

Microwave components, London 1968. — A. J. Angelakos, T. E. Everhart, Microwave communications, New York 1968. — A. J. B. Fuller, Microwaves, London 1969. — H. A. Watson, Microwave semiconductor devices and their circuit applications, New York 1969. — H. Groll, Mikrowellen-Meßtechnik, Berlin 1969. — K. Kurokawa, An introduction to the theory of microwave circuits, New York 1969. — Hewlett Packard Company, Microwave theory and applications, Englewood Cliffs, N. J. 1969. — K. I. Thomassen, Introduction to microwave fields and circuits, Englewood Cliffs, N. J. 1971. — Л. А. Вайнштейн, В. А. Соколов, Лекция по сверхвысокочастотной электронике, Москва 1972. — Б. С. Воинов, Широкодиапазонные колебательные системы СВЧ, Москва 1972. — И. В. Лебедев, Техника и приборы СВЧ, Москва 1972. — G. Rudilosso, Tecnica e sistemi a microonde, Roma 1972. Z. Smrčić

ELEKTRONIKA, UREĐAJI I SISTEMI. U ovom članku u seriji članaka o elektronici obrađeni su elektronički uređaji i sistemi kojima se ne bave drugi članci u ovoj enciklopediji (v. uvodni članak *Elektronika*). To su elektronički uređaji primijenjeni u radio-difuziji (radio-prijenosu i televiziji), radiovezama, radarskim sistemima, satelitskim vezama i elektroničkoj navigaciji. Glavama u kojima se obrađuju navedene grane primijenjene elektronike prethode glave u kojima se iznose neke teorijske osnove kvalitetne proizvodnje signala i njihovog prijenosa kroz prostor (Rasprostiranje radio-valova i šum), te teorijski osnovi i izvedba uređaja koji su svim granama radio-tehnike zajednički (Odašiljači, Radio-prijemnici i Antene).

ODAŠILJAČI

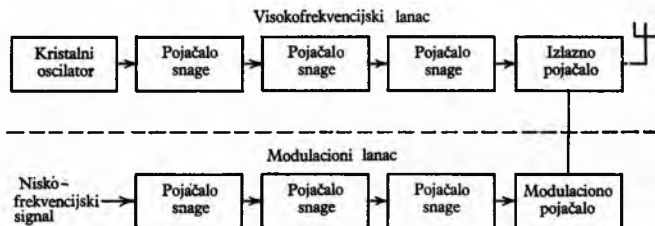
Odašiljač je elektronički uređaj u sustavu radio-prijenosa koji služi za stvaranje moduliranog prijenosnog elektromagnetskog vala dovoljne snage i pogodne visoke frekvencije. Tim se valom napaja antena koja ga zrači i time omogućuje prijenos informacije do udaljenog korisnika. Prenesena informacija sastavljena je redovno od signala audio-frekvencija (50 Hz...20 kHz) ili video-frekvencija (reda veličine megaherca). Da bi se bežičnim putem prenijela neka informacija, treba je u odašiljaču najprije transponirati u područje viših frekvencija i nakon dovoljnog pojačanja proslijediti anteni. U području viših frekvencija može se, naime, i s pomoću po dimenzijama manjih antena postići efikasno zračenje elektromagnetskih valova koji u bežičnoj vezi služe za prijenos informacije od odašiljača do prijemnika. Snaga zračenja antene neznatan je dio privedene snage sve dok dimenzije antene ne postanu istoga reda veličine kao duljina elektromagnetskog vala. Međutim, transponiranje frekvencija poruke u područje viših frekvencija ne pridonosi samo smanjenju dimenzija antene, već omogućuje također istovremeni prijenos više informacija, jer na višim frekvencijama ima mjesta za više bežičnih prijenosnih kanala. Prijenosni medij (troposfera, ionosfera) doduše ne djeluju jednako na radio-valove svih frekvencija, ali se taj utjecaj ne mijenja za signale relativno uskog transponiranog pojasa frekvencija, pa prema tome sve frekvencije poruke imaju jednake uvjete prijenosa.

Modulacija zove se proces transformacije poruke u oblik prikladan za prijenos. Njome se postiže transponiranje signala poruke u frekvencije koje su prikladnije za prijenos preko okolnog medija. U prijemu (v. poglavlje Prijemnici, str. 599) izdvaja se signal poruke *demodulacijom* i to tako da je primljena informacija što vjernija reprodukcija prvobitne odaslane informacije. Razlikuju se dvije vrste modulacije, analogna i digitalna. Pri *analognoj modulaciji* mijenja se jedan od parametara prijenosnog kontinuiranog sinusnog signala visoke frekvencije. Tako se dobiva modulacija amplitude, modulacija frekvencije i modulacija faze. Pri *digitalnoj modulaciji* nastaje prekidanjem sinusnog signala slijed diskretnih impulsa na koje se može djelovati mijenjajući im amplitudu, frekvenciju ili širinu, ili kodiranjem (v. u poglavlju Šum ovog članka, str. 634).

Općenito o konstrukciji odašiljača. Prema zakonitostima rasprostiranja elektromagnetskih valova, domet odašiljača ovisi, osim o frekvenciji na kojoj radi, također o njegovoj snazi. Odašiljač treba stoga da sadrži osim sklopova koji će stvoriti i modulirati prijenosni val također sklopove za njegovo pojačanje. Odašiljači sastoje se stoga načelno od niza elektroničkih i električnih uređaja: osnovnog oscilatora, više stupnjeva za pojačanje i eventualnu multiplikaciju frekvencije, kruga za prilagođenje izlaza na antenu ili pojni vod, modulatora, sklopova za napajanje, pomoćnih (ponekad automatiziranih) uređaja za mjerenje, kontrolu i upravljanje.

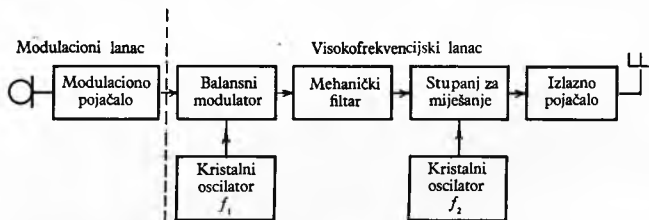
Sastav sklopova i uređaja nije za odašiljače svih vrsta jednak, već ovisi o njihovoj namjeni i upotrijebljenoj frekvenciji. Tako se npr. frekvencijska modulacija provodi obično u nekom stupnju male snage, tj. u jednom od prvih stupnjeva pojačanja, a amplitudna se modulacija vrši obično u posljednjem stupnju uz veliku snagu. Za neke tipične vrste odašiljača dan je u daljem izlaganju načelan sastav uz kratak opis.

Visokofrekvencijski lanac *srednjevalnog radiodifuzijskog odašiljača* (sl. 1) počinje oscilatorom, zatim se nizom pojačala postiže snaga koja se privodi anteni. U izlaznom se stupnju modulira amplituda visokofrekventnog prijenosnog vala. Pojačalima modulacijskog lanca postiže se potreban nivo niskofrekventne snage.



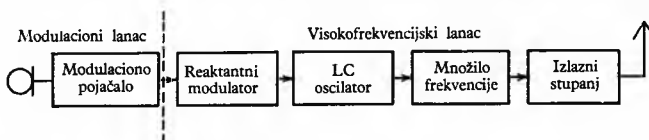
Sl. 1. Blok-shema radio-difuzijskog odašiljača s modulacijom na anodi

U *radiotelefonskim odašiljačima* s jednim bočnim pojansom (sl. 2) preostaje, nakon potiskivanja prijenosnog signala balansnim modulatorom i odvajanja jednog bočnog pojasa filtracijom, samo jedan bočni pojas koji sadrži cijelu informaciju. Samo on se prenosi anteni, koja ga zrači.

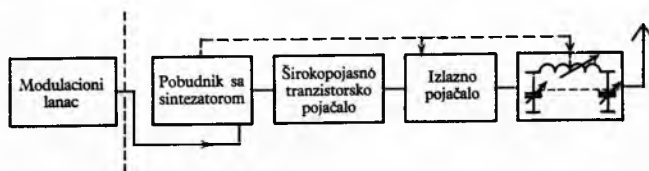


Sl. 2. Blok-shema radio-telefonskog odašiljača s jednim bočnim pojansom

Odašiljač s frekvencijskom modulacijom (sl. 3) djeluje svojim reaktantnim modulatorom na frekvenciju osnovnog oscilatora. Višestrukom multiplikacijom frekvencije moduliranog signala u pojačalima za množenje frekvencija postiže se nominalna frekvencija i snaga odašiljača kojom se informacija prenosi anteni.



Sl. 3. Blok-shema odašiljača s modulacijom frekvencije



Sl. 4. Blok-shema suvremenog odašiljača sa sintezatorom, širokopojasnim pojačalom i automatskim ugađanjem izlaznih krugova

U suvremenim odašiljačima primjenjuju se u stupnjevima manje snage pretežno tranzistori, a samo u izlaznom stupnju veće snage i pripadnom modulacijskom pojačalu elektronike. Kao oscilator služi često sintezator, a umjesto usklađenih visokofrekvencijskih pojačala u predstupnjevima upotrebljava se često širokopojasno pojačalo. Ugađanje, koje može biti ručno ili automatsko, vrši se nakon postavljanja sintezatora na određenu frekvenciju samo

u izlaznom pojačalu i u stupnju za prilagođenje antene ili pojnova voda (sl. 4).

