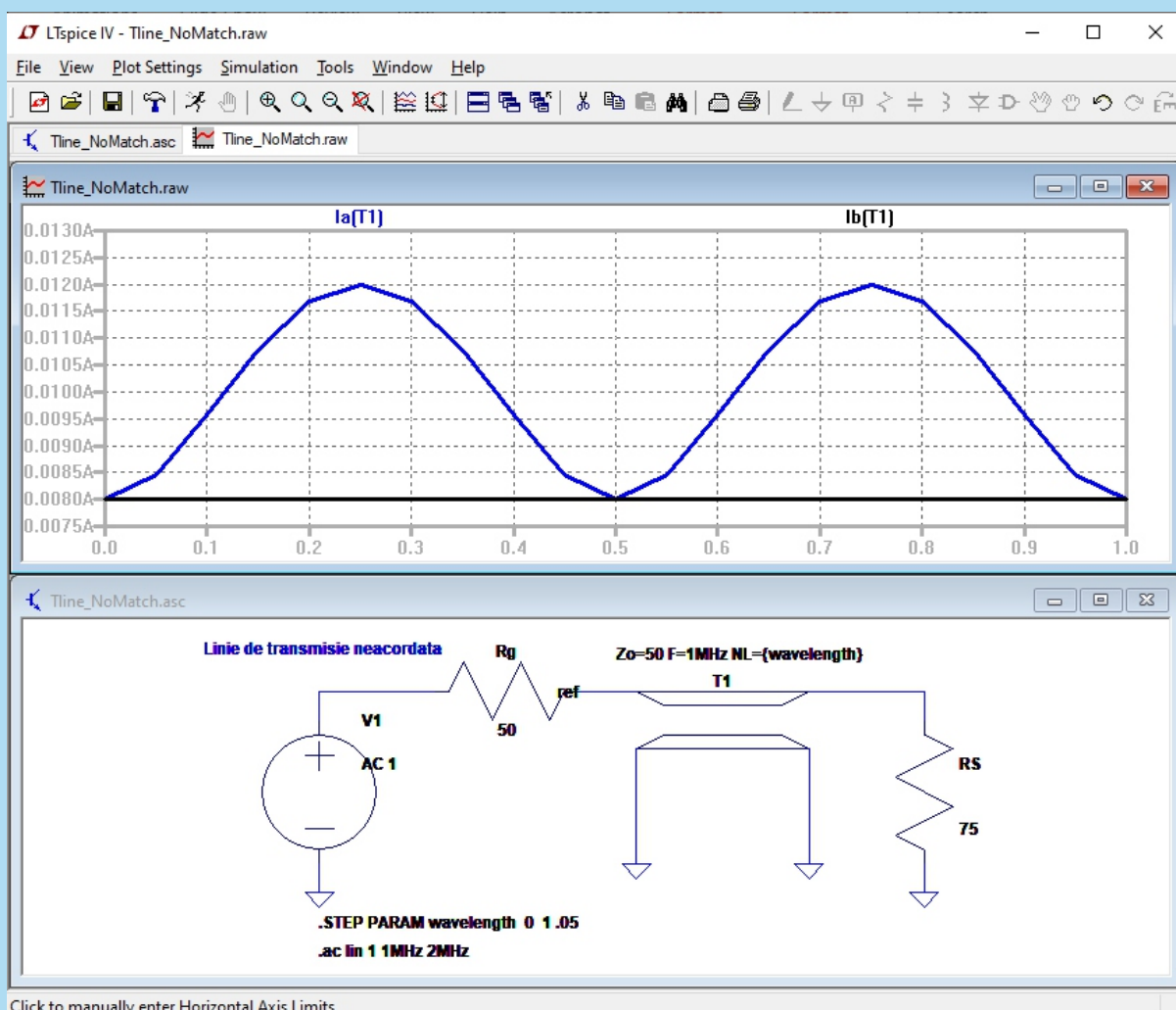


Marius PURCAR

MODELAREA NUMERICĂ A CIRCUITELOR ELECTRICE

Îndrumător de laborator



UTPRESS
Cluj-Napoca, 2020
ISBN 978-606-737-466-7

Marius Purcar

MODELAREA NUMERICĂ A CIRCUITELOR ELECTRICE

Îndrumător de laborator



UTPRESS

Cluj - Napoca, 2020

ISBN 978-606-737-466-7



Editura U.T.PRESS
Str. Observatorului nr. 34
C.P. 42, O.P. 2, 400775 Cluj-Napoca
Tel.:0264-401.999
e-mail: utpress@biblio.utcluj.ro
<http://biblioteca.utcluj.ro/editura>

Director: ing. Călin Câmpean

Recenzia: Conf. dr. ing. Grindei Laura
Conf. dr. ing. Păcurar Claudia

Copyright © 2020 Editura U.T.PRESS

Reproducerea integrală sau parțială a textului sau ilustrațiilor din această carte este posibilă numai cu acordul prealabil scris al editurii U.T.PRESS.

ISBN 978-606-737-466-7

Bun de tipar: 06.07.2020

Cuprins

Cuprins

1	Introducere	1
2	Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor	3
2.1	Definirea unei scheme electrice noi: File → New Schematic	3
2.2	Salvarea schemei electrice: File → Save As	4
2.3	Introducerea componentelor electrice: Edit → R, L, C, D sau F2	6
2.4	Amplasarea componentelor electrice și desenarea schemei electrice: CTRL+R, CTRL+E, Esc, Del, F2, F3, F5, F7, F8, F9, etc.	8
2.5	Inițierea cu valori numerice a componentelor electrice	17
2.6	Etichetarea nodurilor	20
2.7	Comenzile de simulare	21
2.8	Rularea modelului de circuit	22
2.9	Setarea preferințelor de culori	23
2.10	Modificarea expresiei unei variabile	25
2.11	Modificarea culorii trasei	26
2.12	Modificarea grosimii trasei	27
2.13	Măsurarea semnalului cu ajutorul cursorului	28
2.13.1	Măsurarea defazajului	28
2.13.2	Măsurarea diferenței de amplitudine	33
2.14	Exportul rezultatelor	34
2.14.1	Exportul rezultatelor grafice din LTSpice sub format imagine	34
2.14.2	Exportul rezultatelor grafice din LTSpice sub format text	35
2.14.3	Inserarea rezultatelor rezolvărilor/ simularilor în versiunea electronică PDF a acestui îndrumător de laborator	37
3	Analiza AC LTSpice a unui circuit în regim sinusoidal	43
3.1	Analiza de tip AC	43
3.2	Măsurarea impedanței cu ajutorul LTSpice	45
3.3	Temă	48
3.4	Temă	49
4	Modelarea circuitelor trifazate	51
5	Bobine cuplate în LTSpice	55
5.1	Modelarea unui transformator monofazat	58
5.2	Temă	60

Cuprins

6	Circuite liniare în regim tranzitoriu	61
6.1	Circuitul R, L serie.....	61
6.1.1	Conectarea circuitului R, L la o sursă de tensiune continuă E	61
6.1.2	Deconectarea circuitului R, L de la o sursă de tensiune continuă E.....	64
6.1.3	Supratensiunea la deconectarea circuitului R, L de la o sursă de tensiune continuă E	65
6.1.4	Definirea unui comutator in LTSpice pentru simularea unui circuit R, L serie in regim tranzitoriu	67
6.1.5	Definirea unei surse de tensiune cu semnal dreptunghiular	71
6.2	Circuitul R, C serie	73
6.2.1	Conectarea circuitului R, C la o sursă de tensiune continuă E	73
6.3	Deconectarea circuitului R, C de la o sursă de tensiune continuă E	78
6.4	Supratensiunea la deconectarea circuitului R, L de la o sursă de tensiune continuă E	80
7	Aplicații avansate: redresoare	85
7.1	Redresor monofazat cu priza mediană	85
7.2	Redresor monofazat cu punte de diode.....	86
7.3	Redresor mono alternanță.....	88
8	Modelarea numerică a filtrelor.....	91
8.1	Filtrul trece jos	91
8.2	Filtrul trece sus.....	94
8.3	Filtrul trece bandă	97
8.4	Filtrul oprește bandă	99
9	Linii de transmisie bifilare	101
9.1	Reflexii pe liniile de transmisie bifilare	101
10	Bibliografie.....	117

1 Introducere

De la apariția circuitelor integrate, modelarea și simularea numerică au jucat un rol important în proiectarea circuitelor. Simularea este folosită de obicei pentru verificarea corectitudinii și verificarea circuitelor în timpul proiectării lor. De-a lungul anilor, simularea a înlocuit aproape în întregime panoul de testare. Verificarea unui circuit prin simulare conduce la creșterea gradului de încredere în funcționarea acestuia după construcția fizică.

Ca disciplină, modelarea numerică a circuitelor electrice a apărut la începutul anilor '70, cu programe timpurii cum ar fi SPICE [1], CANCER [2] sau ASTAP [3]. Aceste programe au devenit populare în perioada de dezvoltare a circuitelor integrate și au permis proiectarea noilor generații de circuite integrate. Deși după anii 80, modelarea numerică - prima disciplină CAD electronică - a fost înlocuită de alte domenii ale EDA (electronic automation design), cum ar fi proiectarea fizică, verificarea formală, verificarea modelului, etc., totuși, această disciplină rămâne fundamentală pentru formarea unui inginer profil electric.



În cadrul acestor lucrări de laborator se urmărește învățare de către ingineri a principiilor de modelare numerică a circuitelor electrice cu ajutorul programului LTSpice® [4].

LTSpice este un software de simulare a circuitelor electrice de înaltă performanță bazat pe SPICE [1], [5]. LTSpice permite elaborarea și simularea numerică a schemelor electrice cu circuite analogice și vizualizarea formelor de undă.

LTSpice este produs de Analog Devices (original de Linear Technology), fabricant de semiconductor. În momentul de față este cel mai distribuit și utilizat software SPICE din industrie. Deși este freeware, LTSpice nu are capabilități restricționate în mod artificial. Astfel nu are limite în numărul de noduri, componente sau sub circuite.

Modelele Spice sunt 100% compatibile cu LTSpice dar LTSpice este un simulator mult mai performant. În ultima perioadă foarte mulți utilizatori au trecut de la SPICE la LTSpice.

Biblioteca de componente electronice LTspice conține majoritatea reguletoarelor, comutatoarelor, amplificatoarele bazate pe componente analogice precum și o bibliotecă generală configurabilă pentru simularea generală a circuitelor.

LTwiki [6] este un portal cu documentație și exemple de utilizare LTspice, SPICE în Electronică. Acest site nu are nicio afiliere cu dispozitivele analogice și permite alăturarea grupului LTspice și schimbul de experiențe.

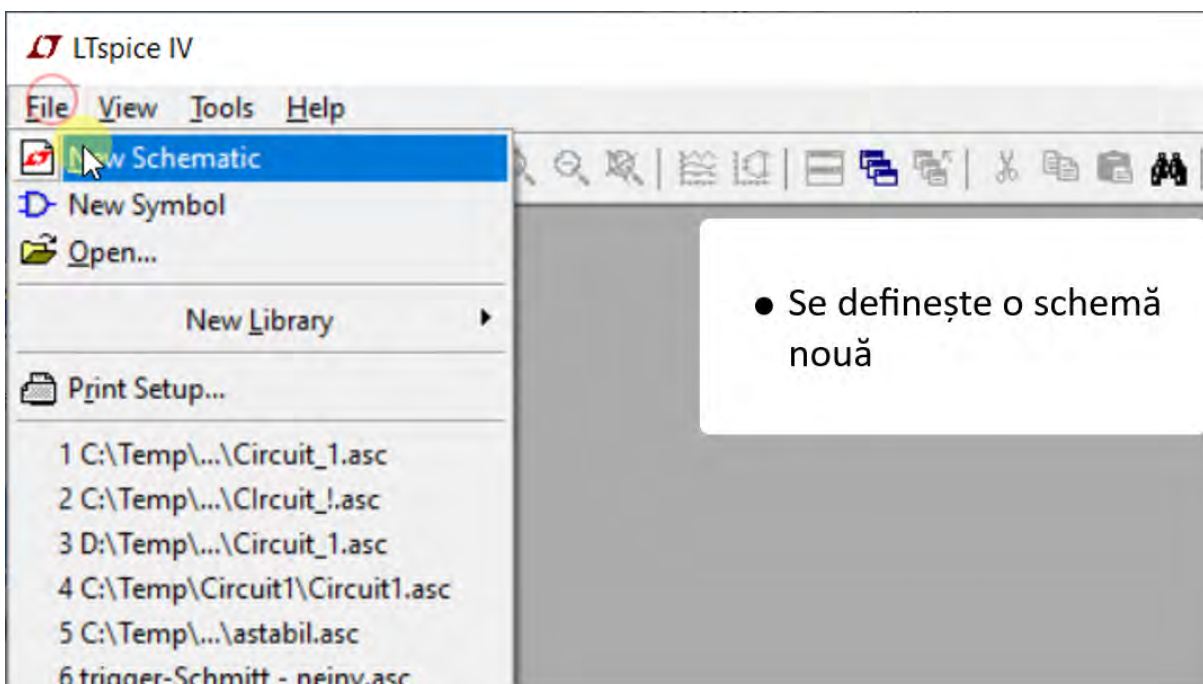
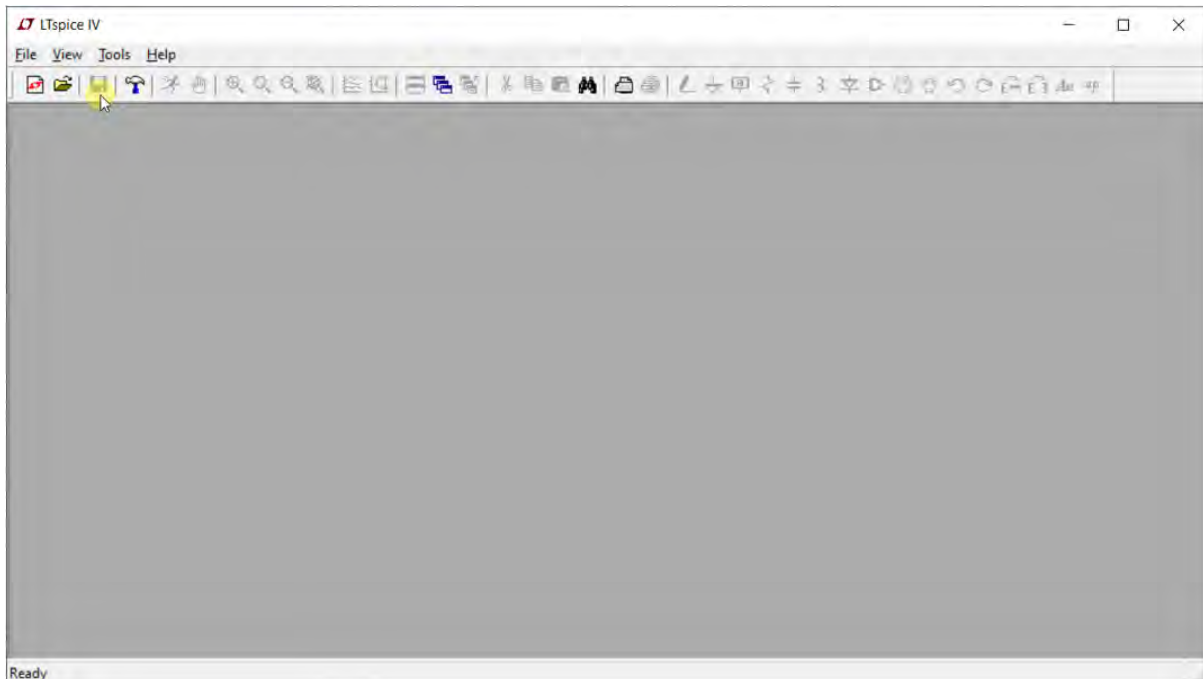
Îndrumătorul de laborator este structurat pe 10 capitole plus bibliografia.

Capitolul 2 prezintă un exemplu general de utilizare LTSpice în cazul unui circuit electric în regim sinusoidal format din elemente pasive de circuit și moduri de postprocesare și captare a rezultatelor. Celelalte capitole introduc pe rând diferite moduri de lucru caracteristice simulării cu ajutorul LTSpice în contextul modelării: circuitelor electrice în regim sinusoidal (capitolul 3), circuitelor trifazate (capitolul 4), bobinelor cuplate și transformatoarelor electrice (capitolul 5), elementelor liniare de circuit în regim tranzitoriu (capitolul 6), aplicațiilor avansate: redresoarele (capitolul 7), filtrelor pasive (capitolul 8) și a liniilor de transmisie (capitolul 9).

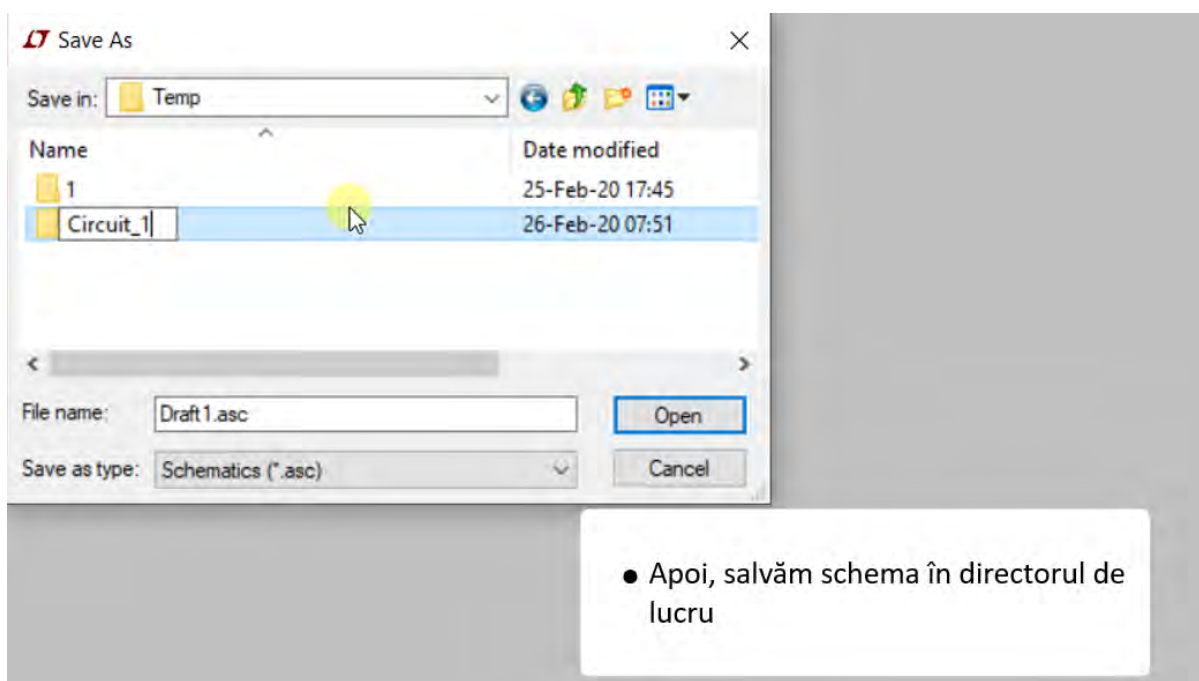
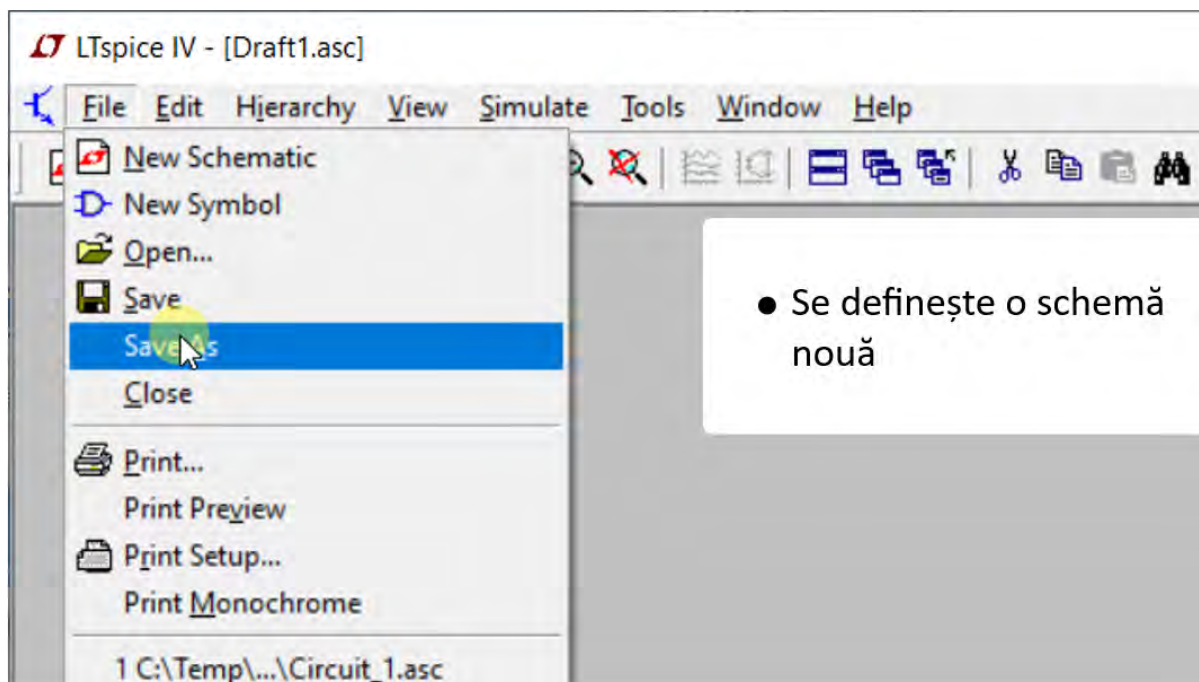
Acest îndrumător de laborator este conceput astfel încât la finalizarea fiecărei rezolvări/simulări a problemelor corespunzătoare unei lucrări, studentii să-și încarce versiunea proprie a rezultatelor rezolvării/ simulării, în formatul electronic PDF al acestei versiuni, cu ajutorul programului Adobe Acrobat Reader DC®. Astfel, documentul final obținut va servi ca suport de verificare al corectitudinii lucrărilor pentru profesorul îndrumător.

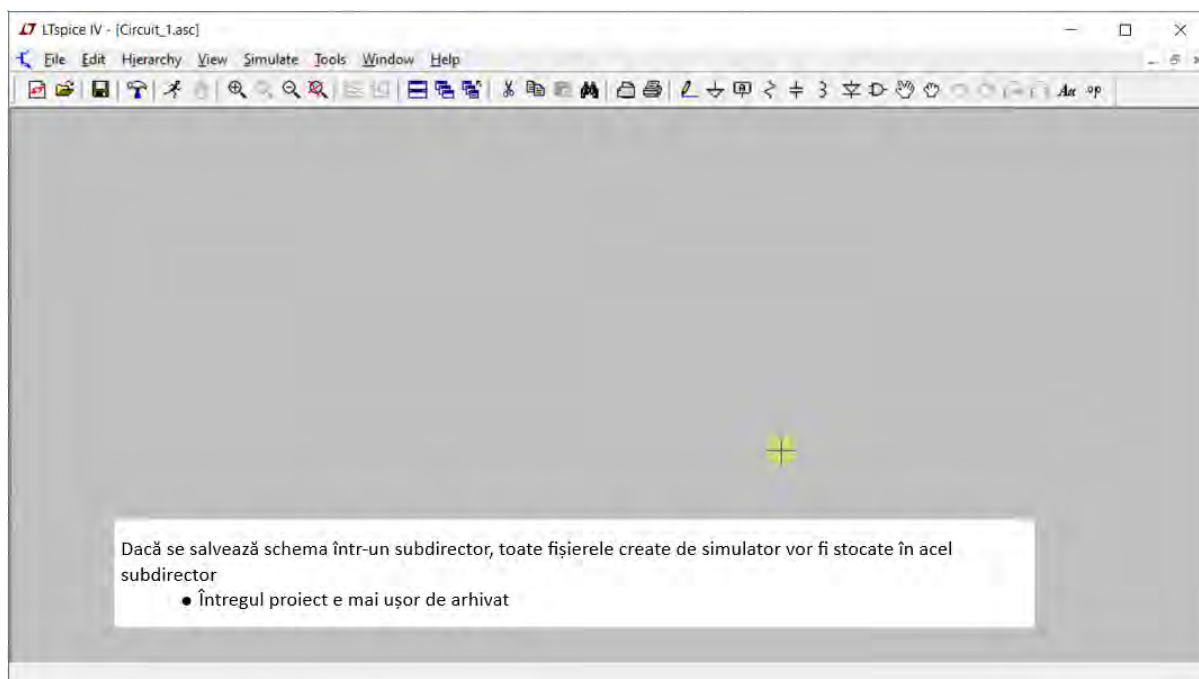
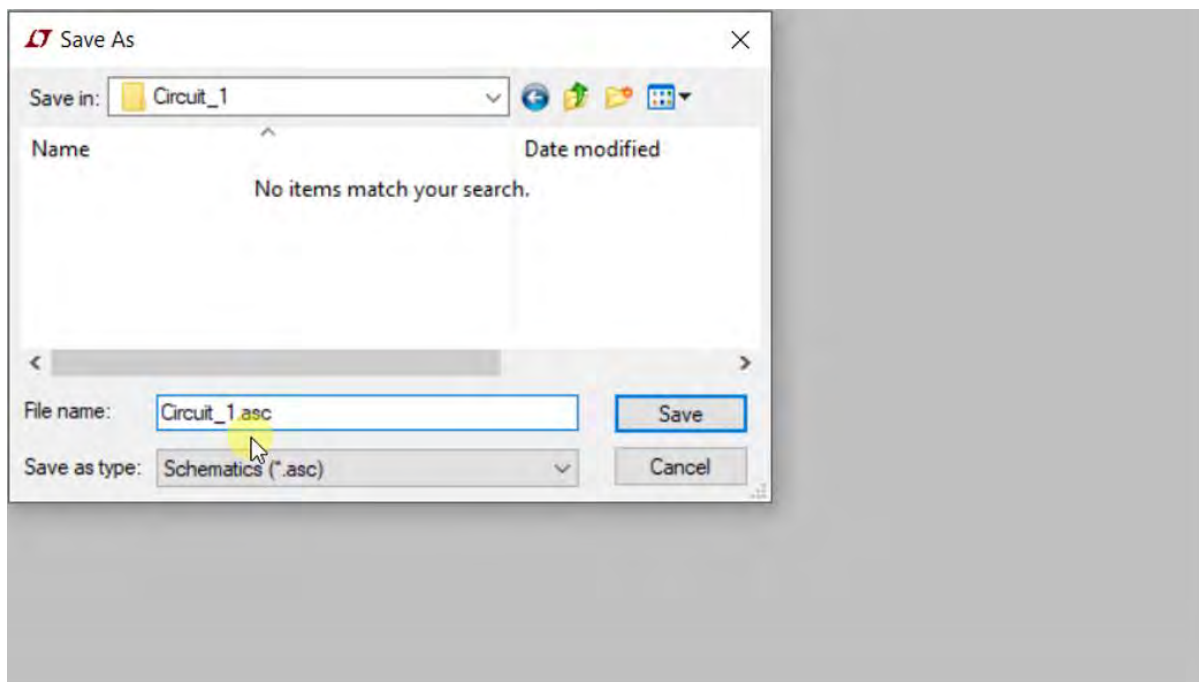
2 Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor

2.1 Definirea unei scheme electrice noi: File → New Schematic

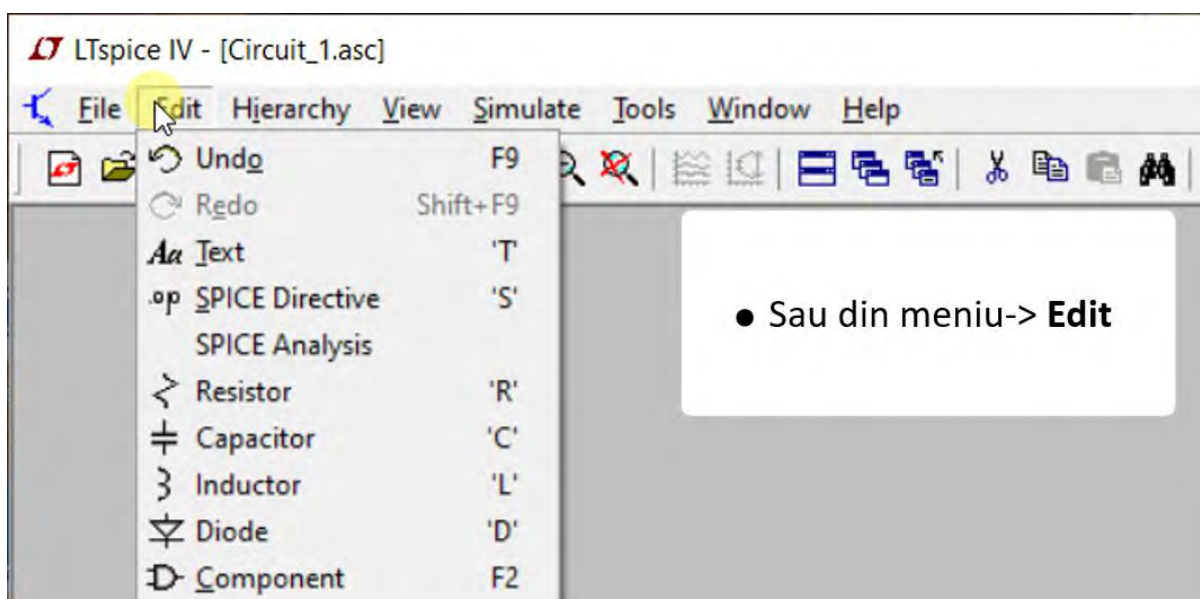


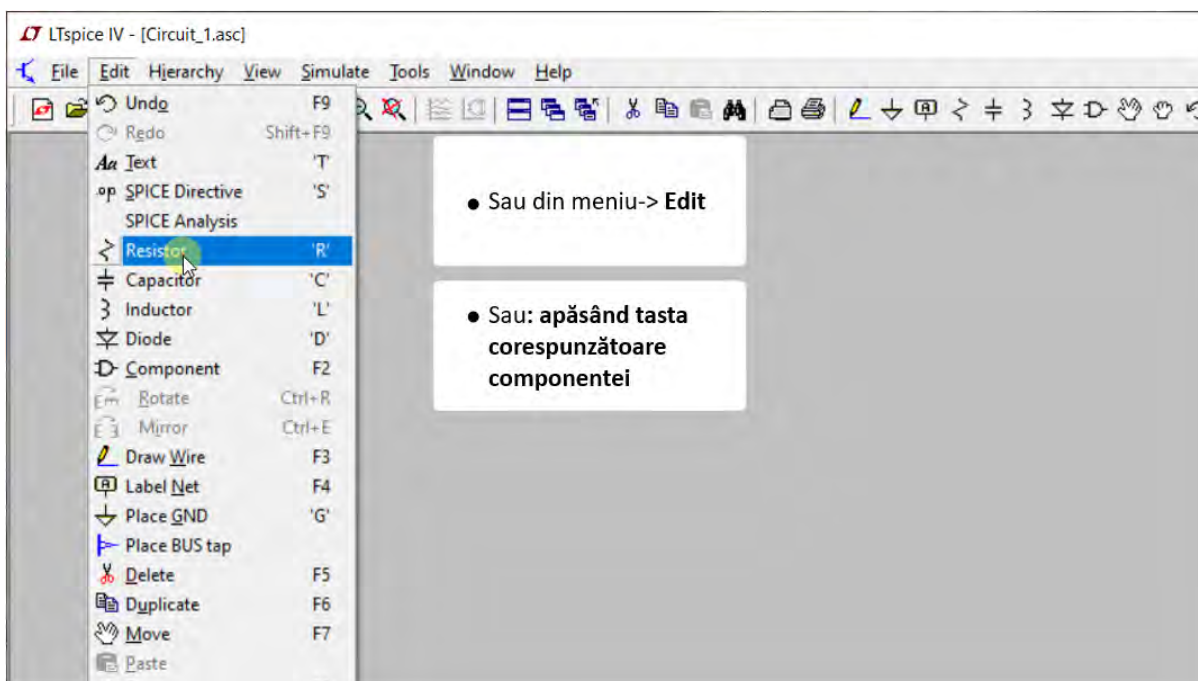
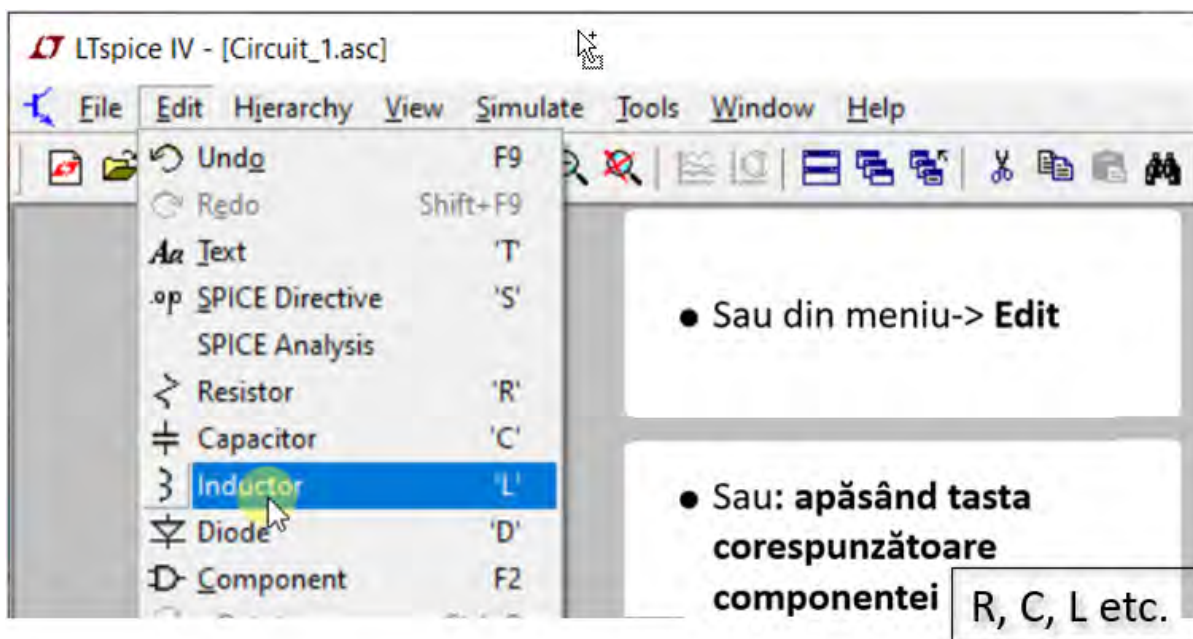
2.2 Salvarea schemei electrice: File → Save As



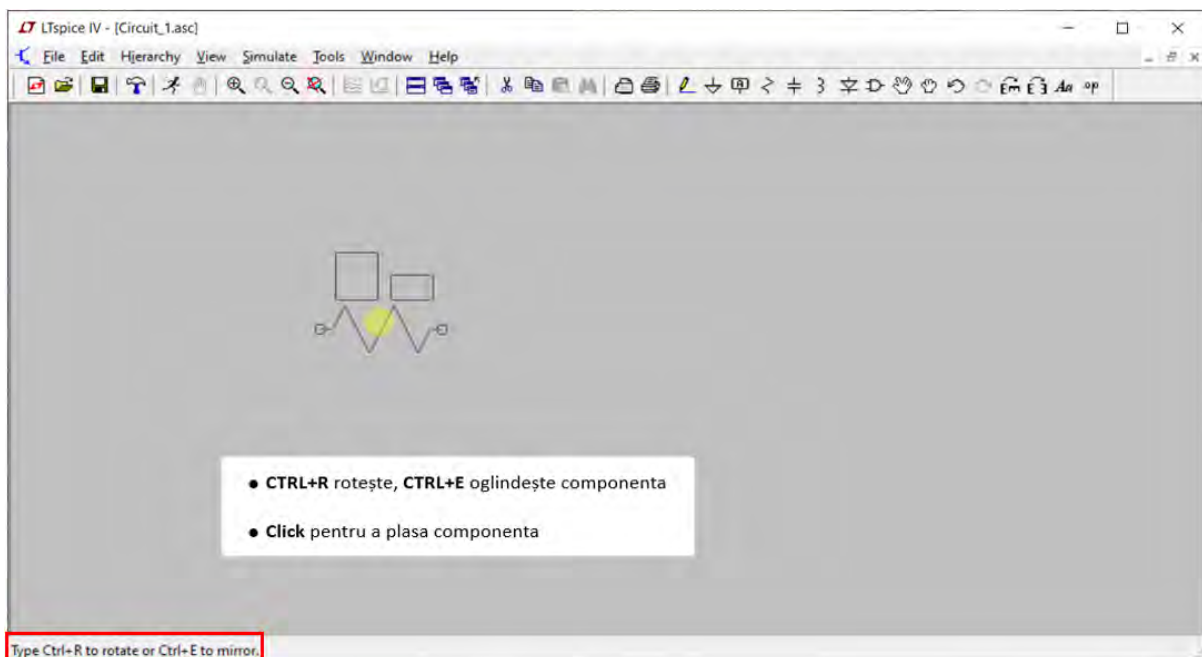
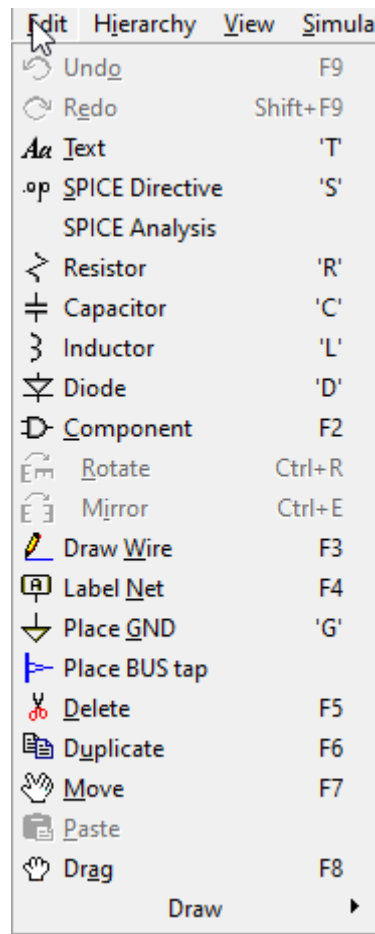


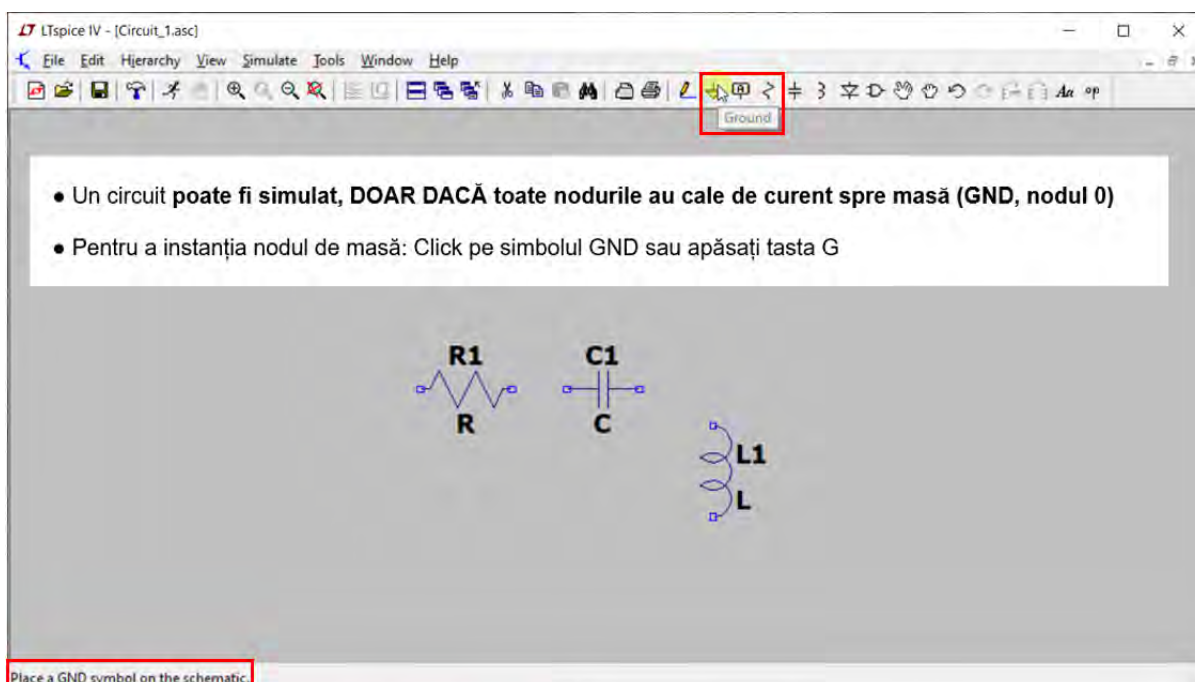
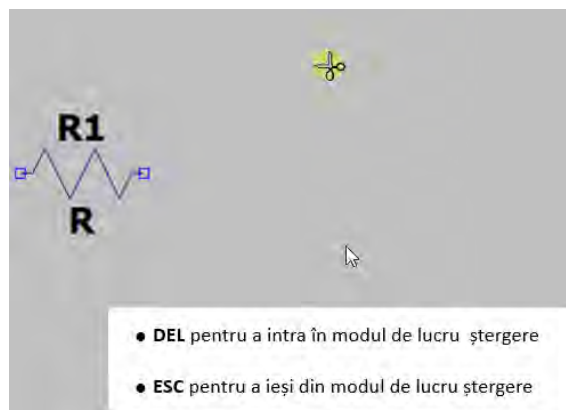
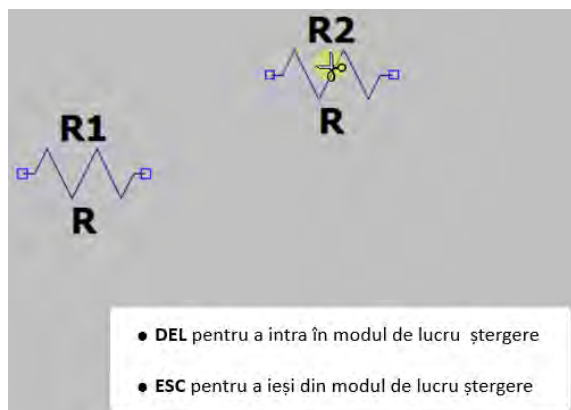
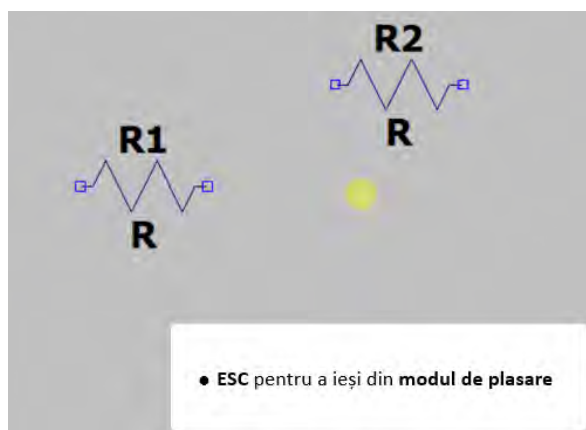
2.3 Introducerea componentelor electrice: Edit → R, L, C, D sau F2

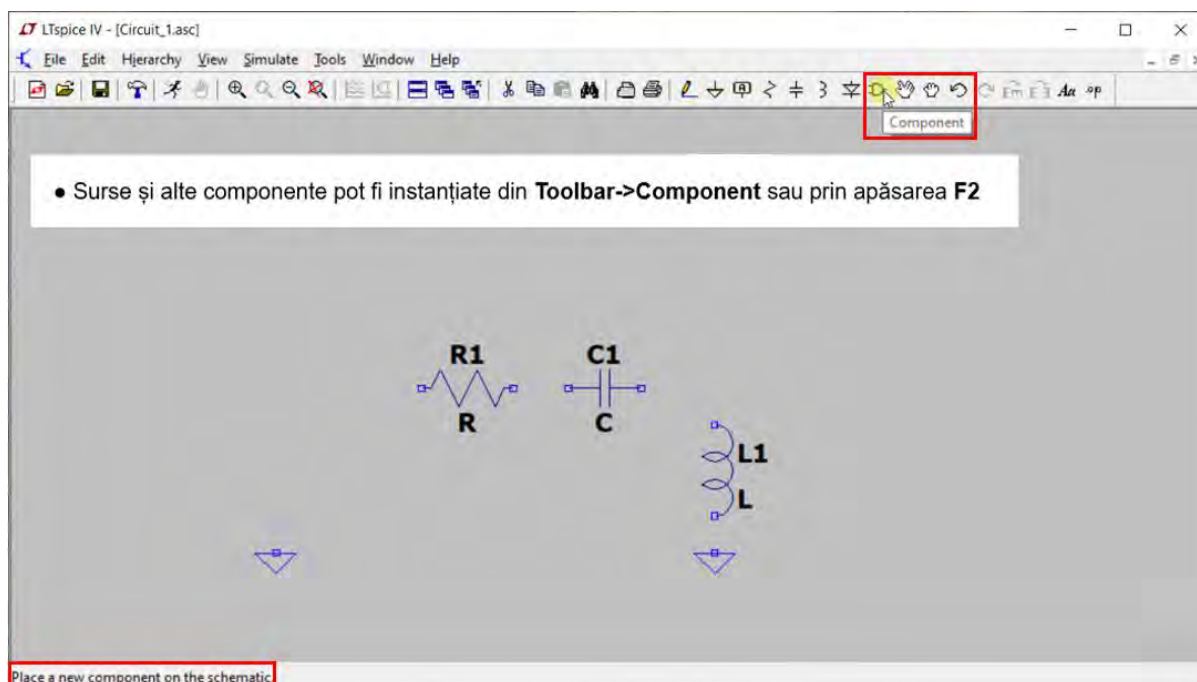
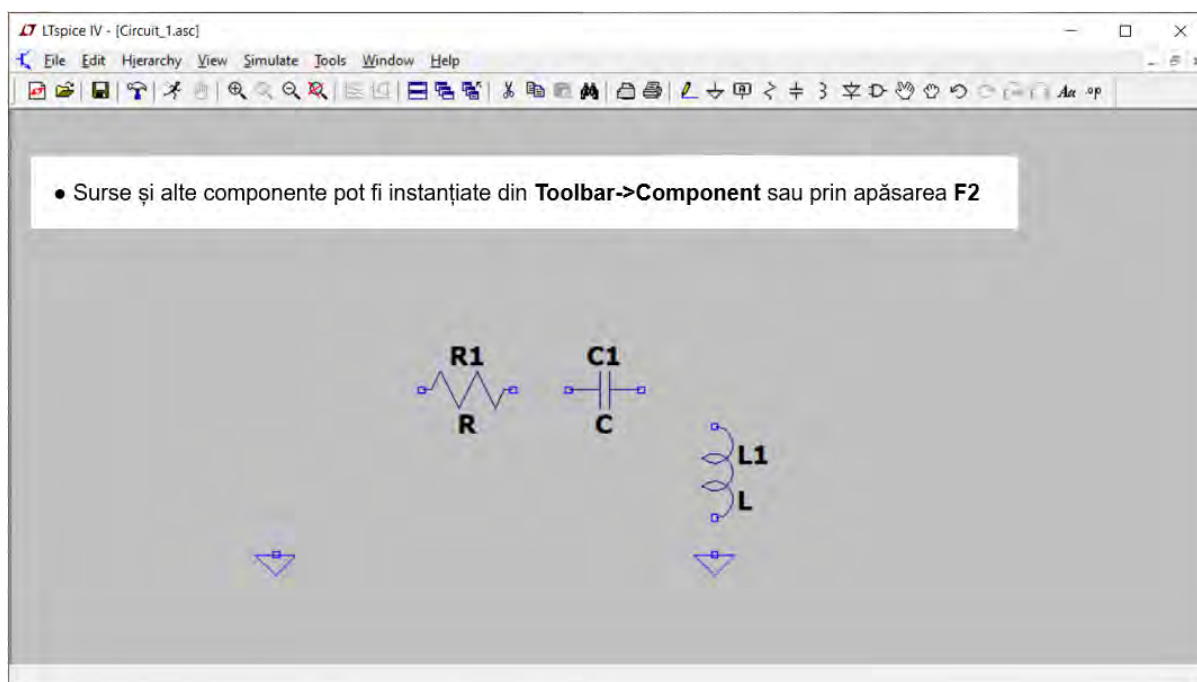




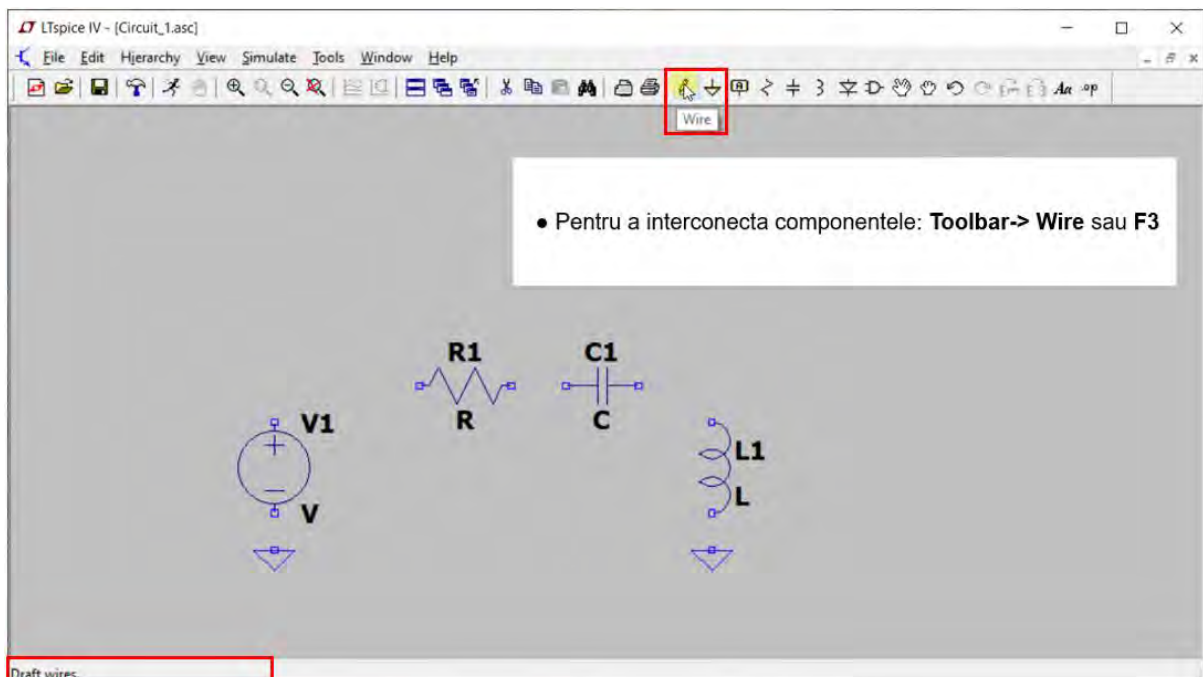
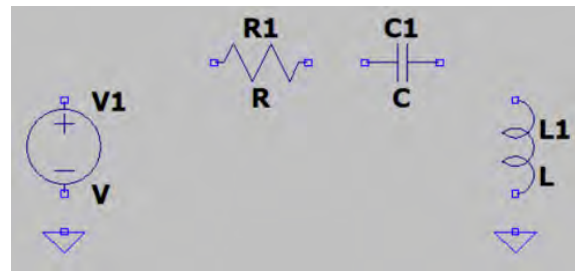
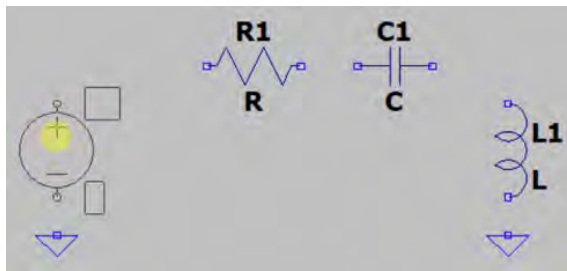
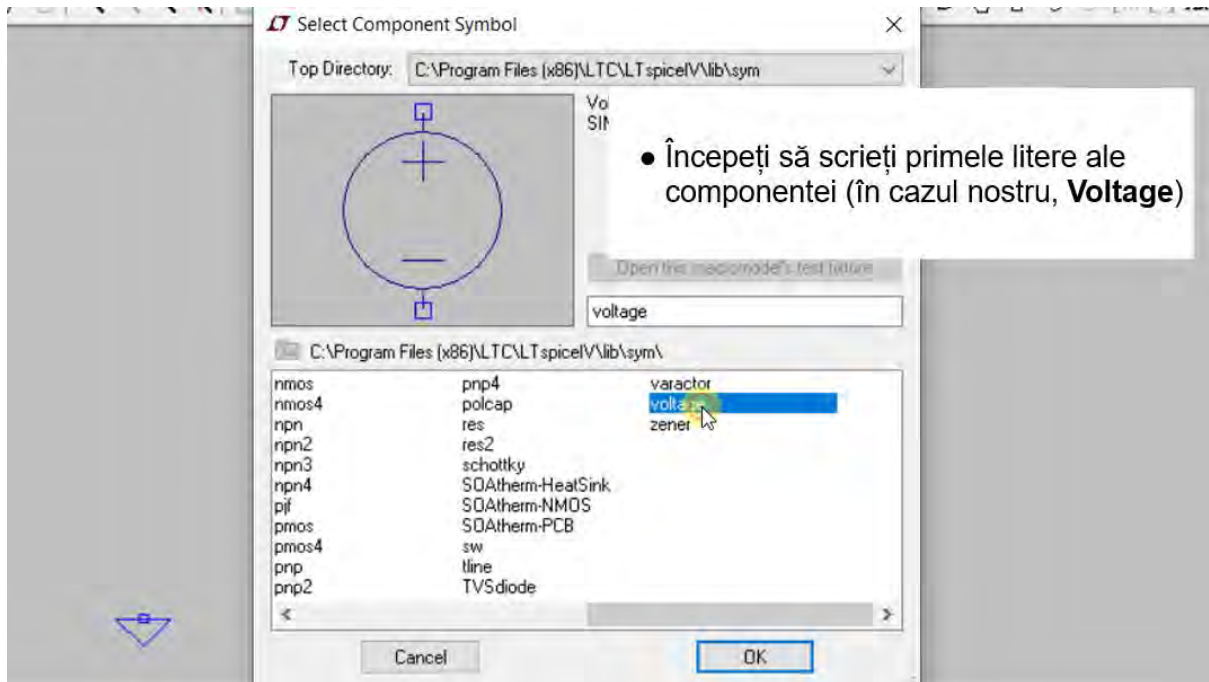
2.4 Amplasarea componentelor electrice și desenarea schemei electrice:
CTRL+R, CTRL+E, Esc, Del, F2, F3, F5, F7, F8, F9, etc.

