

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis).

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Προγράμματα προσομοίωσης κυκλωμάτων είναι τα λεγόμενα «Προγράμματα τύπου SPICE», από το όνομα του πρωτοποριακού λογισμικού (SPICE -Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Berkeley και αποτελεί πλέον ένα διεθνές πρότυπο αλγορίθμων για προσομοίωση κυκλωμάτων. Η εμφάνισή του άλλαξε δραματικά τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται και προετοιμάζονται σύνθετες ηλεκτρονικές κατασκευές. Ακόμη σημαντικότερη όμως ήταν η επίδρασή του στη διδασκαλία των Ηλεκτρονικών τόσο σε προπτυχιακό όσο και σε μεταπτυχιακό επίπεδο στα Ανώτερα και Ανώτατα Εκπαιδευτικά Ιδρύματα σε όλο τον κόσμο. Για το λόγο αυτό, ο ιδρυτής του SPICE καθ. Donald O. Pederson βραβεύτηκε το 1998 με το μετάλλιο τιμής του Παγκόσμιου Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE).

Η αρχική ιδέα του D. Pederson και των συνεργατών του ήταν να δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα δέσμης (batch mode) που θα μπορούσε να τρέχει στους μεσαίους και μεγάλους υπολογιστές των δεκαετιών του '60 και '70. Τα αποτελέσματα καταγράφονταν σε αρχεία κειμένου. Υπό αυτή τη μορφή το πρόγραμμα υποστηρίχτηκε από το Πανεπιστήμιο του Berkeley μέχρι και το τέλος της δεκαετίας του '80. Η εντυπωσιακή όμως εξέλιξη στον χώρο των προσωπικών υπολογιστών και κυρίως στον τομέα των Λειτουργικών Συστημάτων με γραφικά (GUI) δε μπορούσε παρά να συμπαρασύρει και το SPICE. Έτσι, σήμερα, το πρόγραμμα υποστηρίζεται και από άλλες ερευνητικές ομάδες και εταιρείες, παρέχει ένα φιλικότατο περιβάλλον γραφικών και παρέχονται όλα τα εργαλεία που απαιτούνται από την αρχική σχεδίαση έως και το τέλος της κατασκευής ενός Ηλεκτρικού/Ηλεκτρονικού κυκλώματος.

Ανάλογα λοιπόν με το περιεχόμενο ενός μαθήματος Ηλεκτρονικών θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και η αντίστοιχη λειτουργία ενός προγράμματος SPICE.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΟΥ SPICE

Πώς δουλεύει το SPICE.

Το πρόγραμμα δέχεται με την μορφή κώδικα μια περιγραφή του υπό ανάλυση κυκλώματος με μια σειρά εντολών. Τα αρχεία προγράμματος που δημιουργούνται έχουν την χαρακτηριστική κατάληξη .cir . Η σύνταξη ενός τέτοιου προγράμματος προϋποθέτει την αναγνώριση των στοιχείων του κυκλώματος και την αρίθμηση των κόμβων του. Κατόπιν εκτελεί εντολές προσομοίωσης μετρήσεως μεγεθών και μπορεί να δώσει δεδομένα εξόδου είτε γραφικά είτε αριθμητικά.

Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η αντίστροφη διαδικασία, όπου σχεδιάζουμε ένα κύκλωμα με την βοήθεια του σχεδιαστικού πακέτου του προγράμματος (Capture) και ο

κώδικας δημιουργείται αυτόματα. Αυτές οι συμπληρωματικές δυνατότητες προσφέρονται και σε προγράμματα του εμπορίου που χρησιμοποιούν το SPICE για εκπαιδευτικούς σκοπούς ή απλή σχεδίαση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το πρόγραμμα Electronics Workbench όπου υπάρχει και ειδική εντολή δημιουργίας αρχείου κώδικα σε SPICE.

