

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **28** (2000/2001)

Številka 5

Strani 272-279

Janez Strnad:

KAKO JE RADIO DOBIL GLAS

Ključne besede: fizika, električno nihanje, radio, radijski valovi, Klemenčičev križ, amplitudna modulacija, frekvenčna modulacija.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/28/1452-Strnad.pdf>

© 2001 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

KAKO JE RADIO DOBIL GLAS

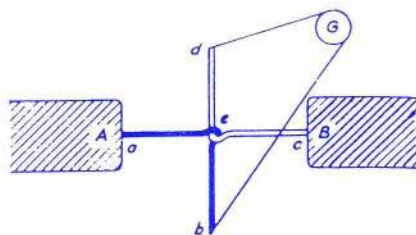
Prispevek o radiu, objavljen v prejšnji številki Preseka, je opisal, kako so pred sto leti radijske valove začeli uporabljati za prenašanje sporočil z Morsovimi znaki. Za kaj drugega je bilo električno nihanje, ki so ga zmogli tedanji nihajni krogi, namreč preveč dušeno. Poskusi, da bi dobili izmenični tok z dovolj visoko frekvenco z dinamoestroji, so se izjalovili, čeprav je Nikola Tesla dosegel dvajset tisoč nihajev na sekundo.

Od prvih poskusov Heinricha Hertza so znanstveniki izboljševali zaznavanje radijskih valov. Hertz jih je zaznaval še tako, da je opazoval iskre v sprejemnem krogu z iskriščem. Oliver Lodge je razvil koherer in Gulielmo Marconi ga je izpopolnil. Pri tem so izkoristili pojav, da se je kovinskim opilkom v stekleni cevi pod vplivom radijskih valov zmanjšal električni upor. Radijske valove so zaznavali tudi po delovanju na magnet; Marconi je izkoristil pojav, da so radijski valovi zmanjšali magnetno histerezo železa. Zaradi tega so vse manj uporabljali koherer.

Nekdanji Boltzmannov asistent Ignac Klemenčič, ki je delal v Gradcu in Innsbrucku, je že leta 1893 zaznaval radijske valove s *Klemenčičevim križem*. Pri tem je izkoristil pojav, da valovi segrejejo kovino, ko se v njej absorbirajo, in izmeril nastalo temperaturno razliko s termoelementom (slika 1). Za uspehe pri raziskovanju radijskih valov, predvsem njihovega odboja na kovinskih in žeplovih ploščah, je Klemenčič dobil visoko priznanje.

Pozneje so si pomagali s kristalom, ki se ga je dotikala kovinska konica. Taka naprava je usmerila visokofrekvenčno nihanje v sprejemnem krogu, usmerjeni tok pa so speljali skozi slušalke.

Že leta 1874 je Ferdinand Braun, ki je iznašel katodno cev, ugotovil, da je kristal cinkove svetlice ZnS s točkastim kovinskim priključkom v eni smeri bolje prevajal kot v drugi. Pozneje so ugotovili, da ima to lastnost tudi dibakrov oksid Cu_2O , in leta 1906 priznali še patenta za usmerjanje s karborandom SiC in silicijem. Leta 1901, torej pred sto leti, je Braun s



Slika 1. Ignac Klemenčič je vodnika iz železa (ab) in bakra (cd) sestavil v križ in eno prečko uporabil kot sprejemno anteno med kovinskima ploščama (A in B). Izmenični tok po tej prečki je segrel spojno mesto med železom in bakrom (e). Zaradi temperaturne razlike med tem spojnim mestom in spojnim mestom med bakrom in železom (b) je nastala termoelektrična napetost, ki je pognala tok po občutljivem galvanometru (G).

kristalom cinkove svetlice s točkastim kovinskim priključkom prvič usmeril visokofrekvenčni tok v nihajnem krogu sprejemne antene. Okoli leta 1915 so predvsem v manj zahtevnih amaterskih radijskih sprejemnikih uporabljali tak kristalni usmernik ali *detektor*. Razvoj je vodil do polprevodniških elementov, predvsem do tranzistorja, ki smo jih v Preseku opisali v vrsti prispevkov. Toda polprevodniški elementi so zagospodarili nad radiom šele po letu 1960. Dotlej so radio obvladovale *elektronke*.

