

Piše: Božidar Pasarić, 9A2HL

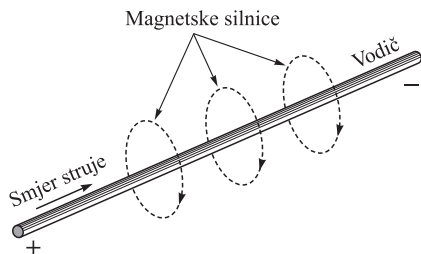
Elektronika za mlade - 6. nastavak

Najprije malen ispravak: na slici 4. u prošleme nastavku umjesto "Napon baterije" treba stajati "Napon na kondenzatoru C". Moja pogreška. A sada prelazimo na:

2.3. Zavojnice

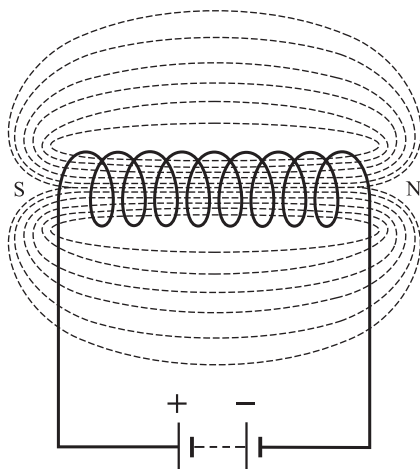
(fizikalna svojstva, serijski i paralelni spoj zavojnica)

Zavojnice su treća, ali jednako važna komponenta radijskih uređaja. Sve je počelo 1819. godine kada je danski fizičar Hans Christian Oersted primijetio da u blizini vodiča kroz koji teče električna struja magnetska igla poskakuje. Bilo je očito da između elektriciteta i magnetizma postoji tijesna veza. Trebalo je još dvanaest godina pa da se izazove i suprotna pojava - da magnetsko polje proizvede električnu struju. To je učinio Englez Michael Faraday 1832., koji je otkrio da za tu svrhu magnetsko polje mora biti **promjenljivo**. Naime, bez obzira na to u koliko jako magnetsko polje stavili zavojnicu, u njoj neće nastati električna struja ako je to polje nepromjenljivo. Faraday je, dakle, otkrio **elektromagnetsku indukciju**.



Slika 1.

Prema tome, ako kroz neki vodič teče električna struja, oko njega će se stvoriti **magnetsko polje** (sl.1.). To polje prema dogovoru prikazujemo kružnicama okomitim na vodič, koje imaju određen smjer i koje se zatvaraju same u sebe. Ako promijenimo smjer struje, promijenit će se i smjer tih silnica. Magnetske silnice ne možemo prekinuti; možemo im samo promijeniti stazu, ali one će se uvijek na kraju zatvoriti same u sebe. (Svi pokušaji da se načini tzv. jedнопolni magnet dosad su propali.) Magnetsko polje osobito će se pojačati ako vodič namotamo oko nekog kartonskog ili plastičnog valjčića: silnice pojedinih zavoja u unutrašnjosti će se zbrojiti, pa će njihov "snop" u valjku biti mnogo gušći (sl. 2.). Otvor na kojemu silnice izlaze iz zavojnice zovemo sjeverni pol (N), a u koji ulaze - južni pol (S). Ne postoji bitna razlika između trajnoga magneta, nači-



Slika 2.

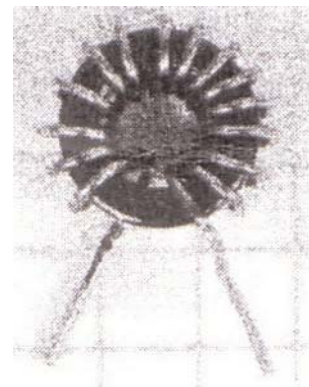
njenog od čelika, i **elektromagneta** prikazanog na slici. Ukupan broj svih silnica koje izlaze iz elektromagneta zovemo magnetski tok ili fluks tog elektromagneta i označujemo grčkim slovom Φ (fi).

Sposobnost vodiča ili zavojnice da oko sebe stvori magnetsko polje zovemo **induktivnost**, koju označujemo slovom **L**, a mjerimo je jedinicom **henri (H)**, prema američkome znanstveniku Josephu Henryju (1797 - 1878.), koji je otkrio samoindukciju i objasnio zakone transformacije. Manje jedinice su mH (milihenri) i μ H (mikrohenri). Induktivna zavojnica ponaša se, možemo reći, obratno od kondenzatora. I ona ima tri svojstva:

1. Također može "usklađiti" određenu energiju, ali u obliku **magnetskog polja**.
2. Osim omskoga, pruža i dodatni otpor izmjeničnoj struji, ali - suprotno kondenzatoru - taj otpor je to veći što je veća induktivnost zavojnice i što je frekvencija struje veća. To je tzv. **induktivni otpor zavojnice X_L** .
3. Ostvaruje fazni pomak između napona i struje, ali tako da **napon prethodi struji**.

U ovome nastavku govorimo samo o malenim induktivnostima kakve se rabe kod visokih frekvencija. O induktivnostima za niske i industrijske frekvencije govorit ćemo u sljedećem nastavku. Klasična jednoslojna zavojnica imat će veću induktivnost što joj je promjer valjka veći, što ima više zavoja žice i što je namotani sloj kraći. (Dakako, u tome ne smijemo pretjerati, jer bi za to trebala što tanja žica, čiji otpor bi postao prevelik. Zato se smatra da je najkvalitetnija ona jednoslojna zavojnica, namotana zavoj do zavoja, čija je duljina približno jednaka njenom promjeru.)

Postoji i četvrti faktor, a to je **jezgra**. Naime, ako u sredinu valjka (gdje su silnice najgušće) stavimo željezo, njena će se induktivnost višestruko povećati. Kada se radi o visokim frekvencijama (radiotehnika), to ne može biti obično željezo, jer stvara prevelike gubitke, već tzv. visokofrekvencijsko željezo koje se izrađuje od željezne prašine i ljepila koje je ujedno i izolator, tako da su u v.f. željezu gubici uslijed vrtložnih struja maleni. Osim v.f. željeza danas postoje i tzv. feriti. To su feromagnetni keramički materijali od kojih se često izrađuju prstenovi, tzv. **toroidi** na koje se namotava izolirana žica (sl. 3).



Slika 3.

I v.f. željezo se također često oblikuje kao toroid. Svojstvo v.f. jezgara i toroida da povećavaju induktivnost zavojnice označuje se grčkim slovom μ_r (mi relativno) i odgovarajućim brojem, npr. $\mu_r 7$. Taj broj nam govori za koliko će se puta povećati induktivnost zavojnice u odnosu na zračnu zavojnicu. (To nas donekle podsjeća na ulogu dielektrika u kondenzatorima.) U praksi taj broj se kreće od 3 do 35 kod v.f. željeza, a 20 do 10000 kod ferita. Riječ je o **magnetskoj propusnosti**, tj. magnetskoj propusnosti tog materijala. Što je propusnost veća, bit će veći i broj magnetskih silnica koje nastaju u zavojnici, pa samim tim i induktivnost zavojnice. V.f. jezgra nam omogućuje da smanjimo broj zavoja za istu induktivnost, što znači manji omski otpor žice i veću kvalitetu zavojnice (Q).

U praksi v.f. željezo se često oblikuje kao vijak koji se može uvrstati u tijelo zavojnice, pa na taj način možemo namjestiti njenu induktivnost u određenim granicama bez odmotavanja ili dodavanja zavoja. Od ferita se izrađuju i feritni štapovi duljine desetak centimetara, koji zajedno s namotanom zavojnicom služe kao ugrađene (magnetske) antene u prijamnicima na dugim, srednjim i kratkim valovima. Toroidi od v.f. željeza obično

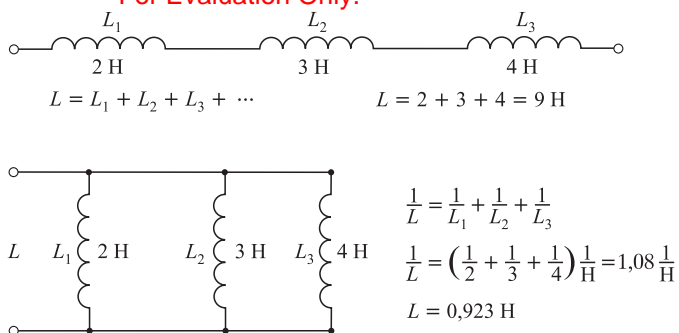
su označeni bojama, dok oni od ferita to nisu. Kada se radi o toroidima, njihova je prednost ta, što silnice ne izlaze iz prstena, pa ih najčešće ne treba oklapati u metalne lonce, što se inače čini radi sprječavanja induktivne veze s drugim zavojnicama. Kada se radi o visokim (tj. radijskim) frekvencijama, potrebna induktivnost zavojnica obično se kreće od nekoliko mikrohenrija do nekoliko milihenrija. Za v.f. željezo još treba reći i to da ih proizvođači često proizvode za različita frekvencijska područja, npr. 2 - 10 MHz, 8 - 30 MHz, itd. Za njihovu pravilnu uporabu treba nabaviti tehničke podatke od proizvođača.

Serijski i paralelni spoj zavojnica

Zavojnice možemo spajati i serijski i paralelno, baš kao i otpornike, pa tu vrijede čak i isti obrasci (sl. 4.). Ali, pritom mora biti zadovoljen važan uvjet: Zavojnice ne smiju biti u međusobnoj induktivnoj sprezi. Dvije zavojnice se nalaze u induktivnoj sprezi ako silnice iz jedne zavojnice prolaze kroz drugu - djelomice ili u cjelini (sl. 5.). Kada je ne želimo, induktivnu spregu možemo spriječiti na četiri načina:

- da zavojnice dovoljno udaljimo jednu od druge,
- da ih postavimo okomito jednu prema drugoj,
- da svaku zavojnicu oklopimo, tj. stavimo u bakreni, mjedeni ili aluminijski lonac, ili ih odijelimo metalnom pregradom,
- da ih namotamo na toroidima.

Faktor sprege ne može biti veći od 1 (tj. 100 %) i označava se slovom *k*. Naime, kada su dvije zavojnice u induktivnoj sprezi, njihova zajednička induktivnost raste brže nego kada to nisu, a ako im je faktor sprege 1, onda raste čak i s kvadratom povećanja broja zavoja (2 puta više zavoja daje 4 puta veću induktivnost). Međutim, u praksi



Slika 4.

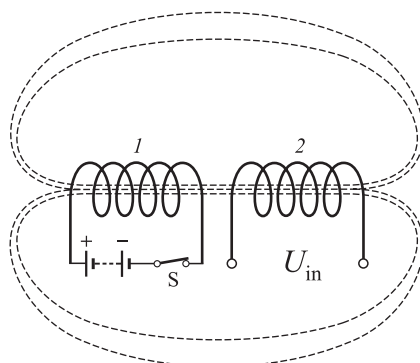
međusobna induktivna sprega između dviju zavojnica često je nužna, što ovisi o shemi uređaja.

Danas se u prodaji mogu dobiti i tvornički izrađene zavojnice. Izgledaju kao otpornici i označene su bojama. Čest je način uporabe zavojnice kao v.f. prigušnice, gdje se iskorištava njeno svojstvo da pruža velik otpor v.f. izmjeničnoj struji, a malen otpor istosmjernoj (sl. 6.). Vidimo da za rad sa zavojnicama trebamo poprilično znanja, pa i mjernih instrumenata. One su očito "nestašna djeca" radiotehnike.

