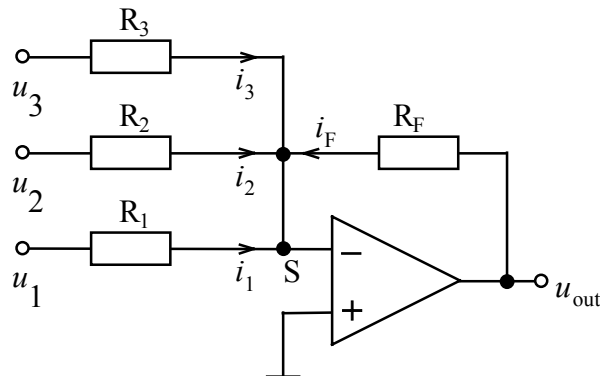


3. Osnovna linearna in nelinearna vezja z operacijskim ojačevalnikom

3.1 Seštevalnik

Vezje seštevalnika realiziranega na invertirajočem vhodu kaže spodnja slika. Napetosti, ki jih želimo sešteti, moramo priključiti z enako polariteto prek vhodnih uporov. Število teh uporov je poljubno, saj zaradi tokovne primerjave v sumacijski točki S, kjer je $u_d \rightarrow 0$, ne vplivajo na ostale vhodne napetosti.



Slika: Seštevalnik

V sumacijski točki velja enakost tokov

$$i_1 + i_2 + \dots + i_3 + i_F = 0$$

oziroma

$$\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \dots + \frac{u_3}{R_3} + \frac{u_{out}}{R_F} = 0.$$

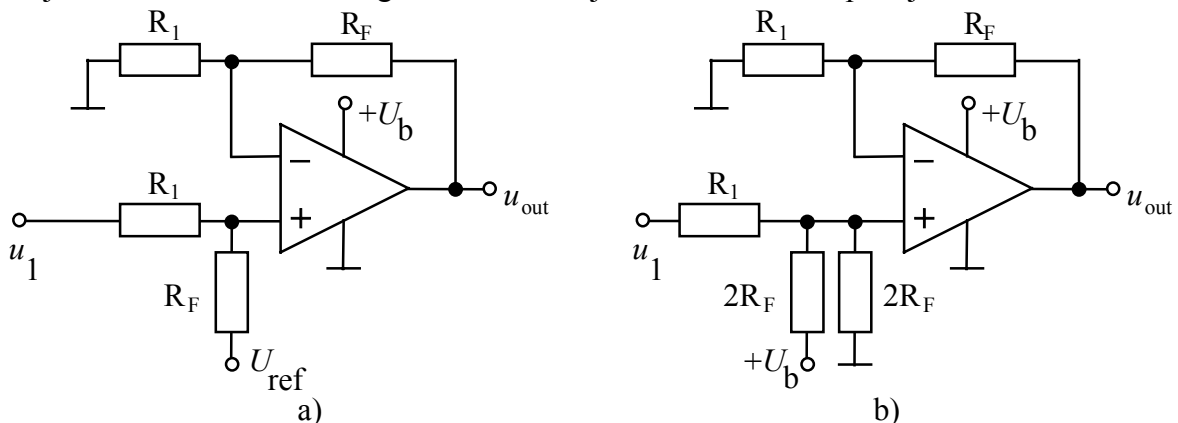
Izhodna napetost znaša

$$-u_{out} = \frac{R_F}{R_1} \cdot u_1 + \frac{R_F}{R_2} \cdot u_2 + \dots + \frac{R_F}{R_3} \cdot u_3.$$

Če imajo vsi upori enako upornost velja

$$u_{out} = -\sum_{i=1}^n u_i.$$

Vezje seštevalnika realiziranega na neinvertirajočem vhodu kaže spodnja slika



Slika: Seštevalnik na neinv. vhodu oziroma ojačevalnik z enojnim napajanjem OP-ja
Izhodna napetost vezja na sliki _a

$$u_{out} = U_{ref} + \frac{R_F}{R_1} u_1.$$

je enaka vsoti referenčne napetosti in vhodne napetosti priključene na upor R_1 .