Τα φυσικά μεγέθη δίνονται στις βασικές μονάδες μέτρησης στο σύστημα S.I. και τα πολλαπλάσια-υποπολλαπλάσια δηλώνονται με τα παρακάτω σύμβολα:

T	Terra	10^{12}
G	Giga	10^9
Meg	Mega	10^6
K	Kilo	10^3
M	Milli	10^{-3}
U	Micro	10^{-6}
N	Nano	10^{-9}
P	Pico	10^{-12}
F	Femto	10^{-15}

Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι το πρόγραμμα είναι εφοδιασμένο με στοιχεία που αφορούν εκ των προτέρων προσδιορισμένες τιμές πολλών παραμέτρων των επιμέρους διατάξεων και στοιχείων των κυκλωμάτων. Οι τιμές αυτές υπάρχουν σε ειδικούς πίνακες που δίδονται από τον κατασκευαστή της έκδοσης του προγράμματος και αναφέρονται ως εξ'ορισμού (default). Εάν σε μια εντολή σύνταξης από αυτές που αναφέρονται παρακάτω δεν δίδεται τιμή σε κάποια από τις παραμέτρους, αυτή αυτόματα θεωρείται ότι παίρνει την εξ'ορισμού.

Ο τρόπος εργασίας του προγράμματος είναι ο ακόλουθος:

A) Κάνει έλεγχο σε ένα αρχείο εισόδου (input file-data deck) που περιέχει πληροφορίες σχετικά με:

- Το ίδιο το κύκλωμα, και το τι θές να κάνεις με αυτό.
- Το είδος της πληροφορίας που θέλουμε ως αποτέλεσμα.

B) Εκτελεί τις εντολές προσομοίωσης και δίνει σε αρχεία εξόδου είτε γραφικές αναπαραστάσεις των διαφόρων μεγεθών είτε και αριθμητικές τιμές.

Τα απαιτούμενα βήματα σύνταξης ενός κώδικα προγράμματος σε SPICE είναι:

1^ο Βήμα. Αρίθμηση των κόμβων.

Αριθμούνται οι κόμβοι του κυκλώματος, ο καθένας με έναν θετικό αριθμό, ενώ στην γείωση δίνουμε πάντοτε τον αριθμό Μηδέν (0). Η αρίθμηση δεν είναι απαραίτητο να είναι συνεχής. Υπάρχουν εκδόσεις του SPICE ή εκπαιδευτικές παραλλαγές του (π.χ. Electronics Workbench 5.0) που δέχονται και ονόματα στους κόμβους που υποδηλώνουν κάποια ιδιαίτερη λειτουργία (π.χ. OUT).

Οι βασικοί κανόνες αρίθμησης είναι οι: α) Δεν δίνουμε τον ίδιο αριθμό σε δύο διαφορετικούς κόμβους β) Η γείωση έχει πάντα τον αριθμό μηδέν γ) δεν υπάρχουν κόμβοι «στον αέρα» (floating).

2^ο Βήμα. Περιγραφή των στοιχείων του κυκλώματος.

Τα στοιχεία του κυκλώματος, παθητικά και ενεργά δηλώνονται στο SPICE με συγκεκριμένες εντολές. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην σύνταξη απλών προγραμμαμάτων είναι:

- Παθητικά (passive) : R, L, C
- Πηγές τάσεις και ρεύματος (voltage and current sources-independent only).
- Διατάξεις ημιαγωγών: Δίοδοι, Τρανζίστορς (BJT, JFET, MOSFET), κλπ.

Ονομασία στοιχείων.

Για την ονομασία των στοιχείων χρησιμοποιούνται εντολές εισόδου με συγκεκριμένη σύνταξη. Οι εντολές αυτές δίδονται παρακάτω για όλα τα βασικά στοιχεία. Ο συμβολισμός +N, -N δηλώνει θετική-αρνητική σύνδεση (π.χ. άνοδος-κάθοδος).

Εντολές σύνταξης παθητικών στοιχείων (R, L, C).

RXXXXXXXX +N -N value (Ohms)

LXXXXXXXX +N -N value (Henrys)

CXXXXXXXX +N -N (value) (Farads)

Παραδείγματα:

R1 2 5 12K

Αυτό δηλώνει ότι η αντίσταση R1 συνδέεται ανάμεσα στους κόμβους 2 και 5 και έχει τιμή 12 kΩ.

CBYPASS 1 0 1U

Αυτό δηλώνει ότι ο πυκνωτής Bypass συνδέεται ανάμεσα στους κόμβους 1 και 0 (δηλαδή την γείωση) και έχει τιμή 1 micro-Farad.

L5 3 4 12M

Αυτό δηλώνει ότι το πηνίο L5 συνδέεται ανάμεσα στους κόμβους 3 και 4 και έχει τιμή 1 milli-Henry.

Εντολές σύνταξης για πηγές τάσης και ρεύματος.

