

Stanko Paunović

ELEKTRONIČKI SKLOPOVI

**Udžbenik za predmet elektronički sklopovi za zanimanja:
elektrotehničar, tehničar za elektrostrojarstvo, tehničar za elektroenergetiku, zrakoplovni
tehničar IRE, tehničar za finomehaniku, elektromehaničar, elektromonter,
elektroinstalater i autoelektričar**

4. izdanje

Zagreb, 2005.

© Stanko Paunović, dipl. ing., 2000.

Urednik

Prof. dr. sc. Neven Elezović

Recenzenti

Radojka Bubić, dipl. ing.

Grgur Gudelj, prof.

Velibor Ravlić, dipl. ing.

Mr. sc. Aleksandar Szabo

Lektorica

Anđelka Zdjelar, prof.

Design ovitka

Julija Vojković

Nakladnik

ELEMENT, Zagreb, Menčetićeva 2

tel. 01/6008-700, 6008-701

fax 01/6008-799

<http://www.element.hr>

e-mail: element@element.hr

Tisak

Tisak Trebotić, Zagreb

PREDGOVOR

Ovaj udžbenik namijenjen je poučavanju iz predmeta **ELEKTRONIČKI SKLOPOVI** koji je u nastavnom planu i programu obrazovanja za zanimanja **elektrotehničar, tehničar za elektroenergetiku, tehničar za elektrostrojarstvo, tehničar za električne strojeve s primijenjenim računalstvom, zrakoplovni tehničar IRE, tehničar za finomehaniku, elektromehaničar i elektromonter**. Taj predmet zastupljen je u obveznom dijelu plana i programa za zanimanja elektrotehničar, tehničar za elektroenergetiku, tehničar za elektrostrojarstvo, tehničar za električne strojeve s primijenjenim računalstvom, elektromehaničar i elektromonter, s dva sata nastave na tjedan, odnosno na godinu sa sedamdeset sati u drugom, odnosno trećem razredu, a u zanimanju zrakoplovni tehničar IRE s jednako toliko sati u 3. i 4. razredu. Od ukupnoga broja sati nastave toga predmeta obvezno je najmanje osamnaest sati ostvariti praktičnim radom u laboratoriju. Taj broj sati nastave elektroničkih sklopova mogu škole povećati putem izborne nastave, obrađujući pojedine teme detaljnije ili dodajući nove. U programu za zanimanje tehničar za finomehaniku taj se predmet izučava u 3. razredu s četiri sata nastave na tjedan od čega je obvezno najmanje jedan sat na tjedan (na godinu trideset i pet sati) ostvariti laboratorijskim vježbama. Osim toga sadržaj udžbenika odgovara sadržaju predmeta **ELEKTRONIKA I UPRAVLJANJE** koji je u nastavnom planu i programa za zanimanja u obrtništvu: **elektroinstalater, elektromehaničar i autoelektričar**.

Opseg i način izlaganja gradiva u ovom udžbeniku takav je da može udovoljiti potrebama obveznog i izbornoga dijela nastave elektroničkih sklopova u svim navedenim programima. S obzirom na manje razlike u sadržaju predmeta te razlike u raspoloživu vremenu za nastavu u programima za spomenuta zanimanja, izbor građe za obradu bit će različit. U nekim zanimanjima bit će potrebno obraditi sve sadržaje, a u nekima će se manji broj tema moći izostaviti iz proučavanja.

Građa udžbenika podijeljena je u 15 poglavlja. Na kraju je udžbenika dodatak, popis literature i kazalo. U dodatku su: označivanje otpornika i kondenzatora, normirane vrijednosti otpora otpornika i kapaciteta kondenzatora, označivanje poluvodičkih komponenata, izvodi iz tvorničkih podataka za elektroničke komponente potrebni za izvođenje predviđenih laboratorijskih vježbi, ispitivanje ispravnosti poluvodičkih elemenata i popis potrebnog pribora i instrumenata za izvođenje laboratorijskih vježbi. Zbog cjelovitosti teksta, na početku 2., 3., 4., 9. i 10. poglavlja ukratko su opisana svojstva elektroničkih elemenata bez detaljnije fizikalne analize budući da je to sadržaj predmeta **ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI I KOMPONENTE**.

Poglavlja udžbenika sastoje se od opisa izvedbe, rada, svojstava i primjene pojedinih sklopova, zadataka za praktičan laboratorijski rad i pitanja i zadataka za ponavljanje i provjeru znanja.

Opis rada i svojstava sklopova dan je kao prikaz ispitivanja i mjerenja (pokusa) obavljenih na stvarnim sklopovima u laboratoriju ili s pomoću simulacijskog računalnoga programa *Electronics Workbench* kojim raspolažu elektrotehničke škole. Stoga se u izlaganju gradiva upotrebljavaju simboli elemenata i komponenata prema programu *Electronics Workbench*. Ovakav pristup omogućava nastavniku da svako izlaganje popрати pokazivanjem djelovanja sklopa čime će učeniku učiniti izlaganje bližim i prihvatljivijim. Isto vrijedi i za učenike pri samostalnom radu na svladavanju pojedinoga gradiva. Pri tumačenju gradiva naglasak je na fizikalnoj slici rada i svojstava sklopova. Matematički aparat sveden je na najmanju potrebnu mjeru: upotrebljava se kad je neophodno za samo fizikalno razumijevanje pojava i rada sklopova ili za neposrednu praktičnu primjenu.

Pitanja i zadaci za laboratorijske vježbe sastoje se od pripremnoga dijela, praktičnoga dijela i dijela za zaključke. Pitanja i zadaci iz pripremnog dijela služe za stjecanje i obnavljanje neophodnog znanja i prikupljanje podataka koji su potrebni prije pristupa samom izvođenju vježbe. Taj dio treba izraditi prije dolaska na rad u laboratorij. Praktični dio, tj. zadaci za neposredan praktičan rad u laboratoriju (spojite, izmjerite, prikažite rezultate, izračunajte na temelju izmjerenih vrijednosti), sastoji se od većega broja pokusa. Odabir vježbi, odnosno pokusa, ovisi o sadržaju i opsegu proučavanja elektroničkih sklopova u svakom od spomenutih programa za zanimanja i treba biti takav da pokrije svako područje unutar nastavnog predmeta.

Pokusi na satu i samostalne vježbe u laboratoriju mogu se izvoditi uz pomoć laboratorijske opreme ili simulacijom s pomoću računalnih programa (Electronics Workbench, Multisim 7, Crocodile Technology).

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja traže izvođenje odgovarajućih zaključaka na temelju opažanja, izmjerenih ili računski dobivenih vrijednosti, odnosno rješavanje zadataka na osnovi gradiva izloženoga u udžbeniku te znanja i iskustva stečenoga laboratorijskim vježbama.

Zadaci za praktičan rad u laboratoriju provjeravani su uz pomoć računalnoga aplikacijskog programa *ELECTRONICS WORKBENCH* te uz pomoć učila OP-AMP DESIGNER OA-2, proizvod tvrtke E&L te učila DE-01 i DE-02 tvrtke ELDING.

U radu na konačnom oblikovanju teksta udžbenika i otklanjanju pogrešaka pomogli su mi recenzenti Radojka Bubić, dipl. ing., Grgur Gudelj, prof., Velibor Ravlić, dipl. ing. i mr. sc. Aleksandar Szabo. Svojim sugestijama pripomogli su da objašnjenja i jezik udžbenika budu jasniji i pristupačniji korisniku. Svima koji su mi pomogli u radu na udžbeniku ovim putem najtoplije zahvaljujem.

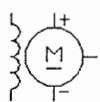
U Zagrebu, 2005.

Autor

SADRŽAJ

	Str		Str.
1. Elektronika u sustavima za mjerenje, upravljanje i zaštitu uređaja i postrojenja	1	7. Oscilatori	81
2. Poluvodičke diode		7.1. Oscilatori sinusoidnoga napona	82
2.1. Svojstva dioda	3	7.2. Oscilatori nesinusoidnoga napona	86
2.2. Ispravljački sklopovi	4	Zadaci za laboratorijske vježbe	88
2.3. Diodni ograničavači i restauratori	6	Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru	90
2.4. Zenerova dioda	8	znanja	
Zadaci za laboratorijske vježbe	10	8. Stabilizator napona	91
Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru	12	8.1. Stabilizatori napona s tranzistorima	92
znanja	14	8.2. Integrirane izvedbe stabilizatora	94
3. Osnovni sklopovi s bipolarnim tranzistorima	17	Zadaci za laboratorijske vježbe	95
3.1. Svojstva bipolarnih tranzistora	18	Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru	97
3.2. Osnovni spojevi pojačala s bipolarnim tranzistorima	23	znanja	
3.2. Bipolarni tranzistor kao sklopka	29	9. Sklopovi s tiristorima i jednospojnim tranzistorom	99
Zadaci za laboratorijske vježbe	31	9.1. Tiristori	100
Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru	34	9.2. Jednospojni tranzistor	107
znanja	37	Zadaci za laboratorijske vježbe	109
4. Osnovni sklopovi s unipolarnim tranzistorima	38	Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru	111
4.1. Spojni tranzistori s efektom polja	41	znanja	
4.2. Tranzistori s efektom polja i izoliranim zasunom	46	10. Optoelektronički elementi	113
4.3. Osnovni spojevi pojačala s unipolarnim tranzistorima	48	10.1. Fotodetektori	114
4.4. Unipolarni tranzistor kao sklopka	50	10.2. Svjetleće diode	120
Zadaci za laboratorijske vježbe	52	10.3. Fotovezni elementi	121
Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru		Zadaci za laboratorijske vježbe	123
znanja		Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru	125
5. Pojačala		znanja	
5.1. Darlingtonov spoj	53	11. Osnovni digitalni sklopovi	127
5.2. Diferencijsko pojačalo	54	11.1. Analogni i digitalni signali	128
5.3. Pojačala snage	55	11.2. Osnovni logički sklopovi	132
Zadaci za laboratorijske vježbe	58	11.3. Skupine integriranih digitalnih sklopova	139
Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru	62	Zadaci za laboratorijske vježbe	144
znanja	64	Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru	145
6. Operacijsko pojačalo		znanja	
6.1. Osnovne osobine operacijskoga pojačala	65	12. Multivibratori u digitalnoj elektronici	147
6.2. Sklopovi s operacijskim pojačalom	66	12.1. Bistabilni multivibratori	148
Zadaci za laboratorijske vježbe	69	12.2. Monostabilni multivibratori	152
Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru	74	12.3. Astabilni multivibratori	154
znanja	78	12.4. Vremenski sklop	156
		Zadaci za laboratorijske vježbe	158
		Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru	162
		znanja	

	Str.		Str.
13. Registri, brojila i memorije	165	15. Digitalno upravljanje	193
12.1. Registri	166	15.1. DA i AD pretvorba	194
13.2. Brojila	170	15.1. Osnovna organizacija i način rada	202
13.3. Memorije	173	mikroračunala	
Zadaci za laboratorijske vježbe	177	Zadaci za laboratorijske vježbe	208
Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja	178	Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja	209
14. Složeni logički sklopovi	179	Dodatak	211
14.1. Sklopovi za kodiranje i dekodiranje	180	A) Označivanje otpornika	212
14.2. Upravljački sklopovi pokazivača	183	B) Označivanje kondenzatora	213
14.3. Sklopovi za selektiranje i demultipleksiranje	186	C) Normirane vrijednosti otpora otpornika i kapaciteta kondenzatora	214
14.4. Programirljive digitalne komponente	188	D) Označivanje elektroničkih poluvodičkih komponenata	215
Zadaci za laboratorijske vježbe	191	E) Izvodi iz tvorničkih podataka za poluvodičke elektroničke komponente	217
Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja	192	F) Ispitivanje ispravnosti poluvodičkih elemenata	229
		Kazalo	233
		Literatura	237



1. ELEKTRONIKA U SUSTAVIMA ZA MJERENJE, UPRAVLJANJE I ZAŠTITU UREĐAJA I POSTROJENJA

Počeci razvoja i primjene elektronike povezuju se s razvojem radiotehnike. Postupno elektronika ima sve veću primjenu u industriji i ostalim područjima tehnike. Osobito se primjena elektronike širi sredinom dvadesetoga stoljeća razvojem poluvodičke tehnike, prvo pronalaskom tranzistora a zatim pojavom sve većeg broja različitih poluvodičkih elemenata i integriranih poluvodičkih sklopova. Danas je uloga elektronike, nadasve digitalne, u svim područjima tehnike nezaobilazna.

Stoga je nužno da svaki elektrotehničar spozna temeljna znanja iz elektroničkih analognih i digitalnih sklopova kako bi s potpunim razumijevanjem mogao pratiti njihovo djelovanje u sustavima različitih mjerenja, upravljanja i zaštite uređaja i postrojenja.

U ovome, uvodnom, poglavlju navedeni su osnovni pojmovi iz elektronike te pokazan jednostavan primjer sustava u kojemu su primijenjeni sklopovi koji se detaljnije razmatraju u sljedećim poglavljima.

Osnovni pojmovi i sistematizacija

Elektronika je grana znanosti i tehnike koja obuhvaća izučavanje i primjenu pojava povezanih s gibanjem elektrona i električki nabijenih čestica u vakuumu, plinovima, tekućinama i poluvodičima koje se ostvaruju u elementima elektroničkih uređaja (*Tehnička enciklopedija 4*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža).

Ovisno o području u kojem elektronički sklopovi, tj. elektronika nalazi primjenu upotrebljavaju se nazivi informacijska elektronika i energetska elektronika. **Informacijska elektronika** bavi se dobivanjem, pretvorbom, obradom i prijenosom signala koji sadrži informaciju (radiokomunikacije i telekomunikacije, mjerna tehnika, računska tehnika). **Energetska elektronika** je područje elektronike koje se bavi elementima i sklopovima u području proizvodnje, prijenosa i razdiobe električne energije.

Prema karakteru električnog signala može se govoriti o analognoj i digitalnoj elektronici. U **analognoj elektronici** iznos signala koji sadrži informaciju može imati bilo koju vrijednost između dviju krajnjih. U **digitalnoj elektronici** iznos signala ima jednu od dvije međusobno dovoljno različite veličine.

Uz te podjele, s kojima se najčešće susrećemo, javljaju se i različiti drugi pojmovi i podjele koje proizlaze iz različitih područja primjene. Elementi i sklopovi koji se proizvode masovno i proizvedeni su za rad u uvjetima prihvatljivim za boravak ljudi, svrstavaju se u **potrošačku elektroniku** (engl. consumer, commercial). Jednima se traži da uz određenu kvalitetu utvrđenu normama imaju što nižu cijenu. Elementi i sklopovi **profesionalne elektronike** (engl. professional, military) predviđeni su za rad u težim uvjetima pa njihova pouzdanost i trajnost moraju udovoljiti znatno višim normama.

Elektronički uređaji sastavljeni su od elektroničkih sklopova, a elektronički sklopovi od elektroničkih elemenata međusobno povezanih u strujne krugove.

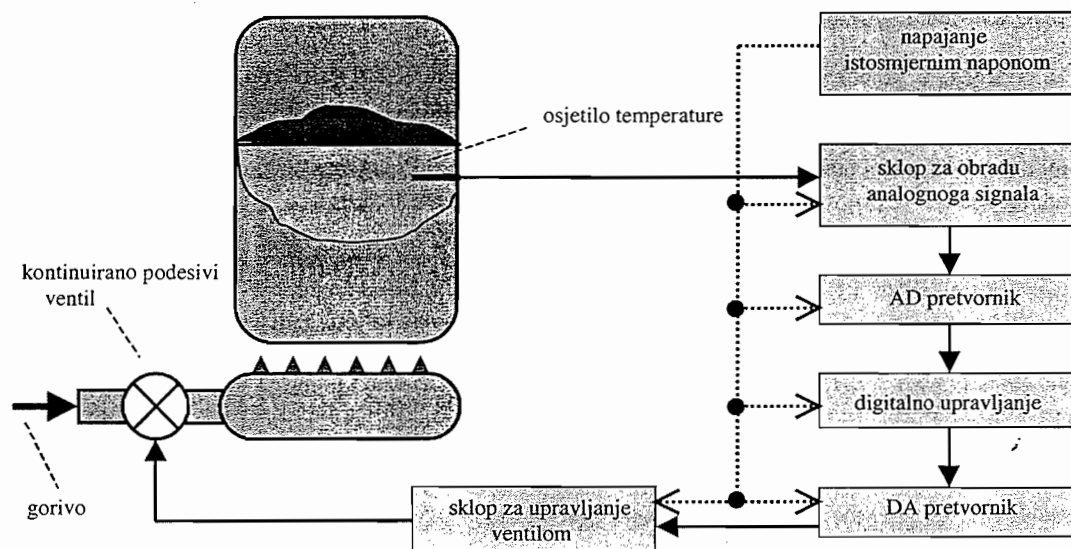
Elektronički elementi su sastavni dijelovi elektroničkih sklopova. Dijele se na pasivne i aktivne. **Aktivni elektronički elementi** mogu se podijeliti na dvije skupine: **elektronske cijevi** i **poluvodičke elemente**. U elektronskim cijevima nosioci su struje elektroni koji se gibaju u vakuumu ili plinovima. Njihova uporaba je u današnje vrijeme znatno smanjena. Najčešće upotrebljavani element iz te skupine je katodna cijev osciloskopa. Pretežno se u elektroničkim sklopovima danas nalaze poluvodički elementi kod kojih se protjecanje struje ostvaruje gibanjem nosilaca naboja (elektrona i šupljina) u krutim tvarima. **Pasivni elektronički elementi** su otpornici, kondenzatori, zavojnice i transformatori. Djeluju tako da na njima nastaje pad napona, odnosno uvjetuju međusobne odnose električnih veličina.

Elektronički sklopovi složeni su strujni krugovi koji se sastoje od elektroničkih elemenata i obavljaju neku funkciju (npr. generiranje signala, pojačanje signala itd.). Sklopovi mogu biti građeni od pojedinačnih (diskretnih) elemenata ili u integriranoj izvedbi kod koje su svi elementi sklopa smješteni u jedno kućište. S obzirom na međusobni razmještaj i povezanost elemenata, integrirani sklopovi mogu biti hibridni i monolitni. Kod hibridnih integriranih sklopova grupe elemenata izvedene su na posebnim dijelovima kristala smještenim na podlogu od izolatora. Grupe elemenata međusobno su povezane vrlo tankim žicama i sve zatvorene u jednom kućištu. U monolitnim integriranim sklopovima svi elementi izvedeni su na jednoj poluvodičkoj podlozi u zajedničkom kućištu.

Pojedinačni elektronički elementi ili integrirane izvedbe sklopova nazivaju se **elektroničke komponente**. To su najmanji odvojivi sastavni dijelovi elektroničkog sklopa i uređaja.

Primjer sustava za upravljanje

Na slici 1.1. prikazana je blok-shema sustava za regulaciju temperature u tehnološkom procesu. Temperaturno osjetilo daje podatak o temperaturi promatranoga sredstva u tehnološkom procesu. Osjetilo je ujedno pretvornik temperature u naponski signal čija je veličina proporcionalna iznosu temperature. Taj signal, nakon obrade (pojačanje, linearizacija karakteristike osjetila), pretvara se s pomoću analognog-digitalnog pretvornika u digitalni oblik. Digitalni signal dovodi se na sklop za digitalno upravljanje u kojemu se uspoređuje sa zadanom vrijednošću. Izlaz iz digitalnog upravljačkog sklopa pretvara se u analogni signal koji se dovodi na sklop za upravljanje ventilom koji regulira dovod goriva u plamenik u skladu s potrebnom temperaturom. Tijek signala prikazan je na blok-shemi punom crtom. Potreban napon za djelovanje svih spomenutih elektroničkih sklopova osigurava izvor stabiliziranih napona. Razdioba napona napajanja pokazana je na blok-shemi isprekidanom crtom.



Slika 1.1. Blok-shema sustava za reguliranje temperature



2. SKLOPOVI S DIODAMA

Poluvodičke diode su elektroničke komponente s dvije elektrode, različitih izvedbi, svojstava i namjena. U ovom poglavlju opisane su dioda opće namjene (u stručnoj literaturi susreće se naziv ispravljačka dioda, engl. rectifier diode, njem. Gleichrichterdiode) i Zenerova dioda. Višeslojne diode opisane su u poglavlju 9. *Tiristori i jednospojni tranzistor*, a fotodioda, svijetleća i laserska dioda u poglavlju 10. *Optoelektronički elementi*.

Načela djelovanja dioda poznata su čitatelju od prije iz predmeta ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI I KOMPONENTE. Stoga su ovdje ukratko opisana osnovna svojstva dioda proširena sa znanjima o tehničkim podacima važnim za uporabu. Glavni dio čine prikazi izvedbi, svojstava i primjene sklopova s diodama.

Ovo poglavlje ima četiri dijela. U prvom dijelu opisana su svojstva dioda opće namjene. U sljedeća dva opisane su izvedbe, svojstva i primjene ispravljačkih sklopova te ograničavača i restauratora napona. U posljednjem dijelu dan je prikaz svojstava i osnovne primjene Zenerove, tunelske i kapacitivne diode.

2.1. Svojstva dioda

Propusno polarizirana dioda
Zaporno polarizirana dioda
Strujno-naponska karakteristika diode
Karakteristične veličine diode

2.2. Ispravljački sklopovi

Poluvalni ispravljač
Punovalni ispravljač
Glađenje ispravljenoga napona

2.3. Diodni ograničavači i restauratori

Paralelni diodni ograničavači
Serijski diodni ograničavači
Dvostrani diodni ograničavač
Restauratori

2.4. Ostale vrste dioda

Svojstva Zenerove diode
Stabilizacija napona sa Zenerovom diodom

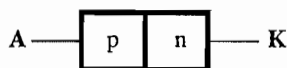
Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 2.1. Poluvalni ispravljač
Vježba 2.2. Punovalni ispravljač
Vježba 2.3. Stabilizacija napona sa
Zenerovom diodom

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

2.1. SVOJSTVA DIODA

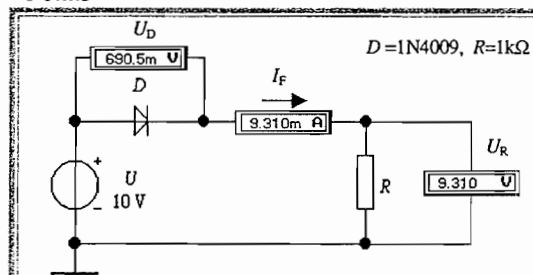
Diode opće namjene (ispravljačke diode) sastoje se od *p*-tipa i *n*-tipa poluvodiča. Izvod povezan s *p*-tipom poluvodiča je **anoda** (A), a izvod povezan s *n*-tipom je **katoda** (K). Mogu biti silicijske i germa-nijske. Imaju svojstvo da u jednome smjeru propuštaju struju, a u drugome ne.



Slika 2.1. Građa i simboli diode

Propusno polarizirana dioda

Pokus



Slika 2.2. Spoj propusno polarizirane diode

Kad je **anoda** na **pozitivnijem** potencijalu od **katode**, za diodu se kaže da je **propusno polarizirana**. U tom slučaju kroz diodu teče **propusna struja** I_F (engl. forward current, njem. Durchlassstrom) od anode prema katodi. Na diodi je mali pad napona koji za silicijske diode iznosi oko 0,7V, a za germa-nijske diode oko 0,3V (slika 2.2.).

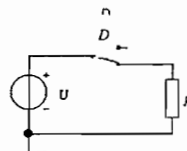
Veličina struje, koja teče kroz propusno polariziranu diodu, ovisi o priključenom naponu U i otporu R otpornika spojenog u seriju s diodom:

$$I_D = I_F = \frac{U - U_D}{R}$$

Dioda ima vrlo mali otpor pa je **napon** $U_D = U_F$ na diodi mali. Stoga je gotovo sav napon U priključenog izvora na otporu R , pa struja kroz diodu približno iznosi:

$$I_D = I_F = \frac{U}{R}$$

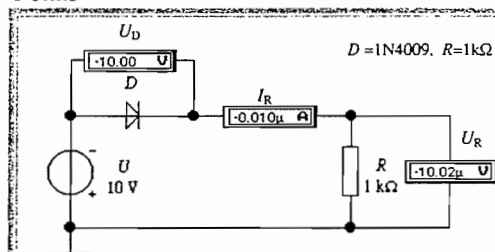
Stoga se može reći da dioda djeluje kao uključena sklopka (slika 2.3.).



Slika 2.3. Djelovanje propusno polarizirane diode

Zaporno polarizirana dioda

Pokus

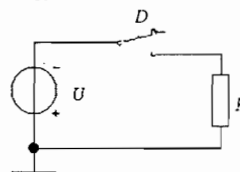


Slika 2.4. Spoj zaporno polarizirane diode

Kad je **katoda** na **pozitivnijem** potencijalu od **anode**, dioda je **zaporno (nepropusno) polarizirana** (slika 2.4.). Kroz diodu teče u smjeru od katode prema anodi vrlo mala struja I_R koja se naziva **reverzna struja** (preostala struja, engl. reverse current, njem. Sperrstrom). Reverzna struja za germa-nijske diode reda je veličine desetak mikroampera, a za silicijske desetak nanoampera.

U serijskomu spoju zaporno polarizirane diode i otpornika R reverzna struja diode može se zanemariti. Stoga se može zanemariti i pad napona na otporniku R . Zaporni napon na diodi (engl. reverse voltage, njem. Sperrspannung) napon je U priključenog izvora. Dioda djeluje praktično kao isključena sklopka (slika 2.5.)

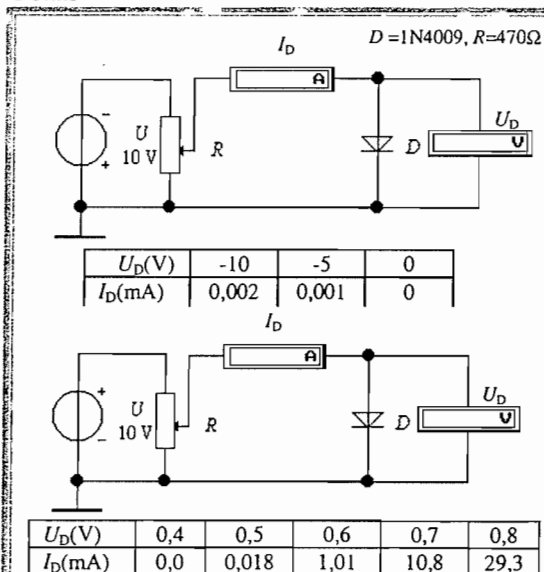
$$I_D = I_R = 0 \quad U_D = U = 0$$



Slika 2.5. Zaporno polarizirana dioda djeluje kao isključena sklopka

Strujno-naponska karakteristika diode

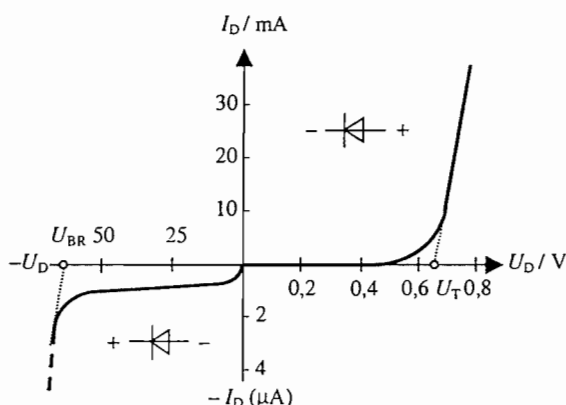
Pokus



Slika 2.6. Snimanje strujno-naponske karakteristike diode

Grafički prikaz odnosa napona i struje diode naziva se **strujno-naponska karakteristika diode** (slika 2.7.).

Dioda postaje vodljiva kad priključeni napon propusne polarizacije dostigne iznos U_T . Taj napon naziva se **napon praga** ili **napon koljena** (engl. threshold voltage, knee voltage, njem. Schwellspannung, Schleusenspannung) i za silicijske diode iznosi oko 0,6V-0,7V, a za germanijske diode 0,2V-0,3V.



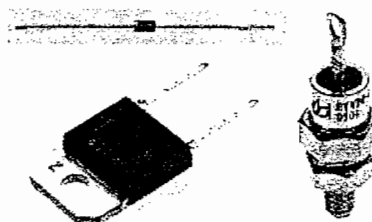
Slika 2.7. Strujno-naponska karakteristika diode

Ako priključeni napon zaporne polarizacije prijeđe vrijednost U_{BR} koja se naziva **probojni napon** (engl. breakdown reverse voltage, njem. Durchbruchspannung), dolazi do nagloga porasta reverzne struje, što može prouzročiti uništenje diode. Iznos probnog napona za diode kreće se u rasponu od nekoliko desetaka volta do nekoliko kilovolta.

Karakteristične veličine diode

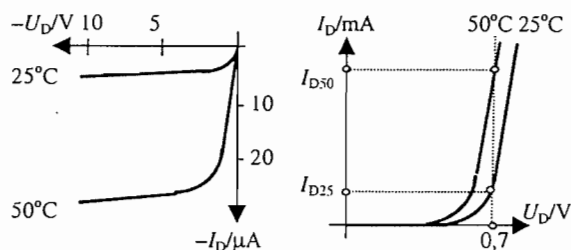
Najvažnije karakteristične veličine diode jesu:

- **dopuštena vrijednost napona zaporne polarizacije U_R** koja se smije priključiti na diodu a da ne dođe do njezina trajnog oštećenja
- **dopuštena jakost struje I_F** koja smije teći kroz diodu pri propusnoj polarizaciji a koja neće uzrokovati trajno oštećenje diode
- **dopušteni utrošak snage P_{tot}**
- **temperaturno područje rada**
- **oblik kućišta i raspored izvoda.**



Slika 2.8. Primjeri izvedbi dioda

Dopušteni zaporni napon silicijskih dioda iznosi od nekoliko desetaka pa do tisuću volta. Dopuštene jakosti struja dioda iznose od nekoliko desetaka miliampera do nekoliko kiloampera. Utjecaj temperature na karakteristike diode pokazan je na slici 2.9. U tvorničkim podacima karakteristične veličine dioda uvijek se daju za određeno područje temperatura.



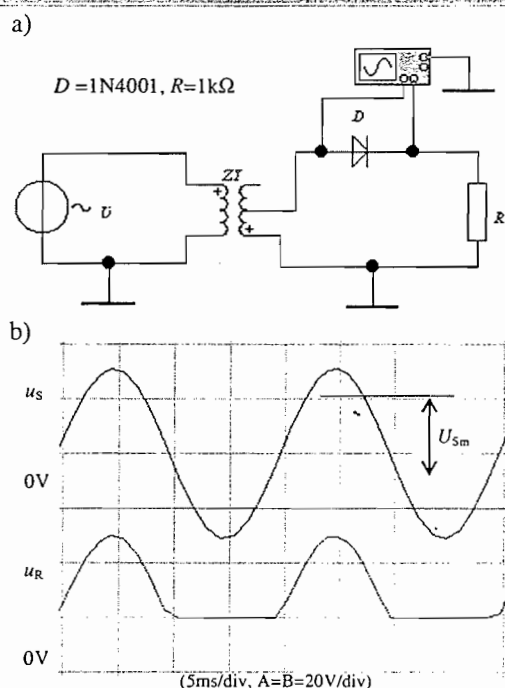
Slika 2.9. Utjecaj temperature na karakteristike diode

2.2. ISPRAVLJAČKI SKLOPOVI

Za normalan rad elektronički sklopovi trebaju istosmjerni napon napajanja. U tu se svrhu izmjenični napon mreže transformira na potrebnu vrijednost i zatim ispravlja. Ispravljanje se obavlja spojevima ispravljačkih dioda koji se nazivaju ispravljački sklopovi, kraće ispravljači (engl. rectifier circuits, njem. Gleichrichterschaltungen). Ispravljački spojevi mogu biti poluvalni i punovalni.

Poluvalni spoj ispravljača

Pokus



Slika 2.10. Poluvalni ispravljač: a) shema, b) ulazni i izlazni napon

Poluvalni spoj ispravljača (engl. halfwave rectifier, njem. Einweggleichrichter) najjednostavniji je ispravljački spoj. Dioda propušta struju samo za vrijeme jedne poluperiode izmjeničnoga napona. Za spoj na slici 2.10.a to je pozitivna poluperioda. Stoga se na trošilu javlja samo pozitivni dio izmjeničnoga napona (slika 2.10.b). Srednja vrijednost ispravljenoga napona (istosmjerna komponenta), uz zanemareni pad napona na diodi, iznosi:

$$U_{ST} = \frac{U_{Sm}}{\pi} = 0,45U_s$$

gdje su U_{Sm} i U_s vršna, odnosno efektivna vrijednost napona na sekundaru transformatora, tj. na ulazu ispravljača. Dopuštena vrijednost napona zaporne polarizacije diode mora biti veća od U_{Sm} .

Primjer 2.1.

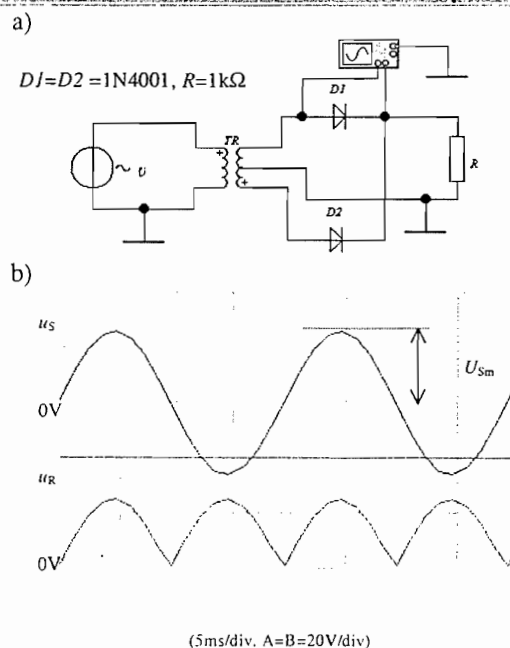
Koliki mora biti najmanje dopušteni napon zaporne polarizacije diode ako je sklop sa slike 1.11. priključen na mrežni napon uz prijenosni omjer transformatora 10:1?

$$U_R > U_{Sm} = (220/10) 2^{1/2} = 31,11V$$

Punovalni spoj ispravljača

Znatno bolja svojstva imaju punovalni ispravljači. To su spoj s dvije diode (slika 2.11.) i mosni ili Graetzov spoj (slika 2.12.).

Pokus



Slika 2.11. Punovalni ispravljač: a) shema, b) ulazni i izlazni napon

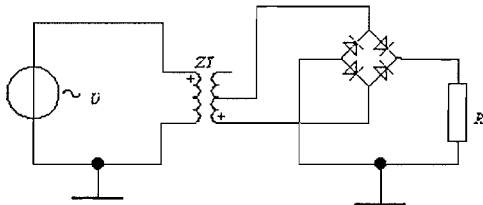
U spoju s dvije diode (engl. fullwave rectifier using a center-tapped transformer, njem. Mittelpunktgleichrichter) za vrijeme pozitivne poluperiode napona na sekundaru transformatora vodljiva je dioda $D1$, a za vrijeme negativne poluperiode dioda $D2$. Struja teče kroz trošilo uvijek u istom smjeru pa se na njemu dobije pozitivan napon u obje poluperiode.

Srednja vrijednost ispravljenoga napona (istosmjerna komponenta), uz zanemareni pad napona na diodi, iznosi:

$$U_{ST} = 2 \frac{U_{Sm}}{\pi} = 0,9 U_{Sm}$$

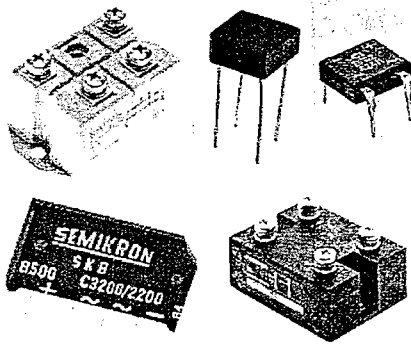
gdje su U_{Sm} i U_s vršna, odnosno efektivna vrijednost napona na sekundaru transformatora (napon gornjeg ili donjeg izvoda prema srednjem izvodu), tj. na ulazu ispravljača. Dopusštena vrijednost napona zaporne polarizacije diode mora biti veća od $2U_{Sm}$.

Isti oblik napona dobije se s pomoću ispravljača u mosnome spoju (Graetzov spoj, engl. bridge rectifier, njem. Brückenschaltung). U_{Sm} je vršna, a U_s efektivna vrijednost napona na sekundaru transformatora, tj. na ulazu ispravljača. Dopusštena vrijednost napona zaporne polarizacije diode mora biti veća od U_{Sm} . Spoj zahtijeva četiri diode ali je transformator jednostavniji.



Slika 2.12. Mosni spoj punovalnog ispravljača

Proizvođači poluvodičkih elemenata proizvode oba spoja ispravljača kao element u jednom kućištu (slika 2.13.).



Slika 2.13. Ispravljač u jednom kućištu

Glađenje ispravljenoga napona

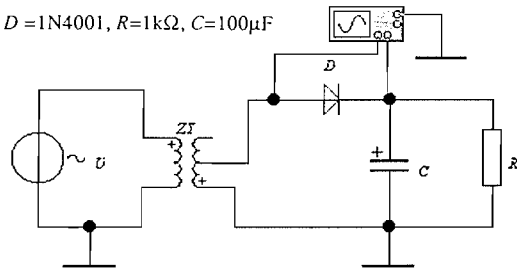
Izlazni napon otporno opterećenog ispravljača ima veliku **valovitost**, tj. uz istosmjernu komponentu sadrži jako izraženu izmjeničnu komponentu, tzv. **napon brujanja** (engl. ripple, njem. Brummspannung). Takav napon nije pogodan za napajanje elektroničkih sklopova. Poboljšanje oblika izlaznoga napona (povećanje istosmjerne komponente uz sma-

njenje valovitosti) dobije se postupkom **glađenja** (filtriranja) ispravljenoga napona. Za glađenje ispravljenoga napona najčešće se upotrebljavaju **kondenzatori velikoga kapaciteta** (slika 2.14.).

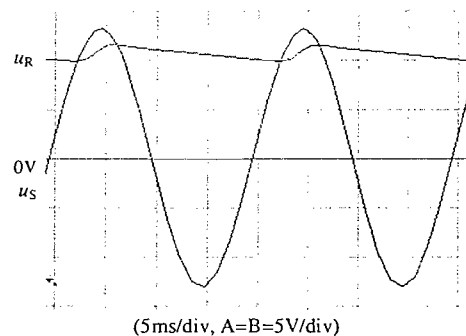
Pokus

a)

$D = 1N4001, R = 1k\Omega, C = 100\mu F$



b)

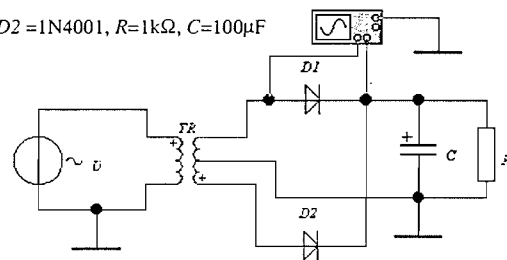


Slika 2.14. Glađenje poluvalno ispravljenoga napona: a) shema spoja, b) naponi

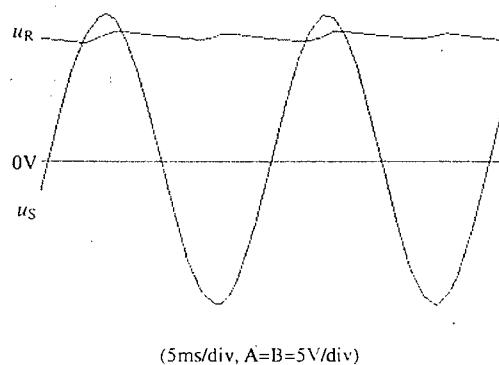
Pokus

a)

$D1 = D2 = 1N4001, R = 1k\Omega, C = 100\mu F$

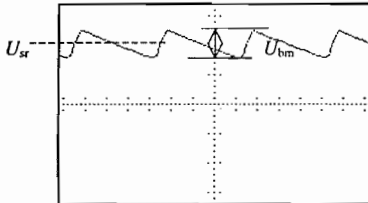


b)



Slika 2.15. Glađenje punovalno ispravljenoga napona: a) shema spoja, b) naponi

Dioda vodi samo dok je anoda pozitivnija od katode. U tome dijelu periode izmjeničnoga napona kondenzator se nabija. U ostalome dijelu periode dioda je zaporno polarizirana. Struju trošilu daje nabijeni kondenzator pa se napon na njemu smanjuje. Što je opterećenje veće, bit će znatnije smanjenje izlaznoga napona. Da se to spriječi, potrebno je primijeniti kondenzatore velikoga kapaciteta.



Slika 2.16. Napon brujanja

Iznos napona brujanja U_{bm} (mjereno od vrha do vrha, slika 2.16.) ovisi o vršnoj vrijednosti ispravljenoga napona (približno jednaka vršnoj vrijednosti napona na sekundarnom namotu transformatora U_{Sm}), o frekvenciji napona brujanja f_b (za poluvalni ispravljač $f_b=50\text{Hz}$, za punovalni ispravljač $f_b=100\text{Hz}$), o opterećenju ispravljača (R) i kapacitetu kondenzatora za glaćenje C :

$$U_{bm} = \frac{U_{Sm}}{f_b R C}$$

Primjer 2.2.

Izračunati napon brujanja ispravljača sa slike 1.15. ako je prijenosni omjer transformatora 10:1, $C=100\mu\text{F}$ i $R=1\text{k}\Omega$.

$$U_{Sm} = (220/10) 2^{1/2} / 2 = 15,56\text{V}$$

$$U_{bm} = 15,56 / (100 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-6}) = 1,556\text{V}$$

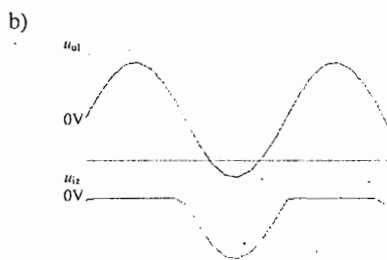
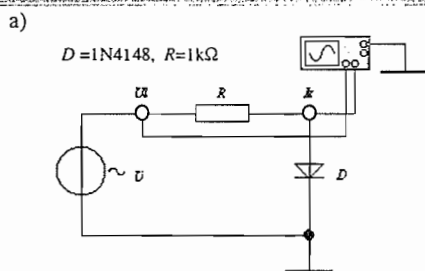
1.3. DIODNI OGRANIČAVAČI I RESTAURATORI

U elektronici je često potrebno ograničiti porast napona iznad određene vrijednosti. Sklopovi koji obavljaju tu funkciju nazivaju se ograničavači (engl. clipping circuits, limiting circuits, skraćeno clippers, odnosno limiters, njem. Begrenzerschaltung).

Neki električni i elektronički sklopovi imaju svojstvo da signalima oduzimaju istosmjernu komponentu (npr. RC-mreža). Kad je potrebno obnoviti (uspostaviti) istosmjernu komponentu, upotrebljavaju se restauratori (engl. restorer, njem. Klemmschaltung).

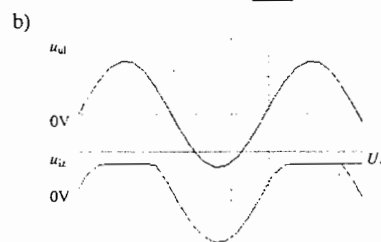
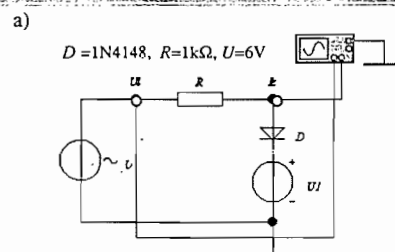
Paralelni diodni ograničavač

Na slici 2.17. pokazan je spoj diode i otpornika koji ograničava porast izlaznoga napona za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznoga napona. Kako je dioda spojena paralelno izlazu, spoj se naziva paralelni ograničavač.

Pokus

(0,2ms/div, A=B=10V/div)

Slika 2.17. Ograničavanje napona diodom

Pokus

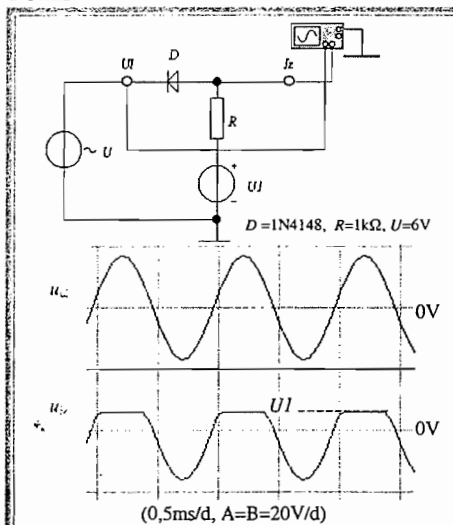
(0,2ms/div, A=B=10V/div)

Slika 2.18. Paralelni diodni ograničavač

Kod paralelnih diodnih ograničavača ulazni napon prenosi se na izlaz kad je dioda nevodljiva. Kad je dioda vodljiva, na izlazu je napon propusne polarizacije diode U_F . Ako se želi porast izlaznog napona ograničiti na neku vrijednost veću od U_F , dodaje se u seriju s diodom izvor napona U_I (slika 2.18.).

Serijski diodni ograničavač

Pokus

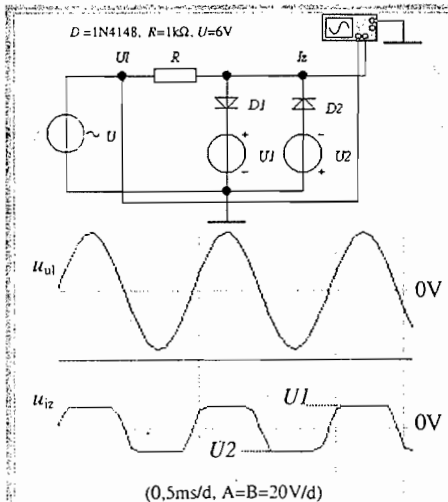


Slika 2.19. Serijski diodni ograničavač

Isti učinak može se postići serijskim diodnim ograničavačem. Ulazni napon prenosi se na izlaz kad je dioda vodljiva. U protivnom je na izlazu napon U_I dodanog istosmjernog izvora (slika 2.19.)

Dvostrani ograničavač

Pokus

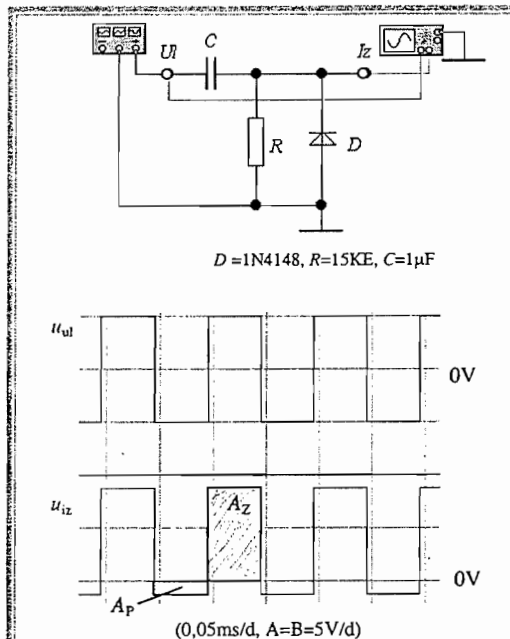


Slika 2.20. Dvostrani paralelni ograničavač

Kad je potrebno ograničiti napon na dvije razine, upotrebljavaju se dvostrani paralelni ograničavači (slika 2.20.).

Restauratori

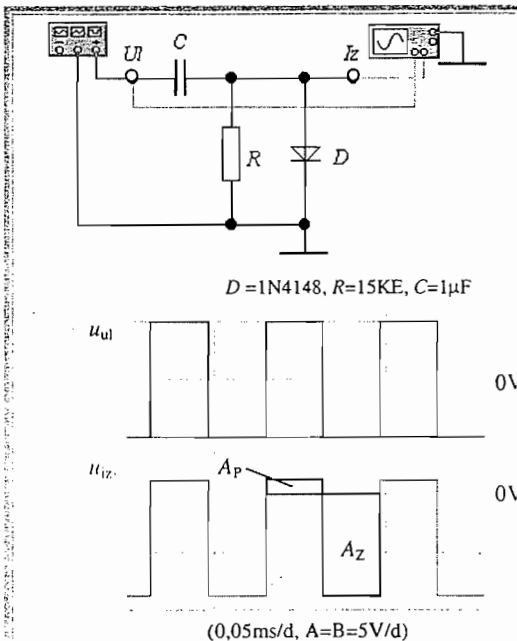
Pokus



Slika 2.21. Restaurator pozitivne komponente

Pokus sa slike 2.21. pokazuje djelovanje restauratora koji obnavlja pozitivnu istosmjernu komponentu.

Pokus



Slika 2.22. Restaurator negativne komponente

Pokus sa slike 2.22. pokazuje djelovanje restauratora koji obnavlja negativnu istosmjernu komponentu.

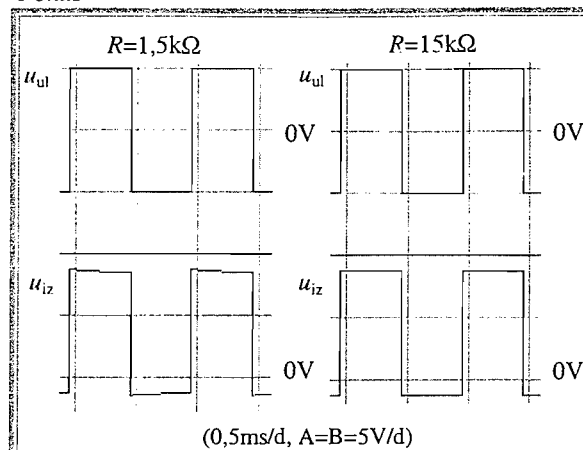
Izlazni napon restauratora nije u potpunosti samo pozitivan, odnosno samo negativan. Uzrok tome je odstupanje svojstava diodne sklopke od onih za idealnu sklopku.

Površina koju izlazni napon zatvara s vremenskom osi u vremenu kad je dioda propusno polarizirana prema površini koju izlazni napon zatvara s vremenskom osi u vremenu kad je dioda zaporno polarizirana, odnosi se kao otpor propusno polarizirane diode r_d prema otporu R (slika 2.21. i 2.22.).

$$\frac{A_p}{A_z} = \frac{r_d}{R}$$

Iz toga proizlazi da bi otpor R trebao biti što veći u usporedbi s otporom propusno polarizirane diode. Međutim, povećanje otpora R ograničeno je iznosima otpora zaporno polarizirane diode.

Pokus



Slika 2.23. Djelovanje restauratora pozitivne istosmjerne komponente

Rezultati pokusa pokazani na slici 2.23. pokazuju utjecaj iznosa otpora R na djelovanje restauratora.

Djelovanje restauratora nije u potpunosti pozitivno, nego zbog neidealnosti diode kao sklopke.

2.4. ZENEROVA DIODA

Svojstva Zenerove diode

Zenerove diode su silicijske diode, kod kojih se primjenjuje svojstvo da kod Zenerova (lavinskog) proboja održavaju stalan napon, praktički neovisan o struji kroz diodu.



Slika 2.24. Simboli Zenerove diode

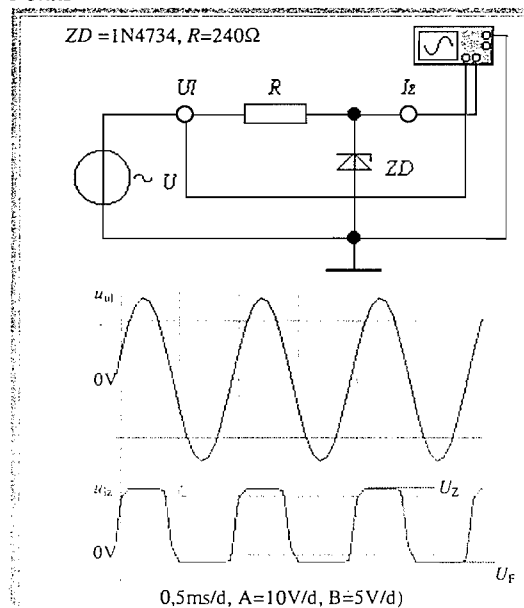


Slika 2.25. Primjeri izvedbi Zenerovih dioda

U pokusu na slici 2.26. na ulaz sklopa spojen je promjenljivi sinusoidni napon. Kad je ulazni napon negativan, Zenerova dioda je propusno polarizirana i na njoj je mali napon U_F . Uz pozitivni ulazni napon manji od napona U_Z dioda je zaporno polarizirana i na njoj je napon izvora. Kad iznos ulaznog napona

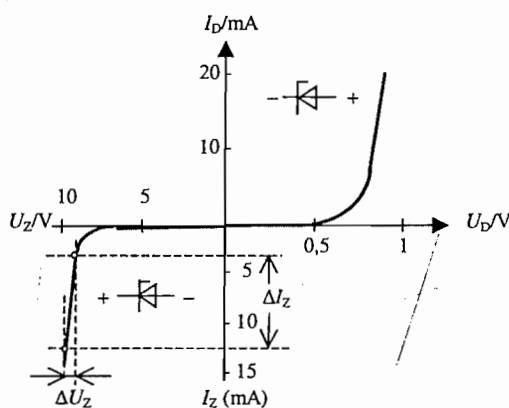
zadobije vrijednost veću od U_Z dioda prelazi u stanje lavinskoga proboja i na njoj je stalan napon U_Z .

Pokus



Slika 2.26. Pobuda Zenerove diode sinusoidnim naponom

Vrijednosti probojnoga napona Zenerovih dioda može se kontrolirati u tijeku procesa proizvodnje. To omogućuje da se proizvode diode s probojnim naponima od volta do nekoliko stotina volta. Dioda s probojnim naponom manjim od 5V nemaju oštro izražen probojni napon. Dioda s probojnim naponom ispod 5V imaju negativan temperaturni koeficijent (s porastom temperature smanjuje se Zenerov napon). Dioda sa Zenerovim naponom iznad 5V imaju pozitivan temperaturni koeficijent (s porastom temperature raste Zenerov napon).



Slika 2.27. Strujno-naponska karakteristika Zenerove diode

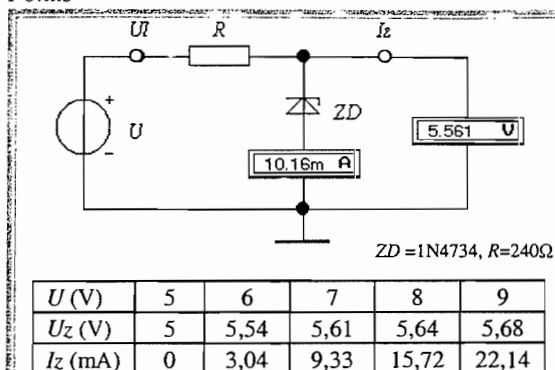
Dioda s većim probojnim naponom imaju veći unutarnji otpor. Unutarnji otpor Zenerove diode jest omjer promjene napona na diodi i promjene struje kroz diodu koja je dovela do promjene napona:

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

Zenerove diode upotrebljavaju se kao stabilizatori i ograničavači napona. Prilikom odabira Zenerovih dioda potrebno je voditi računa o najvećoj dopuštenoj struji diode u Zenerovu području I_Z , odnosno o dopuštenu utrošku snage. Iznosi dopuštenih utrošaka snage kreću se od nekoliko stotina milivata do nekoliko desetaka vata.

Stabilizacija napona sa Zenerovom diodom

Fokus



Slika 2.28. Stabilizacija napona sa Zenerovom diodom

Primjer uporabe Zenerove diode pokazan je na slici 1.28. Riječ je o najjednostavnijoj izvedbi stabilizatora napona. Izlazni je napon ovoga stabilizatora Zenerov napon U_Z . Kako promjene struje I_Z neznatno mijenjaju napon U_Z , izlazni napon može se smatrati stalnim.

Promjena ulaznoga napona uzrokuje promjenu struje Zenerove diode I_Z . Zato se mijenja pad napona na otporniku R , pa je izlazni napon gotovo konstantan.

$$U = U_Z + I_Z R = U_Z$$

Otpornik R služi za ograničenje struje Zenerove diode. Struja kroz diodu ne smije prijeći najveću dopuštenu vrijednost koja je propisao proizvođač kako ne bi došlo do oštećenja diode. No isto tako struja ne smije pasti ispod određene vrijednosti kad se počne smanjivati napon na diodi. Za siguran rad stabilizatora ulazni napon treba biti veći od izlaznoga oko dva puta.

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

VJEŽBA 2.1. POLUVALNI ISPRAVLJAČ

Zadatak

Upoznati svojstva poluvalnog ispravljača mjerenjem istosmjernoga napona i struje opterećenja univerzalnim instrumentom te napona brujanja uporabom osciloskopa.

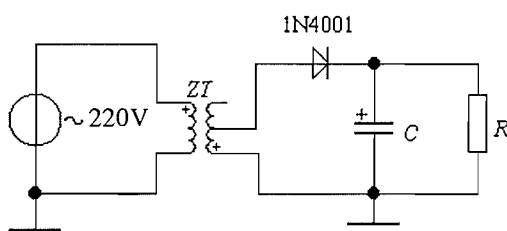
Ustanoviti utjecaj kapaciteta kondenzatora za glaćenje na vrijednost istosmjernoga napona na izlazu i na napon brujanja te mogućnost opterećenja ispravljača.

Ustanoviti utjecaj opterećenja na vrijednost izlaznoga napona i napona brujanja.

Pribor i instrumenti

- diode 1N4001 (4 komada)
- otpornici $0,1k\Omega$, $0,47k\Omega$ i $1k\Omega$
- kondenzatori $47\mu F$, $100\mu F$ i $470\mu F$
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument (2 komada)
- osciloskop
- izvor izmjeničnoga napona $0-48V$, $50Hz$ (regulacijski transformator).

Priprema



Slika 2.29. Poluvalni ispravljač

1. Navedite najveći dopušteni zaporni napon i najveću dopuštenu struju pri propusnoj polarizaciji za diodu 1N4001.

2. Izračunajte srednju vrijednost ispravljenoga napona ispravljača sa slike 2.29. bez spojenoga kondenzatora C uz napon na sekundarnom namotu transformatora $U_S=24V$.

3. Izračunajte napon brujanja izlaznoga napona ispravljača sa slike 2.29. uz $C=100\mu F$ ako je napon na sekundarnom namotu transformatora $U_S=24V$.

4. Nacrtajte shemu spoja poluvalnog ispravljača (slika 2.29.) s ucrtanim instrumentima za mjerenje izlazne struje te izlaznoga napona i napona brujanja.

Pokusi

1. Ispitivanje ovisnosti izlaznoga napona o kapacitetu kondenzatora za glaćenje

1.1. Namjestite izlazni napon iz regulacijskoga transformatora na $24V$. Prema nacrtanoj shemi povežite elemente sklopa i instrumente te priključite ulazni napon.

Izmjerite pad napona U_R i struju I_R kroz otpor $R=1k\Omega$ za vrijednosti kapaciteta kondenzatora C : $47\mu F$, $100\mu F$ i $470\mu F$. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

1.2. Osciloskopom ustanovite oblike ulaznoga i izlaznoga napona poluvalnog ispravljača za vrijednosti kapaciteta kondenzatora za glaćenje C : $47\mu F$, $100\mu F$ i $470\mu F$. Izmjerite napon brujanja za svaki zadani kapacitet kondenzatora.

2. Ispitivanje ovisnosti izlazne struje i napona te valovitosti o otporu potrošača

2.1. Namjestite izlazni napon regulacijskoga transformatora na $24V$. Prema nacrtanoj shemi povežite elemente i priključite napon napajanja.

Izmjerite izlazni napon i struju kroz otpor R za vrijednosti otpora 100Ω , 470Ω i $1k\Omega$. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

2.2. Osciloskopom ustanovite oblik ulaznoga i izlaznoga napona i izmjerite iznos napona brujanja za zadane vrijednosti otpora opterećenja R iz točke 2.1.

VJEŽBA 2.2. PUNOVALNI ISPRAVLJAČ

Zadatak

Upoznati svojstva punovalnog ispravljača mjerenjem istosmjernoga napona i struje opterećenja univerzalnim instrumentom te napona brujanja uporabom osciloskopa.

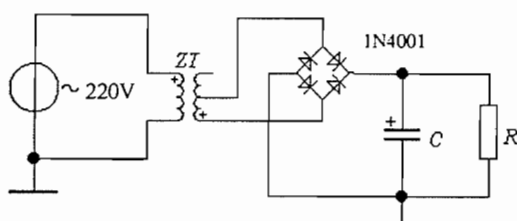
Ustanoviti utjecaj kapaciteta kondenzatora za glade-
nje na vrijednost istosmjernoga napona na izlazu i
napon brujanja te mogućnost opterećenja ispravljača.

Ustanoviti utjecaj opterećenja na vrijednost
izlaznoga napona i napona brujanja.

Pribor i instrumenti

- diode 1N4001 (4 komada)
- otpornici 100Ω , 470Ω i $1k\Omega$
- kondenzatori $47\mu F$, $100\mu F$ i $470\mu F$
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument (2 komada)
- osciloskop
- izvor izmjeničnoga napona 0-48V, 50Hz (regulacijski transformator).

Priprema



Slika 2.30. Punovalni ispravljač

1. Navedite najveći dopušteni zaporni napon i najveću dopuštenu struju pri propusnoj polarizaciji za diodu 1N4001.

2. Izračunajte srednju vrijednost ispravljenoga napona ispravljača sa slike 2.30. bez spojenoga kondenzatora C uz napon na sekundarnom namotu transformatora $U_S = 24V$.

3. Izračunajte napon brujanja izlaznoga napona ispravljača sa slike 2.30. ako je napon na sekundarnome namotu transformatora $U_u = 24V$.

4. Nacrtajte shemu spoja punovalnog ispravljača (slika 2.30.) s ucrtanim instrumentima za mjerenje izlazne struje te izlaznoga napona i napona brujanja.

Pokusi

1. Ispitivanje ovisnosti izlazne struje i napona te valovitosti o kapacitetu kondenzatora za glade-

1.1. Namjestite izlazni napon iz regulacijskoga transformatora na 24V. Prema nacrtanoj shemi povežite elemente sklopa i instrumente te priključite ulazni napon.

Izmjerite pad napona U_R i struju I_R kroz otpor $R=1k\Omega$ za vrijednosti kapaciteta kondenzatora C : $47\mu F$, $100\mu F$ i $470\mu F$. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

1.2. Osciloskopom ustanovite oblike ulaznoga i izlaznoga napona poluvalnog ispravljača za vrijednosti kapaciteta kondenzatora za glade-
nje C : $47\mu F$, $100\mu F$ i $470\mu F$. Izmjerite napon brujanja za svaki zadani kapacitet kondenzatora.

2. Ispitivanje ovisnosti izlazne struje i napona te valovitosti o otporu potrošača

2.1. Namjestite izlazni napon regulacijskoga transformatora na 24V. Prema nacrtanoj shemi povežite elemente i priključite napon napajanja.

Izmjerite izlazni napon i struju kroz otpor R za vrijednosti otpora 100Ω , 470Ω i $1k\Omega$. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

2.2. Osciloskopom ustanovite oblik ulaznoga i izlaznoga napona i izmjerite iznos napona brujanja za zadane vrijednosti otpora opterećenja R iz točke 2.1.

VJEŽBA 2.3. STABILIZACIJA NAPONA SA ZENEROVOM DIODOM

Zadatak

Upoznati stabilizatorsko djelovanje Zenerove diode mjerenjem napona i struja jednostavnoga stabilizatora napona izvedenoga s pomoću Zenerove diode. Ustanoviti ovisnost izlaznoga napona o promjenama ulaznoga napona i promjenama struje opterećenja.

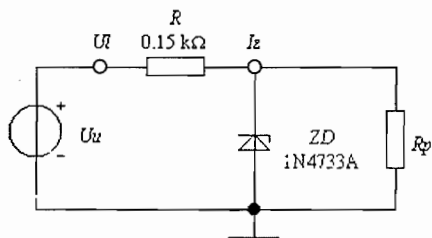
Pribor i instrumenti

- Zenerova dioda 1N4733
- otpornici 150Ω , 330Ω , 470Ω , 680Ω i $1k\Omega$
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument (3 komada)
- izvor istosmjernoga napona 0-15V, 1A.

Priprema

1. Navedite Zenerov napon, dopuštenu struju i dopušteni utrošak snage za diodu 1N4733.

2. Nacrtajte shemu stabilizatora sa Zenerovom diodom prema slici 2.31. opterećenog otporom R_P i spojenim instrumentima za mjerenje ulaznoga i izlaznoga napona te struja kroz diodu i trošilo.



Slika 2.31. Stabilizator s diodom 1N4733

Pokusi**1. Ovisnost izlaznog napona o promjenama ulaznog napona**

1.1. Povežite elemente stabilizatora i instrumente prema shemi. Na ulaz priključite izvor promjenljivog istosmjernog napona i izmjerite vrijednosti izlaznog napona te struje kroz diodu i trošilo za vrijednosti ulaznog napona $U_u = 5V, 6V, 7V, 8V, 9V$ i $10V$.

1.2. Grafički prikažite ovisnost izlaznog napona o promjenama ulaznog napona.

2. Ovisnost izlaznog napona o promjenama struje opterećenja

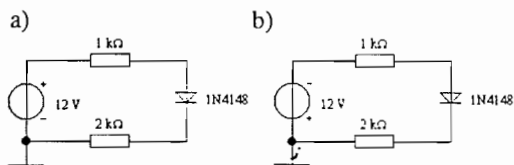
2.1. Na ulaz stabilizatora priključite izvor istosmjernog napona $10V$ i izmjerite vrijednosti izlaznog napona te struje kroz diodu i trošilo za vrijednosti otpora $R_P = 330\Omega, 470\Omega, 680\Omega$ i $1k\Omega$.

2.2. Grafički prikažite ovisnost izlaznog napona o promjenama opterećenja.

PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Kada se dioda može smatrati isključenom, a kada uključenom sklopom?

2. Koliko približno iznose jakosti struja kroz diode i padovi napona na otpornicima spoja dioda i otpornika sa slike 2.32.?



Slika 2.32. Serijski spoj otpornika i diode

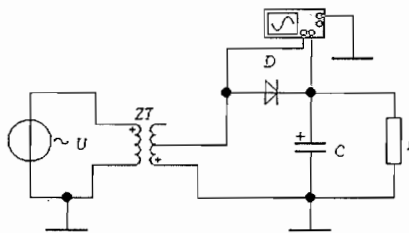
3. Kakav je utjecaj kapaciteta kondenzatora za glaćanje na iznos izlaznog napona i struje ispravljača?

4. Kakav je utjecaj kapaciteta kondenzatora za glaćanje na iznos napona brujanja?

5. Kakav je utjecaj opterećenja na izlazni napon ispravljača?

6. Kakav je utjecaj opterećenja na iznos napona brujanja?

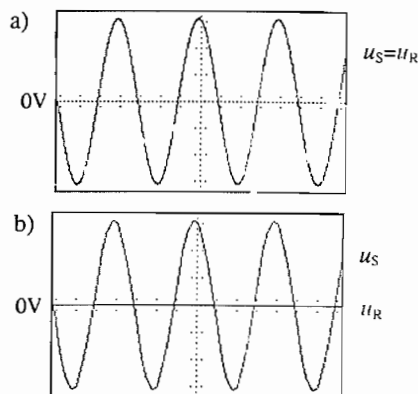
7. Koliki treba biti kapacitet kondenzatora C da napon brujanja izlaznog napona ispravljača sa slike 2.33. ne bude veći od $500mV$ uz napon $24V$ na sekundarnom namotu transformatora i $R=1k\Omega$?



Slika 2.33. Mjerenje na poluvalnom ispravljaču

8. Mjerenjem napona prema slici 2.33. dobiven je napon pokazan na slici 2.34.a. Koja je komponenta u kvaru?

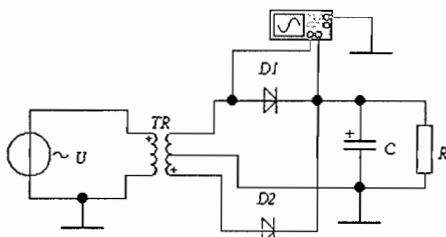
9. Mjerenjem napona prema slici 2.33. dobiven je napon pokazan na slici 2.34.b. Koja je komponenta u kvaru?



(u_S je napon na sekundaru transformatora)

Slika 2.34. Oscilogrami napona na neispravnomu ispravljaču

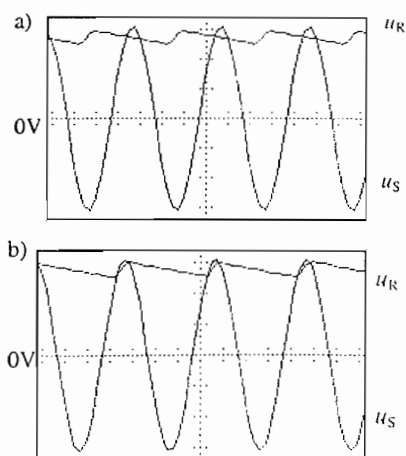
10. Koliki treba biti kapacitet kondenzatora C da napon brujanja izlaznoga napona ispravljača sa slike 2.35. ne bude veći od 500mV uz napon 24V na sekundarnom namotu transformatora i $R=1k\Omega$?



Slika 2.35. Mjerenje na poluvalnom ispravljaču

11. Mjerenjem napona prema slici 2.35. dobiven je napon pokazan na slici 2.36.a. Koja je komponenta u kvaru?

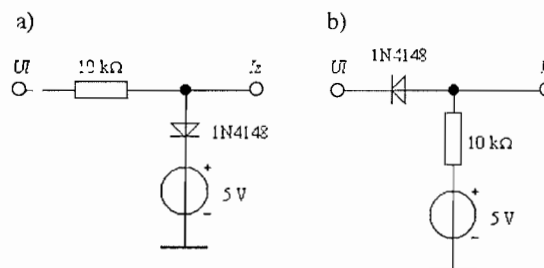
12. Mjerenjem napona prema slici 2.35. dobiven je napon pokazan na slici 2.36.b. Koja je komponenta u kvaru?



(u_S je napon na sekundaru transformatora)

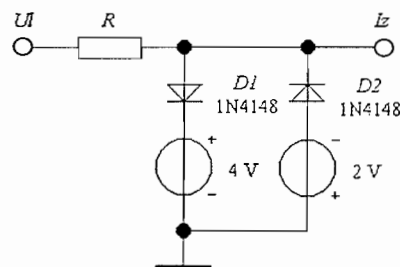
Slika 2.36. Oscilogrami napona na neispravnomu ispravljaču

13. Nacrtajte oblike izlaznoga napona diodnih ograničavača sa slike 2.37. pobuđenoga sinusoidnim naponom frekvencije 1kHz i amplitude 6 V.



Slika 2.37. Diodni ograničavači

14. Usporedite međusobno djelovanje ograničavača sa slike 2.37.



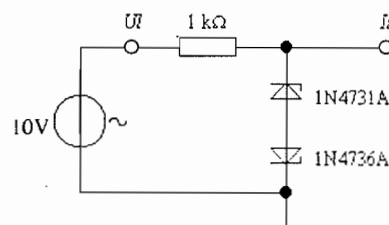
Slika 2.38. Dvostrani diodni ograničavač

15. Nacrtajte oblike izlaznoga napona diodnog ograničavača sa slike 2.38. pobuđenoga sinusoidnim naponom frekvencije 1kHz i amplitude 6 V.

16. Opišite djelovanje stabilizatora sa Zenerovom diodom uz promjene struje opterećenja. Što je kritičnije za Zenerovu diodu, neopterećen ili kratko spojeni izlaz?

17. Kakav će biti izlani napon spoja Zenerovih dioda prema slici 2.39. ako je na ulaz priključen izmjenični napon frekvencije 1kHz i amplitude 10V?

18. Kolika je vršna vrijednost struje kroz diode spoja sa slike 2.39. ako izlaz nije opterećen?



Slika 2.39. Spoj dvaju Zenerovih dioda

19. Kako vrijednost otpora R restauratora utječe na njegovo djelovanje i oblik izlaznoga napona?



3. OSNOVNI SKLOPOVI S BIPOLARNIM TRANZISTORIMA

3.1. Svojstva bipolarnih tranzistora

Ulazne karakteristike u spoju zajedničkog emitera
Prijenosne karakteristike u spoju zajedničkog emitera
Izlazne karakteristike u spoju zajedničkog emitera
Tvornički podaci
Utjecaj vanjskih činitelja na karakteristike tranzistora

3.2. Osnovni spojevi pojačala s bipolarnim tranzistorima

Osnovne značajke pojačala
Pojačalo u spoju zajedničkog emitera
Stabilizacija radne točke
Pojaćanje, ulazni i izlazni otpor pojačala u spoju zajedničkog emitera
Amplitudno-frekvencijska karakteristika pojačala
Pojačalo u spoju zajedničkoga kolektora
Pojaćanje, ulazni i izlazni otpor pojačala u spoju zajedničkoga kolektora

3.3. Bipolarni tranzistor kao sklopka

Tranzistor kao sklopka
Zavojnica u kolektorskome krugu tranzistorske sklopke

Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 3.1. Pojačalo u spoju zajedničkog emitera
Vježba 3.2. Amplitudno-frekvencijska karakteristika pojačala
Vježba 3.3. Tranzistor kao sklopka
Vježba 3.4. Opterećenje tranzistorske sklopke

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

Bipolarni tranzistori su poluvodičke elektroničke komponente s tri elektrode, različitih izvedbi, svojstava i namjene. Kako su načela djelovanja tranzistora čitatelju poznata od prije (ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI I KOMPONENTE), u ovom su poglavlju na početku ukratko opisana osnovna svojstva bipolarnih tranzistora proširena znanjima o tehničkim podacima važnima za uporabu. Glavni dio čine prikazi izvedbi osnovnih spojeva pojačala i sklopke izvedene s pomoću bipolarnih tranzistora. Složenije izvedbe pojačala i nekih drugih sklopova obrađuju se u poglavljima 5. *Pojačala* i 7. *Stabilizatori napona*.

Ovo poglavlje ima tri dijela. U prvom dijelu opisana su svojstva bipolarnih tranzistora. U drugom dijelu dan je prikaz pojačala u spoju zajedničkog emitera i zajedničkoga kolektora. U trećem dijelu opisano je djelovanje bipolarnoga tranzistora u funkciji sklopke.



3. OSNOVNI SKLOPOVI S BIPOLARNIM TRANZISTORIMA

3.1. Svojstva bipolarnih tranzistora

Ulazne karakteristike u spoju zajedničkog emitera
Prijenosne karakteristike u spoju zajedničkog emitera
Izlazne karakteristike u spoju zajedničkog emitera
Tvornički podaci
Utjecaj vanjskih činitelja na karakteristike tranzistora

3.2. Osnovni spojevi pojačala s bipolarnim tranzistorima

Osnovne značajke pojačala
Pojačalo u spoju zajedničkog emitera
Stabilizacija radne točke
Pojaćanje, ulazni i izlazni otpor pojačala u spoju zajedničkog emitera
Amplitudno-frekvencijska karakteristika pojačala
Pojačalo u spoju zajedničkoga kolektora
Pojaćanje, ulazni i izlazni otpor pojačala u spoju zajedničkoga kolektora

3.3. Bipolarni tranzistor kao sklopka

Tranzistor kao sklopka
Zavojnica u kolektorskom krugu tranzistorske sklopke

Zadaci za laboratorijske vježbe

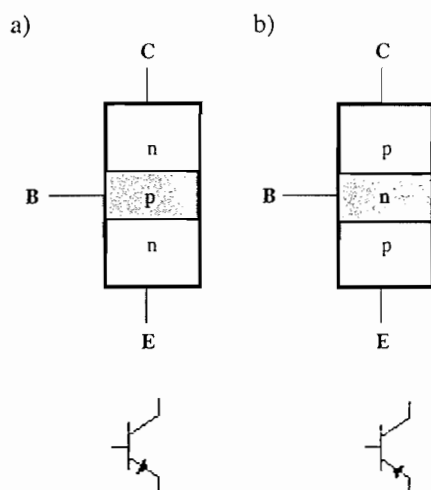
Vježba 3.1. Pojačalo u spoju zajedničkog emitera
Vježba 3.2. Amplitudno-frekvencijska karakteristika pojačala
Vježba 3.3. Tranzistor kao sklopka
Vježba 3.4. Opterećenje tranzistorske sklopke

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

Bipolarni tranzistori su poluvodičke elektroničke komponente s tri elektrode, različitih izvedbi, svojstava i namjene. Kako su načela djelovanja tranzistora čitatelju poznata od prije (ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI I KOMPONENTE), u ovom su poglavlju na početku ukratko opisana osnovna svojstva bipolarnih tranzistora proširena znanjima o tehničkim podacima važnima za uporabu. Glavni dio čine prikazi izvedbi osnovnih spojeva pojačala i sklopke izvedene s pomoću bipolarnih tranzistora. Složenije izvedbe pojačala i nekih drugih sklopova obrađuju se u poglavljima 5. *Pojačala* i 7. *Stabilizatori napona*.

Ovo poglavlje ima tri dijela. U prvom dijelu opisana su svojstva bipolarnih tranzistora. U drugom dijelu dan je prikaz pojačala u spoju zajedničkog emitera i zajedničkoga kolektora. U trećem dijelu opisano je djelovanje bipolarnoga tranzistora u funkciji sklopke.

3.1. SVOJSTVA BIPOLARNIH TRANZISTORA



Slika 3.1. Građa i simboli bipolarnih tranzistora:
a) NPN b) PNP

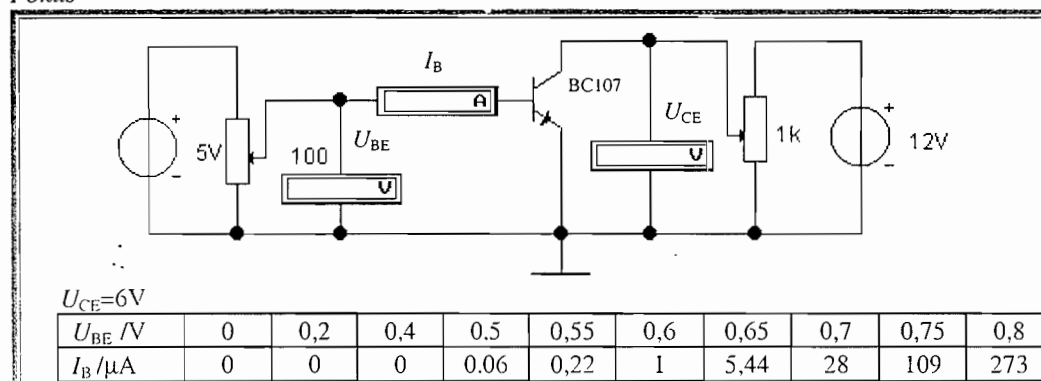
Bipolarni tranzistor sastoji se od tri poluvodička sloja na koja su priključene metalne elektrode. Slojevi i elektrode nazivaju se **baza (B)**, **emiter (E)** i **kolektor (C)**. S obzirom na raspored poluvodičkih slojeva tranzistori mogu biti NPN tipa (slika 3.1.a) ili PNP tipa (slika 3.1.b). S obzirom na materijal od kojega se izrađuju mogu biti silicijski ili germanijski.

Budući da tranzistor ima tri elektrode, jedna se upotrebljava kao ulazna, druga kao izlazna, a treća je zajednička ulaznom i izlaznom strujnome krugu. Zajednička elektroda može biti bilo koja pa se u praksi primjenjuju sva tri načina spajanja tranzistora: **spoj zajedničkog emitera**, **spoj zajedničke baze** i **spoj zajedničkoga kolektora**. Svaki spoj ima svoje osobitosti koje ga čine prikladnim za određene svrhe. U praksi se najčešće upotrebljava spoj zajedničkog emitera pa će na njemu biti pokazana osnovna svojstva i primjene bipolarnih tranzistora.

Za praktičnu primjenu tranzistora potrebno je poznavati odnose između pojedinih struja i napona tranzistora. Proizvođači tranzistora daju za svaki tip i osnovni spoj tzv. **statičke karakteristike** iz kojih se vide omjeri pojedinih struja i napona tranzistora. Karakteristike pojedinoga tipa tranzistora čine srednju vrijednost velikoga broja karakteristika istovrsnih tranzistora. Karakteristike pojedinih primjeraka istoga tipa tranzistora mogu jako odstupati od tipične karakteristike. Za praktičnu primjenu najvažnije su **ulazne**, **prijenosne** i **izlazne** karakteristike tranzistora.

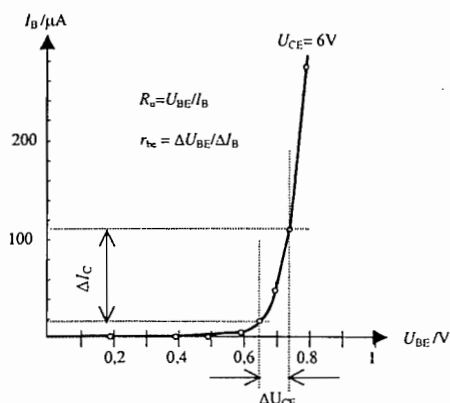
Ulazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera

Pokus



Slika 3.2. Snimanje ulaznih karakteristika tranzistora

Ulazne karakteristike tranzistora (slika 3.3.) pokazuju međusobnu ovisnost struje baze I_B i napona između baze i emitera U_{BE} uz stalan napon U_{CE} . Iz karakteristika se vidi da struja baze počinje teći tek kad napon U_{BE} ima određeni iznos (za silicijske tranzistore to je oko 0,5 V). Promjena napona U_{CE} vrlo malo utječe na iznos struje I_B .



Slika 3.3. Ulazne karakteristike tranzistora

Omjer napona U_{BE} i pripadne struje I_B istosmjerni je otpor između baze i emitera tranzistora R_{BE} . Njega

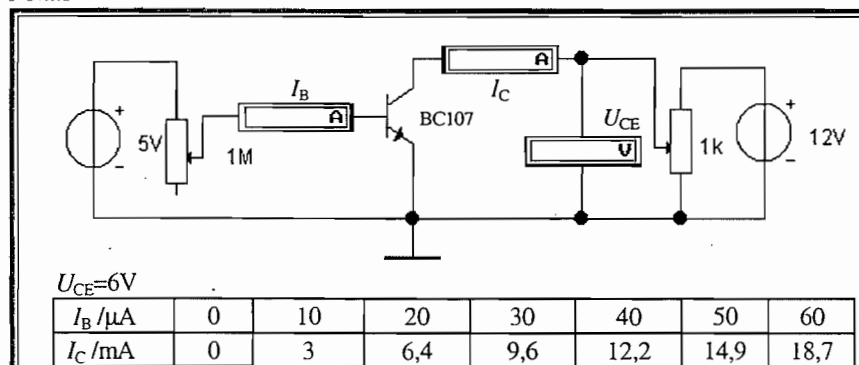
treba razlikovati od otpora za izmjeničnu struju koji se naziva **dinamički ulazni otpor** r_{be} (engl. small-signal input impedance, njem. dynamischer Eingangswiderstand, Wechselstromeingangswiderstand) koji se često označava s h_{ie} . Dinamički ulazni otpor može se dobiti iz ulaznih karakteristika tranzistora kao omjer male promjene napona između baze i emitera U_{BE} i time izazvane male promjene struje baze I_B . S obzirom na zakrivljenost ulazne karakteristike otpor r_{be} mijenjat će se s promjenom struje baze I_B .

Primjer 3.1.

Odrediti otpore R_{BE} i r_{be} tranzistora prema ulaznim karakteristikama (slika 3.3.) za napon $U_{BE}=0,7V$.

$$R_{BE} = 0,7V / 28\mu A = 25k\Omega$$

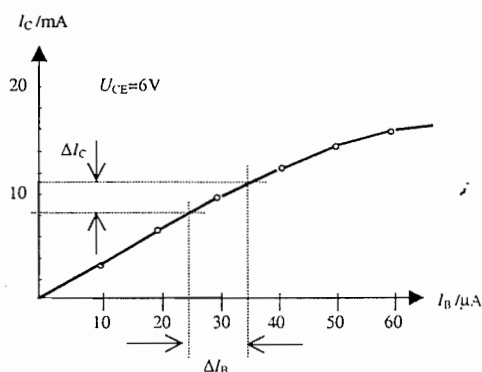
$$r_{be} = (0,75 - 0,65)V / (105 - 5)\mu A = 0,1V / 100\mu A = 1k\Omega$$

Prijenosne karakteristike u spoju zajedničkog emitera**Pokus**

Slika 3.4. Snimanje prijenosne karakteristike tranzistora

Prijenosne karakteristike (slika 3.5.) prikazuju međusobni odnos struje kolektora I_C i struje baze I_B uz stalan napon U_{CE} . Prijenosne karakteristike tranzistora pokazuju da struja kolektora I_C jako ovisi o struji baze I_B . Što je struja baze veća, veća je i struja kolektora.

Iz prijenosne karakteristike tranzistora vidi se da mala promjena ulazne struje, tj. struje baze I_B uzrokuje znatnu promjenu izlazne struje, tj. struje kolektora I_C , što znači da je tranzistorom moguće postići strujno pojačanje. Omjer struje kolektora I_C prema struji baze I_B uz stalan napon U_{CE} naziva se **faktor istosmjernoga strujnoga pojačanja** (engl. D.C. current gain, njem. Gleichstromverstärkung) i označava s h_{FE} ili B . Omjer promjene struje kolektora I_C i promjene struje baze I_B koja je uzrokovala promjenu struje kolektora (slika 3.5.) naziva se **faktor izmjeničnoga strujnoga pojačanja** (engl. small-signal current gain, njem. Wechselstromverstärkung) i označava s h_{fe} ili β .



Slika 3.5. Prijenosna karakteristika tranzistora

Primjer 3.2.

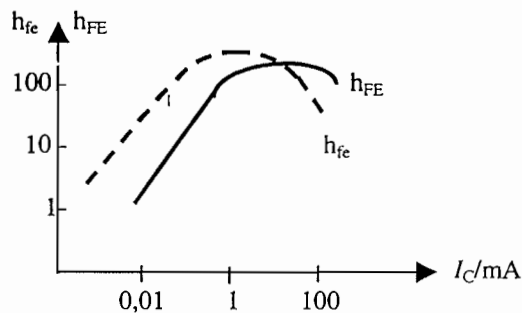
Odrediti h_{FE} i h_{fe} tranzistora prema prijenosnim karakteristikama (slika 3.5.) za struju $I_B = 30\mu A$.

$$h_{FE} = 9,6mA / 30\mu A = 320$$

$$h_{fe} = (11,1 - 8,1)mA / 10\mu A = 300$$

Na iznos obaju faktora utječe napon U_{CE} , struja I_C i temperatura. S porastom struje kolektora I_C oba faktora rastu do određenog iznosa, a zatim se smanjuju (slika 3.6.). Za struje reda veličine nekoliko desetaka do stotinu miliampera faktori h_{FE} i h_{fe} malo se razlikuju i mogu se smatrati jednakima.

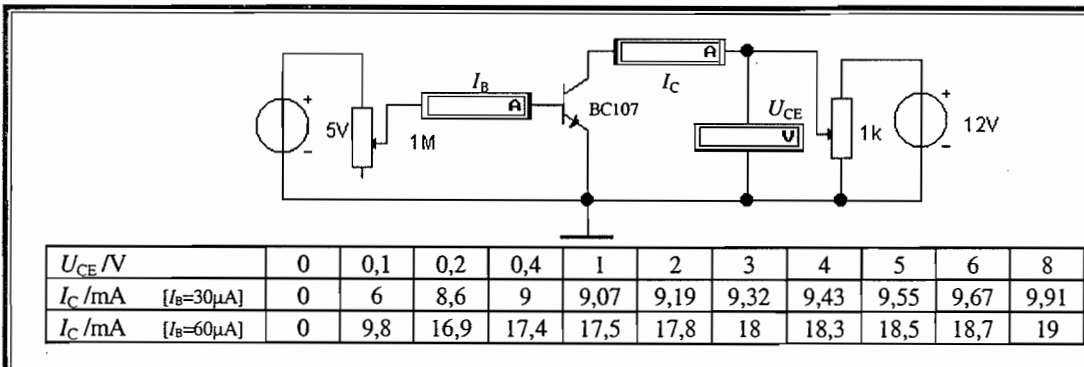
Potrebno je napomenuti da pojedini uzorci istoga tipa tranzistora imaju vrlo različite vrijednosti faktora pojačanja koje se često međusobno razlikuju i nekoliko puta. Stoga karakteristike proizvođača mogu poslužiti samo kao osnovna informacija, a za stvarne karakteristike i parametre, ako je potrebno, izvodi se snimanje i mjerenje za svaki uzorak.



Slika 3.6. Ovisnost faktora strujnoga pojačanja o struji kolektora

Izlazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera

Pokus

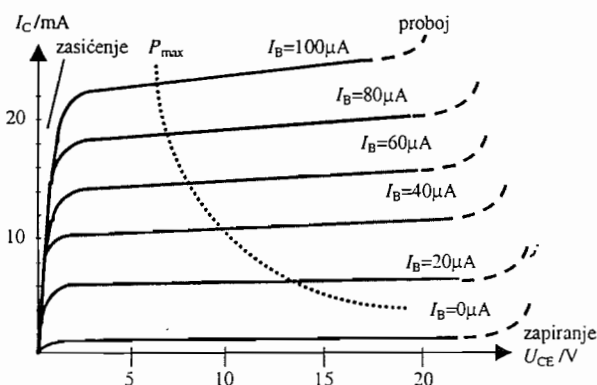


Slika 3.7. Snimanje izlaznih karakteristika tranzistora

Izlazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera (slika 3.8. i 3.9.) pokazuju ovisnost kolektorske struje I_C o naponu između kolektora i emitera U_{CE} i struji baze I_B .

Iz karakteristika se vidi da se za male napone U_{CE} , koji iznose tipično nekoliko stotina milivolta, struja kolektora I_C vrlo naglo mijenja. To se područje naziva **područje zasićenja**. Daljnjim povećanjem napona U_{CE} struja kolektora I_C mijenja se vrlo malo. Ovo područje naziva se **aktivno područje**.

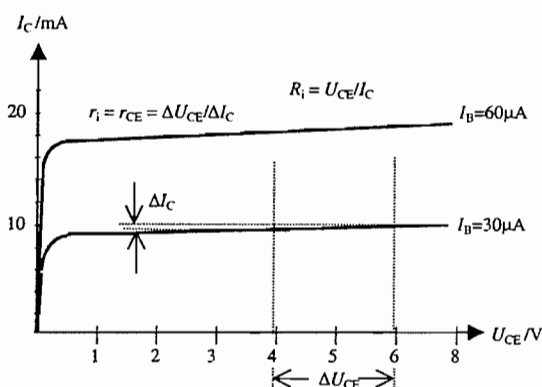
Povećanje napona U_{CE} preko određene vrijednosti uzrokuje nagli porast struje kolektora koja prekomjerno grije tranzistor pa dolazi do proboja u unutarnjoj strukturi tranzistora što može dovesti do njegova uništenja.



Slika 3.8. Izlazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera

Uz struju baze $I_B=0$ teče kroz tranzistor vrlo mala kolektorska struja. Ta struja naziva se **preostala struja kolektora** I_{CE0} (engl. collector cut-off current, njem. Kollektor-Emitter Reststrom) i za silicijske tranzistore je reda veličine nekoliko mikroampera ili manje. Stoga se ona, kod normalnih temperatura, može praktički zanemariti pa se kaže da je tranzistor u **području zapiranja**.

Omjer male promjene struje kolektora I_C i male promjene napona U_{CE} koji je uzrokovao promjenu kolektorske struje uz stalnu struju baze, čini **izlaznu dinamičku vodljivost tranzistora h_{oe}** (engl. small-signal output admittance, njem. Leerlauf-Ausgangsleitwert). Recipročna vrijednost izlazne vodljivosti jest **izlazni dinamički otpor r_{ce}** tranzistora. Vrijednosti dinamičkog izlaznoga otpora za tranzistor u spoju zajedničkog emitera kreću se u granicama od desetak do stotinjak kilooma. Treba razlikovati izlazni dinamički otpor od omjera U_{CE}/I_{CE} koji je istosmjerni otpor R_{CE} za određeni iznos struje i napona.



Slika 3.9. Određivanje parametara tranzistora iz izlaznih karakteristika

Sve što je rečeno o radu i karakteristikama NPN tranzistora vrijedi i za PNP tranzistore, ali uz promijenjeni polaritet napona i smjer struja u odnosu na NPN tranzistore.

Primjer 3.3.

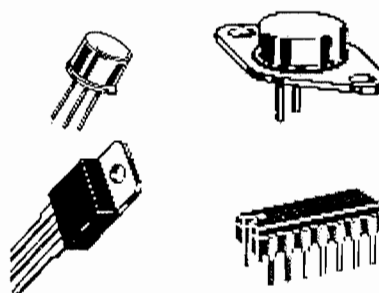
Određiti otpore R_{CE} i r_{ce} tranzistora prema izlaznim karakteristikama (slika 3.9.) za napon $U_{CE} = 5V$ i $I_B = 30\mu A$.

$$R_{CE} = 5V / 9,55mA = 0,52k\Omega$$

$$r_{ce} = (6-4)V / (9,67-9,43)mA = 2V / 0,24mA = 8,33k\Omega$$

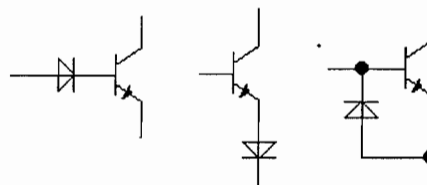
Tvornički podaci

U tvorničkim podacima proizvođači daju informacije o izvedbi i svojstvima tranzistora pomoću slika, tablica, dijagrama i shema. Najvažniji podaci su oblik i dimenzije kućišta, raspored priključaka, faktor strujnoga pojačanja i frekvencijsko područje rada, te najveće dopuštene vrijednosti struje, napona, utroška snage i radne temperature.



Slika 3.10. Oblici kućišta tranzistora

Najveći dopušteni naponi U_{CB} i U_{CE} kreću se od nekoliko desetaka volta kod tranzistora malih snaga pa do nekoliko stotina i više volta kod tranzistora velikih snaga. Tipične dopuštene vrijednosti napona U_{EB} iznose oko 5V. Ako u sklopovima postoji mogućnost pojave većeg napona U_{EB} , potrebno je zaštititi spoj baza-emiter tranzistora (slika 3.11.). Najveće dopuštene vrijednosti kolektorske struje iznose od nekoliko desetaka miliampera do nekoliko desetaka i više ampera, što ovisi o snazi tranzistora, tj. dopuštenom utrošku snage. Iznosi dopuštenog utroška snage iznose od nekoliko stotina milivata do stotinu i više vata kod tranzistora snage.



Slika 3.11. Zaštita spoja baza-emiter

Osim toga, tvornički podaci sadrže i podatke o uvjetima pod kojima su mjerene pojedine karakteristične veličine. Kako većina podataka za isti tip tranzistora varira u velikome rasponu, u tvorničkim podacima obično se daje tipičan podatak ili najveća i najmanja moguća vrijednost.

Uz ostale podatke potrebno je posebno spomenuti vrijednosti napona U_{BE} i U_{CE} za tranzistor u zasićenju. Napon U_{BEzas} (engl. saturation voltage V_{BEsat} , njem. Sättigungsspannung, Restspannung) iznosi za silicijske tranzistore 0,7-0,8 V. Napon U_{CEzas} (engl. V_{CEsat}) kreće se u rasponu 0,1-0,3 V za silicijske tranzistore, ali može imati vrijednosti i veće od volta kod snažnih tranzistora. Vrijednosti za preostale struje kolektora I_{CE0} kreću se na normalnoj temperaturi od nekoliko desetinki mikroampera do nekoliko mikroampera. No kod snažnih tranzistora mogu imati vrijednost od nekoliko miliampera.

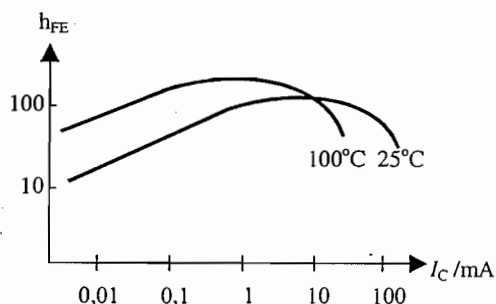
Utjecaj vanjskih činitelja na osobine tranzistora

Na osobine i rad tranzistora od vanjskih faktora mogu utjecati svjetlost, radioaktivno zračenje i temperatura.

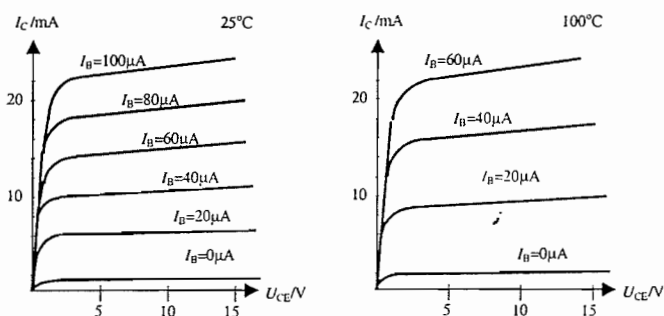
Pod djelovanjem radioaktivnoga zračenja može doći do smanjenja faktora strujnoga pojačanja. Manje su osjetljivi tranzistori namijenjeni radu pri visokim frekvencijama, kao i germanijski u usporedbi sa silicijskim.

Svjetlost može značajno utjecati na svojstva svih poluvodičkih elemenata. Kako bi svojstva tranzistora bila neovisna o utjecaju svjetlosti, kućišta tranzistora izrađuju se od materijala koji ne propušta svjetlost.

Od vanjskih faktora najveći utjecaj na karakteristične veličine tranzistora ima promjena temperature. Zbog povećanja temperature, povećava se preostala struja kolektora I_{CE0} (kod silicijskih tranzistora promjena temperature za 10°C utrostručuje vrijednost preostale struje kolektora) i faktor strujnoga pojačanja (slika 3.12.) Zato dolazi do promjena izlaznih karakteristika (slika 3.13.).

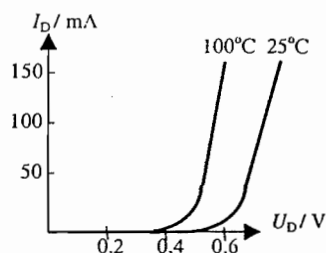


Slika 3.12. Utjecaj temperature na faktor strujnog pojačanja



Slika 3.13. Utjecaj temperature na izlazne karakteristike

Promjena temperature utječe i na međusobnu ovisnost napona U_{BE} i struje I_B (povećanje temperature za 1°C smanjuje napon U_{BE} za oko 2 mV).



Slika 3.14. Utjecaj temperature na ulazne karakteristike

Protjecanje kolektorske struje dovodi do zagrijavanja tranzistora. Pri tome je razvijena snaga (disipacija, **utrošak snage**, engl. power dissipation, njem. Verlustleistung) jednaka umnošku struje I_C i napona U_{CE} . Utrošak snage za pojedini tip tranzistora ne smije prijeći dopuštenu vrijednost P_{tot} . To znači da vrijednosti napona U_{CE} i struje I_C moraju na izlaznim karakteristikama biti ispod krivulje najvećega dopuštenog utroška snage P_{max} (slika 3.8.). Tranzistori većih snaga imaju znatan utrošak snage zbog čega se jače griju. Da bi se stvorena toplina mogla djelotvornije zračiti u okolinu, i time spriječiti pregrijavanje tranzistora, spaja se kućište tranzistora na metalne hladnjake koji svojom povećanom površinom pomažu odvođenje topline s tranzistora. Ako je u tom slučaju kolektor tranzistora povezan s potencijalom zajedničke točke (mase), moguće je spajanje tranzistora izravno na hladnjak. Ako to nije moguće, onda se između kućišta i hladnjaka stavlja pločica tinjca. Tinjac (liskun) sprječava električni spoj kućišta (na koji je povezan kolektor) i hladnjaka, a dobro prenosi toplinu s kućišta na hladnjak.

3.2. OSNOVNI SPOJEVI POJAČALA S BIPOLARNIM TRANZISTORIMA

Pojačala s bipolarnim tranzistorima mogu poslužiti za pojačanje struje (engl. current gain, njem. Stromverstärkung), pojačanje napona (engl. voltage gain, njem. Spannungsverstärkung) i pojačanje snage (engl. power gain, njem. Leistungsverstärkung). Ovisno o tome koja je od elektroda tranzistora zajednička ulaznom i izlaznom krugu pojačala razlikuju se tri osnovna spoja pojačala, svaki s tipičnim osobinama koje ga čine pogodnim za određenu uporabu. Ti spojevi jesu:

- pojačalo u spoju zajedničkog emitera (engl. common-emitter amplifier, njem. Emitterschaltung)
- pojačalo u spoju zajedničkoga kolektora (engl. common-collector amplifier, njem. Kollektorschaltung)
- pojačalo u spoju zajedničke baze (engl. common-base amplifier, njem. Basisschaltung).

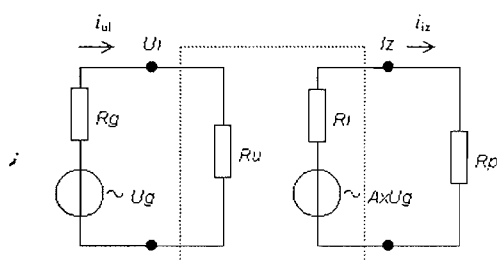
Osnovne značajke pojačala

Osnovne su značajke pojačala strujno i naponsko pojačanje, ulazni i izlazni otpor i frekvencijsko područje rada te fazni odnosi signala na izlazu i ulazu pojačala.

Strujno pojačanje A_i omjer je izlazne struje pojačala i_{iz} (struja koja teče kroz opteretni otpor) i ulazne struje i_{ul} .

Naponsko pojačanje A_u omjer je izlaznoga napona u_{iz} (izmjenični napon na opteretnom otporu) i ulaznoga napona u_{ul} .

Pojačanje snage A_p omjer je izlazne snage P_{iz} koja se dobije na opteretnom otporu spojenomu na izlaz pojačala i privedene snage signala na ulazu P_{ul} .



Slika 3.15. Osnovne značajke naponskoga pojačala

Iz praktičnih razloga pojačanje se često izražava decibelima.

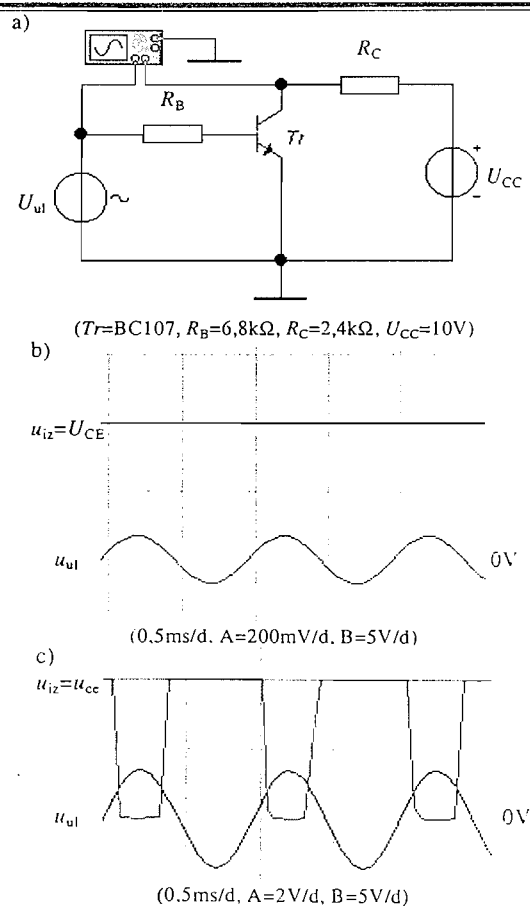
$$A_i = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} \quad A_i = 20 \log \frac{i_{iz}}{i_{ul}} [\text{dB}]$$

$$A_u = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} \quad A_u = 20 \log \frac{u_{iz}}{u_{ul}} [\text{dB}]$$

$$A_p = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} \quad A_p = 10 \log \frac{P_{iz}}{P_{ul}} [\text{dB}]$$

Pojačalo u spoju zajedničkog emitera

Pokus



Slika 3.16. Djelovanje pojačala u spoju zajedničkog emitera

Pokus sa slike 3.16. pokazuje djelovanje izmjeničnoga signala dovedenoga u ulazni krug tranzistora u spoju zajedničkoga emitera. Osciloskop pokazuje vrijednosti ulaznoga (kanal A) i izlaznoga napona, tj. napona između kolektora i emitera (kanal B).

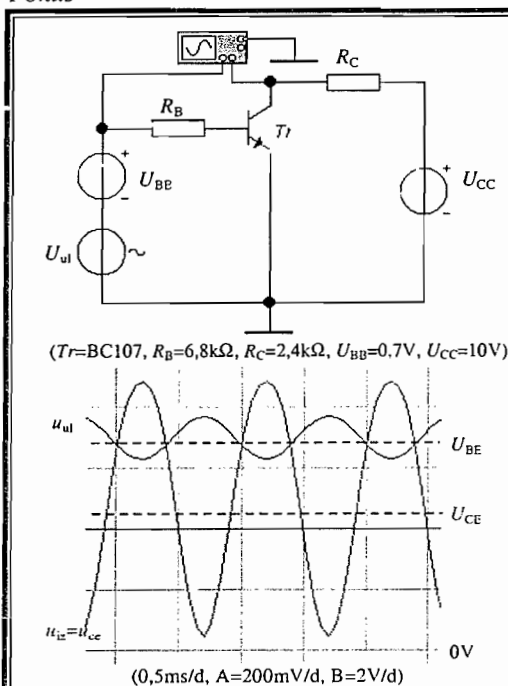
Uz mali ulazni signal (slika 3.16.b) izlazni napon ima stalnu istosmjernu vrijednost jednaku naponu napajanja U_{CC} . To znači da je tranzistor u zapiranju. Uz veliki ulazni signal izlazni napon se u ritmu ulaznog signala mijenja između vrijednosti napona napajanja i napona zasićenja.

Ako se želi da tranzistor radi kao pojačalo, radna točka tranzistora mora biti u aktivnom području rada tranzistora, tj. između zasićenja i zapiranja. Te radne uvjete tranzistoru osiguravaju izvor U_{BB} i otpornik R_B u krugu baze i izvor U_{CC} i otpornik R_C u krugu kolektora (pokus na slici 3.17.).

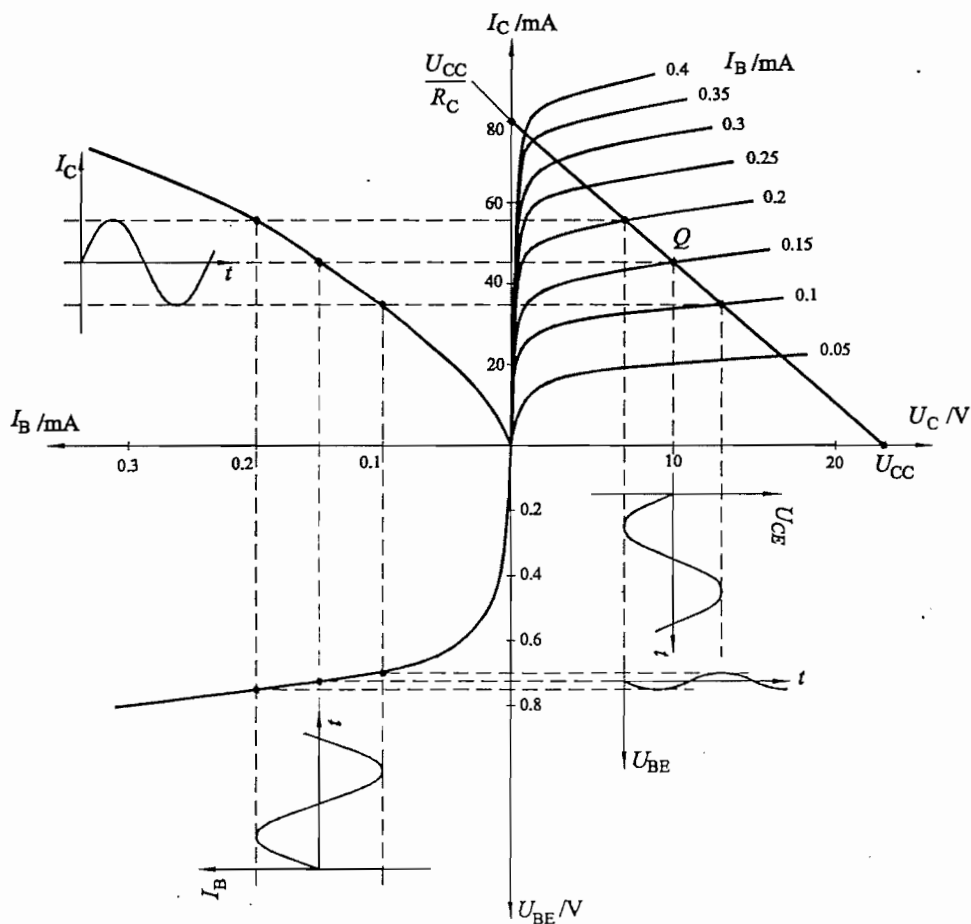
Napon U_{BB} stvara između baze i emitera istosmjerni napon U_{BE} (oko 0,66V). Taj napon tjera struju baze I_B koja drži tranzistor u aktivnom području pa je napon između kolektora i emitera $U_{CE}=4,6V$ (približno pola napona napajanja U_{CC}).

Signal U_u uzrokovat će promjenu napona između baze i emitera U_{BE} . Time se mijenja i struja baze I_B u ritmu ulaznog signala. Ovu promjenu tranzistor će pojačati i dati u izlaznome strujnom krugu (krugu kolektora)

Pokus



Slika 3.17. Pojačanje pojačala u spoju zajedničkog emitera



Slika 3.18. Prikaz djelovanja pojačala na karakteristikama tranzistora

znatno veće promjene struje kolektora I_C . Promjenom struje kolektora mijenja se i pad napona na otporu R_C . Zato se napon U_{CE} mijenja oko vrijednosti napona $U_{CE}=4.6V$ u ritmu ulaznog signala. Iz omjera izlaznog napona $U_{iz}=U_{CE}$ i ulaznog napona U_{ul} vidljivo je da je ostvareno naponsko pojačanje.

Ulazni i izlazni signali su u protufazi, tj. rastuća promjena napona na ulazu izaziva padajuću promjenu na izlazu i obratno.

Za razumijevanje rada pojačala i odabir elemenata i radne točke pojačala pogodna je grafička metoda analize rada sklopova (slika 3.18.).

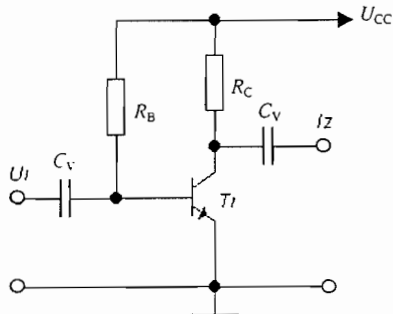
Napon izvora U_{CC} , koji tjera struju I_C kroz otpornik R_C i tranzistor, dijeli se na pad napona na tranzistoru U_{CE} i pad napona na otporniku $I_C R_C$. Međusobni omjer padova napona na ta dva elementa dobije se crtanjem njihovih karakteristika (slika 3.18.). Za tranzistor su to izlazne karakteristike, a za otpornik R_C to je pravac određen jednadžbom:

$$U_{CC} = U_{CE} + I_C R_C$$

Potrebnu struju baze I_B , koja će osigurati radnu točku u aktivnomu području rada tranzistora, postiže se izvorom U_{BB} i otpornikom R_B u krugu baze:

$$U_{BB} = I_B \cdot R_B + U_{BE} \quad I_B = \frac{(U_{BB} - U_{BE})}{R_B}$$

Napon U_{BE} iznosi za silicijske tranzistore tipično 0,65-0,7V. S obzirom na to da su radni pravac i radna točka određeni bez signala na ulazu pojačala, tj. za istosmjerne uvjete rada, nazivaju se **statički radni pravac** i **statička radna točka**. Iz slike 3.18. vidi se da se najveći hod izlaznog signala može dobiti ako je radna točka pojačala u sredini aktivnog područja.



Slika 3.19. Pojačalo s jednim izvorom napona napajanja

Izvor U_{BB} može se nadomjestiti spajanjem otpornika R_B na napon napajanja U_{CC} a da radni uvjeti pojačala ostanu isti (slika 3.19.). Pri tome je:

$$U_{CC} = I_B R_B + U_{BE} \quad I_B = \frac{(U_{CC} - U_{BE})}{R_B}$$

Na taj se način izbjegla potreba za dva izvora napajanja. Kondenzatori C_V imaju zadaću odjeljivanja izvora istosmjernoga napona napajanja od ulaza i izlaza pojačala.

Primjer 3.4.

Računski odrediti položaj statičke radne točke pojačala u spoju zajedničkog emitera (slika 3.19.) za vrijednosti: $U_{CC}=10V$, $R_C=1k\Omega$, $R_B=560k\Omega$, $h_{FE}=100$.

$$I_B = (10 - 0,7)V / 560k\Omega = 16,6\mu A$$

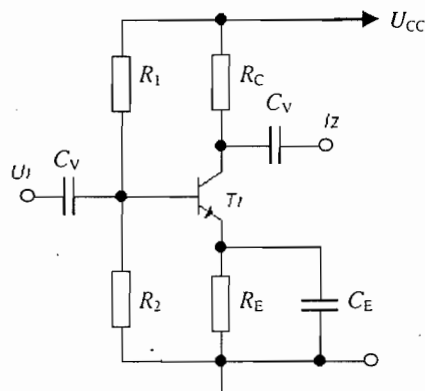
$$I_C = I_B \cdot h_{FE} = 16,6 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 1,66mA$$

$$U_{CE} = 10V - 1,66mA \cdot 1k\Omega = 8,34V$$

Stabilizacija radne točke

S obzirom na rasipanje karakteristika tranzistora, njihovu ovisnost o temperaturi i mogućnost neželjene promjene iznoša napona napajanja, lako je moguće da dođe do pomicanja položaja radne točke pojačala i bez prisutnosti signala na ulazu. Znatno stabilnija radna točka pojačala može se postići spajanjem otpornika R_E u krug emitera (slika 3.20.). Umjesto otpornika R_B struju baze određuje otporno djelilo R_1 i R_2 .

Ako dođe do neželjene promjene napona U_{BE} , npr. smanjenja, to će uzrokovati smanjenje struja I_B i I_C , tj. promijenit će se položaj radne točke. Zbog toga će se smanjiti i struje emitera I_E . Struja I_E stvara pad napona na otporniku R_E koji se također smanjuje. To smanjenje pada napona na otporu R_E znači malo povećanje napona U_{BE} , a time i struje I_B . Dakle, djelovanje otpornika R_E prigušuje prvobitne promjene, odnosno održava stabilnu radnu točku.



Slika 3.20. Pojačalo s otporom u krugu emitera

Za ulazni strujni krug vrijede jednačbe: $U_{BB} - U_{BE} = I_B R_B + I_E R_E$, $I_B = I_E / (1 + h_{FE})$, $R_B = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ i $U_{BB} = U_{CC} R_2 / (R_1 + R_2)$, iz kojih se dobiju izrazi za struju kolektora:

$$I_C \approx I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{1 + h_{FE}}}$$

Ako je R_E puno veće od $R_B / (1 + h_{FE})$, radna točka praktički ne ovisi o faktoru istosmjernoga strujnoga pojačanja h_{FE} , jer tada je $R_B / (1 + h_{FE})$ zanemarivo prema R_E pa za struju kolektora I_C i napon U_{CE} vrijedi:

$$I_C \approx I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E} \quad U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - I_E R_E$$

Primjer 3.5.

Računski odrediti položaj statičke radne točke pojačala u spoju zajedničkog emitera (slika 3.20.) za vrijednosti: $U_{CC} = 10V$, $R_C = 1k\Omega$, $R_1 = 120k\Omega$, $R_2 = 36k\Omega$, $R_E = 270\Omega$, $h_{FE} = 300$.

$$R_B = 120 \cdot 36 / (120 + 36) = 27,7k\Omega$$

$$U_{BB} = 10 \cdot 36 / (120 + 36) = 2,3V$$

$$I_E = (2,3 - 0,7) / (0,27k\Omega + 27,7/300) = 4,4mA = I_C$$

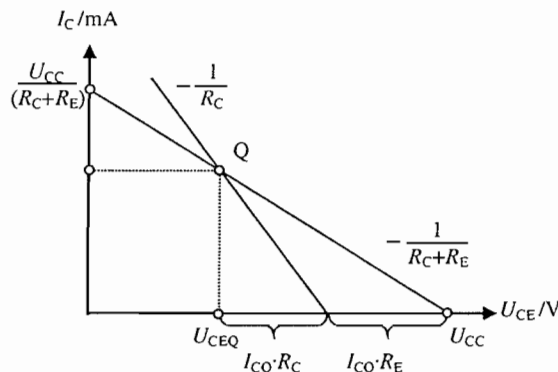
$$I_B = 4,4/300 = 0,0146mA = 14,6\mu A$$

$$U_{CE} = 10V - 4,4mA(1 + 0,27)k\Omega = 4,41V$$

Otpornik R_E povezuje međusobno izlazni i ulazni dio pojačala, tj. ostvaruje povratno djelovanje izlaza na ulaz. To djelovanje naziva se povratna veza ili reakcija. Kako je djelovanje izlazne promjene suprotno djelovanju ulazne promjene, ta se povratna veza naziva **negativna povratna veza**. Otpornik R_E će na isti način kako djeluje na promjene istosmjerne struje, djelovati i na promjene uzrokovane izvorom signala koji se želi pojačati. Dakle otpornik R_E prigušit će i promjene ulaznoga napona i struje što se manifestira kao slabljenje pojačanja. Da se to djelovanje izbjegne, spaja se paralelno otporniku kondenzator dovoljno velikoga kapaciteta C_E (reda veličine stotinu i više mikrofaraada). Taj je kondenzator kratki spoj za izmjenični signal koji se pojačava. Tako izmjenična struja ne prolazi kroz R_E pa za izmjenični signal nema povratne veze, odnosno slabljenja pojačanja.

U ovome slučaju statički radni pravac pojačala određen je iznosom zbroja otpora R_C i R_E (slika 3.21.) i razlikuje se od tzv. **dinamičkoga radnog**

pravca kojeg određuje samo otpor za izmjeničnu struju, u ovom slučaju R_C . Dinamički radni pravac pokazuje u kojemu se rasponu mogu kretati izlazni naponski i strujni signali.

