

LUCRAREA DE LABORATOR NR. 2.

SEMNALE CU PURTĂTOR ARMONIC, MODULATE ÎN AMPLITUDINE

1. Obiectivul lucrării

În această lucrare se va realiza analiza spectrală a oscilațiilor modulate în amplitudine, cu semnal modulator sinusoidal, dreptunghiular și triunghiular.

2. Aspecte teoretice

Se consideră un sistem de comunicație cu un emițător și un receptor. Informația transmisă de emițător către receptor se va găsi mai departe cu numele de “mesaj”. Semnalele electrice corespunzătoare mesajelor pot fi transmise direct, așa cum provin de la sursa care le generează (de exemplu senzori, generatoare de semnal etc.), dar în majoritatea cazurilor această transmisiune are dezavantaje cum ar fi faptul că mai multe semnale ce se doresc a fi transmise au spectre care se suprapun, canalul de comunicație este perturbat în zona de frecvențe în care semnalele mesaj au componente spectrale importante, semnalele mesaj au frecvențe joase etc. În situația în care comunicația este fără fir, de tip radio, dimensiunile antenelor fiind direct proporționale cu lungimea de undă a semnalului, implică utilizarea de antene cu dimensiuni foarte mari pentru a transmite semnale, mesaje, cu frecvență mică.

În procesul de modulație se întâlnesc trei semnale: semnalul modulator (mesaj), semnalul purtător și semnalul modulat. Prin modulație caracteristicile semnalului corespunzător mesajului, numit și semnal modulator, sunt transferate asupra unui semnal având spectrul în domeniul frecvențelor mai ridicate numit semnal purtător (sau undă purtătoare), iar semnalul rezultat în urma procesului de modulație este semnalul modulat.

Utilizarea modulației atenuază sau înlătură dezavantajele transmisiei directe menționate anterior, de exemplu: frecvențele din spectrul semnalului purtător pot fi alese astfel încât domeniul spectral al semnalului modulat să nu se suprapună peste spectrul perturbațiilor.

Procesul de modulare are loc în partea de emisie a unui sistem de comunicații. La recepție se efectuează o operație inversă, demodularea, prin

intermediul căreia, din semnalul modulat recepționat se extrage semnalul modulator, corespunzător mesajului.

Expresia generală a unei oscilații modulate, cu semnal modulator oarecare, este:

$$x(t) = A(t) \cdot \cos \Phi(t), \quad (1)$$

în care $A(t)$ este amplitudinea oscilației, $\Phi(t)$ este unghiul de fază și $\Omega_i(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt}$ este frecvența instantanee. În absența modulației,

$$A(t) = \text{const.} = A_0,$$

$$\Omega_i(t) = \text{const.} = \Omega_0,$$

$$\Phi(t) = \int \Omega_i(t) dt + \phi_0 = \Omega_0 t + \Phi_0$$

și expresia (1) se reduce la cea a purtătoarei:

$$x_0(t) = A_0 \cos(\Omega_0 t + \Phi_0). \quad (1')$$

Vom nota cu $x_m(t)$ semnalul modulator. De obicei, acesta este un semnal cu frecvența maximă din spectru, mult mai joasă decât frecvența semnalului purtător, $\omega_{m,M} \ll \Omega_0$.

În cazul semnalului modulat în amplitudine, amplitudinea $A(t)$ a semnalului modulat variază, în jurul valorii A_0 , în ritmul semnalului modulator, iar frecvența $\Omega_i(t)$ este constantă și egală cu Ω_0 , deci:

$$A(t) = A_0 + K_A x_m(t),$$

iar semnalul modulat în amplitudine devine:

$$x_{MA}(t) = [A_0 + K_A x_m(t)] \cos(\Omega_0 t + \Phi_0). \quad (2)$$

În cazul semnalului modulator armonic avem:

$$x_m(t) = A_m \cos(\omega_m t + \phi_m), \quad (3)$$

$$A(t) = A_0 + K_A A_m \cos(\omega_m t + \phi_m) = A_0 [1 + m \cos(\omega_m t + \phi_m)], \quad (4)$$

$$x_{MA}(t) = A_0 [1 + m \cos(\omega_m t + \phi_m)] \cos(\Omega_0 t + \phi_0). \quad (5)$$

În relațiile de mai sus, K_A este o constantă specifică modulatorului de amplitudine, iar $m = K_A \cdot A_m / A_0$ se numește grad de modulație. În mod normal $m \in [0,1]$. În cazul în care $m > 1$, $A(t)$ devine la un moment dat negativ, ceea ce corespunde unui salt de fază de 180° . Se spune că, în acest caz, oscilația este supramodulată.

Dacă în relația (5) se desface paranteza dreaptă și se transformă produsul de cosinusuri în sumă, rezultă dezvoltarea spectrală a semnalului modulat:

$$x_{MA}(t) = A_0 \cos(\Omega_0 t + \Phi_0) + \frac{m}{2} A_0 \cos[(\Omega_0 + \omega_m)t + \Phi_0 + \phi_m] + \frac{m}{2} A_0 \cos[(\Omega_0 - \omega_m)t + \Phi_0 - \phi_m]. \quad (6)$$

Se constată că spectrul semnalului conține trei componente: purtătoarea nemodulată, de amplitudine A_0 , și două componente laterale, una superioară, de amplitudine $A_1 = \frac{m}{2} \cdot A_0$, pe frecvența $F_0 + f_m$, alta inferioară, de amplitudine

$$A_{-1} = \frac{m}{2} \cdot A_0 = A_1, \text{ pe frecvența } F_0 - f_m.$$

În figură sunt reprezentate spectrele de amplitudine și de fază.

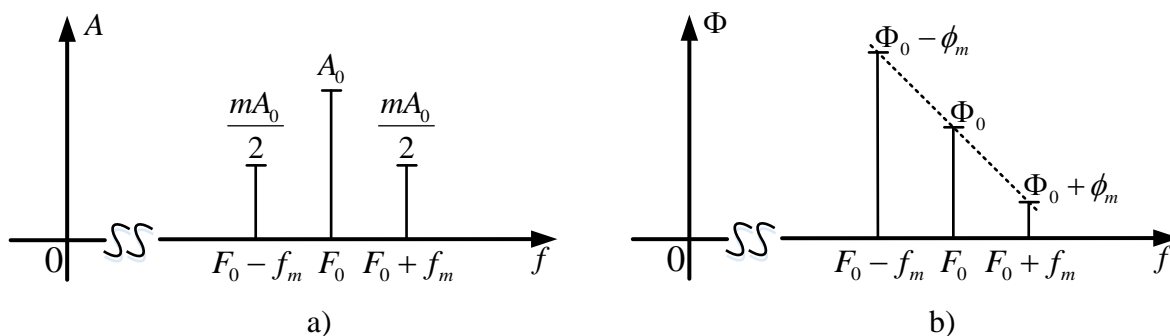


Figura 1. Spectrul de amplitudini și de faze a semnalului MA cu purtător armonic și semnal modulator armonic

Se observă că, în raport cu frecvența purtătoare, spectrul de amplitudine este simetric, iar spectrul de fază este asimetric. Pentru o reprezentare grafică convenabilă, în cazul în care $F_0 \gg f_m$, axa absciselor nu a fost desenată într-o zonă în care nu există componente spectrale.

