



Universitatea Tehnică Cluj Napoca
Facultatea de Automatică și Calculatoare

Proiect de semestru
la disciplina
Electronică de Putere

Student: Duma Octavian Ioan
Grupa: 30132/1

2024 – 2025

Proiect: P1

1.1. Tema proiectului

Analogic Hardware in the Loop (AnHIL) pentru variator coborator ("Buck") de tensiune continua

1.2. Structura conventionala a variatorului coborator:

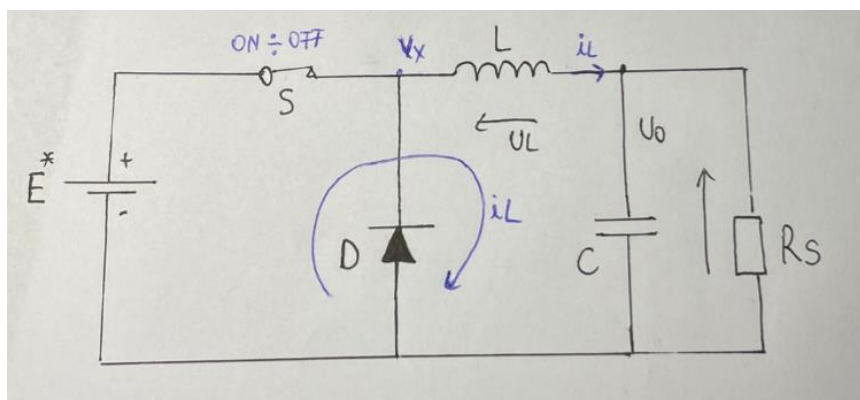


Figura 1.1

Datorita regimului de comutatie in care functioneaza convertorul, circuitul prin bobina (i_L) si tensiunea prin condensator (U_o) prezinta o variatie continua in jurul valorilor medii : ($\overline{i_L}$), ($\overline{U_o}$), rezultand o componenta nedorita "ripple":

$$\begin{cases} \Delta i_L = i_{max} - i_{min} \\ \Delta U_o = U_{omax} - U_{omin} \end{cases}$$

corespunzatoare frecventei de comutatie (f_c), respectiv perioadei de comutatie (T_c).

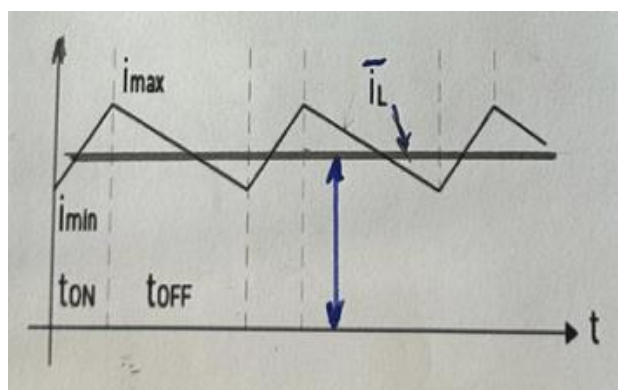


Figura 1.2

1.3. Specificatii de proiectare

1.3.1. Tensiunea de alimentare:

$$E^* = 48 \text{ V}$$

1.3.2. Tensiunea (nominala) de iesire:

$$(U_0)_N = 14 \text{ V}$$

1.3.3. Frecventa de comutatie:

$$f_C = 25 \text{ kHz}$$

1.3.4. Rezistenta (nominala) de sarcina:

$$(R_s)_N = 10 \Omega$$

1.3.5. Variatia acceptata a curentului prin bobina:

$$\Delta i_L = (0.2 \div 0.3) \text{ din valoarea } (I_0)_N$$

$$(I_0)_N = \frac{(U_0)_N}{(R_s)_N}$$

1.3.6. Variatia acceptata a tensiunii de iesire:

$$\Delta U_0 = (2 \div 5) \% \text{ din valoarea } (U_0)_N$$

1.3.7. Valoarea “de calcul” a factorului de umplere (μ):

$$\mu_0 = \frac{(U_0)_N}{E^*}$$

1.4. Relatii de proiectare

1.4.1. Valoarea “minimă” a inductantei bobinei:

$$L \geq \frac{(1 - \mu_0) \cdot \mu_0 \cdot E^*}{f_c \cdot (\Delta i_L)}$$

1.4.2. Valoarea minimă a condensatorului de iesire:

$$C \geq \frac{(\Delta i_L) \cdot \mu_0}{(\Delta U_0) \cdot f_c}$$

Inlocuind cu valorile primite, se obtine:

$$\mu_0 = \frac{14}{48} = 0.29$$

$$(I_0)_N = \frac{14}{10} = 1.4 [A]$$

$$\Delta i_L = (0.28 \div 0.42) [A]$$

$$\Delta U_0 = (2.8 \div 4.2) [V]$$

Am ales 0.29 si 2.8 si obtinem:

$$L \geq 14.1 [mH]$$

$$C \geq 11.6 [\mu F]$$

1.5. Problema frecvenței de comutație

S-a observat din relațiile anterioare că o creștere a frecvenței de comutație, la un set de performanțe impuse, conduce la reducerea variațiilor inductanței (L) și a condensatorului (C). Elementul care determină alegerea frecvenței de comutație este tranzistorul "S", cu rol de comutator/intrerupător capabil să funcționeze corect la frecvențe cât mai ridicate.

Proiect: P2

2.1. Tema proiectului

Analogic "Hardware in the Loop" (AnHIL) pentru variator coborător ("Buck") de tensiune continuă.

2.2. Modelarea convertorului (variatorului)

Modelul matematic al variatorului descrie comportarea acestuia și cele două stări de comutație: ON și OFF, referitoare, evident, la starea tranzistorului din montaj.

Componentele variatorului se consideră idealizate, ignorându-se parametri paraziti (curenți de scurgere și stare (OFF), căderi de tensiune în stare (ON), etc).

Schema echivalentă a variatorului în starea ON este prezentată în figura următoare:

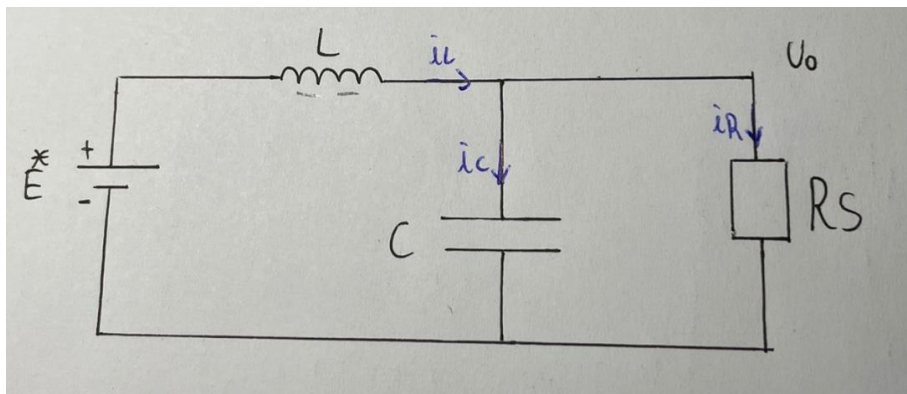


Figura 2.1 "Stare ON"

Se introduce variabila (\underline{u}) pentru a evidenta regimul de comutatie:

$$\underline{u} = 1 \text{ in starea ON}$$

$$\underline{u} = 0 \text{ in starea OFF}$$

In acest caz:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{u} \cdot E = U_L + U_0 = U_L + U_c \\ U_L = L \frac{di_L}{dt} \\ i_c = C \frac{dU_c}{dt} \\ i_R = \frac{U_0}{R_s} \\ i_L = i_c + i_R \end{array} \right.$$

De aici rezulta:

$$\underline{u} \cdot E - U_0 = L \frac{di_L}{dt} \text{ respectiv}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \cdot \underline{u} \cdot E - \frac{1}{L} \cdot U_0$$

Pentru tensiunea de iesire:

$$\frac{dU_0}{dt} = \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_c = \frac{1}{C} (i_L - i_R) = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{1}{R_s} \cdot U_0 \right) = \frac{1}{C} \cdot i_L - \frac{1}{R_s \cdot C} \cdot U_0$$

Starea "OFF" a tranzistorului, figura 2.2, conduce la modificarea ecuatiei curentului (i_L):

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L} \cdot U_0$$

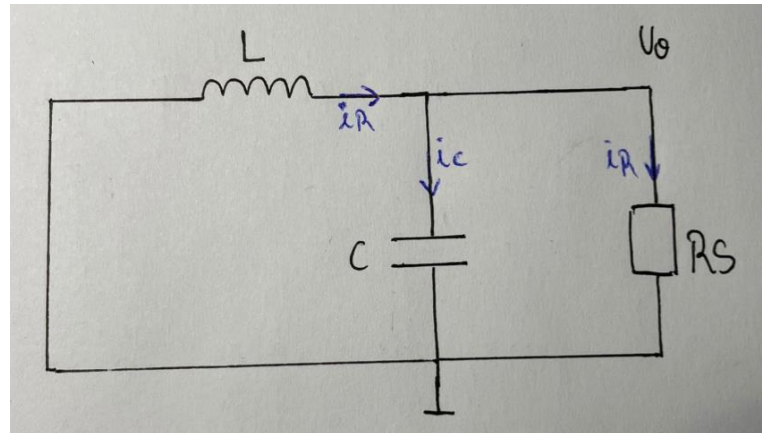


Figura 2.2 "Starea OFF"

2.3. Schema echivalenta structurala a variatorului

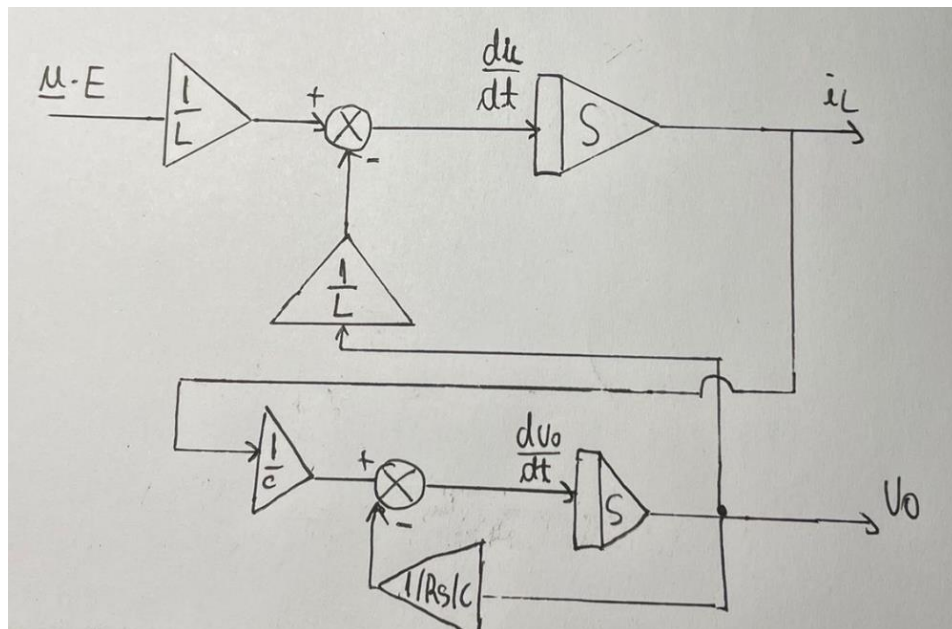


Figura 2.3

2.4. Problema parametrilor “paraziti”

Schema structurala a variatorului, figura 2.3, opereaza cu componente idealizate.

