

BURULEANU

Christian-Daniel

Grupa 125A $\rightarrow m = 125$

Nr. 125.3 $\rightarrow m = 3$

Generator de undă modulată
în durată (PWM) și caracteristică de
frecvență

Teme de proiectare

I/ Să se proiecteze un generator de undă modulată în durată (PWM) cu următoarele date:

- tensiunile de alimentare: $E = (10 + m/3)V$, unde m este numărul dim condică

- undă triunghiulară unipolară are amplitudinea de
 $V_{tri} = (5 + 0,2 \cdot m)V$

- frecvență de modulare (a semnalului care intră în comparător).

$$f = 4 \cdot m \cdot m$$

unde: m - numărul grupei, m - numărul dim condică

II/ Să se traseze caracteristicile de frecvență pentru funcția de transfer din tabelul de pe platformă, în cazul meu (125.3) fiind:

$$G(s) = \frac{1 + s \cdot T}{s \cdot T}; \quad T = 5 \cdot 10^{-1}s \rightarrow \text{constanta de timp din funcția de transfer}$$

Datele de proiectare calculate:

$$- E = (10 + m/3)V = 10 + 3/3 = 11V$$

$$- V_{tri} = (5 + 0,2 \cdot m)V = 5 + 0,2 \cdot 3 = 5,6V$$

$$- f = 4 \cdot m \cdot m = 4 \cdot 125 \cdot 3 = 1500 \text{ Hz}$$

Cuprins proiect:

1. Generator de undă modulată în durată
 - 1.1. Prezentarea generatorului
 - 1.2. Comparator fără histerezis
 - 1.3. Generator de undă triunghiulară liniară, lipsită
 - 1.4. Circuit pentru calculul valoarei absolute
 - 1.5. Semnalul de comandă
 - 1.6. Tabel sintetic cu datele de proiectare și rezultatele tuturor calculelor pentru cap. 1
 - 1.7. Simularea în PSIM a circuitului (cu pas de simulare mai mic sau egal cu 1μs)
 - 1.7.1. Schema simulată, cu valoare tuturor parametrilor elementelor din schema clar redate
 - 1.7.2. Formele de undă pentru trei caturi $U_{com} = f(1V, 3V, 5V)$. De asemenea afipați formele de undă pentru U_{com} sinusoidală de frecvență 50Hz, tensiune medie $V_{tri}/2$ și amplitudine 0.8. Vtre. Marcați pe formele de undă, prin text sau cursori, și indicați clar rezultatele măsurărilor pentru: amplitudini, perioade, frecvențe. Măsurati factorul de umplere al semnalului de la ieșirea generatorului PWM pentru cele trei valori ale lui U_{com} continuu. Măsurati factorul de umplere minim și maxim pentru tensiune de comandă U_{com} sinusoidală.
 2. Caracteristici de frecvență pentru funcția de transfer
 - 2.1. Caracteristica amplitudine - frecvență și deducerea ei
 - 2.2. Caracteristica faza-frecvență și deducerea ei

1. Generator de undă modulată în durată

1.1. Prezentarea generatorului

În literatură, acest tip de generator se mai numește și generator cu factor de umplere variabil sau generator PWM (Pulse Width modulation).

Generatorul de undă modulată în durată este un comparător căruia î se aplică pe o intrare o tensiune liniar variabilă, de către unui triunghiulară uni-polară, iar pe cealaltă intrare un semnal de comandă, care poate fi, de exemplu, semnalul de ieșire al unei regulatori, un semnal rampă sau o undă sinusoidală de frecvență mult mai mică decât frecvența undei triunghiulare.

În figura 1.1.1. este arătata schema electrică a generatorului de undă modulată în durată.

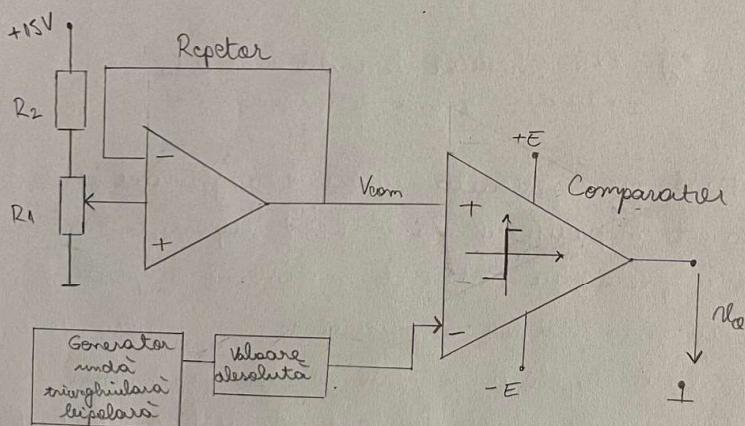


Fig. 1.1.1. Generator de undă modulată în durată

Formele de undă rezultate pentru o undă triunghiulară unipolară aplicată pe intrarea inversoră comparători cu un semnal rampă aplicat pe intrarea neinversoră sunt prezentate în fig. 1.1.2.

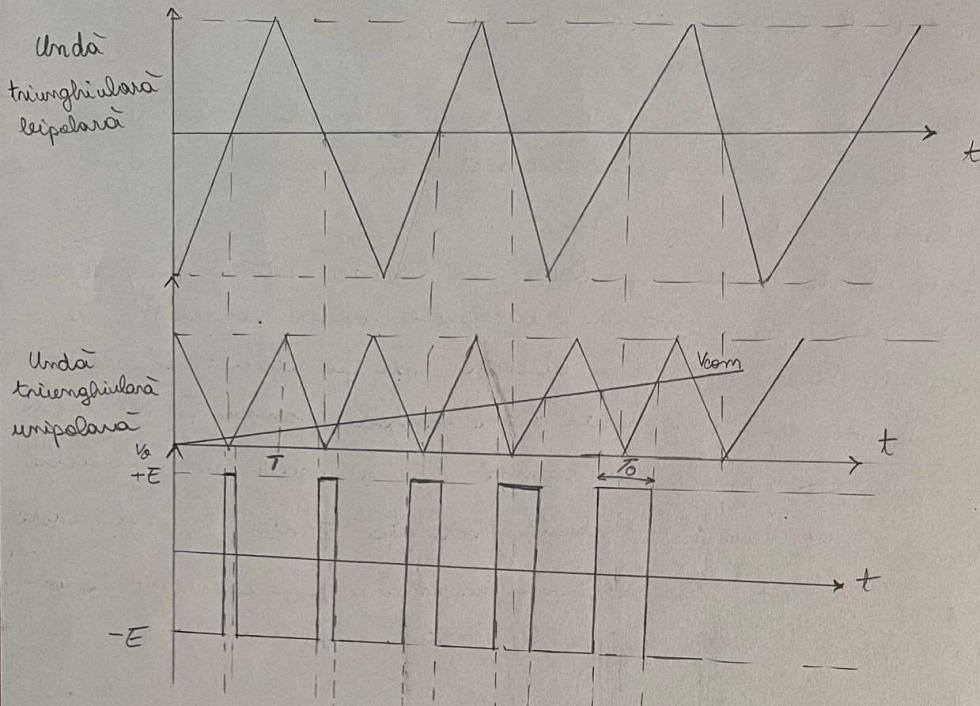


Fig. 1.1.2. Generator de undă modulată
în durată - formă de undă

Dacă se măsoară cu T perioada undei triunghiulare și cu T_0 , adică exemplu, durata căt comparatorul stă în $(+E)$, raportul T_0/T se numește factor de umplere sau factor de modulare și poate fi variat între zero și unu prin varierea amplitudinii semnalului de comandă.

Undă triunghiulară bipolară se poate transforma în undă triunghiulară unipolară de frecvență dublă utilizând circuitul de calcul al realorii absolute.

1.2. Comparator jumătate histeretic

Comparatoarele sunt circuite care amplifică diferența dintre două tensiuni aplicate la intrare, furnizând la ieșire tensiunea de saturare corespunzătoare semnalului diferenței acestora. Semnalul

tensiuni la ieșire este funcție de intrarea pe care se aplică aceeași diferență.

Comparatoarele sunt AC piciale care au un slew-rate foarte ridicat. Dar, nu slew-rate este caracteristica indicata în catalog pentru aceste circuite, ci timpul în care comparatorul ajunge la saturatie pentru o anumită diferență între cele două mărimi aplicate la intrare.

De altfel, la intrarea comparatorului se aplică două unde, una cu frecvență mult mai mare decât cealaltă. Unda de frecvență și aceeași poate fi și o tensiune continuă care se mai numește și diferență de prag. În fig. 1.2.1-a) și b) sunt arătate două posibilități de realizare a unui comparator fără histereză.

