

UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI

Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației

Circuite Electronice Fundamentale 2 – Proiect 1

Generator de Semnal Triunghiular

Profesor coordonator:

Miron Cristea

Student:

Fratu-Halunga Theodor

Grupa 434C

An universitar: 2024-2025

Cuprins

Capitolul 1. Tema proiectului.	3
Capitolul 2. Proiectarea circuitului.	3
2.1 Schema bloc a generatorului de semnal triunghiular.	3
2.2 Implementarea generatorului de semnal triunghiular folosind componente discrete.	5
2.3 Implementarea circuitului folosind componente reale pentru realizarea PCB-ului.	6
2.4 Realizarea PCB-ului final.	7
Capitolul 3. Simularea circuitului.	9
3.1 Posibilitatea reglării frecvenței de oscilație.	9
3.2 Posibilitatea reglării rampelor de urcare/coborâre a semnalului triunghiular.	9
3.3 Posibilitatea reglării amplitudinii de oscilație.	10
3.4 Stabilitatea oscilației la variația temperaturii și deriva termică.	10
Capitolul 4. Instrucțiuni de utilizare a circuitului.	11
Capitolul 5. Bibliografie.	12

Capitolul 1 - Tema Proiectului (N=22).

Se cere să se proiecteze și realizeze un generator de semnal triunghiular având următoarele caracteristici:

- Frecvența de oscilație reglabilă în intervalul 0,1N...2N [kHz] $\Rightarrow f \in [2,2 \text{ kHz} ; 44 \text{ kHz}]$;
- Sarcina de ieșire N [k Ω] $\Rightarrow R_L = 22 \text{ k}\Omega$;
- Posibilitatea de reglaj a rampelor de urcare/coborâre ale semnalului triunghiular;
- Controlul amplitudinii de oscilație în intervalul 0,1N...0,5N [V] $\Rightarrow A \in [2,2 \text{ V} ; 11 \text{ V}]$;
- Domeniul temperaturilor de funcționare: 0°-70°C (verificabil prin testare în temperatură);
- Circuitul va fi alimentat de la o sursă de tensiune simplă;
- Se folosesc componente discrete, nu se folosesc circuite integrate;

Capitolul 2 - Proiectarea circuitului.

2.1 Schema bloc a generatorului de semnal triunghiular.

O implementare posibilă pentru un generator de semnal triunghiular are la bază schema bloc din Fig. 1. Circuitul funcționează pe principiul că un condensator ce este încărcat sau descărcat de un curent constant va avea o cădere de tensiune ce va crește și scadește liniar, așa cum se poate vedea și în Ec. (1). Astfel, condensatorul va fi încărcat de o sursă de curent constant pe durata rampei crescătoare a semnalului triunghiular, apoi va fi descărcat de o sursă de curent constant pe durata rampei descrescătoare a semnalului triunghiular, cele două surse de curent fiind active în contratimp.

$$i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} \Rightarrow u_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt \stackrel{i_c = \text{const.}}{=} \frac{i_c}{C} t + U_{\text{initial}} \quad (1)$$

Pentru a putea controla momentul când funcționează una din sursele de curent iar cealaltă este inactivă, se va utiliza un comparator cu histerezis, cunoscut în literatura de specialitate străină și ca „Trigger Schmitt”. Datorită acestuia, semnalul triunghiular va oscila între limitele date de pragurile de comutarea ale comparatorului.

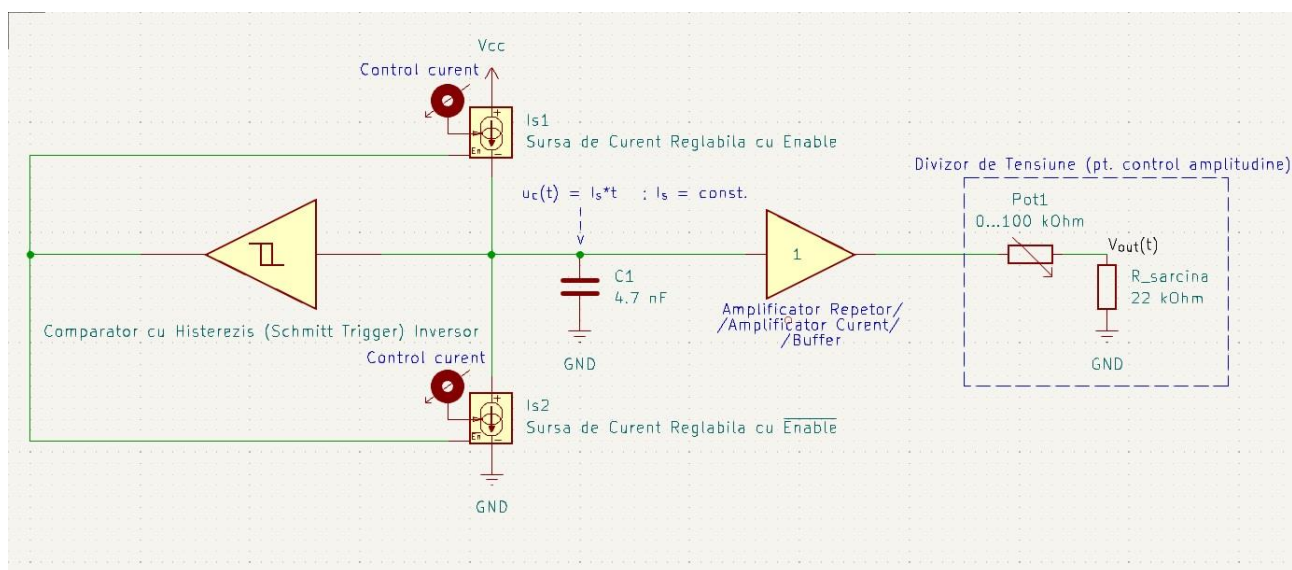


Fig. 1 – Schema bloc conceptuală a generatorului de semnal triunghiular.

