

JEDNA OD METODA ETALONIRANJA MJERAČA MODULACIJE MI 2305

UDC: 621.376.2/.3:53.089.6

Rezime:

U ovom radu opisan je originalan način etaloniranja mjerača modulacije MI 2305. Slijedljivost AM etaloniranja postignuta je korišćenjem tri sekundarna etalona. Slijedljivost FM etaloniranja osigurana je primjenom metode nula Besselovih funkcija.

Ključne riječi: mjerač modulacije, amplitudna modulacija, frekventijska modulacija, slijedljivost.

METHOD OF CALIBRATING MODULATION METER MI 2305

Summary:

In this article an original way of calibrating the MI 2305 modulation meter is described. AM traceability is achieved using three secondary etalons. FM traceability calibrating is achieved by using the Bessel zero method.

Key words: modulation meter, amplitude modulation, frequency modulation, traceability.

Uvod

Dva najpoznatija komercijalna mjerača modulacije su HP 8901A i MI 2305. Oba su već više od petnaest godina u proizvodnim programima proizvođača. Mjerač modulacije HP 8901A posjeduje ugrađene kalibratore AM i FM koji olakšavaju baždarenje ovog mjernog sredstva uz zadovoljavajuću nesigurnost. Oba kalibratora daju signal noseće frekvencije $f_n = 10$ MHz i modulišuće frekvencije $f_m = 10$ kHz. Izlaz iz AM kalibratora je amplitudski modulisan signal sa dubinom modulacije $m = 33,3\% \pm 0,1\%$, dok je izlaz iz FM kalibratora frekventijski modulisan signal vršne devijacije 33 kHz.

Mjerač modulacije MI 2305 ne posjeduje unutrašnje kalibratore. Ako laboratorija u kojoj se MI 2305 baždari posjeduje HP 8901A, onda se kalibratori ovog mjerača koriste za baždarenje MI 2305. Proizvođač MI 2305, engleska firma Markoni, posjeduje kalibrator modulacije koji generiše 108 različitih dubina modulacije i 307 devijacija frekvencije. Nažalost, radi se o standardu firme koji nije dostupan u slobodnoj prodaji.

U ovom radu prikazane su metode baždarenja mjerača modulacije MI 2305 u slučaju kada nije dostupan mjerač modulacije HP 8901A sa svojim internim kalibratorima modulacije. Metode koje su opisane koriste se u metrološkoj la-

boratoriji TOC-KoV u Tivtu. Navedene metode provjere tačnosti mjerenja amplitudne i frekvencijske modulacije mjeračem MI 2305 omogućavaju prihvatljivu nesigurnost mjerenja, tako da se uspješno ostvaruje jedan od osnovnih metroloških principa, princip slijedljivosti.

Definicije i oznake

Neka je dat nemodulisani VF noseći signal (pretpostavlja se da je $\Phi_0 = 0$):

$$u_0(t) = U_0 \cos \omega_0(t) \quad (1)$$

i modulišući signal:

$$u_m(t) = U_m \cos \omega_m(t) \quad (2)$$

Tada je AM signal dat izrazom:

$$u_{AM} = U_0 \cos \pi f_0 t + \frac{U_0 m}{2} \cos 2\pi(f_0 + f_m)t + \frac{U_0 m}{2} \cos 2\pi(f_0 - f_m)t \quad (3)$$

gdje je:

$u_{AM}(t)$ – trenutna vrijednost amplitudno modulisanog signala,

U_0 – amplituda nemodulisanog VF nosećeg signala,

U_m – amplituda modulišućeg signala,

$m = U_m/U_0$ – faktor AM (izražen u procentima se zove dubina modulacije),

ω_m – kružna frekvencija modulišućeg signala ($\omega_m = 2\pi f_m$)

ω_0 – kružna frekvencija nosećeg signala,

t – vrijeme.

