*Proiect Tehnici CAD* ***Generator Pulse-Width Modulation***

Profesori Îndrumători:

Curs: Prof.dr.ing. Ovidiu Aurel Pop

Laborator: Drd. ing. Elena-Mirela Ștețco

Student: Nicoară Paul-Nicolae An:II, Seria A, grupa 2124

 **Specificații de proiectare**..................................................................................................3

 **Schema circuitului**.............................................................................................................4  
 2.1. Schema bloc.................................................................................................................4  
 2.2. Schema electrică..........................................................................................................5

 **Proiectarea circuitului**......................................................................................................6  
 3.1. Comparator cu reacție pozitivă....................................................................................6  
  3.1.1. Valoare calculată..................................................................................................6  
  3.1.2. Valoare măsurată..................................................................................................7  
 3.2. Integratorul..................................................................................................................7  
 3.3. Dimensionarea pentru frecvență fixă...........................................................................8  
 3.4. Comparator fără reacție................................................................................................9  
 3.5. Divizor de tensiune......................................................................................................9  
  3.5.1. Valoare calculată...................................................................................................10  
  3.5.2. Valoare măsurată...................................................................................................11  
 3.6. Etaj de ajustare a amplitudinii......................................................................................12  
  3.6.1. Valoare calculată....................................................................................................13  
  3.6.2. Valoare măsurată...................................................................................................13  
 3.7. Repetor de tensiune......................................................................................................15  
 3.8. LED galben...................................................................................................................15  
  3.8.1. Valoare calculată...................................................................................................17  
  3.8.2. Valoare măsurată...................................................................................................17

 **Simulări**.............................................................................................................................19  
 4.1. Analiza Monte Carlo...................................................................................................19  
  4.1.1. Pentru frecvență...................................................................................................19  
  4.1.2. Pentru factorul de umplere....................................................................................20  
  4.1.3. Pentru amplitudine................................................................................................21  
 4.2. Analiza Worst-Case....................................................................................................24  
  4.2.1. Frecvență.............................................................................................................24  
  4.2.2. Amplitudine..........................................................................................................25  
  4.2.3. Factor de umplere................................................................................................26

 **Bibliografie**.........................................................................................................................28

**1. Specificații de proiectare**

În cadrul acestui proiect se urmărește realizarea unui generator de semnal PWM cu următoarele caracteristici impuse:

* **Factorul de umplere** trebuie să fie reglabil în intervalul:  
  0.5 – 0.9
* **Amplitudinea semnalului** trebuie să fie variabilă, cu valori cuprinse între:  
  3.5 – 11 V
* **Frecvența semnalului** trebuie să fie fixă, având valoarea:  
  20000 Hz

Aceste specificații vor fi respectate pe tot parcursul proiectului, atât în faza de proiectare teoretică, cât și în cea de simulare practică.

**2. Schema circuitului**

**2.1. Schema bloc**

**Integratorul**

**semnalul dreptunghiular => semnal triunghiular**

**Comparator cu reacție pozitivă**

**Divizor rezistiv cu reglaj  
pentru realizarea tensiunii de referință**

**Comparator fără reacție**

**Etaj de ajustare a amplitudinii**

**Repetor de tensiune**

**LED**

**2.2. Schema electrică**



Figura 1: Schema electrică

# În vederea realizării circuitului, am folostit amplificatorul TL082, cu datasheet-ul de mai jos:

|  |  |
| --- | --- |
| Parametru | Valoare |
| Tensiune de alimentare | ±3 V până la ±18 V |
| Curent de alimentare per AO | ~1,4 mA |
| Tensiune de offset la intrare (Vₒₛ) | 3 mV |
| Curent de polarizare la intrare (Iᴮ) | ~65 pA |
| Slew rate | 13 V/µs |
| Lățime de bandă în buclă închisă (GBW) | 3 MHz |
| Tensiune de saturație ieșire (cu ±15 V alimentare) | Aproximativ ±12 V |
| Tensiune diferențială maximă între intrări | ±30 V |
| Impedanță de intrare | >10¹² Ω |
| Număr de AO-uri în capsulă | 2 |
| Tip intrare | JFET (impedanță mare) |
| Ieșire rail-to-rail | Nu |

**3. Proiectarea circuitului**

**3.1. Comparator cu reacție pozitivă**

****

Figura 2: Comparatorul cu reacție pozitivă

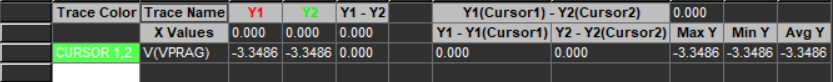
Comparatorul cu reacție pozitivă are rolul de a genera un semnal dreptunghiular cu tranziții rapide și control stabil.

