

NAMJENA, SADRŽAJ I KONCEPCIJA UDŽBENIKA

NAMJENA UDŽBENIKA

Udžbenik *ANALOGNI ELEKTRONIČKI SKLOPOVI* namijenjen je poučavanju iz predmeta **ELEKTRONIČKI SKLOPOVI** koji je u nastavnom planu i programu obrazovanja za zanimanja **elektrotehničar (izborni blok A), tehničar za elektroniku, tehničar za radiokomunikacije, tehničar za telekomunikacije, tehničar za procesnu tehniku, tehničar za računalstvo, tehničar za mehatroniku, elektroničar i elektroničar-mehaničar**. Zastupljenost predmeta u obveznom dijelu plana i programa i najmanji broj sati koje se ostvaruje praktičnim radom u laboratoriju pokazuje tablica 1.

Tablica 1. Zastupljenost predmeta ELEKTRONIČKI SKLOPOVI u okvirnim obrazovnim programima

Zanimanje	Razred	Ukupno sati u tjednu	Najmanji broj sati u tjednu za laboratorijske vježbe	Ukupno sati u godini	Najmanji broj sati u godini za laboratorijske vježbe
elektrotehničar (A)	3.	4	1	140	35
tehničar za elektroniku	3.	4	1	140	35
tehničar za radiokomunikacije	3.	4	1	140	35
tehničar za telekomunikacije	3.	4	1	140	35
tehničar za procesnu tehniku	3.	4	1	140	35
tehničar za računalstvo	3.	4	1	140	35
tehničar za mehatroniku	3.	3	1	105	35
elektroničar	2.	4	1	140	35
elektroničar-mehaničar	2.	4	1	140	35

Osim toga, udžbenik se može rabiti u izornoj nastavi. Prema nastavnim planovima i okvirnim obrazovnim programima za spomenuta zanimanja izborna nastava iz elektroničkih sklopova može se izvoditi tako da se obvezni fond sati predmeta ELEKTRONIČKI SKLOPOVI poveća ili nastavom posebnih predmeta kao što je ANALOGNI I DIGITALNI SKLOPOVI ili drugih na prijedlog samih škola.

SADRŽAJ UDŽBENIKA

Gradivo udžbenika podijeljeno je u 11 poglavlja, a pojedina poglavlja podijeljena su na 2-4 potpoglavlja:

1. Sklopovi s diodama

- 1.1. Svojstva dioda
- 1.2. Ispravljački sklopovi
- 1.3. Diodni ograničavači i restauratori
- 1.4. Ostale vrste dioda

2. Osnovni sklopovi s bipolarnim tranzistorima

- 2.1. Svojstva bipolarnih tranzistora
- 2.2. Osnovni spojevi pojačala s bipolarnim tranzistorima
- 2.3. Negativna povratna veza
- 2.4. Bipolarni tranzistor kao sklopka tranzistorima

3. Osnovni sklopovi s unipolarnim tranzistorima

- 3.1. Spojni tranzistori s efektom polja
- 3.2. Tranzistori s efektom polja i izoliranim zasunom
- 3.3. Osnovni spojevi pojačala s unipolarnim tranzistorima
- 3.4. Unipolarni tranzistor kao sklopka

4. Multivibratori

- 4.1. Bistabilni multivibratori
- 4.2. Schmittov okidni sklop
- 4.3. Monostabilni multivibratori
- 4.4. Astabilni multivibratori

5. Pojačala

- 5.1. Darlingtonov spoj
- 5.2. Dvostupanjska pojačala
- 5.3. Diferencijsko pojačalo
- 5.4. Pojačala snage

6. Operacijsko pojačalo

- 6.1. Osnovne osobine operacijskoga pojačala
- 6.2. Sklopovi s operacijskim pojačalom
- 6.3. Aktivni filtri

7. Oscilatori

- 7.1. RC oscilatori
- 7.2. LC oscilatori
- 7.3. Sintetizatori frekvencije s petljom fazne sinkronizacije

8. Stabilizator napona

- 8.1. Stabilizatori napona i struje s tranzistorima
- 8.2. Integrirane izvedbe stabilizatora

9. Sklopovi s tiristorima i jednospojnim tranzistorom

- 9.1. Tiristori
- 9.2. Jednospojni tranzistor

10. Optoelektronički elementi

- 10.1. Fotodetektor
- 10.2. Svjetleće diode
- 10.3. Fotovezni elementi

11. Ostali sklopovi

- 11.1. Generiranje pilastoga napona
- 11.2. Analogne sklopke i sklopovi za uzimanje uzoraka
- 11.3. Vremenski sklop
- 11.4. Sklopovi energetske elektronike

Dodatak

- A) Označivanje otpornika
- B) Označivanje kondenzatora
- C) Normirane vrijednosti otpora otpornika i kapaciteta kondenzatora
- D) Označivanje elektroničkih poluvodičkih komponenata
- E) Izvodi iz tvorničkih podataka za poluvodičke elektroničke komponente

Svako poglavlje udžbenika, uz opis izvedbe, rada, svojstava i primjene pojedinih sklopova, sadrži pregled ključnih pojmova, popis dodatne literature za učenike, zadatke za praktičan laboratorijski rad i pitanja i zadatke za ponavljanje i provjeru znanja. 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. Zbog cjelovitosti teksta, na početku 1., 2., 3., 9. i 10. poglavlja ukratko su opisana svojstva elektroničkih elemenata bez detaljnije fizikalne analize budući da je to sadržaj predmeta ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI I KOMPONENTE.

KONCEPCIJA UDŽBENIKA

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 omogućuje nastavniku da svako izlaganje popratni pokazivanjem djelovanja sklopa čime će učeniku učiniti izlaganje bližim i prihvatljivijim. 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 svojstava 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 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 što omogućuje nastavniku individualan pristup svakome pojedinome učeniku. Odabir pokusa unutar pojedine vježbe ovisi s jedne strane o sadržaju i opsegu proučavanja elektroničkih sklopova u svakom od spomenutih programa za zanimanja, odnosno s druge strane o mogućnostima, zalaganju i napredovanju učenika. Odabirom pokusa treba omogućiti svakom učeniku svladavanje temeljnih sadržaja svakoga područja unutar nastavnog predmeta, a učenicima koji pokazuju veće mogućnosti i želje treba omogućiti izvođenje svih pokusa kojima se proširuju temeljna znanja.

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.

