

Ο Τελεστικός ενισχυτής 741



Ιστορική Αναδρομή

- ✓ 1964 – Ο Bob Widlar σχεδιάζει το πρώτο ΤΕ: τον 702.
 - ☞ Μόνο 9 transistors, απολαβή OL: 1000
 - ☞ Πολύ ακριβός : \$300 per op-amp

- ✓ 1965 – Ο Bob Widlar σχεδιάζει τον ΤΕ 709 (ο οποίος είναι σχετικά όμοιος σχεδιαστικά με τον $\mu\text{A}741$)
 - ☞ Απολαβή OL ~ 60,000.
 - ☞ Το μεγαλύτερο του μειονέκτημα ήταν η απουσία κυκλώματος προστασίας εξόδου από βραχυκύκλωμα.

- ✓ Ο Dave Fullagar εξελίσσει την σχεδίαση του 309 και καταλήγει στον 741:
 - ☞ Προσθήκη πυκνωτή ανάκτησης (CC)
 - ☞ Απολαβή ανοιχτού βρόγχου ~ 250000
 - ☞ Προσθήκη κυκλωμάτων προστασίας βραχυκυκλώματος

Υποσυστήματα

- ✓ Διαφορικό στάδιο εισόδου
- ✓ Ενδιάμεσο στάδιο υψηλής απολαβής μονής εξόδου
- ✓ Στάδιο εξόδου ισχύος (buffer)
- ✓ Πηγή ρεύματος
- ✓ προστασία βραχυκυκλώματος εξόδου

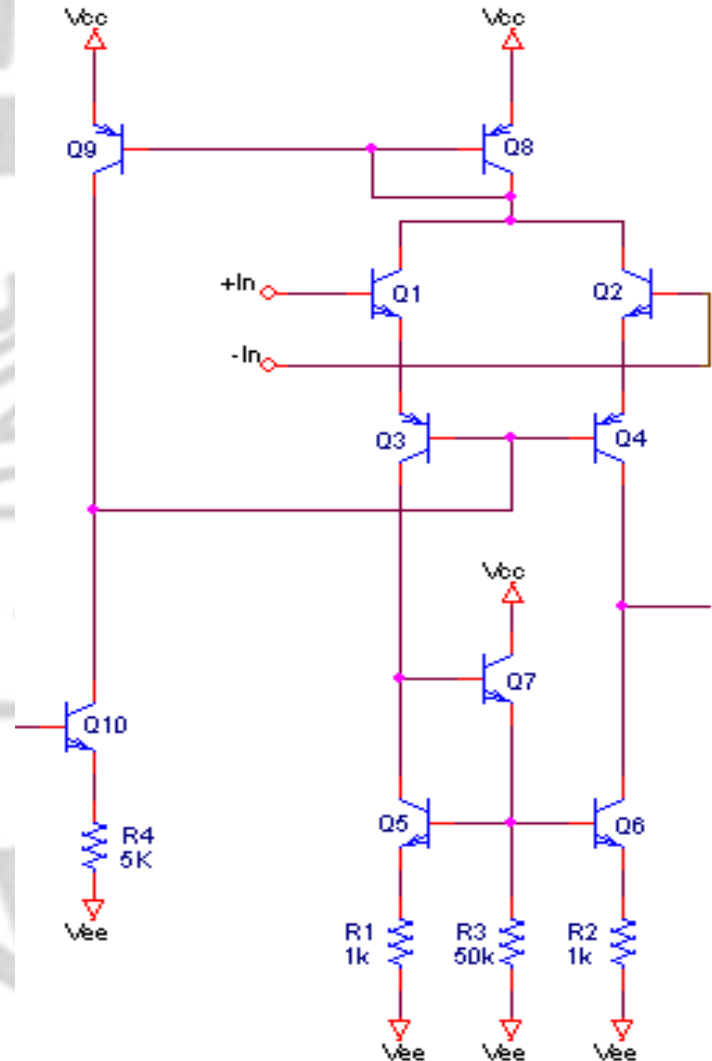
Διαφορικό στάδιο εξόδου

Αποτελείται από τα Q1 έως Q7 με την πόλωση να πραγματοποιείται από τα Q8, Q9, and Q10.

Τα Q1 και Q2 είναι ακόλουθοι εκπομπού οπότε έχουμε υψηλή αντίσταση εισόδου και μεταφορά του διαφορικού σήματος εισόδου σε ενισχυτή κοινής βάσης που αποτελούν τα Q3 και Q4.

Τα Q5, Q6, και Q7, καθώς και οι R1, R2, και R3 αποτελούν το φορτίο για το στάδιο εισόδου. Αυτό το κομμάτι του κυκλώματος παρέχει ένα υψηλής τιμής φορτίο.

Τα Q3 και Q4 λειτουργούν και ως προστασία για τα Q1 και Q2. Η επαφή EB του Q1 και Q2 καταρρέει περίπου στα 7V αλλά στα r_{th} transistors καταρρεει γύρω στα 50V. Οπότε, έχοντας τα σε σειρά με τα Q1 and Q2 προστατεύεται το υπόλοιπο κύκλωμα από μη επιτρεπόμενες στάθμες εισόδου.



