

Projekti iz elektronike

Slavko Kocijančič

Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta

Študijsko gradivo – samo za interno uporabo na Pedagoški fakulteti

Ljubljana 2011, 2020

UVOD.....	1
OPTIČNE KOMUNIKACIJE	2
PRENOS DIGITALNEGA SIGNALA	3
<i>Svetlobni izvor</i>	4
<i>Svetlobni senzorji.....</i>	5
<i>Uporaba operacijskega ojačevalnika kot komparatorja napetosti.....</i>	7
<i>Komparatorji napetosti z odprtim kolektorjem.....</i>	8
<i>Schmittov sprožilnik.....</i>	10
<i>digitalni Schmittov sprožilnik</i>	14
<i>Optični spojniki</i>	14
OPTIČNI PRENOS ANALOGNEGA SIGNALA	14
MODULACIJA SIGNALOV	16
FREKVENČNA MODULACIJA	16
<i>Astabiln multivibrator</i>	17
<i>Napetostno frekvenčni pretvornik.....</i>	19
AMPLITUDNA MODULACIJA.....	19
<i>Napetostno krmiljeni ojačevalniki.....</i>	20
PULZNO ŠIRINSKA MODULACIJA	21
ELEKTRONSKI REGULACIJSKI SISTEMI	22
DVOPOLOŽAJNA (NEZVEZNA) REGULACIJA TEMPERATURE VODE	22
<i>Izvedbe s komparatorjem brez histereze</i>	23
<i>Izvedba z analognim Schmittovim sprožilnikom</i>	24
ZVEZNA REGULACIJA TEMPERATURE VODE.....	24
<i>Z ojačevalnikom moči.....</i>	25
<i>Merjenje temperature.....</i>	26
SPLOŠNO O REGULACIJSKI TEHNIKI	28
<i>Krmiljenje in regulacija.....</i>	28
<i>Zvezne in nezvezne regulacije</i>	29
<i>Regulacije s konstantno in spremenljivo želeno vrednostjo.....</i>	29
<i>Dinamične lastnosti regulacijskih sistemov.....</i>	29
NAPETOSTNI OJAČEVALNIKI.....	30
KOMPENZACIJA MIROVNEGA TOKA IN NAPETOSTNEGA PREMICA	30
<i>Kompensacija napetostnega premika.....</i>	32
<i>*Kompensacija mirovnega toka.....</i>	33
DIGITALNO PROGRAMIRLJIVI OJAČEVALNI SISTEMI	34
DIFERENCIALNI OJAČEVALNIKI	36
<i>Osnovna izvedba diferencialnega ojačevalnika (odštevalni sistem z o.o.)</i>	39
<i>* Elektrometrski diferencialni ojačevalnik.....</i>	41
<i>Instrumentacijski ojačevalnik s tremi operacijskimi ojačevalniki.....</i>	42
<i>* Instrumentacijski ojačevalniki v integriranih vezjih</i>	42
DIGITALNA ELEKTRONIKA - SEKVENČNA VEZJA.....	46

FLIP-FLOPI	46
<i>R-S flip-flop</i>	46
<i>Sinhroni flip - flop (oz. flip - flop z vrati)</i>	47
<i>Pomikalni register</i>	51
ŠTEVNIKI	51
<i>Asinhronski števniki</i>	52
<i>Sinhronski števniki</i>	52
UPORABA MIKROKRMILNIKOV	54
<i>Vhodi in izhodi s posebnimi funkcijami</i>	56
<i>Komunikacijski vmesniki</i>	57
* <i>Serijski periferni vmesnik</i>	58
* <i>I²C</i>	59

UVOD

Študijsko gradivo je nadaljevanje gradiva Elektronika, ki je sestavni del študijskega programa Dvopredmetni učitelj na Pedagoški fakulteti v Ljubljani. Predmet je obvezen za dvopredmetne vezave s tehniko v 3. letniku.

OPTIČNE KOMUNIKACIJE

Brezžične komunikacije večinoma delujejo ali na osnovi elektromagnetnih valov (WiFi, Bluetooth, ...) ali na optični osnovi. Med slednje spada daljinec za upravljanje televizije, optični prenos internetnih povezav. Obstajajo tudi optični sensorji, na primer infrardeči sensorji za razdaljo, policija uporablja »lasersko« merjenje hitrosti avtomobila..., optično deluje tudi senzor za dež na vetrobranskem steklu avtomobila?

Osnovne sestavine sistemov za optične komunikacije so svetlobni izvor, optični vodnik ali neomejen prostor, sprejemnik svetlobnega signala. Večinoma gre za prenos digitalnih signalov (sveti/ne sveti), lahko pa so le ti tudi analogni.

Daljinsko upravljanje

Svetleča dioda (LED) daljinskega upravljalnika oddajajo infrardečo svetlobo, sprejemnik UIR svetlobe pa je v napravi, recimo televiziji. Infrardeča svetloba ima večjo valovno dolžino od še vidne rdeče svetlobe (od 760 nm do 1 mm). Sensorji za digitalno fotografijo/video so v nekaterih telefonih občutljivi tudi na »bližnjo« IR svetlobo, zato lahko preko kamere vidimo svetenje IR svetleče diode na daljincu.

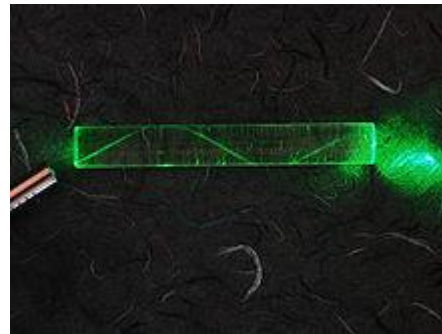


Slika. Fotografija daljinca posneta s telefonom (<https://www.youtube.com/watch?v=vsSZ3IMUQYE>), naše oko svetenje IR LED ne vidi.

Doseg take komunikacije je zelo omejen, saj jakost svetlobe pada s kvadratom razdalje, poleg tega med oddajnikom in sprejemnikom ne sme biti neprozornih predmetov – razen če se povezava vzpostavi preko odbojev.

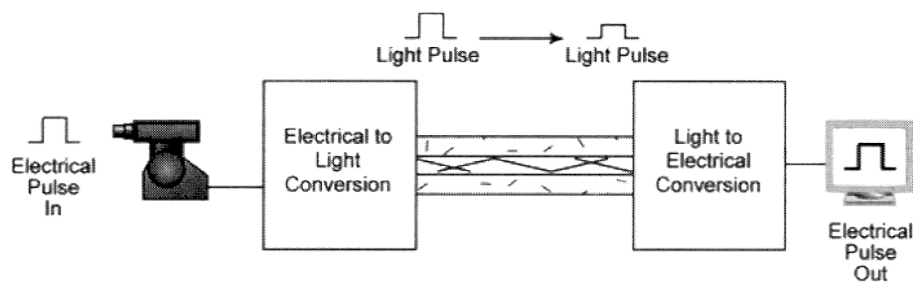
Komunikacija preko optičnih vodnikov

Pogosto optična komunikacija ni mogoča preko prostora. To se zgodi pri večjih razdaljah in/ali kadar svetloba ne more neposredno potovati od oddajnika do sprejemnika. V tem primeru svetloba potuje preko optičnega vodnika.



Slika. Prikaz in princip delovanja optičnega vodnika, ki deluje na osnovi popolnega odboja svetlobe
http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber,

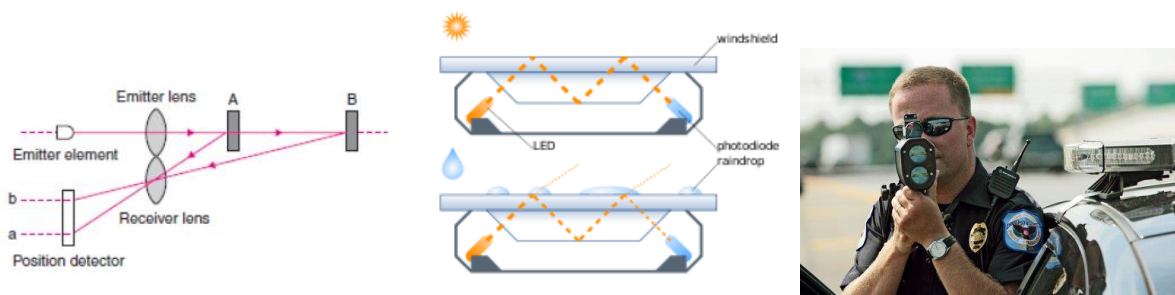
PRENOS DIGITALNEGA SIGNALA



Slika. Shema prenosa digitalnega signala, <http://www.arcelect.com/fibercable.htm>

Optični senzorji

Na temelju oddane in odbite svetlobe delujejo IR senzor razdalje, senzor za dež in laserski merilnik hitrosti (recimo merjenje hitrosti v prometu).



Slika. Koncept IR senzorja razdalje ([levo](#)), senzorja za dež pri avtomobilu ([sredina](#)) in lasersko merjenje razdalje ([desno](#))

SVETLOBNI IZVOR

Svetleče diode imajo podobne lastnosti kot navadne polprevodniške diode. V prevodni smeri oddajajo svetlobo, ko skozi njih začne teči tok. Svetilnost je premo sorazmerna toku. Oddajajo enobarvno svetlobo, njena valovna dolžina je odvisna od kolenske napetosti diode. Velja enačba:

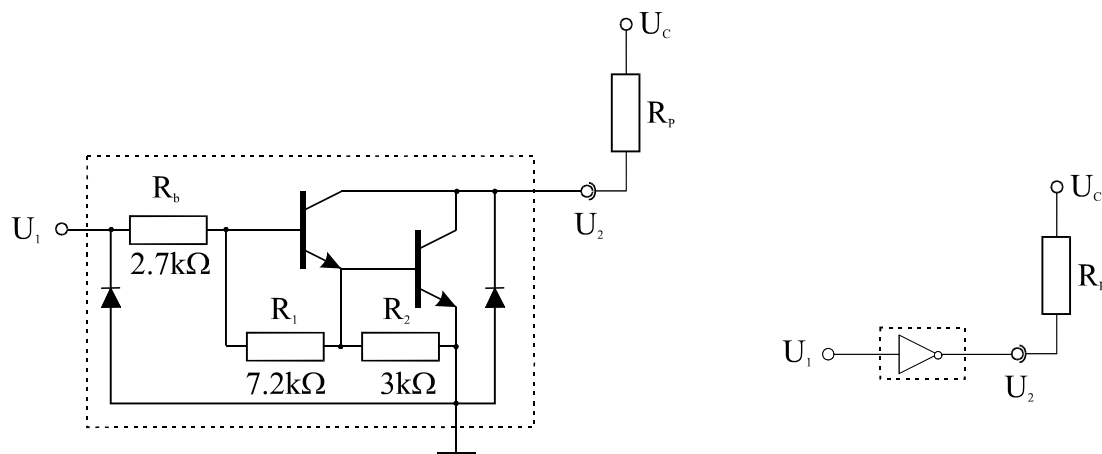
$$e_0 U_K = h \frac{c}{\lambda}$$

kjer je e_0 osnovni naboj, U_K kolenska napetost, h Planckova konstanta, c hitrost svetlobe v vakuumu in λ valovna dolžina oddane svetlobe.

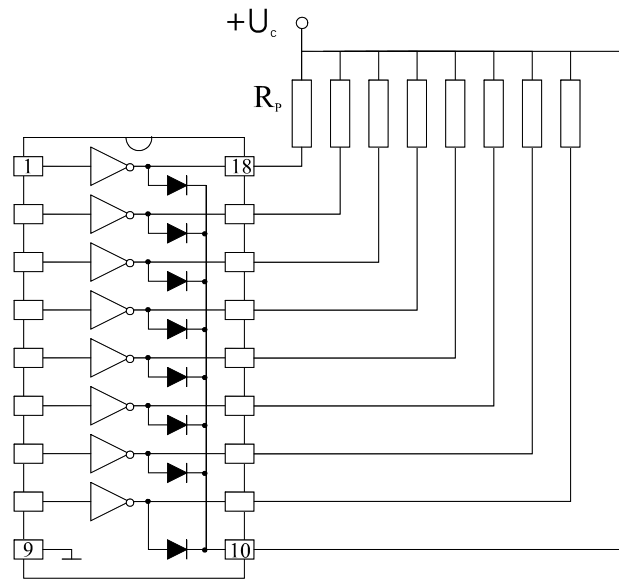
Poleg valovne dolžine oz. barve je pomembna tudi svetlobna moč LEDice (izražane v lumnih) in prostorski kot, v katerega sveti. Svetloba pri 555 nm z močjo 1 W ima svetlobno moč 683 lumna. Celoten prostorski kot je 4π (steradian). Lumen na steradian (1) je candela, ki je fiziološka enota za svetilnost svetila.

Za vklop svetlečih diod, če izvor napetostnega signala ne omogoča zadostnega toka, potrebujemo tranzistor. Namesto posameznih tranzistorjev pogosto raje uporabimo integrirana vezja, ki vsebujejo niz Darlingtonovih spojev v istem ohišju. Za taka vezja rečemo, da imajo izhod z odprtim kolektorjem, primer takega integriranega vezja je ULN2803A.

(<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/motorola/ULN2804A.pdf>).



Slika. Shema Darlingtonovega spoja za en člen v nizu od osmih.



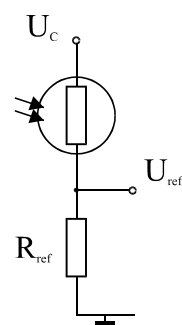
Slika. Integrirano vezje ULN2803A z nizom 8 Darlingtonovih vezij. R_p je v našem primeru zaporedna vezava ene ali več svetlečih diod. Linearni upor ni potreben, saj za breme R_p vezje predstavlja tokovni vir.

SVETLOBNI SENZORJI

Osnovni elektronski sestavni deli, katerih lastnosti so odvisne od osvetljenosti, so fotoupori (LDR - light dependent resistor), fototranzistorji in fotodiode.

Najpreprostejša je vezava fotoupora v delilnik - zaporedno z njim vežemo referenčni upor. Po shemi na sliki ugotovimo, da je napetost na R_{ref} , ki je konstante, odvisna od upornosti fotoupora:

$$U_{ref} = R_{ref} I = R_{ref} \frac{U_c}{R_{ref} + R_{LDR}}$$



Slika. Delilnik napetosti s fotouporom, U_{ref} je izhodna napetost odvisna od osvetljenosti

Fotoupor ima večjo upornost, ko je zatemnjen kot takrat, ko je osvetljen. Torej je napetost na referenčnem uporu večja, ko je osvetljen.

Če pa želimo, da bi napetost R_{ref} lahko priključili na digitalni vhod krmilnika, mora napetost osvetljenega in zatemnjenega fotoupora ustrezati zahtevam za logično 1 in logično 0 izbranega digitalnega integriranega vezja. Z digitalna vezja logike TTL (transistor transistor logic) serije 74... to pomeni, da mora biti napetost logične 0 od -0.7V do +0.6V in za logično 1 od 2.6 do 5.25 V. Če bi zvezno spreminjali

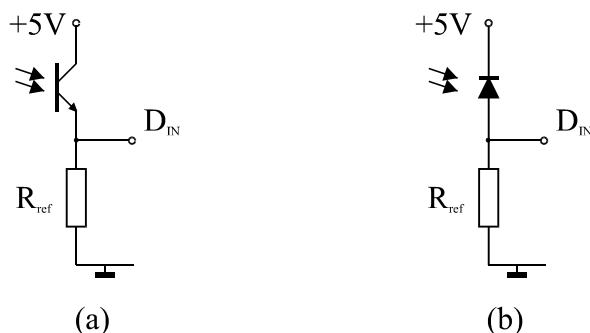
napetost na logičnih vratih (recimo vrata NE) bi opazili, da je preklon med 0 in 1 precej bolj oster, kot je to razumeti iz navedenih podatkov. Vendar pa za napetost znotraj intervala med logično 0 in 1 velja, da je napoved logičnega stanja nezanesljiva.

Ideala logična 0 bi bila torej 0 V in 5 V za logično 1. Primerno napajanje delilnika je zato $U_C=5V$. Da dosežemo zanesljivo napetosti logične 1 pri osvetljenem fotouporu in napetost logične 0 pri zatemnjenem, rabimo optimalno vrednost referenčnega upora R_{ref} . Eksperimentalno to naredimo tako, da na njegovo mesto damo nastavljiv upor in s preizkušanjem pridemo do primerne vrednosti. Da dobimo malo občutka si zastavimo nekoliko idealiziran primer. Recimo, da je upornost osvetljenega fotoupora $1\text{ k}\Omega$ in zatemnjenega $100\text{ k}\Omega$. Če se želimo, da je napetost logične 1 za enako vrednost manjša od 5 V kot je napetost logične 0 večja od 0 V, potem izberemo $R_{ref}=10\text{ k}\Omega$. Premislimo še o bolj splošnem primeru - označimo vrednost večje upornosti z R_0 (neosvetljen fotoupor) in vrednost manjše upornosti z R_1 . Referenčno upornost bi izračunali po enačbi:

$$R_{ref} = R_1 10^{\frac{\log \frac{R_0}{R_1}}{2}}$$

Preverite, če to drži...

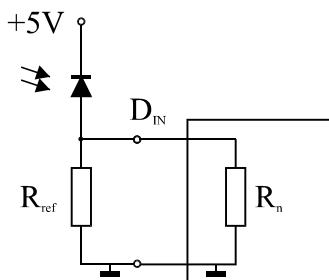
Fototranzistorjem in fotodiodam se prevodnost spremeni precej manj. Osnovna vezava je še vedno delilnik napetosti:



Slika. Shema delilnika napetosti s fototranzistorjem (a) ub fotodiodo (b).

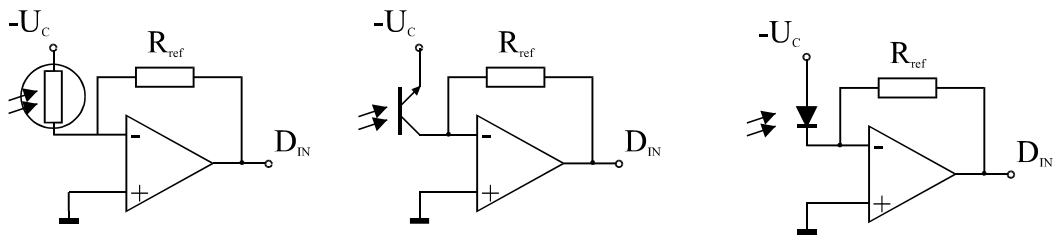
Ne smemo spregledati, da vežemo fotodiodo v zaporni smeri - v prevodni tako ali tako prevaja.

Težava vezave v delilnik je v tem, da celo osvetljen fototranzistor, še posebej pa fotodioda, slabo prevajata. Posledica tega je, da mora biti vrednost referenčnega upora precej velika - pri fotodiodi celo več kot $M\Omega$. Zelo verjetno je, da je vhodna upornost R_n vezja, kamor vežemo izhod delilnika, primerljiva s to vrednostjo ali celo manjša. Notranja upornost R_n vpliva na delilnik s fotoelementom kot vzporedno vezan upor referenčnemu uporu, kar posledično lahko odločilno zmanjša napetost logične 1.



Slika. Prikaz vpliva vhodne notranje upornosti na napetost delilnika s fotodiodo.

Težavi se izognemo z vezavo fotoelementa v tokovno napetostni pretvornik. takrat je izhodna napetost vezja sorazmerna prevodnosti svetlobnega senzorja:



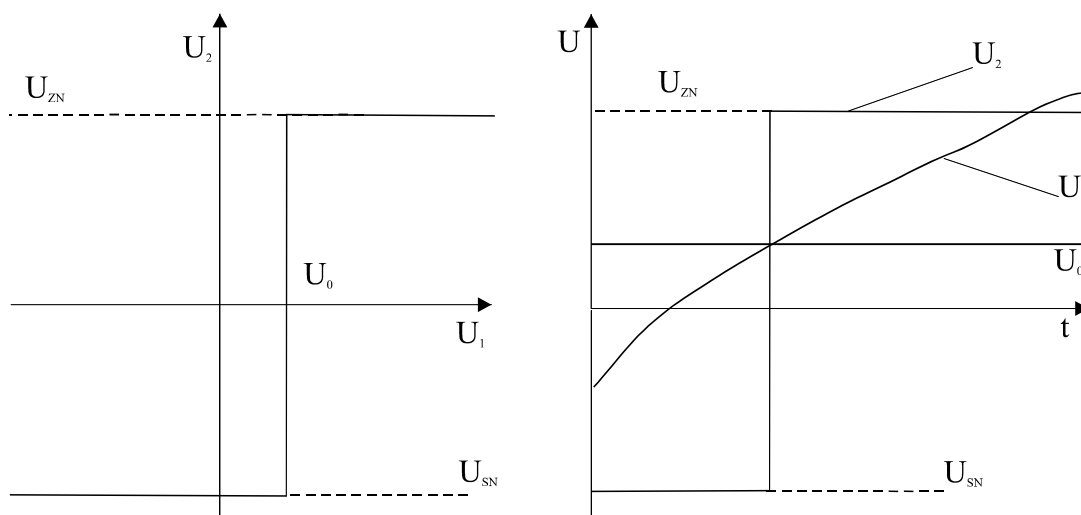
Slika. Shema vezave vseh treh fotoelementov v invertirajočem vezju z operacijskim ojačevalnikom.

Izhodna notranja upornost operacijskega ojačevalnika je majhna, zato velike vrednosti R_{ref} , ki zlasti nastopa pri fotodiodi in fototranzistorju, na izhodu ni čutiti. Vezje torej deluje tudi kot impedančni pretvornik.

Glede občutljivosti na spremembo osvetljenosti se za optične komunikacije zdi najprimernejši fotoupor. Za optične komunikacije pa je poleg svetlobne občutljivosti pomemben tudi časovni odziv na spremembo osvetljenosti. Izkaže se, da je časovni odziv najmanj občutljive fotodiode najkrajši, časovni odziv najbolj občutljivega fotoupora pa najdaljši.

