

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων

Επαλήθευση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων – Μέθοδος σχεδίασης κυκλώματος γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παύλος Σ. Κατσιβέλης

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος **Επιβλέπων:** Γεώργιος Π. Φώτης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006



Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων

134

Επαλήθευση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων – Μέθοδος σχεδίασης κυκλώματος γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παύλος Σ. Κατσιβέλης

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος Επιβλέπων: Γεώργιος Π. Φώτης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την $26^{\eta} \Sigma$ επτεμβρίου 2006.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος Καθηγητής Τρύφων Γ. Κουσιουρής Καθηγητής Περικλής Δ. Μπούρκας Καθηγητής

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006

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.

"Το πιο θαυμάσιο πράγμα που μπορούμε να βιώσουμε είναι το μυστήριο. Είναι η πηγή της αληθινής τέχνης και της επιστήμης"

Albert Einstein

<u>Περίληψη</u>

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του παραγόμενου ρεύματος από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Το υπάρχον Πρότυπο για την δοκιμή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ορίζει τα όρια για τις τέσσερις παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης για συγκεκριμένη πειραματική διάταξη. 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.

Στην εργασία αυτή έγινε επαλήθευση δύο γεννητριών, που υπάρχουν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.. Εξετάστηκαν μέσα από σειρές μετρήσεων για τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 της Schaffner, οι τιμές των παραμέτρων που ορίζει το Πρότυπο, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι τοποθετημένος σε κατακόρυφη γειωμένη μεταλλική πλάκα και όχι σε οριζόντια όπως ορίζει το υπάρχον Πρότυπο.

Τέλος, παρουσιάζεται μέθοδος η οποία βασισμένη στη μέθοδο Prony από τη σύνθεση δικτύων, χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς κυκλώματος και την κατασκευή του τελευταίου, το οποίο παράγει την επιθυμητή έξοδο, που είναι η βέλτιστη εξίσωση και αντιστοιχεί στην εξίσωση του Heidler. Αφού βρέθηκε η συνάρτηση μεταφοράς, υλοποιήθηκε κύκλωμα στο Pspice, προσομοίωση του οποίου έδειξε ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά την κυματομορφή του ρεύματος για την εξίσωση του Heidler.

<u>Λέξεις κλειδιά</u>

Πρότυπο IEC 61000-4-2, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης, ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, κατακόρυφη γειωμένη μεταλλική πλάκα, επαλήθευση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, εξίσωση ρεύματος Heidler, επαναληψημότητα γεννητριών, προσομοίωση, πρόγραμμα Spice, μέθοδος Prony

<u>Abstract</u>

This diploma thesis attempts to evaluate the discharge current generated by electrostatic discharge (ESD) generators. The existing Standard for ESD defines the acceptable values of the four parameters of the discharge-current waveshape for the specific experimental setup. A new parameter, beyond the previous four, is likely to be included in the oncoming revised Standard. This parameter declares whether the waveshape in question is between i(t)+35% and i(t)-35%, or not, where i(t) is defined by Heidler's equation.

Two ESD generators, which are available in the High Voltage Laboratory of the National Technical University of Athens, are being verified in the present diploma thesis. The parameter values of Schaffner's ESD generators, models NSG-433 and NSG-438 were tested through series of measurements. The previous measurements took place with the current transducer (Pellegrini Target) placed on the center of a vertical grounded metal plate rather than a horizontal grounded metal plate, which is defined by the existing Standard.

Finally, a method that tracks the transfer function of the circuit that generates the output discharge current, which corresponds to the Heidler's equation, is demonstrated. Further, this transfer function is used to built the circuit itself in PSpice, a simulation of which indicated that the circuit's output gives a satisfactory approach of the current waveshape of Heidler's equation.

Key words

IEC Standard 61000-4-2, electrostatic discharge, current transducer, ESD current, upright metal grounded plate, verification of ESD generators, Heidler's current equation, generators' repeatability, simulation, Spice program, Prony's method

<u>Πρόλογος</u>

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία του φοιτητή Κατσιβέλη Παύλου για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας είναι η αξιολόγηση της λειτουργίας των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς και η ανάπτυξη μεθόδου με την οποία κατασκευάζεται κύκλωμα, το οποίο παράγει την επιθυμητή κυματομορφή του ρεύματος ως έξοδο. Για τα προηγούμενα, εκτελέσθηκαν εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 σε δοκίμιο τοποθετημένο σε κατακόρυφη θέση υπό τάση φόρτισης ±2 kV και ±4 kV, και ελήφθησαν μετρήσεις. Αναπτύχθηκε πρόγραμμα σε Matlab για την επεξεργασία των μετρήσεων και την αξιολόγηση των παραμέτρων τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου. Περαιτέρω αναπτύχθηκε μέθοδος βασισμένη πάνω στη μέθοδο "Προσέγγισης κρουστικής απόκρισης σε πεπερασμένο αριθμό ισαπεχόντων σημείων" (μέθοδος Prony), για την ανάκτηση της συνάρτησης μεταφοράς κυκλώματος το οποίο παράγει την κατασκευή αυτού του κυκλώματος.

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των θεμάτων που καλύπτονται σε κάθε κεφάλαιο και συγκεκριμένα:

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. Επίσης 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.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται το 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 3** παρουσιάζεται εκτενώς η πειραματική διάταξη, καθώς και ο διαθέσιμος εργαστηριακός εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Δίνονται σχήματα και τεχνικά χαρακτηριστικά των γεννητριών NSG-433 και NSG-438 και των σημαντικών μερών της όλης διάταξης.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ο οποίος αναπτύχθηκε, και υλοποιήθηκε σε γλώσσα Matlab με σκοπό τον έλεγχο των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος που παράγει καθεμιά από τις δύο γεννήτριες (NSG-433, NSG-438) κατά την επαλήθευσή τους σύμφωνα με τα όρια που ορίζει για αυτές το υπάρχον Πρότυπο[3]. Επίσης εξετάσθηκε η παράμετρος W_s που ενδεχομένως να συμπεριληφθεί στην επερχόμενη αναθεωρημένη έκδοση του Προτύπου.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η μέθοδος με την οποία βρίσκεται η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος, που παράγει την απαιτούμενη κυματομορφή ρεύματος. Παρουσιάζεται η μέθοδος Prony, καθώς και η τροποποίηση της προκειμένου να δοθεί ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα. Επίσης προτείνεται μια κατασκευή του κυκλώματος το οποίο παράγει το ρεύμα εκφόρτισης όπως αυτό προδιαγράφεται από την εξίσωση του Heidler για το κεραυνικό ρεύμα. Οι κυκλωματικές προσομοιώσεις του κατασκευασθέντος κυκλώματος έδειξαν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** σύμφωνα με την κατεύθυνση έρευνας που ανακύπτει μέσα από την παρούσα εργασία, αναφέρεται το επόμενο βήμα από αυτήν που είναι η κατασκευή με συγκεκριμένο τρόπο, κυκλώματος το οποίο να παράγει ρεύμα της επιθυμητής μορφής.

Θα ήθελα εδώ να ευχαριστήσω θερμά όλους όσοι συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την ανάθεση της παρούσας εργασίας και για τις άριστες συνθήκες που υπάρχουν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.

Τον κ. Τρύφωνα Γ. Κουσιουρή καθηγητή του Τομέα Σημάτων, Ελέγχου & Ρομποτικής του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την πολύτιμη και συνεχή βοήθειά του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας και για την αμέριστη συμπαράστασή του όλους αυτούς τους μήνες. Η οξυδέρκεια και οι γνώσεις του

iv

υπήρξαν καταλυτικές σε κρίσιμα σημεία της εργασίας αυτής και κυρίως σε θέματα τα οποία πραγματεύεται το 5° κεφάλαιο.

Τον κ. Γεώργιο Π. Φώτη, Υποψήφιο Διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για τη συνεργασία, τη βοήθεια, την υπομονή και τον πολύ χρόνο που διέθεσε για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τον Γεράσιμο Π. Θεοδωράτο Υποψήφιο Διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την πολύτιμη βοήθειά του, την εμπειρία και τις γνώσεις του στην κατασκευή του κυκλώματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που ήταν πάντα κοντά στην παρούσα εργασία, έδωσε λύσεις σε κρίσιμα σημεία και με ενθάρρυνε να συνεχίσω.

Τον κ. Χ. Ηλία για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και την κα Ν. Χ. Ηλία υπεύθυνη του συστήματος ποιότητας του εργαστηρίου για την εργαστηριακή της βοήθεια και τις συμβουλές της.

Όλα τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και ιδιαίτερα την κυρία Χρύσα Σιγάλα για την βοήθεια και την υποστήριξη.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, για την υποστήριξη, και τον τρόπο με τον οποίο ήταν δίπλα μου, τα τελευταία αλλά και όλα τα προηγούμενα χρόνια.

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 μιας 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 (Elctromagnetic 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 ζωική 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 Νάιλον Μαλλί Γούνα Μόλυβδος Μετάξι Αλουμίνιο Χαρτί Πολυουρεθάνη Βαμβάκι	Κερί γυαλίσματος Σκληρό λάστιχο Κόλλα συγκόλλησης Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι Ανοξείδωτο ατσάλι Συνθετικό λάστιχο Ακρυλικό Αφρός πολυουρεθάνης Πολυεστέρας Πολυαιθυλαίνιο PVC TEFLON	
Ξύλο Ατσάλι	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	
Σχετική θέση στην τριβοηλεκτρική σειρά	Αγωγιμότητα των υλικών Σχετική υγρασία	
Επιφάνεια επαφής Συντελεστής τριβής μεταξύ των υλικών Βαθμός διαχωρισμού	Υγρασία στις επιφάνειες των υλικών Βαθμός αναδιάταξης στη δομή του υλικού	

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 ήπιας 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). Επιβλαβείς τάσεις μπορεί ακόμα να δημιουργηθούν ακόμα και στο 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. Με δεδομένο ότι η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι ένα άπαξ εμφανιζόμενο (μοναδιαίο) φαινόμενο, με διάρκεια μικρό κλάσμα του μs, επομένως, κατά τη διάρκεια του φαινομένου, αποκλείεται εκ των πραγμάτων η οποιαδήποτε επέμβαση στις παραμέτρους του παλμού, είναι απαραίτητος ο σαφής και εκ των προτέρων καθορισμός των παραμέτρων του τυπικού παλμού ρεύματος.

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση 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 αγώγιμης 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.

6



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 και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή, με ένα αγώγιμο 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 δευτερευουσών 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 αγώγιμο πλαίσιο, το οποίο δεν έχει οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα στα τοιχώματά 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 εκτιμηθεί η 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 ανθρωπίνου 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 R_{ESD} τη συνολική ωμική αντίσταση σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα και της ωμικής αντίστασης R_L της υπό εξέτασης συσκευής (Device Under Test- DUT), C_{ESD} την χωρητικότητα πυκνωτή ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος σε τάση V_C και L_S την αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης η διαφορική εξίσωση 2ης τάξης που ισχύει είναι:

$$L_{S}C_{ESD} \frac{d^{2}V_{C}}{dt^{2}} + R_{ESD}C_{ESD} \frac{dV_{C}}{dt} + V_{C} = 0, \ V_{C}(0^{-}) = V_{0}, \ V_{C}'(0^{-}) = 0$$
(1.1)

της οποίας η αναλυτική λύση είναι:

$$V_{C}(t) = \frac{\sqrt{\frac{1}{L_{S}C_{ESD}}}}{\sqrt{\frac{1}{L_{S}C_{ESD}} - \frac{R^{2}}{4L_{S}^{2}}}} \cdot e^{-\frac{R}{2L_{S}}t} \sin\left[t \cdot \sqrt{\frac{1}{L_{S}C_{ESD}} - \frac{R^{2}}{4L_{S}^{2}}} + \varphi\right]$$
(1.2)

όπου:
$$\varphi = \arctan\left[\frac{\sqrt{\frac{l}{L_s C_{ESD}} - \frac{R^2}{4L_s^2}}}{\frac{R}{2L_s}}\right]$$
(1.3)

όταν
$$\left(\frac{R}{L_{ESD}}\right)^2 < \frac{4}{L_{ESD}C_{ESD}}$$
 (1.4)

και

$$V_{C}(t) = \frac{1}{b-a} \left[\left(\frac{R}{L_{ESD}} - a \right) e^{-at} - \left(\frac{R}{L_{ESD}} - b \right) e^{-bt} \right]$$
(1.5)

όπου
$$a = \frac{-\frac{R}{L} - \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2} - \frac{4}{LC}}{2}$$
 και $b = \frac{-\frac{R}{L} + \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2} - \frac{4}{LC}}{2}$

•

όταν
$$(\frac{R}{L_{ESD}})^2 > \frac{4}{L_{ESD}C_{ESD}}$$

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	$1,5 \times 10^8 s^{-1}$	$0,1 \times 10^8 s^{-1}$	$10 \times 10^8 s^{-1}$
ω _o	$0,5 \times 10^8 s^{-1}$	$0,8 \times 10^8 s^{-1}$	$30 \times 10^8 s^{-1}$

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 σημάτων κυμαίνεται μεταξύ 100 ps εως 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 ληφθεί από διάταξη όπως αυτή του Σχήματος 1.4 δίνουν κάποιες τιμές για τα στοιχεία του κυκλώματος. Η αντίσταση της επιδερμίδας R είναι περίπου 150Ω έως 1000Ω (χωρίς ο άνθρωπος να κρατά κάποιο μεταλλικό αντικείμενο όπως κλειδιά, μαχαίρι, βίδα, κ.τ.λ), η ανθρώπινη χωρητικότητα κυμαίνεται από 50 pF έως 250 pF, ενώ βρέθηκαν τάσεις πάνω από 15 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)

Κεφάλαιο 2

Πρότυπο IEC 61000-4-2

2.1 Επισκόπηση Προτύπου ΙΕС 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.

2.2 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 2.1 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Σύμφωνα με το Πρότυπο, αποτελείται από μια αντίσταση φόρτισης R_c (50-100 MΩ), έναν πυκνωτή ενταμίευσης ενέργειας C_s (150 pF ± 10%) και μία αντίσταση εκφόρτισης R_d που αντιπροσωπεύει την αντίσταση του δέρματος (330 Ω ± 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 Ω για την R_d .



Σχήμα 2.1: Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [3]



Σχήμα 2.2: Κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [3]

Το ρεύμα εκφόρτισης σύμφωνα με την κυματομορφή του σχήματος 2.2, μπορεί να χωρισθεί 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: **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 (I₃₀): 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 (I₆₀): 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 πίνακα 2.1, που ακολουθεί.