Οι τρόποι σύνταξης των εντολών προσδιορισμού πηγών τάσης και ρεύματος τόσο για συνεχές όσο και για εναλλασσόμενο είναι

VXXXXXXXX +N -N DC (τιμή σε Volts)

VXXXXXXXX +N -N AC (τιμή του πλάτους σε Volts)

VXXXXXXXX +N -N AC (τιμή πλάτους) (φάση)

Στην δήλωση πηγής ρεύματος αντικαθιστούμε το γράμμα *V* με το *I* και τα υπόλοιπα παραμένουν τα ίδια.

Παραδείγματα:

VIN 4 0 DC 5

Αυτό δηλώνει ότι μια πηγή συνεχούς τάσης 5 V είναι συνδεδεσμένη μεταξύ του κόμβου 4 και της γείωσης.

IEE 5 6 DC 5

Αυτό δηλώνει ότι μια πηγή συνεχούς ρεύματος 5A είναι συνδεδεσμένη μεταξύ των κόμβων 5 και 6.

Υπάρχουν και οι εντολές που περιγράφουν εναλλασσόμενες πηγές, όπως τετραγωνικού παλμού, ημιτονοειδείς κλπ. Παρακάτω αναφέρονται αυτές με τον τρόπο σύνταξής τους.

VXXXXXXXX +N -N AC SIN(Vo Va Freq td dg phase)	(Ημιτονοειδής κυματομορφή)
VXXXXXXXX +N -N AC EXP(V1 V2 td ₁ t ₁ td ₂ t ₂)	(Εκθετική κυματομορφή)
VXXXXXXXX +N -N AC PULSE(V1 V2 td tr tf pw per)	(Παλμός)
VXXXXXXXX +N -N AC PWL(t ₁ V ₁ t ₂ V ₂ t _n V _n)	(Γραμμές συνεχόμενες)
VXXXXXXXX +N -N AC SFFM(Vo Va freq md fs)	(Κυματομορφή Διαμορφούμενης συχνότητας)

Στην δήλωση πηγής ρεύματος αντικαθιστούμε το γράμμα *V* με το *I* και τα υπόλοιπα παραμένουν τα ίδια.

Αναλυτικά για κάθε μία εντολή, οι παράμετροι στις παρενθέσεις είναι:

(Ημιτονοειδής κυματομορφή)

SIN(Vo Va Freq td dg phase)

Vo είναι η τάση μηδενισμού (offset). Δεν έχει τιμή εξ'ορισμού και πρέπει να οριστεί.

Va είναι το πλάτος της τάσης. Δεν έχει τιμή εξ'ορισμού και πρέπει να οριστεί.

Freq είναι η συχνότητα. Η εξ'ορισμού τιμή της είναι 1/TSTOP όπου TSTOP είναι η τελική τιμή στην ανάλυση μεταβατικότητας όταν εκτελείται η εντολή .TRANS .

td είναι ο χρόνος καθυστέρησης. Η εξ'ορισμού τιμή του είναι μηδέν.

df είναι ο συντελεστής απόσβεσης. Η εξ'ορισμού τιμή του είναι μηδέν.

Phase είναι η φάση. Η εξ'ορισμού τιμή της είναι μηδέν.

Ένα παράδειγμα για την εντολή είναι και το παρακάτω:

VSIN 2 1 SIN(0 20 1K)

Αυτό δηλώνει ότι μια πηγή σήματος εφαρμόζει μεταξύ των κόμβων 2 και 1 μια κυματομορφή VSIN με μηδενική τιμή offset, πλάτος 20V και συχνότητα 1 kHz.

(Παλμός)

PULSE(V1 V2 td tr tf pw per)

V1 είναι η αρχική τιμή του παλμού.

V2 είναι η τελική τιμή του παλμού.

td είναι ο χρόνος καθυστέρησης. Η εξ'ορισμού τιμή του είναι μηδέν.

tr είναι ο χρόνος ανόδου. Η εξ'ορισμού τιμή του είναι το βήμα εκτύπωσης των παραμέτρων εξόδου (TSTEP).

tf είναι ο χρόνος καθόδου. Η εξ'ορισμού τιμή του είναι επίσης TSTEP.

pw είναι το εύρος του παλμού. Η εξ'ορισμού τιμή του είναι TSTOP, η τελική τιμή χρόνου στην ανάλυση μεταβατικότητας.

per είναι η περίοδος. Η εξ'ορισμού τιμή του είναι επίσης TSTOP. Στην περίοδο δεν περιλαμβάνεται η αρχική καθυστέρηση td.