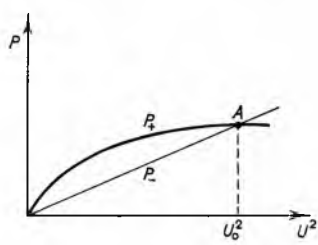
Osnovne značajke odašiljača jesu snaga odašiljača, stabilnost frekvencije, korisnost i frekvencijsko područje. *Snaga odašiljača* je snaga privedena anteni, odnosno ulazu pojnova voda koji spaja izlazni stupanj s antenom. *Stabilnost frekvencije* je svojstvo oscilatora odašiljača da u toku svog rada što manje odstupa od frekvencije na koju je postavljen. Ona se izražava relativno, tj. omjerom odstupanja frekvencije Δf od određene frekvencije f_0 ($\Delta f/f_0$) i odnosi se na određeni vremenski period. Kratkoročna stabilnost frekvencije daje se obično za jedan dan, dugoročna za jedan mjesec ili neki drugi određeni period vremena. Kratkoročna stabilnost frekvencije suvremenih odašiljača iznosi 10^{-4} ... 10^{-8} .

Korisnost (stupanj djelovanja) odašiljača je omjer između snage što je odašiljač predaje anteni i snage dovedene odašiljaču iz izvora napajanja snagom. *Frekvencijsko (valno) područje odašiljača* određeno je maksimalnom i minimalnom frekvencijom (valnom duljinom) na kojoj odašiljač može raditi. Radna frekvencija odašiljača može biti bilo čvrsta, bilo s kontinuiranom ili diskretnom promjenom.

Osnovni oscilator

U sklopu oscilatora odvija se proces pretvorbe istosmjernje struje izvora napajanja u izmjeničnu struju željene visoke frekvencije. Valni oblik, frekvencija i amplituda električnih titraja određeni su vrstom primijenjenog oscilatora i njegovim parametrima. Titraji koje stvara osnovni oscilator u odašiljaču moraju imati sinusni oblik, a njihova frekvencija i amplituda moraju biti stabilne. To se može postići primjenom titrajnog kruga velike dobrote Q u sklopu oscilatora.

Princip rada oscilatora. U idealnom titrajnom krugu bez gubitaka mogli bi se stalno održavati neprigušeni titraji. U svakom praktički realiziranom električnom krugu uzrokovali bi gubici u disipativnim elementima kruga stalno smanjenje amplitudā titraja kad se radi postizanja neprigušenih titraja ne bi privodila iz posebnog izvora napajanja određena dopunska energija (snaga P_+) za pokriće tih gubitaka (snage P_-). Samo ako su privedena i apsorbirana snaga u stabilnoj ravnoteži, tj. ako je stalno $P_+ = P_-$, u titrajnom se sustavu mogu podržavati titraji stalne amplitude. Snaga disipacije kruga proporcionalna je kvadratu napona na stezaljkama titrajnog kruga: $P_- = U^2/R$. Ako su u titrajnom sustavu odnosi linearni, i privedena snaga proporcionalna je kvadratu napona. Ovisnost i jedne i druge snage o kvadratu napona prikazana je pravcem. Ravnoteža među njima vlada samo ako se oba pravca poklapaju. Ravnoteža postignuta pod takvim uvjetima labilna je; svaki vanjski poremećaj narušava je i posljedica je neograničen porast amplitude ili prigušenje titraja. Uz linearne odnose u titrajnom sustavu ne može se, dakle, očekivati da će se uspostaviti stacionarno stanje sustava. Stacionarno se stanje postiže tek nelinearitetom u titrajnom sustavu, koji ima za posljednicu usporenje porasta privedene snage s porastom kvadrata napona (sl. 5). Presjecišta A pravca P_- i krivulje P_+ odgovara ravnoteži $P_+ = P_-$ i određuje amplitudu U_0 stacionarnog stanja. Vanjski poremećaj može samo pomaknuti točku ravnoteže, ali ne i narušiti samu ravnotežu. Stacionarno titrajno stanje je dakle osobina samo nelinearnih sustava. Ako se promatraju isključivo linearni odnosi, analiza rada oscilatora daje kao rezultat samo frekvenciju titranja i početak pobude, tj. samo obavještenje o tome hoće li se promatrani sustav pobuditi ili neće. (V. poglavlje Nelinearni krugovi i sklopovi u članku *Električni krugovi*, str. 73.)



Sl. 5. Energetski odnosi oscilatora. P_+ snaga izvora napajanja, P_- gubici u elementima kruga

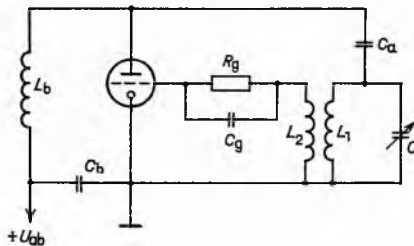
Primjena povratne veze (v. *Elektronika, sklopovi*, str. 511). Postoje različiti postupci određivanja kriterija pobude oscilatora. Oscilator s povratnom vezom često se smatra pojačalom s neizmjerljivo malim ulaznim signalom. Da bi na izlazu takvog

pojačala postojao signal, pojačanje treba da je neizmjerljivo veliko. U sklopu pojačala s povratnom vezom (sl. 6) izlaz pojačala (s jednom ili više elektronki ili tranzistora) vezan je preko pasivnog četveropola sa svojim ulazom. Uvjet je pobude sustava s povratnom vezom da bude zadovoljen izraz $\bar{\beta} \bar{A} = 1$, gdje je $\bar{\beta} = f(\omega)$ prijenosna funkcija pasivnog četveropola, a $\bar{A} = f(u)$ pojačanje aktivnog četveropola. Taj uvjet znači da struja i napon na izlazu pasivnog četveropola moraju biti jednaki po fazi i amplitudi ulaznoj struji i naponu aktivnog četveropola. Zahtjev

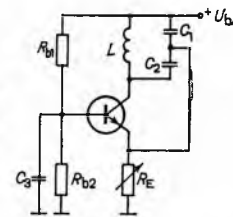
proizlazi iz izraza $\text{Re}(\bar{\beta} \bar{A}) = \beta A = 1$ i $\text{Im}(\bar{\beta} \bar{A}) = 0$.

Vrste oscilatora. Od oscilatorā s povratnom vezom (oscilatorā s reakcijom, v. *Elektronika, sklopovi*, str. 540) neka budu ovdje spomenuti samo oscilatori s transformatorom i oscilatori sa spojem u tri točke.

U oscilatoru s transformatorom ostvaruje se povratna veza preko primarnog i sekundarnog svitka transformatora koji sačinjavaju dio usklađenog kruga. Razlikuju se oscilatori s usklađenim anodnim krugom (za sklopove s elektronkama, sl. 7) odnosno s usklađenim krugom kolektora (za sklopove s tranzistorima) i oscilatori s usklađenim krugom rešetke, odnosno baze.



Sl. 7. Oscilator s transformatorom i usklađenim anodnim krugom. L_b i C_a elementi titrajnog kruga, L_1 i L_2 zavojnice transformatora, C_a kondenzator za sprečavanje prolaza istosmjerne struje kroz titrajni krug, L_b i C_b elementi filtra izvora, R_g i C_g sklop za prednapon i ograničenje amplitude anodne struje



Sl. 8. Colpittsov oscilator. L , C_1 i C_2 elementi titrajnog kruga. Preko kapacitivnog djelitelja C_1 , C_2 ostvaruje se povratna veza na emiter

U oscilatorima sa spojem u tri točke primjenjuju se za povratnu vezu kapacitivni djelitelj (Colpittsov oscilator, sl. 8) ili induktivni djelitelj (Hartleyev oscilator) u titrajnom krugu. U svojstvima ovih oscilatora postoje manje razlike. Oscilatori sa spojem u tri točke manje su osjetljivi od oscilatorā s transformatorom prema promjenama parametara elektronke, odnosno tranzistora. Hartleyev oscilator prikladan je za niže područje frekvencija i kontinuiranu promjenu frekvencije, a Colpittsov oscilator ima prednosti na višim frekvencijama. Izrazi za frekvenciju i početak pobude oscilatora dani su u tabl. 1.

Stabilnost frekvencije odašiljača vrlo je važna jer o njoj ovisi kvalitet i sigurnost radio-veze. Međunarodnim je propisima određena potrebna stabilnost frekvencije odašiljača zavisna od njegove namjene, snage i frekvencijskog područja.

Budući da je oscilator zajednica aktivnog elementa i frekvencijski selektivne mreže, neželjene promjene frekvencije titranja oscilatora mogu nastati uslijed promjene parametara aktivnog elementa i uslijed promjene parametara mreže. Jedne i druge promjene parametara posljedica su vanjskih utjecaja na rad oscilatora. U vanjske utjecaje idu: promjena temperature sastavnih dijelova oscilatora, promjena napona napajanja, promjena opterećenja oscilatora, promjena vlažnosti i pritiska zraka, vibracije sastavnih dijelova, zamjena ili starenje pojedinih dijelova oscilatora. Pобоljšanje stabilnosti frekvencije oscilatora postiže se smanjenjem vanjskih utjecaja ili pak potpunim otklanjanjem uzroka nestabilnosti. Stabilizacija napona napajanja, primjena termostata, kompenzacijski sklopovi i izbor titrajnog kruga s veli-

kom dobrotom Q (100...300) pridonose poboljšanju stabilnosti frekvencije oscilatora. Kod odašiljača s kontinuiranom promjenom frekvencije treba kao uzrok odstupanja od nominalne frekvencije f_0 dodati još netočnost postavljanja frekvencije.

