

Electrotehnica în profunzime

Tema de casă

Negru Mihai

Grupa 313CD, Anul 1

email mihai.upb.info2021@gmail.com

Universitatea Politehnica București

Facultatea de Automatică și Calculatoare

Calculatoare și Tehnologiile Informației

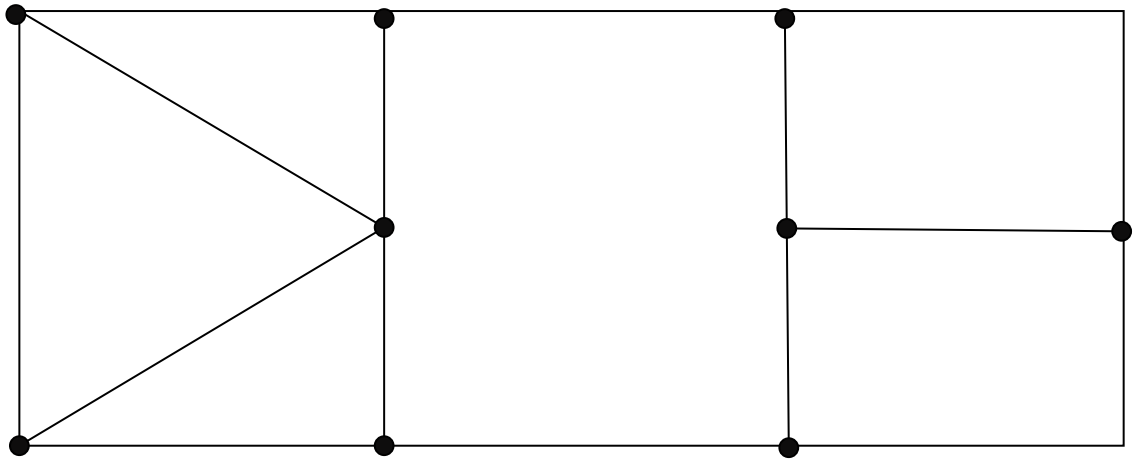
Mai 2022

Cuprins

1	Generarea unui circuit	3
2	Metode sistematice eficiente	6
2.1	Graful de curenți, de tensiuni și bilanțul de puteri	8
3	Generatorul echivalent de tensiune	9
3.1	Determinarea tensiunii și rezistenței de mers în gol	9
3.2	Caracteristica rezistorului liniar și a generatorului echivalent .	12
3.3	Dioda Zener polarizată direct	15
3.4	Dioda Zener polarizată indirect	17
4	Surse comandate	19
5	Rezolvarea circuitelor de curent alternativ	21

1 Generarea unui circuit

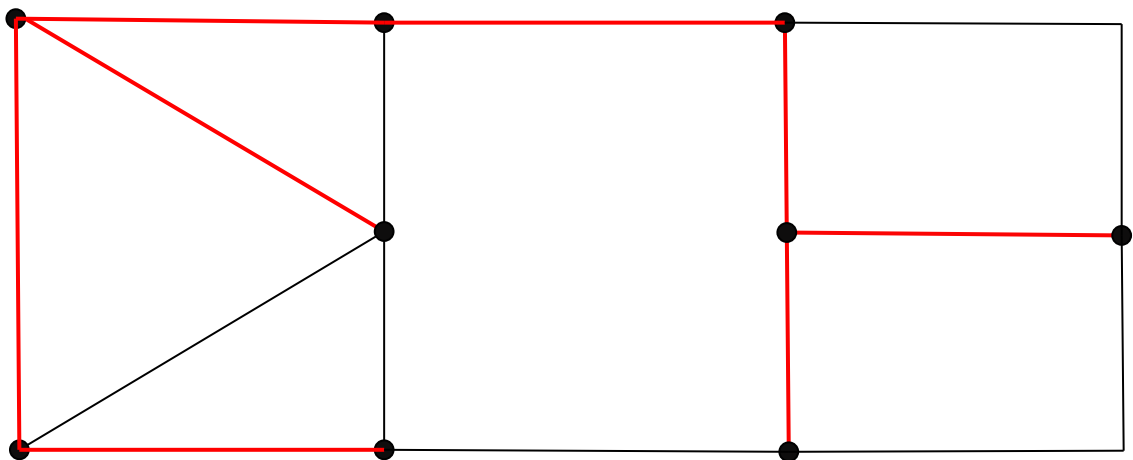
Vom începe prin a reprezenta schematic un graf conex care va reprezenta circuitul electric rezistiv liniar.



Observăm că topologia grafului de mai sus este:

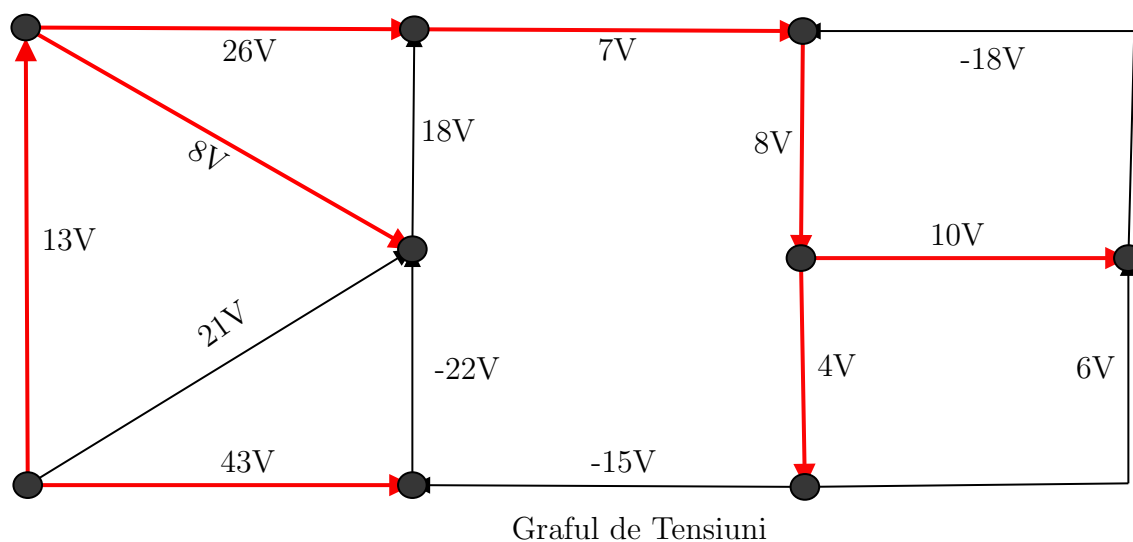
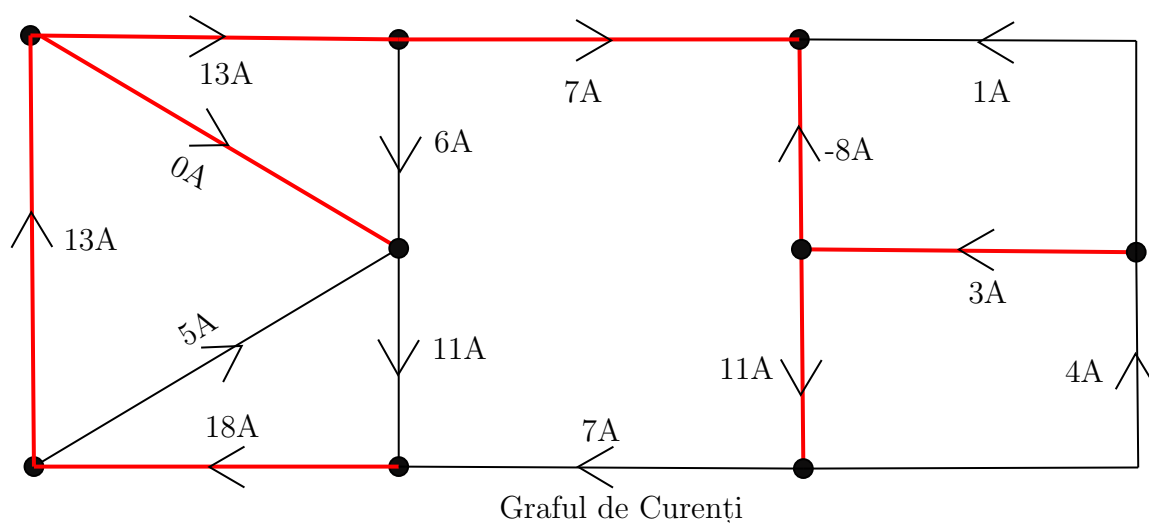
- Numarul de noduri: **9**
- Numarul de laturi: **14**
- Numarul de secțiuni fundamentale: **8**
- Numarul de bucle fundamentale: **6**

În cele ce urmează vom căuta un arbore pentru graful desenat mai sus pentru a putea inițializa lucrul cu intensitățile și tensiunile circuitului.