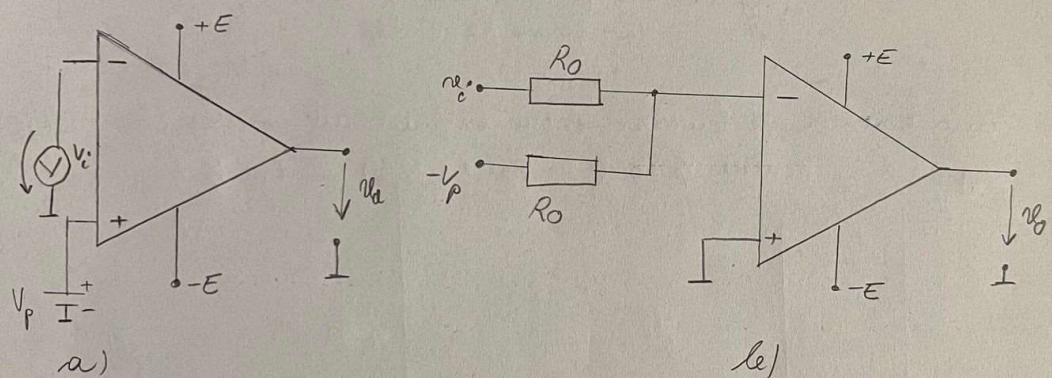


Fig. 1.2.1. Comparator fără histereză

a) semnalele se aplică pe ambele intrări b) cu sumator

Formele de undă pentru comparatorul fără histereză sunt arătate în fig. 1.2.2. pentru că semnal triunghiular lipsesc. Comparatorul leagăcăză în (+E) când $u_i < V_p$ și în (-E) când $u_i > V_p$.

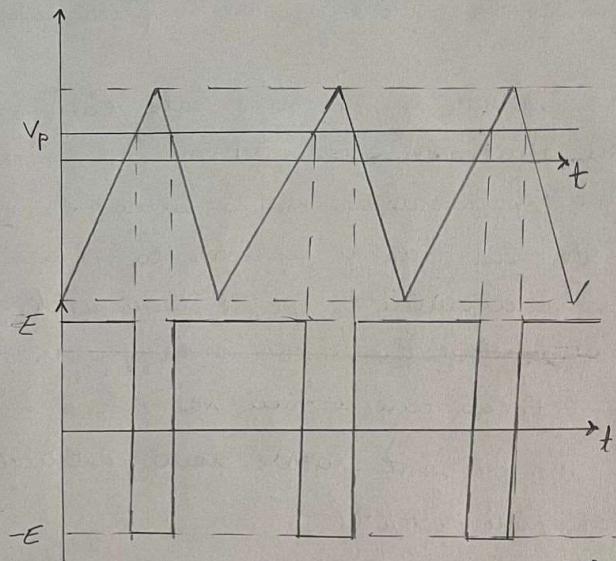


Fig. 1.2.2. Comparatör fără histeresi - forme de undă

Caracteristica de transfer pentru comparatörul inversor este arătată în fig. 1.2.3. a) pentru $V_p > 0$ și în fig. 1.2.3. b) pentru $V_p = 0$

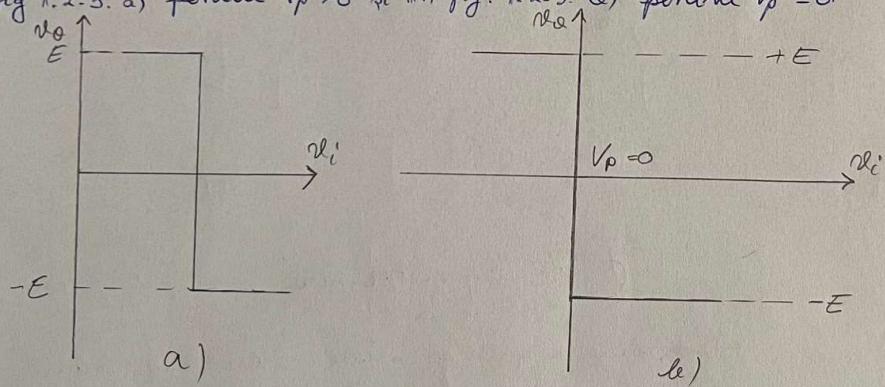


Fig. 1.2.3. Caracteristica de transfer a comparatörelui inversor

a) $V_p > 0$; b) $V_p = 0$

1.3. Generator de undă triunghiulară simetrică

Generatorul de undă triunghiulară este compus dintr-un generator de undă triunghiulară bipolare și un circuit de realare absolute, care transformă undă triunghiulară bipolară în undă triunghiulară unipolară cu frecvență dublă. Generatorul de undă triunghiulară bipolară prezentat în fig. 1.3.1. este compus, în principal, dintr-un comparator cu histeresi (A_1) și un integrator (A_2), ambele realizate cu amplificatoare operaționale. La ieșirea comparatorului este conectat un circuit de limitare cu diode, care fixază amplitudinea semnalului dreptunghiular la ieșirea comparatorului și prin aceasta simetrizează alternanțele undei triunghiulare obținute la ieșirea integratorului.

Datorită circuitului de limitare, amplitudinea undei dreptunghiulare obținută la ieșirea comparatorului are aceasi realare absolute, atât pe alternanță pozitivă, cât și pe cea negativă și anume: $U = V_Z + 2V_D$, unde V_Z este tensiunea diodei Zener, iar V_D este căderea de tensiune pe o diodă în polaritatea directă. Se presupune că V_D este același pentru fiecare din cele patru diode semiconducțoare $D_1 \dots D_4$.

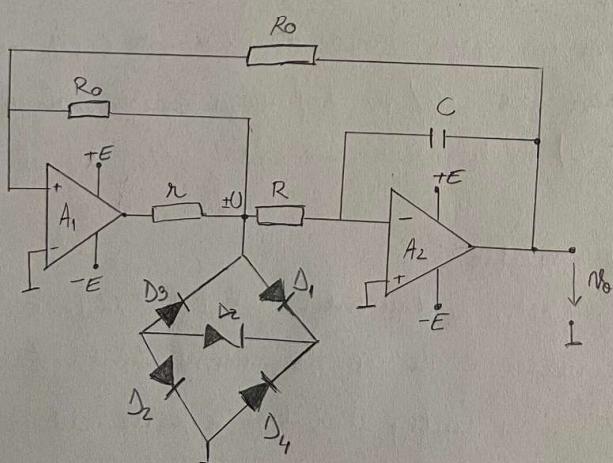


Fig. 1.3.1. Generator de undă triunghiulară simetrică

Formele de undă corespondătoare generatorului de undă triunghiulară simetrică sunt prezentate în fig. 1.3.2.

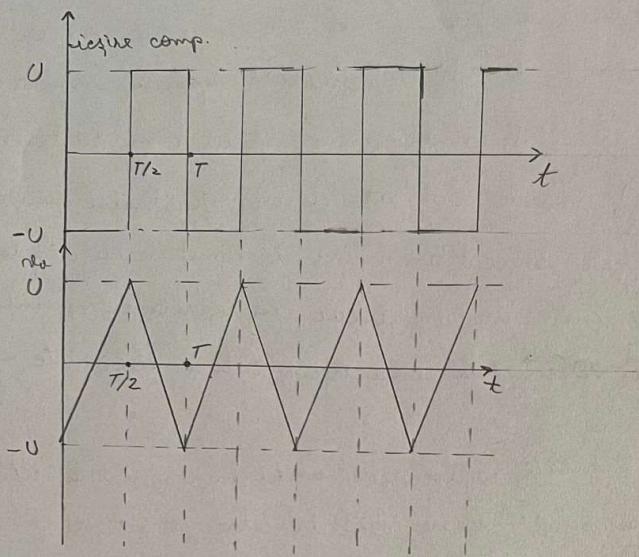


Fig. 1.3.2. Generator de undă triunghiulară simetrică - forme de undă

Înțial, tensiunea la ieșirea comparatorului poate fi pozitivă sau negativă, adică $(\pm U)$, dar, în oricare dintre aceste situații s-ar afla, funcționarea circuitului este aceeași.

Presupunând că tensiunea la ieșirea comparatorului este $(-U)$, tensiunea la ieșirea integratorului se poate spune $(+U)$ și, când atinge această valoare, comparatorul leagănează în $(+U)$ și, din acest moment, integratorul integrează pînă $(-U)$ și.a.m.d.

