

Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za elektroniku, mikroelektroniku,
računalne i inteligentne sustave

Elektronika 1

Ž. Butković, J. Divković Pukšec, A. Barić

10. Sklopovi s operacijskim pojačalima

Operacijsko pojačalo

- ❑ pojačalo s 2 ulaza i najčešće s 1 izlazom
- ❑ ima veliko naponsko pojačanje
- ❑ naziv – rezultat prve primjene u analognim računalima – obavljanje matematičkih operacija s analognim signalima (zbrajanje, oduzimanje, integriranje, deriviranje, ...)
- ❑ izvedbe
 - nekad – diskretni sklopovi (s elektronskim cijevima, s tranzistorima)
 - danas – integrirani sklopovi
- ❑ najčešće primjenjivan analogni integrirani sklop – razna pojačala, aktivni fitri, stabilizatori, komparatori, digitalno-analogni i analogno-digitalni pretvornici, generatori signala, ...

Električki simbol

2 komplementarna napona napajanja →

$$U_{CC} \text{ i } -U_{EE} \rightarrow U_{CC} = U_{EE}$$

U linearnim radu:

$$u_{iz} = A_{VOP} u_d = A_{VOP} (u_+ - u_-)$$

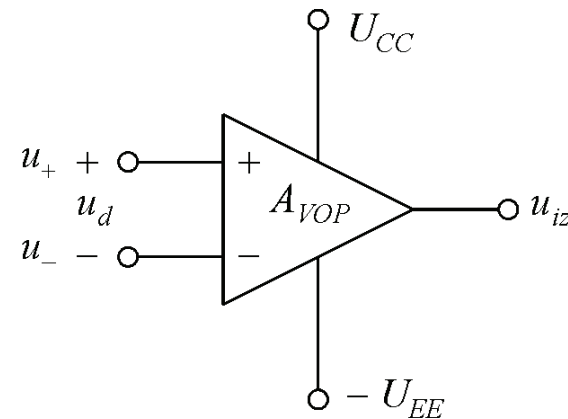
$A_{VOP} \rightarrow$ **naponsko pojačanje operacijskog pojačala**

$$\text{Za } u_- = 0 \rightarrow u_{iz} = A_{VOP} u_+$$

$$\text{Za } u_+ = 0 \rightarrow u_{iz} = -A_{VOP} u_-$$

Ulaz označen s "+" → **neinvertirajući ulaz**

Ulaz označen s "-" → **invertirajući ulaz**

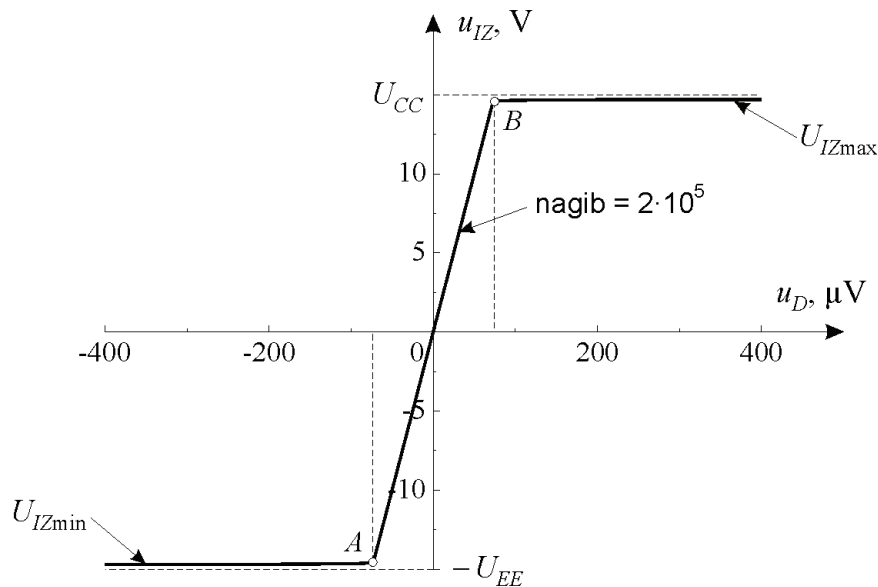


Svojstva operacijskog pojačala

Svojstvo	Idealno pojačalo	Realno pojačalo
Naponsko pojačanje	∞	$10^4 - 10^6$
Ulazni otpor	∞	1 M Ω i više
Izlazni otpor	0	100 Ω i manje
Gornja granična frekvencija	∞	10 Hz i više

Prijenosna karakteristika

Izlazni napon operacijskog pojačala ograničen je naponima napajanja



ulazni napon $\rightarrow u_D = u_+ - u_-$

predznak napona u_{IZ} odgovara
predznaku napona u_D

između točaka A i B operacijsko
pojačalo radi linearno

$u_{iz} = A_{VOP} u_D \rightarrow$ primjena: pojačalo

za veće iznose napona u_D napon u_{IZ}
je u zasićenju U_{IZmax} ili $-U_{IZmin} \rightarrow$
primjena: komparator

Invertirajuće pojačalo (1)

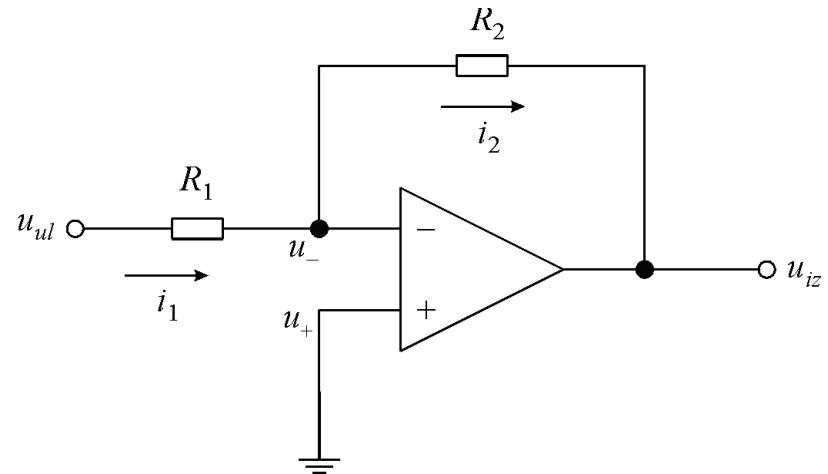
Otporom R_2 izlaz je spojen s ulazom
→ povratna veza

$$i_1 = \frac{u_{ul} - u_-}{R_1} \quad i_2 = \frac{u_- - u_{iz}}{R_2}$$

Zbog velikog ulaznog otpora → $i_1 = i_2$

$$\frac{u_{ul} - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_{iz}}{R_2} \quad u_- = -\frac{u_{iz}}{A_{VOP}}$$

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{VOP}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}$$



Napon u_{ul} spojen je na "-" ulaz → pojačanje je negativno

Invertirajuće pojačalo (2)

$$\text{Uz } A_{VOP} \gg 1 + R_2/R_1 \rightarrow A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$|A_V| \ll A_{VOP} \rightarrow$ negativna povratna veza

Zbog velikog pojačanja $A_{VOP} \rightarrow u_+ = u_- \rightarrow$ **prividni kratki spoj**

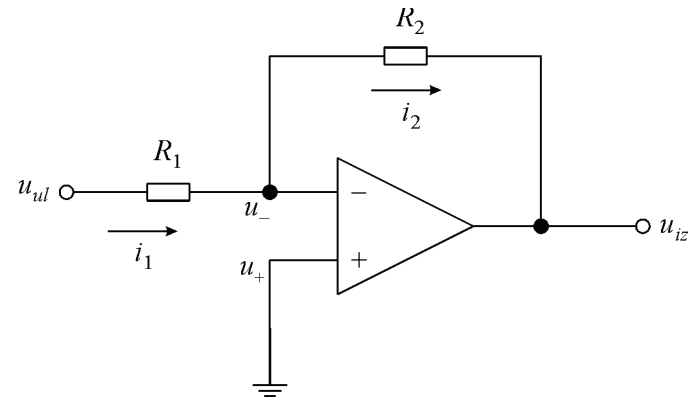
Pojednostavljena analiza sklopova s operacijskim pojačalom:

- ❑ zbog beskonačno velikog ulaznog otpora ulazne struje operacijskog pojačala jednake su nuli
- ❑ zbog beskonačno velikog pojačanja ulazni priključci operacijskog pojačala na istom su potencijalu

$$\text{Ulazni otpor invertirajućeg pojačala} \rightarrow R_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_1} = \frac{u_{ul}}{u_{ul}/R_1} = R_1$$

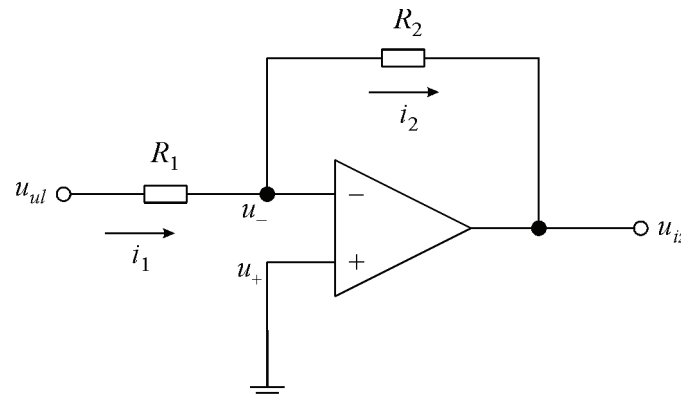
Primjer 10.1

U invertirajućem pojačalu sa slike otpori otpornika su $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ i $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$. Odrediti naponsko pojačanje invertirajućeg pojačala A_V uz pojačanja operacijskog pojačala $A_{VOP} = 10^3, 10^4$ i 10^5 . Za svako pojačanje A_{VOP} odrediti relativnu pogrešku stvarnog pojačanja A_V u odnosu na pojačanje $A_{Vi} = -R_2 / R_1$ uz idealno operacijsko pojačalo, te amplitudu napona U_{-m} invertirajućeg ulaza operacijskog pojačala, ako je amplituda ulaznog sinusnog napona pojačala $U_{ulm} = 0,1 \text{ V}$.



Primjer 10.2

Odrediti otpore R_1 i R_2 invertirajućeg pojačala sa slike tako da ulazni otpor pojačala bude $R_{ul} = 2 \text{ k}\Omega$, a naponsko pojačanje $A_V = -200$. Operacijsko pojačalo je idealno.