ODGOVORI NA PITANJA I RJEŠENJA ZADATAKA ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. SKLOPOVI S DIODAMA

1. Dioda se može smatrati uključenom sklopom kada je anoda diode na pozitivnijem potencijalu od katode, odnosno kad je propusno polarizirana. Kroz diodu teče **propusna struja** I_F od anode prema katodi. Veličina struje koja teče kroz propusno polariziranu diodu ovisi o priključenom naponu U i otporu R spojenom u seriju s diodom. Dioda ima vrlo mali otpor pa je napon na diodi $U_D = U_F$ mali (za silicijske diode iznosi 0,7V, a za germanijske 0,3V). Stoga je gotovo sav napon U priključenog izvora na otporu R .

Dioda se može smatrati isključenom sklopom kada je katoda na pozitivnijem potencijalu od anode, odnosno kada je dioda zaporno polarizirana. Kroz diodu u smjeru katode prema anodi teče vrlo mala struja I_R koja se naziva reverzna struja (za germanijske diode reda veličine desetak mA, a za silicijske desetak nA).

2.a) Dioda je propusno polarizirana
 $I_D = (12 - 0,7)V / 3k\Omega = 3,77mA$ $U_D = 0,7V$
 $U_{R1} = 1k\Omega \cdot 3,77mA = 3,77V$
 $U_{R2} = 2k\Omega \cdot 3,77mA = 7,54V$

2.b) Dioda je zaporno polarizirana
 $I_D = 0$ $U_D = 12V$ $U_{R1} = 0$ $U_{R2} = 0$

3. U dijelu periode izmjeničnog napona kada je anoda na višem potencijalu od katode, kondenzator se nabija. U ostalom dijelu periode dioda je zaporno polarizirana. Struju trošila tada daje nabijeni kondenzator za glaćenje pa se napon na njemu smanjuje. Što je kapacitet kondenzatora za glaćenje veći, bit će manje smanjivanje izlaz-

noga napona, odnosno ispravljač će se moći opteretiti većom strujom.

4. Što je kapacitet kondenzatora za glaćenje veći, iznos napona brujanja je manji.

5. Što je opterećenje ispravljača veće (manji otpor trošila, dakle veća struja opterećenja), izlazni napon ispravljača bit će manji.

6. Što je opterećenje ispravljača veće (manji otpor trošila, dakle veća struja), napon brujanja bit će veći.

7. $C = 24V\sqrt{2} / 0,5V \cdot 50Hz \cdot 1000\Omega = 1360\mu F$

8. Dioda u kratkom spoju.

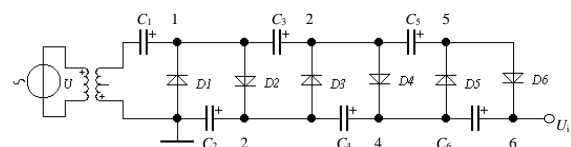
9. Dioda u prekidu

10. $C = 24V\sqrt{2} / 0,5V \cdot 100Hz \cdot 1000\Omega = 680\mu F$

11. Ni jedna.

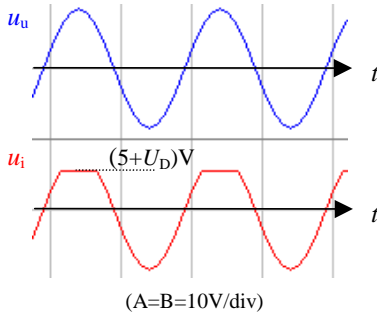
12. Dioda $D2$ u prekidu.

13.

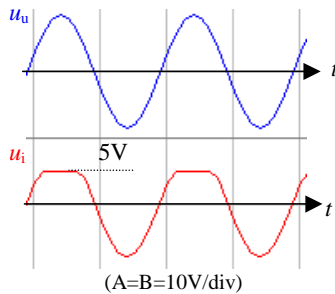


14. $U_S = 620V / 4\sqrt{2} = 109,6V$

15. a)

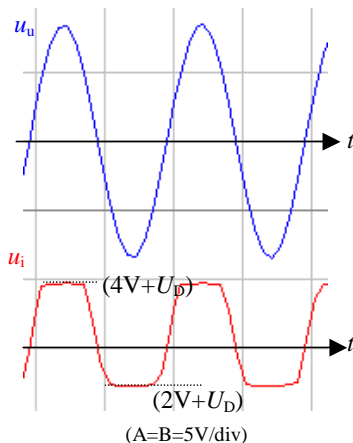


15. b)



16. Paralelni ograničavač sa slike 15.a i serijski ograničavač sa slike 15.b. daju, uz istu pobudu, na izlazu napon istoga oblika, tj. ograničavaju porast izlaznoga napona iznad vrijednosti istosmjernoga napona izvora. Razlikuju se po tome što je kod paralelnoga ograničavača napon na izlazu uvećan za pad napona na propusno polariziranoj diodi (oko 0,6V).

17.

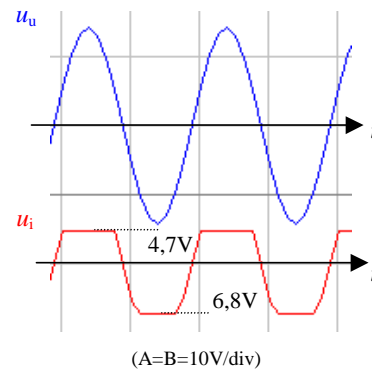


18. Otpor R trebao bi biti što veći u odnosu prema otporu propusno polarizirane diode. Što je otpor veći, to je izlazni napon bliži idealnom. Povećanje otpora R ograničeno je iznosima otpora zaporno polarizirane diode jer u odnosu prema njemu otpor R treba biti što manji.

19. Za stabilizator sa Zenerovom diodom kritičan je neopterećen izlaz jer tada sva struja iz izvora, čiji iznos ograničava otpor R , teče kroz Zenerovu diodu.

20. Iz tvorničkih podataka je $U_{Z1N4731}=4,7V$ i $U_{Z1N4736}=6,8V$. Vršna vrijednost struje kroz diode za vrijeme pozitivne poluperiode priključenoga sinusoidnoga napona je $I_{zmax} = \sqrt{2}(10 - 4,7 - 0,6)V/1k\Omega = 6,65mA$, a za vrijeme negativne poluperiode $I_{zmax} = \sqrt{2}(10 - 6,8 - 0,6)V/1k\Omega = 3,68mA$, što je manje od dopuštenih vrijednosti struja za te diode prema tvorničkim podacima.

21.



22. Najpovoljniju karakteristiku ima tunelska dioda u GaAs izvedbi jer ima najveći raspon između karakterističnih napona U_p , U_v i U_f pa joj to omogućava veću primjenu.

