪Formuliranje **jednadžbi petlji** ili **konturnih struja**:

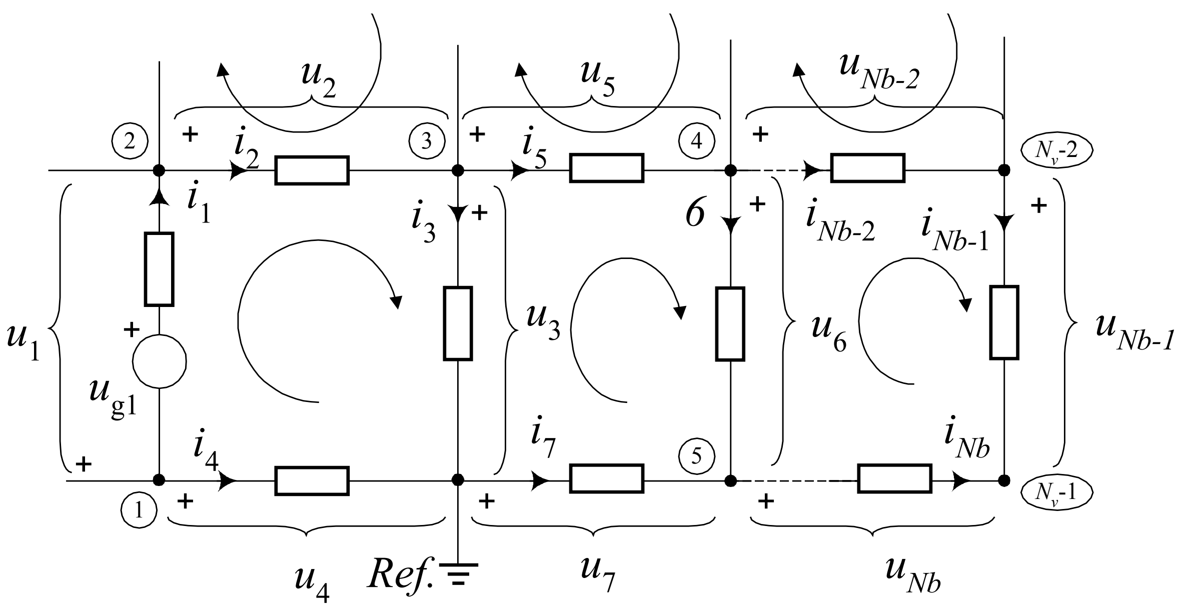
1. Odrediti **referentno čvorište** i N_v–1 čvorišta, za formuliranje linearno neovisnog sustava jednadžbi KZS;



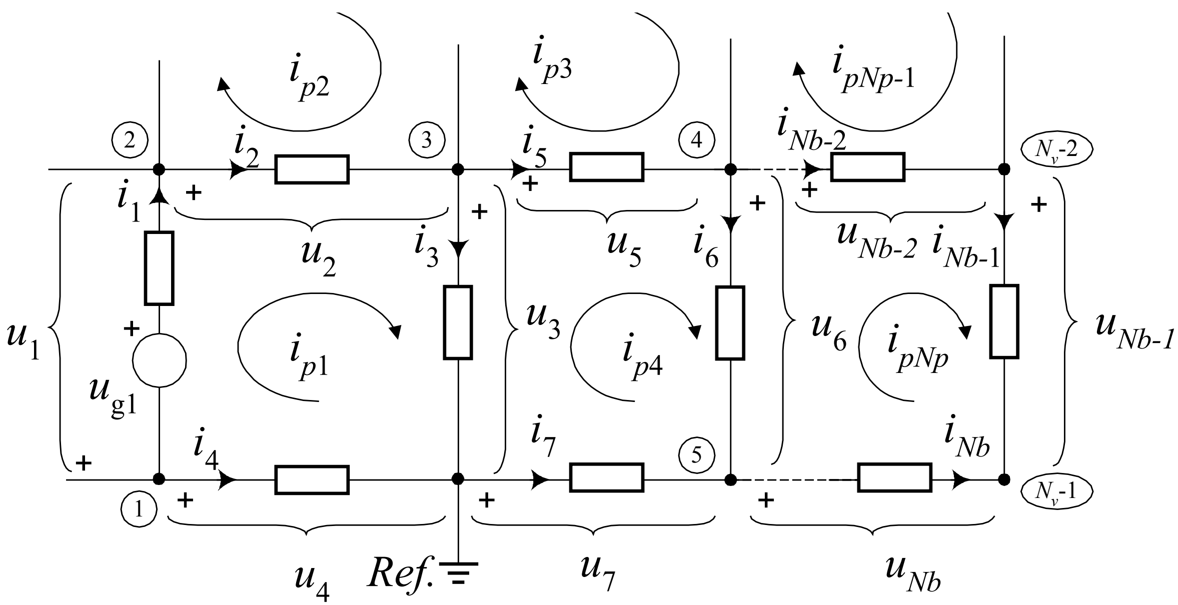
2. Odrediti $N_b - N_v + 1$ petlji za formuliranje linearno neovisnog sustava jednadžbi KZN.
Ukupan mogući broj različitih petlji je puno veći.



Najjednostavnije: odabrati petlje tako da one čine okna mreže.
Jednadžbe petlji → jednadžbe okana (mesh equations);



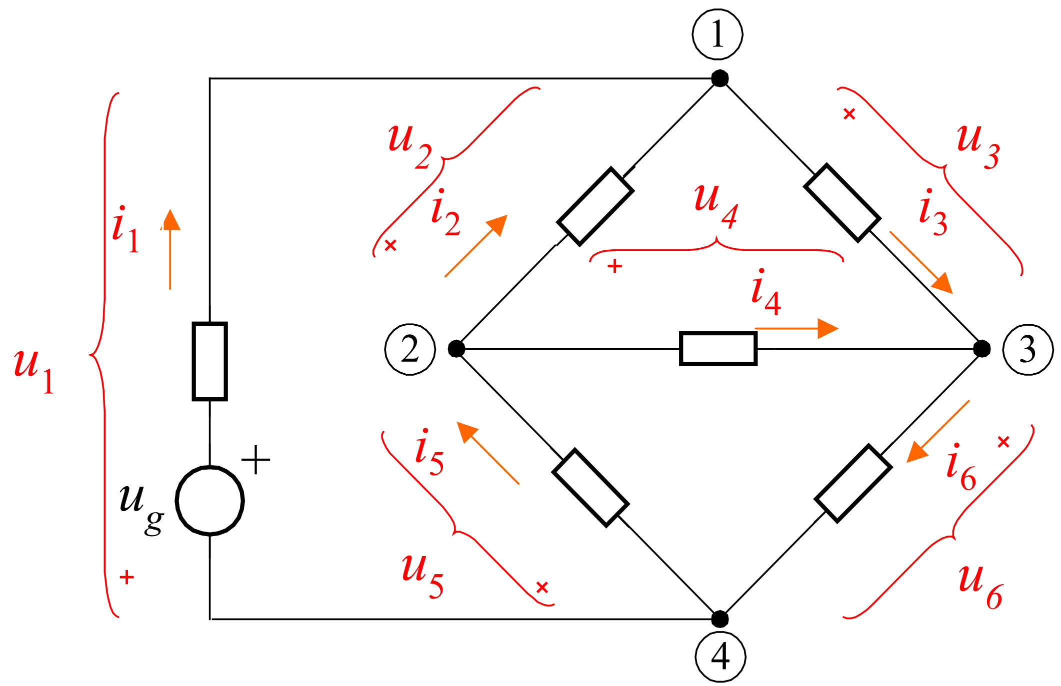
3. Za svaku petlju definirati novu varijablu struje, koju ćemo nazivati **strujom petlje**;



4. Koristeći jednadžbe KZS izraziti sve struje grana varijablama struja petlji;

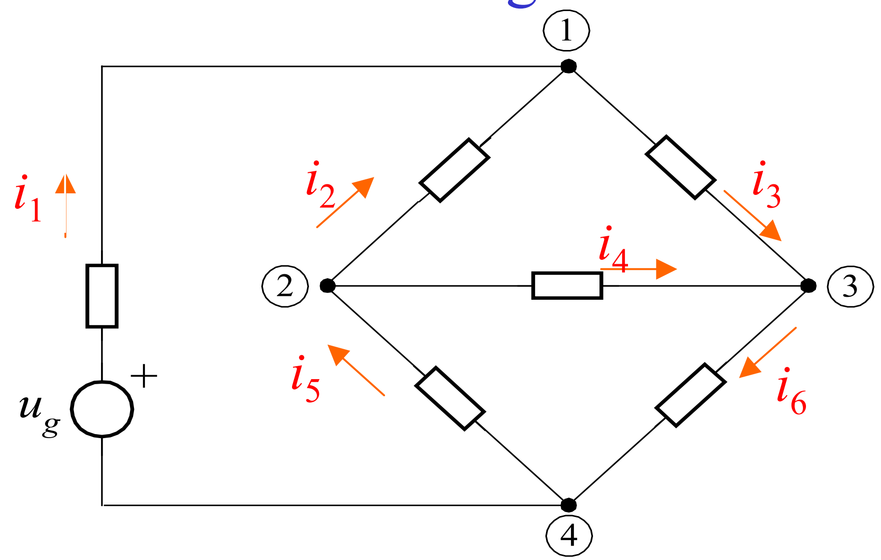
5. Za svaku granu definirati **ovisnost napona o struji**;
6. Napon svake grane izraziti kao funkciju struja petlji;
7. Supstitucijom u jednadžbe KZN dobiva se sustav od $N_b – N_v + 1$ jednadžbi u kojima su nepoznanice $N_b – N_v + 1$ struja petlji.

