

Lucrarea de laborator 4

Măsurarea caracteristicilor de frecvență

Scop: Familiarizarea studenților cu ridicarea și reprezentarea caracteristicilor de frecvență ale unor circuite (diporți).

Breviar teoretic

Răspunsul unui circuit liniar la semnal sinusoidal sau cosinusoidal

Aplicînd la intrarea unui diport pasiv un semnal cosinusoidal

$$x(t) = U_i \cos(\omega t)$$

acest răspuns este tot un semnal cosinusoidal, avînd expresia

$$y(t) = U_i H(\omega) \cos(\omega t)$$

$H(\omega)$ reprezintă valoarea funcției de transfer la frecvența f . Ținînd cont că $H(\omega)$ este o mărime complexă, cu modulul $|H(\omega)|$ și argumentul $\arg\{H(\omega)\}$, semnalul real $y(t)$ se mai poate scrie

$$y(t) = U_i |H(\omega)| \cos(\omega t + \arg\{H(\omega)\})$$

Se observă că amplitudinea semnalului de la ieșire este

$$U_0 = U_i |H(\omega)|$$

iar semnalul de ieșire este defazat față de semnalul de intrare cu valoarea

$$\varphi = \arg\{H(\omega)\}$$

Caracteristica de amplitudine $|H(\omega)|$

$H(\omega)$ se măsoară aplicînd la intrarea circuitului un semnal sinusoidal cu frecvența f și amplitudinea U_i cunoscute. Se măsoară amplitudinea semnalului de la ieșirea circuitului, U_0 , și se determină modulul funcției de transfer la frecvența f :

$$|H(\omega)| = \frac{U_0}{U_i}$$

Dacă $|H(\omega)| > 1$ se spune că circuitul amplifică, dacă $|H(\omega)| < 1$ circuitul atenuază.

$$\text{amplificarea} = |H(\omega)|, \quad \text{atenuarea} = \frac{1}{|H(\omega)|}$$

Caracteristica de amplitudine exprimată în decibeli (dB) se notează $|H(\omega)|_{dB}$:

$$|H(\omega)|_{dB} = 20 \lg |H(\omega)| = 20 \lg \frac{U_0}{U_i} \quad (1)$$

Dacă voltmetrul este etalonat în dB în raport cu o tensiune de referință U_{ref} (de exemplu $U_{ref} = 0,775V$, care să conducă la o putere $P_{ref} = 1 \text{ mW}$ în cazul unei măsurători pe o rezistență de referință de 600Ω), rezultă

$$|H(\omega)|_{dB} = 20 \lg \frac{U_0}{U_{ref}} - 20 \lg \frac{U_i}{U_{ref}}$$

unde $20 \lg \frac{U_0}{U_{ref}}$ este chiar indicația voltmetrului în decibeli (pe care o putem nota $U_0 [dB]$). Se obține

$$|H(\omega)|_{dB} = U_0 [dB] - U_i [dB]$$

Caracteristica de amplitudine reprezintă variația modulului funcției de transfer cu frecvența f , sau pulsația $\omega = 2\pi f$.

Reprezentarea grafică a caracteristicii de amplitudine se poate face într-un sistem de coordonate liniar, semilogaritmice sau dublu logaritmice (figura 1), preferându-se de obicei al treilea sistem. Sistemul dublu logaritmice, denumit și diagramă Bode, permite reprezentarea caracteristicilor de amplitudine într-un domeniu larg de frecvențe.

Definiții: Domeniul de frecvențe unghiulare (pulsații) cuprins între o valoare arbitrară ω_1 și $10\omega_1$ se numește **decadă**, iar domeniul cuprins între ω_1 și $2\omega_1$, **octavă**.

Observație: denumirea de *octavă* poate părea confuză în cazul dublării frecvenței, dar provine din teoria muzicii, unde o octavă reprezintă cele 8 note muzicale cuprinse între o notă de o frecvență oarecare și aceeași notă de frecvență de 2 ori mai mare; de exemplu nota LA din octava 1 = 440Hz, LA din octava 2 = 880Hz).