Valoarea curentului de încărcare și descărcare a condensatorului controlează panta rampelor semnalului dreptunghiular. Din acest motiv, prin modificarea acestor curenți se poate modifica atât frecvența de oscilație a generatorului cât și factorul de simetrie al semnalului triunghiular. Pentru a putea controla mai bine timpii de creștere și de descreștere ai semnalului, se va considera amplitudinea de oscilație a tensiunii la bornele condensatorului ca fiind constantă, iar frecvența de oscilație se poate determina folosind Ec. (2).

$$f_{osc} = \frac{1}{T_{osc}} = \frac{1}{t_c + t_d} = \frac{1}{\frac{2A_{max}}{\frac{I_{S1}}{C}} + \frac{2A_{max}}{\frac{I_{S2}}{C}}} = \frac{1}{2A_{max}C} \cdot \frac{I_{S1}I_{S2}}{I_{S1} + I_{S2}} \quad (1)$$

Totuși, conform cerințelor de proiectare a circuitului, este necesară și posibilitatea controlului amplitudinii de oscilație. În vederea acestui aspect, se va considera amplitudinea de oscilație a tensiunii pe condensator ca fiind amplitudinea maximă de oscilație și se va utiliza un divizor de tensiune rezistiv pentru a micșora amplitudinea semnalului de ieșire, controlul amplitudinii fiind realizat cu ajutorul unui potențiomtru. Amplificatorul repetor situat între condensator și divizorul de tensiune are rolul de izola etajul de oscilație de cel de control al amplitudinii, impedanța sa de intrare foarte mare fiind importantă pentru ca timpul de încărcare și descărcare la același curent să fie cât mai egal. În absența acestuia, timpul de descărcare ar fi fost mai mic la același curent decât timpul de încărcare deoarece o parte din curentul de încărcare al condensatorului ar fi fost preluat de rezistența de intrare echivalentă a divizorului de tensiune iar la descărcare o parte din sarcina acumulată de condensator s-ar fi descărcat prin aceeași rezistență de intrare.

Pentru implementarea comparatorului cu histerezis inversor se va folosi un circuit cu amplificator operațional așa cum se poate vedea în Fig. 2.

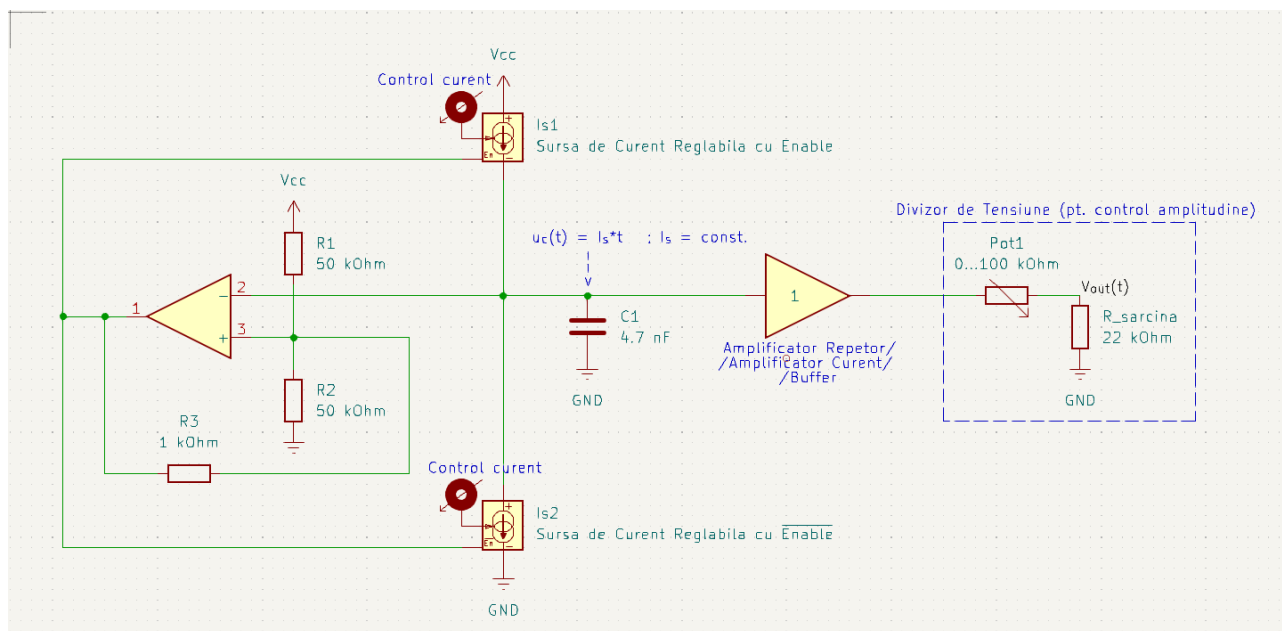


Fig. 2 – Schema bloc a oscilatorului cu implementarea folosind amplificator operațional a comparatorului.