Ένα παράδειγμα σύνταξης είναι:

VPUL 1 0 PULSE(0V 15V 5ns 10ns 30ns 2μs 5μs).

Η παραπάνω εντολή σημαίνει ότι ένα σήμα με την ονομασία VPUL συνδέεται μεταξύ του κόμβου 1 και της γης. Η κυματομορφή ξεκινά από τα μηδέν Volt και παραμένει εκεί για χρόνο 5ns. Η τάση αυξάνει γραμμικά από μηδέν έως τα 15V για τα επόμενα 10ns. Η τάση παραμένει στα 15V για 2μs. Κατόπιν μειώνεται γραμμικά από τα 15 στα μηδέν Volts για χρόνο 30ns. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται για 5μs.

(Εκθετική κυματομορφή)

EXP(V1 V2 td₁ t₁ td₂ t₂)

V1 είναι η αρχική τιμή τάσης. Πρέπει οπωσδήποτε να δηλώνεται αφού δεν υπάρχει εξ'ορισμού τιμή.

V2 είναι η μέγιστη τιμή τάσης. Πρέπει οπωσδήποτε να δηλώνεται αφού δεν υπάρχει εξ'ορισμού τιμή.

td₁ είναι ο χρόνος ανόδου σε sec. Η εξ'ορισμού τιμή του είναι μηδέν.

t₁ είναι η σταθερά χρόνου ανόδου σε sec. Η εξ'ορισμού τιμή της είναι το βήμα εκτύπωσης των παραμέτρων εξόδου (TSTEP).

td₂ είναι ο χρόνος καθόδου σε sec. Η εξ'ορισμού τιμή του είναι (td₁+TSTEP).

t₂ είναι η σταθερά χρόνου καθόδου σε sec. Η εξ'ορισμού τιμή της είναι TSTEP.

Ένα παράδειγμα σύνταξης είναι και το παρακάτω:

VEX 3 2 EXP(-2V 10V 2μs 10μs 40μs 15μs).

Το παραπάνω παράδειγμα δηλώνει ένα σήμα VEX συνδέεται μεταξύ των κόμβων 3 και 2 και είναι εκθετικής μορφής. Η κυματομορφή έχει την τιμή -2V για χρόνο 2μs. Κατόπιν αυξάνει εκθετικά μέχρι τα 10V με σταθερά χρόνου 10μs. Η διάρκεια της αύξησης είναι 40μs. Μετά η τάση φθίνει εκθετικά από τα 10V μέχρι τα -2V με σταθερά χρόνου 15μs.

(Γραμμές συνεχόμενες)

VXXXXXXX +N -N AC PWL(t₁ V₁ t₂ V₂ t_n V_n)

Η κυματομορφή αυτή αποτελείται από συνεχόμενες συνεχείς γραμμές μεταξύ διαδοχικών σημείων. Το κάθε σημείο προσδιορίζεται από δύο ζεύγη τιμών χρόνου και τάσης t_m και V_m, σε sec και Volts αντίστοιχα. Οι χρονικές στιγμές προσδιορίζονται πάντα με αυξανόμενη σειρά, t₁<t₂<t₃<t_n.

(Κυματομορφή Διαμορφούμενης συχνότητας)

VXXXXXXX +N -N AC SFFM(Vo Va freq md fs)

Vo είναι η τάση μηδενισμού (offset). Δεν έχει τιμή εξ'ορισμού τιμή και πρέπει να οριστεί.
Va είναι το πλάτος. Δεν έχει τιμή εξ'ορισμού τιμή και πρέπει να οριστεί.
Fc είναι η φέρουσα συχνότητα σε Hz. Η εξ'ορισμού τιμή της είναι 1/TSTOP.
Mdi είναι ο δείκτης διαμόρφωσης. Η εξ'ορισμού τιμή του είναι μηδέν.
Fs είναι η συχνότητα του σήματος σε Hz.

Ένα παράδειγμα σύνταξης δίνεται παρακάτω:

VIN 2 0 SFFM(0 15 10Meg 4 20K).

Αυτό δηλώνει ότι η πηγή VIN συνδεδεμένη ανάμεσα στους κόμβους 2 και γείωση, παράγει ένα σήμα συχνότητας 10MHz ημιτονοειδές με πλάτος 15V διαμορφούμενο στα 20kHz με δείκτη διαμόρφωσης 4.