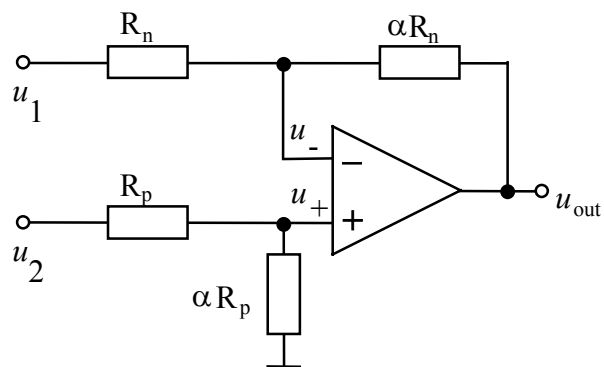
Prikazani seštevalnik je pravzaprav neinvertirajoči ojačevalnik vhodne napetosti u_1 , ki ji je superponirana enosmerna napetost U_{ref} . Pomen vezja se razkrije v primerih, ko imamo za napajanje operacijskega vezja na razpolago le unipolarni napetostni vir ($0, +U_B$).

Če je referenčna napetost enaka polovični vrednosti napajalne napetosti U_b (slika _b), je izhodna napetost enaka

$$u_{out} = \frac{U_b}{2} + \frac{R_F}{R_1} u_1.$$

3.2 Odštevalnik

Vezje odštevalnika dveh napetosti kaže spodnja slika. Vezje je kombinacija ojačevalnika na invertirajočem in neinvertirajočem vhodu.



Slika: Odštevalnik

Na invertirajočem vhodu velja

$$\frac{u_1 - u_-}{R_n} + \frac{u_{out} - u_-}{\alpha R_n} = 0 \quad \text{in s tem} \quad \alpha u_1 + u_{out} = u_- (\alpha + 1).$$

Medtem je napetost na neinvertirajočem vhodu določena z delilnikom napetosti

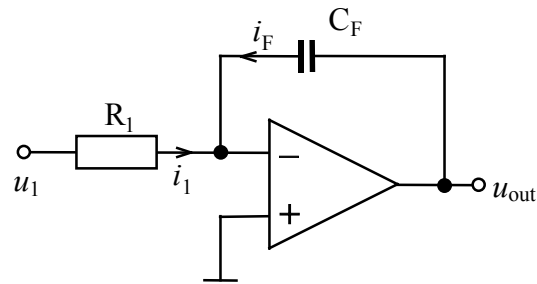
$$u_+ = u_2 \frac{\alpha}{\alpha + 1}.$$

Ker velja $u_p = u_n$, dobimo

$$u_{out} = \alpha(u_2 - u_1).$$

Pogosto izberemo upora $R_n = R_p$ enaka, s čimer zagotovimo tudi optimalne razmere za izničenje vpliva mirovnih tokov.

3.3 Integrator



Slika: Vežje integratorja

Z upoštevanjem tokovnega ravnovesja v sumacijski točki virtualne mase

$$i_1 + i_F = 0 \text{ oziroma } \frac{u_1}{R_1} + C_F \frac{du_{out}}{dt} = 0$$

lahko izhodno napetost zapišemo kot

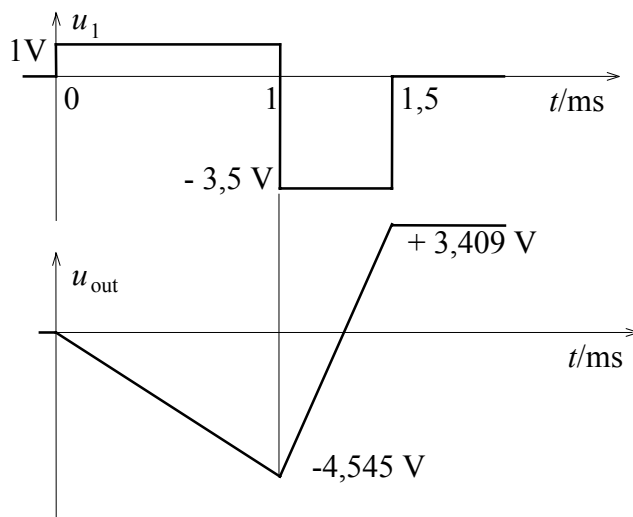
$$du_{out} = -\frac{1}{R_1 C_F} u_1 dt.$$

Z integracijo zgornje enačbe in upoštevanjem časovne konstante integratorja $T_I = R_1 \cdot C_F$ dobimo

$$u_{out}(t) = -\frac{1}{T_I} \int_0^t u_1(t) dt + U_{out}(0),$$

kjer je $U_{out}(0)$ vrednost napetosti na kondenzatorju v začetku integriranja.

