



2023

17. Tranzistori

R2: SCRAPY Vodič

Broj projekta: **2021-1-FR01-KA220-SCH-000031617**



 Co-funded by
the European Union

Podrška Europske komisije za izradu ove publikacije ne znači odobravanje sadržaja, koji odražava samo stavove autora, a Komisija se ne može smatrati odgovornom za bilo kakvu upotrebu informacija sadržanih u njoj.

ECAM EPMI
30/04/2023

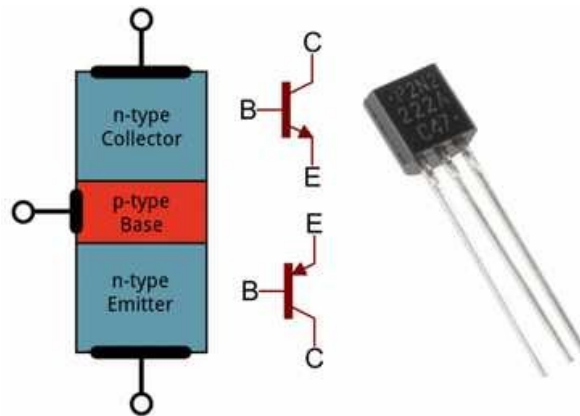
Sadržaj

1 Uvod.....	2
2 Simboli, igle i konstrukcija	3
2.1 Konstrukcija tranzistora.....	3
2.2 Tranzistor kao dvije diode	4
2.3 Struktura i rad tranzistora.....	4
2.4 Proširenje analogije vode.....	5
2.5 Snaga pojačanja	7
3 Načina rada.....	7
3.1 Način zasićenja.....	8
3.2 Način prekida.....	9
3.3 Aktivni način rada	10
3.4 Pojačavanje u aktivnom načinu rada.....	10
3.5 "Reverse Active"	11
4 Vezano uz PNP	11
5 Primjene I: Prekidači	12
5.1 Tranzistorski prekidač	12
6 Otpornik baze s!	14
7 Digitalna logika	14
8 Oscilatori	17
9 Primjene II: Pojačala	18
10 uobičajenih konfiguracija	19
10.1 Zajednički emiter.....	19
10.2 Zajednički kolektor (emitorski sljedbenik).....	19
10.3 Zajednička baza.....	20
10.4 Ukratko	21
11 Višestupanjska pojačala	21
11.1 Diferencijalno pojačalo.....	22
11.2 Push-Pull pojačalo	22
11.3 Njihovo spajanje (operacijsko pojačalo)	23

1 Uvod

Tranzistori vrte svijet naše elektronike. Oni su kritični kao izvor kontrole u svakom modernom krugu. Ponekad ih vidite, ali češće su skriveni duboko unutar matrice integriranog kruga. U ovoj lekciji ćemo vas upoznati s osnovama najčešćeg tranzistora oko spoja s tranzistorom bipolarnog poremećaja (BJT).

U malim, diskretnim količinama, tranzistori se mogu koristiti za stvaranje jednostavnih elektroničkih sklopki, digitalne logike i krugova za pojačavanje signala. U količinama od tisuća, milijuna, pa čak i milijardi, tranzistori su međusobno povezani i ugrađeni u sićušne čipove za stvaranje računalnih memorija, mikroprocesora i drugih složenih IC-ova.



Tranzistori

Obuhvaćeno ovom lekcijom:

Nakon čitanja ove lekcije, želimo da steknete široko razumijevanje o tome kako tranzistori rade. Nećemo previše kopati u fiziku poluvodiča ili ekvivalentne modele, ali ćemo ući dovoljno duboko u temu da ćete shvatiti kako se tranzistor može koristiti kao prekidač ili pojačalo.

Ova lekcija je podijeljena u niz odjeljaka koji pokrivaju:

- **Simboli, pinovi i konstrukcija** -- Objašnjava razlika između tri pina tranzistora.
- **Proširenje analogije vode** -- Vraćamo se na analogiju vode da objasnimo kako se tranzistor ponaša kao ventil.
- Načini rada -- Pregled četiri moguća načina rada tranzistora.
- **Primjene I: sklopke** -- Aplikacijski sklopovi koji pokazuju kako se tranzistori koriste kao elektronički upravljane sklopke.
- **Primjene II: Pojačala** -- Više aplikacijskih sklopova, ovaj put pokazujući kako se tranzistori koriste za pojačavanje napona ili struje.

Postoje dvije vrste osnovnih tranzistora: bipolarni spoj (BJT) i metalni oksid s efektom polja (MOSFET). U ovoj ćemo se lekciji usredotočiti na BJT jer ga je malo lakše razumjeti. Kopajući još dublje u vrste tranzistora, postoje dvije verzije BJT: NPN i PNP. Još ćemo izoštriti naš fokus ograničavanjem naše rane rasprave na NPN. Sužavanjem našeg fokusa -- stjecanjem dobrog razumijevanja NPN -- bit će lakše razumjeti PNP (ili MOSFET, čak) uspoređujući kako se razlikuje od NPN-a.

Prije nego što uđete u ovu lekciju, preporučujemo da pregledate:

- **Napon, struja, otpor i Ohmov zakon** -- Uvod u osnove elektronike.
- **Osnove elektriciteta** -- Razgovarat ćemo malo o elektricitetu kao protoku elektrona. Saznajte kako ti elektroni teku u ovom vodiču.
- **Električna energija** -- Jedna od glavnih primjena tranzistora je pojačanje -- povećanje snage signala. Povećanje snage znači da možemo povećati ili struju ili napon, saznajte zašto u ovom vodiču.
- **Diode** -- tranzistor je poluvodički uređaj, baš kao i dioda. Na neki način, to je ono što biste dobili kada biste složili dvije diode zajedno i spojili njihove anode. Razumijevanje načina na koji dioda radi uvelike će pomoći u otkrivanju rada tranzistora.

2 Simboli, ige i konstrukcija

Tranzistori su u osnovi uređaji s tri priključka. Na spoju s tranzistorom bipolarnog poremećaja (BJT), te su ige označene **kolektorom** (C), **bazom** (B) i **emiterom** (E). Simboli krugova za NPN i PNP BJT su ispod:



Simboli krugova za NPN i PNP tranzistore

Jedina razlika između NPN i PNP je smjer strelice na emiteru. Strelica na NPN pokazuje prema van, a na PNP pokazuje unutra. Korisna mnemonika za pamćenje je:

NPN: Ne pokazuje uN(utra)

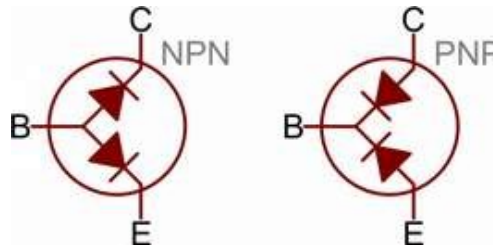
Nazadna logika, ali radi!

2.1 Konstrukcija tranzistora

Tranzistori se oslanjaju na poluvodiče da rade svoju magiju. Poluvodič je materijal koji nije čisti vodič (poput bakrene žice), ali također nije ni izolator (poput zraka). Vodljivost poluvodiča -- koliko lako dopušta protok elektrona -- ovisi o varijablama poput temperature ili prisutnosti više ili manje elektrona. Pogledajmo nakratko ispod haube tranzistora. Ne brinite, nećemo preduboko kopati po kvantnoj fizici.