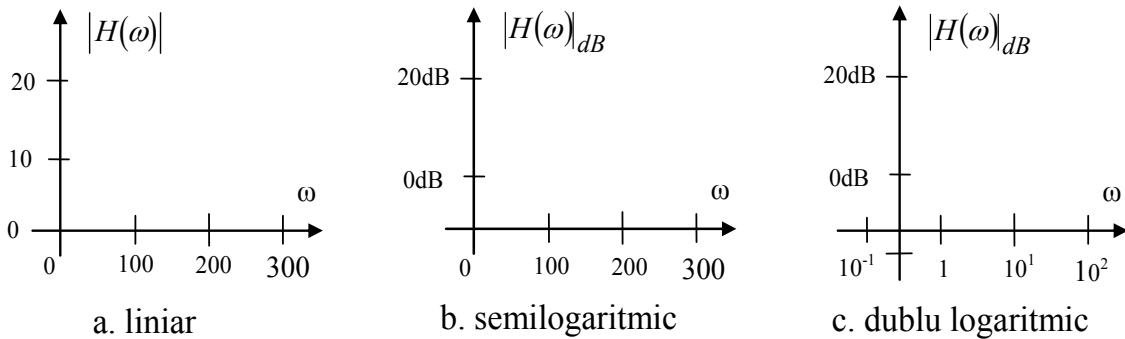


Figura 1

O importanță deosebită, pentru caracteristica de amplitudine, o reprezintă frecvența f_{-3dB} . Această frecvență este cea la care modulul funcției de transfer este cu 3 dB mai mic decât valoarea maximă a acestuia (exprimat în dB).

$$|H(\omega_{-3dB})|_{dB} = \max_{\omega} \{|H(\omega)|_{dB}\} - 3 \quad \text{sau}$$

$$|H(\omega_{-3dB})| = \frac{\max_{\omega} \{|H(\omega)|\}}{\sqrt{2}} \cong 0.707 \cdot \max_{\omega} \{|H(\omega)|\}$$

Se calculează folosind relația (1) că o reducere a valorii modulului de $\sqrt{2}$ ori echivalează cu o scădere cu (foarte aproape de) 3 dB a modulului funcției de transfer exprimat în dB.

În acest scop, la începutul sesiunii de măsurători se reglează nivelul generatorului astfel încât voltmetrul conectat la ieșire să indice, la frecvența aleasă f_0 , un nivel de 0 dB, și se introduce în schema de măsură un voltmetru pentru monitorizarea nivelului tensiunii de intrare, a cărei valoare se reține. În cursul măsurătorii se corectează fin nivelul de la generator pentru a menține nivelul tensiunii de intrare la aceeași valoare. Frecvența f_0 se alege astfel încât în domeniul respectiv de frecvențe nivelul tensiunii de ieșire să nu varieze mult cu frecvența.

Circuitele studiate în lucrare sînt date în figura 2:

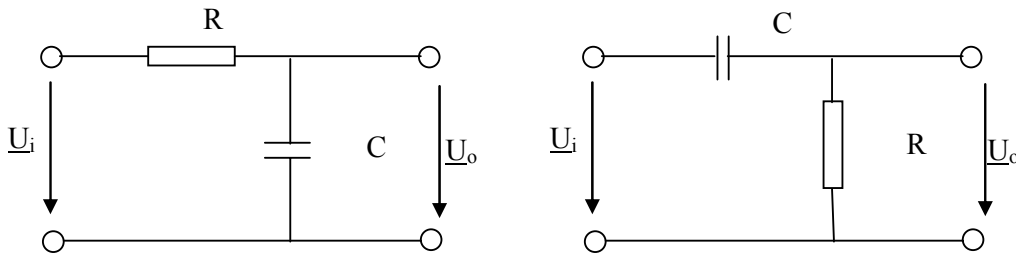


Figura 2: a) FTJ - Circuitul de integrare

b) FTS - Circuitul de derivare

Formulele de calcul pentru funcțiile de transfer ale circuitelor sînt:

- Circuitul de integrare, numit și *filtru trece-jos* (FTJ)

$$H(\omega) = \frac{U_o}{U_i} = \frac{Z_C}{R + Z_C} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad \arg\{H(\omega)\} = -\arctg(\omega RC)$$

- Circuitul de derivare, numit și *filtru trece-sus* (FTS)

$$H(\omega) = \frac{U_o}{U_i} = \frac{R}{R + Z_C} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

$$|H(\omega)| = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad \arg\{H(\omega)\} = \frac{\pi}{2} - \arctg(\omega RC)$$

În ambele cazuri frecvența de tăiere (frecvența la care modulul funcției de transfer scade cu 3dB) este dată de relația

$$f_t = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

unde R și C sînt valorile pentru rezistență, respectiv condensator din circuitul respectiv.

Desfășurarea lucrării

Observație: Se verifică pentru multimetrul numeric ca măsurarea tensiunii în dB să se facă avînd ca rezistență de referință 1000Ω :

- se apasă **SHIFT+SET** (butoanele 10+11 ANEXA 4).
- se apasă **Ω** (butonul 3 ANEXA 4) și se setează valoarea 1000. Se apasă, din nou, butonul **SET**.

Astfel nivelul indicat este exprimat în dB ($0 \text{ dB} = 1 \text{ V}$) și nu în dBm.

(Dacă s-ar dori indicarea în dBm, s-ar seta prin aceeași metodă valoarea 600)

Atenție! indiferent de valoarea setată pentru rezistență, pe afișaj este aprinsă indicația luminoasă dBm (este un marcaj pre-tipărit pe mască și nu se modifică). Prin urmare, singurul mod de a ști ce referință se folosește este cel prezentat. La milivoltmetrul analogic, scările sînt marcate explicit în dB și dBm.

Dacă afișajul în dB/dBm nu este aprins, se apasă **ACV**, apoi **SHIFT+dBm**.

1. Măsurarea frecvenței de tăiere a circuitului integrator (filtru trece jos)

a) Se calculează frecvența de tăiere pentru circuitul FTJ din figura 2a), pe baza formulei (2) și a valorilor componentelor de la masă (care se pot citi în codul culorilor, sau măsura folosind multimetrul numeric, pe modul ohmetru, respectiv capacimetru).

b) Se realizează circuitul pe placa de test (vezi lucrarea 3 pentru modul de interconectare, pe spatele plăcii, a găurilor). În figura 3 este precizat modul de conectare a aparatelor de măsură și a generatorului. Blocul D din figură simbolizează circuitul care se măsoară. Semnalul de la intrare se măsoară cu multimetrul numeric, iar cel de la ieșire cu milivoltmetrul analogic de c.a.

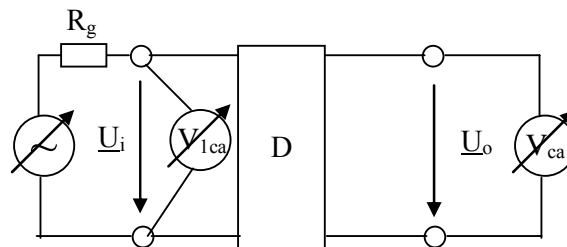


Figura 3: Montajul de măsură pentru ridicarea caracteristicii de amplitudine

Circuitul de integrare este un filtru trece jos (FTJ). La frecvențe joase funcția de transfer în tensiune este aproximativ 1 ($U_o = U_i$).

La intrarea circuitului se introduce (de la generatorul de funcții) un semnal sinusoidal de frecvență joasă $f_1=100\text{Hz}$, fără componentă continuă. Nivelul (amplitudinea) se reglează din butonul **AMPL** pînă cînd pe scara de dB a multimetrului numeric se citește $U_i[\text{dB}] = 0 \text{ dB}$.