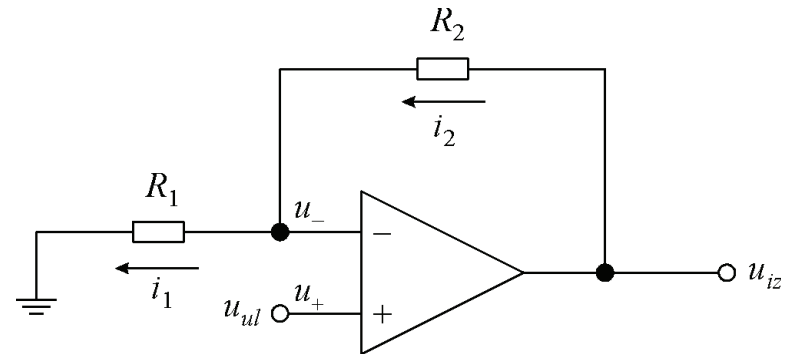
Neinvertirajuće pojačalo

Zbog velikog ulaznog otpora $\rightarrow i_1 = i_2$

$$\frac{u_-}{R_1} = \frac{u_{iz} - u_-}{R_2}$$

$$u_+ - u_- = u_{ul} - u_- = \frac{u_{iz}}{A_{VOP}}$$

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{VOP}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}$$



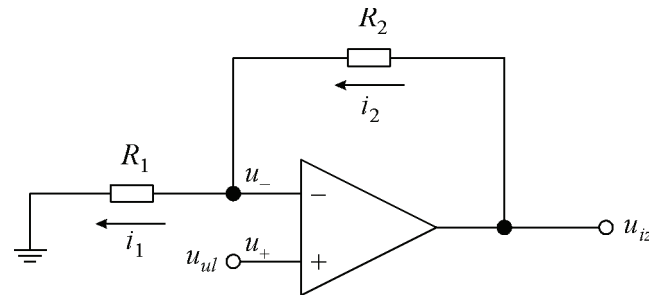
Napon u_{ul} spojen je na "+" ulaz \rightarrow pojačanje je pozitivno

$$\text{Uz } A_{VOP} \gg 1 + R_2/R_1 \rightarrow A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Ulazni otpor jednak je ulaznom otporu neinvertirajućeg ulaza \rightarrow vrlo je velik

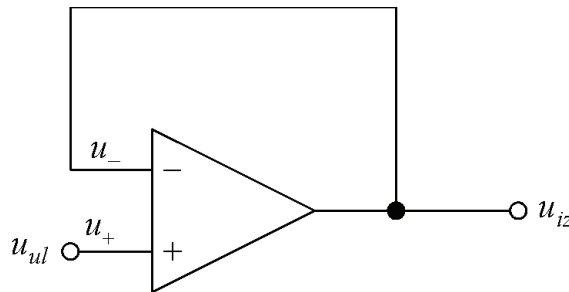
Primjer 10.3

U neinvertirajućem pojačalu sa slike otpori otpornika su $R_1 = 3 \text{ k}\Omega$ i $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$. Odrediti naponsko pojačanje neinvertirajućeg pojačala A_V , amplitude napona U_{-m} invertirajućeg ulaza i U_{izm} operacijskog pojačala, te amplitude struja I_{1m} i I_{2m} ako je amplituda ulaznog sinusnog napona pojačala $U_{ulm} = 0,1 \text{ V}$. Operacijsko pojačalo je idealno.



Naponsko sljedilo

Specijalni slučaj neinvertirajućeg pojačala uz $R_2 = 0$ i $R_1 = \infty$



$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = 1$$

Ima jako veliki ulazni i jako mali izlazni otpor \rightarrow koristi se kao odjelni stupanj ili transformator impedancije \rightarrow slično kao emitorsko ili uvodsko sljedilo.

Diferencijsko pojačalo

Dva ulazna napona u_{ul1} i u_{ul2}

Zbog velikog ulaznog otpora $\rightarrow i_1 = i_2$

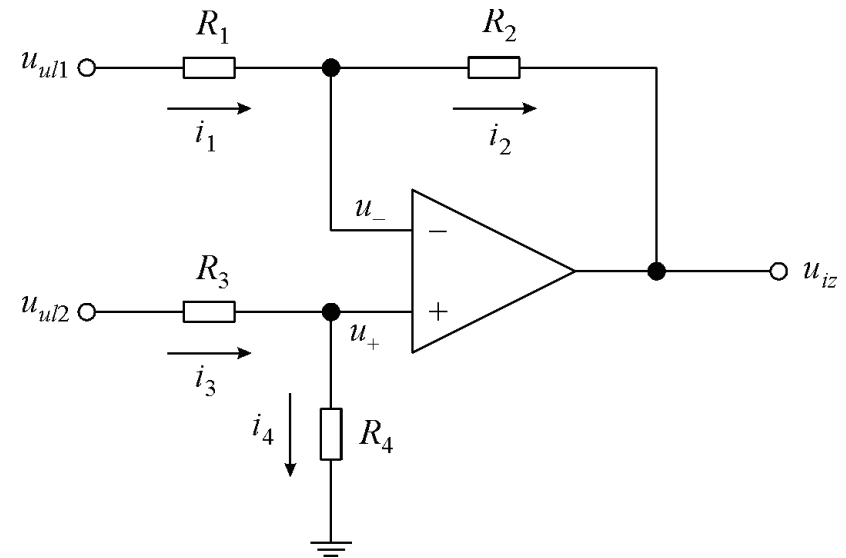
$$\frac{u_{ul1} - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_{iz}}{R_2}$$

$$u_{iz} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)u_- - \frac{R_2}{R_1}u_{ul1}$$

Uz $i_3 = i_4 \rightarrow u_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4}u_{ul2}$

Uz veliki $A_{VOP} \rightarrow u_- = u_+ = u \rightarrow u_{iz} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4}u_{ul2} - \frac{R_2}{R_1}u_{ul1}$

Uz $R_3 = R_1$ i $R_4 = R_2 \rightarrow u_{iz} = \frac{R_2}{R_1}(u_{ul2} - u_{ul1}) = \frac{R_2}{R_1}u_{uld} \quad A_{Vd} = \frac{u_{iz}}{u_{ul2} - u_{ul1}} = \frac{u_{iz}}{u_{uld}} = \frac{R_2}{R_1}$



Instrumentacijsko pojačalo

Pretpostavka → idealna
operacijska pojačala

$$i = \frac{u_{iz2} - u_{iz1}}{2R_1 + 2R_2} = \frac{u_{ul2} - u_{ul1}}{2R_1}$$

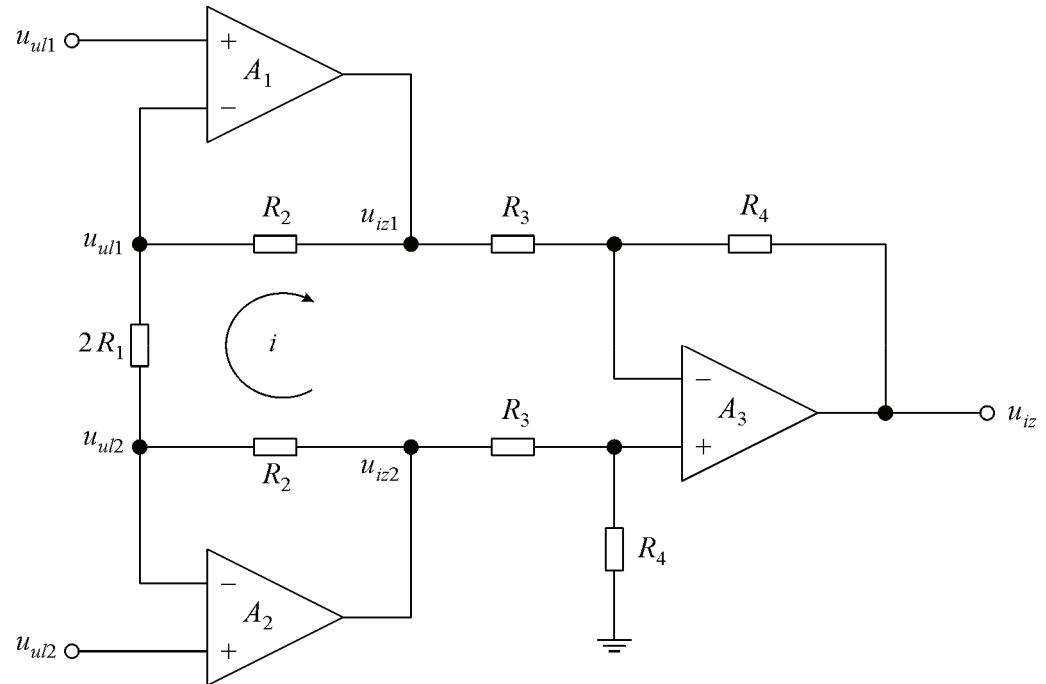
$$u_{iz2} - u_{iz1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)(u_{ul2} - u_{ul1})$$

u_{iz1} i u_{iz2} → ulazni naponi
diferencijskog pojačala

$$u_{iz} = \frac{R_4}{R_3}(u_{iz2} - u_{iz1})$$

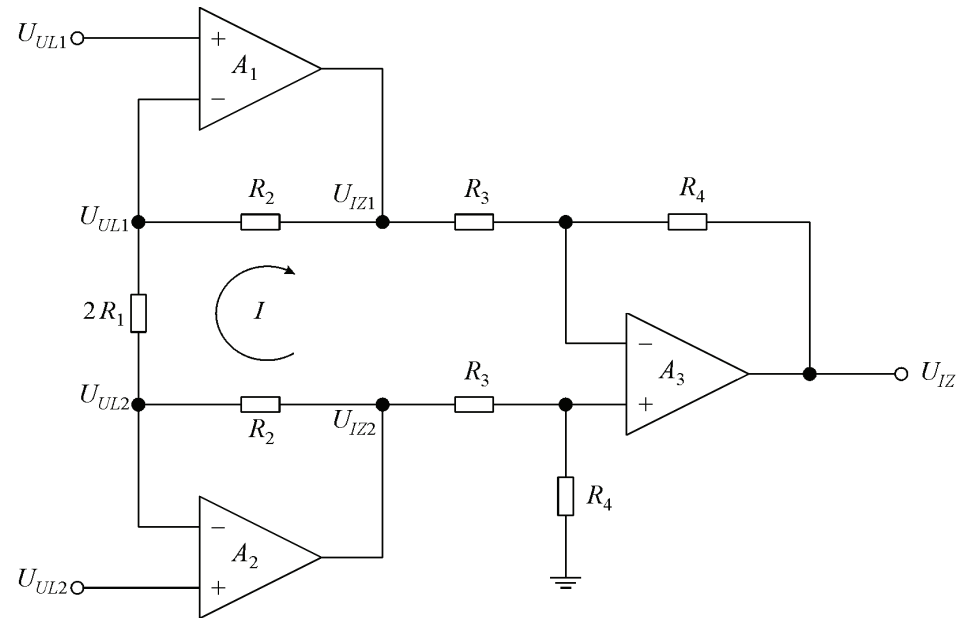
$$u_{iz} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)(u_{ul2} - u_{ul1}) = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{uld}$$

$$A_{Vd} = \frac{u_{iz}}{u_{ul2} - u_{ul1}} = \frac{u_{iz}}{u_{uld}} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$