De exemplu, pentru tranzistorul in comutatie, in stare (ON) s-a considerat $(U_{CE})_{ON} = 0$.

In realitate apare o tensiune $(U_{CE})_{ON} \neq 0$ de ordinul $(0.5 \div 1.5) \text{ V}$ la tranzistoare de putere medie (sub 20W). De asemenea, in starea (OFF) exista totusi un curent de scurgere rezidual, $(i_{CO} \leq 1 \text{ mA})$, care a fost neglijat.

Parametrul “parazit” care are cel mai mare defect in functionarea convertorului este dat de rezistenta “ohmică” a bobinei (r_L).

Corespunzator acestei situatii rezultă schema echivalenta din figura 2.4.

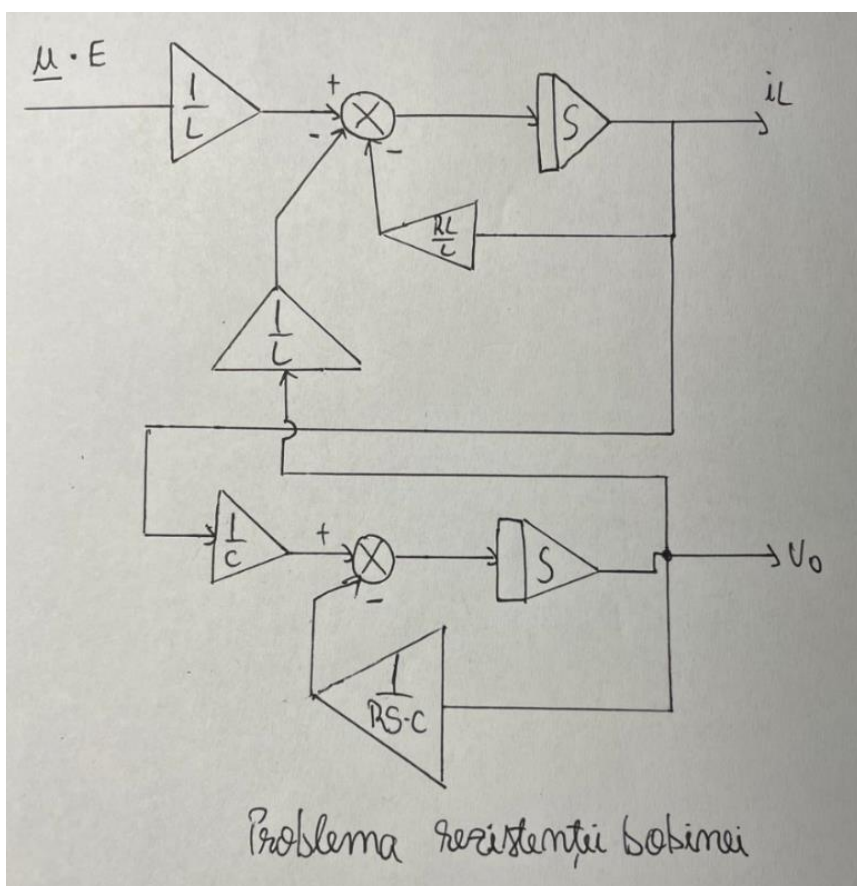
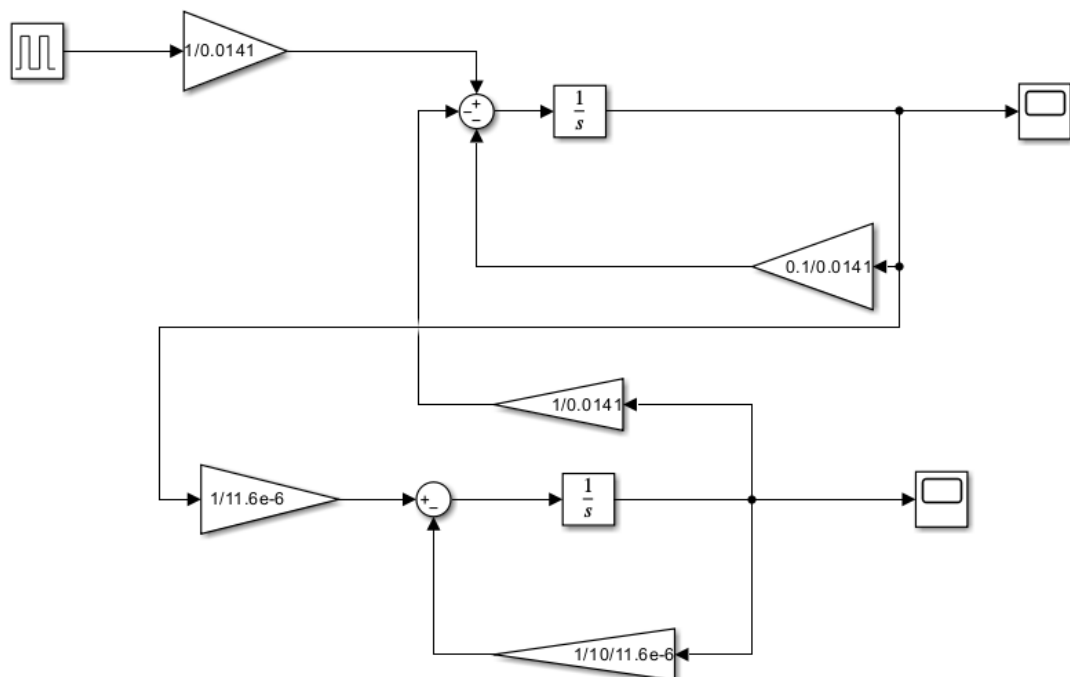
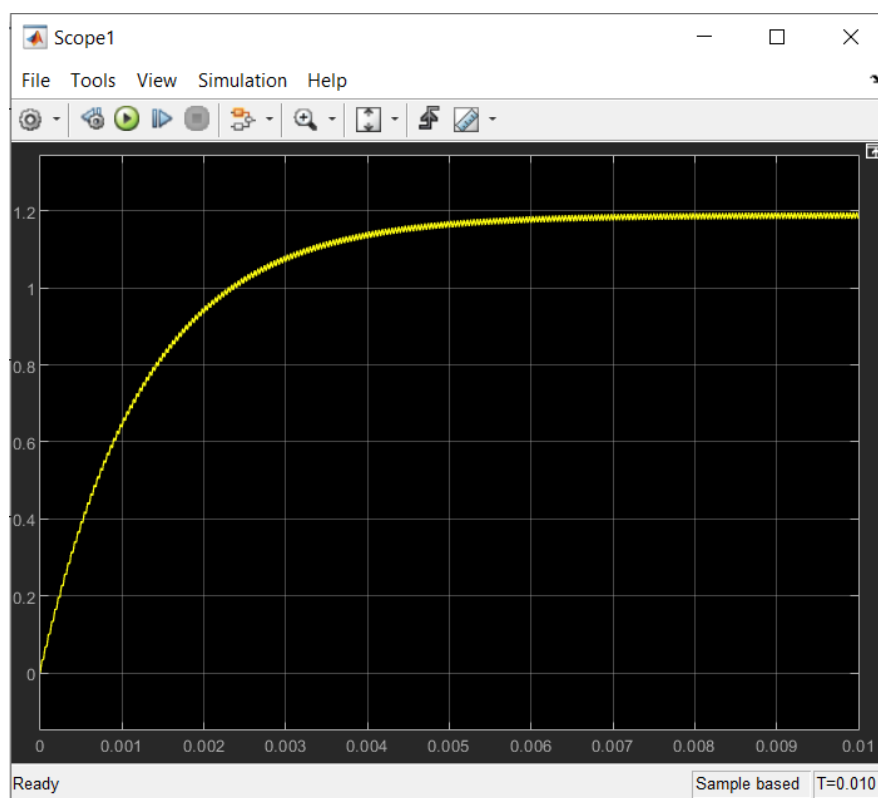


