

VAJA 15. - MERJENJE POGOSTNOSTI NAPAK V RADIJSKI ZVEZI

=====

1. Odpornost radijske zveze na šum in motnje

-----

Odpornost radijske zveze na šum in motnje zavisi od vrste uporabljenega kodiranja in modulacije, kot tudi od tehnične izvedbe uporabljenih oddajnikov in sprejemnikov. V slučaju analognega prenosa je merilo kvalitete zveze razpoložljivo razmerje signal/šum in popačenje željenega izhodnega signala. Oboje lahko izboljšamo s primerno predelavo signala v oddajniku in sprejemniku, na račun povečane pasovne širine  $B$  visokofrekvenčnega signala.

V slučaju številskega (digitalnega) prenosa nas zanima predvsem pogostnost pojavljanja napak BER (Bit Error Rate). Teorija (Shannon) nam pri tem daje spodnjo mejo moči oddajnika za željeno zmogljivost, kot je to prikazano na sliki 1. Shannon-ove meje praktično ne moremo doseči, saj zahteva neskončno komplicirano kodiranje in obdelavo signalov.

S primernim kodiranjem, naprimer NASA deep-space standard, ki vsebuje konvolucijsko in blokovno (Reed-Solomon) kodiranje, lahko glede na zahtevano mejo za pogostnost pojavljanja napak dosežemo prihranek moči oddajnika tudi za faktor do 8dB v primerjavi z nekodiranim PSK (BPSK ali QPSK) prenosom. Bolj pogost pojav je poslabšanje kvalitete zveze zaradi popačenj v oddajniku in sprejemniku. Že samo omejevanje signala v sprejemniku oziroma trdo odločanje v demodulatorju prinese izgubo 2dB glede na idealni slučaj.

Resnični PSK sprejemnik zato ne more doseči niti krivulje pogostnosti napak za idealni PSK demodulator, kot je to prikazano na sliki 2. Krivulja resničnega sprejemnika se približa idealni krivulji na par dB. Merilo za kvaliteto demodulatorja je torej odstopanje izmerjene krivulje BER od idealne krivulje. V nekaterih slučajih (popačenja, motnje) kljub naraščajoči jakosti vhodnega signala pogostnost pojavljanja napak nikoli ne upade pod določeno mejo.

Izmerjena krivulja pogostnosti napak kot funkcija vhodnega razmerja signal/šum pri nekodiranem prenosu zato predstavlja merilo za kvaliteto demodulatorja. Pogostnost napak za idealni BPSK demodulator je prikazana na sliki 3. Pri praktičnih meritvah moramo biti predvsem pozorni na to, da razen BER pravilno izmerimo tudi vhodno razmerje signal/šum. Predvsem pri šumu moramo paziti na to, da računamo s pravilno, efektivno pasovno širino  $B$ .

Povezava med efektivno pasovno širino  $B$  in obliko frekvenčnega spektra signala je prikazana na sliki 4. Ne glede na obliko ovojnice (konstantna ovojnica ali oblikovana ovojnica) ostaja efektivna pasovna širina  $B$  konstantna, saj je odvisna le od bitne hitrosti  $R$ . V slučaju dvofazne PSK (BPSK) modulacije je  $B$  kar enak  $R$ .

Meritev pogostnosti napak (BER) v digitalni radijski zvezi je prikazana na sliki 5. Zvezo preizkusimo tako, da skoznjo pošljemo primerno dolgo sporočilo s skrbno izbrano vsebino. Matematična rešitev naloge iskanja primerne

preizkusnega sporočila je zaporedje maksimalne dolžine, ki ga proizvaja pomikalni register z linearno povratno vezavo. V slučaju binarnega pomikalnega registra dajo linearno povratno vezavo EXOR logična vrata, dolžina maksimalnega zaporedja pa znaša  $(2^{*}N)-1$ , kjer je N število stopenj pomikalnega registra.

