**Lucrarea nr. 3**

**Studiul configurațiilor de bază realizate cu AO. Determinarea comportării în curent alternativ prin simulare SPICE**

# **Scopurile lucrării:**

**L3A – circuitul inversor**

Se studiază **circuitul inversor** determinându-se:

* amplificarea de tensiune în modul și fază;
* rezistenţa de intrare;
* rezistenţa de ieşire;
* banda de frecvenţă în buclă închisă;
* răspunsul în frecvență în buclă deschisă al AO:
* amplificarea la frecvențe foarte joase (câțiva Hz), *a*0,
* frecvența polului dominant, *fa*,
* frecvența la amplificare unitate sau produsul amplificare-bandă *PAB* și
* panta caracteristicii.
* viteza de variație a semnalului de ieșire al AO, *SR*.

# **L3A. Studiul circuitului inversor**

# **Consideraţii teoretice**

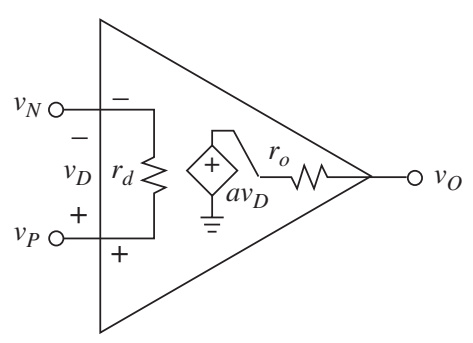
* *schema de principiu:* amplificatorul inversor în fig. 1, *a* iar repetorul inversor în fig. 1, *b*.
* *alimentarea AO şi a circuitului:* sursă dublă, valorile uzuale fiind de +15V şi -15V (fig. 1, *c*).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| *a)* | *b)* | *c)* |
| **Fig. 1.** *Circuitul inversor: (a) Schema amplificatorului inversor.*  *(b) Schema repetorului inversor. (c) Alimentarea circuitului* | | |

* *rolul rezistenţei Rp:* de compensare a efectului curenţilor (c.c.) de polarizare a intrărilor AO.
* *valoarea optimă a rezistenţei Rp*
* *tensiunile de saturaţie*

;

* *modelul de circuit:* este cel din fig. 2, unde
* *rd* - rezistenţa de intrare diferenţială a AO;
* *ro* - rezistenţa de ieşire a AO;
* *avD* - sursă echivalentă de tensiune comandată în tensiune.



**Fig. 2.** *Modelul de circuit al AO alimentat*

* *conceptul de AO ideal şi consecinţele* acestui concept se prezintă în tabelul 1:

**Tabelul 1.** *Conceptul de AO ideal și consecințe*

|  |  |
| --- | --- |
| **Conceptul de AO ideal** | **Consecinţele conceptului de AO ideal** |
| *rd* → ∞ | Curenţii de intrare de semnal variabil sunt egali cu zero,  *iP*=*iN*=0 |
| *ro* = 0 | Tensiunea de ieşire nu se modifică la conectarea sarcinii faţă de situaţia fără sarcină, *vO*=*avD* |
| *a* → ∞ | Tensiunea diferenţială de intrare este egală cu zero  *vD*=*vO*/*a*=0 dar *vD*=*vP*-*vN* ⇒ *vN*=*vP* |

* *Tensiunea de decalaj (offset) de la ieşire*, *EO*, este o eroare de c.c. şi se determină:
* analitic: dacă

unde *VOS* este tensiunea de offset (decalaj) de la intrare iar *IOS* – curentul de offset de la intrare, care se scrie: , unde *IP* este curentul de polarizare a intrării neinversoare iar *IN* curentul de polarizare a intrării inversoare.

* practic, pentru configuraţia aflată în studiu, se leagă intrarea (intrările) la masă şi se măsoară cu un voltmetru electronic, conectat pe tensiune continuă, valoarea tensiunii de ieşire.
* *Amplificarea în tensiune* este:
* pentru *AO ideal*

(1)

* pentru *AO real*, considerând doar efectul valorii finite a amplificării în buclă deschisă:

(2)

unde *b* reprezintă*factorul de reacţie*:

(3a)

iar *T* reprezintă *transmisia pe buclă*

(3b)

* *Rezistenţa de intrare* a circuitului inversor:

(4)

* *Rezistenţa de ieşire* a circuitului inversor:

(5)

* *Banda de frecvenţă* a circuitului inversor (banda în buclă închisă):
* pentru*nivel mic*al semnalului de ieşire:

(6)

unde *PAB* reprezintă produsul amplificare-bandă, denumit și frecvență la amplificare unitate, *fu*.

* pentru*nivel mare*al semnalului de ieşire:

(7)

unde *SR* (*Slew Rate*) reprezintă viteza maximă de variaţie a semnalului de la ieşirea AO și se exprimă în V/μs, iar *Vo,max* este amplitudinea semnalului de la ieșirea circuitului.

# **Desfăşurarea lucrării L3A**

## **Determinarea amplificării în buclă închisă în modul și fază**

Schema circuitului are forma din fig. 3. Se consideră amplificarea *A*1=-10 şi *Rp*=0.



**Fig. 3.** *Circuitul utilizat în determinarea amplificării inversorului*

1. se aplică la intrare mai întâi un semnal sinusoidal cu frecvenţa de 100 Hz, 0.1V amplitudine şi apoi un altul cu frecvenţa de 50 kHz, tot 0.1V amplitudine;
2. se efectuează o analiză în timp *Time Domain (Transient)* cu parametrii notați pe fig. 3;
3. se vizualizează și se aduc în lucrare formele de undă pentru *Vi(t)* şi *Vo(t)*, notându-se defazajul dintre ele;

f=100Hz



*(aici se pune răspunsul în timp al circuitului)*

defazajul = -180°

f=50kHz



*(aici se pune răspunsul în timp al circuitului)*

defazajul = -210.7°

Defazajul se măsoară activând cursoarele. *Vo(t)* prezintă un offset care se compensează înlocuind curba V(VO) cu **V(VO)+offsetul cu semn schimbat**.

1. amplificarea ideală în buclă închisă, *Aid* se determină cu relaţia (1);
2. se alege curba, clic pe *Cursor Max*, se măsoară amplitudinile tensiunilor de intrare şi de ieşire, *Vi,max* respectiv *Vo,max* şi se determină valoarea reală a amplificării în buclă închisă, *Are*:

(8)

1. se compară amplificările în modul date de relaţiile (1) şi (8) şi se determină eroarea relativă a amplificării datorată amplificării finite în buclă deschisă:

(9)

1. măsurătorile şi rezultatele calculelor se trec în **tabelul 2**.

**Tabelul 2.** *Valorile ideală și reală ale amplificării în buclă închisă*

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Frecvenţa  de lucru | *R*1  [kΩ] | *R*2  [kΩ] | *Aid*  (rel.1) | *Vo,max*  [V] | *Vi,max*  [V] | *Are*  (rel. 8) | *εA*[%]  (rel. 9) |
| 100 Hz | 1 | 10 | -10 | -0.9999 | 0.1 | -9.999 |  |
| 50 kHz | -0.87 | 0.1 | -8.7 |  |

## **Determinarea rezistenţei de intrare a amplificatorului inversor, *Ri***

Rezistenţa de intrare a configuraţiei inversoare, *Ri*, se determină pentru circuitul corespunzător amplificării A=-10 luând în seamă și rezistența internă a sursei de semnal, *RS*=600Ω (fig. 4).



**Fig. 4.** *Circuitul pentru determinarea rezistenței de intrare, Ri*

* se aplică la intrare un semnal sinusoidal cu frecvenţa de 100 Hz și apoi de 20kHz de la ieşirea de 600Ω a sursei de semnal, având amplitudinea adecvată obţinerii unui semnal de ieşire fără limitări (VAMPL=0.1V).
* se efectuează o analiză în timp *Time Domain (Transient)* cu parametrii notați pe fig. 4;
* se rulează PSpice, se utilizează markeri individuali de tensiune, se activează cursoarele și se determină cu ajutorul lui *Cursor Max* mărimile *V*3,max și *Vi*,max și valorile se trec în tabelul 3.
* rezistenţa de intrare Ri se calculează cu relaţia

(10)

## **Determinarea rezistenţei de ieşire a amplificatorului inversor, Ro**

Rezistenţa de ieşire a configuraţiei inversoare, *Ro*, are valoarea dependentă de frecvența la care se dorește să se afle și se determină pentru circuitul care are A=-10 (fig. 5).

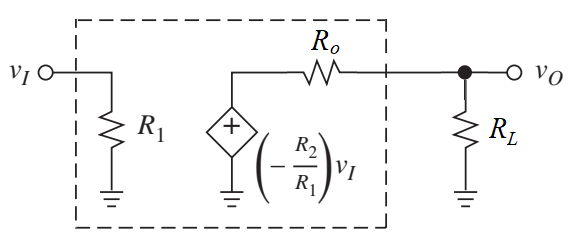


**Fig. 5.** *Schema pentru determinarea rezistenței de ieșire, Ro*

* se conectează la ieşire o rezistenţă de sarcină *RL*=56Ω;
* se aplică la intrare un semnal sinusoidal cu frecvenţa de100Hz și apoi 20kHz, amplitudinea 0.1V și se urmărește ca semnalul de ieşire să nu fie limitat;
* se efectuează o analiză în timp *Time Domain (Transient)* cu parametrii notați pe fig. 5, se rulează PSpice, se folosește un marker individual de tensiune, se activează cursoarele, se compensează offsetul, clic pe *Cursor Max*, se determină amplitudinea tensiunii de ieşire *Vo*1,max și se trece în tabelul 3;
* fără a modifica amplitudinea tensiunii de intrare, se deconectează *RL* (se șterge de pe schemă sau, mai bine, i se modifică valoarea în 1TΩ), se măsoară noua valoare a amplitudinii tensiunii de ieşire *Vo*2,max după compensarea offsetului și se trece în tabelul 3;
* rezistenţa de ieşire a circuitului inversor se calculează cu relaţia:

(11)

pe baza schemei din fig. 6



**Fig. 6.** *Schema folosită la determinarea lui Ro*

**Tabelul 3.** *Valorile rezistenței de intrare și de ieșire ale circuitului inversor*

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Frecvenţa  de lucru | *V*3,max  [mV] | *Vi*,max  [mV] | *Ri* [Ω]  (rel.10) | *Vo*1,max  [mV] | *Vo*2,max  [mV] | *Ro* [Ω]  (rel.11) |
| 100 Hz | 100 | 62.428 | 997 | 999.7 | 999.9 | 0.011 |
| 20 kHz | 100 | 63.258 | 1033 | 920.893 | 976.896 | 3.4 |

## **Determinarea benzii de frecvenţă în buclă închisă**

Schema circuitului pentru determinarea benzii de frecvență are forma din fig. 7.



**Fig. 7.** *Schema pentru determinarea benzii de frecvență în buclă închisă*

* se consideră amplificarea A1=-10.
* se face o analiză de c.a. – *AC Sweep/Noise* cu parametrii din fig. 7;
* se reprezintă grafic DB(V(Vo))-DB(V(Vin)), se activează cursoarele, se observă că maximul este 20dB, se duce cursorul al doilea la 17dB, adică cu 3 decibeli mai jos, de unde și denumirea de ***frecvență la* -3dB**, se citește valoarea frecvenței în tabelul corespunzător lui *Probe Cursor* și se trece în tabelul 4.



*(aici se pune răspunsul în frecvență)*

* cu ajutorul relației (3) și a valorilor de rezistențe se determină factorul de reacție *b* și se trece, de asemenea, în tabelul 4;
* din rel. (6) se determină parametrul *PAB* (produs amplificare-bandă) și se trece în tabelul 4.

**Tabelul 4.** *Valorile frecvenței la -3dB în buclă închisă, ale factorului de reacție și ale frcvenței la amplificare unitate*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parametru | *fA*  [kHz] | *b*  rel. (3a) | *PAB* [kHz]  rel. (6) |
| Valoare | 91.334 | 1/11 | 1004.6 |

## **Determinarea răspunsului în frecvență în buclă deschisă al AO**

Se face pe circuitul din fig. 8.

* Se determină:
  + amplificarea la frecvențe foarte joase (câțiva Hz), *a*0,
  + frecvența polului dominant, *fa*,
  + frecvența la amplificare unitară sau produsul amplificare-bandă *PAB* și
  + panta caracteristicii.

și se trec în tabelul 5.

* se face o analiză de c.a. – *AC Sweep/Noise* cu parametrii din fig. 8;
* Se reprezintă grafic DB(V(Vo))-DB(V(vN))



**Fig. 8.** *Schema de determinare a parametrilor din buclă deschisă ale AO*



*(aici se pune răspunsul în frecvență)*

**Tabelul 5.** *Parametrii caracteristicii în buclă deschisă și SR*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Parametru | *a*0  [dB] | *fa*  [Hz] | *PAB*  [kHz] | Panta  [dB/dec] | SR [V/μs]  (rel. 12) |
| Valoare | 99.876 (100) | 10.091 (10) | 973 (1MHz) | -20 | 0.479 |

## **Determinarea SR**

Schema utilizată în determinarea *SR* și parametrii analizei se prezintă în fig. 9.



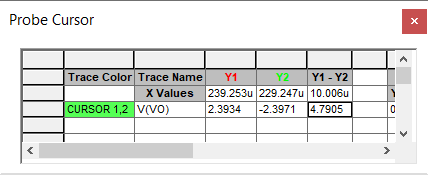
**Fig. 9.** *Schema de determinare a SR*

* se efectuează o analiză în timp *Time Domain (Transient)* cu parametrii notați pe fig. 9, se rulează PSpice, se folosește un marker individual de tensiune, se activează cursoarele și se măsoară diferența de tensiune dintre un minim și maximul imediat următor, Δ*Vo* și diferența de timp corespunzătoare, Δ*t*;
* *SR* se determină din relația

(12)

și valoarea obținută se trece în tabelul 5.





*(aici se pune răspunsul în timp)*

# **L3B. Studiul circuitului neinversor**

# **Scopurile lucrării**

**L3B – circuitul neinversor**

Se studiază **circuitul neinversor** determinându-se:

* amplificarea de tensiune în modul și fază;
* rezistențele de intrare și de ieșire;
* banda de frecvență în buclă închisă;
* comparație între repetorul neinversor și cel inversor.

# **Consideraţii teoretice**

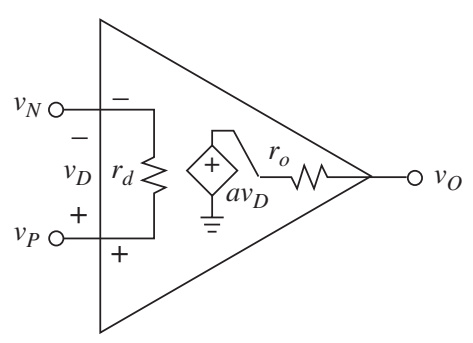
* *schema de principiu:* amplificatorul neinversor în fig. 1, *a* iar repetorul în fig. 1, *b*.
* *alimentarea AO şi a circuitului:* sursă dublă, valorile uzuale fiind de +15V şi -15V (fig. 1, *c*).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| *a)* | *b)* | *c)* |
| **Fig. 1.** *Circuitul neinversor: (a) Schema amplificatorului neinversor.*  *(b) Schema repetorului neinversor. (c) Alimentarea circuitului* | | |

1. *rolul rezistenţei Rp:* de compensare a efectului curenţilor (c.c.) de polarizare a intrărilor AO.
2. *valoarea rezistenţei Rp:*
3. *tensiunile de saturaţie:*

;

1. *modelul de circuit:* este cel din fig. 2, unde
2. *rd* - rezistenţa de intrare diferenţială a AO;
3. *ro* - rezistenţa de ieşire a AO;
4. *avD* - sursă echivalentă de tensiune comandată în tensiune.



**Fig. 2.** *Modelul de circuit al AO alimentat*

1. *conceptul de AO ideal şi consecinţele* acestui concept se prezintă în tabelul 1:

**Tabelul 1.** *Conceptul de AO ideal și consecințe*

|  |  |
| --- | --- |
| **Conceptul de AO ideal** | **Consecinţele conceptului de AO ideal** |
| *rd* → ∞ | Curenţii de intrare de semnal variabil sunt egali cu zero,  *iP*=*iN*=0 |
| *ro* = 0 | Tensiunea de ieşire nu se modifică la conectarea sarcinii faţă de situaţia fără sarcină, *vO*=*avD* |
| *a* → ∞ | Tensiunea diferenţială de intrare este egală cu zero  *vD*=*vO*/*a*=0 dar *vD*=*vP*-*vN* ⇒ *vN*=*vP* |

1. *Tensiunea de decalaj (offset) de la ieşire*, *EO*, este o eroare de c.c. şi se determină:
2. analitic: dacă

unde *VOS* este tensiunea de offset (decalaj) de la intrare iar *IOS* – curentul de offset de la intrare, care se scrie: , unde *IP* este curentul de polarizare a intrării neinversoare iar *IN* curentul de polarizare a intrării inversoare.

1. practic, pentru configuraţia aflată în studiu, se leagă intrarea (intrările) la masă şi se măsoară cu un voltmetru electronic, conectat pe tensiune continuă, valoarea tensiunii de ieşire.
2. *Amplificarea în tensiune* este:
3. pentru *AO ideal*

(1)

1. pentru *AO real*, considerând doar efectul valorii finite a amplificării în buclă deschisă:

(2)

unde *b* reprezintă*factorul de reacţie*:

(3a)

iar *T* reprezintă *transmisia pe buclă*

(3b)

1. *Rezistenţa de intrare* a circuitului neinversor:

(4)

1. *Rezistenţa de ieşire* a circuitului neinversor:

(5)

1. *Banda de frecvenţă* a circuitului inversor (banda în buclă închisă):
2. pentru*nivel mic*al semnalului de ieşire:

(6)

unde *PAB* reprezintă produsul amplificare-bandă, denumit și frecvență la amplificare unitate, *fu*.

1. pentru*nivel mare*al semnalului de ieşire:

(7)

unde *SR* (*Slew Rate*) reprezintă viteza maximă de variaţie a semnalului de la ieşirea AO și se exprimă în V/μs, iar *Vo,max* este amplitudinea semnalului de la ieșirea circuitului.

# **Desfăşurarea lucrării L3B**

## **Determinarea amplificării în buclă închisă în modul și fază**

Schema circuitului are forma din fig. 3. Se consideră amplificarea *A*1=11 şi *Rp*=0.



**Fig. 3.** *Circuitul utilizat în determinarea amplificării configurației neinversoare*

1. se aplică la intrare mai întâi un semnal sinusoidal cu frecvenţa de 100 Hz, 0.1V amplitudine şi apoi un altul cu frecvenţa de 50 kHz, tot 0.1V amplitudine;
2. se efectuează o analiză în timp *Time Domain (Transient)* cu parametrii notați pe fig. 3;
3. se vizualizează și se aduc în lucrare formele de undă pentru *Vi(t)* şi *Vo(t)*;

f=100Hz



*(aici se pune răspunsul în timp al circuitului)*

f=50kHz



*(aici se pune răspunsul în timp al circuitului)*

* *Vo(t)* prezintă un offset care se compensează înlocuind curba V(VO) cu **V(VO)+offsetul cu semn schimbat**.
* defazajul Δ*ϕ* se măsoară activând cursoarele și determinând intervalul de timp Δ*t* între două treceri prin zero spre valori pozitive ale celor două semnale. Valorile lui Δ*t* și Δ*ϕ* se trec în tabelul 2. Defazajul se determină cu relația

(8)

unde *T* este perioada semnalului la frecvența *f*, .

**Observație:** dacă semnalul de ieșire trece mai târziu prin zero spre valori pozitive decât cel de intrare, atunci el este defazat în urmă și defazajul se scrie cu semnul minus.

1. amplificarea ideală în buclă închisă, *Aid* se determină cu relaţia (1) și se trece în tabelul 2;
2. se alege pe rând câte o curbă, clic pe *Cursor Max*, se măsoară amplitudinile tensiunilor de intrare, *Vi,max* şi de ieşire, *Vo,max*, se determină valoarea reală a amplificării în buclă închisă, *Are* cu relația (8) iar mărimile măsurate și calculele se trec în **tabelul 2**:

(9)

1. se compară amplificările în modul date de relaţiile (1) şi (9), se determină eroarea relativă a amplificării datorată amplificării finite în buclă deschisă cu ajutorul relației (10) și rezultatele calculelor se trec în **tabelul 2**.

(10)

**Tabelul 2.** *Amplificarea în buclă închisă și defazajul*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Frecvenţa  de lucru | *R*1  [kΩ] | *R*2  [kΩ] | *Aid*  (rel.1) | Δ*t*  [μs] | Δ*ϕ* [°]  (rel.8) | *Vo,max*  [V] | *Vi,max*  [V] | *Are*  (rel. 9) | *εA*[%]  (rel. 10) |
| 100 Hz | 1 | 10 | 11 | 0 | 0 | 1.0995 | 0.1 | 10.995 |  |
| 50 kHz | 1.7243 | -31 | 0.971 | 0.1 | 9.71 |  |

## **Determinarea rezistenței de intrare**

**PRACTIC:**

* rezistenţa de intrare a configuraţiei neinversoare, *Ri*, se determină pentru circuitul corespunzător amplificării *A*1=11 din fig. 4, aplicând un semnal sinusoidal cu două frecvențe: 100Hz și apoi 10kHz;
* se măsoară valoarea efectivă a tensiunii de la ieşirea generatorului, neconectat la circuit, *Vi*,gol, apoi, după cuplarea generatorului la montaj, se măsoară din nou valoarea efectivă a tensiunii de la borna de intrare a circuitului, *Vi* și se constată că diferențele sunt insesizabile, indicând (calitativ) o valoare foarte mare a *Ri*;

**SPICE:**

* rezistența de intrare, *Ri* se determină efectuând o analiză de c.a. AC Sweep/Noise cu parametrii din fig. 4, se reprezintă grafic V(Vi)/I(Rs) și se determină, activând cursoarele, valorile lui *Ri* la frecvențele din **tabelul 3**.



**Fig. 4.** *Schema de determinare a rezistenței de intrare a circuitului neinversor*



*(aici se pune răspunsul în frecvență al Ri)*

**Tabelul 3.** *Valorile rezistenței de intrare la diferite frecvențe*

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *f* [Hz] | 1 | 10 | 100 | 1k | 10k | 100k | 1M |
| *Ri* [MΩ] | 2140 | 2121 | 1283 | 159.6 | 16.1 | 2.36 | 1.75 |

## **Determinarea rezistenței de ieșire**

Din punct de vedere a structurii de circuit, cele două configurații de bază sunt identice la ieșire, astfel încât valorile rezistenței de ieșire determinate la inversor sunt valabile și la circuitul neinversor.

## **Determinarea benzii de frecvență a circuitului neinversor (banda în buclă închisă)**

* se consideră amplificarea A1=11.
* se face o analiză de c.a. – *AC Sweep/Noise* cu parametrii din fig. 5;



**Fig. 5.** *Schema pentru determinarea benzii de frecvență în buclă închisă*



*(aici se pune răspunsul în frecvență)*

* se reprezintă grafic DB(V(Vo))-DB(V(Vi)), se activează cursoarele și se determină ***frecvența la* -3dB**. Se duce cursorul al doilea cu 3 dB mai jos de poziția primului cursor, se citește valoarea frecvenței în fereastra *Probe Cursor* și se trece în tabelul 4 la *fA*.
* cu ajutorul relației (3a) și a valorilor de rezistențe se determină factorul de reacție *b* și se trece, de asemenea, în tabelul 4;
* din rel. (6) se determină parametrul *PAB* (produs amplificare-bandă) și se trece în tabelul 4.

**Tabelul 4.** *Valorile frecvenței la -3dB în buclă închisă, ale factorului de reacție și ale frcvenței la amplificare unitate*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parametru | *fA*  [kHz] | *b*  rel. (3a) | *PAB* [kHz]  rel. (6) |
| Valoare | 91.334 | 1/11 | 1004.6 |

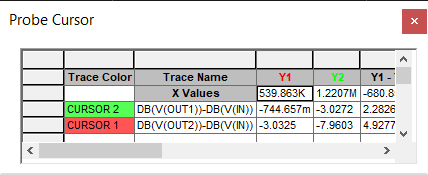
## **Comparație între repetorul neinversor și cel inversor**

* se face o analiză de c.a. – *AC Sweep/Noise* cu parametrii din fig. 6;



**Fig. 6.** *Schema pentru determinarea răspunsului în frecvență la repetorul neinversor și cel inversor*





*(aici se pune răspunsul în frecvență pentru cele două repetoare)*

* se compară benzile de frecvență ale celor două circuite

B1=1221kHz (repetorul neinversor)

B2=539.8kHz (repetorul inversor)

* motivați rezultatul găsit ……..