23. Kapacitivna dioda upotrebljava se u području zaporne polarizacije PN spoja koji djeluje kao dielektrik kondenzatora čije su ploče P-tip i N-tip poluvodiča. Kada PN nije priključen na napon napajanja, područje PN barijere ima određenu širinu, a time i početni kapacitet C_p . Priključi li se izvana napon $-U_d$, proširuje se područje barijere, a time se kapacitet diode C_d smanjuje. On je najmanji kada se $-U_d$ približi probnoj vrijednosti PN spoja, koja iznosi oko 40V. Slika 1.41. pokazuje da sve kapacitivne diode nemaju jednaki kapacitet, ali u svih se kapacitet smanjuje s povećanjem iznosa napona $-U_d$.

2. OSNOVNI SKLOPOVI S BIPOLARNIM TRANZISTORIMA

1. C_V - vezni kondenzatori služe za istosmjerno odvajanje ulaza i izlaza pojačala od izvora napajanja. Ne propuštaju istosmjerni signal, dok za izmjenični signal djeluju, uz dovoljno veliki kapacitet, praktično kao kratki spoj

R_1 , i R_2 - otporno djelilo napona kojim se ostvaruje potrebnii prednapon baze, tj. struja baze R_E - otpornik u krugu emitera koji služi za temperaturnu stabilizaciju radne točke

C_E - kondenzator koji za izmjenični signal kratko spaja emitterski otpornik, odnosno smanjuje njegov utjecaj na smanjenje pojačanja pojačala.

2. Ulazni i izlazni signali (napon) pojačala u spoju zajedničkoga emitera su protufazni, tj. rastuća promjena napona na ulazu izaziva padajuću promjenu na izlazu i obrnuto.

3. Na iznos naponskog pojačanja utječu upravno proporcionalno faktor strujnog pojačanja h_{fe} i otpor R_C , a obrnuto proporcionalno ulazni otpor tranzistora h_{ie} .

4. Ako se na ulaz priključi napon velike amplitude, može nastupiti izobličenje signala na izlazu.

5. Opteretni otpor na izlazu pojačala smanjuje pojačanje pojačala.

6. Kondenzator C_E zajedno s kondenzatorom C_V može utjecati na slabljenje pojačanja, i to na niskim frekvencijama. Kapacitet kondenzatora C_E treba biti većih iznosa (u praksi 10 μ F i više), kratko spaja emitterski otpor u dinamičkim uvjetima rada i tako omogućava na izlazu maksimalno pojačan signal. Međutim za signale vrlo niskih frekvencije čini otpor koji smanjuje pojačanje.

7. Slabljenje pojačanja pri niskim frekvencijama uvjetovano je prisutnošću kondenzatora u pojačalu. To su vezni kondenzatori C_V i kondenzator u krugu emitera C_E . Kapaciteti tih kondenzatora su za signale niskih frekvencija znatan otpor $X_C=1/2\pi fC$.

Pojačanje pojačala pri visokim frekvencijama smanjuje se zbog parazitnih kapacitivnosti između elektroda tranzistora. Njihovo djelovanje može se predočiti kondenzatorima paralelno vezanim na ulazu i izlazu pojačala koji na visokim frekvencijama imaju malu impedanciju.

8. 167Hz

9. Gornja granična frekvencija pojačala može se sniziti tako da se dodaju kondenzatori u ulaznom ili izlaznom krugu.

$$10. C_{iz} = C_{CB} + C_{CE} + C_S = 6\text{pF}$$

$$R = R_C || R_P = 1,3\text{k}\Omega$$

$$f_g = 1/2\pi R \cdot C_{iz} = 20405\text{kHz}$$

$$\parallel_{ul} = C_{BE} + (C_{CB} \cdot A_u) = 1\text{pF} + (3\text{pF} \cdot 100) = 301\text{pF}$$

$$C_{ul} = C_{BE} + (C_{CB} \cdot A_u) = 1\text{pF} + (3\text{pF} \cdot 100) = 301\text{pF}$$

$$f_g = 1/2\pi R_{ul} \cdot C_{ul} = 529022\text{Hz}$$

11. Negativna povratna veza (skraćeno NPV) poboljšava svojstva pojačala. NPV stabilizira vrijednost naponskog pojačanja s obzirom na promjene parametara aktivnih komponenata sklopa do kojih dolazi zbog promjene temperature, starenja elemenata i promjena napona napajanja. Primjenom NPV-a smanjuje se amplituda izobličenja pojačala i stabilizira se položaj radne točke. U ovisnosti o vrsti NPV-a može se mijenjati ulazni i izlazni otpor na željeni iznos čime se uz stabilizaciju iznosa pojačanja stvarna pojačala približavaju idealnim. Uporabom NPV-a u pojačalu povećava se područje propusnog pojasa B.

12. Negativna povratna veza (skraćeno NPV) mijenja vrijednosti dinamičkog ulaznog i izlaznog otpora pojačala u odnosu na r_{ul} i r_{iz} osnovnog pojačala. Djelovanje NPV-a na r_{ul} i r_{iz} ovisi o načinu ostvarivanja NPV-a. Uporabom naponsko-paralelne NPV smanjuje se vrijednost ulaznog i izlaznog otpora pojačala: $r_{ulNPV} = r_{ulA}/(1+\beta A_{ou})$ i $r_{izNPV} = r_{izA}/(1+\beta A_{ou})$.

13. Razlika između strujno-paralelne i naponsko-serijske negativne povratne veze (NPV) jest u tome što je pri strujno-paralelnom NPV-u ulaz grane povratne veze spojen serijski s potrošačem, a izlaz PV je spojen paralelno s ulazom pojačala, dok je pri naponsko-serijskom NPV-u grana povratne veze spojena paralelno s potrošačem i serijski s ulazom pojačala.

14. Tranzistor se može smatrati uključenom (zatvorenom) sklopkom kada su PN spojevi BE i BC propusno polarizirani, odnosno kada je tranzistor u zasićenju, a to je uz ispunjen uvjet $I_{Bzas} > I_{Czas}/h_{FE}$. Otpor tranzistora pri tome gotovo je zanemariv.

Tranzistor se može smatrati isključenom (otvorenom) sklopkom kada je u području zapiranja, odnosno kada su mu PN spojevi baza-emiter i baza-kolektor zaporno polarizirani (ponašaju se kao zaporno polarizirane diode). Tada je struja baze $I_B=0\mu A$, otpor tranzistora vrlo je velik, a napon $U_{CE} \approx U_{CC}$

15. Izlazni i ulazni napon tranzistorske sklopke u spoju zajedničkoga emitera su u protufazi, tj. tranzistor kao sklopka obavlja logičku funkciju invertiranja.

16. 12V

17. 0,1-0,3V

18. Otporno opterećenje tranzistorske sklopke prema masi djeluje kada je sklopka isključena. Otpornici R_C i R_P djeluju kao otporno djelilo koje smanjuje vrijednost izlaznog napona s U_{CC} na $U_i = R_P U_{CC} / (R_C + R_P)$.