Ker delovanje pomikalnega registra z linearno povratno vezavo ustreza algoritmu verižnega deljenja polinomov z binarnimi koeficienti, napravo imenujemo polinomski generator ter jo popolnoma opišemo s pripadajočim polinomom. Maksimalno zaporedje dajo le nerazcepni polinomi in še to ne vsi, zato je treba povratno vezavo pomikalnega registra skrbno izbrati. Matematična odlika maksimalnega zaporedja je v tem, da vsebuje prav vse možne bitne vzorce dolžine enake dolžini registra (razen stanja samih ničel), kar hkrati daje frekvenčni spekter s samimi enako visokimi spektralnimi črtami.

S poskusnim zaporedjem krmilimo oddajnik, radijska zveza pa vnaša slabljenje in različna popačenja. Razen željenega signala dobi sprejemnik na vhod tudi šum in motnje. Grobe napake v zvezi opazimo že iz "očesnega vzorca" (eye pattern) na osciloskopu. Osciloskop prožimo z regeneriranim taktom, kar v slučaju radijske zveze opravlja že sam sprejemnik.

Na drugem koncu merjene zveze preverjamo sprejeto zaporedje z vnaprej znanim vzorcem. V ta namen potrebujemo povsem enak generator zaporedja s pomikalnim registrom, ki ga moramo sinhronizirati z enakim registrom v oddajniku. Najenostavnejša rešitev je uporaba polinomskega delilca, ki se sam sinhronizira na vstopne podatke. Na izhodu polinomskega delilca sicer dobimo za vsako napako tri ali več impulzov, glede na število členov polinoma (odcepov pomikalnega registra).

Pri simetrični BPSK (QPSK) modulaciji brez preostalega nosilca moramo upoštevati tudi nedoločenost faze v sprejemniku. Pri simetrični BPSK modulaciji se lahko vezje regeneracije nosilca zaklene na pravilno fazo oziroma na 180 stopinj zamaknjeno fazo. Pri simetrični QPSK so možni fazni odmiki 0, 90, 180 in 270 stopinj.

Kodiranje signala mora zato upoštevati nedoločenost faze v sprejemniku. Običajno uporabljamo diferencialno kodiranje, da so sprejeti biti enoveljavno določeni. Pri meritvi pogostnosti napak moramo seveda upoštevati vse možne faze sprejemnika kot tudi nove vrste napak, ki se pojavijo takrat, ko regeneracija nosilca preskoči na drugačno fazo (carrier-cycle slip).

## 2. Seznam potrebnih pripomočkov

-----  
Za izvedbo vaje potrebujemo:

- (1) Merilni izvor BPSK signala (1276.8MHz, 1.2288Mbit/s) z vgrajenim polinomskim generatorjem in napajalnikom.
- (2) Nastavljivi, kalibrirani 50-ohmski VF slabilec.
- (3) Izvor šuma s plazovno diodo in ustreznim napajalnikom.
- (4) -20dB smerni sklopnik za 1.3GHz.
- (5) -6dB uporovni delilnik.
- (6) Spektralni analizator s pripomočki (nizkoprepustno sito, nizkošumni predojačevalnik, napajalniki).
- (7) Merilni BPSK sprejemnik z vgrajeno regeneracijo takta, polinomskim delilcem in napajalnikom.
- (8) Osciloskop z možnostjo zunanjega proženja.

- (9) Digitalni števec (frekvencmeter) za 50MHz.
  - (10) Zvočnik (z vgrajenim nizkofrekvenčnim ojačevalnikom).
  - (11) Kable in konektorje za vse povezave.
- Razporeditev in povezava merilnih pripomočkov je prikazana na sliki 6.

### 3. Obrazložitev in opis poteka vaje

-----

Meritev pogostnosti napak v digitalni radijski zvezi je v bistvu meritev občutljivosti sprejemnika. Ker je domet radijske zveze, to je razmerje med močjo oddajnika in občutljivostjo sprejemnika, zelo visoka številka, tudi do 150dB in več, moramo pri meritvah v laboratoriju poskrbeti za primerno oklapljanje oddajnika in sprejemnika.