Primjer 10.4

U instrumentacijskom pojačalu sa slike otpori otpornika su $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 150 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 15 \text{ k}\Omega$ i $R_4 = 30 \text{ k}\Omega$. Uz pretpostavku da su na neinvertirajuće ulaze operacijskih pojačala A_1 i A_2 priključeni istosmjerni naponi $U_{UL1} = 2,5 \text{ V}$ i $U_{UL2} = 2,25 \text{ V}$ odrediti izlazne napone operacijskih pojačala U_{IZ1} , U_{IZ2} i U_{IZ} .



Sklop za zbrajanje

Uz idealno operacijsko pojačalo \rightarrow

$$u_- = u_+ = 0 \text{ i } i_1 + i_2 + i_3 = i_N$$

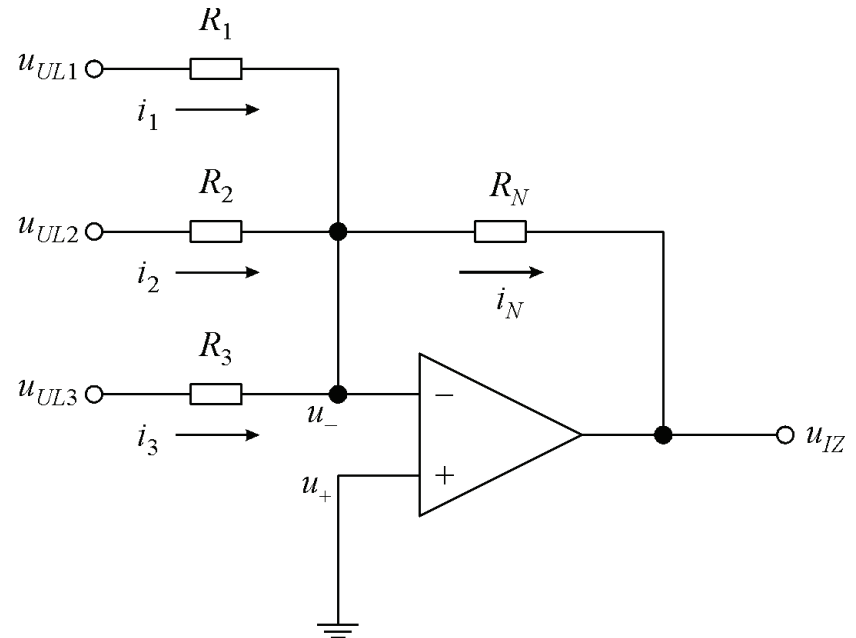
$$\frac{u_{UL1}}{R_1} + \frac{u_{UL2}}{R_2} + \frac{u_{UL3}}{R_3} = -\frac{u_{IZ}}{R_N}$$

$$u_{IZ} = -\left(\frac{R_N}{R_1}u_{UL1} + \frac{R_N}{R_2}u_{UL2} + \frac{R_N}{R_3}u_{UL3}\right)$$

Uz $R_1 = R_2 = R_3 \rightarrow$

$$u_{IZ} = -\frac{R_N}{R_1}(u_{UL1} + u_{UL2} + u_{UL3})$$

Uz $R_1 = R_2 = R_3 = R_N \rightarrow u_{IZ} = -(u_{UL1} + u_{UL2} + u_{UL3})$



Sklop za zbrajanje i oduzimanje (1)

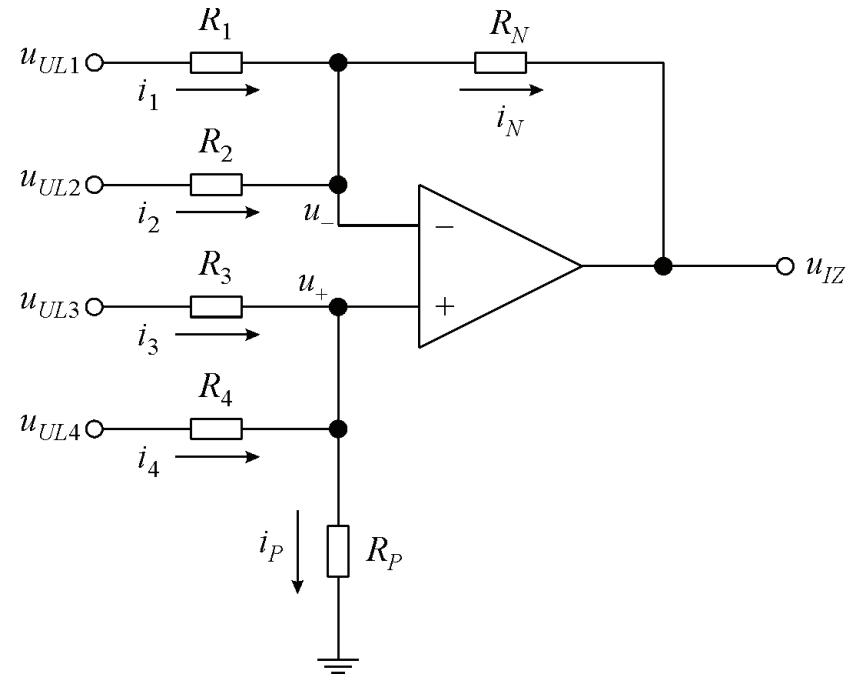
Idealno operacijsko pojačalo \rightarrow

$$u_- = u_+ = u$$

$$i_3 + i_4 = i_P \rightarrow$$

$$\frac{u_{UL3} - u}{R_3} + \frac{u_{UL4} - u}{R_4} = \frac{u}{R_P}$$

$$u \left(1 + \frac{R_P}{R_3} + \frac{R_P}{R_4} \right) = \frac{R_P}{R_3} u_{UL3} + \frac{R_P}{R_4} u_{UL4}$$



Sklop za zbrajanje i oduzimanje (2)

Idealno operacijsko pojačalo →

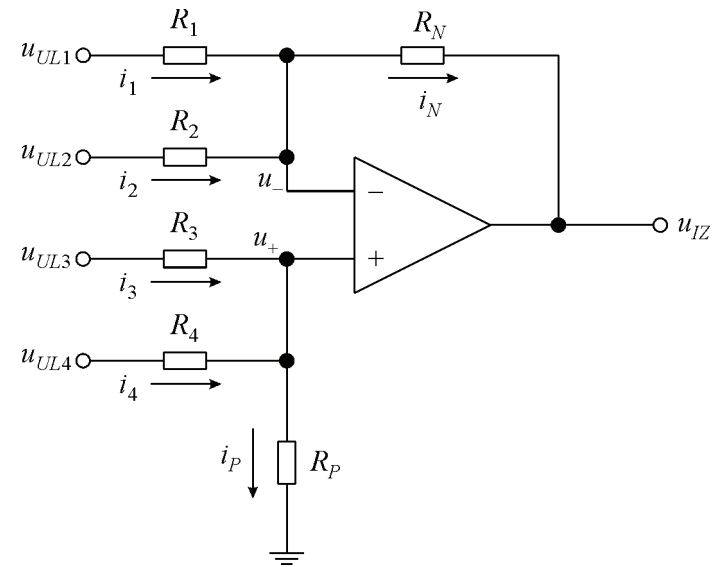
$$i_1 + i_2 = i_N \rightarrow$$

$$\frac{u_{UL1} - u}{R_1} + \frac{u_{UL2} - u}{R_2} = \frac{u - u_{IZ}}{R_N}$$

$$u_{IZ} = u \left(1 + \frac{R_N}{R_1} + \frac{R_N}{R_2} \right) - \frac{R_N}{R_1} u_{UL1} - \frac{R_N}{R_2} u_{UL2}$$

$$u_{IZ} = -\frac{R_N}{R_1} u_{UL1} - \frac{R_N}{R_2} u_{UL2} + \frac{1 + \frac{R_N}{R_1} + \frac{R_N}{R_2}}{1 + \frac{R_P}{R_3} + \frac{R_P}{R_4}} \left(\frac{R_P}{R_3} u_{UL3} + \frac{R_P}{R_4} u_{UL4} \right)$$

$$\text{Uz } R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \text{ i } R_N = R_P \rightarrow u_{IZ} = \frac{R_N}{R_1} (-u_{UL1} - u_{UL2} + u_{UL3} + u_{UL4})$$



Integrator

Idealno operacijsko pojačalo \rightarrow

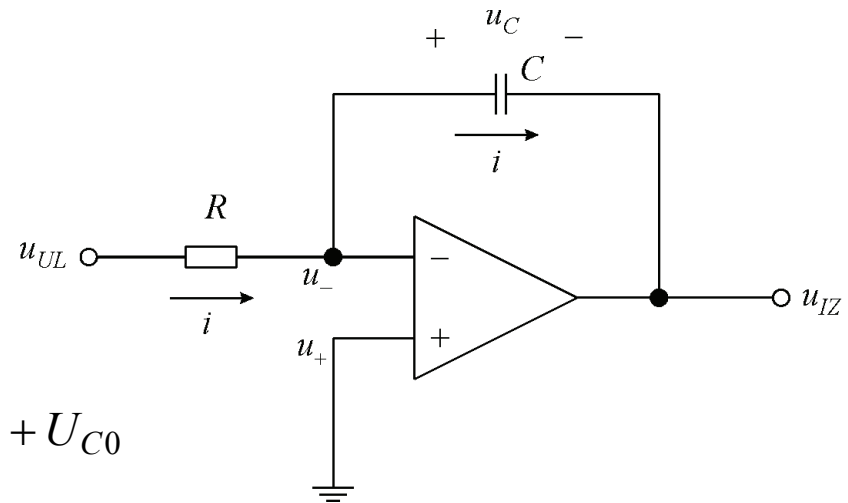
$$u_- = u_+ = 0$$

$$i(t) = \frac{u_{UL}(t)}{R}$$

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + U_{C0} = \frac{1}{RC} \int_0^t u_{UL}(t) dt + U_{C0}$$