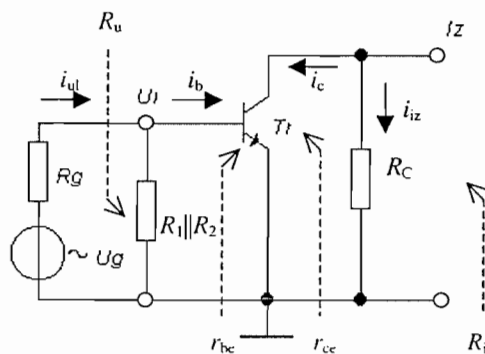


Slika 3.21. Statički i dinamički radni pravac

Za najveći mogući hod izlaznoga signala kod ovakvoga pojačala mora statička radna točka biti pomaknuta od sredine ulijevo tako da su ispunjeni uvjeti:

$$I_B = \frac{U_{CC}}{2R_C + R_E} \quad U_{CE} = \frac{U_{CC}}{2 + \frac{R_E}{R_C}}$$

Pojačanje, ulazni i izlazni otpor pojačala u spoju zajedničkog emitera



Slika 3.22. Pojednostavnjeni sklop pojačala u spoju zajedničkog emitera za mali izmjenični signal

Strujno pojačanje pojačala A_i omjer je izlazne izmjenične struje pojačala (struja koja teče kroz opterećni otpor) i ulazne izmjenične struje. Za pojačalo u spoju zajedničkog emitera sa slike 3.22. izlazna struja i_z jest struja koja teče kroz otpor R_C . Kako je izlazni otpor tranzistora $r_{ce} = 1/h_{oe}$ znatno veći od otpora R_C , može se uzeti da je izlazna struja po iznosu jednaka struji kolektora i_c : $i_z = -i_c = -i_b h_{fe}$.

Izmjenični ulazni signal tjera u pojačalo izmjeničnu struju i_u . Kako je otpor $R_1 \parallel R_2$ znatno veći od ulaznoga otpora tranzistora $r_{be} = h_{ie}$, može se uzeti da je ulazna izmjenična struja pojačala jednaka izmjeničnoj struji baze: $i_u = i_b$. Prema tome, strujno pojačanje pojačala u spoju zajedničkog emitera bit će praktično jednako faktoru strujnoga pojačanja h_{fe} .

Naponsko pojačanje pojačala A_u omjer je izlaznoga izmjeničnoga napona u_{iz} i ulaznoga izmjeničnoga napona u_{ul} (slika 3.22.). Za pojačalo u spoju zajedničkog emitera izlazni napon je izmjenični napon koji na otporu R_C stvara struja i_c . Taj napon je: $u_{iz} = -i_c R_C = -i_b h_{fe} R_C$. Ulazni izmjenični napon je: $u_{ul} = u_{be} = i_b r_{be} = i_b h_{ie}$. Prema tome naponsko pojačanje pojačala u spoju zajedničkog emitera jest: $-h_{fe} R_C / h_{ie}$.

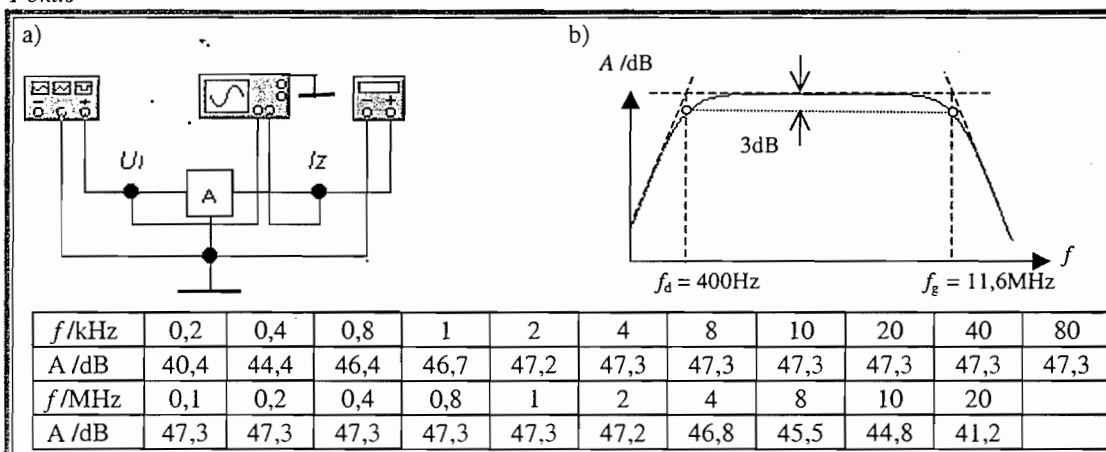
Iznos naponskoga pojačanja pojačala ovisi o iznosu faktora strujnoga pojačanja tranzistora h_{fe} , ulaznom otporu tranzistora h_{ie} i otporu R_C (za veće naponsko pojačanje povoljnija je veća vrijednost). Negativan predznak za naponsko pojačanje znači da je izlazni napon protufazan ulaznomu naponu.

Ulazni otpor pojačala R_u odgovara otporu paralelnoga spoja otpora $R_1 \parallel R_2$ i ulaznoga otpora tranzistora $r_{be} = h_{ie}$. Kako je ulazni otpor tranzistora obično mnogo manji od otpora $R_1 \parallel R_2$, to je ulazni otpor pojačala praktično jednak ulaznom otporu tranzistora.

Izlazni otpor pojačala R_i čini paralelni spoj otpora R_C i izlaznoga otpora tranzistora $r_{ce} = 1/h_{oe}$. Kako je otpor R_C mnogo manji od izlaznoga otpora tranzistora, to je izlazni otpor pojačala jednak otporu R_C .

Amplitudno-frekvencijska karakteristika pojačala

Pokus



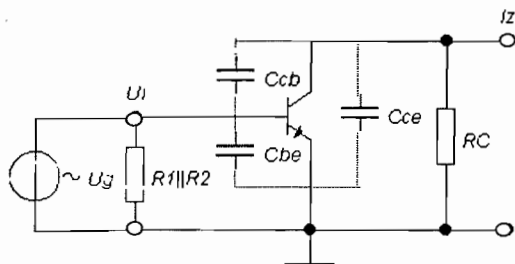
Slika 3.23. Sheme spoja za snimanje amplitudno-frekvencijske karakteristike

Grafički prikaz ovisnosti pojačanja pojačala o frekvenciji signala koji se pojačava naziva se **amplitudno-frekvencijska karakteristika** pojačala (slika 3.23.b). Frekvencije se najčešće nanose u logaritamskomu mjerilu kako bi se mogao prikazati cjelokupan raspon frekvencija u čijem se području promatra rad pojačala.

Iz frekvencijske karakteristike pojačala vidi se da kod signala niskih i visokih frekvencija dolazi do slabljenja pojačanja pojačala. Frekvencije na kojima se pojačanje smanji za $\sqrt{2}$ puta u odnosu prema pojačanju srednjih frekvencija nazivaju se **donja i gornja granična frekvencija** pojačala. Ako se pojačanje izražava decibelima, granične frekvencije su one na kojima se pojačanje smanji za 3 db.

Do slabljenja pojačanja na niskim frekvencijama dolazi zbog kondenzatora u sklopu pojačala (vezni kondenzatori C_v i kondenzator u krugu emitera C_E). Kapaciteti tih kondenzatora, iako većih iznosa, su za signale niskih frekvencija znatan otpor zbog čega slabi pojačanje.

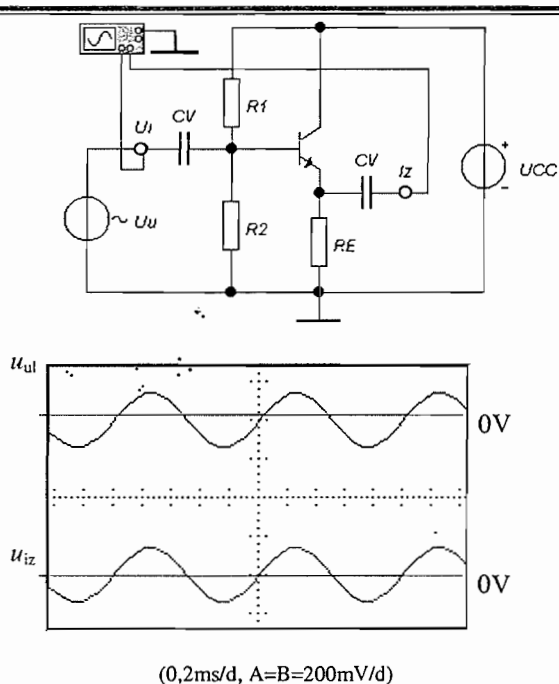
Na visokim frekvencijama dolaze do izražaja **parazitarne kapacitivnosti** tranzistora (slika 3.24.). To su kapacitivnosti koje međusobno čine elektrode tranzistora. Njihovo djelovanje može se predočiti kondenzatorima paralelno vezanima na ulazu i izlazu pojačala. Njihov otpor je na visokim frekvencijama mali pa se zato smanjuje pojačanje. Dodavanjem kondenzatora u ulaznom ili izlaznom krugu može se sniziti gornju graničnu frekvenciju na željeni iznos.



Slika 3.24. Parazitarne kapacitivnosti tranzistora

Pojačalo u spoju zajedničkoga kolektora

Pokus

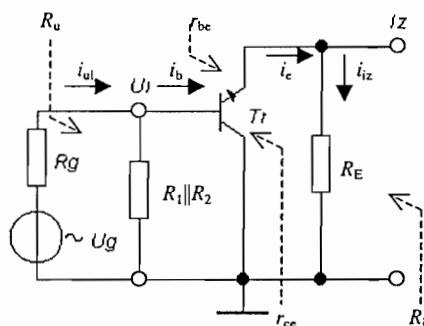


Slika 3.25. Pojačalo u spoju zajedničkoga kolektora

Pojačalo u spoju zajedničkoga kolektora (slika 3.25.) ima naponsko pojačanje približno jednako 1, a napon na izlazu u fazi je s ulaznim naponom (otuda se taj sklop naziva **emitorsko sljedilo** ili **sljedilo napona**, engl. emitter follower, njem. Emitter-Folger). To pojačalo ima veliki ulazni i mali izlazni otpor.

O omjeru ulaznoga otpora pojačala R_u i unutarnjeg otpora izvora signala R_g ovisi koliki će se dio signala izvora prenijeti na ulaz pojačala, a koliki će dio ostati na unutarnjem otporu. Stoga se, kad je potrebno naponski pojačati signal iz izvora s velikim unutarnjim otporom R_g , traži da ulazni otpor pojačala bude što veći. U tom slučaju se emitorsko sljedilo spaja između izvora s velikim unutarnjim otporom i naponskoga pojačala i tako pretvara izvor s velikim unutarnjim otporom u izvor istoga napona a malog unutarnjeg otpora.

Pojačanje, ulazni i izlazni otpor pojačala u spoju zajedničkoga kolektora



Slika 3.26. Pojednostavnjeni sklop pojačala u spoju zajedničkoga kolektora za mali izmjenični signal

Izlazna izmjenična struja pojačala u spoju zajedničkoga kolektora (slika 3.26.) jest struja i_e koja teče kroz otpor R_E . Ako je izlazni otpor tranzistora $r_{ce} = 1/h_o$ znatno veći od otpora R_E , što najčešće jest, izlazna izmjenična struja je: $i_i = i_e = i_b + i_c = i_b(1+h_{fe})$.

Ako su otpori R_1 i R_2 dovoljno velikog iznosa, ulazna izmjenična struja je izmjenična struja baze i_b , pa je strujno pojačanje pojačala u spoju zajedničkoga kolektora približno jednako faktoru strujnoga pojačanja tranzistora h_{fe} : $A_i = i_i/i_u = i_b(1+h_{fe})/i_b = 1+h_{fe} \approx h_{fe}$.

Izlazni izmjenični napon za pojačalo u spoju zajedničkoga kolektora (slika 3.26.) izmjenični je pad napona na otporu R_E : $u_i = i_e R_E = (i_b + i_c) R_E = i_b(1+h_{fe}) R_E = i_b h_{fe} R_E$.

Ulazni izmjenični napon dijeli se na ulazni otpor tranzistora r_{be} i otpor R_E : $u_u = i_b r_{be} + i_e R_E = i_b r_{be} + i_b(1+h_{fe}) R_E = i_b(r_{be} + h_{fe} R_E) = i_b(h_{fe} r_{be} + h_{fe} R_E)$. Stoga je naponsko pojačanje $A_u = i_b h_{fe} R_E / i_b(r_{be} + h_{fe} R_E) = h_{fe} R_E / (r_{be} + h_{fe} R_E) = 1/(r_{be}/h_{fe} R_E + 1)$ što praktički znači da je jednako jedinici jer je $r_{be}/h_{fe} R_E$ puno manje od 1.

Ulazni otpor pojačala R_u paralelni je spoj otpora R_1 , R_2 i ulaznoga otpora tranzistora u spoju zajedničkoga kolektora. Ulazni otpor tranzistora za prikazani spoj (slika 3.26.) može se dobiti iz omjera ulaznoga napona i ulazne struje: $R_u = (i_b r_{be} + i_e R_E) / i_b = [i_b r_{be} + i_b(1+h_{fe}) R_E] / i_b = r_{be} + (1+h_{fe}) R_E = h_{fe} r_{be} + (1+h_{fe}) R_E = (1+h_{fe}) R_E$. Stoga je ulazni otpor pojačala praktički jednak paralelnomu spoju otporova djelila na ulazu pojačala i emitorskog otpora R_E uvećanoga za faktor strujnoga pojačanja:

$R_u = R_1 \parallel R_2 \parallel (1+h_{fe})R_E = R_1 \parallel R_2 \parallel h_{fe}R_E$. To zahtijeva visokoomsko otporno djelilo na ulazu kako bi se zadržao veliki ulazni otpor pojačala, što je u opreci sa zahtjevom za stabilnom radnom točkom.

Izlazni otpor pojačala R_i paralelni je spoj otpora R_E , izlaznoga otpora tranzistora r_{ce} i zbroja otpora izvora signala R_g i ulaznoga otpora tranzistora r_{be} preslikanog u izlazni krug. Otporima r_{be} i R_g (otpori R_1 i R_2 znatno su veći od zbroja r_{be} i R_g pa se ne moraju uzeti u obzir) teče struja $i_b = i_e / (h_{fe} + 1)$ pa je

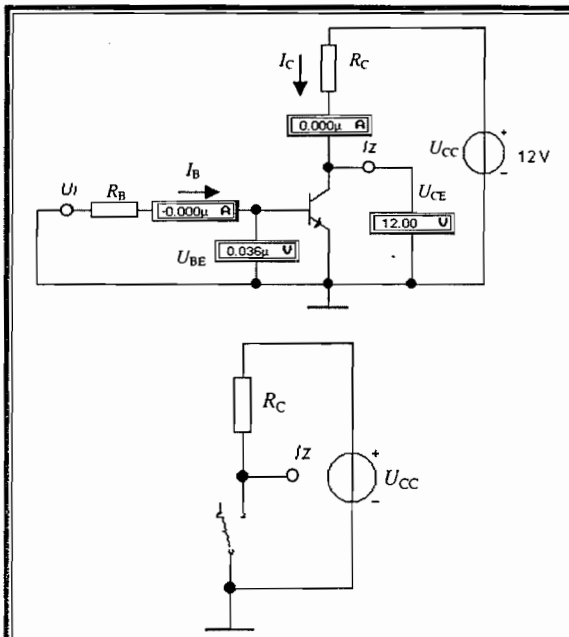
njihovo djelovanje u izlaznome strujnom krugu umanjeno $(1+h_{fe})$ puta. Prema tome, izlazni otpor pojačala u spoju zajedničkoga kolektora je: $R_i = R_E \parallel r_{ce} \parallel (r_{be} + R_g) / (1+h_{fe}) = R_E \parallel r_{ce} \parallel (h_{ie} + R_g) / h_{fe}$

Kako je obično, u prilikama kada se upotrebljava spoj sa zajedničkim kolektorom, $(h_{ie} + R_g) / h_{fe}$ znatno manje od R_E i r_{ce} , izlazni je otpor ovog spoja jednak zbroju unutarnjeg otpora izvora signala i ulaznog otpora tranzistora umanjen za faktor strujnoga pojačanja h_{fe} : $R_i = (h_{ie} + R_g) / h_{fe}$.

3.3. BIPOLARNI TRANZISTOR KAO SKLOPKA

Tranzistor kao sklopka

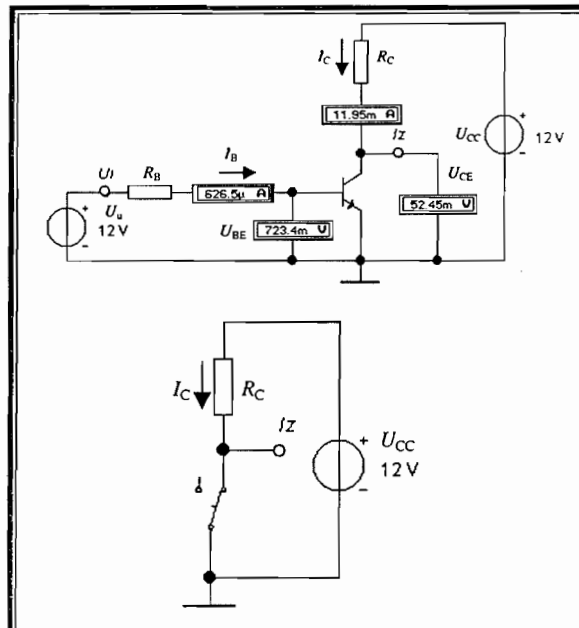
Pokus



Slika 3.27. Tranzistor kao isključena sklopka

Ako je struja baze $I_B = 0$, radna točka tranzistora je u zapiranjju. Tada tranzistorom teče samo mala preostala struja kolektora, koja se praktički može zanemariti, pa je izlazni napon sklopke (napon U_{CE}) gotovo jednak naponu napajanja U_{CC} . Tranzistor zato djeluje kao isključena sklopka (slika 3.27.). Da bi se to postiglo, potrebno je na ulaz tranzistorske sklopke dovesti napon pri kojem će struja baze biti jednaka nuli. To je napon 0V ili mali pozitivan napon (silicijski tranzistori počinju voditi uz napon $U_{BE} = 0,5V$).

Pokus



Slika 3.28. Tranzistor kao uključena sklopka

Uz dovoljno velik pozitivni ulazni napon (za silicijske tranzistore toliki da između baze i emitera bude napon $U_{BE} = U_{BEzas} = 0,7V - 0,8V$) poteći će tranzistorom dovoljno velika struja baze I_{Bzas} koja će radnu točku tranzistora dovesti u područje zasićenja.

$$U_u = I_{Bzas} R_B + U_{BEzas} \quad I_{Bzas} = \frac{(U_u - U_{BEzas})}{R_B}$$

Takva struja baze potjerat će kroz tranzistor najveću moguću struju kolektora I_{Czas} .

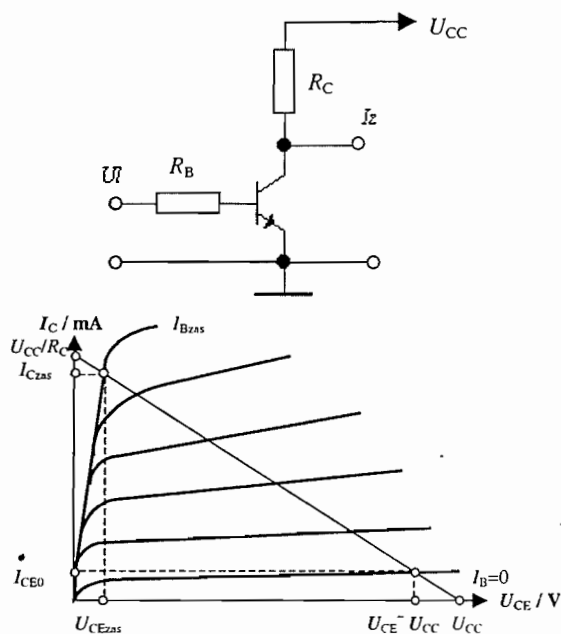
$$U_{CC} = I_{Czas} R_C + U_{CEzas} \quad I_{Czas} = \frac{(U_{CC} - U_{CEzas})}{R_C}$$

Zato je gotovo sav napon napajanja na kolektorskom otporu R_C . Izlazni napon je vrlo mali napon zasićenja tranzistora U_{CEZas} (za silicijske tranzistore iznosi uobičajeno 0,1V-0,3V). Tranzistor u tom slučaju djeluje kao uključena sklopka (slika 3.28.).

Da bi tranzistor bio u zasićenju, mora biti ispunjen uvjet:

$$I_{Bzas} \geq \frac{I_{Czas}}{\beta_{FE}}$$

Dakle, ako se želi da tranzistor djeluje kao sklopka, radna točka tranzistora mora biti u zasićenju (uključena sklopka) ili u zapiranjju (isključena sklopka). U kojemu će području radna točka biti, ovisi o vrijednostima napona napajanja, elemenata ugrađenih u sklopku i ulaznog napona (slika 3.29.).

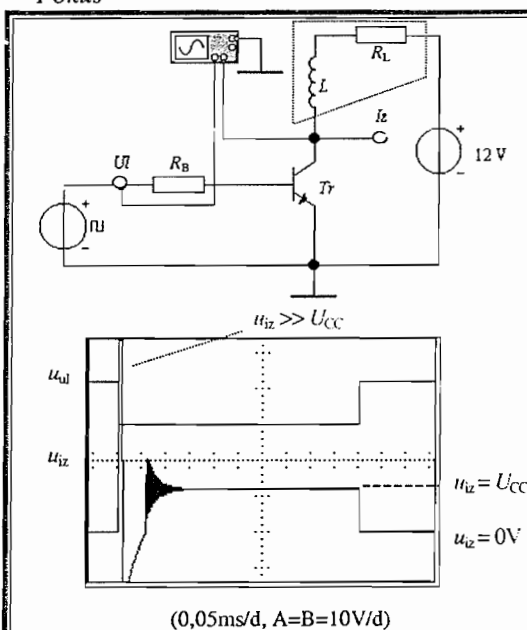


Slika 3.29. Tranzistor kao sklopka (shema i radne točke na karakteristici)

Zavojnica u kolektorskom krugu tranzistorske sklopke

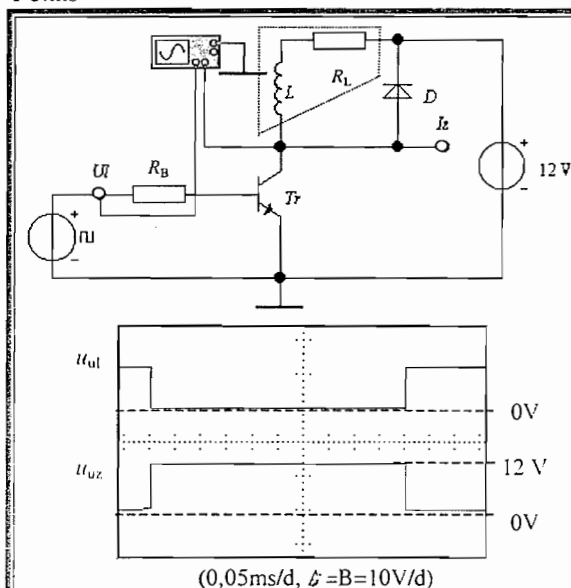
Ponkad se u kolektorskom krugu tranzistora umjesto otpornika nalazi zavojnica, tj. pobudni namot releja ili kakva drugog elektromagneta (slika 3.30.). U trenutku isključenja tranzistorske sklopke, zbog nagloga prekida protjecanja struje kroz zavojnicu, u zavojnici se inducira vrlo veliki napon. Taj napon može uništiti tranzistor ako prijeđe dopušteni iznos napona U_{CEmax} .

Pokus



Slika 3.30. Zavojnica u kolektorskom krugu tranzistorske sklopke

Pokus



Slika 3.31. Zaštita tranzistora od prevelikoga kolektorskoga napona

Zbog zaštite tranzistora, paralelno zavojnici spaja se dioda. Dioda omogućava protjecanje struje kroz zavojnicu i nakon isključenja tranzistorske sklopke. Zato se struja kroz zavojnicu postupno smanjuje i time otklanja visoki napon s kolektora tranzistora (slika 3.31.).

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

VJEŽBA 3.1. POJAČALO U SPOJU ZAJEDNIČKOG EMITERA

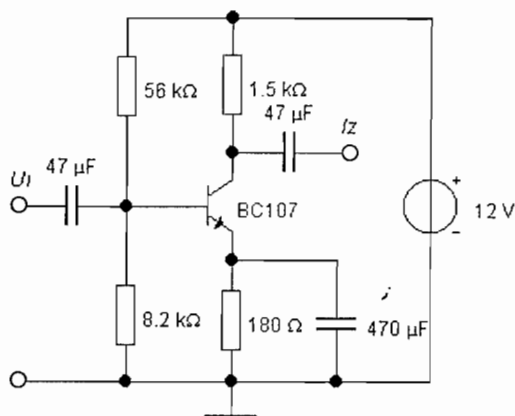
Zadatak

Upoznati svojstva spoja s obzirom na strujno i naponsko pojačanje te fazni odnos ulaznih i izlaznih signala. Ustanoviti utjecaj opterećenja na iznos naponskoga pojačanja. Usvojiti osnovne postupke u primjeni instrumenata (laboratorijski izvor sinusoidnoga napona, elektronički voltmetar, osciloskop) i prikazu mjernih rezultata.

Instrumenti i pribor

- tranzistor BC107 (2N2222)
- otpornici 180Ω, 1,5kΩ, 3,3kΩ, 8,2kΩ i 10kΩ
- kondenzatori 47μF (2 komada) i 470μF
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napajanja 0-15V, 1A
- univerzalni instrument (3 komada)
- elektronički voltmetar
- generator sinusoidnoga napona
- osciloskop.

Priprema



Slika 3.32. Pojačalo u spoju zajedničkog emitera

1. Proučite tvorničke podatke tranzistora BC107 i navedite iznose dopuštenih napona U_{CE} , struje I_C te faktor strujnoga pojačanja.

2. Izračunajte vrijednosti struja baze, kolektora i emitera te napone U_{CE} , U_{R2} i U_{RE} pojačala sa slike 3.32. Rezultate prikažite tablicom.

Pokusi

1. Mjerenje struja i napona pojačala u statičkim uvjetima

1.1. Nacrtajte shemu pojačala sa slike 3.32. sa spojenim instrumentima za mjerenje struja baze, kolektora i emitera te napone U_{CE} , U_B , U_{BE} i U_{RE} .

1.2. Spojite elemente pojačala prema slici 3.32. Priključite pojačalo na napon napajanja i izmjerite struje baze, kolektora i emitera te napone U_{CE} , U_B , U_{BE} i U_{RE} . Rezultate prikažite tablicom.

2. Naponsko pojačanje i fazni omjer ulaznoga i izlaznoga napona

2.1. Nacrtajte shemu spoja za mjerenje naponskoga pojačanja pojačala sa slike 3.32.

2.2. Prema shemi spojite pojačalo i instrumente. Osciloskopom promatrajte napon na ulazu i izlazu pojačala. Nacrtajte dijagrame ulaznoga i izlaznoga napona.

2.3. Izmjerite pojačanje pojačala uz ulazni sinusoidni napon amplitude 10mV i frekvencije 1kHz.

3. Utjecaj amplitude ulaznoga signala na djelovanje pojačala

3.1. Povećajte amplitudu ulaznoga napona na 100mV. Nacrtajte dijagrame ulaznoga i izlaznoga napona.

3.2. Kakav je utjecaj amplitude ulaznoga napona na oblik izlaznoga napona pojačala?

4. Opterećenje pojačala

4.1. Na izlaz pojačala spojite otpor $R_p=3.3k\Omega$ prema masi. Izmjerite pojačanje opterećenoga pojačala uz ulazni sinusoidni napon amplitude 10mV i frekvencije 1kHz.

4.2. Kako opterećenje pojačala utječe na iznos naponskoga pojačanja?

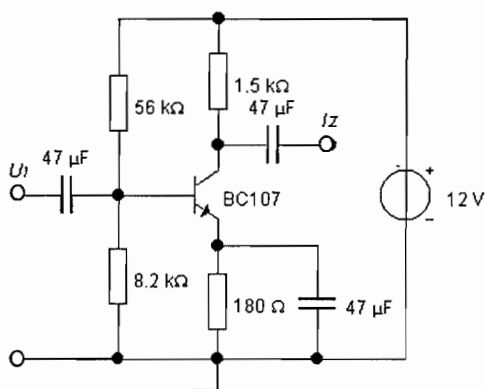
VJEŽBA 3.2. AMPLITUDNO-FREKVENCIJSKA KARAKTERISTIKA POJAČALA

Zadatak

Upoznati svojstva spoja s obzirom na frekvencijsku ovisnost pojačanja, utjecaj pojedinih komponenata na iznose pojačanje, te ovladati osnovnim postupcima u primjeni instrumenata (laboratorijski izvor sinusoidnoga napona, elektronički voltmetar, osciloskop) i prikazu mjernih rezultata.

Instrumenti i pribor

- tranzistor BC107
- otpornici 180Ω, 1,5kΩ, 3,3kΩ, 8,2kΩ i 56kΩ
- kondenzatori 220pF, 470pF, 10 μF, 47μF (3 komada) i 100μF
- eksperimentalna pločica
- spojni vodovi
- izvor napajanja 0-15V, 1A
- elektronički voltmetar
- generator sinusoidnoga napona
- osciloskop.



Slika 3.33. Pojačalo u spoju zajedničkog emitera

Priprema

1. Nacrtajte shemu spoja za snimanje amplitudno-frekvencijske karakteristike pojačala sa slike 3.33.

Pokusi

1. Snimanje amplitudno-frekvencijske karakteristike pojačala

1.1. Spojite pojačalo prema shemi za snimanje amplitudno-frekvencijske karakteristike. Izmjerite pojačanje opterećenoga pojačala ($R_P=3,3k\Omega$) za frekvencije u rasponu od 200Hz do 20MHz uz ulazni sinusoidni napon amplitude 10mV. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

1.2. Na temelju izmjerenih vrijednosti nacrtajte frekvencijsku karakteristiku pojačala. Na nacrtanoj frekvencijskoj karakteristici odredite donju i gornju graničnu frekvenciju pojačala.

2. Utjecaj kapaciteta emitorskoga kondenzatora na granične frekvencije pojačala

2.1. Ustanovite kako kapacitet kondenzatora C_E utječe na granične frekvencije pojačala, i to mjerenjem pojačanja na niskim i visokim frekvencijama: a) uz odspojen kondenzator, b) uz $C_E=10\mu F$, c) uz $C_E=100\mu F$.

3. Ograničavanje gornje granične frekvencije

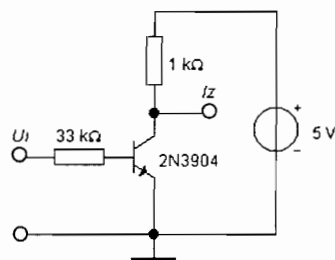
3.1. Paralelno izlazu pojačala sa slike 3.33. spojite kondenzator i ustanovite gornju graničnu frekvenciju za vrijednosti kapaciteta: a) 220pF, b) 470pF.

3.2. Između baze i kolektora tranzistora u pojačalu sa slike 3.33. spojite kondenzator i ustanovite gornju graničnu frekvenciju pojačala za vrijednosti kapaciteta: a) 220pF, b) 470pF.

VJEŽBA 3.3. TRANZISTOR KAO SKLOPKA

Zadatak

Ustanoviti kada tranzistor djeluje kao uključena, a kada kao isključena sklopka. Ispitati odziv tranzistorske sklopke na impulsnu pobudu.



Slika 3.34. Tranzistorska sklopka

Pribor i instrumenti

- tranzistor 2N3904
- otpornici 1kΩ, 1,5kΩ, i 33kΩ
- kondenzator 10nF, 33nF, 56nF i 100nF
- izvor napajanja 5V, 1A
- eksperimentalna pločica
- spojni vodovi
- univerzalni instrument (2 komada)
- generator impulsa
- osciloskop.

Priprema

1. Koliki su izlazni napon te struje I_B i I_C tranzistorske sklopke ako je ulazni napon 0V, odnosno 5V? Provjerite je li ispunjen uvjet zasićenja za tranzistorsku sklopku.

Pokusi

1. Uključena i isključena tranzistorska sklopka

1.1. Spojite elemente tranzistorske sklopke prema shemi sa slike 3.34. i priključite napon napajanja. Izmjerite struje I_B i I_C te izlazni napon kad je ulazni napon 0V.

1.2. Izmjerite struje I_B i I_C te izlazni napon tranzistorske sklopke kad je na ulaz priključen napon 5V.

2. Impulsna pobuda tranzistorske sklopke

2.1. Na ulaz tranzistorske sklopke (slika 3.34.) priključite izvor pravokutnih impulsa amplitude 5V i frekvencije 10kHz. Osciloskopom ustanovite odnos ulaznoga i izlaznoga napona i nacrtajte njihove vremenske dijagrame.

VJEZBA 3.4. OPTEREĆENJE TRANZISTORSKE SKLOPKE

Zadatak

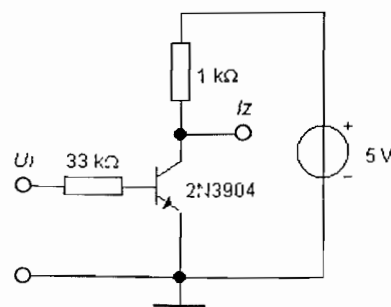
Ispitati djelovanje otpornog i kapacitivnog opterećenja na rad tranzistorske sklopke.

Pribor i instrumenti

- tranzistor 2N3904
- otpornici 1k Ω , 1,5k Ω , i 33k Ω
- kondenzator 10nF, 33nF, 56nF i 100nF
- izvor napajanja 5V, 1A
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument (2 komada)
- generator impulsa
- osciloskop.

Priprema

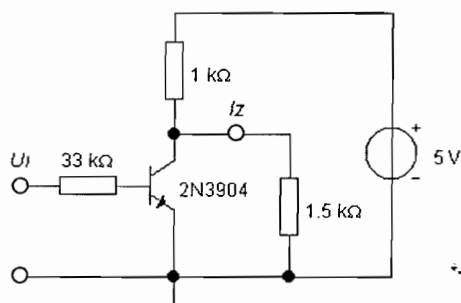
1. Koliki su izlazni napon te struje I_B i I_C tranzistorske sklopke (slika 3.35.) ako je ulazni napon 0V, odnosno 5V?



Slika 3.35. Neopterećena tranzistorska sklopka

Pokusi

1. Opterećenje tranzistorske sklopke otporom prema masi



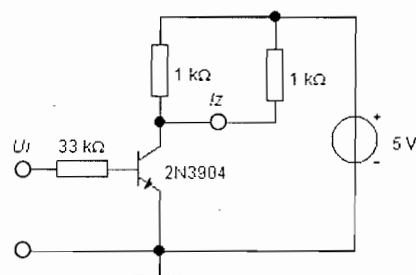
Slika 3.36. Tranzistorska sklopka opterećena otporom prema uzemljenoj točki

1.1. Spojite elemente tranzistorske sklopke prema shemi sa slike 3.36. i priključite napon napajanja. Izmjerite struju I_C i izlazni napon kad je ulazni napon 0V, odnosno 5V.

1.2. Usporedite vrijednosti izlaznoga napona i struje I_C neopterećene sklopke (slika 3.35.) i opterećene sklopke. Kakav je utjecaj otpornoga opterećenja prema masi na rad tranzistorske sklopke?

1.3. Ispitajte ovisnost izlaznoga napona isključene tranzistorske sklopke ($U_a=0V$) o iznosu opteretnog otpora R_p . Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

2. Opterećenje tranzistorske sklopke otporom prema naponu napajanja



Slika 3.37. Tranzistorska sklopka opterećena otporom prema naponu napajanja

2.1. Spojite elemente tranzistorske sklopke prema shemi sa slike 3.37. i priključite napon napajanja. Izmjerite struju I_C i izlazni napon kad je ulazni napon 0V, odnosno 5V.

2.2. Usporedite vrijednosti izlaznoga napona i struje I_C neopterećene sklopke (slika 3.35.) i opterećene sklopke. Kakav je utjecaj otpornoga opterećenja prema napajanju na rad tranzistorske sklopke?

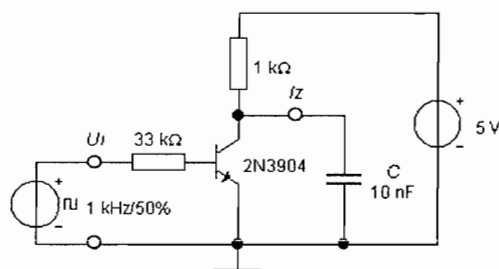
2.3. Ispitajte ovisnost struje I_C i izlaznoga napona uključene tranzistorske sklopke ($U_v=5V$) o iznosu opterećenog otpora R . Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

3. Kapacitivno opterećena tranzistorska sklopka

3.1. Spojite elemente tranzistorske sklopke prema shemi sa slike 3.38. i priključite napon napajanja. Na ulaz priključite izvor pravokutnih impulsa amplitude 5V, frekvencije 1kHz. Osciloskopom ustanovite oblik napona na izlazu. Kakav je utjecaj kapacitivnog opterećenja na rad tranzistorske sklopke?

3.2. Ispitajte utjecaj promjene kapaciteta kondenzatora na oblik izlaznoga napona kapacitivno opterećene tranzistorske sklopke (slika 3.38.). Nacrtajte vremenske dijagrame ulaznoga i izlaznoga napona za vrijednosti kapaciteta kondenzatora C : 10nF, 33nF, 56nF i 100nF.

3.3. Ispitajte utjecaj promjene frekvencije ulaznoga napona na oblik izlaznoga napona kapacitivno opterećene tranzistorske sklopke (slika 3.38.). Nacrtajte vremenske dijagrame ulaznoga i izlaznoga napona za frekvencije f : 2kHz, 4kHz i 10kHz.



Slika 3.38. Kapacitivno opterećena tranzistorska sklopka

PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Objasnite ulogu pojedinih elemenata pojačala sa slike 3.20.

2. Kakav je fazni odnos ulaznoga i izlaznoga napona pojačala u spoju zajedničkog emitera?

3. Koji elementi pojačala utječu na iznos naponskoga pojačanja?

4. Kakav je utjecaj amplitude ulaznoga napona na oblik izlaznoga napona pojačala?

5. Kako opterećenje pojačala utječe na iznos naponskoga pojačanja?

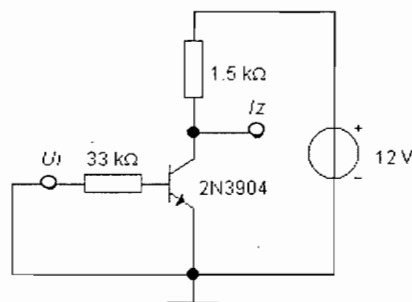
6. Kako kondenzator C_E utječe na naponsko pojačanje pojačala?

7. Zbog čega dolazi do pada pojačanja na niskim i visokim frekvencijama?

8. Kako se može sniziti gornja granična frekvencija pojačala?

9. Uz koje se uvjete tranzistor u spoju prema slici 3.29. može smatrati uključenom, odnosno isključenom sklopkom?

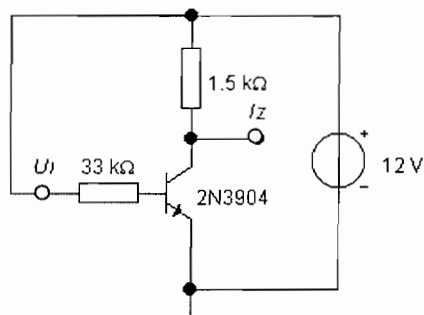
10. Kakav je fazni odnos ulaznog i izlaznoga napona tranzistorske sklopke sa slike 3.29.?



Slika 3.39. Tranzistorska sklopka (zadatak 11.)

11. Koliki je izlazni napon tranzistorske sklopke sa slike 3.39.?

12. Koliki je izlazni napon tranzistorske sklopke sa slike 3.40.?



Slika 3.40. Tranzistorska sklopka (zadatak 12.)

13. Kako i kada utječe opterećenje tranzistorske sklopke otporom prema masi?

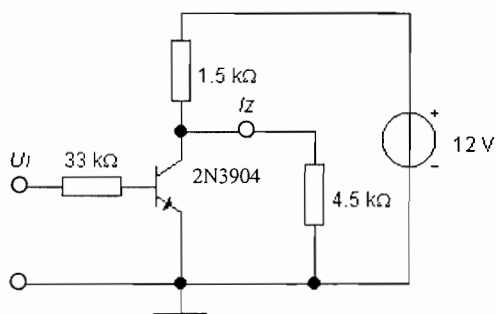
14. Kako i kada utječe opterećenje tranzistorske sklopke otporom prema naponu napajanja?

15. Kako kapacitet kondenzatora na izlazu tranzistorske sklopke utječe na oblik, vrijeme porasta i vrijeme pada izlaznoga napona?

16. Zašto je vrijeme porasta izlaznoga napona kapacitivno opterećene sklopke veće od vremena pada?

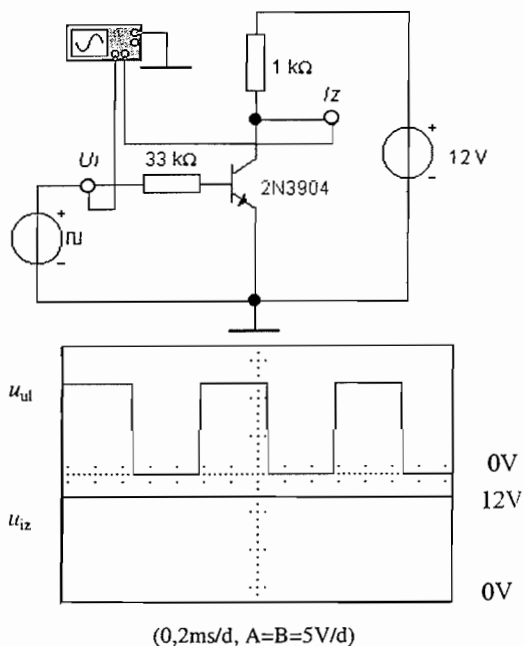
17. Kako frekvencija ulaznoga napona utječe na oblik, vrijeme porasta i vrijeme pada izlaznoga napona kapacitivno opterećene tranzistorske sklopke?

18. Koliki je izlazni napon tranzistorske sklopke sa slike 3.41. ako je na ulazu 0,3 V?



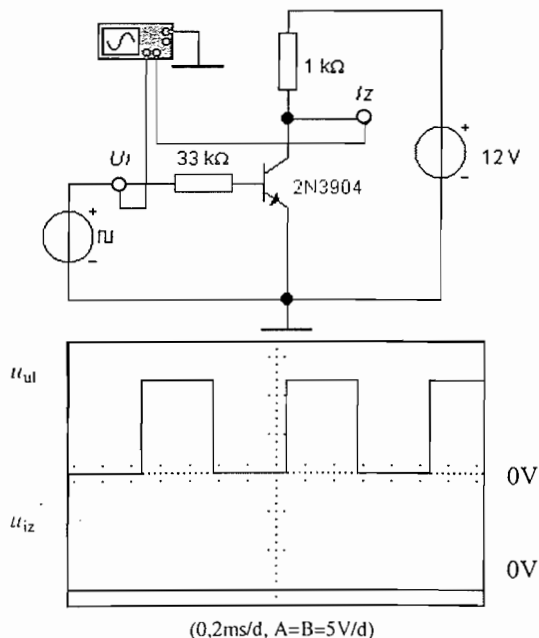
Slika 3.41. Opterećena tranzistorska sklopka

19. Na temelju oscilograma (slika 3.42.) ustanovite moguće uzroke neispravnoga djelovanja sklopke.

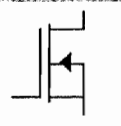


Slika 3.42. Ispitivanje tranzistorske sklopke (zadatak 19.)

20. Na temelju oscilograma (slika 3.43.) ustanovite uzrok neispravnoga djelovanja sklopke.



Slika 3.43. Ispitivanje tranzistorske sklopke (zadatak 20.)



4. OSNOVNI SKLOPOVI S UNIPOLARNIM TRANZISTORIMA

Za razliku od bipolarnih tranzistora, struju unipolarnih tranzistora čini samo jedna vrsta nosilaca naboja (elektron ili šupljina, a ne oboje kao kod bipolarnih tranzistora). Nazivaju se **tranzistori s efektom polja** (engl. field-effect transistor, skraćeno **FET**, njem. Feldeffekt Transistor). To su naponski upravljani elementi. Imaju vrlo veliki ulazni otpor pa ne zahtijevaju ulaznu struju.

Tranzistori s efektom polja mogu biti spojni (engl. junction fieleffect transistor, skraćeno JFET, njem. Sperrschicht-FET) i s izoliranim zasunom, odnosno s izoliranom upravljačkom elektrodom (engl. insulated gate FET, skraćeno IGFET ili metal oxide semiconductor FET, skraćeno MOSFET, njem. Isolierschicht-FET). S obzirom na tip poluvodiča jedna i druga vrsta mogu biti n-kanalni i p-kanalni.

4.1. Spojni tranzistori s efektom polja

Izlazne karakteristike u spoju zajedničkog uvoda
Prijenosna karakteristika
Vertikalni FET

4.2. Tranzistori s efektom polja i izoliranim zasunom

Obogaćeni tip MOSFET-a
Osiromašeni tip MOSFET-a
P-kanalni MOSFET
Zaštita MOSFET-a
Vertikalni MOSFET

4.3. Osnovni spojevi pojačala s unipolarnim tranzistorima

Pojačalo s JFET-om u spoju zajedničkog uvoda
Pojačalo s MOSFET-om u spoju zajedničkog uvoda

4.4. Unipolarni tranzistor kao sklopka

Sklopka s MOSFET-om
Bipolarni tranzistor s izoliranim zasunom

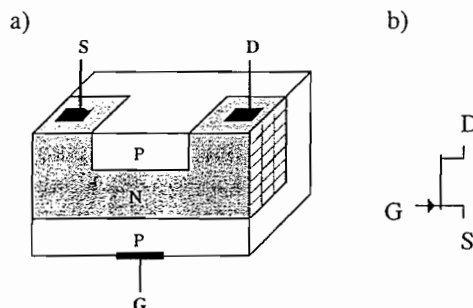
Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 4.1. Pojačalo s JFET-om u spoju zajedničkog uvoda
Vježba 4.2. Pojačalo s MOSFET-om u spoju zajedničkog uvoda

Pitanja za ponavljanje i provjeru znanja

4.1. SPOJNI TRANZISTORI S EFEKTOM POLJA

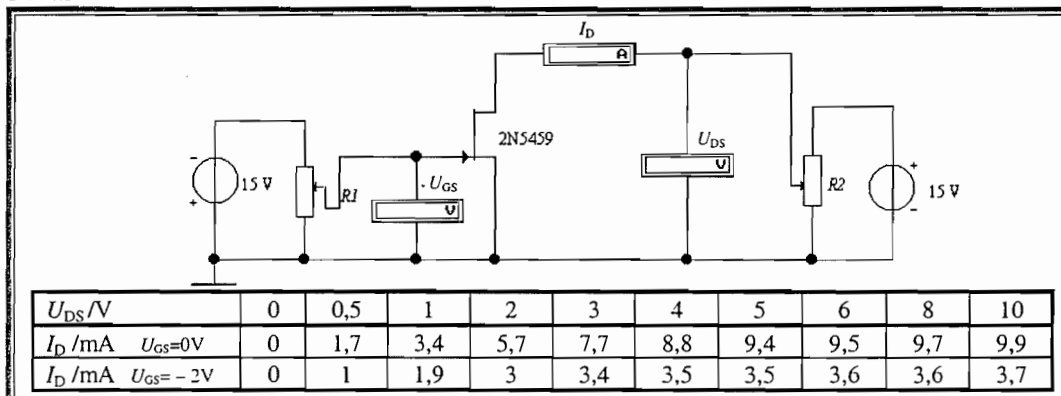
Spojni tranzistori s efektom polja, skraćeno spojni FET, odnosno JFET, mogu biti **n-kanalni** i **p-kanalni**. N-kanalni JFET može se pojednostavnjeno prikazati kao silicijski štapić n-tipa uz koji se sa svake strane nalazi p-tip poluvodiča (slika 4.1.). Priključnice na krajevima n-tipa poluvodiča nazivaju se **uvod S** (od engl. source) i **odvod D** (od engl. drain). Priključnica povezana sa slojem p-tipa naziva se **zasun** ili **upravljačka elektroda G** (od engl. gate). Vrijednost struje I_D (struja odvoda) koja teče kroz tranzistor ovisi o vrijednosti priključenih napona između odvoda i uvida U_{DS} i između zasuna i uvida U_{GS} .



Slika 4.1. Spojni n-kanalni tranzistor s efektom polja: a) pojednostavnjeni prikaz građe, b) simbol

Izlazne karakteristike u spoju zajedničkog uvida

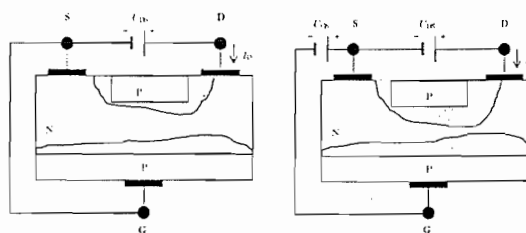
Pokus



Slika 4.2. Spoj za snimanje izlaznih tranzistorskih karakteristika

Uz pozitivni napon priključen između odvoda i uvida i kratkospojen zasun ($U_{GS}=0$) teče tranzistorom struja odvoda I_D čija vrijednost ovisi o naponu U_{DS} prema prikazu na slici 4.4. U početku s porastom napona U_{DS} raste struja I_D linearno (**omsko područje** izlazne strujno-naponske karakteristike tranzistora). Porast struje I_D sužava vodljivi kanal tranzistora (pad napona duž kanala i stvaranje sloja smanjene vodljivosti) pa kad struja I_D dostigne vrijednost struje zasićenja I_{DSS} (međusobni dodir slojeva osiromašene vodljivosti), struja odvoda prestaje rasti. Napon U_{DS} kod kojeg struja odvoda poprima vrijednost struje zasićenja naziva se **napon dodira** U_P (engl. pinch-off voltage, njem. Abschnürspannung). To je **područje dodira** ili

zasićenja u kojemu je struja I_D vrlo malo ovisna o naponu U_{DS} . Povećanje napona U_{DS} preko određene vrijednosti dovodi do lavinskoga proboja, pri kojemu struja I_D naglo raste, što može dovesti do uništenja tranzistora.

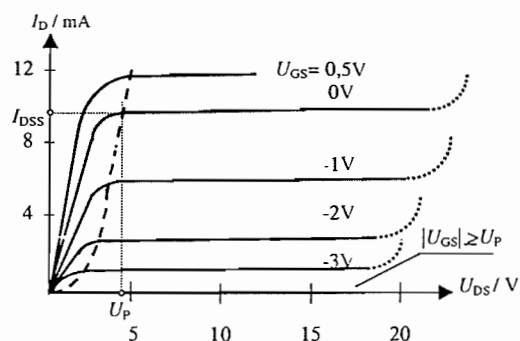


Slika 4.3. Prikaz rada spojnoga n-kanalnog tranzistora s efektom polja

Uz negativne vrijednosti napona U_{GS} teče manja struja I_D (vodljivi kanal je uži) i napon dodira U_P je manji, tj. tranzistor dolazi u zasićenje kod manjih napona U_{DS} i struja I_D . Uz veliki negativni napon U_{GS} (engl. gate-source cut-off voltage ili pinch-off voltage, njem. Abschnürspannung) tranzistorom praktički prestaje teći struja (zatvara se vodljivi kanal). To se događa kad je napon U_{GS} po apsolutnom iznosu jednak ili veći od napona U_P .

Pozitivni prednaponi zasuna ne upotrebljavaju se jer bi to dovelo do propusne polarizacije pn-spoja i pojave struje zasuna. Međutim mali pozitivni naponi do 0,5V mogu se dopustiti s obzirom na napon praga pn-spoja.

Grafički prikaz ovisnosti struje odvoda I_D o naponu U_{DS} uz napon U_{GS} kao parametar jest **izlazna karakteristika** spojnoga tranzistora s efektom polja (slika 44.).



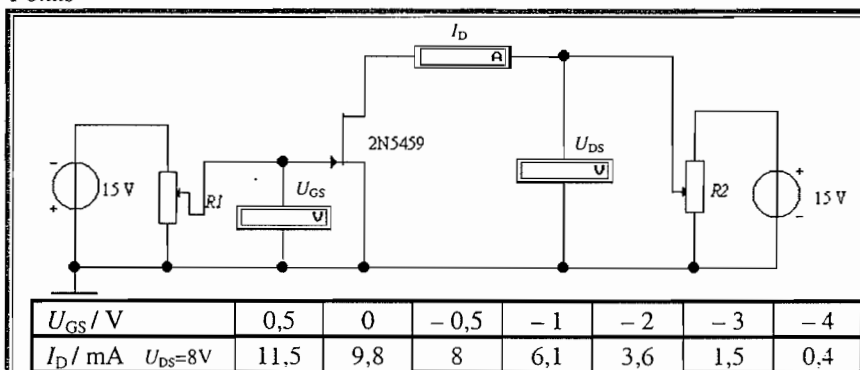
Slika 4.4. Izlazna strujno-naponska karakteristika spojnoga n-kanalnog tranzistora s efektom polja

Omjer promjene napona U_{DS} i time izazvane promjene struje odvoda I_D , uz $U_{GS} = \text{konst.}$, naziva se **izlazni dinamički otpor** r_{DS} (engl. drain-source resistance, njem. dynamische Ausgangswiderstand):

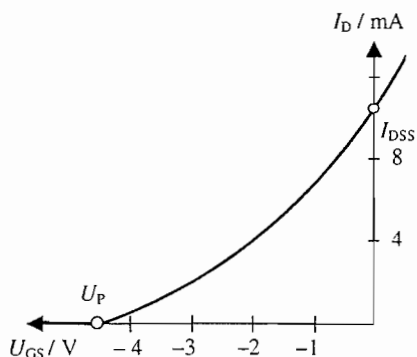
$$r_{DS} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D}$$

Prijenosna karakteristika

Pokus



Slika 4.5. Spoj za snimanje prijenosne karakteristike



Slika 4.6. Prijenosna strujno-naponska karakteristika spojnoga n-kanalnog tranzistora s efektom polja

Grafički prikaz ovisnosti struje odvoda I_D o naponu U_{GS} , uz napon U_{DS} kao parametar, naziva se **prijenosna karakteristika** (engl. transfer characteristic, njem. Steuerkennlinie).

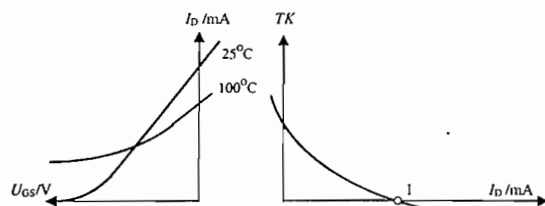
Omjer promjene struje I_D i promjene napona U_{GS} koja je tu promjenu struje izazvala, uz $U_{DS} = \text{konst.}$, naziva se **strmina** (engl. transfer admittance ili transconductance, njem. Steilheit):

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

Ulazni dinamički otpor tranzistora r_{GS} (engl. gate-source resistance, njem. dynamischer Eingangswiderstand) može se smatrati beskonačnim jer je struja upravljačke elektrode praktično zanemariva, budući da se radi o zaporno polariziranom pn-spoju (reda veličine nanoampera ili manja).

Za praktičnu primjenu spojnoga tranzistora s efektom polja važni su podaci o dopuštenim vrijednostima napona između uvida i odvoda U_{DS} , odnosno između zasuna i uvida $-U_{GS}$, dopuštenoj struji odvoda I_D i utrošku snage P_{tot} . Dopuštene vrijednosti struje I_D kreću se od nekoliko desetaka do nekoliko stotina miliampera. Naponi $-U_{GS}$ mogu biti do deset volta, a naponi U_{DS} do nekoliko desetaka volta. Dopušteno rasipanje snage može biti do nekoliko stotina milivata.

Kao i kod bipolarnih tranzistora, tako je i kod unipolarnih vrlo značajan utjecaj promjene temperature na njihove karakteristične vrijednosti. Slika 4.7. pokazuje prijenosne karakteristike za 25°C i 100°C. Iz njih se vidi da u području manjih vrijednosti struja I_D tranzistor ima pozitivni temperaturni koeficijent, a u području većih struja negativan temperaturni koeficijent. Kod struja I_D oko 1mA struja odvoda je neovisna o temperaturi.

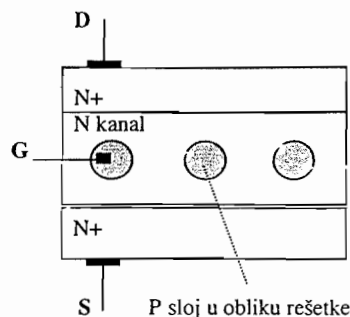


Slika 4.7. Utjecaj temperature na karakteristične veličine tranzistora

Sve što je rečeno za n-kanalni spojni tranzistor s efektom polja vrijedi i za p-kanalni, ali sa suprotnim smjerom struja i polaritetom napona.

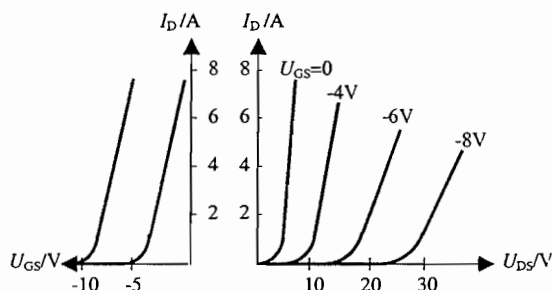
Vertikalni FET

Vertikalni FET (skraćeno VFET) unipolarni je tranzistor snage posebne izvedbe namijenjene pojačanju snage. Kod ovih unipolarnih tranzistora, za razliku od prethodno razmatranih, uvid i odvod nalaze se na suprotnim stranama poluvodiča pa je vodljivi kanal vertikalni. Otuda potječe naziv za taj tip tranzistora.



Slika 4.8. Pojednostavnjeni prikaz građe n-kanalnoga vertikalnoga FET-a

Izlazna strujno-naponska karakteristika VFET-a pokazuje da se, uz stalan napon U_{GS} , povećanjem napona U_{DS} povećava struja I_D (nema pojave sužavanja kanala i zasićenja). Najveća struja uz isti U_{DS} dobije se ako je $U_{GS}=0$. Povećanjem iznosa negativnog napona U_{GS} smanjuje se struja I_D kao kod JFET-a (prijenosna karakteristika). Svakom naponu U_{DS} odgovara posebna prijenosna karakteristika.



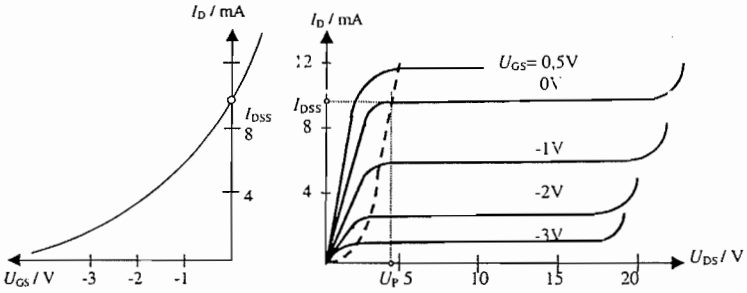
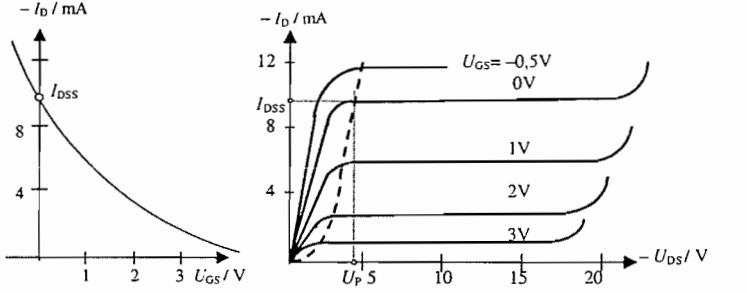
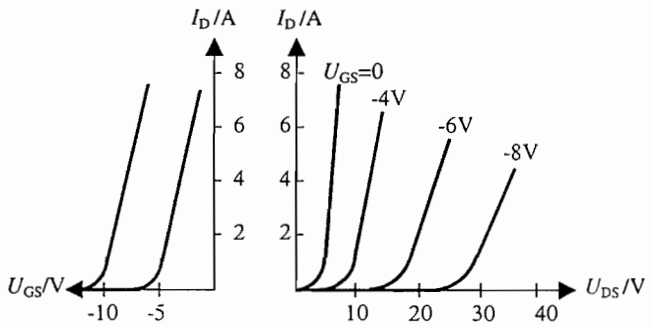
Slika 4.9. Karakteristike n-kanalnoga vertikalnoga FET-a

S obzirom na to da se struja I_D znatno mijenja s povećanjem napona U_{DS} , ovaj tip tranzistora ima znatno manji dinamički izlazni otpor u odnosu prema FET-ovima ($r_{DS} = \Delta U_{DS} / \Delta I_D$, uz $U_{GS} = \text{konst.}$).

Također su i iznosi strmina za ove tranzistore znatno veći jer se s određenom promjenom napona U_{GS} , uz $U_{DS} = \text{konst.}$, dobije znatno veća promjena struje I_D ($g_m = \Delta I_D / \Delta U_{GS}$).

No, kod tih tranzistora struje zasuna I_G nisu zanemarive. Kreću se u granicama od nekoliko miliampera pa do reda veličine ampera kod tranzistora velikih snaga. Zato su njihovi ulazni otpori reda veličine nekoliko kilooma. Naponi U_{DS} mogu biti do nekoliko stotina volta, a struje I_D do nekoliko desetaka ampera uz snage od nekoliko stotina vata.

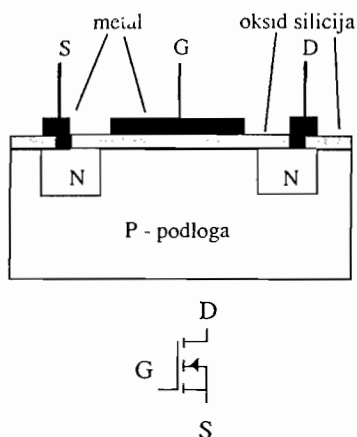
Tablica 4.1. Pregled spojnih unipolarnih tranzistora (JFET)

Tip tranzistora	Simbol	Prijenosna i izlazna strujno-naponska karakteristika
N-JFET (n-kanalni spojni FET)		
P-JFET (p-kanalni spojni FET)		
VFET (vertikalni FET)		

4.2. TRANZISTORI S EFEKTOM POLJA I IZOLIRANIM ZASUNOM

N-kanalni tranzistor s efektom polja i izoliranim zasunom, kraće n-kanalni MOSFET (od engl. metal oxid semiconductor FET), sastoji se od silicijske podloge p-tipa na koju su nanosene dvije zone n-tipa s kojih su izvedeni priključci: uvod S i odvod D. Između uvoda i odvoda na podlogu je nanosen tanki sloj silicijeva dioksida, koji je izolator, a na njega je vezana upravljačka elektroda ili zasun. Postoje dva tipa MOSFET-a: obogaćeni i osiromašeni tip.

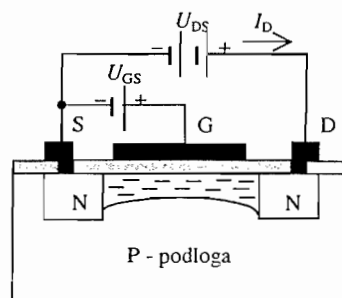
Obogaćeni tip MOSFET-a



Slika 4.10. Struktura i simbol n-kanalnog MOSFET-a (obogaćeni tip)

Priključeni pozitivni napon U_{GS} između zasuna i uvida, veći od vrijednosti U_T koja se naziva napon praga (engl. threshold voltage, cutoff voltage, njem. Abschürspannung), formira u sloju podloge između uvida i odvoda vodljivi kanal (slika 4.11.).

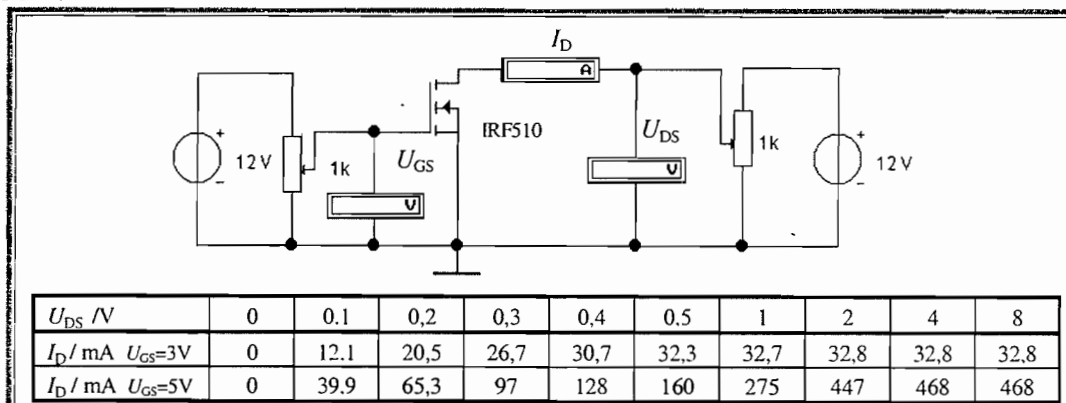
Uz pozitivni napon između odvoda i uvida U_{DS} teče tranzistorom struja I_D . Kako struju čine elektroni, ovaj tip tranzistora naziva se n-kanalni MOSFET. Uz veći napon U_{GS} širi je vodljivi kanal i teče veća struja I_D . Prikazani MOSFET je tzv. **obogaćeni tip** (engl. enhancement MOSFET, skraćeno E-MOSFET, njem. anreicherungs- ili selbstsperrender MOSFET) jer pozitivni napon zasuna obogaćuje kanal slobodnim nosiocima naboja, tj. elektronima.



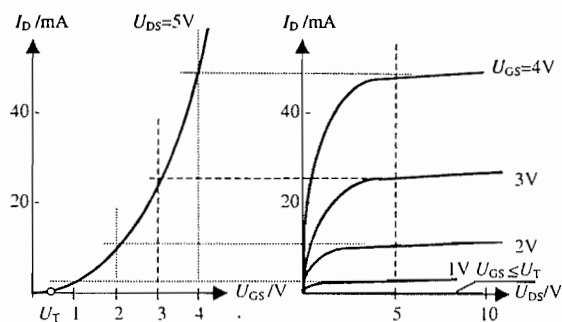
Slika 4.11. Prikaz rada n-kanalnoga MOSFET-a (obogaćeni tip)

Ovisnost struje I_D o naponu U_{DS} i naponu U_{GS} pokazuju izlazne i prijenosne karakteristike tranzistora (slika 4.13.).

Pokus



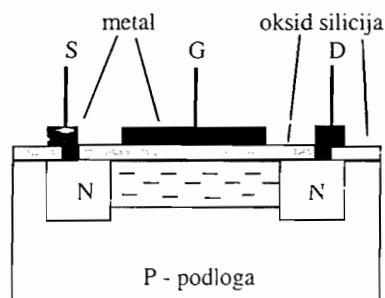
Slika 4.12. Spoj za snimanje tranzistorskih karakteristika



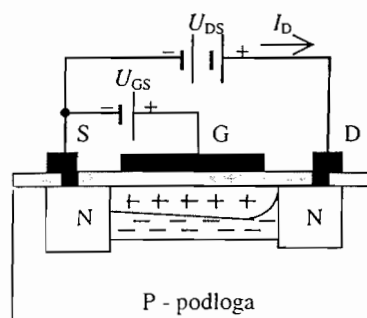
Slika 4.13. Prijenosna i izlazna karakteristika n-kanalnoga MOSFET-a (obogaćeni tip)

Osiromašeni tip MOSFET-a

Kod tzv. **osiromašenoga** MOSFET-a (engl. depletion MOSFET, skraćeno D-MOSFET, njem. verarmungs- ili selbstleitender MOSFET) vodljivi kanal stvoren je u tijeku procesa proizvodnje. Stoga kod tog tranzistora teče struja I_D i uz napon $U_{GS}=0$. Negativnim naponom U_{GS} osiromašuje se kanal elektronima pa se struja I_D smanjuje. Uz dovoljno veliki negativni napon U_{GS} , struja prestaje teći (slika 4.14. i 4.15.).

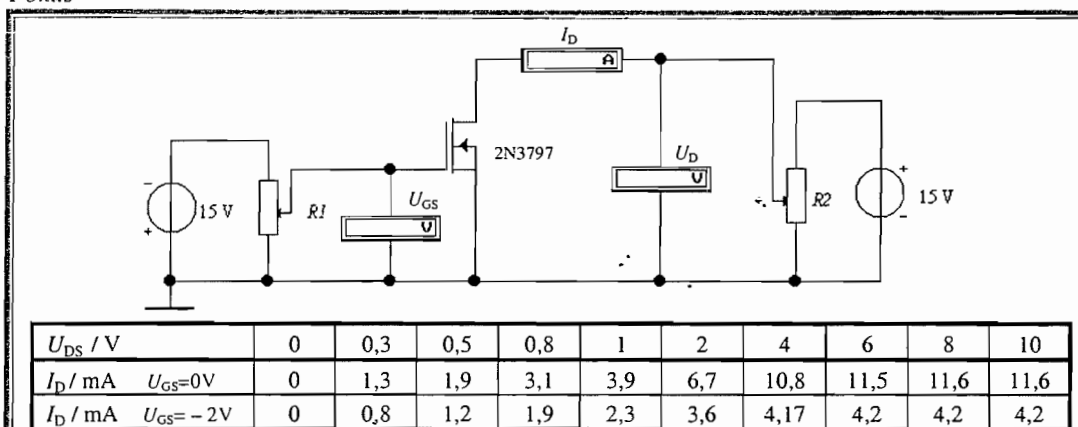


Slika 4.14. Struktura i simbol n-kanalnog MOSFET-a (osiromašeni tip)

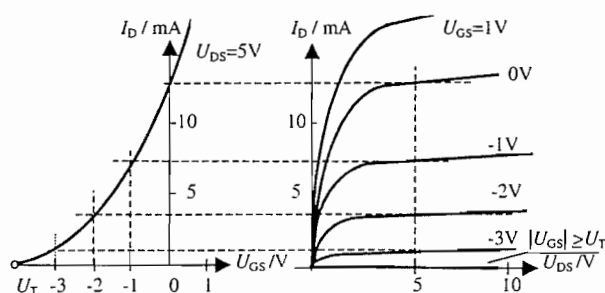


Slika 4.15. Prikaz rada n-kanalnog MOSFET-a (osiromašeni tip)

Pokus



Slika 4.16. Spoj za snimanje tranzistorskih karakteristika



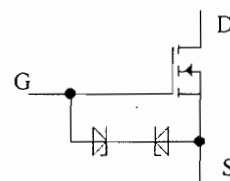
Slika 4.17. Prijenosna i izlazna karakteristika n-kanalnog MOSFET-a (osiromašeni tip)

P-kanalni MOSFET

MOSFET može biti i p-kanalni ako se na vodljivoj podlozi n-tipa izvedu uvod i odvod p-tipa. Izlazne i prijenosne karakteristike su kao kod n-kanalnih tranzistora s tim da je struja I_D suprotnog smjera, kao i polaritet napona U_{DS} i U_{GS} .

Zaštita MOSFET-a

MOSFET-i su vrlo osjetljivi na statički naboj. Zbog velikog ulaznog otpora, i manji naboj može uzrokovati stvaranje velikoga napona na maloj kapacitivnosti između zasuna i vodljivoga kanala koji može uzrokovati proboj izolacijskoga sloja. Čak i dodir izvoda prstima može dati naboj dovoljan za uništenje sklopa izvedenoga s MOSFET-ima. Stoga se ulazi MOSFET-a, osobito u integriranim sklopovima, zaštićuju diodama (slika 4.18.).

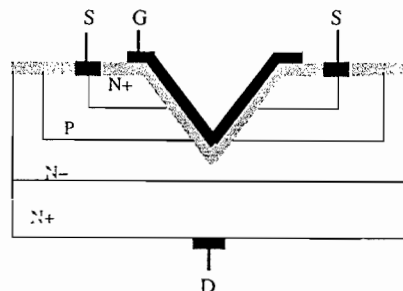


Slika 4.18. Zaštita ulaza unipolarnih tranzistora

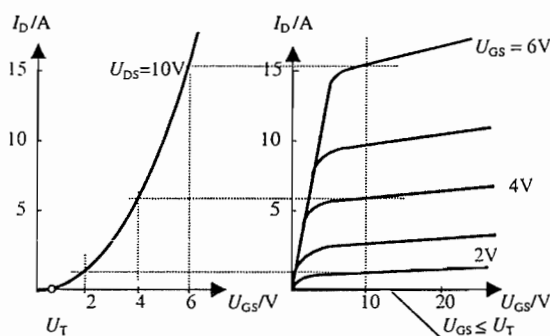
U svakom slučaju, pri radu s MOSFET-ima treba biti oprezan i držati se uputa proizvođača. Većina sklopova s MOSFET-ima isporučuje se tako da su im izvodi međusobno spojeni metalnim prstenom ili vodljivom spužvom. Prsten se smije skinuti tek pošto se sklop zalemi. Svi metalni dijelovi koji dolaze u dodir sa sklopom moraju biti uzemljeni pa i lemnii vrh pri lemljenju. Prvo se lemi podloga a zatim ostale elektrode. Sklop treba držati prstima za kućište i ne ispuštati ga dok se ne zaleme sve elektrode. Priključke ne dodirivati prstima. Pri radu s MOSFET-ima preporučljivo je ruke držati na potencijalu nula. Sklop se ne smije odspajati ili spajati u strujni krug pod naponom napajanja. Signali se ne smiju dovoditi na ulaze sklopa ako nije priključen napon napajanja.

Vertikalni MOSFET

Vertikalni MOSFET (skraćeno **VMOS**) unipolarni je tranzistor snage posebne izvedbe namijenjene pojačanju snage. Statičke karakteristike vertikalnoga MOSFET-a (VMOS-a) slične su karakteristikama n-kanalnoga obogaćenoga MOSFET-a, ali su konstrukcijske promjene omogućile dobivanje znatno većih struja odvoda I_D , malu površinu komponente i povećanu brzinu rada. Radni naponi U_{DS} ovih tranzistora dosežu iznose 1000V, struje odvoda I_D oko 500A uz dozvoljeni utrošak snage i do 2500W.

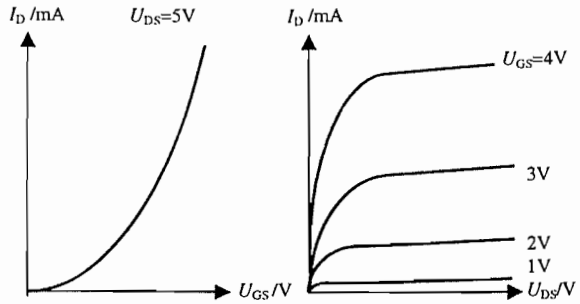
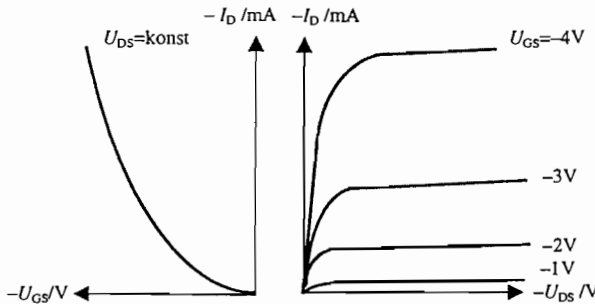
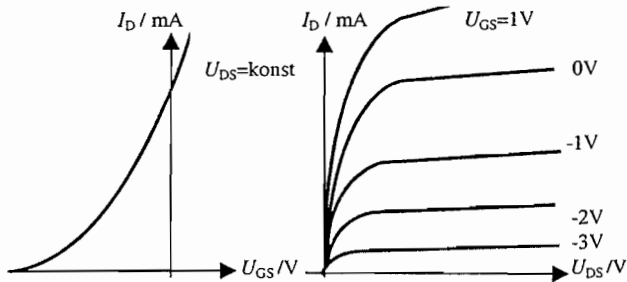
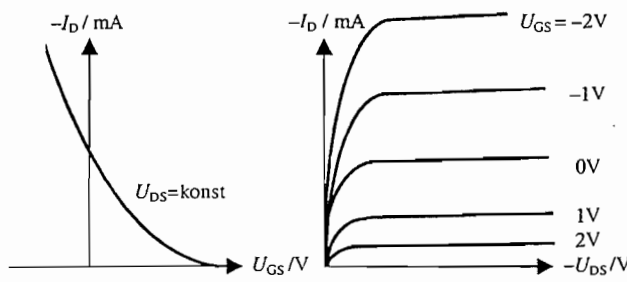
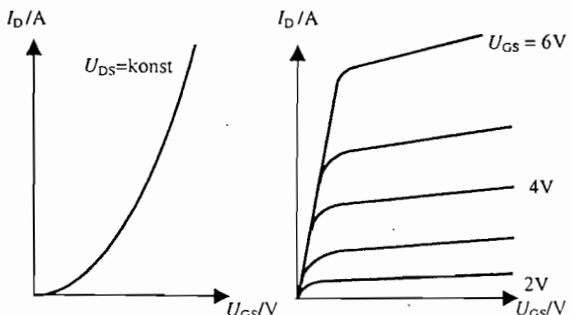


Slika 4.19. Pojednostavnjeni prikaz građe VMOS-a



Slika 4.20. Karakteristike VMOS-a

Tablica 4.2. Pregled unipolarnih tranzistora s izoliranim zasunom (MOSFET)

Tip tranzistora	Symbol	Prijenosna i izlazna strujno-naponska karakteristika
N-MOSFET (obogaćeni)		
P-MOSFET (obogaćeni)		
N-MOSFET (osiromašeni)		
P-MOSFET (osiromašeni)		
VMOS (vertikalni MOS)		

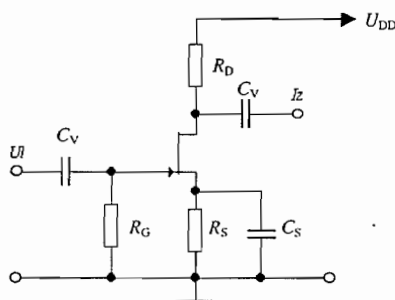
4.3. OSNOVNI SPOJEVI POJAČAJA S UNIPOLARNIM TRANZISTORIMA

Pojačala s unipolarnim tranzistorima služe za pojačanje napona. Posebno su prikladna za pojačanje malih signala zbog niske razine šuma. Slično bipolarnim tranzistorima, s unipolarnim tranzistorima mogu se izvesti tri različita osnovna spoja pojačala, ovisno o tome koja je od tri elektrode zajednička ulaznom i izlaznom krugu, odnosno uzemljena. Ti spojevi pojačala jesu:

- pojačalo u spoju zajedničkog uvida (engl. common-source amplifier, njem. Sourceschaltung)
- pojačalo u spoju zajedničkog odvoda (engl. common-drain amplifier, njem. Drainschaltung)
- pojačalo u spoju zajedničkog zasuna (engl. common-gate amplifier, njem. Gateschaltung).

Pojačalo s JFET-om u spoju zajedničkog uvida

Pojačalo sa spojnim tranzistorom s efektom polja (JFET) u spoju zajedničkog uvida može se izvesti s jednim otporom u ulaznom krugu prema slici 4.21. (spoj s automatskim dobivanjem prednapona upravljačke elektrode).



Slika 4.21. Pojačalo s n-kanalnim JFET-om u spoju zajedničkog uvida

Odabirom iznosa otpora R_S moguće je iz zajedničkog izvora napajanja U_{DD} ostvariti negativni prednapon zasuna u odnosu prema uvidu. Struja I_D

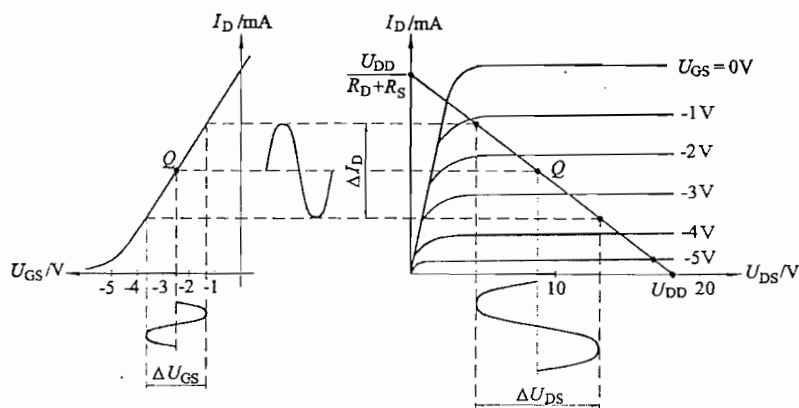
stvara na otporniku R_S pad napona U_{RS} . Zasun je preko otpornika R_G praktično vezan na zajedničku (uzemljenu) točku zbog zanemarive struje zasuna I_G (manja od 10^{-10} A). Stoga je potencijal uvida S viši od potencijala zasuna G za pad napona na otporniku R_S . To znači da je napon U_{GS} jednak negativnoj vrijednosti pada napona na otporniku R_S : $U_{GS} = -I_D R_S$. Iz toga slijedi da je struja I_D u radnoj točki jednaka:

$$I_D = -\frac{U_{GS}}{R_S}$$

Za izlazni strujni krug vrijedi jednadžba: $U_{DD} = U_{DS} + I_D(R_D + R_S)$. Iz čega slijedi napon U_{DS} :

$$U_{DS} = U_{DD} - U_{GS} \frac{R_D + R_S}{R_S}$$

Vezni kondenzatori C_V imaju istu ulogu kao i kod pojačala s bipolarnim tranzistorima, tj. istosmjerno odjeljivanje pojačala od izvora signala koji se pojačava i opterećenja izlaza. Kondenzator C_S treba biti što većega kapaciteta kako bi za izmjenični signal bio praktično kratki spoj i time spriječio pad pojačanja zbog otpora R_S na niskim frekvencijama.



Slika 4.22. Prikaz pojačanja pojačala u spoju zajedničkog uvida na strujno-naponskim karakteristikama JFET-a

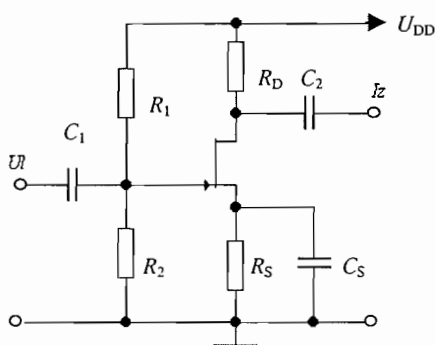
Promjena ulaznog napona, npr. njegovo povećanje, uzrokovat će da se smanji iznos negativnog napona U_{GS} . Zbog promjene napona ΔU_{GS} , povećat će se struja odvoda I_D za iznos $g_m \Delta U_{GS}$. Promjena struje odvoda ΔI_D uzrokovat će povećanje pada napona na otporu R_D , odnosno smanjenje napona U_{DS} za iznos $\Delta I_D R_D$. Iz ovoga kratkog razmatranja slijedi zaključak da su promjene ulaznog i izlaznog napona u protufazi, a naponsko pojačanje pojačala proporcionalno strmini g_m i iznosu otpora u krugu odvoda R_D : $A_u = u_{iz}/u_{ul} = \Delta U_{DS}/\Delta U_{GS} = \Delta I_D R_D/\Delta U_{GS} = g_m \Delta U_{GS} R_D/\Delta U_{GS} = g_m R_D$.

$$A_u = g_m R_D$$

Ulazni otpor pojačala čini paralelni spoj otpora R_G i ulaznog otpora tranzistora r_{gs} . Kako je ulazni otpor samoga tranzistora vrlo velik, to je ulazni otpor pojačala praktično jednak otporu R_G , koji se odabire reda veličine megaoma.

Izlazni otpor pojačala čini paralelni spoj izlaznog otpora tranzistora r_{ds} i otpornika u krugu odvoda R_D . Kako je izlazni otpor tranzistora obično znatno veći od otpora R_D , izlazni otpor pojačala jednak je otporu R_D : $R_i = r_{ds} \parallel R_D = R_D$.

Nedostatak spoja s automatskim dobivanjem prednapona zasuna jest ovisnost položaja radne točke o temperaturi okoline. Taj nedostatak može se izbjeći spojem s djelimom u ulaznom krugu (slika 4.23.)



Slika 4.23. Pojačalo s n-kanalnim JFET-om u spoju zajedničkog uvoda s djelimom u ulaznom krugu

Potencijal zasuna iznosi: $U_G = U_{DD} R_2/(R_1+R_2)$, pa je prednapon U_{GS} jednak: $U_{GS} = U_G - U_{RS} = U_{DD} R_2/(R_1+R_2) - I_D R_S$. Iz toga slijedi struja I_D i napon U_{DS} u statičkoj radnoj točki:

$$I_D = U_{DD} \frac{R_2}{R_S(R_1+R_2)} - \frac{U_{GS}}{R_S}$$

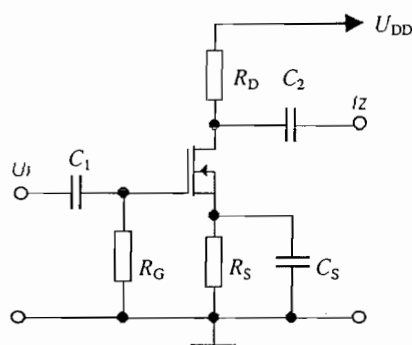
$$U_{DS} = U_{DD} - I_D (R_D + R_S)$$

Otpori R_1 i R_2 trebaju biti tako odabrani da struja djelitelja bude oko deset puta veća od struje zasuna pri najvišoj temperaturi. Najpovoljniji iznos otpora R_S za temperaturnu stabilizaciju radne točke je:

$$R_S = \frac{U_{GS} - U_P}{I_D}$$

Nedostatak je toga spoja smanjeni ulazni otpor pojačala koji sada iznosi $R_1 \parallel R_2$.

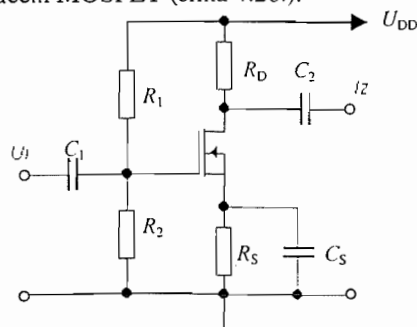
Pojačalo s MOSFET-om u spoju zajedničkog uvoda



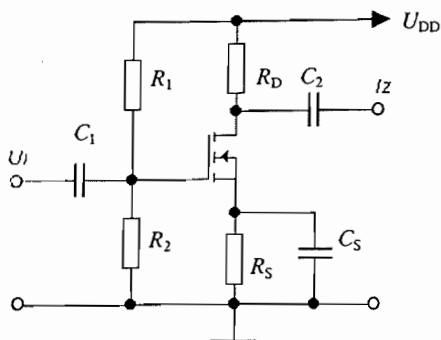
Slika 4.24. Pojačalo s n-kanalnim MOSFET-om (osiromašeni način rada)

Ako se osiromašeni MOSFET primjenjuje tako da radi u osiromašenome načinu rada, potrebno je da potencijal zasuna bude suprotnoga predznaka od napona U_{DS} . Stoga se takav tranzistor upotrebljava u spoju prema slici 4.24. gdje upravljačka elektroda dobiva automatski prednapon kao kod pojačala s JFET-om. U tom slučaju vrijedi: $U_{GS} = -I_D R_S$ i $U_{DS} = U_{DD} - I_D (R_D + R_S)$.

Kada se osiromašeni MOSFET primjenjuje u obogaćenom načinu rada, potencijal upravljačke elektrode istoga je predznaka kao napon i U_{DS} pa se prednapon upravljačke elektrode dobiva djelimom napona (slika 4.25.). Isti spoj upotrebljava se i za obogaćeni MOSFET (slika 4.26.).



Slika 4.25. Pojačalo s n-kanalnim osiromašenim MOSFET-om (obogaćeni način rada)



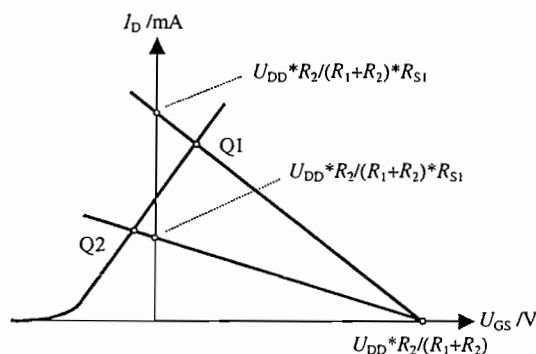
Slika 4.26. Pojačalo s n-kanalnim obogaćenim MOSFET-om (obogaćeni način rada)

U tom slučaju vrijedi: $U_{GS} = U_{DD}R_2/(R_1+R_2) - I_D R_S$
 $U_{DS} = U_{DD} - I_D (R_D + R_S)$. Odabirom vrijednosti otpora R_S može se mijenjati položaj radne točke u širokome rasponu (slika 4.27.), odnosno omogućiti da tranzistor radi u obogaćenu ili osiromašenu načinu rada.

Za dinamičke uvjete rada ovo pojačalo djeluje kao pojačalo sa spojnim FET-om. Naponsko pojačanje pojačala iznosi: $A_u = g_m R_D$.

Ulazni otpor pojačala čini paralelni spoj otpora R_1 i R_2 i ulaznoga otpora tranzistora r_{gs} . Kako je ulazni otpor samoga tranzistora vrlo velik, to je ulazni otpor pojačala praktično jednak paralelnomu spoju otpora R_1 i R_2 : $R_u = R_1 \parallel R_2$.

Izlazni otpor pojačala čini paralelni spoj izlaznoga otpora tranzistora r_{ds} i otpornika u krugu odvoda R_D . Kako je otpor r_{ds} znatno veći od otpora R_D izlazni je otpor jednak otporu R_D : $R_i = r_{ds} \parallel R_D = R_D$.

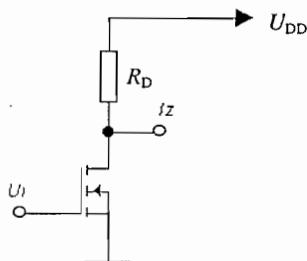


Slika 4.27. Odabir radne točke pojačala s pomoću otpora R_S

4.4. UNIPOLARNI TRANZISTOR KAO SKLOPKA

Sklopka s MOSFET-om

Unipolarni tranzistori upotrebljavaju se i kao sklopke. Na slici 4.28. prikazana je izvedba sklopke s n-kanalnim MOSFET-om.

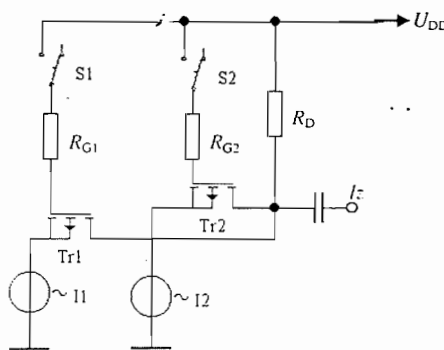


Slika 4.28. Sklopka s MOSFET-om

Ulazni napon 0V drži n-kanalni MOSFET u zapiranjju. Stoga je izlazni napon jednak naponu napajanja U_{DD} pa se tranzistor može smatrati isključenom sklopkom. Uz dovoljno velik pozitivni ulazni napon (reda veličine U_{DD}) tranzistor postaje

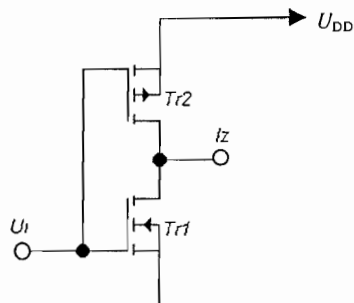
vodljiv i izlazni se napon smanjuje na iznos maloga napona U_{DS} . Tranzistor se može smatrati uključenom sklopkom.

MOSFET-i se upotrebljavaju kao analogne i digitalne sklopke. Na slici 4.29. prikazan je primjer primjene MOSFET-a za uključivanje signala iz dva različita izvora na ulaz pojačala.



Slika 4.29. Primjer primjene sklopke s MOSFET-om

U digitalnim se sklopovima umjesto otpora R_D primjenjuje drugi tranzistor. Posebno veliku primjenu ima uporaba kombinacije n-kanalnoga i p-kanalnoga MOSFET-a prema slici 4.30. (sklopka s komplementarnim MOSFET-ima, integrirani sklopovi skupine CMOS).



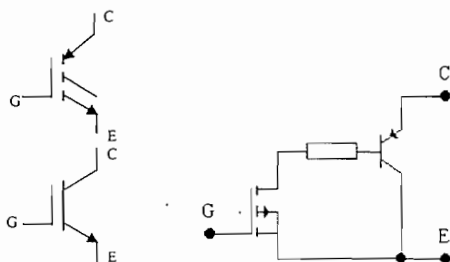
Slika 4.30. Sklopka s komplementarnim MOSFET-ima

Ako je ulazni napon 0V, tranzistor $Tr1$ ima napon $U_{GS}=0V$ i zato je u zapiranjju s otporom između uvida i odvoda oko $10^{10}\Omega$. Zasun tranzistora $Tr2$ je za napon U_{DD} na nižemu potencijalu od njegova uvida pa je taj tranzistor vodljiv. Otpor između uvida i odvoda je oko $1k\Omega$. Izlaz je praktično odspojen od zajedničke točke, a spojen na napon napajanja. Izlazni napon sklopa je U_{DD} pa praktično djeluje kao isključena sklopka.

Kad je ulazni napon U_{DD} , tranzistor $Tr2$ ima napon $U_{GS}=0V$ i zato je u zapiranjju. Otpor između njegova odvoda i uvida je oko $10^{10}\Omega$. Zasun tranzistora $Tr1$ je za napon U_{DD} na pozitivnijem potencijalu od njegova uvida pa je taj tranzistor vodljiv. Otpor između odvoda i uvida tranzistora $Tr1$ je oko $1k\Omega$. Izlaz sklopa je praktički spojen na zajedničku točku (masu) a odspojen od napona napajanja. To znači da sklop djeluje kao uključena sklopka.

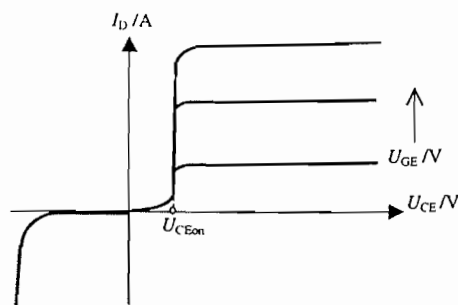
Iz izloženoga se vidi da sklopka, bez obzira na stanje u kojemu se nalazi, ne opterećuje izvor napona napajanja. Na taj način je znatno smanjeno rasipanje snage.

Bipolarni tranzistor s izoliranim zasunom



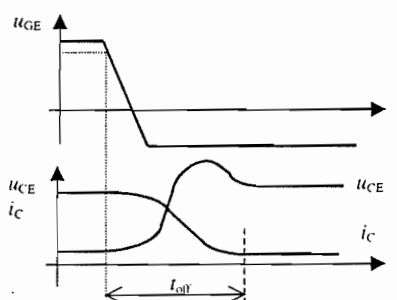
Slika 4.31. Simboli i nadomjesni spoj IGBT-a

Kad je riječ o sklopkama za veće snage, sklopka s bipolarnim tranzistorom može znatno opteretiti prethodni sklop, dok sklopka s unipolarnim tranzistorom ima značajne gubitke u stanju vođenja zbog pada napona na otporu r_{DS} . Za velike snage pokazalo se kao dobro rješenje uporaba **bipolarnih tranzistora s izoliranim zasunom**, skraćeno **IGBT** (od engl. insulated gate bipolar transistor).

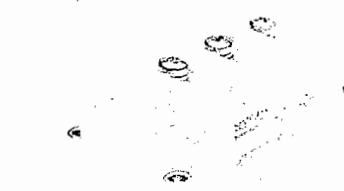


Slika 4.32. Strujno-naponska karakteristika IGBT-a

IGBT je naponski upravljani tranzistor koji objedinjuje dobre osobine tranzistora s izoliranim zasunom (MOSFET) i bipolarnih tranzistora. osobito u impulsnom režimu rada, tj. kad djeluju kao brze sklopke uz male gubitke snage u stanju vođenja. Njegove elektrode su **zasun G**, **emiter E** i **kolektor C**. IGBT se dovodi u stanje vođenja naponom U_{GE} veličine 10-15V. Za pouzdano isključenje IGBT-a i sprječavanje djelovanja smetnji potreban je napon U_{GE} oko -5V. Najveći dopušteni naponi U_{CE} kreću se do 2000V uz struje I_C do 1200A i dopušteni utrošak snage do 2500W. Naponi U_{CE} u stanju vođenja ($U_{CE(on)}$) reda su veličine nekoliko volta.



Slika 4.33. Prikaz djelovanja IGBT-a u impulsnom režimu rada



Slika 4.34. Primjer izvedbe IGBT-a

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

VJEŽBA 4.1. POJAČALO S JFET-OM U SPOJU ZAJEDNIČKOG UVODA

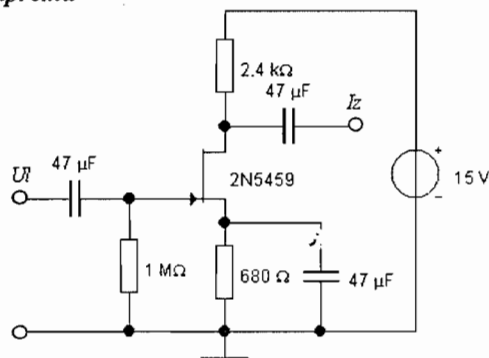
Zadatak

Upoznati svojstva pojačala s JFET-om u spoju zajedničkog uvoda s obzirom na naponsko pojačanje, fazne odnose ulaznih i izlaznih signala, utjecaj pojedinih komponenata na iznose pojačanja i ovladati osnovnim postupcima u primjeni instrumenata (laboratorijski izvor sinusoidnoga napona, elektronički voltmetar, osciloskop) i prikazu mjernih rezultata.

Instrumenti i pribor

- tranzistori 2N5459 (2N5458)
- otpornici: 680Ω, 2,4kΩ, 4,7kΩ i 1MΩ
- kondenzatori 4,7μF (3 komada) i 47μF (3 komada)
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napajanja 15V, 1A
- univerzalni instrument
- elektronički voltmetar
- generator sinusoidnoga napona
- osciloskop.

Priprema



Slika 4.35. Pojačalo s n-kanalnim JFET-om u spoju zajedničkog uvoda

1. Proučite tvorničke podatke tranzistora 2N5459 i navedite iznose dopuštenih napona U_{DS} , struje I_D te strmine g_m .

2. Izračunajte vrijednosti struja odvoda I_D te napone U_{GS} , U_{RS} i U_{DS} u statičkim uvjetima rada za pojačalo sa slike 4.35. Rezultate prikažite tablicom.

Pokusi

1. Mjerenje struja i napona pojačala u statičkim uvjetima

1.1. Nacrtajte shemu pojačala sa slike 4.35. sa spojenim instrumentima za mjerenje struja odvoda I_D te napone U_{GS} , U_{RS} i U_{DS} u statičkim uvjetima rada.

1.2. Spojite elemente pojačala prema slici 4.35. Priključite pojačalo na napon napajanja i izmjerite struje odvoda I_D te napone U_{DS} , U_{GS} , U_{RS} i U_{DS} u statičkim uvjetima rada. Rezultate prikažite tablicom.

2. Naponsko pojačanje i fazni odnos ulaznoga i izlaznoga napona

2.1. Nacrtajte shemu spoja za mjerenje naponskoga pojačanja pojačala sa slike 4.35.

2.2. Prema shemi spojite pojačalo i instrumente i izmjerite pojačanje neopterećenoga pojačala uz ulazni sinusoidni napon amplitude 100mV i frekvencije 1kHz.

2.3. Osciloskopom promatrajte napon na ulazu i izlazu pojačala. Nacrtajte dijagrame ulaznoga i izlaznoga napona.

2.4. Ustanovite utjecaj amplitude ulaznoga napona na oblik izlaznoga napona.

3. Opterećenje pojačala i djelovanje kondenzatora C_S

3.1. Izmjerite pojačanje pojačala opterećenoga otporom $R_P=4,7k\Omega$ uz ulazni sinusoidni napon amplitude 100mV i frekvencije 1kHz.

3.2. Ustanovite kako kondenzator C_S utječe na pojačanje opterećenoga pojačala mjerenjem pojačanja na niskim i visokim frekvencijama uz ulazni sinusoidni napon amplitude 100mV: a) uz odspojen kondenzator, b) uz $C_S=4,7\mu F$.

VJEŽBA 4.2. POJAČALO S MOSFET-OM U SPOJU ZAJEDNIČKOG UVODA

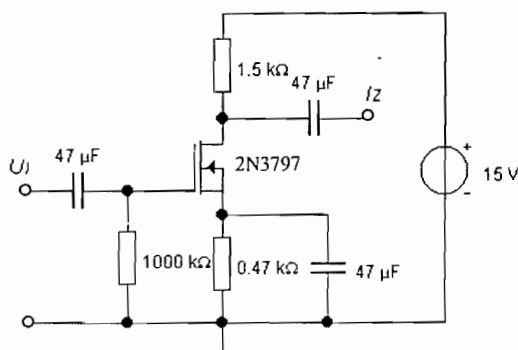
Zadatak

Upoznati svojstva pojačala s MOSFET-om u spoju zajedničkog uvida s obzirom na naponsko pojačanje, fazne odnose ulaznih i izlaznih signala, utjecaj pojedinih komponenata na iznose pojačanja i ovladati osnovnim postupcima u primjeni instrumenata (laboratorijski izvor sinusoidnoga napona, elektronički voltmetar, osciloskop) i prikazu mjernih rezultata.

Instrumenti i pribor

- tranzistori 2N3797
- otpornici: 470 Ω , 1,5 k Ω , 4,7 k Ω i 1 M Ω
- kondenzatori 4,7 μ F (3 komada) i 47 μ F (3 komada)
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napajanja 15 V, 1 A
- univerzalni instrument
- elektronički voltmetar
- generator sinusoidnoga napona
- osciloskop.

Priprema



Slika 4.36. Pojačalo s MOSFET-om u spoju zajedničkog uvida

1. Proučite tvorničke podatke tranzistora 2N3797 i navedite iznose dopuštenih napona U_{DS} , struje I_D te strmine g_m .
2. Izračunajte vrijednosti struja odvoda I_D te napone U_{GS} , U_{RS} i U_{DS} u statičkim uvjetima rada za pojačalo sa slike 4.36. Rezultate prikažite tablicom.

Pokusi

1. Mjerenje struja i napona pojačala u statičkim uvjetima

1.1. Nacrtajte shemu pojačala sa slike 4.36. sa spojenim instrumentima za mjerenje struja odvoda I_D te napone U_{GS} , U_{RS} i U_{DS} u statičkim uvjetima rada.

1.2. Spojite elemente pojačala. Priključite napon napajanja i izmjerite struje odvoda I_D te napone U_{DS} , U_{GS} , U_{RS} i U_{DS} u statičkim uvjetima rada. Rezultate prikažite tablicom.

2. Naponsko pojačanje i fazni odnos ulaznoga i izlaznoga napona

2.1. Nacrtajte shemu spoja za mjerenje naponskoga pojačanja pojačala sa slike 4.36.

2.2. Prema shemi spojite pojačalo i instrumente i izmjerite pojačanje neopterećenoga pojačala uz ulazni sinusoidni napon amplitude 100mV i frekvencije 1kHz.

2.3. Osciloskopom promatrajte napon na ulazu i izlazu pojačala. Nacrtajte dijagrame ulaznoga i izlaznoga napona.

2.4. Ustanovite utjecaj amplitude ulaznoga napona na oblik izlaznoga napona.

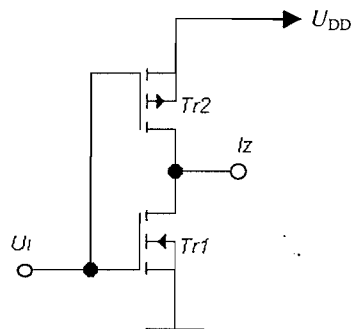
3. Opterećenje pojačala i djelovanje kondenzatora C_S

3.1. Izmjerite pojačanje pojačala opterećenoga otporom $R_P=4,7k\Omega$ uz ulazni sinusoidni napon amplitude 100mV i frekvencije 1kHz.

3.2. Ustanovite kako kondenzator C_S utječe na pojačanje opterećenoga pojačala mjerenjem pojačanja na niskim i visokim frekvencijama uz ulazni sinusoidni napon amplitude 100mV: a) uz odspojen kondenzator, b) uz $C_S=4,7\mu F$.

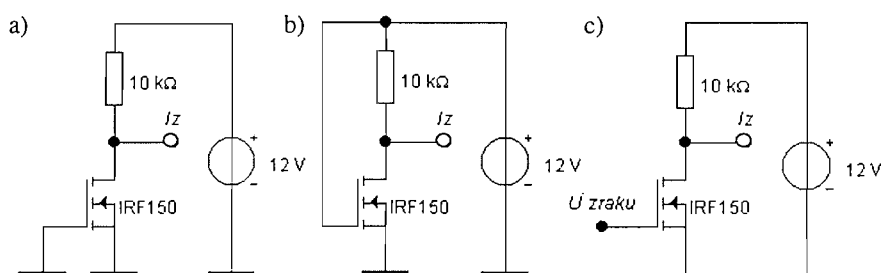
PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Kakav je fazni odnos ulaznoga i izlaznoga napona pojačala s JFET-om u spoju zajedničkog uvoda?
2. Kako opterećenje pojačala utječe na iznos naponskoga pojačanja pojačala s JFET-om u spoju zajedničkog uvoda?
3. Koja je uloga otpora R_S kod pojačala s JFET-om u spoju zajedničkog uvoda?
4. Zašto se kod pojačala s JFET-om paralelno otporu R_S spaja kondenzator C_S ?
5. Kako kapacitet kondenzatora C_S utječe na naponsko pojačanje pojačala s JFET-om u spoju zajedničkog uvoda?
6. Kakav nedostatak ima pojačalo s JFET-om u spoju zajedničkog uvoda? Kako se otklanja taj nedostatak?
7. Kakav je fazni odnos ulaznoga i izlaznoga napona pojačala s MOSFET-om u spoju zajedničkog uvoda?
8. Kako opterećenje pojačala utječe na iznos naponskoga pojačanja pojačala s MOSFET-om u spoju zajedničkog uvoda?
9. Kako kapacitet kondenzatora C_S utječe na naponsko pojačanje pojačala s MOSFET-om u spoju zajedničkog uvoda?
10. Kako se s pomoću otpora R_S može odabrati radna točka pojačala s n-kanalnim osiromašenim MOSFET-om?
11. Uz koje se uvjete tranzistor u spoju prema slici 4.37. može smatrati uključenom, odnosno isključenom sklopkom?

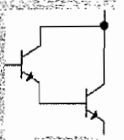


Slika 4.37. Sklopka s MOSFET-ima

13. Kakav je fazni odnos ulaznoga i izlaznoga napona tranzistorske sklopke sa slike 4.37.?
14. Koliki su izlazni naponi tranzistorskih sklopki sa slike 4.38.?



Slika 4.38. Tranzistorske sklopke s MOSFET-om (zadatak 17.)



5. POJAČALA

Nakon što su, u prethodna dva poglavlja obrađeni osnovni spojevi pojačala s tranzistorima, u ovom poglavlju obrađuju se neke posebne izvedbe pojačala koje sadrže dva ili više tranzistora. To su pojačala s Darlingtonovim spojem tranzistora, diferencijsko pojačalo i pojačala snage.

5.1. Darlingtonov spoj

Darlingtonov spoj dva NPN tranzistora
Darlingtonov spoj PNP i NPN tranzistora
Pojačalo u spoju zajedničkog emitera s
Darlingtonovim spojem tranzistora
Sljedilo napona s Darlingtonovim spojem tranzistora

5.2. Diferencijsko pojačalo

Diferencijsko pojačalo sa zajedničkim otporom u
emitorskome krugu
Diferencijsko pojačalo sa strujnim izvorom u
emitorskome krugu
Simetriranje diferencijskoga pojačala
Diferencijsko pojačalo s unipolarnim tranzistorima

5.3. Pojačala snage

Pojačalo u klasi A
Pojačala u klasi B i AB
Pojačalo u klasi C

Zadaci za laboratorijske vježbe

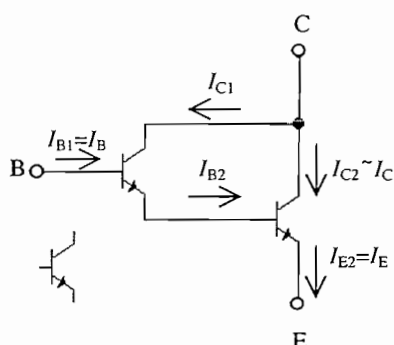
Vježba 5.1. Diferencijsko pojačalo
Vježba 5.2. Diferencijsko pojačalo sa strujnim
izvorom

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

5.1. DARLINGTONOV SPOJ

Kad je potrebno ostvariti veliko pojačanje, upotrebljava se više izravno vezanih tranzistora u spoju poznatom pod nazivom **kompandni** ili **Darlingtonov spoj** (engl. Darlington pair, njem. Darlingtonschaltung). Tranzistori se ponašaju kao jedan ekvivalentni tranzistor čiji je faktor strujnoga pojačanja jednak umnošku faktora pojačanja pojedinih tranzistora.

Darlingtonov spoj dva NPN tranzistora

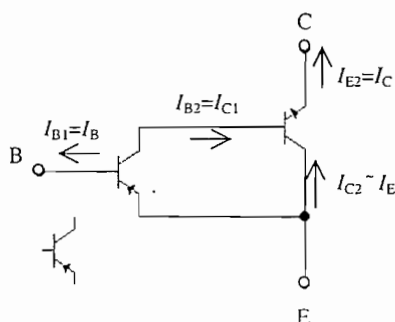


Slika 5.1. Darlingtonov spoj dva NPN tranzistora

Spoj dva NPN tranzistora djeluje kao NPN tranzistor za koji vrijedi: $U_{BE} = U_{BE1} + U_{BE2}$, $I_C = I_B h_{FE} = I_{C2} = I_{B2} h_{FE2} = I_{B1} h_{FE1} h_{FE2}$. Iz toga slijedi:

$$h_{FE} = h_{FE1} h_{FE2} \quad h_{fe} = h_{fe1} h_{fe2}$$

Darlingtonov spoj PNP i NPN tranzistora



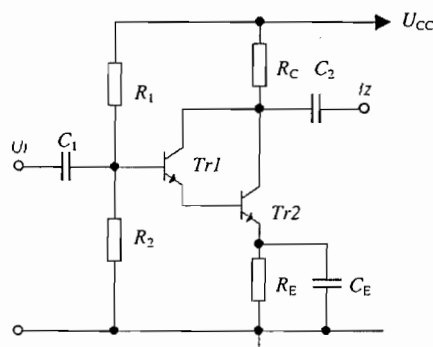
Slika 5.2. Darlingtonov spoj PNP i NPN tranzistora

Spoj PNP i NPN tranzistora djeluje kao PNP tranzistor za koji vrijedi: $U_{BE} = U_{BE1}$, $I_C = I_B h_{FE} = I_{C2} = I_{B2} h_{FE2} = I_{B1} h_{FE1} h_{FE2}$. Iz toga slijedi:

$$h_{FE} = h_{FE1} h_{FE2} \quad h_{fe} = h_{fe1} h_{fe2}$$

Proizvođači poluvodičkih elektroničkih komponenata izrađuju Darlingtonov spoj tranzistora kao integriranu komponentu u jednom kućištu.

Pojačalo u spoju zajedničkog emitera s Darlingtonovim spojem tranzistora

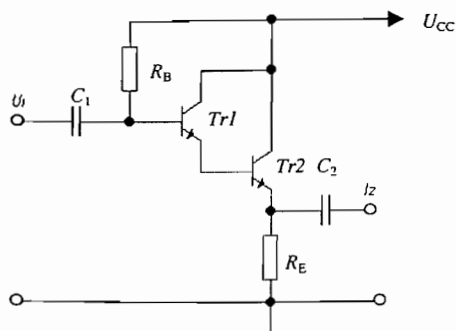


Slika 5.3. Pojačalo u spoju zajedničkog emitera s Darlingtonovim spojem tranzistora

Kod pojačala u spoju zajedničkog emitera s Darlingtonovim spojem tranzistora, tranzistor $Tr1$ djeluje kao emitorsko sljedilo a tranzistor $Tr2$ kao pojačalo u spoju zajedničkog emitera. Time se u usporedbi s običnim pojačalom u spoju zajedničkog emitera s jednim tranzistorom dobije znatno veće strujno pojačanje (faktor strujnoga pojačanja spoja tranzistora praktički je jednak umnošku pojedinačnih faktora strujnoga pojačanja) i veći ulazni otpor pojačala.

Sljedilo napona s Darlingtonovim spojem tranzistora

Sljedilo napona (spoj zajedničkoga kolektora) s Darlingtonovim spojem tranzistora primjenjuje se onda kad je potrebno znatno povećati ulazni otpor pojačala, jer se radi o kaskadi emitorskih sljedila (slika 5.4.). Naponsko je pojačanje sljedila s Darlingtonovim spojem praktički jednako 1.



Slika 5.4. Sljedilo napona s Darlingtonovim spojem tranzistora

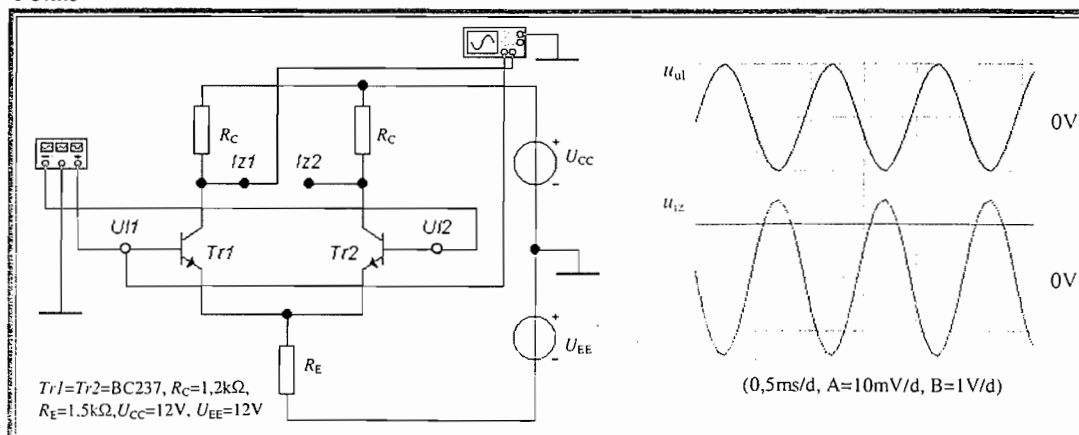
5.2. DIFERENCIJSKO POJAČALO

Diferencijsko pojačalo (engl. difference amplifier, njem. Differenzverstärker) jedan je od najčešće upotrebljivanih spojeva pojačala. Njegovo osnovno svojstvo, zbog kojega se vrlo često upotrebljava, osobito kao ulazno pojačalo, jest da dobro pojačava signale koji se na ulaze dovode u protufazi, odnosno kao razlika dvaju signala, a slabo pojačava signale koji se dovode na ulaze u fazi. Signal koji se želi pojačati može se dovesti i samo na jedan ulaz. Drugi ulaz se u tom slučaju uzemlji.

Pojačani signal može se uzeti s bilo kojeg izlaza (asimetrični izlaz) ili između dva izlaza (simetrični izlaz). Diferencijsko pojačalo može se izvesti sa zajedničkim otporom R_E u emitorskome krugu ili sa strujnim izvorom u emitorskome krugu.

Diferencijsko pojačalo sa zajedničkim otporom u emitorskome krugu

Pokus

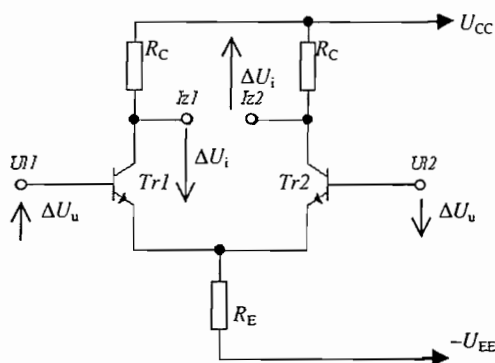


Slika 5.5. Diferencijsko pojačalo s protufaznom pobudom

Promjena ulaznoga napona ΔU_u (porast) dovedena na ulaz $U/I1$ (slika 5.5. i 5.6.) uzrokovat će promjenu (porast) struje kolektora i emitera prvog tranzistora za iznos ΔI_C , odnosno ΔI_E . Istodobno će ista promjena ulaznoga napona dovedena na ulaz $U/I2$ u protufazi s promjenom na ulazu $U/I1$ izazvati suprotnu promjenu (smanjenje) struje kolektora i emitera drugoga tranzistora za isti iznos ΔI_C , odnosno ΔI_E . Zbog toga će potencijal emitera obaju tranzistora ostati nepromijenjen. Međutim, naponi na izlazima I_Z1 i I_Z2 promijenit će se za iznose $\Delta I_C R_C$. Napon U_{I1} smanjit će se, a napon U_{I2} porast će za taj iznos. Dakle ukupna promjena napona na bilo kojem izlazu (asimetričan izlaz) je: $\Delta I_C R_C = \Delta I_B h_{fe} R_C$.

Ako se ta promjena izlaznoga napona podijeli s ukupnom promjenom ulaznoga napona $2\Delta U_u = 2\Delta I_B r_{be}$, dobije se veličina naponskoga pojačanja za protufazno dovedeni signal A_d (**diferencijsko pojačanje**, engl. differential-mode gain, njem. Gegentaktverstärkung):

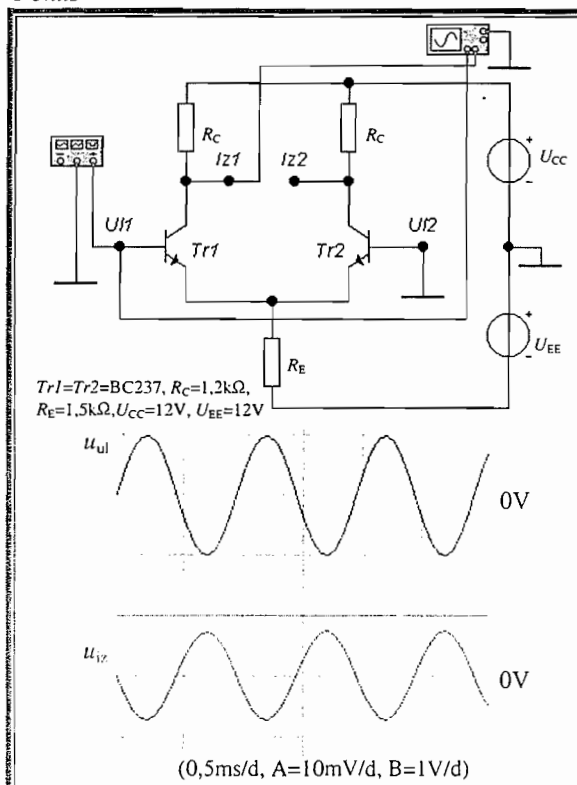
$$A_{ud} = h_{fe} \frac{R_C}{2r_{be}} = h_{fe} \frac{R_C}{2h_{fe}}$$



Slika 5.6. Prikaz djelovanja diferencijskoga pojačala s protufaznom pobudom

Ako se izlazni signal uzima između dva izlaza (simetričan izlaz), promjena napona na izlazu je dvostruko veća pa je i pojačanje jednako dvostrukom iznosu u usporedbi s prethodnim slučajem.

