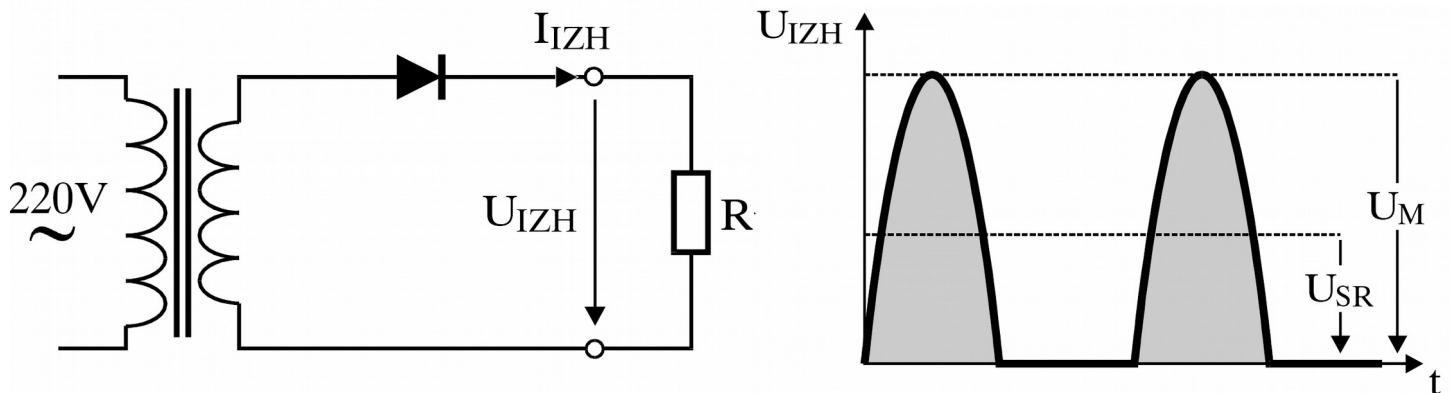


USMERNIKI

• POLVALNI USMERNIK:

- polvalni usmernik prevaja samo v pozitivni polperiodi
- enosmerni tok iz usmernika ni enakomeren, temveč močno utripa, zato tak način usmerjanja ni posebno uporaben
- V pozitivni polperiodi steče električni tok iz transformatorja skozi diodo in breme. Na bremenu ustvari padec napetosti v obliki sinusne polperiode. V negativni polperiodi dioda ne prevaja, zato toka v breme ni. Vsa napetost transformatorja je sedaj na diodi v zaporni smeri.

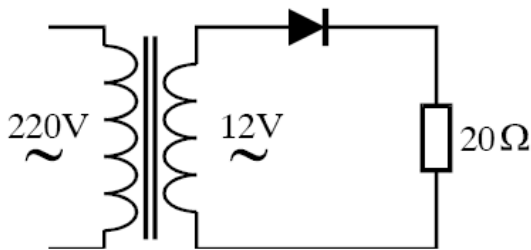


$U_{EF} = \frac{U_M}{\sqrt{2}}$ efektivna vrednost napetosti, kjer je U_M temenska napetost.

$I_{EF} = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$ efektivna vrednost toka, kjer je I_M temenski tok.

$U_{SR} = \frac{U_M}{\pi}$ srednja vrednost napetosti, kjer je U_M temenska napetost.

$I_{SR} = \frac{I_M}{\pi}$ srednja vrednost toka, kjer je I_M temenski tok.



Izračunajmo enosmerno napetost in tok skozi breme polvalnega usmernika! Kolikšno zaporno napetost mora vzdržati dioda?

Temensko napetost, ki jo potrebujemo za izračun srednje vrednosti, dobimo iz efektivne:

$$U_M = U_{EF} \cdot \sqrt{2} = 12\text{V} \cdot 1,41 = \underline{16,97\text{V}}$$

Oblika napetosti na bremenu je polvalna, zato jo izračunamo po enačbi:

$$U_{SR} = \frac{U_M}{\pi} = \frac{16,97\text{V}}{\pi} = \underline{5,4\text{V}}$$

Električni tok pa izračunamo iz napetosti na bremenu:

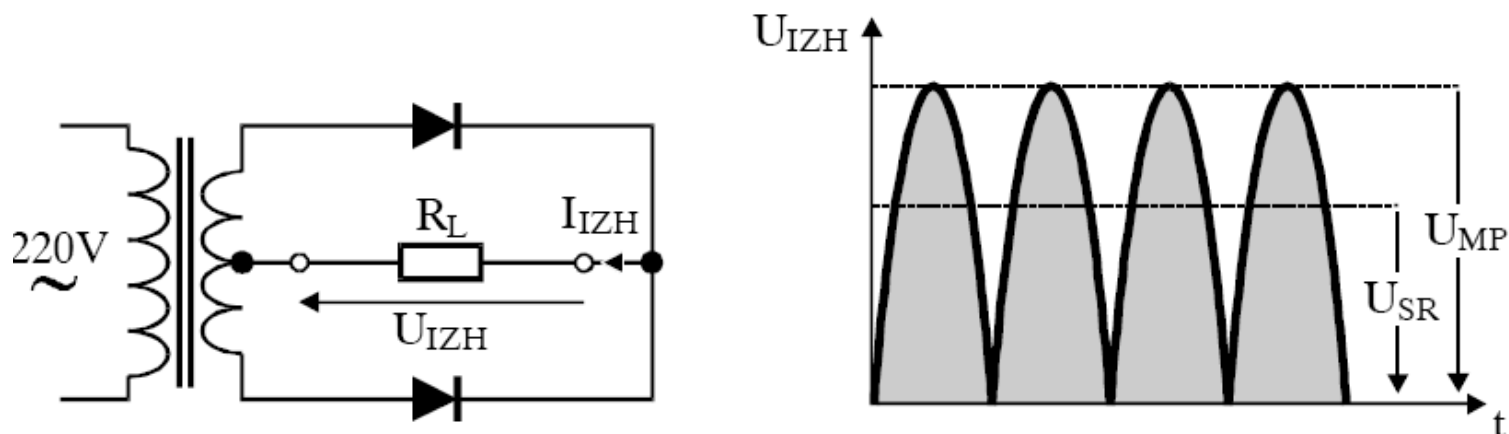
$$I_{SR} = \frac{U_{SR}}{R_B} = \frac{5,4\text{V}}{20\Omega} = \underline{0,27\text{A}}$$

Dioda mora v zaporni smeri zdržati temensko napetost transformatorja:

$$U_{RM} = U_M = \underline{16,97\text{V}}$$

• POLNOVALNI USMERNIK S SREDINSKIM ODCEPOM:

- Polnovalni usmerniki usmerijo obe polperiodi izmeničnega signala, imajo boljši izkoristek in povzročajo manjše utripanje toka skozi breme
- Delovanje usmernika si oglejmo najprej v eni, nato še v drugi polperiodi! V času pozitivne polperiode izmeničnega signala steče tok I_1 skozi diodo D_1 , breme RL in sredinski odcep nazaj v transformator. Ker je na diodi D_2 zaporna napetost, ta ne prevaja, zato skozi njo in spodnjo polovico navitja transformatorja tok ne teče. Tok teče samo skozi zgornjo polovico navitja. V času negativne polperiode steče tok I_2 skozi diodo D_2 , breme RL in sredinski odcep nazaj v transformator. Zaporna napetost na diodi D_1 sedaj prepreči, da bi tok tekkel tudi skozi zgornjo polovico navitja.

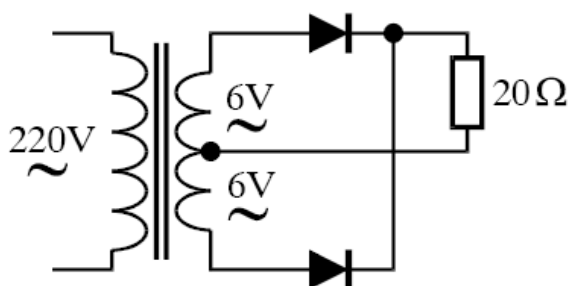


$$U_{SR} = 2 \cdot \frac{U_{MP}}{\pi} \text{ srednja vrednost napetosti}$$

$$I_{SR} = 2 \cdot \frac{I_{MP}}{\pi} \text{ srednja vrednost toka}$$

$$U_{RM} = U_M = U_{EF} \cdot \sqrt{2} \text{ zaporna napetost diode}$$

Primer



Izračunajmo enosmerno napetost in tok na bremenu polnovalnega usmernika s sredinskim odcepom, če transformator pretvori 220V na $2 \times 6V$! Kolikšno zaporno napetost morata vzdržati diodi?

Najprej izračunajmo temensko vrednost napetosti polovice navitja:

$$U_{MP} = U_{EF} \cdot \sqrt{2} = 6V \cdot \sqrt{2} = 8,485V$$

Sedaj lahko izračunamo še enosmerno napetost in tok na bremenu:

$$U_{SR} = 2 \cdot \frac{U_{MP}}{\pi} = 2 \cdot \frac{8,485V}{\pi} = \underline{5,4V}$$

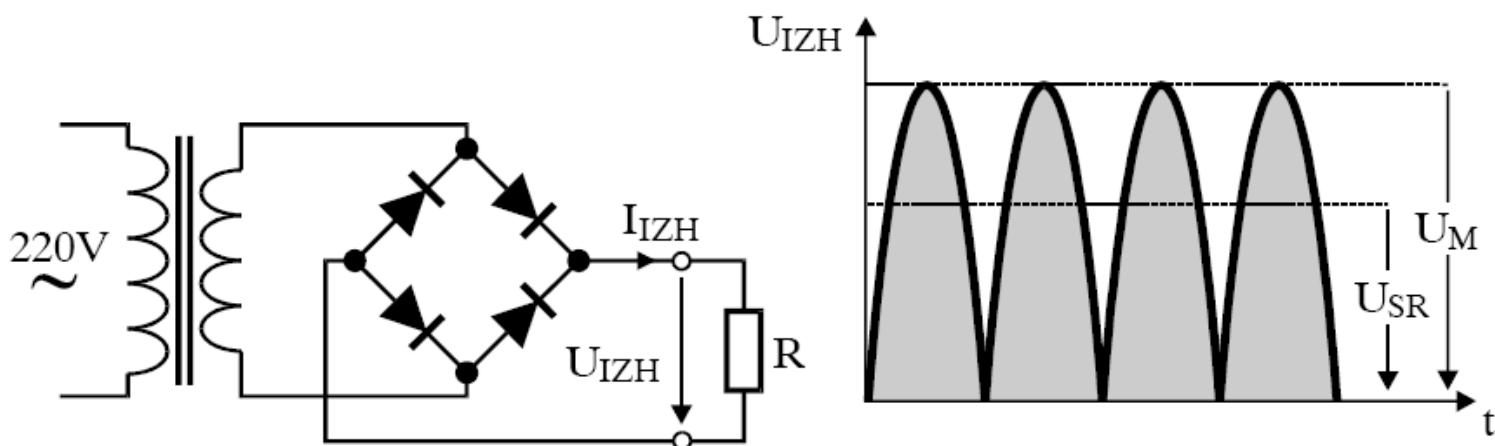
$$I_{SR} = \frac{U_{SR}}{R_B} = \frac{5,4V}{20\Omega} = \underline{270mA}$$

Največja zaporna napetost, ki jo morata diodi vzdržati, je enaka temenski vrednosti napetosti celotnega navitja:

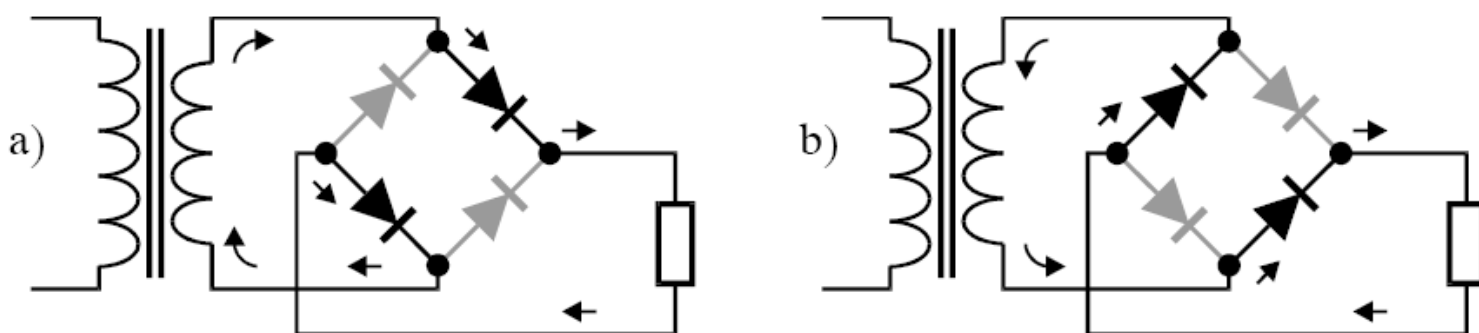
$$U_{RM} = 2 \cdot U_{MP} = \underline{16,97V}$$

• MOSTIČNI POLNOVALNI USMERNIK:

- Z mostičnim polnovalnim usmernikom dosežemo polnovalno usmerjanje brez uporabe sredinskega odcepa na transformatorju. Sestavljen je iz štirih usmerniških diod, vezanih v mostiček (pravimo mu tudi Greatzov mostiček).



- Delovanje si spet oglejmo v posameznih polperiodah. V času pozitivne polperiode steče tok iz transformatorja skozi diodo $D1$, breme R in nazaj skozi diodo $D3$ v transformator. Na diodah $D2$ in $D4$ je zaporna napetost, zato ne prevajata. V času negativne polperiode pa steče tok iz transformatorja skozi diodo $D2$, breme R in nazaj skozi diodo $D4$ v transformator. Sedaj je zaporna napetost na diodah $D1$ in $D3$, zato ne prevajata.