2.2 Implementarea generatorului de semnal triunghiular folosind componente discrete.

În vederea realizării cerinței de proiectare de a folosi doar componente discrete și a nu folosi circuite integrate, este necesară înlocuirea componentelor bloc cu circuite echivalente realizate cu tranzistoare. În absența unor tranzistoare MOS complementare în lista de componente disponibile și datorită amplitudinii de oscilație mari, pentru a putea reduce tensiunea de alimentare, s-a ales utilizarea tranzistoarelor bipolare complementare BC846 și BC856. Circuitul generatorului de semnal triunghiular folosind doar componente active discrete este reprezentat în Fig. 3.

Amplificatorul repetor poate fi implementat fără mari dificultăți folosind un tranzistor NPN în configurație colector-comun. Sursele de curent de asemenea se pot implementa relativ ușor folosind oglinzi de curent; datorită poziției în circuit, pentru sursa de curent de încărcare s-a folosit o oglindă de curent confecționată din tranzistoare PNP iar pentru sursa de curent de descărcare s-a folosit o oglindă de curent confecționată din tranzistoare NPN. Curentul celor două surse se poate regla folosind un potențiomtru pe ramura de control a oglinzii. Tot pe această ramură se găsește și un tranzistor bipolar ce funcționează în regim de comutație, el funcționând ca un întrerupător ce poate opri complet sursa de curent.

Amplificatorul operațional este implementat cu ajutorul unui amplificator diferențial cu sarcină activă și oglindă de curent. Acest funcționând în regim de comparator, nu este necesară implementarea unui etaj de ajustarea a tensiunii de offset, și deoarece singura sarcină a acestuia o reprezintă cele două tranzistoare ale surselor de curent aflate în regim de comutație, nu este necesară utilizarea unui etaj de ieșire colector-comun clasă AB de tip push-pull. Deși adăugarea mai multor etaje de amplificare ar fi putut fi benefică, numărul de componente în plus necesare nu ar fi justificat avantajele în acest caz. De asemenea, amplificatorul operațional nefiind rail-to-rail, întrucât față de limitarea tensiunii de ieșire dată de tensiunea de alimentare există o eroare de aproximativ 0,5 V, a fost necesară adăugarea a două diode semiconductoare pn legate la emitorul tranzistoarelor în regim de comutație pentru a crește tensiunea de comutație din baza acestora cu aproximativ 0,6 V.

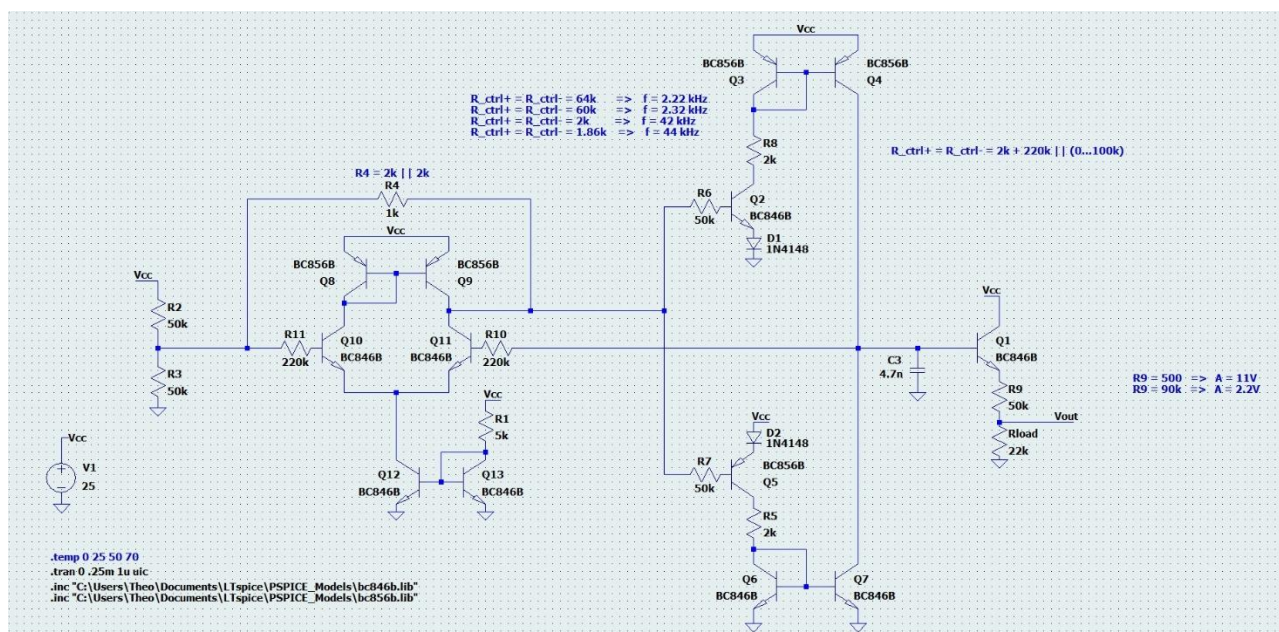


Fig. 3 – Circuitul generatorului de semnal triunghiular implementat cu componente active discrete.

