

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕ
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ LTSPICE**

Όνομα: Γεώργιος (Georgios)

Επώνυμο: Γιαννακού (Giannakou)

A.M:5596

Εξάμηνο:12^ο

Ημ/νία έναρξης: 20/11/2017

Ημ/νία παράδοσης: 26/06/2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται με επεξήγηση του προγράμματος λεπτομερείς, βήματα για καλύτερη σχεδίαση και κατανόηση των πειραματικών κυκλωμάτων στα εργαστηριακά μαθήματα των Ηλεκτρονικών Ι & Ηλεκτρονικών ΙΙ.

Το πρόγραμμα προσομοίωσης δεν προτείνει τοπολογία σχεδιασμού αλλά δίνει την δυνατότητα για γρήγορου και ρεαλιστικού υπολογισμού ακρίβειας στην συμπεριφορά των κυκλωμάτων. Βασίζεται σε μοντέλα εξαρτημάτων και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για καλή προσέγγιση και σχεδίαση. Είναι απαραίτητη η θεωρητική γνώση της λειτουργίας των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις, ώστε για την καλύτερη αντίληψη σε τυχόν προβλήματα ή αποτελέσματα που πρόκειται να δώσει το πρόγραμμα **LTSPICE**.

Περιγράφονται τρόποι προσομοίωσης αναλυτικά και εκτέλεσης για περισσότερη κατανόηση του προγράμματος για τον ακόλουθο χρήστη. Επίσης, παρουσιάζονται κυματομορφές και χαρακτηριστικές των μοντέλων ή των κυκλωμάτων.

Για περισσότερη μελέτη και επεξήγηση του προγράμματος υπάρχει στο διαδίκτυο οδηγίες χρήσης και βίντεο από την εταιρία Analog Devices.

Συνομειύεις υπολογιστή στο πρόγραμμα LTspice

	Schematic	Symbol
Modes	ESC - Exit Mode	ESC - Exit Mode
	F3 - Draw Wire	
	F5 - Delete	F5 - Delete
	F6 - Duplicate	F6 - Duplicate
	F7 - Move	F7 - Move
	F8 - Drag	F8 - Drag
	F9 - Undo	F9 - Undo
	Shift+F9 - Redo	Shift+F9 - Redo
View	Ctrl+Z - Zoom Area	Ctrl+Z - Zoom Area
	Ctrl+B - Zoom Back	Ctrl+B - Zoom Back
	Space - Zoom Fit	
	Ctrl+G - Toggle Grid	
	U - Mark Unncon. Pins	Ctrl+W - Attribute Window
	A - Mark Text Anchors	Ctrl+A - Attribute Editor
	Alt+Click - Power	
	Ctrl+Click - Attr. Edit	
	Ctrl+H - Halt Simulation	

Place	R - Resistor	R - Rectangle
	C - Capacitor	C - Circle
	L - Inductor	L - Line
	D - Diode	A - Arc
	G - GND	
	S - Spice Directive	
	T - Text	T - Text
	F2 - Component	
	F4 - Label Net	
	Ctrl+E - Mirror	Ctrl+E - Mirror
	Ctrl+R - Rotate	Ctrl+R - Rotate

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
Πρόγραμμα προσομοίωσης LTSPICE:	7
Σκοπός:.....	7
Εγκατάσταση του προγράμματος LTSPICE στον υπολογιστή.....	8
Εξοικείωση με το πρόγραμμα LTSPICE	10
Μέθοδοι – Υλικά	11
Βήμα 1 - Αρχή δημιουργίας κυκλώματος	11
Βήμα 2 - Προσθήκη εργαλείων.....	11
Βήμα 3 - Τοποθέτηση εργαλείων	13
Βήμα 4 - Μετονομασία και τιμές των εξαρτημάτων στο κύκλωμα.....	14
Βήμα 5 - Εκτέλεση προσομοίωσης του κυκλώματος στο πρόγραμμα.....	18
A) DC operating point (Σημείο λειτουργίας)	20
B) Transient - Παροδικό	22
C) AC Analysis- Ανάλυση AC:	27
D) DC Sweep – Σάρωση Συνεχούς ρεύματος	30
E) Noise - Θόρυβος	34
F) DC-Transfer: Λειτουργία μεταφοράς Συνεχή ρεύματος	36
Τύποι πηγών	45
i) Voltage Source (none)- Πηγή τάσης συνεχούς ρεύματος	45
ii) PULSE Source - Πηγή παλμού	47
iii) SINE Source (alternating current source)- Πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος	49
iv) EXP Source (exponential voltage) - Εκθετική πηγή τάσης	50
v) SFFM Source (Single Frequency FM)- Πηγή μονάδας συχνότητας	54
vi) PWL Source (Piece-Wise Linear) - Τμηματική γραμμική πηγής.....	57
Εργαστηριακή άσκηση 1	62
Κύκλωμα ανάλυσης διόδου.....	62
Εργαστηριακή άσκηση 2	68
Δίοδος Zener	68
Εργαστηριακή άσκηση 3:	76

Τρανζίστορ Διπολικής Ένωσης.....	76
Εργαστηριακή άσκηση 4:	83
Τρανζίστορ Διακόπτης	83
Εργαστηριακή Άσκηση 5	89
Τελεστικός Ενισχυτής LM741.....	89
Εργαστηριακή άσκηση 6:	95
Ολοκλήρωση με τελεστικό ενισχυτή	95
Βιβλιογραφία	101
Ιστοσελίδες	101

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Εγκατάσταση προγράμματος μέσω	8
Εικόνα 2: Βήματα εγκατάστασης προγράμματος	8
Εικόνα 3: Βήματα εγκατάστασης προγράμματος	9
Εικόνα 4: Εικόνα Προγράμματος	9
Εικόνα 6: Νέο σχηματικό	10
Εικόνα 9: Απλό κύκλωμα προσομοίωσης	14
Εικόνα 14: Παράθυρα δήλωσης πυκνωτών & πηνίων	16
Εικόνα 16: Port type – Συμπεριφορά στοιχείου (είσοδος ή έξοδος)	18
Εικόνα 17: Επεξεργασία προσομοίωσης	19
Εικόνα 18: DC κύκλωμα	20
Εικόνα 21: Αποτελέσματα προσομοίωσης κυκλώματος	22
Εικόνα 22: SPICE Netlist	22
Εικόνα 29 : Παράθυρο εντολών προσομοίωσης	28
Εικόνα 35: Γραφική παράσταση ρεύματος	33
Εικόνα 39: Δήλωση παραμέτρων για το κύκλωμα θορύβου	35
Εικόνα 38: Έξοδος του κυκλώματος για το DC sweep List	34
Εικόνα 42: Παράθυρο Συνολικού Θορύβου	36
Εικόνα 51: Πίνακας Αντιστάσεων	42
Εικόνα 50: Επιλογή βημάτων	42
Εικόνα 56: Παράθυρο επιλεγμένου κέρσορα	44
Εικόνα 57: Σχηματικό της πηγής	45
Εικόνα 58 : Παράθυρο δηλώσεων παραμέτρων ανεξάρτητης πηγής τάσης	46
Εικόνα 60: Παράθυρο δηλώσεων παραμέτρων ανεξάρτητης πηγής τάσης	48
Εικόνα 61: Παράθυρο δηλώσεων παραμέτρων ανεξάρτητης πηγής τάσης	49
Εικόνα 62: Παράθυρο δηλώσεων παραμέτρων ανεξάρτητης πηγής τάσης	51
Εικόνα 64: Κύκλωμα παραδείγματος εκθετικής τάσης	53
Εικόνα 66: Έξοδος στα άκρα της Εκθετικής πηγής	54
Εικόνα 67: Παράθυρο δηλώσεων παραμέτρων ανεξάρτητης πηγής τάσης	54
Εικόνα 68: Παρουσίαση απλού παραδείγματος	55
Εικόνα 72: Παράθυρο δηλώσεων παραμέτρων ανεξάρτητης πηγής τάσης	58
Εικόνα 80: Δίοδος Γερμανίου (Ge)	62
Εικόνα 81: Δίοδος πυριτίου (Si)	63
Εικόνα 82: Χαρακτηριστική ιδανικής διοδίου	63
Εικόνα 83: Χαρακτηριστική ιδανικής διοδίου γερμανίου (Ge) και πυριτίου (Si) V - I	64
Εικόνα 87: Παράμετροι προσομοίωσης κυκλώματος σε ορθή πόλωση	66
Εικόνα 88: Συμπεριφορά διοδίου στην ορθή πόλωση	67
Εικόνα 89: Παράμετροι προσομοίωσης κυκλώματος σε ανάστροφη πόλωση	67
Εικόνα 90: Συμπεριφορά διοδίου σε ανάστροφη πόλωση	68
Εικόνα 91: Χαρακτηριστική καμπύλη της διοδίου Zener	70

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πρόγραμμα προσομοίωσης LTSPICE:

Το πρόγραμμα LTSPICE αποτελεί ένα γρήγορο αξιόπιστο πρόγραμμα προσομοίωσης για να απαντάει σχηματικά κυκλώματα, στα οποία θα απεικονίζονται κυματομορφές με ακρίβεια και σχηματικά μοντέλα (ως βοήθεια περισσότερης κατανόησης του προγράμματος προσομοίωσης).

Πλεονεκτήματα:

- Απεριόριστος αριθμός από κόμβους
- Δημιουργία σχηματικών κυκλωμάτων
- Περιέχει συντακτικά σύμβολα
- Περιέχει βιβλιοθήκες με μοντέλα ηλεκτρικών υλικών

Γρήγορος τρόπος εναλλαγής ισχύος προσομοίωσης:

- Ανίχνευση σταθερής κατάστασης
- Βηματικής απόκριση / παλμική απόκριση
- Υπολογισμός απόδοσης και ισχύος

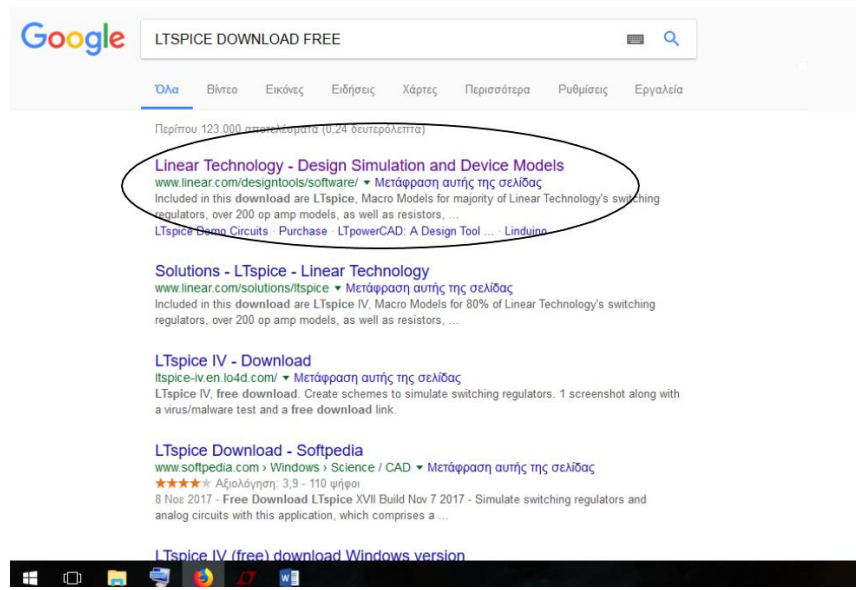
Σκοπός:

Ο σχεδιασμός ηλεκτρονικών συστημάτων σε μια θεμελιώδη διαδικασία κατά την οποία να καλείται ο χρήστης να κάνει συνδυάσεις κατάλληλα με ένα σύνολο ηλεκτρονικών στοιχείων και διατάξεων για να επιτελέσουν μια συγκεκριμένη λειτουργία. Η κατασκευή ενός πρότυπου ηλεκτρικού συστήματος είναι απαραίτητη και για την επιβεβαίωση της καλής λειτουργίας καθώς και την αξιολόγηση των επιδόσεων που επιτυγχάνονται. Επίλυση των θεωρητικών μοντέλων σε κυκλώματα με πολλά στοιχεία που είναι περίπλοκη ή και αδύνατη με αναλυτικό τρόπο. Για αυτό το λόγο γίνεται η χρήση προγραμμάτων ανάλυσης με υπολογιστή, που είναι αποτελεσματικά και επιτρέπουν τη μελέτη της επίδρασης μεγάλου πλήθους παραγόντων ή παραμέτρων σε μικρό διάστημα.

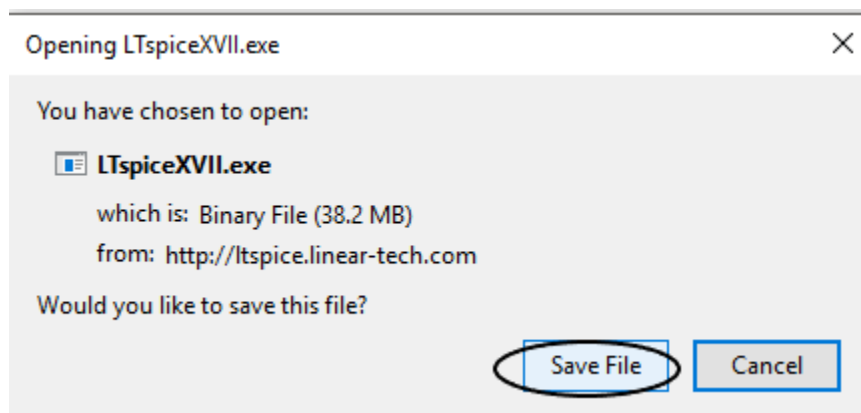
Εγκατάσταση του προγράμματος LTSPICE στον υπολογιστή

Πληκτρολογήσει στο browser Mozilla Firefox ή Google Chrome (LTSPICE DOWNLOAD FREE) και όπου εμφανίζεται το πιο κάτω παραθυράκι (Εικόνα 1). Ακολουθήσει με σειρά τα παρακάτω βήματα.

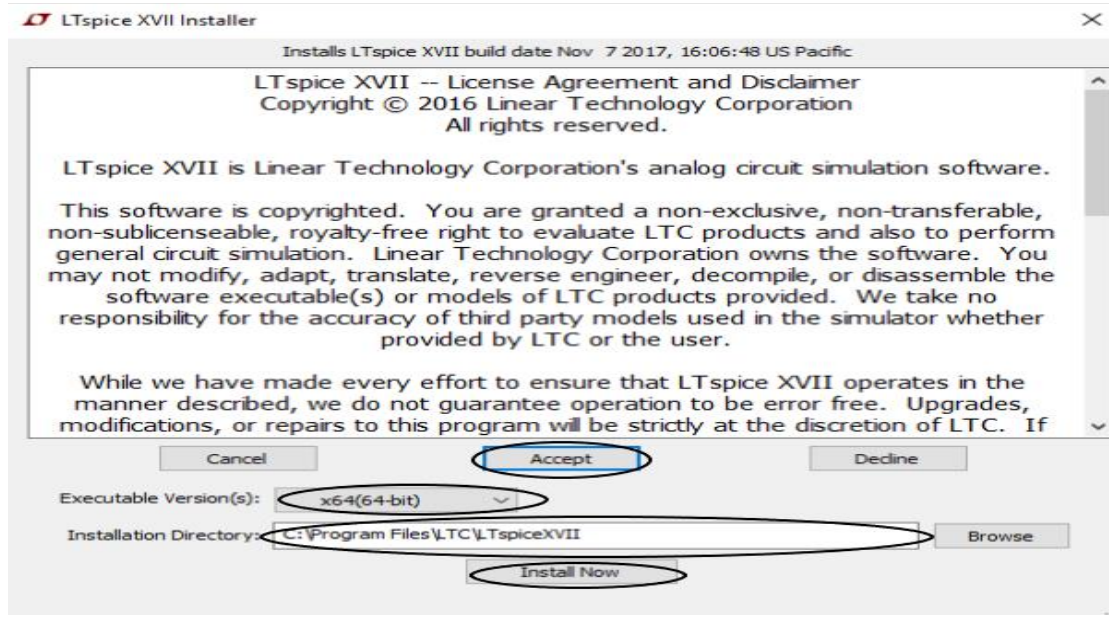
Linear Technology - Design Simulation and Device Models -> Download LTspice for Windows 7, 8 and 10 -> No thanks, just download the software.->Save File



Εικόνα 1: Εγκατάσταση προγράμματος μέσω

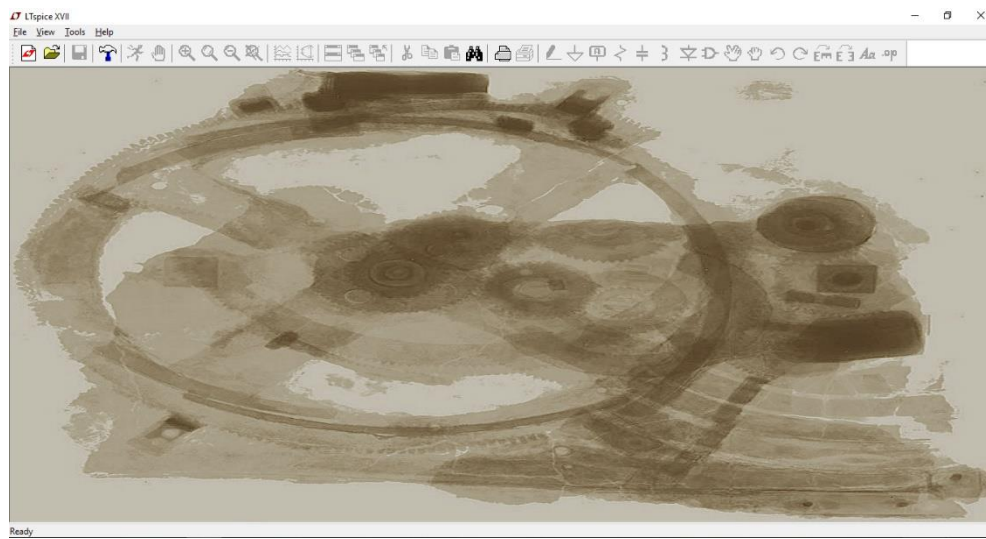


Εικόνα 2: Βήματα εγκατάστασης προγράμματος



Εικόνα 3: Βήματα εγκατάστασης προγράμματος

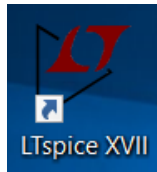
Στην Εικόνα 3, παρουσιάζεται ότι πρέπει να γίνει αποδοχή (Accept) , σε ποια έκδοση με βάση τον υπολογιστή που παρέχεται και μπορείτε να καθορίσετε εσείς σε πιο φάκελο θα αποθηκεύσετε το πρόγραμμα και στην συνέχεια αρχίζετε την εγκατάσταση (Install Now) του προγράμματος LTSPICE. Η εμφάνιση του προγράμματος απεικονίζεται στην πιο κάτω εικόνα (Εικόνα 4).



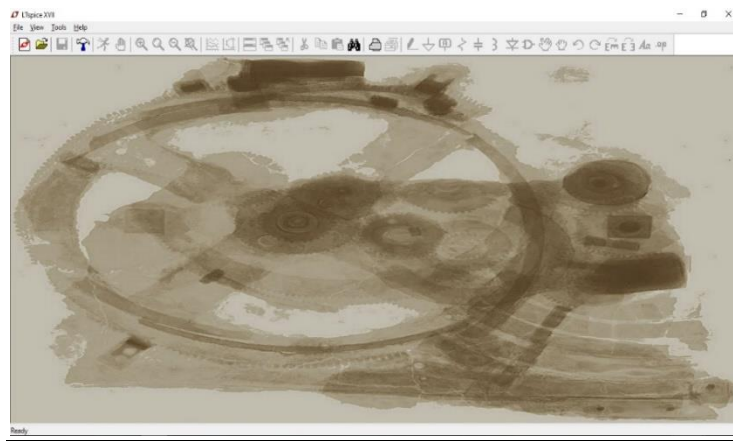
Εικόνα 4: Εικόνα Προγράμματος

Εξοικείωση με το πρόγραμμα LTSPICE


Αρχικά, πρέπει να βρείτε στην επιφάνεια εργασίας (DESKTOP) το πρόγραμμα με το όνομα LTSPICE XVII.

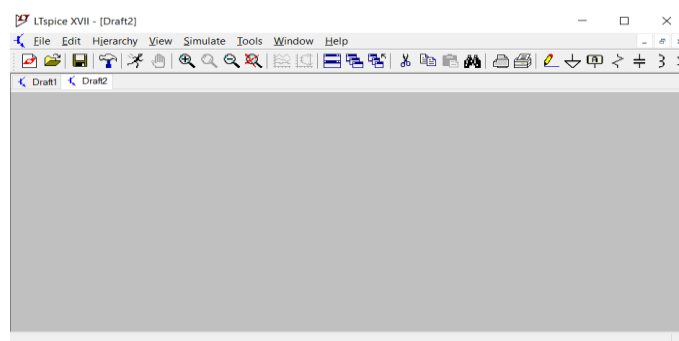


Στην συνέχεια το επιλέγετε και με διπλό αριστερό πάτημα του ποντικιού (mouse) θα εμφανιστεί το παράθυρο της Εικόνας 5.



Εικόνα 5


Για να δημιουργηθεί ένα νέο αρχείο σχηματικού γίνεται επιλογή από την γραμμή εργαλείων (Menu) το αρχείο (File) και μετέπειτα το νέο σχηματικό (New Schematic) ή αλλιώς από το πληκτρολόγιο πατώντας τα πλήκτρα (Ctrl+N), καθώς επίσης μπορεί να επιλεγθεί και από την γραμμή εργαλείων το σχηματάκι , όπου θα εμφανιστεί το παρακάτω παράθυρο.

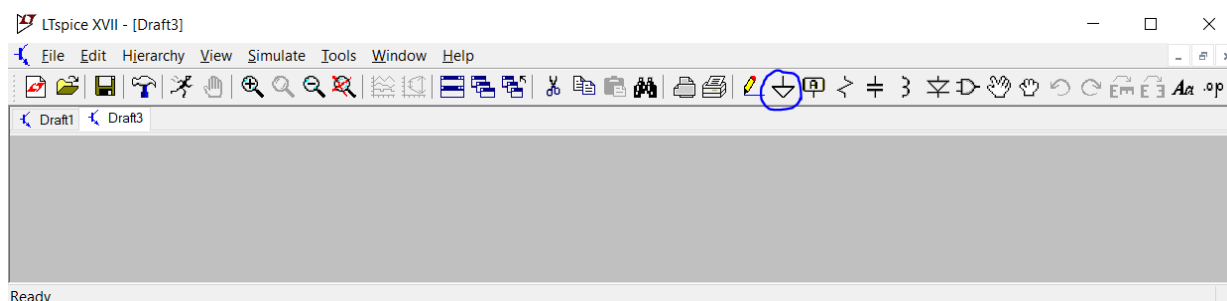


Εικόνα 6: Νέο σχηματικό

Μέθοδοι – Υλικά





Βήμα 1 - Αρχή δημιουργίας κυκλώματος


Με την δημιουργία καινούργιου κυκλώματος προστίθεται γείωση από την γραμμή εργαλείων μέσω του εικονιδίου  αλλιώς μέσω του γράμματος, G, όπου θα γίνει αυτόματα η προσθήκη γείωσης, ενώ μπορεί να γίνει και αλλαγή του κέρσορα σε σχήμα γείωσης τοποθετώντας την στην επιθυμητή θέση που θα επιλέξει ο χρήστης. Επίσης, μπορεί να επιλεγθεί και από την γραμμή μενού στην επεξεργασία (Edit). Η γείωση αποτελεί σημαντικό εργαλείο στο σχηματικό, αφού η απουσία της αφήνει το κύκλωμα ατελές.

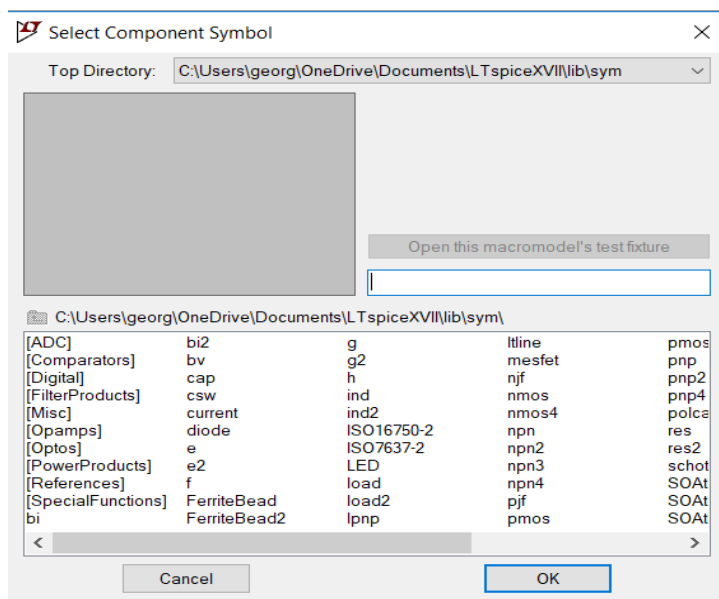


Εικόνα 7

Βήμα 2 - Προσθήκη εργαλείων

Επόμενο βήμα για την δημιουργία του κυκλώματος είναι η προσθήκη εργαλείων. Κύρια εργαλεία με απαραίτητη την προσθήκη τους που υπάρχουν και μπορείτε να τα χρησιμοποιήσετε άμεσα είναι: αντίσταση, πυκνωτής, πηνίο και δίοδος.    

Επίσης, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την βιβλιοθήκη εξαρτημάτων επιλέγοντας το εικονίδιο , αλλιώς με το πάτημα του F2 ανοίγεται το ακόλουθο παράθυρο (Εικόνα 8).



Εικόνα 8

Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται η βιβλιοθήκη εργαλείων, όπου γίνεται η επιλογή εργαλείων που απαιτούνται για το κύκλωμα.



- Res-resistor (αντίσταση)
- Cap-capacitor (πυκνωτής)
- Ind-inductor (πηνίο)
- Diode-diode (δίοδος)
- Voltage- power supply or battery (πηγή ενέργειας)

Σημείωση: Οι ονομασίες που είναι σε αγκύλη είναι μικρές βιβλιοθήκες με άλλα εξαρτήματα και ολοκληρωμένα κυκλώματα.


Για παράδειγμα:

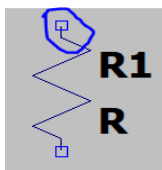
- Opamps (Τελεστικοί ενισχυτές)

Βήμα 3 - Τοποθέτηση εργαλείων

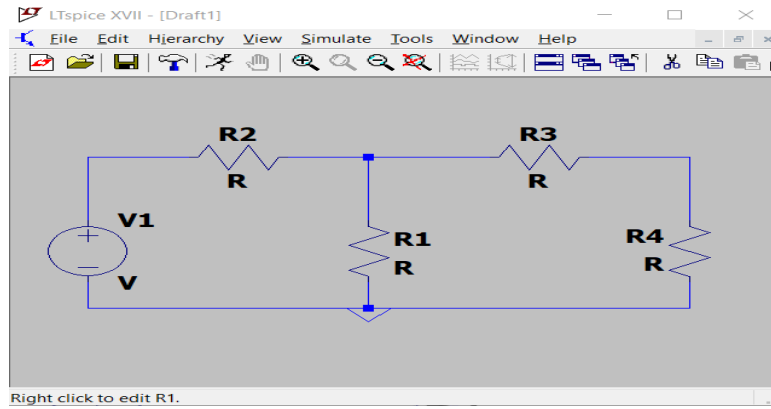
Η τοποθέτηση εξαρτημάτων που χρειάζεται στην επιφάνεια του σχηματικού  επιλέγεται από την βιβλιοθήκη. Συνιστάται οι θέσεις των εργαλείων να είναι σε μια λογική θέση για διευκόλυνση του κυκλώματος. Το εξάρτημα που θα επιλεγθεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερες από μια φορές, ενώ για απαλλαγή από κάποιο εργαλείο ή λανθασμένη εντολή απλώς γίνεται μέσω του Esc. Για την μετακίνηση εξαρτημάτων επιλέγεται από την γραμμή εργαλείων το εικονίδιο  ή σε συντομία F7, σέρνοντας τα εργαλεία στην επιθυμητή θέση αναλόγως του εργαλείου.

Επιπρόσθετα, πριν την τοποθέτηση των εργαλείων στην επιφάνεια σχηματικού μπορεί να γίνει περιστροφή μέσω Ctrl+R για να ταιριάζει ομοιόμορφα στη δημιουργία του κυκλώματος, ενώ ακόμη μπορεί να αντικαθρεπτιστούν μέσω Ctrl+E. Σε περίπτωση που το εργαλείο δεν θα χρησιμοποιηθεί, για διαγραφή του απλώς επιλέγεται το εργαλείο από την επιφάνεια του σχηματικού και διαγραφή 'Delete' από το πληκτρολόγιο.

Μετάπειτα για την σύνδεση των καλωδίων απλώς επιλέγεται από την γραμμή εργαλείων το εικονίδιο  'wire' ή με την βοήθεια του F3, καθώς επίσης και από την επεξεργασία (Edit) από την γραμμή μενού. Σε κάθε εργαλείο υπάρχουν πάντα σημεία ένωσης στα οποία ξεκινάτε μια καλωδίωση. Επαναλαμβάνεται ίδια διαδικασία μέχρι να την πλήρη καλωδίωση του κυκλώματος.




Το σύρμα σύρεται στην επιφάνεια σχηματικού σε ευθεία γραμμή και σε όρθια γωνία, ενώ για διαγώνιες συνδεσμολογίες ο χρήστης έχει κρατημένο το Ctrl. Κατά την ένωση δύο καλωδίων δημιουργείται αυτόματα κόμβος.



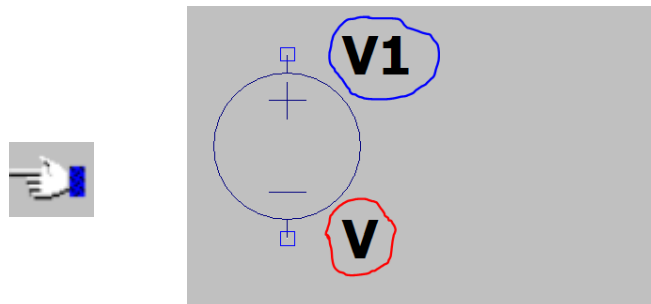
Εικόνα 9: Απλό κύκλωμα προσομοίωσης

Βήμα 4 - Μετονομασία και τιμές των εξαρτημάτων στο κύκλωμα

Η μετονομασία των εξαρτημάτων είναι ένα απλό βήμα το οποίο προτείνεται να εφαρμόζεται για την διευκόλυνση της ανάλυσης του κυκλώματος ως προς τον θεατή. Τα στάδια που ακολουθούνται είναι τα εξής: σύρεται το κέρσοντας σε ένα από τα εργαλεία στο σχηματικό κύκλωμα μέχρι να εμφανιστεί το εικονίδιο , το οποίο δείχνει την κατεύθυνση αριστερά και στην συνέχεια με δεξί κλικ ανοίγεται το παράθυρο για την προσθήκη ονόματος ή κάποιας τιμής στην επιγραφή.

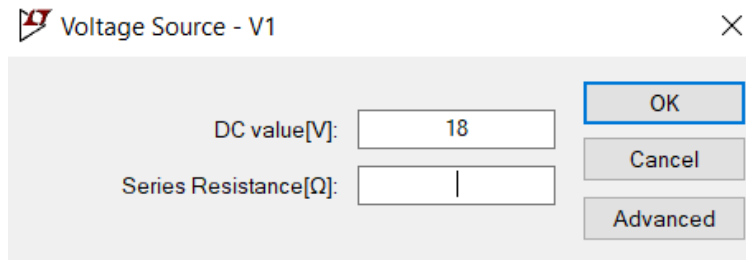
Μία επίδειξη βημάτων παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

A) Αρχική εικόνα: Πηγή τάσης



Εικόνα 10

Στην επιλογή του εργαλείου, θα εμφανιστεί το ακόλουθο παράθυρο στο οποίο θα προστεθεί μία τιμή στην επιγραφή.

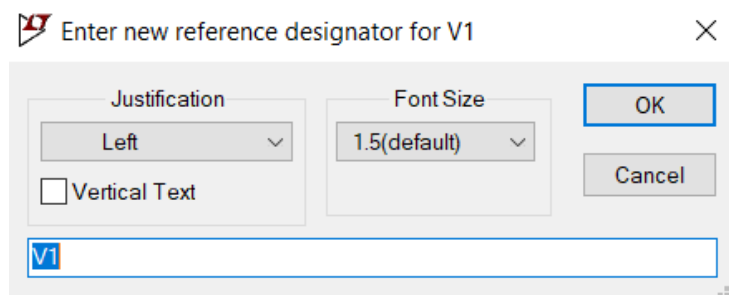


Εικόνα 11

- Voltage Source – Πηγή τάσης
- DC (Direct Current) value – Συνεχές ρεύμα
- Series Resistance – Σειρά αντίστασης

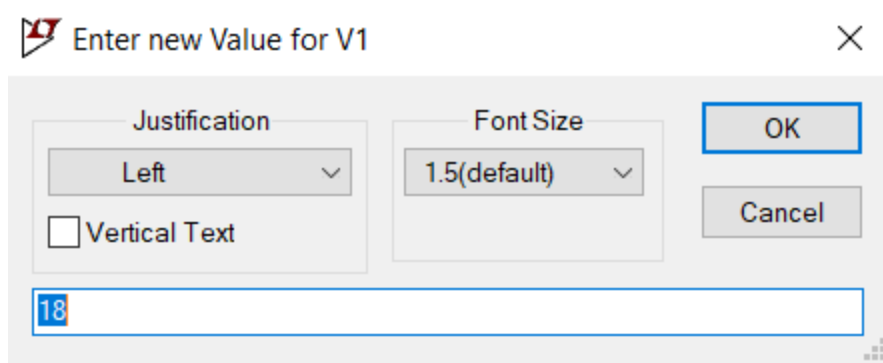
Σημείωση: Προστίθεται συνεχές τάση, όπου το εργαλείο αποτελεί πηγή τάσης.

Μετέπειτα για την μετονομασία του εργαλείου γίνεται επιλογή στο μπλε κύκλο που παρουσιάζεται στην πιο πάνω εικόνα (Εικόνα 12).



