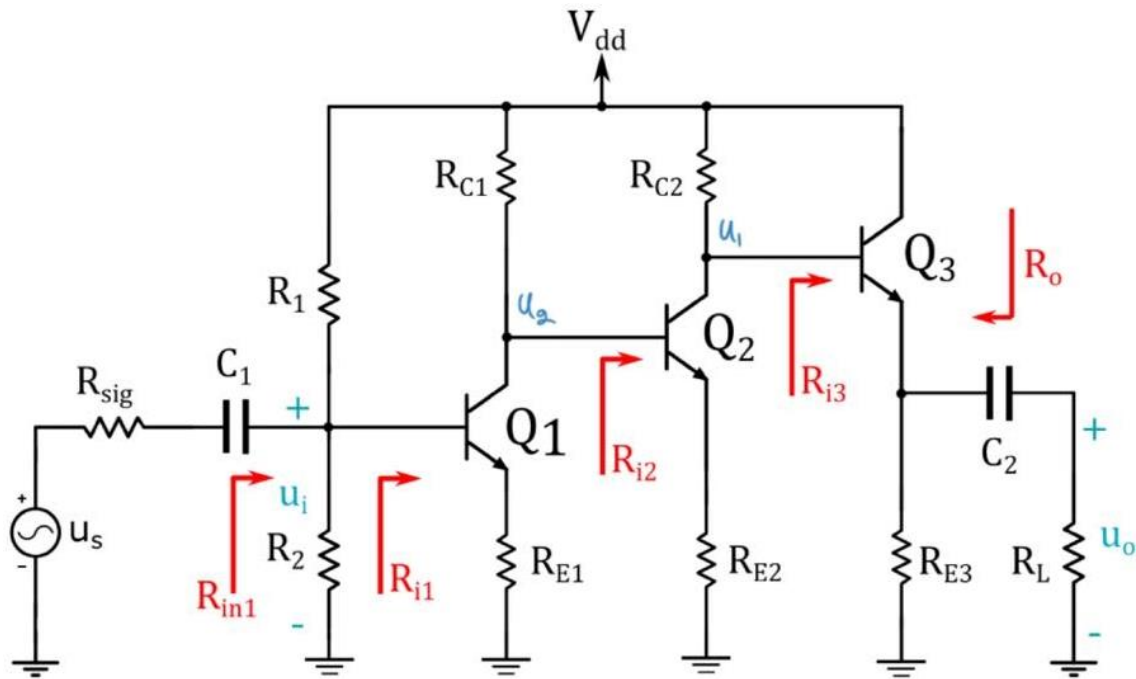


Εργασία σε πρόγραμμα προσομοίωσης LTSpice

Ιωάννης Τσαντήλας
Α.Μ.: 03120883

Άσκηση 1

Θεωρητική Ανάλυση



DC Analysis

Ανοιχτοκυκλώνουμε τους πυκνωτές και προκύπτει από Θεώρημα Thevenin:

$$V_{th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{dd}$$
$$R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Για το Q1

Από Νόμο Τάσεων Kirchhoff:

$$V_{th} - I_{b1} R_{th} - V_{be} - I_{e1} R_{e1} = 0$$

Και αφού $I_{e1} = (b+1)I_{b1}$:

$$I_{b1} = \frac{V_{th} - V_{be}}{R_{th} + (b+1)R_{e1}}$$

Και από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff:

$$I_1 = I_{c1} + I_{b2} \rightarrow \frac{V_{dd} - V_{c1}}{R_{c1}} = bI_{b1} + I_{b2}$$

Για το Q2

Από Νόμο Τάσεων Kirchhoff:

$$V_{b2} - V_{be} - I_{e2}R_{e2} = 0$$

Δηλαδή:

$$V_{b2} = V_{be} + (b + 1)I_{b2}R_{e2}$$

Και από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff:

$$I_2 = I_{c2} + I_{b3} \rightarrow \frac{V_{dd} - V_{c2}}{R_{c2}} = bI_{b2} + I_{b3}$$

Για το Q3

Από Νόμο Τάσεων Kirchhoff:

$$V_{b3} - V_{be} - I_{e3}R_{e3} = 0$$

Δηλαδή:

$$V_{b3} = V_{be} + (b + 1)I_{b3}R_{e3}$$

Και από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff:

$$I_2 = I_{c2} + I_{b3} \rightarrow \frac{V_{dd} - V_{c2}}{R_{c2}} = bI_{b2} + I_{b3}$$

Και επειδή $V_{c1} = V_{b2}$ και $V_{c2} = V_{b3}$ καταλήγουμε:

$$I_{b2} = \frac{V_{dd} - V_{be} - bI_{b1}R_{c1}}{R_{c1} + (b + 1)R_{e2}}$$

$$I_{b3} = \frac{V_{dd} - V_{be} - bI_{b2}R_{c2}}{R_{c2} + (b + 1)R_{e3}}$$

$$I_{b1} = \frac{V_{th} - V_{be}}{R_{th} + (b + 1)R_{e1}}$$

AC Analysis

Ισχύει πως:

$$\frac{u_0}{u_s} = \frac{u_0}{u_1} * \frac{u_1}{u_2} * \frac{u_2}{u_i} * \frac{u_i}{u_s}$$