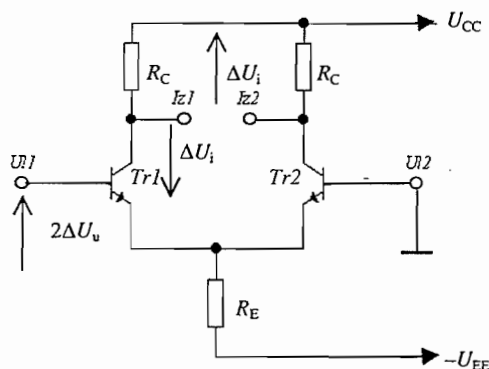
Pokus



Slika 5.7. Diferencijsko pojačalo sa zajedničkim otporom u emitorskome krugu s pobudom samo jednog ulaza

Kad se ulazni signal dovodi samo na jedan ulaz (slika 5.7. i 5.8.), npr. $U1$, a drugi ulaz je uzemljen, promjena napona na ulazu u iznosu $2\Delta U_u$ uzrokovat će porast struje kolektora i emitera toga tranzistora za iznose ΔI_C i ΔI_E . Zbog porasta struje emitera jednoga tranzistora, porast će potencijal emitera obaju tranzistora što će na tranzistor $Tr2$ djelovati kao smanjenje napona baze za ΔU_u , a na bazi tranzistora $Tr1$ kao povećanje napona za ΔU_u .

Dakle promjena signala na jednom ulazu u iznosu $2\Delta U_u$ djeluje kao porast ΔU_u na prvome tranzistoru i smanjenje ΔU_u na drugome tranzistoru (slika 5.10.). To znači da će i promjene izlaznoga napona biti istovjetne kao i u slučaju protufazne promjene napona na oba ulaza. Iz toga slijedi da je i diferencijsko pojačanje jednako bez obzira na to dovodi li se signal na ulaze u protufazi ili na jedan ulaz uz drugi uzemljen. Za promjenu izlaznoga napona bitna je ukupna promjena napona između dva ulaza.



Slika 5.8. Prikaz djelovanja diferencijskoga pojačala s pobudom jednog ulaza

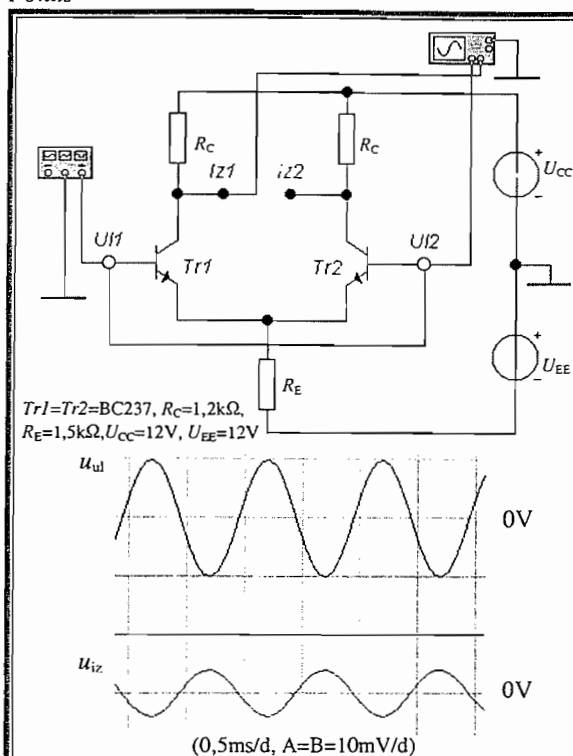
Ako se na oba ulaza dovede promjena ulaznoga napona ΔU_u , istovjetna po veličini i po fazi (slika 5.9. i 5.10.), za isti će se iznos promijeniti struje baze, kolektora i emitera obaju tranzistora. Promjena struje emitera iznosi: $\Delta I_E = \Delta U_u / [2R_E r_{be} / (h_{fe} + 1)] = \Delta U_u / 2R_E = \Delta I_C$.

Ta promjena struje uzrokovat će jednaku promjenu napona na izlazima oba tranzistora. To znači da promjene napona uzetog između izlaza $Iz1$ i $Iz2$ nema ako se izlazni signal uzima sa simetričnog izlaza. Promjena napona jednog izlaza prema zajedničkoj (uzemljenoj) točki iznosi: $\Delta U_i = \Delta U_u R_C / [2R_E + r_{be} / (h_{fe} + 1)] = \Delta U_u R_C / 2R_E$.

Iz toga slijedi da je naponsko pojačanje za istofazni signal A_c (**zajedničko pojačanje**, engl. common-mode gain, njem. Gleichtaktverstärkung) pri asimetričnom izlazu jednako:

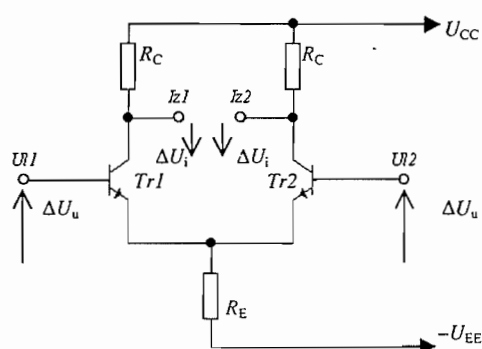
$$A_{uc} = \frac{R_C}{2R_E}$$

Pokus



Slika 5.9. Diferencijsko pojačalo s istofaznom pobudom oba ulaza

To znači da će, uz odgovarajući odnos otpora R_C i R_E , signal doveden na ulaze diferencijskoga pojačala istofazno biti oslabljen.



Slika 5.10. Prikaz djelovanja diferencijskoga pojačala s istofaznom pobudom oba ulaza

Omjer pojačanja za protufazni signal A_d i pojačanja za istofazne signale A_c naziva se **faktor potiskivanja** F_P (engl. common mode rejection ratio, skraćeno CMRR, njem. Gleichtaktunterdrückung). Prema tome, faktor potiskivanja za ovakvo diferencijsko pojačalo jest:

$$F_P = \frac{A_d}{A_c} = h_{fe} \frac{R_E}{r_{be}} = h_{fe} \frac{R_E}{h_{ie}}$$

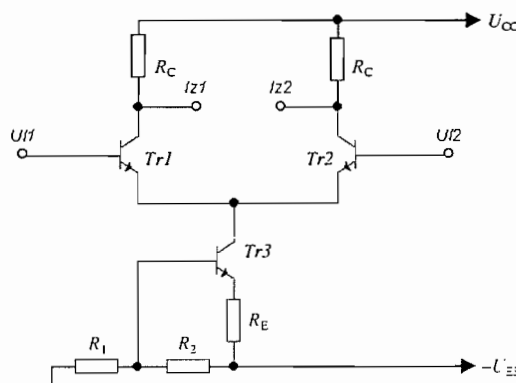
Faktor potiskivanja pokazuje u kojoj mjeri diferencijsko pojačalo potiskuje smetnje. Korisni signal, koji se želi pojačati, dovodi se na ulaze pojačala u protu-

fazi i bit će pojačan. Ako se na ulazima pojačala pojave smetnje, one su istog iznosa i u fazi pa će biti potisnute, odnosno u odnosu prema korisnome signalu oslabljene. Zato se diferencijsko pojačalo posebno često upotrebljava kao ulazni stupanj složenijih elektroničkih sklopova, između ostalog i u operacijskim pojačalima, zatim kao sklop za dobivanje komplementarnih signala (signala u protufazi) te u mjernoj tehnici za mjerenje razlika napona i struja. Faktor potiskivanja često se izražava u decibelima:

$$F_P = 20 \log \frac{A_d}{A_c} [\text{dB}]$$

Diferencijsko pojačalo sa strujnim izvorom u emitorskome krugu

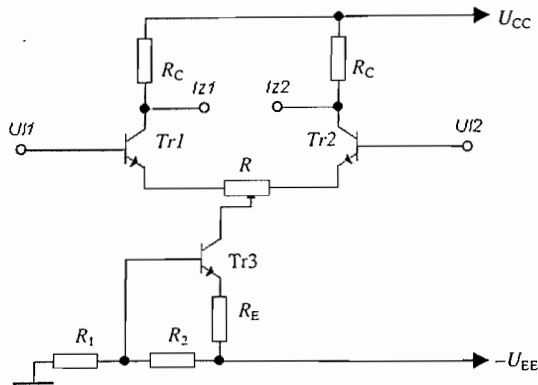
Iz prethodnog izlaganja vidi se da veličina faktora potiskivanja ovisi o iznosu emitorskog otpora R_E . Što je taj otpor veći, veći je i faktor potiskivanja. Međutim, povećanje otpora R_E zahtijeva i povećanje napona izvora napajanja U_{EE} kako bi se zadržali potrebna struja i napon u statičkim uvjetima. Stoga se umjesto velikog otpora R_E upotrebljava tranzistor $Tr3$, koji djeluje kao strujni izvor (slika 5.11.). Njegov je otpor za istosmjernu struju mali, a za promjene napona i struje veliki.



Slika 5.11. Diferencijsko pojačalo sa strujnim izvorom u emitorskome krugu

Simetriranje diferencijskoga pojačala

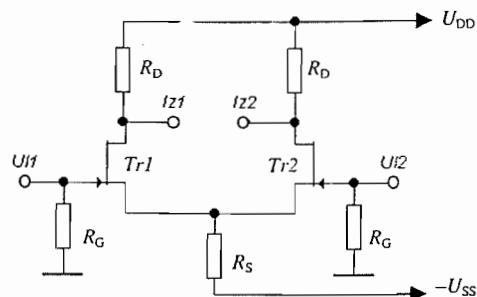
Pokazana dobra svojstva diferencijskoga pojačala temelje se na pretpostavci da je sklop potpuno simetričan, tj. jednakih otpornika R_C i tranzistora potpuno istih osobina, posebno faktora strujnoga pojačanja. Kako to nije moguće u potpunosti postići, sklop se simetrira dodavanjem promjenljivog otpornika od nekoliko desetaka oma u emitorski krug (slika 5.12.).



Slika 5.12. Simetriranje diferencijskoga pojačala

Klizač potenciometra treba podesiti tako da emitterske struje tranzistora *Tr1* i *Tr2* budu jednake bez obzira na faktor strujnoga pojačanja tranzistora. S otporom veličine nekoliko desetaka oma može se otkloniti nesimetrija uzrokovana razlikama u faktoru pojačanja tranzistora u omjeru 1:3.

Diferencijsko pojačalo s unipolarnim tranzistorima



Slika 5.13. Diferencijsko pojačalo s unipolarnim tranzistorima

Na slici 5.13. prikazana je izvedba diferencijskoga pojačala s unipolarnim tranzistorima. Djelovanje mu je isto kao i kod izvedbi s bipolarnim tranzistorima, s tim što ima, zbog unipolarnih tranzistora na ulazu, znatno veći ulazni otpor.

5.3. POJAČALA SNAGE

Pojačalo snage (izlazno pojačalo, pojačalo velikih signala, engl. power amplifier, njem. Leistungsverstärker) ima zadaću predati trošilu što veću izmjeničnu snagu uz što manja izobličenja i što veći stupanj korisnoga djelovanja ili, kraće, **korisnost** (engl. efficiency, njem. Wirkungsgrad). Korisnost je odnos izmjenične snage predane trošilu i ukupne snage privedene pojačalu:

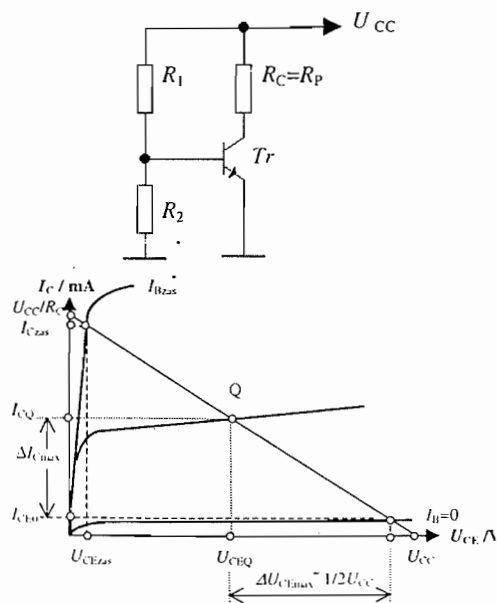
$$\eta = \frac{P_p}{P_{CC}}$$

Pojačalo u klasi A

Kao pojačalo snage može se upotrijebiti pojačalo u spoju zajedničkog emitera (slika 5.14.). Ako je radna točka pojačala približno u sredini radnoga područja, tako da struja kroz tranzistor teče tijekom cijele periode ulaznoga signala, kaže se da pojačalo radi u **klasi A** (engl. class-A amplifier, njem. A-Betrieb).

Kod pojačala u kojemu je trošilo spojeno u kolektorski krug, kolektorska struja teče kroz tranzistor tijekom cijele periode ulaznoga signala pa je predana snaga iz izvora uvijek ista bez obzira na pobudu: $P_{CC} = U_{CC} I_{CQ}$.

Snaga predana trošilu jednaka je umnošku efektivne vrijednosti struje i napona na trošilu, tj. otporu R_C : $P_p = (\Delta U_{CEmax}/\sqrt{2})(\Delta I_{Cmax}/\sqrt{2}) = (U_{CEQ}/\sqrt{2})(U_{CEQ}/\sqrt{2} R_C) = 0.5 U_{CEQ}^2 / R_C = 0.5 I_{CQ}^2 R_C$.

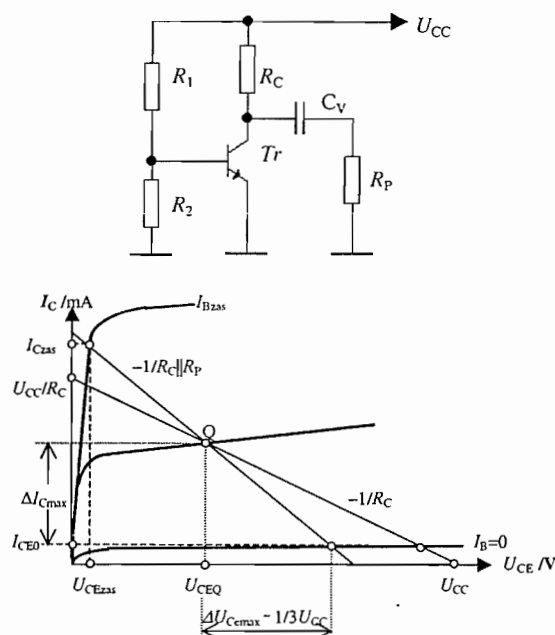


Slika 5.14. Pojačalo snage u klasi A

Najveći hod izlaznoga signala ograničen je teoretski na $U_{CC}/2$. Pri pobudi koja daje najveći hod izlaznoga signala, snaga trošila je:

$$P_P = \frac{U_{CC}}{2\sqrt{2}} \frac{I_C}{\sqrt{2}} = \frac{U_{CC} I_C}{4} = \frac{P_{CC}}{4}.$$

Prema tome, korisnost u najboljem slučaju (kod najvećega hoda izlaznoga signala bez izobličenja) iznosi 25%. No kako je zbog djelovanja preostale struje kolektora i napona zasićenja tranzistora hod izlaznoga signala manji od pretpostavljenog, u stvarnosti je korisnost nešto manja (oko 20%).



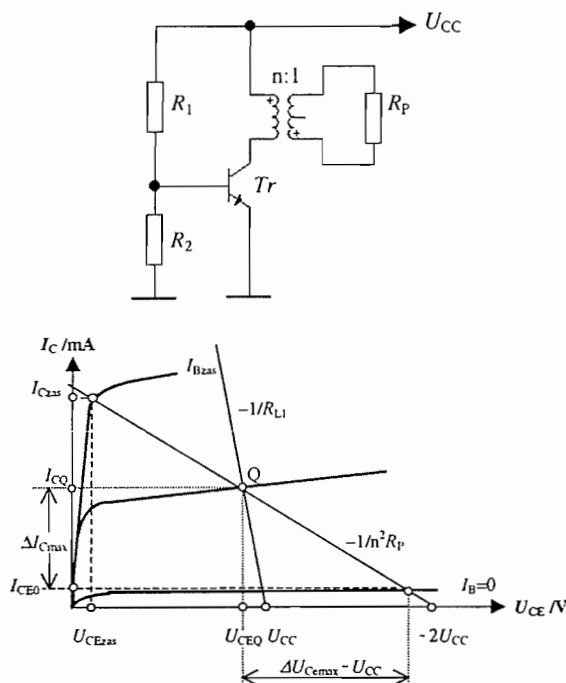
Slika 5.15. Pojačalo snage u klasi A s kapacitivno vezanim trošilom

Za kapacitivno vezano trošilo (slika 5.15.) korisnost je još nepovoljnija jer je u najpovoljnijem slučaju ($R_C = R_P$) najveća promjena izlaznoga napona tek trećina napona napajanja, a trošilo dobiva tek polovinu izmjenične snage: $P_P = 1/2(\Delta U_{CEmax}/\sqrt{2})(\Delta I_{Cmax}/\sqrt{2}) = 1/2(U_{CC}/3\sqrt{2})(I_C/\sqrt{2}) = U_{CC}I_C/12 = P_{CC}/12$.

Najveću korisnost pojačala u klasi A moguće je dobiti ako se trošilo spoji u kolektorski krug preko transformatora (slika 5.16.). R_{L1} je otpor primarnoga namota transformatora, a $R_P n^2$ je transformirani otpor trošila iz sekundarnog u primarni krug transformatora, pri čemu je n prijenosni omjer transformatora.

U statičkim uvjetima rada pojačala jakost struje kroz tranzistor određuje vrlo mali otpor primarnoga namota transformatora R_{L1} . Stoga je statički radni pravac praktično okomit na os napona U_{CE} u točki U_{CC} . Dinamički radni pravac određuje otpor trošila R_P transformiran u primarni krug transformatora na iznos

$R_P n^2$. Radnu točku treba odabrati tako da se postigne najveći hod izlaznoga signala (sjecište statičkoga radnog pravca s pravcem nagiba $1/R_P n^2$ povučenim iz točke $2U_{CC}$), a da razvijena snaga ne prijeđe dopušteni utrošak snage, a napon U_{CE} dopuštenu vrijednost.



Slika 5.16. Pojačalo snage u klasi A s transformatorski vezanim trošilom

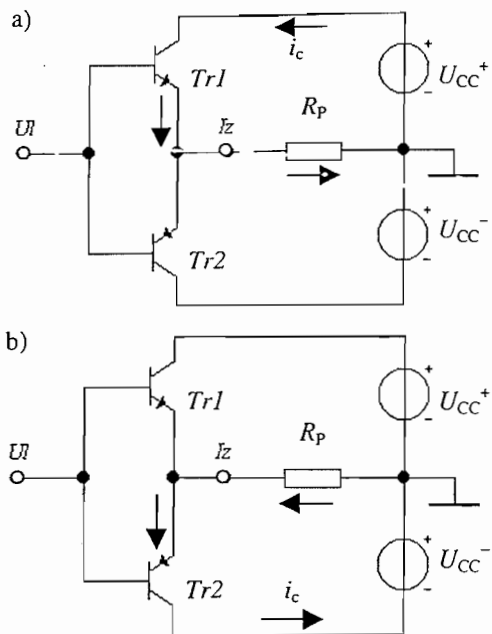
Kad pojačalo nije pobuđeno, ono troši iz izvora snagu: $P_{CC} = U_{CC} I_{CQ}$. Pobuđeno pojačalo predaje trošilu snagu koja je jednaka umnošku efektivne vrijednosti struje kroz trošilo i napona na trošilu:

$$P_P = \frac{\Delta U_{CEmax}}{\sqrt{2}} \frac{\Delta I_{Cmax}}{\sqrt{2}} = \frac{U_{CC} I_{CQ}}{2} = \frac{P_{CC}}{2}.$$

Prema tome u najpovoljnijem slučaju korisnost je 50%. U stvarnosti će stupanj korisnog djelovanja biti nešto niži (oko 40%) zbog djelovanja preostale struje kolektora i napona zasićenja tranzistora.

Pojačala u klasi B i AB

Mного veću korisnost uz veliki hod izlaznoga signala moguće je dobiti pojačalom kod kojega je radna točka tranzistora smještena na granici aktivnoga područja s područjem zapiranja. U tom slučaju struja kroz tranzistor teče samo za vrijeme jedne poluperiode. Takav rad naziva se rad u klasi B.



Slika 5.17. Protutaktno pojačalo snage s komplementarnim tranzistorima

Kako bi se dobila struja kroz trošilo u obje poluperiode, dodaje se prvome tranzistoru drugi tranzistor prema slici 5.17. Tranzistori moraju biti jednakih svojstava s tim da je jedan NPN tipa, a drugi PNP (komplementarni par). Za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznog signala vodljiv je tranzistor $Tr1$, dok je tranzistor $Tr2$ u zapiranju (slika 5.17.a). Za vrijeme negativne poluperiode ulaznog signala vodljiv je tranzistor $Tr2$ a tranzistor $Tr1$ je u zapiranju (slika 5.17.b). Takvo pojačalo naziva se **protutaktno pojačalo** (engl. push-pull amplifier, njem. Gegendtaktendstufe).

Kako u ovome spoju iz izvora teče struja po obliku jednaka punovalno ispravljenoj struji, njezina srednja vrijednost je $\pi/2$ puta manja od vršne vrijednosti. Stoga je privedena snaga pojačalu:

$$P_{CC} = U_{CC} i_C = U_{CC} I_{Czas} / \pi \sqrt{2} = 2 U_{CC} I_{Czas} / \pi,$$

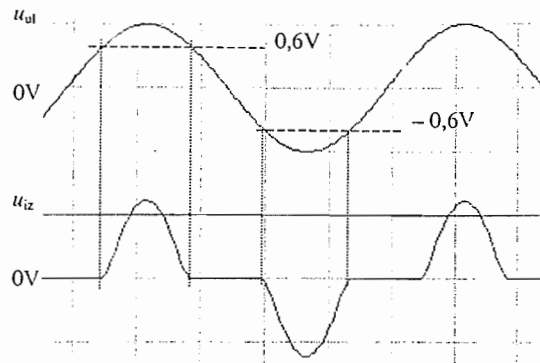
a snaga trošila iznosi:

$$P_P = (\Delta U_{CEmax} / \sqrt{2}) (\Delta I_{Cmax} / \sqrt{2}) = (U_{CC} / \sqrt{2}) (I_{Czas} / \sqrt{2}) = U_{CC} I_{Czas} / 2 = \pi P_{PR} / 4.$$

Prema tome, u najpovoljnijemu slučaju kod pojačala u protutaktnome spoju korisnost može doseći teoretski iznos 78%. Zbog napona zasićenja i preostale struje kolektora, korisnost se kreće u stvarnosti između 65 i 70% pri najvećoj pobudi pojačala, tj. kod najvećega hoda izlaznog signala.

Kako tranzistori počinju voditi tek kad ulazni napon dostigne određeni napon U_{BE} (za silicijske tranzistore

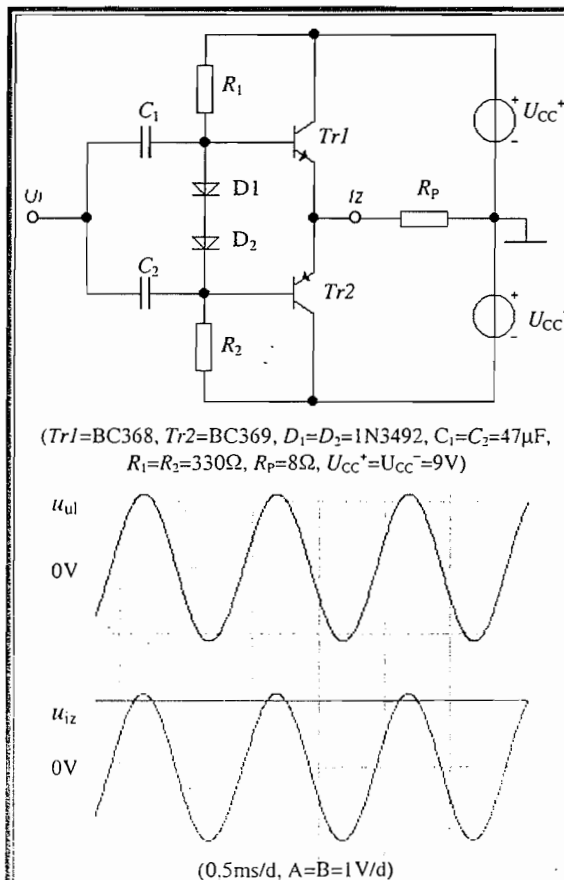
oko 0,6V), izlazni napon protutaktnoga pojačala je izobličen (slika 5.22.). To izobličenje naziva se **izobličenje pri prolazu kroz nulu** (engl. crossover distortion, njem. Übernahme Verzerrung).



Slika 5.18. Izobličenja protutaktnoga pojačala

Izobličenje pri prolazu kroz nulu može se otkloniti tako da se u krugove baza tranzistora dovede odgovarajući prednapon koji će omogućiti da tranzistori vode već u statičkim uvjetima (slika 5.19.). Za takvo pojačalo kaže se da radi u **klasi AB**.

Pokus

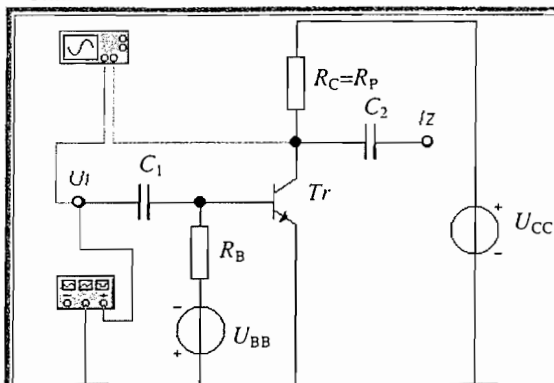


Slika 5.19. Protutaktno pojačalo u klasi AB

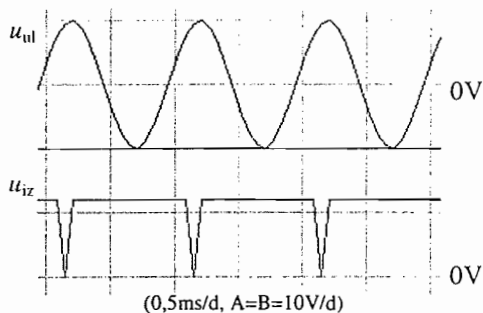
Pojačalo u klasi C

Još veći stupanj djelovanja može se postići s pojačalom koje radi u klasi C (slika 5.20.).

Pokus

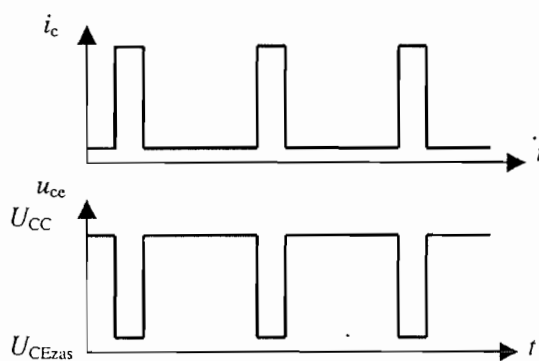


($Tr=BC237$, $R_C=1,2k\Omega$, $R_B=68k\Omega$, $C_1=C_2=47\mu F$, $U_{CC}=12V$, $U_{BB}=3V$)



Slika 5.20. Pojačalo snage u klasi C

Izvor U_{BB} drži tranzistor na takvu negativnom prednaponu da tranzistor dolazi u stanje vođenja samo kratki dio pozitivne poluperiode ulaznog napona kad je trenutna vrijednost ulaznog napona veća od vrijednosti $U_{BB}+U_{BE}$. To znači da kroz trošilo u kolektorskom krugu teče struja samo mali dio periode ulaznog napona. Stoga je privedena snaga iz izvora napajanja vrlo mala.



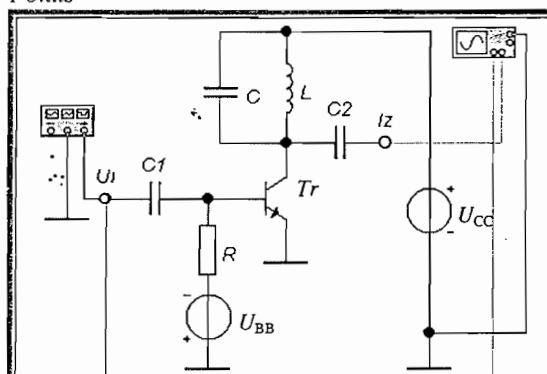
Slika 5.21. Idealizirani struja i napon na izlazu pojačala u klasi C

Ako se impulsni oblik struje i napona na izlazu pojačala predoči idealnim pravokutnim naponom (slika 5.21.), utrošak snage za vrijeme vođenja tranzistora jednak je umnošku struje I_{CZAS} i napona U_{CEZAS} . Kako je veći dio vremena tranzistor nevodljiv, prosječni utrošak snage u periodi ulaznog napona T je: $P_D(sr)=I_{CZAS}U_{CEZAS}t_{on}/T$, gdje je t_{on} vrijeme vođenja tranzistora.

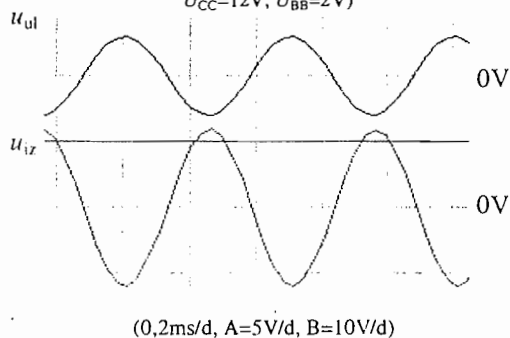
S obzirom na to da se izlazni napon (napon na trošilu) može mijenjati u rasponu od $+U_{CC}$ do $-U_{CC}$, ukupna moguća promjena izlaznog napona je $2U_{CC}$. Stoga je maksimalna izlazna snaga trošila $P_P=U^2/R=(U_{CC}/\sqrt{2})^2/R=U_{CC}^2/2R$.

Zato što je tranzistor uključen samo dio periode ulaznog napona, izlazni je napon pojačala u klasi C izobličen. Da bi se dobio izlazni napon sinusoidnoga oblika, umjesto otpora R_C spaja se u kolektorski krug titrajni krug čija je rezonancijska frekvencija jednaka frekvenciji ulaznog signala (slika 5.22.)

Pokus



(($Tr=BC237$, $R=10k\Omega$, $C_1=C_2=47\mu F$, $C=0,1\mu F$, $L=63mH$, $U_{CC}=12V$, $U_{BB}=2V$)



Slika 5.22. Pojačalo snage u klasi C opterećeno titrajnim krugom

U ovome slučaju otpor R je paralelni spoj otpora zavojnice i trošila spojenoga na izlaz pojačala, što je mala vrijednost. Stoga je ukupna privedena snaga pojačala: $P_{CC}=P_{D(sr)}+P_P$, pa je korisnost: $\eta = P_P/P = P_P/(P_P + P_{D(sr)})$. Kako je $P_P \gg P_{D(sr)}$, to je faktor η neznatno manji od 1, tj. korisnost je približno 100%.

Primjer 5.1.

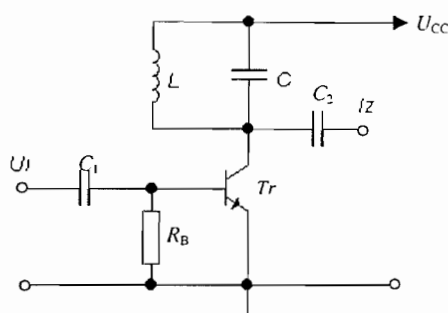
Za koju će frekvenciju ulaznoga napona titrajni krug pojačala biti u rezonanciji ako su vrijednosti elemenata:
 $C = 0,1 \mu\text{F}$ i $L = 63 \text{mH}$?

$$f_0 = f_r = 1/2\pi \sqrt{0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 63 \cdot 10^{-3}} = 2 \text{kHz}$$

Ako je rezonancijska frekvencija titrajnoga kruga u kolektorskome krugu jednaka dvostrukoj vrijednosti frekvencije ulaznoga signala, izlazni napon bit će pojačan i dvostruke frekvencije u odnosu prema ulaznome. U tom slučaju pojačalo radi kao udvostručivač frekvencije.

Ako se u krugu baze pojačala izaberu vrijednosti za C_1 i R_B tolike da je vremenska konstanta $C_1 \times R_B$ znatno veća od periode ulaznoga napona, ulazni krug

pojačala djeluje kao restaurator negativnog istosmjernoga napona jer spoj BE tranzistora djeluje kao dioda. U tom slučaju nije potreban poseban izvor negativnoga prednapona baze U_{BB} (slika 5.23.)



Slika 5.23. Pojačalo snage klase C bez izvora prednapona baze

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

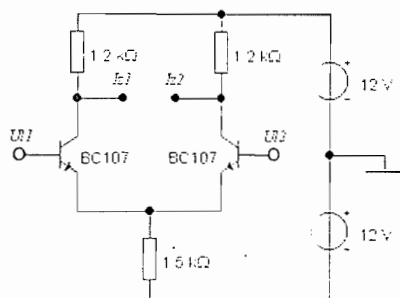
VJEŽBA 5.1. DIFERENCIJSKO POJAČALO

Zadatak

Upoznati svojstva spoja s obzirom na pojačanje istofazno i protufazno dovedenih signala na ulaze pojačala, ispitati djelovanje iznosa otpora na faktor potiskivanja te ovladati osnovnim postupcima u primjeni instrumenata i prikazu mjernih rezultata.

Instrumenti i pribor

- tranzistor BC107 (2 komada)
- otpornici 1,2 k Ω , (2 komada), 1,5 k Ω , i 2,7 k Ω
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvori napajanja 0-15V, 1 A i 0-15V, 1 A
- univerzalni instrument (3 komada)
- generator sinusoidnoga napona
- osciloskop.



Slika 5.24. Diferencijsko pojačalo

Priprema

1. Navedite osnovno svojstvo diferencijskoga pojačala.
2. Što je faktor potiskivanja diferencijskoga pojačala? O čemu ovisi njegova veličina?
3. Iz tvorničkih podataka odredite vrijednosti parametra h_{fe} te dopuštene vrijednosti napona U_{CE} i struje I_C za tranzistor BC107.

Pokusi

1. Naponsko pojačanje i faktor potiskivanja

1.1. Na ulaze pojačala prema shemi sa slike 5.24. spojite istofazno sinusoidni izmjenični napon amplitude 10mV, frekvencije 1kHz. Osciloskopom ustanovite fazne odnose napona na ulazima i izlazima pojačala. Nacrtajte dijagrame ulaznih i izlaznih napona. Izmjerite vrijednost izlaznoga napona i ustanovite iznos zajedničkoga pojačanja.

2.2. Izmjenični sinusoidni napon amplitude 10mV i frekvencije 1kHz priključite samo na jedan ulaz. Osciloskopom promatrajte napon na ulazu i izlazima pojačala. Nacrtajte dijagrame ulaznoga i izlaznih napona.

Izmjerite vrijednost izlaznoga napona i odredite iznos diferencijskoga pojačanja.

2.3. Na temelju izmjerenih vrijednosti zajedničkoga i diferencijskoga pojačanja ustanovite iznos faktora potiskivanja.

2.4. Ponovite postupak iz točke 2.1.-2.4. uz vrijednost otpora $R_E = 2,7 \text{ k}\Omega$ i napon napajanja $U_{CC}=U_{EE}=15 \text{ V}$.

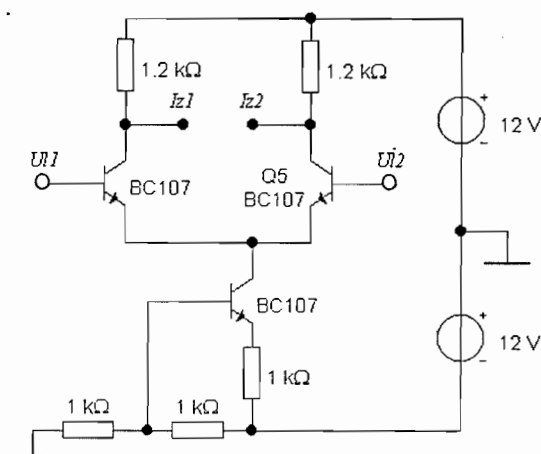
VJEŽBA 5.2. DIFERENCIJSKO POJAČALO SA STRUJNIM IZVOROM

Zadatak

Upoznati svojstva spoja s obzirom na pojačanje istofazno i protufazno dovedenih signala na ulaze pojačala.

Instrumenti i pribor

- tranzistor BC107 (3 komada)
- otpornici $1,0 \text{ k}\Omega$ (3 komada), $1,2 \text{ k}\Omega$, (2 komada)
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvori napajanja 12 V , 1 A i -12 V , 1 A
- univerzalni instrument (3 komada)
- generator sinusoidnoga napona
- osciloskop.



Slika 5.25. Diferencijsko pojačalo sa strujnim izvorom u krugu emitera

Priprema

1. Opišite ulogu trećeg tranzistora u spoju diferencijskoga pojačala sa slike 5.25.

2. Iz tvorničkih podataka odredite vrijednosti parametra h_{fe} te dopuštene vrijednosti napona U_{CE} i struje I_C za tranzistor BC107.

Pokusi

1. Naponsko pojačanje i faktor potiskivanja

1.1. Na ulaze pojačala prema shemi sa slike 5.25. spojite istofazno sinusoidni izmjenični napon amplitude 10 mV , frekvencije 1 kHz . Osciloskopom ustanovite fazne odnose napona na ulazima i izlazima pojačala. Nacrtajte dijagrame ulaznih i izlaznih napona.

Izmjerite vrijednost izlaznoga napona i ustanovite iznos zajedničkoga pojačanja.

1.2. Izmjenični sinusoidni napon amplitude 10 mV i frekvencije 1 kHz priključite samo na jedan ulaz. Osciloskopom promatrajte napon na ulazu i izlazu pojačala. Nacrtajte dijagrame ulaznoga i izlaznoga napona.

Izmjerite vrijednost izlaznoga napona i odredite iznos diferencijskoga pojačanja.

1.3. Na temelju izmjerenih vrijednosti zajedničkoga i diferencijskoga pojačanja ustanovite iznos faktora potiskivanja.

PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Objasnite djelovanje tranzistora u Darlingtonovu spoju.

2. Kakav je fazni odnos ulaznoga i izlaznoga napona pojačala u spoju zajedničkog emitera s Darlingtonovim spojem tranzistora?

3. Kada se upotrebljava pojačalo u spoju zajedničkog emitera s Darlingtonovim spojem tranzistora?

4. Kakav je fazni odnos ulaznoga i izlaznoga napona pojačala u spoju zajedničkoga kolektora s Darlingtonovim spojem tranzistora?

5. Kada se upotrebljava pojačalo u spoju zajedničkoga kolektora s Darlingtonovim spojem tranzistora?

6. Navedite osnovno svojstvo diferencijskoga pojačala.

7. Što je faktor potiskivanja?

8. Kakav je utjecaj iznosa otpora R_E na faktor potiskivanja?

9. Navedite ograničenja u povećanju faktora potiskivanja promjenom otpora R_E .

10. Objasnite način na koji diferencijsko pojačalo slabi smetnje, a pojačava korisni signal.

11. Objasnite kako se diferencijsko pojačalo može primijeniti kao sklop za dobivanje protufaznih (komplementarnih) signala.

12. Objasnite ulogu tranzistora $Tr3$ u spoju diferencijskoga pojačala sa strujnim izvorom.

13. Što je korisnost pojačala?

14. Što su klase rada pojačala snage?

15. Koja je najveća moguća korisnost kod pojačala snage koje radi u klasi A ako je $R_P = R_C$?

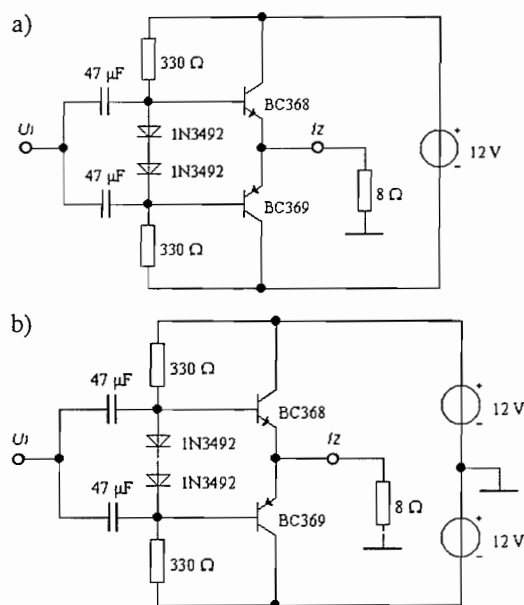
16. Kako se u klasi A može povećati korisnost?

17. U kojoj klasi radi protutaktno pojačalo?

18. Što se postiže protutaktnim pojačalom?

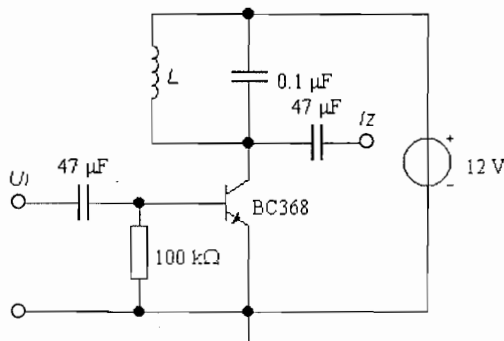
19. Kakva se izobličenja izlaznoga signala javljaju kod pojačala u klasi B?

20. Usporedite međusobno djelovanje pojačala sa slike 5.26.



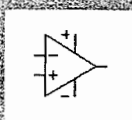
Slika 5.26. Izvedbe protutaktnih pojačala

21. Objasnite zbog čega je korisnost pojačala u klasi C najveća.



Slika 5.27. Pojačalo klase C

22. Odredite vrijednost induktiviteta u kolektorskom krugu pojačala (slika 5.27.) tako da se na izlazu dobije signal frekvencije 4 kHz uz ulazni signal frekvencije 1 kHz.



6. OPERACIJSKO POJAČALO

Operacijsko pojačalo (engl. operational amplifier, njem. Operationsverstärker) integrirana je elektronička komponenta. Naziv potječe od prvobitne primjene (izvođenje računskih operacija u analognim računalima).

Operacijska pojačala imaju vrlo veliku i raznoliku mogućnost primjene što ovisi o vrsti i načinu spajanja elemenata koji se dodaju izvana.

U ovom poglavlju prvo se obrađuju osnovna svojstva operacijskog pojačala a zatim nekoliko primjera primjene.

6.1. Osnovne osobine operacijskoga pojačala

Napajanje operacijskoga pojačala

Djelovanje signala na ulaze pojačala

Osnovne osobine operacijskoga pojačala

Invertirajuće pojačalo

Neinvertirajuće pojačalo

6.2. Sklopovi s operacijskim pojačalom

Pojačalo za zbrajanje i oduzimanje

Diferencijator

Integrator

Komparator

Komparator s histerezom

Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 6.1. Frekvencijska karakteristika

Vježba 6.2. Diferencijator

Vježba 6.3. Integrator

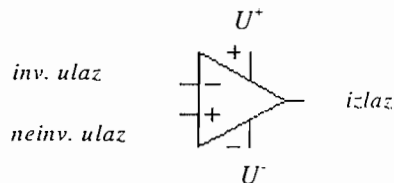
Vježba 6.4. Komparator s histerezom (invertirajući ulaz)

Vježba 6.5. Komparator s histerezom (neinvertirajući ulaz)

Pitanja za ponavljanje i provjeru znanja

6.1. OSNOVNE OSOBINE OPERACIJSKOGA POJAČALA

Operacijsko pojačalo ima pet izvoda (slika 6.1.). Dva su ulazi koji djeluju kao kod diferencijskoga pojačala. Ulaz označen s $-$ naziva se **invertirajući** (engl. inverting input, njem. invertierender Eingang). Ulaz označen s $+$ naziva se **neinvertirajući** (engl. noninverting input, njem. nicht-invertierender Eingang). Na izlazu (engl. output, njem. Ausgang) dobije se pojačani signal s ulaza. Preostala dva izvoda su priključci za **napon napajanja** (engl. power supply, njem. Speisespannung, Versorgungsspannung).

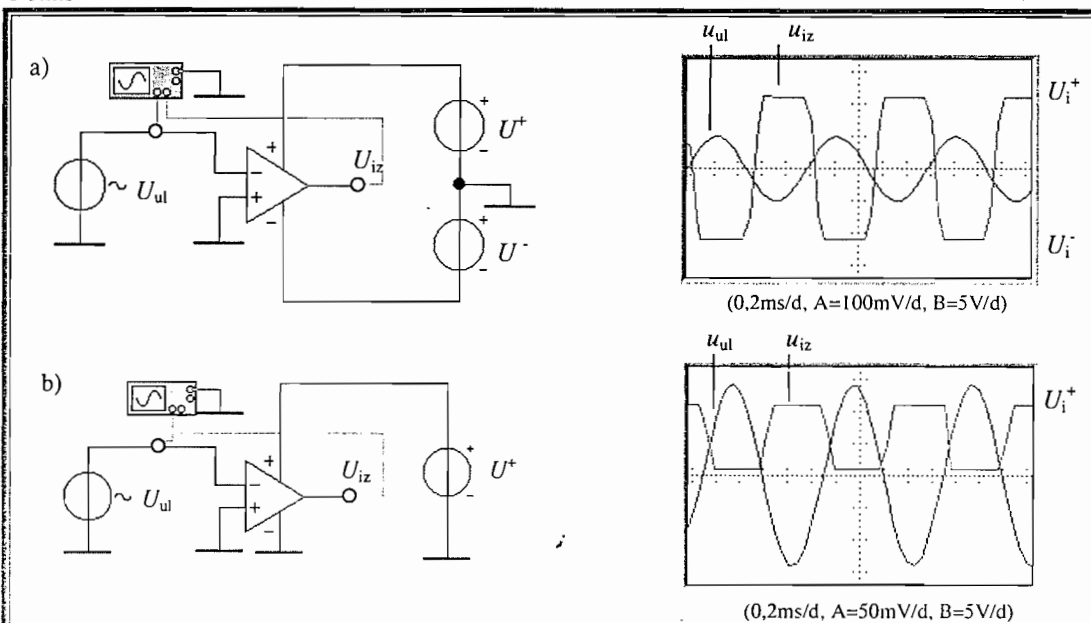


Slika 6.1. Simbol operacijskoga pojačala

Napajanje operacijskoga pojačala

Za napajanje operacijskoga pojačala najčešće se upotrebljavaju dva izvora (slika 6.2.a); rjeđe se upotrebljava jedan izvor (slika 6.2.b).

Pokus



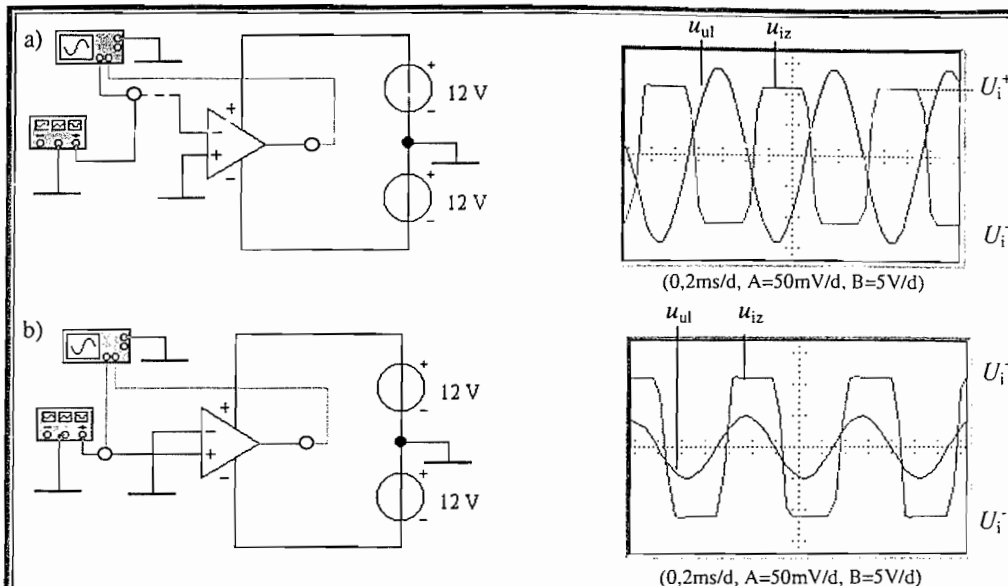
Slika 6.2. Djelovanje operacijskoga pojačala uz: a) napajanje s dva izvora, b) napajanje s jednim izvorom

Djelovanje signala na ulaze pojačala

Signal doveden na invertirajući ulaz pojavljuje se na izlazu pojačan i u protufazi s ulaznim (slika 6.3.a). Ako se signal dovede na neinvertirajući ulaz, na izlazu se dobiva signal pojačan i u fazi s ulaznim (slika 6.3.b).

Budući da je pojačanje operacijskoga pojačala vrlo veliko, signal na izlazu pojačala u oba je slučaja izobličen. Amplituda izlaznoga signala ograničena je iznosom napona napajanja i iznosi oko 90% od napona napajanja.

Pokus



Slika 6.3. Djelovanje signala na ulaze operacijskoga pojačala: a) invertirajući ulaz, b) neinvertirajući ulaz

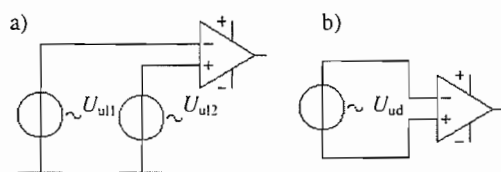
Osnovne osobine operacijskoga pojačala

Proizvođači elektroničkih komponenata proizvode vrlo veliki broj izvedbi operacijskih pojačala. Osobine i primjene operacijskog pojačala bit će pokazane na izvedbi koja nosi oznaku 741.

Pri radu s operacijskim pojačalom potrebno je znati podatke o **dopuštenim vrijednostima** (engl. absolute maximum ratings, njem. Grenzwerte) radnih napona, temperatura i utroška snage (engl. power dissipation, njem. Verlustleistung).

Tablica 6.1. Dopuštene vrijednosti pojačala 741

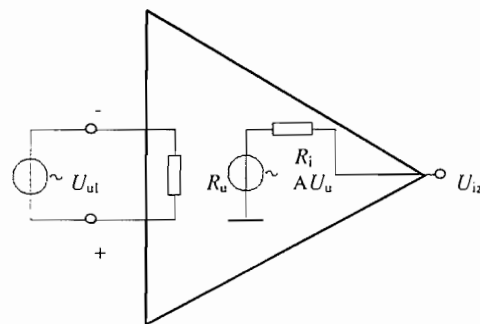
Napon napajanja	$\pm 18V$
Utrošak snage	500 mW
Diferencijski ulazni napon	$\pm 30V$
Ulazni napon	$\pm 15V$
Radna temperatura	0-70 C°
Temperatura lemljenja	300 C°



Slika 6.4. Ulazni naponi operacijskoga pojačala

Potrebno je razlikovati dopušteni ulazni napon između bilo kojeg ulaza i zajedničke točke (naponi U_{ul1} i U_{ul2} , engl. input voltage, njem. Gleichtakt-Eingangsspannung, slika 6.4.a.) od napona između dva ulaza, tzv. diferencijalnog ulaznog napona (napon U_{ud} , engl. differential input voltage, njem. Differenz-Eingangsspannung, slika 6.4.b.). Ulazni napon ne smije prijeći vrijednost napona napajanja.

Najvažnije osobine operacijskoga pojačala jesu: vrlo veliko naponsko pojačanje A_v (engl. voltage gain, njem. Spannungsverstärkung), mali izlazni otpor R_i i veliki ulazni otpor R_u (slika 6.5.).



Slika 6.5. Nadomjesni spoj operacijskoga pojačala

Zbog nesimetričnosti elemenata unutar integriranoga sklopa, na izlazu će postojati određeni napon i onda kad je na ulazu 0V. Taj izlazni napon naziva se **izlazni napon pomaka** (engl. output offset voltage, njem. Ausgangs-Offset-Spannung). Izlazni napon bit će 0V tek kad se na ulaz priključi određeni iznos napona. Taj ulazni napon naziva se **ulazni napon pomaka** (engl. input offset voltage, njem. Eingangs-Offset-Spannung). Za otklanjanje napona namještanja operacijska pojačala imaju dodatne izvođe.

Operacijsko pojačalo dobro pojačava razliku signala između dva ulaza (ulazni dio operacijskoga pojačala je diferencijsko pojačalo). To pojačanje naziva se **diferencijsko pojačanje** (engl. differential-mode gain, njem. Gegentaktverstärkung). Ako se na oba ulaza dovede isti signal, bit će slabo pojačan. To pojačanje naziva se **pojačanje za zajednički signal** (engl. common-mode gain, njem. Gleichtaktverstärkung). Omjer vrijednosti diferencijskoga pojačanja i pojačanja za zajednički signal naziva se **faktor potiskivanja** (engl. common-mode rejection ratio, skraćeno CMMR, njem. Gleichtaktunterdrückung) i izražava se u decibelima.

$$F_P = CMMR = 20 \log \frac{A_d}{A_c}$$

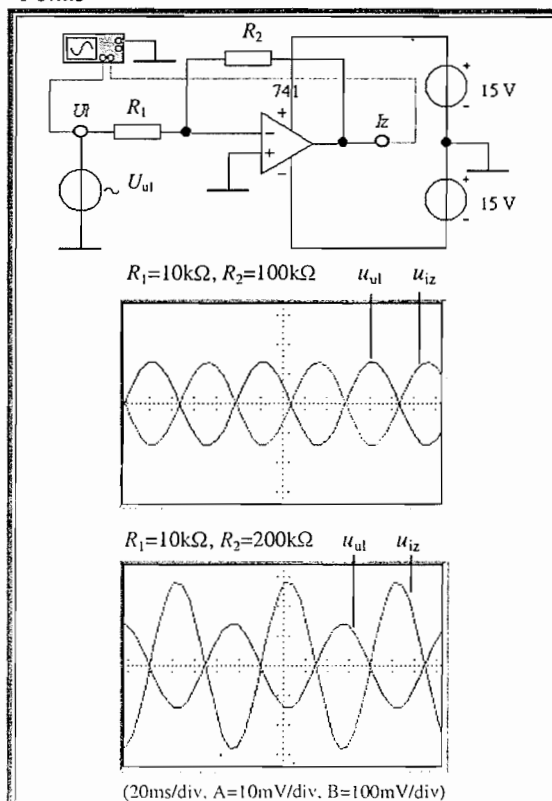
U tablici 6.2. pokazane su tipične vrijednosti električnih karakteristika (engl. electrical characteristics, njem. Kennwerte) pojačala 741.

Tablica 6.2. Električne karakteristike pojačala 741

Naponsko pojačanje	200.000
Faktor potiskivanja	90 dB
Ulazni otpor	2 MΩ
Izlazni otpor	75 Ω
Ulazni napon namještanja	1 mV

Invertirajuće pojačalo

Pokus



Slika 6.6. Istosmjerno invertirajuće pojačalo

Pokus sa slike 6.6. pokazuje da je odnos vrijednosti amplitude izlznoga i ulaznoga napona jednak odnosu otpora R_2 i R_1 . To znači da je pojačanje ovoga pojačala jednako:

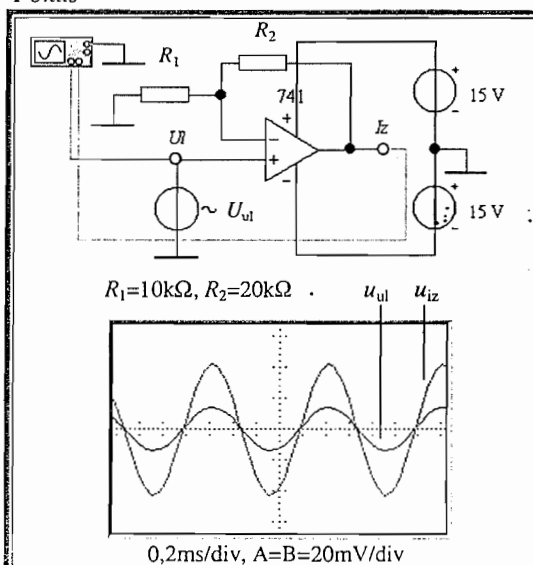
$$A_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

tj. naponsko pojačanje ovisi isključivo o odnosu vrijednosti izvana dodanih otpornika.

Izlazni napon je u protufazi s ulaznim naponom (predznakom minus). Stoga se to pojačalo naziva **invertirajuće pojačalo** (engl. inverting amplifier, njem. invertierender Verstärker).

Neinvertirajuće pojačalo

Pokus



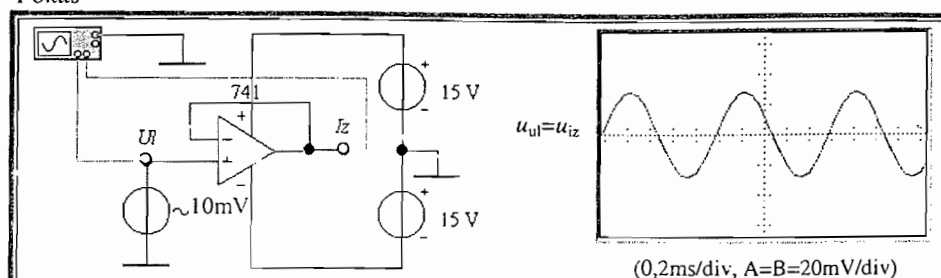
Slika 6.7. Neinvertirajuće pojačalo

Pokus sa spojem prema slici 6.7. pokazuje da je odnos izlznoga i ulaznoga napona za jedan veći od odnosa otpora R_2/R_1 , a izlazni napon je u fazi s ulaznim naponom. Stoga se ovo pojačalo naziva **neinvertirajuće pojačalo** (engl. noninverting amplifier, njem. nichtinvertierender Verstärker), a pojačanje se može izračunati prema izrazu:

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

Ako se kod neinvertirajućega pojačala izvede izravna povratna veza s izlaza na ulaz, dobije se sklop kod kojega je izlazni napon istoga iznosa kao ulazni i s njim u fazi (slika 6.8.). To znači da operacijsko pojačalo u takvu spoju obavlja funkciju sljedila napona.

Pokus



Slika 6.8. Sljedilo napona

6.2. SKLOPOVI S OPERACIJSKIM POJAČALOM

Pojačalo za zbrajanje i oduzimanje

S pomoću operacijskoga pojačala mogu se izvesti pojačalo za zbrajanje (engl. summing amplifier, njem. summierender Verstärker) i pojačalo za oduzimanje (engl. difference amplifier, njem. Differenz Verstärker).

Općenito izlazni napon pojačala za zbrajanje iznosi:

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

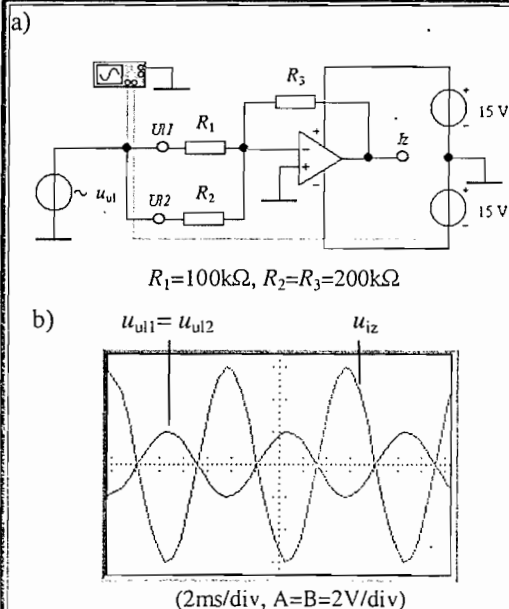
Predznak minus znači da će izlazni napon biti suprotnoga predznaka od ulaznoga, odnosno u protufazi.

Ako su otpori R_1 , R_2 i R_3 jednakih vrijednosti, izlazni napon jednak je zbroju ulaznih:

$$u_{iz} = -(u_{ul1} + u_{ul2})$$

Na slici 6.9. pokazano je operacijsko pojačalo za zbrajanje s dva ulaza. Prema potrebi pojačalo za zbrajanje može imati i više od dva ulaza.

Pokus



Slika 6.9. Pojačalo za zbrajanje

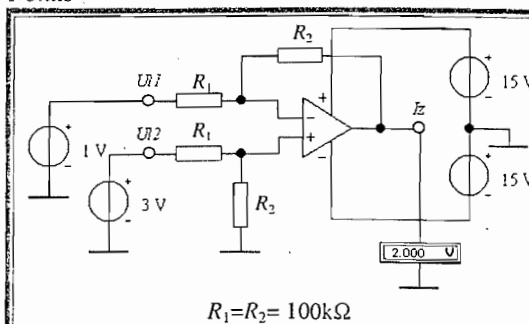
Pokus pokazuje da se, uz jednake ulazne napone amplitude 1V, na izlazu dobije napon amplitude 3V. Uz vrijednosti otpora $R_1=100\text{k}\Omega$, $R_2=R_3=200\text{k}\Omega$ pojačanje napona s ulaza U_{I1} je $R_3/R_1=2$ a pojačanje napona s ulaza U_{I2} je $R_3/R_2=1$ što na izlazu daje 3V. Izlazni napon je u protufazi s ulaznim.

Primjer 6.1.

Koliki će biti izlazni napon ako su vrijednosti otpornika pojačala sa slike 6.9. $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_2=20\text{k}\Omega$ i $R_3=20\text{k}\Omega$, a ulazni naponi $U_{ul1}=1\text{V}$ i $U_{ul2}=2\text{V}$?

$$U_{iz} = -(1\text{V} \cdot 20\text{k}\Omega/10\text{k}\Omega + 2\text{V} \cdot 20\text{k}\Omega/20\text{k}\Omega) = -(2+2) = -4\text{V}$$

Pokus

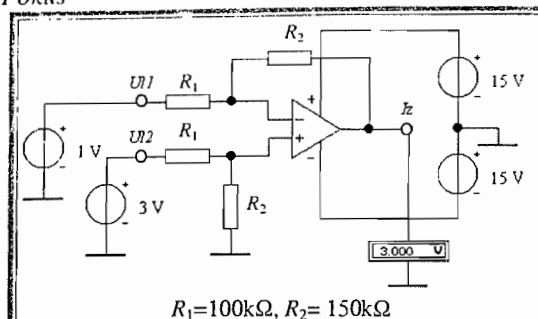


Slika 6.10. Pojačalo za oduzimanje

Pojačalo za oduzimanje pokazano je na slici 6.10. Izlazni napon jednak je razlici napona s ulaza U_{I2} i U_{I1} :

$$u_{iz} = u_{u2} - u_{u1}$$

Pokus



Slika 6.11. Pojačalo za oduzimanje

Pokus sa slike 6.11. pokazuje da pojačalo za oduzimanje s različitim vrijednostima otpora R_1 i R_2 daje na izlazu razliku napona s ulaza U_{I2} i U_{I1} pojačanu za omjer otpora R_2/R_1 . Ulazni napon sa svakog ulaza pojačan je za omjer R_2/R_1 pa je izlazni napon pojačala:

$$u_{iz} = \frac{R_2}{R_1} (u_{u2} - u_{u1})$$

Primjer 6.2.

Koliki će biti izlazni napon ako su vrijednosti otpornika pojačala sa slike 6.11. $R_1=10k\Omega$ i $R_2=20k\Omega$, a ulaznih napona $U_{u1}=1V$ i $U_{u2}=2V$?

$$U_i = 20k\Omega/10k\Omega(2V-1V) = 2V$$

Diferencijator

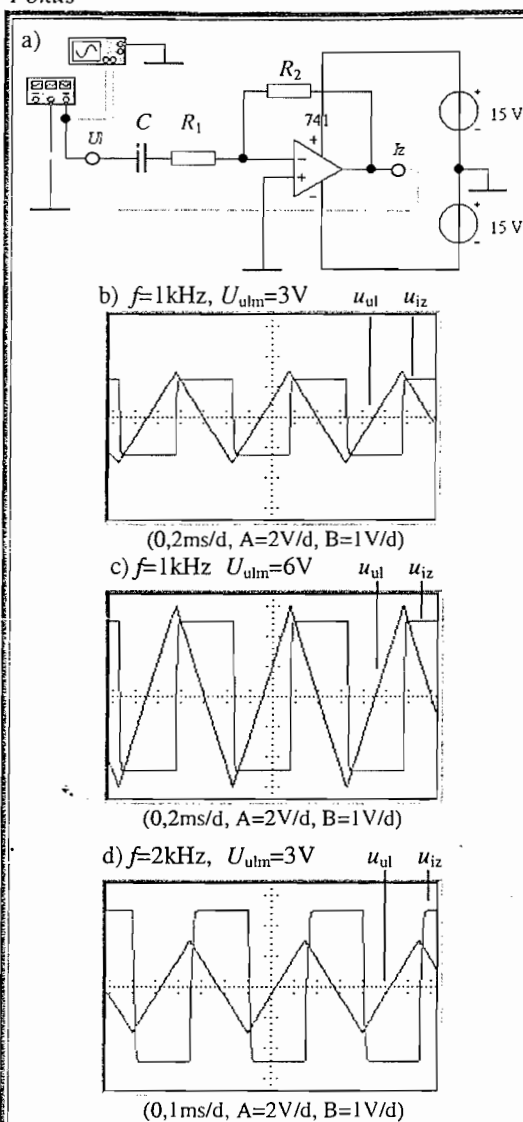
Spoj operacijskoga pojačala prema slici 6.12.a naziva se diferencijator. Pokus pokazuje da taj sklop iz trokutastoga napona daje pravokutni. Uz ulazni napon frekvencije 1 kHz i amplitudu 3V izlazni napon je iste frekvencije i amplitude približno 1,2V (slika 6.12.b). Ako se uz istu frekvenciju poveća amplituda na 6V, poveća se i amplituda izlaznoga napona u istom omjeru, tj. na približno 2,4V (slika 6.12.c). Isti učinak postiže se uz amplitudu 3V, ali povećanu frekvenciju s 1kHz na 2kHz (slika 6.12.d).

To znači da je amplituda izlaznoga napona proporcionalna brzini promjene napona (derivaciji napona po vremenu). Matematički se to može izraziti:

$$U_{izm} = R_2 C \frac{du_u}{dt}$$

gdje je du_u/dt brzina promjene ulaznoga napona.

Pokus



Slika 6.12. Diferencijator

Kad ulazni napon raste, dobije se negativna vrijednost izlaznoga i obratno. To je zbog toga što je ulaz diferencijatora invertirajući ulaz operacijskoga pojačala.

Otpornik R_1 dodan je radi smanjenja osjetljivosti sklopa na visokofrekvencijske šumove.

Primjer 6.3.

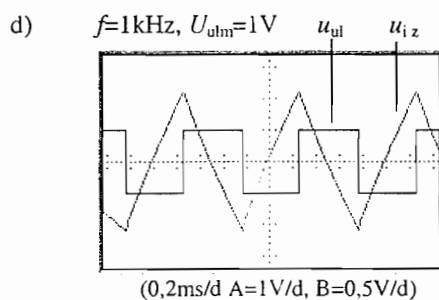
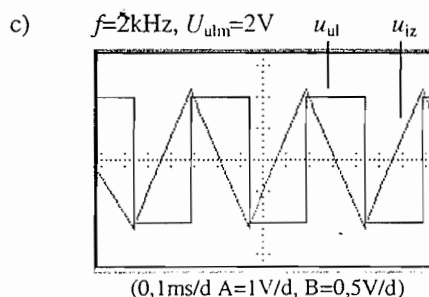
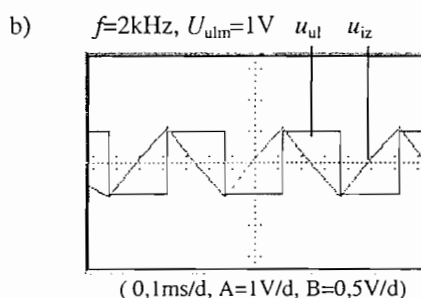
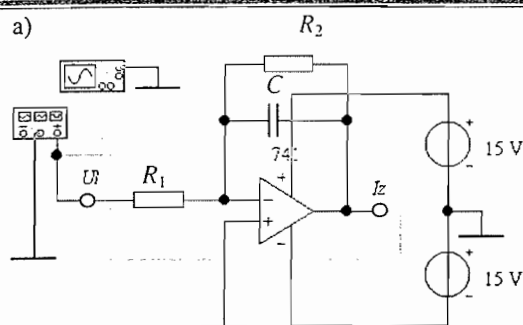
Izračunati amplitudu izlaznoga napona diferencijatora ako su vrijednosti elemenata: $R_1=10k\Omega$, $R_2=220k\Omega$, $C=0,47nF$ a na ulaz je priključen trokutasti napon amplitude 3V, frekvencije 1kHz.

Poluperioda ulaznoga napona je: $T/2 = 1/2f = 1/2 \cdot 10^3 = 0,5ms$. U tome vremenu promijeni se ulazni napon od $-3V$ do $+3V$ pa je brzina promjene ulaznoga napona $du_u/dt=6V/0,5ms$. Prema tome, amplituda pravokutnoga napona na izlazu je:

$$U_{izm} = 220 \cdot 10^3 \Omega \cdot 0,47 \cdot 10^{-9} F \cdot 6V/0,5 \cdot 10^{-3} s = 1,24V$$

Integrator

Pokus



Slika 6.13. Integrator

Spoj operacijskoga pojačala prema slici 6.13. naziva se **integrator**. Pokus pokazuje da taj sklop iz pravokutnoga napona daje trokutasti. Dakle obratno od diferencijatora. Uz ulazni napon frekvencije 2 kHz i amplitudu 1V izlazni napon je iste frekvencije i amplitude približno 1,1V (slika 6.13.b). Ako se uz istu frekvenciju poveća amplituda na 2V, poveća se i amplituda izlaznoga napona u istom omjeru, tj. na približno 2,2V (slika 6.13.c). Isti učinak postiže se uz amplitudu 1V, ali smanjenu frekvenciju s 2kHz na 1kHz (slika 6.13.d).

To znači da je amplituda izlaznoga napona proporcionalna vrijednosti ulaznoga napona i njegovu trajanju. Matematički se to može izraziti:

$$U_{izm} = \frac{U_{ul}}{R_1 C}$$

Kad je ulazni napon pozitivan, dobije se smanjivanje vrijednosti izlaznoga napona i obratno. To je zbog toga što je ulaz integratora invertirajući ulaz operacijskoga pojačala.

Otpornik R_2 dodan je radi stabilnijega rada integratora (sprječava odlazak pojačala u zasićenje).

Primjer 6.4.

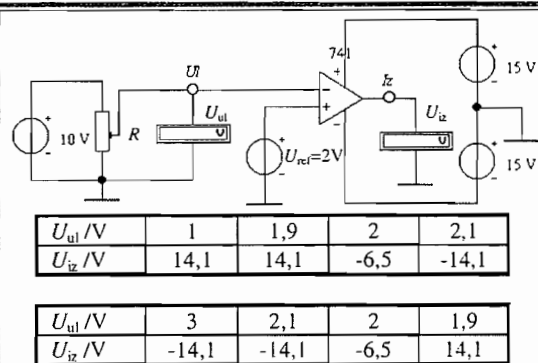
Izračunati amplitudu izlaznoga napona integratora ako su vrijednosti elemenata $R_1=15\text{k}\Omega$, $R_2=100\text{k}\Omega$, $C=15\text{nF}$ i ulazni pravokutni napon amplitude 1V, frekvencije 2kHz.

Poluperioda ulaznoga napona je: $T/2 = 1/2f = 1/2 \cdot 2 \cdot 10^3 = 0,25\text{ms}$. U tome vremenu promijeni se ulazni napon za vrijednost 1V. Prema tome, amplituda trokutastoga napona na izlazu je:

$$U_{izm} = 1\text{V} \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}\text{s} / 15 \cdot 10^3 \Omega \cdot 15 \cdot 10^{-9}\text{F} = 1,11\text{V}$$

Komparator

Pokus

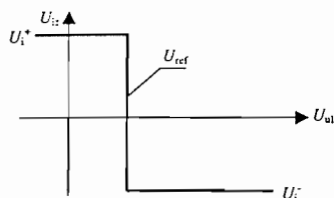


Slika 6.14. Komparator s invertirajućim ulazom

Pokus sa slike 6.14. pokazuje da operacijsko pojačalo daje na izlazu najveći mogući pozitivni napon U_i^+ sve dok je vrijednost ulaznoga napona na invertirajućem ulazu manja od vrijednosti referentnoga napona U_{ref} priključenoga na neinvertirajući ulaz. Kad vrijednost ulaznoga napona dostigne vrijednost referentnoga napona, izlazni se napon brzo mijenja na najveću moguću negativnu vrijednost U_i^- . Tu vrijednost izlazni napon zadržava dok se vrijednost ulaznoga napona ne smanji ispod vrijednosti referentnoga napona.

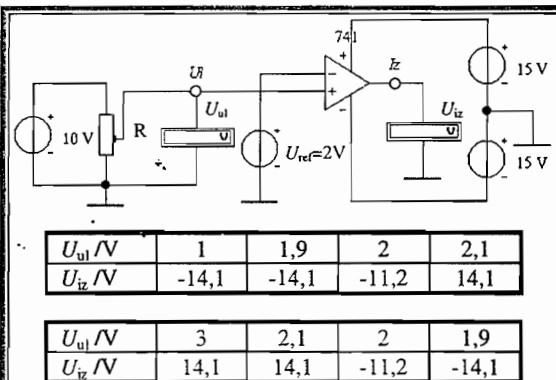
Prema tome operacijsko pojačalo bez elemenata povratne veze djeluje kao komparator, tj. svojim izlaznim naponom pokazuje je li vrijednost ulaznoga napona veća ili manja od vrijednosti referentnoga napona.

Grafički prikaz ovisnosti izlaznoga napona o promjenama ulaznoga napona naziva se prijenosna karakteristika (slika 6.15.).

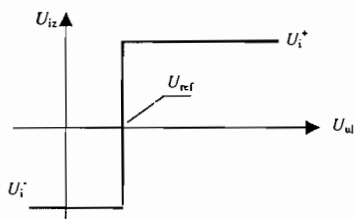


Slika 6.15. Prijenosna karakteristika komparatora s invertirajućim ulazom

Pokus



Slika 6.16. Komparator s neinvertirajućim ulazom



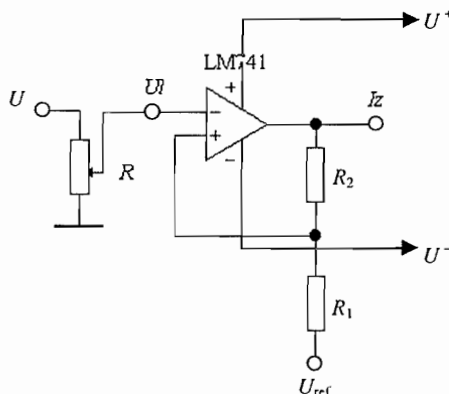
Slika 6.17. Prijenosna karakteristika komparatora s neinvertirajućim ulazom

Komparator se može izvesti i tako da je na invertirajući ulaz spojen izvor referentnoga napona U_{ref} a signal koji se s njime uspoređuje dovodi se na neinvertirajući ulaz (slika 6.16.). Njegova prijenosna karakteristika pokazana je na slici 6.17.

Komparator s histerezom

Pokazani komparatori osjetljivi su na smetnje jer zbog velikoga pojačanja operacijskoga pojačala smetnje na ulazu mogu dovesti do neželjene promje-

ne izlaznoga napona. Manje osjetljiv na smetnje je **komparator s histerezom** (Schmittov okidni sklop, engl. Schmitt trigger, njem. Schmitttrigger). Komparator s histerezom ima otpornu mrežu između izlaza i neinvertirajućeg ulaza (pozitivna povratna veza). Ulazni signal, odnosno referentni napon može se dovesti na bilo koji od dva ulaza operacijskoga pojačala.



Slika 6.18. Komparator s histerezom (invertirajući ulaz)

Na komparatoru sa slike 6.18. referentni napon spojen je preko otpornika R_1 na neinvertirajući ulaz a ulazni napon priključen je na invertirajući ulaz. Njegova prijenosna karakteristika pokazana je na slici 6.19.

Dok je ulazni napon niži od napona na neinvertirajućem ulazu, izlazni napon ima najveću moguću pozitivnu vrijednost U_i^+ . Na neinvertirajućem ulazu je napon:

$$U_1 = U_{ref} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_i^+ \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

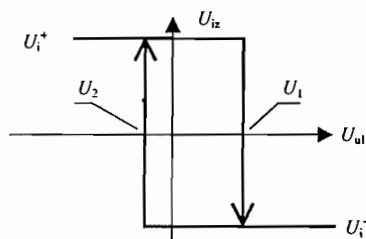
Kad ulazni napon neznatno nadvisi napon na neinvertirajućem ulazu, tj. postane veći od U_1 , izlazni napon komparatora mijenja se na izlaz U_i^- (najveća moguća negativna vrijednost). Stoga se vrijednost ulaznoga napona U_1 kod kojeg dolazi do promjene izlaznoga napona naziva **napon gornje okidne razine**. Sad je na neinvertirajućem ulazu napon:

$$U_2 = U_{ref} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_i^- \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Pri smanjivanju ulaznoga napona dolazi do promjene izlaznoga napona u prvobitno staju kod vrijednosti ulaznoga napona U_2 koja je niža od U_1 . Ta vrijednost naziva se **napon donje okidne razine**.

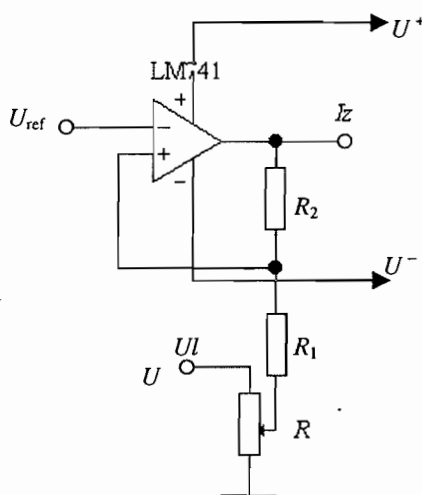
Razlika napona gornje i donje okidne razine naziva se napon histereze komparatora:

$$U_H = U_1 = U_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (U_i^+ + U_i^-)$$



Slika 6.19. Prijenosna karakteristika komparatora s histerezom (invertirajući ulaz)

Na komparatoru sa slike 6.20. referentni napon spojen je na invertirajući ulaz a ulazni napon priključen je na neinvertirajući ulaz preko otpornika R_1 . Prijenosna karakteristika ovoga komparatora pokazana je na slici 6.21.



Slika 6.20. Komparator s histerezom (neinvertirajući ulaz)

Izlazni napon ima vrijednost U_i^- (najveća moguća negativna vrijednost) sve dok je ulazni napon niži od vrijednosti U_1 :

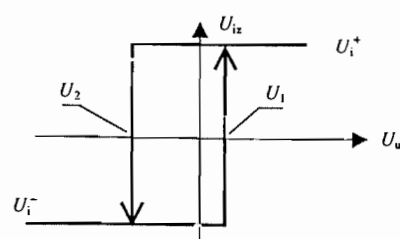
$$U_1 = U_{ref} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} + U_i^- \frac{R_1}{R_2}$$

Kad ulazni napon dostigne vrijednost U_1 (napon gornje okidne razine), napon na izlazu mijenja se na najveću moguću pozitivnu vrijednost U_i^+ . Sad je na neinvertirajućem ulazu napon:

$$U_2 = U_{ref} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} - U_i^+ \frac{R_1}{R_2}$$

Izlazni napon vraća se na prvobitnu vrijednost U_i^- kad se ulazni napon smanji ispod vrijednosti U_2 . Napon histereze ovoga komparatora iznosi:

$$U_H = U_1 - U_2 = \frac{R_1}{R_2} (U_i^+ - U_i^-)$$



Slika 6.21. Prijenosna karakteristika komparatora s neinvertirajućim izlazom

Primjer 6.5.

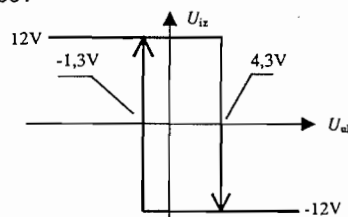
Nacrtati prijenosnu karakteristiku komparatora sa slike 6.18. ako su vrijednosti elemenata $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_2=33\text{k}\Omega$, $U_{ref}=2\text{V}$ i naponi napajanja $\pm 15\text{V}$.

Za vrijednosti napona U_i^+ i U_i^- uzima se približna vrijednost od 80% vrijednosti napona napajanja, tj. 12V .

Naponi gornje i donje okidne razine jesu:

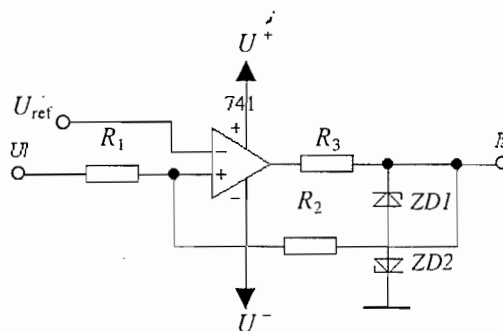
$$U_1 = 2\text{V} \cdot 33\text{k}\Omega / (10\text{k}\Omega + 33\text{k}\Omega) + 12\text{V} \cdot 10 / (10\text{k}\Omega + 33\text{k}\Omega) = 4,326\text{V}$$

$$U_2 = 2\text{V} \cdot 33\text{k}\Omega / (10\text{k}\Omega + 33\text{k}\Omega) - 12\text{V} \cdot 10 / (10\text{k}\Omega + 33\text{k}\Omega) = -1,256\text{V}$$



Slika 6.22. Prijenosna karakteristika komparatora

Kako bi se izlazni napon komparatora učinio neovisnim o naponu napajanja na izlazu komparatora dodaju se Zenerove diode (slika 6.23.). Pozitivna vrijednost izlaznog napona je u tom slučaju $U_{Z1} + U_{F2}$, a negativna vrijednost izlaznog napona je $U_{Z2} + U_{F1}$, gdje su U_Z Zenerovi naponi a U_F naponi propusno polariziranih dioda (oko $0,6\text{V}$).



Slika 6.23. Komparator sa Zenerovim diodama na izlazu

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

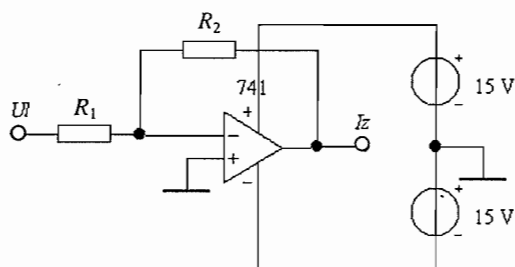
VJEŽBA 6.1. FREKVENCIJSKA KARAKTERISTIKA

Zadatak

Ustanoviti svojstva operacijskoga pojačala u spoju invertirajućega pojačala s obzirom na frekvencijski opseg.

Instrumenti i pribor

- operacijsko pojačalo 741
- otpornici $10\text{k}\Omega$ (2 kom), $100\text{k}\Omega$ i $1\text{M}\Omega$
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napona $+15\text{ V}$, -15 V , 1 A
- univerzalni instrument
- elektronički voltmetar
- generator sinusoidnoga napona
- osciloskop.



Slika 6.24. Invertirajuće pojačalo

Priprema

1. Proučite tvorničke podatke operacijskoga pojačala 741. Navedite dopuštene vrijednosti napona napajanja i ulaznih napona te vrijednosti naponskoga pojačanja, ulaznog i izlaznog otpora.

2. Izračunajte pojačanje pojačala sa slike 6.24. ako su vrijednosti vanjskih elemenata:

a) $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_2=100\text{k}\Omega$, b) $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_2=1\text{M}\Omega$.

Pokusi

1. Frekvencijska karakteristika pojačala s naponskim pojačanjem 10

1.1. Nacrtajte shemu spoja za snimanje frekvencijske karakteristike pojačala.

1.2. Spojite pojačalo ($R_1=10\text{k}\Omega$, $R_2=100\text{k}\Omega$) s instrumentima prema nacrtanoj shemi i izmjerite pojačanje pojačala u decibelima za frekvencije 1kHz , 2kHz , 4kHz , 8kHz , 10kHz , 20kHz , 40kHz , 80kHz , 100kHz i 200kHz . Rezultate prikažite tablicom.

1.3. Na temelju izmjerenih vrijednosti nacrtajte frekvencijsku karakteristiku pojačala (frekvencije nanijeti u logaritamskom mjerilu) i odredite granične frekvencije.

2. Frekvencijska karakteristika pojačala s naponskim pojačanjem 100

2.1. Ponovite postupak iz točke 1.2. uz vrijednosti otpora $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_2=1\text{M}\Omega$.

2.2. Na temelju izmjerenih vrijednosti nacrtajte frekvencijsku karakteristiku pojačala i odredite granične frekvencije.

2.3. Usporedite vrijednosti pojačanja pojačala i granične frekvencije iz prethodna dva mjerenja.

VJEŽBA 6.2. DIFERENCIJATOR

Zadatak

Proširiti znanja o djelovanju diferencijatora:

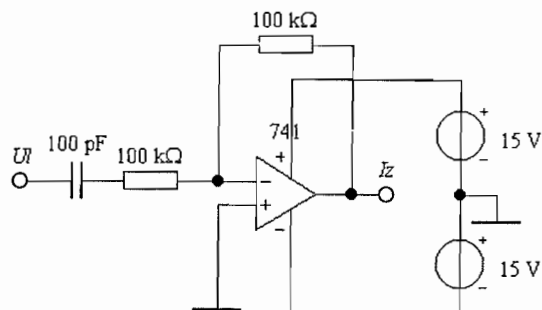
- ustanoviti utjecaj frekvencije ulaznoga napona na djelovanje diferencijatora
- ustanoviti djelovanje diferencijatora na pobudu sinusoidnim i pravokutnim naponom
- ustanoviti utjecaj promjene kapaciteta C na rad diferencijatora.

Instrumenti i pribor

- operacijsko pojačalo 741
- otpornici $10\text{k}\Omega$, $100\text{k}\Omega$ i $1\text{M}\Omega$
- kondenzatori $0,33\text{nF}$, $3,3\text{nF}$, 33nF
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napona $+15\text{ V}$, -15 V , 1 A
- spojni vodovi
- generator sinusoidnoga napona
- osciloskop.

Priprema

1. Izračunati amplitudu pravokutnoga napona na izlazu diferencijatora (slika 6.25.) pobuđenoga trokutastim naponom frekvencije 1kHz, amplitude 1V.



Slika 6.25. Diferencijator

Pokusi

1. Utjecaj frekvencije ulaznoga napona na djelovanje diferencijatora

1.1. Spojite elemente diferencijatora prema shemi sa slike 6.25. Na ulaz priključite izvor trokutastoga napona frekvencije 1kHz i amplitude 1V. S pomoću osciloskopa ustanovite odnose ulaznog i izlaznoga napona. Nacrtajte vremenske dijagrame obaju napona.

1.2. Mijenjajte frekvenciju ulaznoga napona, prvo na niže (500Hz i 100Hz), a zatim na više (2kHz, 10kHz). Kako promjene frekvencije utječu na rad diferencijatora?

2. Utjecaj kapaciteta kondenzatora C na djelovanje diferencijatora

2.1. Na ulaz diferencijatora prema shemi sa slike 6.25. priključite izvor trokutastoga napona frekvencije 1kHz i amplitude 1V.

Mijenjajte kapacitet kondenzatora C, prvo na niže (0,33nF), a zatim na više (33nF). Nacrtajte vremenske dijagrame ulaznoga i izlaznoga napona za oba slučaja.

Kako promjene kapaciteta utječu na rad diferencijatora?

3. Pobuda diferencijatora sinusoidnim naponom

3.1. Na ulaz diferencijatora prema shemi sa slike 6.25. priključite izvor sinusoidnoga napona frekvencije 1kHz i amplitude 1V.

S pomoću osciloskopa ustanovite odnose ulaznog i izlaznoga napona. Nacrtajte vremenske dijagrame obaju napona.

4. Pobuda diferencijatora pravokutnim naponom

4.1. Na ulaz diferencijatora prema shemi sa slike 6.25. priključite izvor pravokutnoga napona frekvencije 1kHz i amplitude 1V.

S pomoću osciloskopa ustanovite odnose ulaznog i izlaznoga napona. Nacrtajte vremenske dijagrame obaju napona.

VJEŽBA 6.3. INTEGRATOR

Zadatak

Proširiti znanja o djelovanju integratora:

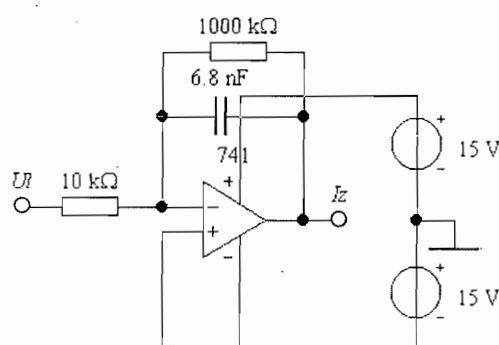
- ustanoviti utjecaj frekvencije ulaznoga napona na djelovanje integratora
- ustanoviti djelovanje integratora na pobudu sinusoidnim i pravokutnim naponom
- ustanoviti utjecaj promjene kapaciteta C na rad integratora.

Instrumenti i pribor

- operacijsko pojačalo 741
- otpornici 10kΩ, 100kΩ i 1MΩ
- kondenzatori 0,68nF, 6,8nF i 68nF
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napona +15V, -15V, 1A
- generator sinusoidnoga napona
- osciloskop.

Priprema

Izračunati amplitudu izlaznoga napona integratora sa slike 6.16. ako je ulazni pravokutni napon amplitude 2V, frekvencije 1kHz.



Slika 6.26. Integrator

Pokusi

1. Utjecaj frekvencije ulaznog napona na djelovanje integratora

1.1. Spojite elemente integratora prema shemi sa slike 6.26. Na ulaz priključite izvor pravokutnoga napona frekvencije 1kHz i amplitude 2V. S pomoću osciloskopa ustanovite odnose ulaznog i izlaznog napona. Nacrtajte vremenske dijagrame obaju napona.

1.2. Mijenjajte frekvenciju ulaznog napona, prvo na niže (500Hz i 100Hz), a zatim na više (2kHz, 10kHz). Kako promjene frekvencije utječu na rad integratora?

2. Utjecaj kapaciteta kondenzatora C na djelovanje integratora

2.1. Na ulaz integratora prema shemi sa slike 6.26. priključite izvor trokutastoga napona frekvencije 1kHz i amplitude 1V.

Mijenjajte kapacitet kondenzatora C, prvo na niže (0,68nF), a zatim na više (68nF). Nacrtajte vremenske dijagrame ulaznog i izlaznog napona za oba slučaja.

Kako promjene kapaciteta utječu na rad integratora?

3. Pobuda integratora sinusoidnim naponom

3.1. Na ulaz integratora prema shemi sa slike 6.26. priključite izvor sinusoidnoga napona frekvencije 1kHz i amplitude 1V.

S pomoću osciloskopa ustanovite odnose ulaznog i izlaznog napona. Nacrtajte vremenske dijagrame obaju napona.

VJEŽBA 6.4. KOMPARATOR S HISTEREZOM (invertirajući ulaz)

Zadatak

Proširiti znanja o djelovanju komparatora:

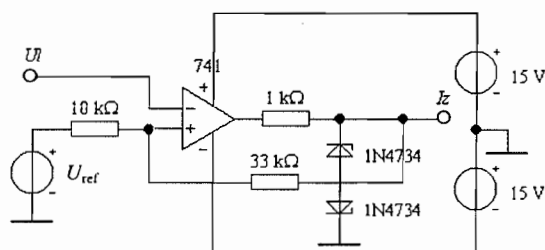
- ispitati svojstva komparatora s histerezom izvedenoga sa Zenerovim diodama na izlazu
- ustanoviti djelovanje komparatora uz sinusoidnu pobudu na ulazu
- ustanoviti odnos frekvencije ulaznog napona i izlaznog napona komparatora.
- ustanoviti utjecaj referentnog napona na oblik prijenosne karakteristike i vrijednost napona histereze.

Instrumenti i pribor

- operacijsko pojačalo 741
- otpornici 1k Ω , 10k Ω i 33k Ω
- Zenerove diode 1N4734 (2 komada)
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napona +15V, -15V, 1A
- izvor napona 0-5V, 1A
- generator sinusoidnoga napona
- osciloskop.

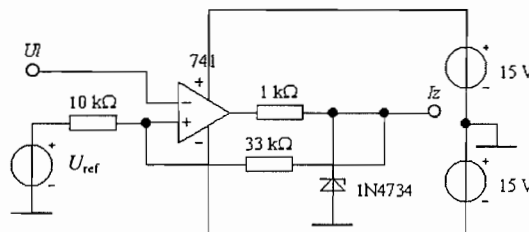
Priprema

1. Izračunajte napone donje i gornje okidne razine komparatora sa slike 6.27. uz referentni napon: a) $U_{ref}=0V$, b) $U_{ref}=3V$.



Slika 6.27. Komparator s histerezom

2. Izračunajte napone donje i gornje okidne razine komparatora sa slike 6.28. uz referentni napon: a) $U_{ref}=0V$, b) $U_{ref}=3V$.



Slika 6.28. Komparator s histerezom

Pokusi

1. Komparator s dvije Zenerove diode

1.1. Spojiti elemente prema shemi sa slike 6.27. Uz referentni napon $U_{ref}=0V$, na ulaz priključite sinusoidni napon frekvencije 1kHz amplitude 5V. Nacrtajte dijagrame ulaznog i izlaznog napona.

1.2. Usporedite frekvencije ulaznog i izlaznog napona.

1.3. Iz dobivenoga oscilograma ustanovite vrijednosti napona donje i gornje okidne razine te napon histereze.

1.4. Spojiti elemente prema shemi sa slike 6.27. Uz referentni napon $U_{ref} = 3V$, na ulaz priključite sinusoidni napon frekvencije 1kHz amplitude 5V.

Nacrtajte dijagrame ulaznog i izlaznog napona.

1.5. Iz dobivenoga oscilograma ustanovite vrijednosti napona donje i gornje okidne razine te napon histereze.

1.6. Kako vrijednost referentnog napona utječe na napon histereze i prijenosnu karakteristiku komparatora?

2. Komparator s jednom Zenerovom diodom

2.1. Spojiti elemente prema shemi sa slike 6.28. Uz referentni napon $U_{ref} = 0V$, na ulaz priključite sinusoidni napon frekvencije 1kHz amplitude 5V. Nacrtajte dijagrame ulaznog i izlaznog napona.

2.2. Usporedite frekvencije ulaznog i izlaznog napona.

2.3. Iz dobivenoga oscilograma ustanovite vrijednosti napona donje i gornje okidne razine te napon histereze.

2.4. Spojiti elemente prema shemi sa slike 6.28. Uz referentni napon $U_{ref} = 3V$, na ulaz priključite sinusoidni napon frekvencije 1kHz amplitude 5V. Nacrtajte dijagrame ulaznog i izlaznog napona.

2.5. Usporedite djelovanje komparatora s jednom i dvije Zenerove diode.

VJEŽBA 6.5. KOMPARATOR S HISTEREZOM (neinvertirajući ulaz)

Zadatak

Ispitati svojstva komparatora s histerezom izvedenoga sa Zenerovim diodama na izlazu:

- ustanoviti djelovanje komparatora uz sinusoidnu pobudu na ulazu
- ustanoviti odnos frekvencije ulaznog napona i izlaznog napona komparatora
- ustanoviti utjecaj referentnog napona na oblik prijenosne karakteristike i vrijednost napona histereze.

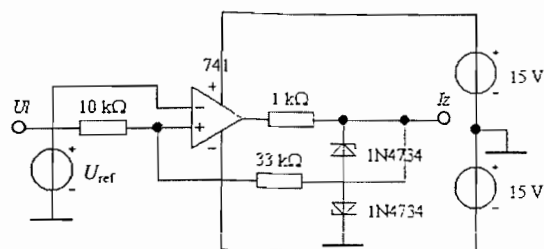
Instrumenti i pribor

- operacijsko pojačalo 741
- otpornici 1k Ω , 10k Ω i 33k Ω
- Zenerove diode 1N4734 (2 komada)

- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napona +15V, -15V, 1A
- izvor napona 0-5V, 1A
- generator sinusoidnog napona
- osciloskop.

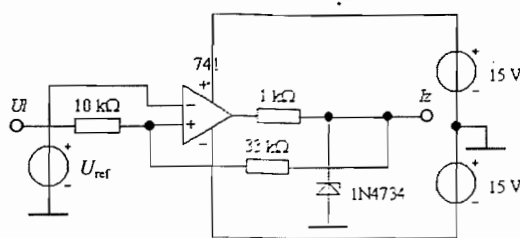
Priprema

1. Izračunajte napone donje i gornje okidne razine komparatora sa slike 6.29. uz referentni napon: a) $U_{ref} = 0V$, b) $U_{ref} = 3V$.



Slika 6.29. Komparator s histerezom

2. Izračunajte napone donje i gornje okidne razine komparatora sa slike 6.30. uz referentni napon: a) $U_{ref} = 0V$, b) $U_{ref} = 3V$.



Slika 6.30. Komparator s histerezom

Pokusi

1. Komparator s dvije Zenerove diode

1.1. Spojiti elemente prema shemi sa slike 6.29. Uz referentni napon $U_{ref} = 0V$, na ulaz priključite izvor sinusoidnog napona frekvencije 1kHz amplitude 5V.

Nacrtajte dijagrame ulaznog i izlaznog napona.

1.2. Usporedite frekvencije ulaznog i izlaznog napona.

1.3. Iz dobivenoga oscilograma ustanovite vrijednosti napona donje i gornje okidne razine te napon histereze.

1.4. Spojiti elemente prema shemi sa slike 6.29. Uz referentni napon $U_{ref} = 3V$, na ulaz priključite sinusoidni napon frekvencije 1kHz amplitude 5V. Nacrtajte dijagrame ulaznog i izlaznog napona.

1.5. Iz dobivenoga oscilograma ustanovite vrijednosti napona donje i gornje okidne razine te napon histereze.

1.6. Kako vrijednost referentnoga napona utječe na napon histereze i prijenosnu karakteristiku komparatora?

2. Komparator s jednom Zenerovom diodom

3.1. Spojiti elemente prema shemi sa slike 6.30. Uz referentni napon $U_{ref}=0V$, na ulaz priključite sinusoidni napon frekvencije 1kHz amplitude 5V. Nacrtajte dijagrame ulaznog i izlaznoga napona.

3.2. Usporedite frekvencije ulaznog i izlaznoga napona.

3.3. Iz dobivenoga oscilograma ustanovite vrijednosti napona donje i gornje okidne razine te napon histereze.

3.4. Spojiti elemente prema shemi sa slike 6.30. Uz referentni napon $U_{ref}=3V$, na ulaz priključite sinusoidni napon frekvencije 1kHz amplitude 5V. Nacrtajte dijagrame ulaznog i izlaznoga napona.

3.5. Usporedite djelovanje komparatora s jednom i dvije Zenerove diode.

PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Kakva je razlika u djelovanju operacijskoga pojačala napajanoga s dva izvora i s jednim izvorom?

2. Kakva je razlika u djelovanju operacijskoga pojačala s obzirom na ulaze pojačala?

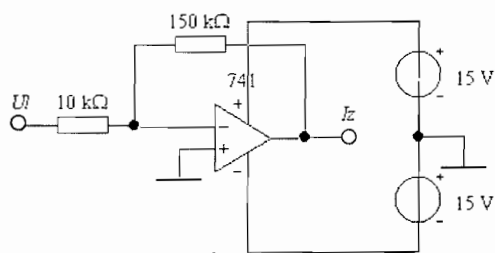
3. Kako vrijednost napona napajanja utječe na amplitudu izlaznoga napona operacijskoga pojačala?

4. Koje su najznačajnije dopuštene vrijednosti na koje se mora paziti pri radu s operacijskim pojačalom?

5. Koje su najznačajnije električne osobine operacijskoga pojačala?

6. Što je faktor potiskivanja operacijskoga pojačala?

7. Koliko je naponsko pojačanje pojačala sa slike 6.31.?

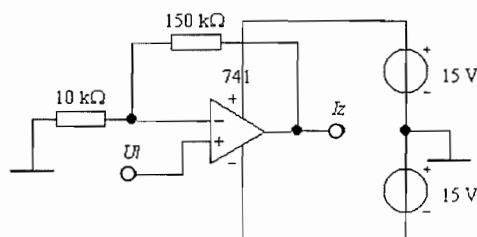


Slika 6.31. Invertirajuće pojačalo (zadatak 7. i 8.)

8. Kako će izgledati izlazni napon pojačala sa slike 6.31. ako se na ulaz priključi sinusoidni napon amplitude 1V?

9. Koliko je naponsko pojačanje pojačala sa slike 6.32.?

10. Kako će izgledati izlazni napon pojačala sa slike 6.32. ako se na ulaz priključi sinusoidni napon amplitude 1V.

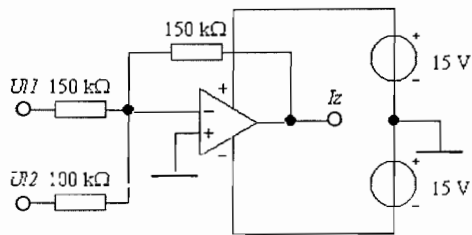


Slika 6.32. Neinvertirajuće pojačalo (zadatak 9. i 10.)

11. O čemu ovisi širina frekvencijskoga pojasa operacijskoga pojačala?

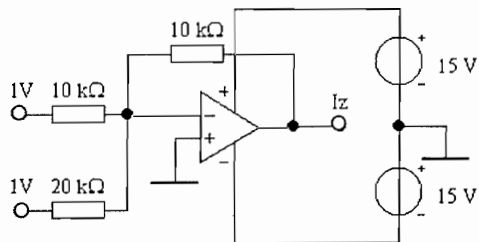
12. Nacrtajte vremenski dijagram ulaznog i izlaznoga napona sklopa sa slike 6.33. ako je na oba ulaza sinusoidni napon amplitude 1V.

13. Nacrtajte vremenski dijagram ulaznog i izlaznoga napona sklopa sa slike 6.33. ako je na ulaz U_{I1} spojen istosmjerni napon 1V, a na ulaz U_{I2} sinusoidni napon amplitude 1V.



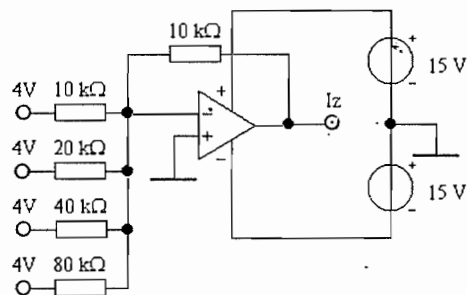
Slika 6.33. Pojačalo za zbrajanje

14. Koliki je izlazni napon sklopa sa slike 6.34.?



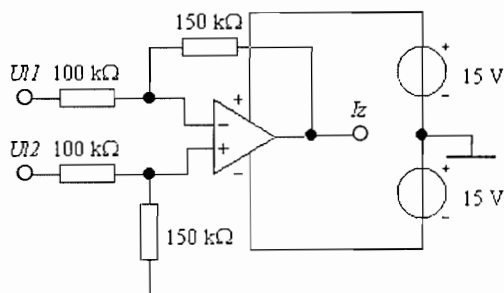
Slika 6.34. Pojačalo za zbrajanje

15. Koliki je izlazni napon sklopa sa slike 6.35.?



Slika 6.35. Pojačalo za zbrajanje

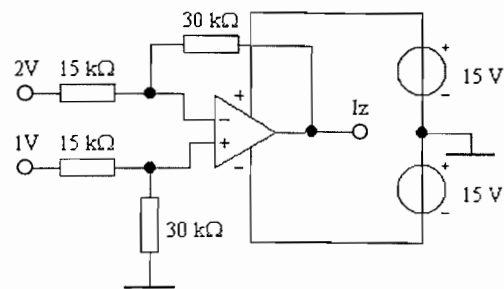
16. Nacrtajte vremenski dijagram ulaznog i izlaznog napona sklopa sa slike 6.36. ako je na ulaz U_{I1} spojen pravokutni napon amplitude 2V, a na ulaz U_{I2} pravokutni napon amplitude 1V.



Slika 6.36. Pojačalo za oduzimanje

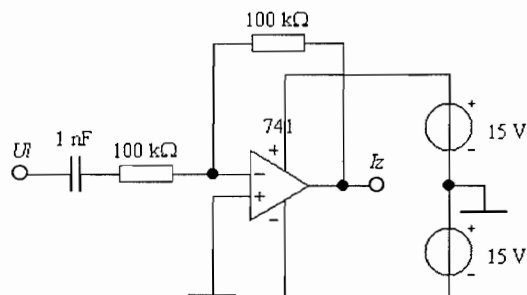
17. Nacrtajte vremenski dijagram ulaznog i izlaznog napona sklopa sa slike 6.36. ako je na ulaz U_{I1} spojen pravokutni napon amplitude 1V, a na ulaz U_{I2} istosmjerni napon $-1V$.

18. Koliki je izlazni napon sklopa sa slike 6.37.?



Slika 6.37. Pojačalo za oduzimanje

19. Nacrtajte vremenske dijagrame ulaznog i izlaznog napona sklopa sa slike 6.38. ako je na ulaz priključen trokutasti napon amplitude 5V i frekvencije 100Hz.

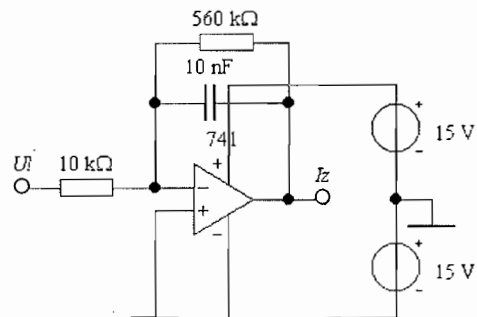


Slika 6.38. Diferencijator

20. Nacrtajte približan izgled vremenskih dijagrama ulaznog i izlaznog napona sklopa sa slike 6.38. ako je na ulaz priključen sinusoidni napon amplitude 5V i frekvencije 100Hz.

21. Kakav je utjecaj frekvencije ulaznog napona na rad diferencijatora?

22. Kakav je utjecaj vrijednosti kapaciteta kondenzatora C na rad diferencijatora?



Slika 6.39. Integrator

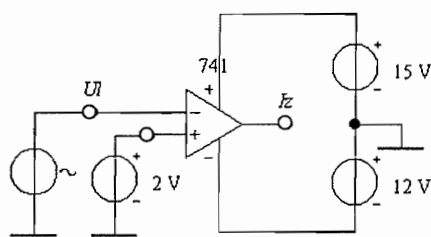
23. Nacrtajte vremenske dijagrame ulaznog i izlaznog napona sklopa sa slike 6.39. ako je na ulaz priključen pravokutni napon amplitude 5V i frekvencije 2kHz.

24. Nacrtajte približan izgled vremenskih dijagrama ulaznog i izlaznoga napona sklopa sa slike 6.39. ako je na ulaz priključen sinusoidni napon amplitude 5V i frekvencije 2kHz.

25. Kakav je utjecaj frekvencije ulaznoga napona na rad integratora?

26. Kakav je utjecaj vrijednosti kapaciteta kondenzatora C na rad integratora?

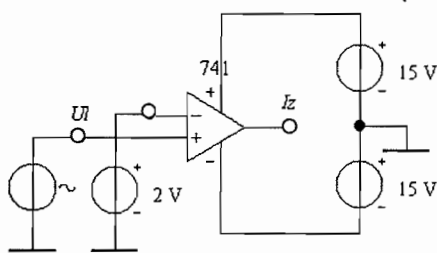
27. Nacrtajte vremenske dijagrame ulaznog i izlaznoga napona sklopa sa slike 6.40. ako je na ulaz priključen sinusoidni napon amplitude 5V, frekvencije 1kHz.



Slika 6.40. Komparator

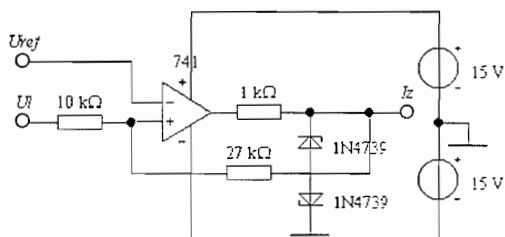
28. Kako izgleda prijenosna karakteristika komparatora sa slike 6.40.?

29. Nacrtajte vremenske dijagrame ulaznog i izlaznoga napona sklopa sa slike 6.41. ako je na ulaz priključen sinusoidni napon amplitude 5V, frekvencije 1kHz.



Slika 6.41. Komparator

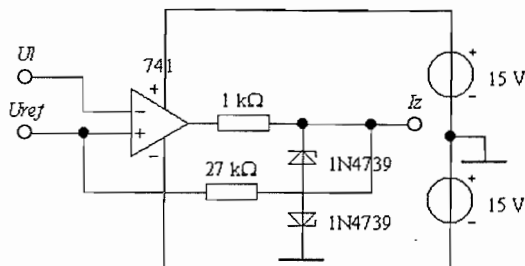
30. Kako izgleda prijenosna karakteristika komparatora sa slike 6.41.?



Slika 6.42. Komparator s histerezom

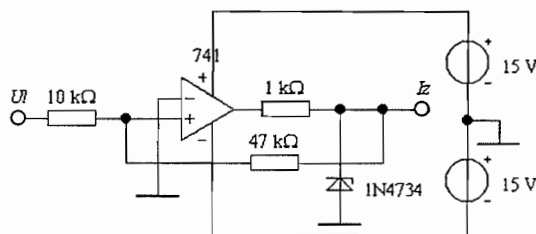
31. Nacrtajte prijenosnu karakteristiku komparatora sa slike 6.42. ako je referentni napon: a) 0V, b) -2V.

32. Nacrtajte prijenosnu karakteristiku komparatora sa slike 6.43. ako je referentni napon: a) 0V, b) -2V.



Slika 6.43. Komparator s histerezom

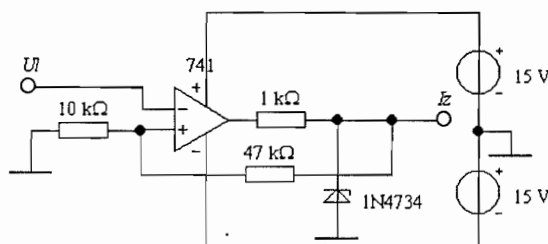
33. Kolika je frekvencija izlaznoga napona komparatora sa slike 6.44. ako je na ulaz priključen sinusoidni napon frekvencije 10kHz?



Slika 6.44. Komparator s histerezom

34. Nacrtajte vremenski dijagram ulaznog i izlaznoga napona komparatora sa slike 6.44. ako je na ulaz priključen sinusoidni napon frekvencije 5kHz, amplitude 10V.

35. Kolika je frekvencija izlaznoga napona komparatora sa slike 6.45. ako je na ulaz priključen sinusoidni napon frekvencije 8kHz?



Slika 6.45. Komparator s histerezom

36. Nacrtajte vremenski dijagram ulaznog i izlaznoga napona komparatora sa slike 6.45. ako je na ulaz priključen sinusoidni napon frekvencije 2kHz, amplitude 10V.

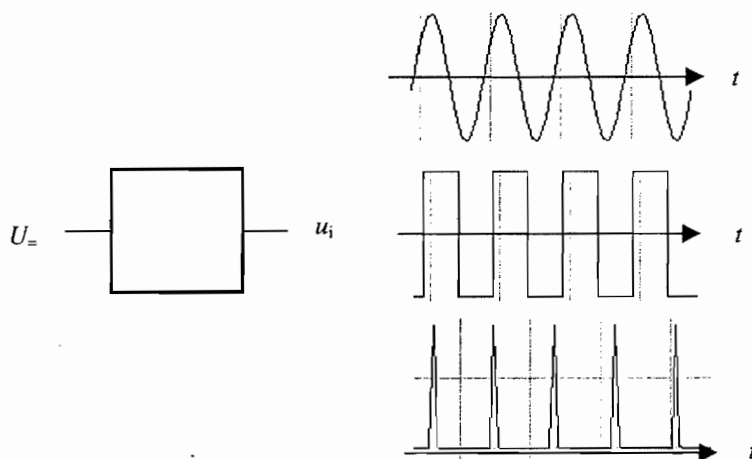
37. Kako vrijednost referentnoga napona utječe na napon histereze komparatora (slika 6.45.)?

38. Kako vrijednost referentnoga napona utječe na oblik prijenosne karakteristike komparatora (slika 6.45.)?



7. OSCILATORI

Oscilatori su sklopovi koji na izlazu daju izmjenični napon bez ulaznoga signala. Priključeni napon napajanja može se smatrati ulaznim naponom koji oscilator pretvara u izmjenični (slika 7.1.). Izlazni napon može biti sinusoidnog i nesinusoidnog oblika (pravokutni, pilasti itd.). Oscilatori sinusoidnoga napona nazivaju se **harmonički oscilatori**, a nesinusoidnoga napona **relaksacijski oscilatori**. U prvome dijelu ovoga poglavlja obrađuju se oscilatori sinusoidnoga napona. Drugi dio posvećen je relaksacijskim oscilatorima.



Slika 7.1. Oscilator i oblici izlaznoga napona

7.1. Oscilatori sinusoidnoga napona

RC-oscilatori

LC-oscilatori

Oscilatori s kristalom kvarca

7.2. Oscilatori nesinusoidnoga napona

Generator pravokutnoga napona

Funkcijski generator

Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 7.1. Generiranje sinusoidnoga napona

Vježba 7.2. Generiranje pravokutnoga napona

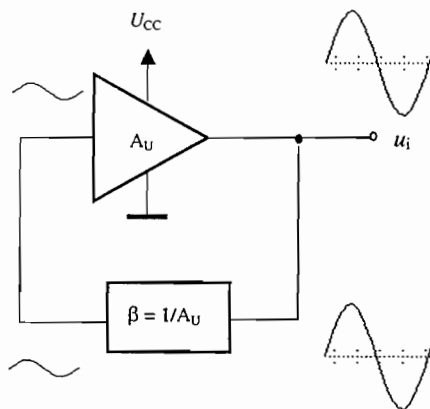
Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

7.1. OSCILATORI SINUSOIDNOGA NAPONA

Na slici 7.2. prikazana je principijelna shema oscilatora ostvarenog uz pomoć pozitivne povratne veze. Signal se s izlaza pojačala preko sklopa za povratnu vezu vraća na ulaz pojačala tako da je napon na ulazu u fazi s naponom na izlazu pojačala. Ako su naponsko pojačanje pojačala A_u i koeficijent povratne veze β takvi da je ispunjen Barkhausenov uvjet:

$$\beta A_u = 1,$$

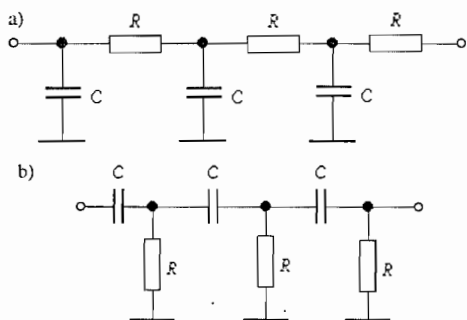
sklop će samostalno oscilirati, tj. davati na izlazu izmjenični napon bez vanjske pobude. Izvedbe oscilatora s povratnom vezom međusobno se razlikuju prema grani povratne veze. Ona može biti izvedena s pomoću mreže otpornika i kondenzatora (RC i CR-mreža) pa se takvi oscilatori nazivaju **RC-oscilatori**, odnosno s pomoću spoja kondenzatora i zavojnice (LC-mreža) pa se takvi oscilatori nazivaju **LC-oscilatori**. Treću skupinu čine oscilatori s kristalom kvarca.



Slika 7.2. Oscilator ostvaren s pomoću pozitivne povratne veze

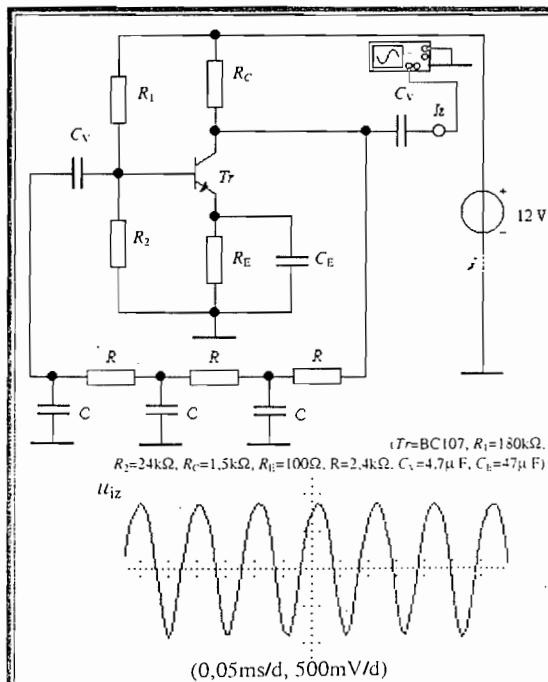
RC-oscilatori

Kod RC-oscilatora pozitivna povratna veza ostvaruje se s pomoću mreže otpornika i kondenzatora. Mreža može biti izvedena kao RC-mreža, odnosno niski propust (slika 7.3.a) ili kao CR-mreža, odnosno visoki propust (slika 7.3.b). Frekvencija izlaznog napona ovisi o vrijednosti elemenata R i C u grani povratne veze. Oscilator se primjenjuje u području frekvencija do 200kHz.



Slika 7.3. Elementi povratne veze RC-oscilatora

Pokus



Slika 7.4. RC-oscilator s RC-mrežom u grani povratne veze

Za oscilator izveden s pomoću RC-mreže (slika 7.4.) koji se naziva i RC-oscilator s faznim pomakom unazad, frekvencija izlaznoga napona može se izračunati prema izrazu:

$$f_1 = \frac{\sqrt{6}}{2\pi RC}$$

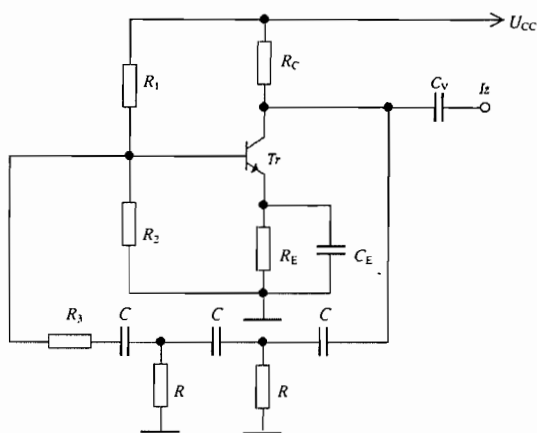
Primjer 7.1.