Leta 1879 je Thomas Alva Edison izdelal prvo vakuumsko žarnico z žarilno nitko. Štiri leta pozneje je pri enem od poskusov v stekleno bučko žarnice vtalil elektrodo in ugotovil, da je naprava prevajala tok, če je to elektrodo povezal s pozitivnim priključkom baterije in nitko z negativnim priključkom. Pojav so opazili tudi drugi, podrobneje pa ga je raziskal v Cambridgeu John Joseph Thomson; skupaj s sodelavci je leta 1897 spoznal, da katodne žarke sestavljajo elektroni. Thomsonov učenc Owen Williams Richardson je leta 1908 ugotovil, kako je gostota toka pri *termični emisiji* iz kovine odvisna od temperature. Leta 1928 je za svoje delo dobil Nobelovo nagrado iz fizike.

Richardsonova enačba $j = AT^2 e^{-W_i/kT}$ povezuje gostoto električnega toka j pri termični emisiji z absolutno temperaturo T kovine. Pri tem je W_i energija, s katero je elektron vezan na kovino, A Richardsonova konstanta z velikostno stopnjo 10^6 A/m²K², e osnova naravnih logaritmov in $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K Boltzmannova konstanta. Enačba je po obliki podobna enačbi za izparilni tlak kapljevine, zato termična emisija elektronov s površja kovine spominja na izhlapevanje molekul z gladine kapljevine.

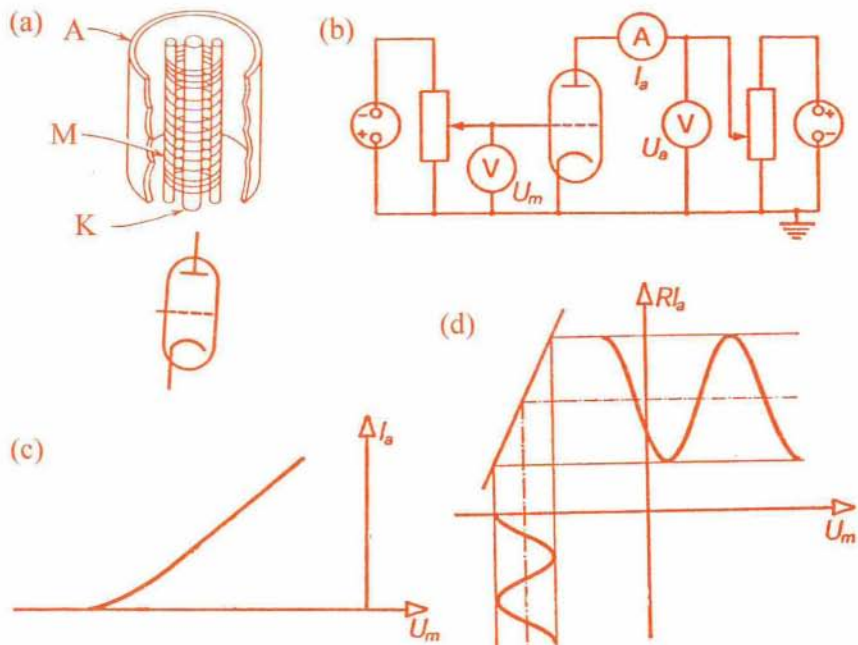
John Ambrose Fleming je leta 1904 v Londonu prvi uporabil elektronko z dvema elektrodama – *diodo*. Kot prva elektroda je služila kovinska nitka, ki jo je razžaril električni tok, kot druga pa hladna kovinska ploščica. Dioda je delovala kot *usmerjevalka*. Če je bila segreta elektroda zvezana z negativnim priključkom tako, da je imela vlogo *katode*, ter hladna elektroda s pozitivnim priključkom tako, da je imela vlogo *anode*, je dioda prepuščala tok; če je bila napetost obrnjena nasprotno, pa ne. Seveda: elektroni, ki izstopijo iz segrete elektrode, lahko odtečejo na hladno elektrodo, ob hladni elektrodi pa ni elektronov, ki bi potovali proti segreti elektrodi. S tako diodo je Fleming usmeril visokofrekvenčni tok. V Združenih državah je leta 1904 začel delati poskuse Lee de Forest in je pozneje tudi sam razvil diodo, neodvisno od Fleminga. Leta 1906 pa je patentiral napravo za ojačevanje šibkih visokofrekvenčnih tokov, v kateri je uporabil elektronko s tremi elektrodami – *triodo*. Med katodo in anodo