Επίπεδο	Ενδεικνυόμενη τάση (kV)	Κορυφή ρεύματος ±10% (A)	Χρόνος ανόδου t _r (ns)	Ρεύμα (±30%) στα 30ns (A)	Ρεύμα (±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 2.1: Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος εκφόρτισης μέσω επαφής [3]

2.3 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 2.3 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 (2.1).

$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) + \frac{i_2}{k_2} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_4}\right)$$
(2.1)

όπου:

$$k_1 = \exp\left(-\frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}\right)$$
(2.2)

$$k_2 = \exp\left(-\frac{\tau_3}{\tau_4} \cdot \left(\frac{n\tau_4}{\tau_3}\right)^{1/n}\right)$$
(2.3)

και

$$\tau_1 = 1,3$$

 $\tau_2 = 2$
 $\tau_3 = 12$
 $\tau_4 = 37,8$
 $i_1 = 17,5$
 $i_2 = 9$
 $n = 1,8$

Επίσης, βασική διαφορά του αναθεωρημένου Προτύπου με το υπάρχον είναι ότι στην επαλήθευση των γεννητριών η γειωμένη μεταλλική επιφάνεια, στης οποίας 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 2.1. Στο σχήμα 2.1 φαίνονται επίσης και οι συναρτήσεις i(t)*135% και i(t)*65%.



Σχήμα 2.1: Καμπύλη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4 kV

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής θα παρουσιαστούν μετρήσεις κατά την επαλήθευση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων όταν η γειωμένη μεταλλική πλάκα είναι κατακόρυφη και όχι οριζόντια. Επίσης, θα μελετηθεί μέθοδος σχετικά με το πώς από την εξίσωση (2.1) μπορούμε να οδηγηθούμε στο κύκλωμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που παράγει την κυματομορφή αυτή.

Κεφάλαιο 3

Πειραματική διάταξη

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται εκτενώς η πειραματική διάταξη, καθώς και ο διαθέσιμος εργαστηριακός εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

3.2 Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων

Για την διεξαγωγή των δοκιμών που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι συνοπτικά ο ακόλουθος:

- Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης.
- Βάσεις στήριξης του ομοαξονικού προσαρμοστή.
- Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας.
- Εξασθενητές (attenuators).
- Παλμογράφος TDS 7254B.
- Κλωβός Faraday.

3.3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ρεύματος. Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο TDS 7254B, ο οποίος περιλαμβάνει 4 κανάλια και το εύρος ζώνης του κυμαίνεται από dc έως 2,5 GHz. Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις πραγματοποιήθηκαν με τις γεννήτριες NSG-438 και NSG-433 της εταιρίας Schaffner. Προκειμένου να μετρήσουμε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και να πάρουμε τις κυματομορφές του, χρησιμοποιούμε ομοαξονικά καλώδια που μεταφέρουν στο εσωτερικό του θαλάμου το σήμα. Επειδή το ρεύμα που δημιουργείται έχει μεγάλες τιμές (περίπου 3,5A/kV) πρέπει να εξασθενήσουμε τα αντίστοιχο σήμα προ της εισαγωγής του στον παλμογράφο. Για το

λόγο αυτό χρησιμοποιούμε τον εξασθενητή της Tektronix (011-0059-03). Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1 ως Pellegrini target δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να μετρήσουμε το εκχυόμενο ρεύμα κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Στη διάταξη χρησιμοποιείται ο MD 101 της Schaffner.



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης

3.3.1 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις πραγματοποιήθηκαν με δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων της εταιρείας Schaffner την NSG-433 [10] και την NSG-438 [11]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά κάθε μιας από αυτές.

3.3.1.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433

Η γεννήτρια NSG-433, η οποία φαίνεται στο σχήμα 3.2 παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις της τάξης των ±18 kV με χρόνο ανόδου μικρότερο από 1 ns. Ο διακόπτης αλλαγής πολικότητας βρίσκεται ενσωματωμένος πάνω στο πιστόλι μαζί με ψηφιακό βολτόμετρο, το οποίο δείχνει την τάση εκφόρτισης.



Σχήμα 3.2: Η γεννήτρια NSG-433

Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις συνήθως επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως πίεση, υγρασία και θερμοκρασία, καθώς επίσης και από το μέγεθος του ηλεκτροδίου εκφόρτισης. Η NSG-433 χρησιμοποιεί μια συσκευή, η οποία ονομάζεται προσαρμοστής εκφόρτισης επαφής (Contact Discharge Adapter) και απαλλάσσει τον παλμό από τις ανεπιθύμητες επιδράσεις του περιβάλλοντος. Ο προσαρμοστής εκφόρτισης επαφής, καθώς και η ακίδα για την πραγματοποίηση των εκφορτίσεων μέσω αέρα φαίνονται στο σχήμα 3.3. Η γεννήτρια NSG-433 περιλαμβάνει επίσης τροφοδοτικό με ενσωματωμένο μετρητή ο οποίος παρουσιάζει τον αριθμό των εκφορτίσεων, που πραγματοποιούνται.



Σχήμα 3.3: Ακίδες για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής για τη γεννήτρια NSG-433

3.3.1.2 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438

Η γεννήτρια αυτή παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μέχρι 30 kV και στον χειρισμό της χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για αποφυγή ατυχήματος. Στο σχήμα 3.4 φαίνεται η γεννήτρια και τα βασικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται. Πρέπει να σημειωθεί ότι η οθόνη είναι οθόνη αφής οπότε οι όποιοι χειρισμοί γίνονται μέσω αυτής.



Σχήμα 3.4: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας NSG-438 και η μεταξύ τους συνδεσμολογία

Η γεννήτρια αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά τμήματα:

- Τη βασική μονάδα, η οποία φαίνεται στο σχήμα 3.5 και περιλαμβάνει την μπαταρία τροφοδοσίας, την γεννήτρια και τον ρυθμιστή υψηλής τάσης, καθώς και ορισμένες διατάξεις ασφαλείας. Περιλαμβάνει επίσης 3 μπουτόν (Power On, Interlock reset, Emergency Power Off) και 4 λυχνίες (Power, Battery, High Voltage, Interlock).
- Η γεννήτρια στην οποία βρίσκονται η ακίδα εκφόρτισης (αέρος ή επαφής), ηλεκτρονικά στοιχεία μέτρησης και η οθόνη αφής / εισαγωγής δεδομένων και το καλώδιο γείωσης. Στην λαβή του πιστολιού βρίσκεται το μπουτόν το οποίο παράγει τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.
- Το DC τροφοδοτικό (CPW1027) το οποίο έχει σαν είσοδο του 100-250 Vac, 50-60 Hz, 1 A και δίνει στην βασική μονάδα 24 Vdc, 2,3 A.



Σχήμα 3.5: Η βασική μονάδα της γεννήτριας με τα μπουτόν και τις ενδεικτικές λυχνίες

Στον πίνακα 3.1 φαίνονται τα συγκεντρωτικά τεχνικά χαρακτηριστικά των δυο γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG-433 και NSG-438, που χρησιμοποιήσαμε κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

	NSG-433	NSG-438	
Πυκνωτής εκκένωσης C_s	$150 \text{ pF} \pm 10\%$	150 pF	
Αντίσταση εκκένωσης R_d	$330 \ \Omega \pm 10\%$	330 Ω	
Αντίσταση φόρτισης R_c	100 MΩ	50 MΩ	
Τάση φόρτισης V_0	2-18 kV για εκφορτίσεις στον αέρα 2-9 kV για εξ επαφής εκφορτίσεις	200 V-30 kV για εκφορτίσεις στον αέρα και για εκφορτίσεις εξ επαφής	
Πολικότητα τάσης εξόδου	Θετική/αρνητική	Θετική/αρνητική	
Χρόνος κρατήματος απλής φόρτισης (90% V ₀)	>5 sec	>5 sec	
Χρόνος ανόδου ρεύματος εκφόρτισης (t _r)	< 1 ns για εκφορτίσεις στον αέρα και για τάσεις ≤ 8 kV 0,7 – 1 ns για εξ επαφής εκφορτίσεις	< 1 ns για εκφορτίσεις στον αέρα και για τάσεις ≤ 8 kV 0,7 – 1 ns για εξ επαφής εκφορτίσεις	
Μέγιστο ρεύματος 2 kV: 7,5A ±10% 4 kV: 15A ±10%		2 kV: 7,5A ±10% 4 kV: 15A ±10%	
Τάση τροφοδοσίας 100/120/220/240 Vac, 50-60 Ηz		100/120/220/240 Vac, 50-60 Hz	
Κατανάλωση	25 VA	25 VA	
Θερμοκρασία λειτουργίας	5-40 °C	5-40 °C	
Υγρασία λειτουργίας	20%-80%	20%-80%	

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

3.3.2 Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης

Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης [12] δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μπορεί να μετρηθεί το ρεύμα από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Είναι γνωστός και σαν Pellegrini target. Στη διάταξη χρησιμοποιήθηκε ο MD 101 της Schaffner.

Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται ο ομοαξονικός προσαρμοστής, που χρησιμοποιήθηκε και στο σχήμα 3.7 ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη διάταξη.



Σχήμα 3.6: Ο ομοαζονικός προσαρμοστής MD 101



Σχήμα 3.7: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη διάταξη

3.3.3 Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας

Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαρκεί μερικά ns. Συνεπώς το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτει είναι της τάξης των GHz. Για αυτό το λόγο απαιτείται τα ομοαξονικά καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν να είναι κατάλληλα για μεταφορά σήματος υψηλής συχνότητας.

3.3.4 Εξασθενητής

Προκειμένου να μετρηθεί το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης το σήμα πρέπει να εξασθενήσει, ώστε να μην κινδυνεύσει να καταστραφεί το κανάλι του παλμογράφου από μεγάλη ένταση ρεύματος. Γι' αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03 της Tektronix με εύρος ζώνης από dc έως 2GHz, με εξασθένηση 20 dB και αντίσταση 50 Ω. Ο εξασθενητής τοποθετείται μεταξύ του ομοαξονικού καλωδίου και του καναλιού του παλμογράφου. Ο εν λόγω εξασθενητής φαίνεται στο σχήμα 3.8 που ακολουθεί:



Σχήμα 3.8: Ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03 της Tektronix

3.3.5 Παλμογράφος

Ο παλμογράφος μοντέλο TDS 7254B είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της Tektronix και λειτουργεί στα 2,5 GHz καλύπτοντας τις απαιτήσεις του ταχέως μεταβατικού φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως άλλωστε ορίζει και το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [17] για παλμογράφο τουλάχιστον 1 GHz. Διαθέτει 4 κανάλια, ενσωματωμένο επεξεργαστή Pentium IV, λειτουργικό σύστημα Windows 2000, οθόνη με ανάλυση 1024 x 768, 3,5 floppy για δισκέτα και CD Recorder για την αποθήκευση των μετρήσεων. Ο TDS 7254S παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9 και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στον πίνακα 3.2.



Σχήμα 3.9: Ο παλμογράφος Tektronix TDS 7254B

Κανάλια Εισόδου	4		
Εύρος ζώνης	2,5 GHz		
Χρόνος ανόδου από το 10% στο 90%	130 ps		
Χρόνος ανόδου από το 20% στο 80%	83 ps		
Ακρίβεια DC κέρδους	$\pm 2\% + (2\% \text{ x offset})$		
Σύζευξη εισόδου	DC, GND		
Αντίσταση εισόδου	$50 \ \Omega \pm 2,5\%$		
Ευαισθησία εισόδου στα 50 Ω	2 mV/div έως 1 V/div		
Κάθετη ανάλυση	8 bit		
Μέγιστη τάση εισόδου, 50 Ω	$ \begin{array}{l} <1 \ V_{RMS} \gamma \iota \alpha \ r < 100 mV/div, \\ <5 \ V_{RMS} \gamma \iota \alpha \ r \ \geq \ 100 mV/div \end{array} $		
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch1	20 Gs/sec		
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch2	10 Gs/sec		
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch3	5 Gs/sec		
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch4	1 Gs/sec		

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά Παλμογράφου TDS 7254B

3.4 Ανασύνθεση ρεύματος

Ο τρόπος υπολογισμού της έντασης του ρεύματος, μέσω της ένδειξης τάσης του παλμογράφου, βασίζεται στη θεωρία δικτύων και συγκεκριμένα αφορά τα δίθυρα [13]. Το Σχήμα 3.10 δίνει το ηλεκτρικό ισοδύναμο της μετρητικής διάταξης συμπεριλαμβανομένου και του καλωδίου με τον εξασθενητή.



Σχήμα 3.10: Ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης [13]

Το παραπάνω κύκλωμα με την μορφή δίθυρων έρχεται στην μορφή του σχήματος 3.11, όπου έχουμε τα δύο δίθυρα που μοντελοποιούν το στόχο εκφόρτισης και το καλώδιο με τον εξασθενητή.



Σχήμα 3.11: Ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης με χρήση δίθυρων [13]

Για τον πίνακα παραμέτρων μεταφοράς του στόχου έχουμε:

$$P_{t \operatorname{arg} et} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_2 \cdot \Omega \\ \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{\Omega} & 1 + \frac{R_2}{R_1} \end{bmatrix}$$
(3.1)

ενώ για τον πίνακα του καλωδίου [23]:

$$P_{cable} = \begin{bmatrix} A^{"} & B^{"} \\ C^{"} & D^{"} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+d^{2}}{2 \cdot d} & \frac{25}{d} \cdot (1-d^{2}) \cdot \Omega \\ \frac{1-d^{2}}{100 \cdot d} \cdot \frac{1}{\Omega} & \frac{1+d^{2}}{2 \cdot d} \end{bmatrix}$$
(3.2)
όπου το d είναι η εξασθένηση σε δεκαδική κλίμακα, $d = \frac{1}{10^{\frac{A}{20}}}$. Για παράδειγμα για

εξασθένηση A=20dB έχουμε d=0.1ενώ για 30dB έχουμε d=0.03162 .