2.2 Tranzistor kao dvije diode

Tranzistori su poput produžetka druge poluvodičke komponente: diode. Na neki način tranzistori su samo dvije diode sa svojim katodama (ili anodama) povezanim zajedno:



Tranzistor kao dvije diode

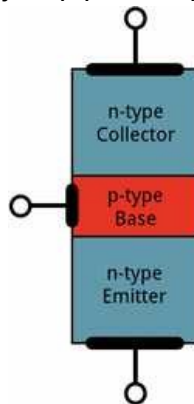
Ovdje je važna dioda koja povezuje bazu emitera; odgovara smjeru strelice na shematskom simbolu i pokazuje u kojem smjeru struja namjerava teći kroz tranzistor.

Predstavljanje dioda je dobro mjesto za početak, ali je daleko od točnog. Ne temeljite svoje razumijevanje rada tranzistora na tom modelu (i ne pokušavajte ga replicirati na matičnoj ploči, neće raditi). Postoji puno čudnih stvari na razini kvantne fizike koje kontroliraju interakcije između tri terminala.

(Ovaj je model koristan ako trebate ispitati tranzistor. Koristeći funkciju ispitivanja dioda (ili otpora) na multimetru, možete mjeriti preko BE i BC terminala kako biste provjerili prisutnost tih "dioda".)

2.3 Struktura i rad tranzistora

Tranzistori se izrađuju slaganjem tri različita sloja poluvodičkog materijala. Nekim od tih slojeva dodani su dodatni elektroni (proces koji se naziva "dopiranje"), a drugima su elektroni uklonjeni (dopirani "rupama" -- odsutnost elektrona). Poluvodički materijal s dodatnim elektronima naziva se **n-tip** (n za negativan jer elektroni imaju negativan naboj), a materijal s uklonjenim elektronima naziva se **p-tip** (za pozitivan). Tranzistori se stvaraju slaganjem n na vrh ap na n ili slaganjem p preko n preko p.



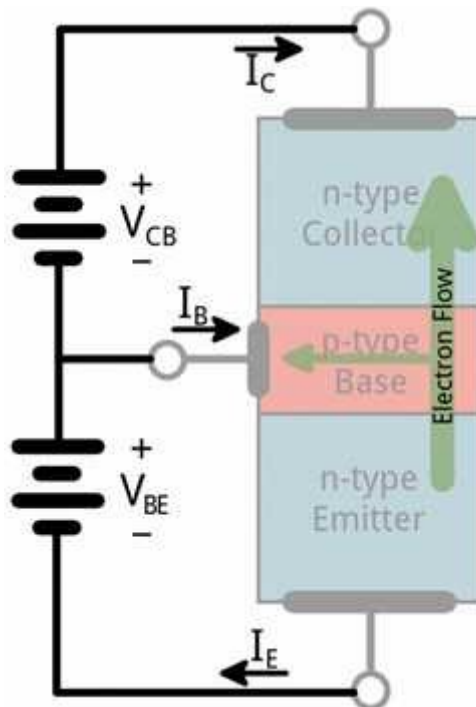
Pojednostavljeni dijagram strukture NPN-a.

Uz malo mahanja rukom, možemo reći da elektroni mogu lako teći iz n gornjih regija, sve dok imaju malu silu (napon) da ih gurnu. Ali protok iz ap regije u n regiju je teško (zahtijeva puno napona). Ali posebna stvar kod tranzistora -- dio koji čini naš model s dvije diode zastarjelim -- jest činjenica da **elektroni mogu lako teći iz baze p-tipa u kolektor n-tipa sve dok je spoj baza-emiter usmjeren prema naprijed** (što znači da je baza na višem naponu od emitera).

NPN tranzistor je dizajniran za prijenos elektrona od emitera do kolektora (tako da konvencionalna struja teče od kolektora do emitera). Emiter "emitira" elektrone u bazu, koja kontrolira broj elektrona koje emiter emitira. Većinu emitiranih elektrona "prikupi" kolektor, koji ih šalje u sljedeći dio kruga.

PNP radi na isti ali suprotan način. Baza i dalje kontrolira protok struje, ali ta struja teče u suprotnom smjeru -- od emitera do kolektora. Umjesto elektrona, emiter emitira "rupe" (konceptualni nedostatak elektrona) koje skuplja kolektor.

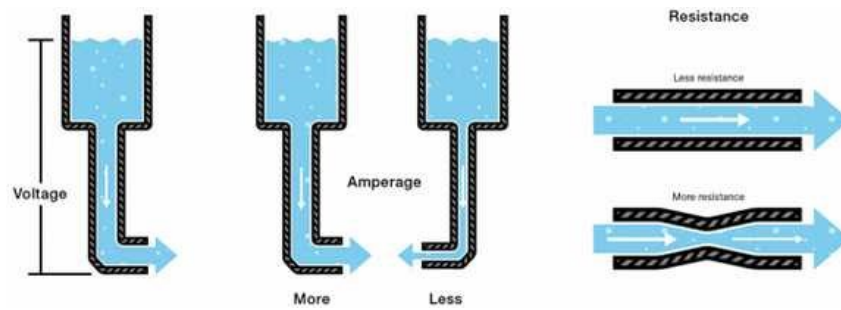
Tranzistor je poput **elektronskog ventila** . Osnovna igla je poput ručke koju možete prilagoditi da omogućite protok više ili manje elektrona od emitera do kolektora. Istražimo dalje ovu analogiju...



Struktura NPN-a

2.4 Proširenje analogije vode

Ako ste u posljednje vrijeme čitali puno lekcija o konceptu električne energije, navikli ste na analogije s vodom. Kažemo da je struja analogna protoku vode, napon je pritisak koji tu vodu gura kroz cijev, a otpor je širina cijevi.



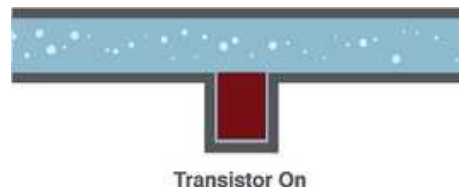
Proširenje analogije vode

Ne iznenađuje da se analogija s vodom može proširiti i na tranzistore: tranzistor je poput vodenog **ventila** - mehanizam koji možemo koristiti za **kontrolu brzine protoka** .

Postoje tri stanja u kojima možemo koristiti ventil, a svako od njih ima drugačiji učinak na brzinu protoka u sustavu.

1) Uključeno -- Kratki spoj

Ventil se može potpuno otvoriti, dopuštajući vodi da **slobodno teče** -- prolazeći kroz njega kao da ventila uopće nema.

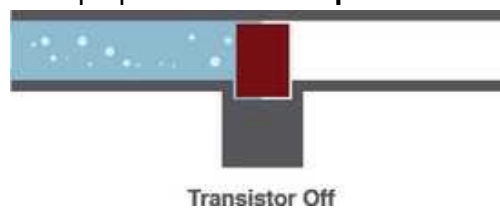


Tranzistor uključen -- Kratki spoj

Isto tako, pod pravim okolnostima, tranzistor može izgledati kao **kratki spoj** između pinova kolektora i emitera. Struja slobodno teče kroz kolektor i izlazi iz emitera.

2) Isključeno -- Otvoreni krug

Kada je zatvoren, ventil može potpuno **zaustaviti protok** vode.

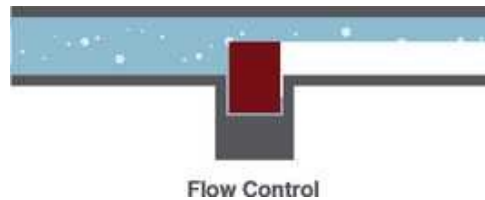


Tranzistor isključen -- Otvoreni krug

Na isti način, tranzistor se može koristiti za stvaranje **otvorenog kruga** između pinova kolektora i emitera.