UPORABA OPERACIJSKEGA OJAČEVALNIKA KOT KOMPATORJA NAPETOSTI

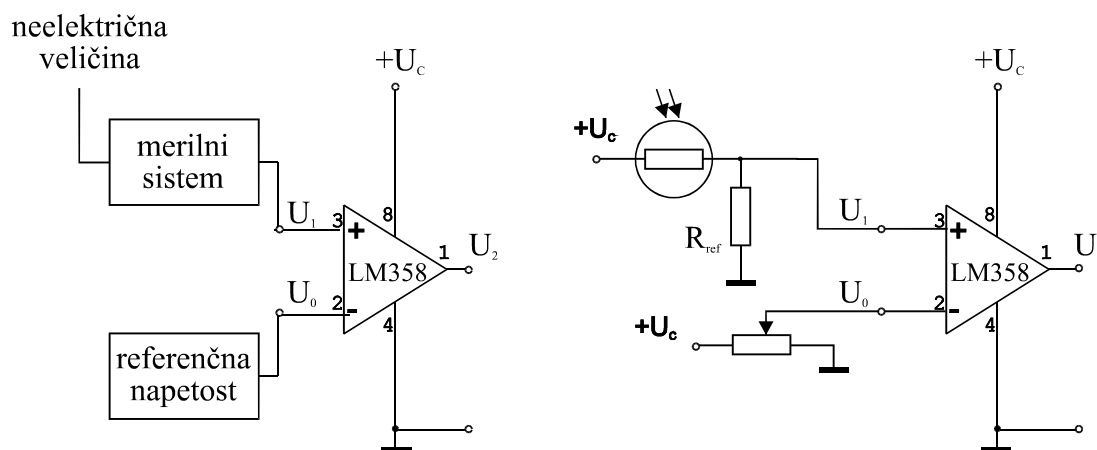
Sprememba napetosti ob danem diskretnem dogodku pogosto ni taka, da bi jo digitalna vezja lahko razumela kot spremembo logičnega stanja. Večkrat tudi se pri merjenju fizikalnih količin električna napetost zvezno spreminja, nas pa zanima le, ali je merjena količina presegla določeno vrednost ali ne. Vezju, ki na svojem vhodu primerja dve napetosti in je napetost na izhodu odvisna od tega, katera je večja, rečemo komparator napetosti. Najenostavneje sestavimo komparator napetosti z operacijskim ojačevalnikom. Na neinvertirajoči (sofazni) vhod operacijskega ojačevalnika vodimo napetost U_1 , na invertirajoči (protifazni) pa drugo napetost U_0 . Za realni operacijski ojačevalnik velja, da je izhodna napetost nekaj tisočkrat do milijonkrat večja od razlike vhodnih napetosti, hkrati pa ne more biti izven intervala napajanja ojačevalnika. To pomeni, da je v primeru, ko je $U_1 > U_0$, napetost na izhodu v zgornjem nasičenju U_{ZN} (okoli 1 V manj od pozitivnega napajanja operacijskega ojačevalnika), ko pa je $U_1 < U_0$, pa je izhodna napetost v spodnjem nasičenju U_{SN} (okoli 1 V večja od negativnega napajanja).



Slika. Grafa izhodne napetosti komparatorja napetosti.

Kadar uporabimo operacijski ojačevalnik kot komparator in njegov izhod vodimo na vhod digitalnega vezja, je najbolje, da izberemo takega, ki ima spodnje napajanje 0 V (LM 324, LM 358), zgornje napajanje U_c pa je lahko kar +5 V. Tako je izhodna napetost pri $U_1 < U_0$ okoli 0 V (logična 0) in pri $U_1 > U_0$ malo manj kot 5 V (logična 1). Kadar sta napajanja drugačni (recimo + 10 V in - 10 V), moramo med izhodom komparatorja in digitalnim vhodom umestiti omejilnik napetosti (upor in Zenerjevo diodo).

Vzemimo, da je U_1 napetost merilnega sistema, U_0 pa referenčna napetost. Kot zgled navedimo vezje, ki odgovori, ali je svetlobni tok večji ali manjši od neke izbrane vrednosti. Za nastavitev referenčne napetosti uporabimo potenciometer.



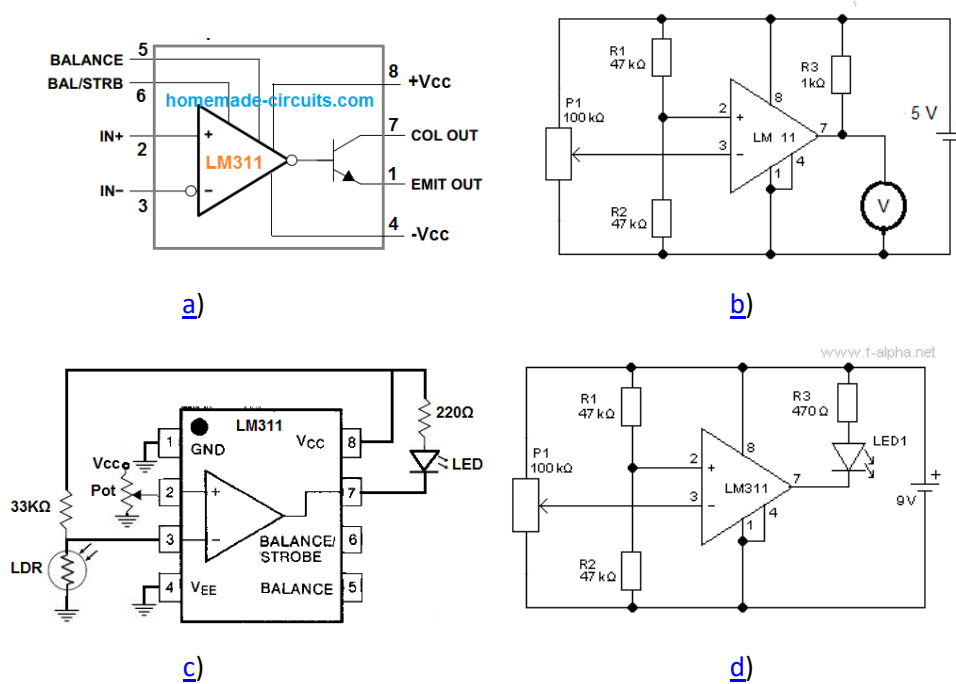
Slika. Splošen princip uporabe komparatorja napetosti (levo) in konkreten primer za osvetljenost.

KOMPARATORJI NAPETOSTI Z ODPRTIM KOLEKTORJEM

Ugotovili smo, da lahko za primerjanje dveh napetosti uporabimo operacijski ojačevalnik. V ta namen pa lahko uporabimo posebna integrirana vezja, ki pa so lahko samo [v funkciji komparatorja](#). V integriranem vezju LM311 gre izhod operacijskega ojačevalnika na baza npn tranzistorja, izhod takega komparatorja (pin 7 pri LM311) pa je odprt kolektor (slika a). Zato izhod vezemo preko upora na pozitivno napajalno napetost, ki je v našem primeru na sliki b +5 V, se pravi ustreza napetosti logične 1. Za naš primer priključka 4 (emitor) vezja LM311 vezemo na ozemljitev, napetost +Vcc prav tako na

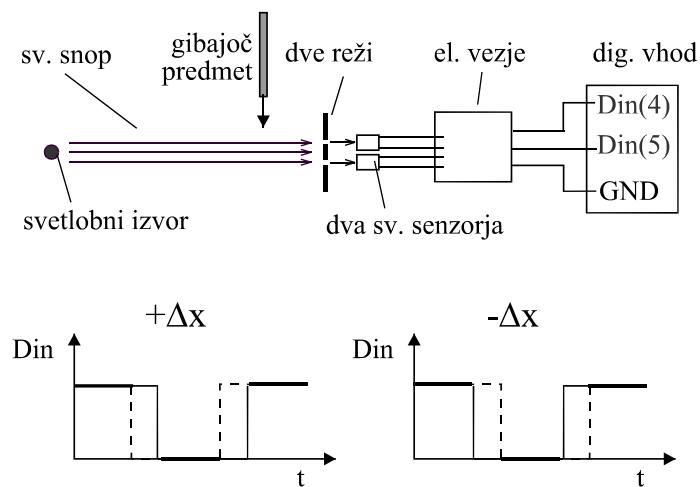
napetost logične 1, napajanje $-V_{cc}$ pa prav tako na GND. Vhoda z oznako STRB (strobe). Če pa ga vežemo preko upora za $10\text{ k}\Omega$, je izhod v stanju U_C ne glede na to, katera napetost na vlohah je večja.

Če torej uporabimo »dvigovalni upor« R_3 kot je to na sliki b) se izhod (7) postavi na $+5\text{ V}$, če je napetost na $+$ vhodu (pin 2) večji potencial kot na $-$ vhodu (pin 3). Tok skozi dvigovalni upor R_3 torej teče, če je izhod 7 na nizkem potencialu. Na sliki d) je poleg dvigovalnega upora še svetleča dioda. Le-ta sveti, če je izhod 7 v nizkem stanju. Ugotovite, kako deluje vezje na sliki c).

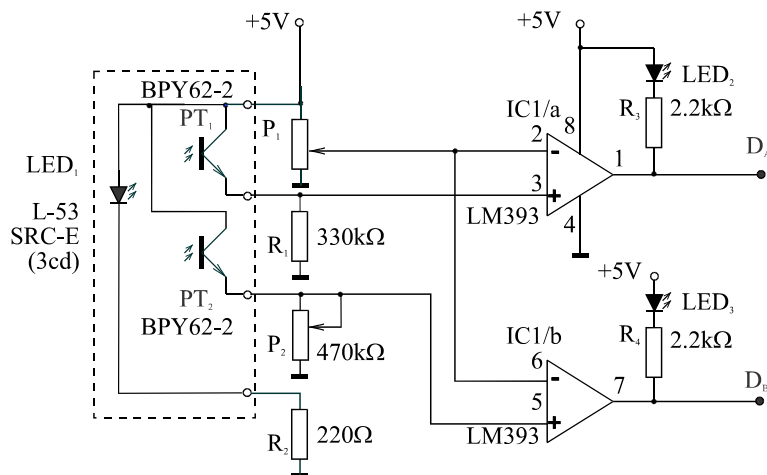


Slika. Komparator napetosti z odprtim kolektorjem LM311 in primer vklopa LED kadar je fotoupor (LDR) v temi.

Poglejmo si še en primer uporabe komparatorja napetosti, to so *Svetlobna vrata z detekcijo smeri gibanja*.



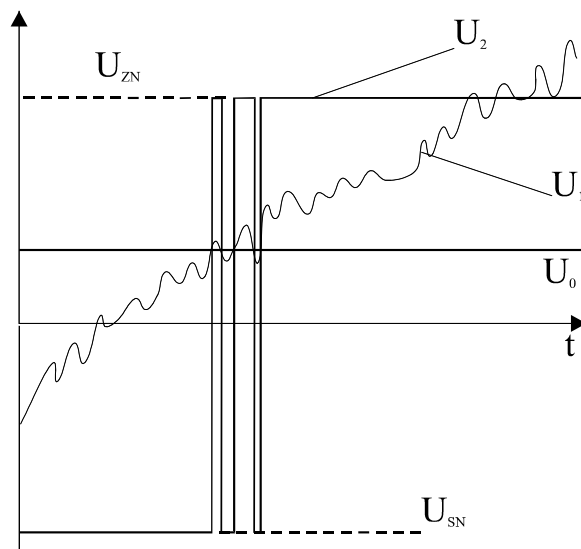
Slika. Koncept svetlobnih vrat za detekcijo smeri gibanja.



Slika. Izvedba svetlobnih vrat z detekcijo smeri gibanja.

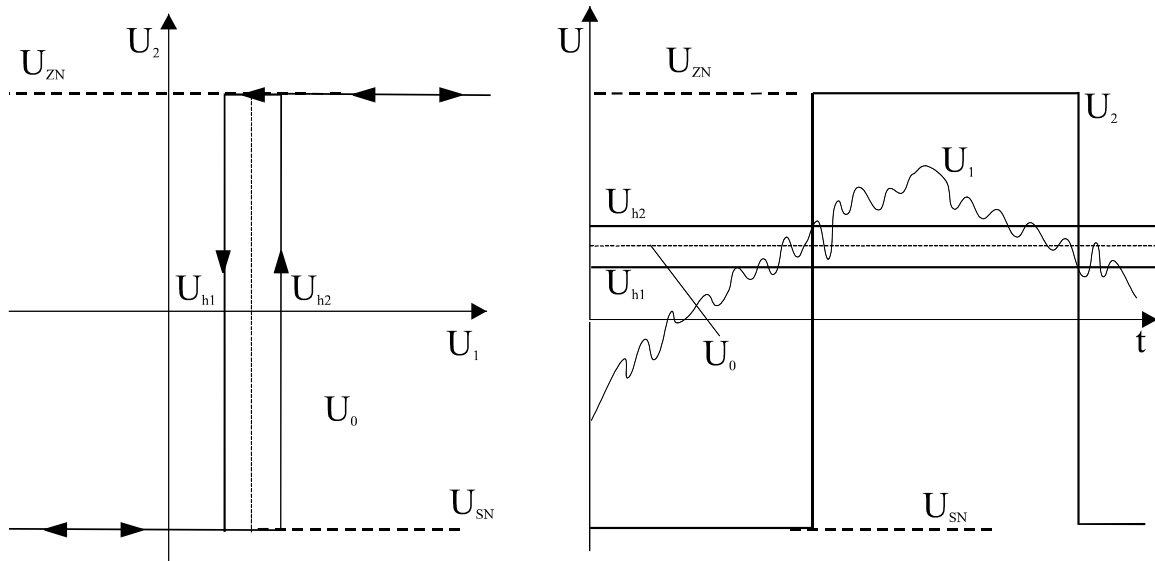
SCHMITTOV SPROŽILNIK

Komparator napetosti ima lahko določene slabosti. Te so zlasti očitne, kadar je v napetosti merilnega sistema tudi znaten šum. Na spodnji sliki vidimo, da je namesto enega prehoda iz 0 v 1 nastalo zaradi šuma več teh prehodov.



Rešitev tega problema je vezje, pri katerem je prehod iz enega nasičenja v drugo odvisen od tega, ali napetost narašča ali pada. Kadar je spreminjanje izhodne napetosti pri naraščanju vhodne drugačna kot pri padanju, govorimo o histerezi. Stanje na izhodu torej ni enolična funkcija stanja na vhodu.

Da se torej izognemo večkratnim preklopom zaradi šuma, naj pride do prehoda iz spodnjega nasičenja U_{SN} v zgornje nasičenje U_{ZN} pri napetosti $U_{h2} = U_0 + U_H$ in iz zgornjega nasičenja U_{ZN} v spodnje nasičenje U_{SN} pri napetosti $U_{h1} = U_0 - U_H$. Intervalu U_H rečemo širina histereze in mora biti večji od pričakovane amplitude šuma.

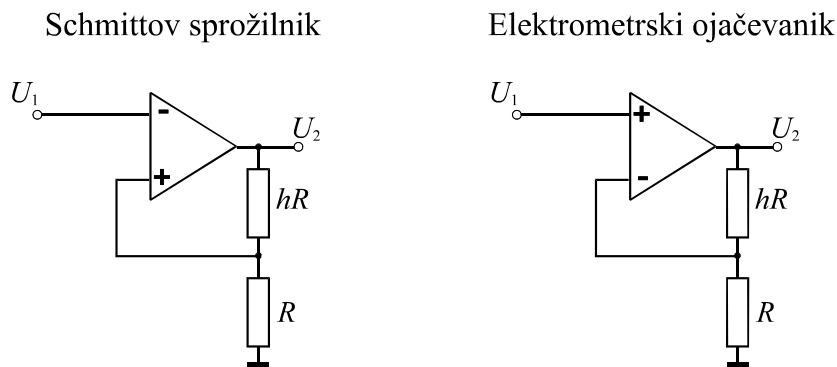


Slika. Izhodna napetost v odvisnosti od vhodne pri Schmittovem sprožilniku.

Komparator s takimi lastnosti se imenuje Schmittov sprožilnik. Obstajajo v obliki logičnih vrat, analogno različico pa naredimo z operacijskim ojačevalnikom.

SCHMITTOV SPROŽILNIK V ELEKTROMETRSKEM SISTEMU

To je osnovna izvedba sprožilnika, ki spominja na elektrometrski ojačevalni istem, le da je povratna zveza pozitivna in ne negativna (bodite pozorni na priključka). Da je povratna zveza pozitivna pomeni, da ima napetosti na izhodu preko povratne zveze poveča razliko napetosti med vhodoma operacijskega ojačevalnika. Tak sistem se nujno znajde v nasičenju.



Slika. Schmittov sprožilnik v neinvertirajočem sistemu za razliko od neinvertirajočega ojačevalnega sistema.

Predstavljajmo si najprej, da je vhodna napetost Schmittovega sprožilnika $U_1=0V$. Na izhodu sta možni tako zgornje kot spodnje nasičenje. Pri zgornjem nasičenju U_{ZN} je napetost na sofaznem vhodu enaka:

$$U_R = U_{ZN} \frac{1}{1+h}$$

Zgornje nasičenje je povečini pozitivna napetost, U_R je prav tako pozitivna in ker je $U_R > U_1 (=0V)$, sistem ostane v zgornjem nasičenju.

Podobno premislamo o spodnjem nasičenju, pri katerem je napetost na sofaznem vhodu

$$U_R = U_{SN} \frac{1}{1+h}$$

Vzemimo, da je spodnje nasičenje negativno in po velikosti enako kot zgornje nasičenje. Takrat je $U_R < U_1$, sistem ostane v spodnjem nasičenju.

Izračunajmo vrednosti na sofaznem vhodu pri zgornjem nasičenju +10V, spodnjem nasičenju -10V in $h=4$:

- zgornje nasičenje, $U_R = +2$ V
- spodnje nasičenje, $U_R = -2$ V

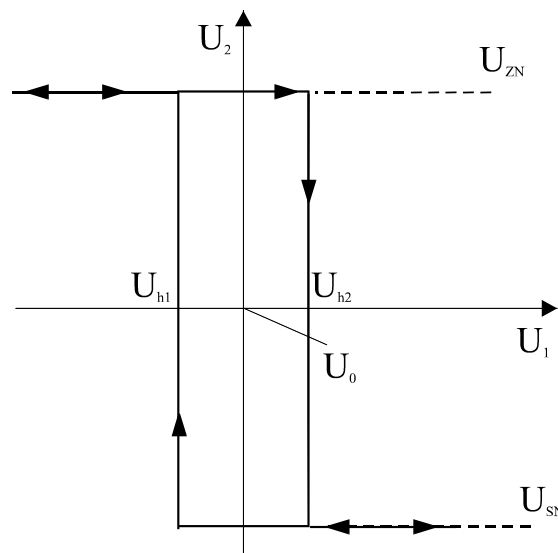
Ugotovili smo torej, da sta pri $U_1 = 0$ V možni dve stanji na izhodu. Privzemimo, da smo v danem primeru v zgornjem nasičenju (+ 10V). Premislimo, kolikšna bi morala biti napetost U_1 na vhodu, da bi stanje na izhodu spremenili v spodnje nasičenje? Do spodnjega nasičenja pridemo, kadar je napetost $U_R < U_1$, torej je

$$U_{h2} = U_{ZN} \frac{1}{1+h}$$

V našem primeru pomeni, da bi morala biti napetost $U_1 > +2$ V. Po prehodu v spodnje nasičenje se spremeni tudi napetost U_R . Zanima nas, kolikšna naj bi bila napetost na vhodu, da bi stanje na izhodu spremenili v zgornje nasičenje, pri katerem vemo, da mora biti $U_R > U_1$, torej:

$$U_{h1} = U_{SN} \frac{1}{1+h}$$

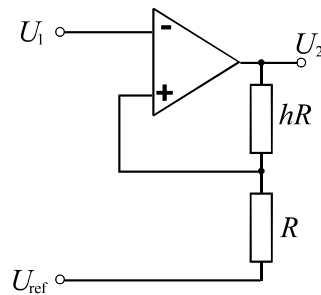
Z našimi številkami to pomeni, da za mara biti za prehod v zgornje nasičenje $U_1 < -2$ V.



Slika. Grafična ponazoritev histereze Schmittovega sprožilnika.

Z razmerjem uporov h torej dosežemo želeno širini histereze, ne moremo pa vplivati na sredino histereze $U_0=0$ V. Poleg tega imamo pri majhnih napetostih zgornje nasičenje in pri velikih spodnje - lahko pa da naša naloga zahteva obratno stanje na izhodu.

Kako bi torej prestavili sredino histereze na U_0' ? Rešitev je prikazuje spodnja slika, kjer to dosežemo z napetostjo U_{ref} .



Slika. Preko napetosti U_{ref} spreminjamo sredino histereze.

Izračunajmo najprej zgornjo mejo histereze:

$$U_{h2} = U_{ref} + RI = U_{ref} + R \frac{U_{ZN} - U_{ref}}{R + hR}$$

$$U_{h2} = U_{ref} + \frac{U_{ZN} - U_{ref}}{1 + h}$$

Spodnjo mejo izračunamo na enak način, le da je odvisna od spodnjega nasičenja:

$$U_{h1} = U_{ref} + \frac{U_{SN} - U_{ref}}{1 + h}$$

Sredina histereze je aritmetična sredina spodnje in zgornje meje:

$$U_0 = \frac{U_{h2} + U_{h1}}{2}$$

Če ste nasičenji po velikosti enaki (recimo +10V in -10V) dobimo naslednjo vrednost za aritmetično sredino histereze:

$$U_0 = U_{ref} \left(1 - \frac{1}{1 + h} \right)$$

Običajno je $h \gg 1$, takrat je torej $U_0 \approx U_{ref}$.

Izračunajmo še širino histereze $U_H = (U_{h2} - U_{h1})/2$:

$$U_H = \frac{1}{1 + h} \frac{U_{ZN} - U_{SN}}{2}$$

Pri simetričnem bipolarinem napajanju je tako tudi nasičenje $U_{ZN} = -U_{SN}$ ($= U_N$) (recimo $U_{ZN}=+10V$, $U_{SN}=-10V$). Takrat velja:

$$U_H = \frac{U_N}{1 + h}$$

Pogosto je spodnje nasičenje 0 V in takrat je

$$U_H = \frac{U_N}{2(1 + h)}$$

DIGITALNI SCHMITTOV SPROŽILNIK

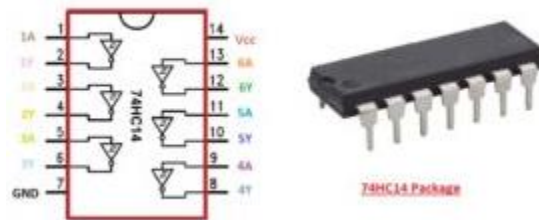
Tipičen zgled je integrirano vezje z oznako IC 74HC14. Šest vrat NE z lastnostjo histereze. Podatki iz kataloga:

$$\Delta U_h = \min 0,4V, \text{ tipično } 0,8 V$$

$$U_{rn} = \min 0,6V, \text{ max. } 1,1V$$

$$U_{rp} = \min 1,5V, \text{ max. } 2,0V$$

Sredina naj bi bila okoli 1,3V.

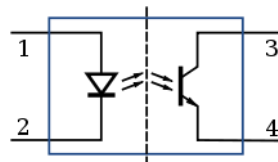


Slika. Integrirano vezje s šest vrati NE s histerezo

Poglejmo si [ponazoritev uporabe](#). Kakšno oblike napetosti si želimo na vhodu Schmittovega sprožilnika. Slabosti takega sistema.

OPTIČNI SPOJNIKI

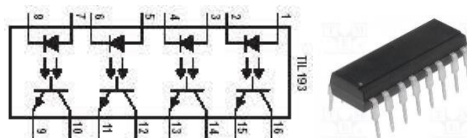
Optični spojniki oz. optični izolatorji so namenjeni prenosu električnega signala preko svetlobnega signala podobno kot pri optičnih vlaknih, le da cilj ni prenos na daljavo ampak galvanska ločitev dveh vezij, med katerima se signal prenaša brez ohmske povezave.



Slika. Princip delovanja, <http://en.wikipedia.org/wiki/Opto-isolator>

Naloga: dorišite shemo na levi in desni od zgornje slike, da bo logična 1 na levi dala na izhodu vezja na desni prav tako logično 1.

Optične spojniki so vgrajeni v integrirana vezja, primer je ISP621-4 s štirimi pari svetlečih diod in štirimi fototranzistorji.



Slika. Integrirano vezje z štirimi pari svetleča dioda->fototranzistor.