je vključil tretjo elektrodo, *mrežico*, ki je kot tanka žička v obliki vijačnice ovijala segreto valjasto katodo (slika 2a).

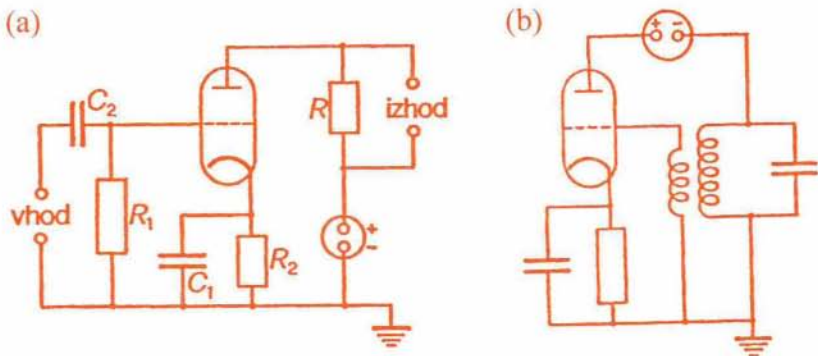
Mrežica je na negativni napetosti proti katodi. Čim večja je ta napetost, tem več elektronov mrežica zavrne proti katodi in tem manjši je tok elektronov od katode na anodo (slika 2b). Napetost med mrežico in anodo vpliva v *anodnem krogu* na tok elektronov, ki ga od katode do anode in skozi delovni upornik poganja baterija. Med katodo in mrežico – rečemo lahko tudi *na vhod* – priključimo kot *signal* izmenično napetost, tako da napetost mrežice proti katodi niha, a je ves čas negativna. Napetost na delovnem uporniku v anodnem krogu – *na izhodu* – niha z enako frekvenco (slika 2d). Razmere izberemo tako, da je povprečna moč na izhodu velikokrat večja kot povprečna moč na vhodu (slika 3a), in imamo *ojačevalnik*. V njem moč na izhodu izvira iz baterije v anodnem krogu, napetost mrežice proti katodi pa določi, kdaj baterija požene tok. V triodi lahko vidimo tudi nekakšno stikalo; če je negativna napetost mrežice proti katodi dovolj velika, tok v anodnem krogu preneha.

Leta 1912 so De Foresta obtožili, da zavaja javnost. Pred sodiščem je tedaj nekdo pod prisego izjavil: “De Forest je rekel in podpisal v številnih časopisih, da bo mogoče prenašati človeški glas čez Atlantik, preden bo minilo nekaj let. Te absurdne in zavajajoče izjave so zapeljale ljudi, da so kupovali delnice njegove družbe.” Leta 1914 so poslali čez Atlantik prvo brezžično telefonsko sporočilo z uporabo De Forestove elektronke.