Primjer:



- N_v=4 čvorišta i N_b=6 grana
- Linearno neovisni sustavi:
- 3 jednadžbe KZS i 3 jednadžbe za KZN.

Jednadžbe krugova



Odabiremo: čvorište 4 → referentno

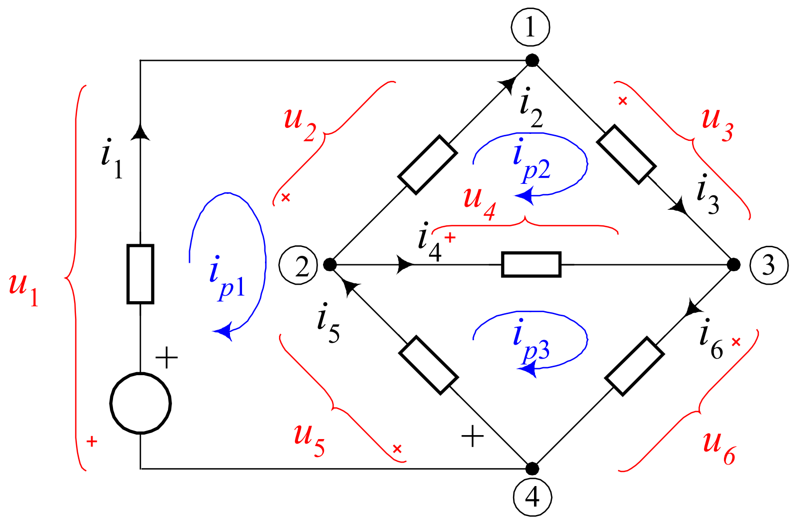
Sustav jednadžbi KZS čvorišta 1, 2, i 3:

$$-i_1 - i_2 + i_3 = 0$$

$$i_2 + i_4 - i_5 = 0$$

$$-i_3 - i_4 + i_6 = 0$$

Sustav petlji:

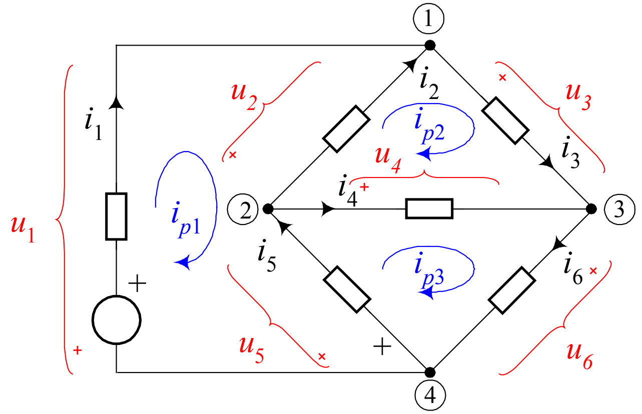


Jednadžbe KZN:

$$u_1 - u_2 - u_5 = 0$$

$$u_2 + u_3 - u_4 = 0$$

$$u_4 + u_5 + u_6 = 0$$



- Uvođenje novih varijabli: struje petlji i_{p1}, i_{p2}, i i_{p3}

$$i_{p1} = i_1 \quad i_{p2} = i_3 \quad i_{p3} = i_6$$

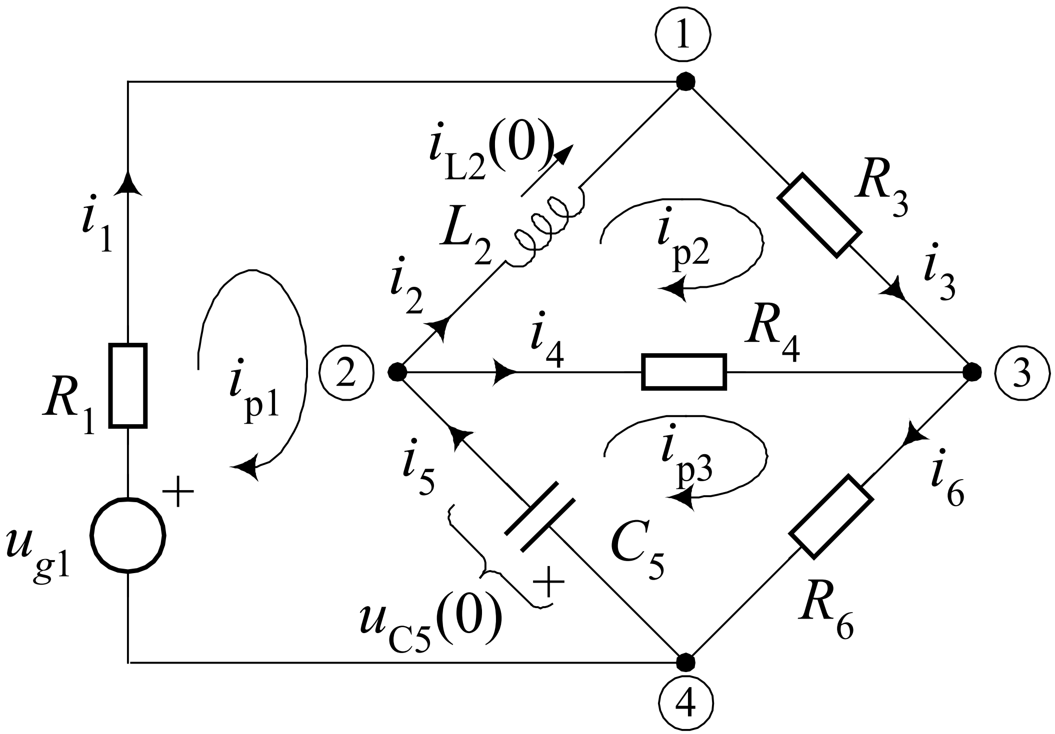
Struje grana izražene strujama petlji

$$i_1 = i_{p1} \qquad i_4 = i_{p3} - i_{p2}$$

$$i_2 = i_{p2} - i_{p1} \qquad i_5 = i_{p3} - i_{p1}$$

$$i_3 = i_{p2} \qquad i_6 = i_{p3}$$

- Strujno naponske relacije grana
  - Neka krug ima oblik



$$u_1 = -u_{g1} + R_1 i_1$$

$$u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt}$$

$$u_3 = R_3 i_3$$

$$u_4 = R_4 i_4$$

$$u_5 = \frac{1}{C_5} \int_0^t i_4(\tau) d\tau + u_{C5}(0)$$

$$u_6 = R_6 i_6$$

Supstitucija novih varijabli → struja petlji i_{p1}, i_{p2}, i i_{p3}

$$u_1 = -u_{g1} + R_1 i_1 = -u_{g1} + R_1 i_{p1}$$

$$u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} = L_2 \frac{d}{dt}\left(i_{p2} - i_{p1}\right)$$

$$u_3 = R_3 i_3 = R_3 i_{p2}$$

$$u_4 = R_4 i_4 = R_4\left(i_{p3} - i_{p2}\right)$$

$$u_5 = \frac{1}{C_5}\int_0^t i_5(\tau)d\tau + u_{C5}(0) = \frac{1}{C_5}\int_0^t \left(i_{p3} - i_{p1}\right)d\tau + u_{C5}(0)$$

$$u_6 = R_6 i_6 = R_6 i_{p3}$$

Izraze za napone grana → u jednadžbe KZN

$$u_1 - u_2 - u_5 = 0$$

$$u_2 + u_3 - u_4 = 0$$

$$u_4 + u_5 + u_6 = 0$$

$$-u_{g1} + R_1 i_{p1} - L_2 \frac{d}{dt}\left(i_{p2} - i_{p1}\right) - \frac{1}{C_5}\int_0^t \left(i_{p3} - i_{p1}\right) d\tau - u_{C5}(0) = 0$$

$$L_2 \frac{d}{dt}\left(i_{p2} - i_{p1}\right) + R_3 i_{p2} - R_4\left(i_{p3} - i_{p2}\right) = 0$$

$$R_4\left(i_{p3} - i_{p2}\right) + \frac{1}{C_5}\int_0^t \left(i_{p3} - i_{p1}\right) d\tau + u_{C5}(0) + R_6 i_{p3} = 0$$

