

PRAKTIKUM IZ OSNOVA ELEKTRONIKE
PROF. SMJEROVI

Vježba 7.

OSCILATORI. MODULACIJA I DEMULACIJA

ZADACI

1. RC oscilator

- a) Precrtajte shemu RC oscilatora i uočite bitne dijelove. Priključite napon napajanja od 12 V.
- b) Snimite visokofrekventni signal na izlazu sklopa (točka **2**), te mijenjanjem potencimetara postignite što je moguće 'savršeniju' sinusoidu. Na temelju sheme objasnite ulogu pojedinog potencimetra. Izmjerite frekvenciju signala i usporedite je s teorijskom vrijednošću.
- c) Snimite visokofrekventne signale u pojedinim točkama sklopa. Usporedite njihove amplitude i pomake u fazi u odnosu na izlazni signal. Objasnite dobivene rezultate. Koja je uloga pojedinog stupnja u *RC* mreži?

2. Oscilator s kristalom

- a) Precrtajte shemu oscilatora s kristalom i uočite bitne dijelove. Priključite napon napajanja od 12 V.
- b) Snimite visokofrekventni signal u pojedinim točkama sklopa. Izmjerite frekvenciju impulsa i usporedite je s teorijskom vrijednošću. Objasnite izgled signala u pojedinim točkama sklopa.

3. Wienov oscilator

- a) Precrtajte shemu Wienovog oscilatora i uočite bitne dijelove. Priključite napon napajanja od ± 9 V (baterije!).
- b) Snimite visokofrekventni signal na izlazu iz Wienovog oscilatora (točka **VF**). Proučite utjecaj potencimetra **P** na oblik signala, te pokušajte dobiti što pravilniji sinusoidalni signal. Izmjerite frekvenciju signala za oba položaja prekidača **S1**, te ih usporedite s teorijskim vrijednostima ($C = 1000$ pF, $R = 6.5$ k Ω ili 13 k Ω).

4. Modulator

- a) Precrtajte shemu modulatora i uočite bitne dijelove. Dovedite na modulator, u točku **NF**, niskofrekventni sinusoidalni signal frekvencije 250 Hz.

- b) Snimite zbrojeni signal (u točki prije diode modulatora) i modulirani signal (nakon diode). Na drugi kanal osciloskopa dovedite originalni niskofrekventni signal. Odredite postotak modulacije za nekoliko vrijdnosti amplitude niskofrekventnog signala. (Oprez: izbjegavati prevelike modulacije kod kojih je signal znatno izobličen.)

5. Demodulator

- a) Precrtajte shemu demodulatora i uočite bitne dijelove.
- b) Snimite demodulirani signal bez i sa priključenim kondenzatorom (prekidač **S2**). Diskutirajte dobivene rezultate. Koja je razlika u fazi između originalnog niskofrekventnog signala i konačnog demoduliranog signala? Zašto?

OSCILATORI

1.1 Uvod

Svaki imalo napredniji uređaj kojim se koristimo u svakodnevnom životu u sebi ima jedan ili više oscilatora – elektroničkih ‘podsklopova’ – kojima je glavni zadatak da daju periodični izmjenični napon ili struju zadane frekvencije. Npr. u najobičnijem ručnom satu, bilo digitalnom, bilo s kazaljka, pogonski mehanizam je upravljan elektroničkim oscilatorom perioda 1 s. U radio prijemniku bitan dio predstavlja oscilator *sinusoidalnog* signala frekvencije od nekoliko stotina kHz. Bežični i mobilni telefoni komuniciraju sa svojim ‘baznim stanicama’ na fiksnim frekvencijama: u oba uređaja se nalazi oscilator *sinusoidalnog* signala frekvencije par desetaka MHz (bežični telefon) tj. 900 MHz (mobilni telefoni).

Uređaji čije se funkcioniranje zasniva na mikroprocesoru također trebaju periodički signal – takt – koji sinkronizira interni rad mikroprocesora, kao i njegovu komunikaciju s memorijom i/ili ostalim vanjskim jedinicama. To su *pravokutni* signali frekvencija od nekoliko stotina kHz (jednostavniji uređaji za pohranu podataka poput elektroničkih planera) do nekoliko GHz za procesore u današnjim¹ stolnim računalima.

Na kraju spomenimo i signale koji služe za vodoravno upravljanje iscrtavanja slike na ekranima monitora, televizora ili osciloskopa. To su tzv. *pilasti* impulsi kod kojih napon od neke početne vrijednosti linearno raste s vremenom, te naglo pada na početnu vrijednost. Tipične frekvencije pilastih impulsa su od nekoliko desetaka kHz u starijim uređajima, pa do nekoliko stotina MHz u najmodernijim osciloskopima.

Gore spomenuti oblici signala – *sinusoidalni*, *pravokutni* i *pilasti* – naravno nisu jedini koji se koriste u uređajima, ali su daleko najrašireniji. Ostali signali (trokutasti, nesimetrični pravokutni . . .) su donekle specijalniji i njihova primjena je ograničena na uređaje s posebnim namjenama.

Zajedničko svim modernim oscilatorima jest primjena prikladne vrste povratne veze: dio signala sa izlaza oscilatora se vraća nazad u sklop u svrhu pobuđivanja ‘novih’ oscilacija. Međutim, konkretna konstrukcija sklopa za osciliranje ovisi o tome koju vrstu periodičkog signala želimo dobiti. Tako npr. oscilator pravokut-

¹kraj 2004. godine

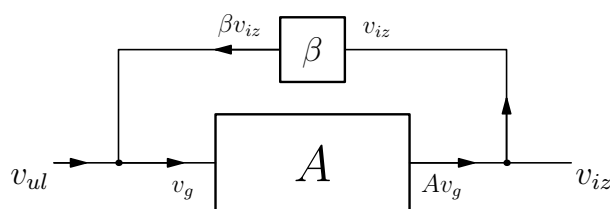
nih impulsa radi u području zasićenja aktivnih elemenata – za vrijeme poluperiode u kojoj je napon pozitivan tranzistor je u OFF stanju, dok je za vrijeme druge poluperiode u stanju ON. Takvi sklopovi se zovu multivibratori i sastoje se primarno od dva tranzistora; izlaz svakog tranzistora je spojen na ulaz drugog (povratna veza).

U ovoj se vježbi nećemo dalje upuštati u detalje rada svih vrsta oscilatora, već ćemo pažnju posvetiti sklopovima za dobivanje sinusoidalnih oblika signala.

1.2 Sinusoidalni oscilatori

Važna klasa oscilatora su sinusoidalni oscilatori. Oni su karakterizirani činjenicom da aktivni elementi elektroničkog sklopa oscilatora ne ulaze u zasićenje. Tipična izvedba takvih oscilatora se zasniva na pozitivnoj povratnoj vezi, koja mora biti takva da omogućuje osciliranje sklopa bez vanjske pobude.