Primer: Opraviti imamo z integratorjem z $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ in $C_F = 22 \text{ nF}$ in ničelnim začetnim pogojem. Določimo potek izhodne napetosti, če ima vhodna napetost potek, ki ga kaže spodnji oscilogram. Opazimo, da se izhodna napetost spreminja le, če je vhodna napetost različna od nič.



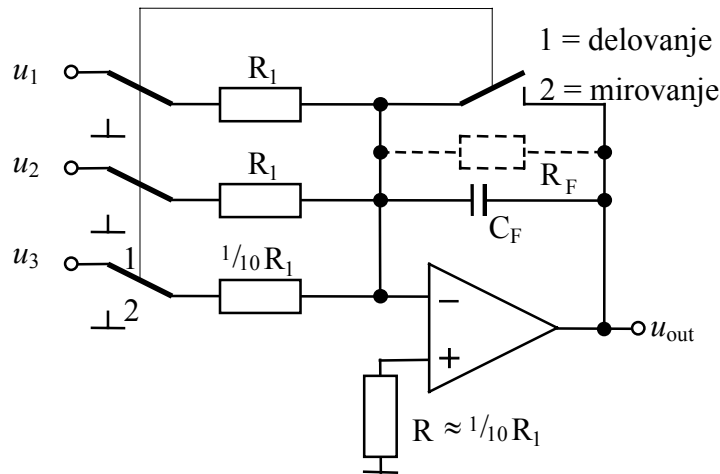
Slika: Odziv integratorja na vhodno napetost

V času časovne konstante T_I se izhodna napetost spremeni ravno za iznos vhodne napetosti.

Zgoraj opisano delovanje se močno razlikuje od realnega, kjer mirovni tok in preostala napetost OP-ja povzročita, da se izhodna napetost spreminja tudi, ko je vhodna napetost enaka nič. Napako zaradi mirovnega toka lahko zmanjšamo, če med neinverzirajoč vhod in maso priključimo dodaten upor z enako upornostjo R_1 . Kompenzacija preostale (offset) napetosti je kljub temu še vedno obvezna.

Omenjeni ukrepi so pogosto obvezni, saj v praksi pogosto nastopi primer, ko želimo integrirati vhodni signal le določen čas. Če želimo integrirati vsoto večih vhodnih signalov, uporabimo integracijsko vezje na sliki, kjer ima eden izmed vhodov 10-krat večjo utež (veljavo) kot ostala dva.

“Lezenje” izhodne napetosti lahko dodatno zmanjšamo, če kondenzatorju vzporedno vežemo upor $R_F \gg R_1$ (črtkano). Za integratorje uporabljamo pretežno operacijske ojačevalnike s FET vhodno stopnjo zaradi majhnih mirovnih tokov.



Slika: Integrator z različnimi utežmi vhodnih signalov

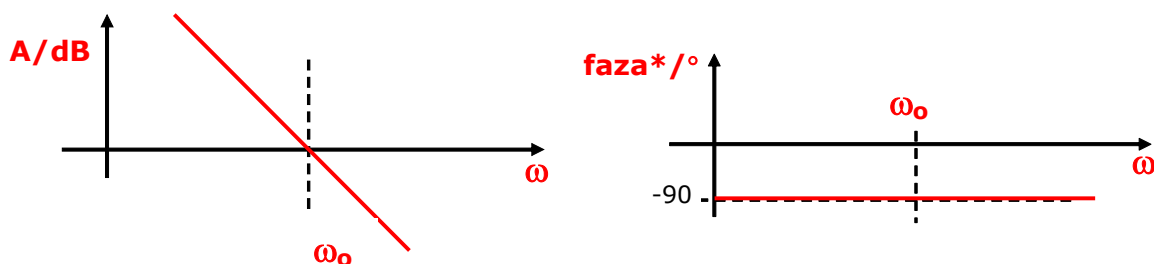
Frekvenčno karakteristiko osnovnega vezja integratorja izpeljemo iz enakosti tokov v sumacijski točki $I_1 + I_F = 0$, od kjer dobimo

