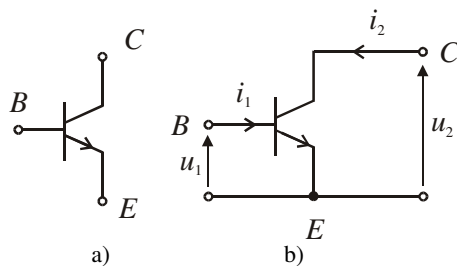


IV. PREDAVANJE

Ovisnost broja prilaza o načinu spoja i načinu primjene naprave. Linearni zavisni izvori. Četiri osnovne vrste linearnih zavisnih izvora. Primjer dobivanja negativnog otpora. Idealno operacijsko pojačalo - konstitutivne relacije u linearnom i nelinearnom području rada. Primjer invertirajućeg pojačala. Idealni transformator: konstitutivne relacije, svojstva. Girator - konstitutivne relacije. Transformacija kapaciteta u induktivitet i obratno.

4. VIŠEPRILAZNI DISIPATIVNI ELEMENTI (OTPORI)

U skladu s izloženim u drugom poglavlju svaka naprava (komponenta) sa dva priključka je jednoprilaz. No, to *ne znači* da komponenta sa $2m$ priključaka ($m > 1$) mora biti m -prilaz. Broj prilaza ovisi o tome kako je promatrana komponenta spojena s ostalim komponentama kao i na koja pitanja u analizi se želi odgovor. Pokažimo to na primjeru bipolarnog tranzistora.



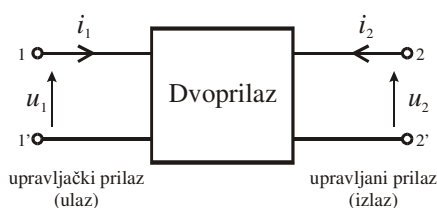
Sl. 4.1 a) Simbol bipolarnog tranzistora
b) Bipolarni tranzistor kao dvoprilaz.

Bipolarni tranzistor možemo smatrati dvoprilazom ako jedan od priključaka shvatimo kao zajednički za oba prilaza (recimo emitterski priključak kao na slici 4.1.b) i ako nas interesira analiza rada bipolarnog tranzistora u sklopu nekog pojačala. U tom je slučaju za razumijevanje rada bitan odnos između varijabli kruga baze i kruga kolektora. Ako nas, međutim, interesira rad bipolarnog tranzistora kao energetske sklopke tada je sa stajališta analize nebitna analiza kruga baze i bipolarni tranzistor valja smatrati jednoprilazom.

Zaključimo: broj prilaza neke komponente sa $m \geq 3$ priključka određuje način *spoja s ostalim komponentama i način primjene*.

4.1 LINEARNI ZAVISNI IZVORI

U nastavku analize ograničit ćemo se samo na dvoprilaze, dakle na elemente mreže električna svojstva kojih su dana samo s obzirom na dva para priključaka (dva prilaza), slika 4.2.



Sl. 4.2 Dvoprilaz i pridruženi referentni smjerovi napona i struje.

Referentni smjerovi napona i struja su pridruženi, te vrijedi

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 \begin{cases} > 0, & \text{dvoprilaz je pasivan (trošilo)} \\ < 0, & \text{dvoprilaz je aktivan (izvor)} \end{cases}$$

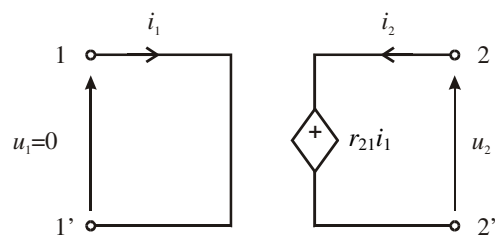
U elektrotehnici postoji čitav niz dvoprilaznih disipativnih komponenata koje se na jednom od svojih prilaza, obično ga nazivamo izlazom, ponašaju *kao strujni ili naponski izvori*, no vrijednosti struja odnosno napona tih "izvora" *nisu nezavisne* nego ih određuje bilo napon bilo struja koji djeluju na ulazu komponente. Tipični primjeri su bipolarni tranzistor, MOSFET, istosmjerni generator i dr.

U najjednostavnijem modelu ovih komponenata pretpostavljamo da je

- dvoprilaz *linearan*,
- snaga upravljanja $p_1 = u_1 i_1 = 0$
- izvor *idealan*: $u_2 \neq f(i_2)$; $i_2 \neq g(u_2)$, i da
- dvoprilaz *nije recipročan*, tj. upravljani prilaz ne djeluje na upravljački prilaz.