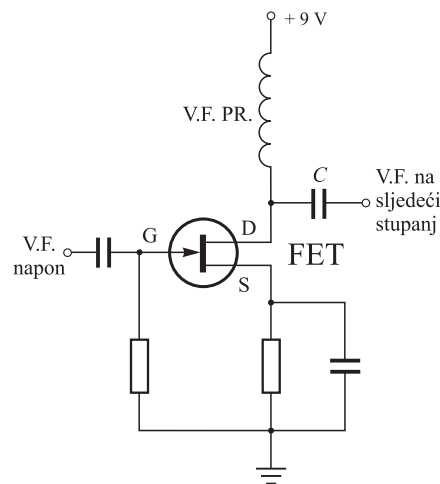
Danas smo upoznali sljedeće pojmove:

- magnetsko polje,
- elektromagnet,
- magnetsku indukciju,
- induktivni otpor zavojnice,
- permeabilnost,
- v.f. željezo, ferit
- v.f. prigušnicu.

Sljedeći put govorit ćemo o induktivnostima za niske i industrijske frekvencije.



Slika 5.



Slika 6.

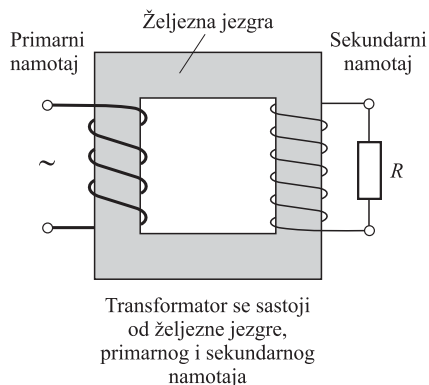
Elektronika za mlade - 7. nastavak

2.4. Transformator

(fizikalna svojstva transformatora, odnos broja primarnog i sekundarnog dijela transformatora)

Transformator je nastao u drugoj polovici 19. stoljeća iz pokušaja da se električna energija prenese na veću udaljenost nego što to omogućuje istosmjerna struja. Naime, prijenos snage uz visok napon traži manju struju, što znači manje gubitke i manje troškove za žicu koja može biti tanja. Taj sukob zastupnika istosmjerne i izmjenične struje kulminirao je pravim ratom između Thomasa A. Edisona i Nikole Tesle, uz konačnu pobjedu Teslina trofaznog sustava. Teorijsku osnovu transformatora dao je Michael Faraday, o čemu smo već govorili: ako se induktivna zavojnica nalazi u promjenljivom magnetskom polju u njoj će se inducirati izmjenični napon. Prvi upotrebljivi transformator načinili su Francuz Lucien Gaulard i Englez John Gibbs, a usavršila su ga tri Mađara: Mikša Deri i njegova dva suradnika u budimpeštanskoj tvrtki Ganz. Oni su 1885. godine prikazali javnosti svoj transformator koji je teorijski bio besprijekorno zamišljen, ali mehanički prilično nepouzdan. Naime, u to vrijeme još nije postojao transformatorski lim pa su primarnu i sekundarnu zavojnicu umjesto toga omotali željeznom žicom. Taj transformator je izmjenični napon od 100 V~ pretvarao u 2000 V~ i tako omogućio prijenos električne energije na veću udaljenost uz malene gubitke. Prvi transformator u današnjem obliku načinio je 1886. Amerikanac William Stanley (1858-1916.) zaposlen kod Westinghousa. Kao izvor koristio je Siemensov generator izmjenične struje dopremljen iz Engleske u Pittsburg. Zahvaljujući Stanleyu Westinghouse je izgradio prvu gradsku mrežu izmjenične struje u mjestu Great Barrington, Massachusetts. Manja hidrocentrala pokretala je generator izmjenične struje napona 500 V, koji se zatim transformatorom podizao na 3000 V. Njega su dalekovodom vodili do grada gdje se drugim transformatorom spuštao na 100 V za žarulje u kućama. Nedostatak jednofazne izmjenične struje bio je taj što ona tada nije mogla pokretati elektromotore, dok je istosmjerna mogla, a to je bio i glavni argument zastupnika istosmjerne struje. Trebalo je pričekati još nekoliko godina da Nikola Tesla izumi trofazni sustav i okretno magnetsko polje.

U osnovi transformator se sastoji od željezne jezgre u obliku okvira koji s jedne strane ima **primarni**, a s druge strane **sekundarni** namotaj (slika 1.).



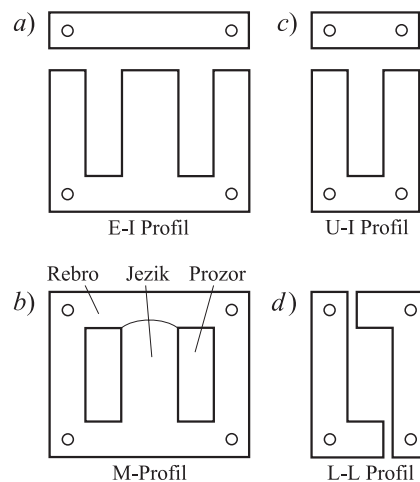
Slika 1.

Primarni namotaj je zapravo induktivna zavojnica priključena na izvor izmjeničnog napona, tako da ona u jezgri stvara promjenljivo magnetsko polje. To promjenljivo magnetsko polje prolazi i kroz sekundarnu zavojnicu u kojoj nastaje inducirani izmjenični napon. Za transformator je bitno sljedeće pravilo: omjer transformacije izmjeničnog napona ovisi o omjeru broja zavoja između primara i sekundara; npr. ako u primaru imamo 200 zavoja, a u sekundaru 1000, omjer transformacije bit će 1:5. Dakle, ako na primar dovedemo 100 V~, na sekundaru će se pojaviti 500 V~. Prema tome, to je transformacija naviše. Transformator možemo i okrenuti. U tom slučaju, ako na primar od 1000 zavoja dovedemo 100 V~, na sekundaru od 200 zavoja pojavit će se 20 V~. To je transformacija 5:1, dakle naniže.

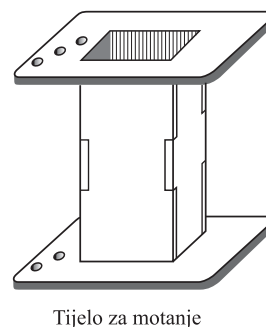
Transformator mora imati željeznu jezgru kako bi se povećala gustoća magnetskog toka i kako bi gotovo sve magnetske silnice iz primara prošle kroz sekundar i tako se postigao najveći mogući faktor sprege između njih ($k=1$). Danas se te jezgre izrađuju od transformatorskog lima raznih oblika (slika 2.). Na slici 3. vidimo i "paketić" načinjen od pertinaksa ili tvrdog kartona. On služi za smještaj primara i sekundara. Danas se i primar i sekundar najčešće motaju na istome "paketiću", ali se između njih nalazi deblji sloj izolacije. Transformatorski limovi prikazani su na slikama 2.a-d. Kada je "paketić" namotan u njega se stavljaju limovi i to izmjenično, najprije s jedne, a zatim s druge strane - sve dok sredina "paketića" ne bude tijesno popunjena. Transformatorski limovi na svojoj površini imaju sloj izolacije, najčešće oksida, kako bi se spriječile inducirane

vrtožne struje, koje predstavljaju gubitak. Danas se najčešće rabe limovi E-I profila ili M profila (s "dva prozora"). Limovi M profila umeću se tako da se središnji jezic potisne prema dolje, ugura u sredinu "paketića" i složi na prethodni lim. Složeni paket E-I limova bez namotaja vidimo na slici 4. Za motanje najčešće služi bakrena žica izolirana lakom (CuL) određene debljine (koju treba izračunati prema jakosti struje). Obično se uzima da 1 mm² presjeka žice može izdržati 3A.

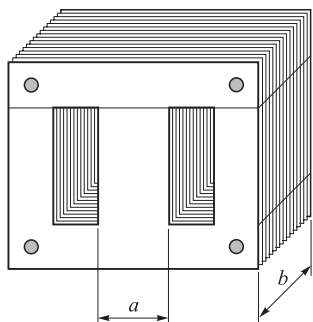
Drugo pravilo koje treba zapamtiti odnosi se na prijenos snage iz primara u sekundar. Ako zanemarimo gubitke u željezu i bakru (1-5%), snage u primaru i u sekundaru su jednake. To znači ako je sekundar opterećen sa 100 W, i u primaru će biti angažirana snaga od 100 W. (Pretpostavimo da je sekundar namotan za 20 V i struja koju iz njega uzimamo ima jakost 5 A.) Prema tome, ako je primar priključen na 100 V, kroz njega će teći struja od 1 A, što je također 100 W. U ovome slučaju primar će biti namotan s više zavoja tanje žice, a sekundar s



Slika 2.



Slika 3.



a – širina jezika
b – debljina paketa
a × b = presjek jezgre

Slika 4.

manje zavoja deblje žice. Ako sekundar nije opterećen nikakvim trošilom, kroz primar će teći samo minimalna struja uzrokovana gubicima u transformatoru. Drugim riječima, struja u primaru automatski se, posredstvom magnetskog polja, prilagođava potrošnji u sekundaru.

U elektronicima i radiotehničkim transformatorima s transformatorskim limom dijele se na **mrežne** i **niskofrekventne**.

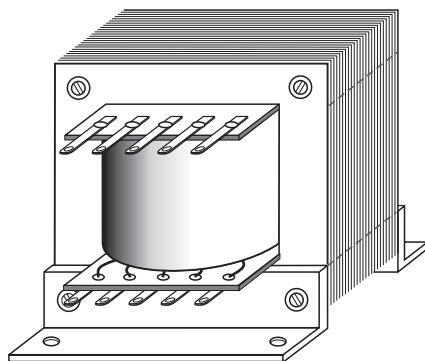
Mrežni transformatori priključuju se na gradsku mrežu i služe za napajanje raznih elektroničkih i radijskih uređaja koji za svoj rad trebaju drukčije napone od napona gradske mreže. (Osim toga te napone treba još pretvoriti u istosmjernu.) Mrežni transformatori se rade za frekvenciju od 50 Hz (u Americi 60 Hz). Niskofrekventni transformatori trebaju bez izobličenja prenijeti cijeli opseg zvučnih, tj. niskih frekvencija (16-16000 Hz). Oni danas najčešće služe za prilagodbu zvučnika na pojačalo; to su tzv. izlazni ili prilagodni transformatori.

Broj zavoja u primaru ili sekundaru ne može biti proizvoljan, već se mora izračunati prema veličini željezne jezgre i njenim svojstvima. Kod mrežnog transformatora treba najprije pronaći **broj zavoja po voltu**, a onda se on množi s naponom. Kada ne možemo doći do izvornih tvorničkih podataka, za mrežne transformatore postoji približna formula:

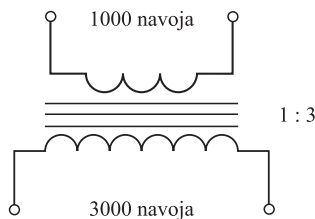
$$\text{Broj zavoja po 1 V} = \frac{45}{S}$$

“S” je presjek jezgre u cm² i može se izračunati iz slike 4. tako da širinu srednjeg jezika, “a”, pomnožimo s debljinom paketa limova, “b”. Npr. za presjek jezgre od 10 cm² dolaze 4,5 zavoja po voltu, pa za primar od 220 V treba namotati 990 zavoja. Takav način računanja vrijedi i za sekundar, s time da izračunati broj zavoja treba povećati za 10% kako bi se nadoknadio pad napona pri opterećenju.

Transformator može imati i nekoliko sekundara, ovisno o raznim naponima koji nam trebaju. Na slici 5. vidimo sliku mrežnog transformatora. Postoje i autotransformatori (ili štedni transformatori) koji radi uštede imaju samo jedan namotaj (slika 6.). Na tom namotaju postoji izvod gdje možemo uzeti neki niži napon.

