



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

## Μέθοδοι ανάκτησης Συνάρτησης Μεταφοράς κυκλώματος – Σχεδίαση γεννήτριας παραγωγής ρεύματος ESD

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρυσανθος Ν. Πουλιιάσης

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπων:** Παύλος Σ. Κατσιβέλης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

138

## Μέθοδοι ανάκτησης Συνάρτησης Μεταφοράς κυκλώματος – Σχεδίαση γεννήτριας παραγωγής ρεύματος ESD

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρύσανθος Ν. Πουλιάσης

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπων:** Παύλος Σ. Κατσιβέλης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7<sup>η</sup> Ιουνίου 2007.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2007

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και κατασκευή μιας γεννήτριας ρεύματος εκφόρτισεων. Το υπάρχον Πρότυπο για την δοκιμή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ορίζει τα όρια για τις τέσσερις παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης. Στην επερχόμενη αναθεώρηση του Προτύπου ενδέχεται να υπάρξει πέρα των τεσσάρων παραμέτρων προσθήκη μιας ακόμα παραμέτρου σχετικά με το αν η κυματομορφή θα βρίσκεται εντός του  $\pm 35\%i(t)$  όπου το  $i(t)$  δίνεται από την εξίσωση του Heidler.

Στα πλαίσια αυτής της μελέτης παρουσιάστηκε η μέθοδος Prony για την ανάκτηση συνάρτησης μεταφοράς και αναπτύχθηκαν δύο νέες μέθοδοι οι οποίες στηρίχθηκαν σε αυτήν. Στη συνέχεια έγινε αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων σε σύγκριση με τη θεωρητική καμπύλη του Heidler την οποία προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε και εξαχθήκαν τα ανάλογα συμπεράσματα. Επιλέγοντας την ακριβέστερη μέθοδο, καταλήξαμε στη συνάρτηση μεταφοράς της οποίας το κύκλωμα σχεδιάσαμε. Τέλος, υλοποιήσαμε με τη βοήθεια του πακέτου προσομοίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων Orcad το κύκλωμα και προσομοιώσαμε την λειτουργία της στο πεδίο του χρόνου. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά που έδινε η τροποποίηση της μεθόδου Prony και με την καμπύλη που δίνει η εξίσωση του Heidler και είδαμε ότι η έξοδος του κυκλώματός μας προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά την τελευταία.

## Λέξεις κλειδιά

Πρότυπο IEC 61000-4-2, Πρότυπο IEC 60-1, Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000.04.05, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, εξίσωση ρεύματος Heidler, λογισμικό πακέτο Orcad, Matlab, μέθοδος Prony.

# Abstract

Aim of this diploma thesis is to study and design a circuit to produce the Electrostatic Discharge Current. The existing Standard for ESD defines the acceptable values of the four parameters of the discharge-current waveshape. In the oncoming revised Standard a new parameter is likely to be included that defines whether the waveshape in question is between  $i(t)+35\%$  and  $i(t)-35\%$ , where  $i(t)$  is defined by Heidler's equation.

Prony method is presented in this study, in order to retrieve the transfer function of the circuit. Furthermore, two new methods were developed in order to do the same task more accurately and efficiently. Afterwards, a collation of the outcome of each one of the three methods takes place and the difference in the accuracy of the three methods profound. Once we choose the most accurate method, and by using the transfer function that it gives, we can design the circuit. The circuit is built in the Orcad Software Package, and simulations of the circuit in the field of time take place. When the simulation's output is compared with the Heidler's equation, the results are more than satisfactory.

## Key words

IEC Standard 61000-4-2, IEC Standard 60-1, ELOT Standard EN 61000.04.05, electrostatic discharge, electrostatic discharge current, Heidler's equation, simulation, Spice program, Orcad software package, Matlab, Prony's method.

# Περιεχόμενα

	<u>Σελίδα</u>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	i
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b>	iii
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση</b>	
1.1	1
1.2	3
1.2.1	3
1.2.2	6
1.3	7
1.3.1	7
1.3.2	8
1.4	9
1.4.1	9
1.4.2	12
1.5	13
1.6	13
1.7	16
1.8	18
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Η μέθοδος Prony</b>	
2.1	20
2.2	23
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Μέθοδοι σχεδίασης κυκλώματος γεννήτριας παραγωγής ρεύματος ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων</b>	
3.1	24
3.1.1	24
3.1.2	24
3.1.3	31
3.1.4	31
3.1.5	38
3.2	41
3.2.1	41
3.2.2	42

	την μέθοδο Prony	
3.2.3	Εφαρμογή της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου με βάση την μέθοδο Prony	43
3.2.4	Σύγκριση-Συμπεράσματα	44
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Σχεδίαση κυκλώματος γεννήτριας παραγωγής ρεύματος ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων</b>		
4.1	Εισαγωγή	46
4.2	Η συνάρτηση μεταφοράς	46
4.3	Το κύκλωμα	49
4.4	Οι έξοδοι των διάφορων βαθμίδων	52
4.5	Συμπεράσματα	60
4.6	Προοπτικές υλοποίησης με πραγματικά στοιχεία	61
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Η επόμενη μέρα</b>		
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b>		
A.1	Κώδικας ο οποίος υλοποιεί την μέθοδο Prony, για την εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς κυκλώματος με γνωστή έξοδο	64
A.1.1	Η πρότυπη θεωρητική εξίσωση, για τάση φόρτισης 4kV	64
A.1.1.1	Η πρότυπη θεωρητική εξίσωση, για τάση φόρτισης 4kV (1ος προσθετέος)	65
A.1.1.2	Η πρότυπη θεωρητική εξίσωση, για τάση φόρτισης 4kV (2ος προσθετέος)	65
A.1.2	Κώδικας που υλοποιεί την μέθοδο Prony για καθέναν από τους δύο προσθετέους της (3.1)	66
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β</b>		
B.1	Κώδικας που υλοποιεί την πρώτη μέθοδο βασισμένη στη μέθοδο Prony για καθέναν από τους δύο προσθετέους της (3.1)	73
B.2	Πρόγραμμα που υπολογίζει τα αποτελέσματα της πρώτης τροποποίησης	76
B.3	Εξαγόμενα του προγράμματος υλοποίησης της πρώτης τροποποίησης	78
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ</b>		
Γ.1	Κώδικας που υλοποιεί την δεύτερη μέθοδο βασισμένη στη μέθοδο Prony για καθέναν από τους δύο προσθετέους της (3.1)	81



Γ.2	Πρόγραμμα που υπολογίζει τα αποτελέσματα της δεύτερης τροποποίησης	84
Γ.3	Εξαγόμενα του προγράμματος υλοποίησης της δεύτερης τροποποίησης	87
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ</b>		
Δ.1	Simulink	89
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>		90

# Πρόλογος

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία του φοιτητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Πουλιάση Χρυσάνθου. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της κατασκευής κυκλώματος το οποίο παράγει το ρεύμα των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε πρόγραμμα με τη βοήθεια του μαθηματικού πακέτου Matlab το οποίο υλοποιούσε την μέθοδο «Προσέγγισης κρουστικής απόκρισης σε πεπερασμένο αριθμό ισαπεχόντων σημείων» (γνωστή και σαν μέθοδος Prony), με στόχο την ανάκτηση της συνάρτησης μεταφοράς κυκλώματος, που παράγει την ζητούμενη κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στην συνέχεια μελετήθηκαν δύο τροποποιημένες μέθοδοι βασισμένες πάνω στην προαναφερθείσα μέθοδο με σκοπό την βελτιστοποίησή της, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων και επιλέχθηκε η καλύτερη. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της τροποποιημένης μεθόδου κατασκευάστηκε κύκλωμα στο PSpice. Έγινε προσομοίωση της λειτουργίας του στο πεδίο του χρόνου και συγκρίναμε τα αποτελέσματα με αυτά που προέκυψαν θεωρητικά από την τροποποιημένη μέθοδο. Τέλος, έγινε μια έρευνα αγοράς και προτάθηκαν οι πιο κατάλληλοι τελεστικοί ενισχυτές που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση του κυκλώματος. Παρακάτω, παρατίθεται μια σύντομη περίληψη των κεφαλαίων της εργασίας αυτής.

Στο **κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται κάποια γενικά στοιχεία για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση και δίνονται οι απαιτούμενοι ορισμοί, που θα μας επιτρέψουν να κατανοήσουμε καλύτερα το φαινόμενο που θα εξετάσουμε. Αναφερόμαστε στους τρόπους με τους οποίους δημιουργείται η ηλεκτροστατική φόρτιση και στα μέτρα τα οποία μπορούν να ληφθούν προκειμένου να προστατεύσουμε τον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό μας. Επίσης, γίνεται αναφορά στο διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2 και δίνονται ορισμοί διαφόρων σημαντικών όρων που περιέχονται σε αυτό. Στο Πρότυπο ορίζονται: η τυπική κυματομορφή του ρεύματος, τα διάφορα επίπεδα τάσεων δοκιμής, ο απαιτούμενος για τις δοκιμές εξοπλισμός και η διαδικασία των δοκιμών που πρέπει να ακολουθείται κάθε φορά.

Στο **κεφάλαιο 2** έγινε μια αναφορά στο έργο και την ζωή του Gaspard Riche de Prony, εμπνευστή της μεθόδου Prony, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη των σκοπών της εργασίας, και μερικές σύντομες αναφορές σε ενδεικτικές εφαρμογές της προαναφερθείσας μεθόδου.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η μέθοδος Prony για την ανάκτηση της συνάρτησης μεταφοράς που αντιστοιχεί στο κύκλωμα της γεννήτριας παραγωγής ρεύματος ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων καθώς και δύο τροποποιήσεις της οι οποίες αναπτύχθηκαν με σκοπό την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στα αποτελέσματα.

Το **κεφάλαιο 4** έχει ως σκοπό να παρουσιάσει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάστηκε το κύκλωμα της γεννήτριας, καθώς και τις κυκλωματικές αποκρίσεις των υποκυκλωμάτων, που αποτελούν μέρη του, αλλά και εκείνη του ίδιου του κυκλώματος. Επίσης, παρουσιάζεται μια πρόταση, σχετικά με τα στοιχεία που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε μια πιθανή υλοποίηση του συγκεκριμένου κυκλώματος που παράγει το ρεύμα εκφόρτισης, όπως αυτό προβλέπεται από την εξίσωση του Heidler.

Τέλος, στο **κεφάλαιο 5** έγινε μια μικρή ανασκόπηση όσων προηγήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία και αναφέρθηκαν τα επόμενα βήματα τα οποία προκύπτουν από την παρούσα εργασία.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου σε αυτή μου την προσπάθεια, τόσο τους τελευταίους μήνες κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής ειδικότερα, όσο και σε όλη μου την πορεία στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ειδικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άτομα εκείνα που χωρίς την ηθική, υλική και πνευματική τους συμπαράσταση και βοήθεια αυτή η εργασία δεν θα έφτανε στο τέλος.

Τον Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και το άριστο κλίμα το οποίο έχει αναπτύξει στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.

Τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Παύλο Κατσιβέλη για τη συνεργασία του, την υπομονή και την ανοχή που επέδειξε στις όποιες αποτυχίες παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας και να του ευχηθώ καλή πορεία στην ακαδημαϊκή του καριέρα.

Το Διδάκτορα κ. Γεώργιο Φώτη, για την προθυμία του να βοηθήσει όσες φορές χρειάστηκε.

Τους Καθηγητές του Τομέα Σημάτων, Ελέγχου & Ρομποτικής του Ε.Μ.Π. κ.κ. Νικόλαο Μαράτο και Τρύφωνα Κουσιουρή, για την παρέμβασή τους σε καίρια σημεία της εργασίας και την άμεση ανταπόκρισή τους στις κατά καιρούς απορίες

μου.

Επίσης, θα θεωρούσα παράλειψη να μην ευχαριστήσω τους Υποψήφιους Διδάκτορες στο Εργαστήριο Μικροηλεκτρονικής κ.κ. Ιωάννη Θανασόπουλο και Γεώργιο Μαζαράκη, τόσο για τη βοήθεια που προσέφεραν, όσες φορές τους ζητήθηκε, όσο και για την ηθική τους συμπαράσταση, καθώς βέβαια και τον Καθηγητή του Τομέα Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής & Συστημάτων Πληροφορικής κ. Ιωάννη Αβαριτσιώτη.

Επίσης, ένα ευχαριστώ και σε όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, γιατί, ακόμα και όσοι δεν χρειάστηκε να βοηθήσουν στην παρούσα εργασία συνέβαλλαν στην επιτυχία της εκπόνηση με το ζεστό κλίμα που δημιουργούσαν στο χώρο του Εργαστηρίου.

Τέλος, ένα εντελώς ξεχωριστό ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου και την αδερφή μου, για λόγους που οι ίδιοι γνωρίζουν.

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση

### 1.1 Περί ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC), αποτελεί ένα πεδίο μελέτης του πώς εφαρμόζεται η βασική φυσική σε σύνθετα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα, με σκοπό την εξέταση της δυνατότητας αυτών να συνυπάρχουν αρμονικά. Εάν επιτυγχάνεται αυτό τότε τα συστήματα θεωρείται ότι εκτελούν τις λειτουργίες τους με ικανοποιητικό τρόπο. Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ενός συστήματος σε ένα τμήμα του ή κάποιο άλλο σύστημα, είναι γνωστό από τότε που άρχισε η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων πριν περίπου έναν αιώνα. Το πρόβλημα έγινε γενικότερου ενδιαφέροντος μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο και όλες οι προοπτικές δείχνουν ότι τα επόμενα χρόνια θα αποτελεί μια μεγάλη περιβαλλοντική ανησυχία, καθώς η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών διευρύνεται συνεχώς σε κάθε τομέα της ζωής μας. Η ιδέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αναπτύχθηκε με σκοπό να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης και χειρισμού των σύνθετων συστημάτων και να βοηθηθεί η ανάπτυξη τους.

Σύμφωνα με το IEEE [1]: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) είναι η ικανότητα μιας διάταξης μιας συσκευής ή ενός συστήματος, να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε το/την περιβάλλει.

Είναι χρήσιμο να δοθούν στο σημείο αυτό οι ορισμοί των όρων που συναντώνται στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα:

**Ατρωσία (Immunity level)** σε μια διαταραχή είναι η ικανότητα μιας διάταξης συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητάς της/του με την παρουσία μίας ηλεκτρικής διαταραχής.

**Ηλεκτρομαγνητική επιδεκτικότητα (Electromagnetic susceptibility)** είναι η αδυναμία μίας διάταξης ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητας της/του κάτω από την παρουσία μίας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής. Δηλαδή επιδεκτικότητα είναι η έλλειψη ατρωσίας.

**Ηλεκτρομαγνητική Στάθμη Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Level)** είναι η καθορισμένη μέγιστη στάθμη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που αναμένεται να εφαρμοστεί σε μία διάταξη, συσκευή ή σύστημα που λειτουργεί σε συγκεκριμένες συνθήκες.

**Στάθμη Ατρωσίας (Immunity level)** είναι η μέγιστη στάθμη μίας δεδομένης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που συμβαίνει σε μία συγκεκριμένη διάταξη, συσκευή ή σύστημα για την οποία αυτό παραμένει ικανό να λειτουργήσει στον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.

**Όριο Ατρωσίας (Immunity Limit)** είναι η καθορισμένη στάθμη ατρωσίας.

**Περιθώριο Ατρωσίας (Immunity Margin)** είναι η διαφορά μεταξύ του ορίου ατρωσίας μίας διάταξης συσκευής ή συστήματος και της στάθμης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

**Περιθώριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Margin)** είναι ο λόγος της στάθμης ατρωσίας μίας διάταξης συσκευής ή συστήματος ως προς μία στάθμη διαταραχής αναφοράς.

**Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (Electromagnetic Interference)** είναι κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πτώση της απόδοσης μίας διάταξης, συσκευής ή συστήματος ή να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωνική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή μπορεί να είναι θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μία μεταβολή ίδιου του μέσου διάδοσης.

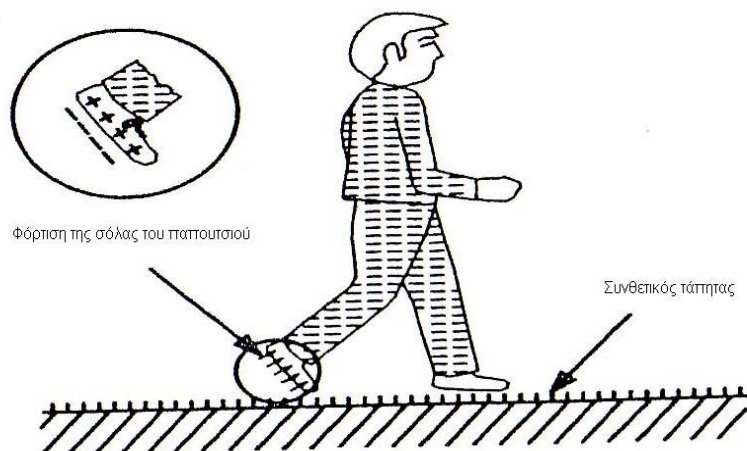
Πολλά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα μεταβάλλονται με τη συχνότητα, αλλά οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς για σχεδιαστικούς σκοπούς εξαρτώνται από τις φυσικές διαστάσεις του συστήματος σε σχέση με τα μήκη κύματος των βασικών πεδίων που υπάρχουν. Αυτό σημαίνει ότι όταν αντιμετωπίσει κανείς ένα πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, υπάρχει πιθανόν μία περιοχή συχνοτήτων για την οποία τα προβλήματα θα είναι πιο σοβαρά και σε αυτή την περίπτωση, θα υπάρχει επίσης μία αντίστοιχη κλίμακα αποστάσεων μέσα στην οποία θα γίνονται διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτέλεση των υπολογισμών. Συνεπώς, η συχνότητα και το μέγεθος παίζουν σημαντικούς ρόλους.

## 1.2 Η ηλεκτροστατική φόρτιση (Electrostatic Charge)

Η ηλεκτροστατική φόρτιση δημιουργείται με δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος συμβαίνει όταν κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο, με το οποίο βρίσκεται σε επαφή (π.χ. ένα αέριο που κινείται ως προς ένα στερεό ή ένα στερεό σε επαφή με ένα άλλο στερεό) συμβαίνει ανταλλαγή ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα τη φόρτιση των δύο υλικών με αντίθετα φορτία [1], [2]. Ο δεύτερος μηχανισμός είναι η φόρτιση εξ επαγωγής.

### 1.2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Γενικά όταν δύο υλικά έρθουν σε επαφή και στη συνέχεια αποχωριστούν, θα υπάρξει μία ροή ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο. Το υλικό που δίνει ηλεκτρόνια φορτίζεται θετικά, ενώ το υλικό που δέχεται ηλεκτρόνια γίνεται φορτίζεται αρνητικά. Ο όρος τριβοηλεκτρισμός αναφέρεται στη φόρτιση που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα επαφής και τριβής των υλικών. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10-25 kV, με αποθηκευόμενες ενέργειες μερικών mJ. Η εκφόρτιση αυτής της ενέργειας παράγει ρεύμα η κυματομορφή του οποίου παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις και μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους και να βλάψει ηλεκτρικές συσκευές. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου κατά την κίνηση του πάνω σε συνθετικό τάπητα.



Σχήμα 1.1: Διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου εξαιτίας της τριβής με το δάπεδο.

Το αν ένα υλικό θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Αυτή η ιδιότητα συνοψίζεται στην τριβοηλεκτρική σειρά του πίνακα 1.1 που ακολουθεί όπου τα υλικά κατατάσσονται ανάλογα με το τι φόρτιση αποκτούν (θετική ή αρνητική).

ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΛΟΓΩ ΤΡΙΒΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΛΙΚΑ	
ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΦΟΡΤΙΖΟΝΤΑΙ ΘΕΤΙΚΑ	ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΦΟΡΤΙΖΟΝΤΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΑ
Αέρας Ανθρώπινο δέρμα Γυαλί Ανθρώπινα μαλλιά Νάilon Μαλλί Γούνα Μόλυβδος Μετάξι Αλουμίνιο Χαρτί Πολυουρεθάνη Βαμβάκι Ξύλο Ατσάλι	Κερί γυαλίσματος Σκληρό λάστιχο Κόλλα συγκόλλησης Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι Ανοξειδωτο ατσάλι Συνθετικό λάστιχο Ακρυλικό Αφρός πολυουρεθάνης Πολυεστέρας Πολυαιθυλένιο PVC TEFLON Λάστιχο σιλικόνης

Πίνακας 1.1: Τριβοηλεκτρική σειρά

Η σχετική θέση του υλικού στην τριβοηλεκτρική σειρά είναι μόνο ένας παράγοντας στη διαδικασία δημιουργίας της φόρτισης. Δυο υλικά τα οποία είναι σε πολύ κοντινή απόσταση μπορούν να δημιουργήσουν μία ευρεία στατική φόρτιση.

Η φόρτιση εξ επαφής είναι ο πιο κοινός τρόπος εμφάνισης στατικού φορτίου. Άλλοι τρόποι, όπως μία δέσμη φορτισμένων ιόντων, spray charging, φωτοηλεκτρική φόρτιση και φόρτιση corona είναι επίσης δυναμικές πηγές στατικών φορτίσεων. Αυτές οι φορτίσεις παραμένουν στάσιμες (στατικές) σε ένα αντικείμενο για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Η απότομη μεταφορά αυτού του φορτίου από το ένα σώμα στο άλλο όταν πρόκειται για αντίθετα φορτισμένα σώματα και όταν αυτά βρεθούν σε πολύ κοντινή απόσταση λέγεται ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και την εκφόρτιση των υλικών φαίνονται στον πίνακα 1.2.



Συντελεστές παραγωγής της φόρτισης	Συντελεστές εκφόρτισης
<p>Σχετική θέση στην τριβοηλεκτρική σειρά</p> <p>Επιφάνεια επαφής</p> <p>Συντελεστής τριβής μεταξύ των υλικών</p> <p>Βαθμός διαχωρισμού</p>	<p>Αγωγιμότητα των υλικών</p> <p>Σχετική υγρασία</p> <p>Υγρασία στις επιφάνειες των υλικών</p> <p>Βαθμός αναδιάταξης στη δομή του υλικού</p>

Πίνακας 1.2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εξαρτάται από τις συνθήκες περιβάλλοντος και κυρίως από την υγρασία. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό υγρασίας τόσο πιο συχνές είναι οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, αλλά πιο ήπιες μορφής. Αντίθετα όταν υπάρχει αυξημένη ξηρασία η συχνότητα των εκφορτίσεων είναι μικρότερη, αλλά οι εκφορτίσεις είναι πιο έντονες (μεγάλο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης – μεγάλος χρόνος ανόδου). Επιβλαβής τάσεις μπορεί ακόμα να δημιουργηθούν ακόμα και 55% σχετικής υγρασίας ή και περισσότερο.

Μερικά σοβαρά προβλήματα που έχουν προκληθεί τα τελευταία χρόνια από ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι:

- Εκρήξεις σε υπέρ-δεξαμενόπλοια κατά τη διάρκεια καθαρισμού των δεξαμενών τους.
- Ζημιές και καταστροφές μικροκυκλωμάτων κατά τη διάρκεια της διακίνησής τους.
- Εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας με καύσιμα των αεροσκαφών.
- Βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων.

Ενδεικτικές ηλεκτροστατικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια διαφόρων ανθρωπίνων ενεργειών φαίνονται στον Πίνακα 1.3. Γενικά είναι καλύτερο να συγκρίνουμε τους μηχανισμούς φόρτισης από το επίπεδο της τάσης που δημιουργούν.

ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ		
	10%	40%	55%
Περπατώντας πάνω σε χαλί	35	15	7,5
Περπατώντας πάνω σε δάπεδο βινυλίου	12	5	3
Κινήσεις ενός εργαζομένου στο γραφείο	6	0,8	0,4

Πίνακας 1.3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV)

Πολλές προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [3], [4] περιλαμβάνουν δοκιμές σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Το μέγεθος ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι στατικό μέγεθος από τη φύση του και έτσι συνήθως καθορίζονται τυπικοί παλμοί και ρεύματα για τις δοκιμές.

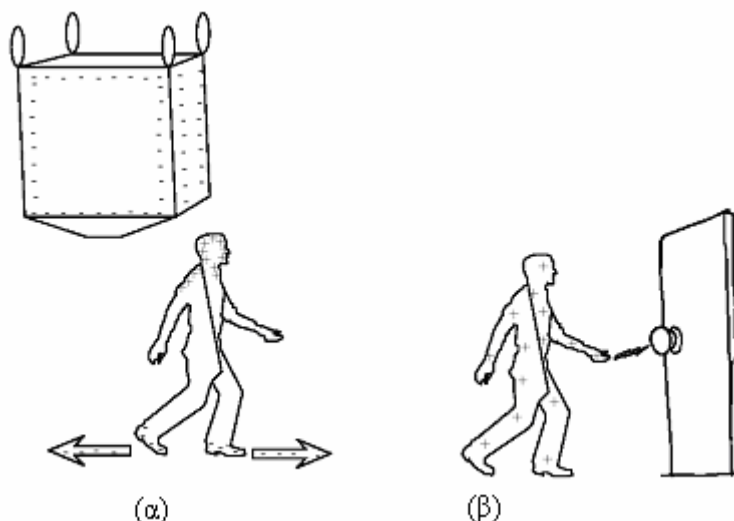
Η ηλεκτροστατική φόρτιση είναι ένας πολύ γνωστός κίνδυνος για τις ηλεκτρονικές διατάξεις η οποία μπορεί να διαταράξει ή και να καταστρέψει ακόμη, ηλεκτρονικά εξαρτήματα και συστήματα τα οποία βρίσκονται κοντά σε αυτή. Αυτό μπορεί να συμβεί από άμεσες εκφορτίσεις πάνω στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, είτε από τα παροδικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος.

### 1.2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής

Μερικές φορές η φόρτιση ενός αντικειμένου μπορεί να μη γίνει με το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο [5], αλλά μπορεί να γίνει εξ επαγωγής. Συγκεκριμένα όταν ένα αντικείμενο εκτίθεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο (όπως για παράδειγμα όταν βρίσκεται δίπλα σε ένα φορτισμένο σώμα) τα αντίθετα φορτία μέσα στο υλικό θα τείνουν να χωριστούν, κατευθυνόμενα είτε προς αυτό είτε από αυτό. Οποιοδήποτε πλεονάζον φορτίο και της ίδιας πολικότητας με το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα θα διαρρεύσει ανάλογα με την αγωγιμότητα του υλικού και της αγωγίμης σύνδεσης. Έτσι, το αντικείμενο θα αποκτήσει μια περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχει το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα.

Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό ακολουθεί το Σχήμα 1.2 στο οποίο φαίνεται ένας άνθρωπος (πολύ καλός αγωγός) δίπλα σε μια μεγάλη δεξαμενή η οποία περιέχει ένα μεγάλο φορτίο αρνητικής πολικότητας. Τα αρνητικά με τα θετικά φορτία

διαχωρίζονται στο ανθρώπινο σώμα μέσω των υποδημάτων και του δαπέδου. Τελικά το ανθρώπινο σώμα φορτίζεται θετικά αντίθετα από το γειτνιάζον αντικείμενο. Επομένως όταν ο άνθρωπος πλησιάσει με το θετικό φορτίο που έχει αποκτήσει την πόρτα και ακουμπήσει το μεταλλικό πόμολο θα δημιουργηθεί μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2β.



Σχήμα 1.2: Εποπτική παρουσίαση της φόρτισης εξ επαγωγής

### 1.3 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και μέτρα προστασίας

#### 1.3.1 Οι επιπτώσεις σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

Όπως έχει προαναφερθεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση παρατηρείται όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάσει υψηλή τιμή, η οποία μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση στη διηλεκτρική αντοχή των ηλεκτρονικών στοιχείων συσκευών με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή τους [2]. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης τα ακόλουθα φαινόμενα μπορεί να λάβουν χώρα:

- Δευτερεύον ηλεκτρικό τόξο εντός του εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει με τη σειρά του την εμφάνιση νέων φαινομένων.
- Διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των κυκλωμάτων. Η ροή ενός υψηλού ρεύματος μπορεί να διαταράξει τις συνθήκες λειτουργίας των

κυκλωμάτων, οδηγώντας σε αλλαγές: στο κέρδος (gain) του κυκλώματος, στο εύρος ζώνης (bandwidth), αλλοιώσεις στα δημιουργούμενα σήματα και στη λογική των ψηφιακών κυκλωμάτων. Τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν από προσωρινή παρεμβολή έως καταστροφή των εξαρτημάτων.