Θα υπολογίσουμε επομένως 4 λόγους:

$$\frac{u_0}{u_1}, \frac{u_1}{u_2}, \frac{u_2}{u_i}, \frac{u_i}{u_s}$$

Έχουμε:

$$\frac{u_0}{u_1} = \frac{\frac{R_{e3}R_l}{R_{e3} + R_l}}{r_{e3} + \frac{R_{e3}R_l}{R_{e3} + R_l}}$$

$$\frac{u_1}{u_2} = -a \frac{R_{c2}R_{i3}}{(R_{e2} + r_{e2})(R_{c2} + R_{i3})}$$

Με:

$$R_{i3} = \left(r_{e3} + \frac{R_{e3}R_l}{R_{e3} + R_l} \right) (b + 1)$$

Επιπλέον:

$$\frac{u_2}{u_i} = -a \frac{R_{c1}R_{i2}}{(R_{e1} + r_{e1})(R_{c1} + R_{i2})}$$

Με:

$$R_{i2} = (r_{e3} + R_{e2})(b + 1)$$

Τέλος:

$$\frac{u_i}{u_s} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_s}$$

Με:

$$R_{in} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{i1}}}$$

$$R_{i1} = (r_{e1} + R_{e1})(b + 1)$$

Με:

$$r_{ei} = \frac{(b + 1)V_T}{I_{bi}}, \mu\epsilon i = 1, 2, 3$$

LTSpice Κύκλωμα

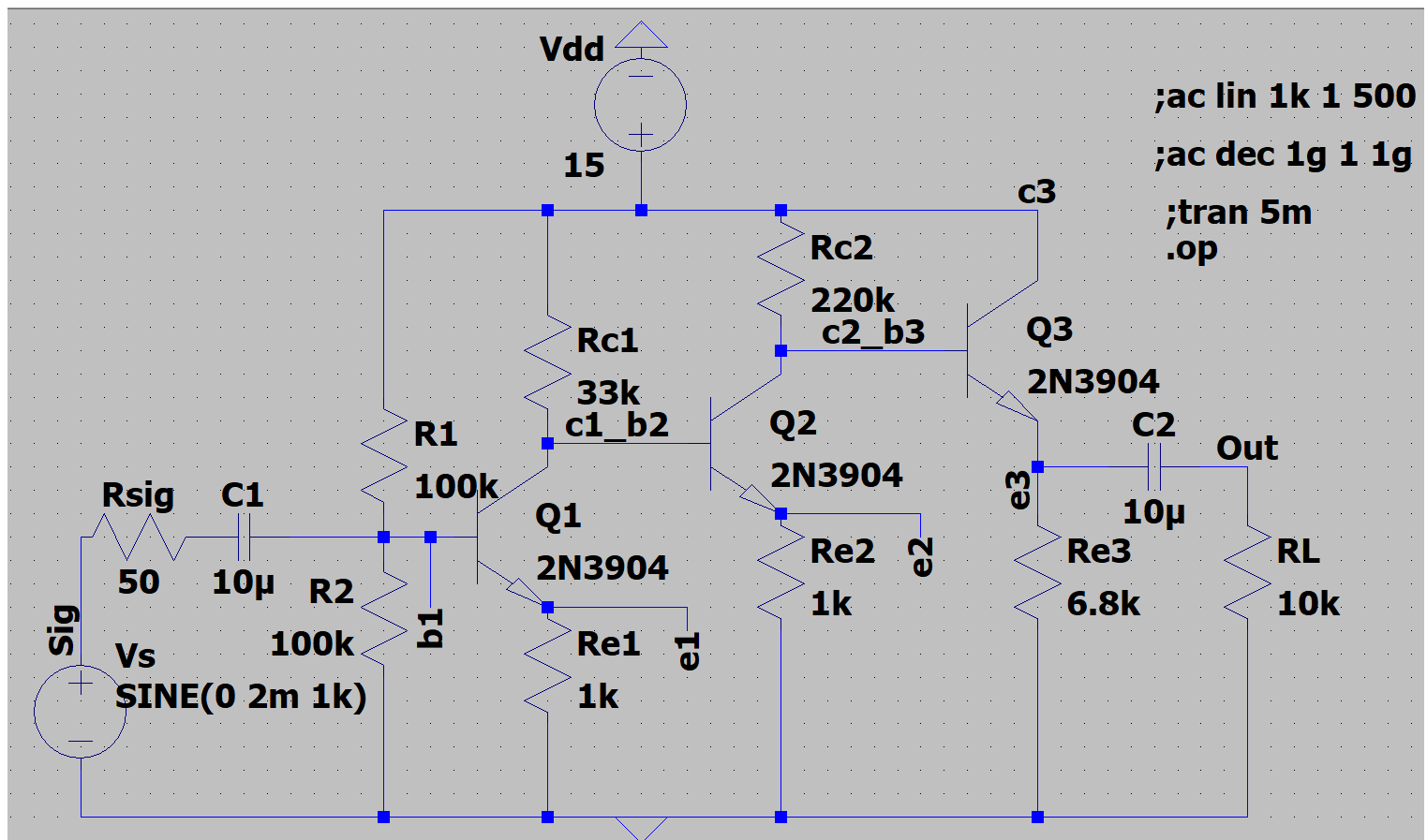
Δοκιμάζουμε διάφορες τιμές για τα στοιχεία ώστε:

- $u_o/u_s > 50$
- $f_L > 100 \text{ Hz}$
- $5 < V_{e3} < 10$

και καταλήγουμε στις εξής:

R_1	R_2	R_{c1}	R_{c2}	R_{e3}	R_L	C_1	C_2
100k Ω	100k Ω	33k Ω	220k Ω	6.8k Ω	10k Ω	10 μ F	10 μ F

Το κύκλωμα:



DC Operating Point

Εκτελούμε DC OP και λαμβάνουμε τις παρακάτω τιμές:

V(sig) :	0	voltage	Ib(Q1) :	0.000125572	device_current
V(b1) :	1.2214	voltage	Ie(Q1) :	-0.000562394	device_current
V(c3) :	15	voltage	I(C2) :	-8.06772e-017	device_current
V(p001) :	6.10698e-016	voltage	I(C1) :	1.2214e-017	device_current
V(c1_b2) :	0.582353	voltage	I(Rc2) :	2.85188e-005	device_current
V(e1) :	0.562394	voltage	I(R1) :	8.06772e-017	device_current
V(c2_b3) :	8.72587	voltage	I(Re3) :	0.00118643	device_current
V(e2) :	0.0248752	voltage	I(Re2) :	2.48752e-005	device_current
V(e3) :	8.06772	voltage	I(Re1) :	0.000562394	device_current
V(out) :	8.06772e-013	voltage	I(Rc1) :	0.000436898	device_current
Ic(Q3) :	0.00118271	device_current	I(Rsig) :	1.2214e-017	device_current
Ib(Q3) :	3.71994e-006	device_current	I(R1) :	0.000137786	device_current
Ie(Q3) :	-0.00118643	device_current	I(R2) :	-1.2214e-005	device_current
Ic(Q2) :	2.47988e-005	device_current	I(Vdd) :	-0.00178591	device_current
Ib(Q2) :	7.64347e-008	device_current	I(Vs) :	1.2214e-017	device_current
Ie(Q2) :	-2.48752e-005	device_current			
Ic(Q1) :	0.000436822	device_current			

Η τάση του εκπομπού του Q3 βρίσκεται στα περίπου 8V, όπως και θέλαμε.

Προκειμένου να εξακριβώσουμε εάν τα transistors βρίσκονται στην ορθή ενεργό περιοχή θα πρέπει:

1. $V_{be} > 0.7$
2. $0.2 < V_{ce} < V_{dd}$
3. $I_b, I_c > 0$

Οι DC τάσεις των στοιχείων είναι:

V(b1)	V(c1_b2)	V(e1)	V(c2_b3)	V(e2)	V(c3)	V(e3)
1.2214	0.582353	0.562394	8.72587	0.0248752	15	8.06772

1. $V_{be} > 0.7$

- $V_{be1} = 0.659006 \text{ V}$
- $V_{be2} = 0.5574778 \text{ V}$
- $V_{be3} = 0.65815 \text{ V}$

Οι διαφορές προσεγγίζουν καλά την τιμή των 0.7 Volts.

2. $0.2 < V_{ce} < 15$

- $V_{ce1} = 0.019959 \text{ V}$
- $V_{ce2} = 8.7009948 \text{ V}$
- $V_{ce3} = 6.93228 \text{ V}$

Οι διαφορές προσεγγίζουν καλά τα απαιτούμενα όρια.

3. $I_b, I_c > 0$

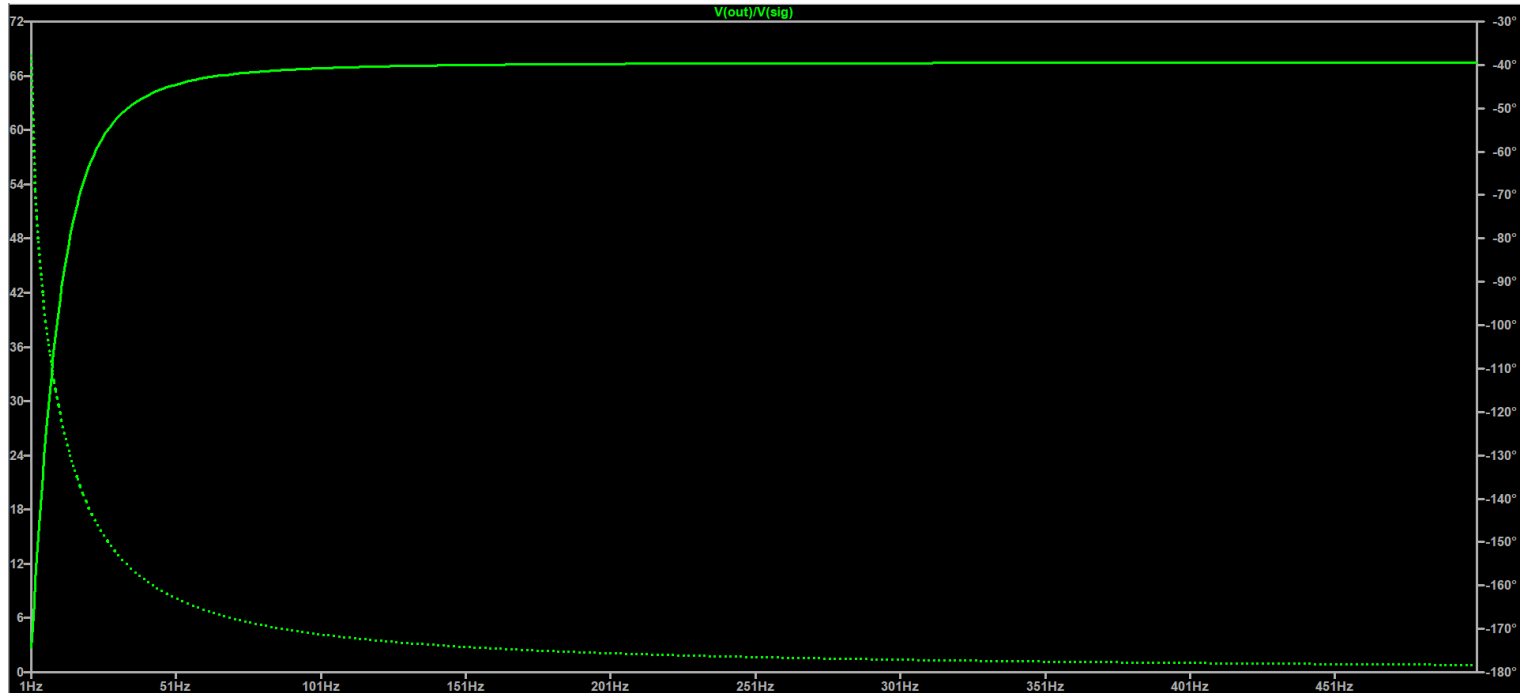
Ib(Q1)	Ic(Q1)	Ie(Q1)	Ib(Q2)	Ic(Q2)	Ie(Q2)
0.000125572	0.000436822	-0.000562394	7.64347e-008	2.47988e-005	-2.48752e-005
Ib(Q3)	Ic(Q3)	Ie(Q3)			
3.71994e-006	0.00118271	-0.00118643			

