

## Study of Model Reduction Techniques for Timing Analysis

### Μελέτη Μεθόδων Υποβιβασμού Τάξεως Μοντέλου στην Ανάλυση Χρονισμού

Master Thesis  
by  
Ξενοφών Πατσιαούρας



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Επιβλέποντες:

Σταμούλης Γεώργιος  
Ευμορφόπουλος Νέστορας  
Πλέσσας Φώτιος

Βόλος, Ιούλιος 2021

# Ευχαριστίες

Με το πέρας της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες της μεταπτυχιακής μου εργασίας κ. Σταμούλη, κ. Ευμορφόπουλο και κ. Πλέσσα για την εμπιστοσύνη που επέδειξαν στο πρόσωπό μου, την άριστη συνεργασία, την συνεχή καθοδήγηση και τις ουσιώδεις υποδείξεις και παρεμβάσεις, που διευκόλυναν την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.

Ιδιαίτερα όμως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτωρ του τμήματος Χαράλαμπο Αντωνιάδη για την συνεργασία και την εκπληκτική χημεία που είχαμε για την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω την γυναίκα μου για την αμέριστη και την υπερπολύτιμη υποστήριξη της καθώς και τα παιδιά μου για την αμέριστη υποστήριξη και την ανεκτίμητη βοήθεια που μου παρείχαν τόσο κατά την διάρκεια των σπουδών μου όσο και κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

# Περίληψη

Κάθε ηλεκτρονικό κύκλωμα αποτελείται από ένα σύνολο ηλεκτρικών διασυνδέσεων. Απαρτίζεται από μία ή πολλαπλές εισόδους, το κύριο μέρος και μία ή πολλές εξόδους. Σε κάθε κύκλωμα παρατηρούνται δύο παράμετροι καθυστέρησης ενός σήματος σε ένα κύκλωμα, την καθυστέρηση των αγωγών διασύνδεσης και την καθυστέρηση των πυλών. Ο βασικός τρόπος διαχείρισης αυτής της καθυστέρησης σε συνδυασμό με την ακρίβεια και την ταχύτητα υπολογισμού στην προσομοίωση γίνεται με τεχνικές μεθόδους μείωσης τάξης του μοντέλου (MOR). Αυτό θα διαπραγματευτεί αυτή εδώ η μεταπτυχιακή εργασία.

# Abstract

Each electronic circuit consists of a set of electrical interfaces. It consists of one or multiple inputs, the main part and one or more outputs.

There are two in each circuit delay parameters of a signal in a circuit, the delay interconnection ducts and gate delays. The basic how to manage this delay combined with accuracy and the calculation speed in the simulation is done with techniques model order reduction (MOR) methods. This will be negotiated in this postgraduate thesis.

# Contents

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>5</b>
1.1	Γενική Περιγραφή . . . . .	5
1.2	Σκοπός της Εργασίας . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Τεχνικό Υπόβαθρο</b>	<b>7</b>
2.1	Βασικές Αρχές Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων . . . . .	7
2.2	Θεώρημα Thevenin . . . . .	8
2.3	Θεώρημα Norton . . . . .	9
2.4	Μοντελοποίηση Κυκλώματος RLC . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Διάφορες Τεχνικές Μέθοδοι Υποβάθμισης</b>	<b>12</b>
3.1	Η Μέθοδος της PRIMA . . . . .	12
3.2	Χρονική Ανάλυση του Υποβαθμισμένου Μοντέλου (RICE) .	14
3.2.1	Υπολογισμός Moments σε RLC Κύκλωμα . . . . .	18
3.2.2	Ο Βασικός Αλγόριθμος Υπολογισμού Διαδρομής . .	18
3.2.3	Προβλήματα Τοπολογικής Διάταξης του Κυκλώματος και Επιλύσεις . . . . .	19
3.2.3.1	Βρόχοι Αντιστάσεων . . . . .	19
3.2.3.2	Ασταθείς Κόμβοι και Βρόχοι Πηνίων . . .	22
3.2.4	Αντιστοίχιση των Moment . . . . .	22
3.2.5	Απόδοση και Αποτελέσματα . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Πειραματική Αξιολόγηση</b>	<b>25</b>
4.1	Σύγκριση του Χρόνου Εκτέλεσης του Κυκλώματος . . . .	26
4.2	Αποτελέσματα Καθυστέρησης του Συνολικού Κυκλώματος	28
<b>5</b>	<b>Επίλογος</b>	<b>30</b>

# List of Figures

2.1	Σύνδεση σε σειρά . . . . .	7
2.2	Σύνδεση παράλληλα . . . . .	8
2.3	Ισοδύναμο Κύκλωμα Θεώρημα Thevenin . . . . .	8
2.4	Σύγκριση $\Theta$ . Norton με $\Theta$ . Thevenin . . . . .	9
3.1	(a) RLC Κύκλωμα (b) Ισοδύναμο Πρώτης Τάξης (c) Ισοδύναμο Δεύτερης Τάξης . . . . .	17
3.2	Δημιουργία Super-Tree . . . . .	21
3.3	Σύγκριση μεταβατικών κυματομορφών RICE και PSPICE .	24
4.1	Με μπλε χρώμα φαίνεται το αρχικό σήμα του κυκλώματος. Ενώ με κόκκινο χρώμα φαίνεται το υποβαθμισμένο σήμα με τη μέθοδο RICE . . . . .	27
4.2	Με μπλε χρώμα φαίνεται το αρχικό σήμα του κυκλώματος. Ενώ με κόκκινο χρώμα φαίνεται το υποβαθμισμένο σήμα με τη μέθοδο PRIMA . . . . .	28

# Chapter 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενική Περιγραφή

Πριν «τυπωθεί» ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα θα πρέπει να επαληθευτεί ότι η σχεδιάσή του τηρεί τις προδιαγραφές χρονισμού που δόθηκαν αρχικά. Για τον λόγο αυτό, σε διάφορα βήματα μιας τυπικής ροής σχεδίασης ελέγχεται ο χρονισμός του κυκλώματος. Μπορούμε να διακρίνουμε δύο συνιστώσες καθυστέρησης ενός σήματος σε ένα κύκλωμα, την καθυστέρηση των αγωγών διασύνδεσης και την καθυστέρηση των πυλών. Σε τεχνολογίες ολοκλήρωσης κάτω των 90nm, η καθυστέρηση των διασυνδέσεων κυριαρχεί της συνολικής καθυστέρησης. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαίος ο γρήγορος και με ακρίβεια υπολογισμός αυτής της συνιστώσας. Οι υπάρχουσες γρήγορες τεχνικές υπολογισμού, όπως το μοντέλο Elmore, αποτυγχάνουν στο να την υπολογίσουν την καθυστέρηση με ακρίβεια γιατί στηρίζονται σε υποθέσεις που δεν ισχύουν πλέον στις σύγχρονες τεχνολογίες ολοκλήρωσης. Από την άλλη μεριά μια πλήρης προσομοίωση επιπέδου SPICE (λύνει το σύστημα διαφορικών εξισώσεων, όπως προκύπτει από την μοντελοποίηση των αγωγών διασύνδεσης ως ένα δίκτυο RC), μολονότι πιο ακριβής, είναι πάρα πολύ αργή.

Οι τεχνικές μείωσης τάξης μοντέλου (MOR) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στο παρελθόν, έτσι ώστε να επιτευχθεί μια χρυσή τομή μεταξύ ακρίβειας και ταχύτητας υπολογισμού στην προσομοίωση. Όλες οι τεχνικές MOR αντικαθιστούν το αρχικό πολύ μεγάλο μοντέλο με ένα μικρότερης τάξης μοντέλο προσπαθώντας να προσεγγίσουν την συμπεριφορά εισόδου/εξόδου όσο πιο καλά γίνεται. Ωστόσο όλες αυτές οι τεχνικές καταλήγουν σε πυκνούς πίνακες που καθιστούν την προσομοίωσή τους μη πρακτική, επισκιάζοντας την όποια μείωση διάστασης του προβλήματος.

Προηγούμενες μέθοδοι που προσπαθούν να αντιμετωπίσουν το παραπάνω

πρόβλημα έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία. Ωστόσο όλες οι προηγούμενες μέθοδοι στηρίζονται σε ευρεστικές τεχνικές, που τις καθιστούν μη καθολικά εφαρμόσιμες. Συνεπώς, σε αυτή την εργασία σκοπός είναι να μελετηθούν οι προηγούμενες τεχνικές και να αναπτυχθεί μια μεθοδολογία που να αποφαίνεται κάτω από ποιες προϋποθέσεις αυτές μπορούν να επιταχύνουν την προσομοίωση των αγωγών διασυνδέσεων, κατά την διάρκεια της χρονικής ανάλυσης ενός κυκλώματος.

## 1.2 Σκοπός της Εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση της χρονικής διάρκειας που απαιτείται για να εκτελεστεί ένα κύκλωμα σε σχέση με το υποβαθμισμένο μοντέλο του, καθώς και πόσο χρόνο χρειάζεται για να προσομοιωθεί το αρχικό κύκλωμα σε σύγκριση με το μειωμένης τάξεως μοντέλο του. Επειδή όμως μας ενδιαφέρει και η ακρίβεια η εργασία περατώνεται με την παρουσίαση δύο παραμέτρων σφάλματος στις κυματομορφές του τελικού σήματος.