2.3 Implementarea circuitului folosind componente reale pentru realizarea PCB-ului.

Întrucât unele componente pasive utilizate în circuitul din Fig. 3 nu există în lista de componente disponibile de la distribuitor, a fost necesară înlocuirea lor cu unele existente care au valori aproximativ egale sau cu structuri care să aibă caracteristici similare. De exemplu, rezistoarele de 50 k Ω au fost înlocuite cu rezistoare reale de 47 k Ω , iar rezistorul variabil R9 cu rezistență minimă de 500 Ω și rezistență maximă de 90 k Ω a fost înlocuit cu un potențiometru de 100 k Ω .

Alte structuri unde precizia a fost considerată mai importantă au fost înlocuite cu structuri echivalente. De exemplu, rezistorul variabil din ramura de control a oglinzilor de curent cu rezistența minimă de 1,86 k Ω și rezistența maximă de 64 k Ω a fost înlocuit cu un ansamblu format dintr-un rezistor de 220 k Ω în paralel cu un potențiometru de 100 k Ω și apoi conectat în serie cu un rezistor de 2 k Ω . Astfel, rezistența echivalentă a structurii variază în funcție de poziționarea potențiometrului între valoarea de 2 k Ω și valoarea de 70,75 k Ω , așa cum se poate vedea și în Fig. 4; în plus, legea de variație este adecvat de liniară.

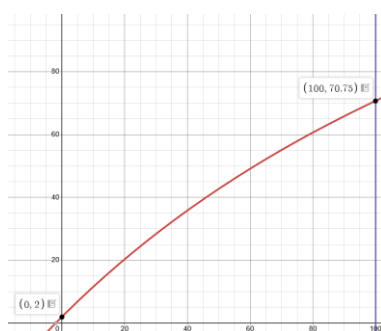


Fig. 4 – Legea de variație a rezistenței echivalente de control pentru cele două surse de curent.

Pentru a verifica că niciuna din componentele utilizate consumă o putere mai mare decât valoarea lor nominală, s-au măsurat prin simulare puterile medii consumate de fiecare din acestea în scenariul cel mai defavorabil, cu frecvența și amplitudinea maximă, scenariu în care circuitul întreg consumă o putere de 785 mW. După ce s-a făcut această validare, s-a implementat în programul de proiectare de PCB-uri KiCAD circuitul din Fig. 5.

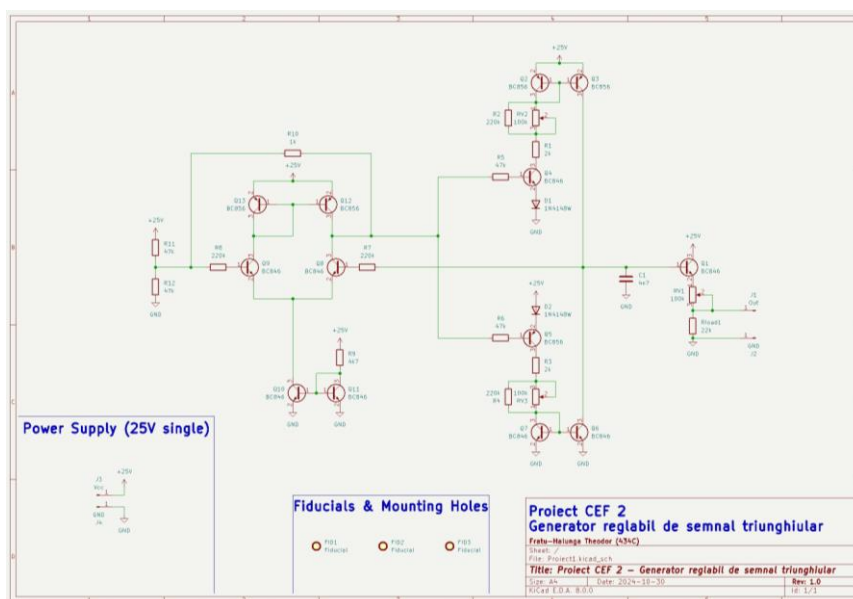


Fig. 5 – Circuitul final pentru generatorul de semnal triunghiular.

2.4 Realizarea PCB-ului final.

După realizarea circuitului din Fig. 5 au fost alocate footprint-urile adecvate pentru fiecare din componente, iar apoi s-a realizat PCB-ul reprezentat în Fig. 6, 7 și 8. PCB-ul a fost realizat conform cerințelor de proiectare, cu o dimensiune de 40x40 mm, două straturi și trasee de 16 mili pentru semnale și de 18 mili pentru alimentare, spațiere de 14 mili între trasee și de 1mm față de marginea plăcii și găuri de trecere „via” cu diametrul de 0,4mm. Componentele pasive utilizate sunt în format chip 0805, iar tranzistoarele sunt în format SOT-23. Stratul de pe spatele plăcii este în mare măsură dedicat pentru a fi plan de masă, însă datorita densității componentelor pe placă a fost necesară întreruperea acestuia cu alte trasee de semnal.