*OPTIČNI PRENOS ANALOGNEGA SIGNALA

Predpostavke:

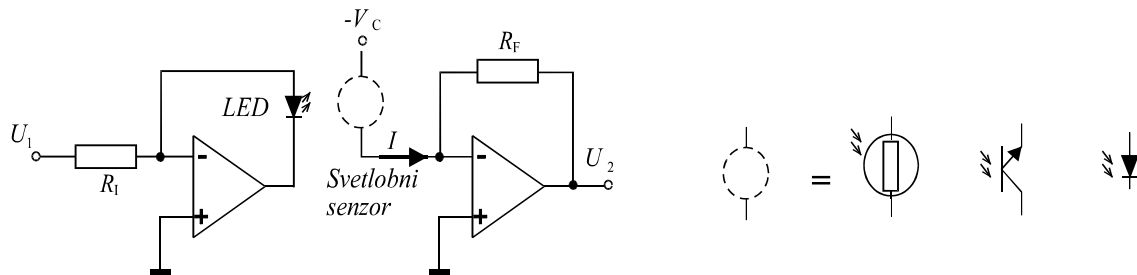
- svetilnost svetleče diode je premo sorazmerna električnemu toku skozi diodo
- prevodnost svetlobnega senzorja je sorazmerna osvetljenosti

Pretvorbe: električna napetost v električni tok, električni tok v svetilnost svetleče diode, osvetljenost svetlobnega senzorja v električni tok, električni tok v električno napetost.

Potrebujemo:

- napetostno tokovni pretvornik za krmiljenje svetilnosti svetleče diode
- tokovno napetostni pretvornik za svetlobni senzor

Izvedba obeh z operacijskim ojačevalnikom.



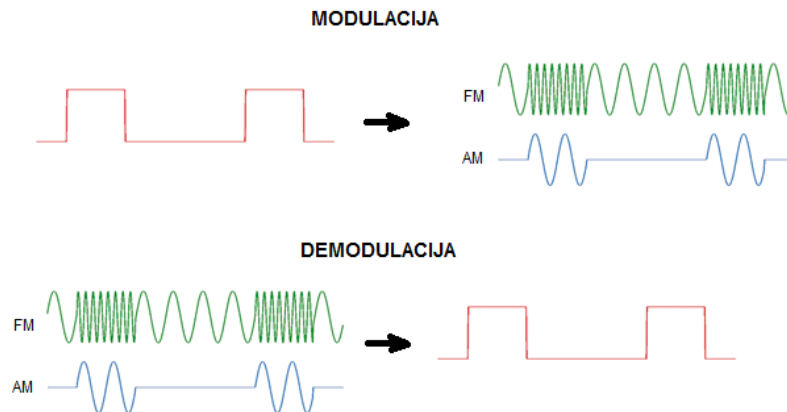
Omejitve: največji tokovi, pri katerih večina operacijskih ojačevalnikov še deluje, je okoli 10 mA.

MODULACIJA SIGNALOV

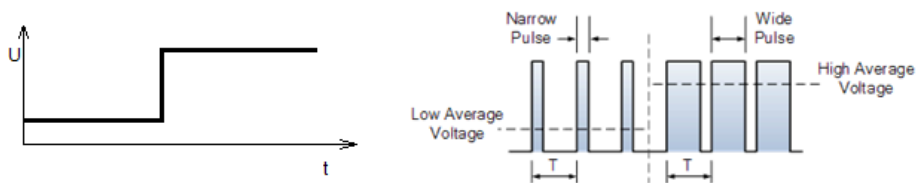
Pri prenosu signala od oddajnika do sprejemnika lahko vmesno le tega moduliramo. Namen je večinoma bolj zanesljiv in/ali hitrejši prenos podatkov. Osnovne modulacije signala so:

- frekvenčna modulacija (FM),
- amplitudna modulacija (AM) in
- pulzno širinska modulacija (PWM).

Spodnja slika ponazarja razliko med AM in FM v primeru, če je signal, ki ga moduliramo, digitalen.



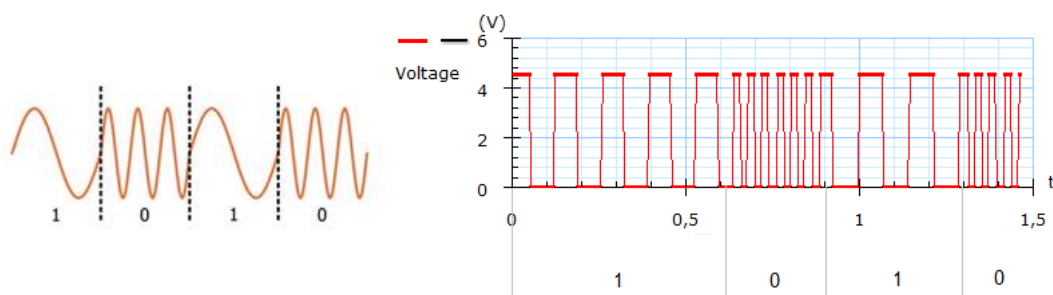
Slika. Primerjava frekvenčne (FM) in amplitudne modulacije (AM) če je vhodni signal digitalen; demodulacija je obraten postopek ([vir](#))



Slika. Pulzno širinska modulacija za dve vrednosti modulirane napetosti ([vir](#))

FREKVENČNA MODULACIJA

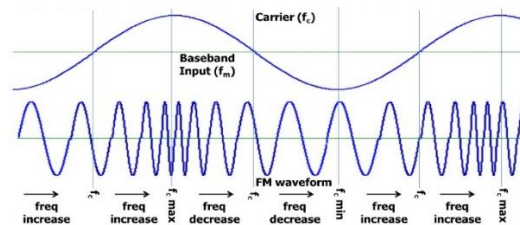
Frekvenčno podana informacija pomeni, da neelektrično veličino pretvorimo v periodičen signal, katerega trenutna frekvenca je odvisna od trenutne vrednosti veličine. Amplituda ni pomembna, v kolikor je dovolj velika da »preglasi« šum. Poglejmo si primera FM za digitalen signal na spodnji sliki.



Slika. Dve obliki frekvenčne modulacije digitalnega signala.

Če ima torej signal nizko frekvenco, to predstavlja logično 1, če pa visoko, pa logično 0, lahko pa tudi obratno. Signal je lahko sinusen ali digitalen, odvisno od medija, ki frekvenčno moduliran signal prenaša.

Za razliko od digitalnih signalov, pri analognih FM signalih nimamo samo dveh različnih frekvenc, ampak je med vhodnim signalom in frekvenco zvezna odvisnost, pretvarjanju vhodnega v izhodni signal rečemo modulacija.



Slika. Frekvenčna modulacija analognega signala.

Vsi zgoraj opisani koncepti se zdijo za praktično uporabo precej zapleteni..., in to tudi so. Frekvenčno modulacijo pa je tudi na amaterskem nivoju mogoče izvesti na izbranih konkretnih primerih, kot so:

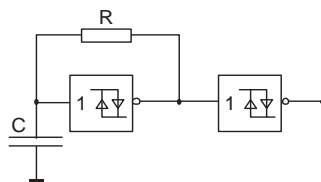
- temperaturno frekvenčna,
- svetlobno frekvenčna pretvorba,
- pretvorba razdalje v frekvenco,
- pretvorba vlažnosti dielektrika v frekvenco,
- in podobno.

ASTABILN MULTIVIBRATOR

Astabilni multivibrator (AsM) je oscilator (angl. *free running oscillator*), ki periodično ponavlja dve stanji na izhodu, v digitalni elektroniki sta to stanji 0 in 1. Najpomembnejša lastnost AsM je njegova lastna frekvenca f , ki je povezana s časovno periodo t_p menjavanja dveh stanj po znani zvezi $f=1/t_p$.

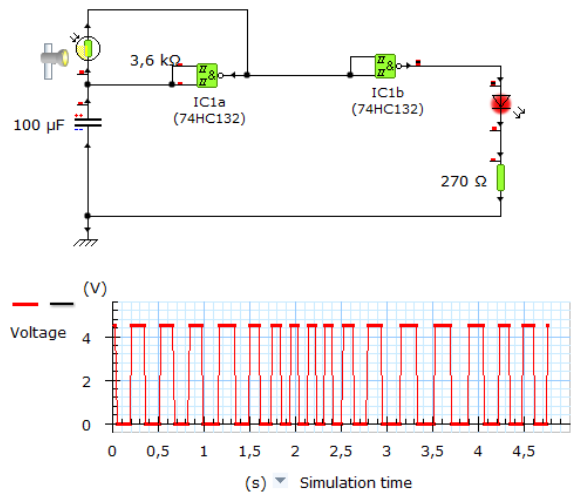
Poglejmo eno od vezij AsM, ki smo ga obravnavali pri elektroniki, to je izvedba s Schmittovimi vrati NE. Do oscilacij pride zaradi histereze. Drugi Schmittov sprožilnik je zaradi izboljšanja oblike signala. Lastna frekvenca se izračuna po enačbi:

$$f \approx \frac{0,92}{RC}$$



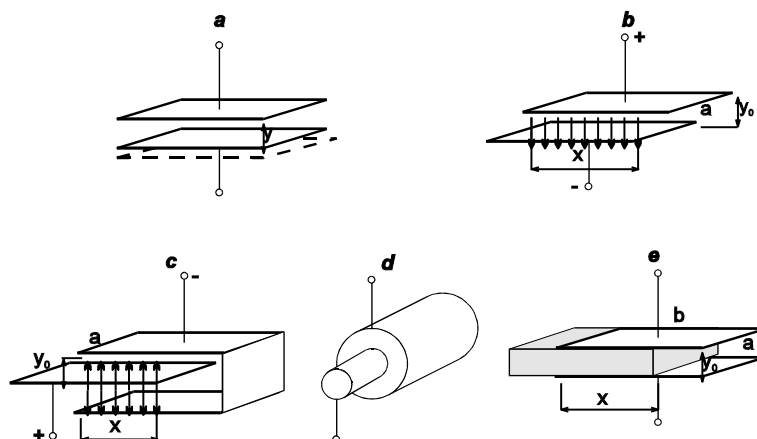
Slika. Astabilni multivibrator sestavljen iz dveh

Najbolj enostavno izvedemo frekvenčno modulacijo, če v AsM, katerega lastna frekvenca je odvisna od upornosti R in kapacitivnosti C , vežemo upor ali kondenzator, ki je odvisen od veličine, ki jo želimo modulirati. Primer, v AsM namesto navadnega upora vežemo termistor tipa NTC ali fotoupor. Torej vsak uporovni senzor lahko v principu uporabimo za frekvenčno modulacijo preko AsM, primer na sliki je simulacija v Yenki, kjer spreminjamo osvetljenost fotoupora.



Slika. Primer FM osvetljenosti preko vezave v AsM.

Obstajajo tudi kapacitivni senzorji, ki so recimo namenjeni merjenju relativne vlažnosti ali razdalj. Načini merjenja lege preko spreminjanja kapacitivnosti prikazuje slika.



Slika. Spreminjanje kapacitivnosti kondenzatorja preko a) razdalje med ploščama, b), c) in d) spreminjanjem efektivne površine kondenzatorja in e) spreminjanja lege dielektrika

Glede na enačbo kapacitivnosti ploščatega kondenzatorja lahko torej spreminjamo razdaljo med ploščama d , površino plošč med katerima je električno polje S in d relativno dielektričnost ϵ_R .

$$C = \epsilon_R \epsilon_0 \frac{S}{d}.$$

Spreminjanje lege dielektrika lahko služi recimo merjenju nivoja vode, plošči sta vzporedni in navpični, ko se nivo vode dviguje se kapacitivnost povečuje in frekvenca pada. ϵ_R se lahko uporabi tudi za merjenje vlažnosti različnih materialov (recimo moka, lesa, ...), saj je relativna dielektričnosti vode zelo velika (okoli 80). Posledično je lastna frekvenca AsM z bolj vlažno moko med ploščama večja, kot če je moka bolj suha.

Spreminjanje kapacitivnosti je tudi osnova [kapacitivnih senzorjev dotika](#).

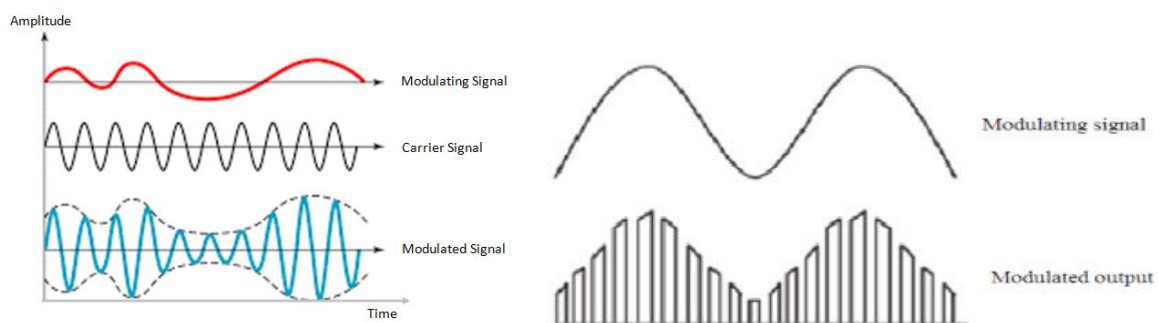
NAPETOSTNO FREKVENČNI PRETVORNIK

Napetostno frekvenčni pretvornik je oscilator, katerega lastna frekvenca je odvisna od vhodne napetosti. Običajno je ta zveza linearna.

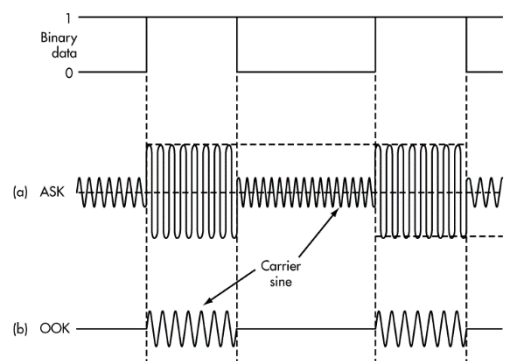
Gradnja takega vezja je zapletena, uporabimo lahko posebej za to narejena integrirana vezja, kot je VFC32.

AMPLITUDNA MODULACIJA

Namesto frekvenčne modulacije je včasih uporabna tudi amplitudna modulacija. To pomeni, da je signal periodičen, informacija pa je vsebovana v njegovi amplitudi. Pri izbiri frekvence je pomembno, da je frekvenca precej večja od frekvence signala oziroma da se v času ene periode merjena veličina ne more bistveno spremeniti.



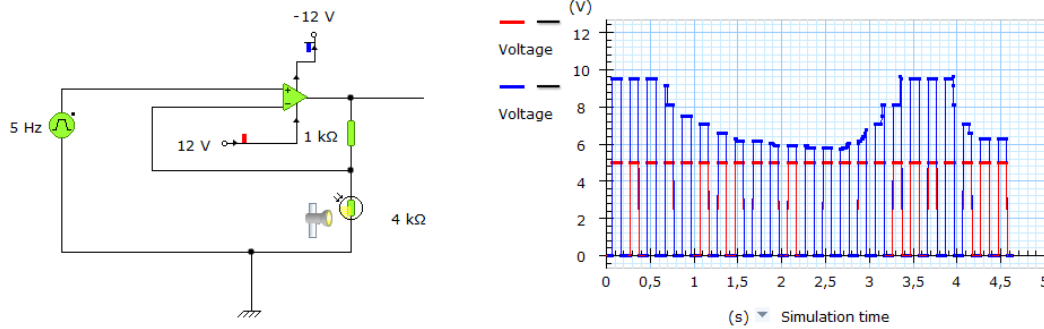
Slika. Časovni potek pri analogni amplitudni modulaciji, [vir1](#), [vir2](#)



Slika. Dva načina digitalne amplitudne modulacije, [vir](#)

Najpreprosteje dosežemo amplitudno modulacijo z uporavnimi senzorji. R_S recimo vežemo kot upor povratne zveze v neinvertirajočem sistemu. Vhodna napetost naj bo sinusna s stalno amplitudo \hat{U}_1 . Amplituda izhodne napetosti bo sorazmerna upornosti R_S :

$$\hat{U}_2 = \hat{U}_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_S} \right)$$

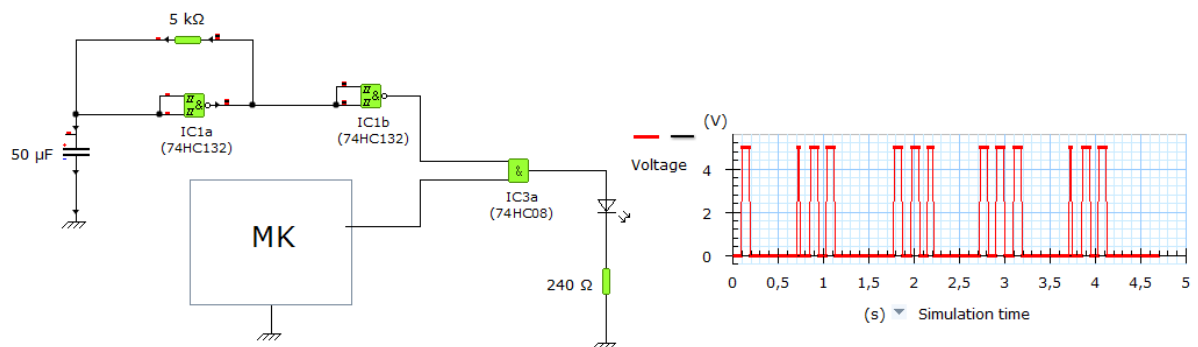


Slika. Generiranje AM signala z neinvertirajočim ojačevalnikom.

Primer: merimo temperaturo, frekvenca vhodnega signala je stalna (recimo 10 kHz), na izhodna amplituda pa naj bo odvisna od temperature. Narišite shemo vezja.

V primeru uporavnih lističev ali kovinskih temperaturnih senzorjev je sprememba upornosti zelo majhna. Takrat vežemo senzor v mostič. Če le tega napajamo z izmenično napetostjo, dobimo na izhodu mostiča amplitudno moduliran signal, ki ga je običajni treba še napetostno ojačati.

Digitalna izvedba AM je na sliki spodaj. MK je mikrokrmilnik, ki glede na ustrezen program generira stanja 0 in 1. Lahko je to zaporedna [komunikacija tipa UART](#) (o tem kasneje). Če si predstavljamo, da je dioda IR in frekvenca generatorja precej večja, je to način, kako pošiljati podatke na daljavo. Seveda moramo signal pred priključitvijo na sprejemnik (recimo drug mikrokrmilnik) predhodno demodulirati. Ker je IR komunikacija pogosta obstajajo IR sprejemniki, ki že imajo vgrajen IR sprejemnik in demodulator, primer [TSOP1738](#), ki je narejen za demodulacijo signala z nosilno frekvenco 38 kHz. Na spletu je več primerov [projektov za krmilnike Arduino](#), ki imajo tudi dodatno knjižnico, ki olajša delo do te mere, da frekvenco 38 kHz generira sam krmilnik.



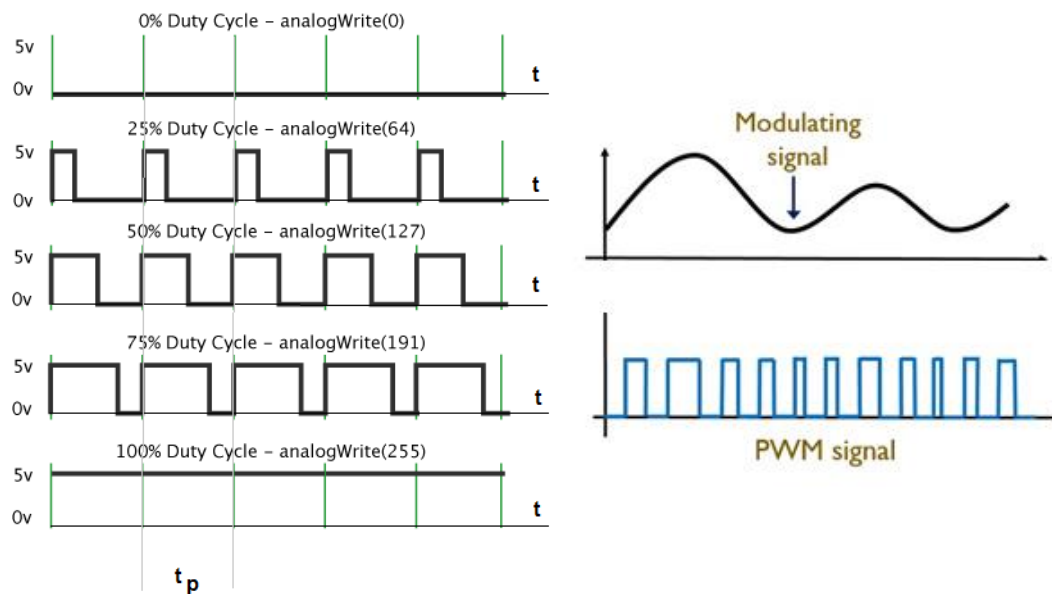
Slika. Generiranje amplitudno moduliranega signala preko mikrokrmilnika.

NAPETOSTNO KRMILJENI OJAČEVALNIKI

To so ojačevalniki, katerih ojačenje je odvisno od enosmerne vhodne napetosti. Ima dva vhoda. Na vhod priključimo izmeničen signal stalne amplitude, na drugi vhod pa enosmerno napetost, ki predstavlja signal. Amplituda izhodne napetosti je odvisna od velikosti enosmerne napetosti.

PULZNO ŠIRINSKA MODULACIJA

Pulzno širinska modulacija (angl. Pulse Width Modulation ali PWM) temelji na konstantni frekvenci in amplitudi, lahko pa amplituda tudi ni pomembna vsaj dokler je dovolj velika, da »preglasi« šum. PWM signal znotraj ene periode spreminja razmerje med visokim stanjem (recimo logična 1) in nizkim stanjem (recimo logična 0). Na spodnji sliki označuje t_p čas periode, ki je za vse narisane signale enak. Vrednosti $f=1/t_p$ rečemo nosilna frekvenca.



Slika. PWM signal za pet različnih deležev visokega stanja (levo, [vir1](#)) in če se vhodna napetost spreminja zvezno (desno, [vir2](#)).

Uporaba PWM je pomembna za krmiljenje moči električnih bremen. Čeprav krmilimo digitalno, je učinek zvezen, če je seveda nosilna frekvenca dovolj velika. Na primer, nosilna frekvenca je 500 Hz, se pravi je t_p enak 2 ms. Če tak signal vklaplja ali izklaplja motor, se rotor motorja v tako kratkem času ne bo vrtel, pa ustavil in spet zavrte..., ampak se bo pri 25 % trajanju vklopa vrtel počasneje kot pri recimo 75 % trajanju vklopa. Podobno velja za grelnik. Zanimiv je učinek PWM na LED. Kot smo že povedali, se LED izjemno hitro vklopi oz. izklopi. V tem primeru pa je časovni odziv našega vida prepočasen (utripanje vidimo nekje do 50 Hz, če je vklop 50 %), zato utripanja ne vidimo.

Arduino IDE ima v svojem naboru ukaz [analogWrite\(nPin, nVal\)](#); čeprav digitalno analognega pretvornika sploh nima. Dejansko ukaz uporablja digitalni izhod, ki je pulzno širinsko moduliran z nosilno frekvenco 490 Hz. Ukaz ne deluje na vseh pinih, pri Uno, Nano, Mini je nPin lahko le 3, 5, 6, 9, 10, 11. Če je nVal enak 0, potem je vklop 0 %, če je 255 (2^8-1) pa 100 %. Če je nVal recimo 79, stanje 1 traja 31 % časa ene periode.