Frekvencijski spektar AM signala sadrži tri komponente: noseći signal amplitude U_0 na frekvenciji f_0 , viši bočni

opseg U_{VBO} na frekvenciji $(f_0 + f_m)$ i niži bočni opseg U_{NBO} na frekvenciji $(f_0 - f_m)$.

FM signal dat je izrazom:

$$u_{FM} = U_0 J_0(m_f) \cos \omega_0 t + U_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_n(m_f) \left\{ \cos \left[\omega_0 - n\omega_m t \right] + \cos \left[(\omega_0 + n\omega_m)t + \frac{n\pi}{2} \right] \right\} \quad (4)$$

gdje je:

J_n – Besselova funkcija,

m_f – faktor modulacije.

Za dati faktor modulacije m_f i svaku izabranu vrijednost n , Besselova funkcija je konstantna. Izraz (4) ima diskretan neograničen spektar. On se sastoji od nosioca, čija je amplituda $U_0 J_0(m_f)$ na frekvenciji ω_0 , i beskonačnog niza komponenata na frekvencijama $\omega_0 - \omega_n$ i $\omega_0 + \omega_n$, čije su amplitude $U_0 J_n(m_f)$, ($n = 1, 2, 3, \dots$). Frekvencijski razmak između dvije susjedne komponente spektra je ω_m .

Tri važne osobine Besselovih funkcija su [1]:

$$J_{-n}(m_f) = (-1)^n J_n(m_f) \quad (5)$$

$$J_{n-1}(m_f) - J_{n+1}(m_f) = \frac{2n}{m_f} J_n(m_f) \quad (6)$$

$$\frac{dJ_n(m_f)}{dm_f} = -\frac{n}{m_f} J_n(m_f) + J_{n-1}(m_f) \quad (7)$$

Vrijednosti faktora modulacije (m_f) odgovara argumentu Besselove funkcije za koje amplituda nosećeg signala dobija vrijednost nule, date su u tabeli 1.

Devijacija frekvencije Δf se računa kao:

$$\Delta f = m_f \cdot f_m \quad (8)$$

Tabela 1

Vrijednosti faktora modulacije m_f

Red nule nosećeg signala	m_f
1	2,40
2	5,52
3	8,65
4	11,79
5	14,93
6	18,07
$n (n > 6)$	$18,07 + \pi \cdot (n - 6)$

Provjera tačnosti mjerenja faktora AM

Postupak utvrđivanja tačnosti mjerenja faktora AM odvija se u nekoliko koraka.

Početni korak je određivanje grešaka mjerenja analizatora spektra kao ključnog mjernog sredstva koje se koristi pri provjeri tačnosti mjerenja faktora AM. Prvo se određuje tačnost mjerenja analizatora spektra HP 5868B na 30 MHz prema blok-šemi na slici 1, jer na toj frekvenciji radi sekundarni etalon – promjenljivi oslabljivač EATON 3232.

Zbog povećanog razlaganja analizatora spektra radi u linearnom režimu (razlaganje $\pm 0,01$ dB). Ispituje se tačnost

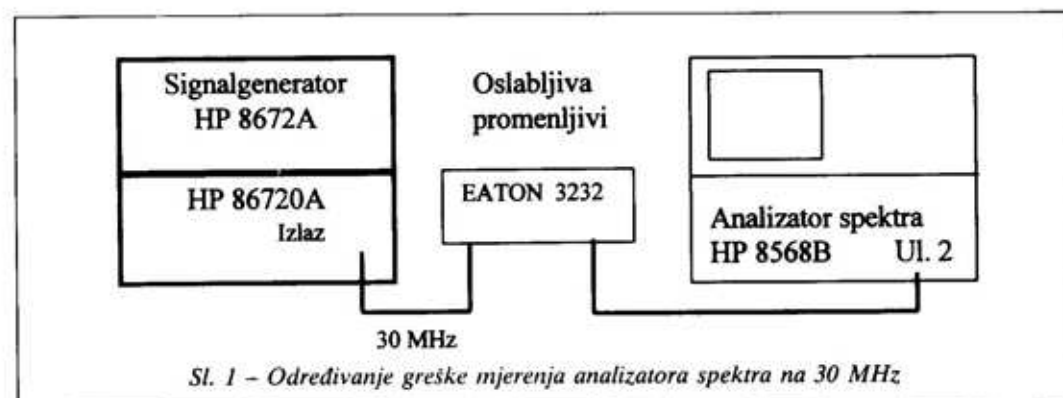
mjerenja dubine modulacije 80% na nosećoj frekvenciji 12 MHz. Dubini modulacije 80% odgovara razlika od 7,94 dB između signala na osnovnoj frekvenciji i signala bočnog opsega.