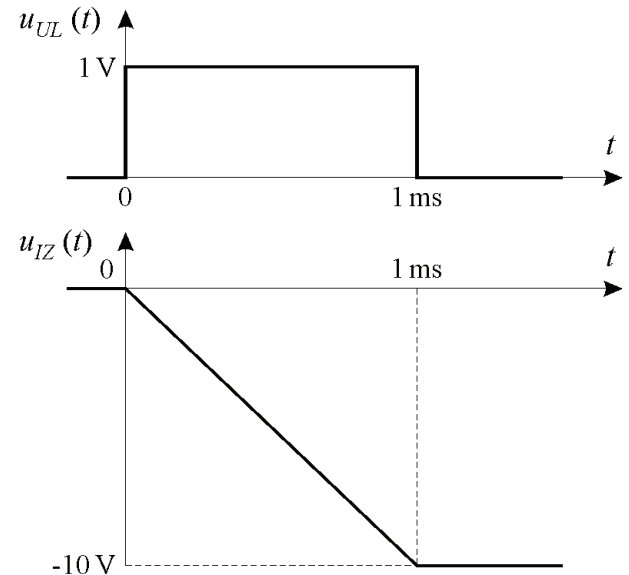
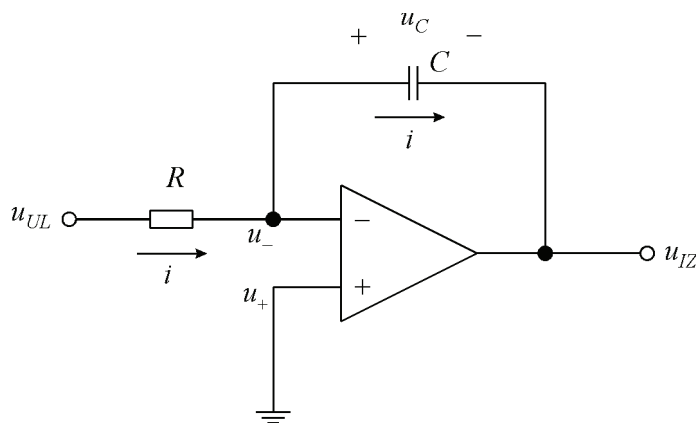
$$U_{C0} = u_C(t=0)$$

$$u_{IZ}(t) = -u_C(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{UL}(t) dt - U_{C0}$$



Primjer 10.5

Odrediti izlazni napon $u_{IZ}(t)$ integratora sa slike ako je ulazni napon $u_{UL}(t)$ impuls amplitude $U_{UL1} = 1 \text{ V}$ i trajanja $T_P = 1 \text{ ms}$. Otpor otpornika $R = 10 \text{ k}\Omega$, a kapacitet kondenzatora $C = 10 \text{ nF}$. Prije dolaska impulsa napon na kondenzatoru bio je jednak nuli, tj. $U_{C0} = 0 \text{ V}$.



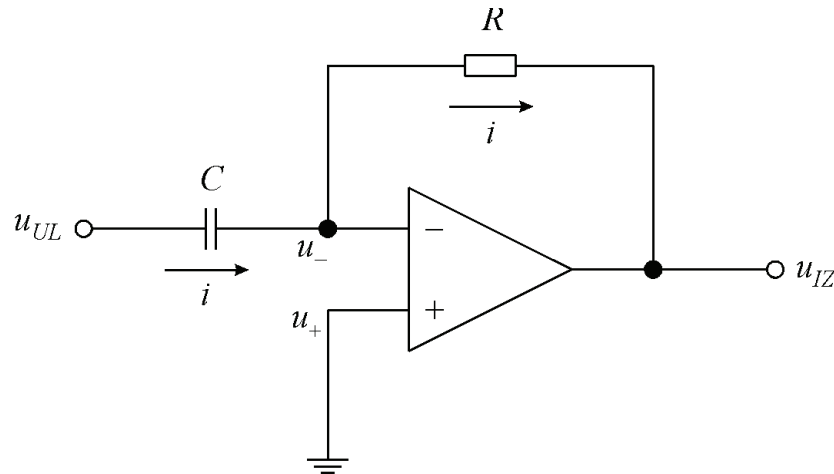
Derivator

Idealno operacijsko pojačalo →

$$u_- = u_+ = 0$$

$$i(t) = C \frac{du_{UL}(t)}{dt}$$

$$u_{IZ}(t) = -R i(t) = -RC \frac{du_{UL}(t)}{dt}$$



Multivibratori

Multivibratori → impulsni sklopovi čiji izlazni napon poprima jedno od dva moguća stanja – stanje niske ili stanje visoke razine.

Stanje može biti:

- ❑ **stabilno** stanje u kojem multivibrator ostaje trajno
- ❑ **kvazistabilno** stanje u kojem multivibrator ostaje ograničeno vrijeme, određeno karakteristikama sklopa.

Tri vrste multivibratora:

- ❑ **bistabilni multivibrator** ili **bistabil** → oba stanja su stabilna,
- ❑ **monostabilni multivibrator** ili **monostabil** → jedno stanje je stabilno, a drugo kvazistabilno,
- ❑ **astabilni multivibrator** ili **astabil** → oba stanja su kvazistabilna.

Operacijsko pojačalo s pozitivnom povratnom vezom

U multivibratorima operacijska pojačala rade s pozitivnom povratnom vezom

Izlazni napon uvijek je u zasićenju

Pretpostavka: na "+" ulazu smetnja (mali pozitivni napon u_+)

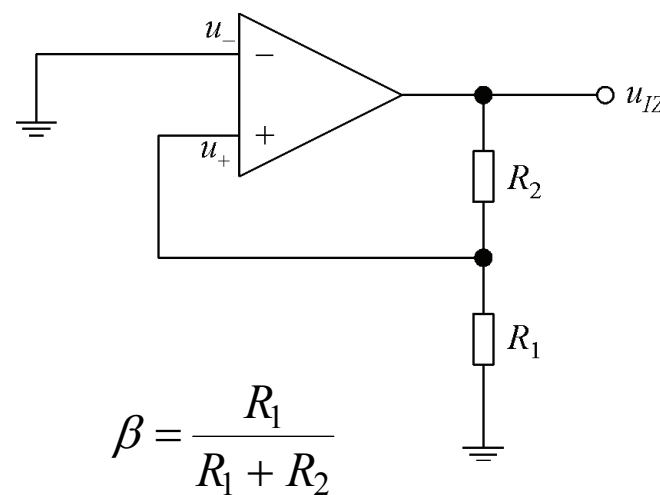
→ na izlazu $u_{IZ} = A_{VOP} u_+$

→ na "+" ulazu $u_+ = \beta u_{IZ}$

→ uz $\beta A_{VOP} > 1$ izlazni napon je sve veći i na kraju postaje napon zasićenja U_{IZmax}

Uz negativnu smetnju na "+" ulazu →

izlazni napon zasićenja $U_{IZmin} = -U_{IZmax}$



Komparator (1)

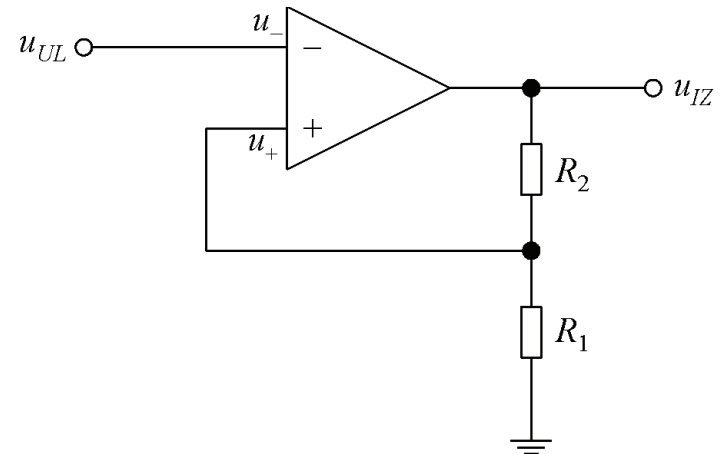
Komparator → sklop koji uspoređuje
(komparira) dva ulazna napona