Figura 2.4

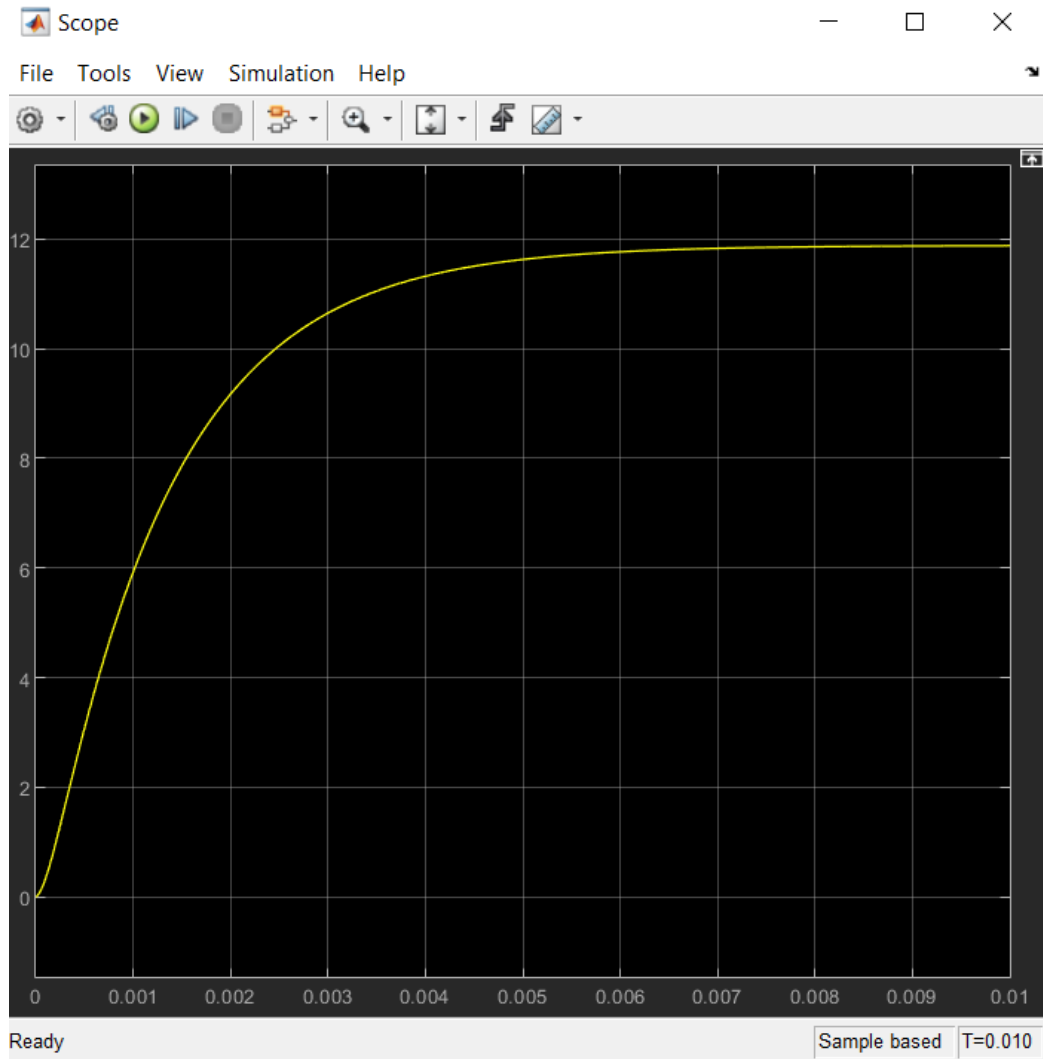
Inlocuind cu valorile primite, am obtinut:



Curentul $i_L(t)$:



Tensiunea $U_o(t)$:



Proiect: P3

Simularea comportarii variatorului coborator de tensiune continua

3.1. Tema proiectului

Analitic "Hardware in the Loop" (AnHIL) pentru variator coborător ("Buck") de tensiune continuă.

3.2. Principii de modelare

În cazul convertoarelor electronice de putere cu funcționare în comutație se folosesc, în mod uzual, două strategii de simulare a comportării.

- a) Simulare cu semnal mic (valori instantanee)
- b) Simulare cu semnal ridicat (valori medii)

Justificarea acestor două strategii:

- 1. Funcționarea convertorului corespunde funcționării în comutație (pentru a reduce puterea disipată de tranzistorul de putere), aparând deci, alături de componenta utilă (adică valoarea medie) și o componentă reziduală, nedorită dar inerentă: (valoarea de ripple)
- 2. Mărimea utilă în aplicații este doar componenta continuă (valoarea medie)

Ambele strategii de simulare se referă la schema electrică conventională.

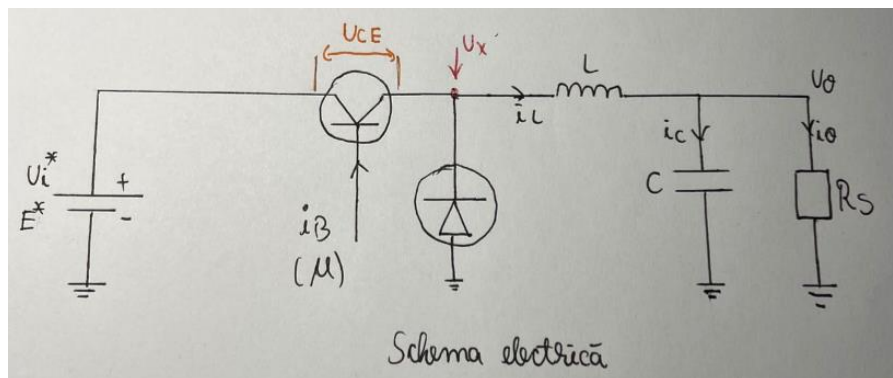
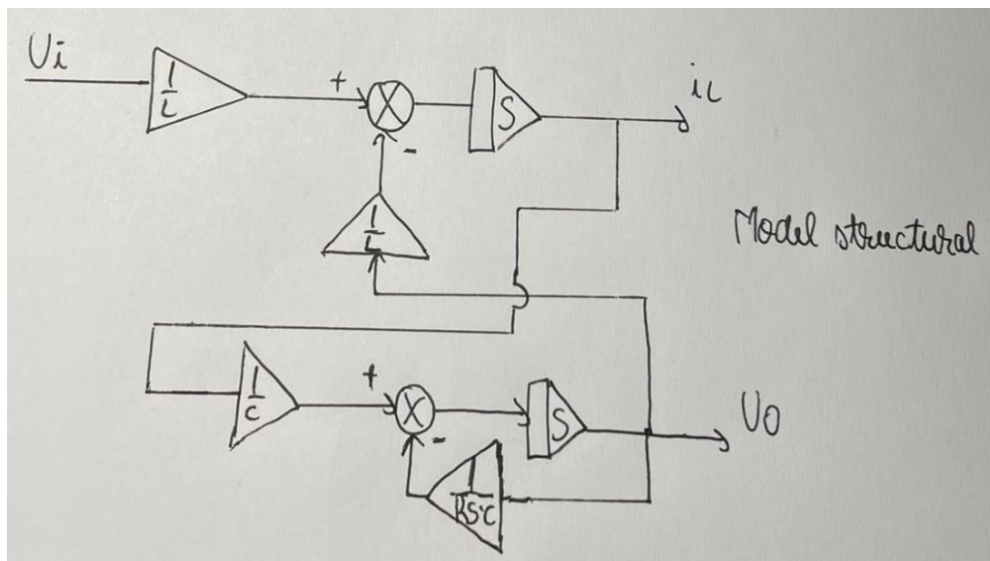


Figura 3.1

3.3. Schema structurala de modelare

In ambele cazuri de foloseste aceeaasi schema structurala:



Deosebirea dintre cele doua cazuri de simulare: ia valori instantanee – valori mediate

Consta in forma tensiunii de intrare aplicate:

- a) Unda dreptunghiulara pentru modelare - valori instantanee
- b) Treapta la modelarea - valori mediate

3.4. Procesul de simulare – valori instantanee:

3.4.1. Se realizeaza schema structurala idealizata din figura 3.2 folosind datele initiale (L, C, fc, Rs)

3.4.2. Se considera o tensiune de alimentare:

$$U_i^* = E^* = 24 \text{ (V)}$$

3.4.3. Sarcina necesita o tensiune de lucru:

$$U_0 = 12 \text{ (V)}$$

3.4.4. Se foloseste schema electrica din figura 3.1 in care:

$$\mu = \frac{U_0}{U_i} = \frac{U_0}{E^*} = \frac{12}{24} = 0.5$$

Datorita regimului de comutatie al tranzistorului(T):(ON->OFF->ON->OFF), tensiunea reala U_x va avea o evolutie dreptunghiulara, figura 3.3, de amplitudine E^* , frecventa $f_c = \frac{1}{T_c}$ si $\mu = 0.50$ ($t_{ON} = t_{OFF}$).

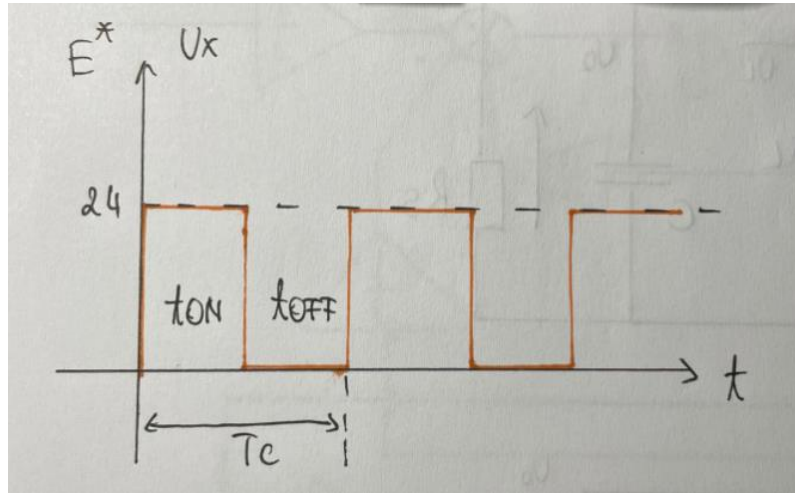
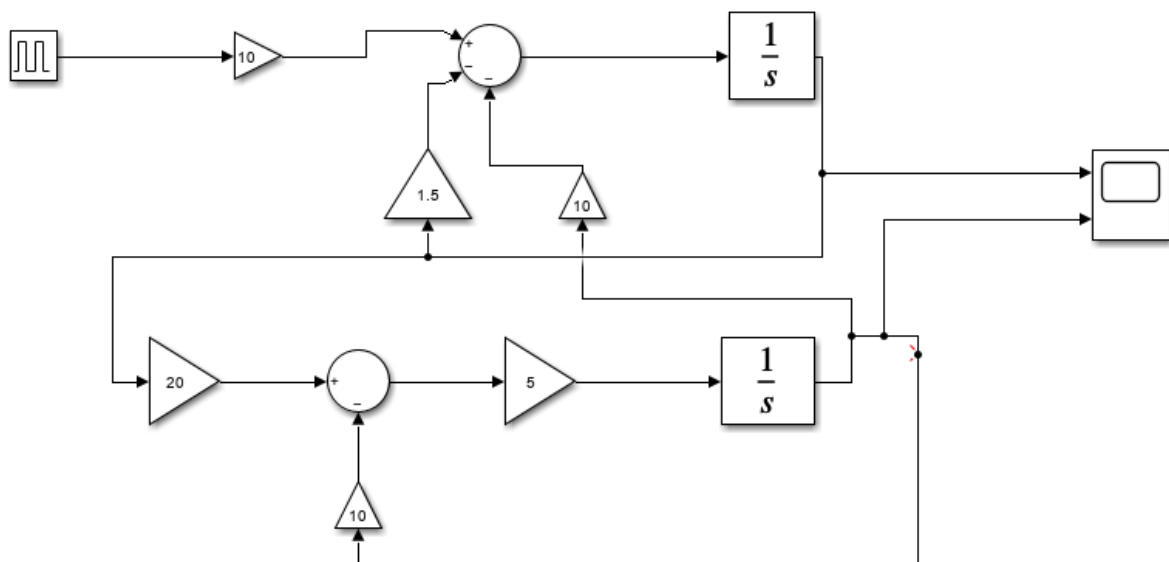
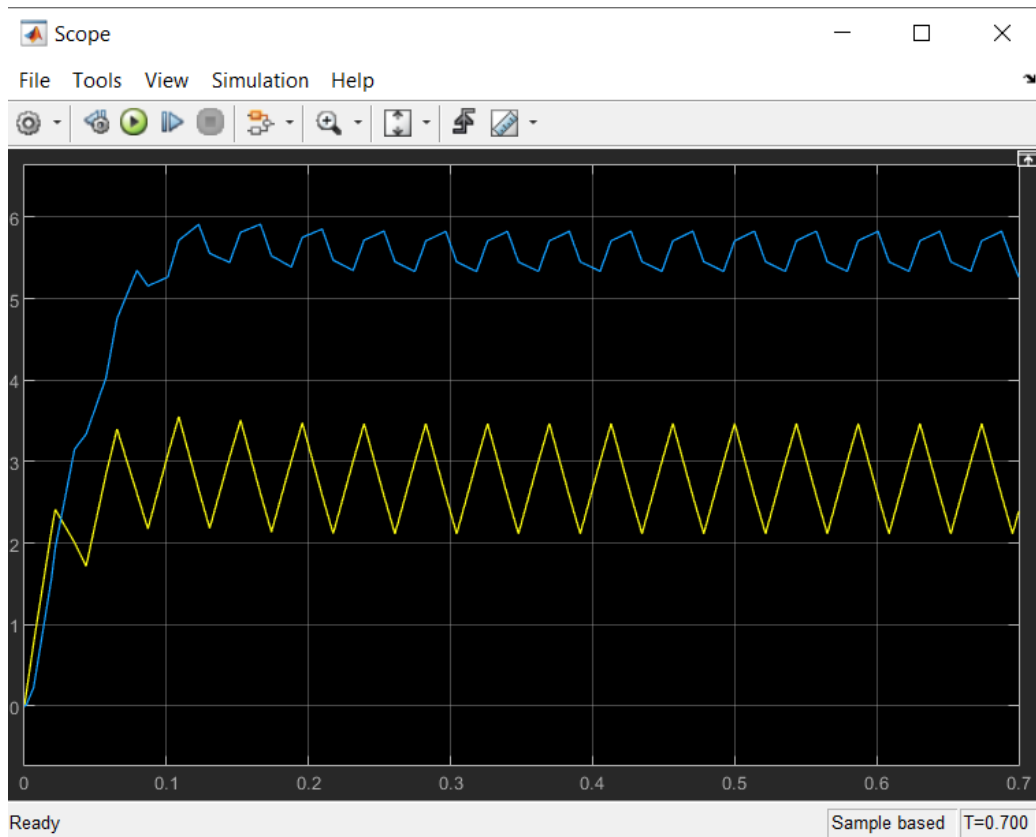