V ta namen uporabimo merilni BPSK oddajnik majhne moči (+10dBm), ki mu izhod še dodatno oslabimo z nastavljivim slabilcem in -20dB sklopnikom. Občutljivost sprejemnika umetno poslabšamo s šumnim izvorom s plazovno diodo, saj pri tej vaji ne merimo občutljivosti sprejemnika pač pa kakovost demodulatorja. Šumni izvor hkrati prekrije lastni šum spektralnega analizatorja in lastni šum merjenega demodulatorja, da obe napravi krmilimo z istim razmerjem signal/šum.

Merilni BPSK izvor vsebuje dva različna polinomska generatorja zaporedij:  $1+X^{**4}+X^{**9}$  s periodo 511 taktov in  $1+X^{**12}+X^{**17}$  s periodo 131071 taktov, kar izbiramo s stikalom na prednji plošči izvora. Na sprejemni strani zaporedje preverjamo s polinomskim delilcem. Tudi tu izberemo željeni polinom s stikalom na prednji plošči sprejemnika. Ker imata polinoma po tri člene, dobimo za vsako napako po tri impulze na izhodu. V sprejemnik je vgrajen še delilnik impulzov z 2, da odstranimo enosmerno komponento v slučaju uporabe števca z izmeničnim vhodom.

Vhodno razmerje signal/šum odčitamo na spektralnem analizatorju. Pri tem nastavimo širino medfrekvenčnega sita spektralnega analizatorja vsaj 10-krat ožjo od glavnega lista spektra BPSK modulacije. Na ta način opazujemo tudi BPSK signal kot šum in velja za signal in za šum isti faktor povprečenja, ki se v merjenem razmerju signal/šum točno krajša, ko vključimo video sito na spektralnem analizatorju.

Pri točni meritvi razmerja signal/šum moramo paziti na motnjo iz vezja regeneracije nosilca sprejemnika, ki lahko popači sliko na zaslonu spektralnega analizatorja. Med meritvijo razmerja signal/šum zato izključimo NAPA JANJE sprejemnika in nikakor ne VF vhod, ker bi s tem pokvarili prilagoditve imepdanc. Za vse meritve sicer zadošča ena sama meritev razmerja signal/šum pri razmeroma visokih vrednostih (okoli 20dB), saj lahko ostala razmerja preprosto določimo s kalibriranim nastavljivim slabilcem signala.

Če upoštevamo pasovno širino sprejemnika in BPSK signala, potem je iskano razmerje signal/šum kar enako razmerju med temensko vrednostjo glavnega lista spektra modulacije in povprečno vrednostjo šuma. Bolj enostavno, odčitano razmerje teme glavnega lista spektra proti šumu je kar  $W_b/K_bT$ , to je to je argument, ki ga pretvorimo iz dB v linearne enote, korenimo in vstavimo v  $\text{erfc}(x)$ .

