

Modulația de amplitudine

Scopul lucrării

Se studiază formele de undă și spectrele semnalelor transmise prin modulație cu undă continuă, cazul modulației de amplitudine (MA).

Modulația cu undă continuă: noțiuni de bază

Modulația este un procedeu care permite transmiterea unui semnal ce conține informație (denumit semnal modulator, sau mesaj), prin modificarea caracteristicilor esențiale ale unui semnal purtător, care are doar rolul de a transporta informația propriu zisă. De cele mai multe ori acest semnal purtător este unul sinusoidal, caz în care avem de a face cu o modulație cu undă continuă. Un astfel de semnal este descris complet de trei parametri: amplitudine, frecvență și fază inițială.

După cum semnalul modulator modifică unul dintre acești parametri, transmiterea se face cu modulație de amplitudine (MA), de frecvență (MF) sau de fază (MP). Ultimele două tipuri, MF și MP, sunt cunoscute ca modulație unghiulară.

Semnalul inițial, care trebuie transmis, este un semnal în banda de bază. Unul dintre efectele modulației este translatarea spectrului semnalului din banda de bază (centrat pe frecvența 0) într-o altă gamă de frecvențe, mai înaltă, adecvată transmisiei pe canal. În principiu, spectrul semnalului MA va fi centrat pe frecvența semnalului purtător.

Exemplu: Semnalul transmis în radiodifuziune este unul audio, cu un spectru de frecvențe având componente până la 20 kHz. Totuși, atunci când dorim să ascultăm un post de radio, de exemplu din gama FM, ne vom poziționa cu receptorul nostru pe o frecvență mult mai mare (de ex. 100 MHz). Aceasta este de fapt frecvența purtătoare folosită în transmisie, și calarea receptorului pe această frecvență permite efectuarea corectă a demodulării.

Modulația de amplitudine

Se consideră un semnal purtător de forma:

$$x_p(t) = A_p \cos(2\pi f_p t) \quad (1)$$

Fie semnalul modulator $x_m(t)$:

$$x_m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) \quad (2)$$

Expresia generală a unui semnal modulat în amplitudine MA, în care modulatorul este $x_m(t)$, iar purtătorul este semnalul sinusoidal în (1) este:

$$x_{MA}(t) = A_p (1 + k_a x_m(t)) \cos(2\pi f_p t) \quad (3)$$

sau în cazul modulatorului sinusoidal, avem:

$$x_{MA}(t) = A_p (1 + m \cos(\omega_m t)) \cos(\omega_p t) \quad (4)$$

Constanta k_a , având dimensiunea $[V^{-1}]$ se numește sensibilitate de amplitudine a modulatorului, iar m este gradul de modulație. În cazul modulatorului sinusoidal are expresia:

$$m = k_a \frac{A_m}{A_p} \quad (5)$$

Se observă în relația (3) că, în urma modulării, amplitudinea semnalului modulat în amplitudine (MA) nu mai este constantă, precum cea a semnalului purtător. Ea este influențată de către caracteristicile semnalului modulator, prin intermediul termenului $k_a x_m(t)$. Pentru că amplitudinea unui semnal sinusoidal este, prin definiție, o mărime pozitivă, se impune condiția:

$$|k_a x_m(t)| \leq 1 \quad (6)$$

În cazul în care această condiție nu este respectată, apare fenomenul de supramodulație, al cărui efect este distorsionarea anvelopei semnalului MA, afectându-se astfel demodularea corectă a semnalului.

În Fig. 1 se arată purtătoarea sinusoidală, un semnal modulator (sinusoidal), și două cazuri de modulare. În Fig. 1c) se observă un caz de modulare corectă, în timp ce în următorul caz (fig. 1d), apar distorsiuni ale anvelopei de modulație, din pricina fenomenului de supra-modulație ($m > 1$).

O condiție importantă pentru ca demodularea să se desfășoare corect este ca frecvența semnalului purtător să fie mult mai mare decât frecvența maximă din spectrul semnalului modulator (f_m):

$$f_p \gg f_m \quad (7)$$

Dacă această condiție este îndeplinită, gradul de modulație poate fi determinat destul de simplu în practică, folosind osciloscopul. Se reia semnalul modulat din Fig. 1c), anvelopa sa ilustrându-se prin linia punctată (Fig. 2) și spectrul semnalului modulat în amplitudine cu modulatorul cosinusoidal este reprezentat în Fig. 3.