ELEKTRONSKI REGULACIJSKI SISTEMI

Najbolj elementarna naloga regulacijskih sistemov je, da v izbranem sistemu vzdržujemo želeno vrednost določene veličine. Najbolj vsakdanji primer je regulacija temperature vode. Pogosti primeri so še regulacija nivoja vode, osvetljenosti, vrtljajev elektromotorja,...

DVOPOLOŽAJNA (NEZVEZNA) REGULACIJA TEMPERATURE VODE

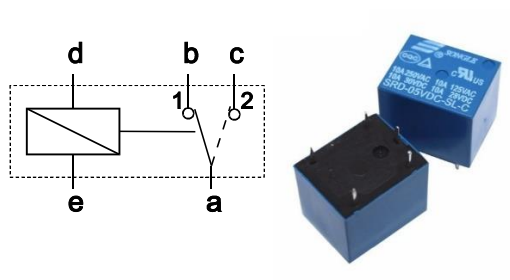
Dvopoložajno pomeni, da ima grelnik lahko le dve stanji, je vključen ali ni. Dve stanji ima torej tudi moč gretja, ki vpliva na temperaturo: $P=0$ ali $P=P_0$. Označimo želeno temperaturo s T_r . Najpreprostejši regulacijski sistem bi vključil grelnik pri $T < T_r$ in izključil pri $T > T_r$. Slabost takega sistema in občutljivost na šum smo že opisali. Ugotovili smo, da je rešitev v histereznem vklopu in izklopu. Če je širina histereze ΔT_h je zagotovo vključen, če je temperatura $T < T_r - \Delta T_h / 2$ in zagotovo izključen, če je $T > T_r + \Delta T_h / 2$. Znotraj histereznega intervala je pri segrevanju vključen in pri ohlajanju izključen.

Za regulacijo temperature potrebujemo senzor temperature - termistor in elektronski sestavni del za vklop in izklop grelnika - rele.

Elektromagnetni rele

Za vklop in izklop električne naprave lahko uporabimo rele.

Rele je element, ki ima v osnovni izvedbi pet priključkov. Trije priključki (a,b,c,) predstavljajo menjalno stikalo, ki je v položaju (1) ali (2), odvisno od tega ali skozi preostala dva priključka (d,e) teče dovolj velik električni tok oz. je dosežena preklopna napetost U_R . Običajno rišemo tako, da je črtkani položaj stikala pri preklopni napetosti. Za razliko od tranzistorja gre v primeru releja za dejansko prekinitev ali sklenitev električnega kroga, zato je upor sklenjenega stikala (R_{ON}) zelo majhen in razklenjenega zelo velik (R_{OFF}). Najpreprostejši primer uporabe je prekinitev ali sklenitev električnega tokokroga z virom napetosti in porabnikom.



Slika. Simbol releja (levo) in primer releja (desno)

V releju je med dvema priključkoma (d,e) tuljava, ki v primeru električnega toka ustvarja magnetno polje, sila magnetnega polja pa deluje na položaj stikala.

Podatki, ki so najpomembnejši pri izbiri tipa releja so:

- napetost med d in e, ki je potrebna za preklop releja v črtkani položaj stikala (U_R)
- ohmska upornost navitja tuljave (med d in e) (R_R), tok preklopa je torej $I_R = U_R / R_R$
- maksimalen tok preko stikal releja (I_{max})
- upornosti med priključki stikal R_{ON} in R_{OFF}

Če bi napetost na releju postopno povečevali, bi stikalo preklopilo pri napetosti $U_r < U_R$ oziroma pri toku $I_r < I_R$. Ta napetost oz. tok žal ni posebno natančno določena. Izkaže pa se, da rele že sam po sebi deluje histerezo.

Termistor

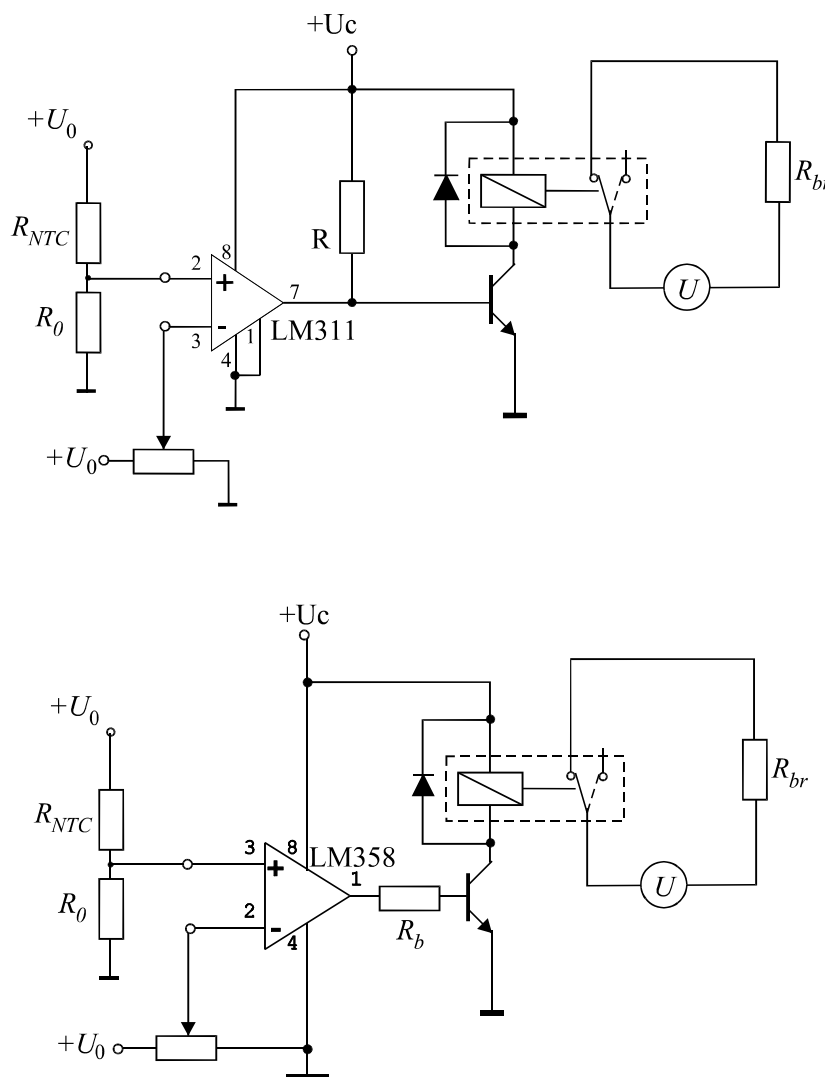
NTC termistorju upornost s temperaturo pada po enačbi:

$$R_{NTC}(T) = R_A e^{\frac{\beta}{T}}$$

kjer sta R_A in β konstanti, ki ju dobimo z umerjanjem (najmanj pri dveh temperaturah).

IZVEDBE S KOMPARATORJEM BREZ HISTEREZE

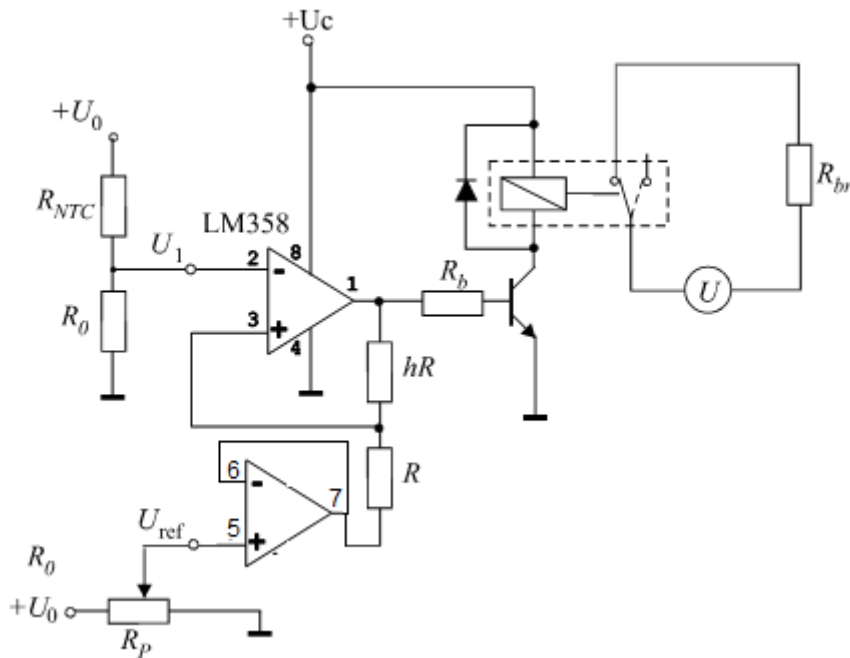
Rele praviloma ne izpostavljamo zvezno spremenljivi napetosti ampak želimo le dve diskretni vrednosti, eno čim bliže 0V in drugo čim bolj podobno preklopni napetosti U_R . Rešitev je komparator napetosti izveden bodisi z operacijskim ojačevalnikom ali komparatorjem z odprtim kolektorjem. Načrtujmo obe izvedbi. Premislimo, pri katerih pogojih je grelnik vključen.



Slika. Shemi za dvopoložajno regulacijo s komparatorjem napetosti.

IZVEDBA Z ANALOGNIM SCHMITTOVIM SPROŽILNIKOM

Komparator zamenjamo s Schmittovim sprožilnikom. Poleg želene temperature nastavimo tudi histerezo.



Slika. Shema za dvopoložajno regulacijo s Schmittovim sprožilnikom.

Referenčna U_{ref} napetost bi morali praviloma dobiti iz napetostnega izvora z minimalno izhodno upornostjo. Nastavitev s potenciometrom je izvedljiva le, če je $R_p \ll hR$.

Zgornji in spodnji preklop histereze izračunamo po enačbah:

$$U_{h2} = U_{ref} + \frac{U_{ZN} - U_{ref}}{1 + h}$$

$$U_{h1} = U_{ref} + \frac{U_{SN} - U_{ref}}{1 + h} = U_{ref} \frac{h}{1 + h}$$

Aritmetična sredina med obema mejama je torej:

$$U_R = \frac{U_{h2} + U_{h1}}{2} = \frac{1}{2} \left(2U_{ref} + \frac{U_{Pnas}}{1 + h} \right)$$

Kadar je $h \gg 1$ velja približek:

$$U_R = U_{ref}$$

Ostane nam še interval od sredine histereze do roba (polovica širine):

$$\Delta U_h = \frac{U_{h2} - U_{h1}}{2} = \frac{1}{2} \frac{U_{Pnas}}{1 + h}$$

ZVEZNA REGULACIJA TEMPERATURE VODE

Izhodiščna ideja zvezne regulacije je: *bliže ko smo želeni temperaturi, manjša naj bo moč grelnika.*

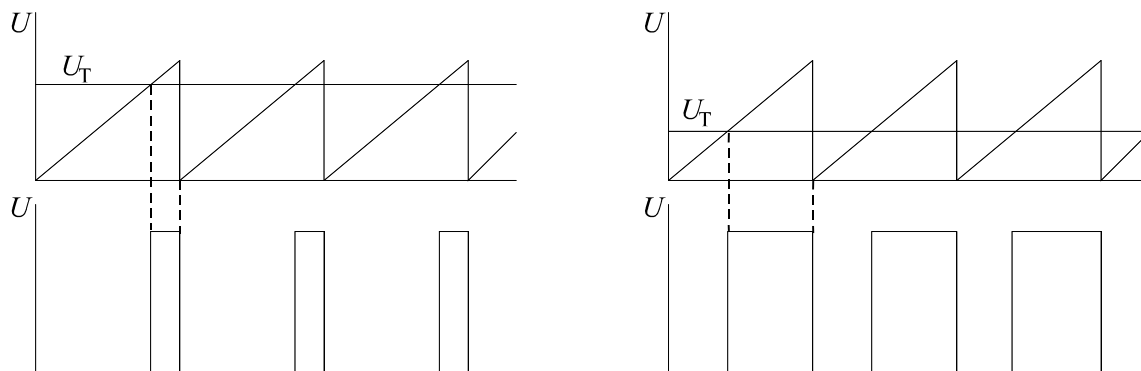
Moč segrevanja naj bo torej premo sorazmerna razliki med dejansko in želeno temperaturo:

$$P = k_p (T - T_c)$$

(Pri negativni moč bi sicer pomenilo, da moramo ohlajati, kar pa grelnik vsekakor ne more.)

Ostane pa še naloga, kako priti do tako oblikovanih napetostnih impulzov. Izhajamo torej iz predpostavke, da imamo merilnik temperature, katerega izhodna napetost U_T je linearno odvisna od temperature sistema T (kar za termistor v delilniku žal ne velja!). Veljati torej mora, da večja ko je napetost merilnika, krajši je t_{on} .

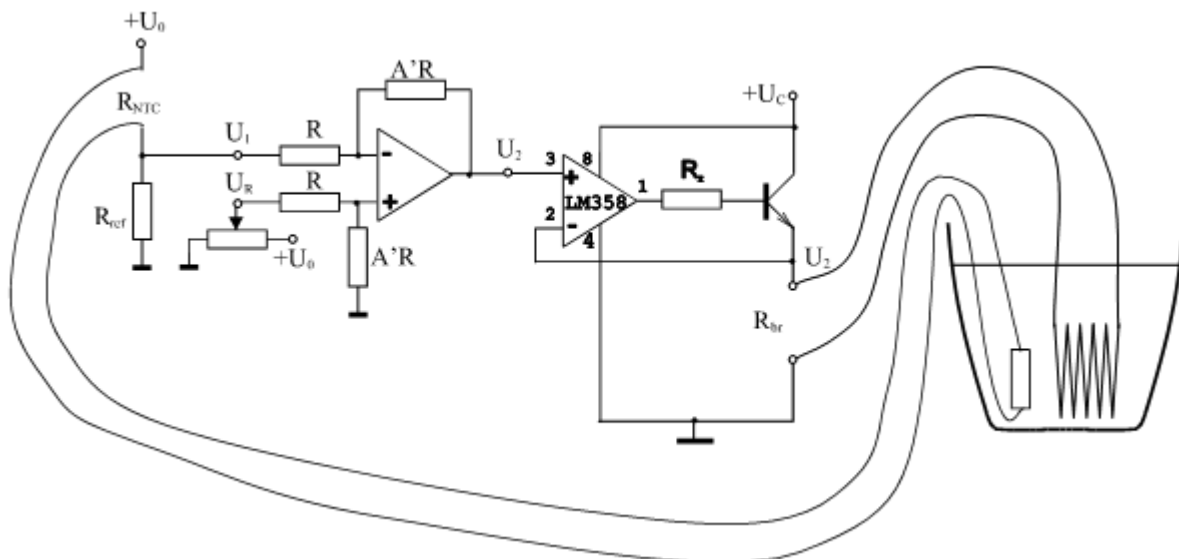
Rešitev je vezje, ki primerja periodično trikotniško ali žagasto napetost z napetostjo merilnika.



Slika. Časovni potek pri pulzno širinskem krmiljenju moči gretja.

Z OJAČEVALNIKOM MOČI

Temperaturo T pretvorimo v napetost U_1 , želeno temperaturo T_R pa v ustrezno "želeno" napetost U_R . Napetostni ojačevalnik ojačuje razliko obeh napetosti $U_2 = A'(U_R - U_1)$. Na koncu potrebujemo še močnostni ojačevalnik, recimo z napetostnim ojačenjem 1. Ker je moč grelnika sorazmerna s kvadratom napetosti U_2 , velja enačba $P = k_2 (U_2)^2 = k_2 (A'(U_R - U_1))^2$.



Slika. Shema pri zvezni regulaciji z ojačevalnikom moči.

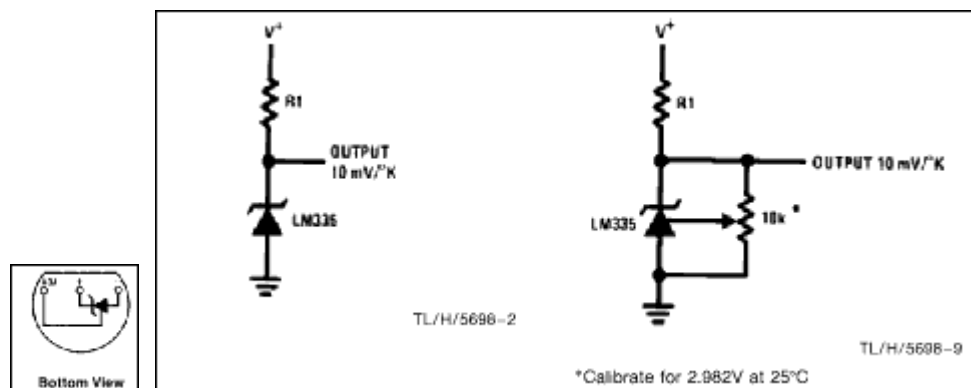
MERJENJE TEMPERATURE

Nezaželena lastnost termistorja je nelinearnost. Linearni oz. skoraj linearni so kovinski termopori in termočleni. Enostavnejši za uporabnika so posebni temperaturni senzori z linearnimi lastnostmi. Najbolj tipični so senzori LM335, LM35 (National Semiconductor) in AD590 (Analog Devices).

LM335

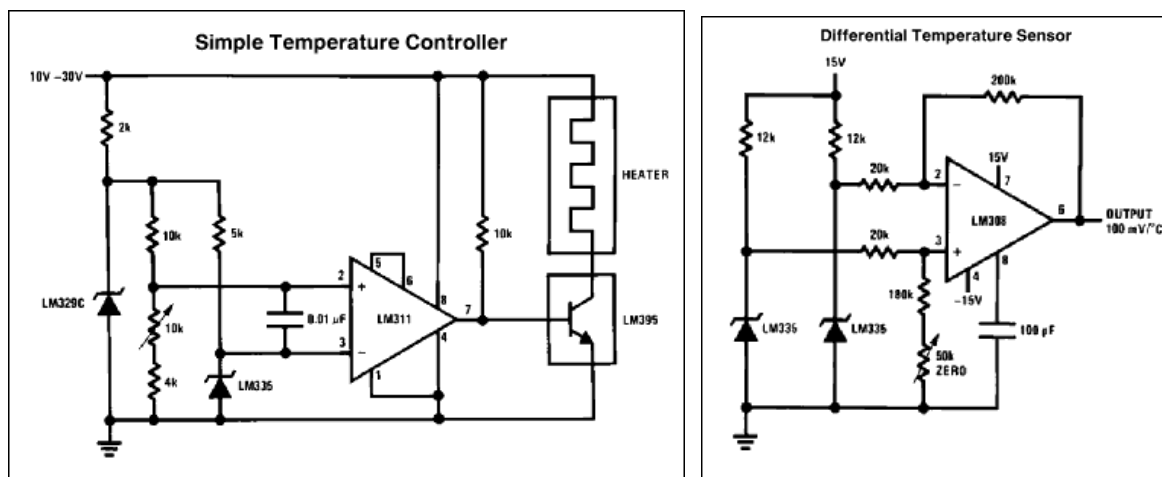
V osnovi je to zenerjeva dioda s temerturno občutljivo zenerjevo napetostjo. Senzor izdelujejo jo lahko v različnih ohišjih, prikladno je ohišje TO 92. Vežemo jo v zaporni smeri, napetost pa natančno ustreza kelvinovi temperaturni skali s koeficientom $+10 \text{ mV/K}$. Deluje na temperaturnem območju -40°C do $+100^\circ\text{C}$ (LM135 pa od -55°C do $+150^\circ\text{C}$). Tipična napaka je manj kot 1K na območju 100K. Dinamična izhodna notranja upornost je okoli 1Ω .

V najbolj enostavni varianti jo vežemo zaporedno z uporom. Dodatno je omogočena tudi kalibracija.



Slika. Vezava temperaturnega senzora LM335 ([vir](#)).

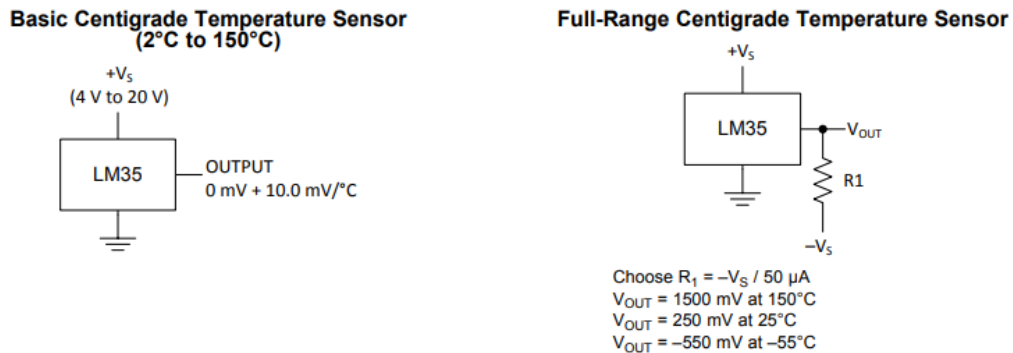
Tipična zgleda uporabe: preprost regulacijski sistem, merjenje razlike temperatur. Naredite analizo vezja.



Slika. Dve shemi kot primer uporabe temperaturnega senzora LM335.

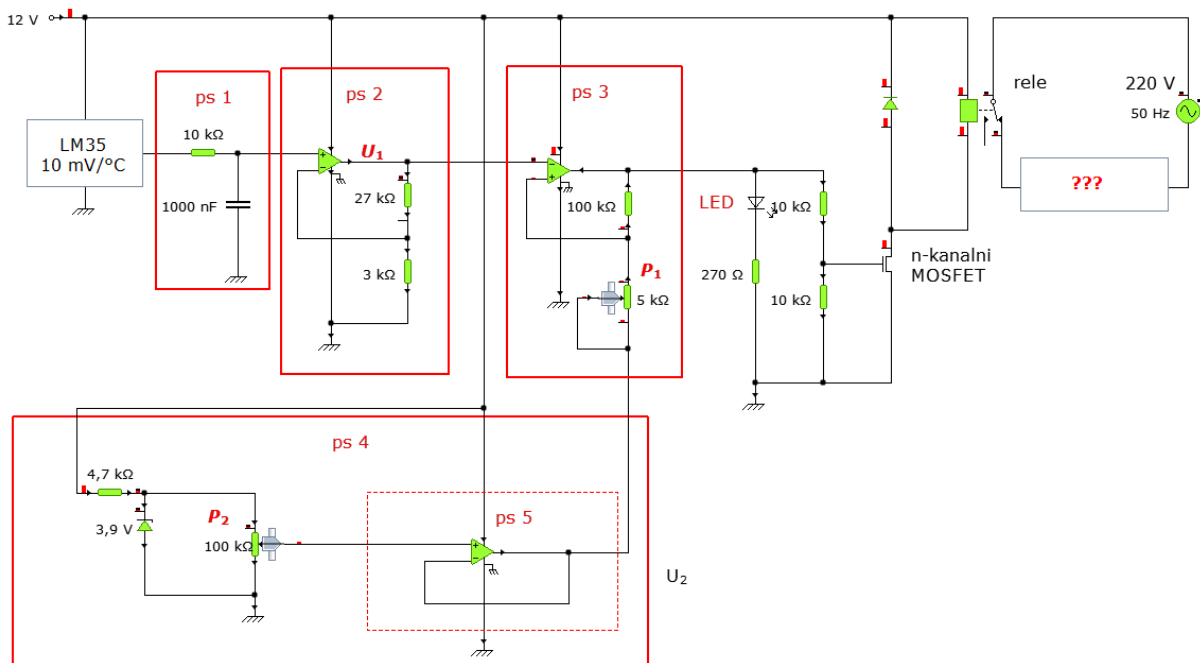
LM35

Senzor LM35 je podoben LM335, le da v njem ni le temperaturno občutljiva Zenerjeve dioda ampak dodatna elektronika, ki omogoča enostavnejše preračunavanje izhodne napetosti v temperaturo, izhodna napetost je namreč $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.



