

*Voluminozni tiskovni papir*, mekan, elastičan, strojnogladak, bezdrvni papir male gustoće i bez punila. Od papira te grupe najpoznatiji je perolaki papir.

*Voštani papir*, bezdrvni celulozni papir obrađen s jedne ili s obje strane parafinom ili cerezinom kako ne bi propuštao zrak ili vodu. Upotrebljava se za zamatanje kolača, kruha, bombona, britvica i sl.

**Formati papira.** Oblik i veličina papira rezanog u listove izražava se formatima papira. Formati su uvjetovani širinom proizvodnih strojeva u grafičkoj industriji i industriji papira, te ekonomskim, praktičnim i estetskim faktorima. Nekada je prilikom ručne izradbe papira format ovisio o veličini i obliku ručnog sita. Kasnije su formate papira određivali pojedini proizvođači papira, pa je bilo više različitih i međusobno neproporcionalnih formata. Dogovorom njemačkih proizvođača papira postignutim 1883. godine bilo je definirano 12 formata, koji su se tada počeli mnogo primjenjivati. U Njemačkoj i u nekim drugim evropskim zemljama uvedeni su 1920. godine standardni formati, koji se od tada primjenjuju i u našoj zemlji u grafičkoj industriji i industriji papira.

Današnji standardni formati papira imaju oblik pravokutnika, a njihova se veličina izražava duljinom stranica (u mm). Duljine stranica standardnog formata odnose se međusobno kao  $1 : \sqrt{2}$ , tj. kao stranica kvadrata prema svojoj dijagonali. Duljina manje stranice ( $m$ ) odnosi se prema većoj ( $M$ ) kao veća stranica prema dvostrukoj duljini manje stranice ( $m : M = M : 2m$ ). Iz toga slijedi da se raspoplavljanjem ili sastavljanjem dvaju listova standardnog formata uzduž njihovih duljih stranica dobije ponovno format jednakih proporcija.

Formati papira svrstavaju se u nekoliko redova (tabl. 1). Osnovni red formata nosi oznaku A uz koju se, već prema veličini pojedinog formata, stavlja i brojevi. Početni format A0 izabran je tako da mu je površina  $1\text{ m}^2$ , pa mu stranice moraju iznositi  $841\text{ mm} \times 1189\text{ mm}$ . Manji formati dobiveni raspoplavljanjem po duljini stranici nose oznake s rastućim brojevima. Osim osnovnog reda formata A, definirani su i tzv. zavisni redovi formata B, C i D, koji se često primjenjuju za omotnice, mape, fascikle i sl. Red formata B definiran je tako da duljina manje stranice njegova početnog formata B0 iznosi  $1000\text{ mm}$ . Red formata C nalazi se po svojoj veličini između redova formata B i A, dok je red formata D najmanji.

## PROIZVODNJA I POTROŠNJA PAPIRA

Svjetska proizvodnja i potrošnja papira, kartona i ljepenke stalno raste. Tako je 1950. godine proizvedeno  $43,7\text{ milijuna tona}$ , 1960. godine  $74,9\text{ milijuna tona}$ , a 1976. godine  $154,1\text{ milijuna tona}$  papira (uključujući i ljepenknu). Iste godine, 1976, trošilo se u svijetu prosječno  $38\text{ kg}$  papira po stanovniku. Već 1979. godine proizvodnja papira i kartona porasla je na  $170,8\text{ milijuna tona}$ , a 1984. godine na  $189,9\text{ milijuna tona}$ . Pregled 20 najvećih proizvođača papira i kartona u 1984. godini i potrošnju papira po stanovniku u tim zemljama daje tabl. 2.

I u Jugoslaviji se nakon drugoga svjetskog rata proizvodnja papira, kartona i ljepenke stalno povećavala, a usporedno s tim rasla je i potrošnja tih proizvoda po stanovniku (tabl. 3). Primjećuje se da se uvoz ne povećava, dok izvoz uglavnom prati povećanu proizvodnju. U pregledu proizvodnje pojedinih vrsta papira, kartona i ljepenki u Jugoslaviji (tabl. 4) vidi se stalni porast sve do 1978. godine. Od tada se, međutim, proizvedene količine nekih proizvoda industrije papira smanjuju, što je osobito izraženo za novinski papir, a nešto manje za natronski papir.

LIT.: K. W. Britt, Pulp and Paper Technology. Van Nostrand Reinhold Co., New York 1970. — J. D. Parker, The Sheet-Forming Process. Tappi, Atlanta 1972. — A. Opherdien, Zellstoff und Papier. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1976. — Europa-Birkner, Handbuch der Herstellung und Verarbeitung von Zellstoff, Papier und Pappe. Birkner & Co. Vlg., Hamburg 1977. — J. Grant, H. H. Young, Paper and Board Manufacture, Technical Division. The British Paper and Board Industry Federation, London 1978.

J. Kos

## PARAZITNE ELEKTROMAGNETSKE POJAVE

Parazitne elektromagnetsko djelovanje iz prirodnih ili umjetnih izvora koje se pojavljuje kao smetnja u radu električnih, električnih ili elektromehaničkih uređaja. Elektromagnetske smetnje mogu se od izvora do uređaja koji ometaju prenositi provođenjem, kad su izvor i uređaj neposredno spojeni vodičima ili vodljivim plohamama, električnim ili magnetskim poljima na manje udaljenosti, ili zračenjem na veće udaljenosti. Može se smatrati da elektromagnetske smetnje onečišćuju okoliš. One mogu onemogućiti ispravno funkcioniranje uređaja, a mogu biti i opasne za ljudе i životinje.

U uređajima ili sustavima ima dijelova koji proizvode elektromagnetsku energiju i onih koje ta energija može ometati u normalnom radu. Prema tome, mogu nastati smetnje unutar uređaja ili sustava i smetnje među uređajima ili sustavima. Utjecaj unutrašnjih smetnji može se smanjiti ili tokom projektiranja, ili korekcijskim zahvatima na već izgrađenom uređaju. Smetnje među uređajima mnogo je teže smanjiti, jer se smetnje mogu prenositi na veliku daljinu, jer uređaji pripadaju različitim korisnicima i jer često uređaji istodobno zrače i uzimaju elektromagnetsku energiju (npr. radio-komunikacijski sustavi).

Svaki uređaj na koji može djelovati električna struja ili napon, električno ili magnetsko polje, odnosno elektromagnetsko zračenje, može biti ometan. Takvi uređaji mogu biti osjetljivi na smetnje u uskom ili širokom frekvencijskom pojasu. Teško je, međutim, definirati prag osjetljivosti na smetnje, jer za to treba definirati granice ispravnog rada.

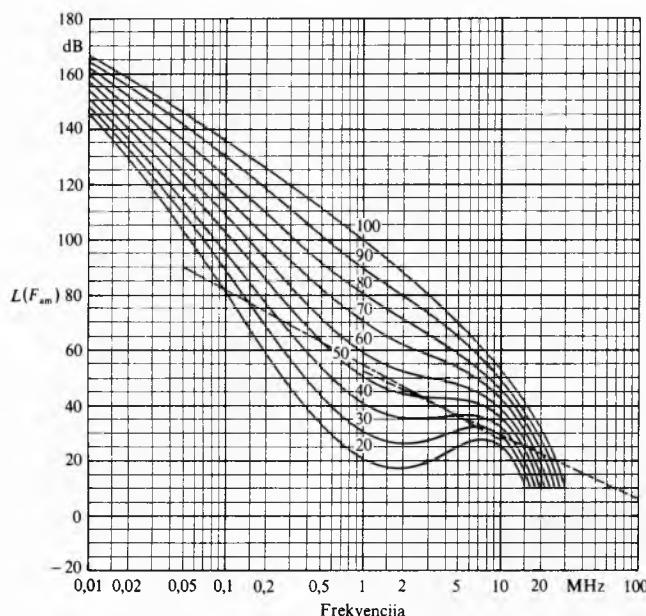
Elektromagnetska kompatibilnost sposobnost je električkog, električnog ili elektromehaničkog uređaja ili sustava da ne bude ometan u svojoj osnovnoj funkciji, ili da svojim djelovanjem ne smanji sposobnost rada drugih uređaja ili sustava. Da bi se osigurao visoki stupanj elektromagnetske kompatibilnosti, potrebno je razraditi postupke kojima se mogu predvidjeti moguće prilike i utjecaji. To zahtijeva proučavanje i poznavanje izvora elektroenergetskih smetnji, prijenosnog puta smetnji i odziva ometanog uređaja.

## IZVORI I PRIJENOSNICI ELEKTROMAGNETSKIH SMETNJI

Prirodni izvori elektromagnetskih smetnji mogu se prema mjestu nastanka svrstati u zemaljske i izvanzemaljske izvore. Uzroci su zemaljskih smetnji većinom prijelazne pojave, odnosno električna izbjivanja, dok su izvanzemaljske smetnje više stacionarne pojave slične šumu ograničenog spektra.

Na frekvencijama nižim od  $\sim 30\text{ MHz}$  najveća je smetnja atmosferski šum koji se prenosi zračenjem, a nastaje izbjivanjem za vrijeme oluja (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 563). Spektar je toga šuma širok i njegove su glavne komponente na frekvencijama između  $2\text{ kHz}$  i  $30\text{ MHz}$ . Pretežni dio atmosferskog šuma u umjerrenom klimatskom pojasu nastaje ljeti, a u tropskom pojasu zimi zbog oluja. Atmosferski šum kao elektromagnetski val može doprijeti refleksijom od ionosfere i tisuću kilometara daleko od izvora. Na temelju podataka registriranih u promatračkim stanicama izrađene su karte s predviđenim jakostima atmosferskog šuma, i to po šest karata za svaku godišnju dobu, jer je dan podijeljen na 6 razdoblja po 4 sata. Na kartama su ucrtane krivulje konstantnog faktora šuma  $F_{am}$  u decibelima (dB), uz središnju frekvenciju od  $1\text{ MHz}$ , koji je razina atmosferskog šuma s obzirom na termički šum određen izrazom  $kT_0B$ , gdje je  $k$  Boltzmannova konstanta,  $T = 293\text{ K}$ , a  $B$  širina frekvencijskog pojasa. Kad je potrebno odrediti razinu snage šuma uz neku drugu središnju frekvenciju, upotrebljava se dijagram na sl. 1. Faktor šuma  $F_{am}$  odgovara vrijednosti medijane, pa je za poznavanje mogućih varijacija potrebno poznavati i rasipanja vrijednosti po godišnjem doba i satima u danu.

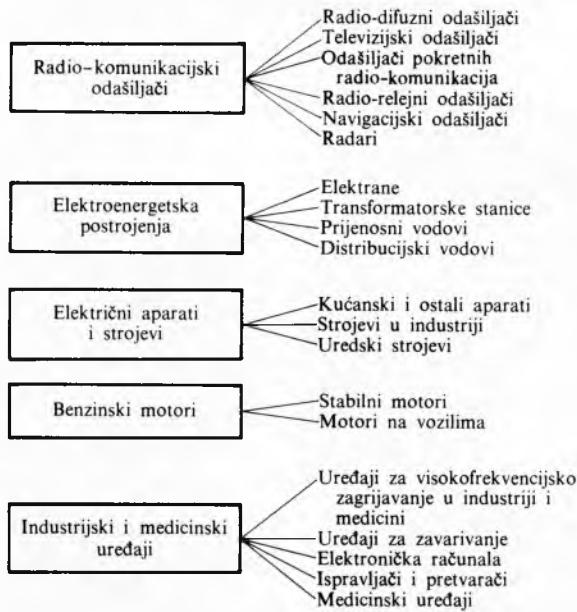
Smetnje mogu nastati i zbog djelovanja električnog naboja. Nagomilani naboje na vodljivim plohamama, koje su dijelovi antena i metalnih konstrukcija, u blizini antena može djelovati tako da se pojavi korona ili probor dielektričnih materijala. Karakteristike takovih smetnji teško je predvidjeti. Radio-komunikacijski uređaji na avionima najčešće su ometani takovim smetnjama.



Sl. 1. Dijagram za određivanje atmosferskog šuma  $F_{am}$  na frekvencijama različitim od 1 MHz. Brojevi uz krivulje označuju atmosferski šum na frekvenciji 1 MHz

Izvanzemaljske su smetnje kozmički šum, šum Sunca i ostalih svemirskih tijela. Kozmički šum nastaje djelovanjem brojnih izvora gotovo jednolikom raspoređenih u svemiru. Šum u smjeru galaktičkog ekvatora ipak je nešto veći nego u smjeru galaktičkih polova. Šum Sunca ima promjenljivu intenzivnost zbog promjenljive aktivnosti Sunca (erupcije). Ta se promjenljivost poklapa s razdobljem Sunčeve aktivnosti od  $\sim 11$  godina. Šum Mjeseca, Jupitera i Kasiopeje A spadaju među jače izvore šuma.

Umjetni izvori elektromagnetskih smetnji jesu sve tehničke naprave koje troše i u kojima se proizvodi električna energija. Glavni umjetni izvori navedeni su na sl. 2.



Sl. 2. Pregled umjetnih izvora smetnji

Radio-komunikacijski odašiljači mogu zbog relativno velike snage zračenja djelovati kao smetnje i na velikim udaljenostima.

Elektroenergetska postrojenja mogu postati izvori smetnji visoke razine zbog pogrešaka na dijelovima postrojenja iako te pogreške ne remete osnovnu funkciju postrojenja (proboj izolacije, kratki spoj, loš kontakt, slaba uzemljenja i dr.). Visokonaponski vodovi izvori su smetnji i kad su u ispravnom

stanju, jer djelovanjem visokih napona nastaje korona. Razina je tih smetnji viša kad kiši ili sniježi, kad je magla i kad je zrak vrlo vlažan. Komponente u spektru tih smetnji protežu se do desetak megaherca.

Smetnje koje proizvode električni aparati i strojevi pojavljuju se uvijek pri uklapanju i isklapanju, odnosno pri zatvaranju i otvaranju strujnih krugova. Posebno su istosmjerni motori izvori smetnje zbog komutacijskih pojava i iskre na komutatorima.

Motori s unutrašnjim izgaranjem izvor su smetnji zbog djelovanja uređaja za paljenje smjese u cilindru (v. Motori s unutrašnjim izgaranjem, TE 9, str. 1). Uređaji za paljenje proizvode niz oštih i kratkih impulsa. U blizini prometnica s gustim prometom slijed je impulsa nepravilan. Vršna vrijednost smetnje grupe vozila nije bitno veća od smetnje koju proizvodi vozilo s najvećom razonom smetnje. Razina smetnji opada s frekvencijom, pogotovo kad je viša od 1 GHz, i to  $\sim 10$  dB po oktavi.

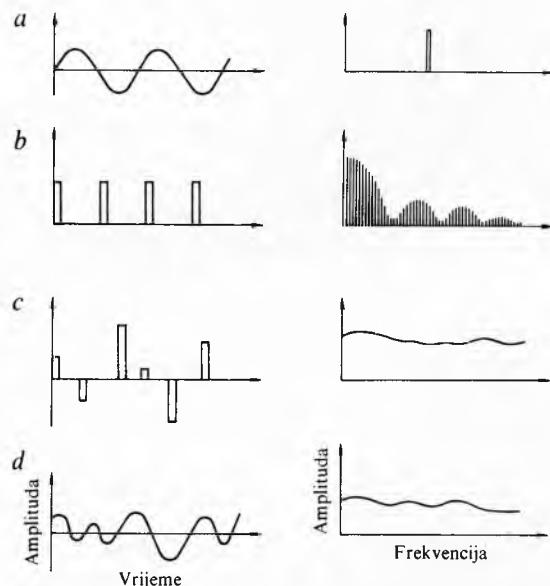
Industrijski i medicinski uređaji u kojima se proizvode struje visokih frekvencija za dielektrično zagrijavanje (v. Elektrotermija, TE 5, str. 182; v. Medicinski elektronički uređaji, TE 7, str. 698) posebno su jaki izvori smetnji. Smetnje imaju osnovnu radnu frekvenciju i više harmonijske frekvencije. Uređaji za lučno zavarivanje stvaraju smetnje u širokom pojasu frekvencije. Različite vrste ispravljača i uređaji s tiristorima također su jaki izvori smetnji. Elektronička računala s perifernim jedinicama izvori su elektromagnetskih smetnji.

**Vremenske i frekvencijske karakteristike izvora smetnji.** Smetnje su slučajni signali koji se ne mogu matematički opisati analitičkom funkcijom u ovisnosti o vremenu. One se, međutim, mogu opisati funkcijama vjerojatnosti koje prikazuju statističko ponašanje amplitude i trajanja smetnje.

Kao i svaki signal, i smetnje se mogu prikazati u koordinatnim sustavima amplituda—vrijeme i amplituda—frekvencija.

Sve se smetnje mogu razvrstati u četiri osnovna tipa: a) kontinuirane sinusne smetnje, b) impulsne smetnje, c) slučajne impulsne smetnje i d) slučajne kontinuirane smetnje. Sve ostale smetnje mogu se svesti na spomenute tipove ili na njihovu kombinaciju.

Kontinuirana sinusna smetnja neprekinuti je sinusni signal koji u koordinatnom sustavu amplituda—frekvencija ima samo jednu spektralnu liniju (sl. 3a).



Sl. 3. Glavni tipovi smetnji: a) sinusne, b) impulsne, c) slučajne impulsne, d) slučajne kontinuirane smetnje

Impulsne smetnje sastoje se od niza jednakih impulsa koji se ponavljaju u jednakim vremenskim razmacima. U koordinatnom sustavu amplituda—frekvencija spektralne su linije na jednakim razmacima, a njihove se amplitude mijenjaju prema zakonu  $(\sin x)/x$  (sl. 3b).

# PARAZITNE ELEKTROMAGNETSKE POJAVE

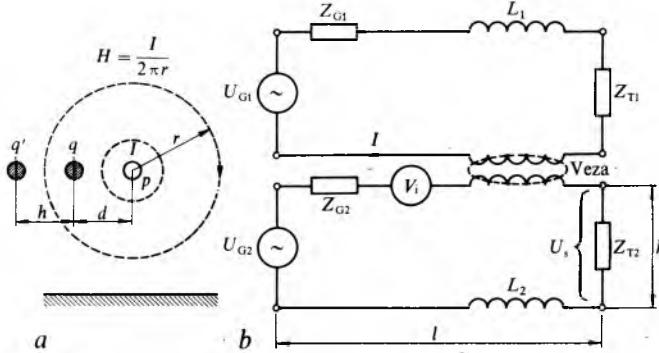
*Slučajne impulsne smetnje* sastoje se od brojnih impulsa koji su nepravilno vremenski raspoređeni i koji imaju različite amplitude. Parametri takve smetnje mogu se odrediti statističkim predviđanjem (npr. prosječni vremenski razmaci impulsa, vjerovatnost prekoračenja odabранe amplitude). Spektar je smetnje kontinuiran (sl. 3c). Često je broj impulsa u jedinici vremena vrlo velik, pa su spektralna svojstva takve smetnje vrlo bliska termičkom šumu.

*Slučajne kontinuirane smetnje* neprekinuti su signali (sl. 3d). One se mogu opisati samo statističkim metodama. Spektar takve smetnje također je kontinuiran.

Prema spektralnoj karakteristici smetnje mogu biti koherente i nekoherente. Izvor elektromagnetskih smetnji smatra se *koherentnim* kad su amplitude i faze susjednih spektralnih komponenata u međusobno konstantnom omjeru. *Nekoherentna smetnja* je ona smetnja kojoj spektralne komponente na susjednim frekvencijama imaju slučajne faze ili istodobno i slučajne faze i slučajne amplitude.