Formula aproximativă de calcul a gradului de modulație folosind osciloscopul este:

$$m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} \cdot 100[\%] \quad (8)$$

Pentru exemplul din fig. 2 se observă că $A_{\max} = 1.5V$ și $A_{\min} = 0.5V$, de unde se obține $m = 50\%$. Amplitudinea semnalului purtător se poate obține conform relației:

$$A_p = \frac{A_{\max} + A_{\min}}{2} \quad (9)$$

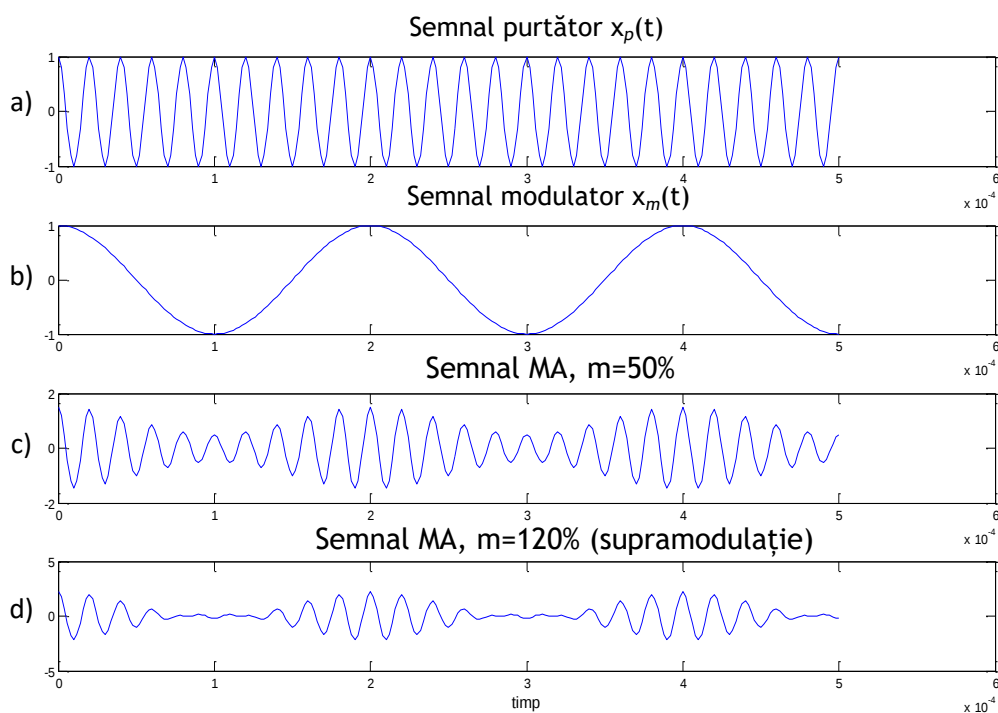


Fig. 1: Modulația de amplitudine cu modulator $x_m(t)$ sinusoidal și ilustrarea supramodulației

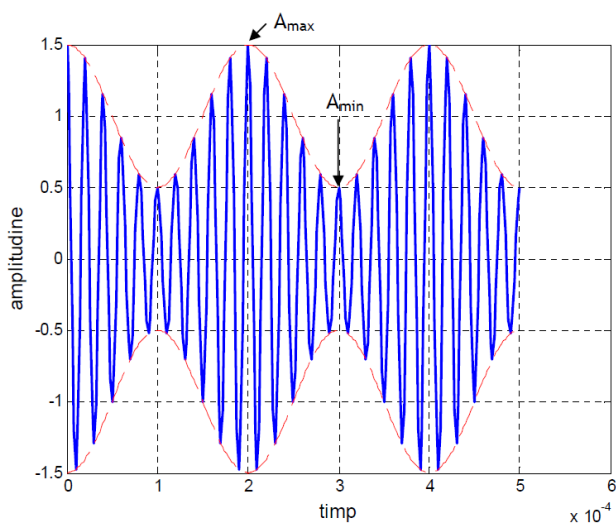


Fig. 2. Măsurarea gradului de modulație cu ajutorul osciloscopului folosind valorile extreme ale anvelopei semnalului MA.

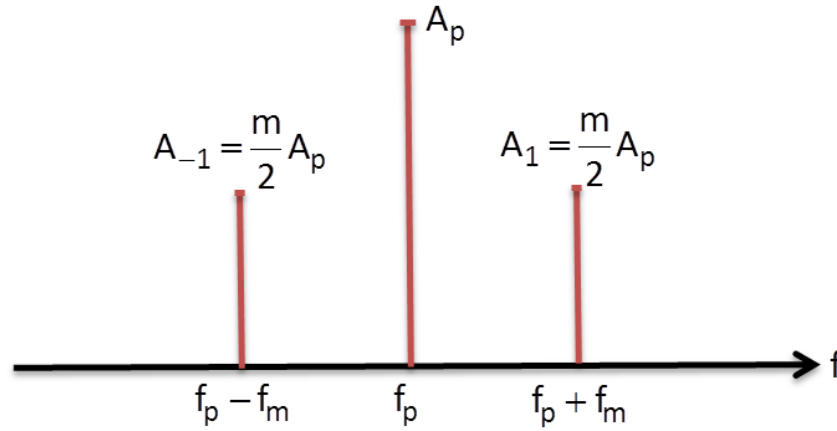


Figura 3. Spectrul semnalului MA cu modulator sinusoidal.