V anodni krog zvežimo nihajni krog iz kondenzatorja ter tuljavice in del napetosti, ki niha z lastno frekvenco nihajnega kroga, speljimo na vhod. S to *povratno vezjo* ali *povratno zanko* dosežemo, da nihajoči tok v nihajnem krogu spodbuja sam sebe in nihajni krog deluje kot izvir nedušene izmenične napetosti – *oscilator*. Primerjati ga je mogoče z uro na nihalo, v kateri nihalo preko zobatega kolesa in zasunka določa, kdaj utež požene nihalo. Kot je Christian Huygens okoli leta 1657 izumil uro na nihalo s povratno vezjo z zobatim kolesom in zasunkom, je leta 1913 Alexander Meissner izumil električni oscilator s povratno vezjo v krogu s triodo (slika 3b). Odtlej je bilo mogoče dobiti nedušeno električno nihanje z veliko višjo frekvenco od dvajset tisoč nihajev na sekundo. To je bil preobrat, ki je radiu omogočil, da je prenašal tudi govor in glasbo, ne samo Morsovih znakov.



Slika 2. Poenostavljena risba triode s katodo K, mrežico M, ki je navita na izolacijska stebrička, in anodo A ter dogovorjeni znak za triodo (a). Steklena bučka, iz katere je izsesan zrak, ni narisana. Z vezjem (b) izmerimo odvisnost anodnega toka I_a od mrežne napetosti U_m pri konstantni anodni napetosti U_a (c) in odvisnost izmenične napetosti na izhodu RI_a , v odvisnosti od nihajoče mrežne napetosti (d). Amplituda prve je veliko večja od amplitude U_m .

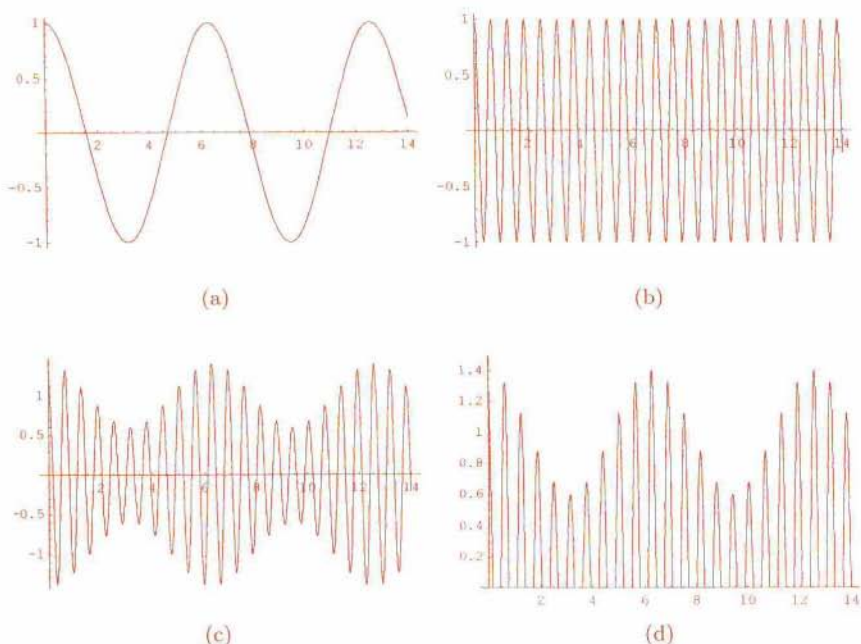


Slika 3. Preprost ojačevalnik s triodo (a) in preprost oscilator s triodo (b). Sosednji tuljavi poskrbita za induktivno sklopitev.

V valovanju sta valovna dolžina λ in frekvenca ν povezani s hitrostjo valovanja $c = \lambda\nu$. Pri radijskih valovih je to hitrost svetlobe v praznem prostoru 300 000 km/s, pri zvoku v zraku v navadnih okoliščinah pa je hitrost valovanja 340 m/s, kar je skoraj milijonkrat manjša hitrost.