Εικόνα 12

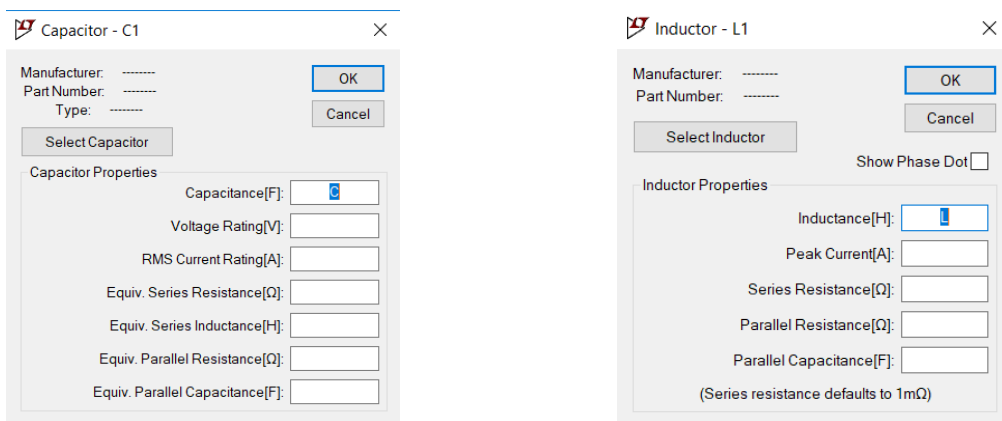
Τοποθετείται το όνομα στην επιγραφή και ακολούθως ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το μέγεθος της γραμματοσειράς, όπως επίσης και την οριζόντια θέση σε κατακόρυφη του ονόματος του εργαλείου. Η μετακίνηση του ονόματος του εργαλείου γίνεται επίσης και με την εντολή (Drag). Εφαρμόζεται η ίδια διαδικασία και για τον κόκκινο κύκλο.



Εικόνα 13

- Justification – Στοιίχιση
- Font Size - Μέγεθος γραμματοσειράς
- Vertical Text – Κατακόρυφο

B) Για πυκνωτής και πηνίο



Εικόνα 14: Παράθυρα δήλωσης πυκνωτών & πηνίων

Η διαδικασία μετονομασίας και η δήλωση παραμέτρων γίνονται με τα ίδια ακριβώς βήματα με την πηγή τάσης.

A) Πηνίο (**Επαγωγέας (Inductor)**):

- Inductance – Επαγωγή
- Peak Current – Πλάτος ρεύματος
- Series Resistance – Σειρά αντίστασης
- Parallel Resistance – Παράλληλη αντίσταση
- Parallel Capacitance – Παράλληλη χωρητικότητα
- Select Inductor - Επιλογή Επαγωγέα

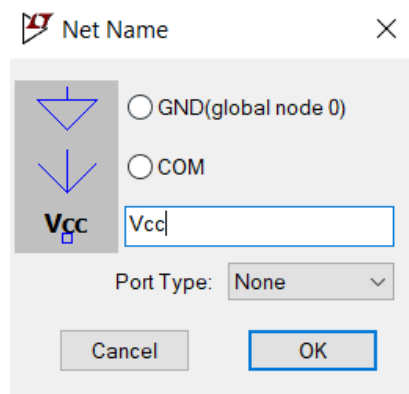
(Σειρά αντίστασης είναι προκαθορισμένη 1miliOhm)

B) Πυκνωτής

- Capacitance - Χωρητικότητα
- Voltage Rating - Τάση
- RMS Current Rating – RMS Ρεύμα
- Equiv. Series Inductance - Ισοδύναμη σειριακή επαγωγή
- Equiv. Parallel Resistance - Ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση
- Equiv. Parallel Capacitance - Ισοδύναμη παράλληλη χωρητικότητα
- Select Capacitor - Επιλογή χωρητικότητας

Στις επιλογές επαγωγέα και χωρητικότητας (Select Inductor or Capacitor) που αναφέρονται στα πάνω παράθυρα (Εικόνα 14) υπάρχουν βιβλιοθήκες στις οποίες περιλαμβάνονται πυκνωτές ή πηνία με αναλυτικά στοιχεία, δηλαδή είναι μοντέλα από εταιρίες στην παγκόσμια αγορά .

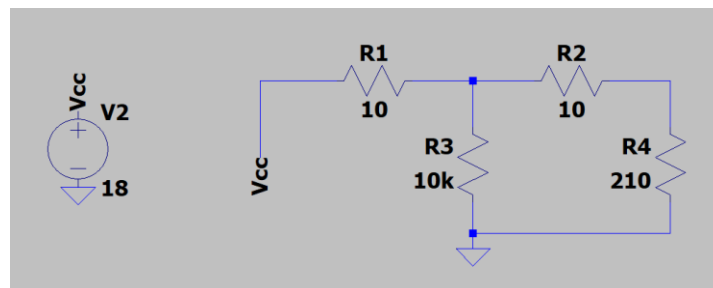
Περαιτέρω για την ονομασία των εργαλείων, μπορεί να γίνει χρήση της εντολής «Ετικέτα» (Label net) από την γραμμή εργαλείων του προγράμματος. Η εντολή βρίσκεται στην επεξεργασία (Edit) ή σε συντόμευση μέσω του F4 (Εικόνα 15).



Εικόνα 15

Το πρώτο σύμβολο είναι η γείωση(global node 0) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για συντόμευση και το δεύτερο σύμβολο είναι το κοινό σημείο (common). Το τρίτο σύμβολο είναι το σημείο όπου μπορεί να δηλωθεί η είσοδος ή η έξοδος ενός κυκλώματος(Εικόνα 15).

Για παράδειγμα:





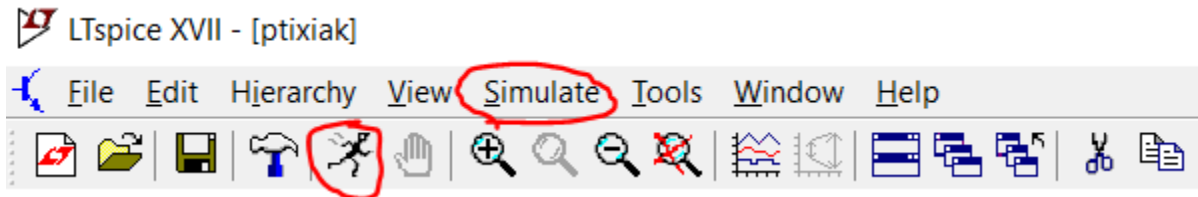
Εικόνα 16: Port type – Συμπεριφορά στοιχείου (είσοδος ή έξοδος)

Βήμα 5 - Εκτέλεση προσομοίωσης του κυκλώματος στο πρόγραμμα

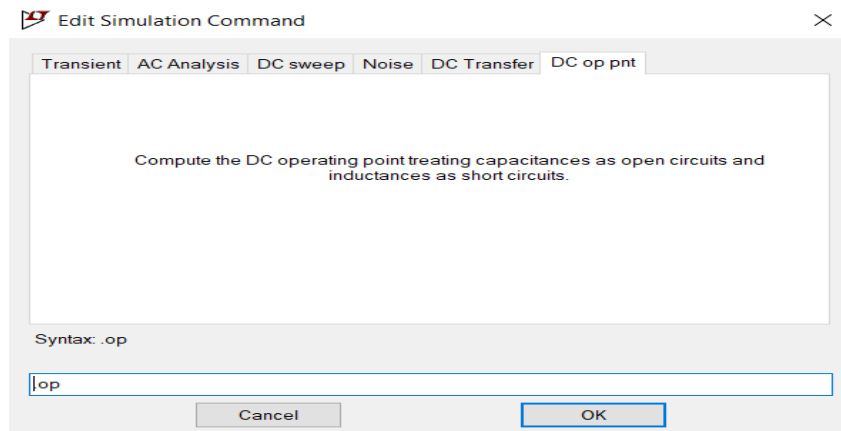
Σε μια διαδικασία εκτέλεσης προσομοίωσης του κυκλώματος είναι απαραίτητο η εφαρμογή μερικών βημάτων, λόγος για μη τυχών σφαλμάτων και καλύτερης όψης του κυκλώματος. Πριν την εκτέλεση προσομοίωσης (Simulate), το κύκλωμα απαιτείται να είναι σωστά σχεδιασμένο και αποθηκευμένο στον υπολογιστή, χωρίς να υπάρχουν επιπλέον εργαλεία (δηλαδή συσκευές που δεν έχουν συνδεθεί) και καλώδια. Ακόμη, τα εργαλεία του κυκλώματος να παρέχουν τις τιμές που επιθυμεί ο χρήστης, ενώ για περισσότερη κατανόηση του κυκλώματος είναι καλό να έχει το κάθε εργαλείο το όνομα του. Κυριότερο βήμα ενός κυκλώματος είναι να έχει γείωση (GND),

όπου η απουσία εν' αυτού θα καταστήσει την εκτέλεση προσομοίωσης ατελής, παρουσιάζοντας σφάλμα.

Η προσομοίωση (Simulate) στην γραμμή μενού γίνεται μέσω της εντολής (Run)  με το εικονίδιο  στην γραμμή εργαλείων του προγράμματος.



Με την εκτέλεση της εντολής προσομοίωσης για πρώτη φορά στο πρόγραμμα εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο.



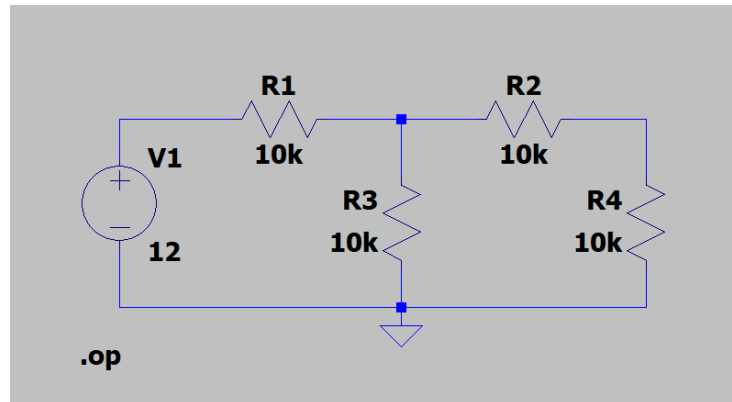
Εικόνα 17: Επεξεργασία προσομοίωσης

Στο παράθυρο επεξεργασίας της προσομοίωσης δίνεται η δυνατότητα να επιλέξει ο χρήστης την ανάλυση που χρειάζεται, έχοντας στην διάθεση του έξι τρόπους:

- A. DC op point- Σημείο λειτουργίας DC
- B. Transient - Παροδικό
- C. AC Analysis - AC ανάλυση
- D. DC sweep - DC σάρωση
- E. Noise - θόρυβος
- F. DC Transfer - DC μεταφορά

A) DC operating point (Σημείο λειτουργίας)

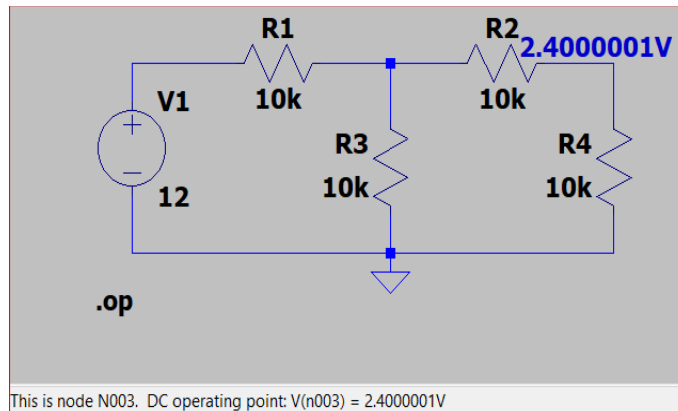
Είναι μία απλή αλλά και απίστευτα χρήσιμη ανάλυση. Παρουσιάζει τις συνεχείς τάσεις (DC) σε όλους τους κόμβους και το συνεχές ρεύμα μέσω όλων των συσκευών του κυκλώματος. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται ένα δείγμα απλού κυκλώματος με την έξοδο να εμφανίζεται σε πίνακα με τις τάσεις και ρεύματα(Εικόνα 21).



Εικόνα 18: DC κύκλωμα

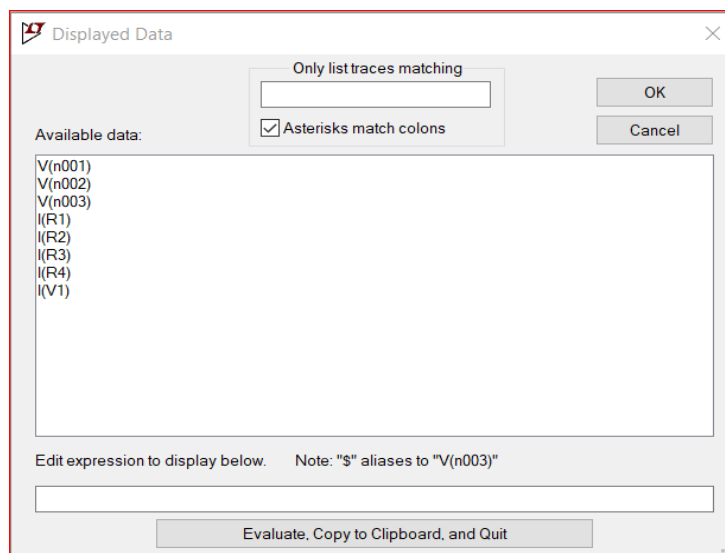
Με την εκτέλεση της προσομοίωσης του κυκλώματος, ο κέρσορας πάνω από οποιοδήποτε καλώδιο στο κύκλωμα, εμφανίζει στο πρόγραμμα στην κάτω αριστερή γωνία παραμέτρους, δηλαδή σε ποιο κόμβο βρίσκεται και την συνεχή τάση (Εικόνα 19).

Σε περίπτωση που ο χρήστης έχει τον κέρσορα του πάνω σε ένα από τα εξαρτήματα, εμφανίζεται το αντίστοιχο ρεύμα και πραγματική ισχύς. Επίσης, όταν επιλέξει ο χρήστης ένα από τα καλώδια εμφανίζεται αμέσως η τάση πάνω από το καλώδιο όπως φαίνεται στην Εικόνα 19. Όταν βρίσκεται το ποντίκι πάνω από κάποιο εργαλείο εμφανίζονται παράμετροι όπως ρεύμα και ισχύ στη γραμμή κατάστασης.



Εικόνα 19

Για την ένδειξη ρεύματος αντί της τάσης στο σημείο που βρίσκεται ο κέρσορας πάνω από το καλώδιο, επιλέγει την τάση και με δεξί κλικ θα εμφανιστεί το ακόλουθο παράθυρο. Ο χρήστης έχει την ευκαιρία να επιλέξει ένα είδος από τα ρεύματα ή τάσης που χρειάζεται για να εμφανιστεί στο κύκλωμα του.



Εικόνα 20

Αποτελέσματα εξόδου του κυκλώματος

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κυκλώματος με τις τιμές των τάσεων και των ρευμάτων στα καλώδια και των εργαλείων που αποτελούν το κύκλωμα.

```
* C:\Users\georg\OneDrive\Desktop\Ptixiaki\ptixiak.asc
--- Operating Point ---
V(n001) :      12      voltage
V(n002) :      4.8      voltage
V(n003) :      2.4      voltage
I(R4) :      -0.00024  device_current
I(R3) :      -0.00048  device_current
I(R2) :      -0.00024  device_current
I(R1) :      -0.00072  device_current
I(V1) :      -0.00072  device_current
```

Εικόνα 21: Αποτελέσματα προσομοίωσης κυκλώματος

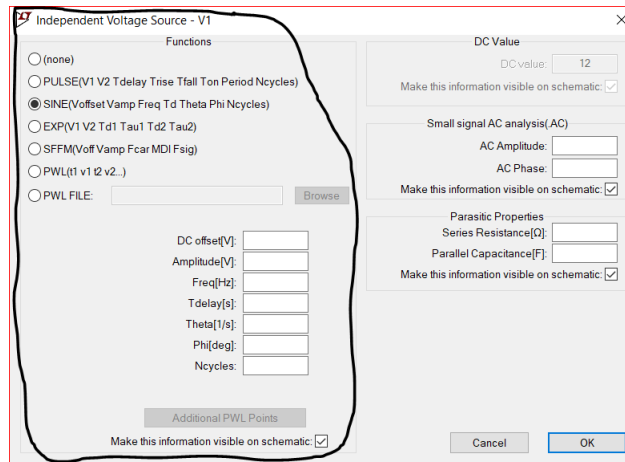
Επιπρόσθετα, μπορεί να γίνει χρήση του SPICE Netlist, επιτρέποντας την δήξη του αριθμού κόμβων στο χρήστη να δει τους αριθμούς κόμβων για κάθε εργαλείο μεταξύ άλλων. Το SPICE Netlist βρίσκεται στον κατάλογο View στην γραμμή μενού του προγράμματος στην επιλογή της εντολής αυτής εμφανίζετε το ακόλουθο παράθυρο:

```
SPICE Netlist: C:\Users\georg\OneDrive\Desktop\Ptixiaki\ptixiak.net
* C:\Users\georg\OneDrive\Desktop\Ptixiaki\ptixiak.asc
V1 N001 0 12
R1 N002 N001 10k
R2 N003 N002 10k
R3 0 N002 10k
R4 0 N003 10k
.op
.backanno
.end
```

Εικόνα 22: SPICE Netlist

B) Transient - Παροδικό

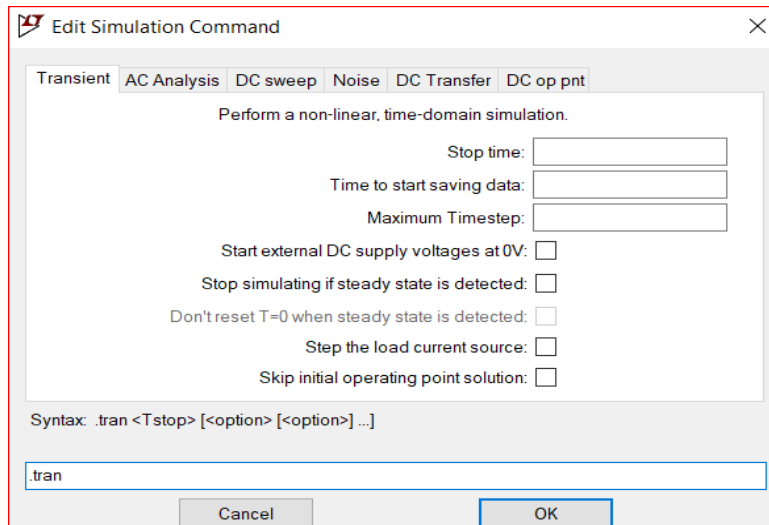
Στον παροδικό μπορεί ο χρήστης να χρησιμοποιήσει AC ή DC τάσεις, ανάλογα με τη προσωρινή ανάλυση πηγής που θέλει. Οι ενότητες που επισημαίνονται στο παρακάτω παράθυρο διαμόρφωσης πηγής είναι σχετικές.



Εικόνα 23

Η μεταβατική ανάλυση είναι ίσως η πιο σημαντική ανάλυση που μπορεί να εκτελεστεί μέσω του LTSPICE, καθώς θα υπολογίζονται οι διάφορες τιμές του κυκλώματος με την πάροδο του χρόνου. Σημαντικές παράμετροι στην παροδική ανάλυση είναι οι εξής:

- Ο χρόνος διακοπής
- Η ώρα έναρξης αποθήκευσης δεδομένων
- Μέγιστο Timestep



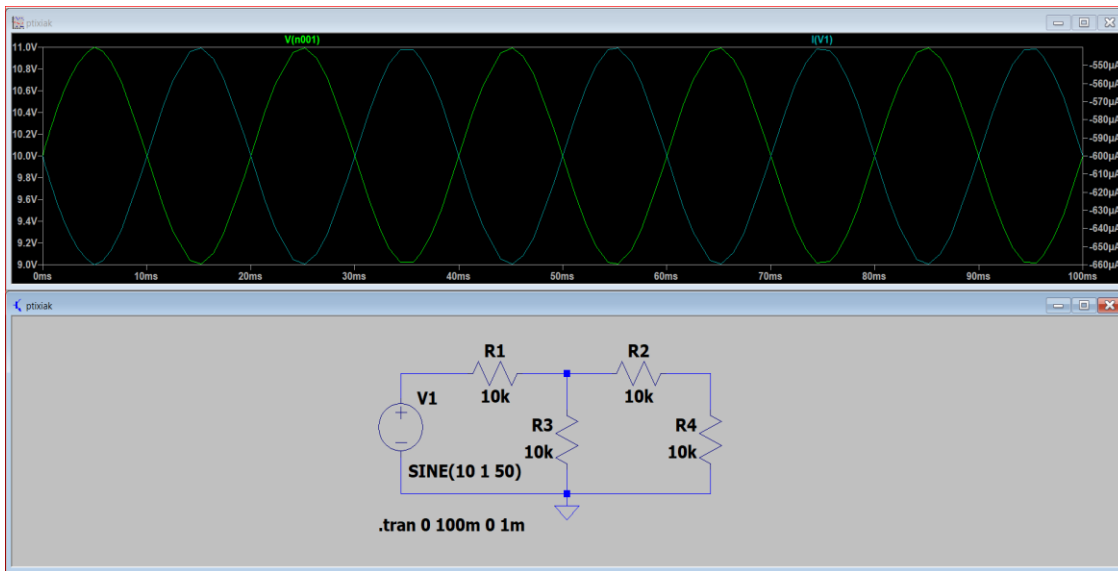
Εικόνα 24

Ο λόγος του χρόνου διακοπής:

Το μέγιστο χρονικό διάστημα καθορίζει πόσους υπολογισμούς θα πραγματοποιήσει το LTSPICE για να σχεδιαστεί μια μορφή κύματος. Το LTSPICE ορίζει πάντα την ώρα εκκίνησης σε μηδέν δευτερόλεπτα και συνεχίζει μέχρι να φτάσει στην καθορισμένη τελική ώρα που έχει ορίσει ο χρήστης. Είναι εξαιρετικά σημαντικό ο καθορισμός του timestep που θα χρησιμοποιηθεί πριν την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Σε περίπτωση που το timestep είναι πολύ μικρό, η οθόνη του καθετήρα θα παρουσιάσει περιττά σημεία όπου θα καταστήσουν δύσκολη την ανάγνωση και καθυστερώντας τον υπολογισμό τους. Αντιθέτως, η ρύθμιση μεγάλου χρονικού διαστήματος timestep, ίσως να χάνετε σημαντικό φαινόμενο που να συμβαίνει σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα στο κύκλωμα.

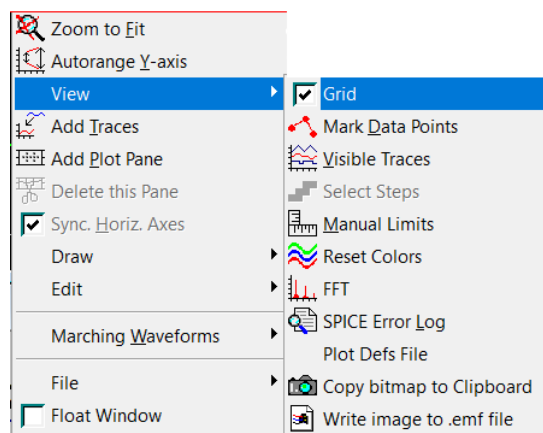
Κατόπι, μπορεί να οριστεί ανώτατο όριο βήμα που θα περιορίσει το μέγεθος κάθε διαστήματος, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα υπολογισμού. Ένα ακόμη εύχρηστο χαρακτηριστικό είναι και η ανάλυση Fourier, η οποία επιτρέπει στον χρήστη να καθορίσει τη βασική συχνότητα και τον αριθμό των αρμονικών.

Παροδική έξοδος του κυκλώματος:



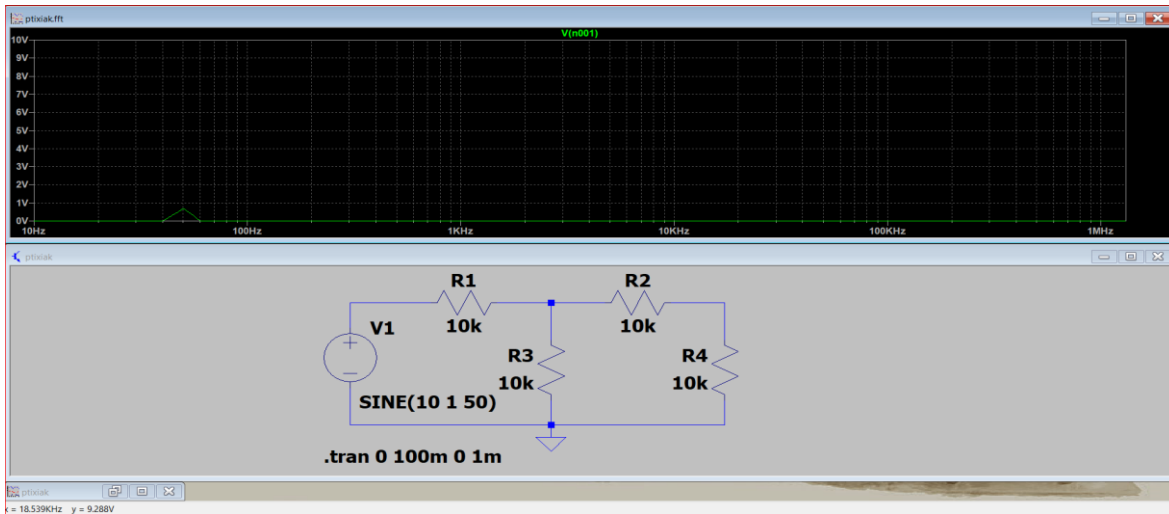
Εικόνα 25

Σημείωση: Στην γραμμή μενού ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει τις ρυθμίσεις γραφικών ή αλλιώς δεξί πάτημα στην γραφική και εμφανίζονται διάφορες εφαρμογές για την γραφική παράσταση όπως φαίνονται παρακάτω εικόνα.



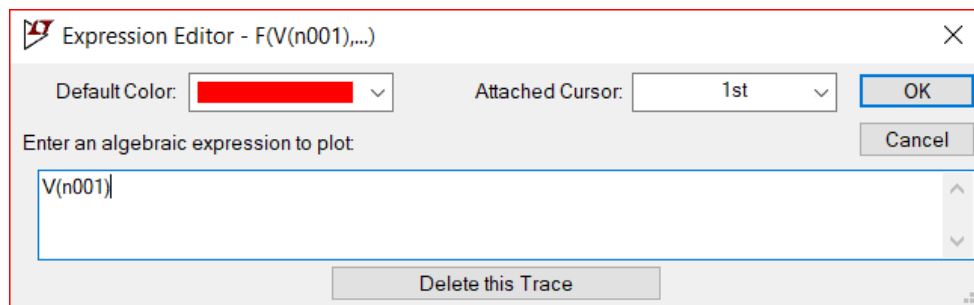
Παράδειγμα μορφής της γραφικής σε Fourier (FFT):

Στο κύκλωμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται μία πηγή με ημιτονοειδές σήμα 10 V DC offset, μέγιστο πλάτος amplitude 1 V, Frequency 50 Hz σε παροδική ανάλυση. Η γραφική παράσταση είναι ανάλυση Fourier, η οποία συσχετίζει την αναλογία τάσης με συχνότητας, καθώς και διαγραφή ή τροποποίηση του σήματος.






Εικόνα 26

Επιλέγοντας το όνομα της γραφικής παράστασης V(n001), ανοίγει ο επεξεργαστής έκφρασης, με την βοήθεια του οποίου ο χρήστης μπορεί να αλλάξει το χρώμα του σήματος στην γραφική παράσταση, όπως και να διαγράψει το σήμα.



Εικόνα 27

Σημείωση: Ο χρήστης επίσης μπορεί να δει το ρεύμα μέσω οποιουδήποτε καλωδίου. Όταν ο κέρσορας περάσει πάνω από κάποιο τυχαίο καλώδιο στο ολοκληρωμένο κύκλωμα, αλλάζει το σχήμα του κέρσορα σε σχήμα τσιμπιδας . Για να εμφανίσει ο χρήστης το σήμα ρεύματος στην γραφική παράσταση, έχει πατάει το πλήκτρο ALT και αμέσως θα εμφανιστεί στην θέση του κέρσορα μια αμπεροτσιμπίδα . Με την επιλογή του καλωδίου εμφανίζετε το σήμα ρεύματος στην γραφική παράσταση. Το ρεύμα το παίρνει από οποιαδήποτε συσκευή. Ακόμη μία επιπλέον χρησιμότητα του πλήκτρου Alt, πάνω από μία συσκευή στο κύκλωμα εμφανίζει το σχήμα θερμομέτρου  το οποίο και με την επιλογή της συσκευής παρουσιάζεται στην γραφική παράσταση η διασπορά ισχύος.

C) AC Analysis- Ανάλυση AC:

Η ανάλυση AC αφορά κυρίως τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την συχνότητα, χρησιμοποιώντας τον υπολογισμό μικρού σήματος ενός κυκλώματος στον χρήστη να δώσει πλάτος ή και φάση έναντι της συχνότητας για τις διαφορετικές εισόδους του κυκλώματος.

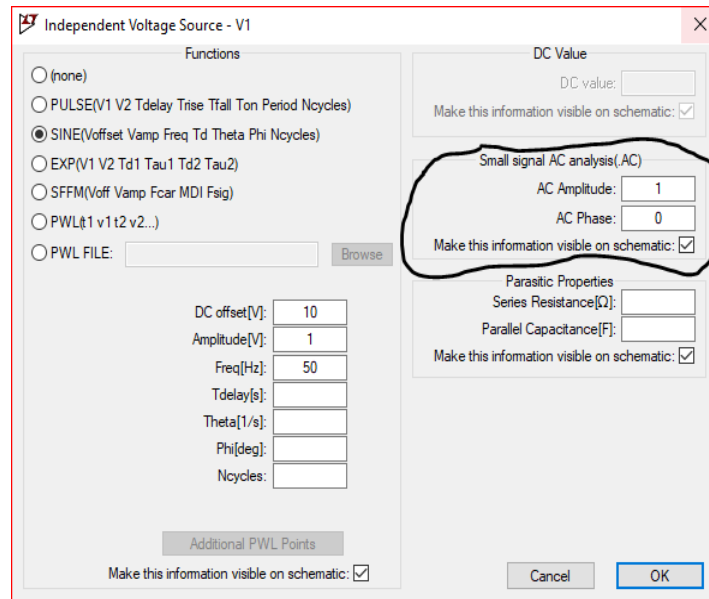
Υπάρχουν τρεις τύποι ανάλυσης:

1. Γραμμική ανάλυση
2. Octave ανάλυση
3. Decade ανάλυση

Τα συγκεκριμένα είδη αναλύσεων περιγράφουν την κλιμάκωση στον άξονα X, δηλαδή αν επιλεγθεί για decade analysis τότε στον άξονα X οι βαθμολογίες ξεκινάνε από 10Hz, 1kHz, 100kHz, 10MHz κ.τ.λ. Άρα σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων η καλύτερη επιλογή που χρησιμοποιείται είναι το decade. Το σημείο λειτουργίας DC υπολογίζεται αρχικά για να ληφθούν τα μοντέλα γραμμικού μικρού σήματος σε όλα τα μη γραμμικά στοιχεία. Στη συνέχεια το ισοδύναμο κύκλωμα αναλύεται από την αρχή σε μια συχνότητα διακοπής. Το αποτέλεσμα μιας ανάλυσης AC εμφανίζεται σε δύο μέρη ,κέρδος και φάση έναντι με την συχνότητα.

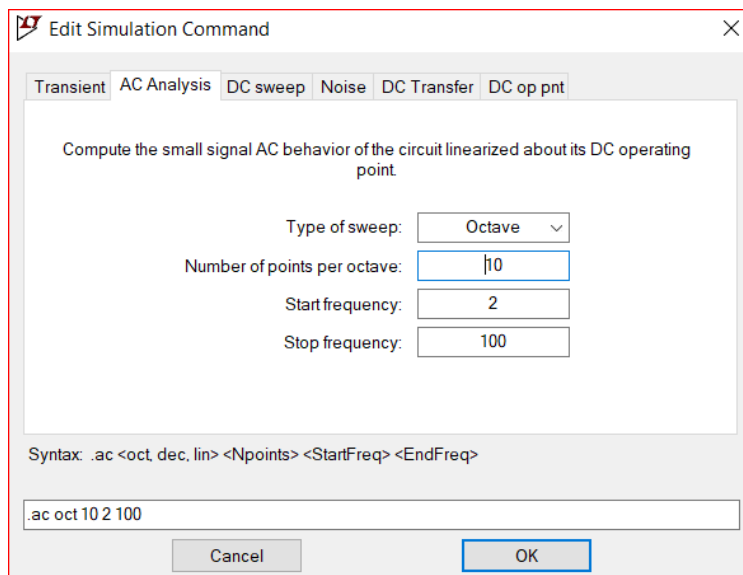
Όταν γίνεται κάποια σάρωση εναλλασσόμενου ρεύματος από μια πηγή, οι παράμετροι της διαμόρφωσης της πηγής, είναι σχετικές. Στην Εικόνα 27 απεικονίζονται οι δύο παράμετροι διαμόρφωσης πηγής.

Σημείωση: Σε σάρωση εναλλασσόμενου ρεύματος, όλες οι πηγές αντιμετωπίζονται ως ημιτονοειδή κύματα.



Εικόνα 28

Επιπλέον, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να καθορίσει σε ποια σημεία το LTSPICE θα υπολογίσει τις συχνότητες, με προσδιορισμός της αρχικής και τελικής συχνότητας, προσαρμόζοντας το εύρος συχνοτήτων που επιθυμεί για το κύκλωμα του.