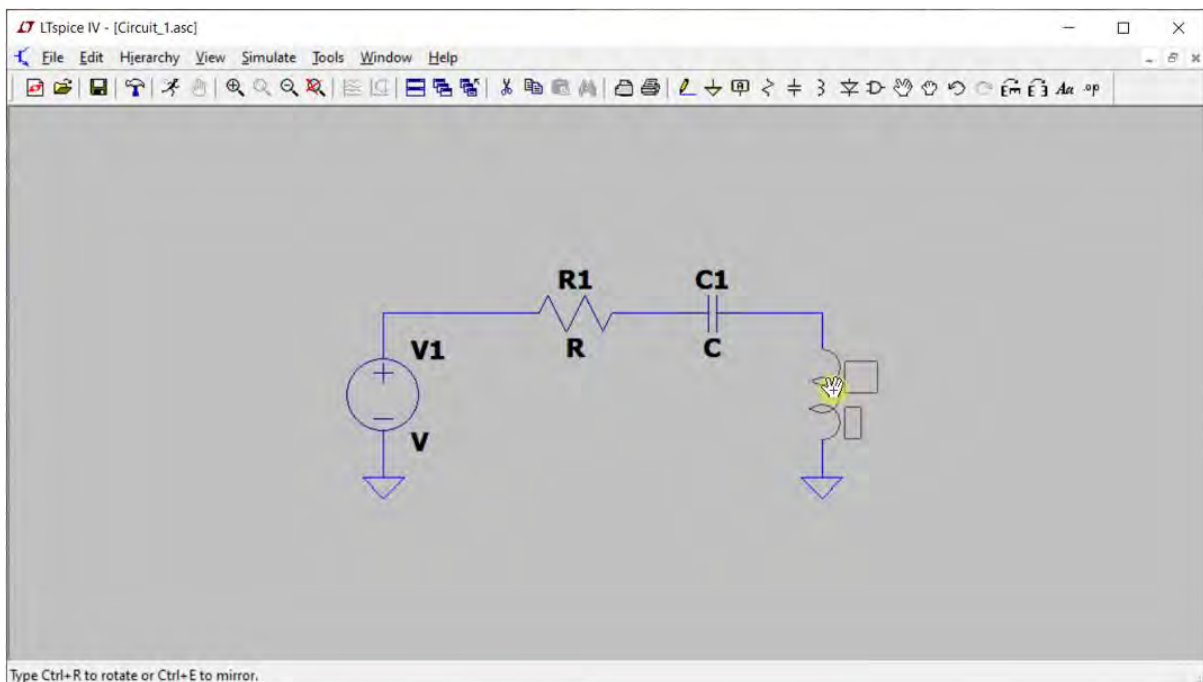
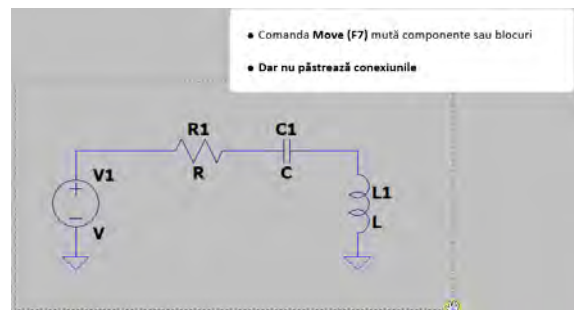
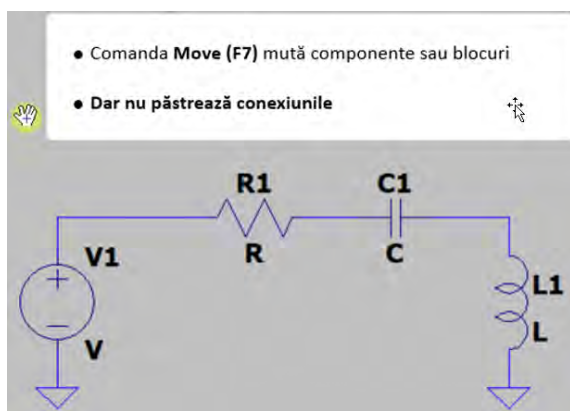
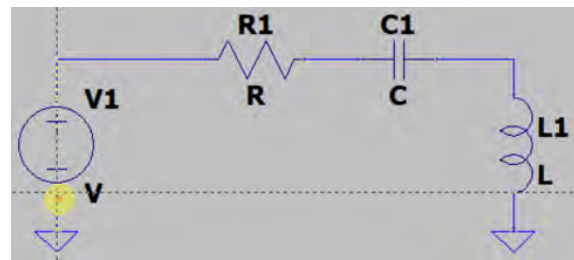
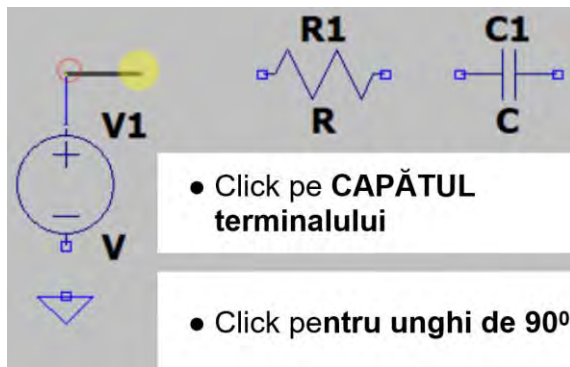




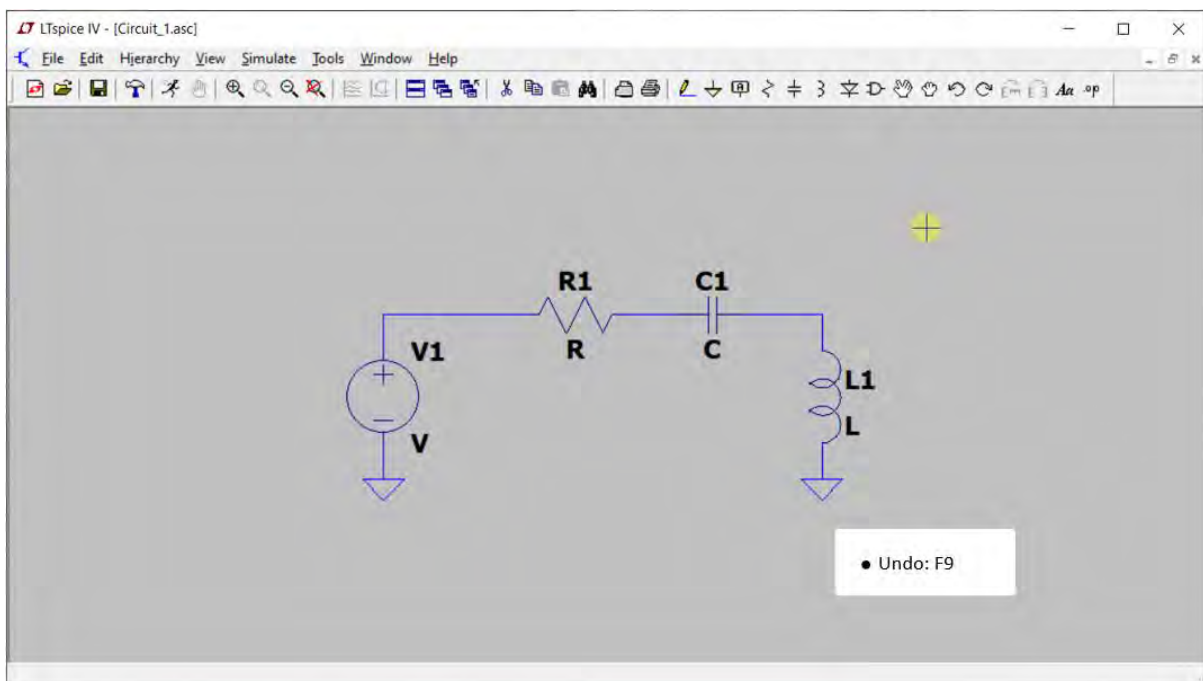
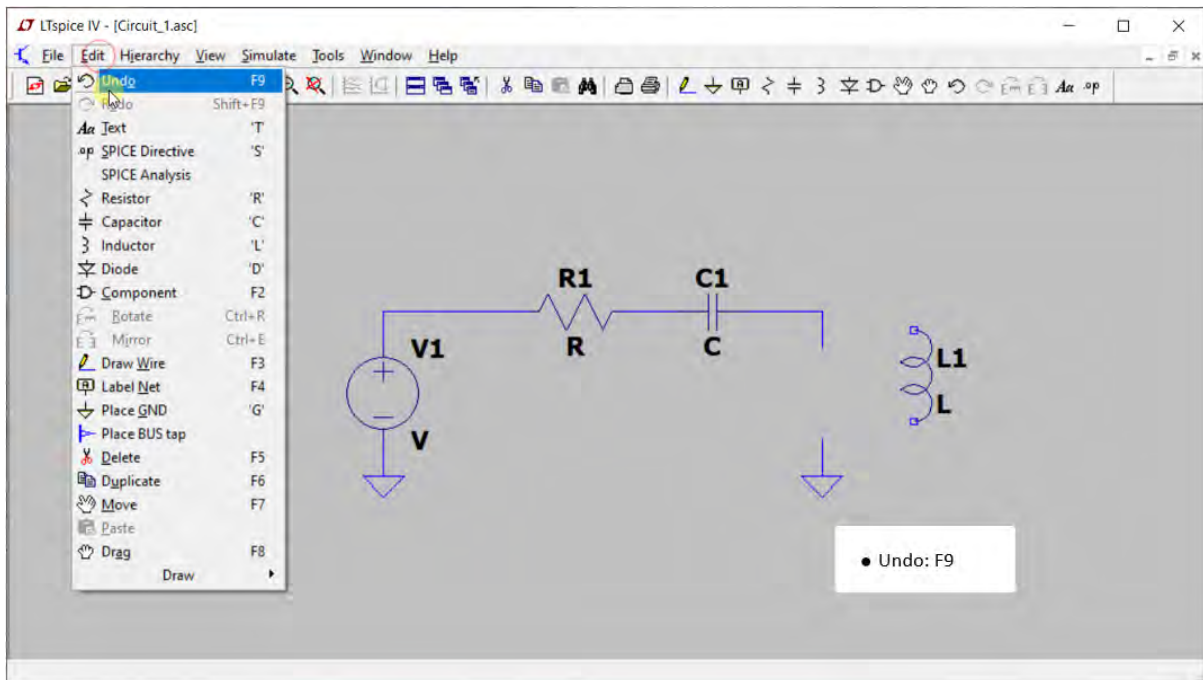
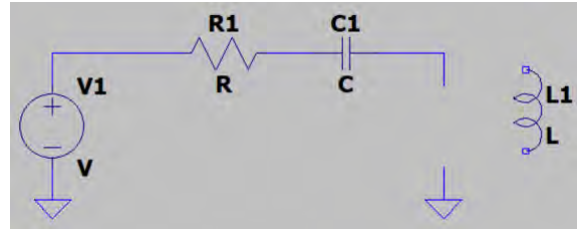
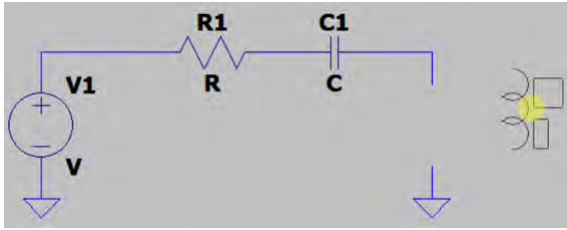


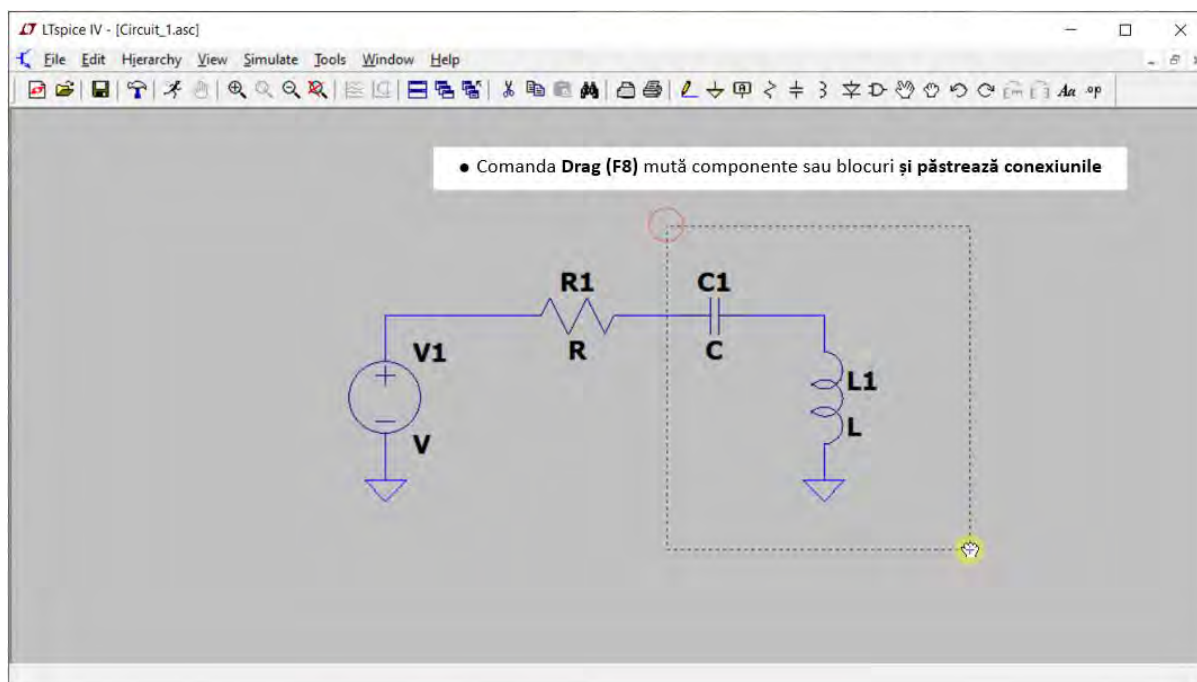
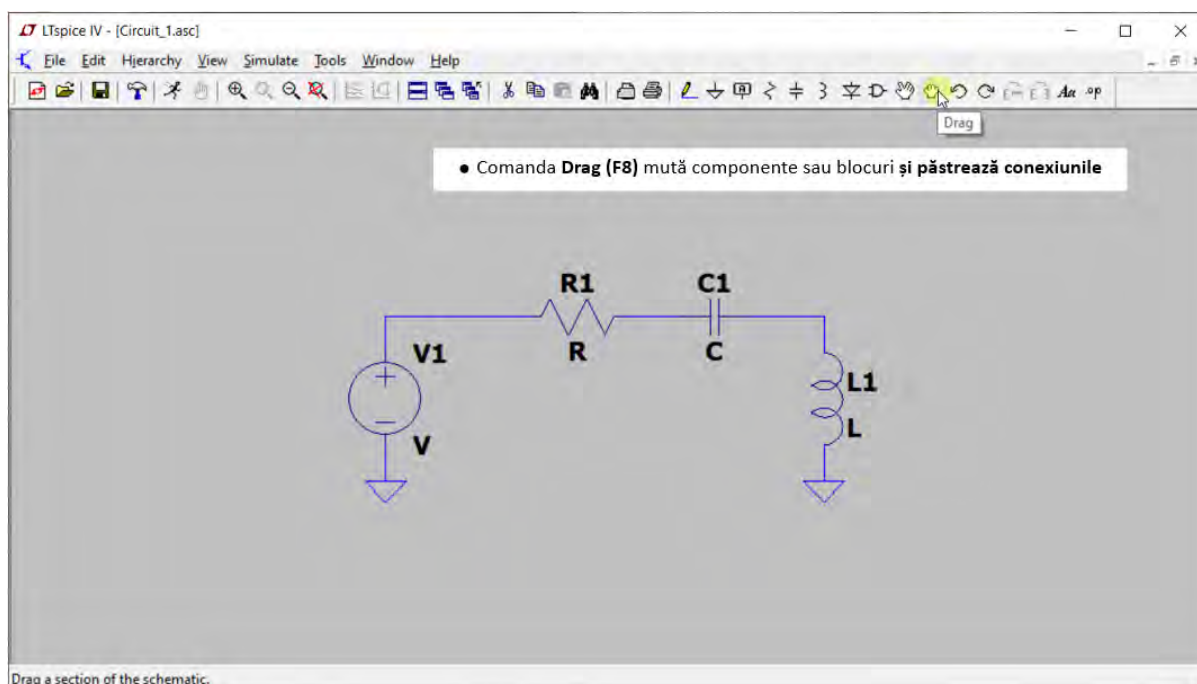
Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor



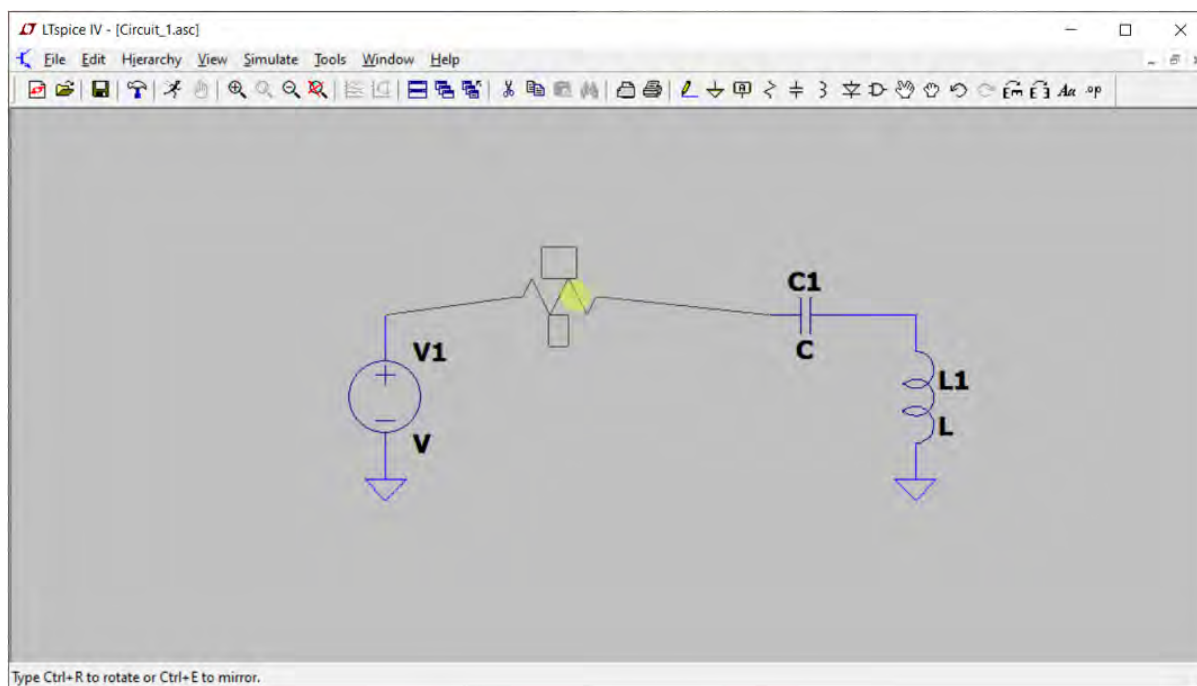
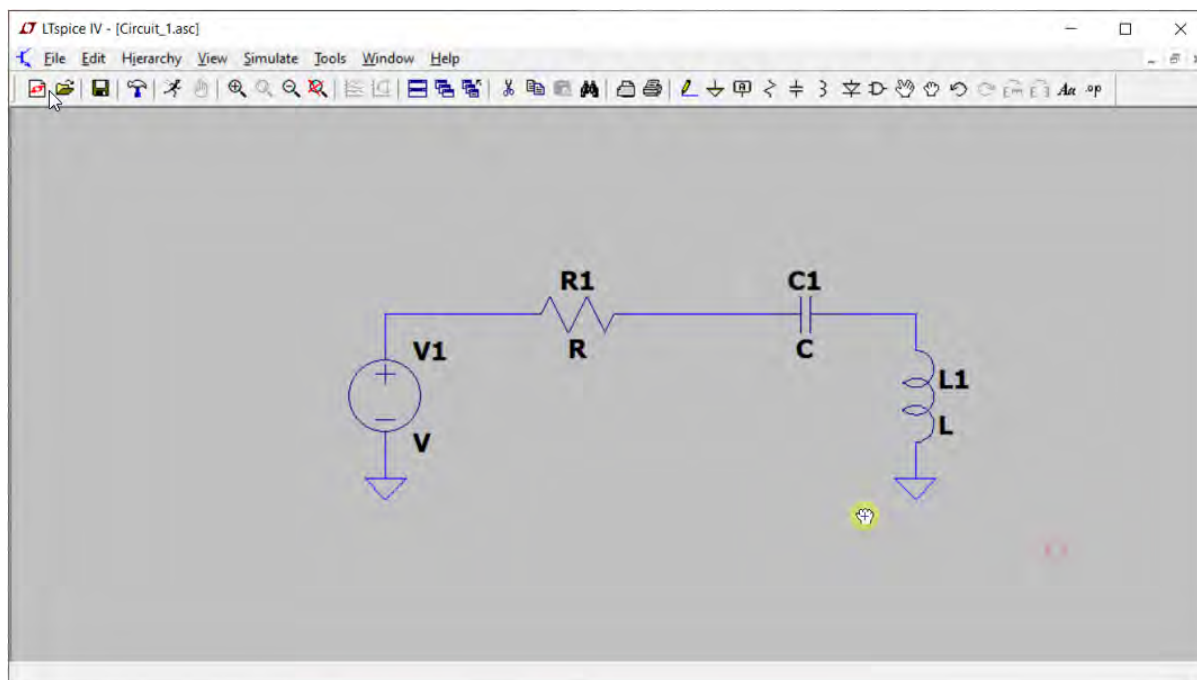


Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor

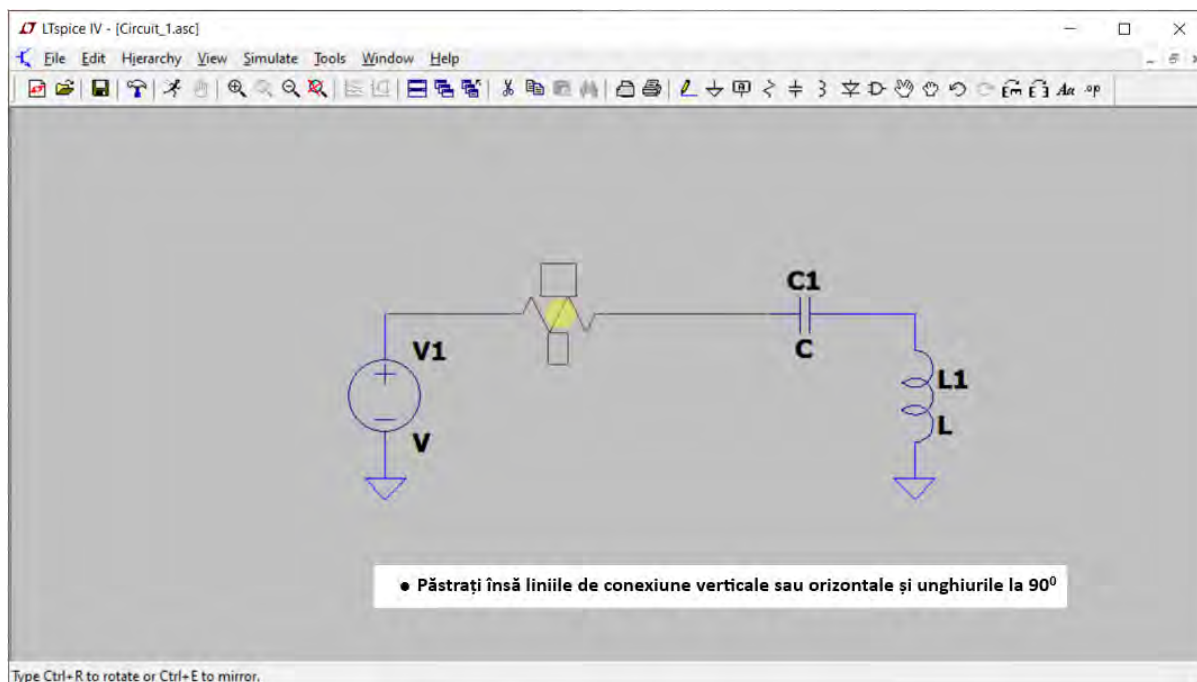




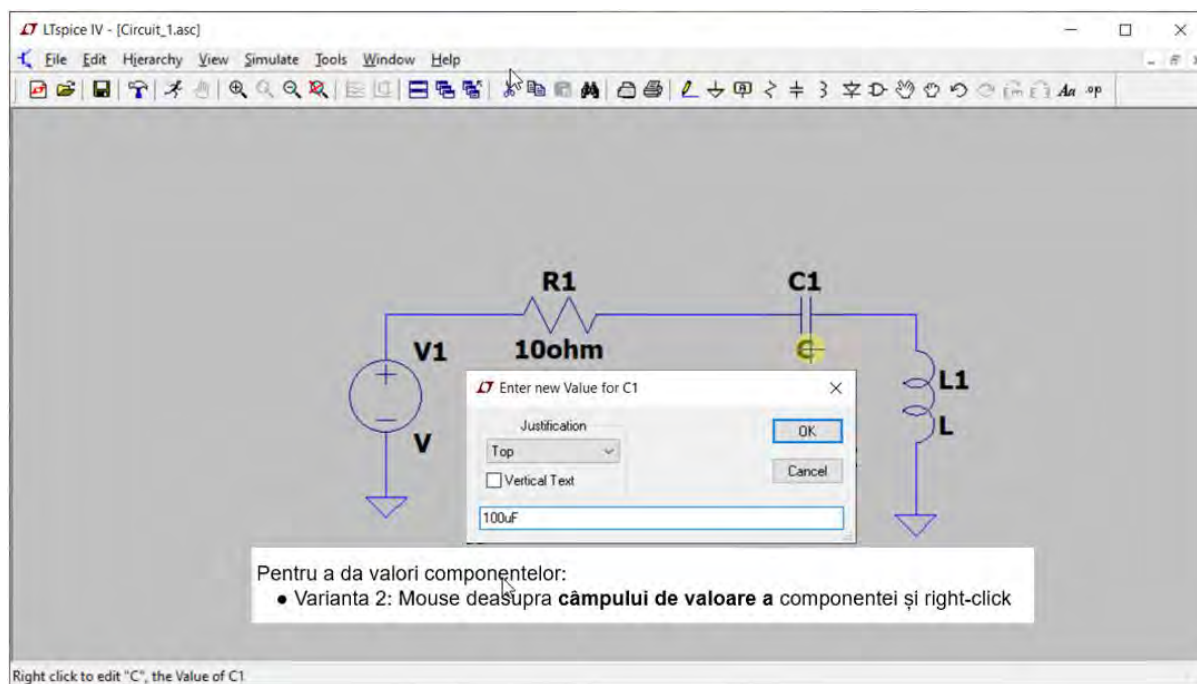
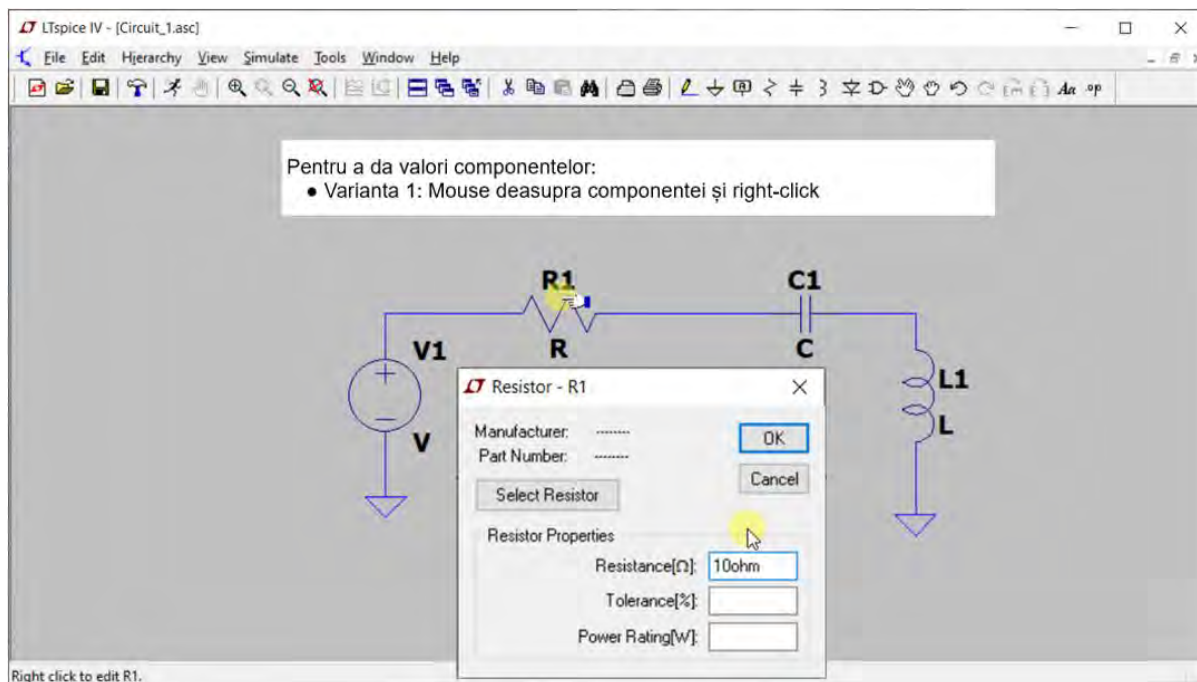
Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor

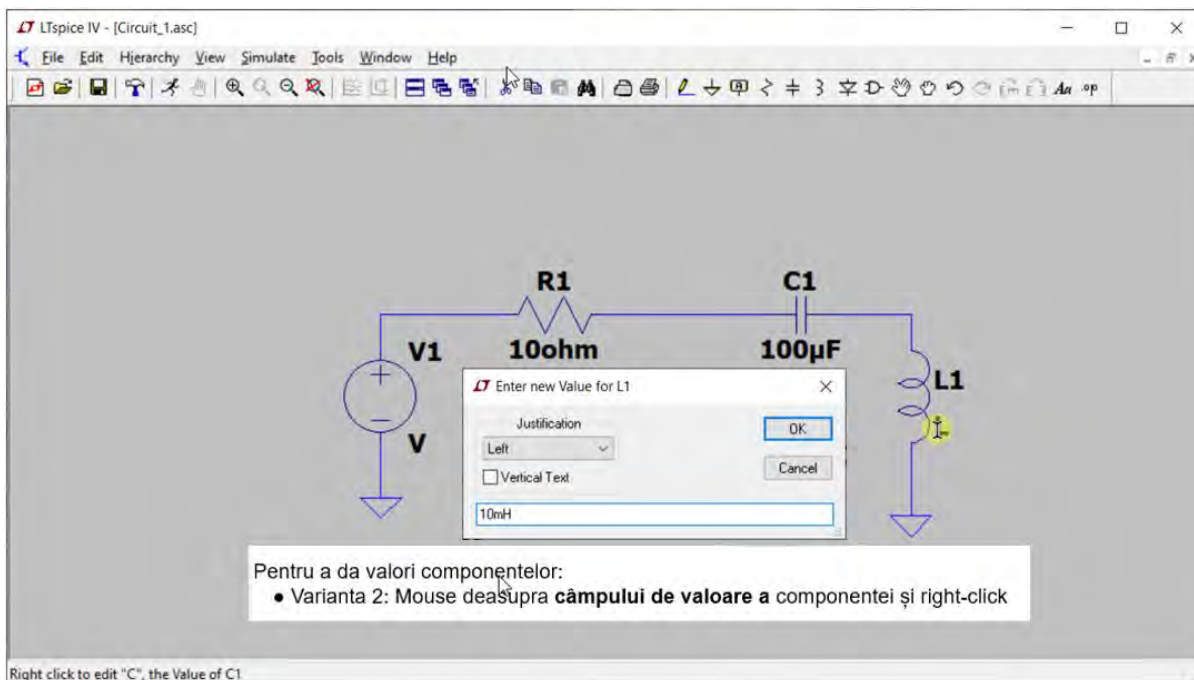


Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor

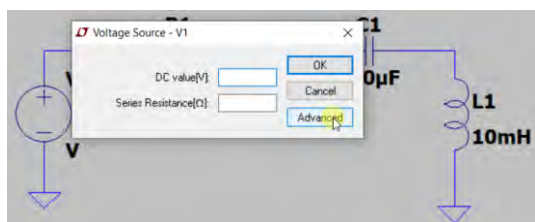
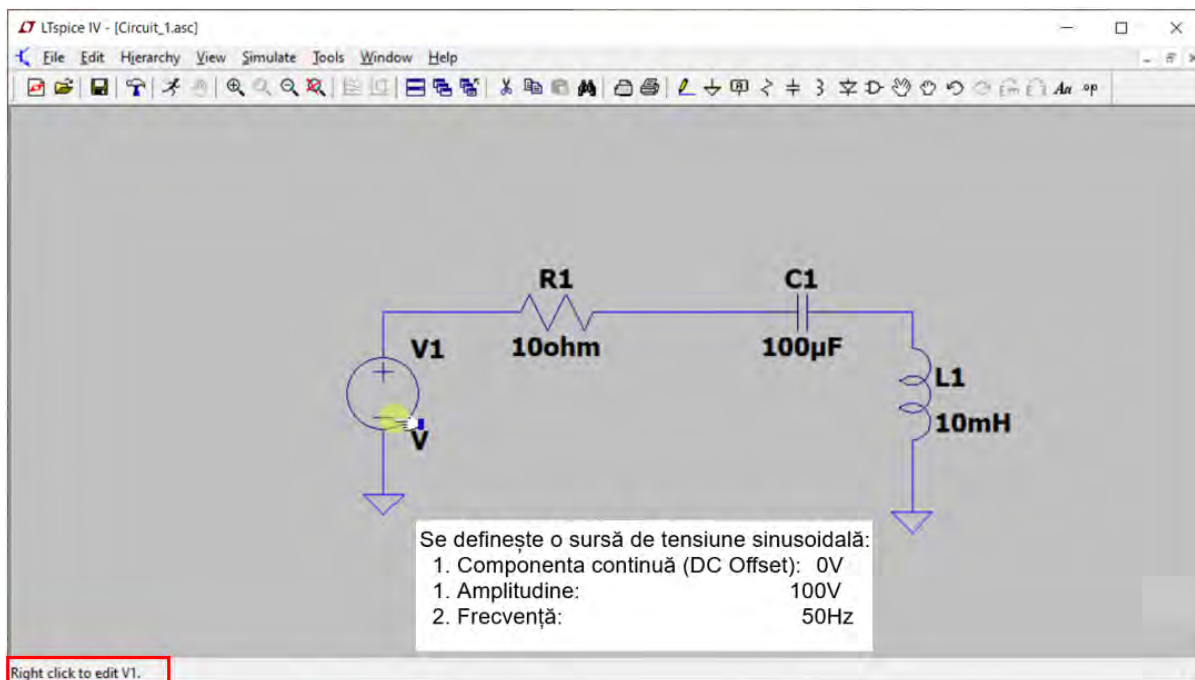


2.5 Inițierea cu valori numerice a componentelor electrice



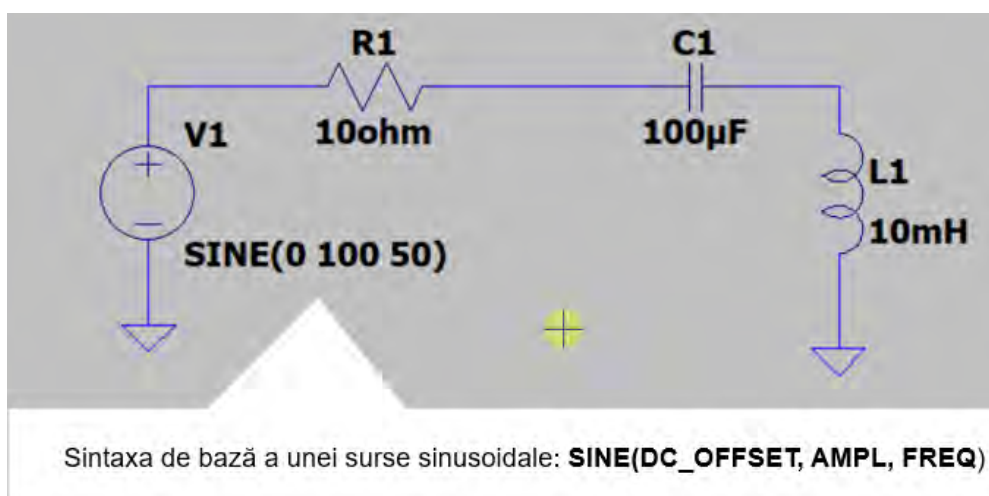
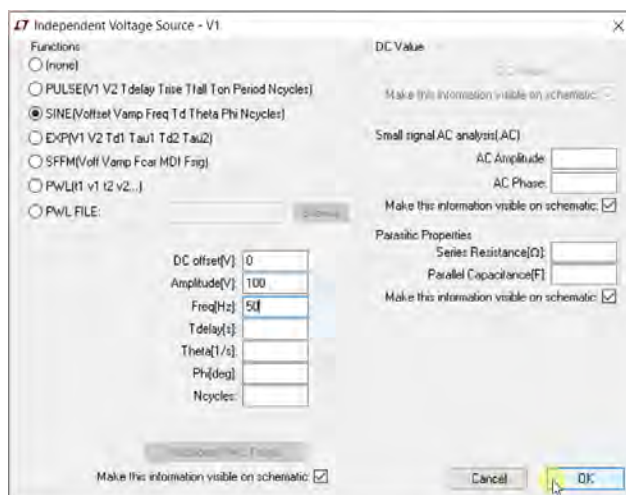


Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor

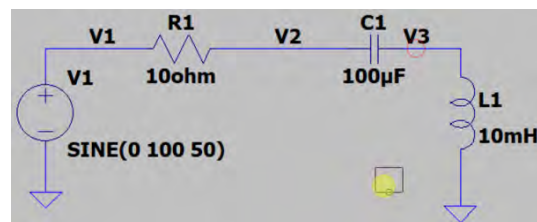
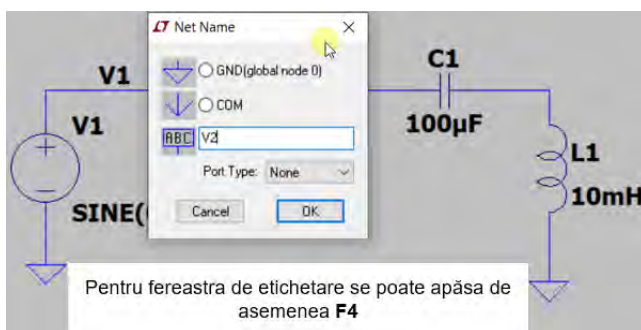
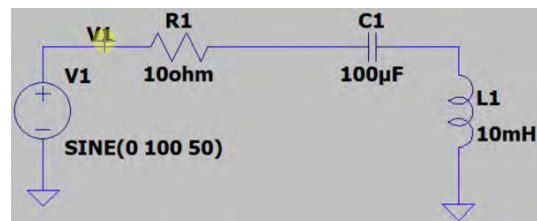
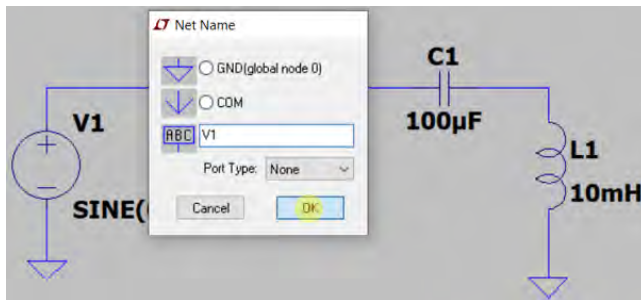
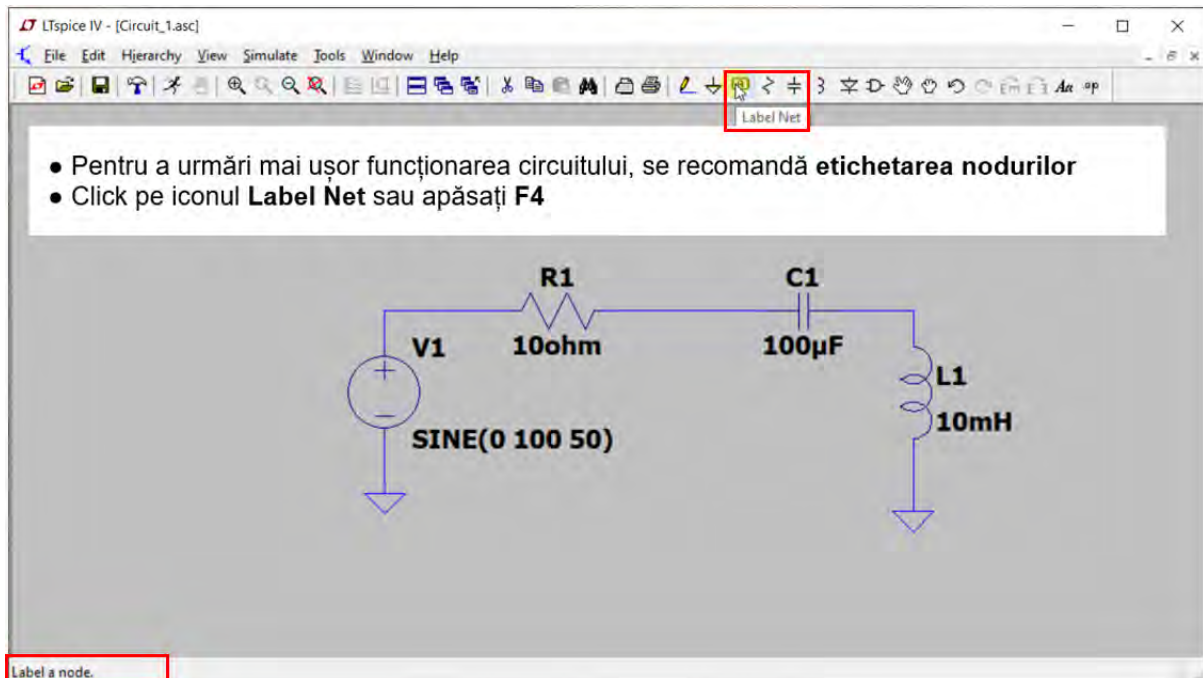


Se definește o sursă de tensiune sinusoidală:

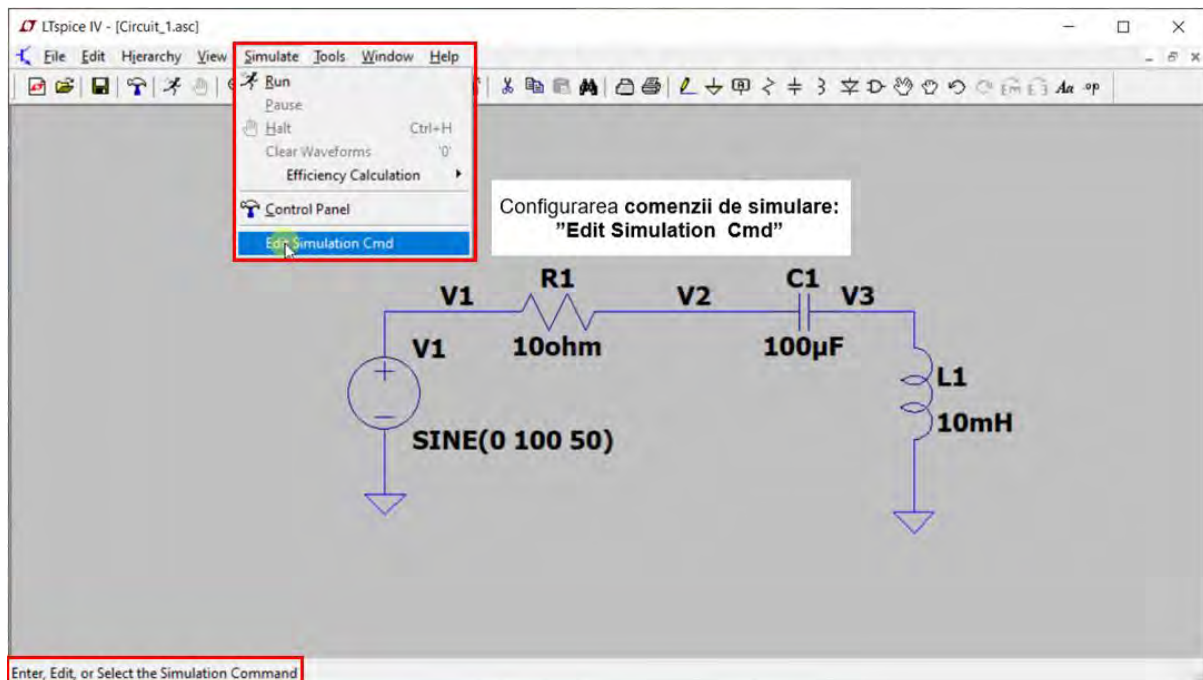
1. Componenta continuă (DC Offset): 0V
1. Amplitudine: 100V
2. Frecvență: 50Hz



2.6 Etichetarea nodurilor

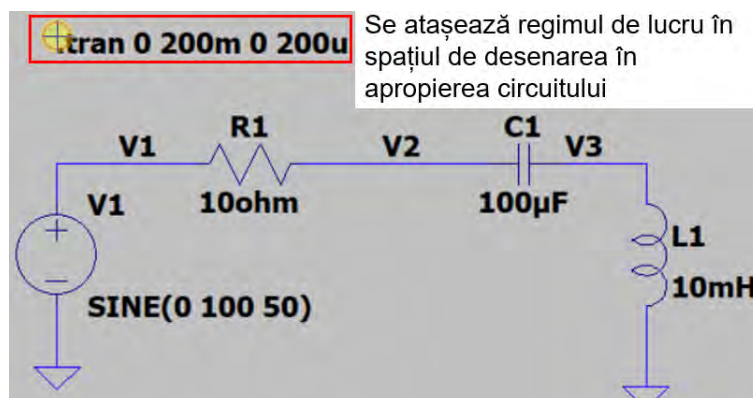
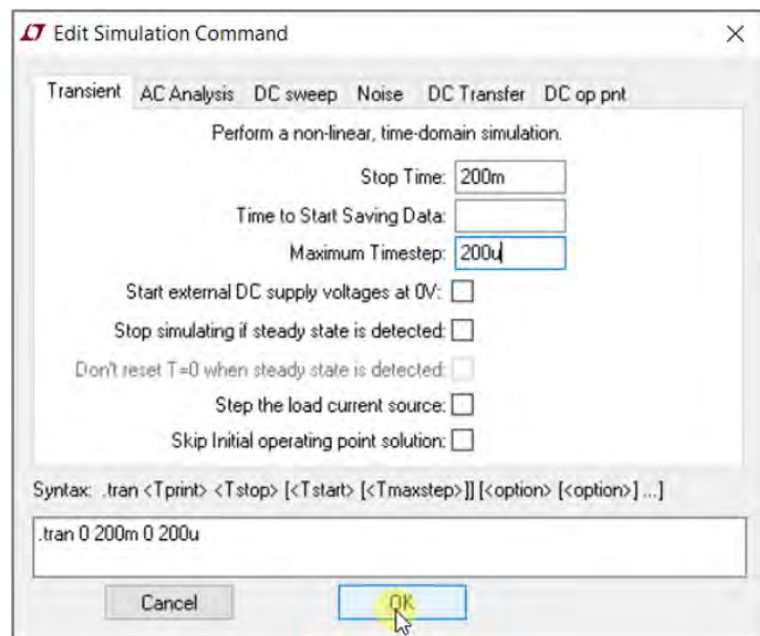