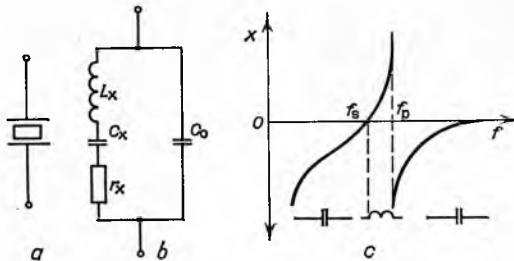
rane promjene nizom diskretnih frekvencija dovoljne gustine u željenom radnom području i primjenom posebnog kristala za svaku radnu frekvenciju. Sustav s kontinuiranom promjenom pretvara se u tom slučaju u višekanalni sustav.

Tablica 1
IZRAZI ZA ODREĐIVANJE FREKVENCIJE I UVJETA ZA POČETAK POBUDE NEKIH VRSTA OSCILATORA

Vrsta oscilatora	Kvadrat kružne frekvencije ω^2	Uvjet za početak pobude
Oscilator s usklađenim anodnim krugom	$= \frac{1}{L_1 C} \frac{r + r_u}{r_u}$	$S > \frac{rC}{M} + \frac{L_1}{r_u M}$ ili $M > \frac{1}{Q \omega_0 S}$
Oscilator s usklađenim krugom kolektora	$\approx \frac{1}{L_1 C + (L_1 L_2 - M^2) \frac{h_{21e}}{h_{11e}}}$	$h_{21e} > \frac{M}{L_1} + \Delta h_e \frac{L_1}{M}$
Colpittsov oscilator s elektronkom	$= \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{r_u} \frac{C}{C_u}\right)$ $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$	$S > \frac{r}{L} (C_1 + C_2) + \frac{1}{r_u} \frac{C}{C_2}$ ili $C_1 C_2 < \frac{S}{r} \frac{1}{\omega_0^2}$
Colpittsov oscilator s tranzistorom	$\approx \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{L}{C_1 + C_2} \frac{h_{21e}}{h_{11e}}\right)$	$h_{21e} > \frac{C_2}{C_1} + \Delta h \frac{C_1}{C_2}$
Hartleyev oscilator s elektronkom	$\approx \frac{1}{LC} \frac{r + r_u}{r_u}$ gdje je $L = L_1 + L_2 + 2M$	$S > \frac{rCL}{(L_1 + M)(L_2 + M)}$

U tim izrazima je $\omega = 2\pi f$, r_u unutarnji otpor elektronke, h parametri tranzistora, r gubici u radnom otporu spojenom u seriju s induktivitetom, S strmina i M međuinduktivitet

Oscilatori s kristalom. Znatno povećanje stabilnosti frekvencije postiže se primjenom nekih mehaničkih titrajnih sustava. Za područje frekvencija od interesa izvanredna stabilnost postiže se piezoelektričnim kristalom kvarca ili turmalina. Pločica izrezana na pogodan način iz kristala kvarca stavljena u promjenljivo električno polje pobuđuje se na mehaničko titranje s pojavom većeg broja rezonantnih frekvencija. U okolišu osnovne rezonantne frekvencije, dovoljno udaljene od neželjenih rezonancija, kristal kvarca može se prikazati nadomjesnim električnim titrajnim krugom (sl. 9 a). Osnovna prednost kvarca je njegova velika ekvivalentna dobrota ($Q = 10^4 \dots 10^5$).



Sl. 9. Kristal kvarca i njegova svojstva. a Simbol za kristal montiran u držač; b nadomjesna shema montiranog kristala, C_0 je kapacitet držača; c zavisnost reaktancije kristala o frekvenciji, f_s je frekvencija serijske rezonancije, f_p je frekvencija paralelne rezonancije

Za primjenu kristala kvarca u sklopovima oscilatora iskorištava se induktivni karakter njegove reaktancije u uskom pojasu između serijske rezonancije f_s i paralelne rezonancije f_p (sl. 9 b). Zamijeni li se zavojnica u sklopovima oscilatora sa spojem u tri točke kristalom kvarca, dobiva se iz Colpittsovog oscilatora *Pierceov oscilator*, a iz Hartleyevog oscilatora *Millerov oscilator*. Primjena serijske rezonancije kristala prikladna je, zbog malih impedancija tranzistora, u sklopovima oscilatora s tranzistorom. Osim kao sastavni dio titrajnog kruga, kristal može poslužiti i kao element za upravljanje već postojećim oscilatorom (sl. 10). Ako se kristal kratko spoji, npr. kondenzatorom, oscilator u tom slučaju nastavlja titranje.

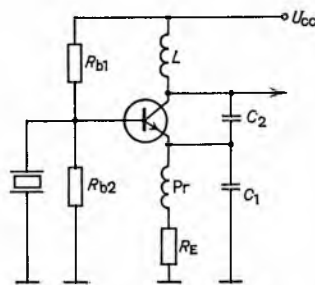
Za oscilatore koji rade samo na jednoj frekvenciji, kao npr. u odašiljačima za radio-difuziju, primjenom kristala postiže se vrlo dobra stabilnost. Problem stabilnosti oscilatora s kontinuiranom promjenom frekvencije može se riješiti zamjenom kontinui-

Sinteзаторi. Preveliki broj kristala može se izbjeći direktnom sintezom frekvencija pomoću oscilatora kojima frekvencije odgovaraju jedinicama, desetnicama i stoticama numeričke vrijednosti sintetizirane frekvencije. Dekadskim biranjem frekvencija u sintezatoru frekvencija znatno se smanjuje broj kristala, ali on je ipak prevelik da bi se ekonomski opravdanim konstrukcijama mogle postići velike stabilnosti frekvencije.

U poboljšanim sintezatorima s digitalnim odabiranjem frekvencija upotrebljava se visokostabilni oscilator s kristalom, npr. od 1 MHz za područje vrlo visokih frekvencija, koji služi kao sekundarna frekvencijska normala. Frekvencija ove normale primjenjuje se kao osnova za stvaranje željenih frekvencija dobivenih dijeljenjem, množenjem i miješanjem. Sintezom dobivena frekvencija s pomoću faznog diskriminatora i promjenljive reaktancije sinhronizira slobodni interpolacijski oscilator. Izlazni signal sintezatora frekvencije odgovara zahtjevima koji se postavljaju osnovnom oscilatoru. Primjena digitalne tehnike pridonosi većoj perspektivi ovog postupka (v. poglavlje Elektronički uređaji u radio-prijenosu).

Visokofrekvencijska pojačala snage

U svakom odašiljaču postoji visokofrekvencijsko pojačalo snage koje se sastoji od više stupnjeva. Prvi, tzv. odvojni stupanj, zaštićuje oscilator od djelovanja ostalih dijelova pojačala. Ostali stupnjevi služe za postepeno pojačanje snage, pri čemu prethodni stupanj daje snagu koja je potrebna za pobudu idućeg stupnja. Po potrebi se u tim istim stupnjevima vrši i multiplikacija frekvencije (v. *Elektronika, sklopovi*, str. 533). Pretposljednji, tzv. pogonski stupanj daje snagu za pobudu posljednjeg stupnja, tj. izlaznog pojačala koje prenosi svoju snagu anteni ili antenskom pojnom vodu.



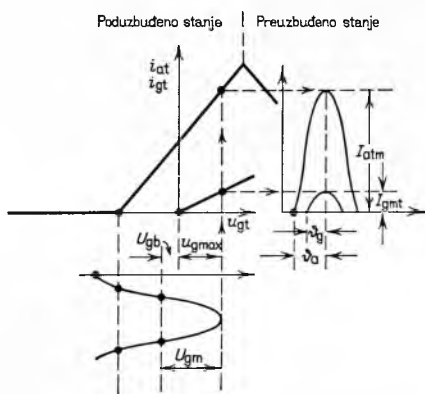
Sl. 10. Oscilator s tranzistorom upravljani kristalom kvarca

Pojačala snage su energetske jedinice koje pretvaraju istosmjernu snagu izvora napajanja u korisnu izmjeničnu snagu frekvencije određene frekvencijom pobudnog napona. Osnovni zahtjev koji se

postavlja pojačalu snage jest da postiže što veće korisne snage uz što bolju korisnost. Korisnost pojačala je omjer između korisne izlazne snage i privedene istosmjerne snage, $\eta = P_k/P_{ab}$. Povoljnija se korisnost postiže povećanjem korisne snage i smanjenjem privedene snage.