- Ηλεκτρική επαγωγή εξαιτίας της χωρητικής σύζευξης σε μέρη του εξοπλισμού τα οποία αναπτύσσουν υψηλές τάσεις εξ επαγωγής. Τα αποτελέσματά τους είναι μια προσωρινή κακή λειτουργία των κυκλωμάτων.
- Μαγνητική επαγωγή εξαιτίας της επαγωγικής σύζευξης από τις διαδρομές που ακολουθεί το εκχυόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

### 1.3.2 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού

Η προστασία από ενδεχόμενες ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μπορεί να γίνει τόσο με προληπτικά μέτρα, όσο και με μέσα που θα ελαχιστοποιήσουν τα δυσμενή αποτελέσματά τους όταν οι εκφορτίσεις αυτές εμφανιστούν [2]. Τα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνουν:

- Προστασία από την εμφάνιση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα από την τριβή δύο μονωτικών υλικών ή από την τριβή ενός μονωτικού και ενός αγωγού. Άρα για να αποτραπεί η εμφάνιση του ηλεκτροστατικού φορτίου, είναι επιβεβλημένη η θωράκιση μίας ή και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή, με ένα αγωγίμο στρώμα.
- Αποτροπή της ανάπτυξης της τάσης φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι το αναπτυσσόμενο φορτίο στην επιφάνεια του υλικού θα πρέπει να οδηγηθεί στο έδαφος. Σε αυτό μπορούν να βοηθήσουν αντιστατικά υλικά [6] με ιδιαίτερα γνωστές τις αντιστατικές πλαστικές σακούλες. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι Fowler, Klein και Fromm [7] ανέπτυξαν κάποιες προτάσεις σχετικά με τη σχεδίαση των δαπέδων, προκειμένου να αποφεύγεται εξαιτίας τους η δημιουργία ηλεκτροστατικού φορτίου. Τα συμπεράσματά τους συνοψίζονται στο ότι τα δάπεδα θα πρέπει να έχουν αντίσταση ως προς γη μικρότερη των 107 Ω και πως θα πρέπει να έχουν αρκετά καλές μονωτικές ιδιότητες.

Η προστασία των συσκευών από τις ηλεκτροστατικές φορτίσεις όταν αυτές έχουν πλέον συμβεί μπορεί να γίνει με την λήψη των ακόλουθων μέτρων:

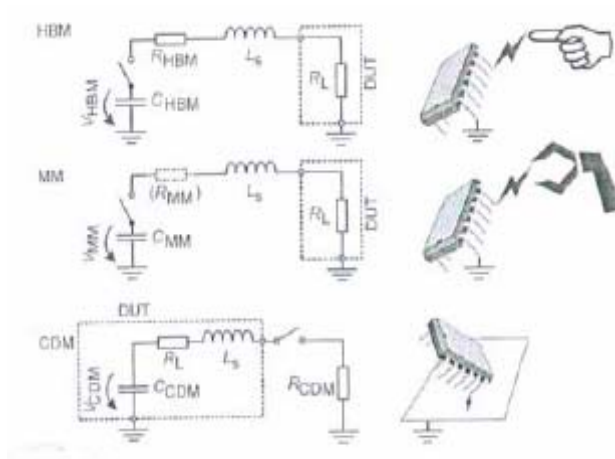
- Πλήρης ή μερική μόνωση του εξοπλισμού, της οποίας σκοπός είναι η αποτροπή δευτερευόντων εκφορτίσεων.
- Θωράκιση ή γείωση των συσκευών, οι οποίες θα εξασφαλίζουν μια εναλλακτική διαδρομή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Θωράκιση κυκλωμάτων εναντίον των πεδίων εξ επαγωγής.
- Εγκατάσταση των συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό.

Όταν τα ηλεκτρικά κυκλώματα τοποθετούνται σε μονωμένο πλαίσιο (case) τότε μπορεί να αποτραπούν ενδεχόμενες δευτερεύουσες φορτίσεις. Για αυτό προκειμένου να είναι αποτελεσματικές πρέπει τα πλαίσια να μην έχουν οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα μέσω των οποίων οι κύριες εκφορτίσεις μπορεί να λάβουν χώρα, είτε άμεσα στα εσωτερικά κυκλώματα ή έμμεσα σε μια προεξοχή, διακόπτη ή μπουτόν, τα οποία διαπερνούν το πλαίσιο. Το μέγιστο δυναμικό το οποίο μπορεί να αναπτύξει ένα ανθρώπινο σώμα είναι 25 kV. Εάν ένα άτομο πλησιάσει κάποιο μέρος του σώματός του, το οποίο συνηθέστερα είναι το δάκτυλό του, πλησιέστερα από 1 cm, μακριά από το κύκλωμα, τότε δεν θα συμβεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εφόσον η διάσπαση του αέρα γίνεται στα 30 kV. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος προστασίας κυκλωμάτων από ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι η τοποθέτησή τους σε ένα αγωγίμο πλαίσιο, το οποίο δεν έχει οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα στα τοιχώματα του.

## 1.4 Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση

### 1.4.1 Γενικά

Προκειμένου να προσομοιωθούν οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα, ώστε μέσω αυτών να μπορέσουν να εκτιμήσουν την επίδραση που μπορεί να έχουν οι εκφορτίσεις στην πραγματικότητα. Με αυτά έχουν ασχοληθεί εκτενέστατα πολλοί ερευνητές [2], [6], [8]. Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα είναι: το μοντέλο του ανθρώπινου σώματος (Human Body Model – HBM), το μοντέλο της μηχανής (Machine Model – MM) και το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (Charged Device Model – CDM). Στο σχήμα 1.3 φαίνονται απλές κυκλωματικές αναπαραστάσεις των κυκλωμάτων αυτών



Σχήμα 1.3: Παραδείγματα εκφορτίσεων σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC [6]

Και τα τρία μοντέλα μπορούν να περιγραφούν από της δεύτερης τάξης διαφορικές εξισώσεις οι οποίες ισχύουν στα RLC κυκλώματα. Θεωρώντας RESD τη συνολική ωμική αντίσταση σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα και της ωμικής αντίστασης RL της υπό εξέτασης συσκευής (Device Under Test- DUT), CESD την χωρητικότητα ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος σε τάση VESD και LS την αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης η διαφορική εξίσωση 2ης τάξης που ισχύει είναι:

$$L_S \frac{d^2 i}{dt^2} + R_{ESD} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_{ESD}} i = 0 \quad (1.1)$$

της οποίας η αναλυτική λύση είναι:

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{-\alpha t} \sinh(\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} t), \quad \alpha > \omega_0 \quad (1.2)$$

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{-\alpha t} \sinh(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t), \quad \alpha < \omega_0 \quad (1.3)$$

Όπου

$$\alpha = \frac{R_{ESD}}{2L_S} \quad \text{ο συντελεστής απόσβεσης}$$

και

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_S C_{ESD}}} \quad \text{η συχνότητα ταλάντωσης}$$

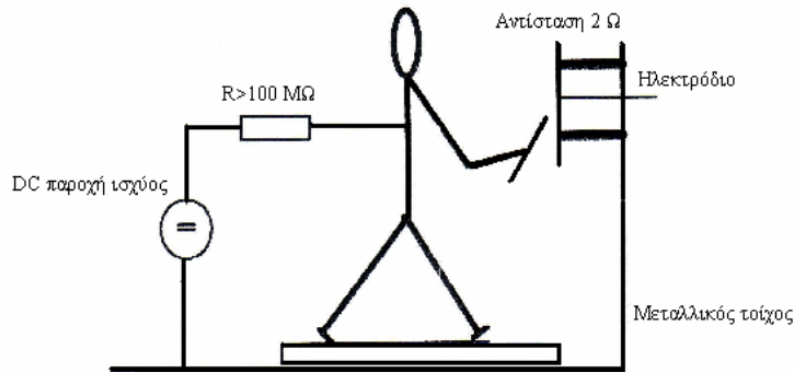
Παραδείγματα για τις τυπικές παραμέτρους και των τριών μοντέλων φαίνονται στον Πίνακα 1.4.

Παράμετρος	HBM	MM	CDM
$V_{ESD}$	4000 V	200 V	500 V
$R_{HBM} / R_{MM} / R_{CDM}$	1,5 kΩ	5 Ω	10 Ω
$C_{ESD}$	100 pF	200 pF	10 pF
$L_S$	500 nH	750 nH	750 nH
$R_L$	10Ω		
$I_{ESD}$	2,6 A	2,8 A	10,4 A
$t_{rise} (10\%/90\%)$	≈ 7 ns	≈ 11 ns	≈ 0,3 ns
$A$	$1,5 \times 10^8 s^{-1}$	$0,1 \times 10^8 s^{-1}$	$10 \times 10^8 s^{-1}$
$\omega_0$	$0,5 \times 10^8 s^{-1}$	$0,8 \times 10^8 s^{-1}$	$30 \times 10^8 s^{-1}$

Πίνακας 1.4: Τυπικές τιμές παραμέτρων για τα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [6].

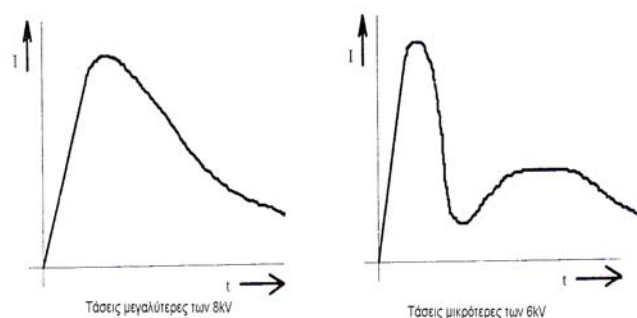
### 1.4.2 Αξιολόγηση του Human Body Model

Από πολλές μετρήσεις που έγιναν σε διαφορετικούς ανθρώπους [9] είναι ξεκάθαρο ότι δημιουργήθηκαν πολλές διαφορετικές αποδεκτές κυματομορφές. Ο χρόνος ανόδου αυτών των κυματομορφών κυμαίνεται μεταξύ 100 ps έως 30 ns. Οι άνθρωποι νοιώθουν μια εκφόρτιση, μόνον όταν η τάση είναι περίπου 3 kV ή μεγαλύτερη.



Σχήμα 1.4: Διάταξη μετρήσεων για εκφορτίσεις ανθρωπίνου σώματος

Μια ανάλυση των αποτελεσμάτων από μετρήσεις που έχουν παρθεί από διάταξη όπως αυτή του Σχήματος 1.4 δίνουν κάποιες τιμές για την διαστασιολόγηση των μερών του κυκλώματος. Η αντίσταση της επιδερμίδας  $R$  είναι περίπου  $150\Omega$  έως  $1000\Omega$  (χωρίς ο άνθρωπος να κρατά κάποιο μεταλλικό αντικείμενο όπως κλειδιά, μαχαίρι, βίδα, κ.τ.λ), η ανθρώπινη χωρητικότητα βρίσκεται περίπου από  $50\text{ pF}$  έως  $250\text{ pF}$ , ενώ βρέθηκαν τάσεις πάνω από  $15\text{ kV}$  υπολογισμένες με το καθιερωμένο μέγεθος και τη χωρητικότητα του ανθρώπου. Η κυματομορφή της εκφόρτισης βρέθηκε να είναι πολύ διαφορετική από άνθρωπο σε άνθρωπο και επίσης από μέτρηση σε μέτρηση.



Σχήμα 1.5: Διάφορες κυματομορφές εκφορτίσεων (ns)



## 1.5 Το πρότυπο IEC 61000-4-2

Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 αποτελεί το δεύτερο τμήμα (Section 2) του τετάρτου μέρους (Part 4) του Προτύπου IEC 1000:1995, το οποίο πραγματεύεται την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Το διεθνές αυτό Πρότυπο σχετίζεται με την ατρωσία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και περιγράφει την μέθοδο και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για την διενέργεια της δοκιμής ηλεκτροστατικών εκκενώσεων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα με έμφαση στον οικιακό εξοπλισμό και τα όργανα μέτρησης [10].

Σε αυτό καθορίζονται:

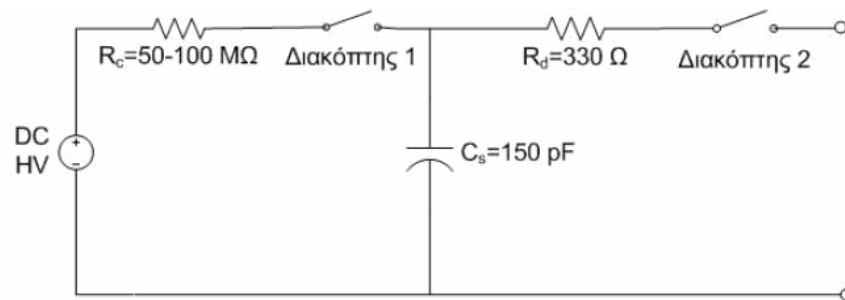
- Η τυπική κυματομορφή του ρεύματος
- Τα διάφορα επίπεδα τάσεων δοκιμής
- Ο απαιτούμενος για τις δοκιμές εξοπλισμός
- Η διαδικασία των δοκιμών

Το Πρότυπο βρίσκεται υπό αναθεώρηση την χρονική περίοδο που συντάσσεται η παρούσα διπλωματική και για αυτό το λόγο οι αναφορές θα γίνονται μόνο στο ήδη δημοσιευμένο Πρότυπο.

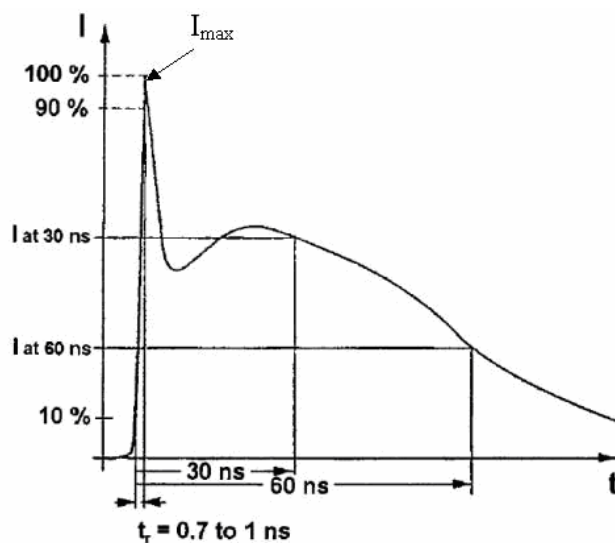
## 1.6 Παράμετροι ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Το διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2 [3] ορίζει τις τυπικές κυματομορφές του εκφορτιζόμενου ρεύματος, τα επίπεδα δοκιμών, τον εξοπλισμό δοκιμών και τη διαδικασία με την οποία η δοκιμή του Προτύπου αυτού θα πρέπει να γίνεται κάθε φορά. Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που περιγράφεται στο Πρότυπο βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model) [6]. Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Σύμφωνα με το Πρότυπο, αποτελείται από μια αντίσταση φόρτισης  $R_c$  (50-100 M $\Omega$ ), έναν πυκνωτή ενταμίευσης ενέργειας  $C_s$  (150 pF  $\pm$  10%) και μία αντίσταση εκφόρτισης  $R_d$  που αντιπροσωπεύει την αντίσταση του δέρματος (330  $\Omega$   $\pm$  10%). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το μοντέλο αναφοράς της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι η εκφόρτιση ανθρώπου-μετάλλου. Γι' αυτό το λόγο όταν ένας άνθρωπος κρατάει ένα κομμάτι

μετάλλου, το δέρμα επηρεάζει σημαντικά το ρεύμα εκφόρτισης. Συνεπώς, όταν λάβει χώρα μία εκφόρτιση το τόξο θα προσπέσει στο μέταλλο και όχι στο δέρμα. Προφανώς  $R_d$  είναι η συνολική αντίσταση της επιδερμίδας και όχι μόνο της περιοχής κοντά στο σημείο της εκφόρτισης. Η τιμή της χωρητικότητας  $C_s$  είναι αντιπροσωπευτική της ηλεκτροστατικής χωρητικότητας του ανθρωπίνου σώματος, ενώ επιλέχθηκε η τιμή των  $330 \Omega$  για την  $R_d$ .



Σχήμα 1.5: Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που ορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2



Σχήμα 1.6: Κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2

Το ρεύμα εκφόρτισης σύμφωνα με την κυματομορφή του σχήματος 1.6, μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: το πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος, το οποίο ονομάζεται και «αρχική κορυφή» (initial peak) και προσομοιώνει την εκφόρτιση του χεριού, και το δεύτερο, που προσομοιώνει την εκφόρτιση του ανθρωπίνου σώματος. Κατά την

επαλήθευση των γεννητριών σύμφωνα με το υπάρχον Πρότυπο [3] πρέπει να ελέγχονται τα όρια τεσσάρων βασικών παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος. Αυτές είναι:

**Μέγιστο ρεύμα ( $I_{max}$ ):** Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης (αρχική κορυφή).

**Χρόνος ανόδου ( $t_r$ ):** Ο χρόνος που απαιτείται, ώστε το ρεύμα εκφόρτισης να αυξηθεί από την τιμή του 10% της μέγιστης τιμής του, στο 90% της μέγιστης τιμής. Ο χρόνος ανόδου της αρχικής κορυφής είναι μεταξύ 0,7 ns και 1 ns.

**Ρεύμα στα 30 ns ( $I_{30}$ ):** Η τιμή του ρεύματος 30 ns μετά την χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται για πρώτη φορά κατά τη φάση ανόδου το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.

**Ρεύμα στα 60 ns ( $I_{60}$ ):** Η τιμή του ρεύματος 60 ns μετά την χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται για πρώτη φορά κατά τη φάση ανόδου το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την επαλήθευση των ηλεκτροστατικών γεννητριών, η οποία γίνεται μόνο για εκφορτίσεις επαφής, όπως αυτός ορίζεται από το υπάρχον Πρότυπο είναι:

- Ανηχωικός θάλαμος
- Παλμογράφος με εύρος τουλάχιστον 1 GHz
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης (Pellegrini target)
- Ομοαξονικό καλώδιο για υψίσυχνα σήματα
- Εξασθενητής
- Μεταλλική επιφάνεια διαστάσεων τουλάχιστον 1,5 m x 1,5 m

Οι αναμενόμενες τιμές καθώς και τα περιθώρια απόκλισης των τεσσάρων παραμέτρων για το ρεύμα εκφόρτισης δίνονται στον παρακάτω πίνακα 1.5

Επίπεδο	Ενδεικνυόμενη τάση (kV)	Κορυφή ρεύματος $\pm 10\%$ (A)	Χρόνος ανόδου tr (ns)	Ρεύμα ( $\pm 30\%$ ) στα 30ns (A)	Ρεύμα ( $\pm 30\%$ ) στα 60ns (A)
1	2	7,5	0,7 έως 1	4	2
2	4	15	0,7 έως 1	8	4
3	6	22,5	0,7 έως 1	12	6
4	8	30	0,7 έως 1	16	8

Πίνακας 1.5: Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος εκφόρτισης μέσω επαφής [3]

### 1.7 Επερχόμενη αναθεώρηση του Προτύπου για τις δοκιμές έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Στα πλαίσια της επερχόμενης αναθεώρησης του υπάρχοντος Προτύπου [3] πιθανόν να ελέγχονται πέρα των τεσσάρων παραμέτρων όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 1.5 και το αν η κυματομορφή του ρεύματος είναι εντός του  $\pm 35\%i(t)$ , για χρόνο από 2 έως 60ns όπου το  $i(t)$  δίνεται από την εξίσωση (1.4).

$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) + \frac{i_2}{k_2} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_4}\right) \quad (1.4)$$

όπου:

$$k_1 = \exp\left(-\frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}\right) \quad (1.5)$$

$$k_2 = \exp\left(-\frac{\tau_3}{\tau_4} \cdot \left(\frac{n\tau_4}{\tau_3}\right)^{1/n}\right) \quad (1.6)$$

και:

$$\tau_1 = 1,3 \quad (1.7)$$

$$\tau_2 = 2 \quad (1.8)$$

$$\tau_3 = 12 \quad (1.9)$$

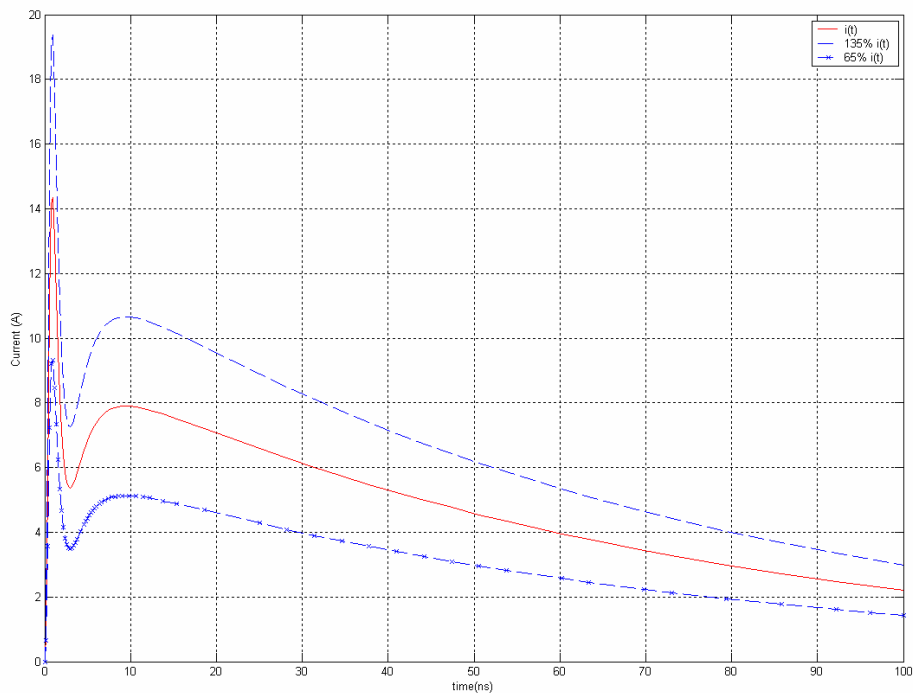
$$\tau_4=37,8 \quad (1.10)$$

$$i_1=17,5 \quad (1.11)$$

$$i_2=9 \quad (1.12)$$

$$n=1,8 \quad (1.13)$$

Επίσης, βασική διαφορά του αναθεωρημένου Προτύπου με το υπάρχον είναι ότι στην επαλήθευση των γεννητριών η γειωμένη μεταλλική επιφάνεια, στις οποίες το κέντρο βρίσκεται τοποθετημένος ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης δεν θα είναι σε οριζόντια διάταξη, αλλά σε κατακόρυφη και αυτό γιατί με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η καλύτερη επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Η απαιτούμενη κυματομορφή που ενδεχομένως να ορίζει το νέο αναθεωρημένο Πρότυπο για την έξοδο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.7. Στο σχήμα 1.7 φαίνονται επίσης και οι συναρτήσεις  $i(t)*135\%$  και  $i(t)*65\%$ .



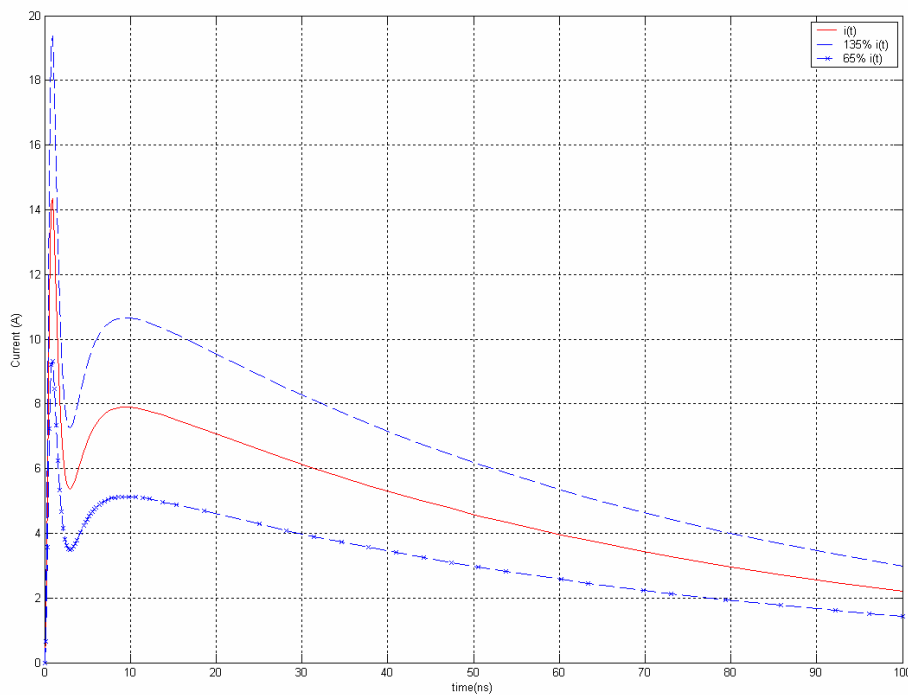
Σχήμα 1.7: Καμπύλη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4 kV

## 1.8 Το πρόβλημα

Σε επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία βάσει της οποίας γίνεται σχεδιασμός του κυκλώματος το οποίο θα παράγει κυματομορφή ρεύματος όπως αυτή περιγράφεται στην εξίσωση (1.14) η οποία φαίνεται παρακάτω

$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) + \frac{i_2}{k_2} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_4}\right) \quad (1.14)$$

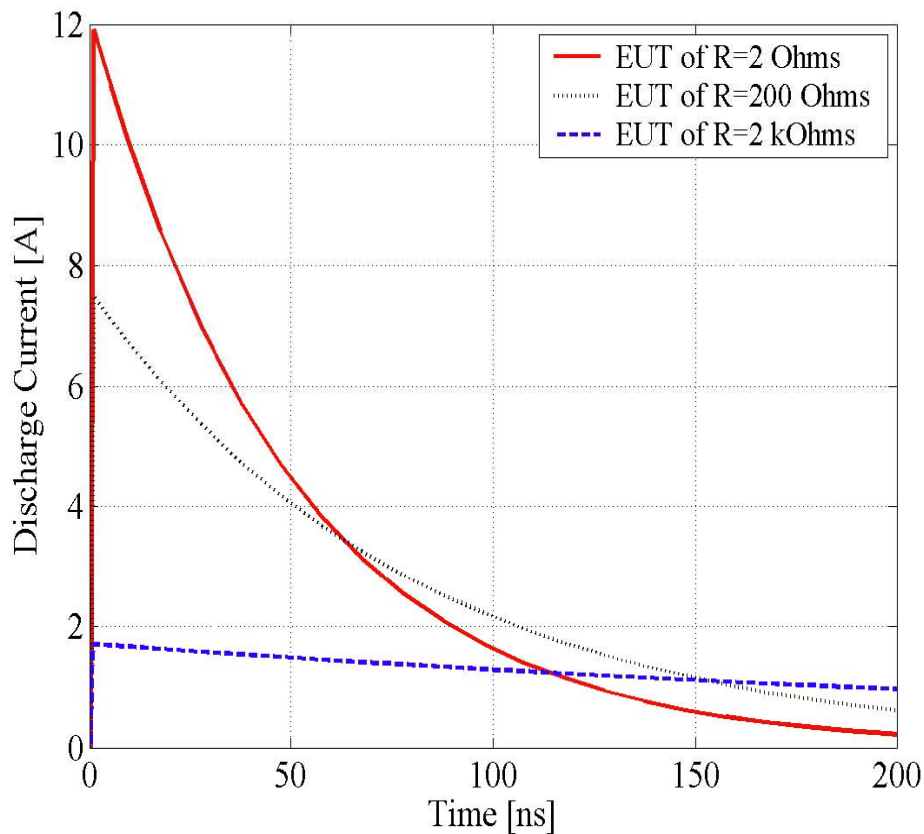
Η απαιτούμενη κυματομορφή που ορίζει το Πρότυπο [3] για την έξοδο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.8: Καμπύλη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4 kV

Σύμφωνα με την θεωρητική εξίσωση, (1.14) η οποία παράγει την αντίστοιχη κυματομορφή γίνεται και ο έλεγχος της κυματομορφής που λαμβάνεται από τις πειραματικές μετρήσεις. Στο επερχόμενο αναθεωρημένο Πρότυπο θα υπάρχει και η απαίτηση τα πειραματικά δεδομένα να κυμαίνονται ανάμεσα στις συναρτήσεις  $i(t) \cdot 135\%$  και  $i(t) \cdot 65\%$ , για χρόνο από 2 έως 60 ns. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι

το εξής. Παρόλο που η παραπάνω κυματομορφή είναι η απαιτούμενη έξοδος, το κύκλωμα της γεννήτριας που περιγράφεται στο υπάρχον Πρότυπο [3] δίνει ως έξοδο την κυματομορφή του σχήματος 1.9.