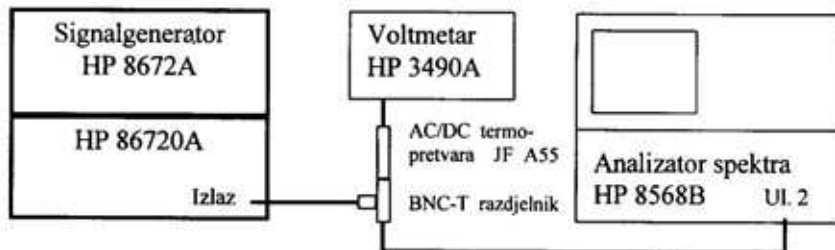
Na promjenljivom oslabljivaču EATON prvo se postavi 0, a zatim 7,94 dB. Koristeći delta-funkciju analizatora spektra pronalazi se korekcionni koeficijent:

$$k = 7,94 - k_a \text{ (dB)} \quad (9)$$

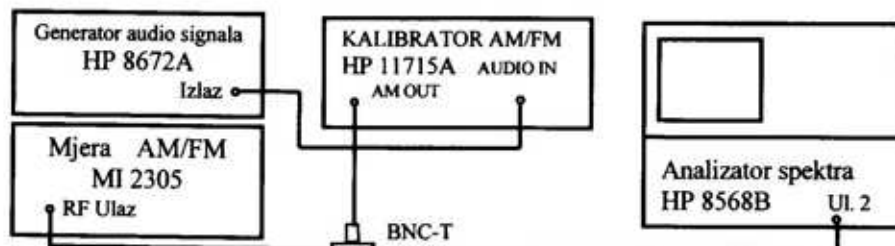
gdje je k_a razlika prikaza na analizatoru spektra kada je na EATON-u postavljena 0 dB i 7,94 dB.

U sljedećem koraku utvrđuje se greška linearnosti amplitudno-frekvencijske karakteristike analizatora spektra prema blok-šemi na slici 2. Očita se DC napon sa AC/DC termopretvarača na 30 MHz. Zatim se ovaj napon održava konstantnim (pažljivim mjenjanjem izlazne snage signal-generatora) na $f_n = 12$ MHz i svim frekvencijama $12 \text{ MHz} \pm f_m$ na kojima se provjerava faktor AM. U svakoj tački (f_n i tačkama $f_n \pm f_m$) mjere se i bilježe odstupanja na HP 8568A u odnosu na nivo zabilježen na 30 MHz. Ove razlike su korekcionni faktori k_1 . Na taj način vrši se korekcija greške linearnosti amplitudno-frekvencijske karakteristike analiza-





Sl. 2 – Blok-šema povezivanja mjernih sredstava za provjeru amplitudno-frekvencijske karakteristike analizatora spektra



Sl. 3 – Blok-šema povezivanja mjernih sredstava za mjerenje dubine AM

tora spektra. Tačno pokazivanje analizatora spektra, kada se koriguje greška na 30 MHz i greška linearnosti, iznosi:

$$t = 7,94 \pm (k + k_1) \quad (10)$$

Provjera tačnosti mjerenja dubine AM obavlja se prema blok-šemi na sl. 3.

Dubina modulacije mjeri se na analizatoru spektra (pri čemu se vrše korekcije) i na mjerачu modulacije MI 2035, a rezultati se upoređuju. Tako se utvrđuje greška mjerenja dubine AM mjerачem MI 2035.