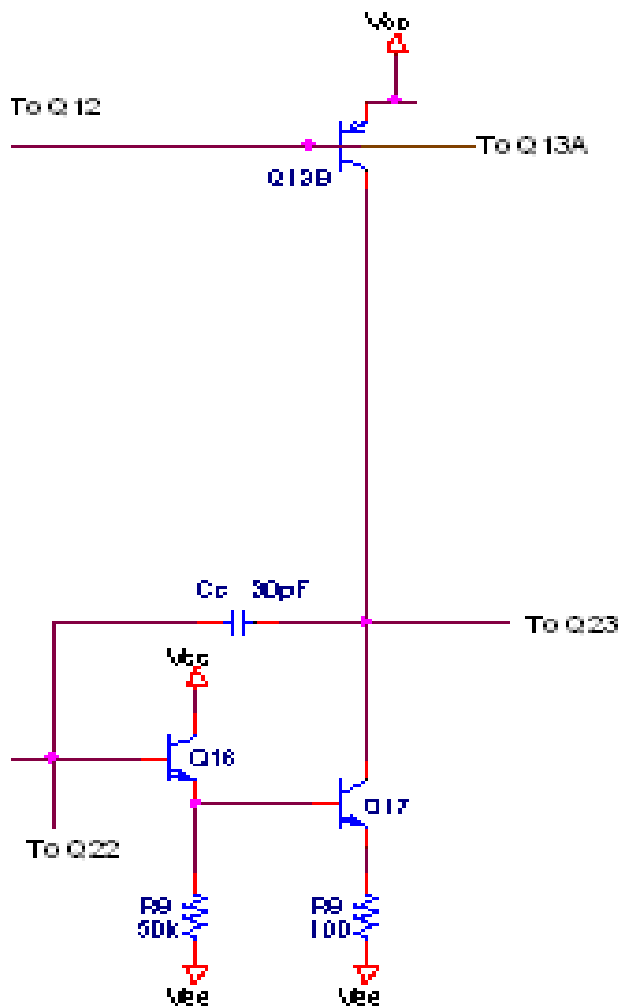
Ενδιάμεσο στάδιο υψηλής απολαβής μόνης εξόδου

Το δεύτερο στάδιο αποτελείται από τα Q16, Q17, Q13B, και τις αντιστάσεις R8 and R9.

Το Q16 λειτουργεί ως ακόλουθος εκπομπού προσφέροντας στο δεύτερο στάδιο υψηλή αντίσταση εισόδου.

Το Q17 λειτουργεί ως ενισχυτής CE με αντίσταση εκπομπού στα 100-Ω. Το φορτίο του CE είναι το Q13B. Συνεπώς πρόκειται για ενεργό φορτίο.

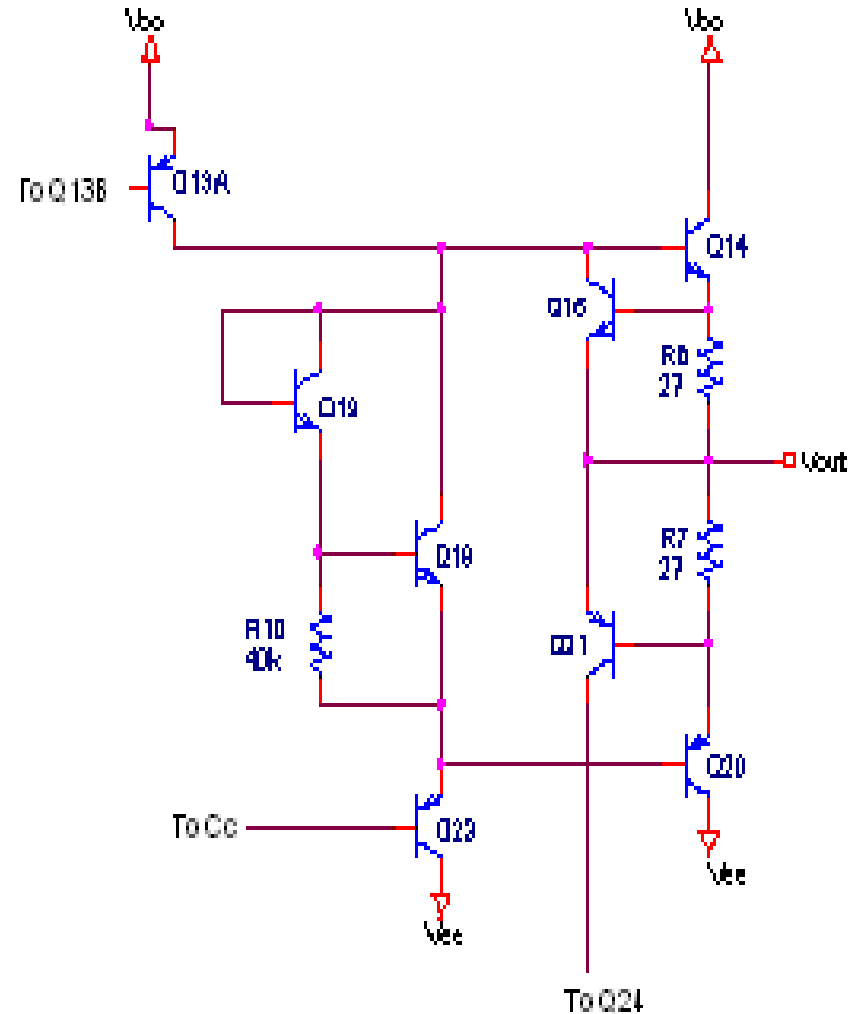
Από την έξοδο του ενισχυτή CE (συλλέκτης του Q17) λαμβάνεται σήμα ανάδρασης, την οποία επιτελεί ο πυκνωτής Cc. Ο συγκεκριμένος πυκνωτής δημιουργεί έναν πόλο ΧΣ γύρω στους 4Hz.