Puterea disipată de către semnalului modulat în amplitudine pe o rezistență de $R=1\Omega$, precum și valoarea efectivă a acestui semnal, calculate folosind reprezentarea în timp a semnalului MA, au expresiile:

$$P = \frac{A_p^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) = P_p \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) \quad (10)$$

$$X_{ef} = \sqrt{P} = \frac{A_p}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{m^2}{2}} \quad (11)$$

Puterea utilă este dată de puterea componentelor din benzile laterale și are expresia:

$$P_u = \frac{A_p^2}{2} \cdot \frac{m^2}{2} = P_p \cdot \frac{m^2}{2} \quad (12)$$

În ecuațiile (10), (11) și (12), A_p se calculează conform ecuației (9), pe baza măsurărilor în domeniul timp. Relațiile omoloage relațiilor (10) și (11), din domeniul frecvență a semnalului MA, sunt:

$$P = \frac{A_p^2}{2} + \frac{A_{-1}^2}{2} + \frac{A_1^2}{2} = A_{p,ef}^2 + A_{-1,ef}^2 + A_{1,ef}^2 \quad (13)$$

$$X_{ef} = \sqrt{P} = \sqrt{\frac{A_p^2}{2} + \frac{A_{-1}^2}{2} + \frac{A_1^2}{2}} = \sqrt{A_{p,ef}^2 + A_{-1,ef}^2 + A_{1,ef}^2} \quad (14)$$

Puterea utilă este dată în acest caz de relația:

$$P_u = \frac{A_{-1}^2}{2} + \frac{A_1^2}{2} = A_{-1,ef}^2 + A_{1,ef}^2 \quad (15)$$

Spectrul semnalului modulat în amplitudine rezultă prin aplicarea transformării Fourier asupra ecuației (3) și un exemplu grafic este dat în Fig. 3:

$$X_{MA}(\omega) = \pi A_c \left[\delta(\omega - \omega_p) + \delta(\omega + \omega_p) \right] + \frac{k_a A_c}{2} \left[X_M(\omega - \omega_p) + X_M(\omega + \omega_p) \right] \quad (16)$$

Se observă în spectru cele două impulsuri Dirac corespunzătoare purtătoarei, precum și faptul că un efect direct al modulației este „translatarea” spectrului semnalului din banda de bază (vezi $X_M(\omega)$) pe frecvența purtătoare. Banda ocupată de către semnalul modulat, situată la dreapta frecvenței purtătoare se numește bandă laterală superioară, iar cea din stânga acesteia se numește bandă laterală inferioară. Se poate deduce că banda semnalului MA este dublul benzii semnalului modulator:

$$B_{MA} = 2 \cdot B_M = 2 \cdot \omega_m \quad (17)$$

Trebuie remarcat că transmisia purtătoarei diminuează randamentul energetic al modulației, deoarece purtătoarea în sine nu conține informație utilă. De asemenea, întrucât o singură bandă laterală este suficientă pentru efectuarea demodulației, transmiterea a două benzi risipește banda. În practică se preferă alte versiuni ale MA, acolo unde este cazul:

- modulația de amplitudine cu purtătoare suprimată (MAPS) și două benzi laterale (prin modulatorul de produs) (engl. “*Suppressed-Carrier Amplitude Modulation*”)
- modulația în amplitudine cu bandă laterală unică (MABLU) (engl. “*Single Side-Band Amplitude Modulation*”, SSB-AM)
- modulația în amplitudine cu rest de bandă laterală (MARBL) (engl. “*Vestigial Side Band Amplitude Modulation*”, VSB-AM)

Descrierea montajului experimental

Montajul folosit în acest scop este alcătuit din: un generator de semnal, un osciloscop și un analizor de spectru conectate în mod corespunzător. Ieșirea generatorului de semnal se conectează atât la intrarea osciloscopului, cât și la intrarea analizorului de spectru. Forma de undă a semnalului modulator poate să fie sinusoidală, dreptunghiulară sau triunghiulară. Frecvența fundamentală a acestuia va fi fixată în jurul valorii $f_m = 20\text{kHz}$. Acest semnal va modula, un semnal purtător sinusoidal cu o frecvență de $f_p = 500\text{kHz}$. Semnalul modulat vor fi vizualizat pe osciloscop. Analiza spectrală se va face cu ajutorul analizorului de spectru.