Banda de frecvență ocupată de semnal, în acest caz particular, este intervalul $[F_0 - f_m, F_0 + f_m]$ de lungime $B = 2f_m$ (dublul frecvenței semnalului modulator).

Din relația (5) se determină valorile maximă și minimă ale amplitudinii oscilației $A(t)$. Acestea se obțin atunci când $\cos(\omega_m t + \phi_m)$ este maxim (egal cu 1) și, respectiv, minim (egal cu -1): $A_{\max} = A_0 \cdot (1 + m)$ și $A_{\min} = A_0 \cdot (1 - m)$. Pentru ca amplitudinile să rămână întotdeauna pozitive, evitând supramodulația, este necesar ca $A_{\min} \geq 0$, adică $m \leq 1$.

Dacă se cunosc A_{\max} și A_{\min} se poate determina gradul de modulație, m , folosind expresia:

$$m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}. \quad (7)$$

Vizualizând semnalul modulat cu un osciloscop (figura 2.a), cu ajutorul relației (7) se poate determina gradul de modulație. De asemenea, se obține amplitudinea semnalului purtător A_0 conform relației:

$$A_0 = \frac{A_{\max} + A_{\min}}{2}. \quad (8)$$

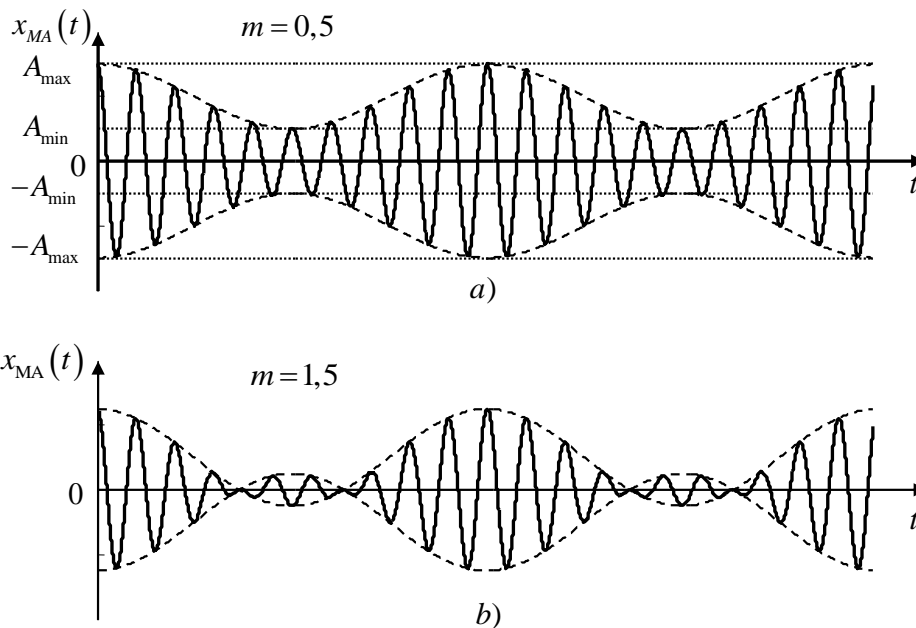


Figura 2. a) Reprezentarea în domeniul timp a unui semnal modulat MA cu $m = 0,5$;
b) Reprezentarea în domeniul timp a unui semnal modulat MA cu $m = 1,5$.

În figura 2.b) este prezentat cazul unui semnal modulată în amplitudine în care oscilația este supramodulată, $m=1,5$.

Puterea disipată de semnalul MA, cu semnal de modulație armonic, pe o rezistență de 1Ω , precum și valoarea efectivă a acestui semnal, calculate folosind reprezentarea în timp (Tabelul 2) a semnalului MA, au expresiile:

$$P = \frac{A_0^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2} \right), \quad (9)$$

$$X_{ef} = \sqrt{P}. \quad (10)$$

Puterea utilă (cea corespunzătoare mesajului) este dată de puterea disipată de componentele laterale și are expresia:

$$P_u = \frac{A_0^2}{2} \cdot \frac{m^2}{2} = P_0 \frac{m^2}{2}. \quad (11)$$

Observație importantă: în relațiile (9), (10) și (11) A_0 se calculează folosind relația (8), pe baza măsurătorilor în domeniul timp (Tabelul 2), iar valoarea obținută se înmulțește cu coeficientul de divizare θ , găsit în lucrarea trecută sau redeterminat în lucrarea curentă, înaintea introducerii în (9), (10) și (11).

Expresiile omoloage celor date de relațiile (9) și (10), folosind de data aceasta reprezentarea în frecvență a semnalului MA, cu semnal de modulație armonic, sunt:

$$P = \frac{A_0^2}{2} + \frac{A_{-1}^2}{2} + \frac{A_1^2}{2} = A_{0,ef}^2 + A_{-1,ef}^2 + A_{1,ef}^2, \quad (12)$$

$$X_{ef} = \sqrt{P} = \sqrt{\frac{A_0^2}{2} + \frac{A_{-1}^2}{2} + \frac{A_1^2}{2}} = \sqrt{A_{0,ef}^2 + A_{-1,ef}^2 + A_{1,ef}^2}. \quad (13)$$

Puterea utilă este dată în acest caz de relația:

$$P_u = \frac{A_{-1}^2}{2} + \frac{A_1^2}{2} = A_{-1,ef}^2 + A_{1,ef}^2. \quad (14)$$

În cazul unui semnal modulator periodic, fără componentă continuă, se poate scrie seria Fourier armonică astfel:

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega_0 t + \phi_k).$$

Banda de frecvență ocupată de $x_m(t)$ este finită și în această bandă sunt cuprinse k_M componente. Rezultă:

$$x_m(t) \approx \sum_{k=1}^{k_M} A_k \cos(k\omega_0 t + \phi_k).$$

Ca urmare, relația (2) a semnalului modulat în amplitudine devine:

$$x_{MA}(t) = A_0 \left[1 + \frac{k_A}{A_0} \sum_{k=1}^{k_M} A_k \cos(k\omega_0 t + \phi_k) \right] \cos(\Omega_0 t + \Phi_0),$$

$$\begin{aligned} x_{MA}(t) = A_0 \cos(\Omega_0 t + \Phi_0) + \sum_{k=1}^{k_M} \frac{m_k A_0}{2} \cos[(\Omega_0 + k\omega_0)t + \Phi_0 + \phi_k] + \\ + \sum_{k=1}^{k_M} \frac{m_k A_0}{2} \cos[(\Omega_0 - k\omega_0)t + \Phi_0 - \phi_k], \end{aligned}$$

unde $m_k = \frac{k_A \cdot A_k}{A_0}$ reprezintă gradele de modulație parțiale.