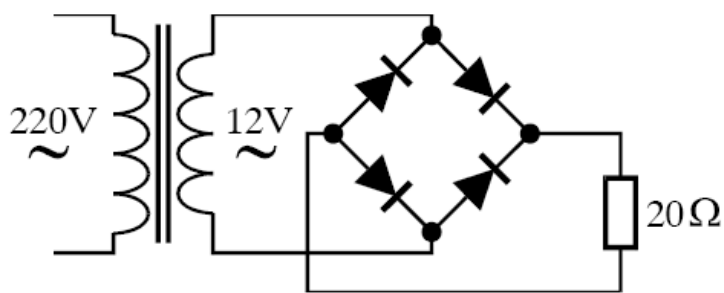


Prevajanje mostička v a) pozitivni in b) negativni polperiodi.

$$U_{SR} = 2 \cdot \frac{U_M}{\pi} \text{ srednja vrednost napetosti, kjer je } U_M \text{ temenska napetost.}$$

$$I_{SR} = 2 \cdot \frac{I_M}{\pi} \text{ srednja vrednost toka, kjer je } I_M \text{ temenski tok.}$$

Primer



Izračunajmo napetost in tok na bremenu polnovalnega usmernika! Kolikšno zaporno napetost morajo zdržati diode?

$$U_M = U_{EF} \cdot \sqrt{2} = 12\text{V} \cdot \sqrt{2} = 16,97\text{V}$$

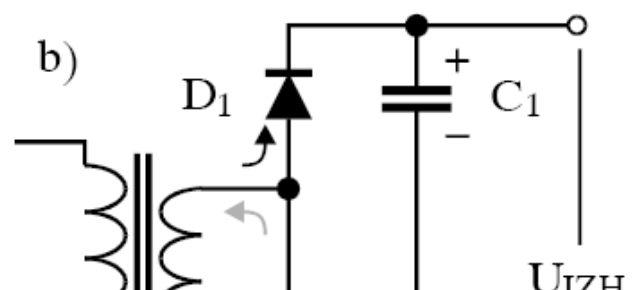
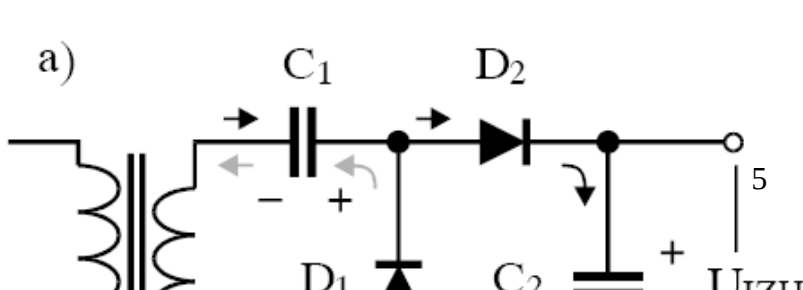
$$U_{SR} = 2 \cdot \frac{U_M}{\pi} = 2 \cdot \frac{16,97\text{V}}{\pi} = \underline{10,8\text{V}}$$

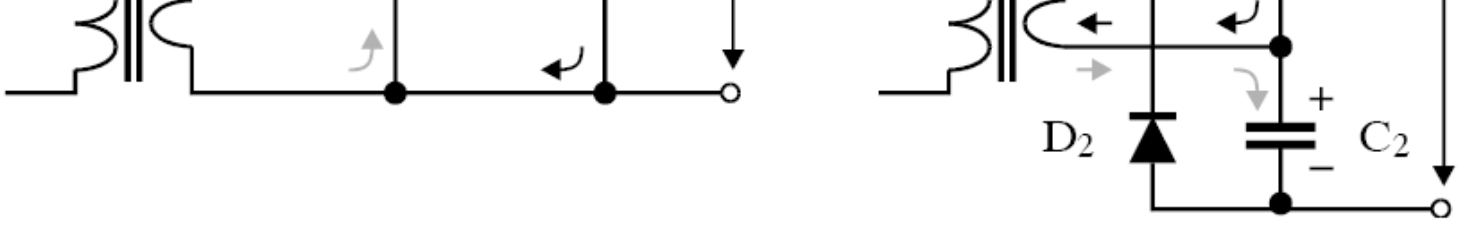
$$I_{SR} = \frac{U_{SR}}{R_B} = \frac{10,8\text{V}}{20\Omega} = \underline{540\text{mA}}$$

$$U_{RM} = U_M = \underline{16,97\text{V}}$$

• MNOŽILNIKI NAPETOSTI:

- Poleg samega usmerjanja lahko z usmerniškim vezjem napetost tudi povečamo. Na ta način prihranimo pri navitju transformatorja. Vezja pa so občutljivejša na različne vrednosti bremen.
- Villardovo podvojitveno vezje je polvalni usmernik. V času negativne polperiode teče tok iz transformatorja skozi diodo D_1 in kondenzator C_1 . Zaradi diode D_2 tok ne teče skozi breme, temveč polni kondenzator C_1 na napetost U . V času pozitivne polperiode teče tok skozi kondenzator C_1 , diodo D_2 ter kondenzator C_2 . Kondenzator C_2 se polni iz dveh napetostnih virov: transformatorja in kondenzatorja C_1 , ki se je v predhodni polperiodi napolnil. Zato se kondenzator C_2 napolni na napetost $2 \cdot U$.



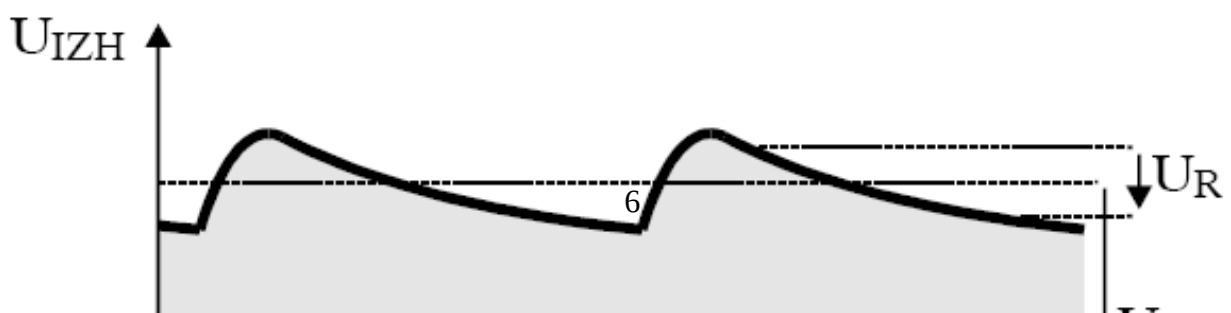


Množilnika napetosti: a) Villardovo podvojitveno vezje in b) Delonovo podvojitveno vezje.

- Delonovo podvojitveno vezje je polnovalni usmernik. V času pozitivne polperiode teče tok skozi diodo $D1$ in kondenzator $C1$; kondenzator $C1$ se napolni na napetost U . V času negativne polperiode pa teče tok skozi kondenzator $C2$ in diodo $D2$; kondenzator $C2$ se napolni na napetost U . Ker sta kondenzatorja na izhodu vezana zaporedno, se padca napetosti obeh kondenzatorjev seštevata. Tako je na izhodu napetost $2 \cdot U$.

• VALOVITOSTI IN GLAJENJE NAPETOSTI:

- valovitost je razmerje med izmenično in enosmerno komponento napetosti na izhodu usmernika
- napetost niha zaradi izmenične napetosti na vhodu



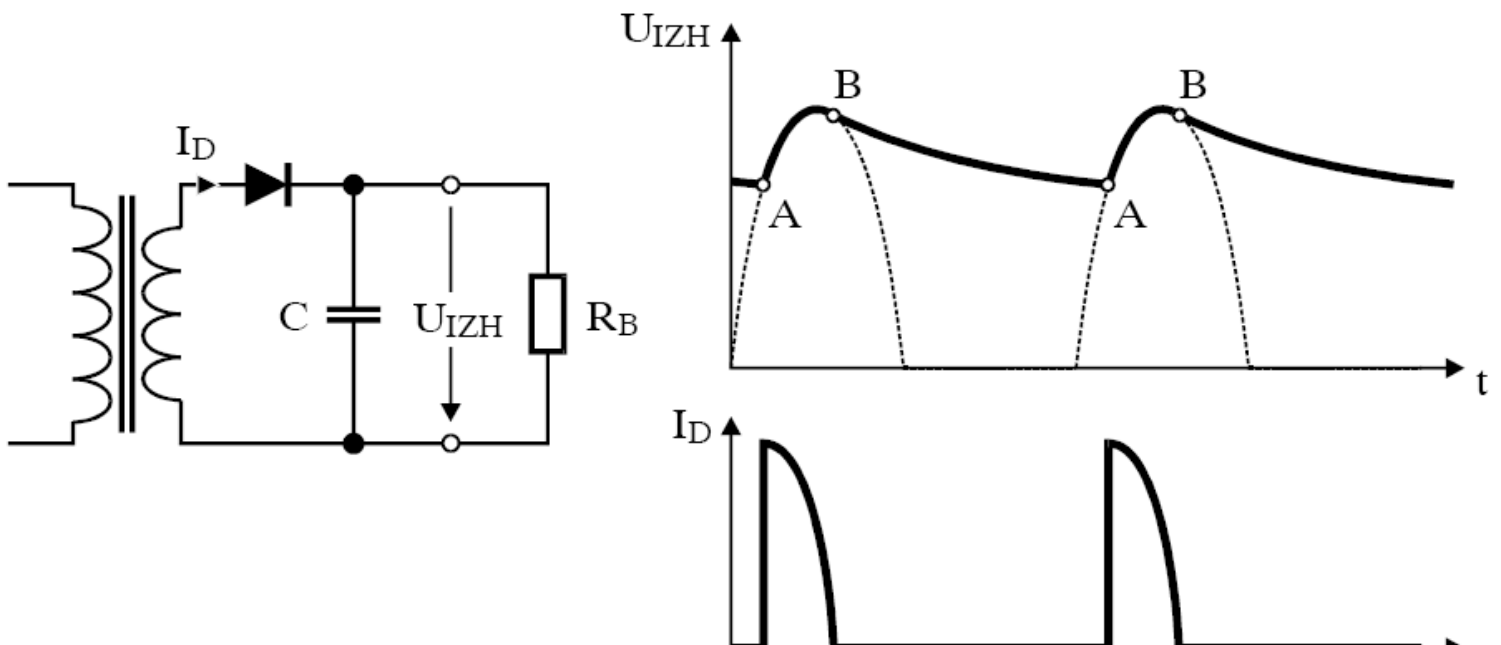


Določanje valovitosti.

Čim manjša je valovitost, tem manj je nihanja izhodne napetosti in boljši je usmernik. Za primer si oglejmo vrednost valovitosti pri osnovnih usmernikih:

<i>tip usmernika</i>	<i>faktor valovitosti</i>
polvalni	1,21
polnovalni	0,48
trofazni usmernik s sredinskim odcepom	0,18
trofazni mostični usmernik	0,042

Zmanjšanje faktorja valovitosti dosežemo z uporabo filtrov. Oglejmo si uporabo najenostavnejšega – RC filtra (slika 3.23). Kondenzator, ki služi za glajenje napetosti, priključimo vzporedno z bremenom.



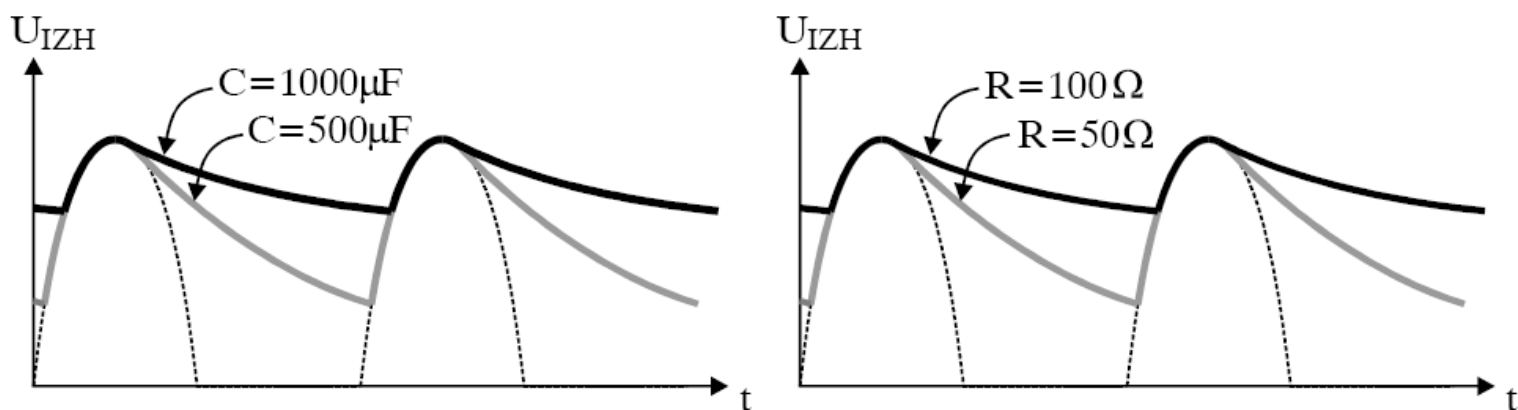
Dioda prevaja, ko je napetost na transformatorju višja od napetosti na kondenzatorju (od točke A do točke B na sliki 3.23). Tok, ki teče skozi diodo, nadaljuje pot skozi kondenzator in breme. V tem času se v kondenzatorju kopiči elektrina.

Ko pa napetost na transformatorju pade pod napetost na kondenzatorju,

črta ne prevaja več (od točke B do točke F na sliki 3.25). Električna, ki se je medtem nabrala na kondenzatorju, se sedaj prazni skozi breme. Zaradi kondenzatorja nihanje napetosti na bremenu ni več tako izrazito.

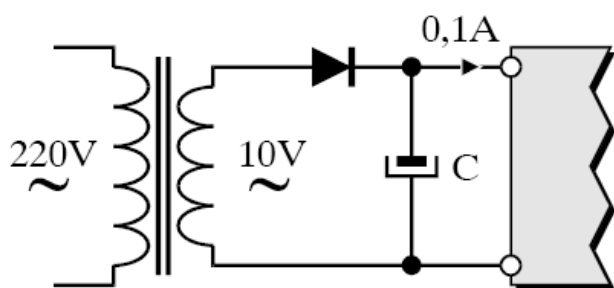
Kako hitro se kondenzator polni ali prazni, je odvisno od časovne konstante:

$$\tau = R \cdot C ,$$



Vpliv kapacitivnosti in toka skozi breme na obliko napetosti.

Primer



Izračunajmo kapacitivnost kondenzatorja C , da bo utripanje napetosti na izhodu U_T znašalo 2V. Napetost transformatorja je 10V, tok bremena 0,1A, omrežna frekvenca pa $f=50\text{Hz}$! Kolikšna je izhodna napetost U_{SR} ?

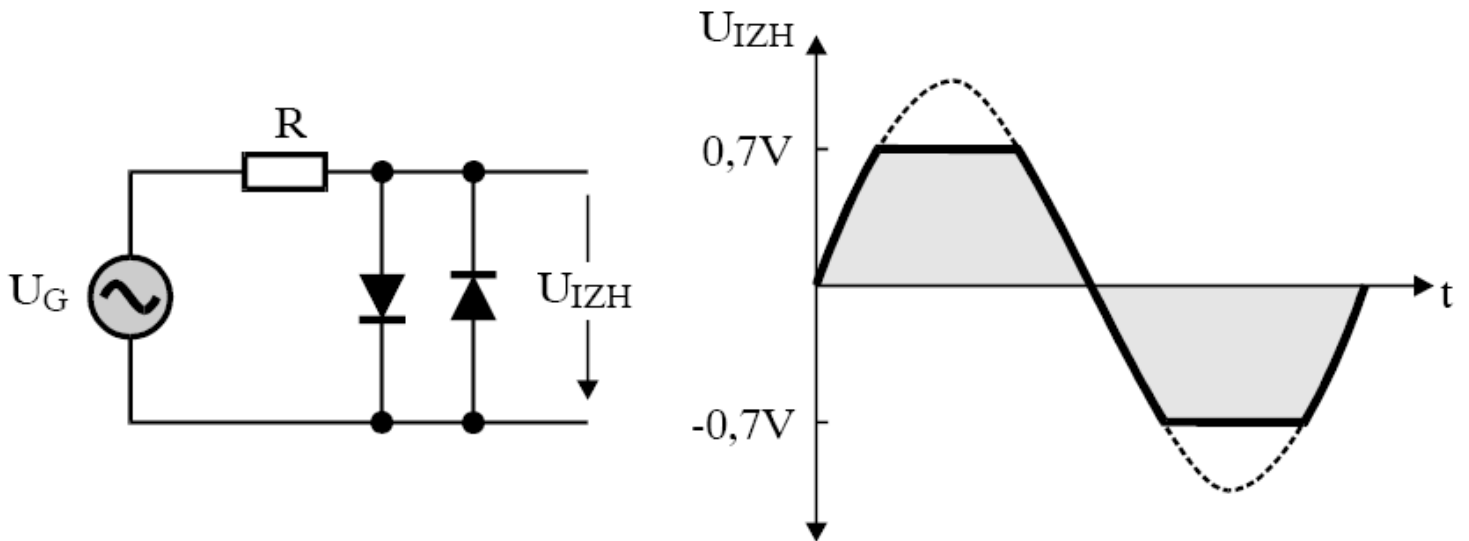
$$C = \frac{I_{SR}}{f \cdot U_T} = \frac{0,1\text{A}}{50\text{Hz} \cdot 2\text{V}} = \underline{1000\mu\text{F}}$$

$$U_M = U_{EF} \cdot \sqrt{2} = 10\text{V} \cdot \sqrt{2} = 14,14\text{V}$$

$$U_{SR} = U_M - \frac{U_T}{2} = 14,14\text{V} - \frac{2\text{V}}{2} = \underline{13,14\text{V}}$$

• OMEJEVANJE NAPETOSTI:

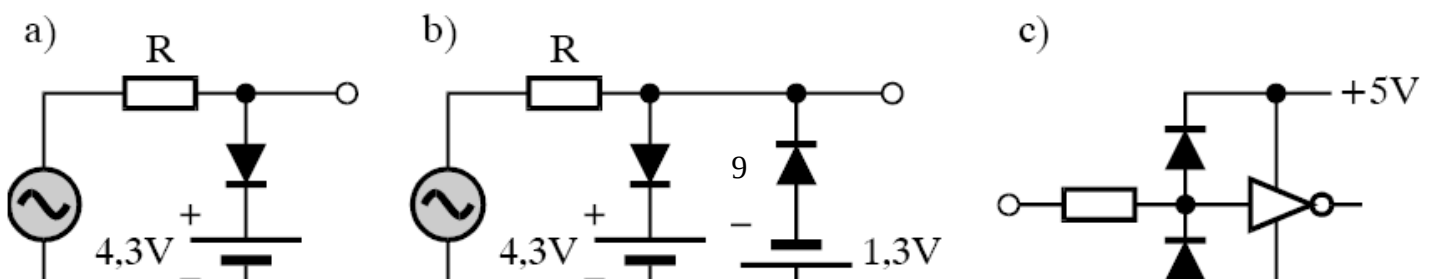
Zaradi napačne priključitve, inducirane napetosti v vodih ali električne spraznitve se lahko napetost na vhodu vezja nevarno poveča in uniči vezje. To lahko preprečimo z ustrezno vezavo diod, ki omeji napetosti na vhodu vezija. Na sliki 3.26 je enostavno vezje z diodama, ki začneta prevajati, brž ko vhodna napetost preseže napetost kolena diod. Prva začne prevajati, ko je na vhodu napetost večja od $+0,7V$, druga pa pri $-0,7V$. Upor služi zato, da ne bi s prevelikim prevodnim tokom uničili diod.