Uvjet b) je moguć, ili ako je $i_1(t) \equiv 0$, što znači da je izvor *upravljan naponom*, ili ako je $u_1(t) \equiv 0$, što znači da je izvor *upravljan strujom*.

4.1.1 Strujom upravljani naponski izvor (SU/NI)



Sl. 4.3 Simbol i pridruženi referentni smjerovi napona i struja strujom upravljanog naponskog izvora.

Uzevši u obzir prve tri pretpostavke proizlazi da je konstitutivna relacija ovog izvora dana izrazom

$$u_2 = r_{21} i_1 \quad (1)$$

gdje je sa r_{21} označena tzv. *prijenosna otpornost*. Izlazna snaga je

$$p_2 = u_2 i_2 = r_{21} i_1 i_2 \geq 0$$

jer su i_1 i i_2 međusobno nezavisni!

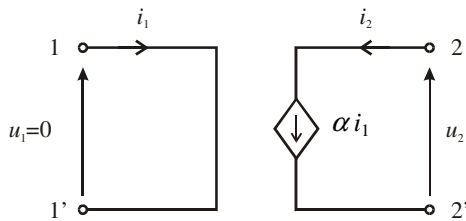
Napomena: Izraz (1) valja čitati ovako: Posljedica (izlazna veličina) $u_2(t)$ jest linearna funkcija uzroka (ulazne veličine) $i_1(t)$. Matematički je korektno napisati izraz (1) i ovako:

$$i_1 = \frac{1}{r_{21}} u_2$$

ali to s fizikalnog stajališta ne znači ništa! Analogno će vrijediti i za sve ostale linearne zavisne izvore.

Istosmjerni generator jest tipičan primjer naprave koja se može modelirati kao strujom upravljani naponski izvor. Tada je i_1 - struja uzbude, a u_2 - napon armature.

4.1.2 Strujom upravljani strujni izvor (SU/SI)



Sl. 4.4 Simbol i pridruženi referentni smjerovi napona i struja strujom upravljanoj strujnoj izvora.

Konstitutivna relacija glasi

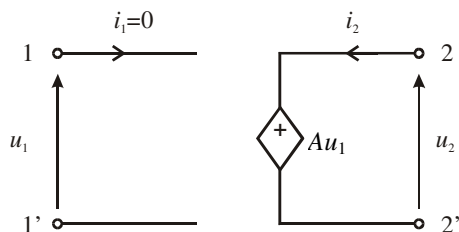
$$i_2 = \alpha i_1 \quad (2)$$

gdje je sa α označen *prijenosni omjer struja*. Također, zbog nezavisnosti u_2 i i_1 vrijedi da je

$$p_2 \geq 0!$$

Tipični primjer naprave modelirane kao SU/SI jest *bipolarni tranzistor*.

4.1.3 Naponom upravljani naponski izvor (NU/NI)



Sl. 4.5 Simbol i pridruženi referentni smjerovi napona i struja naponom upravljanoj naponskoj izvora.

Konstitutivna relacija glasi

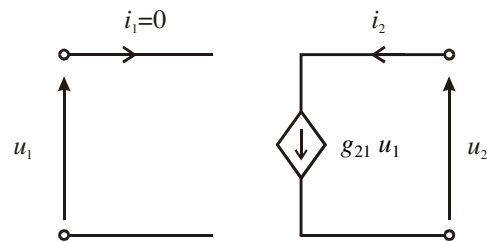
$$u_2 = A u_1 \quad (3)$$

gdje je sa A označen *prijenosni omjer napona*. Također, zbog nezavisnosti u_1 i i_2 vrijedi da je

$$p_2 \geq 0!$$

Tipični primjer naprave modelirane kao NU/NI jest *operacijsko pojačalo*.

4.1.4 Naponom upravljani strujni izvor (NU/SI)



Sl. 4.6 Simbol i pridruženi referentni smjerovi napona i struja naponom upravljanoj strujnoj izvora.

Konstitutivna relacija glasi

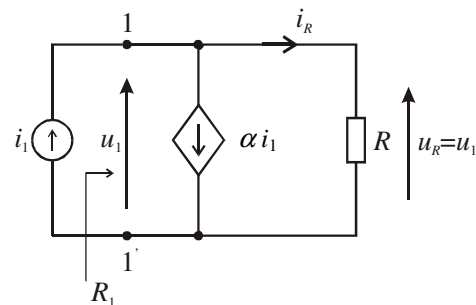
$$i_2 = g_{21} u_1 \quad (4)$$

gdje je sa g_{21} označena *prijenosna vodljivost*. Također, zbog nezavisnosti u_1 i u_2 vrijedi da je

$$p_2 \geq 0!$$

Tipični primjer naprave modelirane kao NU/SI jest *MOSFET*.