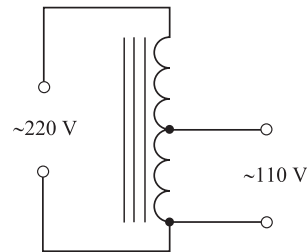


SIMBOL



NF ili mrežni trafo

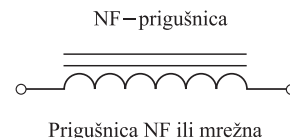
Slika 5.



Autotransformator upotrebljava isti namotaj i za primar i za sekundar

Slika 6.

Po vanjskom izgledu transformatoru je vrlo slična **prigušnica**, iako ona ima drugu namjenu. Naime, ona ima samo jedan namotaj, a zbog svoga induktivnog otpora XL, pruža velik otpor izmjeničnoj, a malen otpor istosmjernoj struji. Kao i transformatori, postoje mrežne i NF prigušnice (slika 7.). Induktivnost NF prigušnice iznosi nekoliko henrija, a mrežne još i više.



Slika 7.

Danas smo upoznali sljedeće pojmove:

- mrežni transformator,
- niskofrekventni transformator,
- primarni namotaj,
- sekundarni namotaj,
- omjer transformacije,
- broj zavoja po voltu,
- transformatorski lim,
- autotransformator,
- prigušnica.

Sljedeći put govorit ćemo o diodama.



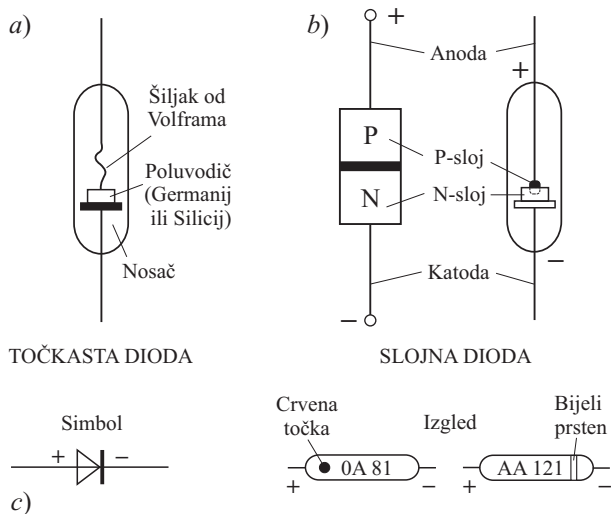
Elektronika za mlade – 8. nastavak

2.5. Diode

Prema definiciji dioda je elektronički element koji propušta struju samo u jednom smjeru. To je, dakle, električni ventil. Dioda može biti elektronska cijev, a može biti i načinjena od poluvodiča kao poluvodička dioda. Nekada se za njenu izradu upotrebljavao najčešće mineral galenit (olovni sjajnik, PbS), pa se naziva i kristalnom diodom. O elektronskoj cijevi – diodi, govorit ćemo drugom prilikom.

Svojestvo nekih minerala da propušta električnu struju samo u jednom smjeru prvi je primijetio Carl F. Braun 1874. godine (poznatiji kao izumitelj katodne cijevi), čak desetak godina prije otkrića radiovalova. Bio je to olovni sulfid, galenit, iako i mnogi drugi minerali pokazuju isto svojstvo. U ono vrijeme radiovalovi su se otkrivali s pomoću koherera. Prema raspoloživim podacima, prvi koji je za detektiranje (otkrivanje) radiovalova upotrijebio improviziranu diodu bio je Gulielmo Marconi prilikom prvog uspješnog prijenosa radiovalova preko Atlantika 1901. godine. Naime, on je upotrijebio kombinaciju željezne piljevine i žive u vezi sa slušalicom, iskoristivši patent Indijca Jagadisha Ch. Bosea iz 1898. godine, a da je to mudro prešutio (kao i Teslin sustav titrajnih krugova, uostalom). Sva je prilika da Marconi nije bio ni svjestan teorijske strane mnogo osjetljivijeg postupka kojim se poslužio, jer je kombinaciju željezne piljevine i žive i dalje zvao kohererom. To je vjerojatno bio i prvi primjer demodulacije amplitudno moduliranog signala u povijesti, dakle prvog detektorskog prijamnika.

Poslije 1920. godine u svijetu su počele nicati radiodifuzne radijske postaje na srednjem i dugom valu, kakve su u osnovi i danas. Iako su već postojale elektronske cijevi, one su bile vrlo skupe i rijetke. Zato su mnogi pojedinci gradili tzv. detektorske prijamnike koji nisu trebali elektronske i skupe baterije – već samo v. f. struju iz antene. Ona je, dakako morala biti dovoljno dugačka, uz odlično uzemljenje. Najkritičniji dio u takvome prijamniku bila je dioda, koja poništava jedan smjer visokofrekventne struje, dok drugi smjer ide u osjetljive visokoomske slušalice u obliku istosmjerne pulsirajuće struje. Diodu je morao svatko sebi sam načiniti.



Slika 3.

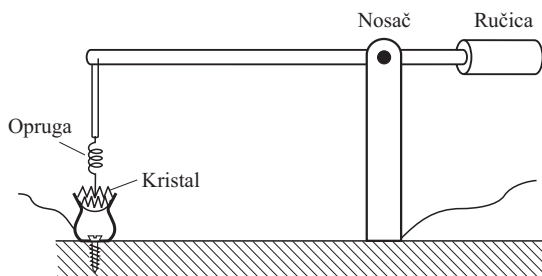
Na slikama 1. i 2. vidimo primjere ležišta, odnosno kućišta za kristal galenita na koji se oslanja mjedeni šiljak. Takva detektorska dioda rabila se sve do Drugog svjetskog rata. Trebalo je rukom potražiti najbolje mjesto na kristalu i odrediti pravi pritisak igle. Dok je uzbuđeni radioamater slušao program, drugi su ukućani morali šutjeti jer je prijam bio tih te hodati na prstima, kako se igla na kristalu ne bi pomaknula.

U elektrotehnici tvari se dijele na vodiče, izolatore i poluvodiče. Pod određenim uvjetima poluvodiči vode struju samo u jednom smjeru. Danas se poluvodičke diode izrađuju od germanija (Ge) i silicija (Si). Konstrukciju poluvodičke diode vidimo na slici 3.a. Ona se sastoji od komadića kristala germanija ili silicija na koji se oslanja šiljak od volframa, zlata ili platine. Sve je to zaliveno u staklenom balončiću. To je tzv. točkasta dioda koja ima vrlo malen vlastiti kapacitet, pa je pogodna za rad na visokim frekvencijama.

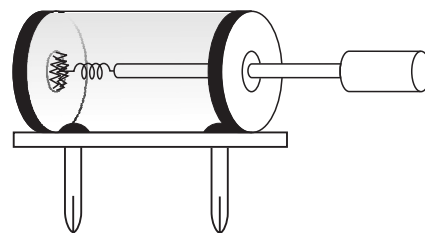
Postoje i slojne poluvodičke diode (slika 3.b.). Takva dioda sastoji se od poluvodičkog sloja silicija (ili germanija) N-tipa i sloja silicija (odnosno germanija)

P-tipa. Na mjestu njihova dodira dobiva se NP sloj koji je bitan za rad diode. Germanij i silicij N-tipa imaju negativna električna svojstva (tj. višak elektrona), a germanij i silicij P-tipa pozitivna električna svojstva (tj. manjak elektrona). To se postiže dodavanjem minimalnih količina primjese ("nečistoće") u germanij ili silicij – npr. fosfora, arsena ili antimona za N-tip, odnosno bora, aluminija, galija ili indija za P-tip poluvodiča. Slojne diode imaju veći vlastiti kapacitet, pa nisu pogodne za rad na visokim frekvencijama, ali zato mogu izdržati mnogo veću struju. Sloj N-tipa u diodi zove se katoda, a sloj P-tipa anoda. Dioda propušta struju samo onda kada se na katodi nalazi negativni, a na anodi pozitivni pol napona. U suprotnom dioda ne propušta električnu struju. Na slici 3.c. vidimo simbol za diodu. U praktičnoj izvedbi crvena točka na diodi označava anodu, a bijeli prsten katodu.

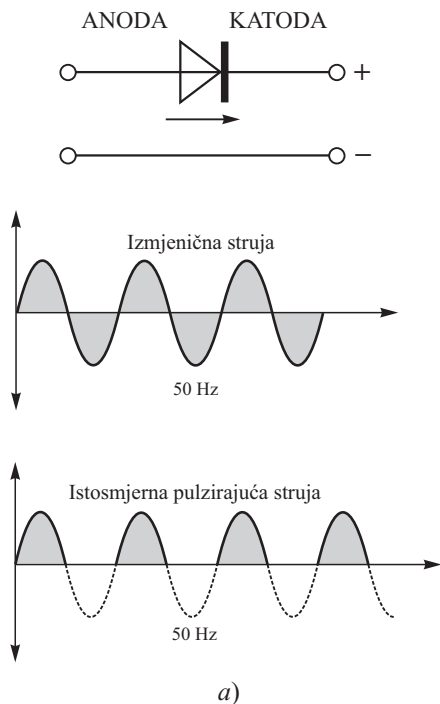
Većina europskih poluvodičkih dioda nose nazive OA (stariji tip, npr. OA81 ili OA91), AA (germanijska dioda, npr. AA121), ili BA (silicijska dioda, npr. BA 125), dok američke diode imaju oznaku 1N (npr. 1N4001). Za potrebe detekcije



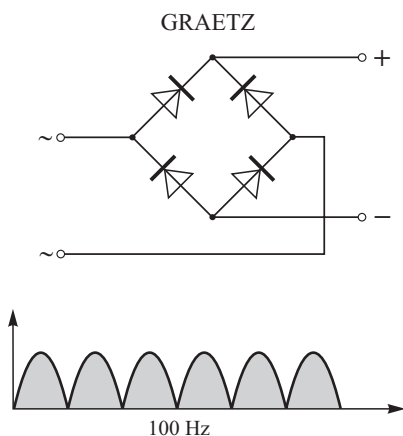
Slika 1.



Slika 2.



a)

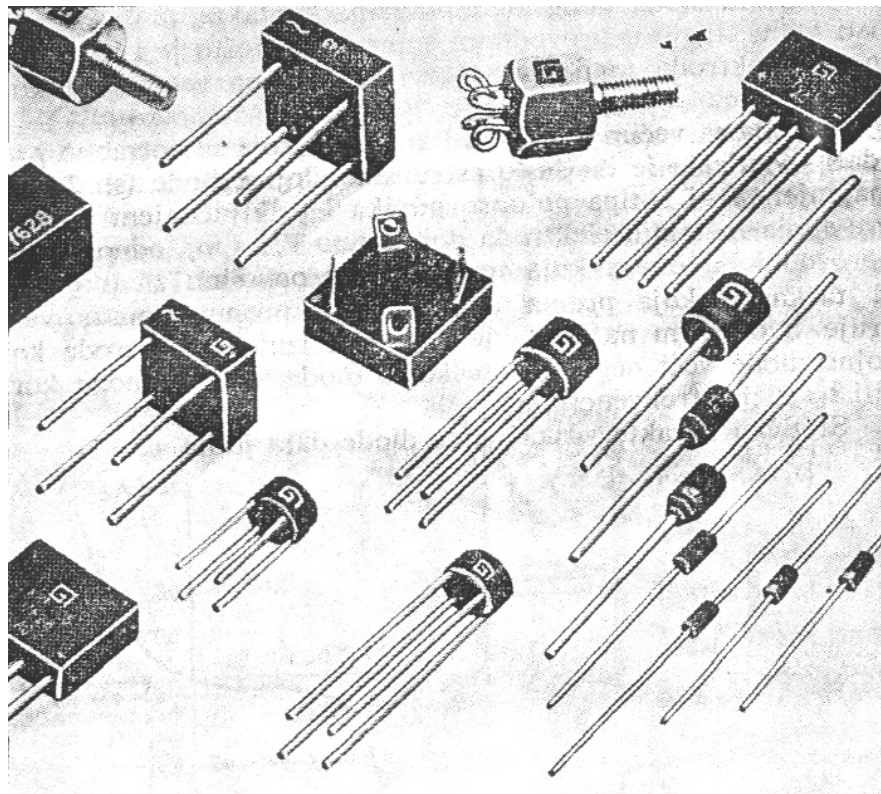


b)

Slika 4.

v. f. signala najosjetljivije su germanijske točkaste diode, a osobito američka 1N34A, koja se danas već vrlo teško nalazi. Silicijske diode mogu biti posebno izrađene i za veliku snagu, npr. za pretvaranje izmjenične struje iz gradske mreže u istosmjernu struju. Takve diode najčešće imaju naziv BY (npr. BY 160). Ako propustimo izmjeničnu struju kroz diodu, dobit ćemo poluvalno ispravljanje (slika 4.a.). Za punovalno ispravljanje potrebno je četiri diode spojiti u tzv. Graetsov spoj (slika 4.b.). Na slici 5. vidimo izbor pojedinačnih dioda, kao i vanjski izgled Graetzova spoja za veće napone i struje.