Nesigurnost mjerne metode uključuje sljedeće greške korišćenih etalona:

- razlaganje analizatora spektra HP 8568B koje u linearnom režimu rada iznosi $\pm 0,01$ dB ili $\pm 0,12\%$;

- greška amplitudno-frekvencijske karakteristike AC/DC termopretvarača JF 55 koja iznosi $\pm 0,25\%$;

- greška amplitudno-frekvencijske karakteristike AM/FM kalibratora HP 11715A koja za $50 \text{ Hz} < f_m < 50 \text{ kHz}$ iznosi $\pm 0,1\%$, a za $20 \text{ Hz} < f_m < 100 \text{ kHz}$ iznosi $\pm 0,25\%$;

- nesigurnost mjerenja oslabljivača EATON 3232 koja iznosi $\pm 0,01$ dB ili $\pm 0,12\%$

Ukupna srednja kvadratna greška računa se kao:

$$\sigma = \pm \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2} \quad (11)$$

i $\sigma = \pm 0,221\%$ za $50 \text{ Hz} < f_m < 50 \text{ kHz}$, odnosno $\sigma = \pm 0,318\%$ za $20 \text{ Hz} < f_m < 100 \text{ kHz}$. Ovoj grešci trebalo bi dodati grešku ponovljivosti mjerenja MI 2035 koja iznosi $\pm 0,02\%$ za srednju vrijednost od pet mjerenja.

S obzirom na to da je najmanja deklarirana greška mjerenja AM mjer-

čem modulacije MI 2305 jednaka $\pm 1\%$ ± 1 cifra za $f_m = 1$ kHz [2] (za ostale vrijednosti f_m , greška mjerenja je veća), mjerna metoda etaloniranja zadovoljava osnovne metrološke principe.

Slijedljivost prema vojnim primarnim etalonima i prema nacionalnim etalonima obezbjeđena je korišćenjem tri sekundarna etalona: AM/FM kalibratora, AC/DC termopretvarača i preciznog promjenjivog oslabljivača. Navedenom metodom provjerava se tačnost mjerenja AM, kada je $m = 80\%$. Međutim, može se izabrati bilo koja dubina modulacije veća od 10% (ova granica je određena linearnim režimom rada analizatora spektra).

Provjera tačnosti mjerenja devijacije frekvencije

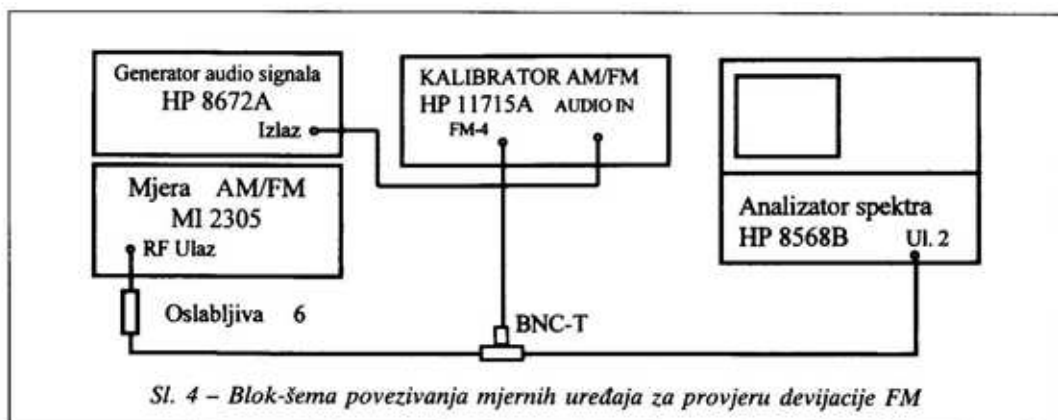
Mjerenje devijacije FM provjerava se metodom nula Besselovih funkcija, koristeći jednakost (8) i vrijednosti za m_f iz tabele 1. Blok-šema povezivanja mjernih uređaja za provjeru mjerenja devijacije FM prikazana je na slici 4.