Pojačala snage s elektronkama. Porast korisne snage postiže se u pojačalima s elektronkama povećanjem pobudnog napona do u područje pozitivnih napona rešetke. To dovodi do pojave struje rešetke, što znači da je i za pobudu pojačala potrebna snaga. Impulsni rad pojačala, koji se takvim načinom pobude postiže, smanjuje privedenu snagu. Anodna struja teče, naime, samo u onom dijelu perioda pobudnog napona koji određuje kut protjecanja 2θ . Za pojačalo klase A je $2\theta = 360^\circ$, za klasu B je $2\theta = 180^\circ$, a za klasu C je $2\theta < 180^\circ$ (v. *Elektronika, sklopovi*, str. 503). Anodna struja je u pojačalima klase C, koja se najviše primjenjuju, zbog nelinearnosti karakteristika elektronke i zbog impulsnog rada vrlo izobličena. Radi dobivanja sinusnog oblika izlaznog napona, u anodni se krug takvih pojačala ugrađuje filter (v. sl. 15) kojim se izdvaja željeni harmonik sadržan u impulsu anodne struje. Frekvencija izlaznog napona odgovara u običnim pojačalima frekvenciji pobudnog napona, u pojačalima koja služe kao množila frekvencije ona je višekратно (obično 2...4 puta) veća od frekvencije na ulazu pojačala. Paralelni titrajni krug često se primjenjuje kao radni otpor pojačala i odatle potječe naziv rezonantno ili usklađeno pojačalo.

Prethodna analiza rada pojačala. Određivanje odnosa naponâ, strujâ i snagâ usklađenog pojačala klase C svodi se na poznavanje valnog oblika impulsa anodne struje. Taj oblik određuju



Sl. 11. Proces pojačanja u rezonantnom pojačalu snage klase C prikazan s pomoću linearizirane dinamičke karakteristike. U_m amplituda izmjeničnog napona na rešetki koji se dobije iz prethodnog stupnja, U_{gb} rešetkin istosmjerni prednapon, $U_{gmax} = U_{gm} - U_{gb}$ amplituda izmjeničnog napona na rešetki koji prelazi u pozitivno područje i izaziva rešetkinu struju i_{gt} , U_{gt} trenutni napon na rešetki. I_{atm} amplituda impulsne anodne struje, I_{gtm} amplituda impulsne rešetkine struje, θ_a kut protjecanja anodne struje, θ_g kut protjecanja rešetkine struje

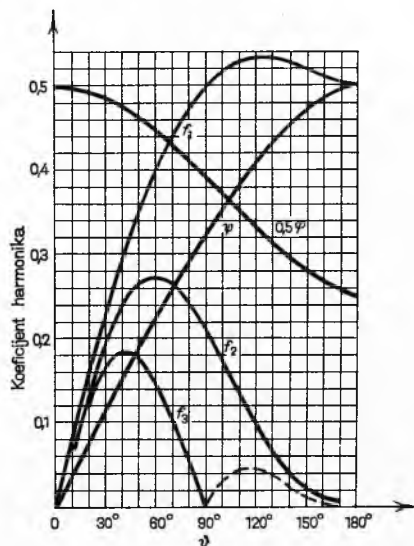
pobudni napon i karakteristika elektronke. Radi pojednostavljenja se u analitičkom postupku analize rada pojačala lineariziraju karakteristike elektronke u cijelom njihovom području. U polju lineariziranih karakteristika postaje radna karakteristika u pojedinim svojim odsječcima linearna. U *poduzbuđenom stanju* pojačala, tj. kad je najveći trenutni pozitivni potencijal rešetke u_{gmax} manji od najmanjeg trenutnog potencijala anode u_{amin} , impuls anodne struje je gornji dio sinusoide, pa trenutna vrijednost anodne struje iznosi

$$i_{at} = f(\omega t) = I_{atm} (\cos \omega t - \cos \theta) / (1 - \cos \theta). \quad (1)$$

Anodna struja u obliku impulsa (sl. 11) s periodskim ponavljanjem sastoji se od zbroja istosmjerne komponente I_{as} i velikog broja harmoničkih komponenata I_{anm} . Komponente anodne struje nađene s pomoću Fourierovih integrala ovise o kutu protjecanja θ i maksimalnoj (tjemenoj) vrijednosti I_{atm} impulsa anodne struje. Istosmjerna komponenta iznosi $I_{as} = I_{atm} \psi(\theta)$, a harmoničke komponente $I_{anm} = I_{atm} f_n(\theta)$, gdje je $n = 1, 2, 3, \dots$ Fourierovi koeficijenti za harmoničke komponente f_n i ψ , koefi-

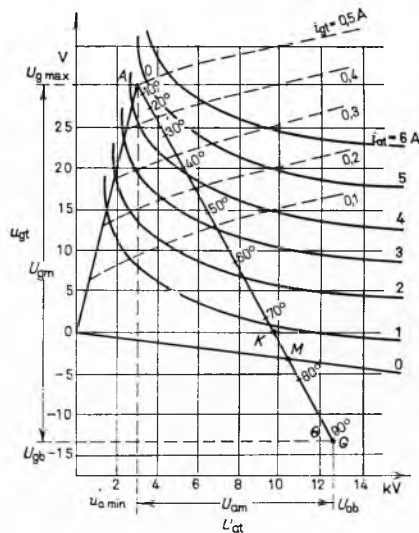
cijent za srednju istosmjernu struju I_{as} , ovise o kutu θ kako prikazuje sl. 12.

Privedena istosmjerna snaga izvora napajanja $P_{ab} = U_{ab} I_{as}$ dijeli se na korisnu izlaznu snagu $P_k = 0,5 U_{am} I_{atm}$ i disipaciju anode $P_a = P_{ab} - P_k$, gdje su U_{ab} i U_{am} istosmjerni anodni napon i amplituda izmjeničnog anodnog napona, a I_{as} i I_{atm} srednja istosmjerna anodna struja i amplituda izmjenične harmoničke komponente.



Sl. 12. Ovisnost Fourierovih koeficijenata o kutu protjecanja θ . f_1, f_2, f_3 koeficijenti harmoničkih komponenata, ψ koeficijent istosmjerne srednje struje, $\psi = f_1(\theta)/2 \psi(\theta)$.

Pobudna snaga $P_{uz} = 0,5 U_{am} I_{atm} \approx 0,9 U_{gm} I_{gs}$ koju daje prethodni stupanj dijeli se na disipaciju rešetke $P_g = P_{uz} - P_{gs}$ i disipaciju izvora (otpornika) za prednapon $P_{gs} = U_{gb} I_{gs}$. Ovdje je U_{gb} i U_{gm} istosmjerni prednapon rešetke i amplituda izmjeničnog napona na rešetki, a I_{gs} i I_{atm} srednja istosmjerna struja rešetke i amplituda izmjenične struje rešetke.



Sl. 13. Određivanje oblika impulsa struje u polju karakteristika konstantne struje. U_{gb} rešetkin istosmjerni prednapon, U_{gm} amplituda izmjeničnog rešetkinog napona, U_{gmax} amplituda izmjeničnog rešetkinog napona, dio koji prelazi u pozitivno područje; u_{gt} trenutni rešetkin napon, U_{ab} istosmjerni napon anodnog izvora, U_{am} amplituda izmjeničnog anodnog napona, U_{amin} minimalni anodni napon, u_{at} trenutni anodni napon, i_{gt} trenutna rešetkina struja, i_{at} trenutna anodna struja, θ_a kut protjecanja anodne struje, θ_g kut protjecanja rešetkine struje, $\cos \theta_a = MG/AG$, $\cos \theta_g = KG/AG$

Kut protjecanja anodne struje θ_a zavisi od istosmjernih i izmjeničnih napona na anodi i rešetki, a može se izračunati iz jednadžbe

$$\cos \theta_a = \frac{U_{ab} + \mu U_{gb}}{U_{am} - \mu U_{gm}}, \quad (2)$$

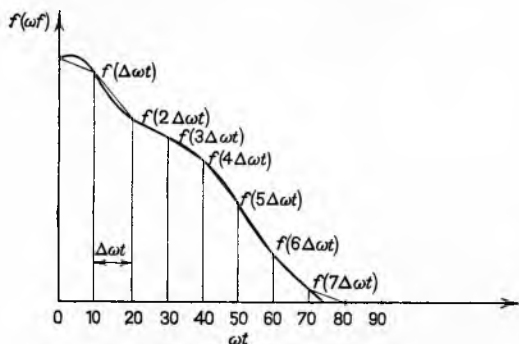
gdje je μ faktor pojačanja elektronke. Struja rešetke počinje teći kad je potencijal rešetke $u_{gt} = 0$, pa se kut protjecanja struje rešetke θ_s može izračunati iz jednadžbe $\cos \theta_s = |U_{gb}|/U_{gm}$.

Korisnost jednog stupnja pojačala iznosi

$$\eta = \frac{P_k}{P_{ab}} = \frac{U_{am}}{U_{ab}} \cdot \frac{f_1(\theta)}{2\psi(\theta)} = h \cdot \varphi(\theta). \quad (3)$$

Ona raste sa smanjenjem kuta protjecanja uz odabranu vrijednost naponske iskoristivosti $h = U_{am}/U_{ab} = 0,80 \dots 0,95$, a $\varphi = f_1(\theta)/2\psi(\theta)$. Porast korisnosti postiže se također povećanjem pobudne snage, tj. prijelazom iz poduzbudenog u granično uzbuđeno stanje (kad je pozitivni potencijal rešetke jednak trenutnom potencijalu anode). Uz ograničenu pobudnu snagu odabire se $u_{a, \min} \approx 1,5 u_{g, \max}$ i $2\theta \approx 150^\circ$, a za veći stupanj korisnosti odabire se manji kut $2\theta \approx 120^\circ$ i granično uzbuđeno stanje, tj. $u_{g, \max} = u_{a, \min}$.