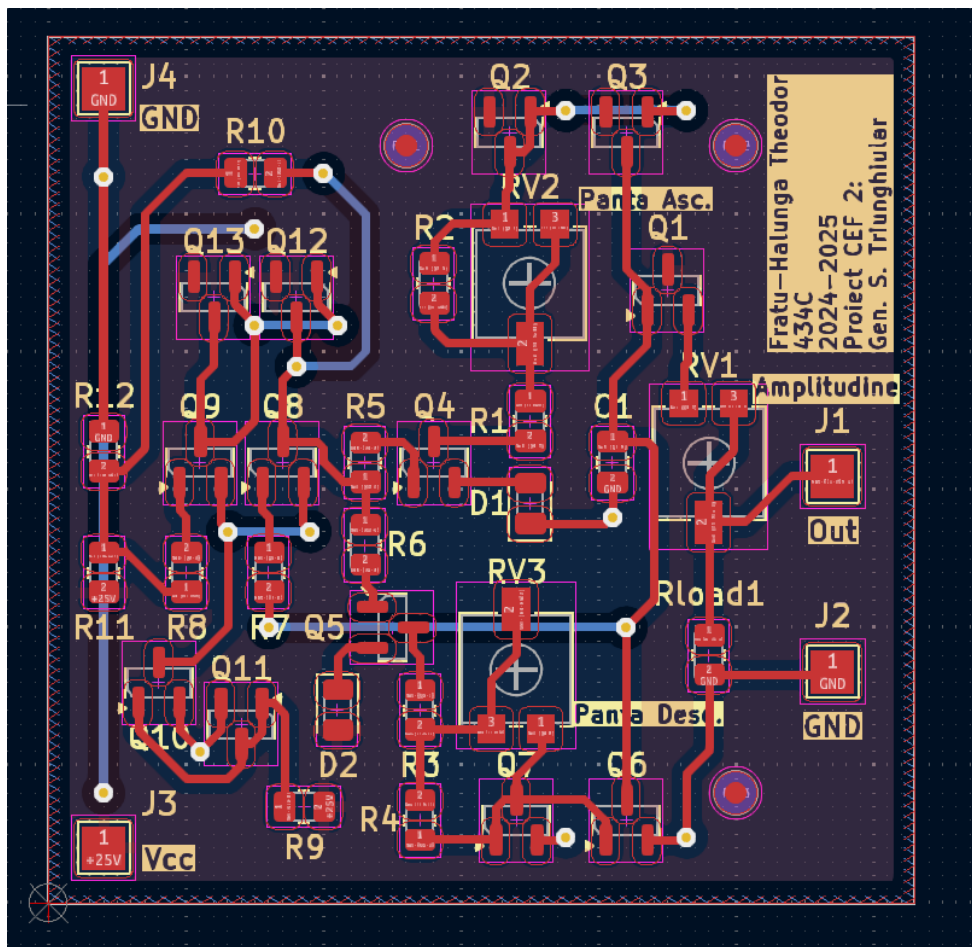


Fig. 6 – Reprezentarea în KiCAD PCBView a PCB-ului final.

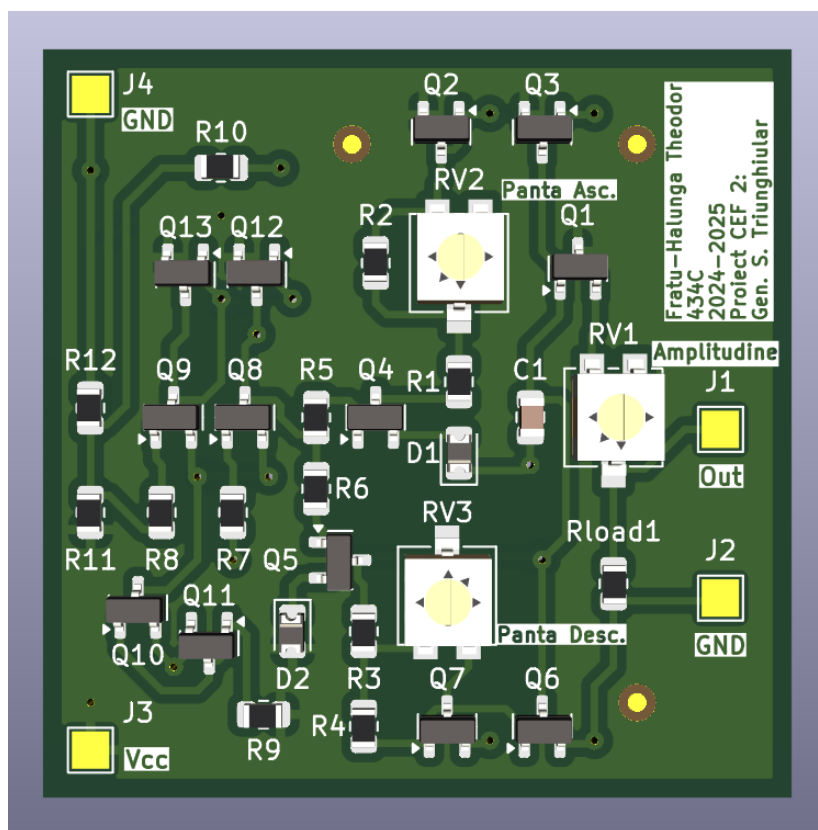


Fig. 7 – Reprezentarea 3D a PCB-ului (vedere de sus)