$$\frac{U_1}{R_1} + j\omega C_F \cdot U_{out} = 0$$

ter od tu

$$U_{out}(j\omega) = -\frac{1}{j\omega R_1 C_F} U_1(j\omega) .$$

Amplitudno-frekvenčno odvisnost od frekvence vzbujanega signala razkriva spodnja slika

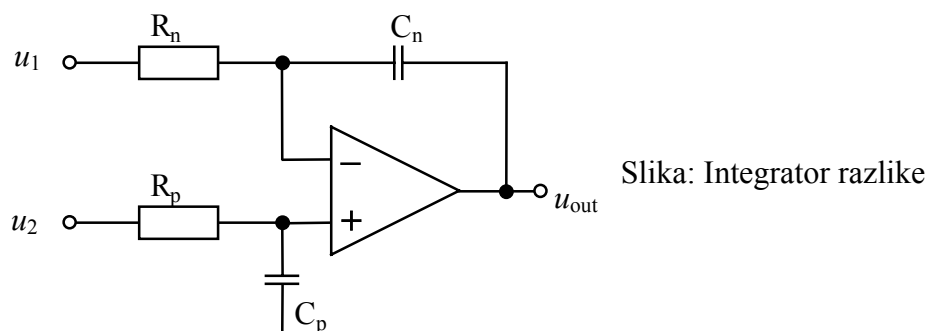


Slika: Bodejev diagram integratorja (faza = $180^\circ + \text{faza}^*$)!

Prenosna funkcija integratorja (v slikovnem prostoru) znaša

$$F(p) = \frac{U_{out}(p)}{U_1(p)} = -\frac{1}{T_I p} .$$

Integrator razlike dveh vhodnih signalov, ki temelji na odštevalnem vezju, kaže spodnja slika.



Slika: Integrator razlike

Če predpostavimo $R_n C_n = R_p C_p = T_I$, potem je trenutna vrednost izhodne napetosti

$$u_{out}(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t (u_2 - u_1) dt + U_{out}(0),$$

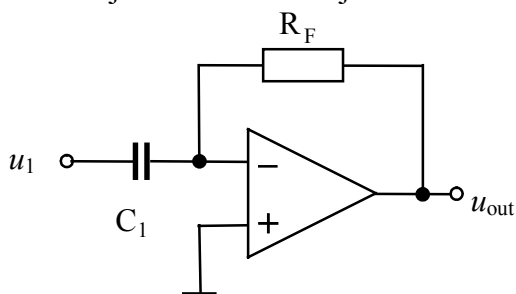
medtem ko je v slikovnem prostoru enaka

$$U_{out}(p) = \frac{1}{T_I p} (U_2(p) - U_1(p)).$$

Vezje uporabljamo predvsem tam, kjer moramo integrirati razliko dveh signalov, pri čemer želimo, da bi bil vpliv sofazne napetosti čim manjši.

3.4 Diferenciator

Matematično funkcijo diferenciranja izvedemo z vezjem diferenciatorja, ki ga kaže slika.



Slika: Vezje diferenciatorja

Iz tokovnega ravnovesja $i_1 + i_2 = 0$ oziroma $C_1 \frac{du_1}{dt} + \frac{u_{out}}{R_F} = 0$

izpeljemo

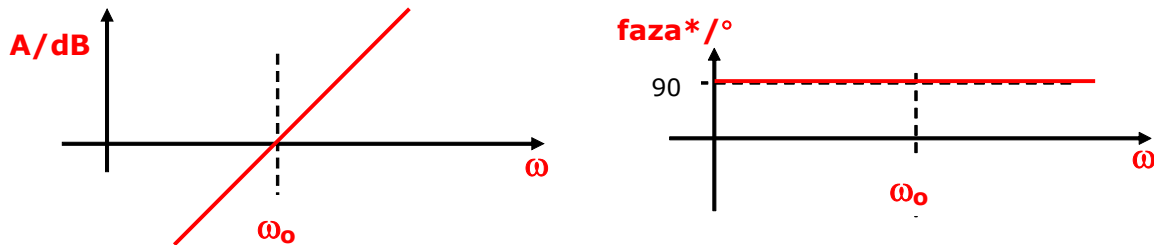
$$u_{out} = -R_F C_1 \frac{du_1}{dt},$$

medtem ko se v frekvenčnem prostoru enačba glasi

$$\frac{U_1(j\omega)}{\frac{1}{j\omega C_1}} + \frac{U_{out}(j\omega)}{R_F} = 0.$$