Kad je tranzistor uključena sklopka, otporno opterećenje prema uzemljenoj točki nema utjecaja na rad sklopke.

19. Otporno opterećenje prema naponu napajanja utječe na rad tranzistorske sklopke kad je sklopka uključena. Opteretni otpor R_P paralelno je spojen otporu R_C . To znači da je ukupna vrijednost otpora u kolektorskoj grani smanjena, što ima za posljedicu težnju za povećanjem struje kolektora I_C . Kako struja baze ostaje nepromijenjena, tranzistor izlazi iz zasićenja pa raste izlazni napon na vrijednost veću od U_{CEzas} . Posljedica toga može biti povećan utrošak (disipacija) snage, i u krajnjem slučaju, uništenje tranzistora kad utrošak snage prijeđe dopuštenu vrijednost.

20. Izlazni signal kapacitivno opterećene tranzistorske sklopke izobličen je jer se izlazni napon mijenja usporeno budući da se kapacitivnost nabija i izbija postupno. Kapacitivno opterećenje tranzistorske sklopke pojavljuje se najčešće pri visokim frekvencijama ulaznog napona jer tada do izražaja dolazi i parazitna kapacitivnost tranzistora.

21. Vrijeme porasta izlaznog napona (vrijeme potrebno da napon naraste od 10% do 90% vrijednosti amplitude) kapacitivno opterećene sklopke veće je od vremena pada (vrijeme potrebno da se napon smanji s 90% na 10% vrijed-

vrijednosti amplitude) jer je vremenska konstanta punjenja kondenzatora veća od vremenske konstante pražnjenja. Izlazni napon raste prema vremenskoj konstanti CR_C pa vrijeme porasta iznosi $t_r=2,2\tau$. Vrijeme pada t_f znatno je kraće jer se napon smanjuje s vremenskom konstantom $C(R_C || r_{ce})$.

22. Pri većoj frekvenciji ulaznoga napona tranzistorske sklopke kraće je vrijeme trajanja impulsa i pauze između impulsa pa se može dogoditi da se kondenzator ne stigne nabiti i izbiti, odnosno vrijeme porasta i pada je duže od periode pa je izlazni signal izobličen.

23. $U_i = 12V \cdot 4,5k\Omega / (1,5 + 4,5)k\Omega = 9V$

24. Tranzistor u prekidu (BE ili CE).

25. Tranzistor u kratkom spoju (CE ili CB)

3. OSNOVNI SKLOPOVI S UNIPOLARNIM TRANZISTORIMA

1. U pojačalu u spoju zajedničkog uvoda izlazni napon fazno je zaokrenut za 180° prema ulaznome, tj. odnos između ulaznoga i izlaznoga napona pojačala je protufazan.

2. Naponsko pojačanje pojačala proporcionalno je strmini g_m i izlaznom otporu sklopa, tj. ovisi o vrijednostima otpora R_D i otporu potrošača R_P , tj. $A_u = g_m (R_D || R_P)$. Dakle, opterećenje pojačala smanjuje naponsko pojačanje u odnosu prema neopterećenom pojačalu.

3. Otpor R_S služi za postavljanje radne točke tranzistora pojačala, tj. za ostvarenje negativnoga prednapona na upravljačkoj elektrodi u odnosu na uvod i za temperaturnu stabilizaciju radne točke.

4. Kondenzator C_S , čiji kapacitet mora biti što veći, ima ulogu da kratko spaja izmjenični signal tako da spriječi pad pojačanja zbog otpora R_S na niskim frekvencijama.

5. Što je kapacitet kondenzatora C_S , spojenoga paralelno s otporom R_S , veći bit će manje smanjenje naponskoga pojačanja pojačala s JFET-om na niskim frekvencijama.

6. Nedostatak pojačala s JFET-om u spoju zajedničkog uvoda jest ovisnost položaja radne točke o temperaturi okoline. Taj nedostatak otklanja se spojem s djelilom R_1 , R_2 u ulaznom krugu (slika 3.23.).

7. Radi se o strujno-serijskoj negativnoj povratnoj vezi ostvarenoj otporom R_S . Takva negativna povratna veza povećava dinamički ulazni i izlazni otpor pojačala.

8. Kod pojačala s MOSFET-om u spoju zajedničkog uvoda, kao i kod pojačala s JFET-om u spoju zajedničkog uvoda, izlazni je napon u protufazi s ulaznim, tj. izlazni napon ima fazni pomak od 180° prema ulaznomu signalu.

9. Naponsko pojačanje pojačala s MOSFET-om u spoju zajedničkog uvoda proporcionalno je strmini g_m i paralelnoj vrijednosti izlaznog otpora pojačala i otpora potrošača R_p , tj. $A_u = g_m (R_D \parallel R_p)$. Dakle opterećenje pojačala smanjuje naponsko pojačanje u odnosu prema neopterećenom pojačalu.

10. Što je kapacitet kondenzatora C_S , spojenoga paralelno s otporom R_S , veći, bit će manje smanjenje naponskog pojačanja pojačala s MOSFET-om na niskim frekvencijama.

11. Veličina otpora R_S određuje položaj radne točke tranzistora, tj. omogućava rad tranzistora u obogaćenom ili osiromašenom načinu rada. Uz manji otpor karakteristika otpora je strmija pa tranzistor djeluje u obogaćenom načinu rada. Uz veći otpor karakteristika je više položena pa tranzistor djeluje u osiromašenom načinu rada.

12. Ako je ulazni napon $0V$, $Tr1$ ima napon $U_{GS} = 0V$ i zato je u zapiranju s otporom između uvoda i odvoda oko $10^{10}\Omega$. Zasun $Tr2$ je za napon U_{DD} na nižemu potencijalu od njegova uvoda pa je taj tranzistor vodljiv. Izlazni napon je otprilike U_{DD} jer $Tr1$ djeluje kao isključena sklopka. Kada je ulazni napon približno jednak U_{DD} , $Tr2$ je tada u zapiranju. Otpor između njegova odvoda i uvoda je oko $10^{10}\Omega$. Zasun $Tr1$ je za U_{DD} na pozitivnijem potencijalu od njegova uvoda, pa $Tr1$ vodljiv. Izlaz sklopa je praktički spojen na zajedničku točku, a odsjeden je od napajanja. Tada $Tr1$ djeluje kao uključena sklopka.

13. Kod tranzistorske sklopke ulazni i izlazni napon uvijek su međusobno protufazni. Dakle, porast napona na ulazu uzrokuje smanjenje napona na izlazu i obrnuto.