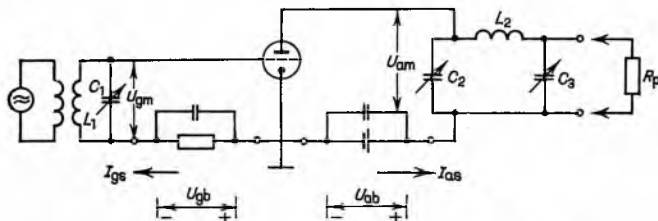
Analiza rada pojačala s pomoću stvarnih karakteristika. Nakon određivanja približnih vrijednosti naponâ, strujâ i snagâ s pomoću lineariziranih karakteristika, provodi se analiza rada pojačala s pomoću stvarnih karakteristika. Stvarni oblik impulsa anodne struje ili struje rešetke određuje se s pomoću linearne radne karakteristike (pravca pojačanja A_G , sl. 13, v. *Elektronika, sklopovi*, str. 489) u polju karakteristike konstantne struje u_{gt} , u_{a1} . Očitavanjem jakosti struja za pojedine položaje radne točke (npr. u razmacima po 10°) dobiva se stvarni oblik impulsa struje (sl. 14).



Sl. 14. Postupak harmonijske analize

Postupkom harmonijske analize određuju se komponente struje, a s pomoću njih i odnosi snaga.

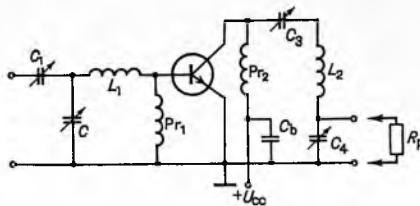
Prilagodjenje impedancije trošila na pojačalo. Da bi elektronka u sklopu rezonantnog pojačala (sl. 15) radila u odabranim (optimalnim) uvjetima, mora opterećenje elektronke biti jednako otporu $R_n = U_{am}^2/2 P_k$. Redovno se otpori trošila, npr. otpor antene ili



Sl. 15. Visokofrekvencijsko pojačalo snage s elektronkom. U_{gb} rešetkin istosmjerni prednapon, U_{gm} amplituda rešetkinog izmjeničnog napona, U_{ab} napon istosmjernog izvora, I_{as} srednja istosmjerna anodna struja, I_{gs} srednja rešetkina istosmjerna struja, R_p otpor trošila; L_2, C_1, C_2 titrajni krug u krugu rešetke L_2, C_4, C_5 titrajni krug u krugu anode

ulazni otpor slijedećeg stupnja, razlikuju od optimalne vrijednosti za rad pojačala. Stoga je potrebno prilagodnim četveropolom transformirati otpor trošila R_p na vrijednost otpora R_n . Potenciometerski spojevi titrajnog kruga (kao npr. C_4 na sl. 16), L-četveropol i II-četveropol (Collinsonov filtar) sastavljeni od reaktancija služe kao prilagodni četveropoli.

Pojačala snage s tranzistorima. Tranzistorima snage predviđenim za rad na visokim frekvencijama zamjenjuju se elektronke u sklopovima visokofrekvencijskih pojačala snage (sl. 16). Nizak napon napajanja tranzistora ograničuje za sada upotrebu tranzistora na manje snage, jer se veća snaga postiže vrlo velikim stru-



Sl. 16. Visokofrekvencijsko pojačalo snage s tranzistorom. P_{r1} visokofrekvencijska prigušnica u krugu baze, P_{r2} filtar izvora napajanja, U_{cc} napon izvora napajanja kolektora, R_p otpor trošila

jama. Za izlazne stupnjeve većih snaga primjenjuju se stoga elektronke koje osim toga zahtijevaju i manju pobudnu snagu od tranzistora.

Zbog ovisnosti parametara tranzistora i karakterističnih veličina pojačala o amplitudi i frekvenciji naponâ i strujâ, analiza rada pojačala s tranzistorima vrlo je složena. Razmatranje idealiziranog slučaja s lineariziranim karakteristikama odgovara postupku analize rada pojačala s elektronkama. Rezultati analize idealiziranog modela odstupaju od stvarnih rezultata, ali uz poznavanje ponašanja tranzistora na visokim frekvencijama često se primjenjuju za osnivanje pojačala. Za to je potrebno poznavati granične vrijednosti tranzistora: probojne napone, graničnu frekvenciju f_t , maksimalnu struju kolektora, maksimalnu disipaciju tranzistora P_t i, konačno, ulaznu i opteretnu impedanciju tranzistora.

U drugom pristupu analizi rada pojačala primjenjuje se model koji se temelji na visokofrekvencijskoj nadomjesnoj shemi tranzistora. Parametri su nadomjesne sheme nelinearni, ali se upotrebom njihovih srednjih vrijednosti dobivaju dobri rezultati za pojačala manjih i srednjih signala. Za rad tranzistora u području jakog zasićenja dat će složeniji nelinearni model uz pomoć elektroničkog računala jasniju sliku o stvarnom ponašanju tranzistora u sklopu rezonantnog pojačala.

Modulatori

Modulatori su elektronički sklopovi koji služe za modulaciju prijenosnog vala (vala nosioca) koji se stvara u osnovnom oscilatoru odašiljača. Prije modulacije on se ponekad još pojača u visokofrekvencijskom stupnju za pojačanje, a po potrebi se njegova osnovna frekvencija u istom stupnju još i umnogostruči.

Modulacija se definira kao proces promjene amplitude, frekvencije ili faze visokofrekvencijskog prijenosnog vala u zavisnosti od trenutne vrijednosti niskofrekvencijskog modulacijskog vala. Trenutna vrijednost sinusnog prijenosnog vala može se prikazati izrazom

$$u = U_{pm} \sin(\omega_p t + \varphi_p), \quad (4)$$

gdje je U_{pm} amplituda njegovog napona, ω_p njegova kružna frekvencija (jednaka 2π puta prijenosna frekvencija f_p), a φ_p njegova faza.

Modulacijom prijenosnog vala frekvencija se signala transponira u područje visokih frekvencija i time omogućuje radio-prijenos informacije. Rezultat modulacije je *modulirani val*. Postoje različite vrste modulacije, već prema tome koja se veličina prijenosnog vala modulira i kakav se prijenosni val (npr. sinusni ili impulsn) primjenjuje.

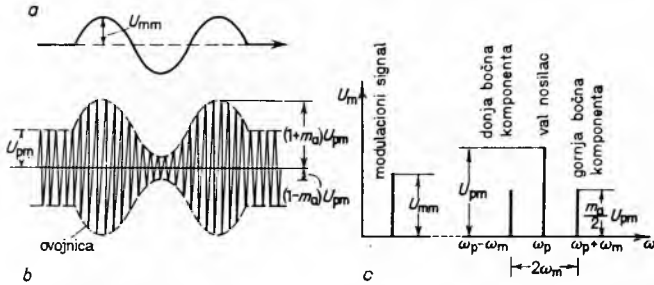
Ovisnost modulirane veličine (amplitude, frekvencije ili faze) o naponu, odnosno struji modulacijskog vala prikazuje se grafički na *modulacijskoj karakteristici*.

Amplitudna modulacija. Pri toj modulaciji mijenja se amplituda (struje, odnosno napona) prijenosnog vala proporcionalno trenutnoj vrijednosti modulacijskog signala u_m . Ako taj signal sadrži samo jednu frekvenciju i ako ima oblik sinusoide, on

se može izraziti ednadžbom $u = U_{mm} \sin \omega_m t$ (sl. 17 a), gdje je U_{mm} amplituda napona modulatorskog signala, a ω_m njegova kružna frekvencija (jednaka 2π puta modulatorska frekvencija f_m). Prijenosni val koji je amplitudno moduliran takvim modulatorskim valom može se prema izrazu (4) prikazati jednadžbom

$$u(t)_a = (U_{pm} + U_{mm} \sin \omega_m t) \cdot \sin(\omega_p t + \varphi) = U_{pm}(t) \sin(\omega_p t + \varphi). \quad (5)$$

U izrazu (5) predstavlja $U_{pm}(t)$ ovojnicu modulacije (sl. 17 b).



Sl. 17. Prijenosni val amplitudno moduliran modulatorom koji sadrži nelinearni element. a Modulatorski val, b modulirani prijenosni val, c frekvencijski spektar s valom nosiocem i bočnim opsezima; U_{mm} amplituda izmjeničnog modulatorskog napona, U_{pm} amplituda nemoduliranog prijenosnog vala

Ako se u izrazu ispusti φ , koji ovdje nema značenja, i ako se prvi izraz u zagradama transformira ovako:

$$U_{pm} + U_{mm} \sin \omega_m t = U_{pm} \left(1 + \frac{U_{mm}}{U_{pm}} \sin \omega_m t \right) = U_{pm} (1 + m_a \sin \omega_m t)$$

i nakon toga uvrsti u jednadžbu (5), može se modulirani val prikazati izrazom:

$$u(t)_a = U_{pm} (1 + m_a \sin \omega_m t) \cdot \sin \omega_p t. \quad (6)$$

U tom je izrazu $m_a = U_{mm}/U_{pm}$, a zove se *stupanj modulacije* ili *faktor modulacije*, u novije vrijeme i indeks modulacije. Ako se on izražava u postocima 100 m%, zove se i *postotak modulacije* ili *đubina modulacije*. Trigonometrijskom transformacijom može se izrazu (6) dati i oblik

$$u(t)_a = U_{pm} \sin \omega_p t + \frac{m_a}{2} U_{pm} \sin(\omega_p + \omega_m) t + \frac{m_a}{2} U_{pm} \sin(\omega_p - \omega_m) t, \quad (7)$$

u kojem su sadržani izrazi za tri signala. Prvi, $U_{pm} \sin \omega_p t$, predstavlja val nosilac prijenosne frekvencije f_p . Druga dva vala imaju jednake amplitude, ali frekvencije su im jedna ispod a druga iznad prijenosne frekvencije, a odgovaraju razlici $(f_p - f_m)$ i sumi $(f_p + f_m)$ (sl. 17 c). Amplitude tih *bočnih komponenti* ovise o stupnju (indeksu) modulacije m_a , čija je maksimalna vrijednost $m_a = 1 = 100\%$.