3) Linearna kontrola protoka

Uz malo preciznog podešavanja, ventil se može podesiti za finu **kontrolu protoka** do neke točke između potpuno otvorenog i zatvorenog.



Linearna kontrola protoka tranzistora

Tranzistor može učiniti istu stvar -- **linearno kontrolirati struju** kroz krug u nekoj točki između potpuno isključenog (otvorenog strujnog kruga) i potpunog uključivanja (kratki spoj).

Iz naše analogije s vodom, širina cijevi slična je otporu u krugu. Ako ventil može fino prilagoditi širinu cijevi, onda tranzistor može fino prilagoditi otpor između kolektora i emitera. Dakle, na neki način, tranzistor je poput **promjenjivog, podesivog otpornika**.

2.5 Snaga pojačanja

Postoji još jedna analogija koju možemo uvući u ovo. Zamislite da, laganim okretanjem ventila, možete kontrolirati brzinu protoka na zapornicama Hooverove brane. Neznatna količina sile koju biste mogli uložiti u okretanje tog gumba ima potencijal stvoriti silu tisućama puta veću. Proširujemo analogiju do njezinih granica, ali ova se ideja prenosi i na tranzistore. Tranzistori su posebni jer mogu **pojačati** električne signale, pretvarajući signal male snage u sličan signal mnogo veće snage.

Otprilike. Ima još puno toga, ali to je dobro mjesto za početak! Pogledajte sljedeći odjeljak za detaljnije objašnjenje rada tranzistora.

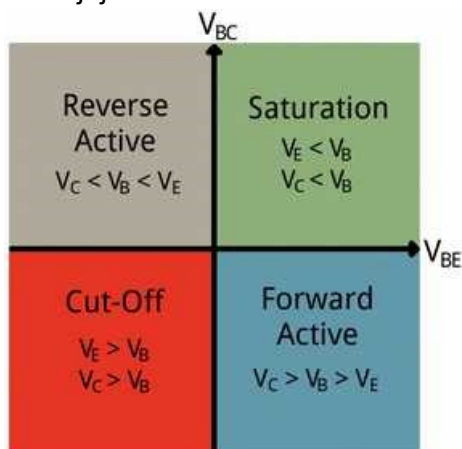
3 Načina rada

Za razliku od otpornika, koji nameću linearni odnos između napona i struje, tranzistori su nelinearni uređaji. Imaju četiri različita načina rada, koji opisuju struju koja kroz njih teče. (Kada govorimo o protoku struje kroz tranzistor, obično mislimo na **struju koja teče od kolektora do emitera NPN-a**.)

Četiri načina rada tranzistora su:

- **Zasićenje** -- Tranzistor djeluje kao **kratki spoj**. Struja slobodno teče od kolektora do emitera.
- **Isključivanje** -- Tranzistor se ponaša kao **otvoreni krug**. Ne teče struja od kolektora do emitera.
- **Aktivno** -- struja od kolektora do emitera **proporcionalna je** struji koja teče u bazu.
- **Obrnuto aktivno** -- Kao i aktivni način, struja je proporcionalna osnovnoj struji, ali teče obrnuto. Struja teče od emitera do kolektora (to nije točno svrha za koju su tranzistori dizajnirani).

Da bismo odredili u kojem je načinu rada tranzistor, moramo pogledati napone na svakom od tri pina i kako su međusobno povezani. Naponi od baze do emitera (V_{BE}), a zatim od baze do kolektora (V_{BC}) postavljaju način rada tranzistora:



Način rada tranzistora

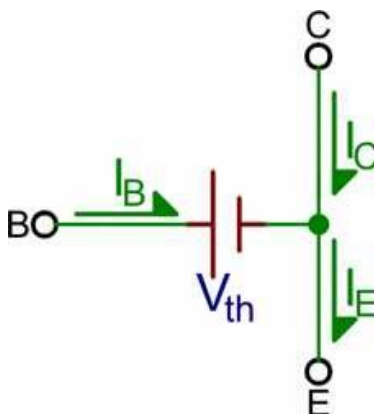
Gornji pojednostavljeni grafikon kvadranta pokazuje kako pozitivni i negativni naponi na tim terminalima utječu na način rada. U stvarnosti je malo kompliciranije od toga.

Pogledajmo pojedinačno sva četiri moda tranzistora; istražiti ćemo kako staviti uređaj u taj način rada i kakav učinak ima na protok struje.

Napomena: Većina ove stranice fokusirana je na **NPN tranzistore**. Da biste razumjeli kako radi PNP tranzistor, jednostavno promijenite polaritet ili znakove $>$ i $<$.

3.1 Način zasićenja

Zasićenje je **jedan mod** tranzistora. Tranzistor u režimu zasićenja djeluje kao kratki spoj između kolektora i emitera.



Način zasićenja

U načinu zasićenja obje "diode" u tranzistoru su usmjerene prema naprijed. To znači da V_{BE} mora biti veće od 0, pa tako i V_{BC} . Drugim riječima, V_B mora biti veći i od V_E i od V_C .

$$V_B > V_C$$

$$V_B > V_E$$

Budući da spoj od baze do emitera izgleda kao dioda, u stvarnosti, V_{BE} mora biti veći od **napona praga** da bi ušao u zasićenje. Postoje mnoge kratice za ovaj pad napona -- V_{th} , V_{γ} i V_d su neke -- a stvarna vrijednost varira između tranzistora (pa čak i dalje ovisno o temperaturi). Za mnoge tranzistore (na sobnoj temperaturi) možemo procijeniti da je ovaj pad oko 0,6 V.

Još jedna loša stvarnost: neće biti savršene vodljivosti između emitera i kolektora. Između tih čvorova stvorit će se mali pad napona. Podatkovne tablice tranzistora definirat će ovaj napon kao **CE napon zasićenja V_{CE} (sat)** -- napon od kolektora do emitera potreban za zasićenje. Ova vrijednost je obično oko 0,05-0,2 V. Ova vrijednost znači da V_C mora biti malo veći od V_E (ali obje još uvijek manje od V_B) da bi se tranzistor doveo u način zasićenja.

3.2 Način prekida

Cutoff mod je suprotan zasićenju. Tranzistor u režimu prekida je isključen -- nema struje kolektora, a samim tim ni struje emitera. Gotovo izgleda kao otvoreni krug.



Režim rada

Da bi se tranzistor prebacio u način rada prekida, napon baze mora biti manji od napona emitera i kolektora. V_{pr} i V_{BE} oba moraju biti negativna.

$$V_C > V_B$$

$$V_E > V_B$$

U stvarnosti, V_{BE} može biti bilo gdje između 0V i V_{th} (~0,6 V) kako bi se postigao način isključivanja.

3.3 Aktivni način rada

Da bi radio u aktivnom načinu rada, V_{BE} tranzistora mora biti veći od nule, a njegov V_{BC} mora biti negativan. Dakle, napon baze mora biti manji od kolektora, ali veći od emitera. To također znači da kolektor mora biti veći od emitera.

$$V_C > V_B > V_E$$

pad napona različit od nule (skraćeno ili V_{th} , V_y ili V_d) od baze do emitera (V_{BE}) da "uključimo" tranzistor. Obično je ovaj napon oko 0,6 V.