Un arbore va trece prin toate nodurile grafului și nu va avea cicluri în componența acestuia astfel numărul total de ramuri va fi egal cu numărul de secțiuni fundamentale adică **8**.

În continuare vom stabili 2 grafuri cel de tensiune și cel de curenți. Pentru a păstra proprietatea de bună formulare a unui circuit vom predefini pentru ramurile arborelui tensiuni **aleatoare**, iar pentru coarde tensiunea se va afla cu **Kirchhoff II**. Pentru intensități vom predefini valori **aleatoare** pe coardele grafului, iar pentru ramuri intensitățile se vor afla cu **Kirchhoff I**.

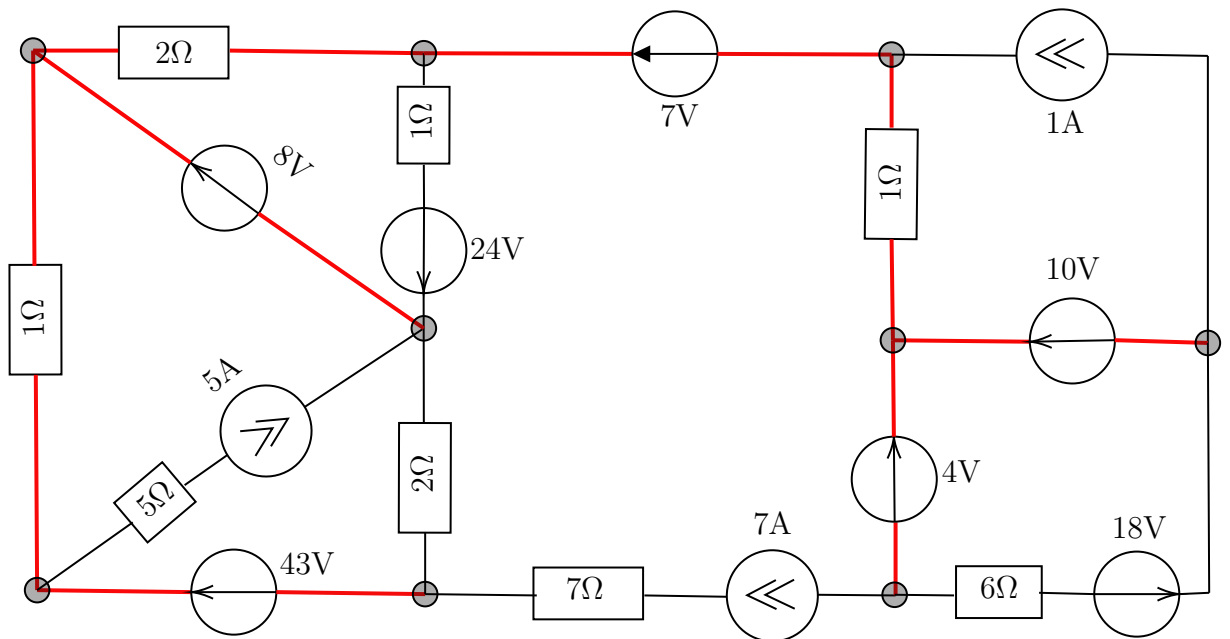


Pentru a verifica acum dacă graful de curenți și graful de tensiuni este bine construit vom verifica *Legea lui Tellegen*.

$$P_c = 13 \cdot 26 + 7 \cdot 7 - 1 \cdot 18 + 0 \cdot 8 + 13 \cdot 13 + 21 \cdot 5 - 15 \cdot 7 + 4 \cdot 11 + 4 \cdot 6$$

$$P_g = 43 \cdot 18 - 22 \cdot 11 + 18 \cdot 6 - 8 \cdot 8 + 3 \cdot 10$$

Cum $P_c = P_g = 606W \Rightarrow$ că *Legea lui Tellegen* este verificată și putem să mergem la pasul următor de construcție a unui circuit electric liniar rezistiv.



Pentru acest circuit electric liniar rezistiv cunoaștem topologia acestuia, astfel încurajăm cititorul să facă un pas către următoarea secțiune unde vom discuta care este cea mai eficientă metodă sistematică pentru circuitul de mai sus, iar apoi vom prezenta pașii și rezolvarea acelei metode.

2 Metode sistematice eficiente

Pentru a putea transla problema circuitului electric la metodele sistematice trebuie să cunoaștem topologia circuitului care am enunțat-o mai sus, plus $n_{SIT} = 4$ și $n_{SIC} = NO(SRC \parallel SIC) = 3$.

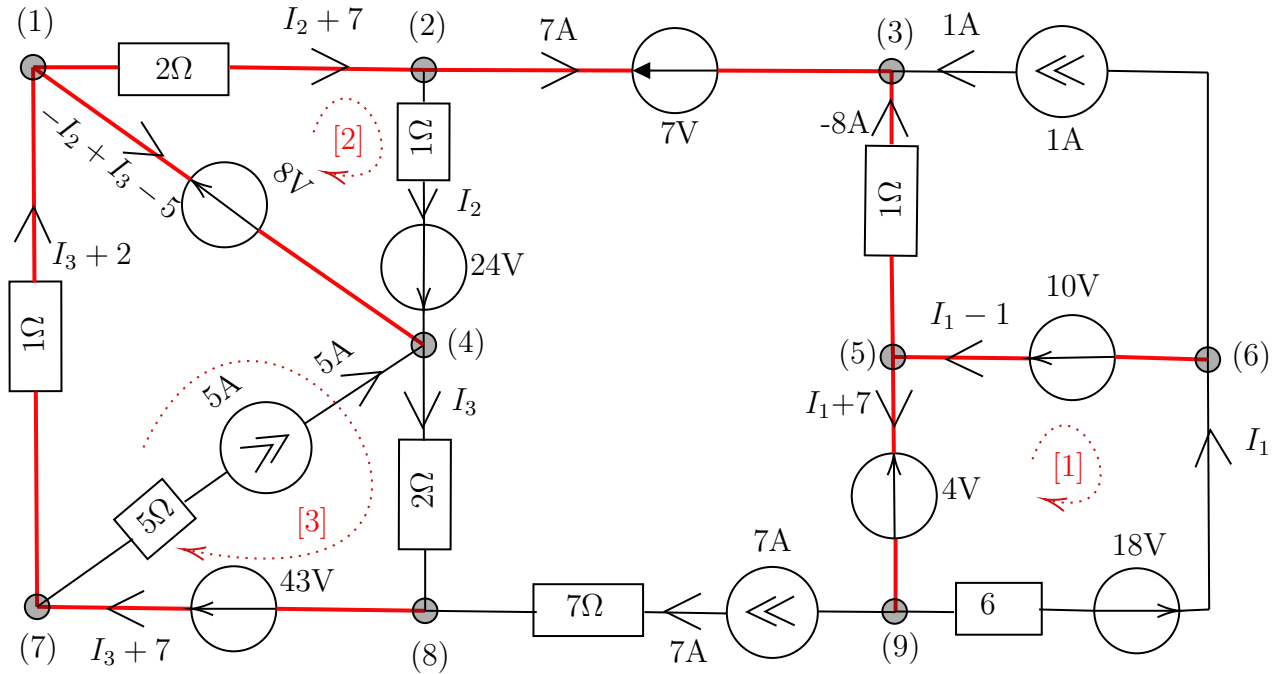
Pentru fiecare metodă sistematică de mai jos vom afișa de câte ecuații avem nevoie pentru a afla toate informațiile utile despre circuit.

- *Kirchhoff clasic* $\Rightarrow 2L = 2 \cdot 14 = 28$ ecuații
- *Kirchhoff în curenți* $\Rightarrow L - N + 1 = 6$ ecuații
- *Kirchhoff în tensiuni* $\Rightarrow N - 1 = 8$ ecuații
- *Curenți de coarde* $\Rightarrow L - N + 1 - n_{SIC} = 3$ ecuații
- *Tensiuni în ramuri* $\Rightarrow N - 1 - n_{SIT} = 4$ ecuații

Conform studiului metodelor sistematice, rezultă că pentru circuitul descris în secțiunea anterioară cea mai eficientă metodă sistematică din cele propuse mai sus ar fi "*Curenți de coarde*".

Pentru a putea rezolva problema propusă trebuie să facem câteva notații pe circuitul nostru. Vom nota nodurile la alegerea noastră, vom alege sensuri de referință arbitrare și vom nota cu simboluri curenții din coardele SRT și cu valori numerice intensitățile din coardele SIC. Mai apoi vom alege la fel arbitrar sensurile de referință pentru curenții plasați pe arborele normal al circuitului și îi vom determina simbolic în funcție de intensitățile din coarde. După aceste notații vom determina 3 bucle care sunt generate de coardele care nu au în compoziția lor un SIC, apoi cu ajutorul lui *Kirchhoff II* pentru buclele alese vom deduce 3 relații care ne vor ajuta la rezolvarea sistemului liniar cu 3 necunoscute.

După ce am aflat curenții necunoscuți vom completa graful de curenți și graful de tensiuni, însă pentru graful de tensiuni trebuie să fim atenți fiindcă pe laturile SRT tensiunile rezultă din relațiile constructive, iar pe laturile **SIC** tensiunile rezultă din *Kirchhoff II*. La final de metodă sistematică vom verifica bilanțul de puteri pentru a fi siguri că nu am greșit în metodele noastre de calcul.



Rescriind ecuațiile rezultante din buclele [1], [2], [3] din *Kirchhoff II* obținem următorul sistem:

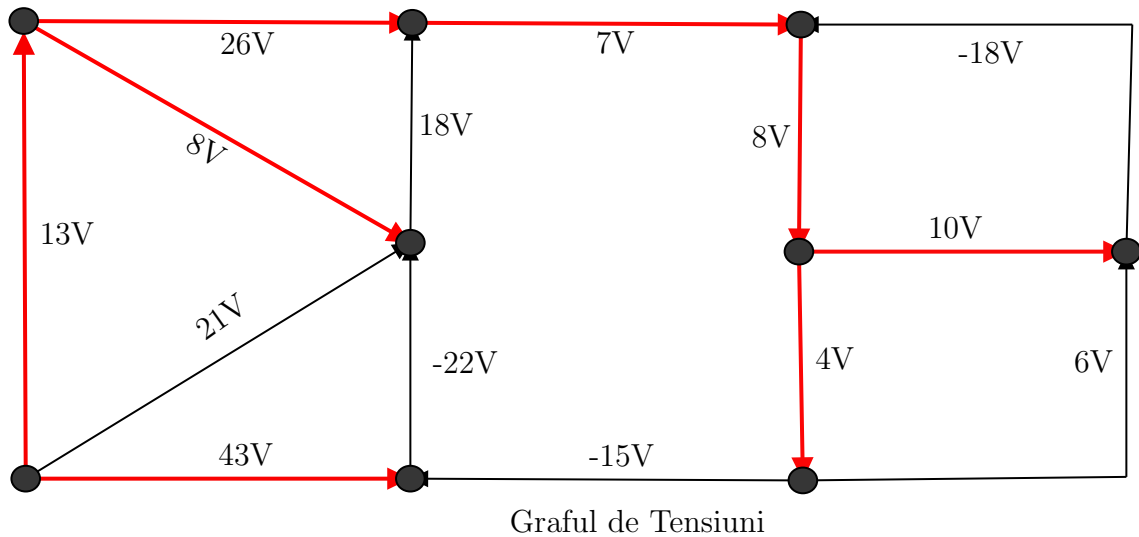
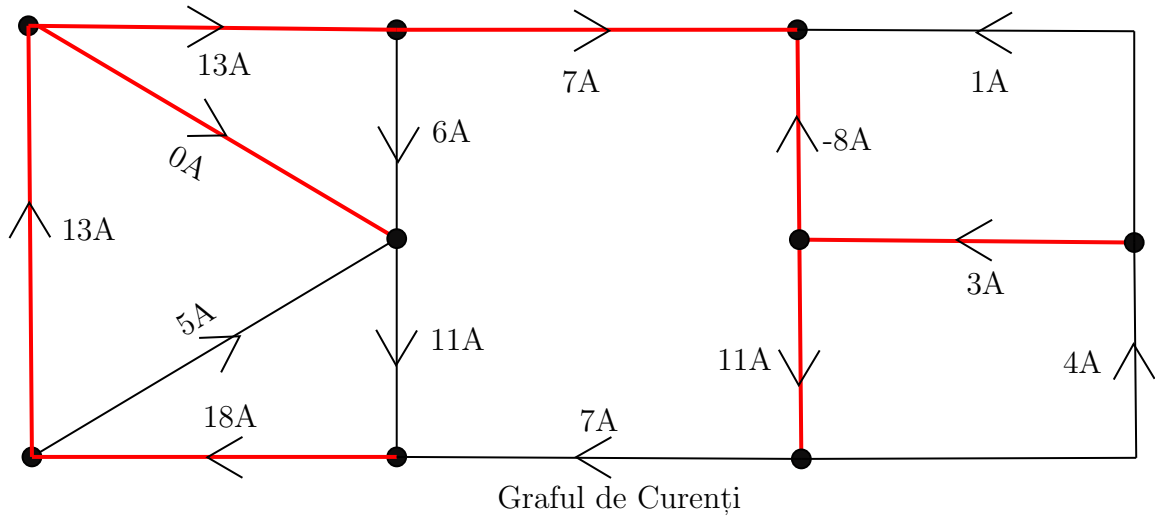
$$\begin{cases} -6I_1 = -18 + 4 - 10 \\ I_2 + 2(I_2 + 7) = 24 + 8 \\ 2I_3 + (I_3 + 2) = 43 - 8 \end{cases}$$

Cum avem noroc acest sistem se rezolvă foarte ușor, rezultând soluția:

$$\begin{cases} I_1 = 4A \\ I_2 = 6A \\ I_3 = 11A \end{cases}$$

2.1 Graful de curenți, de tensiuni și bilanțul de puteri

În urma rezolvărilor pașilor de mai sus am aflat toate intensitățile prezente în circuit.



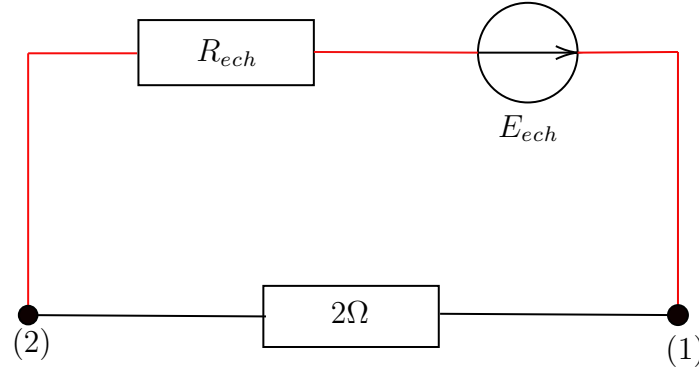
Acum că am aflat cele două grafuri și avem și circuitul electric rezistiv liniar complet, vom verifica bilanțul de puteri ($P_c = P_g$).

$$P_c = 1 \cdot 13^2 + 2 \cdot 13^2 + 5 \cdot 5^2 + 1 \cdot 6^2 + 2 \cdot 11^2 + 7 \cdot 7^2 + 1 \cdot 8^2 + 6 \cdot 4^2 = 1413W$$

$$P_g = -8 \cdot 0 - 7 \cdot 7 + 24 \cdot 6 + 10 \cdot 3 + 43 \cdot 18 - 4 \cdot 11 + 18 \cdot 4 + 4 \cdot 5 + 64 \cdot 7 + 18 \cdot 1 = 1413W$$

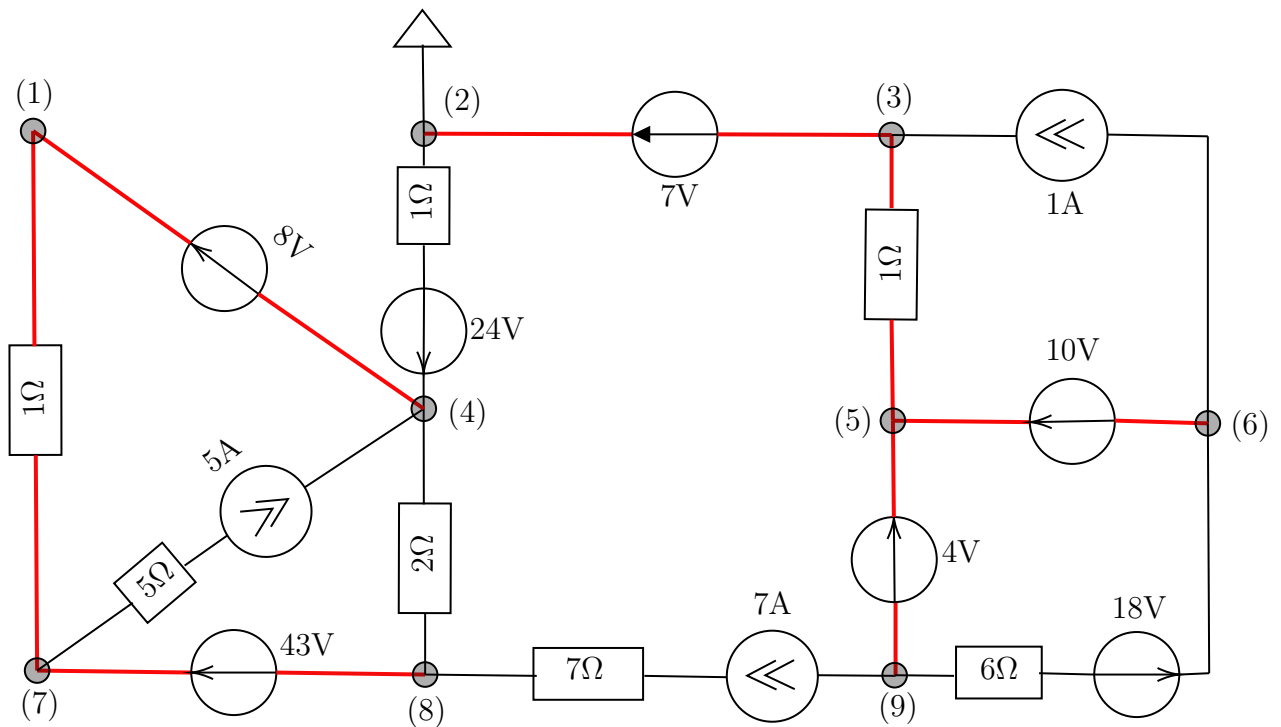
3 Generatorul echivalent de tensiune

În această secțiune vom transforma circuitul electric liniar rezistiv din secțiunile de mai sus într-un generator echivalent de tensiune, față de bornele (1) și (2):



Din teorema lui *Thevenin* rezultă că $E_{ech} = U_{120}$ și $R_{ech} = R_{120}|_{pasivizat}$. Pentru a putea afla în primul rând tensiunea echivalentă ne vom folosi de unealta dedicată *LTSpice*, unde vom tăia din circuit rezistorul dintre bornele (1) și (2) și vom plasa nodul de masă la nodul (2), apoi $V(1)$ va fi E_{ech} .

3.1 Determinarea tensiunii și rezistenței de mers în gol



Rulând acest circuit în *LTSpice* obținem următoarea valoare pentru potențialul nodului (1), care va fi și tensiunea electromotoare căutată:

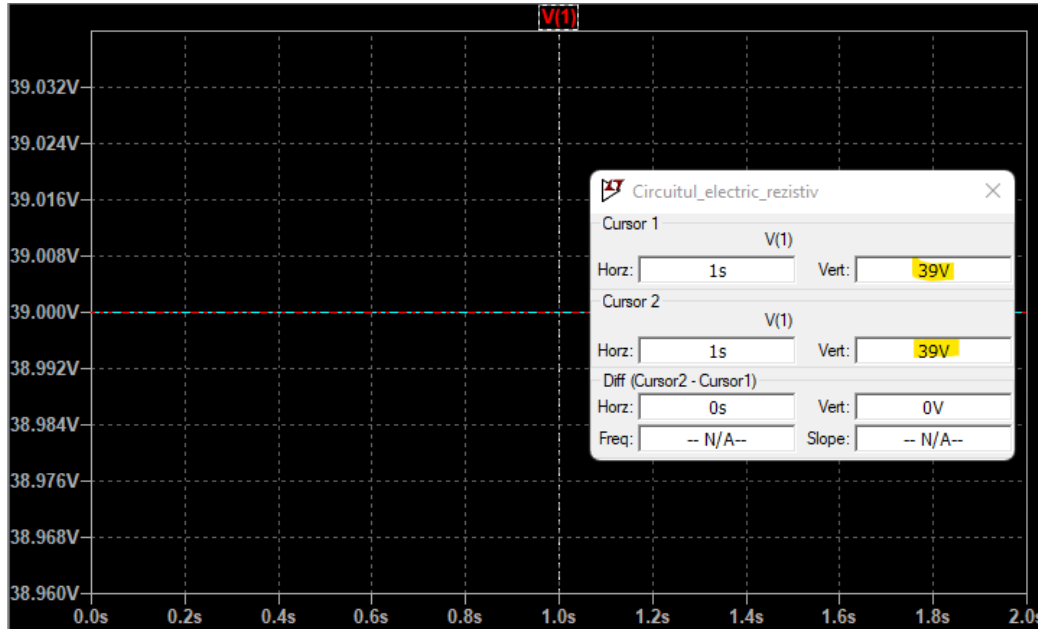
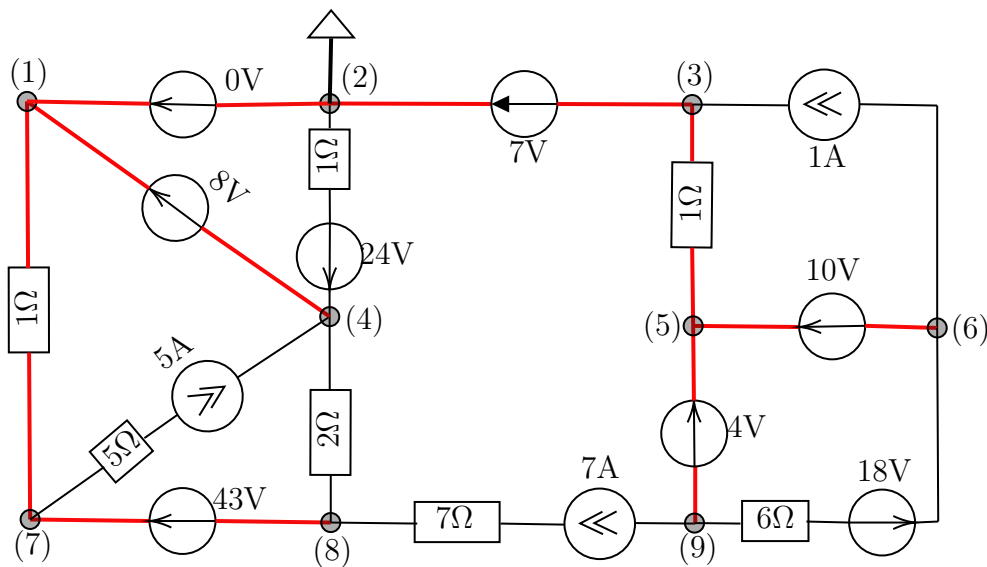


Figura 1: Tensiunea echivalentă

Pentru a putea obține rezistența echivalentă, vom scurtcircuita circuitul echivalent, prin plasarea unui **SIT** cu valoarea **0**, între bornele (1) și (2), cum tensiunea echivalentă este pozitivă rezultă că intensitatea de scurtcircuit este orientată de la borna (1) la borna (2).



La fel rulând acest circuit vom obține următoarea valoare pentru intensitatea de scurtcircuit:

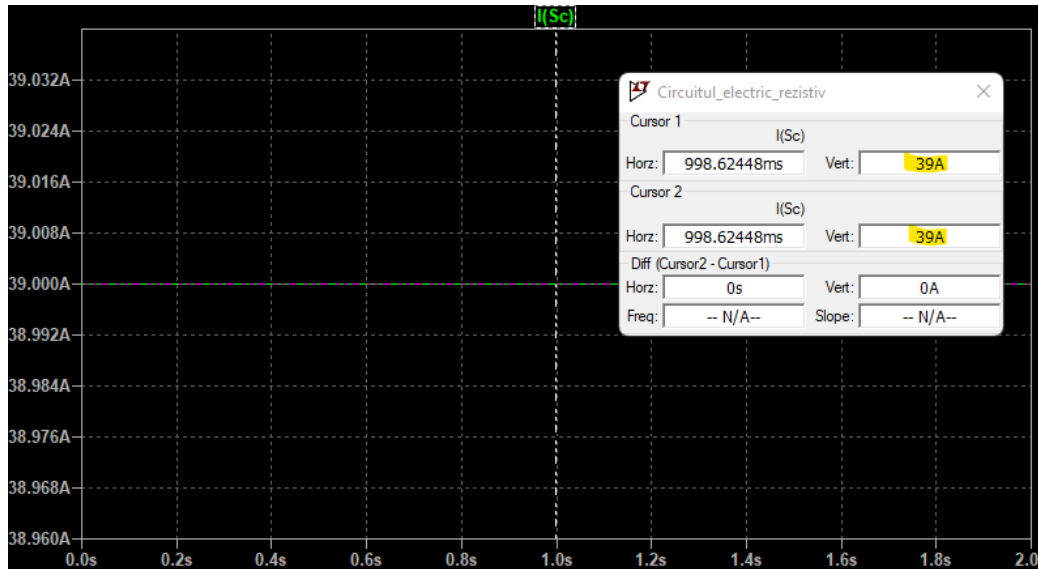
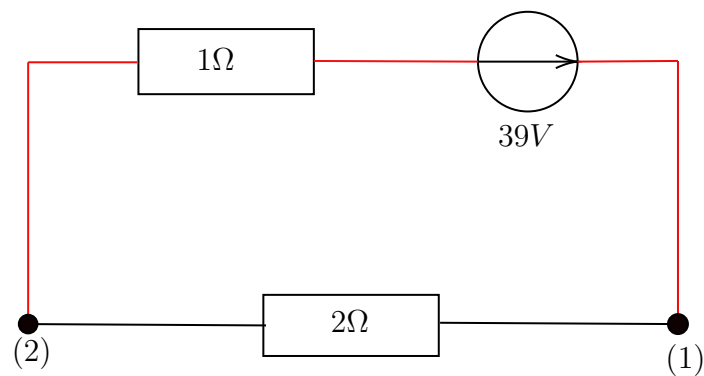


Figura 2: Intensitatea de scurt

Acum cum avem valorile propriu-zise pentru E_{ech} și I_{sc} rezistența echivalentă se va calcula după formula:

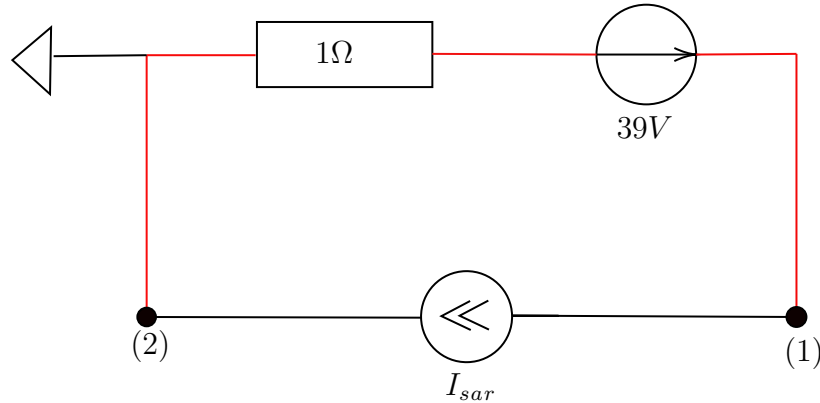
$$R_{ech} = \frac{E_{ech}}{I_{sc}} = \frac{39V}{39A} = 1\Omega$$

Generatorul echivalent de tensiune se rescrie astfel:



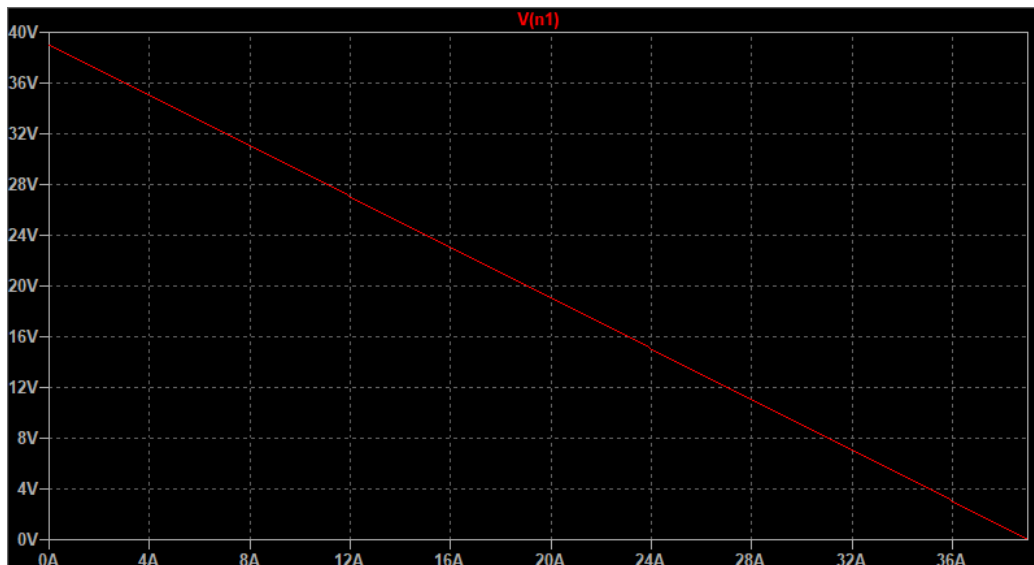
3.2 Caracteristica rezistorului liniar și a generatorului echivalent

Știm foarte bine că caracteristica generatorului liniar va fi o dreaptă cu pantă negativă unde sunt incluse perechile (Intensitate, Tensiune) - $(0, E_{ech})$ și $(I_{sc}, 0)$, deci curențul de sarcină va varia între **0** și I_{sc} (scurt circuit).

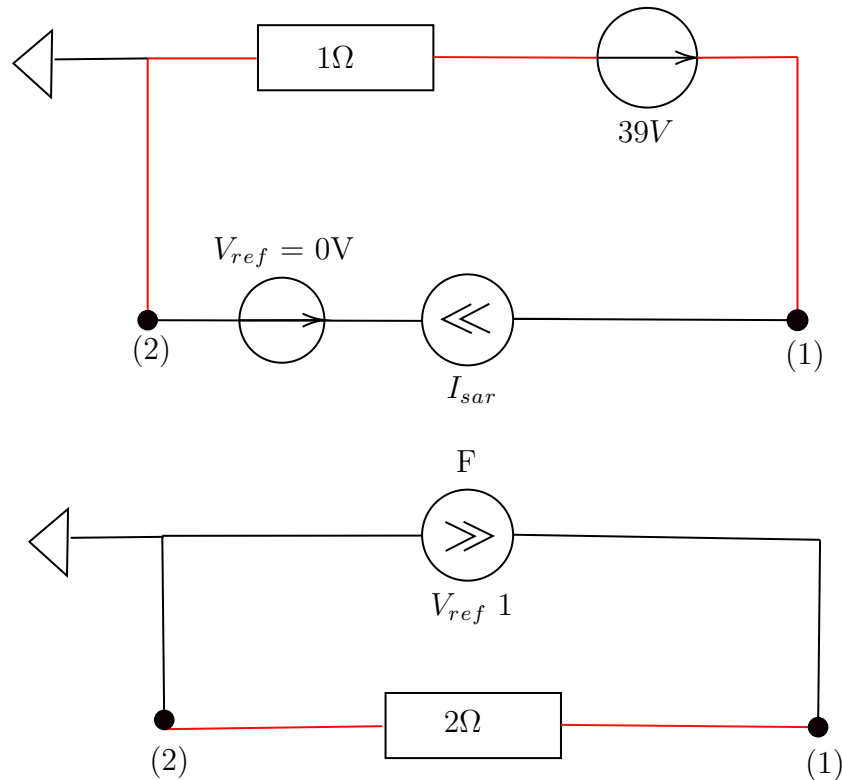


Generatorul echivalent de tensiune

Pentru a putea vedea caracteristica acestuia și pentru a nu supăra LTSpice-ul vom inițializa valoarea intensității de sarcină ca fiind 1, însă pentru a rula circuitul generatorului echivalent vom folosi operatorul **.dc**, unde vom varia intensitatea de sarcină de la 0 către intensitatea de scurtcircuit.



Dacă dorim să interpretăm caracteristica rezistorului liniar vom avea nevoie să imprimăm prin acesta, aceeași intensitate de sarcină, pentru acest lucru vom avea nevoie de un **SICI**, însă un SICI are nevoie ca referință o sursă de tensiune, deci pentru a nu strica circuitele vom adăuga un SIT, în circuitul de mai sus orientat la fel ca E_{ech} , însă cu valoarea **0**. Ambele circuite vor avea ca referință același ground. Important este că factorul de transmitere la SICI să fie 1.



Acum pentru a vizualiza caracteristicile acestora pe un singur graf ne vom folosi de LTSpice, iar pentru a determina care este punctul static de funcționare vom selecta perechea ce definește intersecția celor două grafice, altfel spus haideți să trecem la treabă !!!

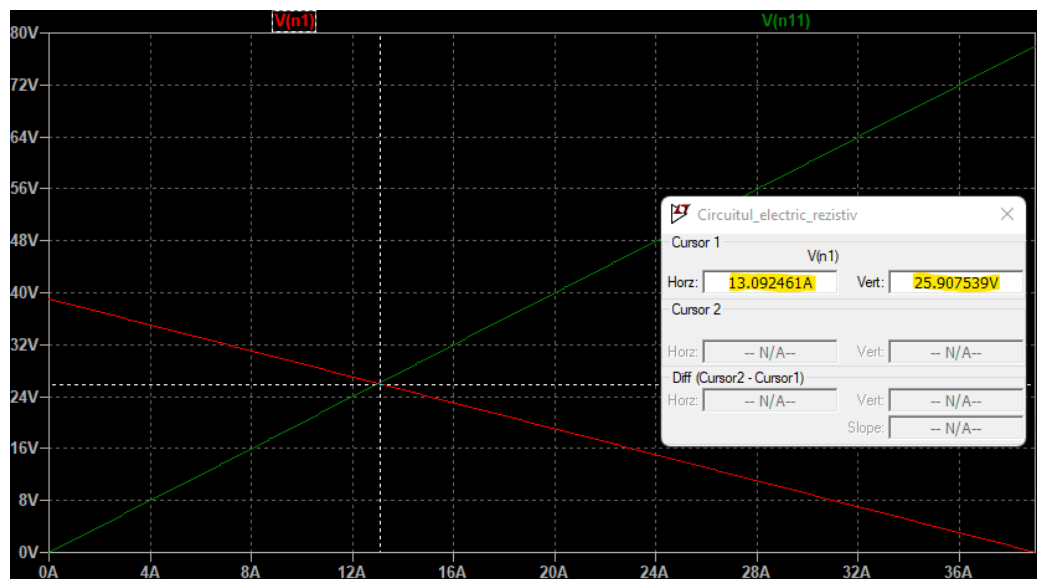


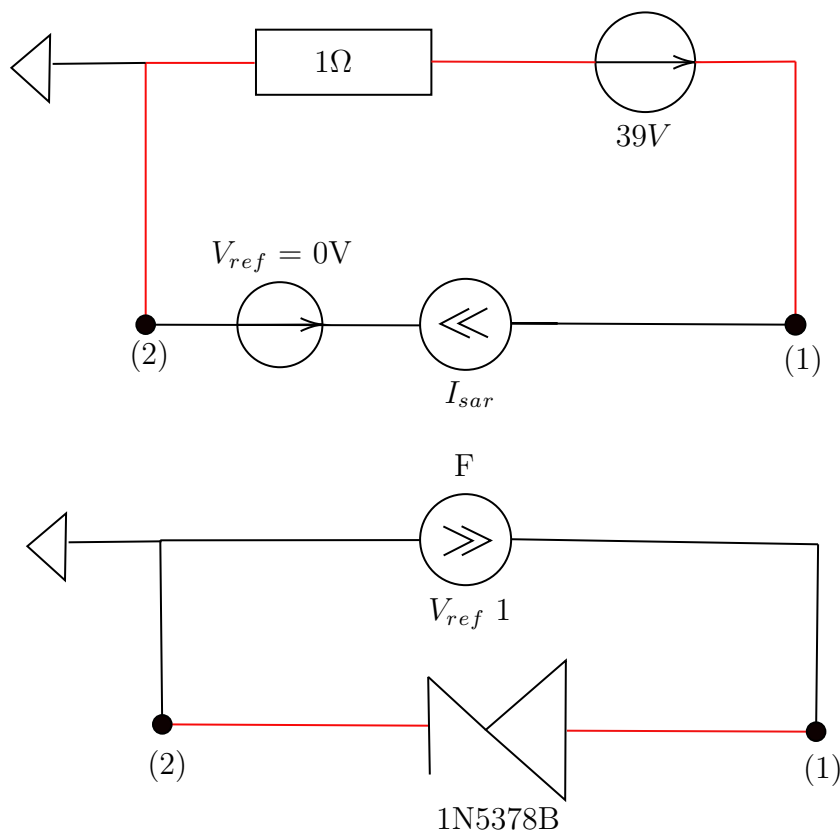
Figura 3: Caracteristici și Punctul stabil

Deci spre final de această secțiune am văzut care este caracteristica generatorului echivalent de tensiune și caracteristica rezistorului liniar, față de restul circuitului la care este conectat. Totodată am aflat și punctul static de funcționare care este determinat de perechea de intensitate și tensiune (13.092, 25.907).

În următoarele două secțiuni vom vedea ce se întâmplă atunci când înlocuim rezistorul liniar cu o diodă Zener prin două metode, cea directă și cea indirectă și la fel vom afla punctele statice de funcționare, cât și caracteristicile fiecăreia.

3.3 Dioda Zener polarizată direct

Pentru această secțiune vom înlocui în schemele de mai sus în loc de rezistorul liniar o diodă Zener polarizată direct. Știm foarte bine că dioda Zener lucrează ca un **SWITCH** pentru un circuit. Deci pe caracteristica acestuia vom vedea că dioda se deschide la o anumită tensiune U_z numită tensiunea *Zener* și apoi ideal ar trebui să fie o linie paralelă până la infinit, însă în cazul real aceasta are o dependență exponențială crescătoare, ceea ce vom observa și pe graficile următoare.



Dioda Zener care a fost aleasă pentru a mulțumi LTSpice-ul este *1N5378B*, care are ”**breakdown voltage**” egal cu **100V**, care este mai mare decât tensiunea echivalentă a generatorului echivalent de tensiune $E_{ech} = 39V$.

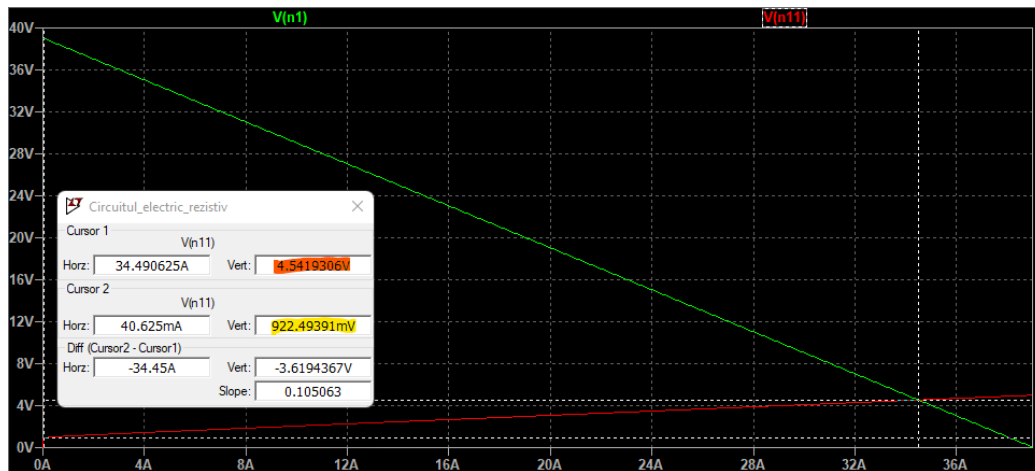
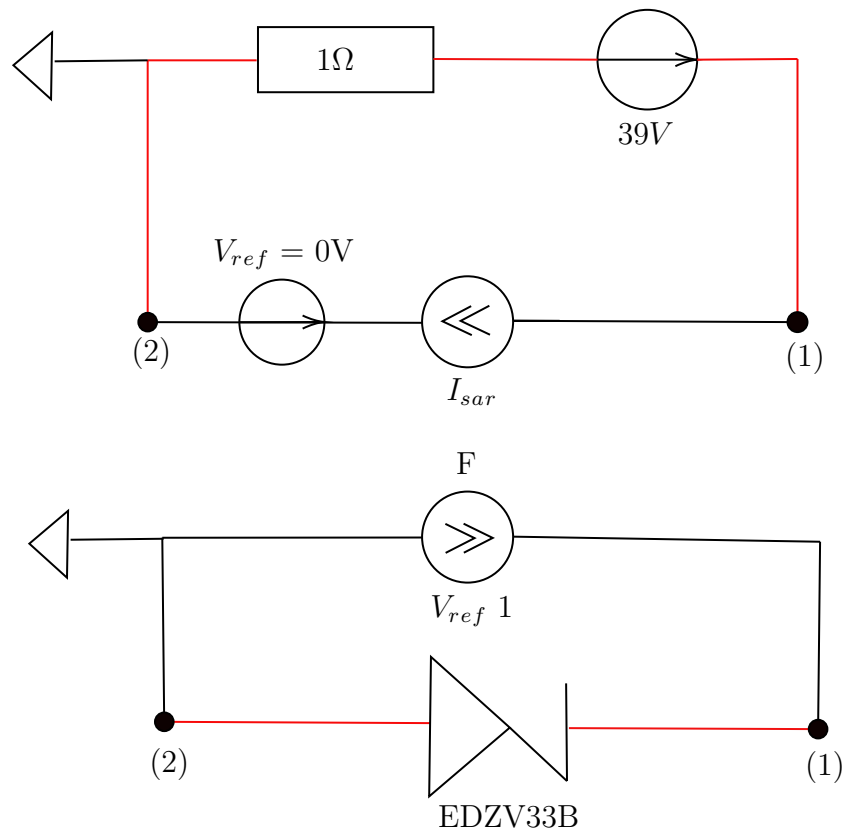


Figura 4: Caracteristica diodei Zener polarizată direct

După cum putem observa pe graficul de mai sus, dioda Zener aleasă are o tensiune de deschidere de **922mV** prin preajma intensității cu valoarea 0, iar punctul stabil de funcționare este defapt intersecția graficului diodei cu graficul generatorului, adică determinat de perechea (Intensitate, Tensiune) $\approx (34.5A, 4.6V)$. Un lucru foarte important de menționat este că dioda Zener pentru modelul ideal ar trebui să fie dependent constant față de tensiunea de tensiunea de deschidere, adică să fie paralel cu axa intensității, însă în modelul real aceasta are o dependență exponențială crescătoare, fin această cauză putem observa pe grafic o creștere latentă a tensiunii. În caz că am fi ales o diodă Zener pentru care **breakdown voltage** ar fi fost mai mică decât tensiunea electromotoare, atunci această dependență de creștere exponențială pe cazul real, ar fi fost cu mult mai mare, din acest motiv am și ales această diodă cu o tensiunea mai mare decât tensiunea generatorului.

3.4 Dioda Zener polarizată indirect

Pentru această secțiune vom proceda identic ca la secțiunea anterioară însă vom schimba sensul diodei și pentru a nu avea mari dependențe exponențiale a diodei, vom alege un **breakdown voltage** mai mic decât tensiunea electromotoare. Acestea fiind spuse vom alege dioda Zener **EDZV33B**, care are tensiunea de deschidere de 33V.



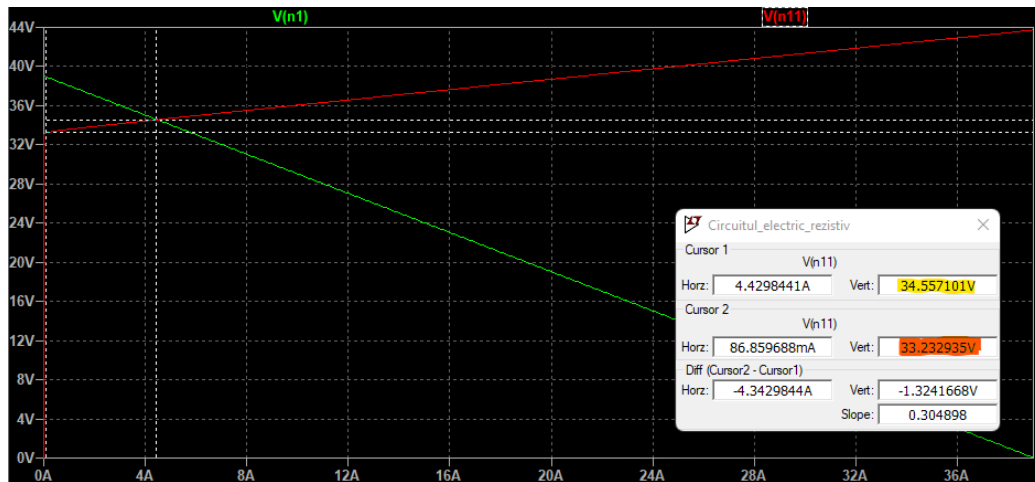


Figura 5: Caracteristica diodei Zener polarizată indirect

După cum putem observa și pe graficul de mai sus, dioda Zener în modelul real se deschide la o tensiune aproximativ egală cu **33V** în preajma curentului egal cu 0 și cum suntem pe modelul real aceasta are o dependență mai mult exponențială crescătoare. Pentru a putea afla punctul stabil de funcționare, vom extrage perechea (Intensitate, Tensiune) care determină intersecția graficelor generatorului echivalent de tensiune și a diodei Zener aleasă, care este **(4.4A, 34,5V)** (Ideal ar fi trebuit să fie **(4.4A, 33V)**). Un lucru foarte important de specificat este dacă am fi ales o diodă cu tensiunea de deschidere mai mare decât tensiunea generatorului echivalent, atunci nu am mai exista un punct stabil de funcționare, fiindcă dioda nu s-ar mai deschide niciodată, din simplul fapt că nu există destul de multă tensiune în circuitul efectiv.

În circuitul de mai sus am ales ca pe latura dintre nodul (4) și (8) să plasăm sursa de curent comandată. Cu ajutorul *LTSpice-ului* și *netlist-ului* am identificat orientarea intensității și astfel am orientat și sursa de curent comandată. Ca post de latură de transfer am ales latura dintre nod-ul (5) și (9), care deja are un *SIT* deci nu va fi nevoie pentru LTSpice să definim un *SIT* de valoare 0. Dacă rulăm circuitul cu operatorul **.op** vom afla că $I_{p1} = 11A$ și $I_{p2} = 11A$, de unde rezultă din formula de calcul a factorului de transfer că valoarea acestuia este $H_t = 1$. După ce am făcut toate calculele de vigoare vom rula circuitul cu operatorul **.op** ca să comparăm datele de ieșire *initiale* cu datele de ieșire după ce am adăugat un **SICI**.

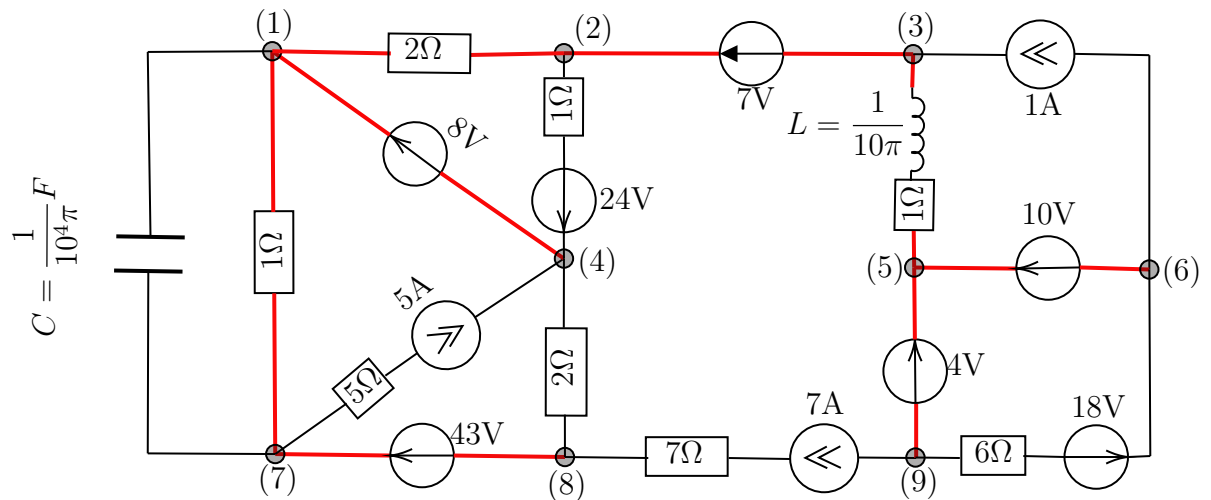
--- Operating Point Initial---			--- Operating Point SICI---		
V(4):	18	voltage	V(4):	18	voltage
V(8):	-4	voltage	V(8):	-4	voltage
V(7):	39	voltage	V(7):	39	voltage
V(3):	-7	voltage	V(3):	-7	voltage
V(9):	-19	voltage	V(9):	-19	voltage
V(5):	-15	voltage	V(5):	-15	voltage
V(6):	-25	voltage	V(6):	-25	voltage
V(1):	26	voltage	V(1):	26	voltage
I(J2):	5	device_current	I(F):	11	device_current
I(J1):	1	device_current	I(J2):	5	device_current
I(J3):	7	device_current	I(J1):	1	device_current
I(R1):	-13	device_current	I(J3):	7	device_current
I(R4):	-13	device_current	I(R1):	-13	device_current
I(R5):	-5	device_current	I(R4):	-13	device_current
I(R8):	-4	device_current	I(R5):	-5	device_current
I(R3):	8	device_current	I(R8):	-4	device_current
I(R7):	7	device_current	I(R3):	8	device_current
I(R6):	11	device_current	I(R7):	7	device_current
I(R2):	6	device_current	I(R6):	11	device_current
I(E2):	0	device_current	I(R2):	6	device_current
I(E7):	-4	device_current	I(E2):	0	device_current
I(E4):	-3	device_current	I(E7):	-4	device_current
I(E5):	11	device_current	I(E4):	-3	device_current
I(E1):	7	device_current	I(E5):	11	device_current
I(E6):	-18	device_current	I(E1):	7	device_current
I(E3):	-6	device_current	I(E6):	-18	device_current
			I(E3):	-6	device_current

Figura 6: Datele înainte și după adăugarea unui SICI

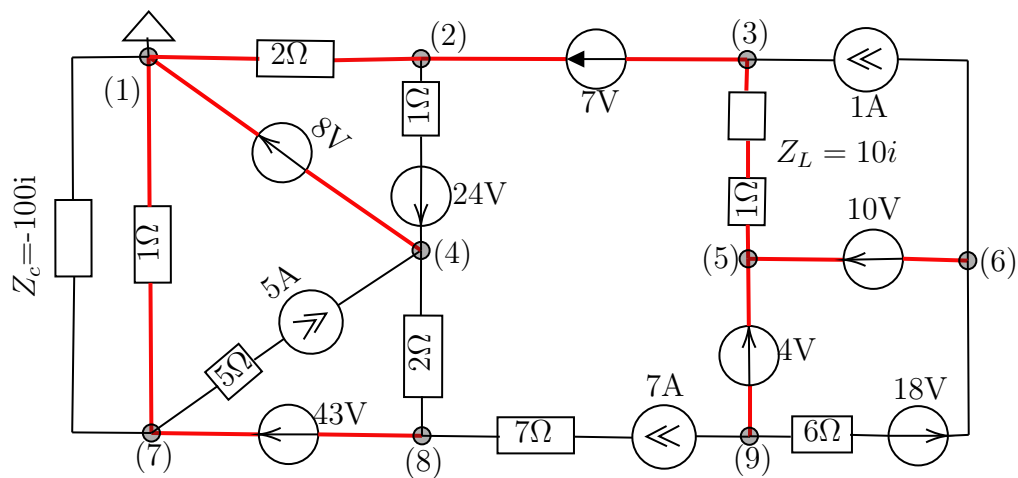
După cum putem observa datele nu s-au modificat ceea ce rezultă că adăugarea sursei de curent comandate a fost efectuată cu succes!

5 Rezolvarea circuitelor de curent alternativ

Pentru această secțiune vom adăuga la circuitul nostru din secțiunea 1, o bobină în serie cu o rezistență pozitivă și un condensator în paralel la fel cu o rezistență pozitivă, cu valorile specificate în enunțul temei. Deci circuitul se transformă în următoarea schemă:



Vom transforma mai departe circuitul de mai sus în circuitul echivalent în complex, pentru explicare valorile scrise deasupra SIT-urilor și SIC-urilor sunt defapt amplitudinea maximă a acestora cu faza inițială 0, iar pentru rezistențe valoarea reprezintă în parte impedanța fiecărei rezistențe, la fel vom considera frecvența circuitului, frecvența industrială egală cu 50Hz:



Bibliografie

- [1] Mathcha <https://www.mathcha.io/> Pentru desenarea circuitelor
- [2] G. Ciuprina, D. Ioan, M. Popescu, A.S. Lup, R. B̃arbulescu, *Teoria circuitelor electrice. Seminar*, disponibil pe moodle.
- [3] Daniel Ioan, *Circuite electrice rezistive - breviare teoretice ,si probleme*, <http://www.lmn.pub.ro/~daniel/culegere.pdf>, 2000.
- [4] Gabriela Ciuprina Template pentru redactarea rapoartelor in LaTeX (v5) <http://www.lmn.pub.ro/~gabriela/LatexTemplate4Students/>