Međutim, modulatorski signali ne sadrže, kao što je naprijed pretpostavljeno, samo jednu frekvenciju, već čitav niz frekvencija raspoređenih u određenom frekvencijskom pojasu. Od svake od tih frekvencija stvaraju se u procesu modulacije dvije nove frekvencije, jedna jednaka sumi $f_p + f_m$ i jedna jednaka razlici $f_p - f_m$. Iz svih frekvencija sume stvara se iznad prijenosne frekvencije *gornji bočni pojas*, a iz frekvencija razlike, ispod prijenosne frekvencije *donji bočni pojas*. Cijeli amplitudno modulirani signal (prijenosni val s oba bočna pojasa) zauzima frekvencijski pojas širine

$$B = 2 f_{m \max}, \quad (8)$$

gdje je $f_{m \max}$ najviša frekvencija sadržana u modulatorskom signalu. Toj širini mora odgovarati i pojas propustljivosti pojačala koja pojačavaju modulirani signal.

U spektru moduliranog signala pojavljuju se frekvencije različite od prijenosne i modulatorske frekvencije. Upravo radi njihova stvaranja vrši se modulacija. One su posljedica nelinearnog procesa, pa stoga u sklopu modulatora mora postojati neka nelinearnost.

Pri amplitudnoj modulaciji vrši se translacija modulatorskog pojasa u područje viših frekvencija s neizmijenjenim odnosom

amplitude pojedinih frekvencija unutar pojasa. Stoga se modulacija amplitude zove i *linearna modulacija*.

Snaga amplitudno moduliranog vala proporcionalna je kvadratu efektivne vrijednosti njegovog napona datog izrazom (7). Iz njega se vidi da će se i ukupna snaga P_p moduliranog prijenosnog vala, u skladu sa tri dijela te jednadžbe, sastojati od snage nosioca bez modulacije, P_{p0} , i snage P_{bp} sadržane u jednom i drugom bočnom pojasu, $P_p = P_{p0} + 2 P_{bp}$. Snaga amplitudno moduliranog vala raste s indeksom modulacije m i ima najveću trenutnu vrijednost pri maksimumu ovojnice $P_{pe} = (1 + m_a)^2 P_{p0}$. Uz $m_a = 1$ mijenja se snaga moduliranog signala za vrijeme jednog perioda modulatorskog signala od nule pa do $4 P_{p0}$. Povećava se i srednja snaga moduliranog prijenosnog vala. Iz jednadžbe (7) može se izvesti izraz za srednju snagu

$$P_p = P_{p0} + \frac{m^2}{4} P_{p0} + \frac{m^2}{4} P_{p0} = P_{p0} \left(1 + \frac{m^2}{2} \right). \quad (9)$$

Iz njega se vidi da snaga bočnih pojasa (drugi i treći dio prve jednadžbe) ovisi o stupnju (indeksu) modulacije m . Za $m = 1$ snaga jednog bočnog pojasa iznosi 1/4 snage prijenosnog vala P_{p0} , ili 1/6 ukupne snage vala P_p . Razlika između (trenutne) maksimalne vršne snage i srednje snage moduliranog signala ima za posljedicu lošu korisnost pojačala moduliranih signala.

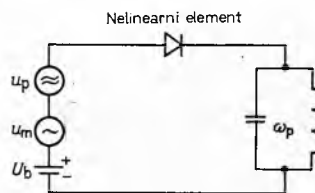
Nedostaci amplitudne modulacije mogu se smanjiti primjenom jednobočnog prijenosa.

Budući da je potpuna informacija sadržana u svakom bočnom pojasu i budući da prijenosni val uopće ne sadrži informaciju, što se sve vidi iz jednadžbe (7), sama se po sebi nameće misao da se radi uštede snage i smanjenja širine upotrijebljenog frekvencijskog pojasa potisne prijenosni val, a eventualno da se potisne i jedan bočni pojas te prenosi samo drugi bočni pojas. U praksi se upotrebljavaju različite varijante konvencionalne amplitudne modulacije, počevši od varijante kod koje se prenosi prijenosni val sa dva bočna pojasa, do varijante kod koje se prenosi samo jedan bočni pojas (v. poglavlje ovog članka Elektronički uređaji u radio-prijenosu).

Jednobočni prijenos ili *SSB* (prema engl. Single Side Band) označava se i međunarodnom oznakom za modulaciju A3J. (Za međunarodne oznake za modulaciju v. poglavlje Šum u ovom članku.) Njegova je osnovna prednost, uz smanjenu širinu pojasa spektra moduliranog signala, smanjeni utrošak snage izvora napajanja za efektivno emitiranje i poboljšan odnos signal/šum. Dok nema modulacije, pri jednobočnom prijenosu odašiljač ne zrači nikakvu energiju. Mana ove vrste modulacije jest što traži specijalan, kompliciraniji prijemnik. Jednobočni prijenos posljednjih se godina sve više afirmirao i u pokretnim će službama za nekoliko godina skoro potpuno zamijeniti klasičnu amplitudnu modulaciju s prijenosom vala nosioca i dvaju bočnih područja (međunarodna oznaka A3). O tome v. i poglavlje ovog članka Primjena elektronike u radio-vezama.

Modulatori za amplitudnu modulaciju mogu se podijeliti u dvije grupe. U modulatorima prve grupe izlazna je struja kontinuirana funkcija vremena. U drugoj grupi izlazna struja teče u nizu diskretnih impulsa. Iz prve grupe bit će opisan modulator s nelinearnim elementom, a iz druge grupe modulirano visokofrekvencijsko pojačalo snage.

U *modulatoru s nelinearnim elementom* dodaje se visokofrekvencijskom prijenosnom signalu u_p niskofrekvencijski modulatorski signal u_m (sl. 18). Aditivno sintetizirani val sadrži samo frekvencije obaju signala i sličan je moduliranom valu. Tek ako se sintetizirani val privede nelinearnom elementu, pojavljuju se nove komponente različitih frekvencija. Iz tako dobivenog niza frekvencija izdvajaju se paralelnim titrajnim krugom komponente karakteristične za amplitudno modulirani val, $f_p - f_m, f_p$ i $f_p + f_m$. Modulatorima s nelinearnim elementom može se ostvariti samo mali indeks modulacije i mala korisnost, a prikladni su samo za male snage.



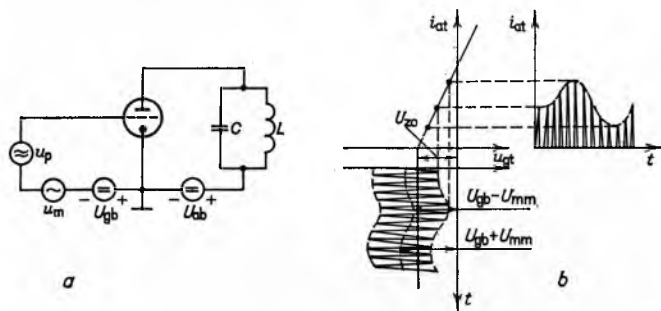
Sl. 18. Shematski prikaz modulatora s nelinearnim elementom. U_b napon baterije, u_m modulatorski napon, U_p napon prijenosnog vala, ω_p frekvencija prijenosnog vala

Modulator snage je u stvari visokofrekvencijsko pojačalo snage klase C modulirano s pomoću niskofrekvencijskog modulijskog pojačala. U visokofrekvencijskom pojačalu s elektronkom, npr. s pentodom, ovisi osnovni harmonik anodne struje o nizu parametara:

$$I_{a1m} = f(U_{g2m}, U_{g2b}, U_{g3b}, U_{ab}, R_e).$$

Prema tome koji se od ovih parametara iskoristi za modulaciju, razlikuje se modulacija pobudom, modulacija na rešetki (pobudnoj, zaštitnoj ili kočnoj), modulacija na anodi i modulacija apsorcijom. Analogno se u tranzistorskim modulatorskim sklopovima razlikuje modulacija na kolektoru, bazi ili emiteru.

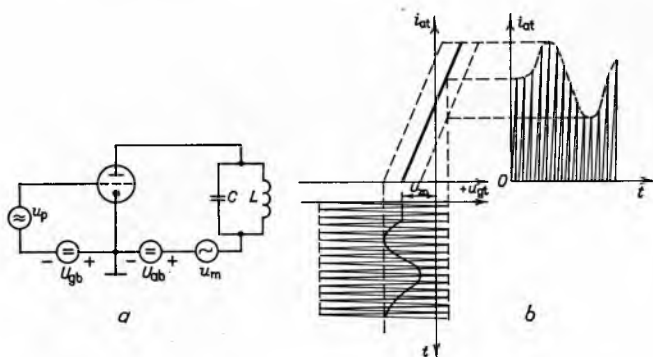
Pri modulaciji na pobudnoj rešetki privodi se napon prijenosnog vala u_p i modulacioni napon u_m toj rešetki (sl. 19 a). Time nastaje promjena prednapona koja uzrokuje promjenu kuta protjecanja i amplitude impulsa anodne struje (sl. 19 b).