Observație: Reglați selectorul de scări (3) al milivoltmetrului analogic de c.a. pentru a fi pe scara de 0dB ! Există o dungă albă pe selectorul (3), care va fi rotită în dreptul zonei gri marcată 0dB, și nu *între* 2 zone gri.

Nivelul semnalului de la ieșire $U_o[\text{dB}]$, se măsoară pe scara de dB a milivoltmetrului analogic de c.a.; ar trebui ca $U_o[\text{dB}] = U_i[\text{dB}] = 0\text{dB}$.

Se crește frecvența semnalului de intrare (folosind selectorul rotativ de la generator, și eventual cele 2 săgeți de sub el, pentru a selecta ce digit se reglează; astfel se poate regla fin sau brut frecvența) pînă cînd $U_o[\text{dB}] = -3 \text{ dB}$. Aceasta reprezintă frecvența de tăiere a circuitului, $f_{-3\text{dB}}$.

Se observă că amplitudinea semnalului de la intrare nu se modifică, sau se modifică foarte puțin; în acest caz, se ajustează fin de la generator pentru a fi egală cu 0dB, și se mai ajustează frecvența pentru ca $U_o[\text{dB}] = -3 \text{ dB}$.

Observație importantă: Efectul filtrului este, evident, modificarea amplitudinii semnalului de la *ieșire*, nu de la *intrare*, aceasta fiind dată de generator. Reglarea frecvenței de la generator nu ar trebui să aibă efect și asupra amplitudinii acesteia, care se reglează independent din butonul AMPL. Totuși, poate apare o modificare a amplitudinii de la *intrare*; acesta este un fenomen parazit, nedorit, cauzat de modificarea cu frecvența a reactanței condensatorului, deci implicit a impedanței de intrare a filtrului. Această impedanță de intrare vine în paralel cu rezistența de ieșire a generatorului, *care este nenulă*. Dacă generatorul ar fi o sursă ideală cu $R_g=0$, acest fenomen nedorit nu ar apărea. În lucrările precedente, la generator am conectat doar osciloscopul, care are o impedanță foarte mare ($1\text{M}\Omega$), deci acest efect nu apărea.

Dacă valorile R-C alese sînt suficient de mari, astfel încît „încărcarea” generatorului să fie slabă, modificarea cu frecvența a amplitudinii de la intrare este neglijabilă, și se poate renunța la voltmetrul de la intrare.

c) Se verifică în continuare liniaritatea circuitului cu nivelul de semnal. Se modifică cu butonul **AMPL** nivelul (amplitudinea) semnalului de intrare la -5 dB , 0dB și $+5 \text{ dB}$ măsurîndu-se nivelul semnalului de ieșire al circuitului în dB. Se va lucra cu semnal sinusoidal de frecvență $f_{-3\text{dB}}$. Se modifică după caz selectorul de scări (3) al milivoltmetrului – vezi anexa 4. Observați că în cazul scărilor în dB, citirea se face aditiv; de exemplu, dacă selectorul este pe scara de -10dB și acul indică 2dB , valoarea măsurată este -8dB .

Circuitul este liniar? (Nivelul semnalului de la ieșire se modifică cu aceeași valoare în dB ca și cel de la intrare?).

2. Măsurarea caracteristicii amplitudine-frecvență.

a) Se determină modulul funcției de transfer pentru circuitul integrator (filtru trece jos) (figura 2a). La intrarea circuitului se introduce un semnal sinusoidal de frecvență f_i avînd nivelul (amplitudinea) reglat la $U_i[dB] = 0dB$. Se măsoară pe scara de dB a milivoltmetrului de c.a. nivelul semnalului de la ieșire $U_o[dB]$. Modulul funcției de transfer va fi $|H(\omega)|_{dB} = U_o|_{dB} - U_i|_{dB}$. Măsurarea se va efectua la frecvențele $f_i = \frac{f_{-3dB}}{10}, \frac{f_{-3dB}}{4}, \frac{f_{-3dB}}{\sqrt{3}}, f_{-3dB}, \sqrt{3}f_{-3dB}, 4f_{-3dB}, 8f_{-3dB}, 10f_{-3dB}, 40f_{-3dB}$, unde f_{-3dB} este frecvența determinată la punctul 1b).