Εικόνα 29 : Παράθυρο εντολών προσομοίωσης

AC Analysis (Εναλλασσόμενο ρεύμα ανάλυσης):

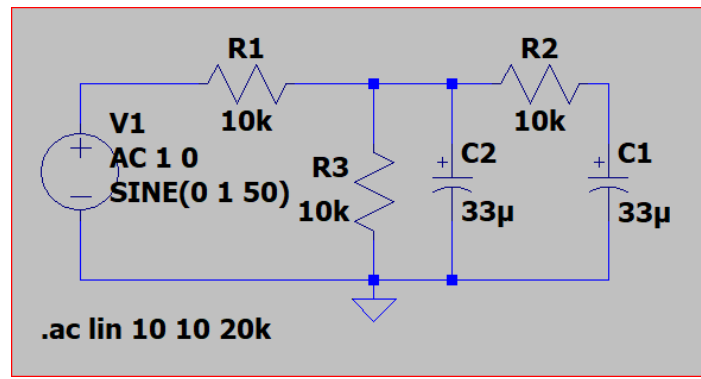
Τύπος σάρωσης - Type of Sweep

Αριθμός Σημείων - Number of points

Εκκίνηση Συχνότητας - Start frequency

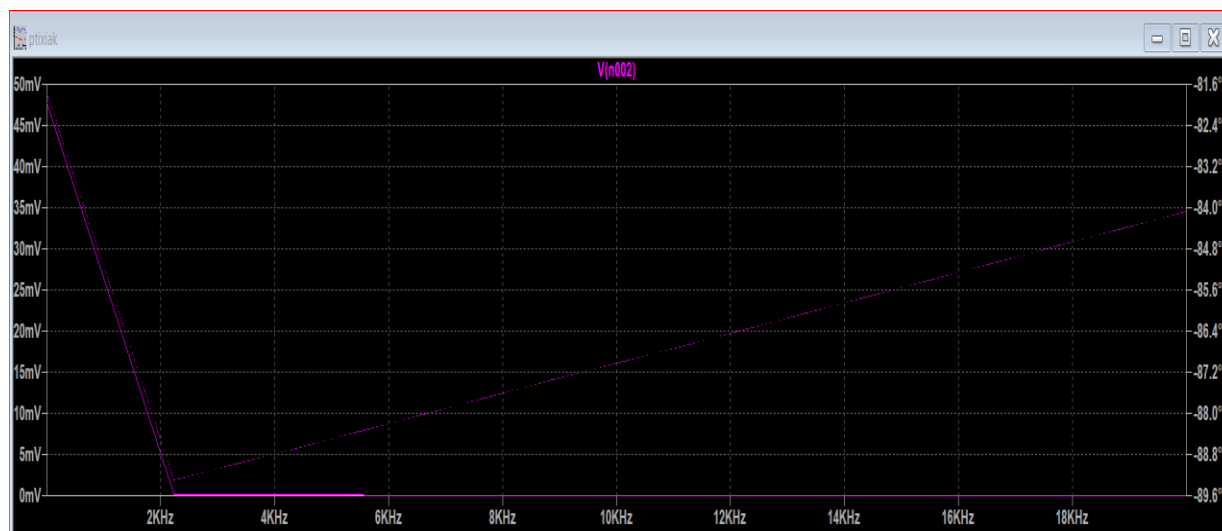
Διακοπή Συχνότητας - Stop frequency

Κύκλωμα με AC ανάλυση:



Εικόνα 30

Γραφική παράσταση AC ανάλυση (τάση (V) – συχνότητα (Hz))

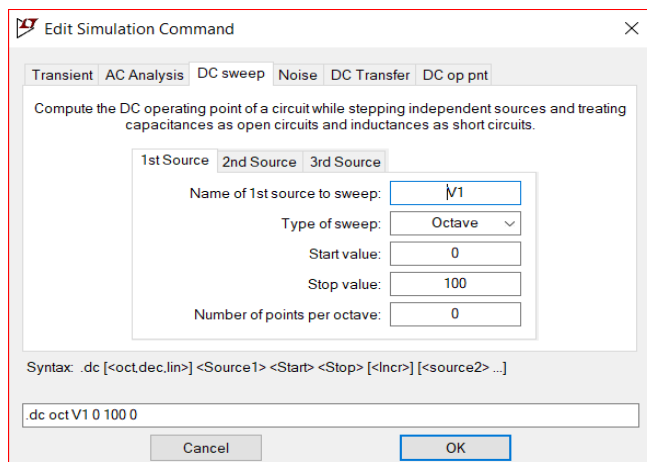


Εικόνα 31

D) DC Sweep – Σάρωση Συνεχούς ρεύματος

Παράθυρο εντολών προσομοίωσης DC Sweep

Η σάρωση συνεχούς ρεύματος επιτρέπει να γίνονται διαφορετικές επαναλήψεις έτσι ώστε ο χρήστης να μπορέσει να παρακολουθήσει το κύκλωμα πώς ανταποκρίνεται σε διάφορες συνθήκες. Πραγματοποιεί μία ακολουθία προσομοιώσεων σημείου λειτουργίας DC, όπου αυξάνει την τάση ή το ρεύμα μιας επιλεγμένης πηγής σε προκαθορισμένα βήματα για ένα εύρος τιμών.



Εικόνα 32

Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης:

- Οι πυκνωτές αντιμετωπίζονται ως ανοικτά κυκλώματα
- Οι επαγωγείς αντιμετωπίζονται ως βραχυκυκλώματα
- Χρησιμοποιούνται μόνο τιμές DC πηγών τάσης και ρεύματος

Αρχικά, ο χρήστης ορίζει το όνομα της πηγής ή των πηγών, όπως επίσης και τον τύπο σάρωσης που επιθυμεί, και στην συνέχεια ολοκληρώνει τις εντολές προσομοίωσης με το να δώσει μία αρχική - τελική τιμή και τον αριθμό των σημείων που θέλει να υπολογίσει. Για παράδειγμα μπορεί να σαρώσει στο κύκλωμα ένα εύρος τάσης από 0V μέχρι έως 12V. Οι δύο πιο σημαντικές σαρώσεις σε αυτό το στάδιο θα είναι η τάση σάρωσης και η τρέχουσα σάρωση.

Ρύθμιση DC sweep:

Όνομα πηγής: V1

Τύπος σάρωσης: Γραμμική -Linear

Αρχική τιμή: 0V

Τελική τιμή: 100V

Αύξηση βηματισμού: Πρέπει να είναι αρκετά μικρό για να δείξει μια απότομη μετάβαση.

Μία επιπλέον ιδιότητα της εντολής DC sweep είναι η εφαρμογή ένθετης σάρωσης, όπου δίνεται το δικαίωμα εκτέλεσης δύο ταυτόχρονων σαρώσεων, έτσι ώστε να επιβλέπονται οι αλλαγές των τάσεων στις διάφορες πηγές DC που επηρεάζουν το κύκλωμα. Δηλαδή επιτρέπει να εκτελεστούν δύο ταυτόχρονες σαρώσεις για την επίβλεψη αλλαγών στις διαφορετικές πηγές DC που επηρεάζουν το κύκλωμα.

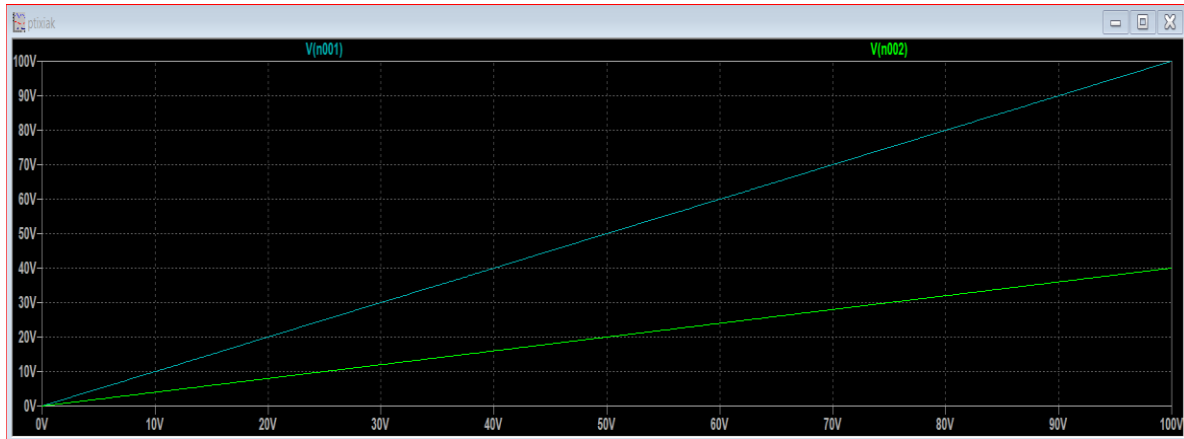
Παράδειγμα:

Κύκλωμα με σάρωση DC και τα απαρτιζόμενα υλικά:

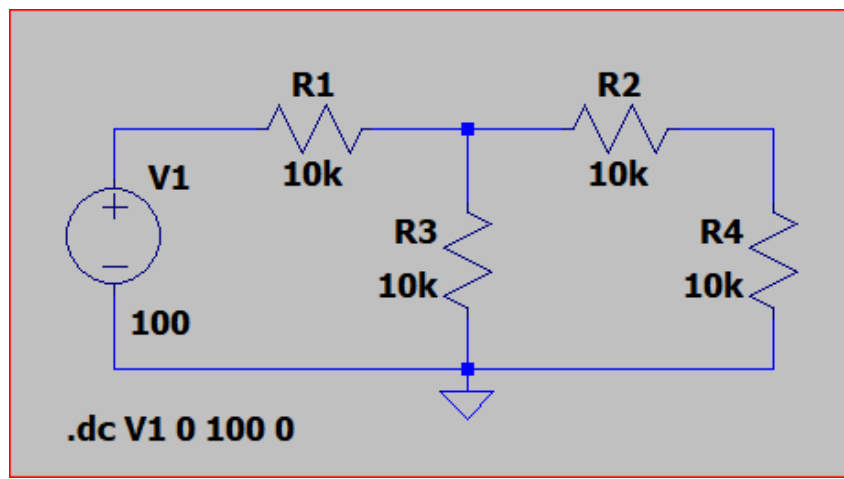
$R1=R2=R3=R4=10K\Omega$

$V1= 100Volts$

Έξοδος τάσης και ρεύματος του κυκλώματος



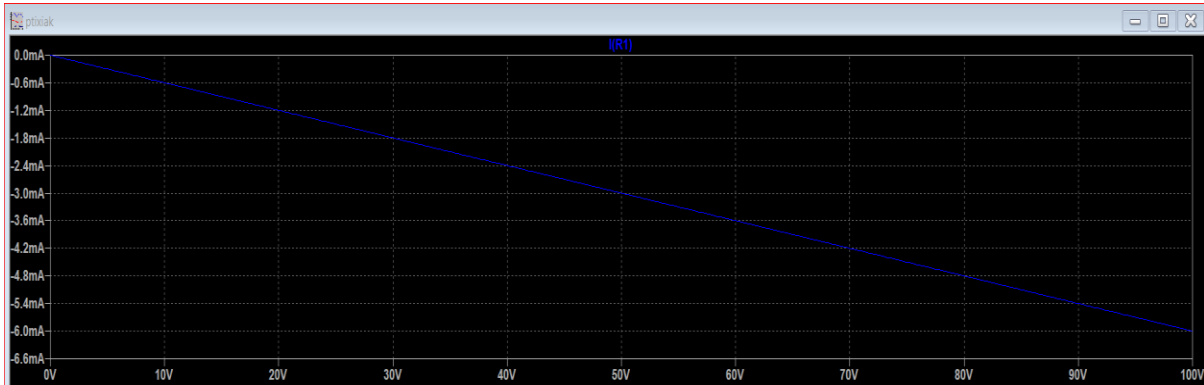
Εικόνα 33



Εικόνα 34

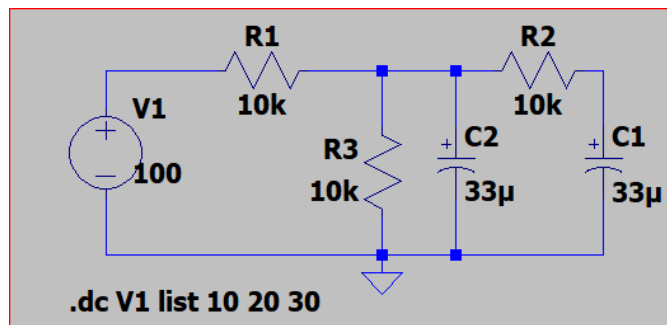
Στην Εικόνα 34 παρουσιάζονται 2 είδη τάσεων (V1 και V2) σε μία γραμμική παράσταση. Η γαλάζια γραμμή είναι η τάση πριν την R1 και η λαχάνι μετά την R1. Στην κάτω εικόνα είναι μία γραμμική παράσταση του ρεύματος με την τάση που διαπερνά την R1.

Παράδειγμα γραφικής παράστασης τάσεων Linear-DC sweep



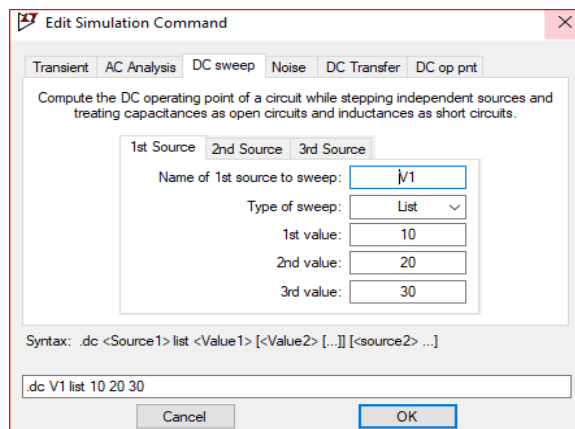
Εικόνα 35: Γραφική παράσταση ρεύματος

Σημείωση: Σε συνεχές ρεύμα μπορεί ο χρήστης να επιλέξει Linear, Octave, Decade ανάλυση, αλλά μπορεί επίσης να υποδεικνύει μια δικό του πίνακα τιμών (List).

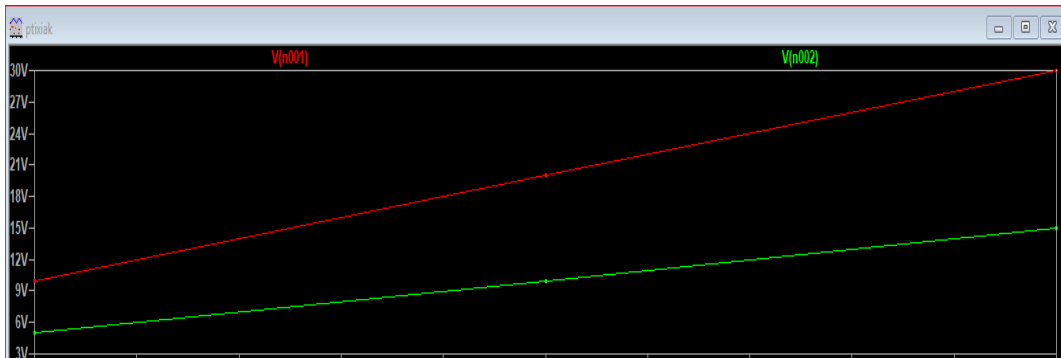


Εικόνα 36

Στην παρακάτω εικόνα δίνονται οι εντολές και οι δοκιμαστικές τιμές για να την ανταπόκρισή του κυκλώματος.



Εικόνα 37

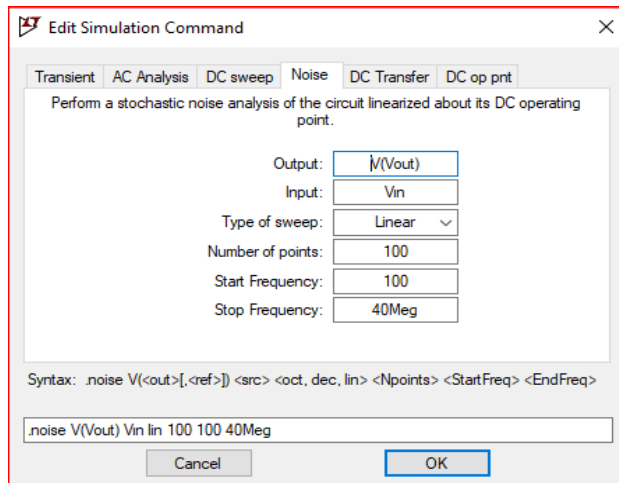


Εικόνα 38: Έξοδος του κυκλώματος για το DC sweep List

E) Noise - Θόρυβος

Το LTSPICE μπορεί να πραγματοποιήσει ανάλυση θορύβου ενός κυκλώματος όπου θα είναι η πυκνότητα τάσης θορύβου (V / \sqrt{Hz}) για εύρος ζώνης 1Hz. Μπορεί εύκολα να καταγράψει τον θόρυβο εξόδου, τον θόρυβο εισόδου ή ακόμη οποιοδήποτε θορυβώδες στοιχείο (αντίσταση, δίοδος ή τρανζίστορ). Ωστόσο, μπορεί να ενσωματώσει εύκολα τον θόρυβο σε ένα επιλεγμένο εύρος ζώνης μιας ανάλυσης θορύβου. Οι υπολογισμοί των θορύβων εκτελούνται σε κάθε βαθμίδα συχνότητας όπου καταγράφονται μέσω ανιχνευτή. Σε περίπτωση υπολογισμού ενός συνολικού θορύβου σε περιορισμένο εύρος ζώνης όπου καθορίζεται από το LTSPICE, ο χρήστης έχει το δικαίωμα να τροποποιήσει τα όρια και δεξιά συχνότητας του προγράμματος προβολής κυματομορφών κάνοντας κλικ στο οριζόντιο άξονα.

Παράθυρο προσομοίωσης επεξεργασίας:

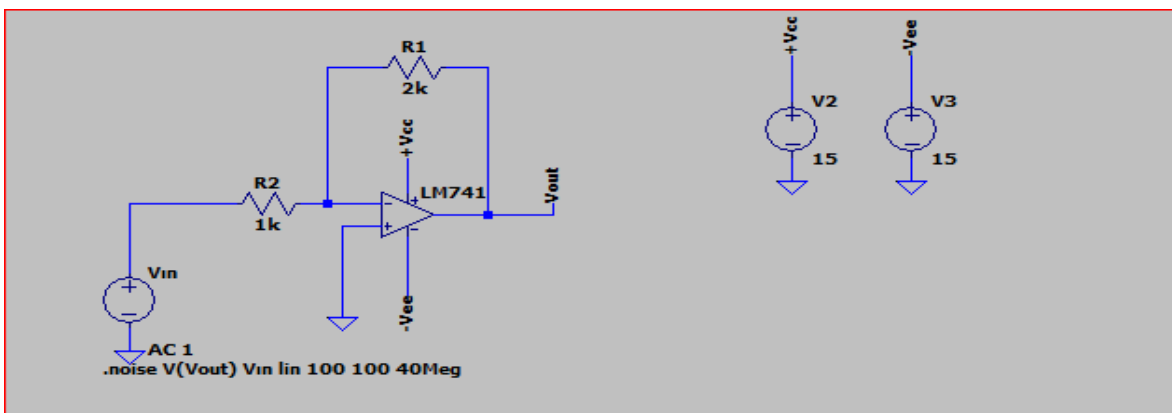


Εικόνα 39: Δήλωση παραμέτρων για το κύκλωμα θορύβου

Σημείωση: Οι παράμετροι έχουν δηλωθεί τυχαία για το ακόλουθο παράδειγμα.

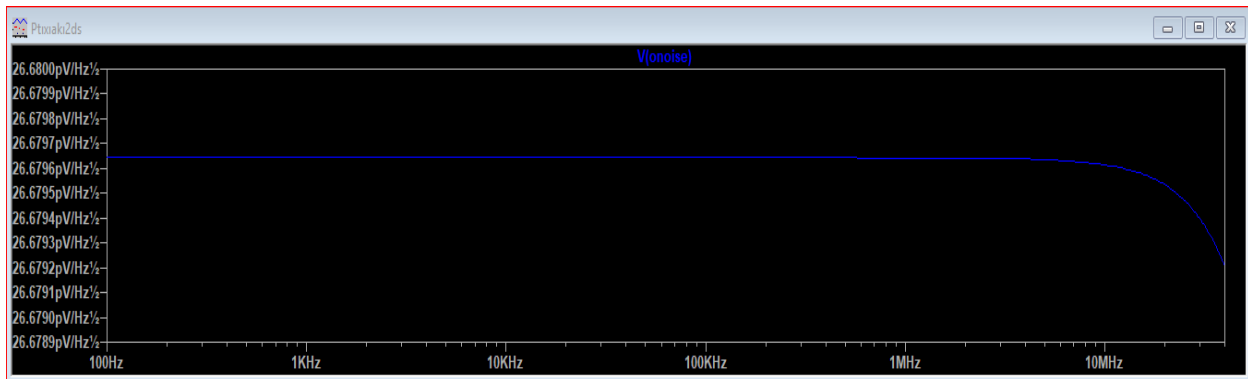
Κύκλωμα Θορύβου στο LTSPICE:

Στην Εικόνα 39 απεικονίζεται ένα κύκλωμα θορύβου με τελεστικό συντελεστή LM741 και είσοδο εναλλασσόμενης τάσης με πλάτος 1V_{p-p} σε σειρά με την αντίσταση R2 και παράλληλα με την R1, ενώ επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και τελεστικός ενισχυτής με συνεχής τάση 15V και -15V για πόλωση.



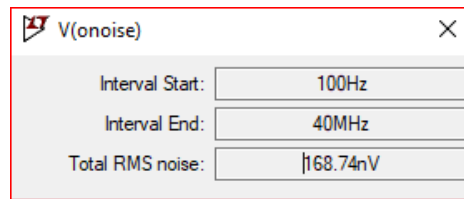
Εικόνα 40

Στην επόμενη γραφική παράσταση παρουσιάζεται η έξοδος του κυκλώματος σε οριζόντιο άξονα την συχνότητα και κάθετο άξονα την τάση ανά την συχνότητα στο τετράγωνο.



Εικόνα 41

Μόλις η κυματομορφή εμφανίσει εύρος ζώνης ενδιαφέροντος, μέσω του Ctrl πάνω στην ετικέτα παρακολούθησης δεδομένων, εμφανίζεται ο συνολικός θόρυβος RMS αναλόγως του εύρου ζώνης που ενδιαφέρει τον χρήστη.



Εικόνα 42: Παράθυρο Συνολικού Θορύβου

Interval Start – Αρχή Περιόδου

Interval End – Τέλος Περιόδου

Total RMS noise - Συνολικό RMS θορύβου

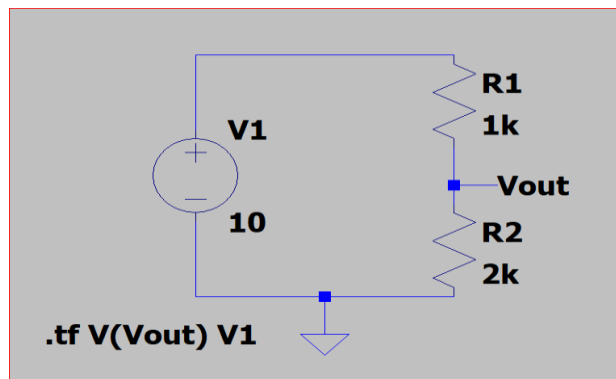
F) DC-Transfer: Λειτουργία μεταφοράς Συνεχή ρεύματος

Η ανάλυση συνάρτησης μεταφοράς LTSPICE υπολογίζει το κέρδος χαμηλής συχνότητας και την αντίσταση εισόδου και εξόδου ενός κυκλώματος.

Δηλαδή:

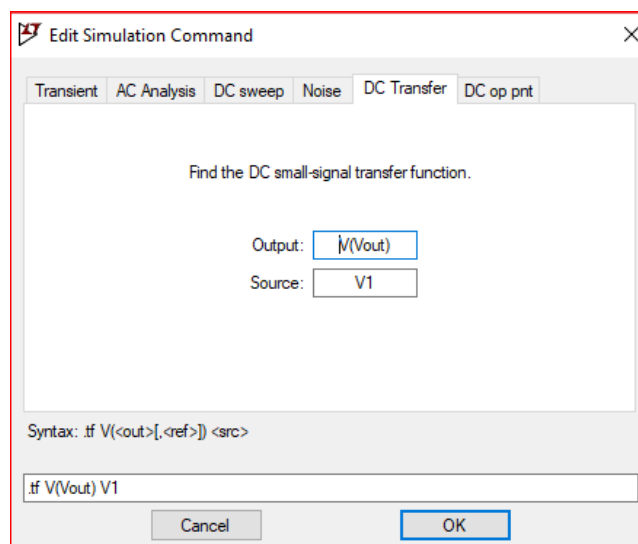
- ❖ Gain (Κέρδος) = τάση εξόδου/ τάση εισόδου
- ❖ Αντίσταση εισόδου ενός κυκλώματος = τάση εισόδου / ρεύματος εισόδου
- ❖ Αντίσταση εξόδου ενός κυκλώματος = τάση εξόδου / ρεύμα εισόδου

Στην παρακάτω εικόνα είναι το κύκλωμα το οποίο εκτελεί την λειτουργία μεταφοράς συνεχούς ρεύματος προσομοίωσης. Αποτελείται από μία πηγή συνεχής τάσης 10 V που είναι παράλληλα με τις αντιστάσεις R1 και R2, οι οποίες είναι σε σειρά μεταξύ τους.



Εικόνα 43

Όπως φαίνεται στην εικόνα 43 ,στην εντολή επεξεργασίας προσομοίωσης, έχουν καθοριστεί οι παράμετροι από τον χρήστη για την προσομοίωση της λειτουργίας μεταφοράς συνεχούς ρεύματος.



Εικόνα 44

Στην συνέχεια το κύκλωμα διαιρέτης τάσης διαιρεί την τάση μεταξύ των δύο αντιστάσεων ανάλογα με την τιμή των αντιστάσεων. Οι τιμές είναι οι εξής:

- Πηγή τάσης εισόδου: $V1 = 10V$
- Αντίσταση $R1 = 1k$
- Αντίσταση $R2 = 2k$

Η τάση εξόδου λαμβάνεται στον κόμβο μεταξύ της αντίστασης $R1$ και της αντίστασης $R2$. Η τάση εξόδου σημειώνεται ως V_{out} στο παραπάνω σχήμα. Έτσι, βρίσκει την λειτουργία μεταφοράς, την σύνθετη αντίσταση εισόδου και την αντίσταση εξόδου ενός παραπάνω κυκλώματος.

Άρα: Λειτουργία μεταφοράς συνεχούς ρεύματος = τάση εξόδου / τάση εισόδου

Τάση εξόδου = τάση εισόδου * Αντίσταση $R2$ / Συνολική αντίσταση

Επομένως, $V_{out} = V1 * R2 / R1 + R2$

$$= 10 * 2k / 3k$$

$$= 6.6666V$$

Λειτουργία μεταφοράς DC = V_{out} / V_{in}

$$\text{Λειτουργία μεταφοράς DC} = 6.6666V / 10V = 0.6666V$$

Αντίσταση εισόδου ενός κυκλώματος $Z1 = V1 / I1$

$$V1 = 10V$$

$I1 = V1 / R1 + R2$, $I1 = 10V / 3k = 3.3 \text{ mA}$. Άρα η σύνθετη αντίσταση $Z1$ είναι $3k\Omega$.

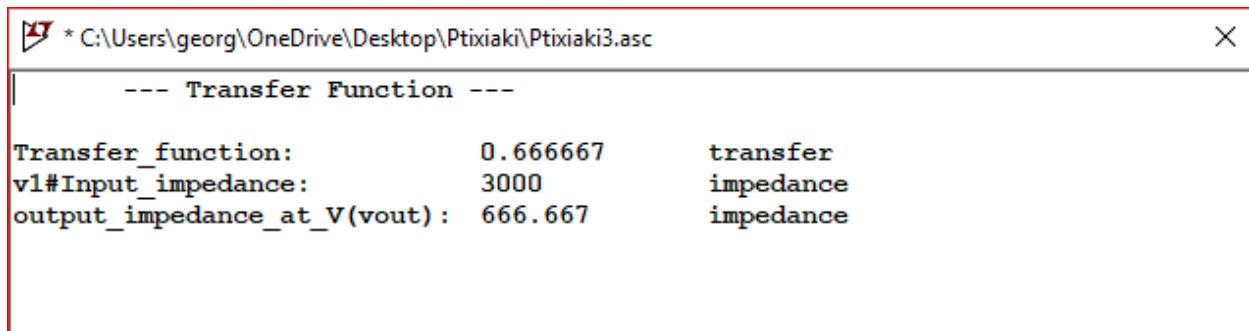
Αντίσταση εξόδου $Z2 = 666.667 \Omega$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω παράθυρο στην εκτέλεση προσομοίωσης του κυκλώματος.

Transfer function: Λειτουργία Μεταφοράς

Input impedance: Αντίσταση εισόδου

Output impedance: Αντίσταση εξόδου




```
--- Transfer Function ---  
Transfer_function:          0.666667      transfer  
v1#Input_impedance:        3000          impedance  
output_impedance_at_V(vout): 666.667    impedance
```

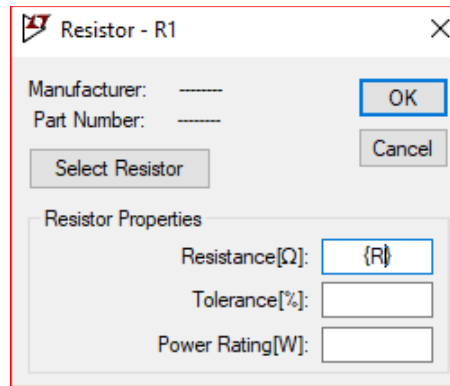
Εικόνα 45

Παραμετρική ανάλυση

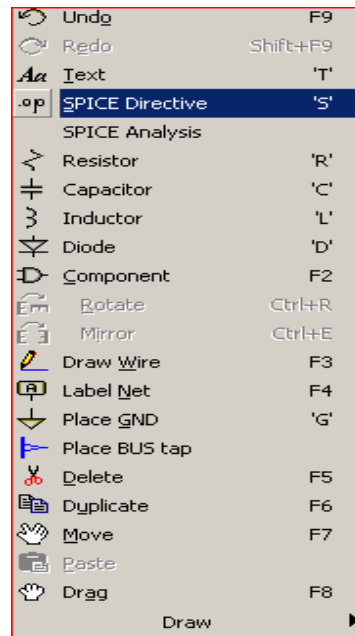
Υπάρχουν και άλλοι τύποι ανάλυσης όπως η παραμετρική ανάλυση και θερμοκρασία. Η παραμετρική ανάλυση επιτρέπει στον χρήστη να εκτελέσει ένα άλλο είδος ανάλυσης (σημείου λειτουργίας DC (συνεχή ρεύματος), παροδικό (Transient), σάρωση (Sweep)) ενώ χρησιμοποιείται μια σειρά από τιμές συνιστωσών. Ο καλύτερος τρόπος να αποδειχθεί αυτό είναι ένα παράδειγμα, όπως την αντίσταση ή κάθε άλλο τυποποιημένο μέρος θα λειτουργήσει εξίσου καλά (πυκνωτής, επαγωγέας).

Αρχικά, ο χρήστης με δεξί κλικ στην αντίσταση τιμής ανοίγεται το παράθυρο διαλόγου που επιτρέπει να ορίσει τις ιδιότητες αντιστάσεων. Καταχωρεί το όνομα της αντίστασης αντί για την τιμή του. Η τιμή της αντίστασης είναι μία παγκόσμια παράμετρος που συμβολίζεται με R. Στην συνέχεια πατώντας το πλήκτρο 'S' ή χρησιμοποιώντας το εικονίδιο .

Παράθυρο διαλόγου της αντίστασης:

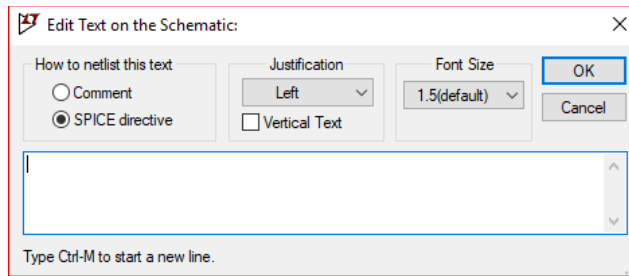


Εικόνα 46



Εικόνα 47

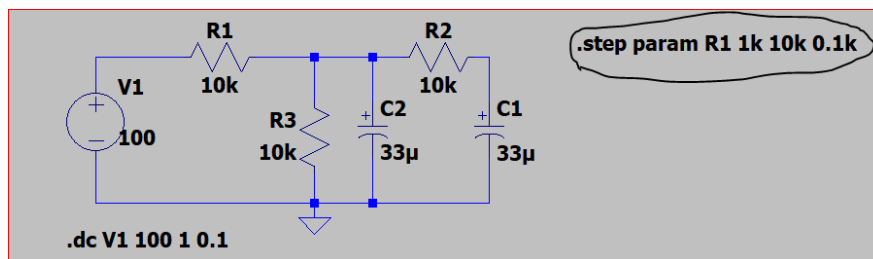
Αμέσως μετά εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο επεξεργασίας.



Εικόνα 48

Σημείωση: Οι οδηγίες ξεκινάνε πάντα με μια περίοδο.