Slika 3.26. Preprosto omejevalno vezje z diodama.

Da bi omejili različne napetosti, moramo diodi spremeniti napetost, pri kateri prevaja. To naredimo s pomočjo napetostnega vira, ki ga vežemo zaporedno z diodo. Napetostni vir obrnemo tako, da se prišteje k napetosti kolena diode (pozitivni pol vira je priključen na katodo diode). Na sliki 3.27 a) je omejevalnik z diodo, kjer začne dioda prevajati šele, ko je vhodna napetost višja od napetosti vira in napetosti kolena diode: $4,3V + 0,7V = 5V$.

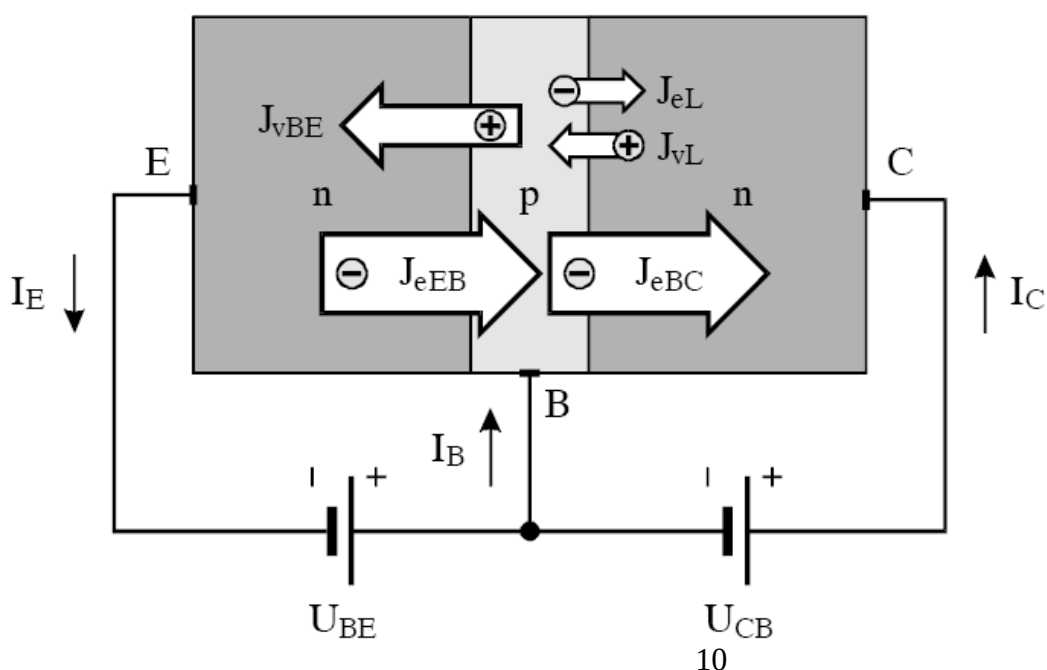
V tem primeru smo omejili samo pozitivno napetost. Navzdol omejimo napetost tako, da vežemo še eno diodo in napetostni vir v nasprotno smer. Na sliki 3.27 b) je vezje, ki omeji napetost na $+5V$ in $-2V$. Na sliki 3.27 c) pa je omejevalnik, ki ga pogosto srečamo na vhodu digitalnih vezij. Dioda D_1 začne prevajati, ko vhodna napetost preseže $+5,7V$, dioda D_2 pa pri $-0,7V$.



BIPOLARNI TRANZISTOR

- **DELOVANJE:**

Tranzistor vsebuje dva *pn* spoja, ki ju lahko priključimo v prevodni ali v zaporni smeri. Prvi spoj je med emitorjem in bazo, imenujemo ga emitorski spoj, drugi pa med kolektorjem in bazo – kolektorski spoj. Tranzistor deluje v tako imenovanem aktivnem področju le, če je emitorski spoj priključen v prevodni smeri, kolektorski pa v zaporni smeri. Na sliki 4.3 si oglejmo tokove, ki tečejo zaradi napetostnih virov U_{BE} in U_{CB} .

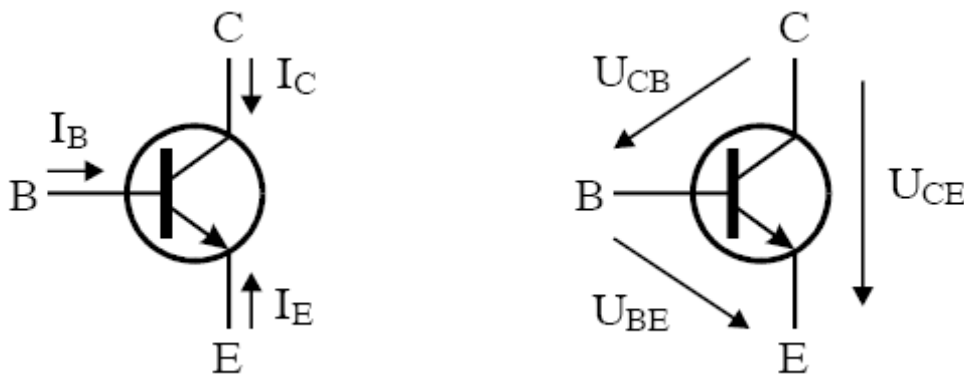


Slika 4.3. Tokovi v npn bipolarnem tranzistorju.

Elektrine, ki stečejo zaradi prevodne napetosti iz emitorja v bazo, nadaljujejo pot v kolektor, ker jih privleče zaporno priključena napetost kolektorskega spoja

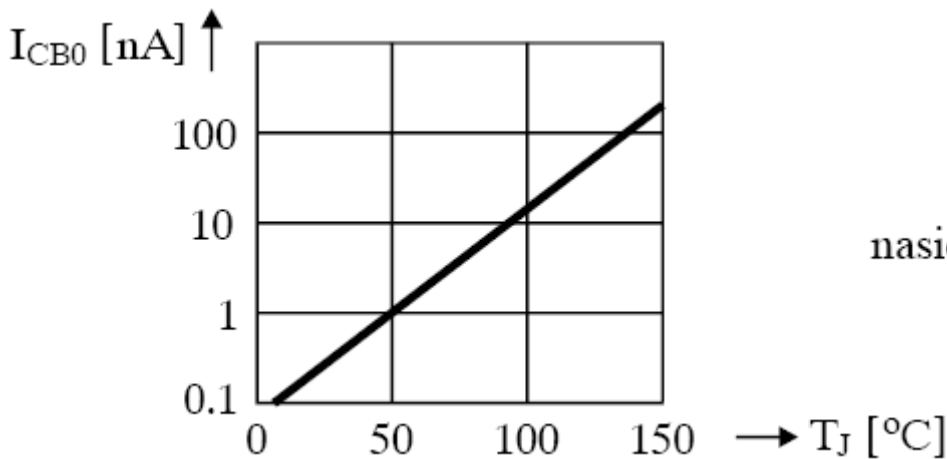
• ANALIZA TOKOV V TRANZISTORJU:

- zaradi prevodne napetosti na emitorskemu U_{BE} steče emitorki tok I_E , število elektronov, ki jih emitor pošilja v bazo, je odvisno od napetosti U_{BE}
- pri npn tranzistorju so potujoče elektrine elektroni, pri pnp pa vrzeli
- zaporna napetost U_{CB} med kolektorjem in bazo povzroči, da elektrine, ki prihajajo iz emitorja v bazo, stečejo v kolektor in tvorijo kolektorski tok I_C
- čim širša je baza, večji je bazni tok I_B in manjši je kolektorski tok I_C
- pri dovolj široki bazi tok ne bi več tekkel in tranzistor bi deloval le še kot dva ločena pn spoja



- kolektorski tok je nekoliko manjši od emitorskega ($I_C = I_E - I_B$)
- ker tranzistor najpogosteje uporabimo tako, da je vhod na bazi, izhod pa na kolektorju, določimo ojačevalni faktor med kolektorskim in baznim tokom $\beta = I_C / I_B$
- kolektorski tok manjšinskih nosilcev elektronov I_{CB0} , ki je v primerjavi s kolektorskim tokom zelo majhen in mu pravimo tudi tok nasičenja

- enačba za kolektorski tok je sedaj: $I_C = \alpha \cdot I_E + I_{CB0}$ in $I_C = \beta \cdot I_B + (\beta + 1) \cdot I_{CB0}$
- ker je kolektorski tok nasičenja I_{CE0} mnogo večji tudi njegov vpliv, ko se spreminja zaradi dovedene energije iz okolice



Odvisnost toka nasičenja od temperature.

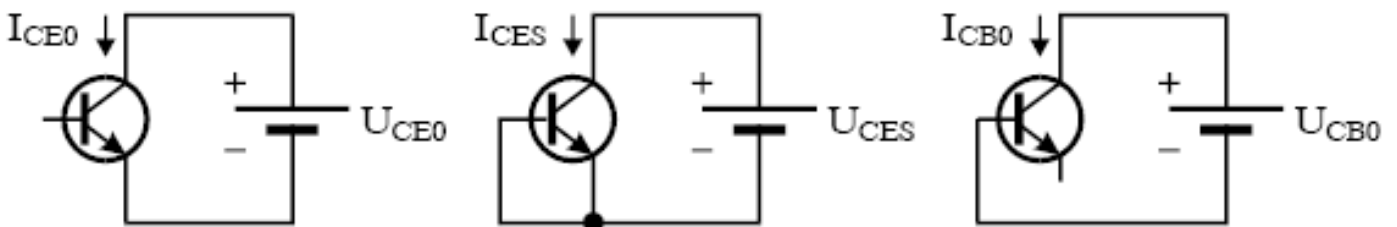
- za označevanje vseh preostalih tokov uporabljamo dodaten indeks:

0....neimenovan priključek je odprt

S....priključka sta kratkosklenjena

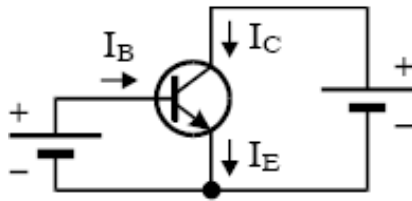
R....med obema priključkoma je upornost

V....med priključkoma je prednapetost v zaporni smeri



Primer priključitve tranzistorja za meritev preostalih tokov v tranzistorju.

Prvi primer



Izračunajmo tokova I_C , I_B ter β , če sta $I_E=10\text{mA}$ in $\alpha=0,99$!

$$I_C = \alpha \cdot I_E = 0,99 \cdot 10\text{mA} = \underline{9,9\text{mA}}$$

$$I_B = I_E - I_C = 10\text{mA} - 9,9\text{mA} = 0,1\text{mA} = \underline{100\mu\text{A}}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{9,9\text{mA}}{0,1\text{mA}} = \underline{99}$$

Drugi primer

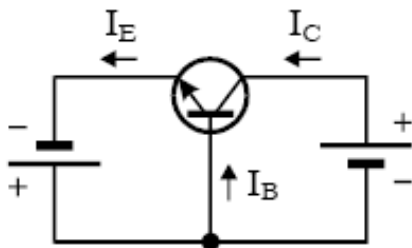
Izračunajmo tok I_B ter faktorja α in β , če sta tokova $I_C=15\text{mA}$ in $I_E=15,2\text{mA}$!

$$I_B = I_E - I_C = 15,2\text{mA} - 15\text{mA} = \underline{0,2\text{mA}}$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{15\text{mA}}{15,2\text{mA}} = \underline{0,9868}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{15\text{mA}}{0,2\text{mA}} = \underline{75}$$

Tretji primer



Izračunajmo tokova I_C in I_E ter faktor β , če je tranzistor priključen tako, kot kaže slika! Bazni tok $I_B=0,1\text{mA}$, $\alpha=0,988$.