Σχήμα 1.9: Έξοδος Γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων όπως αυτή περιγράφεται από το υπάρχον Πρότυπο [3] για διάφορα δοκίμια.

Η ανάγκη συνεπώς, που παρουσιάζεται εδώ είναι η εύρεση και κατασκευή του κυκλώματος, το οποίο παράγει την επιθυμητή έξοδο που είναι η βέλτιστη εξίσωση (σχέση (1.14)) και αντιστοιχεί στο γράφημα του σχήματος 1.9. Η μέθοδος που θα ακολουθηθεί, η οποία από την εξίσωση της εξόδου ανακτά την συνάρτηση μεταφοράς και ακολούθως οδηγεί στην εύρεση του ζητούμενου κυκλώματος είναι η μέθοδος Prony η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

# Κεφάλαιο 2

## Η μέθοδος Prony

### 2.1 Gaspard Riche de Prony. Σύντομη βιογραφία

Η μέθοδος Prony (Prony analysis-Prony method) αναπτύχθηκε από τον Gaspard Riche de Prony το 1795. Παραταύτα, η πρακτική χρήση της μεθόδου περίμενε την ανάπτυξη των ψηφιακών υπολογιστών. Παρόμοια με τον μετασχηματισμό Fourier, η μέθοδος Prony εξάγει χρήσιμες πληροφορίες από ένα ομοιόμορφα δειγματοληπτημένο σήμα και δημιουργεί μία σειρά από μιγαδικούς με μειούμενους εκθέτες ή μειούμενα ημίτονα. Αυτό δίνει την δυνατότητα να εκτιμηθεί η συχνότητα, το πλάτος, η φάση και η εξασθένηση ενός σήματος.

Ο Gaspard Clair François Marie Riche de Prony (22 Ιουλίου 1755 Chamelet, Beaujolais, Γαλλία -29 Ιουλίου 1839 Παρίσι, Γαλλία) ήταν Γάλλος μαθηματικός και μηχανικός που ασχολήθηκε με την υδραυλική. Γεννήθηκε στο Chamelet του Beaujolais της Γαλλίας. Το όνομα της οικογένειάς του ήταν Riche ενώ ο τίτλος de Prony αγοράστηκε από τους γονείς του. Στην πραγματικότητα, ο μικρότερος αδελφός του de Prony ήταν γνωστός με το όνομα Riche. Ο Prony φοίτησε στο κολέγιο Benedictine στο Toissei στο Doubs. Από εκεί εισήχθη στο École Nationale des Ponts et Chaussées το 1776 όπου και σπούδασε μηχανικός. Αποφοίτησε το 1779 σαν αριστούχος και έμεινε ένα ακόμα χρόνο στο Παρίσι κάνοντας αυτό που του είχε πει ο πρύτανης του École Nationale des Ponts et Chaussées. «M de Prony, ενδιαφέρσου να αποκτήσεις βαθιά γνώση της τέχνης σου, γιατί είσαι προορισμένος να γίνεις πρύτανης του École Nationale des Ponts et Chaussées.»

Το 1780 έγινε μηχανικός στο École Nationale des Ponts et Chaussées και μετά από 3 χρόνια σε διάφορα σημεία της Γαλλίας επέστρεψε στο École Nationale des Ponts et Chaussées στο Παρίσι το 1783. Ήταν η χρονιά που εκδόθηκε η πρώτη κύρια εργασία του στην ακαδημία επιστημών (Académie des Sciences) σχετικά με τις δυνάμεις των τόξων. Ο Monge (πατέρας της διαφορικής γεωμετρίας) εντυπωσιάστηκε με την επιστημονική του ανακοίνωση και διέκρινε ότι ο de Prony ήταν άνθρωπος με μεγάλες δυνατότητες.

Το 1785 ο de Prony επισκέφτηκε την Αγγλία σε ένα ερευνητικό έργο που αποσκοπούσε σε μία ακριβή μέτρηση των σχετικών θέσεων του αστεροσκοπείου του Greenwich και του αντίστοιχου στο Παρίσι. Δύο χρόνια μετά προήχθη σε επιθεωρητής στο École Nationale des Ponts et Chaussées. Εκείνη την περίοδο



εμπλέκει με την κατασκευή της γέφυρας του Λουδοβίκου XVI που στις μέρες μας αποκαλείται Pont de la Concorde.

Το 1790 ακολούθησε μια νέα προαγωγή του, σε αρχιμηχανικός στο *École Nationale des Ponts et Chaussées*, αποτέλεσμα των εγκαινίων της παραπάνω γέφυρας.

Επίσης γύρω στο 1791 ο de Prony δούλευε με τον Pierre Girard πάνω στην γεωμετρία. Τότε το 1792, ο de Prony ξεκίνησε ένα σημαντικό στόχο, την παραγωγή λογαριθμικών και τριγωνομετρικών πινάκων, το κτηματολόγιο (*Cadastre*). Με την βοήθεια των Legendre, Carnot και άλλων μαθηματικών, και με 70 με 80 βοηθούς η εργασία αυτή διήρκεσε αρκετά χρόνια και τελείωσε το 1801. Οι πίνακες ήταν απέραντοι, με τις τιμές που υπολογίζονται μεταξύ δεκατεσσάρων και είκοσι εννέα δεκαδικών θέσεων. Κάθε αντίγραφο αποτελούνταν από δεκαοχτώ τόμους μαζί με έναν άλλο όγκο των μαθηματικών διαδικασιών.

Το να εκδοθεί μια τόσο μαζική δουλειά ήταν άλλο θέμα. Οι διαπραγματεύσεις διήρκεσαν αρκετά χρόνια έως ότου το 1809 φάνηκε ότι θα εκδίδονταν. Ο εκδότης έγραψε σχετικά: «Η σημερινή γενιά δεν θα είχε βεβαιώσει ποτέ το τέλος αυτής της μνημειακής εργασίας εάν ο M de Prony δεν είχε την τυχερή ιδέα της εφαρμογής της ισχυρής μεθόδου του τμήματος της εργασίας, που συλλαμβάνει τις μεθόδους για να μειώσει το μακροχρόνιο και επίμοχθο μέρος της παραγωγής των πινάκων στις απλές προσθήκες και τις αφαιρέσεις».

Παρόλα αυτά, οι πίνακες δεν δημοσιεύτηκαν ποτέ ολοκληρωμένοι και ήταν σχεδόν στο τέλος του αιώνα όταν εμφανίστηκε ένα μικρό μέρος. Ήταν πολύ ακριβό το να τυπωθούν, σε μία περίοδο που η Γαλλία δεν ήταν στην καλύτερη οικονομική κατάσταση.

Το 1794 το ιδρύθηκε και διοικήθηκε το *École Centrale des Travaux Publics* από τον Carnot και τον Mongue. Μετονομάστηκε σε *École Polytechnique* το 1795 και ο de Prony ήταν βέβαια ένας από τους βασικούς λέκτορες εκείνη την εποχή. Τοποθετήθηκε ανάμεσα στους πρώτους καθηγητές ως «Prony, λέκτορας στην ανάλυση, διευθυντής του κτηματολογίου, μέλος του ιδρύματος. Ετήσιος μισθός 6.000 φράγκα. Στέγαση μέσα στο σχολείο».

Οι διαλέξεις που παρέδωσε ο Prony στο *École Polytechnique* εκδόθηκαν, συμπεριλαμβανομένων και των διαλέξεων στην υδραυλική.

Το 1798 ο Prony αρνήθηκε την απαίτηση του Ναπολέοντα να συνταχθεί με τον στρατό του που θα έκανε επίθεση στην Αίγυπτο. Ο Fourier, ο Mongue και ο Malus

είχαν συμφωνήσει να είναι μέρος της ερευνητικής δύναμης και ο Ναπολέων ήταν θυμωμένος με την άρνηση του Prony να ακολουθήσει. Δεν επρόκειτο να αποτύχει να λάβει τις τιμές που άξιζε από τον Ναπολέων αλλά η σύζυγος του Prony ήταν στενή φίλη της Ιωσηφίνας και αυτό πιθανόν να έσωσε τον Prony από τα χειρότερα.

Το 1798 ο Prony εκπλήρωσε την φιλοδοξία του να γίνει διορισμένος διευθυντής του *École des Ponts et Chaussées*. Η επιθυμία του για αυτήν την θέση είναι σχεδόν βέβαιο ότι ήταν ο κύριος λόγος για την άρνησή του να ταχθεί με τον Ναπολέοντα. Σαν διευθυντής άρχισε να παράγει ένα αριθμό από σημαντικά μαθηματικά κείμενα στη μαθηματική φυσική. Έγινε μέλος του οργανισμού γεωγραφικού μήκους (*Bureau de Longitude*) και το 1810 και το 1811, παρήγαγε δύο περαιτέρω σημαντικά κείμενα από τις διαλέξεις του στο *École Polytechnique*, τα «Μαθήματα της αναλυτικής μηχανικής» (*Leçons de Mécanique Analytique*) και «Σύνοψη των μαθημάτων του μαθήματος της μηχανικής» (*Sommaire des Leçons du Cours de Mécanique*).

Αφότου νικήθηκε ο Ναπολέων η αναδιοργάνωση στη Γαλλία περιέλαβε μια αναδιάρθρωση του *École Polytechnique* που έκλεισε κατά τη διάρκεια 1816. Ο de Prony έχασε τη θέση του ως καθηγητή εκεί και δεν ήταν μέρος της επιτροπής αναδιοργάνωσης. Εντούτοις, μόλις άνοιξε πάλι το σχολείο, ο de Prony κλήθηκε να είναι εξεταστής έτσι συνέχισε τη σύνδεσή του με αυτό μόνο που έπρεπε να δουλεύει έναν μήνα το χρόνο.

Μια από τις σημαντικότερες επιστημονικές εφευρέσεις του de Prony ήταν το «φρένο de Prony» που εφηύρε το 1821 για να μετρήσει την απόδοση των μηχανών και των μηχανημάτων. Βασίστηκε στις ιδέες του Hachette και ήταν μια αξιοσημείωτη βελτίωση σε μια μέθοδο που ο Pierre Girard είχε χρησιμοποιήσει δύο έτη νωρίτερα.

Το τελευταίο μέρος της καριέρας του Prony είχε να κάνει περισσότερο με την εκπαίδευση παρά με την διοίκηση. Μια μάχη που έδωσε, χωρίς επιτυχία, ήταν ενάντια στον Cauchy, οποίος τάσσονταν περισσότερο υπέρ των καθαρών μαθηματικών και μακριά από τα πιο εφαρμοσμένα μαθηματικά στα οποία ο de Prony πίστευε σταθερά. [18]

## 2.2 Εφαρμογές

Η μέθοδος Prony μέσα από το πέρασμα των αιώνων βρήκε πολλές εφαρμογές. Σε αυτή την παράγραφο θα δώσουμε κάποια παραδείγματα της χρήσης της μεθόδου σε διάφορα πεδία της επιστήμης.

Η μέθοδος Prony μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα συστήματα ισχύος όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της αναγνώρισης συστημάτων SIMO (Single Input Multi Output) που πιθανόν να έχουν επαναλαμβανόμενους πόλους καθώς μπορεί να επεκταθεί έτσι ώστε να συμπεριλάβει και πολλαπλά σήματα με επαναλαμβανόμενους πόλους [19].

Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή της μεθόδου Prony είναι αυτή της εύρεσης ελατωμάτων σε γραμμές μεταφοράς ισχύος μεγάλου μήκους [20]. Η εκτίμηση αυτών των προβλημάτων βασίζεται στις οδεύουσες διαταραχές που δημιουργούνται από τα σφάλματα αυτά των γραμμών.

Η χρήση της μεθόδου Prony επεκτείνεται και στην ιατρική. Έχει αναφερθεί μέθοδος η στηριζόμενη στην μέθοδο Prony η οποία παραμετροποιεί και μοντελοποιεί τους τριγμούς οι οποίοι παράγονται από τους πνεύμονες από παθολογικά αίτια [21]. Επίσης, στο ίδιο πεδίο έχει αναπτυχθεί μέθοδος για την αναγνώριση καρδιακών αρρυθμιών η οποία στηρίζεται επίσης στην μέθοδο Prony [22].

Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή και στον τομέα της ηλεκτρονικής στην κατασκευή ενεργών φίλτρων για τη επιλογή αρμονικών [23]. Αντίθετα με τα ήδη υπάρχοντα φίλτρα που για την κατασκευή τους χρειάζεται να γνωρίζουμε τις συχνότητες των αρμονικών, τα ενεργά φίλτρα που βασίζονται στην ανάλυση Prony μπορούν να αναγνωρίσουν συχνότητες, πλάτη, φάσεις αλλά ακόμα και να αποσβέσουν συνιστώσες των αρμονικών ενός σήματος.

Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με φίλτρα ασαφούς λογικής για την αναγνώριση ταλαντώσεων χαμηλής συχνότητας σε συστήματα ισχύος [24].

Πολύ σημαντική είναι επίσης η χρήση της Prony στην επεξεργασία σήματος και στις τηλεπικοινωνίες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα φαίνεται στην [25].

Η ίδια η φύση της μεθόδου, δεν θα μπορούσε να μην έβρισκε εφαρμογή και στα συστήματα αυτόματου ελέγχου. Κάνοντας χρήση της ανάλυσης Prony, μπορούμε να προσδιορίσουμε μοντέλα γραμμικών συστημάτων μειωμένου βαθμού τα οποία λειτουργούν κοντά στην περιοχή της ευστάθειας [26].

## Κεφάλαιο 3

### Μέθοδοι σχεδίασης κυκλώματος γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

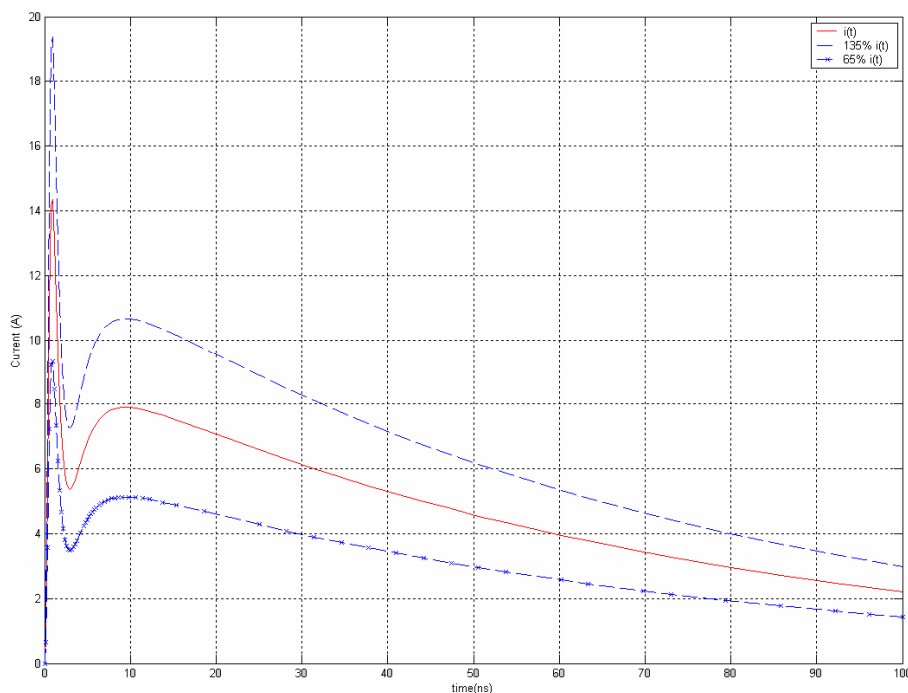
#### 3.1 Μέθοδοι ανάκτησης κρουστικής απόκρισης γραμμικού κυκλώματος

##### 3.1.1 Εισαγωγή

Το κύκλωμα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν είναι γραμμικό. Έτσι, για την ανάκτησή του δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποια από τις γνωστές μεθόδους όπως ο αντίστροφος μετασχηματισμός Laplace. Προέκυψε λοιπόν η ανάγκη εύρεσης μιας μεθόδου σύμφωνα με την οποία θα προσεγγίζεται η κρουστική απόκριση ενός γραμμικού κυκλώματος από την απόκριση του κυκλώματός μας.

##### 3.1.2 Η μέθοδος Prony

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η απαιτούμενη κυματομορφή που ορίζει το Πρότυπο [3] για την έξοδο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1 και προκύπτει από την εξίσωση (3.1)



Σχήμα 3.1: Κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4 kV και EUT 2 Ohm μαζί με τις καμπύλες  $\pm 30\%$  του ρεύματος εκφόρτισης

$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) + \frac{i_2}{k_2} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_4}\right) \quad (3.1)$$

όπου:

$$k_1 = \exp\left(-\frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}\right) \quad (3.2)$$

$$k_2 = \exp\left(-\frac{\tau_3}{\tau_4} \cdot \left(\frac{n\tau_4}{\tau_3}\right)^{1/n}\right) \quad (3.3)$$

και

$$\tau_1 = 0.75 \quad (3.4)$$

$$\tau_2 = 0.82 \quad (3.5)$$

$$\tau_3=3.43 \quad (3.6)$$

$$\tau_4=68.70 \quad (3.7)$$

$$i_1=17.46 \quad (3.8)$$

$$i_2=7.81 \quad (3.9)$$

$$n=3 \quad (3.10)$$

Οι παραπάνω παράμετροι υπολογίστηκαν από πειραματικά δεδομένα σε σχετική εργασία που έγινε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια SCHAFFNER 438 σε πειραματική διάταξη που μπορεί να ευρεθεί στην [11]. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών, αναπτύχθηκε γενετικός αλγόριθμος που εφαρμόστηκε στις ληφθείσες κυματομορφές του ρεύματος. Στους πίνακες 1 και 2 που εικονίζονται παρακάτω φαίνονται οι τιμές των κρίσιμων παραμέτρων όπως τις ορίζει το πρότυπο IEC 61000.4.2 για την εξίσωση του Heidler. Στον πίνακα 1 έχουν καταγραφεί οι αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν για

$$\tau_1=1.3 \quad (3.11)$$

$$\tau_2=2 \quad (3.12)$$

$$\tau_3=12 \quad (3.13)$$

$$\tau_4=37.8 \quad (3.14)$$

$$i_1=17.5 \quad (3.15)$$

$$i_2=9 \quad (3.16)$$

$$N=1.8 \quad (3.17)$$

ενώ στον πίνακα 2 οι τιμές που προέκυψαν από την εργασία που αναφέρθηκε παραπάνω και που όπως αποδεικνύεται από τους πίνακες προσεγγίζουν καλύτερα τις ιδανικές τιμές των κρίσιμων παραμέτρων που ορίζονται για την εξίσωση του Heidler

Παράμετροι	Τιμές των κρίσιμων παραμέτρων για το ρεύμα που ορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2	Τιμές των κρίσιμων παραμέτρων για το ρεύμα όπως προκύπτουν από την εξίσωση του Heidler
$I_p$ (A)	$15 \pm 10\%$	15.14
$t_r$ (ns)	$0.7 \div 1$	0.88
$I_{30ns}$ (A)	$8 \pm 30\%$	7.83
$I_{60ns}$ (A)	$4 \pm 30\%$	3.98

Πίνακας 1: Τιμές των κρίσιμων παραμέτρων της εξίσωσης του heidler για τάση εκφόρτισης +4kV όπως προέκυψαν από σχετική εργασία του ΕΜΠ [11]

Παράμετροι	Τιμές των κρίσιμων παραμέτρων για το ρεύμα που ορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2	Τιμές των κρίσιμων παραμέτρων για το ρεύμα όπως προκύπτουν από την εξίσωση του Heidler
$I_p$ (A)	$15 \pm 10\%$	14,99
$t_r$ (ns)	$0.7 \div 1$	1,00
$I_{30ns}$ (A)	$8 \pm 30\%$	7.83
$I_{60ns}$ (A)	$4 \pm 30\%$	4,00

Πίνακας 2: Τιμές των κρίσιμων παραμέτρων της εξίσωσης του Heidler για τάση εκφόρτισης +4kV όπως προέκυψαν από σχετική εργασία του ΕΜΠ [11]

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η μέθοδος [14] η οποία θα εφαρμοστεί στη συνέχεια στην βέλτιστη εξίσωση, της οποίας η γραφική παράσταση είναι αυτή που δίνεται στο σχήμα 3.1.

Έστω  $gd(t)$  κρουστική απόκριση του επιθυμητού δικτύου και  $g(t)$  η απόκριση του γραμμικού σταθερού δικτύου, που προσεγγίζει την  $gd(t)$ . Θα είναι:

$$g(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \exp(s_i \cdot t) \quad (3.18)$$

Η συνάρτηση  $g(t)$  καλείται παρεμβολή  $n$  τάξεως στο σύνολο των ισαπεχόντων σημείων  $t_k = kT$  εάν:

$$gd(kt) = g(kT) \quad (3.19)$$

για  $k=0,1,\dots,2n-1$

Για τον προσδιορισμό των  $A_i, s_i$ , όπως στη σχέση (5.4) τίθεται:

$$z_i = \exp(s_i T) \quad (3.20)$$

και σχηματίζεται το πολυώνυμο

$$\psi(z) = \prod_{i=1}^n (z - z_i) = \sum_{m=0}^n b_m s^m \quad (3.21)$$

με

$$b_0 = 1 \quad (3.22)$$

Από τις σχέσεις (3.5) και (3.7) προκύπτει:

$$\sum_{m=0}^n g[(m+k)T] b_m = \sum_{m=0}^n \sum_{i=1}^n b_m A_i z_i^{m+1} = \sum_{i=1}^n A_i \sum_{m=0}^n b_m z_i^{m+1} = 0 \quad (3.23)$$

για  $k=0,1,\dots,n-1$ . Η σχέση (3.23) σε μητρική μορφή γράφεται λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (3.21) και (3.22):

$$\begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \cdot & \cdot & \cdot & g(nT-T) \\ g(T) & g(2T) & \cdot & \cdot & \cdot & g(nT) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ g(nT-T) & g(nT) & \cdot & \cdot & \cdot & g(2nT-2T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{n-1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} g(nT) \\ g(nT+T) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g(2nT-T) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$



όπου ο πίνακας

$$\begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \cdot & \cdot & \cdot & g(nT - T) \\ g(T) & g(2T) & \cdot & \cdot & \cdot & g(nT) \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ g(nT - T) & g(nT) & \cdot & \cdot & \cdot & g(2nT - 2T) \end{bmatrix}$$

είναι ο πίνακας που στο εξής θα αναφέρεται σαν  $P_1$  στην παρούσα εργασία.

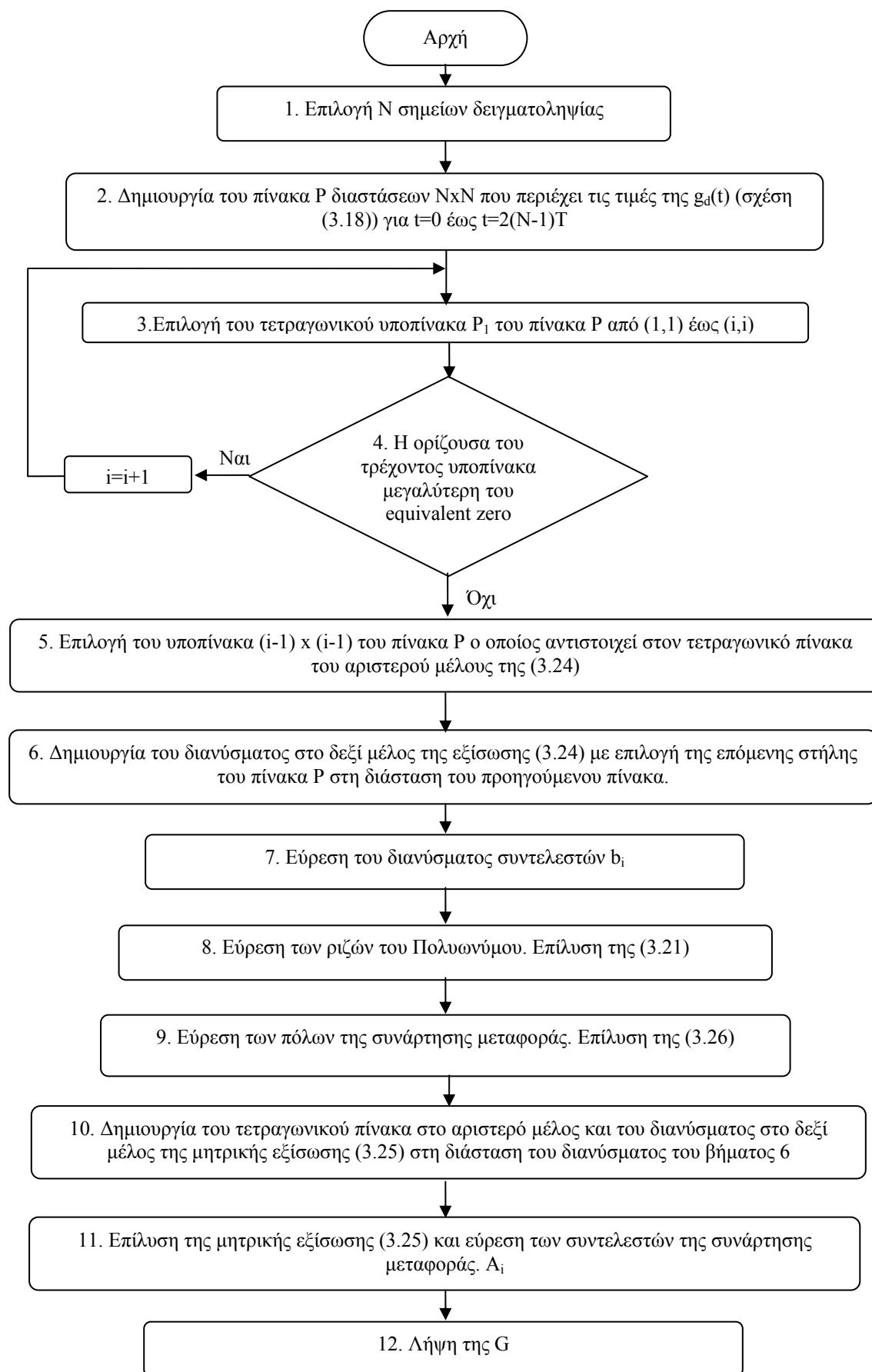
Από τη σχέση (3.24) προκύπτουν οι συντελεστές  $b_i$  και από την εύρεση των ριζών του πολυωνύμου  $\psi(z)$  οι ρίζες  $z_i$ . Οι συντελεστές  $A_i$  προκύπτουν από την μητρική εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdot & \cdot & \cdot & z_n \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ z_1^{n-1} & z_2^{n-1} & \cdot & \cdot & \cdot & z_n^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(0) \\ g(T) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g(nT - T) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Εφ' όσον είναι γνωστά τα  $z_i$ , τα  $s_i$  προκύπτουν από τη σχέση (3.6) ως εξής:

$$s_i = \frac{\text{Ln}(z_i)}{T} \quad (3.26)$$

Παρακάτω, στο σχήμα 3.2 παρατίθεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου της μεθόδου Prony.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου της μεθόδου Prony

### 3.1.3 Stiff Equations

Μια εξίσωση αποκαλείται “stiff” όταν χαρακτηρίζεται από περισσότερες της μιας σημαντικά διαφορετικές φυσικές συχνότητες. Η εφαρμογή οποιασδήποτε μεθόδου που αποβλέπει στη δημιουργία πεπερασμένης τάξεως κυκλώματος έχει να αντιμετωπίσει ως κύριο πρόβλημα την αρκούντως ικανοποιητική δειγματοληψία ώστε να λάβουμε αρκετά πυκνή πληροφορία για το φαινόμενο σε όλη τη διάρκεια του.