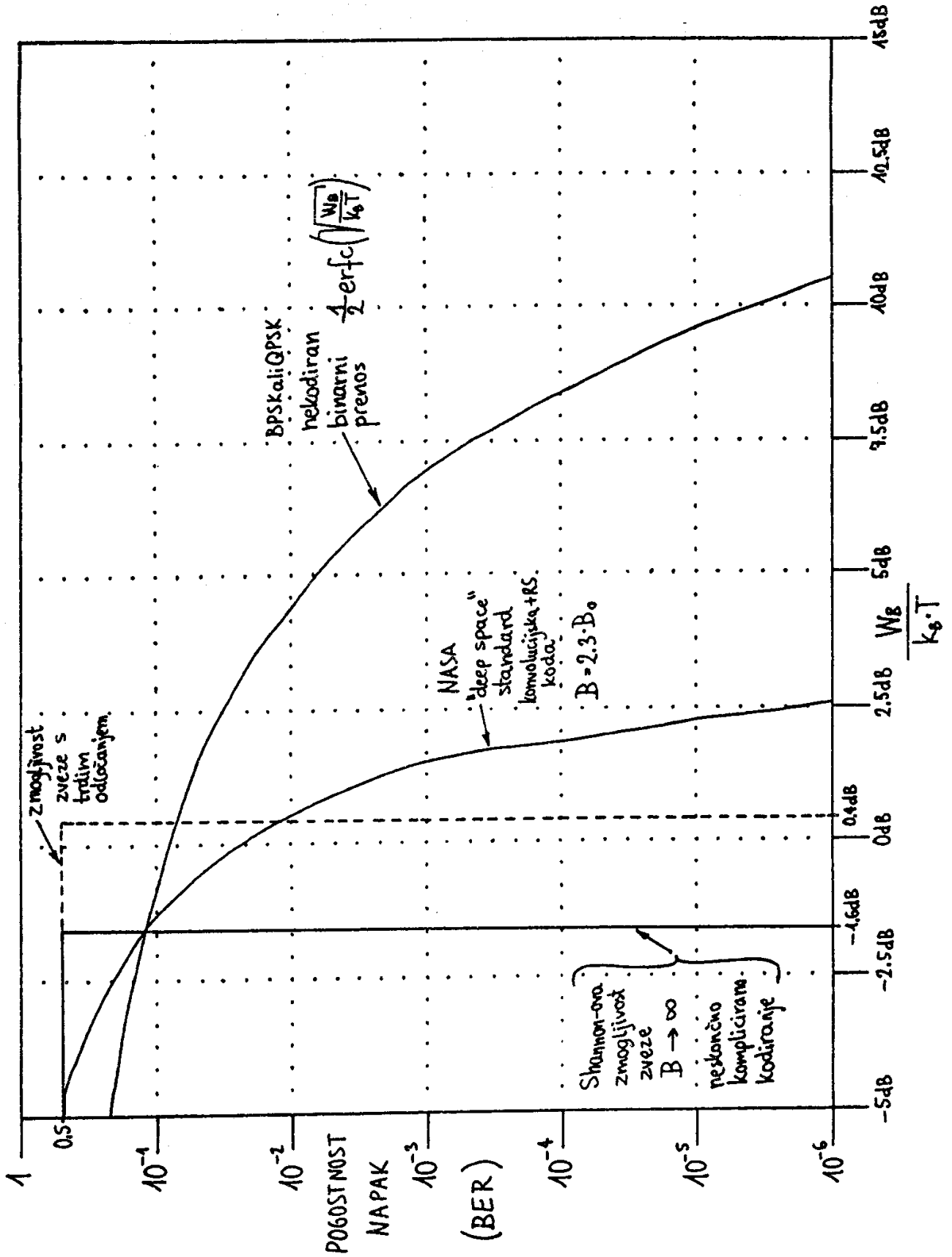
#### 4. Prikaz značilnih rezultatov

-----  
Preden začnemo s pravo meritvijo, preverimo delovanje vseh naprav, predvsem pa ne smemo pozabiti nastaviti točno frekvenco nosilca oddajnika. Sprejemnik ima v ta namen vgrajen inštrument z vrtljivo tuljavico za prikaz odstopanja frekvence nosilca. Vajo nato začnemo z meritvijo razmerja signal/šum s spektralnim analizatorjem, da umerimo skalo nastavljivega slabilca signala.