2.7 Comenzile de simulare

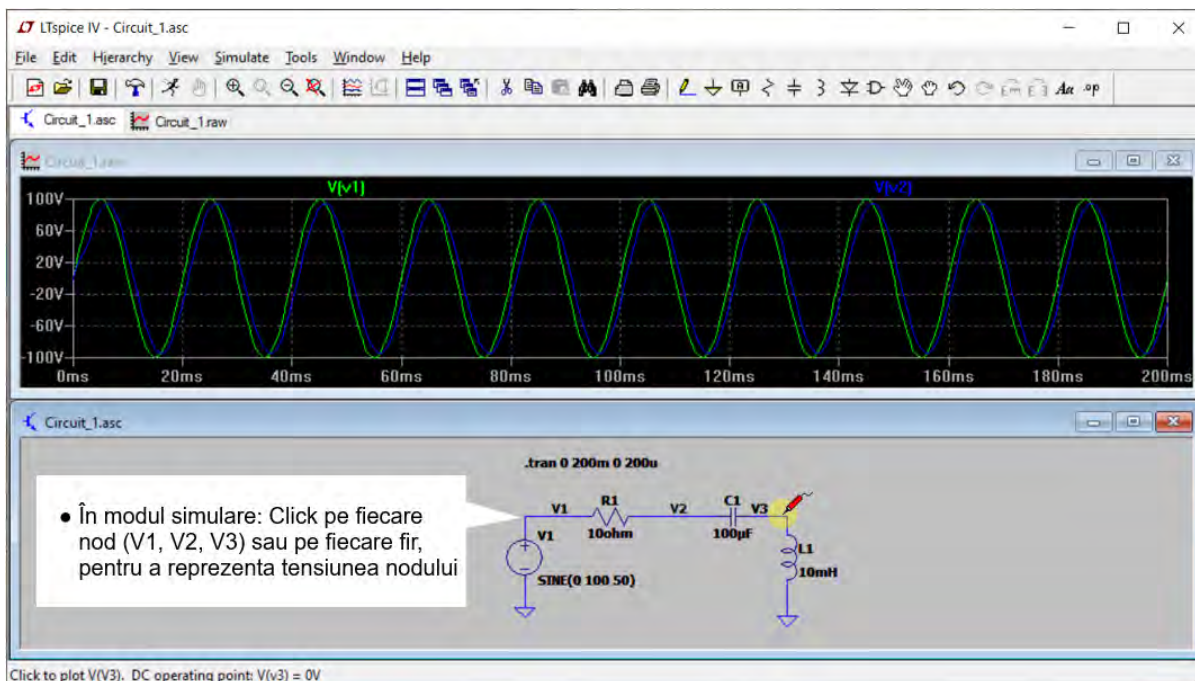
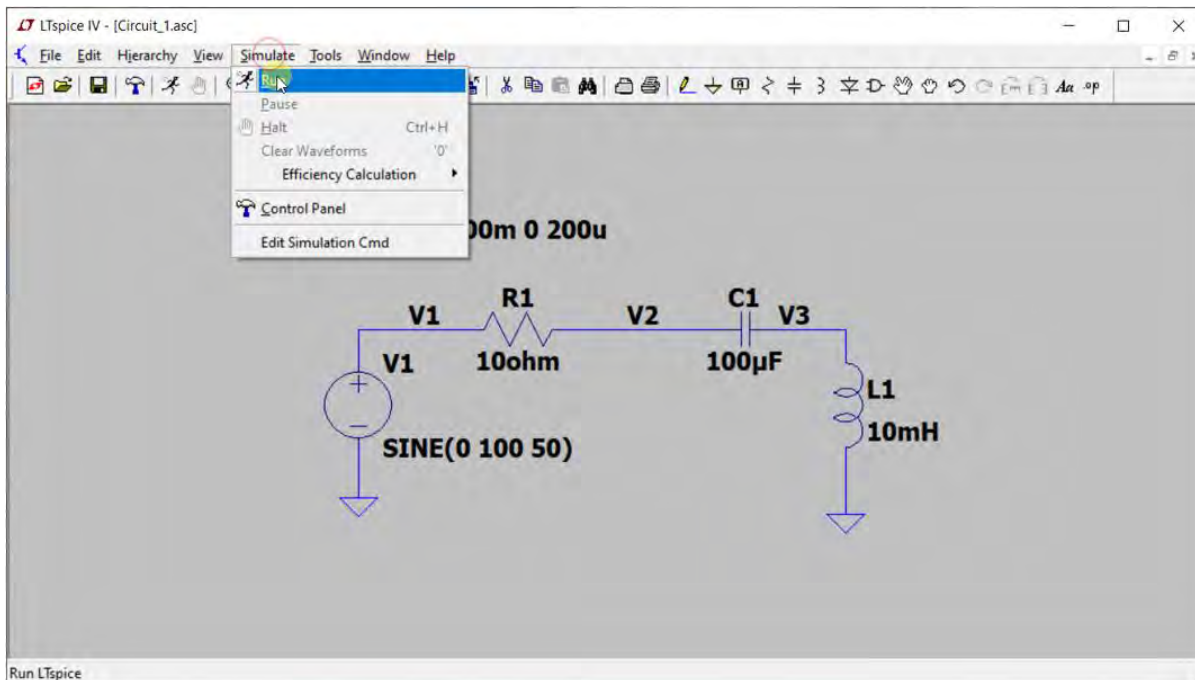


Regimul de lucru a circuitului e **permanent sinusoidal**. O posibilitate este, setarea unei simulări **în domeniul timp: Transient**

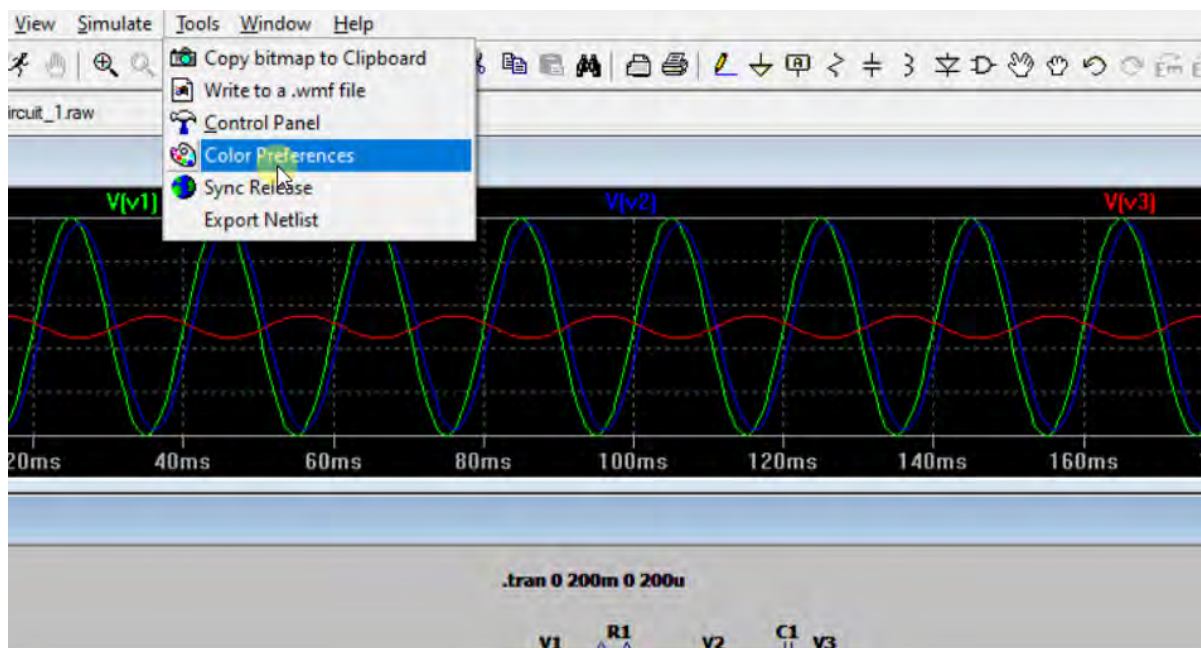
- Frecvența semnalului este de 50Hz, deci perioada e 20ms
- Ajunge să simulăm 10 perioade de semnal
- Se alege pasul maxim să fie de 1/100 din perioada semnalului



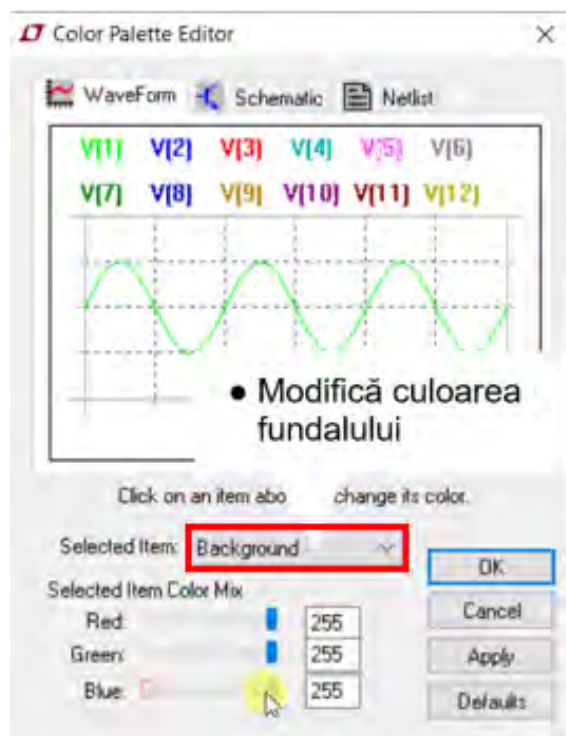
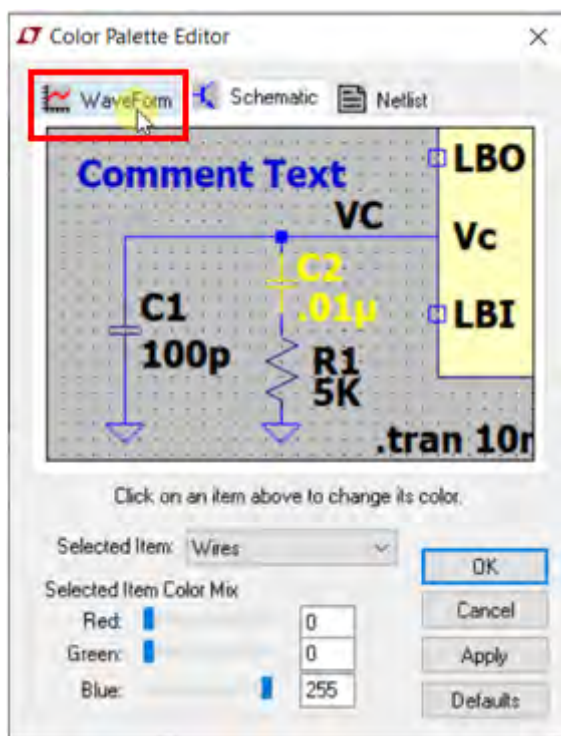
2.8 Rularea modelului de circuit



2.9 Setarea preferințelor de culori

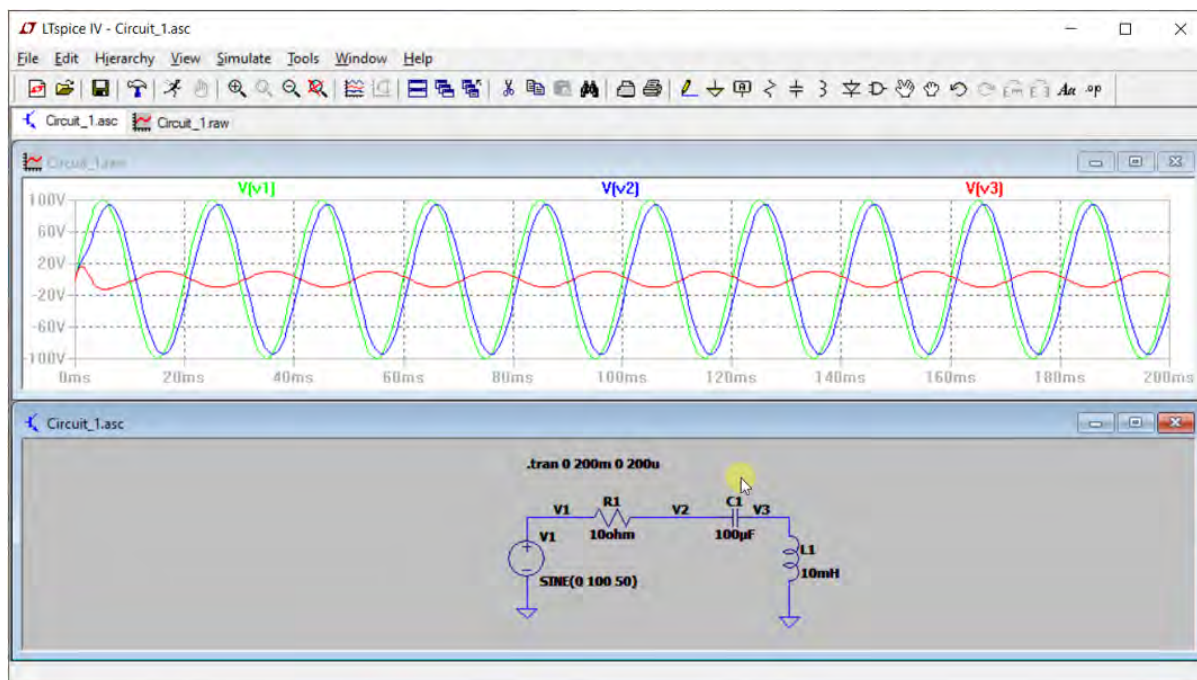


- Dacă se dorește exportarea rezultatelor într-un document, sau tipărirea acestora, se pot face câteva schimbări în **preferințele de culori**

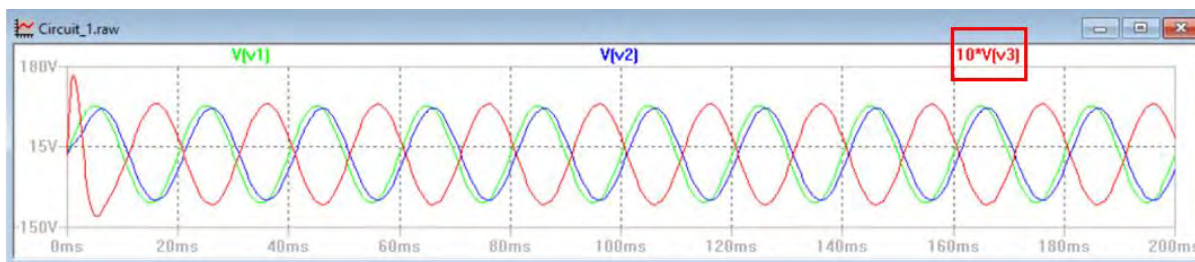
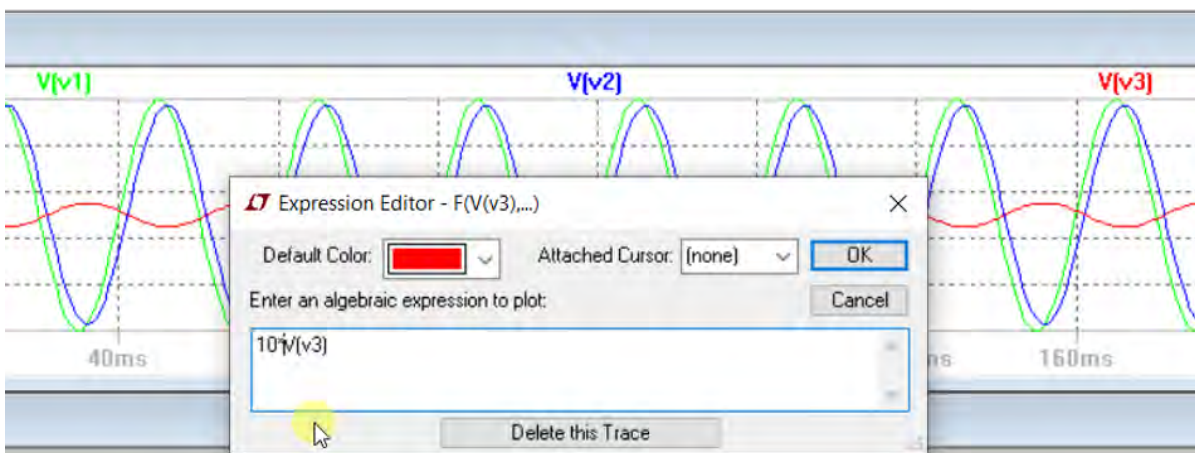
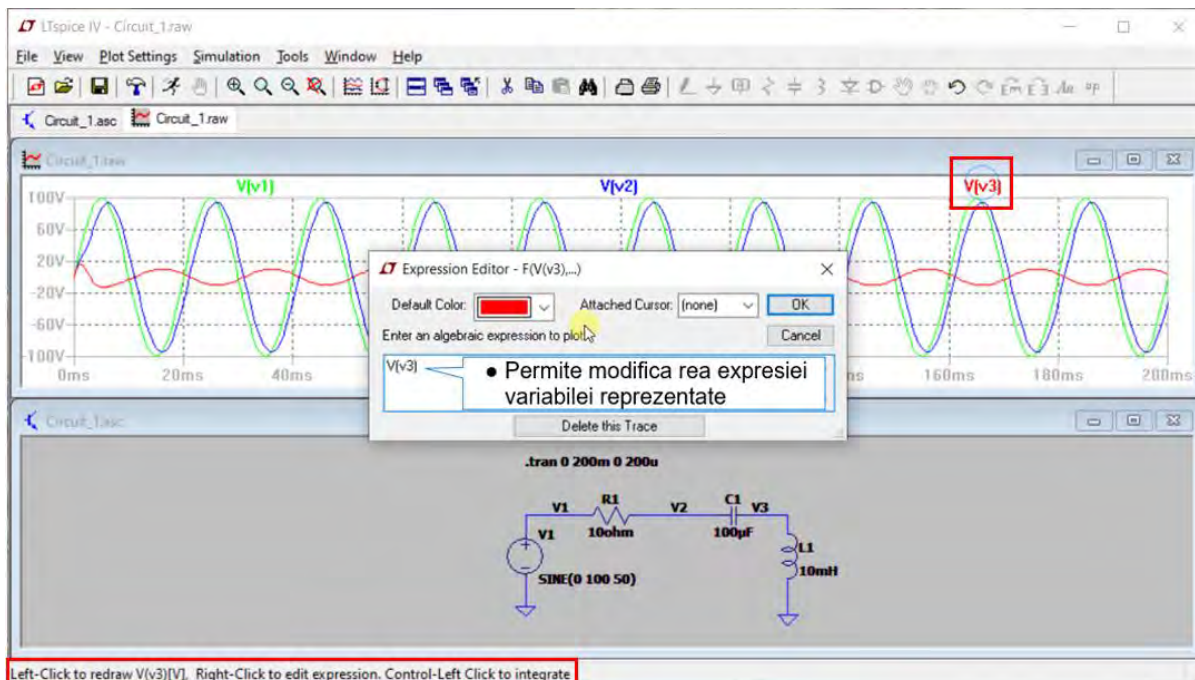


- Modifică culoarea fundalului

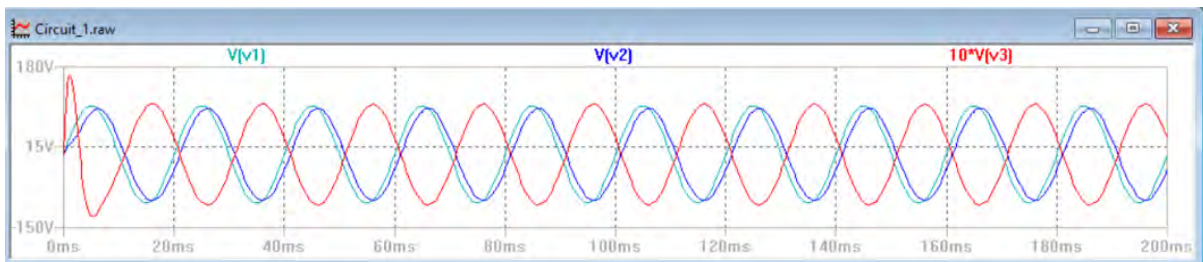
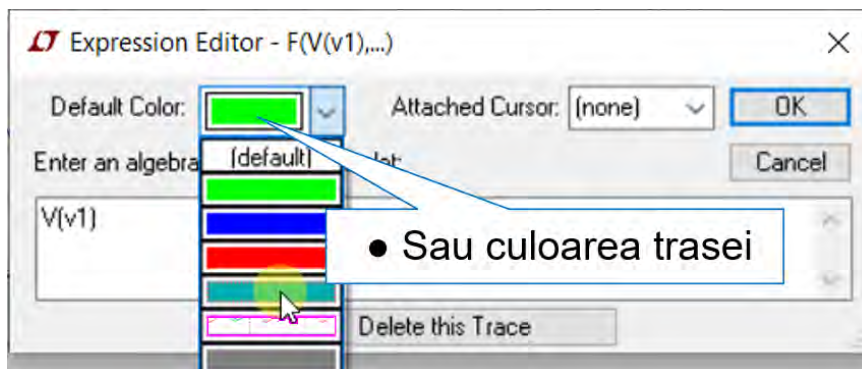
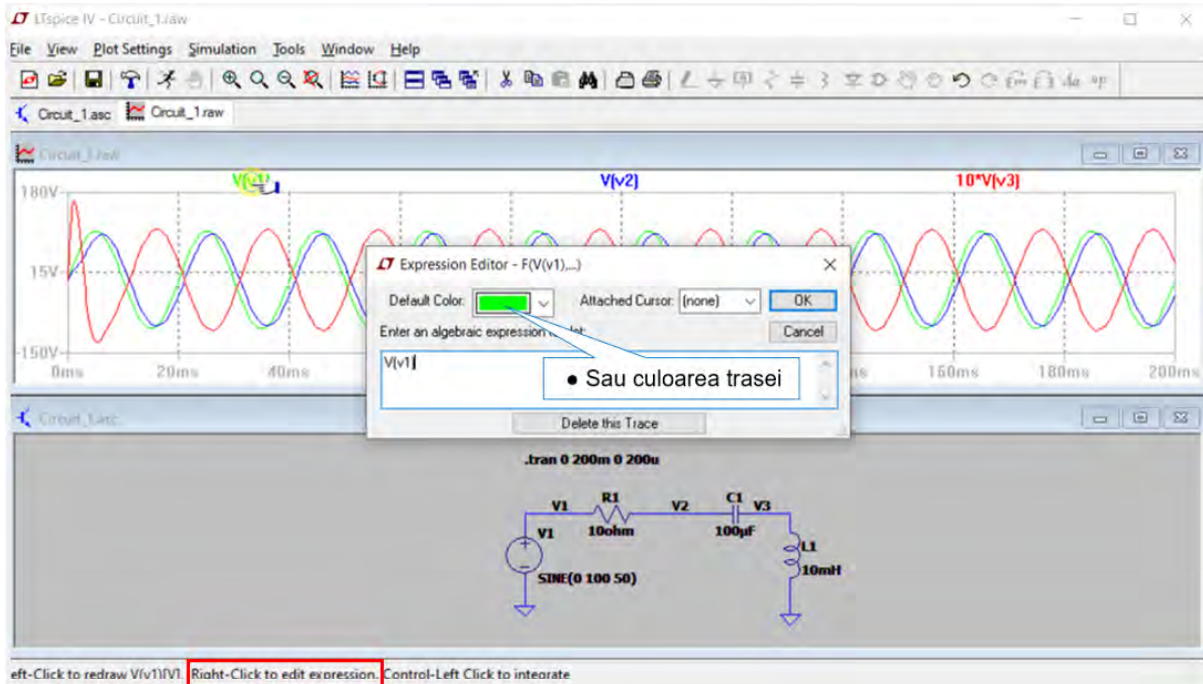
Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor



2.10 Modificarea expresiei unei variabile

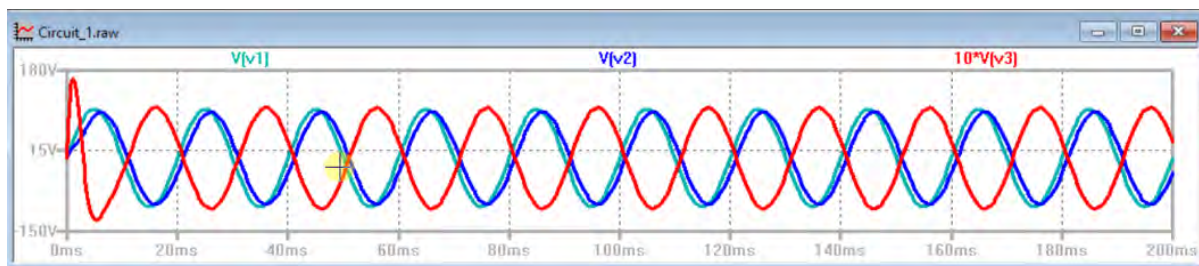
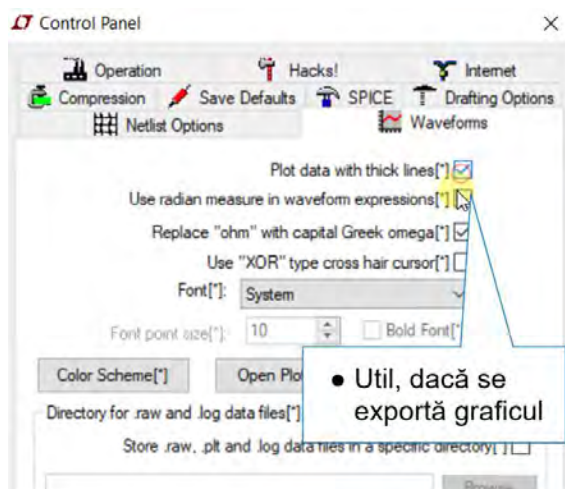
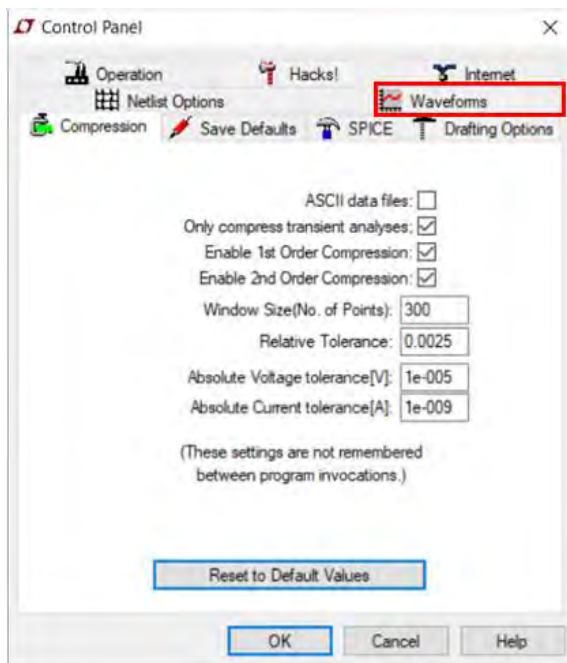
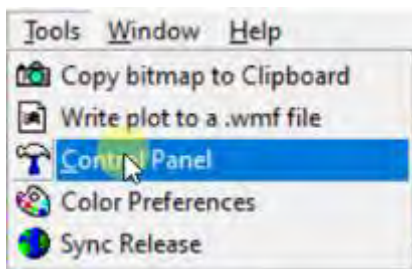


2.11 Modificarea culorii trasei



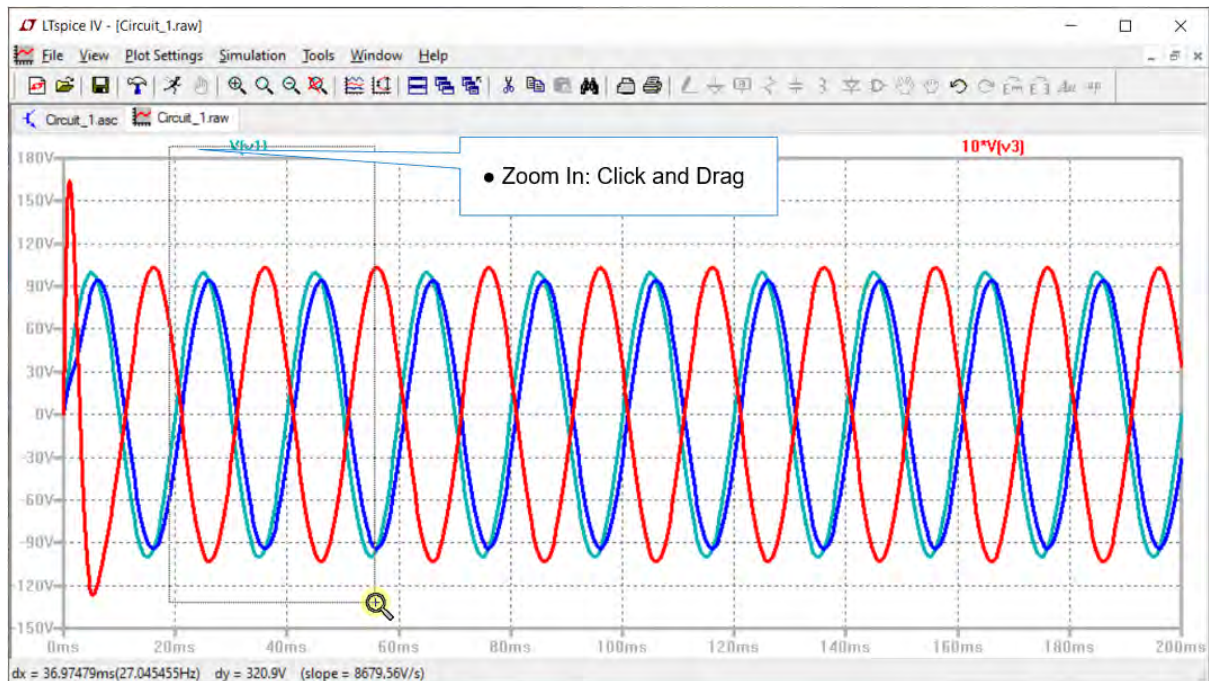
2.12 Modificarea grosimii trasei

Se accesează din meniul principal **Control Panel**, se selectează **Waveforms** și se bifează căsuța **Plot data with thick lines**.



2.13 Măsurarea semnalului cu ajutorul cursorului

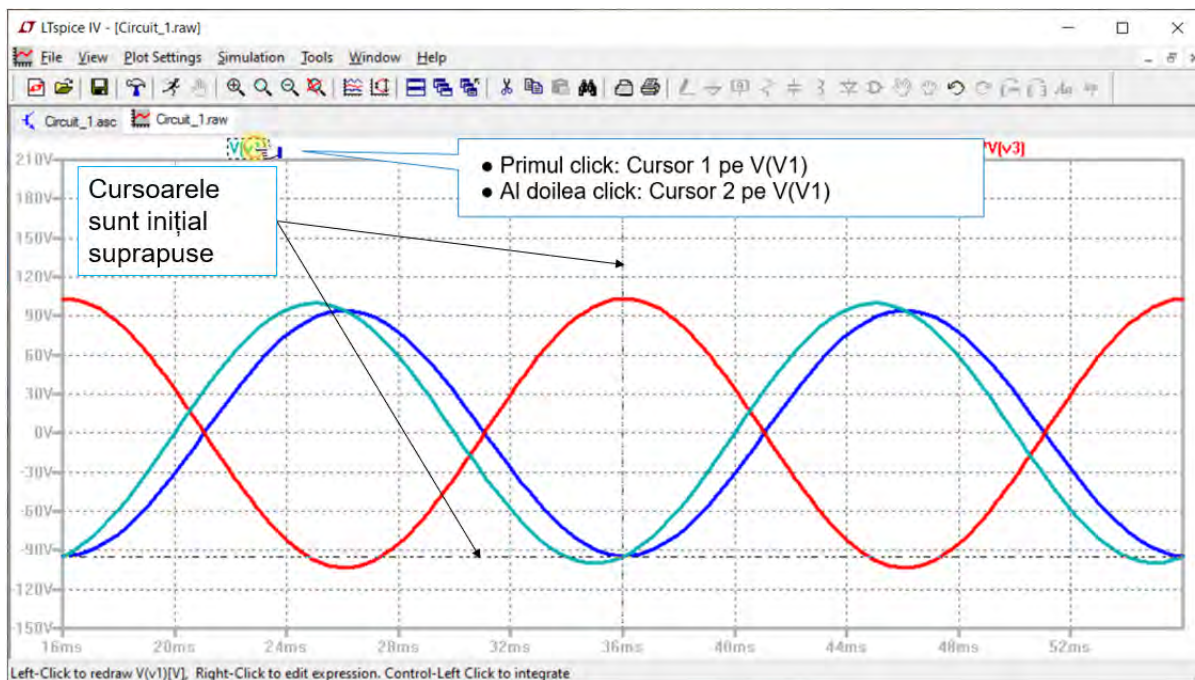
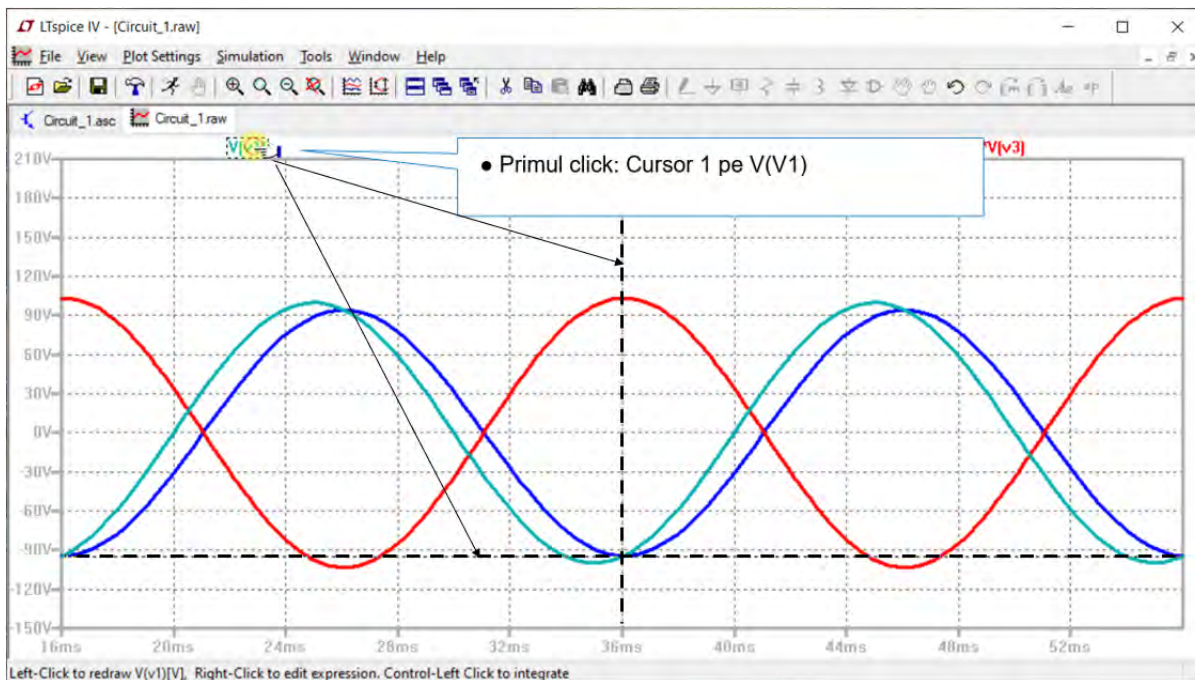
2.13.1 Măsurarea defazajului



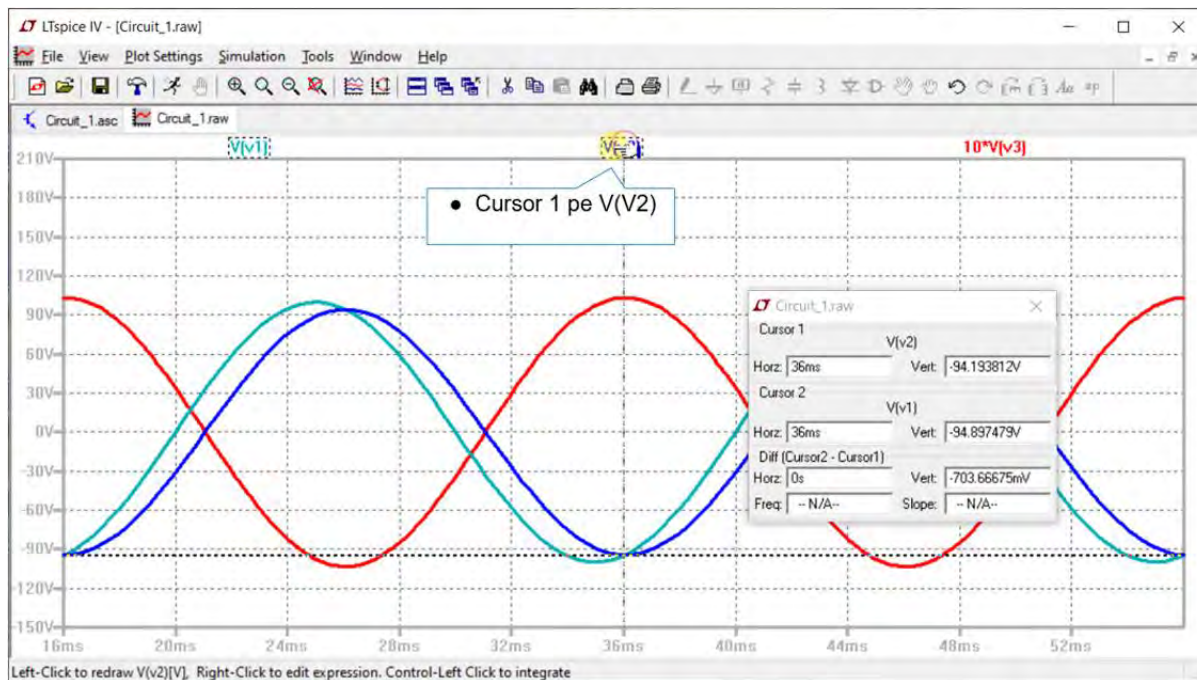
Left Click pe mărimea V(v1)



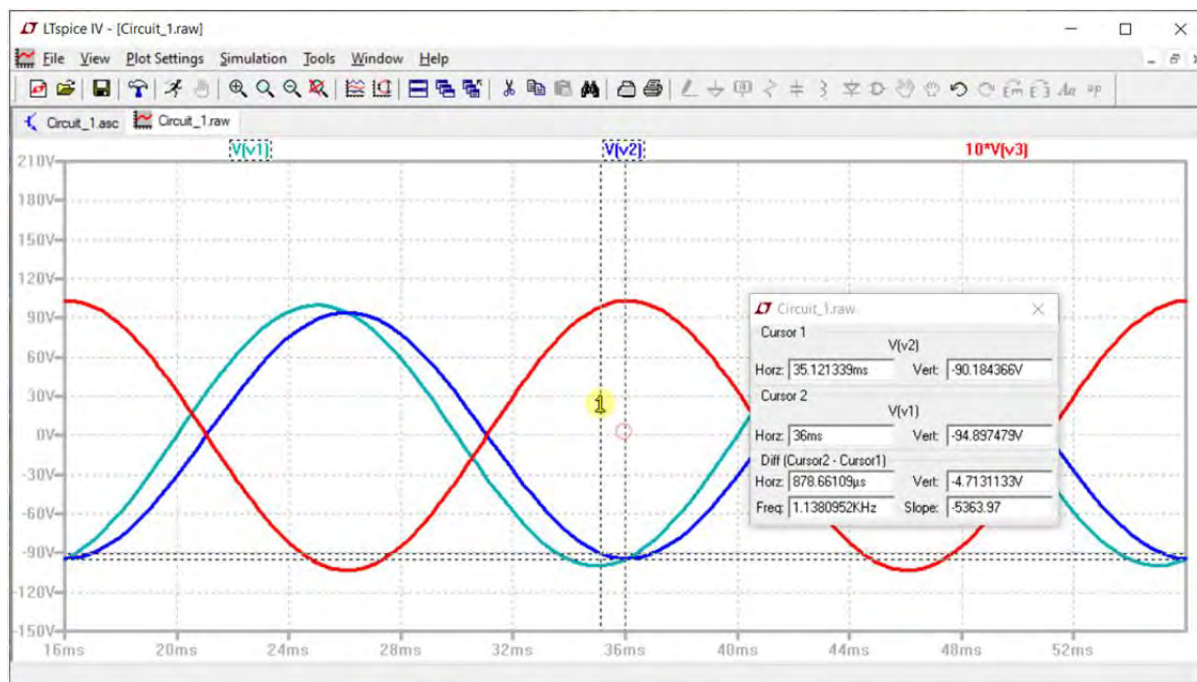
Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor



Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor

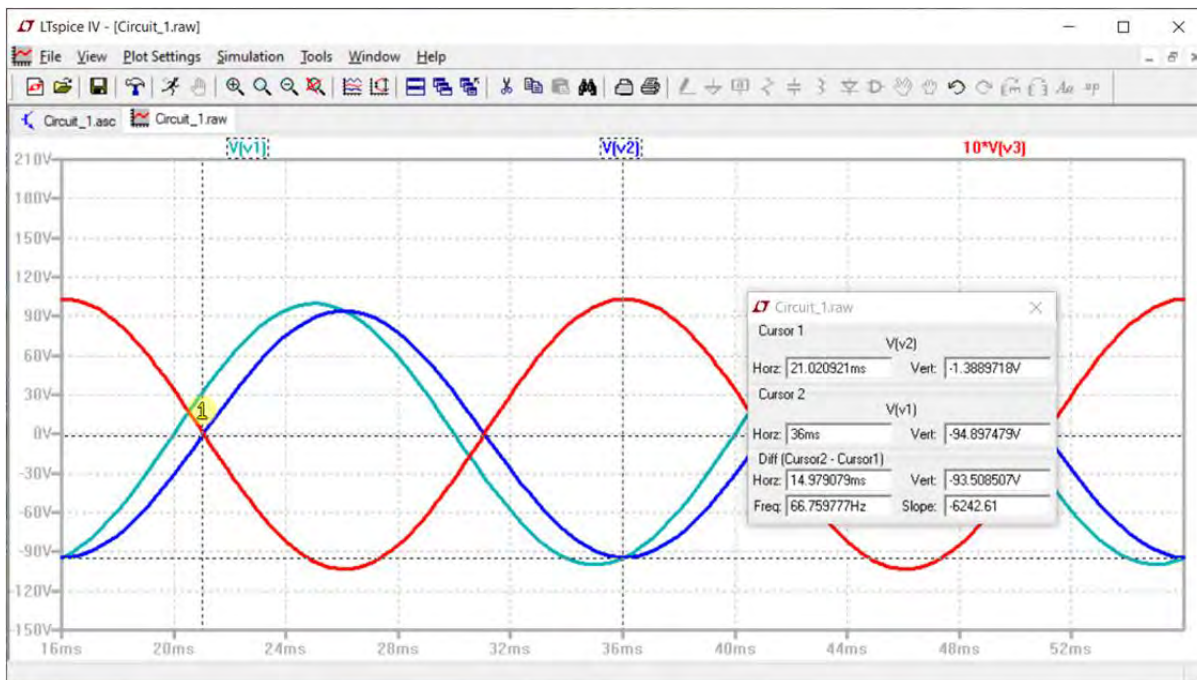


Se deplasează cursorul mouse-ului peste trasa cursorului nou apărută pe centrul ecranului și se trage. Lângă cursorul mouse-ului va apărea nr. 1, adică cursorul 1.

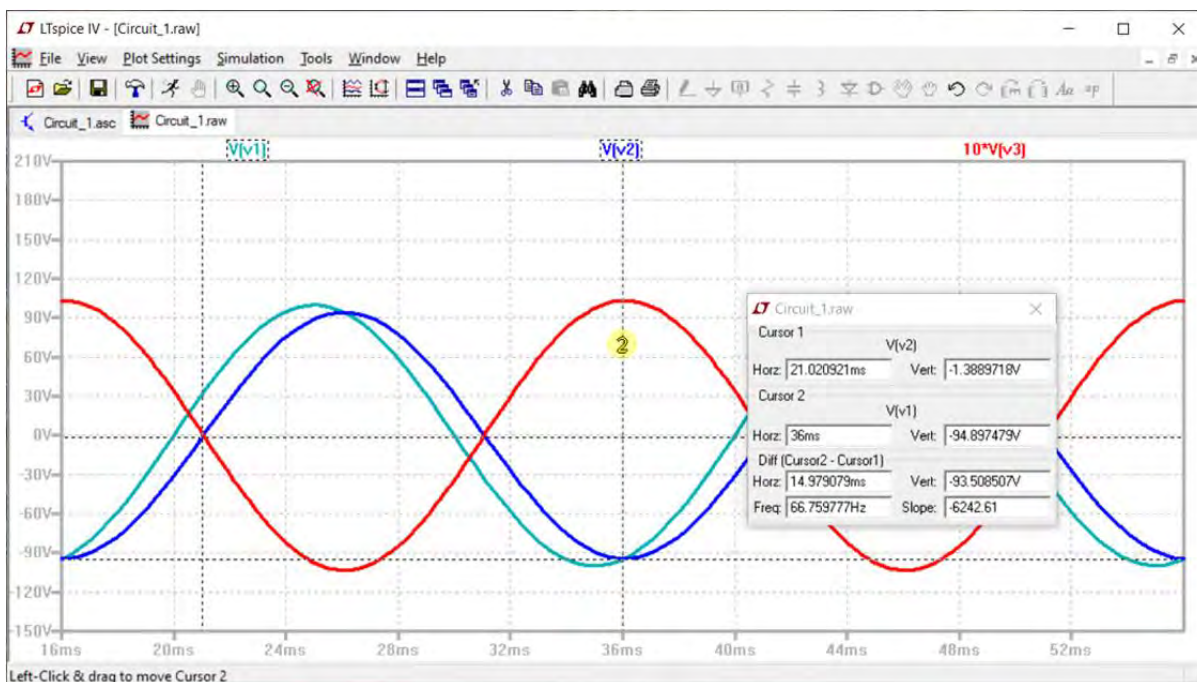


Se trage cursorul 1 până când atât liniile verticale cât și cele orizontale ale acestuia intersectează forma de undă albastru închis, V(v2), în zero (0).

Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor

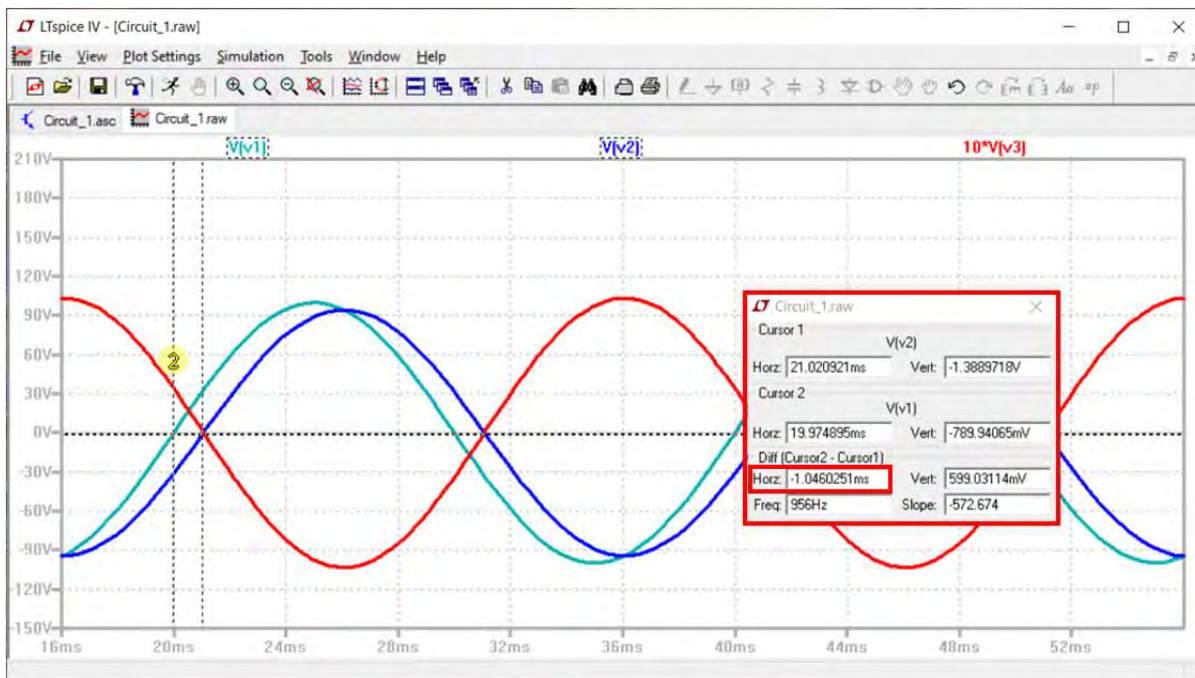


Se deplasează cursorul mouse-ului peste trasa cursorului nou apărută pe centrul ecranului și se trage. Lângă cursorul mouse-ului va apărea nr. 2, adică cursorul 2.

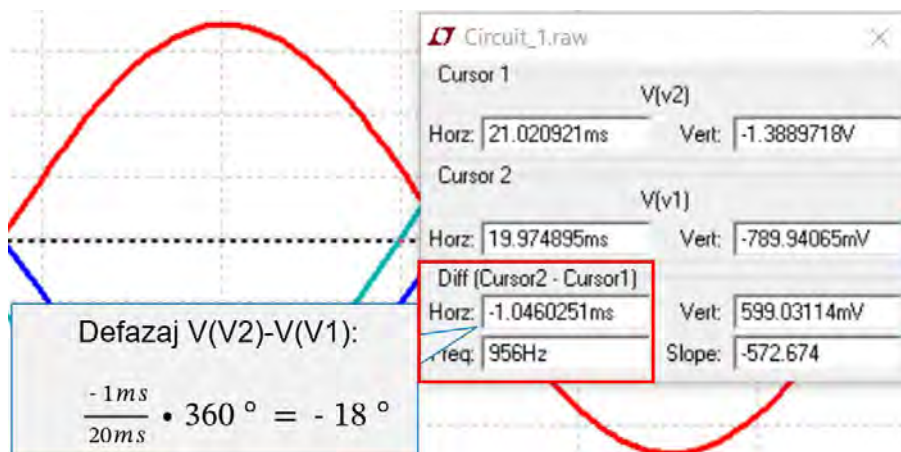


Se trage cursorul 2 până când atât liniile verticale cât și cele orizontale ale acestuia intersectează forma de undă albastru deschis, $v[1]$, în zero (0).

Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor

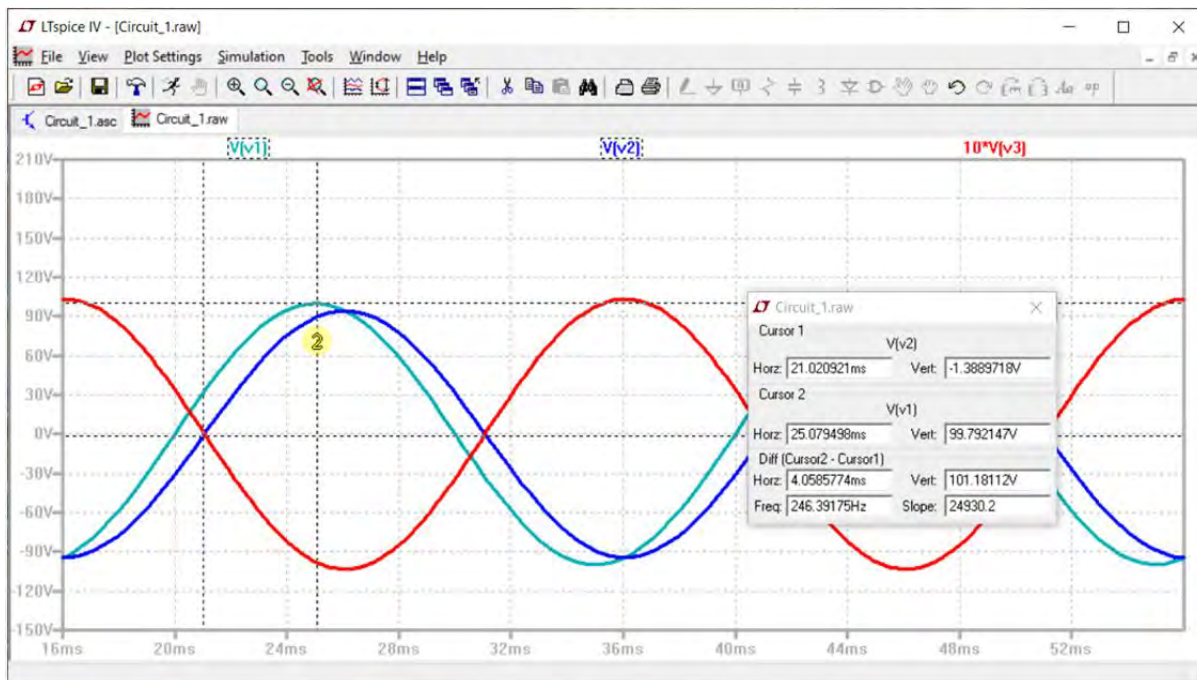


În fereastra cursorului **Circuit_1.raw/ Cursor 1** se va citi defazajul dintre cele două semnale pe orizontală (**Horz**), **Diff(Cursor2 - Cursor1)**.

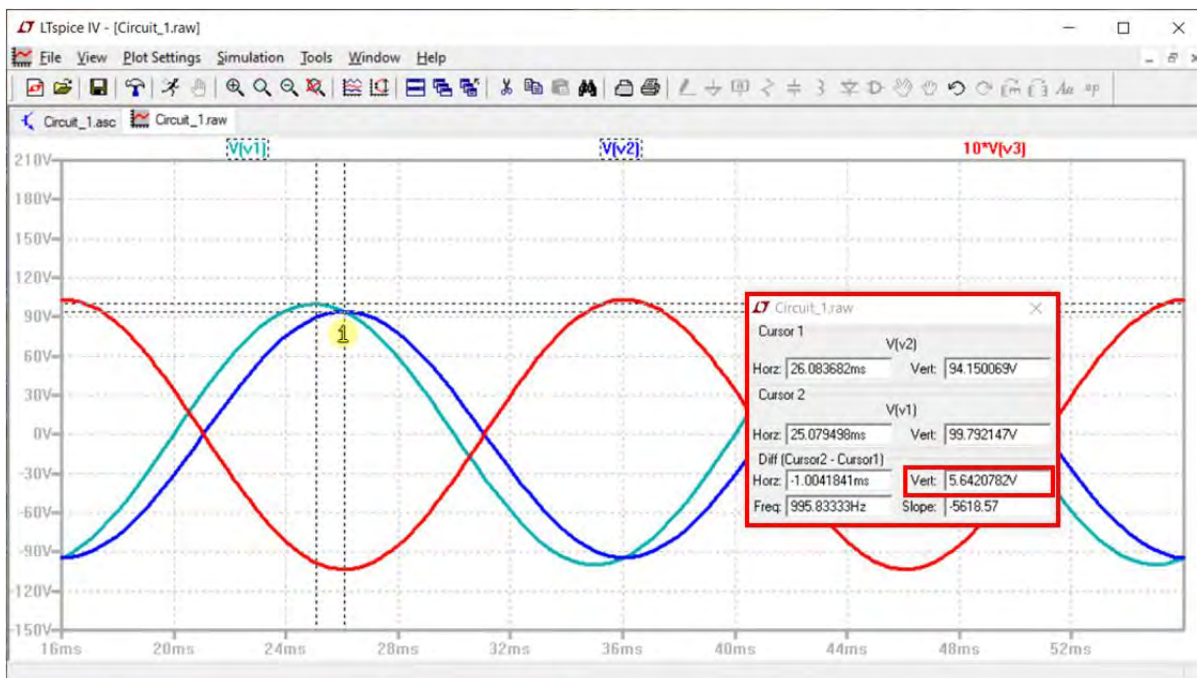


2.13.2 Măsurarea diferenței de amplitudine

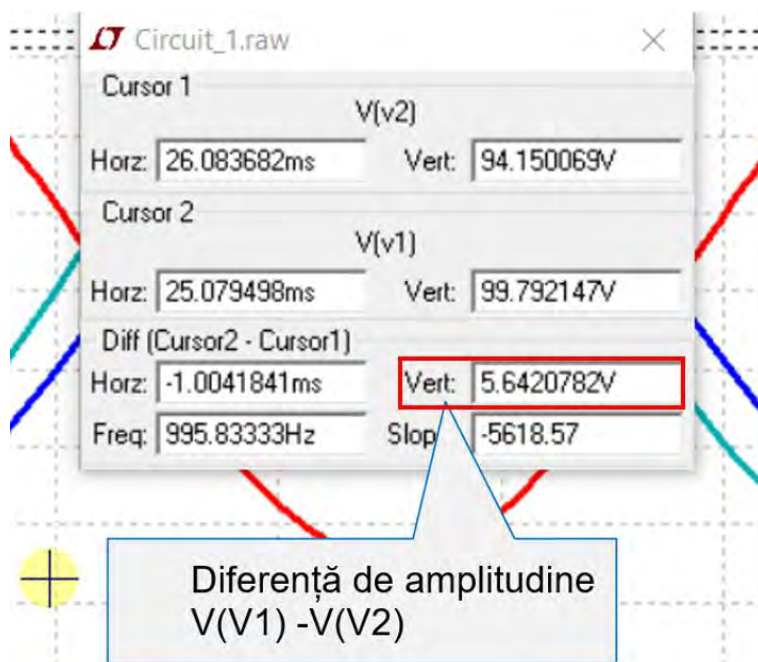
Se trage cursorul 2 până când atât liniile verticale cât și cele orizontale ale acestuia intersectează maximul amplitudinii formei de undă albastru deschis, V(v1).



Se trage cursorul 1 până când atât liniile verticale cât și cele orizontale ale acestuia intersectează maximul amplitudinii formei de undă albastru închis, V(v2).



În fereastra cursorului **Circuit_1.raw/ Cursor 1** se va citi defazajul dintre cele două semnale pe orizontală (**Vert**), **Diff(Cursor2 - Cursor1)**.



2.14 Exportul rezultatelor

Schemele electrice și rezultatele simulărilor pot fi capturate din interfața programului LTSpice cu unelte software oferite de sistemul de operare (Snipping tool, Print screen, etc.), sau alte unelte software (third party software: Greenshoot, Snagit, etc.). Aceste capturi sunt folosite ca surse în redactarea rapoartelor, lucrărilor, etc.

2.14.1 Exportul rezultatelor grafice din LTSpice sub format imagine

Schemele circuitelor electrice și rezultatele ce reprezintă grafic formele de undă pot fi exportate din interfața programului LTSpice: **Tools**→**Copy bitmap to Clipboard** sau **Tools**→**Write to a .wmf file**, a se vedea figura următoare.



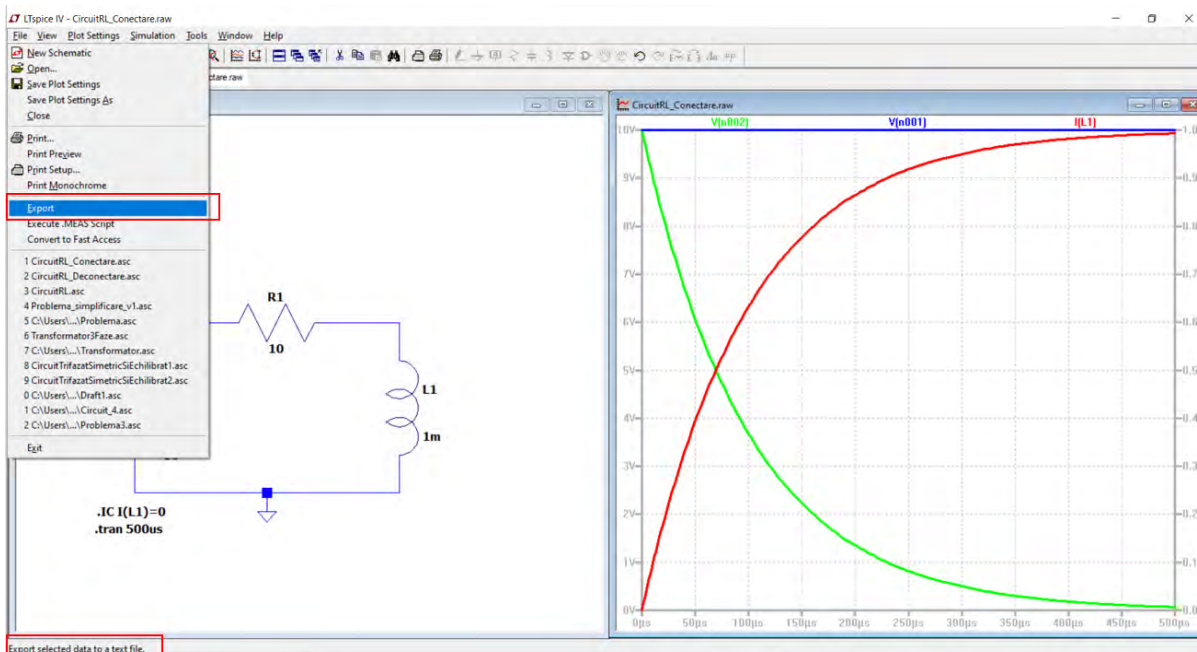
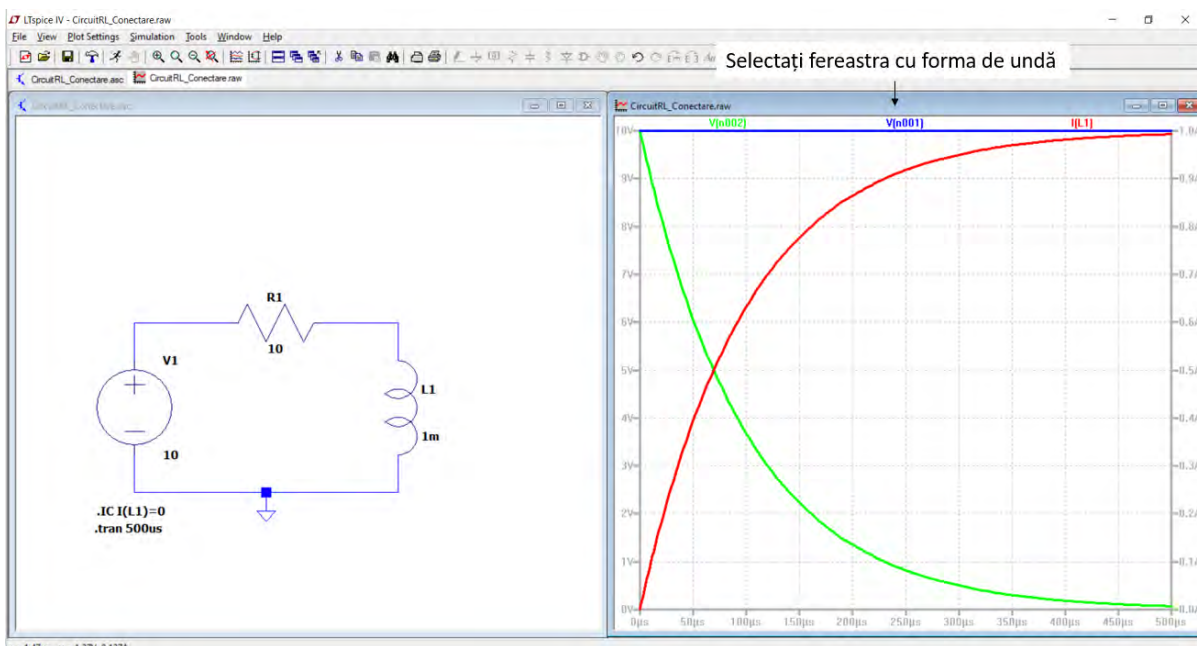
Exportul imaginilor se face cu ajutorul următoarelor operații:

1. Se selectează fereastra grafică de exportat (click cu ajutorul cursorului pe cadrul acestei ferestre), de exemplu cea cu reprezentarea schemei desenate a circuitului electric sau cea a formei de undă.

2. Se utilizează una din operațiile LTSpice: **Tool**→**Copy bitmap to Clipboard** sau **Tools**→**Write to a .wmf file**. În cazul utilizării, **Tools**→**Write to a .wmf file**, trebuie specificată locația și numele fișierului cu extensia **".wmf"** corespunzător ferestrei grafice selectate

2.14.2 Exportul rezultatelor grafice din LTSpice sub format text

Reprezentarea grafică a rezultatelor (forme de undă) din LTSpice poate fi exportată sub format text, în vederea postprocesării sau reprezentării ulterioare a acestora cu ajutorul altor programe, cum ar fi MS Excel.



Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor

The top-left window is the 'Select Traces to Export' dialog in LTSpice. The 'File' field contains the path to the circuit file, and the 'OK' button is highlighted with a red box. The 'Select Waveforms to Export' list includes V(n001), V(n002), I(L1), I(R1), and I(V1).

The top-right window is a Notepad file named 'CircuitRL_Conectare.txt' showing the following simulation results:

time	V(n001)	V(n002)	I(L1)
0.000000000000000000	1.000000e+001	1.000000e+001	1.000000e-008
2.463080356587205e-006	1.000000e+001	9.757072e+000	2.429278e-002
4.926160713174411e-006	1.000000e+001	9.519709e+000	4.802913e-002
7.389241069761616e-006	1.000000e+001	9.287909e+000	7.120907e-002
9.852321426348821e-006	1.000000e+001	9.061674e+000	9.383259e-002
1.231540178293603e-005	1.000000e+001	8.841003e+000	1.158997e-001
1.477848213952323e-005	1.000000e+001	8.625896e+000	1.374104e-001
1.724156249611043e-005	1.000000e+001	8.416353e+000	1.583647e-001
2.393799106753901e-005	1.000000e+001	7.876396e+000	2.123604e-001
3.063441963896758e-005	1.000000e+001	7.366453e+000	2.633547e-001
3.733084821039616e-005	1.000000e+001	6.886523e+000	3.113477e-001
4.402727678182475e-005	1.000000e+001	6.436607e+000	3.563393e-001
5.072370535325333e-005	1.000000e+001	6.016705e+000	3.983295e-001
5.742013392468189e-005	1.000000e+001	5.626817e+000	4.373183e-001
6.411656249611046e-005	1.000000e+001	5.266942e+000	4.733058e-001
7.325439731753905e-005	1.000000e+001	4.814690e+000	5.185310e-001
8.239223213896762e-005	1.000000e+001	4.394691e+000	5.605309e-001
9.153006696039620e-005	1.000000e+001	4.006945e+000	5.993055e-001
1.006679017818248e-004	1.000000e+001	3.651451e+000	6.348548e-001
1.098057366032534e-004	1.000000e+001	3.328210e+000	6.671789e-001
1.189435714246820e-004	1.000000e+001	3.037222e+000	6.962778e-001
1.280814062461105e-004	1.000000e+001	2.778486e+000	7.221513e-001
1.378470312461105e-004	1.000000e+001	2.520046e+000	7.479954e-001
1.46984860675391e-004	1.000000e+001	2.303704e+000	7.696296e-001
1.561227008889677e-004	1.000000e+001	2.102791e+000	7.897209e-001
1.652605357103963e-004	1.000000e+001	1.917306e+000	8.082693e-001
1.743983705318249e-004	1.000000e+001	1.747251e+000	8.252749e-001
1.835362053532534e-004	1.000000e+001	1.592623e+000	8.407377e-001
1.926740401746920e-004	1.000000e+001	1.452424e+000	8.546576e-001

The screenshot shows Microsoft Excel with a data table and a line graph. The data table is as follows:

time	V(n001)	V(n002)	I(L1)
0.00E+00	10.00	10.00	0.000
2.46E-06	10.00	9.76	0.024
4.93E-06	10.00	9.52	0.048
7.39E-06	10.00	9.29	0.071
9.85E-06	10.00	9.06	0.094
1.23E-05	10.00	8.84	0.116
1.48E-05	10.00	8.63	0.137
1.72E-05	10.00	8.42	0.158
2.39E-05	10.00	7.88	0.212
3.06E-05	10.00	7.37	0.263
3.73E-05	10.00	6.89	0.311
4.40E-05	10.00	6.44	0.356
5.07E-05	10.00	6.02	0.398
5.74E-05	10.00	5.63	0.437
6.41E-05	10.00	5.27	0.473
7.33E-05	10.00	4.81	0.519
8.24E-05	10.00	4.39	0.561
9.15E-05	10.00	4.01	0.599
0.000101	10.00	3.65	0.635
0.000110	10.00	3.33	0.667
0.000119	10.00	3.04	0.696
0.000128	10.00	2.78	0.722
0.000138	10.00	2.52	0.748
0.000147	10.00	2.30	0.770
0.000156	10.00	2.10	0.790
0.000165	10.00	1.92	0.808
0.000174	10.00	1.75	0.825
0.000184	10.00	1.59	0.841

The graph, titled 'Variație tensiune și curent bobina exportata pentru Excel', plots Voltage [V] and Current [A] against time [s]. The x-axis ranges from 0.00E+00 to 6.00E-04. The left y-axis (Voltage [V]) ranges from 0.00 to 12.00. The right y-axis (Current [A]) ranges from 0.000 to 1.200. Three data series are shown: V(n001) (blue line, constant at 10.00V), V(n002) (orange line, decreasing from 10.00V to ~1.59V), and I(L1) (grey line, increasing from 0.000A to ~0.841A).

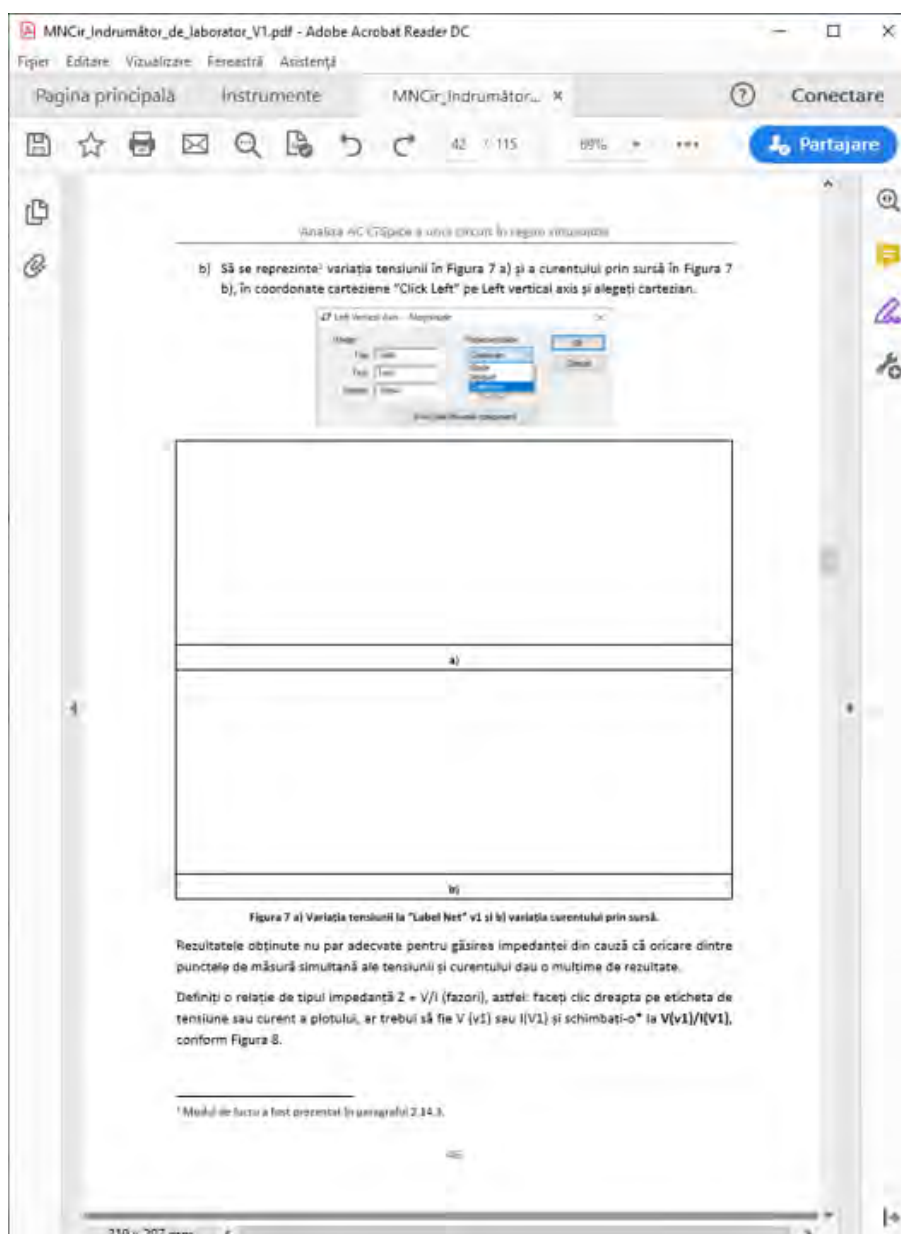
2.14.3 Inserarea rezultatelor rezolvărilor/ simulărilor în versiunea electronică PDF a acestui îndrumător de laborator

Acest îndrumător de laborator este conceput în așa fel încât la finalizarea fiecărei rezolvări/ simulări de lucrări, studenții să încarce versiunea proprie a rezultatelor rezolvării/ simulării, în formatul electronic PDF al îndrumătorului, cu ajutorul Adobe Acrobat Reader DC®.

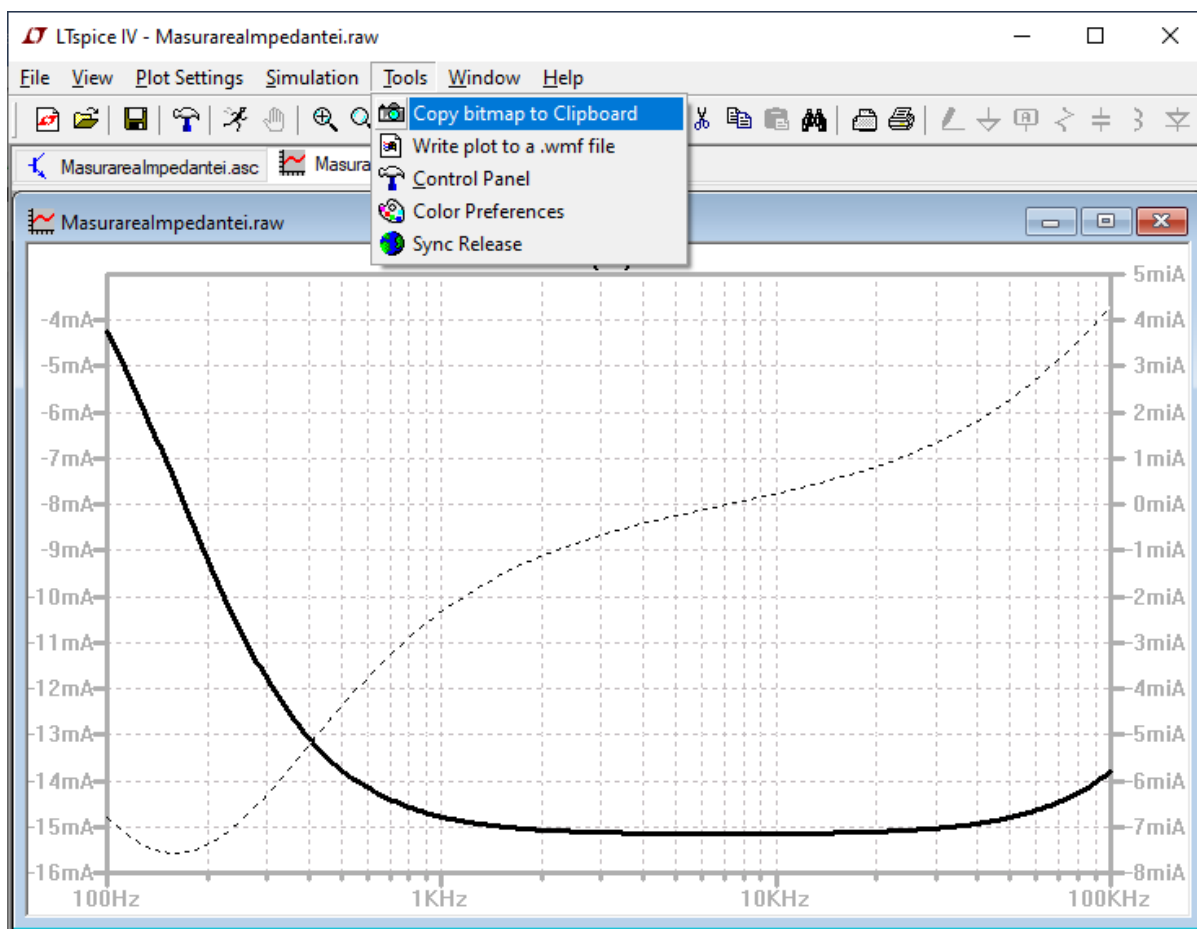
Pentru fiecare câmp sau figură din acest îndrumător, unde se cere inserarea rezultatelor, utilizatorul trebuie să încarce rezultatul obținut în formatul PDF al acestui îndrumător.

2.14.3.1 Inserarea de figuri cu rezultatele simulărilor

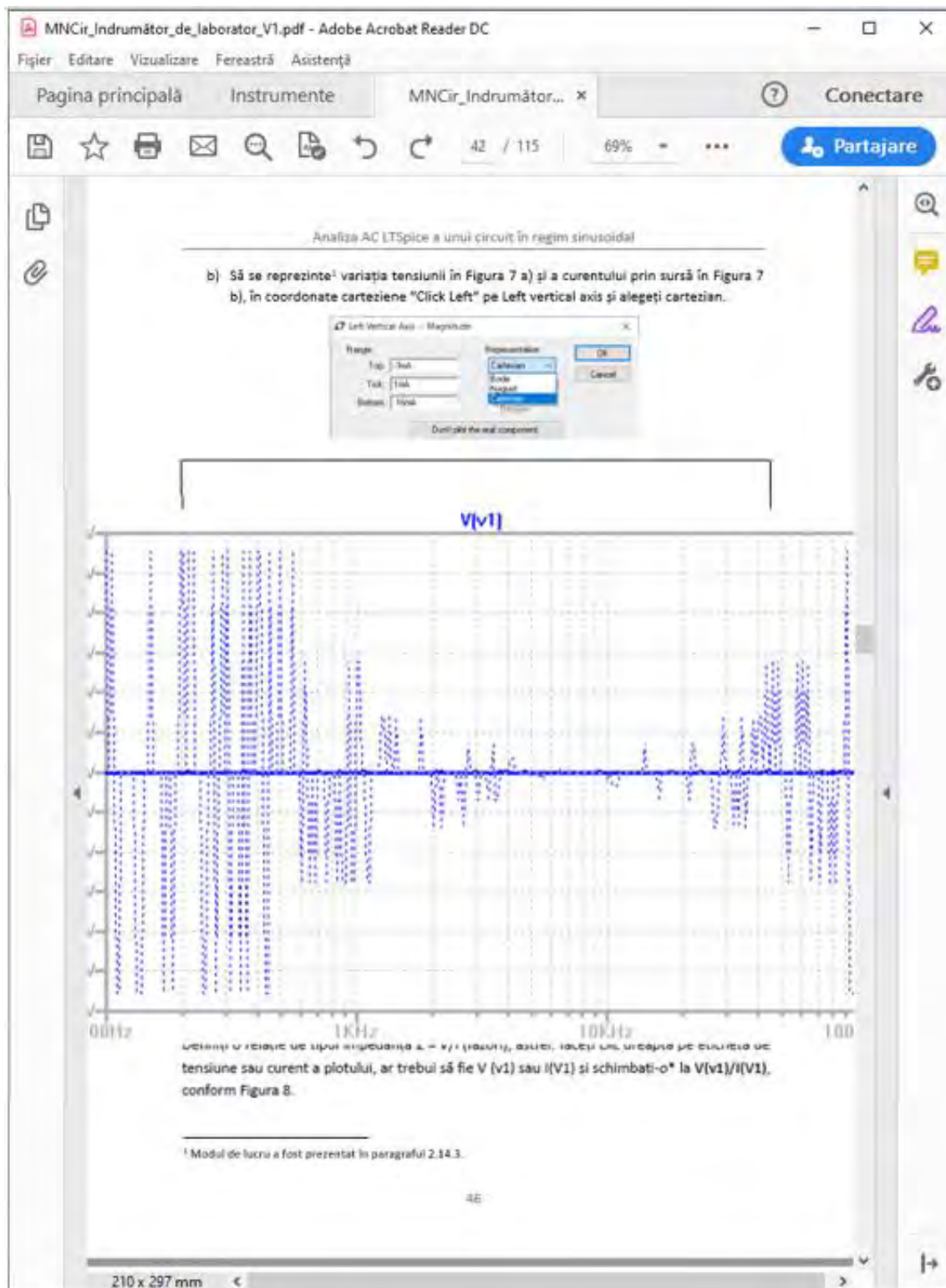
1. Se deschide acest îndrumător cu ajutorul programului Adobe Acrobat Reader DC® și se deschide la pagina unde trebuie inclusă figura, a se vedea ca exemplu figura următoare.



2. Se selectează figura dorită din **LTSpice** și se copiază în **Clipboard** (fie cu facilitățile oferite de sistemul de operare sau cu cele oferite de interfață prin **LTSpice: Tool→Copy bitmap to Clipboard**).



3. Cu ajutorul comenzii "**Ctrl+V**" sau din interfața Adobe Acrobat Reader DC®, **Editare→Lipire**, se aplică figura copiată în **Clipboard** in documentul pdf, a se vedea figura următoare.



4. Se trage cu ajutorul cursorului mouse-ului de colțurile figurii, se ajustează și se mută figura astfel încât să se potrivească la mărimea și poziția chenarului rezervat în document, a se vedea figura următoare.

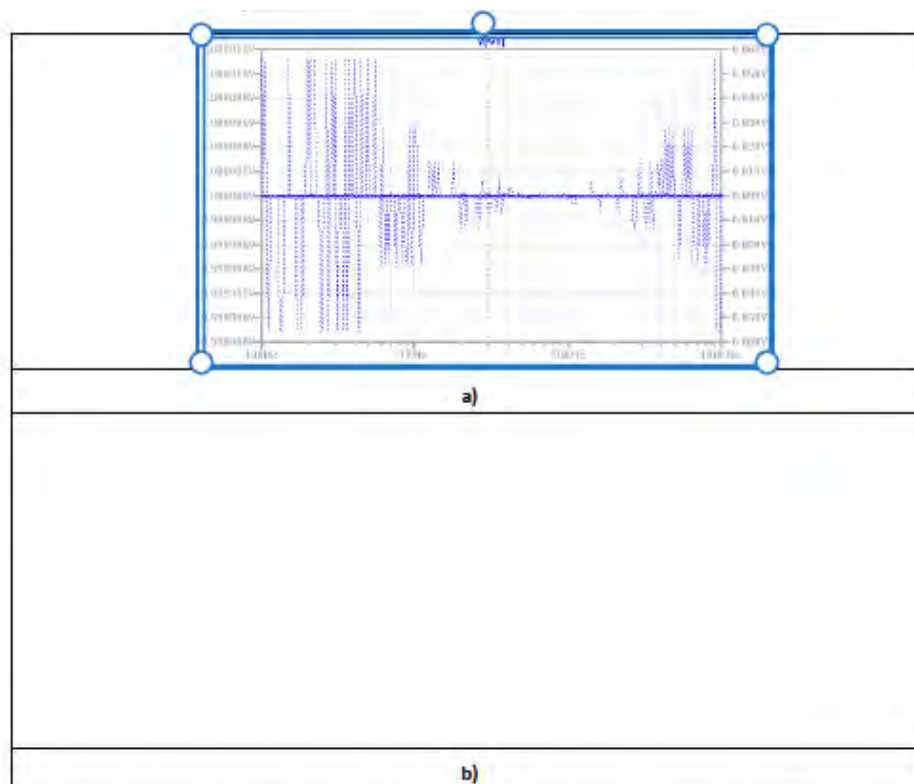
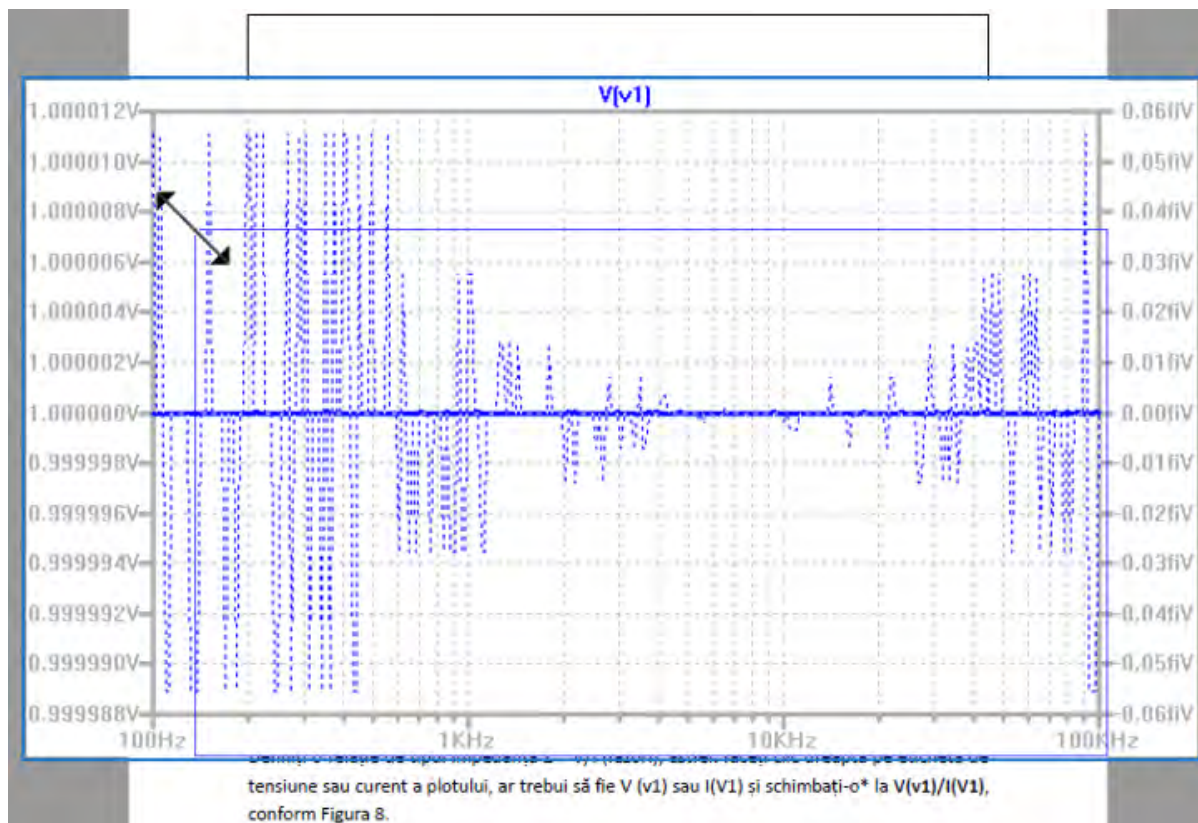


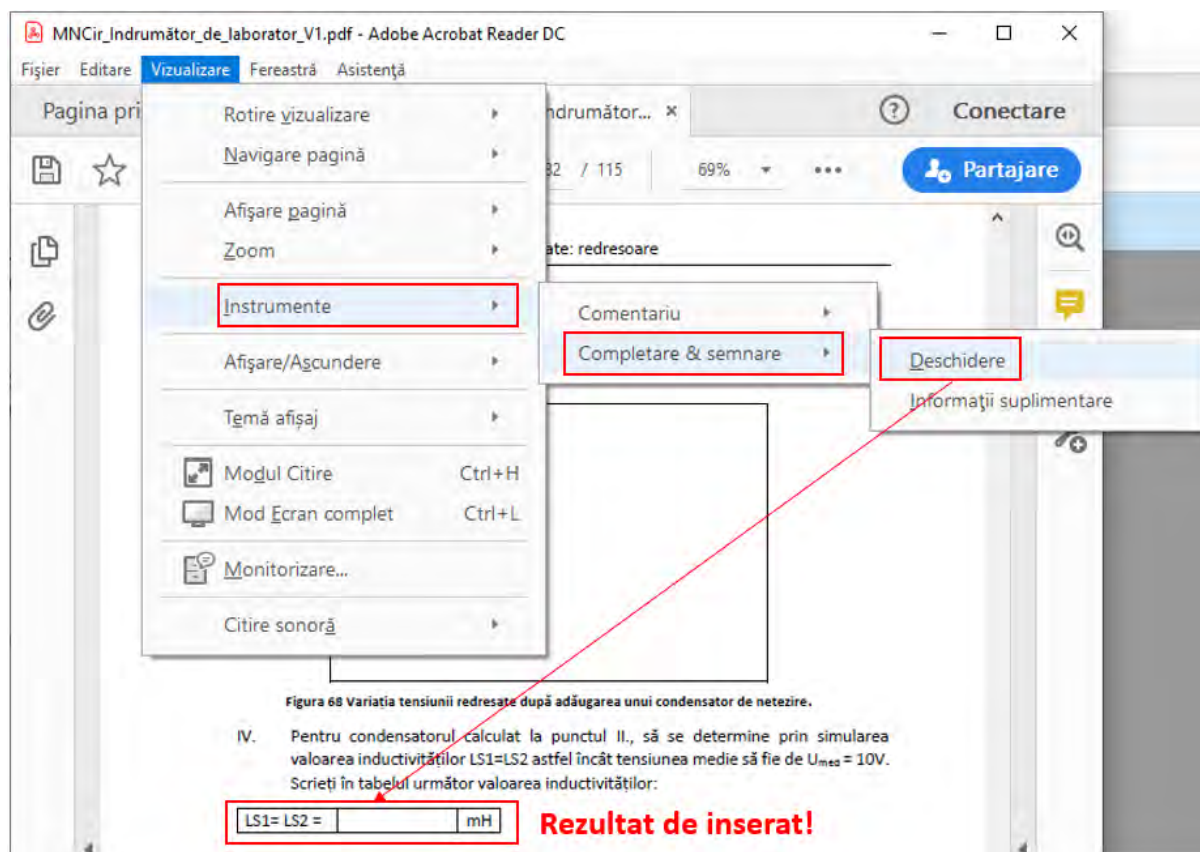
Figura 7 a) Variația tensiunii la "Label Net" v1 și b) variația curentului prin sursă.

5. Se salvează documentul PDF cu ajutorul comenzilor **Ctrl+S** sau **Shift+Ctrl+S**.


2.14.3.2 Inserarea de text cu rezultatele simulărilor

Sunt secțiuni în acest document unde se cere introducerea mărimilor calculate ca valori, sub formă de text.

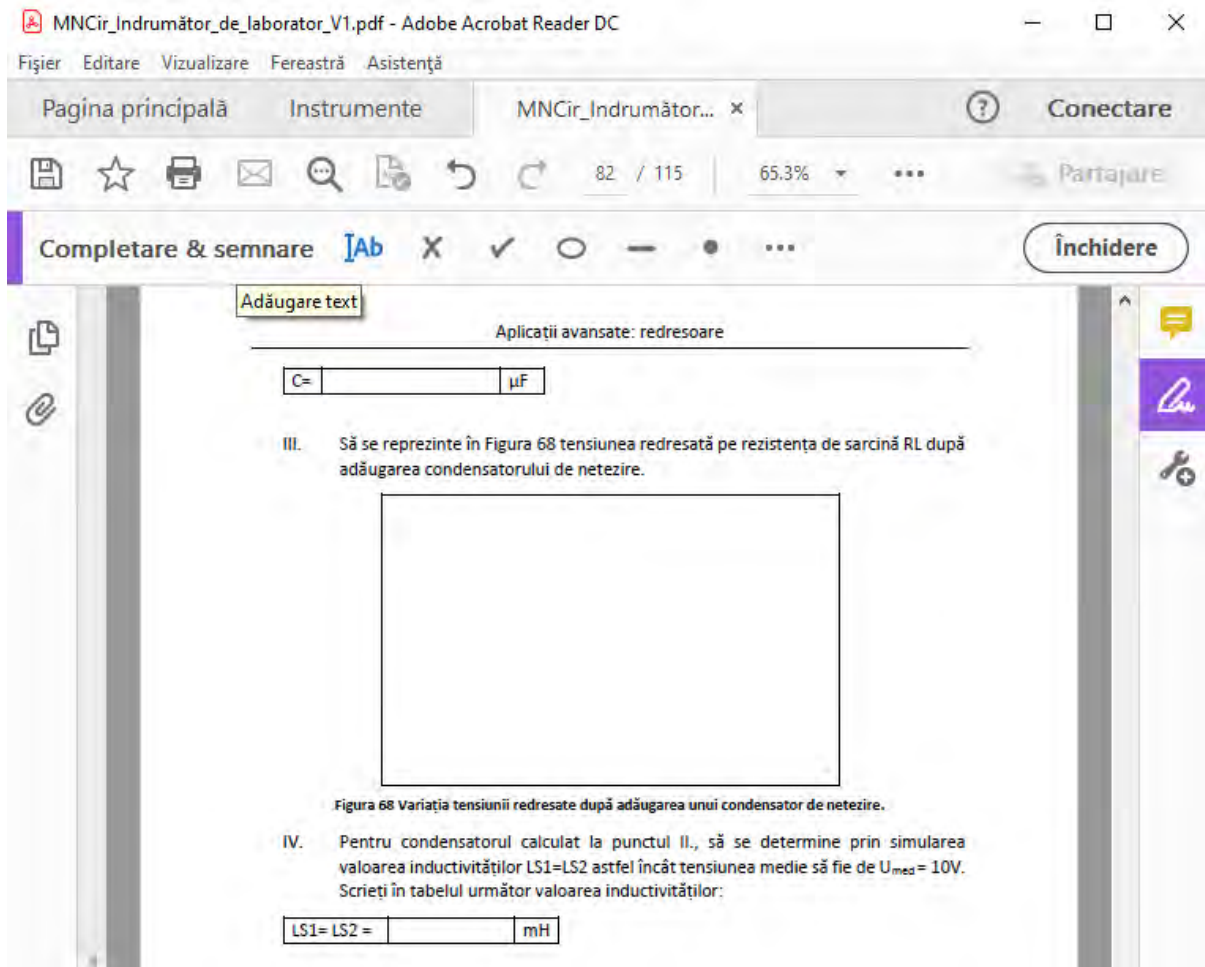
Acest lucru este posibil cu ajutorul instrumentului **Completare & semnare (Fill & sign)** din Acrobat Reader DC.



1. Se selectează opțiunea **Completare & semnare (Fill & sign)**

și se alege din bara de meniu "adăugare text" , a se vedea figura următoare.

Definirea unei scheme electrice noi în LTSpice, rularea și extragerea rezultatelor



2. Cu ajutorul cursorului "adăugare text" **IAb**, se face click în căsuța de inserare a rezultatului în format text și se introduce textul dorit, a se vedea următoarele două figuri:

- IV. Pentru condensatorul calculat la punctul II., să se determine prin simularea valoarea inductivităților $LS1=LS2$ astfel încât tensiunea medie să fie de $U_{med} = 10V$. Scrieți în tabelul următor valoarea inductivităților:

LS1= LS2 = **IAb** mH

- IV. Pentru condensatorul calculat la punctul II., să se determine prin simularea valoarea inductivităților $LS1=LS2$ astfel încât tensiunea medie să fie de $U_{med} = 10V$. Scrieți în tabelul următor valoarea inductivităților:

LS1= LS2 = Introduceți text mH

3. Se salvează documentul PDF cu ajutorul comenzilor **Ctrl+S** sau **Shift+Ctrl+S**.

3 Analiza AC LTSpice a unui circuit în regim sinusoidal

3.1 Analiza de tip AC

Să se utilizeze LTSpice pentru determinarea curenților din ramurile circuitului din Figura 1, cu Sursele de tensiune sinusoidala au următoarele valori: $v_1(t) = 10 \cos(1000 t)V$ și $v_2(t) = 20 \cos(1000t - 30^\circ) V$

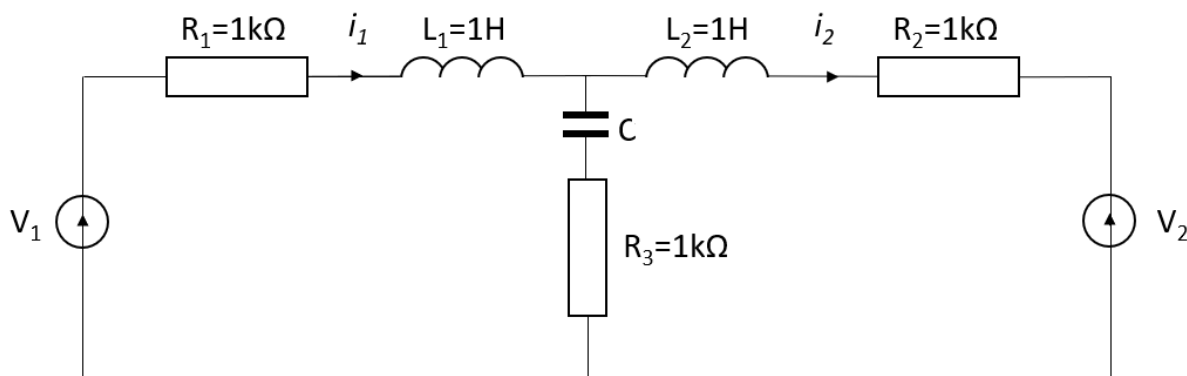


Figura 1 Schema circuitului de rezolvat.

Rezolvare:

Se construiește circuitul LTSpice din, Figura 2 conform instrucțiunilor de la capitolul 1 și "Introducere_LtSpice.mp4".

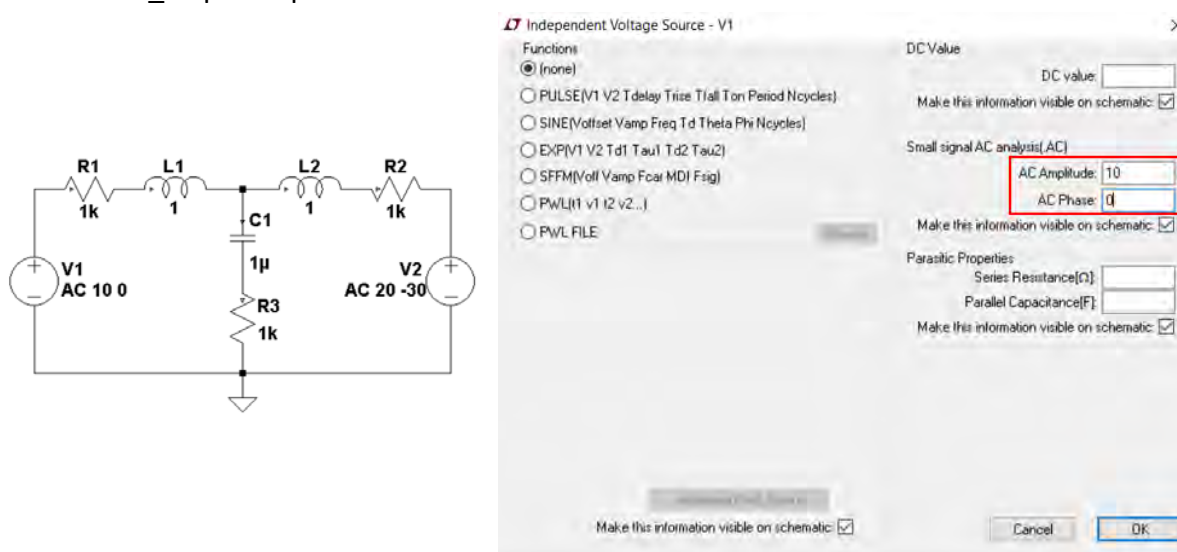


Figura 2 Circuitul LTSpice și setarea sursei de tensiune v1.

Setările sursei de tensiune $v_1(t)$ sunt afișate în Figura 2. Observați că fila butonului radio **Functions** nu a fost selectată. În analiza AC doar valorile AC **Amplitude** și **Phase AC** au vreun efect asupra simulării. Toate celelalte valori sunt ignorate în timpul analizei AC. Rețineți, de asemenea, că nu intrăm într-o frecvență de simulare pentru această aplicație. Amplitudinea AC și faza AC sunt de 10 V, respectiv 0° .

După setarea surselor de tensiune se rulează analiza de curent alternativ. Faceți clic pe pictograma **Run** și va apare fereastra de dialog **Edit Simulation Command** din Figura 3. Selectați fila **AC Analysis**. Analiza AC se poate face pentru una sau mai multe frecvențe. Pentru această problemă analiza se realizează la frecvență (1000 rad/s), așa că selectați **List** din meniul derulant **Type of Sweep**. În zona de text din partea de jos a ferestrei adăugați „{1000 / (2 * pi)}” la comanda de simulare, Figura 3.

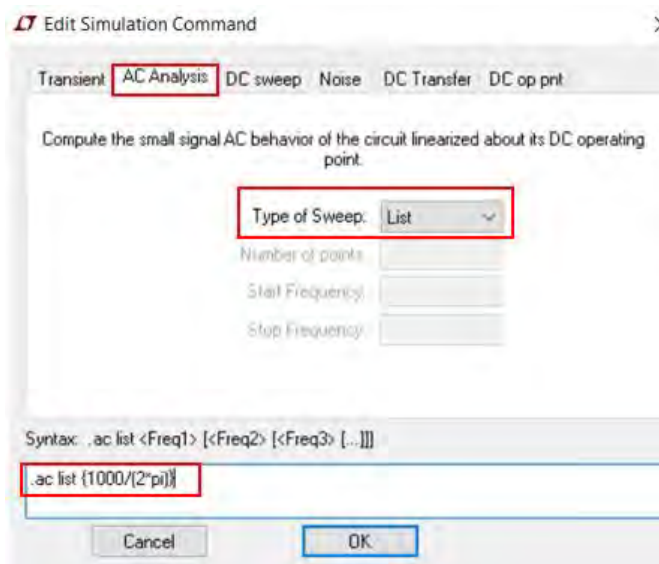


Figura 3 Setarea analizei AC.

- Rețineți că LTspice IV așteaptă frecvențe în Hertz, nu rad / sec. Se putea introduce frecvența direct în Hz dar LTspice poate face conversia singur pe baza operației $1000 (2 * \pi)$.
- Expresia de calculat trebuie să fie introduse între acolade { }.

După apăsarea butonului OK, se efectuează simularea și ar trebui să apară o fereastră similară cu cea din Figura 4.