# Chapter 2

## Τεχνικό Υπόβαθρο

### 2.1 Βασικές Αρχές Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων

Γενικά ο τρόπος με την οποίο συνδέονται τα στοιχεία όπως οι αντιστάσεις, τα πηνία και οι πυκνωτές δημιουργεί και τα αντίστοιχα κυκλώματα ή δίκτυα. Έτσι για παράδειγμα η σύνδεση αντιστάσεων και πυκνωτών δημιουργεί το περίφημο RC κύκλωμα. Οι συνδέσεις μεταξύ τους γίνονται με καλώδια των οποίων τα χαρακτηριστικά μας δίνονται σε μια λίστα. Ομοίως και το RLC κύκλωμα αποτελείται από την σύνδεση πυκνωτών, αντιστάσεων και πηνίων. Κάθε ένα από τα τρία παραπάνω στοιχεία επηρεάζουν το κύκλωμα αφού μειώνουν την αξιοπιστία του σε απόδοση και σε κατανάλωση, σύμφωνα με τον τρόπο σύνδεσής τους, είτε παράλληλα είτε σε σειρά.

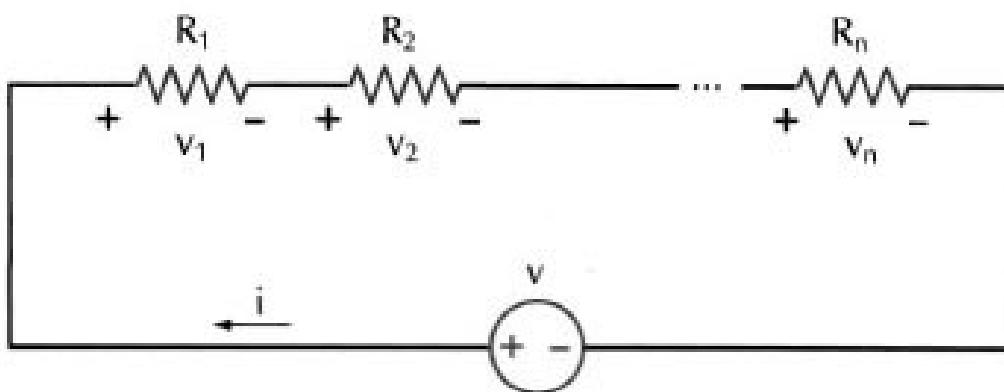


Figure 2.1: Σύνδεση σε σειρά

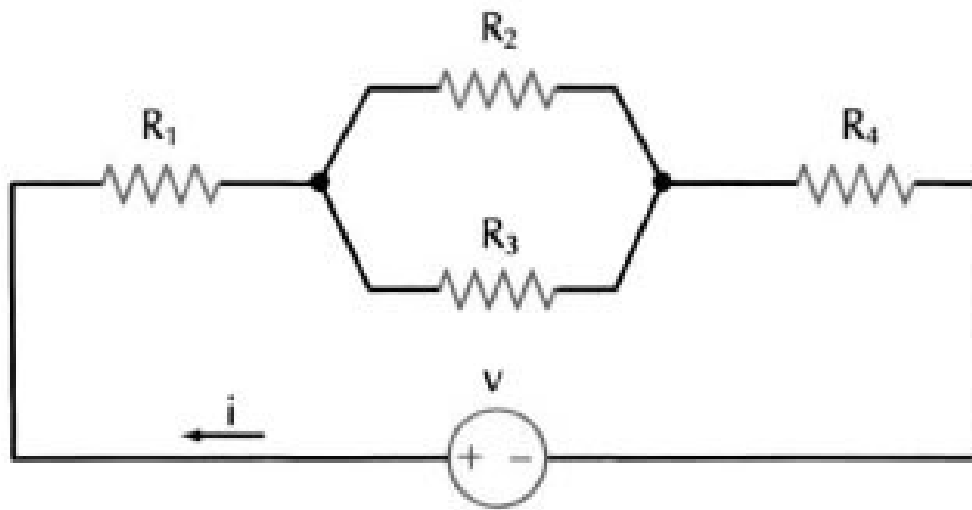


Figure 2.2: Σύνδεση παράλληλα

Αυτό όμως που θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα είναι μια πολύ χρήσιμη τεχνική ανάλυσης των γραμμικών κυκλωμάτων, η μέθοδος ισοδύναμων κυκλωμάτων, δηλαδή η απλοποίηση ενός σύνθετου κυκλώματος σε ένα απλό ισοδύναμο με το αρχικό. Η θεωρία που επιτρέπει αυτή την μετατροπή είναι γνωστή με τα θεωρήματα Norton και Thevenin.

## 2.2 Θεώρημα Thevenin

Σύμφωνα με το Θεώρημα Thevenin οποιαδήποτε δίκτυα με δύο τελικά άκρα (two terminal network) που περιέχουν πηγές τάσης και ρεύματος καθώς και άλλα γραμμικά στοιχεία έχουν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά με ένα ισοδύναμο κύκλωμα που αποτελείται από μια ενιαία πηγή τάσης  $V_{Th}$  σε σειρά με μία ενιαία αντίσταση  $R_{Th}$ .

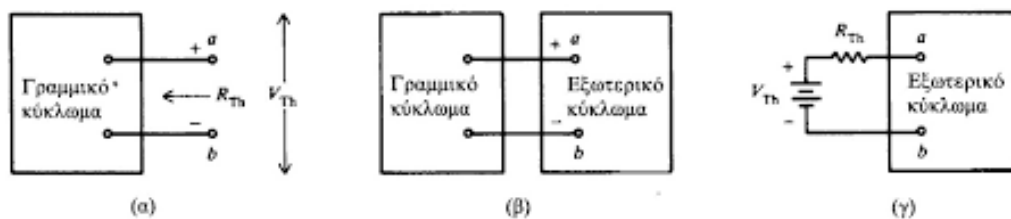


Figure 2.3: Ισοδύναμο Κύκλωμα Θεώρημα Thevenin

Η τάση Thevenin  $V_{TH}$  είναι ίση με την τάση του ανοιχτού κυκλώματος (open circuit) όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (γ).

$V_{TH} = V$  open circuit Από την άλλη η αντίσταση Thevenin δίνεται σε συνάρτηση με την τάση του ανοιχτού κυκλώματος και του ρεύματος βραχυκυκλώματος (short circuit). Εναλλακτικός τρόπος έκφρασης της αντίστασης είναι να θεωρηθεί ότι η  $R_{TH}$  είναι ίση με την αντίσταση με όλες τις πηγές τάσης βραχυκυκλωμένες και τις πηγές ρεύματος ανοιχτές.  
 $R_{TH} = V$  open circuit /  $I$  short circuit

## 2.3 Θεώρημα Norton

Αποτελείται από μια ανεξάρτητη πηγή ρεύματος παράλληλη με την ισοδύναμη αντίσταση Norton. Πιο απλά μπορούμε να το βρούμε χρησιμοποιώντας ένα ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin με ένα μετασχηματισμό πηγής (source transformation).

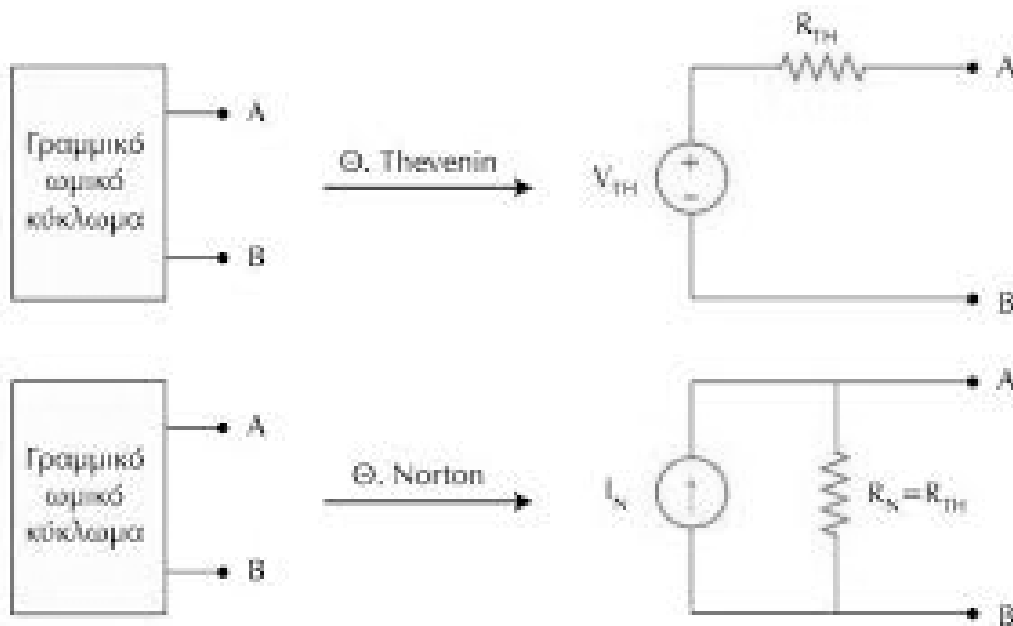


Figure 2.4: Σύγκριση Θ. Norton με Θ. Thevenin

Με βάση την τάση Thevenin η πηγή Norton υπολογίζεται ως εξής:  $I_N = V_{TH} / R_{TH}$  Κατά συνέπεια το ρεύμα Norton είναι ίσο με το ρεύμα βραχυκυκλώματος στα τερματικά και η αντίσταση Norton είναι ίδια με την αντίσταση Thevenin. Σε μερικές βέβαια περιπτώσεις η εξεύρεση του Norton μέσω του Thevenin είναι ακατόρθωτη, έτσι η ένταση  $I_N$

μπορεί να βρεθεί με ανάλυση εάν υποθέσουμε ότι τα δύο τερματικά είναι βραχυκυκλωμένα.