Od tu dobimo:

$$U_{out}(j\omega) = -j\omega R_F C_1 U_1(j\omega) = -j\omega T_D U_1(j\omega).$$



Slika: Bodejev diagram diferenciatorja (faza = $180^\circ + \text{faza}^*$)!

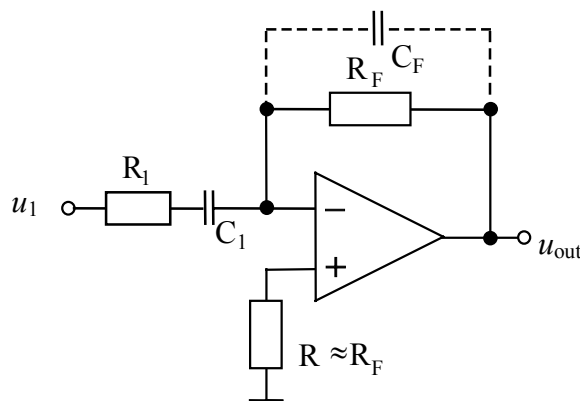
Prenosna funkcija D člana je

$$F(p) = \frac{U_{out}}{U_1} = -pT_D.$$

S prenosne funkcije D člana je razvidno, da ojačenje člana narašča s frekvenco z 20 dB/dekado. Zato je osnovno vezje diferenciatorja s slike praktično neuporabno, saj lahko že majhna vhodna napetost (visokofrekvenčni šum) povzroči nasičenje operacijskega ojačevalnika.

Iz omenjega razloga moramo preoblikovati prenosno funkcijo diferenciatorja z OP tako, da bo prenosna funkcija vezja enaka prenosni funkciji idealnega diferenciatorja le do neke mejne frekvence, nato pa naj začne ojačenje vezja upadati s strmino -20 dB/dekado.

Praktično uporabno vezje diferenciatorja kaže spodnja slika.



Slika: Praktično uporabno vezje diferenciatorja

V začetku analizirajmo vezje brez kondenzatorja C_F . Iz tokovnega ravnovesja $i_1 + i_2 = 0$ izpeljemo

$$\frac{U_1(j\omega)}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} + \frac{U_{out}(j\omega)}{R_F} = 0 \quad \text{od tu:} \quad U_{out} = -\frac{j\omega R_F C_1}{1 + j\omega R_1 C_1} U_1.$$

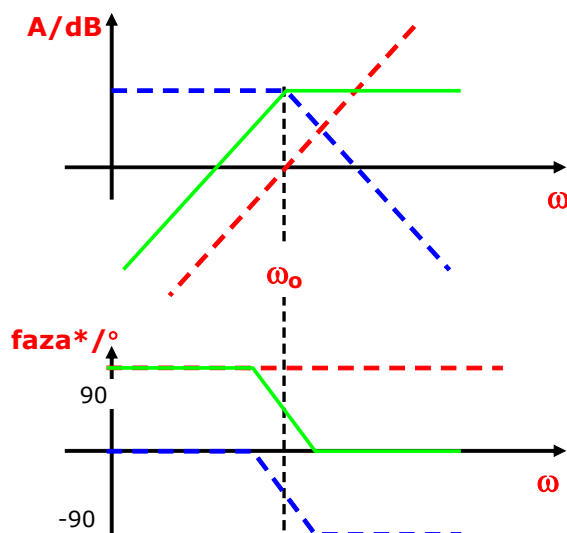
Če zapišemo $T_0 = R_1 C_1$, se izraz za izhodno napetost preoblikuje v

$$U_{out}(j\omega) = -\frac{R_F}{R_1} \cdot \frac{j\omega T_0}{1 + j\omega T_0} \cdot U_1(j\omega).$$

Takšno vezje s prenosno funkcijo

$$F(p) = \frac{U_{out}(p)}{U_1(p)} = -\frac{R_F}{R_1} \cdot \frac{pT_0}{pT_0 + 1}$$

imenujemo diferencialni člen 1.reda (DT₁).