Kada smo govorili o osjetljivosti diode, mislili smo na tzv. potencijalni prag koji ima svaka dioda. Naime, iako smo diodu spojili u propusnom smjeru, ona ipak neće provoditi struju pri nižem



Slika 5.

naponu – do neke granice. Taj potencijalni prag kod silicijskih dioda iznosi 0,4 do 0,9 V, a kod germanijskih 0,2 do 0,5 V, što znači da dioda neće reagirati na v. f. napon iz antene ako je on niži od te vrijednosti. Već spomenuta specijalna germanijska dioda 1N34A ima potencijalni prag od svega 0,14 V, pa je stoga vrlo pogodna za detektorski prijamnik. Na suvremenim digitalnim univerzalnim mjernim instrumentima na skali preklopnika često možemo vidjeti i simbol za diodu. Taj položaj služi upravo za mjerenje potencijalnog praga diode. Pri izboru diode moramo još pripaziti i na najveću dopuštenu struju u propusnom smjeru, kao i na najveći dopušten napon u nepropusnom smjeru (tzv. inverzni napon), što ga ta dioda još može izdržati, a da ne probije.

S vremenom su se razvile i druge vrste poluvodičkih dioda različite namjene. Ovdje ćemo ih samo nabrojiti:

- svjetleća dioda, tzv. LED (*light emitting diode*) koja služi za indicaciju, najčešće umjesto žaruljice,
- Zenerova dioda (po Amerikancu Clarenceu Zeneru), koja služi za stabilizaciju napona,
- kapacitivna dioda (*varicap*), kojoj možemo mijenjati kapacitet promjenom napona,
- tunelska dioda, koja ima negativni otpor,
- foto-dioda (ili foto-otpornik), koja mijenja svoj otpor pod utjecajem svjetlosti,

- gun-dioda, koja oscilira na decimetarskim frekvencijama,
- pin-dioda, koja služi kao prekidač kod visokih frekvencija,
- laserska dioda, koja ima najširu primjenu u CD-playerima,
- Schottky-dioda, koja ima niži naponski prag, kratko vrijeme preklapanja i malen unutrašnji otpor u propusnom smjeru (može poslužiti i umjesto točkaste diode).

Danas smo upoznali sljedeće pojmove:

- germanijske i silicijske poluvodiče,
- točkastu diodu,
- slojnu diodu,
- katodu,
- anodu,
- poluvalno ispravljanje,
- punovalno ispravljanje,
- potencijalni prag diode,
- razne diode posebne namjene.

Sljedeći put govorit ćemo o tranzistorima.

Elektronika za mlade – 9. nastavak

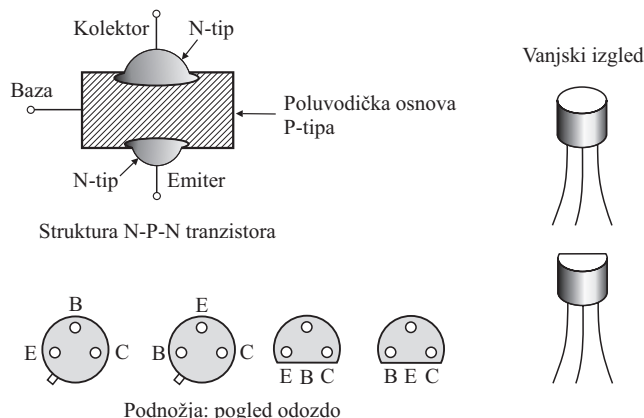
2.6. Tranzistori

(vrste, shematski prikaz NPN, PNP i FE-tranzistora)

Tranzistor su izumili znanstvenici i istraživači Bellovih laboratorija (istraživačke podružnice *American Telephone and Telegraph Company – AT&T*) u gradu Murray Hill, New Jersey, 1947. godine. Njih trojica, William Shockley, Walter Brattain i John Bardeen, za taj izum dobili su 1956. godine Nobelovu nagradu za fiziku. Vođa tima bio je Shockley, genijalni um divlje i naprasne naravi, samouvjeren i "bez dlake na jeziku", kojega je njegova okolina uglavnom tolerirala zbog njegovih znanstvenih rezultata, posebno na području primjene kvantne teorije na razvoj poluvodiča. S nevjerojatnom je lakoćom svodio složene i naoko nerješive probleme na niz logičnih i jednostavnijih zadataka koje je zatim bilo moguće riješiti. Valjda nema izuma u povijesti koji je u pola stoljeća toliko unaprijedio i izmijenio ljudsku civilizaciju kao što je tranzistor. Taj tranzistor nije mogao načiniti ništa nova što prije njega nije mogla načiniti i elektronska cijev; ali je bio nesrazmjerno manji od svoje velike i debele "rođakinje" i trošio je i toliko puta manje energije. Prema tome, teorija i tehnologija u koju je mogao tranzistor "uskočiti" već je postojala gotovo pola stoljeća, pa je vjerovatno i to bio jedan od razloga njegova eksplozivnog širenja. Sam Shockley zamjerio se svijetu svojom teorijom prema kojoj crna rasa ima niži kvocijent inteligencije, a kako imaju mnogo djece, ugrožavaju intelektualni prosjek SAD-a. (Čak je predložio kastriranje osoba koje imaju taj kvocijent niži od 100.) U vremenu upravo suprotnih političkih i znanstvenih trendova, on je bio duboko uvjeren u točnost te svoje teorije, pa ju je pokušavao i znanstveno dokazati. Jedan od najvećih i najkorisnijih umova 20. stoljeća ("Times") umro je u Londonu 1989. u 79. godini života, relativno siromašan i osamljen – uvjeren da je njegov amaterski rad na "disgenetici" važniji od izuma tranzistora. Samo je supruga ostala uz njega. Danas ga nazivaju "ocem Silicijeve doline".

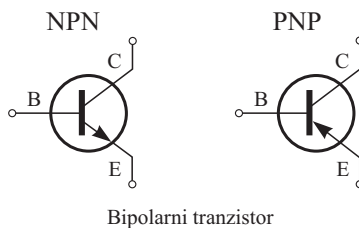
Kako radi bipolarni tranzistor?

Prema tome, kao i elektronska cijev, i tranzistor služi za pojačanje izmjeničnoga električnog signala niske ili visoke frekvencije. (Riječ *tranzistor* je složenica od *transfer resistor* – prijelazni otpornik.) Ovdje ćemo spomenuti dvije vrste tranzistora: **bipolarni** i **FET**. Bipolarni



Slika 2.

tranzistor može biti tipa **PNP** ili **NPN** (slika 1.). O kojem tipu se radi ovisi o vrsti poluvodičkog materijala koji smo upotrijebili. (O poluvodičkim materijalima smo govorili kod dioda.)



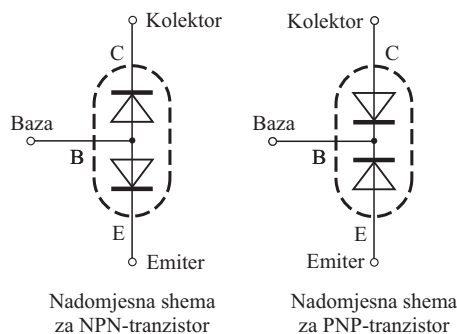
Slika 1.

Bipolarni tranzistor NPN-tipa sastoji se od poluvodičke osnove p-tipa (koja najčešće nije veća od nekoliko kvadratnih milimetara), u koju su sa svake strane posebnim postupkom utaljane dvije kapljice poluvodičkog materijala n-tipa (slika 2.). Osnova se naziva **bazom** (B), manja kapljica je **emiter** (E), a veća **kolektor** (C). Tranzistor se stavlja u metalno ili plastično kućište i ima tri izvoda. (Četvrti je izvod, ako ga ima, uzemljenje metalnog kućišta.) Raspored izvoda tranzistora uvijek se prikazuje s pogledom **odozdo**.

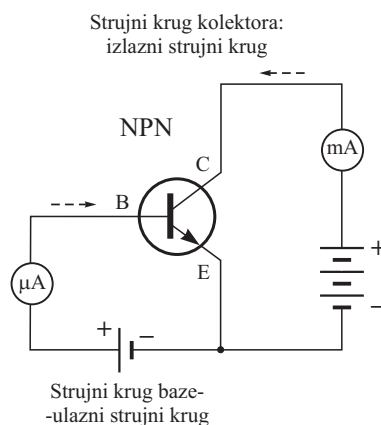
Bipolarni tranzistor može se približno prikazati i kao spoj dviju dioda (slika 3.). Kako je konstrukcija takvog tranzistora simetrična u odnosima baza-emiter i baza-kolektor, on se naziva bipolarnim, tj. dvopolnim. Kod tranzistora uvijek postoje **dva strujna kruga: ulazni i izlazni**. Na ulazni krug dovodi se signal koji želimo pojačati, tj. NF ili VF struja. U izlaznom krugu taj signal dobivamo pojačan. Pritom za istosmjernu struju krug baze (ulazni krug) mora biti spojen u **propusnom**, a krug kolektora (izlazni

krug) - u **nepropusnom** smjeru (slika 4.).

Tranzistor u osnovi radi ovako: iako je istosmjerni napon u kolektorskom strujnom krugu spojen "obratno", tj. u nepropusnom smjeru, u tom krugu ipak će poteći struja pod utjecajem struje u krugu baze. To je tzv. **tranzistorski efekt** i zato tranzistor nije samo običan spoj dviju dioda kako smo to prikazali na slici 3., već je i više od toga. Već i najmanja promjena struje u krugu baze



Slika 3.



Slika 4.

izazvat će oko stotinu puta veću promjenu struje u krugu kolektora. To je osnova za upotrebu tranzistora kao pojačala. Kada u ulaznom krugu ne teče nikakva struja, ona neće teći niti u krugu kolektora. Kod tranzistora male snage, kakvi se najčešće upotrebljavaju, struja baze mjeri se mikroamperima (μA , milijuntina ampera), a struja kolektora u miliamperima (mA, tisućina ampera). U stručnoj literaturi govori se o faktoru strujnog pojačanja β (beta). To je omjer između promjene struje kolektora i promjene struje baze, i on najčešće iznosi 30 do 300, ovisno o tipu i kvaliteti tranzistora. Dakako, postoje i tranzistori snage kod kojih se struja mjeri amperima.