Η πρώτη κίνηση για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος στην παρούσα περίπτωση είναι να διαχωρίσουμε την εφαρμογή της μεθόδου σε καθένα από τους προσθετούς της εξίσωσης Heidler, πράγμα το οποίο υποδηλώνεται από την ίδια τη μορφή της. Η επίτευξη περεταίρω ακρίβειας γίνεται με την εφαρμογή των δύο μεθόδων που προτείνουμε.

### 3.1.4 Πρώτη τροποποιημένη μέθοδος με βάση τη μέθοδο Prony

Στην πράξη αποδείχτηκε ότι η μέθοδος Prony διαθέτει μία σειρά μειονεκτημάτων με πιο χαρακτηριστικό το σημαντικό σφάλμα που εμφανίζεται σε ορισμένα τμήματα του γραφήματος του ρεύματος. Γι’ αυτό το λόγο αναπτύξαμε μια τροποποίηση της παραπάνω μεθόδου η οποία από ότι θα δούμε παρακάτω απέφερε πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Η τροποποίηση αυτή στηρίχθηκε στην παρατήρηση ότι τα προβλήματα της μεθόδου οφείλονται κυρίως στην μεγάλη απώλεια πληροφορίας.

Η μέθοδος Prony αλλά και οι μέθοδοι που προτείνονται στην παρούσα εργασία, λαμβάνουν καταρχήν υπ’ όψιν τους την μήτρα Hankel.

Η μορφή της φαίνεται στην σχέση (3.27) όπου  $N$  ο συνολικός αριθμός των δειγματοληπτούμενων σημείων.

Κάθε επόμενη στήλη έχει την ίδια μορφή με την προηγούμενη μετατοπισμένη κατά μία θέση προς τα «επάνω» με προσθήκη ενός μηδενικού στην θέση που έμενε κενή. Η προσθήκη του μηδενικού ήταν καθαρά υποκειμενική για λόγους ομοιομορφίας αφού ούτως η άλλως εκείνες οι θέσεις του πίνακα έχουν τιμές αδιάφορες για την εφαρμογή της μεθόδου.

Η επιλογή των υποπινάκων αυτής καθορίζει τη μέθοδο που χρησιμοποιούμε, και υποδεικνύει τη σχέση μεταξύ της ευκολίας στο να επιλυθούν τα συστήματα εξισώσεων, με την πληροφορία η οποία λαμβάνεται υπ’ όψιν, πράγμα που θα φανεί ακολούθως.

$$H = \begin{bmatrix} g(0) & g(T) & g(2T) & \dots & g(NT - T) \\ g(T) & g(2T) & g(3T) & \dots & g(NT) \\ g(2T) & g(3T) & \dots & \dots & \dots \\ g(3T) & \dots & \dots & \dots & g(2NT - 2T) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & g(2NT - 2T) & \dots & 0 \\ \dots & g(2NT - 2T) & 0 & \dots & 0 \\ g(2NT - 2T) & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Με μια εποπτική θεώρηση της σχέσης της μήτρας Hankel και της τετραγωνικής μήτρας που εμφανίζεται στο αριστερό μέλος της (3.24), φαίνεται ότι η τελευταία προέρχεται από την μήτρα Hankel, με διαγραφή πλήθους στηλών και γραμμών από κάτω και δεξιά, ως εξής.

$$\left[ \begin{array}{cccc|cccc} g(0) & g(T) & \dots & g(nT - T) & \dots & \dots & \dots & g(NT - T) \\ g(T) & g(2T) & \dots & g(3T) & \dots & \dots & \dots & g(NT) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g(nT - T) & \dots & \dots & g(2nT - 2T) & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & g(2NT - 2T) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & g(2NT - 2T) & \dots & \dots & 0 & \dots \\ \dots & g(2NT - 2T) & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\ g(2NT - 2T) & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \end{array} \right]$$

Σχήμα 3.3: Επιλογή της μήτρας  $P_1$  της μεθόδου Prony από την μήτρα του Hankel όπου  $N$  ο συνολικός αριθμός των δειγματοληπτούμενων σημείων

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό ο πίνακας

$$P_1 = \begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \dots & g(nT-T) \\ g(T) & g(2T) & g(3T) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(nT-T) & \dots & \dots & g(2nT-2T) \end{bmatrix}$$

είναι ο πίνακας  $P_1$  της μεθόδου Prony.

Στην επίλυση του συστήματος (3.24) στη θέση της μήτρας  $H$  εμφανίζεται μια τετραγωνική και πεπερασμένου βαθμού υπομήτρα της με σκοπό να γίνει η επίλυση με αντιστροφή της.

Το αποτέλεσμα είναι τα στοιχεία που υπάρχουν στις θέσεις που υπερβαίνουν το μέγεθος της υπομήτρας να αγνοούνται. Για να αποφύγουμε αυτό το μειονέκτημα της μεθόδου σαρώσαμε τον πίνακα Hankel κατά στήλη με αποτέλεσμα να δημιουργήσουμε ένα πίνακα μη τετραγωνικό (έστω  $P_2$ ) του οποίου οι στήλες είναι λιγότερες από τις γραμμές και αποτελούνται από διανύσματα γραμμικά ανεξάρτητα. Το μήκος των στηλών είναι αυτό για το οποίο κάθε στήλη έχει προσδιορισμένα στοιχεία, δηλαδή το μήκος της τελευταίας στήλης. Η παραπάνω διαδικασία εικονίζεται σχηματικά παρακάτω στο σχήμα

$$\left[ \begin{array}{cccc} g(0) & g(T) & \dots & \dots \\ g(T) & g(2T) & g(3T) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(nT-T) & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(NT-T) & \dots & \dots & \dots \end{array} \right] \begin{array}{c} g(NT-T) \\ g(NT) \\ \dots \\ \dots \\ g(2NT-2T) \end{array}$$

$$\begin{array}{cccc} \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & g(2NT-2T) & 0 \\ \dots & g(2NT-2T) & 0 & 0 \\ g(2NT-2T) & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Σχήμα 3.4: Επιλογή της μήτρας  $P_2$  της τροποποιημένης μεθόδου από την μήτρα του Hankel όπου  $N$  ο συνολικός αριθμός των δειγματοληπτούμενων σημείων

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να τονίσουμε ότι στην τροποποίηση αυτή

χρησιμοποιούμε ως κριτήριο εξάρτησης των “έως τώρα επιλεγθεισών στηλών” τις ιδιοτιμές (singular values) του αντίστοιχου πίνακα που σχηματίζεται από αυτές τις στήλες και όχι την ορίζουσά του όπως στην αρχική μέθοδο. Οι ιδιοτιμές ενός πίνακα ορίζονται από τον τύπο

$$\sigma = \sqrt{\lambda_i}$$

όπου  $\lambda_i$  η  $i$ -οστή ιδιοτιμή του πίνακα  $M^T M$ . Όταν  $0 < \min(\sigma_i) < \text{equivalent zero}$ , τότε ο πίνακας αποτελείται από διανύσματα μεταξύ τους εξαρτημένα. Με τον τρόπο αυτό επιλέγονται οι πρώτες  $n$  “ανεξάρτητες” στήλες. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η αμέσως επόμενη από τις ανεξάρτητες στήλες (που σύμφωνα με τα παραπάνω είναι και η πρώτη από τις εξαρτημένες, αφού όλες οι υπόλοιπες  $n+i$  στήλες είναι γραμμικός συνδυασμός των προηγούμενων) μεταφέρεται στο δεξί μέλος της εξίσωσης (3.24) και παίζει το ρόλο του διανύσματος που βρίσκεται στο δεξί μέλος της εξίσωσης (3.24). Η επίλυση της τροποποιημένης αυτής εξίσωσης δίνει τον τρόπο με τον οποίο εξαρτάται η γραμμικώς εξαρτημένη στήλη από τις προηγούμενες, δηλαδή το διάνυσμα που περιέχει τους  $b_i$  συντελεστές του χαρακτηριστικού πολυωνύμου. Στην επίλυση λαμβάνονται τώρα υπόψη τιμές του ρεύματος  $i(t)$  για  $t$  μέχρι  $(N-1)T$ , ήδη από την πρώτη στήλη!

Αξίζει να σημειωθεί ότι με τη μέθοδο αυτή, για προσέγγιση μικρής τάξης, όπως στην περίπτωση μας, χρησιμοποιείται περίπου το μισό των δειγμάτων. Η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης με την  $(n+1)$ -οστή στήλη στο δεξί μέλος δίνει το διάνυσμα που περιέχει τα  $b_i$ . Ας σημειωθεί ότι κάθε μεταφορά άλλου διανύσματος-στήλης  $(n+i)$  στο δεξί μέλος δίνει ένα διάνυσμα-λύση που υποδεικνύει μεν τον τρόπο εξάρτησης του  $(n+i)$ -οστού διανύσματος-στήλης από τα διανύσματα του πίνακα (δηλαδή τις  $n$  πρώτες στήλες του πίνακα  $P$ ), αλλά αυτό δεν είναι το διάνυσμα που περιέχει τους συντελεστές του χαρακτηριστικού πολυωνύμου.

Σε αυτό το σημείο εμφανίζεται ένα καινούριο πρόβλημα. Ο πίνακας στα αριστερά του συστήματος δεν είναι τετραγωνικός. Έχουμε δηλαδή να επιλύσουμε ένα σύστημα με περισσότερες εξισώσεις από αγνώστους. Η επίλυσή του φαίνεται γραφικά στο σχήμα 3.5.

α) Εξίσωση

β) Αριστερή αντιστροφή

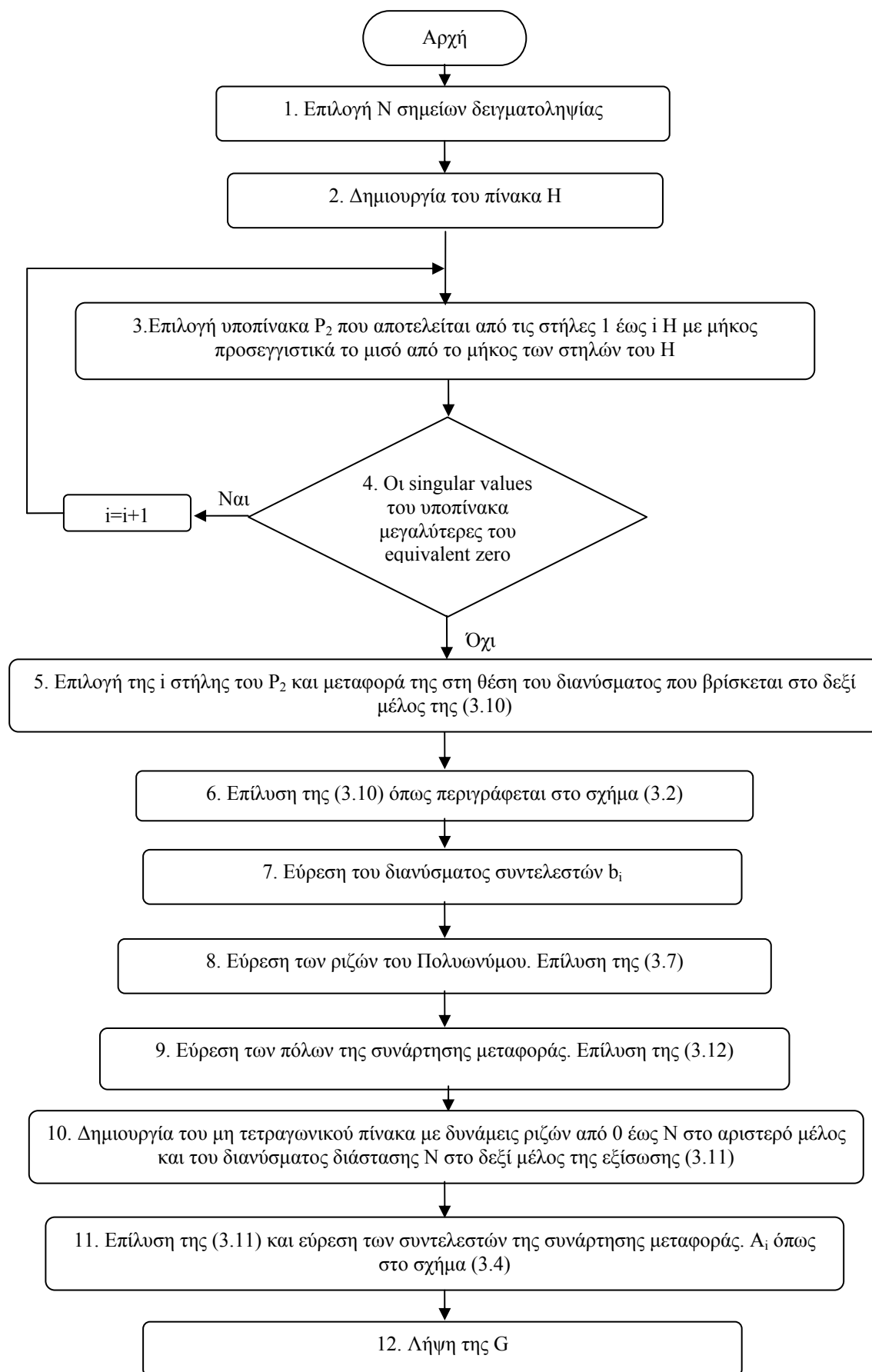
γ) Λύση ελάχιστου μέτρου του σφάλματος

Σχήμα 3.5: Επίλυση συστήματος  $N$  εξισώσεων με  $n$  άγνωστους όπου  $N > n$

Καθώς τα διανύσματα που έχουμε τώρα στον πίνακα είναι γραμμικώς ανεξάρτητα σύμφωνα με την πιο πριν διαδικασία, καμία από τις εξισώσεις του συστήματος δεν απλοποιείται και έτσι το διάνυσμα των λύσεων μου έχει όντως λιγότερες συντεταγμένες από την διάσταση  $N$ , του πίνακα  $H$  που φαίνεται στο σχήμα 3.4. Άρα το διάνυσμα-“λύση” είναι στην πραγματικότητα ένα διάνυσμα που αν πολλαπλασιαστεί με τη μήτρα  $H$  (σχήμα 3.5.α) δίνει ένα διάνυσμα που προσεγγίζει το  $z$  (σχήμα 3.5.α), ώστε το σφάλμα που θα έχουμε να έχει την ελάχιστη ευκλείδεια νόρμα. Ένα ανάλογο στο χώρο - για να γίνει κατανοητή η διαδικασία - θα ήταν να προσπαθούσαμε να δώσουμε μια λύση σε τρισδιάστατο πρόβλημα, με δυνατές λύσεις καθηλωμένες σε επίπεδο  $\varepsilon$ . Συνεπώς η λύση που επιλέγουμε σε αυτήν την περίπτωση είναι αυτή η οποία πολλαπλασιασμένη με την μήτρα  $H$  από αριστερά (σχήμα 3.5.α) δίνει την προβολή του διανύσματος που βρίσκεται στο δεξί μέλος της εξίσωσης (σχήμα 3.5.α) στο επίπεδο  $\varepsilon$ , και άρα η λύση ελάχιστου μέτρου του σφάλματος. Εδώ η λύση αυτή είναι η  $u_0$  (σχήμα 3.5.γ) η οποία προκύπτει από τον από αριστερά πολλαπλασιασμό της εξίσωσης του σχήματος 3.5.α με την  $H^{LM}$  (η οποία ορίζεται στο σχήμα 3.5.γ). Τότε αυτή μετατρέπεται στην εξίσωση του σχήματος 3.5.γ και δίνεται η

“λύση”  $u_0$ . Ομοίως επιλύεται και η εξίσωση (3.25). Οι δυνάμεις στις οποίες υψώνονται οι ρίζες φτάνουν μέχρι το πλήθος των σημείων παρεμβολής. Άρα δημιουργείται και εδώ ένας μη τετραγωνικός πίνακας στο αριστερό μέλος και ένα σύστημα που είναι της μορφής του σχήματος 3.5.α. Από εδώ συνεχίζει η ίδια διαδικασία για την εύρεση του διανύσματος που περιέχει τα  $A_i$  τα οποία είναι οι συντελεστές της κρουστικής απόκρισης της σχέσης (3.18). Παρακάτω, στο σχήμα 3.6 απεικονίζεται το λογικό διάγραμμα της τροποποιημένης μεθόδου.





Σχήμα 3.6: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου της πρώτης τροποποιημένης μεθόδου

### 3.1.5 Δεύτερη τροποποιημένη μέθοδος με βάση τη μέθοδο Prony

Παρά το γεγονός ότι η τροποποιημένη μέθοδος έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, προχωρήσαμε στην μελέτη και εφαρμογή μίας ακόμα τροποποίησης με στόχο να περιορίσουμε ακόμα περισσότερο το σφάλμα και να προσεγγίσουμε όσο γίνεται πιο πολύ το γράφημα που προκύπτει από τον τύπο (3.1). Σκεπτόμενοι με την ίδια λογική που χρησιμοποιήσαμε στην περίπτωση της προηγούμενης-πρώτης τροποποιημένης μεθόδου, προσπαθήσαμε να περιορίσουμε σε μεγαλύτερο βαθμό την απώλεια της πληροφορίας μας. Έχοντας αυτό σαν στόχο, θεωρήσαμε εξ' αρχής τον πίνακα Hankel.

$$H = \begin{bmatrix} g(0) & g(T) & g(2T) & \dots & g(NT-T) \\ g(T) & g(2T) & g(3T) & \dots & g(NT) \\ g(2T) & g(3T) & \dots & \dots & \dots \\ g(3T) & \dots & \dots & \dots & g(2NT-2T) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & g(2NT-2T) & \dots & 0 \\ \dots & g(2NT-2T) & 0 & \dots & 0 \\ g(2NT-2T) & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση το κριτήριο για την διακοπή της σάρωσης είναι οι ιδιοτιμές του πίνακα. Όπως και πριν, λάβαμε υπόψιν μας το γεγονός πως όταν  $0 < \min(\sigma_i) < \text{equivalent zero}$ , τότε ο πίνακας αποτελείται από διανύσματα μεταξύ τους εξαρτημένα.

Αυτή τη φορά επιλέγονται οι πρώτες  $n$  “ανεξάρτητες” στήλες οι οποίες δεν σαρώνονται ολόκληρες αλλά κλιμακωτά και αποτελούν τον πίνακα  $P_3$ .

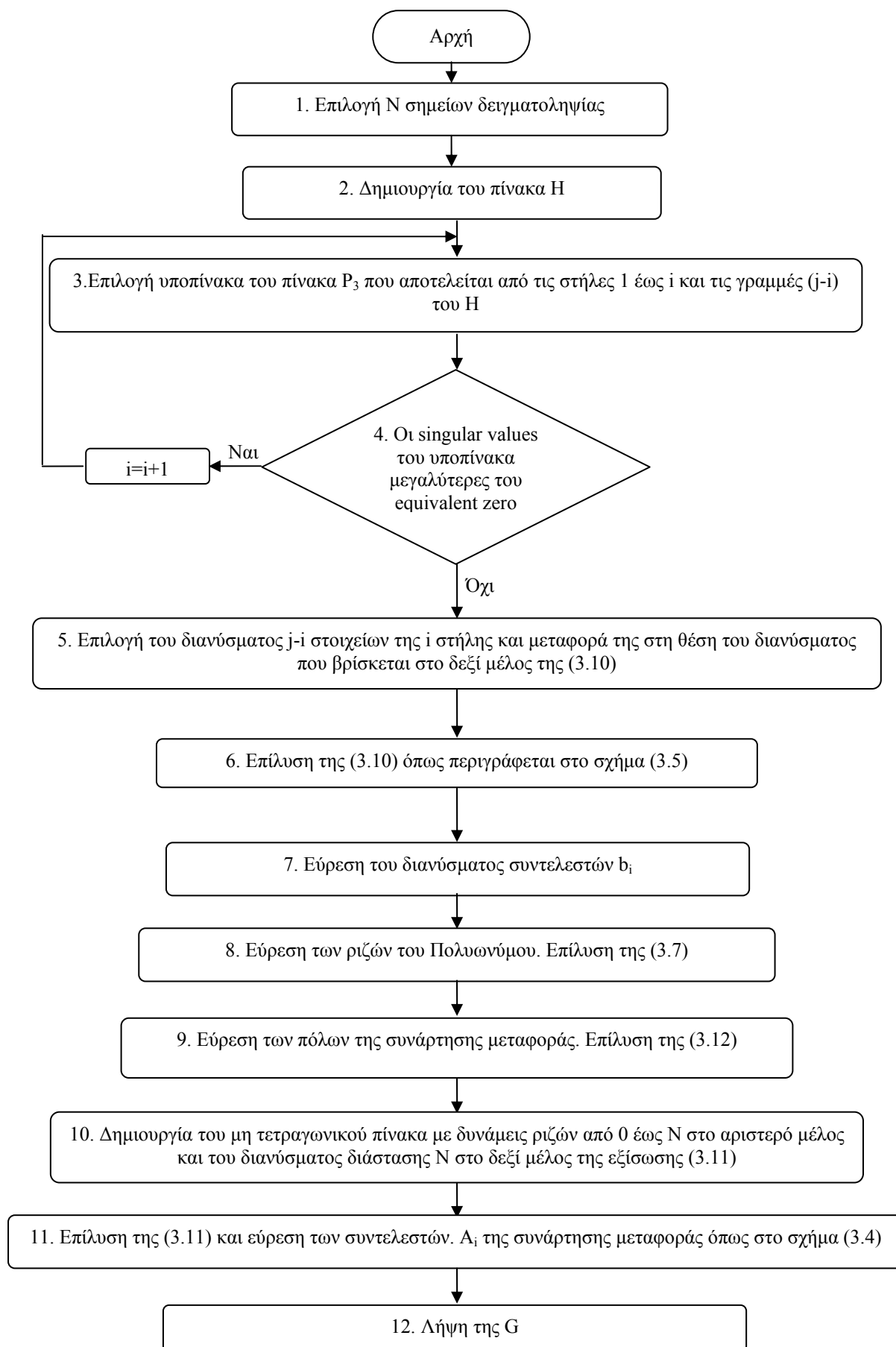
Κάθε επόμενη στήλη που επιλέγεται έχει και μία γραμμή λιγότερη από την προηγούμενη, μέχρι την στιγμή που ικανοποιείται το κριτήριο διακοπής και η σάρωση διακόπτεται. Η διαδικασία επιλογής του πίνακα  $P_3$  εικονίζεται σχηματικά παρακάτω στο σχήμα 3.7.

$$H = \begin{bmatrix} g(0) & g(T) & g(2T) & \dots & g(NT-T) \\ g(T) & g(2T) & g(3T) & \dots & g(NT) \\ g(2T) & g(3T) & \dots & \dots & \dots \\ g(3T) & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & g(2NT-2T) & \dots & \dots \\ \dots & g(2NT-2T) & 0 & \dots & \dots \\ g(2NT-2T) & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Σχήμα 3.7: Επιλογή της μήτρας  $P_3$  της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου από την μήτρα του Hankel όπου  $N$  ο συνολικός αριθμός των δειγματοληπτούμενων σημείων

Το αμέσως επόμενο διάνυσμα είναι το διάνυσμα που αντιστοιχεί στο δεξί μέλος της εξίσωσης (3.24). Από εκείνο το σημείο και έπειτα, η επίλυση του συστήματος είναι ίδια με αυτή της προηγούμενης τροποποιημένης μεθόδου. Έχουμε ένα πίνακα με μη ανεξάρτητα διανύσματα μη τετραγωνικό. Με άλλα λόγια, το πρόβλημα μας είναι ίδιο με αυτό που αντιμετωπίσαμε παραπάνω και κατά συνέπεια η λύση ακολουθεί τα ίδια βήματα τα οποία εικονίζονται στο σχήμα 3.5 με την γνωστή από πριν αναστροφή του πίνακα  $P_3$  και τον πολλαπλασιασμό της από αριστερά και στα δύο μέλη της εξίσωσης. Καταλήγουμε έτσι σε ένα σύστημα με τετραγωνικούς πίνακες το οποίο λύνεται κατά τα γνωστά.

Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου της τροποποιημένης αυτής μεθόδου.



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου

## 3.2 Εφαρμογές των τριών μεθόδων ανεύρεσης κρουστικής απόκρισης κυκλώματος

### 3.2.1 Εφαρμογή της μεθόδου Prony

Στην παρούσα παράγραφο θα δούμε την εφαρμογή της μεθόδου Prony στην ανεύρεση της κρουστικής απόκρισης που προσεγγίζει την εξίσωση του Heidler η οποία χαρακτηρίζεται από τις εξισώσεις 3.1, 3.2 και 3.3 με παραμέτρους:

$$\tau_1=0.75 \quad (3.29)$$

$$\tau_2=0.82 \quad (3.30)$$

$$\tau_3=3.43 \quad (3.31)$$

$$\tau_4=68.70 \quad (3.32)$$

$$i_1=17.46 \quad (3.33)$$

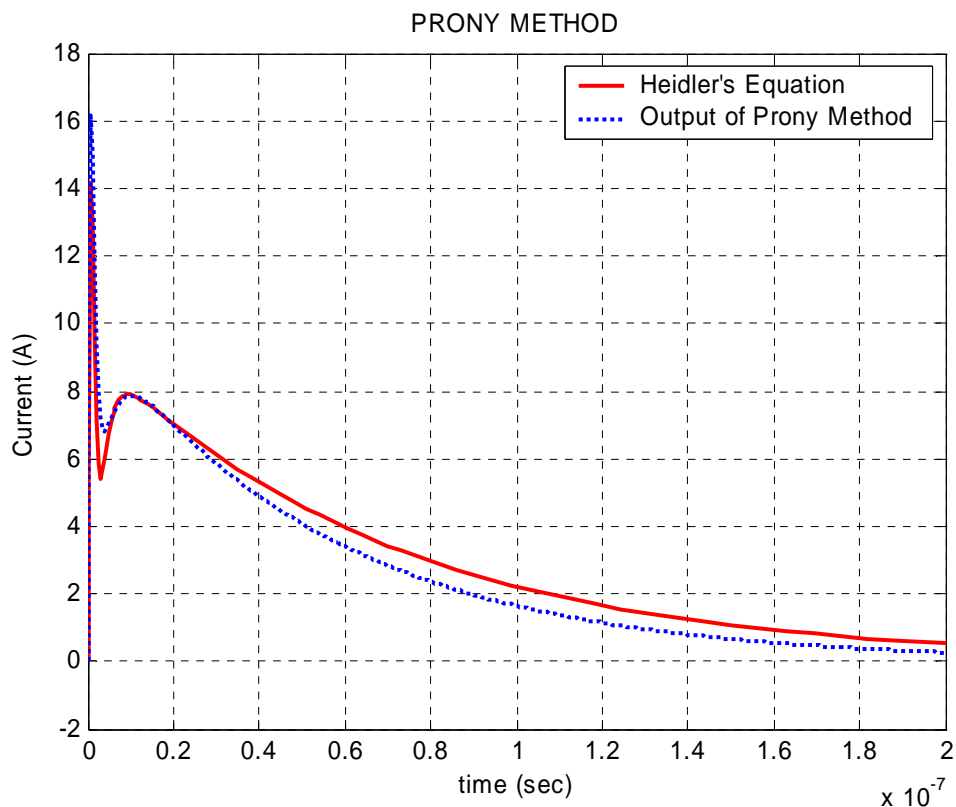
$$i_2=7.81 \quad (3.34)$$

$$n=3 \quad (3.35)$$

Οι οποίες υπολογίστηκαν από σχετική εργασία που έγινε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου [11]

Καθώς το κύκλωμά μας αντιμετωπίζεται σαν γραμμικό, και γνωρίζοντας ότι στα γραμμικά κυκλώματα όταν εφαρμοστεί μια τάση  $\Delta$  στην είσοδό τους η απόκρισή τους είναι ίση με την συνάρτηση μεταφοράς, συγκρίνουμε την έξοδο του κυκλώματος που προκύπτει από κάθε μέθοδο με την εξίσωση του Heidler με την οποία το ιδανικό θα ήταν να ταυτίζεται.

Το αποτέλεσμα της εφαρμογής της μεθόδου εικονίζεται στο σχήμα 3.9.