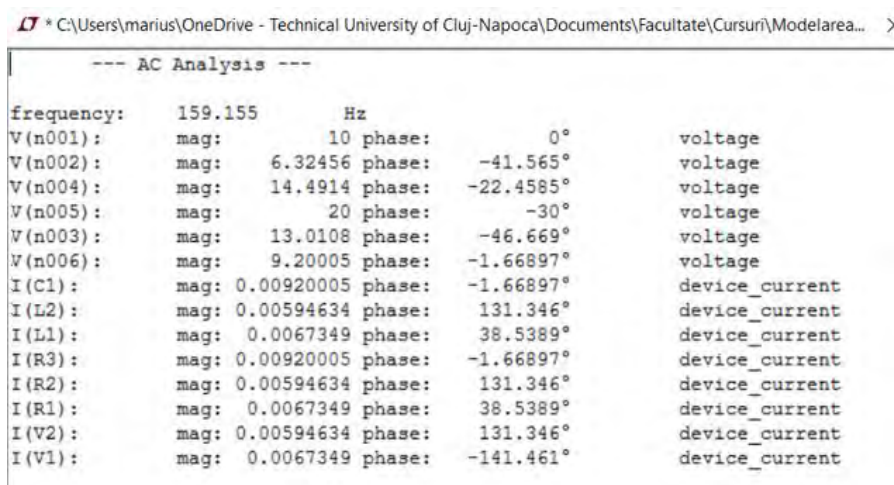


Figura 4 Rezultatele simulării.

3.2 Măsurarea impedanței cu ajutorul LTSpice

- I. Să se realizeze in LTSpice circuitul din Figura 5, cu următorii parametrii:

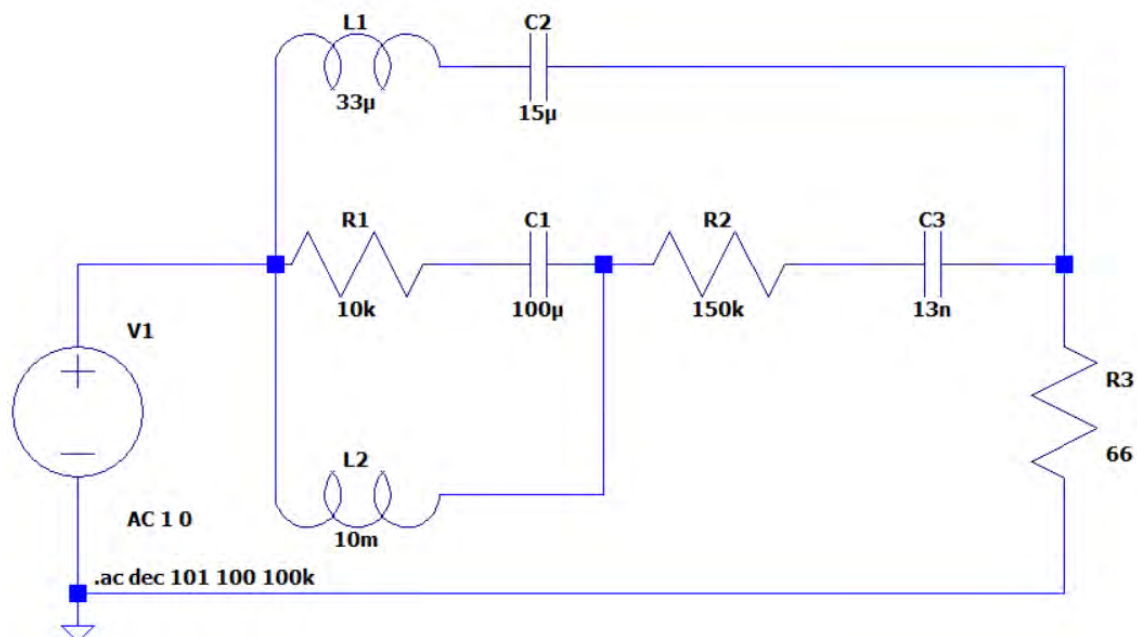
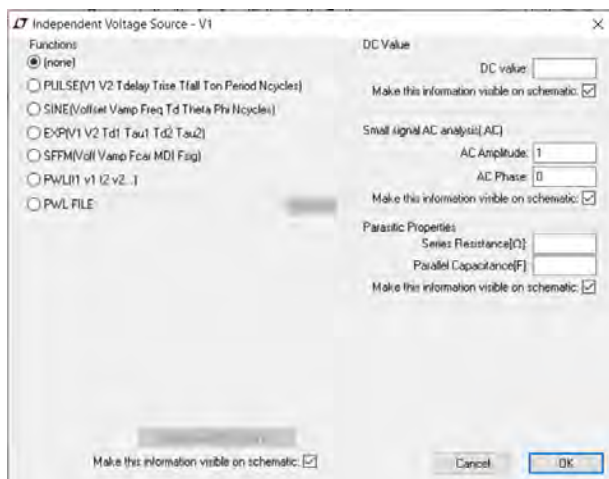
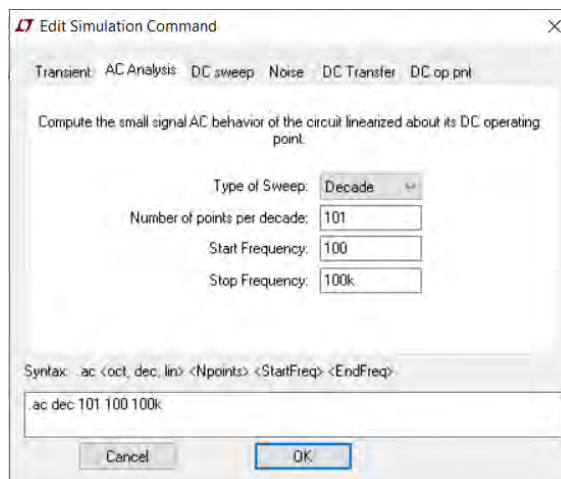


Figura 5 Circuitul de test.

Se setează o sursă AC cu amplitudinea de 1V și faza 0, Figura 6 a), și o analiză de tipul **.ac dec 101 100 100k**, frecvența este baleiată între 100Hz și 100kHz cu 101 puncte pe decadă Figura 6 b).



a)



b)

Figura 6 a) parametrii sursei de tensiune, b) parametrii analizei AC.

- a) Să se adauge o etichetă de rețea "Label Net" v1 la borna de legătură a sursei de tensiune cu circuitul (deasupra sursei de tensiune)

- b) Să se reprezinte¹ variația tensiunii în Figura 7 a) și a curentului prin sursă în Figura 7 b), în coordonate carteziene "Click Left" pe Left vertical axis și alegeți cartezian.

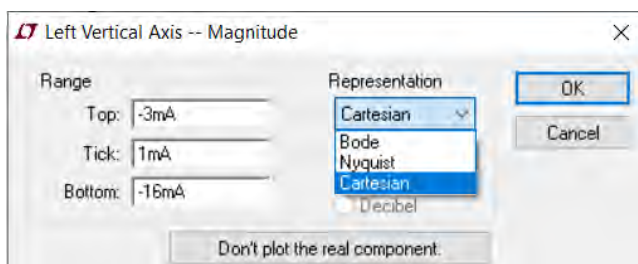


Figura 7 a) Variația tensiunii la "Label Net" v1 și b) variația curentului prin sursă.

Rezultatele obținute nu par adecvate pentru găsirea impedanței din cauză că oricare dintre punctele de măsură simultană ale tensiunii și curentului dau o mulțime de rezultate.

Definiți o relație de tipul impedanță $Z = V/I$ (fazori), astfel: faceți clic dreapta pe eticheta de tensiune sau curent a plotului, ar trebui să fie $V(v1)$ sau $I(V1)$ și schimbați-o* la $V(v1)/I(V1)$, conform Figura 8.

¹ Modul de lucru a fost prezentat în paragraful 2.14.3.



Figura 8 Setarea relației pentru impedanță.

*Când schimbați această zonă puteți defini o expresie mai complexă, cum ar fi $(V(v1) - V(v2)) / (I(v1) - I(v3))$, etc. obiectivul este să fie doar V/I ca să obțineți un termen de tip impedanță.

c) Să se reprezinte în Figura 9 variația impedanței în funcție de frecvență.

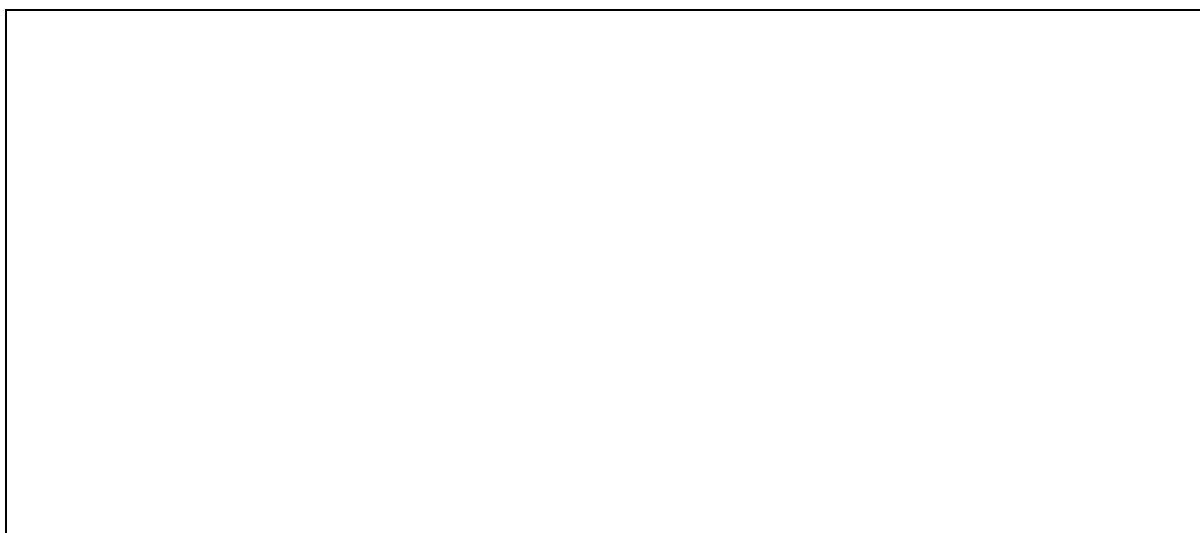


Figura 9 Variația impedanței în funcție de frecvență.

După ce ați convertit graficul în impedanță, poate fi destul de complicată citirea unei soluții exacte la diferite frecvențe. Faceți clic dreapta pe eticheta graficului ($V(v1)/I(V1)$) și selectați un cursor sub cursorul atașat, cursoarele 1 și 2. Astfel se pot măsura în mai multe puncte impedanțele.

d) Să se reprezinte în Figura 10, capturile de ecran ale cursoarelor ce reprezintă impedanța (valorile reale și imaginare) circuitului la a) 200Hz și la b) 10kHz.

a)	b)

Figura 10 Capturile de ecran cu valorile la cursor a impedanței circuitului la a) 200Hz și b) la 10kHz.

3.3 Temă

I. Să se reprezinte în complex simplificat următoarele mărimi sinusoidale:

b. $y(t) = 120\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$

c. $y(t) = 100 \sin(\omega t + \frac{\pi}{4})$

Rezolvare (slide-uri 37-38 [7]), [8], [9].

a. $\underline{Y} = 120e^{j(\frac{\pi}{2})} = 120 \left(\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + j \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \right) = 120(0 + j1) = 120j$

b. $\underline{Y} = \frac{100}{\sqrt{2}} e^{j(\frac{\pi}{4})} = \frac{100}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + j \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = 50 + 50j$

II. Să se rezolve circuitul din Figura 11 utilizând oricare din metodele cunoscute (teoremele lui Kirchhoff, metoda tensiunilor nodale, curenților ciclici, etc.) și comparați cu rezultatele simulării LTSpice. Date numerice: $R_2 = 4 \text{ } [\Omega]$, $R_3 = R_5 = 2 \text{ } [\Omega]$, $\omega = 1 \text{ Hz}$, $\omega L_4 = \frac{1}{\omega C_1} = 1 \text{ } [\Omega]$, $\underline{E}_1 = (50+50j) \text{ } [V]$ și $\underline{E}_3 = 20 \text{ } [V]$.

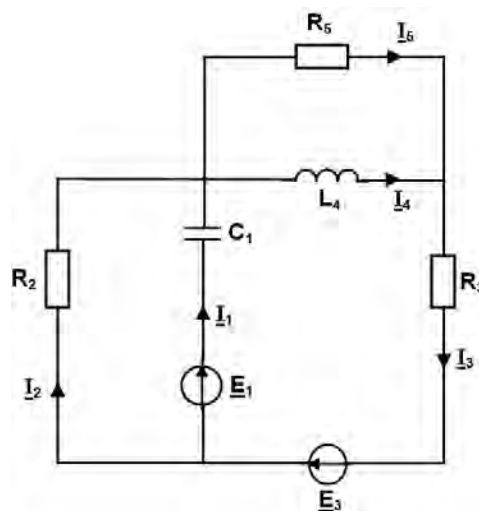


Figura 11 Circuitul de analizat.

III. Tensiunea alternativă sinusoidală aplicată la bornele unui circuit are expresia $u(t) = 60 \sin(\omega t + \frac{\pi}{3})$ V iar curentul care se stabilește prin circuit este $i(t) = 3 \sin(\omega t - \frac{\pi}{6})$ A.

- Să se reprezinte în complex nesimplificat tensiunea u și curentul i .
- Să se reprezinte în complex simplificat tensiunea u și curentul i .
- Să se calculeze impedanța complexă \underline{Z} și admitanța complexă \underline{Y} .
- Să se calculeze puterea aparentă complexă \underline{S} .

3.4 Temă

Inserarea figurilor în versiunea electronică a acestui document

4 Modelarea circuitelor trifazate

- I. În cazul unui circuit trifazat simetric și perfect echilibrat fiecare conductor este parcurs de un curent alternativ cu aceeași frecvență și amplitudine. Aceasta poate fi modelat prin plasarea a trei generatoare de tensiune sinusoidală ca în Figura 12.

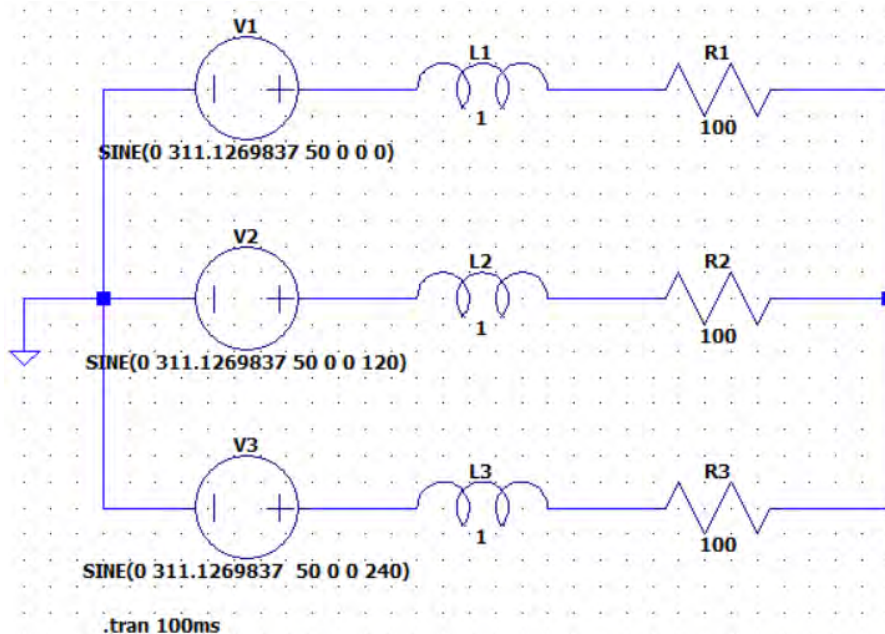


Figura 12 Circuit trifazat.

Amplitudinea tensiunii este dată de $\sqrt{2} \cdot 220V = 311.127V$. Frecvența este de 50 Hz iar fiecare sursă de tensiune are un defazaj de 120 grade față de precedenta.

- I.1. Să se reprezinte variația tensiunilor și curenților prin circuit. Cu cât sunt defazați curenții față de tensiuni pe fiecare fază în parte?
- I.2. Să se introducă un fir neutru cu rezistența de 1Ω și să se reprezinte variația tensiunilor și curenților prin circuit.
- I.3. Să se însereze firul de la punctul 3.2 cu o bobină cu inductivitatea de $0.1mH$ și să se reprezinte variația tensiunilor și curenților prin circuit. Care sunt valorile prin firul neutru?
- I.4. Să se modifice inductivitatea $L1 = 1.5H$ și $R1 = 1000\Omega$ și să se reprezinte variația tensiunilor și curenților prin circuit. Care sunt valorile prin firul neutru?
- I.5. Să se înlocuiască bobinele de la punctul 3.1 cu condensatoare cu valoarea de $10F$ și să se reprezinte variația tensiunilor și curenților prin circuit. Cu cât sunt defazați curenții față de tensiuni pe fiecare fază în parte?
- I.6. Să se reanalizeze punctele 3.1 – 3.5 în cazul conexiunii triunghi atât a generatorului cât și a receptorului.

II. Circuitul trifazat reprezentat în Figura 13 este alimentat de un generator a cărui t.e.m. formează un sistem simetric de succesiune directă. Se cunosc: valoarea efectivă a t.e.m. a generatorului este 120V, $f=50\text{Hz}$, $R_1=R_2=R_3=1/(\omega C_4)=30\ \Omega$, $\omega M=1/(\omega C_1)=1/(\omega C_2)=1/(\omega C_3)=40\ \Omega$ (unde M este inductivitatea mutuală dintre cele două bobine L1 și L2) și $\omega L_1=\omega L_2=50\ \Omega$.

II.1. Să se determine prin calcul analitic:

- Valorile efective ale curenților de fază a generatorului;
- Mărimile de la punctul (a) considerând că se inversează conexiunile la bornele înfășurării fazei 1 a generatorului

II.2. Să se realizeze schema în LTSpice să se rezolve punctele a) și b) de la punctul anterior pentru frecvența de $f=50\text{Hz}$ și să se reprezintă variația curenților și a tensiunilor prin respectiv pe laturile de circuit.

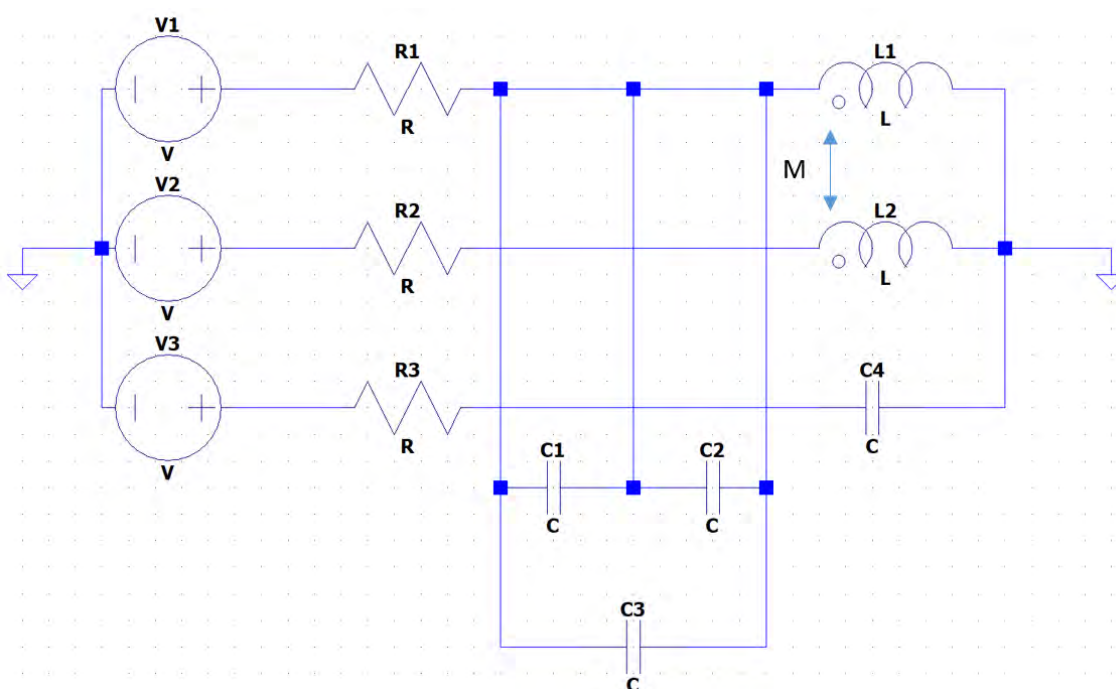


Figura 13 Circuit trifazat cu baterie de compensare.

II.3. Elemente ajutătoare:

- Inductivitatea mutuală M se poate descompune într-o schemă echivalentă, conform, Figura 14, eliminându-se astfel cuplajul;
- Schema triunghi se înlocuiește cu o schemă echivalentă în stea.

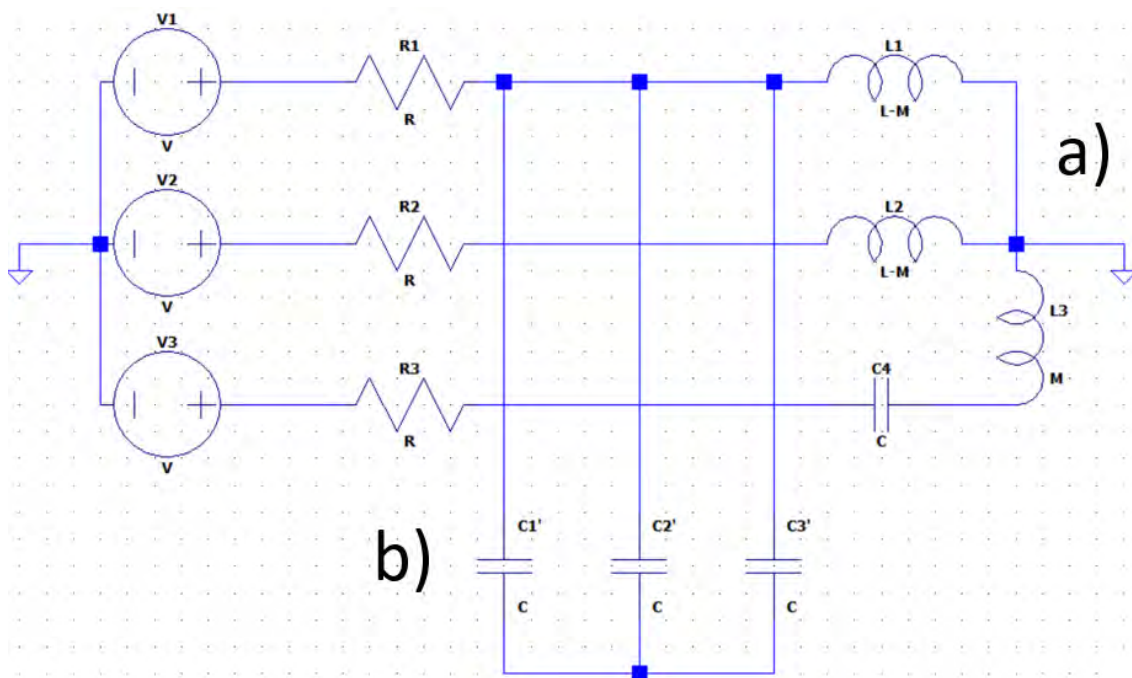


Figura 14 Circuitul echivalent după eliminarea a) cuplajului și b) înlocuirea conexiunii Δ cu Y.

5 Bobine cuplate în LTSpice

Fluxul magnetic produs de două bobine L_1 și L_2 cuplate prin intermediul inductivității mutuale L_m se definește ca:

$$\begin{cases} \psi_1 = L_{11}i_1 + L_m i_2 \\ \psi_2 = L_m i_1 + L_{22}i_2 \end{cases} \quad (1)$$

Sub formă fazorială sistemul de ecuații devine:

$$\begin{cases} \underline{V}_1 = j\omega L_{11}\underline{I}_1 + j\omega L_m \underline{I}_2 \\ \underline{V}_2 = j\omega L_m \underline{I}_1 + j\omega L_{22}\underline{I}_2 \end{cases}, \quad (2)$$

unde

$$L_m = k\sqrt{L_{11}L_{22}}, \quad (3)$$

iar k este factorul de cuplaj.

1.1. Se definește circuitul din Figura 15.

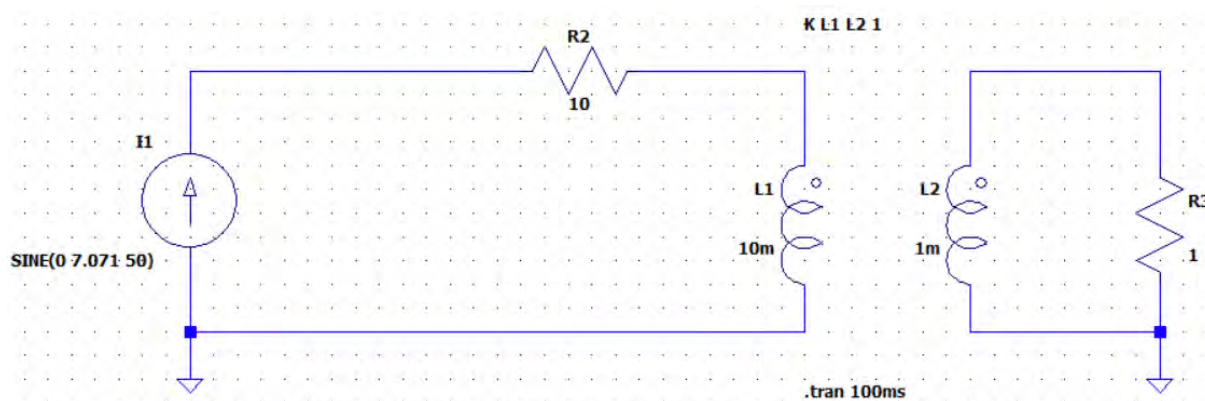


Figura 15 Circuit cu bobine cuplate.

1.2. În LTSpice bobinele cuplate se definesc cu ajutorul tastei "F2" urmată de tastarea "ind2". Figura 16 indică cele două tipuri de bobine din baza de date LTSpice.

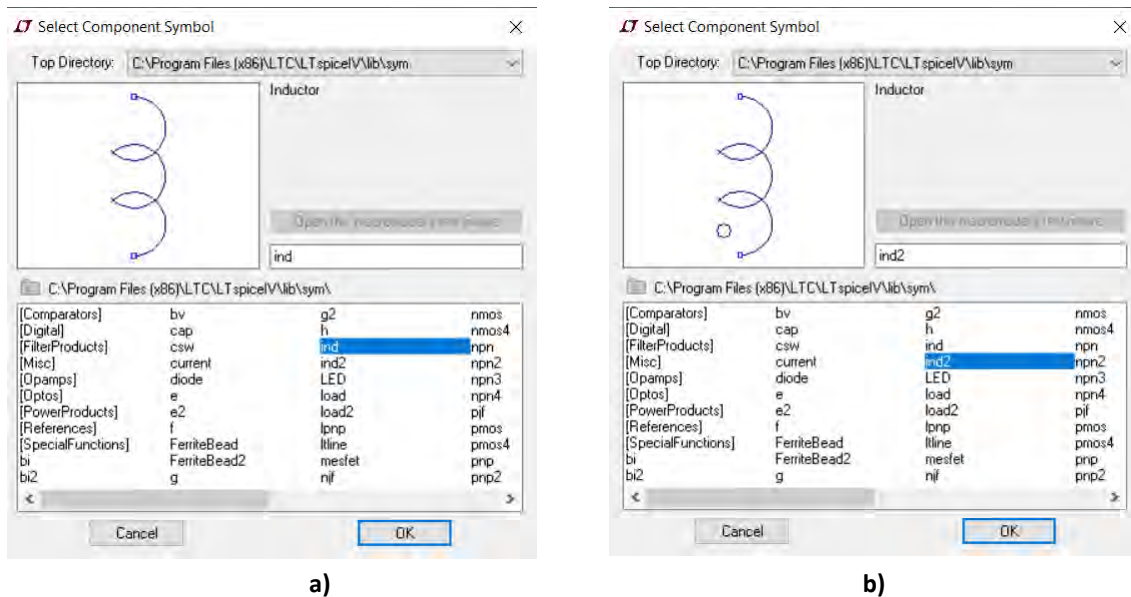


Figura 16 Tipuri de bobine in LTSpice: a) bobina fără cuplaj, b) bobina cu cuplaj.

1.3. O altă modalitate este alegerea din interfață "ind" simplu și bifarea "check box"-ului care indică începutul înfășurării, a se vedea Figura 17:

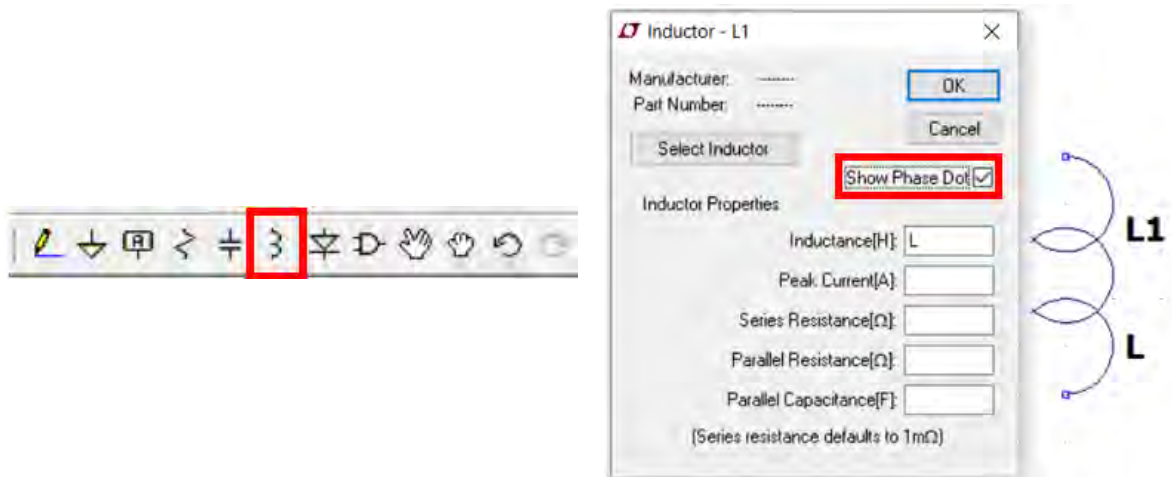


Figura 17 Indicarea începutului înfășurării.

1.4. Cuplajul mutual dintre bobine se definește cu ajutorul directivei LTSpice, "SPICE directive".

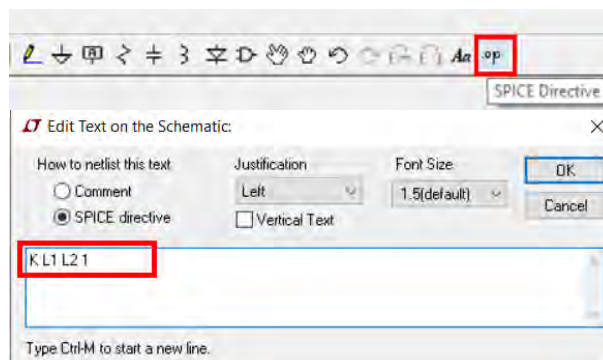


Figura 18 Definirea cuplajului mutual cu ajutorul "SPICE directive".

- 1.5. Calculul puterii consumate pe rezistența R3. Se apasă tasta "Alt", cursorul fiind deasupra rezistenței R3. Cursorul se transformă în termometru, iar în grafic apare puterea sinusoidală consumată pe R3.

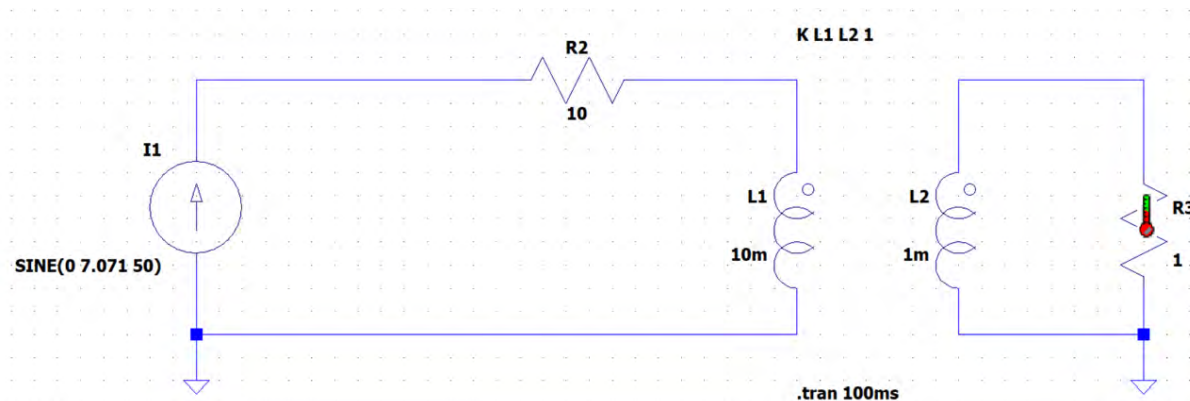


Figura 19 Măsurarea puterii.

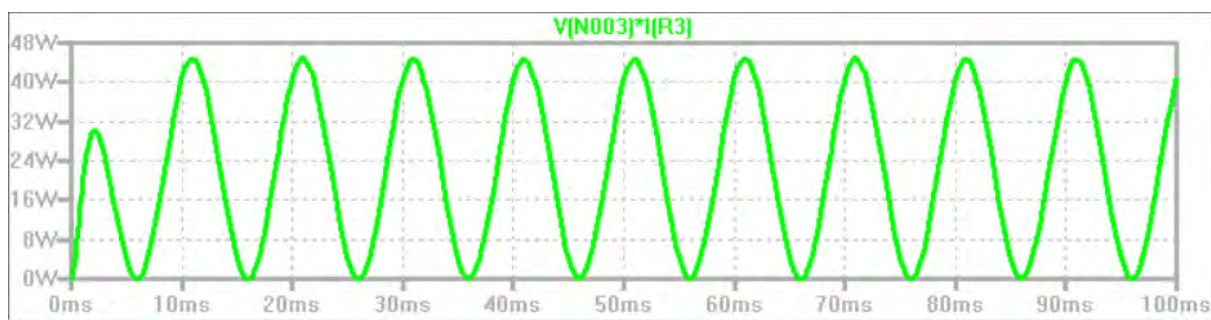


Figura 20 Puterea pe R3.

2. Să se repete exercițiul anterior pentru circuitul din Figura 21.

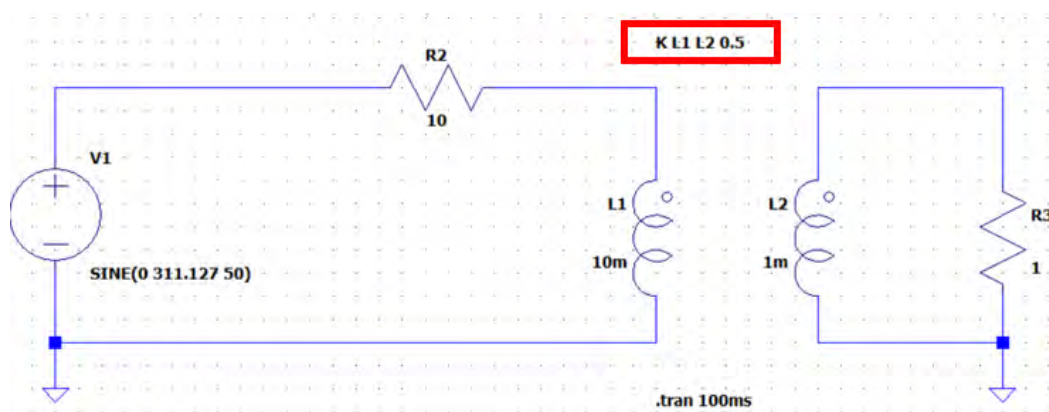


Figura 21 Exercițiu, circuit cu bobine cuplate.

5.1 Modelarea unui transformator monofazat

În LTSpice un transformator se definește din mai multe bobine cuplate. Într-un transformator ideal, puterea din primar va fi transferată integral (100%) fără pierderi către secunda. În realitate, există o reducere a puterii transferate către secundar și aceasta se datorează pierderilor datorate cuplajului magnetic dintre înfășurările primare și secundare. Randamentul cuplajului se va reprezenta în LTSpice cu ajutorul **"SPICE directive"** prin parametrul K. În cazul unui cuplaj perfect $K=1$, pentru un cuplaj imperfect $K < 1$.

Figura 22 prezintă un model de transformare realizat LTSpice, unde L1 și L2 sunt inductivitatea primarului respectiv a secundarului, iar R1 este rezistența din primar, necesară pentru rularea simulării. Aceasta poate fi rezistența primară la înfășurare. V1 este sursa de alimentare sinusoidală, R2 este sarcina. Ambele nu fac parte din model.

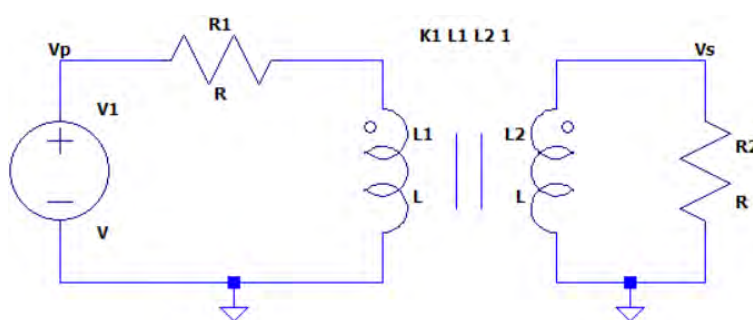


Figura 22 Model de transformator în LTSpice.

Raportul dintre înfășurări, determină raportul sau factorul de transformare (T) al tensiunilor. În cele mai multe cazuri se consideră cunoscută tensiunea primară, de exemplu $V_p=220V$ în valoarea efectivă (RMS). Dacă se dorește în secundar o tensiune efectiv $V_s=10V$, atunci raportul înfășurărilor este:

$$T = \frac{V_P}{V_S} = \frac{220}{10} = 22 \text{ înfășurări.} \quad (4)$$

Relația dintre inductivitatea primară și cea secundară este dată de relația (5):

$$T^2 = \frac{L_P}{L_S} = \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2, \quad (5)$$

Unde L_P și L_S este inductivitatea înfășurării primare respectiv secundare. Astfel pentru o inductivitate în primar de c.a. $484\mu H$, în secundar va fi nevoie de o inductivitate de:

$$L_S = \frac{L_P}{T^2} = \frac{L_P}{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2} = \frac{484}{22^2} = 1\mu H \quad (6)$$

Astfel modelul transformatorului din Figura 22 se reprezintă cu următorii parametri din Figura 23:

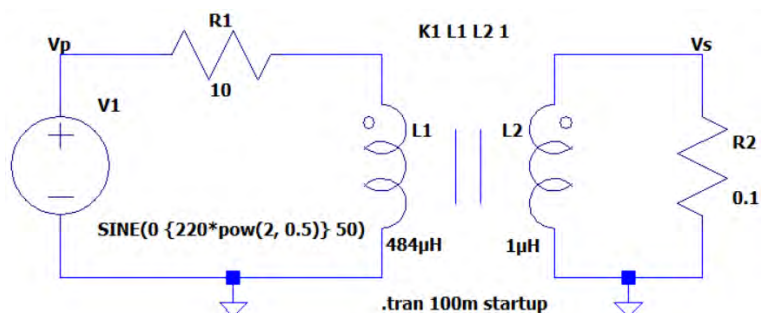


Figura 23 Modelul LTSpice pentru simulare.

Observați o nou mod de scriere, a valorii absolute a tensiunii sursei de alimentare, $\{220*\text{pow}(2,0.5)\}$. Această expresie este egală cu $220\sqrt{2}=311.127\text{V}$, Figura 24. Regimul de lucru este tranzitoriu 100ms, cu pornirea semnalului din zero, Figura 21.

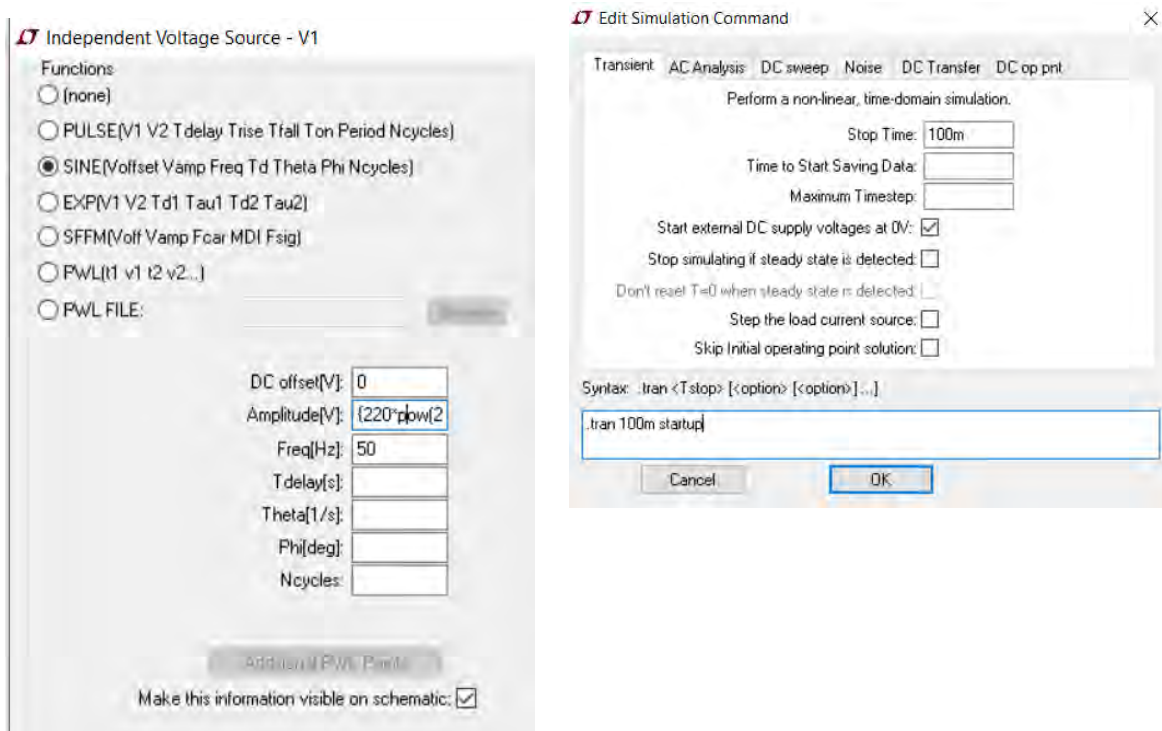


Figura 24 Setarea sursei de alimentare și a regimului de lucru.

- Să se reprezinte tensiunea în primar și în secundar. Care este valoarea maximă a fiecăreia?
- Să se reprezinte curentul în primar și în secundar. Care este valoarea maximă a fiecăruia?
- Să se dimensioneze corect inductivitățile din primar și din secundar și apoi să se repete punctele a și b pentru $R1=0.001\Omega$, $R2=1\Omega$ și $R2=1\text{k}\Omega$.
- Pentru transformatorul dimensionat corect la punctul c, să se reprezinte curenții și tensiunile din primar și secundar pentru $K=0.9$ și 0.5 ;
 - Cu cât cresc sau scad tensiunile și curenții din secundar?
 - Se modifică defazajul?

- e. Să se reprezinte curenții și tensiunile din primar și secundar pentru un cuplaj inversat și transformatorul dimensionat corect la punctul c.

5.2 Temă

Pornind de la modelul de transformator descris anterior definiți un transformator trifazat cu conexiunea Y/Y și Y/ Δ .

6 Circuite liniare în regim tranzitoriu

6.1 Circuitul R, L serie

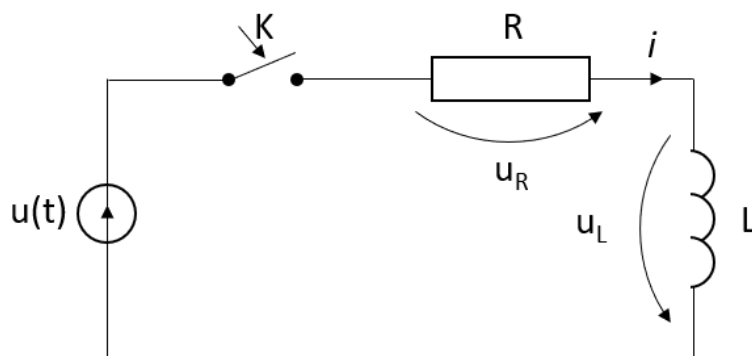


Figura 25 Circuit R, L serie.

Regimul tranzitoriu se găsește din suprapunerea regimului liber (l) peste regimul permanent (p).

$$i(t) = i_p + i_l. \quad (7)$$

Regimul permanenta este o soluție particulară a ecuației diferențiale (8) care se obține aplicând Teorema I a lui Kirchhoff circuitului din Figura 25 la închiderea întrerupătorului K:

$$Ri + L \frac{di}{dt} = u(t). \quad (8)$$

Regimul liber este soluția generală a ecuației diferențiale:

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0. \quad (9)$$

6.1.1 Conectarea circuitului R, L la o sursă de tensiune continuă E

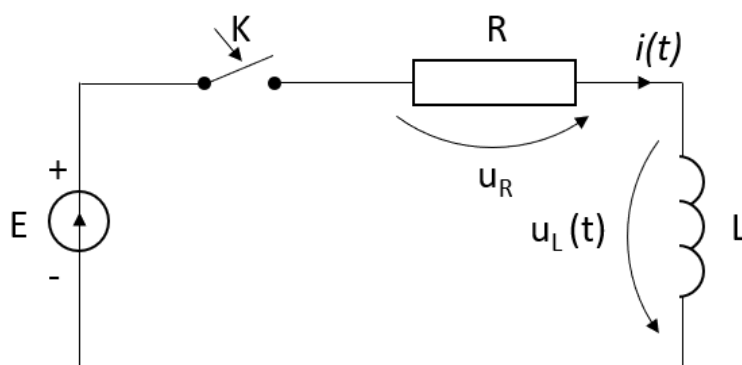


Figura 26 Conectarea la o sursă de curent continuu.

La închiderea comutatorului K din Figura 26, se stabilește prin bobină un curent crescător $i(t)$:

$$i(t) = i_p + (i_0 - i_{p0})e^{-\frac{R}{L}t}, \quad (10)$$

unde:

i_p - este curentul de regim permanent, care are aceeași formă cu tensiunea aplicată, $i_p = \frac{E}{R}$;

i_{p0} - valoarea curentului prin bobină, **după** comutație, la momentul $t = 0$, $i_{p0} = \frac{E}{R}$;

i_0 - valoarea curentului prin bobină, **înainte** de comutație, la momentul $t = 0$, $i_0 = 0$;

Forma finală a curentului prin bobină este dată de relația (11):

$$i(t) = \frac{E}{R} - \frac{E}{R}e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (11)$$

unde:

$\tau = \frac{L}{R}$ este constanta de timp a circuitului, $\left[\frac{L}{R}\right] = \frac{1H}{1\Omega} = \frac{1V \cdot 1s}{1\Omega \cdot 1A} = [s]$.

Tensiunea la bornele bobinei este dată de relația:

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = u_L(t) = E e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (12)$$

- I. Să se reprezinte în Figura 27 variația curentului și a tensiunii prin bobină la închiderea comutatorului K, considerând $E=10V$, $R=10\Omega$, $L=1mH$, $t_{final}=500\mu s$ pentru un pas de timp $\Delta t = 50 \mu s$, utilizând programul MS Excel.

a)	b)

Figura 27 Reprezentare în MS Excel a) a variației curentului prin bobină și b) a variației tensiunii la bornele bobinei, la închiderea comutatorului K.

- I. Să se compare rezultatele cu simularea circuitului în LTSpice.

II. Definirea circuitului în LTSpice, Figura 28.

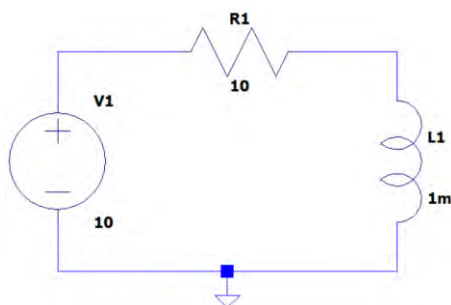
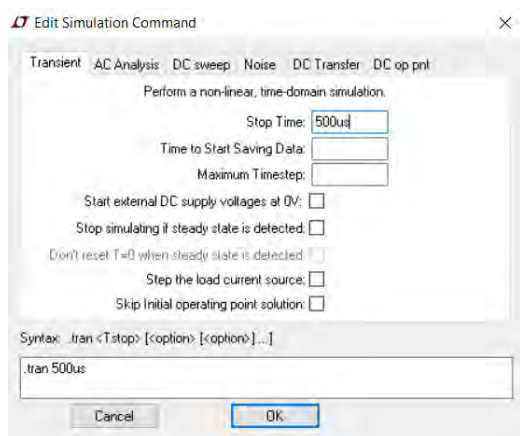
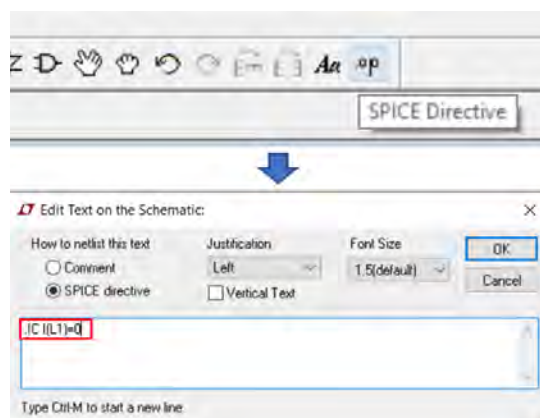


Figura 28 Circuitul LTSpice de încărcare.

III. Se setează regimului tranzitoriu, Stop Time = 500us, Figura 29 a). Se definește directiva Spice: .IC I(L1)=0 pentru impunerea condițiilor inițiale la $t = 0$, $I(L1) = 0$, Figura 29 b).



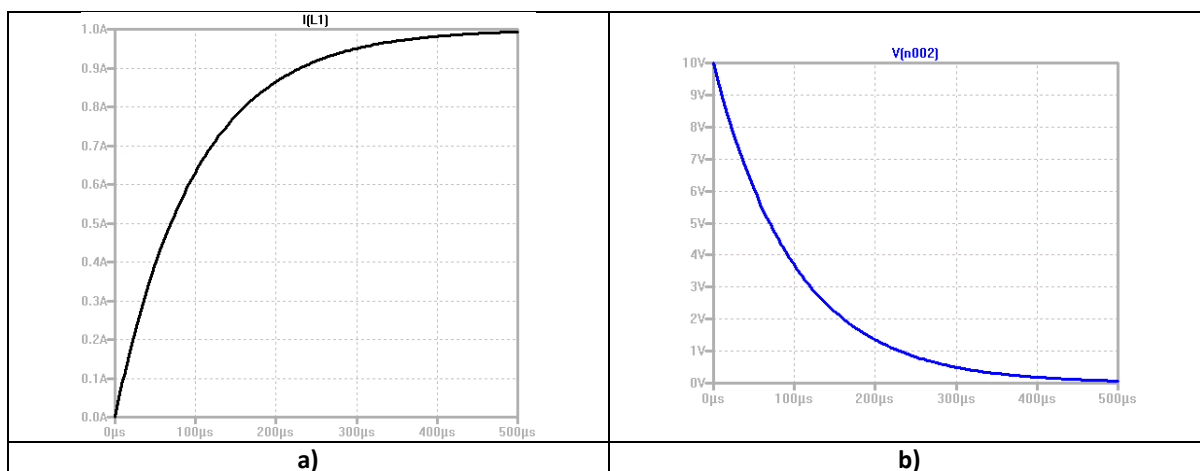
a)



b)

Figura 29 a) Editarea simulării, b) Definirea unei directive Spice pentru impunerea condițiilor inițiale ".IC I(L1)=0".