Figura 3.3

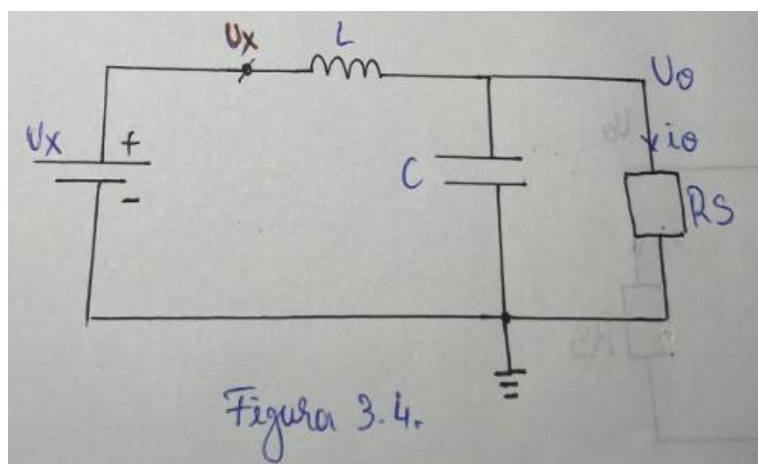
3.4.5. Se va urmări evoluția curentului $i_L(t)$ și a tensiunii $U_o(t)$ (valorii medii, valori instantanee, ripple, etc)





3.5. Procesul de simulare, valori mediate:

Se folosesc aceleasi etape anterioare, dar tensiunea (U_x) va fi $U_x = U_o = 12$ (V) aplicata sub forma unui semnal treapta. De remarcat ca acum filtru (LC) nu mai este necesar, lipsind procesul de comutatie, deci $U_x = U_o$.

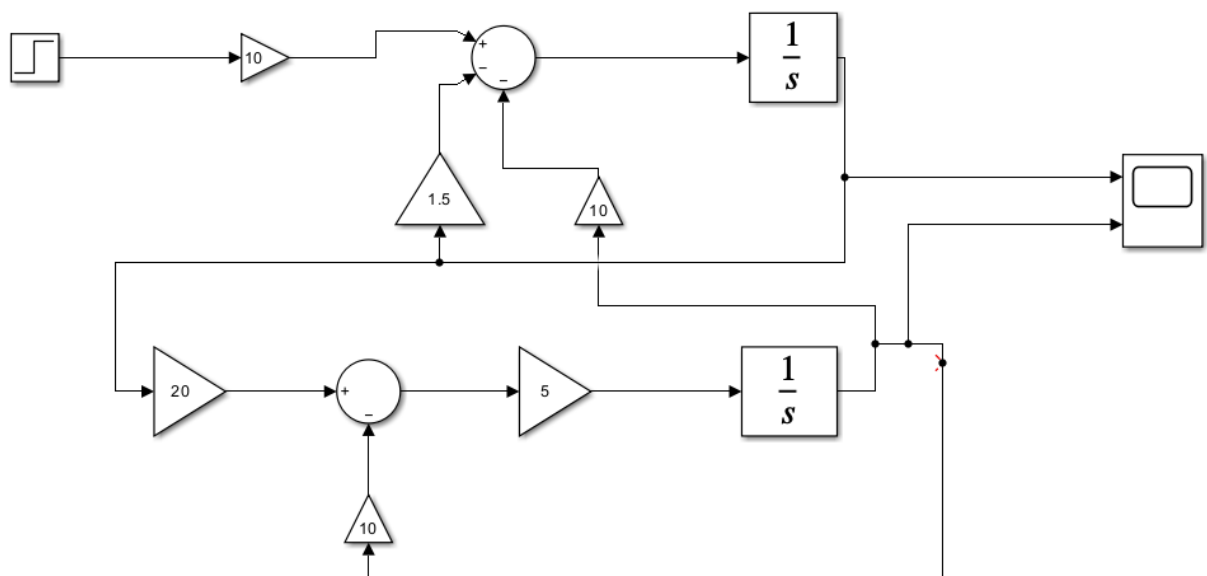
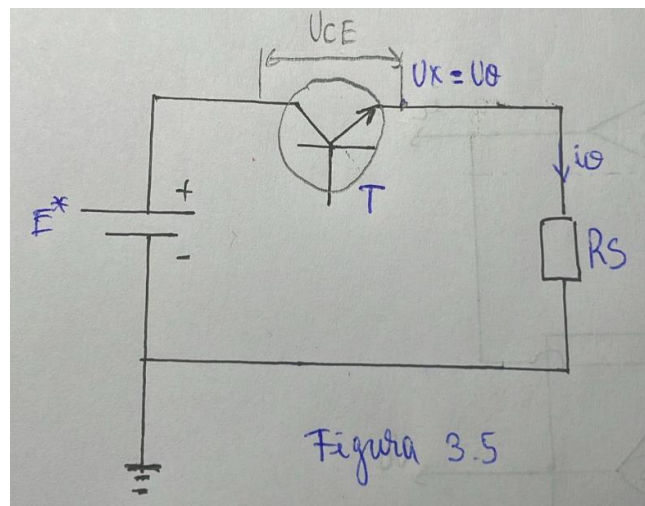


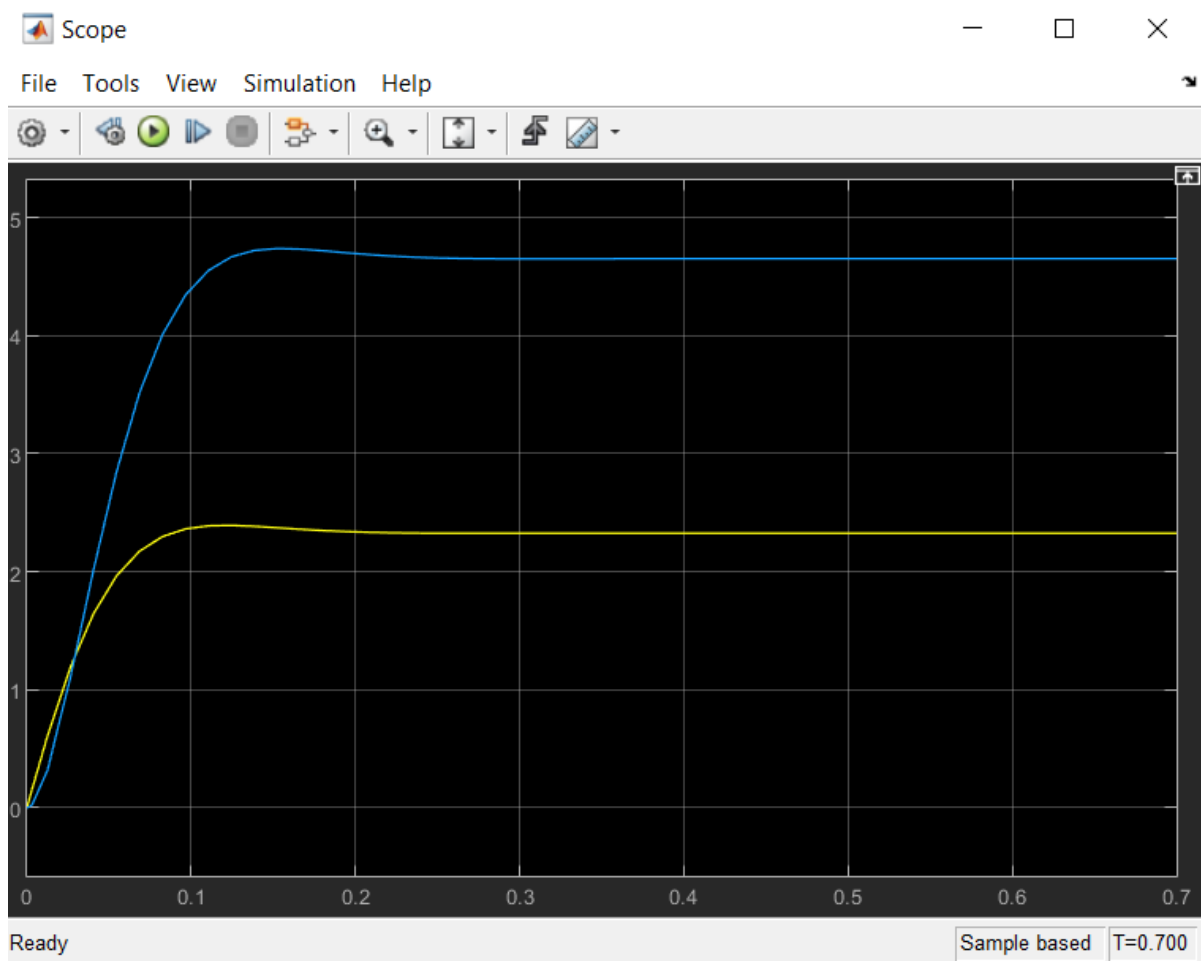
Din schema electrica din figura 3.5 rezulta ca tranzistorul trebuie sa suporte caderea de tensiune (U_{CE}):