14.a) $12V$

14.b) $0,1V$

14.c) $12V$

4. MULTIVIBRATORI

1. Na statičkim ili izravnim ulazima S i R nije dopušteno istodobno dovesti impulse jer će se bistabil nalaziti u nedefiniranom stanju, dok je na dinamičkim ili J i K ulazima dopušteno istodobno dovođenje impulsa pri čemu svaki impuls dovodi do promjene stanja bistabila.

2. S pomoću JK bistabila moguće je dijeliti frekvenciju tako da se istodobno na ulaze J i K dovode impulsi.

3. T ulaz bistabila sa slike 4.38. nastao je spajanjem J i K ulaza. To znači da će svaki impuls na tome ulazu dovesti do promjene stanja bistabila na bilo kojemu izlazu pa će frekvencija impulsa na njima biti dva puta manja od ulazne, tj. $6kHz$.

4. Otporno opterećenje izlaza bistabila prema masi djeluje kad je izlazni tranzistor u zapiranju tako da smanjuje izlazni napon. Stoga pri projektiranju bistabila valja predvidjeti da smanjeni izlazni napon daje dovoljnu struju baze drugomu tranzistoru.

5. Otporno opterećenje izlaza bistabila prema naponu napajanja djeluje kad je izlazni tranzistor u zasićenju tako da povećava struju kolektora toga tranzistora i napona između kolektora i emitera. Stoga pri projektiranju valja predvidjeti veću struju baze toga tranzistora kako bi ostao u zasićenju i pri opterećenju.

6. Kapacitivno opterećenje izlaza bistabila dolazi do većega izražaja pri višim frekvencijama ulaznih napona. Pri višim frekvencijama vrijeme porasta i pada izlaznoga napona može biti veće od trajanja impulsa zbog čega dolazi do izobličenja izlaznoga napona.

7. Kod kapacitivnog opterećenja bistabila dolazi do razlike u vremenu porasta i pada izlaznoga napona zbog toga što se nabijanje kondenzatora (porast izlaznoga napona) odvija preko otpora R_C , a izbijanje kondenzatora (pad izlaznoga napona) preko otpora r_{CE} koji je manji od R_C .

8. Schmittovom okidnom sklopu moguće je povećati napon gornje okidne razine U_1 , smanjenjem otpora R_{C2} . Napon donje okidne razine U_2 moguće je smanjiti povećanjem vrijednosti otpora R_{C1} .

$$U_1 = U_{CC}R_E / (R_{C2} + R_E) + U_{BE}$$

$$U_2 = U_{CC}R_E / (R_{C1} + R_E) + U_{BE}$$

9. 10kHz

10. Schmittov okidni sklop s naponskim djelilom u ulaznom krugu upotrebljava se kada je potrebno oblikovati izmjenični napon malih amplituda u pravokutne impulse. Tada se izmjeničnom naponu dodaje istosmjerna komponenta $U_O = U_{CC}R_2 / (R_1 + R_2)$, čime se podiže razina ulaznoga napona.

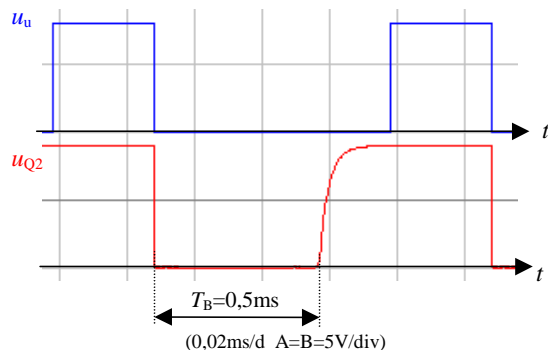
11. Izborom vrijednosti otpora R i R_B može se znatno utjecati na širinu raspona napona okidnih razina, te širinu histereze.

$$U_H = U_{CC}R_B / R$$

12. Izvedbe Schmittova sklopa razlikuju se po vrsti povratne veze. Na slici 4.33. prikazana je izvedba Schmittova okidnog sklopa sa strujnom povratnom vezom, a na slici 4.34. prikazana je izvedba sklopa s naponskom povratnom vezom.

$$13. T = 0,69 * 22 * 10^3 \Omega * 33 * 10^{-9} = 0,5 \text{ms}$$

14.



15. Napon na izlazu $Q2$ za vrijeme stabilnoga stanja smanjit će se s 9V na 6V: $U_i = 9V \cdot 2k\Omega / (1+2)k\Omega = 6V$. Zbog toga će se smanjiti trajanje kvazistabilnoga stanja s 0,5ms na 0,36ms:

$$T_B = 22 \cdot 10^3 \Omega \cdot 33 \cdot 10^{-9} \text{F} \cdot \ln(9+6-0,3-0,7)V / (9-0,5)V = 22 \cdot 33 \cdot 10^{-6} \cdot \ln 1,65 = 22 \cdot 33 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 = 0,36 \text{ms}$$

16. Izlazni napon na izlazu $Q1$ za vrijeme kvazistabilnoga stanja smanjit će se s približno 9V na 6V ako se zanemare iznosi struja kroz otpore od 15k Ω i 5,6k Ω : $U_i = 9V \cdot 2k\Omega / (1+2)k\Omega = 6V$.

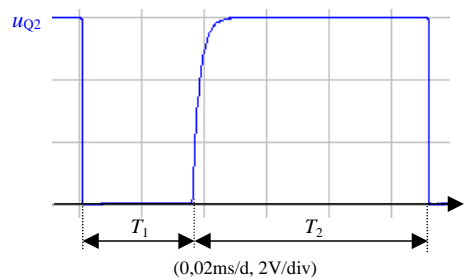
17. Dijeljenje frekvencije s 3 može se provesti s pomoću monostabila tako da trajanje kvazistabilnoga stanja T_B bude veće od dvije, a manje od tri periode ulaznoga napona.