Στάδιο εξόδου ισχύος (buffer)

Το στάδιο εξόδου αποτελείται από το ζεύγος συμπληρωματικών τρανζιστορ Q14 and Q20 και από ένα στάδιο τάξης AB που αποτελείται από τα Q18 - Q19. Τα Q15 και Q21 παρέχουν προστασία βραχυκυκλώματος στην έξοδο. Το Q13A λειτουργεί ως πηγή ρεύματος του σταδίου εξόδου.

Ο σκοπός του σταδίου εξόδου είναι αφ' ενός να παρέχει προσφέρει την απαραίτητη χαμηλή αντίσταση εξόδου. Αφ' ετέρου προσφέρει την δυνατότητα παροχής υψηλής στάθμης ρεύματος στο φορτίο χωρίς να παρουσιάζονται ταυτόχρονα και υψηλές θερμικές απώλειες (λόγω τάξης AB).



Πηγές ρεύματος/ Προστασία βραχυκυκλώματος

- ✓ Τα transistors Q11 και Q12 αποτελούν το ήμισυ του καθρέπτη ρεύματος, ο οποίος χρησιμοποιείται για την παροχή των απαραίτητων ρευμάτων σε ολόκληρο τον ΤΕ.
- ✓ Το Q10 χρησιμοποιείται για την του ρεύματος πόλωσης στο στάδιο εισόδου, το Q13B για το δεύτερο στάδιο και το Q13A για το στάδιο εξόδου
- ✓ Τα Q15, Q21, Q24, Q22 μαζί με τις αντιστάσεις R6, R7, R11 αποτελούν το δικτύωμα προστασίας από βραχυκύκλωμα εξόδου

Ανάλυση DC

Ρεύμα αναφοράς (I_{REF})

- Το ρεύμα αυτό (απαραίτητο για τον καθρέπτη ρεύματος) δημιουργείται από τα Q11, Q12 και την R5. Ευκολα υπολογίζεται ως:

$$I_{REF} := \frac{V_{CC} - V_{be} - V_{be} - (-V_{EE})}{R_5}$$

$$I_{REF} = 0.733\text{mA}$$

- Από αυτή την τιμή του I_{REF} , το ρεύμα στον συλλέκτη του Q10 υπολογίζεται ως:

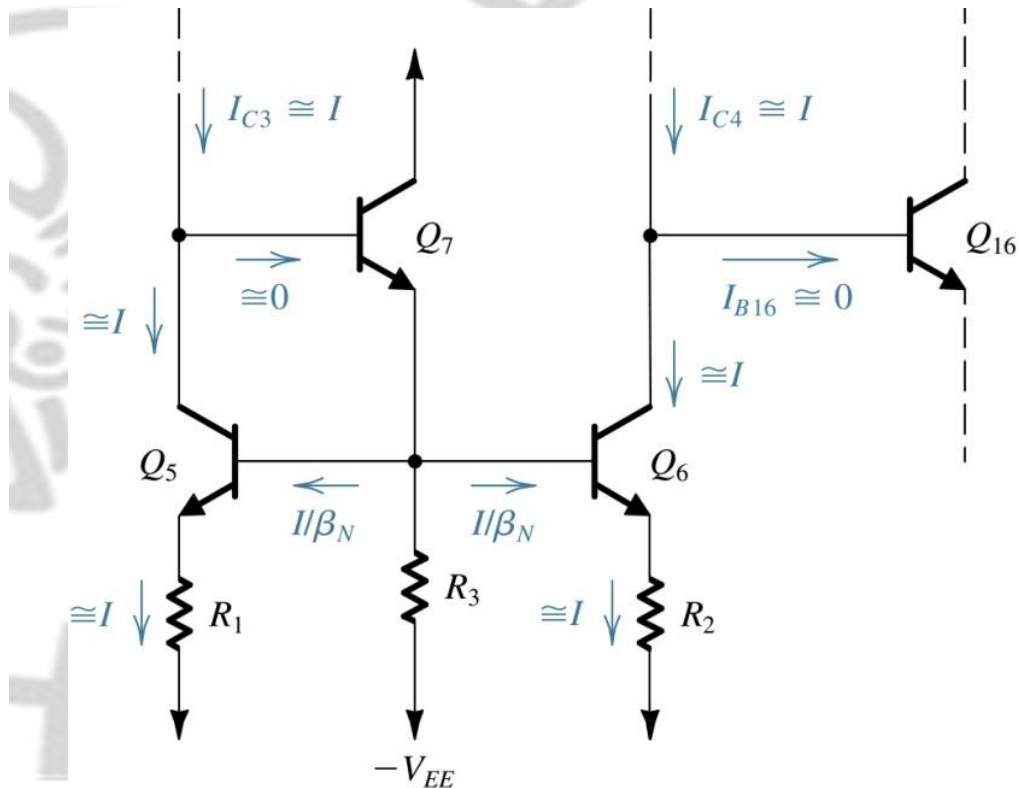
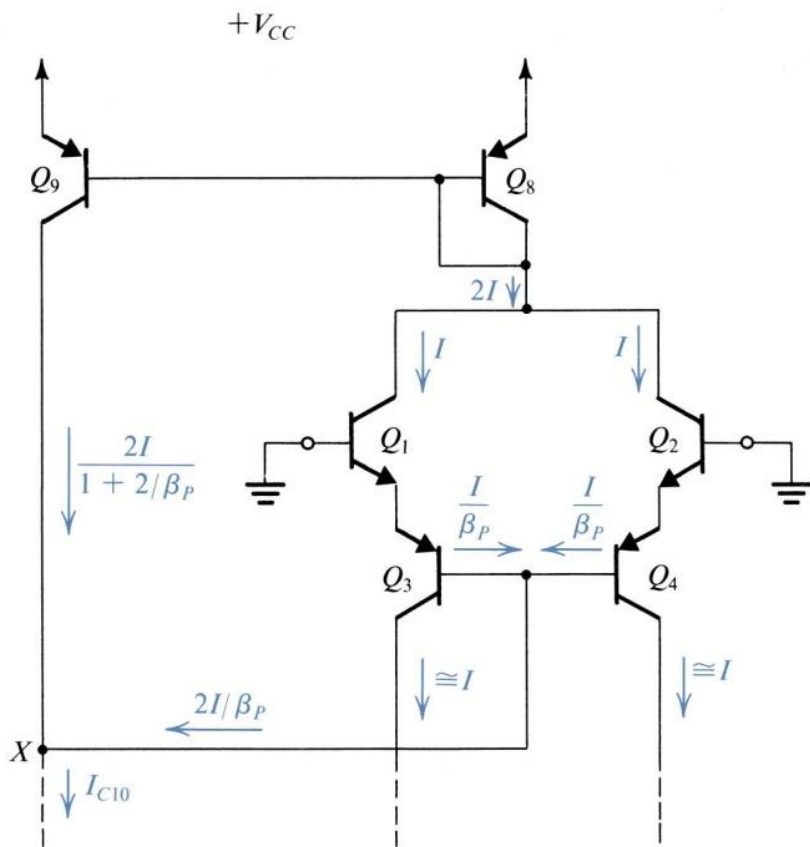
$$I_{C10} \cdot R_4 = V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{REF}}{I_{C10}}\right)$$