Puterea disipată de semnalul MA, cu semnal de modulație o sumă de oscilații armonice, pe o rezistență de 1Ω , precum și valoarea efectivă a acestui semnal, au expresiile:

$$P = \frac{A_0^2}{2} \left(1 + \sum_{k=1}^{k_M} \frac{m_k^2}{2} \right) = P_0 \left(1 + \sum_{k=1}^{k_M} \frac{m_k^2}{2} \right), \quad (15)$$

$$X_{ef} = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{k_M} \frac{m_k^2}{2}}. \quad (16)$$

Puterea utilă este dată de relația:

$$P_u = \frac{A_0^2}{2} \sum_{k=1}^{k_M} \frac{m_k^2}{2} = P_0 \sum_{k=1}^{k_M} \frac{m_k^2}{2}. \quad (17)$$

Expresiile omoloage celor date de relațiile (15) și (16), folosind de data aceasta reprezentarea în frecvență a semnalului MA, cu semnal de modulație o sumă de oscilații armonice, sunt:

$$P = \frac{A_0^2}{2} + \sum_{k=1}^{k_M} \frac{A_{-k}^2}{2} + \sum_{k=1}^{k_M} \frac{A_k^2}{2} = A_{0,ef}^2 + \sum_{k=1}^{k_M} A_{-k,ef}^2 + \sum_{k=1}^{k_M} A_{k,ef}^2, \quad (18)$$

$$X_{ef} = \sqrt{P} = \sqrt{\frac{A_0^2}{2} + \sum_{k=1}^{k_M} \frac{A_{-k}^2}{2} + \sum_{k=1}^{k_M} \frac{A_k^2}{2}} = \sqrt{A_{0,ef}^2 + \sum_{k=1}^{k_M} A_{-k,ef}^2 + \sum_{k=1}^{k_M} A_{k,ef}^2} \quad (19)$$

Puterea utilă este calculată în acest caz cu relația:

$$P_u = P - P_0 = \sum_{k=1}^{k_M} \frac{A_{-k}^2}{2} + \sum_{k=1}^{k_M} \frac{A_k^2}{2} = \sum_{k=1}^{k_M} A_{-k,ef}^2 + \sum_{k=1}^{k_M} A_{k,ef}^2 \quad (20)$$

Spectrul de amplitudini al semnalului modulator periodic este reprezentat în figura 3.a), iar cel al semnalului modulat în amplitudine, în figura 3.b).

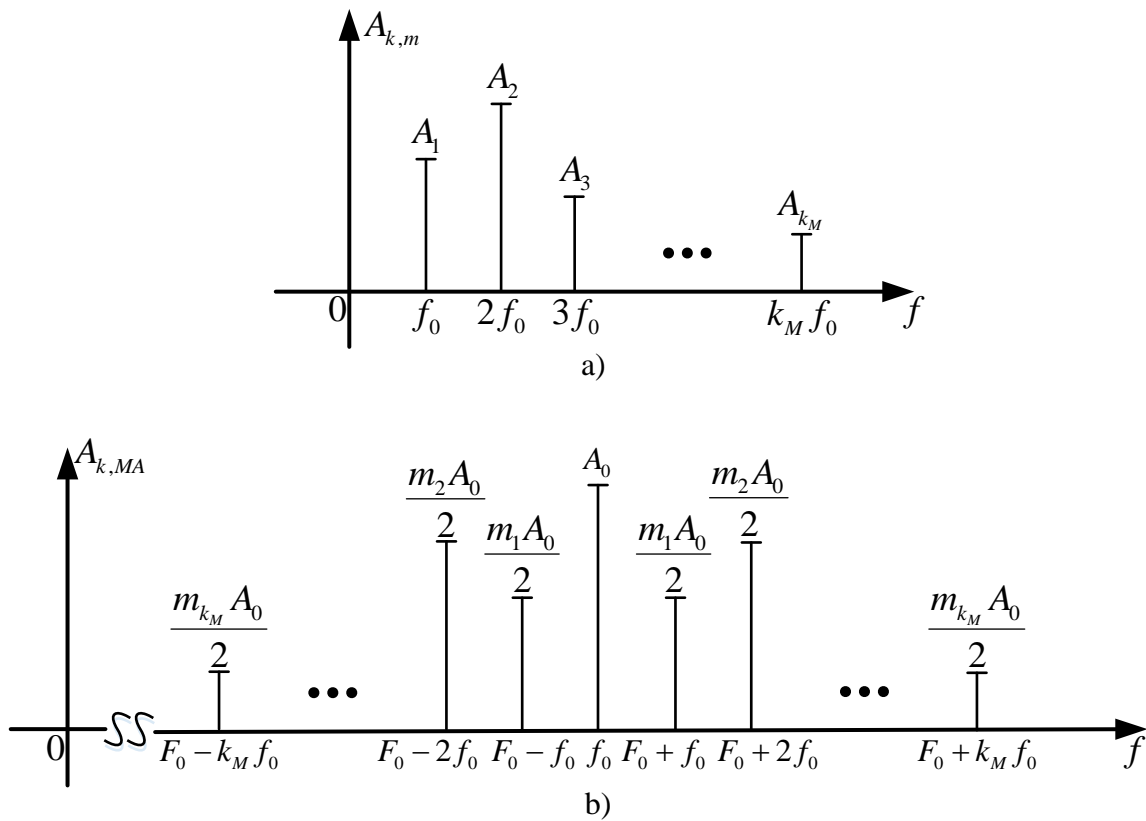


Figura 3. a) Spectrul de amplitudini al semnalului modulator periodic;
b) Spectrul de amplitudini al semnalului $x_{MA}(t)$ pentru un semnal modulator periodic.