Pozitivna povratna veza → izlazni napon je
u zasićenju

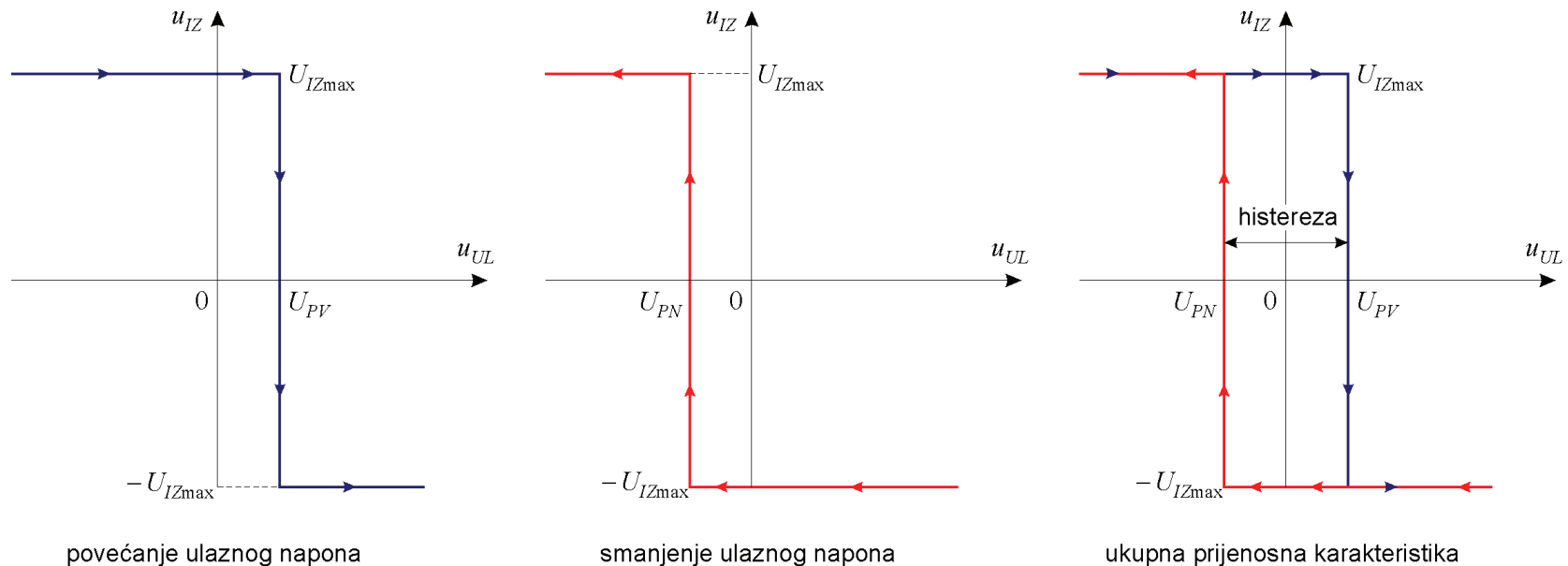
$$u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{IZ} = \beta u_{IZ}$$

Za $u_{UL} = u_- < u_+ \rightarrow u_{IZ} = U_{IZmax}$ i $u_+ = \beta U_{IZmax} = U_{PV} \rightarrow$ pri porastu u_{UL} promjena
izlaza uz $u_{UL} = U_{PV} \rightarrow$ napon u_{IZ} mijenja se s U_{IZmax} na $-U_{IZmax}$

Za $u_{UL} = u_- > u_+ \rightarrow u_{IZ} = -U_{IZmax}$ i $u_+ = -\beta U_{IZmax} = U_{PN} \rightarrow$ pri smanjenju u_{UL}
promjena izlaza uz $u_{UL} = U_{PN} \rightarrow$ napon u_{IZ} mijenja se s $-U_{IZmax}$ na U_{IZmax}



Komparator (2)

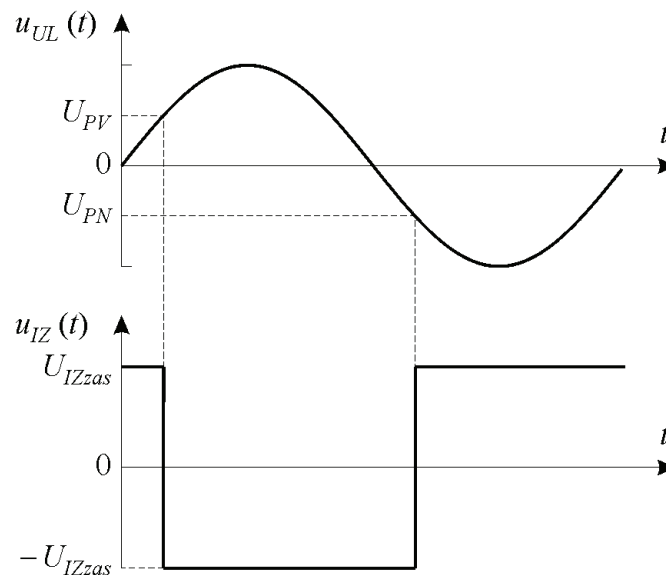


Napon u_{IZ} mijenja stanja pri različitim ulaznim naponima

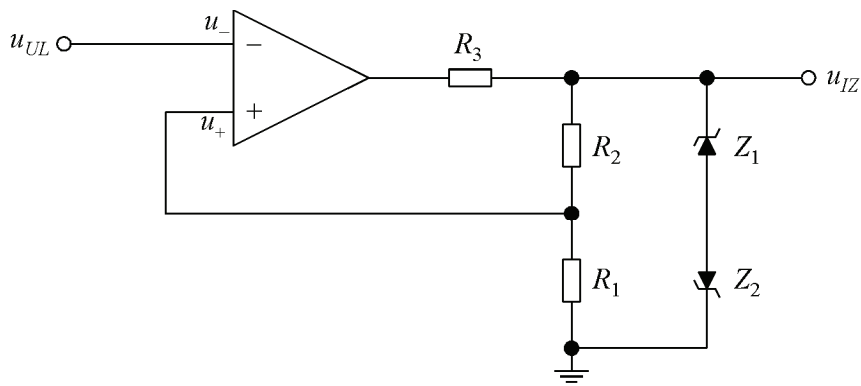
→ prijenosna karakteristika ima svojstvo histereze

širina histereze → $U_H = U_{PV} - U_{PN} = 2\beta U_{IZmax}$

Odziv komparatora na sinusnu pobudu

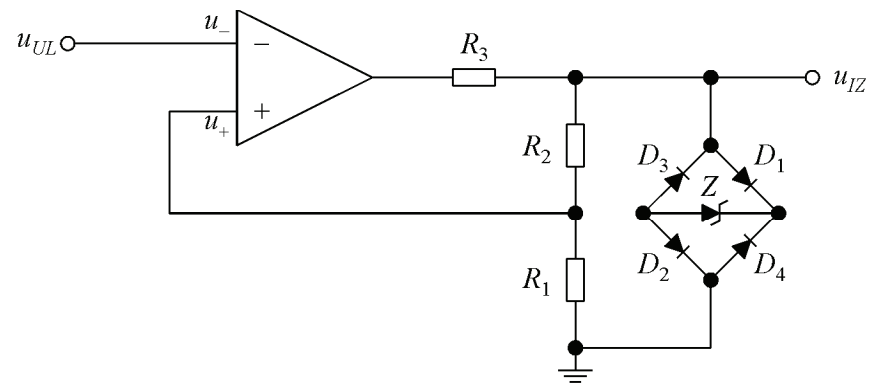


Ograničenje izlaznog napona



s dvije Zenerove diode

$$U_{IZ} = \pm (U_Z + U_D)$$



s četiri diode u mosnom spoju i s jednom Zenerovom diodom

$$U_{IZ} = \pm (U_Z + 2 U_D)$$

Komparator s pomaknutom prijenosnom karakteristikom

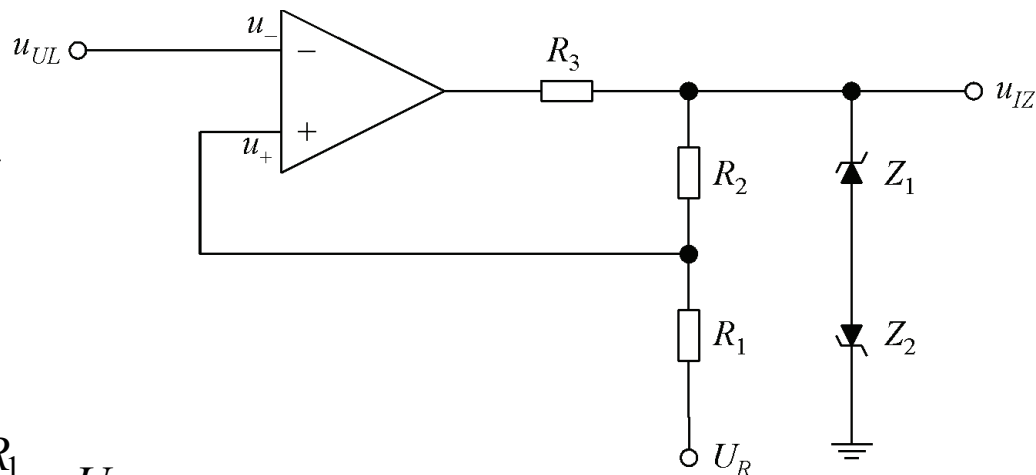
$$u_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_R + \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{IZ}$$

Uz $u_{IZ} = + U_{IZ} = + U_Z + U_D \rightarrow$

$$u_+ = U_{PV} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_R + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{IZ}$$

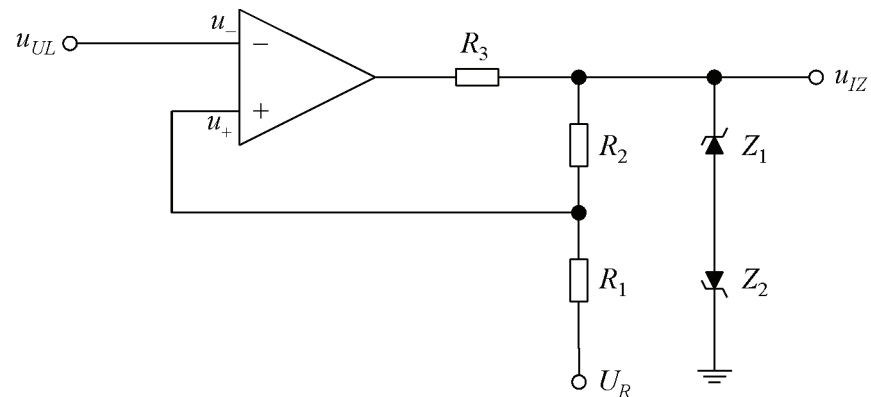
Uz $u_{IZ} = - U_{IZ} = - (U_Z + U_D) \rightarrow$

$$u_+ = U_{PN} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_R - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{IZ}$$



Primjer 10.6

U komparatoru na slici zadano je $R_1 = 1,5 \text{ k}\Omega$, $U_Z = 4,3 \text{ V}$ i $U_D = 0,7 \text{ V}$. Odrediti otpor otpornika R_2 i napon U_R tako da prijenosna karakteristika bude simetrična oko ulaznog napona od 1 V i da je širina histereze $U_H = 100 \text{ mV}$.