Οι πίνακες των (3.1) και (3.2) σχηματίζονται βασιζόμενοι στην (3.3)

$$\begin{bmatrix} Vin\\ Iin \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B\\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vout\\ Iout \end{bmatrix}$$
(3.3)

Για να βρούμε τον συνολικό πίνακα του κυκλώματος αρκεί να πολλαπλασιάσουμε τους δύο πίνακες των (3.1) και (3.2). Αντικαθιστώντας τις τιμές R_1 =2.018Ω, R_2 =48.964Ω και d = 0.1, έχουμε:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = P_{t \text{ arg } et} \cdot P_{cable} = \begin{bmatrix} A' \cdot A'' + B' \cdot C'' & A' \cdot B'' + B' \cdot D'' \\ C' \cdot A'' + D' \cdot C'' & C' \cdot B'' + D' \cdot D'' \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 252.3182 & 494.7682 \\ 5.003 & 250.2275 \end{bmatrix}$$

Χρησιμοποιώντας την (3.3) βρίσκουμε για το ρεύμα της εκφόρτισης:

$$I_{ESD} = C \cdot Vout + D \cdot Iout \Longrightarrow I_{ESD} = C \cdot Vout + D \cdot \frac{Vout}{Zo} = \left(C + \frac{D}{Zo}\right)Vout = C \cdot Vout + D \cdot \frac{Vout}{Zo} = \left(C + \frac{D}{Zo}\right)Vout = C \cdot Vout + D \cdot \frac{Vout}{Zo} = C \cdot Vout + D$$

$$\left(5.003 + \frac{250.2275}{50}\right) Vout \approx 10.0075 \cdot Vout$$

Στην συνέχεια της διπλωματικής εργασίας και για την επεξεργασία των μετρήσεων θα χρησιμοποιούμε για την σταθερά μετασχηματισμού ρεύματος εκφόρτισης-τάσης παλμογράφου C την τιμή 10.

Κεφάλαιο 4

Μετρήσεις και πειραματικά αποτελέσματα

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ο οποίος αναπτύχθηκε, με σκοπό τον έλεγχο των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος που παράγει καθεμιά από τις δύο γεννήτριες (NSG-433, NSG-438) κατά την επαλήθευσή τους σύμφωνα με τα όρια που ορίζει για αυτές το υπάρχον Πρότυπο[3]. Επίσης εξετάσθηκε η παράμετρος W_s που ενδεχομένως να συμπεριληφθεί στην επερχόμενη αναθεωρημένη έκδοση του Προτύπου.

4.2 Αυτοματοποίηση επαλήθευσης γεννητριών ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 κατά την επαλήθευση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και σύμφωνα με το επερχόμενο αναθεωρημένο Πρότυπο, ενδεχομένως θα πρέπει να ελέγχονται και οι 5 παράμετροι (t_r, I_{max}, I₃₀, I₆₀, W_s). Η διαδικασία αυτή μπορεί να αυτοματοποιηθεί. Τα ζεύγη σημείων Ρεύματος – Χρόνου που λαμβάνονται, αποθηκεύονται και η κυματομορφή Ρεύματος – Χρόνου που αυτά συνιστούν μπορεί τώρα να σχεδιαστεί. Εκτίθεται παρακάτω μια υλοποίηση με τη χρήση Matlab (βλ. Παράρτημα A), ενός αλγορίθμου για την αυτόματη αξιολόγηση των παραμέτρων της εκάστοτε κυματομορφής που ορίζει το νέο Πρότυπο. Η έξοδος του προγράμματος είναι η απόδοση τιμών σε κρίσιμες για την κυματομορφή παραμέτρους, και η αξιολόγηση των ανωτέρω.

4.3. Παρουσίαση του αλγόριθμου

Παρακάτω φαίνεται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε:



2υμφωνα με το επερχομενο ανασεορημενο προτιπο η εκαστοτε κυματομορφη θα πρεπει να βρίσκεται ανάμεσα στα όρια i(t)±35%, όπου i(t) η πρότυπη εξίσωση. Σχήμα 4.1: Ο Αλγόριθμος για την επαλήθευση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε λαμβάνει, φορτώνοντας το αντίστοιχο αρχείο, μια σειρά από ζεύγη τιμών, χρόνου-ρεύματος, μια σειρά μετρήσεων δηλαδή, για την ορθότητα των παραμέτρων των οποίων πρέπει να αποφανθεί. Υπάρχει μέριμνα ώστε να έχουμε το χρόνο σε ns και το ρεύμα σε A.

Βρίσκεται το μέγιστο του ρεύματος από τις τιμές που δόθηκαν και ελέγχεται η συμβατότητα του με τις απαιτήσεις του επερχόμενου Προτύπου.

Βρίσκεται το $I_{10\%}$ ως $I_{10\%}=10$ % * I_{max} , και αντίστοιχα το $I_{90\%}$, καθώς και οι χρόνοι στους οποίους αντιστοιχούν τα ανωτέρω. Σε χρόνο 30 ns και 60 ns αργότερα από το

 $I_{10\%}$ βρίσκονται αντίστοιχα τα $I_{30 ns}$ και $I_{60 ns}$. Στο σημείο αυτό αξιολογούνται οι παράμετροι $I_{30 ns}$ και $I_{60 ns}$. Βρίσκεται ο χρόνος ανόδου ως $t_r = t_{190\%}$ - $t_{110\%}$. Αξιολογείται ο χρόνος ανόδου βάσει των προδιαγραφών.

Ελέγχεται σύμφωνα με απαίτηση του επερχόμενου Προτύπου η συνθήκη, για t=2 ns÷ 60 ns, η κυματομορφή να είναι εντός των ορίων 65%*i(t) ÷ 135%*i(t), όπου i(t) είναι η θεωρητική τιμή του ρεύματος, όπως αυτή δίνεται στο Πρότυπο και παρουσιάστηκε στην εξίσωση (2.1) του 2^{ου} κεφαλαίου.

Στον κώδικα περιλαμβάνεται επίσης χωρίο για τη δημιουργία του γραφήματος των τιμών που ελήφθησαν. Για μία εύκολη εποπτική θεώρηση της ορθότητας της μέτρησης, οι τελευταίες παρουσιάζονται στο γράφημα μαζί με το 65%*i(t) και το 135%*i(t), πράγμα που δίνει άμεσα μια εικόνα σε σχέση με το αν ικανοποιείται η απαίτηση "η κυματομορφή να είναι εντός των τιμών 65%*i(t) ÷ 135%*i(t)".

Η θεωρητική εξίσωση του ρεύματος που δίνεται από το Πρότυπο, βρίσκεται σε ξεχωριστό Matlab αρχείο (βλ. Παράρτημα Α), για να είναι εύκολη η αλλαγή της εξίσωσης, επίσης είναι γραμμένη παραμετρικά, για τον εύκολο χειρισμό των παραμέτρων που την συνιστούν σε περίπτωση διόρθωσης.



Σχήμα 4.2 Πειραματικά δεδομένα, σε κοινό γράφημα με την ανοχή που προβλέπεται από το Πρότυπο

4.4. Μετρήσεις για την επαλήθευση των γεννητριών NSG-433 και NSG-438, σε τάσεις φόρτισης ±2kV ,±4kV

Για την επαλήθευση των γεννητριών έγιναν για κάθε γεννήτρια και για κάθε τάση φόρτισης δέκα ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και κατά συνέπεια δέκα μετρήσεις του παραγόμενου ρεύματος εκφόρτισης. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν διαθέσιμα σε ηλεκτρονική μορφή. Από κάθε προκύπτουσα σειρά μέτρησης υπολογίσθηκε ο μέσος όρος των τεσσάρων παραμέτρων για το ρεύμα (I_{max} , t_r , I_{30} και I_{60}), ενώ βρέθηκε επίσης αν η κάθε κυματομορφή κυμαίνεται εντός του $65\%^{*i}(t) \div 135\%^{*i}(t)$ " (παράμετρος η οποία δεν συμπεριλαμβάνεται στο υπάρχον Πρότυπο). Στη συνέχεια υπολογίσθηκε η τυπική απόκλιση των μετρήσεων. Αφού αφαιρέθηκαν οι μέσες τιμές εκείνες, που βρίσκονταν εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης 95% (που παρουσίαζαν δηλαδή τη μεγαλύτερη απόκλιση από το μέσο όρο των μετρήσεων) υπολογίσθηκε ξανά ο μέσος όρος των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα αυτά για τις τέσσερις διαφορετικές τάσεις φόρτισης και τις δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων παρουσιάζονται στους πίνακες 4.1-4.2. Διευκρινίζεται ότι στους παρακάτω πίνακες οι τιμές των παραμέτρων, οι οποίες είναι εκτός των ορίων που καθορίζει το Πρότυπο είναι γραμμοσκιασμένες. Παρατηρώντας τους πίνακες αυτούς προκύπτει ότι η γεννήτρια NSG-438 είναι σύμφωνη με τις τιμές που ορίζει το Πρότυπο σε αντίθεση με την NSG-433, η οποία είναι εκτός των ορίων.

	NSG-433 (Τάση φόρτισης +2kV)					
α/α μέτρησης	I _{max}	t _r	I ₃₀	I ₆₀	Ws	
1 ^η	12,88	0,18	3,99	3,05	Όχι	
2 ^η	12,44	0,14	3,85	3,06	Όχι	
3 ^η	12,44	0,32	3,88	2,94	Όχι	
4 ^η	13,00	0,15	3,92	3,14	Όχι	
5 ^η	12,92	0,13	3,84	2,96	Όχι	
6 ^η	11,88	0,13	3,80	3,13	Όχι	
7^{η}	12,28	0,54	3,80	3,00	Όχι	
8 ^η	13,00	0,22	3,84	3,12	Όχι	
9 ^η	13,24	0,17	3,96	3,00	Όχι	
10 ^η	13,16	0,13	3,72	3,13	Όχι	
Μέση τιμή	12,72	0,21	3,86	3,05	Όχι	
Τυπική απόκλιση	0,439	0,129	0,082	0,073		

Πίνακας 4.1.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης +2 kV (εκφορτίσεις επαφής) και για τη γεννήτρια NSG-433

	NSG-433 (Τάση φόρτισης -2kV)				
α/α μέτρησης	I _{max}	t _r	I ₃₀	I ₆₀	Ws
1^{η}	12,63	0,63	3,58	2,85	Όχι
2^{η}	11,52	0,22	3,55	2,98	Όχι
3 ^η	13,29	0,58	4,03	3,27	Όχι
4^{η}	12,99	0,19	4,10	3,27	Όχι
5 ^η	12,62	0,51	3,82	2,87	Όχι
6^{η}	12,59	0,90	3,51	2,89	Όχι
7 ^η	12,16	0,59	4,34	3,30	Όχι
8^{η}	12,40	0,58	3,89	3,35	Όχι
9^{η}	12,46	0,37	4,05	2,89	Όχι
10^{η}	13,25	0,19	3,69	3,28	Όχι
Μέση τιμή	12,59	0,48	3,86	3,09	Όχι
Τυπική απόκλιση	0,525	0,230	0,276	0,213	

Πίνακας 4.1.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -2kV (εκφορτίσεις επαφής) και για τη γεννήτρια NSG-433

		NSG-433 (Τάση φόρτισης +4kV)						
α/α μέτρησης	I _{max} (A)	t _r	I ₃₀	I ₆₀	Ws			
1 ^η	21,91	0,14	7,69	6,01	Όχι			
2^{η}	22,05	0,22	7,57	6,23	Όχι			
3 ^η	24,85	0,26	7,46	6,50	Όχι			
4^{η}	25,69	0,11	7,42	5,85	Όχι			
5 ^η	24,85	0,16	7,46	6,03	Όχι			
6 ^η	24,15	0,17	7,47	6,09	Όχι			
7^{η}	21,77	0,54	7,22	6,22	Όχι			
8^{η}	26,81	0,19	7,48	6,13	Όχι			
9 ^η	23,59	0,13	7,33	5,95	Όχι			
10 ^η	22,89	0,15	7,43	6,19	Όχι			
Μέση τιμή	23,69	0,21	7,46	6,11	Όχι			
Τυπική απόκλιση	1,712	0,122	0,119	0,179				

Πίνακας 4.1.γ: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4kV (εκφορτίσεις επαφής) και για τη γεννήτρια NSG-433

	NSG-433				
	-	(Ιαση (φορτισης -41	<u> </u>	
α/α μέτρησης	I _{max}	t _r	I ₃₀	I ₆₀	W _s
1^{η}	23,30	0,23	7,77	6,24	Όχι
2 ^η	23,04	0,26	7,64	5,99	Όχι
3 ^η	22,70	0,32	7,29	6,39	Οχι
4 ^η	23,53	0,27	7,87	5,77	Οχι
5 ^η	22,30	1,13	7,34	6,05	Οχι
6 ^η	22,79	0,27	8,05	5,53	Οχι
7^{η}	23,10	0,30	7,85	6,11	Οχι
8^{η}	23,50	1,18	7,34	6,31	Οχι
9 ^η	22,90	0,67	7,92	6,16	Οχι
10 ^η	22,74	0,97	7,72	6,56	Όχι
Μέση τιμή	22,99	0,56	7,68	6,11	Όχι
Τυπική απόκλιση	0,385	0,392	0,271	0,299	

Πίνακας 4.1.δ: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -4kV (εκφορτίσεις επαφής) και για τη γεννήτρια NSG-433

	NSG-438 (Τάση φόρτισης +2kV)				
α/α μέτρησης	I _{max}	t _r	I ₃₀	I ₆₀	Ws
1 ^η	8,41	0,71	3,13	2,53	Όχι
2 ^η	8,48	0,69	3,20	2,48	Όχι
3 ^η	7,71	0,70	3,109	2,51	Όχι
4 ^η	7,96	0,70	3,36	2,48	Όχι
5 ^η	7,64	0,69	3,32	2,50	Όχι
6 ^η	7,52	0,72	3,20	2,40	Όχι
7^{η}	7,80	0,68	3,27	2,50	Όχι
8^{η}	8,340	0,71	3,49	2,64	Όχι
9 ^η	8,24	0,71	3,17	2,51	Όχι
<u>1</u> 0 ^η	8,14	0,69	3,20	2,32	Όχι
Μέση τιμή	8,02	0,70	3,24	2,49	Όχι
Τυπική απόκλιση	0,344	0,012	0,117	0,084	

Πίνακας 4.2.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης +2kV (εκφορτίσεις επαφής) και για τη γεννήτρια NSG-438