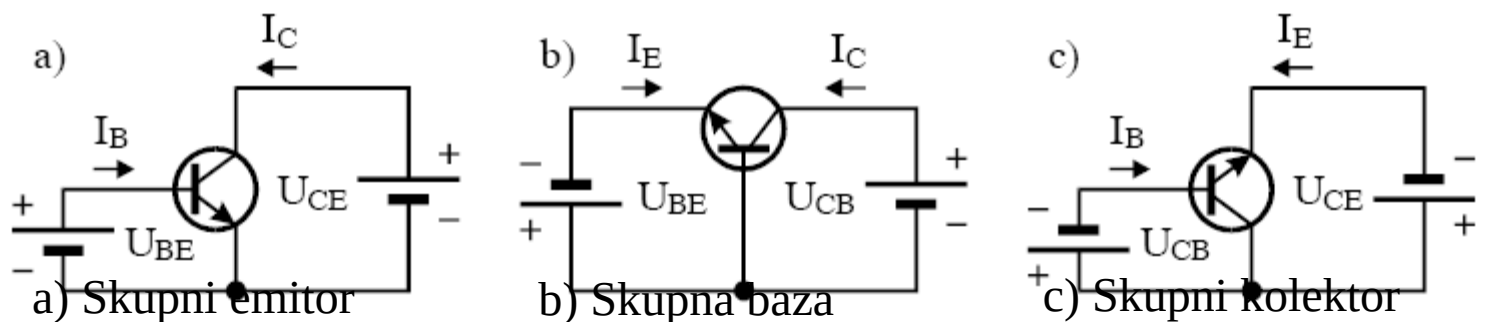
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0,988}{1 - 0,988} = \underline{82,33}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 82,33 \cdot 0,1\text{mA} = \underline{8,233\text{mA}}$$

$$I_E = I_C + I_B = 8,233\text{mA} + 0,1\text{mA} = \underline{8,333\text{mA}}$$

• RAZLIČNE ORIENTACIJE TRANZISTORJA:

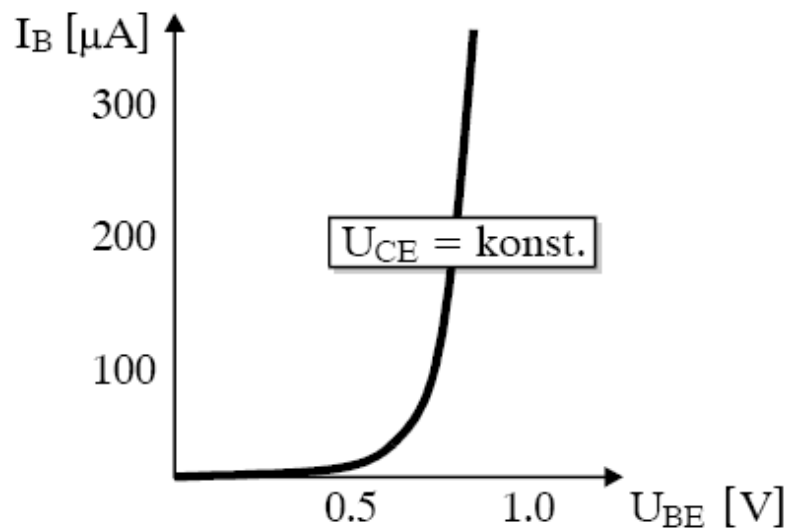
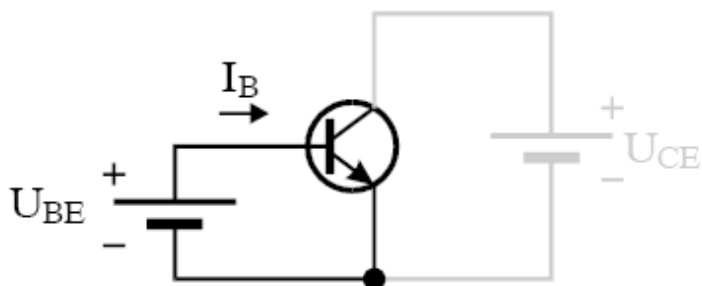
- tranzistor lahko kot ojačevalnik vežemo na tri različne načine
- ker imajo ojačevalniki štiri sponke (dve za vhod in dve za izhod), tranzistor pa samo tri, je ena sponka tranzistorja skupna za vhod in izhod
- način, na katerega je tranzistor v vezju priključen (orientiran), poimenujemo po skupni sponki: skupni emitor, skupna baza, skupni kolektor



	<i>skupni emitor</i>	<i>skupni kolektor</i>	<i>skupna baza</i>
A_I	velika (β)	velika ($\beta+1$)	majhna ($\alpha < 1$)
A_U	velika	majhna (< 1)	velika
R_{VH}	srednja	velika	majhna
R_{IZH}	srednja	majhna	zelo velika

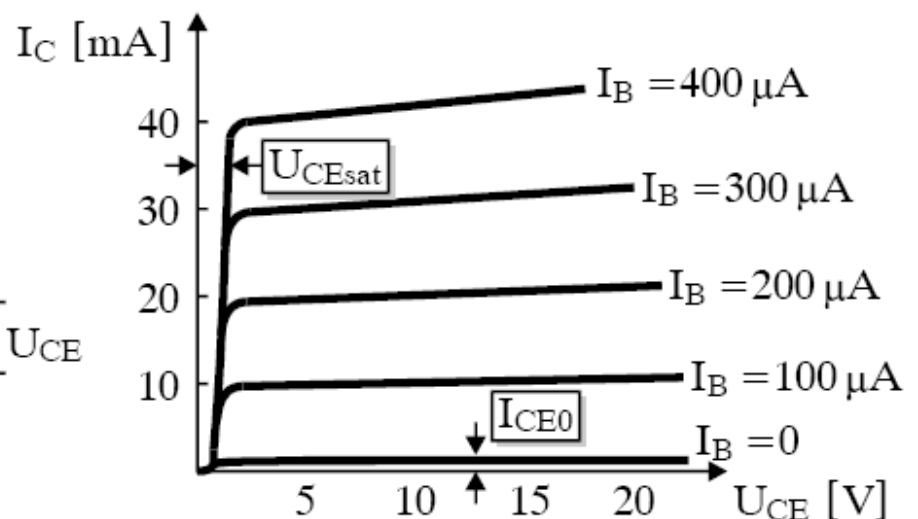
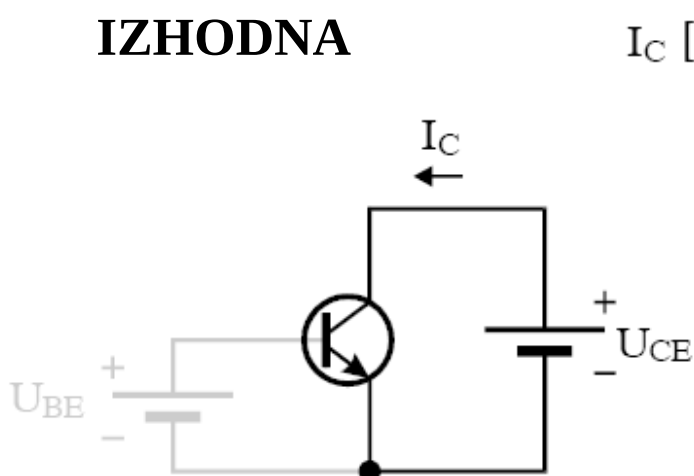
• VHODNA IN IZHODNA KARAKTERISTIKA BIPOLARNEGA TRANZISTORJA:

VHODNA

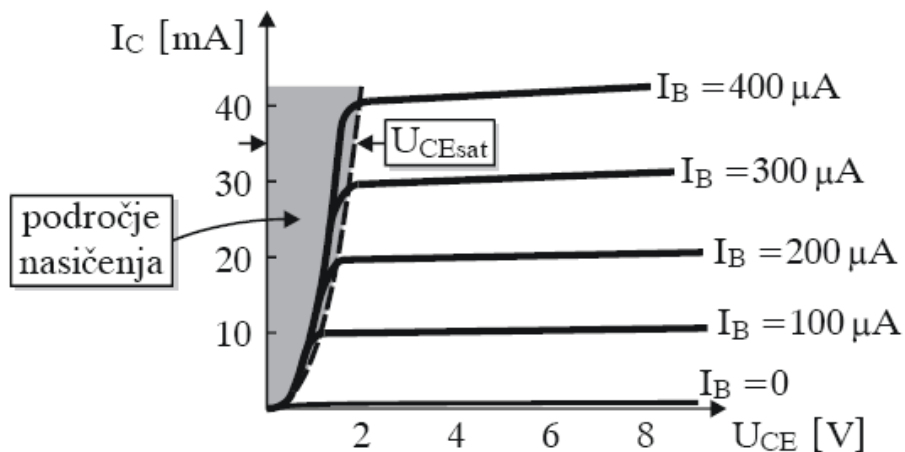


- slika prikazuje odvisnost vhodnega toka I_B od priključene napetosti U_{BE} pri konstantni izhodni napetosti U_{CE}
- karakteristika je podobna karakteristiki diode v prevodni smeri, le da je tok I_B mnogo manjši. Ta je odvisen od števila rekombinacij v bazi, zato je karakteristika nekoliko odvisna tudi od izhodne napetosti U_{CE}

IZHODNA



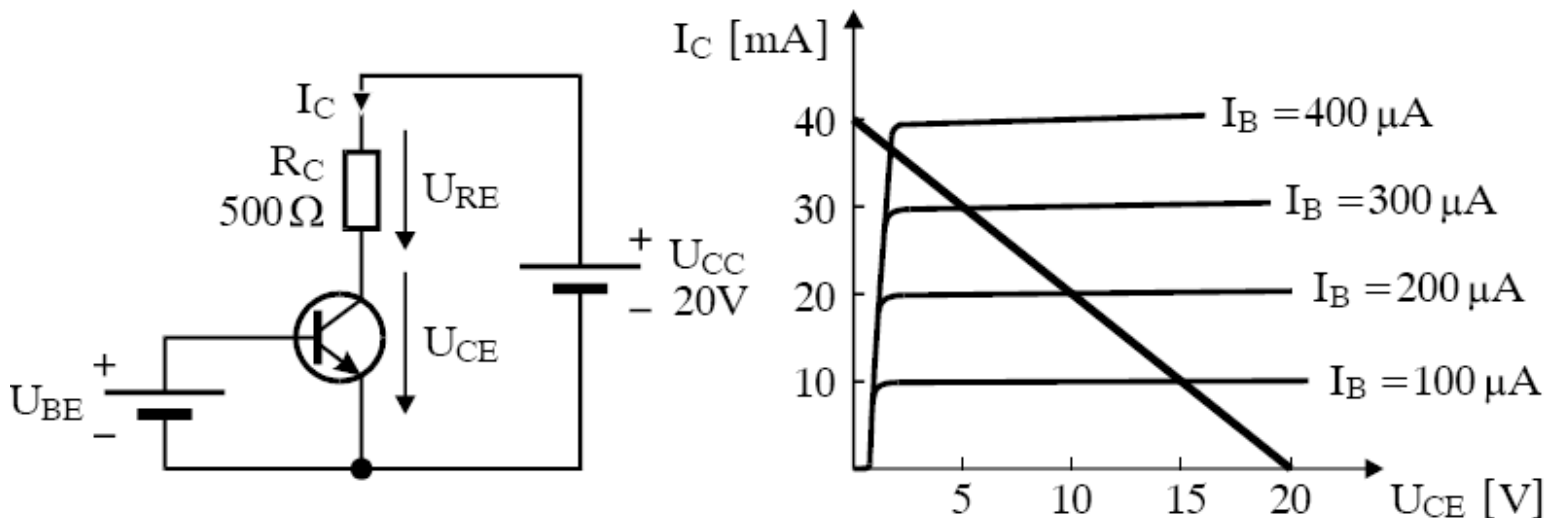
- polje izhodne karakteristike na zgornji sliki kaže odvisnost izhodnega toka I_C od priključene napetosti U_{CE} pri konstantnem baznem toku I_B
- ker je kolektorski tok odvisen predvsem od baznega toka, je v diagramu vrisanih več karakteristik, vsaka velja za določeno vrednost baznega toka
- s povečanjem napetosti U_{CE} se poveča tudi zaporna plast med kolektorjem in bazo, kar ima za posledico širšo kolektorsko zaporno plast
- pri dovolj majhni napetosti U_{CE} kolektorski tok I_C naglo upade – to se zgodi, ko je napetost U_{CE} manjša, kot je napetost med bazo in emitorjem U_{BE} ($U_{CE} = U_{BE} + U_{CB}$), zato med kolektorjem in bazo ni več zaporne napetosti, temveč postane celo prevodna
- napetost U_{CE} , pri kateri začne tok I_C strmo upadati, pravimo **napetost nasičenja** U_{CEsat} . V polju karakteristik imenujemo to - **področje nasičenja tranzistorja**



• BREME, DELOVNA TOČKA IN PREMICA:

- na izhod tranzistorja priključujemo breme. To je lahko navaden ohmski upor, vhodne naslednje ojačevalne stopnje, rele,...
- ko na izhod tranzistorja priključimo ohmski upor R_C kot v vezju na spodnji sliki, kolektorski tok ustvari na njem padec napetosti: $U_{RC} = I_C \cdot R_C$

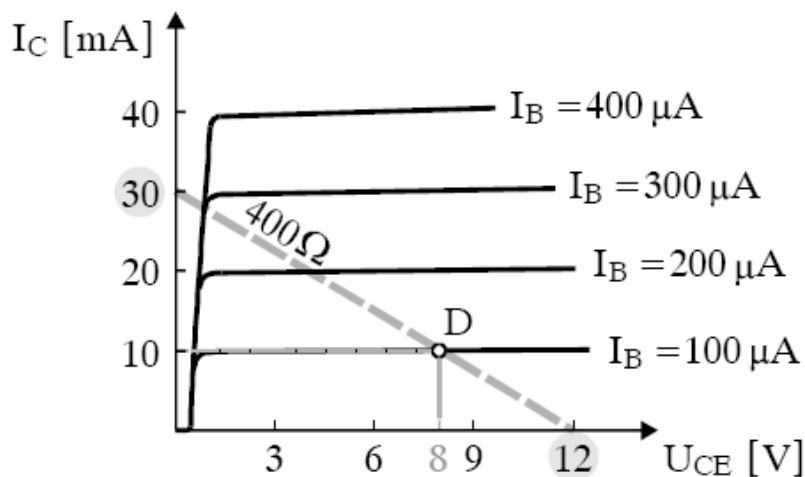
- v izhodni karakteristiki tranzistorja lahko prikažemo odvisnost kolektorskega toka I_C od napetosti med kolekt. in emit. U_{CE} , ki je sedaj odvisna od upora R_C : $I_C = U_{CC} / R_C - U_{CE} / R_C$
- če zadnjo enačbo prikažemo v izhodni karakteristiki, dobimo premico, ki ji pravimo **enosmerna delovna premica**



<i>pogoj</i>	<i>izračun točke</i>
$I_C = 0$	$U_{CE} = U_{CC}$
$U_{CE} = 0$	$I_C = U_{CC} / R_C$

Primer

V izhodno karakteristiko na sliki vrišimo delovno premico ter z njeno pomočjo določimo napetost U_{CE} , če je $I_B = 100 \mu A$! Napajalna napetost znaša $U_{CC} = 12V$, kolektorski upor pa $R_C = 400 \Omega$.

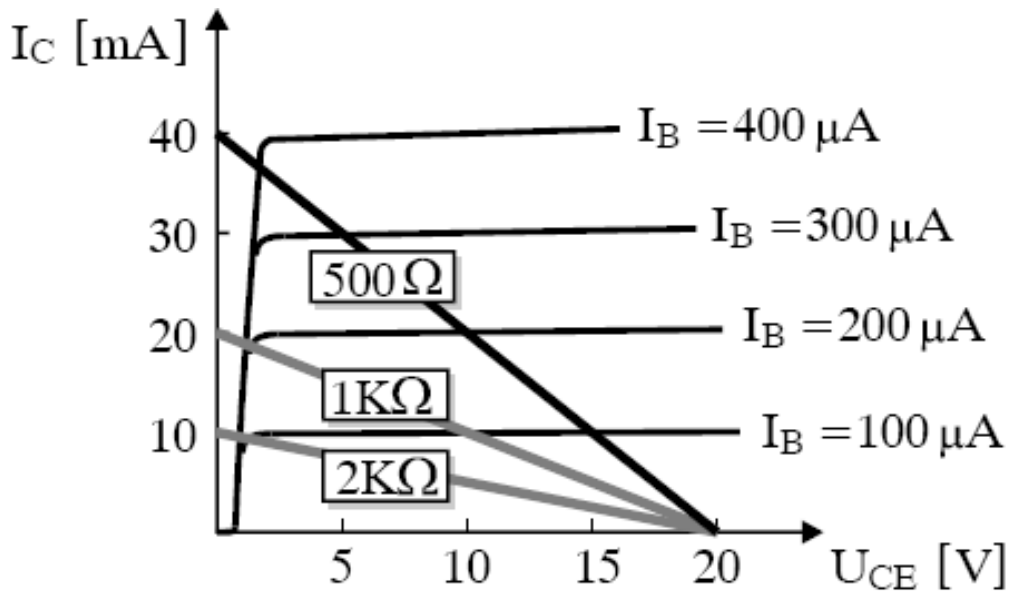


Na abscisi označimo točko pri $U_{CE} = U_{CC} = 12V$, na ordinati pa točko pri:

$$I_C = \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{12V}{400\Omega} = 30mA$$

Sedaj lahko povežemo obe točki s premico. V polju karakteristik vidimo, da krivulja odvisnosti I_C od U_{CE} pri baznem toku $I_B = 100 \mu A$ seka delovno premico v točki »D«. Napetost v dani točki pa znaša $U_{CE} = 8V$.