Banda de frecvență ocupată de semnal este intervalul $[F_0 - k_M f_0, F_0 + k_M f_0]$, de lărgime $B = 2k_M f_0$.

3. Desfășurarea lucrării

Se realizează montajul din figura 4.

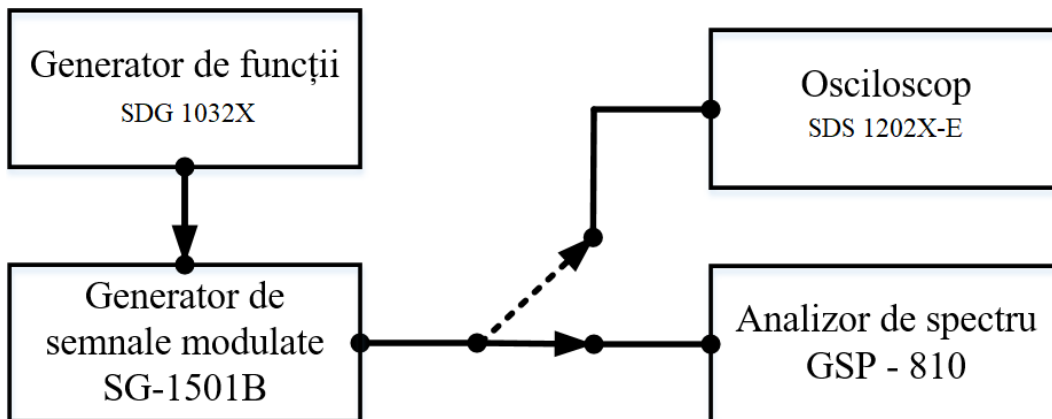


Figura 4. Schema de măsură folosită în lucrare.

A) Determinarea gradului de modulație folosind măsurători spectrale

Se conectează una din ieșirile generatorului de funcții (se apasă butonul Output de deasupra ieșirii) la intrarea generatorului de semnale modulate (EXT INPUT AF/L). Se conectează ieșirea generatorului de semnale modulate (OUTPUT) la intrarea analizorului spectral (RF INPUT 50Ω).

Se reglează parametrii semnalului mesaj de la generatorul de funcții: forma de undă sinusoidală (butonul Waveforms și apoi primul buton din stânga de sub ecran corespunzător formei sinusoidale), se reglează frecvența acestuia la 5 kHz (primul buton din stânga de sub ecran se apasă până este selectat Frequency cu albastru, apoi la tastatura se apasă 5 și din butoanele de sub ecran unitatea de măsură kHz). Valoarea efectivă este un parametru care se va varia în cadrul experimentului (prin modificarea valorii indicată de Amplitude).

Se reglează parametrii semnalului purtător și ai procesului de modulare astfel: se procedează astfel încât în gruparea de butoane MODULATION a generatorului de semnale modulate să fie activate (LED-uri indicatoare aprinse) numai butoanele AM și EXT. Se reglează frecvența purtătoare astfel: se apasă butonul FREQ din gruparea de butoane DATA ENTRY, se introduce valoarea 500 folosind tastele numerice alăturate și se apasă butonul kHz. S-a reglat astfel frecvența purtătoare la 500 kHz, iar pe afișajul FREQUENCY se va găsi valoarea 0.500.0 MHz, primul punct jucând rol de punct zecimal, iar al doilea este doar un separator de grupări zecimale pentru a ușura citirea. Riguros, numărul afișat este 0,500.0. Se reglează gradul de modulație la 20% astfel: se apasă butonul MOD (aflat mai jos de butonul FREQ folosit anterior), se

introduce valoare 20 folosind aceeași tastatură ca la operația anterioară și se apasă butonul ENT care ar trebui să aibă LED-ul aprins. După apăsare, LED-ul se va stinge, iar gradul de modulație introdus (20.0) se va putea citi pe afișajul EXT MODULATION aflat în stânga afișajului FREQUENCY. Atenție, gradul de modulație depinde de amplitudinea semnalului mesaj prin $m = K_A \cdot A_m / A_0$. Aparatul garantează că se va obține gradul de modulație introdus dacă semnalul de intrare are valoarea efectivă egală cu 1 V.

Se reglează parametrii analizorului spectral: se centrează ecranul în jurul frecvenței purtătoare (500 kHz) prin apăsarea butonului CENTER, introducerea valorii 0.5 și apăsarea butonului MHz. Se reglează parametrul SPAN la 5 kHz/div prin apăsarea butonului SPAN și folosirea butonului rotativ pentru selectarea valorii dorite din cele posibile. Se reglează nivelul de referință la 10 dBm prin apăsarea butonului REF LVL și folosirea butonului rotativ pentru selectarea valorii dorite din cele posibile.

Se dorește reglarea nivelului componentei purtătoare la 0 dBm. Pentru aceasta se măsoară purtătoarea cu un cursor prin apăsarea butonului MKR, introducerea valorii 0.5 și apăsarea butonului MHz. Se modifică nivelul componentei purtătoare de la generatorul de semnale modulate până când acesta devine 0 dBm măsurat cu analizorul spectral (atenție, nu afișat pe generatorul de semnale modulate, ci măsurat cu analizorul!) în felul următor: sub una din cifrele afișate pe un afișaj (EXT MODULATION, FREQUENCY sau OUTPUT LEVEL) va fi aprins un LED verde care va indica faptul că acea cifră este selectată. Se va aduce acel LED în cadranul OUTPUT LEVEL prin apăsarea repetată a unei săgeți duble (de exemplu ►►). Apoi se va selecta cea mai puțin semnificativă cifră din acel cadran prin apăsarea repetată a unei săgeți simple (de exemplu ►). Se va folosi butonul rotativ de sub gruparea de săgeți pentru a modifica nivelul purtătoarei. Se rotește din acest buton până la măsurarea pe analizorul spectral a unui nivel de 0 dBm pentru componenta purtătoare. (Pentru că impedanța de intrare în analizoarele spectrale nu mai este 50 Ω, valoarea afișată pe afișajul OUTPUT LEVEL al generatorului de semnale modulate probabil va diferi de 0 dBm, în general fiind mai mare).

