



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Αναφορά Εργασίας στο LTspice XVII για το μάθημα: Ηλεκτρονική Ι

Στοιχεία Φοιτητή: Ονοματεπώνυμο: Αναστάσιος Παπαζαφειρόπουλος

Αριθμός Μητρώου: 03118079

Ακαδημαϊκό έτος: 2019-2020

Μέρος 1:

A)

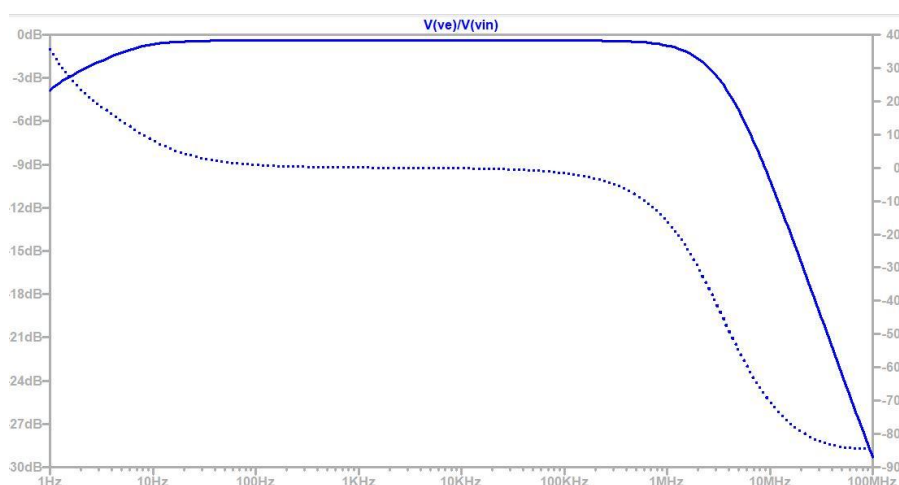
Έπειτα από την dc. op προσομοίωση προέκυψε ο ακόλουθος πίνακας:

| | Ανάλυση με το χέρι | Προσομοίωση σε Spice |
|---------------|--------------------|----------------------|
| V_E (V) | 3.62 | 3.65499 |
| V_C (V) | 9 | 9 |
| V_B (V) | 4.32 | 4.32527 |
| V_{K4} (V) | 4.41 | 4.41263 |
| V_{dd} (V) | 9 | 9 |
| ground | 0 | 0 |
| I_{R1} (mA) | 0.2295 | 0.229368 |
| I_{R2} (mA) | 0.22049 | 0.220632 |
| I_{R3} (mA) | 0.009 | 0.00873674 |
| I_{R4} (mA) | 1.81 | 1.82749 |
| I_C (mA) | 1.801 | 1.81876 |
| I_B (mA) | 0.009 | 0.00873674 |
| I_E (mA) | 1.81 | 1.82749 |

Ισχύς: $V_{dd} \cdot I_{dd} = V_{dd} \cdot (I_c + I_{R1}) \cong 18.27 \text{ mW}$. Παρατηρούμε ότι στη DC ανάλυση οι τιμές της προσομοίωσης γενικά συμφωνούν με τις θεωρητικές τιμές, οι μικρές αποκλίσεις σε κάποιες τιμές οφείλονται στο φαινόμενο Early.

B)

Με βάση την προσομοίωση του LT spice για το κέρδος μικρού σήματος χαμηλών-μεσαίων συχνοτήτων ισχύει: $\frac{V_{out}}{V_{in}} = -0.4 \text{ dB}$, δηλαδή: $\frac{V_{out}}{V_{in}} \cong 0.955$. Αφού ισχύει: $\text{dB} = 20 \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right)$. Όμως, στην ανάλυση με το χέρι βρίσκουμε θεωρητικό κέρδος: $\frac{V_{out}}{V_{in}} \cong 0.9647$. Παρατηρούμε ότι τα δύο κέρδη διαφέρουν κατά: $\left| \Delta \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| \cong 0.97 \cdot 10^{-3}$. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο φαινόμενο Early και στους πυκνωτές, τους οποίους θεωρούμε ως βραχυκυκλώματα στην ανάλυση με το χέρι σε αντίθεση με την προσομοίωση. Το διάγραμμα Bode (απόκρισης συχνότητας) κέρδους και φάσης, είναι το εξής:

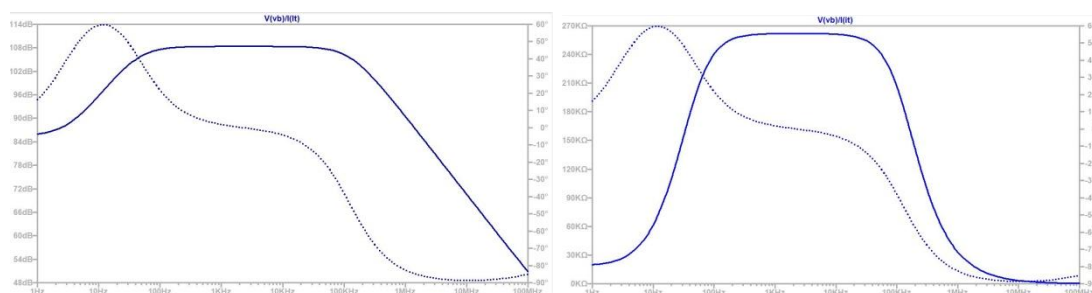


Η πτώση του κέρδους πέρα από συγκεκριμένα όρια οφείλεται:

- Κάτω όριο: Ο πυκνωτής C_1 ($Z = \frac{1}{j\omega C}$) «κόβει» το σήμα, επειδή η συχνότητά του είναι υπερβολικά χαμηλή.
- Πάνω όριο: Το μοντέλο BJT έχει και μικρούς πυκνωτές που στην επίλυση με το χέρι αγνοούμε.

Γ)

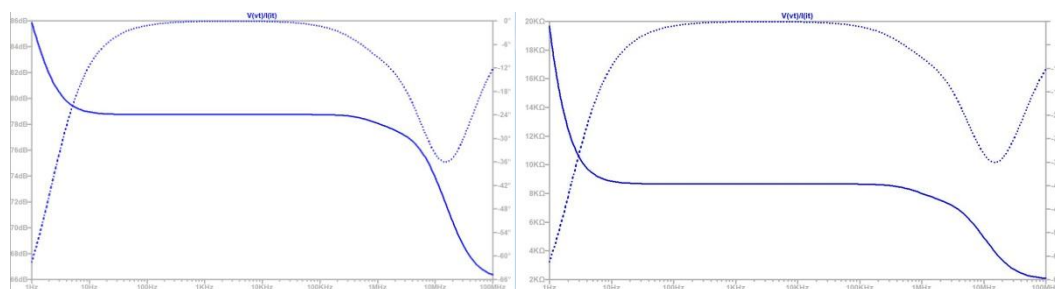
Το διάγραμμα της αντίστασης εισόδου R_{in} (δεξιά από τον $C1$) του ενισχυτικού σταδίου παρουσιάζεται παρακάτω σε dB και σε kΩ αντίστοιχα:



Άρα, από την προσομοίωση προκύπτει: $R_{in} \cong 262 \text{ k}\Omega$. Από την ανάλυση στο χέρι, είναι: $R_{in} \cong 273.87 \text{ k}\Omega$. Παρατηρούμε ότι οι δύο αντιστάσεις εισόδου R_{in} διαφέρουν κατά: $|\Delta R_{in}| \cong 11.87 \text{ k}\Omega$. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο φαινόμενο Early και στους πυκνωτές, τους οποίους θεωρούμε ως βραχυκυκλώματα στην ανάλυση με το χέρι σε αντίθεση με την προσομοίωση.