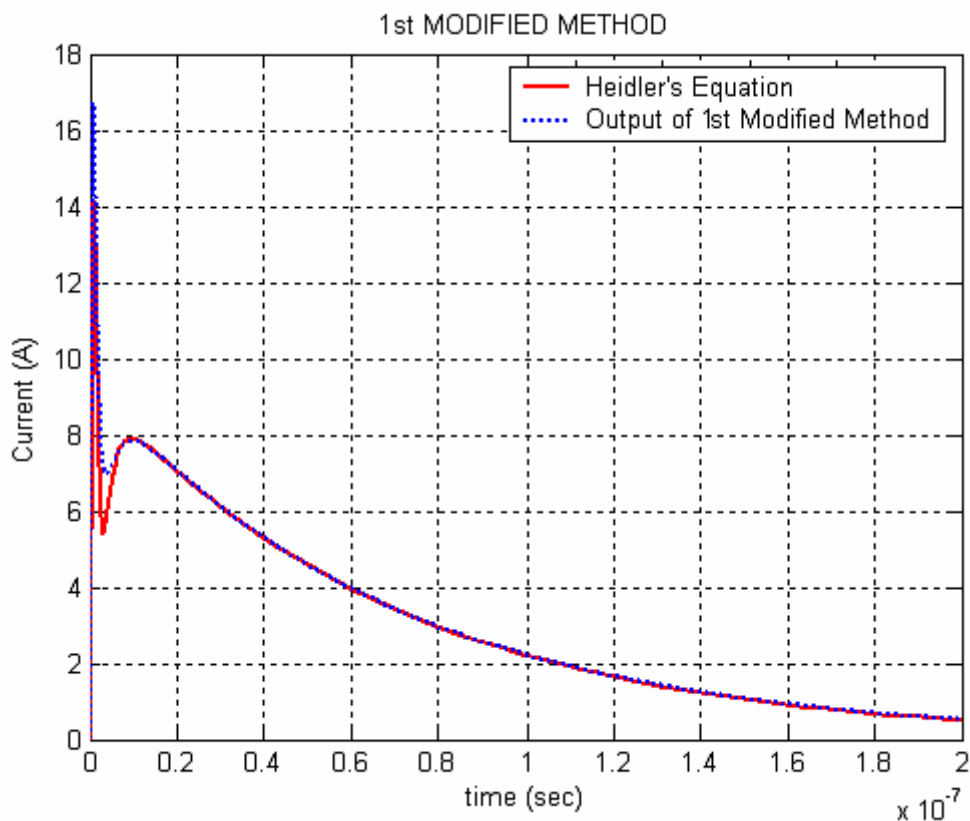
Σχήμα 3.9: Η καμπύλη που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου Prony σε κοινό διάγραμμα με την καμπύλη που προκύπτει από την (3.1)

Το μέσο σφάλμα της μεθόδου Prony υπολογίστηκε ότι είχε ποσοστιαία τιμή 24.8% και μέγιστη τιμή 47.96%

### 3.2.2 Εφαρμογή της πρώτης τροποποιημένης μεθόδου με βάση την μέθοδο Prony

Παρόμοια με την προηγούμενη παράγραφο, θα δούμε τα αποτελέσματα της πρώτης τροποποιημένης μεθόδου για την ανεύρεση της κρουστικής απόκρισης που αναφέρθηκε πριν.

Η εφαρμογή της πρώτης τροποποιημένης μεθόδου μας έδωσε σαν αποτέλεσμα την απόκριση που εμφανίζεται στο παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 3.10.



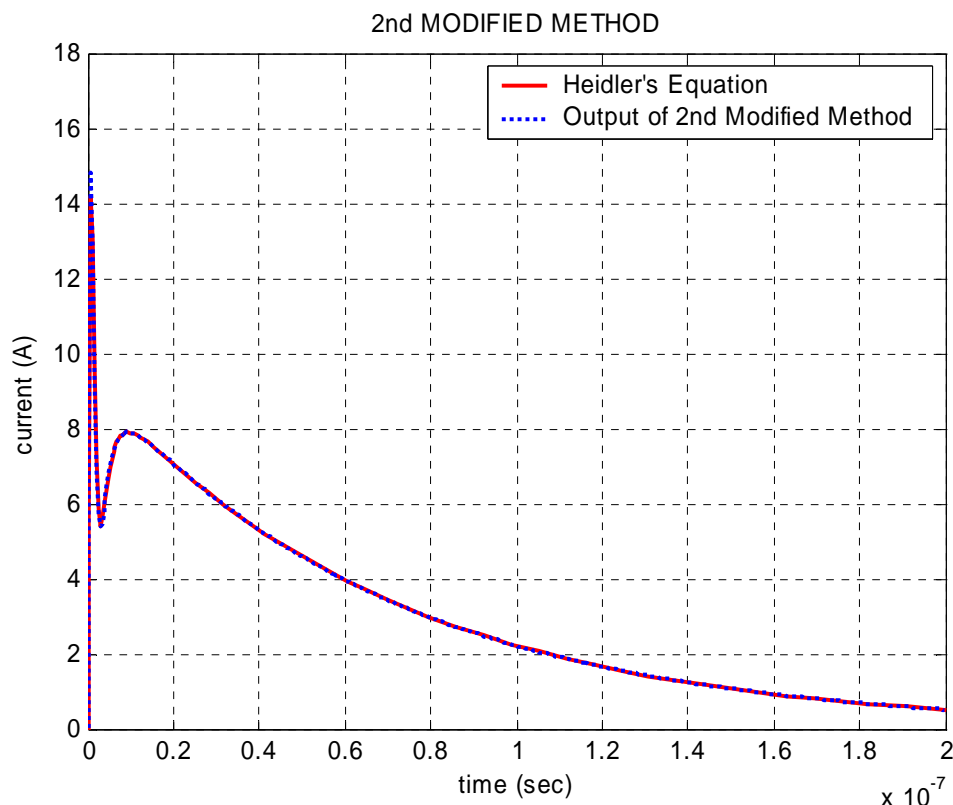
Σχήμα 3.10: Η καμπύλη που προκύπτει από την εφαρμογή της πρώτης τροποποιημένης μεθόδου σε κοινό διάγραμμα με την καμπύλη που προκύπτει από την σχέση (3.1).

Το μέσο σφάλμα της μεθόδου είχε τιμή 0.33% ενώ το μέγιστο σφάλμα ήταν ίσο με 43.32%.

### 3.2.3 Εφαρμογή της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου με βάση την μέθοδο Prony

Όπως κάναμε και για την πρώτη τροποποιημένη μέθοδο στην προηγούμενη παράγραφο, έτσι και στην παρούσα θα δούμε τα αποτελέσματα της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου για την ανεύρεση της κρουστικής απόκρισης

Η εφαρμογή της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου μας έδωσε σαν αποτέλεσμα την απόκριση που εμφανίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 3.11.



Σχήμα 3.11: Η καμπύλη που προκύπτει από την εφαρμογή της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου σε κοινό διάγραμμα με την καμπύλη που προκύπτει από την σχέση (3.1)

Το μέσο σφάλμα αυτή τη φορά είχε τιμή 0.59% ενώ το μέγιστο σφάλμα έφτασε την τιμή του 14.11%.

### 3.2.4 Σύγκριση-Συμπεράσματα

Από τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, εξάγονται αρκετά χρήσιμα συμπεράσματα. Στις δύο τροποποιημένες μεθόδους καταρχάς εμφανίζονται συστήματα, όπου οι άγνωστοι είναι λιγότεροι από τον αριθμό των εξισώσεων, κάτι το οποίο δεν ισχύει στην περίπτωση της μεθόδου Prony. Αυτό το γεγονός καθιστά την επίλυση του συστήματος πιο δύσκολη και γι' αυτό το λόγο έχει αναπτυχθεί και μια ειδική μέθοδος επίλυσης. Πιο σημαντικό βέβαια είναι το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της πρώτης τροποποιημένης μεθόδου αλλά και κυρίως της δεύτερης προσεγγίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την καμπύλη που προκύπτει από τον θεωρητικό τύπο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός της εκμετάλλευσης μεγαλύτερης πληροφορίας. Στην τετραγωνική μήτρα της σχέσης (3.10), η αλλαγή του τρόπου να διατρέχουμε τον



πίνακα, δίνει καλύτερη εικόνα της εξόδου στην μέθοδο, αφού από το πρώτο διάγραμμα ήδη φθάνουμε μέχρι την τιμή  $g((N-1)T)$  στην πρώτη τροποποιημένη μέθοδο και  $g(2NT-2T)$  στην δεύτερη. Επίσης, στη σχέση (3.25) αντίθετα με τον αρχικό έλεγχο που κάναμε στην πρώτη εφαρμογή της μεθόδου Prony, στις δυο τροποποιημένες παίρνουμε όλες τις δυνάμεις κάθε ρίζας, δηλαδή τόσες όσες το πλήθος των σημείων παρεμβολής, και όχι μόνο τόσες δυνάμεις όσοι είναι οι συντελεστές του χαρακτηριστικού πολυωνύμου. Υπό αυτήν την έννοια, και με την απαίτηση τα  $A_i$  να “ικανοποιούν” όλες τις εξισώσεις της (3.25), λαμβάνουμε το διάγραμμα της λύσης των  $A_i$ . Ένα χαρακτηριστικό σημείο που χρίζει προσοχής είναι η τιμή τόσο του μέσου όσο και του μέγιστου σχετικού σφάλματος. Στην μέθοδο Prony το πρώτο είχε τιμή 24.85% ενώ το δεύτερο 47.96%. Αντίθετα, στις άλλες δύο μεθόδους οι τιμές αυτές μειώθηκαν χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, η πρώτη τροποποιημένη μέθοδος ανεύρεσης της κρουστικής απόκρισης έδωσε μέσο σφάλμα κάτω από 1% και μέγιστο σφάλμα 43% περίπου. Η δεύτερη μέθοδος είχε παρόμοιο σχετικό σφάλμα καθώς και αυτό κυμάνθηκε κάτω από το 1% ενώ το μέγιστο σχετικό σφάλμα απέκτησε τιμή κοντά στο 14%, δηλαδή λίγο παραπάνω από 4 φορές μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο της πρώτης τροποποιημένης μεθόδου. Παρά το γεγονός του μικρότερου σχετικού σφάλματος της πρώτης τροποποίησης σε σχέση με τη δεύτερη, η δεύτερη εξακολουθεί να υπερέχει αφού το σφάλμα που παρουσιάζουν και οι δύο μέθοδοι είναι της ίδιας τάξης αλλά οι κρίσιμες παράμετροι, που είναι και αυτές που ενδιαφέρουν κυρίως, έχουν τιμές πιο κοντά στο ιδανικό στην περίπτωση της δεύτερης τροποποίησης. Σημειώνεται δε το γεγονός, ότι η τιμή του μέγιστου ποσοστιαίου σφάλματος εμφανίζεται στην αρχή του φαινομένου, εκεί που οι τιμές του ρεύματος είναι απειροελάχιστες και σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 60-1 [12] και EN 61000.04.05 [13] αγνοούνται για την αποφυγή λάθους μέτρησης οφειλόμενου σε παρασιτικά ρεύματα.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα δικαιώνουν την επιλογή της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου έναντι των άλλων δύο, με μόνο μειονέκτημα την υπολογιστική ισχύ που απαιτείται για την επίλυση του συστήματος, κάτι όμως που στις μέρες μας δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει προσφέρει ηλεκτρονικούς υπολογιστές ικανούς να αντέξουν τέτοιο υπολογιστικό φορτίο. Τα λιγότερα ικανοποιητικά αποτελέσματα τα έδωσε η κλασική μέθοδος ενώ η πρώτη τροποποίηση έδωσε ικανοποιητική προσέγγιση αλλά όχι τόσο καλή όσο αυτή της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου ειδικά σε ότι αφορά το μέγιστο σφάλμα.

## Κεφάλαιο 4

### Σχεδίαση κυκλώματος γεννήτριας ρεύματος ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

#### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε την διαδικασία μέσω της οποίας προχωράμε στην κατασκευή του κυκλώματος της γεννήτριας ξεκινώντας από τα εξαγόμενα αποτελέσματα της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου Prony. Στα προηγούμενα κεφάλαια είδαμε τον τρόπο με τον οποίο η μέθοδος Prony ξεκινώντας από τα πειραματικά δεδομένα εξάγει την συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος. Το επόμενο βήμα είναι να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη συνάρτηση μεταφοράς κατασκευάζοντας το αντίστοιχο κύκλωμα και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Mathematica V.4.0.0.0, σε συνδυασμό με το Matlab V.6.5 και το πρόγραμμα εξομίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων Orcad V9.2.

#### 4.2 Η συνάρτηση μεταφοράς

Στα προηγούμενα κεφάλαια είδαμε πως η εφαρμογή της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου Prony οδήγησε στην εύρεση της Συνάρτησης Μεταφοράς του κυκλώματος στην μορφή αθροίσματος κλασμάτων της μορφής

$$G_i = \frac{A_i}{s - s_i} \quad (4.1)$$

Στο κύκλωμα που θα κατασκευάσουμε θα εφαρμόσουμε βηματική είσοδο με πλάτος 1 και χρησιμοποιώντας την ιδιότητα

$$Y(s) = G(s) \cdot L\{u(t)\} \Rightarrow Y(s) = \frac{1}{s} G(s) \quad (4.2)$$

της βηματικής απόκρισης όπου για  $Y(s)$ , θα ληφθεί η εξίσωση που εντοπίστηκε με την τροποποιημένη μέθοδο Prony αμέσως προηγούμενα, αφού αυτή δίνει την

καλύτερη προσέγγιση θα διαπιστώσουμε αν πράγματι το κύκλωμά μας είναι το επιθυμητό.

Οι τιμές των  $A_i$ ,  $s_i$  που προέκυψαν από την δεύτερη τροποποιημένη μέθοδο είναι αυτές που εμφανίζονται παρακάτω. Στις πρώτες 2 στήλες του πίνακα φαίνονται οι τιμές των  $A_i$ ,  $s_i$  για  $n=n_1=243$  σημεία και στις επόμενες 2 οι τιμές που αντιστοιχούν στα  $n=n_2=64$  σημεία

$A_i$	$s_i$	$A_i$	$s_i$
65.9321	$-1.2133 \cdot 10^9$	9.4720	$-0.0145 \cdot 10^9$
-136.5260	$-3.2775 \cdot 10^9$	-2.4451	$-0.2368 \cdot 10^9$
$35.2970 - 1.7366i$	$(-5.2447 + 3.5643i) \cdot 10^9$	-25.4955	$-0.5881 \cdot 10^9$
$35.2970 + 1.7366i$	$(-5.2447 - 3.5643i) \cdot 10^9$	$9.2343 - 9.6297i$	$(-1.2880 + 0.7072) \cdot 10^9$
		$9.2343 + 9.6297i$	$(-1.2880 - 0.7072) \cdot 10^9$

Πίνακας 4.1: Τα αποτελέσματα της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου ανεύρεσης κρουστικής απόκρισης

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι το κύκλωμά μας έχει συνάρτηση μεταφοράς την:

$$G(s) = G_1(s) + G_2(s) \quad (4.3)$$

με

$$G_1(s) = \frac{65.9321}{s + 1.2133 \cdot 10^9} + \frac{-136.526}{s + 3.2775 \cdot 10^9} + \frac{35.297 - 1.7366i}{s + (5.2447 - 3.5643i) \cdot 10^9} + \frac{35.297 + 1.7366i}{s + (5.2447 + 3.5643i) \cdot 10^9} \quad (4.4)$$

και

$$G_2(s) = \frac{9.472}{s + 0.0145 \cdot 10^9} + \frac{-2.4451}{s + 0.2368 \cdot 10^9} + \frac{-25.4955}{s + 0.5881 \cdot 10^9} + \frac{9.2342 - 9.6297i}{s + (1.2880 - 0.7072i) \cdot 10^9} + \frac{9.2342 + 9.6297i}{s + (1.2880 + 0.7072i) \cdot 10^9} \quad (4.5)$$

Εμείς όμως όπως προαναφέρθηκε, εφαρμόζουμε βηματική είσοδο οπότε θα έχουμε

$$G(s) = G_1(s) + G_2(s) \quad (4.6)$$

με

$$G_1(s) = \left[ \frac{65.9321}{s + 1.2133 \cdot 10^9} + \frac{-136.526}{s + 3.2775 \cdot 10^9} + \frac{35.279 - 1.7366i}{s + (5.2447 - 3.5643i) \cdot 10^9} + \frac{35.297 + 1.7366i}{s + (5.2447 + 3.5643i) \cdot 10^9} \right] \cdot s \quad (4.7)$$

και

$$G_2(s) = \left[ \frac{9.472}{s + 0.0145 \cdot 10^9} + \frac{-2.4451}{s + 0.2368 \cdot 10^9} + \frac{-25.4955}{s + 0.5881 \cdot 10^9} + \frac{9.2342 - 9.6297i}{s + (1.2880 - 0.7072i) \cdot 10^9} + \frac{9.2342 + 9.6297i}{s + (1.2880 + 0.7072i) \cdot 10^9} \right] \cdot s \quad (4.8)$$

Στη συνέχεια κάνοντας χρήση του μαθηματικού πακέτου Mathematica παραγοντοποιήσαμε την  $G(s)$  καταλήγοντας:

$$G(s) = \frac{0.27614 \cdot 10^9 + s}{0.23680 \cdot 10^9 + s} \cdot \frac{3.27112 \cdot 10^{15} + s}{3.27753 \cdot 10^9 + s} \cdot \frac{s}{1.21326 \cdot 10^9 + s} \cdot \frac{251.86748 \cdot 10^{18} - 17.04970 \cdot 10^9 \cdot s + s^2}{2.15900 \cdot 10^{18} + 2.57591 \cdot 10^9 \cdot s + s^2} \cdot \frac{2.08342 \cdot 10^{18} + 2.64707 \cdot 10^9 \cdot s + s^2}{40.21040 \cdot 10^{18} + 10.48931 \cdot 10^9 \cdot s + s^2} \cdot \frac{4.55 \cdot 10^{-6} (0.20657 \cdot 10^{18} + 0.46878 \cdot 10^9 \cdot s + s^2)}{0.00854 \cdot 10^{18} + 0.60265 \cdot 10^9 \cdot s + s^2} \quad (4.9)$$

Δηλαδή, η ολική συνάρτηση μεταφοράς, αποτελείται από ένα γινόμενο επιμέρους συναρτήσεων.  $G_i(s)$ ,  $i=1 \dots 6$  με:

$$G_1(s) = \frac{0.27614 \cdot 10^9 + s}{0.23680 \cdot 10^9 + s} \quad (4.10)$$

$$G_2(s) = \frac{3.27112 \cdot 10^{15} + s}{3.27753 \cdot 10^9 + s} \quad (4.11)$$

$$G_3(s) = \frac{s}{1.21326 \cdot 10^9 + s} \quad (4.12)$$

$$G_4(s) = \frac{251.86748 \cdot 10^{18} - 17.04970 \cdot 10^9 \cdot s + s^2}{2.15900 \cdot 10^{18} + 2.57591 \cdot 10^9 \cdot s + s^2} \quad (4.13)$$

$$G_5(s) = \frac{2.08342 \cdot 10^{18} + 2.64707 \cdot 10^9 \cdot s + s^2}{40.21040 \cdot 10^{18} + 10.48931 \cdot 10^9 \cdot s + s^2} \quad (4.14)$$

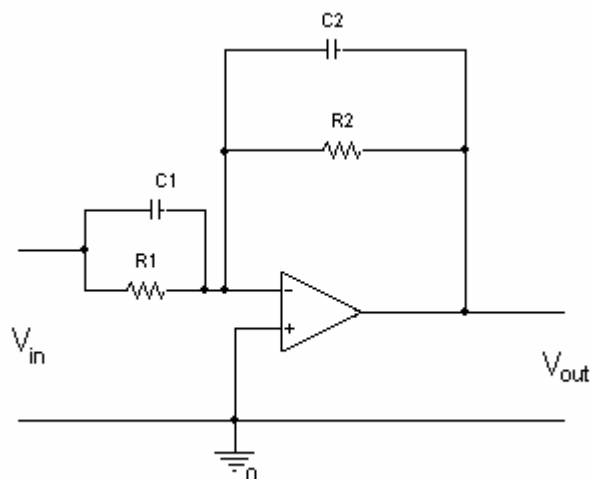
$$G_6(s) = \frac{4.55 \cdot 10^{-6} (0.20657 \cdot 10^{18} + 0.46878 \cdot 10^9 \cdot s + s^2)}{0.00854 \cdot 10^{18} + 0.60265 \cdot 10^9 \cdot s + s^2} \quad (4.15)$$

### 4.3 Το κύκλωμα

Στην παρούσα παράγραφο θα μελετήσουμε το κύκλωμα που παρουσιάζει απόκριση κρουστικής εισόδου αυτή που δίνεται από τη σχέση (4.9). Αυτή μας η προσπάθεια θα στηριχθεί στο ότι η αλυσωτή σύνδεση  $i$  κυκλωμάτων που χαρακτηρίζονται από τις συναρτήσεις μεταφοράς  $G_i$  οδηγεί σε ένα ολικό κύκλωμα με συνάρτηση μεταφοράς  $G = \prod_{i=1}^6 G_i$ . Στηριζόμενοι σε αυτή την αρχή, ανάγουμε το πρόβλημά μας στην

δημιουργία 6 κυκλωμάτων με συναρτήσεις μεταφοράς τις συναρτήσεις των σχέσεων (4.10) έως (4.15) τα οποία στη συνέχεια θα συνδεθούν αλυσωτά δημιουργώντας ένα κύκλωμα με συνάρτηση μεταφοράς την (4.9).

Οι συναρτήσεις  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ , υλοποιούνται από ένα απλό κύκλωμα με ένα τελεστικό ενισχυτή σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία το οποίο και εικονίζεται παρακάτω στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Αναστρέφουσα συνδεσμολογία τελεστικού ενισχυτή

Το παραπάνω κύκλωμα έχει συνάρτηση μεταφοράς την παρακάτω:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2 + \frac{1}{s \cdot C_2}}{\frac{R_1 + \frac{1}{s \cdot C_1}}{R_1 \cdot \frac{1}{s \cdot C_1}}} = -\frac{1}{C_2 \cdot (s + \frac{1}{R_2 \cdot C_2})} \Rightarrow$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{C_1 \cdot (s + \frac{1}{R_1 \cdot C_1})}{C_2 \cdot (s + \frac{1}{R_2 \cdot C_2})}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{C_1 \cdot (s + \frac{1}{R_1 \cdot C_1})}{C_2 \cdot (s + \frac{1}{R_2 \cdot C_2})} \quad (4.16)$$

Αν  $C_1=C_2=C$  τότε η εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{s + a}{s + b} \quad (4.17)$$

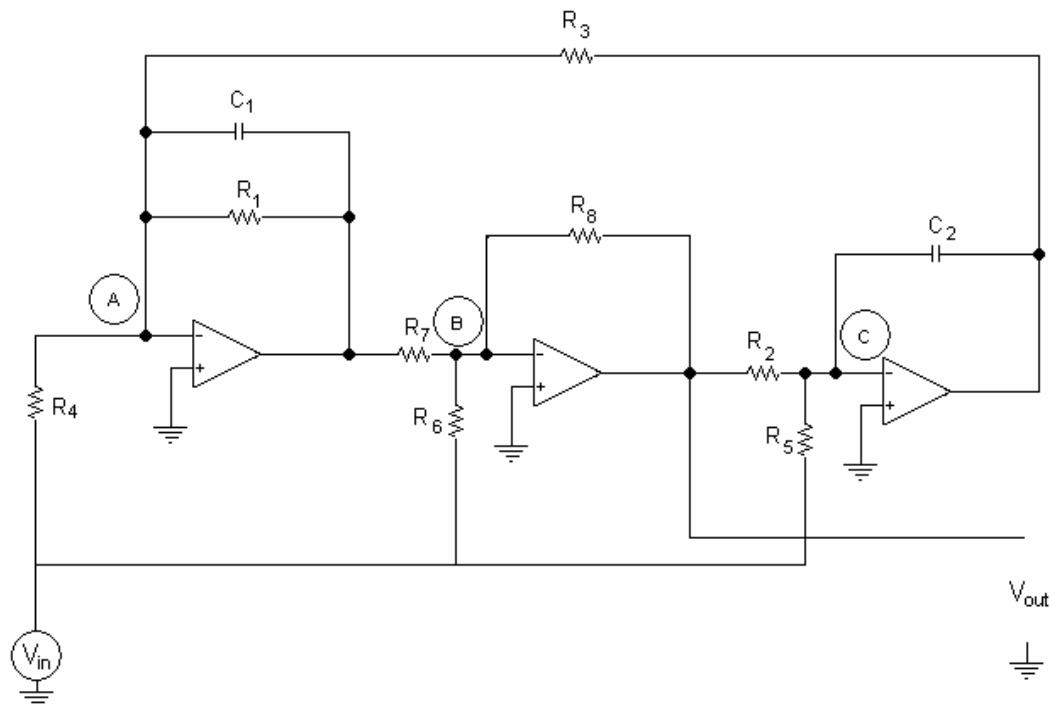
όπου

$$a = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \quad (4.18)$$

$$b = \frac{1}{R_2 \cdot C_2} \quad (4.19)$$

η οποία είναι ίδια με την μορφή των εξισώσεων (4.10), (4.11) και (4.12).

Οι υπόλοιπες συναρτήσεις μεταφοράς υλοποιούνται στην περίπτωση μας με το κύκλωμα των Tow Thomas το οποίο φαίνεται στο σχήμα 4.3.[29]



Σχήμα 4.3: Το κύκλωμα των Tow Thomas

Αναλύοντας το κύκλωμα και γράφοντας τις ανάλογες εξισώσεις για τους κόμβους A, B και C παίρνουμε τα εξής:

$$\text{Κόμβος A:} \quad -\left(\frac{1}{R_1} + sC_1\right)V_1 - \frac{1}{R_3}V_3 = \frac{1}{R_4}V_{in} \quad (4.20)$$

$$\text{Κόμβος B:} \quad -\frac{1}{R_7}V_1 - \frac{1}{R_8}V_2 = \frac{1}{R_6}V_{in} \quad (4.21)$$

$$\text{Κόμβος C:} \quad -\frac{1}{R_2} V_2 - sC_2 V_3 = \frac{1}{R_5} V_{in} \quad (4.22)$$

Η επίλυση αυτών των εξισώσεων μας δίνει τελικά και τη συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_8}{R_6} \cdot \frac{s^2 + s\left(\frac{1}{R_1 C_1} - \frac{R_6}{R_4 C_1 R_7}\right) + \frac{R_6}{R_7 R_3 R_5 C_1 C_2}}{s^2 + s\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{R_8}{R_7 R_2 R_3 C_1 C_2}} \quad (4.23)$$

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος αντιστοιχεί στην συνάρτηση μεταφοράς που πρέπει να χαρακτηρίζει τα 3 τελευταία υποκυκλώματα του κυκλώματός μας.

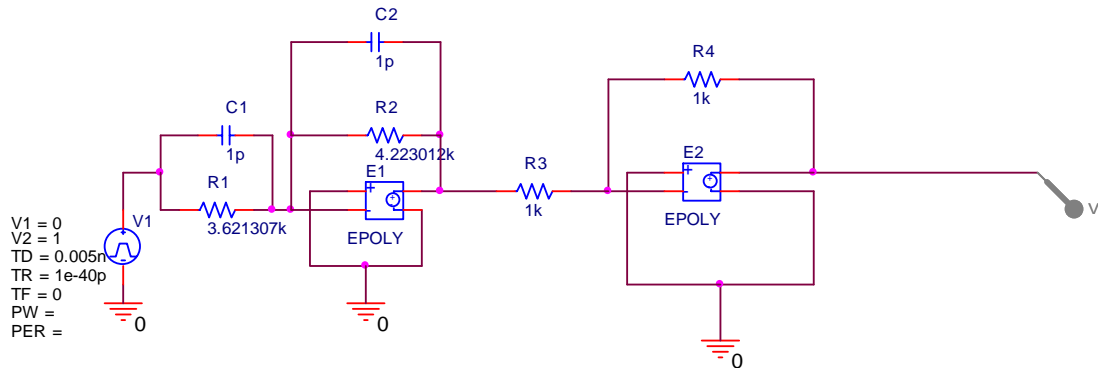
#### 4.4 Οι εξόδοι των διάφορων βαθμίδων

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, το κύκλωμά μας αποτελείται από έξι υποκυκλώματα. Στην παρούσα παράγραφο θα ασχοληθούμε με την κατασκευή αυτών των κυκλωμάτων και την επαλήθευση της απόκρισής τους. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα προσομοίωσης PSpice το οποίο περιέχεται στο λογισμικό πακέτο Orcad. Οι τιμές των στοιχείων προέκυψαν σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση. Εδώ θα παραθέσουμε τα σχηματικά διαγράμματα των κυκλωμάτων που απαιτούνται καθώς και του τελικού κυκλώματος και τις βηματικές τους εξόδους όπως τις υπολογίζει το PSpice σε κοινό διάγραμμα με τις εξόδους που δίνει το Simulink για κάθε ένα από αυτά τα κυκλώματα έτσι ώστε να μπορέσουμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για την συνολική κατασκευή.