	NSG-438 (Τάση φόρτισης -2kV)					
α/α μέτρησης	I _{max}	t _r	I ₃₀	I I60	Ws	
1 ^η	8,24	0,71	3,12	2,56	Όχι	
2^{η}	8,05	0,71	2,89	2,43	Όχι	
3 ^η	8,29	0,74	3,04	2,48	Όχι	
4 ^η	8,27	0,70	2,92	2,49	Όχι	
5 ^η	8,24	0,69	2,96	2,48	Όχι	
6 ^η	7,92	0,69	2,72	2,48	Όχι	
7^{η}	7,76	0,74	2,86	2,47	Όχι	
8^{η}	8,27	0,74	2,94	2,49	Όχι	
9 ^η	8,74	0,75	3,15	2,57	Όχι	
10 ^η	7,92	0,69	2,96	2,40	Όχι	
Μέση τιμή	8,17	0,72	2,96	2,48	Όχι	
Τυπική απόκλιση	0,274	0,024	0,126	0,051		

Πίνακας 4.2.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -2kV (εκφορτίσεις επαφής) και για τη γεννήτρια NSG-438

	NSG-438							
		(Τάση φόρτισης +4kV)						
α/α μέτρησης	I _{max}	t _r	I ₃₀	I ₆₀	Ws			
1^{η}	16,21	0,65	5,77	4,58	Όχι			
2^{η}	15,21	0,71	6,60	4,40	Όχι			
3 ^η	15,25	0,80	6,06	5,07	Όχι			
4^{η}	15,71	0,73	6,23	4,82	Όχι			
5 ^η	15,20	0,71	6,20	4,60	Όχι			
6 ^η	15,99	0,72	6,20	4,80	Όχι			
7^{η}	16,27	0,79	6,20	4,60	Όχι			
8^{η}	16,87	0,73	6,04	4,78	Όχι			
9 ^ŋ	15,80	0,70	6,20	4,40	Όχι			
10^{η}	15,51	0,69	5,74	4,66	Όχι			
Μέση τιμή	15,80	0,72	6,13	4,67	Όχι			
Τυπική απόκλιση	0,544	0,044	0,245	0,204				

Πίνακας 4.2.γ: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4kV (εκφορτίσεις επαφής) και για τη γεννήτρια NSG-438

]	NSG-438			
	(Τάση φόρτισης -4kV)					
α/α μέτρησης	I _{max}	t _r	I ₃₀	I ₆₀	Ws	
1 ^η	15,64	0,69	6,05	4,97	Όχι	
2 ^η	16,74	0,69	5,49	5,11	Όχι	
3 ^η	16,70	0,68	5,75	5,09	Όχι	
4 ^η	15,96	0,70	5,81	4,94	Όχι	
5 ^η	16,30	0,70	5,50	5,10	Όχι	
6 ^η	16,30	0,69	5,84	4,80	Όχι	
7^{η}	17,19	0,75	6,10	5,10	Όχι	
8^{η}	16,43	0,69	5,73	5,04	Όχι	
9 ^η	16,50	0,70	5,67	5,15	Όχι	
10 ^η	16,53	0,68	5,54	5,38	Όχι	
Μέση τιμή	16,43	0,70	5,75	5,07	Όχι	
Τυπική απόκλιση	0.426	0.020	0.211	0.151		

Πίνακας 4.2.δ: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4kV (εκφορτίσεις επαφής) και για τη γεννήτρια NSG-438

4.5. Γραφικές παραστάσεις

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε μια σειρά από γραφήματα που αφορούν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης των δύο γεννητριών. Τα γραφήματα που προέκυψαν ύστερα από επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων με το πρόγραμμα Matlab για εκφορτίσεις επαφής για τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438 υπό τάσεις ±2 kV και ±4 kV, καθώς και τα αντίστοιχα παλμογραφήματά τους είναι τα ακόλουθα:



NSG-433, Τάση φόρτισης +2kV).































Κεφάλαιο 5

Μέθοδος σχεδίασης κυκλώματος γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

5.1 Εισαγωγή-Το πρόβλημα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μεθοδολογία βάσει της οποίας γίνεται σχεδιασμός του κυκλώματος το οποίο θα παράγει κυματομορφή ρεύματος όπως αυτή περιγράφεται στην εξίσωση (5.1).

Η απαιτούμενη κυματομορφή που ορίζει το Πρότυπο [3] για την έξοδο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1.





$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) + \frac{i_2}{k_2} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_4}\right)$$
(5.1)

όπου:

$k_1 = \exp\left(-\frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}\right)$	(5.2)
$k_2 = \exp\left(-\frac{\tau_3}{\tau_4} \cdot \left(\frac{n\tau_4}{\tau_3}\right)^{1/n}\right)$	(5.3)
και	
$\tau_1 = 1,3$	
$\tau_2 = 2$	

 $\tau_3=12$ $\tau_4=37,8$ $i_1=17,5$ $i_2=9$ n=1,8

Σύμφωνα με την παραπάνω θεωρητική εξίσωση, η οποία παράγει την αντίστοιχη κυματομορφή γίνεται και ο έλεγχος της κυματομορφής που λαμβάνεται από τις πειραματικές μετρήσεις (βλ. Κεφ.4). Στο σχήμα 5.1 φαίνονται επίσης και οι συναρτήσεις i(t)*135% και i(t)*65%. Στο επερχόμενο αναθεωρημένο Πρότυπο θα υπάρχει και η απαίτηση τα πειραματικά δεδομένα να κυμαίνονται ανάμεσα σε αυτές, 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 5.2.



Σχήμα 5.2: 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 (5.1)) και αντιστοιχεί στο γράφημα του σχήματος 5.1. Στην ακόλουθη παράγραφο περιγράφεται η μέθοδος που θα ακολουθηθεί, η οποία από την εξίσωση της εξόδου ανακτά την συνάρτηση μεταφοράς και ακολούθως βρίσκεται το ζητούμενο κύκλωμα.

5.2 Μέθοδος Prony - Προσέγγιση κρουστικής απόκρισης σε πεπερασμένο αριθμό ισαπεχόντων σημείων

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 5.1.

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

$$g(t) = \sum_{i=1}^{n} A_i \exp(s_i t)$$
 (5.4)

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

$$g_d(kt) = g(kT) \tag{5.5}$$

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

$$z_i = \exp(s_i T) \tag{5.6}$$

και σχηματίζεται το πολυώνυμο:

$$\psi(z) = \prod_{i=1}^{n} (z - z_i) = \sum_{m=0}^{n} b_m s^m$$
(5.7)

$$\mu\varepsilon \ \mathbf{b}_0 = 1 \tag{5.8}$$

Από τις σχέσεις (5.4) και (5.7) προκύπτει:

$$\sum_{m=0}^{n} g[(m+k)T]b_{m} = \sum_{m=0}^{n} \sum_{i=1}^{n} b_{m}A_{i}z_{i}^{m+i} = \sum_{i=1}^{n} A_{i}\sum_{m=0}^{n} b_{m}z_{i}^{m+i} = 0$$
(5.9)

για k=0,1,...,n-1. Η σχέση (5.9) σε μητρική μορφή γράφεται λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (5.7) και (5.8):

$$\begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \dots & g(nT-T) \\ g(T) & g(2T) & \dots & g(nT) \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ g(nT-T) & g(nT) & \dots & g(2nT-2T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ b_{n-1} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} g(nT) \\ g(nT+T) \\ \vdots \\ \vdots \\ g(2nT-T) \end{bmatrix}$$
(5.10)

Από τη σχέση (5.10) 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:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & . & . & . & 1 \\ z_1 & z_2 & . & . & z_n \\ . & . & . & . \\ z_1^{n-1} & z_2^{n-1} & . & . & z_n^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ . \\ . \\ . \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(0) \\ g(T) \\ . \\ . \\ g(nT) \end{bmatrix}$$
(5.11)

Εφ' όσον είναι γνωστά τα z_i , τα s_i προκύπτουν από τη σχέση (5.6) ως εξής:

(5.12)

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

5.3 Εφαρμογή της μεθόδου Prony στη βέλτιστη εξίσωση

5.3.1 Εισαγωγή

Για την εφαρμογή της μεθόδου Prony αναπτύχθηκε πρόγραμμα σε γλώσσα Matlab, το οποίο έχοντας σαν είσοδό του την εξίσωση (5.1), η οποία θεωρείται ως η κρουστική απόκριση του κυκλώματος, για τις παραπάνω τιμές των παραμέτρων, έχει σαν έξοδό του τις παραμέτρους A_i και s_i της εξίσωσης (5.4). Δηλαδή βρίσκουμε την συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος.

Με μετασχηματισμό Laplace της (5.4) λαμβάνουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του ζητούμενου κυκλώματος, όταν γνωρίζουμε την κρουστική του απόκριση:

$$G(s) = \sum_{i=1}^{n} A_i \frac{1}{s - s_i}$$
(5.13)

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στο σημείο αυτό, διότι στην συγκεκριμένη περίπτωση θα εφαρμόσουμε την αρχή της υπέρθεσης στην εξίσωση (5.1), καθώς θα διαχωρίσουμε την έξοδο στους δύο προσθετέους από τους οποίους αποτελείται και θα εφαρμόσουμε την μέθοδο σε καθέναν από αυτούς για την εύρεση των επιμέρους συναρτήσεων μεταφοράς. Αυτές μπορούν στο τέλος της διαδικασίας να αθροιστούν για να βρεθεί η συνολική συνάρτηση μεταφοράς και έπειτα να βρεθεί το κύκλωμα από αυτήν. Εναλλακτικά μπορεί να βρεθούν δύο ξεχωριστά κυκλώματα για την κάθε μία από τις επιμέρους συναρτήσεις μεταφοράς, και έπειτα αυτά να συνδεθούν παράλληλα, σε κοινή είσοδο. Η παραπάνω πρακτική εφαρμόζεται, καθώς η εφαρμογή της μεθόδου, σε ολόκληρη την εξίσωση έδωσε εντελώς ανακριβή αποτελέσματα και δεν φάνηκε να προσεγγίζει καθόλου καλά την εξίσωση. Ο λόγος είναι ότι έχουμε να κάνουμε με μία εξίσωση που αποτελείται από δύο προσθετέους καθένας από τους οποίους εμφανίζεται σαν μία γραφική παράσταση με ένα μέγιστο. Όμως αυτές είναι απομακρυσμένες και η πρώτη είναι πολύ πιο οξεία και υψηλότερη σε σχέση με την δεύτερη (stiff equations). Καθώς η μέθοδος Prony, για τη δημιουργία συστήματος nτάξης χρησιμοποιεί 2n βήματα, και μόνον αυτά λαμβάνονται υπόψη κατά τη μέθοδο, παρατηρείται ότι με μικρό βήμα παραλείπεται η δεύτερη καμπύλη, ενώ με μεγάλο βήμα δεν εντοπίζεται η πρώτη.

5.3.2 Εφαρμογή της μεθόδου Prony

Σε πρώτη φάση δίνεται ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση της G(s), από την κρουστική απόκριση του κυκλώματος. Είναι ακριβώς η μέθοδος Prony όπως εφαρμόζεται (βλ. Παράρτημα B) σε κάθε έναν από τους δύο προσθετέους της εξίσωσης (5.1) και αναλυτικά εμφανίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 5.3. Το εξαγόμενο της κάθε εφαρμογής είναι η εκάστοτε συνάρτηση μεταφοράς (G_i, i=1,2). Επιλέγοντας ένα αριθμό δειγμάτων N_δ=2(N-1)+1 δημιουργείται ο πίνακας P:

$$P = \begin{bmatrix} g(0) & g(T) & . & . & g(NT - T) \\ g(T) & g(2T) & . & . & g(NT) \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ g(NT - T) & g(NT) & . & . & g(2NT - 2T) \end{bmatrix}$$
(5.15)

Ο πίνακας P της (5.15) περιέχει τιμές της συνάρτησης g(t) για t=0 έως t=2(N-1)T. Για τη δημιουργία ενός συστήματος n-τάξης, θα περιορίσουμε τον ανωτέρω πίνακα σε έναν υποπίνακα ο οποίος θα περιέχει της τιμές της εξίσωσης του ρεύματος για t=0, T, 2T,...,(2n-1)T.

Ο τρόπος με τον οποίο επιλέγεται ο υποπίνακας είναι ο ακόλουθος:

Σαρώνεται η τετραγωνική μήτρα P και βρίσκεται η τιμή της ορίζουσας του κάθε τετραγωνικού υποπίνακα, αρχίζοντας από πάνω και αριστερά. Όταν η ορίζουσα πάρει τιμή ίση ή μικρότερη του επιλεγμένου equivalent zero, η σάρωση σταματά και επιλέγεται ο πίνακας που έχει γίνει αποδεκτός ως αυτήν την στιγμή. Με τον προηγούμενο τρόπο και κριτήριο την μη μηδενική ορίζουσα, ο πίνακας που έχει σχηματιστεί αποτελείται από γραμμικά ανεξάρτητα διανύσματα. Ο πίνακας που επιλέχθηκε είναι ο τετραγωνικός πίνακας που βρίσκεται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (5.10). Επιλύεται τώρα η εξίσωση (5.10) για την εύρεση των b_i που είναι οι συντελεστές του χαρακτηριστικού πολυωνύμου. Το μήκος του διανύσματος των b_i είναι ίσο με το βαθμό του πίνακα που βρίσκεται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (5.10).

Εδώ γίνεται φανερό πως έτσι, οι τιμές της συνάρτησης που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο μπορεί να είναι-και όντως έτσι συμβαίνει-πολύ λιγότερες από αυτές που αρχικά έχουν ληφθεί από την δειγματοληψία. Αυτό δείχνει πως η πληροφορία πάνω στην οποία εφαρμόζεται η μέθοδος είναι πολύ λιγότερη από αυτήν που έχουμε

58

αρχικά. Ο αριθμός των σημείων (N_δ=2(N-1)+1) που θα επιλεγούν εδώ είναι φανερό πως δεν επηρεάζει καθόλου το αποτέλεσμα της μεθόδου, όσο είναι N>n. Έτσι έχουμε με αυτόν τον τρόπο εισαγωγή αξιοσημείωτου σφάλματος και όταν δοκιμάζουμε την δημιουργία γραφήματος i(t)=g(t), με g(t) αυτήν που προκύπτει από την σχέση (5.4) έχουμε το αποτέλεσμα του σχήματος 5.4.

Αντίστοιχα έχουμε περαιτέρω πρόβλημα και στην εξίσωση (5.11). Εδώ λαμβάνονται οι δυνάμεις των λύσεων του χαρακτηριστικού πολυωνύμου, μέχρι την τιμή που αντιστοιχεί στην διάσταση (n) του πίνακα, που βρίσκεται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (5.10) και όχι άλλες, καθώς η τιμή αυτή έχει προεπιλεχθεί, όπως δείχθηκε στην παραπάνω μέθοδο.