Se poate determina acum factorul de divizare θ astfel:

$$\theta = \frac{0.2236 \cdot 10^{\frac{-OUTPUT LEVEL}{20}}}{2 \cdot 0.2236}.$$

Se măsoară nivelul componentelor spectrale al semnalului modulat A_0 , A_1 și A_{-1} folosind analizorul spectral pentru fiecare valoare efectivă a semnalului mesaj indicată în tabel. Pentru prima măsurătoare se procedează astfel: se reglează valoarea efectivă a semnalului mesaj prin apăsarea butonului al doilea de sub ecranul generatorului de funcții (de la stânga la dreapta) până când se selectează Amplitude cu albastru, se introduce valoarea 0.3 din tastatura și se apăsă butonul de sub ecran corespunzător unității V_{rms} . Se măsoară nivelul componentei spectrale A_{-1} cu analizorul spectral prin apăsarea butonului MKR, introducerea valorii 0.495 și apăsarea butonului MHz. Se trece valoarea măsurată în Tabelul 1 (atenție la luarea în considerare a semnului, + sau -, afișat pe analizor). Se procedează similar și pentru A_0 la frecvența de 500 kHz, respectiv pentru A_1 la frecvența de 505 kHz. Valorile măsurate sunt valori efective!

Se determină valorile efective (în volți) pentru fiecare componentă spectrală (tensiunea de referință folosită este 0.2236 V) și se trec în Tabelul 1. Toate valorile măsurate, trecute în Tabelul 1, sunt valori efective (analizorul măsoară valorile efective ale componentelor)!

Se calculează m_1 și m_{-1} folosind formula:

$$A_{k,ef} = \frac{m \cdot A_{0,ef}}{2}, k = \{-1, 1\}.$$

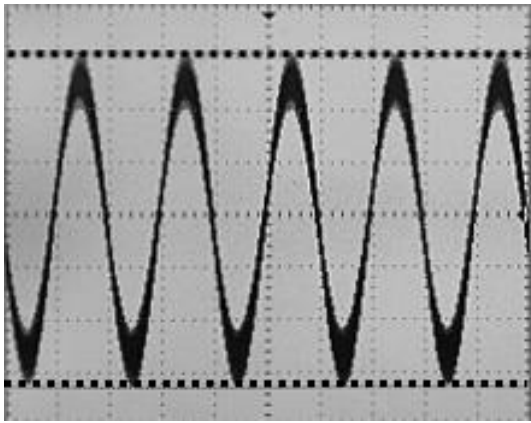
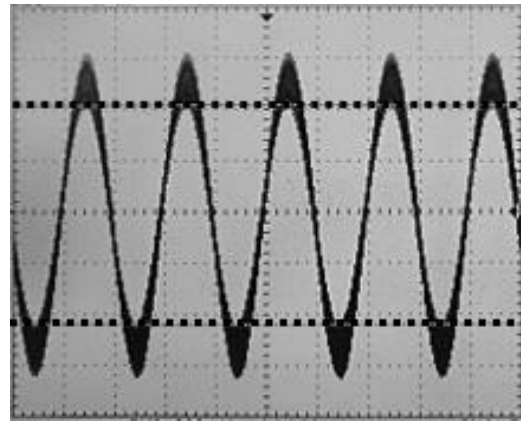
Tabelul 1. Determinarea spectrală a gradului de modulație pentru semnalul MA

$A_{M,ef}$ [V]	$A_{0,ef}$ [dBm]	$A_{1,ef}$ [dBm]	$A_{-1,ef}$ [dBm]	$A_{0,ef}$ [V]	$A_{1,ef}$ [V]	$A_{-1,ef}$ [V]	m_1	m_{-1}
0,3								
0,5								
0,7								
0,9								

B) Determinarea gradului de modulație folosind măsurători în domeniul timp

Se conectează ieșirea generatorului de semnale modulate (Output) la intrarea canalului 2 al osciloscopului (CH 2). Se reglează valoarea efectivă cea mai mică a semnalului modulator (la generatorul de funcții se selectează Amplitude cu albastru, se introduce valoarea 0.3 din tastatura și se apăsă butonul de sub ecran corespunzător unității V_{rms}). Se apăsă butonul Auto Setup al osciloscopului. Pentru efectuarea unor măsurători cu precizie cât mai bună se dorește ca semnalul să ocupe cât mai mult din ecran. Se apăsă butonul 2, corespunzător canalului 2 al osciloscopului, (să fie galben), se apăsă butoanele 1 și Math pentru a le dezactiva (să nu mai fie galbene), din butoanele de sub ecranul osciloscopului se apăsă butonul, de sub Adjust Coarse, astfel încât să se comute opțiunea din Coarse în Fine (pentru a selecta opțiunea dorită se apăsă butonul rotativ Intensity/Adjust) și apoi se modifică coeficientului de deflexie pe verticală din butonul rotativ de deasupra butonului 2 până când semnalul ocupă aproximativ 6 diviziuni pe verticală, similar cu reprezentările de pe pagina următoare.

Se măsoară valorile maxime și minime vârf-la-vârf pe care le ia semnalul modulat pentru fiecare valoare efectivă a semnalului mesaj. $2A_{max}$ va fi intervalul $A_{max} - (-A_{max})$ din figura 2.a), iar $2A_{min}$ va fi intervalul $A_{min} - (-A_{min})$ din aceeași figură. În acest prim caz valoarea efectivă a semnalului mesaj este $0.3 V_{rms}$. Pentru măsurarea $2A_{max}$ se apăsă butonul Cursors, se comută din butonul corespunzător opțiunii Source până când se ajunge la CH2 (butonul de sub ecranul osciloscopului corespunzător Source), și se plasează cei doi cursori (folosind butonul rotativ Intensity/Adjust care tocmai s-a activat) la valoarea maximă respectiv minimă a semnalului. Pentru a selecta cursorul pe care dorim să-l deplasăm se selectează din butonul al doilea de sub ecran (de la stânga la dreapta) Y1 sau Y2 și se apăsă butonul rotativ Intensity/Adjust pentru activarea cursorului respectiv. Valoarea indicată la ΔY (valoare luată în modul) reprezintă $2A_{max}$. Se mută cursorii în mod corespunzător pentru a măsura $2A_{min}$ și se citește valoarea în modul indicată la ΔY .

Măsurarea $2A_{\max}$ Măsurarea $2A_{\min}$

Se repetă aceste măsurători pentru restul valorilor efective ale semnalului mesaj. Formula (7) se poate rescrie astfel:

$$m = \frac{2A_{\max} - 2A_{\min}}{2A_{\max} + 2A_{\min}}$$

După completarea tabelului se observă forma de undă a semnalului modulat: se apasă Auto Setup, se aduce coeficientul de deflexie pe orizontală la $50 \mu\text{s}/\text{div}$ din butonul rotativ de la secțiunea Horizontal și se apasă butonul Run/Stop. Se observă semnalul mesaj în anvelopa semnalului purtător, similar cu figura 2.a).