S obzirom na prijemnik ometanog uređaja razlikuju se uskopojasne i širokopojasne smetnje. *Uskopojasna smetnja* ima većinu spektralnih komponenata koje su unutar propusnog opsega prijemnika, dok *širokopojasna smetnja* zauzima mnogo šire frekvencijsko područje nego što je propusni opseg prijemnika.

**Prijenos elektromagnetske energije** može se ostvariti magnetskim i električnim vezama te zračenjem.



Sl. 4. Raspored vodiča (a) i shema spoja (b) za određivanje magnetske veze među vodičima

**Prijenos magnetskom vezom.** Ako je p vodič kroz koji teče struja I i koji je izvor smetnje za vodiće q i q' (sl. 4a), koji čine zatvoreni strujni krug koji ima na jednom kraju priključen generator, a na drugom kraju trošilo, magnetski tok kroz petlju vodiča q i q' iznosi

$$\Phi = \frac{\mu l I}{2\pi} \ln \frac{d+h}{d}, \quad (1)$$

gdje je  $\mu$  magnetska permeabilnost,  $l$  duljina vodiča,  $h$  njihova međusobna udaljenost, a  $d$  udaljenost vodiča q od vodiča p. Napon smetnje  $U_i$ , koji se inducira u ometanoj petlji, uz sinusni oblik struje s kružnom frekvencijom  $\omega = 2\pi f$ , određuje se iz izraza

$$U_i = -\mu l f I \ln \frac{d+h}{d}. \quad (2)$$

Prema toj relaciji slijedi da bi napon smetnje rastao s povećanjem frekvencije. To bi bilo točno kad se ne bi uzela u obzir induktivnost ometane petlje  $L_2$  i impedancije generatora ( $Z_{G2}$ ) i trošila ( $Z_{T2}$ ) (sl. 4b). Tada napon smetnje na trošilu iznosi

$$U_s = \frac{Z_{T2}}{Z_{G2} + Z_{T2} + j\omega L_2} U_i. \quad (3)$$

Ako se kao prijenosna impedancija  $Z_p$  definira omjer  $U_s/I$ , dobiva se da je

$$Z_p = -\frac{\mu l f Z_{T2}}{Z_{G2} + Z_{T2} + j\omega L_2} \ln \frac{d+h}{d}. \quad (4)$$

Pomoću prijenosne impedancije  $Z_p$  i struje smetnje  $I$  može se jednostavno odrediti napon smetnje na trošilu.

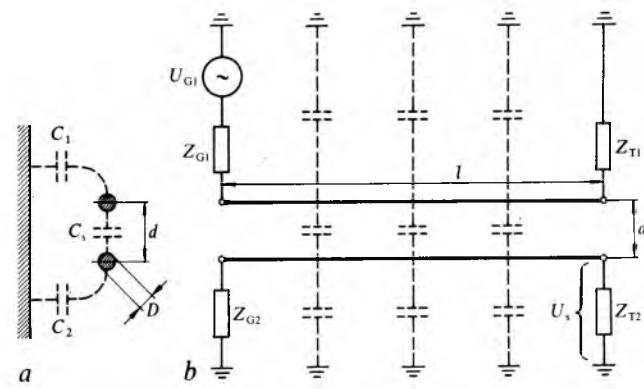
*Prijenos električnom vezom* ostvaruje se preko kapaciteta među vodičima  $C_s$  i kapaciteta između vodiča i vodljivih površina  $C_1$  i  $C_2$  (dijelova postrojenja ili zemlje) (sl. 5a). Napon na trošilu  $U_s$  (sl. 5b) može se odrediti iz izraza

$$U_s = U_{G1} \frac{j\omega C_s Z_2}{4}. \quad (5)$$

koji vrijedi kad je  $Z_{G1} = Z_{T1} = Z_1$ ,  $Z_{G2} = Z_{T2} = Z_2$ ,  $1/(\omega C_1) \gg |Z_1|$ ,  $1/(\omega C_2) \gg |Z_2|$  i  $1/(\omega C_s) \gg |Z_1 + Z_2|$ , što je najčešće zadovoljeno. Za dva paralelna vodiča kapacitet među vodičima određuje se iz izraza

$$C_s = \frac{\pi \epsilon l}{2d}, \quad \text{za } \frac{d}{D} \gg 1, \quad (6)$$

gdje je  $\epsilon$  dielektričnost zraka ( $\epsilon = 8,85 \text{ pF/m}$ ),  $l$  duljina paralelnih vodiča,  $D$  promjer vodiča, a  $d$  njihov razmak.



Sl. 5. Raspored vodiča (a) i shema spoja (b) za određivanje električne veze među vodičima

**Jednakost napona smetnje.** Magnetska veza više utječe kad su impedancije manje, dok za frekvencije više od 10 MHz redovito prevladava utjecaj električne veze. Za niže frekvencije treba razmotriti međusobni položaj vodiča i impedancije strujnih krugova, te ustanoviti koja vrsta veze prevladava.

Ako se postavi da je, prema sl. 4b,  $Z_{G1} = Z_{T1} = Z_1$ , te ako je  $Z_1 \gg \omega L_1$ , struja  $I$  može se odrediti iz izraza

$$I = \frac{U_{G1}}{2Z_1}. \quad (7)$$

Ako se dalje postavi da je  $Z_{G2} = Z_{T2} = Z_2$  i da je  $Z_2 \gg \omega L_2$ , nakon izjednačenja izraza (3) i (5) dobiva se

$$|Z_1 Z_2| = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{d+h}{d} \cdot \ln \frac{2d}{D}, \quad (8)$$

pa je nakon uvrštenja vrijednosti konstanta

$$|Z_1 Z_2| = 7200 \ln \frac{d+h}{d} \cdot \ln \frac{2d}{D}. \quad (9)$$

Ako je apsolutna vrijednost umnoška impedancija mnogo manja od vrijednosti izraza (9), prevladava utjecaj magnetske veze, a ako je mnogo veća, prevladava električna veza. Za približnu procjenu mogu se upotrijebiti sljedeći kriteriji: a) kad je  $|Z_1 Z_2| \leq 300 \Omega^2$ , mjerodavna je magnetska veza, i b) kad je  $|Z_1 Z_2| \geq 10000 \Omega^2$ , mjerodavna je električna veza za određivanje napona smetnje. Navedeni kriteriji vrijede za paralelne vodiče.

**Prijenos zračenjem.** Sve su vodljive plohe po kojima teku struje potencijalni izvori zračenja. Kad su dimenzije ploha reda veličine valne duljine, redovito se pojavljuje intenzivno zračenje. U radio-komunikacijskim sustavima primjenjuju se različite kombinacije vodiča i vodljivih ploha (antene) da bi se ostvarilo djelotvorno zračenje. Širenje elektromagnetskih valova ovisi o

frekvenciji, polarizaciji, visini antene, reljefu terena, električnim svojstvima tla, godišnjem doba i meteorološkim prilikama.

Uz pretpostavku širenja vala u slobodnom prostoru, gustoća snage na udaljenosti  $d$  od odašiljača, u smjeru maksimalnog zračenja, može se odrediti izrazom

$$P_{\max} = \frac{W_0 g_0}{4\pi d^2}, \quad (10)$$

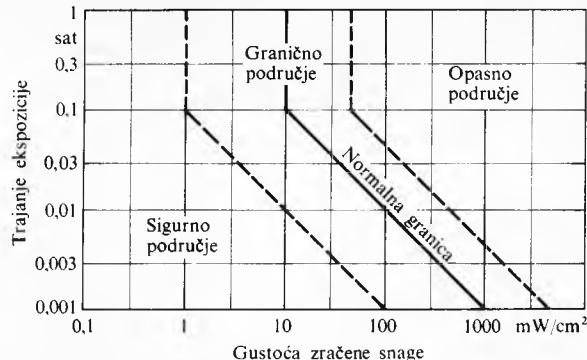
gdje je  $W_0$  snaga odašiljača, a  $g_0$  dobitak antene. Gušenje signala u decibelima između dviju izotropnih antena (v. *Elektronika, uređaji; antene, TE 4, str. 603*) u slobodnom prostoru može se odrediti pomoću prilagođenog izraza

$$a = 32,45 + 20(\lg f + \lg d), \quad (11)$$

gdje je  $f$  frekvencija vala nosioca u megahercima, a  $d$  udaljenost među antenama u kilometrima.

Prilikom određivanja međusobnih utjecaja treba uzeti u obzir da se ova sustava nalaze blizu Zemljine površine. Zračenja nižih frekvencija šire se uz površinu tla, i to najdalje do horizonta. Za više frekvencije do horizonta se proteže područje interferencije, jer se na izravnim val superponira reflektirani val od tla i od građevina na tlu, pa se zbog toga jakost polja mijenja u širokim granicama. Elektromagnetski val širi se iza horizonta ogibom. Kad je frekvencija manja od 30 MHz, može nastati lom ili refleksija vala u ionosferi, pa gustoća snage može biti velika i daleko iza horizonta.

*Opatnost od zračenja za žive organizme.* Prijemnici su elektromagnetskog zračenja i živi organizmi a zračenje može imati biološki i psihološki efekt. U mnogim se zemljama smatra da je dopuštena granica gustoće snage  $10 \text{ mW/cm}^2$  te da djelovanje takva zračenja ne smije biti duže od 6 minuta. Međutim, kao gornja sigurnosna granica uzima se gustoća snage od  $1 \text{ mW/cm}^2$ , jer se tada ne pojavljuju nikakve biološke promjene. Približne se granice dopuštene gustoće dozračene snage i trajanja zračenja ljudi vidi na sl. 6. Zanimljivi su i rezultati ispitivanja djelovanja zračenja na pokušne životinje (tabl. 1).



Sl. 6. Granice dopuštenog trajanja ekspozicije ljudskog tijela elektromagnetskom zračenju

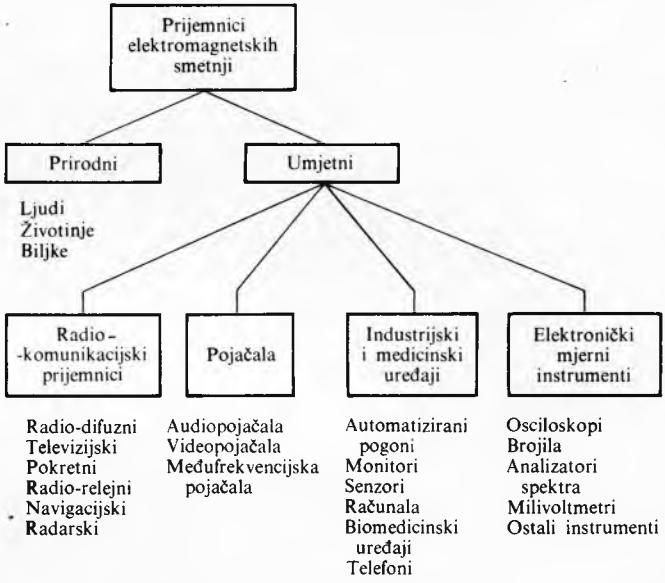
Tablica 1

SMRTNOST POKUSNIH ŽIVOTINJA U OVISNOSTI O FREKVENCIJI, JAKOSTI POLJA (ILI GUSTOĆI ZRAČENJA) I TRAJANJU IZLAGANJA

Vrsta životinje	Frekvencija zračenja	Jakost polja ili gustoća zračenja	Trajanje izlaganja min	Smrtnost %
Miš	50...500 Hz	6,5 kV/cm	60...120	70...90
Štakor	14,88 MHz	9 kV/m	10	100
		5 kV/m	100	80
		4 kV/m	100	25
Štakor	69,7 MHz	5 kV/m 2 kV/m	5 100	100 83
Pas	200 MHz	300 mW/cm² 200 mW/cm²	15 21	50 25
Morsko prase	200 MHz	590 mW/cm² 410 mW/cm²	20 20	67 100
Kunić	200 MHz	165 mW/cm²	30	100

**Električni uređaji kao prijemnici.** Svi aparati i uređaji (sl. 7) koji na bilo koji način reagiraju na elektromagnetsku energiju mogu biti ometani u svojoj osnovnoj funkciji.

Najosjetljiviji su radio-komunikacijski prijemnici. Prijemnici za frekvencijsko područje do nekoliko megaherca osobito su osjetljivi na atmosferski šum. Televizijski i ultrakratkovatni prijemnici nisu osjetljivi na atmosferski šum, ali su osjetljivi na smetnje od uređaja za paljenje motora s unutrašnjim izgaranjem. To vrijedi i za pokretne radio-komunikacijske prijemnike koji rade na frekvencijama od 30...1000 MHz. Radio-relejni uređaji imaju vrlo osjetljive prijemnike, pa se utjecaj smetnji smanjuje pogodnim izborom lokacija, frekvencija, smjera zračenja i antena. Slično vrijedi za radarske i navigacijske uređaje.



Sl. 7. Pregled prijemnika elektromagnetskih smetnji

Smetnje mogu dospijeti u prijemnike i preko ulaznih stezaljki međufrekvenčinskog pojačala. To se može pojaviti kad su ulazni dijelovi prijemnika i međufrekvenčinskog pojačala prostorno udaljeni i spojeni kabelom. Kabel tada može djelovati kao antena koja prima smetnje zračenjem ili elektromagnetskom vezom. Slično vrijedi za videopojakačala i audiopojakačala na koje mogu nepovoljno djelovati odašiljači i energetska mreža.

Industrijski i medicinski uređaji vrlo često detektiraju ili obrađuju signale vrlo malih amplituda koji se pojavljuju na ulaznim stezaljkama. Na izlaznim stezaljkama, međutim, signali imaju velike amplitude, što povećava utjecaj smetnji.

Uredaji za kontrolu i upravljanje industrijskim procesima vrlo često imaju osjetljiva pojačala na koja mogu djelovati veze među kabelima i neprikladna uzemljenja.

Elektronički mjerni instrumenti (osciloskopi, analizatori spektra, milivoltmetri i dr.) mogu dati pogrešne mjerne rezultate zbog smetnji.

Sklopovi u elektroničkim računalima rade sa signalima niske razine, pa su osjetljivi na impulsne smetnje pojačala koja su vezana na memoriske sklopove niske razine (magnetske vrpce, diskovi).

Biomedicinski instrumenti imaju gornju graničnu frekvenciju do stotinjak herca, pa su najosjetljiviji na smetnje iz energetske mreže ili na razlike potencijala zbog lošeg uzemljenja.

## MODEL IZVORA I PRIJEMNIKA SMETNJI

Svrha je modela izvora i prijemnika smetnji da se dobiju podaci o karakteristikama izvora smetnji i karakteristikama njihova djelovanja na prijemnike.

**Radio-komunikacijski odašiljači** imaju osnovni zadatak da proizvedu elektromagnetsko zračenje na radnim frekvencijama. Sirina pojasa odašlanog signala ovisi o spektru modulacijskog signala i vrsti modulacije. Osim snage na željenim frekvencijama,

odašiljač zrači i snagu na neželjenim frekvencijama i usprkos najpoželjnijoj konstrukciji odašiljača. I zračenje na radnim frekvencijama i neželjeno zračenje mogu uzrokovati smetnje na prijemnicima ako se pojave na radnoj frekvenciji prijemnika. Zato se, kad se određuje elektromagnetska kompatibilnost, trebaju uzeti u obzir svi odašiljači kao potencijalni izvori smetnji i trebaju se odrediti njihove snage. Zbog toga se postavlja model odašiljača na radnim i neželjenim frekvencijama, a zbog toga što odašiljač zrači niz frekvencija u željenom pojasu (modulirani odašiljači) model se odašiljača postavlja i u okolišu prijenosne frekvencije. Neželjena zračenja mogu se svrstati u sljedeće grupe: a) zračenja na harmonijskim frekvencijama osnovne frekvencije, b) zračenja na frekvencijama koje nisu harmonijske s osnovnom frekvencijom, c) zračenja nastala intermodulacijom u odašiljaču i d) širokopojasni šum.

Za istraživanje kompatibilnosti postavlja se model gustoće snage prema frekvencijskoj udaljenosti od vala nosioca. Raspodjela razine gustoće snage u decibelima može se aproksimirati izrazom

$$L(P_i) = A_i + B_i \lg \frac{\Delta f}{\Delta f_i}, \quad \Delta f_i \leq \Delta f \leq \Delta f_{i+1}, \quad (12)$$

gdje su  $A_i$  i  $B_i$  konstante,  $\Delta f$  je razlika prema prijenosnoj frekvenciji, dok su  $\Delta f_i$  i  $\Delta f_{i+1}$  donja i gornja granica frekvencijskog područja za koje vrijede konstante  $A_i$  i  $B_i$ . Izraz (12) vrijedi za širinu pojasa odašiljača  $\Delta f_0$  koja ovisi o vrsti modulacije, pa je

$$\text{za amplitudnu modulaciju: } \Delta f_0 = f_g, \quad (13)$$

$$\text{za frekvencijsku modulaciju: } \Delta f_0 = 2(f_g + \Delta F), \quad (14)$$

gdje je  $f_g$  gornja granična frekvencija modulacijskog signala, a  $\Delta F$  frekvencijska devijacija. Za impulsnu modulaciju granice frekvencijskih područja određene su trajanjem impulsa  $\tau$  i trajanjem porasta, odnosno trajanjem smanjenja  $\Delta\tau$  impulsa uz pretpostavku trapeznog oblika impulsa. Ako ne postoji mogućnost mjerjenja, vrijednosti konstanta  $A_i$  i  $B_i$  mogu se uzeti iz tabl. 2.

Tablica 2

VRIJEDNOSTI KONSTANTA ZA PRORAČUN GUSTOĆE SNAGE MODULIRANIH NOSILACA

Vrsta modulacije	$i$	$\Delta f_i$	$A_i$ (prema nosiocu) dB	$B_i$ (po dekadi frekvencije) dB
Samo val nosilac (npr. CW radar)	0	$0,1 \Delta f_0$	0	0
	1	$0,5 \Delta f_0$	0	-133
	2	$\Delta f_0$	-40	-67
AM (govor)	0	1 Hz	-28	0
	1	10 Hz	-28	+28
	2	100 Hz	0	-7
	3	4000 Hz	-11	-60
FM	0	$0,1 \Delta f_0$	0	0
	1	$0,5 \Delta f_0$	0	-333
	2	$\Delta f_0$	-100	0
Impulsni sustavi	0	$\frac{1}{10\tau}$	0	0
	1	$\frac{1}{\pi(\tau + \Delta\tau)}$	0	-20
	2	$\frac{1}{\pi\Delta\tau}$	$-20 \lg \left(1 + \frac{\tau}{\Delta\tau}\right)$	-40

Da bi se odredila procjena zračenja na harmonijskim frekvencijama vala nosioca, potrebno je izračunati prosječnu snagu pojedinih harmonijskih frekvencija i statističku razdiobu te snage. Taj se proračun osniva na dvjema pretpostavkama: a) prosječna razina snage opada s rednim brojem harmonijskih frekvencija i b) za odstupanja od prosječne razine snage vrijedi normalna razdioba, tako da standardna devijacija  $\sigma_h$  ne ovisi o rednom broju harmonijske frekvencije. Prosječna razina snage  $n$ -te harmonijske frekvencije može se izračunati pomoću izraza

$$L(P_n) = L(P_0) + A \lg n + B, \quad (15)$$

gdje je  $L(P_0)$  razina željene snage na osnovnoj frekvenciji,  $A$  koeficijent pravca karakteristike u decibelima po frekvencijskoj dekadi, dok je  $B$  konstanta koja ovisi o osnovnoj frekvenciji i razini snage  $L(P_0)$ .