Generator Pe același canal al generatorului:

- se generează un semnal sinusoidal cu purtătoarea $f_p = 500\text{kHz}$ și amplitudinea vârf-la-vârf $A_p = 2\text{ V}$.
- se modulează semnalul (folosind funcția „Mod”) cu un semnal modulator sinusoidal $f_m = 20\text{kHz}$ (folosind „AM Freq”). Forma de undă a semnalului modulator se setează cu ajutorul parametrului „Shape”, iar gradul de modulație se controlează folosind parametrul „AM Depth”.

Analizor de spectru

Center frequency: 0.5MHz (egală cu frecvența purtătoarei f_p);

Reference level: 10dBm

Span width: 40kHz/div

RBW: 3kHz RBW

Desfășurarea lucrării

1. Se reprezintă grafic semnalul modulat în amplitudine, conform formei observate pe osciloscop. Această operație se va efectua pentru un semnal modulator sinusoidal.
2. Se fixează gradul de modulație m la valorile indicate în Tabelul 1. Frecvența semnalului modulator este $f_m = 20\text{kHz}$, iar frecvența semnalului purtător se fixează la valoarea $f_p = 500\text{kHz}$ și amplitudinea purtătoarei de 2V vârf la vârf (A_p). Se verifică concordanța dintre gradul de modulație impus și cel determinat experimental din măsurătorile de pe osciloscop. Se măsoară pe osciloscop amplitudinile vârf-la-vârf maxime și minime, $2A_{\max}$ și $2A_{\min}$, iar formula (8) se poate rescrie astfel:

$$m = \frac{2A_{\max} - 2A_{\min}}{2A_{\max} + 2A_{\min}} \cdot 100[\%] \quad (18)$$

Se determină amplitudinea semnalului modulator A_m pe baza gradului de modulație impus și a amplitudinii semnalului purtător, folosind relația:

$$A_m = m \cdot A_p. \quad (19)$$

Cu ajutorul analizorului de spectru se măsoară componentele spectrale $A_p[\text{dB}]$, $A_{-1}[\text{dB}]$, $A_1[\text{dB}]$ ale semnalului MA. Valorile A_p , A_{-1} și A_1 măsurate în volți se obțin folosind tensiunea de referință, $U_{\text{ref}} = 223.6\text{mV}$. Se completează tabelul următor.

Tabelul 1

A_m [V _{ef}]	$2A_{\max}$ [div]	$2A_{\min}$ [div]	m [%]	A_p [dB]	A_{-1} [dB]	A_1 [dB]	A_p [V]	A_{-1} [V]	A_1 [V]
			33						
			50						
			60						

3. Cu rezultatele din Tabelul 1 se construiește caracteristica modulatorului $m = f(A_m)$. Se determină K , panta acestei caracteristici.
4. Se reprezintă grafic cele trei spectre corespunzătoare Tabelului 1. Se măsoară banda de frecvență ocupată de către semnalul MA, B_{MA} , folosind analizorul de spectru.

5. Cu ajutorul *Tabelului 1* se completează *Tabelul 2*. În tabelul 2, P_1 semnifică puterea calculată cu relația (10), iar P_2 este puterea calculată cu relația (12). X_{1ef} și X_{2ef} se obțin folosind relațiile (11) și (14). Puterile utile P_{u1} , P_{u2} se calculează cu (12) și (15).

Tabelul 2

A_m [V _{eff}]	P_1 [W]	P_2 [W]	X_{1ef} [V]	X_{2ef} [V]	P_{u1} [W]	P_{u2} [W]	$\frac{P_{u1}}{P_1}$	$\frac{P_{u2}}{P_2}$

Valorile efective folosite la calculul puterilor se obțin conform relației:

$$A_{kef} = U_{ref} \cdot \frac{A_k}{A_p} = U_{ref} \cdot 10^{\frac{A_k[dB]}{20}} \quad (19)$$

6. Se măsoară componentele spectrale ale semnalului MA pentru un semnal modulator dreptunghiular cu factorul de umplere 50%, frecvența $f_m = 10\text{kHz}$. Frecvența semnalului purtător este $f_p = 500\text{kHz}$ și amplitudinea 2V vârf la vârf. Se completează tabelul 3. A_{-k} și A_k sunt componentele spectrale din banda laterală inferioară respectiv banda laterală superioară, măsurate cu analizorul de spectru.

Tabelul 3

k	f_{-k} [kHz]	A_{-k} [dB]	A_{-k} [V]	f_k [kHz]	A_k [dB]	A_k [V]
1						
2						
...						

7. Se determină banda de frecvență, B_{MA} ocupată de către semnalul MA, considerând doar componentele spectrale cu amplitudini mai mari de -40dB . Ce fel de schimbări apar în spectrul semnalului MA față de cazul precedent ? Cum explicați aceste schimbări ?

Întrebări

1. Ce caracteristici ale osciloscopului pot influența precizia măsurării gradului de modulație ?
2. În ce constă aproximația în relația (8)? Care este efectul scăderii frecvenței purtătoare asupra acestei aproximații ?