Με την πρώτη ματιά είναι λογικό στο σύστημα αυτό το οποίο είναι προς επίλυση, να θέλουμε ο πίνακας, ο οποίος περιέχει τις ρίζες z_i να είναι τετραγωνικός. Έτσι αφού έχει ήδη υπολογιστεί ο αριθμός (n) των ριζών (n στήλες) προκύπτει και το πλήθος των δυνάμεων που θα πάρουμε (n γραμμές). Επομένως, προκύπτει ο τετραγωνικός n x n πίνακας που βρίσκεται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (5.11). Άρα, λαμβάνουμε δυνάμεις των z_i έως την τιμή (n-1) και όχι έως την τιμή (N_δ-1), όπου N_δ το πλήθος των σημείων δειγματοληψίας. Αυτό όμως οδηγεί σε μια νέα απώλεια πληροφορίας.



Σχήμα 5.3: Ο αλγόριθμος της μεθόδου Prony

Με την εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς, και την θεώρηση κρουστικής εισόδου στο κύκλωμα έχουμε:

$$Y(s)=G(s)*\mathcal{L}{\delta(t)} \Leftrightarrow$$

 $Y(s)=G(s)$ (5.14)
Ara se authu thu periptiwon h sunarthon metaqorás tautízetai me

 $g(t) = \sum_{i=1}^{n} A_i \exp(s_i t) = y(t)$, με την οποία προσπαθούμε να προσεγγίσουμε την θεωρητική

μετασχηματισμό Laplace της εξόδου, και άρα έχει νόημα η γραφική παράσταση της

εξίσωση. Με την g(t) όπως προέκυψε από την παραπάνω μέθοδο, δηλαδή με τις τιμές των A_i και s_i που έδωσε αυτή, προκύπτει το σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4: Η θεωρητική καμπύλη που προκύπτει από την (5.1) σε κοινό γράφημα με την καμπύλη που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου Prony

Η προσέγγιση δεν φαίνεται να είναι πολύ μακριά από την πραγματικότητα, ειδικά αν λάβουμε υπόψη το μεγάλο θόρυβο που χαρακτηρίζει τις πειραματικές μετρήσεις. Παρόλα αυτά σε ορισμένα σημεία, εμφανίζεται αξιοσημείωτο σχετικό σφάλμα, και αυτό συνιστά μια αδυναμία της μεθόδου.

το

5.3.3 Τροποποίηση της μεθόδου Prony - Εφαρμογή

Στο σχήμα 5.6 δίνεται ο τροποποιημένος αλγόριθμος Prony (βλ. Παράρτημα B) τον οποίο εφαρμόσαμε εκ νέου στους δύο προσθετέους της θεωρητικής εξίσωσης (5.1). Στην προηγούμενη εφαρμογή της μεθόδου διαπιστώθηκε σειρά μειονεκτημάτων τα οποία και καταγράφηκαν. Το μειονέκτημα που διαπερνά όλα τα προβλήματα, που παρουσιάζονται παραπάνω είναι ότι για την εφαρμογή της μεθόδου πριν, είμαστε αναγκασμένοι να αγνοήσουμε μεγάλο κομμάτι της πληροφορίας. Για παράδειγμα για την επίλυση της (5.10) επιλέγεται στη θέση της μήτρας που παρουσιάζεται στην εξίσωση μια τετραγωνική υπομήτρα της μήτρας P, προκειμένου να γίνει η επίλυση της εξίσωσης με αντιστροφή της. Συνεπώς δεν λαμβάνονται υπόψη οι τιμές της εξίσωσης (5.1) που δίνει το i(t), που αντιστοιχούν σε χρόνους οι οποίοι υπερβαίνουν τις διαστάσεις της υπομήτρας.

Στην τροποποίηση αυτή γίνεται προσπάθεια για βελτίωση των παραπάνω. Η επίλυση της (5.10) για την εύρεση των συντελεστών του χαρακτηριστικού πολυωνύμου γίνεται ως εξής:

Η σάρωση στήλη-στήλη του πίνακα P δημιουργεί στο τέλος της έναν μη τετραγωνικό πίνακα (πίνακα με περισσότερες γραμμές από στήλες) που αποτελείται από στήλες – διανύσματα γραμμικά ανεξάρτητα. Σημαντικό είναι να τονίσουμε ότι στην τροποποίηση της μεθόδου χρησιμοποιούμε ως κριτήριο εξάρτησης των "έως τώρα επιλεχθεισών στηλών" τις singular values του αντίστοιχου πίνακα που σχηματίζεται από αυτές τις στήλες. Οι singular values πίνακα M ορίζονται ως σ_i= $\sqrt{\lambda_i}$, όπου λ_i , η i-oστή ιδιοτιμή του πίνακα M^TM. Το κριτήριο εξάρτησης είναι το εξής: Όταν 0<min(σ_i)<equivalent zero, τότε ο πίνακας αποτελείται από διανύσματα μεταξύ τους εξαρτημένα. Έτσι επιλέγονται οι πρώτες n "ανεξάρτητες" στήλες.

Κατά συνέπεια των ανωτέρω οι επόμενες στήλες του πίνακα είναι γραμμικός συνδυασμός των προηγουμένων. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η αμέσως επόμενη από τις ανεξάρτητες στήλες μεταφέρεται στο δεξί μέλος της εξίσωσης (5.10) και παίζει το ρόλο του διανύσματος που βρίσκεται στο δεξί μέλος της εξίσωσης (5.10). 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 τα 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!

62

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 διανύσματοςστήλης (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.

Ομως τώρα έχουμε στο αριστερό μέλος της εξίσωσης έναν πίνακα που δεν είναι τετραγωνικός. Το πρόβλημά μας ανάγεται τώρα στο εξής: Επίλυση συστήματος με περισσότερες εξισώσεις από αγνώστους, με τρόπο που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.5.



α) Εξίσωση



β) Αριστερή αντιστροφή



Σχήμα 5.5: Επίλυση συστήματος εξισώσεων με αριθμό εξισώσεων μικρότερο από τον αριθμό των αγνώστων μεταβλητών

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 Ν, του πίνακα Η που φαίνεται στο σχήμα 5.5. Άρα το διάνυσμα - "λύση" είναι στην πραγματικότητα ένα διάνυσμα που αν πολλαπλασιαστεί με τη μήτρα Η (σχήμα 5.5.α) δίνει ένα διάνυσμα που προσεγγίζει το z, 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 ε. Συνεπώς η λύση που επιλέγουμε σε αυτήν την περίπτωση είναι αυτή η οποία πολλαπλασιασμένη με την μήτρα Η από αριστερά (σχήμα 5.5.α) δίνει την προβολή του διανύσματος που βρίσκεται στο δεξί μέλος της εξίσωσης (σχήμα 5.5.α) στο επίπεδο ε, και άρα η λύση ελαχίστου μέτρου του σφάλματος. Εδώ η λύση αυτή είναι η u_o (σχήμα 5.5.γ) η οποία προκύπτει από τον από αριστερά πολλαπλασιασμό της εξίσωσης του σχήματος 5.5.α με την Η^{LM} (η οποία ορίζεται στο σχήμα 5.5.γ). Τότε αυτή μετατρέπεται στην εξίσωση του σχήματος 5.5.γ και δίνεται η "λύση" u_o .

Ομοίως επιλύεται και η εξίσωση (5.11). 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 5.5.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 (5.4).



Σχήμα 5.6: Ο αλγόριθμος της τροποποιημένης μεθόδου Prony

Όμοια με πριν θα γίνει συγκριτική γραφική παράσταση της g(t) (g(t)=y(t), για είσοδο δ(t)), και της θεωρητικής καμπύλης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Η θεωρητική καμπύλη που προκύπτει από την (5.1) σε κοινό γράφημα με την καμπύλη που προκύπτει από την εφαρμογή της τροποποιημένης μεθόδου Prony

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα έχουμε μια πολύ σημαντική βελτίωση της προσέγγισής μας. Το απόλυτο σφάλμα μειώνεται πάρα πολύ. Το μέγιστο απόλυτο σφάλμα είναι 5,9*10⁻³ A.

Τα πλεονεκτήματα της τροποποίησης μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα:

α) Στην τετραγωνική μήτρα της σχέσης (5.10), η αλλαγή του τρόπου να διατρέχουμε τον πίνακα, αφού εδώ παίρνουμε στήλη-στήλη, δίνει καλύτερη εικόνα της εξόδου στην μέθοδο, αφού από το πρώτο διάνυσμα ήδη φθάνουμε μέχρι την τιμή i((N-1)T).

β) Στη σχέση (5.11) αντίθετα με τον αρχικό έλεγχο που κάναμε στην πρώτη εφαρμογή της μεθόδου Prony, εδώ 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 (5.11), λαμβάνουμε το διάνυσμα της λύσης των A_i. γ) Η συνάρτηση μεταφοράς που ορίζεται στην σχέση (5.4), με τα A_i και s_i όπως αυτά εξάγονται μετά την τροποποίηση της μεθόδου, είναι κατά πολύ πιο κοντά στο επιθυμητό αποτέλεσμα και το σφάλμα μειώνεται σε ασήμαντες τιμές.

5.4 Το κύκλωμα

5.4.1 G(s) υπό την μορφή γινομένου συναρτήσεων μεταφοράς

Στην παράγραφο 5.3 βρέθηκε η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος το οποίο για είσοδο $u(t)=\delta(t)$, δηλαδή την κρουστική συνάρτηση, δίνει έξοδο την y(t)=i(t) όπως αυτή δίνεται στην εξίσωση (5.1).

Στο κύκλωμα που θα πραγματοποιήσουμε θα εφαρμόσουμε βηματική είσοδο, και δεδομένου ότι,

$$Y(s) = G(s)^* \mathcal{L}\{u(t)\} \text{ tote } Y(s) = \frac{1}{s}G(s)$$

Οπότε θα έχουμε για G(s) ότι G(s)=s*Y(s)

όπου για Y(s), θα ληφθεί η εξίσωση που εντοπίστηκε με την τροποποιημένη μέθοδο Prony αμέσως προηγούμενα, αφού αυτή δίνει την καλύτερη προσέγγιση. Η κρουστική απόκριση, δηλαδή, του συστήματος ή η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος όπως αυτή βρίσκεται όταν είναι γνωστή η έξοδος (σχέση (5.1)), για είσοδο την συνάρτηση Dirac.

Από το πρόγραμμα σε Matlab, το οποίο υλοποιεί αυτόν τον αλγόριθμο, λαμβάνουμε, για την συνάρτηση μεταφοράς, που βρέθηκε από την προσέγγιση της κρουστικής

απόκρισης
$$G_1(s) = \sum_{i=1}^{n_1} A_i \frac{1}{s - s_i}$$

 $A_1 = 48.4096$
 $A_2 = -63.2844$
 $A_3 = 7.3888 - 2.2784i$
 $A_4 = 7.3888 + 2.2784i$
 $A_5 = 0.0972$
 $S_1 = -0.0488 * 10^{10}$
 $S_2 = -0.1335 * 10^{10}$
 $S_3 = (-0.3403 + 0.1789i) * 10^{10}$
 $S_4 = (-0.3403 - 0.1789i) * 10^{10}$

Kαι για την
$$G_2(s) = \sum_{i=1}^{n_2} A_i \frac{1}{s - s_i}$$

$$A_1=19.5428$$
 $s_1=-0.2607*10^8$ $A_2=-12.15363$ $s_2=-0.837*10^8$ $A_3=-22.8566$ $s_3=-1.788*10^8$ $A_4=15.4674$ $s_4=-3.1183*10^8$

Σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε την G(s):

 $G(s) = G_1(s) + G_2(s)$ óπου:

$$G_{1}(s) = \frac{48.3895}{s + 0.04879 \cdot 10^{10}} - \frac{63.2844}{s + 0.13352 \cdot 10^{10}} + \frac{7.3867 - 2.2784i}{s + (0.3403 + 1.7892i) \cdot 10^{10}} + \frac{7.3888 + 2.2784i}{s + (0.3403 - 0.1789i) \cdot 10^{10}} + \frac{0.0972}{s + 2.006 \cdot 10^{10}}$$
(5.16)

και

$$G_2(s) = \frac{19.95428}{s + 0.02607 \cdot 10^{10}} - \frac{12.1536}{s + 0.837 \cdot 10^{10}} - \frac{22.8566}{s + 1.788 \cdot 10^{10}} + \frac{15.4674}{s + 3.1183 \cdot 10^{10}}$$
(5.17)

Εδώ όμως με την χρησιμοποίηση βηματικής εισόδου θα έχουμε:

$$G(s)=G_1(s)+G_2(s) \mu \varepsilon$$

$$G_{1}(s) = s \cdot \left\{ \frac{48.3895}{s + 0.04879 \cdot 10^{10}} - \frac{63.2844}{s + 0.13352 \cdot 10^{10}} + \frac{7.3867 - 2.2784i}{s + (0.3403 + 1.7892i) \cdot 10^{10}} + \frac{7.3888 + 2.2784i}{s + (0.3403 - 0.1789i) \cdot 10^{10}} + \frac{0.0972}{s + 2.006 \cdot 10^{10}} \right\}$$
(5.18)

και

$$G_2(s) = s \cdot \{ \frac{19.95428}{s + 0.02607 \cdot 10^{10}} - \frac{12.1536}{s + 0.837 \cdot 10^{10}} - \frac{22.8566}{s + 1.788 \cdot 10^{10}} + \frac{15.4674}{s + 3.1183 \cdot 10^{10}} \}$$
(5.19)

Χρησιμοποιώντας το Mathematica η G(s) γράφεται σαν γινόμενο κλασμάτων στη μορφή:

$$G(s) = \frac{s}{s+2.607 \cdot 10^7} \frac{s-5.65 \cdot 10^{11}}{s+0.2006 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{s+1.1304 \cdot 10^8}{s+8.37 \cdot 10^7} \cdot \frac{s+3.4975 \cdot 10^8}{s+1.788 \cdot 10^8} \cdot \frac{s+6.4021 \cdot 10^9}{s+3.1183 \cdot 10^8} \cdot \frac{s+1.3686 \cdot 10^{10}}{s+3.1183 \cdot 10^8} \cdot \frac{s+2.6621 \cdot 10^{11}}{s+1.335 \cdot 10^9} \cdot \frac{s^2+15.191 \cdot 10^7 \cdot s+0.032833 \cdot 10^{18}}{s^2+6.806 \cdot 10^9 s+14.7809 \cdot 10^{18}} (5.20)$$

Δηλαδή έχει γραφτεί σαν γινόμενο των

$$g_1(s) = \frac{s}{s + 2.607 \cdot 10^7}$$
(5.21)

$$g_{2}(s) = \frac{s - 5.65 \cdot 10^{11}}{s + 0.2006 \cdot 10^{11}}$$
(5.22)

$$g_3(s) = \frac{s + 1.1304 \cdot 10^8}{s + 8.37 \cdot 10^7}$$
(5.23)

$$g_4(s) = \frac{s + 3.4975 \cdot 10^8}{s + 1.788 \cdot 10^8}$$
(5.24)

$$g_5(s) = \frac{s + 6.4021 \cdot 10^9}{s + 3.1183 \cdot 10^8}$$
(5.25)

$$g_6(s) = \frac{s + 1.3686 \cdot 10^{10}}{s + 4.88 \cdot 10^8}$$
(5.26)

$$g_7(s) = \frac{s + 2.6621 \cdot 10^{11}}{s + 1.335 \cdot 10^9}$$
(5.27)

$$g_8(s) = \frac{s^2 + 15.191 \cdot 10^7 \cdot s + 0.032833 \cdot 10^{18}}{s^2 + 6.806 \cdot 10^9 s + 14.7809 \cdot 10^{18}}$$
(5.28)

5.4.2.Υλοποίηση

5.4.2.1 Υλοποίηση των βαθμίδων του κυκλώματος

Η G(s) θα μοντελοποιηθεί σαν αλυσωτή σύνδεση των κυκλωμάτων που συνιστούν οι συναρτήσεις μεταφοράς $g_1(s)$ έως $g_8(s)$ [15, 16].