Το αρνητικό πρόσημο στα ρεύμα των εκπομπών εξηγείται λόγω της εκτέλεσης του LTSpice, όπου τα θέτει ανάποδα από την κανονική φορά.

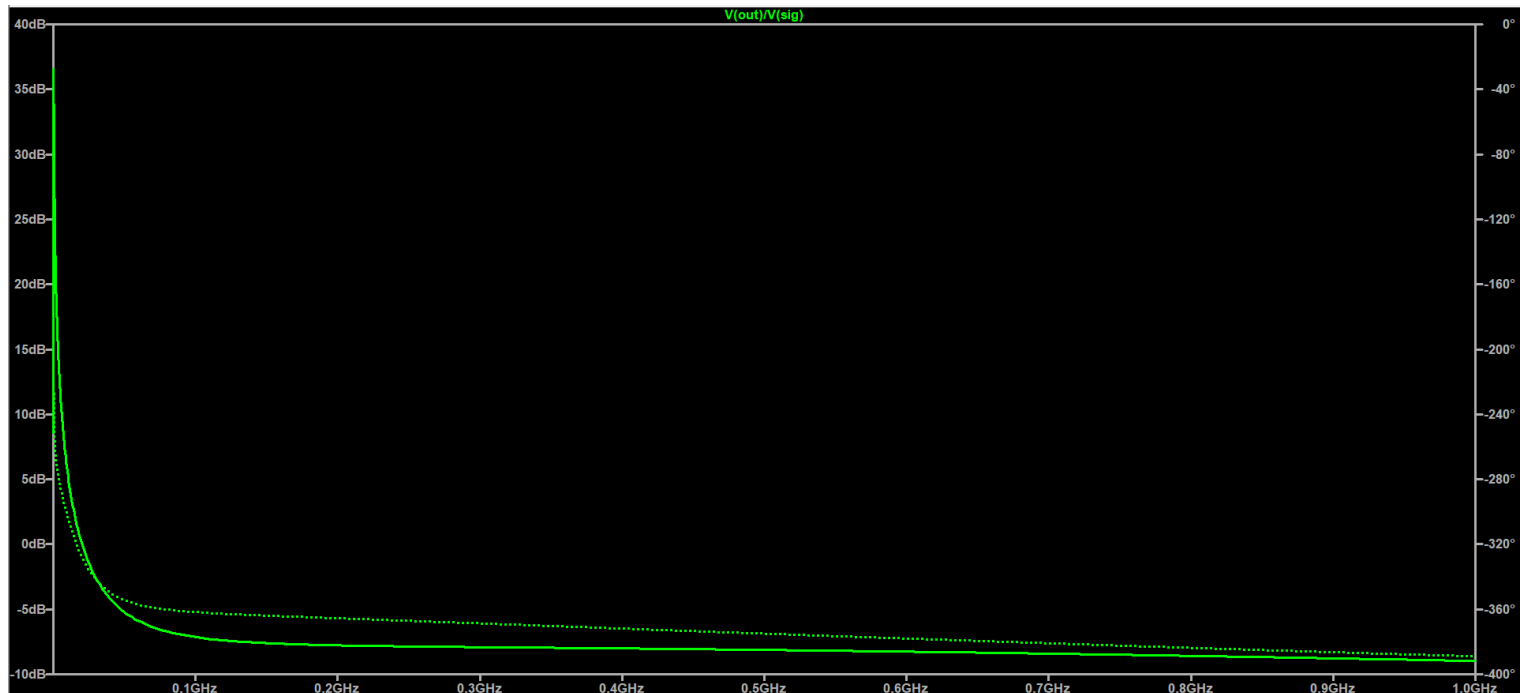
Όλα τα ρεύματα έχουν θετικό πρόσημο. Επομένως, εξετάσαμε όλες τις συνθήκες ώστε τα transistors να βρίσκονται στην ορθή ενεργό περιοχή και αυτές επαληθεύτηκαν.