Izračunati frekvenciju izlaznoga napona RC-oscilatora prema shemi sa slike 7.4. ako su vrijednosti: $R=2,4\text{k}\Omega$ i $C=22\text{nF}$.

$$f_1 = \sqrt{6}/2\pi \cdot 2,4 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^{-9} = 7,39\text{kHz}$$

Kod oscilatora izvedenoga s pomoću CR-mreže, koji se naziva i RC-oscilator s faznim pomakom unaprijed (slika 7.5.) zbroj otpora R_3 i ulaznoga otpora pojačala $R_u = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be}$ treba biti jednak vrijednosti R . Frekvencija izlaznoga napona može se izračunati prema izrazu:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}$$



Slika 7.5. RC-oscilator s CR-mrežom u grani povratne veze

Koeficijent povratne veze CR i CR-mreže je $1/29$. Stoga je potrebno da naponsko pojačanje pojačala kod RC-oscilatora iznosi najmanje 29. Da bi se postiglo potrebno naponsko pojačanje i time uvjet za osciliranje, faktor pojačanja tranzistora mora biti dovoljno velik:

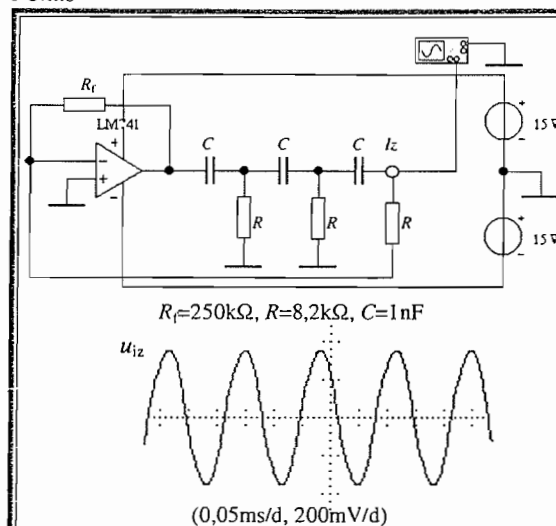
$$h_{fe} > 23 + 29 \frac{R}{R_C} + 4 \frac{R_C}{R}$$

Izborom vrijednosti otpora R_C postiže se potrebno naponsko pojačanje kako bi bio zadovoljen uvjet za oscilacije napona. Promjena frekvencije izlaznoga napona postiže se istodobnom promjenom kapaciteta C svih triju kondenzatora.

RC-oscilator može se izvesti i s pomoću operacijskoga pojačala (slika 7.6.). Frekvencija izlaznoga napona može se izračunati iz izraza:

Da bi se postiglo potrebno naponsko pojačanje i time uvjet za osciliranje, odnos otpora R_F/R mora biti veći od 29.

Pokus



Slika 7.6. RC-oscilator s operacijskim pojačalom

LC-oscilatori

Za područje viših frekvencija primjenjuju se LC-oscilatori. Titrajni krug kojim se ostvaruje povratna veza može biti s kapacitivnim djelilom ili s induktivnim djelilom.

Kod Colpittsova oscilatora povratna veza ostvaruje se s pomoću titrajnoga kruga s kapacitivnim djelilom (slika 7.7.). Na kondenzatoru C_1 izlazni je napon (uz dovoljno veliki C_V da čini kratki spoj za izlazni signal), a na kondenzatoru C_2 napon povratne veze U_F . Prema tome koeficijent povratne veze je

$$\beta = \frac{U_F}{U_i} = \frac{X_{C2}}{X_{C1}} = \frac{C_1}{C_2}$$

Kako je uvjet za osciliranje $\beta A_u > 1$, to slijedi da naponsko pojačanje pojačala mora biti najmanje:

$$A_u \geq \frac{C_2}{C_1}$$

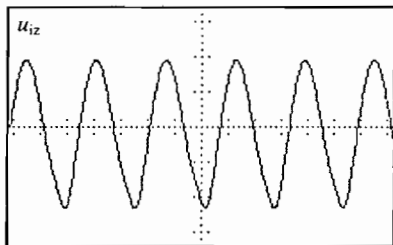
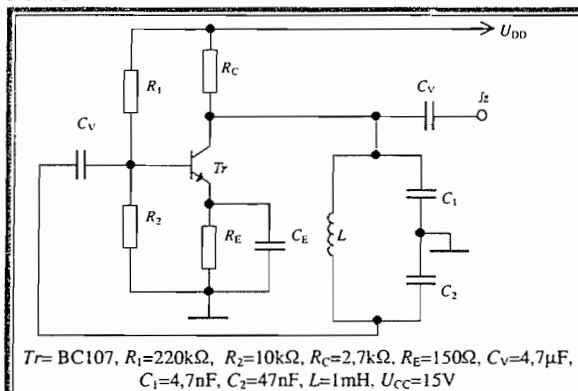
Frekvencija izlaznoga napona ovisi o elementima L , C_1 i C_2 :

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}}$$

gdje je C_T ukupni kapacitet serijskoga spoja C_1 i C_2 .

Colpittsov oscilator upotrebljava se za visoke frekvencije iznad 100MHz (radioprijamnici i TV prijamnici).

Pokus

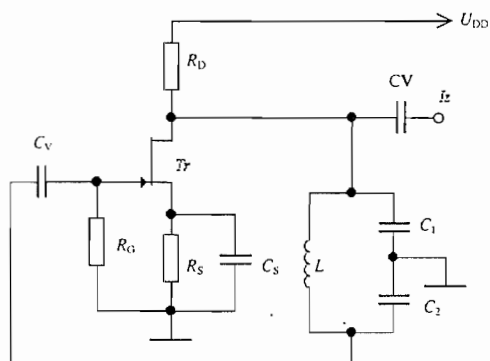


Slika 7.7. Colpittsov oscilator

Ulazni otpor pojačala djeluje kao opterećni otpor titrajnoga kruga u grani povratne veze i smanjuje njegov **faktor dobrote** Q (omjer rezonancijske frekvencije i širine pojasa). Ako je faktor dobrote titrajnoga kruga niži od 10, njegov utjecaj na rezonancijsku frekvenciju titrajnoga kruga, dakle i na frekvenciju izlaznoga napona, više nije zanemariv. U tom je slučaju frekvencija izlaznoga napona:

$$f_i = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}} \sqrt{\frac{Q}{Q+1}}$$

Za smanjenje utjecaja ulaznoga otpora pojačala na rezonancijsku frekvenciju primjenjuju se pojačala s unipolarnim tranzistorima (slika 7.8.) budući da je njihov ulazni otpor vrlo velik, a otpor R_G je reda veličine megaoma.



Slika 7.8. Colpittsov oscilator s FET-om

Primjer 7.2.

Koliko najmanje mora biti naponsko pojačanje oscilatora sa slike 7.7. ako su vrijednosti elemenata $C_1 = 4,7\text{nF}$, $C_2 = 47\text{nF}$ i $L = 1\text{mH}$. Kolika je frekvencija izlaznoga napona?

$$A_u = 47\text{nF}/4,7\text{nF} = 10$$

$$C_T = 47 \cdot 4,7 / (47 + 4,7) = 4,27\text{nF}$$

$$f = 1/2\pi\sqrt{1 \cdot 10^{-3} \cdot 4,27 \cdot 10^{-9}} = 77,06\text{kHz}$$

Kod Hartleyeva oscilatora povratna veza ostvaruje se s pomoću titrajnoga kruga s induktivnim djelilom (slika 7.9.). Frekvencija izlaznoga napona odgovara rezonancijskoj frekvenciji titrajnoga kruga u grani povratne veze:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T C}}$$

gdje je L_T ukupni induktivitet serijskoga spoja L_1 i L_2 .

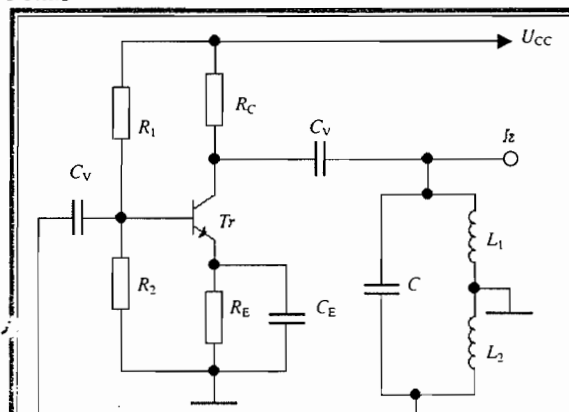
Induktivno djelilo kod Hartleyeva oscilatora djeluje na isti način kao kapacitivno djelilo kod Colpittsova. Stoga je koeficijent povratne veze β određen omjerom induktiviteta L_1 i L_2 :

$$\beta = \frac{U_f}{U_i} = \frac{X_{L2}}{X_{L1}} = \frac{L_2}{L_1}$$

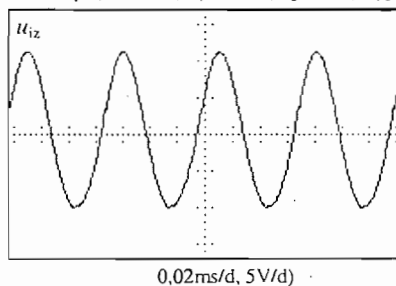
a potrebno pojačanje pojačala da bi oscilator oscilirao jest:

$$A_u \geq \frac{L_1}{L_2}$$

Pokus



$$T_r = \text{BC107}, R_1 = 220\text{k}\Omega, R_2 = 10\text{k}\Omega, R_C = 4,7\text{k}\Omega, R_E = 100\Omega, C_V = 4,7\mu\text{F}, C = 10\text{nF}, L_1 = 10\text{mH}, L_2 = 1\text{mH}, U_{CC} = 15\text{V}$$



Slika 7.9. Hartleyev oscilator

Utjecaj ulaznoga otpora pojačala kao i opterećenja izlaza ima isti učinak na oscilator kao i u slučaju Colpittsova oscilatora. Hartleyev oscilator upotrebljava se na visokim frekvencijama gdje je potrebna kontinuirana promjena frekvencije, što se izvodi promjenom kapaciteta C (radioprijamnici na UKV području).

Primjer 7.3.

Koliko najmanje mora biti naponsko pojačanje oscilatora sa slike 7.9. ako su vrijednosti elemenata $C=10\text{nF}$, $L_1=10\text{mH}$ i $L_2=1\text{mH}$. Kolika je frekvencija izlaznoga napona?

$$A_u = 10\text{mH}/1\text{mH}=10$$

$$L_T = 10\text{mH}+1\text{mH}=11\text{mH}$$

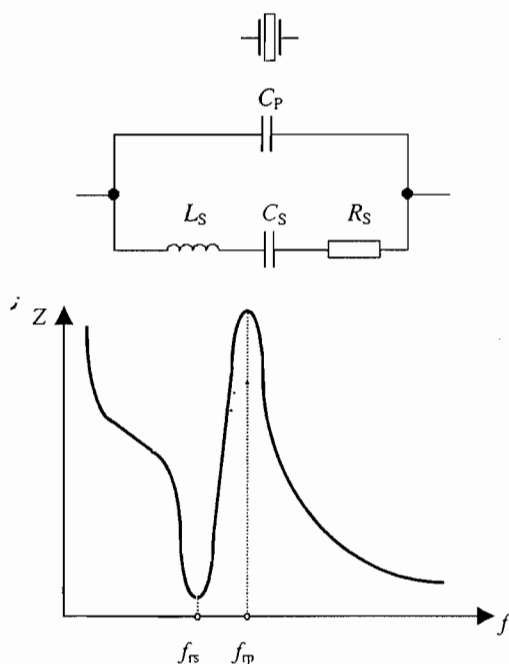
$$f = 1/2\pi\sqrt{1\cdot 10^{-9}\cdot 11\cdot 10^{-3}} = 48\text{kHz}$$

Oscilatori s kristalom kvarca

Kristal kvarca priključen na izmjenični napon djeluje kao serijsko-paralelni titrajni krug koji se može dovesti u serijsku i paralelnu rezonanciju (slika 7.10.) pri čemu je serijska rezonancijska frekvencija uvijek niža od paralelne.

Kristal kvarca bit će u serijskoj rezonanciji na frekvenciji kod koje su induktivni otpor zavojnice L_S i kapacitivni otpor kondenzatora C_S jednaki, a otpor je titrajnoga kruga najmanji i iznosi R_S .

$$f_S = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_S}}$$



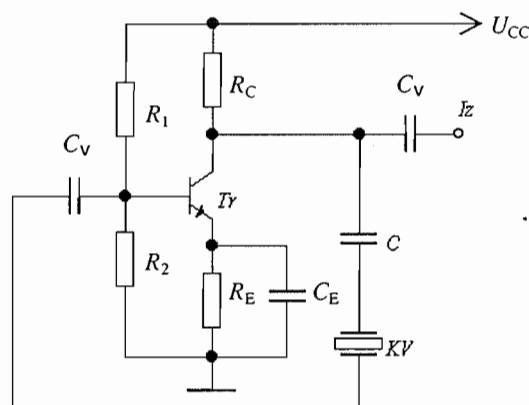
Slika 7.10. Simbol, nadomjesni spoj i frekvencijska karakteristika impedancije kristala kvarca

Kad je induktivni otpor induktiviteta L_S jednak otporu paralelnoga spoja kapaciteta C_S i C_P , nastupa paralelna rezonancija kod koje je impedancija titrajnoga kruga najveća.

$$f_P = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S \frac{C_S C_P}{C_S + C_P}}}$$

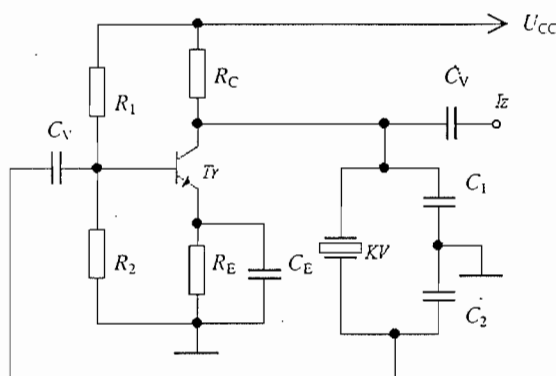
Dobra je osobina kristala kvarca da njime ostvaren titrajni krug ima vrlo veliki faktor dobrote Q i malu ovisnost rezonancijske frekvencije o temperaturi i starenju komponenata. Rezonancijska frekvencija ovisi o njegovim dimenzijama.

Kristal kvarca može se upotrijebiti u oscilatorima tako da zamijeni titrajni krug (slika 7.11.). Frekvencija izlaznoga napona odgovara rezonancijskoj frekvenciji kristala kvarca. Dodatni kondenzator C služi za fino podešavanje frekvencije izlaznoga napona.



Slika 7.11. Oscilator s kristalom kvarca

Ako se u shemi Colpittsova oscilatora zavojnica zamijeni kristalom kvarca, dobije se oscilator poznat pod nazivom Piercov oscilator (slika 7.12.). Njegova izlazna frekvencija također je određena rezonancijskom frekvencijom kristala kvarca. Kapacitetima C_1 i C_2 postiže se potrebna atenuacija napona u grani povratne veze.



Slika 7.12. Piercov oscilator

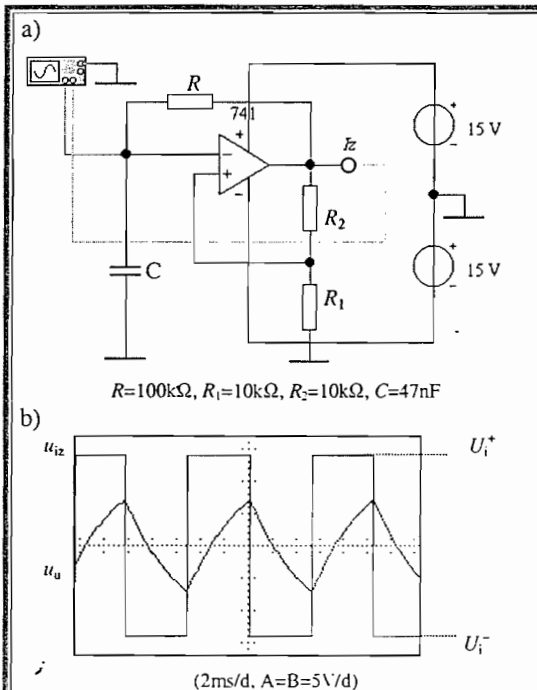
7.2. OSCILATORI NESINUSOIDNOGA NAPONA

Oscilacije nesinusoidnoga napona mogu se dobiti primjenom pozitivne povratne veze i RC-mreže čija vremenska konstanta nabijanja i izbijanja određuje frekvenciju izlaznoga napona ili s pomoću elemenata koji imaju karakteristiku negativnoga otpora.

Ovaj dio sedmoga poglavlja posvećen je sklopovima za generiranje pravokutnoga napona kod kojih se koristi pozitivna povratna veza i RC-mreža. U ovu skupinu sklopova spada i astabilni multivibrator koji se obrađuje u poglavlju 12. *Multivibratori*. Primjeri elemenata s karakteristikom negativnoga otpora su tiristori i jednospojni tranzistor. Njihova svojstva i primjene za generiranje impulsnih oblika napona obrađeni su u poglavlju 9. *Sklopovi s tiristorima i jednospojnim tranzistorom*.

Generator pravokutnoga napona

Pokus



Slika 7.13. Generator pravokutnoga napona

Operacijsko pojačalo u spoju prema shemi sa slike 7.13. djeluje kao generator pravokutnoga napona (astabilni multivibrator). Elementi R i C čine s operacijskim pojačalom integrator, a elementi R_1 i R_2 djeluju s operacijskim pojačalom kao komparator.

Dok izlazni napon ima najveću pozitivnu vrijednost U_i^+ , kondenzator C nabija se preko otpornika R . Brzina nabijanja ovisi o vremenskoj konstanti RC . Kad napon na kondenzatoru naraste na vrijednost kod koje napon na invertirajućem ulazu postaje veći od napona na neinvertirajućem ulazu (dio pozitivnog

izlaznoga napona koji se na neinvertirajući ulaz prenosi preko otpornika R_1), napon na izlazu operacijskoga pojačala naglo prelazi na vrijednost najveće negativne vrijednosti U_i^- .

Sada se kondenzator C izbija preko otpora R i izlaza generatora pravokutnoga napona. Brzina izbijanja ovisi o vremenskoj konstanti RC . Kad se napon na kondenzatoru smanji na vrijednost kod koje napon na invertirajućem ulazu postaje manji od napona na neinvertirajućem ulazu (dio negativnog izlaznoga napona koji se na neinvertirajući ulaz prenosi preko otpornika R_1), napon na izlazu operacijskoga pojačala naglo prelazi na vrijednost najveće pozitivne vrijednosti U_i^+ , tj. u prethodno stanje, pa se čitav postupak ponavlja.

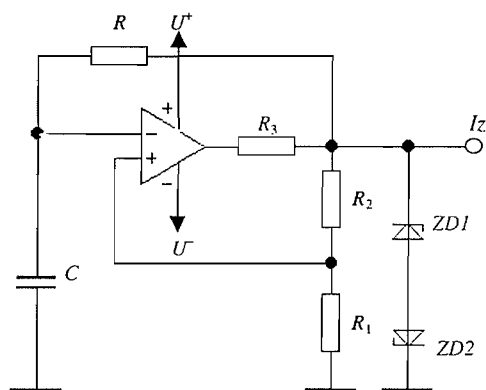
Trajanje pozitivne, odnosno negativne poluperiode izlaznoga napona ovisi o vremenskoj konstanti RC , vrijednostima otpora R_1 i R_2 i vrijednosti izlaznoga napona :

$$T_1 = RC \ln \frac{U_i^+ + \beta U_i^-}{U_i^+ - \beta U_i^-} \quad T_2 = RC \ln \frac{U_i^- + \beta U_i^+}{U_i^- - \beta U_i^+}$$

gdje je $\beta = R_1/(R_1 + R_2)$ pa je frekvencija izlaznoga napona:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2}$$

Kako bi se izlazni napon astabilnoga multivibratora učinio neovisnim o naponu napajanja i opterećenju, na izlazu se dodaju Zenerove diode (slika 7.14.). Pozitivna vrijednost izlaznoga napona je u tom slučaju $U_{Z1} + U_{F2}$, a negativna vrijednost izlaznoga napona je $U_{Z2} + U_{F1}$, gdje su U_Z Zenerovi naponi a U_F naponi propusno polariziranih dioda (oko 0,6V).



Slika 7.14. Generator pravokutnoga napona sa Zenerovim diodama na izlazu

Primjer 7.4.

Izračunati frekvenciju izlaznoga napona generatora pravokutnoga napona sa slike 7.13. ako su vrijednosti elemenata $R=100\text{k}\Omega$, $C=47\text{nF}$, $R_1=R_2=10\text{k}\Omega$.

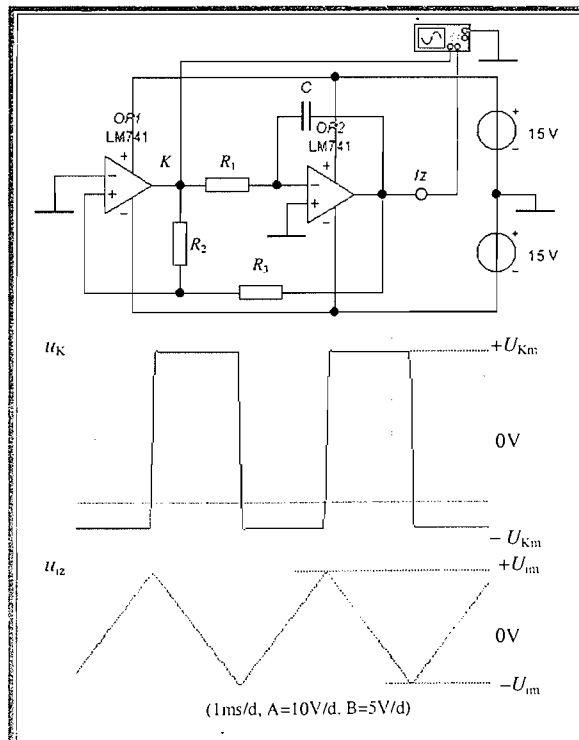
$$T_1 = 100 \cdot 10^3 \Omega \cdot 47 \cdot 10^{-9} \text{F} \cdot \ln(12\text{V} - 0,5 \cdot 12\text{V}) / (12\text{V} - 0,5 \cdot 12\text{V}) = 4,7 \cdot 10^{-3} \cdot \ln 3 = 5,16\text{ms}$$

$$T_2 = 100 \cdot 10^3 \Omega \cdot 47 \cdot 10^{-9} \text{F} \cdot \ln(12\text{V} + 0,5 \cdot 12\text{V}) / (12\text{V} + 0,5 \cdot 12\text{V}) = 4,7 \cdot 10^{-3} \cdot \ln 3 = 5,16\text{ms}$$

$$f = 1 / (5,16\text{ms} + 5,16\text{ms}) = 96,8\text{Hz}$$

Funkcijski generator

Pokus



Slika 7.15. Funkcijski generator

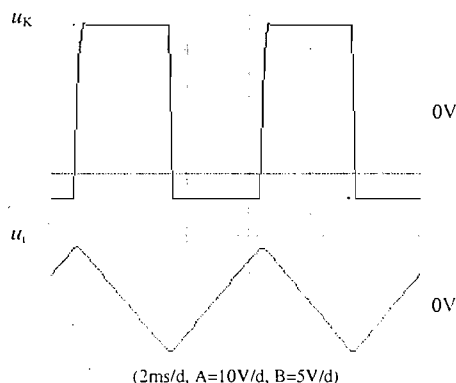
Sklop sa slike 7.15. daje na izlazu trokutasti napon u_{iz} i pravokutni u_K . Zbog toga se naziva i funkcijski generator (engl. function generator). Operacijsko pojačalo $OP1$ i otpornici R_2 i R_3 čine komparator, a operacijsko pojačalo $OP2$, otpornik R_1 i kondenzator C čine integrator.

Maksimalni negativni napon na izlazu komparatora $-U_{Km}$ ulazni je napon integratora. Zbog toga napon na izlazu integratora linearno raste do vrijednosti U_{im} . Izlazni napon integratora dovodi se preko otpornog djelila R_3/R_2 na invertirajući ulaz komparatora. Kad napon na invertirajućem ulazu komparatora dostigne iznos gornje okidne razine U_1 , izlazni napon komparatora naglo mijenja iznos na $+U_{Km}$. To uzrokuje da se sada izlazni napon linearno smanjuje do vrijednosti $-U_{im}$. Stanje traje dok napon na invertirajućem ulazu komparatora ne dostigne iznos donje okidne razine U_2 , kad se sklop vraća u početno stanje.

Naponi gornje i donje okidne razine iznose: $U_1 = +U_{Km} R_3 / R_2$, odnosno $U_2 = -U_{Km} R_3 / R_2$, što znači da vrijednosti otpora R_2 i R_3 utječu na amplitudu izlaznoga napona. Frekvencija trokutastog i pravokutnoga napona ovisi o vrijednostima otpora R_2 i R_3 te vremenskoj konstanti $R_1 C$:

$$f = \frac{1}{4R_1 C} \cdot \frac{R_2}{R_3}$$

To znači da se promjenom iznosa vremenske konstante $R_1 C$ može mijenjati frekvencija bilo kojeg napona a da se ne mijenja amplituda. Vrijednosti elemenata sklopa za napone sa slike 7.15. su $R_1 = 22\text{k}\Omega$ i $C = 100\text{nF}$, a za napone sa slike 7.16. su $R_1 = 22\text{k}\Omega$ i $C = 220\text{nF}$.



Slika 7.16. Naponi funkcijskoga generatora nakon promjene kapaciteta kondenzatora C

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

VJEŽBA 7.1. GENERIRANJE SINUSOIDNOGA NAPONA

Zadaca vježbe

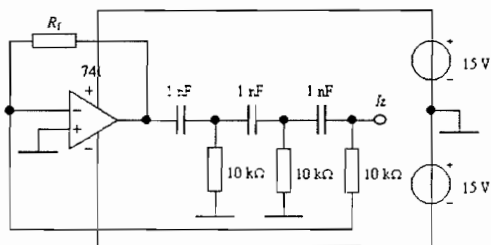
Zadaca je vježbe upoznati svojstva oscilatora sinusoidnoga napona (ovisnost frekvencije izlaznoga napona o ugrađenim elementima, potrebno pojačanje pojačala) i ovladati postupcima u primjeni instrumenata (osciloskop) i prikazu mjernih rezultata.

Instrumenti i pribor

- operacijsko pojačalo 741
- tranzistori BC107
- otpornici 56Ω , $1k\Omega$ (3 komada), $4,7k\Omega$ (4 komada), $10k\Omega$ (4 komada), $33k\Omega$, $150k\Omega$, $220k\Omega$
- kondenzatori $1nF$ (3 komada), $2,2nF$, $4,7nF$ (3 komada), $10nF$ (3 komada), $22nF$, $47nF$, $4,7\mu F$ (3 komada)
- zavojnica $0,1mH$ i $1mH$
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napajanja $0-15V$, $0-(-15V)$, $1A$
- univerzalni instrument
- osciloskop.

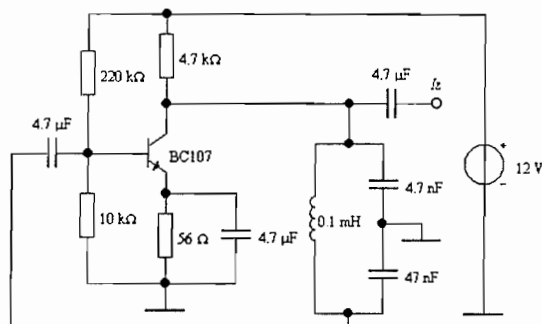
Priprema

1. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona RC-oscilatora sa slike 7.17.
2. Kolika mora biti najmanja vrijednost otpora R_f da bi bio ispunjen uvjet za rad oscilatora sa slike 7.17.?

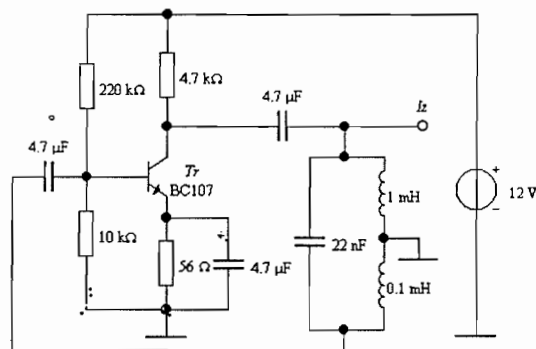


Slika 7.17. RC-oscilator

3. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona LC-oscilatora sa slike 7.18.
4. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona LC-oscilatora sa slike 7.19.



Slika 7.18. Collpitsov oscilator



Slika 7.19. Hartleyev oscilator

Pokusi

1. RC-oscilator

1.1. Spojite elemente oscilatora prema shemi sa slike 7.17. Izmjerite frekvenciju izlaznoga napona RC-oscilatora i nacrtajte vremenski dijagram izlaznoga napona.

1.2. Ispitajte utjecaj promjene vrijednosti otpora R na rad oscilatora uz $C = \text{konst} = 1nF$.

1.3. Ispitajte utjecaj promjene vrijednosti kapaciteta C na rad oscilatora uz $R = \text{konst} = 10k\Omega$.

2. LC-oscilator s kapacitivnim djelilom

2.1. Spojite elemente LC-oscilatora prema shemi sa slike 7.18. Priključite napon napajanja i izmjerite frekvenciju izlaznoga napona. Nacrtajte vremenski dijagram izlaznoga napona.

2.2. Ispitajte utjecaj promjene vrijednosti kapaciteta C_1 i C_2 u grani povratne veze na rad oscilatora uz $L = \text{konst} = 0,1mH$.

3. LC-oscilator s induktivnim djelilom

3.1. Spojite elemente LC-oscilatora prema shemi sa slike 7.19. Priključite napon napajanja i izmjerite frekvenciju izlaznoga napona. Nacrtajte vremenski dijagram izlaznoga napona.

3.2. Ispitajte utjecaj promjene vrijednosti kapaciteta C_1 i C_2 u grani povratne veze na rad oscilatora uz $L = \text{konst} = 0,1 \text{ mH}$.

VJEŽBA 7.2. GENERIRANJE PRAVOKUTNOGA NAPONA

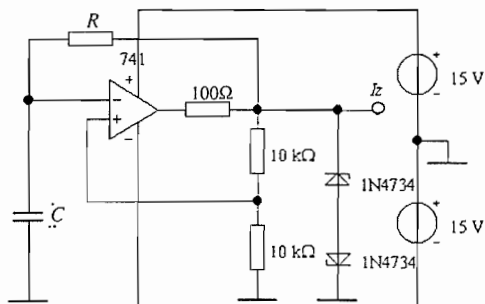
Zadatak

Ispitati svojstva generatora pravokutnoga napona izvedenoga sa Zenerovim diodama na izlazu i ustanoviti utjecaj promjene kapaciteta kondenzatora C i otpora R na frekvenciju izlaznoga napona.

Instrumenti i pribor

- operacijsko pojačalo 741
- otpornici $0,1 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$ (2kom), $33 \text{ k}\Omega$, $47 \text{ k}\Omega$, $68 \text{ k}\Omega$ i $100 \text{ k}\Omega$
- kondenzatori 10 nF , 22 nF , 33 nF , 47 nF i 56 nF
- Zenerove diode 1N4734 (2 komada)
- izvor napajanja $+15 \text{ V}$, -15 V , 1 A
- izvor napona $0-5 \text{ V}$, 1 A
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- generator sinusoidnoga napona
- osciloskop.

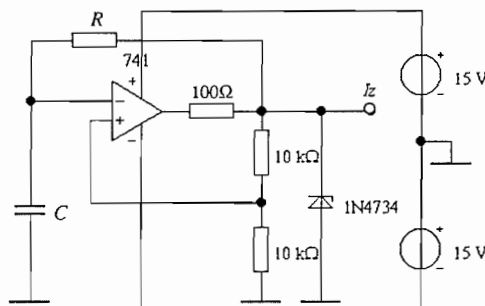
Priprema



Slika 7.20. Generator pravokutnoga napona s dvije Zenerove diode

1. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona sklopa sa slike 7.20. ako su vrijednosti otpora otpornika $R = 33 \text{ k}\Omega$ i kapaciteta kondenzatora $C = 56 \text{ nF}$.

2. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona sklopa sa slike 7.21. ako su vrijednosti otpora otpornika $R = 33 \text{ k}\Omega$ i kapaciteta kondenzatora $C = 56 \text{ nF}$.



Slika 7.21. Generator pravokutnoga napona s jednom Zenerovom diodom

Pokusi

1. Generator pravokutnoga napona s dvije Zenerove diode

1.1. Spojite elemente sklopa prema slici 7.20. Osciloskopom ustanovite oblik napona na kondenzatoru te izmjerite frekvenciju izlaznoga napona ako su vrijednosti otpora otpornika $R = 33 \text{ k}\Omega$ i kapaciteta kondenzatora $C = 56 \text{ nF}$.

1.2. Ustanovite utjecaj promjene kapaciteta kondenzatora C na frekvenciju izlaznoga napona:
 - s pomoću osciloskopa izmjerite frekvenciju izlaznoga napona za vrijednosti kapaciteta C : 56 nF , 47 nF , 33 nF , 22 nF i 10 nF uz vrijednost otpora $R = 33 \text{ k}\Omega$
 - rezultate mjerenja prikažite tablicom i grafički.

1.3. Ustanovite utjecaj promjene otpora otpornika R na frekvenciju izlaznoga napona:
 - s pomoću osciloskopa izmjerite frekvencije izlaznoga napona za vrijednosti otpora R : $33 \text{ k}\Omega$, $47 \text{ k}\Omega$, $68 \text{ k}\Omega$ i $100 \text{ k}\Omega$ uz vrijednost kapaciteta $C = 10 \text{ nF}$
 - rezultate mjerenja prikažite tablicom i grafički.

2. Generator pravokutnoga napona s jednom Zenerovom diodom

2.1. Spojite elemente sklopa prema slici 7.21. Osciloskopom ustanovite oblik napona na kondenzatoru i izmjerite frekvenciju izlaznoga napona ako su vrijednosti otpora otpornika $R = 33 \text{ k}\Omega$ i kapaciteta kondenzatora $C = 56 \text{ nF}$.

2.2. Usporedite djelovanje izvedbe generatora pravokutnoga napona s dvije i jednom Zenerovom diodom na izlazu.

PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Kako promjena vrijednosti otpora R u grani povratne veze utječe na rad RC-oscilatora?

2. Kako se može mijenjati frekvencija izlaznoga napona RC-oscilatora?

3. Zašto naponsko pojačanje pojačala kod RC-oscilatora mora biti najmanje 29?

4. Kako promjene vrijednosti induktiviteta u grani povratne veze utječu na rad Colpittsova oscilatora?

5. Kako promjene vrijednosti kapaciteta u grani povratne veze utječu na rad Colpittsova oscilatora?

6. Kako se može mijenjati frekvencija izlaznoga napona Colpittsova oscilatora?

7. Koliko mora najmanje iznositi naponsko pojačanje pojačala kod Colpittsova oscilatora?

8. Kako promjene vrijednosti induktiviteta u grani povratne veze utječu na rad Hartleyeva oscilatora?

9. Kako promjene vrijednosti kapaciteta u grani povratne veze utječu na rad Hartleyeva oscilatora?

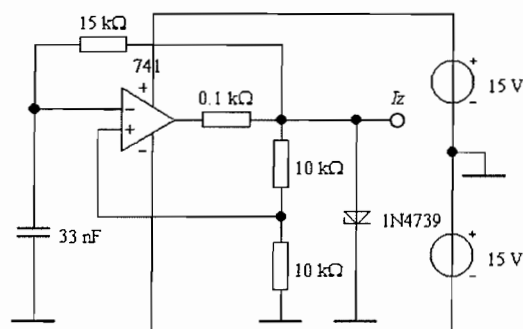
10. Kako se može mijenjati frekvencija izlaznoga napona Hartleyeva oscilatora?

11. Koliko mora najmanje iznositi naponsko pojačanje pojačala kod Hartleyeva oscilatora?

12. Koje su dobre osobine oscilatora izvedenog s kristalom kvarca?

13. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona sklopa sa slike 7.22.

14. Nacrtajte približan izgled vremenskih dijagrama izlaznoga napona i napona na kondenzatoru sklopa sa slike 7.22.



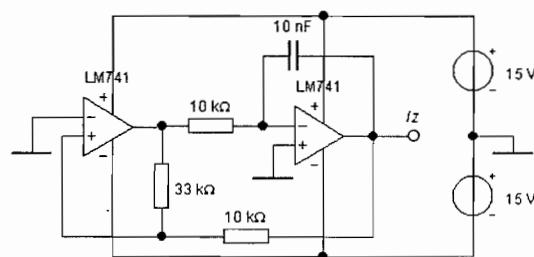
Slika 7.23. Generator pravokutnoga napona

15. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona sklopa sa slike 7.23.

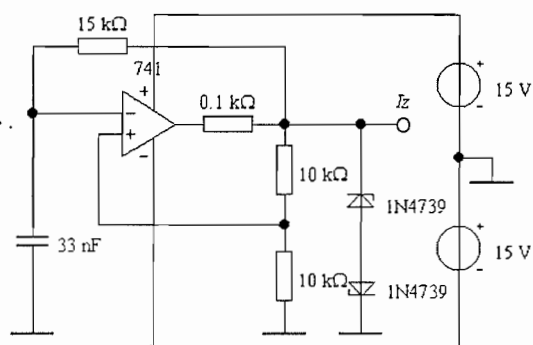
16. Nacrtajte približan izgled vremenskih dijagrama izlaznoga napona i napona na kondenzatoru sklopa sa slike 7.23.

17. Kako povećanje kapaciteta kondenzatora utječe na frekvenciju generatora pravokutnoga napona?

18. Izračunajte frekvenciju napona izlaznoga napona funkcijskoga generatora prema slici 7.24.



Slika 7.24. Funkcijski generator



Slika 7.22. Generator pravokutnoga napona

Većina elektroničkih sklopova zahtijeva stabilan napon napajanja. Stalan iznos napona napajanja, neovisno o tome mijenja li se mrežni napon, struja opterećenja ili temperatura okoline, daju **stabilizatori napona** (regulator napona, engl. voltage regulator, njem. Spannungsregelschaltung). U ovom poglavlju obrađuju se primjeri izvedbi serijskih tranzistorskih stabilizatora te primjeri danas pretežno upotrebljivanih integriranih izvedbi.

8.1. Stabilizatori napona s tranzistorima

Osnovne značajke stabilizatora napona

Serijski tranzistorski stabilizator

Serijski tranzistorski stabilizator s pojačalom u povratnoj vezi

Zaštita stabilizatora od preopterećenja

Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 8.1. Serijski tranzistorski stabilizator

Vježba 8.2. Integrirani stabilizator podesivoga napona

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja**8.2. Integrirane izvedbe stabilizatora**

Stabilizatori stalnog napona s tri izvoda

Integrirani stabilizatori podesivoga napona s tri izvoda

8.1. STABILIZATORI NAPONA S TRANZISTORIMA

Osnovne značajke stabilizatora napona

Osnovne značajke stabilizatora napona jesu:

- područje vrijednosti napona koji se može dovesti na ulaz a da izlazni napon ostane u zadanim granicama
- vrijednost izlaznoga napona
- dopušteno odstupanje izlaznoga napona
- vrijednost struje kojom se može opteretiti stabilizator, tj. izlazna struja.

Učinkovitost stabilizatora napona iskazuje se pomoću sljedećih parametara:

- faktor stabilizacije
- izlazni otpor
- temperaturni koeficijent
- faktor potiskivanja brujanja.

Faktor stabilizacije je omjer promjene izlaznoga napona i promjene ulaznoga napona koja uzrokuje promjenu izlaznoga napona uz stalnu vrijednost struje opterećenja i temperature okoline:

$$FS = \frac{\Delta U_i}{\Delta U_u}$$

Prema gornjoj definiciji, za dobar stabilizator faktor stabilizacije treba biti što manji broj kako bi za određenu promjenu ulaznoga napona bila što manja promjena izlaznoga. Stoga se ponekad faktor stabilizacije definira kao omjer promjene ulaznoga napona i njome izazvane promjene izlaznoga napona. U tom slučaju faktor stabilizacije mora biti što veći broj.

$$G = \frac{\Delta U_u}{\Delta U_i}$$

Izlazni otpor stabilizatora je omjer promjene izlaznoga napona i promjene struje opterećenja stabilizatora koja uzrokuje promjenu izlaznoga napona uz stalnu vrijednost ulaznoga napona i temperature okoline:

$$R_i = \frac{\Delta U_i}{\Delta I_P}$$

Temperaturni koeficijent (engl. temperature coefficient of output voltage, njem. Temperaturkoeffizient) omjer je promjene izlaznoga napona i promjene temperature okoline koja je izazvala pro-

mjenu izlaznoga napona uz stalnu vrijednost ulaznoga napona i struje opterećenja. Iskazuje se u milivoltima po Celzijevu stupnju:

$$TK = \frac{\Delta U_i}{\Delta T}$$

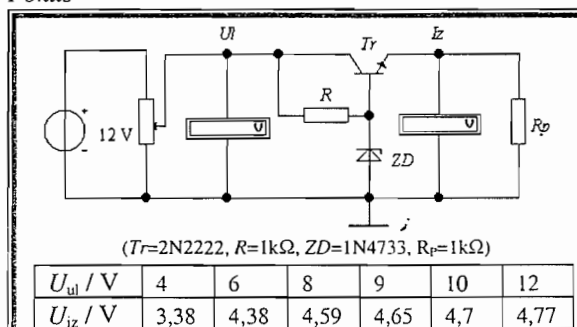
Faktor potiskivanja brujanja (engl. ripple rejection, njem. Brummenunterdrückung) omjer je vrijednosti napona brujanja (izmjenična komponenta ispravljenoga napona) od vrha do vrha na ulazu i vrijednosti napona brujanja od vrha do vrha na izlazu stabilizatora izražen u decibelima.

$$F_B = 20 \log \frac{U_{VVBu}}{U_{VVBi}}$$

Serijski tranzistorski stabilizator

Iz poglavlja 2.4. poznato je da Zenerova dioda ima svojstvo stabilizacije napona te je opisana izvedba stabilizatora napona sa Zenerovom diodom. Nedostatak tih stabilizatora je nemogućnost većega opterećenja.

Pokus



Slika 8.1. Serijski tranzistorski stabilizator

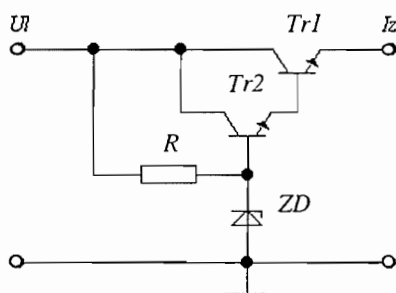
Stabilizator boljih svojstava, s obzirom na mogućnost opterećenja, gubitak snage i izlazni otpor, može se dobiti kombinacijom Zenerove diode i tranzistora u spoju serijskoga tranzistorskog stabilizatora (slika 8.1.). Izlazni napon ovoga stabilizatora jest napon Zenerove diode U_Z umanjen za napon U_{BE} :

$$U_{iZ} = U_{ul} - U_{CE} = U_Z - U_{BE}$$

Tranzistor djeluje kao promjenljivi otpornik čija vrijednost ovisi o ulaznom naponu. Povećanjem ili smanjenjem ulaznoga napona povećava se ili smanjuje otpor tranzistora, a time i napon U_{CE} tako da se izlazni napon vrlo malo mijenja.

Kad su potrebna veća opterećenja stabilizatora, upotrebljava se uz Zenerovu diodu Darlingtonov spoj tranzistora (slika 8.2.).

$$U_{iz} = U_{ul} - U_{CE1} = U_Z - U_{BE1} - U_{BE2}$$

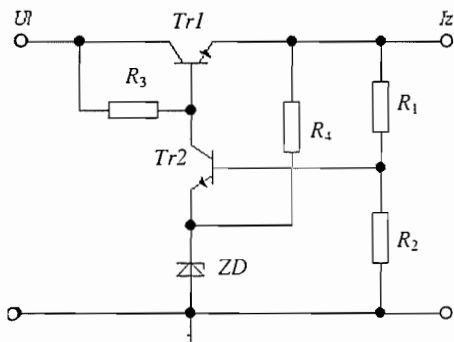


Slika 8.2. Serijski stabilizator s Darlingtonovim spojem tranzistora

Serijski tranzistorski stabilizator s pojačalom u povratnoj vezi

Znatno bolja stabilizatorska svojstva ima serijski tranzistorski stabilizator s pojačalom u povratnoj vezi (slika 8.3). Pojačalo (tranzistor $Tr2$) pojačava promjene koje se javljaju na izlazu. Stoga će se potrebni signal za bazu serijskoga tranzistora $Tr1$ dobiti uz znatno manje promjene izlaznoga napona nego što je to kod sklopa sa slike 8.1. Izlazni napon toga stabilizatora ovisi o odnosu vrijednosti otpornika R_1 i R_2 , što omogućuje podešavanje izlaznoga napona:

$$U_i = (U_Z + U_{BE2}) \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$



Slika 8.3. Serijski tranzistorski stabilizator s pojačalom u povratnoj vezi

Primjer 8.1.

Koliki se može dobiti izlazni napon stabilizatora prema slici 8.3. ako su vrijednosti elemenata $R_1=1k\Omega$, $R_2=1,5k\Omega$ i $ZD=1N4735$?

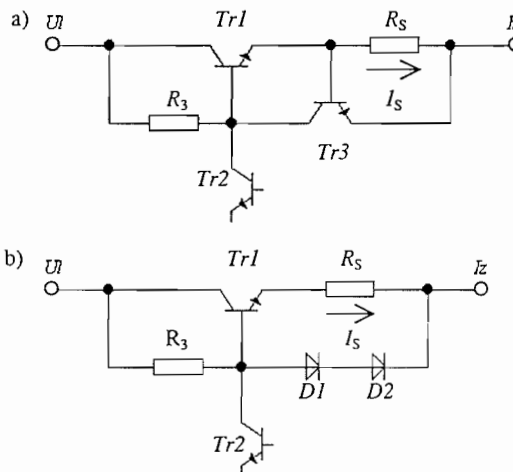
$$U_i = (6,2+0,7)(1+1/1,5) = 11,5V$$

Zaštita stabilizatora od preopterećenja

Otpornik R_S i tranzistor $Tr3$ (slika 8.4.a) štite stabilizator od preopterećenja. Kad struja koja teče u trošilo spojeno na izlaz stabilizatora prijeđe dopušteni iznos I_S , na otporniku R_S nastaje pad napona 0,7 V pa tranzistor $Tr3$ provede. Time se smanji pobuda tranzistora $Tr2$ što ne dopušta daljnji porast izlazne struje stabilizatora. Vrijednost otpora R_S treba izabrati tako da se zadovolji uvjet:

$$I_S = \frac{U_{BE}}{R_S} < I_{Cmax}$$

gdje je I_{Cmax} dopušteni iznos kolektorske struje tranzistora, a napon $U_{BE}=0,7V$ za silicijske tranzistore.



Slika 8.4. Zaštita stabilizatora od preopterećenja

Isto djelovanje ima i spoj s dvije diode (slika 8.4.b). Kad struja opterećenja stabilizatora dostigne dopušteni iznos I_S , diode provedu i smanje pobudu tranzistora $Tr1$ ne dopuštajući daljnji porast izlazne struje stabilizatora. Vrijednost otpora R_S treba odabrati tako da je zadovoljen uvjet:

$$I_S = \frac{2U_D - U_{BE}}{R_S} < I_{Cmax}$$

gdje je I_{cmax} dopušteni iznos kolektorske struje tranzistora, a napon U_D je pad napona na propusno polariziranim diodama (0,7V za silicijske diode).

Primjer 8.2.

Izračunati iznos najveće moguće struje kroz tranzistor $Tr1$ u spoju sa slike 8.4.b ako je $R_S = 1,5\Omega$.

$$I_S = (1,4V - 0,7V) / 1,5 = 0,467A$$

8.2. INTEGRIRANE IZVEDBE STABILIZATORA

Postoji veliki broj različitih tipova integriranih stabilizatora. Mogu se svrstati u četiri skupine: stabilizatori opće namjene, stabilizatori stalnoga izlaznog napona s tri izvoda, stabilizatori podesivoga izlaznog napona s tri i četiri izvoda i impulsni stabilizatori.

Stabilizatori opće namjene (engl. general purpose precision multi-terminal regulators), mogu poslužiti za gradnju velikog broja različitih izvedbi stabiliziranih izvora napona napajanja. Ulazni napon može im se kretati u širokom rasponu, a dodavanjem vanjskih elemenata može se dobiti izlazni napon također u širokom rasponu. Kao primjer može se navesti integrirani sklop poznat pod oznakom 723.

Stabilizatori stalnoga izlaznog napona s tri izvoda (engl. fixed voltage three-terminal, njem. Festspannungsregler) daju na izlazu stalan napon određene vrijednosti. Proizvode se serije s različitim iznosima koji se najčešće upotrebljavaju.

Kod **stabilizatora podesivoga izlaznog napona s tri i četiri izvoda** (engl. adjustable voltage three and four terminal) iznos izlaznoga napona određuje se vrijednostima otpora djelila koje se dodaje izvana.

Kod serijskih stabilizatora napona serijski element (tranzistor) djeluje kao promjenljivi otpor koji na sebe preuzima promjene ulaznog napona. Ovisno o razlici ulaznoga i izlaznog napona te struji opterećenja na serijskom tranzistoru može doći do znatnog utroška snage (engl. power dissipation). Stoga je **stupanj iskoristivosti** (odnos snage predane trošilu i snage privedene iz izvora, engl. efficiency) kod serijskih stabilizatora vrlo nizak, često ispod 20%.

Primjenom **impulsnih stabilizatora napona** (engl. switching regulators) moguće je smanjiti utrošak snage na serijskom tranzistoru te ga učiniti gotovo neovisnim o razlici ulaznoga i izlaznog napona i tako povećati stupanj iskoristivosti iznad 75%.

Osnovne karakteristične veličine integriranih izvedbi stabilizatora jesu: područje vrijednosti ulaznih napona (engl. input voltage range), vrijednosti napona koje se mogu dobiti na izlazu (engl. output voltage range), moguća odstupanja izlaznoga napona (engl. output voltage tolerance), vrijednost struje kojom se može opteretiti stabilizator, tj. izlazna struja (engl. output current), naponski faktor stabilizacije (engl. line regulation), opteretni faktor stabilizacije, (engl. load regulation), temperaturni koeficijent (engl. temperature coefficient of output voltage) i faktor potiskivanja brujanja (engl. ripple rejection).

Naponski faktor stabilizacije je promjena izlaznoga napona uz zadanu promjenu ulaznoga napona. Iskazuje se u milivoltima ili postotku promjene izlaznoga napona.

Opteretni faktor stabilizacije je promjena izlaznoga napona uz zadanu promjenu struje trošila. Iskazuje se također u milivoltima ili postotku promjene izlaznoga napona.

Temperaturni koeficijent i faktor potiskivanja napona brujanja definiraju se na isti način kao kod serijskoga tranzistorskog stabilizatora.

Stabilizatori stalnoga napona s tri izvoda

Kao tipični predstavnici stabilizatora stalnog napona s tri izvoda mogu se uzeti stabilizatori serije 78XX za pozitivne vrijednosti, odnosno 79XX za negativne vrijednosti (slika 8.5). Veličinu izlaznog napona označavaju znamenke XX (tablica 7.1). Izlazi tih stabilizatora mogu se opteretiti strujom od 1A. Kod većih opterećenja djeluje unutrašnja zaštita.

Tablica 8.1. Vrijednosti izlaznih napona integriranih stabilizatora stalnoga napona

Oznaka	$U_i(\text{V})$	Oznaka	$U_i(\text{V})$
7805	5	7905	- 5
7806	6	7906	- 6
7808	8	7908	- 8
7885	8,5		
7812	12	7912	- 12
7815	15	7915	- 15
7818	18	7915	- 15
7824	24	7924	- 24

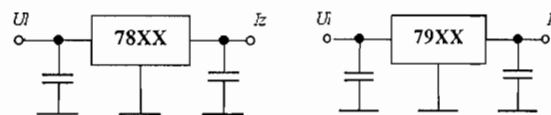
Integrirani stabilizatori podesivoga napona s tri izvoda

Izlazni napon integriranih stabilizatora podesivoga napona s tri izvoda ovisi o vrijednostima izvana dodanih otpora (slika 8.6.):

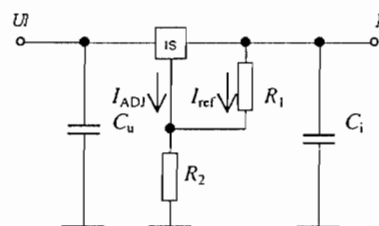
$$R = \frac{U_{BE}}{I_{REG} - \frac{I_{imax}}{h_{FEmin}}}$$

U_{ref} je napon koji vlada između izvoda integriranoga sklopa na koje se spaja otpornik R_1 . Za sklop s ozna-

Dopušteni ulazni napon je 35V. Radi smanjenja utjecaja prijelaznih pojava dodaju se paralelno ulazu i izlazu kondenzatori kapaciteta nekoliko stotina nanofarada.



Slika 8.5. Integrirani stabilizatori napona s tri izvoda kom LM317 U_{ref} iznosi 1,25V. I_{ADJ} je struja koja iz integriranoga sklopa teče kroz otpor R_2 .



Slika 8.6. Integrirani stabilizator podesivoga napona s tri izvoda

Tipična vrijednost za tu struju je 50μA. Kondenzatori kapaciteta nekoliko stotina nanofarada dodaju se paralelno ulazu i izlazu radi smanjenja utjecaja prijelaznih pojava.

Primjer 8.3.

Koliki će biti izlazni napon stabilizatora izvedenoga sa sklopom LM317 prema slici 8.6. ako su otpori $R_1=220\Omega$ i $R_2=2,2k\Omega$?

$$U_i = 1,25(1 + 2200/220) + 50 \cdot 10^{-6} \cdot 2200 = 13,86\text{V}$$

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

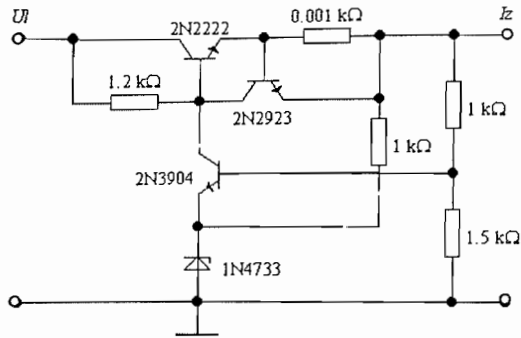
VJEŽBA 8.1. SERIJSKI TRANZISTORSKI STABILIZATOR

Zadatak

Upoznati najvažnija svojstva sklopova za stabilizaciju napona izvedenih s diskretnim elementima (serijski tranzistorski stabilizator) na temelju mjerenja vrijednosti izlaznih napona za zadane promjene ulaznih napona i struja opterećenja.

Pribor i instrumenti

- Zenerova dioda 1N4733
- tranzistori 2N2222 i 2N3904
- otpornici snage 5 W: 1Ω, 4,7Ω, 10Ω, 15Ω, 27Ω, 33Ω i 47Ω
- otpornici snage 2 W: 56Ω, 68Ω, 100Ω,
- otpornici: 1kΩ (2 komada), 1,2kΩ i 1,5kΩ
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument
- izvor istosmjernoga napona 0-15V, 1A
- osciloskop.



Slika 8.7. Serijski tranzistorski stabilizator s pojačalom u povratnoj vezi

Priprema

1. Odredite vrijednost izlaznoga napona stabilizatora sa slike 8.7.
2. Iz tvorničkih podataka odredite vrijednost dopuštene struje kolektora tranzistora 2N2222.
3. Kolika će struja teći kroz tranzistor u slučaju kratkog spoja na izlazu stabilizatora?

Pokusi

1. Ovisnost izlaznoga napona o promjenama ulaznoga napona

1.1. Nacrtajte shemu serijskoga tranzistorskoga stabilizatora prema slici 8.7. opterećenog otporom $R_P = 47\Omega$ i spojenim instrumentima za mjerenje ulaznoga i izlaznoga napona te struje kroz trošilo.

1.2. Povežite elemente stabilizatora i instrumente prema shemi. Na ulaz priključite izvor promjenljivog istosmjernog napona i izmjerite vrijednosti izlaznoga napona i struje kroz trošilo za vrijednosti ulaznoga napona: 9V, 10V, 11V, 12V, 13V, 14V i 15V. Rezultate mjerenja prikazite tablicom.

1.3. Grafički prikazite ovisnost izlaznoga napona o promjenama ulaznoga napona.

1.4. Pomoću grafičkog prikaza ovisnosti izlaznoga napona o ulaznom ustanovite faktor stabilizacije za promjenu ulaznoga napona za $\pm 2V$ od vrijednosti 12V.

2. Ovisnost izlaznoga napona o promjenama struje opterećenja

2.1. Na ulaz priključite izvor istosmjernog napona 15 V i izmjerite vrijednosti izlaznoga napona i struje kroz trošilo za vrijednosti otpora R_P : 10Ω , 27Ω , 33Ω , 47Ω , 56Ω , 68Ω i 100Ω .

2.2. Grafički prikazite ovisnost izlaznoga napona o promjenama opterećenja.

3. Mjerenje faktora potiskivanja napona brujanja

3.1. Osciloskopom izmjerite napon brujanja na ulazu i izlazu stabilizatora uz ulazni napon 15V i priključeni opteretni otpor $R_P = 47\Omega$.

3.2. Na temelju izmjerenih napona brujanja izračunajte faktor potiskivanja napona brujanja.

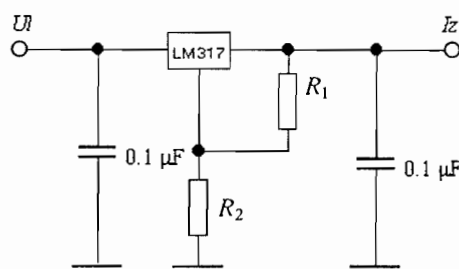
VJEŽBA 8.2. INTEGRIRANI STABILIZATOR PODESIVOGA NAPONA

Zadatak

Upoznati najvažnija svojstva integriranoga stabilizatora podesivoga napona na temelju mjerenja vrijednosti izlaznih napona za zadane promjene ulaznih napona i struja opterećenja.

Pribor i instrumenti

- integrirani sklop LM317
- otpornici snage 5 W: $4,7\Omega$, 10Ω , 15Ω , 27Ω , 33Ω i 47Ω
- otpornici snage 2 W: 56Ω , 68Ω i 100Ω
- otpornici: 220Ω i $1,5k\Omega$
- kondenzatori $0,1\mu F$ (2 komada)
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument
- izvor istosmjernog napona 0-24V, 1A
- osciloskop.



Slika 8.8. Integrirani stabilizator napona LM317

Priprema

1. Proučite tvorničke podatke integriranog sklopa LM317. Navedite najveće dopuštene vrijednosti ulaznog napona i moguće struje opterećenja. Nacrtajte oznake izvoda.

2. Izračunajte vrijednosti izlaznoga napona stabilizatora napona (slika 8.8.) ako su vrijednosti otpora $R_1 = 220\Omega$ i $R_2 = 1,5k\Omega$.

Pokusi

1. Ovisnost izlaznoga napona o promjenama ulaznoga napona

1.1. Nacrtajte shemu integriranoga stabilizatora prema slici 8.8. opterećenog otporom $R_P=47\Omega$ i spojenim instrumentima za mjerenje ulaznoga i izlaznog napona te struja kroz trošilo.

1.2. Povežite elemente stabilizatora i instrumente prema shemi. Na ulaz priključite izvor promjenljivog istosmjernog napona i izmjerite vrijednosti izlaznoga napona i struje kroz trošilo za vrijednosti ulaznoga napona: 9V, 10V, 11V, 12V, 13V, 14V i 15V. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

1.3. Grafički prikažite ovisnost izlaznoga napona o promjenama ulaznoga napona.

1.4. Pomoću grafičkog prikaza ovisnosti izlaznoga napona o ulaznom ustanovite faktor stabilizacije za promjenu ulaznoga napona za $\pm 2V$ od vrijednosti 12V.

2. Ovisnost izlaznoga napona o promjenama struje opterećenja

2.1. Na ulaz stabilizatora priključite izvor istosmjernog napona 15V i izmjerite vrijednosti izlaznoga napona i struje kroz trošilo za vrijednosti otpora R_P : 10 Ω , 27 Ω , 33 Ω , 47 Ω , 56 Ω , 68 Ω i 100 Ω .

2.2. Grafički prikažite ovisnost izlaznoga napona o promjenama opterećenja.

3. Utjecaj odnosa otpora na iznos izlaznoga napona R_1 i R_2

3.1. Ispitajte utjecaj odnosa iznosa otpora R_1 i R_2 na vrijednost izlaznog napona stabilizatora za nekoliko vrijednosti. Obrazložite zapažanja.

PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Kako djeluje serijski tranzistorski stabilizator napona na promjene ulaznoga napona?

2. Koliki je izlazni napon stabilizatora sa slike 8.2. ako je ZD=1N4734?

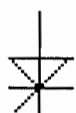
3. Objasnite ulogu tranzistora Tr_2 u spoju stabilizatora sa slike 8.3.

4. Objasnite ulogu tranzistora Tr_3 u spoju stabilizatora sa slike 8.4.a.

5. Odredite vrijednost otpora R_S (slika 8.4.a) kako izlazna struja stabilizatora ne bi prešla vrijednost 0,5A.

6. Kolika mora biti najmanja vrijednost otpora R_S u spoju stabilizatora sa slike 8.4.b. ako je $Tr_1=2N2222$?

7. Kolike moraju biti vrijednost otpora R_1 i R_2 stabilizatora sa slike 8.6. da bi izlazni napon bio 9V?



9. SKLOPOVI S TIRISTORIMA I S JEDNOSPOJNIM TRANZISTOROM

Tiristori su elektroničke komponente s višeslojnim poluvodičkim strukturama. Imaju dva stabilna stanja, vodljivo i nevodljivo, a prijelaz iz jednoga stanja u drugo vrlo je brz. Najvažnija osobina tiristora jest mogućnost upravljanja vrlo velikim snagama uz utrošak malih iznosa snaga. Proizvođači poluvodičkih komponenata proizvode brojne različite vrste tiristora. Postoje tiristori s dvije, tri i četiri elektrode. S obzirom na smjer protjecanja struje tiristori mogu biti jednosmjerni i dvosmjerni.

U prvom dijelu ovoga poglavlja dan je pregled osnovnih svojstava jednosmjernoga diodnog tiristora (četveroslojna dioda), dvosmjernoga diodnog tiristora (dijak), jednosmjernoga triodnog tiristora (SCR), isklapivoga tiristora i dvosmjernoga triodnog tiristora (trijak) i njihove osnovne primjene (sklopovi za generiranje okidnih impulsa s diodnim tiristorima i sklopovi za regulaciju jakosti struje s triodnim tiristorima). Svjetlosno osjetljivi tiristor (LASCR) obrađen je u poglavlju 10. *Optoelektronički elementi*.

U drugom dijelu poglavlja obrađuje se jednospojni tranzistor s primjerom uporabe za generiranje okidnih impulsa.

9.1. Tiristori

Četveroslojna dioda

Generiranje impulsa s pomoću četveroslojne diode

Dijak

Generiranje impulsa s pomoću dijaka

Silicijska upravljiva ispravljačica - SCR

Regulacija struje s pomoću SCR-a

Zaštita tiristora

Okidanje tiristora pri prolazu napona kroz nulu

Isklapivi tiristor

Trijak

Regulacija struje s pomoću trijaka

9.2. Jednospojni tranzistor

Osobine jednospojnoga tranzistora

Generiranje impulsa s pomoću jednospojnoga tranzistora

Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 9.1. Generiranje impulsa s pomoću četveroslojne diode

Vježba 9.2. Regulacija struje s pomoću SCR-a

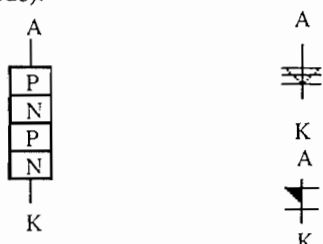
Vježba 9.3. Generiranje impulsa s pomoću jednospojnoga tranzistora

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

9.1. TIRISTORI

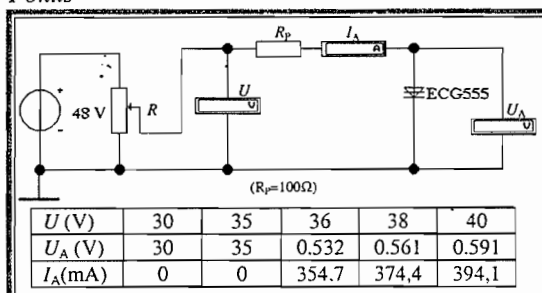
Četveroslojna dioda

Četveroslojna dioda (engl. four-layer diode, njem. Vierschichtdiode) naziva se još Shockleyjeva dioda, prema svom konstruktoru, ili jednosmjerni diodni tiristor (engl. reverse blocking diode thyristor, njem. Thyristordiode).



Slika 9.1. Pojednostavnjeni prikaz građe i simboli četveroslojne diode

Pokus

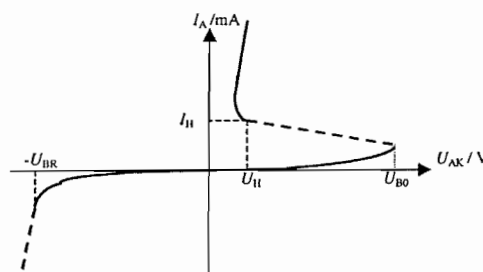


Slika 9.2. Ispitivanje svojstava četveroslojne diode

Osobina je četveroslojne diode da ne vodi struju ni pri propusnoj polarizaciji sve dok napon priključen između anode i katode ne poprими dovoljno veliku vrijednost U_{BO} , koja se naziva **prijelomni napon** (engl. breakover voltage, switching voltage, njem. Kippspannung, Schaltspannung). Dioda kod toga napona naglo prelazi iz nevodljivoga stanja (u kojemu ima otpor od nekoliko megaoma) u vodljivo stanje (u kojem ima otpor od nekoliko oma). Struja naglo poraste uz smanjenje napona između anode i katode. Stoga se za četveroslojnu diodu kaže da ima **karakteristiku negativnog otpora**.

Dioda ostaje u vodljivu stanju sve dok se struja kroz nju ne smanji ispod određene vrijednosti I_H koja se naziva **struja držanja** (engl. holding current, njem. Haltestrom). Uz napon zaporne polarizacije dioda ne vodi, sve dok napon ne bi poprimio veću vrijednost od **probojnoga napona** zaporne polarizacije U_{BR}

(engl. reverse breakdown voltage, njem. Durchbruchspannung), što bi dovelo do uništenja diode.

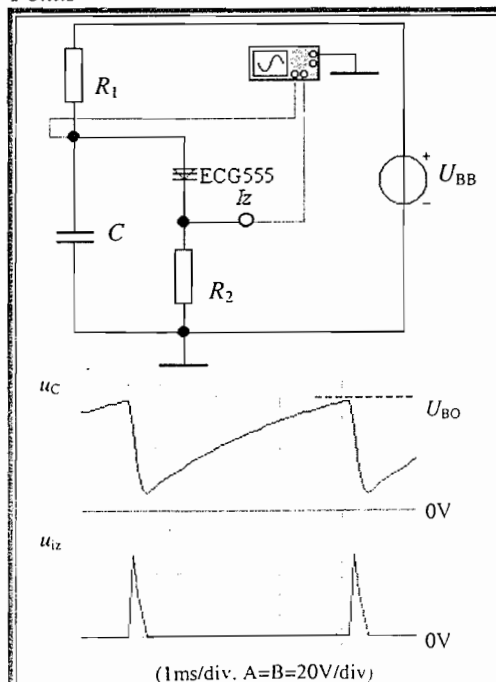


Slika 9.3. Strujno-naponska karakteristika četveroslojne diode

Prijelomni naponi mogu imati vrijednosti između nekoliko desetaka i nekoliko stotina volta. Struje kojima se četveroslojna dioda može opteretiti reda su veličine nekoliko stotina miliampera do nekoliko ampera. Struje držanja I_H mogu biti od nekoliko miliampera do nekoliko desetaka miliampera a naponi držanja U_H između 0,5 V i 1V.

Generiranje impulsa s pomoću četveroslojne diode

Pokus



Slika 9.4. Generiranje impulsa s pomoću četveroslojne diode

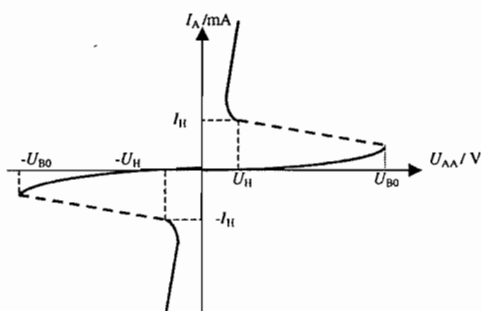
Na slici 9.4. prikazan je primjer generatora okidnih impulsa. Kondenzator C nabija se iz izvora napajanja preko otpora R_1 . Kad napon na njemu dostigne iznos veći od prijelomnoga napona četveroslojne diode U_{BO} , ona provede pa se kondenzator C brzo izbija preko relativno malog iznosa otpora R_2 . Pad napona na optoru R_2 izlazni je napon generatora. Frekvencija impulsa obrnuto je proporcionalna umnošku vrijednosti otpora R_1 i kapaciteta kondenzatora C .

Dijak

Sličnih svojstava četveroslojnoj diodi je **dijak** (engl. diode AC switch, skraćeno DIAC, njem. Zweirichtungsdioden, bidirektionale Triggerdioden, Zweirichtungs-Tyristordioden). Razlikuje se od četveroslojne diode po tome što može propuštati struju u oba smjera (slika 9.6. i 9.7.).

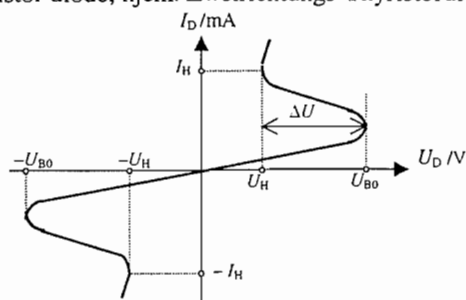


Slika 9.5. Simboli dijaka



Slika 9.6. Strujno-naponska karakteristika dijaka s pet slojeva

Međusobno se prema konstrukciji i obliku strujno-naponske karakteristike razlikuju dva tipa: dijak s pet slojeva (engl. bidirectional diode, njem. Zweirichtungsdioden) i dijak s tri sloja (engl. bidirectional thyristor diode, njem. Zweirichtungs-Thyristordioden).

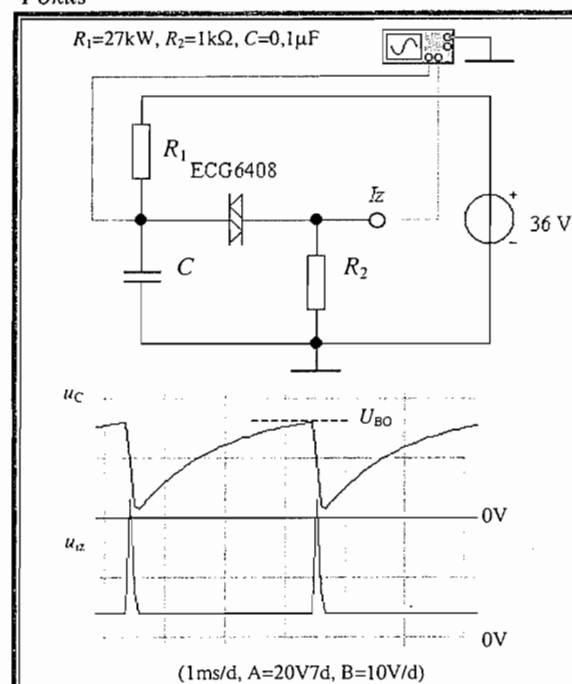


Slika 9.7. Strujno-naponska karakteristika dijaka s tri sloja

Vrijednosti prijelomnoga napona i napona držanja kod dijaka s pet slojeva odgovaraju vrijednostima kao kod četveroslojne diode. Prijelomni napon kod dijaka s tri sloja iznosi između 20V i 40V. Razlika napona između prijelomnoga napona U_{BO} i napona držanja U_H iznosi oko 10V.

Generiranje impulsa s pomoću dijaka

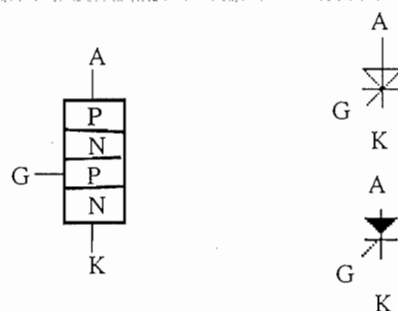
Pokus



Slika 9.8. Generiranje impulsa s pomoću dijaka

Na slici 9.8. prikazana je shema sklopa za generiranje okidnih impulsa s pomoću dijaka. Princip rada je isti kao i kod generatora okidnih impulsa s pomoću četveroslojne diode.

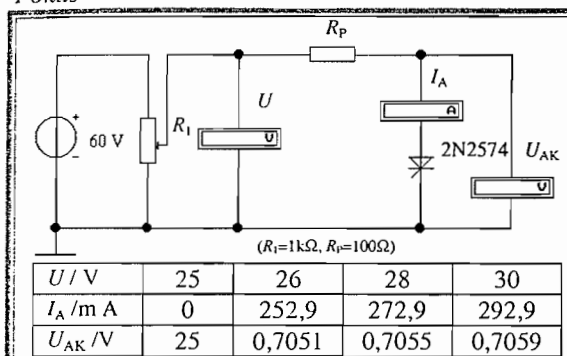
Silicijska upravljiva ispravljača - SCR



Slika 9.9. Pojednostavnjeni prikaz građe i simboli SCR-a

Silicijska upravljiva ispravljačica, skraćeno **SCR** (od engl. naziva silicon controlled rectifier) ili **triodni tiristor** (engl. thyristor-triode, njem. Thyristortriode), element je s tri elektrode. To su **anoda A**, **katoda K** i **upravljачka elektroda G** (od engl. gate). Vrlo često se naziva samo tiristor.

Pokus

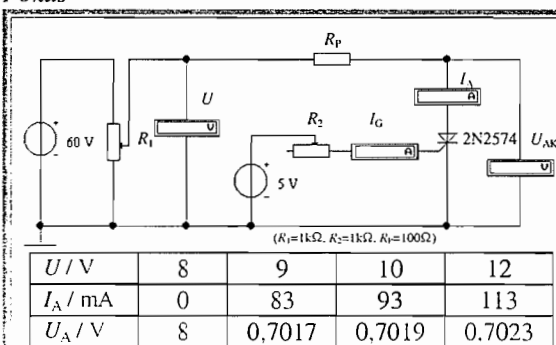


Slika 9.10. Ispitivanje svojstava SCR-a ($I_G=0$)

SCR će pri propusnoj polarizaciji, slično četvero-slojnoj diodi, voditi struju tek ako priključeni napon ima dovoljno veliku vrijednost. Ta vrijednost naziva se **prijelomni napon** U_{B0} (engl. forward breakover voltage, njem. Kippspannung, Schalt-spannung), a može iznositi od nekoliko desetaka volta do preko kilovolta.

Kad tiristor provede, napon između anode i katode smanji se na vrlo mali iznos U_T (engl. forward on-state voltage, njem. Durchlassspannung) koji je reda veličine jedan do dva volta, a struja poprimi veliku vrijednost (slika 9.12.). Stoga se i za tiristor kaže da ima **karakteristiku negativnog otpora**. Ovako se tiristor ponaša kad ne teče struja upravljačke elektrode, tj. kad je $I_G=0$.

Pokus



Slika 9.11. Ispitivanje svojstava SCR-a ($I_G=35mA$)

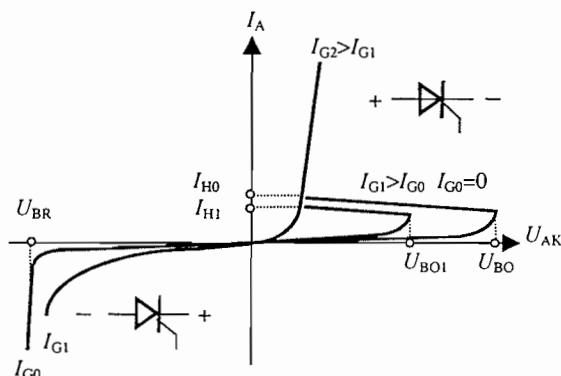
Ako upravljačkom elektrodom teče struja I_G , ovisno o njezinoj veličini, tiristor može provesti i kod napona između anode i katode koji ima manju vri-

jednosti od U_{B0} . Uz dovoljno veliku struju upravljačke elektrode (obično nekoliko desetaka miliampera, što se postiže naponom između upravljačke elektrode i katode od nekoliko volta) tiristor može provesti i kod vrlo malih napona između anode i katode.

Kad je tiristor jednom doveden u stanje vođenja, nije mu više potrebna struja upravljačke elektrode I_G . Tiristor će prestati voditi tek kad struja koja teče kroz njega padne ispod vrijednosti I_H , koja se naziva **minimalna struja vođenja ili struja držanja** (engl. holding current, njem. Haltestrom). Vrijednosti ove struje iznose obično nekoliko miliampera.

Uz napon zaporne polarizacije tiristor se ponaša kao poluvodička dioda. Kroz njega praktički ne teče struja sve dok priključeni napon ne poprimi vrijednost **probojnoga napona zaporne polarizacije** U_{BR} (engl. reverse breakdown voltage, njem. Durchbruchspannung). U tom slučaju, ako struja tiristora nije ničim ograničena, njezin nagli porast uzrokuje uništenje tiristora.

Vrijednosti probojnoga napona zaporne polarizacije U_{BR} i prijelomnoga napona U_{B0} obično su iste.

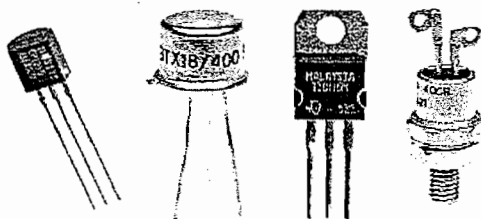


Slika 9.12. Strujno-naponska karakteristika SCR-a

Iz ovoga prikaza slijedi da je za dovođenje tiristora u stanje vođenja potrebna kratkotrajna pobuda relativno male snage. Kod tranzistorske sklopke potrebne su pobude često veće snage i moraju biti trajno prisutne za čitavo vrijeme vođenja.

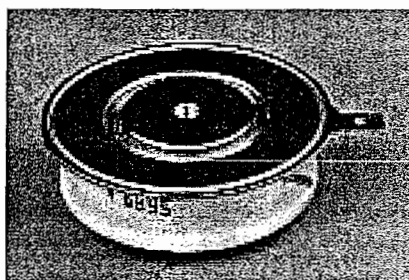
Za rad s tiristorom također je važno poznavati vrijednost **dopuštene struje pri propusnoj polarizaciji** I_F (engl. forward current, njem. Durchlassstrom). Vrijednosti ovih struja, ovisno o tipu tiristora, iznose od nekoliko stotina miliampera do tisuću i više ampera.

Na slici 9.13. pokazano je nekoliko izvedbi tiristora srednje snage.



Slika 9.13. Primjeri izvedbi tiristora srednje snage

Na slici 9.14. pokazano je kućište tiristora velike snage. Radi se o tiristoru čiji probojni napon iznosi 1200V i dopuštene struje pri propusnoj polarizaciji 600A.



Slika 9.14. Primjer izvedbe tiristora velike snage

Regulacija struje s pomoću SCR-a

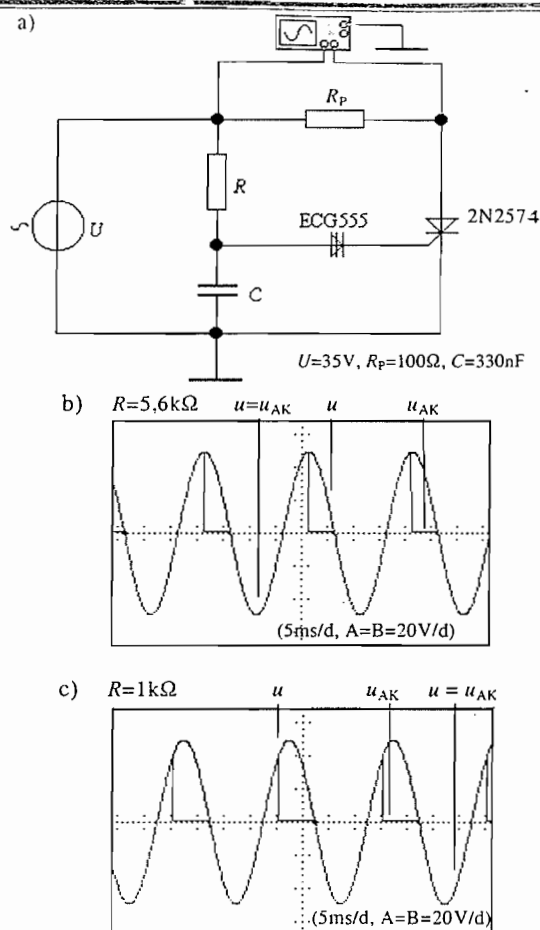
S obzirom na to da se SCR-ima može regulirati trenutak početka vođenja, tj. vrijeme vođenja, a to znači i jakost struje, oni se vrlo često rabe upravo u sklopovima za regulaciju struje u različitim uređajima. Za regulaciju struje trošilo i SCR spajaju se serijski (slika 9.15.a). SCR mora biti tako odabran da može provesti tek dovođenjem okidnog impulsa na upravljačku elektrodu. Jakost struje trošila regulira se promjenom vremena okidanja. Za veću struju kroz trošilo okidni impuls mora se dovesti prije. Padom napona na vrijednost nula volta tiristor se gasi.

Ulazni izmjenični napon kojim se napaja trošilo dovodi se preko RC-mreže na četveroslojnu diodu. Ovisno o veličini otpora R može se mijenjati fazni pomak i veličina napona na kondenzatoru, tj. četveroslojnoj diodi. Time se mijenja i trenutak početka vođenja četveroslojne diode koja okida SCR. S većim otpor R dolazi do kasnijeg vođenja četveroslojne diode, a time i SCR-a (slika 9.15.b). Manji otpor R omogućava ranije vođenje SCR-a (slika 9.15.c)

Impulsi potrebni za okidanje SCR-a u spojevima za regulaciju struje mogu se dobiti iz posebnih izvora okidnih impulsa (npr. primjena jednospojnova tranzistora

stora) ili iz istog izvora kojim se napaja trošilo kojemu se regulira struja. Na slici 9.15. prikazana je shema sklopa za regulaciju struje u kojemu se SCR okida s pomoću četveroslojne diode iz istog izvora kojim se napaja trošilo.

Pokus

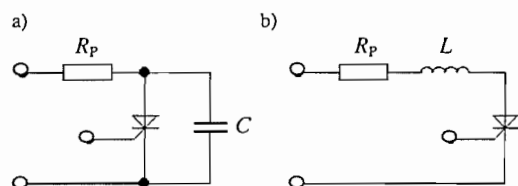


Slika 9.15. Sklop za regulaciju struje s pomoću četveroslojne diode i SCR-a

Zaštita tiristora

Ako je brzina promjene napona između anode i katode veća od dopuštene, može se dogoditi da tiristor provede iako nema potrebnu pobudu na upravljačkoj elektrodi. Ta pojava naziva se dU_{AK}/dt učinak (engl. rate-effekt, njem. Rate-Effekt). Uključivanje tiristora dU_{AK}/dt efektom može imati za posljedicu nagli porast anodne struje, povećani utrošak snage i uništenje tiristora. Dopuštene brzine promjena anodnoga napona tiristora iznose od 10 do 100V/ μs .

Da bi se tiristor zaštitio od prebrze promjene priključenoga anodnoga napona, spaja se između anode i katode kondenzator odgovarajućeg kapaciteta (slika 9.16.a). Dopuštene vrijednosti brzine promjene anodne struje tiristora dI/dt nekoliko su desetaka A/ μ s. Brzina porasta anodne struje ograničava se spajanjem zavojnice odgovarajućeg induktiviteta u seriju s tiristorom (slika 9.16.b).



Slika 9.16. Ograničenje porasta: a) napona između anode i katode, b) anodne struje tiristora

Okidanje tiristora pri prolazu napona kroz nulu

Okidanje tiristora u tijeku poluperiode izaziva pojave smetnji. Smetnje se mogu otkloniti filtriranjem što pri velikim snagama čini znatne teškoće. Smetnje se mogu izbjeći tako da tiristor vodi cijelu poluperiodu

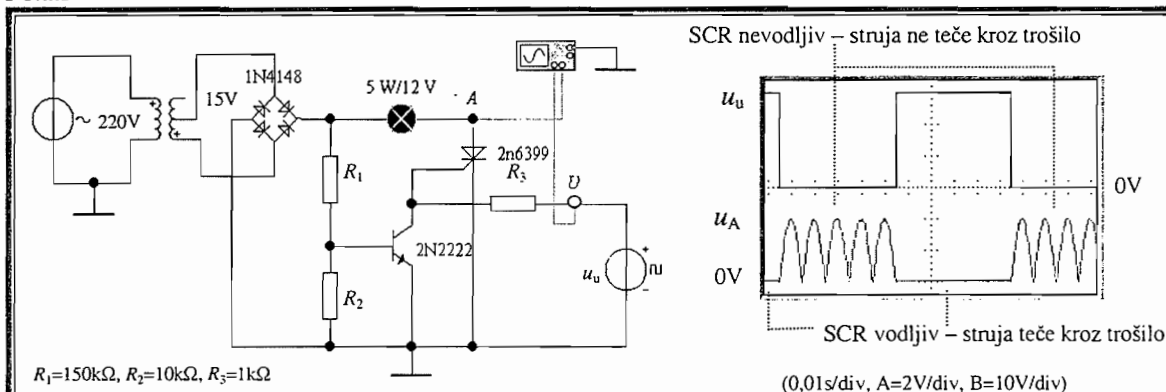
ili uopće ne vodi, tj. da se okida pri prolazu priključenoga napona kroz nulu.

Na slici 9.17. prikazano je djelovanje spoja za okidanje tiristora pri prolazu anodnoga napona kroz nulu (engl. zero crossing switch, njem. Nullspannungsschalter). Tiristor može provesti samo ako su ispunjena dva uvjeta, prvi da na ulazu U upravljački napon u_u ima pozitivnu vrijednost i drugi da je tranzistor u zapiranju. Upravljački napon u_u okidać će tiristor samo ako je tranzistor u zapiranju, tj. kad je napon U_{BE} manji od 0,7V (za silicijske tranzistore). Pri kraju svake poluperiode pada struja tiristora ispod vrijednosti struje pridržavanja I_H pa se tiristor isključuje. No sve dok napon u_u ima pozitivnu vrijednost, tiristor se ponovo uključuje.

Kako se na bazu tranzistora dovodi punovalno ispravljeni napon preko djelila napona, izborom otpora R_1 i R_2 može se postići da je tranzistor pouzdano u zapiranju pri prolazu vrijednosti izmjeničnoga napona kroz nulu, dok je sve ostalo vrijeme vodljiv. Prema tome okidanje se može dogoditi samo pri prolazu napona kroz nulu.

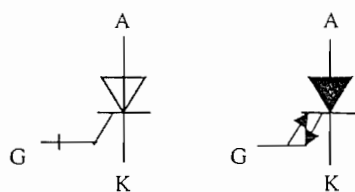
Proizvođači elektroničkih komponenata proizvode i integrirane izvedbe sklopova za okidanje kroz nulu (npr. TCA780 ili μ A742).

Pokus



Slika 9.17. Okidanje tiristora pri prolazu napona kroz nulu

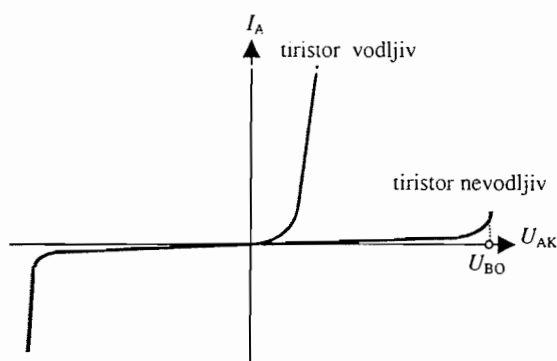
Isklopivi tiristor



Slika 9.18. Simboli isklopivoga tiristora

Isklopivi tiristor, ili **GTO tiristor** (od engl. gate turn off thyristor, njem. Gate abschaltbarer Thyristor, Gate-Abschaltthyristor) dovodi se u stanje vođenja kao i obični tiristor, dovođenjem pozitivnoga impulsa na upravljačku elektrodu. Međutim, u stanje nevođenja ovaj tiristor se, za razliku od običnog, dovodi negativnim impulsom na upravljačkoj elektrodi. Struje uključenog tiristora mogu iznositi nekoliko stotina ampera. Pad napona na propusno polariziranom tiristoru je oko 2V, dok anodni naponi isključenoga tiristora mogu biti od nekoliko stotina volta do preko kilovolta.

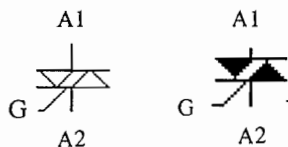
Isklopivi tiristori upotrebljavaju se osobito u sklopovima energetske elektronike za pretvorbu istosmjernoga napona u izmjenični.



Slika 9.19. Strujno-naponska karakteristika isklopivoga tiristora

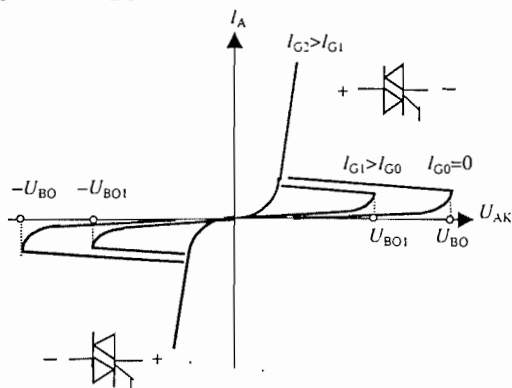
Trijak

Trijak (od engl. triode AC switch, skraćeno TRIAC, njem. Zweirichtungs-Thyristortriode) ili **dvosmjerni triodni tiristor** element je sličnih svojstava SCR-u, s tim što može propuštati struju u obaju smjera bez obzira na polaritet priključenoga napona (slika 9.20.).



Slika 9.20. Simboli trijaka

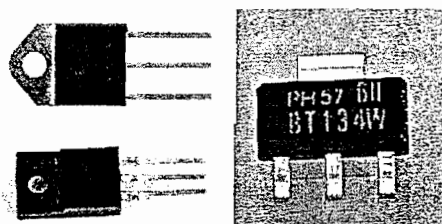
Da bi trijak proveo, potrebno je da napon priključen na njegove elektrode A1 i A2 ima vrijednost prijelomnoga napona U_{BO} ako je struja upravljačke elektrode $I_G=0$. Pomoću struje upravljačke elektrode I_G trijak se može dovesti u stanje vođenja i kod nižih napona od U_{BO} .



Slika 9.21. Strujno-naponska karakteristika trijaka

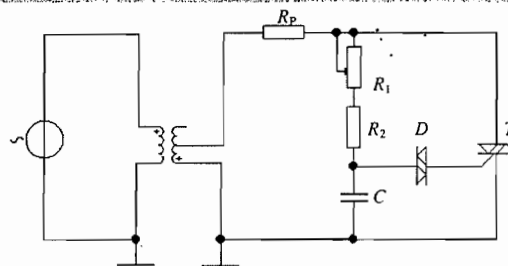
Trijak se može okidati pozitivnim i negativnim impulsima na upravljačkoj elektrodi bez obzira na polaritet napona između glavnih elektroda. Pošto je trijak jednom proveo, struja upravljačke elektrode nema utjecaja na njegov rad. Vrijednosti potrebnih struja i napona za dovođenje trijaka u vođenje, te radni naponi i struje istog su reda veličina kao i kod SCR-a.

Kućišta trijaka slična su kućistima SCR-a. Na slici 9.22. pokazano je nekoliko primjera izvedbi za srednje snage.



Slika 9.22. Primjeri izvedbi trijaka

Regulacija struje s pomoću trijaka

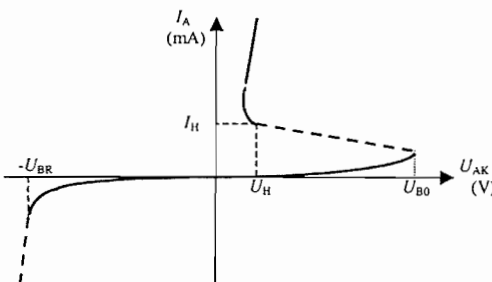
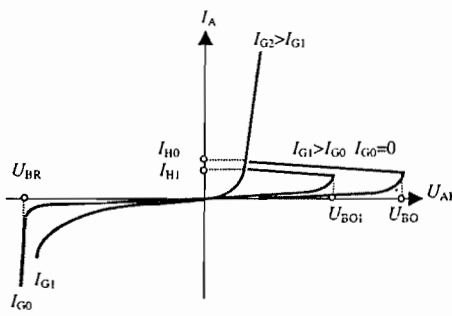
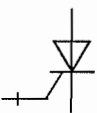
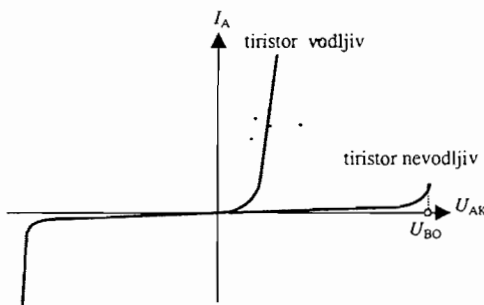
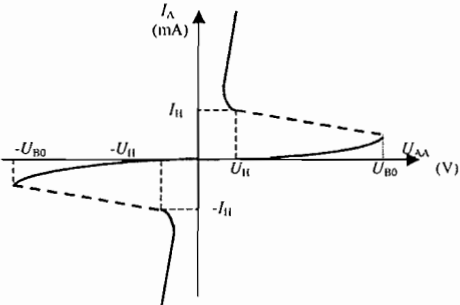
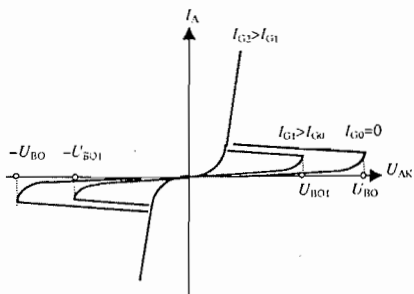


Slika 9.23. Regulacija izmjenične struje s pomoću trijaka

S obzirom na mogućnost vođenja struje u oba smjera trijak je naročito pogodan za regulaciju izmjenične struje (slika 9.23.)

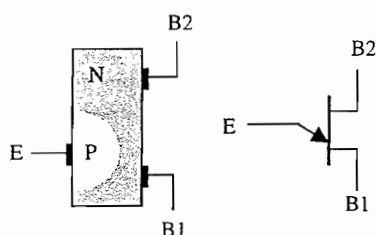
Uz veću vrijednost otpora R (zbroj otpora R_1 i R_2) dolazi do većega faznog pomaka napona na kondenzatoru u usporedbi s naponom na trijaku, što znači do kasnijeg okidanja trijaka pa trošilom R_P teče manja struja. Zbog stabilnijeg okidanja trijaka, stavlja se između njega i kondenzatora C okidni element (dijak) koji dobro reagira i na relativno sporu promjenu napona na kondenzatoru i svojim provođenjem okida trijak. Kad napon na kondenzatoru C dostigne potreban iznos, dijak provede i daje potreban okidni impuls na upravljačku elektrodu trijaka.

Tablica 9.1. Pregled tiristora

Komponenta	Simbol	Strujno-naponska karakteristika
Četveroslojna dioda  		
SCR (silicijska upravljiva ispravljačica)	 	
GTO (isklopivi tiristor)	 	
Dijak	 	
Trijak	 	

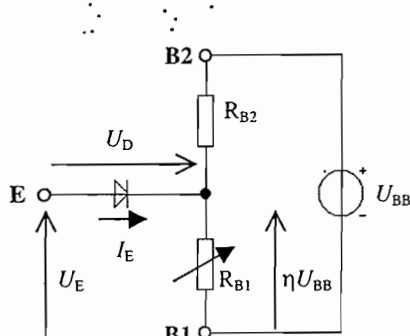
9.2. JEDNOSPOJNI TRANZISTOR

Osobine jednospojnjog tranzistora



Slika 9.24. Građa i simbol jednospojnjog tranzistora

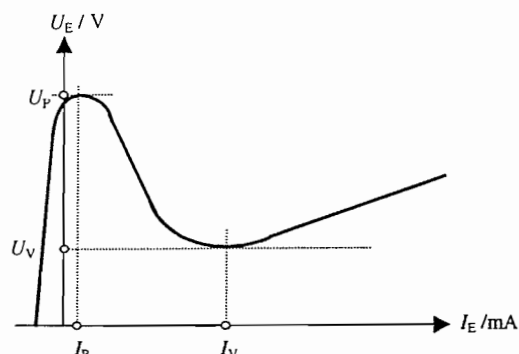
Jednospojnjni tranzistor (engl. unijunction transistor, skraćeno UJT, njem. Unijunction-Transistor, Unijunktionstransistor) ima tri elektrode, od kojih se dvije nazivaju **bazama B1 i B2** (otuda neki ovaj element nazivaju tranzistor s dvije baze, njem. Doppelbasistransistor), a treća je **emiter E** (slika 9.24.).



Slika 9.25. Nadomjesni spoj jednospojnjog tranzistora

Jednospojnjni tranzistor može se prikazati kao spoj dvaju otpora između kojih je spojena dioda (slika 9.25.).

Uz priključen napon napajanja U_{BB} između baza, a emiter kratkospojen (napon $U_E=0$), dioda (PN-spoj) zaporno je polarizirana. Struja emitera I_E vrlo je malog iznosa i negativnoga predznaka. To je reverzna struja zasićenja I_{E0} (reda veličine desetak μA). Tranzistor se može smatrati omskim otporom reda veličine desetak kilooma. Na dijelu otpora R_{B1} pad je napona ηU_{BB} . Faktor η (unutarnji omjer, engl. intrinsic stand-off ratio, njem. Widerstandsteilungsfaktor, Lineares Spannungsverhältnis, Ein-Aus-Verhältnis) iznosi između 0,5 i 0,8.



Slika 9.26. Ulazna strujno-naponska karakteristika jednospojnjog tranzistora

Zato struja emitera I_E ostaje nula i kod priključenoga napona U_E sve dok taj napon ne poprmi iznos veći od ηU_{BB} uvećan za pad napona na diodi U_D (iznosi oko 0,6 V).

Kad napon U_E poprmi vrijednost veću od $\eta U_{BB} + U_D$, ulazna dioda postaje propusno polarizirana i poteče znatna struja emitera I_E . Pri tome dolazi do smanjenja otpora R_{B1} pa se smanjuje i napon U_E (svojstvo negativnog otpora) uz porast struje emitera. Kod iznosa emitorske struje I_V (struja dna, engl. valley point current, njem. Talstrom), napon U_E ima najmanju vrijednost U_V (engl. valley point voltage, njem. Talspannung). Uz porast struje emitera iznad iznosa I_V jednospojnjni tranzistor prelazi iz područja negativnog otpora u područje zasićenja, a napon U_E lagano raste (slika 9.26.).

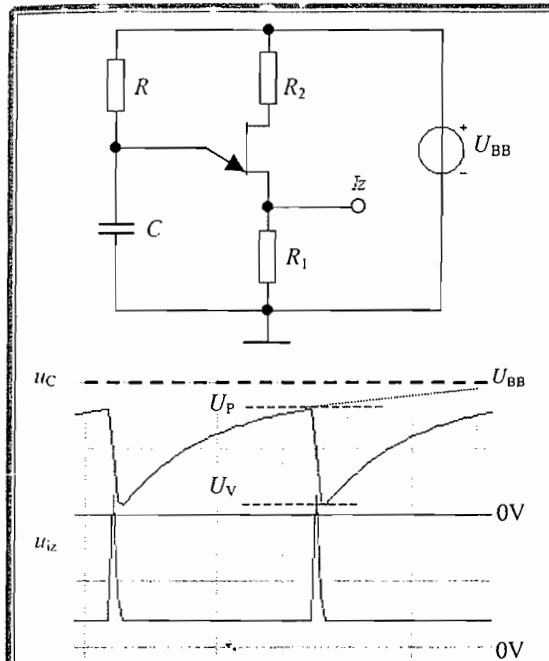
Napon U_E kod kojega je jednospojnjni tranzistor proveo, naziva se **napon vrha U_P** (engl. peak point voltage, njem. Höckerspannung) kojemu pripada **struja vrha I_P** . Vrijednosti struja I_P reda su veličine mikroampera. Vrijednost napona vrha ovisi o vrijednosti napona napajanja spojenom između baza:

$$U_P = \eta U_{BB} + U_D.$$

Naponi napajanja koji se upotrebljavaju imaju iznose do 30V, a istog reda veličine su i dopušteni naponi emitera. Dopuštena struja emitera iznosi tipično oko 50 mA.

Generiranje impulsa s pomoću jednospojnjoga tranzistora

Pol:us



Slika 9.27. Generiranje impulsa s pomoću jednospojnjoga tranzistora

Na slici 9.27. prikazan je primjer uporabe jednospojnjoga tranzistora za generiranje impulsa. Kondenzator C nabija se iz izvora U_{BB} . Kad napon na njemu dostigne iznos U_P , tranzistor provede pa se kondenzator C izbija kroz jednospojni tranzistor strujom I_E . Kad struja tranzistora I_E padne ispod vrijednosti I_V , tranzistor prestaje voditi i kondenzator C ponovo se nabija. Struja izbijanja koja teče kroz jednospojni tranzistor stvara na otporu R_1 impulse čija frekvencija ovisi o iznosu otpora R i kapacitetu C te omjeru η zadanom izborom tranzistora.

S obzirom na to da je $T_1 \gg T_2$, frekvencija izlaznoga napona praktički je $f = 1/T_1$. T_1 se može izračunati približno prema izrazu: $T_1 = RC \cdot \ln[(U_{BB} - U_V)/(U_{BB} - U_P)]$. S obzirom na to da je napon U_V znatno manji od napona U_{BB} vrijedi da je $T_1 = RC \ln[U_{BB}/(U_{BB} - U_P)]$ odnosno:

$$T_1 = RC \ln \frac{1}{1 - \eta}$$

Kako bi jednospojni tranzistor proveo kad se kondenzator dovoljno nabije, otpor R ne smije biti prevelik kako bi struja I_E mogla doseći vrijednost I_P . To znači da pad napona na otporniku R mora biti veći od vrijednosti $I_P R$, tj. $U_{BB} - U_P > I_P R$.

Kako bi se jednospojni tranzistor isključio kad se kondenzator dovoljno izbije, otpor otpornika R mora biti dovoljno velik da se struja I_E smanji ispod vrijednosti I_V . To znači da pad napona na otporniku R mora biti manji od vrijednosti $I_V R$, tj. $(U_{BB} - U_V) < I_V R$. To znači da otpor R treba imati vrijednost: $(U_{BB} - U_V)/I_V < R < (U_{BB} - U_P)/I_P$.

Uz to što se na otporniku R_1 dobije izlazni napon, njegova je zadaća ograničiti struju emitera za vrijeme izbijanja kondenzatora C . Stoga njegova vrijednost treba biti: $R_1 > (U_P - U_V)/I_{EM}$, gdje je I_{EM} dopuštena vrijednost impulsne struje emitera jednospojnjoga tranzistora (engl. peak pulse emitter current, njem. Emitter Spitzenstrom). Ta vrijednost je znatno veća od dopuštene stalne struje emitera I_E .

Otpornik R_2 temperaturno stabilizira napon U_P (faktor η i napon U_D temperaturno su ovisni) a time i frekvenciju izlaznoga napona.

Primjer 9.1.

Kolika će biti frekvencija izlaznoga napona sklopa sa slike 9.27. uz zadane vrijednosti: $R_1 = 27 \Omega$, $R_2 = 330 \Omega$, $R = 56 k\Omega$, $C = 56 nF$, $U_{BB} = 20 V$ i $UJT = 2N1671$?

$$T_1 = 56 k\Omega \cdot 56 nF \cdot \ln [1/(1 - 0,55)] = 2,5 ms$$

$$f = 1/2,5 ms = 400 Hz$$

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

VJEŽBA 9.1. GENERIRANJE IMPULSA S POMOĆU ČETVEROSLOJNE DIODE

Zadatak

Proširiti osnovna znanja o četveroslojnoj diodi i upoznati neke mogućnosti primjene.

Uporaba tvorničkih podataka o elektroničkim elementima.

Stjecanje vještine u radu s osciloskopom na ispitivanju svojstava elektroničkih sklopova

Instrumenti i pribor

- četveroslojna dioda ECG555
- otpornik 100Ω , 10W
- otpornici $1k\Omega$, $27k\Omega$, $47k\Omega$, $56k\Omega$ i $100k\Omega$
- kondenzatori $100nF$, $220nF$, $330nF$ i $470nF$
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- regulacijski transformator
- osciloskop.

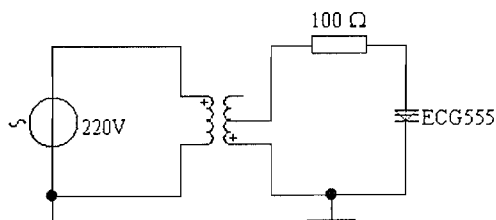
Priprema

1. Nacrtajte simbol s označenim elektrodama i strujno-naponsku karakteristiku četveroslojne diode.

2. Proučite tvorničke podatke četveroslojne diode ECG555. Navedite iznose napona preklapanja dopuštene struje diode pri propusnoj polarizaciji, struju pridržavanja i probojni napon zaporne polarizacije.

Pokusi

1. Mjerenje napona preklapanja



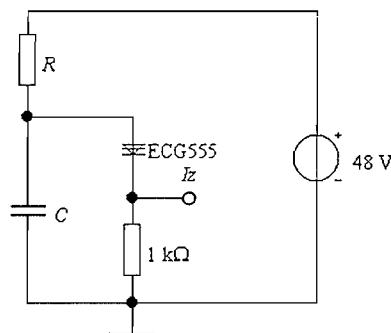
Slika 9.28. Pobuda četveroslojne diode izmjeničnim naponom

1.1. Spojite elemente sklopa prema slici 9.28. Namjestite napon na sekundaru regulacijskoga trans-

formatora na 48V. Osciloskopom promatrajte ulazni napon sklopa i napon na četveroslojnoj diodi. Nacrtajte dijagram obaju napona. Kod koje vrijednosti napona četveroslojna dioda počinje voditi?

2. Generiranje impulsa s pomoću četveroslojne diode

2.1. Spojite elemente sklopa prema slici 9.29. Priključite napon napajanja i ustanovite oblike napona na kondenzatoru C i izlazu I_z ($C=100nF$, $R=27k\Omega$).



Slika 9.29. Sklop za generiranje impulsa s pomoću četveroslojne diode

2.2. Ustanovite iznose frekvencije izlaznoga napona za vrijednosti otpora otpornika R : $27k\Omega$, $47k\Omega$, $56k\Omega$ i $100k\Omega$ uz kapacitet kondenzatora $C=100nF$. Rezultate prikažite tablicom i grafički.

2.3. Ustanovite vrijednosti frekvencije izlaznoga napona za vrijednosti kapaciteta kondenzatora C : $100nF$, $220nF$, $330nF$ i $470nF$ uz otpor otpornika $R=27k\Omega$. Rezultate prikažite tablicom i grafički.

VJEŽBA 9.2. REGULACIJA STRUJE S POMOĆU SCR-A

Zadatak

Upoznati mogućnosti primjene SCR-a za regulaciju struje.

Uvježbavati rad s osciloskopom na ispitivanju svojstava elektroničkih sklopova i uporabu tvorničkih podataka o elektroničkim elementima.

Instrumenti i pribor

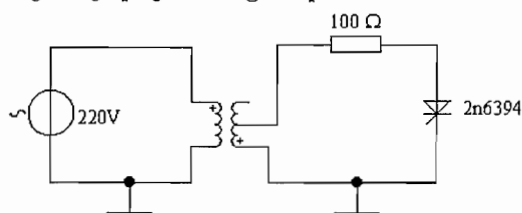
- SCR 2N6394
- četveroslojna dioda ECG555
- promjenljivi otpornik $10\text{k}\Omega$
- otpornik $1\text{k}\Omega$
- otpornik 100Ω , 5 W
- kondenzatori 220 nF
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- regulacijski transformator
- osciloskop.

Priprema

1. Nacrtajte simbol s označenim elektrodama i strujno-naponsku karakteristiku SCR-a.
2. Proučite tvorničke podatke SCR-a 2N6394. Navedite iznose prijelomnoga napona, dopuštene struje SCR-a pri propusnoj polarizaciji i struje držanja.

Pokusi

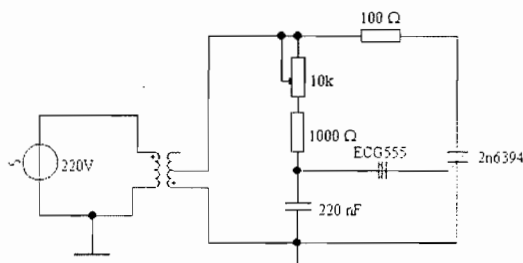
1. Mjerenje prijelomnoga napona SCR-a



Slika 9.30. Pobuda SCR-a izmjeničnim naponom

1.1. Spojite elemente sklopa prema slici 9.30. Namjestite izmjenični ulazni napon sklopa s pomoću regulacijskoga transformatora na 36V. Priključite napon napajanja na sklop. Osciloskopom promatrajte napon na sekundaru transformatora i napon na SCR-u. Nacrtajte dijagram obaju napona. Kod koje vrijednosti napona SCR počinje voditi?

2. Regulacija struje s pomoću SCR-a



Slika 9.31. Regulacija struje s pomoću SCR-a

2.1. Spojite elemente sklopa prema slici 9.31. Priključite napon napajanja. Namjestite napon sekundara regulacijskoga transformatora na 30V. Osciloskopom promatrajte napon na SCR-u i kondenzatoru. Nacrtajte dijagrame obaju napona.

2.2. Podesite vrijednost promjenljivog otpora tako da kut vođenja bude $2\pi/3$ i $\pi/2$. Nacrtajte dijagrame promatranih napona. U kojem slučaju kroz trošilo $R_P = 100\Omega$ teče struja veće jakosti?

VJEŽBA 9.3. GENERIRANJE IMPULSA S POMOĆU JEDNOSPOJNOGA TRANZISTORA

Zadatak

- Proširiti osnovna znanja o jednospojnomu tranzistoru (uporaba tvorničkih podataka o elektroničkim elementima, određivanje faktora η , primjer uporabe).
- Ispitati ovisnost frekvencije generatora impulsa izvedenog s pomoću jednospojnoga tranzistora o kapacitetu ugrađenoga kondenzatora.
- Stjecati vještinu rada s mjernim instrumentima.

Instrumenti i pribor

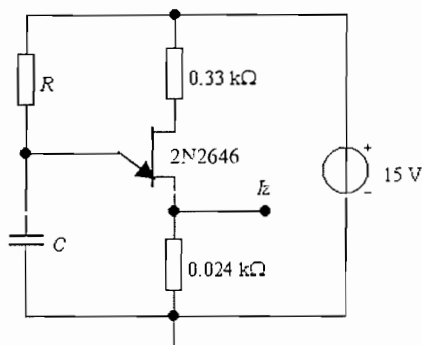
- jednospojni tranzistor 2N2646
- promjenljivi otpornik $10\text{ k}\Omega$
- otpornici 24Ω , 330Ω , $33\text{ k}\Omega$ i $56\text{ k}\Omega$
- kondenzatori 10 nF , 47 nF , 56 nF i 100 nF
- izvor istosmjernoga napona 0-15V, 1A (2 komada)
- univerzalni instrument (2 komada)
- osciloskop.

Priprema

1. Proučite tvorničke podatke jednospojnoga tranzistora 2N2646. Navedite iznose dopuštene struje I_E , faktora η , napona napajanja U_{BB} i zapornog napona U_{EB1} .

2. Izračunajte napon U_P jednospojnoga tranzistora 2N2646 za napon napajanja 15V. Za faktor η uzmite srednju vrijednost iz tvorničkih podataka.

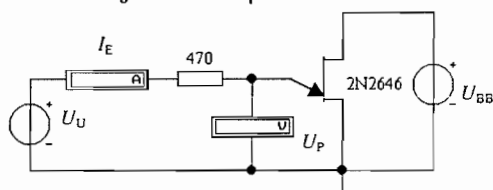
3. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona generatora impulsa (slika 9.32.) ako su vrijednosti otpora $R=56\text{ k}\Omega$ i kapaciteta $C=47\text{ nF}$.



Slika 9.32. Generator impulsa izveden s pomoću jednospojnjoga tranzistora

Pokusi

1. Određivanje faktora η



Slika 9.33. Određivanje faktora η

1.1. Napon izvora U_u namjestite na najmanju vrijednost. Napon napajanja U_{BB} namjestite na vrijednost 9V.

Spojite elemente sklopa prema slici 9.33. i priključite napon napajanja i ulazni napon.

Postupno povećavajte vrijednost ulaznoga napona sve dok jednospojni tranzistor ne provede. Pribilježite napon U_P u tablicu.

1.2. Ponovite postupak iz točke 1.1. za napone napajanja 12V i 15V.

1.3. Iz izmjerenih vrijednosti napona U_P odredite vrijednosti faktora η i unesite u tablicu.

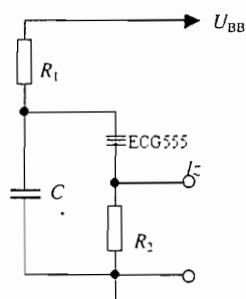
2. Generiranje impulsa s pomoću jednospojnjoga tranzistora

2.1. Spožite elemente sklopa prema slici 9.32. ($R=56k\Omega$) i priključite napon napajanja. Osciloskopom ustanovite oblike napona na kondenzatoru i izlazu sklopa.

2.2. Na temelju oscilograma napona na kondenzatoru i izlazu sklopa ustanovite vrijednosti napona U_V i U_P jednospojnjoga tranzistora i frekvenciju izlaznoga napona.

2.3. Ispitajte utjecaj vrijednosti kapaciteta C na frekvenciju izlaznoga napona. Rezultate prikažite tablicom.

PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

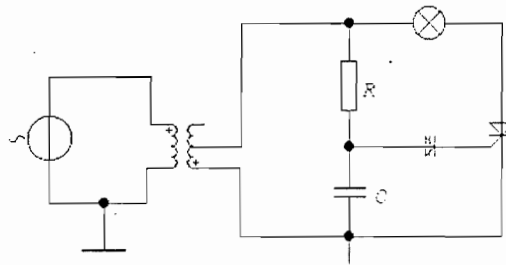


Slika 9.34. generator impulsa

1. Kako povećanje kapaciteta kondenzatora C utječe na frekvenciju izlaznoga napona sklopa sa slike 9.34.?

2. Kako smanjenje otpora otpornika R_1 utječe na frekvenciju izlaznoga napona sklopa sa slike 9.34.?

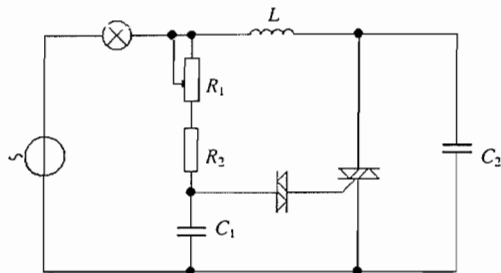
3. Objasnite kako veličina otpora R na shemi spoja za regulaciju struje (slika 9.35.) utječe na jakost struje kroz trošilo.



Slika 9.35. Spoj za regulaciju struje s pomoću SCR-a

4. Objasnite ulogu kondenzatora C_2 i zavojnice L u spoju za regulaciju struje sa slike 9.36.

5. Kako vrijednost otpora R (zbroj otpora R_1 i R_2) utječe na jakost struje kroz trošilo u spoju za regulaciju struje na slici 9.36.?



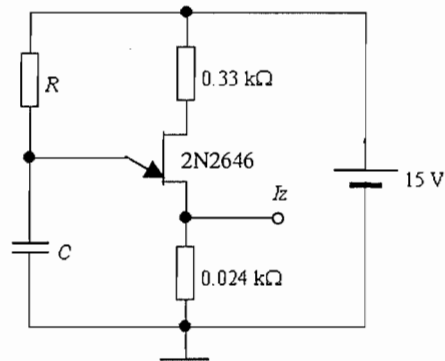
Slika 9.36. Spoj za regulaciju struje s pomoću trijaka

6. Kako frekvencija izlaznoga napona sklopa sa slike 9.37. ovisi o promjenama kapaciteta C ?

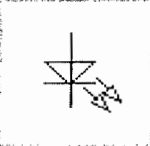
7. Ustanovite granične vrijednosti za otpor R sklopa sa slike 9.37. uz koje će sklop oscilirati.

8. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona sklopa sa slike 9.37. uz najmanju i najveću vrijednost otpora R uz koje će sklop oscilirati.

9. Nacrtajte približan izgled napona na kondenzatoru i bazi B2 jednospojnoga tranzistora za sklop sa slike 9.37.



Slika 9.37. Generator impuls s jednospojnim tranzistorom



10. OPTOELEKTRONIČKI ELEMENTI

Optoelektronički elementi su elektroničke komponente kojih je djelovanje povezano sa svjetlosnim efektom. Razvijen je niz različitih elemenata koji imaju raznovrsnu primjenu (fotografski uređaji, automatsko osvjetljavanje, upravljanje u industriji, komunikacije, daljinska osjetila u sustavima za promatranje i pozicioniranje, uređaji za fotokopiranje).

U opisu svojstava tranzistora spomenut je utjecaj svjetlosti na električna svojstva poluvodiča. Taj se utjecaj kod tranzistora otklanja izvedbom kućišta od materijala nepropusnoga za svjetlost. Kod optoelektroničkih elemenata upravo se primjenjuje taj utjecaj pa su tome prilagođena njihova kućišta.

Optoelektroničke elemente moguće je svrstati u tri osnovne skupine:

- **fotodetektor** (engl. photodetectors, njem. Lichtempfänger), elementi koji svjetlosne veličine pretvaraju u električne, odnosno koji svjetlosnu energiju pretvaraju u električnu
- **svjetlosni izvori** (engl. light sources, njem. Lichtsender) koji električnu energiju pretvaraju u svjetlosnu
- **fotovezni** ili **optovezni elementi** (engl. source-detector combinations, photo-coupled pairs, optical coupler, njem. Optokoppler), kombinacija svjetlosnoga izvora i fotodetektora.