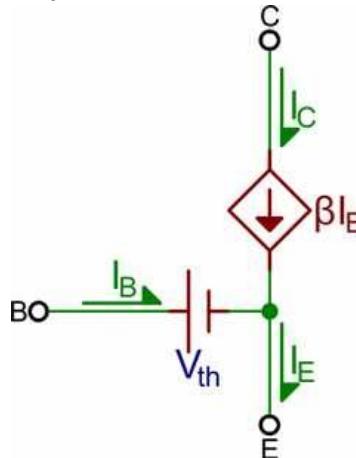
3.4 Pojačavanje u aktivnom načinu rada

Aktivni način rada je najsnažniji način rada tranzistora jer uređaj pretvara u pojačalo. Struja koja ulazi u bazni pin **pojačava** struju koja ulazi u kolektor i izlazi iz emitera.

Naša skraćena oznaka za **pojačanje** (faktor pojačanja) tranzistora je β (možete ga vidjeti i kao β_F ili h_{FE}). β linearno povezuje struju kolektora (I_C) sa strujom baze (I_B):

$$I_C = \beta I_B$$

Stvarna vrijednost β varira ovisno o tranzistoru. Obično je oko 100, ali može biti u rasponu od 50 do 200...čak i 2000, ovisno o tome koji tranzistor koristite i koliko struje prolazi kroz njega. Da je vaš tranzistor imao β od 100, na primjer, to bi značilo da bi ulazna struja od 1 mA u bazu mogla proizvesti struju od 100 mA kroz kolektor.



Model aktivnog načina rada. $V_{BE} = V_{th}$, i $I_C = \beta I_B$.

Što je sa strujom emitera, I_E ? U aktivnom načinu rada struja kolektora i baze ulazi u uređaj, a I_E izlazi. Da bismo povezali struju emitera sa strujom kolektora, imamo još jednu konstantnu vrijednost: α . α je strujni dobitak zajedničke baze, povezuje te struje kao takve:

$$I_C = \alpha I_E$$

α je obično vrlo blizu, ali manje od 1. To znači da je I_C vrlo blizu, ali manje od I_E u aktivnom načinu rada.

Možete koristiti β za izračunavanje α ili obrnuto:

$$\beta = \frac{\alpha}{(1-\alpha)}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$$

Ako je β 100, na primjer, to znači da je α 0,99. Dakle, ako je I_C 100 mA, na primjer, onda je I_E 101 mA.

3.5 “Reverse Active”

Kao što je zasićenje suprotno od prekida, obrnuti aktivni način je suprotan aktivnom načinu. Tranzistor u reverznom aktivnom načinu rada provodi, čak i pojačava, ali struja teče u suprotnom smjeru, od emitera prema kolektoru. Loša strana obrnutog aktivnog načina je što je β (β_R u ovom slučaju) mnogo manji.

Da bi se tranzistor stavio u obrnuti aktivni način rada, napon emitera mora biti veći od napona baze, koja mora biti veća od napona kolektora ($V_{BE} < 0$ i $V_{BC} > 0$).

$$V_C < V_B < V_E$$

Obrnuti aktivni način rada obično nije stanje u kojem želite pokretati tranzistor. Dobro je znati da postoji, ali rijetko je dizajniran kao aplikacija.

4 Vezano uz PNP

Nakon svega o čemu smo pričali na ovoj stranici, još uvijek smo pokrili samo polovicu BJT spektra. Što je s PNP tranzistorima? PNP-ovi rade dosta poput NPN-ova -- imaju ista četiri načina -- ali sve je okrenuto. Da biste saznali u kojem je modu PNP tranzistor, obrnite sve znakove $<$ i $>$.

Na primjer, da biste PNP stavili u zasićenje, V_C i V_E moraju biti viši od V_B . Povucite bazu nisko da biste uključili PNP i učinite je višom od kolektora i emitera da biste ga isključili. I, da bi se PNP stavio u aktivni način rada, V_E mora biti na višem naponu od V_B , koji mora biti viši od V_C .

U sažetku:

Odnosi napona	NPN način rada	PNP način rada
$VE < VB < VC$	Aktivan	Obrnut
$VE < VB > VC$	Zasićen	Prekinut
$VE > VB < VC$	Prekinut	Zasićen
$VE > VB > VC$	Obrnut	Aktivan

Druga suprotna karakteristika NPN i PNP je smjer toka struje. U aktivnom i zasićenom načinu rada, **struja u PNP teče od emitera do kolektora**. To znači da emiter mora biti na višem naponu od kolektora.

Ako ste izgorjeli na konceptualnim stvarima, prijedite na sljedeći odjeljak. Najbolji način da naučite kako tranzistor radi je da ga ispitajte u stvarnim krugovima. Pogledajmo neke aplikacije!

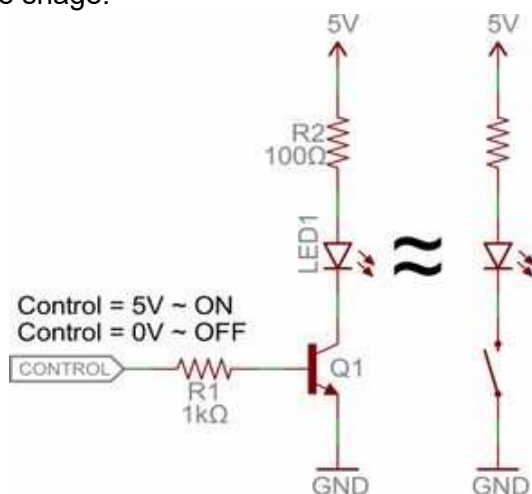
5 Primjene I: Prekidači

Jedna od najosnovnijih primjena tranzistora je njegova uporaba za kontrolu protoka energije u drugi dio strujnog kruga -- korištenje kao električne sklopke. Pokrećući ga u načinu rada prekida ili zasićenja, tranzistor može stvoriti binarni učinak uključivanja/isključivanja prekidača.

Tranzistorski prekidači su kritični blokovi za izgradnju krugova; koriste se za izradu logičkih vrata, koja dalje stvaraju mikrokontrolere, mikroprocesore i druge integrirane sklopove. Ispod je nekoliko primjera sklopova.

5.1 Tranzistorski prekidač

Pogledajmo najosnovniji krug tranzistorske sklopke: NPN sklopku. Ovdje koristimo NPN za kontrolu LED-a velike snage:



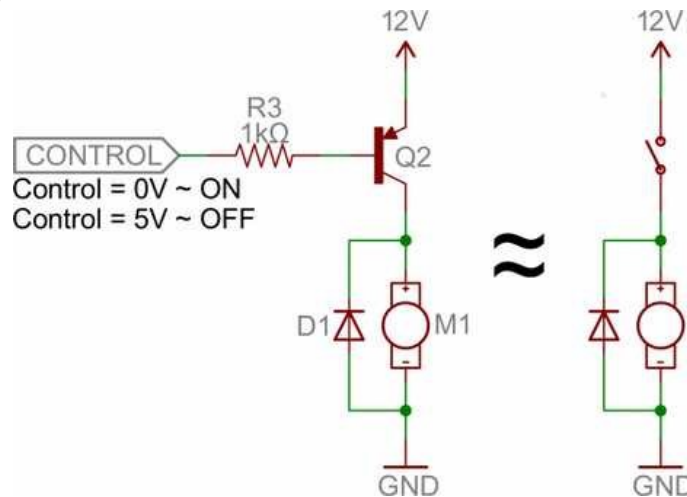
NPN prekidač

Naš upravljački ulaz teče u bazu, izlaz je vezan na kolektor, a emiter se održava na fiksnom naponu.

Dok bi normalni prekidač zahtijevao da se aktuator fizički okrene, ovim prekidačem upravlja napon na osnovnoj igli.

I/O pin mikrokontrolera, poput onih na Arduino, može se programirati da ide visoko ili nisko kako bi uključio ili isključio LED.