## 2.4 Μοντελοποίηση Κυκλώματος RLC

Η μοντελοποίηση του κυκλώματος ξεκίνα αναγνωρίζοντας, σε πρώτο στάδιο, τα αρχεία εισόδου του RLC κυκλώματος που αναφέρονται σε μία λίστα (netlist). Ο αναλυτής που αναπτύσσεται αμέσως μετά, σε γλώσσα C, θα πρέπει να δημιουργεί μια συνδεδεμένη λίστα, στην οποία κάθε στοιχείο-εγγραφή να αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο του κυκλώματος εισόδου και να καταγράφει τον τύπο του ακροδέκτη καθώς και τις τιμές των παραμέτρων του. Επιπρόσθετα η τοπολογία του κυκλώματος προκύπτει από την συνδεσιμότητα και όχι από την φύση των κυκλωματικών στοιχείων του. Εάν  $V = 0,1,2,\dots,n-1$  το σύνολο των κόμβων ή κορυφών του κυκλώματος και  $E = e_1,\dots,e_n$  το σύνολο των κλάδων ή ακμών του κυκλώματος, τότε ο ελαττωμένος πίνακας που δημιουργείται ορίζεται ως εξής:

$$a_{i,j} = \begin{cases} +1 & \text{εάν ο κλάδος } j \text{ εξέρχεται από τον κόμβο } i \\ -1 & \text{εάν ο κλάδος } j \text{ εισέρχεται από τον κόμβο } i \\ 0 & \text{εάν ο κλάδος } j \text{ δεν συνδέεται από τον κόμβο } i \end{cases}$$

Και οι διαστάσεις του πίνακα A είναι  $(n-1) \times m$ . Στην συνέχεια έστω ότι τα k στοιχεία ενός κυκλώματος χωρίζονται σε δύο ομάδες:

1) Στοιχεία των οποίων οι εξισώσεις μπορούν να γραφούν υπό την μορφή  $i_x(t) = g_k * u_k(t) + c_k * du(t)/dt + s_k(t)$ , συμπεριλαμβάνοντας τις αντιστάσεις, χωρητικότητες και τις πηγές ρεύματος.

2) Στοιχεία των οποίων οι εξισώσεις δεν μπορούν να γραφούν με την παραπάνω μορφή ή επιζητείται το ρεύμα τους κατά την προσομοίωση. Εδώ περιλαμβάνονται οι αυτεπαγωγές και οι πηγές τάσης, καθώς και οι αντιστάσεις των οποίων το ρεύμα είναι το ζητούμενο.

Τότε χωρίζουμε τον ελαττωμένο πίνακα A και τα διανύσματα σε υποπίνακες και υποδιανύσματα, που αντιστοιχούν σε δύο ομάδες στοιχείων,  $m_1 + m_2 = m$ , όπου  $m_1$  και  $m_2$  τα στοιχεία του των δυο ομάδων και έχουν ως εξής  $A = [ A1, A2 ]$  και

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}$$

$$i(t) = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix}, \text{ όπου } m_1 \times 1 \text{ και } m_2 \times 2$$

Έτσι με τον πρώτο Νόμο του Kirchhoff έχουμε :

$$\alpha) A_i(t) = 0 \iff A_1 i(t) + A_2 i(t) = 0$$

$$\beta) u(t) = A^T * u(t) \iff \begin{cases} u_1(t) = A_1^T * u(t) (1) \\ u_2(t) = A_2^T * u(t) (2) \end{cases} \text{ καθώς } A^T = \begin{bmatrix} A_1^T \\ A_2^T \end{bmatrix}$$

Οι εξισώσεις των στοιχείων της πρώτης ομάδας γράφονται ως εξής:  
 $i_1(t) = G * u_1(t) + C du_1(t)/dt + s_1(t) (3)$

Όπου G διαγώνιος πίνακας (με μη μηδενικά στοιχεία στη θέση των αντιστάσεων και μηδενικά στις χωρητικότητες και τις πηγές ρεύματος), C διαγώνιος πίνακας (με μη μηδενικές τιμές στη θέση των χωρητικότητων) και  $s_1(t)$  διάνυσμα (με μη μηδενικές τιμές των πηγών ρεύματος).

Και της δεύτερης ως εξής:

$$u_2(t) = R * i_2(t) + L du_2(t)/dt + s_2(t) (4)$$

Όπου R διαγώνιος πίνακας (με μη μηδενικά στοιχεία στη θέση των αντιστάσεων των οποίων το ρεύμα επιζητάτε), L διαγώνιος πίνακας (με μη μηδενικές τιμές στη θέση των αυτεπαγωγών) και  $s_2(t)$  διάνυσμα (με μη μηδενικές τιμές των πηγών τάσεως).

Αντικαθιστώντας την (β) (1) στην (3) προκύπτει:

$$A_1 G A_1^T u(t) + A_1 G A_1^T du(t)/dt + A_2 i_2(t) = A_1 s_1(t) (5)$$

Και από την (β) (2) στην (4) προκύπτει:

$$A_2^T u(t) - L di_2(t)/dt - R i_2(t) = s_2(t) (6)$$

Η (5) αποτελεί ένα σύστημα  $(n-1)$  εξισώσεων ως προς  $(n-1) + m_2$  αγνώστους-συναρτήσεις και η (6) ένα σύστημα  $m_2$  εξισώσεων ως προς τους ίδιους αγνώστους. Ο συνδυασμός τους θα μας δώσει το παρακάτω σύστημα MNA που θα μας απασχολήσει αργότερα.

$$\begin{pmatrix} A_1 G A_1^T & A_2 \\ A_2^T & -R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u(t) \\ i_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_1 C A_1^T & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \frac{du(t)}{dt} \\ \frac{di_2(t)}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -A_1 s_1(t) \\ s_2(t) \end{pmatrix}$$

## Chapter 3

# Διάφορες Τεχνικές Μέθοδοι Υποβάθμισης

Καθώς όλα γύρω μας τα κυκλώματα και τα συστήματα συνεχίζουν να σχεδιάζονται πιο μικρά και γενικά για πιο γρήγορες λειτουργίες, τα μοντέλα διασύνδεσης RLC έχουν ολοένα και πιο κυρίαρχη επιρροή στην μετάδοση του σήματος όπως ποτέ άλλοτε. Επιπλέον η σταθερότητα και παθητικότητα των μακρομοντέλων είναι ιδιαίτερος απαραίτητη, ώστε να είναι εγγυημένη η συνολική σταθερότητα του κυκλώματος, μιας και τα ενεργά και παθητικά μοντέλα φορτιού να είναι συνδεδεμένα. Γι' αυτό το λόγο η σωστή υποβάθμιση του κυκλώματος πρέπει να είναι προσεκτική. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι υποβάθμισης όπως η PRIMA, SPRIM, SIP και PACT. Στην συγκεκριμένη εργασία όμως θα ασχοληθούμε περισσότερο με την μέθοδο της PRIMA, η οποία είναι μια γενική μέθοδος που μας αποδίδει ένα υποβαθμισμένο παθητικό μακρομοντέλο από ένα γραμμικό σύστημα RLC και θα το συγκρίνουμε με την τε. Εδώ αποδεικνύεται πως με τους όρους μιας απλής υλοποίησης, η οποία επεκτείνει την τεχνική του Arnoldi για να συμπεριλάβει εγγυημένη παθητικότητα, παρέχεται απίστευτη ακρίβεια.

### 3.1 Η Μέθοδος της PRIMA

Ουσιαστικά η PRIMA μας αποδίδει ακρίβεια που είναι συγκρίσιμη με το MPVL και ανώτερη από την τεχνική Arnoldi. Έτσι η συγκεκριμένη τεχνική για παθητική υποβάθμιση, που είναι η βάση της PRIMA, είναι αρκετά γενική, ώστε να εμπλέξει πολυάριθμους μεθόδους δημιουργίας χώρου κατά Krylov. Συνεπώς μια απλή εφαρμογή της PRIMA είναι η χρήση των μπλοκ του αλγόριθμου του Arnoldi για να δημιουργήσουμε

τα απαραίτητα διανύσματα, ώστε να τα εφαρμόσουμε για να μετασχηματίσουμε τους MNA πινάκες. Ουσιαστικά η PRIMA είναι μια παθητική μέθοδος βασισμένη στον μπλοκ αλγόριθμο του Arnoldi.