- Calculul frecvenței de oscilație:

Cu notatiile din fig. 1.3.1., pentru intervalul $[0; T/2]$, înținând cont că încărcarea condensatorului C are loc la curent constant de reacție $(-U/R)$, pentru ^{tensiunea la} ieșirea integratorului se poate scrie:

$$n_0 = -\frac{1}{C} \int \left(-\frac{U}{R}\right) dt$$

Din integrare rezulta:

$$v_o = \frac{U}{RC} t + A, \text{ unde } A \text{ este o constantă}$$

Înăind cît că, la $t=0$, $v_o = -U$, se obține: $A = -U$

iar la $t=T/2$; $v_o = U$, și folosind în relația (1.3.2) avem:

$$U = \frac{U}{RC} \cdot \frac{T}{2} - U, \text{ de unde rezultă că perioada undei triunghiulare este } T = 4RC, \text{ iar frecvența de oscilație este } f = \frac{1}{4RC}.$$

Ex. numeric pentru dimensionarea generatorului de unde triunghiulară bipolară:

Se dă: $E = \pm 15V$, frecvența undei triunghiulare unipolare care se aplică comparatoriului (frecvența de comutare) 10kHz ; amplitudinea maximă $10V$; în polarizare directă căderea de tensiune pe oricare dintre diode, $V_A = 0,5V$ la un curent de $1mA$;

• Dimensionarea comparatoriului și circuitului de limitare:

Pentru comparatorul cu histeresi (A_1), din figura 1.3.1. se consideră casul general săcăi, rezistența de pe intrare R_1 , ca și de pe reacție R_2 , și tensiunea dintre intrările comparatoriului v_i . Aplicând principiul superpozitiei efectelor rezulta:

$$\vartheta = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_o + \frac{R_1}{R_1 + R_2} (\pm U)$$

Comparatorul cu histeresi funcționează când $\vartheta = 0$

Pentru $R_1 = R_2 = R_0$ și $v_i = 0$, se obține amplitudinea maximă a unei triunghiulare:

$$v_{tri} = v_o = -/+U = -/+10V$$

Se recomandă alegerea lui R_0 în gama $10\text{--}50\text{k}\Omega$

Pentru acest caz se alege $R_0 = 20\text{k}\Omega$

Dimensionarea circuitului de limitare:

Tensiunea de ieșire V , obținută după rezistența r și la ieșirea comparatorului cu histeresis (A_1), din figura 1.3.1. este:

$$U = V_Z + 2V_D;$$

$$V_Z = U - 2V_D = 10 - 1 = 9V;$$

Calculul rezistenței r (se neglijază curentul prin rezistența R , adică $R \gg r$), la un curent prin dioda Zener $I_Z = 1mA$:

$$r = \frac{E-U}{10^{-3}} = \frac{15-10}{10^{-3}} = 5k\Omega$$

unde E - tensiunea la ieșirea comparatorului

Dimensionarea integratorului

Din fig. 1.1.2. rezultă că frecvența undei triunghiulare unipolare, care se aplică comparatorului este dublă față de frecvența undei triunghiulare bipolare. Deci, frecvența de oscilație a generatorului de undă triunghiulară bipolară este 5 kHz.

Alegând $R \gg r = 5k\Omega$; adică $R = 50k\Omega$.

$$f = \frac{1}{4RC} ; C = \frac{1}{4R \cdot f} = \frac{1}{200 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 5} = 1mF$$

Pentru a realiza o undă triunghiulară unipolară, se folosește un circuit care calculează valoarea absolută, circuit care este prezentat în continuare.

1.4. Circuit pentru calculul valoiei absolute

In figura 1.4.1. este reprezentat un circuit compus dintr-un circuit diodă ideală realizat cu amplificatorul operational A_1 și un sumator inversor realizat cu amplificatorul operational A_2 . Acest circuit calculează valoarea absolută a semnalului de intrare, caracteristica de transfer fiind prezentată în figura 1.4.2.

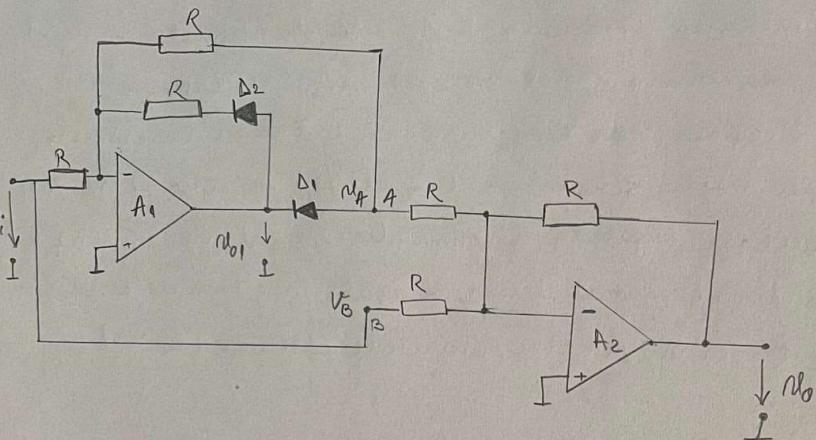


Fig. 1.4.1. Circuit pentru calculul
valerii absolute

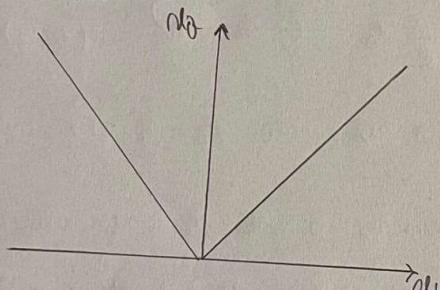


Fig. 1.4.2. Caracteristica de transfer

• Dioda ideală inversoare

Se observă că, atât timp cât amplificatorul operational A_1 funcționează în regim liniar, intrarea inversoare este virtual la masă.

Pentru semnal de intrare $n_i > 0$, $n_{B1} < 0$, dioda D_2 este lebocată, iar dioda D_1 conduce și circuitul funcționează ca un amplificator inversor cu amplificarea (-1); deci $n_A = -n_i$, dioda D_1 fiind cuprinsă în buclă de realție. Deci, pentru $n_i = 0$; $n_A = 0$ și caracteristica de transfer porneste din origine, căderea de tensiune pe D_1 fiind compensată.

Pentru semnal de intrare $n_i < 0$; $n_{B1} > 0$, dioda D_1 este lebocată, iar

dioda D₂ este în conductie. Datorită reactiei negative care se produce prin dioda D₂, intrarea inversare a A₀ este menținută virtual la zero. Deci, tensiunea la ieșire v_A este egală cu zero, pentru că prin rezistența R ieșirea este conectată la intrarea inversare, care este virtual la zero. Rezistența R conectată în serie cu D₂ face ca și pentru polaritatea negativă a semnalului de intrare în reacție să existe același circuit format dintr-o diodă inserată cu o rezistență de releeare R, ca și pentru polaritatea pozitivă ($v_i > 0$).

• Sumatorul

Pentru sumatorul întâlnit din figura 1.4.1, ale cărui semnale de intrare sunt v_A și v_B se poate scrie:

$$v_o = -\frac{R}{2} v_A - \frac{R}{2} v_B = -(2v_A + v_B) \quad (1.4.1)$$

Pentru: $v_i > 0$ avem $v_A = -v_i$; $v_B = v_i$ și din relația (1.4.1) rezultă

$$v_o = v_i > 0$$

Pentru: $v_i < 0$ avem $v_A = 0$; $v_B = v_i$ și din relația (1.4.1) rezultă $v_o = -v_i > 0$

Se aiei rezultă caracteristica de transfer arătată în fig 1.4.2, care reprezintă funcția $v_o = |v_i|$.

Se recomandă alegerea lui R_o în gama 10. — 50 k Ω .

Pentru acest caz se alege $R_o = 20 k\Omega$.

1.5. Semnalul de comandă

Pentru a leuă de reglare automată, semnalul de comandă este semnalul obținut la ieșirea regulatorului. Simplificat, regulatorul este un amplificator al erorii dintre realizarea de referință și realizarea măsurată a parametrului care se reglează.

Pentru functionare fără leuă de reglare obținerea semnalului de comandă se poate face cu un divizor de tensiune, care poate fi format sau nu

de un repetitor. (fig. 1.5.1.)