Na sl.1 je shematski (blok-shema) prikazana izvedba sinusoidalnog oscilatora s pozitivnom naponskom povratnom vezom. Dio izlaznog signala v_{iz} se preko



Slika 1.

'dijeljitelja' β vraća na ulaz sklopa. Standardni izvod daje pojačanje takvog sklopa:

$$Av_g = v_{iz}, \quad (1)$$

gdje je

$$v_g = v_{ul} + \beta v_{iz}. \quad (2)$$

Uvrštavanjem i sređivanjem:

$$Av_{ul} = v_{iz}(1 - \beta A), \quad (3)$$

odakle dobivamo ukupno pojačanje sklopa:

$$A_p = \frac{v_{iz}}{v_{ul}} = \frac{A}{1 - \beta A}. \quad (4)$$

Primijetimo da u ovom izrazu i originalno pojačanje A , a i povratna veza β ovise općenito o frekvenciji ω ulaznog sinusoidalnog signala. U tom je smislu prethodne izraze točnije zapisati kao:

$$A(\omega)v_{ul} = v_{iz} [1 - \beta(\omega)A(\omega)] , \quad (5)$$

$$A_p(\omega) = \frac{A(\omega)}{1 - \beta(\omega)A(\omega)} . \quad (6)$$

Zahtjev na naš sklop je da on oscilira bez dovođenja ulaznog signala. Uvrstimo stoga $v_{ul} = 0$ u izraz (5):

$$0 = v_{iz} [1 - \beta(\omega)A(\omega)] . \quad (7)$$

Desna strana može biti jednaka nuli ili ako je $v_{iz} = 0$ ili ako je zagrada jednaka nuli. Nama je, naravno, interesantan drugi slučaj, iz čega možemo dobiti uvjet da neki sklop s povratnom vezom bude oscilator:

$$\beta(\omega)A(\omega) = 1 . \quad (8)$$

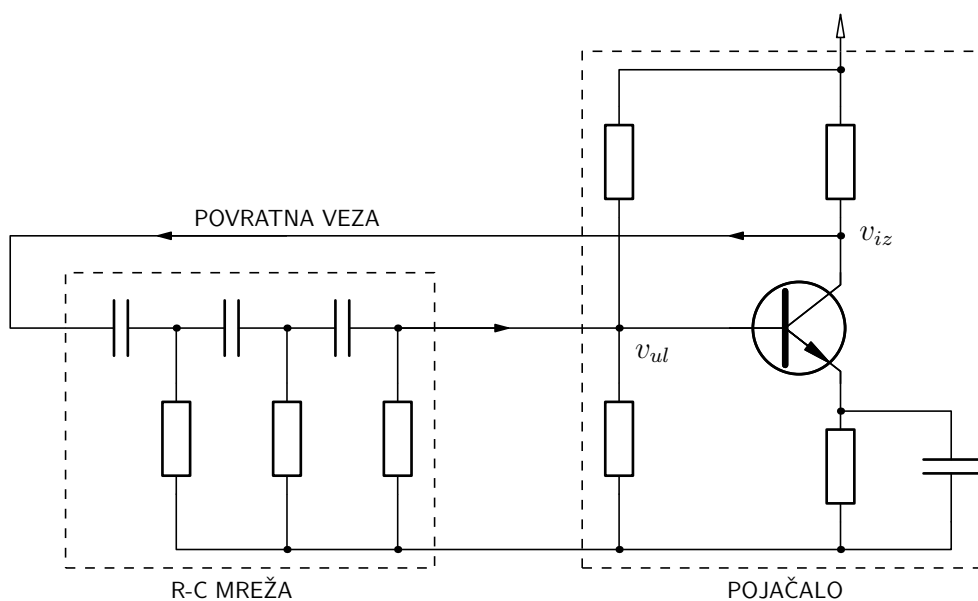
Vidimo da će sklop oscilirati samo onom frekvencijom za koju je zadovoljeno (8), tj. frekvencijom na kojoj je produkt pojačanja i faktora povratne veze (oboje su kompleksni brojevi) jednak *realnom* broju 1.

U jednostavnijim oscilatorskim sklopovima (poput sklopova u ovoj vježbi) pojačalo je izvedeno tako da mu je izlaz u protufazi sa ulazom. Drugim riječima, njegovo pojačanje je realan negativni broj. Iz (8) možemo onda zaključiti da povratna veza mora biti takva da dodatno okrene fazu za 180° kako bi na ulaz pojačala došao signal koji je *u fazi* s izlazom.

1.3 RC oscilator

RC oscilator je sklop koji se koristi za dobivanje sinusoidalnih signala frekvencija od nekoliko Hz pa do par stotina kHz. Sastoji se od BJT pojačala i povratne veze koja izlaz preko mreže otpornika i kondenzatora vodi na njegov ulaz. Na slici sl.2 prikazana je približna shema takvog oscilatora.

Povratna veza – *RC* mreža – sastoji se od 3 serijski spojena *CR* stupnja. Očito, ta mreža će određivati faktor povratne veze $\beta(\omega)$. Izvedimo izraz za njega.



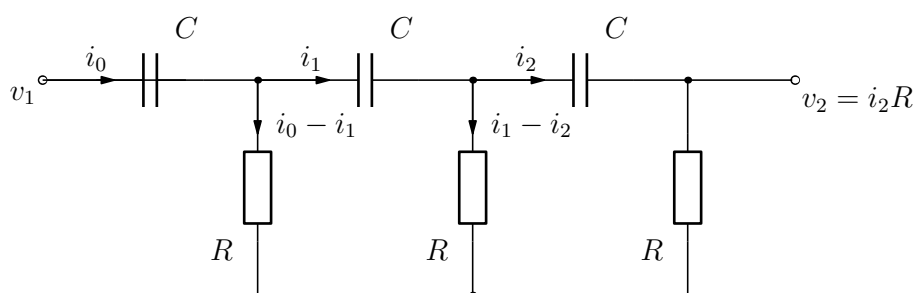
Slika 2.

Za struje označene prema slici sl.3 možemo napisati niz jednakosti:

$$v_1 = i_0 X_C + (i_0 - i_1)R, \quad (9)$$

$$(i_0 - i_1)R = i_1 X_C + (i_1 - i_2)R, \quad (10)$$

$$(i_1 - i_2)R = i_2 X_C + i_2 R. \quad (11)$$



Slika 3.