Prin configurația comparatorului se creează un fenomen numit **histerezis**: comparatorul comută ieșirea doar atunci când semnalul de intrare depășește un anumit prag superior sau inferior, în funcție de starea curentă a ieșirii și îl putem calcula prin relația:

**3.1.1. Valoare calculată**

**3.1.2. Valoare măsurată**





Graficul 1: Domeniul de variație al tensiunii măsurate.

Diferența mică de valori este cauză a amplificatorului operațional care nu este rail-to-rail, astfel la out vom vedea 13.5 V, aceasta fiind limita reală .

**3.2. Integratorul**



Figura 3: Integratorul

Integratorul este un circuit esențial pentru generarea semnalului triunghiular. El primește la intrare un semnal dreptunghiular (de la comparatorul cu reacție pozitivă) și produce la ieșire un semnal în formă de rampă (triunghiular), care crește și scade liniar în timp.

Circuitul este realizat cu un amplificator operațional configurat cu un condensator C1 în buclă de reacție. Intrarea inversoare (−) primește semnalul de la comparator, în timp ce intrarea ne-inversoare (+) este conectată la masă, asigurând funcționarea corectă în regim de integrare.

**3.3. Dimensionarea componentelor pentru frecvența fixă de 20 kHZ**

****

Figura 4: Integratorul

Avem R3=2k, R4=8,2k

Alegem C=2,7n

;

**3.3. Comparator fără reacție**

****

Figura 5: Comparator fără reacție

Comparatorul fără reacție este responsabil pentru transformarea semnalului triunghiular obținut de la integrator într-un semnal PWM. Acesta compară în timp real tensiunea triunghiulară cu o tensiune de referință , generată printr-un divizor de tensiune reglabil.

**3.4. Divizor de tensiune**

****

Figura 6: Divizor de tensiune cu reglaj

Divizorul de tensiune prezentat în figura corespunzătoare permite reglarea precisă a și, prin urmare, oferă controlul asupra formei semnalului PWM. Acesta este un element cheie în realizarea funcționalității cerute de proiect: un *factor de umplere* variabil între 0.5 și 0.9.

**3.4.1 Valoare calculată**

= 2,72 V

**(\*)**

**(\*\*)**

**Din (\*) și (\*\*)**

**3.4.1 Valoare măsurată**

**Când SET= 1 :**

****

**A screenshot of a black box

AI-generated content may be incorrect.**

Graficul 2.: Domeniul de variație al factorului de umplere măsurat.

**Când SET= 0 :**



A screenshot of a black screen

AI-generated content may be incorrect.

Graficul 3.: Domeniul de variație al factorului de umplere măsurat.

**3.5. Etaj de ajustare a amplitudinii**



Figura 7: Etaj de ajustare a amplitudinii

Acest etaj este folosit pentru a regla amplitudinea semnalului PWM. Este format dintr-un divizor de tensiune cu o rezistență fixă (R7), un potențiometru (P2) și două rezistențe legate la masă (R8+R9). Prin modificarea potențiometrului, se poate regla semnalul între 3.5 V și 11 V, conform cerințelor proiectului.

**3.5.1 Valoare calculată**

Când α = 0 => amplitudinea este de 3,5 V

Când α = 1 => amplitudinea este de 11 V

Pentru a calcula amplitudinea semnalului de ieșire folosim formula:

Alegem P =51k R89 = 19k ; R7 = 3,9k

**3.5.1 Valoare măsurată**

Când α = 0 (SET-ul potențiometrului P2):



A screenshot of a graph

AI-generated content may be incorrect.

Graficul 4: Domeniul de variație al amplitudinii măsurate.

Când α = 1 (SET-ul potențiometrului P2):



A screenshot of a black and white screen

AI-generated content may be incorrect.

Graficul 5.: Domeniul de variație al amplitudinii măsurate.