Για όλες τις πηγές ισχύει ο κανόνας: Στην δήλωση πηγής ρεύματος αντικαθιστούμε το γράμμα V με το I και τα υπόλοιπα παραμένουν τα ίδια.

ΕΞΑΣΚΗΣΗ

Τι δηλώνουν οι παρακάτω εντολές;

VBIAS 13 0 2.3mV

VAC 2 3 AC 0.001

VACPHS 2 3 AC 0.001 90

VPULSE 1 0 PULSE (-1mV 1mV 2ns 2ns 50ns 100ns)

V3 26 27 DC 0.002 AC 1 SIN(0.002 0.002 1.5MEG)

IBIAS 13 0 2.3mV

IAC 2 3 AC 0.001

IACPHS 2 3 AC 0.001 90

IPULSE 1 0 PULSE (-1mV 1mV 2ns 2ns 50ns 100ns)

I3 26 27 DC 0.002 AC 1 SIN(0.002 0.002 1.5MEG)

ΕΝΤΟΛΕΣ ΔΗΛΩΣΗΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ.

Το SPICE μπορεί να προσομοιώσει τις λειτουργίες που αφορούν όλες τις γνωστές βασικές διατάξεις ημιαγωγών (Δίοδοι, Διπολικά Τρανζίστορ, MOSFET κλπ) για όλα τα μέχρι σήμερα γνωστά μοντέλα τους καθώς και να δεχτεί σε διάφορες βιβλιοθήκες που διαθέτει και νέα μοντέλα αυτών.

Για την προσομοίωση των ημιαγωγικών στοιχείων χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες εντολές για κάθε ένα. Αυτές είναι οι:

Δίοδοι (diodes) :	D _____ +N -N MNAME
Διπολικά Τρανζίστορς (BJTs):	Q _____ N(col) N(base) N(emit) MNAME
FET επαφής (JFETs):	J _____ N(drain) N(gate) N(source) MNAME
FET MOS (MOSFETs):	M _____ N(drain) N(gate) N(source) N(bulk) MNAME

Το πρόγραμμα προσφέρει τριών ειδών ανάλυση:

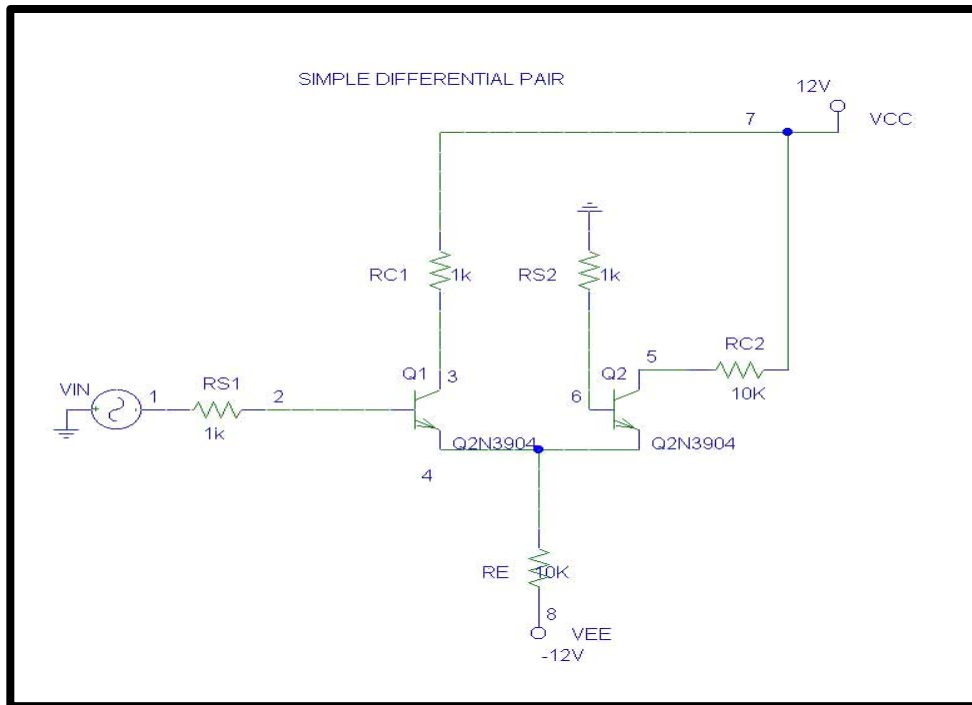
- DC --- Ανάλυση συνεχούς - ρυθμιζόμενη από τάση (Voltage Dependent Analysis).
- AC --- Ανάλυση εναλλασσόμενου σήματος (Frequency Dependent Analysis)
- Transient --- Ανάλυση μεταβατικότητας – χρονικής απόκρισης (Time Dependent Analysis)

Οι υπόλοιπες εντολές βασικής σύνταξης και δήλωσης εκτέλεσης εντολών (π.χ. η εντολή MODEL) θα αναλυθούν σε παραδείγματα στο μάθημα.

ΒΑΣΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Διαφορικό ζεύγος

Το παρακάτω κύκλωμα βρίσκει το DC σημείο λειτουργίας και τη χαρακτηριστική εξόδου για μικρά σήματα ενός διαφορικού ζεύγους. Επιπλέον η ανταπόκριση του κυκλώματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα υπολογίζεται μέσα σε μία συχνότητα εύρους 1Hz μέχρι τα 100 Mhz.

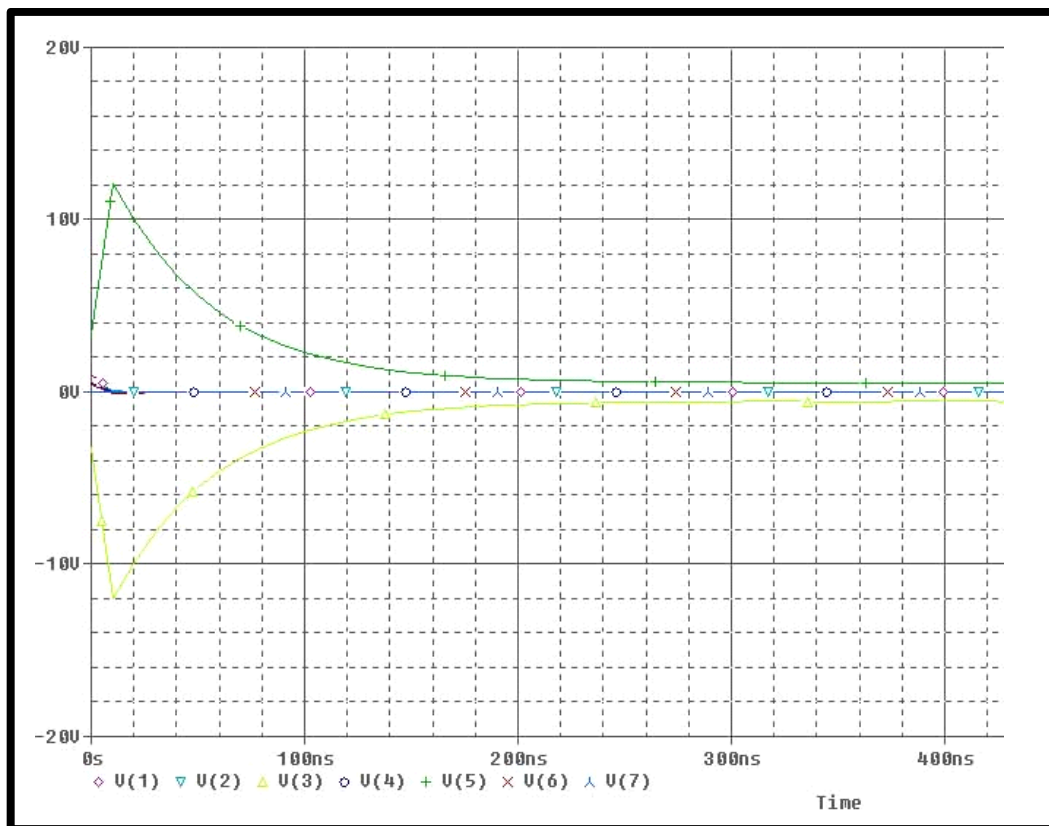


Ο κώδικας προγραμματισμού σε SPICE είναι ο παρακάτω :

```
SIMPLE DIFFERENTIAL PAIR
VCC 7 0 12
VEE 8 0 -12
VIN 1 0 AC 1
RS1 1 2 1K
RS2 6 0 1K
Q1 3 2 4 MOD1
Q2 5 6 4 MOD1
RC1 7 3 10K
RC2 7 5 10K
RE 4 8 10K
.MODEL MOD1 NPN BF=50 VAF=50 IS=1.E-12 RB=100 CJC=.5PF TF=.6NS
.TF V(5) VIN
.AC DEC 10 1 100 MEG
.PLOT AC VM(5) VP(5)
.PRINT AC VM(5) VP(5)
.END
```