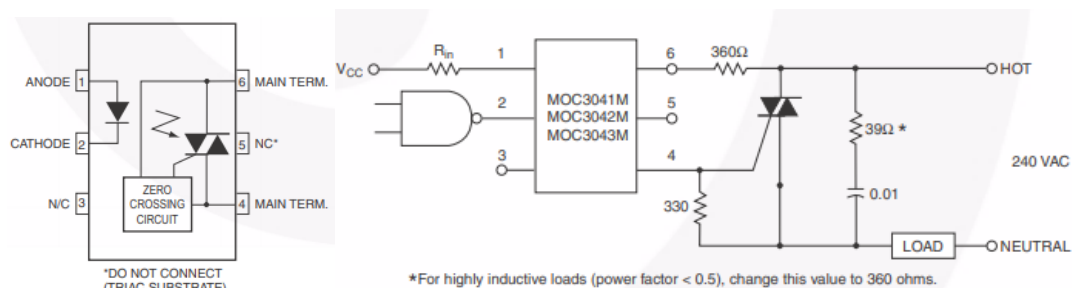
Slika. Dve shemi vezave temperaturnega senzorja LM35 ([vir](#)).

Naredite še analizo vezja spodaj.



Slika. Shema kot primer uporabe temperaturnega senzorja LM35.

Alternativa releju za vklop bremena z izmenično napetostjo je »optotriak« MOC304xM (x=1, 2, ali 3).

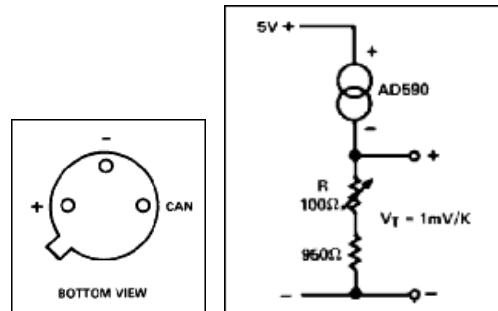


Slika. Vklp in izklop bremena (LOAD) za izmenično napetost z optičnim triakom ([vir](#)).

Bodimo pozorni na shemo, v kateri imamo poleg optotriaka v vezju tudi zunanji običajni triak. Projekt krmiljenja osvetljenosti preko krmilnika Arduino uporablja kot zunanji trika predlaga TIC206 ali BR136 ([vir](#)).

AD590

Senzor je tokovni vir, čigar tok je premo sorazmeren absolutni temperaturi s koeficinetom $1\mu\text{A/K}$. Območje pod 150°C . Vežemo ga na upor ali v tokovno napetostni pretvornik.

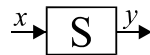


Slika. Vezava temperaturnega sensorja kot tokovni vir ([vir](#))

SPLOŠNO O REGULACIJSKI TEHNIKI

KRMILJENJE IN REGULACIJA

Krmiljenje je proces, pri katerem z neko vhodno veličino x vplivamo na veličino y fizikalnega sistema S . Zvezo ponazorimo $y=f(x)$.

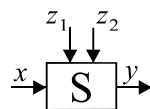


Slika. Osnovna blokovna shema krmilnega sistema

Na veličini y običajno vpliva več dejavnikov, zato v splošnem velja:

$$y = f(x, z_1, z_2, \dots)$$

Ostali vplivi so za krmilni sistem nezaželeni in jih zato imenujemo motnje (označimo z).

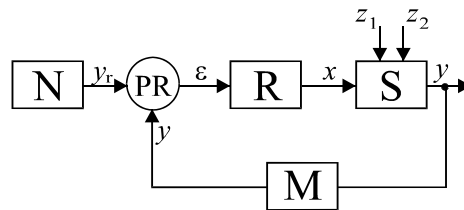


Slika. Blokovna shema krmilnega sistema z neželenimi zunanjimi vplivi.

Če želimo krmiljeno veličino y ohraniti na želeni (predpisani) vrednosti y_r , moramo uporabiti regulacijski sistem. Regulacija je proces, pri kateri regulirano veličino x z merjenjem, primerjanjem in povratnim delovanjem stalno nastavljamo in ohranjamo na želeni vrednosti y_r . Blokovno shemo sestavljajo:

- *Nastavitveni (referenčni) člen* N daje na svojem izhodu želeno vrednost,
- *primerjalni člen* PR primerja želeno vrednost y_r in dejansko (izmerjeno) vrednost y - na izhodu je regulacijski odstopek $\varepsilon = y_r - y$,
- *regulator* R ima na vходу odstopanje na izhodu pa z regulirno veličino x , ki deluje na izvršilne člene (rekeji, motorji, grelniki) in spreminja regulirano veličino y tako, da se napaka ε čim bolj odpravi,

- *merilni člen* M meri trenutno velikost regulirane veličine y in jo posreduje primerjalnemu členu.



Slika. Osnovna blokovna shema regulacijskega sistema

ZVEZNE IN NEZVEZNE REGULACIJE

Regulator je nezvezno delujoč. Najpogosteje ima samo dve stanji - dvopoložajne regulacije. Stacionarnega stanja ne dosežemo, saj regulirana veličina niha okoli želene vrednosti. V posebnem primeru lahko nezvezen regulator deluje zvezno (pulzno delovanje). Perioda izhodne veličine regulatorja x je majna v primerjavi s časovno konstanto odziv a reguliranca, ki zato ne more slediti hitrim spremembam x .

REGULACIJE S KONSTANTNO IN SPREMENLJIVO ŽELENO VREDNOSTJO

Pri konstantni željeni vrednosti ni časovnega spreminjanja želene vrednosti. Tipičen primer je frekvenca napetosti v omrežju. Edine časovno odvisne veličine so v takih primerih motnje. Kadar se želena vrednost s časom spreminja govorimo tudi o *vodenih regulacijah*. Takrat naj bi bil časovni potek regulirane veličine kar se da podoben časovnemu poteku želene vrednosti. Pri *časovno vodenih* (programirane) *regulacijah* se želena vrednost spreminja pa vnaprej določenem časovnem poteku (programu). Pri *sledilnih regulacijah* se želena vrednost spreminja odvisno od sprememb stanja v okolici. Primer so obdelovalni stroji, kjer se želena pozicija orodja spreminja odvisno od oblike obdelovanca. Podobno velja tudi za samo krmiljenje, kjer ni povratnega delovanja, vendar je x časovno odvisen. Uporabljajo se različni izrazi: (časovno) programirano krmiljenje, časovno vodeno krmiljenje.

DINAMIČNE LASTNOSTI REGULACIJSKIH SISTEMOV

Zanima nas časovni potek regulirane veličine, pri čemer je želena vrednost konstantna, dejanska vrednost pa je v začetku različna od želene. Tipična sta dva časovna odziva. Eden spominja na sisteme, ki jih lahko opišemo z diferencialno enačbo prvega reda (sistemi prvega reda - eksponenten časovni potek), drugi z diferencialno enačbo drugega reda (sistemi drugega reda - dušeno nihanje). Pri obeh lahko pride do stacionarne napake - razlika med dejansko in želeno vrednostjo se ne spreminja več. Pri sistemih drugega reda pride tudi do dinamične napake.

NAPETOSTNI OJAČEVALNIKI

Osnovne skupine ojačevalnih sistemov:

- invertirajoči
- elektrometrski (neinvertirajoči)
- diferencialni (odštevalnik)

Skupne pomanjkljivosti sistemov, ki so posledica odstopanja operacijskega ojačevalnika od idealnega:

- vhodna notranja upornost
- izhodna notranja upornost
- tokovni premiki
- napetostni premiki

Pomanjkljivosti, ki so posledica samih ojačevalnih sistemov:

- nizka vhodna notranja upornost invertirajočih sistemov in diferencialnega ojačevalnika
- napetostno ojačenje diferencialnega ojačevalnega sistema je nastavljivo z razmerjem dveh parov uporov
- potrebujemo dvojno napajanje, idealni merilniki naj bi imeli le napajanje, izhodno napetost in skupni priključek

Zgledi sistemov, za katere potrebujemo napetostne ojačevalnike:

KOMPENZACIJA MIROVNEGA TOKA IN NAPETOSTNEGA PREMIKA

Potreba po kompenzaciji teh odstopanj realnega operacijskega ojačevalnika od idealnega je pogosta. Navedimo najprej tipičen primer.

Merjenje temperature s termočlenom

Če žici iz različnih kovin zvežemo v električni krog in imata stika teh kovin različni temperaturi, se v krogu pojavi termoelektrična napetost, kar je poznano kot Seebeckov pojav. Napetost je odvisna od razlike med temperaturama ΔT obeh stikov in od snovi. Kadar merimo na majhnem temperaturnem območju, lahko privzamemo kar linearno zvezo med napetostjo in razliko temperatur:

$$U = k\Delta T$$

$$U = k(T - T_0)$$

k je koeficient termoelektrične napetosti in je odvisen od kombinacije snovi. Njegove vrednosti pri temperaturi 20 °C so za nekatere komercialno uporabljane kombinacije sledeče:

kombinacija snovi	oznaka	k [$\mu\text{V/K}$]	T območje [$^{\circ}\text{C}$]
Cu - konstantan	T	40	-200 do 350

kromel - konstantan	E	60	-200 do 900
kromel - alumel	K	40	0 do 1200
nikrosil - nisol	N	27	0 do 1200
Fe - konstantan	J	52	-150 do 1000
Pt ₁₀₀ - Pt ₉₀ Rh ₁₀	S	5,9	0 do 1500

Konstantan je zlitina Cu/Ni (Cu₅₇ Ni₄₃), kromel Ni/Cr, alumel Ni/Mn/Al/Si, nikrosil Ni/Cr/Si in nisol sestavljajo Ni/Si/Mn.

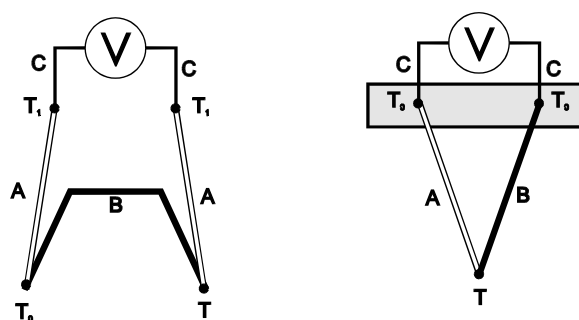
Za večja temperaturna območja linearna zveza med napetostjo in razliko temperatur ne drži. Opisuje jo polinom višje stopnje

$$U = k_1\Delta T + k_2\Delta T^2 + k_3\Delta T^3$$

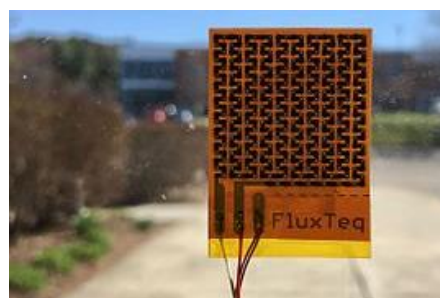
V praksi je običajno dovolj, če upoštevamo le prva dva člena.

Ena od temperatur stika ima vlogo referenčne temperature T_0 . Najpogosteje je to temperatura trojne točke vode ali pri manj natančnih meritvah temperatura ledišča. Drugo stičišče kovin se nahaja na merilnem mestu.

Termično napetost lahko merimo na različne načine. Poleg kombinacije kovin A in B , ki ustvarita termoelektrično napetost zaradi razlike temperatur T_0 in T , v električnem krogu uporabimo tudi vodnike iz drugačne snovi C za priključitev voltmetra. Da je termoelektrična napetost neodvisna od snovi C je pomembno, da sta temperaturi obeh stikov žic C z žicama A ali B enaki.



Slika. Princip delovanja termočlena



Slika. Konkretna izvedba termočlena (levo) in več zaporedno vezanih termočlenov (desno, termopil, angl. »thermopile«).

Glavna odlika termočlena je majhna časovna konstanta, ki je posledica majhnosti spoja, glavna težava pa zagotavljanje natančne referenčne temperature.

Izhodna napetost je majhna, zato potrebujemo napetostni ojačevalnik. Vzemimo, da je $T_0 = T$. Vhodna napetost ojačevalnega sistema bi bila nič, zaradi napetostnega premika ojačevalnika pa bi bila izhodna napetost različna od nič, sklepali bi torej, da sta temperaturi različni.

Napetostni ojačevalnik naj bi torej imel čim manjši napetostni premik in lezenje. Napetostni premik ojačevalnega sistema je posledica napetostnega premika in mirovnega toka operacijskega ojačevalnika.

Potrebujemo ojačevalni sistem s kompenzacijo mirovnega toka in napetostnega premika.

KOMPENZACIJA NAPETOSTNEGA PREMIKA

Napetostni premik si lahko predstavljamo kot enosmerni potencial na neinvertirajočem vhodu. Zaradi velikega ojačenja A operacijskega ojačevalnika, je tudi napetost v sumacijski točki enaka napetostnemu premiku. Zapišemo enačbo za vsoto vseh tokov:

$$\frac{U_1 - U_{off}}{R_1} + \frac{U_2 - U_{off}}{R_2} = 0$$

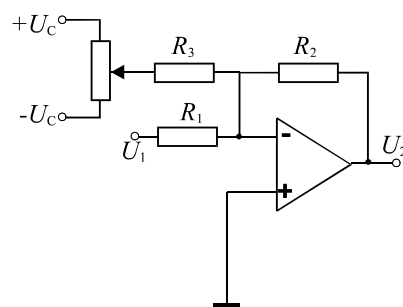
in izrazimo izhodno napetost

$$U_2 = -\frac{R_2}{R_1} U_1 + U_{off} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Drugi člen predstavlja napetostni premik ojačevalnega sistema (ne operacijskega ojačevalnika):

$$U_{2off} = U_{off} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

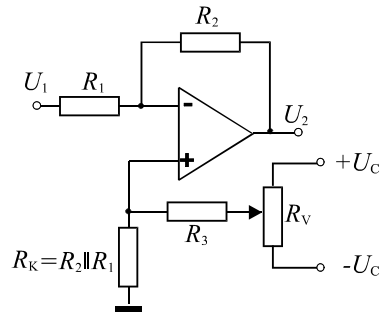
Kompenzacija napetostnega premika najenostavneje izvedemo v sumacijski točki. V bistvu naredimo seštevalnik, s katerim prištejemo napetost $-U_{2off}$.



Slika. Kompenzacija napetostnega premika toka pri invertirajočem ojačevalnem sistemu.

V tem primeru je R_3 precej večji od R_2 .

Drugi način je kompenzacija na neinvertirajočem vhodu in se dopolnjuje s kompenzacijo mirovnega toka:

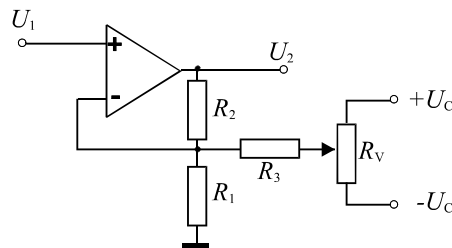


Slika. Kompenzacija mirovnega toka in napetostnega premika pri invertirajočem ojačevalnem sistemu.

Na podoben način obravnavamo vpliv napetostnega premika operacijskega ojačevalnika na elektrometrski ojačevalni sistem, kjer dobimo:

$$U_2 = U_1 + U_{off} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Napetostni premik U_{2off} elektrometrskega ojačevalnega sistema kompenziramo v sumacijski točki.



Slika. Kompenzacija napetostnega premika toka pri neinvertirajočem ojačevalnem sistemu.

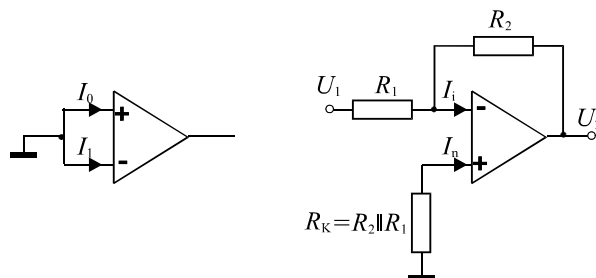
*KOMPENZACIJA MIROVNEGA TOKA

Mirovni tok

$$I_B = \frac{I_n + I_i}{2}; \quad U_n = U_i = 0V$$

Oba tokova sta približno enaka. Zaradi toka I_i je napetost v sumacijski točki večja od nič. Zato vezemo med neinvertirajoči vhod in ozemljitev upor R_k , ki s sofaznim premikom U_s kompenzira to napetost.

$$U_s = I_B R_k \parallel R_2$$



Slika. Kompenzacija mirovnega toka pri invertirajočem ojačevalnem sistemu.

Kompensacija je uspešna kljub lezenju, ne zadošča pa pri različnih vrednostih obeh tokov. Ob znatnem napetostnem premiku

$$I_{off} = I_n - I_i$$

bi morali vezati upor

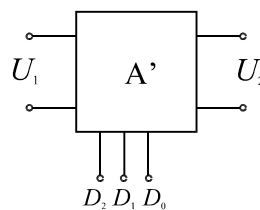
$$R_K = \frac{I_i}{I_n} R_2 \parallel R_1$$

zaradi lezenja tokovnega premika pa taka rešitev ni posebno uspešna.

DIGITALNO PROGRAMIRLJIVI OJAČEVALNI SISTEMI

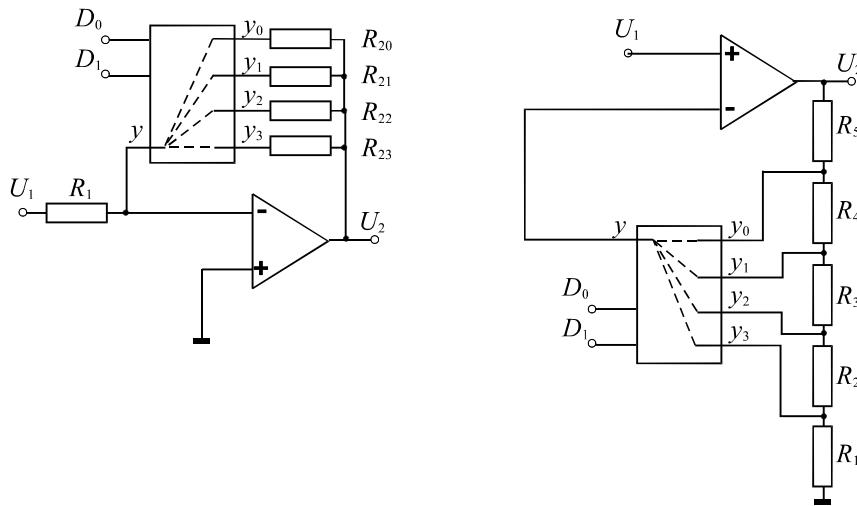
To je ojačevalni sistem, ki pri katerem lahko digitalno izberemo eno od različnih vrednosti ojačenja. Digitalni vhod, preko katerega izberemo ojačenje, ima določeno število bitov (običajno 2 ali 3), na katere vodimo digitalni signal - običajno v naravni dvojiški kodi. Dvo-biten sistem ima torej štiri vrednosti ojačenja, tri-biten osem... Oglejmo si primer tri-bitnega ojačevalnega sistema:

D2	D1	D0	A'
0	0	0	2
0	0	1	5
0	1	0	10
0	1	1	20
1	0	0	50
1	0	1	100
1	1	0	200
1	1	1	500



Slika. Koncept digitalno programirljivega napetostnega ojačevalnika.

Kasneje bomo spoznali integrirana vezja z ojačevalnimi sistemi, pri katerih je digitalna izbira ojačenja že sestavni del vezja. Isto pa lahko dosežemo tudi na osnovi elektrometrskega ojačevalnega sistema in pogojno tudi invertrajočega. V obeh primerih rabimo digitalno krmiljeno stikalo z enim priključkom na eni strani in več (n) priključki na drugi strani, pri čemer ima stikalo n položajev. Lahko bi rekli, da imamo digitalno krmiljeno n položajno "menjalno" analogno stikalo. Oglejmo si princip na obeh osnovnih tipih ojačevalnikov.



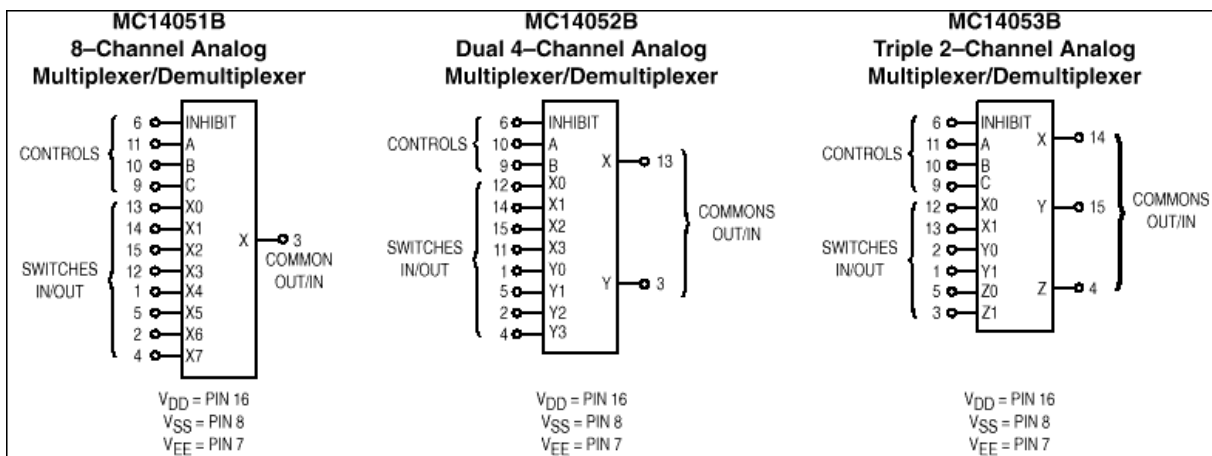
Slika. Izvedba digitalno določljivega elektrometrskega napetostnega ojačevalnika.

Priključek y je lahko sklenjen le z enim od priključkov y_0 do y_3 . S katerim je odvisno od logičnih stanj na vhodoma D_0 in D_1 , kar ilustrira naslednja tabela:

D1	D0	
0	0	$y y_0$
0	1	$y y_1$
1	0	$y y_2$
1	1	$y y_3$

Namesto izraza *analogna stikala* uporabljamo tudi izraz *analogni multipleks/demultipleks*.