Sl. 19. Modulacija na pobudnoj rešetki. a) Principijelna shema sklopa, b) prikaz procesa modulacije; U_{gb} rešetkin istosmjerni prednapon, u_m modulacijski napon, u_p napon prijenosnog vala, U_{mm} amplituda modulacijskog napona, u_{gt} trenutni rešetkin napon, i_{at} trenutna anodna struja

Pri modulaciji na pobudnoj rešetki srednja je vrijednost korisnosti moduliranog pojačala mala, te se ova vrsta modulacije provodi na niskom energetskom nivou. Prednost je modulacije na pobudnoj rešetki mala snaga modulijskog pojačala.

Pri modulaciji na anodi privodi se napon prijenosnog vala u_p rešetki, a modulacijski napon anodi (sl. 20 a). Promjena napona



Sl. 20. Modulacija na anodi, a) Shematski prikaz sklopa, b) prikaz procesa modulacije; U_{gb} i U_{ab} istosmjerni naponi rešetkinog i anodnog izvora, u_p i u_m izmjenični prijenosni i modulacioni napon, U_{zo} zaporni napon

anode uzrokuje promjenu položaja ulazne dinamičke karakteristike (sl. 20 b), koja uzrokuje promjenu zapornog napona U_{zo} i amplitude impulsa anodne struje. Radi poboljšane anodne modulacije obavlja se ponekad i dodatna automatska modulacija na pobudnoj rešetki i istovremena modulacija na zaštitnoj rešetki. Prednost je anodne modulacije približno stalna korisnost pojačala, pa se stoga modulacija izvodi redovno u izlaznom stupnju. Snaga modulijskog pojačala treba da je jednaka polovici privedene istosmjerne snage visokofrekvencijskog pojačala, što se ubraja u nedostatke ove vrste modulacije.

U tranzistorskim modulatorima (pojačalima) smanjenje pojačanja, povećanje napona zasićenja pri većim strujama i pojava inverznih struja kod malih napona napajanja otežavaju postizanje većih indeksa modulacije. Modulacija na kolektoru primijenjena na posljednja dva ili tri stupnja često se upotrebljava u tranzistorskim odašiljačima.

Fazna i frekvenijska modulacija (v. poglavlje ovog članka Elektronički uređaji u radio-prijenosu). Modulacijom faze nastaje promjena faze prijenosnog signala

$$\varphi(t)_p = \omega_p t + \Delta\Phi \sin \omega_m t, \quad (10)$$

gdje je $\Delta\Phi$ fazna devijacija, tj. najveće odstupanje faze od srednje vrijednosti u toku modulacije. Devijacija faze je proporcionalna amplitudi modulijskog napona: $\Delta\Phi = k_p U_{mm}$. Modulaciju faze prati i promjena frekvencije

$$\omega(t)_p = \omega_p + \Delta\omega \cos \omega_m t. \quad (11)$$

Modulacijom frekvencije nastaje promjena frekvencije prijenosnog signala $\omega(t)_f = \omega_p + \Delta\omega \cos \omega_m t$, gdje je $\Delta\omega$ frekvenijska devijacija, tj. najveće odstupanje frekvencije od srednje vrijednosti (centralne frekvencije) u toku modulacije. Frekvenijska je devijacija proporcionalna modulijskom naponu: $\Delta f = k_f U_{mm}$. Modulaciju frekvencije prati i promjena faze $\varphi(t)_f = \omega_p t + \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \times$

$\times \sin \omega_m t$. Povezanost frekvenijske i fazne modulacije vidljiva je iz izraza za modulirani val,

$$u(t)_{f,p} = U_{pm} \cos(\omega_p t + m \sin \omega_m t), \quad (12)$$

gdje je indeks modulacije za frekvenijsku modulaciju $m_f = \Delta f / f_{max}$, a za faznu modulaciju $m_p = \Delta\Phi$. Broj bočnih komponenti ovisi o indeksu modulacije. Taj je broj konačan, ako se zanemare komponente s malim amplitudama.

Širina frekvenijskog pojasa frekvenijski moduliranog signala znatno je veća nego pri amplitudnoj modulaciji. Ona iznosi

$$B = 2 f_{m \max} + K \Delta f.$$

Faktor K ovisi o kvalitetu prijenosa i uzima se obično da je jednak 2. Ako je npr. najviša frekvencija modulijskog signala $f_{m \max} = 15$ kHz, a najveća devijacija frekvencije $\Delta f = 75$ kHz (što je najveća devijacija koja se primjenjuje), potrebna će širina pojasa iznositi $B = 2 \cdot 15 + 2 \cdot 75 = 180$ kHz. Toj širini mora odgovarati i propusni pojas svih pojačala koja pojačavaju u odašiljaču frekvenijski modulirani signal.

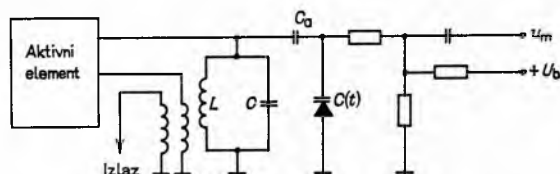
Pojava novih frekvencija i promijenjeni odnos amplituda pojedinih komponenti modulijskog pojasa karakteristika je nelinearnog procesa; frekvenijska i fazna modulacija ubrajaju se stoga u nelinearne modulacije. Veća širina potrebnog pojasa ograničuje upotrebu ove vrste modulacije na područje viših frekvencija. Bolja korisnost pojačala, jer rade sa stalnim amplitudama, poboljšani odnos signal/šum i smanjenje smetnji koje djeluju na amplitudu, prednosti su frekvenijske modulacije.

Modulatori za frekvenijsku modulaciju. Frekvenijska modulacija može se postići direktnim ili indirektnim postupkom.

Pri direktnom postupku modulacije mijenjaju se neposredno parametri titrajnog sustava oscilatora, npr. kapacitet. Nedostatak tog postupka je slabija stabilnost frekvencije titranja.

Pri indirektnom postupku modulacije faznom se modulatoru privodi modulijski napon kojemu je amplituda obrnuto proporcionalna modulijskoj frekvenciji. Na izlazu modulatora dobiva se frekvenijski modulirani signal kojemu je frekvenijska devijacija proporcionalna samo modulijskom naponu. Mogućnost primjene stabilnog oscilatora s kristalom prednost je indirektnog postupka, a složenost i veći broj stupnjeva množila frekvencije ubrajaju se u njegove nedostatke.

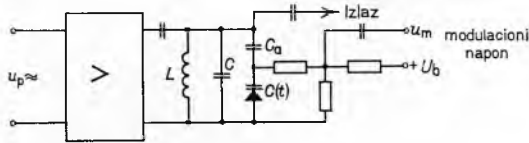
Paralelnim dodavanjem reaktantnog modulatora titrajnom krugu oscilatora nastaje promjena reaktancije, a time i promjena frekvencije titranja. U odašiljačima s elektronikama primjenjuje se za frekvenijsku modulaciju reaktantna elektronka, a u tranzistorskim odašiljačima kapacitivna dioda (varaktor). Kapacitivnost diode mijenja se u skladu s privedenim modulijskim naponom (sl. 21). Dodatnom automatskom regulacijom srednje frekvencije



Sl. 21. Frekvenijska modulacija promjenom reaktancije titrajnog kruga s pomoću kapacitivne diode. U_b napon izvora napajanja, u_m modulacijski napon, L , C titrajni krug, $C(t)$ promjenljivi kapacitet diode

postiže se tražena stabilnost frekvencije odašiljača (v. poglavlje ovog članka Elektronički uređaji u radio-prijenosu).

U filterasko-faznom modulatoru promjenljiva reaktancija narušava rezonanciju paralelnog titrajnog kruga usklađenog pojačala (sl. 22). Posljedica periodske neusklađenosti titrajnog kruga je



Sl. 22. Modulacija faze usklađenog pojačala (oznake iste kao u sl. 21)

periodski promjenljiva amplituda i faza pojačanog signala. Neželjena amplitudna modulacija uklanja se graničnikom amplitude, a fazna devijacija povećava se nizom od više modulatora.

Impulsna modulacija. Različite vrste impulsne modulacije (impulsno-amplitudna, impulsno-širinska, impulsno-fazna i impulsno-kodna) primjenjuju se uglavnom samo u uređajima usmjerenih veza i bit će obrađene u člancima o telegrafiji i telefoniji (v. i poglavlje Šum, str. 634).

Stupanj za prilagođenje

Ovaj stupanj, koji je priključen na izlazno pojačalo odašiljača, treba da prilagodi izlaz odašiljača na antenu ili napojni vod antene. Njegov je zadatak da, s jedne strane, kompenzira reaktivnu komponentu impedancije antene i da, s druge strane, prilagodi otpor antene ili valni otpor pojnog voda otporu izlaznog pojačala. Za tu se svrhu primjenjuju četveropoli različitih izvedbi, npr. L- i Π -filtri.