10.1. Fotodetektor

Fotootpornik
Fotodioda
Fototranzistor
Fototiristor
Fotoelement

10.2. Svjetleće diode

Osobine svjetlećih dioda
Uporaba svjetlećih dioda

10.3. Fotovezni elementi

Osobine fotoveznih elemenata

Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 10.1. Fotodioda i fototranzistor

Vježba 10.2. Svojstva svjetleće diode

Vježba 10.3. Svojstva fotoveznog elementa

Zadaci za laboratorijske vježbe

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

10.1. FOTODETEKTORI

Jednu skupinu fotodetektora čine fotootpornici, fotodiode, fototranzistori i fototristori. Za njih je karakteristično da se pod utjecajem svjetlosti mijenjaju njihove električne značajke (otpor, struja, napon). Drugoj skupini pripadaju fotočlanci (sunčane ćelije ili sunčane baterije) koji svjetlosnu energiju pretvaraju u električnu.

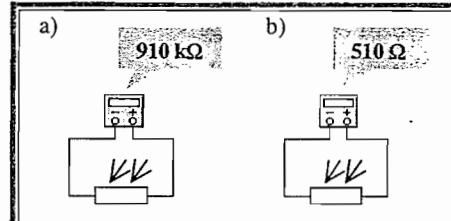
Fotootpornik



Slika 10.1. Simboli i primjer izvedbe fotootpornika

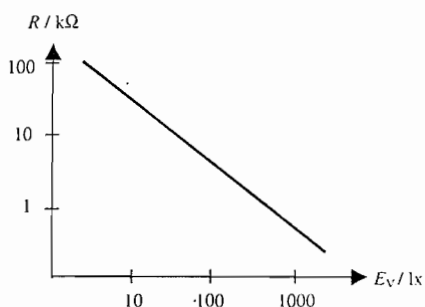
Fotootpornik (engl. light dependent resistors, skraćeno LDR, photoresistors, photoconductive cell, njem. Fotowiderstand) element je čiji električni otpor ovisi o osvjetljenosti njegove površine (slika 10.2.).

Pokus



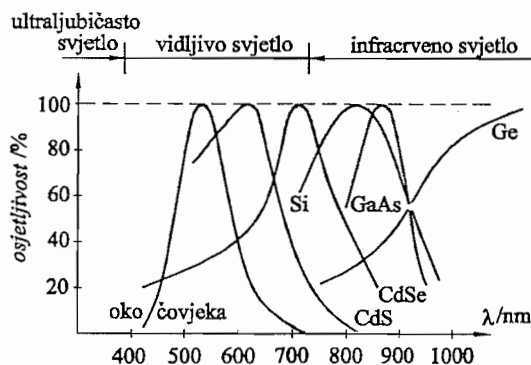
Slika 10.2. Otpor fotootpornika:
a) neosvijetljenoga, b) osvijetljenoga

U neosvijetljenu stanju otpor fotootpornika može biti od nekoliko stotina kilooma do nekoliko megaoma. Kad se fotootpornik osvijetli, poveća se broj slobodnih nosilaca naboja pa se smanjuje električni otpor. Otpor osvijetljenoga fotootpornika može biti od nekoliko stotina oma do nekoliko kilooma.



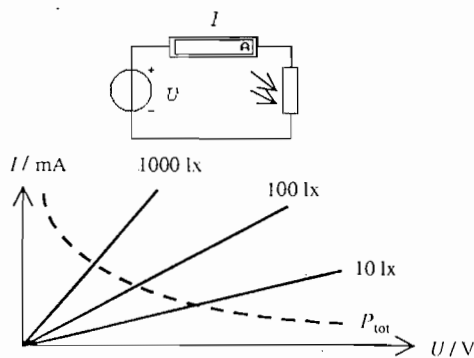
Slika 10.3. Ovisnosti otpora fotootpornika o osvjetljenosti

Za izradu fotootpornika primjenjuju se kadmijev sulfid (CdS), kadmijev selenid (CdSe), germanij (Ge), olovni sulfid (PbS), indijev antimonid (InSb) i olovni selenid (PbSe). Za fotootpornike karakteristična je **spektralna osjetljivost**, tj. valna dužina svjetlosti pri kojoj fotootpornik pokazuje najveću osjetljivost (slika 10.4.). O spektralnoj osjetljivosti ovisi područje primjene. Ako neki uređaj treba djelovati u vidljivu dijelu svjetlosnoga spektra, upotrijebit će se fotootpornici od kadmijeva sulfida ili kadmijeva selenida.



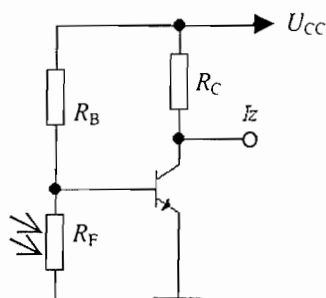
Slika 10.4. Karakteristike spektralne osjetljivosti materijala za fotootpornike

Strujno-naponska karakteristika fotootpornika je linearna (slika 10.5.). Jakost struje u strujnom krugu ovisi o vrijednosti priključenoga napona i osvjetljenosti fotootpornika. Pri uporabi fotootpornika mora se imati na umu najveće dopuštene vrijednosti napona na koji se fotootpornik smije priključiti i utrošak snage P_{tot} .



Slika 10.5. Strujno-naponska karakteristika fotootpornika

Fotootpornici se upotrebljavaju za mjerenje osvijetljenosti, naročito u fotografiji i kao sklopke u uređajima za brojenje, automatsko zatvaranje vrata, automatsko osvjetljavanje i u alarmnim uređajima. U takvim uređajima fotootpornik je ugrađen u djelilo napona baze tranzistora za uključivanje (slika 10.6.).



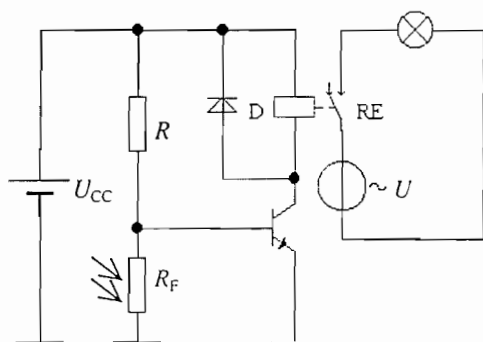
Slika 10.6. Uključivanje tranzistorske sklopke s pomoću fotootpornika

Napon između baze i emitera ovisan je o osvijetljenosti fotootpornika:

$$U_{BE} = U_{CC} \frac{R_F}{R_B + R_F}$$

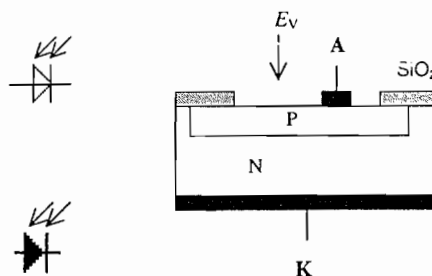
Kad je fotootpornik neosvijetljen, njegov otpor je velik. Zato je napon U_{BE} dovoljno velik da tranzistor dobiva struju baze koja ga drži u zasićenju, pa djeluje kao uključena sklopka. Kad se fotootpornik osvijetli, njegov otpor se smanji pa se smanjuje i napon U_{BE} . Tranzistor ne dobiva potrebnu struju baze i djeluje kao isključena sklopka.

Ako je sklopkom potrebno uključivati trošila veće snage, umjesto trošila R_C u kolektorski strujni krug spaja se namot releja koji svojim radnim kontaktom uključuje trošilo (slika 10.7.).



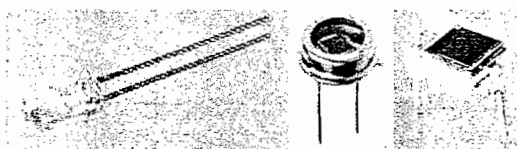
Slika 10.7. Uključivanje trošila veće snage s pomoću fotootpornika

Fotodiode



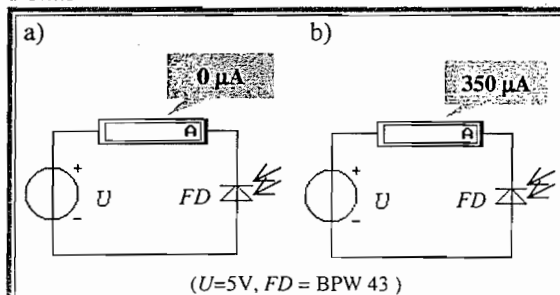
Slika 10.8. Građa i simboli fotodiode

Fotodiode je poluvodički element strukture slične ispravljačkoj diodi (slika 10.8.). Kućište ima prozorčić kroz koji se može osvijetliti PN-spoj (slika 10.9.). Za izradu fotodiode upotrebljavaju se germanij i selen, a najčešće silicij.



Slika 10.9. Primjeri izvedbi fotodiode

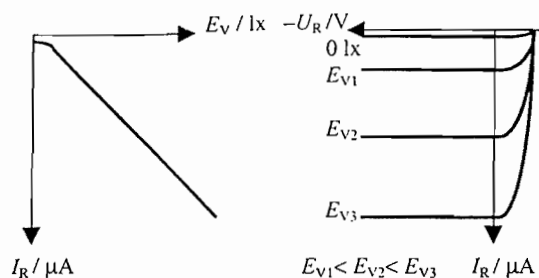
Pokus



Slika 10.10. Struja fotodiode: a) neosvijetljene, b) osvijetljene

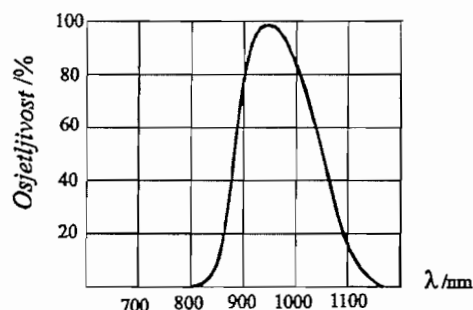
Fotodiode se u strujni krug spaja tako da je zaporno polarizirana (slika 10.10.). Kad je fotodiode neosvijetljena, njome teče vrlo mala **tamna struja** (engl. dark current, njem. Dunkelstrom) koju čini reverzna struja (struja manjinskih nosilaca naboja). Ta struja iznosi za silicijske fotodiode nekoliko nanoampera, a za germanijske nekoliko mikroampera.

Kad se fotodiode (PN-spoj) osvijetli, reverzna struja se jako povećava (pod utjecajem svjetlosne energije poraste broj slobodnih nosilaca naboja). Taj porast struje je kod germanijskih dioda oko dvadeset puta, a kod silicijskih 100-500 puta. Porast reverzne struje proporcionalan je osvijetljenosti fotodiode (slika 10.11.).

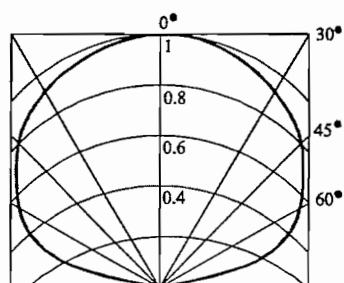


Slika 10.11. Karakteristike fotodiode

Na veličinu struje fotodiode utječu također valna dužina svjetlosti kojom je dioda osvjetljena (**relativna spektralna osjetljivost**, slika 10.12.) i kut pod kojim svjetlost pada na fotodiodu (**kutna osjetljivost**, slika 10.13.).



Slika 10.12. Relativna spektralna osjetljivost fotodiode (silicijska izvedba)

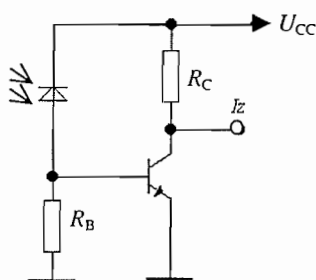


Slika 10.13. Kutna osjetljivost fotodiode (silicijska izvedba)

Za uporabu fotodiode najznačajniji su sljedeći podaci:

- dopušteni reverzni napon koji se smije priključiti na fotodiodu U_R (engl. reverse voltage V_R , njem. Sperrspannung U_R)
- dopuštena struja pri propusnoj polarizaciji I_F (engl. forward current, njem. Durchlassstrom)
- dopušteni utrošak snage P_{tot} (engl. total power dissipation, njem. Verlustleistung)
- fotoosjetljivost S (engl. sensitivity, njem. Fotoempfindlichkeit), odnos struje osvjetljene diode i osvjetljenosti koja je tu struju prouzročila, izražava se u nA/lx ili $\mu A/lx$
- valna dužina najveće osjetljivosti λ_{max} (engl. wavelength of maximale sensitivity, njem. Wellenlänge

für maximale Fotoempfindlichkeit), valna dužina za koje fotodioda ima najveću osjetljivost - iznos tamne struje (engl. dark current, njem. Dunkelstrom).

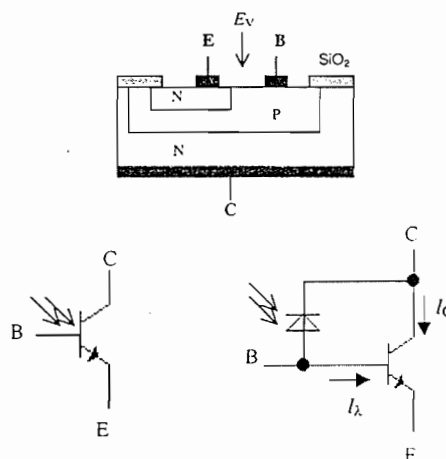


Slika 10.14. Uključivanje tranzistorske sklopke s pomoću fotodiode

Fotodioda kao i fotootpornik može poslužiti za uključivanje tranzistorske sklopke. Fotodioda se u strujni krug spaja tako da je zaporno polarizirana (slika 10.14.). Tranzistor djeluje kao uključena sklopka kad je dioda osvjetljena, jer struja kroz fotodiodu teče u bazu tranzistora. Kad je dioda neosvijetljena, smanji se njezina vodljivost pa tranzistor više ne dobiva dovoljnu struju da bi bio u zasićenju te djeluje kao isključena sklopka.

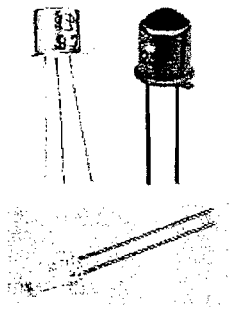
Fototranzistor

Znatno veću osjetljivost na svjetlost u usporedbi s fotodiodom imaju fototranzistori (od nekoliko $\mu A/lx$ do nekoliko stotina $\mu A/lx$). Međutim, brzina rada im je znatno manja od brzine rada fotodiode. Vrijeme uključenja, a posebno isključenja, znatno je duže, reda veličine nekoliko mikrosekundi, dok kod fotodiode može biti manje od nanosekunde.



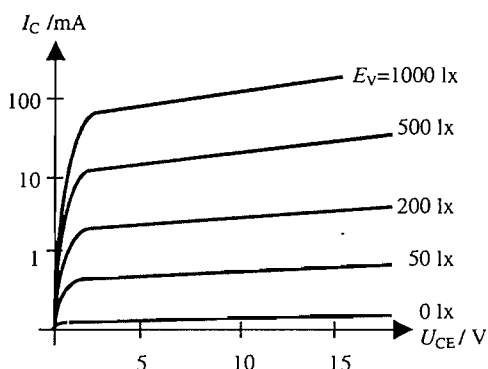
Slika 10.15. Građa, simbol i nadomjesni spoj fototranzistora

Djelovanje fototranzistora slično je djelovanju običnih bipolarnih tranzistora s tim da se struja baze stvara osvjetljavanjem PN-spoja baza-kolektor. Fototranzistor se može predložiti s pomoću spoja bipolarnog tranzistora i fotodiode spojene između kolektora i baze (slika 10.15.).



Slika 10.16. Primjeri izvedbi fototranzistora

Kad je tranzistor neosvijetljen, njime teče samo vrlo mala **tamna struja** (engl. dark current, njem. Dunkelstrom) koju čini preostala struja kolektora, reda veličine od nekoliko nA do nekoliko desetaka nA.



Slika 10.17. Strujno-naponska karakteristika fototranzistora

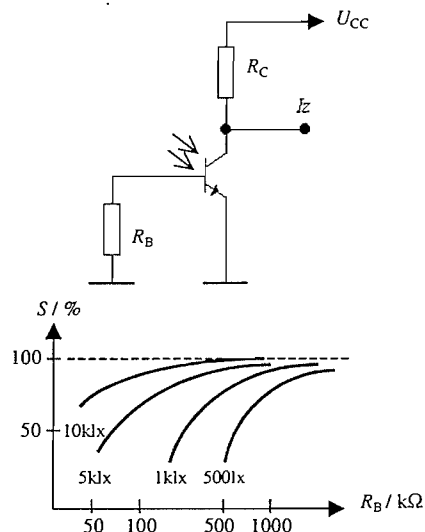
Kad se PN-spoj baza-kolektor osvjetli, poteče struja baze I_λ čija je jakost proporcionalna osvijetljenosti tranzistora pa u kolektorskomu krugu poteče struja:

$$I_C = h_{FE} I_\lambda$$

U kolektorskim se karakteristikama fototranzistora (slika 10.16.) umjesto struje baze kao parametar navodi osvijetljenost u lx ili mW/cm^2 .

Tipične značajke fototranzistora u svezi s foto-učinkom iste su kao i kod fotodiode: fotoosjetljivost, tamna struja i valna dužina najveće osjetljivosti. Uz njih je za uporabu fototranzistora nužno poznavati podatke kao i kod običnih bipolarnih tranzistora. To su dopuštene vrijednosti napona između elektroda, struje kolektora i ukupnog utroška snage.

Fototranzistori mogu biti izvedeni s tri izvoda (kolektor, emiter i baza) ili sa samo dva (kolektor i emiter). Fototranzistor s tri izvoda, kad je neosvijetljen, djeluje poput običnoga bipolarnog tranzistora. Ako se primjenjuje kao fototranzistor, spajanjem otpornika između baze i emitera može mu se podešavati fotoosjetljivost (slika 10.18.). Uz veći otpor R_B veća je osjetljivost.

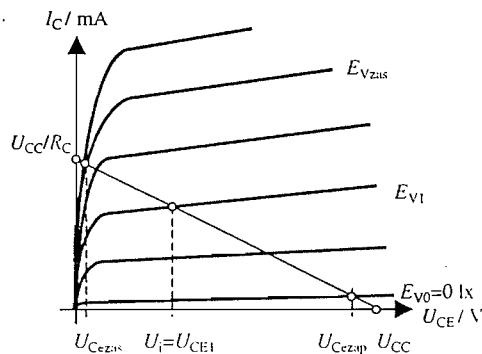


Slika 10.18. Podešavanje fotoosjetljivosti fototranzistora

Fototranzistor u spoju zajedničkog emitera djeluje kao sklop koji daje izlazni napon, odnosno struju ovisnu o osvijetljenosti (slika 10.18.). Što je veća osvijetljenost, fototranzistorom teče veća kolektorska struja pa je izlazni napon sklopa manji:

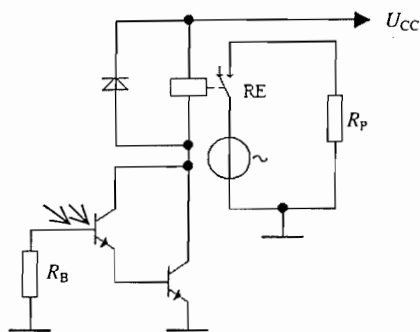
$$U_{iz} = U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$$

Iz prikaza sa slike 10.19. vidi se da osvijetljenost veća od E_{Vz} više ne utječe na povećanje struje kolektora, tj. da je fototranzistor u zasićenju. Nasuprot tome, kad je tranzistor neosvijetljen, radna točka mu je u zapiranjju. To znači da se tranzistor može upotrijebiti kao svjetlom upravljana sklopka.



Slika 10.19. Ovisnost izlaznoga napona o osvijetljenosti

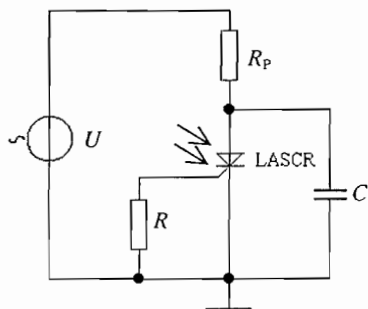
Za potrebe uključivanja trošila koja zahtijevaju veće struje (npr. elektromagneti) proizvode se fototranzistori u Darlingtonovu spoju (slika 10.20.).



10.20. Uključivanje releja s pomoću fototranzistora u Darlingtonovu spoju

Fototiristor

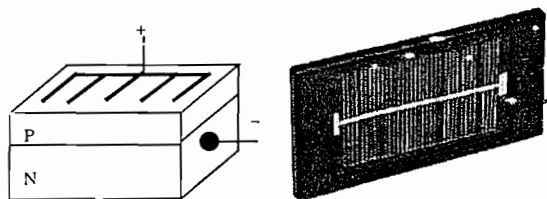
Fototiristor (engl. light activated alicon controlled rectifier, skraćeno LASCR, njem. Fotothyristor) djeluje kao običan jednosmjerni triodni tiristor (SCR) s tim da se u stanje vođenja može dovesti osvjetljenjem PN-spoja upravljačke elektrode (slika 10.21.).



Slika 10.21. Sklop s fototiristorom

Posebno je dobro svojstvo fototiristora, u usporedbi sa svim ostalim fotodetektorima, što izlazna struja nije ovisna o jakosti osvjetljenja. Svjetlošću se fototiristor samo dovodi u stanje vodljivosti, a nakon toga je anodna struja tiristora neovisna o osvjetljenosti. Stoga je, uz odgovarajuće hlađenje, moguć rad s naponima od nekoliko stotina volta i jakosti struja većim od ampera. Većina fototiristorskih spojeva zahtijeva spajanje vanjskog otpora R reda veličine $100\text{k}\Omega$ između upravljačke elektrode i katode. Njime se regulira osjetljivost fototiristora i sprječava moguća samopobuda zbog reverzne struje.

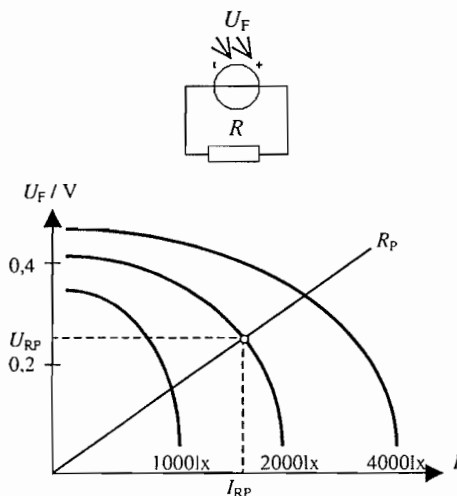
Fotoelement



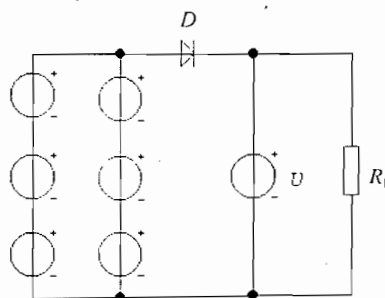
Slika 10.22. Građa i primjer izvedbe fotoelementa

Ako se nepolarizirani silicijski PN-spoj osvijetli, na njegovim priključcima javlja se napon reda veličine $0,4\text{--}0,5\text{V}$. Pod utjecajem svjetlosne energije nastaje veliki broj slobodnih nosilaca naboja, pri čemu šupljine prelaze u P-sloj, a elektroni u N-sloj. Stoga između elektroda priključenih na P-sloj i N-sloj nastaje razlika potencijala (slika 10.22.).

Ako se u vanjski krug tako izvedenoga PN-spoja priključi otporno trošilo, kroz njega će teći struja (slika 10.23.). Napon na trošilu i struja kroz njega ovise o osvjetljenosti. PN-spoj izveden kao fotogenerator naziva se **fotoelement** ili **sunčana ćelija** (engl. solar cell, njem. Solarzelle, Fotoelemente).



Slika 10.23. Struja i naponi u strujnom krugu napajanom fotoelementom

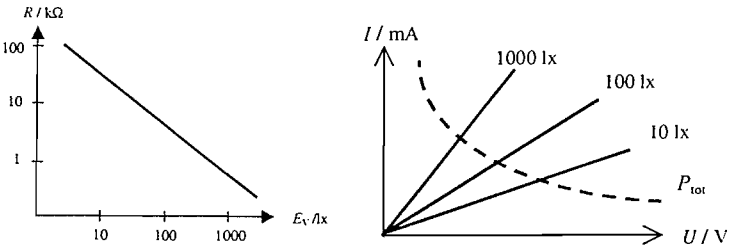
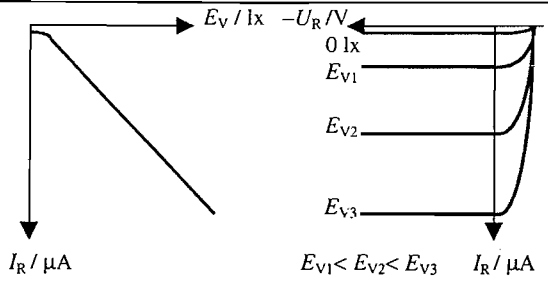
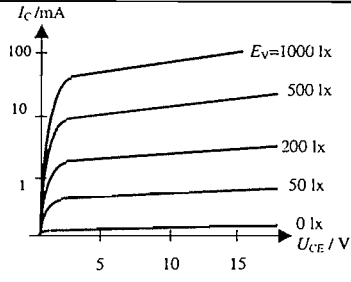
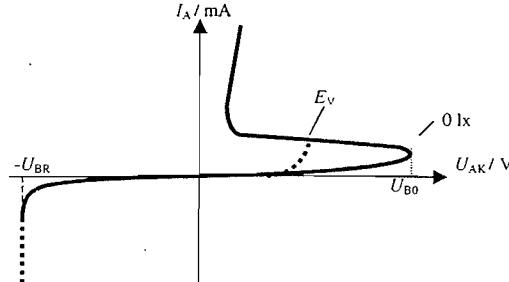
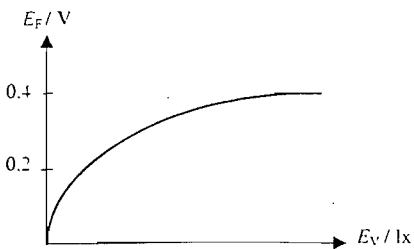


Slika 10.24. Napajanje trošila sunčanom baterijom

Vezivanjem više fotoelemenata serijski i paralelno mogu se dobiti izvori za napajanje trošila s većim naponima i strujama napajanja (slika 10.24.) koji se nazivaju sunčane baterije.

Kad su fotoelementi neosvijetljeni, trošilo dobiva struju iz akumulatora. Kad su fotoelementi osvijetljeni, njihov napon napaja trošilo i puni akumulator napona U . Dioda D sprječava izbijanje akumulatora preko fotoelemenata za vrijeme dok je sunčana baterija neosvijetljena.

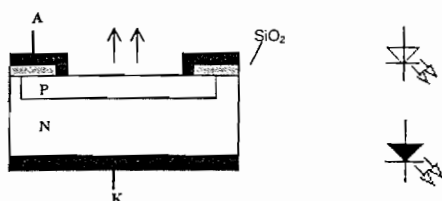
Tablica 10.1. Pregled fotodetektora

Komponenta	Simbol	Karakteristike komponenta
fotootpornik	 	
photodiode	 	
phototransistor		
phototristor	 	
photoelement		

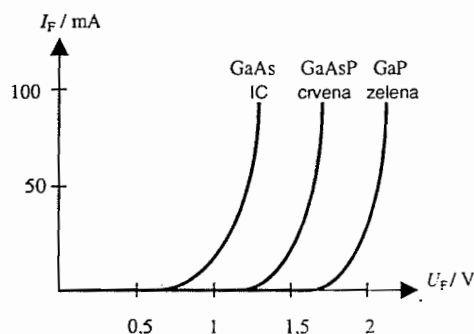
10.2. SVIJETLEĆE DIODE

Osobine svijetlećih dioda

Svijetleće diode (engl. light emitting diode, skraćeno LED, njem. Leuchtstoffdiode) su poluvodički svjetlosni izvori. Propusno polarizirana dioda zrači svjetlost (slika 10.25.).

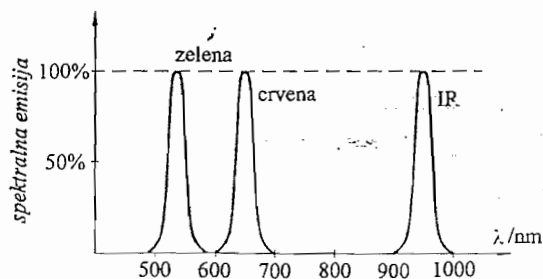


Slika 10.25. Građa i simboli svijetleće diode



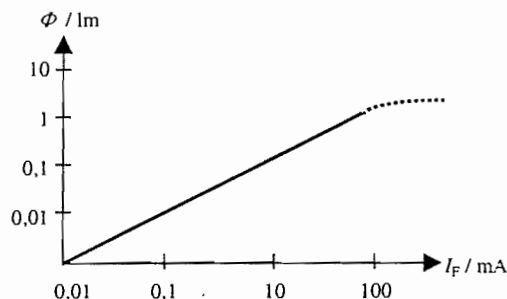
Slika 10.26. Strujno-naponska karakteristika svijetleće diode

Za izradu svijetlećih dioda primjenjuju se spojevi galija s arsenom i fosforom. Ovisno o sastavu, svijetleće diode mogu dati infracrveno, crveno, žuto ili zeleno svjetlo (slika 10.27.).

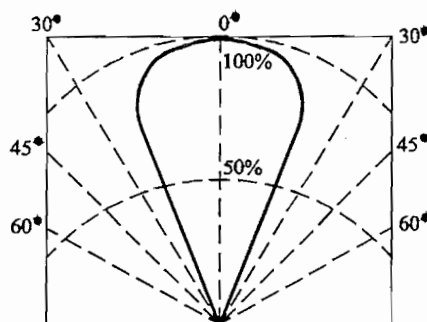


Slika 10.27. Relativna spektralna emisija svijetlećih dioda

Intenzitet svjetlosti ovisi o jakosti struje koja prolazi kroz diodu (slika 10.28.) i smjeru iz kojega se dioda promatra (slika 10.29.).



Slika 10.28. Ovisnost intenziteta svjetlosti svijetleće diode o jakosti struje kroz diodu



Slika 10.29. Usmjerenost svjetla svijetleće diode

Za uporabu svijetlećih dioda važno je poznavati sljedeće podatke:

- dopušteni reverzni napon U_R (engl. reverse voltage, njem. Sperrspannung) koji iznosi nekoliko volta
- dopuštena struja pri propusnoj polarizaciji I_F (engl. forward DC current, njem. Durchlassstrom) koja iznosi od nekoliko desetaka do stotinu miliampera
- dopušteni utrošak snage P_{tot} (engl. power dissipation, njem. Verlustleistung) reda veličine 100mW
- jakost svjetlosti I_O ili I_V (engl. axial luminous intensity, njem. Lichtstarke) izražena u kandelama (cd) uz određenu struju propusne polarizacije ili svjetlosni tok izražen u milivatima, odnosno lumenima (lm)
- pad napona na diodi pri propusnoj polarizaciji U_F (engl. forward voltage, njem. Durchlassspannung) čije se vrijednosti kreću u rasponu 1,3-2V ovisno o struji kroz diodu i boji svjetlosti diode
- valna dužina za svjetlost pri najvećoj emisiji λ_{max} (engl. wavelength, njem. Wellenlänge des emittierten Lichtes)
- vrijeme uključivanja i isključivanja (kreće se u rasponu od nekoliko desetaka do nekoliko stotina nanosekundi).

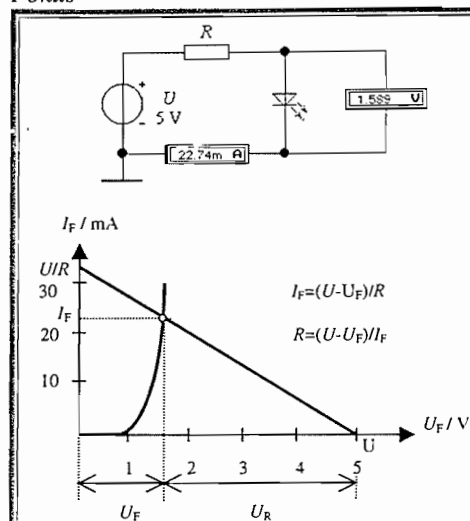


Slika 10.30. Primjeri izvedbi svijetlećih dioda

Uporaba svijetlećih dioda

Svijetleće diode upotrebljavaju se kao signalni i kontrolni elementi te izvori svjetlosti u različitim uređajima. Osnovni spoj svijetleće diode pokazan je na slici 10.31. Otpornik R sprječava porast struje kroz diodu iznad dopuštene vrijednosti. U usporedbi sa žaruljicama znatno su boljih svojstava, osobito s obzirom na vijek trajanja, mogućnost rada s malim naponima, mali utrošak snage i otpornost na udare i vibracije. Nedostatak im je mali dopušteni reverzni napon, svega nekoliko volta.

Pokus



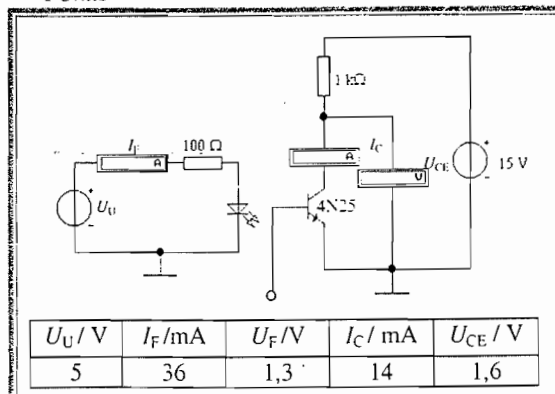
Slika 10.31. Spoj svijetleće diode

10.3. FOTOVEZNI ELEMENTI

Fotovezni elementi (engl. optocoupler, optically-coupled-isolator, njem. optoelektronische Koppellemente, Optokoppler) kombinacija su svjetlosnoga izvora (svijetleća dioda) i fotodetektora (najčešće fotodioda ili fototranzistor) u jednome kućištu (slika 10.32.). Primjenjuju se kad je u nekom uređaju potrebno galvanski odvojiti dva strujna kruga. U tu svrhu fotovezni elementi sve više potiskuju primjenu transformatora i releja. Dobre osobine fotoveznih elemenata jesu vrlo veliki otpor između ulaznoga i izlaznoga kruga, frekvencijsko područje rada do nekoliko stotina kiloherca, nema mehaničkih kontakata, male dimenzije, otpornost na udare i vibracije, vrlo dugi vijek trajanja, mogućnost izravnoga spoja s integriranim digitalnim sklopovima, visoki izolacijski napon između ulaznoga i izlaznoga dijela. Primjenjuju se za nadzor visokonaponskih izvora napajanja, u sklopovima za prijelaz s integriranih digitalnih na druge sklopove, za nadzor brzine vrtnje itd.

Osobine fotoveznih elemenata

Pokus

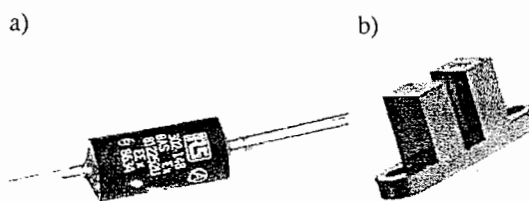


Slika 10.32. Djelovanje fotoveznog elementa

Kad je ulazni napon $U_U = 5V$, svijetleća dioda fotoveznog elementa osvjetljava fototranzistor. Tranzistorom teče struja kolektora I_C , a napon U_{CE} je mali (tranzistor u zasićenju). Kad je ulazni napon $U_U = 0V$, svijetleća dioda fotoveznog elementa ne osvjetljava fototranzistor. Tranzistor je u zapiranju pa je napon U_{CE} praktično jednak naponu napajanja tranzistorske sklopke.

Za uporabu fotoveznih elemenata, osim već spomenutih podataka za svijetleće diode i fototranzistore, značajan podatak je **izolacijski napon** (engl. isolation voltage, njem. Isolationsspannung). To je najveća dopuštena razlika napona između ulaznoga i izlaznoga dijela fotoveznog elementa. Kreće se u rasponu od 0,5 pa do nekoliko kilovolta.

Kućišta fotoveznih elemenata mogu biti izvedena na dva osnovna načina. Svjetlosni izvor i fotodetektor mogu biti u zajedničkomu dijelu kućišta (slika 10.33.a) ili su svaki u posebnu dijelu između kojih se može postaviti mehanička prepreka koja sprječava ili dopušta prolaz svjetlosti od izvora do fotodetektora (slika 10.33.b).



Slika 10.33. Primjeri izvedbi kućišta fotoveznih elemenata

Tablica 10.2. Pregled fotoveznih elemenata

Električna shema	izlazni napon V	izlazna struja mA	$t_{uk}/\mu s$ $t_{isk}/\mu s$
	20	20	0,025-1
	40	50	3 3
	25	200	125
	200	1000	1
	600	100	
	30	100	
	16	50	0,015-0,09 0,01-0,05

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

VJEŽBA 10.1. FOTODIODA I FOTOTRANZISTOR

Zadatak

Proširiti osnovna znanja o fotodiodi i fototranzistoru upoznavanjem tvorničkih podataka, nekih oblika izvedbi i mogućnosti primjene.

Instrumenti i pribor

- fotodioda BPW43
- otpornici $1\text{k}\Omega$, $1,5\text{k}\Omega$, $4,7\text{k}\Omega$, $10\text{k}\Omega$ i $100\text{k}\Omega$
- tranzistor 2N1711
- fototranzistor BPW40
- izvor napajnja 15V
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument.

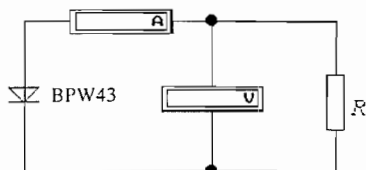
Priprema

1. Proučite tvorničke podatke fotodiode BPW43. Navedite valnu dužinu najveće osjetljivosti i dopuštene vrijednosti zapornoga napona i utroška snage.
2. Proučite tvorničke podatke fototranzistora BPW40. Navedite valnu dužinu najveće osjetljivosti i dopuštene vrijednosti napona U_{CE} i struje kolektora I_C .

Pokusi

1. Osnovna svojstva fotodiode

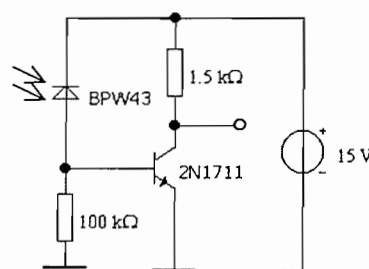
- 1.1. Izmjerite otpor propusno polarizirane fotodiode u osvijetljenu i neosvijetljenu stanju.
- 1.2. Izmjerite otpor zaporno polarizirane fotodiode u osvijetljenu i neosvijetljenu stanju.



Slika 10.34. Mjerenje pada napona i jakosti struje kroz otpornik priključen na fotodiodu

1.3. Na osvijetljenu fotodiodu priključite otpornik R prema shemi sa slike 10.34. Izmjerite jakost struje koja teče strujnim krugom i napon na otporniku za vrijednosti R : $10\text{k}\Omega$, $4,7\text{k}\Omega$ i $1\text{k}\Omega$. Rezultate mjerenja prikažite tablicom. Kako se u ovom slučaju ponaša dioda?

2. Uključivanje tranzistorske sklopke s pomoću fotodiode

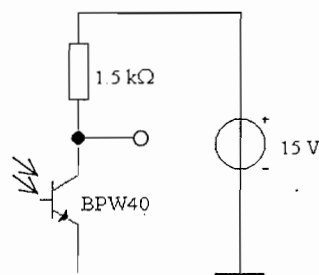


Slika 10.35. Uključivanje tranzistorske sklopke s pomoću fotodiode

2.1. Spojite elemente sklopa prema slici 10.35. i izmjerite napone U_{BE} i U_{CE} , te struje I_B i I_C kad je fotodioda osvijetljena i kad je neosvijetljena. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

2.2. U kojemu se slučaju tranzistor može smatrati uključenom, a u kojemu slučaju isključenom sklopkom?

3. Fototranzistor kao sklopka



Slika 10.36. Fototranzistor kao sklopka

3.1. Spojite elemente sklopa prema shemi sa slike 10.36. i izmjerite struje I_C i napon U_{CE} kad je fototranzistor osvijetljen i kad je neosvijetljen. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

3.2. Kada se fototranzistor može smatrati uključenom a kada isključenom sklopkom?

VJEŽBA 10.2. SVOJSTVA SVIJETLEĆE DIODE

Zadatak

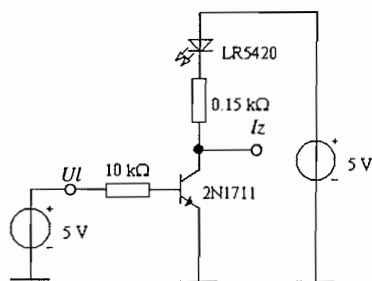
Proširiti osnovna znanja o svijetlećoj diodi upoznavanjem tvorničkih podataka, nekih oblika izvedbi i mogućnosti primjene.

Instrumenti i pribor

- svijetleća dioda LR5420 (LG5410)
- otpornik 150Ω i $10k\Omega$
- tranzistor 2N1711
- izvor napajanja 5V, 1A
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument.

Priprema

1. Proučite tvorničke podatke svijetleće diode LR5420. Navedite iznose uobičajenih vrijednosti za dopušteni iznos reverznoga napona i struje pri propusnoj polarizaciji, utroška snage, te pada napona na diodi pri propusnoj polarizaciji i valnu dužinu za svjetlost pri najvećoj emisiji.



Slika 10.37. Indikacija stanja tranzistorske sklopke s pomoću svijetleće diode

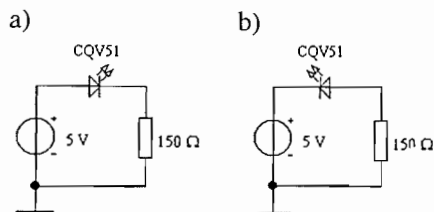
2. Izračunajte približan iznos jakosti struje kroz svijetleću diodu kad je na ulazu tranzistorske sklopke (slika 10.37.) 0V i 5V.

Pokusi

1. Osnovna svojstva svijetleće diode

1.2. Za spoj diode prema slici 10.38.a izmjerite struju kroz svijetleću diodu, napon na diodi i otporniku R . Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

1.2. Za spoj diode prema slici 10.38.b izmjerite struju kroz svijetleću diodu, napon na diodi i otporniku R . Rezultate mjerenja prikažite tablicom.



Slika 10.38. Spoj propusno i zaporno polarizirane diode

2. Indikacija stanja tranzistorske sklopke s pomoću svijetleće diode

1. Izmjerite jakost struje kroz svijetleću diodu i padove napona na svijetlećoj diodi, otporniku 150Ω i tranzistoru (slika 10.37.) kad je ulazni napon sklopke 0V.

2. Izmjerite jakost struje kroz svijetleću diodu i padove napona na svijetlećoj diodi, otporniku 150Ω i tranzistoru (slika 10.37.) kad je ulazni napon sklopke 5V.

VJEŽBA 10.3. SVOJSTVA FOTOVEZNOG ELEMENTA

Zadatak

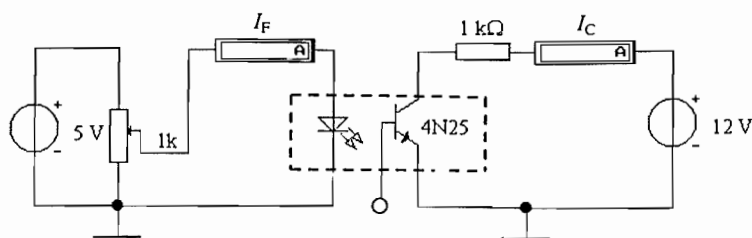
Proširiti osnovna znanja o fotoveznom elementu upoznavanjem tvorničkih podataka, nekih oblika izvedbi i mogućnosti primjene.

Pribor i instrumenti

- fotovezni element 4N25
- otpornik 100Ω i $1k\Omega$
- promjenljivi otpornik $1k\Omega$
- izvor napajanja 15V, 1A
- izvor napajanja 5V, 1A
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument (4 komada)
- funkcijski generator
- osciloskop,

Priprema

1. Proučite tvorničke podatke fotoveznog elementa 4N25. Navedite iznose karakterističnih podataka za izolacijski napon, dopuštenu struju propusne polarizacije, dopušteni reverzni napon i dopušteni utrošak snage svijetleće diode, dopušteni napon U_{CE} , dopuštenu struju kolektora i dopušteni utrošak snage fototranzistora.



Slika 10.39. Spoj za snimanje prijenosne karakteristike fotoveznog elementa

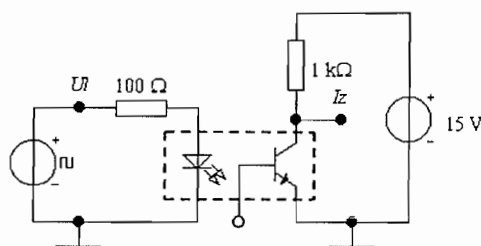
Pokusi

plitude 5V. Osciloskopom ustanovite oblike ulaznoga i izlaznoga napona.

1. Prijenosna karakteristika fotoveznog elementa

1.1. Spojite elemente prema shemi sa slike 10.39. i snimite prijenosnu karakteristiku fotoveznog elementa. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

1.2. Na temelju izmjerenih vrijednosti nacrtajte prijenosnu karakteristiku fotoveznog elementa.



Slika 10.40. Sklop za ispitivanje fotoveznog elementa

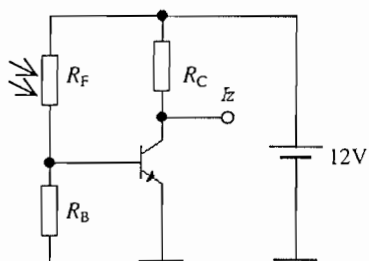
2. Dinamička svojstva fotoveznog elementa

2.1. Na ulaz sklopa prema slici 10.40. priključite izvor pravokutnih impulsa frekvencije 1kHz i am-

plitude 5V. Osciloskopom ustanovite utjecaj promjene frekvencije ulaznoga napona na oblik izlaznoga napona.

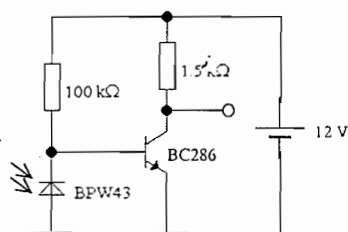
PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Koliki će biti napon na izlazu tranzistorske sklopke sa slike 10.41. kad je fotootpornik neosvijetljen, a koliki kada je osvijetljen?



Slika 10.41. Upravljanje tranzistorskom sklopkom s pomoću fotootpornika

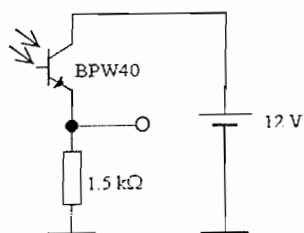
3. Kada će tranzistor u sklopu prema slici 10.42. djelovati kao uključena, a kada kao isključena sklopka?



Slika 10.42. Tranzistorska sklopka upravljana fotodiodom

2. Po čemu su fotodioda i ispravljačka dioda slične, a po čemu se razlikuju?

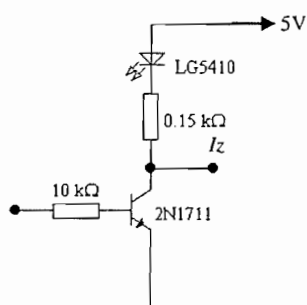
4. Koliki će biti napon na izlazu tranzistorske sklopke sa slike 10.43. kad je fototranzistor neosvijetljen, a koliki kad je osvijetljen?



Slika 10.43. Fototranzistor kao sklopka

5. Uz koji uvjet svijetli svijetleća dioda u sklopu sa slike 10.44.?

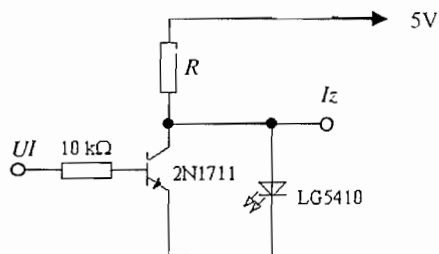
6. Izračunajte potrebnu vrijednost otpora R u spoju sa slike 10.44.



Slika 10.44. Indikacija stanja tranzistorske sklopke

7. Uz koji uvjet svijetli svijetleća dioda u sklopu sa slike 10.45.?

8. Izračunajte potrebnu vrijednost otpora R u spoju sa slike 10.45.



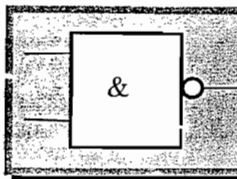
Slika 10.45. Indikacija stanja tranzistorske sklopke

9. Koje su prednosti fotoveznih elemenata pred relejom?

10. Koji sve elementi mogu biti u izlaznom dijelu fotoveznog elementa?

11. Koji su najvažniji podaci za fotovezne elemente?

12. Što pokazuje prijenosna karakteristika fotoveznog elementa?



11. OSNOVNI DIGITALNI SKLOPOVI

Ovo je poglavlje uvod u digitalne sklopove. To su sklopovi koji obrađuju digitalne signale. Naziv digitalni signali i digitalni sklopovi dolazi od engleske riječi digit (znamenka), od koje je izvedena riječ digital što znači numerički, odnosno brojčani.

Poglavlje ima tri dijela. U prvom dijelu opisani su digitalni signali te binarni i heksadecimalni brojevni sustav čije poznavanje je nužno za razumijevanje rada digitalnih sklopova. U drugom dijelu opisana su svojstva i osnovne primjene najjednostavnijih digitalnih sklopova, tj. osnovnih logičkih sklopova. U posljednjem dijelu dan je prikaz izvedbi i svojstava skupina integriranih digitalnih sklopova. Opis je ograničen na dvije najrasprostranjenije skupine, TTL i CMOS.

11.1. Analogni i digitalni signali

Analogni i digitalni signali

Decimalni brojevni sustav

Binarni brojevni sustav

Pretvorba brojeva između binarnog i decimalnog brojevnog sustava

Heksadecimalni brojevni sustav

Pretvorba brojeva između heksadecimalnog i drugih brojevnih sustava

Kodovi

11.2. Osnovni logički sklopovi

Sklop I

Sklop ILI

Sklop NE

Sklop NI

Sklop NILI

Integrirani logički sklopovi

Međusobno povezivanje osnovnih logičkih sklopova

11.3. Skupine integriranih digitalnih sklopova

Karakteristične veličine integriranih digitalnih sklopova

Sklopovi skupine TTL

Karakteristične veličine sklopova skupine TTL

Sklopovi s otvorenim kolektorom

Sklopovi skupine CMOS

Karakteristične veličine sklopova skupine CMOS

Sklopovi s tri izlazna stanja

Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 11.1. Svojstva integriranih logičkih sklopova

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

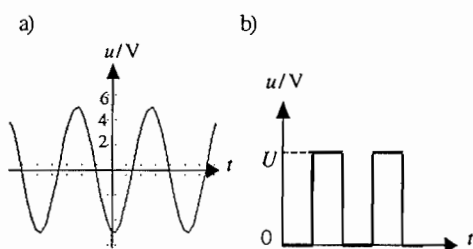
11.1. ANALOGNI I DIGITALNI SIGNALI

Analogni i digitalni signali

Sklopovi razmatrani u prethodnim poglavljima nazivaju se analognima jer su signali na njihovim ulazima i izlazima analogni. Osnovna značajka analognoga signala je njegova neprekinutost (kontinuiranost).

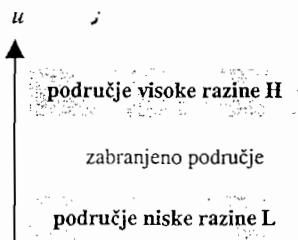
Kod digitalnih signala podatak čine kombinacije diskretnih stanja promatrane veličine. Ako se radi o naponu, onda digitalni signal može imati jednu od samo dvije moguće vrijednosti. Te vrijednosti su najčešće 0V i U/V.

Na slici 11.1.a prikazan je sinusoidni napon amplitude 6V. Digitalni prikaz amplitude toga napona pokazan je na slici 11.1.b.



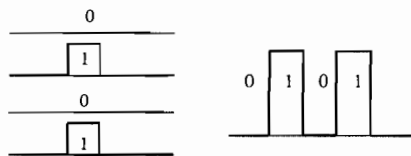
Slika 11.1. Analogni i digitalni signal

Dakle, vidi se da u digitalnomu signalu napon može poprimiti jednu od svega dvije moguće vrijednosti. To su vrijednosti visoke razine H (od engl. high) i vrijednost niske razine L (od engl. low). Vrijednosti napona između razina H i L signal ne može imati. Naponi niske i visoke razine mogu odstupati od nominalnih vrijednosti pa se govori o područjima niske i visoke razine (slika 11.2.).



Slika 11.2. Područja napona u digitalnim sklopovima

Ako se naponu niske razine dodijeli znamenka 0, a naponu visoke razine znamenka 1, digitalni signali mogu se prikazati pomoću znamenki **binarnoga brojevnoga sustava**. Stoga se takvi signali nazivaju binarnima. Binarni signali mogu biti paralelni i serijski (slika 11.3.).



Slika 11.3. Binarni signali

Za razumijevanje rada digitalnih sklopova potrebno je poznavati binarni brojevni sustav na kojem se temelji prikaz digitalnih podataka.

Decimalni brojevni sustav

Decimalni brojevni sustav u svakodnevnoj je uporabi. Razmatranje o decimalnom brojevnom sustavu treba olakšati pristup brojevnim sustavima koji se upotrebljavaju u digitalnoj elektronici.

U decimalnom brojevnom sustavu ima deset znamenaka: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 i 9, što znači da se svi brojevi od nula do devet mogu prikazati jednom znamenkom. To su jednoznamenakasti brojevi. Najveći broj koji se može napisati jednom znamenkom jest devet. Za broj deset nema znamenke pa se taj broj piše kombinacijom dviju znamenaka 10. S pomoću dviju znamenaka mogu se napisati svi brojevi od deset do devedeset devet. To su dvoznamenkasti brojevi. Za veće brojeve potrebne su tri ili više znamenaka. Općenito se može reći da najveći broj koji se može napisati s n znamenaka iznosi $10^n - 1$. Položaj znamenke u bilo kojem broju naziva se **brojno mjesto**. Svako brojno mjesto ima svoju vrijednost, odnosno težinu. **Težine brojnih mjesta** u decimalnom brojevnom sustavu mogu se prikazati kao potencije broja deset (broj znamenaka u sustavu). Zato se kaže da je deset osnovica ili baza decimalnoga brojevnog sustava. Najniže cjelobrojno mjesto ima težinu $10^0 = 1$. Težine viših brojnih mjesta iznose $10^1 = 10$, $10^2 = 100$, $10^3 = 1000$ itd. Težine mjesta desno od decimalnoga zareza iznose 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} itd.

Primjer 11.1.

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l} 10^2 = 100 \\ 10^1 = 10 \\ 10^0 = 1 \\ 10^{-1} = 0,1 \end{array} \right\} \text{težine mjesta} \\
 432,5 = 4 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 2 \cdot 10^0 + 5 \cdot 10^{-1} \\
 \left. \begin{array}{l} \text{znamenka najmanje težine mjesta} \\ \text{decimalni zarez, točka} \\ \text{znamenka najveće težine mjesta} \end{array} \right\}
 \end{array}$$

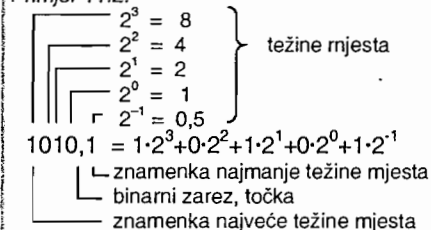
U decimalnome brojevnom sustavu brojevi se prikazuju nizom znamenki koje označavaju koeficijente kojima se množi baza sustava dignuta na potenciju pripadnoga brojnog mjesta. Pri pisanju brojeva pišu se samo koeficijenti, a težine mjesta određuju se prema položaju koeficijenata.

Binarni brojevni sustav

Binarni brojevni sustav ima samo dvije znamenke: 0 i 1. Zato je već za pisanje broja dva potrebno koristiti se kombinacijom dviju binarnih znamenaka. Stoga se broj dva u binarnom sustavu piše 10. Najveći dvoznamenkasti broj u binarnome brojevnom sustavu je 11, što odgovara decimalnom broju tri. Najveći broj koji se uopće može napisati s n znamenaka iznosi $2^n - 1$.

Osnovica binarnoga brojevnog sustava je dva. Prema tome, težine cjelobrojnih mjesta u binarnome brojevnom sustavu su $2^0=1$, $2^1=2$, $2^2=4$, $2^3=8$ itd. Brojna mjesta desno od binarnog zareza imaju težine 2^{-1} , 2^{-2} , 2^{-3} itd. Za znamenke binarnoga brojevnog sustava (binarne znamenke) vrlo često se upotrebljava naziv **bit** (skraćeno od engl. binary digit).

Primjer 11.2.



Dakle i u binarnome brojevnom sustavu brojevi se prikazuju nizom znamenaka koje označavaju koeficijente kojima se množi baza sustava dignuta na potenciju koja odgovara brojnom mjestu. Pri pisanju brojeva pišu se samo koeficijenti, a težine mjesta određuju se prema položaju koeficijenata.

Tablica 11.1. Prikaz binarnih brojeva od nula do petnaest

Binarni broj	Decimalni broj	Binarni broj	Decimalni broj
0	0	1000	8
1	1	1001	9
10	2	1010	10
11	3	1011	11
100	4	1100	12
101	5	1101	13
110	6	1110	14
111	7	1111	15

Pretvorba brojeva između binarnog i decimalnog brojevnog sustava

Broj iz binarnog brojevnog sustava pretvara se u odgovarajući broj decimalnoga sustava tako da se svaka znamenka binarnog broja pomnoži sa svojom težinom mjesta i tako dobiveni iznosi zbroje.

Primjer 11.3.

Pretvorba binarnog broja 1011011 u decimalni.

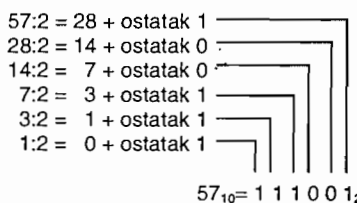
$$101101_2 = 1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$$

$$= 1 \cdot 32 + 1 \cdot 8 + 1 \cdot 4 + 1 \cdot 1 = 45_{10}$$

Jedan od načina pretvorbe decimalnog broja u binarni provodi se uzastopnim dijeljenjem decimalnog broja s 2. Ako se kod dijeljenja dobije ostatak, znamenka binarnog broja je 1, a ako ostatka nema, znamenka je 0. Prvo dijeljenje daje znamenku najnižega brojnog mjesta.

Primjer 11.4.

Pretvorba decimalnog broja 57 u binarni.



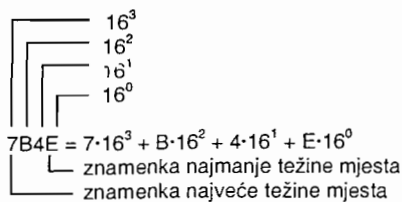
Heksadecimalni brojevni sustav

Osnovica **heksadecimalnoga brojevnog sustava** je 16, odnosno sustav ima 16 znamenaka. Za znamenke od nula do devet koriste se znamenke decimalnoga brojevnog sustava. Kako za znamenke deset do petnaest ne postoje simboli, koristi se šest slova abecede: A, B, C, D, E, i F.

Tablica 11.2. Znamenke heksadecimalnoga brojevnog sustava

Heksa-decimalna znamenka	Decimalni broj	Heksa-decimalna znamenka	Decimalni broj
0	0	8	8
1	1	9	9
2	2	A	10
3	3	B	11
4	4	C	12
5	5	D	13
6	6	E	14
7	7	F	15

Primjer 11.5.



Heksadecimalni brojevi sustav upotrebljava se vrlo često u prikazivanju rada digitalnih uređaja zbog jednostavne pretvorbe u binarni brojevi sustav i obratno.

Pretvorba brojeva između heksadecimalnog i drugih brojevnih sustava

Brojevi heksadecimalnoga brojevnog sustava pretvaraju se u decimalne brojeve tako da se vrijednost svake znamenke množi s težinom brojnog mjesta i dobiveni iznosi zbroje.

Primjer 11.6.

Pretvorba heksadecimalnog broja 1A2F u decimalni.

$$1A2E_{16} = 1 \cdot 16^3 + A \cdot 16^2 + 2 \cdot 16^1 + E \cdot 16^0$$

$$= 1 \cdot 4096 + 10 \cdot 256 + 2 \cdot 16 + 14 \cdot 1 = 6702_{10}$$

Pretvorba decimalnog broja u heksadecimalni može se provesti istim postupkom kao i u prethodno spomenute brojne sustave, dakle uzastopnim dijeljenjem decimalnog broja sa 16, tj. bazom sustava. Ostatak dijeljenja označava heksadecimalne znamenke.

Primjer 11.7.

Pretvorba decimalnog broja 217 u heksadecimalni.

$$217:16 = 13 + \text{ostatak } 9$$

$$13:16 = 0 + \text{ostatak } 13$$

$$217_{10} = D9_{16}$$

Broj u heksadecimalnom sustavu pretvara se u binarni broj tako da se svaka znamenka heksadecimalnoga brojevnog sustava nadomjesti odgovarajućim binarnim brojem, tj. četverobitnom kombinacijom.

Tablica 11.3. Znamenke heksadecimalnoga brojevnoga sustava i njihovi binarni ekvivalenti

Heksa- decimalna znamenka	Binarni ekvivalent	Heksa- decimalna znamenka	Binarni ekvivalent
0	0000	8	1000
1	0001	9	1001
2	0010	A	1010
3	0011	B	1011
4	0100	C	1100
5	0101	D	1101
6	0110	E	1110
7	0111	F	1111

Primjer 11.8.

Pretvorba heksadecimalnog broja A3F u binarni.

$$A3E_{16} = 1010 \ 0011 \ 1110$$

$$= 101000111110_2$$

Za pretvorbu binarnog broja u heksadecimalni potrebno je binarni broj razdijeliti u skupine od četiri binarne znamenke počevši od najnižeg mjesta. Svaka skupina binarnih znamenaka predočava se ekvivalentnom heksadecimalnom znamenkom.

Primjer 11.9.

Pretvorba binarnog broja 110001101011 u heksadecimalni.

$$110001101011_2 = 1100 \ 0110 \ 1011 = C6B_{16}$$

Kodovi

U digitalnim uređajima podaci se prikazuju s pomoću binarnih znamenaka. Da bi se uz brojeve mogli prikazivati i znakovi i slova, upotrebljavaju se kodovi. Kod je određena kombinacija binarnih znamenaka koja se dodjeljuje decimalnoj znamenki, slovu ili znaku.

Ako se kodiranjem želi prikazati znamenke decimalnoga brojevnog sustava, potrebno je uporabiti kombinacije od najmanje četiri bita. S četiri bita može se dobiti $2^4=16$ različitih kombinacija. Kako je za prikaz znamenaka decimalnoga brojevnog sustava potrebno svega 10 kombinacija, brojni su načini za kodiranje decimalnih znamenaka. Za primjer uzet je BCD kod.

11.2. OSNOVNI LOGIČKI SKLOPOVI

Digitalni sklopovi mogu imati jedan ili više ulaza i izlaza. Naponi na ulazima i izlazima mogu imati vrijednosti unutar područja koja odgovaraju binarnim znamenkama 0 ili 1. Stanje napona na izlazima sklopova vezano je za ispunjenje određenih uvjeta na ulazima. Između stanja na ulazima i stanja izlaza postoji određena logička veza, odnosno digitalni sklopovi obavljaju logičke funkcije ili operacije. Stoga se digitalni sklopovi nazivaju i logički sklopovi.

Logički sklopovi kod kojih stanje izlaza ovisi o trenutnom stanju ulaza nazivaju se kombinacijski logički sklopovi. Sklopovi kod kojih stanje izlaza ovisi o stanju ulaza i o prethodnom stanju na izlazu nazivaju se slijedni (sekvencijski) sklopovi.

U shemama digitalnih uređaja digitalni sklopovi prikazuju se odgovarajućim simbolima. Vrlo često se upotrebljavaju simboli prema američkim normama (MIL-ST-806B 1962. Graphic Symbols for Logic Diagrams, Department of Defense, USA). Od 1984. godine uvode se u uporabu simboli prema IEC (International Electrotechnical Commission).

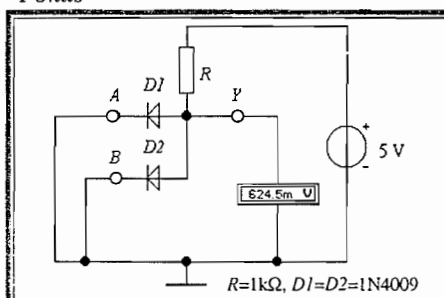
Logička svojstva digitalnih sklopova mogu se iskazati tablicama stanja (engl. truth table). Tablica stanja je pregledan prikaz svih kombinacija ulaznih binarnih veličina i odgovarajućih stanja na izlazu. U tvorničkim podacima proizvođača digitalnih sklopova i uređaja često se umjesto oznaka 0 i 1 upotrebljavaju oznake L (od engl. low=nisko) i H (od engl. high=visoko).

Engleski matematičar George Boole razvio je u 19. stoljeću logičku algebru (naziva se i Booleova algebra) koja se upotrebljava za analizu i sintezu logičkih sklopova. Tako se logička svojstva digitalnih sklopova mogu iskazati i algebarskim ili logičkim jednadžbama.

U ovom poglavlju razmatraju se osnovni logički sklopovi, njihovo međusobno povezivanje u svrhu realizacije složenijih logičkih operacija i logička algebra.

Sklop I

Pokus

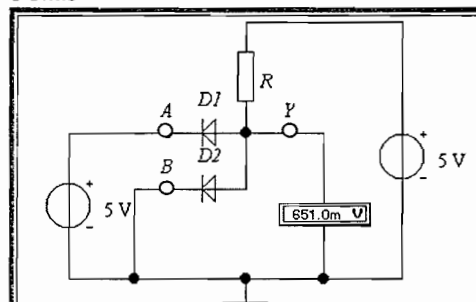


Slika 11.4. Djelovanje sklopa I (na svim ulazima stanje 0)

Ako je na oba ulaza napon 0V (slika 11.4.), što odgovara logičkom stanju 0, bit će obje diode propusno polarizirane. Stoga će na izlazu Y biti mali napon oko 0,6V (pad napona na propusno polariziranoj diodi), što također odgovara logičkom stanju 0.

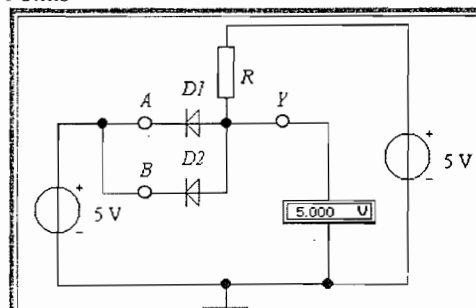
Napon na izlazu Y ostaje oko 0,6V sve dok je barem na jednom od ulaza 0V jer je pripadajuća dioda propusno polarizirana (slika 11.5.).

Pokus



Slika 11.5. Djelovanje sklopa I (barem jedan ulaz u stanju 0)

Pokus



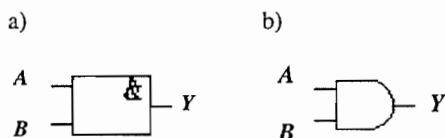
Slika 11.6. Djelovanje sklopa I (svi ulazi u stanju 1)

Tek kad je na svim ulazima napon 5V, što odgovara logičkom stanju 1, obje diode postaju zaporno polarizirane. U tom je slučaju na izlazu Y napon 5V, što odgovara logičkom stanju 1.

Tablica 10.6. Naponska tablica i tablica stanja sklopa I s dva ulaza

B/V	A/V	Y/V	B	A	Y
0	0	0,624	0	0	0
0	5	0,651	0	1	0
5	0	0,651	1	0	0
5	5	5	1	1	1

Sklop koji na izlazu daje stanje 1 samo ako su svi ulazi u stanju 1 naziva se **logički sklop I** (engl. AND gate, njem. UND Gatter). Na slici 11.7. prikazani su simboli sklopa I. Sklop može imati dva ili više ulaza.

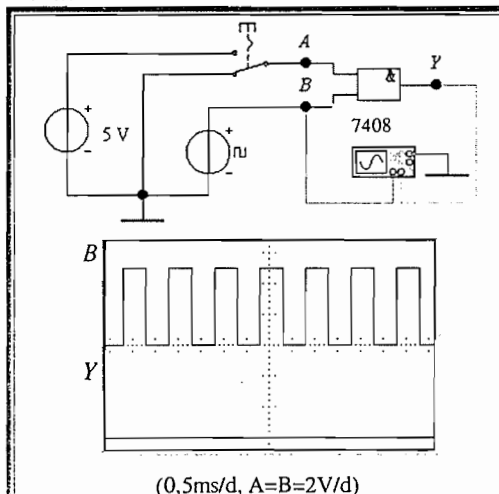


Slika 11.7. Simboli sklopa I
a) IEC, b) ANSI

Sklop I obavlja logičku operaciju I (povezivanje, konjunkcija) što se može iskazati algebarskom jednačinom:

$$Y = A \cdot B$$

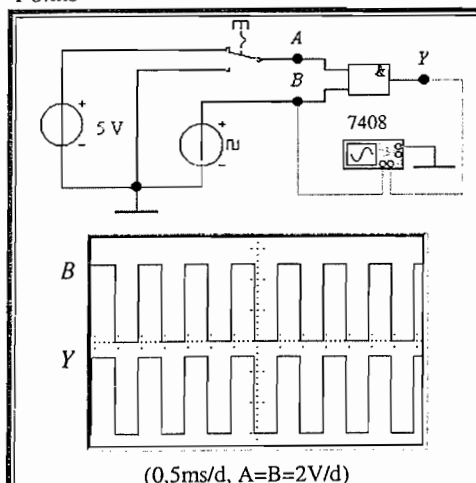
Pokus



Slika 11.8. Impulsna pobuda sklopa I

Logički sklop I može se upotrijebiti kao sklop za zabranu (slika 11.8.) i dopuštenje prolaza impulsa (slika 11.9.). Signal s ulaza A može proći na izlaz samo kad je drugi ulaz sklopa I u stanju 1.

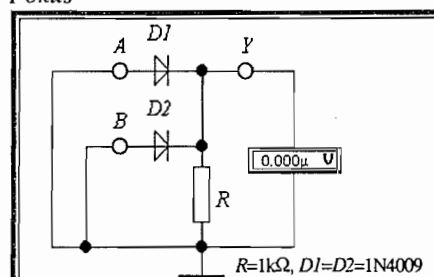
Pokus



Slika 11.9. Impulsna pobuda sklopa I

Sklop ILI

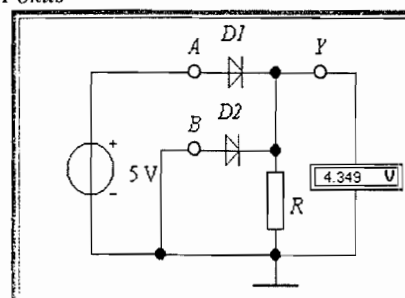
Pokus



Slika 11.10. Djelovanje sklopa ILI
(svi ulazi u stanju 0)

Kad je na oba ulaza napon 0V (slika 11.10.), što odgovara logičkom stanju 0, bit će obje diode zaporno polarizirane. Kroz otpornik R ne teče struja pa je na izlazu 0V, što odgovara logičkom stanju 0.

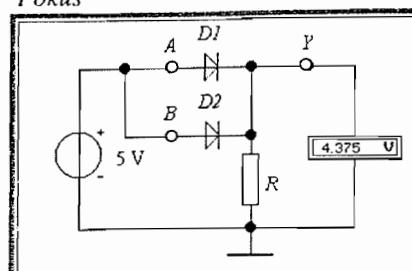
Pokus



Slika 11.11. Djelovanje sklopa ILI
(barem jedan ulaz u stanju 1)

Čim je barem na jednom ulazu napon 5V, što odgovara stanju 1, bit će pripadajuća dioda propusno polarizirana (slika 11.11.). Kroz tu diodu teče struja koja na otporniku R stvara pad napona $5V - U_D$, što odgovara logičkom stanju 1.

Pokus

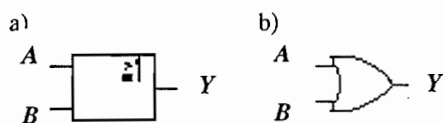


Slika 11.12. Djelovanje sklopa ILI (svi ulazi u stanju 1)

Tablica 10.7. Naponska tablica i tablica stanja sklopa ILI s dva ulaza

B / V	A / V	Y / V	B	A	Y
0	0	0	0	0	0
0	5	4,349	0	1	1
5	0	4,349	1	0	1
5	5	4,375	1	1	1

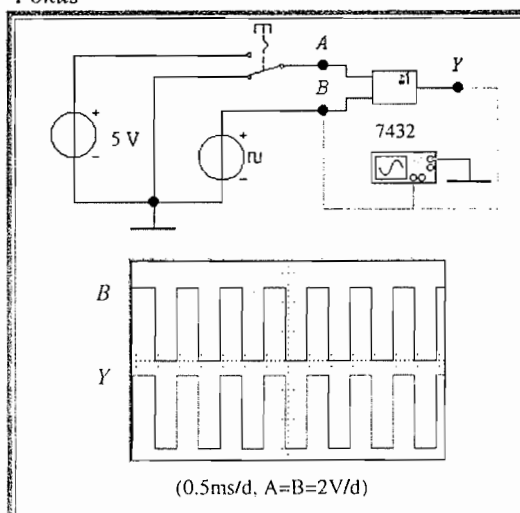
Sklop koji na izlazu daje stanje 1 ako je na bilo kojem ulazu stanje 1, naziva se **logički sklop ILI** (engl. OR gate, njem. ODER Gatter). Na slici 11.13. prikazani su simboli sklopa ILI. Sklop može imati dva ili više ulaza.

Slika 11.13. Simboli sklopa ILI
a) IEC, b) ANSI

Logički sklop ILI obavlja logičku operaciju ILI (rastavljanje, disjunkcija) što se može iskazati algebarskom jednačinom:

$$Y = A + B$$

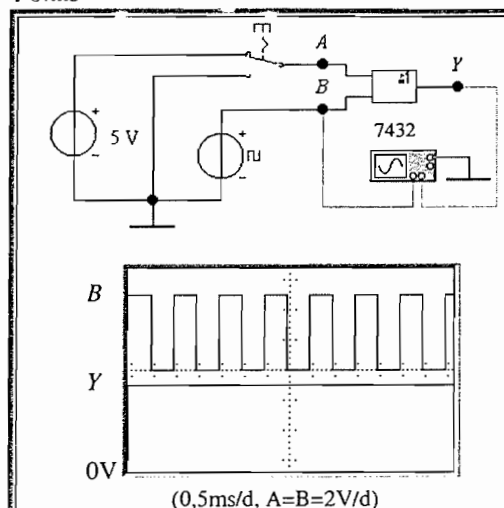
Pokus



Slika 11.14. Impulsna pobuda sklopa ILI

Logički sklop ILI može se također upotrijebiti kao sklop za dopuštenje (slika 11.14.) i zabranu prolaza impulsa (slika 11.15.). Signal s ulaza A nalazi se na izlazu Y samo kad je drugi ulaz u stanju 0.

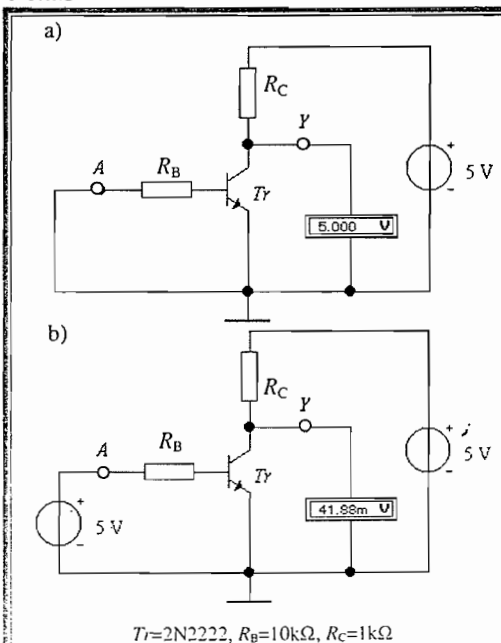
Pokus



Slika 11.15. Impulsna pobuda sklopa ILI

Sklop NE

Pokus

Slika 11.16. Djelovanje sklopa NE:
a) ulaz u stanju 0, b) ulaz u stanju 1

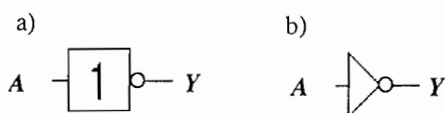
Kad je na ulazu sklopa napon 0V (logičko stanje 0), radna točka tranzistora je u području zapiranja. Tranzistor se može smatrati isključenom sklopkom pa je na izlazu Y napon napajanja 5V, tj. logičko stanje 1 (slika 11.16.a).

Kad je na ulazu tranzistorske sklopke napon 5V (logičko stanje 1), radna točka tranzistora je u zasićenju (slika 11.16.b). Tranzistor se može smatrati uključenom sklopkom. Na izlazu Y je 0,042V (napon U_{CEZas}) što označava logičko stanje 0.

Tablica 10.8. Naponska tablica i tablica stanja sklopa NE

A/V	Y/V	A	Y
0	5	0	1
5	0,042	1	0

Sklop koji na izlazu daje stanje suprotno stanju na ulazu naziva se logički sklop NE, odnosno invertor (engl. NOT circuit, inverter, njem. NICHT Gatter). Sklop ima jedan ulaz i jedan izlaz. Kad je na ulazu stanje 1, na izlazu je stanje 0 i obratno. Funkciju logičkog sklopa NE obavlja tranzistorska sklopka.

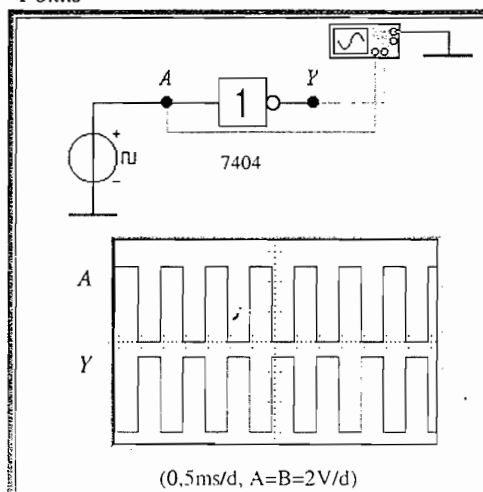


Slika 11.17. Simboli sklopa NE
a) IEC, b) ANSI

Logički sklop NE obavlja logičku operaciju NE (negacija, inverzija, komplementiranje) što se može iskazati algebarskom jednačicom:

$$Y = \bar{A}$$

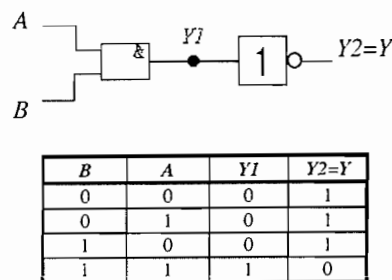
Pokus



Slika 11.18. Impulsna pobuda sklopa NE

Sklop NI

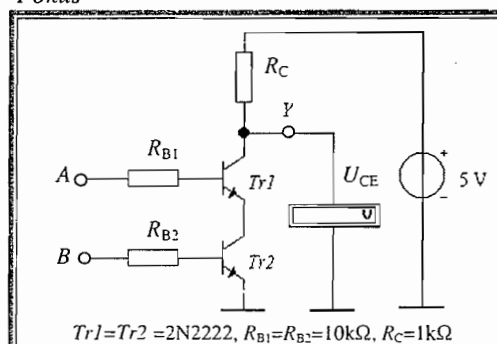
Spajanjem sklopa I sa skloptom NE dobije se sklop NI (engl. NAND gate, njem. NAND Gatter). Taj sklop daje na izlazu stanje 1 ako je na bilo kojem ulazu stanje 0. Kad je na svim ulazima stanje 1, tada je na izlazu stanje 0 (slika 11.19.).



Slika 11.19. Djelovanje spoja sklopova I i NE

Umjesto spajanja diodnog sklopa I i tranzistorske sklopke, sklop NI je moguće izvesti i kaskodnim spojem dviju tranzistorskih sklopki (slika 11.20.).

Pokus



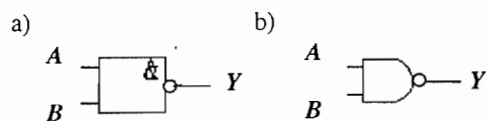
Slika 11.20. Izvedba sklopa NI s pomoću kaskodnog spoja tranzistorskih sklopki

Tablica 11.9. Naponska tablica i tablica stanja sklopa NI s dva ulaza

B/V	A/V	Y/V	B	A	Y
0	0	5	0	0	1
0	5	5	0	1	1
5	0	5	1	0	1
5	5	0,144	1	1	0

Ako je na oba ulaza sklopa napon 0V, radne točke oba tranzistora su u području zapiranja, tj. tranzistori djeluju kao isključene sklopke pa je na izlazu Y napon napajanja 5V, dakle logičko stanje 1. Takvo stanje ostaje na izlazu dok je na bilo kojem od ulaza napon 0V, jer je pripadni tranzistor isključena sklopka koja prekida strujni krug.

Sklop NI može imati dva i više ulaza. Na slici 11.21. prikazani su simboli sklopa NI s dva ulaza.

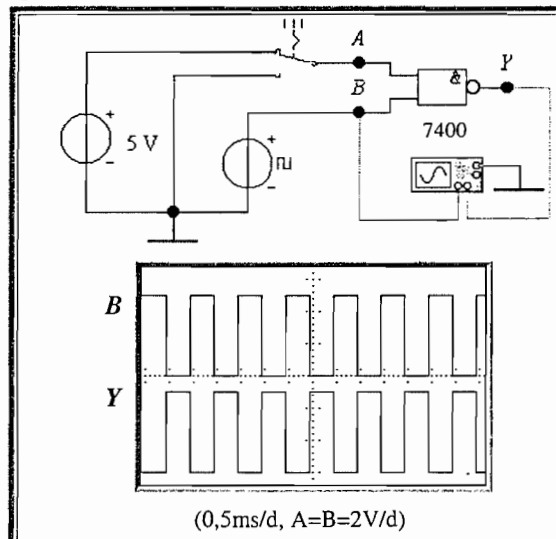


Slika 11.21. Simboli sklopa NI
a) IEC, b) ANSI

Logički sklop NI obavlja logičku operaciju NI što se može iskazati algebarskom jednačicom:

$$Y = \overline{A \cdot B}$$

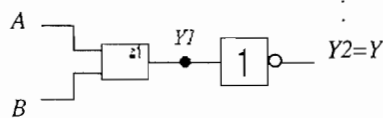
Pokus



Slika 11.22. Djelovanje sklopa NI kao invertora

Pokus sa slike 11.22. pokazuje kako se s pomoću sklopa NI može izvesti invertor, tj. sklop NE.

Sklop NILI



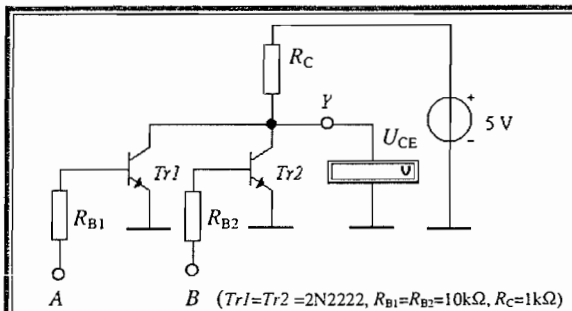
B	A	Y1	Y2=Y
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

Slika 11.23. Djelovanje spoja sklopova ILI i NE

Spajanjem sklopa ILI sa sklopom NE dobije se sklop NILI (engl. NOR gate, njem. NOR Gatter). Taj sklop daje na izlazu stanje 0 ako je na bilo kojem ulazu stanje 1. Kad je na svim ulazima stanje 0, tada je na izlazu stanje 1 (slika 11.23.).

Umjesto spajanja diodnoga sklopa ILI i tranzistorske sklopke, sklop NILI je moguće izvesti i paralelnim spojem dviju tranzistorskih sklopki (slika 11.24.).

Pokus



Slika 11.24. Izvedba sklopa NILI s pomoću paralelnoga spoja tranzistorskih sklopki

Tablica 11.10. Naponska tablica i tablica stanja sklopa NILI s dva ulaza

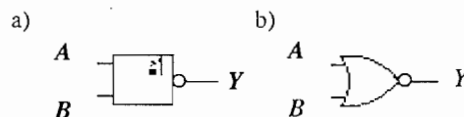
B/V	A/V	Y/V
0	0	5
0	5	0,071
5	0	0,071
5	5	0,055

B	A	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Ako je na oba ulaza sklopa napon 0V, radne točke oba tranzistora su u području zapiranja, tj. djeluju kao isključene sklopke pa je na izlazu Y napon napajanja 5V, što odgovara logičkom stanju 1.

Čim se na jedan od ulaza sklopa dovede napon 5V (logičko stanje 1), pripadni tranzistor prelazi u stanje zasićenja, tj. djeluje kao uključena sklopka pa je na izlazu mali napon zasićenja tranzistora U_{CEzas} , dakle logičko stanje 0.

Sklop NILI može imati dva i više ulaza. Na slici 11.25. prikazani su simboli sklopa NILI s dva ulaza.

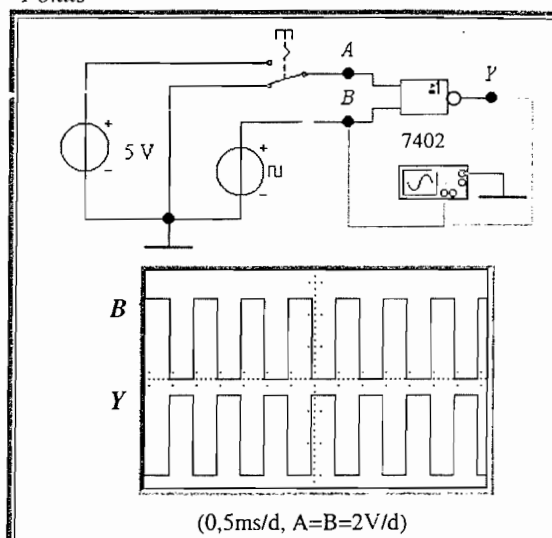


Slika 11.25. Simboli sklopa NILI
a) IEC, b) ANSI

Logički sklop NILI obavlja logičku operaciju NILI što se može iskazati algebarskom jednačicom:

$$Y = \overline{A + B}$$

Pokus

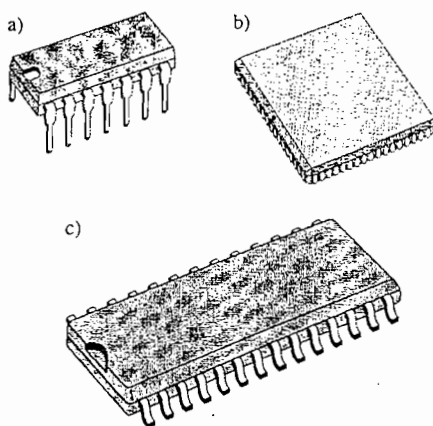


Slika 11.26. Djelovanje sklopa NILI kao invertora

Pokus sa slike 11.25. pokazuje kako se s pomoću sklopa NILI može izvesti invertor, tj. sklop NE.

Integrirani logički sklopovi

Elektronički logički sklopovi danas se proizvode isključivo u integriranoj izvedbi. Sve komponente sklopa izvedene su na jednoj pločici silicija zatvorenoj u odgovarajuće kućište. Kućišta mogu biti različitog oblika s različitim brojem izvoda, plastična ili keramička. Sama kućišta su znatno većih dimenzija od integriranog sklopa. Ograničenje u izvedbi integriranih sklopova jest broj izvoda. Ovisno o broju ulaza i izlaza koje ima logički sklop, u jedno kućište moguće je smjestiti jedan osnovni logički sklop ili više njih. Kod složenijih sklopova potrebno je više izvoda, pa su kućišta takvih sklopova većih dimenzija.



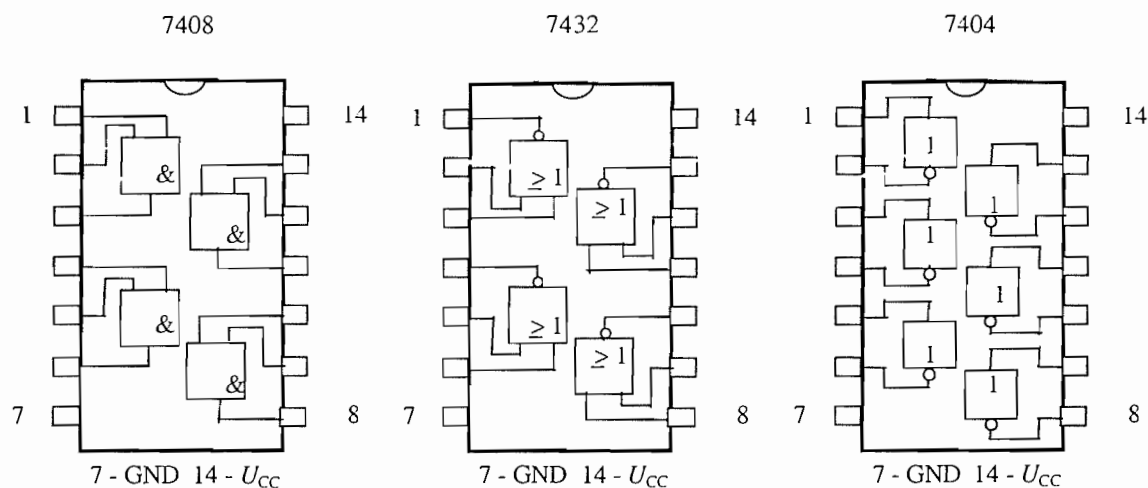
Slika 11.27. Primjeri izvedbi kućišta integriranih digitalnih sklopova

Česti oblik kućišta integriranih sklopova je dvolinijsko kućište (engl. dual-in-line package, skraćeno DIP, slika 11.27.a), zatim plosnato kućište (engl. flat package, slika 11.27.c) i sve češće različiti oblici kućišta za površinsku montažu (engl. surface mounted device, leadless package, leadless chip carrier, small-outline package, slika 11.27.b).

Danas se proizvodi mnogo različitih sklopova, od osnovnih logičkih do čitavih uređaja u jednom kućištu. Osnovni integrirani logički sklopovi sadrže manji broj integriranih elemenata (do 100) i nazivaju se sklopovi niskog stupnja integracije (engl. SSI, skraćeno od Small Scale Integration). Složeniji integrirani sklopovi (brojila, registri, dekoderi) sadrže veći broj integriranih elemenata (od 100 do 1000) i nazivaju se sklopovi srednjeg stupnja integracije (engl. MSI, skraćeno od Medium Scale Integration). Još veći broj elemenata (od 1000 do 100 000) sadrže sklopovi visokog stupnja integracije (engl. LSI, skraćeno od Large Scale Integration). Tu spadaju memorije i mikroprocesori. Već nekoliko godina javljaju se i sklopovi vrlo visokog stupnja integracije (engl. VLSI, skraćeno od Very Large Scale Integration). To su sklopovi s više od 100 000 integriranih elemenata.

Svi integrirani logički sklopovi mogu se svrstati u nekoliko skupina. Za sklopove unutar neke skupine karakteristično je da su prilagođeni za međusobno spajanje, što omogućava relativno jednostavnu gradnju složenih digitalnih uređaja. O značajkama logičkih sklopova pojedinih skupina govori se u trećem dijelu ovoga poglavlja kad se obrađuju skupine integriranih sklopova.

Pri radu s integriranim sklopovima neophodno je poznavati raspored izvoda ili dijagram spajanja (engl. pin connection diagram, pin assignment, pin description, pin configuration). Iz njega se vide funkcije izvoda integriranoga sklopa. Postupak brojenja izvoda za DIP kućišta vidi se iz prikaza na slici 11.28. Izvodi označeni s U_{CC} , odnosno V_{CC} (engl. voltage) i GND (engl. ground) služe za spajanje zajedničkoga napona napajanja za sve logičke sklopove unutar jednog kućišta. Na izvod V_{CC} spaja se pozitivni pol izvora napajanja, a na izvod GND negativni pol.



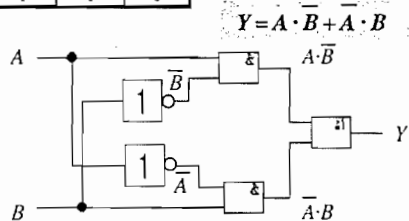
Slika 11.28. Raspored izvoda integriranih logičkih sklopova (pogled odozgo)

Međusobno povezivanje osnovnih logičkih sklopova

Osnovni logički sklopovi spajaju se međusobno radi izvođenja složenijih logičkih operacija. Složena logička operacija može biti zadana tablicom stanja. Iz tablice stanja može se doći do algebarskog izraza. Postupnim crtanjem simbola osnovnih logičkih sklopova dobije se odgovarajuća logička shema složenoga logičkog sklopa (slika 11.29.).

Primjer 11.13.

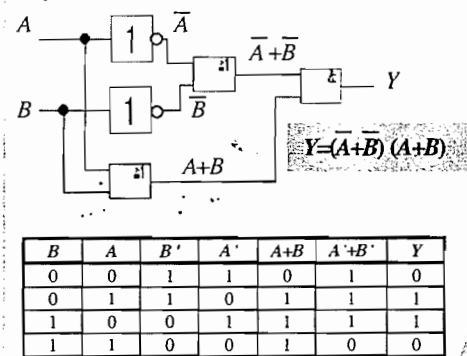
B	A	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



Slika 11.29. Algebarska jednadžba i logička shema složenoga logičkog sklopa zadanoga tablicom stanja

Ako je zadana logička shema složenoga logičkog sklopa, iz nje je vrlo lako izvesti algebarski izraz, a zatim i tablicu stanja (slika 11.30.).

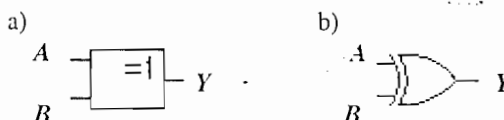
Primjer 11.14.



Slika 11.30. Algebarska jednadžba i tablica stanja složenoga logičkog sklopa zadanoga shemom

Primjeri sa slika 11.29. i 11.30. pokazuju kako se sklop istih logičkih svojstava (koji obavlja istu logičku operaciju) može izvesti na više načina.

Sklop iz oba primjera ima svojstvo da na izlazu daje logičko stanje 1 samo kada su na oba ulaza različita logička stanja. Takav sklop naziva se **isključivo ILI**, skraćeno **EX-ILI** (engl. exclusive OR, njem. Exklusiv ODER). Simboli toga sklopa pokazani su na slici 11.31.

Slika 11.31. Simboli sklopa isključivo ILI
a) IEC, b) ANSI

11.3. SKUPINE INTEGRIRANIH DIGITALNIH SKLOPOVA

Već je spomenuto da se digitalni sklopovi proizvode u integriranoj izvedbi u širokom rasponu od osnovnih logičkih sklopova do vrlo složenih sustava smještenih u jedno kućište. Kad su potrebne kapacitivnosti, induktivnosti, otpori većih vrijednosti ili sklopovi većih snaga, integriranim digitalnim sklopovima dodaju se izvana komponente u pojedinačnoj (diskretnoj) izvedbi.

Svi integrirani digitalni sklopovi mogu se svrstati u nekoliko skupina koje su nastale tijekom razvoja njihove proizvodnje. Sklopovi unutar jedne skupine standardizirani su i prilagođeni za međusobno spajanje. Za sklopove pojedine skupine karakteristični su: temeljni sklop na čijoj se izvedbi temelje svi ostali sklopovi u skupini, napon napajanja, ulazni i izlazni naponi i struje, utrošak snage i brzina rada.

U ovom će se poglavlju prikazati osnovna svojstva skupina integriranih digitalnih sklopova koji se danas najviše upotrebljavaju. To su skupina TTL, kod koje su bipolarni tranzistori glavne komponente sklopova i skupina CMOS u kojoj se primjenjuju komplementarni tranzistori s efektom polja s izoliranom upravljačkom elektrodom (MOSFET). Naglasak je na temeljnom sklopu skupine. Izvedbe složenijih sklopova obrađuju se u idućim poglavljima.

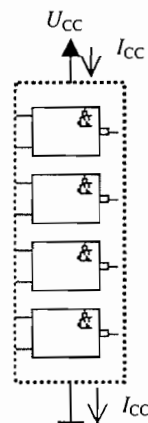
Karakteristične veličine integriranih digitalnih sklopova

Za svaku skupinu integriranih sklopova karakteristična je vrijednost **napona napajanja** (engl. DC power supply, njem. Speisespannung). Većina sklopova ima dva izvoda na koje se spaja izvor napona napajanja. Jedan izvod označava se s U_{CC} , odnosno U_{DD} (engl. V_{CC} , V_{DD} , od voltage = napon). Na taj izvod spaja se jedan pol izvora napajanja, najčešće pozitivan. Drugi pol izvora spaja se na izvod označen s GND (engl. ground = zemlja) koji je vezan na zajedničku točku sklopa i uzemljen. Kod integriranih sklopova koji sadrže više istovjetnih logičkih sklopova u jednom kućištu, jedan par izvoda za napajanje zajednički je za sve pojedine logičke sklopove. U shemama složenih logičkih sklopova izostavlja se crtanje izvoda za napajanje.

Već je u prethodnom dijelu ovoga poglavlja spomenuta važnost ispravnog spajanja izvoda za valjano funkcioniranje integriranoga digitalnog sklopa. Osnovni preduvjet za rad digitalnog sklopa je ispravan spoj napona napajanja. Neispravno spojen napon napajanja ne samo što onemogućava rad sklopa nego može uzrokovati njegovo oštećenje.

Struja koja teče iz izvora u integrirani sklop naziva se **struja napajanja** (engl. current supply).

Ova struja ovisi o stanju u kojemu se nalaze izlazi logičkih sklopova. Srednja vrijednost tih struja pomnožena s naponom napajanja daje prosječnu vrijednost potrebne električne snage za rad sklopova. Ovaj podatak naziva se **utrošak snage** (engl. power dissipation).



Slika 11.32. Utrošak snage integriranih digitalnih sklopova

Da bi digitalni sklop na izlazu dao potrebno stanje, mora na ulazu biti odgovarajuća vrijednost ulaznog napona.

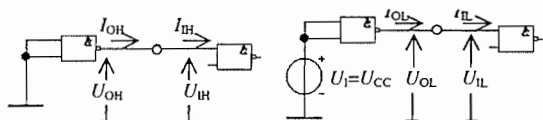
U_{IH} je napon koji je potrebno dovesti na ulaz da bi ga sklop prihvatio kao stanje 1. Naziva se **ulazni napon stanja visoke razine**, odnosno logičkog stanja 1 (engl. high level input voltage, skraćeno V_{IH}).

U_{IL} je **ulazni napon stanja niske razine**, odnosno logičkog stanja 0 (engl. low level input voltage, skraćeno V_{IL}). To je napon koji je potrebno dovesti na ulaz da bi ga sklop prihvatio kao stanje 0.

Osim toga potrebno je voditi računa i o tome da ulazni napon ne prijeđe **najveću dopuštenu vrijednost** (engl. absolute maximum rating V_{IN}) kako se ne bi oštetio digitalni sklop.

U_{OH} je **izlazni napon stanja visoke razine**, odnosno logičkog stanja 1 (engl. high level output voltage, skraćeno V_{OH}). To je napon koji logički sklop daje na izlazu kad je u stanju 1.

U_{OL} je **izlazni napon stanja niske razine**, odnosno logičkog stanja 0 (engl. low level output voltage, skraćeno V_{OL}). To je napon koji logički sklop daje na izlazu kad je u stanju 0.



Slika 11.33. Ulazni i izlazni naponi i struje digitalnih sklopova

I_{IH} je **ulazna struja stanja visoke razine**, odnosno logičkog stanja 1 (engl. high level input current). To je struja koja teče u ulaz sklopa kad je na njemu napon iz područja visoke razine, odnosno logičko stanje 1.

I_{IL} je **ulazna struja stanja niske razine**, odnosno logičkog stanja 0 (engl. low level input current). To je struja koja teče u ulaz sklopa kad je na njemu napon iz područja niske razine, odnosno logičko stanje 0.

I_{OH} je **izlazna struja stanja visoke razine**, odnosno logičkog stanja 1 (engl. high level output current). To je struja koja teče iz izlaza sklopa kad je na njemu napon iz područja visoke razine, odnosno logičko stanje 1.

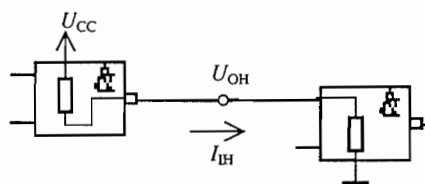
I_{OL} je **izlazna struja stanja niske razine**, odnosno logičkog stanja 0 (engl. low level output current). To je struja koja teče iz izlaza sklopa kad je na njemu napon iz područja niske razine, odnosno logičko stanje 0.

Prilikom međusobnog spajanja logičkih sklopova moguće su dvije situacije s obzirom na strujne prilike.

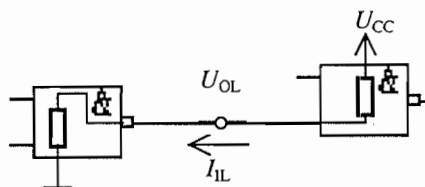
Kad je na izlazu digitalnog sklopa stanje visoke razine, tj. stanje 1, struja teče iz njega u ulaz drugog sklopa (slika 11.34.a). Izlaz prvog sklopa djeluje kao izvor struje za drugi sklop koji djeluje kao otporno opterećenje prema masi (engl. current sourcing).

Kad je na izlazu sklopa stanje niske razine, tj. stanje 0, struja teče iz ulaza drugog u izlaz prvog sklopa (slika 11.34.b). Izlaz prvog sklopa djeluje kao ponor struje i vuče struju iz drugog sklopa koji djeluje kao otporno opterećenje prema naponu napajanja (engl. current sinking).

a)

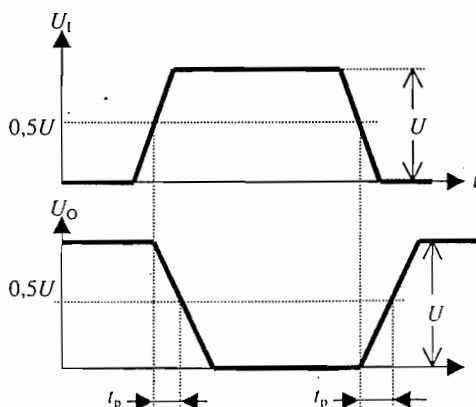


b)



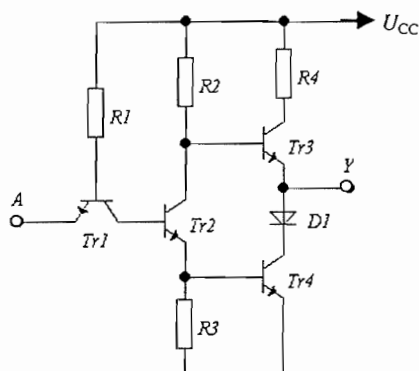
Slika 11.34. Struje pri međusobnom opterećenju digitalnih sklopova

Kad se na ulaz bilo kojega digitalnog sklopa dovede signal, potrebno je određeno vrijeme t_p da pod utjecajem tog signala dođe do promjene stanja na izlazu sklopa. To vrijeme naziva se **vrijeme kašnjenja** (engl. propagation delay time, njem. Laufzeit). Vrijeme kašnjenja mjeri se najčešće od trenutka kad promjena ulaznog napona dostigne 50% iznosa do trenutka kad promjena izlaznog napona dostigne 50% ukupnog iznosa (slika 11.35.).



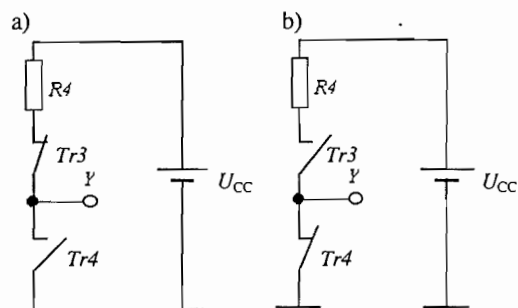
Slika 11.35. Vrijeme kašnjenja

Sklopovi skupine TTL



Slika 11.36. Invertor u skupini TTL

Na slici 11.36. prikazana je električna shema invertora iz skupine TTL. Kad je na ulazu A napon iz područja niske razine (logičko stanje 0), propusno je polariziran PN-spoj baza-emiter tranzistora $Tr1$. Struja teče iz izvora napajanja preko otpornika $R1$, spoja baza-emiter tranzistora $Tr1$ i ulaza sklopa u zajedničku točku. Tranzistor $Tr2$ je bez struje baze, tj. u zapiranju. Zato je i tranzistor $Tr4$ bez struje baze, tj. u zapiranju. Kroz otpornik $R2$ teče struja baze u tranzistor $Tr3$ koji je vodljiv i ostvaruje vezu izlaza Y s naponom napajanja. Izlazni napon ima vrijednost iz područja visoke razine, što odgovara logičkom stanju 1 (slika 11.37.a).



Slika 11.37. Prikaz rada invertora s pomoću sklopki:
a) ulaz u stanju 0, b) ulaz u stanju 1

Kada je na ulazu A napon iz područja visoke razine (logičko stanje 1), tada je zaporno polariziran spoj baza-emiter tranzistora $Tr1$. Zato je propusno polariziran spoj baza-kolektor istog tranzistora. Iz izvora napajanja, preko otpora $R1$ i spoja baza-kolektor tranzistora $Tr1$ teče struja baze tranzistora $Tr2$. Tranzistor $Tr2$ je sada vodljiv. Prednapon baze tranzistora $Tr3$ iznosi 1,1V što je nedovoljno da se spoj baza-emiter tog tranzistora propusno polarizira. Tranzistor $Tr3$ je u zapiranju pa je izvor napona napajanja odspojen od izlaza Y . Na otporu $R3$ nastaje pad napona 0,8V što je dovoljno da propusno polarizira spoj baza-emiter tranzistora $Tr4$. Taj tranzistor je

u zasićenju pa je na izlazu Y napon iz područja niske razine, odnosno napon koji odgovara logičkom stanju 0 (slika 11.37.b).

Osim prikazanog sklopa s jednim ulazom proizvode se još identični sklopovi s dva, tri, četiri i osam ulaza. Njihovi ulazni tranzistori imaju onoliko emitera koliko sklop ima ulaza. Sve dok je na bilo kojem ulazu napon iz područja niske razine (logičko stanje 0), propusno je polariziran PN-spoj baza-emiter tranzistora $Tr1$, pa shodno tome izlazni napon ima vrijednost iz područja visoke razine, što odgovara logičkom stanju 1.

Karakteristične veličine sklopova skupine TTL

Karakteristične veličine pojedinih integriranih digitalnih sklopova, neophodne za primjenu, mogu se naći u tvorničkim podacima proizvođača. Na početku podataka je naziv i oznaka sklopa. Većina proizvođača primjenjuje standardizirane oznake. Po tim oznakama svi digitalni sklopovi skupine TTL nose oznaku 74 (sklopovi potrošačke namjene, temperaturno područje rada od 0 do 70°C), ili 54 (sklopovi profesionalne namjene, s temperaturnim područjem rada od -55 do 125°C), a iza njih dvoznamenkasti ili troznamenkasti broj koji označava vrstu sklopa prema logičkoj funkciji. To su oznake tzv. standardnih sklopova skupine TTL (tablica 11.11.).

Tablica 11.11. Primjeri integriranih sklopova skupine TTL

Oznaka sklopa	Logička funkcija
7400	4 sklopa NI s 2 ulaza
7401	4 sklopa NI s 2 ulaza, otvoreni kolektor
7402	4 sklopa NILI s 2 ulaza
7404	6 sklopova NE
7406	6 sklopova NE, otvoreni kolektor
7408	4 sklopa I s 2 ulaza
7432	4 sklopa ILI s 2 ulaza

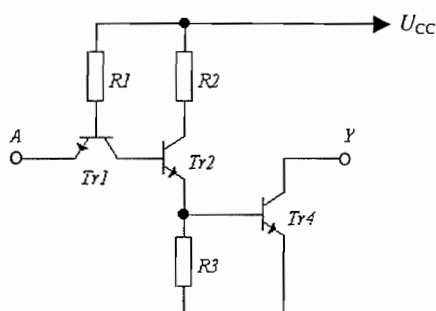
Uz to su proizvođači komponenata razvili nekoliko podskupina koje se međusobno razlikuju po brzini rada, utrošku snage i iznosim ulaznih i izlaznih struja. Sklopovi tih podskupina označavaju se odgovarajućim slovom koje stoji između oznaka 74, odnosno 54, i dvoznamenkastog ili troznamenkastog broja (tablica 11.12.).

Tablica 11.12. Karakteristične veličine sklopova skupine TTL

	74	74S	74LS	74AS	74ALS
U_{CC}/V	5	5	5	5	5
U_{IH}/V	2	2	2	2	2
U_{IL}/V	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
U_{OH}/V	2,4	2,7	2,7	2,5	2,5
U_{OL}/V	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4
I_{IL}/mA	1,6	2	0,36	0,48	0,1
I_{OI}/mA	16	20	8	20	8
t_p/ns	9	3	9,5	1,7	4
P_D/mW	10	20	2	8	1,2

Sklopovi s otvorenim kolektorom

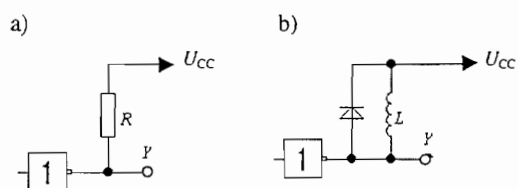
Logički sklopovi u skupini TTL proizvode se i u izvedbi kojoj nedostaju u izlaznom dijelu otpornik R_4 , tranzistor Tr_3 i dioda D_1 (slika 11.38.). U ostalom dijelu izvedbe identični su temeljnom sklopu skupine prikazanome na slici 11.36. Kolektor izlaznog tranzistora izravno je vezan za izlaz i nije povezan s naponom napajanja. Takva izvedba naziva se sklop s otvorenim kolektorom (engl. open collector, njem. offene Kollektor).



Slika 11.38. Invertor s otvorenim kolektorom

Da bi sklop mogao logički ispravno funkcionirati, potrebno je izvana dodati otpornik koji se spaja između izlaza i napona napajanja (slika 11.39.a.).

Kod najvećeg broja sklopova s otvorenim kolektorom vanjski otpornik spaja se na napon napajanja od 5V. Međutim, postoje sklopovi s otvorenim kolektorom kod kojih se vanjski otpornik može spojiti na viši napon. Ovi sklopovi upotrebljavaju se kad je potrebno međusobno spojiti sklopove s različitim naponima napajanja.

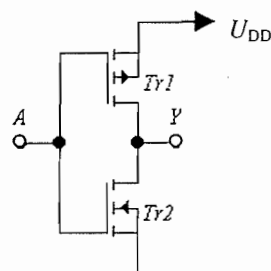


Slika 11.39. Primjer primjene sklopova s otvorenim kolektorom

Uz mogućnost rada s većim izlaznim naponom, neki logički sklopovi imaju izlazni tranzistor kroz koji smije teći veća struja. Ovakvi sklopovi nazivaju se snažni logički sklopovi (engl. power gate, buffer, driver). Dopusćeni napon na koji se priključuje vanjski otpornik iznosi 30V, a struja koja može teći u izlazni tranzistor kod stanja 0 iznosi 40mA. Ti sklopovi upotrebljavaju se kada se na izlaz spaja trošilo veće snage, npr. zavojnica elektromagneta (slika 11.39.b.).

Sklopovi skupine CMOS

U skupini CMOS (engl. complementary MOS) primjenjuju se p-kanalni i n-kanalni MOSFET zajedno. Rad sklopova skupine CMOS temelji se na sklopki s komplementarnim MOSFET-ima. Tranzistori su međusobno spojeni tako da p-kanalni MOSFET ima spojen uvod na napon napajanja, a n-kanalni na zajedničku točku. Upravljačke elektrode spojene su zajedno i čine ulaz, a zajedno spojeni odvodi čine izlaz (slika 11.40.).



Slika 11.40. Sklop NE u skupini CMOS

Ako je ulazni napon 0V (stanje 0 na ulazu A), tranzistor Tr_2 ima napon $U_{GS}=0V$ i zato je u zapiranjju s otporom između odvoda i uvida oko $10^{10}\Omega$. Upravljačka elektroda tranzistora Tr_1 je za napon U_{DD} na nižem potencijalu od njegova uvida pa je taj tranzistor u zasićenju. Otpor između uvida i odvoda je oko $1k\Omega$. Izlaz Y je praktički odspojen od zajedničke točke, a spojen na napon napajanja pa je na izlazu stanje 1.

Kad je ulazni napon U_{DD} (stanje 1 na ulazu A), tranzistor Tr_1 ima napon $U_{GS} = 0V$ i zato je u zapiranjju. Otpor između njegova odvoda i uvida je oko $10^{10}\Omega$. Upravljačka elektroda tranzistora Tr_2 je za napon U_{DD} na pozitivnijem potencijalu od njegova uvida pa je taj tranzistor u zasićenju. Otpor između odvoda i uvida je oko $1k\Omega$. Izlaz Y je sada praktički spojen na masu, a odspojen od napona napajanja pa je na izlazu stanje 0.

Višestrukim kombiniranjem komplementarnih MOS tranzistora moguće je ostvariti sklopove NI i NILI koji su temeljni sklopovi u skupini CMOS.

Sklopovi s unipolarnim tranzistorima osjetljivi su na statički naboj. I vrlo mala količina naboja može dovesti do proboja tankog sloja oksida između upravljačke elektrode (zasuna) i vodljivog sloja podloge. Iako su tranzistori na ulazu integriranih digitalnih sklopova skupine CMOS zaštićeni diodama, treba i s njima postupati vrlo pažljivo i držati se uputa proizvođača.

Pojedini tipovi sklopova s MOSFET-ima isporučuju se tako da su im izvodi međusobno kratkospojeni prstenom od metala ili vodljivom spužvom. Prsten se smije skinuti tek pošto se sklop zalemi. Svi metalni dijelovi koji dolaze u dodir sa sklopom moraju biti uzemljeni, uključujući i lemnii šiljak pri lemljenju. Sklop se drži prstima za kućište i ne ispušta dok se ne zaleme svi izvodi. Izvode ne treba nikako dirati prstima. Dodir prstima može dati statički naboj dovoljan za uništenje sklopa.

Sklop se ne smije odspajati ili spajati u strujni krug pod naponom napajanja. Signali se ne smiju dovoditi na ulaze sklopa ako nije priključen napon napajanja.

Karakteristične veličine sklopova skupine CMOS

Prvi sklopovi skupine CMOS za opću primjenu pojavili su se 1968. godine (američka tvrtka RCA). Tijekom nekoliko godina proširio se broj i asortiman proizvedenih sklopova tako da su sklopovi te skupine najvažniji i najrasprostranjeniji u primjeni.

Od početka sedamdesetih godina pojavljuju se u skupini CMOS podskupine s karakterističnom oznakom 74, odnosno 54. Sklopovi koji nose oznaku 74 predviđeni su za temperaturno područje rada od -40 do $+85$ °C, a s oznakom 54 za područje od -55 do $+125$ °C.

Sklopovi tih podskupina su s obzirom na raspored izvoda i logičke funkcije kompatibilni sklopovima skupine TTL. Na taj je način omogućeno da se u određenim uvjetima sklopovi nekih podskupina TTL zamijene ekvivalentnim sklopovima podskupine 74C.

Tablica 11.13. Karakteristične veličine sklopova skupine CMOS

	74HC	74HCT	74AC	74ACT
U_{CC}/V	2-6	5	2-6	5
U_{IH}/V	3,5	2	3,5	2
U_{IL}/V	1	0,8	1,35	0,8
U_{OH}/V	4,9	4,9	4,9	4,9
U_{OL}/V	0,1	0,1	0,1	0,1
I_{OL}/mA	5	5	24	24
I_{OH}/mA	5	5	24	24
t_D/ns	10	10	5	5
P_D/mW	1	1	0,8	0,8
**	10	10	8	8

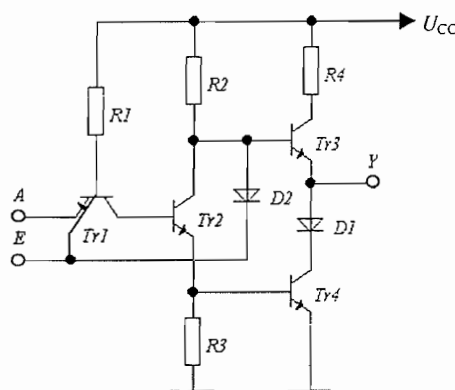
* za frekvenciju ulaznoga signala 1MHz

** za frekvenciju ulaznoga signala 10MHz

Da bi se omogućila veća kompatibilnost sa sklopovima iz skupine TTL, poslije su razvijene podskupine 74HCT i 74ACT kod kojih su vrijednosti ulaznih napona kompatibilne s vrijednostima izlaznih napona sklopova skupine TTL (tablica 11.13.).

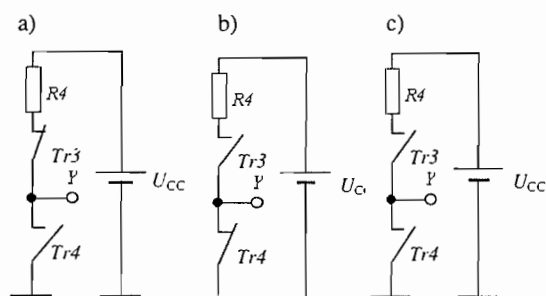
Sklopovi s tri stanja

Pojedini digitalni sklopovi u skupini TTL i CMOS mogu osim izlaznog stanja 0 i 1 imati i stanje visoke impedancije Z. Zato se za takve sklopove kaže da mogu imati tri stanja (engl. tri-state logic, njem. Tri-State Ausgang, drei Ausgang Zustand).



Slika 11.41. Sklop NE s tri stanja

Sklopovi s tri stanja osim uobičajenih logičkih ulaza imaju i poseban upravljački ulaz (engl. enable). Njime se sklopu dopušta (engl. enabled) izlazno stanje 0 ili 1 u ovisnosti o stanju na logičkim ulazima, odnosno ne dopušta (engl. disabled) ta ovisnost i tada je na izlazu stanje visoke impedancije Z. Primjer izvedbe takvoga sklopa pokazan je na slici 11.41. a prikaz rada s pomoću sklopki na slici 11.42.