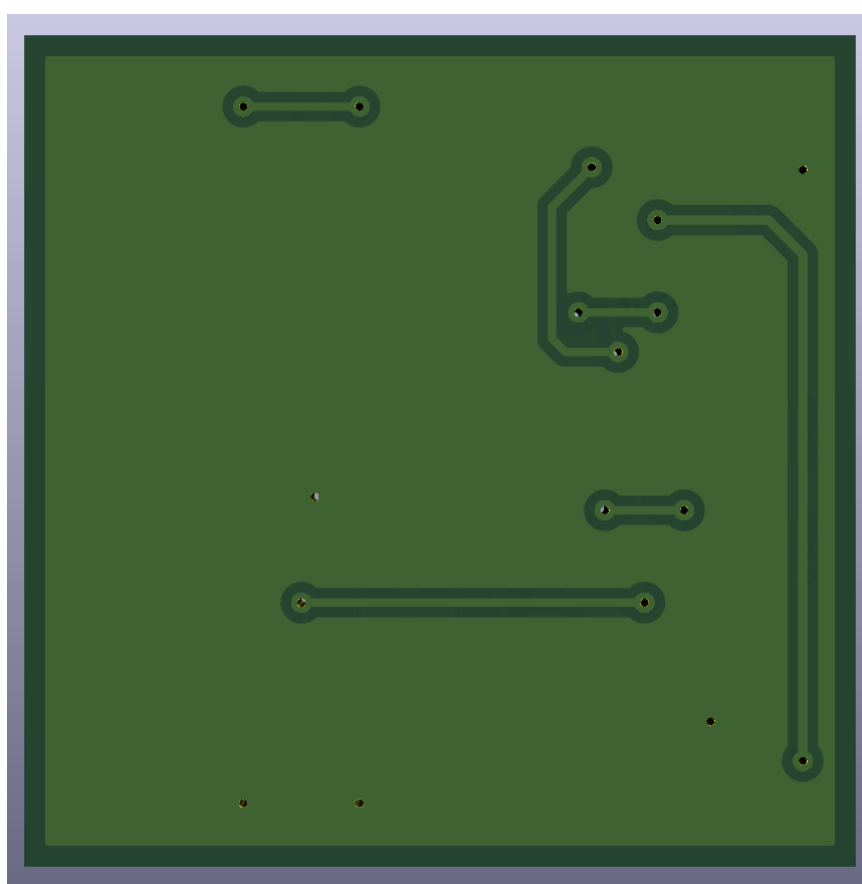


Fig. 8 – Reprezentarea 3D a PCB-ului (vedere de jos)

Capitolul 3 – Simularea Circuitului.

3.1 Posibilitatea reglării frecvenței de oscilație.

Pentru simularea circuitului s-a utilizat programul LTspice, componentele utilizate fiind cele din librăria standard a programului, cu excepția tranzistoarelor bipolare BC846 și BC856, unde s-au utilizat modelele SPICE de pe pagina producătorului [7], [8]. Circuitul simulat este cel din Fig. 3, iar tipul de simulare a fost de tip Transient, folosindu-se directiva SPICE `.tran 0 2.5m 1u uic`. Frecvența a fost măsurată indirect, folosindu-se cursorii pentru a măsura perioada de oscilație și apoi prin inversarea acesteia pentru a determina frecvența. Frecvența poate fi reglată modificând valorile rezistențelor R8 și R5. De exemplu, pentru valoarea de 64 k Ω , frecvența de oscilație obținută a fost de 2,22 kHz, așa cum se poate vedea în Fig. 9, pe când pentru valoarea de 1,86 k Ω s-a obținut frecvența de 44 kHz, așa cum se vede în Fig. 10.



Fig. 9 – Analiza transient a circuitului pentru frecvența de oscilație de 2,22 kHz

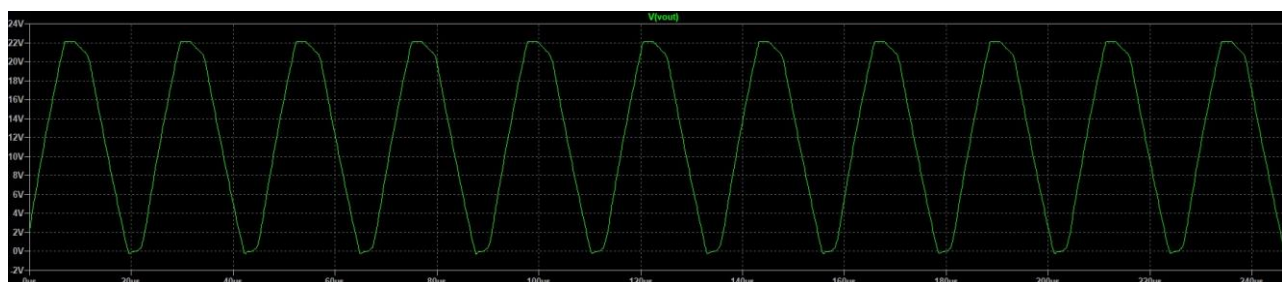


Fig. 10 – Analiza transient a circuitului pentru frecvența de oscilație de 44 kHz