Slika: Frekvenčna karakteristika člena DT₁ (faza = 180°+faza*!).

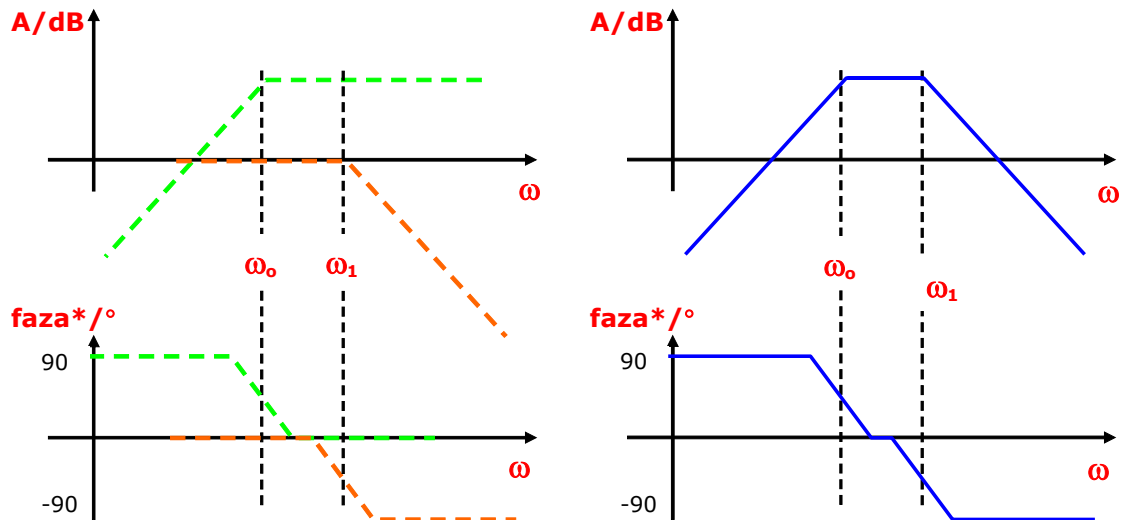
Podobno dobimo z upoštevanjem kondenzatorja C_F

$$U_{out}(j\omega) = -\frac{R_F}{R_1} \cdot \frac{j\omega T_0}{(1 + j\omega T_0)(1 + j\omega T_1)} U_1(j\omega), \text{ kjer je } T_1 = R_F C_F, T_0 = R_1 C_1.$$

Prenosna funkcija vezja z zgornje slike je enaka prenosni funkciji diferencialnega člena 2.reda (DT₂)

$$F(p) = -\frac{R_F}{R_1} \cdot \frac{pT_0}{(1 + pT_0)(1 + pT_1)}.$$

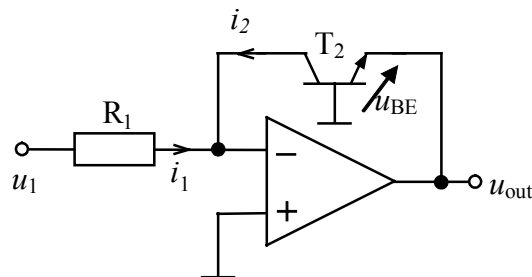
Obnašanje vezja si lažje predstavljamo, če prenosno funkcijo podamo v grafični obliki in sicer v Bodejevem diagramu. Najprej opazimo, da ojačenje vezja narašča z naraščajočo frekvenco z 20 dB/dekado vse od frekvence f_0 , kjer začne upadati z -20 dB/dekado. Maksimalno ojačenje je omejeno z razmerjem R_F/R_1 na končno vrednost.

Slika: Frekvenčna karakteristika člena DT_2 (faza = $180^\circ + \text{faza}^*$)!