Kad se mogu provesti mjerena pomoću više uređaja istog tipa ili pomoću jednog odašiljača koji može raditi s različitim frekvencijama ( $m$  uređaja, odnosno frekvencija), vrijednosti  $A$ ,  $B$  i  $\sigma_h$  mogu se odrediti pomoću izmjerjenih razina snage  $L(P_{ni})$  na različitim harmonijskim frekvencijama ( $n = 2$  do  $n = n_{\max}$ ) i za različite uređaje (od  $i = 1$  do  $i = m$ ). Pomoću izmjerjenih razina snage mogu se izračunati sljedeće konstante

$$C_1 = \sum \sum L(P_{ni})^2, \quad (16)$$

$$C_2 = m \sum_n (\lg n)^2, \quad (17)$$

$$C_3 = \sum \sum L(P_{ni}) \lg n, \quad (18)$$

$$C_4 = \sum \sum L(P_{ni}), \quad (19)$$

$$C_5 = m \sum_n (\lg n), \quad (20)$$

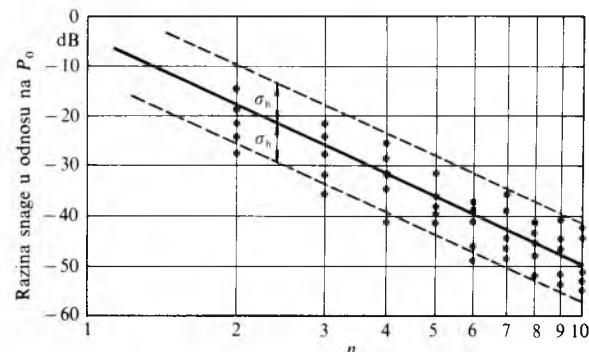
pomoću kojih se određuju vrijednosti  $A$ ,  $B$  i  $\sigma_h$ :

$$A = \frac{m n_{\max} C_3 - C_4 C_5}{m n_{\max} C_2 - C_5^2}, \quad (21)$$

$$B = \frac{C_4 - A C_5}{m n_{\max}}, \quad (22)$$

$$\sigma_h = \frac{C_1 - B C_4 - A C_3}{m n_{\max}}. \quad (23)$$

Opisanim postupkom dobiva se dijagram prikazan na sl. 8.

Sl. 8. Grafički prikaz rezultata mjerena prosječne razine snage prema harmonijskim frekvencijama ( $n$ )

Točnost se, dakako, povećava s povećanjem broja mjerena, ali se već sa pet mjerena dobiva prihvatljiva točnost, jer se tada postiže da standardna devijacija pogreške iznosi svega 2 dB. Ako nema ni toliko mjerena, mogu se upotrijebiti vrijednosti iz tabl. 3 koje su prosječne vrijednosti mnogobrojnih mjerena.

Tablica 3  
VRIJEDNOSTI KONSTANTA ZA PRORAČUN PROSJEČNE SNAGE NA  $n$ -TOJ HARMONIJSKOJ FREKVENCIJI

Frekvencijsko područje	$A$ (po dekadi frekvencije) dB	$B$ (prema 1. harmonijskoj frekvenciji) dB	$\sigma_h$ dB
$f < 30 \text{ MHz}$	-70	-20	10
$f = 30 \dots 300 \text{ MHz}$	-80	-30	15
$f > 300 \text{ MHz}$	-60	-40	20
Prosječak za sva područja	-70	-30	20

Za neharmonijske smetnje koje nastaju zbog nelinearnog rada nekih stupnjeva odašiljača može se postaviti izraz analogan izrazu (15), pa je

$$L(P_s) = L(P_0) + A' \lg \frac{f}{f_0} + B', \quad (24)$$

jer su neharmonijske smetnje kontinuirano raspodijeljene u spektru. Kad ne postoji mogućnost mjerjenja, može se prema američkom standardu postaviti da je  $A' = \sigma_h' = 0$ , dok se vrijednost  $B'$  očitava iz tabl. 4.

Tablica 4

## VRIJEDNOST KONSTANTE B ZA PRORAČUN NEHARMONIJSKIH SMETNJI

Apsolutna razina snage odašiljača $L(P, 1 \text{ mW})$ dB	Relativna razina snage smetnje prema snazi odašiljača dB
20	-38
50	-80
70	-100
100	-118

Intermodulacija nastaje zbog nelinearnosti izlaznih stupnjeva odašiljača kad su dva odašiljača smještena jedan blizu drugoga. Izvori smetnje tada su oba odašiljača koji preko antena zrače tu smetnju. Frekvencije smetnji zbog intermodulacije 3. reda iznose  $2f_1 - f_2$  i  $2f_2 - f_1$ , gdje su  $f_1$  i  $f_2$  frekvencije nosilaca prvog i drugog odašiljača.

Ako je razlika odašiljačkih frekvencija manja od 1%, razina snage smetnje u decibelima iznosi

$$L(P_s) = L(P_0) - 10, \quad (25)$$

gdje je  $L(P_0)$  razina signala koji uzrokuje smetnju tzv. interferentnog signala. Ako je, međutim, razlika frekvencija odašiljača veća od 1%, razina je smetnje u decibelima

$$L(P_s) = L(P_0) - 10 - 30 \lg \Delta f. \quad (26)$$

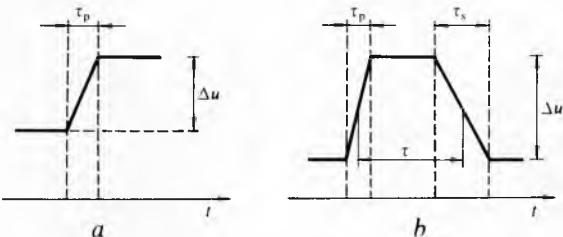
U izrazu (26)  $\Delta f$  je određeno relacijom

$$\Delta f = \frac{f_1 - f_0}{f_0}, \quad (26a)$$

gdje je  $f_0$  frekvencija odašiljača, a  $f_1$  frekvencija signala koji uzrokuje intermodulaciju.

Sirokopojasni šum odašiljača nema većeg značenja s obzirom na ostale izvore smetnji, pa se taj šum uzima u obzir samo za odašiljače većih snaga (npr. veće od 1 kW). I tada se, međutim, za frekvencije bliske valu nosiocu taj utjecaj može uključiti u model gustoće razine snage prema izrazu (12). Za frekvencije koje se razlikuju od frekvencije nosioca može se upotrijebiti izraz (24), odnosno tabl. 4.

**Impulsni izvori smetnji** nastaju zbog prijelaznih pojava u električnim napravama. Nagli skokovi trenutnih vrijednosti struje ili napona uzrokuju impulsne smetnje koje imaju relativno širok spektar. Dva najčešća oblika naglih promjena napona ili struje vide se na sl. 9.

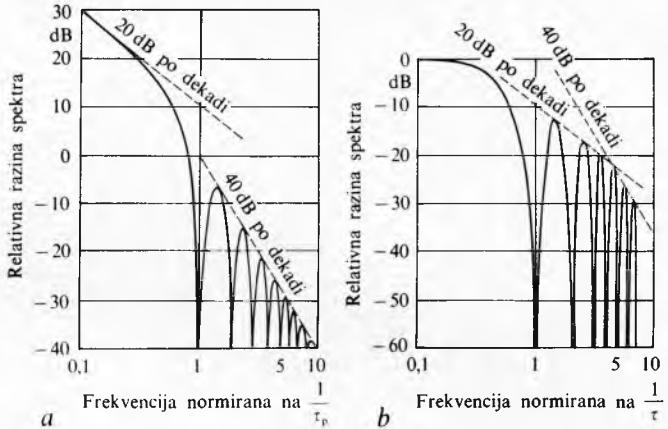


Sl. 9. Valni oblici nagle promjene napona (ili struje). a) naponski (strujni) skok, b) naponski (strujni) impuls

Naponski skok za  $\Delta u$  (sl. 9a) ostvaruje se tokom vremena  $\tau_p$ , pa je strmina porasta  $\Delta u/\tau_p$ . Spekter amplituda takva naponskog skoka može se prikazati izrazom

$$A(f) = \frac{\Delta u}{2\pi f} \cdot \frac{\sin \pi f \tau_p}{\pi f \tau_p}. \quad (27)$$

Gustoča spektra amplitude  $A(f)$  vidi se na sl. 10a, gdje su mjerilo za frekvencije normirana frekvencija  $1/\tau_p$  a mjerilo za amplitude višekratnici amplitude  $\Delta u \tau_p / (2\pi^2)$ . Za male vrijednosti normirane frekvencije spektar opada 20 dB po frekvencijskoj dekadi, dok za veće normirane frekvencije smanjenje spektra iznosi 40 dB po frekvencijskoj dekadi.



Sl. 10. Gustoča spektra amplituda za naponski skok (a) i za naponski impuls (b)

Kratkotrajno povećanje napona (sl. 9b) karakterizirano je strminom porasta napona  $\Delta u/\tau_p$  strminom smanjenja napona  $\Delta u/\tau_s$  i prosječnim trajanjem impulsa  $\tau$ . Gustoča spektra amplituda prikazuje se izrazom

$$A(f) = \left| \frac{\Delta u}{\pi f} \right| \left| \frac{\sin \pi f \tau_p}{\pi f \tau_p} \exp(j\pi f \tau) - \frac{\sin \pi f \tau_s}{\pi f \tau_s} \exp(-j\pi f \tau) \right|. \quad (28)$$

Ako se pretpostavi da je  $\tau_p = \tau_s$ , radi lakšega kvalitativnog uvida, dobiva se

$$A(f) = 2\tau \Delta u \frac{\sin \pi f \tau}{\pi f \tau} \cdot \frac{\sin \pi f \tau_p}{\pi f \tau_p}. \quad (29)$$

Na sl. 10b vidi se spektar amplituda koji ima mjerilo za frekvencije normirane frekvenciju  $1/\tau$ , a mjerilo za amplitude višekratnik amplitude  $2\tau \Delta u$ . Ovojnice spektra amplituda mogu se prikazati relacijama prema području frekvencija:

$$\text{za } f \leq \frac{1}{\pi \tau}: \quad A(f) = 2\tau \Delta u, \quad (30)$$

$$\text{za } \frac{1}{\pi \tau} \leq f \leq \frac{1}{\pi \tau_p}: \quad A(f) = \frac{2\Delta u}{\pi f}, \quad (31)$$

$$\text{za } f > \frac{1}{\pi \tau_p}: \quad A(f) = \frac{2\Delta u}{\pi^2 f^2 \tau_p}. \quad (32)$$

Za područje frekvencija prema (31) dobiva se da pad ovojnice iznosi 20 dB po frekvencijskoj dekadi, a za područje prema (32) pad ovojnice iznosi 40 dB. S gledišta elektromagnetske kompatibilnosti povoljniji su impulsi s manjom strminom bokova i s dužim trajanjem impulsa, što je nepovoljno s gledišta sigurnosti i djelotvornosti rada naprave koja je izvor smetnji.

Vrlo se često impulsi jednakog oblika pojavljuju u jednakim vremenskim razmacima. Takvo ponavljanje impulsa stvara takve fazne odnose da se veći dio spektra poništava, pa ostaju samo spektralne linije na razmacima  $f_o$ . Ta razlika frekvencije  $f_o$  jednaka je recipročnoj vrijednosti vremenskog razmaka  $T_o$  između dva sucesivna impulsa. Amplitude spektralnih linija za beskonačno strme bokove ( $\tau_p = 0$ ) određene su izrazom

$$A(f) = \frac{2\tau \Delta u}{T_o} \cdot \frac{\sin \pi f \tau}{\pi f \tau}. \quad (33)$$

Amplitude spektralnih linija za niske frekvencije ( $f \leq \frac{1}{\pi \tau}$ ) prak-

tički su konstante i iznose

$$A(f) = \frac{2\pi\Delta u}{T_0}. \quad (34)$$

Kad su vremenski razmaci između impulsa i amplitude impulsa slučajne veličine, nije moguće postaviti opći model za takav izvor smetnji. Tada se mora spektar izvora odrediti mjenjem.

**Spojna mesta uređaja kao izvori smetnji.** Priključnice i druga spojna mesta mogu biti izvori smetnji zbog lošeg kontakta. Prijelazni otpor ovisi o mehaničkim naprezanjima i o struji koja protječe spojevima.

Potiskivanje harmonijskih frekvencija odašiljača ovisi o materijalu kontakata i tlaku. Ako su kontakti od srebra i ako nisu pritisnuti, potiskivanje harmonijskih frekvencija odašiljača snage 4 W iznosi 70 dB, ali ako na kontakt djeluju tlak od 10 kPa, potiskivanje će iznositi 150 dB. Slično se ponašaju kontakti od slitine bakra s berilijem. Aluminijski kontakti bez tlaka djeluju kao srebrni kontakti, ali pod tlakom od 10 kPa potiskuju harmonijske frekvencije za 90 dB. Model takvih izvora smetnji nije moguće postaviti, ali se može procijeniti razina smetnji na temelju podataka o potiskivanju harmonijskih frekvencija.

Korodirani spojevi metalnih konstrukcija mogu biti izvori smetnji ako se nalaze u snažnom elektromagnetskom polju. Na dodirnim mjestima različitih metala uz prisutnost vlage ili morske vode nastaju galvanski elementi, pa nastaje ubrzana korozija. Korozija se može pojaviti i na spoju istovrsnih metala uz prisutnost elektrolita ako kroz spoj teče struja. Korodirani su spojevi nonlinearne impedancije slične diodama koje mogu stvarati harmonijske frekvencije i frekvencije kombinacija. Ako metalni dijelovi (ograde, užad, jarboli i sl.) imaju dimenzije reda veličine valne duljine, oni mogu djelovati kao antene. Sve takve smetnje vrlo su nepogodne jer ih je teško identificirati, a ne mogu se predvidjeti. Takve izvore smetnji, kad se pojave, treba otkriti malim prijenosnim prijemnicima s prikladnom antenom.

U blizini odašiljača prekidi na nedefiniranim visokofrekvenčnim kontaktima stvaraju širokopojasne smetnje. Takve su pojave dosta česte u blizini kratkovalnih odašiljača snage 0,4...1 kW koji rade na području frekvencija od 1,5...30 MHz. Takve pojave nastaju i zbog vibracija. Vrlo su česte smetnje od 20 dB iznad 1 μV uz širinu pojasa od 10 kHz, a u nepovoljnim uvjetima zapažene su i smetnje do 60 dB. Smetnje toga tipa teško je locirati jer su širokopojasne, a mogu se prenositi i zračenjem i elektromagnetskim vezama.

**Dalekovodi.** Postoje tri tipa izvora smetnji na dalekovodima. Prvi je korona (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 684) koja je tinjavi izboj u neposrednoj blizini vodiča popraćen svjetlucanjem, drugi nastaje zbog neispravnosti dijelova dalekovoda, a treći zbog refleksije elektromagnetskih valova.

**Korona** nastaje kad električno polje uz površinu vodiča pređe kritičnu vrijednost ( $\sim 30 \text{ kV/cm}$ ). Ona je ograničena na prostor oko vodiča gdje se izbojem ionizira zrak. Izboj nastaje i za vrijeme pozitivne i za vrijeme negativne poluperiode. Pozitivni proces ionizacije širi se na mnogo veće udaljenosti nego negativni izboj. Osim toga, strujni impulsi za vrijeme pozitivne poluperiode veći su i desetak puta nego impulsi za vrijeme negativne poluperiode. Strujni impulsi vrlo su oštiri s trajanjem bokova od nekoliko desetaka nanosekunda, pa izrazitije komponente spektra imaju frekvenciju i od nekoliko megaherca. Smetnje na tim frekvencijama slabo se prigušuju uzduž dalekovoda, pa se ukupna smetnja na bilo kojem mjestu dalekovoda sastoji od zbroja pojedinačnih smetnji uzduž dalekovoda (i do desetak kilometara na obje strane od promatranoj mjestu). Suhu vodič dalekovoda obložen je sitnim česticama nečistoća koje imaju oštре rubove što omogućuje izboj. Tada će se izboj sastojati od mnogo manjih izvora smetnji, pa je smetnja vrlo slična termičkom šumu. Kad je vodič mokar, tanki film prekriva čestice nečistoća što otupljuje oštре rubove, ali se tada stvaraju i veće kapljice. Za izboj je tada potreban viši napon, pa se povećava i naboj na zaobljenim rubovima.

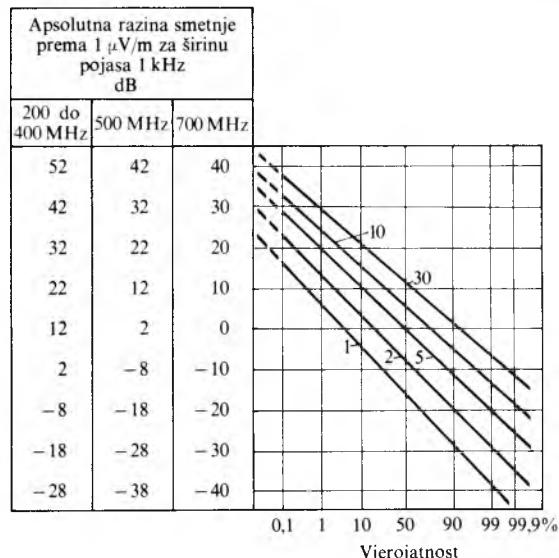
Zbog toga nastaju jači i rjeđi lokalni izvori smetnji, pa mokri dalekovod uzrokuje impulsne smetnje.

**Smetnje zbog neispravnosti dijelova dalekovoda** nastaju zbog oštećenja izolatora, naslage nečistoća na izolatorima i zbog proboga izolacije među električki nabijenim plohamama. Oštećenja izolatora nisu česta, ali mogu izbojem kroz oštećene dijelove uzrokovati velike smetnje. Naslage prašine, soli u priobalnom području i industrijske nečistoće na izolatorima mogu osjetno povećati smetnje, pogotovo kad su izolatori vlažni. Osim toga, kad su naslage nečistoće dobro vodljive, mogu se tokom sušenja izolatora povećati smetnje i zbog iskrenja između osušenih dijelova. Proboj izolacije može uzrokovati iskrenje među dvjema metalnim plohamama, između metalnog dijela i električki nabijene površine izolatora, te u šupljinama unutar izolacijskog materijala. Njihanjem izolatora zbog vjetra mogu porasti smetnje toga tipa.

Smetnje uzrokovane dalekovodima prenose se zračenjem i mogu ometati prijem radio-difuznih emisija u području frekvencija od nekoliko megaherca na udaljenosti 100...200 m od dalekovoda. Za proračun razine (jakost električnog polja prema jakosti polja od  $1 \mu\text{V/m}$ ) tih radio-smetnji postoji niz metoda. Sve metode polaze od pretpostavke da je razina radio-smetnji proporcionalna maksimalnoj jakosti električnog polja, koja ovisi o rasporedu vodiča i naponu dalekovoda. Većina metoda računa da je jakost polja smetnje obrnuto proporcionalna kvadratu promjera vodiča, te da jakost polja opada s udaljenošću od dalekovoda prema zakonu  $d^{-n}$ , gdje je  $d$  udaljenost od dalekovoda, a  $n$  ima vrijednost od 1...2.

Dalekovod, kao i svaka metalna konstrukcija, može uzrokovati refleksije elektromagnetskih valova. Na prijemnom mjestu mogu se pojaviti direktni i reflektirani val. Fazni odnosi tih valova ovise o udaljenosti prijemne antene od dalekovoda. Zbog superpozicije tih valova može ukupna jakost polja biti na pojedinim mjestima vrlo malena, pa će prijem biti nekvalitetan ili čak onemogućen, iako je jakost polja direktnog vala dovoljna za kvalitetan prijem. Smetnja zbog refleksije nastaje kad su odašiljač i prijemna antena na istoj strani dalekovoda.