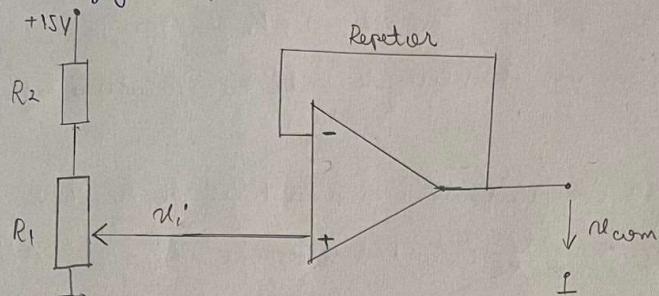


Fig. 1.5.1. Generarea semnalului de comandă

Voltajul maxim de tensiune de intrare este egal cu amplitudinea maximă a undei triunghiulare unipolare $U_{i\max} = 10V$. Putem scrie:

$$U_{i\max} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot E = 10V$$

Pe de altă parte, divisorul R_1, R_2 trebuie să se comporte ca un generator de tensiune pentru ~~ca~~ tensiunea de intrare U_i . dacă este pus ne-potrivit, rezistența de intrare a acestuia fiind foarte mare, această condiție practic nu mai este necesară.

De exemplu, pentru un amplificator repetitor realizat cu un AO care are: rezistența de intrare fără reacție $R_i = 500k\Omega$, rezistența de ieșire $R_o = 100\Omega$, și amplificarea diferențială $A_d = 10^5$, înălțând cînd că factorul de reacție este $f = 1$, se obține:

- rezistența de intrare cu reacție: $R_{ir} = R_i(1 + A_d f) = 500(1 + 10^5)[k\Omega] \approx 50.000M\Omega$

- rezistența de ieșire cu reacție: $R_{or} = \frac{R_o}{1 + A_d f} = \frac{100}{(1 + 10^5)} [k\Omega] = 0,001k\Omega$

Pentru $E = 15V$ avem: $\frac{R_o}{R_1 + R_2} = \frac{10}{15}$

Pentru $R_1 = 20k$ se obține $R_2 = 10k$

Preluarea datelor pentru realizare personală de proiectare

Având în vedere: $E = 11V$, $V_{tri} = 4 = 5,6V$, $f = 1500\text{Hz}$:

- dimensionarea generatorului de undă triunghiulară lipsă de polaritate

$$V_0 = 0,5V$$

- dimensionarea comparatoanelui și circuitului de limitare

$$\mathcal{N} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \mathcal{N}_0 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} (I S, E) \rightarrow \text{se definește } \mathcal{N}_{tri} = \mathcal{N}_0 = -1 + 0 = -1 + 5,6V$$

$$R_0 \text{ rămâne } R_0 = 20\text{ k}\Omega$$

- circuitul de limitare

$$U = V_Z + 2V_D \Rightarrow V_Z = U - 2V_D = 5,6 - 1 = 4,6V$$

$$r = \frac{11 - 5,6}{10^{-3}} = 5400\Omega = 5,4k\Omega$$

- dimensionarea integratorului

frecvența de oscilație a generatorului de undă triunghiulară lipsă de polaritate este $\frac{1500}{2} = 750\text{Hz}$

$$R \gg r \rightarrow r = 5,4k\Omega \Rightarrow R = 54\text{ k}\Omega$$

$$f = \frac{1}{4RC} \Rightarrow C = \frac{1}{4R \cdot f} = \frac{1}{4 \cdot 54 \cdot 10^3 \cdot 750} = 6,1\text{nF}$$

- pentru calculul rezistenții absolute pastrăm $R = 20\text{ k}\Omega$.

- semnalul de comandă

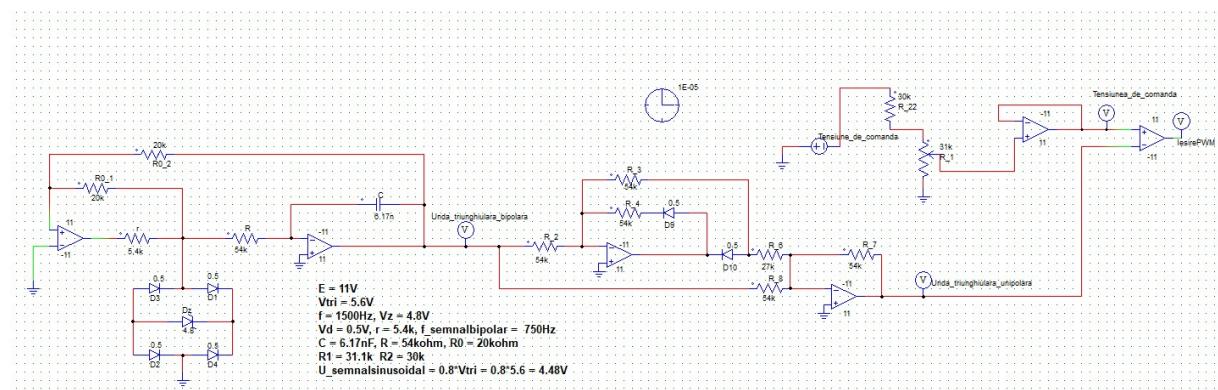
$$\mathcal{N}_{max} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot E = 5,6V$$

$$R_{in} = 50000\text{ M}\Omega, R_{out} = 0,1\text{ k}\Omega$$

$$\text{pentru } E = 11\text{ V avem: } \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{5,6}{11} \Rightarrow R_1 = \frac{5,6}{2,7} R_2$$

$$\text{Pentru } R_2 = 30\text{ k}\Omega \Rightarrow R_1 = 31,1\text{ k}\Omega$$

Schema circuitului folosită pentru generarea semnalelor



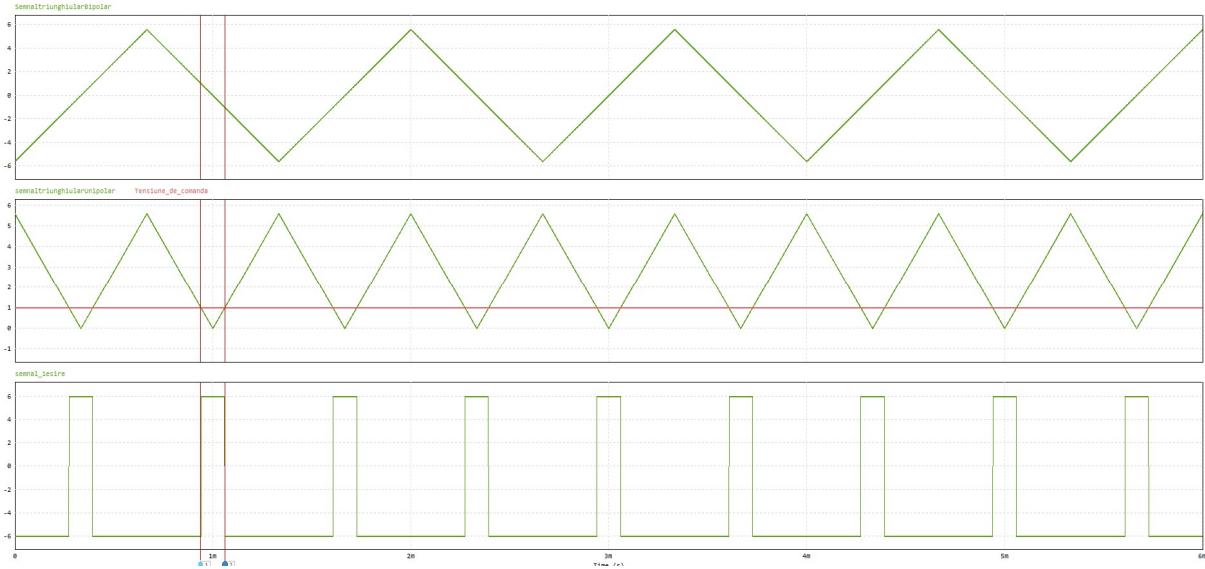
Tabel date

E = 11V		
Vtri = 5.6V		
f = 1500Hz		
generator de unda triunghiular simetric	R0	20kohm
	Vz	4.6
	r	5400
	R	54000
	C	6.17284E-09
calculul variabile	R	20000
Semnalul de comanda	R1	31100
	R2	30000