Kada je napon na bazi veći od 0,6 V (ili koliko god V_{th} vašeg tranzistora mogao biti), tranzistor se počinje zasićivati i izgleda kao kratki spoj između kolektora i emitera. Kada je napon na bazi manji od 0,6 V, tranzistor je u režimu prekida -- struja ne teče jer izgleda kao otvoreni krug između C i E.



Prekidač za nisku stranu

Gornji sklop naziva se sklopka na niskoj strani jer je sklopka -- naš tranzistor -- na strani na niskoj (zemlji) strujnog kruga. Alternativno, možemo koristiti PNP tranzistor za stvaranje sklopke visoke strane

Slično NPN krugu, baza je naš ulaz, a emiter je vezan na konstantni napon. Ovaj put, međutim, emiter je vezan visoko, a opterećenje je spojeno na tranzistor na strani uzemljenja.

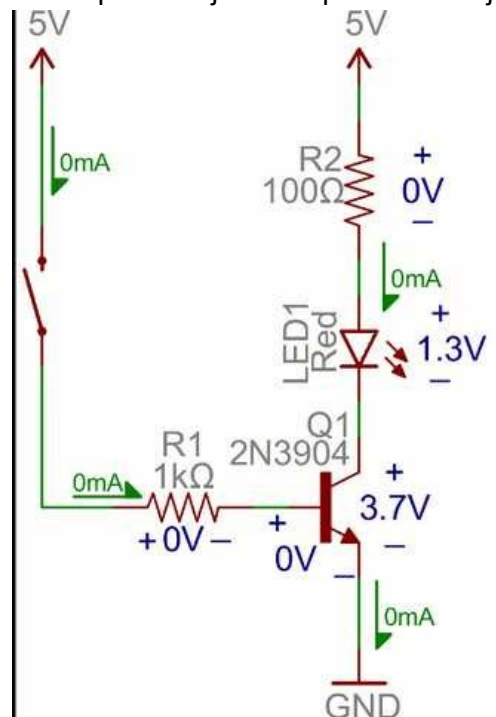
Ovaj sklop radi jednako dobro kao i sklopka temeljena na NPN-u, ali postoji jedna velika razlika: da biste "uključili" opterećenje, baza mora biti niska. To može uzrokovati komplikacije, osobito ako je visoki napon opterećenja (V_{CC} je 12 V koji se spaja na emiter VE na ovoj slici) viši od visokog napona našeg kontrolnog ulaza. Na primjer, ovaj sklop ne bi radio ako pokušavate koristiti Arduino koji radi od 5 V da biste isključili motor od 12 V. U tom slučaju, bilo bi **nemoguće isključiti prekidač** jer bi V_B (spajanje na kontrolni pin) uvijek bio manji od V_E .

6 Otpornik baze s!

Primijetit ćete da svaki od tih krugova koristi serijski otpornik između kontrolnog ulaza i baze tranzistora. Ne zaboravite dodati ovaj otpornik! Tranzistor bez otpornika na bazi je poput LED-a bez otpornika koji ograničava struju.

Podsjetimo se da je, na neki način, tranzistor samo par međusobno povezanih dioda. Pokrećemo diodu baznog emitera prema naprijed da uključimo opterećenje. Dioda treba samo 0,6 V da se uključi, veći napon od toga znači veću struju. Neki tranzistori mogu biti ocijenjeni samo za maksimalnu struju od 10-100 mA koja prolazi kroz njih. Ako napajate struju veću od maksimalne, tranzistor bi mogao eksplodirati.

Serijski otpornik između našeg kontrolnog izvora i baze **ograničava struju u bazu**. Čvor baza-emiter može dobiti sretan pad napona od 0,6 V, a otpornik može spustiti preostali napon. Vrijednost otpornika i napon na njemu će postaviti struju.



Otpornik baze

Otpornik mora biti dovoljno velik da učinkovito ograniči struju, ali dovoljno mali da napaja bazu dovoljnom strujom. 1 mA do 10 mA obično će biti dovoljno, ali provjerite podatkovnu tablicu vašeg tranzistora kako biste bili sigurni.

7 Digitalna logika

Tranzistori se mogu kombinirati kako bi stvorili sva naša temeljna logička vrata: AND, OR, NOT.

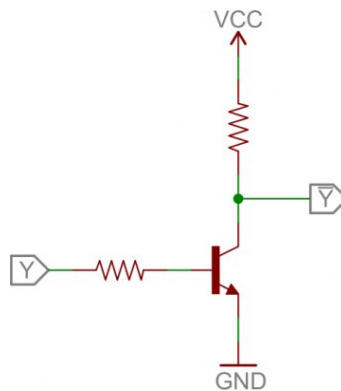
(Napomena: Danas se MOSFET-ovi češće koriste za izradu logičkih vrata nego BJT-ovi. MOSFET-ovi su energetski učinkovitiji, što ih čini boljim izborom.)

Inverter

Evo tranzistorskog kruga koji implementira **pretvarač** ili NOT vrata:

Ovdje će visoki napon u bazu uključiti tranzistor, koji će učinkovito povezati kolektor s emiterom. Budući da je emiter spojen izravno na masu, kolektor će također biti (iako će biti malo viši, negdje oko $V_{CE(sat)} \sim 0,05-0,2 \text{ V}$). S druge strane, ako je ulaz nizak, tranzistor izgleda kao otvoreni krug, a izlaz se podiže na VCC

(Ovo je temeljna konfiguracija tranzistora koja se naziva zajednički emiter. Više o tome kasnije.)

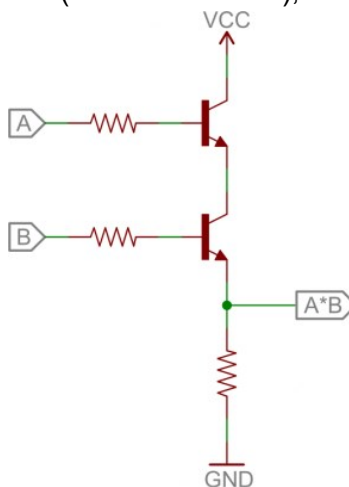


Inverter izgrađen od tranzistora.

AND Vrata

Ovdje je par tranzistora koji se koriste za stvaranje AND vrata s 2 ulaza:

Ako je bilo koji tranzistor isključen, tada će izlaz na kolektoru drugog tranzistora biti niski. Ako su oba tranzistora "uključena" (baze oba visoka), tada je izlaz kruga također visok.

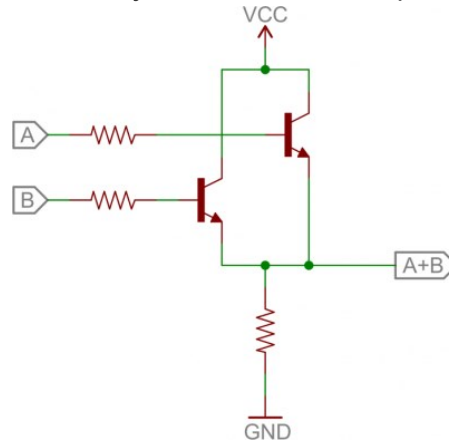


2 ulaza AND vrata izgrađena od tranzistora.

OR Vrata

I, konačno, evo **OR vrata s 2 ulaza** :

U ovom krugu, ako su jedan (ili oba) A i B visoki, dotični tranzistor će se uključiti i povući izlaz visoki. Ako su oba tranzistora isključena, tada se izlaz povlači nisko kroz otpornik.