$$U_{CE} = E^* - U_o = 24 - 12 = 12 \text{ V}$$

si curentul de sarcina i_o disipand puterea:

$$P_T = U_{CE} \cdot i_c = U_{CE} \cdot i_o$$





3.6. Problema modelarii structural liniare

Pentru schema din figura 3.4 s-a realizat schema structurala cu doua integratoare din figura 3.2. Este cunoscut faptul ca structuri din figura 3.4, liniare, componentei constante i se poate asa si un model frecvential prin functia de transfer (H_{VTC}):

$$\frac{U_o(s)}{U_x(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

cu relatii evidente intre (ζ, ω) si (L, CR)

Proiect: P4

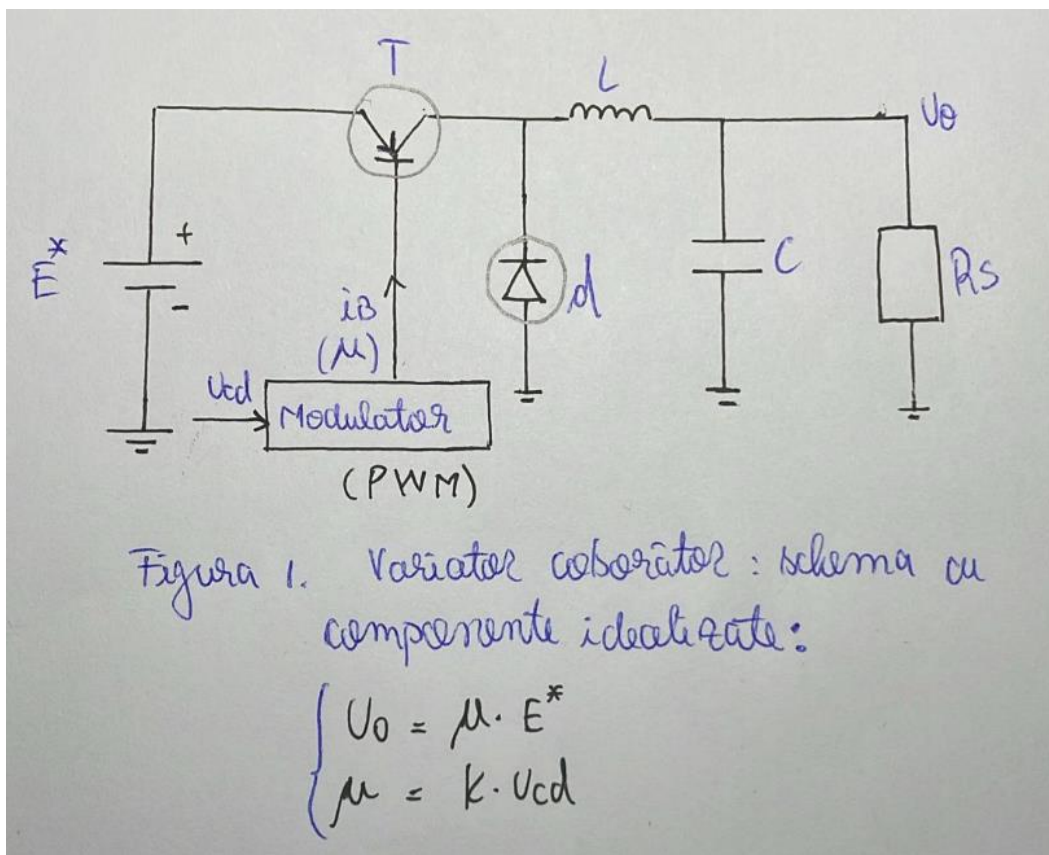
Problema implementării convertorului analogic folosind amplificatoare operationale (AO)

Tema proiectului

Analitic "Hardware in the Loop" (AnHIL) pentru variator coborător ("Buck") de tensiune continuă.

4.1. Structura conventională a variatorului

Variatorul coborător de tensiune construiește o variantă de convertor electronic de putere.



4.2. Modelarea matematica a variatorului

Din ecuatiile specifice variatorului din P3 a rezultat schema urmatoare:

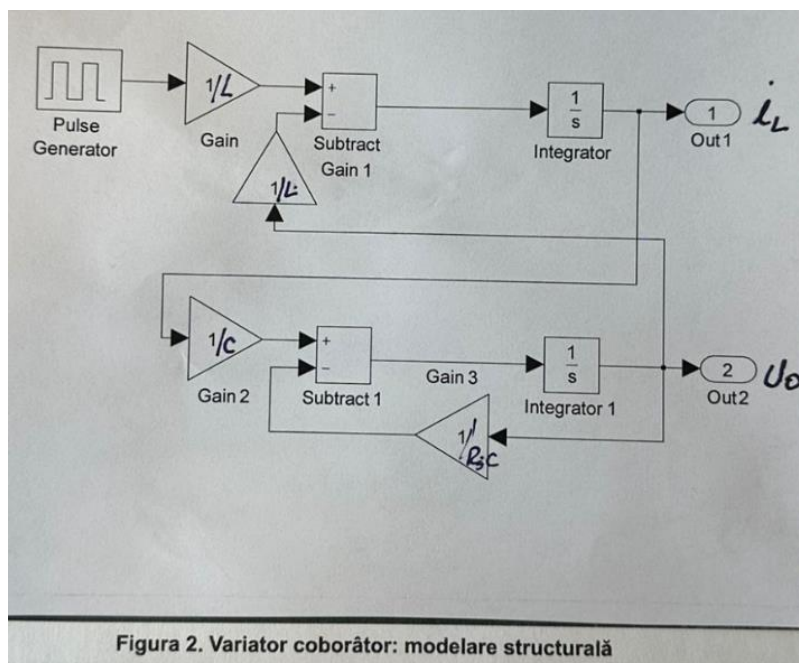


Figura 2. Variator coborător: modelare structurală

4.3. Dacă se ține cont de cel mai important parametru "parazit" al schemei: reprezentarea schemică a bobinei, rezulta schema structurală din figura 3.