$$I_{C10} := 18.42\mu\text{A}$$

- Η τιμή αυτή του I_{C10} είναι διπλάσια από την τιμή του I (η οποία θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για ανάλυση)

Ανάλυση DC (συν.)

Για το στάδιο εισόδου, χρησιμοποιούμε την τιμή του I_{C10} που βρήκαμε πριν και συνεχίζουμε όπως φαίνεται παρακάτω



Ανάλυση DC (συν.)

Δεύτερο στάδιο

Θεωρώντας $\beta \gg 0$, οι παρακάτω εξισώσεις πόλωσης ισχύουν

$$I_{C13B} := 0.75 \cdot I_{REF}$$

$$I_{C13B} = 550 \mu\text{A}$$

$$I_{C16} = I_{E16} = \frac{I_{B17} + I_{E17} \cdot R_8 + V_{be}}{R_9} = 16.2 \mu\text{A}$$

Ανάλυση DC (συν.)

Στάδιο εξόδου

Θεωρώντας ότι το Q13A δύναται να παράσχει το $\frac{1}{4}$ του I_{REF} , οι παρακάτω εξισώσεις ισχύουν:

$$I_{C23} = I_{E23} = 0.25 \cdot I_{REF} = 180\mu A$$

Θεωρώντας επίσης ότι η V_{be} είναι $0.7V$, το ρεύμα στην R10 θα είναι $18\mu A$, μπορούμε να καταλήξουμε στην παρακάτω εξίσωση:

$$I_{C18} = I_{E18} = I_{C23} - I_{R10} = 162\mu A$$

Εφόσον το ρεύμα βάσης του Q18 είναι $I_{C18} / \beta = 162\mu A / 200$, θα έχουμε:

$$I_{C19} = I_{E19} = I_{R10} + I_{B18} = 18.8\mu A$$

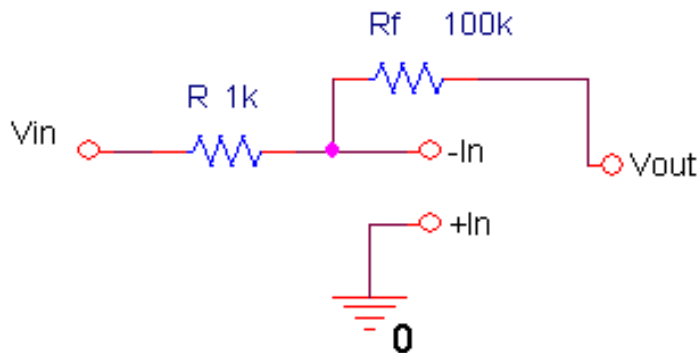
Ανάλυση DC (συν.)

Πίνακας αποτελεσμάτων

DC Collector Currents of the 741 op-amp (uA)							
Q1	9.5	Q8	19	Q13B	550	Q19	15.8
Q2	9.5	Q9	19	Q14	154	Q20	154
Q3	9.5	Q10	19	Q15	0	Q21	0
Q4	9.5	Q11	730	Q16	16.2	Q22	0
Q5	9.5	Q23	730	Q17	550	Q23	180
Q6	9.5	Q13A	180	Q18	165	Q24	0
Q7	10.5						