LIT.: G. A. Дробов, Радиопередающие устройства, Москва 1951. — H. A. Thomas, Theory and design of valve oscillators, London 1951. — W. A. Edson, Vacuum tube oscillators, New York 1953. — С. И. Бычков, Магнетронные передатчики, Москва 1955. — Э. И. Модель, Радиопередающие устройства, Москва, 1961. — С. И. Еватюно, Радиопередающие устройства, Москва 1950. — L. Gray, R. Graham, Radiotransmitters, New York 1961. — R. Busi, Centres émetteurs de haute montagne en ondes métriques et décimétriques, Paris 1966. — V. O. Stokes, Radiotransmitters, London 1970.

I. Modlic

RADIO-PRIJEMNICI

Radio-prijemnici su naprave sastavljene od niza elektroničkih sklopova s pomoću kojih se iz signala što ih u anteni induciraju modulirani elektromagnetski valovi izvaja, pojačava i detektira signal koji sadrži željenu informaciju. Ta se informacija prenosi korisniku odgovarajućim uređajem za reprodukciju, npr. slušalicama, zvučnikom, teleprinterom, ekranom katodne cijevi, posredstvom memorije računala i sl.

Radio-prijemnici mogu biti izvedeni kao samostalni uređaji ili kao dio drugih elektroničkih uređaja. Osim za prijem programa radio- i televizijskih predajnih stanica, oni se upotrebljavaju u svim vrstama radio-veza, u goniometarskim, radarskim i elektroničkim navigacijskim uređajima, u radio-astronomiji i dr.

Marta 1893 održao je Nikola Tesla u Franklinovom institutu u Washingtonu predavanje i demonstraciju predaje i prijema elektromagnetskih valova. Time je Tesla položio temelje bežičnom prenosu energije i radio-vezama. Već 1896 Tesla postiže svojom 200-kilovatnom eksperimentalnom radio-predajnom i pripadnom prijemnom stanicom, postavljenim u Coloradu, bežični prenos signala na udaljenosti od 30 km na dugim valovima. Pri tom je kao indikator prijema upotrijebio plinom punjenu sijalicu. Izvanredno zaslužni pioniri radio-prijemne tehnike, i radio-veza uopće, bili su A. S. Popov i G. Marconi. U maju 1895 u Ruskoj akademiji nauka Popov demonstrira predaju i prijem radio-valova. Već 1899 Popov usavršava svoj prijemnik i demonstrira prenos radio-telefonije na udaljenosti od 35 km. Kao prva otpočela je tvrtka Marconi Co u Engleskoj s proizvodnjom radio-predajnika i prijemnika 1897. U prvim radio-prijemnicima kao indikatori ili detektori služili su kohereri (cijevčice s metalnim prahom) i magnetski ili elektrolitski detektori. S obzirom na neefikasnost tih uređaja, tadašnji su dometi bili maleni. Tek primjenom kristalnog detektora u prijemnicima omogućene su radio-veze na velike udaljenosti.

Nakon pronalaska diode (S. J. Fleming, 1904) i triode (Lee de Forest, 1906) počinje u toku prvog svjetskog rata uspon radio-prijemne tehnike. Razvijeni su prvi detektori s elektronkama, pojačala i oscilatori (A. Meissner, 1913). Direktno prijemnike s kristalnim detektorom zamjenjuje audio-prijemnik (prijemnik s regeneracijom), koji se koristi pozitivnom povratnom spregom (E. H. Armstrong, 1913).

Slijedeći je korak u razvoju radio-prijemne tehnike heterodinski prijemnik, koji omogućava prijem telegrafije na nemoduliranom prenosnom valu. Direktnom prijemniku dodan je u tom slučaju oscilator (heterodin) koji je induktivno spregnut na antenski krug prijemnika. Izbijanjem signala primljenog antenom i signala što ga stvara heterodin dobije se nakon detekcije u slušalicama određeni ton, npr. 1000 Hz, moduliran telegrafskim (Morseovim) znacima.

1917 Levi daje novu shemu radio-prijemnika, koja sadrži dva pomoćna lokalna oscilatora, pa od toga dolazi naziv superheterodin. Godinu dana kasnije E. H. Armstrong patentira usavršenu shemu superheterodinskog prijemnika koji već sadrži sve bitne podsklopove današnjih modernih radio-prijemnika. Paralelno s radio-prijemnicima razvijali su se i sastavni dijelovi, posebno specijalne prijemne elektronke. U drugom svjetskom ratu mnogo se je radilo na usavršavanju kristalnih dioda iz prvih godina prijemne radio-tehnike. Usavršavanje tih dioda bilo je potrebno za radarske prijemnike na decimetarskim i centimetarskim valovima. Na temelju tih istraživačkih radova izraden je 1948 prvi kontakti tranzistor, a 1949 slojni tranzistor. U toku posljednjih 20 godina razvijeni su novi tranzistori vrlo visokih kvaliteta za radio-prijemnu tehniku, a pored njih čitav niz drugih poluvodičkih elemenata.

Podjela radio-prijemnikâ. Suvremeni radio-prijemnici dijele se prema namjeni na kućne ili koncertne radio-prijemnike, kojima se primaju programi radio-difuzijskih stanica, i na profesionalne radio-prijemnike koje primjenjuju za održavanje radio-vezâ državne, društvene i druge organizacije, npr. armija, novinske agencije, broderska poduzeća itd. Tehnički zahtjevi za profesionalne radio-prijemnike daleko su oštriji nego za koncertne.

Radio-prijemnici dijele se također prema frekvencijskim područjima za koja su konstruirani (v. poglavlje Elektronički uređaji u radio-prijenosu, tabl. 1) i prema vrsti rada za koju su predviđeni (npr. za rad s amplitudnom modulacijom A1, A2, A3 ili s frekvencijskom modulacijom F1, F6, v. poglavlje Elektronički uređaji u radio-vezama). U praksi se radio-prijemnici konstruiraju za prijem jednog frekvencijskog područja ili više njih, ili za jednu vrstu rada ili više njih.

Radio-prijemnici dijele se i prema mjestu i ambijentu eksploatacije na prijemnike predviđene za montažu u stacionarnim radio-centrima, na prijemnike za pokretne objekte (brodove, avione, umjetne satelite i sl.) i na prenosne prijemnike. Razlike u pogledu tehničkih zahtjeva, naročito konstrukcijske izvedbe, klimatske i mehaničke zaštite za te su pojedine vrste prijemnika znatne i u većini se slučajeva ti prijemnici ne mogu jedan drugim zamijeniti.

Prema načinu biranja željene frekvencije postoji podjela na prijemnike s kontinuiranim biranjem bilo koje frekvencije unutar njihovog radnog područja, prijemnike s mogućnošću izbora između 1 do 30 fiksnih frekvencija i prijemnike s dekadnim biranjem frekvencija, kojima lokalni oscilator radi na principu frekvencijske sinteze ili analize.

Prema aktivnim elementima koji su upotrijebljeni u sklopovima prijemnika govori se o prijemnicima s elektronkama i o tranzistorskim prijemnicima.

Osnovne karakteristike prijemnikâ. Najvažnije osnovne karakteristike radio-prijemnika jesu: osjetljivost, selektivnost, frekvencijska stabilnost, tačnost postavljanja na željenu frekvenciju, vjernost reprodukcije primljene informacije i sigurnost u eksploataciji.

Osjetljivost prijemnika određena je potrebnim nivoom normiranog visokofrekventnog signala koji je doveden na ulaz prijemnika, da bi se na izlazu dobila normirana izlazna snaga uz određeni odnos signala prema šumu. Osjetljivost radio-prijemnika izražava se bilo u mikrovoltima bilo u decibelima u odnosu na 1 μ V. Za goniometarske prijemnike u kojima je antena sastavni dio uređaja, osjetljivost se izražava jakošću polja, tj. u μ V/m.

Osjetljivost je pojedinih vrsta prijemnika različita. Tako se osjetljivost dobrih prijemnika za prijem radio-difuzije na srednjem valu kreće između 8 i 15 μ V. Kod kvalitetnih profesionalnih prijemnika postignute su na srednjim i visokim frekvencijama osjetljivosti od 0,5 do 5 μ V, a za odnos signal/šum bolji od 20 dB.

Pri određivanju osjetljivosti postavljaju se najčešće svi promjenljivi elementi na maksimalno pojačanje, a automatska se regulacija pojačanja isključuje. Normirani visokofrekvencijski ulazni signal moduliran je pri amplitudnoj modulaciji sa 600 Hz (ponekad 800 ili 1000 Hz) uz stupanj modulacije od 30%. Pri frekvencijskoj modulaciji on je moduliran sa 600 Hz (ponekad 800 ili 1000 Hz) uz devijaciju od 22,5 kHz (tj. 30% od maksimalne devijacije od 75 kHz) za koncertne prijemnike, i uz devijaciju od 5,3 kHz (tj. 30% od maksimalne devijacije od 15 kHz) za profesionalne prijemnike.

Normirana izlazna snaga iznosi 0,5 W za prijemnike koji imaju izlaznu snagu veću od 1 W, 50 mW za prijemnike koji imaju izlaznu snagu od 0,1 W do 1 W, a 1 W za prijemnike koji se upotrebljavaju u motornim vozilima ili prostorijama s velikom bukom, a reprodukcija se signala obavlja pomoću zvučnika.