3.2 Posibilitatea reglării rampelor de urcare/coborâre pentru semnalul triunghiular.

Dacă cele două rezistențe R8 și R5 au valori diferite, atunci semnalul triunghiular nu va mai fi simetric, așa cum se poate vedea în Fig. 11 și 12. Gradul de asimetrie depinde de diferența relativă dintre cele două valori, întrucât cele două componente controlează de fapt timpul de creștere și de descreștere al semnalului triunghiular.

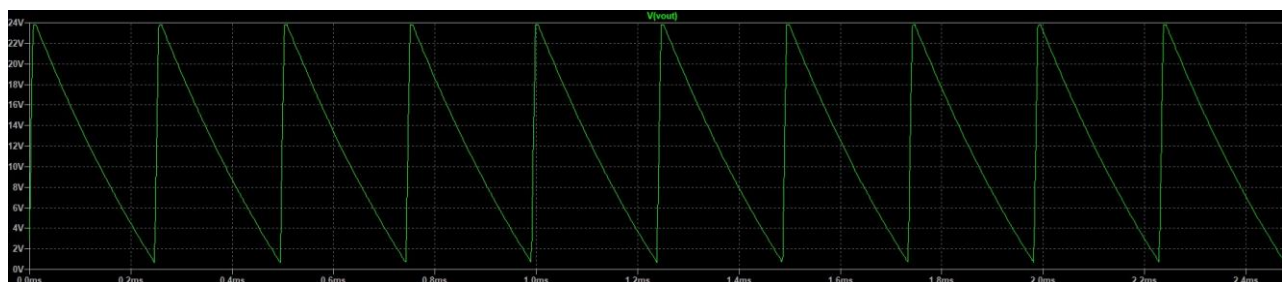


Fig. 11 – Analiza transient a circuitului pentru frecvența de oscilație de 4,4 kHz și pantă crescătoare minimă.

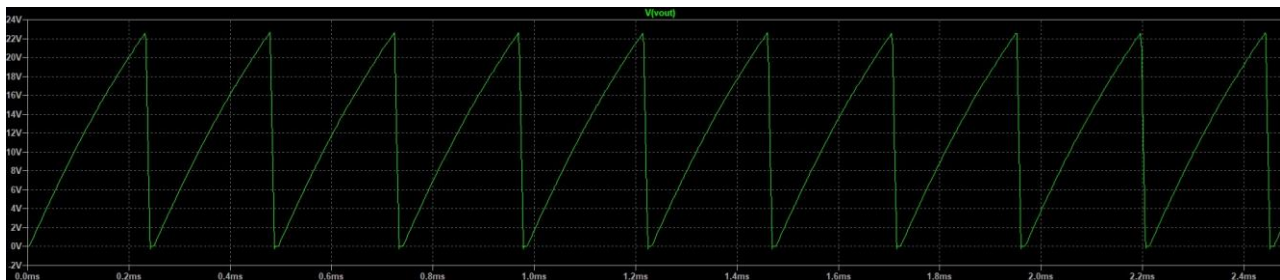


Fig. 12 – Analiza transient a circuitului pentru frecvența de oscilație de 4,4 kHz și pantă descrescătoare minimă.

3.3 Posibilitatea reglării amplitudinii de oscilație.

Amplitudinea de oscilație este controlată prin modificarea valorii rezistorului variabil R9 din divizorul de tensiune de la ieșire. Amplitudinea de oscilație a fost determinată prin utilizarea cursorilor pentru a determina amplitudinea vârf la vârf a semnalului și împărțirea acestei valori la 2. Așadar, pentru valoarea de 500 Ω amplitudinea semnalului de ieșire este de 11V, așa cum se poate vedea în Fig. 13, iar pentru valoarea de 90 k Ω amplitudinea semnalului de ieșire este de 2,2V, așa cum se poate vedea în Fig. 14.



Fig. 13 – Analiza transient a circuitului pentru amplitudinea de 11V



Fig. 14 – Analiza transient a circuitului pentru amplitudinea de 2,2V

3.4 Stabilitatea oscilației la variația temperaturii și deriva termică.

Pentru a determina dacă oscilația este stabilă în domeniul de temperatură de 0°-70°C, pe lângă directiva SPICE `.tran` s-a adăugat și directiva `.temp 0 25 50 70`, care are ca efect rularea simulării de tip transient pentru temperaturile de 0°, 25°, 50° și 70°C. După cum se vede în Fig. 15 și 16, oscilația este stabilă în întreg domeniul de temperatură. Se poate observa că deriva termică este mai mare pentru frecvențe mici față decât pentru frecvențe mari, întrucât curentul debitat de sursele de curent la frecvențele mici este mult mai mic decât la frecvențele mari.