V primeru vezja DT_1 pravimo, da se obnaša kot diferenciator le do frekvence $f \ll f_0 = 1/T_0$. Z vzporedno vezanim kondenzatorjem C_F k uporu R_F dosežemo ustrezno zmanjšanje ojačenja pri visokih frekvencah, s čimer preprečimo nasičenje izhoda operacijskega ojačevalnika. Zgornja frekvenčna karakteristika velja za primer, ko sta časovni konstanti različni ($R_1C_1 \neq R_FC_F$).

3.5 Množilnik

Osnovno vezje, na katerem je osnovano vezje analognega množilnika, je t.i. logaritemski ojačevalnik.



Slika: Logaritemski ojačevalnik

Vezje analiziramo kot vsa vezja do sedaj. Bistvena sprememba je v uporabi diode ali še pogosteje bipolarnega tranzistorja v povratni zanki operacijskega ojačevalnika (slika _). Relacija med kolektorskim tokom in napetostima na spoju BE in CB je podana z enačbo

$$i_C \approx I_{ES} \left(e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} - 1 \right) - I_{CS} \left(e^{\frac{u_{BC}}{U_T}} - 1 \right).$$

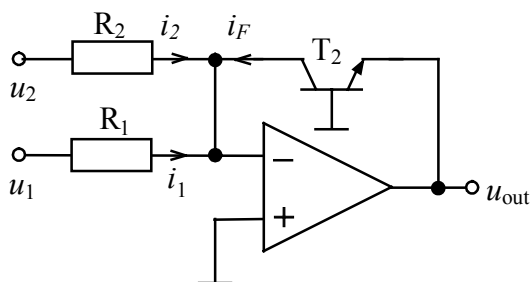
Z upoštevanjem $u_{BC} = 0$ ter tokovne enakosti v sumacijski točki dobimo

$$u_{OUT} = -U_T \cdot \ln \left[\frac{u_1}{I_{ES} \cdot R_1} + 1 \right] \text{ oziroma približno } u_{OUT} = -U_T \cdot \ln \left[\frac{u_1}{I_{ES} \cdot R_1} \right].$$

Iz izraza je razvidno, da je izhodna napetost prenosorazmerna naravnemu logaritmu vhodne napetosti. Omenjeno zakonitost uporabimo v vezju množilnika

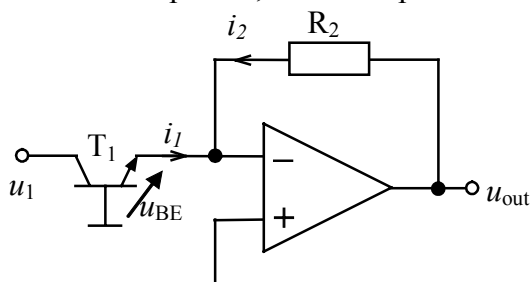
$$u_{OUT} = -U_T \cdot \left[\ln \left[\frac{u_1}{I_{ES} \cdot R_1} \right] + \ln \left[\frac{u_2}{I_{ES} \cdot R_2} \right] \right],$$

kjer je logaritem izhodne napetosti enak vsoti naravnih logaritmov obeh vhodnih napetosti.



Slika: Množilnik

Če želimo dobiti na izhodu vezja izhodno napetost $\ln u_1 + \ln u_2 = \ln(u_1 \cdot u_2)$, ki bo neposredno prenosorazmerna zmožku vhodnih napetosti, dodatno uporabimo eksponencialni ojačevalnik.



Slika: Eksponencialni ojačevalnik

Ker je $u_{BE} = 0$, dobimo sledečo relacijo med izhodno in vhodno napetostjo, ki mora biti obvezno negativnega predznaka.

$$u_{OUT} = I_{CS} R_2 \left[e^{\frac{-u_1}{U_T}} - 1 \right]$$

Na podoben način lahko realiziramo tudi matematično operacijo deljenja dveh napetosti (na osnovi odštevanja logaritmov vhodnih napetosti in antilogaritmiranja dobljenega rezultata).

Slabosti prikazanih vezij:

- majhen razpon vhodne napetosti v katerem dosežemo želeno matematično operacijo,
- velika temperaturna odvisnost (lezenje karakteristik),
- unipolarna vhodna in izhodna napetost.