Bode Diagrams

Για συχνότητες 1 έως 500Hz, παρατηρούμε ότι το κέρδος ξεπερνά την τιμή των 50 V/V, με $f_L > 100\text{Hz}$:

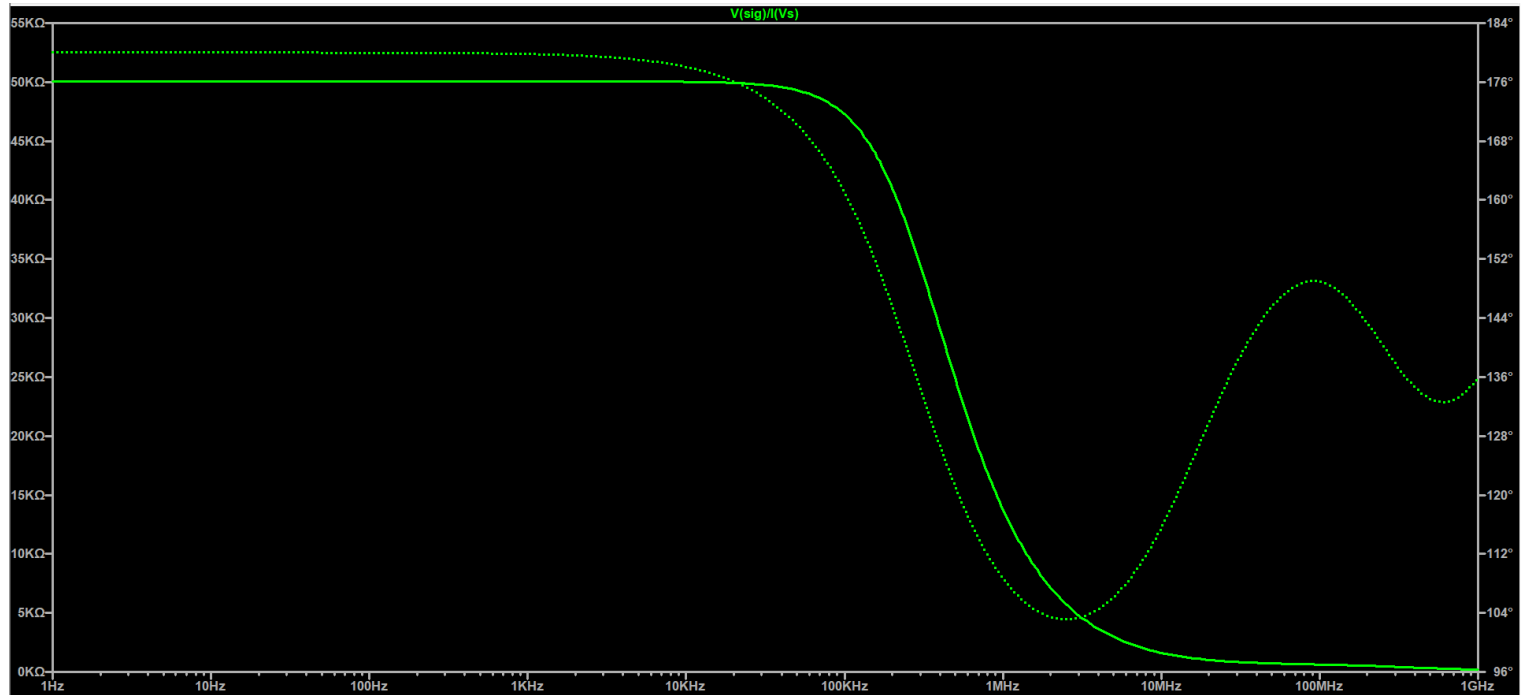


Και το ζητούμενο διάγραμμα κέρδους και φάσης για συχνότητες 1 έως 1GHz:



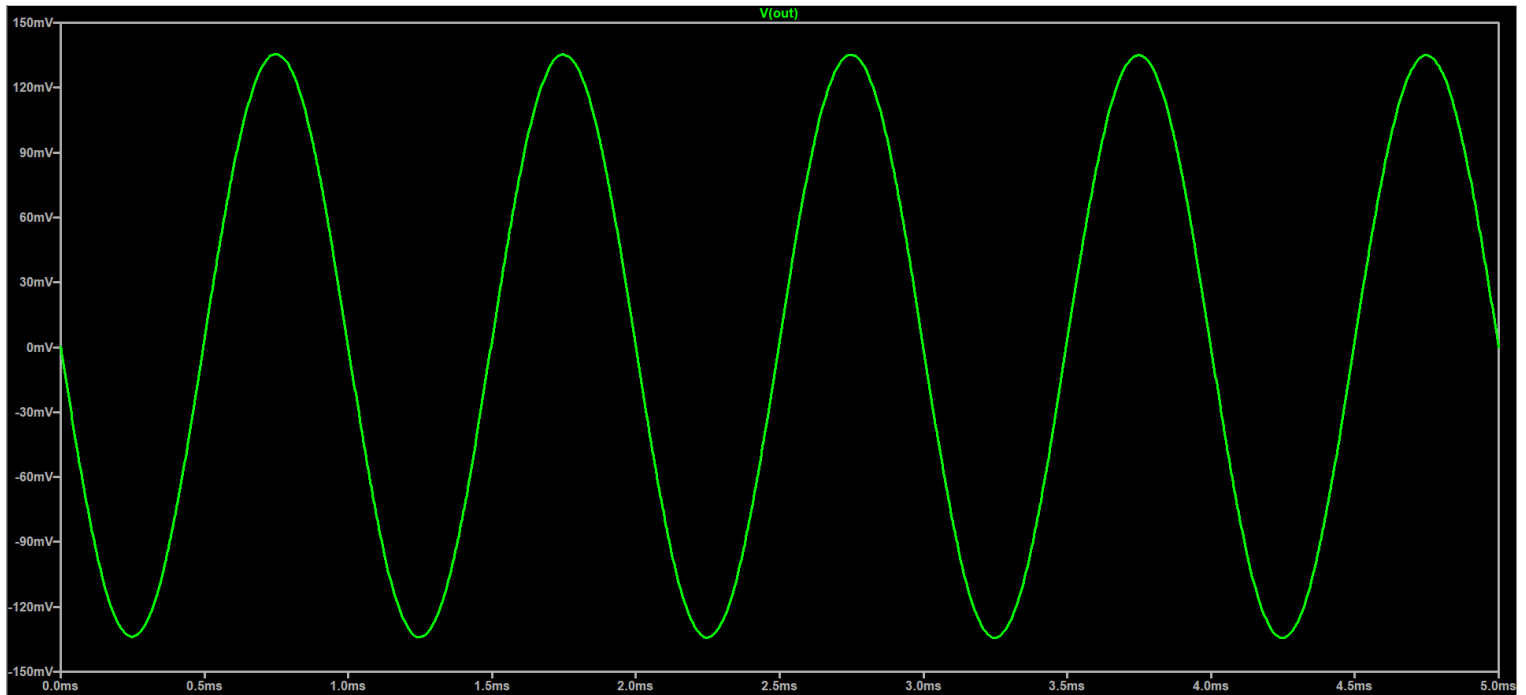
Αντίσταση εισόδου R_{in1}

Βραχυκυκλώνουμε τον πυκνωτή C_1 και εκτελούμε ac analysis με όρια 1 έως 1GHz. Προκύπτει:



Transient Simulation

Transient προσομοίωση για ημιτονοειδές σήμα πλάτους 2mV, συχνότητας 1kHz, σε διάστημα 5 περιόδων (περίπου 5msec):



Άσκηση 2

Εύρεση συνάρτησης μεταφοράς $H(s)$

$$I_1 = \frac{V_{in} - V_A}{R_1} \quad (1)$$

$$I_1' = \frac{V_A - 0}{\frac{1}{sC_1}} \quad (2)$$

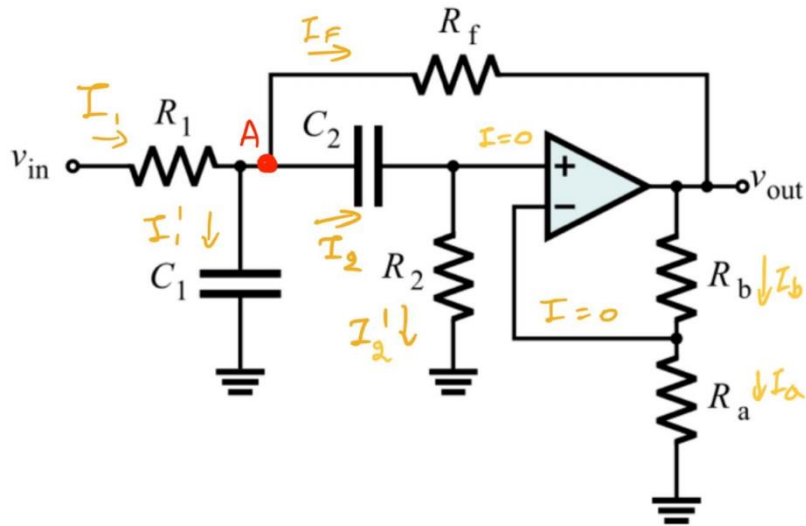
$$I_F = \frac{V_A - V_{out}}{R_f} \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{V_A - V^+}{\frac{1}{sC_2}} \quad (4)$$

$$I_2' = \frac{V^+ - 0}{R_2} \quad (5)$$

$$I_b = \frac{V_{out} - V^-}{R_b} \quad (6)$$

$$I_a = \frac{V^- - 0}{R_a} \quad (7)$$



- Από $I_a = I_b$ και τις (6), (7):

$$\frac{V_{out} - V^-}{R_b} = \frac{V^-}{R_a} \rightarrow V^- = V_{out} \frac{R_a}{R_b + R_a} \quad (8)$$

- Από $I_2 = I_2'$ και τις (4), (5):

$$\frac{V_A - V^+}{\frac{1}{sC_2}} = \frac{V^+}{R_2} \rightarrow V^+ = V_A \frac{R_2}{\frac{1}{sC_2} + R_2} \quad (9)$$

- Από $V^- = V^+$ και τις (8), (9):

$$V_{out} \frac{R_a}{R_b + R_a} = V_A \frac{R_2}{\frac{1}{sC_2} + R_2} \rightarrow V_A = V_{out} \frac{R_a}{R_b + R_a} \left(\frac{1}{sR_2C_2} + 1 \right) \quad (10)$$

- Από $I_1 = I_1' + I_F + I_2$ και τις (1), (2), (3), (4):

$$\frac{V_{in} - V_A}{R_1} = sC_1V_A + \frac{V_A - V_{out}}{R_F} + (V_A - V^+)sC_2$$

Μέσω της (9):

$$\frac{V_{in}}{R_1} = V_A \left(sC_1 + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_F} + sC_2 - \frac{sR_aC_2}{\frac{1}{sC_2} + R_2} \right) - \frac{V_{out}}{R_F}$$

Μέσω της (10):

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{R_aR_1}{R_b + R_a} \left(\frac{1}{sR_2C_2} + 1 \right) \left(sC_1 + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_F} + sC_2 - \frac{sR_aC_2}{\frac{1}{sC_2} + R_2} \right) - \frac{1}{R_F}$$

Τελικά, πράγματι, προκύπτει ότι:

$$H(s) = \frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{\left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) \frac{s}{R_1C_1}}{s^2 + s \left(\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_2C_2} - \frac{R_b}{R_aR_FC_1} \right) + \frac{R_1 + R_F}{R_1R_2R_FC_1C_2}}$$