Primjer: Odredite nadomjesnu otpornost R_1 sklopa sheme spoja prema slici 4.7.



Sl. 4.7 Odabere li se da je $\alpha = 2$, to je $R_1 = -R!$

Proizlazi da je

$$i_1 = \alpha i_1 + \frac{1}{R} u_1 \Rightarrow u_1 = R(1 - \alpha) i_1$$

odnosno

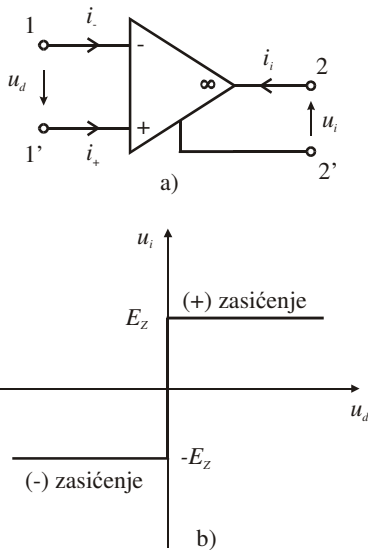
$$R_1 = (1 - \alpha) R$$

4.2 IDEALNO OPERACIJSKO POJAČALO (IOP)

Idealno operacijsko pojačalo jest element mreže definiran sljedećim konstitutivnim relacijama:

$i_- = 0$;	$i_+ = 0$	(5a)
$u_d = 0$;	$-E_Z < u_i < E_Z$	linearno područje rada (5b)
$u_i = E_Z \frac{u_d}{ u_d }$;	$u_d \neq 0$	nelinearno područje rada (5c)

pri čemu su sve oznake i njihovo značenje dani na slici 4.8. Pri tome se ulazni napon u_d naziva *napon diferencije* (razlike), a sa u_i označen je *izlazni napon*. E_Z je tzv. *napon*



Sl. 4.8 a) Simbol idealnog operacijskog pojačala (IOP).
b) Karakteristika IOP-a.

zasićenja i u stvarnim operacijskim pojačalima nešto je niži od istosmjernog napona napajanja pojačala. U linearnom području rada idealno operacijsko pojačalo je

- posebni slučaj naponom upravljano naponskog izvora sa $A \rightarrow \infty$, i
- zbog $u_d = 0$ *virtualni kratki spoj*.

Napomena: Idealno operacijsko pojačalo je model stvarnog operacijskog pojačala. U literaturi se često pri analizi sklopova s operacijskim pojačalima operacijsko pojačalo prikazuje samo s pomoću tri priključka 1, 1' i 2 dok je priključak na masu (zemlju) 2' ispušten. Za razliku od ostala tri priključka na stvarnom operacijskom pojačalu *taj priključak i ne postoji* nego se napon izlaza u_i definira u odnosu na srednju točku izvora za napajanje. Iako fizički ne postoji, priključak 2' se u analizi mreža s operacijskim pojačalima *mora naznačiti*. U protivnom bi u skladu sa KZS-om, izraz (1.3) i konstitutivnom relacijom (5a) uvijek vrijedilo da je

$$i_i = 0$$

što nije točno!

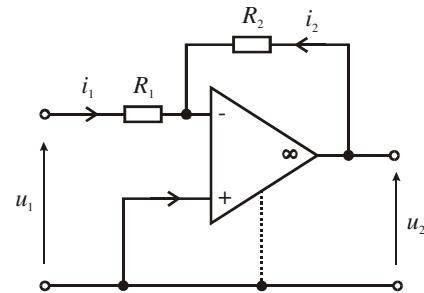
Primjer: Odredite izlazni napon sklopa sheme spoja prema slici 4.9 ako se idealno operacijsko pojačalo nalazi u linearnom području rada.

Rješenje: Kako je $u_d = 0$, to vrijede jednačbe KZN-a

$$u_1 = R_1 i_1; u_2 = R_2 i_2$$

Budući da je zbog $i_- = 0$,

$$i_1 + i_2 = 0$$



Sl. 4.9 Operacijsko pojačalo u spoju invertirajućeg pojačala.

to dobivamo da je

$$\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} = 0$$

odnosno

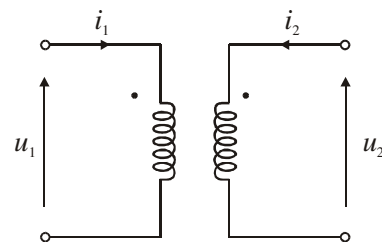
$$u_2 = -\frac{R_2}{R_1} u_1.$$

4.3 IDEALNI TRANSFORMATOR

Idealni transformator je dvoprilaz definiran konstitutivnim relacijama

$$u_1 = n u_2; i_2 = -n i_1 \quad (6)$$

gdje je n realni broj i naziva se *prijenosni omjer*.