Pazite! Izvor napona u strujnom krugu kolektora nikada se ne smije spojiti u propusnom smjeru, jer će prevelika i nekontrolirana struja uništiti tranzistor! Dakle, na NPN tranzistoru kolektor mora biti pozitivan, a na PNP tranzistoru – negativan. Radni napon tranzistora najčešće iznosi između 3 i 30 volta. U bipolarnih tranzistora ulazni strujni krug ima manji ulazni otpor, oko 200Ω , dok je izlazni otpor kolektorskog kruga nešto veći (i do nekoliko kilooma). Ovdje smo prikazali rad tranzistora u tzv. spoju sa **zajedničkim emiterom** jer je u ovom spoju emiter zajednička elektroda za oba kruga (slika 4.). Postoje i spojevi sa zajedničkom bazom i sa zajedničkim kolektorom, čime se ne mijenja načelno prikazan rad bipolarnog tranzistora. Osnovnu ispravnost bipolarnog tranzistora možemo provjeriti i ommetrom tako da ga uključimo u krug baze, i zatim u krug kolektora - najprije u propusnom smjeru, a zatim u nepropusnom smjeru, kao kada provjeravamo ispravnost dioda. Suvremeni digitalni univerzalni mjerni instrumenti često imaju položaj i priključne rupice za mjerenje strujnog pojačanja β (beta). Posebno se izrađuju bipolarni tranzistori za pojačanje niskih, a posebno za pojačanje visokih frekvencija. (Ovi potonji imaju manji unutrašnji kapacitet između svojih elektroda.)

Kako radi FET?

Kada su Bardeen, Brattain i Shockley poslije Drugoga svjetskog rata započeli svoja istraživanja na poluvodičima u Bellovim laboratorijima, oni su zapravo namjeravali dovršiti ono što danas nazivamo **tranzistor s efektom polja** (FET - *field effect transistor*), što ga je još 1925. zamislio naturalizirani Amerikanac – Austrijanac Julius Lilienfeld, a Shockley ga predložio za daljnji razvoj. Međutim, kako je ta ideja bila patentirana, Bellovi laboratoriji su se predomislili i istraživanje usmjerili prema onome što danas nazivamo tranzistor s kontaktnim šiljcima. Kako je to područje bilo bliže Bardeenu i Brattainu, Shockley se izdvojio i nastavio istraživati kod kuće. Nešto prije

Božića 1947. godine prvaj dvojici proradio je tranzistor s kontaktnim šiljcima, a da Shockley nije bio blizu, pa čak nije ni znao za to. Shvativši da će njegovo ime biti izostavljeno, digao je užasnu galamu jer je on bio pokretač istraživačkog projekta. Kako je tranzistor s kontaktnim šiljcima bio vrlo nestabilan i nepouzdan, Shockley je u roku od samo nekoliko tjedana, vjerojatno iz inata da pokaže što on može, izišao u javnost s cjelovitom teorijom o ponašanju poluvodiča i objavio svoje rješenje stabilnog tranzistora koji je i proradio 1950. godine: to je slojni tranzistor u kojemu se u obliku sendviča nalaze tri sloja poluvodiča – ili u kombinaciji PNP ili NPN. Pokazalo se da je to pravo rješenje, pa su Nobelovu nagradu ravnopravno podijelila sva trojica.

Što je bilo s FET-om kao polaznom idejom? Lilienfeld je teoretski točno predvidio mogućnost izrade FET-a, ali tehnologija pročišćavanja poluvodiča u to vrijeme još nije bila na razini da bi on mogao proraditi. Tek oko 1960. godine stručnjaci Bellovih i nekih drugih laboratorija usavršili su postupak u dovoljnoj mjeri da bi FET proradio. FET je mnogo sličniji elektronskoj cijevi triodi, već i zato što je njegov ulazni otpor vrlo velik. Postoje dvije vrste FET-tranzistora: J-FET i MOS-FET (ili IG-FET). I jedan i drugi mogu biti s n-kanalom ili s p-kanalom. Naziv J-FET dolazi od "junction FET" (spojni FET), a IG-FET od "insulated gate FET" (FET s izoliranim vratima).

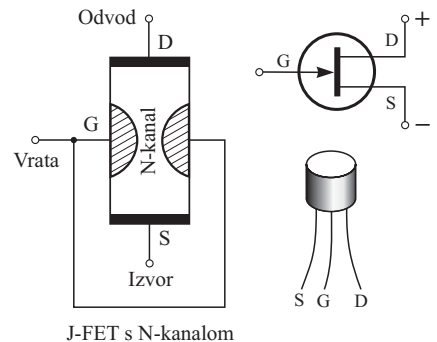
Strukturu i simbol J-FET-a vidimo na slici 5. Kao i bipolarni tranzistor i FET ima tri izvoda, ali se drukčije zovu:

- S (*source* - izvor)
- G (*gate* - vrata, zasun)
- D (*drain* - odvod).

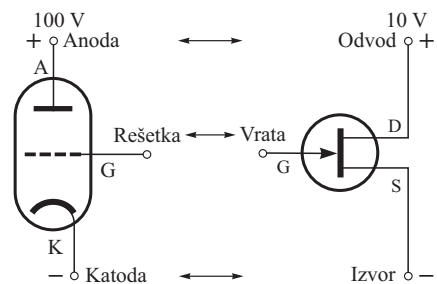
Kod FET-ova s n-kanalom, koji su češći, kada na izvor S dovedemo negativni, a na odvod D pozitivni pol napona, kroz kanal će proteći struja. Vrata G su elektroda za regulaciju struje FET-a i u odnosu na izvor S moraju biti negativno polarizirana. Tako se u n-kanalu stvara "suženje" koje smanjuje struju FET-a otprilike na polovicu – kao kada stanemo na cijev za zalijevanje vrta. (To se zove radni režim FET-a u A-klasi.) Taj nega-

tivni napon mora, dakako, biti točno odmjeren; prevelik prednapon mogao bi struju FET-a smanjiti do ničice. Kako malene promjene napona na vratima G uzrokuju znatne promjene struje kroz FET, on radi kao pojačalo. J-FET ima ulazni otpor od nekoliko megaoma i po tome je sličan elektronskoj cijevi triodi (slika 6.).

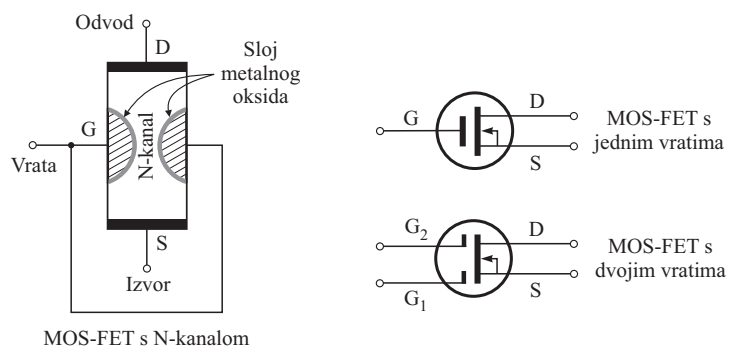
Potrebno je uočiti da spoj vrata-izvor (G - S) u J-FET-u predstavlja poluvo-dičku diodu. Zato vrata J-FET-a s n-kanalom nikada ne smiju dobiti pozitivan napon: zbog struje zasićenja FET bi prestao raditi kao pojačalo, a možda bi bio i uništen. Još veći ulazni otpor ima MOS FET (*metal oxide semiconductor FET*), nazvan još i IG FET (*insulated gate FET* – FET s izoliranim vratima). Naime, kod njega se između vrata i kanala nalazi vrlo tanak sloj oksida, koji je odličan izolator (slika 7.). Na taj način upravljanje strujom u kanalu ostvaruje se isključivo naponom, elektrostatički, a ulazni otpor penje se na stotine mega-



Slika 5.



Slika 6.



Slika 7.

oma. Postoje i IG-FET-ovi s dvama vratima, koji su zato pogodni za miješanje u superheterodinskim prijamnicima.

Postoji nekoliko sustava označavanja tranzistora. U europskom sustavu prvo slovo označava osnovni materijal: A za germanij i B za silicij. Drugo slovo označava namjenu: C – NF tranzistor male snage, D – NF tranzistor veće snage, F – VF tranzistor. Broj iza slova je redni broj tog tipa tranzistora. Npr. AC117 je germanijev NF tranzistor, BF173 je silicijev VF tranzistor, BF145 je silicijev J-FET (u europskom se sustavu FET-ovi ne označavaju na poseban način).

Američka oznaka sastoji se od znamenke, slova N i još dvije do četiri znamenke: 2 je bipolarni tranzistor ili J-FET (npr. 2N2222, 2N3819), a 3 je MOS FET (npr. 3N200). Japanci i Rusi imaju svoje načine označavanja tranzistora.

U ovome napisu spomenuli smo samo dvije osnovne vrste tranzistora, iako postoje i druge.

Danas smo upoznali sljedeće pojmove:

- tranzistor,
- tranzistorski efekt,
- faktor strujnog pojačanja bipolarnog tranzistora,

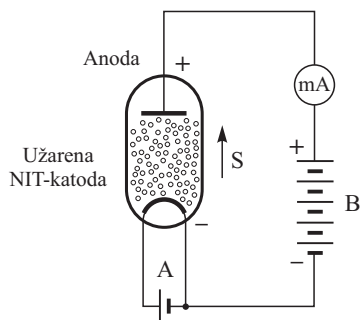
- dvije osnovne vrste tranzistora: bipolarni i FET,
- bipolarne tranzistore NPN i PNP,
- FE tranzistore J-FET i IG-FET,
- FET s n-kanalom i FET s p-kanalom,
- elektrode bipolarnog tranzistora: emiter E, bazu B i kolektor C,
- elektrode FET-a: izvor (*source*, S), vrata (*gate*, G) i odvod (*drain*, D),
- ulazni strujni krug i izlazni strujni krug tranzistora.

Sljedeći put govorit ćemo o elektronskim cijevima. ■

Elektronika za mlade – 10. nastavak

2.6. Elektronske cijevi (osnovno poznavanje, funkcije pojedinih elektroda)

Krajem devetnaestoga stoljeća tek rođena radiotehnika našla se u krizi. Problem je bio u slaboj osjetljivosti prijamnika s kohererom, što se pokušavalo nadoknaditi većom snagom odašiljača. (G. Marconi je za vezu iz Engleske s brodovima na Atlantiku rabio odašiljač snage 30 kW!) Svjetlo na kraju tunela prvi je upalio engleski inženjer John Ambrose Fleming, ugrađivši metalnu pločicu u Edisonovu žarulju u kojoj je vladao vakuum. (To je bio učinio već i Edison, ali nije dalje istraživao.) Pokazalo se, kada je Fleming na užarenu nit stavio minus, a na pločicu plus pol baterije, da kroz vakuumsku cijev protječe struja (slika 1.). On je taj svoj izum nazvao *thermionic valve* – termionski ventil, jer je nit morala biti užarena, kako bi izbacivala elektrone (on je mislio ione), a ventil zato jer je cijev provodila struju



Slika 1.

samo u jednom smjeru. Kasnije je cijev nazvana **diodom** jer ima dvije elektrode – negativnu **katodu** i pozitivnu **anodu**. Fleming je brzo uvidio da anoda mora biti u obliku cilindra koji obuhvaća katodu, kako bi privukla sve elektrone. Radiotehnika je dobila pouzdanu napravu koja je mogla izmjeničnu struju pretvarati u istosmjernu, pa tako i otkrivati radiovalove, odnosno visokofrekventne struje. (Zanimljivo je da je popularna kristalna dioda izumljena tek poslije dvije godine – 1906.). Ipak, još uvijek je nedostajalo ono najvažnije – pojačanje slabijih signala koji dolaze iz antene.