Η μορφή που έχουν οι $g_1(s)$ έως $g_7(s)$ εύκολα παραπέμπει στην υλοποίηση τους.

Ένα κύκλωμα όπως το παρακάτω (σχήμα 5.8), θα έχει για συνάρτηση μεταφοράς την

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{Z_2}{Z_1},$$
(5.29)

$$\delta \pi \text{ov } Z_i = \frac{R_i \frac{1}{sC_i}}{R_i + \frac{1}{sC_i}} = \frac{R_i}{R_i sC_i + 1} = \frac{\frac{1}{C_i}}{s + \frac{1}{R_i C_i}} = \frac{1}{C_i (s + \frac{1}{R_i C_i})}, \quad \text{ápa } \eta \text{ συνάρτηση μεταφοράς}$$

$$\gamma \text{(vertal } \frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{C_1 (s + \frac{1}{R_1 C_1})}{C_2 (s + \frac{1}{R_2 C_2})}.$$
(5.30)



Σχήμα 5.8: Τοπολογία αναστρέφουσας συνδεσμολογίας αρνητικής ανάδρασης

Άρα η τελευταία παίρνει τη μορφή που έχουν οι συναρτήσεις g₁(s) έως g₇(s), οι οποίες είναι της μορφής $\frac{a+s}{b+s}$, αν είναι έστω $C_1 = C_2 = C$, και αν έπειτα εξισώσουμε τα $\frac{1}{R_1C} = a$ και, $\frac{1}{R_2C} = b$.

Άρα οι συναρτήσεις $g_1(s)$ έως $g_7(s)$ γράφονται στη μορφή

$$g_{i}(s) = \frac{\left(s + \frac{1}{R_{1}C}\right)}{\left(s + \frac{1}{R_{2}C}\right)}$$
(5.31)

Για την g₈(s) η οποία είναι της μορφής $K \frac{ms^2 + cs + d}{s^2 + as + b}$ θα προσπαθήσουμε μια υλοποίηση χρησιμοποιώντας το κύκλωμα του Friend το οποίο έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9: Το κύκλωμα του Friend που πραγματοποιεί τη γενική συνάρτηση μεταφοράς δεύτερης τάζης

Για να βρεθούν οι τιμές του κυκλώματος του σχήματος 5.9 είναι απαραίτητο να γίνει επίλυσή του.

Επιλύνοντας το κύκλωμα στους κόμβους 1,2,3 και 4 προκύπτει το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων σε μητρική μορφή:

$$\begin{bmatrix} G_4 + G_5 + s(C_1 + C_2) & -sC_1 & -sC_2 \\ -sC_1 & G_2 + G_6 + G_7 + sC_1 & -G_2 \\ 0 & G_C + G_D + G_B & -G_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_4 \\ G_6 \\ G_C \end{bmatrix} \cdot V_{in}$$
(5.32)

Επιλύνοντας ως προς V_0 προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος του σχήματος 5.9 η οποία είναι:

$$g_8(s) = \frac{s^2 + k_1 s + k_2}{s^2 + k_3 s + k_4}$$
(5.33)

όπου:

$$k_{1} = \frac{(C_{1} + C_{2})[G_{C}(G_{2} + G_{7}) - G_{6}G_{B}] + C_{I}(G_{C}G_{S} - G_{B}G_{4})}{C_{I}C_{2}G_{C}}$$
(5.34)

$$k_{2} = \frac{(G_{4} + G_{5})[G_{C}(G_{2} + G_{7}) - G_{6}G_{B}]}{C_{I}C_{2}G_{C}}$$
(5.35)

$$k_{3} = \frac{(C_{1} + C_{2})[G_{2}G_{C} - G_{B}(G_{6} + G_{7})] - C_{1}G_{B}(G_{4} + G_{5})}{C_{1}C_{2}G_{C}}$$
(5.36)

$$k_4 = \frac{(G_4 + G_5)[G_2G_C - G_B(G_6 + G_7)]}{C_1C_2G_C}$$
(5.37)

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι είναι $G_7 < 0$. Κάτι τέτοιο υλοποιείται με την παράλληλη τοποθέτηση τελεστικού ενισχυτή με κέρδος 2 όπως στο σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10: Το κύκλωμα του Friend με την τροποποίηση, για «αρνητική» R₇.

Επομένως οι συντελεστές k_1 , k_2 , k_3 και k_4 θα πρέπει να ισούνται με τους αντίστοιχους συντελεστές της σχέσης (5.28). Έτσι προκύπτει το ακόλουθο σύστημα 4 εξισώσεων με 9 αγνώστους:

$$\begin{cases} \frac{(C_{1}+C_{2})[G_{C}(G_{2}+G_{7})-G_{6}G_{B}]+C_{I}(G_{C}G_{S}-G_{B}G_{4})}{C_{I}C_{2}G_{C}} = 0.15191 \cdot 10^{9} \\ \frac{(G_{4}+G_{5})[G_{C}(G_{2}+G_{7})-G_{6}G_{B}]}{C_{I}C_{2}G_{C}} = 6.806 \cdot 10^{9} \\ \frac{(C_{1}+C_{2})[G_{2}G_{C}-G_{B}(G_{6}+G_{7})]-C_{I}G_{B}(G_{4}+G_{5})}{C_{I}C_{2}G_{C}} = 0.032833 \cdot 10^{18} \\ \frac{(G_{4}+G_{5})[G_{2}G_{C}-G_{B}(G_{6}+G_{7})]}{C_{I}C_{2}G_{C}} = 14.7809 \cdot 10^{18} \end{cases}$$

$$(5.38)$$

Προκειμένου να επιλυθεί το παραπάνω σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε το Mathematica. Το Mathematica δεν λειτουργούσε αν θεωρούσαμε 4 αγνώστους και 9 παραμέτρους, γεγονός που υποδήλωνε ότι υπήρχαν ισοδύναμες εξισώσεις ανάμεσα από τις 4 αυτές όπως φαίνονται στην (5.38). Θεωρώντας ως αγνώστους τις G_2 , G_4 , G_7 , ενώ τις υπόλοιπες μεταβλητές σαν παραμέτρους με τιμές $C_1=C_2=1$ nF, $G_B=G_C=G_5=G_6=1$ Ω^{-1} προκύπτουν οι σχέσεις :

$$G_2 = \frac{(0.0022213G_B + G_C)G_7 + 0.9978G_BG_6}{0.9978G_C}$$
(5.39)

$$G_{2} = \frac{(C_{1} + C_{2})(0.0022G_{C}G_{7} + 0.0022213G_{B}G_{7}) + (0.9978G_{5} - 0.1516 \cdot 10^{9}C_{2})C_{1}G_{C}}{0.9978C_{1}G_{B}}$$
(5.40)

$$G_7 = \frac{C_1(G_B + G_C)G_5 + 6.6541 \cdot 10^9 C_1 C_2 G_C}{(C_1 + C_2)(G_B + G_C)}$$
(5.41)

Από προκύπτει τις σχέσεις (5.39), (5.40), (5.41) ότι: G₂=3,1731 Ω^{-1} , G₄=0,8672 Ω^{-1} και G₇=2,1635 Ω^{-1} Επομένως:

 R_2 =0,3152 Ω, R_4 =1,1531 Ω και R_7 =0,4622 Ω

Στο σημείο αυτό έχει βρεθεί η πραγματοποίηση των συναρτήσεων g₁(s) έως g₈(s). Κάθε ένα από αυτά τα κυκλώματα εξετάστηκε υπό ac-ανάλυση στο PSpice, καθώς και λάβαμε τα γραφήματα των αντίστοιχων συναρτήσεων μεταφοράς στο πεδίο της συχνότητας. Συγκρίναμε αυτά τα δύο γραφήματα για κάθε μία από τις 8 βαθμίδες του κυκλώματος, σε κοινό γράφημα, και αν τα τελευταία συμπίπτουν ικανοποιητικά επιβεβαιώνεται η ορθότητα των πραγματοποιήσεων. Αμέσως παρατίθεται ένα παράδειγμα αυτής της διαδικασίας. Π.χ. για την πέμπτη βαθμίδα ακολουθήθηκε η κάτωθι διαδικασία: α) Γράφημα της συνάρτησης μεταφοράς στο πεδίο της συχνότητας



Σχήμα 5.11: Γράφημα της συνάρτησης μεταφοράς στο πεδίο της συχνότητας

β) AC-analysis της υλοποίησης της βαθμίδας στο PSpice



Σχήμα 5.12: Έξοδος του κυκλώματος όπως φαίνεται στην προσομοίωση στο PSpice, για την ac-analysis

γ) Κοινό γράφημα των δύο ανωτέρω καμπυλών



Σχήμα 5.13: Κοινό γράφημα της συνάρτησης της συνάρτησης μεταφοράς και της εξόδου του αντίστοιχου κυκλώματος όπως αυτό υλοποιήθηκε στην προσομοίωση του PSpice, στο πεδίο της συχνότητας

Επίσης κάθε ένα από αυτά τα κυκλώματα εξετάστηκε και στο πεδίο του χρόνου στο PSpice, καθώς και λάβαμε τα γραφήματα των αντίστοιχων συναρτήσεων μεταφοράς στο πεδίο του χρόνου. Πάλι, όμοια με πριν, συγκρίναμε αυτά τα δύο γραφήματα για κάθε μία από τις 8 βαθμίδες του κυκλώματος, σε κοινό γράφημα, και αν τα τελευταία συμπίπτουν ικανοποιητικά επιβεβαιώνεται η ορθότητα των πραγματοποιήσεων και στο πεδίο του χρόνου. Και εδώ δίνεται ένα παράδειγμα αυτής της διαδικασίας. Π.χ. για την πέμπτη βαθμίδα ακολουθήθηκε η κάτωθι διαδικασία:

α) Γράφημα της συνάρτησης μεταφοράς στο πεδίο του χρόνου



Σχήμα 5.14: Γράφημα της συνάρτησης μεταφοράς που χαρακτηρίζει την 5^η βαθμίδα στο πεδίο του χρόνου

β) Απόκριση στο χρόνο της υλοποίησης της βαθμίδας στο PSpice



Σχήμα 5.15: Απόκριση της 5^{ης} βαθμίδας στο για βηματική είσοδο, στο πεδίο του χρόνου

γ) Κοινό γράφημα των δύο ανωτέρω καμπυλών



Σχήμα 5.16: Κοινό γράφημα της συνάρτησης της συνάρτησης μεταφοράς και της εξόδου του αντίστοιχου κυκλώματος όπως αυτό υλοποιήθηκε στην προσομοίωση του PSpice, στο πεδίο του χρόνου

5.4.2.2 Υλοποίηση του συνολικού κυκλώματος

Η αλυσωτή σύνδεση των παραπάνω κυκλωμάτων μας δίνει το ζητούμενο κύκλωμα. Το κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 5.17.



Σχήμα 5.17: Το κύκλωμα για την παραγωγή της ζητούμενης κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης υλοποιημένο στο PSpice.

Το κύκλωμα δίνει έξοδο, για είσοδο βηματική συνάρτηση, όπως έδειξε προσομοίωση στο Spice, την ακόλουθη καμπύλη του σχήματος 5.18.



Σχήμα 5.18: Έξοδος του κυκλώματος για βηματική είσοδο-Προσομοίωση στο PSpice

Με την λήψη των ζευγών ρεύματος-χρόνου που δίνει το κύκλωμα σύμφωνα με την προσομοίωση στο Spice, έχουμε την δυνατότητα να παρατηρήσουμε σε κοινό γράφημα την θεωρητική καμπύλη, και αυτήν που προκύπτει από την μέθοδο Prony, και να ελέγξουμε το κατά πόσο ικανοποιητική είναι η σύμπτωση των δύο καμπύλων. Το σχήμα 5.19, που παρατίθεται πιο κάτω, δείχνει τις δύο αυτές καμπύλες.



Σχήμα 5.19: Κοινό γράφημα της θεωρητικής εξίσωσης και της εξόδου του κυκλώματος

5.5 Συμπεράσματα

Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε προσπάθεια να βρεθεί η συνάρτηση μεταφοράς κυκλώματος το οποίο υπό δεδομένη είσοδο (εδώ για είσοδο την βηματική συνάρτηση) παράγει ως έξοδο την γραφική παράσταση που φαίνεται στο σχήμα 5.1. Για της ανάγκες αυτής προσπάθειας αναπτύχθηκε μέθοδος, που αποτελεί μια τροποποίηση της μεθόδου Prony. Για την εξαγόμενη από αυτήν την μέθοδο συνάρτηση μεταφοράς, μπορεί να κατασκευαστεί κύκλωμα το οποίο χαρακτηρίζει αυτή η συνάρτηση μεταφοράς.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια υλοποίηση αυτού του κυκλώματος με ιδανικά στοιχεία: αντιστάσεις, πυκνωτές, και τελεστικούς ενισχυτές. Το μειονέκτημα της είναι όμως ότι το Γινόμενο Κέρδους-Εύρους Ζώνης (Gain Bandwidth Product - GBWP) των 8 βαθμίδων του κυκλώματος της παρούσας εφαρμογής είναι μεγαλύτερο το αντίστοιχο των τελεστικών ενισχυτών που υπάρχουν στο εμπόριο (με συνήθεις τιμές που φτάνουν περί τα 2 MHz) και άρα δεν καλύπτουν τις απαιτήσεις του προβλήματός μας. Παρόλα αυτά έχουν κατασκευαστεί και είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο τελεστικοί ενισχυτές με GBWP της τάξεως των 1,5 GHz [17]. Επίσης, πρόσφατη ερευνητική εργασία [18] έδειξε τη δυνατότητα κατασκευής τελεστικών ενισχυτών με GBWP που φτάνει τα 37GHz.