Tabelul 2. Determinarea gradului de modulație pentru semnalul MA în domeniul timp

A_M [V _{rms}]	$2A_{\max}$ [V]	$2A_{\min}$ [V]	m	m [%]
0,3				
0,5				
0,7				
0,9				

Să se deseneze forma de undă a semnalului modulat în amplitudine pentru toate valorile efective (date în Tabelul 2) ale semnalului mesaj.

Se schimbă forma de undă generată (triunghiulară și apoi dreptunghiulară), se reglează valoarea efectivă la 0,5 V și se vizualizează în mod similar forma de undă a semnalului modulat. Se desenează aceste două forme de undă.

C) Se măsoară banda de frecvență ocupată de către semnalul MA, B_{MA} , folosind analizorul de spectru

Se va considera că formează banda semnalului toate componentele cu amplitudini mai mari decât 1% din amplitudinea componentei corespunzătoare semnalului purtător.

Se conectează din nou ieșirea generatorului de semnale modulate (Output) la intrarea analizorului spectral (RF INPUT 50 Ω). Se reglează parametrul SPAN al analizorului la 5 kHz/div prin apăsarea butonului SPAN și folosirea butonului rotativ pentru selectarea valorii dorite din cele posibile. Se reglează nivelul semnalului purtător (indicația OUTPUT LEVEL pe generatorul de semnale modulate – operația s-a descris mai sus) astfel încât componenta spectrală aflată la frecvența de 500 kHz să aibă un nivel de 0 dBm măsurat cu analizorul prin apăsarea tastei MKR, introducerea valorii 0.5 și apăsarea tastei MHz (condiția ar trebui să fie îndeplinită fără a necesita modificări. Se modifică dacă este nevoie).

Se reglează de la generatorul de funcții valoarea efectivă a semnalului mesaj la o valoare mai mare sau egală cu 0.3 V (condiția ar trebui să fie îndeplinită fără a necesita modificări. Se modifică dacă este nevoie).

Componentele cu amplitudini mai mari de 1% din cea a purtătoarei, în condițiile de față ($A_0 = 0$ dBm) sunt acele componente mai mari de -40 dBm. Conform figurii 3.b) are sens să se măsoare nivelul componentelor plasate pe frecvențele $F_0 \pm k \cdot f_0$, unde k este un număr întreg și, în cazul de față, $F_0 = 500$ kHz, $f_0 = 5$ kHz. Se recomandă măsurarea și notarea nivelurilor componentelor corespunzătoare frecvențelor date de $F_0 \pm k \cdot f_0$ de la $k = 0$ către valori pozitive până la întâlnirea a 3 componente consecutive cu niveluri mai mici decât -40 dBm, apoi să se reia măsurătorile la frecvențe date de $F_0 \pm k \cdot f_0$ de la $k = -1$ către valori negative până la întâlnirea a 3 componente consecutive cu niveluri mai mici decât -40 dBm. Banda va fi dată de diferența frecvențelor componentelor spectrale cu frecvență maximă, respectiv minimă care au nivelul mai mare de -40 dBm.

Se compară banda semnalului modulat cu banda de frecvență a semnalului modulator B_m (banda unui semnal sinusoidal cu frecvența egală cu 5 kHz, noțiune asimilată în Lucrarea 1).

D) Se măsoară lărgimea de bandă a generatorului de semnale modulate în amplitudine

Amplitudinea semnalului purtător se fixează astfel încât amplitudinea componentei spectrale pe frecvența purtătorului, $F_0 = 500$ kHz, să fie 0 dBm (condiția ar trebui să fie îndeplinită fără a necesita modificări. Se modifică dacă este nevoie.). Se fixează frecvența semnalului mesaj la $f_m = 5$ kHz (condiția ar trebui să fie îndeplinită fără a necesita modificări. Se modifică dacă este nevoie). Se dorește să se obțină gradul de modulație de 30%, adică nivelul componentelor spectrale laterale (pe frecvențele 505 kHz și 495 kHz) să fie -16.47 dBm.

Justificare: Știind că $A_{k,ef} = \frac{m \cdot A_{0,ef}}{2}$, $k = \{-1,1\}$, $A_{0,ef} = 0.2236$ [V], $U_{ref} = 0.2236$ V și gradul de modulație “m” dorit de 30% (sau 0,3) rezultă:

$$A_{k,ef} \Big|_{\text{dBm}} = 20 \lg \left(\frac{A_{k,ef}}{U_{ref}} \right) = -16.47 \text{ dBm}, k = \{-1,1\}.$$

Pentru aceasta se măsoară folosind cursorul analizorului spectral (MKR) nivelul componentei spectrale plasată la 505 kHz și se modifică valoarea efectivă a semnalului mesaj prin apăsarea butonului corespunzător Amplitude (de sub ecran) al generatorului de funcții și modificarea valorii folosind butonul rotativ până când nivelul măsurat cu analizorul este cel dorit.

Se schimbă frecvența semnalului modulator (mesaj) prin apăsarea butonului (de sub ecran) corespunzător Frequency al generatorului de funcții, introducerea valorii dorite și apăsarea butonului corespunzător kHz, conform Tabelului 3, până când amplitudinile componentelor laterale, A_{-1} și A_1 măsurate cu analizorul de spectru (modificând corespunzător frecvența la care se face măsurarea prin apăsarea MKR și introducerea noii valori), devin cu 3 dB mai mici față de valoarea de la care s-a început la $f_m = 5$ kHz (-16.47 dBm), adică -19.47 dBm. Frecvența corespunzătoare a semnalului modulator (mesaj) afișată pe generatorul de funcții este f_M . Banda de frecvență maximă a semnalului MA, dat de către generatorul de semnal modulat, este $B_{MA} = F_{1M} - F_{-1M}$, unde

F_{1M} și F_{-1M} sunt frecvențele corespunzătoare componentelor cu nivelurile A_1 , respectiv A_{-1} egale cu nivelul căutat (≈ -19.47 dBm).

Tabelul 3 Determinarea benzii de frecvență generatorului de semnale modulate

F_M [kHz]	5	7	9	11	15	...	$F_M =$
F_1 [kHz]	505	507	509				$F_{1M} =$
A_1 [dBm]	-16.47						$A_{1(-3\text{dBm})} \cong -19.47$
F_{-1} [kHz]	495	493	491				$F_{-1M} =$
A_{-1} [dBm]	-16.47						$A_{-1(-3\text{dBm})} \cong -19.47$

E) Se măsoară componentele spectrale ale semnalului MA pentru un semnal modulator dreptunghiular cu factorul de umplere 50%, frecvența $f_0 = 5$ kHz și amplitudine $A_m = 2 V_{\text{rms}}$.