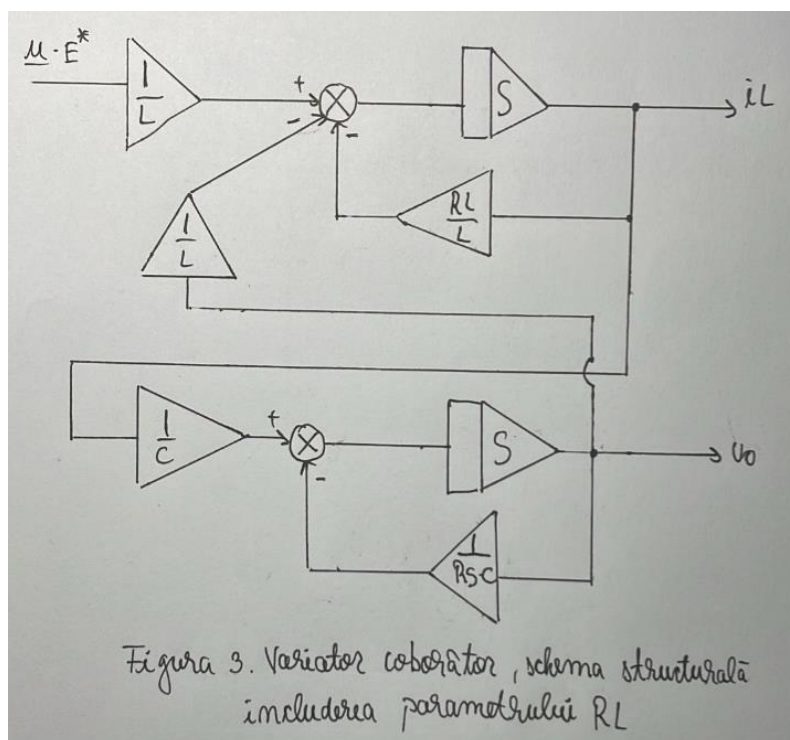


Figura 3. Variator coborător, schema structurală
inclusiunea parametrului R_L

4.4. Varianta aleasa pentru simulare

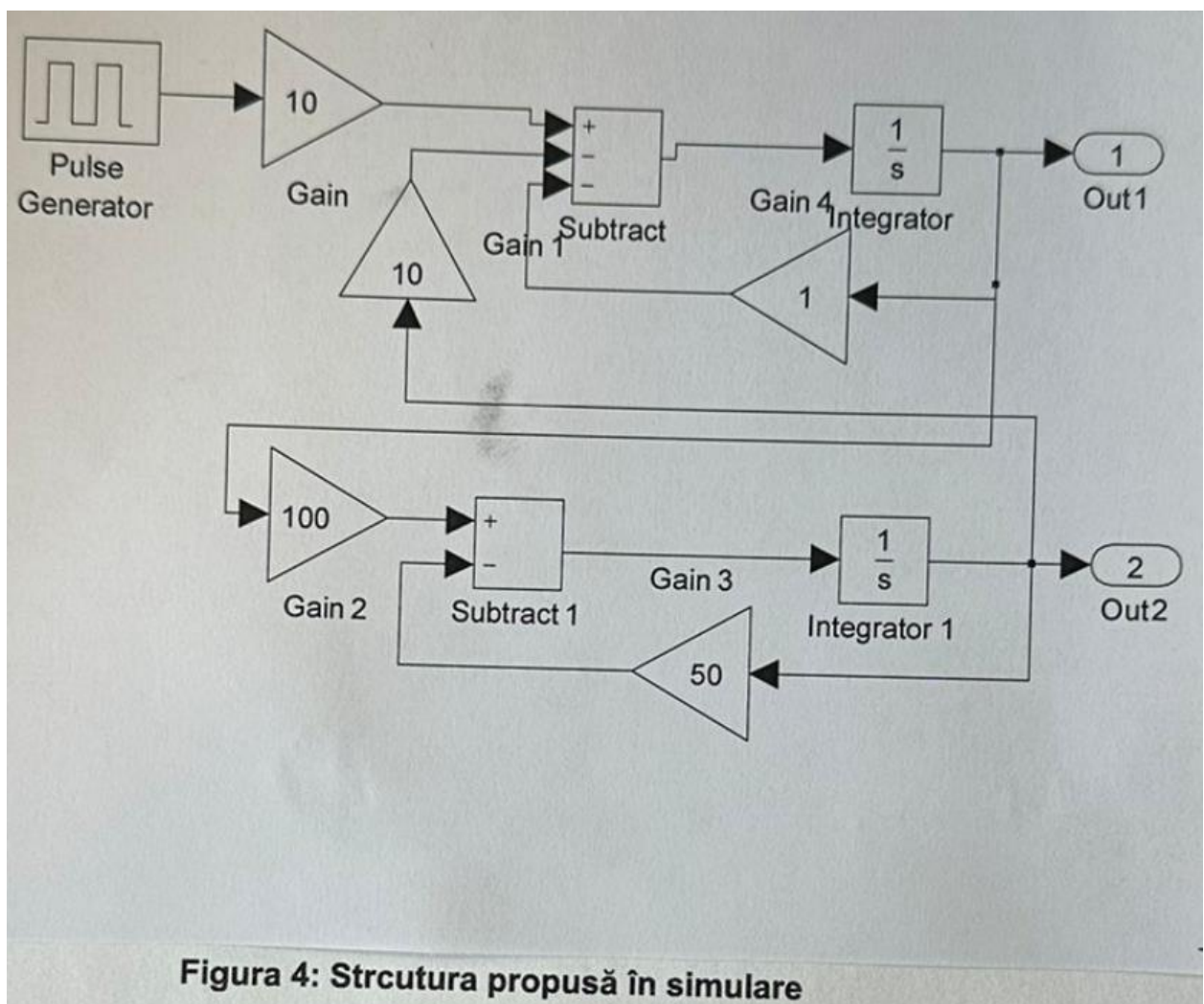
Se presupun parametrii:

$$L = 0.1 \text{ H}$$

$$C = 10.000 \mu\text{F}$$

$$(R_s)_N = 2 \Omega$$

Se obtine astfel schema din figura 4:



4.5. Adaptari pentru simulare analogica cu amplificatoare operationale

Valorile relativ mari ale factorului de ponderare, de exemplu 100 sau 50, pot pune problema in precizia de simulare intrucat amplificatoarele operationale sunt considerate circuite idealizate:

factor de amplificare $A \rightarrow \infty$

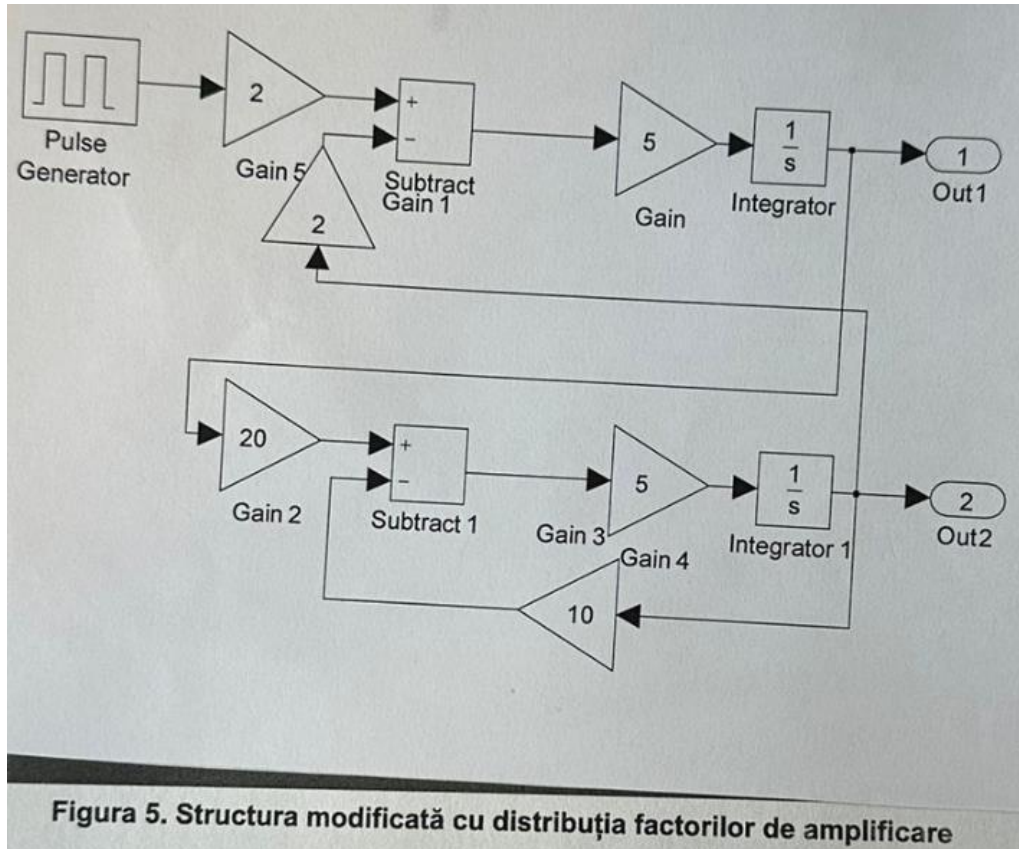
impedanta de intrare $Z_i \rightarrow \infty$

impedanta de iesire $Z_o \rightarrow 0$

banda de frecventa $\Delta \rightarrow \infty$

In acest caz, coeficientii sunt realizati atat pentru (i_L), cat si pentru (U_o) de catre doua amplificatoare operationale.

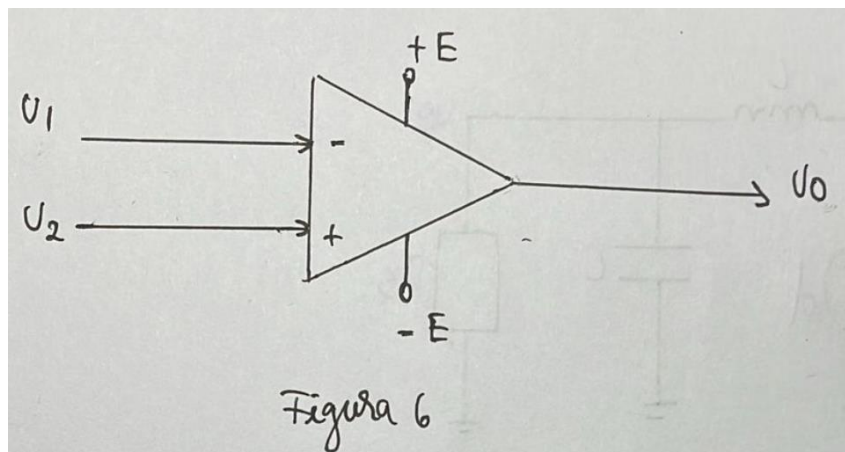
Se propune in acest caz structura modificata din figura 5:



4.6. Utilizarea amplificatoarelor operationale (integrate)

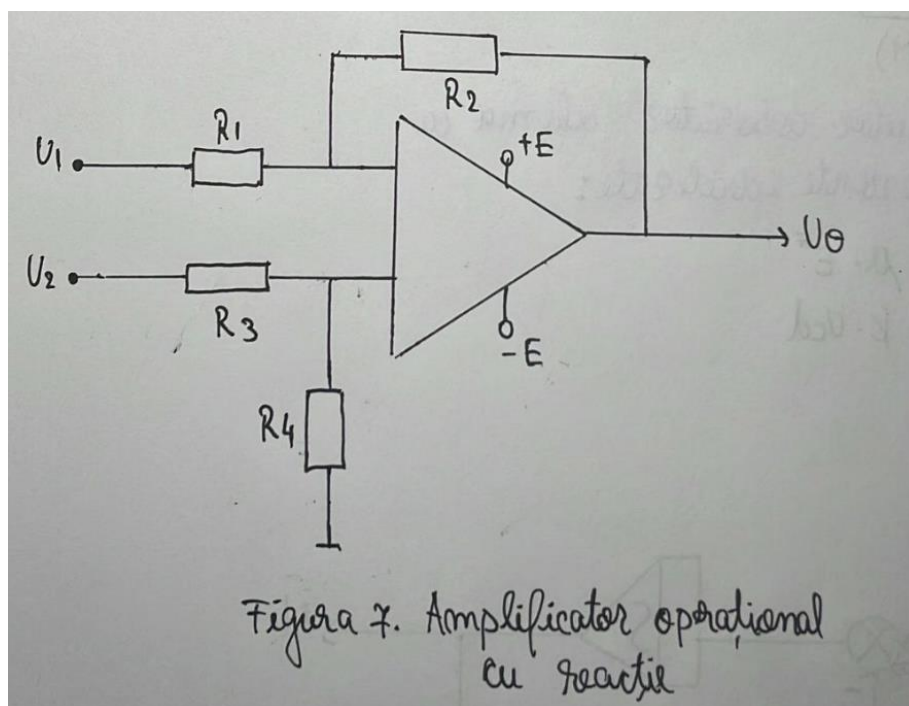
Reprezentarea simbolica a unui AO este determinate in figura 6 in care:

$$U_o = k(U_2 - U_1), \quad k \rightarrow \infty$$



In aplicatie sunt necesari factori de amplificare (de ponderare in unele cazuri), de valori finite, calculate cu precizie.

Structura este realizata prin utilizarea rezistoarelor in special in circuitele de reactie negativa.