- če spreminjamo upornost bremena, potem se v karakteristiki spremeni tudi nagib delovne premice. Skupna je le točka na abscisi (x os)

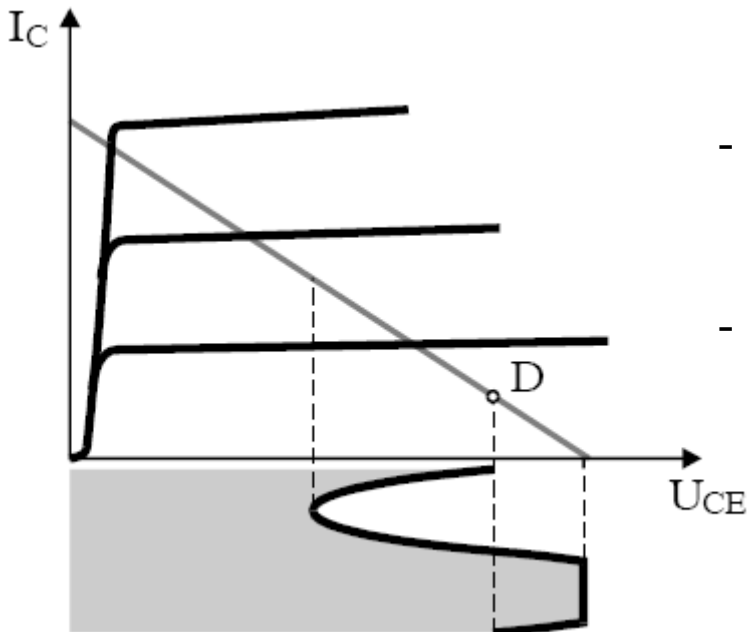


- ko breme vsebuje tudi kapacitivnosti in induktivnosti, se delovna premica spremeni v krivuljo. Oblika krivulje je sedaj odvisna tudi od frekvence signala
- **DELOVNA TOČKA:** je tista točka na delovni premici, ki določa razmere, ko na tranzistor ni priključen nikakršen vhodni signal
- točka nam podaja velikost toka I_C in napetosti U_{CE} ko tranzistor "miruje"
- ker se delovna točka premika po delovni premici, jo moramo stabilizirati z ustreznim vezjem
- prav tako se premakne, ko v vezju zamenjamo tranzistor, kajti tudi tranzistorji istega tipa se med seboj razlikujejo

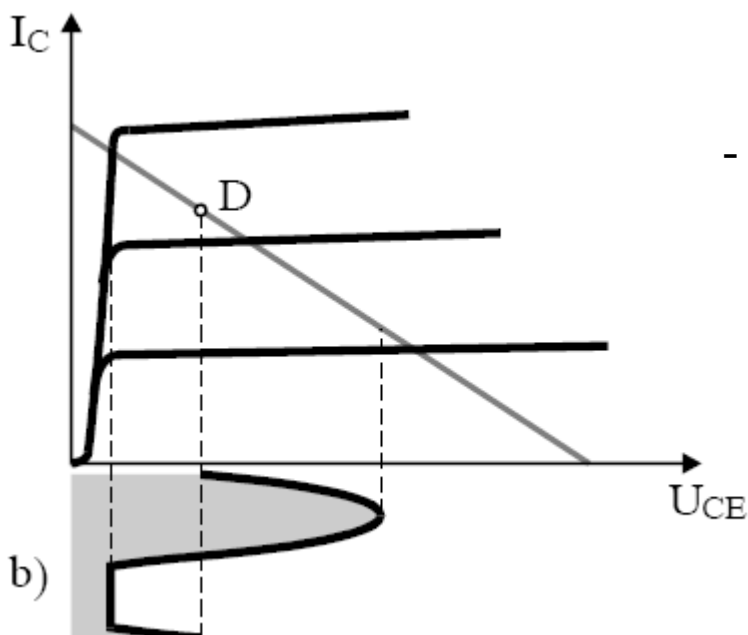
• NASTAVITEV DELOVNE TOČKE:

- ko ne vhod tranzistorja priključimo generator izmeničnega signala, bo tok I_C tekel le takrat, ko bo napetost med bazo in emitorjem prevodna in višja od potencialnega praga pn spoja, ki znaša pri siliciju od 0,5 do 0,8V

- oblika izhodnega signala je torej popačena, zelo majhne spremembe napetosti na vhodu niso dovolj, da bi stekel tok I_C , saj signal ne preseže potencialnega praga
- nastavitve delovne točke je odvisna predvsem od tipa ojačevalnika, če želimo, da bo signal na izhodu čim manj popačen, bomo pri dovolj veliki napajalni napetosti ($U_{CC} \gg U_{CEsat}$) nastavili delovno točko kar na sredino delovne premice ($U_{CE} = U_{CC} / 2$)



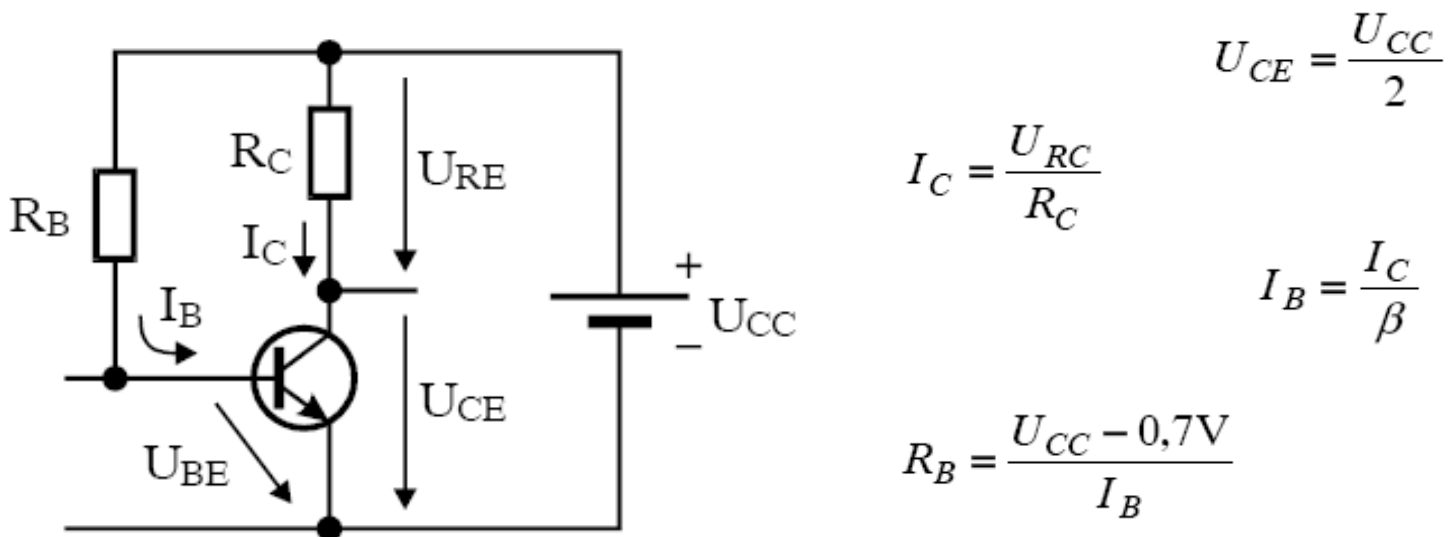
- prenizka postavitev delovne točke bi povzročila predčasno popačenje izhodnega signala
- nižanje baznega toka bi povsem zaprlo tranzistor



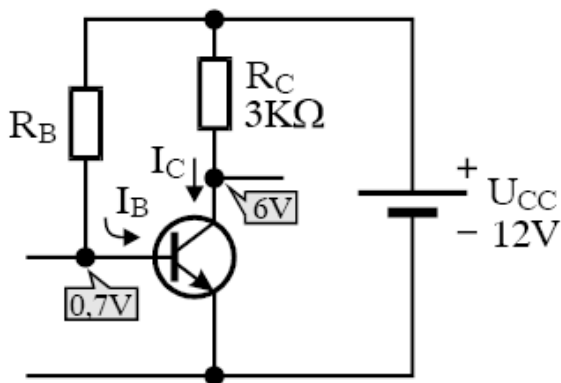
- previsoka nastavitve delovne točke bi povzročilo, da bi napetost U_{CE} zašla v področje nasičenja, ki je določeno z napetostjo U_{CEsat}

❖ Nastavitev delovne točke z uporom na bazi:

- najenostavneje jo nastavimo z baznim uporom R_B , sedaj steče skozi upor R_B bazni tok I_B , ki povzroči tok I_C



Primer



Pri danem vezju nastavimo delovno točko na sredino delovne premice. Kolektorski upor $R_C = 3\text{k}\Omega$, napajalna napetost $U_{CC} = 12\text{V}$ ter $\beta = 100$.

Najprej izračunajmo kolektorski tok, ki teče skozi tranzistor, ko je delovna točka na sredini delovne premice:

$$U_{CE} = \frac{U_{CC}}{2} = 6\text{V}$$

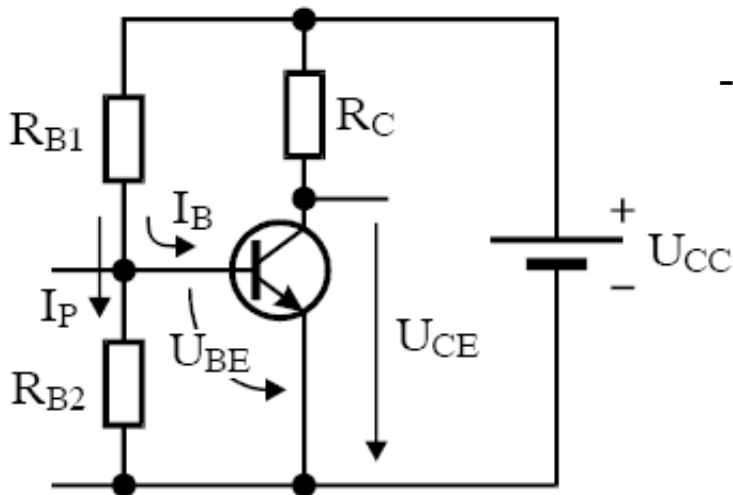
$$I_C = \frac{U_{RC}}{R_C} = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_C} = \frac{6\text{V}}{3\text{k}\Omega} = \underline{2\text{mA}}$$

S pomočjo kolektorskega toka I_C dobimo bazni tok I_B in upornost upora R_B :

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{2\text{mA}}{100} = 20\mu\text{A}$$

$$R_B = \frac{U_{CC} - 0,7\text{V}}{I_B} = \frac{12\text{V} - 0,7\text{V}}{20\mu\text{A}} = \underline{565\text{k}\Omega}$$

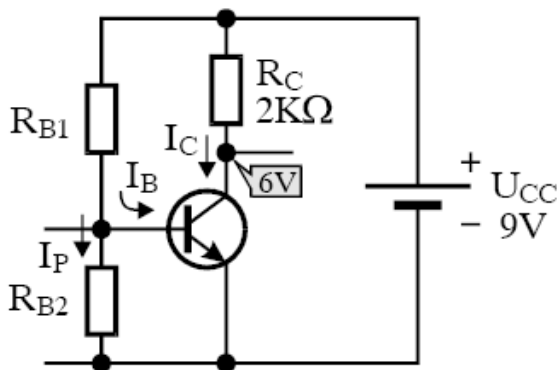
- nekoliko boljšo nastavitve delovne točke lahko dosežemo z delilnikom napetosti na spodnji sliki



- delilnik napetosti predstavljata upora R_{B1} in R_{B2} . Izbrana sta tako, da je prečni tok I_P skozi upora mnogo večji od baznega toka. Sedaj sprememba baznega toka ne vpliva v tolikšni meri na razporeditev padcev napetosti na uporih

- napetost U_{BE} ostane tako pri različnih vrednostih baznega toka enaka

Primer



Izračunajmo vrednost upora R_{B1} in R_{B2} , da bo delovna točka tranzistorja na sredi delovne premice! $R_C = 2\text{k}\Omega$, $U_{CC} = 9\text{V}$, $\beta = 100$, prečni tok I_P naj bo 10-krat večji od baznega.

Najprej izračunamo bazni tok I_B , ko je delovna točka na sredi delovne premice:

$$U_{CE} = \frac{U_{CC}}{2} = 4,5\text{V}$$

$$I_C = \frac{U_{RC}}{R_C} = \frac{4,5\text{V}}{2\text{k}\Omega} = 2,25\text{mA}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{2,25\text{mA}}{100} = \underline{22,5\mu\text{A}}$$

Nato izračunamo prečni tok I_P , ki naj bo 10-krat večji od baznega:

$$I_P = 10 \cdot I_B = 10 \cdot 22,5\mu\text{A} = 225\mu\text{A}$$

Izračunajmo upor R_{B2} , skozi katerega teče tok I_P , padec napetosti pa je enak Tok skozi upor R_{B1} je enak vsoti prečnega in baznega toka $I_P + I_B$, padec napetosti pa dobimo s pomočjo drugega Kirchhoffovega zakona:

$$U_{CC} = U_{RB1} + U_{RB2} = U_{RB1} + U_{BE}$$

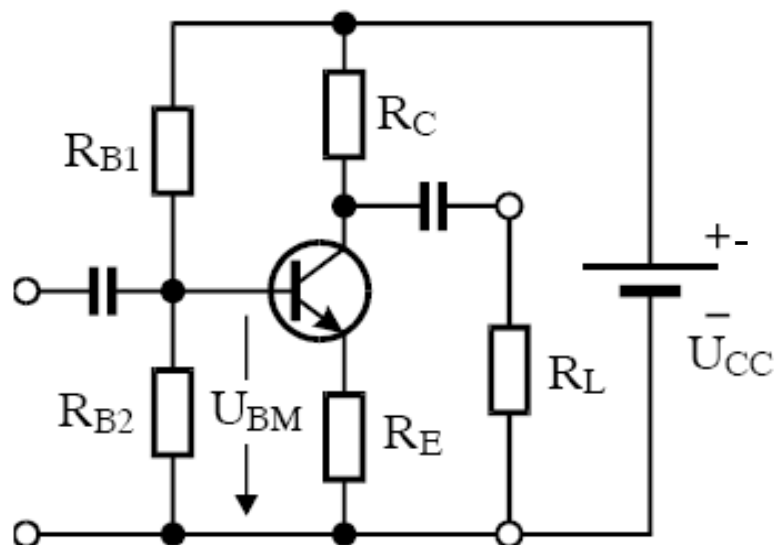
Tako dobimo upornost upora R_{B1} :

$$R_{B1} = \frac{U_{RB1}}{I_P + I_B} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{I_P + I_B} = \frac{9\text{V} - 0,7\text{V}}{225\mu\text{A} + 22,5\mu\text{A}} = \underline{33,5\text{k}\Omega}$$

• STABILIZACIJA DELOVNE TOČKE:

- položaj delovne točke lahko med obratovanjem drsi po delovni premici, razlog za to pa je segrevanje tranzistorja
- z večanjem temperature se večja tudi tok nasičenja I_{CE0} in delovna točka se premakne navzgor po delovni premici, proti področju nasičenja
- premik točke preprečujemo z vezji, ki stabilizirajo delovno točko

❖ Stabilizacija delovne točke z emitorskim uporom:



ko na emitor tranzistorja priključimo emitorski upor R_E , se vhodna napetost na tranzistorju U_{BM} porazdeli na padec napetosti na tranzistorju U_{BE} in na emitorskem uporu U_{RE}

- zaradi povečanja temperature tranzistorja se poveča tok nasičenja I_{CE0} , ki poveča tok I_C in pomakne delovno točko

navzgor. Istočasno se poveča tudi tok skozi emitorski upor R_E .