Faktor $\beta(\omega)$ ćemo onda odrediti kao:

$$\beta(\omega) = \frac{v_2}{v_1} = \frac{i_2 R}{v_1}. \quad (12)$$

Gornji sustav jednadžbi lakše je riješiti ako se svaka jednadžba podijeli s R i uvede oznaka $\lambda = X_C/R = 1/j\omega RC$:

$$\frac{v_1}{R} = i_0\lambda + i_0 - i_1, \quad (13)$$

$$i_0 - i_1 = i_1\lambda + i_1 - i_2, \quad (14)$$

$$i_1 - i_2 = i_2\lambda + i_2. \quad (15)$$

Eliminiranjem i_0 i i_1 dobivamo:

$$i_2 = \frac{1}{\lambda^3 + 5\lambda^2 + 6\lambda + 1} \frac{v_1}{R}, \quad (16)$$

odakle slijedi izraz za $\beta(\omega)$:

$$\beta(\omega) = \frac{1}{\lambda^3 + 5\lambda^2 + 6\lambda + 1} = \frac{1}{j/(\omega RC)^3 - 5/(\omega RC)^2 - 6j/\omega RC + 1}. \quad (17)$$

Pogledajmo sada kako možemo zadovoljiti uvjet osciliranja (8). S obzirom na to da se može očekivati da je $|\beta(\omega)|$ srazmjerno dosta manji od 1, pojačanje $A(\omega)$ bi trebalo biti što veće. Za pojačanje znamo da je najveće u srednjem području frekvencije, gdje je ujedno $A(\omega)$ blizak negativnom (velikom) realnom broju. To znači da bi i $\beta(\omega)$ trebao biti realan i negativan. Nazivnik, a time i čitav izraz za $\beta(\omega)$, bit će realan ako je:

$$\frac{j}{(\omega RC)^3} - \frac{6j}{\omega RC} = 0 \Rightarrow (\omega RC)^2 = \frac{1}{6}. \quad (18)$$

To nam ujedno daje i frekvenciju sinusoidalnog signala koji nam sklop daje:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC\sqrt{6}} \quad \text{ili} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}} \frac{1}{RC}. \quad (19)$$

Kako je $\beta(\omega = \omega_0) = -1/29$ možemo odrediti i minimalno pojačanje pojačala s BJT koje može poslužiti pri gradnji oscilatora:

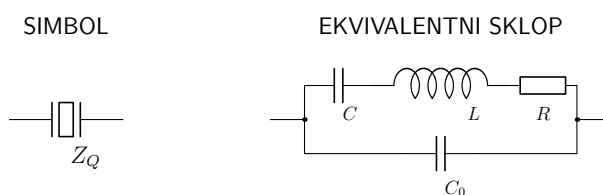
$$\beta(\omega_0)A(\omega_0) = 1 \Rightarrow A(\omega_0) = -29. \quad (20)$$

U izvodu za frekvenciju osciliranja smo šutke pretpostavili da je izlazni otpor pojačala s BJT zanemariv, a ulazni beskonačan. Takvi uvjeti su u realnim sklopovima rijetko zadovoljeni. Posljedica toga je da u uvjetu (19) ne možemo sasvim slobodno birati vrijednosti otpora R i kapaciteta C . Osim toga, niti su svi elementi savršeni (identičnih vrijednosti), a niti BJT nema idealnu karakteristiku. Zato je realni sklop nešto kompliciraniji; dodatni otpornici, kondenzatori i potenciometri upravo služe da isprave te nesavršenosti, te da sklop približe idealnim pretpostavkama kakve smo mi ovdje načinili.

1.4 Oscilator s kristalom

RC oscilator je srazmjerno jednostavan oscilator, te kao takav ima dosta mana. Najveća mu je mana to što je vrlo osjetljiv na vanjske uvjete: temperaturu i stabilnost napona napajanja. Puno stabilniji i pouzdaniji sklop može se dobiti oscilatorom s kristalom. Radi se o dodatnom elektroničkom elementu – kristalu (preciznije: kristal između dviju ploča kondenzatora) – koji radi na principu piezoelektriciteta: vanjsko električno polje u njemu uzrokuje mehaničku deformaciju. Ako se električno polje periodički mijenja, onda kristal titra. Upravo postojanje dobro definiranih vlastitih frekvencija titranja tog kristala, koje ovise o njegovoj masi i dimenzijama, može poslužiti kao dobra osnova za povratnu vezu.

U električnom krugu kristal se može zamjeniti s ekvivalentnom shemom u kojoj se nalaze kondenzatori, zavojnica i otpornik (sl.4).



Slika 4.

Vrijednost induktiviteta L u ovoj ekvivalentnoj shemi je povezana s masom kristala, R sa činjenicom da se titranja prenose na okolinu (dakle, gube se \rightarrow otpor!), a C s detaljima konfiguracije kontakata na kristalu, dimenzije i smjera vanjskog električnog polja u odnosu na kristalne osi. C_0 je povezan s 'običnim' kapacitetom pločastog kondenzatora unutar kojeg se nalazi izolator.

Nije teško izvesti ukupnu impedanciju ekvivalentnog sklopa kristala. U području visokih frekvencija otpor R se može zanemariti pa se za $Z_Q = Z_Q(\omega)$ dobiva:

$$Z_Q(\omega) = \frac{1}{j\omega C_0} \frac{\omega^2 - \omega_1^2}{\omega^2 - \omega_2^2}, \quad (21)$$

gdje smo definirali

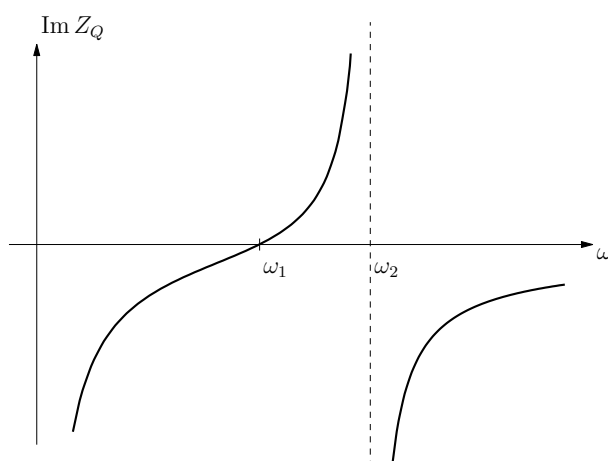
$$\omega_1^2 = \frac{1}{LC}, \quad (22)$$

$$\omega_2^2 = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_0} \right) \quad (23)$$

$$= \omega_1^2 + \frac{1}{LC_0} = \omega_1^2 \left(1 + \frac{C}{C_0} \right). \quad (24)$$