Δ)

Το διάγραμμα της αντίστασης εξόδου R_{out} (στον εκπομπό, συμπεριλαμβανομένης και της R_4) του ενισχυτικού σταδίου παρουσιάζεται παρακάτω σε dB και σε $\text{k}\Omega$ αντίστοιχα:



Άρα, από την προσομοίωση προκύπτει: $R_{out} \cong 8 \text{ k}\Omega$. Από την ανάλυση στο χέρι, είναι: $R_{out} \cong 121 \Omega$. Παρατηρούμε ότι οι δύο αντιστάσεις εισόδου R_{in} διαφέρουν κατά: $|\Delta R_{in}| \cong 7.879 \text{ k}\Omega$. Η διαφορά αυτή είναι αναπάντεχα μεγάλη. Αν δεν έχει γίνει αριθμητικό λάθος στην ανάλυση με το χέρι οφείλεται στο φαινόμενο Early και στους πυκνωτές (και τη συνδεσμολογία τους), τους οποίους θεωρούμε ως βραχυκυκλώματα στην ανάλυση με το χέρι σε αντίθεση με την προσομοίωση.

Μέρος 2:

A)

Έπειτα από την dc. op προσομοίωση προέκυψε ο ακόλουθος πίνακας:

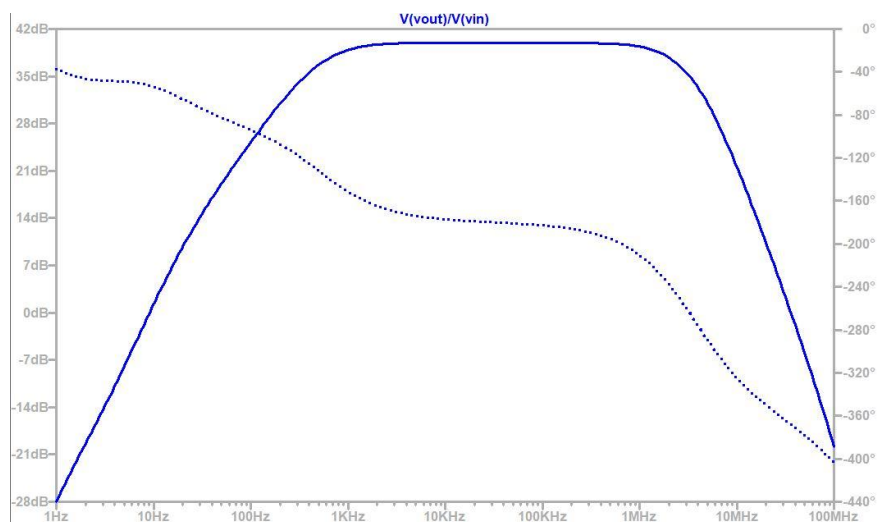
| | Ανάλυση με το χέρι | Προσομοίωση σε Spice |
|-----------------------|--------------------|----------------------|
| $V_{E1} \text{ (V)}$ | 2.22 | 2.26591 |
| $V_{C1} \text{ (V)}$ | 3.71 | 3.71045 |
| $V_{B1} \text{ (V)}$ | 2.92 | 2.92069 |
| $I_{E1} \text{ (mA)}$ | 0.9648 | 0.985179 |
| $I_{B1} \text{ (mA)}$ | 0.0048 | 4.87657 |
| $I_{C1} \text{ (mA)}$ | 0.96 | 0.980302 |
| $V_{E2} \text{ (V)}$ | 3.71 | 3.71045 |
| $V_{C2} \text{ (V)}$ | 12 | 12 |
| $V_{B2} \text{ (V)}$ | 4.41 | 8.01875 |
| $I_{E2} \text{ (mA)}$ | 0.9607 | 4.07062 |
| $I_{B2} \text{ (mA)}$ | 0.00478 | 0.0197321 |
| $I_{C2} \text{ (mA)}$ | 0.000956 | 4.05089 |
| $V_{E3} \text{ (V)}$ | 7.38 | 3.75635 |
| $V_{C3} \text{ (V)}$ | 12 | 12 |
| $V_{B3} \text{ (V)}$ | 8.09 | 3.75635 |

| | | |
|---------------|--------|-----------|
| I_{E3} (mA) | 4.104 | 0.980302 |
| I_{B3} (mA) | 0.0204 | 0.0047227 |
| I_{C3} (mA) | 4.08 | 0.97558 |