Κεφάλαιο 6

Η επόμενη μέρα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με την επαλήθευση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν στο κέντρο κατακόρυφης γειωμένης μεταλλικής πλάκας. Εκτός των τεσσάρων παραμέτρων, που ορίζει το υπάρχον Πρότυπο ότι πρέπει να ελεγχθούν (t_r , I_{max} , I_{30} , I_{60}) ελέγχθηκε και μια πέμπτη παράμετρος η οποία ενδεχομένως να συμπεριληφθεί στο επερχόμενο αναθεωρημένο Πρότυπο. Η παράμετρος αυτή δείχνει αν η κυματομορφή είναι εντός του ±35%i(t), όπου i(t) είναι η εξίσωση του Heidler [14] για το κεραυνικό ρεύμα.

Αφού διαπιστώθηκε η ασυμφωνία μεταξύ της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και του κυκλώματος της γεννήτριας, όπως αυτά ορίζονται στο υπάρχον Πρότυπο [3] έγινε εφαρμογή της μεθόδου Prony από τη σύνθεση δικτύων, σε τροποποιημένη μορφή, ώστε να βρεθεί η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος. Η μέθοδος Prony, η οποία και τροποποιήθηκε κατάλληλα, υπολόγισε τη συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος που παράγει το ρεύμα μορφής ίδιας με αυτό που περιγράφεται στην εξίσωση του Heidler. Κατόπιν, η συνάρτηση αυτή υλοποιήθηκε κυκλωματικά στο πρόγραμμα Pspice, όπου και βρέθηκε ότι το σχεδιασθέν κύκλωμα δίνει ρεύμα εκφόρτισης πολύ κοντά σε αυτό της εξίσωσης του Heidler.

Η παρούσα διπλωματική εργασία κατέδειξε την χρησιμότητα της μεθόδου Prony στην εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς του κυκλώματος για δεδομένη είσοδο, που οδηγεί στο σχεδιασμό του κυκλώματος, ενώ η τροποποίησή της την κατέστησε πιο αποτελεσματική σε ανάλογες εφαρμογές. Στο μέλλον θα πρέπει να μελετηθεί η κατασκευή κυκλώματος γεννήτριας 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 δεν είναι συνήθης 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 [19], η οποία φαίνεται να υλοποιεί αποκλειστικά και μόνο με παθητικά στοιχεία κύκλωμα το οποίο χαρακτηρίζεται από οποιαδήποτε συνάρτηση μεταφοράς.



Α.1 Κώδικας για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας αξιολόγησης των παραμέτρων των μετρήσεων

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που πραγματοποιήθηκε σε γλώσσα Matlab, ο οποίος λαμβάνοντας μια σειρά μετρήσεων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι οποίες έγιναν υπό τάση φόρτισης $\pm 2kV$ ή $\pm 4kV$, υπολογίζει τις κρίσιμες παραμέτρους t_r , I_{max} , I_{30} , I_{60} και τις αξιολογεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου, καθώς και εξετάζεται αν η κυματομορφή βρίσκεται στα όρια i(t) $\pm 35\%$, (i(t) η θεωρητική εξίσωση 2.1).

A.1.1 Κώδικας αξιολόγησης των παραμέτρων των κυματομορφών υπό τάση φόρτισης ±2kV

close all; clear all; str00=['***********************************
disp(str00); disp(str000);
load temp.txt;
%time (ns)=time * 10^9 time=temp(:,1); timens=time*10^9;
%logw tou eksastheniti amplitude=abs(temp(:,2)); amplitude10=amplitude*10;
% %x=[timens amplitude10]; %save 'I.txt' x -ascii; %
%kanw grafiki parastasi twn (t,1)

```
plot (timens, amplitude10, 'r'); hold on;
 %fplot('IFUN(t)', [0 300], 'b-.'); hold on;
 fplot('0.5*1.35*IFUN(t)', [0 300], 'k--'); hold on;
 fplot('0.5*0.65*IFUN(t)', [0 300], 'k-.');
 xlabel ('time (ns)');
 ylabel ('I (A)');
 legend('absolute value of experimental data','135% i(t)','65% i(t)');
 grid
 zoom on
%Ip to megisto reuma-----
Ip=max(amplitude10);
%tsekarw simbatotita me prodiagrafes------
if (Ip>=6.75) & (Ip<=8.25)
 testIp=1;
else
 testIp=0;
end
°/_____
%Ipdiv10 = 10%Ip-----
Ipdiv10=Ip/10;
\%Ip09 = 90%Ip-----
Ip09=Ip*0.9;
%tsekarw an mou exoun dwsei swsta ta dedomena (t,I)------
n1=length(amplitude10);
n2=length(timens);
if (n1 \sim = n2)
 str1=['Anantistixia dedomenwn'];
 disp(str1);
else
 n=n1;
 %t<->I10%, time30ns, time60ns-----
 %briskw to t10 pou antistixei sto t<->I10%, gia tin akribeia to amesws
 %megalytero
 %----Eyresi toy deikti k pou antistixei sto Imax-----
  for k=1:n
             if amplitude10(k)==max(amplitude10)
                    kImax=k;
             end
       end
 °⁄_____
 k=1;
 while (amplitude10(k)<Ipdiv10)
     k = k+1;
 end
 poso=abs(amplitude10(k)-Ipdiv10);
 %
 KK=k+1;
```

```
for k=KK:kImax
   if abs(amplitude10(k)-Ipdiv10)<poso
     poso=abs(amplitude10(k)-Ipdiv10);
      k = k+1;
    end
 end
 if amplitude10(k)>Ipdiv10
 k10plus=k;
 k10minus=k-1;
 end
 if amplitude10(k)<Ipdiv10
 k10plus=k+1;
 k10minus=k;
        end
 %twra kanw grammiki paremboli gia na brw ton xrono t pou antistixei sto
  %I10%
  %i eytheia orizetai apta simeia (timens(k10minus), amplitude10 (k10minus))
 % kai (timens(k10plus), amplitude10 (k10plus)), kai to simeio pou me
 % endiaferei einai ( time10amp, Ipdiv10 ) sto opoio psaxnw to time10amp ara exw:
 klisi1=(amplitude10(k10plus) - amplitude10(k10minus)) / (timens(k10plus) - timens(k10minus));
 time10amp=timens(k10minus) + (Ipdiv10-amplitude10(k10minus))/klisi1;
 if time10amp<0
    time10amp=0;
  end
 time30ns = time10amp + 30;
 time60ns = time10amp + 60;
  %-----
 % Eyresi toy I 30ns-----
 i=1;
 while (timens(i)<time30ns)
     i=i+1;
  end
  i 30nsplus=i;
  i 30nsminus=i-1;
 %twra kanw grammiki paremboli antistrofa gia na brw to reuma pou antistixei
 %sta 30 ns meta to I10%
 %i eytheia orizetai apta simeia ( (timens(i 30nsminus), amplitude10 (i 30nsminus))
 % kai (timens(i_30nsplus) , amplitude10 (i_30nsplus)) , kai to simeio pou me
 % endiaferei einai ( time30ns , amplitude10 30ns ) sto opoio psaxnw to amplitude10 30ns ara exw:
 klisi2=(amplitude10(i 30nsplus) - amplitude10(i 30nsminus)) / (timens(i 30nsplus) -
timens(i 30nsminus));
 amplitude10 30ns= klisi2 * (time30ns-timens(i 30nsminus))+ amplitude10(i 30nsminus);
 %tsekarw simbatotita me prodiagrafes-----
 if (amplitude10 30ns<=5.2) & (amplitude10 30ns>=2.8)
      testI30ns=1;
 else
      testI30ns=0;
```

```
end
 %------
 % Eyresi toy I 60ns-----
 i=1;
 while (timens(i)<time60ns)
    i=i+1;
 end
 i 60nsplus=i;
 i 60nsminus=i-1;
 %twra kanw grammiki paremboli gia na brw to reuma pou antistixei
 %sta 60 ns meta to I10%
 %i eytheia orizetai apta simeia ( (timens(i_60nsminus) , amplitude10 (i_60nsminus))
 % kai (timens(i 60nsplus), amplitude10 (i 60nsplus)), kai to simeio pou me
 % endiaferei einai ( time60ns , amplitude10_60ns ) sto opoio psaxnw to amplitude10_60ns ara exw:
 klisi3=(amplitude10(i 60nsplus) - amplitude10(i 60nsminus)) / (timens(i 60nsplus) -
timens(i 60nsminus));
 amplitude10 60ns= klisi3 * (time60ns-timens(i 60nsminus))+ amplitude10(i 60nsminus);
 %tsekarw simbatotita me prodiagrafes-----
 if (amplitude10 60ns \le 2.6) & (amplitude10 60ns \ge 1.4)
     testI60ns=1;
   else
     testI60ns=0;
 end
     _____
  %---
 %Euresi toy Tr (xronos anodou)=xronos apo to 10% sto 90 % toy IMAX=Ip -----
 %Prwta prepei na brw to t<->I90% me ton idio tropo pou brika to t<->I10%
 %
 k1=1;
 while (amplitude10(k1)<Ip09)
     k1 = k1 + 1;
 end
 poso1=abs(amplitude10(k1)-Ip09);
 KK1=k+1;
 for k=KK1:kImax
   if abs(amplitude10(k1)-Ip09)<poso1
    poso1=abs(amplitude10(k1)-Ip09);
     k1 = k1 + 1;
   end
 end
 if amplitude10(k1)>Ip09
 k90plus=k1:
 k90minus=k1-1;
```

```
end
```

if amplitude10(k1)<Ip09

```
k90plus=k1+1;
k90minus=k1;
end
%twra kanw grammiki paremboli gia na brw ton xrono t pou antistixei sto
%I90%
%i eytheia orizetai apta simeia (timens(k90minus) , amplitude10 (k90minus))
% kai (timens(k90plus) , amplitude10 (k90plus)) , kai to simeio pou me
% endiaferei einai ( time90amp , Ip09 ) sto opoio psaxnw to time90amp ara exw:
klisi4=(amplitude10(k90plus) - amplitude10(k90minus)) / (timens(k90plus) - timens(k90minus));
time90amp=timens(k90minus) + ( Ip09 - amplitude10(k90minus))/klisi4;
%sinepws o xronos anodou einai:
rise_time= time90amp - time10amp;
```

```
%tsekarw simbatotita me prodiagrafes-----
if (rise_time>=0.7) & (rise_time<=1)
    testRtime=1;
else
    testRtime=0;
end
%------</pre>
```

```
str6=['==> To reuma korifis Ip='];
disp(str6);
disp(Ip);
str4=['==> O xronos anodou pou apaiteitai wste to reuma na ftasei apo to 10% sto 90% tis max
timis tou einai tr='];
str4_1=['ns'];
disp(str4);
disp(rise_time);disp(str4_1);
```

```
str2=['==> H timi tou reumatos 30ns afou to reuma exei labei to 10% tis max timis tou einai I30='];
disp(str2);
disp(amplitude10_30ns);
str3=['==> H timi tou reumatos 60ns afou to reuma exei labei to 10% tis max timis tou einai I60='];
disp(str3);
disp(amplitude10_60ns);
```

j=j+1; test=1;

else

```
test=0;
        end
end
if (timens(j)<60) & (test==0)
    testWs=0;
end
if (timens(j)>=60) & (test==1)
          testWs=1;
end
%-----
if ((testIp==1) & (testI60ns==1) & (testRtime==1)& (testI30ns==1) & (testWs==1))
   str8=['i kimatomorfi einai ENTOS prodiagrafwn!!'];
         disp(str8);
else
   str70=['*ATTENTION: i kimatomorfi den einai entos prodiagrafwn!!, dioti'];
   disp(str70);
   if (testIp==0)
   str71=[' -> To Imax den einai entos oriwn!'];
   disp(str71);
   end
   if (testRtime==0)
   str72=[' -> O xronos anodou den einai entos oriwn!'];
  disp(str72);
   end
   if (testI30ns==0)
   str73=[' -> To I,30 ns den einai entos oriwn!'];
   disp(str73);
   end
   if (testI60ns==0)
   str74=[' -> To I,60 ns den einai entos oriwn!'];
   disp(str74);
   end
   if (testWs==0)
   str73=[' -> Den simmorfwnontai oi times metaxi 2 kai 60 ns!'];
   disp(str73);
   end
end
```

```
end
```

Α.1.2 Κώδικας αξιολόγησης των παραμέτρων των κυματομορφών υπό τάση φόρτισης ±4kV

close all; clear all; disp(str00); disp(str000); load temp.txt; %time (ns)=time * 10^9-----time=temp(:,1); timens=time*10^9; %logw tou eksastheniti-----amplitude=abs(temp(:,2)); amplitude10=amplitude*10; %-----%x=[timens amplitude10]; %save 'I.txt' x -ascii; % %kanw grafiki parastasi twn (t,I)----plot (timens, amplitude10, 'r'); hold on; %fplot('IFUN(t)', [0 300], 'b-.'); hold on; fplot('1.35*IFUN(t)', [0 300], 'k--'); hold on; fplot('0.65*IFUN(t)', [0 300], 'k-.'); xlabel ('time (ns)'); ylabel ('I (A)'); legend('absolute value of experimental data','135% i(t)','65% i(t)'); grid zoom on %Ip to megisto reuma-----Ip=max(amplitude10); %tsekarw simbatotita me prodiagrafes-----if (Ip>=13.5) & (Ip<=16.5) testIp=1; else testIp=0; end %-%Ipdiv10 = 10%Ip-----Ipdiv10=Ip/10; %Ip09 = 90%Ip-----Ip09=Ip*0.9;