Αφού κάνουμε  $[q/N] + 1$  επαναλήψεις στον αλγόριθμο του Arnoldi, όπου  $n \times q$  ο πίνακας  $H$  και  $q \times q$  ο πάνω Hessenberg πίνακας  $H$  βρίσκονται ως:

$$\text{colps}(X) = \text{Kr}(A, R, q)$$

$$X^T X = I_q \quad (3.1)$$

$$X^T A X = H(1) \quad (3.2)$$

Με την χρήση του κλασικού Arnoldi έχουμε τον μειωμένης τάξης πίνακα  $Y$  που προκύπτει από την μετατροπή των πινάκων MNA με την μέθοδο Laplace.

$$Y(s) = L^T X (I - sH)^{-1} X^T R(2) \quad (3.3)$$

Στον αλγόριθμό της PRIMA, οι πίνακες αγωγιμότητας και αναγκαιότητας είναι κατευθείαν μειωμένης τάξης και έτσι η παθητικότητα εμφανίζεται κατά την υποβάθμιση. Θέτοντας την αλλαγή μεταβλητής  $x_n = X x_n$  και πολλαπλασιάζοντας την πρώτη γραμμή του πίνακα  $X^T$  έχουμε:

$$(X^T C X) x_q = -(X^T C X) x_q + (X^T B) u_N \quad (3.4)$$

$$i_N = (L^T X) x_q(3) \quad (3.5)$$

Έτσι για το μακρομοντέλο, οι μειωμένης τάξεως πίνακες είναι:

$$C = X^T C X G = X^T G X \quad (3.6)$$

$$B = X^T B L = X^T L(4) \quad (3.7)$$

Αυτός ο τύπος αποτελεί την μαθηματική αναλογία της μετατροπής. Από τον (3) τύπο έτσι έχουμε:

$$Y(s) = L^T (G + sC)^{-1} B(6) \quad (3.8)$$

Επειδή το μέγεθος των πινάκων  $G$  και  $C$  είναι μικρό, είναι πολύ εύκολο να βρούμε τους πόλους και τα μηδενικά του  $Y(s)$ . Η πολυπλοκότητα του αλγόριθμου είναι βασικά ίδια με την διαδικασία του μπλοκ του Arnoldi. Ο αλγόριθμος του Arnoldi χρησιμοποιείται μόνο για να παράγουμε

τα μπλοκ του Krylon που είναι απαραίτητα για την παραπάνω μαθηματική αναλογία.

Τέλος χρησιμοποιώντας τις ίδιες αρχές με την μέθοδο της PRIMA, μπορούμε να παράγουμε παθητικά υποβαθμισμένα μοντέλα για το σύνολο των RLC κυκλωμάτων με πάρα πολλούς τρόπους.

### **3.2 Χρονική Ανάλυση του Υποβαθμισμένου Μοντέλου (RICE)**

Το λογισμικό αξιολόγησης της ταχείας διασύνδεσης κυκλωμάτων (RICE(Rapid Interconnect Circuit Evaluation)) αναπτύχθηκε για να αναλύει μοντέλα διασύνδεσης RC και RLC οποιαδήποτε μεγέθους και πολυπλοκότητας. Το RICE εστιάζει συγκεκριμένα στο πρόβλημα παθητικής διασύνδεσης του κυκλώματος εφαρμόζοντας την τεχνική αντιστοίχισης του χρόνου στην εκτίμηση των ασυμπτωτικών κυματομορφών (AWE) και την τεχνική εφαρμογής συγκεκριμένης ανάλυσης των κυκλωμάτων, ώστε να αποδώσει μεγάλο κέρδος στον χρόνο εκτέλεσης της διάδοσης του σήματος χωρίς να θυσιάσει καθόλου την ακρίβεια του.

Η καθυστέρηση στην διάδοση του σήματος που προκύπτει στα κυκλώματα οφείλεται σε δύο παραμέτρους, πρώτα στις πύλες και δεύτερον στην διασύνδεση του κυκλώματος. Πάρα πολύ προσομοιωτές ανάλυσης του χρόνου υποθέτουν ότι η καθυστέρηση αποδίδεται κατά κύριο λόγο στην πύλη που οδηγεί την συνολική χωρητικότητα του φορτιού. Ωστόσο οι σχεδιαστές ανακάλυψαν ότι η μεγαλύτερη καθυστέρηση του σήματος προέρχεται από τις επιδράσεις που έχει η διασύνδεση του κυκλώματος και μάλιστα αποδίδουν ένα εβδομήντα τις εκατό (70%) πάνω σε αυτή την εκδοχή.

Επιπρόσθετα η συγκεκριμένη τεχνική αναπτύχθηκε ειδικά για τον χαρακτηρισμό των κυκλωμάτων διασύνδεσης RLC. Γενικά το RICE μας αποδίδει αποτελέσματα πιο αποδοτικά για μεγάλα κυκλώματα. Η βασική τεχνική που χρησιμοποιεί είναι η μέθοδος της αντιστοίχισης του χρόνου σε ασυμπτωτικές κυματομορφές, που εστιάζει στο πρόβλημα της παθητικής διασύνδεσης λαμβάνοντας υπ' όψιν την πλήρη αξιοποίηση της κανονικότητας του κυκλώματος. Ουσιαστικά αναλύει το κύκλωμα αξιοποιώντας τις απλές τοπολογίες του και διασφαλίζοντας σταθερά αποτελέσματα.

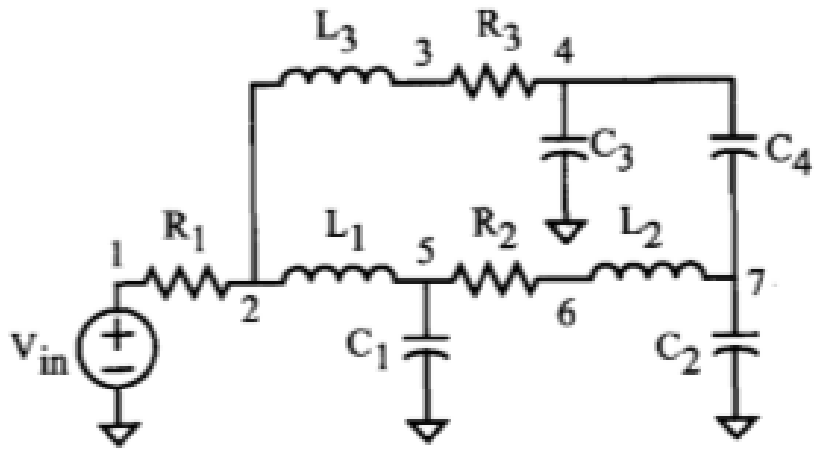
Η τεχνική αντιστοίχισης του χρόνου εξαρτάται από δύο κρίσιμες παραδοχές, πρώτα τα moments να μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια και αποδοτικότητα και έπειτα να μπορούν να ταιριάζουν κατά προσέγγιση



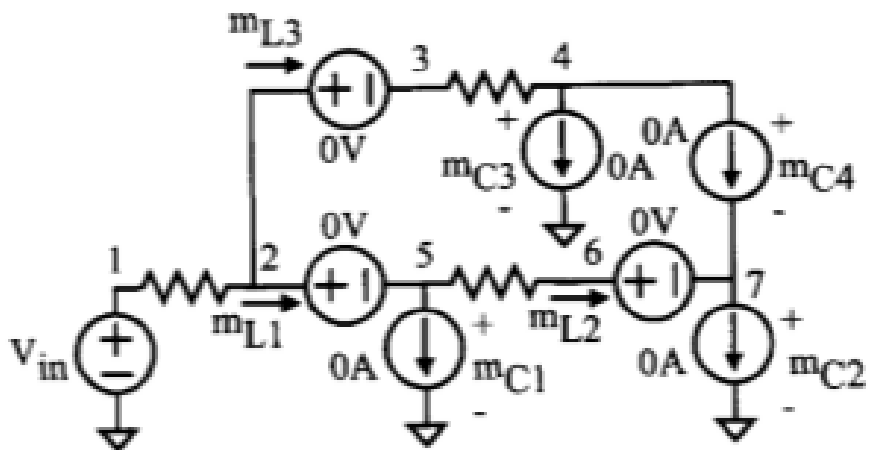
στο υποβαθμισμένο μοντέλο. Η κομψότητα αυτής της τεχνικής είναι η απόδοση του τρόπου με τον οποίο υπολογίζονται οι χρόνοι σε ένα γραμμικό κύκλωμα. Απαιτεί ανάλυση σε λίγα διαδοχικά dc κυκλώματα, όπου οι πυκνωτές αντικαθιστούνται από πηγές ρεύματος dc και τα πηνία από πηγές τάσης dc.

Η διαδικασία αρχίζει με την αντικατάσταση της εισόδου με μια πηγή συνεχούς ρεύματος που είναι ίση με την τελική αξία του κυκλώματος. Οι επόμενες τάσεις σε κάθε μία πηγή πυκνωτή ρεύματος αποτελεί την πρώτη γενιά του χρόνου κάθε πυκνωτή. Ομοίως το ίδιο ισχύει και για τα πηνία, με την πρώτη γενιά να παρουσιάζεται με το πρώτο moment. Οι επόμενες γενιές των moments υπολογίζονται μηδενίζοντας την πηγή και αντικαθιστώντας κάθε πηγή πυκνωτή και πηνίου με την δημιουργία του προηγούμενου moment και αντιστοιχώντας την τιμή της χωρητικότητας και της επαγωγής.