Tehničkom i istraživačkom intuicijom Amerikanac Lee de Forest 1907. godine između katode i anode ubacuje žičanu rešetku i tako dobiva novu vrstu elektronske cijevi – **triodu** (slika 2.). Stvar je u tome što već malene promjene napona na toj **upravljačkoj rešetki** (g_1 - engl. *grid*), izazivaju velike pro-

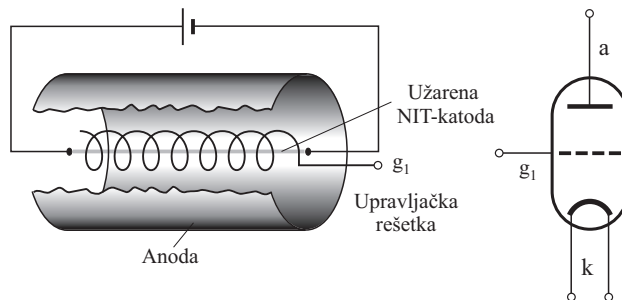
mjene anodne struje, pa cijev radi kao **pojačalo**. Lee de Forest je priznao da baš ne razumije sasvim kako dioda i trioda rade. I on je mislio je da se radi o prolazu iona kroz ostatke plina (niski vakuum). Ipak, radiotehnika je mogla krenuti naprijed.

(Fleming je tužio de Foresta da mu je ukrao patent. Parnicu je ipak dobio de Forest kada je dokazao da njegov izum, trioda, ima bitno novo svojstvo koje dioda nema, a to je pojačanje.) Tek je 1915. Amerikanac Irving Langmuir dokazao da se kod elektronske cijevi radi o prolazu elektrona kroz vakuum koji zato mora biti što veći (visoki vakuum).

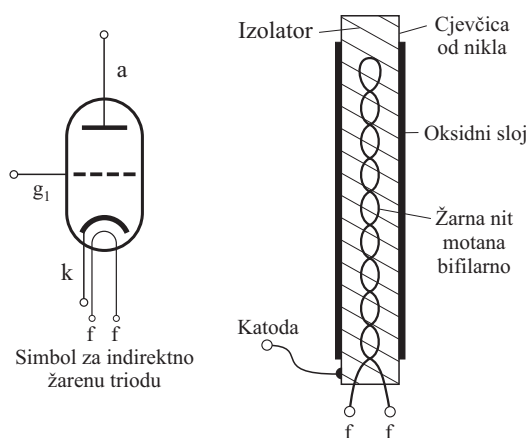
Dok se napajanje prijamnika ostvarivalo iz baterija, u uporabi su bile tzv. **direktno grijane** elektronske cijevi kojima užarena nit služi i kao katoda. A kada je izmjenična struja gradske mreže ušla u opću upotrebu, prešlo se na **indirektno grijane** elektronske cijevi – oko 1930. godine (slika 3.). Katoda je sada uska cijev od nikla kroz koju prolazi izolirana žarna nit. Tako se izbjeglo brujanje na frekvenciji gradske mreže. Da bi cijev proradila, treba pričekati oko jedne minute dok se katoda ugrije. U Europi su još uvijek najpoznatije cijevi E-serije kojima napon grijanja iznosi 6,3 V~, kao i cijevi P-serije (za televizore) sa strujom grijanja od 0,3 A~.

U početku je žarna nit svijetlila kao i u žarulje, ali se ubrzo otkrilo da je emisija katode mnogo izdašnija ako se pokrije bijelim slojem **barijeva i stroncijeva oksida**. Tada je dovoljno zagrijati katodu na oko 1 000 °C (narančasto), pa je tako, uz manju potrošnju, i trajnost cijevi mnogo veća. Uz napon grijanja moramo imati i izvor anodnog napona koji kod prijamnih cijevi obično iznosi 100 ... 250 V.

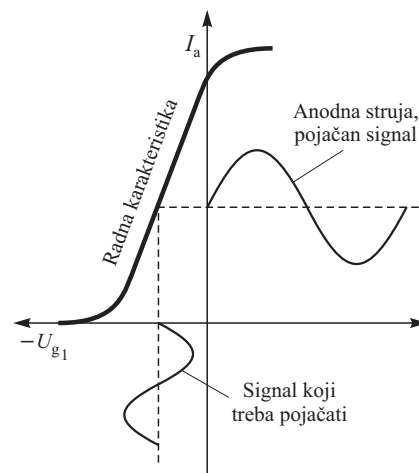
Najvažnije podatke o triodi možemo dobiti iz njene **Ug/la karakteristike** (slika 4.). Ona nam govori kako se mijenja anodna struja I_a pod utjecajem promjena n.f. ili v.f. napona U na upravljačkoj rešetki g_1 . Što je ta karakteristika strmija, to imamo veće pojačanje.



Slika 2.



Slika 3.

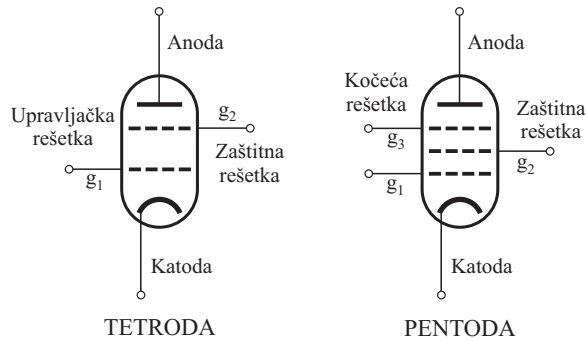


Slika 4.

(Kako dolazi do struje zasićenja već kod nultog napona na upravljačkoj rešetki, elektronske cijevi moraju raditi u negativnom području napona na g_1 .) Najširu upotrebu trioda je dobila kada je Edwin Armstrong izumio pozitivnu povratnu spregu, jer je takav prijamnik za ono vrijeme bio vrlo osjetljiv i dovoljno selektivan. To je tzv. direktni prijamnik s povratnom spregom kojim su se služili

mnogi radioamateri prije Drugog svjetskog rata, pa i poslije njega.

Trioda je pokazala i neke nedostatke. U prvome redu to je bio velik kapacitet između anode i upravljačke rešetke, što je stvaralo nestabilnost kod radijskih frekvencija, kao i smanjeno pojačanje zbog velikog prohvata, tj. zbog utjecaja anode na anodnu struju. Taj problem riješen je 1926. kada je između upravljačke rešetke i anode ugrađena još jedna rešetka – **zaštitna** (g2). Tako smo dobili **tetrodu**. Zaštitna rešetka dobiva pozitivan napon niži od anodnoga, ali je za visoke ili niske frekvencije uzemljena preko kondenzatora. Nedostatak tetrode su tzv. sekundarni elektroni koji se izbijaju iz anode i povećavaju struju zaštitne rešetke g2. Ako se dogodi da je napon na g2 veći nego na anodi, g2 preuzima njenu ulogu, pa se može užariti i rastaliti. Taj problem riješen je 1929. tako da je između zaštitne rešetke i anode stavljena još jedna, treća rešetka nazvana **kočećom** (g3). Ona je spojena na katodu ili na minus pol i sprječava sekundarne elektrone da dođu do zaštitne rešetke (slika 5.). To je **pentoda** – cijev s pet elektroda, odnosno tri rešetke. Postoje i cijevi s još više elektroda i rešetki – heksoda, heptoda i oktoda – sve prema grčkim brojevima. U suvremenoj izvedbi postoje i višestruke cijevi u istome balonu: trioda-pentoda, dvostruka trioda, trioda-heptoda, duodioda-trioda, itd. Postoji nekoliko sustava označavanja elektronskih cijevi. Europski je najbolje sistematiziran i najlakše se pamti.



Slika 5.

Kada elektronska cijev radi kao pojačalo snage, npr. u izlaznom stupnju odašiljača, moramo pripaziti i na dopuštenu **disipaciju anode**, tj. količinu topline koju anoda može preuzeti na sebe. Naime, ne pretvara se sva istosmjerna snaga u visokofrekventnu energiju, već se jedan dio pretvara u toplinu koja zagrijava anodu. Zato se za tu namjenu izrađuju veće i snažnije cijevi. Mogući omjer između v.f. snage i snage pretvorene u toplinu iznosi približno 2:1, ovisno o radnome režimu cijevi – npr. ako anoda ima disipaciju od 25 W, iz cijevi možemo "izvući" oko 50 W v.f. energije. Podatke o elektronskim cijevima kao i spoj podnožja naći ćemo u posebnim priručnicima, koji su se nekada na latinskom zvali "Vade mecum" (pođi sa mnom.) Na slici 6. vidimo skupinu suvremenijih elektronki različite snage i namjene.

Danas su elektronske cijevi zamijenjene tranzistorima. Ipak ima slučajeva kada se još upotrebljavaju – u neke vojne svrhe, u skupljim hi-fi pojačalima i u izlaznim stupnjevima odašiljača iznad 200 W. Elektronske cijevi još uvijek ne treba smatrati zastarjelim izumom, kao npr. parnu lokomotivu, već kao paralelno tehničko rješenje u odnosu na

tranzistore. Ipak, odlaskom elektronskih cijevi, oko sredine prošloga stoljeća, završeno je romantično, tzv. "zlatno doba" radiotehnike.

Danas smo upoznali sljedeće pojmove:

- elektronska cijev dioda,
- katoda,
- anoda,
- elektronska cijev trioda,
- upravljačka rešetka g1,
- direktno grijana katoda,
- indirektno grijana katoda,
- Ug/Ia karakteristika,
- tetroda,
- zaštitna rešetka g2,
- pentoda,
- kočeća rešetka g3,
- disipacija anode.

U sljedećem nastavku govorit ćemo o filterima. ■

Elektronika za mlade – 11. nastavak

Poglavlje 3.

Krugovi

3.1 Osnovno poznavanje električnih filtara

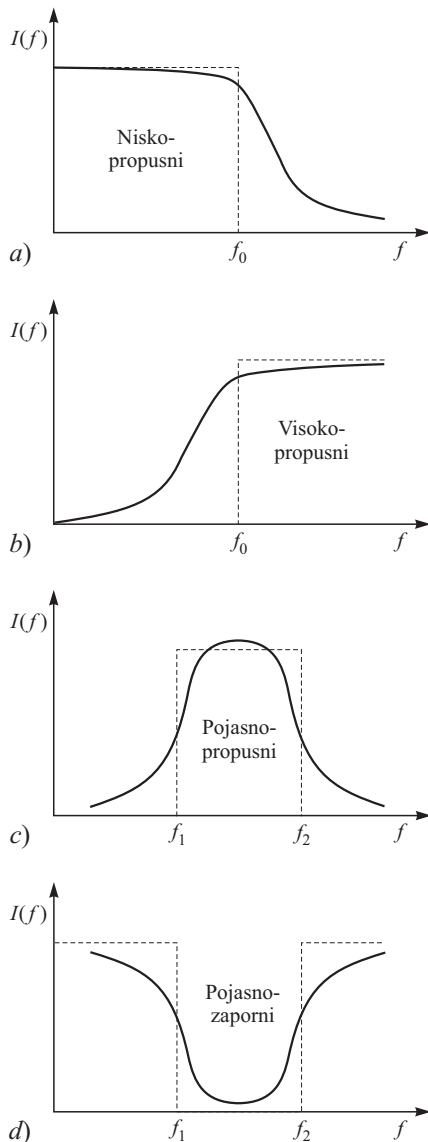
Električni filtri su sklopovi koji propuštaju izmjeničnu struju samo određenih frekvencija, dok druge frekvencije znatno oslabljuju ili ih uopće ne propuštaju. Kod niskih frekvencija filtri se najčešće sastoje od otpornika i kondenzatora (RC-filtri), dok se kod visokih frekvencija oni sastoje od zavojnica i kondenzatora, tj. od induktivnosti i kapaciteta (LC-filtri). Postoje aktivni i pasivni filtri. Aktivni filtri u sebi imaju i pojačalo s povratnom vezom, dok pasivni filtri to nemaju. Ovdje govorimo o pasivnim filtrima.