Υπολογισμός Στοιχείων

$$f_0 = 10k + 83k = 93k$$

Θεωρούμε $R_1=R_f=R$, $R_2=2*R$ και $C_1=C_2=C$ στον κάτωθι τύπο:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_f + R_1}{C_1 C_2 R_1 R_2 R_f}}$$

Και προκύπτει:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2R}{2C^2 R^2}} = \frac{1}{2\pi RC} \rightarrow$$
$$RC = \frac{1}{2\pi f_0} \approx 0.001818 * 10^{-3}$$

Για standard value $C=3.3\mu F$:

$$R \approx 12.79 \text{ Ohms}$$

Υπάρχει διαθέσιμη standard value αντίσταση των 15 Ωμ, επομένως έχουμε σχετικά καλή προσέγγιση, της τάξεως λάθος περίπου 0.1475. Συνολικά τα στοιχεία:

$$R_1 = R_f = 12.75 \Omega$$

$$R_2 = 25.5 \Omega$$

$$C_1 = C_2 = 3.3 \mu F$$

Όσον αφορά τις τιμές των R_a , R_b :

$$\frac{3 - G}{2} = \frac{1}{2Q}$$

Με $Q=0.707$ προκύπτει $G \approx 1.5855$ και αφού:

$$G = 1 + \frac{R_b}{R_a}$$

Προκύπτει:

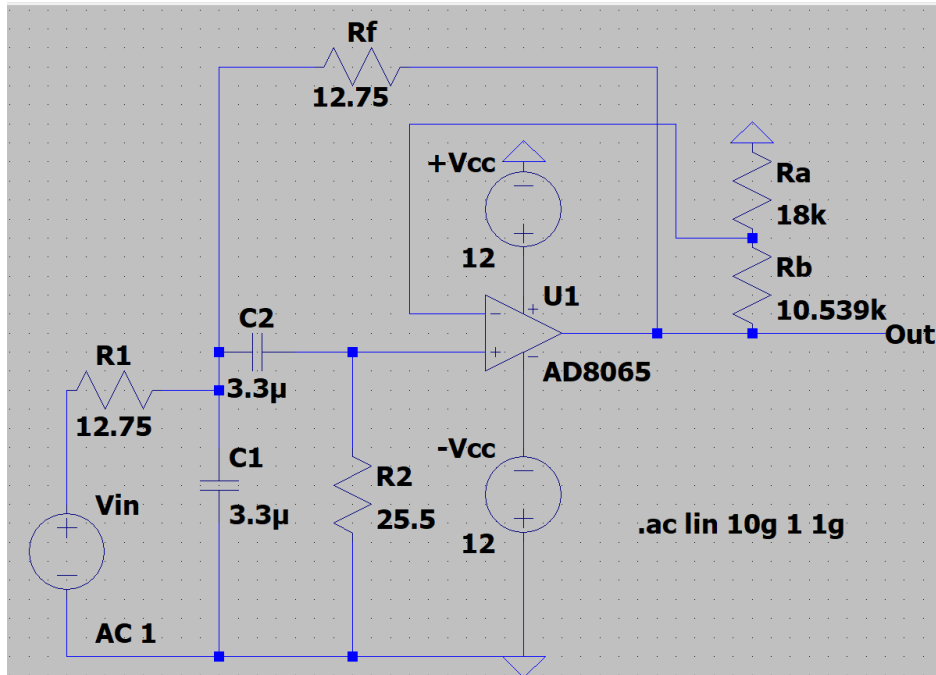
$$\frac{R_b}{R_a} \approx 0.5855$$

Για $R_a = 18k\Omega$ προκύπτει $R_b = 10.539k\Omega$, η οποία υπάρχει σαν standard value 10kΩ. Άρα:

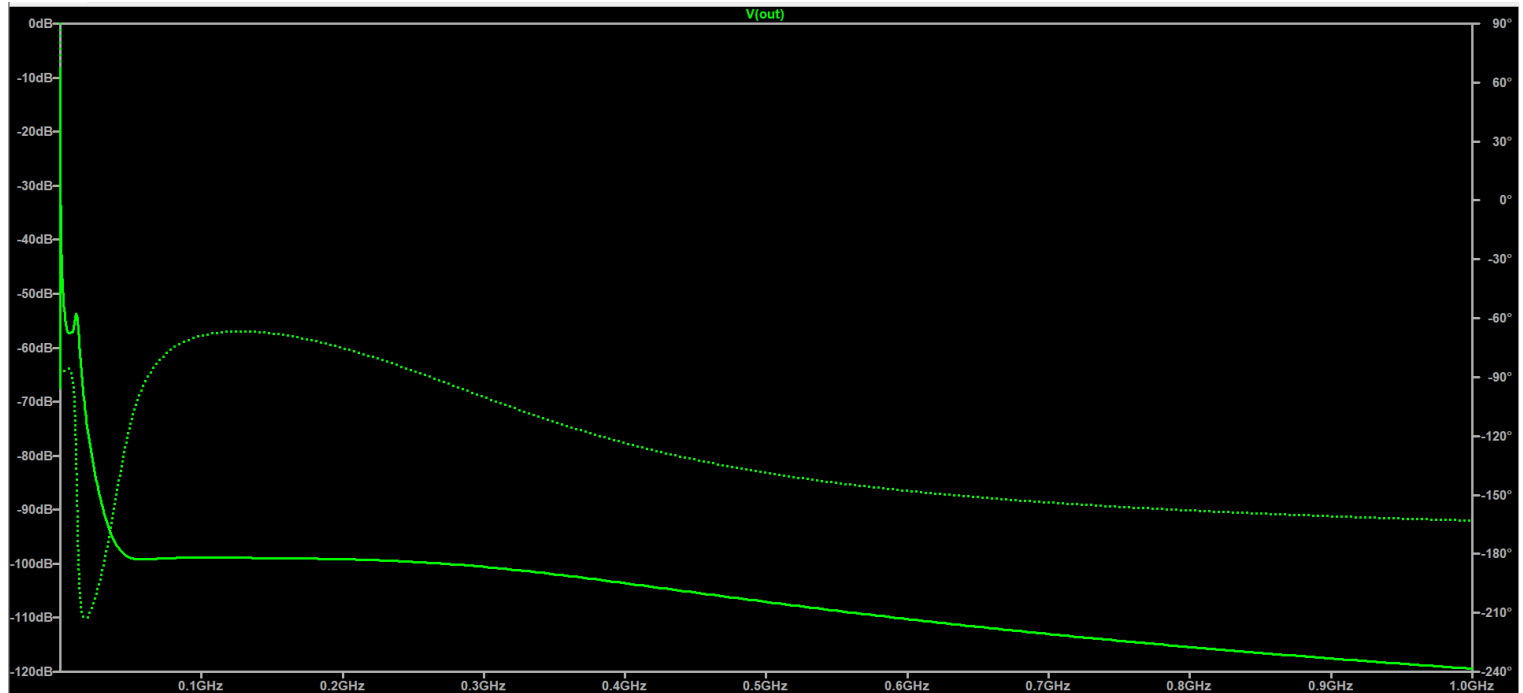
$$R_a = 18k\Omega, R_b = 10.539k\Omega$$