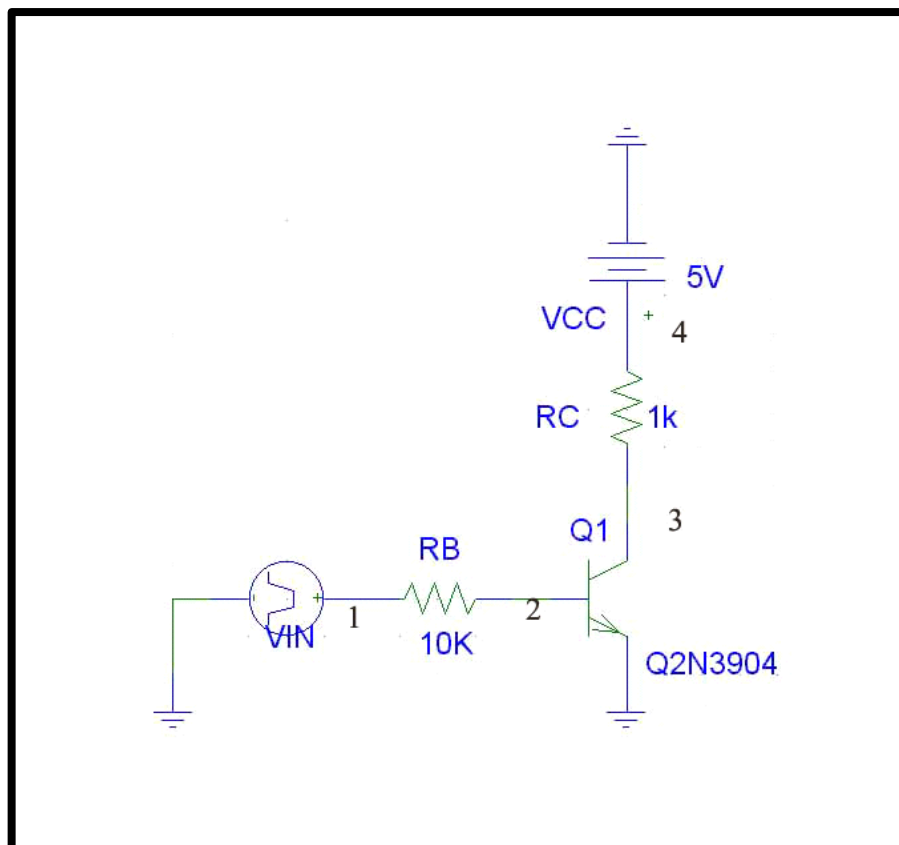
Πάνω στο κύκλωμα που παρατίθεται παραπάνω βρίσκεται η αρίθμηση των κόμβων που χρησιμοποιείται στον SPICE κώδικα που συνεπάγεται ότι είναι και οι ίδιοι κόμβοι που εμφανίζονται στις χαρακτηριστικές εξόδου .

Εδώ βλέπουμε τις χαρακτηριστικές εξόδου του κυκλώματος για τους διάφορους βρόγχους του .



Απλός αντιστροφέας RTL.

Κύκλωμα και αρίθμηση βρόγχων.



Το παρακάτω πρόγραμμα υπολογίζει την χαρακτηριστική μεταφοράς για DC και την ανταπόκριση σε παλμό ενός απλού RTL αναστροφέα . Η είσοδος είναι ένας παλμός από 0 μέχρι 5 Volts με καθυστέρηση, ανύψωση και χρόνο πτώσης για 2 ns και ένα πλάτος παλμού 30 ns .

Ο κώδικας σε SPICE του κυκλώματος είναι :

```
SIMPLE RTL INVERTER
VCC 4 0 5
VIN 1 0 PULSE 0 5 2NS 2NS 2NS 30NS
RB 1 2 10K
Q1 3 2 0 Q1
RC 3 4 1K
.PLOT DC V(3)
.PRINT TRAN V(3) V(5)
.MODEL Q1 NPN BF=20 RB=100 TF=.1NS CJC=2PF
.DC VIN 0 5 0.1
.TRAN 1NS 100NS
.END
```

Οι χαρακτηριστικές μεταφοράς του είναι.