18. Perioda ulaznoga napona frekvencije 1kHz je 1ms. Za dijeljenje frekvencije toga napona s 5 mora trajanje kvazistabilnoga stanja biti veće od 4, a manje od 5, npr. 4,3ms. Prema tome kapacitet kondenzatora monostabila sa slike 4.39. umjesto 33nF treba biti: $C_B = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{s} / 0,69 \cdot 22 \cdot 10^3 \Omega = 283 \text{nF}$.

$$19. f = 1 / (0,69(22 \cdot 103 \Omega \cdot 2,2 \cdot 10^{-9} \text{F} + 22 \cdot 103 \Omega \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} \text{F})) = 9,83 \text{kHz}$$

$$20. T_1 = 0,69 \cdot 22 \cdot 10^3 \Omega \cdot 2,2 \cdot 10^{-9} \text{F} = 33,4 \mu\text{s}$$

$$T_2 = 0,69 \cdot 22 \cdot 10^3 \Omega \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} \text{F} = 71,3 \mu\text{s}$$



21. Otporno opterećenje izlaza astabila prema masi djeluje kada je izlazni tranzistor u zapiranju tako da smanji izlazni napon na iznos $U_{CE} = U_{CC}R_P / (R_{C2} + R_P)$. Zbog toga je promjena napona na kolektoru jednoga tranzistora, odnosno na bazi drugoga tranzistora manja. Stoga će napon U_{BE} toga tranzistora brže doći do vrijednosti U_T kod koje provede, nego kod neopterećenog astabila pa će pripadajuće kvazistabilno stanje biti kraće. Posljedica je povećanje frekvencije izlaznoga napona.

22. Napon na izlazu Q_2 , kad je taj tranzistor nevodljiv (kvazistabilno stanje T_2), smanjit će se na 4V: $U_{Q2}=6V \cdot 2k\Omega / (1+2)k\Omega = 4V$. Zbog smanjenoga napona na izlazu Q_2 , smanjit će se trajanje kvazistabilnoga stanja T_1 s 33,4 μ s na 23,8 μ s pa će se povećati frekvencija astabila s 9,83kHz na 10,51kHz:

$$T_2 = 22 \cdot 10^3 \Omega \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} F \cdot \ln 2 = 22 \cdot 10^3 \Omega \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} F \cdot 0,69 = 71,3 \mu s$$

$$T_1 = 22 \cdot 10^3 \Omega \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} F \cdot \ln[(6+4-0,3-0,7)V / (6-0,5)V] = 22 \cdot 10^3 \Omega \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} F \cdot \ln 1,63 = 22 \cdot 10^3 \Omega \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} F \cdot 0,49 = 23,8 \mu s$$

$$f = 1 / (71,3 + 23,8) \text{ms} = 10,51 \text{kHz}$$

23. Za astabil sa slike 4.40. opterećen otporom od 2k Ω na izlazu Q_2 trajanje kvazistabilnoga stanja je $T_1 = \ln 1,63 \cdot 22 \cdot 10^3 \Omega \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} F = 23,8 \mu s$ (vidi rješenje zadatka 22.), a za neopterećeni astabil $T_1 = \ln 2 \cdot 22 \cdot 10^3 \Omega \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} F = 33,4 \mu s$. Kako bi i uz opterećenje ostala ista frekvencija, tj. trajanje kvazistabilnoga stanja T_1 , potrebno je povećati kapacitet kondenzatora s 2,2nF na C_{B1} . To znači da je: $T_1 = \ln 1,63 \cdot 22 \cdot 10^3 \Omega \cdot C_{B1} = 0,49 \cdot 22 \cdot 10^3 \Omega \cdot C_{B1} = 33,4 \mu s$. Iz toga slijedi $C_{B1} = 33,4 \mu s / 0,49 \cdot 22 \cdot 10^3 \Omega = 3,1 \text{nF}$.

24. Otporno opterećenje izlaza astabila prema naponu napajanja djeluje na tranzistoru kada je u zasićenju tako da se poveća struja njegova kolektora, što može uzrokovati izlazak tranzistora iz zasićenja u aktivno područje i povećanje izlaznoga napona. Zbog toga je smanjena promjena napona na kolektoru opterećenog tranzistora, odnosno bazi drugog tranzistora ($\Delta U_{CE2} = \Delta U_{BE1} = U_{CC} - U_{CE2}$), što ima za posljedicu smanjenje trajanja kvazistabilnog stanja, odnosno povećanje frekvencije izlaznoga napona.

5. POJAČALA

1. U Darlingtonovu spoju tranzistori se ponašaju kao jedan ekvivalentni tranzistor čiji je faktor strujnog pojačanja jednak umnošku faktora pojačanja pojedinih tranzistora (slika 5.1.)

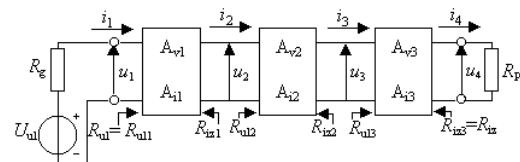
2. Fazni odnos ulaznog i izlaznog napona u spoju zajedničkog emitera s Darlingtonovim spojem tranzistora takav je da je signal na izlazu pojačan i fazno zaokrenut za 180° prema ulaznome signalu.

3. Pojačalo u spoju zajedničkog emitera s Darlingtonovim spojem tranzistora upotrebljava se kada je potrebno dobiti znatno veće strujno pojačanje i veći ulazni otpor pojačala.

4. Fazni odnos ulaznog i izlaznog napona u spoju zajedničkog kolektora s Darlingtonovim spojem tranzistora jest takav da se signal s ulaza prenosi na izlaz, dakle u fazi je s ulaznim.

5. Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora s Darlingtonovim spojem tranzistora upotrebljava se kada je potrebno znatno povećati ulazni otpor pojačala, a smanjiti izlazni otpor, jer se radi o kaskadi emitorskih sljedila.

6. Ukupno naponsko pojačanje kaskadnog spoja jednako je umnošku naponskog pojačanja svakog pojedinog stupnja: $A_{uuk} = (u_4 / u_3)(u_3 / u_2)(u_2 / u_1) = A_{u3} A_{u2} A_{u1}$. To vrijedi i za strujno pojačanje: $A_{iuk} = (i_4 / i_3)(i_3 / i_2)(i_2 / i_1) = A_{i3} A_{i2} A_{i1}$



7. Temperaturna stabilizacija radne točke kod izravno vezanog pojačala ostvaruje se otporom R u grani povratne veze (slika 5.8.). Ako s porastom temperature poraste struja I_{C1} , dolazi do smanjenja U_{CE1} , a time i U_{BE2} odnosno I_{E2} . Kako se napon sa R_E prenosi u ulazni krug pojačala, pada napon U_{BE1} , a time i I_B . Zbog veze $I_{C1} = \beta I_B$ smanjuje se i struja I_{C1} , što dokazuje suprotno djelovanje onome koje nastaje s porastom temperature.

8. Temperaturna stabilizacija radne točke kod RC pojačala ostvaruje se odabirom elemenata kojima se osigurava da I_B i I_C za svaki stupanj budu veće od dovedene i pojačane izmjenične struje signala, kako bi se izbjegla izobličenja. Svaki sljedeći stupanj mora imati veću I_B i I_C od prethodne, pa treba paziti na pravilan odabir statičke radne točke. Temperaturna stabilizacija radne točke ostvaruje se otporima R_{E1} i R_{E2} .