Ισχύς: $V_{dd} \cdot I_{dd} = V_{dd} \cdot (I_{RB1} + I_{Rc} + I_{C2}) \cong 62.76W$. Παρατηρούμε ότι, εδώ, στη DC ανάλυση οι τιμές της προσομοίωσης διαφέρουν περισσότερο με τις θεωρητικές τιμές συγκριτικά με το μέρος 1 (ιδιαίτερα στα τρανζίστορ Q1,Q2). Αν δεν έχει γίνει λάθος στην ανάλυση με το χέρι, οι αποκλίσεις οφείλονται στο φαινόμενο Early. Όπως φαίνεται εδώ που έχουμε συνδεσμολογία με 3 τρανζίστορ δεν είναι καθόλου αμελητέο και επηρεάζει σημαντικά κάποια αποτελέσματα.

B)

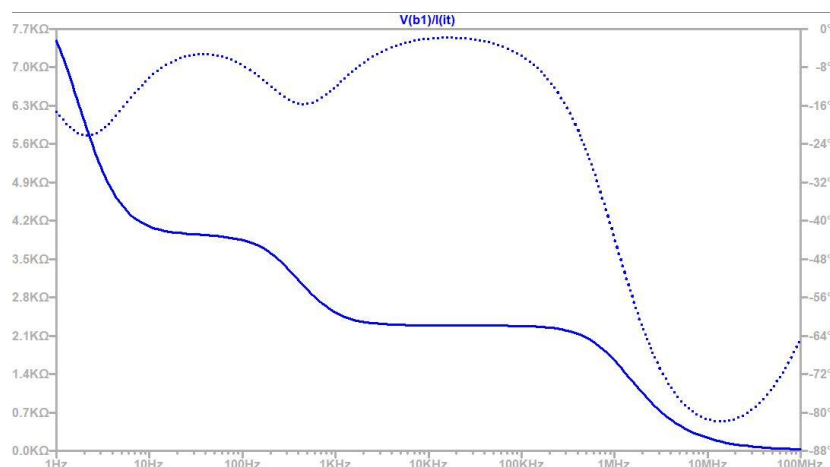
Με βάση την προσομοίωση του LT spice για το κέρδος μικρού σήματος χαμηλών-μεσαίων συχνοτήτων ισχύει: $\frac{V_{out}}{V_{in}} = 40dB$, δηλαδή: $\frac{V_{out}}{V_{in}} \cong 100$. Αφού ισχύει: $dB = 20\log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)$. Όμως, στην ανάλυση με το χέρι βρίσκουμε θεωρητικό κέρδος: $\frac{V_{out}}{V_{in}} \cong -101.77$. Παρατηρούμε ότι τα δύο κέρδη δεν έχουν καμία σχέση μεταξύ τους. Αυτό, αν έχει γίνει σωστά η ανάλυση με το χέρι(που μάλλον δεν έχει γίνει) οφείλεται στο φαινόμενο Early και στους πυκνωτές, τους οποίους θεωρούμε ως βραχυκυκλώματα στην ανάλυση με το χέρι σε αντίθεση με την προσομοίωση. Κι εδώ βλέπουμε μεγάλη διαφορά συγκριτικά με το μέρος 1. Το διάγραμμα Bode (απόκρισης συχνότητας) κέρδους και φάσης, είναι το εξής:



Η εξήγηση είναι ίδια με την αντίστοιχη του μέρους 1.