Ανάλυση ασθενούς σήματος

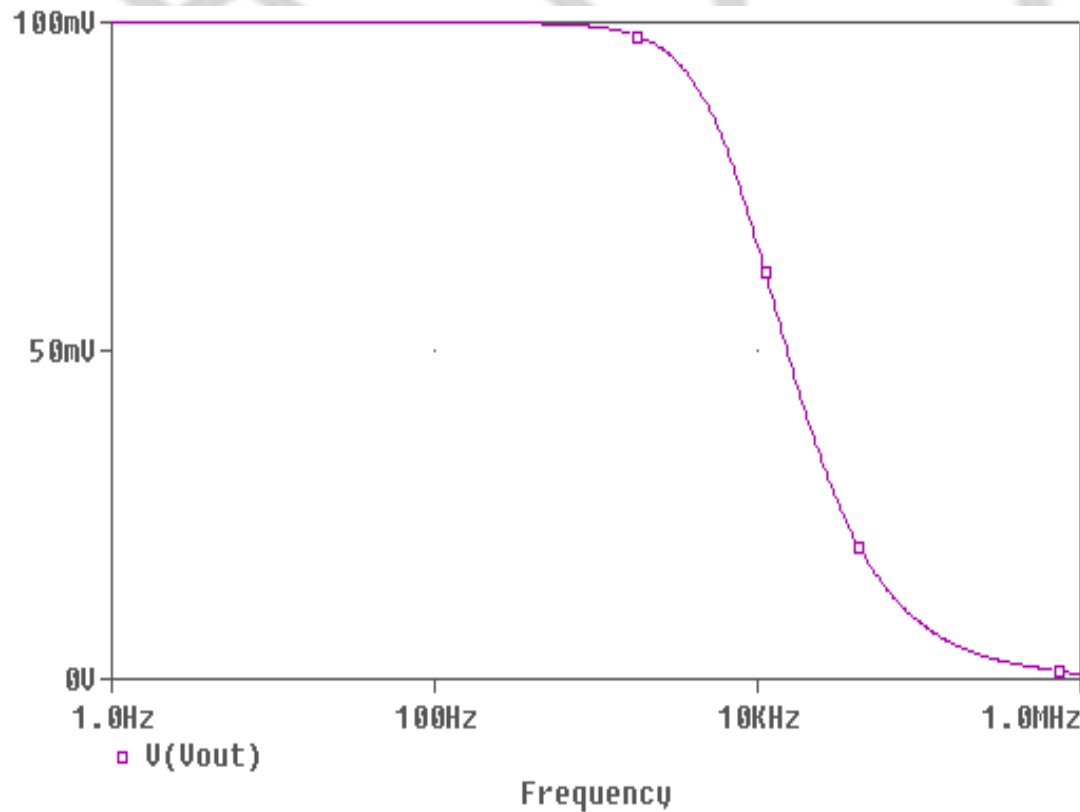
Προκειμένου να απεικονιστούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά του 741, σε μεταβολές ασθενούς σήματος, προσθέτουμε ένα απλό δικτύωμα ανάδρασης (R_f - R).



Αυτό το δίκτυωμα θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση μας. Η απολαβή κλειστού βρόγχου ρυθμίζεται στο (R_f / R) .

Ανάλυση ασθενούς σήματος (συν.)

1. Απόκριση συχνότητας

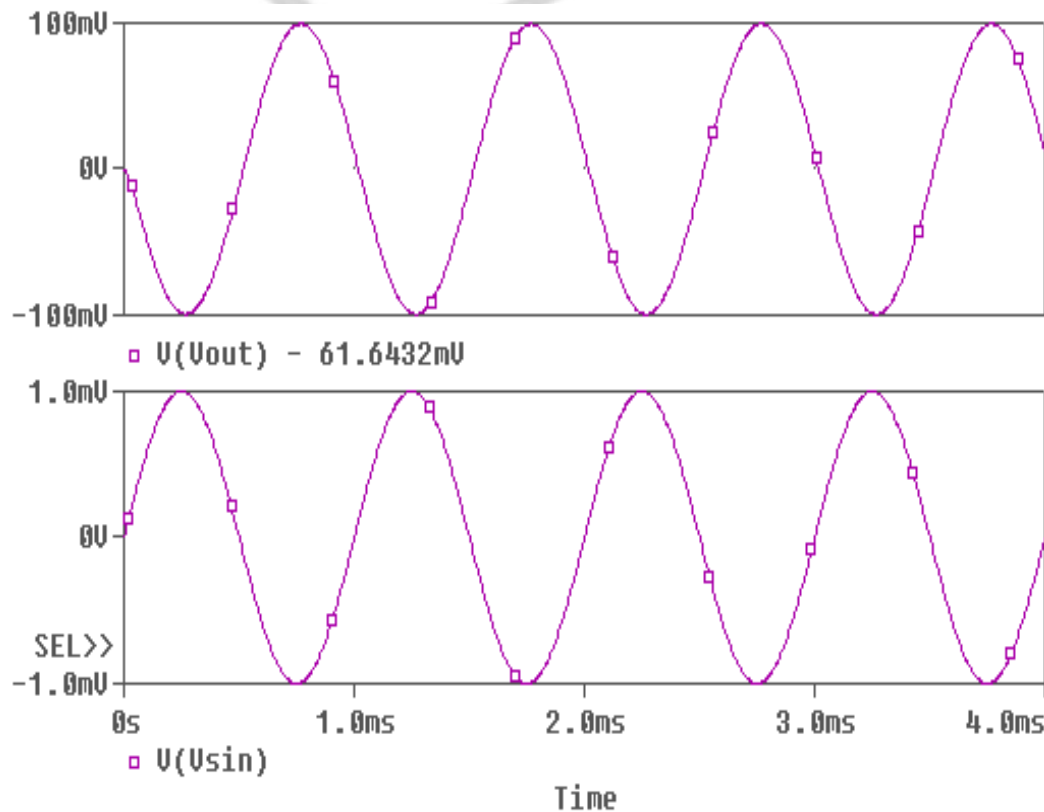


Στον ΤΕ (με το δικτύωμα ανάδρασης που παρουσιάσαμε πριν) εφαρμόζεται σήμα 1mV AC signal.

Ο ΤΕ σε αναστρεφουσα συνδεσμολογία έχει απολαβή 100 μέχρι τα 8kHz. Από εκεί και πέρα η απολαβή εξασθενεί με ρυθμό 20dB/decade μέχρι να φθάσει στη συχνότητα μοναδιαίας απολαβής (που εδώ είναι στο 1MHz.)