Se schimbă forma de undă a semnalului modulator (mesaj) prin apăsarea butonului Waveforms al generatorului de funcții și apoi se selectează forma de undă dreptunghiulară prin apăsarea butonului corespunzător de sub ecran. Se reglează valoarea efectivă a acesteia la 1 V prin apăsarea butonului corespunzător Amplitude, introducerea valorii dorite și apăsarea butonului corespunzător V_{rms} (generatorul e proiectat să livreze semnalul cu parametrii afișați pe ecran într-o sarcină de 50 Ω . Cum impedanța sa de ieșire este tot de 50 Ω , se formează un divizor de tensiune alcătuit din impedanța de ieșire și de sarcină, ce determină ca în sarcină să ajungă un semnal de 2 ori mai mic decât semnalul generat. Pentru a compensa acest lucru generatorul din acest laborator va genera întotdeauna tensiuni duble față de cele afișate. Este clar că dacă impedanța de sarcină are o valoare mare – reprezentată în cazul de față de intrarea generatorului de semnale modulate, marcată pe acesta, egală cu 10 k Ω – divizorul de tensiune format va introduce o atenuare neglijabilă, iar în sarcină va ajunge aproape tot semnalul generat, care, reamintim, este dublu față de cel afișat. Utilizatorul trebuie să țină cont de acest fapt și, pentru a obține o valoare efectivă de 2 V la intrarea generatorului de semnale modulate, trebuie să se regleze o valoare efectivă de 1 V la generatorul de funcții. Unele generatoare permit specificarea impedanței de sarcină – fie High Z, fie 50 Ω – pentru afișarea corespunzătoare a valorilor).

Se reglează parametrul SPAN la 20 kHz/div. Se reglează nivelul semnalului purtător (indicația OUTPUT LEVEL pe generatorul de semnale modulate – operația s-a descris mai sus, la punctul A) astfel încât componenta spectrală aflată la frecvența de 500 kHz să aibă un nivel de 0 dBm măsurat cu analizorul prin apăsarea tastei MKR, introducerea valorii 0.5 și apăsarea tastei MHz (condiția ar trebui să fie îndeplinită fără a necesita modificări. Se modifică dacă este nevoie).

Se completează Tabelul 4. A_{-k} și A_k sunt componentele spectrale din banda laterală inferioară, respectiv banda laterală superioară, măsurate cu analizorul de spectru. Se măsoară toate componentele spectrale cu amplitudini mai mari de -40 dBm (până se întâlnesc măcar 3 componente consecutive cu niveluri mai mici de -40 dBm).

Tabelul 4 Măsurarea componentelor spectrale laterale pentru un semnal MA cu semnal modulator dreptunghiular

k	F_{-k} [kHz]	$A_{-k,ef}$ [dBm]	$A_{-k,ef}$ [V]	F_k [kHz]	$A_{k,ef}$ [dBm]	$A_{k,ef}$ [V]
1	495			505		
2	490			510		
...						

F) Se determină banda de frecvență B_{MA} ocupată de către semnalul MA, de la punctul E), considerând că intră în această bandă componentele spectrale cu amplitudini mai mari de -40 dBm conform instrucțiunilor de la punctul C).

G) Se măsoară primele k componente spectrale ale semnalului modulator (mesaj), unde k ia valorile din Tabelul 4.

Cum acest semnal are o frecvență de 5 kHz, el nu poate fi măsurat cu analizorul spectral, deci se va folosi osciloscopul pe post de analizor spectral.

Se conectează generatorul de funcții direct la osciloscop (intrarea CH2), fără a mai folosi generatorul de semnale modulate. Se apasă Auto Setup, se apasă butonul Math, se selectează din butoanele de sub ecranul osciloscopului Operator – FFT, Source – CH2. Se modifică din butonul rotativ (din secțiunea Horizontal) SEC/DIV astfel încât să intre cât mai multe perioade pe ecran (5 ms/DIV). Apoi, se activează Hz/div din butonul corespunzător de sub ecranul

osciloscopului se pune 20kHz folosind butonul rotativ SEC/DIV din secțiunea Horizontal.

Se folosesc cursorii pentru a măsura nivelurile componentelor, notate $A_{k,p}$: se apasă butonul Cursors, se selectează Source – Math și butonul corespunzător lui Y pentru a activa cursorii să măsoare nivelul și se folosește butonul rotativ Intensity/Adjust pentru a muta cursorii și a efectua măsurătorile. Valorile se citesc de la cursorul activ Y1 sau Y2 (în partea de jos a ecranului se vede care cursor este activ). Atenție, componentele spectrale ale semnalului dreptunghiular studiat sunt plasate la frecvențe date de $k \cdot 5$ kHz. Se poate schimba tipul cursorului în X (se apasă butonul corespunzător lui X de sub ecran) (măsoară frecvențele) pentru a identifica întâi componentele de măsurat. Se completează Tabelul 5. Osciloscopul are $U_{ref} = 1$ V, iar analizorul spectral are $U_{ref} = 0.2236$ V. Se calculează gradele de modulație parțială studiind figura 3.

Tabelul 5. Determinarea gradelor de modulație parțială

k	$A_{k,p,ef}$	$\frac{A_{k,p,ef}}{A_{1,p,ef}}$	$\frac{A_{-k,ef}}{A_{-1,ef}}$	$\frac{A_{k,ef}}{A_{1,ef}}$	m_{-k}	m_k
1						
2						
...						

H) Se repetă punctele E), F) și G) pentru un semnal modulator triunghiular simetric, frecvența $f_0 = 5$ kHz și valoarea efectivă $A_m = 1.2$ V.

I) Cu rezultatele din Tabelul 2 se construiește caracteristica modulatorului $m = f(A_m)$. Se determină K_A , panta acestei caracteristici.

J) Se fac prelucrările de date necesare completării tabelului 1 și se reprezintă grafic cele patru spectre.

K) Cu ajutorul tabelelor 1 și 2 se completează Tabelul 6.

În Tabelul 6, P_1 semnifică puterea calculată cu relația (9), iar P_2 puterea calculată cu relația (12). X_{1ef} și X_{2ef} se obțin folosind relațiile (10), respectiv (13). Puterile utile P_{U_1} , P_{U_2} se calculează cu ajutorul relațiilor (11), respectiv

(14). Pe coloana A_m au fost scrise valorile care au ajuns de fapt în sarcină (la intrarea generatorului de semnale modulate). Pe generator acestea au fost reglate la jumătate. Cauzele au fost explicate la punctul E).