**3.6. Repetor de tensiune**



Figura 8: Repetor de tensiune

Un repetor de tensiune este un amplificator operațional configurat astfel încât ieșirea să fie direct conectată la intrarea inversoare (-), iar semnalul de intrare să fie aplicat la intrarea neinversoare (+). În această configurație, tensiunea de ieșire este egală cu tensiunea de intrare (Vout = Vin). Rolul repetorului de tensiune constă în transferul maxim de energie între componente.

**3.7. LED galben**



Figura 9: LED-ul

La finalul lanțului de semnal se află un LED galben (D3), conectat în serie cu o rezistență de limitare a curentului (R10). Acesta are rolul de a transforma semnalul PWM în semnal luminos.

Intensitatea luminoasă a LED-ului este determinată de **amplitudinea semnalului**, în timp ce **timpul cât LED-ul stă aprins** într-un ciclu de semnal este dat de **factorul de umplere**. Astfel, reglând acești doi parametri, putem controla cu precizie comportamentul optic al LED-ului.

Dioda D4 este folosită pentru protecție, prevenind tensiunile inverse care ar putea deteriora LED-ul.

**Caracteristicile LED-ului:**

A close-up of a document

AI-generated content may be incorrect.

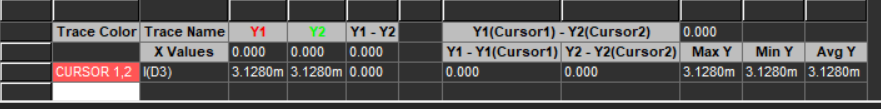
**3.7.1 Valoare calculată**

LED-ul galben incepe sa lumineze de la 5 mA, iar ca și valoare constantă suportă 20 mA. Vom folosi valoarea maximă a curentului suportat pentru a dimensiona rezistența => R=560Ω.

**3.7.1 Valoare măsurată**

**Când :**

****



Graficul 6.: Domeniul de variație al curentului măsurat pentru led.

Când



A screenshot of a computer

AI-generated content may be incorrect.

Graficul 7: Domeniul de variație al curentului măsurat pentru led.

**4. Simulări**

**4.1. Monte Carlo**

Toleranțele componentelor electronice influențează direct comportamentul circuitelor. Abaterile față de valorile nominale, cauzate de procesele de fabricație, pot genera deviații funcționale semnificative. Aceste variații trebuie integrate în proiectare, simulare și dacă este cazul, în etapele de calibrare. Pentru a evidenția deviațiile parametrilor de circuit cauzate de toleranțele componentelor, se va realiza o analiză de tip Monte Carlo. Aceasta va genera o histogramă care reflectă distribuția valorilor rezultate. Analiza Monte Carlo se efectuează printr-o simulare de tip Transient Time Domain (Time Transient), configurată în modul Monte Carlo/Worst Case. Histograma este realizată la 100 de rulări.

**4.1.1. Analiza Monte Carlo pentru frecventa**



Graficul 8.: Domeniul de variație al frecvenței în analiză Monte Carlo

Din 100 de rulări reiese că:

* În intervalul de frecvențe [19.277k, 19.367k], avem procentajul de 2%.
* În intervalul de frecvențe [19.372k, 19.468k], avem procentajul de 5%.
* În intervalul de frecvențe [19.470k, 19.566k], avem procentajul de 9%.
* În intervalul de frecvențe [19.570k, 19.662k], avem procentajul de 12%.
* În intervalul de frecvențe [19.665k, 19.761k], avem procentajul de 28%.
* În intervalul de frecvențe [19.763k, 19.859k], avem procentajul de 20%.
* În intervalul de frecvențe [19.861k, 19.957k], avem procentajul de 11%.
* În intervalul de frecvențe [19.959k, 20.055k], avem procentajul de 9%.
* În intervalul de frecvențe [20.056k, 20.153k], avem procentajul de 3%.
* Restul de 1% vor avea o frecvență de 20.153k.

**4.1.2. Analiza Monte Carlo pentru factorul de umplere**

Vom avea o dată când SET-ul este pe 0 si o dată cand SET-ul este pe 1 pe P1.