Postupak mjerenja je sljedeći: na generatoru funkcija HP 3325A, koji se koristi kao generator audio signala, podese se željena f_m . Ovaj signal se dovodi

na AUDIO ulaz AM/FM kalibratora HP 11715A. Na izlazu FM-4 ovog kalibratora podese se $f_n = 100$ MHz. Modulirani signal se vodi na testirajući mjerac AM/FM MI 2305 i analizator spektra HP 8568A. Ukoliko se na HP 3325A zada dovoljno mala amplituda izlaznog napona, a zatim se taj napon povećava, uočice se smanjivanje nivoa nosećeg signala na analizatoru spektra. U jednom momentu noseći signal će se potpuno izgubiti i to je prva nula nosećeg signala kojoj odgovara $m_f = 2,40$. Korisno je (mada se u proračunima ne traži) zabilježiti amplitudu signala sa HP 3325A za koji se javlja nula nosećeg signala. Povećavajući nivo signala HP 3325A, ponovo će se javiti noseći signal. Daljim povećavanjem navedene amplitude noseći signal će se ponovo izgubiti (druga nula).

Analiza nesigurnosti mjerenja devijacije frekvencije metodom nula Besselovih funkcija mora biti vrlo koncizno izvedena, jer princip slijedljivosti nije izveden korišćenjem etalona propisne tačnosti koji su baždareni u metrološkim laboratorijama višeg stepena, već proizilazi iz prirode same metode.

Dvije su vrste grešaka koje se javljaju pri etaloniranju MI 2305 kao mjeraca FM: greške koje nastaju zbog prirode



primjenjene metode i greške koje potiču od samog uređaja koji se testira.

S obzirom na to da se devijacija računa po formuli (8), vrlo je važno da modulišuća frekvencija f_m signala koji proizvodi audio generator bude što tačnija. Ako je relativna greška ove frekvencije manja od $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ (što HP 3325A zadovoljava), tada se greška može zanemariti. Faktori koji utiču na veličinu faktora modulacije m_f su: dubina (u dB) na kojoj se gubi nosilac, FM izobličenja koja u mjerni sistem unose audio generator i AM/FM kalibrator i parazitna amplitudna modulacija.

Pažljivim mijenjanjem napona audio signala (korišćeni audio generator HP 3325A ima programabilnu mogućnost zadanja napona u koracima 0,01 mV vršne vrijednosti) može se postići da nosilac nestane između 60 dB i 70 dB dubine u odnosu na maksimalni nivo. Koristeći formule (5), (6) i (7), a takođe i:

$$\frac{\Delta m}{m_f} = \frac{\Delta J}{\rho m_f} \quad (12)$$

gdje je ΔJ relativna dubina (izražena u procentima) na kojoj se gubi nosilac, a ρ je gradijent od $J(m_f)$ u tački $J(m_f) = 0$, može se proračunati greška $\Delta m_f/m_f$ u zavisnosti od dubine nestanka nosioca. Ukoliko je poznata dubina A (dB) na kojoj se gubi nosilac, ΔJ (%) se računa iz obrasca $A = 20 \log 1/\Delta J$.

Proračunata relativna greška $\Delta m_f/m_f$ (%) za razne vrijednosti dubine nestanka nosioca i za nule Besselovih funkcija prvog reda prikazana je u tabeli 2.

Ako se razmatraju nule drugog, trećeg, itd. reda, greške određivanja m_f se smanjuju. Tako, na primjer, ako se nestanak nosioca za nulu drugog reda javi na -60 dB, $\Delta m_f/m_f = 0,053\%$, a ako se

Relativna greška faktora modulacije u odnosu na dubinu nestanka nosioca

Dubina nestanka nosioca (dB)	Greška $\Delta m_f/m_f$ (%)
50	-2,5635
55	-0,1426
60	-0,0801
65	-0,0450
70	-0,0253
75	-0,0143

posmatra nula trećeg reda $\Delta m_f/m_f = -0,043\%$. U obavljenim mjerenjima uvijek su posmatrane nule prvog reda, jer je za nule višeg reda potreban viši napon audio signala, a audio ulaz AM/FM kalibratora HP11715A ne dozvoljava signal čija je maksimalna vrijednost veća od 5V.