- Nakon sređenja:

$$R_1 i_{p1} + L_2 \frac{di_{p1}}{dt} + \frac{1}{C_5}\int_0^t i_{p1} d\tau - L_2 \frac{di_{p2}}{dt} - \frac{1}{C_5}\int_0^t i_{p3} d\tau = u_{g1} + u_{C5}(0)$$

$$-L_2 \frac{di_{p1}}{dt} + (R_3 + R_4) i_{p2} + L_2 \frac{di_{p2}}{dt} - R_4 i_{p3} = 0$$

$$-\frac{1}{C_5}\int_0^t i_{p1} d\tau - R_4 i_{p2} + (R_4 + R_6) i_{p3} + \frac{1}{C_5}\int_0^t i_{p3} d\tau = -u_{C5}(0)$$

- Sustav od tri integrodiferencijalne jednadžbe s tri nepoznanice u vremenskoj domeni.

- Primjena Laplaceove transformacije → tri algebarske jednadžbe

$$U_{g1}(s)+\frac{u_{C5}(0)}{s}-L_2 i_{L2}(0)=R_1 I_{p1}(s)+sL_2\left(I_{p1}(s)-I_{p2}(s)\right)+\frac{1}{sC_5}\left(I_{p2}(s)-I_{p3}(s)\right)$$

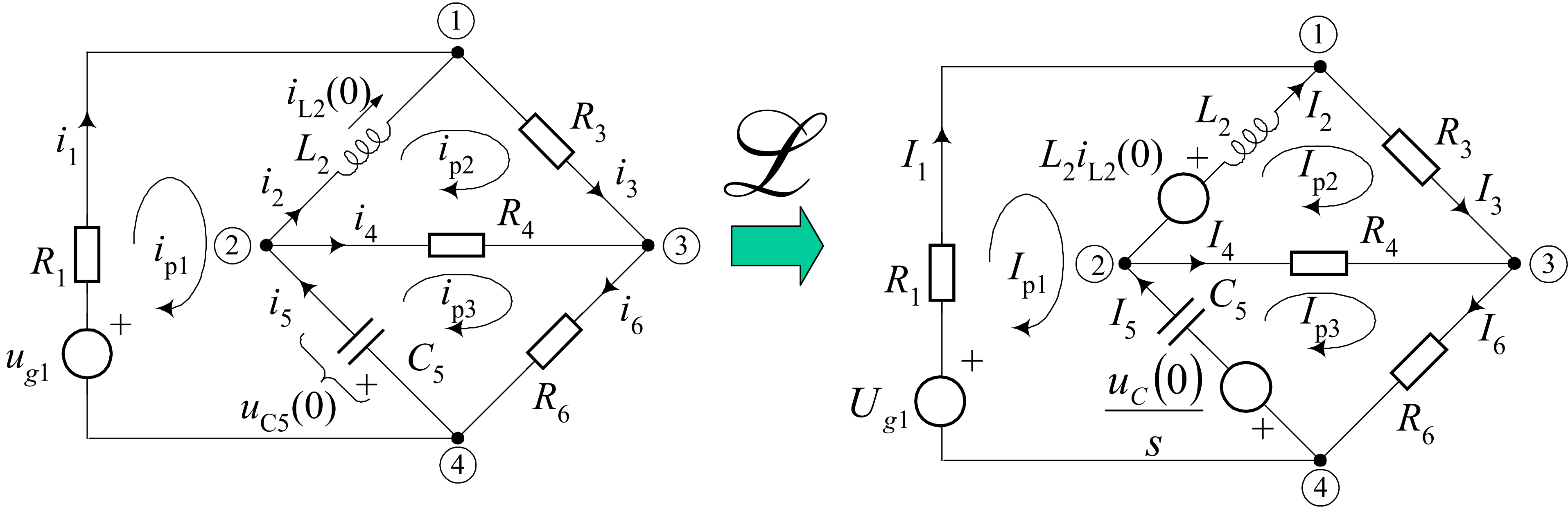
$$L_2 i_{L2}(0)=sL_2\left(I_{p2}(s)-I_{p1}(s)\right)+R_3 I_{p2}(s)+R_4\left(I_{p2}(s)-I_{p3}(s)\right)$$

$$-\frac{u_{C5}(0)}{s}=\frac{1}{sC_5}\left(I_{p3}(s)-I_{p1}(s)\right)+R_4\left(I_{p3}(s)-I_{p2}(s)\right)+R_6 I_{p3}(s)$$

gdje je $i_{L2}(0)= i_{p2}(0)-i_{p1}(0)$.

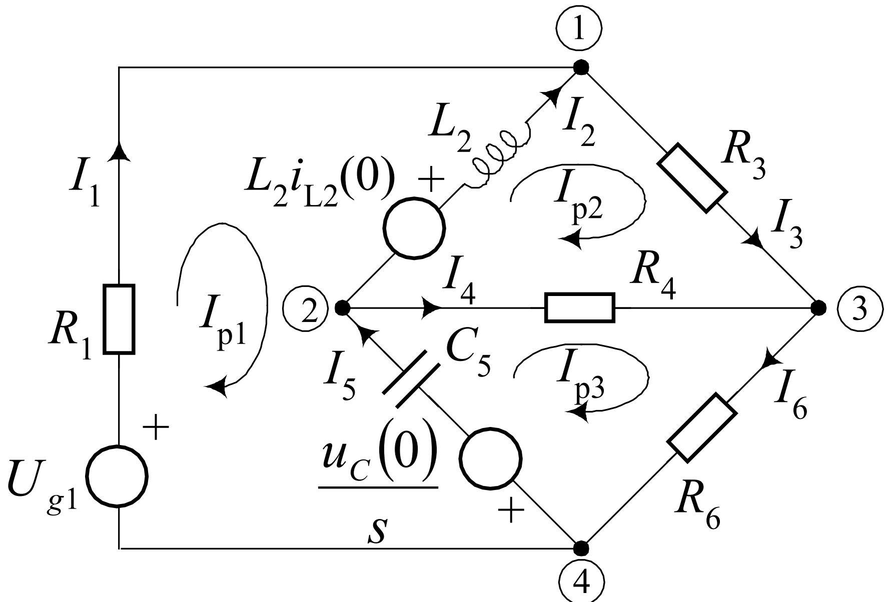
- Jednadžbe petlji moguće je pisati i direktno u domeni kompleksne frekvencije s.

- Prije toga → “pripremiti” mrežu:
  - transformirati je u frekvencijsku domenu i
  - početne veličine prikazati kao neovisne izvore.
  - sve strujne izvore transformirati u naponske.



- Jednadžbe petlji → izravno → struje petlji I_{p1}, I_{p2}, i I_{p3} kao nepoznanice.

- U granama koje su zajedničke različitim petljama zamislit ćemo da teče istovremeno više struja petlji.



- Npr. kroz granu 2 → struje I_{p1} i I_{p2}
- KZS je zadovoljen jer je $I_2 = I_{p2} - I_{p1}$

- Jednadžbe KZN

$$U_{g1}(s)+\frac{u_{C5}(0)}{s}-L_2 i_{L2}(0)=R_1 I_{p1}(s)+sL_2\left(I_{p1}(s)-I_{p2}(s)\right)+\frac{1}{sC_5}\left(I_{p2}(s)-I_{p3}(s)\right)$$

$$L_2 i_{L2}(0)=sL_2\left(I_{p2}(s)-I_{p1}(s)\right)+R_3 I_{p2}(s)+R_4\left(I_{p2}(s)-I_{p3}(s)\right)$$

$$-\frac{u_{C5}(0)}{s}=\frac{1}{sC_5}\left(I_{p3}(s)-I_{p1}(s)\right)+R_4\left(I_{p3}(s)-I_{p2}(s)\right)+R_6 I_{p3}(s)$$

Nakon sređivanja

$$U_{g1}(s)+\frac{u_{C5}(0)}{s}-L_2 i_{L2}(0)=\left(R_1+sL_2+\frac{1}{sC_5}\right)I_{p1}(s)-sL_2 I_{p2}(s)-\frac{1}{sC_5}I_{p3}(s)$$

$$L_2 i_{L2}(0)=-sL_2 I_{p1}(s)+\left(R_3+R_4+sL_2\right)I_{p2}(s)-R_4 I_{p3}(s)$$

$$-\frac{u_{C5}(0)}{s}=-\frac{1}{sC_5}I_{p1}(s)-R_4 I_{p2}(s)+\left(R_4+R_6+\frac{1}{sC_5}\right)I_{p3}(s)$$

Jednadžbe krugova

- Za konačnu formu jednadžbi petlji:
- Odabrati jednake orijentacije struja petlji u svim petljama.
- Lijeva strana jednadžbe → suma naponskih izvora u petlji
- Desna strana:
  - suma napona nastalih djelovanjem struje promatrane petlje
  - suma napona nastalih djelovanjem ostalih struja u suprotnome smjeru.
- Ovakav način pisanja jednadžbi se naziva i jednadžbama konturnih struja ili jednadžbama okana.