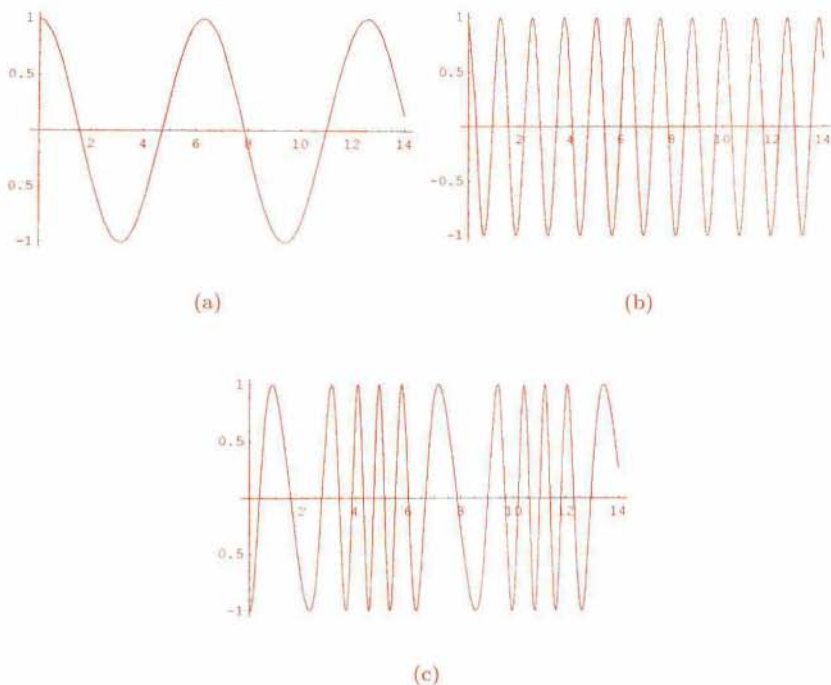
Heinrich Hertz zaradi velikega razmerja med frekvenco radijskih valov in frekvenco zvoka morda ni pomislil na to, da bi s svojimi valovi prenašal sporočila. Dozdevno slabost radijskih valov spremenimo v prednost. Najprej mislimo na *srednje radijske valove* z valovno dolžino med 100 m in 1000 m in s frekvenco med 3 MHz in 0,3 MHz (megahertz, MHz, je milijon nihajev na sekundo). Vzemimo valovno dolžino 202 m ali frekvenco 1,49 MHz Vala 202 na srednjih valovih. Slišimo zvok s frekvenco od 16 s^{-1} do okoli $20 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$, a prenos se znatno ne poslabša, če zajamemo samo frekvence do mejne frekvence 0,01 MHz ali celo 0,005 MHz. Vzemimo, da bi radi prenesli z radijskimi valovi ton s frekvenco 1000 s^{-1} ali 0,001 MHz. Upor mikrofona se spreminja s frekvenco zvoka, ki ga zadene, zato tok v krogu z mikrofonom niha s frekvenco 0,001 MHz (slika 4a).