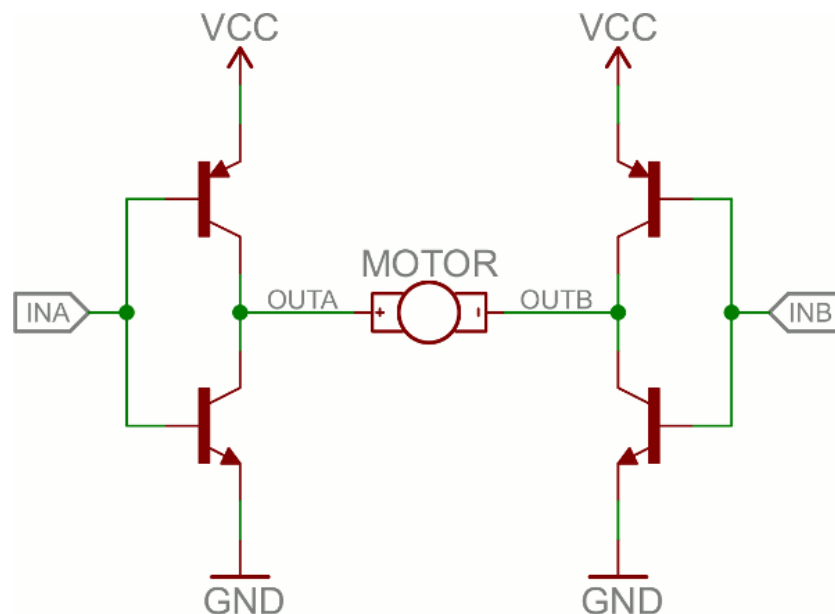


2-ulazna OR vrata izgrađena od tranzistora.

H-most

H-most je krug temeljen na tranzistoru koji može pokretati motore i u smjeru kazaljke na satu i u suprotnom smjeru. To je nevjerojatno popularan sklop -- pokretačka snaga bezbrojnih robota koji se moraju moći kretati i naprijed i natrag.

U osnovi, H-most je kombinacija četiri tranzistora s dvije ulazne linije i dva izlaza:



Možete li pogoditi zašto se zove H most?

(Napomena: dobro dizajnirani H-most obično ima puno više toga, uključujući flyback diode, bazne otpornike i Schmidtove okidače.)

Ako su oba ulaza istog napona, izlazi motora će biti isti napon i motor se neće moći okretati. Ali ako su dva ulaza suprotna, motor će se vrtjeti u jednom ili drugom smjeru.

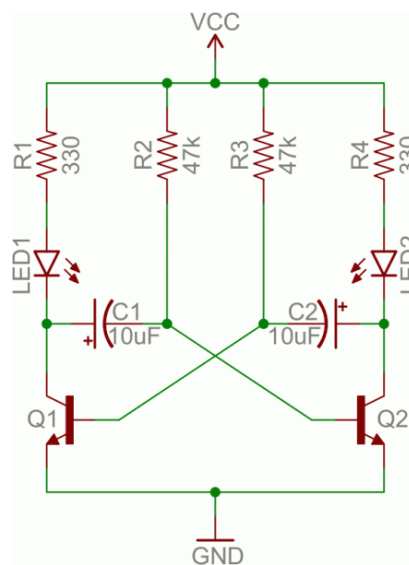
H-most ima tablicu istine koja izgleda otprilike ovako:

Unos A	Unos B	Izlaz A	Izlaz B	Smjer motora
0	0	1	1	Zaustavljen (kočenje)
0	1	1	0	U smjeru kazaljke na satu
1	0	0	1	Suprotno od kazaljke na satu
1	1	0	0	Zaustavljen (kočenje)

8 Oscilatori

Oscilator je krug koji proizvodi periodički signal koji varira između visokog i niskog napona. Oscilatori se koriste u svim vrstama sklopova: od jednostavnog treptanja LED-a do proizvodnje taktnog signala za pokretanje mikrokontrolera. Postoji mnogo načina za stvaranje oscilatornog kruga uključujući kvarcne kristale, op-pojačala i, naravno, tranzistore.

Evo primjera oscilirajućeg kruga, koji nazivamo **astabilni multivibrator**. Korištenjem **povratne veze**, možemo koristiti par tranzistora za stvaranje dva komplementarna, oscilirajuća signala.



Titrajni krug

Osim dva tranzistora, kondenzatori su pravi ključ ovog sklopa. Poklopci se naizmjenično pune i prazne, što uzrokuje naizmjenično uključivanje i isključivanje dva tranzistora.

Analiza rada ovog kruga izvrsna je studija rada i kapa i tranzistora. Za početak pretpostavimo da je C1 potpuno napunjen (pohranjuje napon od oko VCC), C2 je ispražnjen, Q1 je uključen, a Q2 isključen. Evo što se događa nakon toga:

- Ako je Q1 uključen, tada je lijeva ploča C1 (na shemi) spojena na oko 0 V. To će omogućiti pražnjenje C1 kroz kolektor Q1.
- Dok se C1 prazni, C2 se brzo puni kroz otpornik niže vrijednosti -- R4.
- Nakon što se C1 potpuno isprazni, njegova desna ploča će se povući na oko 0,6 V, što će uključiti Q2.
- U ovom trenutku smo zamijenili stanja: C1 je ispražnjen, C2 je napunjen, Q1 je isključen, a Q2 je uključen. Sada izvodimo isti ples na drugu stranu.
- Kada je Q2 uključen, C2 se ispušta kroz kolektor Q2.
- Dok je Q1 isključen, C1 se može puniti, brzo preko R1.
- Nakon što se C2 potpuno isprazni, Q1 će se ponovno uključiti i vratit ćemo se u početno stanje.

Može biti teško zamotati glavu. Ovdje možete pronaći još jedan odličan demo ovog sklopa. Odabirom specifičnih vrijednosti za C1, C2, R2 i R3 (i držanjem R1 i R4 niskim), možemo postaviti brzinu našeg kruga multivibratora:

$$f = \frac{1}{\ln(2) \cdot (R_2 C_1 + R_3 C_2)}$$

Dakle, s vrijednostima za kape i otpornike postavljene na 10μF odnosno 47kΩ, frekvencija našeg oscilatora je oko 1,5 Hz. To znači da će svaki LED treptati oko 1,5 puta u sekundi. Kao što već vidite, postoji mnoštvo sklopova koji koriste tranzistore. Ali jedva da smo zagreballi površinu. Ovi primjeri uglavnom pokazuju kako se tranzistor može koristiti u zasićenim i cut-off modovima kao prekidač, ali što je s pojačanjem? Vrijeme je za više primjera!

9 Primjene II: Pojačala

Neke od najmoćnijih tranzistorskih primjena uključuju pojačanje: pretvaranje signala male snage u signal veće snage. Pojačala mogu povećati napon signala, uzimajući nešto iz μV raspona i pretvarajući to u korisniju mV ili V razinu. Ili mogu pojačati struju, što je korisno za pretvaranje μA struje koju proizvodi fotodioda u struju puno veće magnitude. Postoje čak i pojačala koja uzimaju struju i proizvode viši napon, ili obrnuto (nazivaju se trans otpor i transkonduktivnost).