b) Din măsurătorile efectuate la punctul 2a) se determină panta filtrului în banda de oprire (zona de frecvențe mai mari ca f_{-3dB}). Panta filtrului se va calcula atît în dB/decadă cît și în dB/octavă (cu cîți decibeli a scăzut amplitudinea cînd frecvența semnalului crește de 10 ori, respectiv de 2 ori).

c) Se reprezintă grafic pe hîrtia logaritmică modulul funcției de transfer funcție de frecvență pentru circuitul integrator. De ce acest circuit îndeplinește funcția de filtru trece jos?

3. Măsurarea frecvenței de tăiere a circuitului derivator (filtru trece sus)

a) Se calculează frecvența de tăiere pentru filtrul trece sus (FTS) (figura 2b).

b) Se realizează pe placa de test schema circuitului FTS. Procedînd ca la punctul 1b) se determină frecvența de tăiere la -3dB, cu următoarea deosebire: nu se va pleca de la frecvența de 100 Hz, ci de la o frecvență de valoare mare (ex: 200 kHz), la care se reglează $U_i[dB] = 0dB$ și se verifică dacă $U_o[dB] = 0dB$. Apoi se va scădea frecvența pînă cînd se ajunge cu indicația $U_o[dB] = -3dB$.

4. Măsurarea caracteristicii amplitudine-frecvență.

a) Procedînd ca la punctul 2a) se determină modulul funcției de transfer pentru filtrul trece sus (figura 2b). Măsurarea se va efectua la frecvențele $\frac{f_{-3dB}}{10}, \frac{f_{-3dB}}{4}, \frac{f_{-3dB}}{\sqrt{3}}, f_{-3dB}, \sqrt{3}f_{-3dB}, 4f_{-3dB}, 8f_{-3dB}, 10f_{-3dB}, 40f_{-3dB}$, unde f_{-3dB} este frecvența determinată la punctul 3b).

b) Din măsurătorile efectuate la punctul 4a) se determină panta filtrului în banda de oprire (zona de frecvențe mai mici ca f_{-3dB}). Panta filtrului se va calcula atît în dB/decadă cît și în dB/octavă (cu cîți decibeli a scăzut amplitudinea pentru un raport al frecvențelor de 10 ori, respectiv de 2 ori). Se vor alege oricare 2 frecvențe din tabel care se află în raportul cerut.

c) Se reprezintă grafic modulul funcției de transfer funcție de frecvență pentru circuitul derivator. De ce acest circuit îndeplinește funcția de FTS?

5. **Determinarea răspunsului în domeniu timp pentru circuitele FTJ/FTS**

Pentru a vedea de ce circuitele FTJ/FTS se numesc respectiv integrator/derivator, se aplică la intrarea diportului un semnal *dreptunghiular* de o frecvență în jurul valorii f_{3dB} și se vizualizează semnalul de la ieșirea diportului cu osciloscopul. Se va observa forma de undă respectivă și se vor evidenția caracteristicile răspunsului unui circuit RC de integrare, respectiv de derivare.

Întrebări pregătitoare pentru laborator

Atenție! veniți cu calculator științific!

1. Să se transforme în decibeli următoarele tensiuni: $U_1=2V$, $U_2=5V$, $U_3=10V$, $U_4=200mV$, $U_5=800mV$, $U_6=400mV$. Se va considera drept tensiune de referință $U_{ref}=1V$.
2. Să se deducă expresia funcției de transfer, modulul și argumentul funcției de transfer pentru circuitele din figura 2
3. Determinați valoarea $U_1/U_2|_{dB}$, dacă $U_1/U_2=20$.
4. Determinați valoarea U_1/U_2 , dacă $U_1/U_2|_{dB}=34\text{ dB}$.
Indicație $\lg 2 \approx 0,3$; $\lg 3 \approx 0,477$; $\lg 5 \approx 0,7$;