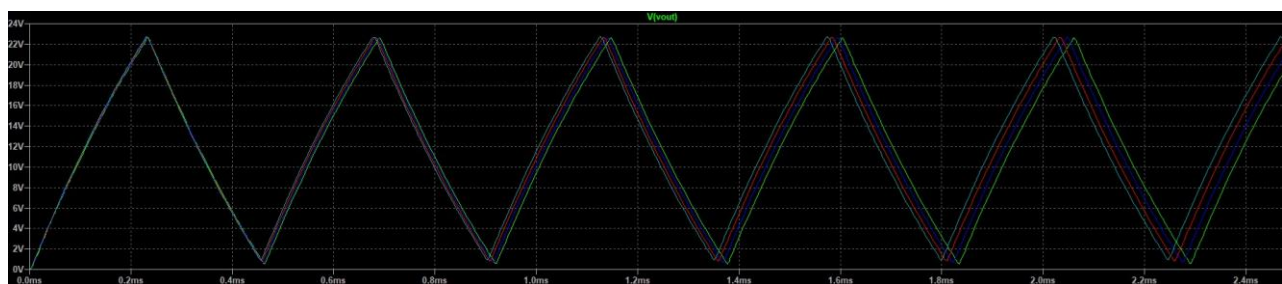


Fig. 15 – Analiza derivei termice pentru frecvența de 2,2 kHz

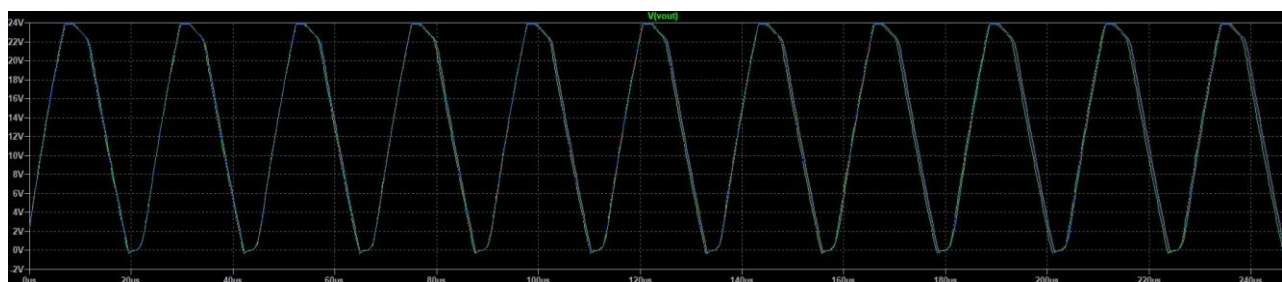


Fig. 16 – Analiza derivei termice pentru frecvența de 44 kHz

Capitolul 4 – Instrucțiuni de utilizare a circuitului.

Pentru explicarea modului de utilizare a circuitului se va utiliza Fig. 7, întrucât reflectă cel mai bine PCB-ul fizic final. Alimentarea circuitului se va face printr-o sursă de tensiune simplă conectate la terminalele Vcc și GND din partea stângă a plăcii. În proiectarea circuitului s-a utilizat o tensiune de alimentare de 25V, cu un curent maxim aproximat prin adăugare cu valoarea de 40mA; un exemplu de sursă de tensiune ce ar putea alimenta circuitul este Tenma 72-10480. Cu toate acestea, este posibilă alimentarea circuitului și cu o tensiune mai mică de 25V, însă amplitudinea maximă și frecvențele de oscilație vor fi mai mici.

Semnalul de ieșire poate fi preluat de la terminalele Out și GND din partea dreaptă a plăcii. Amplitudinea semnalului de ieșire poate fi reglată prin reglarea potențiometrului RV1, etichetat „Amplitudine”. Panta ascendentă a semnalului triunghiular poate fi modificată prin reglarea potențiometrului RV2, etichetat „Panta Asc.”. Panta descendentă a semnalului triunghiular poate fi modificată prin reglarea potențiometrului RV3, etichetat „Panta Desc.”. Atât frecvența semnalului triunghiular cât și simetria acestuia pot fi reglate prin modificarea potențimetrelor RV2 și RV3 în tandem.

Capitolul 5 – Bibliografie.

- [1] Horowitz P, Hill W, Robinson I. The art of electronics. Cambridge: Cambridge university press; 1989 Jul 28.
- [2] Scherz P. Practical electronics for inventors. McGraw-Hill, Inc.; 2006 Nov 14.
- [3] Self D. Audio power amplifier design. Routledge; 2013 Jul 4.
- [4] Dascalu D, Rusu A, Profirescu M, Costea I. Dispozitive si Circuite Electronice. Editura Didactica si Pedagogica; 1982
- [5] Brezeanu G, Draghici F. Circuite Electronice Fundamentale. Niculescu; 2013
- [6] <https://nptel.ac.in/courses/117107094>
- [7] <https://diotec.com/en/product/BC846B.html>
- [8] <https://diotec.com/en/product/BC856B.html>
- [9] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/schmitt.html>