Ανάλυση ασθενούς σήματος (συν.)

2. Transient analysis



Εφαρμόζουμε ημιτονικό
σήμα 1mV 1kHz

Στην έξοδο του ΤΕ έχουμε
σήμα ημιτονικό ,
ανεστραμμένο, πλάτους
100mV

Ετσι, επιβεβαιώνουμε ότι
πρόκειται για
αναστρεφοντα ενισχυτή με
απολαβή κλειστού
βρόγχου ίση με 100.

Ανάλυση ασθενούς σήματος (συν.)

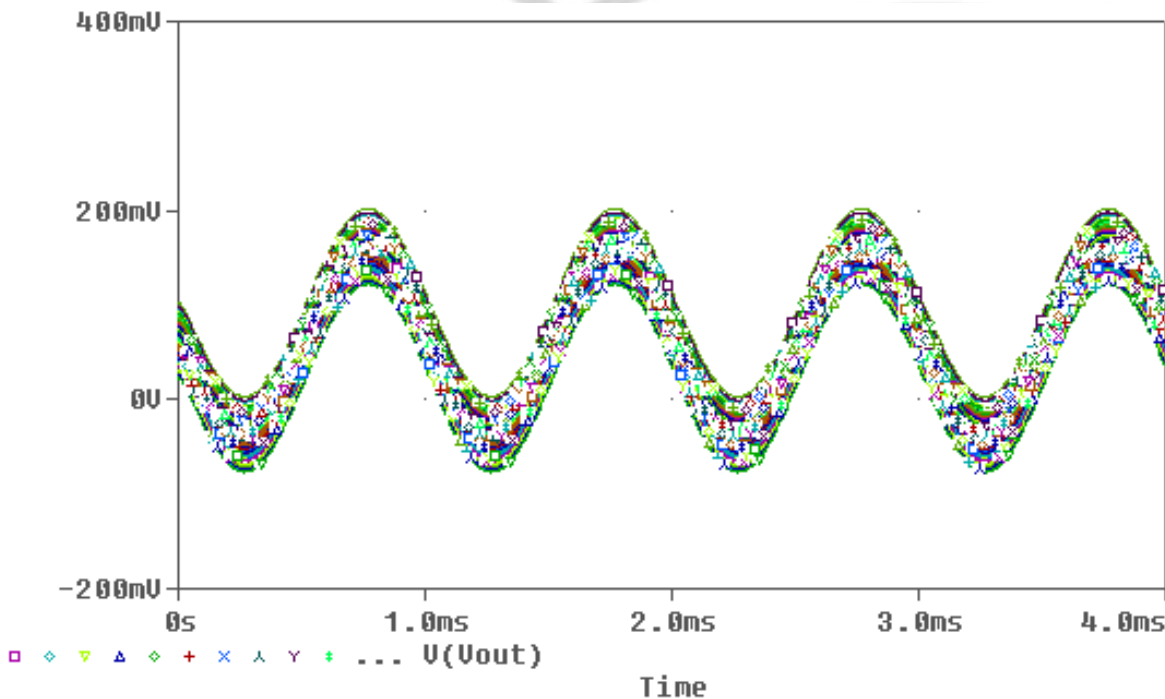
3. Ανάλυση Monte Carlo

- a. Σε όλες τις αντιστάσεις του σχηματικού, ορίζεται ανοχή 2% και επαναλαμβάνονται τα προηγούμενα βήματα.
- b. Στη συνέχεια, ορίζουμε ανοχή 50% για τα β των τρανζίστορ (και επαναλαμβάνουμε τα προηγούμενα)
- c. Τέλος, ορίζεται θερμοκρασιακή μεταβολή από -150°C έως 100°C

Αποτελέσματα Monte Carlo Analysis

Μεταβολή τιμών αντιστάσεων κατά 2%

☞ Transient Analysis



Όπως φαίνεται από το διπλανό σχήμα, η οριζόμενη μεταβολή των τιμών στις αντιστάσεις, προκαλεί μεταβολές στις τιμές του σήματος εξόδου.

Παρόλα αυτά η μορφή του σήματος εξόδου ΔΕΝ αλλοιώνεται.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Το offset των 61mV παραμένει !