Digitalna analogna stikala je mogoče najti tudi v CMOS seriji digitalnih integriranih vezij: CD4016, CD4051, CD4052, CD4053 (namesto CD pri firmi Motorola MC1 ali [74HC](#)):



TRUTH TABLE							
Control Inputs				ON Switches			
Inhibit	Select			MC14051B	MC14052B	MC14053B	
	C*	B	A				
0	0	0	0	X0	Y0 X0	Z0	Y0 X0
0	0	0	1	X1	Y1 X1	Z0	Y0 X1
0	0	1	0	X2	Y2 X2	Z0	Y1 X0
0	0	1	1	X3	Y3 X3	Z0	Y1 X1
0	1	0	0	X4		Z1	Y0 X0
0	1	0	1	X5		Z1	Y0 X1
0	1	1	0	X6		Z1	Y1 X0
0	1	1	1	X7		Z1	Y1 X1
1	x	x	x	None	None	None	

* Not applicable for MC14052
x = Don't Care

Slika. Primer delovanja analognih stikal ([vir](#)).

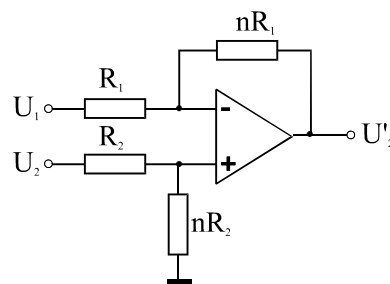
Priključek V_{DD} mora imeti isto napetost kot je napetost logične 1 na kontrolnik vhodih (controls). Priključek V_{SS} je napetost logične 0 (običajno 0V). V_{EE} določa najmanjšo analognu napetost. Napetost preko stikal je lahko med V_{DD} in V_{EE} . V_{EE} ne sme biti večji od V_{SS} .

DIFERENCIALNI OJAČEVALNIKI

Instrumentacijski ojačevalniki temeljijo na odštevalnem sistemu z operacijskim ojačevalnikom oz. diferencialnem ojačevalnikom. Izhodna napetost je premo sorazmerna razliki dveh vhodnih napetosti, kot kaže enačba:

$$U'_2 = A'(U_2 - U_1).$$

Ojačevalnik smo obravnavali v okviru Elektronike, saj spada med osnovna vezja z operacijskim ojačevalnikom (glej še druga [vezja](#)). Za shemo spodaj velja, da je napetostno ojačenje $A' = n$.



Slika. Vezje diferencialnega ojačevalnika oz. odštevalnega sistema z operacijskim ojačevalnikom.

Potreba po diferencialnih ojačevalnikih je pogosta, pogledimo nekatere zglede:

Merjenje gostote magnetnega pretoka s Hallovim senzor

Hallov senzor je namenjen elektronskemu merjenju ene komponente gostote magnetnega pretoka B . Z ustrežno postavitvijo treh senzorjev lahko določimo tako velikost B kot smer celotnega magnetnega polja (se pravi B_x , B_y , B_z). Poleg neposredne meritve B se Hallov senzor uporabi posredno tudi za merjenje sile, kot detektor kontakta, v robotiki (več [1](#), [2](#)).

Princip Hallovega senzorja:

Prevodnik (dopiran polprevodnik) v obliki pravokotnika je v magnetnem polju. Priključimo ga na enosmerni vir. Na nosilce toka deluje magnetna sila $\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$. Naboji se ustavijo na robu ploščice, zato se ustvari prečno električno polje. Električna sila deluje na naboje v nasprotni smeri, v stacionarnem stanju je vsota električna sile $\vec{F} = e\vec{E}$ in magnetne sile nič (enaki po velikosti, nasprotni po smeri):

$$e \frac{U_H}{l_x} = ev_y B_z$$

Vpeljemo prostorninsko gostoto nosilcev toka $n = \frac{dN}{dV}$ in upoštevamo zvezo med električnim tokom in hitrostjo nosilcev toka:

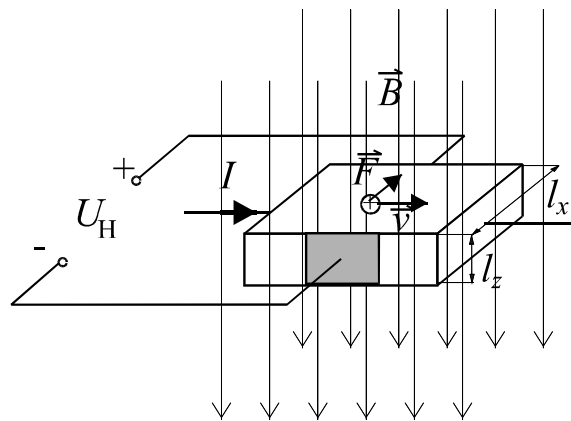
$$I = \frac{de}{dt} = \frac{e_0 ndV}{dt} = \frac{e_0 n l_x l_z v_y dt}{dt} = e_0 n l_x l_z v_y$$

Od tod dobimo Hallovo napetost:

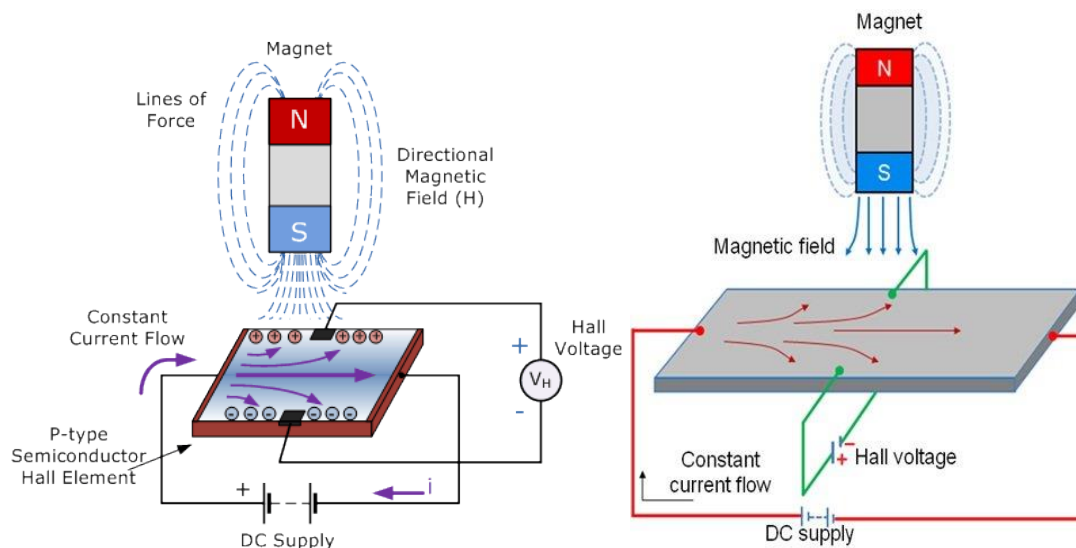
$$U_H = \frac{B_z I}{e_0 n l_y}$$

Večina komercialnih senzorjev ima izvedeno temperaturno kompenzacijo. Ker je spoja za odvzem Hallove napetosti nemogoče narediti povsem simetrično, pride do napetostnega premika.

Potrebujemo diferencialni ojačevalni sistem. Občutljivost naj bo nastavljiva s samo enim uporom, drugi naj bo za kompenzacijo napetostnega premika senzorja in ojačevalnega sistema.



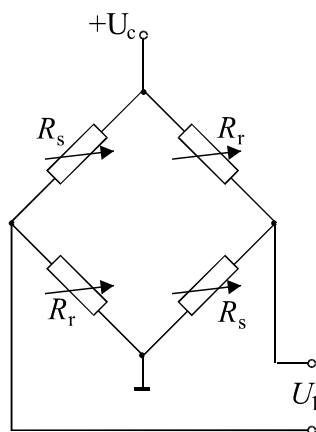
Slika. Skici kažeta drugačno polariteto Hallove napetosti (vir [1](#), [2](#)).



Slika. Skici kažeta drugačno polariteto Hallove napetosti (vir [1](#), [2](#)).

Merjenje sile z uprovnimi lističi

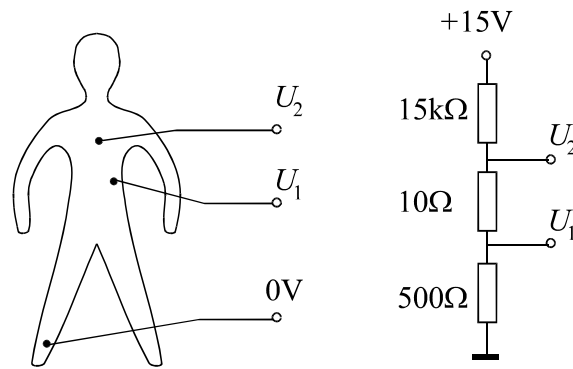
Eden od načinov merjenja sile je, da štiri lističe nalepimo na palico obremenljive na upogib in sicer dva zgoraj, dva spodaj. Pri delovanju sile navzdol se zgornja lističa R_r raztegneta, spodnja R_s skrčita. Vežemo ju v mostič.



Potrebujemo diferencialni napetostni ojačevalnik z veliko vhodno notranjo upornostjo.

Merjenje EKG

Električno aktivnost srca merimo na površini telesa, v osnovni varianti s tremi elektrodami:



Slika. Koncept beleženja EKG – postavitev elektrod na kožo in nadomestno vezje.

***Kompenzacija referenčne napetosti pri merjenju s termočlenom**

Single Power Supply Cold Junction Compensation

THERMO-COUPLE	R3	R4	SEEBECK COEFFICIENT
J	1.05K	385Ω	52.3 μV/°C
T	856Ω	315Ω	42.8 μV/°C
K	816Ω	300Ω	40.8 μV/°C
S	128Ω	46.3Ω	6.4 μV/°C

Adjustments:

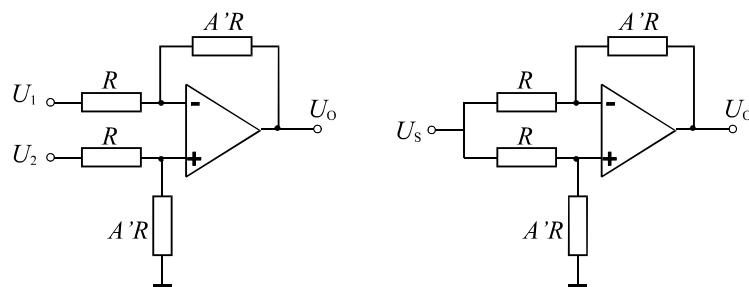
- Adjust R1 for the voltage across R3 equal to the Seebeck Coefficient times ambient temperature in degrees Kelvin.
- Adjust R2 for voltage across R4 corresponding to thermocouple

J	14.32 mV
T	11.79 mV
K	11.17 mV
S	1.768 mV

TL/H/5698-11

Slika. Merjenje temperature (ne razlike!) s termočlenom s kompenzacijo temperature referenčnega spoja.

OSNOVNA IZVEDBA DIFERENCIALNEGA OJAČEVALNIKA (ODŠTEVALNI SISTEM Z O.O.)



Slika. Diferencialni ojačevalnik (levo) in njegova sofazna vezava vhodne napetosti.

Osnovno izvedbo diferencialnega ojačevalnika sestavljajo štirje upori in operacijski ojačevalnik. Ugotovili smo že, da je ojačenje sistema A' :

$$U_o = A'(U_2 - U_1)$$

Notranja upornost vhoda U_2 je kar $R_{vh2} = R + A'R$ (zanemarimo notranjo upornost neinvertirajočega vhoda, ki je zelo velika). Večje težave so z vhodom U_1 , vendar če je $A' \gg 1$ je $U_1 \approx U_2$, in posledično je tudi vhodna notranja upornost približno enaka tisti za vhod U_2 .

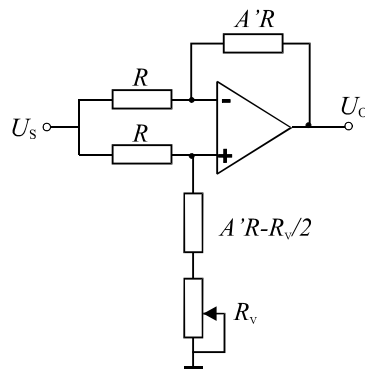
Podobno kot o sofaznem ojačenju operacijskega ojačevalnika vpeljemo tudi sofazno ojačenje diferencialnega ojačevalnika: $U_2 = U_1 = U_s$. Pri idealnem operacijskem ojačevalniku in enakih parih uporov, naj bi bila izhodna napetost sistema nič. Za realni sistem pa vpeljemo sofazno ojačenje (angl. *common-mode voltage gain*) sistema

$$A'_s = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_s}$$

in rejekcijski faktor (angl. *common mode rejection ratio*) sistema

$$G' = \frac{A'}{A'_s} (= CMRR)$$

Vpliv sofaznega ojačenja kompenziramo z nastavljivim uporom R_v med neinvertirajočim vhodom in ozemljitvijo:

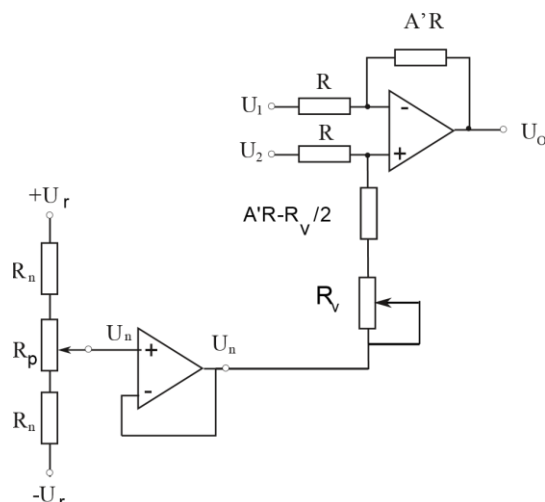


Slika. Izboljšava vezja z možnostjo kompenzacije sofaznega ojačenja preko nastavljivega upora R_v .

Z njegovo nastavitvijo pri spreminjajoči sofazni napetosti U_s želimo čim bolj zmanjšati spreminjanje izhodne napetosti U_o .

Druga pogosta napaka operacijskega ojačevalnih sistemov je napetostni premik. Tega odpravimo z nastavitvijo napetosti U_n , pri čemer naj bo $U_1 = U_2 = 0V$. Vezje lahko uporabimo tudi za nastavitev ničelne napetosti:

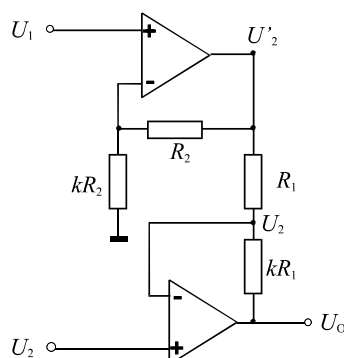
$$U_o = U_n + A'(U_2 - U_1)$$



Slika. Izboljšava vezja z možnostjo tako kompenzacije napetostnega premika kot kompenzacije sofaznega ojačenja.

Slabost osnovne izvedbe diferencialnega ojačevalnika je različna vhodna notranja upornost za oba vhoda in nastavljivost ojačenja, za kar je treba spreminjati razmerje dveh parov uporov. Možna rešitev za povečanje vhodne notranje upornosti sta dva sledilnika napetosti - skupaj imamo tri operacijske ojačevalnike. Drugi možnosti sta elektrometrski diferencialni ojačevalnik (odštevalni sistem) in instrumentacijski ojačevalnik s tremi o.o.

* ELEKTROMETRSKI DIFERENCIALNI OJAČEVALNIK



Slika. Izboljšava vezja z možnostjo kompenzacije napetostnega premika.

Sestavljata ga dva operacijska ojačevalnika. Oba vhoda sta na neinvertirajočih vhodih operacijskih ojačevalnikov, s čimer je dosežena velika vhodna notranja upornost. Izhodno napetost U'_2 je enaka izhodni napetosti elektrometrskega ojačevalnega sistema:

$$U'_2 = U_1 \left(1 + \frac{R_2}{kR_2} \right)$$

Zapišemo še enačbo za vsoto vseh tokov v sumacijski točki:

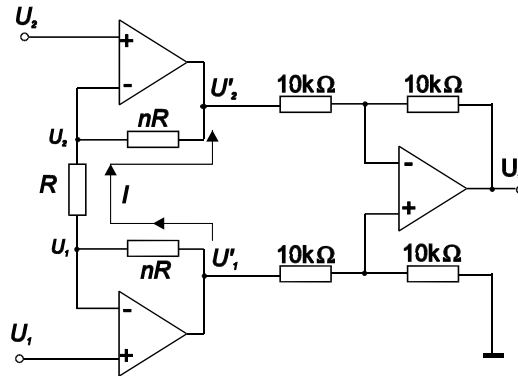
$$\frac{U'_2 - U_2}{R_1} + \frac{U_o - U_2}{kR_1} = 0$$

V enačbo vstavimo izraz za U'_2 , jo uredimo in izrazimo izhodno napetost:

$$U_o = 1 + k \left(\frac{U_2}{U_1} \right) - U_1 \zeta$$

S tem sistemom smo dosegli veliko vhodno notranjo upornost, ojačenje pa je še vedno odvisno od dveh parov uporov.

INSTRUMENTACIJSKI OJAČEVALNIK S TREMI OPERACIJSKIMI OJAČEVALNIKI



Slika. Shema instrumentacijskega ojačevalnika s tremi o. o.

Izpeljimo ojačenje ojačevalnega sistema na sliki. Zaradi velikega ojačenja operacijskih ojačevalnikov smemo privzeti, da sta napetosti protifaznih vhodov enaki napetostim sofaznih vhodov. Električni tok skozi upor R je torej

$$I = \frac{U_1 - U_2}{R} \tag{En. 0.1}$$

Ker je vhodna upornost obeh vhodov operacijskih ojačevalnikov praktično neskončna, teče isti tok tudi skozi upora označena z nR . Napetosti na izhodih obeh ojačevalnikov sta zato

$$\begin{aligned} U'_1 &= U_1 + I nR = U_1 + n \left(\frac{U_1 - U_2}{R} \right) nR \\ U'_2 &= U_2 - I nR = U_2 - n \left(\frac{U_1 - U_2}{R} \right) nR \end{aligned} \tag{En. 0.2}$$

Napetosti U'_1 in U'_2 odšteje odštevalnik na izhodu in tako dobimo izhodno napetost

$$U' = U'_1 - U'_2 = 1 + 2n \left(\frac{U_1 - U_2}{R} \right) - U_2 \zeta \tag{En. 0.3}$$

Ojčenje sistema je $1+2n$ in ga torej lahko določimo z enim nastavljivim uporom R' .

Ceneni operacijski ojačevalniki, s katerimi lahko zgradimo opisani ojačevalni sistem, precej odstopajo od idealnega operacijskega ojačevalnika. Pri velikih ojačenjih sta posebno moteči preostala napetost in lezenje. V takih primerih si zato raje pomagamo z instrumentacijskimi ojačevalniki, ki jih prav tako izdelujejo kot integrirana vezja. Nekatera najbolj poznana imajo oznake SGA 100, ICL7650SCPD, INA101HP, AD625JN.

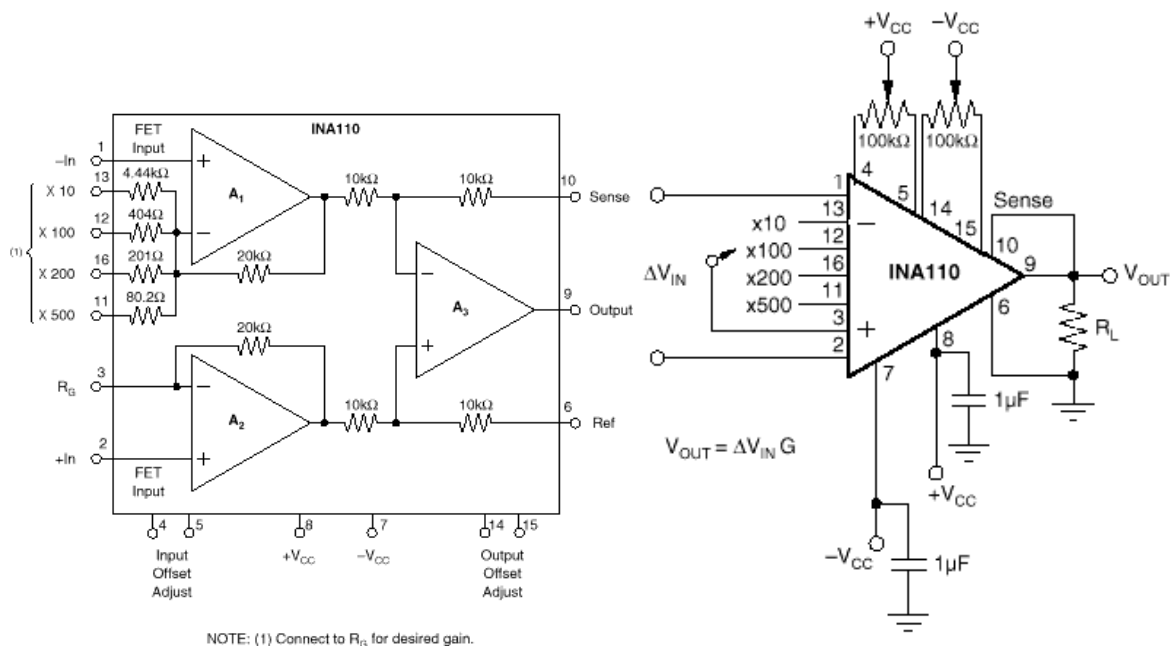
* INSTRUMENTACIJSKI OJAČEVALNIKI V INTEGRIRANIH VEZJIH

Poceni operacijski ojačevalniki, s katerimi lahko zgradimo opisani ojačevalni sistem, precej odstopajo od idealnega operacijskega ojačevalnika. Pri velikih ojačenjih sta posebno moteči preostala napetost in lezenje. V takih primerih si zato raje pomagamo z instrumentacijskimi ojačevalniki, ki jih prav tako

izdelujejo kot integrirana vezja. Navedimo dva zgleda firme Burr-Brown INA110 in PGA202/203 ter integrirano vezje firme Analog Devices AD625.

INA110

Ima izjemno veliko vhodno notranjo upornost ($10^{12} \Omega$, vir [1](#)). Ojačenje izberemo med 10, 100, 200 in 5000, odvisno je od povezave med priključkom 3 in enim od priključkov 13, 12, 16, 11. Če priključek 3 ni povezan, je ojačenje 1. Za kompenzacijo napetostnega premika lahko uporabimo en ali dva potenciometra. Postopek je sledeč: najprej pri visokem ojačenju (>100) nastavimo vhodni napetostni premik (input offset) in nato pri manjšem ojačenju nastavimo izhodni napetostni premik (output offset). Priključek 6 (Ref) je namenjen nastavitvi ničelne (referenčne) vrednosti napetosti. Priključek 10 (Sense) priključimo neposredno na breme. Za zagotovitev večjega toka skozi breme med izhod in breme vežemo emitorski sledilnik - pomembno je, da priključek 10 vežemo na breme.