Intrucat factorul de amplificare (k) are valori foarte mari, iar tensiunea (U_o) are valori finite, rezulta ca:

$$\Delta U_i = (U_+ - U_-) \rightarrow \infty$$

$$U_+ = U_-$$

Din figura 7 rezultă:

$$i_1 = \frac{U_1 - U_o}{R_1 + R_2}$$

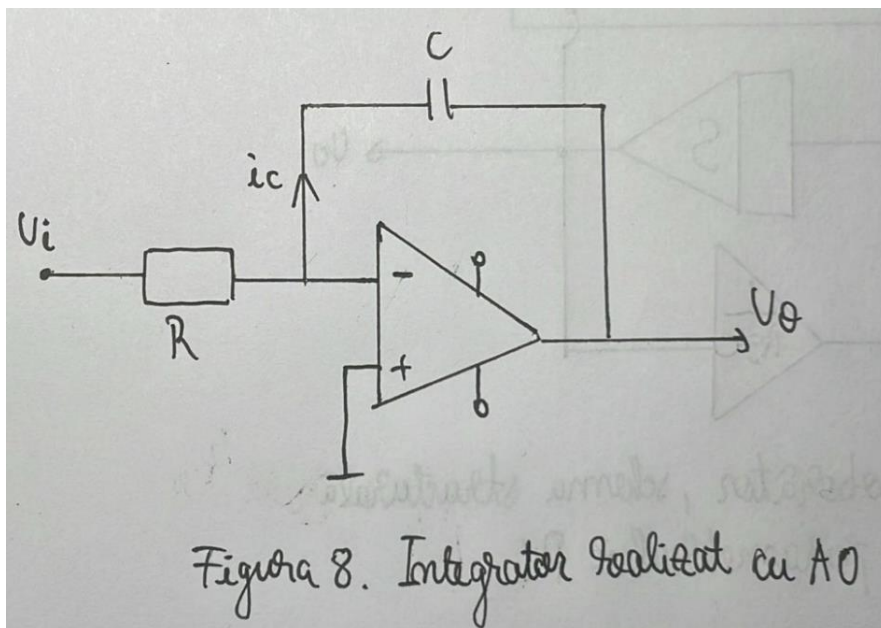
$$U_- = U_1 - R_1 \cdot \frac{U_1 - U_o}{R_1 + R_2}$$

$$U_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_2 \quad (\text{divizor de tensiune})$$

$$U_o = - \frac{R_2}{R_1} \cdot U_1 + \frac{R_4}{R_1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \cdot U_2$$

Ultima relatie va conduce la alegerea rezistentelor pentru simulare.

In privinta integratorului, schema tipică este data în figura 8:



Din ecuatia specifica unui condensator:

$$i_C = C \frac{dU_C}{dt} = C \frac{dU_o}{dt}$$

Cu transformata Laplace:

$$i_C(s) = s \cdot C \cdot U_o(s)$$

si deci reactanta capacitiva va fi:

$$X_C(s) = \frac{1}{C \cdot s}$$

Folosind relatiile anterioare, cu $U_2=0$:

$$U_o = - \frac{R_2}{R_1} \cdot U_1 = - \frac{X_C}{R_1} \cdot U_1 = - \frac{X_C}{R} \cdot U_1 = - \frac{1}{R \cdot C \cdot s} \cdot U_1$$

Transformata Laplace inversa va fi:

$$U_o(t) = - \frac{1}{RC} \int U_1(t) dt$$

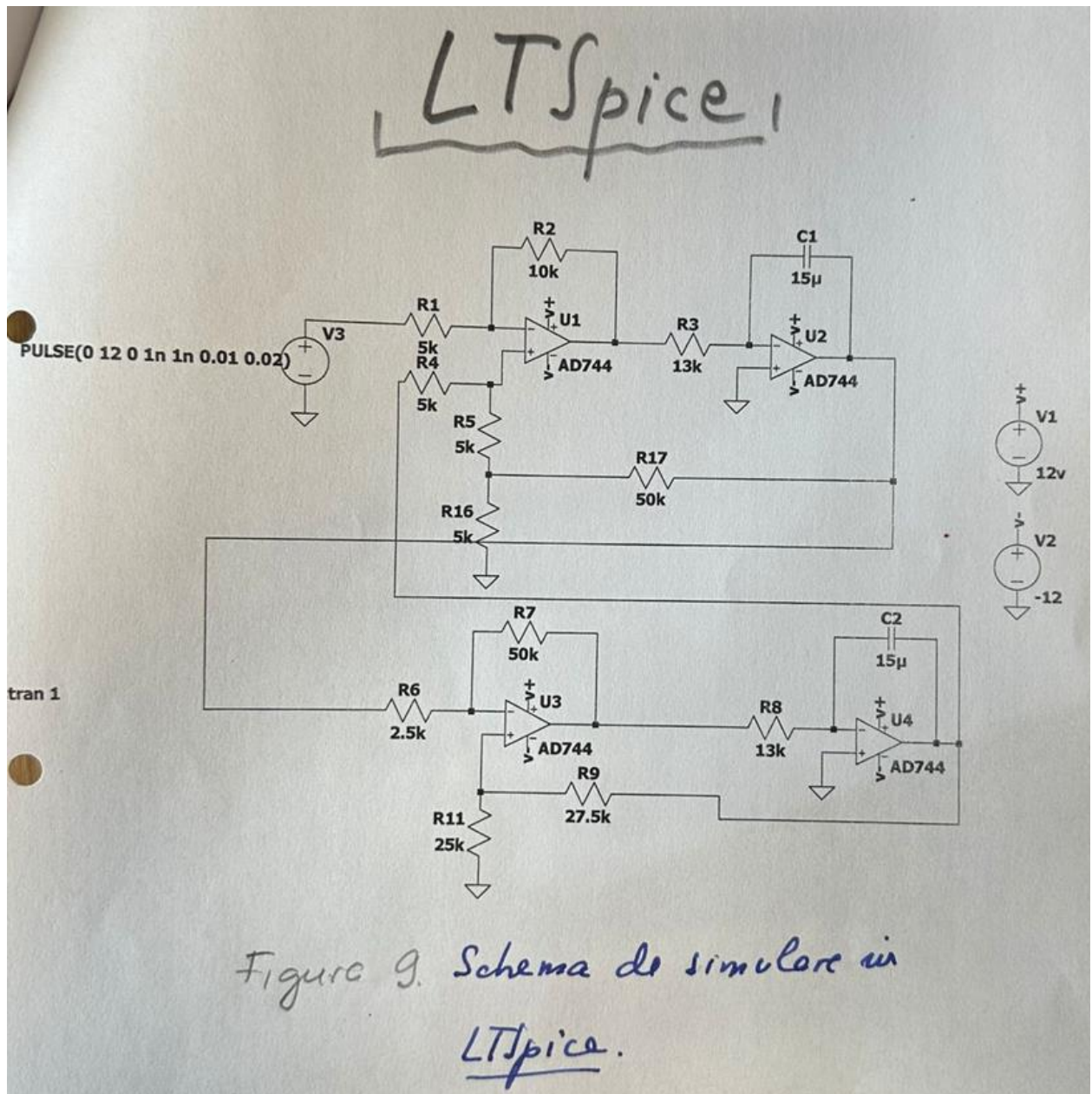


Figura 9. Schema de simulare in LTSpice

Project: P5

Realizarea (AnHIL) folosind amplificatoare operationale (AO)

5.1. Tema proiectului

Analogue “Hardware in the Loop” (AnHIL) pentru variator coborator (“Buck”) de tensiune continua.

5.2. Principiul de realizare

Este necesara transpunerea structurii convertorului modulate in mediul Simulink in varianta prestabilita cu amplificatoare operationale (AO) si elemente passive de circuit.

Se utilizeaza mediul “LTSpice”.