- U matričnoj formi: $$\mathbf{U}_g = \mathbf{Z}_p \cdot \mathbf{I}_p$$

$$\mathbf{I}_p = \begin{bmatrix} I_{p1} \\ I_{p2} \\ I_{p3} \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{I}_p$ → vektor struja petlji

$\boldsymbol{U}_g$ → vektor naponskih izvora i početnih veličina u petljama

$$\mathbf{U}_p = \begin{bmatrix} U_{g1}(s) + \dfrac{u_{C5}(0)}{s} - L_2 i_{L2}(0) \\ L_2 i_{L2}(0) \\ -\dfrac{u_{C5}(0)}{s} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{Z}_p$ kvadratna matrica → ***matrica impedancija petlji*** :

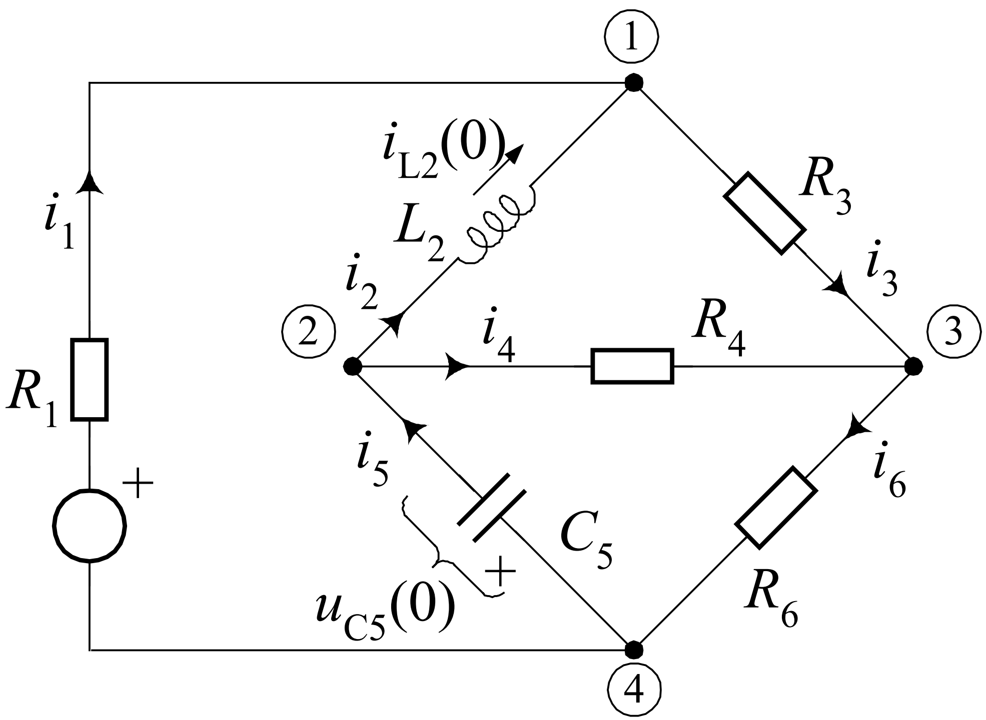
$$\mathbf{Z}_p = \begin{bmatrix} R_1 + sL_2 + \dfrac{1}{sC_5} & -sL_2 & -\dfrac{1}{sC_5} \\ -sL_2 & R_3 + R_4 + sL_2 & -R_4 \\ -\dfrac{1}{sC_5} & -R_4 & R_4 + R_6 + \dfrac{1}{sC_5} \end{bmatrix}$$

- Element glavne dijagonale
  - → suma impedancija u promatranoj petlji.
- Elementi izvan glavne dijagonale
  - → impedancije, zajedničke dvjema petljama.
- Elementi izvan glavne dijagonale imaju negativan predznak → posljedica odabira istoga smjera za sve struje petlji.

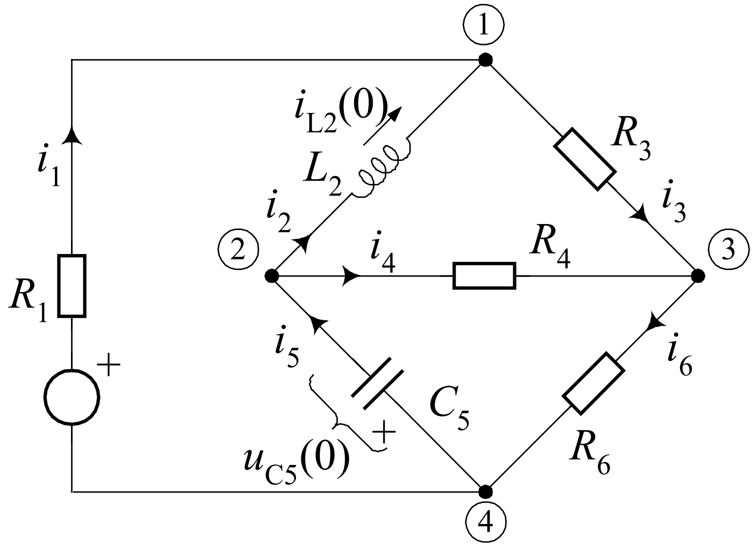
- **Jednadžbe čvorišta**
- Za mrežu s N_v čvorišta i N_b grana
- 1. Odrediti $N_v{-}1$ čvorišta za formuliranje sustava jednadžbi KZS. Preostalo čvorište je **referentno**;
- 2. Za svako čvorište definirati novu varijablu → **napon čvorišta**;
- 3. Za svaku granu definirati ovisnost struje o naponu;

- 4. Koristeći KZN izraziti napone grana naponima čvorišta;
- 5. Struju svake grane izraziti kao funkciju napona čvorišta;
- 6. Supstitucijom u jednadžbe KZS → sustav jednadžbi s N_v-1 nepoznanica napona čvorišta.

- Za ilustraciju → mreža s N_v=4 čvorišta i N_b=6 grana.



Jednadžbe krugova



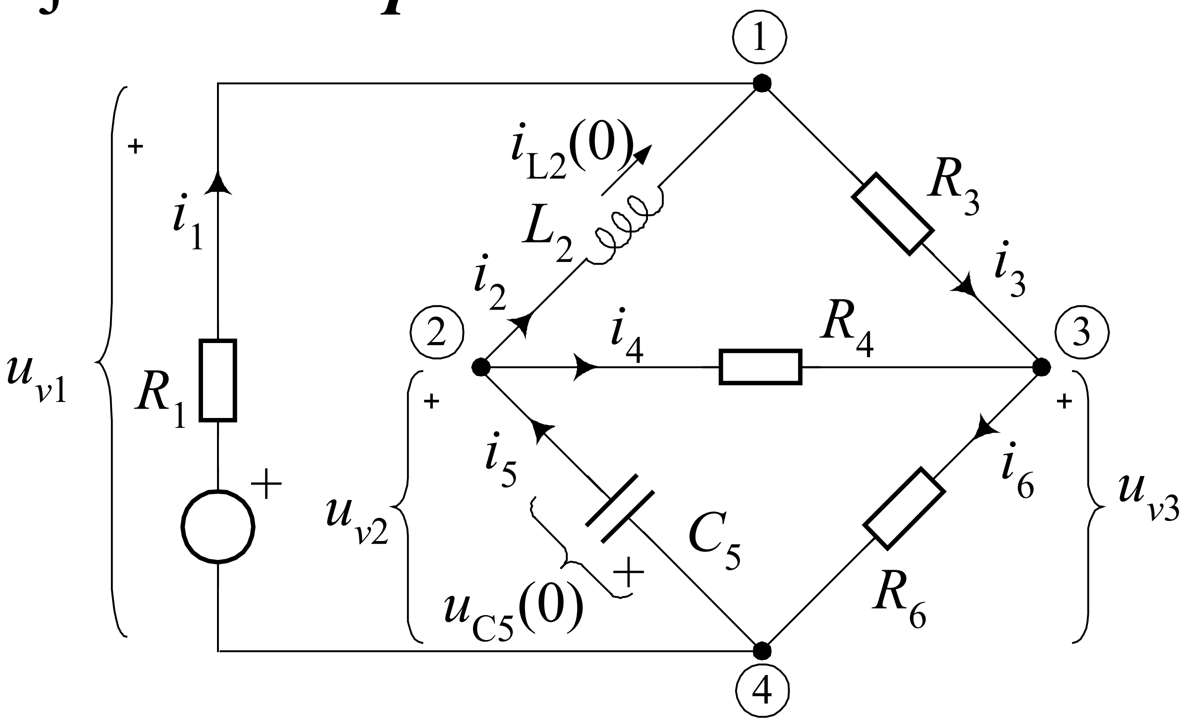
- Za formuliranje sustava jednadžbi KZS → čvorišta 1, 2, i 3.
- Čvorište 4 → referentno