Izraz (21) može se još zapisati u obliku

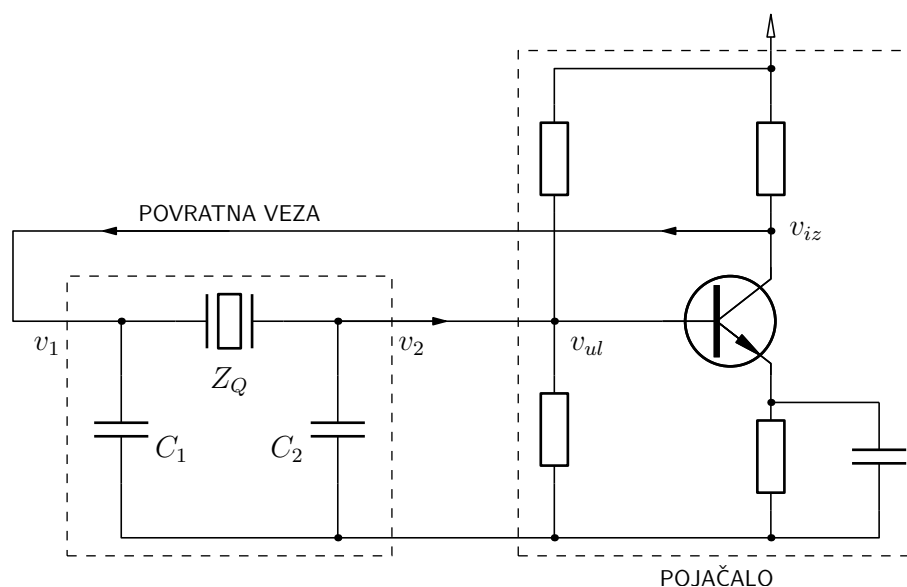
$$Z_Q(\omega) = \frac{1}{j\omega C_0} \frac{\omega^2 - \omega_2^2 + \omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega^2 - \omega_2^2} = \frac{1}{j\omega C_0} \left(1 + \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega^2 - \omega_2^2} \right). \quad (25)$$



Slika 5.

Oдавде lako vidimo frekventnu karakteristiku kristala (sl.5). Zanimljivo je da se u području frekvencija između ω_1 i ω_2 kristal ponaša kao induktivitet. Parametri tvornički proizvedenih kristala su takvi da su ω_1 i ω_2 vrlo bliske frekvencije. Kao što ćemo kasnije vidjeti upravo to područje nam je najinteresantnije za primjenu.

Tipičan (pojednostavljeni) oscilatorski sklop s kristalom dan je na slici sl.6. Izlaz pojačala spojen je preko kristala i dva kondenzatora na ulaz pojačala; dakle i ovdje se radi o povratnoj vezi. Kako bismo našli kojom frekvencijom će sklop oscilirati, moramo naći faktor povratne veze $\beta(\omega) = v_2/v_1$. Nije teško vidjeti da



Slika 6.

vrijedi:

$$v_2 = \frac{v_1}{Z_Q + X_{C_2}} X_{C_2} = v_1 \frac{1}{1 + Z_Q/X_{C_2}}. \quad (26)$$

Prema tome:

$$\beta(\omega) = \frac{1}{1 + Z_Q/X_{C_2}} = \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C} \left(1 + \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega^2 - \omega_2^2}\right)}. \quad (27)$$

Uvjet (8) najlakše je zadovoljiti kada je β najveći. U našoj aproksimaciji (sa zanemarenim R u ekvivalentnoj shemi za kristal) to odgovara frekvenciji na kojoj je nazivnik izraza (27) jednak nuli. Kratki izvod daje:

$$\omega_0^2 = \omega^2 = \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{C}{C_0 + C_2}\right) = \omega_1^2 \left(1 + \frac{C}{C_0 + C_2}\right) \quad (28)$$

ili

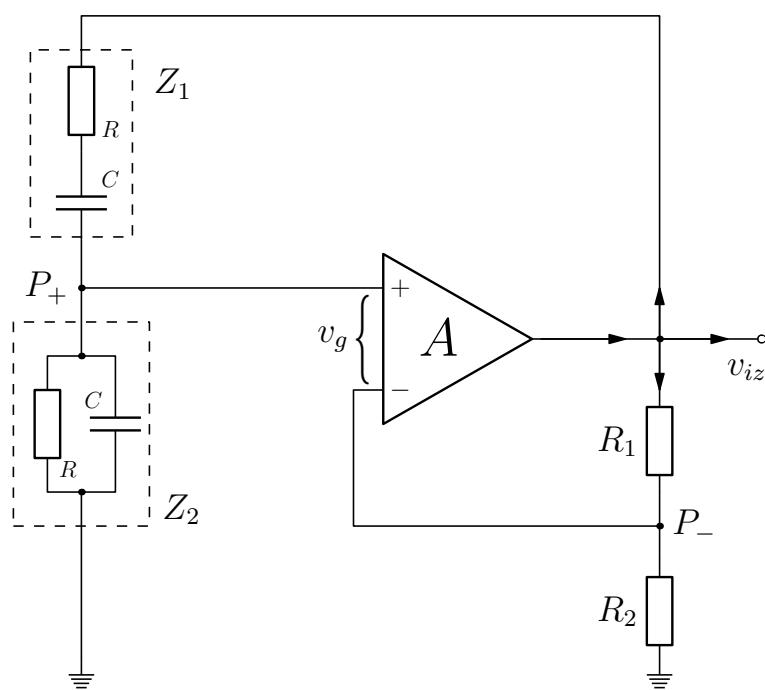
$$\omega_0 = \omega_1 \sqrt{1 + \frac{C}{C_0 + C_2}} \Rightarrow f_0 = f_1 \sqrt{1 + \frac{C}{C_0 + C_2}}. \quad (29)$$

Primijetimo da se ta frekvencija nalazi u području između ω_1 i ω_2 , što znači da kristal radi u induktivnom režimu rada. Zaista, može se pokazati da će gornji sklop oscilirati i ako se umjesto kristala stavi zavojnica prikladnog induktiviteta (tzv. *Colpittsov* oscilator s kojim se ovdje nećemo baviti).

Sklop s kristalom kakav koristimo u ovoj vježbi se u literaturi još naziva i *Pierceov oscilator*. Sastoji se od BJT pojačala i povratne veze s kristalom rezonantne frekvencije 455 kHz. Taj podatak otprilike odgovara sredini područja između frekvencija ω_1 i ω_2 , koje je samo po sebi jako usko. Takva nepreciznost u specifikaciji bitno je manja od točnosti ostalih elemenata (tipično 5% ili 1% za otpornike i kondenzatore). Dakle, ako sklop uopće može oscilirati, tj. ako je pojačanje pojačala dovoljno veliko, davat će sinusoidalni signal frekvencije upravo oko 455 kHz.

1.5 Wienov oscilator

Jedan tip oscilatora koji se zasniva na pozitivnoj povrtanoj vezi je i tzv. *Wienov oscilator*. Njegova shema dana je na sl.7, a sastoji se od operacijskog pojačala i povratne veze preko $Z_1 - Z_2$ impedancija i $R_1 - R_2$ otpornika.