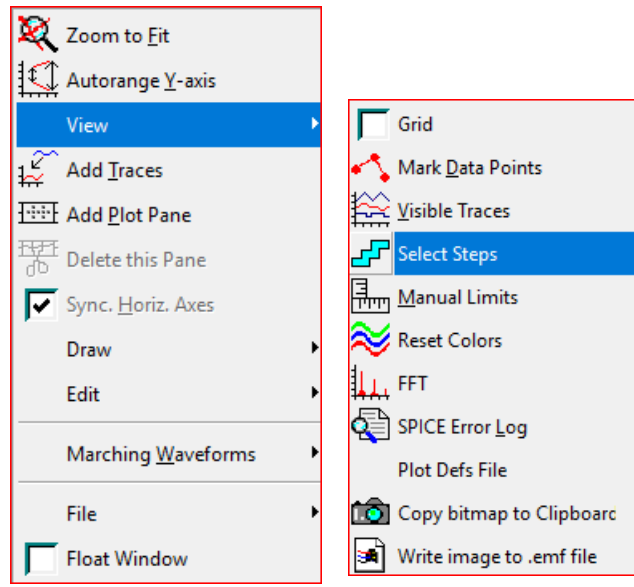
Για παράδειγμα:



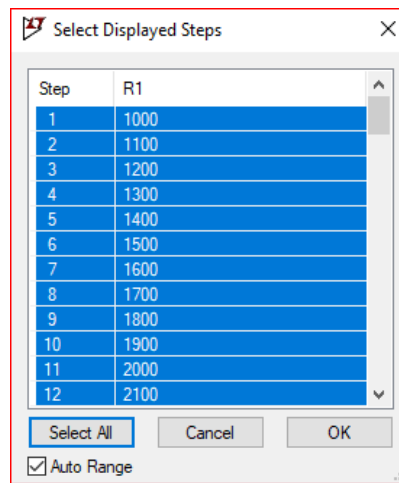
Εικόνα 49

Η παράμετρος (**.step param R 1k 10k 0.1k**) σημαίνει να βηματίζει την παράμετρο R από 1kΩ σε 10kΩ σε βήματα 0.1kΩ για κάθε βήμα της εξωτερικής προσομοίωσης. Σε περίπτωση μη γραφικής ανάλυσης, όπως ένα σημείο λειτουργίας DC θα παρουσιάσει στην γραφική εξόδου κλιμακωτή παράμετρο ως προς τον οριζόντιο άξονα. Αντιθέτως, σε μία ανάλυση που είναι ήδη γραφική όπως η παροδική, το γράφημα θα παρουσιάσει μία σειρά γραμμών, δηλαδή μία για κάθε τιμή της κλιμακωτής παραμέτρου.

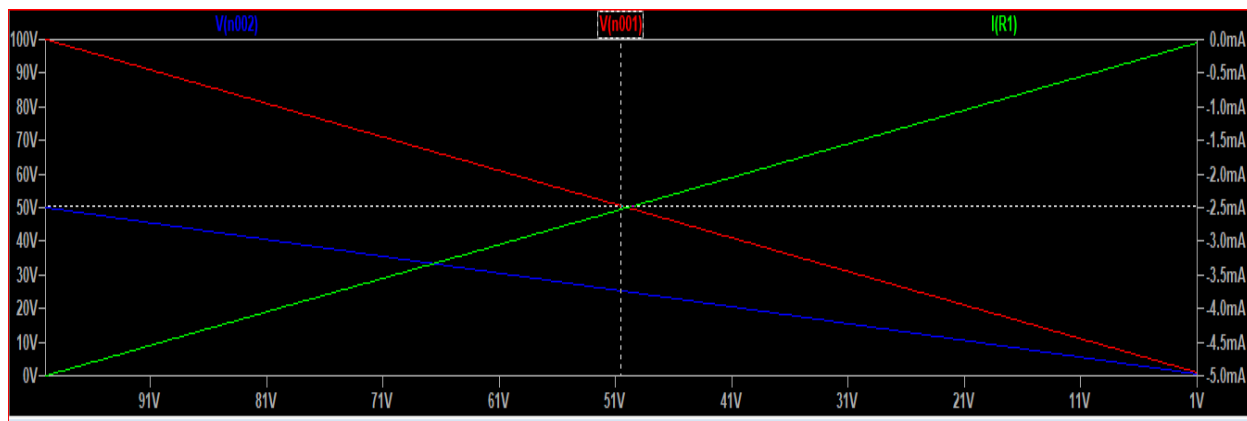
Για περισσότερη βοήθεια η εντολή 'Επιλογή Βημάτων' από το μενού εντοπισμού το οποίο με δεξί κλικ πάνω από την γραφική ακολουθεί το άνοιγμα του πίνακα αντιστάσεων, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τιμή αντίστασης για την εκτέλεση του κυκλώματος.



Εικόνα 50: Επιλογή βημάτων



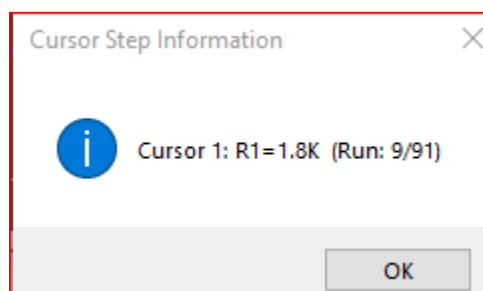
Εικόνα 51: Πίνακας Αντιστάσεων



Εικόνα 52

Έξοδος του παραπάνω κυκλώματος με παραμετρικές αντιστάσεις:

Στο ακόλουθο παράθυρο εμφανίζεται με δεξί κλικ πάνω από το κοινό σημείο της διακεκομμένης γραμμής (άσπρης γραμμής), όπου είναι η τιμή της επιλεγόμενης αντίστασης που έχει επιλέξει ο χρήστης και η θέση της αντίστασης από τον πίνακα επιλογής βημάτων.



Εικόνα 53

Θερμοκρασία

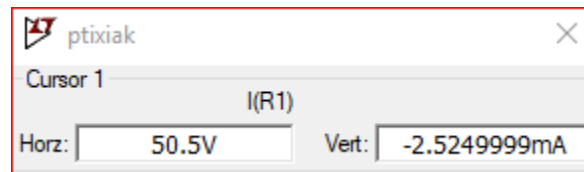
Για να γίνει μια σάρωση θερμοκρασίας, ο χρήστης μεταβαίνει σε παραμετρική ανάλυση, όπου έναντι μεταβολής της συνιστώσας τιμής, θα γίνει αλλαγή της παραμέτρου σε θερμοκρασία. Με άλλα λόγια, από την εντολή βημάτων παραμέτρου της αντίστασης (.step param R 1k 10k 0.1k), δηλώνεται(.step temp 0 100 1) κλιμάκωση θερμοκρασίας του κυκλώματος από 0°C σε 100°C με βήματα 1°C για κάθε βήμα της εξωτερικής προσομοίωσης.

Στην παρακάτω γραφική παράσταση παρουσιάζεται παράδειγμα της ροής του ρεύματος μέσα από την αντίσταση R1(10k).

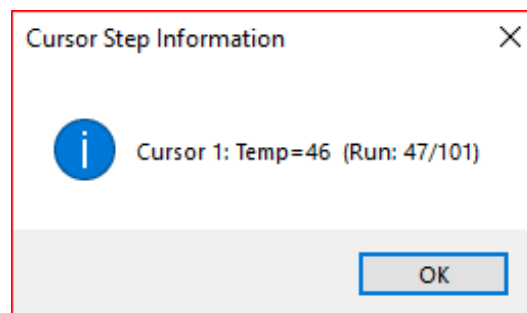


Εικόνα 54

Τα αποτελέσματα της γραφικής παράστασης, δηλαδή το κέντρο των αξόνων της διακεκομμένης γραμμής, εμφανίζονται στην κάτω δεξιά γωνία της οθόνης και ακολούθως στο παράθυρο(Εικόνα 55) του επιλεγμένου κέρσορα, όπου δείχνει την θερμοκρασία και την τρεχόμενη θέση του πίνακα βημάτων.



Εικόνα 55



Εικόνα 56: Παράθυρο επιλεγμένου κέρσορα

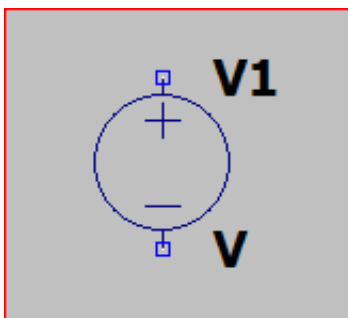
Τύποι πηγών

Στο πρόγραμμα προσομοίωσης LTSPICE υπάρχουν 7 είδη πηγών για βοήθημα του χρήστη οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

- i) Voltage Source (none) – Πηγή τάσης συνεχούς ρεύματος
- ii) PULSE Source – Πηγή παλμού
- iii) SINE Source (Alternating Current Source) – Πηγή εναλασσόμενου ρεύματος
- iv) EXP Source (Exponential Voltage) – Εκθετική πηγή τάσης
- v) SFFM Source (Single Frequency FM) – Πηγή μονάδας συχνότητας
- vi) PWL Source (Piece – Wise Linear) – Τμηματική γραμμικής πηγής

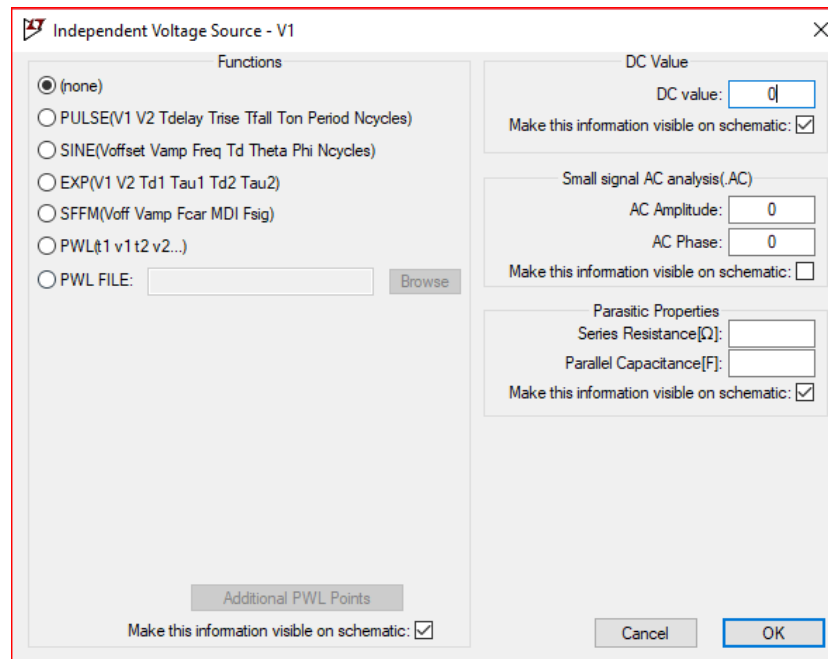
i) Voltage Source (none)- Πηγή τάσης συνεχούς ρεύματος

Πηγή τάσης αποτελεί μια συσκευή δύο ακροδεκτών που μπορεί να διατηρεί σταθερή τάση. Μια ιδανική πηγή τάσης μπορεί να διατηρήσει την σταθερή τάση ανεξαρτήτως της αντίστασης φορτίου ή του ρεύματος εξόδου. Ωστόσο, μία πραγματική πηγή τάσης δεν μπορεί να παρέχει απεριόριστο ρεύμα. Οι πραγματικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, όπως μπαταρίες, οι γεννήτριες μπορούν να μοντελοποιηθούν για λόγους ανάλυσης ως συνδυασμός μιας ιδανικής πηγής τάσης και πρόσθετων συνδυασμών στοιχείων συνθέτης αντίστασης.



Εικόνα 57: Σχηματικό της πηγής

Μια πηγής τάσης μπορεί να ρυθμιστεί με πολλούς τρόπους. Κάνοντας δεξί κλικ πάνω από το σχήμα της πηγής θα εμφανιστεί το παράθυρο «Ανεξάρτητη πηγή τάσης»(Εικόνα 57). Οι επιλογές που εμφανίζονται στο παράθυρο θα αλλάξουν καθώς αλλάζει η επιλεγμένη λειτουργία. Αυτή είναι η βασική πηγή συνεχούς ρεύματος τάσης που προσομοιώνει μια απλή μπαταρία και σας επιτρέπει να καθορίσετε την τιμή τάσης DC.



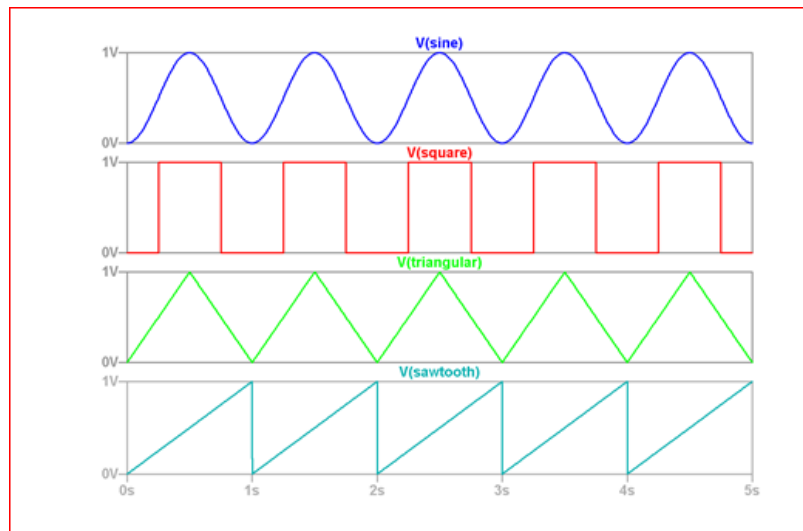
Εικόνα 58 : Παράθυρο δηλώσεων παραμέτρων ανεξάρτητης πηγής τάσης

ii) PULSE Source - Πηγή παλμού

Η πηγή παλμού χρησιμοποιείται συχνά για μια παροδική προσομοίωση ενός κυκλώματος, κατά την οποία ο χρήστης μπορεί να κάνει την πηγή παλμού να δράσει σαν τετραγωνική πηγή κύματος. Καθ' αυτού δεν πρέπει ποτέ να χρησιμοποιηθεί σε μια μελέτη απόκρισης συχνότητας επειδή το πρόγραμμα LTspice υποθέτει ότι είναι στον τομέα του χρόνου και μετέπειτα το οικόπεδο της ανίχνευσης θα δώσει μη ακριβές αποτελέσματα.

Μπορεί επίσης να γίνει παράλειψη του βοηθήματος N cycles εάν χρειαστεί μίας τετραγωνικής κυματομορφής ελεύθερης εκκίνησης. Για τριγωνική κυματομορφή μπορεί να ρυθμιστεί ο χρόνος ανόδου και ο χρόνος πτώσης ίσα με το μισό της επιθυμητής περιόδου στην λειτουργία παλμών. Ομοίως, στην δημιουργία πριονωτού παλμού (sawtooth) μπορεί να ρυθμιστεί ο χρόνος ανύψωσης ίσος με την περίοδο και ο χρόνος πτώσης με μηδέν.

Στην Εικόνα 58 απεικονίζονται μερικοί βασικοί παλμοί που μπορεί ο χρήστης να χρησιμοποιήσει στο πρόγραμμα προσομοίωσης.



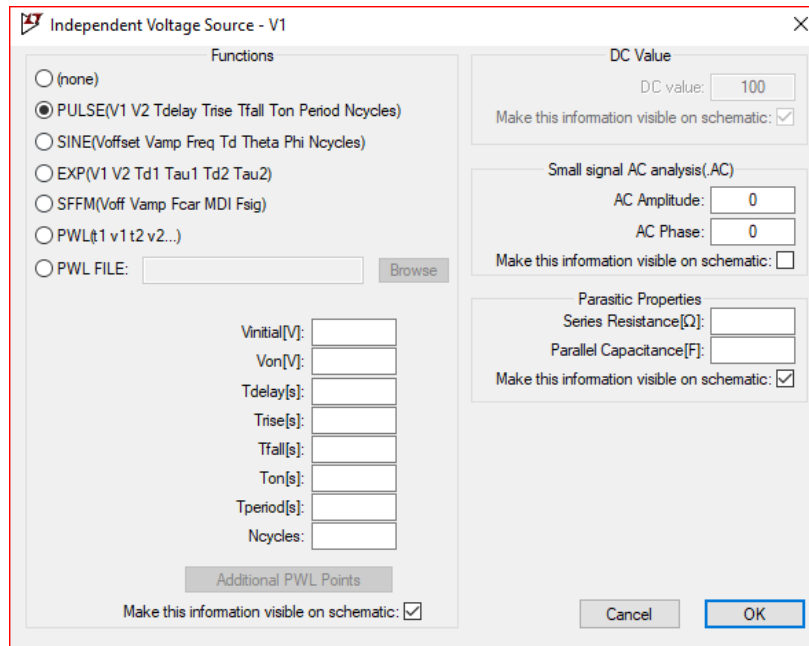
Εικόνα 59

V(sine): Ημιτονοειδής κυματομορφή

V(square): Τετραγωνική κυματομορφή

V(triangular): Τριγωνική κυματομορφή

V(sawtooth): Πριονωτή κυματομορφή



Εικόνα 60: Παράθυρο δηλώσεων παραμέτρων ανεξάρτητης πηγής τάσης

V initial: Είναι η τιμή όταν ο παλμός που δεν είναι ενεργοποιημένος {ανοιχτό(on)}. Έτσι για ένα τετραγωνικό κύμα η τιμή του μπορεί να είναι μηδενική ή αρνητική.

Von: Είναι η τιμή όταν ο παλμός είναι πλήρως ενεργοποιημένος {ανοιχτός(on)}. Μπορεί επίσης να είναι μηδενικό ή αρνητικό

T delay: Είναι η χρονική καθυστέρηση. Οι προεπιλεγμένες μονάδες είναι σε δευτερόλεπτα. Η καθυστέρηση μπορεί να είναι μηδενική, αλλά όχι αρνητική.

T rise: Είναι ο χρόνος ανόδου του παλμού. Το πρόγραμμα επιτρέπει την τιμή αυτή να είναι μηδέν, αλλά ο μηδενικός χρόνος ανόδου μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σύγκλισης σε ορισμένες προσομοιώσεις παροδικής ανάλυσης. Μονάδα μέτρηση είναι σε δευτερόλεπτα

T fall: Είναι ο χρόνος πτώσης σε δευτερόλεπτα του παλμού.

T on: Είναι το πλάτος παλμού όταν ο παλμός είναι πλήρως ενεργοποιημένος. Μονάδες μέτρησης σε δευτερόλεπτα.

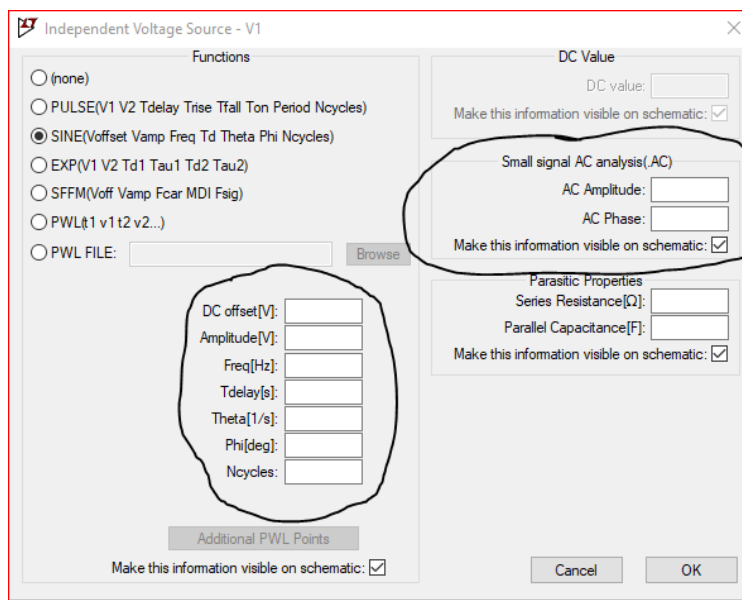
T period: Είναι η περίοδος και ο συνολικός χρόνος σε δευτερόλεπτα του παλμού.

N cycles: Είναι ο αριθμός επαναλήψεων του παλμού. Ο χρήστης μπορεί να το αφήσει για 0 επαναλήψεις για τρέχοντες παλμού.

Η παλμική πηγή είναι από τις σημαντικότερες πηγές του προγράμματος LTSPICE γιατί χρησιμοποιείται πολύ συχνά ο τετραγωνικός παλμός για την ανταπόκριση διάφορων εξαρτημάτων και κυκλωμάτων.

iii) SINE Source (alternating current source)- Πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος

Το εναλλασσόμενο ρεύμα είναι ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο αναστρέφει περιοδικά την κατεύθυνση, σε αντίθεση με το συνεχές ρεύμα όπου ρέει μόνο προς μία κατεύθυνση και χρησιμοποιείται σε επιχειρήσεις και κατοικίες. Η κυματομορφή εναλλασσόμενου ρεύματος στα περισσότερα κυκλώματα ηλεκτρικής ισχύος είναι ημιτονοειδές κύμα, του οποίου η θετική μισή περίοδος αντιστοιχεί με την θετική κατεύθυνση του ρεύματος και αντίστροφα. Σε ορισμένες εφαρμογές χρησιμοποιούνται διαφορετικές κυματομορφές όπως οι τριγωνικές κυματομορφές ή τετραγωνικές.



Εικόνα 61: Παράθυρο δηλώσεων παραμέτρων ανεξάρτητης πηγής τάσης

Αρχικά στο πρόγραμμα LTSPICE υπάρχουν δύο ομάδες παραμέτρων.

Για μία ανάλυση AC οι παράμετροι είναι εξής:

1. AC Amplitude πού είναι η μέγιστη τιμή της τάσης.
2. AC Phase που είναι η γωνία της φάσης της τάσης.

Για μια παροδική ανάλυση οι παράμετροι είναι:

DC offset (Μετατόπιση Συνεγή ρεύματος): Είναι μία μετατόπιση τάση DC. Θα πρέπει να τεθεί σε μηδέν εάν ο χρήστης χρειάζεται καθαρό ημιτονοειδές κύμα.

Amplitude (Πλάτος κυματομορφής): Το πλάτος είναι το αδιευκρίνιστο εύρος του ημιτονοειδούς κύματος. Δηλαδή η μέγιστη τιμή που μετρήθηκε από την μηδενική μετατόπισης συνεχούς ρεύματος τιμή (DC offset).

Frequency (Συχνότητα): Είναι συχνότητα του ημιτονοειδές κύματος. Μέτρηση μονάδας είναι σε Hz.

Tdelay (Περιοδική καθυστέρηση): Είναι η χρονική καθυστέρηση. Μονάδα μέτρησης σε δευτερόλεπτα. Για κανονικό ημιτονοειδές κύμα η χρονική καθυστέρηση πρέπει να είναι μηδέν.

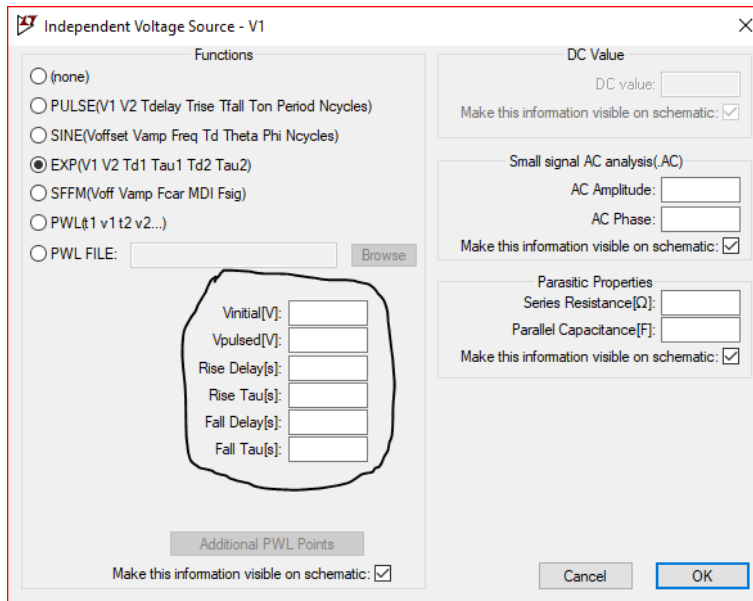
Theta (Παράγοντας Απόσβεσης): Χρησιμοποιείται για την εφαρμογή μιας εκθετικής αποσύνδεσης στο ημιτονοειδές. Για κανονικό ημιτονοειδές κύμα ορίζετε στο μηδέν.

Phi (Γωνιακή φάση): Το ϕ είναι η πρόοδος φάσης. Μετριέται σε μοίρες. Για μορφή συν ημιτονοειδούς κύματος ο χρήστης πρέπει να ρυθμίζει την παράμετρο σε ενενήντα μοίρες.

N cycles: Είναι ο αριθμός κύκλων του παλμού. Για τρέχοντες παλμούς παραμένει στο μηδέν.

iv) EXP Source (exponential voltage) - Εκθετική πηγή τάσης

Μια εκθετική συνάρτηση βαθμίδας, η οποία στο εύρος V μειώνεται σταδιακά προς το μηδέν. Οι εκθετικές λειτουργίες είναι σημαντικές για την ανάλυση ενός κυκλώματος στο οποίο περιέχει αντιστάσεις, πυκνωτές και επαγωγείς.



Εικόνα 62: Παράθυρο δηλώσεων παραμέτρων ανεξάρτητης πηγής τάσης

V initial: Είναι η τάσης εκκίνησης (V1).

V pulsed: Είναι η μέγιστη τάση (V2).

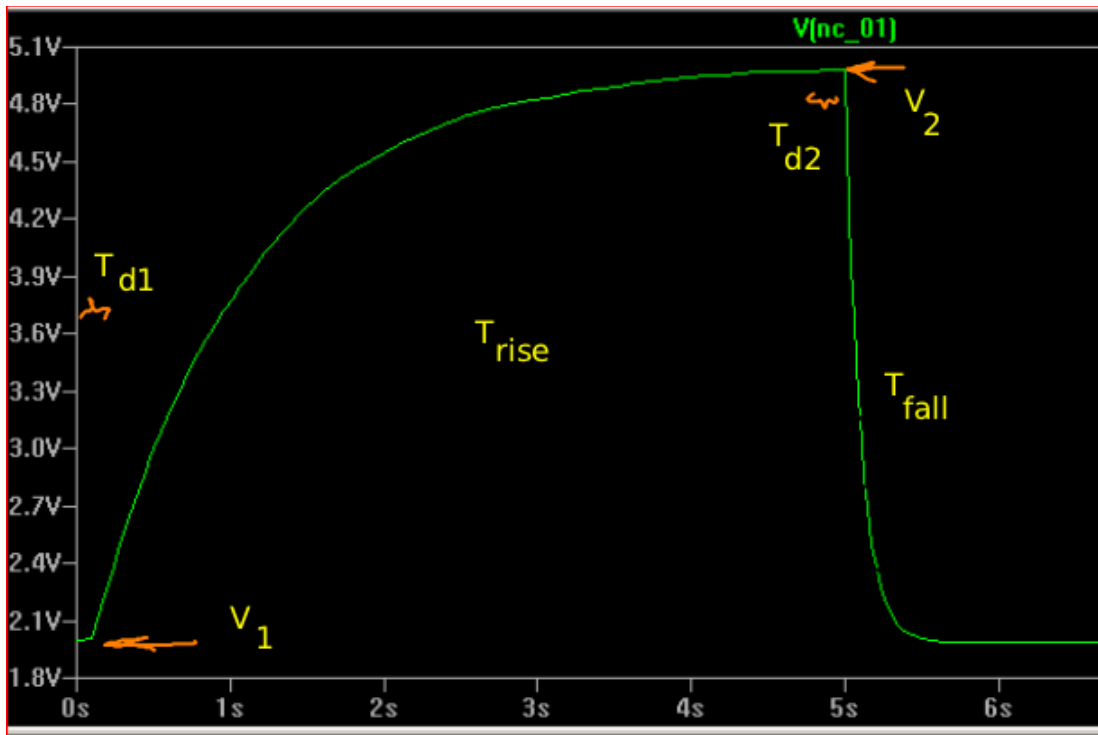
Rise Delay: Είναι η αύξηση της καθυστέρησης του χρόνου αναμονής στην έναρξη πριν την αλλαγή (Td1).

Rise Tau: Είναι η σταθερά χρόνου για την αλλαγή (Tau1).

Fall Delay: Είναι η καθυστέρηση πτώσης του χρόνου αναμονής στη μέγιστη τάση πριν την αλλαγή (Td2).

Fall Tau: Είναι η χρονική σταθερά για την αλλαγή πίσω από την τάση εκκίνησης (Tau2).

Για περισσότερη κατανόηση της εκθετικής πηγής ακολουθεί η παρακάτω εικόνα εξόδου.



Εικόνα 63

Ακολουθεί στην συνέχεια ένα μικρό παράδειγμα για την εκθετική πηγή.

Δήλωση παραμέτρων στην ανεξάρτητη πηγή τάσης:

Για την αρχική τάση έχει δηλωθεί : $V_1 = 2 V$

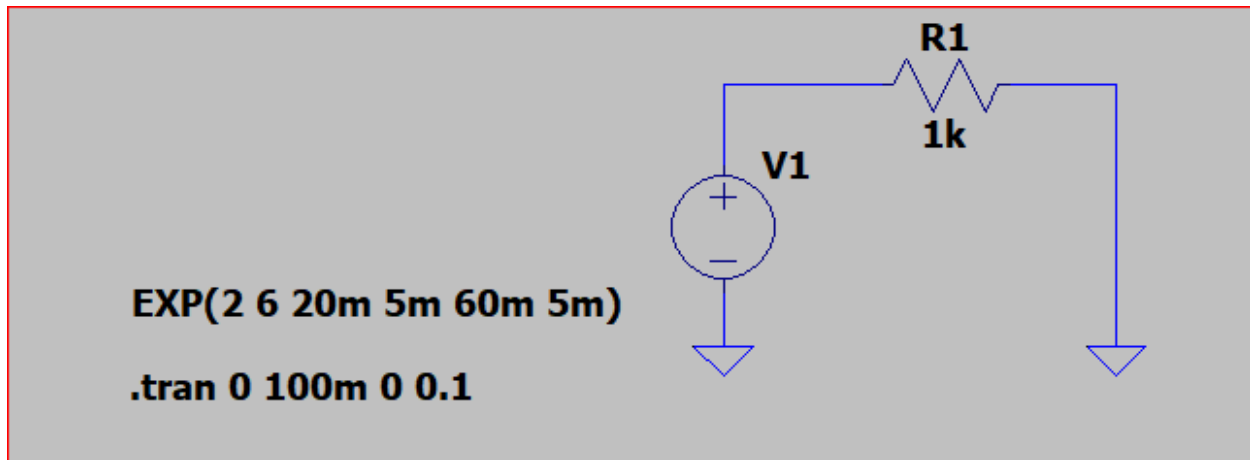
Για μέγιστη τάση : $V_2 = 6V$

Rise Delay: $T_{d1} = 20ms$

Rise Tau: $Tau_1(T\ rise) = 5ms$

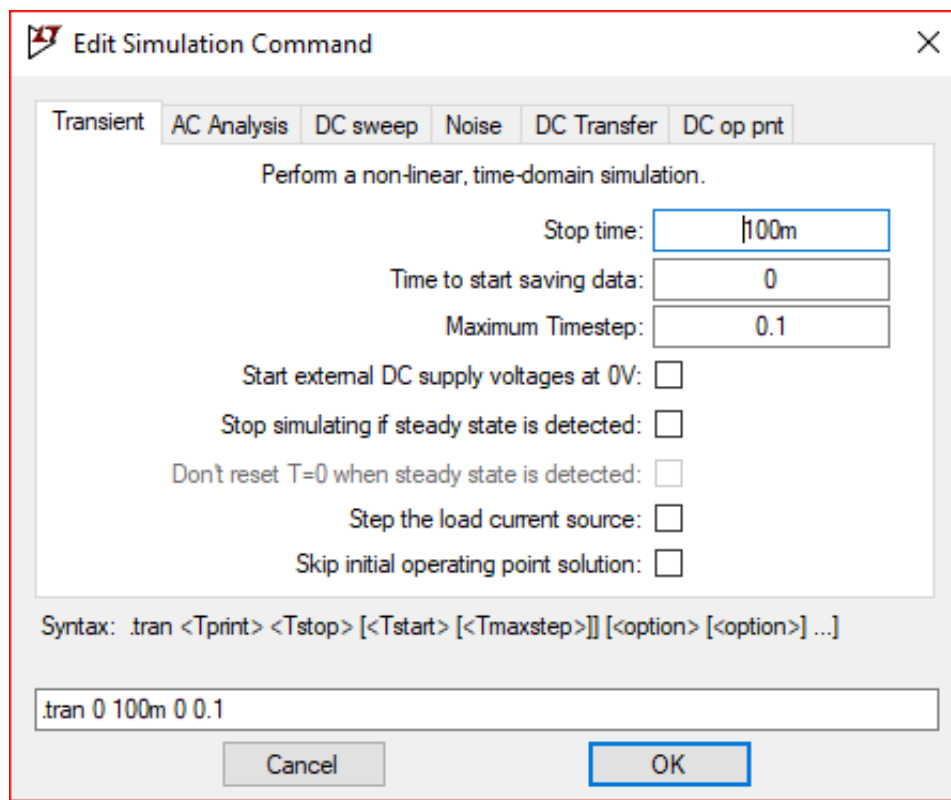
Fall Delay: $T_{d2} = 60ms$

Fall Tau: $Tau_2(T\ fall) = 5ms$

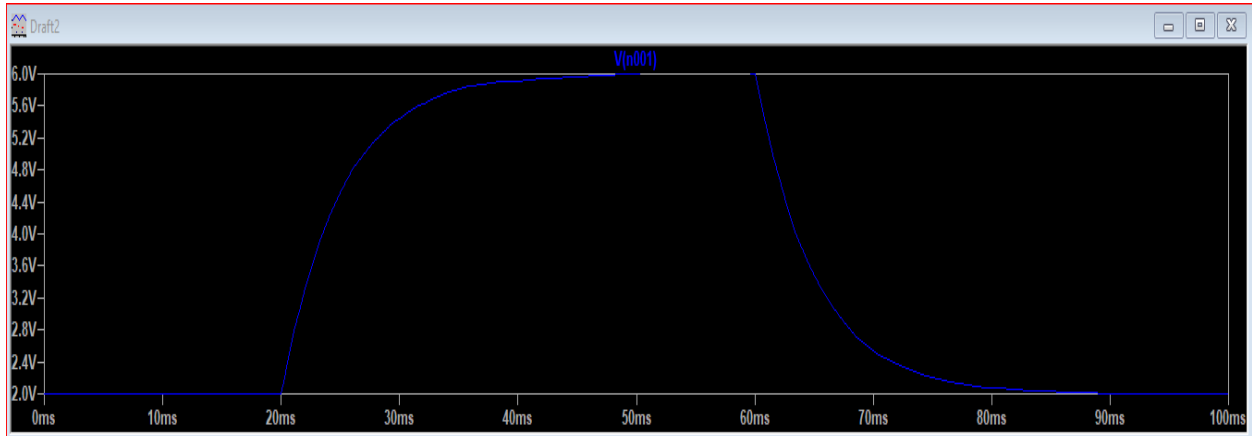


Εικόνα 64: Κύκλωμα παραδείγματος εκθετικής τάσης

Δήλωση επεξεργασίας προσομοίωσης για σταμάτημα χρόνου στα 100millisecond , ξεκινήματος αποθήκευσης χρόνου από το 0 και με μέγιστο βηματισμό 0,1.