IV. Să se reprezinte variația curentului și a tensiunii simulate cu ajutorul LTSpice în Figura 30 (exemplu de captură din LTSpice conform instrucțiunilor de la paragraful 2.14.3).



a)

b)

Figura 30 Simulare LTSpice: a) a variației curentului prin bobină și b) a variației tensiunii la bornele bobinei, la închiderea comutatorului K.

6.1.2 Deconectarea circuitului R, L de la o sursă de tensiune continuă E

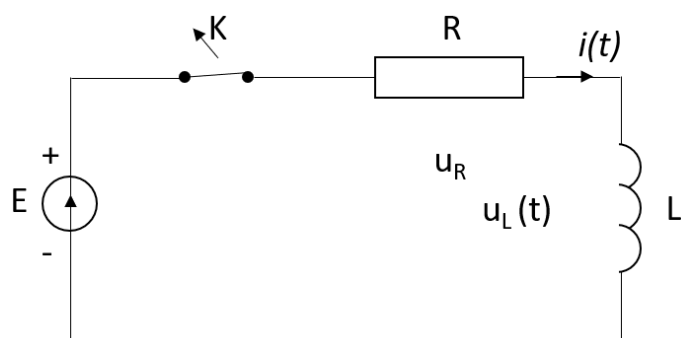


Figura 31 Deconectarea circuitului R, L de la sursa de tensiune.

După stabilirea regimului de lucru permanent ($t > \tau$), la deschiderea comutatorului K, al circuitului din Figura 31, curentul prin bobină este $i_0 = \frac{E}{R}$. Curentul de regim permanent se stabilește la $i_p = i_{p0} = 0$. Astfel, forma de variație a curentului prin bobină este dată de relația (13):

$$i(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (13)$$

- V. Să se reprezinte în Figura 32 variația curentului și a tensiunii prin bobină la deschiderea comutatorului K, pentru $t=500\mu\text{s}$, cu un pas de timp $\Delta t = 50 \mu\text{s}$, utilizând programul MS Excel.

a)	b)

Figura 32 Reprezentare în MS Excel a) a variației curentului prin bobină și b) a variației tensiunii la bornele bobinei, la deschiderea comutatorului K.

- VI. Să se compare rezultatele cu simularea circuitului în LTSpice.
 VII. Se definește directiva Spice: .IC I(L1)=1 pentru impunerea condițiilor inițiale la $t=0$, $I(L1) = 1$, Figura 33 a).

- VIII. Se rotește bobina pentru a stabili un curent pozitiv (de la 1 la 0A), Figura 33 b). Regimului tranzitoriu rămâne neschimbat Stop Time = 500us

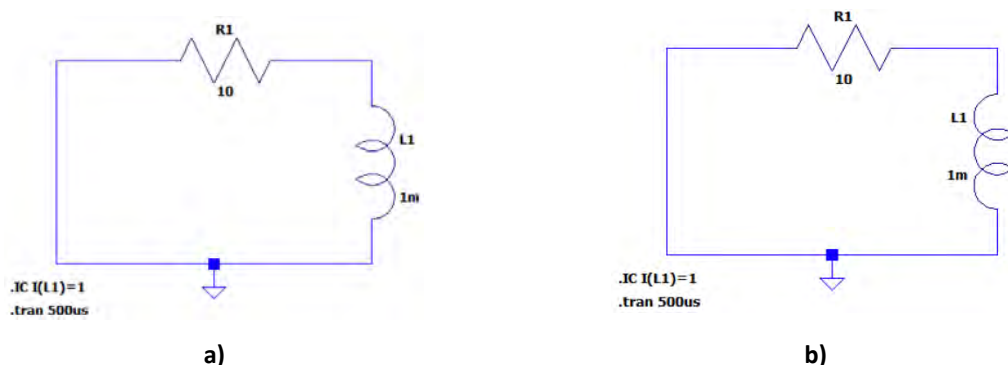


Figura 33 a) Circuitul R, L fără sursa de tensiune și curentul .IC I(L1)=1; b) circuitul cu bobina rotită pentru a avea o variație pozitivă a curentului.

- IX. Să se reprezinte variația curentului și a tensiunii simulate cu ajutorul LTSpice în Figura 34.

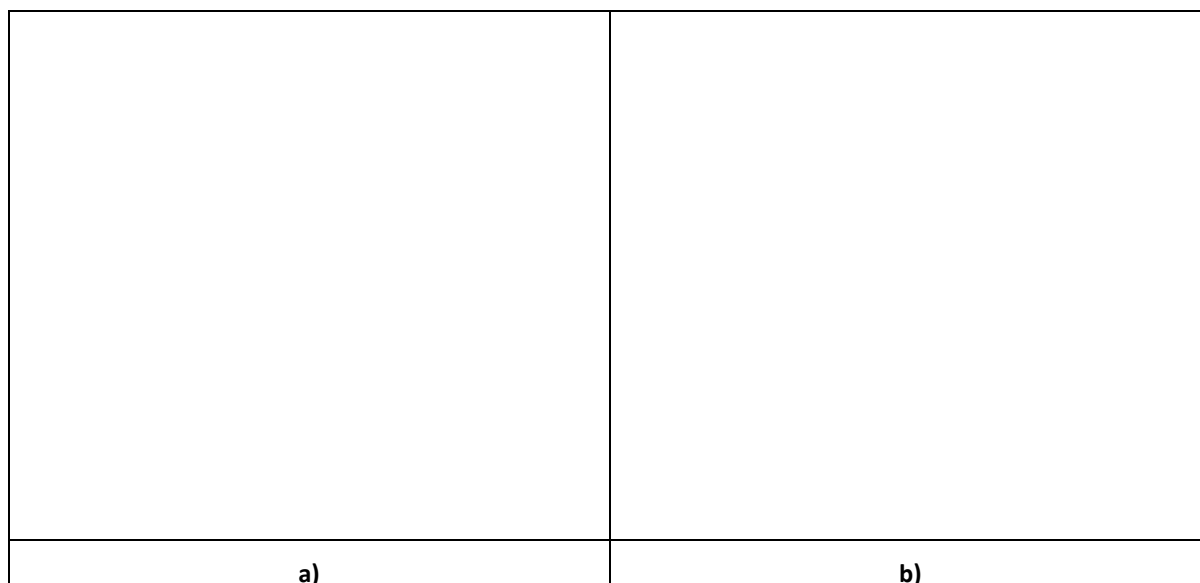


Figura 34 Simulare LTSpice a) variației curentului prin bobină și b) a variației tensiunii la bornele bobinei, la deschiderea comutatorului K.

6.1.3 Supratensiunea la deconectarea circuitului R, L de la o sursă de tensiune continuă E

La deschiderea lui K poate apare o scânteie (la bobine mai mari chiar arc electric) care se menține până când bobina se descarcă (toată energia magnetică se transformă în căldură prin R și arcul electric).

Fie ρ rezistența între contactele întreruptorului, (Figura 35), care echivalează cu arcul electric (descărcarea) ce se produce la deschidere $0 < \rho < \infty$:

$$i_p = \frac{E}{R + \rho} = i_{p0}, i_0 = \frac{E}{R} \Rightarrow i(t) = \frac{E}{R + \rho} + \frac{\rho E}{R(R + \rho)} e^{-\frac{R + \rho}{L}t} \quad (14)$$

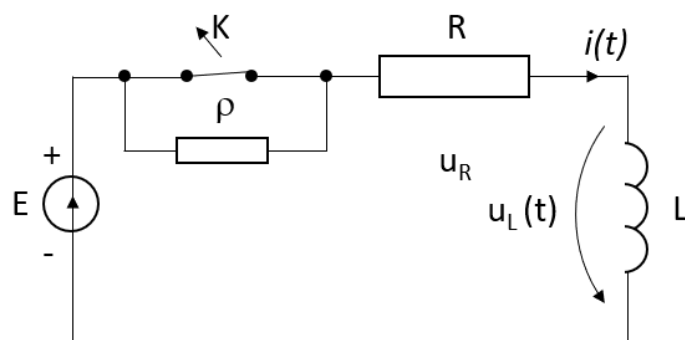


Figura 35 Rezistența arcului electric ρ la deconectarea circuitului R, L de la sursa de tensiune.

Tensiunea pe bobină la momentul $t=0$ (momentul deconectării) devine:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -\frac{\rho}{R} E e^{-\frac{R+\rho}{L}t} \quad (15)$$

Dacă $\frac{\rho}{R} = 10$ și $E = 10V \Rightarrow \frac{\rho}{R} E = 1000V$, adică apare pericolul de supratensiune la deschiderea circuitelor cu bobine.

Dacă K nu este un întreruptor mecanic (ci unul electronic, static) trebuie să se prevadă în paralel cu K un circuit de stingere prin care să se descarce bobina. În paralel cu circuitul RL se prevede o diodă de fugă prin care se va închide curentul de descărcare a bobinei $i_d(t)$ atunci când se decuplează de la sursă (se deschide K). Tensiunea la bornele bobinei va avea dinamica conform relație (16) și Figura 36:

$$\begin{cases} u_L = L \frac{di}{dt} = E e^{-\frac{t}{\tau}} \\ u_L = L \frac{di_d}{dt} = -E e^{-\frac{t}{\tau}} \end{cases} \quad (16)$$

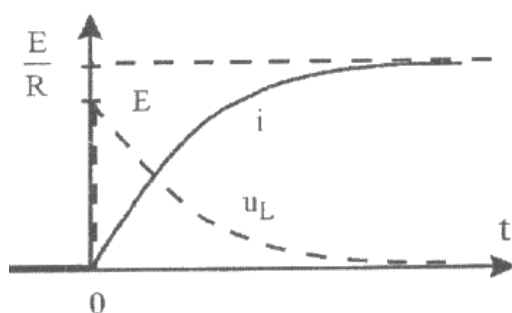


Figura 36 Dinamica tensiunii la bornele bobinei cu circuit de stingere.

- I. Să se realizeze în LTspice circuitul echivalent al deschiderii întrerupătorului K în condiții de supratensiune, Figura 37 a), și atenuarea supratensiunii printr-un circuit de stingere cu ajutorul unei diode de fugă, Figura 37 b).

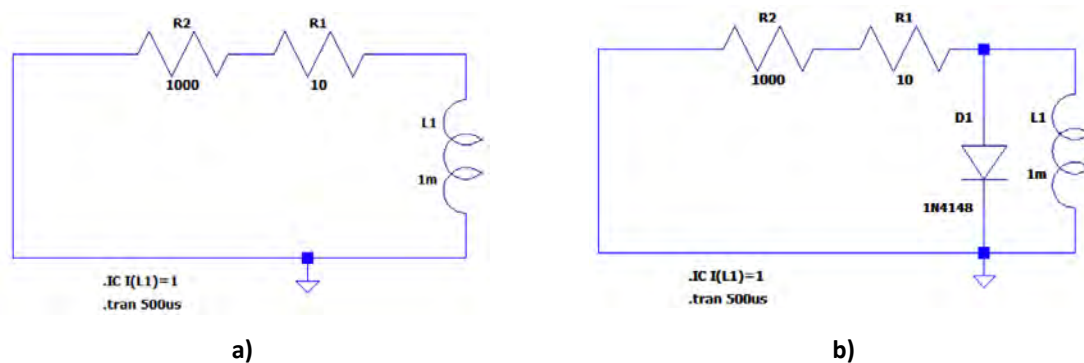


Figura 37 a) Schema echivalentă LTSpice a circuitului pentru simularea supratensiunii la deschiderea circuitului; b) schema echivalentă LTSpice a circuitului cu atenuarea supratensiunii printr-un circuit de stingere cu ajutorul unei diode de fugă.

II. Să se reprezinte în Figura 38 variația tensiunii simulate cu ajutorul LTSpice pentru cazurile a) și b) descrise anterior.

a)	b)

Figura 38 Simularea LTSpice a variației tensiunii la bornele bobinei la deschiderea comutatorului K: a) fără circuit de stingere, b) cu circuit de stingere.

6.1.4 Definirea unui comutator în LTSpice pentru simularea unui circuit R, L serie în regim tranzitoriu

Circuitele de încărcare și descărcare definite în Figura 28 și Figura 33 a) se definesc într-un singur circuit cu ajutorul unui comutator, sw, comandat în tensiune, conform Figura 39.

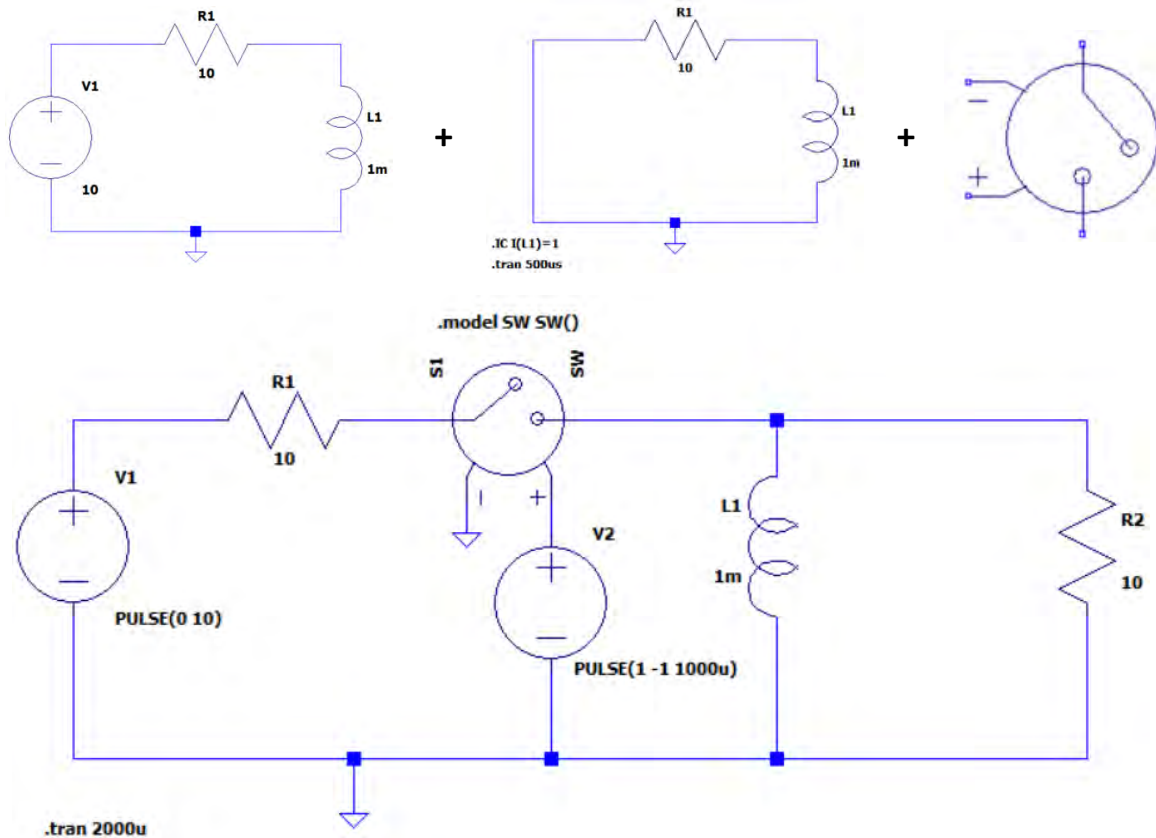


Figura 39 Schema echivalentă a circuitului de încărcare cu comutator K de tip sw în LTSpice.

Comutatorul se găsește în biblioteca de componente sub numele de **sw**. Pentru funcționarea acestuia în circuitul spice, trebuie definită **Spice directive**: **.model SW SW()**, Figura 40.

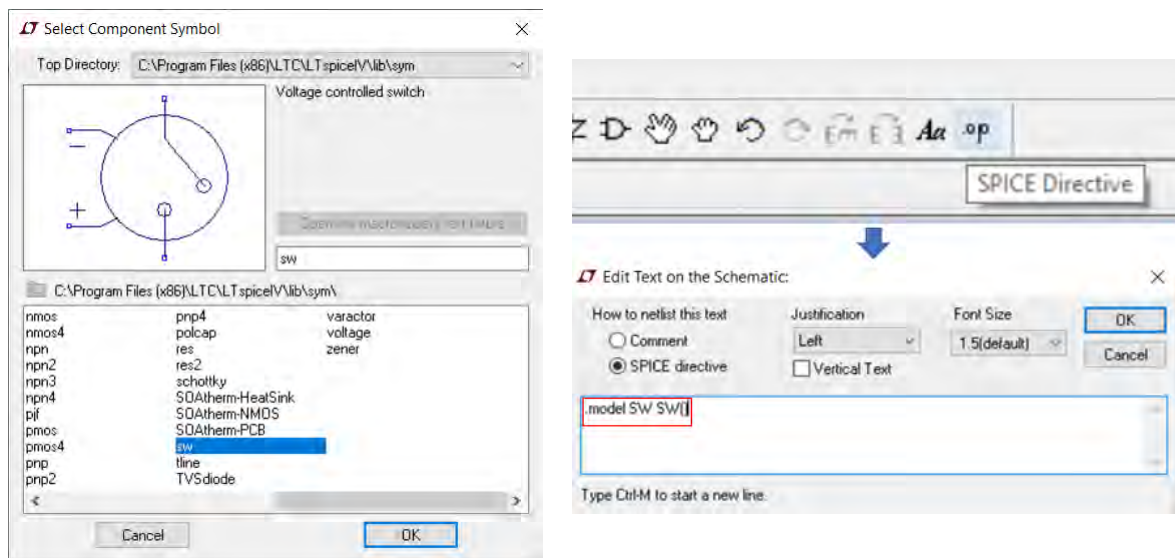


Figura 40 Definirea comutatorului sw.

Bobina se încarcă printr-o sursă de curent continuu care se definește cu ajutorul unui puls, **PULSE(0 10)** cu o durată de $2000\mu s = 2s$.

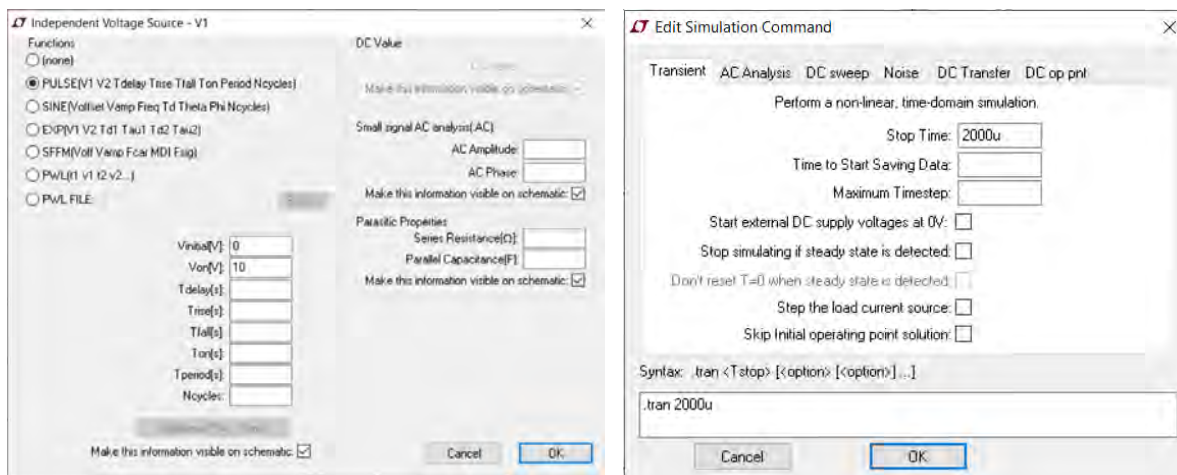


Figura 41 Definirea sursei de încărcare.

Comutatorul **sw** este comandat de o sursă de tensiune care basculează între 1 și -1 timp de $1000\mu\text{s}=1\text{s}$, adică **PULSE(1 -1 1000u)**, Figura 42. Aceasta înseamnă că pentru încărcarea bobinei stă pe poziția închis (1V)* $1000\mu\text{s}$ iar apoi comută pe poziția deschis (-1V)*.

*Valoarea impusă nu contează. Trebuie doar să fie pozitivă pentru contactul normal închis și negativă pentru contactul normal deschis.

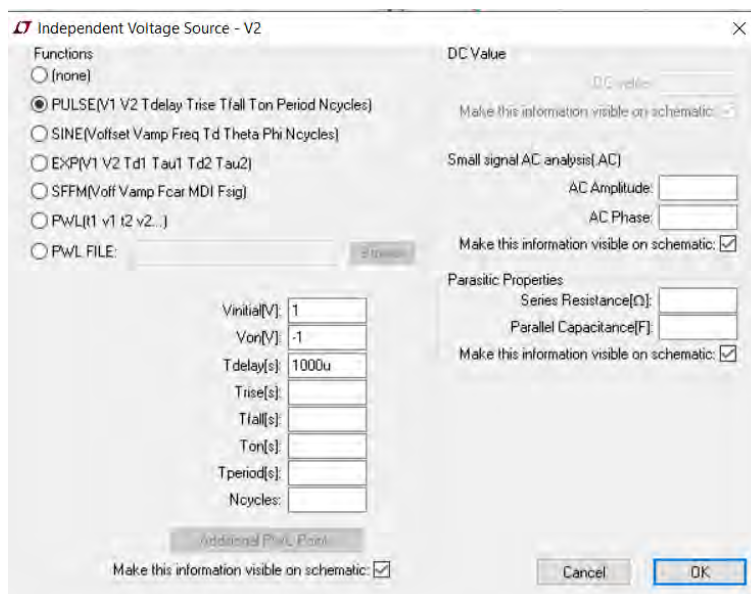


Figura 42 Definirea sursei de comandă a comutatorului sw.

- I. Să se reprezinte în Figura 43 a) variația curentului prin bobină și în Figura 43 b) variația tensiunii la bornele bobinei, simulate cu ajutorul LTSpice.

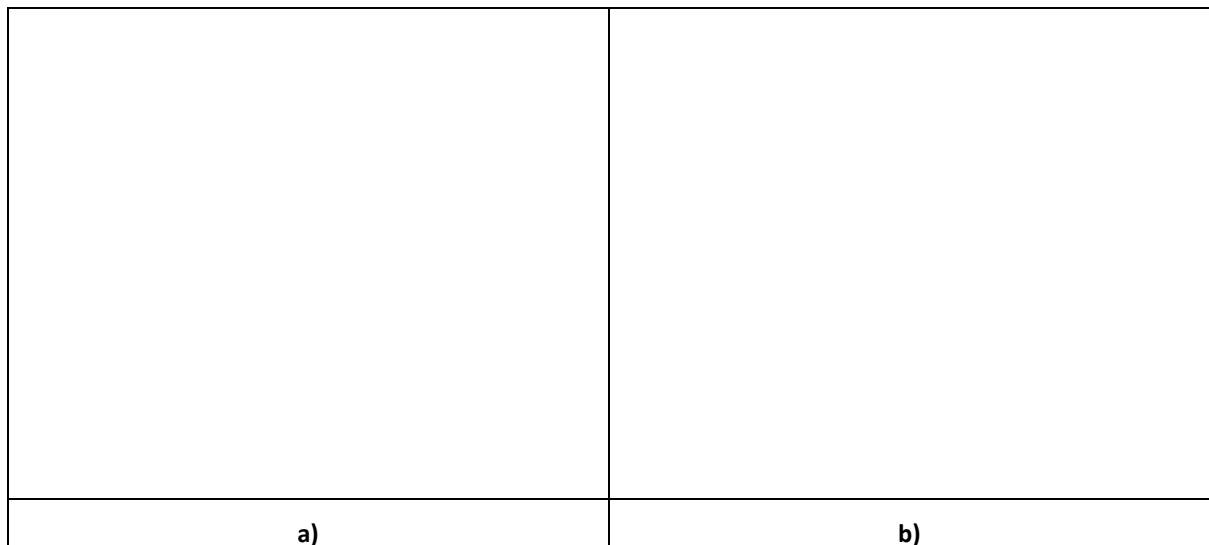


Figura 43 Simulare LTSpice: a) variația tensiunii la bornele bobinei, b) variația curentului prin bobină.

- II. De ce curentul prin bobină nu atinge valoarea de 10A calculată în cazurile anterioare 6.1.1 și 6.1.2?

Valoarea implicită a lui $R_{on}=1\Omega$, a se consulta **LTSpice -> Help -> Search -> sw.**

- III. Să se definească Spice directive: **.model SW SW(Ron=1m).**
 IV. Să se reprezinte în Figura 44a) variația curentului prin bobină pentru cazul **.model SW SW()** și în Figura 44 b) curentului prin bobină pentru cazul **.model SW SW(Ron=1m).**

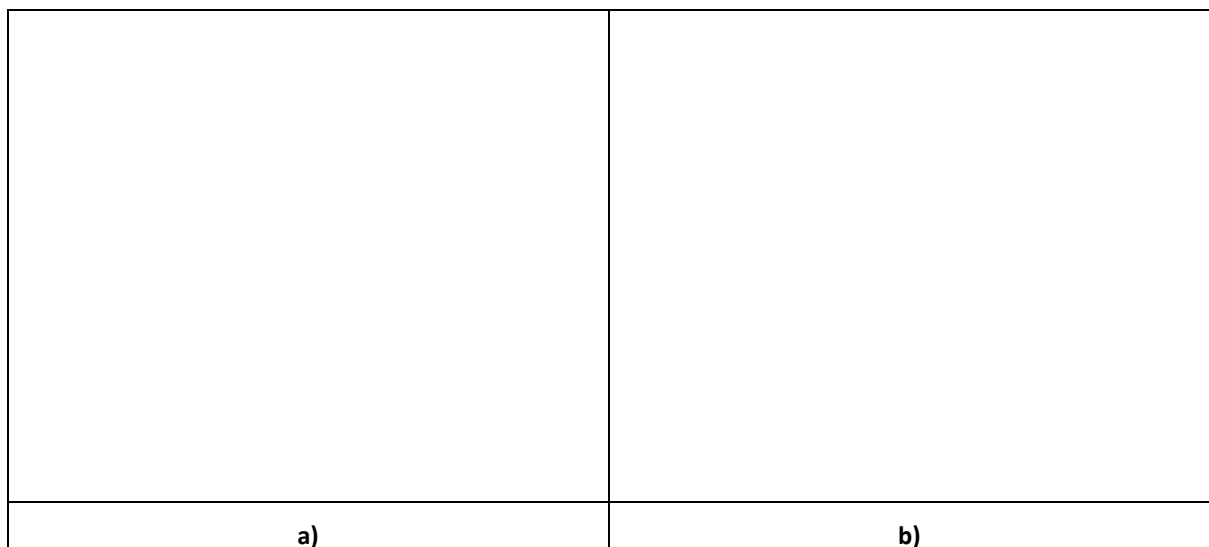


Figura 44 Simulare LTSpice: a) variația curentului prin bobină pentru **.model SW SW()**, b) variația curentului prin bobină pentru **.model SW SW(Ron=1m).**

- V. Să se simuleze circuitul echivalent al deschiderii întrerupătorului K în condiții de supratensiune și atenuarea acesteia cu ajutorul unei diode de fugă.

6.1.5 Definirea unei surse de tensiune cu semnal dreptunghiular

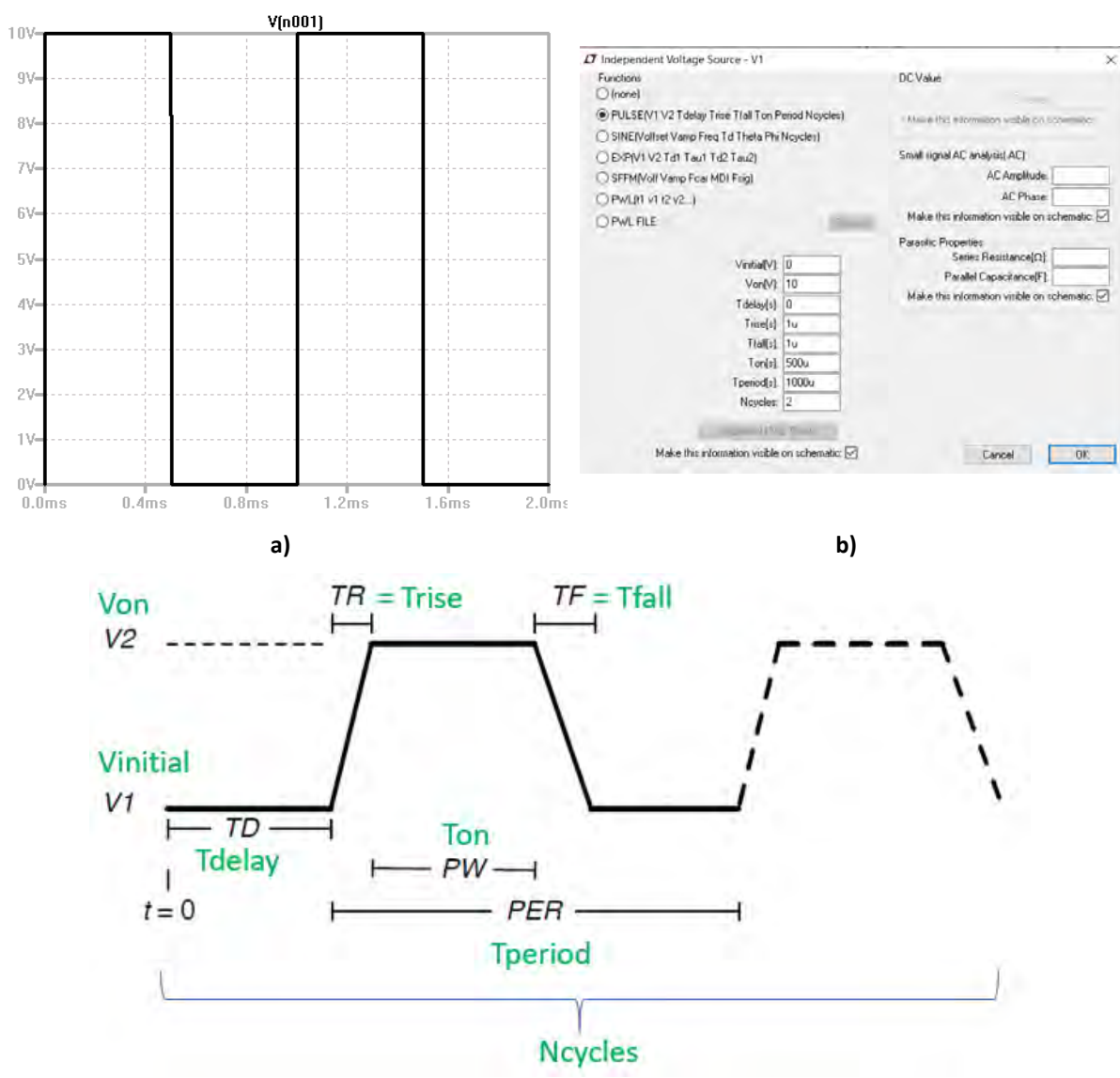


Figura 45 Definirea unei surse de semnal dreptunghiular.

I. Să se realizează circuitul din Figura 46.

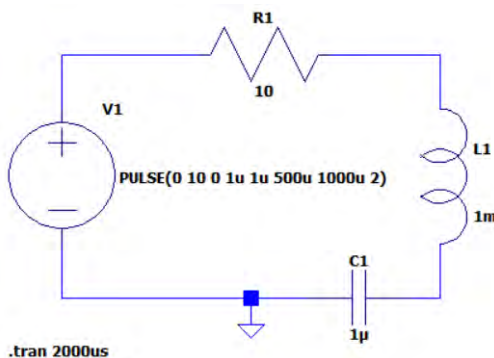


Figura 46 Circuitul de analiză.

- II. Să se reprezinte în Figura 47 a) variația tensiunii la bornele sursei, bobinei și a condensatorului.
- III. Să se reprezinte în Figura 47 b) curentului prin circuit.

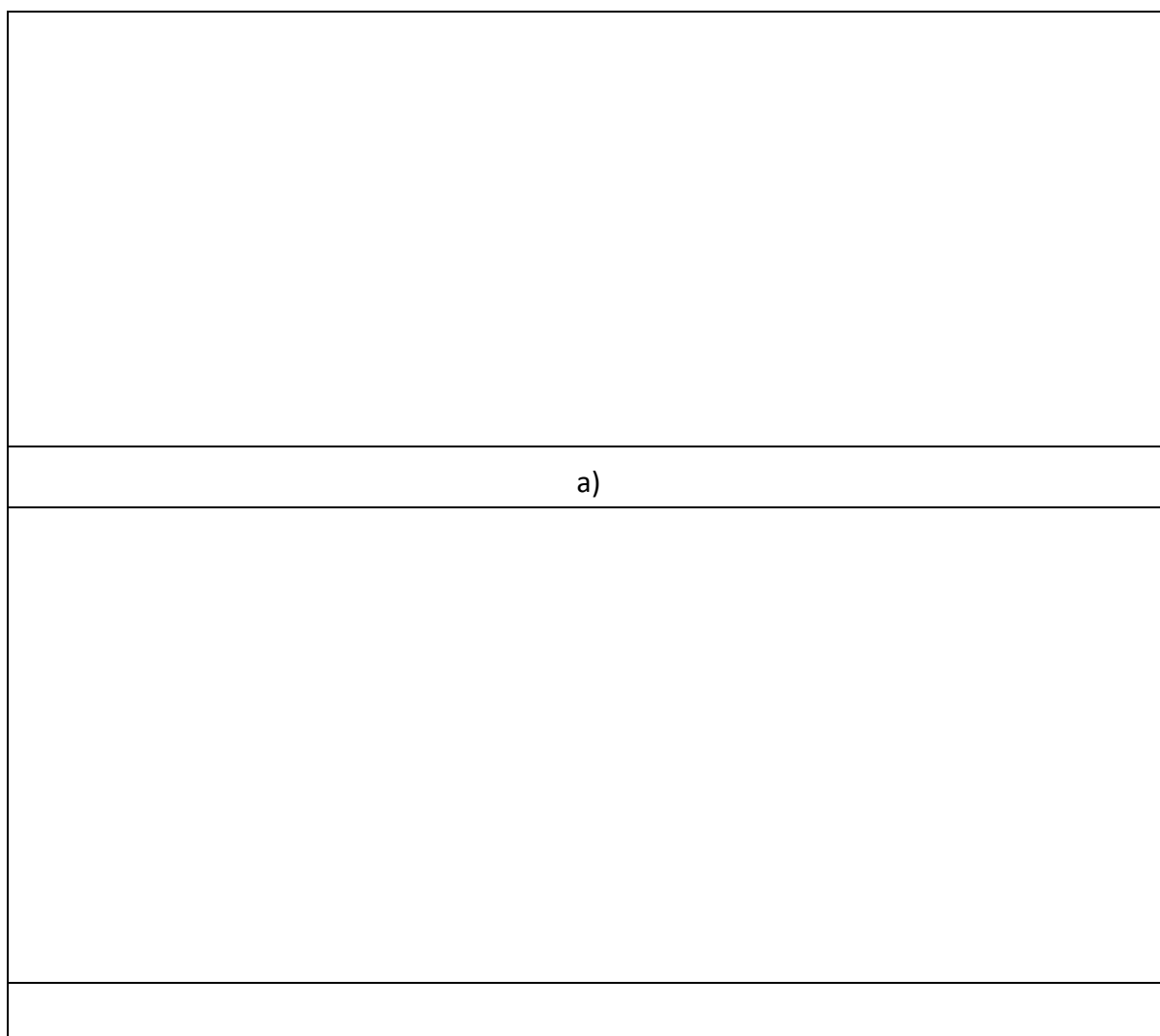


Figura 47 Simulare LTSpice: a) variația tensiunii la bornele sursei, bobinei și a condensatorului, b) curentului prin circuit.

6.2 Circuitul R, C serie

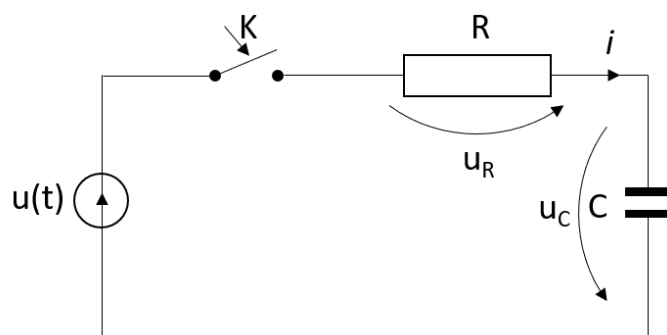


Figura 48 Circuit R, C serie.

Regimul tranzitoriu se găsește din suprapunerea regimului liber (l) peste regimul permanent (p).

$$q(t) = q_p + q_l \quad (17)$$

Regimul permanenta este o soluție particulară a ecuației diferențiale (17) corespunzătoare sarcinii acumulate de condensator la închiderea la închiderea întrerupătorului K din Figura 48:

$$R \frac{dq_p}{dt} + \frac{1}{C} q_p = u(t). \quad (18)$$

Regimul liber este soluția generală a ecuației diferențiale:

$$R \frac{dq_l}{dt} + \frac{1}{C} q_l = 0. \quad (19)$$

6.2.1 Conectarea circuitului R, C la o sursă de tensiune continuă E

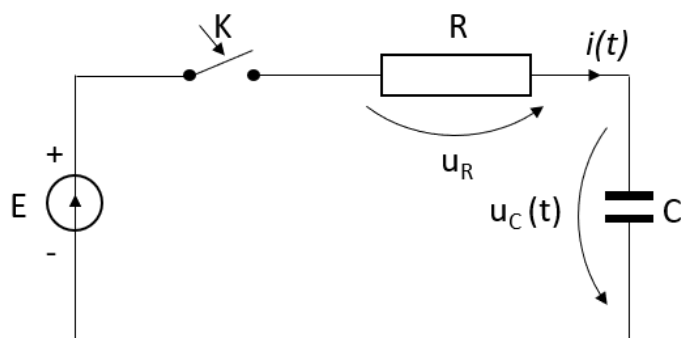


Figura 49 Conectarea la o sursă de curent continuu.

La închiderea comutatorului K din Figura 49, se stabilește prin condensator o sarcină crescătoare $q(t)$:

$$q = q_p + (q_0 - q_p) e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (20)$$

unde:

q_0 – este sarcina de pe armatura condensatorului **înainte** de a se produce comutația;

q_p – sarcina de regim permanent;

q_{p0} – valoarea lui q_p la momentul $t=0$;

$\tau = RC$ [s] – constanta de timp a circuitului.

Curentului prin condensator este dată de relația (21):

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (21)$$

iar tensiunea la bornele condensatorului este dată de relația:

$$u_c(t) = E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (22)$$

- II. Să se reprezinte în Figura 50 variația curentului și a tensiunii prin condensator la închiderea comutatorului K, considerând $E=10V$, $R=10\Omega$, $C=10\mu F$, $t_{final}=0.5ms$ pentru un pas de timp $\Delta t = 0.05ms$, utilizând programul MS Excel.

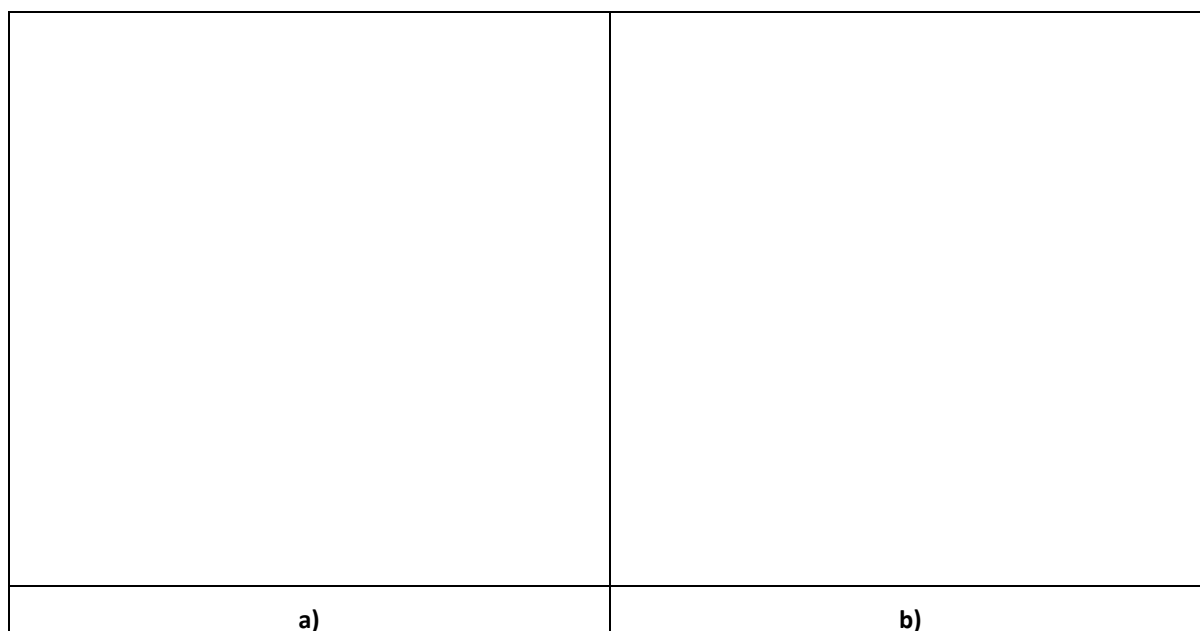


Figura 50 Reprezentare în MS Excel a) a variației curentului prin condensator și b) a variației tensiunii la bornele condensatorului, la închiderea comutatorului K.

- III. Să se compare rezultatele cu simularea circuitului în LTSpice.
 IV. Să se definească circuitul din Figura 51.

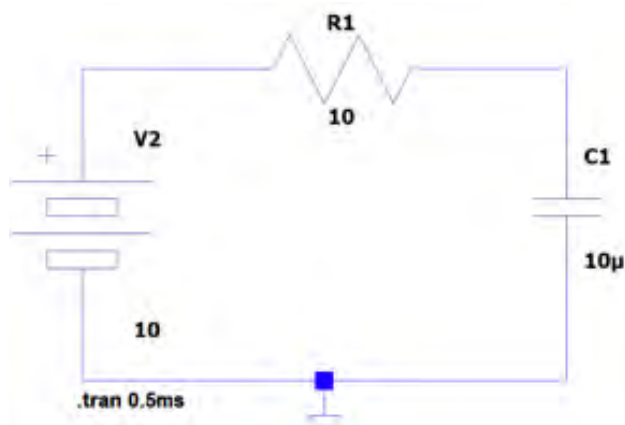
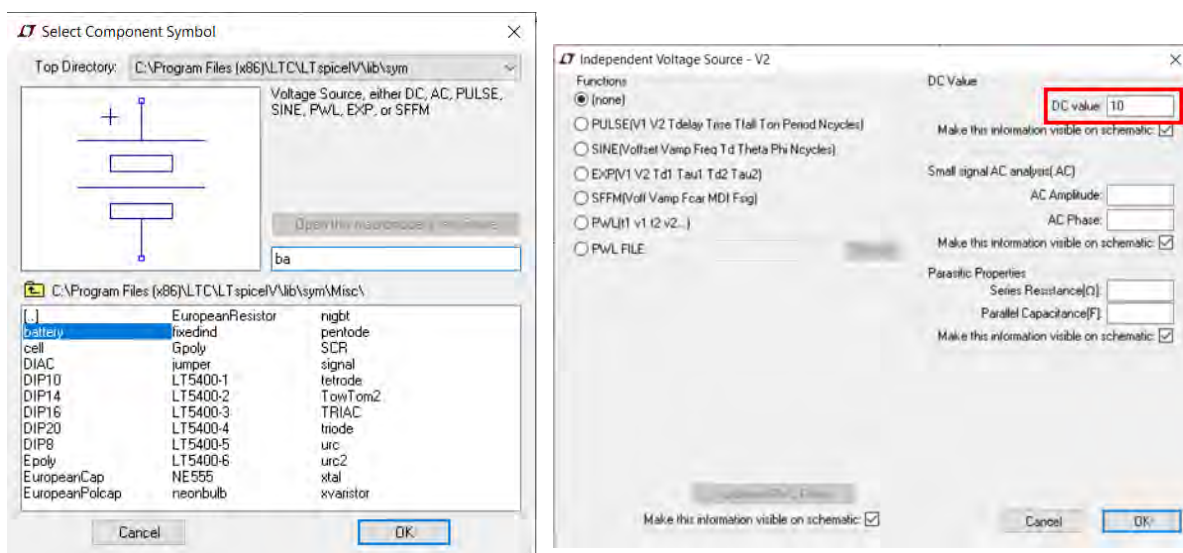


Figura 51 Circuitul LTSpice de încărcare.

- V. Se defineşte o sursă de curent continuu sub forma unei baterii, Select Component Symbol -> Battery.



a)

b)

Figura 52 a) Definirea unei surse de curent continuu (Battery) b) Setările unei surse de curent continuu.

- VI. Se setează regimului tranzitoriu, Stop Time = 0.5ms, Figura 53a). Se defineşte directiva Spice: .IC V(n002)=0, pentru impunerea condițiilor inițiale la $t = 0$, $q(C) = 0$, Figura 53b).

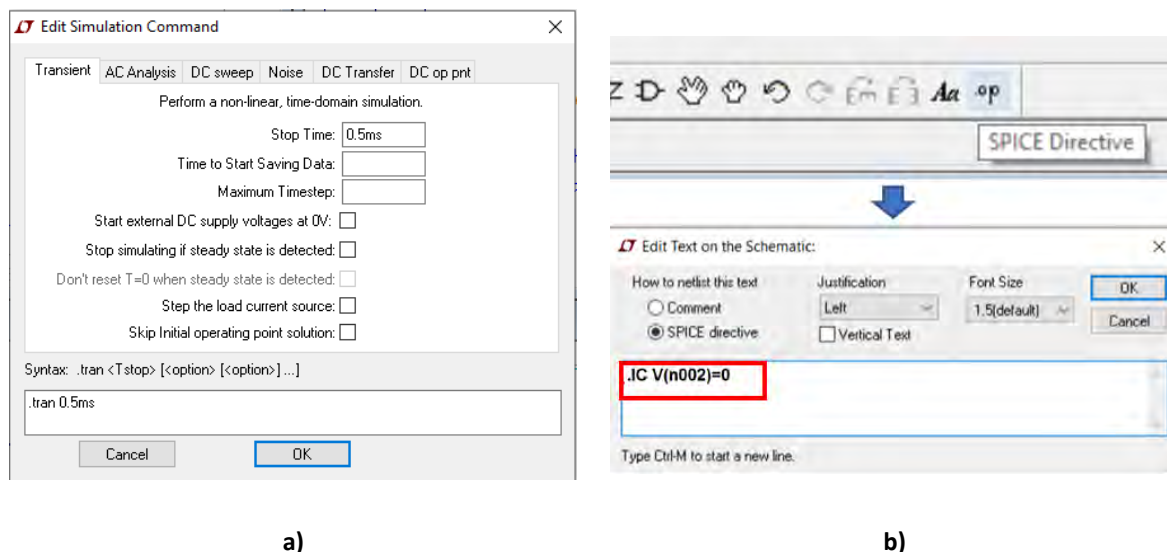


Figura 53 a) Editarea simulării, b) Definirea unei directive Spice pentru impunerea condițiilor inițiale $V(n002)=0$.

n002 este nodul de legătura dintre Condensator și Rezistor. Se determină fie făcând **Click** cu cursorul pe nodul respectiv (Figura 54 a) sau prin vizualizarea listei de legătură, **SPICE Netlist** (Figura 54 b).

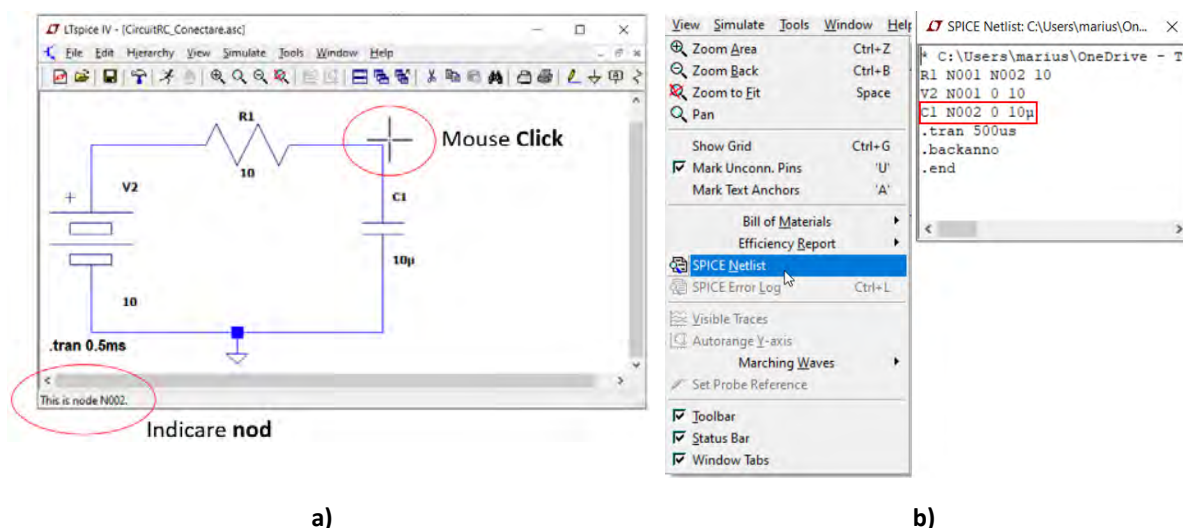


Figura 54 a) Determinarea numărului nodului prin Mouse Click, b) Determinarea nodului prin vizualizarea listei de legătură, SPICE Netlist.

- a. Să se reprezinte variația curentului și a tensiunii simulate cu ajutorul LTSpice în Figura 30.

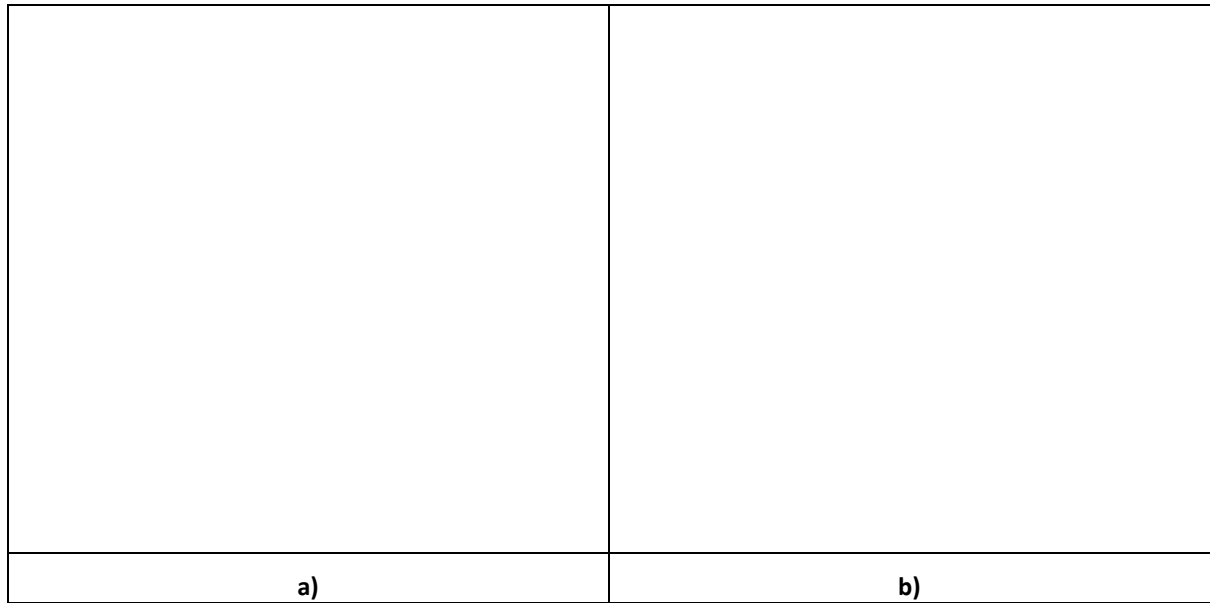


Figura 55 Simulare LTSpice: a) a variației curentului prin condensator și b) a variației tensiunii la bornele condensatorului, la închiderea comutatorului K.