9. U statičkim uvjetima rada pojačala uz zadani napon napajanja $U_{CC}=12V$ slijedi:

$$U_{CC}=I_{C1}R_{C1}+U_{CE1}$$

$$U_{BE1}=I_{E2}R_{E2} \quad I_{E2}=U_{BE1}/R_{E2}=1,17mA$$

$$U_{CE1}=I_{E2}(R_{E1}+R_{E2})+U_{BE2}=3,5V$$

$$I_{C1}=(U_{CC}-U_{CE1})/R_{C1}=4,25mA$$

$$U_{CC}=I_{C2}(R_{C1}+R_{E1}+R_{E2})+U_{CE2}$$

$$I_{E2}=I_{C2}$$

$$U_{CE2}=U_{CC}-I_{C2}(R_{C1}+R_{E1}+R_{E2})=7,67V$$

U dinamičkim uvjetima rada vrijedi:

$$A_{u2}=-h_{fe2}R_{C2}/h_{ie2}=-130$$

$$A_{u1}=-h_{fe1}R_{C1} \parallel h_{ie2}/h_{ie1}=-68$$

$$A_{uuk}=A_{u1}A_{u2}=8840$$

$$A_{i2}=h_{fe2} \quad A_{i1}=h_{fe1}$$

$$A_{iuk}=h_{fe2} h_{fe1}=10000$$

10. $f_{d1}=40Hz$

$$f_{d2}=f_{d1}/(2^{1/n}-1)^{1/2}$$

$$n=2$$

$$f_{d2}=40/(2^{1/2}-1)^{1/2}=62,15Hz$$

$$f_{g1}=18kHz$$

$$f_{g2}=f_{g1}(2^{1/n}-1)^{1/2}=11,52kHz$$

11. Osnovno svojstvo diferencijalnog pojačala je da pojačava signale koji se na ulaze dovode u protufazi, a slabo pojačava signale koji se na ulaze dovode u fazi. Signal koji se želi pojačati može se dovesti i na samo jedan ulaz, a drugi se ulaz pri tome uzemljuje.

12. Faktor potiskivanja diferencijalnog pojačala je omjer pojačanja za istofazni signal prema pojačanju za protufazni signal ($F_P=A_d/A_c$). Faktor potiskivanja pokazuje u kojoj mjeri diferencijalno pojačalo potiskuje smetnje. Faktor potiskivanja često se izražava u decibelima ($F_P=20\log h_{fe}R_E/h_{ie}$).

13. S povećanjem otpora R_E bit će veći iznos faktora potiskivanja ($F_P=h_{fe}R_E/h_{ie}$).

14. S povećanjem otpora R_E može se dobiti visok iznos faktora potiskivanja, ali je pri tome potrebno povećati i napon izvora U_{EE} . Zbog toga se koristi treći tranzistor koji djeluje kao strujni izvor koji je za istosmjerni signal mali otpor, a za izmjenični veliki.

15. Korisni signal koji se želi pojačati dovodi se na ulaze u protufazi 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 korisnom signalu oslabljene.

16. Dovodjenjem signala na jedan ulaz diferencijalnog pojačala na kolektoru toga tranzistora dobije se signal fazno pomaknut prema ulaznome za 180° , a na kolektoru drugoga tranzistora signal koji je u fazi s ulaznim.

17. Treći tranzistor u spoju diferencijalnog pojačala $Tr3$ (slika 5.17.) upotrebljava se umjesto otpornika R_E . Tranzistor $Tr3$ (pojačalo u spoju zajedničke baze) djeluje kao strujni izvor, te je njegov otpor za istosmjernu struju mali, a za promjene napona i struje veliki čime se dobije veliki faktor potiskivanja.

$$18. A_{ud}=400mV/50mV=8$$

$$A_{uc}=0,5mV/50mV=0,01$$

$$F_P=A_{ud}/A_{uc}=8/0,01=800$$

19. Korisnost pojačala je odnos izmjenične snage predane trošilu i ukupne snage privedene pojačalu ($\eta=P_P/P_{CC}$).

20. Klasa rada pojačala određuje tip pojačala snage. Klasa se definira položajem radne točke tranzistora i prema tome postoje četiri tipa pojačala: pojačalo u klasi A, B, AB i C.

21. Najveća moguća korisnost kod pojačala koje radi u klasi A postiže se kada je $R_P=R_C$ i iznosi $1/12$.

22. Najveću korisnost pojačala u klasi A moguće je dobiti ako se trošilo spoji u kolektorski krug preko transformatora. U tome slučaju teoretski je moguće postići korisnost 50%, a praktično oko 40%.

23. Protutaktno pojačalo radi u klasi B. Struja kroz tranzistor teče samo za vrijeme jedne poluperiode signala jer je radna točka takvog pojačala na granici aktivnog područja rada tranzistora i područja zapiranja.

24. Protutaktnim se pojačalom postiže mnogo veća korisnost pojačala koja u najpovoljnijem slučaju iznosi 78%.

25. Kod pojačala u klasi B pojavljuju se izobličenja pri prolasku napona signala kroz nulu. Kako tranzistori počinju voditi tek kada ulazni signal dostigne određeni napon U_{BE} , izlazni signal protutaktnog pojačala je izobličen (slika 5.25.).

To izobličenje se može otkloniti tako da se u krugove baza tranzistora dovede odgovarajući prednapon koji će omogućiti da tranzistori vode već u statičkim uvjetima. To je pojačalo klase AB (slika 5.26.).

26. Kod pojačala na slici 5.35.a postoji samo jedan izvor napona napajanja, tako da će se 12V s toga izvora dijeliti na oba tranzistora pa se dobije manji hod izlaznoga signala bez izobličenja u usporedbi s pojačalom sa slike 5.35.b s dva napona napajanja.

$$27. L = 1/4\pi^2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 10^6 = 0,0158H = 15,8mH$$

6. OPERACIJSKA POJAČALA

1. Operacijsko pojačalo napajano s dva izvora, pobuđeno izmjeničnim naponom, daje na izlazu također izmjenični napon (pozitivne i negativne vrijednosti), dok pojačalo napajano s jednim izvorom napajanja, uz istu pobudu, daje na izlazu napon samo jednoga polariteta, dok je napon drugoga polariteta odrezan.

2. Signal doveden na invertirajući ulaz bit će na izlazu pojačan i u protufazi s ulaznim, a signal doveden na neinvertirajući ulaz bit će na izlazu pojačan i u fazi s ulaznim.