U mjerenjima su za vrijednosti f_m od 1 kHz, 50 kHz i 250 kHz postignute dubine nestajanja nosioca od 75,3 dB, 63,5 dB i 61,5 dB, što odgovara relativnim greškama određivanja faktora modulacije od -0,0138%; -0,0535% i -0,0641%, respektivno.

Greške u proračunu frekvencijske devijacije nastaju zbog harmonijskog izobličenja u modulacionom signalu koji uslovljava promjenu vrijednosti faktora modulacije u tačkama u kojima nosilac postiže nulu. Slične greške javljaju se kada postoji parazitna AM.

Propisano FM izobličenje AM/FM kalibratora HP 11715A je $\pm 0,25\%$, dok je dozvoljeno FM izobličenje signala HP 3325A $\pm 0,06\%$, što je ukupno $\pm 0,085\%$. Koristeći tablice iz literature [3] pomjeraj nule Besselove funkcije u procentima iznosi $0,15 \cdot 0,085 = \pm 0,0128\%$.

Neželjena (parazitska) AM za izlaz iz AM/FM kalibratora manja je od

0,08%. Koristeći tablice iz literature [4] dobija se da je pomjeraj prve nule Besselove funkcije uslovljen neželjenom AM: $0,33 \cdot 0,08 = 0,0264\%$.

Ukupna nesigurnost mjerenja primjenom metode nula Besselovih funkcija iznosi:

$$\sigma_{F1} = \pm \sqrt{0,0073} = \pm 0,0854\% \quad (13)$$

Ovoj nesigurnosti treba dodati greške koje nastaju od uređaja koji se testira MI 2305: izobličenje demodulisanog audio signala (tipično $\pm 0,06\%$), zaostala FM (što se može zanemariti) i greška ponovljivosti (za pet mjerenja iznosi $\pm 0,01$), što daje:

$$\sigma_{F2} = \pm \sqrt{0,004} = \pm 0,0632\% \quad (14)$$

Sabiranjem σ_{F1} i σ_{F2} dobija se ukupna nesigurnost metode etaloniranja MI 2305 za mjerenje frekvencijske modulacije:

$$\sigma_F = \sigma_{F1} + \sigma_{F2} = \pm 0,1486\% \quad (15)$$

S obzirom na to da MI 2305 pri mjerenju FM najmanju grešku ($\pm 0,5\%$

± 1 cifra) ima za $f_m = 1$ kHz (za ostale f_m greška mjerenja je veća) [2], greška metode etaloniranja je zadovoljavajuća.

Zaključak

Etaloniranje mjerača modulacije MI 2305 može se uspješno izvršiti i u metrološkim laboratorijama koje ne posjeduju mjerač modulacije HP 8901A. Provjera tačnosti mjerenja faktora AM može se vršiti modernim analizatorima spektra, ali je prethodno sekundarnim etalonima potrebno utvrditi faktore za korekciju grešaka ovog mjernog sredstva. Metoda nula Besselovih funkcija obezbjeđuje prihvatljivu nesigurnost mjerenja pri provjeri tačnosti mjerenja devijacije frekvencije mjeračem MI 2305.

Literatura:

- [1] Stojanović, I.: Osnovi telekomunikacija, Građevinska knjiga, Beograd 1981.
- [2] Modulation meter 2305, Marconi Instruments Ltd., Lit. No 46890-359, Issue 1, 12/93.
- [3] Mitrinović, D. S.: Uvod u specijalne funkcije, Građevinska knjiga, Beograd 1975.
- [4] Skinner, A. D.: Modulation measurements for 2305 modulation meter, Instrument application note from Marconi Instruments Ltd., No 50, Lit. No 46889-404F, 3/84.