$$-i_1 - i_2 + i_3 = 0 \qquad u_1 - u_2 - u_5 = 0$$

$$i_2 + i_4 - i_5 = 0 \qquad u_2 + u_3 - u_4 = 0$$

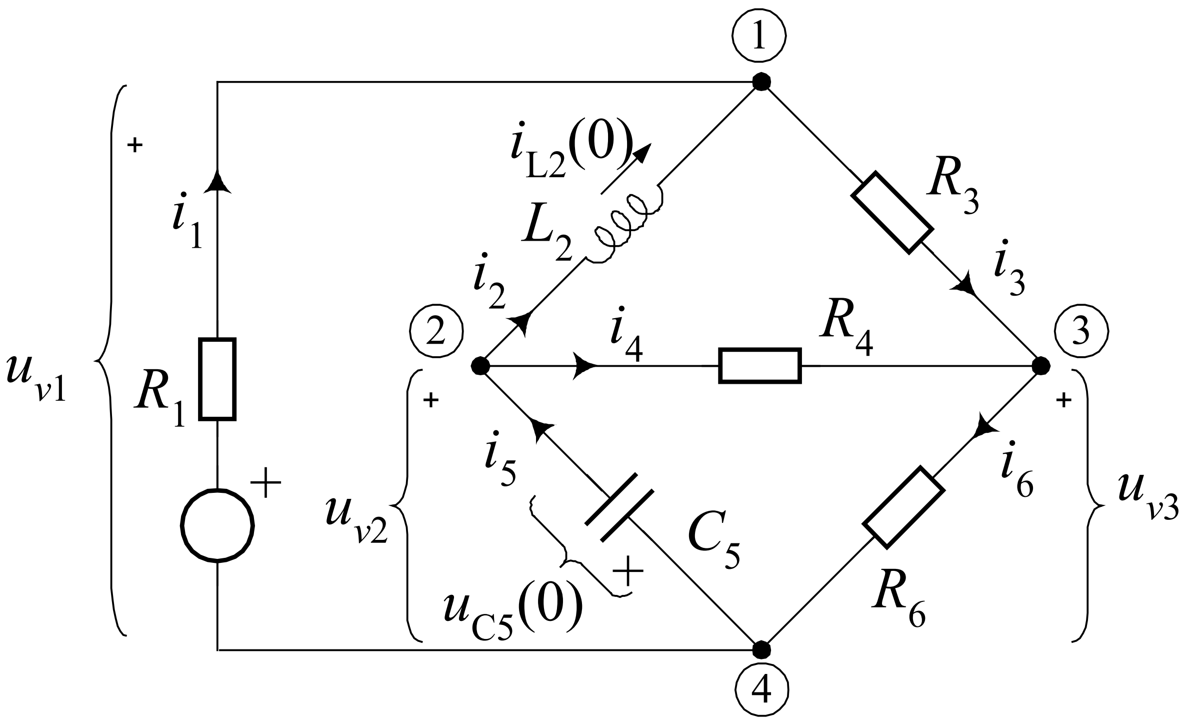
$$-i_3 - i_4 + i_6 = 0 \qquad u_4 + u_5 + u_6 = 0$$

- Nove varijable → ***naponi čvorišta***



- u_{v1} napon između čvorišta 1 i referentnoga čvorišta 4
- u_{v2} napon između čvorišta 2 i referentnoga čvorišta 4
- u_{v3} napon između čvorišta 3 i referentnoga čvorišta 4

- Primjenom KZN napone grana izraziti naponima čvorišta



$$u_1 = -u_{v1}$$

$$u_2 = u_{v2} - u_{v1}$$

$$u_3 = u_{v1} - u_{v3}$$

$$u_4 = u_{v2} - u_{v3}$$

$$u_5 = -u_{v2}$$

$$u_6 = u_{v3}$$

- Strujno naponske relacije za grane:

$$i_1 = \frac{u_{g1} + u_1}{R_1} = \frac{u_{g1} - u_{v1}}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{1}{L_2}\int_0^t u_2(\tau)d\tau + i_{L2}(0) = \frac{1}{L_2}\int_0^t (u_{v2} - u_{v1})d\tau + i_{L2}(0)$$

$$i_3 = \frac{u_3}{R_3} = \frac{u_{v1} - u_{v3}}{R_3}$$

$$i_4 = \frac{u_4}{R_4} = \frac{u_{v2} - u_{v3}}{R_4}$$

$$i_5 = C_5 \frac{du_5}{dt} = -C_5 \frac{du_{v2}}{dt}$$

$$i_6 = \frac{u_6}{R_6} = \frac{u_{v3}}{R_6}$$

- Supstitucijom u jednadžbe KZS:

$$-\frac{u_{g1}-u_{v1}}{R_1}-\frac{1}{L_2}\int_0^t\left(u_{v2}-u_{v1}\right)d\tau-i_{L2}(0)+\frac{u_{v1}-u_{v3}}{R_3}=0$$

$$\frac{1}{L_2}\int_0^t\left(u_{v2}-u_{v1}\right)d\tau+i_{L2}(0)+\frac{u_{v2}-u_{v3}}{R_4}+C_5\frac{du_{v2}}{dt}=0$$

$$\frac{u_{v1}-u_{v3}}{R_3}-\frac{u_{v2}-u_{v3}}{R_4}+\frac{u_{v3}}{R_6}=0$$

- odnosno

$$\frac{u_{v1}}{R_1}+\frac{1}{L_2}\int_0^t u_{v1}d\tau+\frac{u_{v1}}{R_3}-\frac{1}{L_2}\int_0^t u_{v2}d\tau-\frac{u_{v3}}{R_3}=\frac{u_{g1}}{R_1}+i_{L2}(0)$$

$$-\frac{1}{L_2}\int_0^t u_{v1}d\tau+\frac{1}{L_2}\int_0^t u_{v2}d\tau+\frac{u_{v2}}{R_4}+C_5\frac{du_{v2}}{dt}-\frac{u_{v3}}{R_4}=-i_{L2}(0)$$

$$-\frac{u_{v1}}{R_3}-\frac{u_{v2}}{R_4}+\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_6}\right)u_{v3}=0$$

- Primjena Laplaceove transformacije → sustav od tri algebarske jednadžbe čvorišta

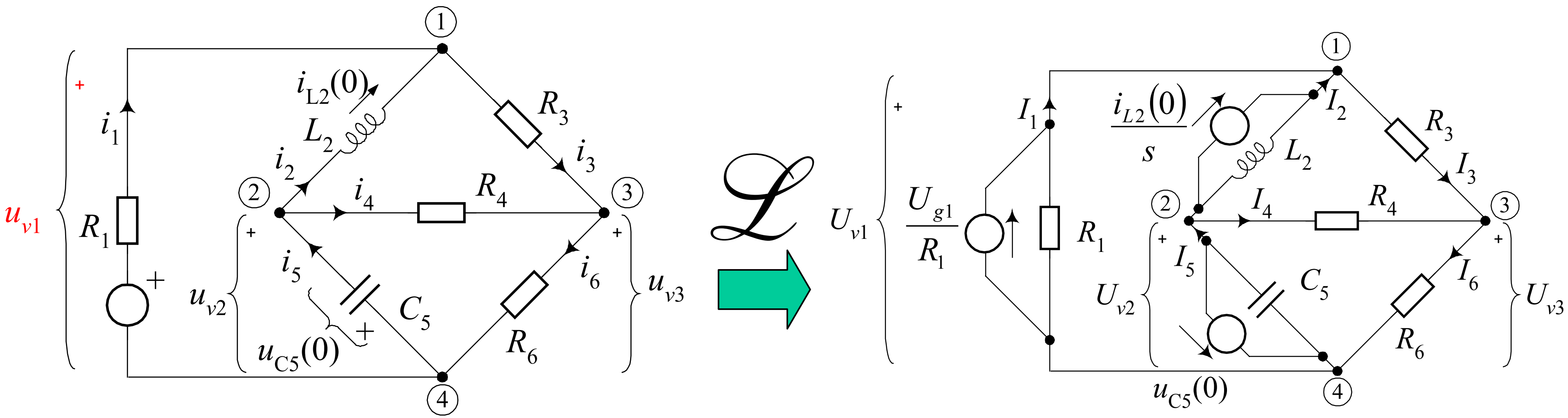
$$\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{sL_2}+\frac{1}{R_3}\right)U_{v1}(s)-\frac{1}{sL_2}U_{v2}(s)-\frac{1}{R_3}U_{v3}(s)=\frac{U_{g1}(s)}{R_1}+\frac{i_{L2}(0)}{s}$$