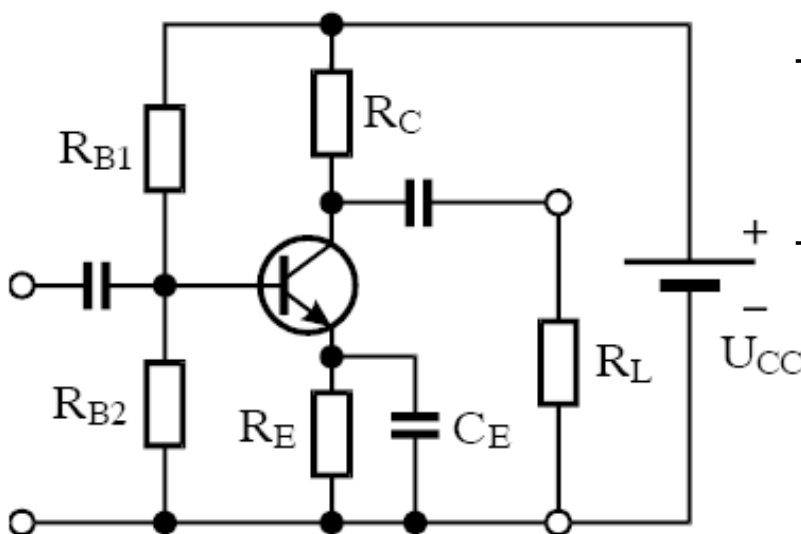
To povzroči večji padec napetosti na emitorskem uporu U_{RE}

- ker je vhodna napetost U_{BM} ostala nespremenjena, se zaradi povečanja padca napetosti U_{RE} zmanjša padec napetosti U_{BE} – posledica je manjši tok I_B in s tem manjši tok I_C

• OJAČEVALNIKI PRI NIZKIH FREKVENCAH:

- bipolarni tranzistor se najpogosteje uporablja za ojačenje signalov
- pri dovolj majhnem signalu nelinearnosti tranzistorja lineariziramo, uporabljamo lahko diferencialne upornosti
- ker so delovne frekvence dovolj nizke, parazitne kapacitivnosti elementov in fazni zasuki še ne pridejo do izraza

❖ Tranzistor v orientaciji s skupnim emitorjem:



- vezje na sliki je ojačevalnik s tranzistorjem, ki je vezan v orientaciji s skupnim emitorjem
- delovna točka je stabilizirana z emitorskim uporom R_E , kondenzator C_E pa služi za znižanje impedance med emitorjem in maso

- kondenzatorja C_1 in C_2 preprečita odtok enosmernega baznega in kolektorskega toka skozi generator in breme. Na izhodu ojačevalnika je priključeno breme R_L

Delovna točka naj bo na sredini delovne premice, zato bo $U_{CE} = U_{CC}/2$. Ostali podatki ojačevalnika so: $U_{CC} = 12V$, $I_C = 5mA$, $h_{fe} = 100$, $h_{ie} = 1k\Omega$, $U_{RE} = 0,1 \cdot U_{CC}$, $I_P = 10 \cdot I_B$ ter upornost bremena $R_L = 1k\Omega$. S pomočjo znančih enačb izračunamo upore:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{fe}} = \frac{5mA}{100} = 50\mu A$$

$$I_E = I_C + I_B = 5mA + 50\mu A = 5,05mA$$

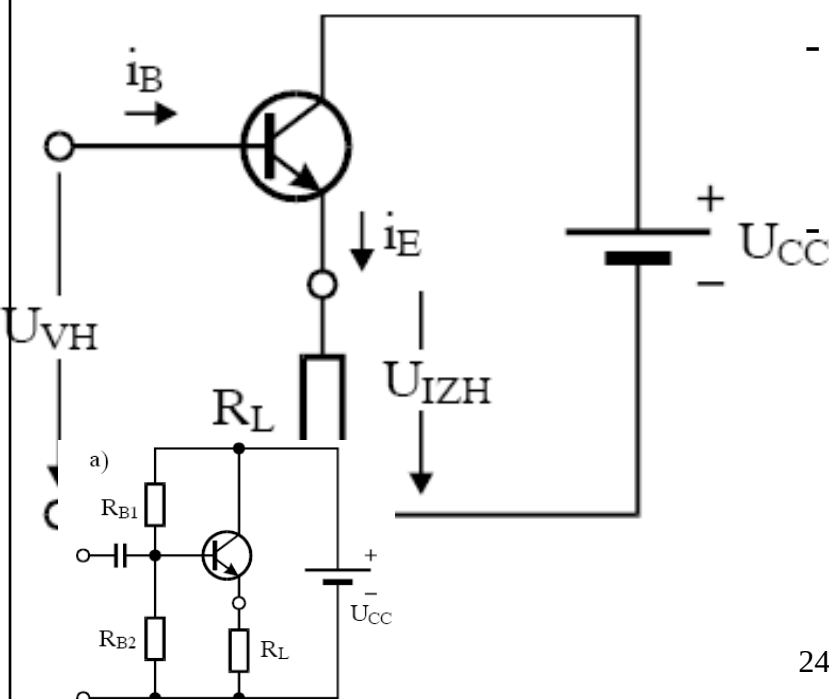
$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE} - U_{RE}}{I_C} = \frac{12V - 6V - 1,2V}{5mA} = 960\Omega$$

$$R_E = \frac{U_{RE}}{I_E} = \frac{1,2V}{5,05mA} = 238\Omega$$

$$R_{B2} = \frac{U_{BE} + U_{RE}}{I_P} = \frac{0,7V + 1,2V}{500\mu A} = 3,8k\Omega$$

$$R_{B1} = \frac{U_{CC} - U_{RB2}}{I_P + I_B} = \frac{12V - 1,9V}{500\mu A + 50\mu A} = 18,4k\Omega$$

❖ Tranzistor v orientaciji s skupnim kolektorjem:



- breme je priključeno na emitorju tranzistorja, vhod pa je med bazo in kolektorjem

takemu ojačevalniku pravimo tudi emitorski sledilnik – to ime je dobilo zato, ker je napetostno ojačenje takega ojač. Približno 1 in torej izhodna napetost sledi vhodni

Na sliki 4.27 a) je ojačevalnik s podatki: $U_{CC}=12\text{V}$, $R_L=100\Omega$, $h_{ie}=100\Omega$, $h_{fe}=80$ in $I_P=10 \cdot I_B$. S pomočjo znančnih enačb dobimo padce napetosti na uporih:

$$U_{CC} = U_{CE} + U_{RE} = U_{CC} + I_E \cdot R_L$$

$$U_{CC} = U_{RB1} + U_{RB2} = (I_P + I_B) \cdot R_{B1} + I_P \cdot R_{B2}$$

$$U_{RB2} = U_{BE} + U_{RE} = 0,7\text{V} + I_E \cdot R_L$$

Emitorski tok izračunamo s pomočjo upornosti emitorskega upora R_L :

$$I_E = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_L} = \frac{12\text{V} - 6\text{V}}{100\Omega} = 60\text{mA}$$

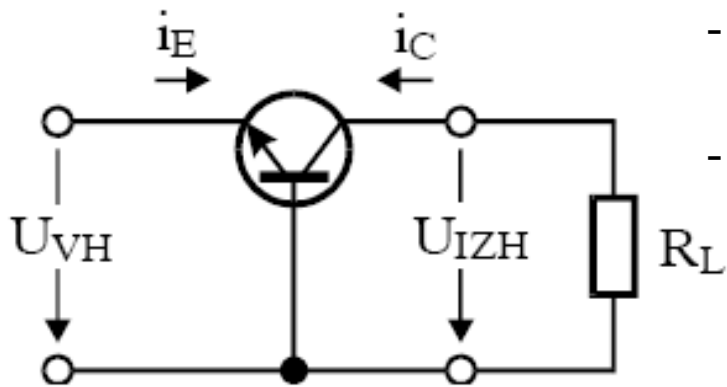
$$I_B = \frac{I_E}{h_{fe} + 1} = \frac{60\text{mA}}{80 + 1} = 741\mu\text{A}$$

Upora R_{B1} in R_{B2} pa izračunamo s pomočjo znančnih enačb:

$$R_{B2} = \frac{U_{BE} + U_{RE}}{I_P} = \frac{0,7\text{V} + 6\text{V}}{7,41\text{mA}} = 904\Omega$$

$$R_{B1} = \frac{U_{CC} - U_{RB1}}{I_P + I_B} = \frac{12\text{V} - 6,7\text{V}}{7,41\text{mA} + 741\mu\text{A}} = 650\Omega$$

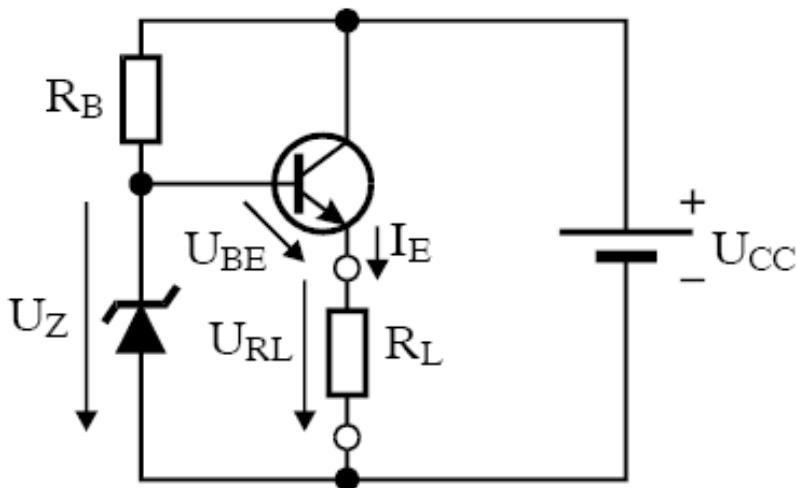
❖ Tranzistor v orientaciji s skupno bazo:



- vhod ojačevalnika je med emitorjem in bazo, izhod pa med kolektorjem in bazo
- značilnost tega ojačevalnika je majhna vhodna upornost, ki je primerna, ko nanj priključujemo generatorje z majhno notranjo upornostjo (npr. antena)

- poleg tega je kapacitivnost kolektorskega spoja, ki pri tranzistorju v orientaciji s skupnim emitorjem vrača signal iz izhoda nazaj na vhod ter slabi ojačenje pri višjih frekvencah, sedaj sklenjena na maso

❖ Napetostni sledilnik:



- tranzistor na sliki je uporabljen kot emitorski sledilnik
- taka vezava omogoča boljšo regulacijo napetosti, kot če bi uporabili samo prebojno diodo
- breme je priključeno na emitor, zato je tranzistor v orientaciji s skupnim kolektorjem

- prebojna dioda, tranzistor in breme tvorijo zaključeno zanko ($U_Z = U_{BE} + U_{RL}$)
- to pomeni, da je padec napetosti na bremenu U_{RL} odvisen le od napetosti na prebojni diodi, ki pa je konstantna. Če bi se padec napetosti na bremenu na primer znižal, bi to povzročilo zvišanje napetosti U_{BE} . Zaradi tega bi se povečal tok I_B in tok I_C . Skozi breme bi stekel večji tok in padec napetosti na njem bi narastel

Primer

Izračunajmo upornost baznega upora R_B na sliki 4.31 tako, da bo padec napetosti na bremenu $U_{RL} = 12V$, največji tok pa $I_L = 100mA$! Za kolikšno napetost mora biti izdelana prebojna dioda in kolikšna je njena največja

Napetost prebojne diode mora biti:

$$U_Z = U_{BE} + U_{RL} = 0,7V + 12V = 12,7V$$

Tok skozi prebojno diodo ne sme biti nikoli nižji od toka, ki je predpisan, da se dioda še nahaja v področju preboja. Naj bo najmanjši tok diode $I_Z = 5mA$. To je tedaj, ko je bazni tok tranzistorja največji:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \cong \frac{I_L}{\beta} = \frac{100mA}{100} = 1mA$$

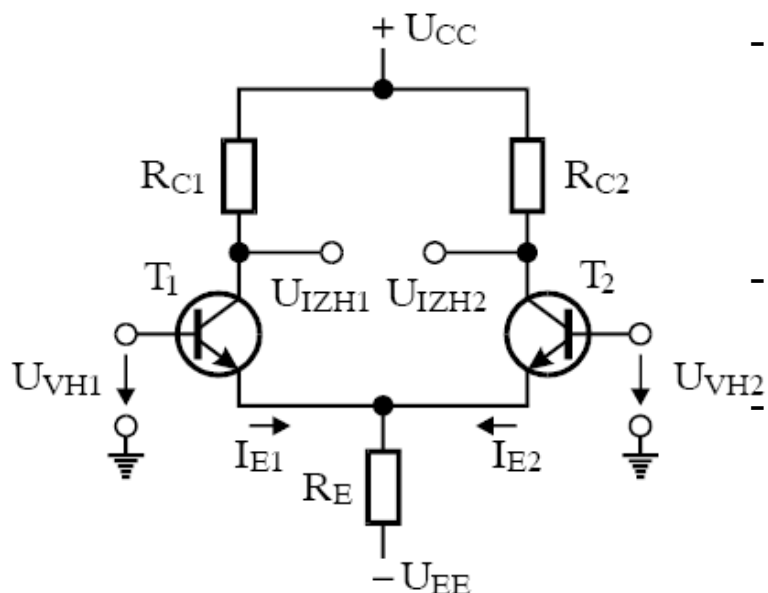
Sedaj lahko izračunamo upornost baznega upora, skozi katerega tečeta oba tokova:

$$R_B = \frac{U_{CC} - U_Z}{I_B + I_Z} = \frac{16V - 12,7V}{1mA + 5mA} = \underline{550\Omega}$$

Največ električne moči potroši dioda tedaj, ko je tok skozi njo največji. To je v primeru, ko je bazni tok nič. Zato je največja izgubna moč diode:

$$P_Z = U_Z \cdot I_Z = 12,7V \cdot 6mA = 76,2mW$$

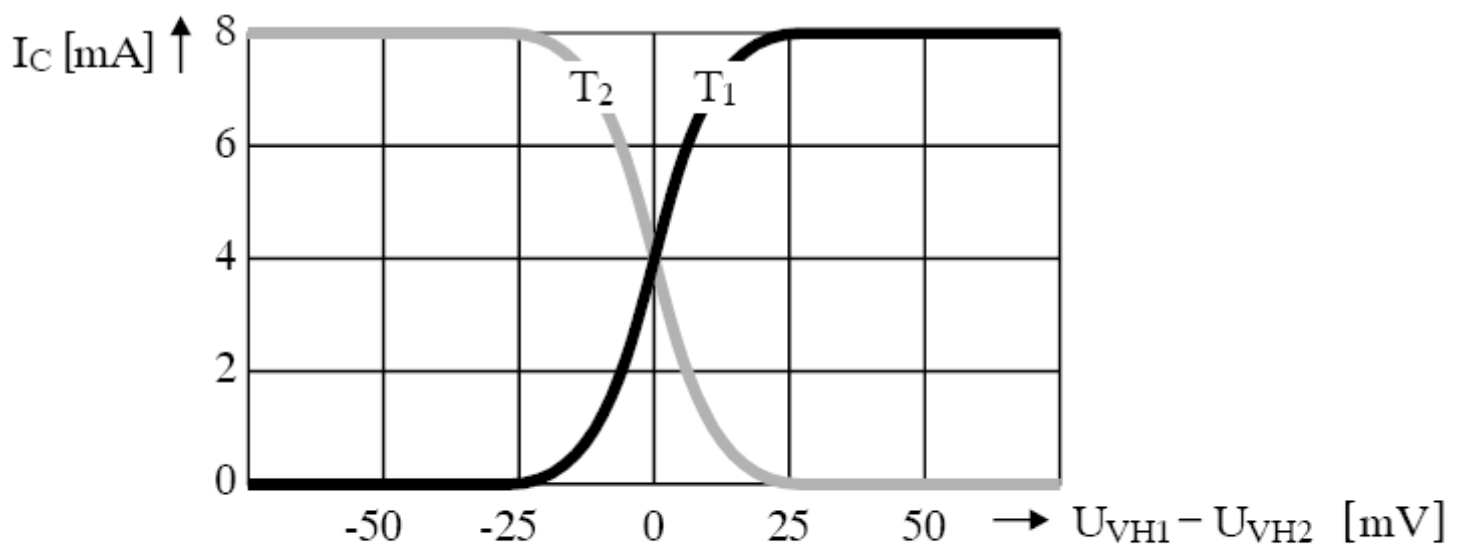
❖ Diferencialni ojačevalnik:



- sestavljen je iz dveh nasproti ležečih tranzistorjev, tako ima ojačevalnik dva para vhodnih priključkov ter dva para izhodnih priključkov
- ta ojačevalnik ojača le razliko napetosti na obeh vhodih
- v vezju na sliki sta oba emitorja tranzistorjev vezana skupaj, vhodni napetosti se porazdelita na padec

emitor tranzistorja ter emitorski upor, ki je vezan na vir napetosti U_{EE}

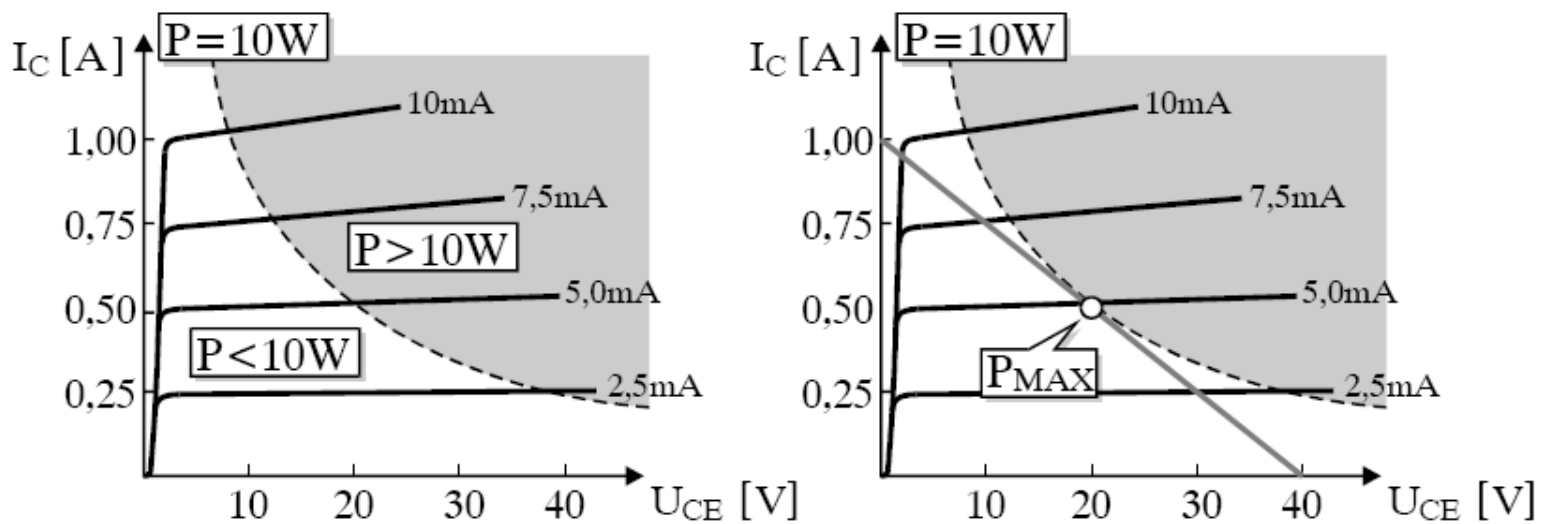
- padec napetosti na emitorskem uporju je za obe vhodni napetosti enak. Če sta vhodni napetosti enaki, potem sta tranzistorja (enaka) enako odprta
- denimo, da vhodna napetost U_{vh1} na prvem tranzistorju naraste. Zaradi tega se prvi tranzistor dodatno zapre in tok I_C se poveča. Prav tako se poveča tok I_{E1} , ki povzroči, da se poveča padec napetosti U_{RE}
- kaj pa se dogaja z drugim tranzistorjem? Ker se vhodna napetost U_{vh2} ni sprememba, povečanje padca napetosti U_{RE} povzroči znižanje padca napetosti U_{BE2} drugega tranzistorja. Drugi tranzistor se zaradi tega za isto mero, kot se je prvi odprl, zapre (protitaktno delovanje)



Slika 4.35. Prenosna karakteristika diferencialnega ojačevalnika.

- **MOČNOSTNI OJAČEVALNIK:**

- so ojačevalniki z veliko močjo na izhodu ter z velikimi signali, ki so blizu izkrmiljenja (izkrmiljenje se zgodi, ko ima izhodni signal največjo možno amplitudo)
- tako postanejo pomembni potrošnja el. moči, izkoristek moči, segrevanje tranzistorja, hlajenje, izkrmiljenje signala in popačenje
- pozorni moramo biti predvsem na omejitve tranzistorja, ki so tako tokovne (največji dopustni tokovi), napetostne (prebojne napetosti spojev) in omejitev izgubne moči (segrevanje tranzistorja)



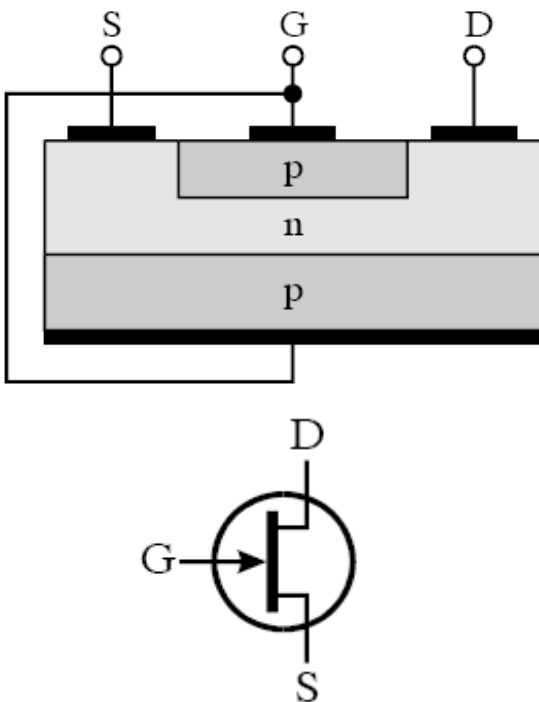
Slika 4.55. Omejitve izgubne moči tranzistorja.

- izgubno el. moč lahko vrišemo v polje izhodnih karakteristik kot hiperbulo $P = U_{CE} * I_C$
- v polju med hiperbulo je moč večja, pod njo pa manjša
- prekoračitev dopustne izgubne moči povzroči prekomerno pregrevanje tranzistorja in njegovo uničenje

UNIPOLARNI TRANZISTORJI

- pravimo jim tudi tranzistorji z vplivom polja (FET- field effect transistor)
- unipolarni so zato, ker je el. tok v teh tranzistorjih sestavljen le iz večinskih nosilcev naboja. Ta tok teče skozi polprevodniški kanal, ki ima dva priključka: izvor (S-source) in ponor (D-drain). Vhodni priključek, s katerim krmilimo tok skozi kanal, imenujemo vrata (G-gate)
- glede na zgradbo vhodnega priključka ločimo:
 - spojni FET (JFET)
 - FET z izoliranimi vrati (IGFET ali MOSFET)
- MOSFET tranzistorji se po zgradbi delijo v dva tipa: z induciranim kanalom in z vgrajenim kanalom

• JFET TRANZISTOR:

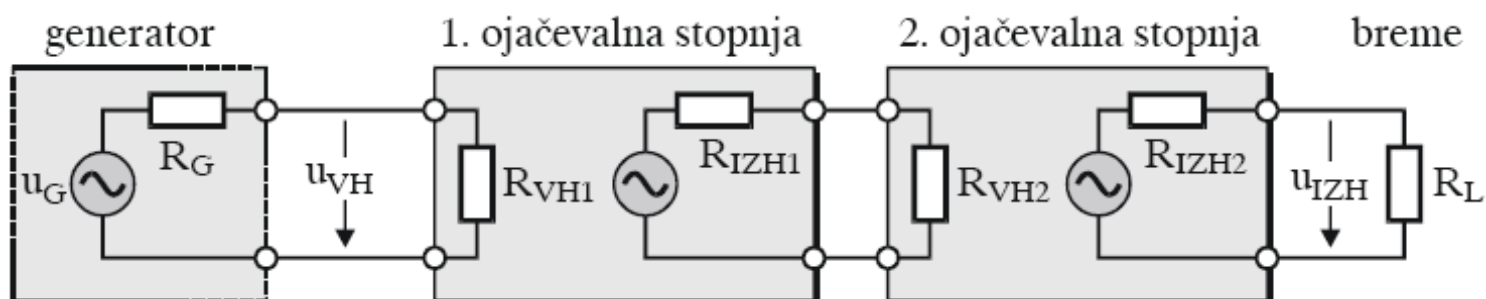


- tranzistor sestavlja kanal, umeščen v nasprotni tip polprevodnika. Na ta polprevodnik, ki oklepa kanal, je spojen vhodni priključek – vrata
- ko na kanal priključimo el. napetost U_{DS} , stečejo skozi kanal večinski nosilci, le-ti pritekajo skozi izvor in odtekajo skozi ponor. Za pravilno delovanje tranzistorja moramo na vhod priključiti napetost tako, da je pn spoj med vrati in kanalom polariziran v zaporno smer. Zaradi tega nastane med kanalom in oklepajočim polprevodnikom

- pri tranzistorju z n-kanalom mora biti napetost na vratih (U_{GS}) negativnejši kot na izvoru

VEČSTOPENJSKI OJAČEVALNIKI

- za doseganje večjega ojačenja vežemo več ojačevalnikov enega za drugim



- napetostno ojačenje celotnega ojačevalnika je:

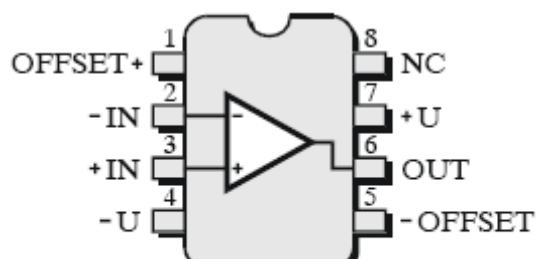
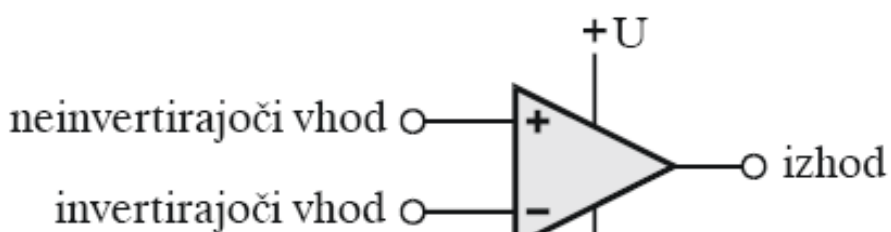
$$u_{VH2} = u_{IZH1} \cdot \frac{R_{VH2}}{R_{VH2} + R_{IZH1}}$$

$$A_U = \frac{u_{IZH}}{u_{VH}} = A_{U1} \cdot A_{U2} \cdot \dots \cdot A_{Un}$$

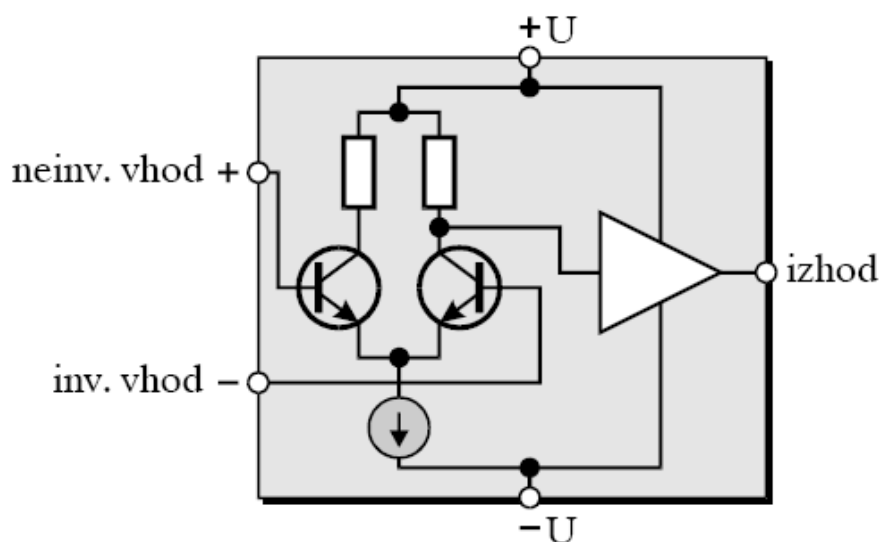
- največja moč je tedaj, ko sta upornosti generatorja in ojač. enaki. Takrat se na vhodu ojačevalnika troši ravno polovica, ki jo proizvaja generator:

$$R_{VH} = R_G$$

OPERACIJSKI OJAČEVALNIK



- je ojačevalnik v integrirani izvedbi. Tranzistorji so povezani med seboj direktno, da lahko ojačajo tako enosmerne kot izmenične signale
- Lastnosti:
 - zelo velika vhodna upornost,
 - zelo nizka izhodna upornost,
 - zelo veliko napetostno ojačenje (10^4 do 10^5),
 - protifazne signale na obeh vhodih ojača, medtem ko sofazne slabi.

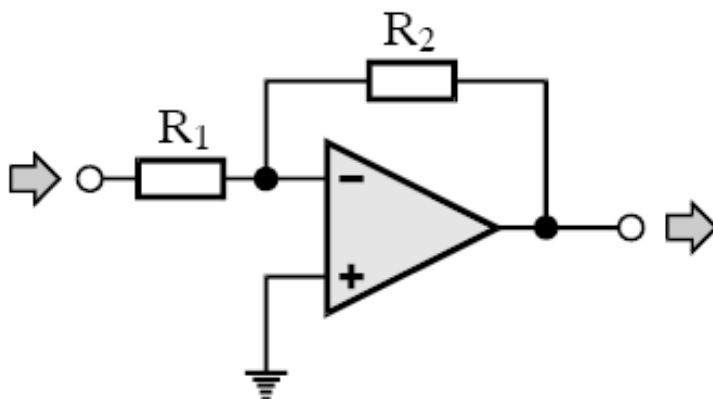


Slika 7.3. Notranjost operacijskega ojačevalnika.

