

LABORATOR 5

Analiza circuitelor în regim tranzitoriu

1. Ce este regimul tranzitoriu?

În capitolele precedente a fost prezentată analiza de curent continuu cu surse independente sau comandate și analiza în frecvență. În acest capitol se va prezenta analiza circuitelor în funcție de timp - analiza tranzitorie (TRANsient Analysis) a circuitelor. Este vorba despre regimul general variabil, o analiză de semnal mare în care nu se pune nicio restricție asupra semnalelor de intrare.

Prin regim tranzitoriu înțelegem și trecerea de la o stare de echilibru a circuitului la alta (stările inițială și finală) ca de exemplu când în circuit are loc o schimbare a parametrilor - închiderea unui întrerupător, modificarea tensiunii unei surse etc. Teoretic starea finală este atinsă după un timp infinit dar în practică se consideră că după 3 constante de timp regimul tranzitoriu s-a încheiat și că s-a ajuns la starea de echilibru finală. Pentru rezolvarea analitică, preponderent se folosește metoda operațională (a Transformatei Laplace). Acest tip de probleme se mai numesc și probleme cu condiții inițiale deoarece, așa cum vom vedea, curenții prin bobine și tensiunile la bornele condensatoarelor nu pot prezenta salturi. Aceasta presupune rezolvarea unei probleme suplimentare pentru aflarea condițiilor inițiale pentru bobine (curenți) și condensatoare (tensiuni).

În continuare se va prezenta modul în care este declarată analiza tranzitorie, apoi modul în care se declară sursele de curent și de tensiune având anumite forme în timp. Se vor prezenta exemple de probleme în care ne interesează evoluția în timp a mărimilor.

2. Cum se declară comanda de analiza tranzitorie?

Analiza regimului tranzitoriu se formulează cu comanda ".TRAN". Sintaxa ei este:

```
.TRAN pas_afișare moment_final [moment_început [pas_max]] [UIC]
```

Această comandă va face analiza circuitului în domeniul timp de la $t_{initial}=0$ până la $t_{final}=moment_final$. Spice folosește un pas intern de calcul care este ajustat automat. Valoarea maximă a pasului intern este implicit $moment_final/50$ în cazul în care nu se specifică *pas_max*. Valoarea *pas_afișare* este folosită de Spice pentru a scrie (a afișa) rezultatele analizei în fișierul de ieșire. Dacă *pas_afișare=moment_final*, se vor lua în considerare la afișare toate punctele calculate. Însă pentru grafice (editorul grafic PROBE) se poate specifica un *moment_început*. Cuvântul cheie opțional UIC provine de la *Use Initial Conditions* și indică prezența unor condiții inițiale ce trebuie luate în considerare la începutul analizei regimului tranzitoriu (atunci când se folosește cuvântul cheie IC la condensatoare și bobine - IC provine de la *Initial Conditions*).

Iată câteva exemple de comenzi de analiza tranzitorie:

```
*Ex1: analiza se termină la 1s și are pasul de afișare de 0.1ms:
.TRAN 0.1ms 1s
*Ex2: analiza se termină la 1s, are pasul de afișare de 0.1ms.
*Rezultatele sunt afișate începând cu 5ms:
.TRAN 0.1ms 1s 5ms
*Ex3: analiza se termină la 1s, are pasul maxim de integrare
0.05ms
*și pasul de afișare de 0.1ms. Rezultatele sunt afișate
*începând cu 5ms și sunt folosite condițiile inițiale:
.TRAN 0.1ms 1s 5ms 0.05ms UIC
*Ex4: analiza se termină la 1s, sunt afișați toți pașii
calculați:
.TRAN 1s 1s
```

3. Tipuri de surse folosite în analiza de regim tranzitoriu

Pentru sursele de tensiune și respectiv de curent a căror expresie primește ca argument timpul, pot fi folosite următoarele declarații:

```
Enume nod+ nod- VALUE={expresie}
Gnume nod- nod+ VALUE={expresie}
```

În cadrul expresiei pot fi folosiți operatorii +, -, *, /, (,) iar ca variabilă independentă este timpul (*time*).

De exemplu pentru tensiunea de forma $e(t) = 1 + 2\exp(-3t)$ se folosește următoarea declarație:

```
E 1 0 value={1+2*exp(-3*time)}
```

Pentru curentul de forma $i(t) = 15\cos(1000t + \frac{\pi}{6})$ [mA] se folosește următoarea declarație:

```
G 2 0 value={0.015*cos(1000*time+30*3.14/180)}
```

Am folosit literele E și G, aceste surse sunt surse comandate deoarece pot depinde și de alte potențiale electrice din circuit, nu numai de timp.

Alte tipuri de surse sunt:

- PWL - de la PieceWise Linear - pentru semnale aperiodice cu variație liniară pe porțiuni
- SIN - pentru semnale sinusoidale
- EXP - pentru semnale exponențiale
- PULSE - pentru impulsuri periodice
- SFFM - pentru semnale modulate în frecvență

3.1. Sursa PWL

Sursa PWL are următoarea sintaxă:

PWL($t_1, v_1, t_2, v_2, \dots, t_n, v_n$)

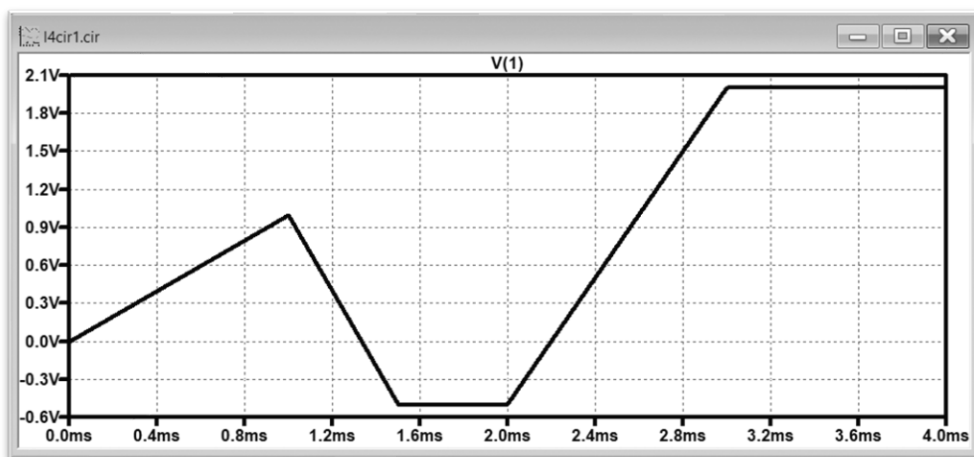
Se observă că semnalul este dat prin perechi (t_i, V_i).

Ca exemplificare, să urmează pașii de mai jos:

- Se folosește următorul program:

```
LTspice XVII - [I4cir1.cir]
File Edit View Simulate Tools Window Help
[Icons]
sursa PWL
V 1 0 PWL(0,0 1ms,1V 1.5ms,-0.5V 2ms,-0.5V 3ms,2V 4ms,2V 4.01ms,0V)
R 1 0 1
.tran 40ns 4ms
.probe
.end
```

- Se obține V(1):



Se observă că în afară de literele folosite pentru multipli și submultipli, unitățile de măsură sunt ignorate. Deci dacă vom scrie mV, V va fi ignorat reținându-se doar submultiplul m (10^{-3}).

3.2. Sursa SIN

Sursa SIN are următoarea sintaxă:

```
SIN( $v\_decalaj, v\_amplitudine, frecvența, întârziere,$   
 $factor\_amortizare, faza$ )
```

Parametrii de mai sus au următoarele semnificații:

- $v_decalaj$ - valoarea de decalaj (offset)
- $v_amplitudine$ - amplitudinea semnalului

- *frecvența* - frecvența semnalului
- *întârziere* - timpul de întârziere
- *factor_amortizare* - dacă amplitudinea descrește
- *faza* - faza în grade

Sursa va începe (pentru $t \in (0, \text{întârziere})$) cu valoarea:

$$= v_decalaj + v_amplitudine * \sin\left(\frac{2\pi * faza}{360}\right)$$

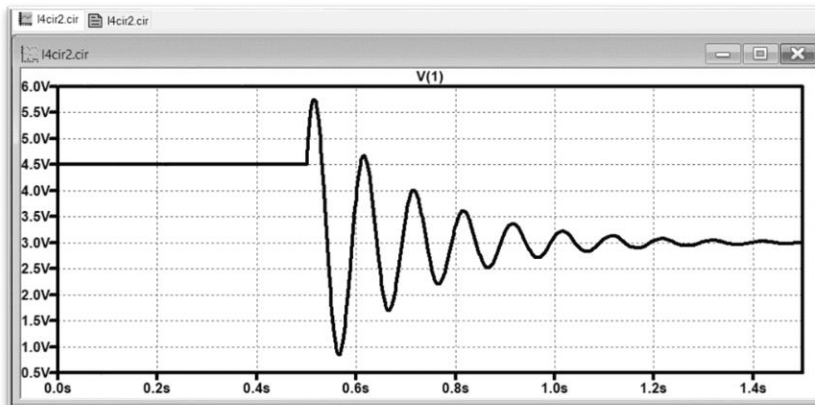
și va continua cu expresia:

$$= v_decalaj + v_amplitudine * \exp(t - \text{întârziere}) * \text{factor_amortizare} * \sin\left[2\pi * \text{frecvența} * (t - \text{întârziere}) + \frac{2\pi * faza}{360}\right]$$

- Se folosește următorul program:

```
LTspice XVII - [I4cir2.cir]
File Edit View Simulate Tools Window Help
[Icons]
sursa SIN
V 1 0 SIN(3V 3V 10Hz 0.5s 5 30)
.tran 3ms 1.5s
.probe
.end
```

- Se obține V(1):



Se observă din nou că în afară de literele folosite pentru multipli și submultipli, unitățile de măsură sunt ignorate. Deci dacă scriem V, Hz, s, ele vor fi ignorate, dar folosindu-le avem avantajul lizibilității codului.

3.3. Sursa EXP

Sursa EXP are următoarea sintaxă:

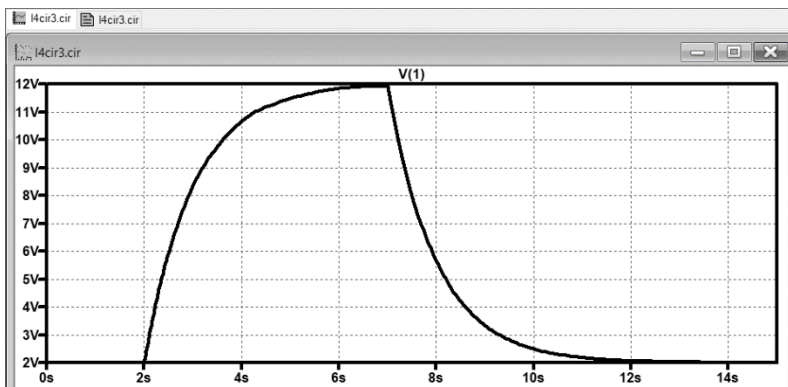
```
EXP(v_inițială,v_vârf,întârz_creștere,const_creștere,
întârz_descreștere,const_descreștere)
```

Parametrii de mai sus au următoarele semnificații:

- $v_{inițială}$ - valoarea inițială
 - $v_{vârf}$ - valoarea de vârf
 - $întârz_{creștere}$ - momentul când începe frontul anterior
 - $const_{creștere}$ - constanta de timp a frontului anterior
 - $întârz_{descreștere}$ - momentul când începe frontul posterior
 - $const_{descreștere}$ - constanta de timp a frontului posterior
- Se folosește următorul program:

```
LTspice XVII - [I4cir3.cir]
File Edit View Simulate Tools Window Help
sursa EXP
V 1 0 EXP(2V 12V 2s 1s 7s 1s)
R 1 0 1
.tran 150ms 15s
.probe
.end
```

- Se obține V(1):



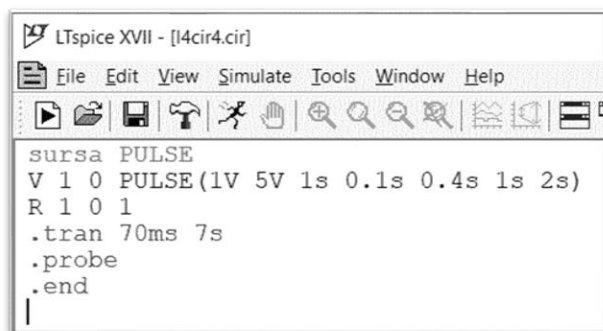
Constanta de timp reprezintă intervalul de timp măsurat de la pornirea frontului anterior/posterior, după scurgerea căruia variația mărimii respective până la valoarea sa de regim permanent va fi de "e" ori mai mică decât variația totală. În practică se consideră că regimul tranzitoriu se încheie după 3 constante de timp. Cât timp înseamnă 3 constante de timp pentru frontul anterior de mai sus? Dar pentru cel posterior?

3.4. Sursa PULSE

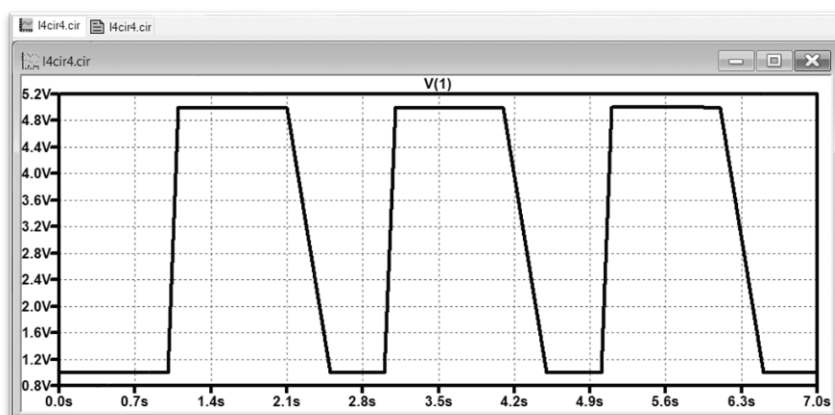
Sursa PULSE descrie un tren de impulsuri și are următoarea sintaxă:

```
PULSE(v_inițială,v_puls,întârziere,durată_creștere,
durată_descreștere,durată_puls,perioada)
```

- Se folosește următorul program:



- Se obține V(1):



3.5. Sursa SFFM (Single Frequency Frequency Modulated)

Sursa SFFM descrie o formă de undă modulată în frecvență și are următoarea sintaxă:

```
SFFM(v_decalaj,v_amplitudine,frecv_purtătoare,factor_modulație,frecv_modulatoare)
```

Parametrii de mai sus au următoarele semnificații:

- *v_decalaj* - valoarea de decalaj (offset)
- *v_amplitudine* - valoarea amplitudinii
- *frecv_purtătoare* - frecvența purtătoare
- *factor_modulație* - coeficient ce măsoară modulația
- *frecv_modulatoare* - frecvența unde modulatorie

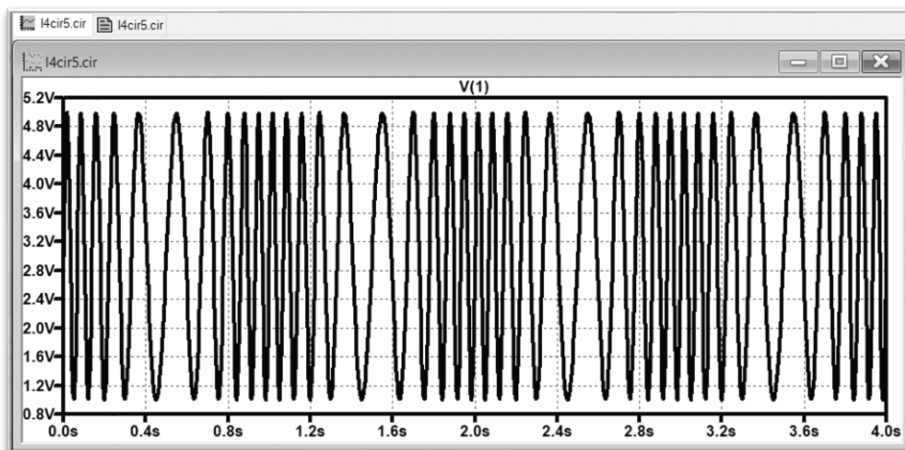
Sursa va avea expresia:

$$v_decalaj + v_amplitudine * \sin(2\pi * frecv_purtătoare * (t - factor_modulație * \sin(2\pi * frecv_modulatoare * t)))$$

- Se folosește următorul program:

```
LTspice XVII - [I4cir5.cir]
File Edit View Simulate Tools Window Help
sursa SFFM
V 1 0 SFFM(3V 2V 10Hz 5 1Hz)
R 1 0 1
.tran 40ms 4s 0s 4ms
.probe
.end
.end
```

- Se obține $V(1)$:



Se observă că unda sinusoidală prezintă variații ale perioadei. Se spune că unda purtătoare este modulată în frecvență deoarece frecvența ei depinde de frecvența undei modulatorie. Modulația FM se folosește și în cazul posturilor de radio analogice din banda de frecvențe ultrascurte și în cazul televiziunii analogice terestre care în prezent nu mai este folosită.

4. Probleme cu condiții inițiale

De obicei, aceste probleme se referă la circuite ce conțin întrerupătoare care la momentul inițial se deschid sau se închid. Aceasta înseamnă că trebuie determinate condițiile inițiale (fișier Spice separat) iar apoi în simularea de regim tranzitoriu (fișier Spice separat) trebuie incluse aceste condiții inițiale. Condițiile inițiale sunt tensiunile pe condensatoare și curenții prin bobine la momentul inițial.

Practic rezolvarea unei astfel de probleme necesită rezolvarea unui circuit pentru aflarea condițiilor inițiale și apoi simularea propriu-zisă de regim tranzitoriu.

În acest ultim circuit condițiile inițiale pentru bobine și condensatoare sunt precizate folosind cuvântul cheie IC ca în exemplele de mai jos:

```
C 20 25uF ic=5V
L3 2 0 15H IC=2.308A
```

De asemenea, în cadrul comenzii `.tran` trebuie folosit cuvântul cheie UIC (Use Initial Conditions).

Se va analiza un caz concret. Fie circuitul:

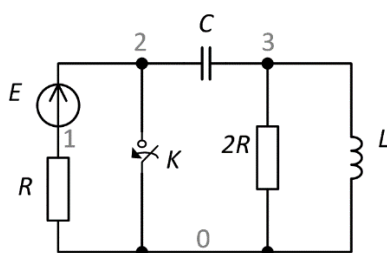


Fig. 4.1. Circuit cu întrerupător (condiții inițiale)

Se dau: $E=90V$, $R=5\Omega$, $L=62.5mH$ și $C=100\mu F$.

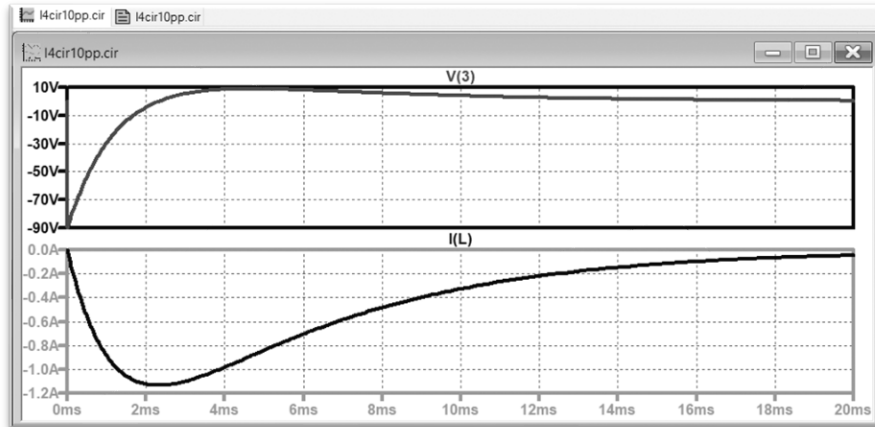
Programul pentru aflarea condițiilor inițiale este dat mai jos:

```
LTspice XVII - [I4cir10.cir]
File Edit View Simulate Tools Window Help
Aflarea conditiilor initiale
V1 2 1 90
R1 1 0 5
R2 3 0 10
C 2 3 100u
L 3 0 62.5m
.dc lin V1 90 90 1
.print dc V(2,3) I(L)
.end
```

Se obțin $U_C(0)=90V$ și $I_L(0)=0A$. Simularea propriu-zisă de regim tranzitoriu este dată mai jos (după ce a fost închis întrerupătorul K):

```
LTspice XVII - [I4cir10pp.cir]
File Edit View Simulate Tools Window Help
I4cir10.cir I4cir10pp.cir
regim tranzitoriu
C 0 3 100u IC=90
R2 3 0 10
L 3 0 62.5m ic=0
.tran 0.5ms 20ms UIC
.probe
.end
```

Se obțin următoarele variații ale curentului prin bobină și a tensiunii pe condensator:



5. Reprezentarea rezultatelor unor analize fazoriale sub formă grafică

Să presupunem că avem un sistem trifazat de tensiuni dat de următorii fazori:

$$\underline{V}_1 = \frac{218.8}{\sqrt{2}} e^{j7.2^\circ}$$

$$\underline{V}_2 = \frac{218.8}{\sqrt{2}} e^{-j128.8^\circ}$$

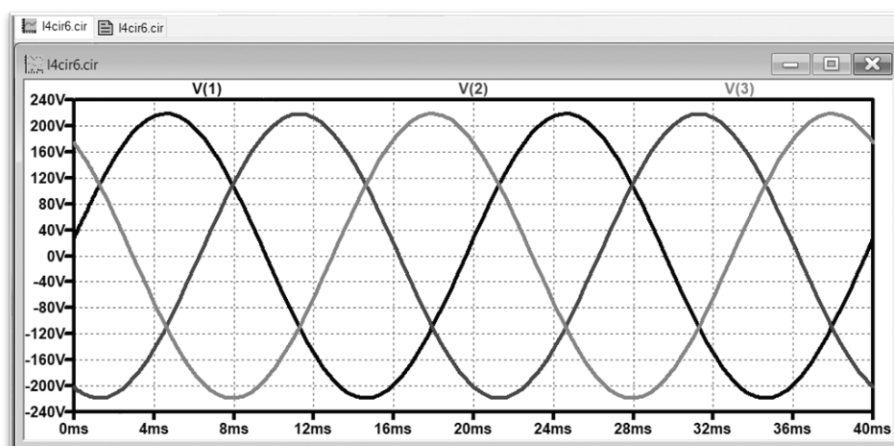
$$\underline{V}_3 = \frac{218.8}{\sqrt{2}} e^{j127.2^\circ}$$

Pentru a afișa variația în timp a tensiunilor, se folosesc următorii pași:

- Se folosește următorul program:

```
LTspice XVII - [I4cir6.cir]
File Edit View Simulate Tools Window Help
fazori timp
V1 1 0 sin(0V 218.8V 50Hz 0 0 7.2)
V2 2 0 sin(0V 218.8V 50Hz 0 0 -112.8)
V3 3 0 sin(0V 218.8V 50Hz 0 0 127.2)
.tran 40ms 40ms 0 0.2ms
.probe
.end
|
```

- Se obține evoluția celor 3 tensiuni trifazate:



6. Diferența dintre regimul permanent și cel tranzitoriu

Fie circuitul R-L serie din figura 4.2 alimentat de o sursă sinusoidală egală cu $\sqrt{2} \sin \omega t$ și $f=100\text{Hz}$. Se va vedea cât este curentul prin circuit.

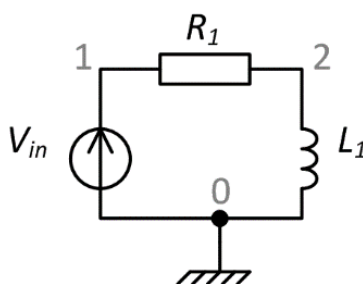


Fig. 4.2. Circuit R-L serie

- Se simulează circuitul mai întâi în curent alternativ. Se obține următorul fișier de ieșire:

```

--- AC Analysis ---

frequency:    100      Hz
V(1): mag:    1 phase: 3.18055e-015° voltage
V(2): mag:    0.53198 phase: 57.8516° voltage
I(L1): mag:    0.0846672 phase: -32.1393° device_current
I(R1): mag:    0.0846672 phase: -32.1393° device_current
I(Vin): mag:    0.0846672 phase: 147.861° device_current
  
```

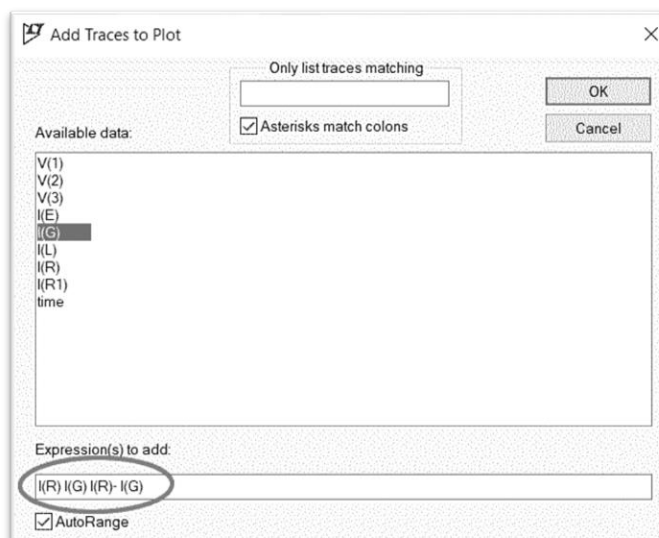
Deci modulul curentului este aproximativ 0.084A iar faza inițială este -32° .

Se va vedea diferența dintre regimul tranzitoriu și regimul permanent (sinusoidal) de mai sus. Pentru aceasta se consideră un circuit cu două porțiuni: o porțiune (nodurile 0, 1 și 2) care se alimentează la momentul 0 cu sursa E cu parametrii AC determinați mai sus, deci este un curent tranzitoriu care va fi afișat. Cealaltă porțiune de circuit (nodurile 3 și 0) simulează regimul permanent folosind sursa G. Diferența dintre cei doi curenți va da influența regimului tranzitoriu (aproape de momentul 0s). Se observă că pentru momente de timp mai mari cei doi curenți se suprapun, ceea ce era de așteptat.

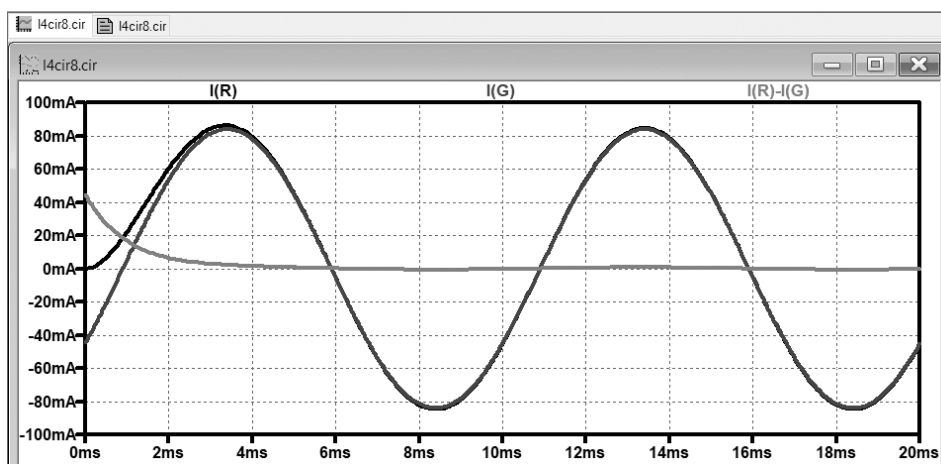
- Se folosește următorul program:

```
LTspice XVII - [I4cir8.cir]
File Edit View Simulate Tools Window Help
comparatie reg tranzitoriu - reg permanent
.param rad={2*3.141/360}
E 1 0 value={sin(628*time)}
R 1 2 10
L 2 0 10mH
G 3 0 value={0.084*sin(628*time-32.148*rad)}
R1 3 0 10
.tran 20ms 20ms
.probe
.end
|
```

- Apăsați Add Traces și introduceți cele 3 curbe ca în figură:



- Se obține regimul tranzitoriu, cel permanent și diferența lor:



Deoarece la momentul 0 curentul prin rezistorul R este 0, urmează regimul tranzitoriu. Curentul în regim permanent are o valoare bine determinată și este simulat prin sursa G. Diferența lor este reprezentată și ea.

7. Filtre în regim tranzitoriu

În capitolul precedent s-a studiat analiza în frecvență și ca aplicație, au fost prezentate anumite tipuri de filtre. Au fost prezentate caracteristicile filtrelor, adică ce benzi de frecvență filtrează. Filtrele pot fi studiate însă și în domeniul timp aplicând un impuls treapta unitate la intrare și observând cum este transformat acesta la ieșire.

Se va studia filtrul trece-sus, simularea pentru filtrul trece-jos rămânând ca temă. Se folosește următorul circuit (circuit R-C serie):

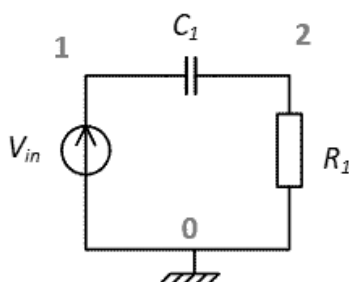


Fig. 4.3. Circuit R-C serie

Intrarea este sursa V_{in} dar ieșirea diferă în funcție de tipul filtrului. Pentru filtrul trece-sus, ieșirea este tensiunea pe rezistor $V(2,0)$. Pentru filtrul trece-jos ieșirea este tensiunea pe condensator $V(1,2)$. Intuitiv aceasta era de așteptat deoarece condensatorul se comportă la frecvențe joase ca o întrerupere, iar pentru frecvențe ridicate, ca un scurt-circuit.

Filtrul trece-sus (circuit de derivare)

În acest caz tensiunea de ieșire este tensiunea pe rezistor $V(2,0)$. Analitic, ea are expresia:

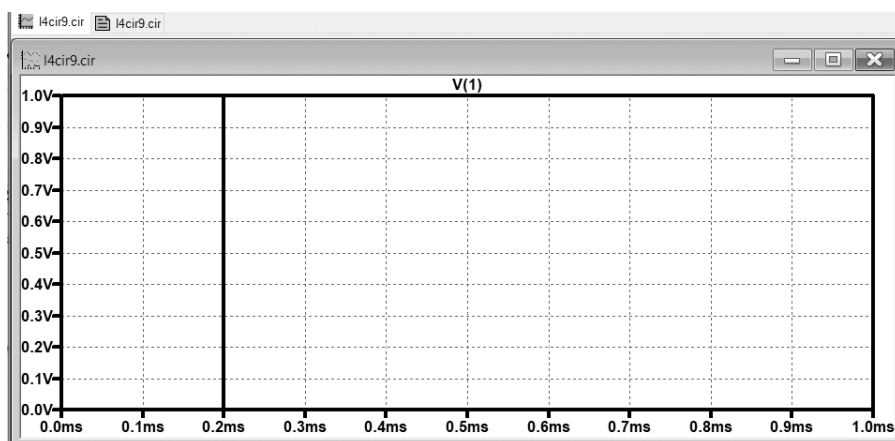
$$V_{out} = V_{in} e^{-t/\tau}$$

τ este constanta de timp și este egală cu $R_I * C_I$.

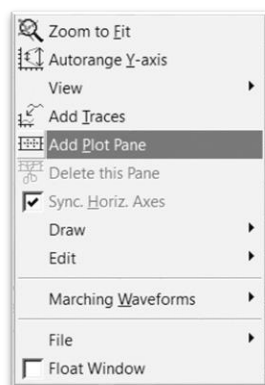
- Se folosește următorul program:

```
LTspice XVII - [I4cir9.cir]
File Edit View Simulate Tools Window Help
[Icons]
filtru trece-sus
Vin 1 0 AC 1V PWL(0,0 0.2ms,0V 0.2001ms,1V 1ms,1V)
R1 2 0 10
C1 1 2 15uF
.tran 0.01ms 1ms
.probe
.end
```

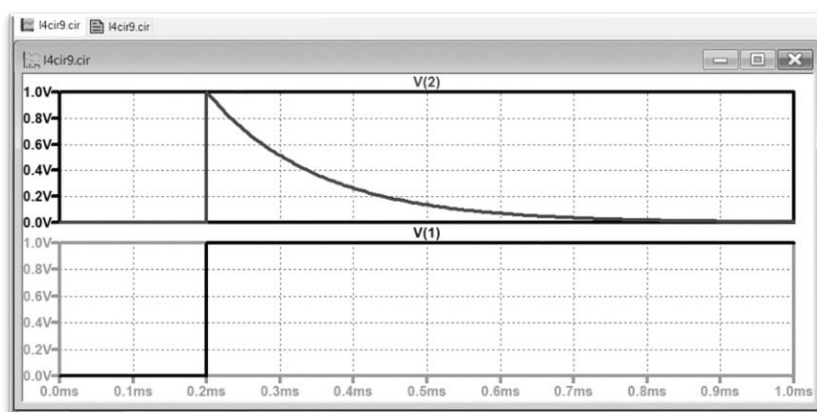
- Se vizualizează tensiunea de intrare:



- Se dă click dreapta și se apasă Add Plot Pane:



- Se adaugă V(2) și se obține rezultatul:



- Pentru analiza în frecvență se folosește următorul program:

bobină și a variației tensiunii la bornele condensatorului, de la 0s până la 8ms, cu pasul de timp 0.01ms. Se dau: $R_1=400\Omega$, $R_2=800\Omega$, $L_2=0.2H$, $C_3=2.5\mu F$ și $E_1=60V$

2. Rulați programul pentru filtrul trece-sus prezentat anterior pentru $R_1=1\Omega$ și apoi pentru $R_1=100\Omega$. Ce modificări apar în domeniul timp și în domeniul frecvență?
3. Rulați programul pentru filtrul trece-sus pentru un impuls dreptunghiular, de exemplu:

```
Vin 1 0 AC 1v pw1(0,0 0.2m,0 0.2001m,1 0.4m,1 0.4001m,0 1m,0)
```

4. Rulați programul pentru filtrul trece-sus pentru un tren de impulsuri, de exemplu:

```
Vin 1 0 AC 1v pw1(0,0 0.001m,1 0.2m,1 0.2001m,0 0.5m,0 0.5001m  
+1 0.7m,1 0.7001m,0 1m,0 1.001m,1 1.2m,1 1.2001m,0 1.5m,0)  
.tran 0.01m 1.5m
```

5. Analizați filtrul trece-jos similar cum ați făcut pentru filtrul trece-sus anterior (de data aceasta ieșirea este tensiunea pe condensator).