**Uredaji za paljenje motora s unutrašnjim izgaranjem** stvaraju slijed kratkih impulsala trajanja 1...5 ns. Vršna vrijednost impulsa ovisi o vrsti vozila, brzini i opterećenju, te o istrošenosti vozila. Smetnje u blizini prometnica ovise o gustoći prometa, tipovima vozila i njihovoj starosti, pa se one mogu odrediti samo mjerjenjem. Rezultati mjerjenja smetnji provedenih u Japanu vide se na sl. 11. Mjerjenja provedena u SAD pokazuju: a) smetnje na frekvencijama nižim od  $\sim 100 \text{ MHz}$  više naginju vertikalnoj polarizaciji, pa je taj efekt više izražen kad smetnju uzrokuje jedno vozilo nego grupa vozila, b) vršna vrijednost smetnje



Sl. 11. Vjerojatnost prekoračenja apsolutne razine smetnje u decibelim prema  $1 \mu\text{V/m}$  za širinu pojasa od  $1 \text{ kHz}$ . Brojevi uz pravce označuju gustoću prometa (broj vozila u minutu)

grupe vozila nije bitno veća od smetnje koju stvara vozilo s najvećom smetnjom i c) na frekvencijama višim od  $\sim 1\text{ GHz}$  smetnja opada približno 20 dB po oktavi.

Smatra se da danas ne postoji bolji model za predskazivanje smetnji od motornih vozila od onog prikazanog na sl. 11, pa se taj model upotrebljava u praksi. Pri tom se računa da razina polja opada s kvadratom udaljenosti od prometnice.

**Osjetljivost prijemnika.** Da bi se mogla provesti analiza djelovanja smetnji na prijemnike, potrebno je definirati kvalitetu prijema i osjetljivost na smetnje. Općenito se smatra da su smetnje premašile dopuštenu granicu ako je kvaliteta prijema pala ispod neke dopuštene razine.

Kad je izvorna poruka električni signal, svi se sustavi mogu razvrstati u sustave koji prenose analogne i koji prenose digitalne signale. Za prijenos analognog signala važna je vjerna reprodukcija valnog oblika. Tada se kao mjeru kvalitete uzima srednja vrijednost kvadrata odstupanja primljenog od odaslanog signala. Tu je statističku veličinu moguće izraziti omjerom spektralne gustoće snage signala i smetnje, pa je tako definirana kvaliteta prenijete poruke. Kad se prenosi digitalni signal, važno je samo da li je signal primljen, a valni oblik primljenog impulsa nije bitan. Tada je mjeru kvalitete omjer broja pogrešno primljenih i broja odaslanih impulsa.



Sl. 12. Primjer prikaza smetnji na analognim i digitalnim uređajima prema razini smetnji

Osjetljivost sustava na smetnje može se prikazati dijagramom u kojemu se vidi ovisnost kvalitete o razini smetnje. Na sl. 12 vide se tipične krivulje koje omogućuju usporedbu analognih i digitalnih sustava. Pokazuje se da su digitalni sustavi povoljniji, jer oni rade sa zadovoljavajućom kvalitetom kod viših razina smetnji, nego analogni sustavi.

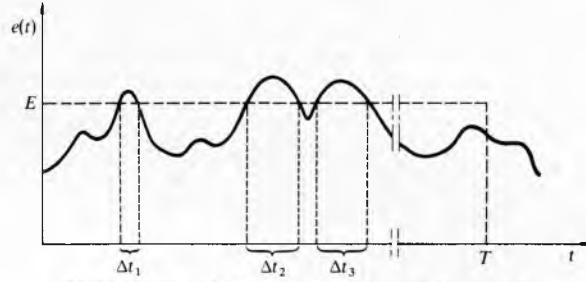
Kad izvorna poruka nije električni signal, već akustički ili svjetlosni signal, a to vrijedi za komunikacijske sustave, vrlo je teško definirati kvalitetu prijema i osjetljivost na smetnje, jer poruke završavaju u svijesti čovjeka. Kad se prenosi govor, bitna je razumljivost govora, dok je za prijenos glazbe važan estetski doživljaj. Zbog svoje zalihosti (redundancije) govor je mnogo manje osjetljiv na smetnje nego glazba. Iako televizijska slika ima veliku zalihost, jer se signali dvaju uzastopnih redaka vrlo malo razlikuju, ipak je prijem televizijske slike vrlo osjetljiv na smetnje zbog estetskih zahtjeva.

se, naime nacrti vremenski dijagram razine smetnji  $e(t)$  (sl. 13) na kojemu je označena maksimalno dopuštena smetnja  $E$ , lako se određuju vremenska razdoblja  $\Delta t_n$  kad je razina smetnje prekoračena. Vjerojatnost prekoračenja dobiva se iz relacije

$$v_p(E) = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N \Delta t_n, \quad (35)$$

gdje je  $T$  trajanje promatranja.

Kad se prenosi govor, razumljivost je mjeru kvalitete. Mjerenje razumljivosti zasniva se na emisiji slogova ili riječi bez povezanog smisla u koju se dodaju smetnje. Za svaku razinu smetnje određuje se postotak ispravno primljenih slogova ili riječi, pa se dobiva razumljivost kao funkcija razine smetnji. Obično se kao granica ispravnog rada uzima razumljivost od 90%. Za manje kvalitetne sustave može se odabrati i niža granica razumljivosti.



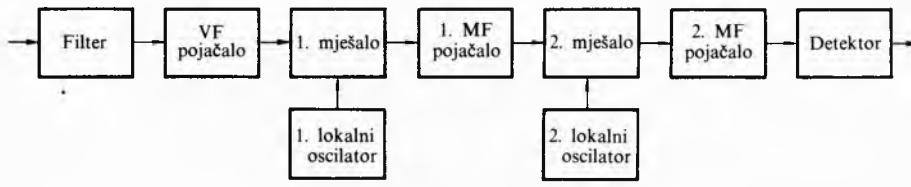
Sl. 13. Primjer određivanja prekoračenja razine smetnji

Kad se prenosi slika, mogu se pojaviti različite smetnje koje djeluju različito na subjektivnu ocjenu kvalitete reprodukcije, uz dodavanje smetnji promjenljivih razina. Tada se ispitivanja provode pomoću više osoba koje ocjenjuju primljenu sliku (ocjene slike: odlična, vrlo dobra, dobra, granična i neupotrebljiva). Smatra se da je ona smetnja granična kad je 50% promatrača izjavilo da primljena slika ima graničnu kvalitetu.

**Odziv prijemnika moduliranih signala.** Prijemnici daju na izlazu odziv kad su na ulazu pobuđeni moduliranim signalom određene frekvencije i širine pojasa (korisni signal na radnoj frekvenciji). Prijemnici daju jači ili slabiji odziv kad se na ulazu pojave signali smetnje. Da bi se odredila osjetljivost prijemnika na smetnje, potrebno je utvrditi efekte smetnji i frekvencijska područja u kojima su takvi efekti dominantni.

Kao osnova za razmatranje poslužit će superheterodinski prijemnik (blok-sHEMA na sl. 14) koji se najčešće upotrebljava. Na ulazu je visokofrekvenčno pojačalo širine pojasa  $B_{VF}$  a nakon stupnja za miješanje slijedi niz međufrekvenčnih pojačala širine pojasa  $B$  koja može biti jednaka ili mnogo uža od  $B_{VF}$ , što ovisi o tipu prijemnika. Na kraju je detektor iza kojeg se dobiva odasana poruka (modulacijski signal) koja se nekada i pojačava. Ima i složenijih prijemnika, ali se širina pojasa  $B$  uvijek odnosi na najužu širinu frekvencijskog pojasa.

Da bi se predvidjele smetnje, potrebno je utvrditi odziv prijemnika na svim frekvencijama. Prema frekvencijama mogu



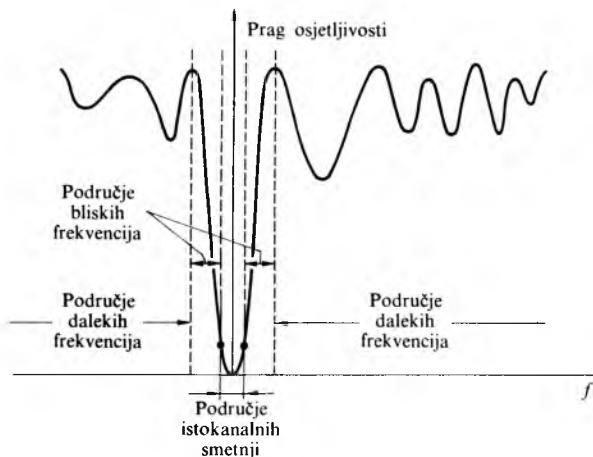
Sl. 14. Pojednostavljena blok-sHEMA prijemnika

Bez obzira na vrstu poruka, nije ekonomski opravdano zahtijevati da razina smetnji nikada ne prijeđe granicu koja odgovara minimalnoj kvaliteti prijema. Zbog toga se dopušta da neki postotak od vremena rada sustav radi s kvalitetom nižom od minimalne. Taj dopušteni postotak ovisi o vrsti poruke, a može se odrediti pomoću vjerojatnosti prekoračenja razine smetnji. Ako

se smetnje koje djeluju na prijemnike svrstati u tri grupe: a) smetnje u spektru korisnog signala, b) smetnje u području bliskih frekvencija i c) smetnje u području dalekih frekvencija (sl. 15).

Smetnje u spektru korisnog signala (istokanalne smetnje) odnose se na sve signale koji imaju frekvencije unutar naruže-

širine pojasa  $B$  oko vala nosioca (područje frekvencije  $\pm B$  oko vala nosioca). Smetnje u području bliskih frekvencija odnose se na signale kojima su frekvencije unutar najveće širine pojasa  $B_{VF}$  oko vala nosioca. Smetnje u području dalekih frekvencija odnose se na signale izvan pojasa širina  $B_{VF}$ .



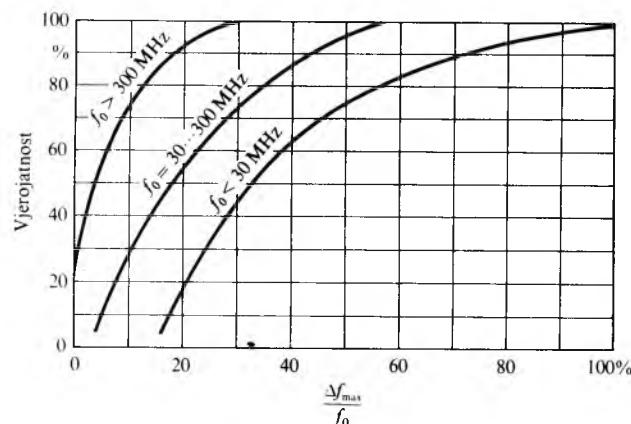
Sl. 15. Područja frekvencija prema odzivu prijemnika

*Signal istokanalne smetnje* prolazi kroz prijemnik do detektora kao i korisni signal. Istokanalna smetnja smanjuje kvalitetu primljene poruke, pa je može potpuno maskirati tako da se poruka ne može ni prepoznati. Budući da je prijemnik jednako osjetljiv na korisni signal i na smetnju, minimalna kvaljeta primljene poruke ovisi samo o vrsti modulacije korisnog signala i smetnje. Tada se osjetljivost na smetnje izražava omjerom snaga korisnog signala i signala smetnje, što odgovara razlici razina. Tako npr. ako korisni amplitudno moduliran signal prenosi govor i ako je signal smetnje amplitudno ili frekvencijski moduliran, korisni signal mora imati višu razinu za najmanje 17 dB. Ako je, međutim, korisni signal frekvencijski moduliran, razlika razina mora biti najmanje 8 dB.

*Smetnje u području bliskih frekvencija* nastaju zbog nelinearnih efekata u visokofrekvenčnim pojačalima ili u sklopovima za miješanje. One se pojavljuju kao intermodulacija, kao smanjenje osjetljivosti na radnoj frekvenciji ili kao unakrsna modulacija.

*Intermodulacija* je stvaranje novih signala smetnji na tzv. frekvencijama kombinacija koje su svi mogući zbrojevi i razlike frekvencija valova nosilaca signala i njihovih harmonijskih frekvencija. Ako je, naime, jedna od frekvencija kombinacija jednakih frekvencija korisnog signala, smetnja se dalje prenosi kao istokanalna smetnja, ali s mnogo manjom razinom.

*Smanjenje osjetljivosti na radnoj frekvenciji* nastaje zbog smanjenog pojačanja korisnog signala koje nastaje djelovanjem nelinearnih efekata u stupnjevima prijemnika.



Sl. 16. Vjerojatnost obuhvata smetnji na bliskim frekvencijama kad se uzmu u obzir odašiljači s prijenosnim frekvencijama u području  $\Delta f_{max}$  oko frekvencije  $f_0$

*Unakrsna modulacija* pojavljuje se samo kad se primjenjuje amplitudna modulacija, a nastaje kad zbog prevelikog signala smetnje jedan ili više stupnjeva pojačala mora raditi u nelinearnom području. Tada se modulacijski signal prebacuje s vala nosioca smetnje na val nosilac korisnog signala, pa se modulacijski signal smetnje pojavljuje na izlazu prijemnika.

Smetnje na bliskim frekvencijama ovise o visokofrekvenčnom selektivnosti prijemnika koja definira frekvencijsko područje unutar kojeg se moraju nalaziti signali smetnji da bi djelovali na prijemnik. Ako se sa  $\Delta f_{max}$  označi maksimalna razlika frekvencija odašiljača koji stvara smetnju i vala nosioca korisnog vala, veličina  $\Delta f_{max}$  pokazuje područje frekvencija za koje treba promatrati utjecaj smetnji na bliskim frekvencijama. Krivulje na sl. 16 pokazuju vjerojatnost obuhvata smetnji na bliskim frekvencijama kao funkciju omjera  $\Delta f_{max}$  i frekvencije korisnog vala.

**Istokanalne smetnje.** Gornja granica dopuštene istokanalne smetnje (prag osjetljivosti) sa gledišta elektromagnetske kompatibilnosti jednaka je snazi šuma, koja se može odrediti iz relacije

$$P_p = F_s k T B, \quad (36)$$

gdje je  $F_s$  faktor šuma prijemnika,  $k$  Boltzmannova konstanta,  $T$  temperatura (obično 290 K), a  $B$  širina frekvencijskog pojasa. Prag osjetljivosti izražen razinom snage u decibelima iznad jednog milivata iznosi

$$L(P, 1 \text{ mW}) = 10 \lg F_s - 174 + 10 \lg B. \quad (37)$$

**Intermodulacija.** Smetnje na frekvencijama kombinacija koje su bliske središnjoj frekvenciji prolaze prijemnikom kao i korisni signal, pa se tako degradira kvaliteta željene poruke. Da bi se utvrdila mogućnost te pojave treba identificirati takve parove odašiljača i odrediti efekte intermodulacije.

Ako na ulazu prijemnika djeluju dva sinusna signala oblika

$$u_1 = U_1 \sin \omega_1 t, \quad (38)$$

$$u_2 = U_2 \sin \omega_2 t, \quad (39)$$

na izlazu nelinearnog pojačala, osim pojačanih signala prema (38) i (39), pojavit će se i signali oblika

$$u_s = k_{mn} U_1^m U_2^n \sin(m\omega_1 t \pm n\omega_2 t), \quad (40)$$

gdje je  $k_{mn}$  faktor proporcionalnosti koji ovisi o karakteristikama pojačala, a  $m$  i  $n$  prirodni brojevi kojima zbroj odgovara redu nelinearnosti pojačala. Frekvencije signalâ koji mogu uzrokovati smetnje zbog intermodulacije moraju udovoljiti sljedećem uvjetu

$$|mf_1 \pm nf_2| = |f_0 \pm \Delta B|, \quad (41)$$

gdje su  $f_1$  i  $f_2$  frekvencije odašiljača,  $f_0$  je središnja frekvencija prijemnika, a  $2\Delta B$  širina pojasa međufrekvencije unutar koje se intermodulacija znatno ne prigušuje. Dijeljenjem izraza (41) sa središnjom frekvencijom prijemnika  $f_0$  dobiva se

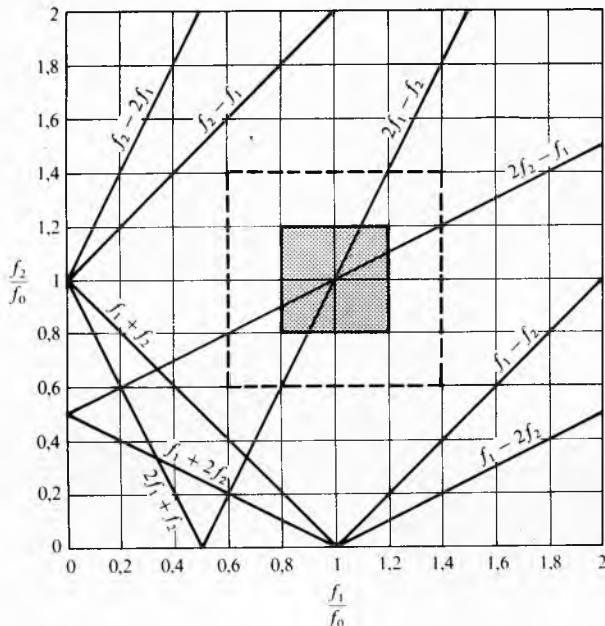
$$\left| m \frac{f_1}{f_0} \pm n \frac{f_2}{f_0} \right| = \left| 1 \pm \frac{\Delta B}{f_0} \right|. \quad (42)$$

Za  $\Delta B = 0$  ta je jednadžba prikazana na sl. 17, i to za sve moguće vrijednosti  $m$  i  $n$  kad je  $m+n=2$  i  $m+n=3$  koje odgovaraju intermodulacijskim produktima 2. i 3. reda. Kad se uzme u obzir prigušenje u visokofrekvenčnom dijelu za maksimalno 60 dB, što odgovara frekvencijskom pomaku od središnje frekvencije za  $\pm \Delta B_{60}$ , mogu se pojaviti smetnje uz dovoljno veliku snagu ako frekvencije dvaju signala zadovoljavaju sljedeće uvjete:

$$\text{za smetnje 3. reda: } |2f_b - f_d - f_0| \leq B_{60}, \quad (43)$$

$$\text{za smetnje 5. reda: } |3f_b - f_d - f_0| \leq B_{60}, \quad (44)$$

gdje je  $f_b$  frekvencija bliža  $f_0$ , a  $f_d$  frekvencija dalja od  $f_0$ . Frekvencije smetnji koje zadovoljavaju gornje uvjete dolaze prve u obzir pri utvrđivanju mogućnosti pojave smetnji. Na sl. 17 iscrtanom je površinom označeno područje koje u prvom redu treba analizirati za određivanje smetnji zbog intermodulacije.