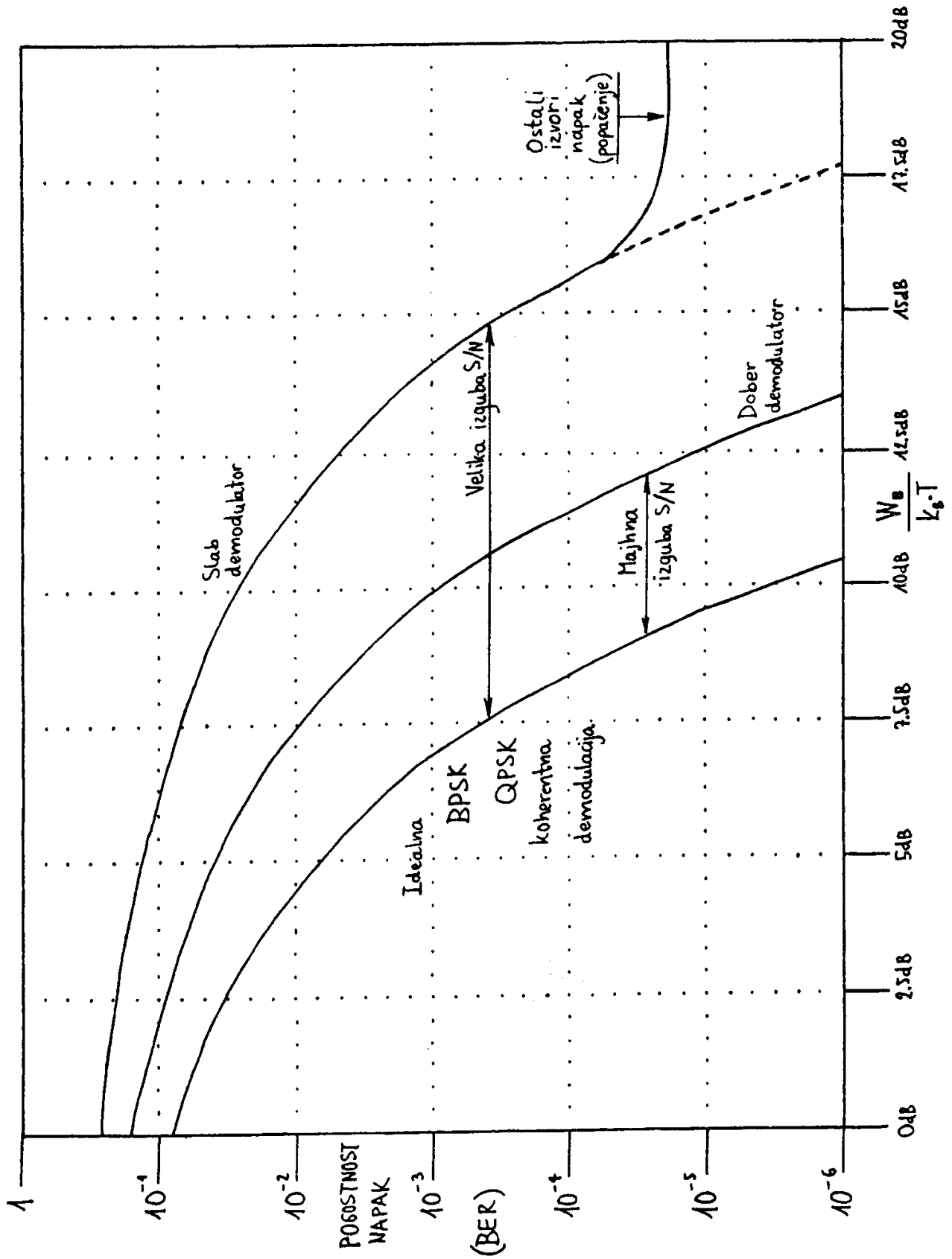
Pri vaji nato izmerimo pogostnost napak pri različnih razmerjih signal/šum, da bi na koncu narisali diagram kot na sliki 2. Pri pogostnosti napak nad 1% ( $1.0E-2$ ) vnaša pogreške prekrivanje posameznih impulzov na izhodu polinomskega delilca. Krivuljo pogostnosti napak je smiselno meriti do vrednosti  $1.0E-7$ , kar pomeni pri hitrosti 1.2288Mbit/s eno napako vsakih 8 sekund.

Pri vaji izmerimo in narišemo dve krivulji pogostnosti napak za oba polinoma:  $1+X^{**4}+X^{**9}$  in  $1+X^{**12}+X^{**17}$ . Izmerjeni krivulji primerjamo s krivuljo za idealni PSK demodulator ter določimo izgubo S/N uporabljenega PSK demodulatorja. Krivulji tudi primerjamo med sabo ter tako puskusimo določiti druge izvore napak v zvezi.

\*\*\*\*\*



Slika 1 - Pogostnost napak pri nekodiranem in kodiranem prenosu.



Slika 2 - Pogostnost napak resničnih PSK sprejemnikov.