Sl. 4.10 Simbol i pridruženi referentni smjerovi napona i struja idealnog transformatora.

Svojstva idealnog transformatora:

a) **neenergetski element**

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 = u_1 i_1 + \frac{u_1}{n} \cdot (-n i_1) = 0 \quad (7)$$

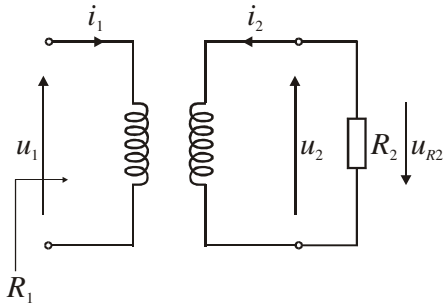
b) transformacija veličina trošila

Odredimo nadomjesnu otpornost R_1 sklopa sheme spoja prema slici 4.11. Uvrste li se u jednadžbu KZN-a

$$u_2 + R_2 i_2 = 0$$

konstitutivne relacije dane izrazima (6), to dobivamo

$$\frac{u_1}{n} + R_2(-ni_1) = 0$$

Sl. 4.11 Transformacija veličina trošila na primjeru otpora R_2 .

odnosno

$$u_1 = n^2 R_2 i_1$$

ili

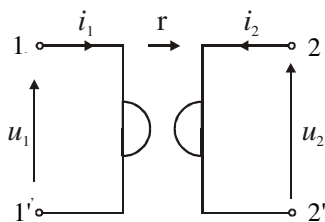
$$R_1 = n^2 R_2.$$

4.4 GIRATOR (H. Tellegen, 1952.)

Girator je dvoprilaz definiran konstitutivnim relacijama

$$u_1 = r i_2; \quad u_2 = -r i_1 \quad (8)$$

gdje je r realni broj i naziva se **omjer zakretanja**.



Sl. 4.12 Simbol i pridruženi referentni smjerovi napona i struje giratora.

Svojstva giratora:

a) *neenergetski element*

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 = u_1 i_1 + (-r i_1) \cdot \frac{u_1}{r} = 0 \quad (9)$$

b) transformacija kapaciteta u induktivitet i obratno (slika 4.13)

Iz

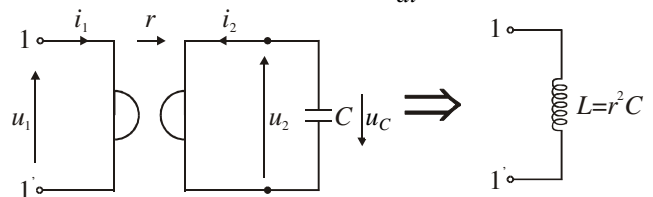
$$u_2 + u_C = 0, \quad i_2 = i_C = C \frac{du_C}{dt}$$

proizlazi da je

$$i_2 = -C \frac{du_2}{dt}$$

tj. da je

$$u_1 = r i_2 = -r C \frac{du_2}{dt}$$



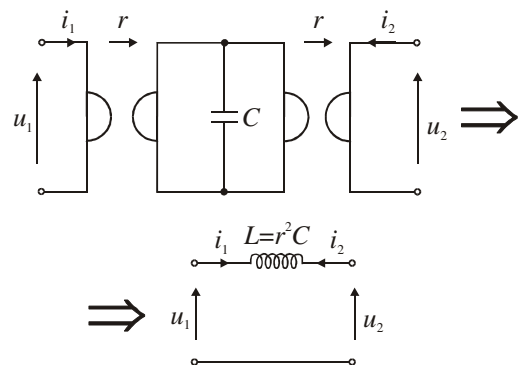
Sl. 4.13 Transformacija kapaciteta u induktivitet.

No, jer je $u_2 = -r i_1$, to odmah dobivamo da je

$$u_1 = -r C \left(-r \frac{di_1}{dt} \right) = r^2 C \frac{di_1}{dt} = L \frac{di_1}{dt}$$

te je

$$L = r^2 C \quad (10)$$



Sl. 4.14 Realizacija "lebdećeg" induktiviteta.

Napomena: Pri izvedbi niskopropusnih reaktivnih filtara induktivitet se nalazi u uzdužnoj grani filtra. Oba priključka induktiviteta realiziranog s pomoću giratora moraju biti slobodna. Slika 4.14 prikazuje kako se to realizira.