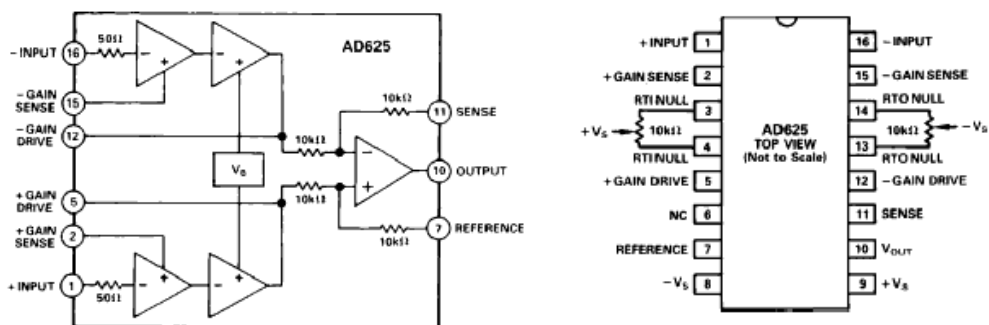


Ojačenje je lahko tudi poljubno, če med seboj povežemo priključke 11, 12, 16 in med njimi in priključkom 3 vežemo upor R_G . Izračunamo ga po enačbi:

$$R_G = \frac{40.0k\Omega}{A-1} - 50\Omega$$

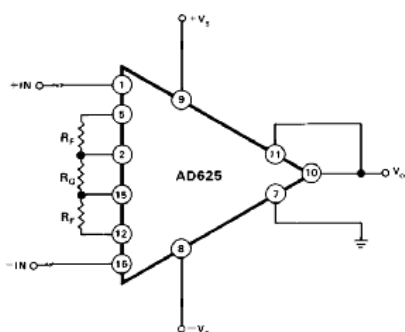
AD625

Napetostni premik posebej lahko kompenziramo na vhodu in izhodu (3,4 oz. 13, 14). Vlogo priključkov z oznako Sense in Reference že poznamo.



Ojačenje instrumentacijskega ojačevalnika je določljivo s tremi zunanjimi upori med priključki 2, 5, 12, 15. in je enako:

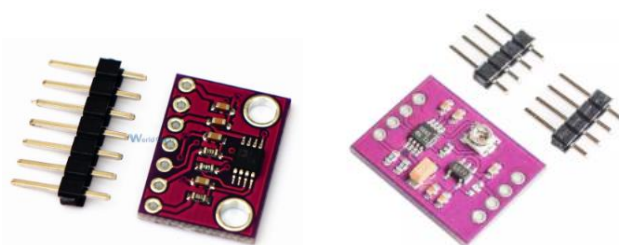
$$A = \frac{2R_F}{R_G} + 1$$



Z uporabo digitalnih stikal in verige uporov je mogoče tudi pri tem ojačevalniku doseči digitalno nastavljivo ojačenje.

* Mini tiskana vezja z instrumentacijskim ojačevalnikom

Za šolske projekte so uporabna le integrirana vezja, ki jih lahko vstavimo v prototipno ploščico, oznaka ohišja je DIL (angl. Dual In Line, včasih oznaka DIP, vir [1](#)). Najdemo pa različne izvedbe instrumentacijskih ojačevalnikov že prispajkanih na tiskani ploščici s pini, preko katerih jih lahko vežemo na prototipno ploščico. Dva primera sta na sliki, vezje z AD8221AR ima celo programirljivo napetostno ojačenje (Projekti iz elektronike). Cena takih vezij na kitajskih spletnih straneh je majhna (na sliki iz trgovine Aliexpress do 3 €).



Slika. Instrumentacijski ojačevalnik na tiskani ploščici izdelan na temelju integriranega vezja AD8221AR (levo) in INA333 (desno).

Naprodaj so tudi vezja z ojačevalnikom in elektrodami za EKG. V tem primeru zraven dobimo tudi kabel za povezavo med elektrodami in ojačevalnikom (slika, cena na Aliexpress je okoli 4 €).



Slika. Instrumentacijski ojačevalnik s kablom in elektrodami za EKG. Ojačevalnik je narejen na osnovi AD8232.

DIGITALNA ELEKTRONIKA - SEKVENČNA VEZJA

Za opazovano merilno mesto želimo vedeti, ali je temperatura v nekem obdobju prerasla predpisano vrednost. Varnostni sistem v avtomobilu mora lastnika opozoriti, da je bil sprožen alarm. V mnogih primerih torej želimo ohraniti informacijo o nekem dogodku, ki je v času preverjanja stanja na izhodu vezja že mimo. Takemu vezju rečemo spominska celica. Čeprav je mogoče narediti tudi analogne spominske celice, je pomen digitalnih spominskih celic neprimerno večji in uporabnejši.

Iz digitalne elektronike vemo, da je logičnima vrata mogoče kombinirati tako, da dosežemo zahtevano pravilnostno tabelo. Temu področju digitalne elektronike rečemo kombinacijska logika. Večina digitalnih sistemov ima poleg kombinacijske logike tudi spominske elemente - to so **sekvenčna vezja**.

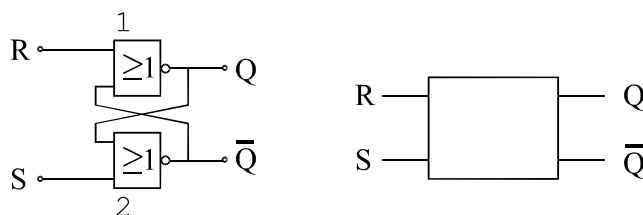
Spominski element ohrani informacijo na izhodu tudi potem, ko se signal na vhodu spremeni.

FLIP-FLOPI

To so spominski elementi za shranjevanje enega bita informacije. Drugo ime za flip -flop je tudi bistabilni multivibrator, bolj poredko je zaslediti izraz dvojček.

R-S FLIP-FLOP

To je najbolj osnovna oblika spominske celice (angleško *RS latch*). Zgradimo ga lahko iz dveh NEIN ali dveh NEALI vrat. Ima dva vhoda in dva izhoda, katerih stanji sta vedno nasprotni.



Slika. Shema RS flip-flopa in njegov simbol.

Začnimo s flip-flopom z vrati NEALI. Naj bo začetno stanje $S = 1$ in $R = 0$. Ker je $S = 1$ je izhodno stanje vrat 2 lahko le 0, torej $\bar{Q} = 0$. Na vhodu vrat 1 je torej stanje obeh vhodov 0 in le v tej kombinaciji je lahko stanje na izhodu NEALI vrat enako 1, torej $Q = 1$. Če se nato S spremeni v $S = 0$, je na vhodih vrat 2 kombinacija 0, 1, torej se stanje na izhodu \bar{Q} ne spremeni.

Pravilnostna tabela za opisano spremembo je torej sledeča:

SET:

S	R	Q	\bar{Q}
1	0	1	0
0	0	1	0

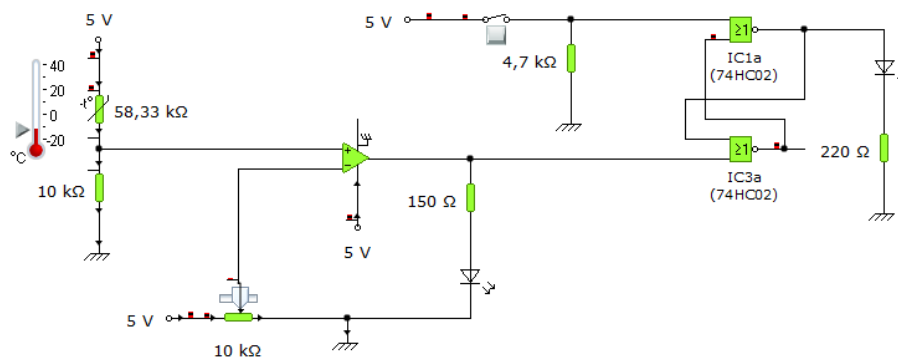
Očitno je vezje invariantno glede na zamenjavo vhodov S in R . Kar je S postane R in kar je Q postane \bar{Q} .

RESET:

S	R	Q	\overline{Q}
0	1	0	1
0	0	0	1

Dobili smo rezultat, kakršen v kombinacijski logiki ni mogoč. Pri istem stanju 0 0 na vhodu smo dobili dve različni vrednosti na izhodu - odvisno od tega, kakšno je bilo stanje na vhodu pred spremembo stanja na 0 0. Stanje 1 1 na vhodu da na izhodu stanji 0 0 - to pa ni zaželeno, rečemo tudi, da je prepovedano.

Premislimo sedaj o tem, ali lahko sestavimo vezje, ki si bo zapomnilo, ali je bila med našo odsotnostjo prekoračena neka mejna temperatura. Sestavimo električno vezje s komparatorjem napetosti, ki na izhodu daje stanje logične 1, kadar je temperatura čez mejno in stanje 0, če je pod njo. Izhod komparatorja vežimo na vhod S flip-flopa. Njegov drugi vhod R vežimo preko stikalo, tako da na njem ročno lahko vzpostavimo stanje 0 ali 1. Bodimo pozorni le na stanje enega izhoda, recimo Q . Naj bo začetna temperatura pod mejno vrednostjo ($S = 0$) in s stikalom postavimo vhod R v stanje 1. Izhod Q zavzame stanje 0 in ko stikalo preklonimo v stanje 0 ($R = 0, S = 0$), Q ohrani stanje 0. Če je temperatura ves čas pod mejno ($S = 0$), se ne bo nič spremenilo ($Q = 0$). Če pa se temperatura poviša nad mejno ($S = 1, R = 0$), izhod Q spremeni stanje v 1. Tudi če se temperatura znova zniža pod mejno vrednost ($S = 0, R = 0$), ostane izhod v stanju 1 ($Q = 1$). Stanje se ne spremeni, tudi če bi temperatura večkrat preseгла mejno vrednost.



Slika. Shema uporabe RS flip-flopa, ki zabeleži začasno prekoračitev izbrane in nastavljive temperature (datoteka simulacije ima ime dig-RSff-nor1.yka)

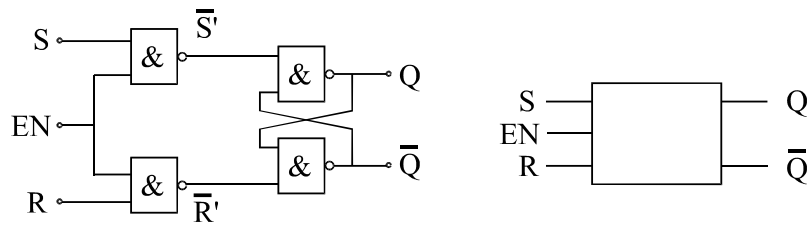
SINHRONI FLIP - FLOP (OZ. FLIP - FLOP Z VRATI)

Pri RS flip-flopih se sprememba stanj na izhodih takoj odraža v spremembi stanj na izhodih. Zato takim ff rečemo, da so asinhroni. Flip - flope z dodatnim priključkom - vrati imenujejo sinhroni ff. Pri njih prenos stanja na izhod pogojujejo vrata. To je pomembno povsod kjer moramo za več ff zagotoviti istočasen prenos stanj iz vhodov na izhode.

Statični flip-flop (angleško *gated RS latch*) dovoljuje prenos stanja iz vhoda na izhod kadar je na vratih določeno logično stanje. Dinamični flip-flop (angleško *RS flip-flop*) prenaša stanje iz vhoda na izhod v trenutku določene spremembe stanja na vratih.

STATIČNI FLIP-FLOP

Osnovna izvedba je RS flip-flop z dodatnimi dvojnimi vrati IN s po dvema vhodoma. Le če je stanje vhoda EN logična 1, se sprememba stanja na R ali S prenaša preko vrat IN na vhoda R' in S'.

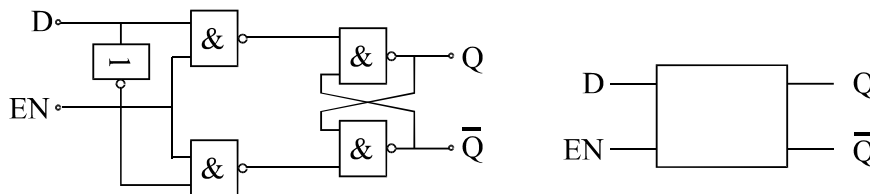


Slika. Shema statičnega flip-flopa in njegov simbol.

Dobimo torej RS flip-flop z vrati.

STATIČNI D FLIP-FLOP

Omenili smo že, da je stanje 1 1 pri RS flip-flopu 'prepovedano'. Taki kombinaciji se izognemo, če pred en vhod damo vrata NE. Dobimo D flip-flop (angleško *D latch*). Vhod je tako samo eden in dobi oznako D. Stanje se iz D prenaša na Q kadar je stanje EN logična 1, kadar pa je na EN logična 0, na izhodu ni spremembe (oznaka X v tabeli) ne glede na morebitne spremembe stanja na vhodu D.



Slika. Shema statičnega D flip-flopa in njegov simbol.

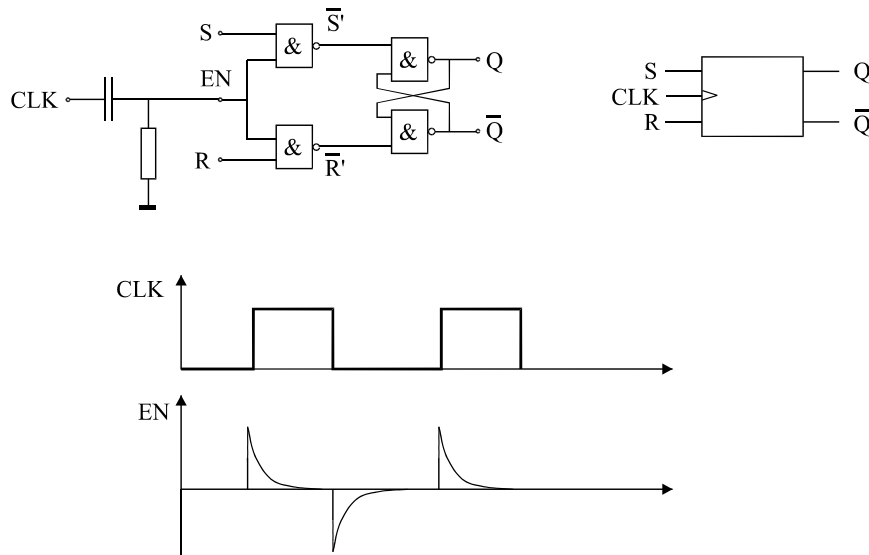
D	EN	Q	\bar{Q}
0	0	X	X
0	1	0	1
1	0	X	X
1	1	1	0

Statični D ff lahko torej sestavimo iz štirih osnovnih logičnih vrat NEIN in iz vrat NE.

DINAMIČNI FLIP-FLOP

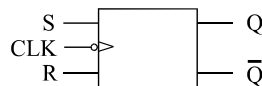
Dinamični flip-flop (angleško samo *flip-flop*) je glede na število priključkov podoben statičnemu flip-flopu, le da se stanje prenaša iz vhoda na izhod le v kratkem časovnem intervalu spremembe stanja na vratih iz 0 v 1 oz. pri nekaterih ff iz 1 v 0.

Da je namesto samega stanja na vhodu pomembna sprememba stanja dosežemo z vezjem za odvajanje (diferencialni člen). Po pozitivni spremembi na vhodu diferencialnega člena dobimo za kratek čas logično 1. Pri negativni spremembi je sicer na izhodu negativna napetost, ki pa predstavlja logično 0. Oznaka vrat pri dinamičnih ff je tako CP (angleško *clock pulse*) or CLK (angleško *clock*).



Slika. Shema dinamičnega flip-flopa, njegov simbol in časovni potek dveh signalov na vhodu.

Pri nekaterih ff se prenaša stanje iz vhoda na izhod pri spremembi stanja na vhodu CLK iz 1 v 0, kar na simbolu označuje krogec pri CLK.



Slika. Simbol dinamičnega flip-flopa z negativnim proženjem na vhodu CLK.

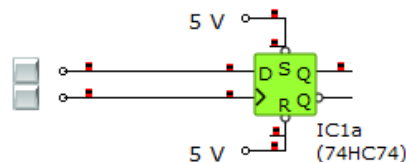
DINAMIČNI D FLIP-FLOP

Vezje za odvajanje je izpeljano iz statičnega flip-flopa. Stanje se iz D na Q prenaša bodisi pri spremembi CLK iz 0 v 1 (levo) ali iz 1 v 0 (na simbolu krogec pri CLK).



Slika. Simbol dinamičnega D flip-flopa s pozitivno spremembo proženja (levo) in negativnim proženjem (desno).

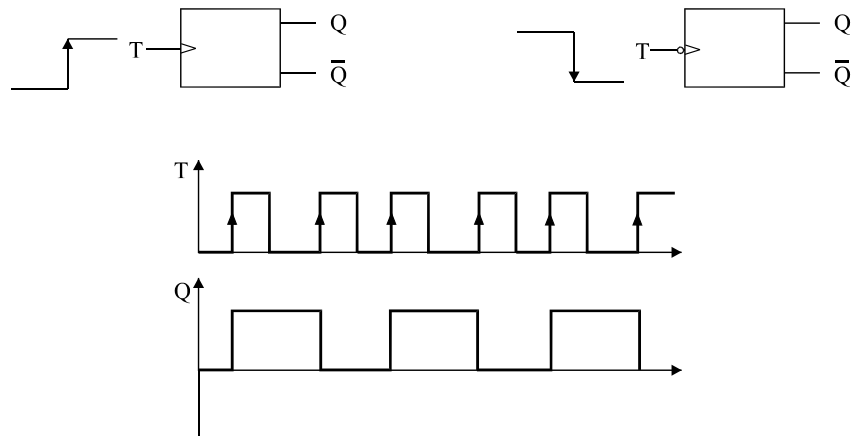
Obstajajo pa integrirana vezja, ki imajo poleg opisane funkcije še dva priključka za vzpostavitev stanja na izhodu (set/reset). Eno takih je 74HC74, katerega simulacijo omogoča tudi program Yenka.



Slika. Simulacija delovanja dinamičnega D ff (datoteka dig-Dff1.yka)

T FLIP-FLOP

Ima samo en vhod z oznako T (angl. *toggle flip-flop*). Stanje na izhodu se spremeni vsakič, kadar pride na T impulz. Prav tako sta dve možni izvedbi - do spremembe na izhodu pride pri pozitivni spremembi stanja na T (simbol nima krogca na vhodu T) ali pri negativni (simbol s krogcem).

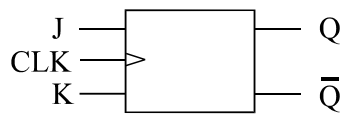


Slika. Shema dinamičnega flip-flopa, njegov simbol in časovni potek svih signalov na vhodu.

Očitno je, da je število impulzov na izhodu za pol manjše od števila na vhodu. Lahko bi rekli, da smo dobili delilnik frekvence. Če izhod prvega T flip-flopa vodimo na vhod naslednjega, je frekvenca 4 - krat manjša, naslednji T ff zmanjša frekvenco za 8-krat itd.

* JK FLIP-FLOP

Uporabimo ga lahko kot statični ff z vrati, D ff ali T ff - zato ga imenujemo tudi univerzalni flip-flop. Vhoda z oznako J in K imata podobno funkcijo kot R in S pri dinamičnem ff. Razlika pa je v tem, da je pri JK ff stanje 1 1 na vhodu dovoljeno.



JK flip-flop ima štiri načine delovanja:

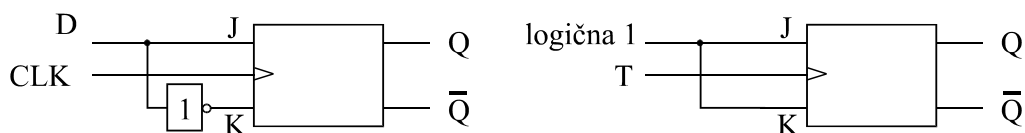
J je 0, K je 0: ko se CLK spremeni na 1, se na izhodu nič ne spremeni (stanje se ohranja)

J je 1, K je 0: ko se CLK spremeni na 1, dobi Q stanje 1 in \bar{Q} stanje 0 (reset)

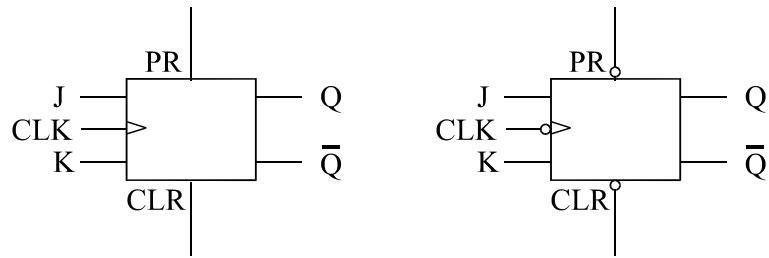
J je 0, K je 1: ko se CLK spremeni na 1, dobi Q stanje 0 in \bar{Q} stanje 1 (set)

J je 1, K je 1: ko se CLK spremeni na 1, se stanje na izhodu spremeni glede na prejšnje stanje

Zelo enostavno lahko uporabimo JK flip-flop kot dinamični D flip-flop ali T flip-flop.

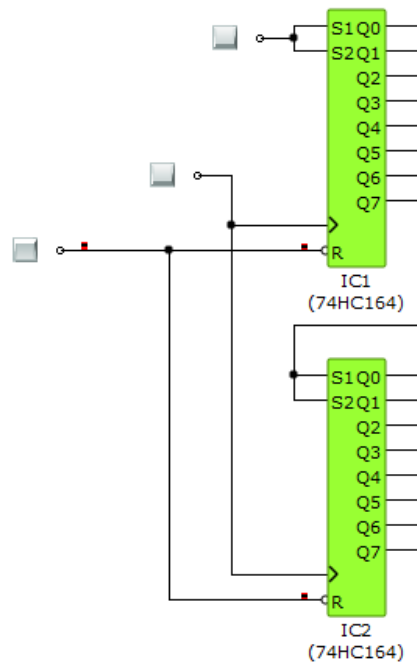


Slabost flip-flopov je, da ob priključitvi napajanja ne moremo vedeti, kakšno stanje bodo zavzeli izhodi. Zato ima večina izvedb tudi enega ali dva priključka za nekakšno inicializacijo. Priključek z oznako PR (angleško *preset*) služi prednastavitvi logične 1 na izhodu, priključek CLR (angleško *clear*) pa brisanju - na izhodu dobimo stanje 0. Vhoda PR in CLR imata prednost pred stanji na vhodu. Če je torej stanje PR enako 1, je stanje Q enako 1 ne glede na stanja na J in K. Podobno velja tudi za vhod CLR, stanje 1 postavi stanje 0 na Q. Sočasnost PR je 1 in CLR je 1 ni dovoljena. Večina JK flip-flopov v integriranih vezjih ima negirana PR in CLR. Logično 1 na Q dobimo s trenutnim prehodom v stanje 0 vhoda PR, logično 0 na Q pa s trenutni prehodom na logično 0 vhoda CLR; prepovedano je stanje 0 na PR in CLR.



POMIKALNI REGISTER

Register je spominska enota za več bitov. Pogosto jih je osem, da vanj lahko shranimo zlog (angleško *byte*). Pomikalni register sestavlja več kaskadno vezanih flip-flopov. Kaskadna vezava pomeni, da imamo nek začetni vhodni ff, njegov izhod vodimo na vhod naslednjega ff itd. Več kaskadno vezanih ff ima tudi skupne kontrolne vhode. Najosnovnejša kontrolna vhoda imata oznaki CLR in CLK. CLR (angl. clear, brisanje) vse izhode postavi na 0. Vhod CLK pa povzroči prenose podatka iz enega flip-flopa na naslednjega v kaskadi.