6.3 Deconectarea circuitului R, C de la o sursă de tensiune continuă E

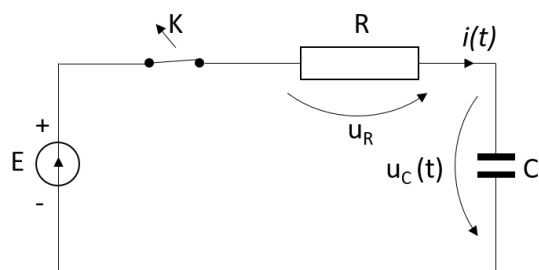


Figura 56 Deconectarea circuitului R, C de la sursa de tensiune.

După stabilirea regimului de lucru permanent ($t > \tau$), la deschiderea comutatorului K, al circuitului din Figura 56, sarcina acumulată este $q_0 = EC$. Sarcina de regim permanent se stabilește pentru $q_p = q_{p0} = 0$, iar variația sarcinii în timp este dată de relația

$$q(t) = CE e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (23)$$

Astfel, forma de variație a curentului prin condensator este dată de relația (24):

$$i_d(t) = \frac{dq}{dt} = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (24)$$

iar tensiunea la bornele condensatorului variază după relația:

$$u_C = E e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (25)$$

- I. Să se reprezinte în Figura 57 variația curentului și a tensiunii prin condensator la deschiderea comutatorului K, pentru $t=0.5\text{ms}$, cu un pas de timp $\Delta t = 0.05\text{ms}$, utilizând programul MS Excel.

a)	b)

Figura 57 Reprezentare în MS Excel a) a variației curentului prin condensator și b) a variației tensiunii la bornele condensatorului, la deschiderea comutatorului K.

II. Să se compare rezultatele cu simularea circuitului în LTSpice.

Se definește directiva Spice: `.IC V(n001)=10` pentru impunerea condițiilor inițiale la $t = 0$, $V_C = 10V^*$, Figura 58.

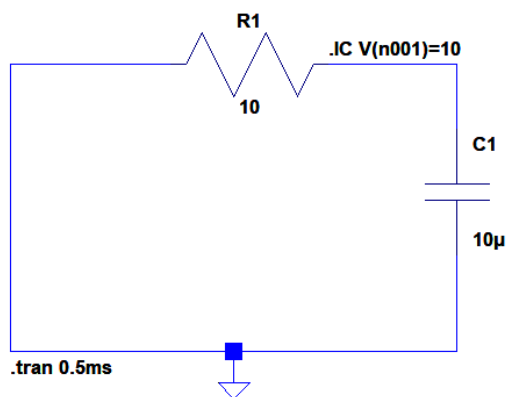


Figura 58 a) Circuitul R, C fără sursa de tensiune și curentul și tensiunea impusă de `.IC V(n001)=10`.

*Deoarece sursa de tensiune este complet eliminată din circuit, nodurile se renumerează. Circuitul va avea doar două noduri: nodul zero de împământare (ground) și nodul N001 dintre rezistență și condensator.

III. Să se reprezinte variația curentului și a tensiunii simulate cu ajutorul LTSpice în Figura 34.

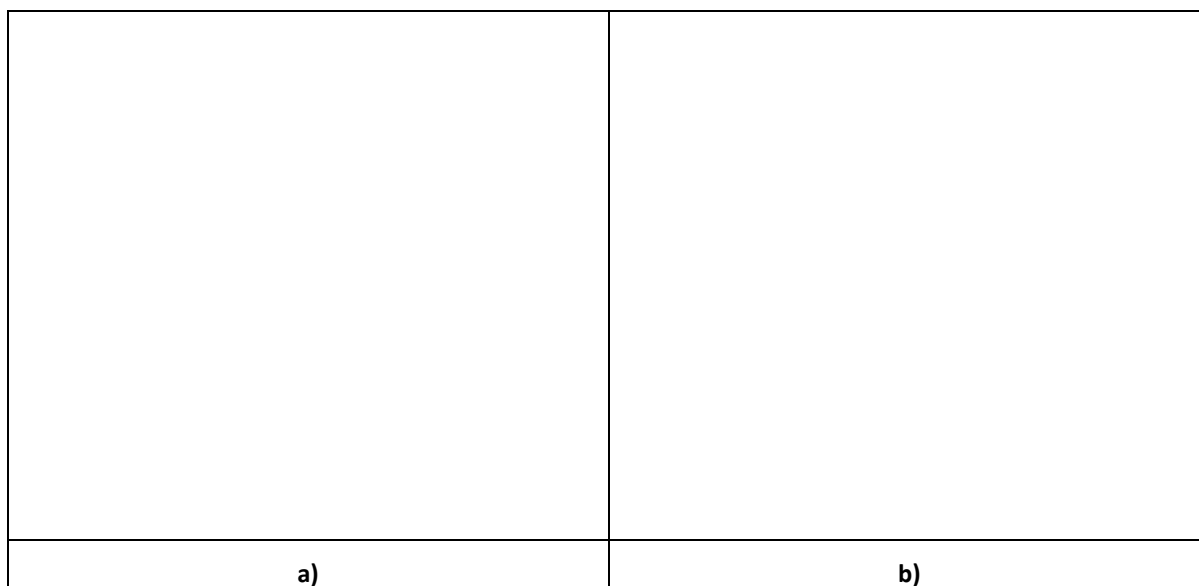


Figura 59 Simulare LTSpice a) variației curentului prin condensator și b) a variației tensiunii la bornele condensatorului, la deschiderea comutatorului K.

IV. Să reprezinte în același grafic forma de variație a tensiunii la bornele sursei și a condensatorului produse de circuitul LTSpice din Figura 60 .

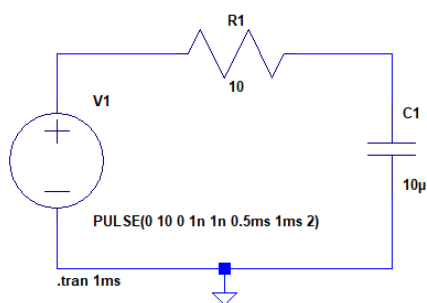


Figura 60 Simulare LTSpice a variației tensiunii la bornele sursei și a condensatorului pentru un semnal de tipul puls.

6.4 Supratensiunea la deconectarea circuitului R, L de la o sursă de tensiune continuă E

Curentul de încărcare este un impuls cu valoarea inițială E/R . Dacă R este mic (cum este cazul la cuplarea cablurilor de comunicații care sunt circuite RC cu $R \ll$, poate deveni periculos pentru circuit. În acest caz, în serie cu circuitul RC se introduce o rezistență de valoare R_p mare (rezistență de pornire) care va limita vârful impulsului de curent la $E/(R+R_p)$ iar după regimul de cuplare se închide contactul K_1 pentru a scoate din R_p circuit, Figura 61.

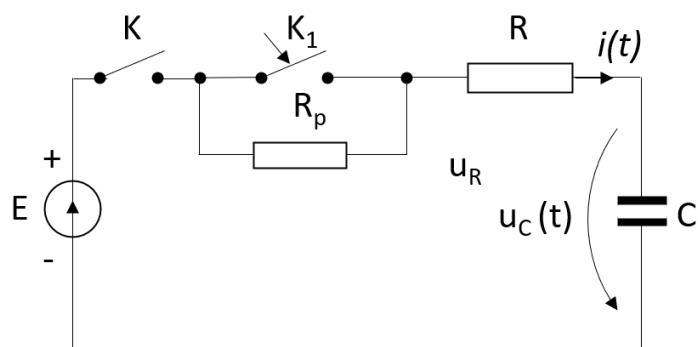


Figura 61 Circuitul de cuplare a unui condensator în circuit.

Astfel curentul de încărcare se diminuează de la :

$$i = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (26)$$

la

$$i = \frac{E}{R + R_p} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (27)$$

- I. Să se realizeze în LTspice circuitul echivalent de încărcare al condensatorului la tensiunea maximă, conform schemei din Figura 61, pentru $E=100V$, $R_p=1k\Omega$ și $R=0.1\Omega$.
 - Sursa de tensiune va fi de tipul **PULSE(0 100)**,
 - Regimul de funcționare este de tipul **.tran 1ms**,
 - Comutatoarele vor fi de tipul **sw**, comandate în tensiune, conform Figura 62.

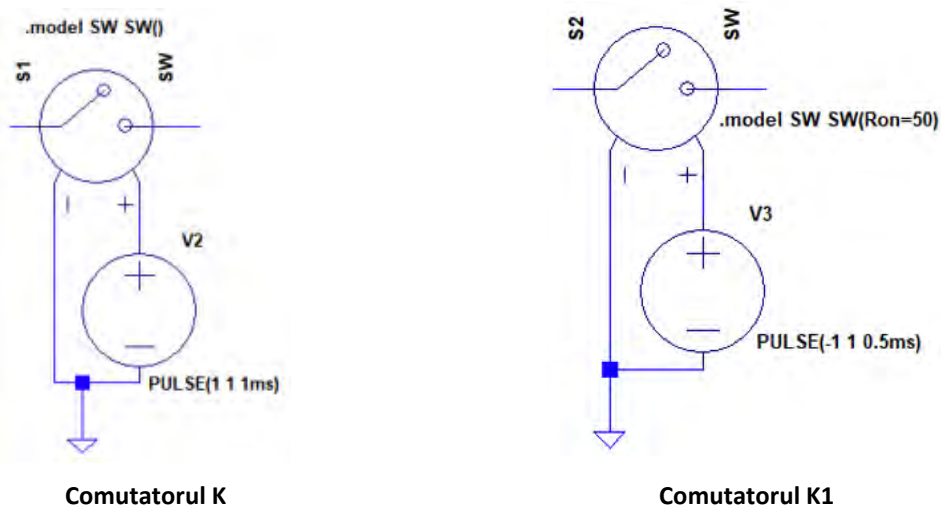


Figura 62 a) Comutatoarele sw, comandate în tensiune.

- II. Să se reprezinte în Figura 63 variația tensiunii și a curentului prin condensator (în același grafic) simulate cu ajutorul LTSpice pentru cazurile a) $R_{on}=1$ și b) $R_{on}=5$ (unde R_{on} este rezistența internă în Ω a comutatorului S2); care dintre aceste valori este recomandată pentru un curent de comutație prin tranzistor cât mai mic?

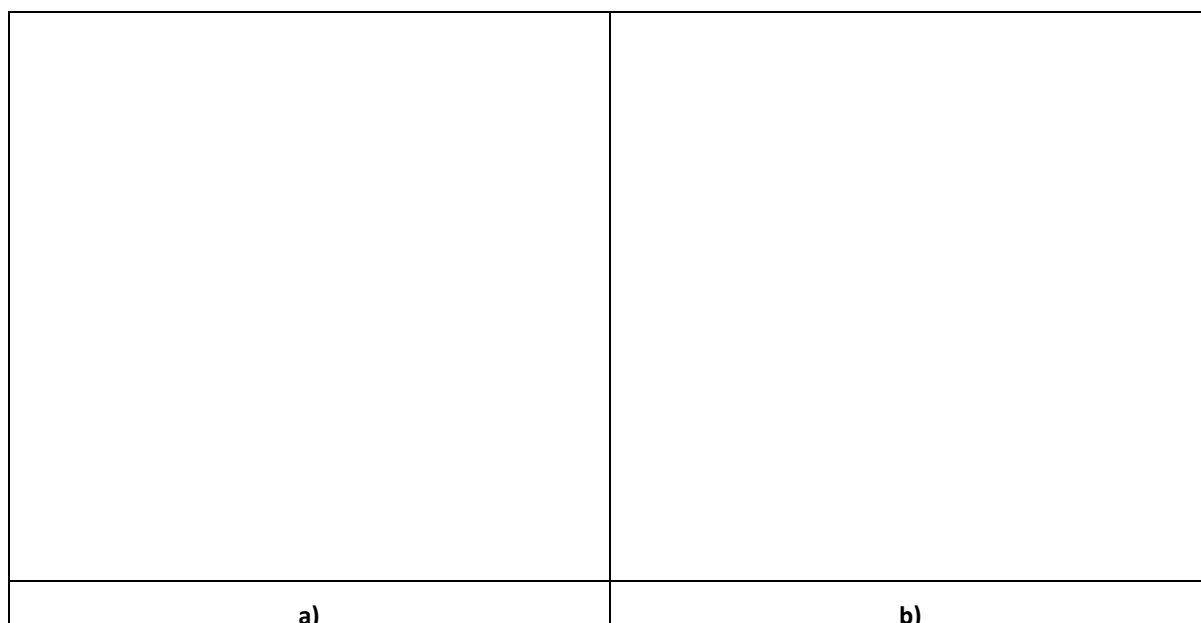


Figura 63 Simularea LTSpice a variației tensiunii la bornele condensatorului și a curentului de încărcare pentru: a) $R_{on}=1\Omega$ și b) $R_{on}=50\Omega$.

- III. Să se realizeze o analiză parametrică cu ajutorul LTSpice, a influenței rezistorului R_P asupra variației tensiunii la bornele condensatorului și a curentului de încărcare (în același grafic).
- Pentru analiza parametrică rezistorul R_P se definește conform Figura 64; pentru funcționarea acestuia în circuitul LTSpice, trebuie definită **Spice directive**: `.step param R 1 1000 100`, unde **R** este numele variabilei asociate rezistorului R_P prin **{R}**, în Figura 64 stânga, **1** este valoarea inițială, **1000** este valoarea finală și **100** pasul de incrementare.

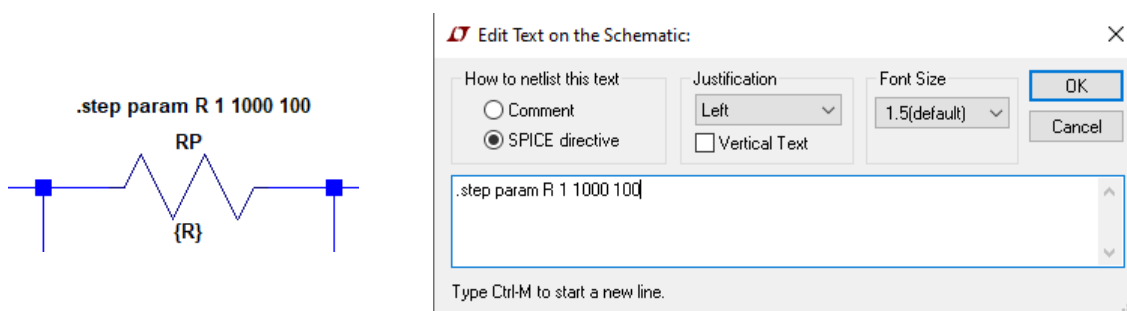


Figura 64 Setarea analizei parametrică.

- Se vor face două reprezentări grafice a analizei parametrică (variația rezistenței R_P), pentru două valori ale rezistenței interne a comutatorului K_1 : $R_{on}=1\Omega$ în Figura 65 a) și $R_{on}=50\Omega$ în Figura 65 b). De la ce valoare a lui R_P curentul de încărcare scade sub 1A?

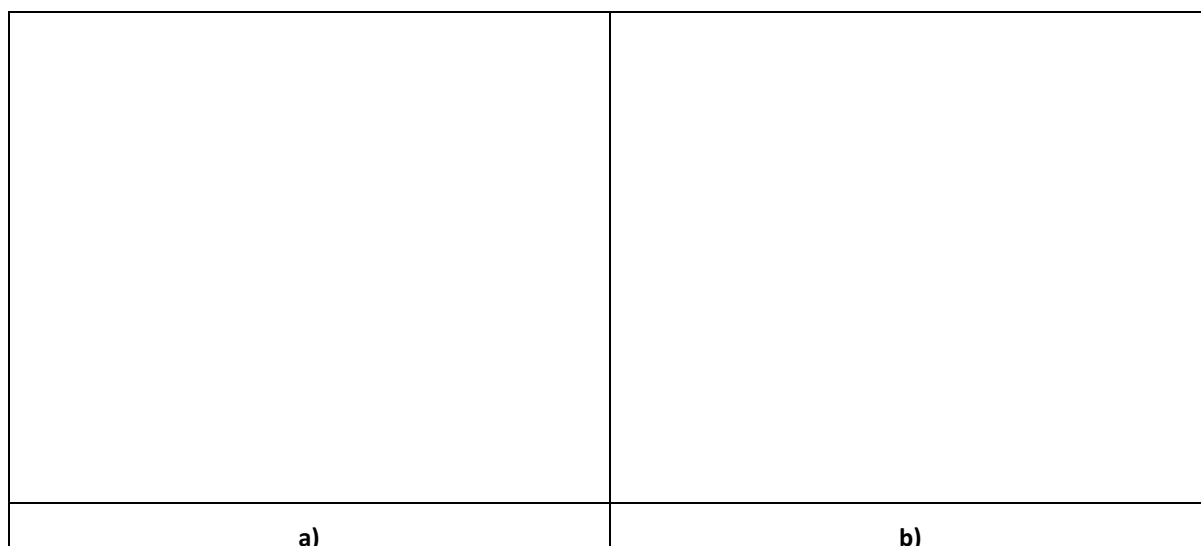


Figura 65 Analiza parametrică LTSpice a influenței rezistorului R_P asupra variației tensiunii la bornele condensatorului și a curentului de încărcare pentru: a) $R_{on}=1\Omega$ și b) $R_{on}=50\Omega$.

7 Aplicații avansate: redresoare

7.1 Redresor monofazat cu priză mediană

Să se realizeze în LTSPice redresorul cu transformator cu priză mediană din Figura 66.

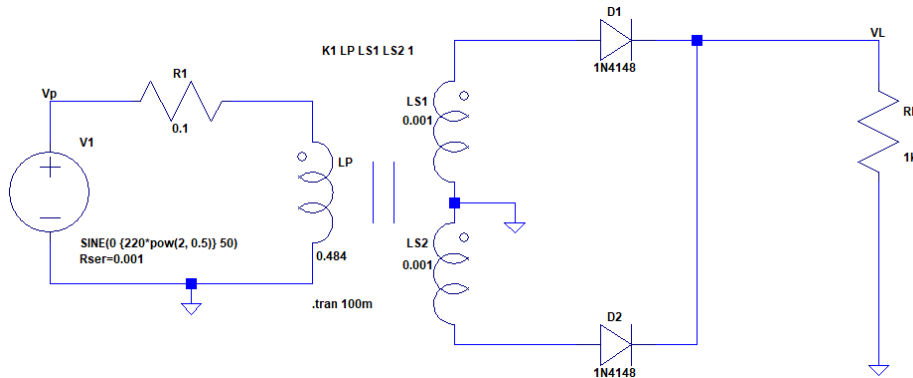


Figura 66 Circuit redresor cu transformator cu priză mediană.

- I. Să se reprezinte în Figura 67 tensiunea redresată pe rezistența de sarcină RL.

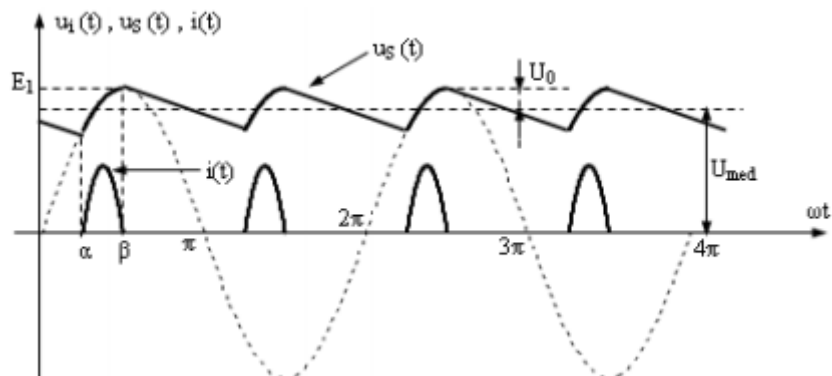


Figura 67 Variația tensiunii redresate.

- II. Să se introducă un condensator de netezire și să se determine prin simulare valoarea acestuia astfel încât factorul de ondulație să fie cât mai scăzut;

Factorul de ondulație

$$\gamma = \frac{U_0}{U_{med}}$$



Scrieți în tabelul următor valoarea condensatorului de netezire:

C=		μF
----	--	---------------

- III. Să se reprezinte în Figura 68 tensiunea redresată pe rezistența de sarcină RL după adăugarea condensatorului de netezire.



Figura 68 Variația tensiunii redresate după adăugarea unui condensator de netezire.

- IV. Pentru condensatorul calculat la punctul II., să se determine prin simularea valoarea inductivităților $LS1=LS2$ astfel încât tensiunea medie să fie de $U_{med} = 10V$. Scrieți în tabelul următor valoarea inductivităților:

LS1= LS2 =		mH
------------	--	----

7.2 Redresor monofazat cu punte de diode

Să se repete problema 2.1 pentru cazul în care transformatorul din Figura 66 are doar o înfășurare secundară LS1 iar redresarea se face cu ajutorul unei punți de diode.

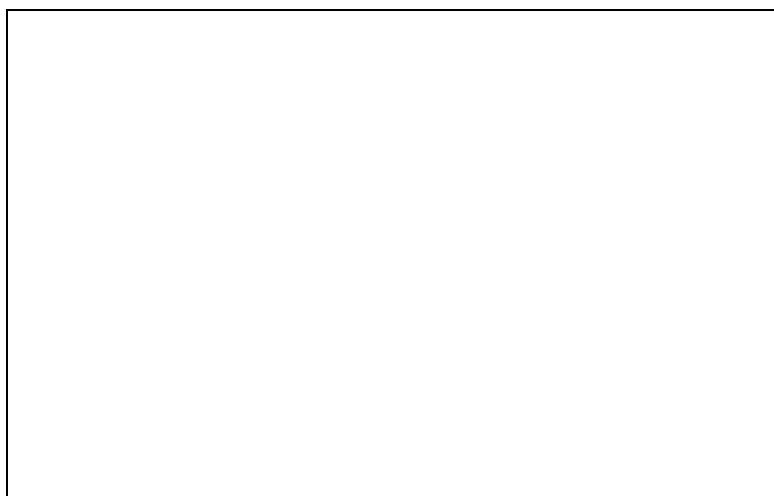


Figura 69 Schema LTSpice a redresorului monofazat cu punte de diode.

- I. Să se reprezinte în Figura 70 tensiunea redresată pe rezistența de sarcină RL pentru redresorul în punte.



Figura 70 Variația tensiunii redresate pentru redresorul în punte.

- I. Să se introducă un condensator de netezire și să se determine prin simulare valoarea acestuia astfel încât factorul de ondulație să fie cât mai scăzut; Scrieți în tabelul următor valoarea condensatorului de netezire:

C=		μF
----	--	----

- II. Să se reprezinte în Figura 71 variația tensiunii redresate după adăugarea unui condensator de netezire.

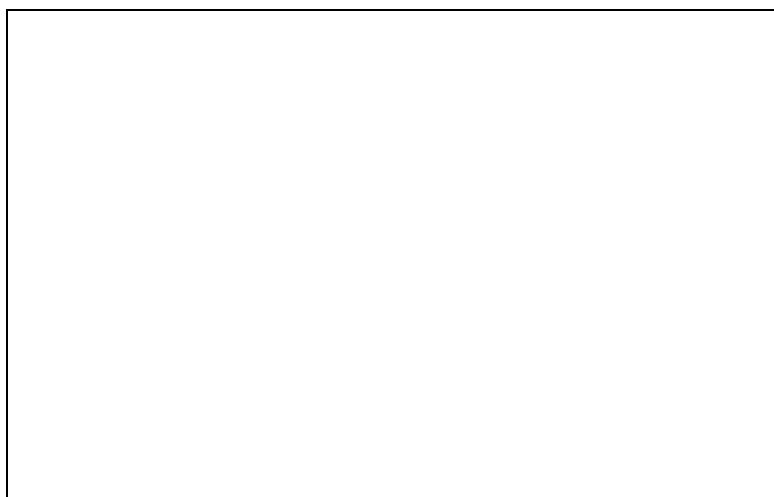


Figura 71 Variația tensiunii redresate după adăugarea unui condensator de netezire.

- III. Pentru condensatorul calculat la punctul II., să se determine prin simularea valoarea inductivității LS1 astfel încât tensiunea medie să fie de $U_{med} = 10V$. Scrieți în tabelul următor valoarea inductivității LS1:

LS1=		mH
------	--	----

7.3 Redresor mono alternanță

Să se repete problema 2.1 pentru cazul în care transformatorul din Figura 66 are doar o înfășurare secundară LS1 iar redresarea se face mono alternanță doar cu o diodă.



Figura 72 Schema LTSpice a redresorului monofazat mono alternanță.

- I. Să se reprezinte în Figura 73 tensiunea redresată pe rezistența de sarcină RL pentru redresorul în punte.

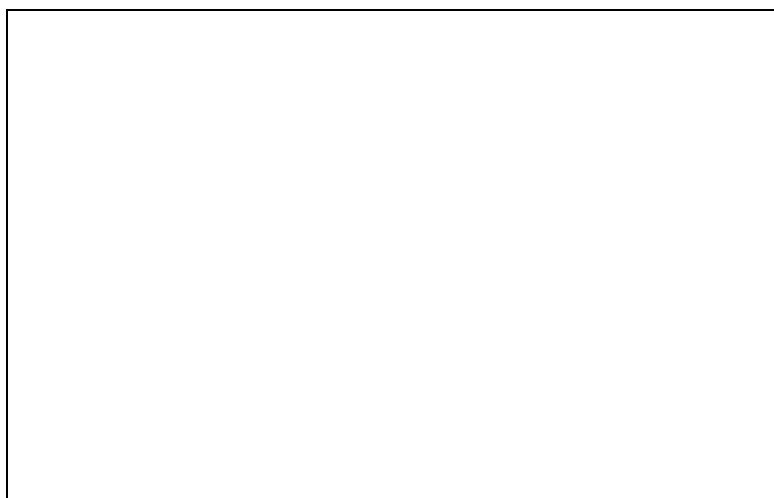


Figura 73 Variația tensiunii redresate pentru redresorul în punte.

- IV. Să se introducă un condensator de netezire și să se determine prin simulare valoarea acestuia astfel încât factorul de ondulație să fie cât mai scăzut; Scrieți în tabelul următor valoarea condensatorului de netezire:

C=		μF
----	--	----



Figura 74 Variația tensiunii redresate după adăugarea unui condensator de netezire.

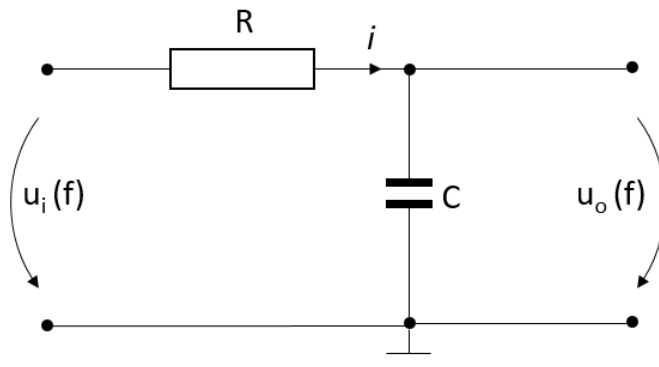
- V. Pentru condensatorul calculat la punctul II., să se determine prin simularea valoarea inductivităților LS1 astfel încât tensiunea medie să fie de $U_{med} = 10V$. Scrieți în tabelul următor valoarea inductivității LS1:

LS1=		mH
------	--	----

8 Modelarea numerică a filtrelor

8.1 Filtrul trece jos

- I. Pentru filtrul trece jos, de ordinul I din Figura 75, cu următorii parametrii:



$U_{in} =$	10	V
$R =$	4.7	$k\Omega$
$C =$	47	nF
$f_{inițial}$	1	Hz
f_{final}	10000	Hz

Figura 75 Filtrul RC trece jos.

- e) Să se traseze cu ajutorul LTSpice, în Figura 76, diagrama Bode.



Figura 76 Diagrama Bode a filtrului trece jos de ordinul I.

- f) care este frecvența de tăiere?

Se va utiliza analiza de tip AC în frecvență conform definiției sursei LTSpice din Figura 28.

.ac dec 10 1 10k

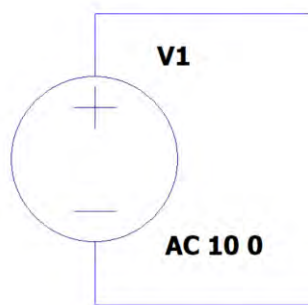


Figura 77 Schema sursei de alimentare pentru analiza de tip AC in frecvență.

II. Să se transforme sursa de tensiune într-o sursă sinusoidală (conform Figura 78) și să se reprezinte semnalul sinusoidal pe sursă și la ieșirea din filtru în Figura 27.

a. Cum și cu cât sunt cele două semnale defazate?

b. Cu cât se atenuază tensiunea de ieșire față de cea de intrare?

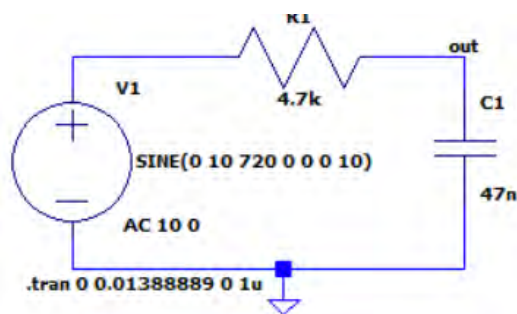


Figura 78 Schema LTSPice a unui filtru RC trece jos alimentat de la o sursă de tensiune sinusoidală.



Figura 79 Semnalul sinusoidal la bornele sursei și la ieșirea din filtru.

- III. Din filtrul RC prezentat în Figura 75, să se realizeze în LTSPice un filtru de ordinul II și să se suprapună în diagrama Bode din Figura 80, ieșirea fiecărui etaj de filtrare.

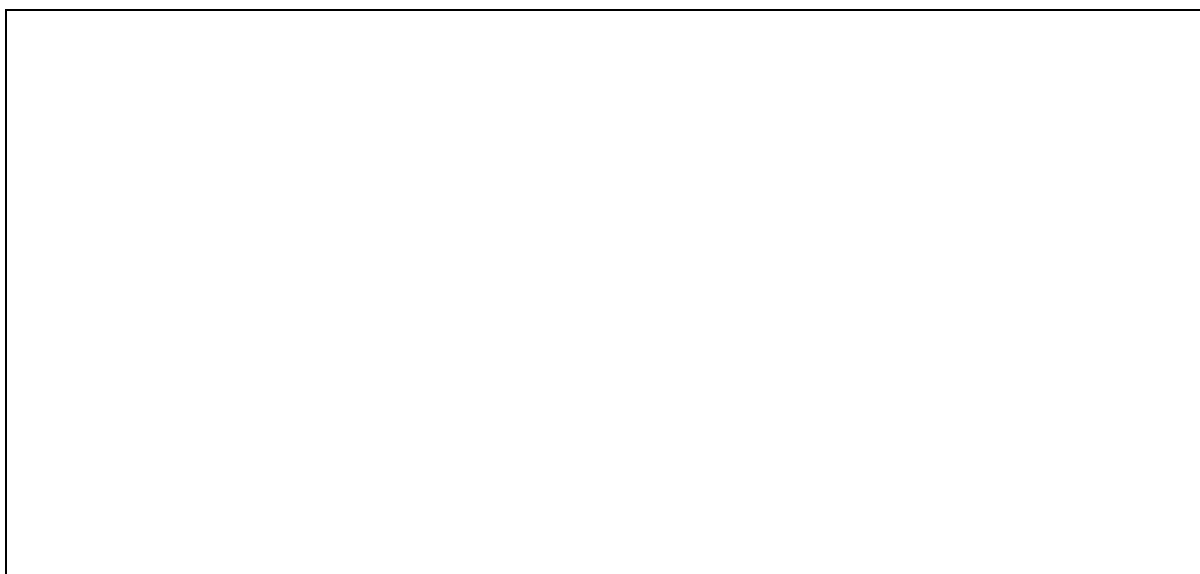


Figura 80 Diagrama Bode pentru Filtrul RC trece jos de ordinul II.

- IV. Filtrul de ordinul II definit anterior să se transforme într-un circuit integrator prin aplicarea unui semnal dreptunghiular de tipul **PULSE(0 10 0 0.1u 0.1u 0.000694444 0.00138889 10)** și **.tran 0 0.0138889 0 1u**. Să se reprezinte semnalul de intrare suprapus pe semnalul de ieșire în Figura 81.

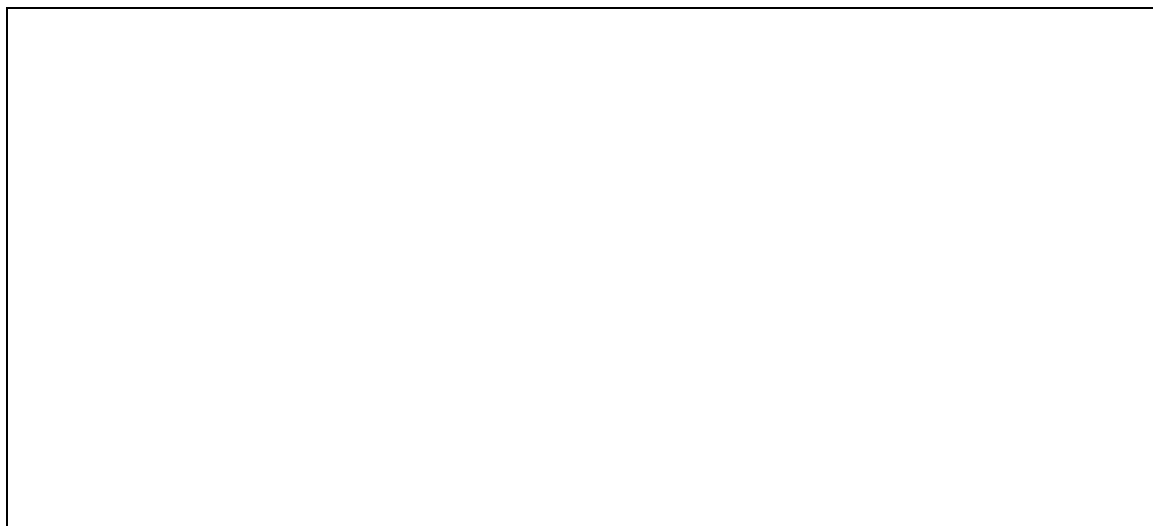
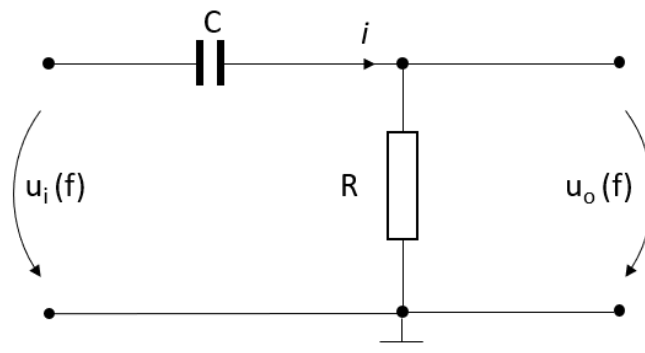


Figura 81 Răspunsul circuitului integrator.

8.2 Filtrul trece sus

I. Pentru filtrul trece sus, de ordinul I din Figura 82, cu următorii parametrii:



$U_{in} =$	10	V
$R =$	4.7	k Ω
$C =$	47	nF
$f_{\text{inițial}}$	1	Hz
f_{final}	10000	Hz

Figura 82 Filtru RC trece sus.

a) să se traseze diagrama Bode cu ajutorul LTSpice în Figura 83.



Figura 83 Diagrama Bode a filtrului trece sus de ordinul I.

b) care este frecvența de tăiere?

Se va utiliza analiza de tip AC în frecvență conform definiției sursei LTSpice din Figura 84.

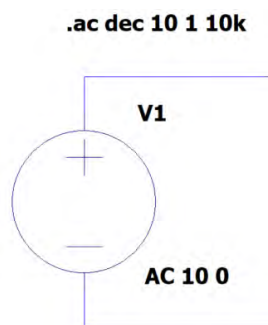


Figura 84 Schema sursei de alimentare pentru analiza de tip AC in frecvență.

- II. Să se transforme sursa de tensiune într-o sursă sinusoidală (conform Figura 85) și să se reprezinte semnalul sinusoidal pe sursă și la ieșirea din filtru în Figura 86.
- a. Cum și cu cât sunt cele două semnale defazate?

- b. Cu cât se atenuază tensiunea de ieșire față de cea de intrare?

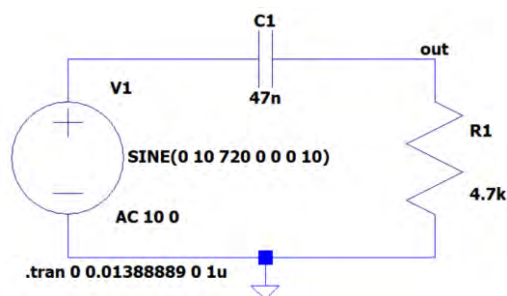


Figura 85 Schema LTSPice a unui filtru RC trece jos alimentat de la o sursă de tensiune sinusoidală.



Figura 86 Semnalul sinusoidal la bornele sursei și la ieșirea din filtru.

- III. Din filtrul RC prezentat la Figura 82, să se realizeze în LTSPice un filtru de ordinul II și să se suprapună în diagrama Bode din Figura 87, ieșirea fiecărui etaj de filtrare.



Figura 87 Diagrama Bode pentru Filtrul RC trece sus de ordinul II.

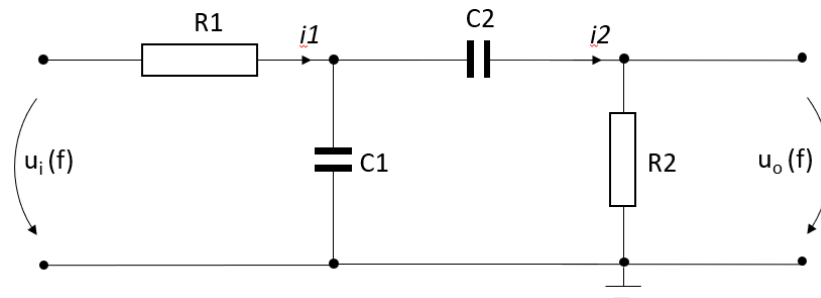
- IV. Filtrul de ordinul II definit anterior să se transforme într-un circuit diferențial prin aplicarea unui semnal dreptunghiular de tipul **PULSE(0 10 0 0.1u 0.1u 0.000694444 0.001388889 10)** și **.tran 0 0.01388889 0 1u**. Să se reprezinte semnalul de intrare suprapus pe semnalul de ieșire în Figura 88.



Figura 88 Răspunsul circuitului integrator.

8.3 Filtrul trece bandă

I. Pentru filtrul trece bandă din Figura 82, cu următorii parametrii:



$U_{in} =$	10	V
$R1 =$	4.7	$k\Omega$
$R2 =$	4.7	$k\Omega$
$C1 =$		nF
$C2 =$		nF
$f_{tj} =$	100	Hz
$f_{ts} =$	500000	Hz
$f_r =$		Hz

Figura 89 Filtru RC trece bandă.

- Să se calculeze valorile $C1$ și $C2$ (în tabelul de mai sus) astfel încât frecvențele f_{tj} și f_{ts} să fie cele din Figura 89. Să se calculeze valoarea frecvenței de rezonanță (în tabelul de mai sus).
- Să se traseze diagrama Bode cu ajutorul LTSpice în Figura 90.



Figura 90 Diagrama Bode a filtrului trece bandă.

Se va utiliza analiza de tip AC în frecvență conform definiției sursei LTSpice din Figura 91.

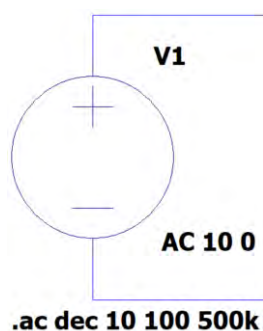


Figura 91 Schema sursei de alimentare pentru analiza de tip AC in frecvență.

II. Să se transforme sursa de tensiune într-o sursă sinusoidală (conform Figura 92) și să se reprezinte semnalul sinusoidal pe sursă și la ieșirea din filtru în.

a. Cum și cu cât sunt cele două semnale defazate?

--	--

b. Cu cât se atenuază tensiunea de ieșire față de cea de intrare?

--	--

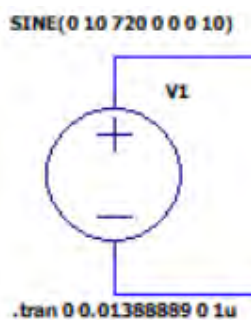


Figura 92 Schema LTSPice a unei surse de tensiune sinusoidală.

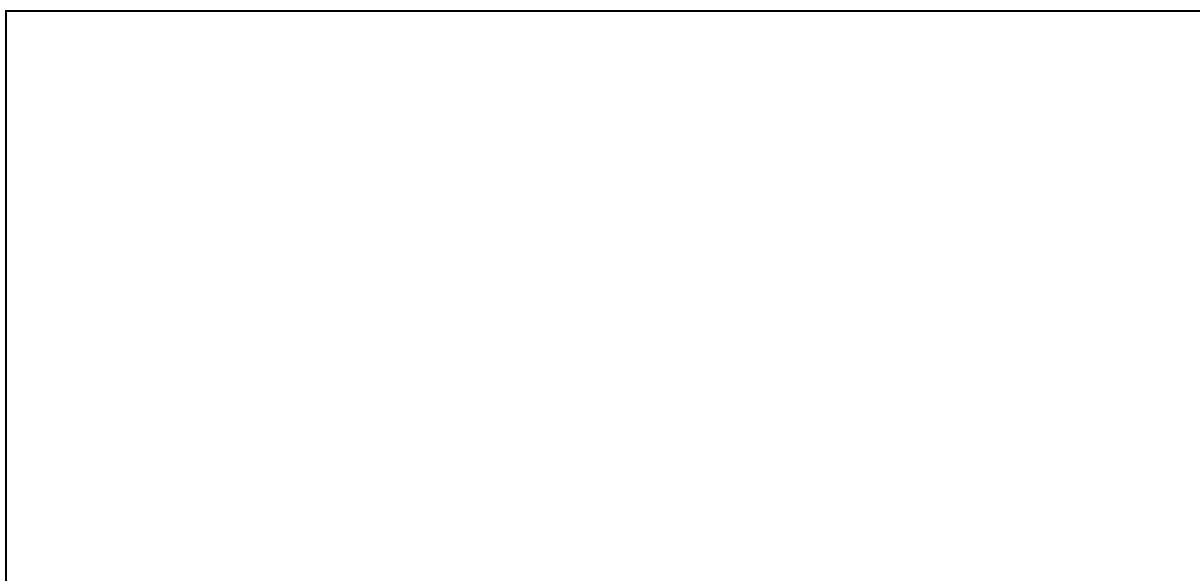


Figura 93 Semnalul sinusoidal la bornele sursei și la ieșirea din filtru.

8.4 Filtrul oprește bandă

- I. Pentru filtrul trece bandă din figura următoare să se traseze diagrama Bode în Figura 95.

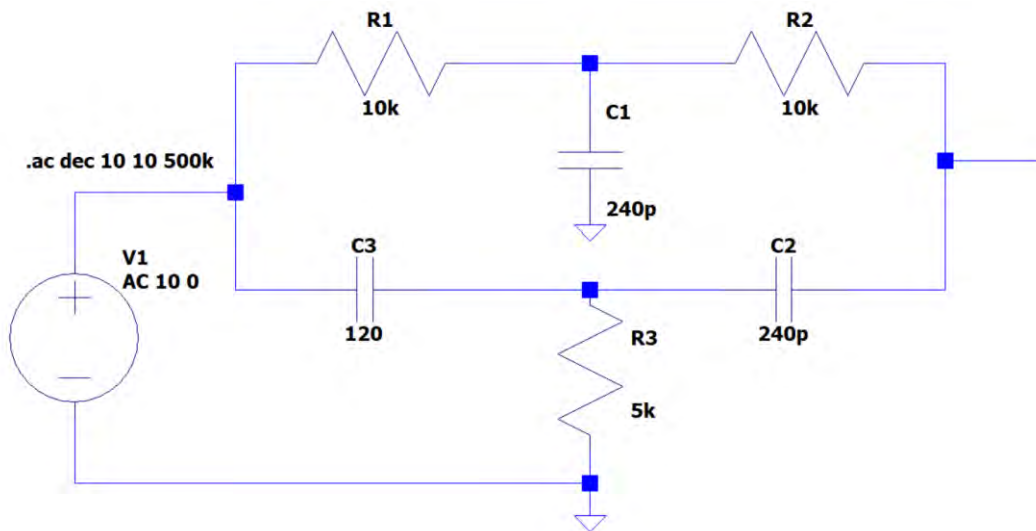


Figura 94 Filtru RC oprește bandă.



Figura 95 Diagrama Bode a filtrului oprește bandă.

- II. Să se determine din grafic, frecvența centrată sau de rezonanță

- III. și frecvențele de tăiere:

9 Linii de transmisie bifilare

9.1 Reflexii pe liniile de transmisie bifilare

La înaltă frecvență circuitele sunt de obicei închise pe impedanța caracteristică. Astfel impedanța generatorului (sursei) este egală cu impedanța caracteristică (Z_0) a liniei de cuplaj (transmisie) cu receptorul (sarcina). Impedanța receptorului este de asemenea egală cu Z_0 .

În practică se utilizează cabluri cu impedanță standardizată, 50, 75, 100 Ω , etc.

Considerăm un receptor cu impedanța de sarcină R_R cuplat printr-un cablu coaxial cu impedanța caracteristică de $Z_0=50\Omega$ la generator de semnal dreptunghiular cu impedanța de sarcină $R_G=50\Omega$, Figura 96.

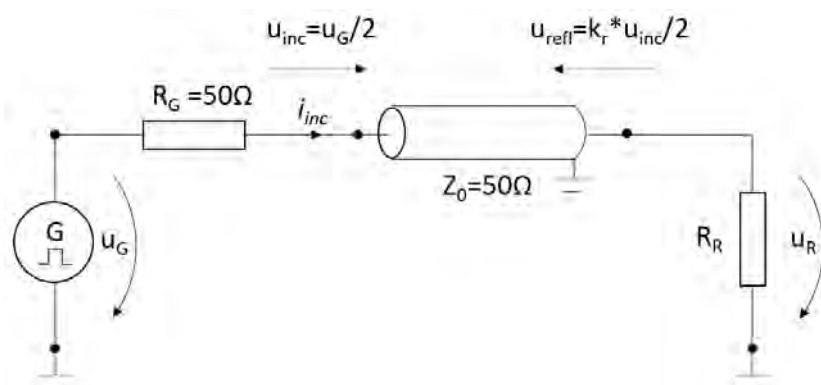


Figura 96 Considerăm un generator de semnal dreptunghiular cuplat printr-un cablu coaxial la .

Deoarece impedanța cablului este egală cu cea a generatorului, acestea formează un divizor de tensiune, astfel tensiunea care intră în cablu (unda incidentă) este $u_{inc}=u_G/2$.

Când unda incidentă ajunge la receptor, aceasta este în totalitate "absorbită" dacă receptorul are impedanța de 50 Ω [10]. Altfel, surplusul de energie (unda reflectată u_{refl}) este reflectat spre generator cu viteza undei pe cablu. Se definește coeficientul de reflexie:

$$k_r = \frac{U_{refl}}{U_{inc}} = -\frac{I_{refl}}{I_{inc}} = \frac{Z_R - Z_0}{Z_R + Z_0} \quad (28)$$

Tensiunea pe receptor este dată de:

$$U_r = U_{inc} + U_{refl} \quad (29)$$

În fiecare punct din cablu este valabilă legea lui Ohm:

$$I_{inc} = \frac{U_{inc}}{Z_0} \text{ și } I_{refl} = \frac{U_{refl}}{Z_0} \quad (30)$$

- I. Se consideră tensiunea generatorului de semnal este 20V, lăţimea pulsului de 10ns si frecvenţa $f=1\text{kHz}$. Acesta este conectat la un receptor $R_R=75\Omega$ printr-un cablu coaxial RG58 ($Z_0=50\Omega$ şi lungimea $l = 100\text{m}$).

Să se calculeze şi să se reprezinte semnalele (incidente şi reflectate) atât analitic cât şi cu ajutorul LTSpice pentru următoarele situaţii:

- la intrarea in cablu,
- la mijlocul cablului şi
- la sfârşitul cablului.

i. Rezolvare analitică

Se consideră cablul fără pierderi, astfel Z_0 va fi o mărime reală. Din ecuaţia (28) se calculează coeficientul de reflexie:

$$k_r = \frac{75 - 50}{75 + 50} \Omega = +0.2 \quad (31)$$

Viteza cu care unda circulă prin cablu este:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r} \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2.25}} = 2 \times 10^8 \text{m/s} \quad (32)$$

Unde ϵ_0 şi μ_0 sunt permitivitatea electrică şi permeabilitatea magnetică a vidului $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ este viteza luminii în vid, $\epsilon_r = 2.25$ este permitivitatea electrică relativă şi $\mu_r = 1$ este permeabilitatea magnetică relativă a polietilenei utilizate în cablul RG58 (Figura 97).

Timpu necesar semnalului pentru parcurgerea cablului de lungime $l = 100\text{m}$:

$$t = \frac{l}{v} = \frac{100}{2 \times 10^8} = 0.5 \times 10^{-6} \text{s} = 0.5 \mu\text{s} \quad (33)$$

Amplitudinea undei incidente:

$$u_{\text{inc}} = \frac{u_G}{2} = 10\text{V} \quad (34)$$

Amplitudinea undei reflectate:

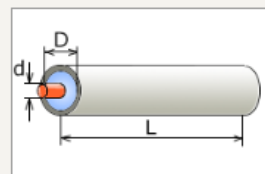
$$u_{\text{refl}} = k_r u_{\text{inc}} = 2\text{V} \quad (35)$$

Amplitudinea tensiunii la receptor este dată de ecuaţia (29):

$$u_r = u_{\text{inc}} + u_{\text{refl}} = 12\text{V} \quad (36)$$

Coaxial Cable Calculator

This coaxial cable calculator determines the distributed capacitance and inductance of a coaxial cable, its impedance and cutoff frequency for a given cable geometry and relative permittivity or velocity factor. Note that these calculations are theoretical and engineers and technicians will probably never have the need to calculate these parameters of a coaxial cable since they always use components with well-known specifications. The calculator is designed mostly for hobbyists, university students, and researchers. For practical applications, please visit manufacturers' websites and consult their data.