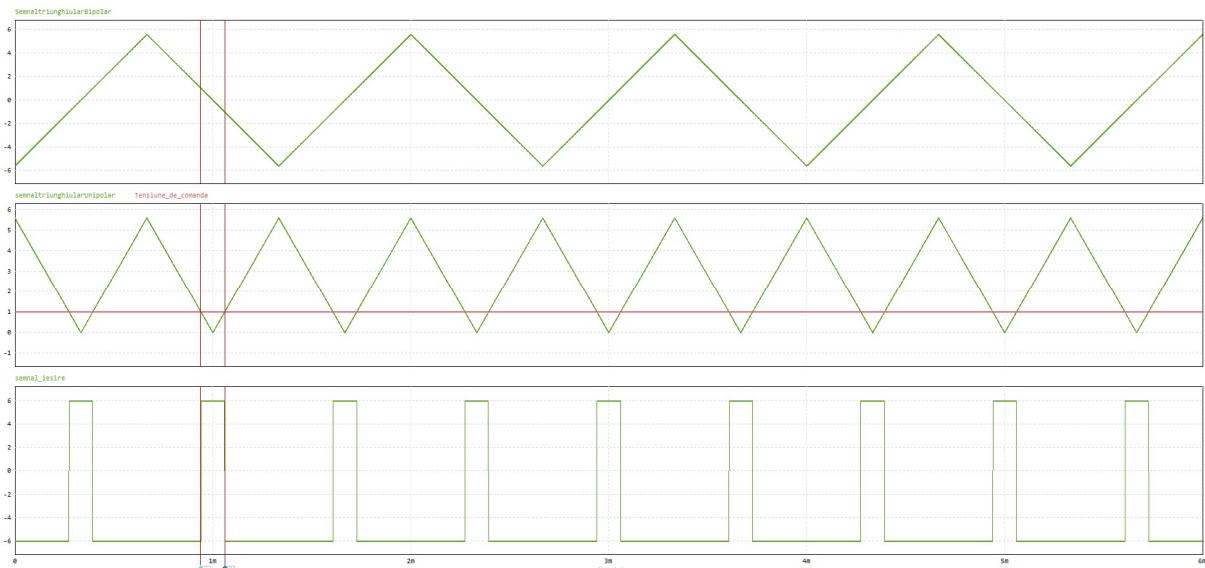
Urmează simulările în funcție de u_{com} având valoare mică ($u_{com} = 1V$), o valoare medie ($u_{com} = 3V$) și o valoare mare ($u_{com} = 5V$).

Rezultate simulări

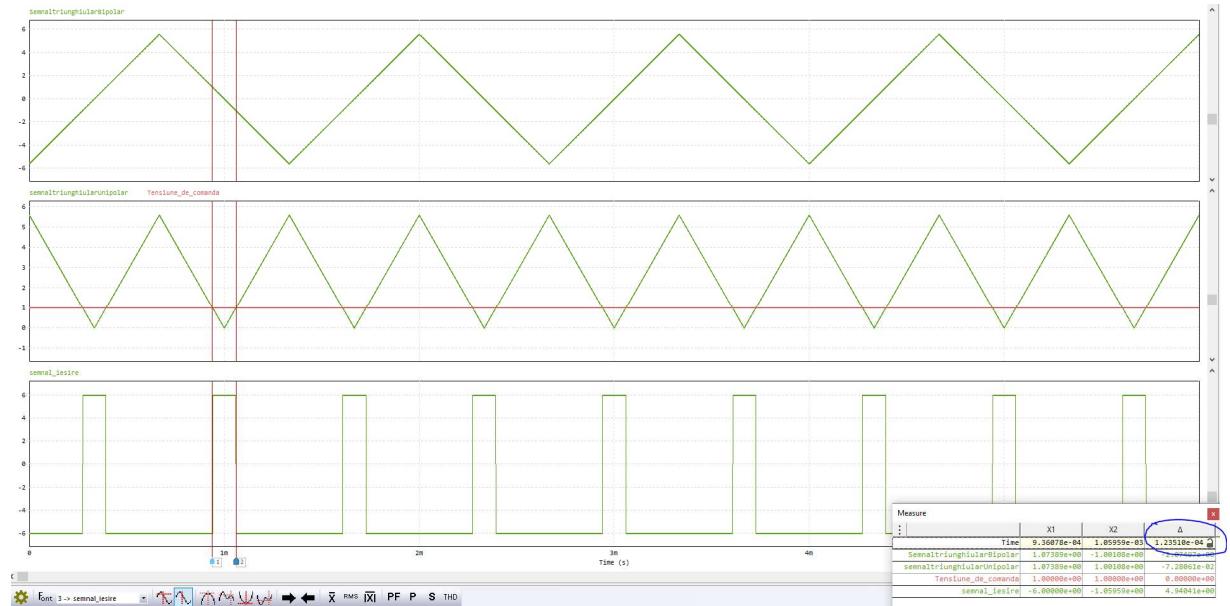
A) Semnalele de ieșire în prima fază



Modificand $u_{com} = 1V$, obținem:



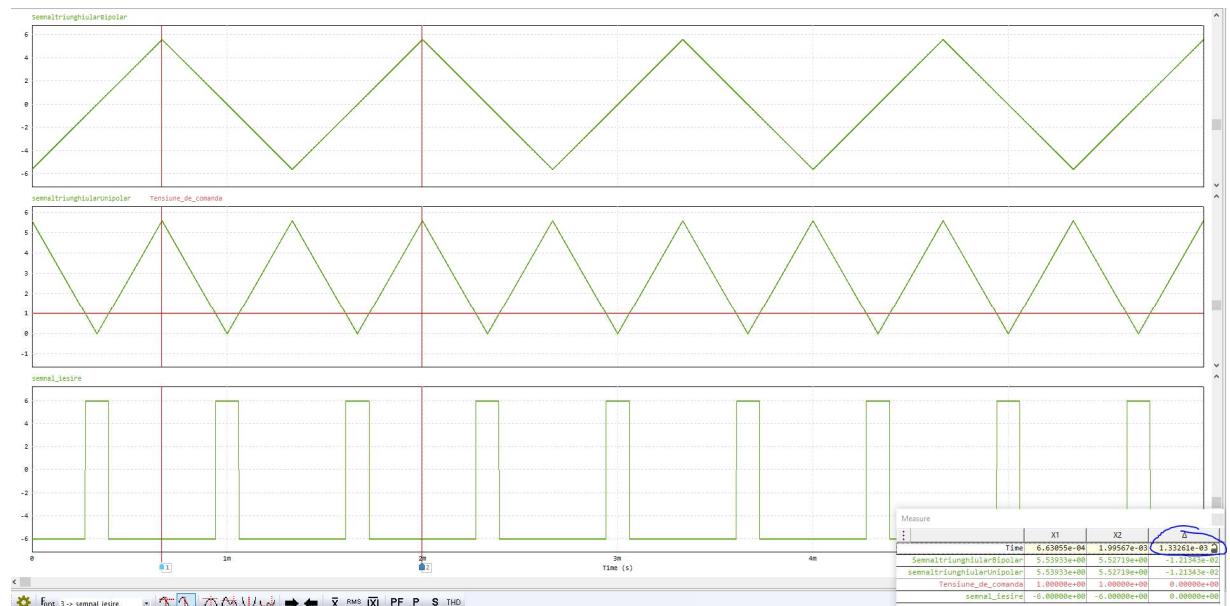
Masuram



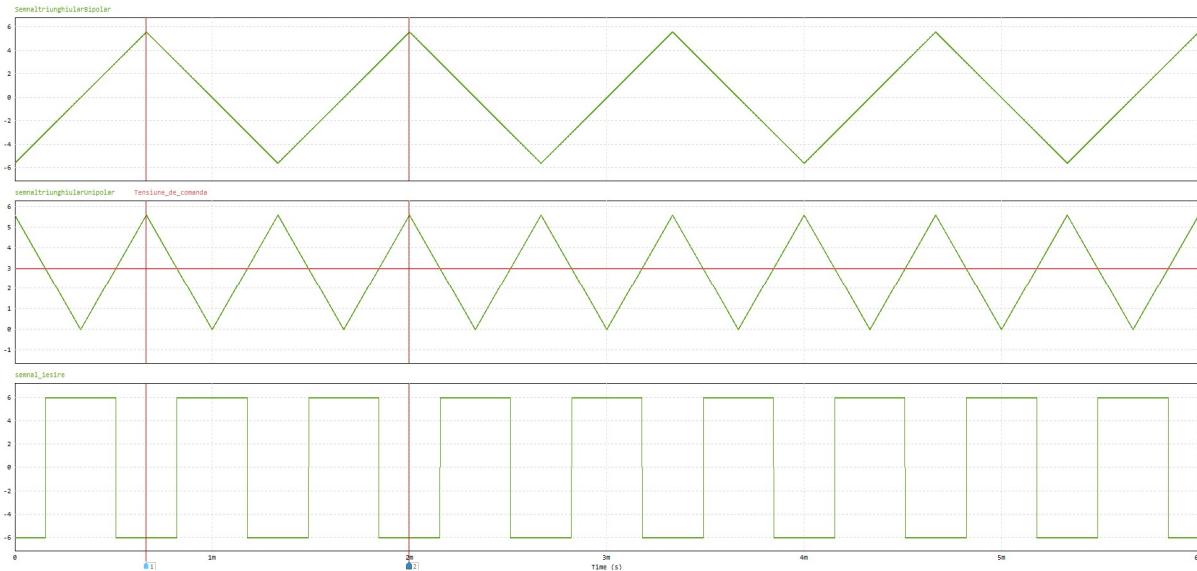
Perioada pulsăției pozitive este $T_{poz} = 1.23 \cdot 10^{-4}$