Slika 7.

Promotrimo najprije napone u točkama P_+ i P_- , pod pretpostavkom da je na izlazu iz operacijskog pojačala napon v_{iz} . Nije teško vidjeti da su ti naponi

jednaki:

$$P_+ = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} v_{iz} = \frac{1}{1 + Z_1/Z_2} v_{iz}, \quad (30)$$

$$P_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{iz} = \frac{1}{1 + R_1/R_2} v_{iz}, \quad (31)$$

s obzirom na to da su i $Z_1 - Z_2$ i $R_1 - R_2$ dijelitelji napona. Na ulaz operacijskog pojačala dolazi napon v_g :

$$v_g = P_+ - P_- = \left(\frac{1}{1 + Z_1/Z_2} - \frac{1}{1 + R_1/R_2} \right) v_{iz}. \quad (32)$$

S druge strane, mora biti:

$$Av_g = v_{iz}. \quad (33)$$

Iz ovih dviju jednadžbi možemo dobiti:

$$A \left(\frac{1}{1 + Z_1/Z_2} - \frac{1}{1 + R_1/R_2} \right) v_{iz} = v_{iz}, \quad (34)$$

ili nakon kraćenja s v_{iz} :

$$A \left(\frac{1}{1 + Z_1/Z_2} - \frac{1}{1 + R_1/R_2} \right) = 1. \quad (35)$$

To je upravo ponovno izveden uvjet (8).

Za idealno operacijsko pojačalo, za koje je $A \rightarrow \infty$, gornji izraz se reducira na:

$$\frac{1}{1 + Z_1/Z_2} - \frac{1}{1 + R_1/R_2} \approx 0. \quad (36)$$

Iz njega zaključujemo da nam omjer Z_1/Z_2 mora biti *realan* broj, po mogućnosti jednak omjeru R_1/R_2 . Računamo:

$$Z_1 = R + \frac{1}{j\omega C}, \quad \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R} + j\omega C. \quad (37)$$

Slijedi:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right) \left(\frac{1}{R} + j\omega C \right) = 2 + j \left(\omega RC - \frac{1}{\omega RC} \right). \quad (38)$$

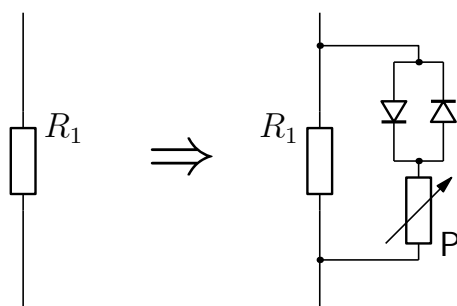
Omjer Z_1/Z_2 će, prema tome, biti realan broj kada je zagrada u gornjem izrazu jednaka nuli, tj. upravo na frekvenciji:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (39)$$

To je ujedno i frekvencija kojom će sklop oscilirati. Uočimo još na kraju da otpornici R_1 i R_2 moraju zadovoljavati uvjet $R_1/R_2 = 2$, s obzirom na to da je za gore dobiveni ω_0 omjer $Z_1/Z_2 = 2$.

1.5.1 Wienov oscilator – sklop

Sklop za Wienov oscilator na maketi odgovara gore opisanom sklopu, uz dva dodatka. a) Otpornici u Z_1 i Z_2 se prekidačem mogu mijenjati između dvije vrijednosti: $6.5\text{ k}\Omega$ i $13\text{ k}\Omega$. b) U sklopu je paralelno otporu R_1 spojen potenciometar **P** i dvije diode (sl.8). Ovi elementi ispravljaju eventualne nesimetrije u operacijskom pojačalu te odstupanja otpornika i/ili kondenzatora od deklariranih vrijednosti.



Slika 8.

PRINCIP RADIOFONIJE

2.1 Prijenos (emisija)

Kada se u vodiču proizvode visokofrekventni titraji, dio električne energije prelazi u okolni prostor u obliku elektromagnetskih valova. Ako je uloga tog vodiča da zrači elektromagnetske valove, on se naziva antena za odašiljanje. Antene su obično na jednom svom kraju slobodne, a na drugom kraju uzemljene, i njima se u radiofoniji prenosi govor i glazba preko radiostanica. Emitirani elektromagnetski val koji emitira jedna antena je polariziran i na udaljenostima većim od desetak valnih duljina električno polje elektromagnetskog vala je okomito na površinu zemlje, a magnetsko polje je horizontalno.

Dok radiostanica ne emitira nikakav zvuk, antena emitira sinusni val stalne amplitude, kojem se veličina električnog vektora na nekom mjestu mijenja s vremenom prema jednadžbi:

$$e_0 = E_0 \cos \omega_0 t, \quad (40)$$

gdje je e_0 elongacija električnog polja, E_0 njegova amplituda, ω_0 frekvencija ($\omega_0 = 2\pi f_0$) i t je vrijeme. Ovaj val se naziva *val nosilac*. Za radiostanice koje emitiraju u području 'srednjih valova' s valnom duljinom od npr. 300 m, frekvencija vala nosioca je 1 MHz; frekvencije vala nosilaca su značajno više od najviših akustičkih frekvencija koje može detektirati ljudsko uho.

U svrhu radioprijenosa u val nosilac treba utisnuti niskofrekventnu pojavu, što se naziva *modulacijom*. Postoji nekoliko metoda moduliranja vala nosioca: amplitudna modulacija (modulira se amplituda vala nosioca), frekventna (modulira se frekvencija vala nosioca) i fazna (modulira se faza). Kod amplitudne modulacije mijenja se amplituda vala nosioca na taj način da njeno odstupanje od nemodulirane vrijednosti postaje direktno proporcionalno trenutnoj vrijednosti amplitude modulirajućeg (niskofrekventnog) vala, ali je neovisno o njegovoj frekvenciji.