$$-\frac{1}{sL_2}U_{v1}(s)+\left(\frac{1}{sL_2}+\frac{1}{R_4}+sC_5\right)U_{v2}(s)-\frac{1}{R_4}U_{v3}(s)=-\frac{i_{L2}(0)}{s}-C_5u_{C5}(0)$$

$$-\frac{1}{R_3}U_{v1}(s)-\frac{1}{R_4}U_{v2}(s)+\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_6}\right)U_{v3}(s)=0$$

gdje je $u_{C5}(0)=-u_{v2}(0)$.

- Jednadžbe čvorišta je moguće pisati i direktno u domeni kompleksne frekvencije *s*, uz prethodnu pripremu :
  - transformirati mrežu u frekvencijsku domenu
  - neovisne izvore i početne veličine prikazati kao strujne izvore



- Za čvorišta 1, 2 i 3 moguće je direktno pisati jednadžbe KZS.
- Jedna strana svake jednadžbe → suma ulazećih struja strujnih izvora
- Druga strana → suma struja pasivnih elemenata

$$\frac{U_{g1}(s)}{R_1}+\frac{i_{L2}(0)}{s}=\frac{1}{R_1}U_{v1}(s)+\frac{1}{sL_2}\left(U_{v1}(s)-U_{v2}(s)\right)+\frac{1}{R_3}\left(U_{v1}(s)-U_{v3}(s)\right)$$

$$-\frac{i_{L2}(0)}{s}-C_5u_{C5}(0)=\frac{1}{sL_2}\left(U_{v2}(s)-U_{v1}(s)\right)+\frac{1}{R_4}\left(U_{v2}(s)-U_{v3}(s)\right)+sC_5U_{v2}(s)$$

$$0=\frac{1}{R_3}\left(U_{v3}(s)-U_{v1}(s)\right)+\frac{1}{R_4}\left(U_{v3}(s)-U_{v2}(s)\right)+\frac{1}{R_6}U_{v3}(s)$$

Nakon sređivanja:

$$\frac{U_{g1}(s)}{R_1}+\frac{i_{L2}(0)}{s}=\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{sL_2}+\frac{1}{R_3}\right)U_{v1}(s)-\frac{1}{sL_2}U_{v2}(s)-\frac{1}{R_3}U_{v3}(s)$$

$$-\frac{i_{L2}(0)}{s}-C_5u_{C5}(0)=-\frac{1}{sL_2}U_{v1}(s)+\left(\frac{1}{sL_2}+\frac{1}{R_4}+sC_5\right)U_{v2}(s)-\frac{1}{R_4}U_{v3}(s)$$

$$0=-\frac{1}{R_3}U_{v1}(s)-\frac{1}{R_4}U_{v2}(s)+\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_6}\right)U_{v3}(s)$$

Jednadžbe krugova

- Konačna forma jednadžbi čvorišta:
- Orijentacije napona čvorišta → znak + na čvorištu koje nije referentno.
- Lijeva strana jednadžbe → suma strujnih izvora čije struje ulaze u čvorište
- Desna strana → suma struja u granama s pasivnim elementima:
  - struja nastala djelovanjem napona promatranoga čvorišta i
  - sume struja suprotnih smjerova nastalih djelovanjem napona ostalih čvorišta.
- Ovakav način pisanja jednadžbi → ***jednadžbe čvorišta***.

- U matričnoj formi $\mathbf{I}_g = \mathbf{Y}_v \cdot \mathbf{U}_v$

- $\mathbf{U}_v$ → vektor napona čvorišta

$$\mathbf{U}_v = \begin{bmatrix} U_{v1} \\ U_{v2} \\ U_{v3} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{I}_g$ → vektor strujnih izvora

$$\mathbf{I}_g = \begin{bmatrix} \dfrac{U_{g1}(s)}{R_1} + \dfrac{i_{L2}(0)}{s} \\ -\dfrac{i_{L2}(0)}{s} - C_5 u_{C5}(0) \\ 0 \end{bmatrix}$$

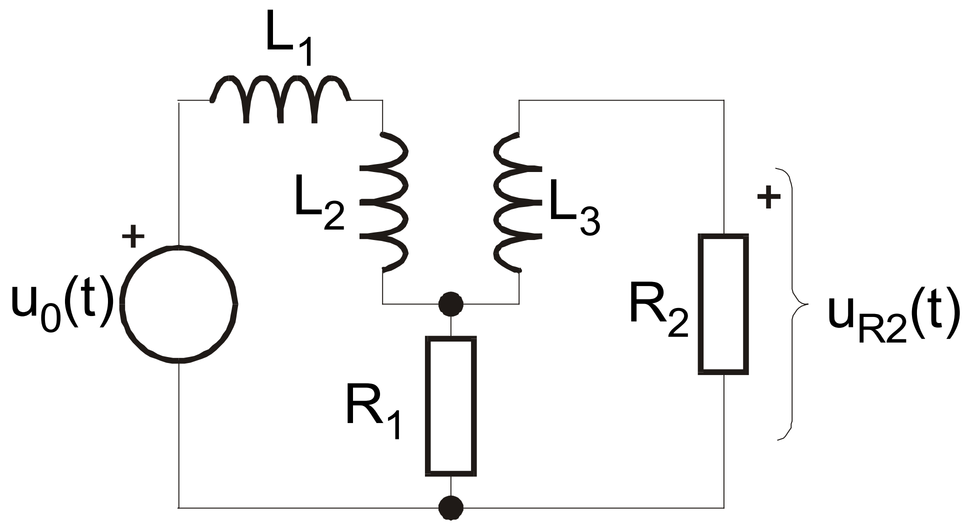
$$\mathbf{I}_g = \mathbf{Y}_v \cdot \mathbf{U}_v$$

$\mathbf{Y}_v$ kvadratna matrica → **matrica admitancija čvorišta**.

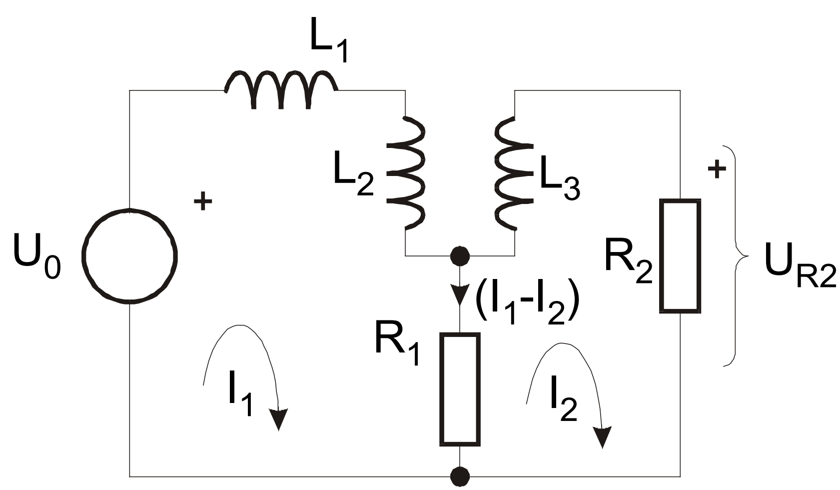
$$\mathbf{Y}_v = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1}+\frac{1}{sL_2}+\frac{1}{R_3} & -\frac{1}{sL_2} & -\frac{1}{R_3} \\ -\frac{1}{sL_2} & \frac{1}{sL_2}+\frac{1}{R_4}+sC_5 & -\frac{1}{R_4} \\ -\frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_4} & \frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_6} \end{bmatrix}$$

- Element glavne dijagonale matrice
- → suma admitancija grana vezanih na promatrano čvorište.
- Elementi izvan glavne dijagonale
- → admitancije grana, spojenih na dva promatrana čvorišta.
- Negativni predznaci elemenata izvan glavne dijagonale
  →posljedica odabira orijentacija napona čvorišta.