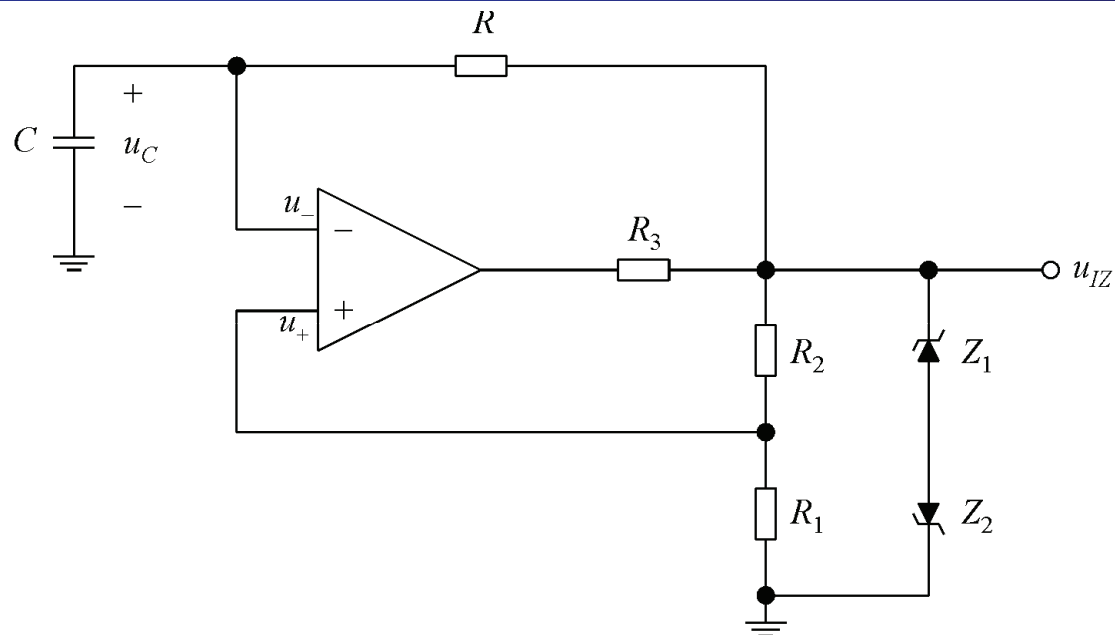


Astabil

R_1 i R_2 spojeni na u_+ →
komparator

$$u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{IZ} = \beta u_{IZ}$$

$$u_{IZ} = \pm U_{IZ} = \pm (U_Z + U_D)$$



Promjenu stanja komparatora osigurava RC -mreža → $u_- = u_C$

Nabijanjem i izbijanjem kapaciteta C mijenja se polaritet napona $u_+ - u_-$
a time i napona u_{IZ}

Astabil – opis rada (1)

U $t = 0 \rightarrow$ promjena u_{IZ} s $-U_{IZ}$ na $+U_{IZ}$

u $t = 0_- \rightarrow u_+ = -\beta U_{IZ} = U_{PN} = u_- = u_C$

u $t = 0_+ \rightarrow u_{IZ} = +U_{IZ} \rightarrow C$ se nabija

$$u_C(t) = U_{PN} + (U_{IZ} - U_{PN}) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

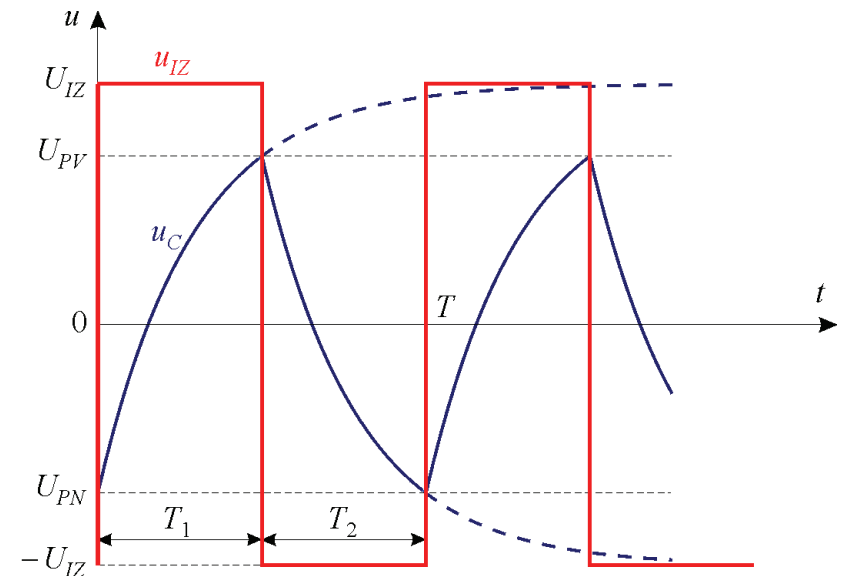
za $u_{IZ} = +U_{IZ} \rightarrow u_+ = +\beta U_{IZ} = U_{PV}$

U $t = T_1 \rightarrow u_C = U_{PV}$

$$u_C(T_1) = U_{PV} = U_{PN} + (U_{IZ} - U_{PN}) \left[1 - \exp\left(-\frac{T_1}{\tau}\right) \right]$$

$$\tau = RC$$

$$T_1 = \tau \ln\left(\frac{U_{IZ} - U_{PN}}{U_{IZ} - U_{PV}}\right) = \tau \ln\left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta}\right) = \tau \ln\left(1 + 2\frac{R_1}{R_2}\right)$$



Astabil – opis rada (2)

U $t = T_1 \rightarrow$ promjena u_{IZ} s $+U_{IZ}$ na $-U_{IZ}$

u $t = T_{1-} \rightarrow u_+ = +\beta U_{IZ} = U_{PV} = u_- = u_C$

u $t = T_{1+} \rightarrow u_{IZ} = -U_{IZ} \rightarrow C$ se izbijaja

$$u_C(t) = U_{PV} + (-U_{IZ} - U_{PV}) \left[1 - \exp\left(-\frac{t - T_1}{\tau}\right) \right]$$

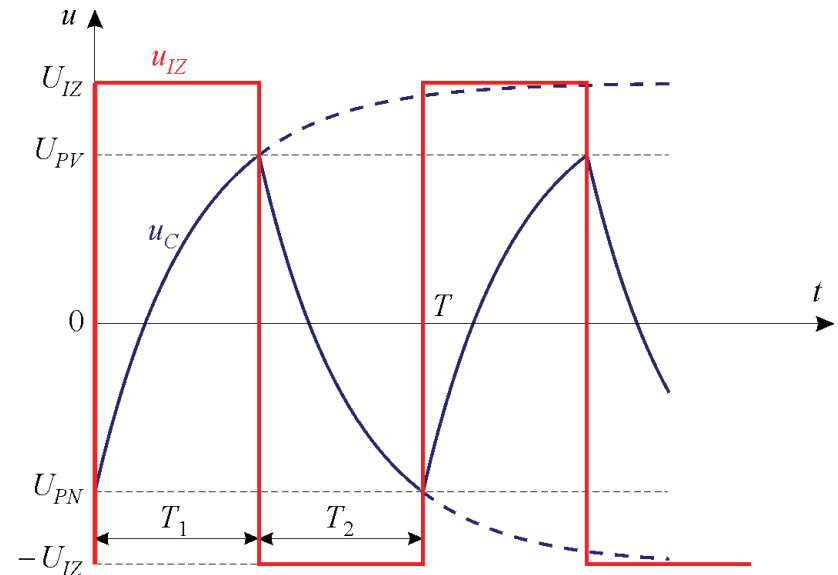
za $u_{IZ} = -U_{IZ} \rightarrow u_+ = -\beta U_{IZ} = U_{PN}$

U $t = T_1 + T_2 \rightarrow u_C = U_{PN}$

$$u_C(T_1 + T_2) = U_{PN} = U_{PV} + (-U_{IZ} - U_{PV}) \left[1 - \exp\left(-\frac{T_2}{\tau}\right) \right]$$

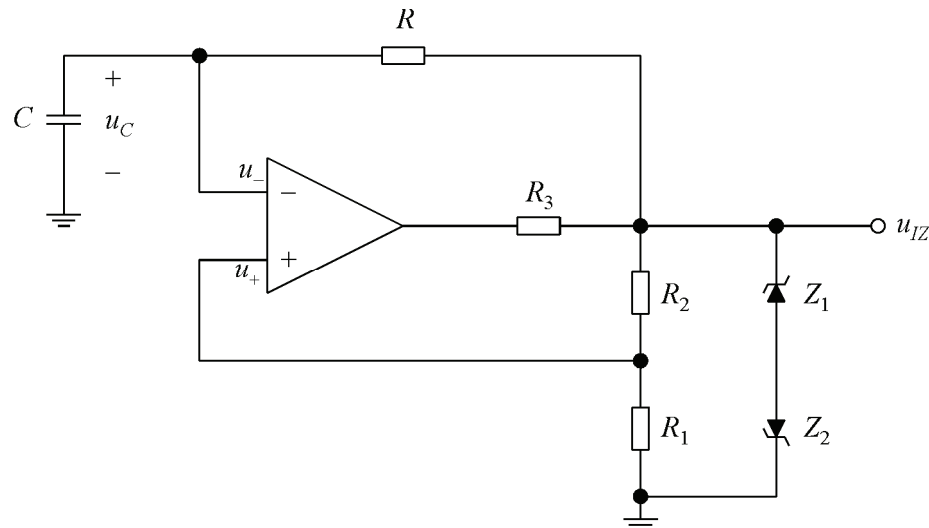
$$T_2 = \tau \ln\left(\frac{U_{IZ} + U_{PV}}{U_{IZ} + U_{PN}}\right) = \tau \ln\left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta}\right) = T_1$$