Γ)

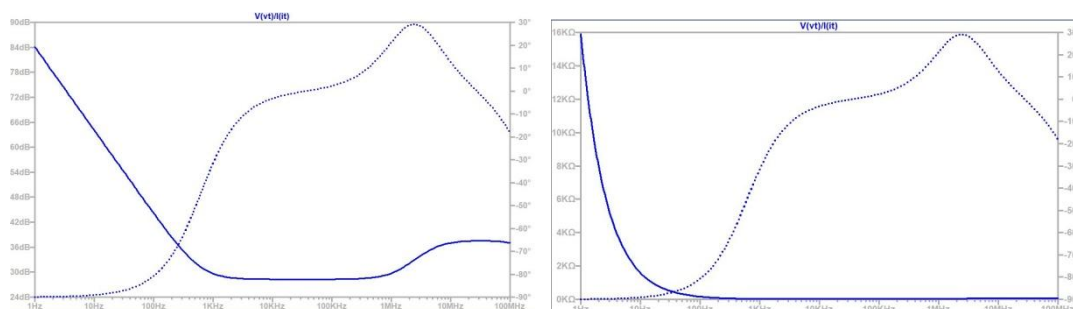
Το διάγραμμα της αντίστασης εισόδου R_{in} (όπως αναγράφεται στο σχήμα) του ενισχυτή παρουσιάζεται παρακάτω σε $k\Omega$:



Άρα, από την προσομοίωση προκύπτει: $R_{in} \cong 2.2k\Omega$. Από την ανάλυση στο χέρι, είναι: $R_{in} \cong 2.26238k\Omega$. Παρατηρούμε ότι οι δύο αντιστάσεις εισόδου R_{in} διαφέρουν κατά: $|\Delta R_{in}| \cong 62.38\Omega$. Η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή και οφείλεται στο φαινόμενο Early και στους πυκνωτές, τους οποίους θεωρούμε ως βραχυκυκλώματα στην ανάλυση με το χέρι σε αντίθεση με την προσομοίωση.

Δ)

Το διάγραμμα της αντίστασης εξόδου R_{out} (όπως αναγράφεται στο σχήμα) του ενισχυτή παρουσιάζεται παρακάτω σε dB και σε $k\Omega$ αντίστοιχα:



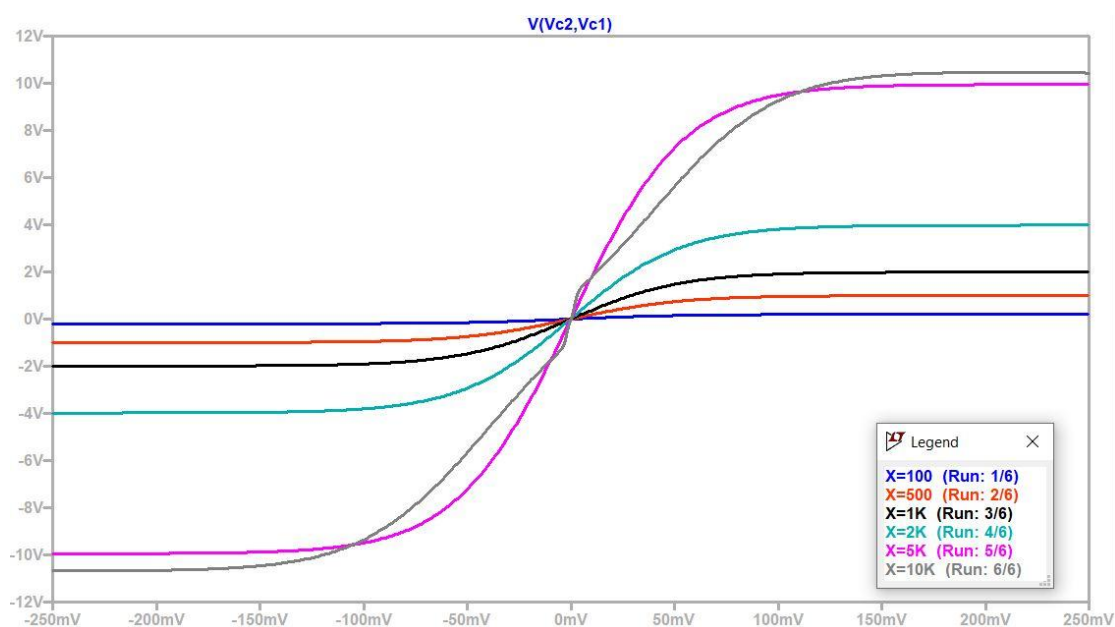
Άρα, από την προσομοίωση προκύπτει: $R_{out} \cong 47\Omega$. Από την ανάλυση στο χέρι, είναι: $R_{out} \cong 25.627\Omega$. Παρατηρούμε ότι οι δύο αντιστάσεις εισόδου R_{in} διαφέρουν κατά: $|\Delta R_{in}| \cong 21.373k\Omega$. Αν δεν έχει γίνει αριθμητικό λάθος στην ανάλυση με το χέρι, η μικρή αυτή διαφορά οφείλεται στο φαινόμενο Early και στους πυκνωτές (και τη συνδεσμολογία τους), τους οποίους θεωρούμε ως βραχυκυκλώματα στην ανάλυση με το χέρι σε αντίθεση με την προσομοίωση.