Example: Calculate the distributed capacitance and inductance, impedance and a cutoff frequency of a coaxial cable RG-58 with the following characteristics: inner conductor diameter 0.9 mm (0.035 in), outer conductor diameter 3.15 mm (0.124 in), type of insulation is polyethylene with the relative permittivity of 2.3.

Input

Diameter of the Inner Conductor of the Coax Cable

d 0.9 millimeter (mm)

Inner Diameter of the Coax Cable Shield

D 3.15 millimeter (mm)

Relative Permittivity of the Dielectric (Dielectric Constant)

ϵ_r 2.25

OR Velocity of Propagation (%) or Velocity Factor

VF 66.67 %

OR Wavelength Shortening Factor

k 1.50

OR Type of Dielectric Material

Select material type

Calculate

Reset

Share

Output

Distributed Capacitance of the Coax Cable

C' 99.91765 pF/m

Distributed Inductance of the Coax Cable

L' 250.55259 nH/m

Coax Impedance

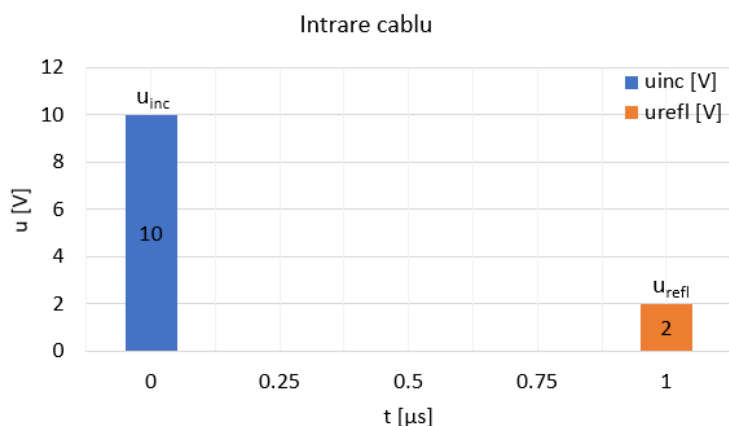
Z₀ 50.07585 Ω

Cutoff Frequency of the Coax Cable

f_c 31.41626 GHz

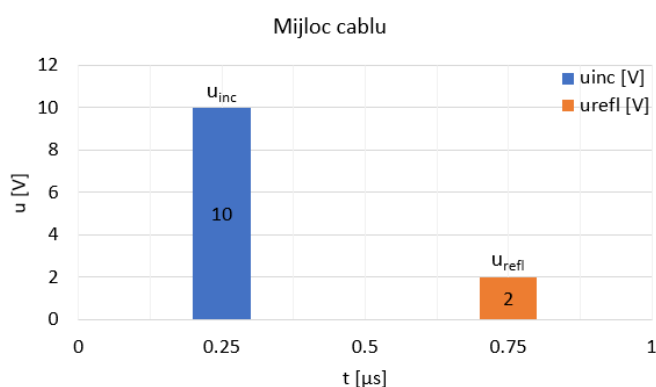
<https://www.translatorscafe.com/unit-converter/en/calculator/coaxial-cable/?wd=0.9&wdu=mm&sd=3.15&sdu=mm&mt=3>

Figura 97 Date de catalog si calculul parametrilor unui cablu coaxial RG58 .



La intrarea cablului apare unda incidentă $u_{inc} = u_G/2 = 10V$. După propagarea de-a lungul cablului $l = 100m$ timp de $0.5\mu s$, unda incidentă atinge receptorul și se propagă înapoi unda reflectată $u_{refl} = k_r u_{inc} = 2V$, prin cablul $l = 100m$, timp de $0.5\mu s$. După $1\mu s$, la începutul cablului apare $u_{refl} = 2V$.

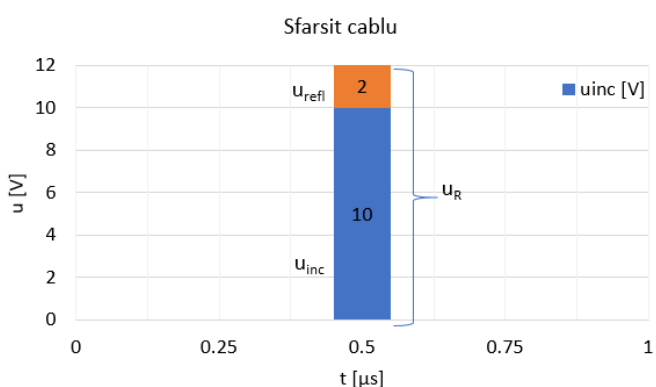
(a)



După $0.25\mu s$, unda incidentă ajunge la mijlocul cablului ($50m$).

Unda reflectată ajunge la mijlocul cablului la $0.75\mu s$, deoarece unda incidentă are nevoie de $0.5\mu s$ până la sfârșitul cablului și încă $0.25\mu s$ până la mijlocul cablului.

b)



După $0.5\mu s$, unda incidentă ajunge la sfârșitul cablului ($100m$). Din cauza neacordării la receptor, o parte din energie este reflectată prin u_{refl} . Astfel tensiunea măsurată la receptor este $u_r = u_{inc} + u_{refl} = 12V$.

c)

Figura 98 Semnalele incidente și reflectate pentru cazurile a, v și c.

ii. Rezolvarea numerică cu ajutorul LTSpice

Se definește circuitul din Figura 99:

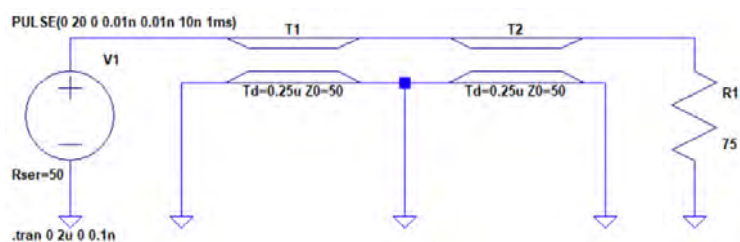
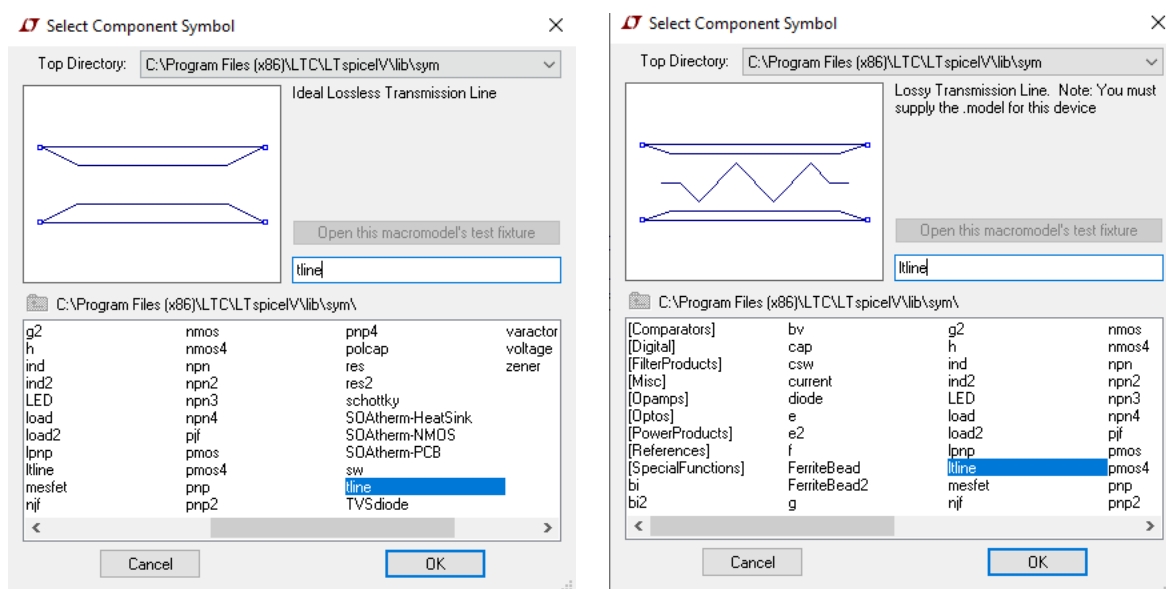


Figura 99 Circuit LTSpice pentru modelarea propagării unui semnal pe un cablu coaxial RG58.

Pentru a măsura semnalul la mijlocul liniei de transmisie aceasta se definește din două porțiuni, T1 și T2.

În LTSpice se pot defini 2 tipuri de linii, linie de transmisie fără pierderi (Ideal Transmission line) **tline** și cu pierderi (Lossy Transmission Line) **ltline**, Figura 100.



a) Modelul a) tline și b) ltline din biblioteca LTSpice.

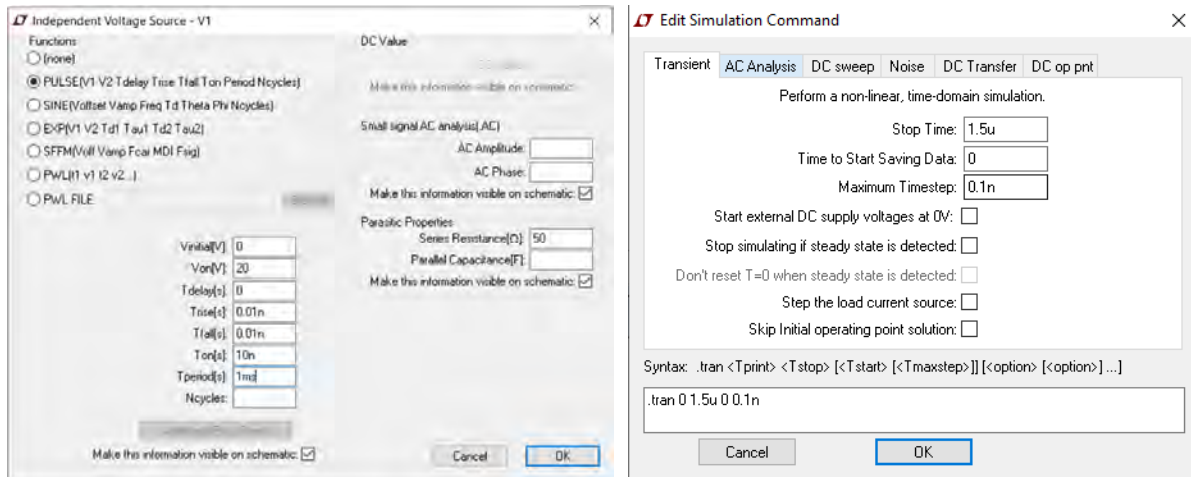
O linie de transmisie ideală **tline**, se poate defini în funcție de:

1. timpul de întârziere și impedanța proprie Z_0 "**Td=50n Z0=50**", sau
2. impedanța proprie Z_0 , frecvența de lucru și lungimea liniei ca multiplu de lungimi de undă "**Z0=50 F=1MHz NL={wavelength}**".

Timpul de parcurgere a cablului de către unda incidentă, $t = 0.5\mu s$, se împarte în mod egal între cele două linii. Astfel, parametri LTSpice pentru cele două linii sunt: **T1 -> Td=0.25u Z0=50** și **T2 -> Td=0.25u Z0=50**, Figura 99.

Se definește o sursă de tensiune cu amplitudinea de 20V, de tipul puls, cu durata de creștere și cădere de 0,01ns, durata impulsului de 10ns, perioadă de $T=1/f=1/kHz=1ms$ și rezistența de 50Ω "**PULSE(0 20 0 0.01n 0.01n 10n 1ms)**", vezi Figura 101a).

Se alege regimul de lucru tranzitoriu "**.tran 0 1.5u 0 0.1n**", vezi Figura 101b).

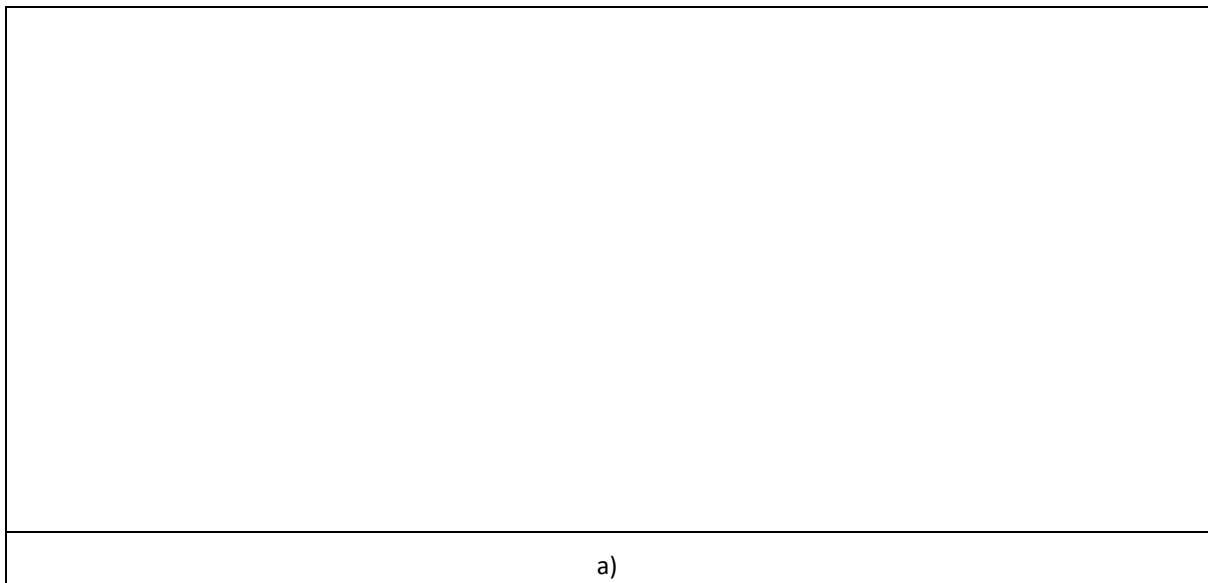


a)

b)

Figura 101 a) Sursa de tensiune și b) regimul de lucru al acesteia.

Să se reprezinte în Figura 102a), b) și c) variația tensiunii undelor incidente și reflecte la începutul, mijlocul și sfârșitul cablului coaxial.



a)

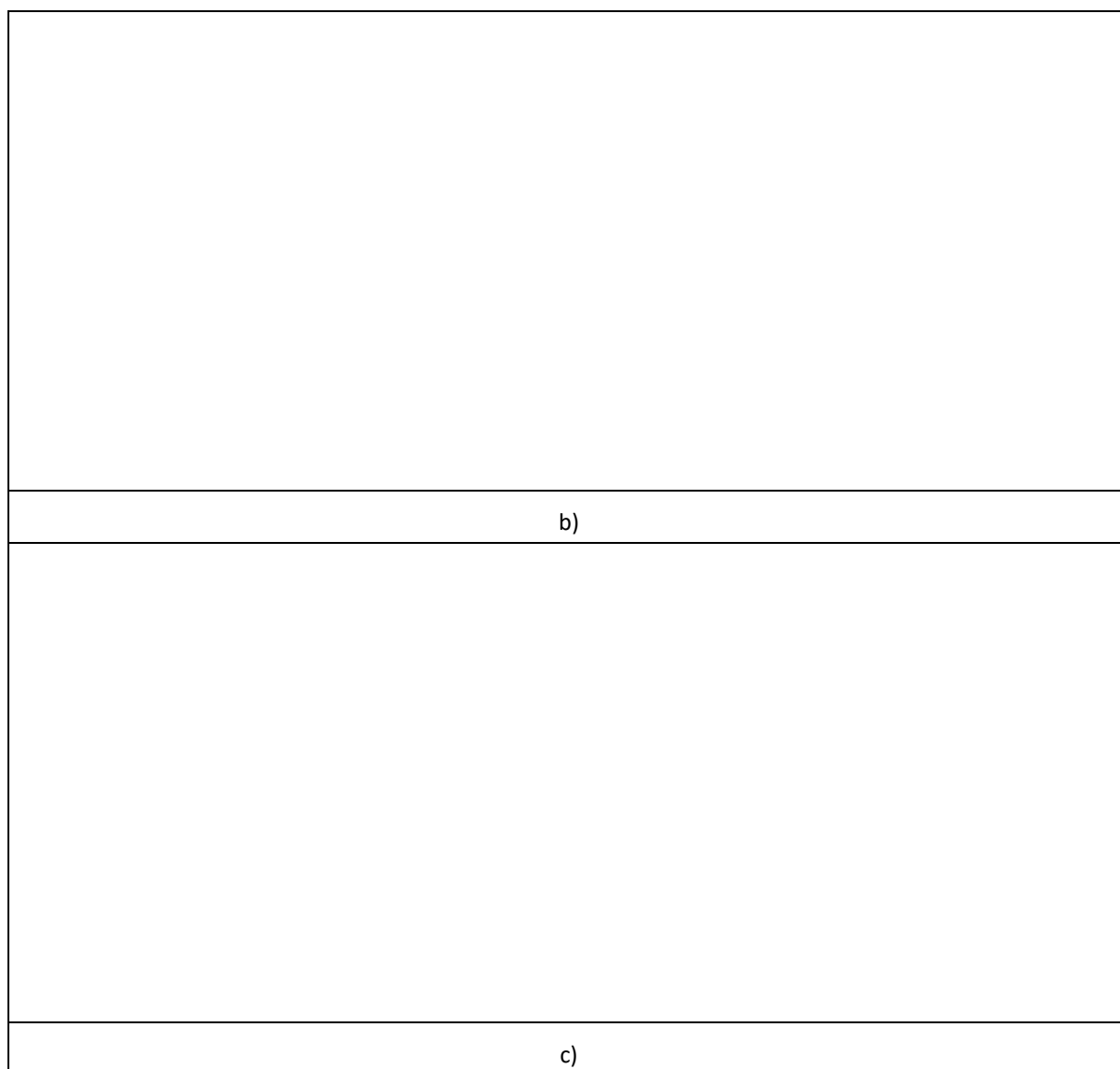


Figura 102 a) Variația tensiunii incidente și reflectate la a) începutul, b) mijlocul și c) sfârșitul cablului coaxial.

Să se reprezinte în Figura 103a), b) și c) variația curentului undelor incidente și reflectate la începutul, mijlocul și sfârșitul cablului coaxial.

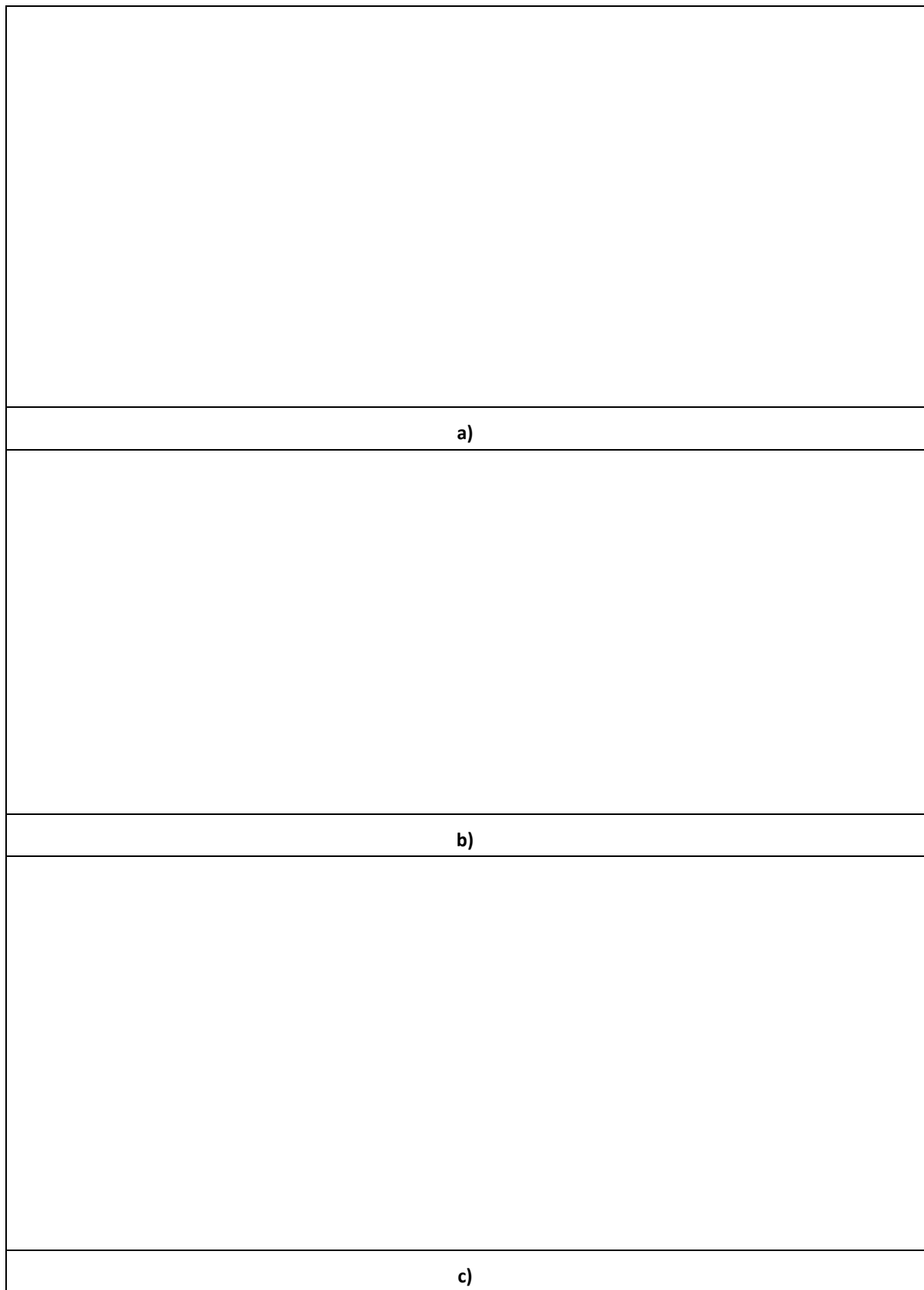
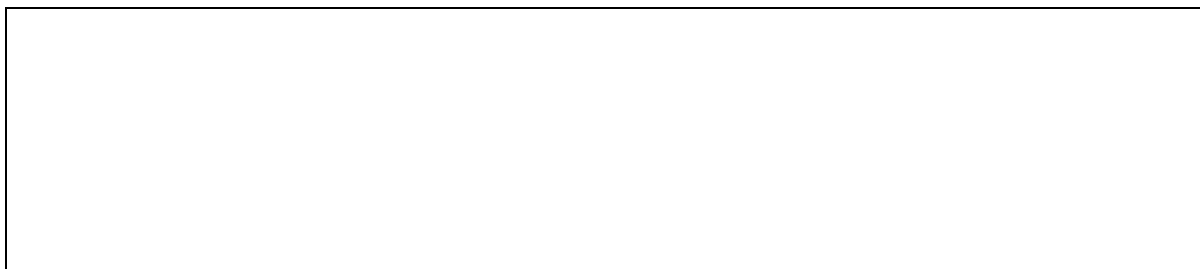
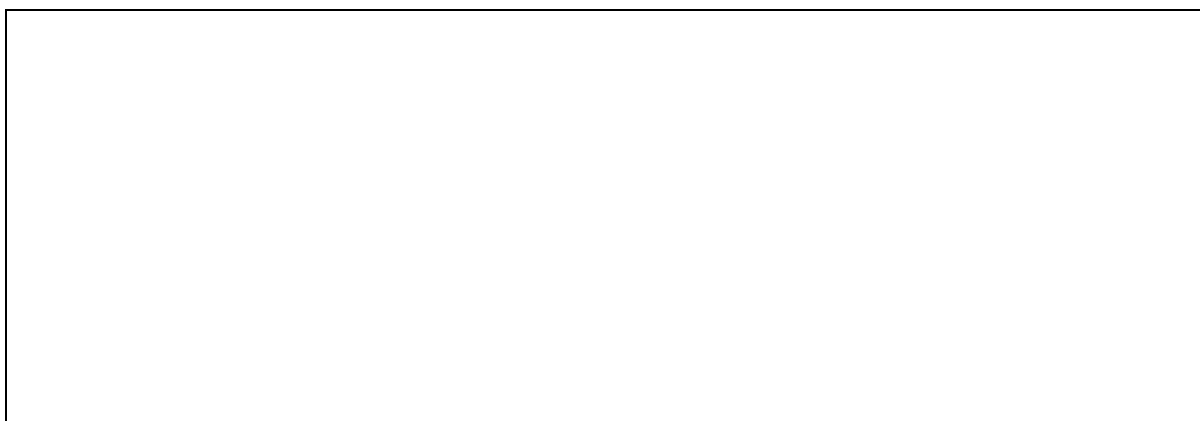


Figura 103 a) Variația curentului incident și reflectat la a) începutul, b) mijlocul și c) sfârșitul cablului coaxial.

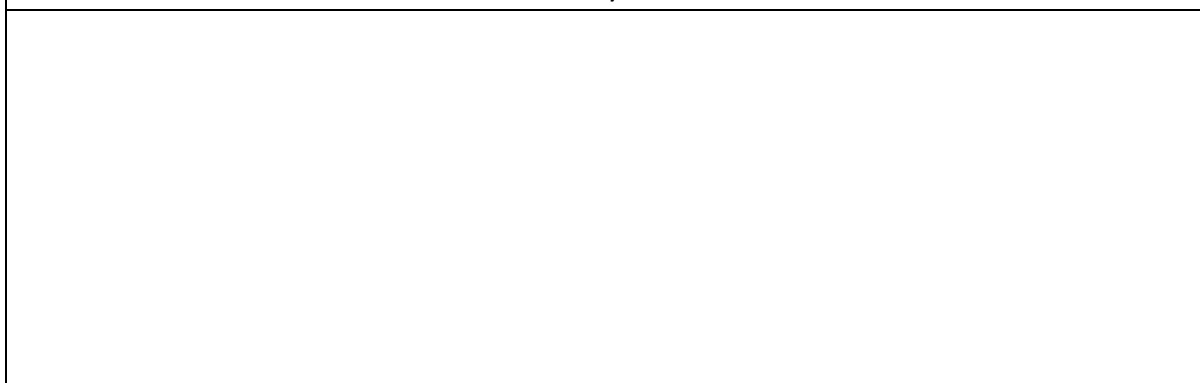
Să se explice care sunt diferențele dintre formele de undă ale tensiunii și cele ale curentului și care sunt cauzele acestora.



Să se reprezinte în Figura 104a), b) și c) variația tensiunii undelor incidente și reflectate la începutul, mijlocul și sfârșitul cablului coaxial pentru $R_1=50\Omega$.



a)



b)



c)

Figura 104 a) Variația tensiunii incidente și reflectate la a) începutul, b) mijlocul și c) sfârșitul cablului coaxial pentru $R_1=50\Omega$.

Să se reprezinte în Figura 105 a), b) și c) variația curentului undelor incidente și reflectate la începutul, mijlocul și sfârșitul cablului coaxial pentru $R_1=50\Omega$.

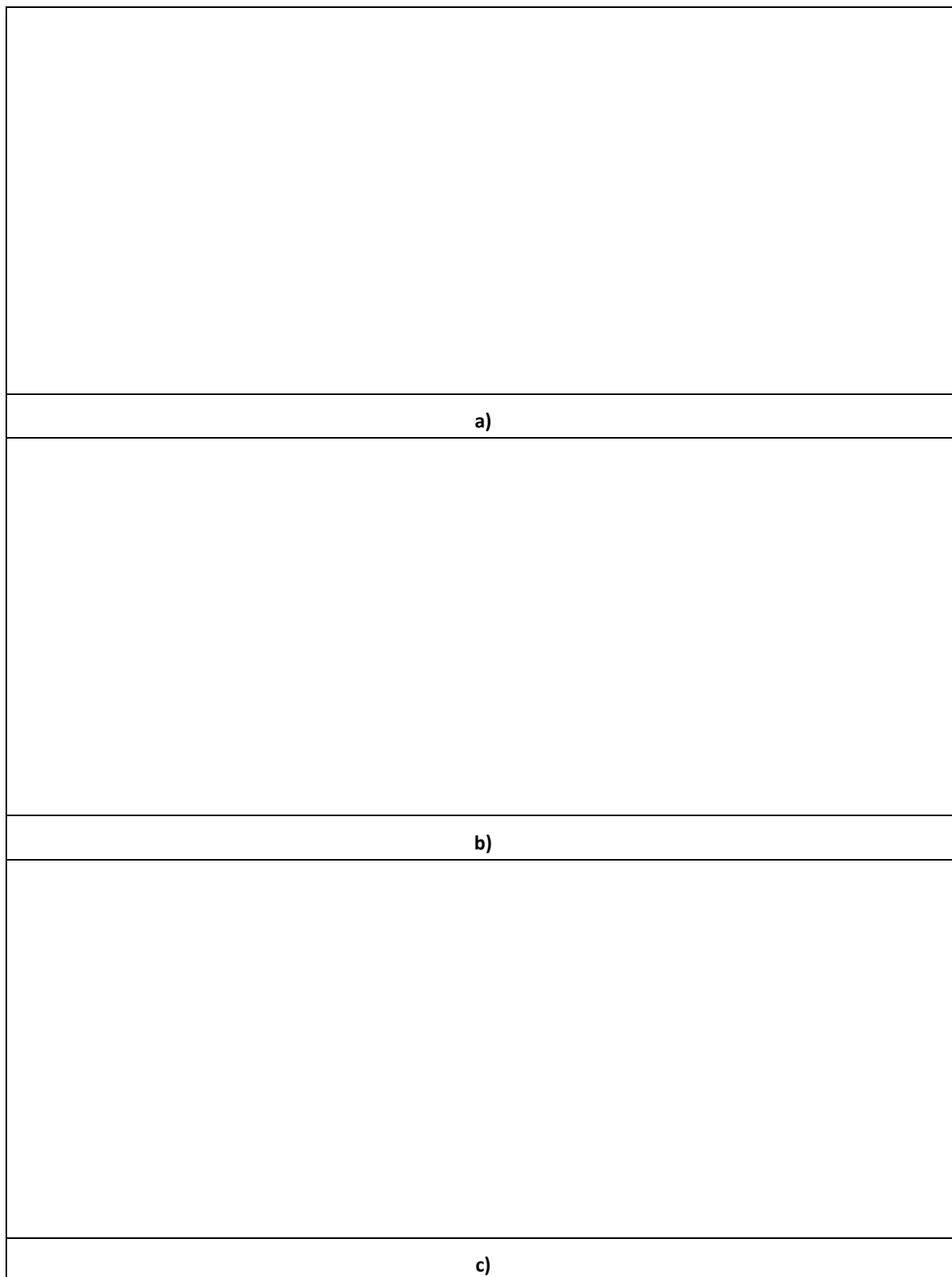


Figura 105 a) Variația curentului incident și reflectat la a) începutul, b) mijlocul și c) sfârșitul cablului coaxial pentru $R_1=50\Omega$.

Să se explice care sunt diferențele dintre formele de undă ale tensiunii și cele ale curentului și care sunt cauzele acestora.

Să se reprezinte în Figura 106a), b) și c) variația tensiunii undelor incidente și reflecte la începutul, mijlocul și sfârșitul cablului coaxial pentru sfârșitul liniei în scurt circuit, $R_1=1e-12\Omega$.

a)

b)

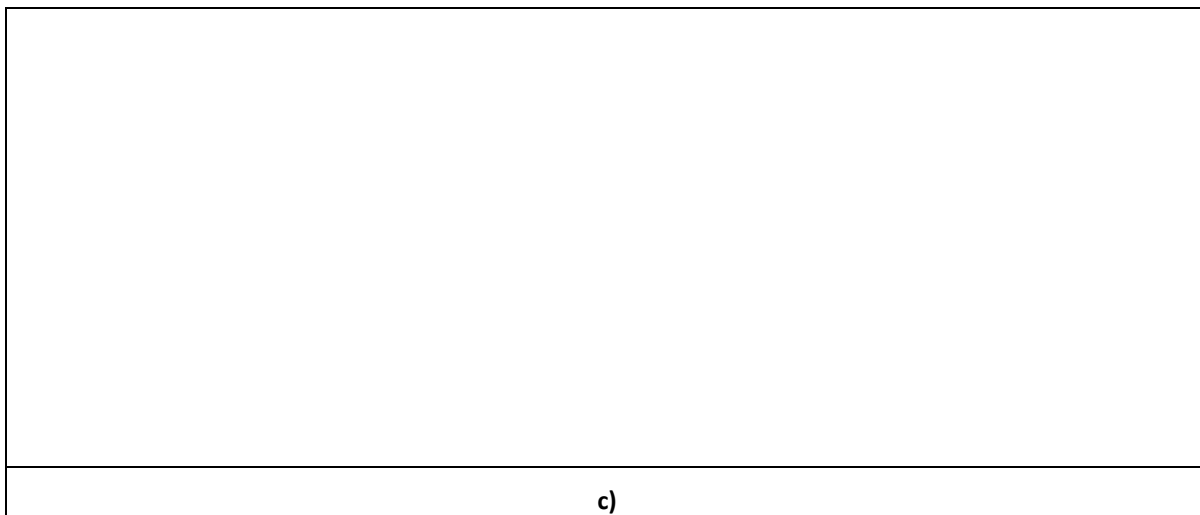
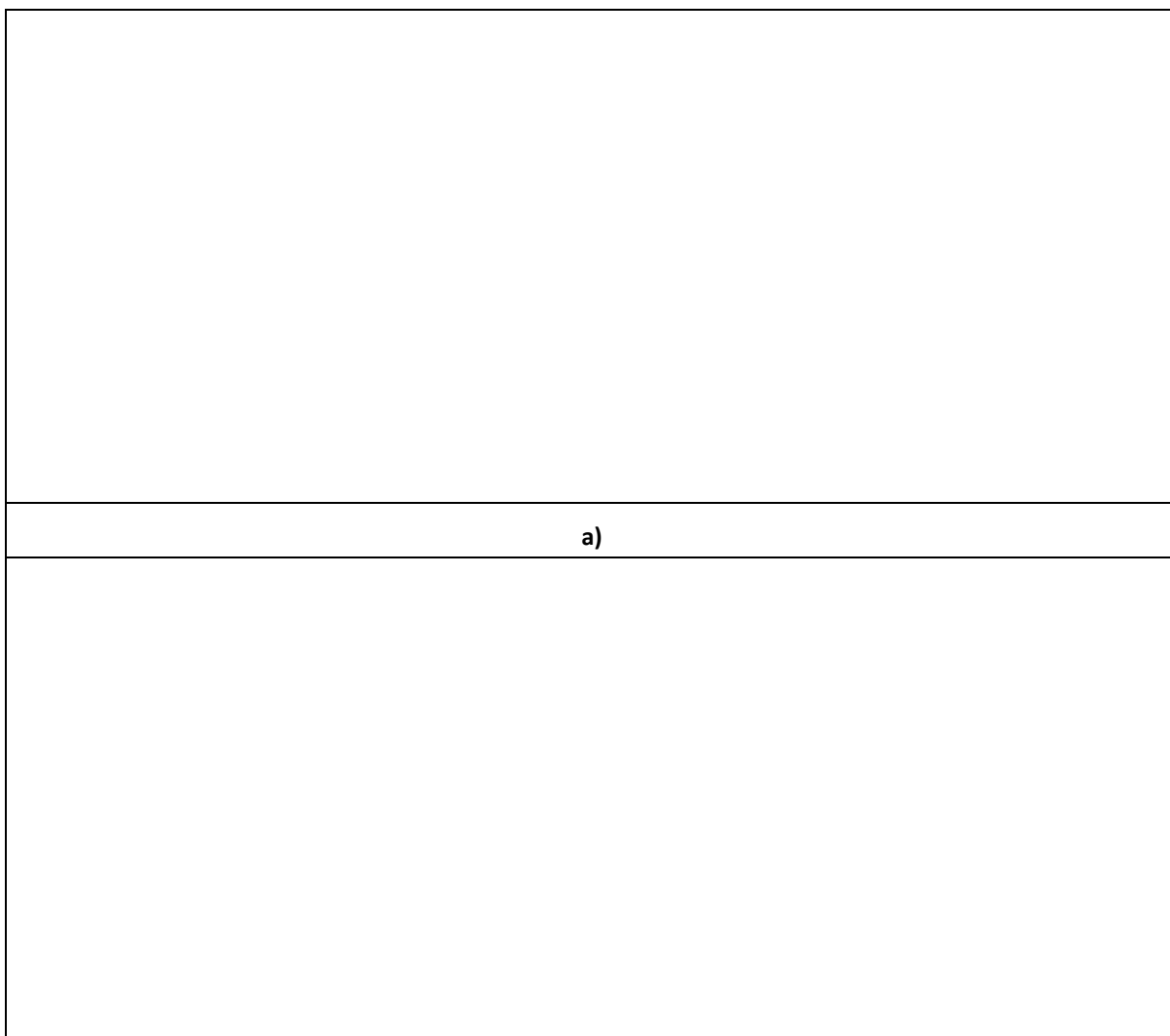


Figura 106 a) Variația tensiunii incidente și reflectate la a) începutul, b) mijlocul și c) sfârșitul cablului coaxial pentru sfârșitul liniei în scurt circuit, $R_1=1e-12\Omega$.

Să se reprezinte în Figura 105 a), b) și c) variația curentului undelor incidente și reflectate la începutul, mijlocul și sfârșitul cablului coaxial pentru sfârșitul liniei în scurt circuit, $R_1=1e-12\Omega$.



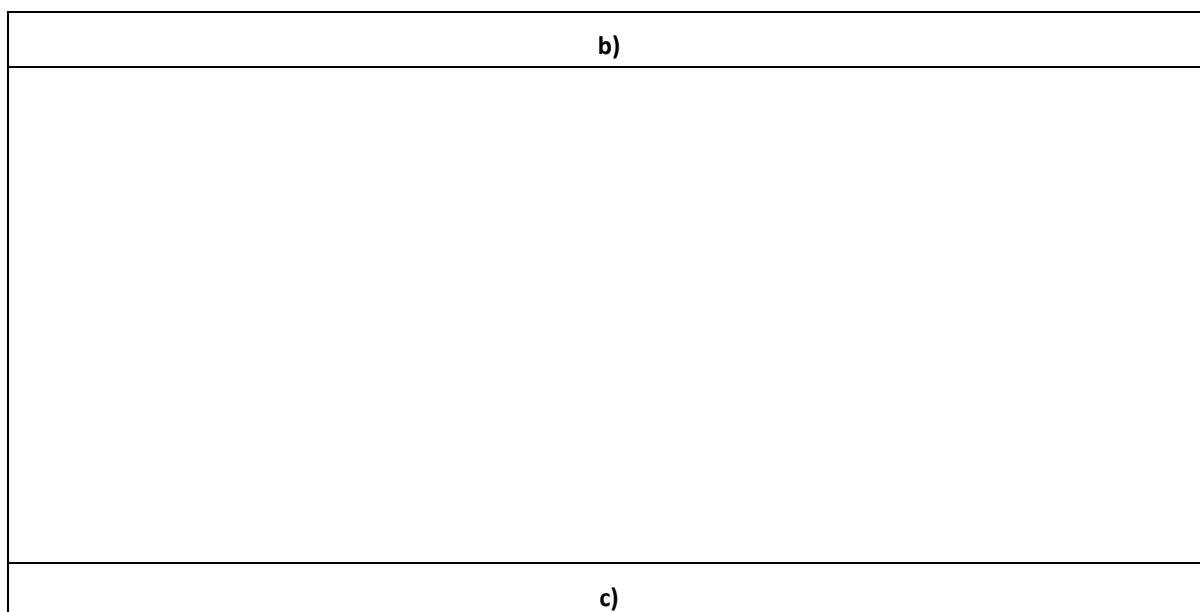
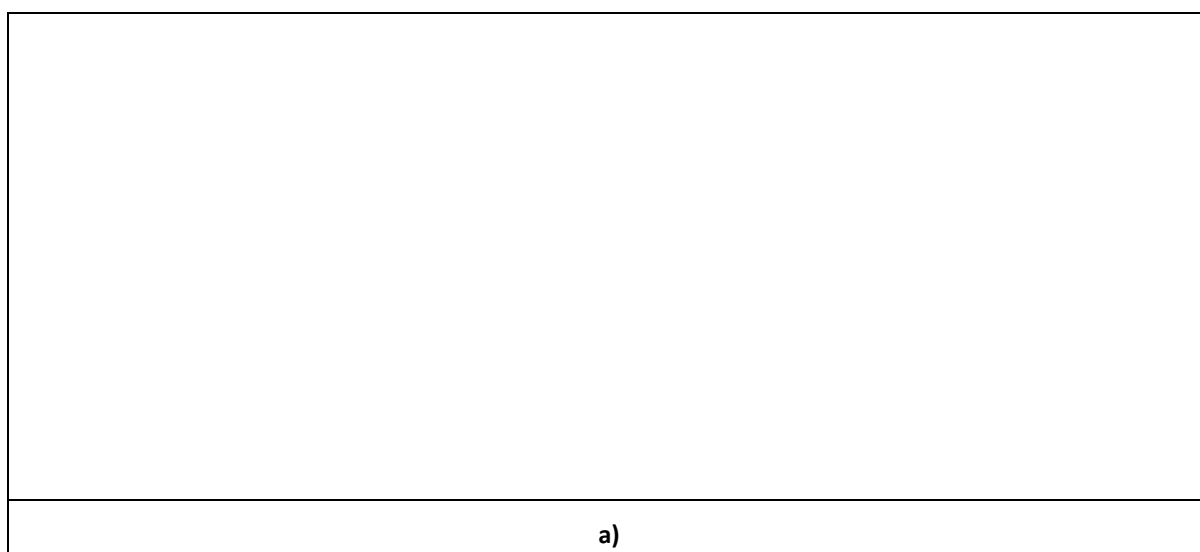


Figura 107 a) Variația curentului incident și reflectat la a) începutul, b) mijlocul și c) sfârșitul cablului coaxial pentru sfârșitul liniei în scurt circuit, $R_1=1e-12\Omega$.

Să se reprezinte în Figura 108a), b) și c) variația tensiunii undelor incidente și reflectate la începutul, mijlocul și sfârșitul cablului coaxial pentru sfârșitul liniei în gol, $R_1=1e+12\Omega$.



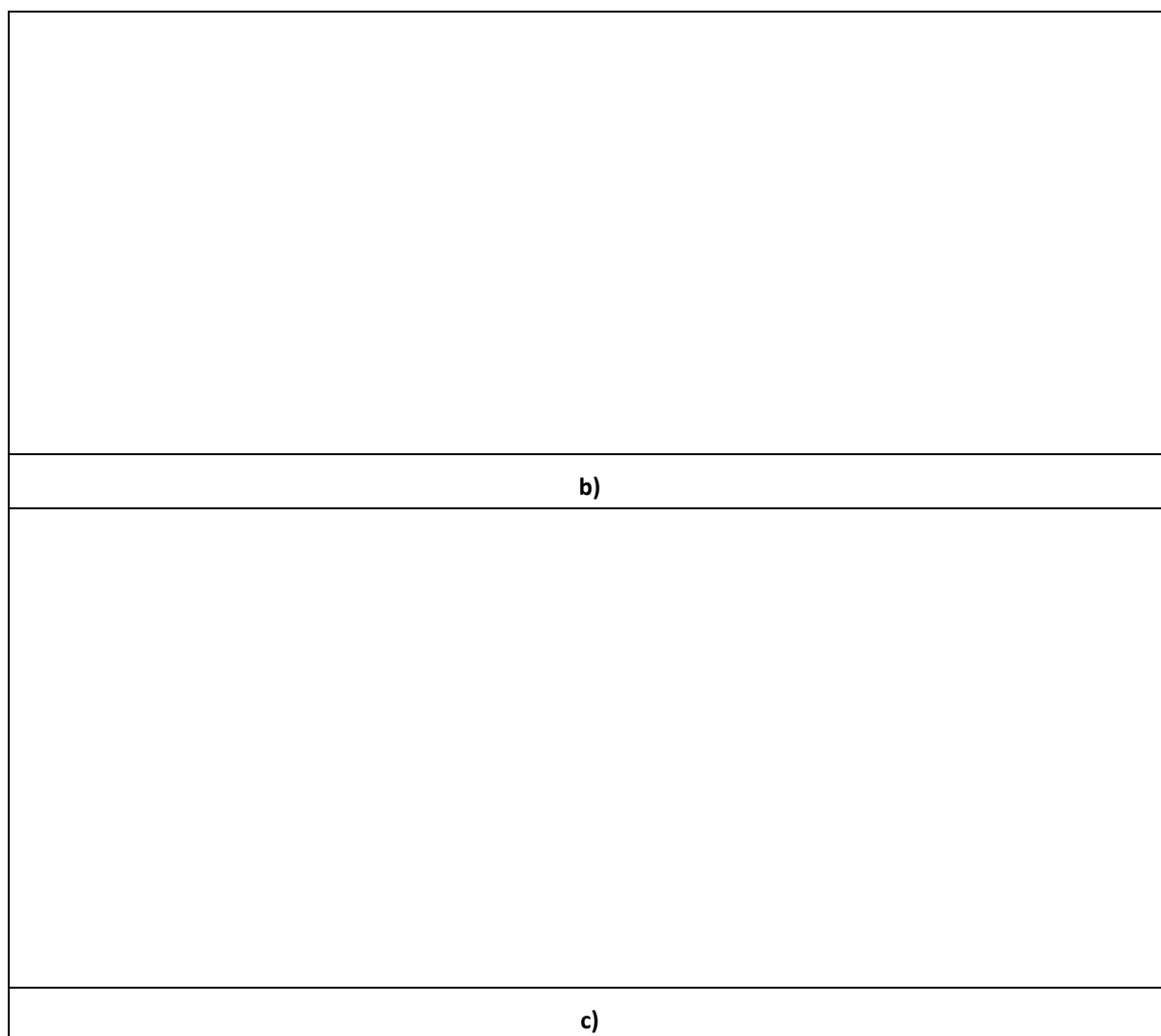


Figura 108 a) Variația tensiunii incidente și reflectate la a) începutul, b) mijlocul și c) sfârșitul cablului coaxial pentru sfârșitul liniei in gol, $R_1=1e+12\Omega$.

Să se reprezinte în Figura 109a), b) și c) variația curentului undelor incidente și reflectate la începutul, mijlocul și sfârșitul cablului coaxial pentru sfârșitul liniei in gol, $R_1=1e+12\Omega$.

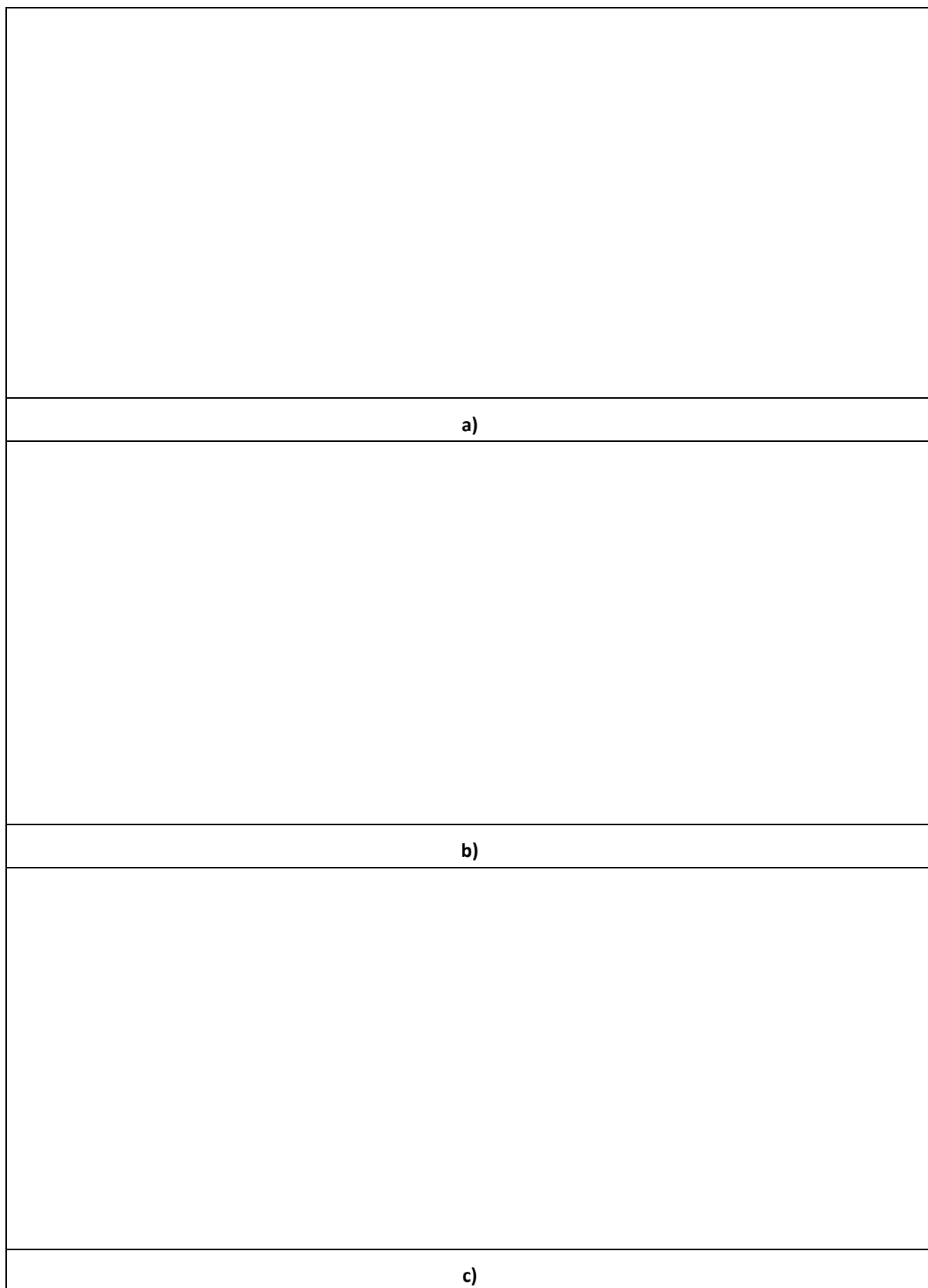


Figura 109 a) Variația curentului incident și reflectat la a) începutul, b) mijlocul și c) sfârșitul cablului coaxial pentru sfârșitul liniei în gol, $R_1=1e+12\Omega$.

10 Bibliografie

- [1] L. W. Nagel, "SPICE2: A computer program to simulate semiconductor circuits", PhD thesis, EECS department, University of California, Berkeley, Electronics Research Laboratory, Memorandum no. ERL-M520, 1975.
- [2] L. W. Nagel and R. Rohrer, "Computer Analysis of Nonlinear Circuits, Excluding Radiation", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. SC-6, pp. 166-182, August 1971.
- [3] W. Weeks, A. Jimenez, G. Mahoney, D. Mehta, H. Qassemzadeh, and T. Scott, "Algorithms for ASTAP - A network-analysis program," IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. 20, no. 6, pp. 628-634, November 1973.
- [4] <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- [5] <https://www.pspice.com/>
- [6] <http://ltwiki.org>
- [7] PURCAR, M., Teoria circuitelor electrice, note de curs, Cursuri_3-4-5_Teoria_Circuitelor.pdf.
- [8] CIUPA R. Bazele electrotehnicii Teorie și aplicații, Vol. 2, Editura Cărții de Știință, 276 pagini, 2006.
- [9] SIMION, E., MAGHIAR T., Electrotehnică, Editura didactică și pedagogică, București, 408 pagini, 1981.
- [10] John D. KRAUS, Electromagnetics, 4th Revised edition, McGraw-Hill Education – Europe, 847 pagini, 1991.