Factorul de umplere: $D = T_{poz}/T = (1.23 \cdot 10^{-4})/(6.66 \cdot 10^{-4}) \cdot 100 = 18.46\%$

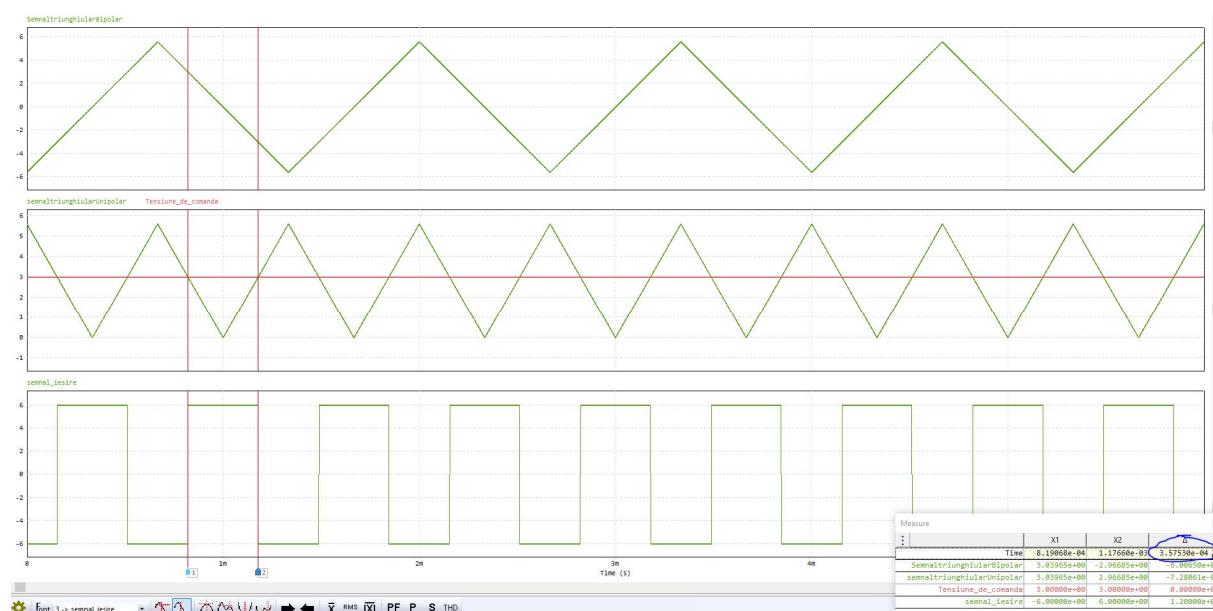
Perioada $T = 1.33 \cdot 10^{-3}s$



Pentru ucom = 3V, obtinem:



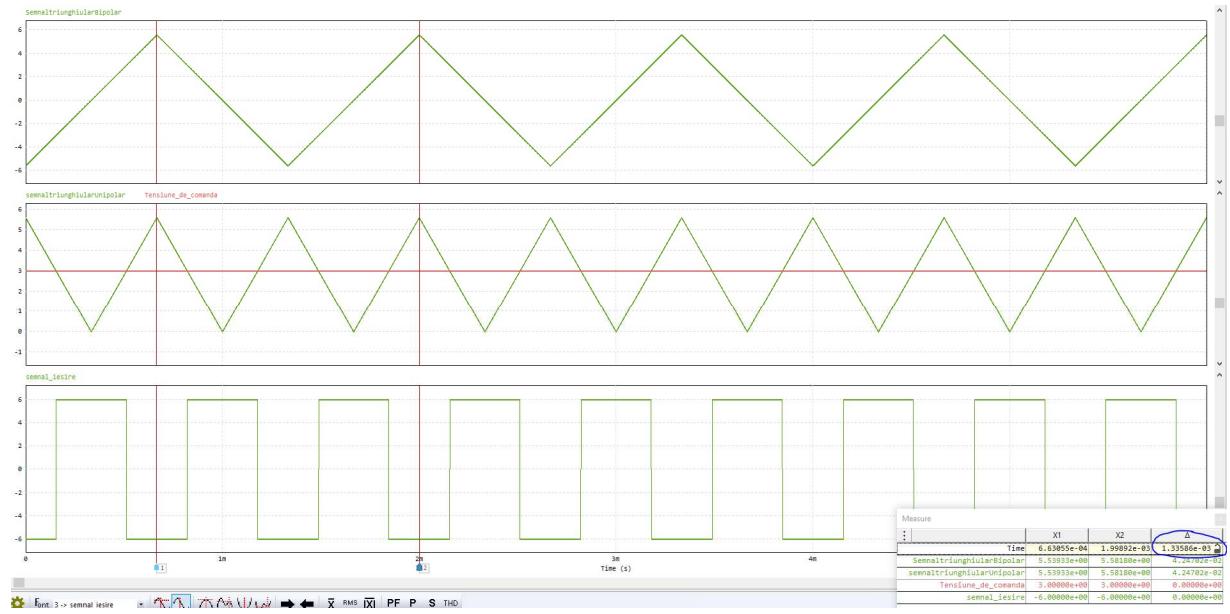
Masuram:



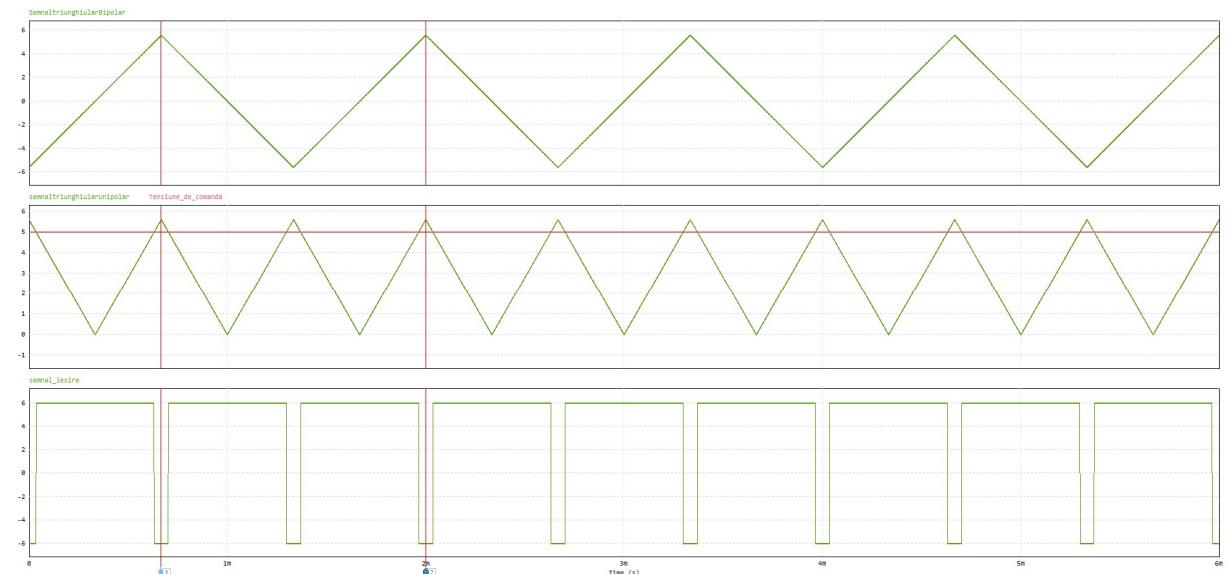
Perioada pulsării pozitive este Tpoz = $3.57 \cdot 10^{-4}$

Factorul de umplere: D = Tpoz/T = $(3.57 \cdot 10^{-4}) / (6.66 \cdot 10^{-4}) \cdot 100 = 53.16\%$