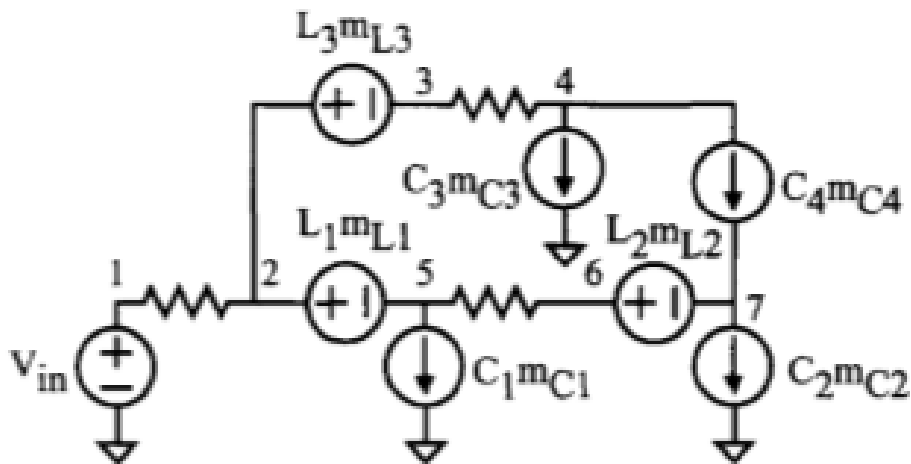
Για να το κατανοήσουμε ως υποθέσουμε έχοντας ένα RLC κύκλωμα και η πρώτη γενιά των moment δημιουργείται με τον μετασχηματισμό του κυκλώματος σε ένα ισοδύναμο dc κύκλωμα. Οι τάσεις σε κάθε ένα πυκνωτή και πηνίο αποτελούν την πρώτη γενιά. Η νέα γενιά των moments δημιουργείται με την αντιστοίχιση της χωρητικότητας και της επαγωγής σε κάθε έναν πυκνωτή και πηνίο αντίστοιχα. Και το κύκλωμα ξανά επιλύεται. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να πάρουμε τον επιθυμητό αριθμό των moments που θέλουμε. Η διαδικασία απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.1: (a) RLC Κύκλωμα (b) Ισοδύναμο Πρώτης Τάξης (c) Ισοδύναμο Δεύτερης Τάξης

Ο λόγος που η συγκεκριμένη διαδικασία είναι πιο γρήγορη από μία προσωρινή ανάλυση του κυκλώματος είναι λόγω των λίγων dc αναλύσεων που χρειάζονται για να βρούμε τα moments και γιατί η αντιστοίχιση των moments αυτών με τους πραγματικούς πόλους είναι πιο αποτελεσματικοί για ένα μικρό αριθμό πόλων. Επίσης η προσωρινή ανάλυση απαιτεί ένα τεράστιο αριθμό από υπολογισμούς για να βρούμε τα moments.

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει πως ο πρωταρχικός παράγοντας για να εγγραφούμε αποδοτικότητα είναι να αναπτύξουμε μια αποτελεσματική αλγοριθμική ανάλυση dc κυκλωμάτων, το οποίο γίνεται με μια τεχνική εντοπισμού του μονοπατιού (path-tracing). Έτσι η ανάπτυξη της μεθόδου του RICE είναι να επιτρέπει της δομές δέντρου του κυκλώματος να είναι όσο το δυνατόν πιο αποδοτικές, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει στα μοντέλα

να αποκλίνουν από την υποβαθμισμένη απόδοση τους κατά ένα ποσό λιγότερο ή περισσότερο αναλογικά με την τυπολογική τους διάταξη.

### 3.2.1 Υπολογισμός Moments σε RLC Κύκλωμα

Πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση του για τον βασικό εντοπισμό μονοπατιού για RLC δέντρα, είναι αναγκαίο να διευκρινίσουμε το γεγονός, πως αν ένα δέντρο ενός κυκλώματος δημιουργηθεί και περιλαμβάνει όλες τις πηγές τάσεις, πηνία και αντιστάσεων και εξαιρεί όλους τους πυκνωτές και τις πηγές ρεύματος, τότε το μοντέλο του κυκλώματος έχει αυστηρά σκληρή δομή δέντρου. Η διαδικασία του RICE χειρίζεται κυκλώματα τα οποία δεν πληρούν αυτή την προϋπόθεση, αλλά αυτά τα οποία μπορούν να δεχτούν επεκτάσεις στον βασικό αλγόριθμο τους. Συνεπώς για να δημιουργηθεί ένα δέντρο κυκλώματος διασύνδεσης πρέπει να θεωρήσουμε όλους τους πυκνωτές σαν συνδέσεις και όλες τις αντιστάσεις και πηνία σαν κλαδιά του δέντρου.

### 3.2.2 Ο Βασικός Αλγόριθμος Υπολογισμού Διαδρομής

Δημιουργώντας το ισοδύναμο κύκλωμα dc για να βρούμε τα moments καθώς καθορίζονται οι τιμές στις πηγές ρεύματος του πυκνωτή και στις πηγές τάσεων του πηνίου, ένα διάγραμμα δέντρου μπορεί να διασχιστεί ώστε να επιλυθούν τα ρεύματα και οι τάσεις του κυκλώματος dc. Με μία διέλευση μπορούν να υπολογιστούν τα ρεύματα στα κλαδιά του δέντρου και με άλλη μια να υπολογιστούν όλες οι τάσεις στους κόμβους.

Καθώς διασχίζουμε το δέντρο σε κάθε κόμβο αθροίζουμε τα ρεύματα των συνδέσεων και των κλαδιών, εξαιρώντας το ρεύμα του κλαδιού που συνδέει τον κόμβο με τον προκάτοχό του. Το συνολικό άθροισμα μας δίνει το συνολικό ρεύμα για το κλαδί του δέντρου μέχρι τον κόμβο του προκάτοχου. Η χρήση της αντίστροφης διαδρομής μας εγγυάται ότι ένας κόμβος δεν επισκέφθηκε, μέχρις ότου όλα τα ρεύματα από όλα τα κλαδιά από τον κόμβο του απόγονου να είναι γνωστά. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν όλοι οι κόμβοι είναι γνωστοί. Για κάθε πηνίο το ρεύμα το οποίο υπολογίζεται αποτελεί το νέο moment του, και αυτή που θα χρησιμοποιηθεί για να βρούμε την επόμενη γενιά των moments. Το ίδιο ισχύει και για τους πυκνωτές και για τις αντιστάσεις χρησιμοποιώντας αντίστοιχα την χωρητικότητα και την ανοχή τους για να βρούμε την επόμενη γενιά των moments.

Η παραπάνω διαδικασία για να παράγει όλα τα moments θα χρειαστεί να διασχίσει πάρα πολλές φορές το γράφημα του δέντρου. Ένας πιο

αποδοτικός τρόπος είναι να πραγματοποιηθεί μια εικονική αναζήτηση. Επίσης αυτή η τεχνική βελτιώνει και την χρήση της μνήμης κατά τον χρόνο εκτέλεσης, διότι δεν μειώνει τον όγκο της μνήμης αλλά ελαχιστοποιεί τα σφάλματα τα οποία προκύπτουν κατά την διάρκεια της εικονικής αναζήτησης.

Για να κατανοήσουμε την τεχνική της εικονικής αναζήτησης πρέπει να αναγνωρίσουμε ότι ένα κύκλωμα dc χρειάζεται πραγματικά μια μόνο διαδρομή αναζήτησης ανεξάρτητα από των αριθμό των moments που απαιτούνται, διότι στο γράφημα οι κόμβοι επισκέπτονται με την ίδια σειρά για κάθε γενιά moments. Συνεπώς μπορούμε να διασχίσουμε το δέντρο μια φορά και να απομνημονεύσουμε τις τοποθεσίες και τις τάξεις των συνδέσμων και κλαδιών του. Με την απομνημόνευση μπορούμε να οργανώσουμε το δέντρο σε ένα σύνολο αριθμητικών διανυσμάτων και να τα συμπίεσουμε σε μια λίστα, για να έχουμε μεγαλύτερη αποδοτικότητα, η οποία μας περιγράφει τις αριθμητικές πράξεις που πρέπει να εκτελεστούν στα διανύσματα ώστε να παραχθούν τα αποτελέσματα του αλγόριθμου της αναζήτησης της διαδρομής.