Διαγράμματα Bode

Δημιουργούμε το κύκλωμα στο πρόγραμμα LTSpice:



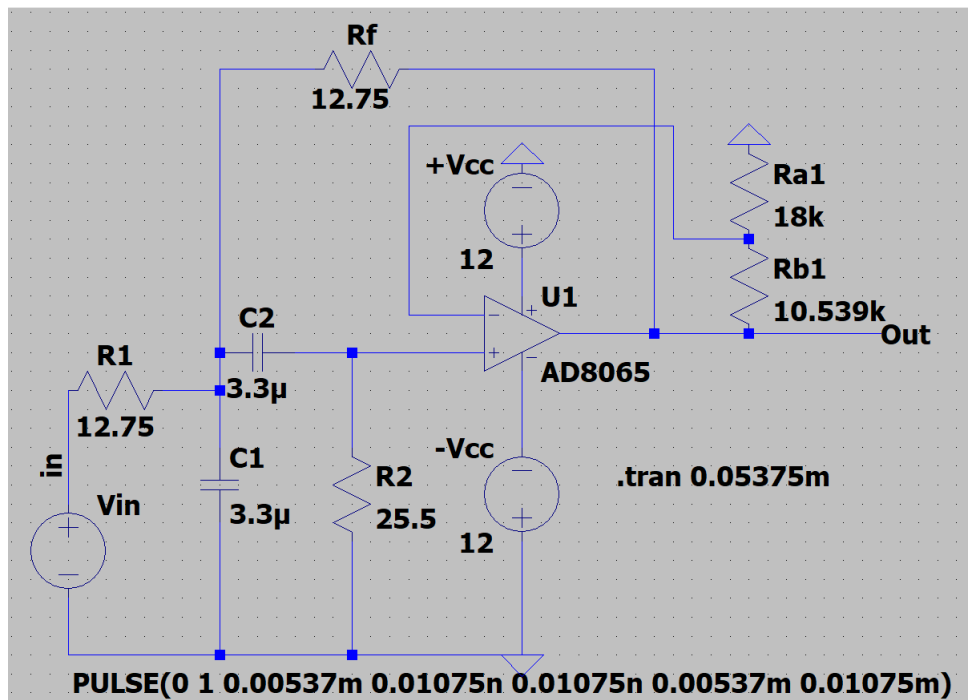
Και προκύπτει το ζητούμενο διάγραμμα:



Transient Ανάλυση

Αφού $f_0 = 93\text{kHz}$, $T = 0.01075\text{ msec}$ και επειδή θέλουμε duty cycle 50%, θα πάρουμε παλμό με περίοδο 0.005375 msec .

Επιπλέον, θα βάλουμε μία (αμελητέα) καθυστέρηση, της τάξεως των 0.001075 nsec , ώστε να προσομοιώσουμε πιο «πραγματικές» συνθήκες:



Οι προδιαγραφές της πηγής Vin:

Independent Voltage Source - Vin

Functions

- ☐ (none)
- ☒ PULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Period Ncycles)
- ☐ SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi Ncycles)
- ☐ EXP(V1 V2 Td1 Tau1 Td2 Tau2)
- ☐ SFFM(Voff Vamp Fcar MDI Fsig)
- ☐ PWL(t1 v1 t2 v2...)
- ☐ PWL FILE: Browse

Vinitial[V]: 0

Von[V]: 1

Tdelay[s]: 0.00537m

Trise[s]: 0.01075n

Tfall[s]: 0.01075n

Ton[s]: 0.00537m

Tperiod[s]: 0.01075m

Ncycles:

Additional PWL Points

Make this information visible on schematic: ☒

DC Value

DC value:

Make this information visible on schematic: ☒

Small signal AC analysis(AC)

AC Amplitude:

AC Phase:

Make this information visible on schematic: ☒

Parasitic Properties

Series Resistance[Ω]:

Parallel Capacitance[F]:

Make this information visible on schematic: ☒

Cancel OK