Sl. 17. Frekvencije  $f_1$  i  $f_2$  koje stvaraju proizvode intermodulacije drugog i trećeg reda na središnjoj frekvenciji  $f_0$  prijemnika

Kad se analizira smetnja zbog intermodulacije, obično se računa s ekvivalentnom ulaznom snagom, koja je jednaka ulaznoj snazi signala sa središnjom frekvencijom koja uzrokuje jednak efekt na izlazu prijemnika kao intermodulacijska smetnja. Razina ekvivalentne ulazne snage u decibelima određena je izrazom

$$L(P_E) = m L(P_b) + n L(P_d) + a_{IM}, \quad (45)$$

gdje su  $L(P_b)$  i  $L(P_d)$  razine signala smetnji na bližoj i daljoj frekvenciji, a  $a_{IM}$  faktor intermodulacije. Ta relacija slijedi iz izraza (40), jer potencije  $m$  i  $n$  nakon logaritmitanja postaju koeficijenti. Faktor intermodulacije dobiva se mjerenjem na prijemniku. Na ulaz prijemnika priključe se dva signala smetnji jednakne snage, kojima se snage povećavaju do razine  $L(P_{so})$  uz koju se na izlazu prijemnika dobiva jednak odziv kao da je na ulaz priključen korisni signal razine  $L(P_p)$ . Razina  $L(P_p)$  odgovara pragu prijema signala na korisnoj frekvenciji. Tada je  $L(P_{so}) = L(P_b) = L(P_d)$ , a  $L(P_p) = L(P_E)$ , pa je

$$a_{IM} = L(P_p) - (m+n) \cdot L(P_{so}). \quad (46)$$

Faktor intermodulacije praktički je konstantan za manje snage smetnji sve do razine zasićenja, iznad koje ovisi i o snazi smetnje. Pri određivanju razine ekvivalentne ulazne snage razlikuju se četiri slučaja:

1. Oba su signala smetnji ispod razine uz koju se pojavljuje zasićenje u prijemniku, a ekvivalentna snaga smetnje i korisni signal su manji od praga kad se uključi automatska regulacija pojačanja. To odgovara relacijama (45) i (46), pa je za inter-

modulaciju 3. reda ( $m = 2, n = 1$ ) razina ekvivalentne ulazne snage

$$L(P_E) = 2L(P_b) + L(P_d) + L(P_p) - 3L(P_{so}). \quad (47)$$

2. Korisni signal ili ekvivalentna ulazna snaga smetnje prelaze prag kad se uključi automatska regulacija pojačanja, ali još nije dostignuta razina zasićenja. Zbog smanjenja visokofrekvenčnog pojačanja (za  $\Delta g_{VF}$  u decibelima) razina ekvivalentne ulazne snage za intermodulaciju 3. reda iznosi

$$L(P_E) = 2L(P_b) + L(P_d) + L(P_p) - 3L(P_{so}) - 2\Delta g_{VF}. \quad (48)$$

3. Smetnja na bližoj frekvenciji prelazi razinu zasićenja. Tada snaga  $P_b$  ne djeluje na ekvivalentnu ulaznu snagu, ali se mora uzeti u obzir prag zasićenja  $P_{zas}$ , pa je razina ekvivalentne ulazne snage za intermodulaciju 3. reda

$$L(P_E) = 2L(P_b) + L(P_d) + L(P_p) - 3L(P_{so}). \quad (49)$$

4. Smetnja na daljoj frekvenciji prelazi granicu zasićenja, pa tada snaga  $P_d$  nema utjecaja na ekvivalentnu ulaznu snagu. Za intermodulaciju 3. reda razina ekvivalentne ulazne snage iznosi

$$L(P_E) = 2L(P_b) + L(P_{zas}) + L(P_p) - 3L(P_{so}). \quad (50)$$

Ako nije poznat prag zasićenosti za promatrani prijemnik, može se primijeniti izraz

$$L(P_{zas}) = L(P_{zo}) + 10\lg \frac{\Delta f}{f_0}, \quad (51)$$

gdje je  $L(P_{zo})$  referentni prag zasićenja, a  $\Delta f$  razlika frekvencije signala smetnje i središnje frekvencije  $f_0$  prijemnika. Vrijednosti referentnog praga zasićenja (sl. 18) određene su ispitivanjem više prijemnika.

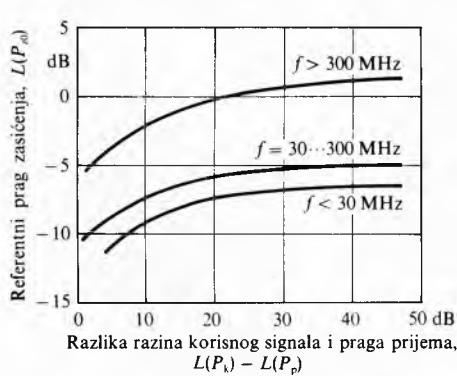
**Model pada osjetljivosti na radnoj frekvenciji.** Ako se na ulazu u prijemnik pojave jedan ili više signala smetnje dovoljno velike snage na frekvencijama bliskim središnjoj frekvenciji, smanjuje se osjetljivost prijemnika, jer se smanjuje omjer korisnog signala  $S_k$  i šuma  $S_s$  (omjer  $S_k/S_s$ ). Ako se razina signala smetnje prikaže u logaritamskom mjerilu, s porastom razine signala smetnje omjer  $S_k/S_s$  opada linearno (sl. 19). Za signale smetnje koji su manji od praga zasićenja  $L(P_{szas})$  omjer  $S_k/S_s$  ne ovisi o smetnji, pa je

$$L(S_k/S_s) = L(P_k) - L(P_p) - L(S_k/S_s)_p, \quad (52)$$

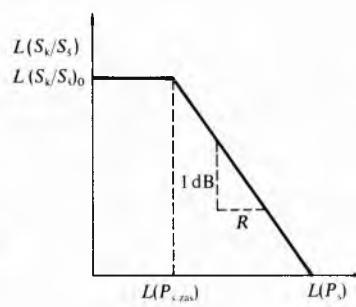
gdje je  $L(P_k)$  razina korisnog signala,  $L(P_p)$  razina praga prijema, a  $L(S_k/S_s)_p$  omjer  $S_k/S_s$  u decibelima koji odgovara razini korisnog signala  $P_k$ . Kad je razina smetnje veća od  $L(P_{szas})$ , razina omjera signal-šum dobiva se iz izraza

$$L(S_k/S_s) = L(S_k/S_s)_0 - \frac{L(P_s) - L(P_{szas})}{R}, \quad (53)$$

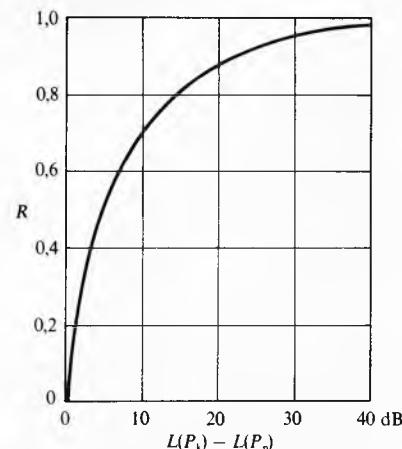
gdje je  $(S_k/S_s)_0$  omjer koji vrijedi za razinu signala smetnje,  $L(P_s) = L(P_{szas})$ , a  $R$  je faktor prikazan na sl. 20.



Sl. 18. Ovisnost referentne razine praga zasićenja  $L(z_0)$  o razini korisnog signala.  $L(P_k)$  razina korisnog signala,  $L(P_p)$  razina praga prijema



Sl. 19. Ovisnost omjera signal-šum o razini signala smetnje

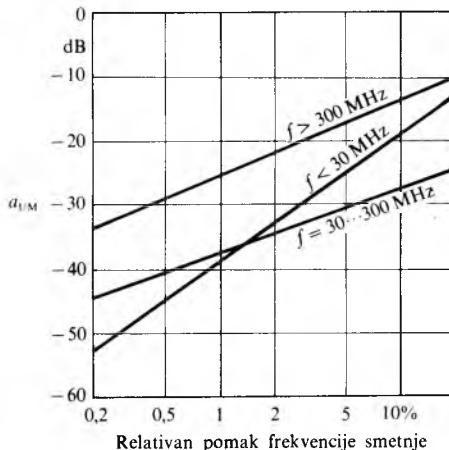


Sl. 20. Ovisnost faktora  $R$  u izrazu (53) o razini korisnog signala.  $L(P_k)$  razina korisnog signala,  $L(P_p)$  razina praga prijema

**Model unakrsne modulacije.** Unakrsna modulacija nastaje kad se pojavi dovoljno jaki signal na bilo kojoj bliskoj frekvenciji. Takva je modulacija moguća samo kad je signal smetnje amplitudno moduliran i kad prijemnik prima amplitudno modulirane signale. Omjer snage korisnog signala  $S_k$  i smetnje  $S_i$  amplitudno modulirane sa dva bočna pojasa, može se odrediti iz izraza

$$S_k/S_i = -2L(P_s) + a_{UM}, \quad (54)$$

gdje je  $a_{UM}$  faktor unakrsne modulacije, koji se određuje iz dijagrama na sl. 21, što je načinjen na temelju mnogih mjerena na tipičnim prijemnicima.



Sl. 21. Ovisnost faktora unakrsne modulacije o relativnoj frekvenčijskoj udaljenosti smetnje od srednje frekvenčije prijemnika

**Parazitni odzivi na dalekim frekvenčijama** pojavljuju se na onim frekvenčijama na kojima osnovna frekvenčija ili harmonijske frekvenčije signala smetnje mogu miješanjem s osnovnom frekvenčijom ili harmonijskim frekvenčijama lokalnog oscilatora stvarati signal međufrekvenčije. Frekvenčija smetnji koja stvara parazitni odziv u prijemniku s jednim miješanjem mora zadovoljavati uvjet

$$f_{MF} = |pf_{LO} \pm qf_s|, \quad (55)$$

iz kojeg se određuje frekvenčija smetnje

$$f_s = \left| \frac{pf_{LO} \pm f_{MF}}{q} \right|, \quad (56)$$

gdje su  $p$  i  $q$  redovi harmonijskih frekvenčija lokalnog oscilatora i signala smetnji,  $f_{LO}$  je frekvenčija lokalnog oscilatora, a  $f_{MF}$  međufrekvenčije.

Kad prijemnik ima dva miješanja, frekvenčija je signala smetnje

$$f_s = \left| \frac{p_1 f_{1LO} \pm p_2 f_{2LO} \pm f_{MF}}{q_1 q_2} \right|, \quad (57)$$

gdje se indeks 1 odnosi na prvo, a indeks 2 na drugo miješanje.

Istraživanja pokazuju da najveće smetnje nastaju na prvom stupnju miješanja, pa se parazitni odzivi na drugom i eventualno na trećem stupnju miješanja ne moraju razmatrati. Za parazitni odziv na frekvenčiji dobivenoj miješanjem uz  $q = 1$  potrebna je mnogo manja snaga smetnje nego na frekvenčijama uz  $q > 1$ .

Prag osjetljivosti prijemnika za parazitne odzive određen je izrazom

$$L(P_{SO}) = L(P_o) + A \lg \frac{f}{f_o} + B, \quad (58)$$

jer stupnjevi prijemnika imaju određenu širinu pojasa, pa parazitni odzivi nisu samo na diskretnim frekvenčijama.

Kad postoji mogućnost mjerjenja na više prijemnika, konstante  $A$  i  $B$  te standardna devijacija  $\sigma_s$  mogu se odrediti mjerjenjem kao analogne vrijednosti u jednadžbi (15), dakle prema izrazima (21) do (23). Kad ne postoje izmjereni podaci, mogu se upotrijebiti

vrijednosti iz tabl. 5 koje su dobivene mjerjenjem na mnogo prijemnika.

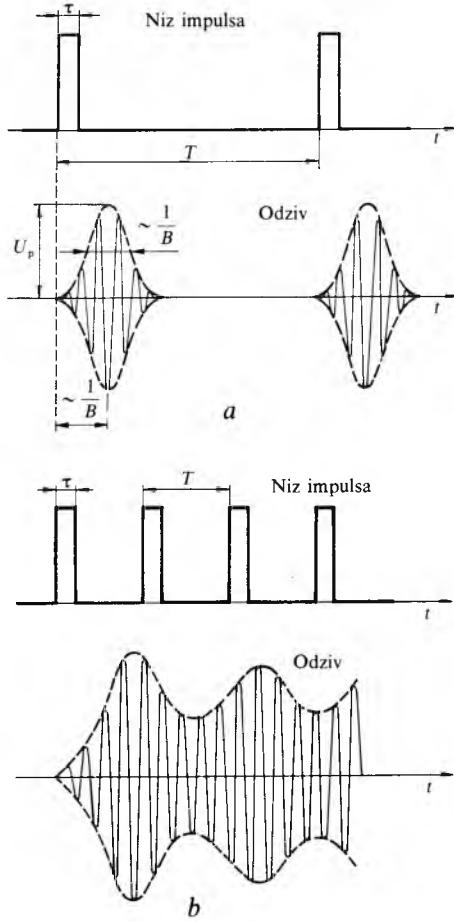
Tablica 5  
VRIJEDNOSTI KONSTANTA ZA PRORAČUN PRAGA OSJETLJIVOSTI PRIJEMNIKA

Frekvenčijsko područje	A (po dekadi frekvenčije) dB	B (prema korisnom odzivu) dB	$\sigma_s$ dB
$f < 30 \text{ MHz}$	25	85	15
$f = 30 \dots 300 \text{ MHz}$	35	85	15
$f > 300 \text{ MHz}$	40	60	15
Prosječna vrijednost	35	75	20

**Odziv na impulse.** Širina najužeg frekvenčijskog pojasa  $B$  određuje odziv prijemnika na impulse. Redovito je frekvenčija ponavljanja (repeticijska frekvenčija) impulsâ smetnji niska s obzirom na širinu pojasa  $B$ .

Kad se na ulazu prijemnika pojavi niz kratkih impulsa u vremenskim razmacima  $T$  tako da je  $T \ll 1/B$ , dobiva se na kraju posljednjeg međufrekvenčijskog pojasa odziv oblika prikazanog na sl. 22a. Tada se zbog niske repeticijske frekvenčije impulsi ne prekrivaju, pa je kašnjenje i širina međufrekvenčijskog impulsa približno jednaka recipročnoj vrijednosti širine pojasa  $B$ . Ako je, međutim, repeticijska frekvenčija viša ili reda veličine širine pojasa  $B$ , impulsi će se u međufrekvenčijskom dijelu prekrivati i vršna vrijednost impulsa se mijenja (sl. 22b).

Ako je srednja frekvenčija  $f_o$  mnogo niža od recipročne vrijednosti trajanja impulsa  $\tau$ , amplitude spektralnih linija mogu se prikazati izrazom (34), pa je gustoća spektra konstantna



Sl. 22. Raspored impulsa na ulazu prijemnika i odziv međufrekvenčijskog pojasa. a niska repeticijska frekvenčija impulsa, b visoka repeticijska frekvenčija impulsa

i iznosi  $2\tau A$ . Vršna vrijednost napona jednaka je integralu gustoće spektra s metnjem preko širine pojasa prijemnika, pa je

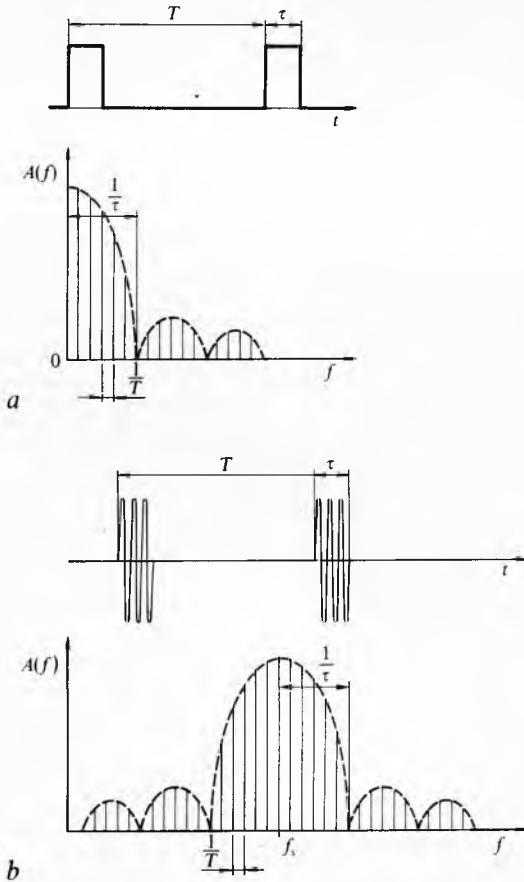
$$U_p = \int_{f_0-B/2}^{f_0+B/2} 2\tau A df = 2\tau AB \quad \left( \text{za } f_0 \leq \frac{1}{\pi\tau} \right). \quad (59)$$

Izraz (59) vrijedi kad se unutar propusne karakteristike prijemnika pojavljuje dovoljno (najmanje  $\sim 10$ ) spektralnih linija.

Impulsne smetnje mogu se pojaviti i kao niz visokofrekvenčkih impulsa kad je val nosilac smetnje amplitudno moduliran impulsima. Oblik spektra jednak je kao da se radi o kratkim impulsima (sl. 23), ali je pomaknut udesno za frekvenciju nosioca smetnje. Ako je frekvencijski razmak središnje frekvencije prijemnika i vala nosioca smetnje manji od  $1/(\pi\tau)$ , vršni je napon

$$U_p = \tau AB, \quad (60)$$

što vrijedi uz pretpostavku da su impulsi koherenti.



Sl. 23. Raspored impulsa na ulazu prijemnika i odziv međufrekvenčijskog pojačala. a) niz impulsa, b) visokofrekvenčkih impulsa

### PREDVIĐANJE I MJERENJE SMETNJI

**Općenito o predviđanju smetnji.** Da bi se postigao željeni stupanj elektromagnetske kompatibilnosti, potrebno je već tokom projektiranja nekog sustava predviđjeti smetnje koje se mogu pojaviti unutar projektiranog sustava ili djelovanjem drugih sustava. Razlikuju se tri stupnja predviđanja smetnji.

Prvi je stupanj predviđanja smetnji koje se mogu pojaviti međusobnim djelovanjem dijelova podsustava (komponente, skloovi, uređaji). Drugi stupanj obuhvaća analizu i predviđanje mogućih smetnji među podsustavima većeg sustava, dok treći stupanj daje podatke o utjecaju projektiranog sustava na predvidiv okoliš odnosno utjecaj drugih sustava na projektirani sustav.

Sve se smetnje, unutar sustava ili među sustavima, mogu svesti na kombinacije međusobnog djelovanja između izvora smetnji i prijemnika. Za svaku kombinaciju treba odrediti raspodjelu snagu na ulazu prijemnika, odnosno općenito na ulazu svakog uređaja osjetljivog na smetnje. Zatim treba usporediti tu snagu s osjetljivošću na smetnje i utvrditi da li postoje mogućnosti ometanja. To se može formulirati izrazom

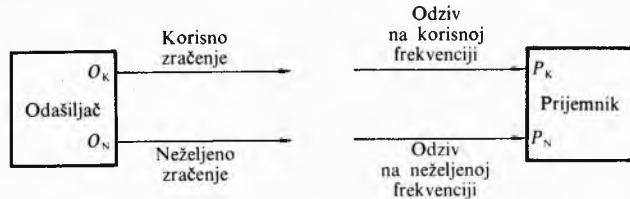
$$L(P_R(f,t,d,s)) = L(P_o(f,t)) + a(f,t,d,s), \quad (61)$$

gdje je  $L(P_o(f,t))$  razina snage odašiljača (obično u decibelima iznad jednog milivata) koja je funkcija frekvencije  $f$  i vremena  $t$ ,  $a(f,t,d,s)$  gušenje u decibelima koje ovisi o frekvenciji, vremenu, udaljenosti  $d$  i smjeru  $s$  ako se smetnja prenosi zračenjem, dok je  $L(P_R(f,t,d,s))$  razina snage na ulazu prijemnika, koja, kad je sustav kompatibilan, mora biti manja od razine praga osjetljivosti  $L(T(f,s))$ , što znači da mora biti ispunjen uvjet

$$L(P_R(f,t,d,s)) < L(T(f,s)). \quad (62)$$

Iako su relacije (61) i (62) jednostavne, vrlo je teško odrediti vrijednosti u tim relacijama. Odašiljač (izvor signala) je izvor dviju vrsta signala. Glavninu snage odašiljača daje u korisnom dijelu spektra, ali se ipak mali dio snage emitira na neželjenim frekvencijama. Slično je i s prijemnikom. On je, naime, vrlo osjetljiv na korisni dio spektra, ali postoji mogućnost odziva i na neželjenim frekvencijama. Međutim, da bi takav odziv imao jednak učinak kao korisni signal, moraju signali na neželjenim frekvencijama biti mnogo jači nego na korisnoj frekvenciji.