**SET-ul pe 0:**



Graficul 9: Domeniul de variație al factorului de umplere în analiză Monte Carlo

Din 100 de rulări reiese că:

* În intervalul DutyCycle:[856.503m, 859.895m], avem procentajul de 7%.
* În intervalul DutyCycle: [860.000m, 863.392m], avem procentajul de 9%.
* În intervalul DutyCycle: [863.462m, 866.853m], avem procentajul de 4%.
* În intervalul DutyCycle: [866.853m, 870.280m], avem procentajul de 19%.
* În intervalul DutyCycle: [870.385m, 873.773m], avem procentajul de 19%.
* În intervalul DutyCycle: [873.881m, 877.273m], avem procentajul de 16%.
* În intervalul DutyCycle: [877.308m, 880.734m], avem procentajul de 8%.
* În intervalul DutyCycle: [880.769m, 884.196m], avem procentajul de 11%.
* În intervalul DutyCycle: [884.266m, 887.666m], avem procentajul de 5%.
* Restul de 2% vor avea un DutyCycle de 887.666m.

**SET-ul pe 1:**



Graficul 10: Domeniul de variație al factorului de umplere în analiză Monte Carlo

Din 100 de rulări reiese că:

* În intervalul DutyCycle: [491.355m, 494.462m], avem procentajul de 5%.
* În intervalul DutyCycle: [494.523m, 497.631m], avem procentajul de 4%.
* În intervalul DutyCycle: [497.662m, 500.769m], avem procentajul de 11%.
* În intervalul DutyCycle: [500.831m, 503.908m], avem procentajul de 12%.
* În intervalul DutyCycle: [503.939m, 507.046m], avem procentajul de 13%.
* În intervalul DutyCycle: [507.139m, 510.185m], avem procentajul de 20%.
* În intervalul DutyCycle: [510.246m, 513.323m], avem procentajul de 17%.
* În intervalul DutyCycle: [513.354m, 516.462m], avem procentajul de 6%.
* În intervalul DutyCycle: [516.523m, 519.600m], avem procentajul de 5%.
* Restul de 7% vor avea un DutyCycle de 519.630m

**4.1.3. Analiza Monte Carlo pentru amplitudine**

Vom avea o dată când SET-ul este pe 0 si o dată cand SET-ul este pe 1 pe P2.

**SET-ul pe 0:**



Graficul 11: Domeniul de variație al amplitudinii în analiză Monte Carlo

Din 100 de rulări reiese că:

* În intervalul de amplitudini [3.516V, 3.521V], avem procentajul de 15%.
* În intervalul de amplitudini [3.521V, 3.5275 V], avem procentajul de 7%.
* În intervalul de amplitudini [3.527 V, 3.533 V], avem procentajul de 12%.
* În intervalul de amplitudini [3.5332 V, 3.5387 V], avem procentajul de 6%.
* În intervalul de amplitudini [3.5388 V, 3.544 V], avem procentajul de 11%.
* În intervalul de amplitudini [3.5445 V, 3.550 V], avem procentajul de 11%.
* În intervalul de amplitudini [3.5501 V, 3.5557 V], avem procentajul de 16%.
* În intervalul de amplitudini [3.5558 V, 3.561 V], avem procentajul de 14%.
* În intervalul de amplitudini [3.5615 V, 3.5670 V], avem procentajul de 7%.
* Restul de 1% vor avea o amplitudini de 3.5670V.

**SET-ul pe 1:**



Graficul 12: Domeniul de variație al amplitudinii în analiză Monte Carlo

Din 100 de rulări reiese că:

* În intervalul de amplitudini [11.389 V, 11.396 V], avem procentajul de 5%.
* În intervalul de amplitudini [11.397 V, 11.404 V], avem procentajul de 4%.
* În intervalul de amplitudini [11.404 V, 11.412 V], avem procentajul de 11%.
* În intervalul de amplitudini [11.412 V, 11.419 V], avem procentajul de 17%.
* În intervalul de amplitudini [11.419 V, 11.427 V], avem procentajul de 19%.
* În intervalul de amplitudini [11.427 V, 11.434 V], avem procentajul de 10%.
* În intervalul de amplitudini [11.434 V, 11.442 V], avem procentajul de 15%.
* În intervalul de amplitudini [11.432 V, 11.449 V], avem procentajul de 12%.
* În intervalul de amplitudini [11.449 V, 11.457V], avem procentajul de 4%.
* Restul de 3% vor avea o amplitudini de 11.457V.

**4.2. Worst-Case**

Simularea worst-case constă în evaluarea performanțelor circuitului prin analizarea extremelor intervalelor de variație ale parametrilor componentelor, determinate de valorile lor nominale și toleranțele specificate, în scopul identificării configurației care conduce la cele mai nefavorabile condiții de funcționare.