$$T = T_1 + T_2 \quad f = 1/T$$

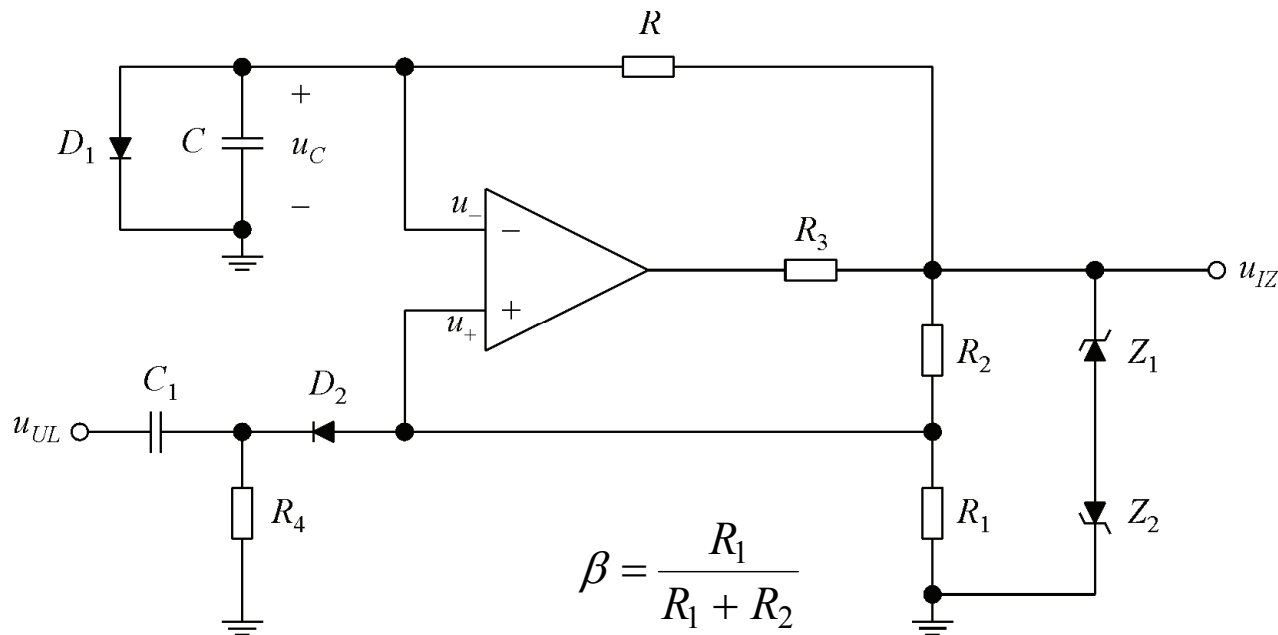


Primjer 10.7

U astabilu sa slike zadano je $R = 10 \text{ k}\Omega$ i $C = 1 \text{ nF}$. Odrediti omjer otpora R_1 / R_2 uz koje će frekvencija izlaznog pravokutnog napona biti 20 kHz .



Monostabil



Razlike u odnosu na astabil:

- dodana dioda D_1 koja osigurava stabilno stanje
- dodana mreža za okidanje (C_1 , R_4 i D_2) za prelazak kvazistabilno stanje

Monostabil – opis rada (1)

Stabilno stanje

$u_{IZ} = +U_{IZ} \rightarrow C$ je nabijen do

$u_- = u_C = U_{D1} \approx 0,7 \text{ V} \rightarrow u_+ = +\beta U_{IZ} > u_-$

Kvazistabilno stanje

u $t = t_1 \rightarrow$ okidni impuls $\rightarrow u_+ < u_- \rightarrow$

$u_{IZ} = -U_{IZ} \rightarrow C$ se nabija prema $-U_{IZ}$

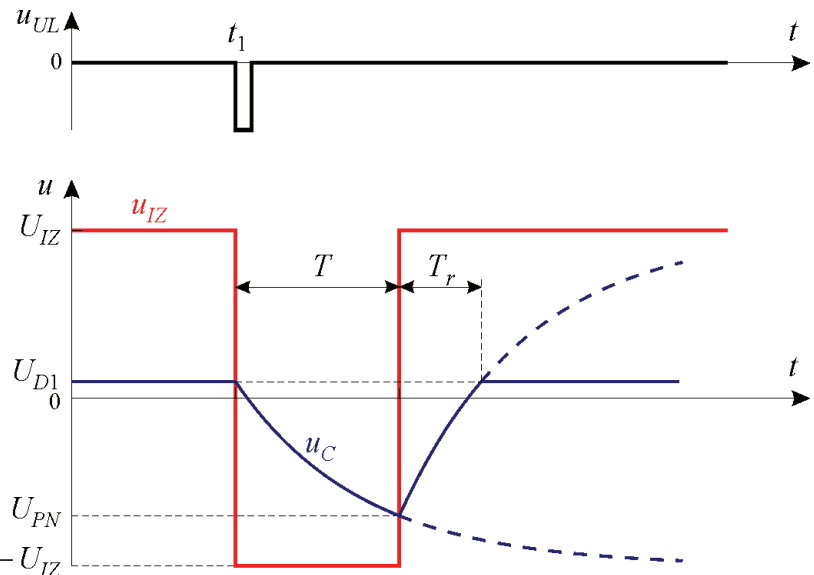
$$u_C(t) = U_{D1} + (-U_{IZ} - U_{D1}) \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_1}{\tau}\right) \right]$$

za $u_{IZ} = -U_{IZ} \rightarrow u_+ = -\beta U_{IZ} = U_{PN}$

u $t = t_1 + T \rightarrow u_C = U_{PN}$

$$u_C(t_1 + T) = U_{PN} = U_{D1} + (-U_{IZ} - U_{D1}) \left[1 - \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) \right] \quad \tau = RC$$

$$T = \tau \ln\left(\frac{U_{IZ} + U_{D1}}{U_{IZ} + U_{PN}}\right) = \tau \ln\left(\frac{1 + U_{D1}/U_{IZ}}{1 - \beta}\right)$$



$T \rightarrow$ trajanje kvazistabilnog stanja

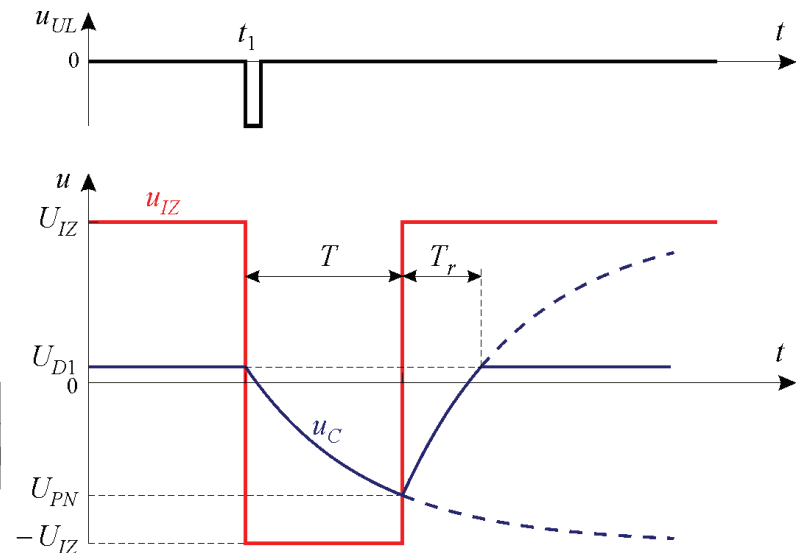
Monostabil – opis rada (2)

U $t = t_1 + T \rightarrow$ promjena u_{IZ} s $-U_{IZ}$ na $+U_{IZ} \rightarrow$ stabilno stanje

u $t = (t_1 + T)_- \rightarrow u_+ = -\beta U_{IZ} = U_{PN} = u_- = u_C$

u $t = (t_1 + T)_+ \rightarrow u_{IZ} = +U_{IZ} \rightarrow C$ se nabija prema $+U_{IZ}$

$$u_C(t) = U_{PN} + (U_{IZ} - U_{PN}) \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_1 - T}{\tau}\right) \right]$$



U $t = t_1 + T + T_r \rightarrow u_C = U_{D1} \rightarrow$ prestaje nabijanje

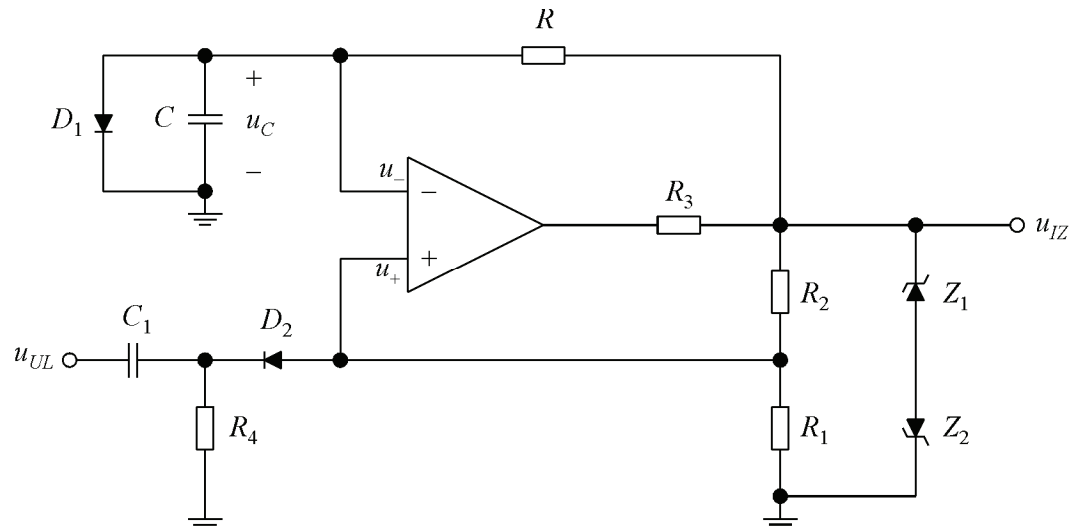
$$u_C(t_1 + T + T_r) = U_{D1} = U_{PN} + (U_{IZ} - U_{PN}) \left[1 - \exp\left(-\frac{T_r}{\tau}\right) \right]$$

$$T_r = \tau \ln\left(\frac{U_{IZ} - U_{PN}}{U_{IZ} - U_{D1}}\right) = \tau \ln\left(\frac{1 + \beta}{1 - U_{D1}/U_{IZ}}\right)$$