Postoje četiri moguća međusobna djelovanja između odašiljača i prijemnika (sl. 24): a) veza  $O_K-P_K$  između korisnog signala odašiljača i odziva prijemnika u korisnom dijelu spektra, b) veza  $O_K-P_N$  između korisnog signala odašiljača i odziva na neželjenoj frekvenciji prijemnika, c) veza  $O_N-P_K$  između signala na neželjenoj frekvenciji odašiljača i odziva prijemnika na korisnom dijelu spektra i d) veza  $O_N-P_N$  između signala na neželjenoj frekvenciji odašiljača i odziva na neželjenoj frekvenciji prijemnika. Smetnje koje nastaju vezom  $O_N-P_N$  mogu se zanemariti jer su one mnogo manje od onih uzrokovanih ostalim vezama.



Sl. 24. Shema mogućih smetnji između odašiljača i prijemnika

Pri određivanju međusobnog utjecaja para odašiljač-prijemnik polazi se od frekvencijskog rasporeda. Pri tom se upotrebljavaju već opisani modeli odašiljača i prijemnika. Najprije se analizira utjecaj bliskih frekvencija koje su u području  $\pm 20\%$  od središnjih frekvencija svih odašiljača i prijemnika. Zatim se ispituju moguće smetnje na dalekim frekvencijama, i to u području od jedne desetinke do deseterostrukje središnje frekvencije. Poslije toga se promatra istodobnost rada odašiljača i prijemnika. Kad su utvrđeni mogući parovi odašiljač-prijemnik, određuje se prigušenje signala među tim parovima tako da se parovi eliminiraju prema udaljenosti.

**Predviđanje smetnji unutar sustava ili između njih.** Prije bilo kakve analize potrebno je sakupiti podatke o uređajima i sustavima koji će se razmatrati, i to za sve moguće izvore smetnji, prijemnike i moguće puteve prijenosa smetnji. Ako se odbace istokanalne smetnje koje nastaju samo između sustava, a mogu se lako utvrditi i eventualno ukloniti, problem predviđanja smetnji svodi se na veze  $O_K-P_N$  i  $O_N-P_K$ .

Ako se promatra samo jedan par odašiljač-prijemnik (sl. 25), te ako se pojavljuje samo jedna od spomenutih smetnji, za nesmetani rad prijemnika mora biti ispunjen jedan od sljedećih uvjeta:

$$P_K \leq T_K, \quad (63)$$

## PARAZITNE ELEKTROMAGNETSKE POJAVE

$$P_N \leq T_{N_1} \quad (64)$$

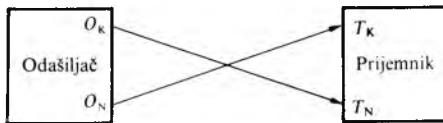
gdje su  $T_K$  i  $T_N$  maksimalno dopuštena snaga signala smetnji (prag osjetljivosti) u području odziva prijemnika u korisnom, odnosno u neželjenom frekvencijskom području. Ako istodobno postoje oba signala smetnje, uvjet se može napisati u obliku

$$P_K + \frac{T_K}{T_N} P_N \leq T_K. \quad (65)$$

Taj uvjet vrijedi uz pretpostavku da se snage smetnji smiju zbrajati, što je praktički uvijek dopušteno. Drugi uvjet nije potrebno postavljati jer su u izrazu (65) obuhvaćena oba praga osjetljivosti. Ako uvjet (65) nije ispunjen, potrebno je smanjiti snagu  $P_K$ , tj. snagu odašiljača na neželjenim frekvencijama  $O_N$  ili prag prijemnika  $P_N$ , odnosno provesti oba zahvata istodobno. Uvjet da su smetnje na granici dozvoljenih može se napisati u obliku

$$k P_K + n \frac{T_K}{T_N} P_N = T_K, \quad (66)$$

gdje su  $k \leq 1$  i  $n \leq 1$  faktori potiskivanja smetnji. U izrazu (66) izostavljen je znak nejednakosti jer nema smisla da se spomenutim promjenama ostvari ukupna snaga smetnje manja od  $T_K$ .

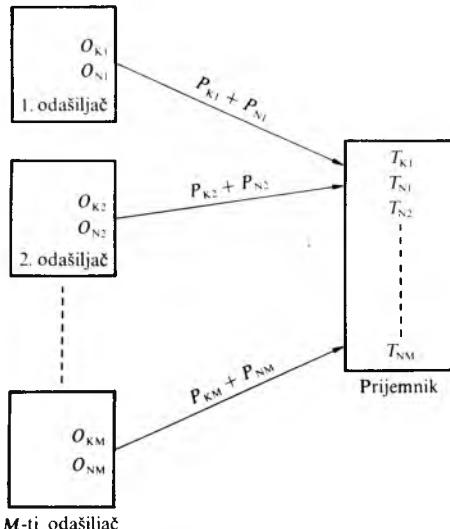


Sl. 25. Shema dominantnih smetnji između odašiljača i prijemnika

Ako postoji  $M$  odašiljača koji mogu djelovati na isti prijemnik (sl. 26), izraz koji odgovara relaciji (66) glasi

$$\sum_{i=1}^M \left( k_i P_{Ki} + n_i \frac{T_K}{T_{Ni}} \right) = T_K. \quad (67)$$

U izrazu (67) pojavljuje se mnogo nezavisnih veličina  $k_i$  i  $n_i$ , pa postoji vrlo mnogo rješenja kojima je zadovoljen taj uvjet.



Sl. 26. Shema djelovanja smetnji više odašiljača na jedan prijemnik

Najčešće se traži takvo rješenje uz koje je potrebno najmanje mijenjati postojeće stanje, a to znači da faktori potiskivanja budu što bliži jedinici. Minimum promjena bit će postignut kad bude

$$\sum_{i=1}^M (|ln k_i| + |ln n_i|) \rightarrow \min. \quad (68)$$

Da bi se odredile vrijednosti faktora potiskivanja  $k_i$  i  $n_i$  za jedan par odašiljač-prijemnik, postavljaju se jednadžbe

$$k_i P_{Ki} + n_i \frac{T_K}{T_{Ni}} P_{Ni} = T_K, \quad (69)$$

$$y = -\ln k_i - \ln n_i, \quad (70)$$

s time da se zahtijeva minimum funkcije  $y$ . Izraz (70) odgovara izrazu (68) kad su  $k_i < 1$  i  $n_i < 1$ . Pomoću Lagrangeova mnoštva  $\lambda$  može se postaviti nova funkcija  $\Phi$  u obliku

$$\Phi = -\ln k_i - \ln n_i + \lambda (k_i P_{Ki} + n_i \frac{T_K}{T_{Ni}} P_{Ni} - T_K). \quad (71)$$

Prve derivacije po varijablama  $k_i$  i  $n_i$  izjednačene s nulom daju uvjete ekstrema, pa se dobiva

$$\frac{\partial \Phi}{\partial k_i} = -\frac{1}{k_i} + \lambda P_{Ki} = 0, \quad (72)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n_i} = -\frac{1}{n_i} + \lambda \frac{T_K}{T_{Ni}} P_{Ni} = 0. \quad (73)$$

Iz jednadžba (69), (72) i (73) mogu se odrediti rješenja koja glase

$$k_i = \frac{T_K}{2P_{Ki}}, \quad n_i = \frac{T_{Ni}}{2P_{Ni}}, \quad \lambda = \frac{2}{T_K}. \quad (74)$$

Na temelju druge derivacije funkcije  $\Phi$  može se pokazati da izračunate vrijednosti  $k_i$  i  $n_i$  odgovaraju minimalnoj vrijednosti  $y$ . Može se dogoditi da je jedan od faktora potiskivanja veći od 1. Tada se postavi da je taj faktor jednak jedinici, a vrijednost drugog faktora izračuna se iz izraza (69).

Analognim se postupkom dobivaju vrijednosti za  $k_i$  i  $n_i$  za prilike kad djeluje  $M$  odašiljača. Tada se faktori potiskivanja izračunavaju iz izraza:

$$k_i = \frac{T_K}{2MP_{Ki}}, \quad n_i = \frac{T_K}{2MP_{Ni}}. \quad (75)$$

Ako se dobije da je bilo koji faktor  $k_i$  ili  $n_i$  veći od 1, on se izjednačuje s jedinicom, a njegova se pripadna snaga smetnje prebacuje na desnu stranu izraza (67).

Dosadašnja razmatranja osnovaju se na pretpostavci da su snage smetnji poznate, jer se promatrao djelovanje poznatih uređaja i sustava. Kad se, međutim, radi o vrlo mnogo izvora smetnji koji se ne mogu pojedinačno identificirati, opisani postupak nije prikladan. To se posebno odnosi na gradsku području i zračene smetnje. Ne postoji suglasnost o metodama za predviđanje tih smetnji, ali izgleda da su najprihvataljivija dva postupka.

Prvi postupak predviđanja sastoji se u kontrolnim mjerjenjima na karakterističnim mjestima tokom dužeg vremenskog razdoblja. Pomoću tih mjerjenja određuje se porast smetnji, pa se može predviđati budući razvoj razine smetnji.

Drugi postupak polazi od pretpostavke da postoji korelacijska veza između smetnji i nekih parametara okoliša. Pokazuje se, naime, da za područje frekvencija iznad 20 MHz razina smetnji ovisi o gustoći automobilskog prometa, dok za područje frekvencija ispod 20 MHz postoji dobra korelacija između razine smetnji i potrošnje električne energije.

**Mjerne veličine i jedinice.** Pri određivanju smetnji mjeri se napon, struja, električno i magnetsko polje, te snaga.

Snaga se može vrlo točno mjeriti u svim frekvencijskim područjima, ali se ipak dosta rijetko mjeri pri određivanju smetnji. Najčešće se upotrebljava jedinica milivat (mW). Razine snaga (logaritmi omjera snaga) izražavaju se prema određenima snazi, obično prema snazi od 1 mW. Razina snage u decibelima (dB) s obzirom na 1 mW što se obično označava dBm, dobiva se iz snage  $P$  pomoću izraza

$$L(P, 1 \text{ mW}) = 10 \lg(10^3 P), \quad (76)$$

pa je

$$L(P, 1 \text{ mW}) = 30 + 10 \lg P, \quad (77)$$

gdje je  $P$  snaga u vatima. Uz razinu snage treba navesti otpor

na kojemu je izmjerena snaga, koji najčešće iznosi  $50 \Omega$ , ali može iznositi  $75, 150, 300$  i  $600 \Omega$ .

Smetnje izražene naponom najčešće se izražavaju mikrovoltima ( $\mu\text{V}$ ). Razine se iskazuju prema naponu od  $1 \mu\text{V}$ . Razina naponu dobiva se u decibelima pomoću izraza

$$L(U, 1 \mu\text{V}) = 20 \lg(10^6 U) = 120 + 20 \lg U, \quad (78)$$

gdje je  $U$  napon u voltima. Uz napon ili razinu naponu treba navesti i otpor.

Ako se radi o efektivnoj vrijednosti naponu, snaga, napon i otpor vezani su izrazom

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (79)$$

dok su razine snage i naponu u decibelima vezane izrazom

$$L(P, 1 \text{ mW}) = L(U, 1 \mu\text{V}) - \lg R - 90. \quad (80)$$

Za najčešće upotrebljavani otpor od  $50 \Omega$  izraz (80) ima oblik

$$L(P, 1 \text{ mW}) = L(U, 1 \mu\text{V}) - 107, \quad (81)$$

što znači da napon od  $1 \mu\text{V}$  na otporu od  $50 \Omega$  daje razinu snage od  $-107 \text{ dBm}$ .

Kad se smetnje mjeri pomoću struje, obično se upotrebljava jedinica mikroamper ( $\mu\text{A}$ ). Redovito se struja  $I$  mjeri posredno pomoću pada naponu  $U$  na relativno malom otporu  $R$ , pa je

$$I = \frac{U}{R}. \quad (82)$$

Razina struje u decibelima s obzirom na  $1 \mu\text{A}$  dobiva se tada iz izraza

$$L(I, 1 \text{ mA}) = L(U, 1 \mu\text{V}) - 20 \lg R. \quad (83)$$

Kad se smetnja prenosi zračenjem, mjeri se jakosti električnog  $E$  i magnetskog polja  $H$ , a rjeđe gustoća snage  $\varphi$ . Te tri veličine povezane su izrazom

$$\varphi = EH. \quad (84)$$

U slobodnom prostoru jakost električnog polja proporcionalna je jakosti magnetskog polja, a faktor je proporcionalnosti valni otpor  $Z_0 = 120 \pi \Omega = 377 \Omega$  slobodnog prostora, pa je

$$E = Z_0 H. \quad (85)$$

Veza razine gustoće snage i razine električnog polja izraženih u decibelima glasi

$$L(\varphi, 1 \text{ mW/m}^2) = L(U, \mu\text{V/m}) - 115,75, \quad (86)$$

a veza magnetskog i električnog polja

$$L(H, \mu\text{A/m}) = L(E, \mu\text{V/m}) - 51,5. \quad (87)$$

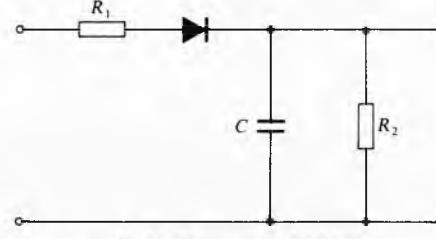
Prijemnici elektromagnetskih smetnji osjetljivi su na smetnje u određenom frekvencijskom području. Prema tome, uz spomenute električne veličine treba navesti i frekvencijsko područje na koje se odnosi ta veličina. Frekvencijsko područje jednoznačno je određeno srednjom frekvencijom i širinom frekvencijskog pojasa.

Budući da prijemnici imaju različite širine frekvencijskih pojasa, vrlo se često smetnje izražavaju kao napon ili jakost električnog polja po širini frekvencijskog pojasa (obično 1 MHz). Npr.  $\mu\text{V/MHz}$  ili  $\mu\text{V/m}$  po MHz.

**Vrste defekcije.** Provode se mjerjenja vršne, kvazivršne efektivne i srednje vrijednosti signala smetnje. Koju od tih veličina treba mjeriti, ovisi o ispitivanom uređaju ili sustavu, a merni sustav mora biti takav da smetnju vrednuje približno jednakom kao ispitivani uređaj ili sustav. Za komunikacijske sustave to je posebno važno, jer treba uzeti u obzir karakteristike ljudskih osjetila i subjektivni doživljaj smetnje. Danas se najčešće mjeri vršna i tzv. kvazivršna vrijednost signala. Za mjerjenje tih vrijednosti detektori se nalaze iza zadnjeg međufrekvencijskog pojačala, imaju jednaku shemu (sl. 27), ali imaju različite vrijednosti otpora i kapaciteta da se dobiju različite vremenske konstante nabijanja i izbijanja.

Detektor ima dvostruku funkciju. On mora odstraniti val nosilac, a zatim vrednovati anvelopu koja odgovara smetnji u

obliku moduliranog signala. Budući da smetnje mogu biti kontinuirane ili u obliku impulsa, a treba ih vrednovati tako da otklon indikatora bude donekle proporcionalan subjektivnom utisku smetnje, ne dolazi u obzir ni mjerjenje efektivne, ni mjerjenje srednje vrijednosti. Dakle, dolazi u obzir mjerjenje samo vršne i kvazivršne vrijednosti. Detektor vršne vrijednosti daje na izlazu napon proporcionalan vršnoj vrijednosti smetnje bez obzira na valni oblik, pa će indikator imati jednak otklon kad je smetnja kontinuirana i kad je smetnja slijed impulsa ako su vršne vrijednosti tih smetnji jednake. Dakako da će se subjektivni utisak tih smetnji razlikovati, što ne pokazuje otklon indikatora.



Sl. 27. Shema spoja detektora

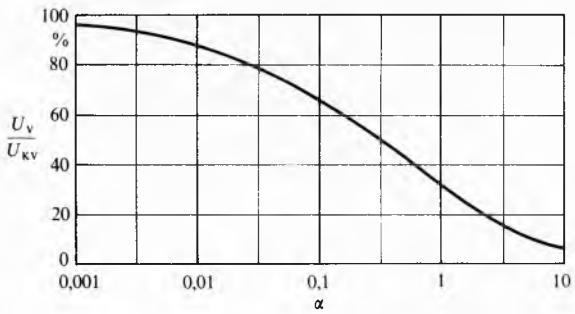
Da bi se uzeo u obzir i subjektivni utisak smetnje, upotrebljava se kvazivršni detektor. Tada impulsne smetnje s većim vremenskim razmakom impulsa, odnosno pojedinačni impulsi daju manji otklon indikatora iako imaju iste vršne vrijednosti. Vrednovanje impulsnih smetnji ovisi i o širini frekvencijskog pojasa prijemnika. Kad pojačalo ima široki pojас, ulazni se impulsi malo smanjuju, a širina se malo povećava, a kad prijemnik ima uski pojас, impuls se bitno smanjuje, a širina se veoma poveća.

**Mjerni prijemnici.** Danas se za nevojne potrebe uglavnom upotrebljavaju prijemnici (sl. 27) prema preporukama CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) sa sljedećim glavnim karakteristikama:

a) za frekvencije od  $0,15 \dots 30 \text{ MHz}$ : širina pojasa prijemnika  $B_6 = 9 \text{ kHz}$ , vremenska konstanta nabijanja  $T_1 = R_1 C = 1 \text{ ms}$ , vremenska konstanta izbijanja  $T_2 = R_2 C = 160 \text{ ms}$ ;

b) za frekvencije od  $25 \dots 1000 \text{ MHz}$ : širina pojasa prijemnika  $B_6 = 120 \text{ kHz}$ , vremenska konstanta nabijanja  $T_1 = R_1 C = 1 \text{ ms}$ , vremenska konstanta izbijanja  $T_2 = R_2 C = 550 \text{ ms}$ .

Širina pojasa  $B_6$  znači širinu pojasa kojoj pad signala na rubovima iznosi  $6 \text{ dB}$  s obzirom na sredinu frekvencijskog pojasa.



Sl. 28. Ovisnost napona vršnog i kvazivršnog detektora o faktoru  $\alpha$

Za vojne potrebe danas se, prema američkim standardima, daje prednost vršnom detektoru koji ima mnogo veći omjer vremenskih konstanta  $T_2/T_1$  nego kvazivršni detektor. Vršna je detekcija, naime, pogodnija za mjerjenje smetnji u sustavima koji obrađuju digitalne signale.

Kako su prijemnici vršnih i kvazivršnih vrijednosti praktički ravnopravni, pita se kakva veza postoji između tih dviju vrijednosti. Ako se pretpostavi da frekvencijska karakteristika ima oblik dvaju parova kritično vezanih titrajnih krugova, veza između kvazivršne i vršne vrijednosti napona može se odrediti iz dijagrama na sl. 28. Na apscisi je veličina  $\alpha$  koja ovisi o parametrima prijemnika prema izrazu

$$\alpha = \frac{T_1 B_6}{4 T_2 f_r}, \quad (88)$$

gdje je  $f_r$  repeticijska frekvencija impulsa.