Εικόνα 65



Εικόνα 66: Έξοδος στα άκρα της Εκθετικής πηγής

ν) SFFM Source (Single Frequency FM)- Πηγή μονάδας συχνότητας

The dialog box 'Independent Voltage Source - V1' is shown with the following settings:

- 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:
- 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:
- Additional Parameters:**
 - DC offset[V]:
 - Amplitude[V]:
 - Carrier Freq[Hz]:
 - Modulation Index:
 - Signal Freq[Hz]:
- Additional PWL Points:**
- Make this information visible on schematic:
-

Εικόνα 67: Παράθυρο δηλώσεων παραμέτρων ανεξάρτητης πηγής τάσης

Σημείωση: Στην παραπάνω εικόνα παραμένουν οι παράμετροι του προηγούμενου παραδείγματος στην εκθετική πηγή.

Ο τύπος πηγής SFFM (Single Frequency FM) έχει τις εξής παραμέτρους:

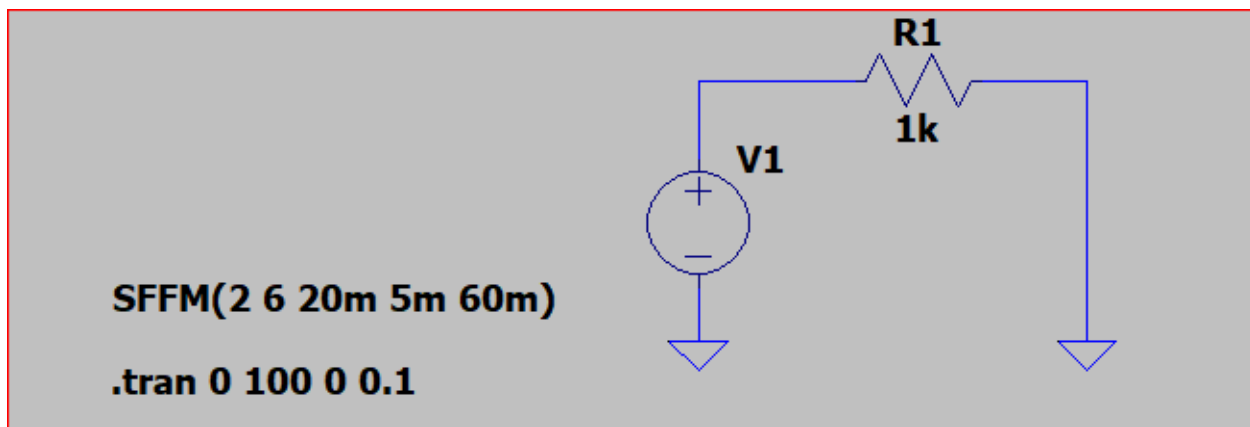
DC offset: Είναι μία μετατόπιση τάση DC. Θα πρέπει να τεθεί σε μηδέν εάν ο χρήστης χρειάζεται καθαρό ημιτονοειδές κύμα.

Amplitude: Είναι το πλάτος της τιμής του εναλλασσόμενου ρεύματος στο ημιτονοειδές κύμα.

Carrier Freq: Είναι η συχνότητα μεταφοράς.

Modulation Index: Είναι ο δείκτης διαμόρφωσης.

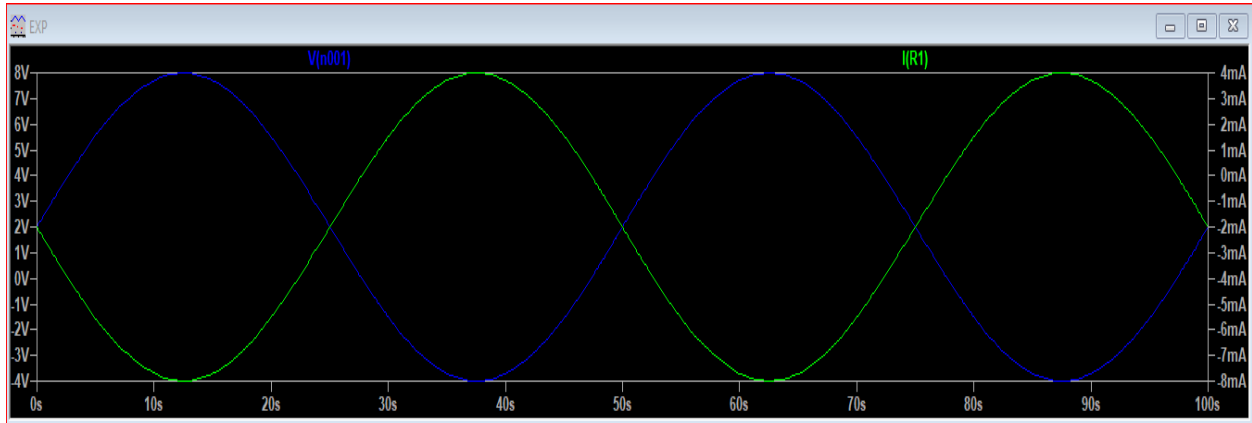
Signal Freq: Είναι το σήμα της συχνότητα.



Εικόνα 68: Παρουσίαση απλού παραδείγματος

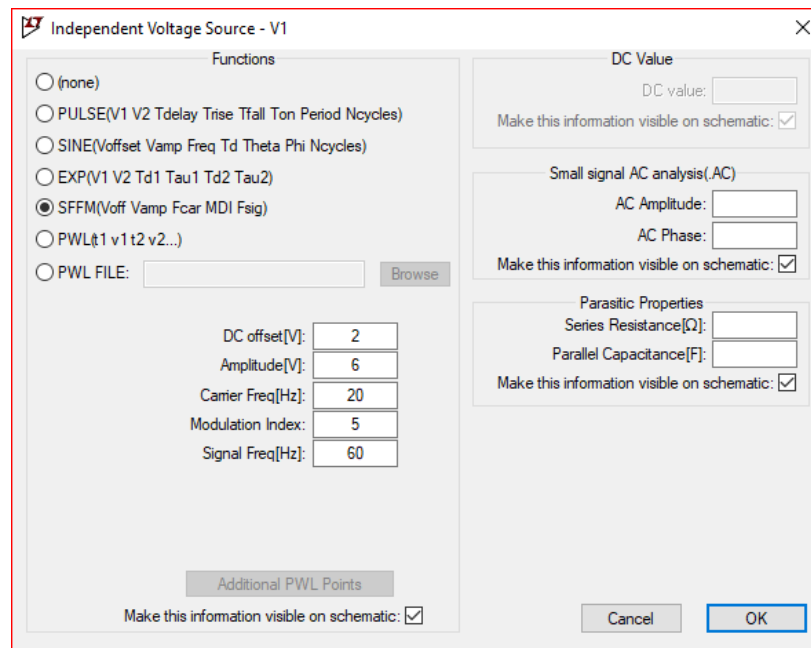
Ακολούθως η επεξεργασία προσομοίωσης παραμένει η ίδια με το προηγούμενο παράδειγμα.

Έξοδος κυκλώματος με την πηγή διαμόρφωσης απλής συχνότητας:



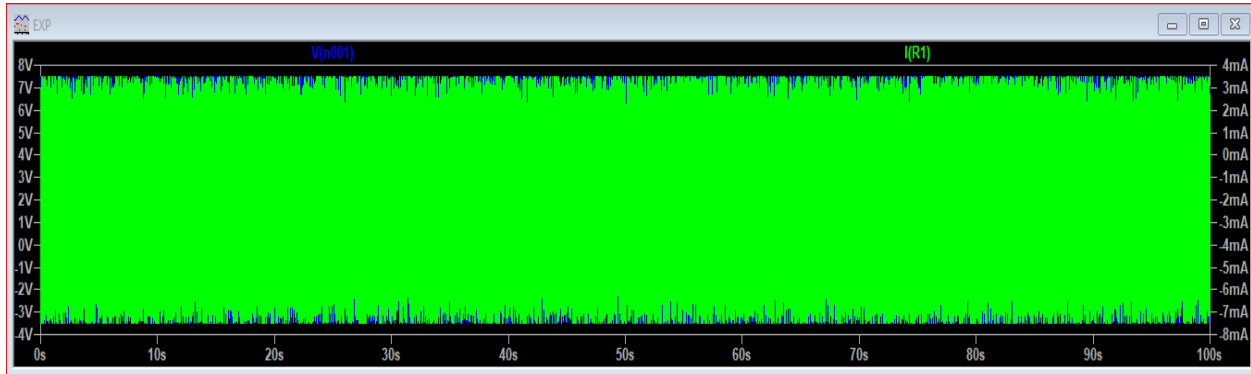
Εικόνα 69

Με μία μετατροπή στο παράθυρο της ανεξάρτητης πηγής αλλάζει η έξοδος κυκλώματος. Έχουν αφαιρεθεί η μικρές μονάδες millisecond για την ανταπόκριση του κυκλώματος στις κανονικές συχνότητες.



Εικόνα 70

Η έξοδος που παρουσιάζεται στις κανονικές συχνότητες:

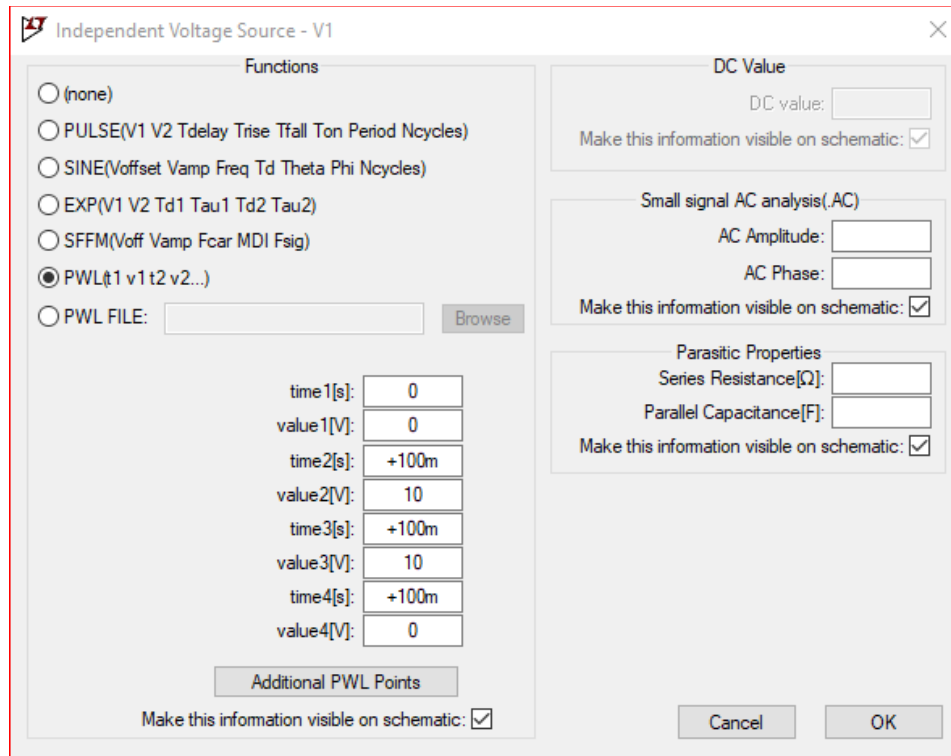


Εικόνα 71

vi) PWL Source (Piece-Wise Linear) - Τμηματική γραμμική πηγής

Η τμηματική γραμμική πηγή είναι μια συνάρτηση που χρήστης μπορεί να την χρησιμοποιήσει για να δημιουργήσει μία μορφή κύματος που αποτελεί από τμήματα ευθείας γραμμής που σχεδιάζεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων που ορίζετε. Δεδομένου ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όσα σημεία θέλει ο χρήστης. Επίσης μπορεί δημιουργήσει μια πολύ περίπλοκη μορφή κύματος. Η τμηματική γραμμική πηγή μπορεί να είναι πηγή τάσης ή πηγή ρεύματος.

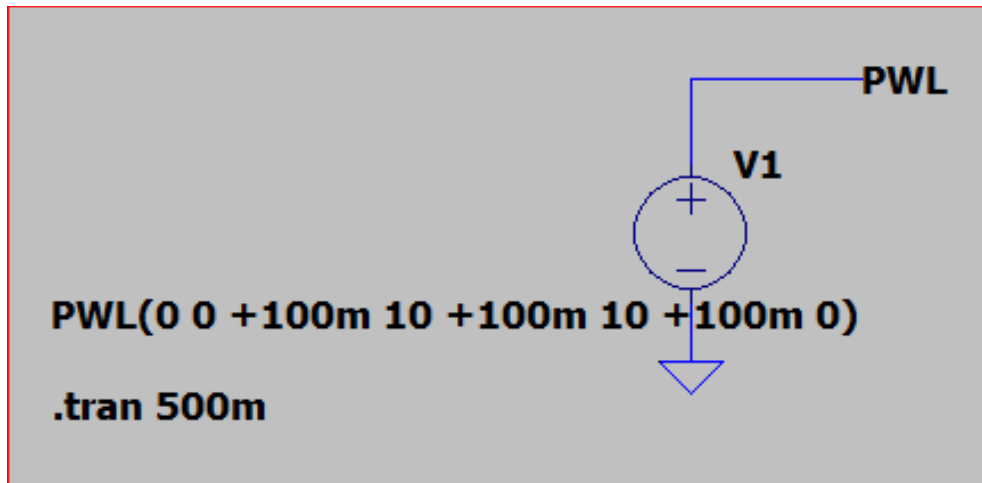
Η σύνταξη αυτής της πηγής είναι ευέλικτη και έχει πολλούς προαιρετικούς παραμέτρους. Οι απαιτούμενοι παράμετροι είναι τα δισδιάστατα σημεία που αποτελούνται από μια τιμή χρόνου και μια τιμή τάσης ή μια τιμή ρεύματος. Μπορούν να υπάρχουν πολλά από τα ζεύγη δεδομένων, αλλά οι τιμές του χρόνου πρέπει να είναι σε αύξουσα σειρά και τα διαστήματα μεταξύ των τιμών του χρόνου δεν χρειάζεται να είναι συμμετρικά.



Εικόνα 72: Παράθυρο δηλώσεων παραμέτρων ανεξάρτητης πηγής τάσης

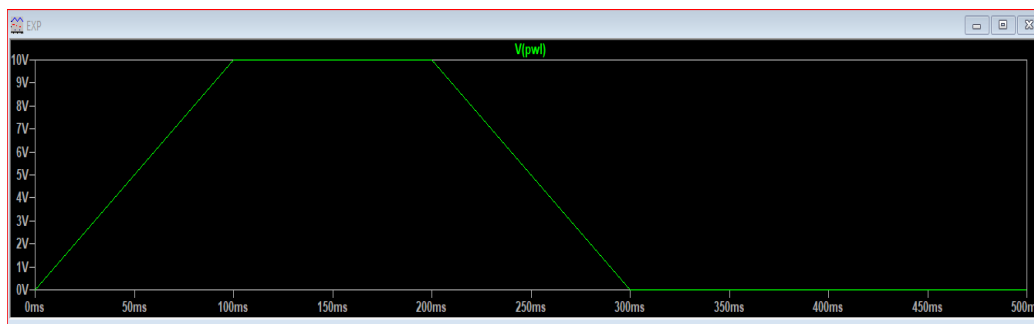
Ακολουθεί ένα μικρό παράδειγμα για εύκολη κατανόηση για τον χρήστη:

Έχουν δηλωθεί οι παράμετροι από το πάνω παράθυρο της ανεξάρτητης πηγής. Για αρχή να ξεκινάει με την πρώτη τιμή του χρόνου με παράμετρο 0 δευτερόλεπτα και ακολουθεί στην με τιμή τάσης 0 Volts. Στην συνέχεια για δεύτερη τιμή χρόνου στα 0,1 δευτερόλεπτα να συνεχίζεται το τμήμα γραμμικής ευθείας στα 10 Volts μέχρι 0,2 δευτερόλεπτα και να καταλήγει στα 0 Volts στα 0,3 δευτερόλεπτα με πλήρη πάροδο χρόνου στα 0,5 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 73

Ακολουθή η έξοδος του παραδείγματος:

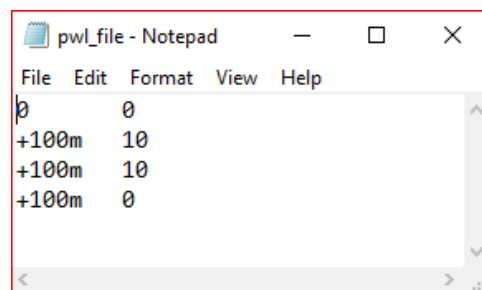


Εικόνα 74

Το LTSPICE επιτρέπει επίσης την ανάγνωση κυματομορφών PWL από αρχείο. Ο τρόπος ανάγνωσης μπορεί να γίνει από ένα .txt αρχείο.

Παράδειγμα :

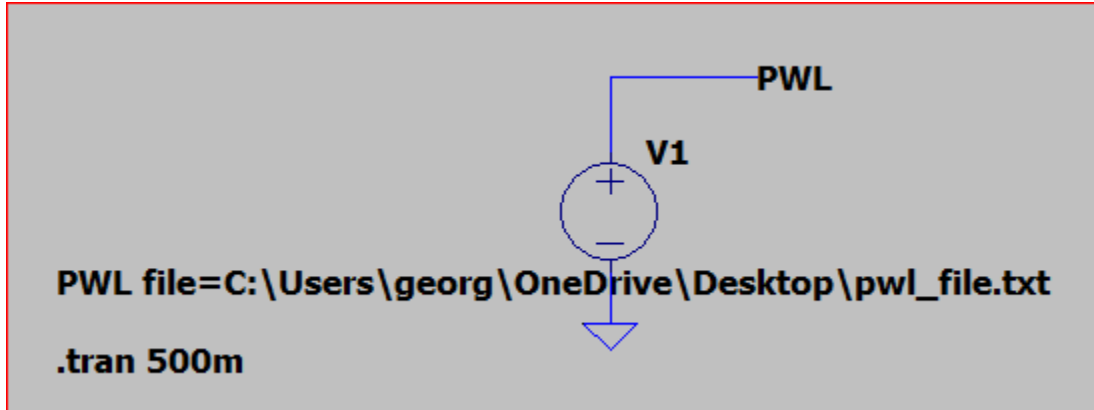
Αρχείο PWL αποθηκευμένο στην επιφάνεια εργασίας:



Εικόνα 75

Αριστερά είναι η δήλωση παραμέτρων της τιμής του χρόνου και δεξιά είναι η τιμές της πηγής τάσης.

Εμφάνιση των παραμέτρων.

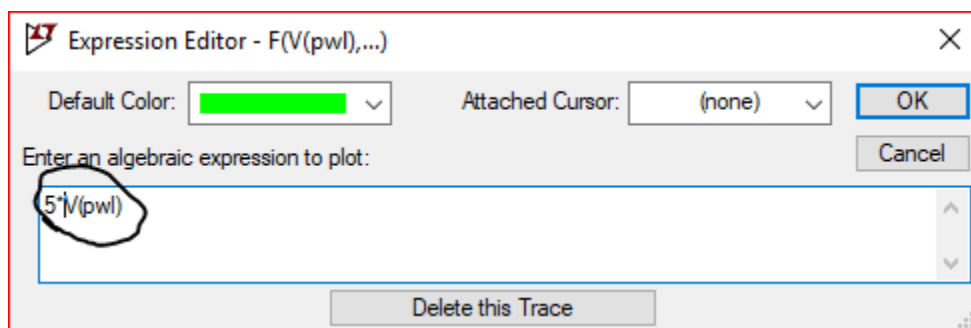


Εικόνα 76

Η έξοδος παραμένει η ίδια με το προηγούμενο παράδειγμα αφού οι παράμετροι δεν έχουν αλλάξει.

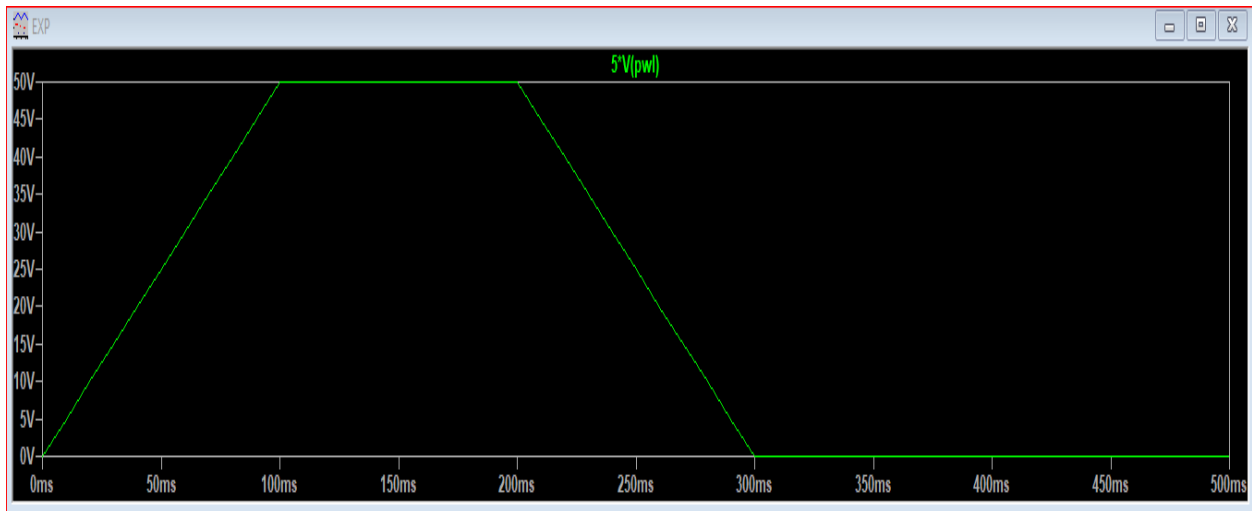
Σημείωση: Το εικονίδιο $V(pwl)$ στην γραφική παράσταση της εξόδου του πάνω παραδείγματος μπορεί ο χρήστης να το επεξεργαστεί εάν χρειαστεί όχι μόνο για μετονομασία αλλά και για μαθηματικούς σκοπούς όπως δείχνει στην παρακάτω εικόνα.

Στην εικόνα φαίνεται μία μαθηματική πράξη.



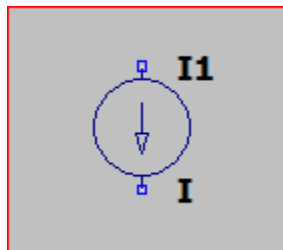
Εικόνα 77

Έξοδος της μαθηματικής πράξης:



Εικόνα 78

Για πηγές ρεύματος:



Εικόνα 79

Οι δηλώσεις παραμέτρων που έχουν αναφερθεί πιο πάνω για τις πηγές τάσης ισχύουν και για τις πηγές ρεύματος. Η διαφορά τους είναι πως για τα κυκλώματα που θα έχουν πηγή ρεύματος το βέλος πρέπει να τοποθετηθεί προς την κατεύθυνση της ροής του συμβατικού ρεύματος. Αυτό ισχύει για όλες τις τρέχουσες πηγές συμπεριλαμβανόμενων των AC και DC.

Παρακάτω ακολουθούν κάποιες εργαστηριακές ασκήσεις ηλεκτρονικών προσομοιωμένα στο λογισμικό LTSPICE.

Εργαστηριακή άσκηση 1

Κύκλωμα ανάλυσης διόδου

Η διάδος είναι ένα μη γραμμικό στοιχείο. Περιορίζει την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος, δηλαδή επιτρέπει στο ρεύμα να περάσει από μία κατεύθυνση και δεν αφήνει την ροή του ρεύματος να περάσει από την αντίθετη κατεύθυνση.

- Μία ιδανική διάδος στα άκρα της ορθής πόλωσης έχει ως αποτέλεσμα μηδέν αντίσταση , άρα έχει άπειρο ρεύμα και κατά την αντίστροφη πόλωση έχει άπειρη αντίσταση και μηδενικό ρεύμα. Στην περίπτωση που η ιδανική διάδος είναι ορθά πολωμένη δηλαδή διαπερνά η ροή του ρεύματος από την θετική κατεύθυνση τότε η διάδος συμπεριφέρεται σαν ανοιχτός διακόπτης.
- Σε περίπτωση αντίστροφης πόλωσης της ιδανικής διόδου τότε η συμπεριφορά της θα είναι σε λειτουργία αποκοπής, δρα σαν κλειστός διακόπτης.

Σε κύκλωμα που περιέχει πραγματική διάοδο , για να λειτουργήσει σταθεροποιητικά πρέπει να διαρρέετε από ένα ελάχιστο ρεύμα. Επίσης δεν πρέπει να ξεπερνά τα όρια της ισχύς της καθώς και τα όρια του μέγιστου ρεύματος της. Το ρεύμα περιορίζεται συνήθως από μία αντίσταση.

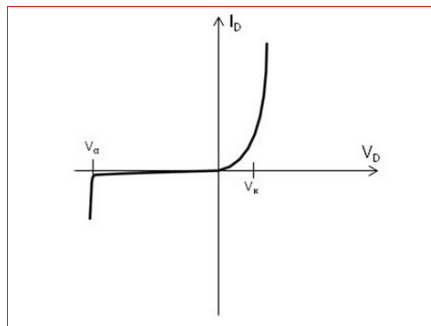
Οι περισσότεροι διάοδοι είναι κατασκευασμένες από υλικά ημιαγωγών όπως πυρίτιο ή γερμάνιο.



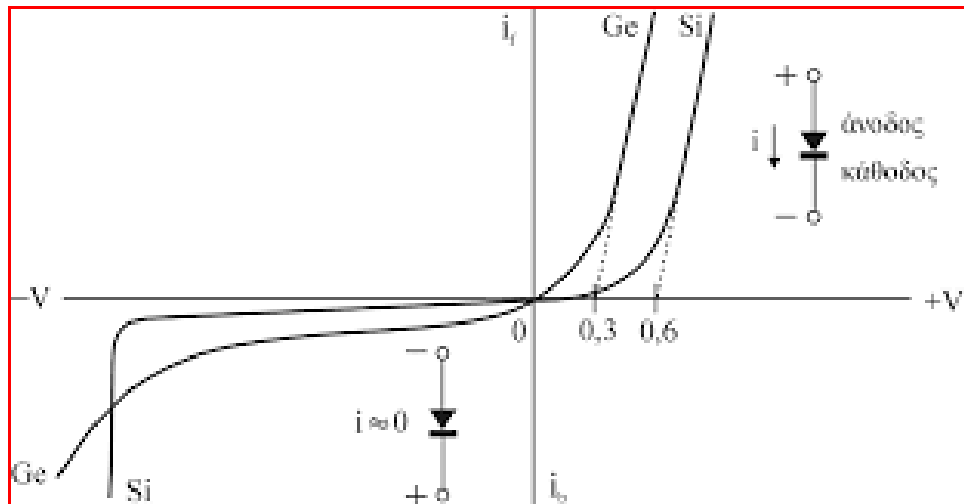
Εικόνα 80: Δίοδος Γερμανίου (Ge)



Εικόνα 81: Δίοδος πυριτίου (Si)

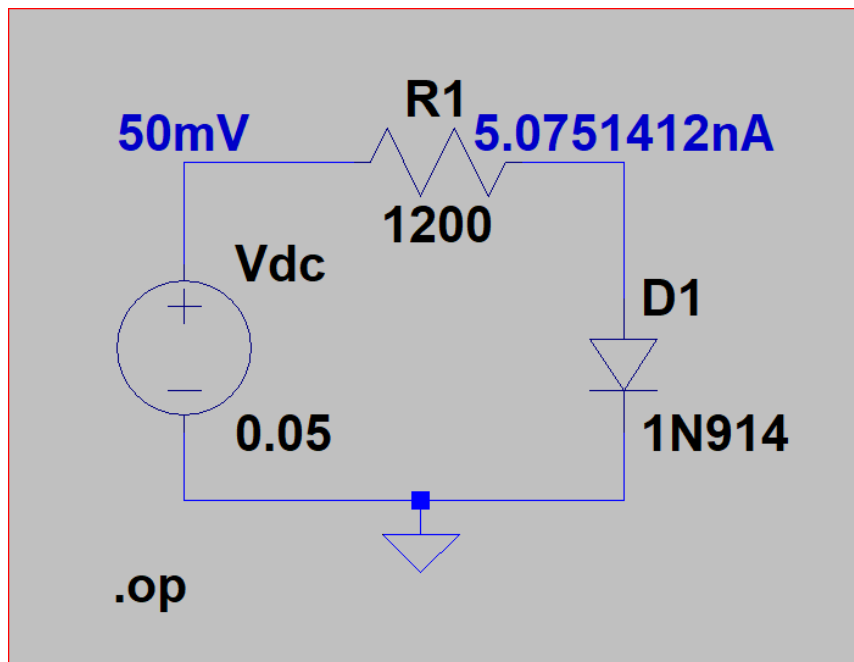


Εικόνα 82: Χαρακτηριστική ιδανικής διόδου



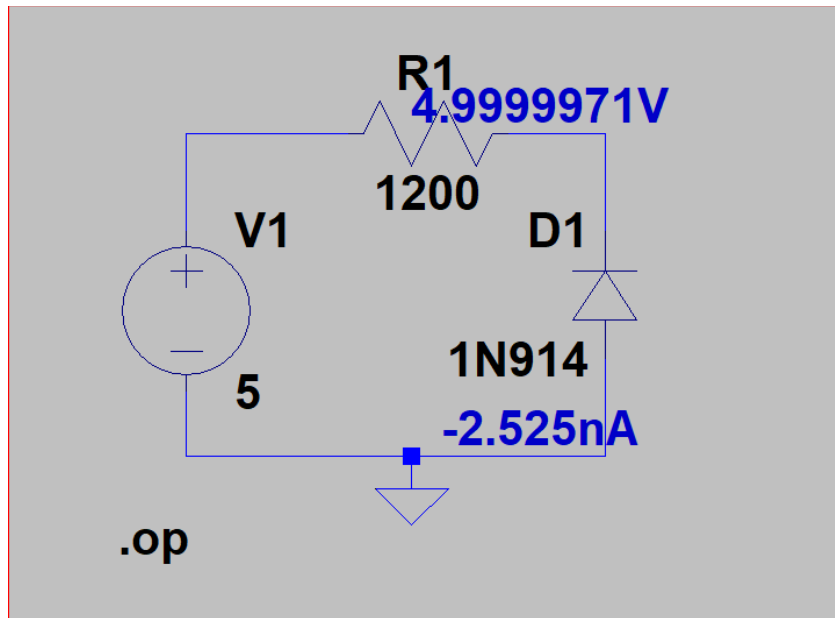
Εικόνα 83: Χαρακτηριστική ιδανικής διόδου γερμανίου (Ge) και πυριτίου (Si) V - I

Πραγματοποίηση του παρακάτω κυκλώματος με δίοδο πυριτίου 1N914 σε ορθή πόλωση.



Εικόνα 84

Πραγματοποίηση του παρακάτω κυκλώματος με δίοδο πυριτίου 1N914 σε ανάστροφη πόλωση.



Εικόνα 85

Η χρησιμοποίηση ανάλυσης συνεχούς ρεύματος σε σημείο λειτουργίας (DC op). Δόθηκαν τιμές για την τάση εισόδου Vdc και με την εντολή προσομοίωσης του κυκλώματος πάρθηκαν και τυπώθηκαν οι ακόλουθες τιμές ρεύματος της διόδου σε ορθή πόλωση και σε ανάστροφη πόλωση. Οι τιμές ρεύματος βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα.

Ορθή πόλωση	<u>Vdc</u> (V)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
	<u>If(A)</u>	5.07 n	20.36 n	204.4 0n	1.79 μ	12.3 7μ	46.05 μ	100.06 μ	164. 58μ	234.5 1μ
Ανάστρο φη Πόλωση	<u>Vdc</u> (V)	5	10	25	40	55	70	85	100	115
	<u>If(A)</u>	2.53 n	2.53n	2.545 n	2.56 n	2.57 n	2.59 n	2.605 n	2.62 n	2.635 n

Αποτελέσματα της ανάλυσης DC op.