- na vhodu op. ojač. je diferencialni ojačevalnik, zato ojača le razliko napetosti na obeh vhodih. Sofazni signali so oslavljeni, kar nam pove tudi zelo velik rejekcijski faktor CMRR, ki podaja razmerje med protifaznim in sofaznim ojačenjem v dB

• INVERTIRAJOČI OJAČEVALNIK:

- Vhod je na invertirajočem priključku, to pomeni, da bo izhodni signal v protifazi z vhodnim

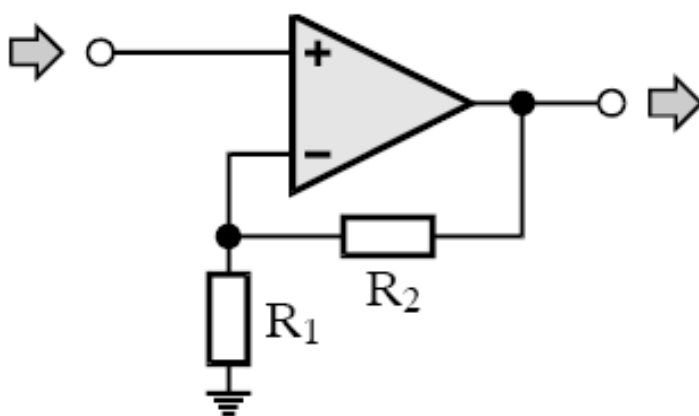


$$A_U = -\frac{R_2}{R_1}$$

- povratno zanko izvedemo s pomočjo dveh uporov, ki znižata ojačanje ojačevalnika – negativna povratna vezava

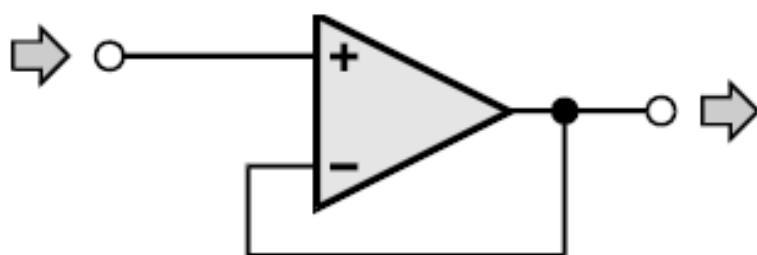
• NEINVERTIRAJOČI OJAČEVALNIK:

- vhod je vezan na neinvertirajoči priključek, izhodni signal je v fazi z vhodnim
- negativna povratna vezava je narejena iz dveh uporov, ker želimo negativno povratno vezavo, mora izhodni signal pritekati na invertirajoči vhod



$$A_U = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

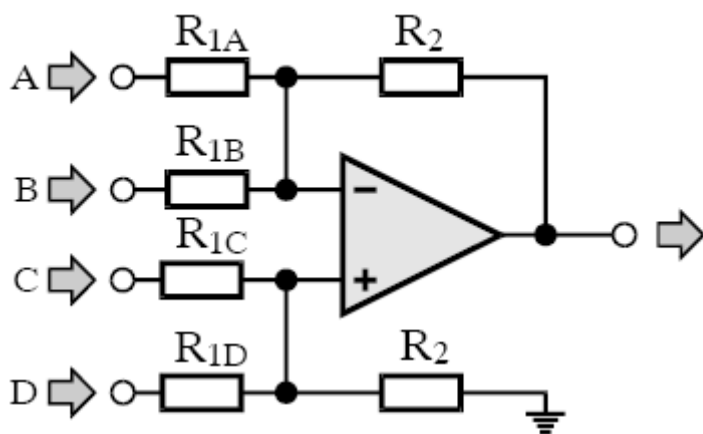
Če upor R_1 odvezamemo, namesto upora R_2 pa naredimo kratek spoj, potem dobimo ojačevalnik, ki ima ojačenje 1. Rečemo mu napetostni sledilnik (angl. voltage follower). Izhodna napetost je popolnoma enaka vhodni; vhodna upornost je zelo velika, izhodna pa zelo majhna.



Slika 7.6. Vezje napetostnega sledilnika.

• SEŠTEVALNIK IN ODŠTEVALNIK:

Ko priključimo napetosti na oba vhoda operacijskega ojačevalnika, dobimo na izhodu napetost, ki je za napetostno ojačenje večja od razlike obeh napetosti na vhodu. Na ta način lahko naredimo vezje, ki sešteva in odšteva napetosti na vhodu. Primer takega vezja vidimo na sliki 7.7. Izhodna napetost je sorazmerna seštevku vhodnih napetosti U_A in U_B in razliki vhodnih napetosti U_C in U_D .

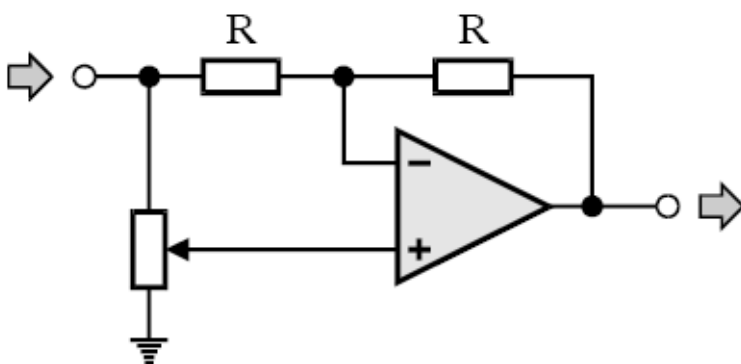


Slika 7.7. Vezje seštevalnika in odštevalnika napetosti.

$$U_{IZH} = -R_2 \cdot \left(\frac{U_A}{R_{1A}} + \frac{U_B}{R_{1B}} - \frac{U_C}{R_{1C}} - \frac{U_D}{R_{1D}} \right)$$

- **SPREMEMBA KOEFICIENTA OJAČENJA:**

S pomočjo potenciometra v vezju na sliki 7.8 lahko poleg spremembe ojačenja spremenimo tudi polariteto izhodnega signala.



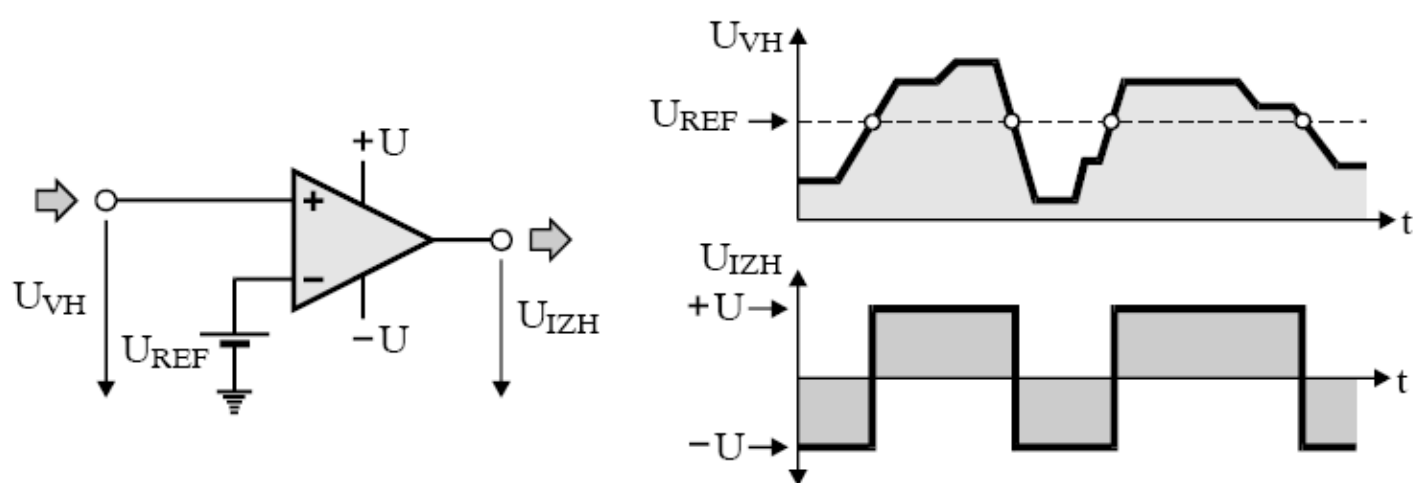
Slika 7.8. Vezje za spremembo koeficienta ojačenja.

Ko je drsnik potenciometra na skrajni spodnji točki ($n=0$), se ojačevalnik obnaša kot invertirajoči ojačevalnik z ojačenjem 1. Ko pa drsnik pomaknemo v skrajno zgornjo lego ($n=1$), se ojačevalnik obnaša kot neinvertirajoči ojačevalnik z ojačenjem 1. Enačba izhodne napetosti je:

$$U_{IZH} = (2 \cdot n - 1) \cdot U_{VH}$$

- **PRIMERJALNIK:**

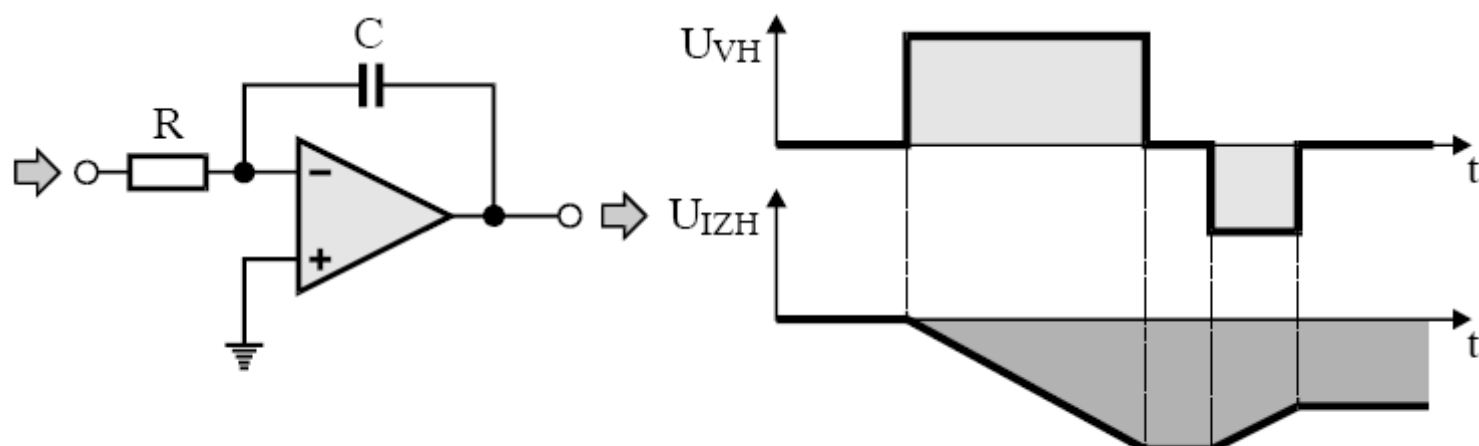
Operacijski ojačevalnik ima zelo veliko napetostno ojačenje. Če ojačenja ne znižamo s pomočjo negativne povratne zanke, je izhodna napetost vedno maksimalna in sicer pozitivna, če je napetost na neinvertirajočem vhodu večja od napetosti na invertirajočem, in negativna, če je napetost na neinvertirajočem vhodu manjša od napetosti na invertirajočem. Zaradi tega ojačevalnik uporabljamo kot primerjalnik (angl. comparator). Na izhodu operacijskega ojačevalnika brez povratne vezave dobimo lahko le dve vrednosti napetosti.



Slika 7.10. Vezje napetostnega primerjalnika.

• **INTEGRATOR:**

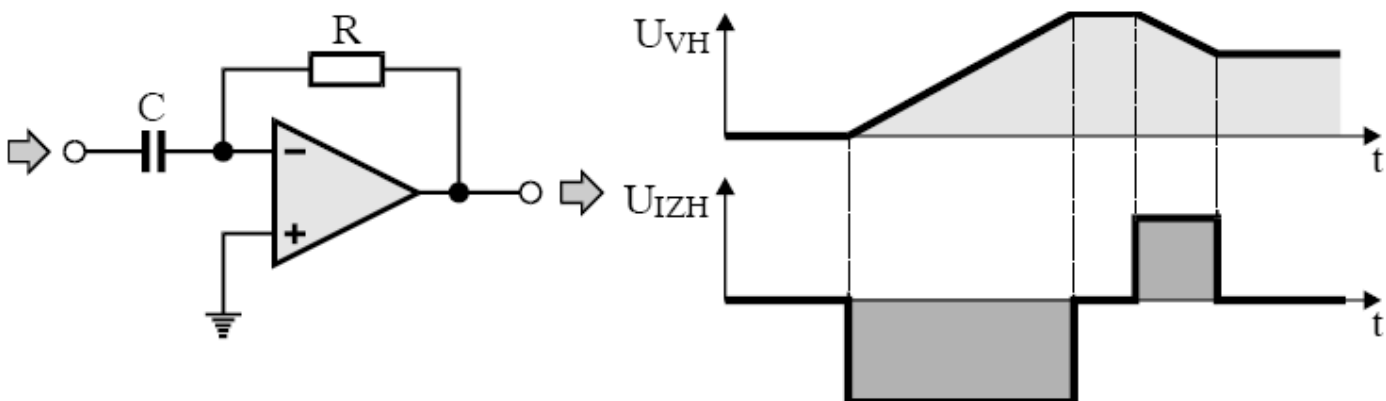
Integriranje je matematična operacija, s pomočjo katere izračunamo ploščino tiste površine, ki jo oklepata funkcija in abscisa (x-os). Oglejmo si funkcijo, ki je odvisna od časa (npr. odvisnost U_{VH} od časa, slika 7.18). Kjer ima krivulja pozitivne vrednosti (nad absciso), tam ploščina s časom narašča, pri negativnih vrednostih (pod absciso) pa ploščina pada. Kjer ima funkcija vrednost 0, se ploščina ne spreminja. V določenem časovnem intervalu je torej integral te funkcije sorazmeren ploščini, ki jo funkcija v intervalu oklepa z absciso.



Slika 7.18. Vezje integratorja.

• DIFERENCIATOR:

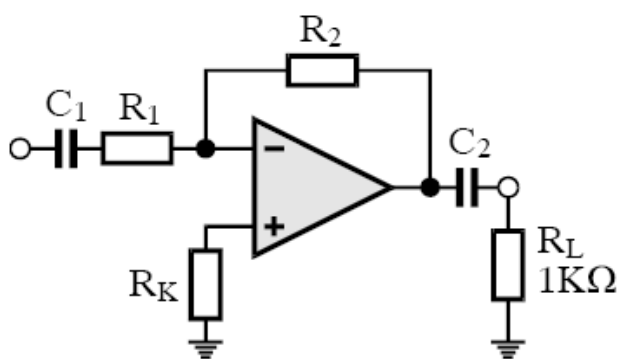
Diferenciranje (ali odvajanje) je matematična operacija, s pomočjo katere ugotovimo hitrost spreminjanja določene funkcije. Če vrednost funkcije narašča, je odvod pozitiven in po velikosti enak hitrosti spremembe. Odvod je po predznaku negativen, če vrednost funkcije pada. Ko pa se vrednost funkcije ne spreminja, je odvod enak 0.



Slika 7.19. Vezje diferenciatorja.

Hitrejša sprememba vhodne napetosti požene skozi kondenzator večji tok, ta pa povzroči višjo napetost na izhodu vezja. Ker je signal pripeljan na invertirajoči vhod, je izhodni signal, podobno kot pri integratorju, obrnjen.

Primer



Izračunajmo vrednosti elementov tako, da bo imel ojačevalnik ojačenje $A_U = -50$, vhodno upornost $R_{VH} = 10\text{k}\Omega$ ter spodnjo mejno frekvenco $f_L = 60\text{Hz}$! Upornost bremena je $1\text{k}\Omega$, napetostni generator na vhodu pa ima upornost 0.

Napetost na invertirajočem vhodu je 0, zato je vsa vhodna napetost na upor R_1 . Vhodna upornost ojačevalnika je enaka:

S pomočjo ojačenja izračunamo upor R_2 :

$$R_2 = -A_U \cdot R_1 = 50 \cdot 10\text{k}\Omega = 500\text{k}\Omega$$

Upor R_K služi za izravnavo vhodnega toka, zato znaša:

$$R_3 = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 9,8\text{k}\Omega$$

Kondenzatorja C_1 in C_2 vplivata na spodnjo mejno frekvenco:

$$f_L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot R},$$

zato sta kapacitivnosti kondenzatorjev enaki:

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_L \cdot R_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60\text{Hz} \cdot 10\text{k}\Omega} = 265\text{nF}$$

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_L \cdot R_L} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60\text{Hz} \cdot 1\text{k}\Omega} = 2,65\mu\text{F}$$