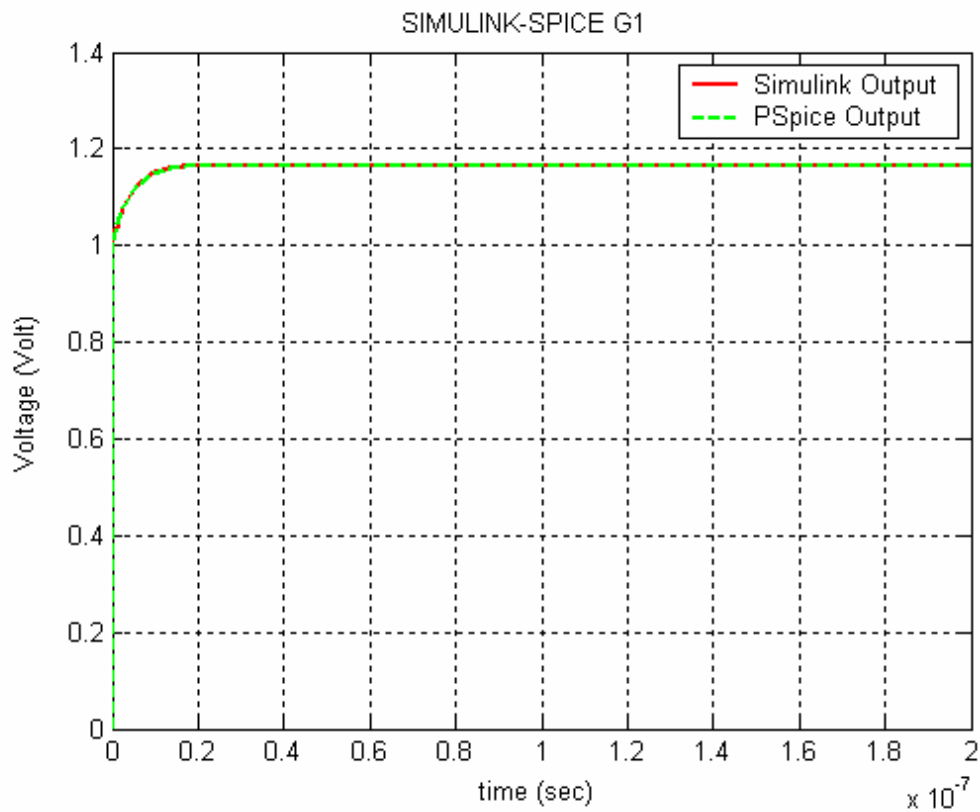
## Βαθμίδα 1

### Σχηματικό διάγραμμα



Σχήμα 4.4: Το σχηματικό διάγραμμα της πρώτης βαθμίδας

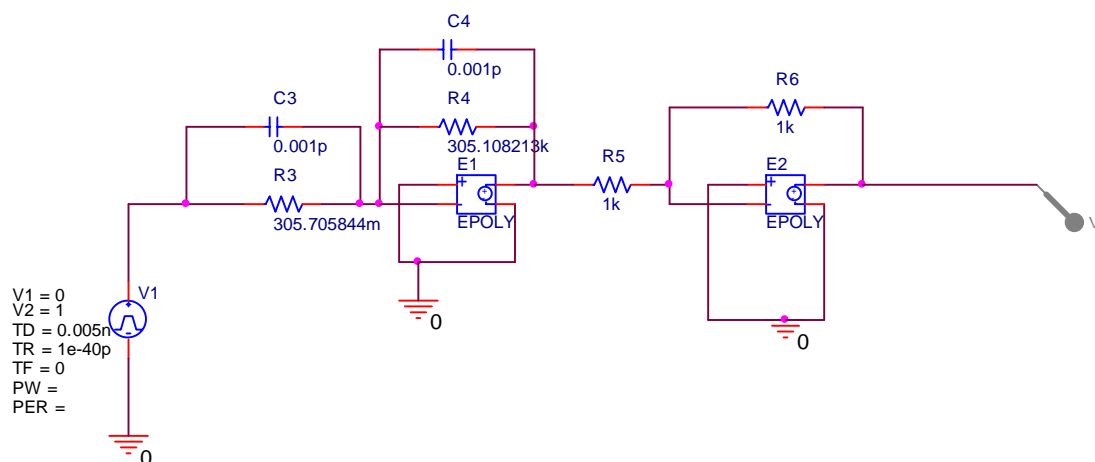
### Απόκριση



Σχήμα 4.5: Η απόκριση της πρώτης βαθμίδας σύμφωνα με το PSpice σε κοινό διάγραμμα με την θεωρητική της απόκριση

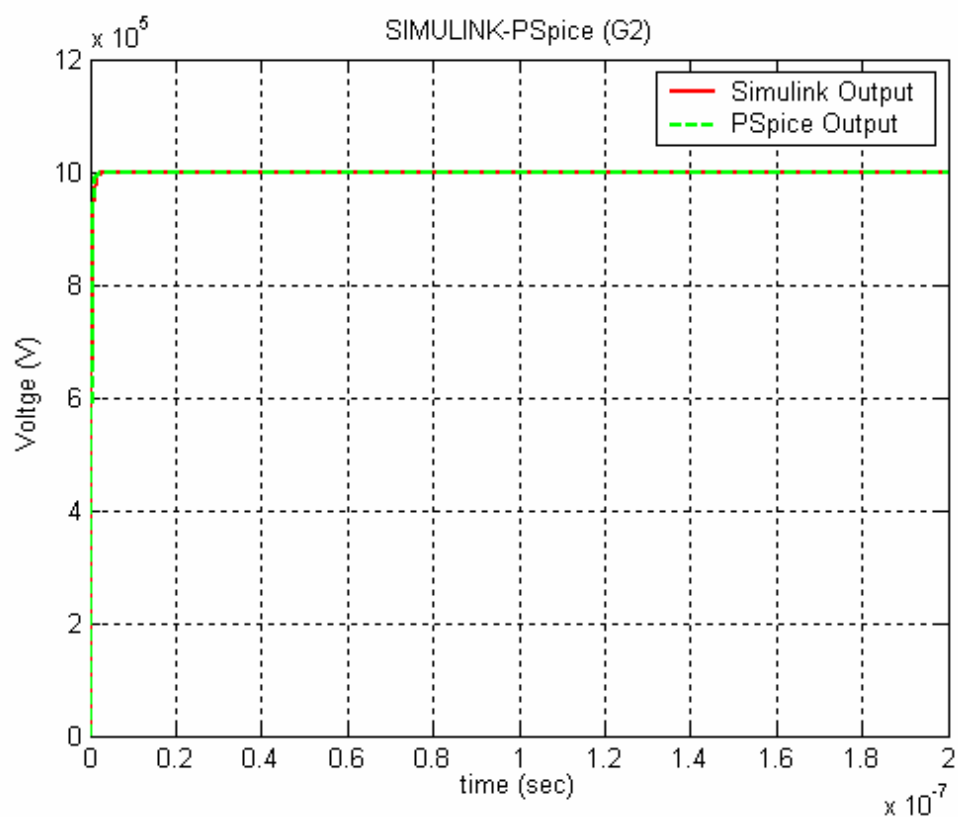
## Βαθμίδα 2

### Σηματικό διάγραμμα



Σχήμα 4.6: Το σηματοτικό διάγραμμα της δεύτερης βαθμίδας

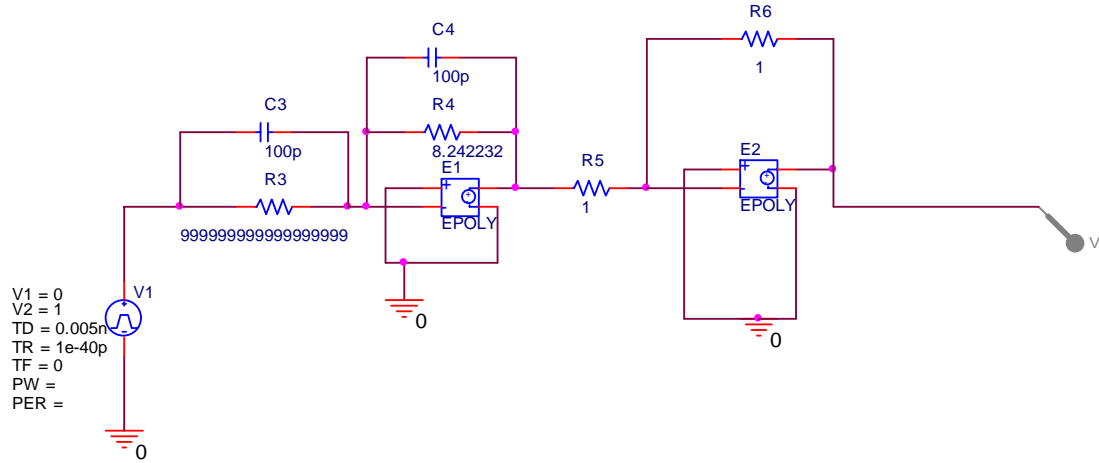
### Απόκριση



Σχήμα 4.7: Η απόκριση της δεύτερης βαθμίδας σύμφωνα με το PSpice σε κοινό διάγραμμα με την θεωρητική της απόκριση

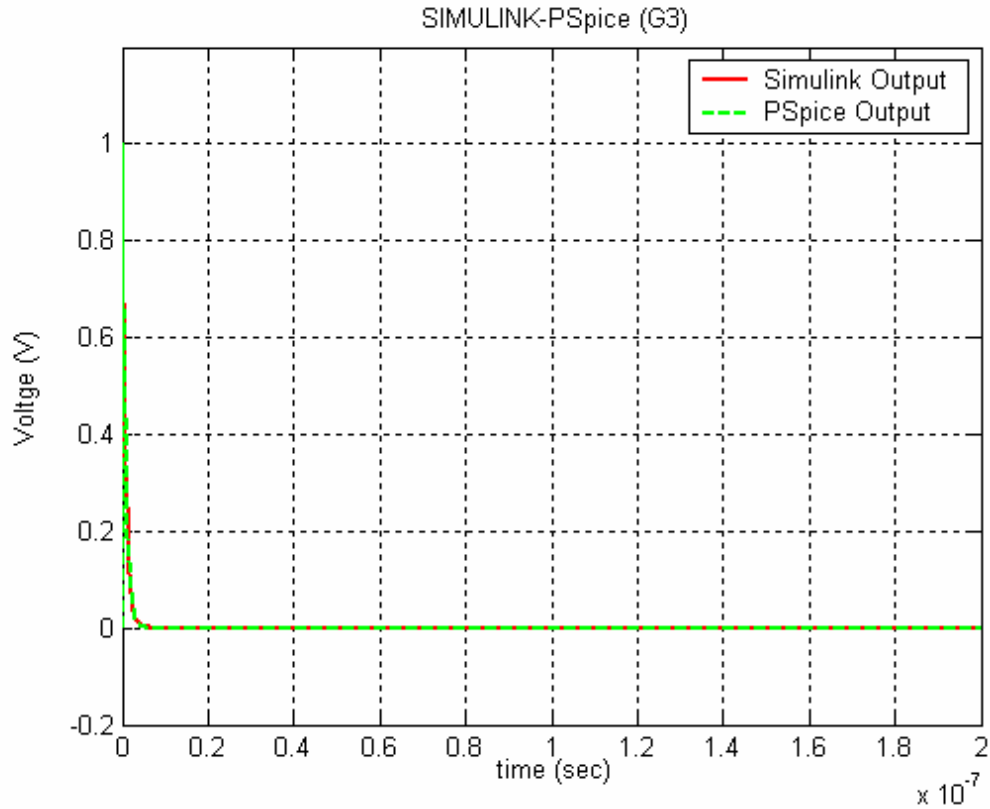
### Βαθμίδα 3

#### Σχηματικό διάγραμμα

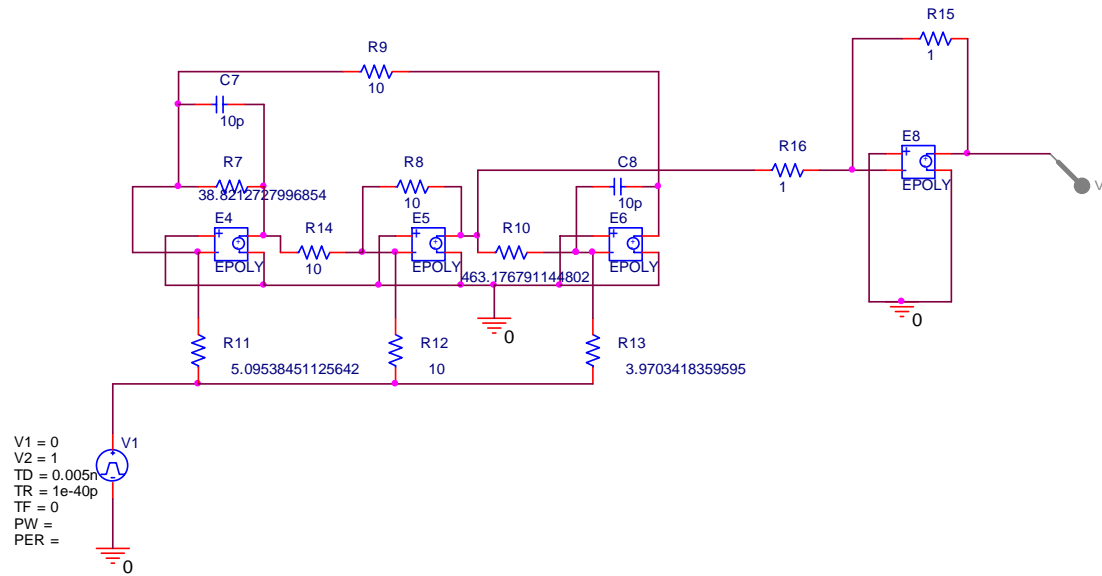


Σχήμα 4.8: Το σχηματικό διάγραμμα της τρίτης βαθμίδας

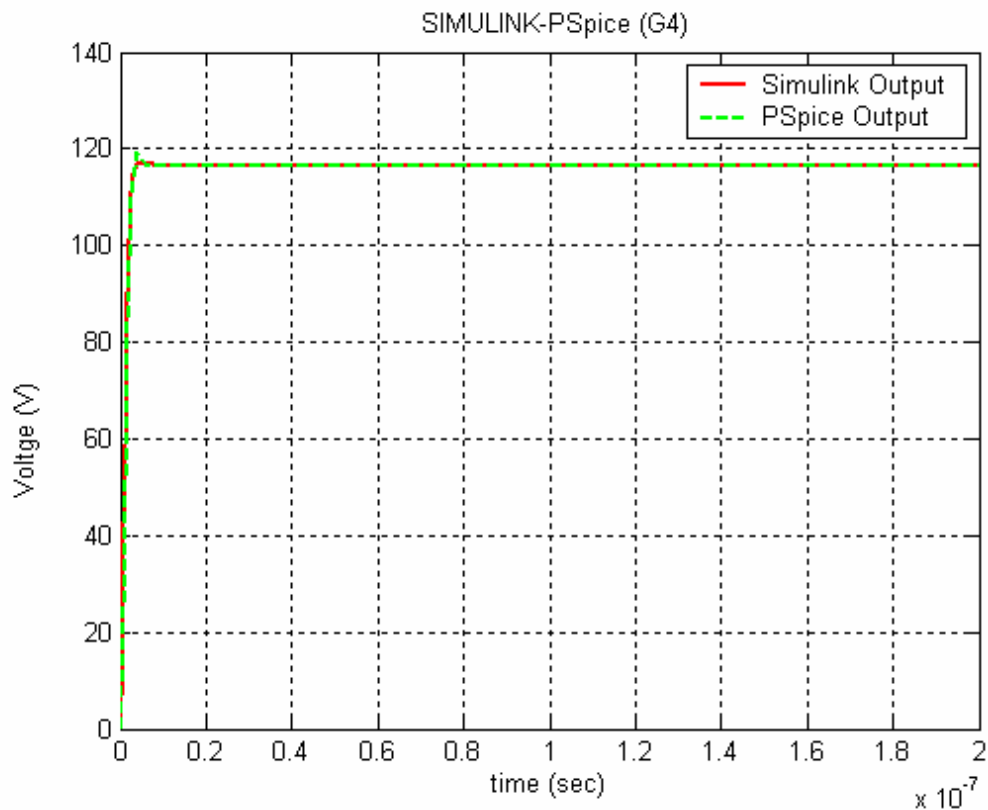
#### Απόκριση



Σχήμα 4.9: Η απόκριση της τρίτης βαθμίδας σύμφωνα με το PSpice σε κοινό διάγραμμα με την θεωρητική της απόκριση

**Βαθμίδα 4****Σχηματικό διάγραμμα**

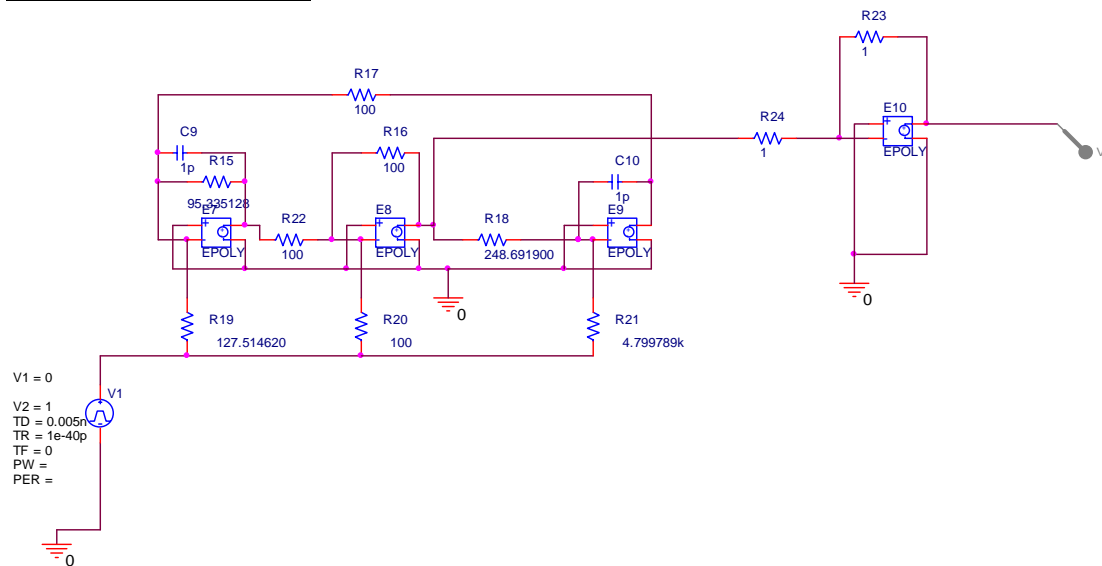
Σχήμα 4.10: Το σχηματικό διάγραμμα της τέταρτης βαθμίδας

**Απόκριση**

Σχήμα 4.11: Η απόκριση της τέταρτης βαθμίδας σύμφωνα με το PSpice σε κοινό διάγραμμα με την θεωρητική της απόκριση

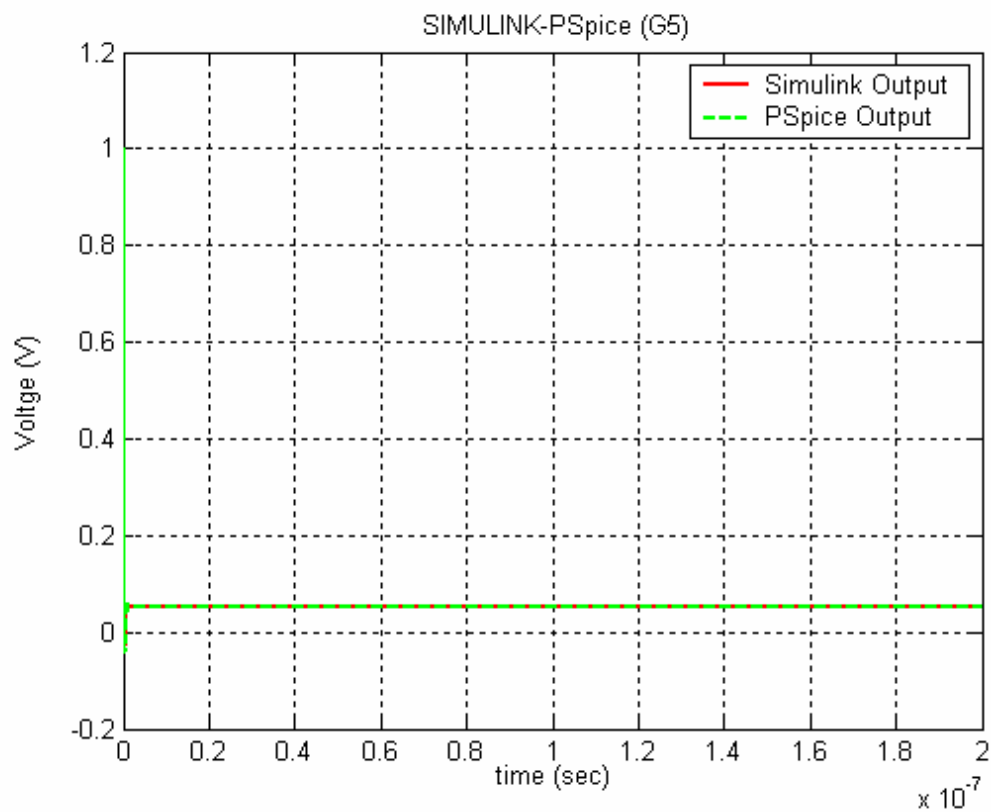
## Βαθμίδα 5

### Σχηματικό διάγραμμα



Σχήμα 4.12: Το σχηματικό διάγραμμα της πέμπτης βαθμίδας

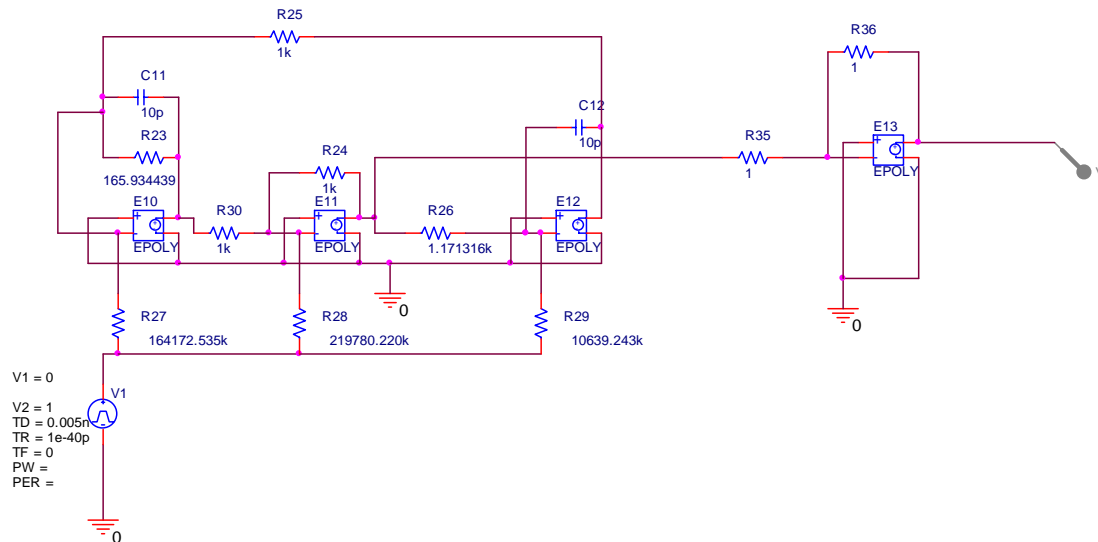
### Απόκριση



Σχήμα 4.13: Η απόκριση της πέμπτης βαθμίδας σύμφωνα με το PSpice σε κοινό διάγραμμα με την θεωρητική της απόκριση