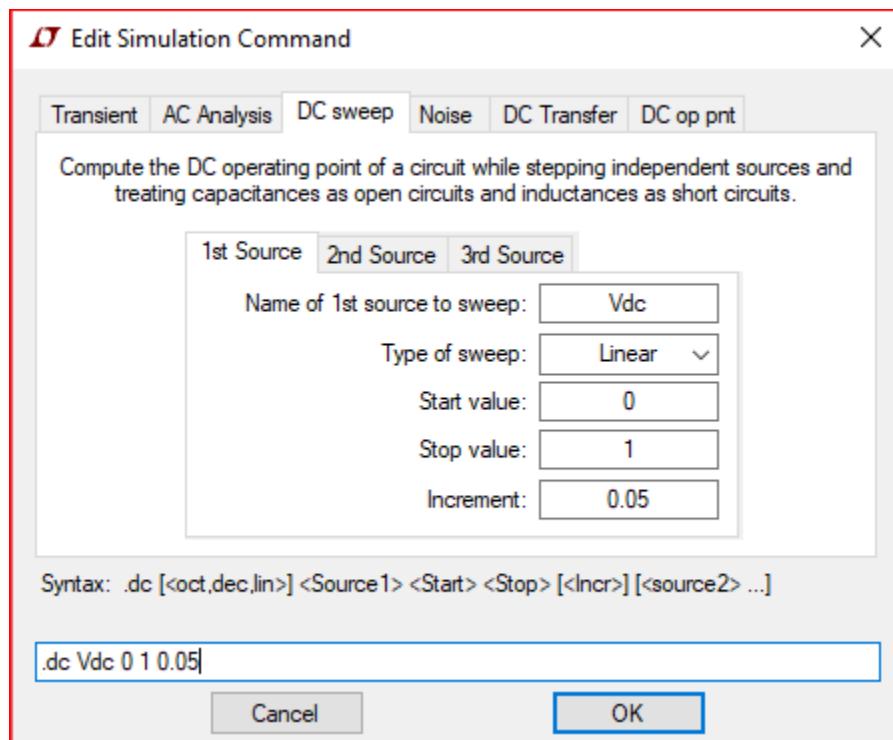
```
* C:\Users\georg\OneDrive\Documents\LTspiceXVII\Draft1.asc

--- Operating Point ---

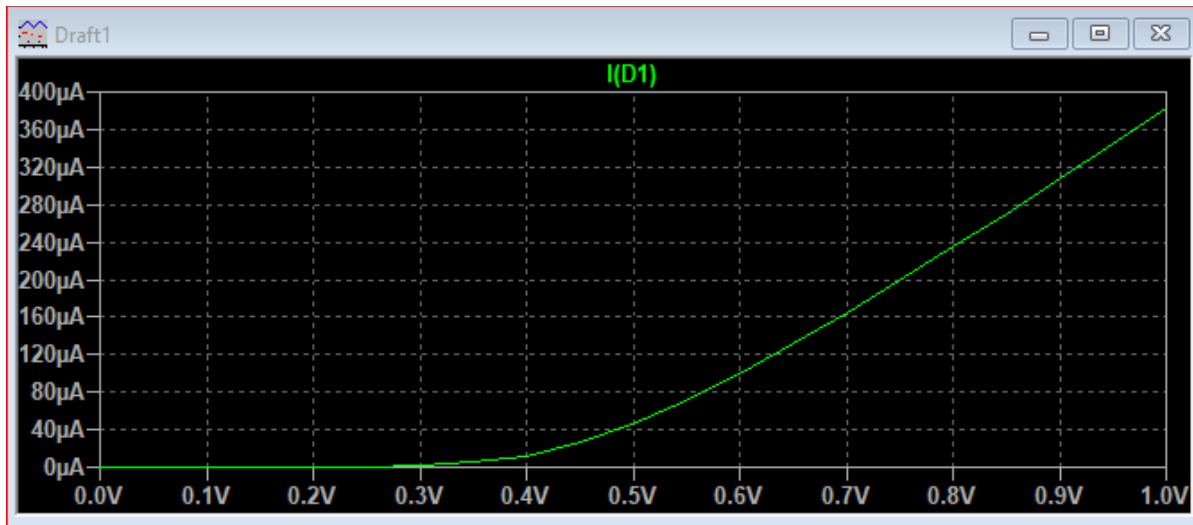
V(n001) :      0.05      voltage
V(n002) :      0.0499939 voltage
I(D1) :       5.07514e-009 device_current
I(R1) :      -5.07514e-009 device_current
I(Vdc) :      -5.07514e-009 device_current
```

Εικόνα 86

Στην συνέχεια για επαλήθευση των παραπάνω αποτελεσμάτων ορθής πόλωσης του συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιήθηκε η εντολή DC sweep ανάλυση, δίνοντας μεταβλητή την τάση εισόδου Vdc , με επιλογή τύπου σάρωση(Type of sweep)- γραμμική(Linear) , με αρχική τιμή (Start Value): 0V, με τελική τιμή(Stop Value): 1V και με αύξηση βηματισμού(Increment): 0.05V.

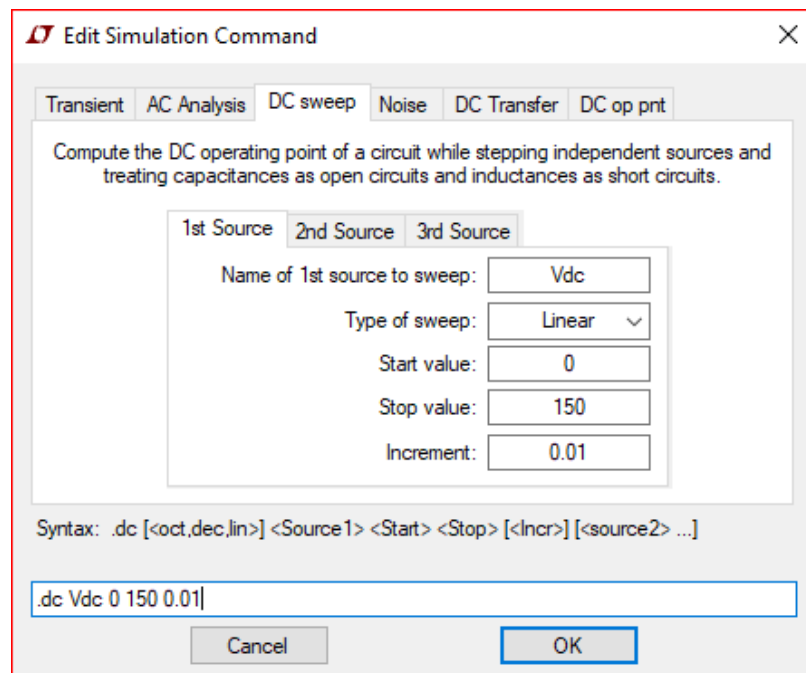


Εικόνα 87: Παράμετροι προσομοίωσης κυκλώματος σε ορθή πόλωση



Εικόνα 88: Συμπεριφορά διόδου στην ορθή πόλωση

Αντιθέτως, για την συμπεριφορά της διόδου κατά την ανάστροφη πόλωση δόθηκαν οι παράμετροι στο DC sweep, για αρχική τιμή: 0V, για τελική τιμή :150V και με αύξηση βηματισμού 0,01. Επίσης, δόθηκαν οι παράμετροι μεγαλύτερη τιμές στην τελική τιμή της αναστροφής της διόδου με σκοπό την παρατήρηση συμπεριφορά της στο όριο της διάσπασης, όπου για την συγκεκριμένη δίοδο το όριο της είναι 75V.



Εικόνα 89: Παράμετροι προσομοίωσης κυκλώματος σε ανάστροφη πόλωση



Εικόνα 90: Συμπεριφορά διόδου σε ανάστροφη πόλωση

Εργαστηριακή άσκηση 2

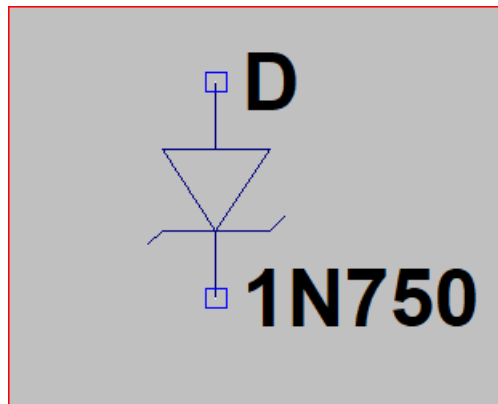
Δίοδος Zener

Οι διόδοι Zener έχουν εφευρεθεί κυρίως για την αντικατάσταση των απλών διόδων στην περιοχή κατάρρευσης, οι οποίες δεν μπορούν να λειτουργήσουν σωστά στην συγκεκριμένη περιοχή λόγω κινδύνου καταστροφής τους. Η χρησιμότητα των διόδων αυτών είναι η σταθεροποίηση της τάσης, κυρίως στην ανάστροφη πόλωση, ενώ παράλληλα ενεργεί σαν σταθεροποιητής τάσης, όπου συγκρατεί την τάση στα άκρα σταθερή, ανεξαρτήτως των μεταβολών του ρεύματος που την διαρρέει. Αντίθετα, στην ορθή πόλωση η διάοδος Zener λειτουργεί μόνο σαν μια απλή διάοδος. Η ενεργοποίηση της διόδου Zener δημιουργείται από την αύξηση της ανάστροφης τάσης που αυξάνει το ηλεκτρικό πεδίο με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να κινούνται με μεγάλη ταχύτητα και να συμβάλει μέσα στην διάοδο με αρκετά μεγάλη κινητική ενέργεια. Με το φαινόμενο αυτό στα όρια της διόδου, τα ηλεκτρόνια σπάνε τους δεσμούς των ατόμων του ημιαγωγού και απελευθερώνεται ο μεγάλος αριθμός νέων ηλεκτρονίων που βοηθά στην δημιουργία ενός ισχυρού ρεύματος. Η περιοχή τάσεων και ρευμάτων όπου συμβαίνει το φαινόμενο Zener ονομάζεται περιοχή διάσπασης (breakdown) της διόδου.

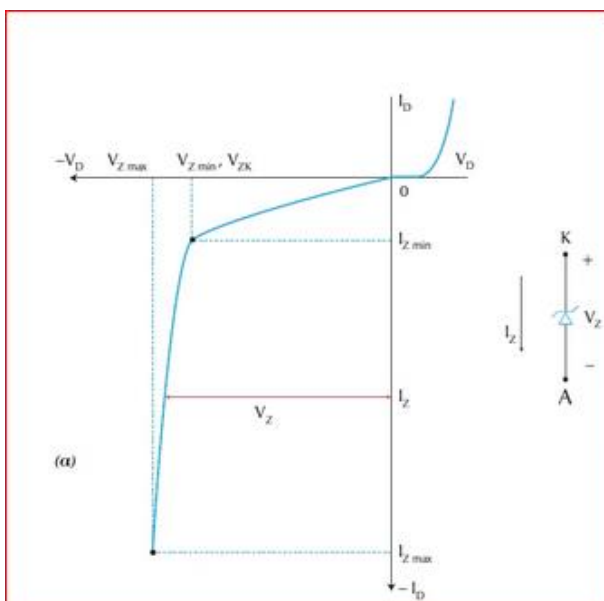


Εικόνα 90: Δίοδος Zener

Συμβολισμός της διόδου Zener 1N750 στο πρόγραμμα LTspice:



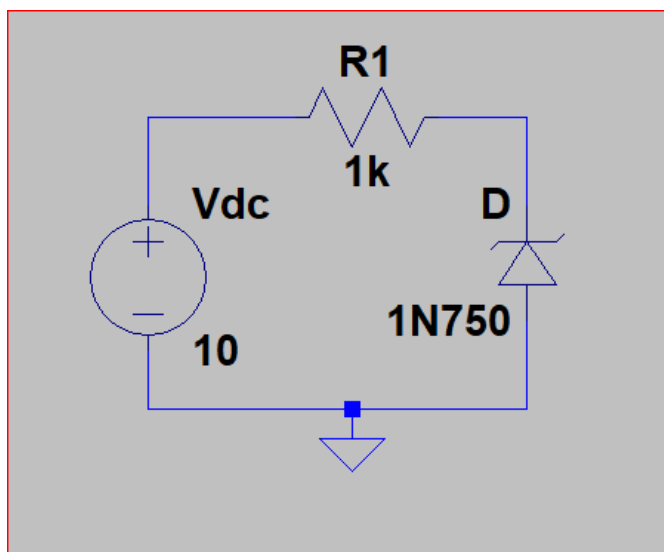
Εικόνα 91



Εικόνα 91: Χαρακτηριστική καμπύλη της διόδου Zener

Πραγματοποίηση του παρακάτω κυκλώματος με δίοδο Zener 1N750 σε ανάστροφη πόλωση.

Μετρήθηκαν και πάρθηκαν τιμές για την χάραξη της χαρακτηριστικής καμπύλης της διόδου Zener χωρίς φορτίο και μόνο από την ανάστροφη πόλωση.

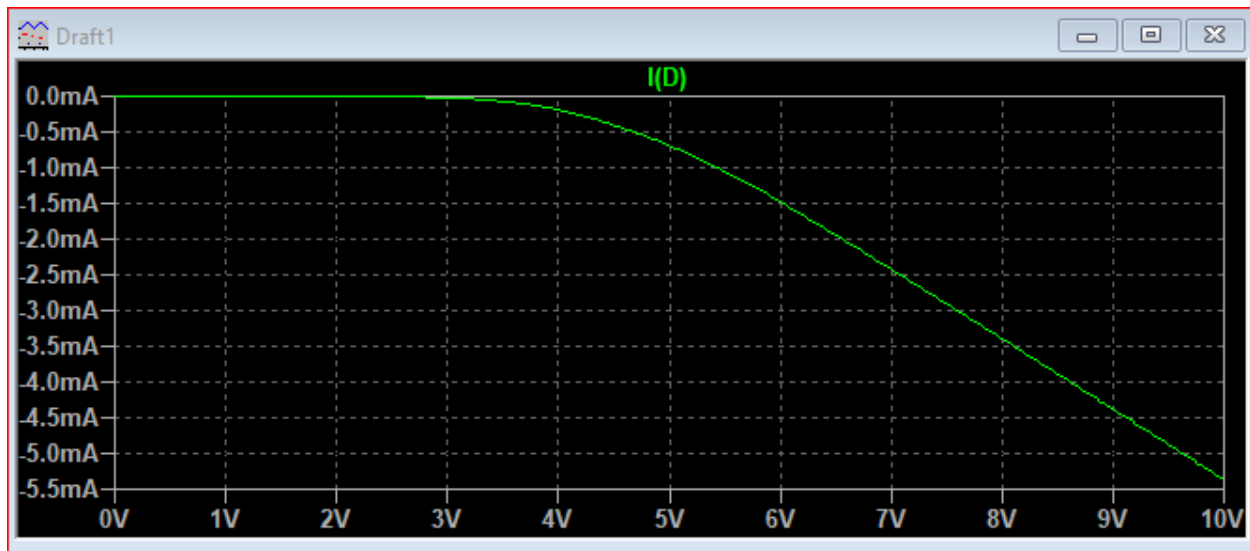


Εικόνα 92

Ανάστροφη πόλωση	Vdc(V)	1	2	3	4	5	6	7	8
	Iz(A)	133.5n	1.8μ	23.08μ	195.08μ	700,3μ	1,48m	2.43m	3.40m

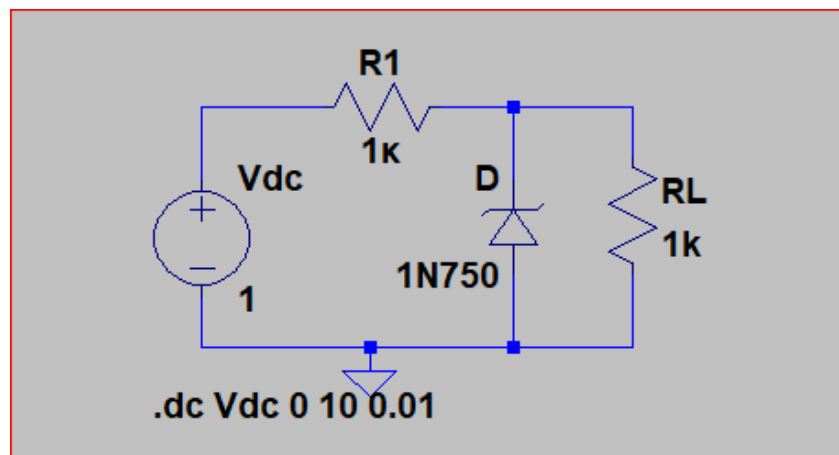
Σημείωση: Το πρόσημο των πιο πάνω τιμών είναι αρνητικό λόγο της φοράς ροής του ρεύματος.

Συμπεριφορά διόδου Zener στην ανάστροφη πόλωση χωρίς φορτίο.



Εικόνα 93

Στην συνέχεια τοποθετήθηκε ένα μεταβλητό φορτίο στην έξοδο.



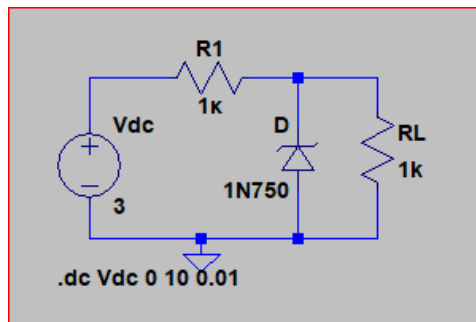
Εικόνα 94

Ανάστροφη	Vdc(V)	1	2	3	4	5	6	7	8
Πόλωση	Iz(A)	133.54n	1.84μ	23.08μ	318.9μ	163.24μ	902.4m	1.6	2.46

Συμπέρασμα:

Συγκρίνοντας τους δύο πίνακες των κυκλωμάτων της διόδου Zener με φορτίο και χωρίς φορτίο σημειώνεται πως από τα 0V μέχρι 3V η κατάσταση του ρεύματος είναι η ίδια. Η αλλαγή συμπεριφοράς της διόδου συμβαίνει από τα 4V και πάνω. Στις παρακάτω χαρακτηριστικές με τάση εισόδου με 3V, με 5V, με 7V η συμπεριφορά της διόδου Zener δεν αλλάζει καθόλου ούτε αν και το φορτίο να είναι μεγάλο.

Κύκλωμα με είσοδο τάσης 3V:



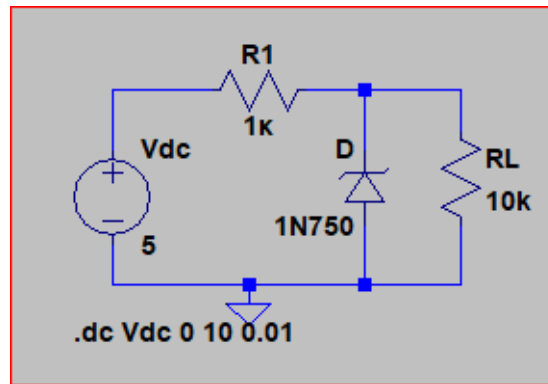
Εικόνα 95

Χαρακτηριστική καμπύλη:



Εικόνα 96

Κύκλωμα με είσοδο τάσης 5V και με φορτίο $R_L=10k$:



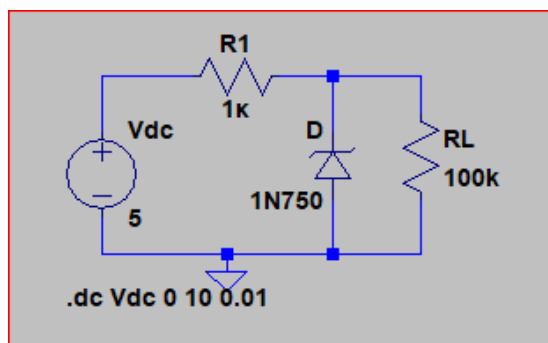
Εικόνα 97

Χαρακτηριστική καμπύλη:



Εικόνα 98

Κύκλωμα με είσοδο τάσης 7V και με φορτίο $R_L=100k$:



Εικόνα 99

Χαρακτηριστική καμπύλη:



Εικόνα 100

Σημείωση: Από τις γραφικές φαίνεται η αλλαγή της διόδου Zener συμβαίνει από 4.7V και μετά, γιατί η διάταξη κατάρρευσης της συγκεκριμένης διόδου είναι $V_{breakdown} = 4.7V$. Δηλαδή μετά από κάποια χαρακτηριστική τιμή τάσης την οποία ονομάζουμε τάση κατάρρευσης έχουμε απότομη αύξηση των ελεύθερων φορτίων και απότομη αύξηση του ρεύματος. Σε μία κανονική δίοδο εφαρμοσθεί ανάστροφη πόλωση τάσης μεγαλύτερη από την τάση κατάρρευσης, η δίοδος καταστρέφεται. Ο περιορισμός γίνεται στα όρια σύμφωνα με την μέγιστη ισχύ που δίνουν οι προδιαγραφές της διόδου.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά για μια δίοδο Zener, που λειτουργεί πάντα πολωμένη ανάστροφα:

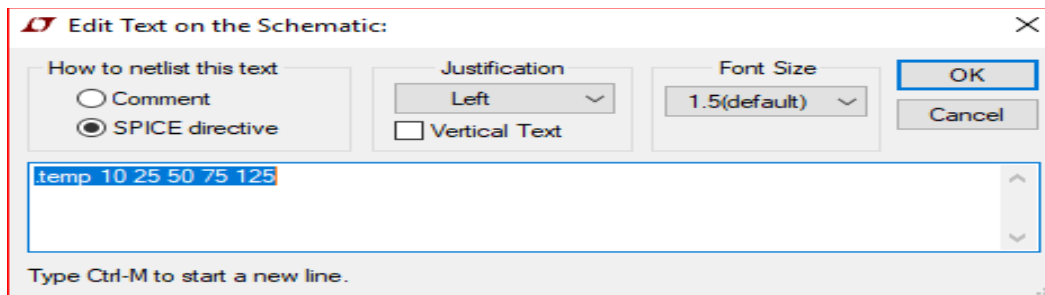
- Η τάση Zener, η τιμή της οποίας κυμαίνεται από 2,4V έως και 200V.
- Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς.
- Η δυναμική αντίσταση της διόδου R_z .
- Ο συντελεστής θερμοκρασίας S_z , ο οποίος δηλώνει το ρυθμό μεταβολής της τάσης V_z , με τη θερμοκρασία.

Μέτρηση θερμοκρασίας της διόδου Zener:

Προστέθηκε παράμετρος θερμοκρασίας για την μέτρηση θερμοκρασίας της διόδου.

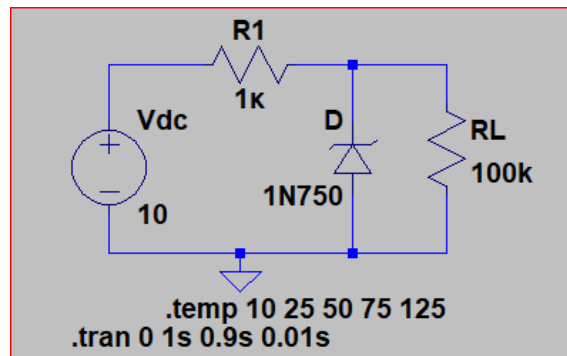
Ο θερμικός συντελεστής καθορίζει το ποσοστό αλλαγής της τάσης Zener κάθε αλλαγή θερμοκρασίας σε *C. Με την βοήθεια του προγράμματος γίνεται ανάλυση θερμοκρασίας και την συμπεριφορά της διόδου.

Παράμετρος της θερμοκρασία για 10 20 50 75 125 βαθμούς κελσίου:



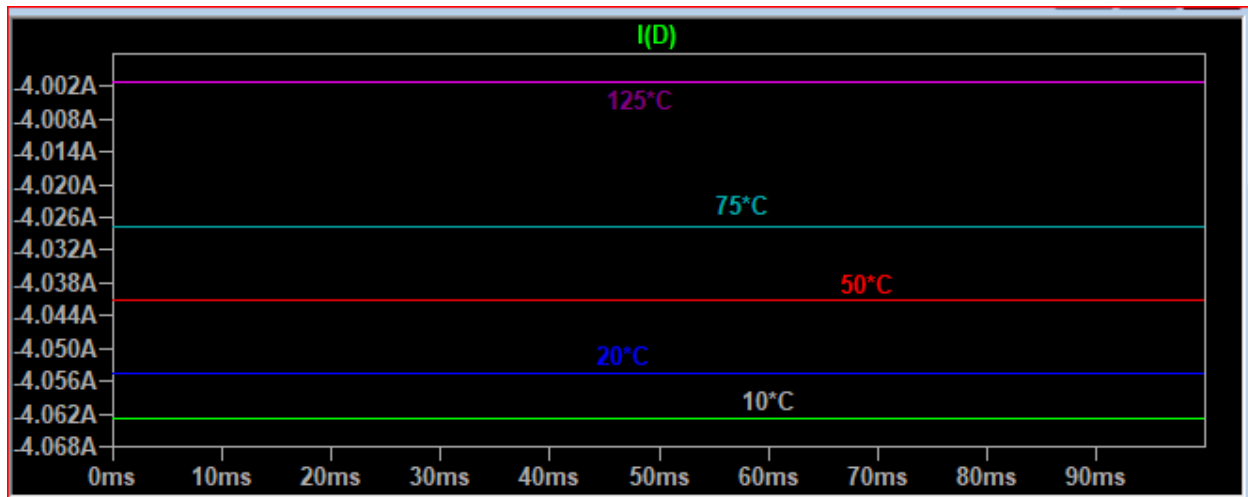
Εικόνα 101

Κύκλωμα:



Εικόνα 102

Αποτελέσματα προσομοίωσης της θερμοκρασίας διόδου Zener:



Εικόνα 103

Εργαστηριακή άσκηση 3:

Τρανζίστορ Διπολικής Ένωσης

Το τρανζίστορ αλλιώς και ως κρυσταλλοτρίοδος ή κρυσταλλολυχνία. Το τρανζίστορ αποτελείται από ένα κρύσταλλο με τρεις περιοχές εμπλουτισμένες από οπές και ηλεκτρόνια. Οι τρεις περιοχές ενός τρανζίστορ ονομάζονται ανάλογα με την λειτουργία τους , εκπομπός, βάση και συλλέκτης. Ο εκπομπός είναι μια έντονη εμπλουτισμένη περιοχή , η βάση είναι μια περιοχή λιγότερο εμπλουτισμένη και πολύ λεπτή. Το πάχος της βάσης επιτρέπει στα περισσότερα φορτία τα οποία ξεκινούν από τον εκπομπό και φθάνουν στον συλλέκτη. Το επίπεδο του συλλέκτη είναι χαμηλότερο από αυτό του εκπομπού και από αυτό της βάσης αλλά , στον συλλέκτη καταναλώνεται μεγαλύτερη ισχύς από ότι στη βάση και τον εκπομπό.

Τα διπολικά τρανζίστορ επαφής κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Τα γενικής χρήσεως μικρού σήματος.
2. Τα ισχύος.
3. Τα RF(ραδιοσυχνότητας-μικροκυμάτων).

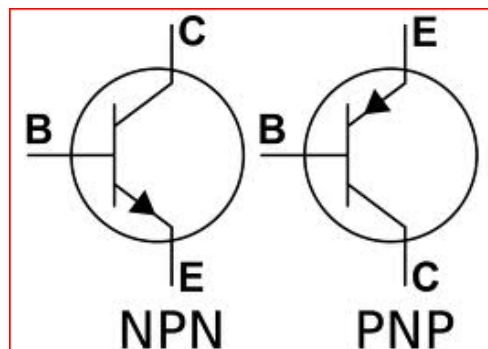
Τα γενικής χρήσεως χρησιμοποιούνται για χαμηλές ή μεσαίες ισχύος ενισχυτές ή σε κυκλώματα διακόπτων. Τα τρανζίστορ ισχύος χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερα ρεύματα για

παράδειγμα στα στερεοφωνικά, στο σύστημα ενισχυτή ισχύος. Τα RF είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν σε υπερβολικά υψηλές συχνότητες και είναι κοινή η χρήση τους σε διάφορα συστήματα επικοινωνιών καθώς επίσης σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων.

Δύο κατηγορίες τρανζίστορ:

- P-N-P(εκπομπός-βάση-συλλέκτης)
- N-P-N(εκπομπός-βάση-συλλέκτης)

Η λειτουργία των δύο τρανζίστορ είναι ίδια με την διαφορά πως ο φορέας του ρεύματος από τον εκπομπό προς τον συλλέκτη στο τρανζίστορ **PNP** είναι η οπή, ενώ ο φορέας του ρεύματος από τον εκπομπό προς τον συλλέκτη στο τρανζίστορ **NPN** είναι το ηλεκτρόνιο. Στο κύκλωμα του τρανζίστορ **NPN** το ρεύμα των ηλεκτρονίων ρέει από τον εκπομπό προς τον συλλέκτη εσωτερικά του κρυστάλλου και παριστάνεται με το βέλος να δείχνει την αντίθετη πορεία των ηλεκτρονίων. Στο κύκλωμα του τρανζίστορ **PNP** το ρεύμα των οπών ρέει από τον εκπομπό προς τον συλλέκτη και παριστάνεται με το βέλος να δείχνει την πορεία των οπών.



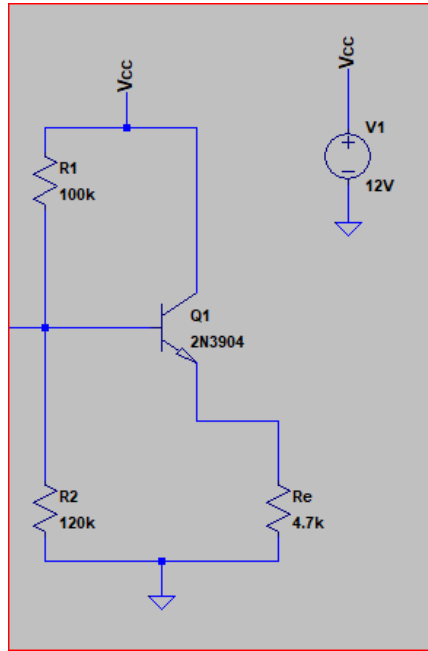
Εικόνα 104

Πραγματοποίηση κυκλώματος :Ενισχυτή Κοινού Συλλέκτη:

Στο κύκλωμα θα χρησιμοποιηθεί το τρανζίστορ 2N3904.

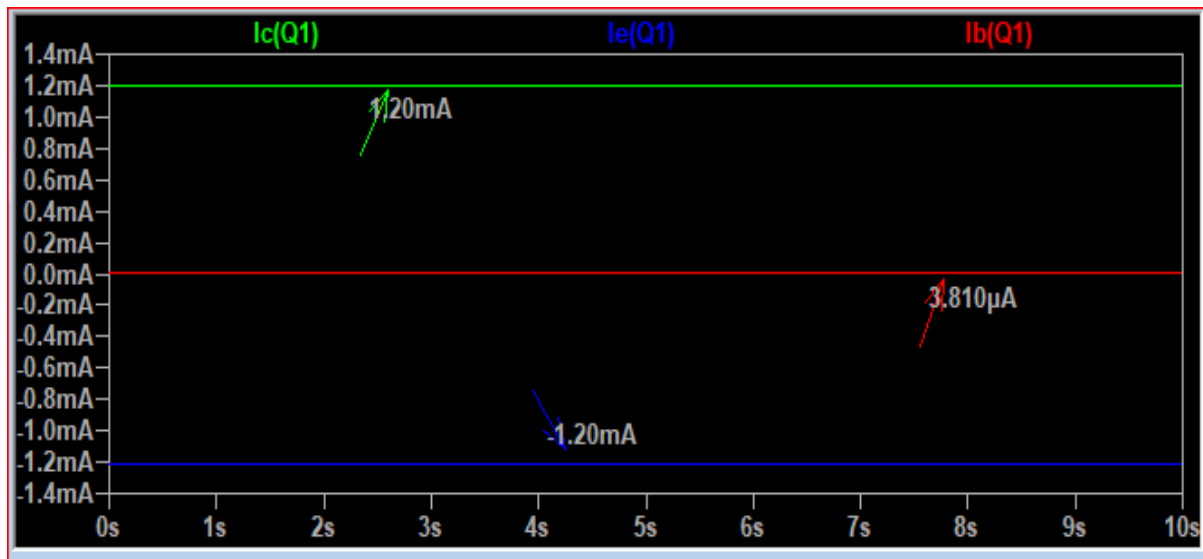
Πρώτο Στάδιο: Υπολογισμός DC μεγέθη: I_e , I_c , I_b , V_b , V_c , V_{ce} στο σημείο Q.

Κύκλωμα χωρίς ημιτονοειδές σήμα συχνότητάς στην είσοδο και χωρίς φορτίο R_L στην έξοδο.



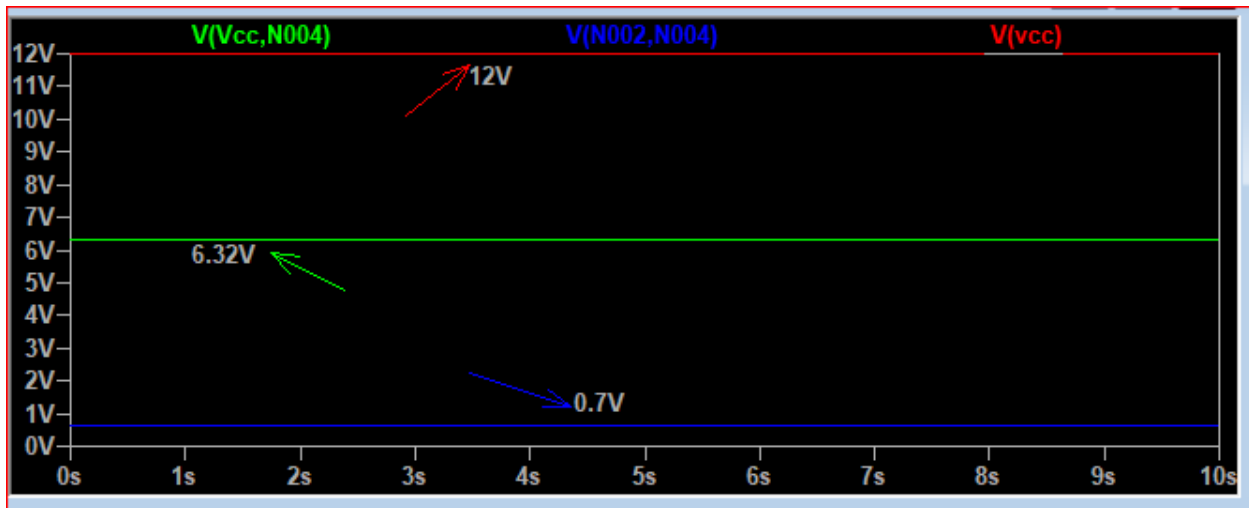
Εικόνα 105:Κύκλωμα ενισχυτή κοινού συλλέκτη

Χαρακτηριστική ρευμάτων του Εκπομπού(Ie), Βάσης(Ib) και Συλλέκτη(Ic).