Za mjerne prijemnike s karakteristikama prema preporukama CISPR veza između vršne i kvazivršne vrijednosti određena je korekcijskim faktorom  $a_{\text{kv}}$  koji je ovisan o repeticijskoj frekvenciji (sl. 29). Korekcijski faktor zapravo je funkcija omjera vršne i kvazivršne vrijednosti prema izrazu

$$a_{\text{kv}} = 20 \lg \frac{U_v}{U_{\text{kv}}}. \quad (89)$$

Osjetljivost mernog prijemnika ovisi o šumu koji nastaje u ulaznim sklopovima. Snaga šuma svedena na ulazne stezaljke dobiva se iz izraza

$$P_{\text{sm}} = 4 \cdot 10^{-21} F_s B, \quad (90)$$

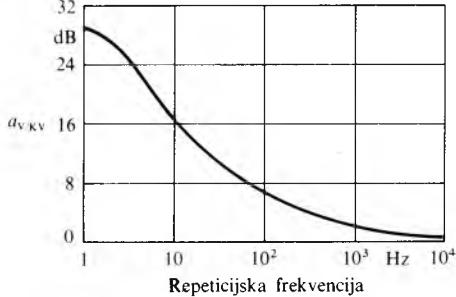
gdje je  $F_s$  faktor šuma prijemnika, a  $B$  širina frekvencijskog pojasa. Omjer vršnog napona signala i efektivnog napona šuma može se odrediti pomoću izraza (59) i (90), pa se dobiva

$$\frac{U_p}{U_{\text{sm,ef}}} = 2\tau A B (4 \cdot 10^{-21} F_s B R)^{-\frac{1}{2}}, \quad (91)$$

gdje je  $R$  ulazni otpor prijemnika. Logaritmiranjem izraza (91) dobiva se omjer razinā vršnog napona signala i efektivnog napona šuma u decibelima

$$L\left(\frac{U_p}{U_{\text{sm,ef}}}\right) = 20 \lg(2\tau A) + 204 - 10 \lg F_s - 10 \lg R + 10 \lg B. \quad (92)$$

Izraz (92) vrijedi za širokopojasne i koherentne impulsne smetnje.



Sl. 29. Omjer vršne i kvazivršne vrijednosti napona mernog prijemnika prema preporukama CISPR za frekvencijsko područje od 0,15...30 MHz

Za nekoherentne smetnje, kad spektralne komponente na susjednim frekvencijama imaju slučajne faze ili istodobno i slučajne amplitude i slučajne faze, egzaktna veličina kojom je karakterizirana smetnja može biti samo prosječna snaga, jer se jedino toplinski efekt može precizno mjeriti. Kako su faze komponenata u spektru slučajne veličine, ukupni se napon na izlazu dobiva iz drugog korijena zbroja kvadrata komponenata. To znači da se, analogno izrazu (59), dobiva

$$U_p = 2\tau A \sqrt{B}, \quad (93)$$

pa je pomoću izraza (90)

$$\frac{U_p}{U_{\text{sm,ef}}} = 2\tau A \sqrt{B} (4 \cdot 10^{-21} F_s B R)^{-\frac{1}{2}}. \quad (94)$$

Tada je omjer razina vršnog napona signala i efektivnog napona šuma

$$L\left(\frac{U_p}{U_{\text{sm,ef}}}\right) = 20 \lg(2\tau A) + 204 - 10 \lg F_s - 10 \lg R. \quad (95)$$

Prema tome, za širokopojasne nekoherentne smetnje osjetljivost se prijemnika ne mijenja sa širinom pojasa.

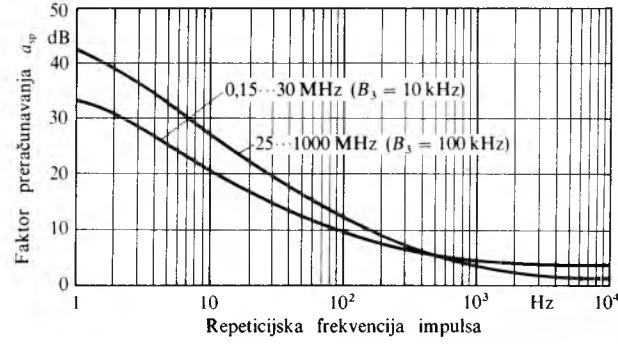
**Spektralni analizatori** rade s vršnim detektorima, a baždani su u efektivnim vrijednostima sinusnog signala, pa oni

ispravno mjere samo kontinuirane sinusne smetnje. Kad se, međutim, spektralnim analizatorima mjeri vršne vrijednosti, a potrebno je prema preporukama CISPR mjeriti kvazivršne vrijednosti, moraju se odrediti korekcijski faktori za impulsne smetnje da bi se utjecaj smetnji mogao neposredno očitavati na ekranu.

Budući da se standardizirane širine pojasa spektralnih analizatora (1, 3, 10, 30, 100, 300, ... kHz) razlikuju od širine pojasa prijemnika prema preporukama CISPR, treba korekcijskom faktoru prema sl. 29 dodati korekciju zbog različite širine pojasa. Širina pojasa spektralnog analizatora odnosi se uvek na pad razine od 3 dB ( $B_3$ ), dok se širina pojasa prijemnika odnosi na pad razine od 6 dB ( $B_6$ ). U spektralnim analizatorima redovito se primjenjuju logaritmička pojačala, pa je  $B_6 = 1,5 B_3$ . Napon koherentnih smetnji proporcionalan je širini pojasa, pa korekcija zbog različitih širina pojasa iznosi

$$b = 20 \lg \frac{B_2}{B_1}. \quad (96)$$

Uz tu korekciju faktor je preračunavanja  $a_{\text{sp}}$  za spektralni analizator kao funkcija repeticijske frekvencije prikazan na sl. 30. Očitanje na analizatoru treba smanjiti za faktor  $a_{\text{sp}}$  da bi se dobila gotovo vršna vrijednost. Ako postoje druge širine pojasa od onih za koje vrijede krivulje na dijagramu na sl. 30, treba uzeti u obzir faktor  $b$  (96).



Sl. 30. Faktor  $a_{\text{sp}}$  spektralnog analizatora

Spektralni analizator radi u širokom pojusu, pa postoji opasnost od preopterećenja. Impulsni signal može toliko preoptereti analizator da nastaju velike pogreške u mjerenu i da se to ne primijeti, jer je signal na ekranu mnogo manji od maksimalnoga. Da bi se to spriječilo, vršni napon ne smije biti veći od 0,3...0,5 V, što ovisi o tipu analizatora.

**Antene** se upotrebljavaju uz merni prijemnik za mjerenu jakost polja. Da bi se mogla odrediti jakost polja, potrebno je poznavati antenski faktor  $A_F$  koji povezuje jakost polja  $E$  i napon  $U$  na izlazu antene prema izrazu

$$E = A_F U. \quad (97)$$

Redovito se antenski faktor izražava u decibelima, pa je tada

$$A_F = 20 \lg \frac{L(E, \mu\text{V/m})}{L(U, \mu\text{V})}. \quad (98)$$

Antenski faktor može se odrediti teorijski. Efektivna površina antene dobiva se iz relacije

$$A_{\text{ef}} = \frac{\lambda^2}{4\pi}, \quad (99)$$

gdje je  $\lambda$  valna duljina, a  $D$  usmjerenostr antene. Snaga koju na svojim stezaljkama predaje antena prijemniku kad je prilagođena za maksimalni prijenos snage iznosi

$$W = P_r A_{\text{ef}} k = \frac{E^2}{120} A_{\text{ef}} k, \quad (100)$$

gdje je  $P_r$  gustoća snage na udaljenosti  $r$  od izvora, a  $k$  faktor iskoristenja snage. Snaga koju antena daje na svojim stezaljkama iznosi

$$W = \frac{U^2}{R}. \quad (101)$$

Nakon izjednačenja izraza (100) i (101), a uzimajući u obzir relaciju (97), te da je dobitak antene

$$g = kD, \quad (102)$$

dobiva se da je

$$A_F = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \left( \frac{480}{gR} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (103)$$

Uz  $R = 50 \Omega$  izraz (103) ima oblik

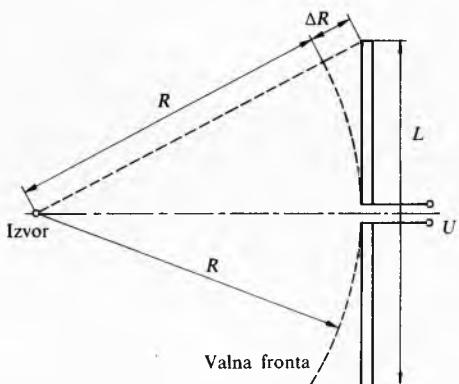
$$A_F = \frac{9,73}{\lambda \sqrt{g}}. \quad (104)$$

Ako se valna duljina  $\lambda$  zamjeni frekvencijom, antenski je faktor u decibelima

$$A_F = -29,78 + 20 \lg f - g, \quad (105)$$

gdje je  $f$  frekvencija u megahercima, a  $g$  dobitak antene u decibelima.

Kad se mjeri jakost polja izvora zračenja, izvor mora biti dovoljno daleko od antene. Val koji se širi od izvora ima oblik kugle, ali se na dovoljno velikoj udaljenosti može pretpostaviti da je fronta vala ravnina (planarni val). Dobitak antene uvijek se mjeri uz pretpostavku da postoji planarni val. Ako taj uvjet nije ispunjen, pojavljuje se pogreška mjerenja. Zbog toga je potrebno utvrditi minimalnu udaljenost antene od izvora zračenja da bi pogreška bila manja od dopuštene.



Sl. 31. Skica za određivanje minimalne udaljenosti antene od točkastog izvora

Da bi se odredila spomenuta minimalna udaljenost, razmotrit će se antena u obliku dipola duljine  $L$ . Napon  $U$  na stezalkama dipola nastaje djelovanjem električnog polja na cijelu duljinu dipola, pa je taj napon zbroj induciranih elementarnih naponova uzduž cijelog dipola. Kad je val planaran, svi su elementarni naponi u fazi. Ako je val kuglast, maksimalni fazni pomak između središnjeg i rubnog elementarnog napona ovisi o vrijednosti  $\Delta R$  (sl. 31) izraženoj u dijelovima valne duljine. Za smanjenje dobitka antene za 5% vrijednost  $\Delta R$  iznosi  $1/8$  valne duljine ( $R = \lambda/8$ ). Iz pravokutnog trokuta na sl. 31 dobiva se

$$R^2 + \left( \frac{L}{2} \right)^2 = (R + \Delta R)^2, \quad (106)$$

gdje je  $R$  udaljenost izvora do središta antene. Za  $\Delta R = \lambda/8$  iz (106) dobiva se minimalna udaljenost antene od izvora zračenja, pa je

$$R_{\min} = \frac{L^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{16}. \quad (107)$$

Ako je  $L \gg \lambda$ , tada je

$$R_{\min} = \frac{L^2}{\lambda}. \quad (108)$$

Za poluvalni dipol ( $L = \lambda/2$ ) minimalna udaljenost iznosi

$$R_{\min} = \frac{3}{16} \lambda. \quad (109)$$

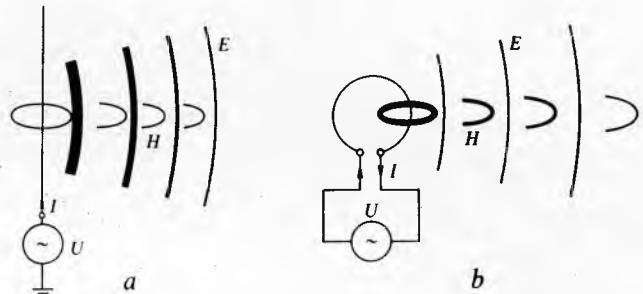
Ako je duljina antene mnogo manja od valne duljine, fronta vala može se uvijek smatrati ravnom.

Međusobni odnosi električnog i magnetskog polja ovise o udaljenosti od izvora. Na velikoj udaljenosti ta su polja istofazna, ali su u prostoru međusobno okomita i nalaze se u ravnini okomitoj na smjer širenja, pa tada vrijedi relacija

$$\frac{E}{H} = Z_0 = 120 \pi \Omega = 377 \Omega, \quad (110)$$

gdje je  $Z_0$  valna impedancija.

Za manje udaljenosti treba razlikovati dva tipa izvora zračenja.



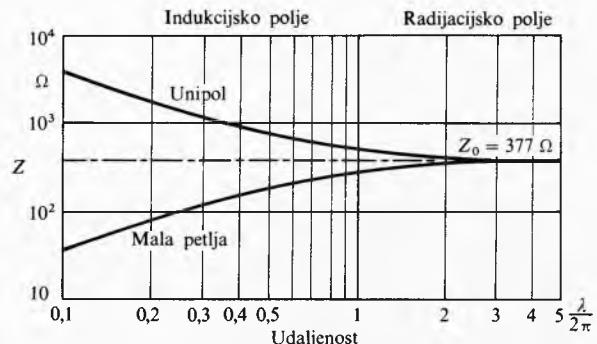
Sl. 32. Izvori elektromagnetskih zračenja s električnim ( $E$ ) i magnetskim ( $H$ ) poljem. a) unipol, b) mala petlja

Prvi je tip izvora zračenja tzv. unipol kojemu je polovica dipola iznad vodljive plohe (sl. 32a). U njemu je struja malena, a napon visok, pa je impedancija u blizini izvora velika, veća od  $377 \Omega$ . U izrazu za jakost električnog polja dominantan je član  $\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^3$ , a u izrazu za magnetsko polje član  $\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2$ . Zbog toga se električno polje brže smanjuje s udaljenosću od magnetskog polja, pa valna impedancija opada i asimptotski se približava vrijednosti od  $377 \Omega$ . Na udaljenosti  $r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$  valna impedancija iznosi

$$Z = \frac{\lambda}{2\pi r} Z_0. \quad (111)$$

To je tzv. područje inducijskog polja, a granica mu je na udaljenosti  $r = \frac{\lambda}{2\pi}$ , dakle na približno šestini valne duljine.

Drugi je tip izvora mala petlja (sl. 32b) s malom impedancijom (mali napon, velika struja). U izrazu za električno polje dominantan je član  $\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2$ , a u izrazu za magnetsko polje član  $\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^3$ . Valna je impedancija u blizini izvora malena



Sl. 33. Ovisnost valne impedancije  $Z$  o udaljenosti od izvora zračenja

i iznosi

$$Z = \frac{2\pi r}{\lambda} Z_0, \quad (112)$$

za  $r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$ . S povećanjem udaljenosti raste valna impedancija i asimptotski se približava vrijednosti od 377 Ω.

Na sl. 33 vidi se ovisnost valne impedancije o udaljenosti od izvora zračenja za unipol i malu petlju.

**Mjerni prostori** treba da izoliraju ispitivani uredaj ili sustav s pripadnim mjernim instrumentima od elektromagnetskih utjecaja okoliša. Postoje otvoreni i zatvoreni mjerni prostori.

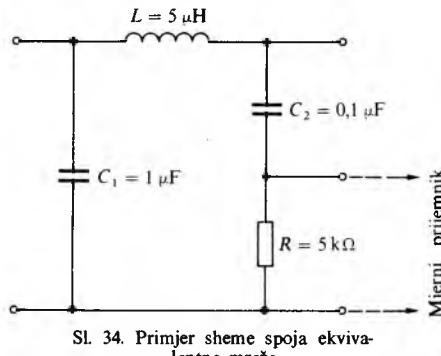
U otvorenim prostorima mjere se veliki uredaji, zračenja u dalekoj zoni (v. Elektronika, uredaji, Antene, TE 4, str. 603) ili smetnje među sustavima. Na otvorenim mjernim prostorima teren mora biti slobodan (bez zgrada, metalnih konstrukcija) unutar kuta  $\pm 45^\circ$ , ili unutar dvostrukog kuta usmjerenošto oko smjera glavnog zračenja. Kad se ispituje elektromagnetska kompatibilnost između sustava (pogotovo između vojnih sustava), svi se uredaji postavljaju na njihove stvarne lokacije. Tada treba paziti da zračenja i vrlo dalekih izvora ne iskrive rezultate mjerjenja. Zbog toga je povoljno mjerna mjesta postaviti među prirodnim preprekama (brežuljcima, šumama i sl.). Smetnje okoliša moraju biti barem 6 dB ispod razine koja je maksimalno dopuštena za smetnje među sustavima. Ispitivanja su u otvorenim prostorima skupa i ona se rijetko primjenjuju.

Zatvoreni mjerni prostori nalaze se redovito unutar tvornica gdje su razine smetnji vrlo visoke. Zbog toga se takvi prostori moraju izolirati od elektromagnetskih utjecaja. Danas se bez teškoća postiže gušenje od 100 dB za frekvencijsko područje od pet dekada, počevši od 10 kHz pa na više. To se postiže oklapanjem mjernog prostora metalnim pločama. Ako je potrebna visoka izolacija i od relativno niskih frekvencija, materijal oklopa mora imati visoku permeabilnost.

Da bi se spriječio prijenos smetnji preko električne mreže, u svaku fazu treba ugraditi filter koji prigušuje vodljive smetnje. Osim toga, treba ispitivani uredaj i instrumentarij priključiti na različite faze da bi se što moguće više smanjilo međusobno djelovanje ispitivanog uredaja i mjernih instrumenata.

Kad se u zatvorenom prostoru mjere smetnje zbog zračenja, treba unutrašnje strane zidova obložiti materijalom koji apsorbira elektromagnetsko zračenje da bi se spriječila refleksija od zidova.

**Senzori i injektori vodljivih smetnji.** Kad se mjeri na energetskim mrežama, potrebno je ispitivani uredaj izolirati od smetnji koje se pojavljuju u tim mrežama. To se postiže spajanjem kondenzatora između faznog i nultog vodiča, koji kratko spaja signale viših frekvencija, a za struju frekvencije 50 Hz predstavlja veliku impedanciju.



Sl. 34. Primjer sheme spoja ekvivalentne mreže

Ekvivalentna mreža (sl. 34) služi za mjerjenje vodljivih smetnji koje proizvodi ispitivani uredaj i koje daje u energetsku mrežu. Ona se upotrebljava da bi se osigurali uvijek jednakci uvjeti mjerjenja i da bi ispitivani uredaj bio na mreži zaključen točno definiranom impedancijom.

Da bi se odredila osjetljivost uredaja na vodljive smetnje iz energetske mreže, upotrebljavaju se injektori vodljivih

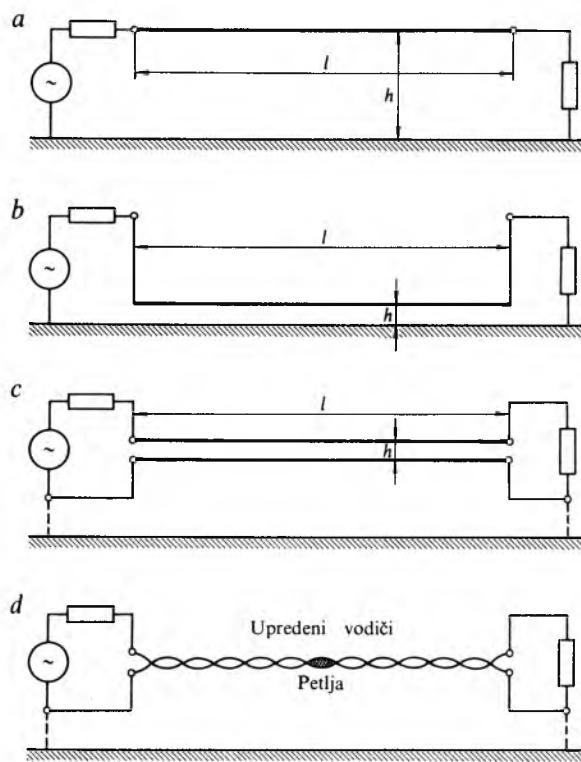
smetnji. To su specijalni transformatori s jezgrom koja ne postaje zasićena kad kroz transformatorske namote teku velike struje i pad napona na transformatoru je malen.