### 3.2.3 Προβλήματα Τοπολογικής Διάταξης του Κυκλώματος και Επιλύσεις

#### 3.2.3.1 Βρόχοι Αντιστάσεων

Ένας τύπος τυπολογικής διάταξης που μας δημιουργεί πρόβλημα στην εύρεση των moment είναι οι βρόχοι αντιστάσεων, οι οποίοι είναι ανεπιθύμητοι, λόγω του ότι δεν γνωρίζουμε από πριν τα ρεύματα των αντιστάσεων. Ένας τρόπος επίλυσης του προβλήματος διαχείρισης ενός μόνο βρόχου, είναι η χρήση της μεθόδου του Kron που χρησιμοποιεί το θεώρημα του Thevenin.

$$I_R = U_{oc}/R_{i\text{nk}} + R_i h \quad (3.9)$$

Όπου εδώ ουσιαστικά αντικαθιστούμε τον βρόχο της αντίστασης με πηγή ρεύματος αξίας IR έτσι αποκαθιστούμε την δομή του δέντρου και μπορούμε να κάνουμε αναζήτηση της διαδρομής. Η ύπαρξη πολλών βρόχων αντιστάσεων μας αναγκάζει να αναπτύξουμε έναν πιο αποδοτικό τρόπο συμπίεσης των κυκλωμάτων με την δημιουργία ενός πιο μικρότερου ισοδύναμου κυκλώματος, που να μπορεί να λυθεί πιο εύκολα για να υπολογίσουμε τα ρεύματα στις αντιστάσεις. Η τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί εδώ είναι παρόμοια με την πρώτη, με μια διαφορά, ότι μας δίνεται η δυνατότητα να δημιουργήσουμε πηγές τάσεων και η ικανότητα να

διαχειριστούμε μηδενικές αντιστάσεις. Με την χρήση του θεωρήματος του Norton αντικαθιστούμε τους βρόχους με ένα σουπερ δέντρο όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

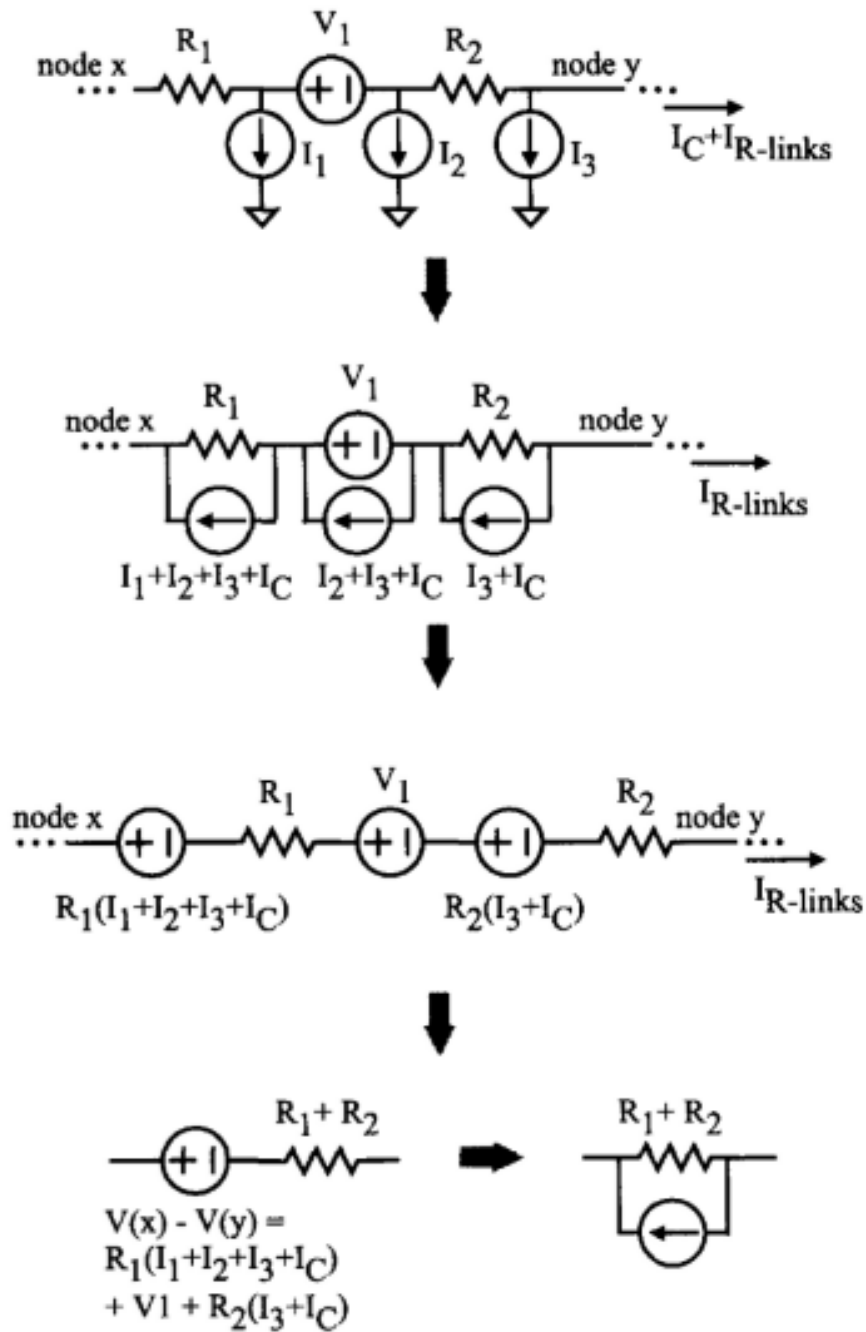


Figure 3.2: Δημιουργία Super-Tree

Χρησιμοποιείται το θεώρημα Norton σε σχέση με το θεώρημα Thevenin,

λόγω της διευκόλυνσης που μας δίνει ο Norton ώστε να χρησιμοποιήσουμε την ανάλυση κόμβων για να επιλύσουμε ένα συμπαγές κύκλωμα. Επιπλέον η χρήση του Θεωρήματος του Norton μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε την αποσύνθεση του Cholesky για την εύρεση των τάσεων στους κόμβους. Συνοφίζοντας για να επιλύσουμε ένα συμπαγές κύκλωμα και να δημιουργήσουμε τα moments, πραγματοποιούμε εικονική αναζήτηση, έπειτα υπολογίζουμε με το Θεώρημα του Norton τα ρεύματα και τις τάσεις με την μέθοδο του Cholesky και φτάνουμε στην τελική λύση με μια δεύτερη εικονική αναζήτηση.

### 3.2.3.2 Ασταθείς Κόμβοι και Βρόχοι Πηνίων

Η ύπαρξη ενός ασταθή κόμβου δημιουργεί έναν καθαρό διαχωρισμό των πυκνωτών στο γράφημα, με την αντικατάσταση του πυκνωτή με πηγή ρεύματος. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με την χρήση της αρχής διατήρησης του φορτιού για κάθε έναν πυκνωτή. Η συγκεκριμένη τεχνική ισχύει μόνο για τους πυκνωτές. Έτσι το σύστημα επιλύεται με την χρήση της LU αποσύνθεσης πριν υπολογίσουμε τυχόν moments. Για να υπολογίσουμε τις γενιές των moments απαιτούνται δυο εικονικές αναζητήσεις, μεταχειρίζοντας παράλληλα τους πυκνωτές σαν μηδενικές πηγές τάσεως.

Από την άλλη η ύπαρξη βρόχων με πηνία μπορεί να προκύψει κατά την μοντελοποίηση μιας βασικής μονάδας διασύνδεσης, όπου δύο συσκευές οδηγούν μια γραμμή ταυτόχρονα και η γραμμή μοντελοποιείται χωρίς επαγωγικές απώλειες. Η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος είναι ίδια με την παραπάνω με την μόνη διαφορά ότι εδώ χρησιμοποιούμε την αρχή διατήρησης της ροής.

Τελειώνοντας αν τα κυκλώματα περιέχουν έναν συνδυασμό από τους παραπάνω τύπους, τότε πρέπει να οριοθετηθεί μια συγκεκριμένη σειρά επίλυσης, με της συνδέσεις των πηνίων να επιλύονται πρώτα, σε συνέχεια οι πυκνωτές και τέλος οι βρόχοι αντιστάσεων. Οι βρόχοι πηνίων, που συμπεριλαμβάνουν άλλα πηνία ή άλλους πυκνωτές, δεν επηρεάζουν το κύκλωμα και δεν επηρεάζονται από τις αλλαγές των βρόχων των αντιστάσεων.

### 3.2.4 Αντιστοίχιση των Moment

Μόλις παραχθούν τα moments όπως αναφέρθηκε παραπάνω πρέπει να ταιριαστούν με τους πόλους του υποβαθμισμένου μοντέλου. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι με την πρότυπη τεχνική να γίνεται με την επίλυση του παρακάτω πολυωνύμου:



$$\begin{bmatrix} m_0 & m_1 & \cdots & m_{q-1} \\ m_1 & m_2 & \cdots & m_q \\ & \vdots & & \vdots \\ m_{q-1} & m_q & \cdots & m_{2q-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{q-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_q \\ -m_{q+1} \\ \vdots \\ -m_{2q-1} \end{bmatrix}$$

$$a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 + \cdots + a_{q-1}\tau^{q-1} + \tau^q = 0$$

Το μοναδικό πρόβλημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι ότι μπορεί να δώσει ασταθή μοντέλα για μεγάλο αριθμό κυκλωμάτων διασύνδεσης. Αυτό το πρόβλημα προκαλείται από εγγενή αστάθεια που σχετίζεται με τις τεχνικές αντιστοίχισης των moments και την αξία του θορύβου στα moment.

Το πρόβλημα αυτό μπορούμε να το παρακάμψουμε, ωθώντας τους πόλους να έχουν αρνητικά μέρη δεδομένου ότι τα μοντέλα είναι αυστηρά παθητικά. Αυτή η τεχνική δουλεύει καλά για RC κυκλώματα που έχουν πραγματικούς πόλους, ενώ είναι πολύπλοκο για RLC κυκλώματα. Επίσης μια δεύτερη προσέγγιση είναι να κάνουμε μετατόπιση των moments, αποκλείοντας την χαμηλότερη τάξη των στιγμών και προσθέτοντας την υψηλότερη τάξη. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να έχουμε σταθερό μοντέλο, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι μπορεί να επιτευχθεί, ή μέχρι να μην γίνεται άλλη χρονική μετατόπιση. Ουσιαστικά με αυτό τον τρόπο αποβάλλουμε τις υψηλές συχνότητες που δημιουργούν αστάθεια.