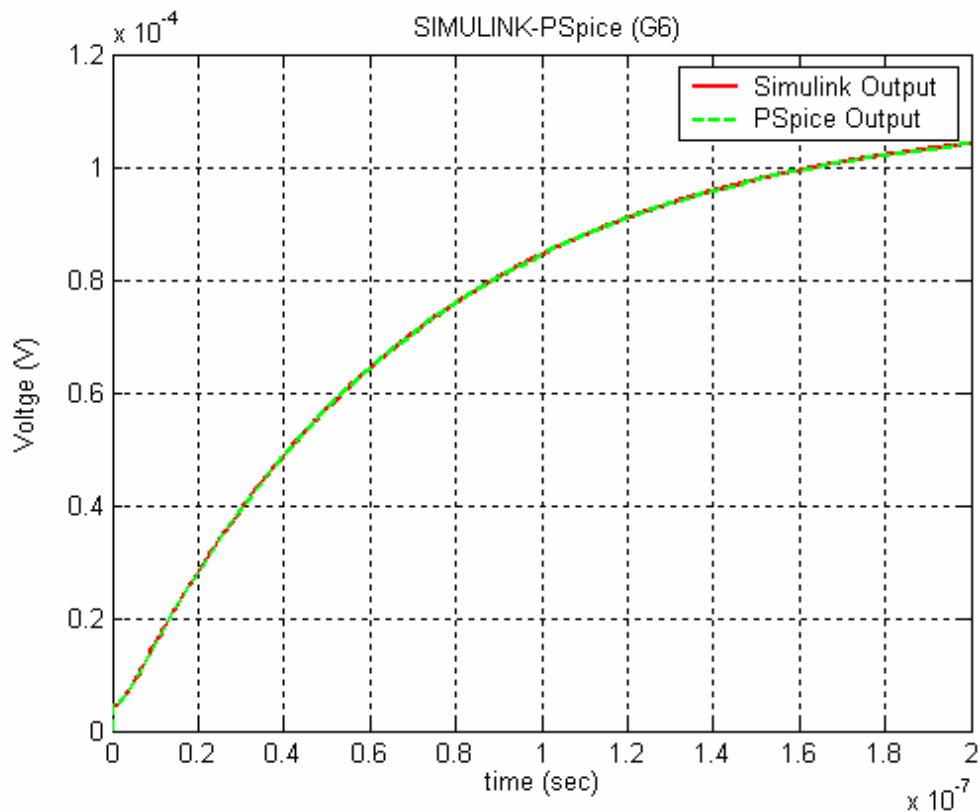
### Βαθμίδα 6

### Σχηματικό διάγραμμα



Σχήμα 4.14: Το σχηματικό διάγραμμα της έκτης βαθμίδας

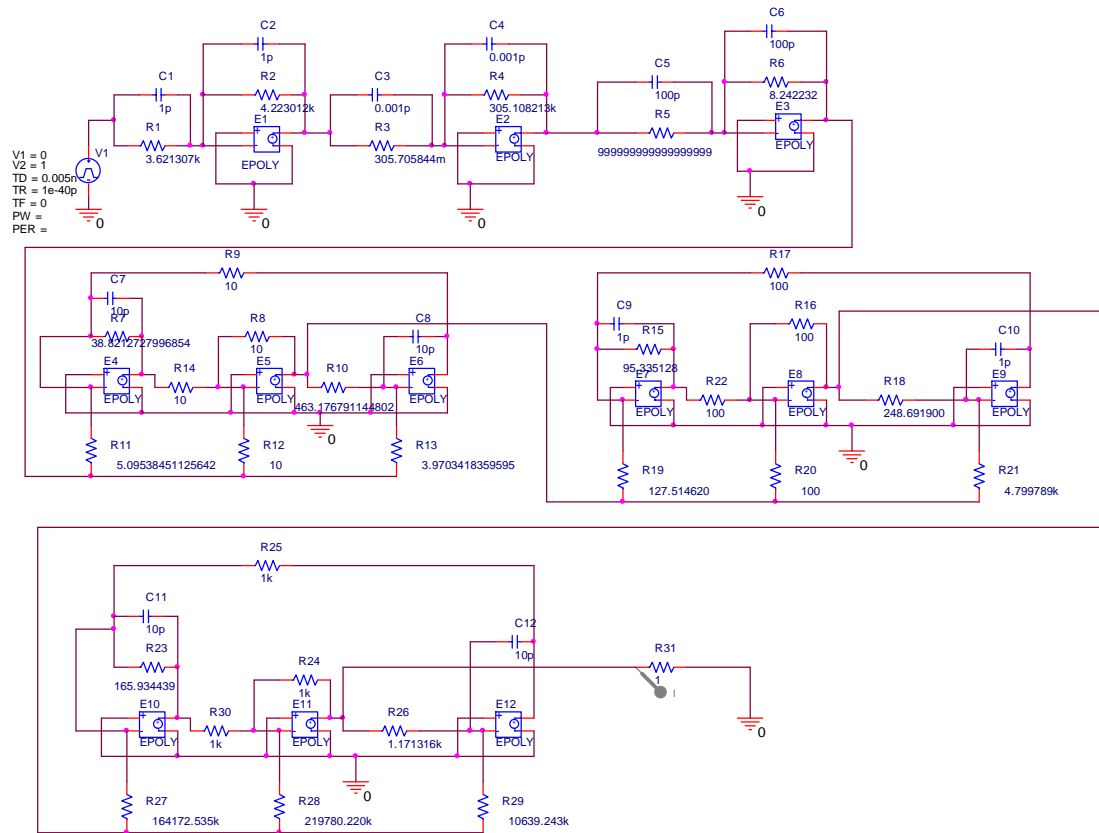
### Απόκριση



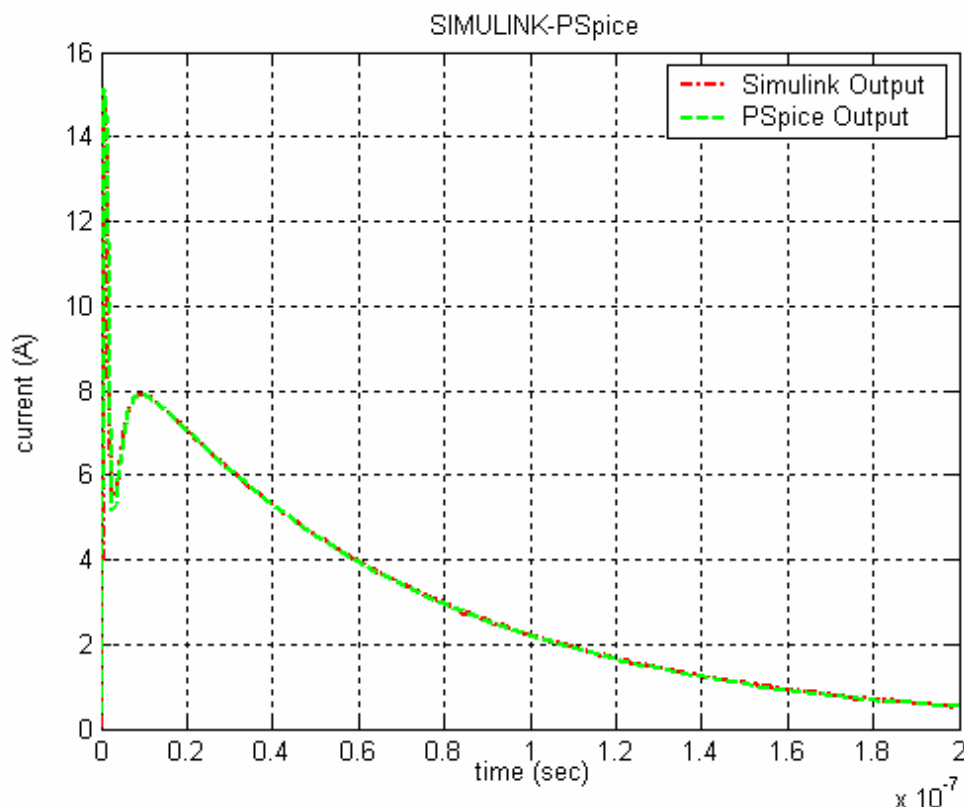
Σχήμα 4.15: Η απόκριση της έκτης βαθμίδας σύμφωνα με το PSpice σε κοινό διάγραμμα με την θεωρητική της απόκριση

**Συνολικό κύκλωμα που παράγει το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης**

**Σηματικό διάγραμμα**



Σχήμα 4.16: Το σηματικό διάγραμμα του κυκλώματος που παράγει το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

**Απόκριση**

Σχήμα 4.17: Η απόκριση της γεννήτριας εκφορτίσεων σύμφωνα με το PSpice σε κοινό διάγραμμα με την θεωρητική της απόκριση

**4.5 Συμπεράσματα**

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό ότι η προσέγγιση που επιτυγχάνει η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε είναι πολύ ικανοποιητική, τόσο για κάθε μια από τις βαθμίδες ξεχωριστά όσο και για το συνολικό κύκλωμα. Σύμφωνα με το IEC 60-1 [12] που αφορά υψηλές τάσεις αλλά και το ΕΛΟΤ EN 61000-4-5 [13] που αφορά EMC-EMI, για κεραυνικές τάσεις τα όρια μέτρησης είναι το  $U_{30\%}$  και το  $U_{90\%}$  ενώ για κεραυνικά ρεύματα χρησιμοποιούμε το  $I_{10\%}$  και το  $I_{90\%}$ . Με αυτό τον τρόπο εξαλείφονται τα παρασιτικά ρεύματα που εμφανίζονται στα πρώτα ns. Αν αγνοήσουμε λοιπόν σύμφωνα με τα παραπάνω το διάστημα 0-0.2ns οπότε και η τιμή του ρεύματος φτάνει περίπου στο 10% της μέγιστης τιμής της, τότε το μέγιστο σφάλμα είναι 9.74%, το δε μέσο σφάλμα αποκτά τιμή 0.89% η οποία κρίνεται αρκούντως ικανοποιητική. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με την επίσης ικανοποιητική απόκριση σε ότι αφορά τις κρίσιμες παραμέτρους της συνάρτησης που προσπαθούμε να προσεγγίσουμε μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το κύκλωμα που κατασκευάσαμε ικανοποιεί τις προδιαγραφές που θέσαμε.



#### 4.6 Προοπτικές υλοποίησης με πραγματικά στοιχεία

Το κύκλωμα που υλοποιήσαμε αποτελείται από 6 διαφορετικές βαθμίδες. Αυτό σημαίνει πως για να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα οι βαθμίδες θα πρέπει να συνεργάζονται όσο το δυνατό καλύτερα. Για να ικανοποιείται αυτή η απαίτηση, δεν πρέπει να παρουσιάζονται καθυστερήσεις στο σήμα κατά την μετάβασή του από την κάθε βαθμίδα στην επόμενη. Κάτι τέτοιο στην πραγματικότητα δεν είναι δυνατό, μπορούμε όμως να περιορίσουμε τις όποιες αποκλίσεις εμφανίζονται διαλέγοντας όσο το δυνατόν πιο γρήγορα στοιχεία και ειδικότερα, επιλέγοντας τους γρηγορότερους τελεστικούς ενισχυτές που μπορούμε. Ένα μέτρο της ταχύτητας ενός τελεστικού ενισχυτή είναι το Gain Bandwidth Product (GBWP). Το GBWP μιας συσκευής είναι η παράμετρος που υποδηλώνει το μέγιστο πιθανό γινόμενο κέρδους και εύρους ζώνης [15] και αυτό θα χρησιμοποιήσουμε σαν κριτήριο για την επιλογή των τελεστικών ενισχυτών που θα χρησιμοποιήσουμε στο κύκλωμα. Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία ημιαγωγών μας έχει προσφέρει πολύ γρήγορα τρανζίστορ. Αυτό το γεγονός οδήγησε στην κατασκευή πολύ γρήγορων συστοιχιών από τρανζίστορ και κατά συνέπεια σε πολύ γρήγορους τελεστικούς ενισχυτές.

Αξιόπιστες λύσεις για την υλοποίηση αυτή είναι οι τελεστικοί **LMH6624** [16], **LMH6626** [17] της εταιρείας National Semiconductor με GBWP 1.5GHz, και 1.3GHz αντίστοιχα. Βέβαια, παρά το γεγονός ότι το GBWP των ενισχυτών που προτείνουμε είναι πολύ μεγάλο, αυτό που ίσως προβληματίζει είναι το μέγιστο ρεύμα εξόδου, το οποίο και στα δύο μοντέλα έχει τιμή 100mA, τιμή που απέχει πάρα πολύ από την επιθυμητή τιμή των 16A που σχεδόν απαιτούνται από την εφαρμογή μας. Αυτό το μειονέκτημα δεν αποτελεί τροχοπέδη στην επιλογή των στοιχείων αφού το μικρό ρεύμα μπορεί να ενισχυθεί στις επιθυμητές τιμές με την χρήση ενός τρανζίστορ ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος το οποίο θα πολωθεί κατάλληλα ώστε να αποδίδει στην έξοδο το επιθυμητό ρεύμα .

## Κεφάλαιο 5

### Η επόμενη μέρα

Η παρούσα διπλωματική ασχολήθηκε με τη μελέτη γεννήτριας παραγωγής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Prony ώστε να υπολογιστεί η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος του ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Prony και της εξίσωσης του Heidler [14] για το κεραυνικό ρεύμα, την οποία και προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε, κατέδειξε την ανάγκη χρησιμοποίησης μιας νέας μεθόδου, καθώς η προσέγγισή μας παρουσίαζε πολύ μεγάλο σχετικό σφάλμα. Αναπτύχθηκε μια μέθοδος η οποία στηρίζονταν στην μέθοδο Prony και μας έδινε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, δεν σταθήκαμε εκεί αλλά δημιουργήσαμε και μία δεύτερη μέθοδο και από τα αποτελέσματα αυτής καταλήξαμε στην κατασκευή του ζητούμενου κυκλώματος. Η λειτουργία του κυκλώματος, στη συνέχεια, προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα PSpice και η κυματομορφή του ρεύματος, που προέκυψε από την εφαρμογή κρουστικού παλμού Dirac στην είσοδο, συγκρίθηκε με το ρεύμα εκφόρτισης που δίνει η εξίσωση του Heidler. Τα αποτελέσματα δικαίωσαν αυτή μας την επιμονή, καθώς η προσέγγιση που επιτεύχθηκε ήταν φανερή ακόμα και με γυμνό οφθαλμό, χωρίς καν να είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του σφάλματος, ο οποίος και δεν διέψευσε την εκτίμησή μας αυτή.

Το επόμενο βήμα θα μπορούσε να είναι η κατασκευή του κυκλώματος με πραγματικά στοιχεία, καθώς είναι σίγουρο ότι, η χρησιμοποίησή τους θα εισαγάγει αλλοιώσεις στο σήμα, καθώς αυτό διέρχεται από την κάθε βαθμίδα του κυκλώματος στην επόμενη. Για την υλοποίηση αυτή, απαιτούνται τελεστικοί ενισχυτές μεγάλης ταχύτητας και υψηλού ρεύματος κορεσμού. Παρά το γεγονός ότι στο εμπόριο, αυτή τη στιγμή, υπάρχουν τελεστικοί ενισχυτές με ρεύμα εξόδου της τάξης του Ampere, η ταχύτητά τους κρίνεται μη ικανοποιητική. Αντίστοιχα, υπάρχουν ενισχυτές που παρουσιάζουν πολύ υψηλές ταχύτητες, οι οποίοι, όμως, δεν αποδίδουν στη έξοδό τους το απαιτούμενο για την εφαρμογή ρεύμα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν κάποιες αρχικές προτάσεις για την κατασκευή αυτή, με τη χρήση γρήγορων τελεστικών ενισχυτών, οι οποίοι θα καθιστούσαν δυνατή την παραγωγή ρεύματος, με μορφή τέτοια, που να προσεγγίζει την μορφή της εξίσωσης του Heidler, αλλά με μικρότερο πλάτος. Στη συνέχεια, προτάθηκε η προσθήκη στην έξοδο του κυκλώματος ενός ενισχυτή ρεύματος, ο οποίος θα ενισχύσει την ένταση του ρεύματος

στην επιθυμητή τιμή. Θεωρητικά αυτή η υλοποίηση φαντάζει εύκολη, πρακτικά, όμως, εμφανίζονται τεχνικές δυσκολίες, οι οποίες την καθιστούν αρκετά δύσκολη, αφού στην ουσία μιλάμε για κυκλώματα τα οποία συνδέονται αλυσωτά και πρέπει να συνεργάζονται ικανοποιητικά μεταξύ τους.

Τέλος, μια ενδιαφέρουσα μελλοντική μελέτη θα ήταν αυτή της κατασκευής κυκλώματος γεννήτριας παραγωγής ρεύματος ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, με χρήση αποκλειστικά και μόνο παθητικών στοιχείων. Κάτι τέτοιο, όμως, είναι αρκετά δύσκολο να γίνει, λόγω της μορφής που έχει η συνάρτηση μεταφοράς, η οποία είναι εξεζητημένη για να υλοποιηθεί με τις ευρέως διαδεδομένες τεχνικές κατασκευής κυκλωμάτων, αποκλειστικά και μόνο με παθητικά στοιχεία. Στο πρόβλημα αυτό, ενδεχομένως να δίνει λύση η μέθοδος του Darlington [28], η οποία φαίνεται να υλοποιεί αποκλειστικά και μόνο με παθητικά στοιχεία κύκλωμα, το οποίο χαρακτηρίζεται από οποιαδήποτε συνάρτηση μεταφοράς.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### Α.1 Κώδικας ο οποίος υλοποιεί την μέθοδο Prony, για την εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς κυκλώματος με γνωστή έξοδο

Παρακάτω φαίνεται ο κώδικας που πραγματοποιήθηκε σε γλώσσα Matlab, οποίος λαμβάνοντας την συνάρτηση που αντιπροσωπεύει την έξοδο, και θεωρώντας κρουστική είσοδο δίνει την συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος. Η τελευταία είναι γραμμένη στη μορφή:

$$g(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(s_i t)$$

οπότε αρκεί η εύρεση των  $A_i$  και των αντιστοιχών  $s_i$  για την γνώση της συνάρτησης μεταφοράς. Η πιο πάνω διαδικασία εφαρμόζεται σε καθέναν από τους δύο προσθετέους της (3.1). Στο τέλος προστίθενται οι συναρτήσεις μεταφοράς για την εύρεση της ολικής και σχεδιάζεται η αντίστοιχη γραφική παράσταση.

#### Α.1.1 Η πρότυπη θεωρητική εξίσωση, για τάση φόρτισης 4kV

```
function i=IFUN(t);
```

```
t1 = 0.75;
```

```
t2 = 0.82;
```

```
t3 = 3.43;
```

```
t4 = 68.70;
```

```
i1 = 17.46;
```

```
i2 = 7.81;
```

```
n = 3;
```

```
k1=exp( (- t1/t2) * (((n*t2)/t1)^(1/n)) );
```

```
k2=exp( (- t3/t4) * (((n*t4)/t3)^(1/n)) );
```

$$i=(i1/k1) * (((t/t1)^n) / (1+(t/t1)^n)) * \exp(- (t/t2)) + (i2/k2) * (((t/t3)^n) / (1+(t/t3)^n)) * \exp(-t/t4);$$

### **A.1.1.1 Η πρότυπη θεωρητική εξίσωση, για τάση φόρτισης 4kV (1<sup>ος</sup> προσθετέος)**

```
function i=IFUN1(t);
```

```
t1 = 0.75E-9;
```

```
t2 = 0.82E-9;
```

```
t3 = 3.43E-9;
```

```
t4 = 68.70E-9;
```

```
i1 = 17.46;
```

```
i2 = 7.81;
```

```
n = 3;
```

```
k1=exp( (- t1/t2) * (((n*t2)/t1 )^ (1/n)) );
```

```
k2=exp( (- t3/t4) * (((n*t4)/t3 )^ (1/n)) );
```

```
i=(i1/k1) * (((t/t1)^n) / (1+(t/t1)^n)) * exp(- (t/t2));
```

### **A.1.1.2 Η πρότυπη θεωρητική εξίσωση, για τάση φόρτισης 4kV (2<sup>ος</sup> προσθετέος)**

```
function i=IFUN2(t);
```

```
% t=0;
```

```
t1 = 0.75E-9;
```

```
t2 = 0.82E-9;
```

```
t3 = 3.43E-9;
```

```
t4 = 68.70E-9;
```

```
i1 = 17.46;
```

```
i2 = 7.81;
```

n = 3;

k1=exp( (- t1/t2) \* (((n\*t2)/t1 )^ (1/n)) );

k2=exp( (- t3/t4) \* (((n\*t4)/t3 )^ (1/n)) );

i=(i2/k2) \* (((t/t3)^n) / (1+(t/t3)^n )) \* exp(-t/t4);

### A.1.2 Κώδικας που υλοποιεί την μέθοδο Prony για καθέναν από τους δύο προσθετέους της (3.1)

Εδώ παρατίθεται ο κώδικας που βρίσκει τις παραμέτρους  $A_i$ ,  $s_i$  για τον πρώτο προσθετέο της (3.1). Η συνάρτηση IFUN1 που καλείται, υλοποιείται όπως η IFUN στο Παράρτημα Α.1.1, προφανώς για τον πρώτο προσθετέο της (3.1).

close all;

clear all;

```
string0=['*****
*****'];
```

```
disp (string0);
```

```
%-----
```

```
%-----
```

```
%Sto simeio ayto, tha ginei prospatheia gia eyresi toy kiklwmatos to
```

```
%opoio paragei tin parapanw kroustiki apokrisi.stin progmatikotita tha
```

```
%prepei na broume tin SINARTISI METAFORAS kiklwmatos to οποιο paragei tin
```

```
%parapanw kroustiki apokrisi
```

```
%1.skopos i eyresi Ai opou g(t)=Σ Ai exp(si*t)
```

```
%2.g(kT)=i(kT)
```

```
%3.zi=exp(si*T)
```

```
%4.ψ(z)= Σ bm * z^m

%5.Dimiourgia tou pinaka.Tha dialexw 100 simeia apo to 0 ws to 50 ns gia tin
efarmogi tis methodou

%...diladi bima 0.1605 ns

%ara tha exw ton pinaka estw M [n , n]

Tarxi=0;
Ttelos=10;
fplot('IFUN1(t)', [Tarxi Ttelos], 'r');
grid;
eqzero=0.000001;
simeia=100;
bima=0.1605;

%+++++++++++++++++=
for i=1:simeia
    for j=i:simeia
        TempVar=IFUN1((i+j-2)* bima);
        M(i,j)=TempVar;
        M(j,i)=TempVar;
    end
end

%+++++++++++++++++=

%euresi tou MyRank,stin pragmatikotita, eyresi tis arketa mi midenikis orizousas---

p1=2;
```

```
logiko=1;
while (p1<simeia) & (logiko==1)
    matrix1=M (1: p1 , 1: p1 );
    orizousa=det(matrix1);
    abs_orizousa=abs(orizousa);
    if (abs_orizousa>eqzero)
        logiko=1;
        p1=p1+1;
    else
        logiko=0;
    end
end

p1=p1-1;
matrix1=matrix1(1:p1 , 1:p1);

MyRank=p1;
MyRank=rank(M,1);
matrix1=M (1: MyRank , 1: MyRank );

%-----ayto einai to dianisma sto dexio melos tis eksiswsis 5. -----

for (v1=1:MyRank)
    orisma=(MyRank + v1-1 )*bima;
    vector2(v1)= - IFUN1(orisma);
```



```
end

%-----ayto einai to dianisma sto aristero melos tis eksiswsis 5. -----

inv_matrix1=inv(matrix1);
vector2= vector2';
vector1=inv_matrix1 * vector2;

%-----den xerw an xreiazetai, alla prepei na einai-----

%MyRank=length(vector1)

%6.poliwnimo-----

%to vector2 einai mikous (MyRank). loipon to poliwnimo mou exei
%MyRank+1 orous.mou leipei o sintelestis tou megisto bathmiou pou
%einai "1".alla epeidi ta exw bgalei anapoda,tha mpei sto telos ws
%eksis:

vector1_orizontio=rot90(vector1);
vectfull=[vector1_orizontio 1 ];

%kai twra to fernw sta swsta tou ws eksis:

newMyRank=MyRank+1;

for (vr=1:newMyRank)
```

```
    vectright(vr)=vectfull(newMyRank-vr+1);
end

%kai idou oi RIZES!!-----
vector_roots= roots(vectright);

%7.---epilisi tis eksiswsis sto bima 7-----

%---ftiaxnw ton pinaka matA1----
for (x2=1:MyRank)
    for (x1=1:MyRank)
        matA1(x1,x2)=(vector_roots(x2))^(x1-1);
    end
end

%---ftiaxnw to dianisma vectA2-----

vectA2=matrix1(:,1);

%---kai to dianisma vectA1 prokiptei ws epilisi tou vectA1= matA1^-1 * vectA2--

inv_matA1=inv(matA1);
vectA1= inv_matA1 * vectA2;

%8.----Euresi tw n s,i -----
for (ds=1:MyRank)
```

```

vector_s(ds)=(log ( vector_roots(ds) ) ) / bima ;
end

%.Edw exw teleiwsei ta basika, diladi stin eksiswsi  $g(t)=\sum A_i \exp(s_i * T)$ , kserw ta
Ai { vectA1 }

%kai ta si { vector_s }

% Ara tipwnw ta Ai kai si , kai ==> briskw tin G(s) me metasximatismo Laplace
spo tin (*)

string1=["To dianisma A1 einai:"];
disp (string1);
disp(vectA1);

string2=["Ta "Si" einai:"];
disp (string2);
disp(vector_s);

%-----

%*****

fid1 = fopen('A1_A.txt','w');
fid2 = fopen('A1_s.txt','w');
fid3 = fopen('A1_R.txt','w');

LV_A1=length(vectA1);
LV_S=length(vector_s);

```

```
for i=1:LV_A1
```

```
    fprintf(fid1,'%16.8f %16.8f\n',real(vectA1(i)),imag(vectA1(i)));
```

```
end
```

```
for i=1:LV_S
```

```
    fprintf(fid2,'%16.8f %16.8f\n',real(vector_s(i)),imag(vector_s(i)));
```

```
end
```

```
    fprintf(fid3,'%16.1f ',MyRank);
```

```
fclose(fid1);
```

```
fclose(fid2);
```

```
fclose(fid3);
```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### **B.1 Κώδικας που υλοποιεί την πρώτη μέθοδο βασισμένη στη μέθοδο Prony για καθέναν από τους δύο προσθετέους της (3.1)**

Όμοια παρατίθεται ο κώδικας που βρίσκει τις παραμέτρους  $A_i$ ,  $s_i$  έστω για τον πρώτο προσθετέο της (3.1).

```
close all;
clear all;
```

```
string0=['*****
*****'];
```

```
disp (string0);
```

```
Tarxi=0;
Ttelos=100;
%fplot('IFUN1(t)', [Tarxi Ttelos], 'r');
%grid;
```

```
eqzero=0.0000001;
```

```
%-----ALLAGH VIMATOS-----
```

```
%simeia=1181;
%simeia=input('DWSTE SHMEIA GIA TO BIMA1: ');
simeia=221;
bima=100/(simeia-1);
```

```
%Sto simeio ayto tha lifthoun oi times tis IFUN,thewritikis sinartisis toy reymatos,
%gia na ftiaxtei meta o pinakas M.
```

```
for i=1:simeia
    t1=bima * (i-1);
    ta(i)=IFUN1(t1);
end
```

```
% o pinakas M einai diastasewn (simeia/2) x (simeia/2),kai kataskeuazetai
```

```
% stili - stili
for j=1:(simeia+1)/2
    M(j,:)=ta(j:j+(simeia-1)/2);
end
```

```

%S'ayton ton vroxo ,prospathoume,sarwnwnontas stili-stili ton pinaka M
%na stamatisoume ekei pou o pinakas "pinakas" exei idiotimi konta sto 0.
Ir1=1;
bool=1;

while ((Ir1<(simeia+1)/2 ) & (bool==1))
    matrix=M(:,1:Ir1); %o matrix einai i sarwsi kata stili toy M
    pinakas=matrix'*matrix; %pinakas=anastrofos(matrix)*matrix
    singval=eig(pinakas); %singval= oi idiotimes toy "pinakas"

    if singval(1)>eqzero %o "pinakas" einai thetika orismenos.Oi idiotimes
        bool=1; %emfanizontai sto Matlab ap'ti mikroteri sti
        Ir1=Ir1+1; %megaliteri.sinepws exei noima i sogrisi me
        %to miden na ginei me aytin tin timi
    else
        bool=0;
    end
end

%Ara twra exoume entopisei tis stiles pou sinistoyn ton pinaka me ANeksartites
%stiles,AN.
AN=M(:,1:Ir1-1);

%kai ara einai i epomeni stili pou einai grammikos sindiasmos twn proigoumenwn.
%diladi eksartimeni,EK.
EK=-M(:,Ir1); % to "-" mpike gia tin eksiswsi pou akolouthei

%kai briskontai twra ta bi, pou einai oi sintelestes tou xarakteristikou poliwnimou
inv_AN=inv(AN'*AN);
vector_b=inv_AN*AN'*EK;

%sinepws to vector_b einai to xarakteristiko poliwnimo me stoixeia ap'to
diatetagmena
%ap'to sintelesti toy elaxistobathmiou pros tou megistobathmiou, xwris ton sintelesti
%aytoy poy einai monada.To parakatw dianisma diladi antistixei sto plires
xarakteristiko
%poliwnimo,me antistrofa balmena stoixeia.
vector_temp=[vector_b ; 1];

%Sinepws exw to dianisma pou antistoixei sto xarakteristiko poliwnimo:
poli=flipud(vector_temp);

%oi rizes tou xarakteristikou poliwnimou einai:
vector_z=roots(poli);

%kai ta Si, tha einai:
vector_s=log(vector_z)/bima;

%twra tha ginei i eyresi twn Ai
for k=1:simeia %<----Dimiourgia tou pinaka matA1

```

```

    for m=1:Ir1-1
        matA1(k,m)=vector_z(m)^(k-1);
    end
end

%kai briskontai twra ta Ai, pou einai oi sintelestes twn ekthetikvn sti
%sinartisi metaforas
inv_matA1=inv(matA1'*matA1);
vector_A=inv_matA1*matA1'*ta';

%sinewps to sfalma pou exw gia tin anwterw proseggisi tha einai:
error1=real(matA1*vector_A)' - ta;

%anaparastasi sfalmatos
plot(error1, 'b')
grid;
zoom on

disp('To megisto sfalma tou prwto programmatos,gia xrono=100 ns kai ')
disp(simeia);
disp('epilegmena simeia, einai:');
disp(max(error1));

disp('ta A, gia to prwto programma, einai');
disp(vector_A);

disp('ta s, gia to prwto programma, einai');
disp(vector_s);
%*****
*****

fid1 = fopen('A1_A.txt','w');
fid2 = fopen('A1_s.txt','w');
fid3 = fopen('A1_R.txt','w');

LVa=length(vector_A);
LVs=length(vector_s);
for i=1:LVa
    fprintf(fid1,'%16.8f %16.8f\n',real(vector_A(i)),imag(vector_A(i)));
end

for i=1:LVs
    fprintf(fid2,'%16.8f %16.8f\n',real(vector_s(i)),imag(vector_s(i)));
end

if LVa==LVs
    R1=LVa;

```

end

```

fprintf(fid3,'%16.1f ',R1);

fclose(fid1);
fclose(fid2);
fclose(fid3);

fid4 = fopen('bima1.txt','w');
fprintf(fid4,'%16.8f \n',bima);
fclose(fid4);

```

## **B.2 Πρόγραμμα που υπολογίζει τα αποτελέσματα της πρώτης τροποποίησης**

Από το παραπάνω πρόγραμμα με εφαρμογή του στους δύο προσθετέους της εξίσωσης (3.1) και τον κατάλληλο χειρισμό των αποτελεσμάτων λαμβάνουμε την συνολική συνάρτηση μεταφοράς υπό την μορφή των παραμέτρων  $A_i$  και  $s_i$ . Το πρόγραμμα που αναλαμβάνει αυτή την διαδικασία εικονίζεται παρακάτω

```

%1st MODIFIED METHOD

close all;
clear all;
% clc;

string0=['*****
*****'];
disp (string0);

Tarxi=0;
Ttelos=200;
fplot('IFUN1(t)+IFUN2(t)', [Tarxi Ttelos], 'r');
grid;

string1=['Ta Ai, tou prwtou programmatos einai:'];
disp (string1);
load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\1st_modified\A1_A.txt;
N1=length(A1_A);
for i=1:N1
    ToA1_A(i)=A1_A(i,1)+A1_A(i,2)*(-1)^.5;
end
disp(ToA1_A);

string2=['Ta Si, tou prwtou programmatos einai:'];
disp (string2);
load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\1st_modified\A1_s.txt;