Pretpostavimo da je modulirajući val sinusan i da ima oblik:

$$e_m = E_m \cos \omega_m t. \quad (41)$$

U skladu s gornjom definicijom amplituda moduliranog vala je funkcija vremena i dana je relacijom:

$$E(t) = E_0 + kE_m \cos \omega_m t, \quad (42)$$

gdje je k neka konstanta proporcionalnosti. Drugi član na desnoj strani predstavlja odstupanje amplitude superponirano na konstantnu vrijednost E_0 . Potpuni izraz za amplitudno modulirani visokofrekventni val je prema tome:

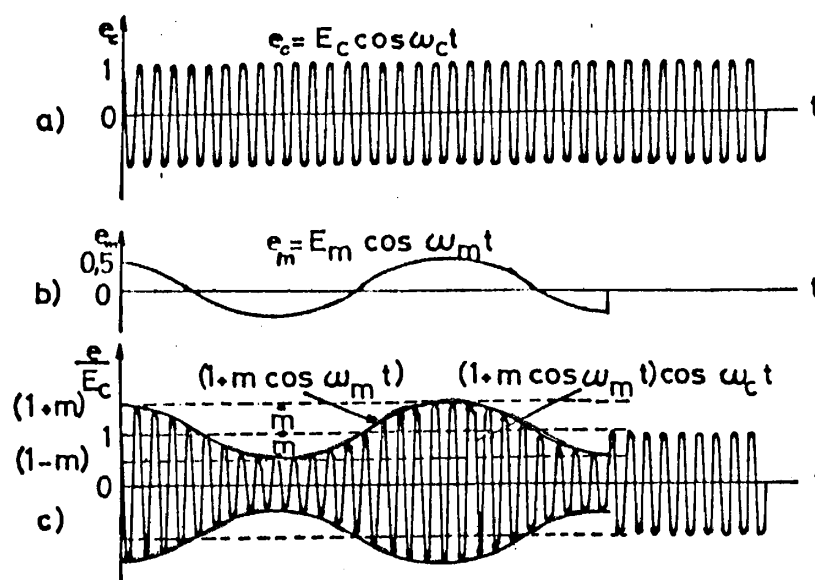
$$e = (E_0 + kE_m \cos \omega_m t) \cos \omega_0 t. \quad (43)$$

Ova jednadžba se može još pisati u obliku:

$$e = E_0(1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_0 t, \quad (44)$$

gdje je $m = kE_m/E_0$ *faktor modulacije*. Budući da je u radiofoniji omjer frekvencije f_0/f_m jako velik (> 1000), amplituda vala $E_0(1 + m \cos \omega_m t)$ se sporo

mijenja u odnosu na član $\cos \omega_0 t$. Vremenska promjena amplitude nazive se još i anvelopa visokofrekventnog vala. Faktor modulacije m označava opseg u kojem modulacija mijenja amplitudu tog vala.



Slika 9. (a) Nemodulirani val nosilac prikazan za $E_0 = 1$, $\omega_0 = 20$. (b) Nisko-frekventna sinusna pojava koju treba utisnuti u val nosilac ($E_0 = 0.5$, $\omega_m = 1$). (c) Amplitudno modulirani val sa sinusnom modulacijom.

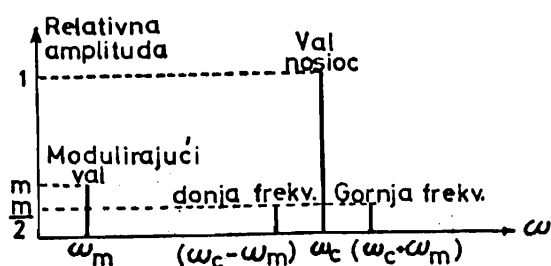
Po svojoj prirodi amplitudno modulirani val je nesinusan, i po Fourierovom teoremu on se mora sastojati iz većeg ili manjeg broja jednostavnijih sinusnih komponenti. Uz pomoć trigonometrijske jednakosti:

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)] \quad (45)$$

dobivamo relaciju za amplitudno modulirani val:

$$e = E_0 \cos \omega_0 t + (mE_0/2) \cos(\omega_0 + \omega_m)t + (mE_0/2) \cos(\omega_0 - \omega_m)t \quad (46)$$

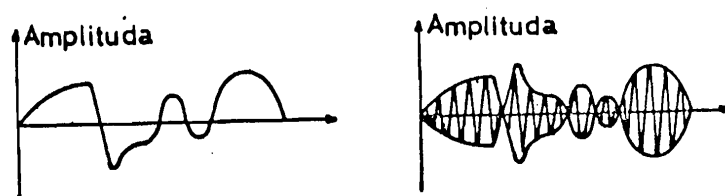
koja nam pokazuje da se sinusno modulirani val sastoji od sume triju sinusnih komponenti različitih frekvencija: frekvencije ω_0 vala nosioca, 'gornje' frekvencije ($\omega_0 + \omega_m$) i 'donje' frekvencije ($\omega_0 - \omega_m$). Grafički prikaz relativnih amplituda svih komponenti u ovisnosti o frekvenciji nazivamo frekventnim spektrom vala



Slika 10. Frekventni spektar sinusno moduliranog vala.

i prikazan je za naš slučaj na sl.10. Sinusnu komponentu predočava vertikalna linija na određenoj frekvenciji, s visinom koja odgovara amplitudi. Osim triju komponenti vala na slici je prikazan i modulirajući val.

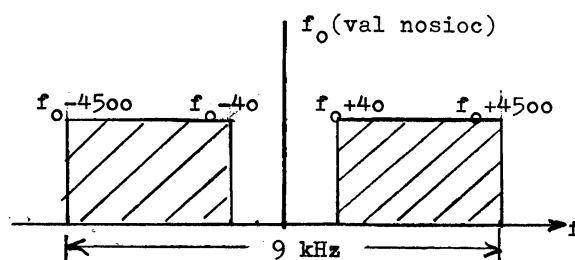
Treba dodati da val nosilac neke radiostanice nije gotovo nikada sinusno moduliran. Niskofrekventne pojave koje se utiskuju u val nosilac (govor, glazba) nisu sinusne pojave već imaju nepravilan oblik. Zbog toga je i anvelopa amplitudno moduliranog vala također nepravilna, no usprkos toj nepravilnosti, modulacija ostaje periodična. U tom slučaju se umjesto jednostavne relacije, koju smo imali prije, dobiva komplicirani Fourierov red velikog broja članova. Frekventni spektar će također biti mnogo složeniji (sl.11).



Slika 11. Amplitudna modulacija s realnim niskofrekventnim signalom. (a) Realni zvučni signal. (b) Val nosilac moduliran realnim zvučnim signalom.

U radiofoniji se frekvencije odašiljača – koji emitiraju amplitudno modulirane valove u srednjevalnom području – međusobno razlikuju za 9 kHz. To znači da širina bočnog pojasa ne smije prijeći 4.5 kHz, da se time izbjegnu preklapanja između dviju stanica. Val nosilac sa u amplitudnoj modulaciji može prema tome modulirati sa niskofrekventnim signalima do 4.5 kHz. (Kao donja frekventna granica uzima se 40 Hz).

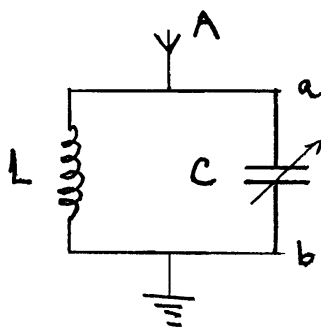
Frekventna karakteristika prijemnika mora biti istog ovakvog oblika, ako se želi postići korektni prijem amplitudno moduliranog visokofrekventnog vala. Kao što ćemo to diskutirati kasnije, idealna frekventna karakteristika međufrekventnog transformatora (koji je sastavni dio npr. superheterodinskog prijemnika) je isto ovakvog oblika.