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{W_b}{k_b T}} \right)$$

$W_b \equiv$  energija enega bita

$$k_b = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

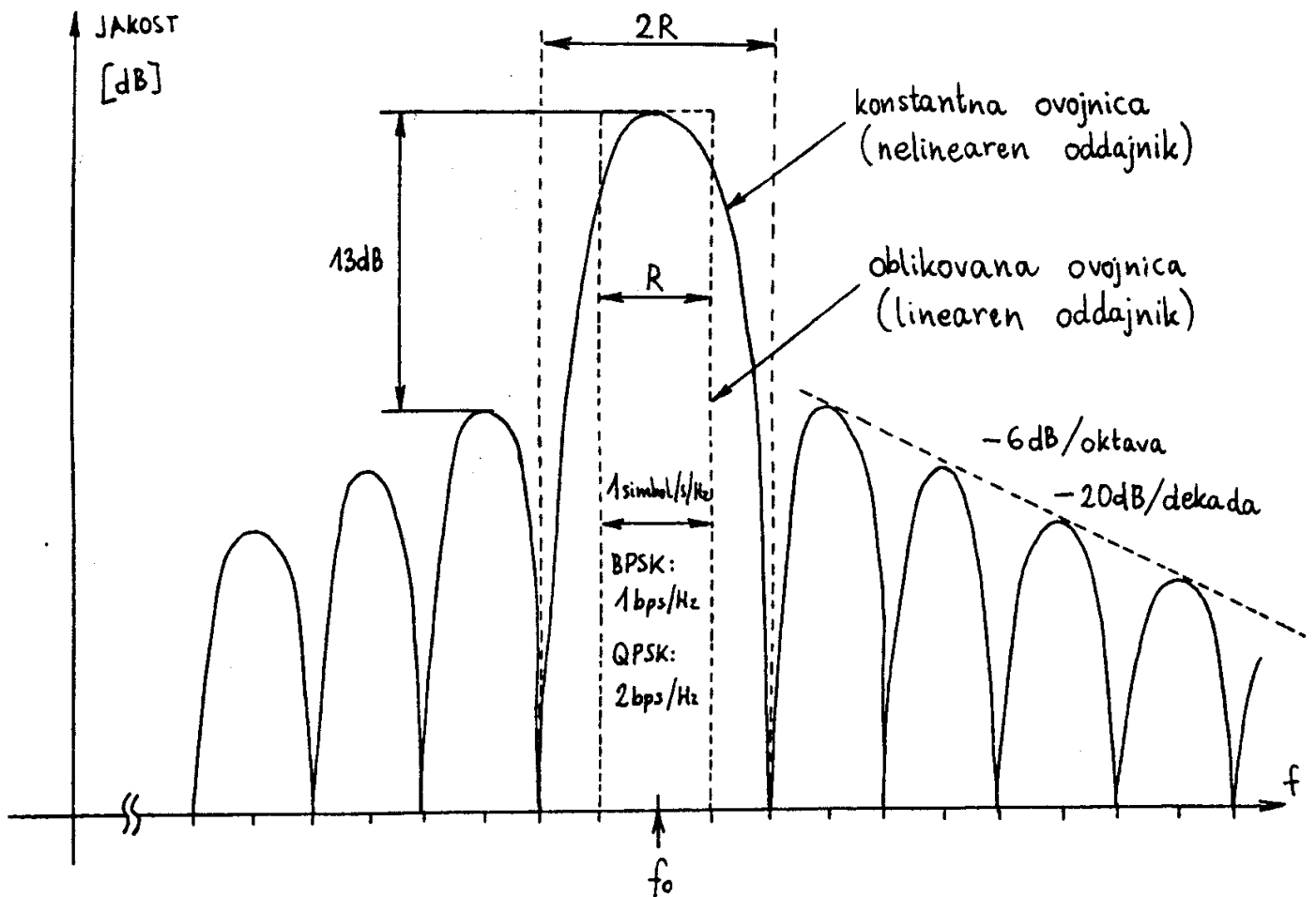
$T \equiv$  šumna temperatura sistema

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2} du = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