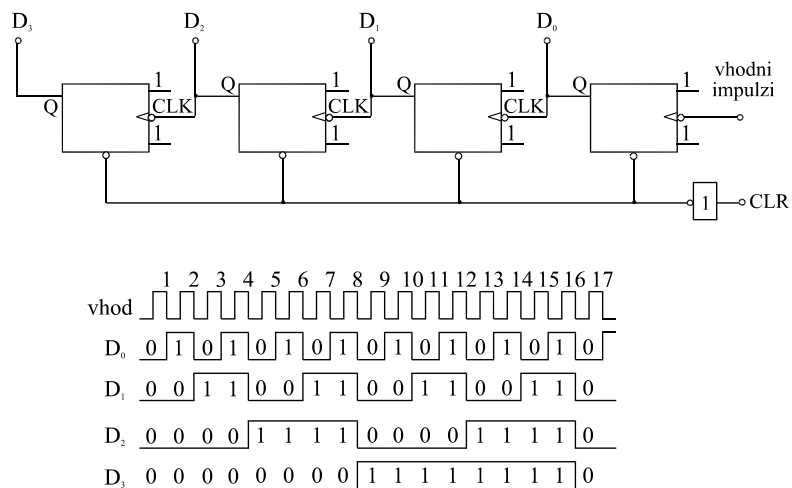
Slika. Simulacija delovanja pomikalnega registra, datoteka dig-shift_reg.yka.

ŠTEVNIKI

Števniki (večinoma se uporablja izraz *števec*) je splošno digitalno vezje narejeno iz T flip-flopov, ki štejejo impulze na njihovem vhodu. Trenutno število pulzov lahko ugotovimo kadarkoli, saj štejejo sproti. Vhodni impulzi so lahko periodični ali pa tudi ne.

Razdelimo jih v dve splošni skupini - asinhronski in sinhronski števniki.

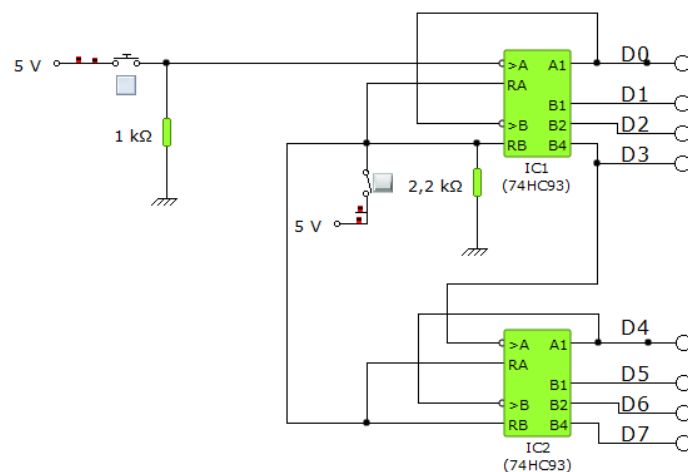
ASINHRONSKI ŠTEVNIKI



Slika. Blokova shema delovanja asinhronnega števnik.

To je najbolj osnovna oblika števnikov. JK flip-flopi so uporabljeni kot T flip-flopi. Impulze, ki jih štejemo, vodimo na CLK prvega flip-flopa. Izhod Q prvega flip-flopa je vezan na CLK naslednjega, itd. S štirimi flip-flopi lahko v naravni dvojiški kodi štejemo od 0 do 15, v splošnem z n flip flopi štejemo da 2^n-1 .

Za števnik na sliki simulacije velja, da se stanje na izhodu spremeni pri prehodu iz 1 v 0 na vhodu A. Najnižji bit predstavlja prvi flip-flop (D0), najvišjega pa zadnji ff (D7). Ko pride na vhod 256. impulz, stanja vseh flip-flopov postanejo 0 in štetje se začne znova.



Slika. Simulacija delovanja asinhronnega števnik, datoteka dig-stevnik1.yka

Obstajajo tudi števnik, ki štejejo navzdol. Stanju 0 0 0 0 torej sledi 1 1 1 1 (=15), 1 1 1 0 (=14) itd.

BCD ŠTEVNIKI

BCD (angleško *binary coded decimal*) štejejo od 0 (0 0 0 0) do 9 (1 0 0 1), po desetem impulzu spet sledi 0. Na štirje bite za vsako dekada lahko priključimo displej...

SINHRONSKI ŠTEVNIKI

Težava asinhronskih števnikov je, da vsak flip-flop ustvari določeno zakasnitev v odzivu. Zaradi kaskadne vezave se zakasnitve kopičijo in tako je njihova uporabnost pri večbitnih sistemih frekvenčno

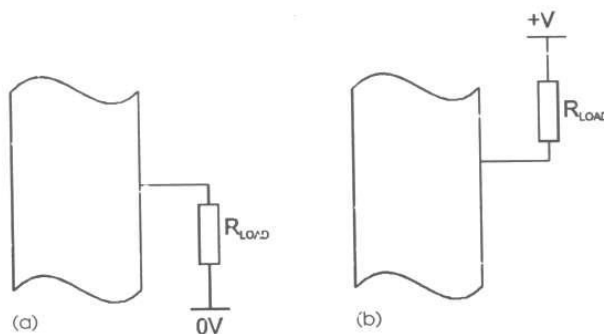
omejena. Pri sinhronskih števniki vhodni signal proži vse flip-flope hkrati, zato pa je njihova zgradbo bolj zapletena.

UPORABA MIKROKRMILNIKOV

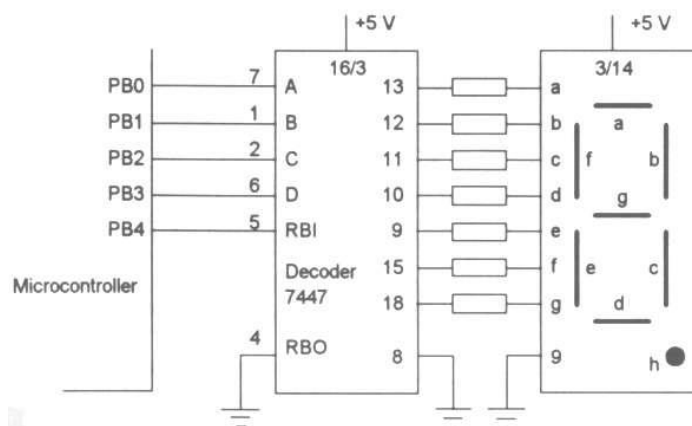
IZHODI

Breme lahko priključimo na izhod na dva načina, iz izbranega bita proti V_{CC} ali proti GND. Nekateri V prvem primeru tok teče v MK (output sink current), v drugem pa iz MK (output source current). Za oba tokova veljajo omejitve glede na velikost. Pri nekaterih MK sta tokova različna, takrat je maksimalen tok v MK večji (recimo nekaj mA) kot tok ven iz MK (lahko le nekaj $100 \mu A$).

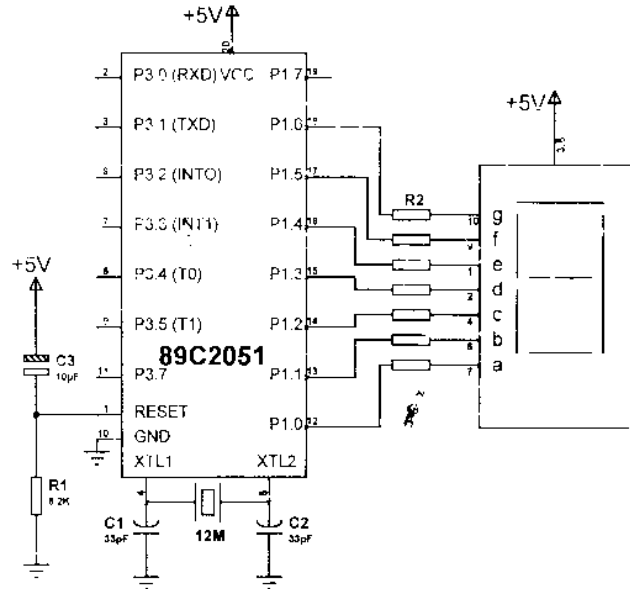
LED vežemo raje preko upora na V_{CC} kot na GND.



Slika 4. Dva načina priključitve bremena na izhod

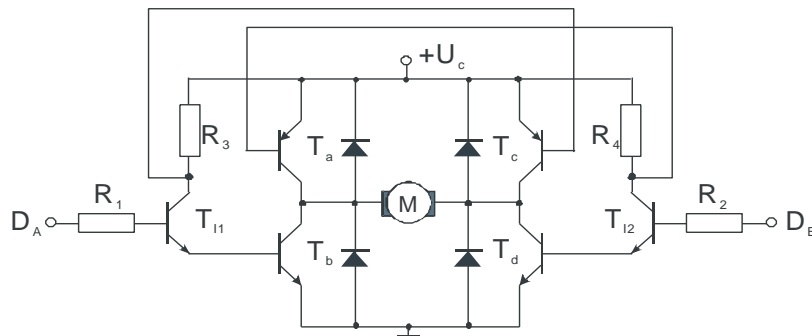


Slika 5. Povezava MK, dekoderja in 7-segmentnega prikazovalnika [6].



Neposredna priključitev 7-segmentnega prikazovalnika na MK [2]

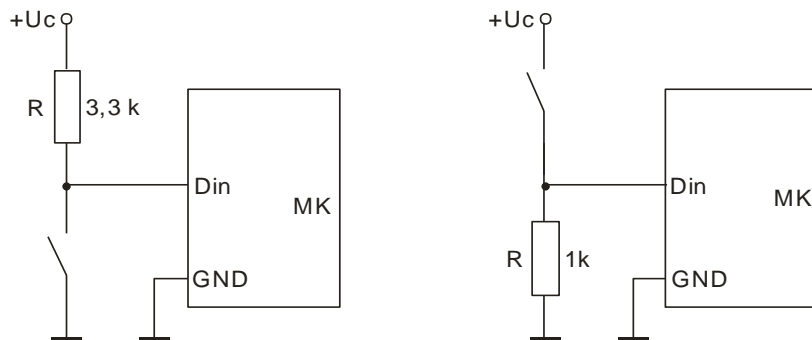
Za krmiljenje DC motorja z možnostjo vrtenja v obe smeri in zaustavitve sta potrebna dva bita. Poleg uporabe relejev in posebnih integriranih vezij, je možno tudi krmiljenje samo s tranzistorji.



Slika 7. Krmiljenje enosmernega motorja z dvema bitoma

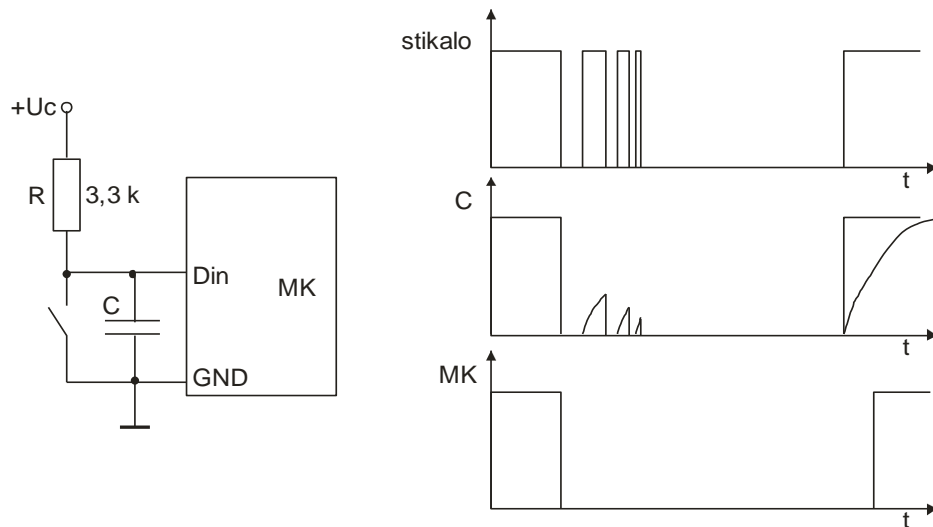
VHODI

Najbolj tipična je priključitev stikala. Najbolj zanesljiv je vezava, kjer poleg stikala uporabimo še upor, saj nepriključen vhod večinoma zavzame stanje 1.



Slika 8. Dva načina vezave stikal na vhodu MK

Pri vklopu stikala pride do prehodnih stikov, kar lahko povzroča težave pri štetju. Rešitev je primerna izbira pogostosti preverjanja stanja stikala ali tako, da dodamo kondenzator.



Slika 9. Elektronsko preprečitev prehodnih stikov pri stikalu

VHODI IN IZHODI S POSEBNIMI FUNKCIJAMI

Vhodi in izhodi s posebnimi funkcijami se dosegljivi preko istih priključkov kot vzporedni I/O (porti). Način delovanja posameznega priključka je mogoče programirati.

ATmega16 ima tako štiri izhode s pulzno širinsko modulacijo (PWM) na pinih PB3, PD4, PD5 in PD7. Ima tudi osem analognih vhodov na pinih PA0 do PA7 (označeni tudi ADC0 do ADC7). Analogni komparator je dostopen preko pinov PB3 (negativni vhod) in PB4 (pozitivni vhod), prav tako pa služi kot negativni komparator katerikoli vhod ADC0 do ADC7.

Digitalno analogni pretvorniki (DAC) so redkeje vgrajeni v mikrokrmilnike.

V kolikor AD in DA pretvornika ni v mikrokrmilniku ali lastnosti niso ustrezne ali ne moremo žrtvovati I/O pinov, uporabimo integrirana vezja za priključitev AD oz. DA pretvornika na mikrokrmilnik. AD in DA pretvorniki so lahko povezani z MK vzporedno, lahko pa tudi serijsko preko enega od standardnih komunikacijskih protokolov. DA pretvornik lahko realiziramo tudi preko frekvenčno napetostnega pretvornika, AD pa preko napetostno frekvenčnega pretvornika. Tipično integrirano vezje za V-F in F-V pretvornik je LM331.5

PULZNO ŠIRINSKA MODULACIJA (PWM)

PWM signal je mogoče generirati programsko, za kar obstajajo različne možnosti. Temelj vsej je znana frekvenca ure (clock). Vsak ukaz mikrokrmilnika traja znano celo število period ure ($t_{OSC}=1/f_{OSC}$). Menjavanje stanja 0 in 1 kominiramo z ukazom za čakanje (NOP), ko mikroprocesor določeno število stanj t_{CLK} ne dela nič. Nekoliko bolj prikladen način programiranja PWM signala temelji na uporabi časovnikov/števnikov in programskih prekinitev.

Precej mikrokrmilnikov omogoča generacijo PWM signala brez stalnega programskega nadzora. Lahko bi rekli, da so ti PWM izhodi elektronski (hardverski). V tem primeru je nosilna frekvenca signala od 100 Hz do nekaj 10 kHz z ločljivostjo 1/256. 8-bitni števec ponavljajoče šteje od 0 do 255 in trenutno vrednost primerja s podatkom zapisanim v določenem registru (označimo ga z PWM0). Dokler je stanje števca manjše od tega števila v registru, generira na izhodnu PWM signala stanje 0, ko pa je števec

preštel do števila večjega ali enakega od števila v registru, je na izhodu stanje 1. Tudi nosilna frekvenca f_{PWM} je zapisana v posebnem registru (označimo ga z PWMP). Primer izračuna nosilne frekvence podaja enačba:

$$f_{PWM} = \frac{f_{OSC}}{(2 \cdot 255 (1 + PWMP))}$$

Primer programa v zbirnem jeziku:

```
mov PWMP, #22 ; določitev nosilne frekvence
mov PWM0, #63 ; določitev razmerja med stanjem 1 in 0
```

Pri f_{OSC} je 12 MHz da vrednost 22 nosilno frekvenco 1 kHz. Vrednost 63 določi razmerje 1:3 za trajanje stanja 1 in 0.

PWM signal je moče uporabiti tudi namesto DA pretvornika. Na izhod damo RC člen kot nizko prepustno sito, ki mu sledi sledilnik napetosti, če potrebujemo večje tokove pa tudi ojačevalnik moči.

KOMUNIKACIJSKI VMESNIKI

Komunikacijski vmesniki so namenjeni povezovanju med samimi mikrokontrolerji, med MK in drugimi kompleksnimi napravami (recimo PC) ter med MK in zunanjimi integiranimi vezji: pomnilnikom, ADC, DAC, itd.

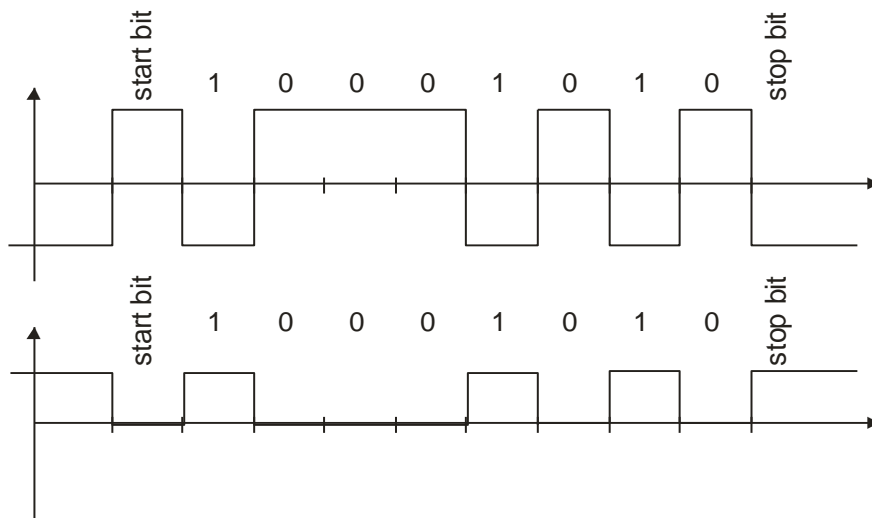
SERIJSKI PROTOKOL UART

Serijski vmesnik z oznako UART je zelo razširjen pri uporabi mikrokontrolerjev. Za komunikacijo med PC-ji in zunanjimi napravami ga je izpodrinila USB (universal serial bus) komunikacija. Kljub temu večina MK podpira UART, medtem ko samo novejši podpirajo tudi USB. Ker je gradnja USB sistemov precej bolj zahtevna, so razvili integrirana vezja, ki predstavljajo nekakšen pretvornik iz UART na USB (na strani PC-ja je treba namestiti dodaten programski gonilnik).

UART kratica pomeni Universal Asynchronous Receive Transmit. V osnovi so za povezavo med dvema sistemom potrebni trije vodniki. Oddajanje podatkov označujemo s Tx (Transmit), sprejemanje pa z Rx (Receive). Tako je Tx ene naprave povezan z Rx druge naprave in obratno. Obe napravi povezuje še GND. Logična 1 je napetost med -3 V in -25 V, logična 0 pa med +3 V in +25 V. Podatek sestavljajo: start bit, 5-8 podatkovnih bitov, bit parnosti (parity) in stop bit. Parity bit ni vedno prisoten (ni obvezen).

Frekvenca prenosa mora biti med dvema napravama skladna. Enota je bps in pomeni število bitov na sekundo (bits per second), angleško rečejo temu "baud rate". Možno je nastaviti komunikacijsko hitrost sledeč določeni lestvici: 300 bps, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400,

Na strani MK daje podporo UART komunikaciji pina z oznakama RXD in TXD, ki sta dostopna preko dveh splošnih pinov. Pri ATmega16 sta to pina PD0 (RXD) in PD1 (TXD). V tem primeru je podatek oblikovan podobno kot pri RS232 standardu, le da imata logična 1 in 0 običajne napetosti (recimo okoli 5 V za 1 in okoli 0 V za 0). Za pretvorbo v RS232 standard je treba logično 1 spremeniti v negativno napetost, logično 0 (okoli 0V) pa v pozitivno napetost.



Slika. Časovni potek pri pošiljanju znaka 'Q'. Zgornji graf prikazuje časovni potek pri skladen s standardom RS232, spodnji pa UART signal na strani MK

* SERIJSKI PERIFERNI VMESNIK

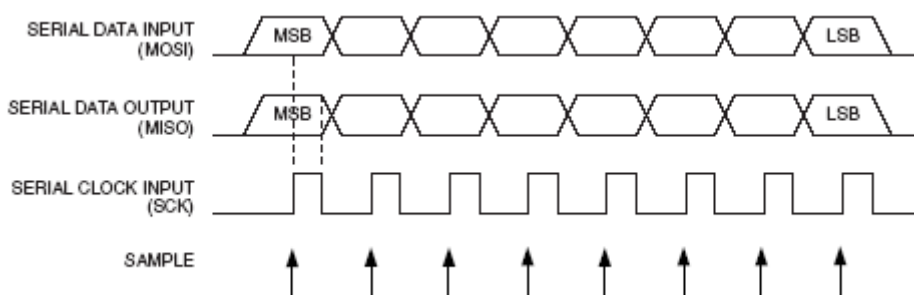
SPI – serial peripheral interface je sinhroni serijski protokol s tremi nujnimi povezavami in eno opcijsko. Komunikacija določa, da je ena naprava gospodar (master), druga pa suženj (slave). MK je lahko tako v vlogi master kot v vlogi slave.

MOSI – master out slave in je izhod za master in vhod za slave.

MISO – master in slave out je vhod za master in izhod za slave enoto.

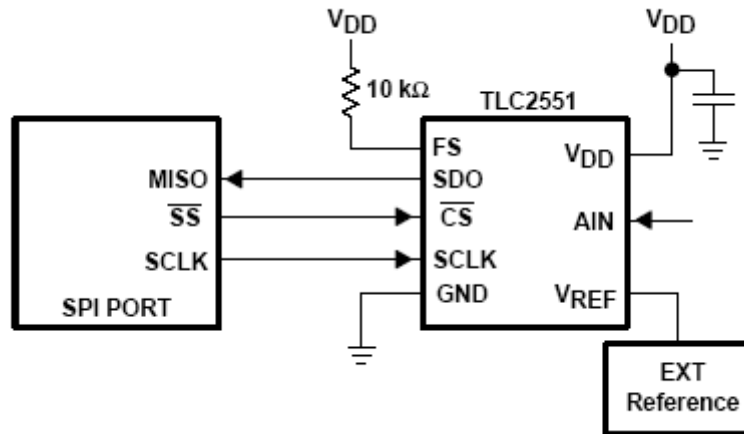
SPICLK je izhod za master in vhod za slave in določa takt prenosa podatkov.

\overline{SS} – slave select je izhod na master in ni nujno v uporabi (je opcijski). Preko njega slave ugotovi, ali ga je master izbral. Pri povezavi med dvema MK, je MOSI povezan z MOSI, MISO z MISO in SPICLK z SPICLK. Izhod master MK je opcijsko povezan z \overline{SS} .



Slika. Časovni potek SPI protokola.

SPI protokol je mogoče uporabiti tudi za povezavo s serijskim AD pretvornikom (recimo TLC2551). ADC posreduje podatke serijsko preko digitalnega izhoda (SDO) kadar je \overline{SS} v stanju 0. Takt določa SCLK.



Slika. SPI povezava med MK in AD pretvornikom.

* I²C

I²C ali IIC (Inter Integrated Circuit bus). Je serijska povezava preko dveh žic. Sestavljata ga SDA (serial data) in SVL (serial clock). Obes sta dvosmerni. Vsaka naprava (recimo IC) ima svoj unikaten naslov, preko katerega ve, da ga je master izbral. Naslov se tako kot podatek posreduje serijsko.