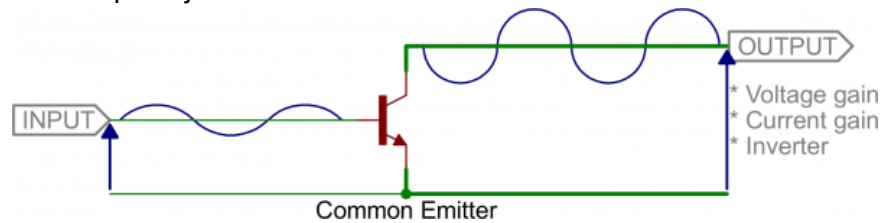
Tranzistori su ključna komponenta mnogih krugova pojačala. Postoji beskonačna raznolikost tranzistorskih pojačala, ali na sreću, puno njih se temelji na nekim od ovih primitivnijih sklopova. Zapamtite ove sklopove i, nadamo se, uz malo usklađivanja uzoraka, možete shvatiti složenija pojačala.

10 uobičajenih konfiguracija

Tri najosnovnija tranzistorska pojačala su zajednički emiter, zajednički kolektor i zajednička baza. U svakoj od tri konfiguracije, jedan od tri čvora je trajno vezan na zajednički napon (obično uzemljenje), a druga dva čvora su ili ulaz ili izlaz pojačala.

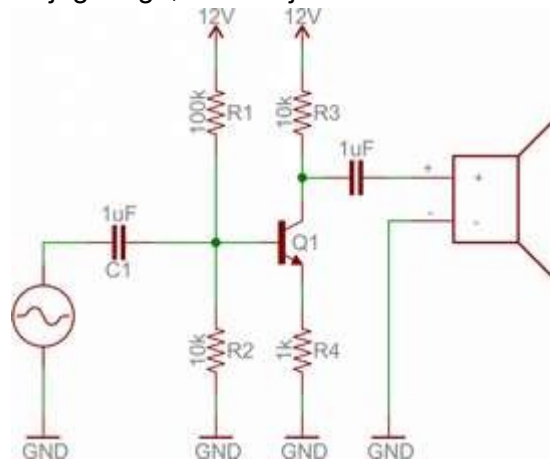
10.1 Zajednički emiter

Zajednički emiter jedan je od popularnijih rasporeda tranzistora. U ovom krugu, emiter je vezan na napon koji je zajednički i bazi i kolektoru (obično masi). Baza postaje ulaz signala, a kolektor postaje izlaz.



Zajednički emiter

Krug zajedničkog emitera je popularan jer je dobro prilagođen za **pojačanje napona**, posebno na niskim frekvencijama. Izvršni su za pojačavanje audio signala, na primjer. Ako imate mali ulazni signal od vrha do vrha od 1,5 V, možete ga pojačati na mnogo viši napon pomoću malo kompliciranijeg kruga, kao što je:

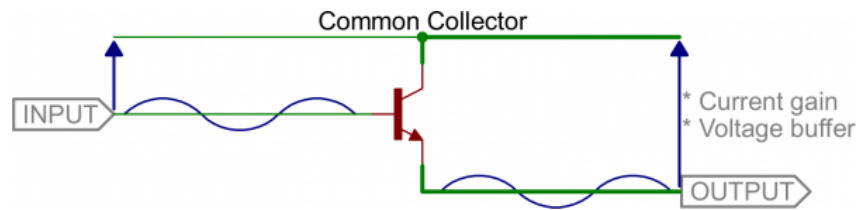


Krug zajedničkog emitera

Ipak, jedna mana uobičajenog odašiljača je da **invertira** ulazni signal (usporedite ga s inverterom s prethodne stranice!).

10.2 Zajednički kolektor (emitorski sljedbenik)

Ako spojimo pin kolektora na zajednički napon, koristimo bazu kao ulaz, a emiter kao izlaz, imamo zajednički kolektor. Ova konfiguracija je također poznata kao **emitorski sljedbenik**.

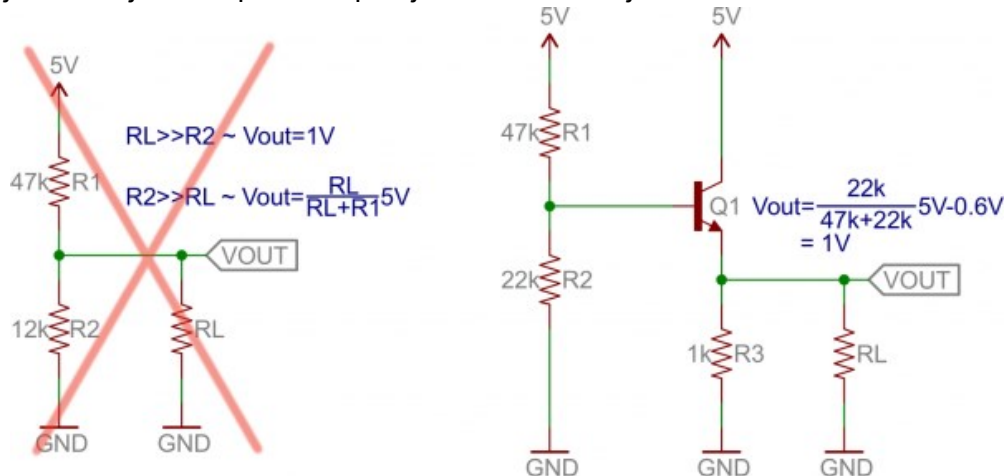


Zajednički kolektor

Zajednički kolektor ne pojačava **napon** (zapravo, izlazni napon će biti 0,6 V niži od ulaznog napon). Iz tog razloga, ovaj krug se ponekad naziva pratilac napona.

Ovaj sklop ima veliki potencijal kao **strujno pojačalo**. Uz to, visoko strujno pojačanje u kombinaciji s gotovo jediničnim pojačanjem napona čini ovaj sklop izvrsnim međuspremnikom napona. Međuspremnik **napona** sprječava da strujni krug opterećenja neželjeno ometa krug koji ga pokreće.

Na primjer, ako ste željeli isporučiti 1 V opterećenju, mogli biste ići lakšim putem i upotrijebiti razdjelnik napona ili upotrijebiti emitorski sljedbenik.



Krug zajedničkog kolektora

Kako opterećenje postaje veće (što, obrnuto, znači da je otpor manji), izlaz kruga razdjelnika napona opada. Ali izlazni napon emitorskog pratioca ostaje stabilan, bez obzira na opterećenje. Veća opterećenja ne mogu "opteretiti" emitorski sljedbenik, jer mogu sklopiti s većim izlaznim impedancijama.

10.3 Zajednička baza

Razgovarat ćemo o zajedničkoj bazi da malo zaključimo ovaj odjeljak, ali ovo je najmanje popularna od tri temeljne konfiguracije. U pojačalu sa zajedničkom bazom, emiter je ulaz, a kolektor izlaz. Baza je zajednička za obje.



Zajednička baza

Zajednička baza je kao anti-emiter-sljedbenik. To je pristojno pojačalo napona, a ulazna struja je otprilike jednaka izlaznoj struji (zapravo ulazna struja malo je veća od izlazne). Krug zajedničke baze najbolje radi kao **međuspremnik struje**. Može uzeti ulaznu struju s niskom ulaznom impedancijom i isporučiti tu istu struju izlazu s višom impedancijom.

10.4 Ukratko

Ove tri konfiguracije pojačala su srce mnogih kompliciranijih tranzistorskih pojačala. Svaki od njih ima aplikacije u kojima blista, bilo da pojačavaju struju, napon ili međuspremnik.

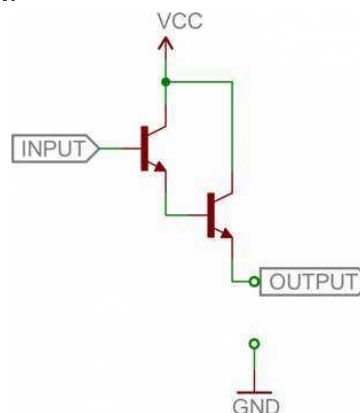
	Zajednički emiter	Zajednički sakupljač	Zajednička baza
Pojačanje napona	Srednji	Niski	Visoki
Trenutni napon	Srednji	Visoki	Niski
Ulazna impedancija	Srednji	Visoki	Niski
Izlazna impedancija	Srednji	Niski	Visoki

11 Višestupanjska pojačala

Mogli bismo nabrajati u nedogled o velikoj raznolikosti tranzistorskih pojačala. Evo nekoliko brzih primjera da pokažete što se događa kada kombinirate gore navedena jednostupanjska pojačala:

Darlington

Darlingtonovo pojačalo spaja jedan zajednički kolektor u drugi kako bi se stvorilo pojačalo s jakim strujnim pojačanjem.



Višestupanjska pojačala

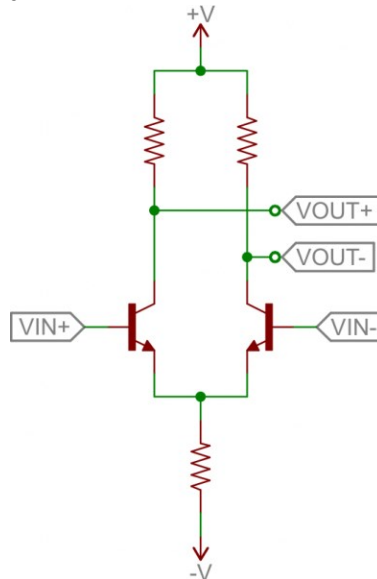
Izlazni napon je otprilike isti kao i ulazni napon (minus oko 1,2 V-1,4 V), ali strujni dobitak je proizvod dva tranzistorska dobitka. To je β^2 -- više od 10 000!

Darlingtonov par izvrstan je alat ako trebate pokretati veliko opterećenje s vrlo malom ulaznom strujom.

11.1 Diferencijalno pojačalo

Diferencijalno pojačalo oduzima dva ulazna signala i pojačava tu razliku. To je kritičan dio povratnih krugova, gdje se ulaz uspoređuje s izlazom, kako bi se proizveo budući izlaz.

Evo temelja diferencijalnog pojačala:



Diferencijalno pojačalo

Ovaj krug se također naziva **dugorepi par**. To je par krugova sa zajedničkim emiterom koji se međusobno uspoređuju kako bi proizveli diferencijalni izlaz. Dva ulaza se primjenjuju na baze tranzistora; izlaz je diferencijalni napon na dva kolektora.

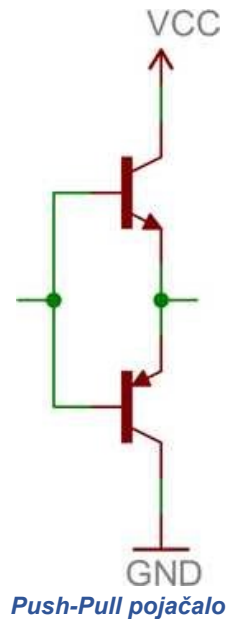
11.2 Push-Pull pojačalo

Push-pull pojačalo je koristan "završni stupanj" u mnogim višestupanjskim pojačalima. To je energetske učinkovito pojačalo snage koje se često koristi za pogon zvučnika.

Osnovno push-pull pojačalo koristi NPN i PNP tranzistor, oba konfigurirana kao zajednički kolektori:

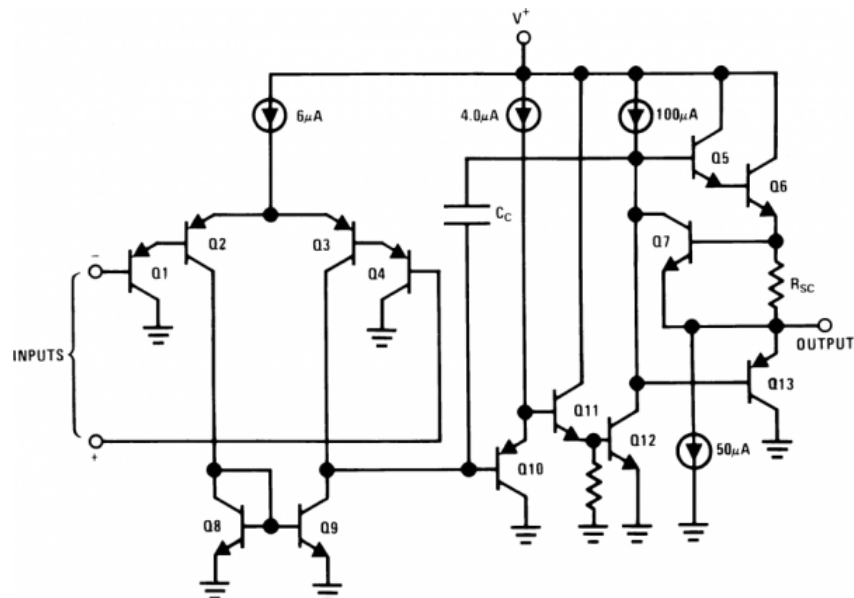
Push-pull pojačalo ne pojačava napon (izlazni napon bit će nešto manji od ulaznog), ali pojačava struju. Posebno je koristan u bipolarnim krugovima (onima s pozitivnim i negativnim napajanjem) jer može i "gurnuti" struju u opterećenje iz pozitivnog napajanja i "izvući" struju van i pretočiti je u negativno napajanje.

Ako imate bipolarno napajanje (ili čak i ako nemate), push-pull je izvrstan završni stupanj za pojačalo, koji djeluje kao međuspremnik za opterećenje.



11.3 Njihovo spajanje (operacijsko pojačalo)

Pogledajmo klasičan primjer višestupanjskog tranzistorskog kruga: operacijsko pojačalo. Sposobnost prepoznavanja uobičajenih tranzistorskih krugova i razumijevanje njihove svrhe može vam daleko dogurati! Evo kruga unutar LM3558, jednostavnog operacijskog pojačala:



Unutarnji dijelovi operacijskog pojačala LM358. Prepoznajete li neka pojačala?

Ovdje sigurno ima više složenosti nego što ste možda spremni obuhvatiti; međutim, mogli biste vidjeti neke poznate topologije:

- Q1, Q2, Q3 i Q4 čine ulazni stupanj. Izgleda kao zajednički kolektor (Q1 i Q4) u diferencijalno pojačalo, zar ne? Samo izgleda obrnuto jer koristi PNP-ove. Ovi tranzistori pomažu u formiranju ulaznog diferencijalnog stupnja pojačala.
- Q11 i Q12 su dio druge faze. Q11 je zajednički kolektor, a Q12 zajednički emiter. Ovaj par tranzistora će međuspremnik signala iz kolektora Q3 i osigurati visoko pojačanje dok signal ide u završni stupanj.
- Q6 i Q13 su dio završne faze, i također bi trebali izgledati poznato (posebno ako zanemarite RSC) -- to je push-pull! Ovaj stupanj sprema izlaz, dopuštajući mu da pokreće veća opterećenja.
- Postoji niz drugih uobičajenih konfiguracija o kojima nismo govorili. Q8 i Q9 su konfigurirani kao strujno zrcalo, koje jednostavno kopira količinu struje kroz jedan tranzistor u drugi.

Nakon ovog ubrzanog tečaja o tranzistorima, ne bismo očekivali da ćete razumjeti što se događa u ovom krugu, ali ako možete početi identificirati uobičajene tranzistorske krugove, na pravom ste putu!