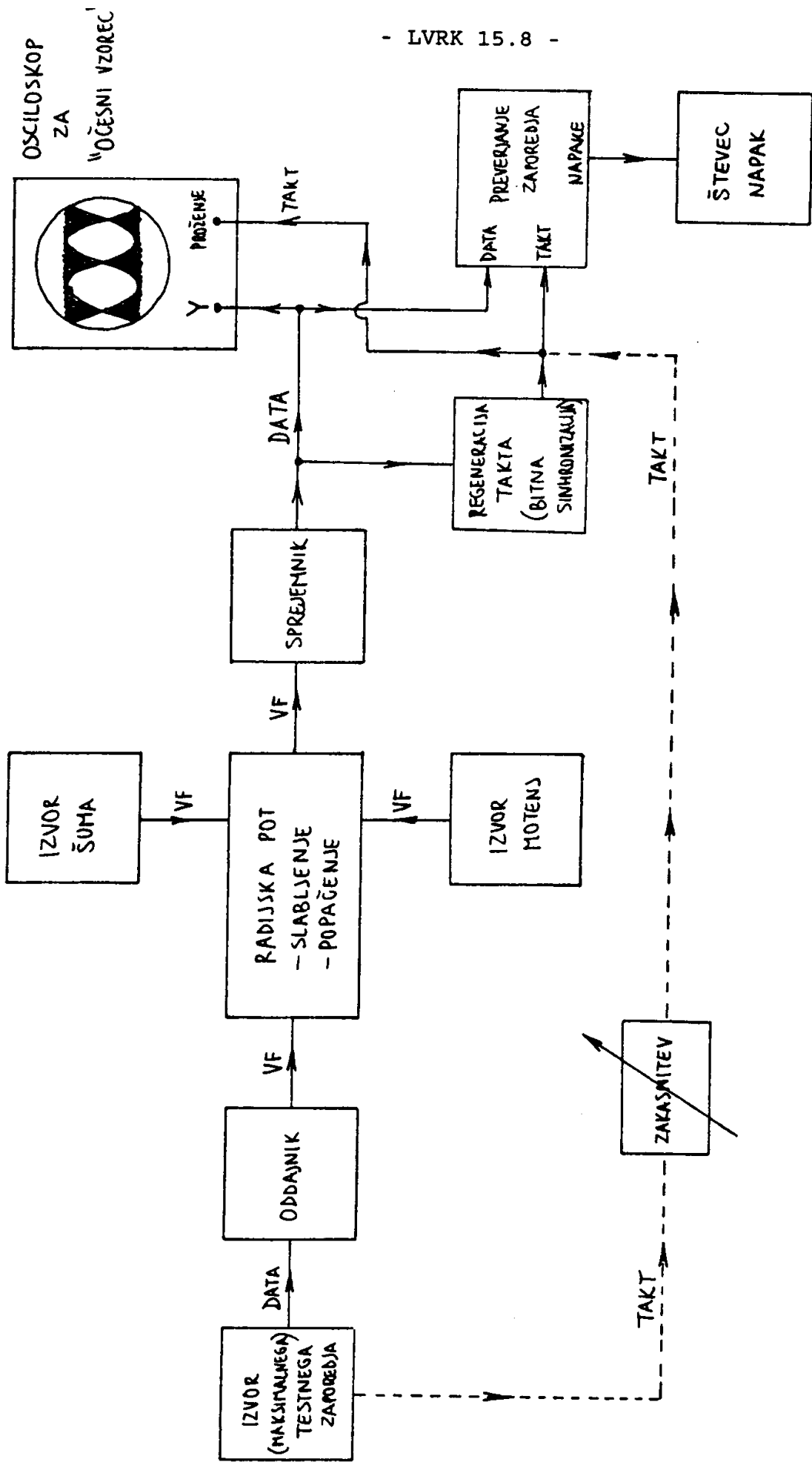
$P_s = W_b \cdot R$  ;  $R \equiv$  simbolna (bitna) hitrost (BPSK)

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{P_s}{R k_b T}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{P_s}{P_n}} \right) ; P_n \text{ pri } B=R!$$

Slika 3 - Pogostnost napak pri BPSK modulaciji.