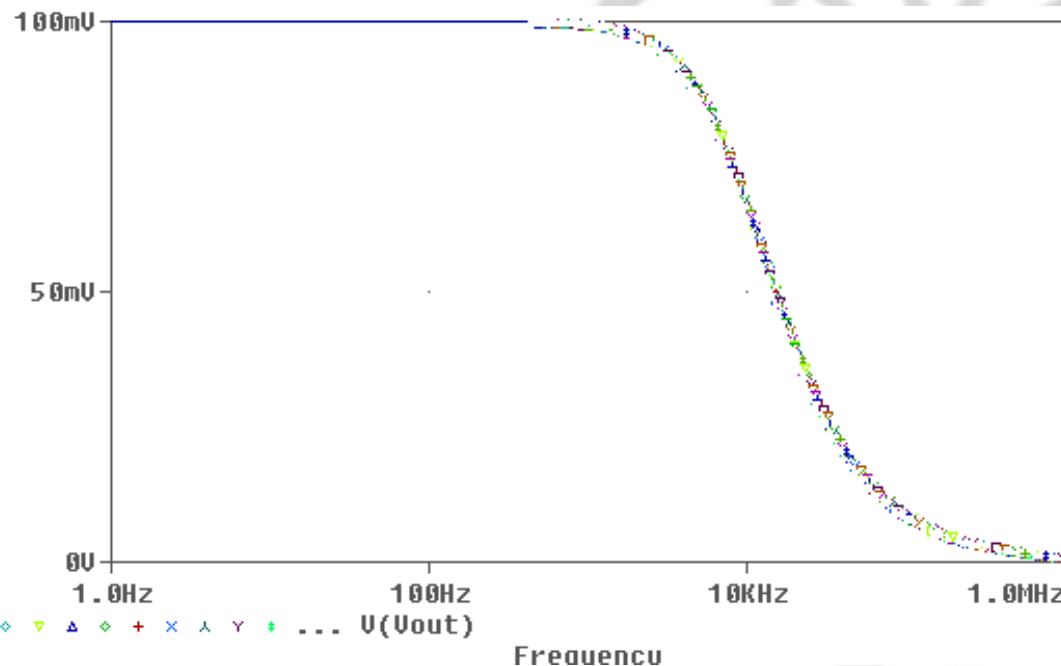
Αποτελέσματα Monte Carlo Analysis

Μεταβολή τιμών αντιστάσεων κατά 2%

☞ Απόκριση συχνότητας

Όπως ήταν αναμενόμενο, οι μεταβολές των αντιστάσεων έχουν ΕΛΑΧΙΣΤΗ επίδραση στην απόκριση συχνότητας.

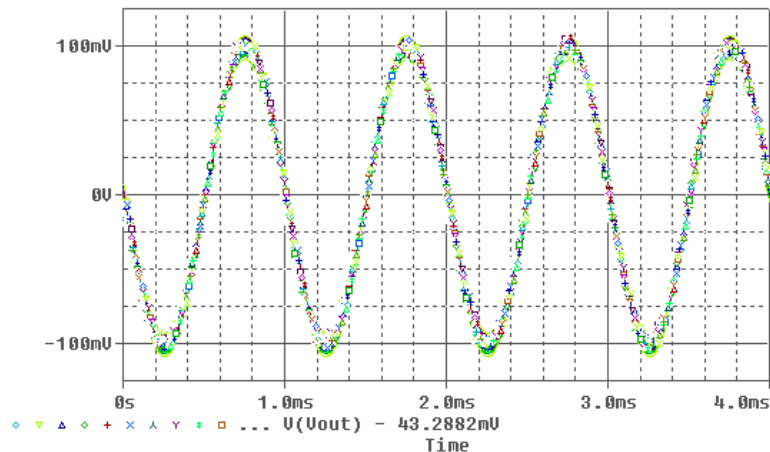
Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι οι αντιστάσεις δεν επιδρούν στις χωρητικότητες του ΤΕ και κατ' επέκταση δεν επιδρούν στους πόλους της Συνάρτησης Μεταφοράς.



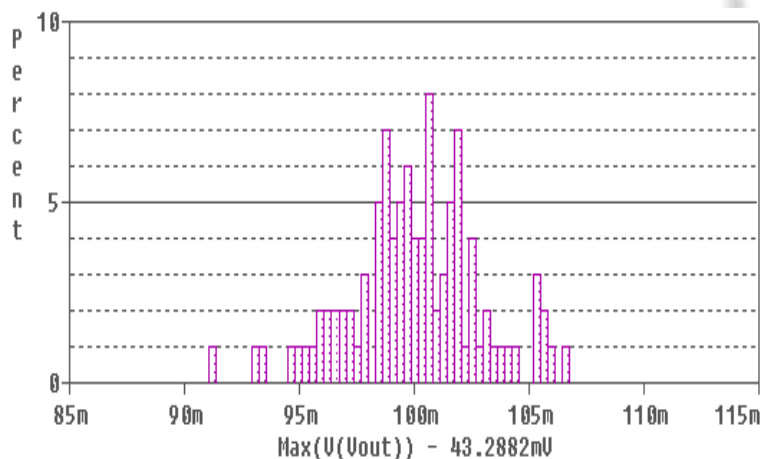
Αποτελέσματα Monte Carlo Analysis

Μεταβολή β κατά 50%

Transient Analysis



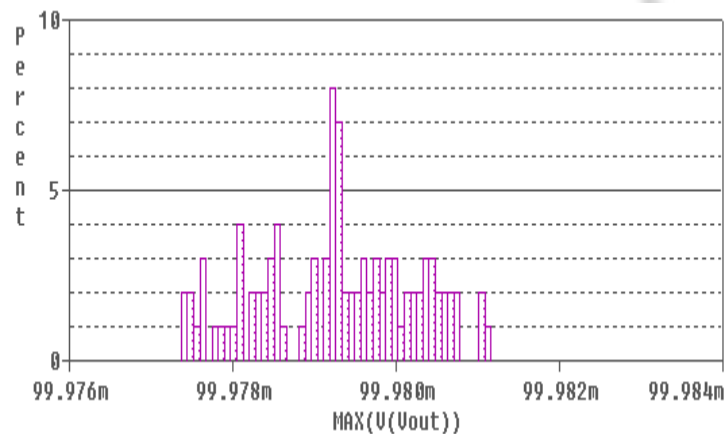
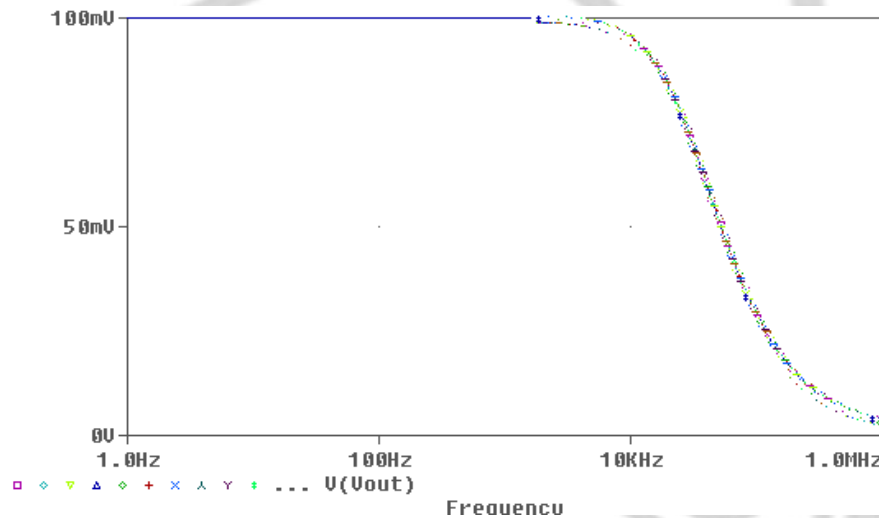
Το διπλανό διάγραμμα μας αποδεικνύει ότι η μεταβολή των β στον ΤΕ έχει ΕΛΑΧΙΣΤΗ επίδραση στο σήμα εξόδου. Ο ΤΕ 741 είναι ένα παράδειγμα σχεδίασης ΤΕ με αναισθησία στις μεταβολές του β .



Το διπλανό διάγραμμα είναι ένα ιστόγραμμα το οποίο μας δείχνει πόσες φορές μία συγκεκριμένη τιμή του σήματος εξόδου μετρήθηκε κατά τη διάρκεια όλων των προσομοιώσεων. Είναι ευδιάκριτο το γεγονός ότι το εύρος τιμών του σήματος εξόδου είναι εντός ενός διαστήματος 5mV από την αναμενόμενη (θεωρητική) τιμή

Αποτελέσματα Monte Carlo Analysis

Μεταβολή β κατά 50%



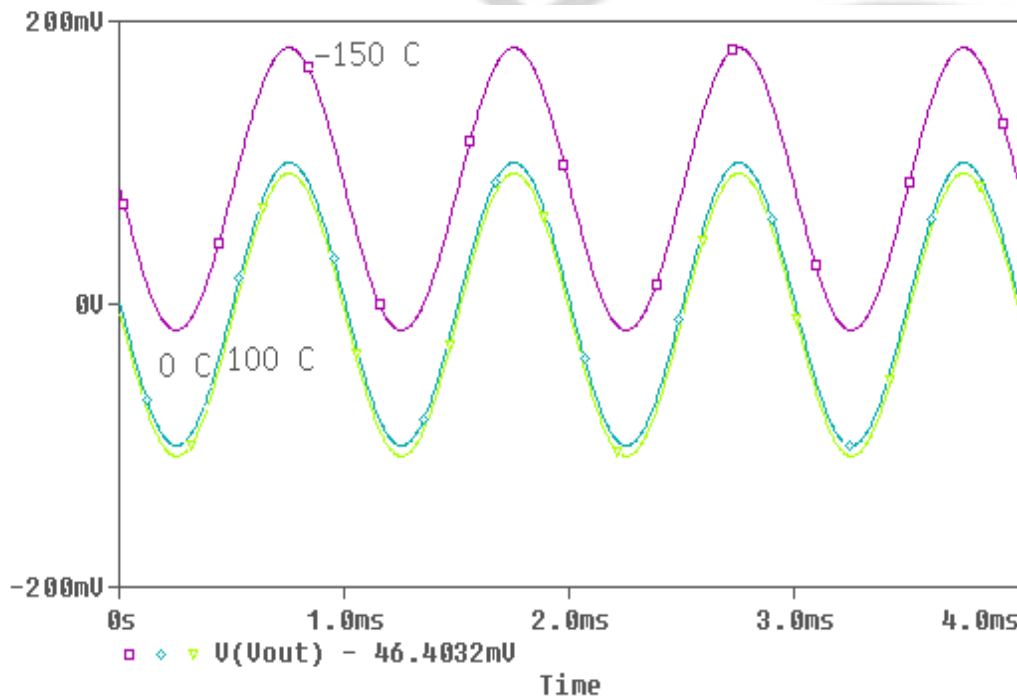
Τα διπλανά διαγράμματα μας δίδουν τις εξής πληροφορίες:

Η μεταβολή των β ΔΕΝ επηρεάζει την απόκριση συχνότητας και το εύρος τιμών του σήματος εξόδου

Το χαρακτηριστικό αυτό είναι τρομακτικά σημαντικό διότι, με δεδομένο ότι τα τρανζίστορ παραγωγής παρουσιάζουν μεταβολές στο β , το να έχουμε κυκλωματικές υλοποιήσεις που δεν επηρεάζονται αυτές τις μεταβολές των β , παρέχει την σταθερότητα και την ακρίβεια λειτουργίας που απαιτούμε από κάθε ηλεκτρονικό κύκλωμα

Αποτελέσματα Monte Carlo Analysis

Μεταβολή θερμοκρασίας (-150°C , 0°C και 100°C)



Εύκολα διακρίνουμε ότι οι μεταβολές θερμοκρασίες δεν επηρεάζουν τη μορφή του σήματος εξόδου ΑΛΛΑ ΕΠΗΡΡΕΑΖΟΥΝ τη μέγιστη τιμή του (η απολαβή παραμένει αμετάβλητη). Με μια προσεκτικότερη εξέταση του διπλανού διαγράμματος μας δίδει την πληροφορία ότι αυτό που μεταβάλλεται στην ουσία είναι το DC offset.