**Mjerni izvori.** Za mjerjenje osjetljivosti na smetnje nekog uredaja ili sustava upotrebljavaju se osim oscilatora (eventualno s dodatnim pojačalima) i generatori impuls. Takvi generatori mogu proizvoditi impulse koji traju manje od jedne nanosekunde pa do nekoliko mikrosekunda. Nekim generatorima može se impuls sinhronizirati izvana, pa se može ubaciti u energetsku mrežu u bilo kojem položaju naponskog vala frekvencije 50 Hz. U nesinhronom radu generatori mogu dati i do 1000 impulsa u sekundi. Postoje i generatori impuls a i do napona od 500 V.

Osim za mjerjenje osjetljivosti, generatori impuls a upotrebljavaju se za baždarenje prijemnika do frekvencija na kojima generator impuls a još ima konstantan spektar.

**Postupci za potiskivanje smetnji.** Potiskivanje smetnji provodi se redukcijom sprega između vodiča unutar uredaja, ili između kabela koji povezuje dijelove uredaja ili sustava. Važna je komponenta za smanjenje smetnji oklanjanje dijelova uredaja ili cijelih sustava. Dobro uzemljenje potreban je preduvjet za dobru elektromagnetsku kompatibilnost. Budući da se praktički svi uredaji ili sustavi napajaju iz energetske mreže preko koje se lako prenose vodljive smetnje, pravilno odabrani filtri za odvajanje od mreže važan su faktor u potiskivanju smetnji.

Kao primjer mogućnosti potiskivanja smetnji razmotrit će se spoj između generatora i trošila (otpora). Moguće izvedbe spoja vide se na sl. 35. Najveća elektromagnetska veza ostvaruje se spojem prikazanim na sl. 35a, jer je tada površina petlje ( $lh$ ) najveća. Površina se petlje smanjuje, a time se smanjuje i elektromagnetska veza, ako se vodič postavi neposredno iznad vodljive površine (sl. 35b). Još je povoljnije ako se kao povratni vodič upotrijebi izolirani vodič umjesto vodljive plohe, jer se tada izbjegava veza između dva vodiča preko međuimpedancije koju predstavlja vodljiva ploha zbog konačne vodljivosti. Najpovoljnije je kad se oba vodiča upredu (sl. 35d), jer se tada napon inducirani zbog magnetske veze u susjednim petljama praktički poništava. Kad se ne upotrebljava vodljiva ploha, kao povratni vodič (sl. 35c i d), strujni krug treba uzemliti na jednom od krajeva.



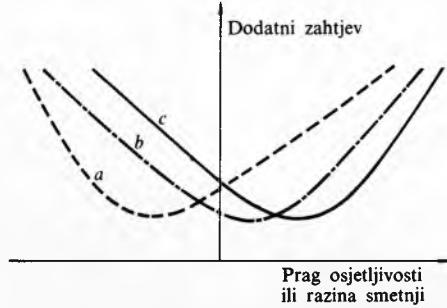
Sl. 35. Mogućnosti spajanja generatora i trošila

Za više frekvencije upredeni se vodiči stavljuju u oklop (oklopljeni kabeli). Tada oklop mora biti spojen s vodljivom plohom na oba kraja. Ako je, međutim, duljina oklopog kabela velika s obzirom na valnu duljinu, mora se oklop galvanski spojiti s vodljivom plohom na razmacima koji nisu veći od osmine valne duljine.

### ELEKTROMAGNETSKA KOMPATIBILNOST SUSTAVA

**Mogućnost realizacije.** Kad se razmatra elektromagnetska kompatibilnost, treba razlikovati kompatibilnost unutar sustava od kompatibilnosti s okolišem.

Ako ne postoji kompatibilnost unutar sustava, sustav ne može uopće raditi, ili radi sa smanjenom kvalitetom. Može se zamisliti da je kompatibilnost unutar sustava postignuta potpunim potiskivanjem smetnji iz svih podsustava. Tada prag osjetljivosti svakog od sustava može imati bilo koju nisku vrijednost. Nasuprot tome, moguće je zamisliti da je prag osjetljivosti svih podsustava vrlo visok, pa je moguće ostvariti kompatibilnost uz vrlo visoke razine smetnji. To su dva ekstrema, pa je očito da postoji optimum koji ovisi o nekom dodatnom zahtjevu (masa, obujam, cijena, pouzdanost). Dakako da se optimumi uz različite dodatne zahtjeve ne moraju ostvariti uz jednaku prag osjetljivosti ili jednaku razinu smetnji (sl. 36).



Sl. 36. Ovisnost dodatnih zahtjeva o pragu osjetljivosti, odnosno o razini smetnji. Dodatni zahtjevi: a) prostor, b) masa, c) cijena

Kad se promatra elektromagnetska kompatibilnost s okolišem, treba razlikovati kompatibilnost s poznatim i s nepoznatim okolišem. Kao poznati okoliš smatraju se drugi sustavi s kojima promatrani sustav trajno ili povremeno radi. Npr. brodski uređaj trajno radi s ostalim uređajima na brodu, a povremeno s uređajima u luci. Nepoznati okoliš čine drugi sustavi koji se slučajno mogu naći u blizini promatranog sustava. Kompatibilnost s takvim sustavima može se odrediti samo s određenom vjerojatnošću.

**Ocjena kompatibilnosti sustava.** Poznato je da i najkvalitetniji uređaji mogu biti ometani ili mogu ometati druge, dok i najslabiji uređaji mogu raditi dobro u područjima gdje je elektromagnetsko onečišćenje slabo. Međutim, ako su uređaji dobri s gledišta kompatibilnosti, rjeđe će se pojavljivati smetnje, pa je moguće smjestiti više uređaja na ograničenom prostoru.

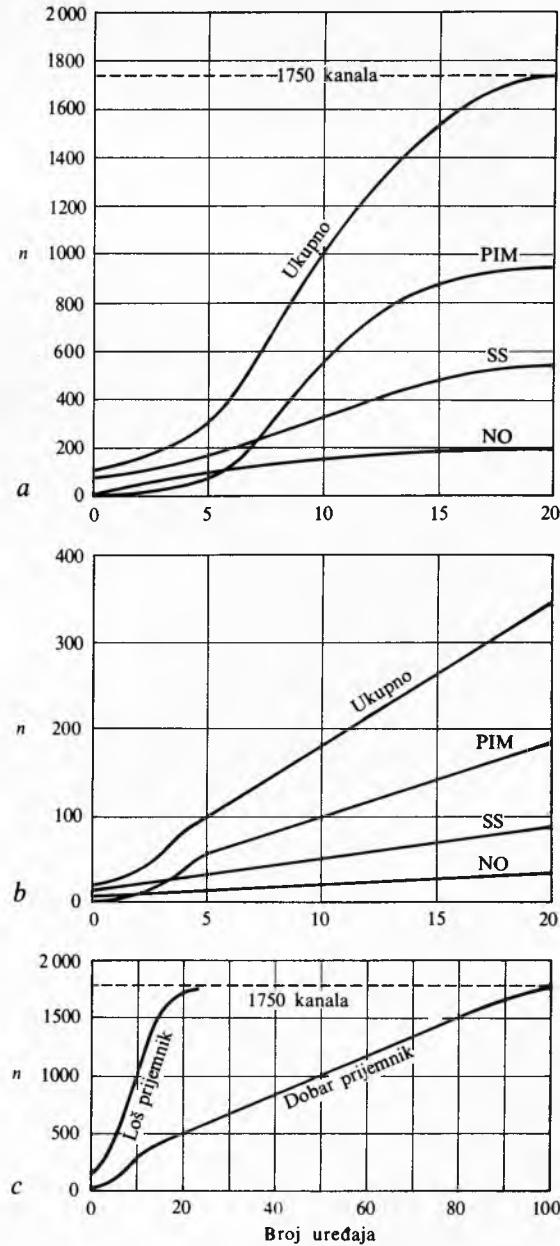
Postizanje elektromagnetske kompatibilnosti vezano je s većom proizvodnom cijenom. Obično su za dobar uređaj u smislu kompatibilnosti potrebna veća početna ulaganja, ali ukupni troškovi obično nisu veći. Kad je, naime, proizveden uređaj s malim stupnjem kompatibilnosti, često su potrebne naknadne preinake, a troškovi preinaka redovito su veći od razlike u proizvodnim troškovima za dobar ili lošiji uređaj s gledišta kompatibilnosti.

Pojam dobrog uređaja treba razlikovati od njegove dobrote u smislu kompatibilnosti. Loš uređaj u smislu kompatibilnosti može, naime, biti i dobar s obzirom na svoje ostale karakteristike.

Zbog svega toga pokušava se kompatibilnost iskazati brojčano kako bi se dobilo objektivno mjerilo kvalitete.

Za ilustraciju takvih nastojanja razmotrit će se kompatibilnost prijemnika i odašiljača, uz pretpostavku da su uređaji smješteni jedan pored drugoga i da rade istodobno. To znači

da su pretpostavljeni najnepovoljniji prostorni i vremenski faktori. Kao mjerilo kvalitete, odnosno kompatibilnosti, može se uzeti broj kanala koji su ometani u radu. Za određivanje broja ometanih kanala ustanovljeno je da je dovoljno promatrati tri uzroka ometanja (parametra) rada odašiljača: a) smetnje na susjednim frekvencijama (SS), b) odziv na neželjenim frekvencijama (NO) i c) produkti intermodulacije trećeg reda (PIM), te tri uzroka ometanja (parametra) rada prijemnika: a) šum nosioca (SN), neželjena zračenja (NZ) i zračenja zbog intermodulacije trećeg reda (OIM). Za svaki od spomenutih ometanja određuje se broj ometanih kanala prema broju uređaja od kojih svaki radi na svojem kanalu. Na sl. 37 prikazan je rezultat takva ispitivanja za loš prijemnik (sl. 37a) i za dobar prijemnik (sl. 37b). Na sl. 37c prikazan je ukupni broj ometanih kanala za dobar i loš prijemnik. Vidi se da će upotrebo lošeg uređaja biti ometani svi kanali (ima 1750 kanala) ako radi samo 20 primopredajnika, dok će pri upotrebi dobrog uređaja moći raditi 100 primopredajnika uz jednak ometanje. Kao faktor vrednovanja može se odabrati minimalni broj uređaja koji ometaju sve raspoložive kanale. Takav je postupak



Sl. 37. Ovisnost broja ometanih kanala o broju uređaja u radu. a) loš prijemnik, b) dobar prijemnik, c) usporedba lošeg i dobrog prijemnika

vrlo složen i kad se provodi eksperimentalno i kad se proračunava na elektroničkom računalu.

Kad se, međutim, žele samo grubo svrstati uređaji u nekoliko grupa radi usporedbe kvalitete, moguće je primijeniti približni postupak. Uz današnje stanje razvoja tehnologije poznata je donja i gornja granica svakog od parametara uređaja koji se uzimaju u obzir pri ometanju. Svaki se parametar budi brojem  $B$  od 0...100. Budući da parametri različito utječu na broj ometanih kanala, treba bodove svakog parametra vrednovati pomoću koeficijenata vrijednosti  $a$ . Ukupan broj bodova za prijemnik ( $B_p$ ), za odašiljač ( $B_o$ ) i cijeli sustav ( $B$ ) određuje se iz izraza:

$$B_p = a_{SS} B_{SS} + a_{NO} B_{NO} + a_{PIM} B_{PIM}, \quad (113)$$

$$B_o = a_{SN} B_{SN} + a_{NZ} B_{NZ} + a_{OIM} B_{OIM}, \quad (114)$$

$$B = a_p B_p + a_o B_o, \quad (115)$$

dok je

$$a_{SS} + a_{NO} + a_{PIM} = 1, \quad (116)$$

$$a_{SN} + a_{NZ} + a_{OIM} = 1, \quad (117)$$

$$a_p + a_o = 1, \quad (118)$$

gdje je  $B$  s pripadnim indeksom parametra broj bodova za prijemnik, odnosno odašiljač, a  $a$  koeficijent vrijednosti za pojedini parametar. Iz podataka na sl. 37 vidi se, bez obzira da li se radi o lošem ili dobrom uređaju, da su koeficijenti vrijednosti

$$a_{SS} = 0,3, \quad a_{NO} = 0,1, \quad a_{PIM} = 0,6.$$

Analogno se mogu odrediti i ostali koeficijenti vrijednosti.

Tako određeni broj bodova omogućuje određivanje redoslijeda uređaja s obzirom na elektroenergetsku kompatibilnost.

LIT.: W. C. Hart, E. W. Malone, Lightning and Lightning Protection. Encyclopedia Series, Vol. IV, Don White Consultants, Inc., Gainesville 1979. — J. R. Herman, Electromagnetic Ambients and Man-made Noise. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1979. — D. R. J. White, Electromagnetic Shielding Materials and Performance. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1979. — D. M. Jansky, Spectrum Management Techniques. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1980. — D. R. J. White, EMI Control in the Design of Printed Circuit Boards and Backplanes. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1980. — R. V. Carstensen, EMI Control in Boats and Ships. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1981. — B. E. Keiser, EMI Control in Aerospace Systems. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1981. — E. R. Freeman, Interference Suppression Techniques for Microwave Antennas and Transmitters. Artech House, Inc., 1982. — M. F. Gord, Electromagnetic Interference Control in Medical Electronics. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1982. — H. M. Schlicke, Electromagnetic Compossibility. Marcel Dekker AG Verlag, Basel 1982. — M. Mardiguan, Interference Control in Computers and Microprocessor-based Equipment. Don White Consultants, Inc., Gainesville 1984.

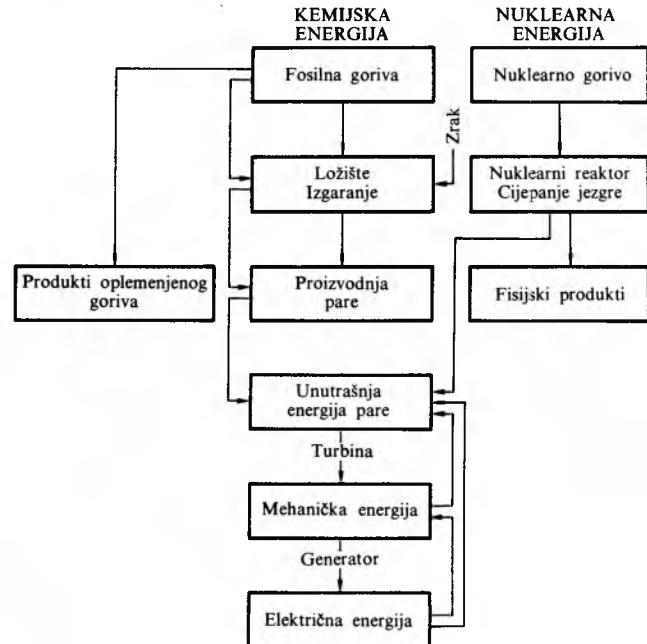
E. Zentner

**PARNI KOTAO (GENERATOR PARE)**, dio energetskog, industrijskog ili toplinskog postrojenja u kojemu se toplina oslobođena izgaranjem goriva predaje vodi te je pretvara u vodenu paru koja na izlazu iz parnog kotla ima određeni tlak i temperaturu. Riječ je, dakle, o izmjenjivaču topline koji je u početku razviti bio grijana posuda djelomično napunjena vodom, pa odatle potječe naziv *parni kotao*. Danas se sve više upotrebljava ispravniji naziv: *generator pare*.

Problemi i zadaci parnog kotla u sklopu energetskih, industrijskih i toplinskih postrojenja čine potpuno određeno i odvojeno područje. Još uvjek ne postoje sve potrebne i provjene teorijske osnove na području strujanja, prolaza topline, čvrstoće specijalnih materijala, poznavanja goriva itd., pa se parni kotlovi grade na temelju mnogih iskustvenih podataka. Zbog toga su se razvili brojni tipovi različitih parnih kotlova, različitih učina (kapaciteta) i različitih karakteristika pare (parametara pare).

Brzi razvoj parnog kotla posljednjih desetljeća dao je mnoga rješenja koja nisu do kraja ispitana. Ta rješenja stvaraju niz novih pitanja na području prolaza topline, strujanja itd.

Povećane potrebe za električnom energijom i težnje za što ekonomičnijim energetskim postrojenjem uvjetuju gradnju parnog kotla većih i velikih učina s istodobnim povećanjem karakteristika proizvedene vodene pare. U osnovnoj shemi (sl. 1) vidi se koje mjesto zauzima parni kotao pri pretvorbi energije goriva u električnu energiju.



Sl. 1. Prikaz pretvorbe energije goriva u električnu energiju

Osnovne karakteristike parnog kotla dane su sa tri glavna parametra koji se pokušavaju normirati, odnosno ukloniti u određene granice. Ti su parametri: učin (kapacitet)  $D$  parnog kotla, tlak  $p$  u parnom kotlu i temperatura pregrijane pare  $t_{pr}$ . Osim tih veličina bitna je karakteristika korisnost parnog kotla  $\eta_{gp}$ .

Pisani radovi Herona iz Aleksandrije (oko -150. god.) pokazuju da su ljudi već u starom vijeku iskoristavali vodenu paru da pokreće mehaničke igračke i slične male naprave, kao što je npr. bila Heronova kugla. Upotrebljavala se zasićena niskotlačna para proizvedena u običnim zatvorenim posudama, koje se, dakle, mogu smatrati pretečama parnog kotla.

Tokom čitavog srednjeg vijeka nitko se nije bavio parom kao radnim medijem, pa su se tek za vrijeme renesanse ponovo pokušali pronaći načini na koje bi se ekspanzijom pare obavljao koristan rad. Talijanski graditelj G. Branca (1571–1640) opisao je malu apotekarsku miješalnicu pogonjenu parom; francuski arhitekt Salomon de Claus (1576–1626) radio je na razvoju orgulja na paru; u Engleskoj se Edward Somerset, markiz od Worcester-a (1601–1667), među ostalim pronalascima, bavio i nekom vrstom jednostavnog parnog stroja itd., ali svi su se ti prijedlozi i pronalasci zasnivali na niskotlačnoj pari proizvedenoj u običnim tlačnim posudama i nisu imali zapaženijega praktičnog uspjeha.

Francuski fizičar D. Papin (1647–1714) prvi je konstruirao veću tlačnu posudu, sličnu parnom kotlu, koja je proizvodila paru nešto višeg tlaka, a bila je dio Papinova parnog stroja namijenjenog za pogon broda. Iako je imao sigurnosni ventil, taj je kotao pri ispitivanju eksplodirao, pa je Papin napustio dalji rad na razvoju parnih postrojenja. U isto je vrijeme u Engleskoj mehaničar T. Savery (1650–1715) sagradio rudničku pumpu na pogon parom proizvedenom u jednostavnom parnom kotlu. Savaryjeva pumpa imala je dostu nedostatak, pa ju je usavršio T. Newcomen (1663–1729), a za proizvodnju pere izgradio je kotao s rešetkom (sl. 2).

Prvi pravi parni kotao konstruirao je 1769. god. engleski inženjer J. Watt (1736–1819). Za razliku od ranijih tlačnih posuda i parnih kotlova koji su bili neprikladna oblika i građeni od neprikladnih materijala, s parnim cilindrom postavljenim neposredno na kotao, Watt je svoj parni kotao napravio od kovanog željeza sa željeznom plamenom cijevi i potpuno ga odijelio od parnog stroja (sl. 3). Prvi Wattov parni kotao proizvodio je paru tlaka od ~0,035 MPa, koja je služila za pogon parnog stroja.

S razvojem parnih strojeva razvijali su se i parni kotlovi, pa su prvi godina XIX.-već proizvodili paru tlaka do 0,175 MPa. U Engleskoj je 1800. god. graditelj lokomotive R. Trevithick (1771–1833) konstruirao vrlo ekonomičan visokotlačni plamenocijevni kotao, a 1804. god. Amerikanac J. Stevens (1749–1838) izumio je vodocijevni kotao s tankim cijevima koje su jednim krajem bile spojene sa spremnikom vode. Oko 1820. god. pojavio se