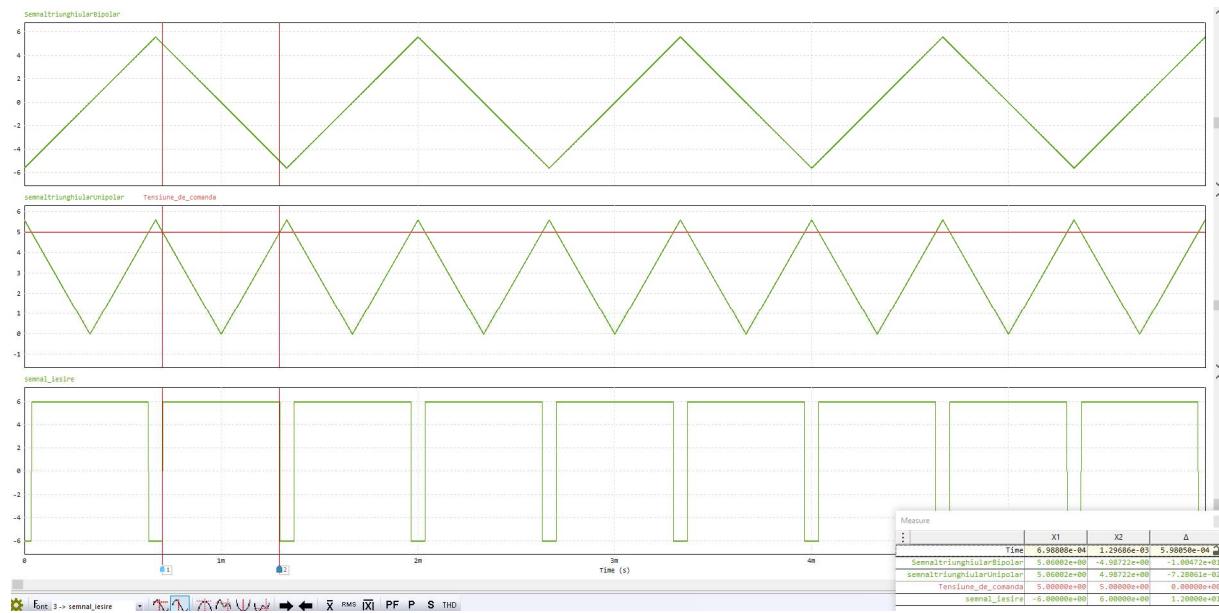
Perioada $T = 1.33 \cdot 10^{-3}$ s



Pentru Ucom = 5V



Masuram:



Perioada este $T = 6.68 \times 10^{-4}$

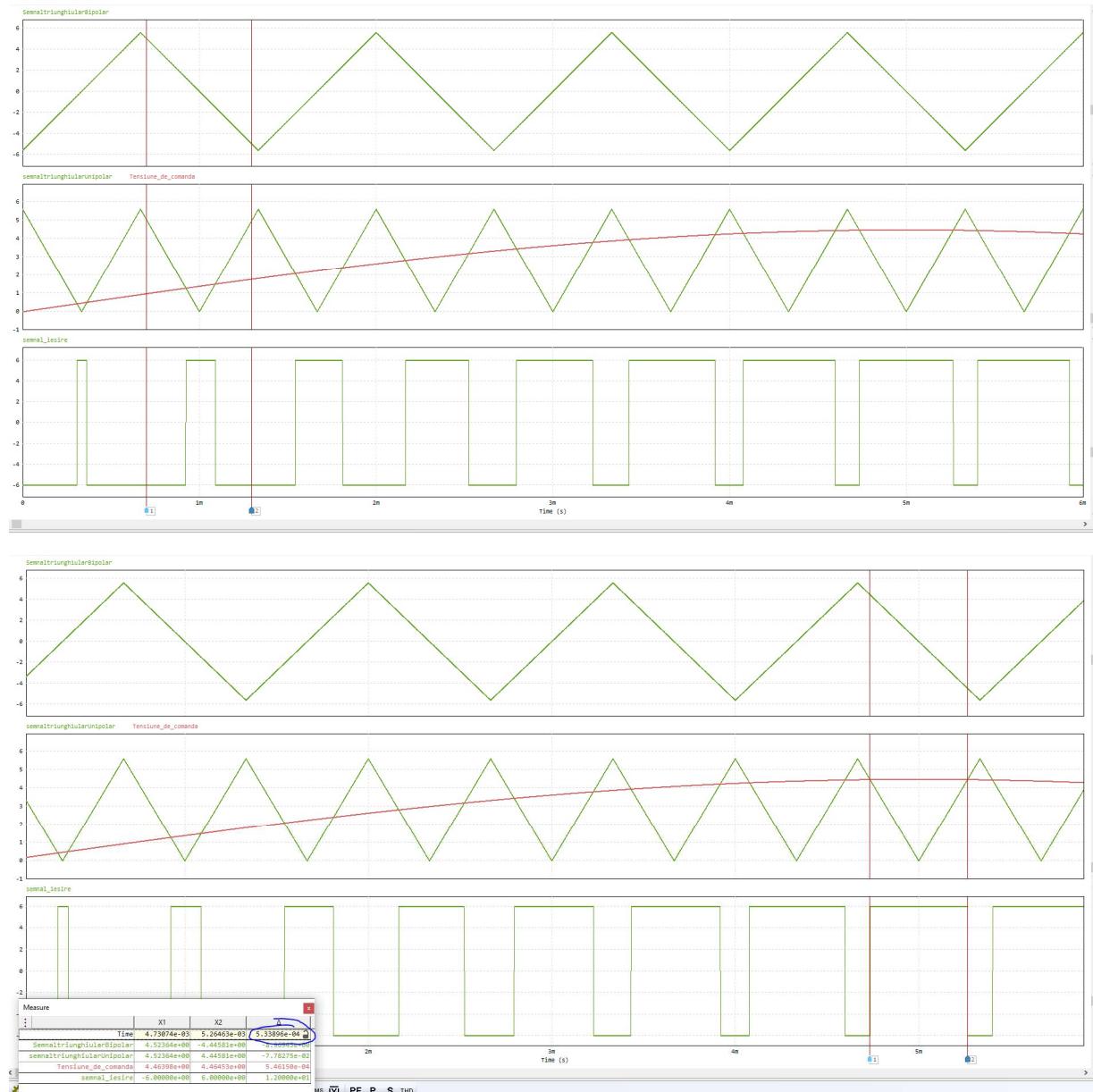
Perioada pulsăției pozitive este $T_{poz} = 5.98 \times 10^{-4}$

Factorul de umplere: $D = T_{poz}/T = ((5.98 \times 10^{-4})/(6.66 \times 10^{-4})) * 100 = 89.32\%$

În urma simulărilor am obținut amplitudinile undelor triunghiulare unipolare și bipolare aproximativ 5.62V, aproximativ cât valoarea de 5.6V impusă în temă. Mai mult, frecvențele respectă condițiile impuse pentru ambele tipuri de unde iar factorul de umplere pentru u_{com} mic este $D = 0.18$ aproximativ egal cu 0.2 impus prin tema, pentru u_{com} mediu este $D = 0.53$ aproximativ egal cu cel de 0.5 impus, iar pentru u_{com} mare este $D = 0.89$ aproximativ egal cu cel de 0.8 impus.

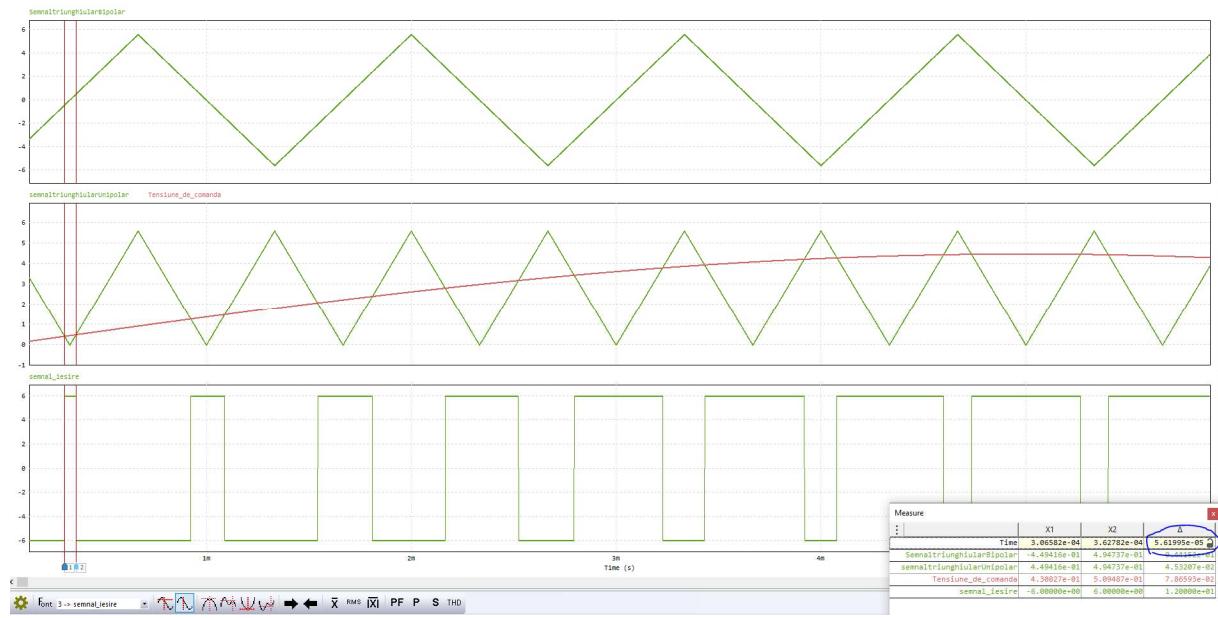
B) Sursa sinusoidală

Pentru semnalul sinusoidal am folosit amplitudinea de $0.8 \cdot V_{tri} = 4.48V$ și frecvența de $f = 50Hz$ impuse.