3. Amplituda signala ograničena je iznosom napona napajanja i iznosi oko 90% od napona napajanja.

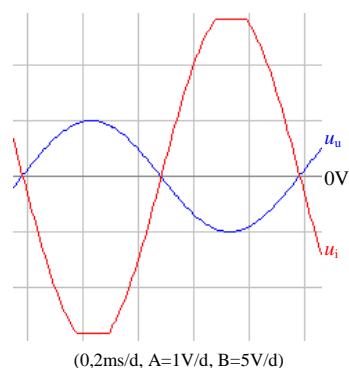
4. Dopuštene vrijednosti na koje se mora paziti pri radu s operacijskim pojačalom su vrijednosti: napona napajanja, ulaznoga napona (napon ulaza prema uzemljenoj točki i napon između dva ulaza tzv. diferencijalni ulazni napon), radne temperature, utroška snage i temperature lemljenja 300C°.

5. Najvažnija električna svojstva operacijskog pojačala jesu: vrlo veliko naponsko pojačanje (200000 i više), veliki ulazni otpor (npr. 2MΩ) i mali izlazni otpor (npr. 75Ω), faktor potiskivanja (npr. 90dB), ulazni napon namještanja (npr. 1mV).

6. Faktor potiskivanja operacijskog pojačala je omjer vrijednosti diferencijskoga pojačanja i pojačanja za zajednički signal i izražava se u dB: $F_p = 20 \log A_d / A_c$.

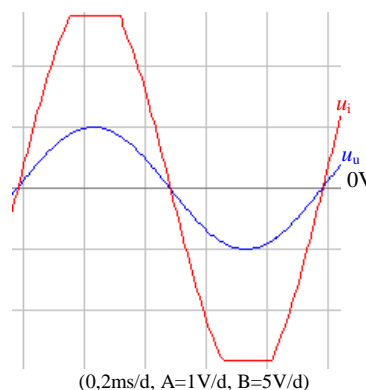
$$7. A_u = -150k\Omega / 10k\Omega = -15$$

8.



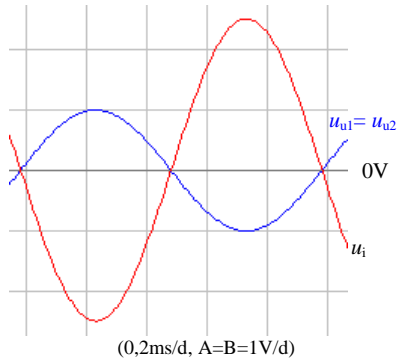
$$9. A_u = 1 + 150k\Omega / 10k\Omega = 16$$

10.

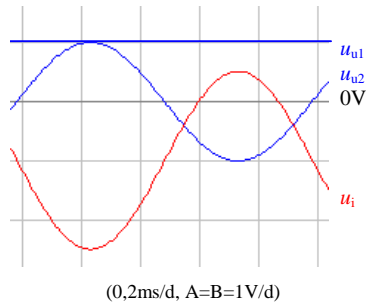


11. Širina frekventijskog pojasa B operacijskoga pojačala bez povratne veze jednaka je gornjoj graničnoj frekvenciji f_g jer donja granična frekvencija f_d za operacijsko pojačalo iznosi 0Hz. Za pojačalo bez povratne veze vrlo je niska, reda veličine desetak herca. Kako se operacijsko pojačalo upotrebljava u sklopovima s elementima koji čine jake negativne povratne veze, širina frekventijskog opsega se povećava, ali se pojačanje smanjuje. Gornja granična frekvencija za operacijsko pojačalo s povratnom vezom je $f_{gpv} = f_{go}(1 + \beta A_{uo})$, gdje je f_{go} gornja granična frekvencija bez povratne veze, a β faktor povratne veze. Za operacijsko pojačalo stalan (konstantan) je umnožak pojačanja i širine frekventijskog pojasa $A_{uo}B$ i jednak vrijednosti frekvencije jediničnog pojačanja f_T (frekvencija na kojoj je pojačanje jednako 1, odnosno 0dB). To znači da širina frekventijskog pojasa ovisi o primijenjenoj povratnoj vezi, odnosno o pojačanju pojačala s povratnom vezom. Što je to pojačanje manje, veća je širina frekventijskog pojasa.

12.



13.

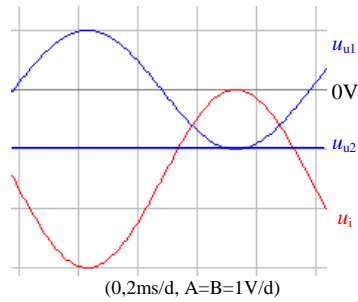


14. -1,5V

15. -7,5V

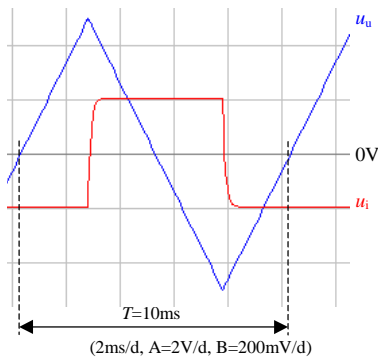
16. -1,5V

17.

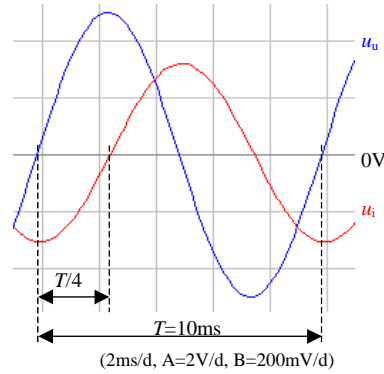


18. -2V

19.



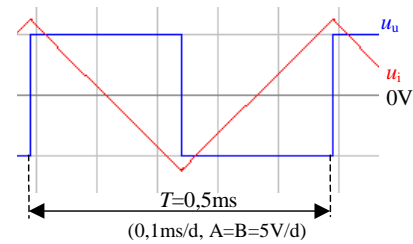
20.



21. Kod diferencijatora amplituda je izlaznoga napona proporcionalna brzini promjene ulaznoga napona $U_{izm}=R_2Cdu_u/dt$. Što je frekvencija ulaznoga napona veća, bit će veća brzina njegove promjene. Dakle s porastom frekvencije ulaznoga napona bit će veća amplituda izlaznoga napona. Međutim s porastom frekvencije iznad određene vrijednosti, dolazi do izobličenja izlaznoga napona.

22. Amplituda izlaznoga napona diferencijatora proporcionalna je s kapacitetom kondenzatora C , tj. što je vrijednost kapaciteta kondenzatora C veća, bit će veća amplituda izlaznoga napona. Međutim s kapaciteta kondenzatora iznad određene vrijednosti dolazi do izobličenja izlaznoga napona.

23.



24.