U prvim danima radiotehnike, krajem 19. stoljeća, prijamna antena se vezivala neposredno na detektorski krug, tako da smo u slušalicama istodobno čuli telegrafске signale svih odašiljača u okolini. Kako su odašiljači u pravilu radili pomoću zupčastoga rotacijskog iskrišta, a visina tona svakog odašiljača se razlikovala ovisno o brzini vrtnje tog iskrišta, brodski su radiotelegrafisti "birali" željenu postaju usredotočivši svoj sluh na određenu visinu tona, pa je tako njihov mozak služio kao prvi filter. To uostalom čine iskusniji radioamateri i danas kada u slušalicama čuju dvije ili tri radiotelegrafске postaje istodobno.

Imamo četiri vrste filtara:

- **niskopropusni**, koji propušta izmjenične struje samo do određene granične frekvencije, iznad koje ih više ne propušta ili ih znatno oslabljuje (NPF, engleski LPF – *low pass filter*);
- **visokopropusni**, koji propušta izmjenične struje tek počevši od neke granične frekvencije, dok niže ne propušta (VPF, engleski HPF – *high pass filter*);
- **pojasnopropusni**, koji propušta samo jedan uski pojas frekvencija, dok ostale ne propušta jer za njih predstavlja velik otpor (PPF, engleski BPF – *band pass filter*);
- **pojasnozaporni**, (ili nepropusni) koji ne propušta određeni uski pojas frekvencija, dok ostale propušta jer za njih predstavlja malen otpor (PZF, engleski BSF – *band stop filter*).

Svojstva tih filtara grafički su prikazana na slikama 1. a-d, iz kojih možemo lako vidjeti koje frekvencije taj filter propušta, a koje oslabljuje.



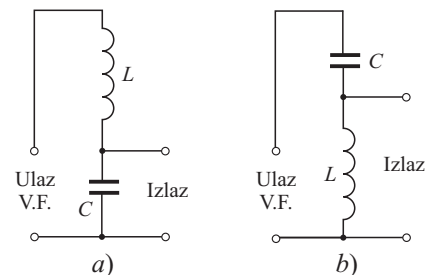
Slika 1.

Idealnu karakteristiku pojedinog filtra označili smo crticama, ali nju u praksi nije moguće postići. Svaki filter istodobno stvara i fazni pomak između svoga ulaza i izlaza, no ovdje to nije tema. O pojasnopropusnom i pojasnozapornom filteru govorit ćemo u sljedećem nastavku.

Kada određujemo kakav filter želimo, moramo navesti vrstu filtra (NPF ili VPF), njegovu graničnu frekvenciju f_0 , kao i njegov ulazni, odnosno izlazni

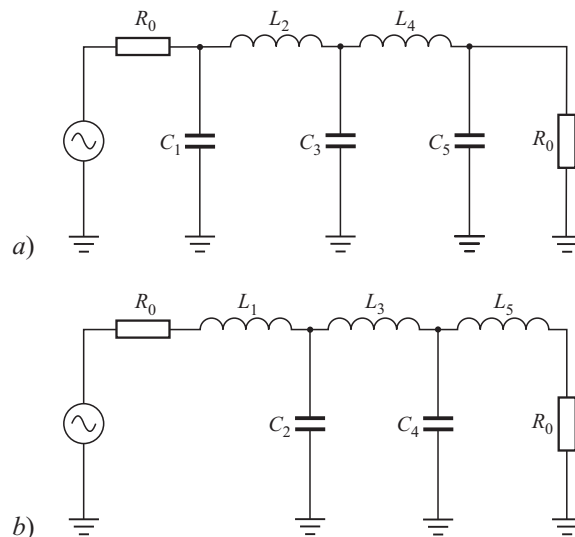
otpor R_0 (što je jako važno, jer ako taj otpor nije prilagođen otporu priključenog uređaja, filter neće davati očekivane rezultate). Za broj članova u filteru važna je još i predviđena veličina gušenja neželjenih frekvencija izražena u decibelima po oktavi.

Osnovni oblik niskopropusnog filtra vidimo na slici 2.a. To je zapravo frekvencijski ovisan razdjelnik napona. Kada se frekvencija povećava, induktivni otpor zavojnice raste, a kapacitivni otpor kondenzatora pada. Ako na spoj gledamo kao na razdjelnik napona, onda je razumljivo da je s porastom frekvencije napon na izlazu sve manji. Kod visokopropusnog filtra (slika 2.b.) situacija je obratna.



Slika 2.

Kako bismo dobili što oštrije "koljeno" na graničnoj frekvenciji, filtri se rade s većim brojem elemenata. Slika 3. prikazuje niskopropusni filter s 5 elemenata (zavojnica i kondenzatora; $n = 5$). Postoji nekoliko načina izračunavanja NPF i VPF, ali se često daju i već gotove tablice. Najpoznatiji i najlakši je način po britanskome inže-

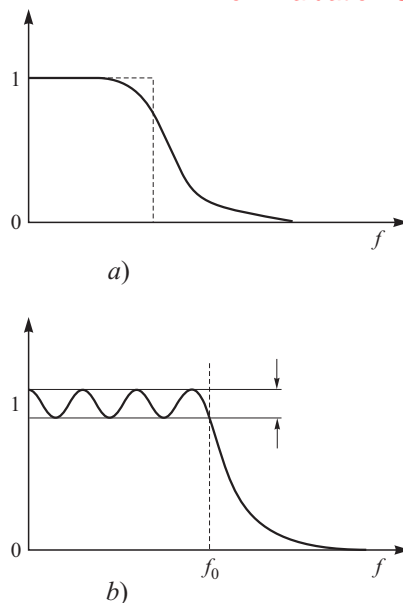


Slika 3.

njeru S. Butterworthu, a iza njega dolazi matematički postupak po Čebiševu. Kako u Velikoj Britaniji ima mnogo Butterwortha, zanimljivo je da Butterworth u svome članku iz 1930. nije htio otkriti što znači ono S. – pretpostavlja se Stephen. Postoji i mogućnost da se sve skupa radi o pseudonimu. Pafnutij Ljvovič Čebišev (1821 - 1894.) bio je ruski matematičar, čija je teorija ortogonalnih polinoma poslužila za izračun filtra, pa je takav izračun imenovan njemu u čast. Imao je francusku guvernantu te je jednako dobro govorio francuski kao i ruski. Stoga je svoje radove objavljivao na francuskom, što je mnogo pridonijelo njegovoj znanstvenoj karijeri.

Iako shematski i jedan i drugi filter izgledaju jednako, razlika između filtra (tj. veličine zavojnica i kondenzatora) izračunatog po Butterworthu i filtra po Čebiševu jest u tome što prvi ima blaže koljeno i vrlo ravnu propusnu karakteristiku, dok drugi ima oštrije koljeno, ali i valovitu propusnu karakteristiku (engleski *ripple*, slike 4.a., 4.b.). (Zbog toga nije pogodan npr. za hi-fi niskofrekventna pojačala.) Još oštrije koljeno imaju tzv. eliptični filteri, ali nažalost i veliku valovitost u nepropusnom dijelu karakteristike. Teorija filtera je, dakle, prilično složena. Niskopropusni filter pretvara se u visokopropusni tako da zavojnice i kondenzatori međusobno zamijene mjesta.

Dolaskom amaterskih odašiljača s tranzistorima naglo se povećala primjena niskopropusnih filtera. Radi se o tome da izlazni tranzistori, osim osnovne, proizvode i snažne harmoničke frekvencije, koje padaju u viša frekvencijska područja i tamo stvaraju smetnje, što je zakonom zabranjeno. Prema tome, niti jedan odašiljač, pa ni amaterski, ne može dobiti dozvolu za rad, dok mu izlaz nije "čist", tj. bez harmoničkih frekvencija. Tu služe niskopropusni filteri koji ne propuštaju frekvencije iznad



Slika 4.

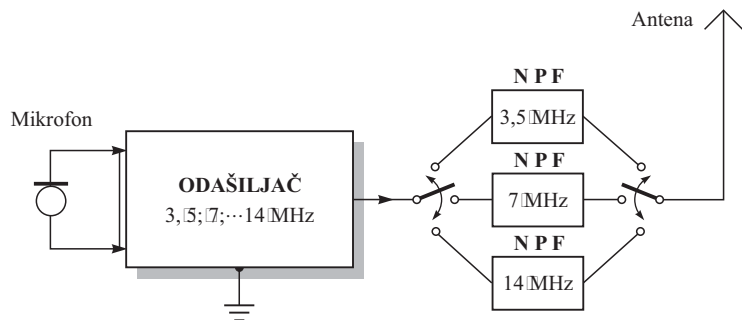
osnovne. Npr. ako naš odašiljač radi na 3 500 kHz, graničnu frekvenciju niskopropusnog filtra postaviti ćemo na 4 000 kHz, pa ako je on dovoljno kvalitetan, druga harmonička frekvencija na 7 000 kHz neće se čuti, kao ni sve više harmoničke frekvencije. Na taj način izbjegava-

mo veike i skupe promjenjive titrajne krugove koji su kod odašiljača s elektronskim cijevima neizbježni, a pojednostavljuje se i ugađanje takvih odašiljača. Dakako, za svako amatersko područje moramo imati poseban niskopropusni filter namješten na potrebnu graničnu frekvenciju, kao i na impedanciju izlaznog pojačala i koaksijalnog antenskog voda, odnosno antene (slika 5.). Danas na tržištu postoje i tvornički niskopropusni filteri za pojedina amaterska područja. Ulazna i izlazna impedancija im je standardnih 50 oma, a predviđeni su za neku maksimalnu dopuštenu snagu. Nisko i visokopropusni filteri imaju i mnoge druge namjene, ali ovdje smo naveli samo onu koja je najvažnija za radioamatere.

Danas smo upoznali sljedeće pojmove:

- četiri vrste električnih filtera (NPF, VPF, PPF i PZF),
- graničnu frekvenciju, f_0 ,
- filter po Butterworthu,
- filter po Čebiševu,
- ulaznu i izlaznu impedanciju filtra R_0 .

Sljedeći put govorit ćemo o titrajnim krugovima i izračunu rezonantne frekvencije. ■

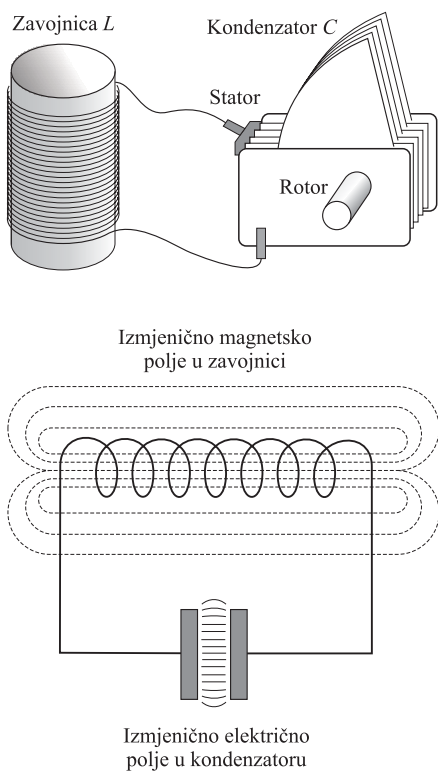


Slika 5.