Slika 12. Frekventna karakteristika prijemnika.

2.2 Primanje

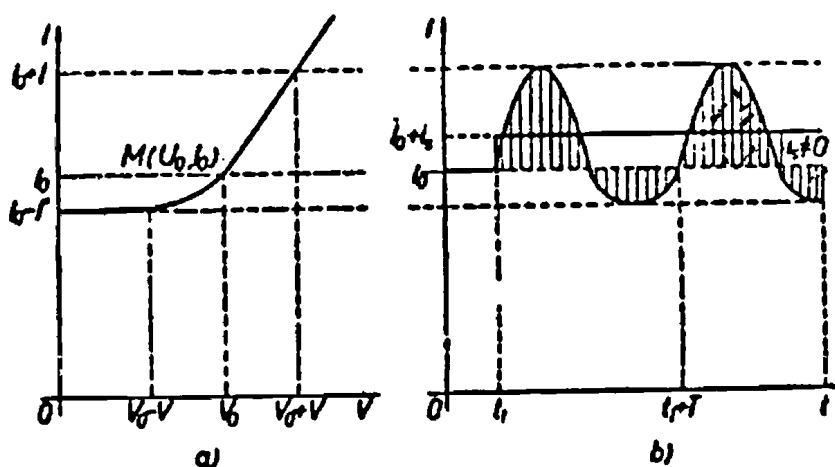
Prijemna stanica ili prijemnik mora imati uređaj koji će signal što ga emitira antena za odašiljanje u obliku elektromagnetskog vala opet pretvoriti u izmjenični signal u nekom vodiču. Tu ulogu ima antena za primanje: u principu to je vodič prikladnog oblika i položaja, često izoliran na jednom kraju, a uzemljen na drugom. Antena ima neku vlastitu samoindukciju i kapacitet prema zemlji (sl.13). Kad na nju stižu elektromagnetski valovi, oni u njoj induciraju izmjeničnu elektromotornu silu koja uzrokuje odgovarajuću izmjeničnu struju.



Slika 13.

Amplituda te struje bit će maksimalna kada je vlastita frekvencija antene upravo jednaka frekvenciji upadnog vala nosioca: u tom slučaju antena rezonira na upadni val. Zbog malih energija što ih antena prima od upadnog vala, rezonancija je nužan uvjet primanja. Ona se može postići tako da se npr. antena A spoji s paralelnim titrajnim krugom promjenjivog kapaciteta. Mijenjanjem tog kapaciteta C , antena se može ugoditi na upadni val. Između točke a i b titrajnog kruga tada postoji visokofrekventni napon, koji se s vremenom mijenja kao polje upadnog moduliranog vala.

Daljnja zadaća prijemnika je da se taj napon upotrijebi za dobivanje nisko-frekventnog izmjeničnog napona kojem se srednja vrijednost mijenja s vremenom na isti način kao što se mijenja pojava prvobitno utisnuta u val nosilac. Kad je emisijom preneseni ton jednostavan, treba dobiti srednji napon koji ima oblik što sličniji krivulji prikazanoj na sl.9b. Naime, nema akustičkog uređaja, slušalice ili mikrofona koji bi mogao slijediti visokofrekventne titraje što ih hvata antena. Dakle, potrebno je visokofrekventnu struju *demodulirati* i nakon pojačanja je poslati u slušalice ili zvučnik.



Slika 14. (a) $V - I$ karakteristika neke diode. Randa točka M nalazi se na zakrivljenom dijelu karakteristike, $U_0 = V_0$. (b) Postoji ispravljanje. Srednja struja i_s različita je od nule, pa se sveukupna srednja struja razlikuje od struje mirovanja I_0 .

Da bi došlo do demodulacije (ili ispravljanja ili detekcije) upadnog visokofrekventnog signala, potrebno je da uređaj za ispravljanje bude takav da upadni

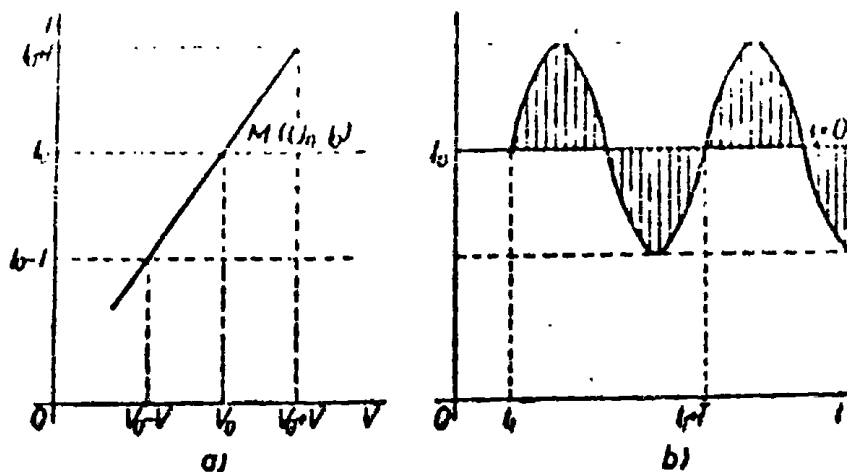
izmjenični napon, koji djeluje na ispravljački uređaj, prouzrokuje struju čija je srednja vrijednost različita od struje što je uređaj daje dok na njega ne djeluje signal. Ovaj uvjet povlači za sobom potrebu da se krivulja ispravljačkog uređaja, koja predočava ovisnost struje o naponu, zakrivi na mjestu radne točke. Za dani uređaj ta je točka određena naponom V_0 , koji djeluje na ispravljački uređaj u odsutnosti signala; uređajem tada teče struja I_0 , tako da radna točka ima koordinate $M(V_0, I_0)$, a između tih koordinata postoji određena funkcionalna veza (sl.14).

Može se pokazati da je srednja vrijednost promjene struje koja teče uređajem za ispravljanje dana izrazom:

$$i_s = \frac{V^2}{4} \frac{d^2 I_0}{dV_0^2}, \quad (47)$$

tj. da raste s kvadratom amplitude upadnog signala i sa zakrivljenošću karakteristike u radnoj točki.

U slučaju da se koristi ravni dio karakteristike, srednja vrijednost je jednaka nuli i nema detekcije.



Slika 15. (a) Radna točka M nalazi se na pravocrtnom dijelu karakteristike, $U_0 = V_0$. (b) Nema ispravljanja. Srednja struja $i_s = 0$, pa se sveukupna srednja struja ne razlikuje od struje mirovanja I_0 .