Τέλος είναι δύσκολο να οριοθετήσουμε τα λάθη των κυματομορφών στο πεδίο του χρόνου, με αποτέλεσμα η επιλογή της κατάλληλης σειράς προσέγγισης να είναι αρκετά επίπονη.

### 3.2.5 Απόδοση και Αποτελέσματα

Η μέθοδος του RICE μπορεί να αναλύσει κυκλώματα RLC, αλλά η ανάλυση είναι αρκετά ευαίσθητη με τον αριθμό των πόλων του κυκλώματος. Παράμετροι όπως η απώλεια γραμμής, χωρητική και επαγωγική σύζευξη και ο μεταβατικός χρόνος της εισόδου επηρεάζουν την απαιτούμενη προσέγγιση και μερικές φορές απαιτούν πιο ισχυρές μεθόδους αντιστοίχισης των moments.

Συγκρίνοντας δύο μοντέλα στις παρακάτω εικόνες, που έχουμε ένα RLC μοντέλο και ένα συγκεντρωτικό RLC μοντέλο που αποδίδεται από την εταιρία, διαπιστώνουμε ότι οι κυματομορφές είναι σχεδόν δυσδιάκριτες. Ο συνολικός χρόνος λειτουργίας με την μέθοδο του RICE είναι 0,04 cpu-seconds ενώ με την μέθοδο PSPICE είναι 23,05 seconds.

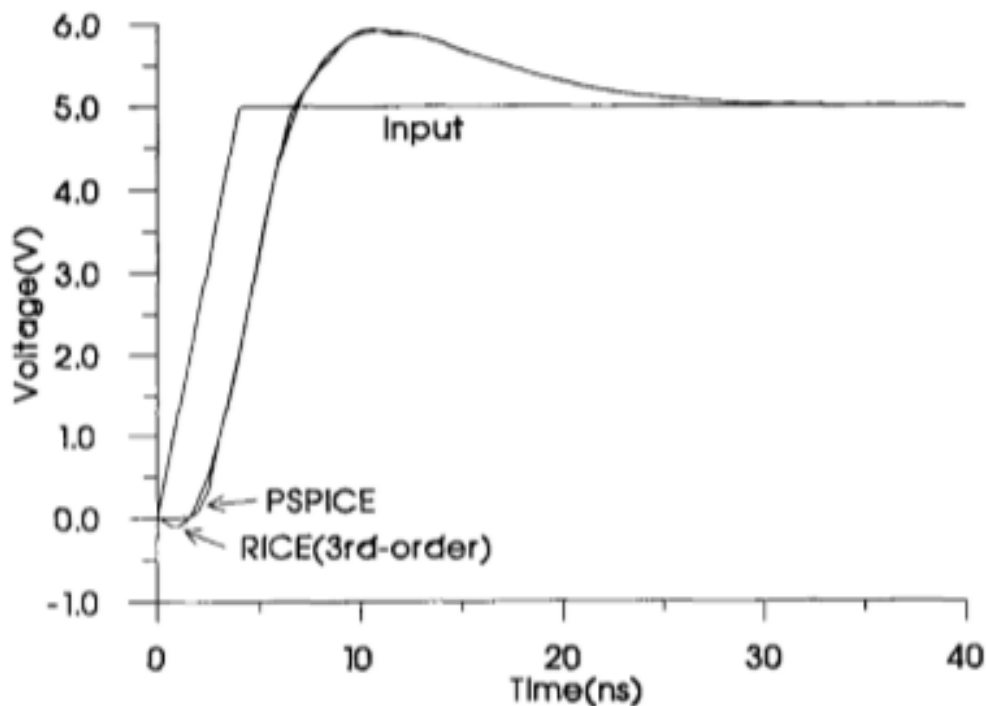


Figure 3.3: Σύγκριση μεταβατικών κυματομορφών RICE και PSPICE

Κατά συνέπεια η αναζήτηση του μονοπατιού κατά την μέθοδο RICE είναι πιο αποδοτική από την ανάλυση των κόμβων κατά την μέθοδο της ανάλυσης ασυμπτωτικών κυματομορφών (AWE). Εστιάζοντας όμως στην AWE ειδικότερα σε παθητικά μοντέλα μπορούν να επιτευχθούν μεγάλα κέρδη σε ταχύτητα, ακρίβεια και σταθερότητα του μοντέλου, ενώ το RICE είναι αποδοτικό για ένα μεγάλο φάσμα προβλημάτων ανάλυσης του χρόνου.

## Chapter 4

# Πειραματική Αξιολόγηση

Στην συγκεκριμένη ενότητα σας παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που αποτυπώθηκαν με την ανάπτυξη ενός κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού C και αποτυπώθηκαν με την βοήθεια του προγράμματος Matlab. Για την ολοκλήρωση του κώδικα χρησιμοποιήθηκε υπολογιστής με επεξεργαστή Intel Core I5 στα 1,6 GHz και RAM 8 GB.

Αναλύθηκε προσεκτικά βήμα βήμα ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η μοντελοποίηση του κυκλώματος και στην συνέχεια η υποβάθμιση το, με απώτερο σκοπό την παρατήρηση της χρονικής διάρκειας εκτέλεσης του αρχικού κυκλώματος σε σχέση με το υποβαθμισμένο μοντέλο. Τέλος χρησιμοποιώντας την κυματομορφή του σήματος υπολογίσαμε τον χρόνο που χρειάζεται το σήμα να μεταδοθεί από την είσοδο στην έξοδο, παίρνοντας ως τομή το μέσον του σήματος, δηλαδή στο πενήντα τοις εκατό του σήματος (50%) και τον χρόνο που απαιτείται για να μεταδοθεί η κυματομορφή του σήματος στην έξοδο από το τριάντα τοις εκατό μέχρι το εβδομήντα τοις εκατό (30%-70%). Οι παραπάνω διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να αποτυπωθεί με δυο παραμέτρους σφάλματος η καθυστέρηση του σήματος και η κλήση του στην έξοδο.

Κίνητρο του πειράματος ήταν να βρούμε ουσιαστικά την κατάλληλη φόρμουλα με την οποία θα μπορούμε να αποδίδουμε την μέγιστη ακρίβεια σε σχέση με την μικρότερη ταχύτητα εκτέλεσης του κυκλώματος. Βέβαια συγκεκριμένο ρόλο παίζουν πάρα πολλοί παράμετροι όπως ο αριθμός πυλών εισόδου, εξόδου, η πολυπλοκότητα του κυκλώματος καθώς και ο σαφής καθορισμός των moments.

Κύκλωμα / Τρόπος Υποβάθμισης	Αρχικό Κύκλωμα	Υποβαθμισμένο Κύκλωμα
PRIMA	0.320404	0.036915
RICE	0.167159	0.000169

Table 4.1: Σύγκριση χρόνου εκτέλεσης του κυκλώματος

## 4.1 Σύγκριση του Χρόνου Εκτέλεσης του Κυκλώματος

Χρησιμοποιώντας κάποια σταθερά μοντέλα RC και RLC κυκλωμάτων προσπαθήσαμε να αναλύσουμε την συμπεριφορά ορισμένων μεθόδων υποβάθμισης των κυκλωμάτων και να αποτυπώσουμε την διαφορά που έχουν χρονικά τα κανονικά μοντέλα σε σχέση με τα υποβαθμισμένα.

Εφαρμόζοντας την μέθοδο της PRIMA διαπιστώθηκε ότι οι αρχικοί πίνακες του κυκλώματος επηρεάζουν τους υποβαθμισμένους πίνακες και κατά συνέπεια τον χρόνο εκτέλεσης του. Όσο πιο πυκνοί είναι οι αρχικοί πίνακες του κυκλώματος, δηλαδή δεν έχουν πολλά μηδενικά στοιχεία, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια αποδίδει το κύκλωμα με την υποβάθμιση του. Στην αντίπερα όχθη οι αραιοί αρχικοί πίνακες αποδίδουν ακριβώς το αντίθετο αποτέλεσμα.

Επίσης ανακαλύφθηκε πως όσο περισσότερα moments απαιτήσουμε από το κύκλωμα τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια μας αποδίδεται στην έξοδο. Τέλος είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί πως σε κάθε κύκλωμα υπάρχει ένα σημείο τομής, ανάλογα με το μέγεθος των αρχικών κυκλωμάτων και των moments που απαιτούμε, που το υποβαθμισμένο μοντέλο είναι πιο αργό από το αρχικό. Συνεπώς πρέπει να μπορούμε να αναγνωρίζουμε αυτό το όριο και να μην το υπερβαίνουμε για δημιουργούμε αποδοτικά αποτελέσματα.