Perioada pulsăției pozitive este $T_{poz} = 5.33 \cdot 10^{-4}$

Factor umplere $D = T_{poz}/T = (5.33 \cdot 10^{-4})/(6.66 \cdot 10^{-4}) \cdot 100 = 79.28\%$ – cel mai mare



Perioada pulsăției pozitive $T_{poz} = 5.61 \times 10^{-4}$

Factor umplere $D = T_{poz}/T = (5.61 \times 10^{-5} / 6.66 \times 10^{-4}) * 100 = 8.42\% - \text{cel mai mic}$

Referitor la primele simulări, u_{com} a fost ales astfel încât amplitudinea semnalului de comandă să nu depășească amplitudinea undelor triunghiulare.

II să se traseze caracteristica de frecvență pentru funcția de transfer:

$$G(s) = \frac{1 + s \cdot 10^{-1}}{s \cdot T} \quad \text{unde } T = 5 \cdot 10^{-1}$$

pentru $s = j\omega$

$$\Rightarrow G(s) = G(j\omega) = \frac{1 + j\omega \cdot 10^{-1}}{j\omega \cdot T} = \frac{1 + j\omega \cdot 10 \cdot 5 \cdot 10^{-1}}{j\omega \cdot 5 \cdot 10^{-1}} = \\ = \frac{1 + 0.5 \cdot j\omega}{j\omega \cdot 5} = \frac{2 + 10j\omega}{j\omega}$$

Calculul zereurilor și al polilor

• zereuri: $2 + 10j\omega = 0 \Rightarrow 10j\omega = -2 \Rightarrow \omega = -\frac{2}{10j} = -\frac{1}{5j}$

dar luăm modulul \Rightarrow un zero: $\frac{1}{5j} = 0,2j = \omega_0 [\text{rad/s}]$

• poli: $j\omega = 0 \Rightarrow \omega_p = 0 [\text{rad/s}]$

Un zero crește panta caracteristicii cu $+(20dB/\text{dec})$ și un pol o scade cu $-(20dB/\text{dec})$.

Un zero sau un pol nu influențează caracteristica pentru valori mai mici decât valoarea lor, adică polul ω_p nu influențează caracteristica.

În aceste condiții, funcția de transfer devine:

$$A(j\omega) = \frac{2 + 10j\omega}{j\omega} \rightarrow |A(j\omega)|_{dB} = 20 \lg \frac{\sqrt{4 + 100\omega^2}}{\omega}$$

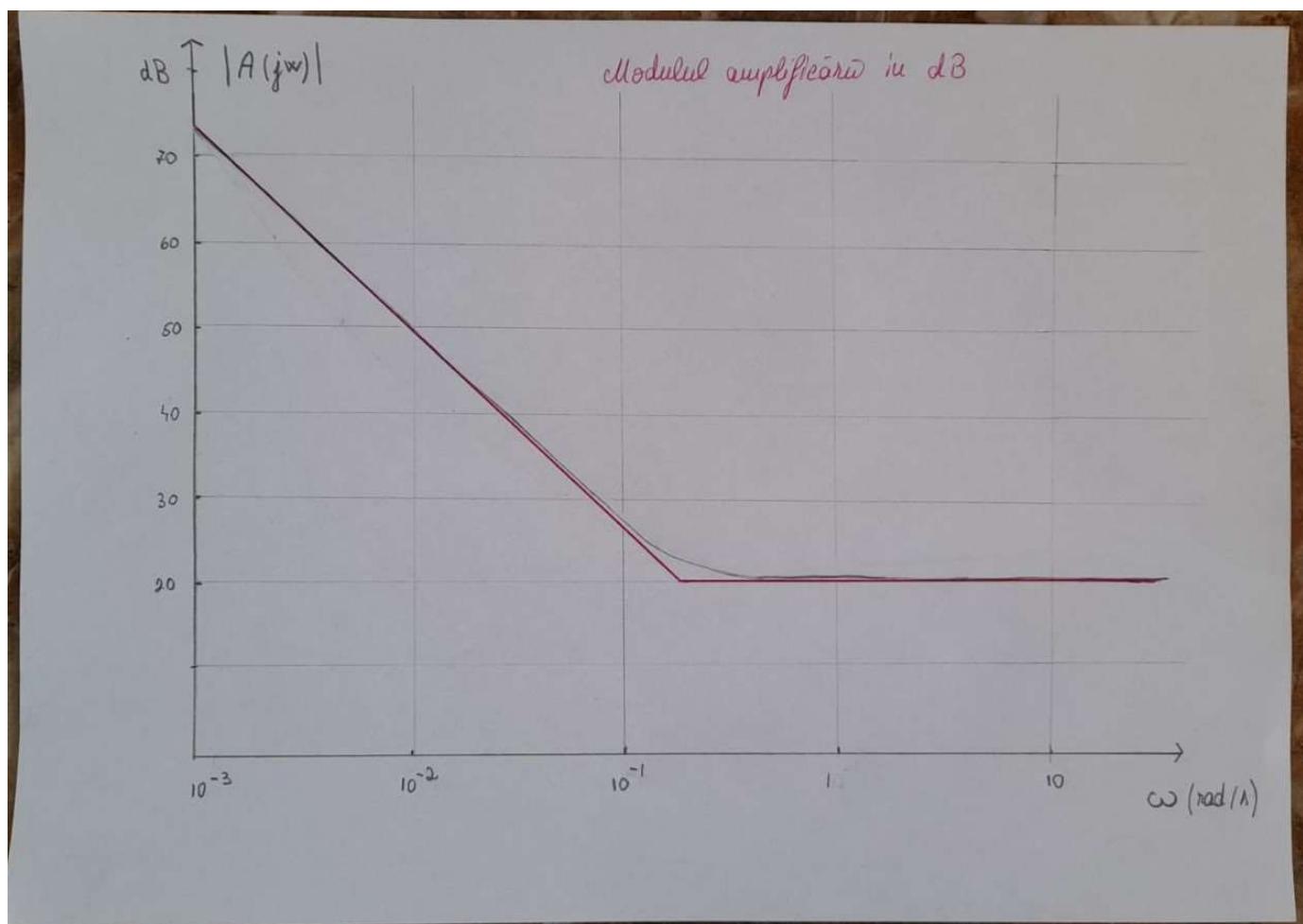
pentru $\omega = 0,2 \Rightarrow |A(j\omega)|_{dB} = 30,4 dB$ iar pentru $\omega = 0 \Rightarrow$

$$\Rightarrow |A(j\omega)|_{dB} = \infty \rightarrow 0 dB$$

După realizarea caracteristicii fazii funcție de frecvență s-a observat că mai ușor eliminarea acesteia: în interval simetric care cuprinde o decadă mai întâi și una după realoarea polului /zervelui, fază variază liniar, iar în afara acestui interval, deforajul între-dus de acesta este zero.

$$\Theta\left(\frac{1}{f} \cdot 0\right) = -\operatorname{arctg}(0) = 0$$

Analiza grafică confirmă acest lucru, mai întâi puncta fiind la -20dB de la pol, apoi la 0 ($5 \cdot 10^{-1}$) și să crească cu $20\text{dB}/\text{dec}$ deci se anulează și puncta rămâne constantă și numeric egală cu 0.



Se poate observa caracteristica asimptotică desenată cu roșu, iar cu creionul trasată este caracteristica reală.

În mod similar este prezentată caracteristica fază funcție de frecvență în următoarea figură.