Exerciții

1. Să se calculeze modulul funcției de transfer în tensiune pentru circuitele din figura 2, la frecvențele $f_t/10$, $f_t/4$, f_t , $2f_t$, $4f_t$, $10f_t$.
2. Pentru circuitele din figura 4 să se calculeze modulul funcției de transfer la frecvențele $f_t/10$, $f_t/\sqrt{3}$, f_t , $\sqrt{3}f_t$, $10f_t$, unde f_t este frecvența de tăiere a circuitului, frecvența la care modulul funcției de transfer scade cu 3dB.

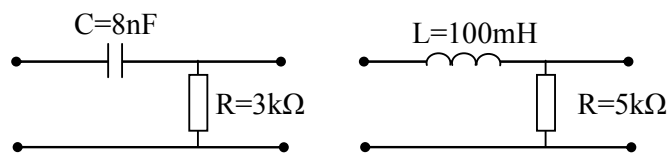


Figura 4

3. Pentru circuitul din figura 5 să se determine și să se reprezinte grafic modulul și argumentul funcției de transfer ($Z(\omega) = \frac{U(\omega)}{I(\omega)}$). Să se determine frecvența de rezonanță, frecvența la care modulul funcției de transfer este maxim.

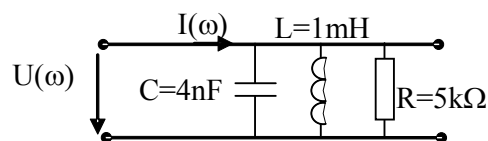


Figura 5

ANEXA 3. Milivoltmetrul analogic de curent alternativ

- Afișajul analogic cu scările de măsură:
 - 0 ÷ 1 (cu extensie 1.1), în V.
 - 0 ÷ 3 (cu extensie 3.5), în V.
 - 20dB ÷ 0dB (cu extensie +2dB)
 - 20dBm ÷ 0dBm (cu extensie +3dBm).
 - Reglajul de zero.
 - Comutatorul de selectare a scării – selectează valorile maxime de pe scara respectivă.
 - la selectarea valorilor 1mV, 10mV, 100mV, 1V, 10V, 100V citirea se face pe scara (a).
 - la selectarea valorilor 300μV, 3mV, 30mV, 300mV, 3V, 30V, citirea se face pe scara (b).
 - Pentru citirea în dB ($U_{ref} = 1V$) sau dBm ($U_{ref}=0,775V$) se însumează valoarea indicației cu cea a comutatorului (3).
- $$U_{dB} = 20 \cdot \lg \left(\frac{U}{U_{Ref}} \right)$$
- Conectorul de intrare (pentru semnalul de măsurat).
 - Conectorul de ieșire.
 - Comutatorul și indicatorul de funcționare.