Από την άλλη μεριά η μέθοδος της PACT είναι πρώτης τάξεως υποβάθμιση και ουσιαστικά επιλύει το κύκλωμα, λαμβάνοντας ως παραμέτρους την συχνότητα και την ακρίβεια. Έτσι δημιουργείται το μοντέλο υποβάθμισης και ουσιαστικά ορίζουμε εμείς πόσο ακριβής θέλουμε να είμαστε. Το ίδιο συμβαίνει και με την SIP με μόνη διαφορά πως υπολογιστικά πάει ανάποδα σαν δομή σε σχέση με την PACT. Παρακάτω φαίνονται και γραφικά κάποια αποτελέσματα των μεθόδων.

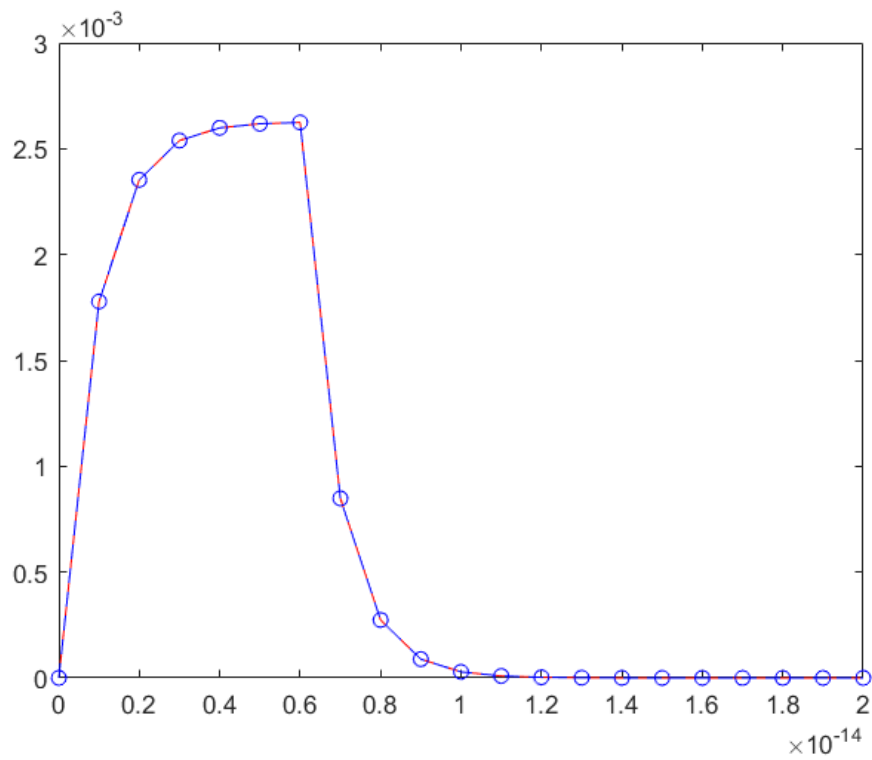


Figure 4.1: Με μπλε χρώμα φαίνεται το αρχικό σήμα του κυκλώματος. Ενώ με κόκκινο χρώμα φαίνεται το υποβαθμισμένο σήμα με τη μέθοδο RICE

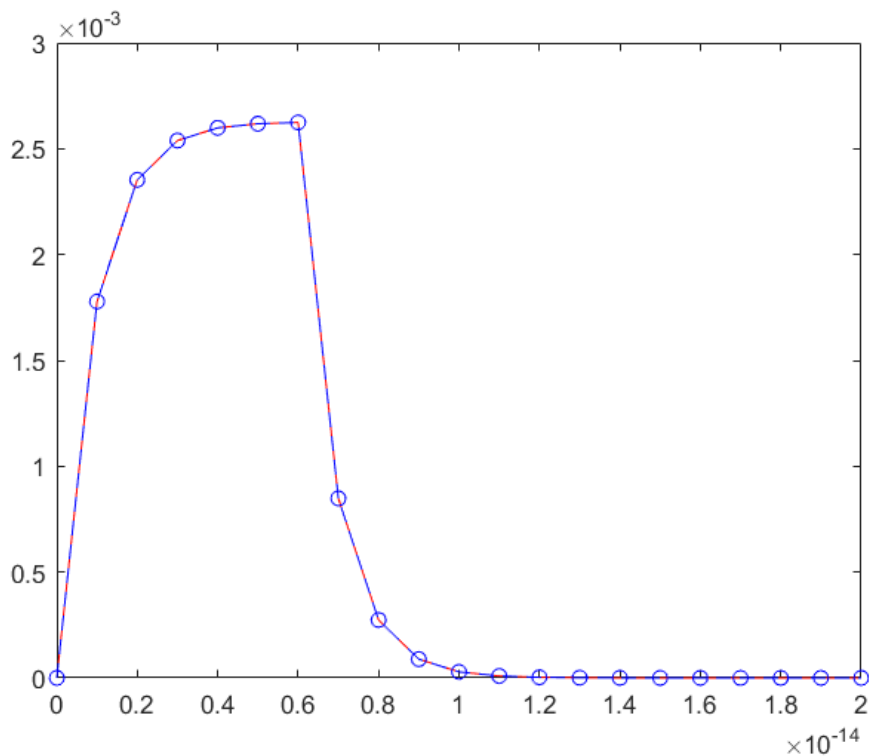


Figure 4.2: Με μπλε χρώμα φαίνεται το αρχικό σήμα του κυκλώματος. Ενώ με κόκκινο χρώμα φαίνεται το υποβαθμισμένο σήμα με τη μέθοδο PRIMA

Παρατηρούμε ότι στο ίδιο ακριβώς κύκλωμα παίρνοντας δύο moments, έχουμε τρομερή ακρίβεια με την ταχύτητα εκτέλεσης να φαίνεται στον πίνακα 4.1.

## 4.2 Αποτελέσματα Καθυστέρησης του Συνολικού Κυκλώματος

Στο συγκεκριμένο κομμάτι της πειραματικής αξιολόγησης παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα μετά και από την ολοκλήρωση του κώδικα για την συνολική καθυστέρηση του σήματος από την χρονική στιγμή της εισόδου μέχρι την χρονική στιγμή που αποδίδεται στην έξοδο.

Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα αποτελέσματα μετά από προσομοίωση τεσσάρων διαφορετικών κυκλωμάτων. Οι τιμές των σφαλμάτων θέλουμε να προσεγγίζουν το μηδέν για μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα διάδοσης.

Κύκλωμα / Τρόπος Υποβάθμισης	PRIMA		RICE	
	Σφάλμα Καθυστέρησης	Σφάλμα Κλήσης	Σφάλμα Καθυστέρησης	Σφάλμα Κλήσης
Leon3	5.9337e+04	8.5335e+04	2.6747e-04	5.9906e-04
b19	14.7020	19.6272	0.0011	0.0017
Leon2	1.7918e+03	2.0286e+03	8.2809e-04	0.0015
<u>netcard</u>	7.8084e+03	8.4400e+03	9.1560e-04	0.0019

# Chapter 5

## Επίλογος

Στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάσαμε ένα τρόπο ανάλυσης του κυκλώματος με σκοπό την εύρεση του χρόνου καθυστέρησης του σήματος από την στιγμή της εισόδου του μέχρι την στιγμή της εξόδου του. Πιο συγκεκριμένα μελετήσαμε τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να πετύχουμε την μείωση του χρόνου καθυστέρησης με κάποιες μεθόδους υποβάθμισης του κυκλώματος, χωρίς ωστόσο να απολέσουμε καθόλου από την ακρίβεια του σήματος. Τέλος παρουσιάσαμε τα αποτελέσματά μας γραφικά συγκρίνοντας τις διάφορες μεθόδους υποβάθμισης και αποτυπώνοντας την συνολική καθυστέρηση του κυκλώματος ως σφάλμα καθυστέρησης του σήματος και σφάλμα κλήσης.



# Bibliography

- [1] L. T. Pillage and R. A. Rohrer, "Asymptotic waveform evaluation for timing analysis," *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, vol. 9, pp. 352–366, Apr. 1990.
- [2] P. Feldmann and R. W. Freund, "Efficient linear circuit analysis by Padé approximation via the Lanczos process," *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, vol. 14, pp. 639–649, May 1995.
- [3] K. J. Kerns, I. L. Wemple, and A. T. Yang, "Stable and efficient reduction of substrate model networks using congruence transforms," in *IEEE/ACM Proc. ICCAD*, Nov. 1995, pp. 207–214.
- [4] L. M. Silveira, M. Kamon, and J. White, "Efficient reduced-order modeling of frequency-dependent coupling inductances associated with 3-D interconnect structures," in *IEEE/ACM Proc. DAC*, June 1995, pp. 376–380.
- [5] S. Khanna, "Sorting out signal integrity," *Electron. Engin. Times*, pp. 6M9, June 10, 1991.
- [6] J. K. Ousterhous, "CRYSTAL: A timing analyzer for NMOS VLSI circuits," in *Proc. 3rd Caltech Conf. on VLSI*, Mar. 1983, pp. 5749.
- [7] C. J. Terman, "Simulation Tools for Digital LSI Design." Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Sept. 1983.
- [8] N. P. Jouppi, "Timing Analysis and Performance Improvement of MOS VLSI Designs," *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, vol. 6, pp. 65M65, 1987.
- [9] T. A. Lane, F. J. Belcourt, and R. J. Jensen, "Electrical Characteristics of Copper/Polyimide Thin-Film Multilayer Interconnects," in *Multi-chip Modules: System Advantages, Major Constructions, and Materials Technologies*. New York: IEEE Press, 1991.