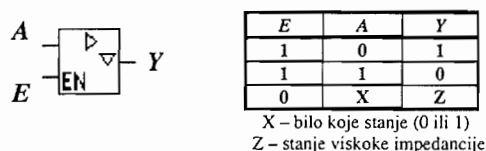
Slika 11.42. Prikaz rada sklopa s tri stanja:

- a) izlaz u stanju 1, b) izlaz u stanju 0,
c) izlaz u stanju visoke impedancije

Kad je na ulazu E napon vrijednosti iz područja visoke razine (stanje 1), struja ne može teći kroz diodu D2 niti spojem baza-emiter preko ulaza F. Zato stanje na izlazu Y ovisi o stanju na ulazu A. Sklop radi kao standardni inverter (slika 11.41. a i b).

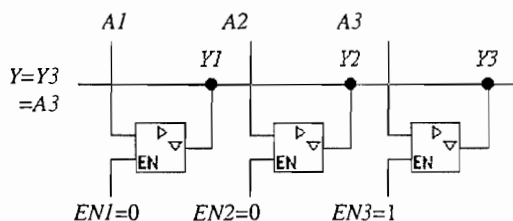
Kad je na ulazu E napon vrijednosti iz područja niske razine (stanje 0), propusno je polariziran spoj baza-emiter tranzistora Tr1 i preko ulaza E teče struja u priključeni izvor. Zato baza tranzistora Tr2 ne dobiva potrebnu pobudu i ne vodi. Zato i baza tranzistora

Tr4 ostaje bez pobude pa u izlaznom dijelu tranzistor *Tr4* djeluje kao isključena sklopka. Izlaz *Y* odspojen je od zajedničke točke. Napon stanja 0 na ulazu *E* uzrokuje da vodi dioda *D2*. Zato i baza tranzistora *Tr3* ostaje bez pobude pa i tranzistor *Tr3* djeluje u izlaznom krugu kao isključena sklopka. To znači da je izlaz *Y* odspojen i od izvora napona napajanja. Ovo je treće stanje koje se naziva stanje visoke impedancije *Z* (slika 11.42.c).



Slika 11.43. Simboli i tablica stanja sklopa NE s tri stanja

Sklopovi s tri stanja primjenjuju se, uz ostalo, u slučajevima kad je potrebno nekoliko signala dovesti na zajedničko odredište jednom linijom (sabitnica, engl. bus). U određenom vremenu može se prenositi samo jedan signal, dok izlazi ostalih sklopova moraju biti u stanju visoke impedancije. U primjeru sa slike 11.44. to je signal s ulaza *A3*.



Slika 11.44. Primjer primjene sklopova s tri stanja

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

VJEŽBA 11.1. SVOJSTVA INTEGRIRANIH LOGIČKIH SKLOPOVA

Zadatak

Upoznati primjere izvedbi integriranih logičkih sklopova, njihove osobine i neke mogućnosti primjene.

Naučiti kako se s pomoću sklopova NI i NILI mogu izvesti ostali logički sklopovi.

Pribor i instrumenti

- integrirani sklopovi 7400 i 7402
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument
- izvor istosmjernoga napona 5V

Priprema

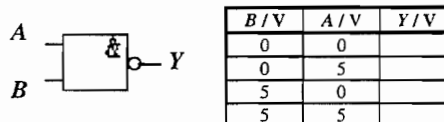
1. Nacrtajte dijagrame spajanja integriranih sklopova 7400 i 7402.

Pokusi

1. Ispitivanje svojstava sklopa 7400

1.1. Spojite sklop 7400 na napon napajanja (5V) i ispitajte djelovanje jednog od logičkih sklopova mjerenjem izlaznih napona uz napone na ulazima *A* i *B* prema tablici na slici 11.45. (0V – spoj na uzemlje-

nu točku, tj. GND, 5V – spoj na napon napajanja). Izlazne napone mjerite voltmetrom i vrijednosti unesite u tablicu.

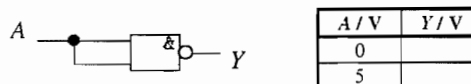


Slika 11.45. Ispitivanje sklopa 7400

1.2. Koju funkciju obavlja sklop? Napišite pripadnu tablicu stanja i logičku jednadžbu.

2. Izvedbe ostalih logičkih sklopova s pomoću sklopova NI

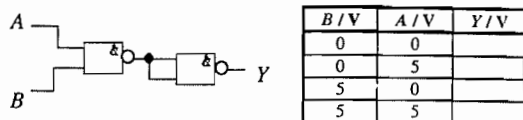
2.1. Na ulaze *A* i *B* priključite redom napone prema slici 11.46. Izlazne napone mjerite voltmetrom i vrijednosti unesite u tablicu.



Slika 11.46. Ispitivanje sklopa NI

2.2. Koju funkciju obavlja sklop sa slike 11.46.? Napišite pripadnu tablicu stanja i logičku jednadžbu.

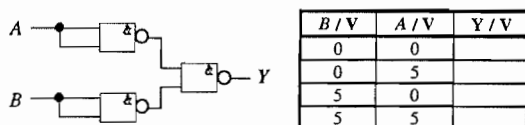
2.3. Na ulaze *A* i *B* priključite redom napone prema slici 11.47. Izlazne napone mjerite voltmetrom i vrijednosti unesite u tablicu.



Slika 11.47. Ispitivanje spoja sklopova NI

2.4. Koju funkciju obavlja sklop sa slike 11.47.? Napišite pripadnu tablicu stanja i logičku jednadžbu.

2.5. Na ulaze A i B priključite redom napone prema slici 11.48. Izlazne napone mjerite voltmetrom i vrijednosti unesite u tablicu.

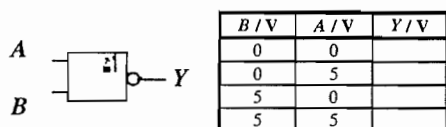


Slika 11.48. Ispitivanje spoja sklopova NI

2.5. Koju funkciju obavlja sklop sa slike 11.48.? Napišite pripadnu tablicu stanja i logičku jednadžbu

3. Ispitivanje svojstava sklopa 7402

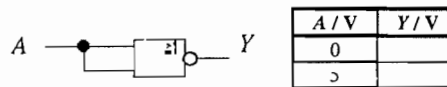
3.1. Spojite sklop 7402 na napon napajanja (5V) i ispitajte djelovanje jednog od logičkih sklopova mjerenjem izlaznih napona uz napone na ulazima A i B prema tablici na slici 11.49. (0V – spoj na uzemljenu točku, tj. GND, 5V – spoj na napon napajanja). Izlazne napone mjerite voltmetrom i vrijednosti unesite u tablicu.



Slika 11.49. Ispitivanje sklopa 7402

3.2. Koju funkciju obavlja sklop sa slike 11.49.? Napišite pripadnu tablicu stanja i logičku jednadžbu.

4. Izvedbe ostalih logičkih sklopova s pomoću sklopova NILI

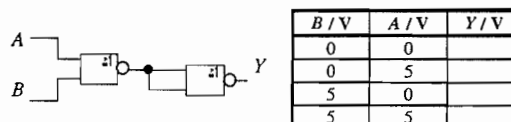


Slika 11.50. Ispitivanje sklopa NILI

4.1. Na ulaze A i B priključite redom napone prema slici 11.50. Izlazne napone mjerite voltmetrom i vrijednosti unesite u tablicu.

4.2. Koju funkciju obavlja sklop sa slike 11.50.? Napišite pripadnu tablicu stanja i logičku jednadžbu.

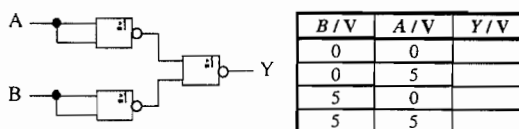
4.3. Na ulaze A i B priključite redom napone prema slici 11.51. Izlazne napone mjerite voltmetrom i vrijednosti unesite u tablicu.



Slika 11.51. Ispitivanje spoja sklopova NILI

4.4. Koju funkciju obavlja sklop sa slike 11.51.? Napišite pripadnu tablicu stanja i logičku jednadžbu.

4.5. Na ulaze A i B priključite redom napone prema slici 11.52. Izlazne napone mjerite voltmetrom i vrijednosti unesite u tablicu.



Slika 11.52. Ispitivanje spoja sklopova NILI

2.5. Koju funkciju obavlja sklop sa slike 11.52.? Napišite pripadnu tablicu stanja i logičku jednadžbu.

PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

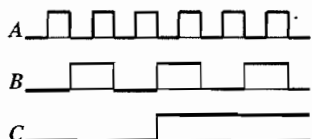
1. Objasnite razlike između decimalnoga i binarnoga brojevnog sustava.

2. Koji se najveći broj (izražen decimalno) može napisati s 5 znamenaka binarnog sustava?

3. Koliko je binarnih znamenaka potrebno za prikaz decimalnog broja 47?

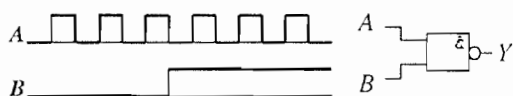
4. Pretvorite binarni broj 110110 u decimalni.

5. Pretvorite decimalni broj 53 u binarni.
6. Navedite značajke heksadecimalnoga brojevnog sustava.
7. Pretvorite heksadecimalni broj 12BF u decimalni.
8. Pretvorite decimalni broj 3127 u heksadecimalni.
9. Pretvorite heksadecimalni broj 2C4E u binarni.
10. Pretvorite binarni broj 100101000111111 u heksadecimalni.
11. Kodirajte BCD kodom broj 395.
12. Koji broj decimalnog brojevnoga sustava odgovara binarnoj kombinaciji 100001100010 u BCD kodu?
13. Koliko binarnih znamenaka treba da se broj 128 napiše u binarnome brojevnom sustavu, a koliko da se napiše u BCD kodu?
14. Kodirajte podatak Y:5 u ASCII kodu.
15. Koji je sadržaj podatka 1011000 0101011 0111000 zadanog u ASCII kodu?
16. Nacrtajte simbol sklopa I s tri ulaza i napišite pripadni algebarski izraz i tablicu stanja.



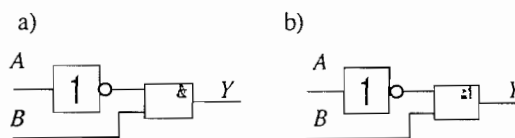
Slika 11.53. Impulsna pobuda sklopova I i ILI

17. Nacrtajte dijagram izlaznog napona sklopa I s tri ulaza za zadanu pobudu na ulazu (slika 11.53.).
18. Nacrtajte simbol sklopa ILI s tri ulaza i napišite pripadni algebarski izraz i tablicu stanja.
19. Nacrtajte dijagram izlaznog napona sklopa ILI s tri ulaza za zadanu pobudu na ulazu (slika 11.53.).
20. Nacrtajte simbol sklopa NI s tri ulaza i napišite pripadni algebarski izraz i tablicu stanja.



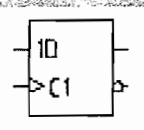
Slika 11.54. Impulsna pobuda sklopova NI i NILI

21. Nacrtajte dijagram izlaznog napona sklopa NI za zadanu pobudu na ulazu (slika 10.54.).
22. Nacrtajte simbol sklopa NILI s tri ulaza i napišite pripadni algebarski izraz i tablicu stanja.
23. Nacrtajte dijagram izlaznog napona sklopa NILI za zadanu pobudu na ulazu (slika 10.54.).
24. Napišite pripadni algebarski izraz i tablicu stanja za sklopove sa slike 11.55.



Slika 11.55. Složeni logički sklopovi

25. Pokažite kako se s pomoću sklopa NI može izvesti sklop NE.
26. Pokažite kako se s pomoću sklopa NI može izvesti sklop I.
27. Pokažite kako se s pomoću sklopa NI može izvesti sklop ILI.
28. Pokažite kako se s pomoću sklopa NILI može izvesti sklop NE.
29. Pokažite kako se s pomoću sklopa NILI može izvesti sklop I.
30. Pokažite kako se s pomoću sklopa NILI može izvesti sklop ILI.
31. Koje su najznačajnije razlike između dva sklopa NI koji nose oznake 74S00 i 74LS00?
32. Koje su najznačajnije razlike između dva sklopa NILI koji nose oznake 74AS02 i 74ALS02?
33. Po čemu se međusobno razlikuju sklopovi NI 7400 i 7401?
34. Navedite osnovne značajke sklopova s otvorenim kolektorom.
35. Navedite osnovne značajke sklopova s tri izlazna stanja.
36. Koje su najznačajnije razlike između dva sklopa NI koji nose oznake 74HC00 i 74HCT00?
37. Koje su najznačajnije razlike između dva sklopa NI koji nose oznake 74AC00 i 74ACT00?



12. MULTIVIBRATORI U DIGITALNOJ ELEKTRONICI

Multivibratori su sklopovi s dva različita stanja. Do promjene stanja multivibratora može doći na dva načina: djelovanjem vanjskog signala i bez djelovanja vanjskog signala. Stanje koje je moguće promijeniti samo djelovanjem vanjskog signala naziva se stabilno stanje. Stanje koje se mijenja bez djelovanja vanjskog signala naziva se kvazistabilno stanje. Na temelju mogućih kombinacija stanja razlikuju se tri vrste multivibratora:

- bistabilni, kojemu su oba stanja stabilna
- monostabilni, koji ima jedno stabilno i jedno kvazistabilno stanje
- astabilni, koji ima oba stanja kvazistabilna.

Svaki od tih multivibratora može se izvesti s pomoću tranzistora, a u digitalnoj elektronici s pomoću logičkih sklopova. Međutim, u praksi digitalne elektronike najviše se upotrebljavaju integrirane izvedbe pa će njima biti poklonjena najveća pozornost. Osim toga postoje integrirani sklopovi koji se mogu upotrebljavati i kao monostabilni i kao astabilni multivibrator, tzv. vremenski sklopovi od kojih se obrađuje jedan primjer.

12.1. Bistabilni multivibratori

Tranzistorska izvedba bistabila
 Promjena stanja bistabila
 Izvedbe bistabila s pomoću logičkih sklopova
 Integrirane izvedbe bistabila
 Schmittov okidni sklop
 Logički sklopovi sa Schmittovim okidnim sklopom

12.2. Monostabilni multivibratori

Tranzistorska izvedba monostabila
 Integrirane izvedbe monostabila

12.3. Astabilni multivibratori

Tranzistorska izvedba astabila
 Izvedbe astabila s pomoću logičkih sklopova

12.4. Vremenski sklop

Izvedba i svojstva vremenskoga sklopa 555
 Izvedba monostabila s pomoću vremenskoga sklopa 555
 Izvedba astabila s pomoću vremenskoga sklopa 555

Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 12.1. Tranzistorski monostabil
 Vježba 12.2. Integrirane izvedbe monostabila
 Vježba 12.3. Tranzistorski astabil
 Vježba 12.4. Vremenski sklop 555

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

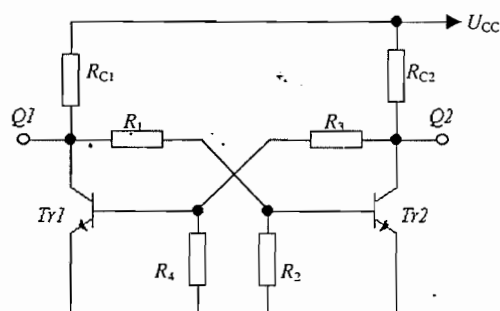
12.1. BISTABILNI MULTIVIBRATORI

Za digitalne sklopove obrađene u prethodnim poglavljima karakteristično je da stanje izlaza ovisi o trenutnom stanju na ulazima. Novo stanje na izlazu ne ovisi o prethodnom stanju izlaza. Takvi sklopovi nemaju svojstvo pamćenja i nazivaju se kombinacijski sklopovi (engl. combinational circuits).

Međutim, za gradnju digitalnih uređaja neophodni su i sklopovi koji mogu zadržati stanje na izlazu i nakon promjene stanja na ulazu. Takvi sklopovi nazivaju se sekvencijski ili slijedni sklopovi (engl. sequential circuits).

Temeljni sklop sa svojstvom pamćenja u digitalnoj elektronici jest bistabilni multivibrator, kraće bistabil (engl. bistable multivibrator, flip-flop, njem. bistabile Kippstufe). Već je prije spomenuto da bistabil ima dva stabilna stanja (otuda i naziv sklopa) koja se označavaju binarnim simbolima 0 i 1. Prema tome, ovisno o stanju u kojemu se nalazi, bistabil pamti 0 ili 1.

Tranzistorska izvedba bistabila



Slika 12.1. Shema bistabila

Pri uključenju sklopa na napon napajanja, zbog odstupanja vrijednosti komponenata od nazivnih, jedan tranzistor ode u zasićenje a drugi u zapiranje. Ako je tranzistor $Tr1$ u zasićenju, tada je tranzistor $Tr2$ u zapiranju. Na kolektoru tranzistora $Tr1$ mali je napon zasićenja:

$$U_{CE1} = U_{CEzas}$$

Putem otpornog djelila $R1/R2$ taj se napon prenosi na bazu tranzistora $Tr2$. Kako je to vrlo mali napon, blizu 0V, tranzistor $Tr2$ je u zapiranju pa je na njegovu kolektoru napon napajanja umanjen za pad napona na otporu $RC2$ koji stvara struja djelila $R3/R4$ i preostala struja kolektora I_{C0} :

$$U_{CE2} = U_{CEzap}$$

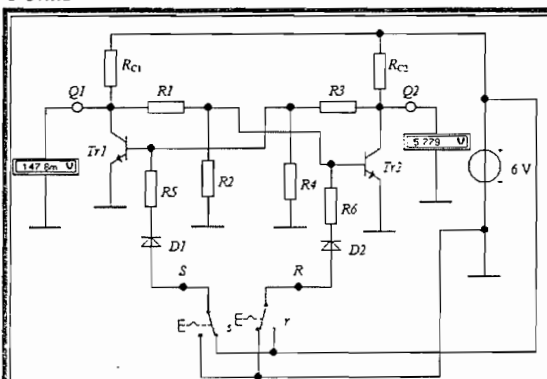
Napon U_{CE2} dovoljno je velik da podržava struju zasićenja tranzistora $Tr1$. Dakle, na izlazu $Q1$ je napon koji odgovara stanju 0, a na izlazu $Q2$ je napon koji odgovara stanju 1.

U drugome stabilnom stanju tranzistor $Tr1$ je u zapiranju, a tranzistor $Tr2$ u zasićenju, odnosno na izlazu $Q1$ je napon koji odgovara stanju 1, a na izlazu $Q2$ je napon koji odgovara stanju 0.

Promjena stanja bistabila

Kako bi se bistabilima mogla mijenjati stanja, potrebno je na osnovni spoj dodati ulaze preko kojih će djelovati prikladna pobuda.

Pokus



S / V	R / V	Q1 / V	Q2 / V
0	0	0,162	5,767
0	6	5,779	0,148
6	0	0,148	5,779
6	6	0,146*	0,146*

($R1=R3=22k\Omega$, $R2=R4=R5=R6=1k\Omega$, $RC1=RC2=1k\Omega$, $Tr1=Tr2=107$, $D1=D2=1N4148$)

Slika 12.2. Bistabil sa statičkim ulazima za okidanje

Ulazi preko kojih se promjena stanja bistabila (okidanje, engl. trigger, njem. Steuerung) postiže djelovanjem istosmjernoga pozitivnog napona (slika 12.2.), nazivaju se statički ili izravni ulazi i obično se označavaju sa S i R (od engl. set i reset).

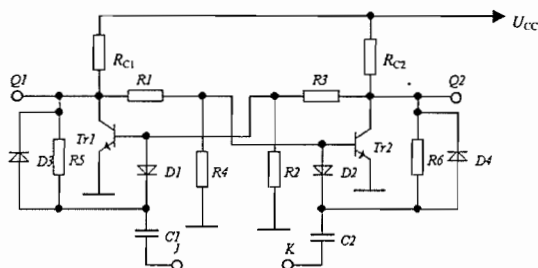
Do promjene stanja dolazi kad pozitivni napon djeluje na ulaz spojen na bazu tranzistora koji ne vodi (npr. R). Time taj tranzistor prelazi u zasićenje pa se njegov kolektorski napon smanji na U_{CEz} što preko otpornoga dijelila $R3/R4$ djeluje na bazu susjednoga tranzistora $Tr1$ i dovodi ga u zapiranje. Njegov izlazni napon poraste približno na iznos U_{CC} što održava tranzistor $Tr2$, koji je proveo, u zasićenju i nakon prestanka djelovanja pobude s ulaza.

Do nove promjene stanja može doći samo ako se pozitivni napon dovede na ulaz S . Time tranzistor $Tr1$ dolazi u zasićenje, a tranzistor $Tr2$ u zapiranje.

Istodobno dovođenje pozitivnoga napona na oba ulaza nije dopušteno.

Bistabil s ulazima R i S naziva se **SR-bistabil**.

Ulazi preko kojih se promjena stanja bistabila postiže dovođenjem pozitivnih impulsa nazivaju se dinamički ulazi i obično se označavaju s J i K (slika 12.3.). Impuls djeluje samo preko onog ulaza koji je spojen na bazu tranzistora koji je vodljiv.



Slika 12.3. Bistabil s dinamičkim ulazima za okidanje

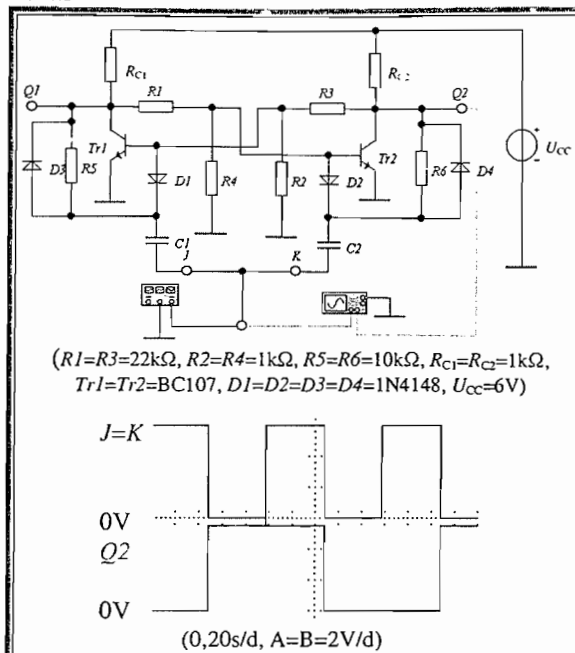
Ako je tranzistor $Tr1$ u zasićenju, pozitivni će impuls djelovati samo ako se dovede na ulaz J . Impuls će preko diode $D3$ i vodljivoga tranzistora $Tr1$ nabiti kondenzator $C1$. Pri prestanku djelovanja impulsa kondenzator $C1$ izbija se preko otpornika $R5$ i vodljivoga tranzistora $Tr1$. Na otporniku $R5$ nastaje negativan impuls (djelovanje CR-mreže) koji preko diode $D1$ dovodi tranzistor $Tr1$ u zapiranje. To uzrokuje povećanje napona U_{CE1} što preko dijela $R1/R2$ dovodi tranzistor $Tr2$ u zasićenje.

Bistabili s ulazima J i K naziva se **JK-bistabil**.

Kod JK-bistabila dopušteno je istodobno dovođenje impulsa na oba ulaza. Svaki impuls, bez obzira na to koji je tranzistor u zasićenju, promijeni stanje bistabila (slika 12.4.).

Ako se usporedi frekvencija na ulazu i izlazu bistabila, vidi se da u ovom slučaju JK-bistabil dijeli frekvenciju ulaznih impulsa s 2.

Pokus

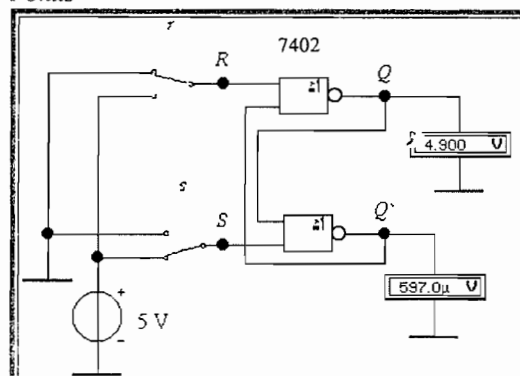


Slika 12.4. Istodobno djelovanje impulsa na oba ulaza JK-bistabila

Izvedbe bistabila s pomoću logičkih sklopova

Bistabili se mogu izvesti s pomoću logičkih sklopova. Primjer izvedbe SR-bistabila pokazan je na slici 12.5. Izlazi se označavaju s Q i Q' .

Pokus



Slika 12.5. SR-bistabil izveden s pomoću sklopova NILI

Djelovanje ulaza prikazuje se tablicama stanja (tablica 12.5.). Stanje 1 odgovara visokoj naponskoj razini (4,9V), a stanje 0 niskoj naponskoj razini (0,5mV). Prethodno stanje na izlazu Q označavat će se oznakom Q_0 , a novo stanje oznakom Q . Treba napomenuti da se u stručnoj literaturi i tvorničkim podacima proizvođača integriranih digitalnih sklopova vrlo često rabe i oznake Q_n za staro stanje i Q_{n+1} za novo stanje bistabila.

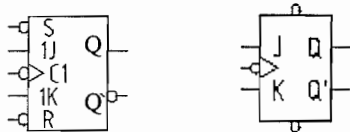
Tablica 12.1. Tablica stanja SR-bistabila

S	R	Q	Q'
0	0	Q_0	Q_0'
0	1	0	1
1	0	1	0
1*	1*	1	1

* nedopuštena stanje na ulazima

Integrirane izvedbe bistabila

U digitalnoj elektronici upotrebljavaju se integrirane izvedbe bistabila. U skupinama TTL i CMOS postoji vrlo velik izbor različitih tipova bistabila.



CP	J	K	S	R	Q	Q'
X	X	X	0	0	1*	1*
X	X	X	0	1	1	0
X	X	X	1	0	0	1
↓	0	0	1	1	Q_0	Q_0'
↓	0	1	1	1	0	1
↓	1	0	1	1	1	0
↓	1	1	1	1	Q_0	Q_0'

* nestabilno stanje na izlazima

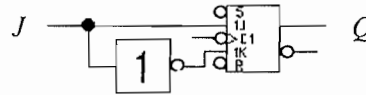
Slika 12. 6. Primjer integrirane izvedbe JK-bistabila (simbol i tablica stanja)

Primjer integrirane izvedbe JK-bistabila pokazan je na slici 12.6. Osim ulaza za podatke J i K bistabil ima poseban upravljački ulaz označen s CI (proizvođači integriranih sklopova označavaju ga s CP ili CLK , od engl. clock pulse). Taj ulaz služi za sinkroniziranje rada više zajedno spojenih bistabila (vidi registri i brojiča). Signal s ulaza za podatke J i K djeluje kod ovoga bistabila na zadnji (padajući) brid upravljačkog impulsa dovedenoga na ulaz CI (u tablici označeno znakom ↓). Pri tome ulazi S i R (proizvođači integriranih sklopova često ih označavaju s PR i CLR) moraju biti u stanju 1.

Ulazi S i R su asinkroni ulazi. Dovođenjem stanja 0 na te ulaze bistabil se može postaviti u odgovarajuće stanje bez obzira na djelovanje upravljačkih impulsa. Zato se ti ulazi nazivaju asinkronim ulazima.

Primjer 12.1.

Za spoj sa slike 12.7. napisati tablicu stanja.

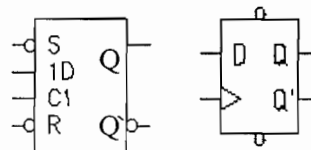


Slika 12.7. Spoj JK-bistabila invertora

CP	J	K	S	R	Q	Q'
X	X	X	0	0	1*	1*
X	X	X	0	1	1	0
X	X	X	1	0	0	1
↓	0	1	1	1	0	1
↓	1	0	1	1	1	0

* nestabilno stanje na izlazima

Spoj JK-bistabila prema slici 12.7. na izlazu daje stanje jednako stanju na ulazu u vrijeme nailaska upravljačkog impulsa. Takav bistabil naziva se D-bistabil.



CP	D	S	R	Q	Q'
X	X	0	0	1*	1*
X	X	0	1	1	0
X	X	1	0	0	1
↑	0	1	1	0	1
↑	1	1	1	1	0

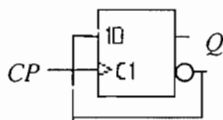
* nestabilno stanje na izlazima

Slika 12.8. Primjer integrirane izvedbe D-bistabila (simbol i tablica stanja)

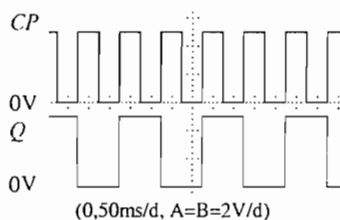
Primjer integrirane izvedbe D-bistabila pokazan je na slici 12.8. Taj bistabil ima jedan ulaz za podatke D i ulaz za upravljački impuls CI . Signal s ulaza za podatke D djeluje kod toga bistabila na prednji (rastući) brid upravljačkog impulsa dovedenoga na ulaz CI (u tablici označeno znakom ↑). Pri tome ulazi S i R moraju biti u stanju 1.

Primjer 12.2.

Za spoj D-bistabila prema slici 12.9., pobuđen nizom impulsa na ulazu CP, nacrtajte dijagram ulaznog i izlaznog napona.



Slika 12. 9. Spoj D-bistabila



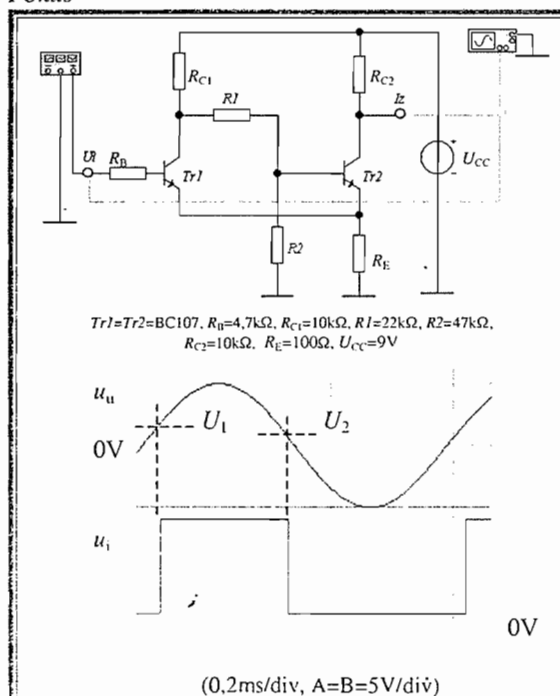
Sklop ima dva stabilna stanja. U jednomu stanju je tranzistor $Tr1$ u zapiranju a tranzistor $Tr2$ u zasićenju, a u drugom je obratno. Na stanje sklopa izravno utječe razina ulaznog napona.

Kod ulaznog napona 0V tranzistor $Tr1$ je u zapiranju. Tranzistor $Tr2$ dobiva potrebnu struju baze preko otpora R_{C1} i $R1$ pa je u zasićenju. Izlazni napon je zbroj padova napona na otporu R_E i napona U_{CE} :

$$U_{iz} = U_{CEz} + I_E R_E \approx U_{CC} \frac{R_E}{R_{C2} + R_E}$$

Takvo stanje ostat će sve dok ulazni napon ne poprimi dovoljno veliku pozitivnu vrijednost U_1 (napon gornje okidne razine, njem. Einschaltsschwelle) pri kojoj tranzistor $Tr1$ postaje vodljiv. To je vrijednost pada napona na otporu R_E , koji stvara struja I_{E2} , uvećan za napon U_{BE} kod kojega tranzistor prelazi u zasićenje (za silicijske tranzistore oko 0,6-0,7V):

$$U_1 = U_{CC} \frac{R_E}{R_{C2} + R_E} + U_{BE}$$

Schmittov okidni sklop**Pokus**

Slika 12.10. Schmittov okidni sklop

Posebna vrsta bistabila je emitterski vezani bistabil, poznatiji pod nazivom Schmittov okidni sklop (engl. emitter-coupled binary, Schmitt Trigger, njem. Schmitt-Trigger). Kod te vrste bistabila izlaz tranzistora $Tr1$ povezan je s ulazom tranzistora $Tr2$ putem otpornoga djelila $R1/R2$ kao kod običnoga bistabila, dok je druga veza ostvarena s pomoću zajedničkog otpora u emitterskom krugu R_E .

Zato što je tranzistor $Tr1$ postao vodljiv, smanjio se napon na njegovu kolektoru pa tranzistor $Tr2$ ne dobiva potrebnu struju baze te prelazi u zapiranje. Izlazni napon sklopa postaje približno napon napajanja U_{CC} . Na otporu R_E sada je pad napona $I_{E1} R_E$.

Takvo stanje ostat će i kad se ulazni napon smanji ispod razine U_1 jer je $I_{E1} R_E$ manje od $I_{E2} R_E$. Do promjene stanja doći će tek kad se ulazni napon smanji ispod razine U_2 (napon donje okidne razine, njem. Ausschaltsschwelle) pri kojoj tranzistor $Tr1$ prestaje voditi. To je vrijednost pada napona na otporu R_E koji stvara struja I_{E1} uvećan za pad napona U_{BE} kod kojeg još tranzistor vodi (oko 0,6-0,7V):

$$U_2 = U_{CC} \frac{R_E}{R_{C1} + R_E} + U_{BE}$$

Razlika napona U_1 i U_2 naziva se histerezom (engl. hysteresis, njem. Schalthysterese).

Schmittov okidni sklop upotrebljava se kao sklopka neosjetljiva na smetnje, diskriminator razine napona (pokazuje kad je promatrani napon iznad ili ispod određene razine) i za oblikovanje drugih valnih oblika u pravokutne impulse (slika 12.10.).

Primjer 12.3.

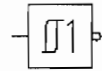
Izračunati napon histereze Schmittovoga okidnoga sklopa ako je zadano: $U_{CC}=9V, R_{C1}=10k\Omega, R_{C2}=1k\Omega$ i $R_E=150\Omega$.

$$U_H = U_1 - U_2 = 9 \cdot 0,15 / (1 + 0,15) - 9 \cdot 0,15 / (10 + 0,15) = 1,04V$$

Logički sklopovi sa Schmittovim okidnim sklopom

Među integriranim logičkim sklopovima postoje sklopovi koji u ulaznom dijelu imaju Schmittov okidni sklop. Ti sklopovi imaju manju osjetljivost na smetnje i dobar odziv na spore promjene ulaznoga signala. Primjer takva sklopa je sklop 7414 (inverter) čiji simboli su prikazani na slici 12.11. Razlikuju se od ostalih logičkih sklopova po tome što imaju dvije razine ulaznih napona kod kojih dolazi do promjena logičkih stanja na izlazima.

a)



b)



Slika 12.11. Simboli invertora sa Schmittovim okidnom sklopom: a) IEC, b) ANSI

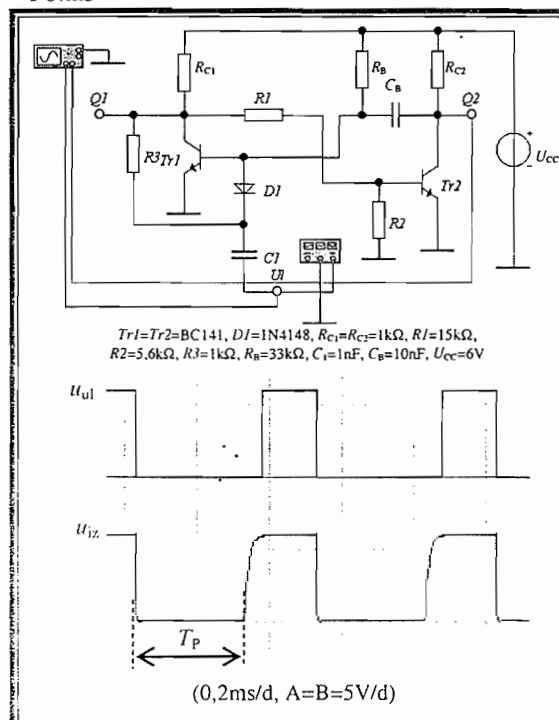
Logički sklopovi sa Schmittovim okidnim sklopom upotrebljavaju se za pretvorbu izobličenih i sporo-promjenljivih signala u pravokutne te za generiranje impulsa (vidi poglavlje 12.3. *Astabilni multivibrator*).

12.2. MONOSTABILNI MULTIVIBRATORI

Monostabilni multivibrator, kraće monostabil (engl. monostable multivibrator, one-shot, njem. monostabile Kippschaltung) ima jedno stabilno i jedno kvazistabilno stanje. Za promjenu stabilnoga stanja potrebna je vanjska pobuda preko prikladnog ulaza za okidanje, dok se iz kvazistabilnoga stanja sklop sam vraća u stabilno stanje. Monostabilni multivibrator primjenjuje se najčešće za kašnjenje impulsa i dijeljenje frekvencije.

Tranzistorska izvedba monostabila

Pokus



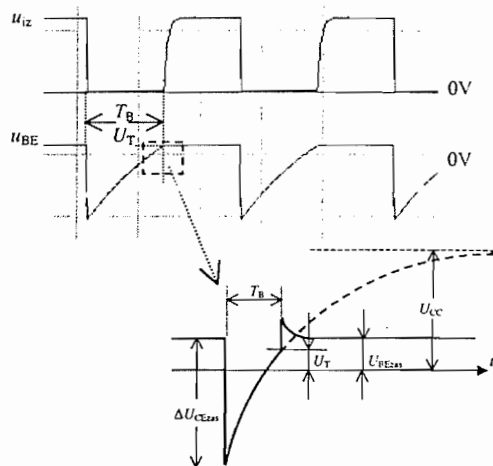
Slika 12.12. Djelovanje monostabila

Pri uključanju na napon napajanja monostabil je u stabilnom stanju. Tranzistor $Tr1$ dobiva preko otpora R_B struju baze koja ga drži u zasićenju. Napon na izlazu $Q1$ je U_{CEzas} a tranzistorom $Tr1$ teče kolektorska struja zasićenja. Otpor R_B mora biti tako odabran da je zadovoljen uvjet zasićenja za tranzistor $Tr1$: $I_{B1zas} > I_{Czas1}/h_{FE1}$, gdje je $I_{B1zas} = (U_{CC} - U_{BEzas})/R_B$.

Mali napon s kolektora tranzistora $Tr1$ preko djelila otpora $R1/R2$ drži tranzistor $Tr2$ u zapiranju. Napon na izlazu $Q2$ približno je jednak naponu napajanja U_{CC} , a kondenzator C_B nabijen je na napon $U_{CC} - U_{BEzas}$.

Pozitivan impuls napona u_u na ulazu za okidanje preko otpora $R3$ i vodljivoga tranzistora $Tr1$ brzo nabija kondenzator $C1$. Pri prestanku djelovanja impulsa kondenzator se počne izbijati. Negativan napon na otporu $R3$ preko diode $D1$ zakoči tranzistor $Tr1$ pa napon na njegovu kolektor poraste na vrijednost približnu naponu napajanja U_{CC} . Taj napon preko djelila $R1/R2$ tjera u bazu tranzistora $Tr2$ struju koja ga dovodi u zasićenje. Na izlazu $Q2$ je napon U_{CEzas} a tranzistorom teče kolektorska struja I_{Czas} . To je kvazistabilno stanje.

Kondenzator C_B sada se preko otpora R_B i vodljivoga tranzistora $Tr2$ izbiju i zatim nabija. Struja koja teče kroz otpor R_B stvara negativni prednapon baze tranzistora $Tr1$ koji se mijenja od negativnog iznosa prema naponu U_{CC} i drži tranzistor $Tr1$ u zapiranju i nakon prestanka pobudnog impulsa.

Slika 12.13. Dijagrami napona u_{iz} i u_{BE1}

Kad napon u_{BE1} dostigne iznos U_T kod kojeg tranzistor počinje voditi (za silicijske tranzistore to je oko 0,5V), mijenja se stanje sklopa. Tranzistor $Tr1$ provede i napon u_{CE1} naglo se smanji s iznosa U_{CC} na iznos U_{CEZAS} što preko djelila $R1/R2$ dovede tranzistor $Tr2$ u zapiranje, odnosno povrat sklopa u prvobitno, stabilno stanje.

Prema tome trajanje kvazistabilnoga stanja ovisi o vremenskoj konstanti $R_B C_B$ i može se izračunati prema izrazu:

$$T_P = R_B C_B \ln 2 = 0,693 R_B C_B$$

Dakle, odabirom vrijednosti za R_B i C_B može se postići željeno trajanje kvazistabilnoga stanja. Međutim, odabir vrijednosti za otpor R_B ograničen je uvjetom zasićenja za tranzistor $Tr1$.

Primjer 12.4.

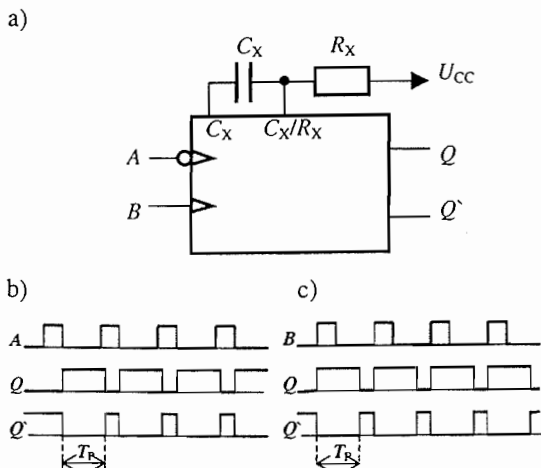
Izračunati trajanje kvazistabilnoga stanja monostabila sa slike 12.12. ako su vrijednosti $C_B=10\text{nF}$ i $R_B=33\text{k}\Omega$.

$$T_P = 0,693 \cdot 33 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9} = 228,69 \mu\text{s}$$

Integrirane izvedbe monostabila

Monostabilni multivibrator se u digitalnoj elektronici najviše upotrebljava za kašnjenje impulsa, odnosno onda kad je potrebno odgoditi ili produžiti njegovo djelovanje.

Monostabilni učinak moguće je postići s pomoću spojeva logičkih sklopova i RC-mreža. Međutim, proizvođači digitalnih sklopova proizvode nekoliko tipova integriranih izvedbi. Za njih je svojstveno da im se izvana dodaju otpornik i kondenzator čija vremenska konstanta utječe na trajanje kvazistabilnog stanja (slika 12.14.a).

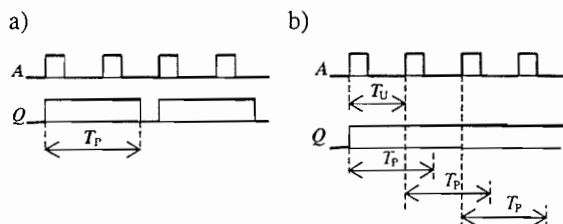


Slika 12.14. Integrirani monostabil

Svi integrirani monostabili imaju barem dva ulaza za okidanje, koji se međusobno razlikuju prema bridu kojim impuls uzrokuje promjenu stanja na izlazu (slika 12.14.b i 12.14.c). Integrirani monostabili mogu se prema djelovanju okidnih impulsa podijeliti u dvije skupine: monostabili bez svojstva ponovnog okidanja (engl. nonretriggerable) i sa svojstvom ponovnog okidanja (engl. retriggerable, njem. retriggerbare).

Kod monostabila bez svojstva ponovnog okidanja impulsi koji se dovode na ulaz za okidanje za vrijeme trajanja kvazistabilnog stanja, ne djeluju na monostabil. Djelovanje okidnog impulsa moguće je tek po prestanku kvazistabilnog stanja (slika 12.15.a).

Kod monostabila sa svojstvom ponovnog okidanja impulsi koji se dovode na ulaz za okidanje za vrijeme trajanja kvazistabilnog stanja, djeluju na monostabil tako da mu neprestano produžuju kvazistabilno stanje (slika 12.15.b).



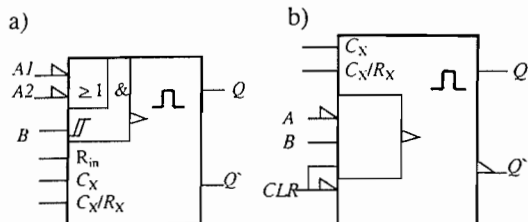
Slika 12.15. Djelovanje monostabila: a) bez svojstva ponovnog okidanja, b) sa svojstvom ponovnog okidanja

Integrirani sklop 74121 primjer je integriranoga monostabila bez svojstva ponovnog okidanja. Ima tri ulaza za okidanje (slika 12.16.a). Preko ulaza A (bilo kojeg ili oba) monostabil se okida padajućim bridom. tj. prijelazom iz stanja 1 u stanje 0, uz uvjet da je istodobno na ulazu B stanje 1. Okidanje na ulazu B zbiva se na rastući brid, tj. prijelazom iz stanja 0 u stanje 1. Pri tome mora barem jedan od ulaza A biti u stanju 0.

Trajanje impulsa na izlazu, tj. trajanje kvazistabilnog stanja, može se približno izračunati iz izraza:

$$T_P = 0.693 \cdot R_X \cdot C_X$$

Za R_X može se izabrati vrijednost između 2 i 40kΩ, a za C_X do 1000μF, što daje vrijednosti trajanja kvazistabilnog stanja između 40ns i 28s.



Slika 12.16. Simboli integriranih izvedbi monostabila: a) 74121, b) 74123

Integrirani sklop 74123 sadrži u jednom kućištu dva istovjetna monostabila sa svojstvom ponovnog okidanja. Osim ulaza A i B za okidanje padajućim, odnosno rastućim bridom, ovaj monostabil ima poseban ulaz označen oznakom CLR (slika 12.16.b). Dok je na ulazu CLR stanje 0, nije moguće okidanje monostabila. Ako je ulaz CLR u stanju 1, moguće je okidanje monostabila preko ulaza A i B.

Trajanje kvazistabilnog stanja određuju elementi koji se dodaju izvana. R_X ne smije biti manji od 5 niti veći od 50kΩ. Za C_X nema ograničenja. Trajanje kvazistabilnog stanja moguće je približno izračunati prema izrazu:

$$T_P = k \cdot R_X \cdot C_X \cdot \left(1 + \frac{700}{R_X}\right)$$

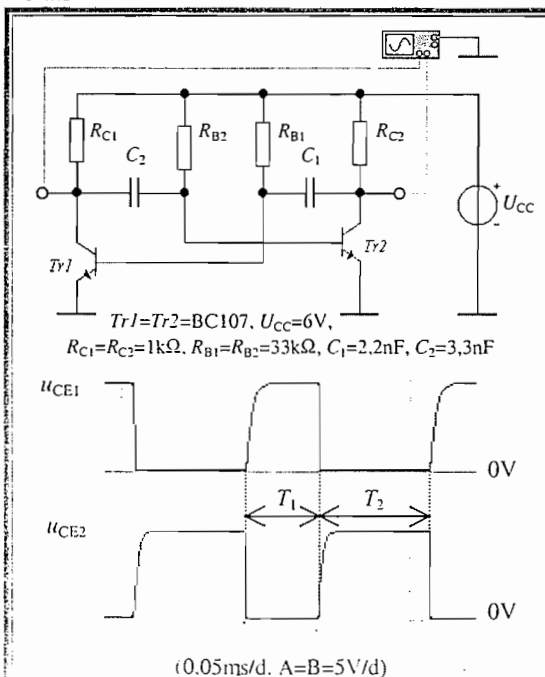
gdje je k konstanta ovisna o skupini integriranih sklopova kojoj pripada sklop.

12.3. ASTABILNI MULTIVIBRATORI

Astabilni multivibrator, kraće astabil (engl. astable multivibrator, njem. astabile Kippstufe) jest multivibrator koji ima oba stanja kvazistabilna. To znači da se stanja sklopa neprekidno izmjenjuju bez vanjske pobude. Astabilni multivibrator primjenjuje se kao generator pravokutnih impulsa.

Tranzistorska izvedba astabila

Pokus



Slika 12.17. Shema i djelovanje astabila

Pri uključanju na napon napajanja zbog i najmanje, ali neizbježne nesimetričnosti sklopa jedan od tranzistora, npr. $Tr2$, bit će više vodljiv u odnosu na drugi, tj. $Tr1$. Posljedica toga je da tranzistor $Tr2$ dolazi u zasićenje, a $Tr1$ u zapiranje. To je kvazistabilno stanje čije trajanje je označeno s T_1 (slika 12.17.).

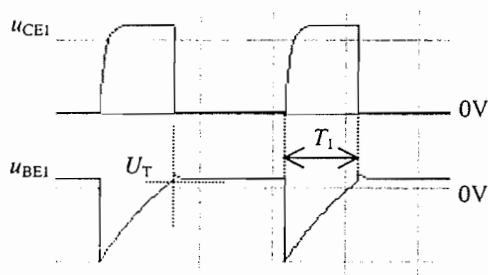
Za vrijeme trajanja kvazistabilnoga stanja T_1 , napon u_{CE1} približno je jednak naponu napajanja: $u_{CE1} = U_{CC}$. Preko otpora R_{C1} i baze vodljivoga tranzistora $Tr2$ kondenzator C_2 nabio se na napon $U_{CC} - U_{BEzAS}$.

Napon U_{CC} preko otpora R_{B2} tjera u bazu tranzistora $Tr2$ struju koja ga drži u stanju zasićenja. Napon u_{CE2} je napon zasićenja tranzistora: $u_{CE2} = U_{CEZAS}$, a tranzistorom u izlaznom krugu teče struja zasićenja: $I_{C2} = I_{CZAS}$.

Otpor R_{B2} mora biti tako odabran da je zadovoljen uvjet zasićenja za tranzistor $Tr2$: $I_{B2ZAS} > I_{C2ZAS} / h_{FE2}$, gdje je $I_{B2ZAS} = (U_{CC} - U_{BEZAS}) / R_{B2}$.

U trenutku uključanja nabijen kondenzator C_1 sada se preko otpora R_{B1} i vodljivoga tranzistora $Tr2$ izbija. Struja koja teče kroz otpor R_{B1} stvara prednapon baze tranzistora $Tr1$ koji se mijenja od negativnog iznosa prema naponu U_{CC} (slika 12.18.).

Kad napon u_{BE1} dostigne iznos U_T kod kojeg tranzistor počinje voditi (za silicijske tranzistore to je oko 0,5V), mijenja se stanje sklopa. Tranzistor $Tr1$ provede, i napon u_{CE1} naglo se smanji s iznosa U_{CC} na iznos U_{CEzas} :

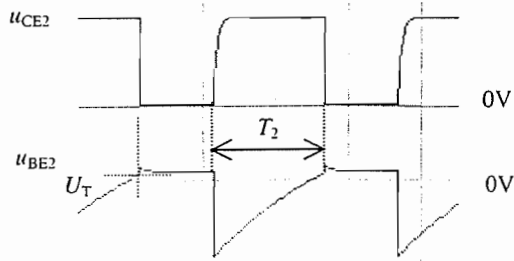


(0,05ms/d, A=B=5V/d)

Slika 12.18. Naponi u_{CE1} i u_{BE1} astabila

To smanjenje napona prenosi se preko kondenzatora C_2 na bazu tranzistora $Tr2$ i on prestaje voditi pa napon u_{CE2} postaje približno jednak naponu napajanja U_{CC} , što znači da je astabil prešao u kvazistabilno stanje T_2 .

Preko otpora R_{C2} i baze vodljivoga tranzistora $Tr1$ kondenzator C_1 brzo se nabio na iznos $U_{CC}-U_{BEzas}$. Napon U_{CC} preko otpora R_{B1} tjera u bazu struju koja ga drži u zasićenju pa je kolektorska struja tranzistora $Tr1$ struja zasićenja: $I_{C1} = I_{Czas1}$. Otpor R_{B1} mora biti tako odabran da je zadovoljen uvjet zasićenja za tranzistor $Tr1$: $I_{B1zas} > I_{C1zas}/h_{FE1}$, gdje je $I_{B1zas} = (U_{CC} - U_{BEzas})/R_{B1}$.



(0,05ms/d, A=B=5V/d)

Slika 12.19. Naponi astabila u_{CE2} i u_{BE2}

Sada se kondenzator C_2 izbija preko otpora R_{B2} i time podržava kvazistabilno stanje T_2 sve dok napon

u_{BE2} ne dostigne iznos U_T . Tada ponovo provede tranzistor $Tr2$. Time izazvana promjena napona u_{CE2} prenosi se na bazu tranzistora $Tr1$ koji prelazi u zapiranje pa se uspostavlja kvazistabilno stanje T_1 .

Iz izloženog objašnjenja rada astabila očigledno je da trajanje kvazistabilnoga stanja T_1 ovisi o brzini promjene napona u_{BE1} , a T_2 o brzini promjene napona u_{BE2} . Ti naponi se zbog izbijanja i nabijanja kondenzatora C_1 , odnosno C_2 , mijenjaju eksponencijalno ovisno o veličini vremenskih konstanti $\tau_1 = R_{B1}C_1$, odnosno $\tau_2 = R_{B2}C_2$. Stoga se trajanja kvazistabilnih stanja mogu izračunati prema izrazima:

$$T_1 = R_{B1} C_1 \ln 2 = 0,693 R_{B1} C_1$$

$$T_2 = R_{B2} C_2 \ln 2 = 0,693 R_{B2} C_2$$

Iz toga slijedi frekvencija izlaznoga napona astabila:

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{0,693}{R_{B1}C_1 + R_{B2}C_2}$$

Prema tome, odabirom vrijednosti za R_B i C_B može se postići željeno trajanje kvazistabilnih stanja, odnosno frekvencije izlaznoga napona. Međutim, odabir vrijednosti za otpore R_B ograničen je uvjetom za zasićenje tranzistora.

Primjer 12.5.

Izračunati frekvenciju izlaznoga napona astabila ako su vrijednosti elemenata: $R_{C2}=R_{C1}=1\text{ k}\Omega$, $R_{B2}=R_{B1}=33\text{ k}\Omega$, $C_1=2,2\text{ nF}$, $C_2=3,3\text{ nF}$ i $U_{CC}=9\text{ V}$.

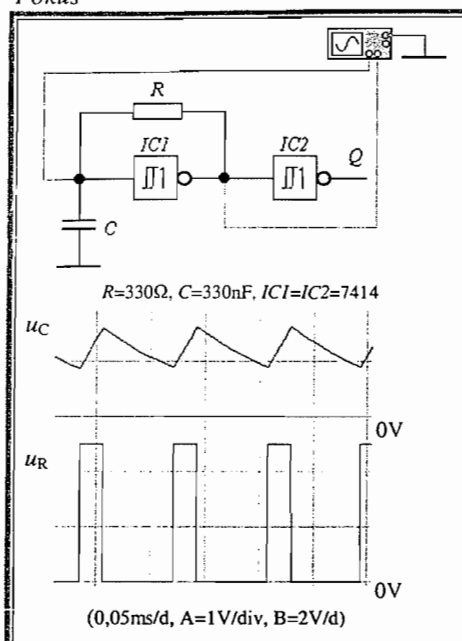
$$f = 1 / (0,693(33 \cdot 10^3 \cdot 2,2 \cdot 10^{-9} + 33 \cdot 10^3 \cdot 3,3 \cdot 10^{-9})) = 7950,4\text{ Hz}$$

Izvedba astabila s pomoću logičkih sklopova

U digitalnoj elektronici astabil se upotrebljava za generiranje impulsa ritma. Mogu se primijeniti logički sklopovi, monostabili, integrirane izvedbe i tzv. vremenski sklopovi.

Pokus sa slike 12.20. pokazuje jednostavan način generiranja pravokutnih impulsa s pomoću logičkih sklopova koji na ulazu imaju Schmittov okidni sklop. Dok je izlazni napon prvog invertora $IC1$ u stanju 1, kondenzator C nabija se preko otpornika R . Kad napon na kondenzatoru dostigne iznos gornjeg okidnog praga Schmittova okidnoga sklopa, dolazi do brze promjene stanja na izlazu prvog invertora. Sad se kondenzator C izbija preko otpornika R i izlaza prvog invertora sve dok napon na njemu ne padne ispod donjeg okidnoga praga Schmittova okidnoga sklopa. To uzrokuje vraćanje prvog invertora u prvobitno stanje.

Pokus



Slika 12.20. Astabil izveden s pomoću invertora sa Schmittovim okidnim sklopom

Frekvencija izlaznoga napona ovisi o vrijednostima elemenata C i R . Ako se kao invertori upotrebe sklopovi 7414 standardne podskupine TTL, moguće je za približno izračunavanje frekvencije koristiti se izrazom:

$$f = 0,8 \frac{R}{C}$$

Drugi inverter $IC2$ dodaje se da se izlaz astabila odijeli od RC-mreže.

Primjer 12.6.

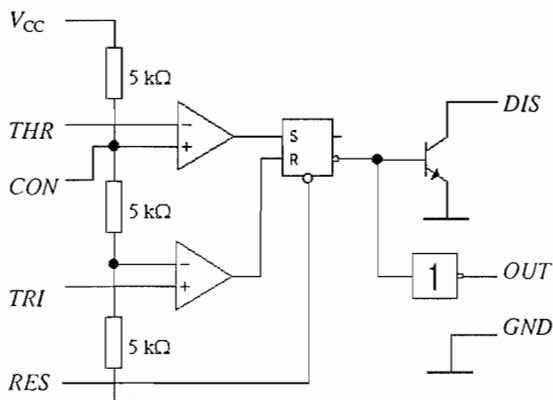
Izračunati frekvenciju izlaznoga napona generatora impulsa (slika 12.20.) ako su zadane vrijednosti elemenata: $R=0,33\text{k}\Omega$ i $C=0,33\mu\text{F}$.

$$f = 0,8 / 330 \cdot 0,33 \cdot 10^{-6} = 7346\text{Hz}$$

12.4. VREMENSKI SKLOP

Vremenski sklop (engl. timer, njem. Zeitgeber) integrirani je sklop raznovrsnih mogućnosti primjene. Vrlo je česta primjena vremenskoga sklopa za kašnjenje impulsa (monostabilni multivibrator) i za generiranje impulsa (astabilni multivibrator). Mnogi proizvođači integriranih sklopova proizvode vremenski sklop poznat pod nazivom 555 (bipolarna izvedba), odnosno 7555 (unipolarna izvedba).

Izvedba i svojstva vremenskoga sklopa 555



Slika 12.21. Logička shema vremenskoga sklopa 555

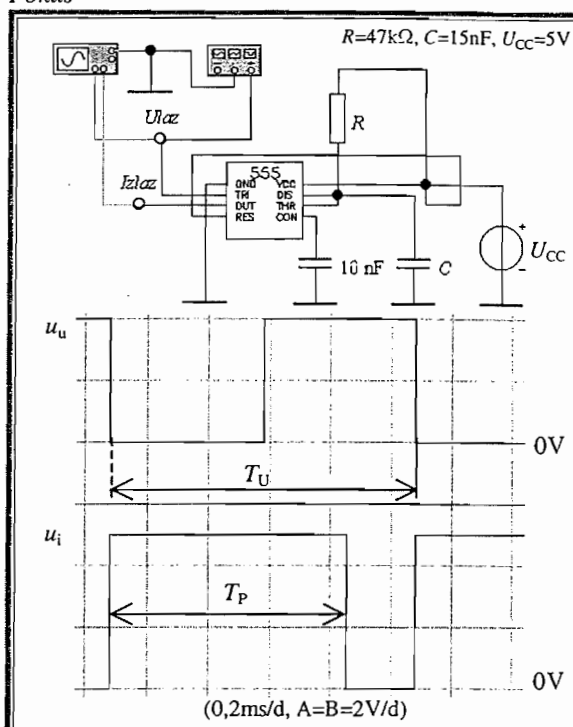
Vremenski sklop 555 sadrži otporno djelo, dva komparatora, bistabil, izlazni stupanj i tranzistor za

izbijanje kondenzatora (slika 12.21.). Dodavanjem elemenata izvana moguće je dobiti različite sklopove. Napon napajanja može biti između 5 i 15 volta. Amplituda izlaznoga napona približno je jednaka naponu napajanja.

Izvedba monostabila s pomoću vremenskoga sklopa 555

Spajanjem kondenzatora C i otpornika R s vremenskim sklopom prema slici 12.22. dobije se monostabil. U stabilnom stanju kondenzator C je prazan i izlazni napon je niske razine (stanje 0). Dovođenjem okidnog impulsa na ulaz za okidanje (izvod TRI) aktivira se bistabil preko komparatora K2. Tranzistor prelazi u zapiranje, a izlazni napon prelazi u područje visoke razine (stanje 1). Kondenzator C nabija se preko otpornika R . To je kvazistabilno stanje (slika 12.22.).

Pokus



Slika 12.22. Djelovanje sklopa 555 u spoju monostabila

Kad napon na kondenzatoru C dostigne vrijednost dvije trećine napona U_{CC} , komparator $K1$ vraća bistabil preko ulaza R u početno stanje. Izlazni napon prelazi u područje niske razine (stanje 0). Kondenzator C izbija se preko vodljivoga tranzistora. Sklop je ponovo u početnom, stabilnom stanju u kojemu ostaje do ponovnog okidanja.

Trajanje kvazistabilnoga stanja, tj. impulsa na izlazu monostabila, određuju vrijednosti elemenata R i C :

$$T_P = 1,1RC$$

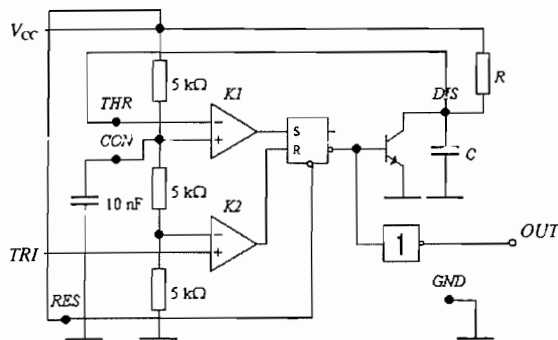
Vrijednosti kapacitivnosti kondenzatora C mogu se kretati od 1000pF do 100μF, a otpora R od 1kΩ do 10MΩ.

Preko izvoda RES moguće je prekinuti trajanje kvazistabilnoga stanja u bilo kojemu trenutku dovodenjem napona niske razine.

Primjer 12.7.

Izračunati trajanje kvazistabilnoga stanja monostabila izvedenoga s pomoću sklopa 555 ako su zadane vrijednosti $R=47k\Omega$ i $C=15nF$.

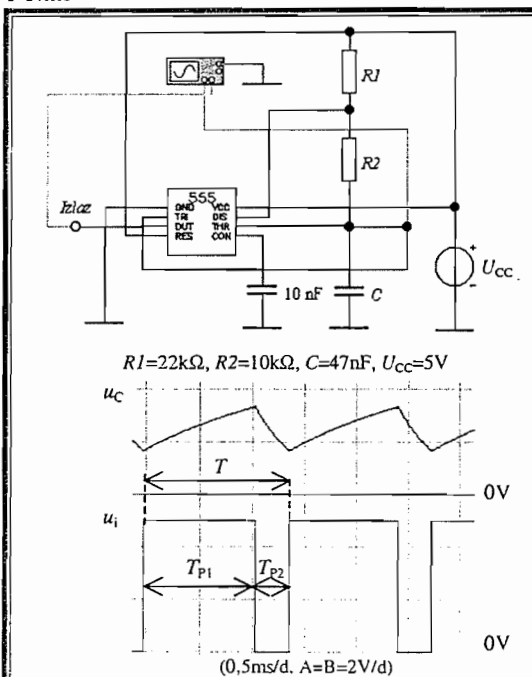
$$T_P = 1,1 \cdot 47 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^{-9} = 775,5 \mu s = 0,7755 ms$$



Slika 12.23. Skop 555 u spoju monostabila

Izvedba astabila s pomoću vremenskoga sklopa 555

Pokus

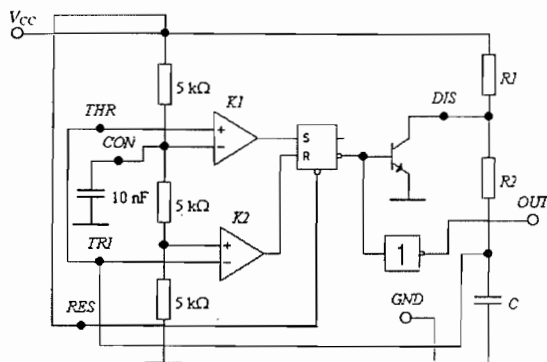


Slika 12.24. Djelovanje sklopa 555 u spoju astabila

Dodavanjem dvaju otpornika i kondenzatora vremenskomu sklopu prema slici 12.24. dobiva se astabil.

Kad je tranzistor nevodljiv ($Q'=0$), nabija se kondenzator C preko otpornika $R1$ i $R2$. Na izlazu astabila je napon koji odgovara stanju 1. To je kvazistabilno stanje T_{P1} .

Kad napon na kondenzatoru dostigne iznos od dvije trećine napona U_{CC} , komparator $K1$ mijenja stanje i postavlja bistabil u stanje 0 ($Q=1$). Tranzistor provede i kondenzator se izbija preko otpornika $R2$. U tom je razdoblju na izlazu astabila napon koji odgovara stanju 0. To je kvazistabilno stanje T_{P2} . Kad se kondenzator izbije do iznosa jedne trećine napona U_{CC} , komparator $K2$ mijenja stanje i postavlja bistabil u stanje 1. Tranzistor prestaje voditi i kondenzator C ponovo se nabija preko oba otpora.



Slika 12.25. Skop 555 u spoju astabila

Trajanja kvazistabilnih stanja ovise o vrijednostima elemenata $R1$, $R2$ i C :

$$T_{P1} = 0,693 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C \quad T_{P2} = 0,693 \cdot R_2 \cdot C$$

pa se frekvencija izlaznoga napona može izračunati:

$$f = \frac{1}{(T_{P1} + T_{P2})}$$

Vrijednosti kapacitivnosti kondenzatora mogu biti između 1000pF i 100μF, a zbroj otpora $R1$ i $R2$ između 1kΩ i 10MΩ.

Primjer 12.8.

Izračunati frekvenciju izlaznoga napona astabila izvedenog s pomoću sklopa 555 ako su vrijednosti elemenata:

$R_1 = 22\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$ i $C = 47\text{nF}$.

$$T_{P1} = 0,693 \cdot (22 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) \cdot 47 \cdot 10^{-9} = 1074,8 \mu\text{s}$$

$$T_{P2} = 0,693 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 47 \cdot 10^{-9} = 329,7 \mu\text{s}$$

$$f = 1 / (1074,8 \cdot 10^{-6} + 329,7 \cdot 10^{-6}) = 712\text{Hz}$$

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

VJEŽBA 12.1. TRANZISTORSKI MONOSTABIL

Zadatak

Proširiti znanja o monostabilnom multivibratoru (utjecaj opterećenja na trajanje impulsa).

Upoznati mogućnosti primjene monostabila.

Uvježbavati postupke u primjeni instrumenata pri ispitivanju elektroničkih sklopova i prikazu mjernih rezultata.

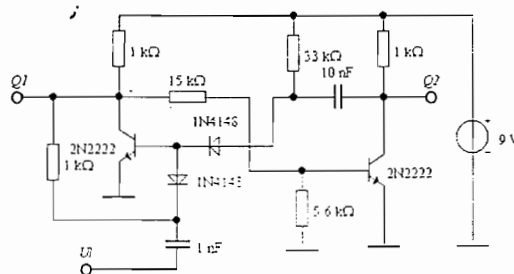
Pribor i instrumenti

- tranzistor 2N2222, 2 komada
- diode 1N4148 (2 komada)
- otpornici 1kΩ (3 komada), 1,5kΩ, 4,7kΩ, 5,6kΩ, 5kΩ, i 33kΩ
- kondenzatori 1nF, 10nF, 22nF i 33nF
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napajanja 0-15V.
- osciloskop
- funkcijski generator.

Priprema

1. Izračunajte trajanje kvazistabilnoga stanja monostabilnoga multivibratora sa slike 12.26.

2. Nacrtajte očekivani oblik napona u_{BE1} , u_{BE2} , u_{CE1} i u_{CE2} monostabila sa slike 12.26. ako je na ulaz za okidanje priključen izvor pravokutnih impulsa frekvencije 2 kHz.



Slika 12.26. Monostabilni multivibrator

Pokusi

1. Mjerenje napona i struja monostabila u stabilnomu stanju

1.1. Spojite elemente monostabila sa slike 12.26. i priključite na napon napajanja. Izmjerite vrijednosti napona U_{BE} i U_{CE} obaju tranzistora monostabila za stabilno stanje.

Koji tranzistor je u zasićenju, a koji u zapiranju?

2. Trajanje kvazistabilnoga stanja

2.1. Na ulaz monostabila (slika 12.26.) priključite izvor pravokutnih impulsa amplitude U_{CC} i frekvencije 2kHz. Osciloskopom utvrdite oblike napona u_{BE} i u_{CE} obaju tranzistora.

2.2. Na temelju dobivenih oscilograma napona u_{BE} i u_{CE} odredite trajanje kvazistabilnoga stanja. Koja je uloga diode spojene između baze tranzistora $Tr1$ i otpora R_B ?

3. Promjena trajanja kvazistabilnoga stanja

3.1. Ispitajte utjecaj vrijednosti otpora R_B na rad monostabila sa slike 12.26. tako da umjesto otpora od 33k Ω spojite otpore 15k Ω , odnosno 47k Ω . Iznesite zapažanja.

3.2. Ispitajte utjecaj vrijednosti kondenzatora C_B na rad monostabila tako da umjesto kondenzatora od 10nF spojite kondenzatore od 22nF i 33 nF. Iznesite zapažanja.

3.3. Kako djeluje monostabil kad je trajanje kvazistabilnoga stanje duže od periode ulaznoga napona?

4. Opterećenje monostabila otporom prema masi

4.1. Izlaz monostabila Q_1 (slika 12.26.) opteretite otporom $R = 4,7k\Omega$ spojenim prema masi. Na ulaz za okidanje spojite izvor okidnih impulsa amplitude U_{CC} i frekvencije 2kHz. Osciloskopom ustanovite oblike napona u_{BE} i u_{CE} obaju tranzistora i trajanje kvazistabilnoga stanja.

4.2. Izlaz monostabila Q_2 (slika 12.26.) opteretite otporom $R = 4,7k\Omega$ spojenim prema masi. Na ulaz za okidanje spojite izvor okidnih impulsa amplitude U_{CC} i frekvencije 2kHz. Osciloskopom ustanovite oblike napona u_{BE} i u_{CE} obaju tranzistora i trajanje kvazistabilnoga stanja.

4.3. Koje promjene u rad monostabila unosi otporno opterećenje spojeno prema masi?

VJEŽBA 12.2. INTEGRIRANE IZVEDBE MONOSTABILA

Zadatak

Proširiti znanja o integriranim izvedbama monostabila.

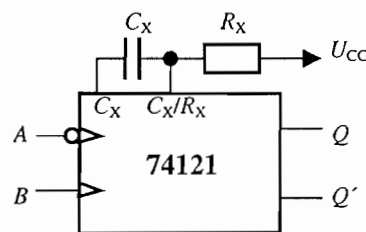
Upoznati mogućnosti primjene monostabila.

Pribor i instrumenti

- integrirani sklopovi 74121 i 74123
- otpornici 5,6k Ω , 15 k Ω , 33k Ω
- kondenzatori 33nF i 470nF
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napajanja 5V
- osciloskop
- funkcijski generator.

Priprema

1. Proučite tvorničke podatke integriranoga sklopa 74121. Opišite svojstva i nacrtajte dijagram spajanja.

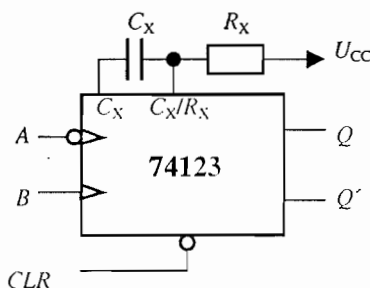


Ulaz A je spoj ulaza A1 i A2.

Slika 12.27. Integrirani monostabil 74121

2. Izračunajte trajanje kvazistabilnoga stanja monostabilnoga multivibratora sa slike 12.27. ako su vrijednosti elemenata $R_X = 15k\Omega$ i $C_X = 33nF$.

3. Proučite tvorničke podatke integriranoga sklopa 74123. Opišite svojstva i nacrtajte dijagram spajanja.



Slika 12.28. Integrirani monostabil 74123

4. Izračunajte trajanje kvazistabilnoga stanja monostabilnoga multivibratora sa slike 12.28. ako su vrijednosti elemenata $R_X=5,6k\Omega$ i $C_X=470nF$.

Pokusi

1. Integrirani monostabil 74121

1.1. Povežite elemente monostabila sa slike 12.27. ($R_X=15k\Omega$ i $C_X=33nF$) i priključite na napon napajanja 5V. Na ulaz priključite izvor pravokutnih impulsa amplitude U_{CC} frekvencije 2kHz. Uz pomoć osciloskopa nacrtajte dijagrame ulaznog i izlaznoga napona.

1.2. Na temelju dobivenih oscilograma odredite trajanje kvazistabilnoga stanja.

1.3. Povećajte frekvenciju ulaznoga napona na iznos 10kHz. Uz pomoć osciloskopa nacrtajte dijagram ulaznog i izlaznoga napona.

1.4. Kakav je odnos frekvencije ulaznog i izlaznoga napona?

2. Integrirani monostabil 74123

2.1. Povežite elemente monostabila sa slike 12.28. ($R_X=5,6k\Omega$ i $C_X=470nF$) i priključite na napon napajanja 5V. Ulaz CLR spojite na napon napajanja. Na ulaz priključite izvor pravokutnih impulsa amplitude U_{CC} frekvencije 1kHz. Uz pomoć osciloskopa nacrtajte dijagrame ulaznog i izlaznoga napona.

2.2. Na temelju dobivenih oscilograma odredite trajanje kvazistabilnoga stanja.

2.3. Povećajte frekvenciju ulaznoga napona na iznos 5kHz. Uz pomoć osciloskopa nacrtajte dijagram ulaznog i izlaznoga napona.

2.4. Kakav je odnos ulaznog i izlaznoga napona?

2.5. Po čemu se međusobno razlikuju integrirani sklopovi 74121 i 74123?

VJEŽBA 12.3. TRANZISTORSKI ASTABIL

Zadatak

Detaljnije upoznati ovisnost trajanja kvazistabilnih stanja i frekvencije izlaznoga napona o uporabljenim elementima.

Upoznati utjecaj opterećenja na frekvenciju izlaznoga napona.

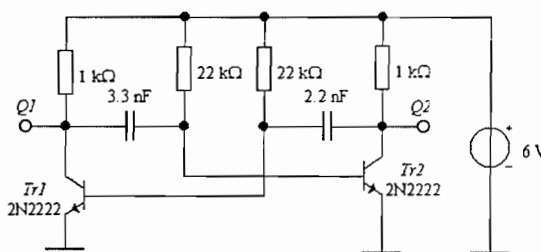
Pribor i instrumenti

- tranzistor 2N2222 (2 komada)
- otpornici $1k\Omega$ (3 komada), $1,5k\Omega$, $10k\Omega$ (2 komada), $22k\Omega$ (2 komada) i $33k\Omega$ (2 komada)
- kondenzatori $2,2nF$ (2 komada), $3,3nF$ (2 komada), $5,6nF$, $10nF$ i $22nF$
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvori napajanja 0-15V, 1A
- osciloskop.

Priprema

1. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona astabilnoga multivibratora sa slike 12.29.

2. Nacrtajte očekivani oblik napona u_{BE1} , u_{BE2} , u_{CE1} i u_{CE2} astabila sa slike 12.29.



Slika 12.29. Astabilni multivibrator

Pokusi

1. Oblici napona i frekvencija

1.1. Spojite elemente astabila sa slike 12.29. i priključite na napon napajanja. Osciloskopom ustanovite oblike napona u_{BE1} , u_{BE2} , u_{CE1} i u_{CE2} .

1.2. Na temelju dobivenih oscilograma odredite trajanje kvazistabilnih stanja i frekvenciju izlaznoga napona.

2. Promjena frekvencije izlaznoga napona

2.1. Ispitajte utjecaj promjene vrijednosti otpora R_{B1} , odnosno R_{B2} na rad astabila tako da umjesto otpora od $22k\Omega$ spojite otpore $10k\Omega$, odnosno $33k\Omega$. Iznesite zapažanja.

2.2. Ispitajte utjecaj promjene vrijednosti kondenzatora C_1 , odnosno C_2 na frekvenciju izlaznoga napona astabila. Rezultate ispitivanja prikažite tablicom.

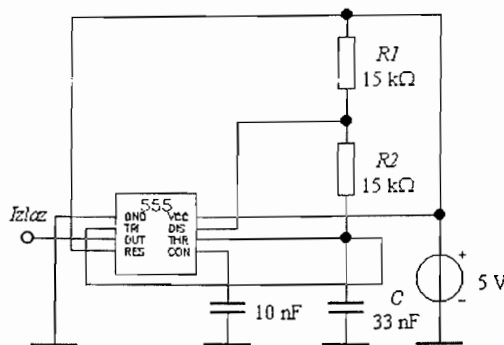
3. Opterećenje astabila otporom prema masi

3.1. Izlaz astabila Q_1 (slika 12.29.) opteretite otporom $R=1,5k\Omega$ spojenim prema masi. Osciloskopom ustanovite oblike napona u_{BE} i u_{CE} obaju tranzistora, trajanje kvazistabilnoga stanja i frekvenciju izlaznoga napona.

3.2. Izlaz monostabila Q_2 (slika 12.29.) opteretite otporom $R=1,5k\Omega$ spojenim prema masi. Osciloskopom ustanovite oblike napona u_{BE} i u_{CE} obaju tranzistora, trajanje kvazistabilnoga stanja i frekvenciju izlaznoga napona.

3.3. Koje promjene u rad astabila unosi otporno opterećenje spojeno prema masi?

1. Izračunajte trajanje kvazistabilnoga stanja monostabilnoga multivibratora sa slike 12.30.



Slika 12.31. Astabil

2. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona astabilnoga multivibratora sa slike 12.31.

VJEŽBA 12.4. VREMENSKI SKLOP 555

Zadatak

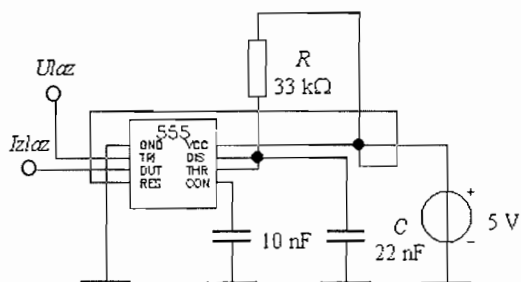
Detaljnije upoznati djelovanje integriranoga sklopa 555 u spoju monostabilnoga i astabilnoga multivibratora (ovisnost frekvencije izlaznoga napona o uporabljenim elementima).

Uvježbavati postupke u primjeni instrumenata pri ispitivanju elektroničkih sklopova i prikazu mjernih rezultata.

Pribor i instrumenti

- vremenski sklop 555
- otpornici $10k\Omega$ (2 komada), $22k\Omega$ (2 komada) i $33k\Omega$ (2 komada) i $47k\Omega$
- kondenzatori $10nF$ (2 komada) $22nF$, $33nF$ i $47nF$
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvori napajanja 0-15V, 1A
- funkcijski generator
- osciloskop.

Priprema



Slika 12.30. Monostabil

Pokusi

1. Trajanje kvazistabilnoga stanja monostabila

1.1. Na ulaz monostabila (slika 12.30.) priključite izvor pravokutnih impulsa amplitude U_{CC} i frekvencije 1kHz. Osciloskopom ustanovite oblike ulaznog i izlaznoga napona.

1.2. Na temelju oscilograma ulaznog i izlaznoga napona odredite trajanje kvazistabilnoga stanja.

1.3. Povećajte frekvenciju ulaznoga napona na iznos 5kHz. Osciloskopom ustanovite oblike ulaznog i izlaznoga napona.

1.4. Kako djeluje monostabil kad je trajanje kvazistabilnoga stanje duže od periode ulaznoga napona?

2. Promjena trajanja kvazistabilnoga stanja

2.1. Ispitajte utjecaj vrijednosti otpora R na rad monostabila sa slike 12.30. tako da umjesto otpora od $33k\Omega$ spojite otpore $22k\Omega$, odnosno $47k\Omega$. Iznosite zapažanja.

2.2. Ispitajte utjecaj vrijednosti kondenzatora C na rad monostabila tako da umjesto kondenzatora od $22nF$ spojite kondenzatore od $10nF$ i $33nF$. Iznosite zapažanja.

3. Oblici napona i frekvencija astabila

3.1. Spojite elemente astabila sa slike 12.31. i priključite na napon napajanja. Osciloskopom ustanovite oblike napona na izlazu i kondenzatoru C .

3.2. Na temelju dobivenih oscilograma odredite trajanja kvazistabilnih stanja i frekvenciju izlaznoga napona.

4. Promjena frekvencije izlaznoga napona

4.1. Ispitajte utjecaj promjene vrijednosti otpora $R1$, odnosno $R2$ na rad astabila tako da umjesto otpora od $15\text{k}\Omega$ spojite otpore $10\text{k}\Omega$, odnosno $22\text{k}\Omega$. Iznosite zapažanja.

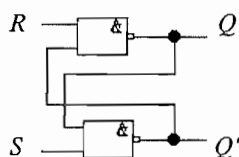
4.2. Ispitajte utjecaj promjene vrijednosti kondenzatora C na frekvenciju izlaznoga napona astabila. Rezultate ispitivanja prikažite tablicom.

PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Po čemu se međusobno razlikuju SR-bistabil i JK-bistabil?

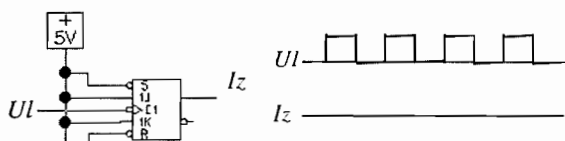
2. Na koji način je moguće dijeliti frekvenciju s pomoću JK-bistabila?

3. Napišite tablicu stanja za bistabil sa slike 12.32.



Slika 12.32. Bistabil izveden s pomoću sklopova NI

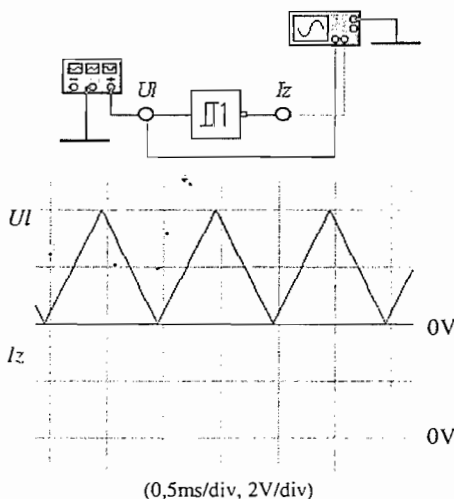
4. Nacrtajte dijagram izlaznoga napona sklopa sa slike 12.33.



Slika 12.33. JK-bistabil

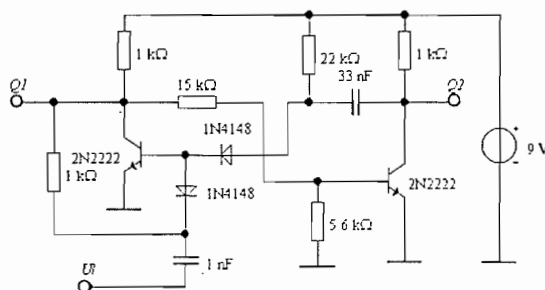
5. Nacrtajte dijagram izlaznoga napona sklopa sa slike 12.34.

6. Kolika je frekvencija izlaznoga napona sklopa sa slike 12.34. ako je frekvencija ulaznoga napona 2kHz ?



Slika 12.34. Invertor sa Schmittovim okidnim sklopom

7. Izračunajte trajanje kvazistabilnoga stanja monostabila sa slike 12.35.

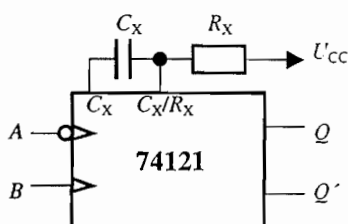


Slika 12.35. Monostabil

8. Nacrtajte približan izgled ulaznoga i izlaznoga napona monostabila sa slike 12.35. ako je frekvencija ulaznoga napona 1 kHz.

9. Kako će utjecati na rad monostabila sa slike 12.35. opteretni otpor iznosa $2\text{k}\Omega$ spojer na izlaz $Q2$?

10. Izračunajte trajanje kvazistabilnoga stanja monostabilnoga multivibratora sa slike 12.36. ako su vrijednosti elemenata $R_X = 22\text{k}\Omega$ i $C_X = 15\text{nF}$.

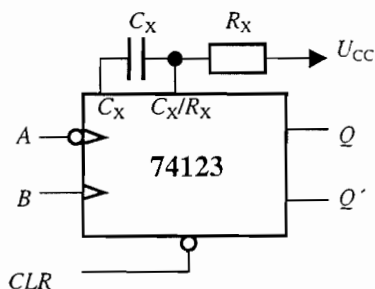


Ulaz A je spoj ulaza A1 i A2.

Slika 12.36. Integrirani monostabil 74121

11. Nacrtajte dijagram ulaznoga i izlaznoga napona monostabila sa slike 12.36. ($R_X = 22\text{k}\Omega$ i $C_X = 15\text{nF}$) ako je: a) frekvencija impulsa dovedenih na ulaz A 1kHz uz ulaz B=1, b) frekvencija impulsa dovedenih na ulaz B 5kHz uz ulaz A=0.

12. Izračunajte trajanje kvazistabilnoga stanja monostabilnoga multivibratora sa slike 12.37. ako su vrijednosti elemenata $R_X = 15\text{k}\Omega$ i $C_X = 330\text{nF}$.

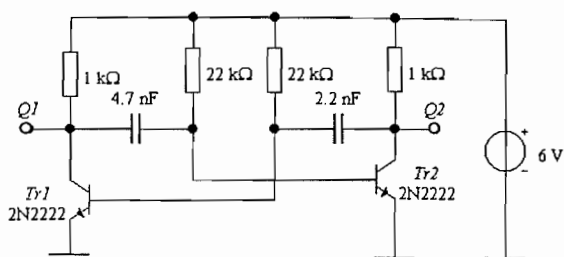


Slika 12.37. Integrirani monostabil 74123

13. Nacrtajte dijagram ulaznoga i izlaznoga napona monostabila sa slike 12.37. ($R_X = 15\text{k}\Omega$ i $C_X = 330\text{nF}$) ako je: a) frekvencija impulsa dovedenih na ulaz A 0,5kHz uz ulaz B=1, b) frekvencija impulsa dovedenih na ulaz B 1kHz uz ulaz A=0.

14. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona astabila sa slike 12.38.

16. Nacrtajte približan izgled napona na izlazu $Q2$ astabila sa slike 12.38.

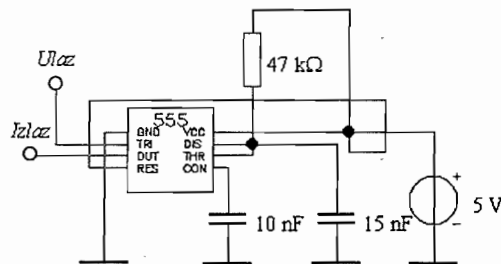


Slika 12.38. Astabil

16. što će se dogoditi s izlaznim naponom ako se izlaz $Q2$ astabila sa slike 12.38. optereti otporom $2\text{k}\Omega$?

17. Navedite mogućnosti uporabe vremenskoga sklopa.

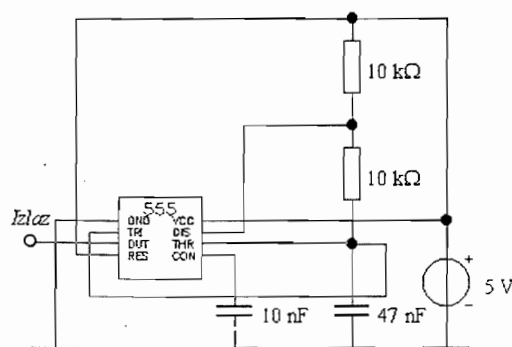
18. Izračunajte trajanje kvazistabilnoga stanja monostabilnoga multivibratora sa slike 12.39.



Slika 12.39. Vremenski sklop 555 u spoju monostabila

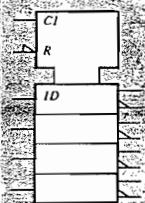
19. Nacrtajte dijagram ulaznoga i izlaznoga napona monostabila sa slike 12.39. ako je frekvencija impulsa dovedenih na ulaz 1kHz.

20. Izračunajte frekvenciju izlaznoga napona astabilnoga multivibratora sa slike 12.40.



Slika 12.40. Vremenski sklop 555 u spoju astabila

21. Nacrtajte približan izgled izlaznoga napona astabila sa slike 12.40.



13. REGISTRI, BROJILA I MEMORIJE

U ovom poglavlju obrađuju se složeniji digitalni sklopovi čiji su osnovni sastavni elementi slijedni (sekvencijski) logički sklopovi, tj. sklopovi koji imaju svojstvo pamćenja digitalne znamenke. To su registri, brojila i memorije.

Registri ili spremnici najčešće se upotrebljavaju kao sklopovi u kojima se čuvaju podaci za vrijeme dok se s njima obrađuju pojedine operacije, dakle kao privremene memorije.

Registri se mogu upotrebljavati i za brojenje impulsa i dijeljenje frekvencije. Međutim u tu svrhu više se upotrebljavaju brojila koja se obrađuju u drugom dijelu ovog poglavlja.

U trećem dijelu obrađuju se sklopovi za pohranjivanje podataka, tj. memorije.

13.1. Registri

Registri s paralelnim upisom i čitanjem podataka

Registri sa serijskim upisom i čitanjem podataka

Posmačni registar kao brojilo

13.2. Brojila

Binarno brojilo

Dekadno brojilo

Brojilo prema natrag

Integrirane izvedbe brojila

13.3. Memorije

Osobine i karakteristične veličine upisno-ispisnih memorija

Statičke memorije

Dinamičke memorije

Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 13.1. Registri i brojila

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

13.1. REGISTRI

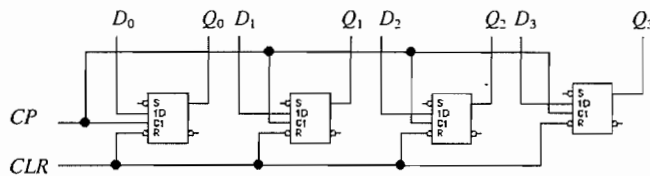
U prethodnom poglavlju obrađen je temeljni sklop sa svojstvom pamćenja u digitalnoj elektronici. To je bistabilni multivibrator, kraće bistabil. Bistabil je osnovni memorijski element registra. Kako bistabil ima dva stabilna stanja kojima je moguće pridružiti značenje 0, odnosno 1, to znači da bistabil može zapamtiti jednu binarnu znamenku (bit). Ako je potrebno zapamtiti višebitni podatak, potrebno je imati toliko bistabila koliko bitova ima podatak.

Bistabili u registru mogu biti tako povezani da je moguće istodobno upisati sve bitove podatka, svaki u pripadni bistabil. To je paralelni upis podatka. Na isti način moguće je podatke pročitati iz registra.

Podatak se može u registar upisati i iz njega pročitati serijski. Bitovi podatka ulaze jedan po jedan u registar u ritmu impulsa za upravljanje i jednako tako izlaze.

Integrirane izvedbe registara imaju različite kombinacije mogućnosti upisa i čitanja podatka. U ovom dijelu bit će pokazane načelne izvedbe registra s paralelnim, odnosno serijskim upisom i čitanjem podatka te primjeri integriranih izvedbi, a zatim i neki primjeri primjene registara.

Registri s paralelnim upisom i čitanjem podatka

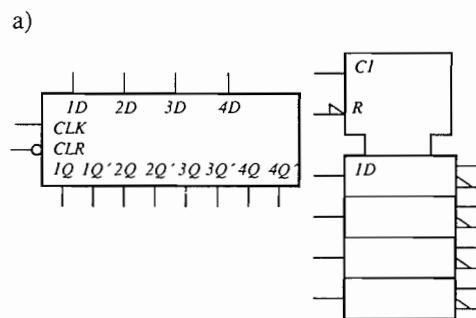


Slika 13.1. Registar s paralelnim upisom i čitanjem podatka

Bitovi podatka dovode se na ulaze D_0 - D_3 . Upis podatka zbiva se na prednji brid impulsa ritma koji se dovodi na ulaz CP . Na izlazima Q_0 - Q_3 pojavljuje se podatak s ulaza. S pomoću stanja 0 na ulazu CLR mogu se svi bistabili istodobno postaviti u stanje 0. Inače ulaz CLR mora biti u stanju 1.

Primjer izvedbe registra s takvim svojstvima jest integrirani sklop 74175. Na slici 13.2. prikazani su njegovi simboli (ANSI i IEC) i tablica stanja. Ulaz za impulse ritma ovdje je označen s CLK (od engl. clock). Osim izlaza Q ova izvedba registra ima izlaze Q' , na kojima se dobije komplement upisanoga podatka.

Podatak se s ulaza D upisuje u bistabile i pojavljuje na izlazima Q na prednji brid impulsa ritma na ulazu CLK uz uvjet da je ulaz za brisanje CLR u stanju 1 (tablica stanja sa slike 13.2.b).



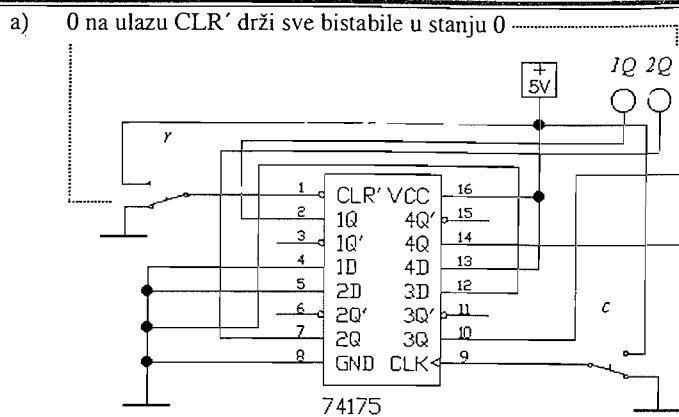
b)

Način rada	Ulazi			Izlazi	
	CLR	CLK	D_n	Q_n	Q_n'
Brisanje	L	X	X	L	H
Upis 1	H	↑	h	H	L
Upis 0	H	↑	l	L	H

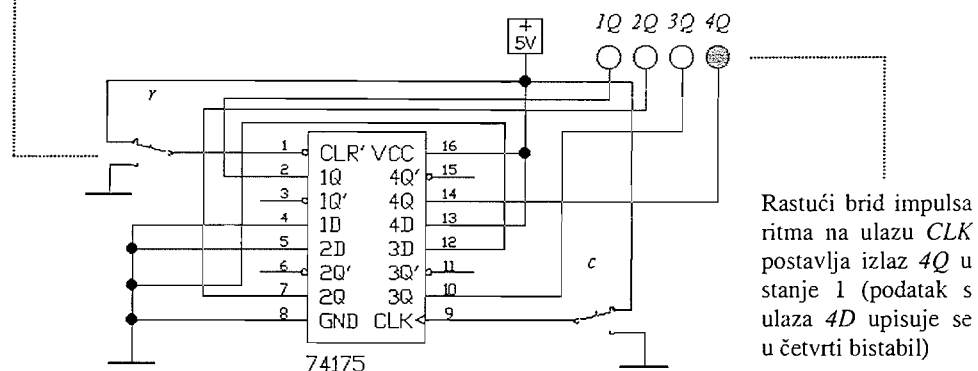
↑ prijelaz iz stanja 0 u stanje 1
 X bilo koje stanje ulaza
 L, H stanje 0, odnosno 1
 l, h stanje 0, odnosno 1 na ulazu prije djelovanja impulsa ritma

Slika 13.2 Integrirani sklop 74175:
a) simboli (ANSI i IEC), b) tablica stanja

Pokus



b) 1 na ulazu CLR' omogućava djelovanje impulsa ritma na ulazu CLK



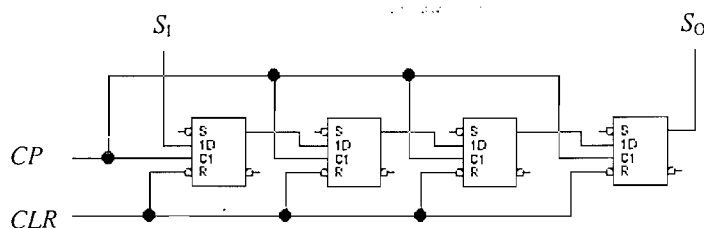
Slika 13.3. Prikaz djelovanja registra 74175 (paralelni upis podatka)

Ulaz 4D posljednjeg bistabila je u stanju 1 (spoj na U_{CC}). Ulazi D ostalih bistabila su u stanju 0 (spoj na masu). Stanje 0 na ulazu CLR' drži sve bistabile u stanju 0. Izlazi Q svih bistabila su u stanju 0, što pokazuju svijetleće diode spojene na izlaze Q (slika 13.3.a).

Postavljanje ulaza CLR u stanje 1 omogućava djelovanje impulsa ritma te upis i čitanje podatka u registar. Dovođenjem impulsa ritma na ulaz CLK (s pomoću sklopke c) četvrti bistabil prelazi u stanje 1 jer je njegov ulaz 4D u stanju 1, a ostali bistabili ostaju u stanju 0 jer su njihovi ulazi D u stanju 0 (slika 13.3.b).

Registri sa serijskim upisom i čitanjem podatka

Bistabili u registru mogu se povezati na način pokazan na slici 13.4. To omogućava serijski upis i čitanje podatka. Podatak se dovodi na ulaz S_1 a čita na izlazu S_0 . Upis podatka odvija se bit po bit u ritmu impulsa koji se dovode na ulaz CP.



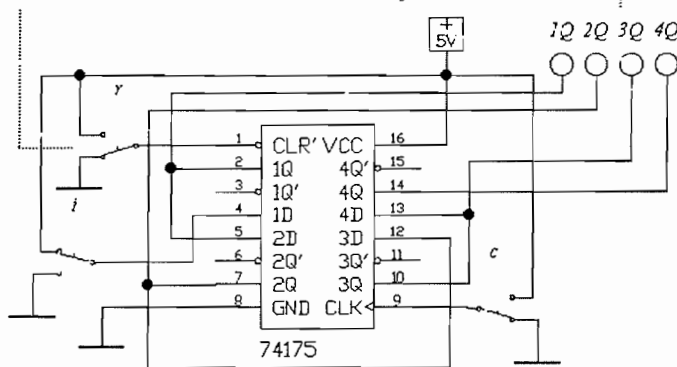
Slika 13.4. Registar sa serijskim upisom i čitanjem podatka

U pokusu na slici 13.5. pokazano je djelovanje integriranog sklopa 74175 u spoju serijskog registra. Stanjem 0 na ulazu CLR svi bistabili registra postavljeni su u stanje 0 (slika 13.5.a).

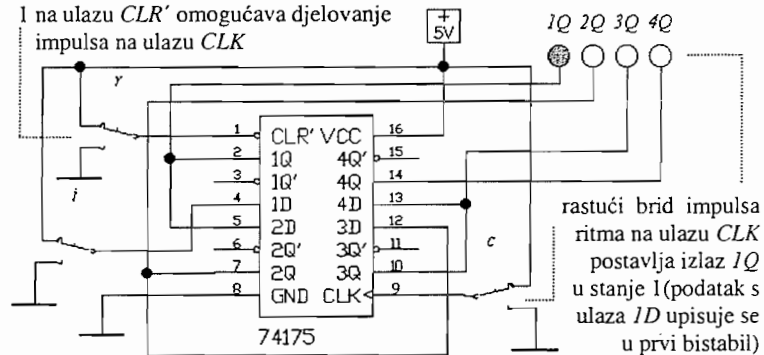
Ulaz CLR postavljen u stanje 1 omogućava upisivanje i čitanje podatka. Svi bistabili su u stanju 0. Na serijskom je ulazu (ulaz 1D prvog bistabila) stanje 1. Na prvi impuls ritma (ostvaren djelovanjem sklopke c) prvi bistabil prelazi u stanje 1, dok ostali bistabili ostaju u stanju 0 što pokazuju svijetleće diode spojene na izlaze Q (slika 13.5.b).

Pokus

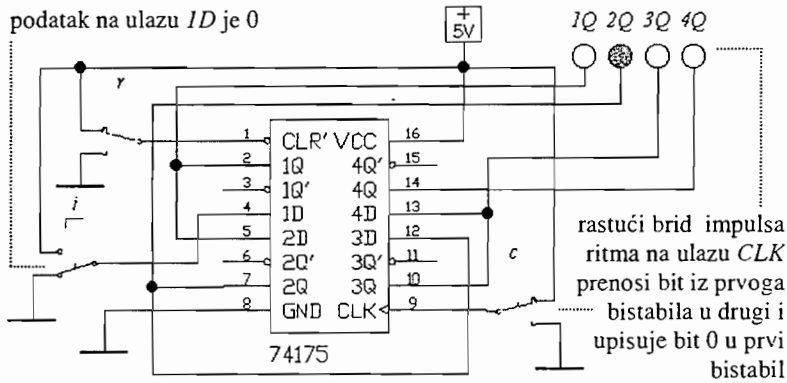
a)

0 na ulazu CLR' drži sve bistabile u stanje 0

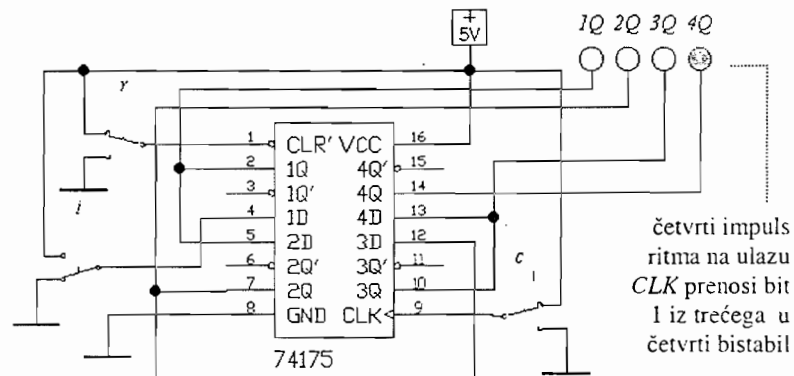
b)

1 na ulazu CLR' omogućava djelovanje impulsa na ulazu CLK 

c)

podatak na ulazu $1D$ je 0

d)



Slika 13.5. Prikaz djelovanja registra 74175 (serijski upis podatka)

Kad svi bistabili postignu stanje 1, izlaz $4Q'$ prelazi u stanje 0. Stoga sada bistabili postupno prelaze u stanje 0 (slika 13.6.b). Nakon osmog impulsa, sklop je u početnom stanju.

Ako se stanja bistabila i broj impulsa na ulazu CLK prikažu tablicom stanja vidi se da sklop broji impulse od 0 do 7.

Ako se uspoređi perioda ulaznoga napona s periodom napona na bilo kojem izlazu Q , vidi se da u pokazanom primjeru sklop dijeli frekvenciju s osam.

Općenito se može reći da Johnsonovo brojilo, koje se sastoji od n bistabila, broji od 0 do $2n-1$, odnosno dijeli frekvenciju s $2n$.

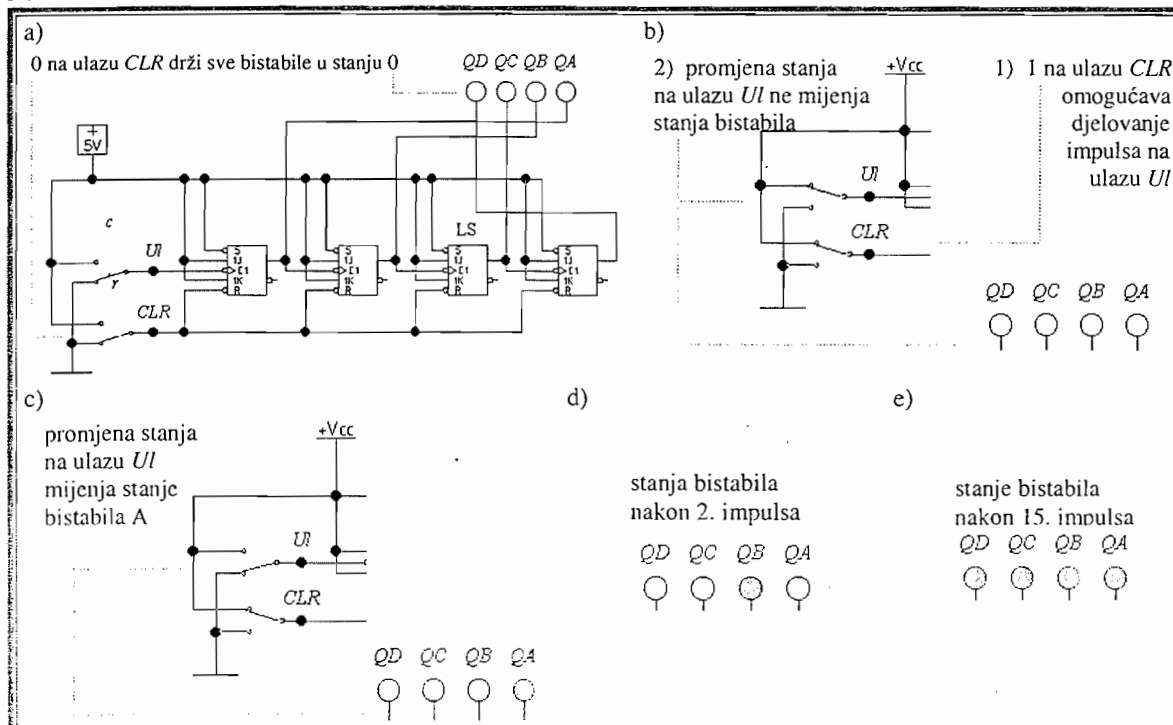
13.2. BROJILA

U poglavlju o registrima pokazano je na koji način se registar može primijeniti za brojenje impulsa i sukladno tome za dijeljenje frekvencije. Što je broj do kojeg je potrebno brojiti veći, to je potreban veći broj bistabila u registru. Povezivanjem bistabila u sklop brojila moguće je s istim brojem bistabila postići brojenje do znatno većeg broja, odnosno dijeljenje frekvencije s većim brojem. Osim toga, brojilo se upotrebljava za mjerenje vremena i periode, odnosno frekvencije.

Brojilo može biti izvedeno tako da broj impulsa predočen stanjem bistabila raste ili pada. Na temelju toga brojila se dijele na brojila prema naprijed i brojila prema natrag. Postoje integrirane izvedbe koje imaju obje mogućnosti.

Binarno brojilo

Pokus



Slika 13.8. Asinkrono binarno brojilo

Svi ulazi J i K su u stanju 1 tako da svaki impuls koji se pojavi na ulazima CP bilo kojeg bistabila uzrokuje promjenu njegova stanja. Stanjem 0 na ulazu CLR svi su bistabili postavljeni u stanje 0 (slika 13.8.a).

Postavljanjem ulaza CLR u stanje 1 ostvaren je uvjet za djelovanje impulsa na ulazu UI (spojen na ulaz CP prvog bistabila). Prvi impuls na ulazu UI ostvaren s pomoću sklopke c djeluje padajućim bridom na prvi bistabil koji prelazi u stanje 1 (slika 13.8.c).

Drugi impuls na ulazu UI vraća prvi bistabil u stanje 0. Promjena stanja na izlazu QA djeluje kao padajući brid impulsa na CP ulazu drugog bistabila i postavlja ga u stanje 1 (slika 13.8.d).

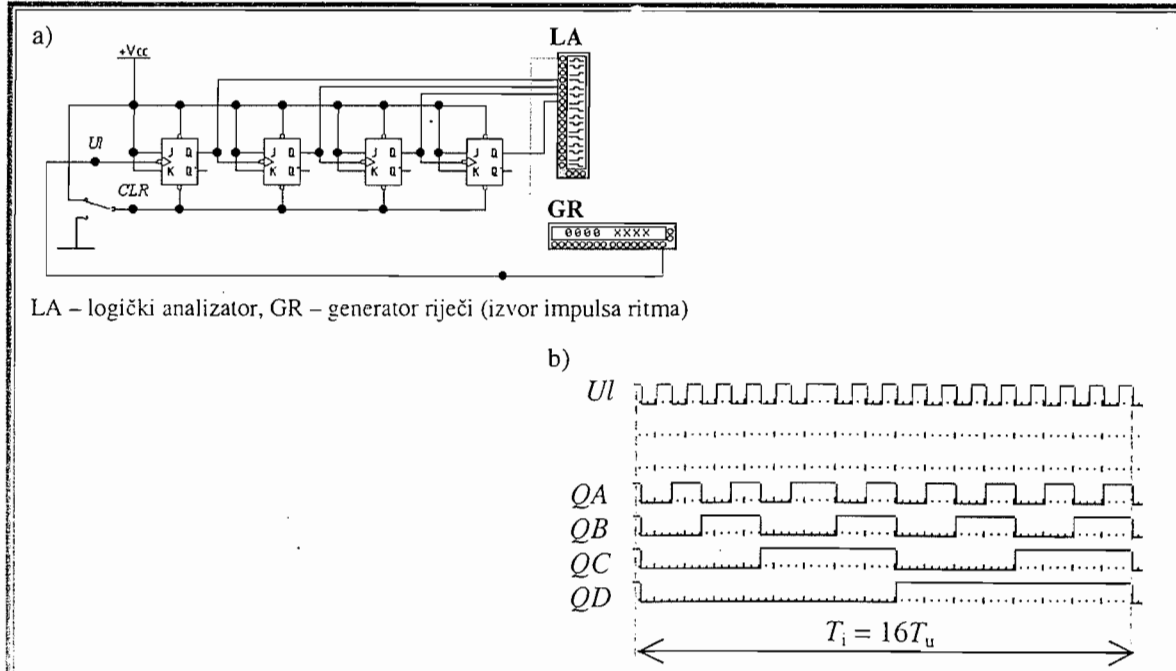
Sljedeći impuls na ulazu UI postavit će ponovo izlaz prvog bistabila QA u stanje 1, s tim da i izlaz QB drugog bistabila ostaje u stanju 1. Četvrti impuls vratit će izlaze QA i QB u stanje 0 (djelovanje padajućeg brida na ulazima CP), a izlaz trećeg bistabila postaviti u stanje 1 (padajući brid s izlaza QB djeluje na ulaz CP trećeg bistabila). Nakon petnaestog impulsa svi će bistabili biti u stanju 1 (slika 13.8.e). Šesnaesti impuls dovodi bistabile u početno stanje kad su svi izlazi Q u stanju 0.

Ako se stanja bistabila nakon svakog impulsa prikažu tablicom stanja (tablica 13.1.) vidi se da stanja bistabila odgovaraju binarnom broju impulsa na ulazu UI . Zato se takvo brojiło naziva **binarno brojiło** (engl. binary counter, njem. Dualzähler). Kod brojila s četiri bistabila kombinacije stanja bistabila počinju se ponavljati nakon petnaestoga impulsa. To znači da je s takvim brojiłom moguće brojiti do 15. Općenito se može reći da se s n bistabila može brojati do $2^n - 1$.

Tablica 13.1. Stanja bistabila asinkronoga brojila

Broj impulsa na UI	Stanja bistabila			
	QD	QC	QB	QA
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	1	0	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

Pokus



Slika 13.9. Prikaz djelovanja brojila s pomoću logičkog analizatora: a) shema spoja, b) vremenski dijagrami

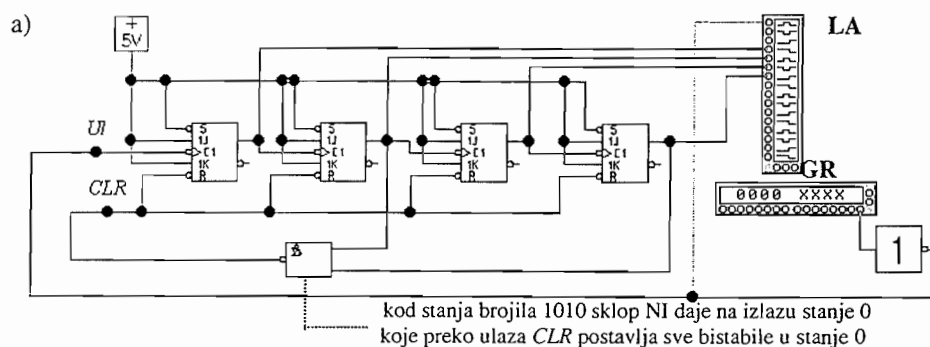
Iz pokusa sa slike 13.9. vidi se da je frekvencija impulsa na izlazu QA prvog bistabila dva puta manja od ulazne, na izlazu QB drugog bistabila četiri puta manja od ulazne itd. To znači da pokazano binarno brojiło dijeli frekvenciju s 2, 4, 8 ili 16, ovisno s kojeg se izlaza Q uzima signal. Općenito vrijedi da brojiło s n bistabila dijeli frekvenciju ulaznih impulsa s 2^n .

Dekadno brojilo

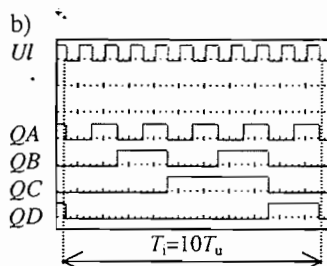
U praksi se pokazuje potreba za brojilima čija će osnova brojanja biti različita od 2^n . Između takvih brojila najčešće se upotrebljava brojilo s osnovom brojanja 10 (engl. mod-10 counter). Takvo brojilo naziva se **dekadno brojilo** (engl. decade counter).

Za izvedbu dekadnog brojila potrebna su četiri bistabila. S manjim brojem bistabila nije moguće postići dovoljan broj različitih binarnih kombinacija. Međutim, s četiri bistabila javlja se višak od šest binarnih kombinacija. Kombinacije 0000-1001 binarni su brojevi 0-9. Preostale kombinacije 1010-1111 višak su koji treba eliminirati. Dakle, bistabili moraju biti međusobno tako povezani da se na deseti impuls svi vraćaju u početno stanje. U pokusu na slici 13.10. pokazan je primjer kako se to može učiniti.

Pokus



LA – logički analizator, GR – generator riječi (izvor impulsa ritma)



c)

Broj impulsa	Stanja bistabila			
	QD	QC	QB	QA
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	0	0	0	0

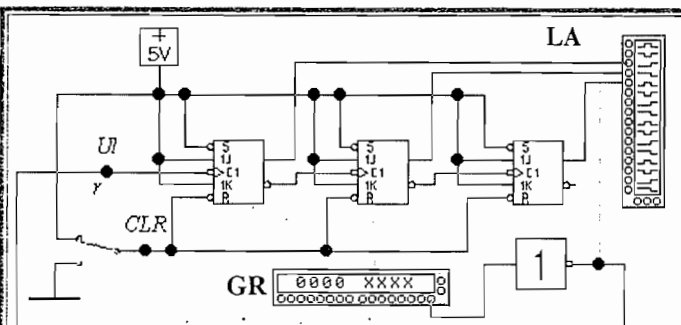
Slika 13.10. Prikaz djelovanja dekadnog brojila

Brojilo prema natrag

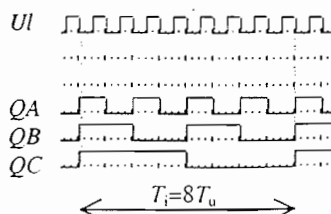
Kod prethodno razmatranih brojila dovođenjem impulsa ritma raste sadržaj brojila. Takva brojila broje od nule prema najvećem broju i nazivaju se brojila prema naprijed ili brojila na više (negl. up counter, njem. Vorwärtszähler).

Ako se signal iz prethodnog bistabila uzima s izlaza Q' umjesto s Q , dobije se brojilo kojem se sadržaj smanjuje (slika 13.11.). To je brojilo koje broji od najvećeg broja prema nuli i naziva se brojilo prema natrag ili brojilo naniže (engl. down counter, njem. Rückwärtszähler).

Pokus



LA – logički analizator, GR – generator riječi (izvor impulsa ritma)

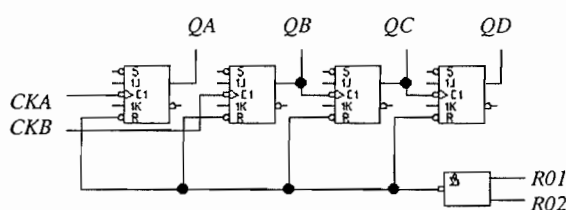


Slika 13.11. Brojilo prema natrag

Integrirane izvedbe brojila

Proizvođači digitalnih komponenata proizvode velik broj različitih tipova integriranih brojila. Kao primjer binarnog brojila može se spomenuti sklop 7493.

Integrirani sklop 7493 binarno je brojilo sastavljeno od četiri bistabila (slika 13.12.). Moguće je brojenje impulsa od 0 do 15 i dijeljenje frekvencije s 2, 4, 8 i 16. Za dijeljenje frekvencije sa 16 potrebno je povezati izlaz *QA* s ulazom *CKB*. Promjena stanja bistabila odvija se na zadnji brid impulsa.

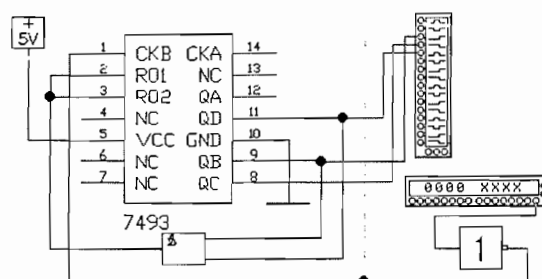


Slika 13.12. Logička shema integriranog brojila 7493

Brojilo ima izvedene posebne ulaze za istodobno postavljanje svih bistabila u stanje 0. To su ulazi *R01* i *R02*. Za postavljanje svih bistabila u stanje 0 moraju oba ulaza biti u stanju 1. Brojenje je moguće ako je barem jedan od ta dva ulaza u stanju 0.

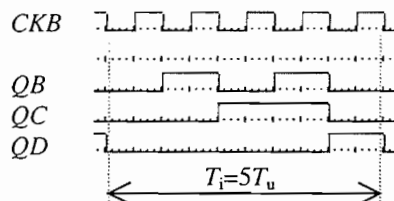
Primjer 13.1.

S koliko dijeli frekvenciju sklop sa slike 13.13.?



Slika 13.13. Spoj integriranog brojila 7493

Impuls se dovode na ulaz *CKB*. Izlazi *QB* i *QD* spojeni su preko sklopa i na ulaze *R01* i *R02*. To znači kad izlazi *QB* i *QD* budu u stanju 1 brojilo će se postaviti u početno stanje. To će se dogoditi pri izlaznom stanju 101 koje odgovara petom impulsu. Dakle, sklop dijeli frekvenciju s pet. Do istoga zaključka se može doći promatranjem vremenskih dijagrama ulaza *CKB* i izlaza *QB*, *QC* i *QD* (slika 13.14.).



Slika 13.14. Vremenski dijagrami sklopa sa slike 13.13.