```



```

N2=length(A1_s);
for i=1:N2
    ToA1_s(i)=A1_s(i,1)+A1_s(i,2)*(-1)^.5;
end
disp(ToA1_s);

string3=['Ta Ai, tou deyterou programmatos einai:'];
disp (string3);
load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\1st_modified\A2_A.txt;
N3=length(A2_A);
for i=1:N3
    ToA2_A(i)=A2_A(i,1)+A2_A(i,2)*(-1)^.5;
end
disp(ToA2_A);

string4=['Ta Si, tou deyterou programmatos einai:'];
disp (string4);
load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\1st_modified\A2_s.txt;
N4=length(A2_s);
for i=1:N4
    ToA2_s(i)=A2_s(i,1)+A2_s(i,2)*(-1)^.5;
end
disp(ToA2_s);

%*****
****

load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\1st_modified\A1_R.txt;
load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\1st_modified\A2_R.txt;

load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\1st_modified\bima1.txt;
load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\1st_modified\bima2.txt;

%*****
*****

teliko_bima=min([bima1,bima2]);

fid = fopen('C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\1st_modified\Ola.txt','w');
t=0;
i=1;
while (t<Ttelos)
    IGd1(i)=Func_G(ToA1_A,ToA1_s, A1_R, t);
    IGd2(i)=Func_G(ToA2_A,ToA2_s, A2_R, t);
    IGd(i)=IGd1(i)+IGd2(i);
    tim(i)=t;
    fprintf(fid,'%16.8f %16.8f\n',t, IGd(i));
    i=i+1;
end

```

```

        t=t+teliko_bima;
    end
    hold on
    plot(tim,IGd,'bl:')
    zoom on
    fclose(fid);

zoom on
xlabel('time (sec)');
ylabel('Current (A)');
legend('Heidler"s Equation','Output of Modified Method')
title('1st MODIFIED METHOD');

%----SFALMA 1is TROPOPOIHSHS-----
t=Tarxi;
i=1;

while (t<Ttelos)
    modif1(i)=IGd(i);
    Heidler(i)=IFUN1(t)+IFUN2(t);
    t=t+teliko_bima;
    i=i+1;
end

t=Tarxi+teliko_bima; %Exairoume thn timi (0,0) kai sta 2 graphmata
i=2;

while (t<Ttelos)
    ErrorH_P(i-1)=abs((Heidler(i)-modif1(i))/Heidler(i));
    t=t+teliko_bima;
    i=i+1;
end

disp(string0);
disp('To max % sfalma tis 1-is methodou einai')
    Error_H_P=max(ErrorH_P)*100;
    disp(Error_H_P)

disp('To meso % sfalma tis 1-is methodou einai')
meso_sfalma=(sum(ErrorH_P)/(length(ErrorH_P)-1))*100;
disp(meso_sfalma);

```

### **B.3 Εξαγόμενα του προγράμματος υλοποίησης της πρώτης τροποποίησης**

```
>>
```

```

*****
*****

```

Ta  $A_i$ , tou prwtou programmatos einai:

1.0e+002 \*

0.6758      -0.1986      -1.7744      0.6486 - 0.5602i    0.6486 + 0.5602i

Ta  $S_i$ , tou prwtou programmatos einai:

-1.2188      -2.3151      -3.8608      -6.7268 + 3.2187i    -6.7268 - 3.2187i

Ta  $A_i$ , tou deyterou programmatos einai:

9.4950    -0.1771    -9.3179

Ta  $S_i$ , tou deyterou programmatos einai:

-0.0146    -0.1046    -0.3402

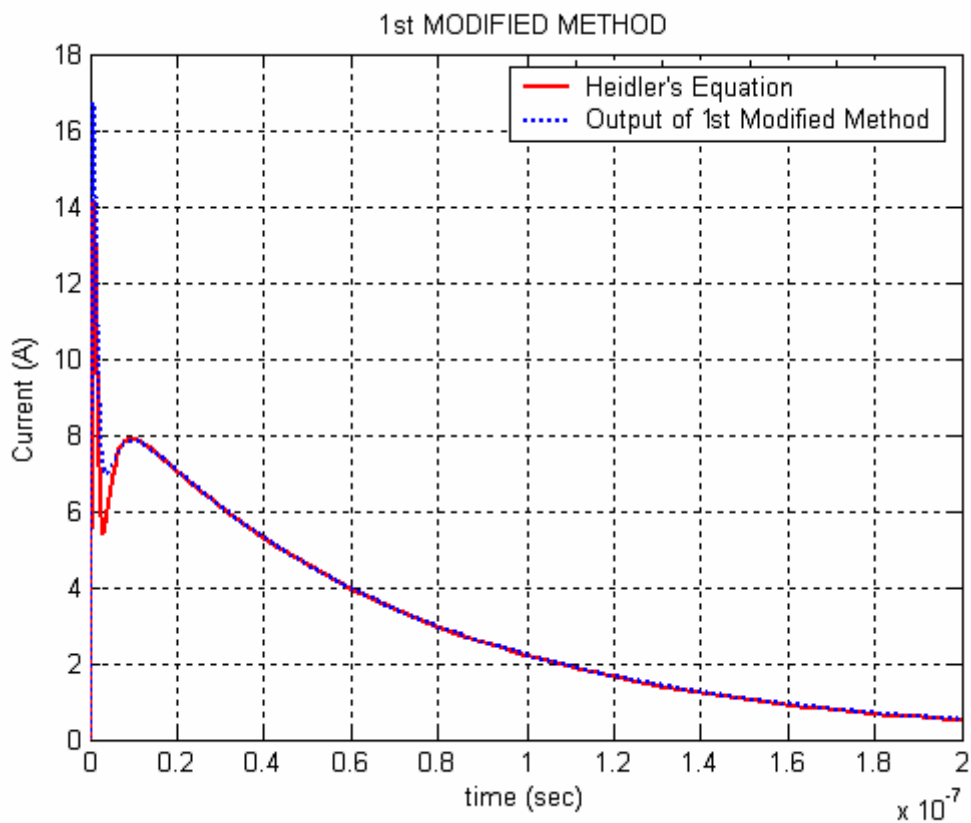
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

To max % sfalma tis 1-is methodou einai

43.3229

To meso % sfalma tis 1-is methodou einai

0.6275



Σχήμα Π.Β.1: Η καμπύλη που προκύπτει από την εφαρμογή της πρώτης τροποποιημένης μεθόδου σε κοινό διάγραμμα με την καμπύλη που προκύπτει από την σχέση (3.1).

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

### Γ.1 Κώδικας που υλοποιεί την δεύτερη μέθοδο βασισμένη στη μέθοδο Prony για καθέναν από τους δύο προσθετέους της (3.1)

```

close all;
clear all;
clc;

string0=['*****
*****'];
DT=clock;
str = datestr(DT,31);
disp(str);
disp(string0);

%eqzero=0.000028;
eqzero=0.00092;

%Orismos vhmatos

simeia=243;
bima=(100/(simeia-1))*1e-9;

%Edw lamvanoume ta shmeia ths 8ewrhtikhhs synarthshs gia na kataskevasoume
%ton M

for i=1:simeia
    ta=bima * (i-1);
    t(i)=IFUN1(ta);
end

%Dhmiourgia pinaka M diastasewn (simeia)x(simeia/2) me mhden ta teleftaia
%stoixeia ka8e sthlhs

for j=1:(simeia/2)
    for i=1:simeia
        M(i,j)=0;
    end
end

for i=1:simeia
    M(i,1)=t(i);
end

for k=1:(simeia+1)
    for i=1:simeia

```

```

        for j=2:(simeia/2)
            if (i+j)==k
                M(i,j)=t(k-1);
            end
        end
    end
end

%Epilogi pinaka P

loop=2; %den exei nohma na paroume mono thn stili 1
flag=0;

while (loop<=(simeia/2))&(flag==0)
    for i=1:(simeia+1-loop)
        for j=1:loop
            P(i,j)=M(i,j);
        end
    end

    %Check singvalues
    pinakas=P'*P;
    singval=eig(pinakas);
    if singval(1)>eqzero %oi idiotimes exoun afxousa seira
        loop=loop+1;
        flag=0;
        P;
    else
        flag=1;
    end
    lines=i; %edo kratame tin diastasi tou P gia na mporesoume meta na vroume ton
    pinaka Z (P*U=Z)
    rows=j;
end

%dimiourgia telikou sistimatos (P*U=Z)
clear P;
for i=1:lines
    for j=1:rows-1
        P(i,j)=M(i,j);
    end
end

for i=1:(lines)
    Z(i,1)=-M(i,rows); % to "-" mpike gia thn teliki exisosi
end

%=====
=====

```

```

%ypologismos ton synteleston bi
inv_P=inv(P'*P);
vector_b=inv_P*P'*Z;

%to vector_b einai oi syntelestes tou xarakteristikou poliwnimou
%se afxousa seira
vector_temp=[vector_b ; 1];

%to dianisma pou antistoixei sto xarakteristiko poliwnimo 8a einai:
poli=flipud(vector_temp);

%oi rizes tou xarakteristikou polionimou einai:
vector_z=roots(poli);

%opote ta si einai:
vector_s=log(vector_z)/bima;

%=====
=====

%ypologismos Ai
for k=1:simeia          %<----Dimiourgia tou pinaka matA1
    for m=1:rows-1
        matA1(k,m)=vector_z(m)^(k-1);
    end
end

%Ypologizontai ta Ai
inv_matA1=inv(matA1'*matA1);
vector_A=inv_matA1*matA1'*t;

disp('Ta Ai tou protou tmimatos einai:');
disp(vector_A);

disp('Ta Si tou protou tmimatos einai:');
disp(vector_s);

%
%=====
=====

%Ypologismos & anaparastasi sfalmatos

error1=real(matA1*vector_A)' - t;

plot(error1, 'b')
title('Sfalma protou tmimatos');
zoom on

disp('To megisto sfalma tou prwtou tmimatos,gia xrono=100 ns kai ')

```

```
disp(simeia)
disp('epilegmena simeia, einai:');
disp(max(error1));

%=====
%Ektyposi apotelesmaton se arxeia

fh1 = fopen('A1_A.txt','w');
fh2 = fopen('A1_s.txt','w');
fh3 = fopen('A1_R.txt','w');

LVa=length(vector_A);
LVs=length(vector_s);
for i=1:LVa
    fprintf(fh1,'%16.8f %16.8fn',real(vector_A(i)),imag(vector_A(i)));
end

for i=1:LVs
    fprintf(fh2,'%16.8f %16.8fn',real(vector_s(i)),imag(vector_s(i)));
end

if LVa==LVs
    R1=LVa;
end

    fprintf(fh3,'%16.1f ',R1);

fclose(fh1);
fclose(fh2);
fclose(fh3);

fh4 = fopen('bimal.txt','w');
fprintf(fh4,'%16.16f \n',bima);
% fprintf(fh4,'%16.8f \n',bima);
fclose(fh4);
```

## **Γ.2 Πρόγραμμα που υπολογίζει τα αποτελέσματα της δεύτερης τροποποίησης**

Από το παραπάνω πρόγραμμα με εφαρμογή του στους δύο προσθετέους της εξίσωσης (3.1) και τον κατάλληλο χειρισμό των αποτελεσμάτων λαμβάνουμε την συνολική συνάρτηση μεταφοράς υπό την μορφή των παραμέτρων  $A_i$  και  $s_i$ . Το πρόγραμμα που αναλαμβάνει αυτή την διαδικασία εικονίζεται παρακάτω

```
%2nd MODIFIED METHOD
```



```

close all;
clear all;
clc;

%Emfanisi imerominias kai grafikou pou simatodotoun tin enarksi tou
%programmatos
DT=clock;
str = datestr(DT,31);
disp(str);
string0=['*****
*****'];
disp (string0);

Tarxi=0;
Ttelos=200e-9;
fplot('IFUN1(t)+IFUN2(t)', [Tarxi Ttelos], 'r');
grid;

string1=['Ta Ai, tou prwtou tmimatos einai:'];
disp (string1);
load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\2nd_modified\A1_A.txt;
N1=length(A1_A);
for i=1:N1
    ToA1_A(i)=A1_A(i,1)+A1_A(i,2)*(-1)^.5;
end
disp(ToA1_A);

string2=['Ta Si, tou prwtou tmimatos einai:'];
disp (string2);
load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\2nd_modified\A1_s.txt;
N2=length(A1_s);
for i=1:N2
    ToA1_s(i)=A1_s(i,1)+A1_s(i,2)*(-1)^.5;
end
disp(ToA1_s);

string3=['Ta Ai, tou deyterou tmimatos einai:'];
disp (string3);
load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\2nd_modified\A2_A.txt;
N3=length(A2_A);
for i=1:N3
    ToA2_A(i)=A2_A(i,1)+A2_A(i,2)*(-1)^.5;
end
disp(ToA2_A);

string4=['Ta Si, tou deyterou tmimatos einai:'];
disp (string4);
load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\2nd_modified\A2_s.txt;
N4=length(A2_s);

```

```

for i=1:N4
    ToA2_s(i)=A2_s(i,1)+A2_s(i,2)*(-1)^.5;
end
disp(ToA2_s);

%*****
****

load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\2nd_modified\A1_R.txt;
load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\2nd_modified\A2_R.txt;

load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\2nd_modified\bima1.txt;
load C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\2nd_modified\bima2.txt;

%*****
*****

teliko_bima=min([bima1,bima2]);
fh = fopen('C:\Diplomatiki\Dika_mou\18\Matlab\2nd_modified\Ola.txt','w');
t=Tarxi;
i=1;

while (t<Ttelos)
    IGd1(i)=Func_G(ToA1_A,ToA1_s, A1_R, t);
    IGd2(i)=Func_G(ToA2_A,ToA2_s, A2_R, t);
    IGd(i)=IGd1(i)+IGd2(i);
    tim(i)=t;
    fprintf(fh,'%16.8f %16.8f\n',t, IGd(i));

    t=t+teliko_bima;
    i=i+1;
end

hold on;
plot(tim,IGd,'bl:')
zoom on
fclose(fh);

%Ektypwsh grafikhs apo simulink
for i=1:391
    It(i)=revma(1,1,i);
    plottime(i)=xronos(i);
end
plot(plottime,It,'k-.')
zoom on

ylabel('current (A)');
xlabel('time (sec)');
legend('Heidler"s Equation','Output of 2nd Modified Method');

```

```

title('2nd MODIFIED METHOD');

%-----Sfalma modif2-Heidler-----
t=Tarxi;
i=1;

while (t<Ttelos)
    modif2(i)=IGd(i);
    Heidler(i)=IFUN1(t)+IFUN2(t);
    t=t+teliko_bima;
    i=i+1;
end

t=Tarxi+teliko_bima; %Exairoume thn timi (0,0) kai sta 2 grafhmata
i=2;

while (t<Ttelos)
    ErrorH_P(i-1)=abs((Heidler(i)-modif2(i))/Heidler(i));
    t=t+teliko_bima;
    i=i+1;
end

disp(string0);
disp('To max % sfalma tis 2-is methodou einai')
    Error_H_P=max(ErrorH_P)*100;
    disp(Error_H_P)

disp('To meso % sfalma tis 2-is methodou einai')
meso_sfalma=(sum(ErrorH_P)/(length(ErrorH_P)-1))*100;
disp(meso_sfalma);

```

### Γ.3 Εξαγόμενα του προγράμματος υλοποίησης της δεύτερης τροποποίησης

\*\*\*\*\*

Ta  $A_i$ , του prwtou tmimatos einai:

1.0e+002 \*

0.6593      -1.3653      0.3530 - 0.0174i    0.3530 + 0.0174i

Ta  $S_i$ , του prwtou tmimatos einai:

1.0e+009 \*

-1.2133      -3.2775      -5.2447 + 3.5643i    -5.2447 - 3.5643i

Ta  $A_i$ , του δευτερου tmimatos einai:

9.4720      -2.4451      -25.4955      9.2343 - 9.6297i    9.2343 + 9.6297i

Ta  $S_i$ , του δευτερου tmimatos einai:

1.0e+009 \*

-0.0145      -0.2368      -0.5881      -1.2880 + 0.7072i    -1.2880 - 0.7072i

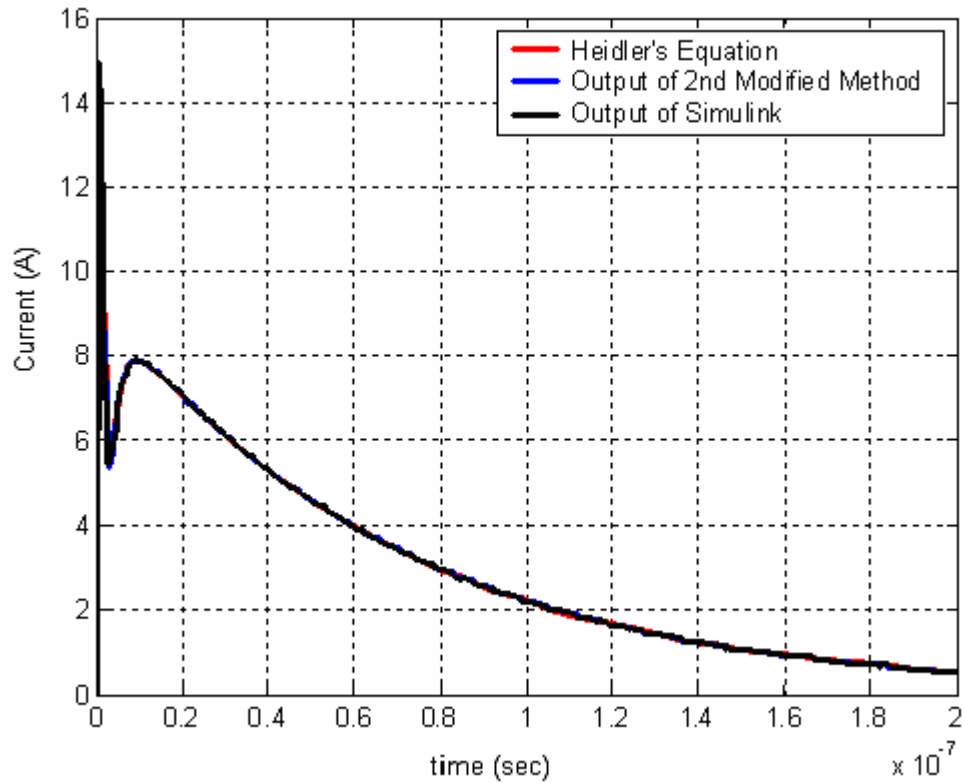
\*\*\*\*\*

To max % sfalma tis 2-is methodou einai

14.1119

To meso % sfalma tis 2-is methodou einai

0.2320

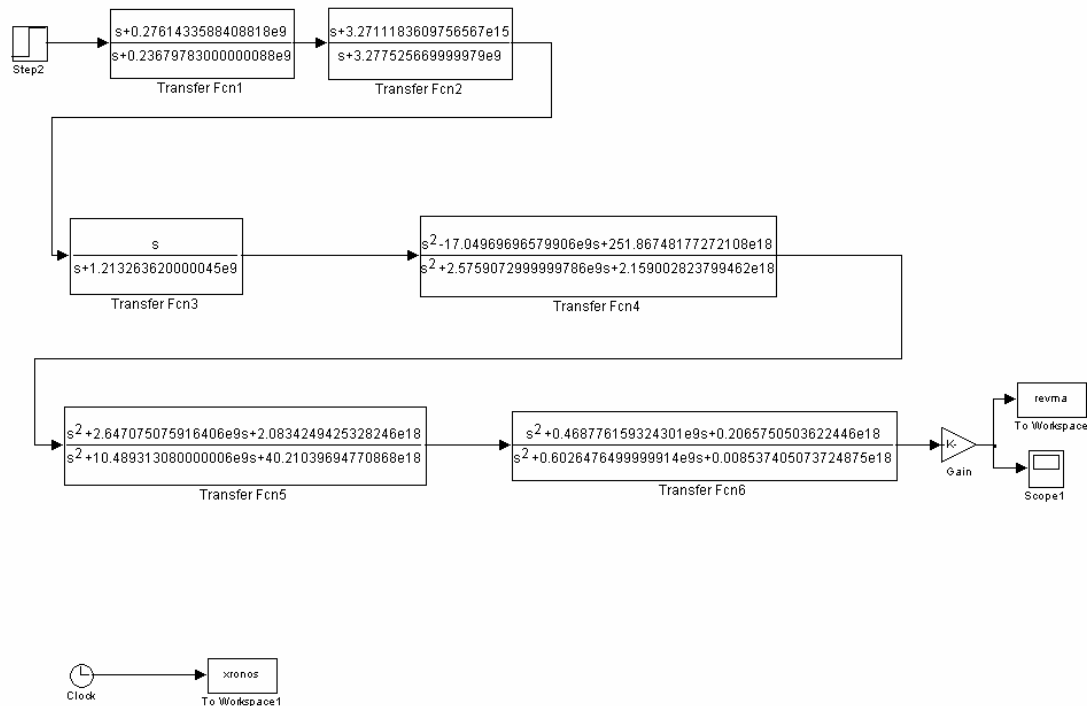


Σχήμα 3.11: Η καμπύλη που προκύπτει από την εφαρμογή της δεύτερης τροποποιημένης μεθόδου σε κοινό διάγραμμα με την καμπύλη που προκύπτει από την σχέση (3.1) και την έξοδο του Simulink

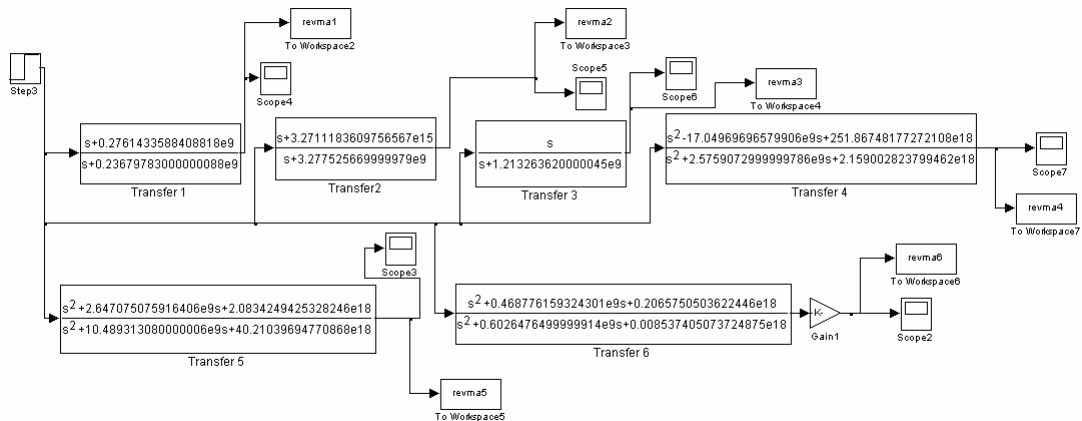
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

## Δ.1 Simulink

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης στο Matlab στο πεδίο του χρόνου και την σύγκριση των εξόδων των έξι βαθμίδων με την θεωρητική έξοδο που περιμέναμε από το Matlab χρησιμοποιήσαμε το simulink. Εδώ παρατίθενται τα block διαγράμματα που χρησιμοποιήσαμε



Σχήμα Π.Δ.1: Block διάγραμμα για προσομοίωση του συνολικού κυκλώματος.



Σχήμα Π.Δ.2: Block διάγραμμα για προσομοίωση κάθε μίας βαθμίδας χωριστά.

# Βιβλιογραφία

- [1] Paul A. Chatterton – Michael A. Houlden, “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό”, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1992.
- [2] Theodore Dangelmayr, “ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control”, Van Noshand Ranhold, New York, 1990.
- [3] IEC 61000-4-2: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication”, 2001
- [4] ΕΛΟΤ EN 61000.06.01: “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Μέρος 6.1: Γένια Πρότυπα – Ατρωσία για κατοικήσιμα, εμπορικά και ελαφρής βιομηχανίας περιβάλλοντα”, 2001.
- [5] Paul Cartwright, “Electrostatic Hazards in the aerosol industry”, διαθέσιμο στη διεύθυνση <http://www.chilworth.co.uk/publications/publications.asp>
- [6] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, “ Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development”, Elsevier, 2003.
- [7] Stephen L. Fowler, William G. Klein, Alrry Fromm, “Procedure for the Design Analysis and Auditing of Static Control Flooring/Footwear Systems διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.esdjournal.com/techpaper/sfowler/esd97/esd97.htm>
- [8] Ariadna Kaplan, Bob McReynolds, “Dielectric characteristics of materials- Electrostatic Discharge”, November 2002, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www2.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/papers/mate210/electrostatic.pdf>
- [9] Martin Lutz, “The determination of the immunity to electrostatic discharge ‘ESD’ with transient 1000 generator”, EMC Partner, Seminar 1999.
- [10] “Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-433”, Instruments Schaffner, Publ. 1303E.
- [11] Ασημακοπούλου Φανή, «Βελτιστοποίηση των παραμέτρων της εξίσωσης του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με χρήση γενετικών αλγορίθμων» (Διπλωματική εργασία, Αθήνα Μάρτιος 2006)
- [12] IEC 60-1 “High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements”
- [13] ΕΛΟΤ EN 61000.04.05 «Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) – Μέρος 4: Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων – Τμήμα 5: Δοκιμή ατρωσίας από υπερεντάσεις-υπερτάσεις»
- [14] Heidler H., “*Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung*”, presented at 18<sup>th</sup> ICLP (International Conference on Lightning Protection), Munich, Germany, 1985
- [15] DICTIONARY OF ELECTRONICS διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.sciencelobby.com/dictionary/g.html>
- [16] Datasheet του τελεστικού ενισχυτή LMH6624 διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.national.com/pf/LM/LMH6624.html>
- [17] Datasheet του τελεστικού ενισχυτή LMH6626 διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.national.com/pf/LM/LMH6626.html>
- [18] De Prony biography διαθέσιμη στη διεύθυνση [http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Biographies/De\\_Prony.html](http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Biographies/De_Prony.html)

- [19] D. J. Trudnowski- J. M. Johnson and J. F. Hauer, “SIMO System Identification from Measured Ringdowns” (The American Control Conference-Philadelphia, Pennsylvania, June 1998)
- [20] M. M. Tawfik-M. M. Morcos, Department of Electrical and Computer Engineering, Kansas State University, “A Fault Locator for Transmission Lines Based on Prony Method”
- [21] Yasemin P. Kahya, C. Asli Yilmaz, “Modeling of Respiratory Crackles” (22<sup>nd</sup> Annual EMBS International Conference, July 23-28,2000, Chicago IL.)
- [22] Szi-Wen Chen Clarkson, P.M., Biomed. Eng. Center, Ohio State Univ., Columbus, OH “Prony residual analysis for the identification of cardiac arrhythmias”
- [23] Li Qi, *Member, IEEE*, Lewei Qian, *Student Member, IEEE*, David Cartes, *Member IEEE*, and Stephen Woodruff, “Initial Results in Prony Analysis for Harmonic Selective Active Filters”
- [24] Da hu Li, Yijia Cao, Member, IEEE and Guang Wang, “Online Identification of Low-Frequency Oscillation in Power System based on Fuzzy Filter and Prony Algorithm” (2006 International Conference on Power System Technology)
- [25] Ritcey, J.A., Dept. of Electr. Eng., Washington Univ., Seattle, WA “Prony approximations for probability density functions”
- [26] Pierre, D.A. Trudnowski, D.J. Hauer, J.F., Dept. of Electr. Eng., Montana State Univ., Bozeman, MT “Identifying linear reduced-order models for systems with arbitrary initial conditions using Prony signal analysis”
- [27] Τρύφων Κουσιουρής, “*Θεωρία Συνθέσεως Δικτύων*”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 1989
- [28] Darlington S., “Synthesis of Reactance 4-Poles”, *J. Math. Phys.* 18 (1939), pp. 257-353.
- [29] Gobind Daryanani “Principles of active network synthesis and design” Εκδόσεις John Wiley & sons