WORST CASE ALL DEVICES

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

Device MODEL PARAMETER NEW VALUE

C\_C1 C\_C1 C 1.01 (Increased)

R\_R8 R\_R8 R .99 (Decreased)

R\_R5 R\_R5 R .99 (Decreased)

R\_R2 R\_R2 R .99 (Decreased)

R\_R1 R\_R1 R 1.01 (Increased)

R\_R3 R\_R3 R .99 (Decreased)

R\_R4 R\_R4 R .99 (Decreased)

R\_R6 R\_R6 R 1.01 (Increased)

R\_R7 R\_R7 R 1.01 (Increased)

R\_R10 R\_R10 R .99 (Decreased)

R\_R9 R\_R9 R 1.01 (Increased)

**4.2.1. Worst-Case pentru frecvență (când SET=SET=1):**

Frecvența nominală este de 19.76k, iar cea worst-case este de 19.69k.

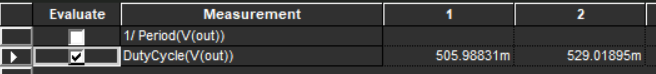
A black box with white text

AI-generated content may be incorrect.

Graficul 13: Domeniul de variație al frecvenței în analiză Worst-Case

**4.2.2. Worst-Case pentru factorul de umplere** **(când SET=SET=1):**

****



Graficul 14: Domeniul de variație al factorului de umplere în analiză Worst-Case

Semnalul nominal este cel verde, cu linie întreruptă, iar cel roșu este cel worst-case.

Factorul de umplere nominal este de 529.01, iar cel worst-case este de 505.98 .

**4.2.3. Worst-Case pentru amplitudine** **(când SET=SET=1):**

****

A screenshot of a computer

AI-generated content may be incorrect.

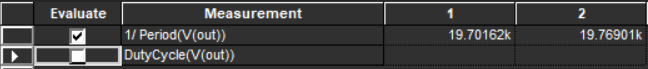
Graficul 15: Domeniul de variație al amplitudinii în analiză Worst-Case

Factorul de umplere nominal este de 529.01, iar cel worst-case este de 505.98 .

**4.2.4. Worst-Case pentru frecvență (când SET=SET=0):**

Semnalul nominal este cel verde, cu linie întreruptă, iar cel roșu este cel worst-case.

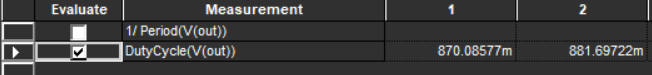
Frecvența nominală este de 19.76k, iar cea worst-case este de 19.70k.



Graficul 16: Domeniul de variație al frecvenței în analiză Worst-Case

**4.2.5. Worst-Case pentru factorul de umplere** **(când SET=SET=0):**

****

****

Graficul 17: Domeniul de variație al factorului de umplere în analiză Worst-Case

Factorul de umplere nominal este de 881.69m, iar cel worst-case este de 870.08m.

**4.2.6. Worst-Case pentru amplitudine** **(când SET=SET=0):**

A screenshot of a computer

AI-generated content may be incorrect.Graficul 18: Domeniul de variație al amplitudinii în analiză Worst-Case

**Bibliografie**

 **Simulare generator PWM (Falstad):**  
<https://www.falstad.com/circuit/e-pwmgen.html>

 **Tutorial YouTube – PWM Explained:**  
<https://www.youtube.com/watch?v=GQLED3gmONg&t=0s>

 **Tutorial YouTube – PWM și aplicații:**  
<https://www.youtube.com/watch?v=81BPgU4KoYI&t=0s>

 **Texas Instruments – „Understanding Op Amp Parameters” (PDF):**  
<https://www.ti.com/lit/an/sboa212b/sboa212b.pdf>

 **Cadence – OrCAD Tutorial (PDF):**  
<https://www.cadence.com/content/dam/cadence-www/global/en_US/documents/solutions/cadence-cloud/oncloud/orcad-tutorial.pdf>

 **Wikipedia – Pulse-Width Modulation:**  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation>

 **Laboratoare și cursuri CEF, CAD**

 **Carte: Proiectare asistată de calculator (Autori; Ovidiu Pop, Raul Fizeșan, Gabriel Chindriș)**