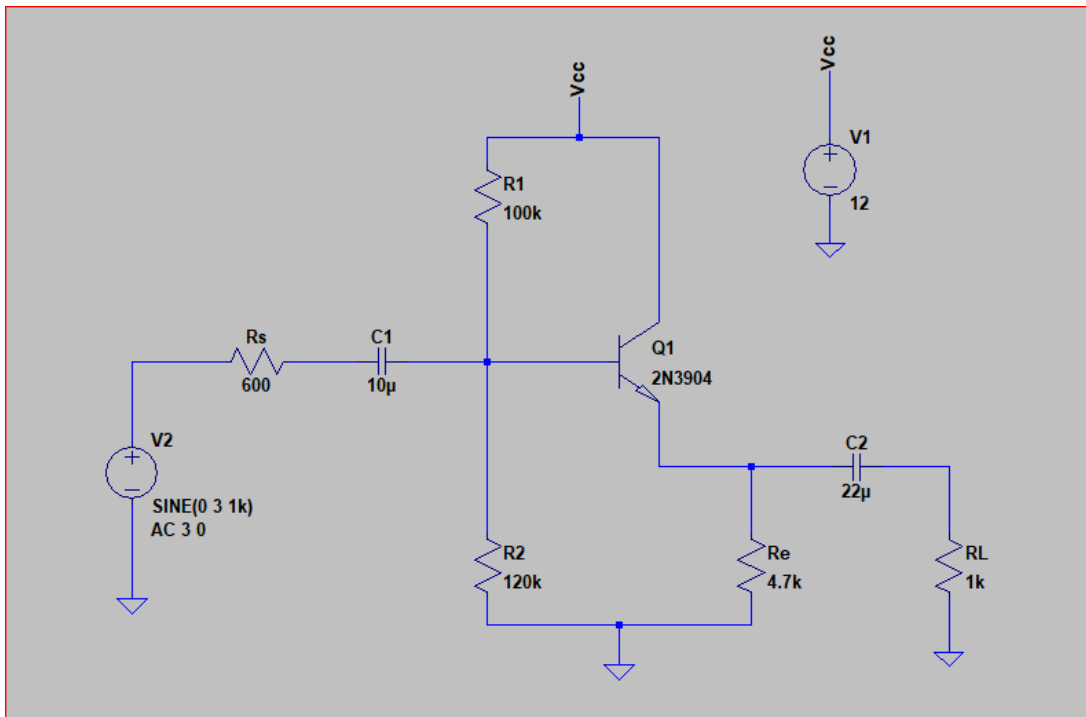
Εικόνα 106

Χαρακτηριστική τάσεων στα σημεία του τρανζίστορ V_{ce}, V_c, V_b .



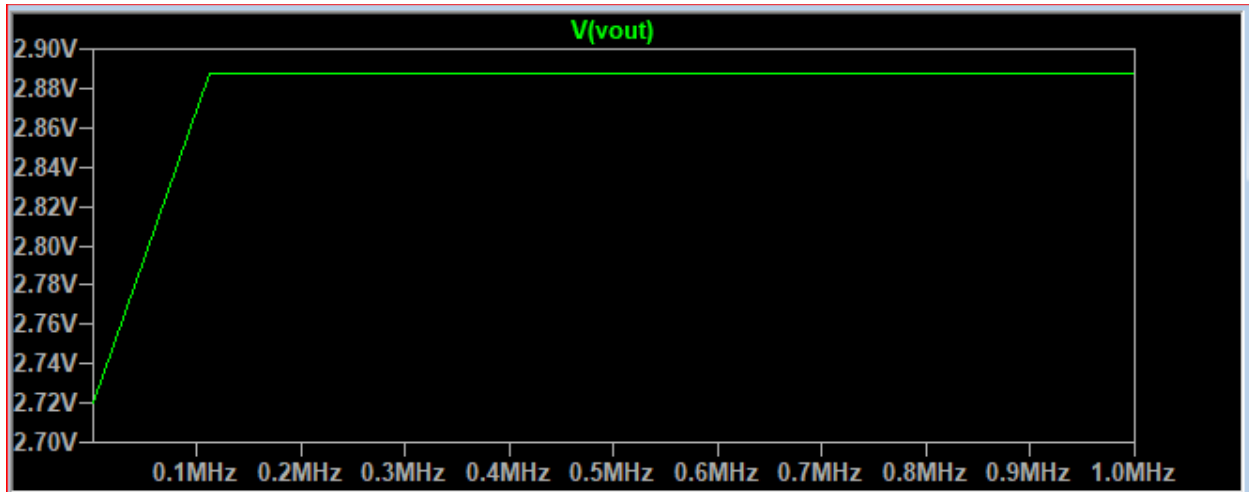
Εικόνα 107

Δεύτερο Στάδιο: Τοποθέτηση τάσης στην είσοδο με ημιτονοειδές σήμα συχνότητας $f = 1\text{kHz}$ και με πλάτος $V_{p-p} = 3\text{V}$, αντίσταση εισόδου $R_s = 600\Omega$. Τροφοδοσία στην $+V_{cc} = 12\text{V}$.



Εικόνα 108

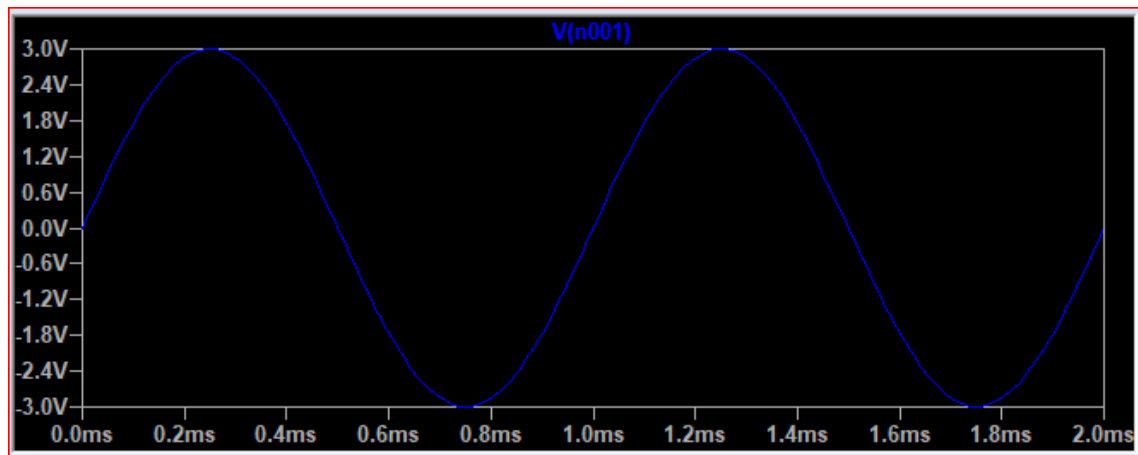
Χάραξη καμπύλης απόκλισης του ενισχυτή και εύρος ζώνης του ενισχυτή για την περιοχή συχνοτήτων από 20Hz μέχρι 1MHz με βήμα δειγματοληψίας 10 σημείων ανά δεκάδα.
Χρησιμοποίηση AC Analysis.



Εικόνα 109

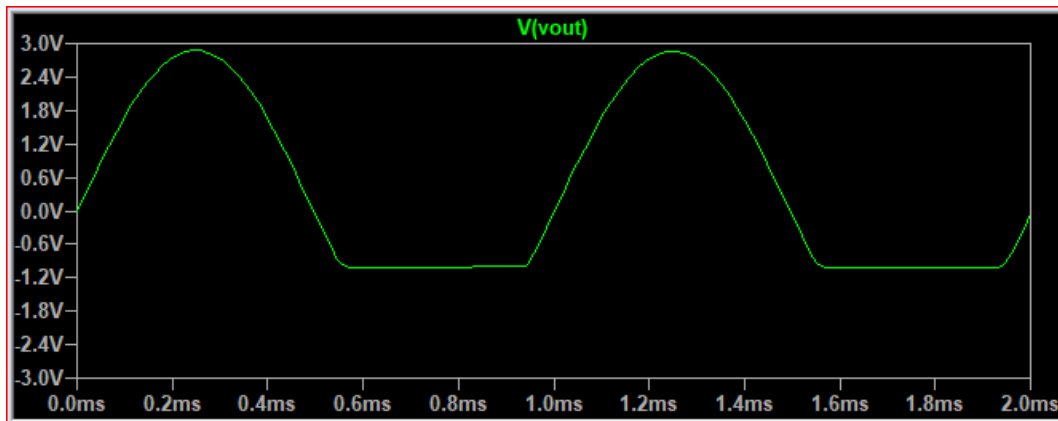
Για υπολογισμό του κέρδους τάσης εκτελείται η παροδική ανάλυση (Transient Analysis) με χρόνο εκτέλεσης 3msec.

Χαρακτηριστική καμπύλη της τάσης εισόδου:



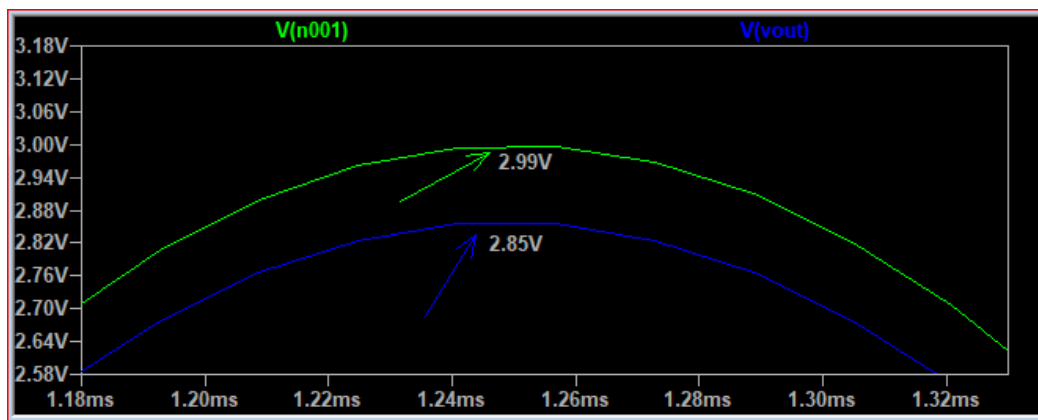
Εικόνα 110

Χάραξη καμπύλης της τάσης εξόδου:



Εικόνα 111

Κυματομορφή τάσης εισόδου και εξόδου.



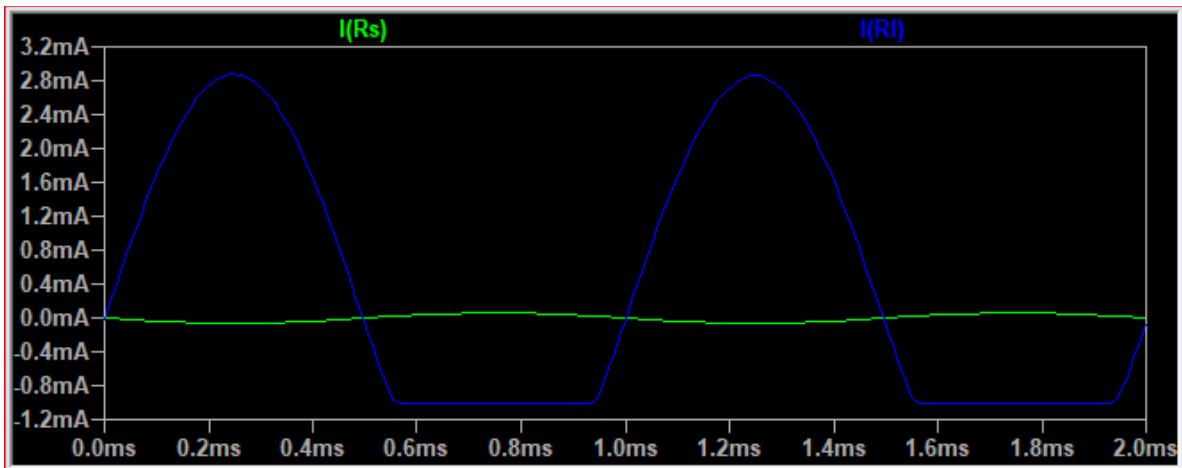
Εικόνα 112

Τύπος κέρδος τάσης: $A_v = V_{out} / V_{in}$

$$A_v = 2.85V / 2.99V$$

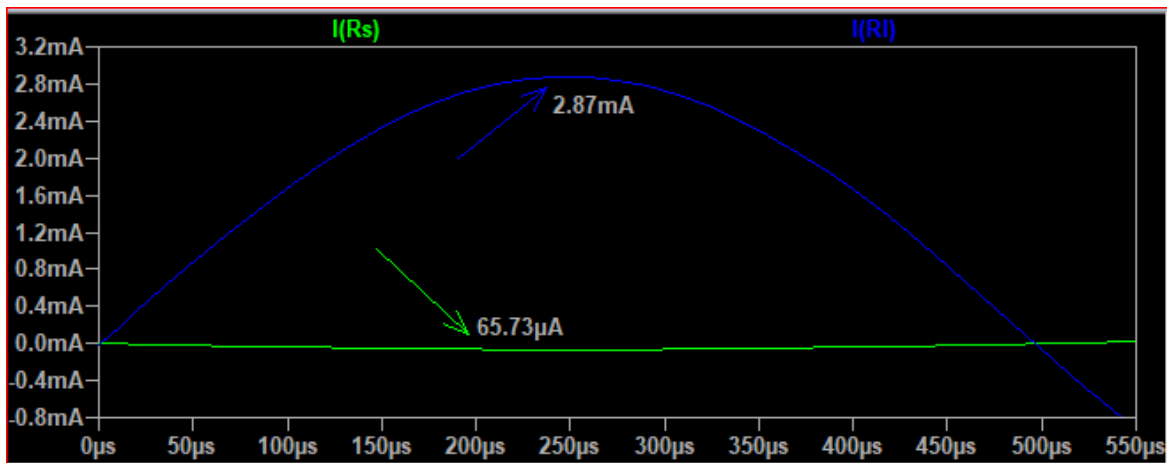
$$A_v = 0.954$$

Κυματομορφή ρεύματος εισόδου και εξόδου:



Εικόνα 113

Τύπος κέρδος ρεύματος: $A_i = I_{out} / I_{in}$



Εικόνα 114

Άρα: $A_i = 2.87\text{mA} / 65.73\mu\text{A} = 43.66$

Τύπος κέρδος ισχύος: $A_p = A_v * A_i$

Άρα το κέρδος ισχύος είναι: $A_p = 0.954\text{V} * 43.66 = 41.651$

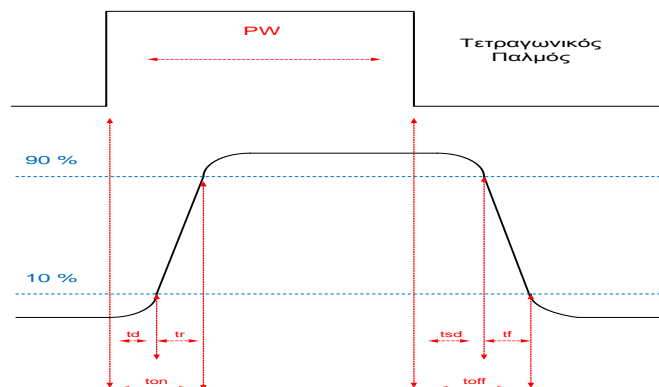
Εργαστηριακή άσκηση 4:

Τρανζίστορ Διακόπτης

Το τρανζίστορ διακόπτης προσφέρει την δυνατότητα μεταβολής της περιόδου μιας παλμοσειράς στην έξοδο του τρανζίστορ. Χρησιμοποιείται συχνά για τον έλεγχο μεγάλων ρευμάτων στο φορτίο, το οποίο μπορεί να είναι μία λυχνία ή κάποιο άλλο μεγάλου μεγέθους φορτίο. Προσδιορίζεται από τους χρόνους απόκρισης του και κατανέμονται στους εξής:

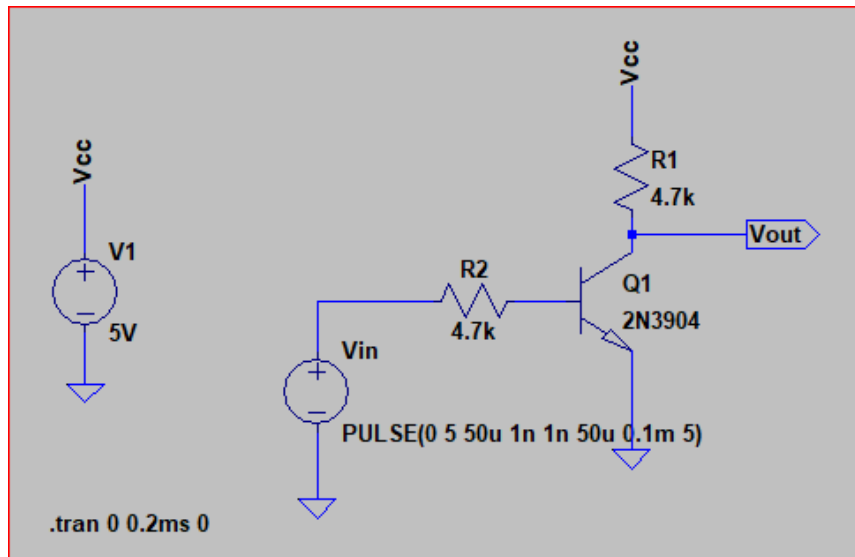
- Χρόνος καθυστέρησης t_d (delay time). Είναι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ της αρχής των σημάτων εισόδου και εξόδου.
- Χρόνος ανόδου t_r (rise time). Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να διανύσει στην ενεργό περιοχή.
- Χρόνος καθυστέρησης αποθήκευσης t_{sd} (storage delay time). Είναι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ του τέλους των σημάτων εισόδου και εξόδου, καθώς το τρανζίστορ αρχίζει να αποκόπτεται.
- Χρόνος καθόδου t_f (fall time). Είναι ο χρόνος μέσα στο οποίο το σήμα εξόδου ελαττώνεται από το 90% στο 10% της τελικής του τιμής.
- Χρόνος έναυσης (T_{on}). Είναι ο συνολικός χρόνος μέσα στον οποίο το τρανζίστορ άγει πλήρως, περίπου ίσος με t_d+t_r .
- Χρόνος διακοπής T_{off} . Είναι ο συνολικός χρόνος μέσα στο οποίο το τρανζίστορ αποκόπτεται πλήρως, είναι περίπου ίσος με $t_{sd}+t_f$.

Προσδιορισμός των χρόνων απόκρισης ενός τρανζίστορ διακόπτη:



Εικόνα 115

Πραγματοποίηση του κυκλώματος στο πρόγραμμα LTspice.

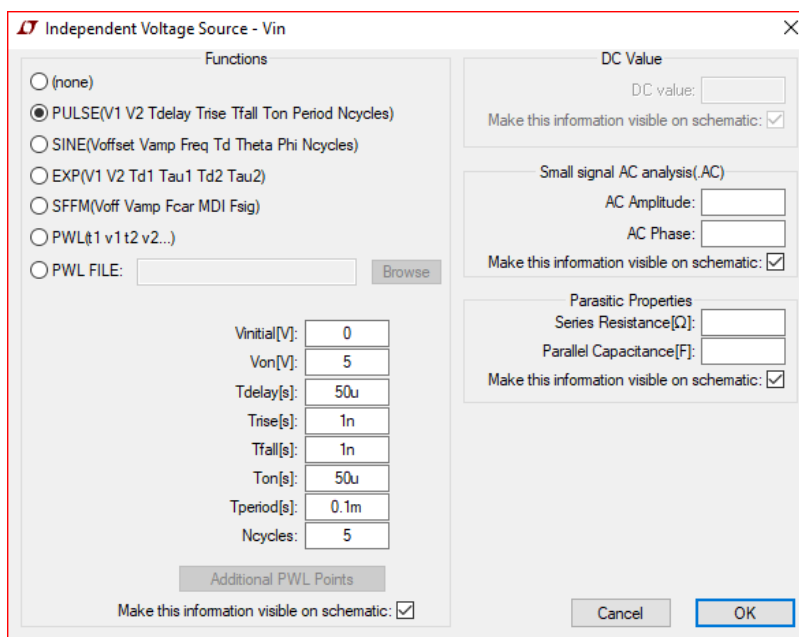


Εικόνα 116

Το πρόγραμμα LTspice δίνει την δυνατότητα να δημιουργήσει ο χρήστης την παλμοσειρά.

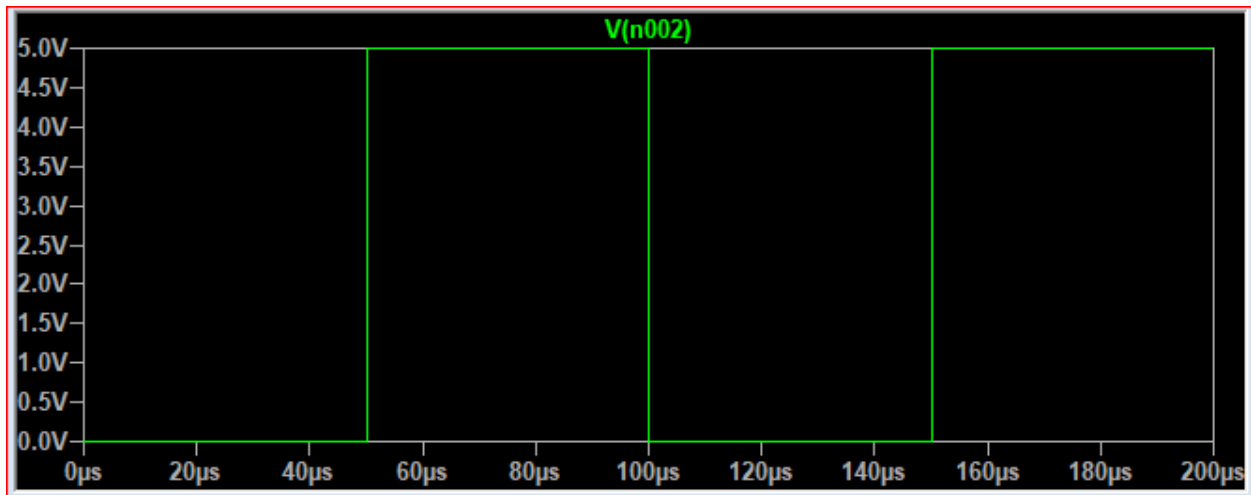
Τα χαρακτηριστικά πλάτος και περιόδου έχουν ως εξής:

Δημιουργία και χαρακτηριστικά παλμού για τάση 5 Volts και περίοδος 0.1millisecond για 5 παλμούς και συχνότητα $f = 1\text{kHz}$:



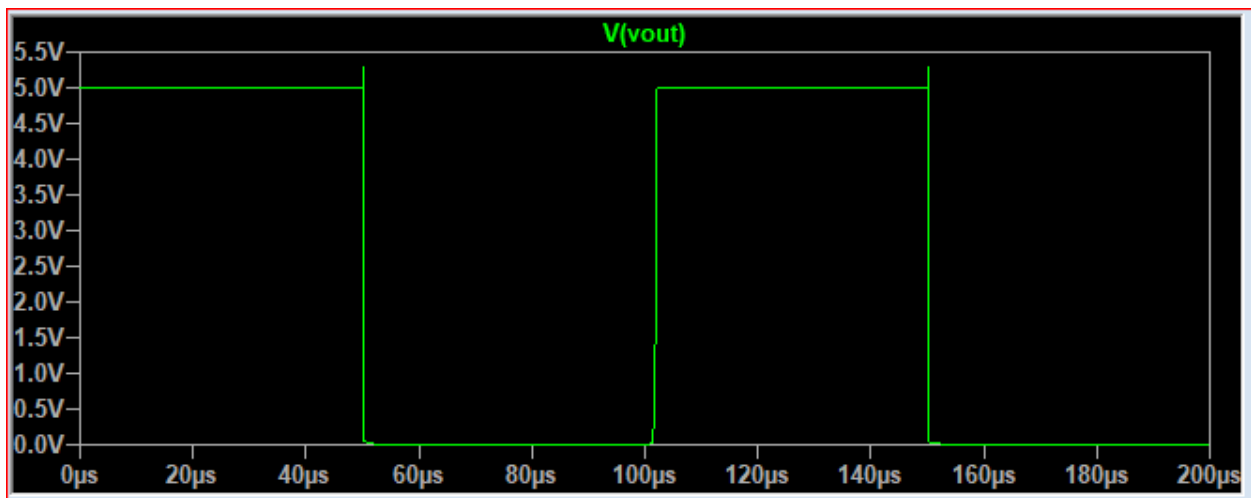
Εικόνα 117

Παλμοσειρά εισόδου με εντολή προσομοίωσης transient για διάστημα χρόνου από 0 μέχρι 0.2ms:



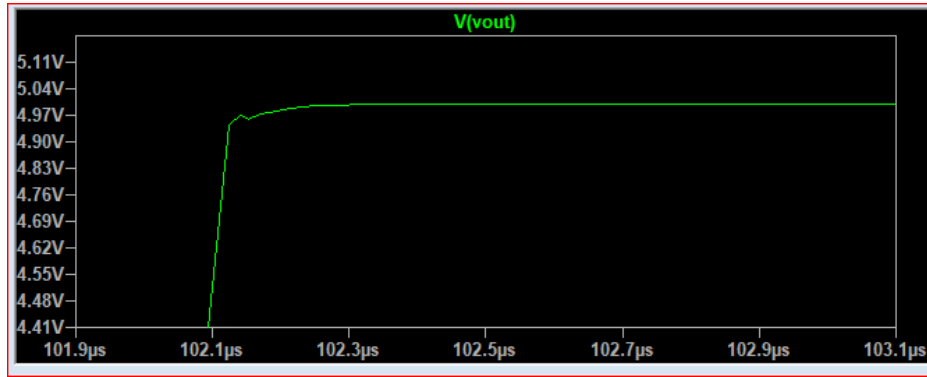
Εικόνα 118

Παλμοσειρά εξόδου (Vout) με εντολή προσομοίωσης transient για διάστημα χρόνου από 0 μέχρι 0.2ms:

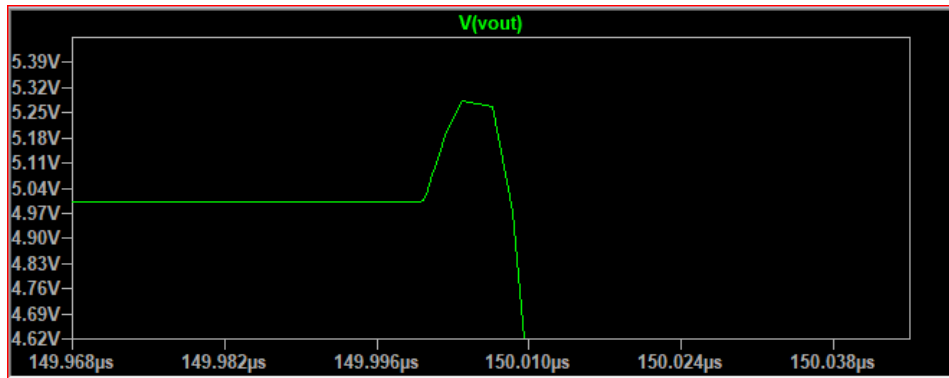


Εικόνα 119

Παρατήρηση πώς στη έξοδο, η παλμοσειρά έχει παραμορφωθεί.



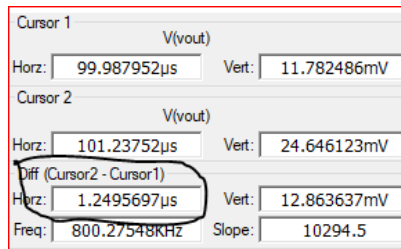
Εικόνα 120



Εικόνα 121

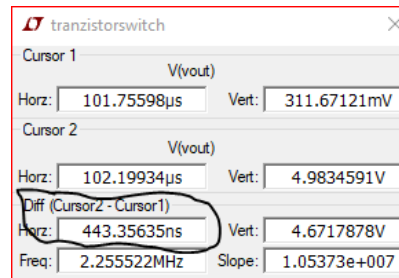
Με την βοήθεια των κερσόρων , γίνεται η μέτρηση του χρόνου διακοπής ($T_{off} = t_{sd} + t_f$) και του χρόνου έναυσης ($T_{on} = t_d + t_r$).

Td (Χρόνος καθυστέρησης):



Εικόνα 122

Tr (Χρόνος ανόδου):

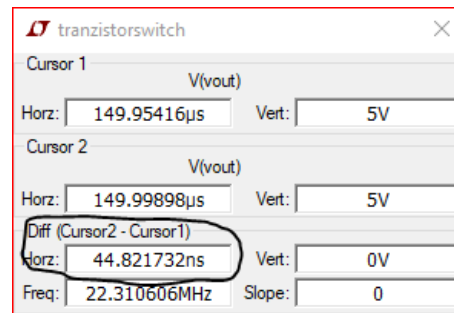


Εικόνα 123

Άρα: Ο χρόνος έναυσης είναι:

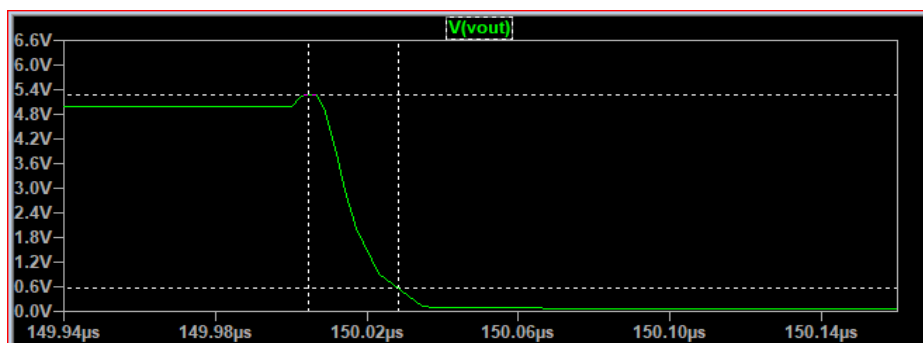
$$T_{on} = 1.249\mu s + 443.35ns = 1.692\mu s$$

Tsd(Χρόνος αποθήκευσης):

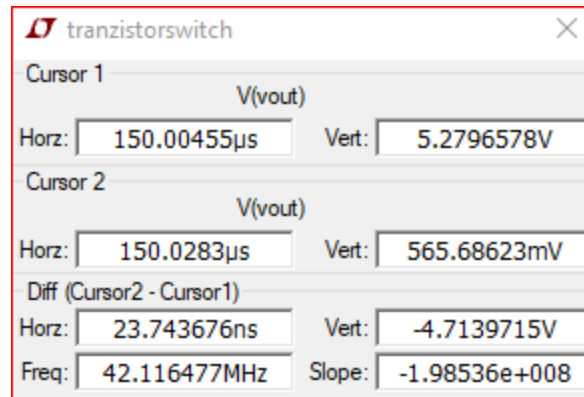


Εικόνα 124

Tf (Χρόνος Καθόδου):



Εικόνα 125



Εικόνα 126

Άρα: Ο χρόνος διακοπής είναι:

$$\mathbf{T_{off} = T_{sd} + T_f = 44.821ns + 23.743ns = 0.685ns}$$

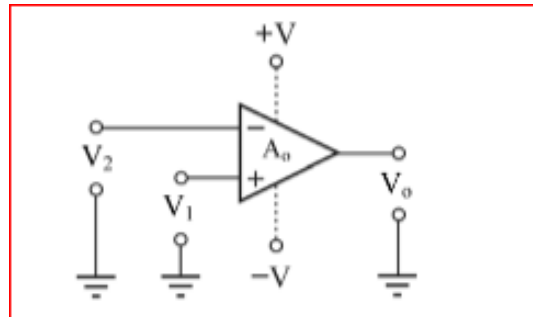
Η ελάχιστη περίοδος της παλμοσειράς εισόδου είναι:

$$\mathbf{T_{min} = T_{on} + T_{off} = 1.692\mu s + 0.685ns = 1.6926\mu s}$$

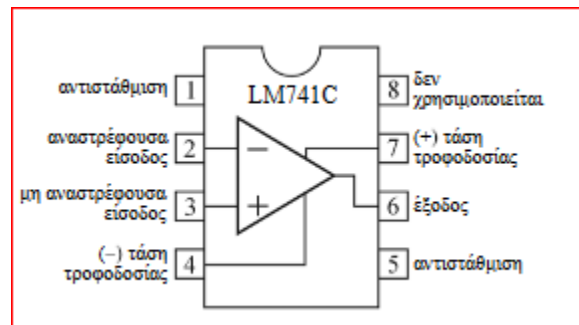
Εργαστηριακή Άσκηση 5

Τελεστικός Ενισχυτής LM741

Ο Τελεστικός Ενισχυτής LM741 αποτελεί ένα από τα πιο χρήσιμα αναλογικά κυκλώματα. Κατασκευάζεται ως ολοκληρωμένο κύκλωμα και απαρτίζεται από μερικές δεκάδες τρανζίστορ. Πρόκειται για ενισχυτή τάσης άμεσης σύζευξης με πολύ μεγάλη τιμή ενίσχυσης τάσης, με πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου και πολύ χαμηλή αντίσταση εξόδου. Η ονομασία του οφείλεται στη δυνατότητα που έχει να πραγματοποιεί μαθηματικές πράξεις μεταξύ των σημάτων τάσης.



Εικόνα 127: Σύμβολο τελεστικού ενισχυτή



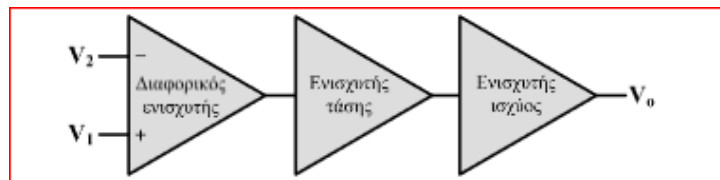
Εικόνα 128

Ρυθμός μεταβολής (slew rate):

Δυνατότητα του σήματος της εξόδου του ενισχυτή να παρακολουθεί τις μεταβολές του σήματος εισόδου. Υπάρχει το ενδεχόμενο να παραμορφώνεται το σήμα εξόδου όταν η συχνότητα του σήματος εισόδου ξεπεράσει ένα όριο. Χρειάζεται συμμετρική τροφοδοσία από 9V μέχρι 15V.

Διαθέτει δύο εισόδους, τη μη αναστρέφουσα(+) και την αναστρέφουσα(-), μία έξοδο, καθώς και συμμετρική τροφοδοσία συνεχούς τάσης. Ένας τυπικός τελεστικός ενισχυτής αποτελείται από τρεις βασικές λειτουργικές βαθμίδες.

- Η βαθμίδα εισόδου: Είναι ένας διαφορικός ενισχυτής ο οποίος δίνει την δυνατότητα ύπαρξης της αναστρέφουσας και της μη αναστρέφουσας εισόδου ,επίσης προσφέρει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για ένα ποιοτικό τελεστικό ενισχυτή όπως υψηλής αντίσταση εισόδου και υψηλό λόγο απόρριψης κοινού σήματος.
- Η ενδιάμεσα βαθμίδα: Είναι ένας σύνθετος ενισχυτής δύο υποβαθμίδων (κοινού συλλέκτη – κοινού εκπομπού), ο οποίος προσδίδει στο κύκλωμα την απαιτούμενη υψηλή ενίσχυση τάσης.
- Η βαθμίδα εξόδου: Είναι ένας ενισχυτής ισχύος τύπου push pull.