13.3. MEMORIJE

Jedno od bitnih svojstava digitalnih uređaja i njihova prednost pred analognim jest sposobnost pamćenja velikog broja podataka bez ograničenja u trajanju. Ta osobina čini digitalne uređaje primjenljivim u svim područjima tehnike. Dio digitalnog uređaja u koji se pohranjuju podaci naziva se memorija. Memorija može biti unutrašnja (engl. internal memory, njem. interne Speicher) ili vanjska (engl. external memory, njem. externe Speicher).

Unutrašnja memorija je radna (operativna) memorija u koju su pohranjeni podaci i instrukcije za obradu podataka za vrijeme trajanja obrade. Za unutrašnje memorije karakteristična je velika brzina rada, ograničen kapacitet (ukupan broj bitova koji se u memoriju može pohraniti) i relativno visoka cijena po bitu kapaciteta. Unutrašnje memorije koje se pretežno koriste poluvodički su sklopovi, i to će biti predmet razmatranja ovog poglavlja.

Prema načinu uporabe unutrašnje memorije mogu biti takve da se u njih može upisati podatak bez ograničenja na pristupačan i brz način i iz njih isto tako pročitati upisani podatak. To su **upisno-ispisne memorije** (engl. read/write memory, skraćeno RWM, njem. Schreib-Lese-Speicher). Druga grupa memorijskih sklopova su **ispisne memorije** ili memorije sa stalnim sadržajem (engl. read only memory, skraćeno ROM, njem. Festwertspeicher). U toj grupi sklopova ima nekoliko vrsta s obzirom na način i mogućnosti upisa podatka. Opća zajednička osobina tih memorijskih sklopova jest ograničenje s obzirom na broj i način upisa podatka. dok pri čitanju podataka iz ispisne memorije nema ograničenja. Kako su ispisne memorije po svojoj strukturi složeni kombinacijski sklopovi, njihova će se svojstva obraditi u sljedećem poglavlju.

Vanjske memorije upotrebljavaju se za duže ili kraće čuvanje velikog broja ulaznih i obrađenih podataka. Osobina vanjskih memorija je velik kapacitet i relativno niska cijena po bitu zapamćenog podatka. Podaci se prije uporabe prebacuju iz vanjske memorije u unutrašnju. Kao vanjske memorije upotrebljavaju se magnetski i optički mediji (magnetski diskovi i diskete, optički diskovi). Kako se tu radi o vrlo složenom sustavu elektromehaničkih dijelova i elektroničkih sklopova za upravljanje, vanjske memorije nisu predmetom razmatranja ovog udžbenika.

Sa stajališta tehnologije poluvodičke memorije mogu biti bipolarne (engl. bipolar memory, njem. bipolare Halbleiterspeicher) i unipolarne ili MOS-memorije (engl. unipolar memory, MOS memory, njem. unipolare Halbleiterspeicher).

Osnovni elementi bipolarnih memorija su bipolarni tranzistori. U toj grupi proizvode se memorijski sklopovi u skupinama TTL i ECL. Za memorijske sklopove tih skupina najznačajnije svojstvo je velika brzina rada. Međutim, što je veća brzina rada, ostala svojstva su nepovoljnija. Veći je utrošak snage, niži kapacitet, niža imunost na smetnje i veća cijena po bitu kapaciteta. Kod memorija s unipolarnim tranzistorima (skupine NMOS i CMOS) brzine rada su niže, ali su povoljnija ostala svojstva. Veći je kapacitet i imunost na smetnje, niži utrošak snage i cijena po bitu kapaciteta.

Osobine i karakteristične veličine upisno-ispisnih memorija

Memorije su digitalni sklopovi koji se sastoje od određenog broja memorijskih ćelija (engl. memory cell, njem. Speicherzelle). Svaka memorijska ćelija može zapamtiti jednu digitalnu znamenku, tj. jedan bit. Ukupni broj bitova koji se može pohraniti u neki memorijski sklop jest **kapacitet memorije** (engl. capacity, njem. Speicherkapazität). Veći kapaciteti memorija izražavaju se u kilobitima (skraćeno Kb, gdje je $1\text{Kb}=2^{10}=1024$ bitova) i megabitima (skraćeno Mb, gdje je $1\text{Mb}=2^{20}=1048576$ bitova).

Više bitova čini **memorijsku riječ** (engl. memory word, njem. Datenword). Riječ koja se sastoji od osam bitova naziva se **bajt** (engl. byte, skraćeno B). Memorijske ćelije mogu biti unutar memorijskog sklopa međusobno povezane tako da se u njih može pohraniti memorijska riječ. Kapacitet takvih memorija može se izraziti umnoškom broja riječi i broja bitova u riječi.

Ako se broj riječi označi s **M** i broj bitova u riječi s **K**, onda se kapacitet memorije može izraziti kao **M·K** bitova.

Primjer 13.2.

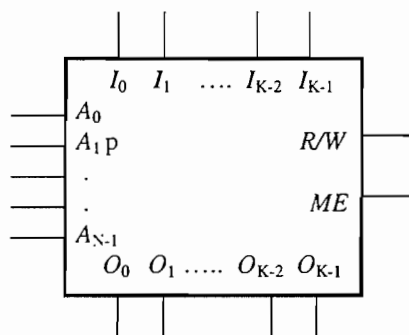
Kako se može označiti kapacitet memorije u koju se može pohraniti 512 riječi koje se sastoje od 8 bitova?

Kapacitet memorije je 512×8 bitova = 4096b = 4Kb .

Svaka riječ podatka spremljena u memoriju ima svoje mjesto (lokaciju). Broj kojim se to mjesto označava pri upisivanju ili čitanju naziva se adresa (engl. address, njem. Adresse).

Stoga svaki memorijski sklop, osim izvoda za ulaze **I** i izlaze **O** (najčešće s tri stanja) podatka, mora imati i ulaze za adresu **A** (slika 13.15.). Pri upisivanju mora se na ulaze za podatak dovesti binarna kombinacija podatka i na ulaze za adresu binarna kombinacija adrese. Broj bitova adrese **N** ovisi o broju riječi **M** koji se može pohraniti u memoriju:

$$M = 2^N$$



Slika 13.15. Opći prikaz memorije

Primjer 13.3.

Koliko adresnih ulaza mora imati memorija kapaciteta od 512 četverobitnih riječi?

Memorija kapaciteta 512 riječi (bez obzira na broj bitova u riječi) mora imati 9 adresnih ulaza jer je $512=2^9$. Najniža adresa takve memorije je 00000000, a najviša 11111111.

Pri opisivanju adresa i sadržaja memorija velikog kapaciteta i s riječima većeg broja bitova upotrebljava se, radi veće preglednosti, heksadecimalni sustav.

Primjer 13.4.

Koju binarnu kombinaciju treba dovesti na ulaze za adresiranje memorije A_0-A_7 ako se sadržaj D6 želi pohraniti u lokaciju AF?

Na adresne ulaze memorije treba dovesti binarnu kombinaciju 10101111, jer je $AF_{16} = 1010\ 1111_2$ pri čemu je $A_0=1, A_1=1, A_2=1, A_3=1, A_4=0, A_5=1, A_6=0$ i $A_7=1$.

Operacija upisivanja (engl. write operation, njem. Schreibevorgang) jest postupak kojim se riječ podatka pohranjuje na određeno mjesto (adresu) memorije. Obratni postupak kojim se riječ podatka s određenog mjesta u memoriji dovodi na izlazne izvode memorije naziva se operacija čitanja (engl. read operation, njem. Lesevorgang). Stoga upisno-ispisne memorije imaju poseban upravljački ulaz kojim se određuje koja će se operacija s podatkom obavljati. To je ulaz čitaj/piši (oznaka R/W od engl. read/write input). Obično je operacija čitanja moguća kad je taj ulaz u stanju 1, a operacija upisivanja pri stanju 0. Dosta često se za taj ulaz upotrebljava oznaka WE (od engl. write enable).

Osim spomenutih ulaza memorijski sklopovi imaju dodatni upravljački ulaz kojim se može potpuno spriječiti pristup sklopu. Taj ulaz označava se ME (od engl. memory enable), CS (od engl. chip select) ili CE (od engl. chip enable). Jedno stanje na tom ulazu (npr. stanje 0) omogućava normalan rad memorijskog sklopa (čitanje i upisivanje), a suprotno stanje (u ovom primjeru 1) onemogućava pristup memoriji. Tada je stanje izlaza neovisno o stanju adresnih ulaza i na pripadnoj adresi pohranjenih podataka. To je najčešće stanje visoke izlazne impedancije.

Radi smanjenja broja izvoda, pojedini tipovi memorija proizvode se sa zajedničkim izvodom za ulaz i izlaz podatka.

Nakon kapaciteta, najvažniji podaci za memorijske sklopove su podaci koji govore o brzini rada. Osnovni podatak koji upućuje na brzinu rada memorijskih sklopova jest vrijeme potrebno da bi se riječ podatka pročitala. To vrijeme naziva se **vrijeme pristupa** (oznaka t_{ACC} od engl. access time, njem. Zugriffszeit). To je vrijeme od trenutka kad se na adresne ulaze dovede binarni signal koji predstavlja adresu do trenutka kad se traženi podatak pojavi na izlazu memorije.

Upisno-ispisne memorije najčešće su takve izvedbe da adresa mjesta u kojem je smještena riječ podatka nema utjecaja na brzinu čitanja i upisivanja podatka. To znači da je vrijeme pristupa jednako za svaku adresu. Takve memorije nazivaju se memorije s izravnim pristupom (engl. random access memory, skraćeno RAM, njem. Speichern mit wahlfreiem Zugriff).

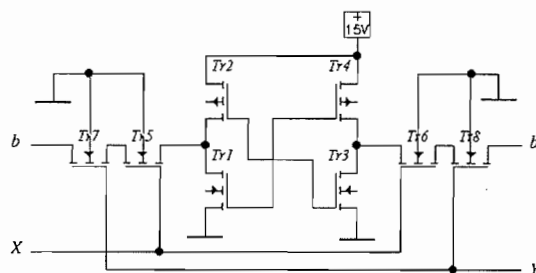
Poluvodički memorijski sklopovi s izravnim pristupom koji se danas upotrebljavaju mogu se svrstati u dvije osnovne grupe. Jedna grupa su **statičke memorije** (engl. static random access memory, skraćeno **SRAM**, njem. statische Speicher). Druga grupa su **dinamičke memorije** (engl. dynamic access memory, skraćeno **DRAM**, njem. Dynamische Speicher).

Osnovni memorijski element (memorijska ćelija) statičkih memorija je bistabil. Za statičke memorije karakteristično je da će podatak ostati pohranjen u memoriji za sve vrijeme u kojem je sklop priključen na napon napajanja.

Memorijska ćelija dinamičkih memorija je parazitna kapacitivnost. Binarni podatak unosi se nabijanjem i izbijanjem kapacitivnosti. Podatak pohranjen u takvu memoriju s vremenom se gubi i nužno ga je periodički obnavljati ili osvježavati (engl. refresh, njem. auffrischen).

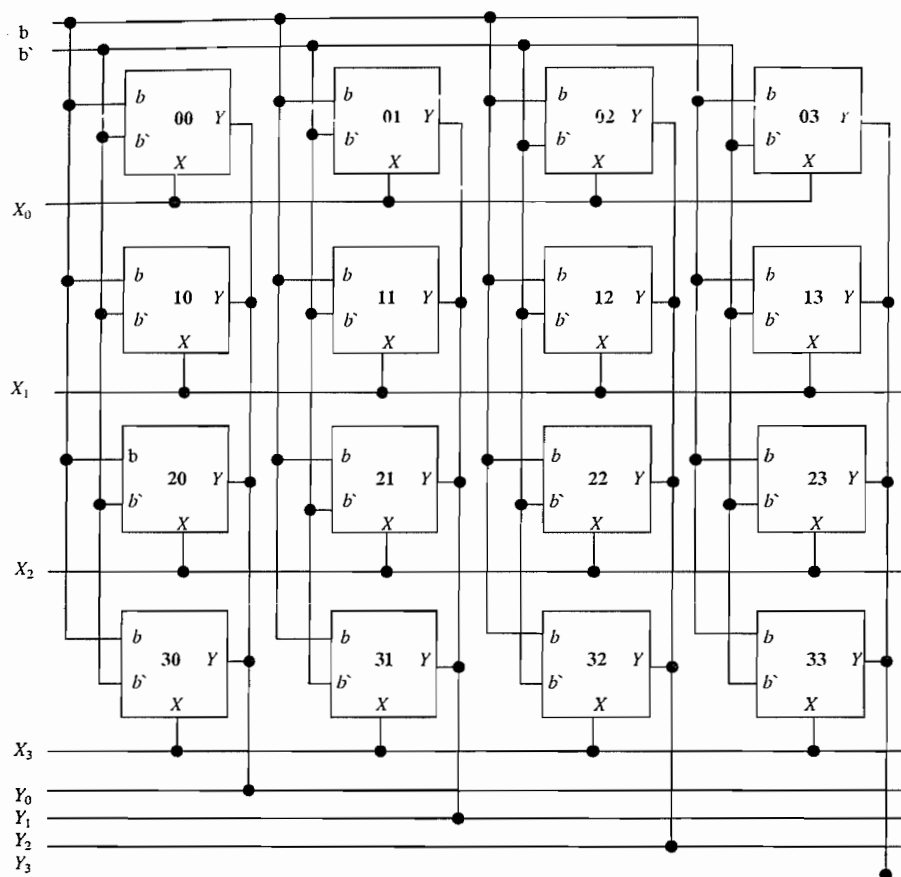
Sklopovi statičkih memorija jednostavniji su za uporabu, ali su manjeg kapaciteta u usporedbi s dinamičkim. Kapaciteti pojedinačnih sklopova statičkih memorija dostižu 1Mb. Dinamičke memorije znatno su većeg kapaciteta (4Mb), ali zahtijevaju složene popratne sklopove za osvježavanje podataka.

Statičke memorije



Slika 13.16. Bistabil memorijske ćelije u izvedbi CMOS

Tranzistori $Tr1-Tr4$ čine bistabil. Tranzistori $Tr5-Tr7$ i $Tr6-Tr8$ su sklopke za pristup memorijskoj ćeliji kojima se upravlja signalom s voda za odabir retka (ulaz X) i odabir stupca (ulaz Y). Ulaz b spojen je na vod za podatak. Da bi se bit podatka mogao u odabranu ćeliju spremati ili iz nje pročitati, potrebno je da se istodobno na njezinim vodovima za odabir retka i odabir stupca pojavi stanje 1. To omogućava uključivanje sklopke za odabir retka i sklopke za odabir stupca a time i pristup do bistabila.



Slika 13.17. Organizacija memorijske matrice

Memorijske ćelije međusobno se povezuju u memorijskom sklopu u niz redaka i stupaca. Skup svih memorijskih ćelija čini **memorijsku matricu**. Na slici 13.17. prikazana je memorijska matrica kapaciteta 16 jednobitnih riječi. Sklop za dekodiranje adrese, upravljački sklopovi i pojačala za upis i čitanje ispušteni su. Od svih bistabila bit će aktiviran samo onaj bistabil kojemu su istodobno pobuđeni i vod retka i vod stupca. Prikazani bistabili čine ravninu jednog bita iste težine. Memorijski sklopovi mogu imati samo jednu ravninu (sklopovi kapaciteta $M \times 1$ bit) ili više ravnina, tj. onoliko koliko bitova ima riječ koja se može pohraniti u memoriju (sklopovi kapaciteta $M \times K$ bitova).

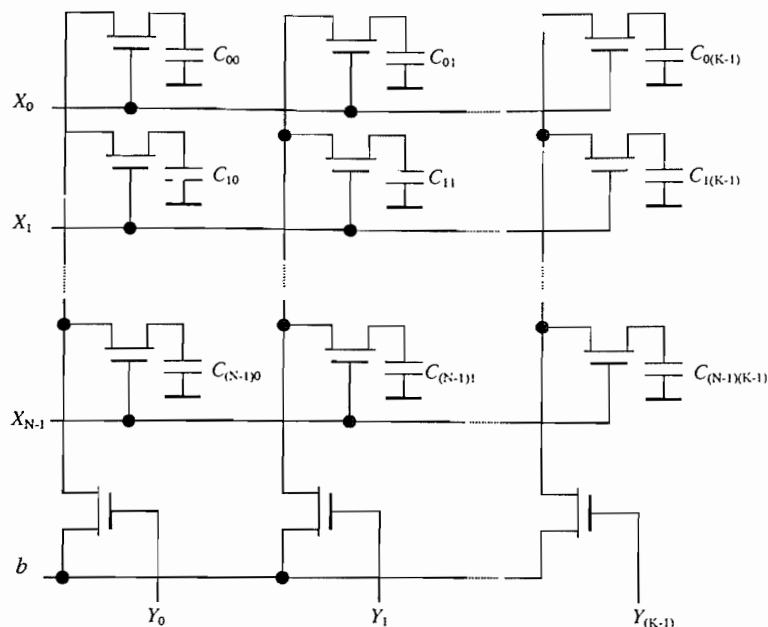
Dinamičke memorije

Memorijsku ćeliju kod dinamičkih memorija čini parazitna kapacitivnost C (slika 13.18). Nabijena kapacitivnost predstavlja bit 1, izbijena kapacitivnost bit 0.

Da bi se u ćeliju upisao ili iz nje pročitao bit podatka, potrebno je uključiti odgovarajući par tranzistora vezan za pripadni vod retka i vod stupca. Ako se radi o memorijskoj ćeliji C_{01} , onda se to postiže dovođenjem u stanje 1 voda za redak X_0 i voda za stupac Y_1 .

Pri upisu podatka napon s voda bita će pomoću uključenih tranzistora nabiti ili izbiti kapacitet C_{01} . Pri čitanju podatka napon s kapaciteta pojaviti će se na vodu bita. Pojačalom za čitanje detektirat će se stanje na vodu bita.

Pri čitanju dolazi do gubitka podatka s kapaciteta. Na dugački vod bita priključen je veliki broj vodova redaka, pa on ima relativno visok kapacitet na koji se raspodjeljuje naboj s memorijskog kapaciteta. Zato dolazi do smanjenja napona na memorijskom kapacitetu ispod potrebne vrijednosti. Kako se podatak iz memorije ne bi izgubio, potrebno ga je nakon čitanja odmah ponovno upisati, za što su potrebni dodatni sklopovi.



Slika 13.18. Memorijska matrica dinamičke memorije

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

VJEŽBA 13.1. REGISTRI I BROJILA

Zadatak

Proširiti znanja o registrima i brojilima. Upoznati tvorničke podatke integriranih izvedbi registara i brojila. Upoznati mogućnosti primjene i postupke s integriranim izvedbama registara i brojila.

Pribor i instrumenti

- integrirani sklop 74175 (2 komada)
- integrirani sklop 7493
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napajanja 5V
- osciloskop
- generator impulsa.

Priprema

1. Nacrtajte dijagram spajanja sklopa 74175 i opišite namjenu i djelovanje pojedinih izvoda.

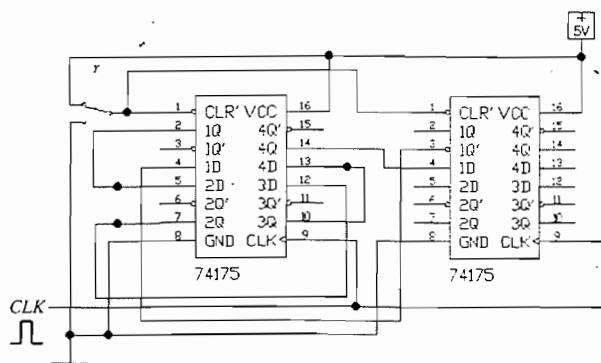
2. Nacrtajte dijagram spajanja sklopa 7493 i opišite namjenu i djelovanje pojedinih izvoda.

Pokusi

1. Posmačni registar kao brojilo

1.1. Prema shemi sa slike 13.19. spojite sklopove i priključite na napon napajanja. Na ulaz *CLK* priključite izvor impulsa. S pomoću osciloskopa (ili logičkog analizatora) promatrajte i nacrtajte dijagram ulaznog (*CLK*) i izlaznih napona (*Q*).

1.2. Na temelju dobivenog dijagrama napišite tablicu stanja sklopa sa slike 13.19. S koliko sklop dijeli frekvenciju impulsa dovedenih na ulaz *CLK*?

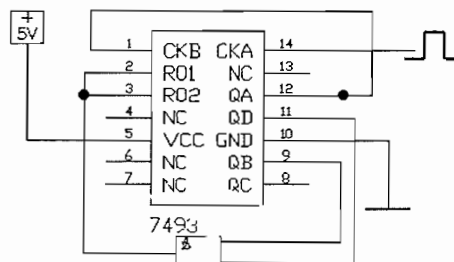


Slika 13.19. Spoj sklopova 74175

2. Sklop 7493 u spoju dekadnoga brojila

2.1. Prema shemi sa slike 13.20. spojite sklopove i priključite na napon napajanja. Na ulaz CKA priključite izvor impulsa. S pomoću osciloskopa (ili logičkog analizatora) nacrtajte dijagrame ulaznog (CLK) i izlaznih napona (Q).

2.2. Na temelju dobivenog dijagrama napišite tablicu stanja sklopa sa slike 13.20. S koliko sklop dijeli frekvenciju ulaznoga napona?



Slika 13.20. Spoj sklopa 7493

PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

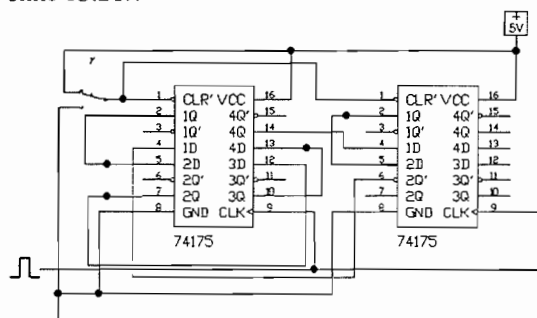
1. Navedite tipove registrara s obzirom na mogućnosti upisa i ispisa podatka.

2. Što je posmačni registar?

3. Pokažite kako se s pomoću integriranog sklopa 74175 može izvesti peterobitni posmačni registar?

4. Pokažite kako se s pomoću integriranog sklopa 74175 može izvesti Johnsonovo brojilo koje dijeli frekvenciju sa 6.

5. S koliko dijeli frekvenciju Johnsonovo brojilo sa slike 13.21.?



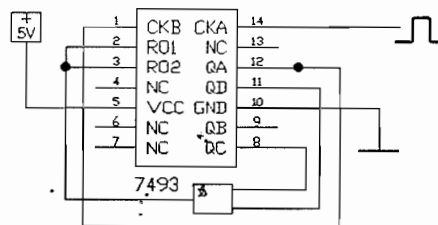
Slika 13.21. Spoj sklopova 74175

6. Koliko je potrebno bistabila za binarno brojilo koje dijeli frekvenciju s 32?

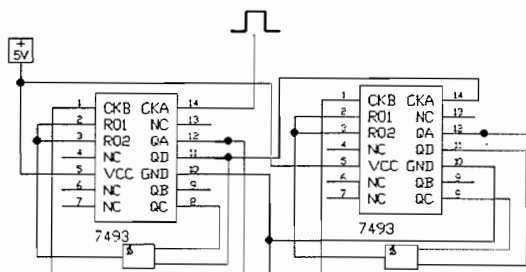
7. Pokažite kako se s pomoću integriranog sklopa 7493 može izvesti binarno brojilo koje dijeli frekvenciju sa 6?

8. S koliko dijeli frekvenciju brojilo sa slike 13.22.?

9. Do koliko je moguće brojiti impulse s brojiлом prikazanim na slici 13.23.?



Slika 13.22. Spoj sklopa 7493



Slika 13.23. Spoj dvaju integriranih brojila 7493

10. Što je kapacitet memorije i kako se iskazuje?

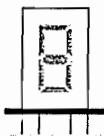
11. Kako su međusobno povezani kapacitet memorije i broj adresnih ulaza?

12. Koliko adresnih ulaza mora imati memorija u koju se može pohraniti 16384 osmerobitnih riječi?

13. Koliki je kapacitet memorije koja ima 10 adresnih ulaza i 8 ulaza za bitove podatka?

14. Objasnite značenje skraćenica SRAM i DRAM.

15. Navedite osnovna svojstva statičkih i dinamičkih memorija s izravnim pristupom.



14. SLOŽENI LOGIČKI SKLOPOVI

U ovom poglavlju obrađuju se primjeri složenih logičkih sklopova čiji su osnovni sastavni elementi kombinacijski logički sklopovi. To su sklopovi za kodiranje i dekodiranje, upravljački sklopovi pokazivača (indikatora), sklopovi za demultipleksiranje i selektiranje te programirljive digitalne komponente.

14.1. Sklopovi za kodiranje i dekodiranje

Koder
Dekoder

14.2. Upravljački sklopovi pokazivača

7-segmentni pokazivač
Upravljanje 7-segmentnim pokazivačem

14.3. Sklopovi za selektiranje i demultipleksiranje

Multiplesor ili selektor
Demultiplesor

14.4. Programirljive digitalne komponente

Ispisne memorije
Programirljive logičke komponente

Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 14.1. Primjena 7-segmentnog pokazivača

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

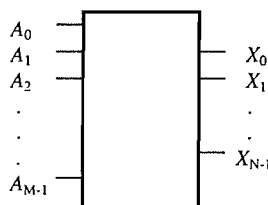
14.1. SKLOPOVI ZA KODIRANJE I DEKODIRANJE

O kodiranju, vrstama kodova i njihovoj primjeni bilo je govora u poglavlju 10.1. *Analogni i digitalni signali*. U ovom dijelu četrnaestoga poglavlja obrađuju se sklopovi za kodiranje i dekodiranje.

Koder

Zadatak je sklopova za kodiranje, kraće kodera (engl. encoder, njem. Codierer), da aktivni ulazni signal pretvori u kodirani izlazni signal. To znači da sklop za kodiranje ima onoliko ulaza koliko podataka (npr. slova, znamenki, znakova ili naredbi) treba kodirati. Broj izlaza odgovara broju bitova koda koji se primjenjuje (slika 14.1). Broj bitova koda, tj. broj izlaza N uvjetuje mogući broj ulaza M . Koder s N izlaza može imati najviše $M=2^N$ ulaza. Ako se u nekom kodu ne rabi svih 2^N mogućih kombinacija, broj ulaza može biti i manji (npr. BCD-dekadni koder).

Od M ulaza samo jedan može biti u aktivnom stanju u danom trenutku, npr. u stanju 1, dok svi ostali ulazi tada moraju biti u stanju 0. Pri tome se na izlazima dobije odgovarajuća N -bitna kombinacija. Kad se aktivira drugi ulaz, na izlazima se dobije nova N -bitna kombinacija.



Slika 14.1. Opći prikaz kodera

Za kodiranje decimalnih znamenki u BCD kodu potreban je sklop s deset ulaza (za svaku znamenku jedan) i četiri izlaza (četverobitni kod). Kad je na ulazu A_0 stanje 1, a na svim ostalim ulazima stanje 0, na izlazima X je stanje 0000. Ako je na ulazu A_1 stanje 1, onda je na izlazima X stanje 0001 (tablica 14.1.).

Tablica 14.1. Tablica stanja za kodiranje decimalnih znamenki u BCD kodu (aktivan signal stanje 1)

Ulazi										Izlazi			
A_9	A_8	A_7	A_6	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1	A_0	X_3	X_2	X_1	X_0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

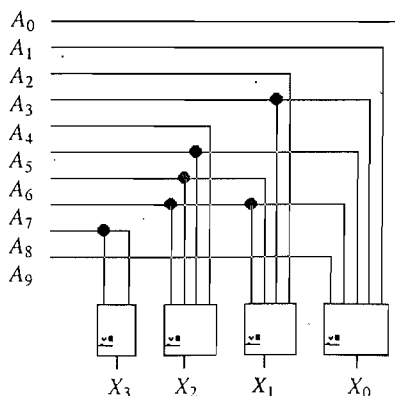
Tablica stanja pokazuje da se sklop za kodiranje znamenki decimalnoga brojevnog sustava može izvesti s pomoću četiri sklopa ILI s odgovarajućim brojem ulaza. Izlazi sklopova ILI ujedno su izlazi kodera (slika 14.2.). To se može prikazati i logičkim jednadžbama:

$$X_0 = A_1 + A_3 + A_5 + A_7 + A_9$$

$$X_1 = A_2 + A_3 + A_6 + A_7$$

$$X_2 = A_4 + A_5 + A_6 + A_7$$

$$X_3 = A_8 + A_9$$



Slika 14.2. Logička shema kodera decimalnih znamenki u BCD kodu

Primjer 14.1.

Napisati tablicu stanja za sklop sa slike 14.3.

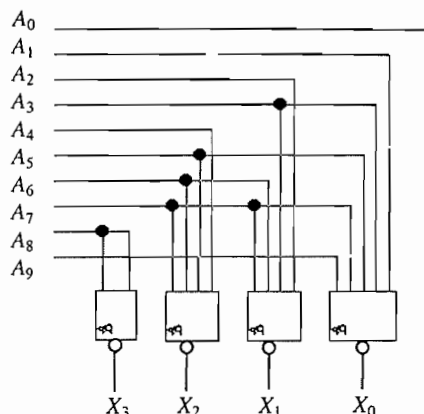
Tablica za sklop sa slike 14.3. pokazuje da se koder za BCD kod može izvesti i sa sklopovima NI. Takav koder razlikuje se od koder sa sklopovima ILI po tome što je aktivni signal na ulazu 0. To se može prikazati logičkim jednadžbama:

$$X_0 = A_1 \cdot A_3 \cdot A_5 \cdot A_7 \cdot A_9$$

$$X_1 = A_2 \cdot A_3 \cdot A_6 \cdot A_7$$

$$X_2 = A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 \cdot A_7$$

$$X_3 = A_8 \cdot A_9$$



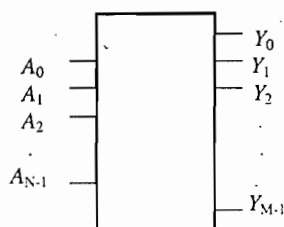
Slika 14.3. Logička shema složenoga sklopa izvedena sa sklopovima NI

Tablica 14.2. Tablica stanja za koder decimalnih znamenki u BCD kodu s pomoću sklopova NI

Ulazi										Izlazi			
A ₉	A ₈	A ₇	A ₆	A ₅	A ₄	A ₃	A ₂	A ₁	A ₀	X ₃	X ₂	X ₁	X ₀
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0
1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1

Dekoder

Zadaća sklopova za dekodiranje, kraće dekodera (engl. decoder, njem. Decoder) suprotna je sklopovima za kodiranje. To znači da se na ulaze dovodi kodirani podatak, a na jednom od više izlaza dobiva informacija o ulaznom podatku. Stoga broj ulaza N odgovara broju bitova primijenjenoga koda, a broj izlaza M broju kodiranih podataka koji se dekodiraju (slika 14.4.). Međutim, broj izlaza M ne može biti veći od broja 2^N .



Slika 14.4. Opći prikaz dekodera

Za dekodiranje binarnih kombinacija BCD koda dekodier mora imati četiri ulaza (četverobitni kod) i deset izlaza (deset binarnih kombinacija koje treba dekodirati).

Dovođenjem zadane binarne kombinacije na ulaze A_0 - A_{N-1} aktivira se samo jedan od izlaza M . Aktivirani izlaz može biti stanje 1 ili stanje 0, što ovisi o izvedbi. Svi ostali izlazi su u suprotnom stanju od aktiviranog. Promjenom ulaznog stanja aktivira se drugi izlaz.

Ako je aktivni signal na izlazu stanje 1, onda se logička svojstva dekodera mogu prikazati tablicom stanja (tablica 14.3.). Tablica stanja pokazuje da se sklop za dekodiranje znamenki decimalnoga brojevnog sustava može izvesti s pomoću deset sklopova I s četiri ulaza i četiri invertora. Izlazi sklopova I ujedno su izlazi dekodera (slika 14.5.). To se može prikazati logičkim jednadžbama:

$$Y_0 = \bar{A}_0 \cdot \bar{A}_1 \cdot \bar{A}_2 \cdot \bar{A}_3$$

$$Y_1 = A_0 \cdot \bar{A}_1 \cdot \bar{A}_2 \cdot \bar{A}_3$$

$$Y_2 = A_0 \cdot A_1 \cdot \bar{A}_2 \cdot \bar{A}_3$$

$$Y_3 = A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \bar{A}_3$$

$$Y_4 = A_0 \cdot \bar{A}_1 \cdot A_2 \cdot \bar{A}_3$$

$$Y_5 = A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$$

$$Y_6 = \bar{A}_0 \cdot A_1 \cdot \bar{A}_2 \cdot \bar{A}_3$$

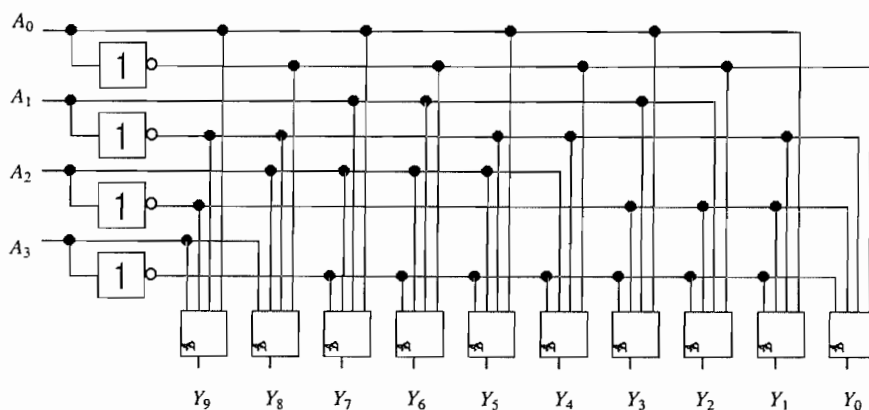
$$Y_7 = A_0 \cdot \bar{A}_1 \cdot A_2 \cdot \bar{A}_3$$

$$Y_8 = \bar{A}_0 \cdot \bar{A}_1 \cdot A_2 \cdot \bar{A}_3$$

$$Y_9 = A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$$

Tablica 14.3. Tablica stanja za dekoder decimalnih znamenki u BCD kodu s pomoću sklopova I

Ulazi				Izlazi									
A ₃	A ₂	A ₁	A ₀	Y ₉	Y ₈	Y ₇	Y ₆	Y ₅	Y ₄	Y ₃	Y ₂	Y ₁	Y ₀
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0



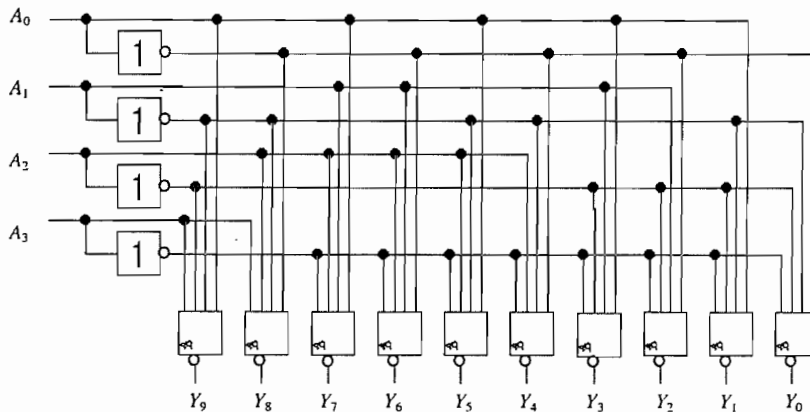
Slika 14.5. Logička shema BCD-dekadnog dekodera

Primjer 14.2.

Napisati tablicu stanja za sklop sa slike 14.6.

Tablica za sklop sa slike 14.6. pokazuje da se dekoder za BCD kod može izvesti i sa sklopovima NI. Takav dekoder razlikuje se od dekodera sa sklopovima I po tome što je aktivni signal na izlazu stanje 0.

Sklop 7445 primjer je integrirane izvedbe takva dekodera.

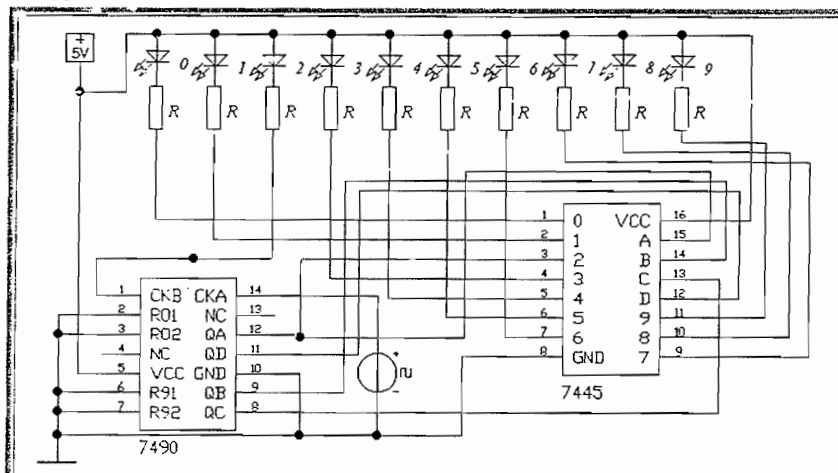


Slika 14.6. Logička shema složenog sklopa izvedenog sa sklopovima NI

Tablica 14.4. Tablica stanja za dekoder izveden s pomoću sklopova NI

Ulazi				Izlazi									
A ₃	A ₂	A ₁	A ₀	Y ₉	Y ₈	Y ₇	Y ₆	Y ₅	Y ₄	Y ₃	Y ₂	Y ₁	Y ₀
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Pokus



Slika 14.7. Primjena dekodera 7445 za dekodiranje stanja dekadnoga brojila

U pokusu sa slike 14.7. pokazan je primjer primjene dekodera za dekodiranje stanja dekadnoga brojila. Svaka kombinacija na ulazu daje samo na jednom izlazu (onomu koji odgovara binarnoj kombinaciji na ulazu) stanje 0. Svjetleća dioda spojena na taj izlaz svijetli. Ostali izlazi su u stanju 1 pa njihove diode ne svijetle (tablica 14.5.).

Tablica 14.5. Stanja izvoda spoja sklopova za dekodiranje stanja dekadnoga brojila

D	C	B	A	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	Dioda svijetli
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	3
0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	4
0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	5
0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	6
0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	7
1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9

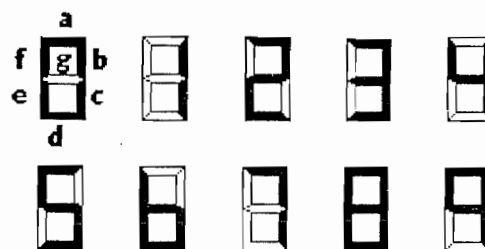
14.2. UPRAVLJAČKI SKLOPOVI POKAZIVAČA

U prethodnom poglavlju pokazano je kako se BCD-dekadni dekodер može, uz pomoć svijetlećih dioda, primijeniti za praćenje stanja dekadnog brojila. Međutim, u praksi se često zbog praktičnih razloga zahtijeva mogućnost izravnog očitavanja dekadnih znamenki. U tu svrhu upotrebljavaju se različiti tipovi pokazivača (indikatora). U ovom poglavlju bit će govora o vrlo često upotrebljavanom 7-segmentnom pokazivaču i potrebnim upravljačkim sklopovima za rad takva pokazivača.

7-segmentni pokazivači

7-segmentni pokazivači (engl. 7-segment indicator, 7-segment display, njem. Siebensegmentanzeige) izrađeni su od sedam svijetlećih segmenata. Segmenti se aktiviraju binarnim signalima podataka. Prema tome koji su segmenti aktivirani, na pokazivaču se dobije jedna od znamenki decimalnoga brojevnog sustava (slika 14.8.).

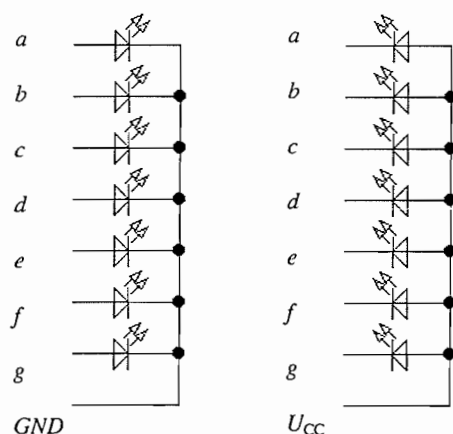
U praksi se upotrebljava više različitih tipova 7-segmentnih pokazivača. Najčešći su pokazivači sa svijetlećim diodama i pokazivači s tekućim kristalom.



Slika 14.8. 7-segmentni pokazivač

Kod 7-segmentnog pokazivača sa svijetlećim diodama diode mogu biti spojene na dva načina (slika 14.9.).

Za pokazivač u kojem su katode spojene na zajedničku točku (engl. common-cathode type, gemeinsame Katodenanschluss), aktivan signal na ulazima *a-g* je stanje 1. Zajednička elektroda, tj. katoda spaja se na uzemljenu točku (minus pol izvora napajanja). Napon stanja 1 na aktiviranim izlazima tjera struju kroz diode prema uzemljenoj točki i te diode svijetle.

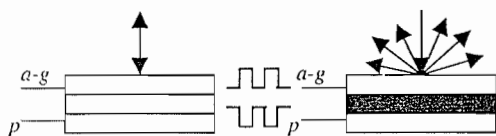


Slika 14.9. Spoj svijetlećih dioda u 7-segmentnom pokazivaču

Kod pokazivača u spoju zajedničke anode (engl. common-anode type, njem. gemeinsame Anodenanschluss) aktivni signal na ulazima *a-g* je stanje 0. Zajednička elektroda, tj. anoda spaja se na napon napajanja. Napon napajanja tjera struju kroz one diode čije su katode na potencijalu koji odgovara stanju 0 i te diode svijetle.

7-segmentni pokazivač moguće je izvesti uporabom pojedinačnih dioda. Serijskim spajanjem dviju ili više dioda u jedan segment mogu se dobiti pokazivači potrebnih dimenzija. Proizvođači digitalnih komponenta proizvode i gotove 7-segmentne pokazivače.

Pokazivači s tekućim kristalom sastoje se od podloge kao zajedničke elektrode (engl. backplane) i sedam elektroda u obliku segmenata. Između zajedničke elektrode i segmentnih elektroda nalazi se tekući kristal (slika 14.10.).



Slika 14.10. 7-segmentni pokazivač s tekućim kristalom

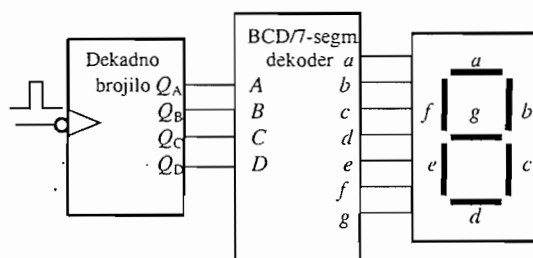
Svjetlost koja pada na nepobuđeni segment reflektira se pod kutom od 180° i taj segment nije vidljiv. Svjetlost koja pada na pobuđeni segment reflektira se u svim smjerovima od kristala što čini segment vidljivim.

Za pobudu segmenata pokazivača s tekućim kristalom potreban je izmjenični napon iznosa 3-15V i frekvencije 25-60Hz. Pobuda istosmjernim naponom djeluje nepovoljno na tekući kristal (elektrolitsko razlaganje). Zajednička elektroda i segmenti, s tekućim kristalom između, čine ustvari kapacitivnost kojom teče u pobuđenom stanju izmjenična struja. Što je frekvencija niža, i struja je manja, a to znači manji utrošak snage. No frekvencije niže od 25Hz nije moguće primijeniti jer tada dolazi do zamjetljivog titranja svjetlosti pokazivača.

U praktičnim izvedbama za pobudu pokazivača s tekućim kristalom upotrebljavaju se pravokutni impulsi niske frekvencije koji se protufazno (engl. out-of-phase) dovode na zajedničku elektrodu i segmente (slika 14.10.).

Upravljanje 7-segmentnim pokazivačem

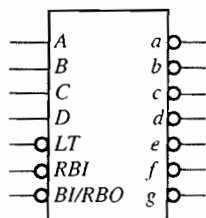
Ako se želi četverobitni numerički podatak iz brojila ili kakvog drugog sklopa prikazati pomoću 7-segmentnog pokazivača, potrebno je pretvoriti ga u sedmerobitni podatak (slika 14.11.). Sklopovi koji obavljaju tu funkciju nazivaju se BCD/7-segmentni dekoderi (engl. BCD-to 7-segment decoder/driver) i proizvode se kao integrirani sklopovi u skupinama TTL i CMOS. Unutar takvog sklopa dekodira se četverobitni BCD kod s ulaza i zatim kodira u sedmerobitni kod potreban za upravljanje 7-segmentnim pokazivačem.



Slika 14.11. Opći prikaz spoja 7-segmentnoga pokazivača i dekadnoga brojila

Primjer BCD/7-segmentnog dekodera je sklop 7447 (slika 14.12.). To je sklop namijenjen upravljanju pokazivača u spoju zajedničkih anoda.

Osim ulaza za četverobitni podatak A, B, C i D te izlaza za 7-segmentni pokazivač a, b, c, d, e, f i g , oba sklopa imaju još tri posebna izvoda.



Pomoću izvoda LT moguće je ispitati ispravnost svih segmenata pokazivača. Ulaz RBI služi za gašenje nepotrebnih nula kod višeznamenastih brojeva. Ako je na tom ulazu stanje 0, uz ulaze $A=B=C=D=0$ neće svijetliti nijedan segment. Ako je potrebno da nula svijetli, ulaz RBI mora biti u stanju 1. Izvod BI/RBO je ulaz i izlaz. Kad je sklop u stanju gašenja nule, na tom izvodu dobije se stanje 0. Ako se na taj izvod dovede stanje 0, sklop ne dopušta da svijetli bilo koji segment bez obzira na stanje na ulazima $A-D$ (tablica 14.6.).

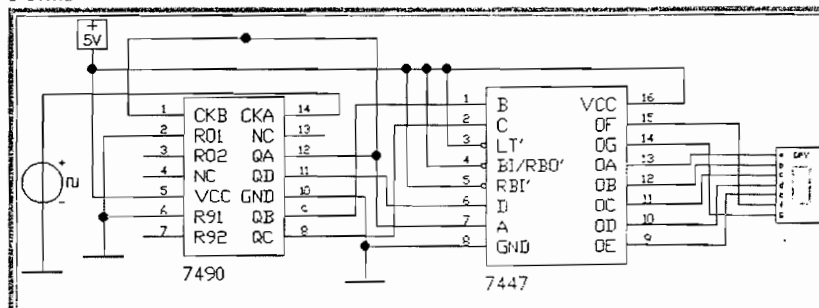
Slika 14.12. Simbol integriranoga sklopa 7447

Tablica 14. 6. Tablica stanja integriranoga sklopa 7447

Učinak	Ulazi							Izlazi						
	LT	RBI	D	C	B	A	BI/RBO	a	b	c	d	e	f	g
0	H	H	L	L	L	L	H	L	L	L	L	L	L	H
1	H	X	L	L	L	H	H	H	L	L	L	H	H	H
2	H	X	L	L	H	L	H	L	L	H	L	L	H	L
3	H	X	L	L	H	H	H	L	L	L	L	H	H	L
4	H	X	L	H	L	L	H	H	L	L	H	H	L	L
5	H	X	L	H	L	H	H	L	H	L	L	H	L	L
6	H	X	L	H	H	L	H	H	H	L	L	L	L	L
7	H	X	L	H	H	H	H	L	L	L	L	H	H	H
8	H	X	H	L	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L
9	H	X	H	L	L	H	H	L	L	L	H	H	L	L
	H	X	H	L	H	L	H	H	H	H	L	L	H	L
	H	X	H	L	H	H	H	H	H	L	L	H	H	L
	H	X	H	H	L	L	H	H	L	H	H	H	L	L
	H	X	H	H	L	H	H	L	H	H	L	H	L	L
	H	X	H	H	H	L	H	H	H	H	L	L	L	L
	H	X	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
BI	X	X	X	X	X	X	L	H	H	H	H	H	H	H
RBI	H	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H
LT	L	X	X	X	X	X	H	L	L	L	L	L	L	L

L – stanje 0, H – stanje 1, X – bilo koje stanje

Pokus



Slika 14.13. Spoj dekadnoga brojila i 7-segmentnoga pokazivača

U pokusu sa slike 14.13. pokazan je primjer primjene 7-segmentnog pokazivača za izravno očitavanje dekadnoga brojala. Generator impulsa niske frekvencije (1Hz) priključen je na ulaz dekadnoga brojala 7490. Četvero-bitni izlaz dekadnoga brojala prilagođava se s pomoću BCD/7-segmentnog dekodera 7447 na sedmerobitni ulaz 7-segmentnoga pokazivača.

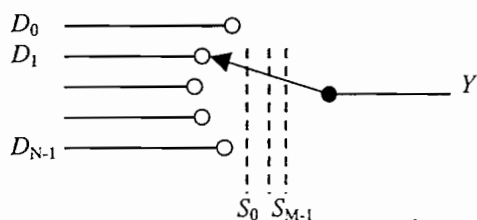
14.3. SKLOPOVI ZA SELEKTIRANJE I DEMULTIPLEKSIRANJE

U ovom dijelu četrnaestoga poglavlja obrađuju se sklopovi za selektiranje (odabir) i distribuciju (raspodjelu) digitalnih podataka. To su selektor ili multiplexsor i demultiplexsor.

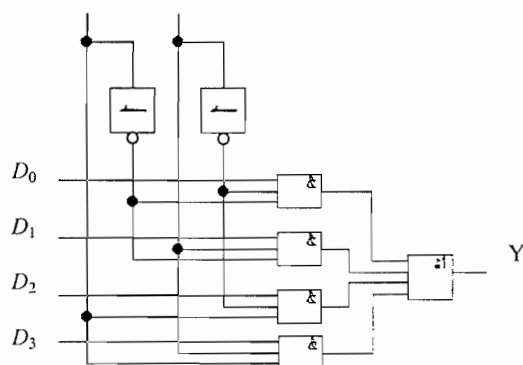
Multiplexsor ili selektor

Multiplexsor ili selektor (engl. multiplexer, data selector, njem. Multiplexer) sklop je kojim se odabire podatak s jednog od više ulaza i usmjerava (prenosi) na izlaz (slika 14.14.). S kojeg ulaza će se odabrati podatak i prenijeti na izlaz ovisi o stanju posebnih ulaza za odabiranje (adresiranje). Broj ulaza za podatke N ovisi o broju ulaza za odabiranje M :

$$N=2^M.$$



Slika 14.14. Opći prikaz djelovanja multiplexsora



Slika 14.15. Logička shema multiplexsora

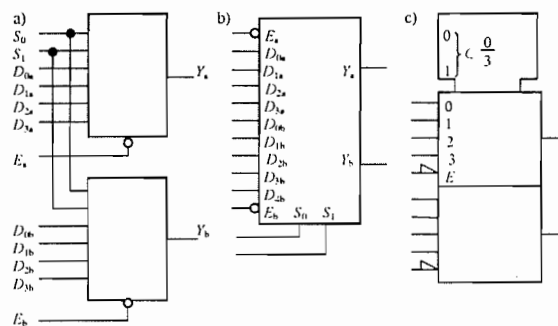
Na slici 14.15. prikazana je logička shema multiplexsora s četiri ulaza. U tom slučaju multiplexsor treba imati dva ulaza za odabiranje podataka. Podaci s ulaza dovode se na sklopove I. Koji sklop I će prenijeti podatak s ulaza na izlaz preko sklopa II, ovisi o kombinaciji na ulazima za odabiranje podataka S_0 i S_1 . To se može prikazati i tablicom stanja (tablica 14.7.).

Tablica 14. 7. Tablica stanja multiplexsora s četiri ulaza

Ulazi za odabir		Izlaz
S_1	S_0	Y
0	0	D_0
0	1	D_1
1	0	D_2
1	1	D_3

Proizvođači digitalnih komponenata proizvode veći broj integriranih izvedbi multiplexsora. Kao primjer može se navesti sklop 74153.

Integrirani sklop 74153 sadrži dva multiplexsora s četiri ulaza. Ulazi za odabiranje podataka zajednički su za oba multiplexsora (slika 14.16.). Osim toga sklop ima za svaki multiplexsor poseban upravljački ulaz E (od engl. enable). Stanje 0 na ulazu E omogućava normalan rad multiplexsora, a stanje 1 daje na izlazu Y stanje 0 bez obzira na stanje ulaza S i D (tablica 14.8.).



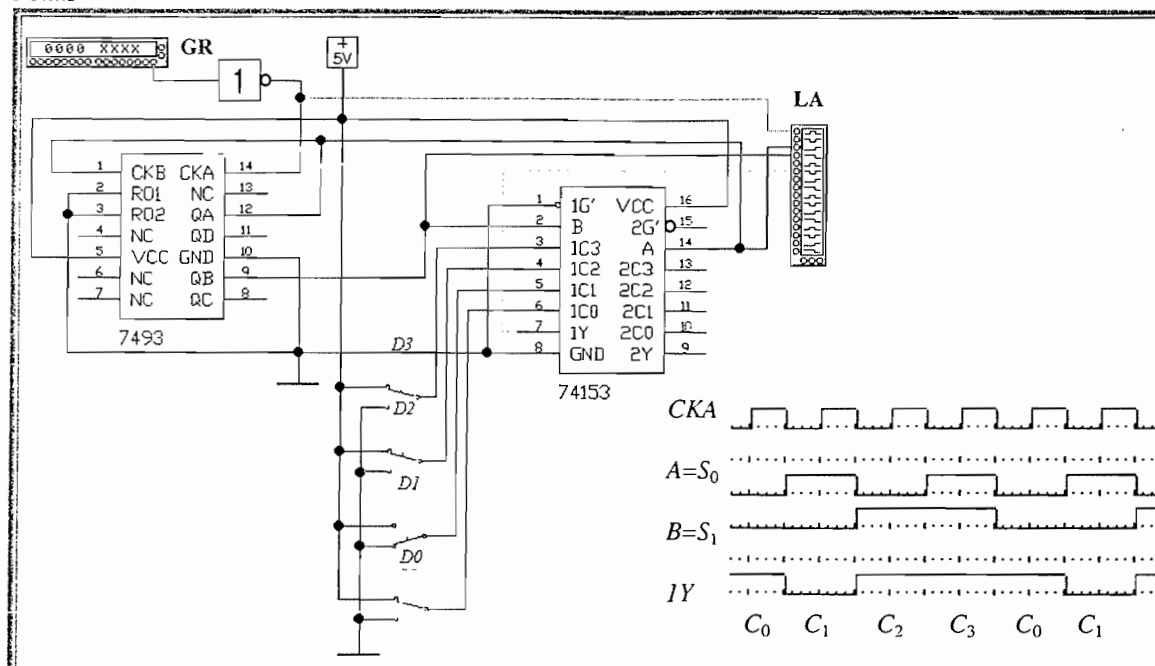
Slika 14.16. Integrirani sklop 74153:
a) pojednostavnjena shema, b) standardni simbol.
c) IEC simbol

Tablica 14. 8. Tablica stanja integriranoga sklopa 74153

E	S_1	S_0	Y
H	X	X	L
L	0	0	D_0
L	0	1	D_1
L	1	0	D_2
L	1	1	D_3

L – stanje 0, H – stanje 1. X – bilo koje stanje, D_0 – D_3 – stanje na ulazima

Pokus

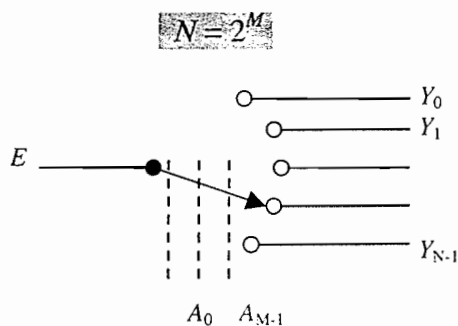


Slika 14.17. Primjer uporabe multipleksora

U pokusu sa slike 14.17. pokazan je primjer uporabe multipleksora. Sklop 7493 je brojilo od 00 do 11 koje na ulazima za odabiranje A i B multipleksora 74153 omogućava redom prijenos podataka s ulaza 1C3-1C0 na izlaz 1Y. Vremenski dijagram napona pokazuje da multipleksor u ovom slučaju pretvara paralelni digitalni signal s ulaza 1C3-1C1 u serijski na izlazu 1Y. U primjeru sa slike taj podatak je 1101. Sklopkama D3-D0 moguće je na ulaze multipleksora postaviti bilo koji drugi četverobitni podatak.

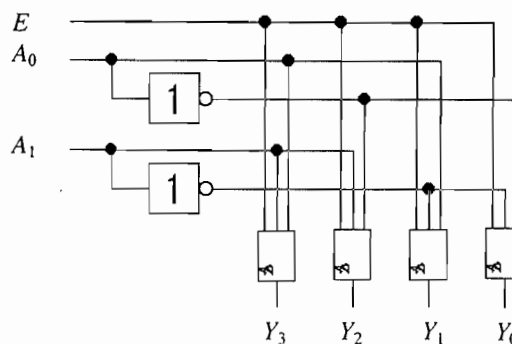
Demultipleksor

Demultipleksor (engl. demultiplexer, data distributor, njem. Demultiplexer) obavlja funkciju suprotnu multipleksoru. To je sklop s kojim se podatak s jednog ulaza (E) prenosi na jedan od više izlaza (Y_1 - Y_{N-1}). Na koji izlaz će se podatak usmjeriti ovisi o stanju ulaza za adresiranje (A_0 - A_{M-1}). Broj izlaza za podatke N ovisi o broju ulaza za adresiranje M:



Slika 14.18. Opći prikaz djelovanja demultipleksora

Na slici 14.19. prikazana je logička shema i simbol demultipleksora s četiri izlaza. Podaci s ulaza D dovode se na ulaze sklopova I. Broj sklopova I odgovara broju izlaza. Na koji izlaz će se podatak prenijeti ovisi o kombinaciji na ulazu A_0 - A_3 . Djelovanje sklopa može se prikazati tablicom stanja (tablica 14.9.).



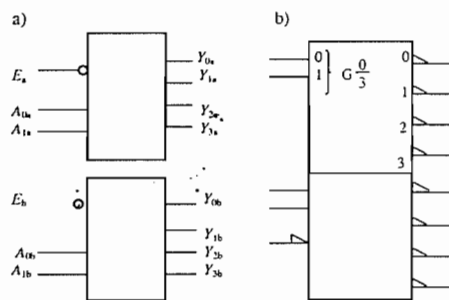
Slika 14.19. Logička shema demultipleksora s četiri izlaza

Tablica 14.9. Tablica stanja demultipleksora s četiri izlaza

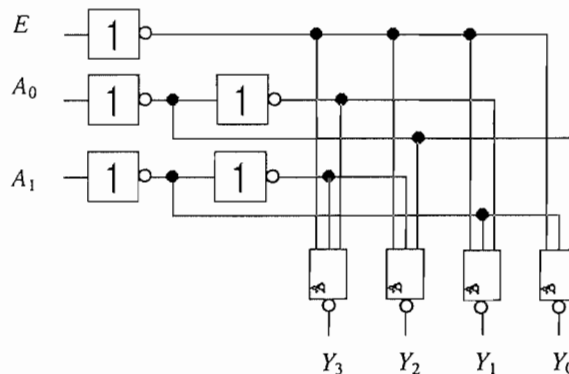
Ulazi			Izlazi			
E	A_1	A_0	Y_3	Y_2	Y_1	Y_0
0	X	X	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	1	0
1	1	0	0	1	0	0
1	1	1	1	0	0	0

X – bilo koje stanje

Logička shema i tablica stanja pokazuju da se demultipleksor može primijeniti i za dekodiranje. Ulazi A_0 i A_1 u tom su slučaju ulazi za binarni podatak koji treba dekodirati. Ulaz E je upravljački ulaz kojim se omogućava ili zabranjuje rad dekodera. Takva mogućnost uporabe razlog je da se u tvorničkim podacima proizvođača takav sklop naziva dekodier/demultipleksor. Kao primjer integrirane izvedbe može se navesti sklop 74139.

Slika 14.20. Integrirani sklop 74139:
a) standardni simbol, b) IEC simbol

Integrirani sklop 74139 sadrži u jednom kućištu dva istovjetna dekodera/demultipleksora s četiri izlaza (slika 14.20.).

Slika 14.21. Logička shema
dekodera/demultipleksora 74139

Logička shema dekodera/demultipleksora razlikuje se od osnovne sheme sa slike 14.19. Sklopovi NI u izlaznom dijelu uzrok su invertiranom podatku na izlazima. Dvostruki invertori na ulazima za adresiranje omogućavaju manje opterećenje izlaza prethodnog sklopa. Isto vrijedi i za ulaz E .

Tablica 14.10. Tablica stanja demultipleksora 74139

Ulazi			Izlazi			
E	A_1	A_0	Y_3	Y_2	Y_1	Y_0
H	X	X	H	H	H	H
L	L	L	H	H	H	L
L	L	H	H	H	L	H
L	H	L	H	L	H	H
L	H	H	L	H	H	H

X – bilo koje stanje, L – stanje 0, H – stanje 1

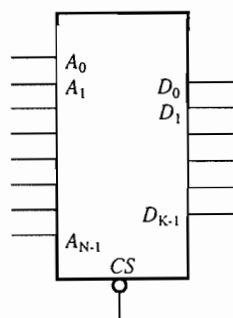
14.4. PROGRAMIRLJIVE DIGITALNE KOMPONENTE

U poglavlju 13.3. Memorije spomenute su ispisne memorije koje bez obzira na naziv memorije čine vrstu složenih kombinacijskih sklopova jer se sastoje od dekodera i kodera. Ti sklopovi poznati su pod skraćenim nazivom ROM (od engl. read only memory). U pravilu, podatak se u ispisnu memoriju upisuje jednom. Postupak upisivanja sadržaja u ispisnu memoriju naziva se programiranje ispisne memorije. Osim ispisnih memorija postoje i programirljive logičke komponente za koje se često upotrebljava skraćenica PLD (od engl. programable logic device) o kojima će također biti govora u ovom poglavlju.

Ispisne memorije

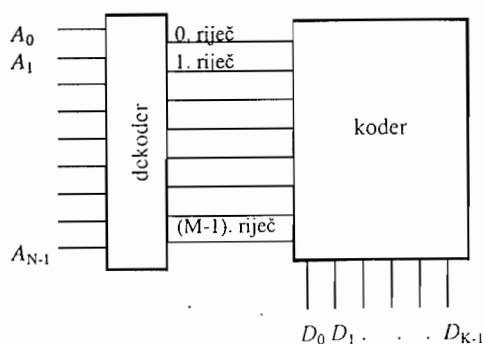
Ispisne memorije ili memorije sa stalnim sadržajem služe za pohranjivanje stalnih podataka ili podataka koji se vrlo rijetko mijenjaju. U normalnom režimu rada podatak se iz ispisne memorije može samo pročitati. Ispisne memorije su takve izvedbe da upisani podatak ostaje u njoj pohranjen i nakon isključenja napona napajanja. Iz toga proizlazi osnovna primjena ispisnih memorija, a to je čuvanje programa digitalnih sustava koji omogućavaju pokretanje sustava nakon uključivanja napona napajanja. Osim toga ispisne memorije upotrebljavaju se za generiranje znakova, tablice podataka, izvođenje logičkih operacija i pretvorbu kodova (npr. BCD/7-segmentni dekoderi spominjani u poglavlju 14.2. *Upravljački sklopovi pokazivača*, zapravo su ispisne memorije).

Svaka ispisna memorija ima izvode za adresne ulaze (obično označeni s A), za izlaz podatka (oznaka D) i upravljačke ulaze (CS , CE i OE). Razlikuju se od upisno/ispisnih po tome što nemaju izvode za ulaz podatka i upravljački ulaz čitaj/piši (R/W ili WE).



Slika 14.22. Simbol ispisne memorije

Podatak iz ispisne memorije čita se tako da se na adresne ulaze A dovede binarna kombinacija koja označava lokaciju iz koje se želi pročitati sadržaj i odgovarajući signal na upravljački ulaz CS (stanje 0 prema slici 14.22.).



Slika 14.23. Blok-shema ispisne memorije

Svaka se ispisna memorija zapravo sastoji od dekodera i koda (slika 14.23.). Prema izvedbi koda, odnosno prema načinu upisivanja podatka i mogućnostima brisanja upisanih podataka razlikuje se nekoliko tipova ispisnih memorija.

Tvornički programirane ispisne memorije za koje se najčešće upotrebljava opći naziv za sve ispisne memorije **ROM** (od engl. read only memory) programiraju se tvornički tijekom postupka proizvodnje. Dakle korisnik dobiva memoriju s već upisanim podacima. Prema postupku programiranja nazivaju se **maskom programirane ispisne memorije** (engl. mask-programmed ROM, skraćeno MROM).

Ispisne memorije kojima sadržaj programira korisnik nazivaju se **programirane ispisne memorije** (engl. programmable ROM, skraćeno **PROM**). U takvu memoriju korisnik može upisati podatak samo jednom.

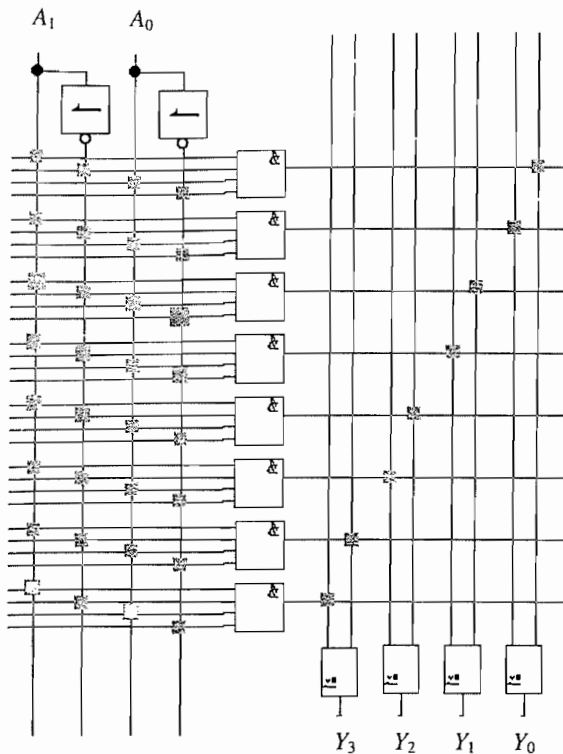
Izbrisive programirane ispisne memorije (engl. Erasable Programmable ROM, skraćeno **EPROM**) programiraju se električnim putem. Njihov sadržaj može se posebnim postupkom (izlaganjem ultraljubičastom zračenju) izbrisati, nakon čega je moguće memoriju ponovno programirati.

Brži i jednostavniji postupak brisanja sadržaja moguće je kod ispisnih memorija koje se nazivaju **električki izbrisive programirane ispisne memorije** (engl. Electrically Erasable Programmable ROM, skraćeno **EEPROM**).

Programirane logičke komponente

Programirane logičke komponente (engl. Programmable Logic Device, skraćeno **PLD**) složeni su logički sklopovi koji na jednoj pločici poluvodiča sadrže velik broj međusobno povezanih, standardnih digitalnih sklopova (osnovni logički sklopovi, bistabili, registri). Dio veza između pojedinih sklopova moguće je programirati na način kako se to izvodi kod nekih ispisnih memorija.

Programirano logičko polje sastoji se od programiranih polja sklopova I (matrica dekodera) i polja sklopova ILI (matrica koda). Na slici 14.24. prikazana je logička shema programiranog polja s dva ulaza, četiri izlaza i osam sklopova I (osam izlaznih linija dekodera). Stvarni integrirani sklopovi programiranih logičkih polja sadrže znatno veći broj ulaza i izlaza.



Slika 14.24. Shema programirljivoga logičkog polja

Kod komponenata za koje proizvođači digitalnih komponenata upotrebljavaju naziv **PAL** (kratica od engl. programmable array logic) izlazi sklopova I čvrsto su povezani s određenim ulazima sklopova ILI, a polje sklopova I programira se na sličan način kao kod ispisnih memorija.

Za programirljiva logička polja kod kojih je moguće programirati ulazno polje sklopova I (matricu dekodera) i izlazno polje sklopova ILI (matricu kodera) proizvođači digitalnih komponenata upotrebljavaju naziv **PLA**, skraćeno od engl. programmable logic arrays.

U današnje vrijeme razvijena su programirljiva logička polja koja je moguće programirati više puta. Vrlo je raširena uporaba komponenata za koje se upotrebljava naziv **GAL** (od engl. Gate Array Logic). Programiranje i brisanje prije programirane logičke funkcije izvodi se električkim putem, slično električki programirljivim ispisnim memorijama.

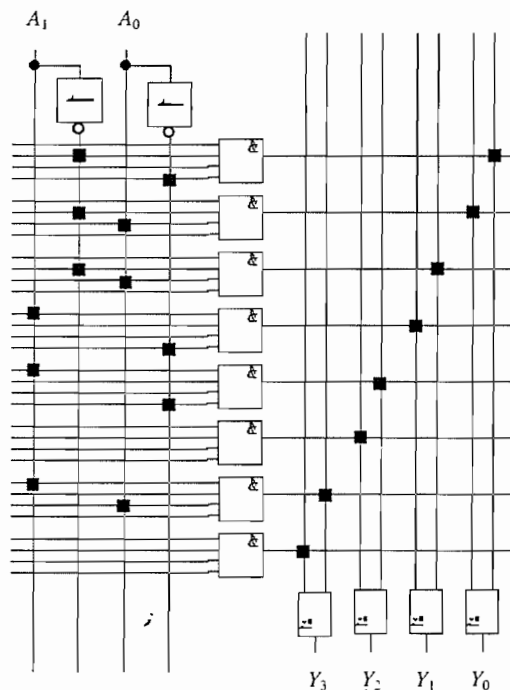
Primjer 14.3.

Nacrtati logičku shemu isprogramiranoga logičkog polja s 2 ulaza i 4 izlaza (prema slici 14.24.) koje će obavljati funkciju prema zadanoj tablici stanja.

Tablica 14.11. Tablica stanja za programiranje logičkog polja

Ulazi		Izlazi			
A_1	A_0	Y_3	Y_2	Y_1	Y_0
0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1
1	0	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0

Tablica stanja pokazuje da izlaz Y_0 mora biti u stanju 1 za dvije od četiri moguće ulazne kombinacije. To su kombinacije kad su oba ulaza u stanju 0 i kad je ulaz A_0 u stanju 1 i A_1 u stanju 1. To znači da na ulazu prvoga sklopa I treba ostati veza s ulazima A_0 i A_1 i na ulazu drugoga sklopa I veza s A_0 i A_1 . Za preostale dvije kombinacije izlaz Y_0 bit će u stanju 0. Na isti način prema tablici stanja programiraju se veze ostalih sklopova I (slika 14.25.). Ostali izlazi Y imaju stanje 1 samo za jednu od četiri moguće kombinacije. Za izlaz Y_3 to je kombinacija kad su oba ulaza u stanju 1. To znači da na izlazu Y_3 polje djeluje kao sklop I.



Slika 14.25. Logička shema isprogramiranoga logičkog polja prema tablici 14.11.

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

VJEŽBA 14.1. Primjena 7-segmentnog pokazivača

Zadatak

Proširiti znanja o sklopovima za upravljanje 7-segmentnim pokazivačima.

Upoznati tvorničke podatke integriranih izvedbi brojila i upravljačkih sklopova 7-segmentnih pokazivača.

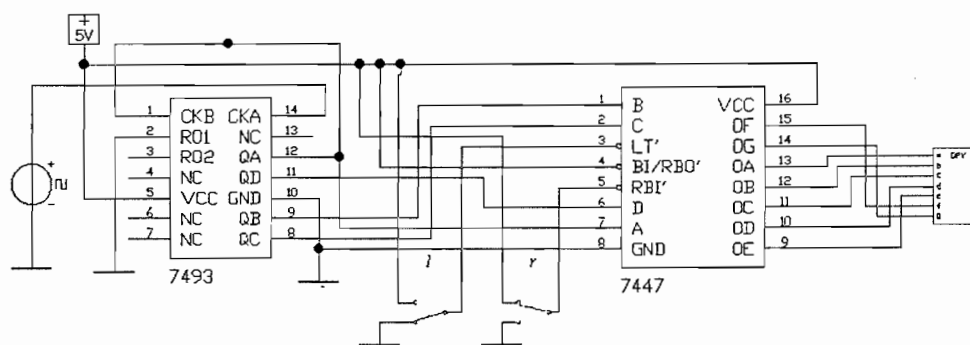
Upoznati mogućnosti primjene i postupke s integriranim izvedbama upravljačkih sklopova 7-segmentnih pokazivača.

Pribor i instrumenti

- integrirani sklop 7447
- integrirani sklop 7493
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- izvor napajanja 5V
- osciloskop
- generator impulsa.

Priprema

1. Nacrtajte dijagram spajanja sklopa 7447 i opišite namjenu i djelovanje pojedinih izvoda.
2. Nacrtajte dijagram spajanja sklopa 7493 i opišite namjenu i djelovanje pojedinih izvoda.



Slika 14.26. Spoj brojila 7493 i 7-segmentnog pokazivača

Pokusi

1. Svojstva sklopa 7447

1.1. Spojite dijelove sklopa prema shemi sa slike 14.26. uz frekvenciju ulaznih impulsa od 1Hz te priključite na napon napajanja. Što pokazuje 7-segmentni pokazivač?

1.2. Promijenite položaj sklopke *l* tako da je na ulazu *LT* sklopa 7447 napon 5V. Što u tom slučaju pokazuje pokazivač?

1.3. Koju namjenu ima ulaz *LT* sklopa 7447?

1.4. Uz *l*=1 promijenite položaj sklopke *r* tako da je ulaz *RBI* spojen na 0V. Što u tom slučaju pokazuje 7-segmentni pokazivač?

1.5. Koja je namjena ulaza *RBI* sklopa 7447?

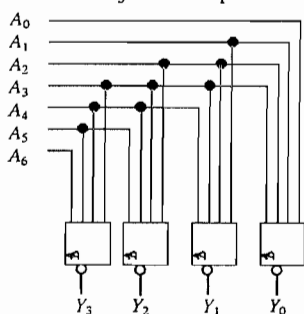
2. Pokazivanje stanja dekadnog brojila

2.1. Preuredite shemu spoja sa slike 14.26. tako da sklop 7493 djeluje kao dekadno brojilo.

2.2. Priključite spoj na napon napajanja uz *LT*=1. Što u tom slučaju pokazuje 7-segmentni pokazivač?

PITANJA I ZADACI ZA PONA VLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Napišite tablicu stanja za sklop sa slike 14.27.



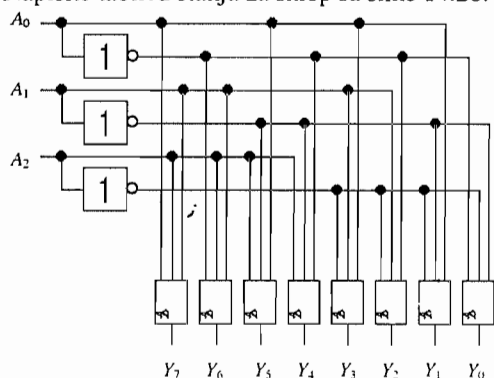
Slika 14.27. Logička shema sklopa uz zadatak 1.

2. Koliko najviše ulaza može imati koder s 4 izlaza?
3. Nacrtajte logičku shemu sklopa koji obavlja funkciju prema tablici 14.12.

Tablica 14.12. Tablica stanja sklopa uz zadatak 3

Ulazi							Izlazi			
A_6	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1	A_0	X_3	X_2	X_1	X_0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0
0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

4. Napišite tablicu stanja za sklop sa slike 14.28.



Slika 14.28. Logička shema sklopa uz zadatak 4

5. Koliko najviše izlaza može imati dekodner s 4 ulaza?
6. Nacrtajte logičku shemu sklopa koji obavlja funkciju prema tablici 14.13.
7. Zašto se 7-segmentni pokazivač ne može izravno priključiti na brojilo izvedeno sa sklopom 7493?

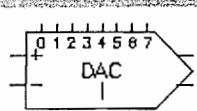
Tablica 14.13. Tablica stanja sklopa uz zadatak 6

Ulazi			Izlazi						
A_2	A_1	A_0	X_5	X_4	X_3	X_2	X_1	X_0	
0	0	0	0	0	0	0	0	1	
0	0	1	0	0	0	0	1	0	
0	1	1	0	0	0	1	0	0	
1	1	1	0	0	1	0	0	0	
1	1	0	0	1	0	0	0	0	
1	0	0	1	0	0	0	0	0	

8. Po čemu se razlikuju upravljački sklopovi za 7-segmentni pokazivač sa svijetlećim diodama u spoju zajedničke anode i spoju zajedničke katode?
9. U čemu je osnovna razlika pobudnog signala za 7-segmentni pokazivač sa svijetlećim diodama i pokazivača s tekućim kristalom?
10. Što će pokazivati 7-segmentni pokazivač sa slike 14.13. ako je na ulazu LT sklopa 7447 stanje 0?
11. S kojeg ulaza D će biti podatak na izlazu Y ako je na ulazima S sklopa sa slike 14.15. stanje $S_0=1, S_1=0$?
12. Kakvo stanje mora biti na ulazima S sklopa sa slike 14.15. da bi se podatak s ulaza D_2 prenio na izlaz Y ?
13. Na koji izlaz Y će se prenijeti podatak s ulaza E sklopa sa slike 14.21. ako je na ulazima A stanje $A_0=1, A_1=0$?
14. Kakvo stanje mora biti na ulazima A da bi se podatak s ulaza E sklopa sa slike 14.21. prenio na izlaz Y_3 ?
15. Po čemu se ispisne memorije (ROM) razlikuju od memorija s izravnim pristupom (RAM)?
16. Po čemu se međusobno razlikuju ispisne memorije EPROM i EEPROM?
17. Nacrtajte logičku shemu logičkog polja sa slike 14.24. isprogramiranog tako da obavlja funkcije prema tablici 14.14.

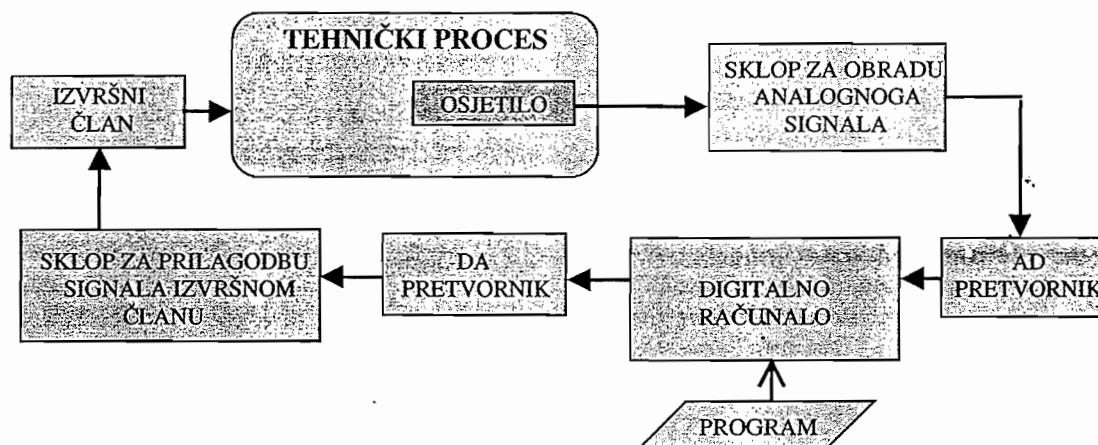
Tablica 14.14. Tablica stanja uz zadatak 13.24.

Ulazi		Izlazi			
A_1	A_0	Y_3	Y_2	Y_1	Y_0
0	0	0	1	1	0
0	1	0	0	0	1
1	0	0	0	0	1
1	1	1	0	1	0



15. DIGITALNO UPRAVLJANJE

Poopćeni prikaz sustava za digitalno upravljanje pokazan je na slici 15.1. Odvijanjem nekoga procesa mijenjaju se njegove karakteristične veličine. To mogu biti pomak, brzina, temperatura, tlak, protok itd. Osjetilo (senzor) mjeri te promjene i šalje ih na sklop za analognu obradu signala. Tu se signal mijenja (filtrira, pojačava i kompenzira nelinearnost karakteristike osjetila) i poprima oblik i veličinu pogodnu za prihvatanje u analognu-digitalni pretvornik. AD-pretvornik daje signalu digitalni oblik nakon čega signal dolazi u računalo na obradu. Da bi računalo moglo obaviti potrebnu obradu, mora mu se staviti na raspolaganje potrebna programska potpora (softver) kojim se određuje što i kako se u promatranom procesu mora mijenjati. Digitalni signal se iz računala dovodi u digitalno-analogni pretvornik koji ga vraća u analogni oblik. Prije dovođenja toga signala na izvršni član, koji će u željenom opsegu djelovati na promjene u procesu, potrebno je signal prilagoditi izvršnom članu (npr. prema potrebnoj snazi).



Slika 15.1. Opći prikaz sustava za digitalno upravljanje

U ovom, završnom poglavlju bit će ukratko razmotreni do sada neobrađeni sklopovi i uređaji digitalnoga sustava za upravljanje. To su sklopovi za digitalno-analognu i analognu-digitalnu pretvorbu i organizacija i način rada mikroračunala.

15.1. DA i AD pretvorba

DA pretvorba

DA pretvornik s ljestvičastom otpornom mrežom

Primjer integrirane izvedbe DA pretvornika

AD pretvorba

AD pretvornik s dvojnim nagibom

AD pretvornik s postupnom aproksimacijom

Paralelni AD pretvornik

Sklopovi za uzimanje uzoraka i pamćenje

Primjer integrirane izvedbe AD pretvornika

15. 2. Osnovna organizacija i način rada mikroračunala

Mikroračunalo

Programska oprema mikroračunala

Mikroprocesor

Memorija mikroračunala

Instrukcije mikroprocesora

Mikroupravljači

Programirajući logički upravljači

Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 15.1. DA i AD pretvorba

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

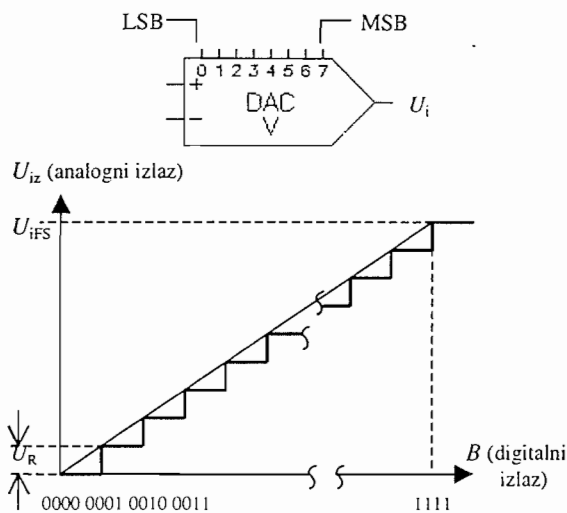
15.1. DA I AD PRETVORBA

Sve veća uporaba digitalnih sustava u različitim područjima tehnike zahtijeva čestu primjenu sklopova za pretvorbu signala iz analognog oblika u digitalni i obratno. Tu funkciju obavljaju **analogno-digitalni pretvornik** (skraćeno AD pretvornik, engl. AD converter, skraćeno ADC, njem. A/D Wandler) i **digitalno-analogni pretvornik** (skraćeno DA pretvornik, engl. DA converter, skraćeno DAC, njem. D/A Wandler).

Pomoću AD pretvornika signal se iz analognog oblika pretvara u digitalni kako bi mogao biti prihvaćen u digitalni sustav. Nakon obrade, digitalni signal je vrlo često potrebno vratiti u analogni oblik. Tu ulogu obavlja DA pretvornik. Stoga se u ovom dijelu poglavlja razmatraju mogućnosti AD i DA pretvorbe. Počinje se s DA pretvornicima budući da su ti sklopovi vrlo često i sastavni dijelovi AD pretvornika.

DA pretvorba

DA pretvorba jest postupak kojim se digitalna veličina (binarni signal) pretvara u napon ili struju proporcionalnu digitalnoj veličini. Na slici 15.2. prikazan je simbol i ulazno-izlazna (prijenosna) karakteristika DA pretvornika. Ulaz označen s LSB jest ulaz za bit najmanje težine mjesta, a ulaz MSB je za bit najveće težine mjesta. Ako DA pretvornik ima četiri ulaza, na ulazima može imati šesnaest različitih vrijednosti ulazne digitalne veličine (od 0000 do 1111). Svakoj vrijednosti ulazne veličine odgovara točno određena vrijednost izlaznog napona ili struje.



Slika 15.2. Simbol i prijenosna karakteristika DA pretvornika

Kad su svi bitovi digitalne ulazne veličine 0, izlazna veličina DA pretvornika ima najmanju moguću vrijednost (engl. zero scale output, skraćeno ZS). Kad su svi bitovi digitalne ulazne veličine 1, izlazna veličina ima najveću moguću vrijednost (engl. full range output, full scale output, skraćeno FS).

Postupnom promjenom ulazne digitalne veličine od stanja u kojem su svi bitovi 0 u stanje u kojem su svi bitovi 1, analogna izlazna veličina DA pretvornika mijenja se stepeničasto od najmanje moguće vrijednosti do najveće. Pri bilo kojoj promjeni ulazne veličine za 1 bit izlazna analogna veličina mijenja se uvijek za isti iznos. Ta najmanja moguća promjena izlazne veličine naziva se **rezolucija** ili **razlučivost** (engl. resolution, step size). Na temelju prijenosne karakteristike može se reći da je rezolucija promjena izlaznog napona DA pretvornika koja nastaje promjenom ulaznog signala za jedan bit, odnosno promjenom bita najmanje težine mjesta.

Zbog skokovitih promjena izlazne analogne veličine, prijenosna karakteristika DA pretvornika je diskontinuirana. Diskontinuiranost je manja što je vrijednost napona odnosno struje rezolucije niža, a što je veći broj mogućih razina izlaznog signala, tj. ako je broj bitova ulazne digitalne veličine veći. Stoga većina proizvođača integriranih komponenata iskazuje rezoluciju brojem bitova ulazne digitalne veličine.

Općenito DA pretvornik s n ulaza imat će 2^n različitih razina signala na izlazu pa je napon rezolucije $U_R = U_{1FS}/2^n - 1$. Izlazni napon jednak je umnošku rezolucije i vrijednosti digitalnog ulaznog signala B :

$$U_{iz} = \frac{U_{1FS} B}{2^n - 1}$$

Primjer 15.1.

Koliki je napon rezolucije 4-bitnog DA pretvornika ako je najveća moguća vrijednost izlaznog napona 10V?

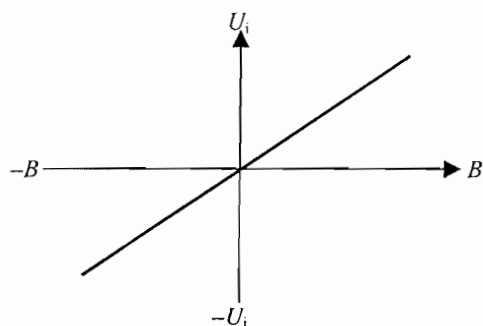
$$U_R = 10V / (2^4 - 1) = 10V / 15 = 0,67V$$

Primjer 15.2.

Koliki je izlazni napon 5-bitnog DA pretvornika čija je rezolucija 0,2V ako je ulazni signal 11111?

$$U_{iz} = 0,2V \cdot 31 = 6,2V$$

DA pretvornici kojima ulazna veličina može imati samo pozitivne vrijednosti nazivaju se unipolarnima. Pretvornici kojima ulazna veličina može imati pozitivne i negativne vrijednosti nazivaju se bipolarnim pretvornicima (engl. bipolar output converter). Prijenosna karakteristika takvih pretvornika (slika 15.3.) prikazuje se u dva kvadranta (engl. two-quadrant DAC). To su pretvornici kod kojih se bit najveće težine mjesta (MSB) ulazne digitalne veličine upotrebljava kao bit za predznak.



Slika 15.3. Prijenosna karakteristika DA pretvornika

Sklopovi za DA pretvorbu mogu se svrstati u dvije osnovne skupine: statički (paralelni) i dinamički (serijski).

Za statičke pretvornike karakteristično je da se svi bitovi digitalnog signala dovode na ulaz istodobno (paralelno). Načelo pretvorbe je zbrajanje komponenta struje koje se dobiju od bitova digitalnog signala putem otporne mreže. Otporna mreža može biti s težinski raspoređenim vrijednostima ili ljestvičasta mreža. Za te pretvornike karakteristična je velika brzina pretvorbe neovisna o veličini digitalnog podatka. Točnost pretvorbe ovisi o točnosti odnosa otpornika u otpornoj mreži.

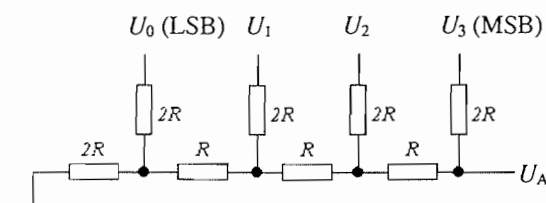
Kod dinamičkih (serijskih) pretvornika primjenjuje se načelo integriranja naponskih impulsa. Digitalni signal pretvori se u impulsni signal određene frekvencije u kojem širina impulsa odgovara veličini digitalnog signala. Analognim integratorom dobije se iz impulsa analogni napon čija je vrijednost odraz veličine digitalnog signala. Takvi pretvornici sporiji su u usporedbi s paralelnima. Trajanje pretvorbe ovisi o veličini digitalnog signala. Točnost pretvorbe ovisi o analognom integratoru.

DA pretvornik s ljestvičastom otpornom mrežom

Na slici 15.4. prikazana je ljestvičasta otporna mreža za 4-bitni digitalni signal. Naponi U_0 – U_3 sudjeluju u iznosu izlaznog napona u skladu s težinom mjesta koje predstavljaju u digitalnom ulaznom signalu.

Napon bita najveće težine U_3 pojavljuje se na izlazu mreže s polovicom svog iznosa, napon U_2 s četvrtinom, napon U_1 s osminom i napon bita najmanje težine U_0 sa šesnaestinom svog iznosa. Prema tome izlazni napon ljestvičaste otporne mreže za bilo koji digitalni signal iznosi:

$$U_A = \frac{U_3}{2} + \frac{U_2}{4} + \frac{U_1}{8} + \frac{U_0}{16}$$

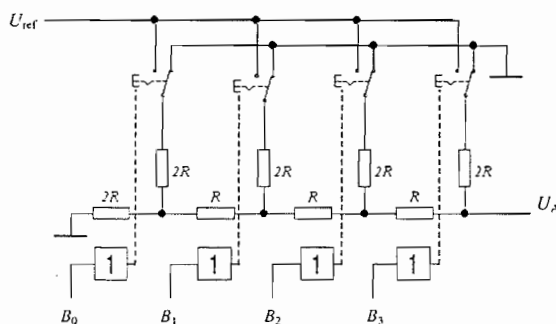


Slika 15.4. Ljestvičasta otporna mreža

Naponi U_0 – U_3 mogu imati vrijednosti $U_{IL}(V)$ za bit 0, odnosno $U_{IH}(V)$ za bit 1. Da bi se izbjegao utjecaj dosta širokog raspona vrijednosti koje mogu imati ti naponi, digitalni signal upotrebljava se za upravljanje sklopkama na ulazu otporne mreže. Digitalni signal sa stanjem 1 uključuje sklopku i na pripadne otpore mreže dolazi napon U_{ref} . Ako je digitalni signal u stanju 0, sklopka je isključena i na taj dio otporne mreže dolazi napon 0V (slika 15.5.). Izlazni napon mreže iznosi:

$$U_A = U_{ref} \frac{B_3}{2} + U_{ref} \frac{B_2}{4} + U_{ref} \frac{B_1}{8} + U_{ref} \frac{B_0}{16}$$

$$U_A = \frac{U_{ref}}{2} \left(B_3 + \frac{B_2}{2} + \frac{B_1}{4} + \frac{B_0}{8} \right)$$



Slika 15.5. DA pretvornik s ljestvičastom otpornom mrežom

Na temelju ovog razmatranja može se izvesti opći izraz za izlazni napon ljestvičaste otporne mreže s n ulaza:

$$U_A = \frac{U_{ref}}{2} \cdot \frac{B}{2^{n-1}} = U_{ref} \frac{B}{2^n}$$

pri čemu je n broj ulaza DA pretvornika, odnosno broj bitova digitalnog signala, a B vrijednost digitalnog signala izražena decimalnim brojem.

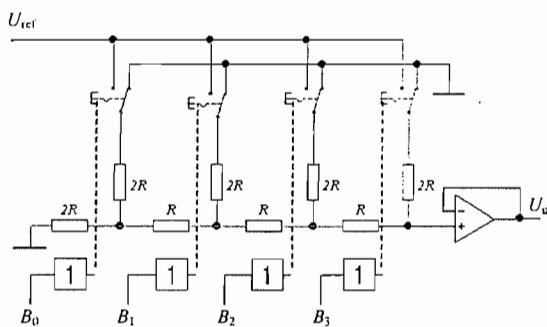
Primjer 15.3.

Koliki će biti izlazni napon DA pretvornika s ljestvičastom otpornom mrežom (slika 15.5.) za digitalni signal 1010 ako je $U_{ref}=4V$?

$$U_{iz} = 4V \cdot 10/16 = 2,5V$$

Izlaz otporne mreže može se spojiti na ulaz operacijskog pojačala. Ako je to naponsko sljedilo (slika 15.6), izlazni napon takvog DA pretvornika jest:

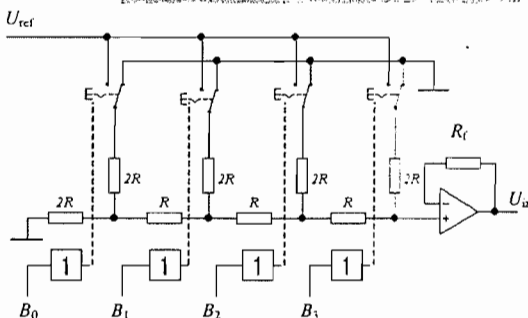
$$U_{iz} = \frac{U_{ref}}{2} \cdot \frac{B}{2^{n-1}} = U_{ref} \frac{B}{2^n}$$



Slika 15.6. DA pretvornik sa sljedilom napona

Kad je operacijsko pojačalo u spoju invertirajućeg pojačala (slika 15.7), izlazni je napon:

$$U_{iz} = -U_{ref} \frac{R_f}{2R} \cdot \frac{B}{2^{n-1}} = -U_{ref} B \frac{R_f}{2^n R}$$



Slika 15.7. DA pretvornik s invertirajućim operacijskim pojačalom

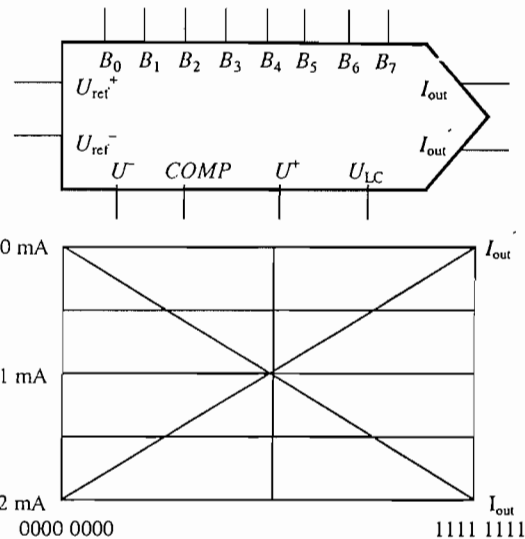
Primjer 15.4.

Koliki će biti izlazni napon DA pretvornika s ljestvičastom otpornom mrežom (slika 15.7.) za digitalni signal 1010 ako je $R_f=R$ i $U_{ref}=5V$?

$$U_{iz} = -5V \cdot 10/2 \cdot 2^3 = -5V \cdot 10/16 = -3,125V$$

Primjer integrirane izvedbe DA pretvornika

DAC-08 (PMI, Analog Devices) 8-bitni je DA pretvornik s ljestvičastom otpornom mrežom i strujnim izlazom (slika 15.8.).



Slika 15.8. Simbol s rasporedom izvoda i prijenosna karakteristika sklopa DAC-08

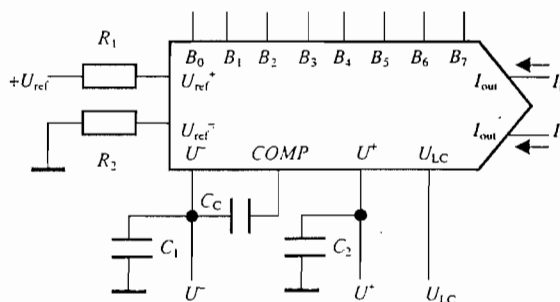
B_0 - B_7 su ulazi za 8-bitni digitalni signal. Izvod s oznakom *COMP* služi za frekvencijsku kompenzaciju pojačala referentne struje. U^+ i U^- su izvodi za napajanje. I_{out} i I_{out}' su analogni strujni izlazi. U_{ref}^+ i U_{ref}^- su ulazi za referentni napon kojima se osigurava potrebna referentna struja.

Sklop DAC-08 ima poseban izvod U_{LC} , koji služi za prilagođenje digitalnih ulaza DA pretvornika na izlaze digitalnih sklopova različitih skupina. Za prilagođenje na sklopove iz skupine TTL taj se izvod spaja na 0V.

Izlazna struja jednaka je umnošku vrijednosti digitalnoga ulaznog signala B izraženog decimalnim brojem i ulazne referentne struje I_{ref} :

$$I_o = I_{ref} \cdot \frac{B}{2^8}$$

Vrijednost referentne struje može se podesiti u rasponu od 0 do 4mA dodavanjem otpora između izvora referentnog napona i izvoda U_{ref} . Najveća izlazna struja koju je moguće dobiti (engl. Full Range Current) iznosi 2mA.



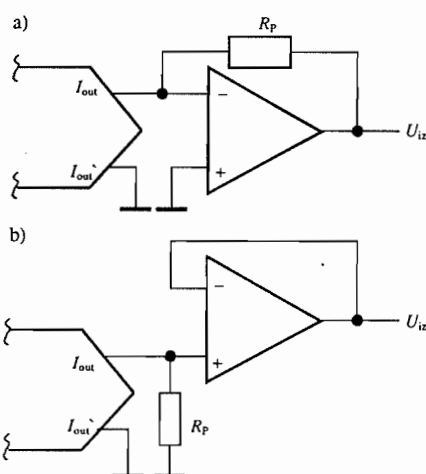
Slika 15.9. Osnovni spoj sklopa DAC-08

Na slici 15.9. prikazan je osnovni spoj sklopa DAC-08 s pozitivnim referentnim naponom. Vrijednosti izlaznih struja i pripadnih digitalnih ulaznih signala za taj spoj prikazane su u tablici 15.1. Referentni napon može biti i negativna vrijednost. Onda se on spaja na ulaz U_{ref} preko otpora R_1 . Otpor R_2 se u tom slučaju spaja na zajedničku točku.

Tablica 15.1. Vrijednosti digitalnih ulaznih i analognih izlaznih signala sklopa DAC-08

Digitalni ulazi								Analogni izlazi	
B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	$I_{out} \text{ (mA)}$	$I_{out}' \text{ (mA)}$
1	1	1	1	1	1	1	1	1,9920	0,0000
1	0	0	0	0	0	0	1	1,0080	0,9840
1	0	0	0	0	0	0	0	1,0000	0,9820
0	1	1	1	1	1	1	1	0,9820	1,0000
0	0	0	0	0	0	0	0	0,0020	1,9840
0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000	1,9920

Ako se sklopu DAC-08 doda izvana operacijsko pojačalo, dobije se pretvornik s naponskim izlazom i malim izlaznim otporom. Za spoj s invertirajućim pojačalom (slika 15.10.a) izlazni napon se kreće u rasponu od 0V do $I_{om}R_P$, a za spoj sa sljedilom napona (slika 15.10.b) od 0V do $-I_{om}R_P$, pri čemu je $I_{om}=I_{ref} \cdot 255/256$.



Slika 15.10. DAC-08 u spoju s operacijskim pojačalom

Primjer 15.5.

Koliki je izlazni napon sklopa DAC-08 za spoj prema slici 15.10.a ako je $I_{ref}=2\text{mA}$, $R_P=5\text{k}\Omega$ a ulazna digitalna veličina iznosi 0101 0101?

$$U_{iz} = 2\text{mA} \cdot 5\text{k}\Omega \cdot 170/256 = 6,640625\text{V}$$

Primjer 15.6.

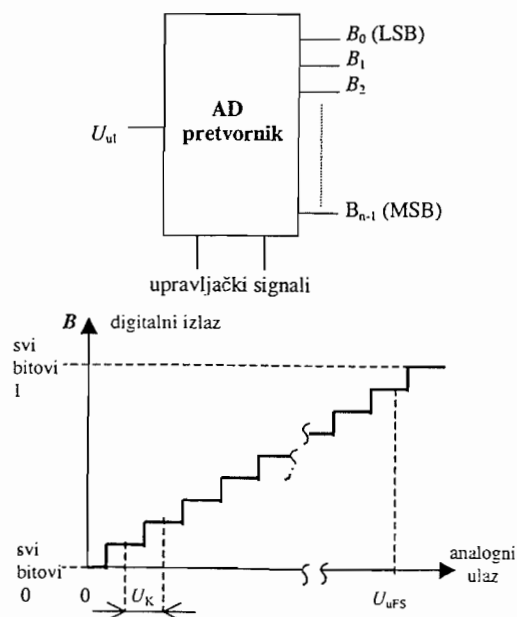
Koliki je izlazni napon sklopa DAC-08 za spoj prema slici 15.10.b ako je $I_{ref}=2\text{mA}$, $R_P=5\text{k}\Omega$ a ulazna digitalna veličina iznosi 0101 0101?

$$U_{iz} = 2\text{mA} \cdot 5\text{k}\Omega \cdot 85/256 = 6,5625\text{V}$$

AD pretvorba

AD pretvorba je postupak kojim se analogna veličina pretvara u digitalnu. Analognu veličinu predstavlja amplituda ulaznog signala U_A , a digitalnu veličinu binarni signal određenog broja bitova (slika 15.11.). Osim izvoda za ulaznu veličinu i izlazne veličine AD pretvornik ima određeni broj izvoda za upravljanje i sinkronizaciju rada s ostalim sklopovima u digitalnom sustavu.

Izlazna karakteristika AD pretvornika po obliku je istovjetna karakteristici DA pretvornika, s tim da su ulazne i izlazne veličine zamijenile osi koordinatnog sustava (slika 15.11.). Stoga rezolucija AD pretvornika znači iznos promjene analogne ulazne veličine potrebne da se izlazna digitalna veličina promijeni za 1 bit. Ako je U_{uFS} najveći analogni napon koji je moguće dovesti na ulaz, a n broj bitova izlazne digitalne veličine, onda je rezolucija AD pretvornika $U_{uFS}/(2^n-1)$. Prema tome, i u slučaju AD pretvornika rezolucija ovisi o broju bitova digitalne izlazne veličine. Stoga proizvođači integriranih izvedbi AD pretvornika iskazuju rezoluciju brojem bitova izlazne digitalne veličine.



Slika 15.11. Simbol i prijenosna karakteristika AD pretvornika

Dok je kod DA pretvornika svakoj vrijednosti izlazne veličine pridružena jedna ulazna veličina, kod AD pretvornika svakoj izlaznoj veličini pridružen je raspon ulaznih veličina U_K . Taj raspon ulaznih veličina neki nazivaju širina kanala. Slika 15.11. pokazuje da je širina kanala jednaka rezoluciji. Za sve vrijednosti napona unutar širine kanala dobit će se ista izlazna

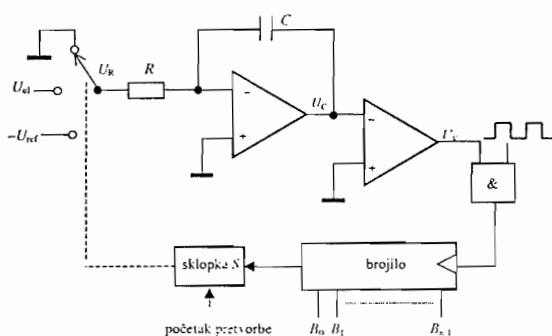
digitalna veličina. Kako se samo jedna vrijednost može smatrati pravom vrijednošću analogne veličine kojoj je pridružen pripadni binarni signal (najprikladnije je da to bude srednja vrijednost napona unutar kanala), sve ostale vrijednosti ulaznog napona unutar kanala čine pogrešku razmjernu udaljenosti napona od središnje vrijednosti. Ta pogreška AD pretvornika naziva se **pogreška kvantizacije** (engl. quantization error) i iznosi $\pm U_K/2$. Kako iznos pogreške kvantizacije proizlazi izravno iz rezolucije, to će ona biti to manja što je veća rezolucija, tj. broj bitova izlazne digitalne veličine.

S obzirom na oblik prijenosne karakteristike, AD pretvornici mogu biti unipolarni i bipolarni. Kod unipolarnih pretvornika ulazni napon može biti samo jednog polariteta, a kod bipolarnih pozitivne i negativne vrijednosti.

Postoji više različitih načina za pretvorbu analognog signala u digitalni. Među najzastupljenijima su (u integriranim izvedbama) AD pretvornik s dvojnim nagibom, AD pretvornik s postupnom aproksimacijom i paralelni AD pretvornik.

AD pretvornik s dvojnim nagibom

Na slici 15.12. prikazana je blok-shema AD pretvornika s dvojnim nagibom (engl. dual slope AD converter, njem. A/D Wandler nach dem Dual-Slope-Verfahren).

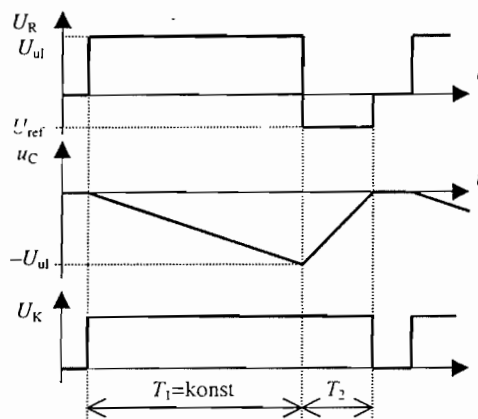


Slika 15.12. Blok-shema AD pretvornika s dvojnim nagibom

U početnom je stanju na ulazu integratora napon 0V, pa je i napon u_C jednak 0V. Izlazni napon komparatora U_K ima iznos koji odgovara stanju 0. Stoga impulsi iz generatora impulsa ne mogu proći do brojila. Brojilo je u početnom stanju u kojem su svi bistabili u stanju 0.

Signal za početak AD pretvorbe dovodi na ulaz integratora analogni ulazni napon U_{ul} . Napon na izlazu

integratora mijenja se linearno do vrijednosti $-U_{ul}$: $u_C = T_1 \cdot U_{ul} / R \cdot C$.



Slika 15.13. Vremenski dijagram napona AD pretvornika s dvojnim nagibom

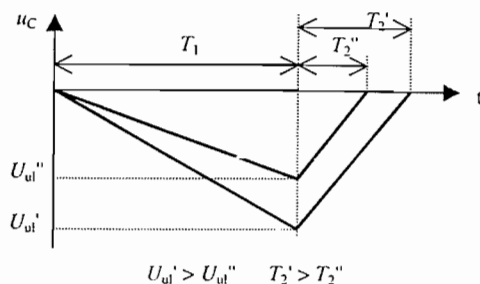
Promjena napona na kondenzatoru mijenja izlazni napon komparatora U_K u stanje 1. To omogućava da impulsi iz generatora pobuđuju brojilo. Brojilo mijenja stanja od početnog 0000 do 1111. Kad brojilo nakon stanja 1111 dođe ponovno u stanje 0000, analogna sklopka uključuje na ulaz integratora napon U_{ref} . Izlazni napon integratora mijenja se linearno od dostignutog iznosa, koji je proporcionalan ulaznom analognom naponu U_{ul} , do napona $-U_{ref}$: $u_C = T_2 \cdot U_{ref} / R \cdot C$

Za to vrijeme brojilo nastavlja s brojenjem od stanja 0000 naviše. Kad izlazni napon integratora dostigne iznos napona 0V, izlazni napon komparatora U_K prelazi u stanje 0 i prekida brojenje brojila. Zatečeno stanje brojila, tj. vrijeme T_2 proporcionalno je vrijednosti analognoga ulaznog napona U_A . Izjednačavanjem izraza za izlazni napon integratora u_C za vremena T_1 i T_2 dobije se $T_1 \cdot U_{ul} / R \cdot C = T_2 \cdot U_{ref} / R \cdot C$. Iz toga slijedi:

$$U_{ul} = U_{ref} \cdot \frac{T_2}{T_1} = k \cdot T_2$$

Bez obzira na iznos analognog ulaznog napona U_{ul} , vrijeme T_1 ima isti iznos, jer se radi o brojenju brojila od 0000 do 1111. Međutim, iznos ulaznoga analognog napona utječe na iznos izlaznog napona integratora. Što je veći ulazni napon U_{ul} , veći je i izlazni napon integratora u_C . Veličina izlaznog napona integratora utječe na veličinu vremena T_2 . Bez obzira na iznos napona u_C brzina njegove promjene je ista.

Kako vrijednosti tog napona za različite vrijednosti ulaznog napona nisu iste, to će vremena T_2 za različite ulazne napone biti različita. Ta vremena, odnosno stanja brojila bit će proporcionalna iznosu napona u_C , odnosno ulaznom naponu (slika 15.14).

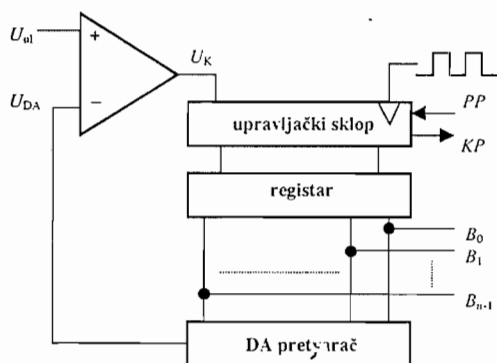


Slika 15.14. Naponi na izlazu integratora za različite ulazne napone

Ovu vrstu pretvornika odlikuje neosjetljivost na smetnje i velika točnost pretvorbe. Ona je neovisna o iznosima elemenata R i C , a ovisi samo o točnosti i stabilnosti napona U_{ref} . Međutim, brzina pretvorbe je mala, to manja što je veća rezolucija (veći broj bistabila u broju, duži ciklus brojenja T_1) i ovisna je o veličini analognog napona (vrijeme T_2). Takvi pretvornici upotrebljavaju se u digitalnim voltmetrima.

AD pretvornik s postupnom aproksimacijom

AD pretvornici s postupnom (sukcesivnom) aproksimacijom (engl. successive approximation AD converter, njem. Stufenwandler) omogućavaju kratko i stalno vrijeme pretvorbe, neovisno o vrijednosti analognog ulazne veličine.



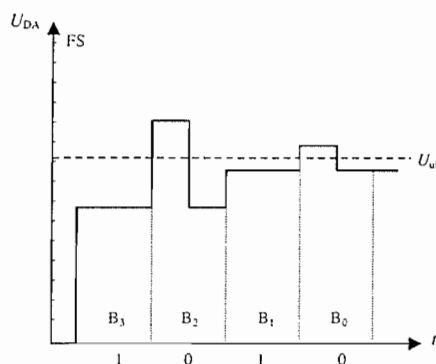
Slika 15.15. AD pretvornik s postupnom aproksimacijom

Analogni signal U_{ul} dovodi se na neinvertirajući ulaz analognog komparatora (slika 15.15.). Izlazni napon komparatora U_K , koji može imati vrijednost stanja 0 ili stanja 1, omogućava da se bistabili registra redom (od izlaza za bit najveće težine do izlaza za bit najmanje težine mjesta) postavljaju u stanje 1.

Kod svake promjene stanja registra pretvara se njegov izlazni napon pomoću unutarnjeg DA pretvornika u analogni napon U_{DA} . Taj napon dovodi se na invertirajući ulaz komparatora i uspoređuje s vrijednošću analognog ulaznog napona U_{ul} . Ako je

napon U_{DA} manji od U_{ul} , izlazni napon komparatora U_K ostaje u stanju 1 i zadnje postavljene bistabil registra ostaje u stanju 1. Ako je napon U_{DA} veći od napona U_{ul} , izlazni napon komparatora U_K prelazi u stanje 0 pa se zadnje postavljene bistabil registra vraća u stanje 0.

Proces pretvorbe ponavlja se u onoliko koraka koliko registar ima bistabila, odnosno koliko izlazna digitalna veličina ima bitova. Na slici 15.16. prikazane su vrijednosti napona U_{DA} za slučaj 4-bitnog pretvornika.



Slika 15.16. Napon U_{DA} 4-bitnog AD pretvornika

U početnom stanju svi bistabili registra su u stanju 0, napon U_{DA} je 0V a izlazni napon komparatora U_K odgovara stanju 1. Na znak za početak pretvorbe registar prelazi u stanje u kojem je izlaz za bit najveće težine mjesta u stanju 1. Unutrašnji DA pretvornik daje, za odabrani primjer, napon U_{DA} koji je manji od ulaznog analognog napona U_{ul} . Zato bistabil B_3 ostaje u stanju 1. Sljedeći impuls ritma postavlja bistabil B_2 u stanje 1. Sada je napon U_{DA} veći od ulaznog napona U_{ul} pa izlazni napon komparatora prelazi u stanje 0. Zato se bistabil B_2 vraća u stanje 0, pa se napon U_{DA} spušta ispod vrijednosti ulaznog analognog napona U_{ul} . Sljedeći impuls ritma postavlja bistabil B_1 u stanje 1. U ovom slučaju je napon U_{DA} manji od napona U_{ul} , pa dotični bistabil ostaje u stanju 1. Novi impuls ritma postavlja bistabil B_0 u stanje 1. Sada je napon U_{DA} veći od napona U_{ul} zbog čega se bistabil B_0 vraća u stanje 0 čime je pretvorba završena.

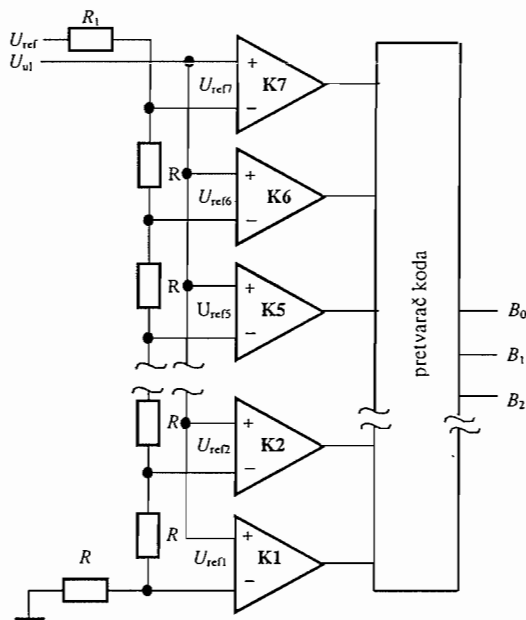
Na slici 15.16. vidi se da se izlazna digitalna veličina 1010 dobije za sve vrijednosti ulaznog analognog napona koje se kreću u rasponu od $(10/16) \cdot U_{ref}$ do $(11/16) \cdot U_{ref}$. To znači da točnost pretvorbe ovisi o broju bistabila registra, tj. broju bitova izlazne digitalne veličine i vrijednosti referentnog napona unutarnjeg DA pretvornika. Za n -bitni AD pretvornik s postupnom aproksimacijom rezolucija iznosi:

$$\frac{U_{ref}}{2^{n-1}}$$

Dakle, s većim brojem bitova i nižim iznosom referentnog napona bit će manji koraci promjene napona U_{DA} , tj. veća točnost. Međutim, smanjivanje iznosa referentnog napona smanjuje najveću moguću vrijednost ulaznog napona, a povećanje broja bitova izlazne digitalne veličine produžava trajanje pretvorbe.

Paralelni AD pretvornik

Paralelni AD pretvornik (engl. flash converter, njem. Paralleler A/D Wandler) omogućava najbrže pretvaranje analognog napona u digitalni signal. Takav pretvornik sastoji se od određenog broja komparatora i pretvornika koda (slika 15.17.).



Slika 15.17. Paralelni AD pretvornik

Na neinvertirajuće ulaze svih komparatora dovodi se istodobno ulazni analogni napon U_{ul} , a na invertirajuće ulaze referentni naponi. Svaki komparator ima zasebni iznos referentnog napona. Vrijednosti referentnog napona rastu od najniže vrijednosti U_{ref1} do najviše U_{ref7} za isti iznos.

Komparatori kod kojih je ulazni analogni napon U_A istog ili višeg iznosa od njegova pripadnog referentnog napona, dat će na izlazu stanje 1. Komparatori kod kojih je analogni ulazni napon U_{ul} nižeg iznosa od razine njihovih referentnih napona, dat će na izlazu stanje 0. Stanja na izlazima komparatora predočuju netežinski kod koji se pomoću pretvornika koda može pretvoriti u binarni broj (tablica 15.2.). Pretvornik koda može se izvesti pomoću dekodera i koda.

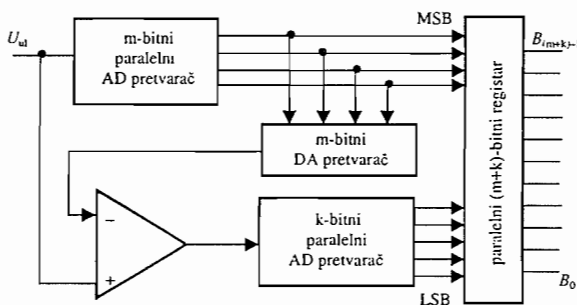
Tablica 15.2. Tablica stanja paralelnog AD pretvornika

	K7	K6	K5	K4	K3	K2	K1	B ₇	B ₆	B ₅
$U_{ul} < U_{ref1}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$U_{ref1} < U_{ul} < U_{ref2}$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
$U_{ref2} < U_{ul} < U_{ref3}$	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
$U_{ref3} < U_{ul} < U_{ref4}$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
$U_{ref4} < U_{ul} < U_{ref5}$	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
$U_{ref5} < U_{ul} < U_{ref6}$	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$U_{ref6} < U_{ul} < U_{ref7}$	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
$U_{ref7} < U_{ul}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Paralelni AD pretvornik na slici 15.17. ima 3-bitni izlaz što znači da može dati osam različitih binarnih signala. Za to je potrebno sedam komparatora na ulazu koji raščlanjuju ulazni analogni napon na osam razina. Općenito, ako digitalni izlaz paralelnog AD pretvornika ima n bitova, potrebno je $2^n - 1$ komparatora. To čini najveći nedostatak ovog AD pretvornika jer je za višebitni izlaz potreban vrlo velik broj komparatora.

Vrijeme pretvorbe paralelnih AD pretvornika jednako je kašnjenju signala kroz sklopove, što znači da je reda veličine nekoliko desetaka nanosekundi.

Teškoća u svezi s potrebom velikog broja komparatora rješava se, uz prihvatljivo produženje vremena pretvorbe, pretvorbom u dva koraka tzv. poluparalelnim pretvornikom (engl. half-flash converter, sub-ranging converter).