Σχόλιο: Οι τιμές των ερωτημάτων (Γ) και (Δ) με παραξένεψαν ως προς την τιμή του ερωτήματος (Β). Υποθέτω πως στην ανάλυση με το χέρι του (Β) έχει γίνει κάποιο αριθμητικό λάθος και έχει «χαθεί» ένα πρόσημο. Αν αληθεύει αυτή η υπόθεση, τότε και οι δύο τιμές των κερδών (θεωρητική και προσομοίωσης) είναι παραπλήσιες.

Μέρος 3:

A)

Παρακάτω παρουσιάζεται η χαρακτηριστική μεταφοράς της διαφορικής εξόδου $u_{c2}-u_{c1}$ ως προς την είσοδο, σε κοινούς άξονες για τις ακόλουθες τιμές της αντίστασης R_c : 100Ω, 500Ω, 1kΩ, 2kΩ, 5kΩ, 10kΩ:



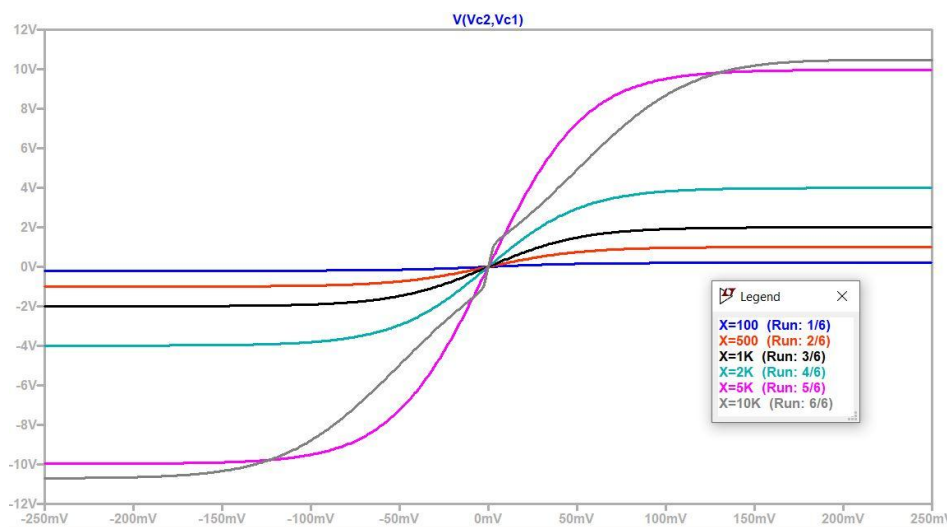
Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις αντιστάσεις με μεγαλύτερη τιμή έχουν μεγαλύτερο συντελεστή διεύθυνσης και μεγαλύτερη κατακόρυφη απόσταση των δύο ακρότατων τους. Αυτό σημαίνει πως όταν η αντίσταση R_c έχει μεγαλύτερη τιμή, τότε η διαφορά $u_{c2}-u_{c1}$ μεταβάλλεται γρηγορότερα και σε μεγαλύτερο εύρος τιμών. Η θεωρητική ανάλυση είχε γίνει στην άσκηση 18 της δεύτερης σειράς ασκήσεων. Τότε, είχαμε καταλήξει στην ακόλουθη σχέση:

$$u_{c1} - u_{c2} = I \cdot \tanh\left(\frac{u_{b1} - u_{b2}}{2V_T}\right) \cdot R_c \quad (1)$$

Επομένως, το αποτέλεσμα μας είναι αναμενόμενο από τη θεωρητική ανάλυση.