Tabelul 6. Calculul puterilor semnalului MA

A_m [V]	P_1 [mW]	P_2 [mW]	X_{1ef} [V]	X_{2ef} [V]	P_{U_1} [mW]	P_{U_2} [mW]	$\frac{P_{U_1}}{P_1}$	$\frac{P_{U_2}}{P_2}$
0,3								
0,5								
0,7								
0,9								

L) Se reprezintă grafic spectrele de amplitudini normate $\frac{A_k}{A_0}$ și $\frac{A_k}{A_1}$ în funcție de frecvență, pentru semnalul MA, respectiv $\frac{A_{k,p}}{A_{1,p}}$ pentru semnalul modulator.

M) Cu ajutorul tabelului 5 se completează Tabelul 7.

În Tabelul 7, P_1 semnifică puterea calculată cu relația (15), iar P_2 puterea calculată cu relația (18). X_{1ef} și X_{2ef} se obțin folosind relațiile (16), respectiv (19). Puterile utile P_{U_1} , P_{U_2} se calculează cu ajutorul relațiilor (17), respectiv (20). Valorile efective folosite la calculul puterilor se obțin conform relației (21).

Tabelul 7

P_1 [mW]	P_2 [mW]	X_{1ef} [V]	X_{2ef} [V]	P_{U_1} [mW]	P_{U_2} [mW]	$\frac{P_{U_1}}{P_1}$	$\frac{P_{U_2}}{P_2}$

N) Se repetă punctul M) pentru semnalul de la punctul H).

4. Întrebări pregătitoare

- a) Să se reprezinte spectrul de amplitudine pentru un semnal modulat în amplitudine definit de relația: $x_{MA}(t) = 2 \left[1 + 0.3 \cos \left(2000\pi t + \frac{\pi}{2} \right) \right] \cos(6\pi \cdot 10^6 t)$, știind că $A_m = 1 \text{ V}$.
- b) Se poate demodula corespunzător semnalul modulator dacă expresia semnalului MA este $x_{MA}(t) = 3 \left[1 + 1.1 \sin(1000\pi t) \right] \cos(2\pi \cdot 10^6 t)$? Argumentați.
- c) Un semnal purtător de amplitudine 5 V și frecvență 100 kHz este modulat în amplitudine de o undă modulatorie armonică de frecvență 1 kHz, cu gradul de modulație 0.5. Scrieți expresia semnalului MA.
- d) Se poate realiza modulația între un semnal modulator dreptunghiular cu factor de umplere de 25 % și frecvență de 200 kHz și o purtătoare armonică de frecvență 13MHz? Argumentați.
- e) Cât este gradul de modulație în amplitudine, m_1 , dacă $A_1 = -9 \text{ dBm}$, iar $A_0 = 0 \text{ dBm}$ și $U_{ref} = 0.2236 \text{ V}$.
- f) Fie un semnal modulat în amplitudine format dintr-un semnal modulator armonic și o purtătoare armonică. Se măsoară cu osciloscopul $A_{\min} = 0$. Cât este gradul de modulație?
- g) Avem un semnal modulat în amplitudine format dintr-un semnal modulator armonic și o purtătoare armonică. Se măsoară cu osciloscopul $2A_{\min} = 3 \text{ V}$ și $2A_{\max} = 6 \text{ V}$. Cât este amplitudinea purtătoarei în absența semnalului modulator, A_0 ?
- h) Pe spectrul de amplitudine a unui semnal modulat în amplitudine se măsoară următoarele $A_0 = 0 \text{ dBm}$, $A_{-1} = A_1 = -9 \text{ dBm}$, $A_{-2} = A_2 = -25 \text{ dBm}$. Știind că $U_{ref} = 0.2236 \text{ V}$, să se calculeze puterea semnalului MA.
- i) Pe spectrul de amplitudine a unui semnal modulat în amplitudine (semnal modulator armonic, purtătoare armonică) se măsoară $A_0 = -0.5 \text{ dBm}$. Știind că gradul de modulație este de 35% și $U_{ref} = 0.2236 \text{ V}$, să se calculeze puterea semnalului MA.

j) Fie un semnal modulată în amplitudine format dintr-un semnal modulator sinusoidal cu frecvența egală cu 10 kHz și o purtătoare armonică cu frecvența egală cu 1 MHz. Care este banda semnalului modulată?

k) Fie 3 semnale mesaj (modulatoare) x_1 , x_2 și x_3 . Banda semnalului x_1 este 50 kHz, banda semnalului x_2 este 300 kHz, iar banda semnalului x_3 este 5 kHz. Sunt disponibile 3 semnale purtătoare armonice x_{p1} , x_{p2} și x_{p3} cu frecvențele 10 MHz, 10,32 MHz și 10,38 MHz. Alegeți perechile semnal mesaj – semnal purtător care ar putea fi folosite astfel încât să transmitem semnalele MA rezultate pe același canal, în același timp.

5. Întrebări

- Cum trebuie să arate caracteristica ideală $m(A_m)$ și ce semnificație are abaterea de la forma ideală?
- Ce caracteristici ale osciloscopului pot influența precizia măsurării gradului de modulație?
- Cum se poate determina caracteristica unui modulator MA utilizând numai un voltmetru de valori de vârf?
- Cum se explică valoarea benzii de frecvență a generatorului de semnale MA, măsurată la punctul E)?
- Cum se poate determina caracteristica unui modulator MA folosind numai un voltmetru de valori efective?

6. Aplicații

- La măsurarea cu osciloscopul a unui semnal MA se găsesc: $A_{\max} = 18 \text{ V}$, $A_{\min} = 2 \text{ V}$. Se cere valoarea sa efectivă.
- La măsurarea cu analizorul de spectru a unui semnal MA se constată că nivelul purtătoarei este cu 20 dB mai mare decât al componentelor laterale. Se cere determinarea gradului de modulație, m .
- Se generează un semnal MA punând $A_0 = 1 \text{ V}$, $A_m = 0,5 \text{ V}_{\text{rms}}$, $F_0 = 800 \text{ kHz}$, $f_m = 10 \text{ kHz}$. Să se determine, utilizând analizorul de spectru, gradul de modulație.
- Aceeași problemă, utilizând osciloscopul. Să se determine panta caracteristicii modulatorului, K_A . Să se măsoare componentele spectrale și să se reprezinte grafic spectrul de amplitudini al semnalului.