V nihajnem krogu oddajne postaje niha tok z *nosilno frekvenco* 1,49 MHz (slika 4b) in oddajna antena seva *nosilno valovanje* s to frekvenco, če v radiu ni slišati zvoka. Sestavimo oba nihajoča tokova tako, da se amplituda visokofrekvenčnega toka spreminja z zvočno frekvenco (slika 4c). Postopek je znan kot *amplitudna modulacija* AM. Oddajna antena, po kateri poganjamo ta tok, seva radijske valove. V sprejemni anteni, uglaseni na frekvenco 1,49 MHz, zbudijo izmenični tok, ki ustreza izmeničnemu toku v oddajni anteni. Ta tok lahko sestavimo iz toka s frekvenco 1,49 MHz, toka s frekvenco $(1,49 + 0,001) \text{ MHz}$ in toka s frekvenco $(1,49 - 0,001) \text{ MHz}$. Razlika frekvenc je tako majhna, da lahko izkoristimo resonanco, če anteni uglasimo na nosilno frekvenco 1,49 MHz. Visokofrekvenčni tok v sprejemni anteni ojači visokofrekvenčni ojačevalnik usmerjevalka pa ga usmeri (slika 4d). Spremenljivi del usmerjenega toka ojači še nizkofrekvenčni ojačevalnik. Ojačeni tok poganja zvočnik, ki oddaja ton s frekvenco 1000 s^{-1} . Tako lahko prenesemo ton s katero koli frekvenco ali mešanico tonov do mejne zvočne frekvence. Vsaki oddajni postaji ustreza *kanal*, t.j. frekvenčni pas s širino dveh zvočnih mejnih frekvenc okoli nosilne frekvence, tako da sosednje postaje ne motijo druga druge. Predpisi o širini kanala se spreminjajo od države do države, za radijske oddaje meri širina od 0,005 MHz do 0,01 MHz, pogosto 0,009 MHz, za telefonijo je pas ožji. Modulacijo te vrste in srednje valove so sprva uporabljale vse javne radijske postaje, ki so nastale v ZDA 1916, na Nizozemskem 1919, v Angliji in Franciji 1922, v Nemčiji 1923, v Sloveniji 1928.



Slika 4. Amplitudna modulacija: nizkofrekvenčni tok (a) in visokofrekvenčni tok (b) dasta amplitudno modulirani tok (c), s katerim napajajo oddajno anteno. V sprejemni anteni se pojavi tok z enako časovno odvisnostjo, le da je šibkejši. Tok ojačimo in usmerimo (d) ter zgladimo, da dobimo nizkofrekvenčni tok, po frekvenci enak prvotnemu (a). Tega še enkrat ojačimo in z njim napajamo zvočnik. Na risbi je $\nu_v = 10\nu_z$ ter $k_a = 0,4$. Razmerje med frekvenco srednjih radijskih valov in zvočno frekvenco je v resnici precej večje.

Poznamo še *frekvenčno modulacijo* FM, pri kateri z zvočno frekvenco vplivamo na frekvenco visokofrekvenčnega toka (slika 5). Ta vrsta modulacije zahteva večjo širino kanala, denimo 0,05 MHz, zaradi česar mora biti nosilna frekvenca precej višja. Primerni so *ultrakratki valovi* UKV z valovno dolžino med 1 m in 10 m, t.j. s frekvenco med 30 MHz in 300 MHz. Prenos z njimi se je začel širiti po letu 1950. (Oddajnik Vala 202 ali Drugega programa Radia Slovenija na Krimu npr. oddaja pri frekvenci 93,5 MHz ali valovni dolžini 3,2 m.) Oddajne antene za ultrakratke valove so lahko tudi vodoravne, medtem ko so antene za srednje valove vse navpične. Elektromagnetne motnje v ozračju navadno prizadenejo amplitudo valov, ne njihove frekvence. Zato so motnje pri prenosu s



Slika 5. Frekvenčna modulacija: nizkofrekvenčni tok (a), visokofrekvenčni tok (b) in amplitudno modulirani tok (c), s katerim napajajo oddajno anteno. Na risbi je $\nu_v = 5\nu_z$ in $m = 3$. Razmerje med frekvenco UKV in zvočno frekvenco je v resnici veliko večje.

frekvenčno modulacijo veliko manjše kot pri prenosu z amplitudno modulacijo. Ultrakratki valovi potujejo premo, medtem ko srednji valovi sledijo ukrivljenosti Zemlje. Zaradi tega ultrakratkovalovna oddajna postaja pokriva le območje s premerom, manjšim od sto kilometrov. Slovenija je danes prepletena z mrežo takih postaj, na srednjih valovih oddaja samo še nekaj oddajnikov, namenjenih Slovencem po svetu.