B)

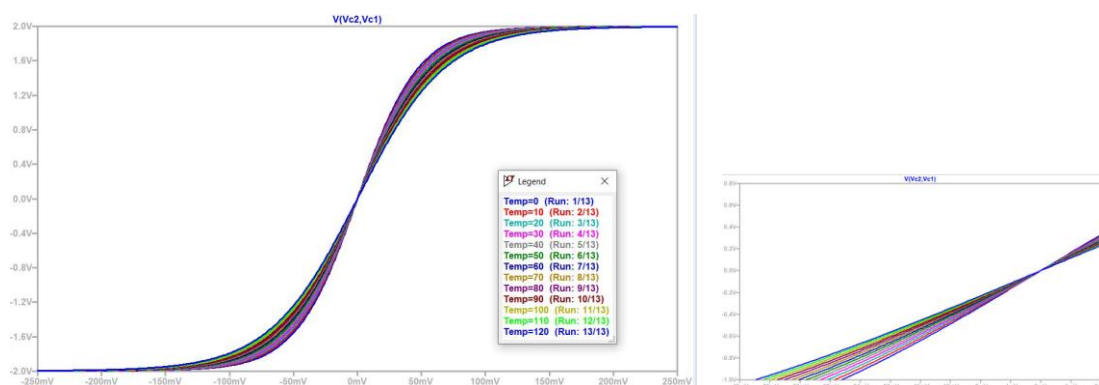
Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για το τρανζίστορ 2N3904 ($\beta=300$), προκύπτει η ακόλουθη γραφική παράσταση:



Παρατηρούμε ότι είναι σχεδόν ίδια με την προηγούμενη. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού πραγματοποιείται ουσιαστικά αλλαγή μόνο στο β ($200 \rightarrow 300$), άρα και στο α ($0.995 \rightarrow 0.996$). Η μεταβολή του α είναι τόσο μικρή που θεωρείται αμελητέα. Οπότε σύμφωνα, με τη σχέση (1) οδηγούμαστε στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα.

Γ)

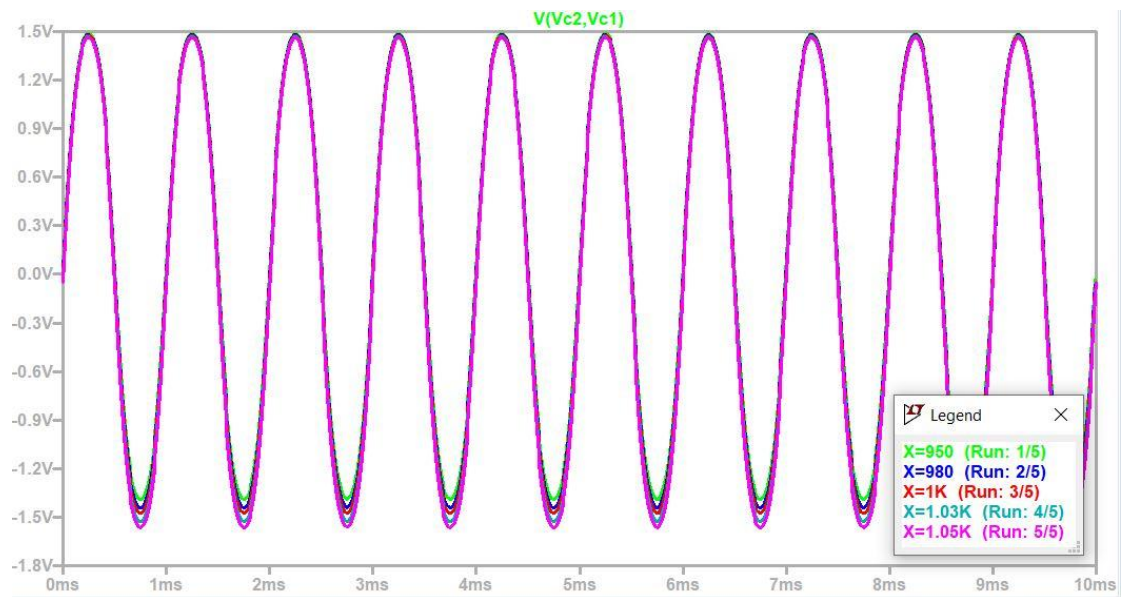
Η συνάρτηση μεταφοράς για θερμοκρασίες από 0 μέχρι 120 βαθμούς, με βήμα 10 βαθμών, σε κοινούς άξονες είναι η ακόλουθη:



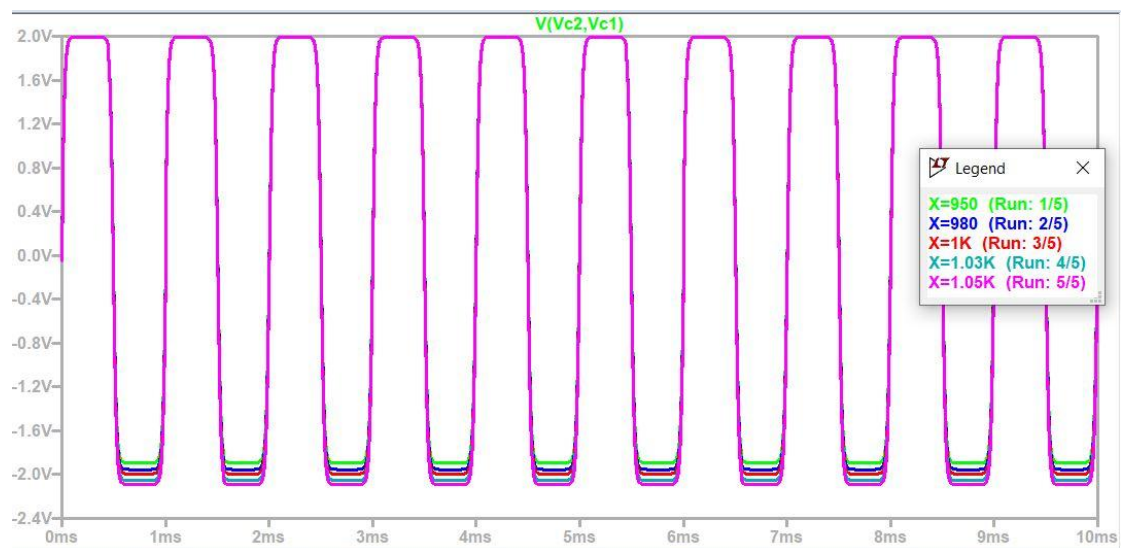
Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται ο συντελεστής διεύθυνσης της καμπύλης που απεικονίζει τη διαφορική έξοδο $u_{c2}-u_{c1}$, άρα η τιμή της μεταβάλλεται πιο αργά. Επίσης, η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν επηρεάζει τα ακρότατα. Αυτά όλα είναι αναμενόμενα, καθώς ισχύει η σχέση: $V_T = \frac{kT}{q}$. Οπότε, η σχέση (1) επιβεβαιώνει τα αποτελέσματά μας και τη μορφή της γραφικής παράστασης.

Δ)

Παρακάτω παρουσιάζονται οι ζητούμενες γραφικές παραστάσεις στους ίδιους άξονες:



Αν αυξηθεί αρκετά το πλάτος θα παρατηρηθεί κορεσμός, όπως φαίνεται παρακάτω:



Για αυτές τις γραφικές παραστάσεις χρησιμοποιήθηκε ενδεικτικά πλάτος $A=0.3$.