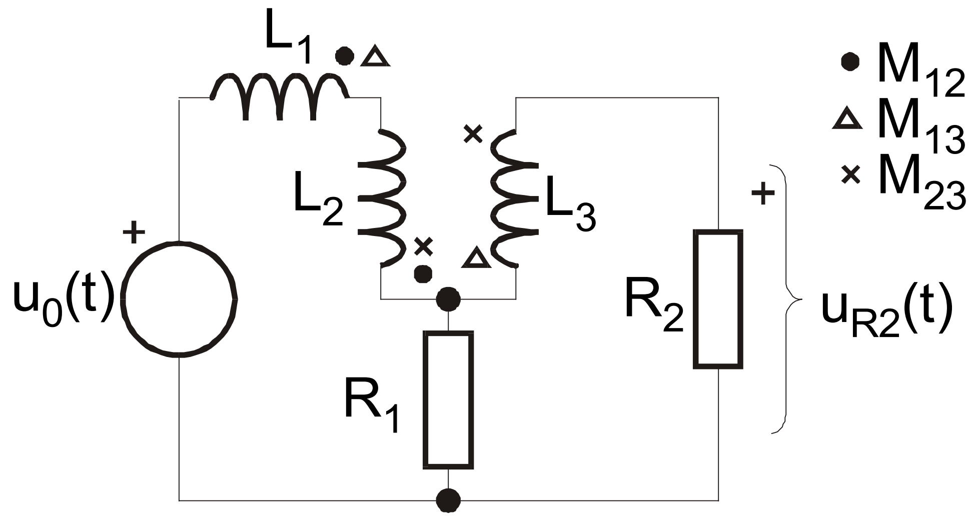
1.A. Za mrežu prikazanu slikom izračunati napon $u_{R2}(t)$ ako su zadane normalizirane vrijednosti elemenata: R_1=1, R_2=1, L_1=1, L_2=2, L_3=4 te napon generatora $u_0(t)=S(t)$.



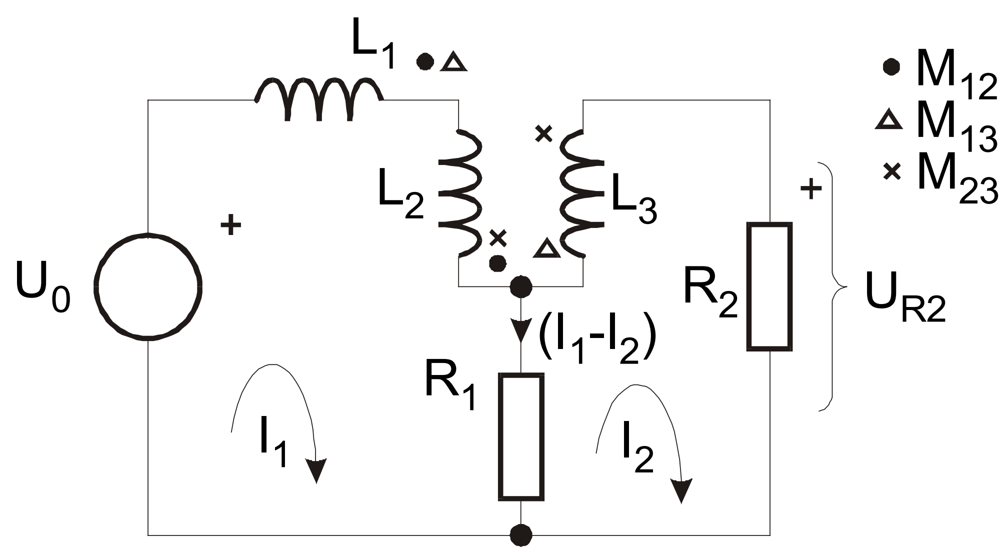
Rješenje:



1.B. Za mrežu prikazanu slikom izračunati napon $u_{R2}(t)$ ako su zadane normalizirane vrijednosti elemenata: R_1=1, R_2=1, L_1=1, L_2=2, L_3=4, M_{12}=1/2, M_{13}=2, M_{23}=3 te napon generatora $u_0(t)=S(t)$.



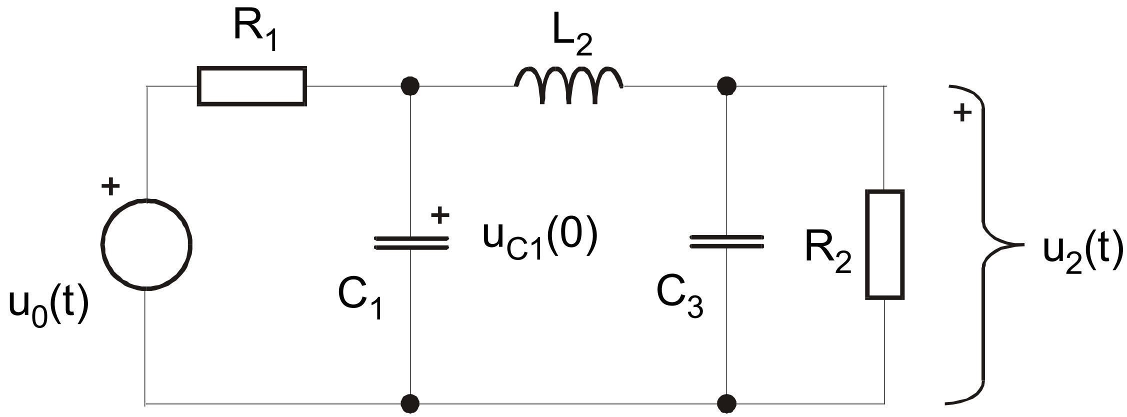
Rješenje:

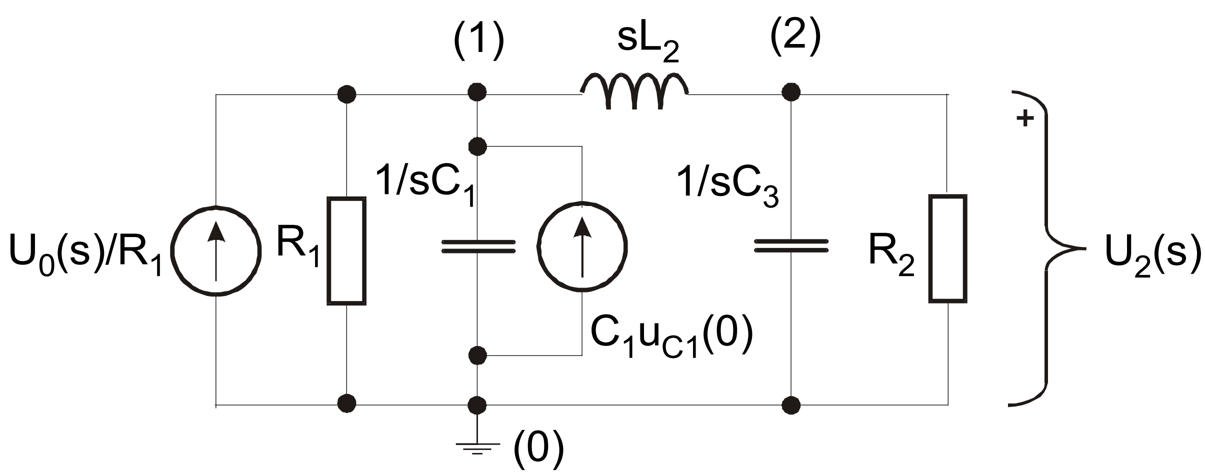


2.Izračunati odziv napona $u_2(t)$ na otporu R_2 za mrežu prikazanu slikom. Zadana je pobuda, početni napon na kapacitetu C_1 i normalizirane vrijednosti elemenata.