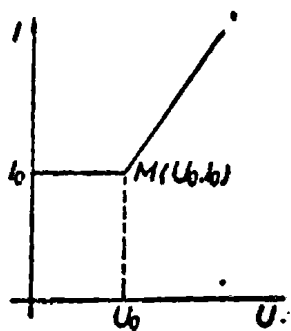
Relacija (47) pokazuje da je i_s kvadratna funkcija od V i ova detekcija se naziva paraboličnom. Ona nije pogodna za radiofoniju jer se u zvuku jake am-

plitude snažno pojačavaju, a slabe gotovo sasvim potiskuju, pa sve komponente zvuka nisu u zvučniku vjerno reproducirane. Kaže se da je zvuk izobličen.

Iz tog razloga se u radiofoniji nastoji postignuti linearna detekcija, kod koje se srednja struja detekcije mijenja proporcionalno s amplitudom upadnog visokofrekventnog vala. U tom se slučaju za srednju vrijednost struje dobiva:

$$i_s = \frac{V}{\pi} \frac{dI_0}{dV_0}. \quad (48)$$

Najjednostavnija metoda demodulacije je pomoću diode, za koju pretpostavljamo idealnu karakteristiku, analognu onoj prikazanoj na sl.16.

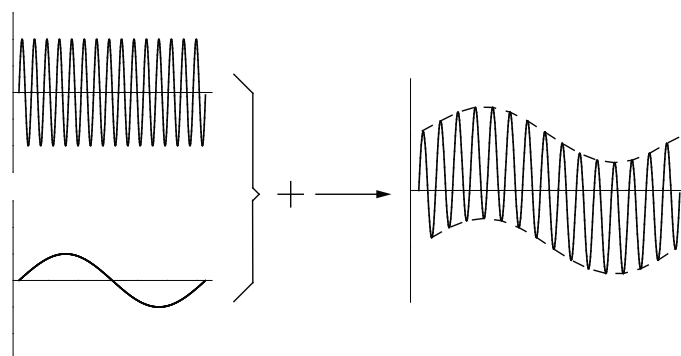


Slika 16. Oblik karakteristike diode kod linearne detekcije, $U = V, U_0 = V_0$.

2.3 Modulator

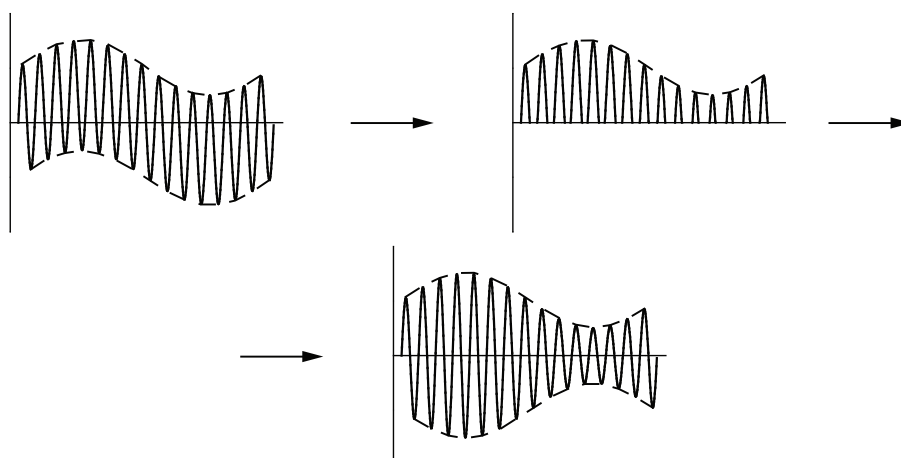
Sklop za moduliranje koji ćemo koristiti u ovoj vježbi sastoji se od dva dijela. Prvi dio je jednostavni sumator izveden pomoću operacijskog pojačala. Na njega priključujemo visokofrekventni signal nosilac iz Wienovog oscilatora i niskofrekventni sinusoidalni signal iz generatora impulsa koji želimo modulirati. Na izlazu iz operacijskog pojačala ćemo, prema tome, dobiti zbroj ta dva signala (sl.17) – to još nije modulirani signal!

‘Pravi’ modulirani signal se dobiva tako da se zbrojeni signal prvo ispravi, tj. da mu se diodom odreže donji dio. Nakon toga, svaka gornja poluperioda djeluje na zavojnicu i kondenzator tako da ih ‘zatitra’; zbog dugog odzivnog vremena LC kruga (uz pravilan izbor elemenata) njegovo istitravanje uzrokuje pojavu donje poluperiode, što onda rezultira efektivnom pojavom ‘pravog’ moduliranog signala



Slika 17. Zbrajanje signala

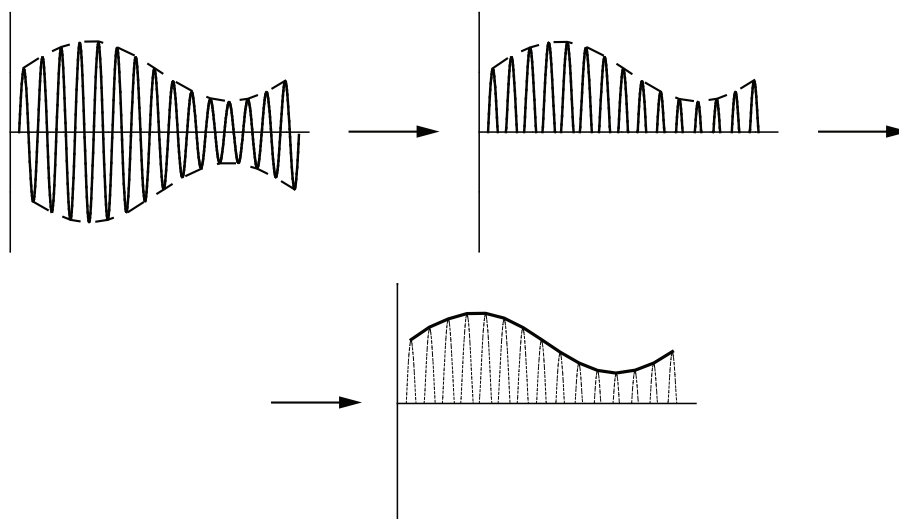
(sl.18). U praksi, modulacija se vrši na 'razumljiviji' način, ali to rezultira znatno kompliciranijim sklopovima.



Slika 18. Moduliranje signala

2.4 Demodulator

Demodulator se, u našem sklopu, sastoji od diode, koja ispravlja modulirani signal, i iz kondenzatora, koji zajedno s unutrašnjim otporom diode tvori niskopropusni (RC) filter (vidi sl.19). Rezultat tog filtera je da od visokofrekventnog (i ispravljenog signala) dobijemo samo niskofrekventnu komponentu (anvelopu).



Slika 19. Demodulacija signala