5.3. Schema elettrica

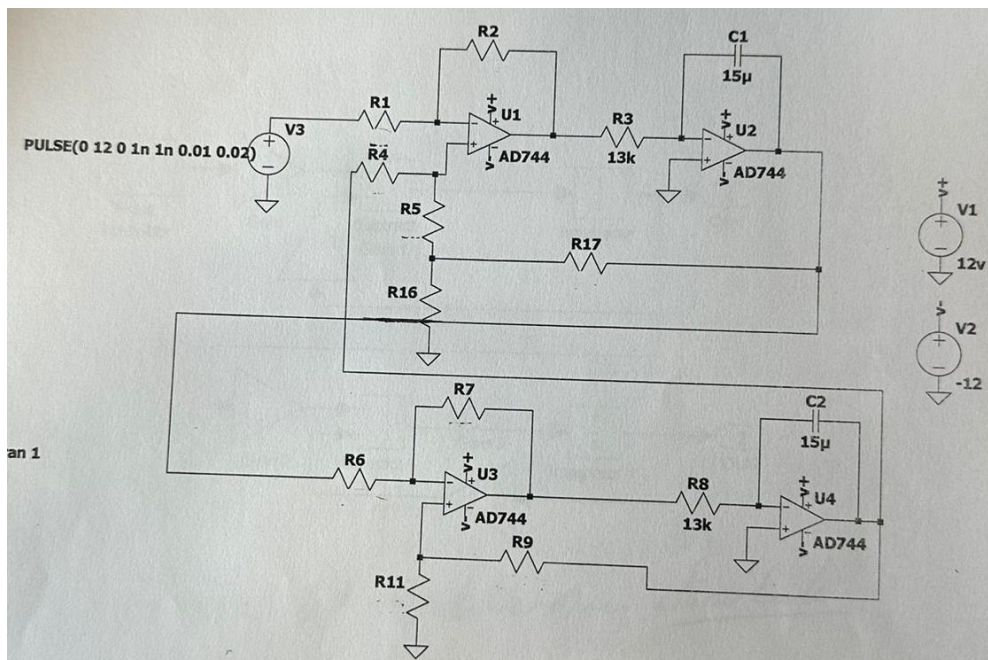


Figura 5.1. Realizarea cu 4 AO

5.4. Modelul Simulink

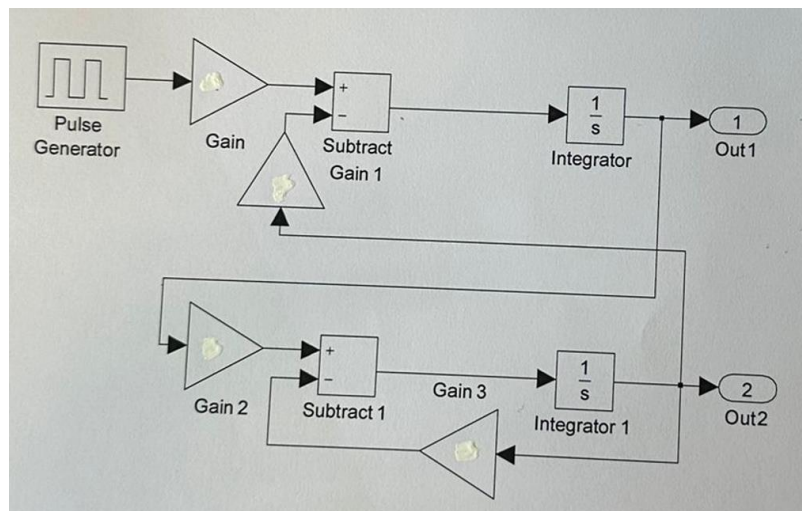
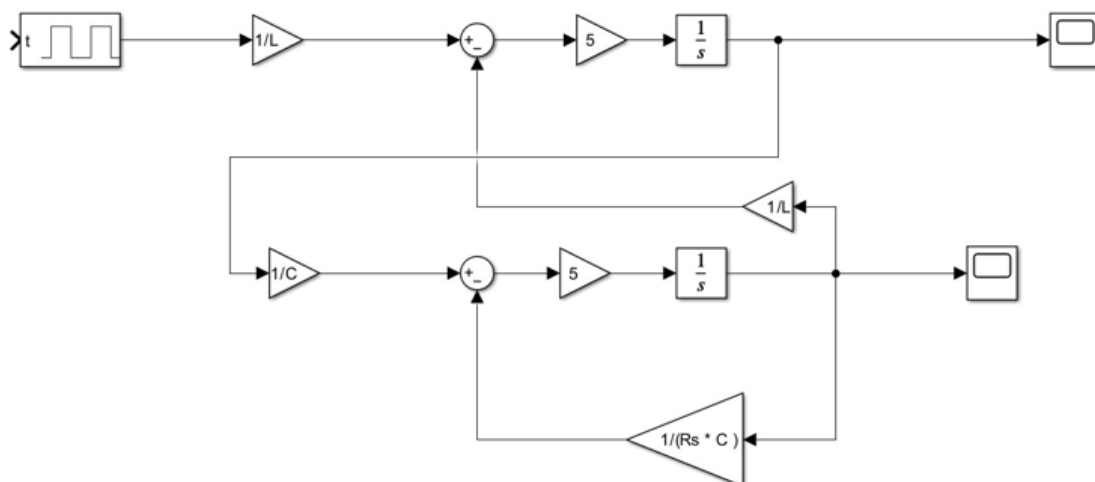


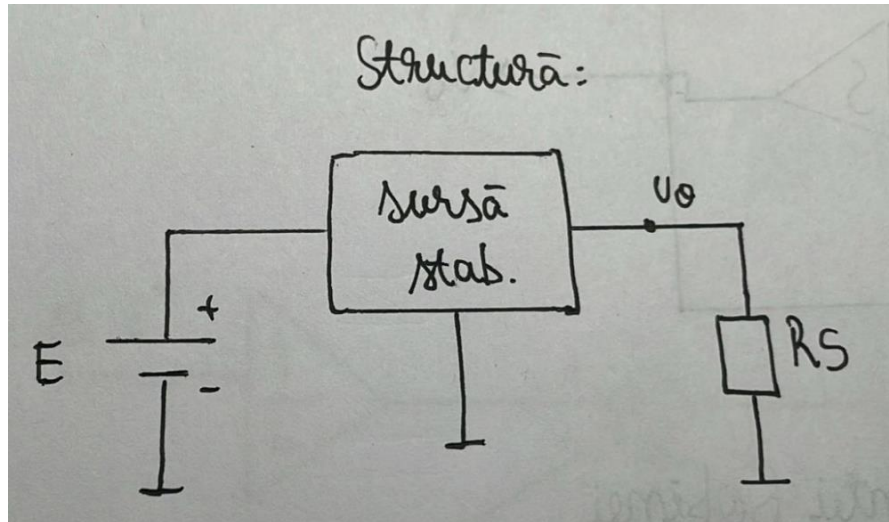
Figura 5.2. Modelare in Simulink

$$\begin{cases} C = 11,6 \mu\text{F} = 11,6 \cdot 10^{-6} \\ L = 14,1 \text{ mH} = 14,1 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad \begin{cases} R_s = 10 \text{ k}\Omega \\ f_c = 30 \text{ kHz} \end{cases} \quad U_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_1 + \frac{R_4}{R_1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \cdot u_2$$

$$\begin{cases} \frac{1}{L} = \frac{1}{14,1 \times 10^{-3}} = 70,92 \Rightarrow \frac{1}{L} \cdot 5 = 354,6 \\ \frac{1}{C} = \frac{10^6}{11,6} = 86206,9 \Rightarrow \frac{1}{C} \cdot 5 = 431034,5 \end{cases} \quad \frac{1}{R_s \cdot C} = \frac{10^6}{11,6 \cdot 10} = \frac{10^5}{11,6} = 8620,68$$



Proiect: P6
Aplicație (AnHILL)
Sursă stabilizatoare de tensiune continuă



Performante:

$$U_o = U_o^* = ct.$$

Perturbatii:

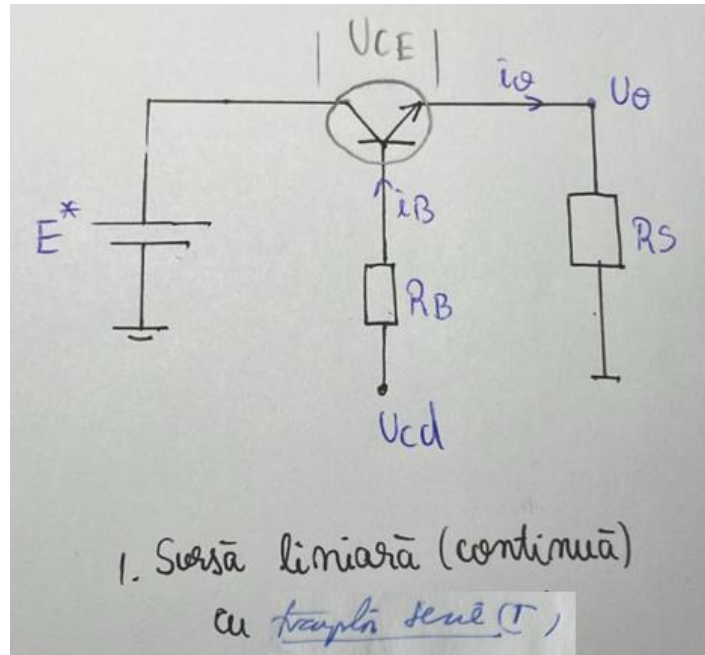
- a. $R_s = \text{variabil}$ (se schimbă structura)*
- b. $E^* = f$ fluctuant (acumulator în descărcare, încărcare)*

Variante:

1. Sursă liniară(continuă) cu triplu sens:

$$U_o = E^* - U_{CE}$$

$$U_o \text{ perturbat} \rightarrow \begin{cases} a. R_s \downarrow ; i_o \uparrow \Rightarrow U_o \downarrow \\ b. E^* \downarrow \Rightarrow U_o \downarrow ; E^* \uparrow \Rightarrow U_o \uparrow \end{cases}$$



$$U_{CE} \approx E^* - k \cdot i_B = E^* - \frac{1}{R_S} \cdot U_{cd}$$

$$E^* = 24 \text{ V} \quad U_O = 12 \text{ V}$$

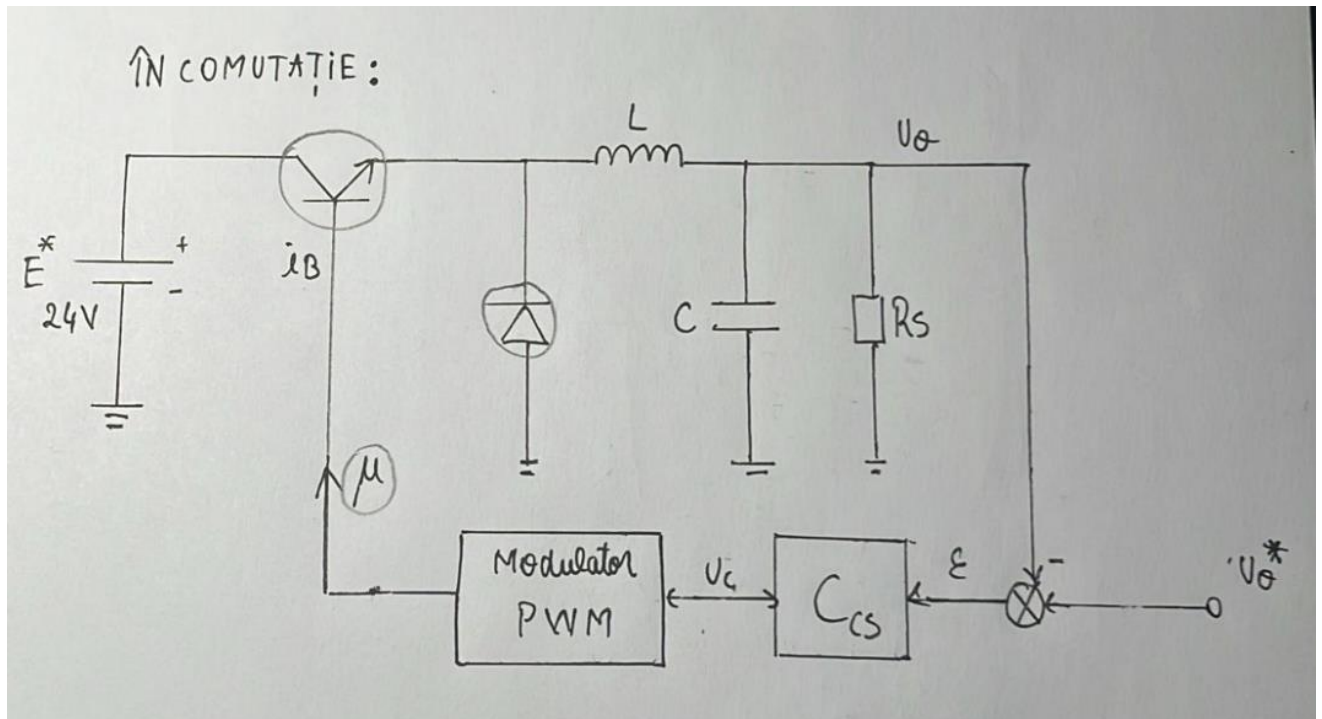
$$\left. \begin{array}{l} k \cdot i_B = 12 \\ i_B = 0.1 \text{ A} \end{array} \right\} \Rightarrow k = \frac{12}{0.1} = 120$$

$$R_S = 3 \Omega$$

$$I_O = \frac{U_O}{R_S} = \frac{12}{3} = 4 \text{ A}$$

$$P_T = U_{CE} \cdot i_C = U_{CO} \cdot i_B = 12 \cdot 4 = 48 \text{ W}$$

2. În comutație:



VTC cu sursă stabilizată de tensiune