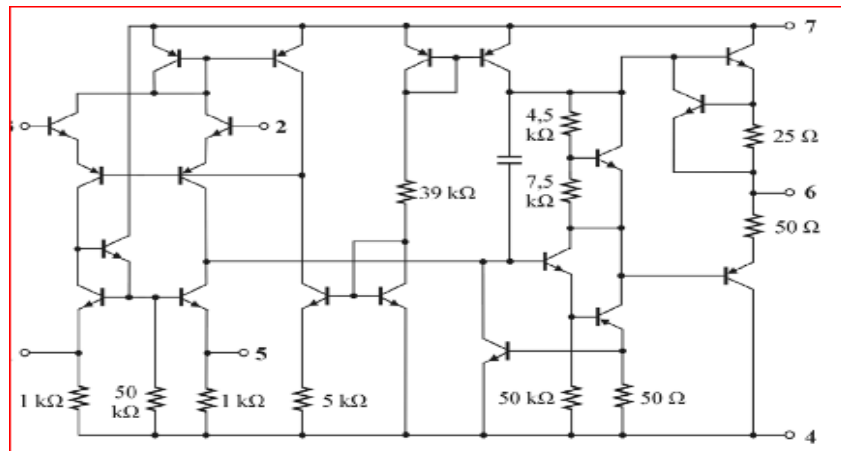


Εικόνα 129

Εξής χαρακτηριστικά που παρουσιάζει ο τελεστικός ενισχυτής:

- Άπειρο κέρδος τάσης A
- Αντίσταση εισόδου άπειρης τιμής
- Αντίσταση εξόδου μηδενικής τιμής
- Τάση εξόδου ίση με το μηδέν όταν είναι μηδέν η τάση εισόδου
- Άπειρο εύρος ζώνης
- Άπειρο λόγο απόρριψης
- Άπειρη τιμή του μέγιστου ρυθμού μεταβολής

Κυκλωματικό διάγραμμα τυπικού τελεστικού ενισχυτή LM741C:



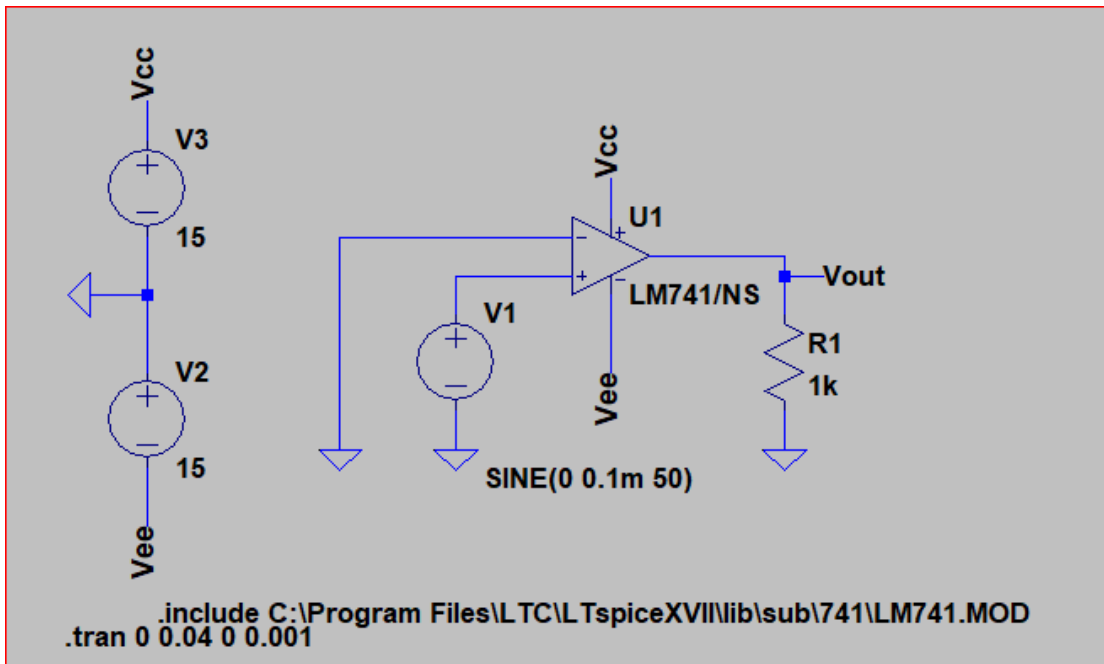
Εικόνα 130



Εικόνα 131: Τυπική εμπορική μορφή τελεστικού ενισχυτή

Πραγματοποίηση του παρακάτω κυκλώματος: Απόκριση συχνότητας Ανοικτού βρόχου - Τοπολογία αναστρέφοντα ενισχυτή

Ρύθμιση της γεννήτριας ώστε να μην έχει παραμόρφωση στην έξοδο και μεταβάλλοντας την συχνότητα του σήματος εισόδου(50,100,500,1k,5k,10k,100k,500kHz) και υπολογισμός του κέρδους τάσης και κέρδους τάσης σε (db) για κάθε συχνότητα. Στις προσομοιώσεις ο χρόνος εκτέλεσης είναι ανάλογα με την συχνότητα του σήματος, δηλαδή για 50Hz συχνότητας ,ο χρόνος εκτέλεσης είναι $T=1/50 = 0,02$. Στο παρακάτω κύκλωμα παροχή τάσης εισόδου στα $V_{in}=0.1mV$ ημιτονοειδές σήμα με συχνότητα αρχής 50Hz. Η εκτέλεση προσομοίωσης transient με σταμάτημα χρόνου στα 0.04 δευτερόλεπτα για δύο περιόδους και με βηματισμό 0.001 δευτερόλεπτα.



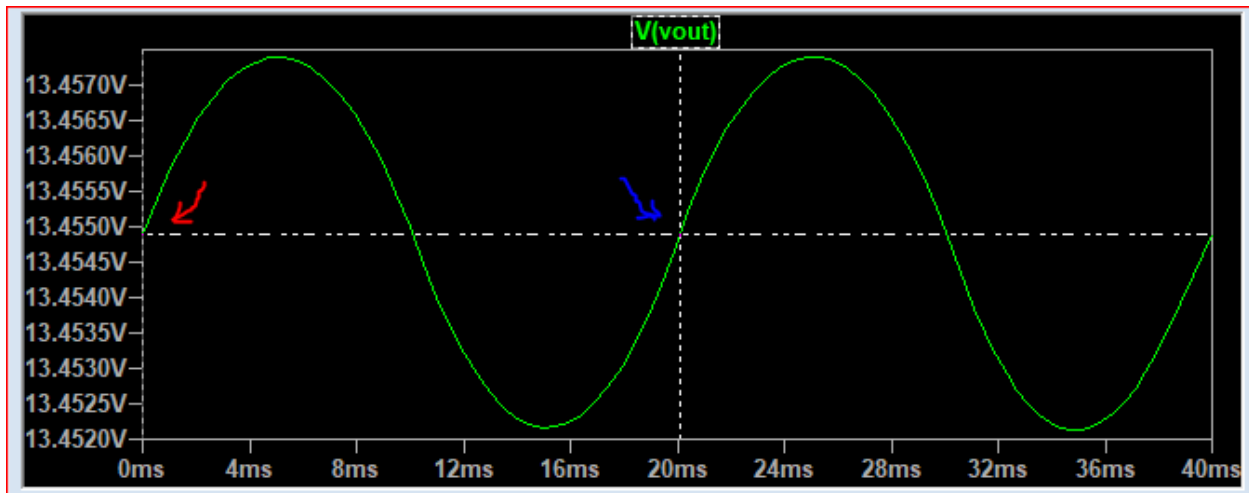
Εικόνα 132: Κύκλωμα απόκρισης συχνότητας ανοιχτού βρόχου

Υπολογίσει τάση εξόδου, κέρδος τάσης και κέρδους για κάθε συχνότητα.

<u>Συχνότητα(Hz)</u>	<u>Vin(V)</u>	<u>Vout(V)</u>	<u>Av</u>	<u>A(db)</u>
50	0.1m	-749.67n	0.70m	-2.15
100	0.1m	-67.84μ	0.67	-0.16
500	0.1m	-56.80μ	0.56	-0.25
1k	0.1m	-46.79μ	0.46	-0.33
5k	0.1m	-39.02μ	0.39	-0.40
10k	0.1m	-32.56μ	0.32	-0.49
100k	0.1m	-11.70μ	0.11	-0.95
500k	0.1m	-6.11μ	0.61	-0.21

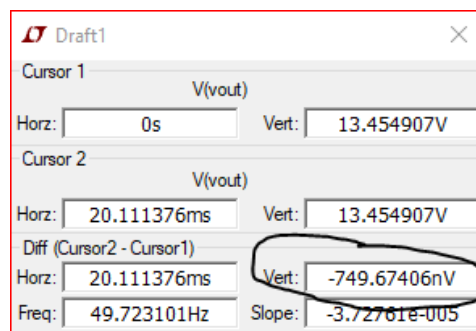
Σημείωση: Υπολογισμός κέρδους τάσης: $A_v = V_{out} / V_{in}$ και $A(db) = 10\log(A_v)$
 Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η τάση εξόδου έχει διαφορά φάσης 180 μοίρες ως προς την τάση εισόδου

Για συχνότητα $f=50\text{Hz}$: Το κόκκινο βελάκι είναι ο κέρσορας 1 και το μπλε βελάκι ο κέρσορας 2. Με την βοήθεια των κερσόρων υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ τους για την περίοδο T .



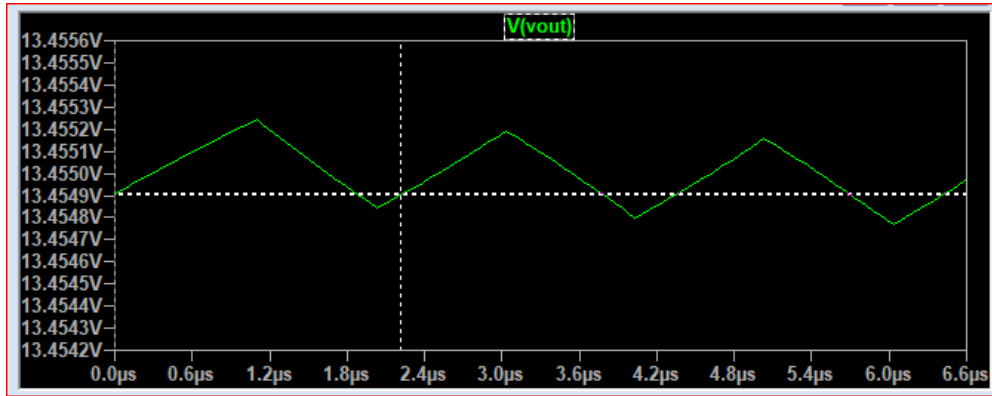
Εικόνα 133

Το αποτέλεσμα βρίσκεται μέσα στην κυκλωμένη ετικέτα. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία και για τα άλλα πειραματικά αποτελέσματα.



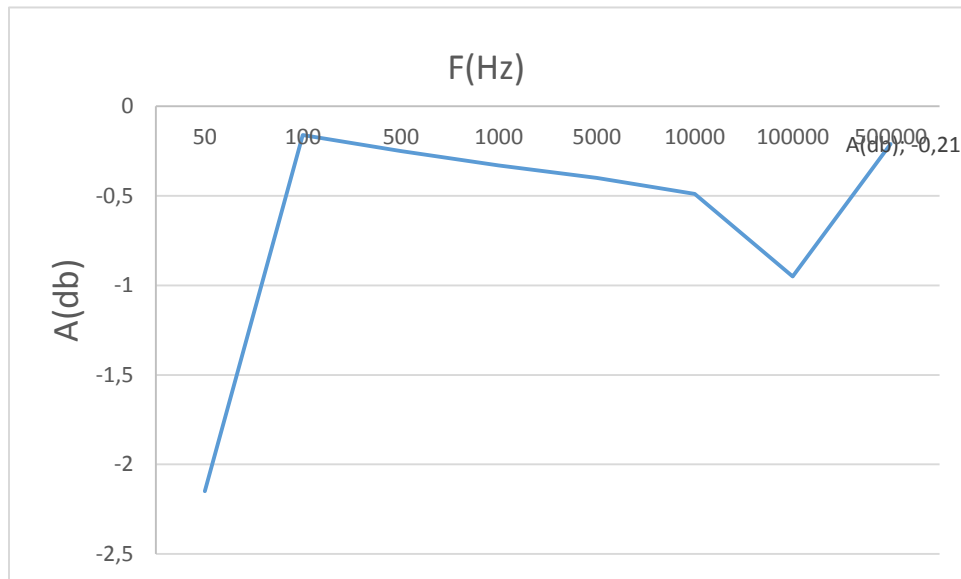
Εικόνα 134

Παραμόρφωση στα 500kHz. Ξεκίνησε το σήμα να παραμορφώνεται από τις 10kHz.



Εικόνα 135

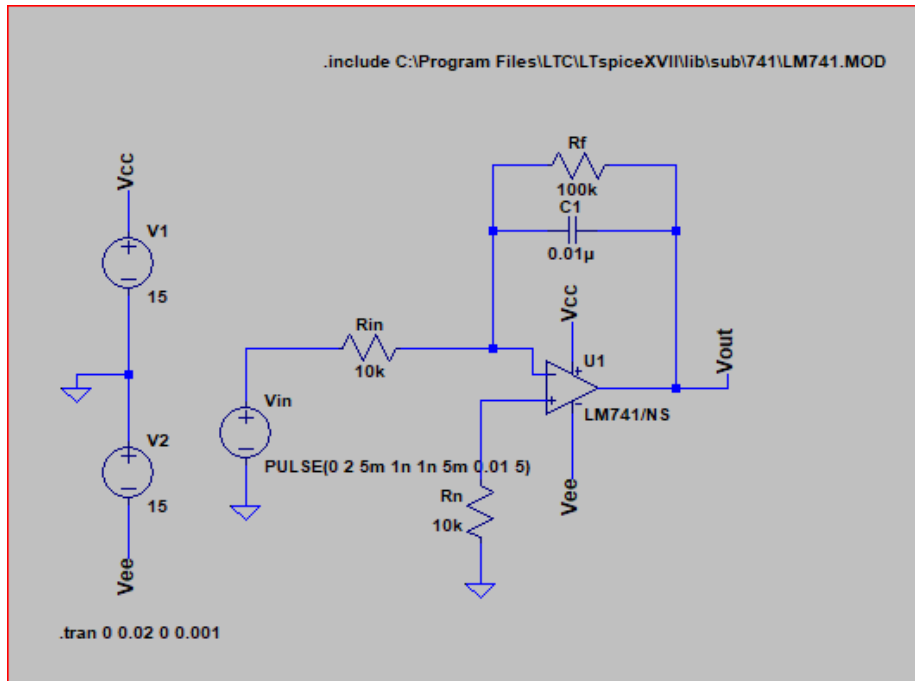
Γραφική παράσταση του $A(\text{db})$ με σχέση συνάρτηση της συχνότητας: $A(\text{db}) = f(F)$



Εργαστηριακή άσκηση 6:

Ολοκλήρωση με τελεστικό ενισχυτή

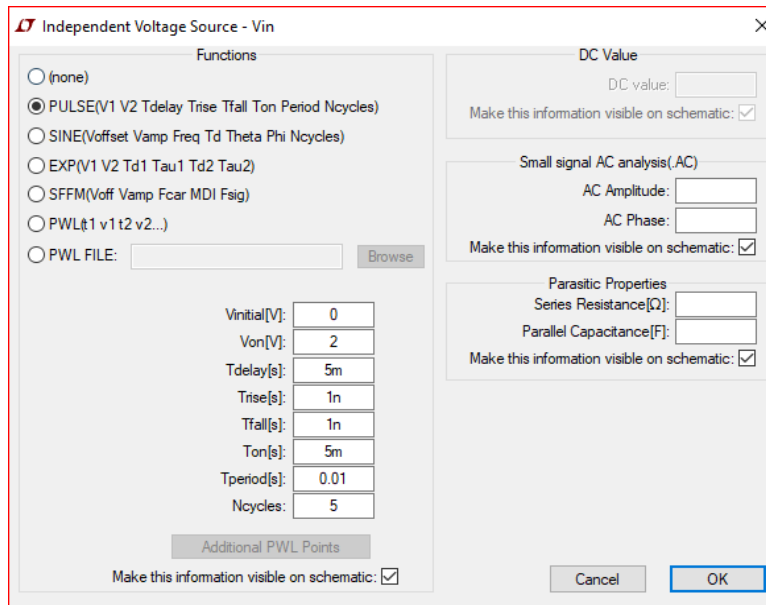
Πραγματοποίηση του παρακάτω κυκλώματος στο πρόγραμμα LTspice:



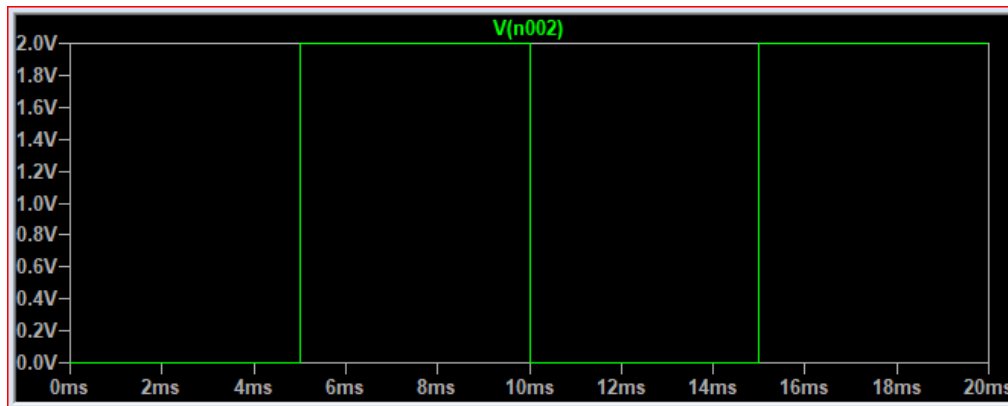
Εικόνα 136 :Κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή

Τοποθέτηση τετραγωνικού σήματος από με πλάτος $2V_{p-p}$ και για συχνότητες 100 Hz, 200Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 5kHz. Αποτελέσματα μετρήσεων V_{out} (p-p) και κυματομορφές εισόδου και εξόδου ακολουθούνται παρακάτω. Στην εκτέλεση προσομοίωσης ο χρόνος εκτέλεσης transient με σταμάτημα χρόνου στα 0.02 δευτερόλεπτα για δύο περιόδους και με βηματισμό 0.001 δευτερόλεπτα.

Παράμετροι για τετραγωνικό σήμα στην είσοδο.



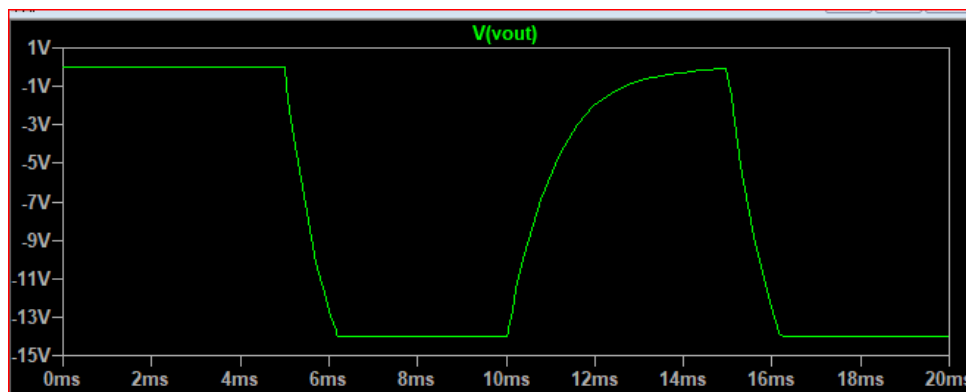
Εικόνα 137



Εικόνα 138: Τετραγωνικός παλμός εισόδου

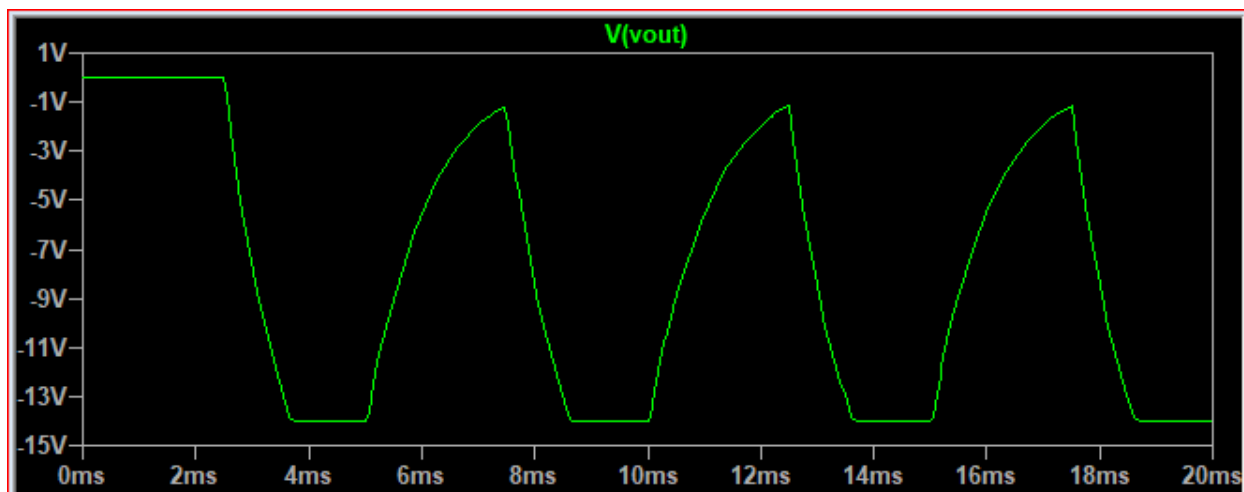
Fin(Hz)	100	200	500	1k	2k	5k
Vout(p-p)	-14.039	-14.033	-12.54	-7.77	-4.39	-1.88

Για συχνότητα 100Hz, άρα $T_{\text{period}} = 1/100 = 0.01\text{s}$, $T_{\text{on}} = 0.005\text{s}$.



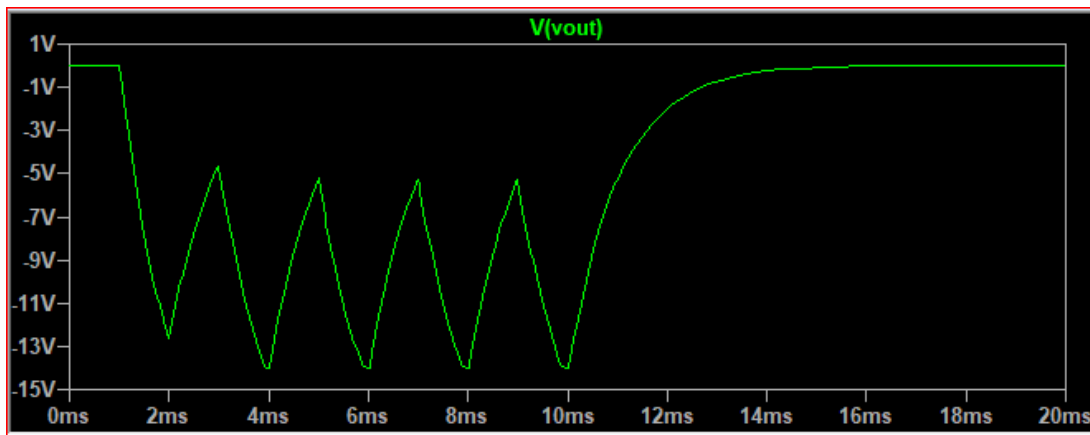
Εικόνα 139

Για συχνότητα 200Hz, άρα $T_{\text{period}} = 1/200 = 0.005\text{s}$, $T_{\text{on}} = 0.0025\text{s}$.



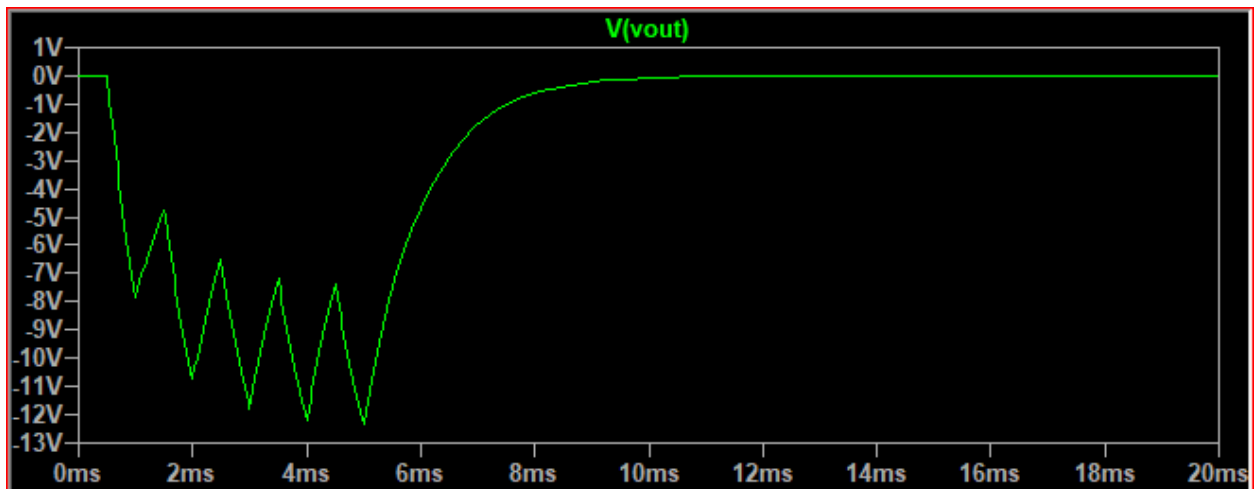
Εικόνα 140

Για συχνότητα 500 Hz , άρα $T_{period} = 1/500 = 0.002s$, $T_{on} = 0.001s$.



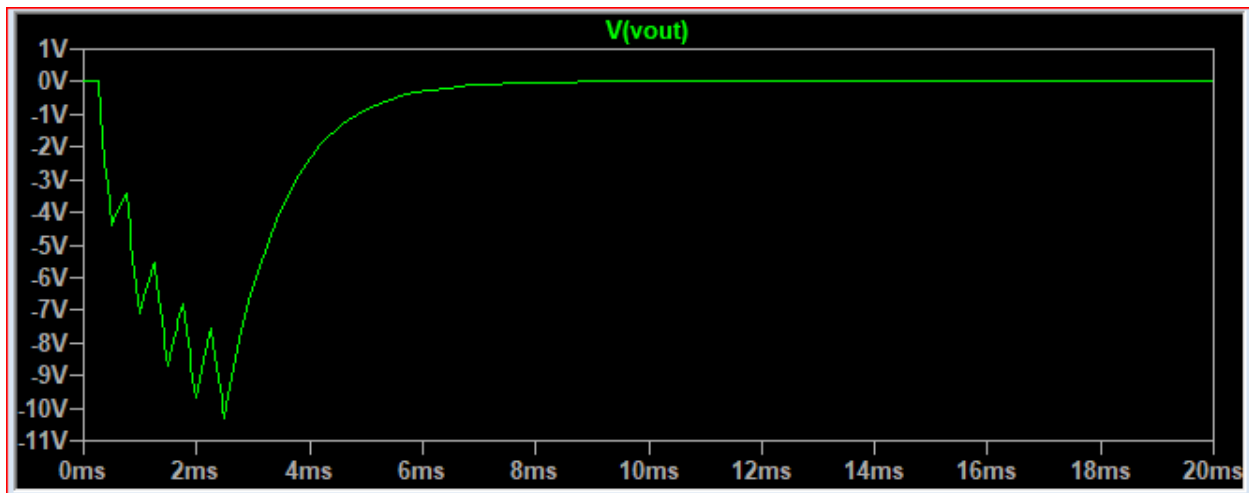
Εικόνα 141

Για συχνότητα 1000Hz , άρα $T_{period} = 1/1000 = 0.001s$, $T_{on} = 0.0005s$.



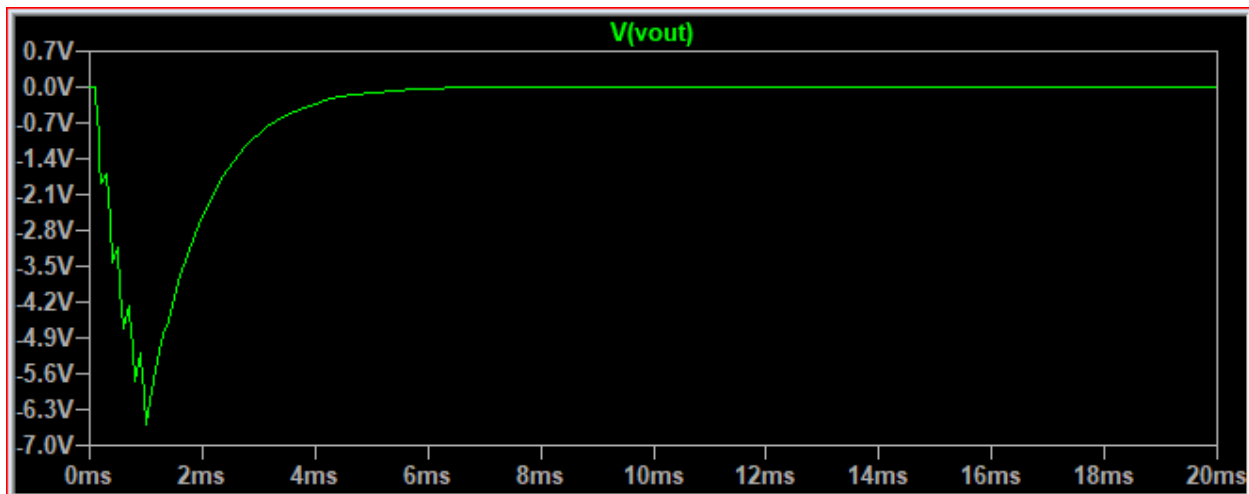
Εικόνα 142

Για συχνότητα 2000Hz , άρα $T_{\text{period}} = 1/2000 = 0.0005\text{s}$, $T_{\text{on}} = 0.00025\text{s}$



Εικόνα 143

Για συχνότητα 5000Hz , άρα $T_{\text{period}} = 1/5000 = 0.0002\text{s}$, $T_{\text{on}} = 0.0001\text{s}$



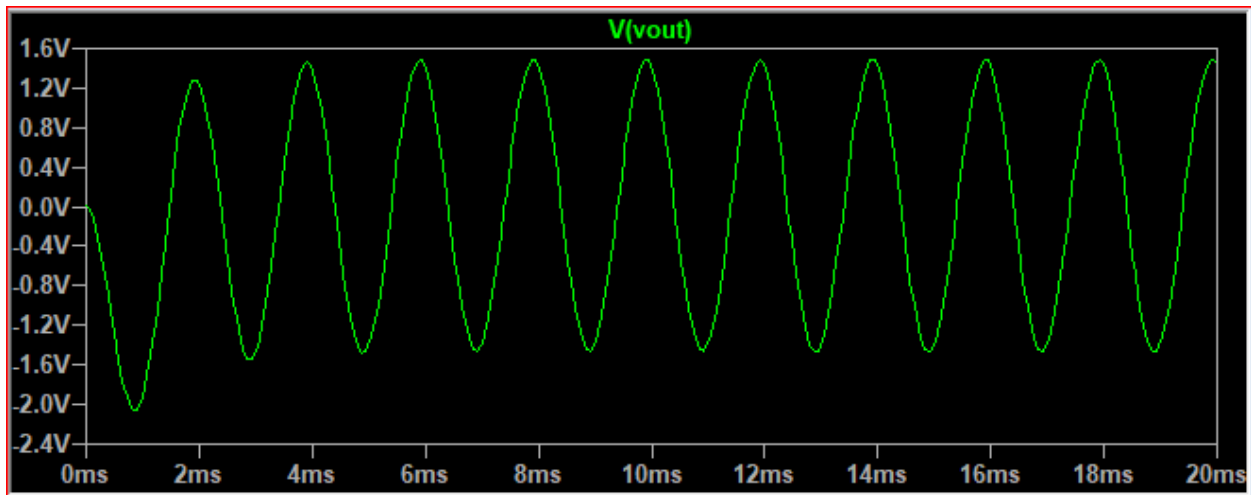
Εικόνα 144

Υπολογίσει της συχνότητας αποκοπής του κυκλώματος:

$$f_c = \frac{1}{2\pi * R_f * C}$$

$$f_c = 1.59\text{Hz}$$

Αντικατάσταση τετραγωνικού σήματος με ημιτονοειδές σήμα συχνότητας 500Hz και 0.5Vp-p:



Εικόνα 145

Παρατήρηση κυματομορφής εξόδου: Η κυματομορφή εξόδου έχει την μορφή σήματος συνημιτονοειδές.

Βιβλιογραφία

- Albert P. Malvino, Ph. D., «*Ηλεκτρονική*», Ε.Ε. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ
- Βισκαδούρος Γ., «*Εργαστηριακές ασκήσεις Ηλεκτρονικά I & Ηλεκτρονικά II*», Καθηγητής ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
- Δρ. Δρακάκης Ε., «*Σχεδίαση & Ανάλυση Κυκλωμάτων Με Η/Υ*», Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
- Χατζόπουλος Α., Κωνσταντίνου Δ., Μπόντζιος Γ., Φάρχα Σ. Α., «*SPICE Ανάλυση και σχεδίαση Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων*», ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ

Ιστοσελίδες

- Analog.com/Technical-articles/ltpspice-generating-triangular-sawtooth-waveforms by Analog Devices by Cabino Alonso.
- [Pspice.com/Pspice community](http://Pspice.com/Pspice%20community), Date Posted: 10/08/2016
- Simonbramble.co.uk by Simon Bramble Senior Applications Engineer at Analog Devices/articles/LTspice Tutorial Part 5.
- [Wilfrid Laurier University](http://WilfridLaurierUniversity.com), “*LTspice Tutorial by Terry Sturtevant*”, Date Posted: 12/05/2017.
- [Κ.Γιανναράς](http://K.Giannaras.com), “*Γενικά ηλεκτρονικά/Τομέας ηλεκτρονικής και ρομποτικής/ άρθρο Δίοδος Zener*”, Date Posted: 02/08/2015.