$u_0(t) = \delta(t)$ $\quad R_1 = R_2 = 1$ $\quad C_1 = C_3 = 1$

$u_{C1}(0) = 1$ $\quad L_2 = 2$

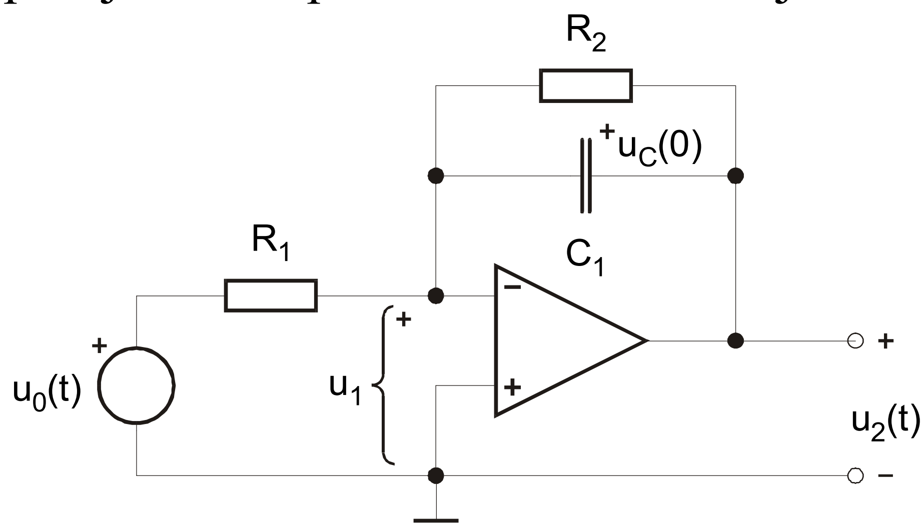




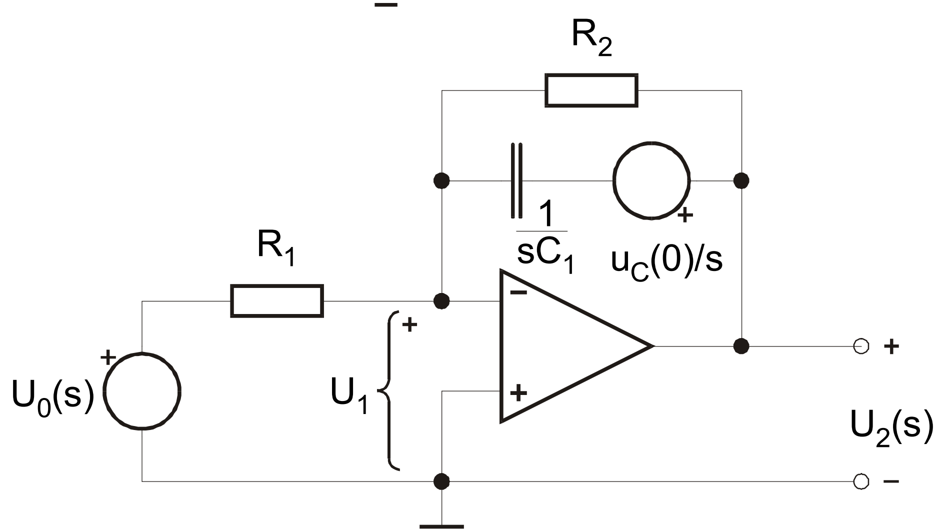
3. Za mrežu na slici odrediti i skicirati odziv napona $u_2(t)$ ako je zadano:

$$u_0(t) = S(t),\ R_1 = 1,\ R_2 = 1,\ C_1 = 1,\ u_C(0) = 1$$

Odziv izračunati primjenom Laplaceove transformacije.

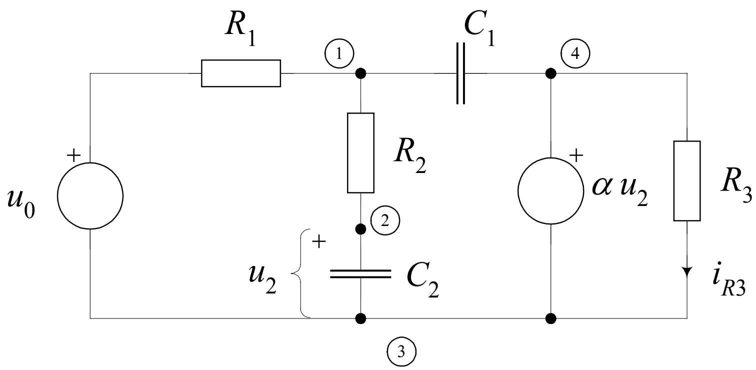


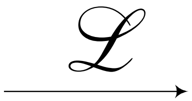
Rješenje:

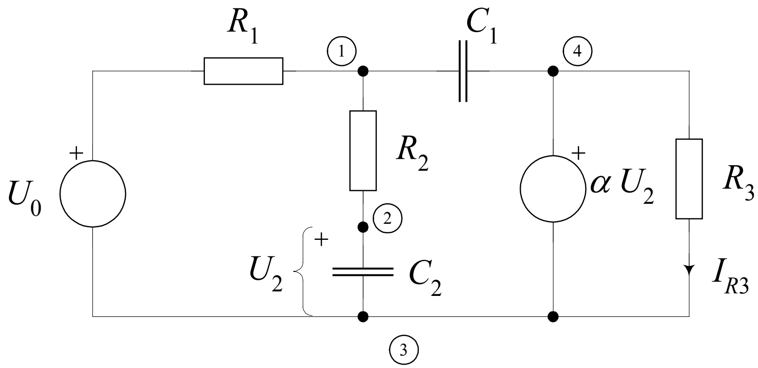


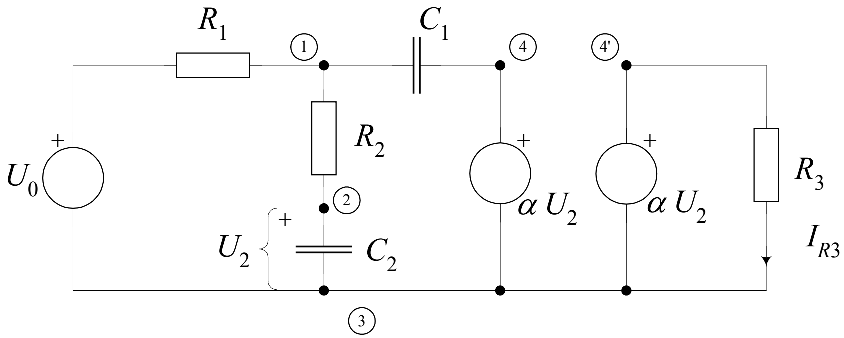
4. Odredite odziv $i_{R3}(t)$ mreže na slici ako je pobuda $u_0(t) = \delta(t)$.

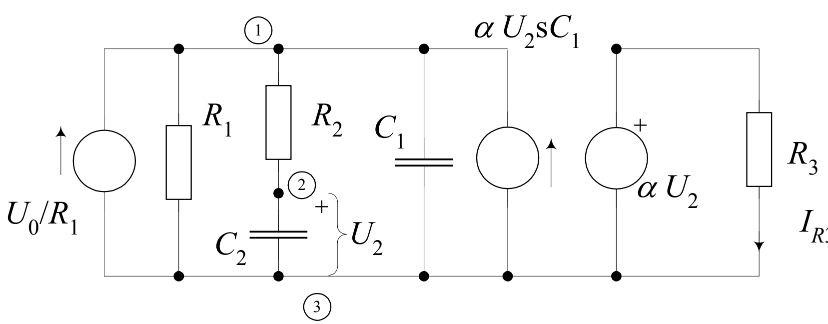
Zadano je: $R_1 = R_2 = 1,\ C_1 = C_2 = 2,\ \alpha = 2,\ R_3 = 2$



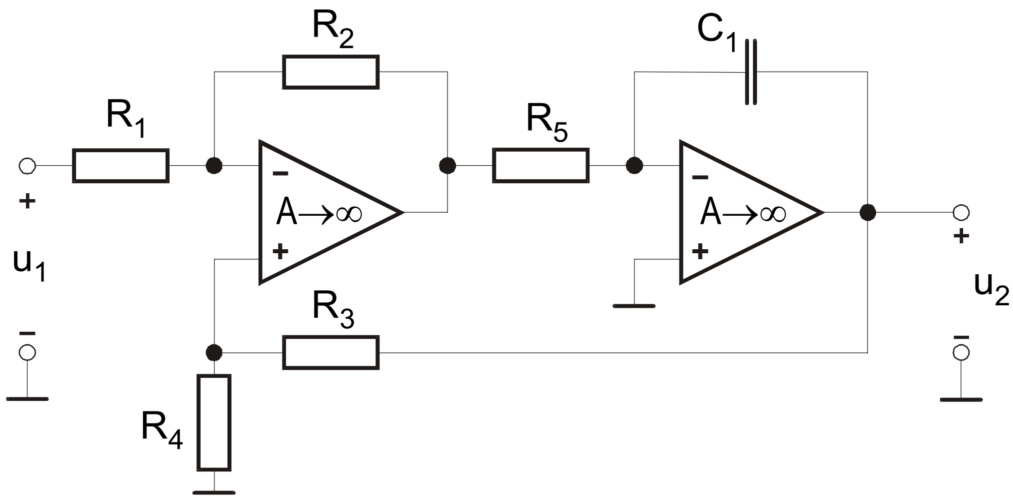








5. Odrediti odziv $U_2(s)$ za mrežu prikazanu slikom ako je pobuda $U_1(s) = \frac{1}{s}$.
Zadano je $R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=1$, $C_1=1$.



Rješenje: