

FUNCIONS I SISTEMES ELECTRÒNICS

Pràctica 3

L'amplificador operacional real

Setembre 2023

Objectiu de la pràctica

L'objectiu d'aquesta pràctica és veure les limitacions, tant en contínua com en alterna, del funcionament d'un amplificador operacional (AO). En aquest cas, això ho farem a partir de la seva simulació amb el programa PSPICE. L'AO que utilitzarem en aquest estudi és el model uA741 disposat en una configuració d'amplificador inversor tal com es mostra en la Figura 1.

La pràctica es divideix en dues sessions al laboratori i **no requereix de cap estudi previ**. En la primera haureu de fer les simulacions temporals (TRAN) per veure la resposta en el temps i l'error a la sortida degut a les limitacions en contínua de l'AO. La segona sessió consisteix en simular els circuits en el domini de la freqüència (AC) per veure com influeixen la resposta freqüencial de l'AO i el seu slew-rate en el funcionament en alterna.

En el text hi ha una sèrie de qüestions que heu de respondre a mesura que aneu fent les corresponents simulacions. També hi heu d'adjuntar la captura dels resultats gràfics de les simulacions. Les qüestions que no es realitzin durant les dues hores de la sessió corresponent quedaran com a treball personal. L'informe, amb totes les qüestions resoltes amb les captures corresponents, s'haurà de lliurar per a la seva avaluació, com a molt tard, a l'inici de la següent pràctica.

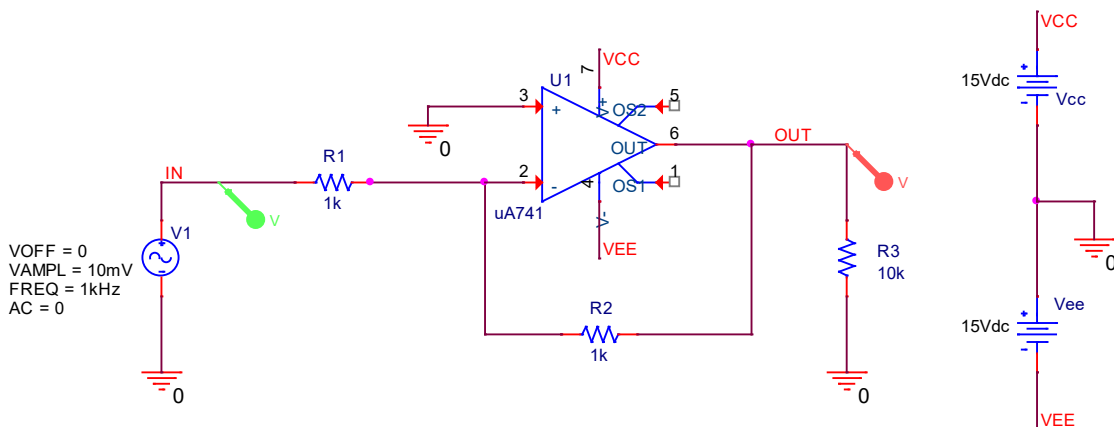


Figura 1.

PRIMERA SESSIÓ

1. Resposta Temporal.

Creeu un nou projecte amb el programa OrCAD i introduïu l'esquemàtic de l'amplificador inversor de la Figura 1 seguint els passos que vàreu aprendre en la pràctica d'introducció al PSPICE. Escolliu la vostra zona als servidors o una memòria USB on gravareu totes les dades de la simulació per poder-les salvar i emportar-les a l'acabar la sessió de laboratori. Pots trobar una guia ràpida de les principals instruccions que has d'utilitzar en aquesta pràctica en el document "*Informació Consulta Ràpida ORCAD CAPTURE PSPICE.pdf*".

Les tensions d'alimentació del circuit han de ser de ± 15 V i les resistències d'1 k Ω . Considera que la font de tensió d'entrada de l'etapa amplificadora genera un senyal sinusoidal d'1 kHz i de 10 mV d'amplitud i fes la simulació temporal (TRAN) de 5 períodes d'aquest senyal.

Qüestió 1.1: Visualitzeu les tensions d'entrada i sortida. Quin és el guany i el desfasament aproximat que hi ha entre els dos senyals?

Qüestió 1.2: Visualitzeu les tensions als nodes d'entrada inversor i no inversor de l'AO (feu el zoom adequat per veure-les correctament). Comenteu la validesa del curtcircuit virtual a partir d'aquestes tensions.

Realitzeu una nova simulació amb un senyal sinusoidal d'entrada d'una freqüència d'1 MHz. Tingueu en compte que el simulador no discrimina minúscules i majúscules, per tant entén 1MHz com 1mHz, és a dir, 10^{-3} Hz. Per tal de definir una freqüència de 10^6 Hz es pot escriure 1megHz. Fixeu-vos que, al canviar la freqüència del senyal d'entrada, heu de canviar adequadament els paràmetres de la simulació temporal per poder visualitzar uns 5 períodes del senyal de sortida.

Qüestió 1.3: Visualitzeu les tensions d'entrada i sortida. Quin és el guany i el desfasament hi ha entre els dos senyals? Justifiqueu la diferència respecte a la qüestió 1.1.

2. Saturació de la tensió de sortida (marges dinàmics).

Canvieu el valor de la resistència R_2 a 10 k Ω i fes una simulació temporal considerant com entrada una font sinusoidal de freqüència 1 kHz i amplitud 1 V.

Qüestió 2.1: Visualitzeu les tensions d'entrada i sortida. Quin és el guany i el desfasament aproximat que hi ha entre els dos senyals?

Canvieu l'amplitud de la font sinusoidal d'entrada a 2 V i torneu a fer la simulació.

Qüestió 2.2: Visualitzeu les tensions d'entrada i sortida. Quina forma té el senyal de sortida? Per què?

Qüestió 2.3: Afegiu un altre plot en la presentació de resultats (feu un Plot > Add Plot to Window) i visualitzeu-hi les tensions als nodes d'entrada inversor i no inversor de l'AO. Es conserva el curtcircuit virtual durant tot el període del senyal? Quan es perd?

Qüestió 2.4: A partir del guany de l'amplificador, calculeu la màxima amplitud que pot tenir el senyal d'entrada de l'etapa sense produir distorsió en el senyal de sortida? Feu una simulació per comprovar la validesa del càlcul.

3. Errors en contínua. Tensió d'offset i corrents de polarització.

En aquest exercici observarem els errors en contínua de l'AO. Començarem amb una simulació de l'etapa inversora de guany unitat (amb les dues resistències d'1 kΩ) amb un senyal d'entrada sinusoïdal d'1 kHz de freqüència i 1 mV d'amplitud.

Qüestió 3.1: A la representació simultània dels senyals d'entrada i sortida, canvieu el senyal d'entrada pel seu senyal invertit $-V_{IN}(t)$. Quin efecte s'aprecia? A què és degut?

Anul·leu la font d'entrada ajustant la seva tensió a 0 V i simuleu un altre cop el circuit.

Qüestió 3.2: Visualitza la sortida. Quin valor té la tensió contínua de sortida?

Canvieu la resistència R_2 de realimentació de l'AO per a que el guany sigui -10.

Qüestió 3.3: Quin valor té ara la tensió contínua de sortida?

Encara amb la tensió d'entrada igual a 0 V, canvieu la resistència R_1 a 10 kΩ de manera que el guany sigui de nou la unitat.

Qüestió 3.4: Quin valor té ara la tensió contínua de sortida?

Qüestió 3.5: Mitjançant l'anàlisi del circuit quan es consideren les limitacions en contínua de l'AO, justifiqueu els diferents resultats obtinguts en les qüestions 3.2, 3.3 i 3.4.

Mantenint les resistències de 10 kΩ de la darrera simulació, afegiu una resistència de valor 5 kΩ connectada entre l'entrada no inversora de l'AO i el terminal de referència.

Qüestió 3.6: Quin valor té ara l'error de sortida? Per què?

Qüestió 3.7: A partir de les qüestions anteriors, calculeu els valors de la tensió d'offset i els corrents de polarització de les dues entrades. Compareu aquest valors amb les especificacions de l'AO.

4. Error en mode comú.

Per il·lustrar l'error que introdueix el mode comú de les tensions d'entrada en qualsevol amplificador diferencial, simulem una etapa restadora de guany unitat basada en un AO com la que es mostra en la Figura 2.

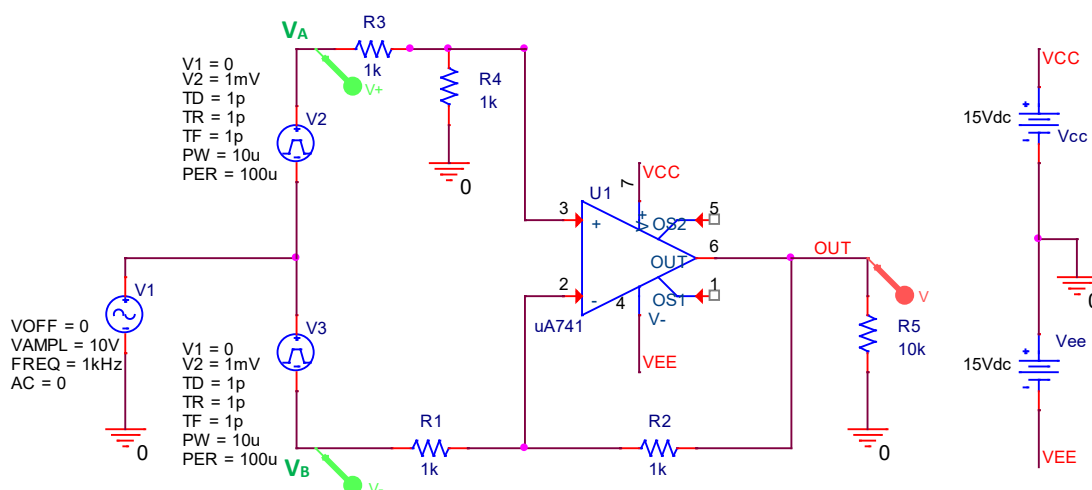



Figura 3.

Com s'observa a la figura, la tensió en mode comú de les entrades de l'etapa restadora és un senyal sinusoïdal d'1 kHz de freqüència i 10 V d'amplitud (font de tensió sinusoïdal V_1). La tensió diferencial entre les entrades d'aquesta etapa és un senyal quadrat de 2 mV de valor pic a pic (suma de les dues fonts de tensió quadrada V_2 i V_3).

Analitzeu el circuit de la figura considerant l'AO ideal i especifiqueu la tensió de sortida en funció de les tensions d'entrada V_A i V_B .

Qüestió 4.1: Quina forma hauria de tenir el senyal de sortida? Quin seria el seu valor pic a pic?

Feu una simulació temporal i representeu la tensió diferencial d'entrada de l'etapa amplificadora (feu servir els marcadors diferencials: ) i la tensió de sortida.

Qüestió 4.2: La sortida obtinguda és la prevista en la qüestió anterior? Perquè?

Qüestió 4.3: Quin és el guany de tensió diferencial (component quadrada de la tensió)?

Qüestió 4.4: Quin és el guany de tensió en mode comú (component sinusoïdal de la tensió)?

Analitzeu el circuit per veure la contribució a la sortida degut al $CMRR_{AO}$.

Qüestió 4.5: Quin és $CMRR_{AO}$ de l'AO a partir de l'anàlisi anterior i les mesures de les qüestions anteriors. Compara el resultat amb el $CMRR_{AO}$ especificat pel fabricant.

SEGONA SESSIÓ

5. Resposta freqüencial.

Amb el mateix amplificador inversor de la Figura 1 utilitzat en la sessió anterior, heu de fer una simulació AC. Per tant, substituïu la font de tensió d'entrada per una font de tensió del tipus VAC amb una amplitud d'1 V, o bé, afegiu un valor AC=1V a la mateixa font sinusoidal d'entrada de l'etapa (Podeu consultar el document “*Informació Consulta Ràpida ORCAD CAPTURE PSPICE.pdf*”).

Feu l'anàlisi AC del circuit entre 1 Hz i 10 MHz (*Start Frequency: 1, End Frequency: 10meg, Points/Decade: 1000*) i representeu el guany en dBs (amb “DB(V(OUT)/V(IN))”) de l'etapa amplificadora. Afegiu un altre plot en la presentació de resultats amb el desfasament entre senyal d'entrada i senyal de sortida (amb “P(V(OUT)/V(IN))”), és a dir, el diagrama de Bode complet mòdul i fase.

Qüestió 5.1: Quin guany i desfasament introdueix l'etapa per a un senyal d'1 kHz?

Qüestió 5.2: Quin ample de banda a -3 dB té l'etapa?

6. Producte Guany-Ample de Banda (compromís entre guany i ample de banda).

Feu una anàlisi AC de l'etapa amplificadora per a valors de la resistència R_2 igual a 1 k Ω , 10 k Ω i 100 k Ω , canviant com a paràmetre el valor de la resistència de realimentació (tal i com es mostra en el document de consulta ràpida de com fer una anàlisi paramètrica). Representeu en una mateixa gràfica el diagrama de Bode (mòdul i fase) amb els diferents valors de la resistència de realimentació.

Qüestió 6.1: Quins guanys i amplex de banda s'obtenen per a cada resistència? Quin és el producte guany-ample de banda en cada cas? Es compleix sempre que el producte guany per ample de banda sigui constant?

Qüestió 6.2: A partir del guany donat per la R_2 igual a 100k Ω , quina és la freqüència de guany unitat f_t de l'AO? Compareu-la amb les especificacions.

Qüestió 6.3: En el cas del guany donat per la R_2 igual a 100k Ω , i atenent a l'amplitud de la font de tensió d'entrada, justifica com estaria la tensió de sortida si fessis una simulació temporal. Perquè no apareix aquest efecte en la simulació del tipus AC?

7. Temps de Pujada.

En aquest exercici trobareu el temps de pujada de la tensió de sortida de l'AO que es mesura en un seguidor de tensió. Per tant, introduïreu l'esquemàtic del seguidor de tensió amb un uA741 i fareu una simulació TRAN. El senyal d'entrada el generarà una font *Vpulse* amb una amplitud petita de 10 mV com la que mostra la Figura 3. L'objectiu és fer una simulació temporal que ens permeti mesurar el temps de resposta de l'amplificador a una variació de tipus esglaó del senyal d'entrada.

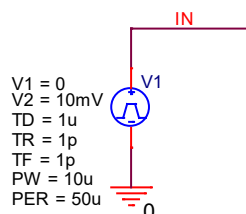


Figura 3.

Qüestió 7.1: Quin és el temps de pujada de l'AO definit com el temps que triga la seva sortida en passar del 10 al 90 % del valor final? Compareu el resultat amb les especificacions de l'AO.

8. Slew-Rate.

Repetiu ara la simulació del circuit de l'apartat anterior però amb un senyal quadrat d'entrada de gran amplitud amb $V_2 = 1 \text{ V}$.

Qüestió 8.1: Visualitzeu la tensió de sortida. Quin és l'efecte que predomina ara sobre el senyal de sortida? Quina és la màxima derivada del senyal de sortida (pots obtenir-la a partir del pendent d'un flanc d'aquest senyal)? Compareu el resultat amb les especificacions de l'AO.

Per tal d'observar millor l'efecte no lineal de limitació del temps de resposta introduït per l'*Slew-Rate* (SR) de l'AO, fareu ara una sèrie de simulacions en que el senyal d'entrada serà sinusoïdal. Canvieu la font d'entrada de la qüestió anterior per una font sinusoïdal de 5 V d'amplitud i 1 kHz de freqüència. Feu una simulació temporal d'uns quants períodes.

Qüestió 8.2: Compareu el senyal d'entrada i de sortida representant ambdues senyals. S'aprecia distorsió al senyal de sortida? A partir del càlcul amb el SR especificat pel fabricant de l'AO, justifiqueu la resposta.

Una manera alternativa per veure i quantificar la distorsió d'un senyal és mitjançant la seva representació en el domini freqüencial, és a dir, a partir de les seves components espectrals obtingudes mitjançant la Transformada de Fourier Ràpida (*FFT - Fast Fourier Transform*). La distorsió d'un senyal sinusoïdal d'una determinada freqüència (fonamental) es tradueix en l'aparició dels seus harmònics, és a dir, components del senyal a freqüències múltiples del fonamental (segon harmònic a dos cops la freqüència del fonamental, tercer harmònic a tres cops la freqüència del fonamental, ...). Quant més gran sigui la distorsió, major amplitud tenen els harmònics. Tingueu present que, en el cas de la distorsió d'un senyal sinusoïdal sense cap tensió contínua afegida, només apareixen els harmònics imparells (tercer, cinquè, setè, ...).

Repetiu de nou la mateixa simulació de la qüestió anterior però incloent-hi molts més períodes i punts de simulació (uns 100 períodes amb 1000 punts per període). Representeu la FFT dels senyals d'entrada i sortida, és a dir la representació dels senyals en el domini freqüencial. El programa PSPICE permet canviar de forma fàcil la visualització del senyal temporal al domini freqüencial mitjançant l'activació de la **tecla FFT del menú**. Heu de ajustar l'eix de freqüències al marge on haurien d'aparèixer els primers harmònics, per exemple fins a 10 cops la freqüència del fonamental. També poseu l'eix vertical en escala logarítmica per poder observar més fàcilment l'amplitud dels harmònics.

Qüestió 8.3: Tenen el senyals d'entrada i sortida les mateixes components freqüencials? Justifica la presència o absència de distorsió en el senyal de sortida a partir de la FFT d'aquests senyals.

Ara repetirem els passos anteriors per a un senyal d'entrada també sinusoïdal de 5 V d'amplitud però de 20 kHz de freqüència (No oblideu d'ajustar la durada de la simulació a un parell de períodes del senyal i utilitzar un pas prou petit per a que la sortida tingui prou resolució).

Qüestió 8.4: Compareu el senyal d'entrada i de sortida en el domini temporal com heu fet en la qüestió 8.2. S'aprecia distorsió en l'observació d'un període del senyal de sortida?

Repeteix de nou la simulació però incloent-hi molts més períodes (uns 100 i 1000 punts per període) i visualitza la FFT dels senyals d'entrada i sortida.

Qüestió 8.5: Quin resultat dona la representació de la FFT comparada amb l'obtinguda en la qüestió 8.3? Relaciona-ho amb l'aparició de distorsió en el senyal de sortida.