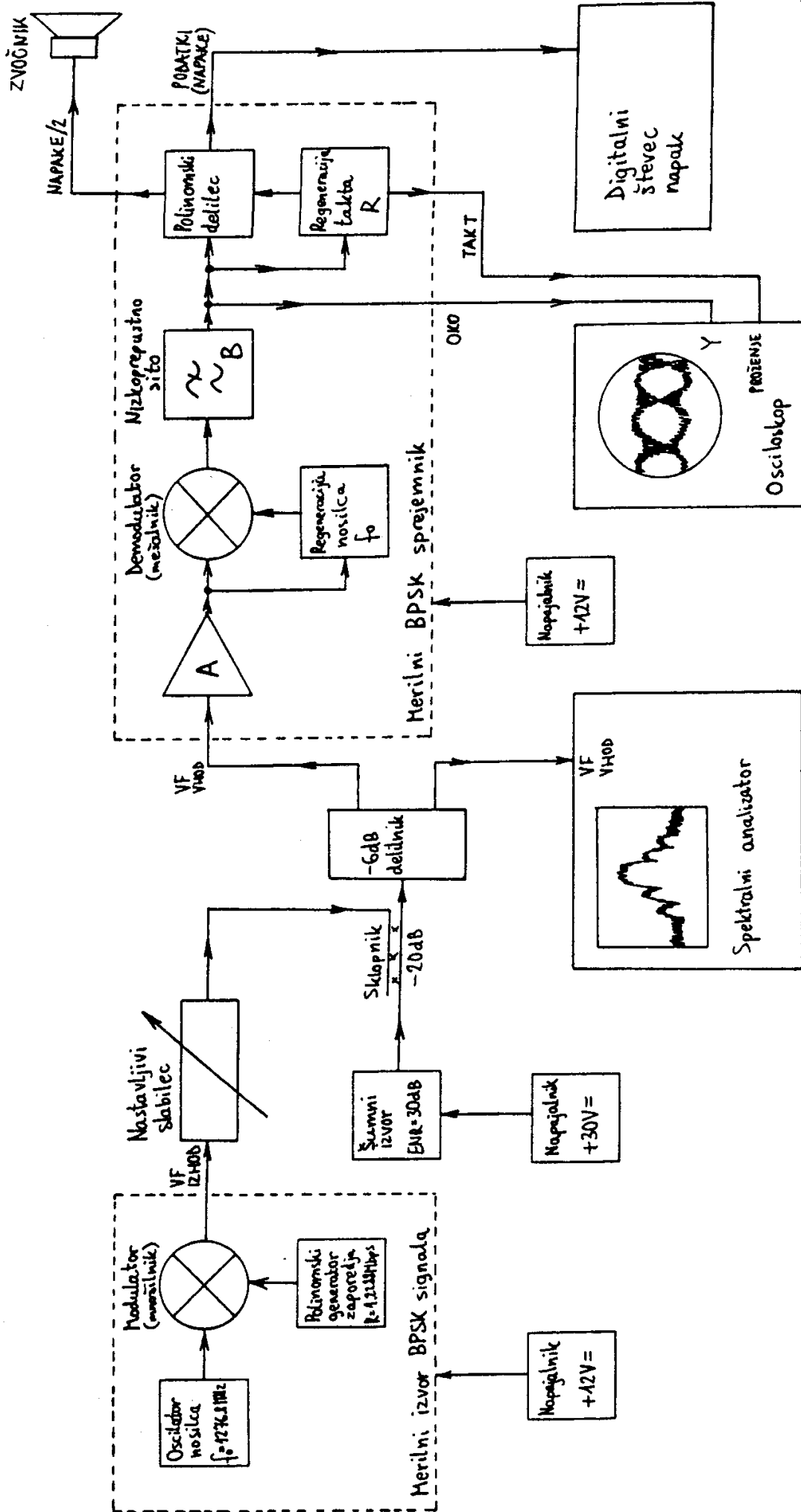


Slika 4 - Frekvenčni spekter PSK (BPSK, QPSK) oddaje.



Slika 5 - Meritev pogostnosti napak (BER) v digitalni radijski zvezi.





Slika 6 - Razporeditev in vezava merilnih pripomočkov.