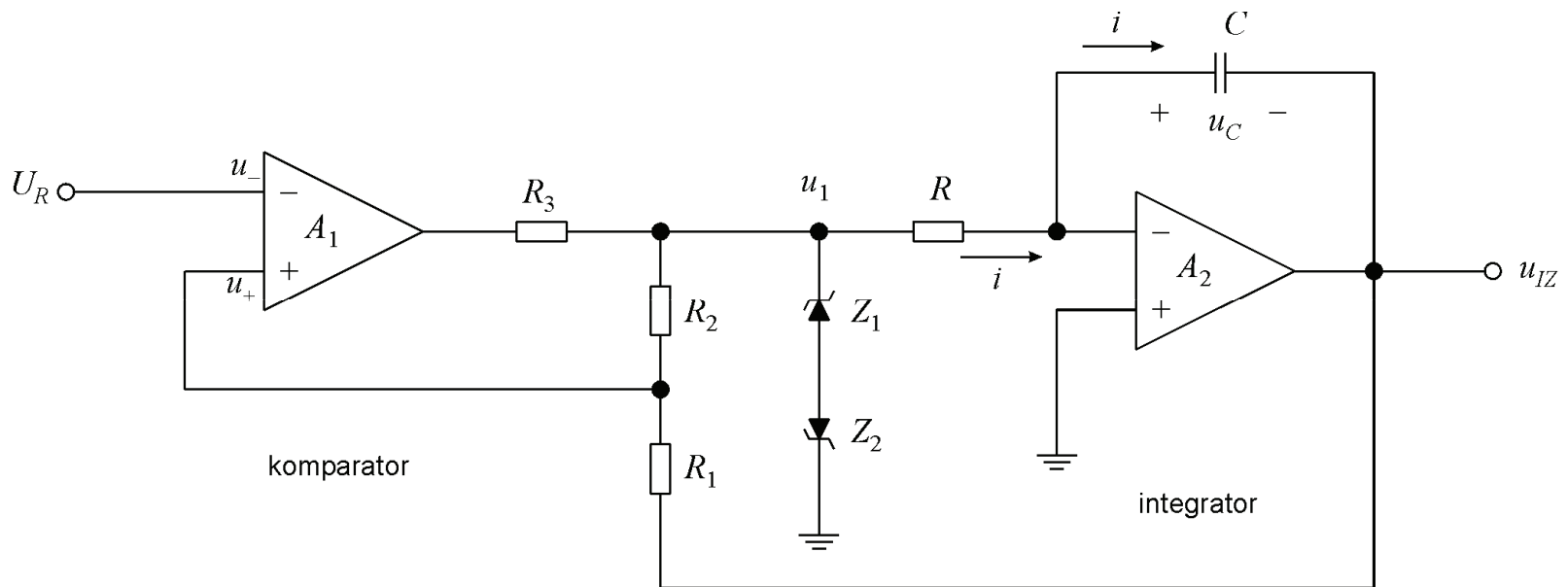
$T_r \rightarrow$ vrijeme oporavka monostabila

Primjer 10.8

U monostabilu prema slici zadano je $U_{IZ} = 5\text{ V}$, $U_{D1} = 0,7\text{ V}$, $R_1 = 22\text{ k}\Omega$, $R_2 = 18\text{ k}\Omega$, $R = 11\text{ k}\Omega$ i $C = 2\text{ nF}$. Odrediti trajanje kvazistabilnog stanja i minimalno vrijeme između okidnih impulsa.



Generator trokutnog napona



$$u_1 = \pm U_1 = \pm (U_Z + U_D)$$

$$u_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{IZ} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_1$$

Generator trokutnog napona – opis rada (1)

Za $u_1 = -U_1$

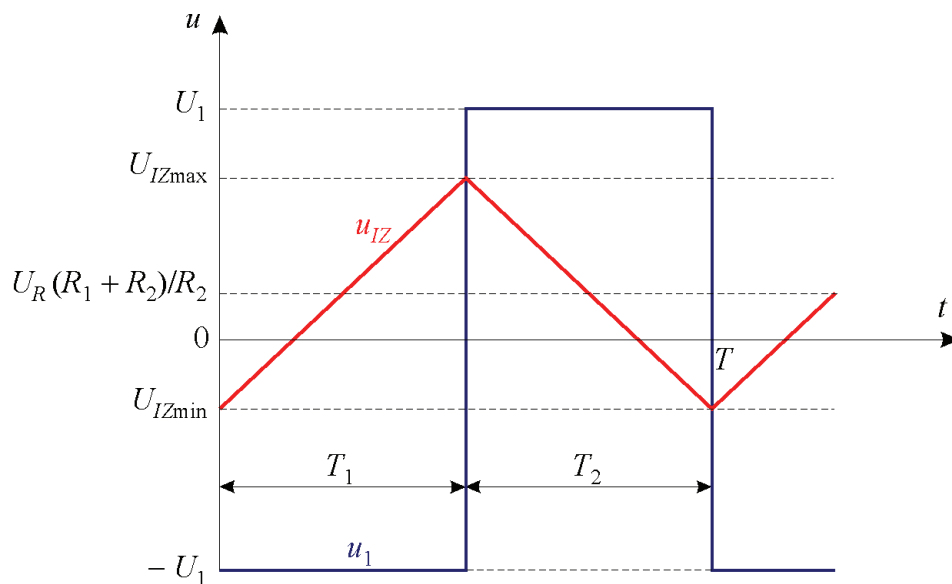
$$u_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{IZ} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_1$$

$i = -I = -U_1/R \rightarrow u_{IZ}$ i u_+ se povećavaju

za $u_+ = u_- = U_R \rightarrow u_{IZ} = U_{IZ\max}$

$$u_+ = U_R = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{IZ\max} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_1$$

$$U_{IZ\max} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_R + \frac{R_1}{R_2} U_1$$



Generator trokutnog napona – opis rada (2)

Za $u_1 = +U_1$

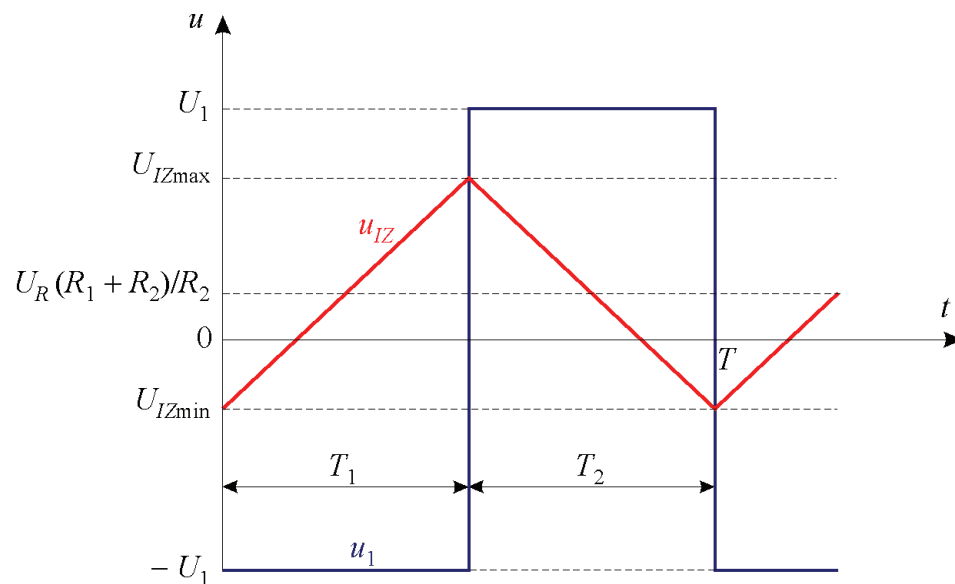
$$u_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{IZ} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_1$$

$i = +I = +U_1/R \rightarrow u_{IZ}$ i u_+ se smanjuju

za $u_+ = u_- = U_R \rightarrow u_{IZ} = U_{IZmin}$

$$u_+ = U_R = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{IZmin} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_1$$

$$U_{IZmin} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_R - \frac{R_1}{R_2} U_1$$



Generator trokutnog napona – opis rada (3)

$$U_{IZ\max} - U_{IZ\min} = 2 \frac{R_1}{R_2} U_1$$

srednja vrijednost

$$U_{IZ} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_R$$

izlazni napon integratora

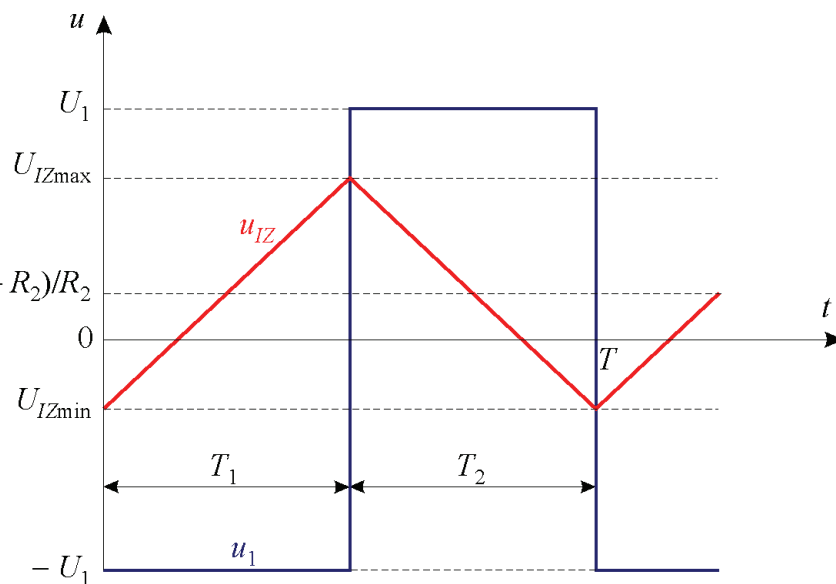
$$u_{IZ}(t) = -u_C(t) = -\frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt - U_{C0}$$

za $0 < t < T_1 \rightarrow i = -I = -U_1/R$

$$u_{IZ}(t) = \frac{U_1}{RC} \int_0^t dt + U_{IZ\min} = \frac{U_1}{RC} t + U_{IZ\min}$$

$$\text{u } t = T_1 \rightarrow u_{IZ} = U_{IZ\max} \rightarrow u_{IZ}(T_1) = U_{IZ\max} = \frac{U_1}{RC} T_1 + U_{IZ\min}$$

$$T_1 = (U_{IZ\max} - U_{IZ\min}) \frac{RC}{U_1} = 2RC \frac{R_1}{R_2}$$



$$T = T_1 + T_2 = 2T_1 = 4RC \frac{R_1}{R_2}$$

Primjer 10.9

U generatoru trokutnog napona prema slici zadano je $U_1 = 5 \text{ V}$ i $R = 10 \text{ k}\Omega$.

Odrediti omjer otpora R_1 / R_2 , kapacitet kondenzatora C i napon U_R da se dobije trokutni napon kojemu je frekvencija 10 kHz , napon od vrha do vrha 5 V i srednja vrijednost 1 V .