Elektronika za mlade – 12. nastavak

3.2. Pojasnopropusni filter i izračun rezonantne frekvencije

U prošlom nastavku obradili smo niskopropusni i visokopropusni filter, pa su nam ostali još **pojasnopropusni filter** i **pojasnozaporni filter**, koji su od prvih dana radiotehnike najvažniji tipovi filtera, jer propuštaju (ili ne propuštaju) samo uzak pojas frekvencija i tako osiguravaju selektivnost prijemnika. Najčešći tip pojasnopropusnog filtera je **titrajni krug**, iako još postoje i drugi: s kristalom kvarca, keramički rezonator i elektromehanički filter. Njihovo djelovanje osniva se na **rezonanciji**, tj. svojstvu da ističu jednu određenu frekvenciju, dok ostale guše. Titrajni krug se sastoji od induktivnosti i kapaciteta, tj. od zavojnice i kondenzatora (slika 1.). Svaki titrajni



Slika 1.

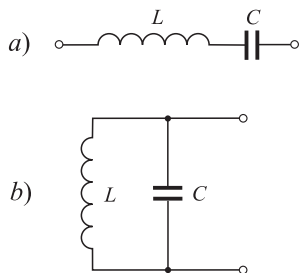
krug ima neku svoju vlastitu **rezonantnu frekvenciju**. Što su zavojnica i kondenzator veći, to je rezonantna frekvencija niža – i obratno. (Omski otpor žice u zavojnici R ne utječe na rezonantnu frekvenciju, već na kvalitetu titrajnog kruga.) Titrajni krug može biti serijski ili paralelni (slika 2.). Rezonantnu frekvenciju titrajnoga kruga možemo izračunati prema obrascu Williama Thomsona (lorda Kelvina, 1853.):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

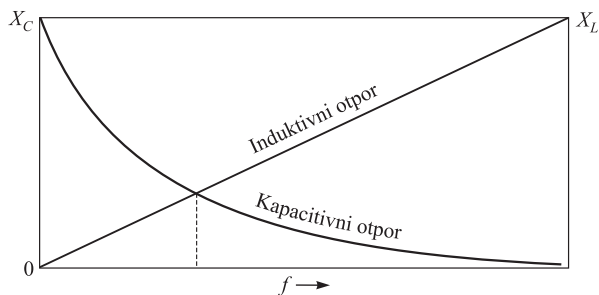
Do rezonancije dolazi kada se kod neke frekvencije induktivni otpor zavojnice X_L **izjednači** s kapacitivnim otporom kondenzatora X_C .

Zato izraz $X_L = X_C$ zovemo **uvjetom rezonancije**.

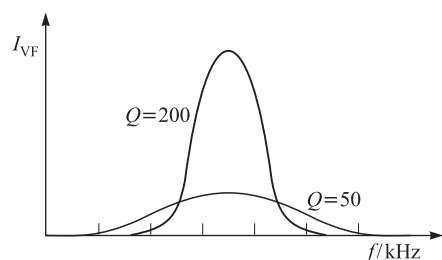
Stvar je u tome što kod zavojnice napon prethodi struji, dok kod kondenzatora struja prethodi naponu (u idealnom slučaju za 90°), pa ukupna fazna razlika među njima iznosi 180° , što znači da se induktivni otpor X_L i kapacitivni otpor X_C u rezonanciji međusobno poništavaju. Ostaje samo omski otpor žice R kojom je namotana zavojnica, a taj je vrlo malen. (Ovo je primjer za serijski titrajni krug – slika 3.) Prema tome, kod serijskoga titrajnog kruga njegov složeni otpor za izmjeničnu struju X (impedancija) u rezonanciji je najmanji, a struja kroz njega je najveća. Kako odmičemo frekvenciju na jednu ili na drugu stranu, impedancija kruga se povećava. Tako dobivamo **rezonantnu krivulju** tog titrajnog kruga. Ona će biti to uža što je kvaliteta titrajnog kruga Q veća (slika 4.), dakle, što je impedancija zavojnice veća i što zavojnica ima manji omski otpor: $Q = X_L / R$. To je tzv. "**faktor kvalitete**" titrajnog kruga, koji obično iznosi između 50 i 300. On nam govori za koliko puta će se visokofrekventna struja u titrajnom krugu povećati kada on dođe u rezonanciju. (Danas se, umjesto na kartonskom valjku, zavojnice motaju na v.f. željezu ili na feritnom prstenu, toroidu, pa su zato minijaturne i trebaju manje zavoja – što znači i bolji Q.)



Slika 2.

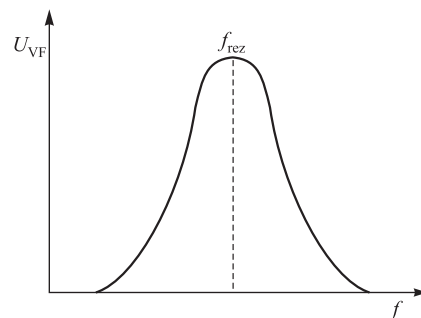


Slika 3.



Slika 4.

Sve što smo do sada rekli vrijedi i za paralelni titrajni krug s jednom razlikom: obratno negoli kod serijskog titrajnog kruga, on u rezonanciji ima **najveću impedanciju** koja se s promjenom frekvencije smanjuje (slika 5.). Inače, Thomsonov obrazac vrijedi i u ovom slučaju. Kako bi se rezonantna frekvencija u prijamnicima mogla mijenjati, izrađuju se promjenljivi kondenzatori. Iz praktičnih razloga u prijamnicima rabimo gotovo isključivo paralelne titrajne krugove. Kada nam treba veća selektivnost ili odgovarajući propusni pojas, povezat ćemo nekoliko titrajnih krugova, bilo



Slika 5.

induktivno, bilo kapacitivno. No, to je šira tema.

Thomsonov obrazac je prilično nezgodan za izračun (nije lako računati u faradima i henrijima i izvaditi drugi korijen iz decimalnog broja u nazivniku), pa za amaterske potrebe postoji prerađena i prilagođena formula:

$$f = \frac{159}{\sqrt{LC}} \text{ gdje je:}$$

f = frekvencija u MHz,
 L = induktivnost u μH ,
 C = kapacitet u pF.

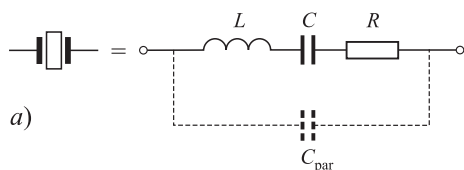
Naprimjer: koliku rezonantnu frekvenciju ima titrajni krug uz induktivnost $L = 120 \mu\text{H}$ i kapacitet $C = 300 \text{ pF}$?

Odgovor:

$$f_{\text{MHz}} = \frac{159}{\sqrt{120 \times 300}} = \frac{159}{\sqrt{36000}} = \frac{159}{190} = 0,837$$

- pa je rezonantna frekvencija = 0,837 MHz = 837 kHz.

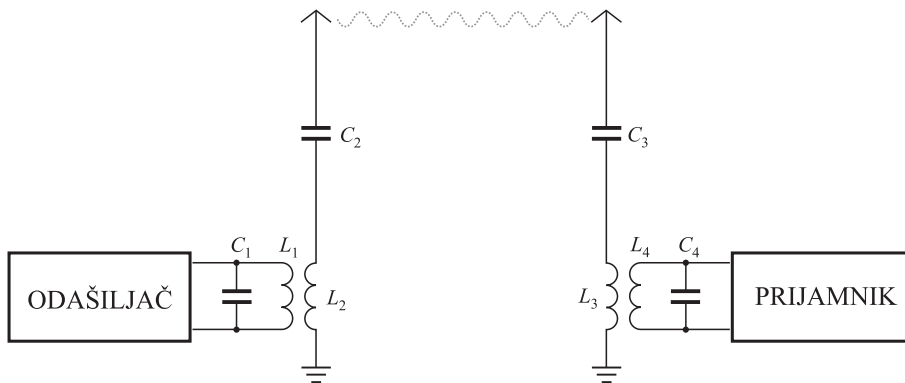
Još oštriju rezonantnu krivulju ima kristal kremenata (kvarca). Kada takvu kristalnu pločicu stavimo između dvije limene pločice, ona se ponaša kao vrlo



Slika 6.

kvalitetan serijski titrajni krug. Tako izgleda i njegov simbol (slika 6.). Nedostatak je kvarcnoga kristala što ne može mijenjati svoju rezonantnu frekvenciju, već radi na onoj za koju je izbrušen. Spajanjem više komada kvarcnih kristala možemo dobiti vrlo selektivne pojasnopropusne filtre, ali im je cijena prilično visoka. Keramički filtri slični su kvarcni, ali su jeftiniji i imaju širu rezonantnu krivulju. Elektromehaničke međufrekventne filtre ugrađivala je svojedobno u svoje prijarnike američka tvrtka "Collins", ali se oni danas već teško nalaze. Vrlo su skupi.

Na slici 7. vidimo pojasnopropusni (A) i pojasnozaporni (B) filtar. Oba se sastoje od jednoga paralelnog i jednoga seri-

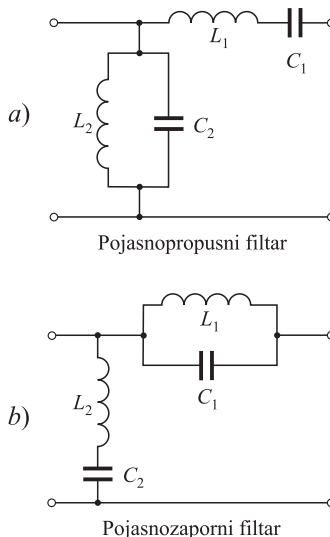


Slika 8.

jskog titrajnog kruga. Koju funkciju će obavljati ovisi o tome kako smo ih spojili. Filtar na slici A je pojasnopropusni: paralelni titrajni krug L2C2 ističe rezonantnu frekvenciju koju serijski titrajni krug L1C1 s lakoćom propušta. U slučaju B serijski titrajni krug L2C2 kratko spaja rezonantnu frekvenciju, dok je paralelni titrajni krug L1C1 ne propušta. To je, dakle, pojasnozaporni filtar.

Nikola Tesla je prvi primijenio pojavu električne rezonancije u radiotehnici, za što je i dobio patent 1900. godine. Njegov sustav od četiri ugođena titrajna kruga, dva u odašiljaču i dva u prijarniku, još je i danas neizbježno načelo svake radijske veze (slika 8.). Međutim, nakon tri godine

upornih pokušaja i lobiranja, na dosada neobjašnjen način Gulielmo Marconi uspjeva 1907. dobiti patentno pravo na isti taj izum, za koji dobiva i Nobelovu nagradu 1911. kao izumitelj radija. To je bio jedan od dva razloga zbog kojih je ponosni Tesla javno odbio Nobelovu nagradu koju je trebao dobiti 1914. godine. (Drugi je razlog bio taj, što je tu nagradu trebao podijeliti s Thomasom A. Edisonom, koji je godinama u američkoj javnosti vodio sramotnu harangu protiv izmjenične struje i Nikole Tesle.) Tek u listopadu 1943. godine Vrhovni patentni sud SAD-a poništio je Marconijev patent i proglasio Teslin patent izvornim i originalnim. Ali to se dogodilo devet mjeseci poslije Tesline smrti i nakon što je Marconi punih 35 godina maksimalno financijski iskorištavao taj patent, dok je Tesla umro kao velik siromah. I tako i titrajni krugovi imaju svoju gorku priču.



Slika 7.

Danas smo upoznali:

- titrajni krug kao pojasnopropusni filtar,
- uvjet rezonancije,
- serijski i paralelni titrajni krug,
- rezonantnu frekvenciju titrajnoga kruga,
- faktor kvalitete Q titrajnog kruga,
- rezonantnu krivulju titrajnog kruga,
- kvarcni kristal,
- keramički rezonator.

U sljedećem nastavku govorit ćemo o ispravljanju izmjenične struje, pojačalu i oscilatoru. ■