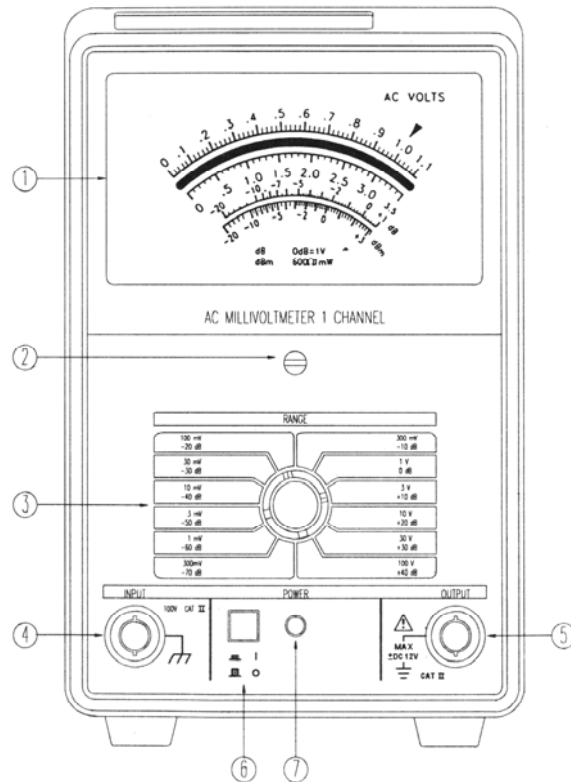


Figura A6. Milivoltmetrul de ca

Atenție : Milivoltmetrul de c.a. indică **tensiunea efectivă** a semnalului și este gradat pentru semnal **sinusoidal**. Pentru semnale de altă formă, aparatul va comite o eroare sistematică.

ANEXA 4 . Multimetrul numeric Instek GDM-8246

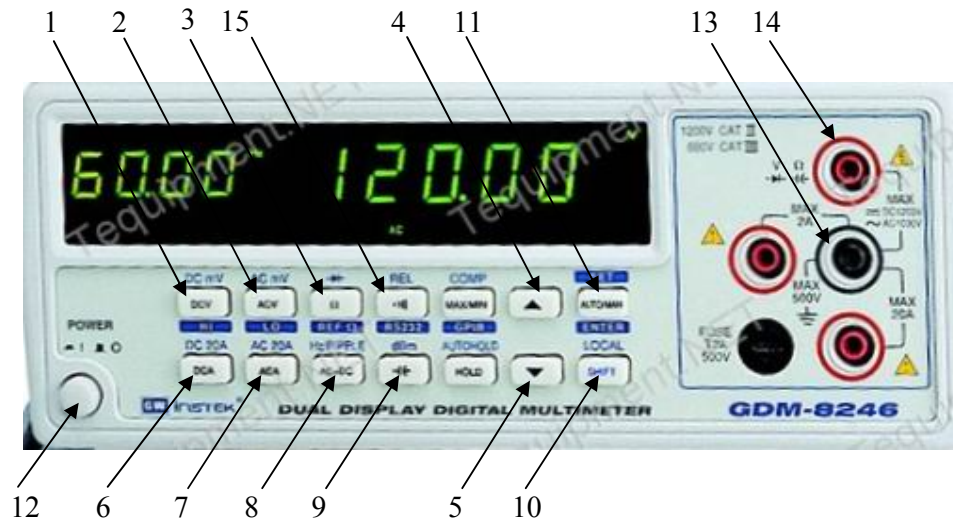


Figura A7. Panoul frontal al multimetrului numeric

1. butonul de selectare a măsurării tensiunii continue (Voltmetru de cc)
2. butonul de selectare a măsurării valorii efective a tensiunii alternative (Voltmetru de ca)
3. butonul de selectare a măsurării rezistenței (Ohmetru de cc)
4. butonul de creștere a valorii unui parametru intern aparatului (sau de schimbare a scărilor în sens crescător, pe modul manual)
5. butonul de micșorare a valorii unui parametru intern aparatului
6. butonul de selectare a măsurării intensității curentului continuu (Ampermetru de cc)
7. butonul de selectare a măsurării intensității efective a curentului alternativ (Ampermetru de ca)
8. butonul de selectare a măsurării tensiunii alternative cu tot cu componentă continuă
9. butonul de selectare a măsurării capacității unui condensator la frecvență joasă (Capacitmetru)
10. butonul de selectare a celei de-a doua funcții, scrisă cu albastru, pentru butoanele anterioare
11. butonul de selectare între realizarea automată sau manuală de modificare a scării de măsură / intrarea în modul de selectare a unora dintre parametrii interni ai aparatului. Ex: selectarea rezistenței de referință pentru a indica valoarea tensiunii efective în dB sau dBm.
12. butonul de pornire
13. borna de intrare negativă (GND)
14. borna de intrare pozitivă
15. detector de continuitate – atunci când este selectat și se ating între ele cele 2 borne, aparatul emite un semnal sonor; se folosește atunci când se dorește verificarea continuității unor fire, circuite, etc, fără a ne uita la afișaj.