Pri frekvenčni modulaciji je mogoč stereofonski prenos, kar pomeni, da napajamo posebej levi in desni zvočnik v sprejemniku z nihajočima tokovoma, ki ustrezata nihajočima tokovoma v levemu in desnemu mikrofону. Pri tem je treba upoštevati še dodatno zahtevo, da mora ostati uporaben tudi starejši sprejemnik, ki ni prilagojen stereofonskemu prenosu. Zadeve so dokaj zapletene, zato smo se zadovoljili s površnim opisom.

Amplitudna modulacija. Napetost, ki niha z visoko nosilno frekvenco ν_v , pomnožimo z izrazom, v katerem člen niha z zvočno frekvenco ν_z , in uporabimo zvezo $\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos (\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos (\alpha - \beta)$:

$$U_0 \cos (2\pi\nu_v t) \cdot [1 + k_a \cos (2\pi\nu_z t)] = \\ = U_0 \cos (2\pi\nu_v t) + \frac{1}{2} k_a U_0 \cos [2\pi(\nu_v + \nu_z)t] + \frac{1}{2} k_a U_0 \cos [2\pi(\nu_v - \nu_z)t];$$

k_a je koeficient amplitudne modulacije, ki je navadno manjši kot 1.

Frekvenčna modulacija. Iz enačbe $2\pi\nu = d\varphi/dt$ izhaja za fazo $\varphi = 2\pi \int \nu dt$. Naj visoka frekvenca vsebuje člen, ki niha z zvočno frekvenco $\nu = \nu_0[1 + k_f \cos(2\pi\nu_z t)]$, pa dobimo

$$U_0 = U_0 \cos \varphi = U_0 \cos \left(2\pi \int_0^t \nu dt \right) = \\ = U_0 \cos [2\pi\nu_0 t + (\nu_0/\nu_z)k_f \sin (2\pi\nu_z t)] = \\ = U_0 \cos (2\pi\nu_0) \cos [m \sin (2\pi\nu_z t)] - U_0 \sin (2\pi\nu_0) \sin [m \sin (2\pi\nu_z t)].$$

Uporabili smo zvezo $\cos (\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$; k_f je koeficient frekvenčne modulacije in $m = \nu_0 k_f / \nu_z$ razmerje med spremembo nosilne frekvence in zvočno frekvenco. Izraz je precej bolj zapleten kot pri amplitudni modulaciji.

Dodajmo še kratko pripombo o televiziji, pri kateri moramo prenašati vidni in zvočni signal. Za prenos vidnega signala uporabimo amplitudno modulirano nihanje z zelo visoko frekvenco VHF od 48,5 MHz do 222,75 MHz (za kanale od 2 do 11) ali z ultra visoko frekvenco UHF od 471,25 MHz do 788,75 MHz (za kanale od 21 do 60). Ustrezne valovne dolžine ležijo na območjih od 6,1 m do 1,3 m ter od 64 cm do 38 cm. Za prenos zvočnega signala uporabimo frekvenčno modulacijo. Zvočnemu in vidnemu signalu ustreza skupaj kanal s širino 7 MHz. Upoštevati moramo, da pri današnji barvni televiziji prenašamo podatke za tri barve. Zopet mora biti izpolnjena zahteva, da dobimo pri tem s starim črno belim sprejemnikom črno-belo sliko. Tako si lahko predstavljamo, kako zapletena je zadeva v podrobnostih. Fizik se navadno zadovolji s tem, da okvirno opiše osnove.

Prenos sporočil z radijskimi valovi se je do danes zelo razširil, a nekaj nedanjih naprav ni več v rabi. Med te sodijo elektronke – diode, triode in take z več elektrodami, ki so bistveno prispevale k razvoju radia in televizije, a so svoje mesto prepustile polprevodniškim elementom.

Janez Strnad