Slika 15.18. Pojednostavnjena blok-shema poluparalelnog AD pretvornika

Kod poluparalelnog AD pretvornika analogni signal pretvara se u m -bitni digitalni signal koji čini dio izlaznoga n -bitnog signala od bita najveće težine mjesta (MSB) na niže (Slika 15.18.). Istodobno se m -bitni signal pomoću unutrašnjeg m -bitnog DA pretvornika pretvara u analogni signal U_{DA} koji se s ulaznim analognim naponom U_A dovodi na pojačalo razlike. Razlika ta dva analogni napona pretvara se pomoću drugog paralelnog AD pretvornika u k -bitni digitalni signal koji čini drugi dio izlaznoga n -bitnoga digitalnog signala. Integrirane izvedbe takvih pretvornika (12-bitne i 14-bitne) imaju vrijeme pretvorbe reda veličine 500ns.

Primjer 15.7.

Izračunati potreban broj komparatora za 8-bitni paralelni i 8-bitni poluparalelni AD pretvornik izveden s pomoću dva 4-bitna paralelna pretvarača.

Broj komparatora za 8-bitni paralelni AD pretvornik:
 $2^8 - 1 = 256 - 1 = 255$

Broj komparatora za 8-bitni poluparalelni AD pretvornik:
 $2 \cdot (2^4 - 1) = 2 \cdot (16 - 1) = 2 \cdot 15 = 30$

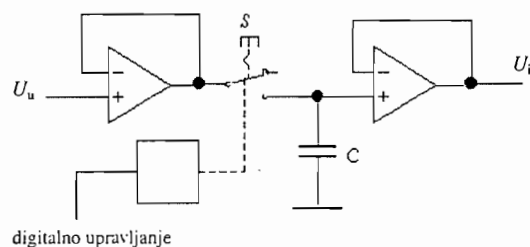
Sklopovi za uzimanje uzoraka i pamćenje

Prilikom razmatranja rada AD pretvornika pretpostavljeno je da se ulazni analogni signal ne mijenja unutar jednog ciklusa pretvorbe. To se može smatrati točnim ako je frekvencija ulaznoga analognog napona vrlo mala u usporedbi s frekvencijom pretvorbe jer se u tom slučaju može smatrati da se ulazni napon neće promijeniti za vrijeme trajanja pretvorbe.

Kod analognih signala koji se brzo mijenjaju (signali viših frekvencija) potrebno je analogni napon prije pretvorbe dovesti na sklop za uzimanje uzorka i pamćenje (engl. sample and hold circuit). Taj sklop uzima uzorak ulaznoga analognog napona i održava ga stalnim na ulazu AD pretvornika za vrijeme trajanja jednog ciklusa pretvorbe.

Osnovni spoj sklopa za uzimanje uzoraka i pamćenje prikazuje slika 15.19. To je zapravo analogna memorija u kojoj kondenzator služi kao memorijski element.

Ulazno pojačalo s pojačanjem 1 je sklop za prilagođenje ulaza sklopa za uzimanje uzoraka na izvor signala i djeluje kao snažni sklop (engl. buffer) koji omogućava potrebnu struju za nabijanje kondenzatora. Upravljački sklop uključuje i isključuje sklopku S (FET ili diodni most).



Slika 15.19. Shema osnovnog spoja sklopa za uzimanje uzoraka i pamćenje

Kad je sklopka S uključena (period uzimanja uzorka), kondenzator se nabije na iznos ulaznog napona koji ostaje na njemu i za vrijeme kad je sklopka isključena.

čena. Za vrijeme dok je sklopka isključena (period pamćenja uzorka) kondenzator održava stalan analogni napon koji se dovodi na AD pretvornik. Dodatno operacijsko pojačalo s velikim ulaznim otporom i pojačanjem 1 služi da za trajanja periode pamćenja smanji promjene napona kondenzatora na najmanju mjeru.

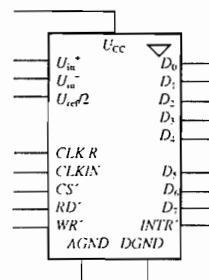
Proizvođači elektroničkih komponenata proizvode znatan broj integriranih izvedbi sklopova za uzimanje uzoraka i pamćenje. Postoji također velik broj integriranih izvedbi AD pretvornika koji sadrže na ulazu sklop za uzimanje uzoraka i pamćenje.

Primjer integrirane izvedbe AD pretvornika

Proizvođači integriranih elektroničkih komponenata proizvode vrlo velik broj različitih izvedbi AD pretvornika i ostalih komponenata potrebnih za rad pretvornika (sklopovi za uzimanje uzoraka i pamćenje, izvori referentnog napona). Pojedine izvedbe sadrže u istom kućištu sklop za uzimanje uzoraka i izvor referentnog napona. Također postoje izvedbe koje mogu obaviti AD pretvorbu većeg broja ulaznih napona. Takvi sklopovi sadrže na ulazu analogni multiplexor kojim se po određenom redoslijedu ulazni naponi dovode na ulaz AD pretvornika. Nazivaju se višekanalnim AD pretvornicima.

Integrirani sklop ADC 0801 je 8-bitni AD pretvornik s postupnom aproksimacijom (slika 15.20.). Na izvod U_u^+ i U_u^- priključuje se ulazni napon (diferencijski ulazi). Analogni ulazni napon AD pretvornika jednak je razlici napona U_u^+ i U_u^- . 8-bitni digitalni izlazni signal dobije se na izvodima D0-D7.

Potreban napon napajanja sklopa je +5V. Za izvor referentnog napona moguće je koristiti se naponom napajanja. U tom slučaju izvod $U_{ref}/2$ treba ostati otvoren (na njemu je tada napon $U_{CC}/2$). Područje ulaznog analognog napona u tom slučaju iznosi 0-5V.



Slika 15.20. AD pretvornik ADC0801

Ako se na izvod $U_{ref}/2$ priključi napon u rasponu 1,5V-2,5V, referentni napon će iznositi 3-5V. U tom slučaju raspon vrijednosti ulaznih napona bit će također u rasponu 3-5V. Izvodi $AGND$ i $DGND$ su izvodi za uzemljenje analognog, odnosno digitalnog dijela AD pretvornika.

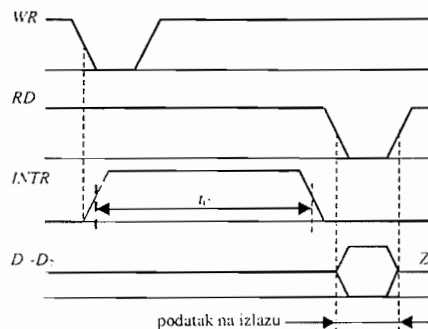
Izvod $CLK IN$ služi za priključak vanjskog izvora impulsa ritma potrebnog za rad AD pretvornika. Osim toga, sklop sadrži unutrašnji izvor impulsa ritma čija frekvencija ovisi o izvama priključenim elementima R i C :

$$f = \frac{1}{1,1 \cdot RC}$$

U tom slučaju otpornik R priključuje se između izvoda $CLK R$ i $CLK IN$, a kondenzator C između izvoda $CLK IN$ i uzemljene točke.

Izvodi CS , RD i WR su upravljački ulazi. Ulaz CS (chip select) mora biti u stanju 0 kako bi bila moguća AD pretvorba i pristup do digitalnog signala na izlazima D_0-D_7 . Ako je ulaz CS u stanju 1, nije moguć postupak AD pretvorbe bez obzira na stanje ostalih ulaza, a digitalni izlazi D_0-D_7 bit će u stanju visoke izlazne impedancije Z .

Dovođenjem impulsa sa stanjem 0 na ulaz WR daje se znak za početak pretvorbe. Stanje 0 na ulazu RD omogućava prolaz digitalnog podatka iz registra do digitalnih izlaza D_0-D_7 .



Slika 15.21. Djelovanje ulaza AD pretvornika

Izvod $INTR$ je ulaz kojim se označava kraj AD pretvorbe. Na znak za početak pretvorbe (padajući brid na ulazu WE) taj izlaz prelazi u stanje 1 i ostaje u njemu do kraja pretvorbe kada se vraća u stanje 0.

Primjer 15.8.

Izračunati napon rezolucije sklopa ADC 0801 ako je ulaz $U_{ref}/2$: a) otvoren, b) spojen na napon 1,5V.

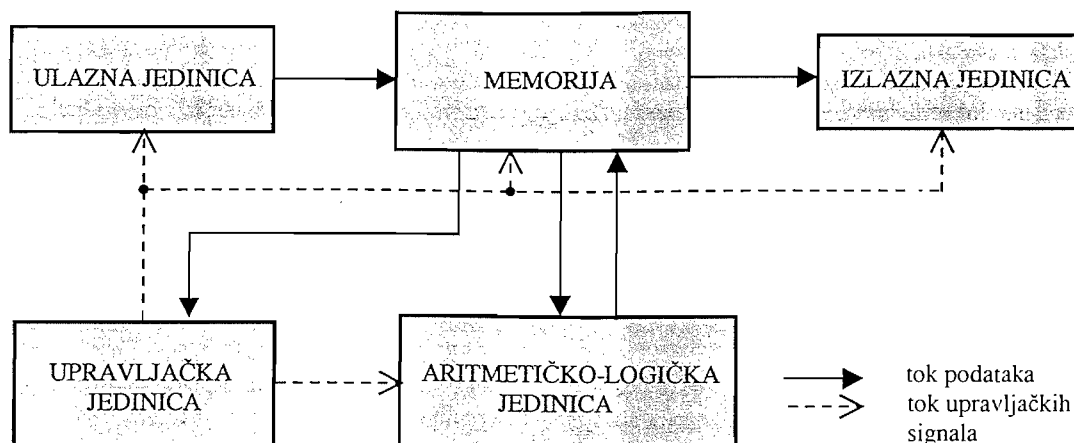
a) napon rezolucije = $5V/(2^8-1) = 5V/255 = 19,6mV$

b) napon rezolucije = $2 \cdot 1,5V/(2^8-1) = 3V/255 = 11,8mV$

15.2. OSNOVNA ORGANIZACIJA I NAČIN RADA MIKRORAČUNALA

Danas je u praksi vrlo velik broj digitalnih sustava različite namjene koji se mogu smatrati programski upravljanim uređajima, tj. računalima različite namjene. Sva se ta računala zasnivaju na načelima koja je prije više od pola stoljeća izložio američki matematičar John von Neumann. Njegov model računala (slika 15.22.), koji vrijedi za većinu današnjih računala, sastoji se od:

- ulazno-izlaznog dijela s pomoću kojega se u računalo unose podaci iz procesa i okoline te instrukcije programa koji omogućava obradu tih podataka, odnosno iz računala prenose obrađeni podaci u proces
- memorije, dijela u kojem se pohranjuju podaci i instrukcije uneseni izvana u računalo kao i rezultat obrade podataka
- aritmetičko-logičke jedinice (engl. Arithmetic-Logic Unit, skraćeno ALU) koja s podacima izvodi instrukcijama zadane aritmetičke i logičke operacije
- upravljačke jedinice (engl. Control Unit) koja upravlja radom svih ostalih dijelova na temelju instrukcija iz memorije računala.



Slika 15.22. Von Neumannov model računala

Aritmetičko-logička i upravljačka jedinica sa skupom potrebnih registara (spremnika) čine cjelinu koja se naziva procesor. Od 1971. godine počinju se proizvoditi procesori kao integrirane komponente nazvane mikroprocesorima pa se računala izgrađena s mikroprocesorom nazivaju mikroračunala.

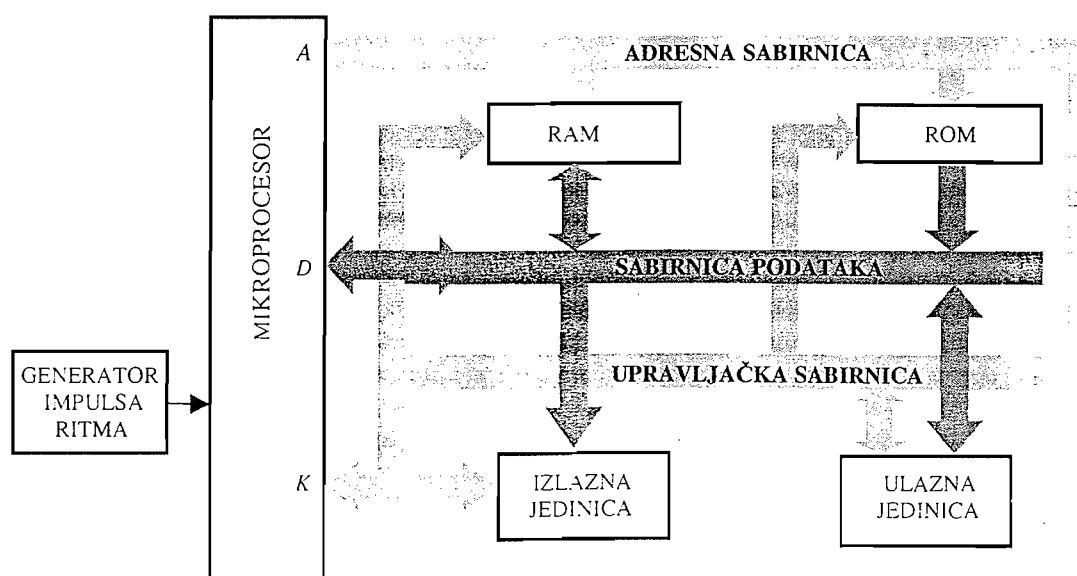
Mikroračunalo

Na slici 15.23. pokazana je tipična struktura mikroračunala. Osnovni dijelovi mikroračunala međusobno su povezani sabirnicom (engl. bus). Sabirnica je snop vodiča na koji su spojeni dijelovi mikroračunala. Sabirnica mikroračunala ima tri dijela:

- adresni dio
- podatkovni dio
- upravljački dio.

Adresna sabirnica je jednosmjerna sabirnica. Preko nje mikroprocesor šalje informacije o adresi podatka i instrukcije za obradu podatka prema memoriji, ulaznoj ili izlaznoj jedinici. Ako mikroprocesor ima n adresnih izlaza, isto toliko vodova ima adresna sabirnica. U tome se slučaju njome može poslati 2^n različitih adresa.

Podatkovna sabirnica je dvosmjerna. Njome se bitovi podatka s izvoda D mikroprocesora odvođe prema memoriji i izlaznoj jedinici ili dovode u mikroprocesor iz memorije i ulazne jedinice.



A – adresni izlazi. D – podatkovni ulazi-izlazi. K – upravljački ulazi/izlazi

Slika 15.23. Tipična struktura mikroračunala

Za vrijeme u kojemu mikroprocesor prima podatke, izvodi *D* djeluju kao ulazi u mikroprocesor. To je operacija čitanja (engl. read) kojom se podaci primaju iz određene lokacije memorije ili iz ulazno/izlazne jedinice.

Za vrijeme u kojemu mikroprocesor šalje podatak, izvodi *D* djeluju kao izlazi mikroprocesora. To je operacija pisanja (engl. write) kojom se podaci šalju u adresu određenu lokaciju memorije ili u izlazno/ulaznu jedinicu.

Upravljačkom sabirnicom odašilju se i primaju signali koji usklađuju (sinkroniziraju) međusobno djelovanje dijelova mikroračunala. Mikroprocesor šalje signale memoriji i ulazno-izlaznoj jedinici i prima signale od njih.

Memorija mikroračunala sastoji se od dva dijela: memorije s izravnim pristupom, skraćeno RAM i ispisne memorije skraćeno ROM (detaljno obrađeno u poglavlju 13.3. *Memorije* i 14.4. *Programirljive digitane komponente*). U RAM se sadržaji mogu upisivati i iz njega čitati. To su sadržaji koji se tijekom rada računala mijenjaju. Sadržaji koji se tijekom rada mikroračunala ne mijenjaju pohranjeni su u ROM-u odakle se mogu samo čitati.

Generator impulsa ritma daje impulse kojima se sinkronizira odvijanje pojedinih operacija koje obavljaju sklopovi unutar mikroprocesora i ostali dijelovi mikroračunala.

Za funkcioniranje sklopova unutar svih dijelova mikroračunala potrebno je odgovarajuće istosmjerno napajanje. Taj dio je ispušten iz pojednostavnjenoga prikaza mikroračunala.

Programska oprema mikroračunala

Sastavni dijelovi mikroračunala nazivaju se sklopovska oprema (engl. hardware). Međutim, da bi mikroračunalo moglo obavljati zadanu funkciju, potrebno je upisati u njegovu memoriju program odnosno programirati njegov rad. Programiranje je moguće obaviti izravnim upisom instrukcija u obliku binarnih brojeva (programiranje u strojnom jeziku) ili programiranjem na višoj razini uporabom različitih programa. Ti programi nazivaju se programska oprema ili programska potpora (engl. software).

Programska oprema može se razvrstati u nekoliko razina:

- Viši programski jezici kod kojih jedna instrukcija zamjenjuje više instrukcija strojnoga jezika. Oni su kraći i razumljiviji. U te programe spadaju npr. Pascal i C.

- Prevoditelj (kompilator, engl. compiler) je program kojim se instrukcije izvornoga programskog teksta (source code) prevode u strojne instrukcije.

- Asembler ili mnemonički prevoditelj (engl. assembler) je program kojim se prevode strojne instrukcije zapisane riječima u strojne instrukcije zapisane binarnim brojevima.

- Povezivač ili linker (engl. link) je program koji različite dijelove programa koji su nastali djelovanjem prevoditelja pretvara u cjeloviti i izvedivi program.

- Operacijski sustav je skup programa koji omogućavaju rad svih dijelova računala i uporabu svih njegovih mogućnosti.

Namjenski ili aplikacijski programi su takvi programi koji se pišu za točno određenu korisničku namjenu (uređivanje teksta, baze podataka itd.) uporabom nekog od viših programskih jezika

Mikroprocesor

Na slici 15.24. pokazana je pojednostavnjena struktura mikroprocesora. Uz upravljačku jedinicu i aritmetičko-logičku jedinicu mikroprocesor sadrži skup registara koji služe za privremeno pohranjivanje podataka i instrukcija za vrijeme obavljanja operacija s podacima.

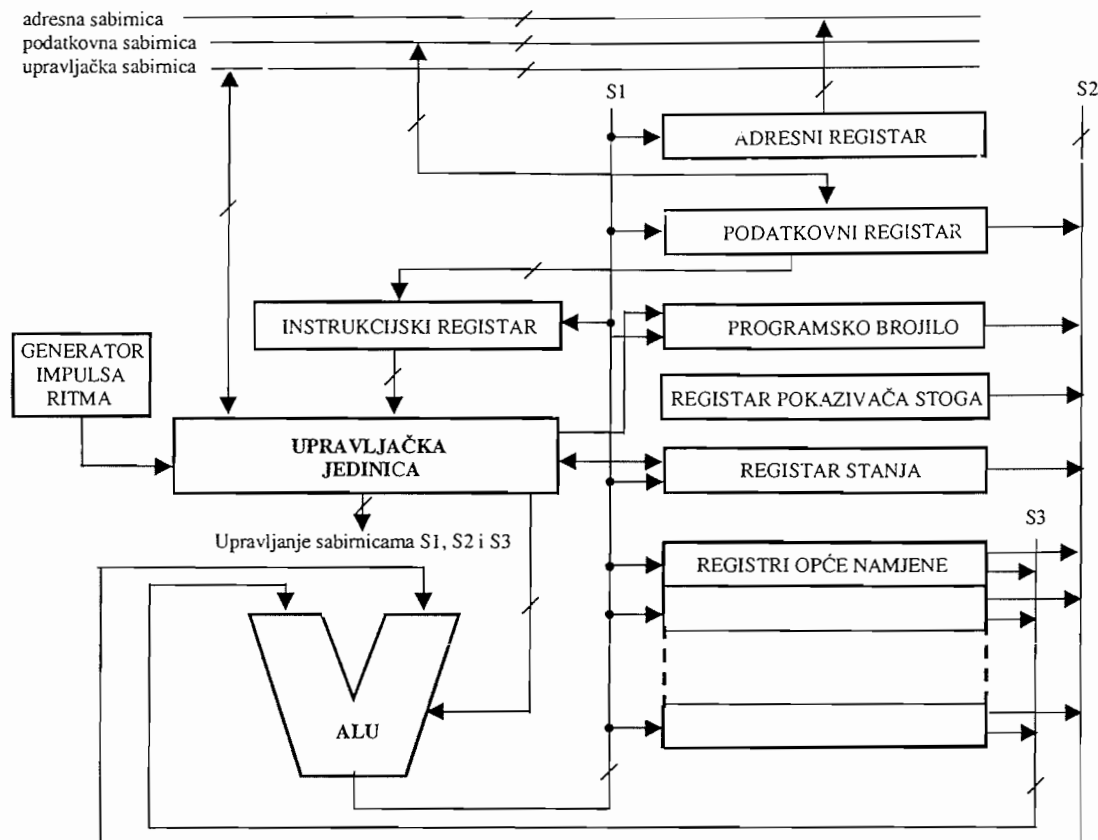
Adresni registar služi za adresiranje memorije i ulazno-izlazne jedinice. Mikroprocesor iz adresnoga registra postavlja na adresnu sabirnicu adresu. U ciklusu pisanja memorija prihvaća adresu i na nju pohranjuje podatak. U ciklusu čitanja memorija prihvaća tu adresu i iz nje vadi podatak koji šalje na podatkovnu sabirnicu.

Podatkovni registar služi za prijenos podataka između mikroprocesora i podatkovne sabirnice.

Instrukcijski registar prihvaća instrukcije (informaciju o tome što treba raditi s podatkom) pribavljene iz memorije. Odatle se instrukcije prenose upravljačkoj jedinici koja na temelju njih određuje što treba raditi s podacima.

Programsko brojilo (engl. Program Counter) je registar koji sadrži adresu instrukcije koja je na redu za obavljanje. Nakon obavljanja svake instrukcije upravljačka jedinica povećava sadržaj programskoga brojila za jedan.

Registar stanja (engl. Status Register) služi za zapisivanje stanja nakon obavljanja pojedinih operacija (npr. javlja li se pri zbrajanju prijenos ili ne, je li rezultat neke operacije 0 ili nije, sadrže li bitovi podataka parni ili neparni broj jedinica itd.).



Slika 15.24. Pojednostavnjeni prikaz strukture mikroprocesora

U opće registre pohranjuju se podaci s kojima se obavljaju operacije i rezultat tih operacija.

Registar pokazivača stoga (engl. Stack Pointer) služi za poseban način adresiranja.

Upravljačka jedinica upravlja radom mikroprocesora, dekodira instrukcije iz instrukcijskoga registra i na temelju toga određuje koju vrstu operacije aritmetičko-logička jedinica treba obaviti.

Upravljačka jedinica radi u ritmu koji određuje generator impulsa ritma. Impulsi iz generatora ritma pobuđuju elektroničke sklopove unutar mikroprocesora. Svi procesi unutar mikroprocesora, kao i oni koji se odvijaju između pojedinih dijelova mikroračunala, sinkronizirani su impulsima iz generatora ritma. Današnji mikroprocesori rade s frekvencijama iznad gigaherca.

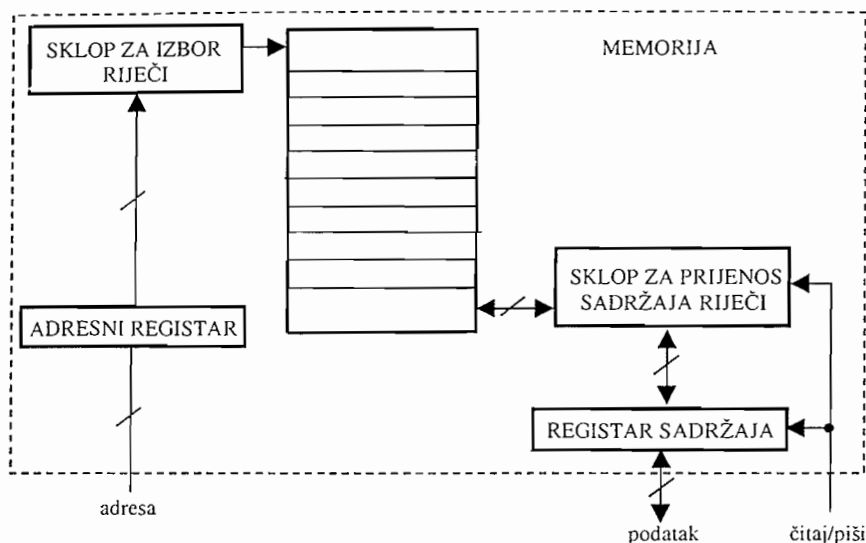
Aritmetičko-logička jedinica obavlja aritmetičke i logičke operacije s podacima koji se dovode na njene ulaze putem podatkovne sabirnice. Koju operaciju će aritmetičko-logička jedinica obaviti određuje upravljačka jedinica dekodiranjem instrukcija koje se s upravljačke sabirnice i instrukcijskog registra dovodi na nju. Upravljačka jedinica iz primljene instrukcije ustanovljuje od kuda je podatak došao i kamo treba pohraniti rezultat operacije.

Dijelovi mikroprocesora međusobno su povezani unutarnjom sabirnicom. Na slici 15.24. one su označene slovima S1, S2 i S3.

Uz već spomenute brzine rada mikroprocesori se međusobno razlikuju i po drugim osobinama. Jedna od najvažnijih je broj bitova podatkovnih registara. Prvi mikroprocesor 4004 tvrtke INTEL iz 1971. godine bio je 4-bitni. Danas se pretežno upotrebljavaju 32-bitni, nešto manje 16-bitni mikroprocesori, a u nekim primjenama nalaze se već i 64-bitni mikroprocesori.

Memorija mikroračunala

U memoriju mikroračunala pohranjuju se podaci koji se obrađuju i instrukcije programa koji određuje što treba činiti s podacima. Na slici 15.25. pokazana je pojednostavnjena struktura memorije mikroračunala. Uz memorijske sklopove RAM i ROM (obrađeni u poglavlju 13.3. *Memorije*), memorija mikroračunala sadrži adresni registar, sklop za izbor riječi, registar sadržaja i sklop za prijenos sadržaja riječi.



Slika 15. 25. Pojednostavljeni prikaz memorije mikroračunala

Adresni registar i registar sadržaja omogućavaju uspostavljanje veze memorije s ostalim dijelovima mikroračunala. U adresni registar pohranjuje se adresa sa sabirnice mikroračunala. Na temelju te adrese sklop za izbor riječi odabire adresiranu riječ u memorijskom sklopu. Upravljački signal čitaj/piši s upravljačke sabirnice određuje djelovanje memorije.

Za vrijeme tzv. ciklusa čitanja ili dobavljanja (engl. read) podatak se iz memorije prenosi u mikroprocesor. Mikroprocesor postavlja adresu na adresnu sabirnicu, a upravljački sklop preko upravljačke sabirnice daje signal čitaj što omogućava da se iz memorijskog sklopa na podatkovnoj sabirnici dobije podatak koji prihvaća mikroprocesor.

U vremenu koje se naziva ciklus pisanja ili pohranjivanja (engl. write) podatak se pohranjuje u memoriju. Procesor na adresnu sabirnicu postavlja adresu a signal piši s upravljačke sabirnice omogućava da se sadržaj podatka preko registra sadržaja pohrani u odgovarajuću adresu memorije.

- pribavljena instrukcija se dekodira i na temelju dijela koji se naziva operacijski kod određuje se koju operaciju treba obaviti

- stanje programskoga brojila poveća se za jedan i pokazuje sljedeću instrukciju

- upravljačka jedinica šalje aritmetičko-logičkoj jedinici informaciju o tome koju operaciju treba obaviti

- na temelju dijela instrukcije koji se naziva adresni dio instrukcije, upravljačka jedinica pronalazi iz koje lokacije dolaze podaci s kojima treba obaviti operaciju i kamo treba pohraniti rezultat

- ako se podaci za obavljanje operacije nalaze u memoriji, njihova adresa prebacuje se u adresni registar mikroprocesora, podaci se iz memorije prenose u podatkovni registar

- aritmetičko-logička jedinica dobiva iz podatkovnoga registra podatke s kojima obavlja zadanu operaciju i rezultat šalje na odredište

- ovisno o dobivenim rezultatima popunjava se registar stanja.

Instrukcije mikroprocesora

U memoriji mikroračunala pohranjene su instrukcije programa redoslijedom kojim ih treba izvoditi. Taj niz instrukcija naziva se **strojni program**. Programsko brojilo sadrži adresu početne instrukcije strojnoga programa. Nakon izvršenja prve instrukcije, stanje programskoga brojila poveća se za jedan što u sljedećem koraku omogućava izvršavanje druge instrukcije i tako redom.

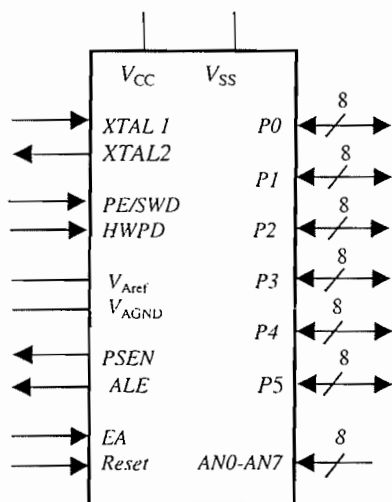
Instrukcije se izvođe automatski jedna za drugom prema sljedećim koracima:

- na temelju stanja programskoga brojila mikroprocesor dolazi do instrukcije iz memorije

Mikroupravljači

Razvoj tehnologije i potrebe za proizvodnjom složenih standardnih komponenta dovele su krajem sedamdesetih godina do razvoja komponente koja je u jednom kućištu imala sve potrebne elemente mikroračunala (mikroprocesor, RAM, ROM, sklopove za ulazno/izlazno komuniciranje, multipleksore, sklopove za uzimanje uzoraka i analognog-digitalne pretvornike) međusobno povezane unutarnjom sabirnicom. Ti sklopovi nazvani su mikrokontroleri (engl. microcontroller) ili mikroupravljačima. Njihova pojava oslobodila je mnoge konstruktore uređaja i sustava poslova oko gradnje mikroračunala i omogućila uvođenje digitalnog upravljanja u manje procese u industriji, automobile, kućanske aparate itd.

Kao primjer mogu se navesti mikroupravljači iz skupine 8051 iz sredine osamdesetih godina koji se upotrebljavaju i danas. Prvi mikroupravljač iz te porodice proizveden je u tvrtki INTEL, a poslije su mikroupravljači iz te porodice počeli proizvoditi i drugi proizvođači (npr. Siemens, AMD, Philips, Harris itd.). Na slici 15.26. pokazan je pojednostavnjeni prikaz mikroupravljača C515A iz Siemensove skupine C500 8-bitnih upravljača. Taj mikroupravljač ima 68 izvoda (priključaka).



Slika 15.26. Pojednostavnjeni prikaz mikroupravljača iz porodice 8051

Izvodi V_{CC} i V_{SS} su izvodi na koje se priključuje napon napajanja (5V na V_{CC} i 0V na V_{SS}).

Taj mikroupravljač ima 8-bitni mikroprocesor čija je radna frekvencija do 24MHz. U kućište je ugrađen generator impulsa ritma kojemu se izvana treba dodati kristal kvarca na izvode XTAL1 i XTAL2. Preko tih izvoda može se priključiti i vanjski generator impulsa ritma.

Mikroupravljač ima unutarnji ROM kapaciteta 32KB i RAM kapaciteta 256B. Dodavanjem vanjske memorije može se proširiti ROM i RAM, svaki na 64KB. U tu svrhu upotrebljavaju se svi izvodi P0 i P2 te dva izvoda P3. Signal na izvodu EA omogućava čitanje iz unutarnjeg ROM-a ili iz vanjske programske memorije. Signali na izvodima ALE i PSEN pokazuju stanje pri pisanju i čitanju podataka. Ostali izvodi P1 i P3 imaju posebne funkcije, a izvodi P4 i P5 su digitalni ulazi/izlazi.

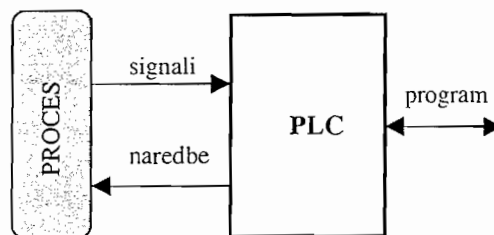
Izvodi AN0-AN7 su analogni ulazi na koje se može priključiti osam analognih signala. Ti signali se unutar mikroupravljača preko analognoga multiplexora dovode na AD pretvornik s postupnom aproksimacijom. Za pretvorbu potreban referentni napon priključuje se na izvode V_{Aref} i V_{AGND} .

Kratkotrajnim djelovanjem niskonaponske razine na ulazu *Reset* omogućava se postavljanje mikroupravljača u početno stanje (postavljanje svih bistabila registara u početno stanje 0).

Mikroupravljač C515A ima mogućnost rada u štednom načinu rada (engl. power saving mode). Taj se način primjenjuje, prije svega, kod baterijskoga napajanja mikroupravljača. Štedni način rada postiže se tako da se procesoru unutar mikroupravljača spriječi dovod impulsa ritma ili da se potpuno zaustavi rad oscilatora impulsa ritma. U tu svrhu upotrebljavaju se ulazi *PE/SWD* i *HW/PD*.

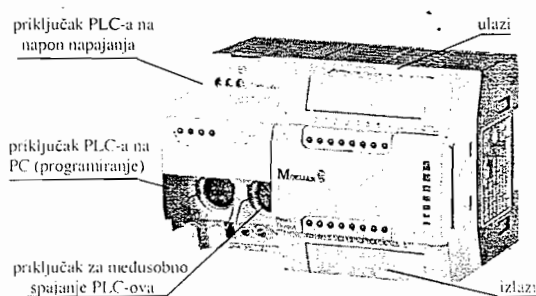
Programirljivi logički upravljači

Posebnu skupinu čine mikroracunala za sekvencijsko (slijedno) upravljanje i regulaciju u industriji koja se nazivaju **programirljivi logički upravljači** (programirljivi kontroleri, engl. Programmable Logic Controllers, skraćeno **PLC**, njem. Speicher-programmierbare Steuerungen, skraćeno **SPS**). Programiraju se uporabom posebnih programskih jezika putem osobnoga računala (PC).



Slika 15.27. Upravljanje procesom s pomoću programirljivoga logičkog upravljača

Napajanje može biti istosmjernim ili mrežnim naponom (ugrađen ispravljački dio). Ulazi i izlazi omogućavaju izravan prijam i odašiljanje digitalnih i analognih signala (ugrađeni AD i DA pretvornici). Primjer izvedbe programirljivoga logičkog upravljača pokazan je na slici 15.28.



Slika 15.28. Primjer izvedbe programirljivoga logičkog upravljača (proizvod tvrtke Moeller)

ZADACI ZA LABORTORIJSKE VJEŽBE

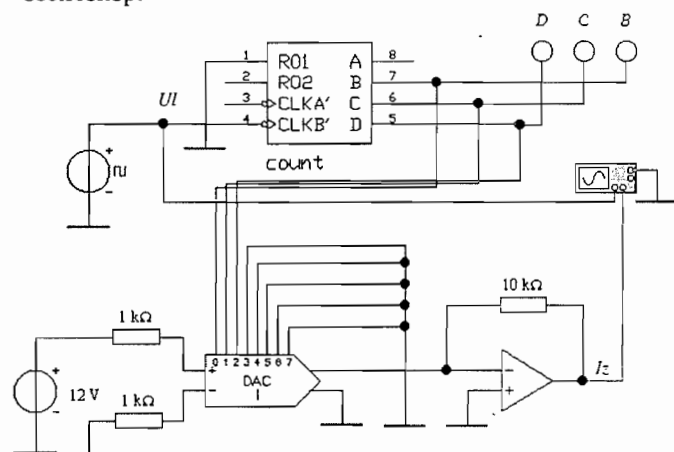
VJEŽBA 15.1. DA I AD PRETVORBA

Zadatak

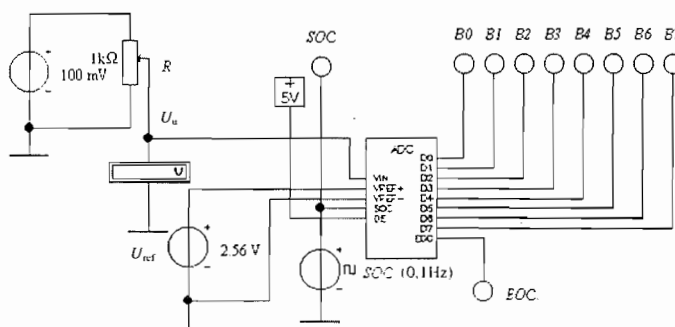
Konkretiziranje općih znanja o postupcima DA i AD pretvorbe praktičnim radom na izabranim primjerima integriranih DA i AD pretvornika, upoznavanje realnih izvedbi DA i AD pretvornika te stjecanje osnovnih vještina u manipuliranju s DA i AD pretvornicima i uporaba tvorničkih podataka.

Pribor i instrumenti

- izvori napona napajanja +5V i 0 – (± 15)V
- generator pojedinačnih impulsa
- pokazivači stanja sa svijetlećim diodama
- univerzalni instrument
- izvor napona 0-5V (2 komada)
- integrirani sklopovi DAC-08, ADC 0801, 7493 i 741
- otpornici 5k Ω (2 komada) i 10k Ω
- podesivi otpornik 10k Ω
- kondenzatori 150pF, 0,01 μ F i 0,1 μ F (2 komada)
- spojni vodovi
- osciloskop.



Slika 15.29. DA pretvornik (DAC-08)



Slika 15.30. AD pretvornik (ADC 0801)

Priprema

1. Proučite sklop DAC-08. Nacrtajte simbol i na njemu označite brojeve izvoda. Opišite namjenu svih izvoda.

2. Proučite sklop ADC 0801. Na rasporedu izvoda (dijagram spajanja) upišite oznake izvoda. Opišite namjenu i djelovanje izvoda. Navedite vrijednosti napona napajanja i dopuštene vrijednosti ulaznog napona.

Pokusi

1. DA pretvornik

1.1. Spojite elemente sklopa prema slici 15.29. i ustanovite međusobnu ovisnost ulaznog i izlaznoga napona.

2. AD pretvornik

2.1. Spojite elemente sklopa prema slici 15.30. Zabilježite izlazna stanja DA-pretvornika za vrijednosti ulaznih napona 0mV, 10mV, 20mV, 30mV, 40mV, 50mV, 60mV 70mV 80mV i 90mV.

PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

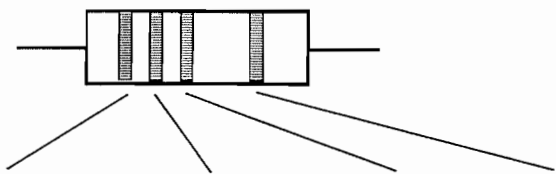
1. Nacrtajte prijenosnu karakteristiku DA pretvornika i objasnite pojam rezolucije.
2. Koliki je napon rezolucije 8-bitnog DA pretvornika ako je najveći mogući izlazni napon 10V?
3. Koliki je izlazni napon 8-bitnog DA pretvornika čija je rezolucija 25mV ako ulazni digitalni signal ima vrijednost 10011001?
4. Nacrtajte shemu DA pretvornika s ljestvičastom otpornom mrežom i objasnite djelovanje.
5. Kako se kod DA pretvornika otpornom mrežom otklanja nepovoljno djelovanje odstupanja ulaznih napona od nominalnih vrijednosti?
6. Digitalna veličina na ulazu 8-bitnog DA pretvornika s ljestvičastom otpornom mrežom i naponskim sljedilom iznosi 10001000. Koliki je izlazni napon ako referentni napon iznosi 5V?
7. Digitalna veličina na ulazu bitnog DA pretvornika s ljestvičastom otpornom mrežom i invertirajućim pojačalom iznosi 10001000. Koliki je izlazni napon ako referentni napon iznosi 5V, a $R_F = R$?
8. Nacrtajte prijenosnu karakteristiku AD pretvornika i objasnite pojam rezolucije.
9. Nacrtajte načelnu shemu AD pretvornika s postupnom aproksimacijom.
10. Navedite najznačajnije prednosti i nedostatke AD pretvornika s postupnom aproksimacijom.
11. U čemu je prednost poluparalelnoga AD pretvornika u usporedbi s paralelnim AD pretvornikom?
12. Objasnite potrebu i način rada sklopa za uzimanje i pamćenje uzoraka.
13. Objasnite funkciju dijelova računala po von Neumannovu modelu.
14. Koja je uloga sabirnice u mikroračunalu?
15. Objasnite namjenu programske opreme mikroručunala i navedite razine programske opreme.
16. Na pojednostavljenom prikazu strukture mikroprocesora objasnite namjenu i djelovanje pojedinih dijelova.
17. Objasnite strukturu i namjenu mikroupravljača.
18. Što su programirljivi logički upravljači?

DODATAK

- A) Označivanje otpornika
- B) Označivanje kondenzatora
- C) Normirane vrijednosti otpora otpornika i kapaciteta kondenzatora
- D) Označivanje elektroničkih poluvodičkih komponenata
 - Europske oznake
 - Američke oznake
- E) Izvodi iz tvorničkih podataka za poluvodičke elektroničke komponente
 - Diode
 - Bipolarni tranzistori
 - Unipolarni tranzistori
 - Tiristori
 - Jednospojni tranzistori
 - Optoelektronički elementi
 - Stabilizatori napona
 - Operacijska pojačala
 - Vremenski sklop
 - Digitalne komponente
- F) Ispitivanje ispravnosti poluvodičkih elemenata

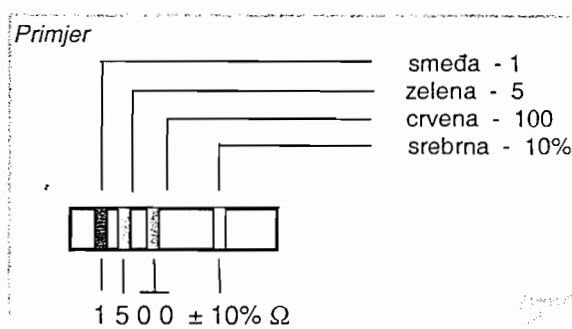
A) OZNAČIVANJE OTPORNIKA

Za praktičnu su uporabu najvažnije karakteristične veličine otpornika nazivni iznos otpora i opteretivost. Iznosi su nazivnih veličina normirani uz dopuštena odstupanja (tolerancije) i označeni su na otpornicima. Označivanje može biti ispisivanjem nazivne vrijednosti u omima ili nanošenjem oznake putem boja (slika A.1.).

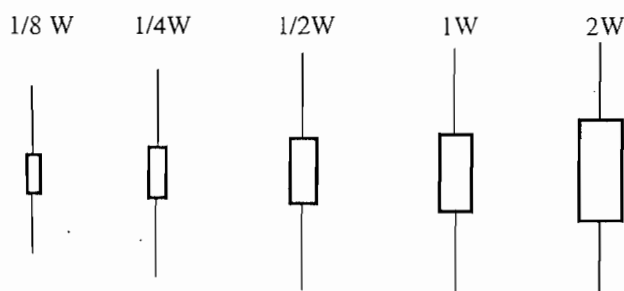


Boja	Prva znamenka	Druga znamenka	Množitelj	Tolerancija
crna	0	0	10^0	
smeđa	1	1	10^1	
crvena	2	2	10^2	
narandžasta	3	3	10^3	
žuta	4	4	10^4	
zelena	5	5	10^5	
plava	6	6	10^6	
ljubičasta	7	7	10^7	
siva	8	8	10^8	
bijela	9	9	10^9	
zlatna	-	-	10^{-1}	5%
srebrna	-	-	10^{-2}	10%
bez boje	-	-	-	20%

Slika A.1. Označivanje otpornika bojom



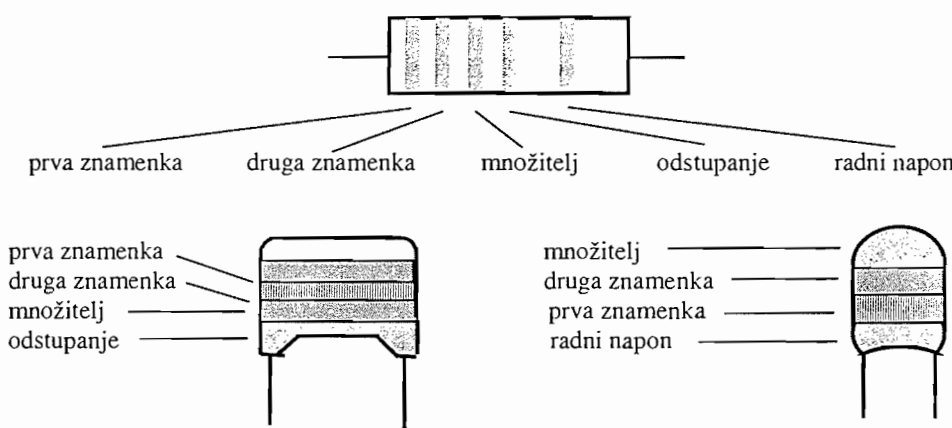
Opteretivost otpornika je dopušteni utrošak snage izražen u vatima uz određenu temperaturu zraka (obično 25°C). Označena je na otporniku ili je vidljiva iz njegovih dimenzija (slika A.2.).



Slika A.2. Opteretivost otpornika

B) OZNAČIVANJE KONDENZATORA

Karakteristične su veličine, važne za uporabu kondenzatora, nazivni kapacitet i radni napon. Nazivna vrijednost kapaciteta uz dopuštena odstupanja može biti napisana na kućištu kondenzatora u mikrofaramadima ili pikofaramadima ili označena bojom (slika B.1.). Radni napon (vrijednost istosmjernog ili efektivna vrijednost izmjeničnoga napona koji se smije priključiti na kondenzator u trajnomu pogonu) također može biti napisana na kućištu u voltima ili označena bojom (slika B.1.).

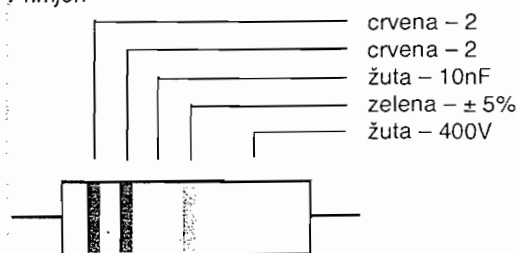


Boja	1.	2.	Množitelj		Odstupanje	Radni napon	
	znamenka	znamenka	FK	TK		FK	TK
crna	0	0	1pF	1μF	20%	-	10V
smeđa	1	1	10pF	10μF	1%	100V	-
crvena	2	2	0,1nF	-	2%	200V	-
narančasta	3	3	1nF	-	-	300V	35V
žuta	4	4	10nF	-	-	400V	6,3V
zelen	5	5	0,1μF	-	5%	500V	16V
plava	6	6	1μF	-	-	600V	20V
ljubičasta	7	7	10μF	-	-	700V	-
siva	8	8	100μF	10nF	-	800V	25V
bijela	9	9	1000μF	0,1μF	10%	900V	3V
zlatna	-	-	-	-	5%	1000V	-
srebrna	-	-	-	-	10%	2000V	-
bez boje	-	-	-	-	20%	500V	-

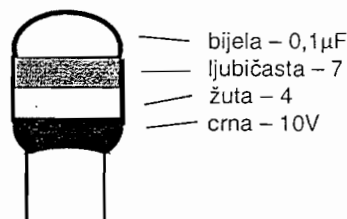
FK - folijski kondenzatori, TK - tantalni kondenzatori

Slika B.1. Označivanje kondenzatora bojom

Primjeri



220 nF ± 5%, 400V



4,7μF, 10V

C) NORMIRANE VRIJEDNOSTI OTPORA OTPORNIKA I KAPACITETA KONDENZATORA

Nazivne vrijednosti otpora otpornika i kapaciteta kondenzatora normirane su uz dopuštena odstupanja. Normirane vrijednosti utvrđuju se prema vrijednostima iz tzv. E-redova u kojima se dvije međusobne vrijednosti razlikuju za faktor $\sqrt[n]{10}$, gdje je n broj mogućih vrijednosti unutar jedne dekade. Osobito su često u uporabi redovi:

- E 6 sa šest vrijednosti unutar dekade i dopuštenim odstupanjem od 20% od nazivne vrijednosti
 - E 12 s dvanaest vrijednosti unutar dekade i dopuštenim odstupanjem od 10% od nazivne vrijednosti
 - E 24 s dvadeset četiri vrijednosti unutar dekade i dopuštenim odstupanjem od 5% od nazivne vrijednosti.
- Vrijednosti unutar dekade 10-100 (dane u omima, odnosno faradima) prikazane su u tablici C1. Ostale vrijednosti dobiju se množenjem vrijednost iz reda s pripadnim množiteljem (vidi označivanje otpornika i kondenzatora).

Tablica C.1. Standardizirane vrijednosti otpornika i kondenzatora

Red Faktor Dopušteno odstupanje	E6 $\sqrt[6]{10}$ 20%	E12 $\sqrt[12]{10}$ 10%	E24 $\sqrt[24]{10}$ 5%
Normirane vrijednosti u dekadi 10-100	10	10	10
			11
		12	12
	15		13
		15	15
			16
	22	18	18
			20
		22	22
	33		24
		27	27
			30
	47	33	33
			36
		39	39
	68		43
		47	47
			51
	82	56	56
			62
		68	68
	91		75
		82	82
			91

D) OZNAČIVANJE ELEKTRONIČKIH POLUVODIČKIH KOMPONENATA

EUROPSKE OZNAKE

Prema europskim oznakama (uvedenim od 1960. godine) standardne izvedbe elemenata u uređajima široke potrošnje označuju se s pomoću dva slova i dvoznamenkastog ili troznamenkastoga broja. Elementi za profesionalnu i posebnu uporabu označuju se s tri slova i dvoznamenkastim brojem.

Prvo slovo	Drugo slovo	Treće slovo	Znamenka
<i>Materijal od kojeg je poluvodič izrađen</i>	<i>Osnovna namjena elementa</i>	<i>Posebna namjena</i>	<i>Redni broj konstrukcije</i>
A - germanij	A - detektorska dioda		
B - silicij	B - diode s promjenljivim kapacitetom (varikap-diode)		
C - galij	C - tranzistor za niske frekvencije		
R - ostali poluvodički materijali	D - tranzistor snage za niske frekvencije		
	E - tunelska dioda		
	F - visokofrekvencijski tranzistor		
	G - kombinirani elementi		
	H - Hallov generator		
	L - tranzistor snage za visoke frekvencije		
	M - Hallov modulator		
	P - elementi osjetljivi na svjetlost		
	Q - elementi koji zrače svjetlost		
	R - elementi za električnu kontrolu i okidanje		
	S - tranzistor za impulsne sklopove		
	T - kontrolni elementi i sklopke velike snage		
	U - tranzistor za impulsne sklopove velike snage		
	X - varaktori		
	Y - ispravljačka dioda		
	Z - stabilizatorski element		

Primjeri

BC 268 je silicijski tranzistor za niske frekvencije, **RPY 61** je fotootpornik, **BYX 27** je silicijska dioda za industrijske potrebe (treće slovo označuje posebnu namjenu)

Dodatni element može biti broj ili slovo i broj. Broj označuje najveći zaporni napon za ispravljačke diode i tiristore. Slovo i broj označuju odstupanja i nominalni radni napon Zenerovih dioda. U tom slučaju slova znače: A – 1%, B – 2%, C – 5% i D – 10%.

Primjeri

BZY 93-C7V5 Zenerova dioda s radnim naponom 7,5V (V između 7 i 5 označuje decimalni zarez) s odstupanjem 5%

BYX34-500 Ispravljačka dioda posebne namjene s dopuštenim zapornim naponom od 500V

AMERIČKE OZNAKE

Oznaka se sastoji od tri elementa. Prvi element je znamenka, drugi element je slovo (N za sve poluvodiče), treći element je redni broj proizvoda (dva elementa s brojevima jedan do drugog mogu se potpuno razlikovati). Oznaka može imati i dodatni element. To su slova A, E ili C koja označuju inačicu istog tipa elementa (razlike u dopuštenim naponima ili faktoru strujnoga pojačanja).

Prvi element	Drugi element	Treći element	Dodatni elemnt
Znamenka	Slovo	Znamenka	Slovo
1 - za diode 2 - za tranzistore 3 - za tetrodne tranzistore 4 - za fotovezne elemente	N - za sve poluvodiče	redni broj proizvoda	A B C } inačica istog tipa elementa

Primjeri

1N746	Zenerova dioda nazivnoga napona 3,3V (minimalno 2,97V, maksimalno 3,63V)
1N746A	Zenerova dioda nazivnoga napona 3,3V (minimalno 3,135V, maksimalno 3,465V)
1N456	silicijska dioda opće namjene (dopuštena struja 135mA, dopušteni zaporni napon 30V)
2N696	NPN silicijski tranzistor opće namjene (dopušteni kolektorski napon 60V, najveća dopuštena struja kolektora 1A)
3N170	n-kanalni MOSFET (dopuštena struja odvoda 30mA, dopušteni napon izvor-odvod 25V)
4N25	fotovezni element (GaAs LED / fototranzistor, dopuštena struja I_F 80mA, dopušteni napon U_{CE} 30V)

Iz navedenih se primjera vidi da se iz oznaka ne može zaključiti o kakvim se svojstvima pojedinog elementa radi.

E) IZVODI IZ TVORNIČKIH PODATAKA ZA POLUVODIČKE ELEKTRONIČKE KOMPONENTE

Diode

1N401-1N407

1N4148, 1N1448, 1N4446

Zenerove diode

BZX2,7-BZX33

1N4728-1N4754

Bipolarni tranzistori

BC107

BC141, BC286, 2N1711

2N2222, 2N3904

Unipolarni tranzistori

2N5457-2N5459

2N3796-2N3797

Tristori

2N2574-2N2575

2N6394-2N6395

ECG555

Jednospojni tranzistori

2N1671, 2N2646

Optoelektronički elementi

BPW 43

BP103BI, BPW40

LG5410, LR5420

4N25-4N28

Stabilizatori napona

LM317

Operacijska pojačala

741

Vremenski sklop

555

Digitalne komponente

7400, 7402

74175

7493

7447

74121

74123

DAC-008

ADC0801

DIODE

V_{RRM}	repetitive peak reverse voltage (vršna vrijednost izmjeničnoga zapornog napona)
I_{FAV}	average forward current (srednja struja pri propusnoj polarizaciji)
V_F, U_R	direct forward voltage (istosmjerni pad napona na propusno polariziranoj diodi pri struji I_F)
I_F	direct forward current (istosmjerna struja propusno polarizirane diode)
I_R	direct reverse current (istosmjerna struja zaporno polarizirane diode pri naponu V_R)
V_R, U_R	direct reverse voltage (istosmjerni napon zaporno polarizirane diode)
P_{tot}	total power dissipation (ukupni utrošak snage)
T_A	ambient temperature (temperatura okoline)

1N4001-1N4007 SILICON RECTIFIER DIODES ¹

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

Oznaka	V_{RRM} / V	I_{FAV} / A	$T_A / ^\circ C$
1N4001	50	1	75
1N4002	100	1	75
1N4003	200	1	75
1N4004	400	1	75
1N4005	600	1	75
1N4006	800	1	75
1N4007	1000	1	75

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ C$)
(ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

Oznaka	V_F / V	I_F / A	$I_R / \mu A$	V_R / V
1N4001	1,1	1	10	50
1N4002	1,1	1	10	100
1N4003	1,1	1	10	200
1N4004	1,1	1	10	400
1N4005	1,1	1	10	600
1N4006	1,1	1	10	800
1N4007	1,1	1	10	1000

1N4148, 1N4446, 1N4448 SILICON HIGH SPEED SWITCHING DIODES ²

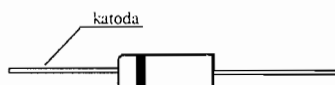
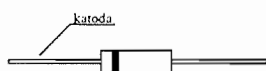
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

Oznaka	V_{RRM} / V	I_{FAV} / mA	P_{tot} / mW
1N4148	150	150	500
1N4446	150	150	500
1N4448	150	150	500

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ C$)
(ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

Oznaka	V_F / V	I_F / mA	$I_R / \mu A$	V_R / V
1N4148	1	10	0,025	20
1N4446	1	20	0,025	20
1N4448	1	100	0,025	20

KUĆIŠTA



¹ prema podacima proizvođača Philips i Iskra

² prema podacima proizvođača Philips

ZENEROVE DIODE

V_Z	nominal regulator voltage, Zener voltage (Zenerov napon uz struju I_Z)
I_{ZT}	test current
i_{Zmax}	maximal direct reverse current (najveća dopuštena struja Zenerove diode pri zapomoj polarizaciji: uz priključeni napon $U > U_Z$)
P_{tot}	total power disipation (ukupni utrošak snage)
T_J	junction temperature (temperatura spoja)
T_A	ambient temperature (temperatura okoline)

BZX 2,7-BZX33 ZENER DIODES ¹

$P_{tot} = 500 \text{ mW}$, $T_J = 175^\circ\text{C}$
Tolerance = $\pm 5\%$

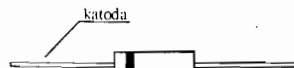
Oznaka	V_Z / V $I_Z = 5 \text{ mA}$	I_{Zmax} / mA $T_A = 45^\circ\text{C}$
BZX 2,7	2,5 – 2,9	135
BZX 3	2,8 – 3,2	117
BZX 3,3	3,1 – 3,5	109
BZX 3,6	3,4 – 3,8	101
BZX 3,9	3,7 – 4,1	92
BZX 4,3	4,0 – 4,6	85
BZX 4,7	4,4 – 5,0	76
BZX 5,1	4,8 – 5,4	67
BZX 5,6	5,2 – 6,0	59
BZX 6,2	5,8 – 6,6	54
BZX 6,8	6,4 – 7,2	49
BZX 7,5	7,0 – 7,9	44
BZX 8,2	7,7 – 8,7	40
BZX 9,1	8,5 – 9,6	36
BZX 10	9,4 – 10,6	33
BZX 11	10,4 – 11,6	30
BZX 12	11,4 – 12,7	28
BZX 13	12,4 – 14,1	25
BZX 15	13,8 – 15,6	23
BZX 16	15,3 – 17,1	20
BZX 18	16,8 – 19,1	18
BZX 20	18,8 – 21,2	17
BZX 22	20,8 – 23,3	16
BZX 24	22,8 – 25,6	13
BZX 27	25,1 – 28,9	12
BZX 30	28,0 – 32,0	10
BZX 33	31,0 – 35,0	9

1N4728-1N4754 ZENER DIODES ²

$P_{tot} = 1 \text{ W}$

Oznaka	V_Z / V	I_{ZT} / mA	I_{Zmax} / mA $T_A = 45^\circ\text{C}$
1N4728	3,3	76	276
1N4729	3,6	69	256
1N4730	3,9	64	234
1N4731	4,3	58	217
1N4732	4,7	53	193
1N4733	5,1	49	178
1N4734	5,6	45	162
1N4735	6,2	41	146
1N4736	6,8	37	133
1N4737	7,5	34	121
1N4738	8,2	31	111
1N4739	9,1	28	100
1N4740	10,0	25	91
1N4741	11,0	23	83
1N4742	12,0	21	76
1N4743	13,0	19	69
1N4744	15,0	17	61
1N4745	16,0	15,5	57
1N4746	18,0	14	50
1N4747	20,0	12,5	45
1N4748	22,0	11,5	41
1N4749	24,0	10,5	38
1N4750	27,0	9,5	34
1N4751	30,0	8,5	30
1N4752	33,0	7,5	27
1N4753	36,0	7	25
1N4754	39,0	6,5	23

KUĆIŠTA



¹ prema podacima proizvođača Iskra

² prema podacima proizvođača International Rectifier

BIPOLARNI TRANZISTORI

V_{CE}	collector-emitter d.c. voltage (istosmjerni napon između kolektora i emitera)
V_{EB}	emitter-base d.c. voltage (istosmjerni napon između emitera i baze)
I_C	collector d.c. current (istosmjerna struja kolektora)
P_{tot}	total power dissipation (ukupni utrošak snage)
h_{FE}	d.c. current gain (faktor istosmjernoga strujnog pojačanja kod određene struje kolektora I_C)
h_{fe}	small-signal current gain (faktor izmjeničnoga strujnog pojačanja kod određene frekvencije)
f	cut-off frequency (granična frekvencija tranzistora)

BC107 SILICON LOW POWER NPN TRANSISTORS ¹

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

V_{CE}	45V
V_{EB}	6V
I_C	200mA
P_{tot}	300mW

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ \text{C}$)
(ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

h_{FE} ($I_C = 2 \text{ mA}$, $U_{CE} = 5 \text{ V}$)	110-240
h_{fe} ($f = 1 \text{ kHz}$)	125-900
U_{CEsat} / V ($I_C = 100 \text{ mA}$, $I_B = 5 \text{ mA}$)	0,6V
f	150MHz

BC141, BC286, 2N1711 SILICON MEDIUM POWER NPN TRANSISTORS ²

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

	BC141	BC286	1N1711
V_{CE} / V	60	60	50
V_{EB} / V	7	7	7
I_C / A	1	1	1
P_{tot} / W	0.8	0.8	1

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ \text{C}$)
(ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

	BC141	BC286	1N1711
h_{FE}	40-100 $I_C = 100 \text{ mA}$ $U_{CE} = 1 \text{ V}$	20-180 $I_C = 500 \text{ mA}$ $U_{CE} = 2 \text{ V}$	100-300 $I_C = 150 \text{ mA}$ $U_{CE} = 10 \text{ V}$
U_{CEsat} / V		0,7 $I_C = 1 \text{ A}$ $I_B = 15 \text{ mA}$	1,5 $I_C = 150 \text{ mA}$ $I_B = 15 \text{ mA}$
F / MHz	50	100	150

2N2222, 2N3904 SILICON SWITCHING NPN TRANSISTORS ¹

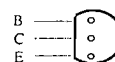
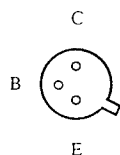
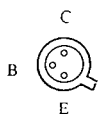
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

	2N2222	2N3904
V_{CE} / V	30	40
V_{EB} / V	5	5
I_C / mA	800	200
P_{tot} / mW	500	350

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ \text{C}$)
(ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

	2N2222	2N3904
h_{FE}	100-300 $I_C = 150 \text{ mA}$ $U_{CE} = 10 \text{ V}$	100-300 $I_C = 10 \text{ mA}$
U_{CEsat} / V	0,4 $I_C = 150 \text{ mA}$ $I_B = 15 \text{ mA}$	0,4 $I_C = 150 \text{ mA}$ $I_B = 15 \text{ mA}$
F / MHz	250	300

KUĆIŠTA



¹ prema podacima proizvođača Philips

² prema podacima proizvođača Philips i SGS

UNIPOLARNI TRANZISTORI

V_{DS}	drain-source d.c. voltage (istosmjerni napon između odvoda i uvoda)
I_D	drain d.c. current (istosmjerna struja odvoda)
P_{tot}	total power dissipation (ukupni utrošak snage)
V_P	pinch-off voltage (napon dodira)
g_m	transfer admittance (strmina)

2N5457-2N5459 N-CHANNEL JFET ¹

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

Oznaka	V_{DS} / V	I_D / mA	P_{tot} / mW
2N5457	25	10	310
2N5458	25	10	310
2N5459	25	10	310

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ C$)
(ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

Oznaka	U_P / V	g_m / mS $U_{DS} = 15 V$
2N5457	- 3,25	
2N5458	- 4,0	1,5-5,5
2N5459	- 5,0	2-6

2N5638-2N5640 N-CHANNEL JFET ¹

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

Oznaka	V_{DS} / V	I_D / mA	P_{tot} / mW
2N5638	30	10	310
2N5639	30	10	310
2N5640	30	10	310

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ C$)
(ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

Oznaka	U_P / V	r_{DS} / Ω
2N5638	-10,0	< 30
2N5639	- 8,0	< 60
2N5640	- 8,0	

2N3796, 2N3797 N-CHANNEL DEPLETION MOSFET ²

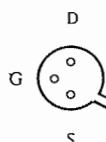
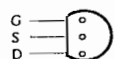
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

Oznaka	V_{DS} / V	I_D / mA	P_{tot} / mW
2N3796	25	20	300
2N3797	20	20	300

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ C$)
(ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

Oznaka	U_P / V	g_m / mS $U_{DS} = 15 V$
2N3796	- 3,25	0,9-1,8
2N3797	- 4,0	0,9-1,8

KUĆIŠTA



¹ prema podacima proizvođača Motorola i National Semiconductors

² prema podacima proizvođača Motorola

TIRISTORI

V_{50}	breakover voltage (prijelomni napon)
I_{TRMS}	efektivna vrijednost propusne struje
V_T	d.c. on-state voltage (istosmjerni napon na vodljivom tiristoru)
I_T	d.c. on-state current (istosmjerna struja vodljivog tiristora)
I_H	continuous, direct holding current (stalna, istosmjerna struja držanja)
V_{GT}	gate trigger continuous, direct voltage (stalni, istosmjerni napon okidanja)
I_{GT}	gate trigger continuous, direct current (stalna, istosmjerna vrijednost struje okidanja na upravljačkoj elektrodi)
I_{TAV}	average forward current (prosječna, srednja vrijednost propusne struje)
P_{tot}	total power dissipation (ukupni utrošak snage)

SCR

Oznaka	V_{BO} / V	I_{TRMS} / A	I_H / A	V_{GT} / V	I_{GT} / mA	V_T / V	I_T / A
2N2574	50		0,01	0,7	40	1,1	20
2N2575	100		0,01	0,7	40	1,1	20
2N6394	50	12	0,04	1,5	30	1,7	24
2N6395	100	12	0,04	1,5	30	1,7	24

SHOCKLEY DIODE, DIAC

Oznaka	Tip	V_{BO} / V	P_{tot} / mW	I_H / A	V_T / V	I_T / A
ECG555	Shockleyeva dioda	35	500	0,02	1,5	1
ECG6407	DIAC	28	300	0,02	1,5	1
ECG6408	DIAC	32		0,2	1,5	1

JEDNOSPOJNI TRANZISTORI

I_E	emitter current RMS (struja emitera, efektivna vrijednost)
V_{BB}	interbase voltage (napon između baza)
V_{B2E}	reverse emitter voltage (reverzni napon između emitera i baze B2)
ϑ	operating temperature range (radna temperatura)
η	intrinsic stand-off ratio (faktor η)
I_P	peak-point emitter current (struja emitera kod napona $U_E = U_P$)
I_V	valley point current (struja emitera kod napona $U_E = U_V$)

2N1671, 2N2646 SILICON UNIJUNCTION TRANSISTOR ¹

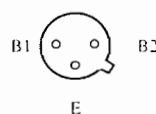
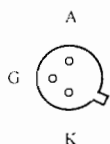
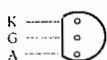
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

I_E	50 mA
V_{B2E}	30 V
V_{BB}	35 V
ϑ	(-65)-(+140) °C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

	2N1671	2N2646
η ($U_{BB}=10V$)	0,47-0,62	0,56-0,75
$R_{BB} / k\Omega$ ($U_{BB}=10V, I_E=0$)	4,7-9,1	4,7-9,1
$I_P / \mu A$ ($U_{BB}=25V$)	25	5
I_V / mA ($U_{BB}=20V, R_{B2}=100\Omega$)	8	4

KUĆIŠTA



¹ prema podacima proizvođača General Electric

OPTOELEKTRONIČKI ELEMENTI

λ_{Smax}	Wellenlänge der maximalen Fotoempfindlichkeit (valna dužina najveće osjetljivosti)
V_R, U_R	reverse voltage, Sperrspannung (zaporni napon)
I_F	forward dc current, Durchlassstrom (struja propusno polarizirane diode)
λ	wavelength, Lichtwellenlänge (valna dužina emitirane svjetlosti)
U_{CE}	napon između kolektora i emitera fototranzistora
U_{EC}	napon između emitera i kolektora fototranzistora
U_{EB}	reverzni napon između baze i emitera fototranzistora
I_C	struja kolektora fototranzistora
CTR	current transfer ratio (prijenosni omjer)
ϑ	operating temperature range, Betriebstemperatur (radna temperatura)
T_A, T_U	ambient temperature, Umgebungstemperatur (temperatura okoline)
T_j	junction temperature, Sperrschichttemperatur (temperatura PN-spoja)
T_S, T_L	soldering temperature, Lotspannung (temperatura lemljenja uz naznačeno dopušteno trajanje)
P_{tot}	power dissipation, Verlustleistung (utrošak snage)
P_{totP}	total package power dissipation, Verlustleistung (ukupni utrošak snage kućišta)
λ_{Smax}	Wellenlänge der maximalen Fotoempfindlichkeit (valna dužina najveće osjetljivosti)
S	Fotoempfindlichkeit (fotoosjetljivost)
I_R	Dunkelstrom (tamna struja)
U_L	Leerlaufspannung (napon na osvijetljenoj fotodiodi u praznom hodu)
I_P	Fotostrom (fotostruja)

BPW43 SILIZIUM-FOTODIODEN ¹

GRENZDATEN
(DOPÜSTENE VRIJEDNOSTI)

U_R / V	32 V
ϑ	(-40) - (+80) °C
P_{tot} ($T_U = 25^\circ C$)	100 mW

KENNDATEN ($T_U = 25^\circ C$)
(ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

S	15 $\mu A/lx$
λ_{Smax}	850 nm
I_R ($U_R = 10 V$)	2 nA
U_L ($E_V = 1000 lx$)	365 mV

BP103BI, BPW40 NPN-SILIZIUM-FOTOTRANSISTOREN ¹

GRENZDATEN
(DOPÜSTENE VRIJEDNOSTI)

U_{CE}	35 V
U_{EC}	7 V
I_C	100 mA
T_L ($t = 5 s$)	260 °C
P_{tot} ($T_U = 25^\circ C$)	210 mW

KENNDATEN ($T_U = 25^\circ C$)
(ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

I_P / mA ($E_V = 1000 lx$)	1.6-3.2 (BP103) 3-6 (BPW40)
λ_{Smax} / nm	850
I_{CE0} / nA ($U_{CE} = 30 V, E_V = 0 lx$)	5



¹ prema podacima proizvođača Siemens

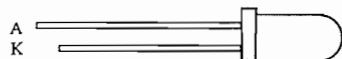
LG5410, LR5420 LED¹

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

I_F	40 mA
V_R	5 V
ϑ	(-55°C)-(+100°C)
T_S (5s)	260 °C
P_{tot} ($T_A=25^\circ\text{C}$)	120 mW

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

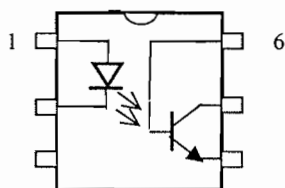
	LG5410	LR5420
λ / nm	560	660
U_F /V ($I_F=10\text{mA}$)	2,0	1,6

**4N25-4N28 OPTICALLY-COUPLED ISOLATORS²**

GaAs light emitting diode and photo-transistor
High current transfer ratio (typical 50%)
500V-2500V minimum isolation input-to-output
 $10^{11} \Omega$ isolation resistance

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

ϑ	(-55°C)-(+100°C)	
T_S (10s)	260 °C	
P_{totP} ($T_A=25^\circ\text{C}$)	250 mW	
INPUT DIODE		OUTPUT TRANSISTOR
I_F 80 mA	V_{CE}	30 V
V_R 3 V	V_{CB}	70 V
P_{tot} ($T_A=25^\circ\text{C}$) 150 mW	V_{BE}	7 V
	P_{tot} ($T_A=25^\circ\text{C}$)	150 mW



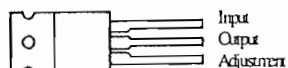
¹ prema podacima proizvođača Siemens

² prema podacima proizvođača General Electric

STABILIZATORI NAPONA

LM317 ADJUSTABLE THREE TERMINAL VOLTAGE REGULATOR

Output voltage range (područje izlaznog napona)	1,2-37 V
Output current (izlazna struja)	1,5 A
Input/output voltage difference (razlika između ulaznog i izlaznog napona)	40 V
Line regulation of typically (naponski faktor stabilizacije)	0,01%
Load regulation of typically (opterećni faktor stabilizacije)	0,1%
Ripple rejection (faktor potiskivanja brujanja)	80 dB
Ambient temperature (temperatura okoline)	0-70 °C



OPERACIJSKA POJAČALA

741

Internal frequency compensation (unutarnja frekvencijska kompenzacija)

Short circuit protection (zaštita od kratkog spoja na izlazu)

High input voltage range (široki raspon ulaznih napona)

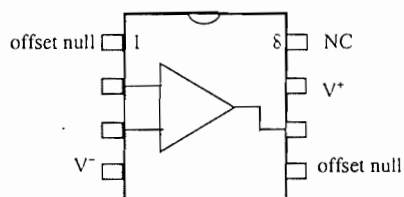
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

Supply voltage (napon napajanja)	± 18 V
Internal power dissipation (utrošak snage)	dvolinijsko kućište 500 mW
Differential input voltage (diferencijski ulazni napon)	± 30 V
Input voltage (ulazni napon)*	± 15 V
Operating temperature range (temperaturno radno područje)	0 - 70 °C
Lead temperature soldering, soldering 60 s (temperatura lemljenja, trajanje lemljenja 60 s)	300 °C

* Za napone napajanja manje od ± 15 V najveći dopušteni ulazni napon jednak je naponu napajanja.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

Offset voltage (napon pomaka)	2 mV
Output voltage swing (raspon promjena izlaznog napona)	± 14 V
Large signal voltage gain (pojaćanje velikoga signala)	200
CMRR	90 dB
Input resistance (ulazni otpor)	2 M Ω
Output resistance (izlazni otpor)	75 Ω
Unity gain crossover frequency (granična frekvencija kod jediničnoga pojaćanja)	1 MHz

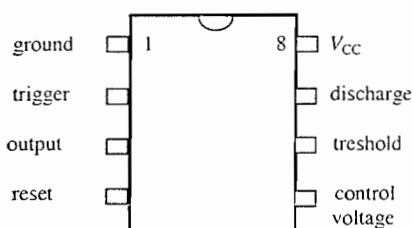
 $T_A = 25$ °C, $V_S = \pm 15$ V

VREMENSKI SKLOP

555

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

Supply voltage (napon napajanja)	$\pm 16 \text{ V}$
Power dissipation (utrošak snage)	600 mW
Operating temperature range (temperaturno radno područje)	$0 - 70 ^\circ\text{C}$
Lead temperature soldering, soldering 60 s (temperatura lemljenja, trajanje lemljenja 60 s)	$300 ^\circ\text{C}$



DIGITALNE KOMPONENTE

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

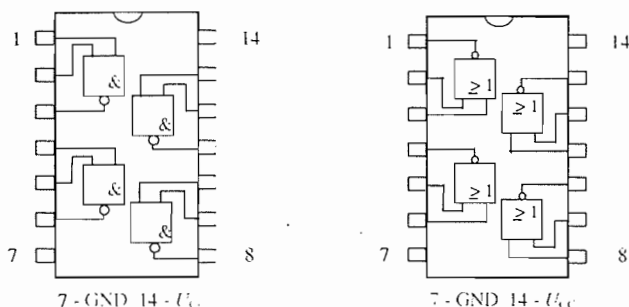
Symbol	Parametar	74LS	74HC	74HCT
V_{CC}	Supply voltage (napon napajanja) / V	$(-0,5) - (7)$	$(-0,5) - (7)$	$(-0,5) - (+7)$
V_{in}	Input voltage (ulazni napon) / V	$(-0,5) - (15)$	$(-1,5) - (V_{CC}+1,5)$	$(-1,5) - (V_{CC}+1,5)$
V_{out}	Output voltage (izlazni napon) / V	$(-0,5) - (10)$	$(-0,5) - (V_{CC}+0,5)$	$(-0,5) - (V_{CC}+0,5)$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS
(ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

Symbol	Parametar	74LS	74HC	74HCT
V_{IH}	High-level input voltage (ulazni napon stanja 1) / V	2	3,5	2
V_{IL}	Low-level input voltage (ulazni napon stanja 0) / V	0,8	1	0,8
V_{OH}	High-level output voltage (izlazni napon stanja 1) / V	2,7	4,9	4,9
V_{OL}	Low-level output voltage (izlazni napon stanja 0) / V	0,5	0,1	0,1
I_{OH}	High-level output current (izlazna struja stanja 1) / mA	0,4	5	5
I_{OL}	Low-level output current (izlazna struja stanja 0) / mA	8	5	5

$T_A = 25 ^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 5 \text{ V}$

7400 Quad 2-Input NAND Gates, 7402 Quad 2-Input NOR Gates

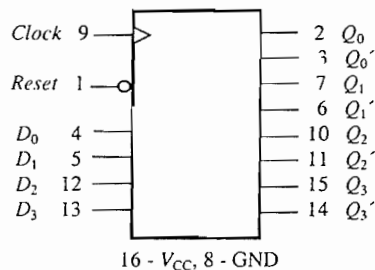


74175 Quad D Flip-Flop

FUNCTION TABLE (TABLICA STANJA)

Inputs			Outputs	
Reset	Clock	D	Q	Q'
L	X	X	L	H
H		H	H	L
H		L	L	H
H	L	X	no change	

L - stanje 0, H - stanje 1, X - bilo koje stanje
no change - bez promjene,
 promjena na rastući brid impulsa ritma

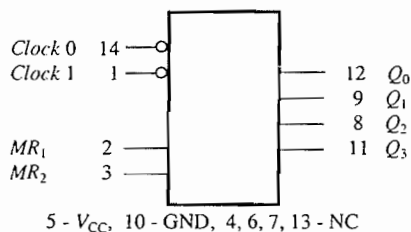


7493 (74393) 4 - bit Binary Counter

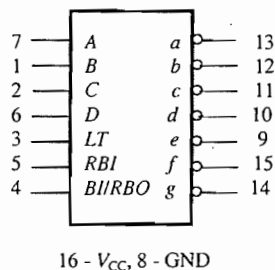
FUNCTION TABLE (TABLICA STANJA)

Reset Inputs		Outputs			
MR ₁	MR ₂	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃
H	H	L	L	L	L
L	H	count			
H	L	count			
L	L	count			

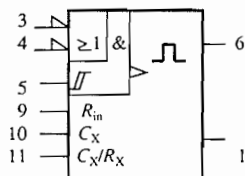
H - stanje 1, L - stanje 0, count - brojilo broji



7447 BCD TO 7/SEGMENT DECODER/DRIVER



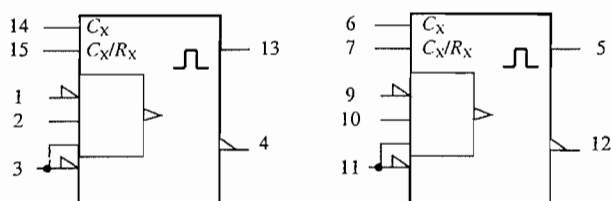
74121 MONOSTABLE MULTIVIBRATOR



7 - GND, 14 - U_{CC}

A ₁	A ₂	B	Q
0	X	1	0
X	0	1	0
X	X	0	0
1	1	X	0
1	↓	1	
↓	1	1	
↓	↓	1	
0	X	↑	
X	0	↑	

74123 RETRIGGERABLE MONOSTABLE MULTIVIBRATOR



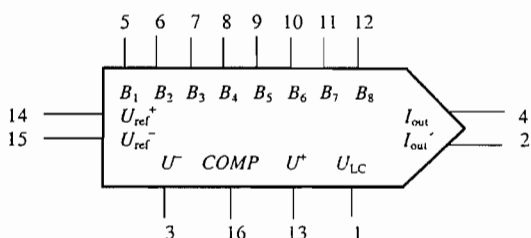
8 – GND, 16 – U_{CC}

CLR	A	B	Q
0	X	X	0
X	1	X	0
X	X	0	0
1	0	↑	⌊
1	↓	1	⌊
↓	0	1	⌊

DAC-08 8-BIT HIGH-SPEED D/A CONVERTER

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (DOPUŠTENE VRIJEDNOSTI)

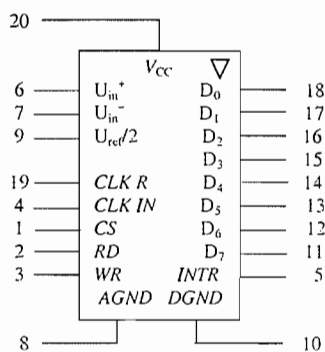
Power supply range (napon napajanja)	($\pm 4,5$) - (± 18) V
V+ supply to V- supply (razlika napona između U+ i U-)	36 V
Power dissipation (utrošak snage)	500 mW
Logic inputs (ulazni napon digitalnih ulaza)	(U ⁻) - (U ⁻ + 36) V
I_{out}	4,25 mA
Reference inputs differential voltage (razlika referentnih napona)	± 18 V
Reference input current (struja na ulazima referentnoga napona)	5 mA



ELECTRICAL CHARACTERISTICS
(ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE)

Resolution (rezolucija)	8 bita
U_{IL}	0,8 V
U_{IH}	2 V

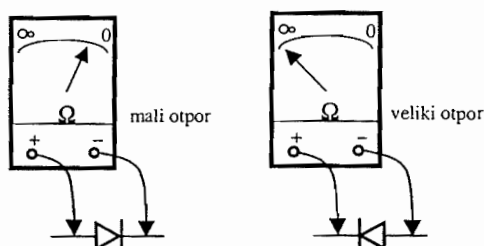
ADC0801 8-BIT SUCCESSIVE APPROXIMATION A/D CONVERTER



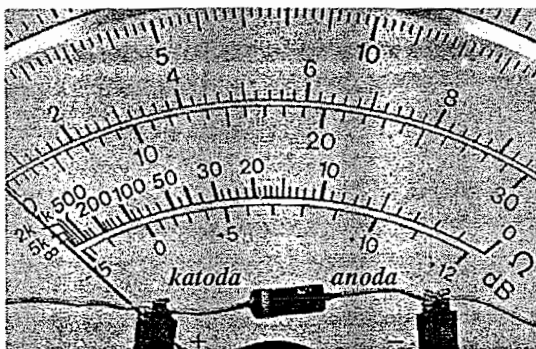
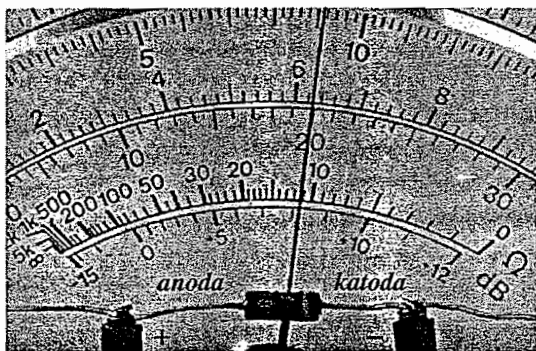
F) ISPITIVANJE ISPRAVNOSTI POLUVODIČKIH ELEMENATA

Ispitivanje ispravnosti dioda

Ispornost dioda moguće je jednostavno ispitati analognim ommetrom (slika F.1. i F.2.). Propusno polarizirana dioda ima mali otpor reda veličine nekoliko desetaka oma, a zaporno polarizirana veliki otpor od nekoliko stotina kilooma i više. Pri mjerenju otpora propusno polarizirane diode treba rabiti područje $R \times 10$ ili $R \times 1$ kako bi dioda pouzdano bila propusno polarizirana. Pri mjerenju otpora u zapornome smjeru treba rabiti područje za mjerenje viših otpora.



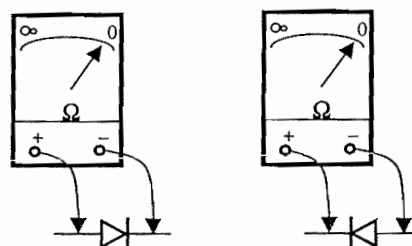
Slika F.1. Ispitivanje diode analognim ommetrom



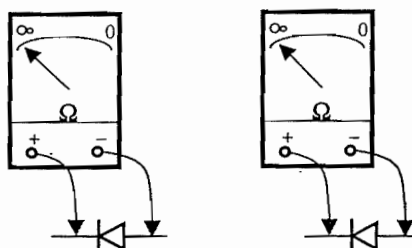
Slika F.2. Primjer ispitivanja diode analognim instrumentom (mjerno područje $R \times 10$)

U slučaju da je dioda u kratkom spoju, otpor će u oba smjera biti blizu nule (slika F.3.a). Ako je dioda u prekidu, instrument će u oba smjera pokazivati beskonačan otpor (slika F.3.b).

a)



b)



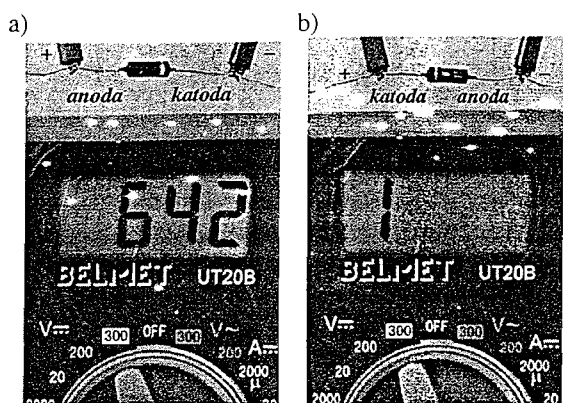
Slika F.3. Ispitivanje dioda ommetrom: a) dioda u kratkom spoju, b) dioda u prekidu

Na isti način može se ispitati ispravnost Zenerovih dioda. Ommetar pokazuje mali otpor pri propusnoj polarizaciji, a veliki otpor pri zapornoj polarizaciji.

Digitalni multimetri imaju posebno mjerno područje za ispitivanje dioda označeno simbolom diode (slika F.4.). Namješten na to mjerno područje multimeter dovodi napon na diodu koji ju propusno ili zaporno polarizira.

Ako je pozitivni pol napona multimetra priključen na anodu, a negativni na katodu, dioda je propusno polarizirana pa instrument pokazuje pad napona na propusno polariziranoj diodi, koji obično iznosi između 0,5 i 0,8V (slika F.4.a).

Ako je negativni pol napona multimetra priključen na anodu, a pozitivni na katodu, dioda je zaporno polarizirana. Dioda djeluje kao prekid strujnoga kruga što instrument pokazuje znakom 1 (slika F.4.b).

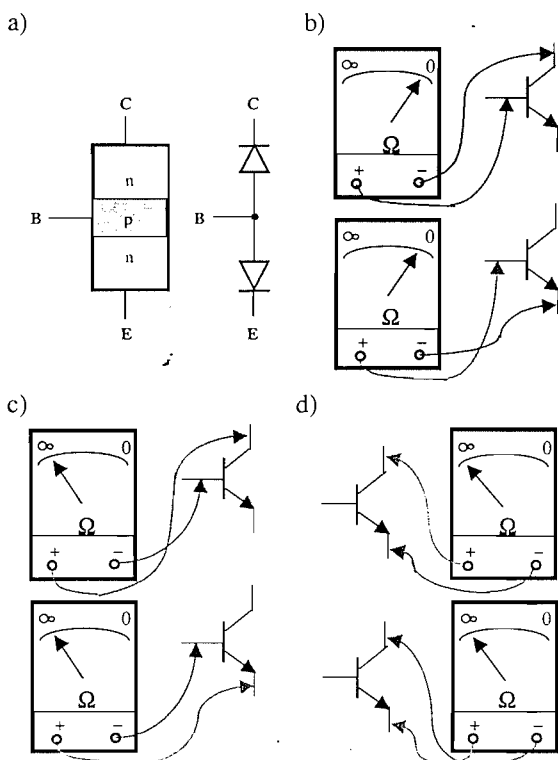


Slika F.4. Ispitivanje diode digitalnim multimetrom

Ispitivanje ispravnosti bipolarnih tranzistora

Brzo i jednostavno ispitivanje ispravnosti tranzistora može se provesti također ommetrom. U tu se svrhu tranzistor može smatrati sastavljenim od dvije diode suprotno spojene u seriju (slika F.5.a).

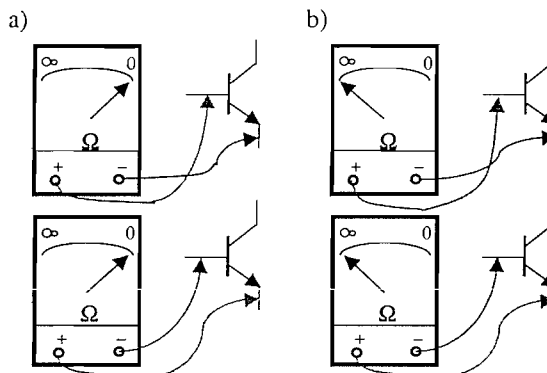
Pri ispitivanju NPN tranzistora pozitivni pol ommeta priključi se na bazu, a negativni pol na emiter, odnosno na kolektor (slika F.5.b). U tom su slučaju obje diode propusno polarizirane i ommetar za ispravn transistor pokazuje mali otpor (ovisno o tipu tranzistora, od nekoliko stotina oma do nekoliko kilooma).



Slika F.5. Ispitivanje ispravnosti tranzistora s pomoću ommeta

Priključkom negativnoga pola ommeta na bazu a pozitivnoga pola na emiter, odnosno kolektor (slika F.5.c), obje diode su nepropusno polarizirane i instrument mora pokazati veliki otpor (stotinu i više kilooma).

Ispitivanje otpora između kolektora i emitera (slika F.5.d) mora dati, bez obzira na polaritet priključka ommeta, vrlo veliki otpor (stotinu i više kilooma).

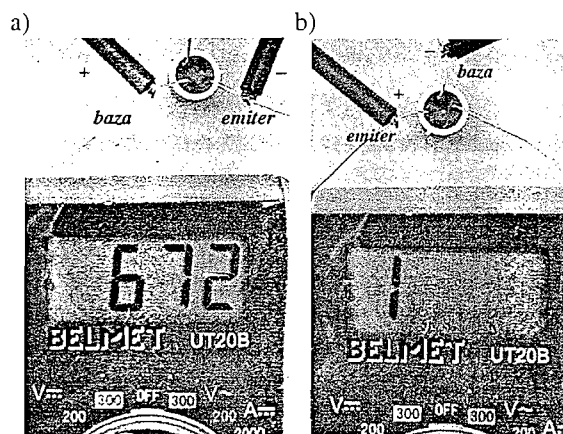


Slika F.6. Ispitivanje tranzistora ommetrom: a) spoj baza-emiter u kratkom spoju, b) spoj baza-emiter u prekidu

U slučaju da je tranzistor neispravan, tj. u kratkom spoju između baze i kolektora, odnosno emitera, otpor će u oba smjera biti blizu nule (slika F.6.a).

Ako je spojen između baze i emitera, odnosno baze i kolektora u prekidu, instrument će u oba smjera pokazivati beskonačan otpor (slika F.6.b).

Pri ovom ispitivanju potrebno je paziti na veličinu napona baterije kojom se napaja ommetar i struju koju može ta baterija potjerati kroz ispitivani element. Na području Rx1 teku struje koje, iako rijetko, mogu uništiti tranzistor.



Slika F.7. Ispitivanje tranzistora s pomoću digitalnoga multimetra

Za ispitivanje ispravnosti tranzistora može se rabiti i digitalni multimeter na mjernom području za ispitivanje dioda označenom simbolom diode (slika F.7.). Namješten na to mjerno područje, multimeter dovodi na spoj baza-kolektor, odnosno baza-emiter napon koji ih propusno ili zaporno polarizira.

Ako je pozitivni pol napona multimetra priključen na bazu, a negativni na kolektor, odnosno emiter, spoj baza-kolektor, odnosno baza-emiter propusno je polariziran. Instrument pokazuje pad napona na propusno polariziranom spoju baza-kolektor, odnosno baza-emiter, koji obično iznosi između 0,5 i 0,8V (slika F.7.a).

Ako je negativni pol napona multimetra priključen na bazu, a pozitivni na kolektor, odnosno emiter, spoj baza-kolektor, odnosno baza-emiter zaporno je polariziran. Spojevi baza-kolektor, odnosno baza-emiter djeluju kao prekid strujnog kruga što instrument pokazuje znakom 1 (slika F.7.b).

Na isti način moguće je ispitati i PNP tranzistor pazeći na polaritet priključaka ommetra i nadomjesni spoj PNP tranzistora.

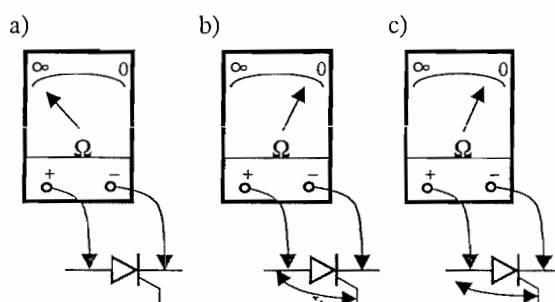
Pojedini digitalni multimetri imaju posebne priključnice za spajanje tranzistora i mjerno područje za ispitivanje iznosa faktora strujnog pojačanja h_{FE} (slika F.8.). Na zaslonu instrumenta dobije se izravno iznos faktora istosmjernoga strujnog pojačanja.



Slika F.8. Digitalni multimeter s priključnicama za mjerenje faktora istosmjernoga strujnog pojačanja

Ispitivanje ispravnosti tiristora

Ispravnost SCR-a (jednosmjernoga triodnog tiristora) može se provjeriti ommetrom. Ommetar priključen između anode i katode (slika F.9.a) mora, bez obzira na polaritet, pokazivati vrlo veliki otpor. Uz priključak pozitivnoga pola ommetra na anodu i njegovim kratkotrajnim spajanjem na upravljačku elektrodu (slika F.9.b) SCR provede i ommetar mora za ispravan element pokazivati mali otpor i nakon što se upravljačka elektroda odspoji od pozitivnoga pola instrumenta (slika F.9.c). Odspajanjem anode ili katode od instrumenta SCR prestaje voditi, pa ponovno ispitivanje otpora između anode i katode mora dati veliki iznos otpora.

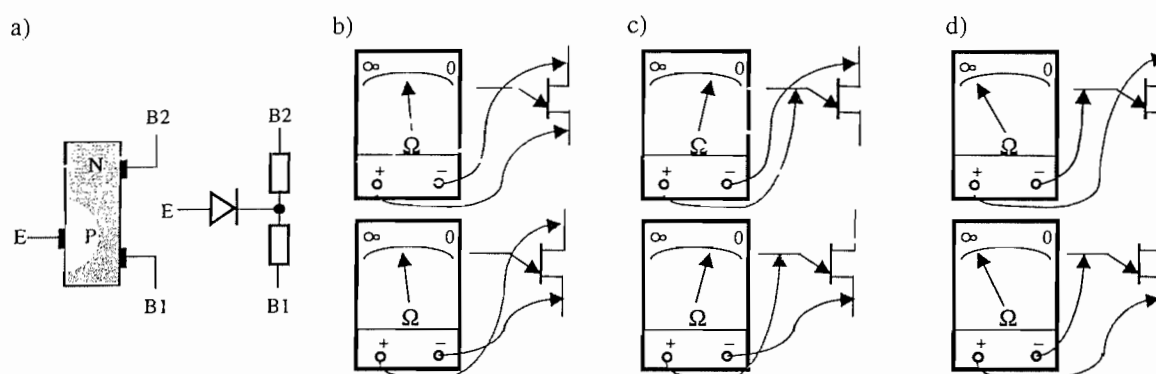


Slika F.9. Ispitivanje SCR-a ommetrom

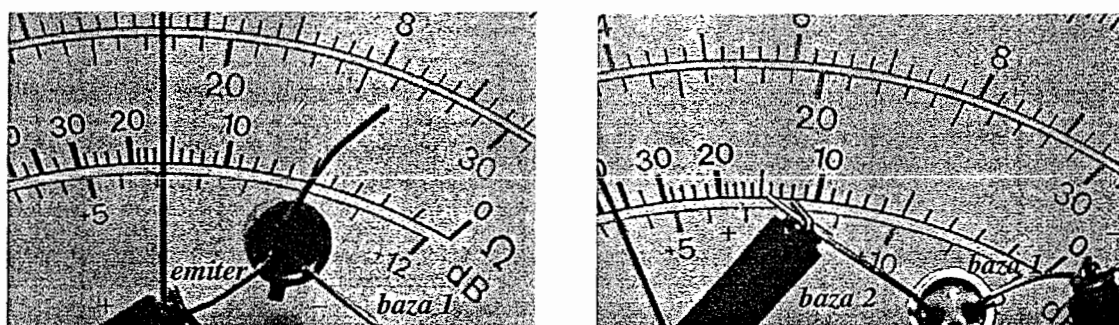
Za ispitivanje SCR-a ommetrom obično se upotrebljava područje $R \times 1$. Pri ispitivanju SCR-a većih snaga može se dogoditi da instrument ne daje dovoljnu struju za okidanje. Nasuprot tome, pri ispitivanju SCR-a manjih snaga moguće je prevelikom strujom okidanja uništiti element. To se može izbjeći uporabom višega omskog područja.

Ispitivanje ispravnosti jednospojnjoga tranzistora

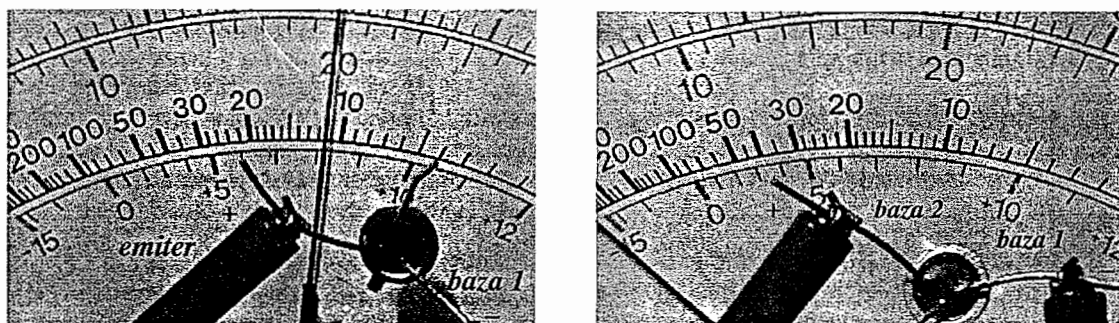
Mogućnost provjere ispravnosti jednospojnjoga tranzistora temelji se na prikazu tranzistora s pomoću dva otpora i diode (slika F.10.a). Otpor između baza mora biti isti bez obzira na polaritet priključnica ommetra (slika F.10.b). Otpor između emitera i pojedinih baza ovisi o polaritetu priključnica instrumenta. Uz pozitivni pol priključen na emiter, PN spoj diode je propusno polariziran i ommetar mora pokazati niski otpor, reda veličine nekoliko kilooma (slika F.10.c). Uz obrnuti polaritet priključnica ommetra, PN spoj diode nepropusno je polariziran i instrument pokazuje vrlo veliki otpor (slika F.10.d).



Slika F.10. Ispitivanje ispravnosti jednospojnjoga tranzistora



Slika F.11. Primjer ispitivanja ispravnoga jednospojnjog tranzistora analognim instrumentom (mjerno područje Rx100)



Slika F.12. Primjer ispitivanja neispravnoga jednospojnjog tranzistora analognim instrumentom (mjerno područje Rx100)

KAZALO

A

AD pretvornik 2, 197
- s dvojnim nagibom 198
- s postupnom aproksimacijom 199
- paralelni 200
AD-pretvorba 197
alfanumerički kod 131
aktivno područje 20
amplitudno-frekvencijska karakteristika 27
anoda 4, 102
ASCII 131
asinkroni ulazi 150
astabil 154
astabilni multivibrator 154

B

Barkhausenov uvjet 82
baza 18, 107
baza brojevnoga sustava 128
BCD/dekadni dekodner 183
BCD/7-segmentni dekodner 184
BCD kod 126
binarna znamenka 129
binarni brojevni sustav 128
binarni signali 128
bipolarni tranzistor 17
bipolarni tranzistor s izoliranim zasunom 49
bistabil 148
bistabilni multivibrator 148
Booleova algebra 132
brojilo 170
- binarno 170
- dekadno 172
- integrirano 173
- Johnsonovo 169
brojno mjesto 128

C

CMOS 49, 142
Colpittsov oscilator 83

Č

četveroslojna dioda 100

D

DA-pretvornik 2, 194
- s ljestvičastom otpornom mrežom 195
DA pretvorba 194
Darlingtonov spoj
D-bistabil 150

dekoder 181
demultipleksor 187
diferencijsko pojačalo 55
diferencijsko pojačanje 56
dijak 101
dijeljenje frekvencije 149, 170, 171
dinamički radni pravac 26
dinamički ulazi za okidanje 149
dinamički otpor 19, 20
- izlazni 21
- ulazni 19
dioda 3, 100
diodni ograničavač 8
DRAM 175
dvolinijsko kućište 137
dvosmjerni triodni tiristor 105
dvostrani ograničavač 9

E

emiter 18
emitorsko sljedilo 28
EEPROM 189
EPROM 189
EX-ILI 138

F

faktor dobrote 84
faktor istosmjernoga strujnoga pojačanja 19
faktor potiskivanja 57, 68
faktor stabilizacije 92
faktor izmjeničnoga strujnoga pojačanja 19
FET 38
filtriranje ispravljenoga napona 7
fotodetektor 114
fotodioda 115
fotoelement 118
fotoosjetljivost
- spektralna 114, 116
- kutna 116
fotootpornik 114
fototiristor 118
fototranzistor 116
fotovezni element 121

G

GAL 190
gladenje ispravljenog napona 7
Graetzov spoj 6
GTO tiristor 104

H

harmonički oscilatori 81
 Hartleyjev oscilator 84
 heksadecimalni brojevni sustav 129
 histereza 72, 151

I

IEC 132
 IGBT 49
 IGFET 37
 isklopivi tiristor 104
 isključivo ILI 138
 ispisne memorije 189
 - električki izbrisive 189
 - izbrisive 189
 - maskom programirane 189
 - tvornički programirane 189
 ispravljački sklopovi 6
 izlazna dinamička vodljivost 21
 izlazna karakteristika 20, 38
 izlazni dinamički otpor 21
 izolacijski napon 121

J

jednospojni tranzistor 107
 JFET 38
 JK-bistabil 149

K

kapacitivno opterećenje tranzistorske sklopke 34
 karakteristika negativnog otpora 100, 102
 katoda 4
 kod 130
 kolektor 18
 kombinacijski sklopovi 148
 kompaundni spoj 54
 korisnost 58
 kristal kvarca 85
 kutna osjetljivost 116
 kvazistabilno stanje 147, 152, 154

L

LASCR 118
 LC-oscilatori 83
 logička algebra 132
 logički simbol 132
 logički sklop I 133
 logički sklop ILI 134
 logički sklop NE 135
 logički sklop NI 135
 logički sklop NILI 136

M

memorije 173
 - ispisne 173, 189
 - dinamičke 175, 176

- s izravnim pristupom 175
 - statičke 175,
 - upisno-ispisne 173
 memorijska matrica 176
 memorijska riječ 174
 minimalna struja vođenja 102
 monostabil 152, 156
 monostabilni multivibrator 147, 152, 156
 MOSFET 37, 41
 mosni spoj ispravljača 6
 multivibratori 147
 multipleksor 186

N

NBCD-kod 131
 napon
 - napajanja 139
 - brujanja 7
 - dodira 38
 - koljena 5
 - praga 5
 - vrha 107
 - zaporne polarizacije 5
 naponsko pojačanje 23
 negacija 135
 negativna povratna veza 26
 n-kanalni tranzistor 38, 42

O

obogaćeni MOSFET 42
 odvod 38
 okidanje bistabila 149
 okidanje tiristora pri prolazu napona kroz nulu 104
 omsko područje 38
 opterećenje tranzistorske sklopke 33
 optoelektronički elementi 113
 oscilatori 81
 oscilator s kristalom kvarca 85
 osiromašeni MOSFET 42
 osjetljivost na statički naboj 43, 142
 otporno opterećenje tranzistorske sklopke 33
 otvoren kolektor 142

P

PAL 190
 paralelni diodni ograničavač 9
 parazitna kapacitivnost 27, 176
 Piercov oscilator 85
 p-kanalni tranzistor 38, 43
 PLA 190
 PLD 189
 područje dodira 38
 područje zapiranja 20
 područje zasićenja 20

pojačalo
 - klase A 58
 - klase AB 59
 - klase B 59
 - klase C 61
 - snage 58
 - u spoju zajedničke baze 23
 - u spoju zajedničkog emitera 23
 - u spoju zajedničkoga kolektora 23, 28
 - u spoju zajedničkog odvoda 46
 - u spoju zajedničkog uvoda 46
 - u spoju zajedničkog zasuna 46
 pojačanje snage 23
 pokazivač 183
 - sa svijetlećim diodama 183
 - 7-segmentni 183
 - s tekućim kristalom 183
 polualni ispravljač 6
 poluvodička dioda 3
 posmačni registri 169
 preostala struja kolektora 20
 pretvorba brojeva različitih brojevnih sustava 129
 prijelomni napon 100, 102
 prijenosna karakteristika 19, 39, 72
 probojni napon 5, 100
 programirljivo logičko polje 189
 PROM 189
 propusna polarizacija 4
 propusna struja 4
 protutaktno pojačalo 60
 punovalni ispravljač 6

R

RAM 175
 RC-oscilator 82
 registri 165, 166
 relaksacijski oscilatori 81
 relativna
 - spektralna emisija 120
 - spektralna osjetljivost 114, 116
 restaurator 9
 reverzna struja 4
 rezolucija 194
 ROM 188, 189

S

sabirница 144, 203
 Schmittov okidni sklop 151
 SCR 101
 sekvencijski slopovi 148
 selektor 186
 serijski diodni ograničavač 9
 serijski tranzistorski stabilizator 92, 93
 Shockleyeva dioda 100
 silicijska upravljiva ispravljačica 101
 simetriranje diferencijskoga pojačala 57
 sklop s otvorenim kolektorom 142

sklop s tri stanja 143
 sklopka s komplementarnima MOSFET-ima 49, 142
 sklopka s MOSFET-om
 slijeđni sklopovi 148
 sljedičilo napona 28, 68
 spoj zajedničke baze 23
 spoj zajedničkog emitera 23
 spoj zajedničkoga kolektora 23, 28
 spoj zajedničkog odvoda 46
 spoj zajedničkog uvoda 46
 spoj zajedničkoga zasuna 46
 spojni tranzistor s efektom polja 38
 SRAM 175
 SR-bistabil 149
 srednja vrijednost ispravljenog napona 6
 stabilizacija radne točke 25
 stabilizator napona sa Zenerovom diodom 11
 stabilizatori napona 92
 stabilno stanje 147
 stanje visoke impedancije 143
 statička radna točka 25
 statički radni pravac 25
 strmina 39
 struja držanja 100, 102
 strujno-naponska karakteristika 18, 100, 107
 strujno pojačanje 23
 sunčana ćelija 118
 svijetleća dioda 120
 svjetlosni izvori 113

T

tablica stanja 132
 tamna struja 220
 temperaturni koeficijent 137, 148
 težina brojnoga mjesta 128
 tiristori 191
 tranzistor 23, 53, 80
 tranzistor kao sklopka 80, 89
 tranzistor s efektom polja 54
 tranzistor s efektom polja i izoliranim zasunom 54, 56
 trijak 197
 triodni tiristor 193
 TTL 127, 139, 141

U

ulazni otpor 26
 ulazni dinamički otpor 19
 unipolarni tranzistori 37
 unipolarni tranzistori snage 40, 44
 unutarnji otpor 26
 upravljačka elektroda 38, 102
 utrošak snage 5, 21, 139
 uvod 38

V

valna dužina najveće osjetljivosti 116
valovitost 7
vertikalni FET 40
VFET 40
vertikalni MOS 44
VMOS 44
vremenski sklop 156
vrijeme kašnjenja 140

Z

zajedničko pojačanje 56
zaporna polarizacija 4
zasun 38
zaštita stabilizatora 93
Zenerova dioda 10
Zenerov napon 10

LITERATURA

- D. Baumann i drugi, *Fachkenntnisse Elektrotechnik - Energieelektronik, Energietechnik*, Handwerk und Technik, Hamburg, 1991.
- D. Bell, *Fundamentals of electronic devices*, Reston Publishing, Reston, 1975.
- Z. Benčić, Z. Plenković, *Energetska elektronika I.*, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- H. Bernstein, *PC-Elektronik Labor, Band 2*, Franzis Verlag, Feldkirchen, 1996.
- K. Beuth, *Elektronik 2, Bauelemente der Elektronik*, Vogel Verlag, Würzburg, 1975.
- K. Beuth, W. Schmusch, *Elektronik 3, Grundsaltungen der Elektronik*, Vogel Verlag, Würzburg, 1976.
- P. Biljanović, *Elektronički sklopovi*, Školska knjiga, Zagreb, 1993.
- G. Bishop, *Linear electronic circuits and systems*, Macmillan Press, London, 1974.
- K. Block, H. J. Hölzl, G. Weigt, P. Zachert, *Bauelemente der Elektronik und ihre Grundsaltungen*, Stam-Verlag, Köln, 1993.
- L. Borucki, *Digitaltechnik*, B. G. Teubner, Stuttgart 1989.
- T. Brodić, *Elektronički elementi i osnovni sklopovi*, Školska knjiga, Zagreb, 1995.
- L. Budin, *Mikroračunala i mikroupravljači*, Element, Zagreb, 1997.
- G. Buhle, E. Hofmeister, *Halbleiterelemente für die Elektronik*, Siemens, 1980.
- M. Cirovic, *Basic electronics*, Reston Publishing Company, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1974.
- M. Colwell, *Electronic components*, Butterworth and Co., London, 1976.
- G. Deboo, C. Burrous, *Integrated circuits and semiconductor devices, theory and application*, McGraw-Hill, New York, 1971.
- D. Fišer, M. Kuljiš, B. Mencl, *Elektronika*, Sastavni dijelovi, Tehnička enciklopedija, 4. svezak, Leksikografski zavod, Zagreb, 1973.
- W. Fletcher, *An Engineering Approach to Digital Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1980.
- T. Floyd, *Electronic Devices*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1996.
- J. Gies, *Digitalni integrirani sklopovi* (Tabellenbuch digitaler integrierter Schaltungen), Tehnička knjiga, Zagreb, 1992.
- J. Grilec, D. Zorc, *Osnove elektronike*, Školska knjiga, Zagreb, 1993.
- K. Haas, *Grundlagen der Elektronik*, Österreichischer Gewerbeverlag, Wien, 1991.
- K. Hamann, W. Lindemann, *Elektronik im Kraftfahrzeug*, Noltenmeyer Verlag, Frankfurter Fachverlag, 1987.
- T. Jelaković, *Tranzistorska audiopojačala*, Školska knjiga, Zagreb, 1973.

- T. Jelaković, *Uvod u elektrotehniku i elektroniku*, Školska knjiga, Zagreb, 1975.
- B. Juzbašić, *Elektronički elementi*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1970.
- E. Kühn, *Handbuch TTL- und CMOS-Schaltkreise*, Veb Verlag Technik, Berlin, 1988.
- C. Kuhnc, *AD/DA Praxis*, Franzis-Verlag, München, 1990.
- D. Leach, A.P. Malwino, *Digital Principles and Applications*, McGraw-Hill Book Company, 1986.
- J. Lenk, *Practical semiconductor data book for electronic engineers and technicians*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1970.
- M. Levine, *Digital Theory and Practice Using Integrated Circuits*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1978.
- O. Liman, *Elektronika na lak način*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1981.
- H. Meister, *Elektronik 1, Elektrotechnische Grundlagen der Elektronik*, Vogel Verlag, Würzburg, 1974.
- B. Mitchell, *Semiconductor pulse circuits and semiconductor devices, theory and applications*, McGraw-Hill, New York, 1970.
- L. Nashelsky, *Introduction to Digital Computer Technology*, J. Wiley&Sons, New York, 1977.
- S. Paunović, *Laboratorijske vježbe iz osnova elektrotehnike*, Tehnička škola Ruđera Boškovića, Zagreb, 1980.
- S. Paunović, *Elektronički sklopovi, Integrirani analogni sklopovi – Laboratorijske vježbe*, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- S. Paunović, *Digitalna elektronika 1, Zadaci za praktičan rad i uvježbavanje*, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- S. Paunović, *Digitalna elektronika 2, Zadaci za praktičan rad i uvježbavanje*, Školska knjiga, Zagreb, 1995.
- S. Paunović, *Digitalna elektronika 1*, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- S. Paunović, *Digitalna elektronika 2*, Školska knjiga, Zagreb, 1995.
- S. Paunović, Z. Šimunec, *Računalni elektronički laboratorij – Uporaba programa Electronics Workbench*, CadCam Design Centar, Zagreb, 1997.
- U. Peruško, *Digitalna elektronika*, Školska knjiga, Zagreb, 1991.
- J. Pettit, M. McWhorter, *Electronic switching, timing and pulse circuits*, McGraw-Hill, New York, 1970.
- L. Rotheiser, H. Pichler, *Optoelektronik*, Franzis Verlag, München, 1976.
- S. Ribarić, *Naprednije arhitekture mikroprocesora*, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- W. Schmidt, O. Feustel, *Optoelektronik*, Vogel Verlag, Würzburg, 1975.
- J. Sloop, *Today's Electronics*, E&L Instruments, New Haven, 1983.
- G. Smiljanić, *Računala i procesi*, Školska knjiga, Zagreb, 1991.
- H.G. Steidle, *Tranzistorske tablice*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1991.
- A. Szabo, *Impulsna i digitalna elektronika I.*, Tehnička škola Ruđera Bokovića, Zagreb, 1973.
- A. Szabo, *Impulsna i digitalna elektronika II.*, Tehnička škola Ruđera Bokovića, Zagreb, 1973.

- A. Szabo, *Industrijska elektronika*, Tehnička škola Ruđera Boškovića, Zagreb, 1975.
- A. Šarčević, *Elektroničke komponente i analogni sklopovi*, Tehnička škola Ruđera Boškovića, Zagreb, 1987.
- T. Šurina, *Tranzistorska tehnika*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1980.
- F. Tedeschi, M. Taber, *Solid-state electronics*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1976.
- R. Tocci, *Digital Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1988.
- T. Towers, *Practical solid state DC supplies*, W. Foulsham and Co., London, 1976.
- H. Willems, D. Blank, H. Mohn, *Nachrichtentechnik*, B.G. Teubner, Stuttgart, 1988.
- A. Židan, B. Milobar, *Spojevi s tranzistorima i drugim poluvodičkim elementima*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1981.
- Electronics Workbench, Users Guide*, Interactiv Image Technologies, Toronto, 1995.
- Handbuch der Elektronik, Analogtechnik*, Medien-Institut, Bremen, 1991.
- Handbuch der Elektronik, Digitaltechnik*, Medien-Institut, Bremen, 1988.

Katalozi, tvornički podaci, publikacije i CD-ovi proizvođača elektroničkih komponenta

- AVNET Katalog CD*, (CD), **AVNET EMG**, Braunschweig, 1998. (dobrotom tvrtke Piletić, Zagreb)
- Bauelemente, Technische Erleuterungen und Kenndaten für Studierende*, **Siemens**, München, 1977.
- Data Acquisition Circuits Data Book*, **Texas Instruments**, Dallas, 1997
- Dallas Semiconductor Data Book*, **Dallas Semiconductor**, Dallas, 1993. (dobrotom tvrtke CadCam Design Centar, Zagreb)
- Data Book Precision Analog Integrated Circuits*, **PMI** (Precision Monolithics Inc.), Santa Clara, 1990. (dobrotom tvrtke SEMPEC)
- Diotec Selection Guide*, **Diotec Elektrische Bauelemente**, Heitersheim
- Diskrete Halbleiter*, **Siemens**, München, 1980.
- Electronic Catalog 2000, Automation and Power Distribution*, (CD), **Moeller**, Bonn, 2000. (dobrotom tvrtke Unikomerc, Zagreb)
- Electronic components catalogue*, **Farnell**, Leeds, 1997. (dobrotom tvrtke ALTPRO, Zagreb)
- Electronic components*, **Iskra**, Ljubljana, 1981.
- FACT Data*, **Motorola Semiconductors**, Cambridge, 1988. (dobrotom tvrtke SEMPEC)
- FAST and LS TTL Data*, **Motorola INC.**, Phoenix, 1989. (dobrotom tvrtke ELBATEX)
- Ferranti Halbleiter Handbuch*, **Ferranti**, München, 1986.
- Halbleiter Semiconductor*, (CD), **Diotec Elektrische Bauelemente**, Heitersheim, 1998. (dobrotom tvrtke Diopin, Trbovlje)
- High Speed AD and DA Converters Data Sheets*, **Hitachi**, 1989. (dobrotom tvrtke MIBATRON)

- High-Speed CMOS Logic Data*, **Motorola Inc.**, Phoenix, 1989.
- Hitachi Advanced CMOS Logic HD74AC Series Data Book*, **Hitachi**, 1989. (dobrotom tvrtke MIBATRON)
- Hitachi IC Memory Data Book*, **Hitachi**, 1990. (dobrotom tvrtke MIBATRON)
- Hitachi Optodevice Data Book*, **Hitachi**, 1989.
- International Rectifier, Hexfet-Power, MOSFET, IGBTs*, **I.O.R.**, 1989.
- International Rectifier, Product Digest*, **I.O.R.**, 1988.
- Iractive, the complete power conversion design tool*, (CD), **International Rectifier**, 1998.
- Linera Integrated Circuits*, **Harris Semiconductor**, Melbourne, USA, 1996. (dobrotom tvrtke Piletić)
- Motorola Semiconductor Master Selection Guide*, **Motorola**, Phoenix, 1988.
- Microcomputer Components*, 8-bit CMOS Microcontroller C515A, **Siemens**, 1997.
- Optoelectronics Designers Catalog*, **Hewlett Packard**, Palo Alto, 1982.
- Opto-Halbleiter, Datenbuch*, **Siemens**, München, 1981.
- Poluprovodniki*, **Iskra**, Ljubljana, 1985.
- Power MOSFETs and IGBTs*, **SGS-Thomson** Microelectronics, 1993
- Preferred Type Range Catalogue 1990*, Philips, Brussels, 1990.
- Preferred Type Catalogue*, **Philips**, Brussels, 1990.
- RS Components*, (CD), **RS Components**, Gmünd, 1997.
- Schuricht Elektronik*, **D. Schuricht GmbH&Co**, Graz, 1999. (dobrotom tvrtke Terna, Ljubljana)
- Semiconductora Data CD-ROM*, (CD), **Farnell**, Leeds, 1998. (dobrotom tvrtke ALTPRO, Zagreb)
- Semiconductor Devices for Telecommunications, Data Book*, **Hitachi**, 1989.
- Semikron Inovation+Service, IGHT*, **Semikron International**, Nürnberg, 1995.
- SGS-Ates Componenti Electronici*, **SGS**, 1981.
- Shortform*, **SGS-Thomson**, 1988.
- Siemens Components Service, Preferred Products 1986.*, **Siemens**, München, 1986.
- SI- Fotodetektoren*, **Siemens**, München, 1985.
- SIPMOS Kleinsignaltransistoren*, **Siemens**, München, 1986.
- SIPMOS Leistungstransistoren*, **Siemens**, München, 1985.
- Surface Mount Products, Selector Guide*, **Motorola**, 1990.
- 1998 Data Converter Handbook*, **Lienar Technology**, Milpitas. USA. 1998.