%tsekarw an mou exoun dwsei swsta ta dedomena (t,I)-----n1=length(amplitude10); n2=length(timens); if (n1~=n2) str1=['Anantistixia dedomenwn'];

```
disp(str1);
else
 n=n1;
 %t<->I10%, time30ns, time60ns------
 %briskw to t10 pou antistixei sto t<->I10%, gia tin akribeia to amesws
 %megalytero
 %----Eyresi toy deikti k pou antistixei sto Imax-----
  for k=1:n
               if amplitude10(k)==max(amplitude10)
                       kImax=k;
               end
        end
  %----
            _____
 k=1:
 while (amplitude10(k)<Ipdiv10)
      k = k+1;
  end
 poso=abs(amplitude10(k)-Ipdiv10);
 %
 KK=k+1;
 for k=KK:kImax
   if abs(amplitude10(k)-Ipdiv10)<poso
     poso=abs(amplitude10(k)-Ipdiv10);
      k = k+1;
    end
 end
 if amplitude10(k)>Ipdiv10
 k10plus=k;
 k10minus=k-1;
 end
 if amplitude10(k)<Ipdiv10
 k10plus=k+1;
 k10minus=k;
        end
 %twra kanw grammiki paremboli gia na brw ton xrono t pou antistixei sto
 %I10%
 %i eytheia orizetai apta simeia (timens(k10minus), amplitude10 (k10minus))
 % kai (timens(k10plus), amplitude10 (k10plus)), kai to simeio pou me
 % endiaferei einai ( time10amp , Ipdiv10 ) sto opoio psaxnw to time10amp ara exw:
 klisi1=(amplitude10(k10plus) - amplitude10(k10minus)) / (timens(k10plus) - timens(k10minus));
 time10amp=timens(k10minus) + ( Ipdiv10-amplitude10(k10minus))/klisi1;
 if time10amp<0
    time10amp=0;
  end
 time30ns = time10amp + 30;
 time60ns = time10amp + 60;
```

9/₀------

```
89
```

```
% Evresi toy I 30ns------
 i=1;
 while (timens(i)<time30ns)
     i=i+1;
 end
 i 30nsplus=i;
 i 30nsminus=i-1;
 %twra kanw grammiki paremboli antistrofa gia na brw to reuma pou antistixei
 %sta 30 ns meta to I10%
 %i eytheia orizetai apta simeia ( (timens(i 30nsminus), amplitude10 (i 30nsminus))
 % kai (timens(i 30nsplus), amplitude10 (i 30nsplus)), kai to simeio pou me
 % endiaferei einai ( time30ns , amplitude10 30ns ) sto opoio psaxnw to amplitude10 30ns ara exw:
 klisi2=(amplitude10(i_30nsplus) - amplitude10(i_30nsminus)) / (timens(i_30nsplus) -
timens(i 30nsminus));
 amplitude10 30ns= klisi2 * (time30ns-timens(i 30nsminus))+ amplitude10(i 30nsminus);
 %tsekarw simbatotita me prodiagrafes-----
 if (amplitude10 30ns<=10.4) & (amplitude10 30ns>=5.6)
     testI30ns=1;
 else
     testI30ns=0;
 end
  %_-----
 % Evresi tov I 60ns-----
 i=1;
  while (timens(i)<time60ns)
     i=i+1;
 end
 i 60nsplus=i;
 i 60nsminus=i-1;
 %twra kanw grammiki paremboli gia na brw to reuma pou antistixei
  %sta 60 ns meta to I10%
 %i eytheia orizetai apta simeia ( (timens(i 60nsminus) , amplitude10 (i 60nsminus))
 % kai (timens(i 60nsplus), amplitude10 (i 60nsplus)), kai to simeio pou me
 % endiaferei einai ( time60ns, amplitude10 60ns ) sto opoio psaxnw to amplitude10 60ns ara exw:
 klisi3=(amplitude10(i 60nsplus) - amplitude10(i 60nsminus)) / (timens(i 60nsplus) -
timens(i 60nsminus));
 amplitude10_60ns= klisi3 * (time60ns-timens(i_60nsminus))+ amplitude10(i_60nsminus);
 %tsekarw simbatotita me prodiagrafes------
 if (amplitude10 60ns<=5.2) & (amplitude10 60ns>=2.8)
     testI60ns=1;
   else
     testI60ns=0;
 end
      _____
```

%Euresi toy Tr (xronos anodou)=xronos apo to 10% sto 90 % toy IMAX=Ip -----

```
%Prwta prepei na brw to t<->I90% me ton idio tropo pou brika to t<->I10%
0/0-----
k1=1;
while (amplitude10(k1)<Ip09)
    k1 = k1 + 1;
end
poso1=abs(amplitude10(k1)-Ip09);
%
KK1=k+1;
for k=KK1:kImax
  if abs(amplitude10(k1)-Ip09)<poso1
   poso1=abs(amplitude10(k1)-Ip09);
    k1 = k1 + 1;
  end
end
if amplitude10(k1)>Ip09
k90plus=k1;
k90minus=k1-1;
end
if amplitude10(k1)<Ip09
k90plus=k1+1;
k90minus=k1;
      end
%twra kanw grammiki paremboli gia na brw ton xrono t pou antistixei sto
%I90%
%i eytheia orizetai apta simeia (timens(k90minus), amplitude10 (k90minus))
% kai (timens(k90plus), amplitude10 (k90plus)), kai to simeio pou me
% endiaferei einai ( time90amp , Ip09 ) sto opoio psaxnw to time90amp ara exw:
klisi4=(amplitude10(k90plus) - amplitude10(k90minus)) / (timens(k90plus) - timens(k90minus));
time90amp=timens(k90minus) + ( Ip09 - amplitude10(k90minus))/klisi4;
%sinepws o xronos anodou einai:
rise time=time90amp - time10amp;
%tsekarw simbatotita me prodiagrafes-----
```

str6=['==> To reuma korifis Ip=']; disp(str6); disp(Ip); str4=['==> O xronos anodou pou apaiteitai wste to reuma na ftasei apo to 10% sto 90% tis max timis tou einai tr='];

```
str4_1=['ns'];
disp(str4);
disp(rise time);disp(str4 1);
```

```
str2=['==> H timi tou reumatos 30ns afou to reuma exei labei to 10% tis max timis tou einai I30='];
disp(str2);
disp(amplitude10_30ns);
str3=['==> H timi tou reumatos 60ns afou to reuma exei labei to 10% tis max timis tou einai I60='];
disp(str3);
disp(amplitude10_60ns);
```

```
%Tsekarw tin kimatomorfi Ws gia simbatotita me prodiagrafes apo 2 ws 60ns------
j=1;
while (timens(j)<2)
        j=j+1;
end;
test=1;
while (timens(j) < 60) \& (test == 1)
 t1=timens(j);
        temp1=IFUN(t1)*1.35;
        temp2=IFUN(t1)*0.65;
        if (amplitude10(j) \ge temp2) \& (amplitude10(j) \le temp1)
               j=j+1;
               test=1;
        else
       test=0;
        end
end
if (\text{timens}(i) < 60) & (\text{test}==0)
    testWs=0;
end
if (timens(j)>=60) & (test==1)
          testWs=1;
end
°/_____
if ((testIp==1) & (testI60ns==1) & (testRtime==1)& (testI30ns==1) & (testWs==1))
  str8=['i kimatomorfi einai ENTOS prodiagrafwn!!'];
         disp(str8);
else
  str70=['*ATTENTION: i kimatomorfi den einai entos prodiagrafwn!!, dioti'];
  disp(str70);
  if (testIp==0)
  str71=[' -> To Imax den einai entos oriwn!'];
  disp(str71);
```

```
end
```

```
if (testRtime==0)
str72=[' -> O xronos anodou den einai entos oriwn!'];
disp(str72);
end
```

```
if (testI30ns==0)
str73=[' -> To I,30 ns den einai entos oriwn!'];
disp(str73);
end
if (testI60ns==0)
str74=[' -> To I,60 ns den einai entos oriwn!'];
disp(str74);
end
if (testWs==0)
str73=[' -> Den simmorfwnontai oi times metaxi 2 kai 60 ns!'];
disp(str73);
end
end
```

end

A.2 Η πρότυπη θεωρητική εξίσωση, για τάση φόρτισης 4kV

function i=IFUN(t);

t1 = 1.3; t2 = 2; t3 = 12; t4 = 37.8; i1 = 17.5; i2 = 9; n = 1.8; $k1 = exp((-t1/t2) * (((n*t2)/t1)^{(1/n)});$ $k2 = exp((-t3/t4) * (((n*t4)/t3)^{(1/n)});$ $i = (i1/k1) * (((t/t1)^n) / (1+(t/t1)^n)) * exp(-(t/t2)) + (i2/k2) * (((t/t3)^n) / (1+(t/t3)^n)) * exp(-t/t4);$

Α.3 Παράδειγμα τρεξίματος σε μία σειρά μετρήσεων υπό τάση φόρτισης 4kV

Matlab output:

0.4574

ns

==> H timi tou reumatos 30ns afou to reuma exei labei to 10% tis max timis tou einai I30= 5.7697

==> H timi tou reumatos 60ns afou to reuma exei labei to 10% tis max timis tou einai I60= 4.5818

*ATTENTION: i kimatomorfi den einai entos prodiagrafwn!!, dioti

-> O xronos anodou den einai entos oriwn!

-> Den simmorfwnontai oi times metaxi 2 kai 60 ns!



Σχήμα Π.Α.1: Γραφική παράσταση του μετρηθέντος ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4kV σε κοινό γράφημα με τα όρια i(t)±35%, όπως εξάγεται από το πρόγραμμα σε Matlab

Παράρτημα **B**

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

Στα 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 αντιστοίχων s_i για την γνώση της συνάρτησης μεταφοράς. Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 5, η πιο πάνω διαδικασία εφαρμόζεται σε καθέναν από τους δύο προσθετέους της (2.1). Στο τέλος προστίθενται οι συναρτήσεις μεταφοράς για την εύρεση της ολικής και σχεδιάζεται η αντίστοιχη γραφική παράσταση.

B.1.1 Κώδικας που υλοποιεί την μέθοδο Prony για καθέναν από τους δύο προσθετέους της (2.1)

Εδώ παρατίθεται ο κώδικας που βρίσκει τις παραμέτρους A_i, s_i για τον πρώτο προσθετέο της (2.1). Η συνάρτηση IFUN1 που καλείται, υλοποιείται όπως η IFUN στο Παράρτημα A2, προφανώς για τον πρώτο προσθετέο της (2.1).

close all; clear all;

%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 twn 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)=Σ Ai exp(si*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);

B.1.2 Κώδικας που υλοποιεί την τροποποιημένη μέθοδο Prony για καθέναν από τους δύο προσθετέους της (2.1)

Όμοια παρατίθεται ο κώδικας που βρίσκει τις παραμέτρους A_i, s_i έστω πάλι για τον πρώτο προσθετέο της (2.1).

close all; clear all;
```
******
string0=['*********
              disp (string0);
Tarxi=0;
Ttelos=100;
%fplot('IFUN1(t)', [Tarxi Ttelos], 'r');
grid;
eqzero=0.0000001;
simeia=1181;
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'avton 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= oi idiotimes toy "pinakas"
 singval=eig(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 xaraktiristikou poliwnimou

inv_AN=inv(AN'*AN); vector_b=inv_AN*AN'*EK;

%sinepws to vector_b einai to xaraktiristiko 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 xaraktiristiko %poliwnimo,me antistrofa balmena stoixeia. vector temp=[vector b; 1];

%Sinepws exw to dianisma pou antistoixei sto xaraktiristiko poliwnimo: poli=flipud(vector temp);

%oi rizes tou xaraktiristikou 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';

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

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

disp('To megisto sfalma tou prwtou 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(fid2);
fclose(fid3);

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

B.2 Παράδειγμα εξαγομένων των δύο ανωτέρω προγραμμάτων (της μεθόδου Prony και της τροποποιημένης μεθόδου Prony)

Μετά την εφαρμογή των ανωτέρω προγραμμάτων σε καθέναν από τους δύο προσθετέους της (2.1) λαμβάνουμε με την κατάλληλη διαχείριση των αποτελεσμάτων την ολική G(s) (διαφορετική για κάθε μία από τις δύο μεθόδους), υπό την μορφή των παραμέτρων A_i και s_i της καθεμιάς. Αυτό γίνεται με ένα μικρό κομμάτι κώδικα που συγκεντρώνει και παρουσιάζει τα συνολικά αποτελέσματα, και σχεδιάζει τη συνολική γραφική παράσταση. Τα αποτελέσματα του τελευταίου κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν.

B.2.1 Εξαγόμενα του προγράμματος υλοποίησης της μεθόδου Prony

Matlab output:



Σχήμα Π.Β.1: Η θεωρητική καμπύλη που προκύπτει από την (2.1) σε κοινό γράφημα με την καμπύλη που προκύπτει από το πρόγραμμα που υλοποιεί τη μέθοδο Prony σε Matlab

B.2.2 Εξαγόμενα του προγράμματος υλοποίησης της τροποποιημένης μεθόδου Prony

Matlab output:



Σχήμα Π.Β.2: Η θεωρητική καμπύλη που προκύπτει από την (2.1) σε κοινό γράφημα με την καμπύλη που προκύπτει από το πρόγραμμα που υλοποιεί την τροποποιημένη μέθοδο Prony σε Matlab

<u>Βιβλιογραφία</u>

- Paul A. Chatterton Michael A. Houlden, "Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό", Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1992.
- [2] Theodore Dangelmayer, "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 ΕΝ 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/techpapr/sfowler/esd97/esd97.htm.
- [8] Ariadna Kaplan, Bob McReynolds, "Dielectric characteristics of materials-Electrostatic Discharge", November 2002, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <u>http://www2.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/papers/mate210/electrostatic.pdf</u>.
- [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] "Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-438", Instruments Schaffner, Publ. 601-242A.
- [12] Schaffner Company, Technical document and product information for the MD 101.

- [13] J. Sroka, "*Recalculation of the discharge current from the oscilloscope reading applied by the Schaffner Calibration Laboratory in Luterbach*", Schaffner's Technical Document.
- [14] Heidler H., "Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung", presented at 18th ICLP (International Conference on Lightning Protection), Munich, Germany, 1985.
- [15] Τρύφων Κουσιουρής, "Θεωρία Συνθέσεως Δικτύων", Εκδόσεις ΕΜΠ, 1989.
- [16] Χρήστος Χαλκιάς, Γιάννης Παπανάνος, "Σχεδίαση Ηλεκτρονικών Φίλτρων Ενεργά Αναλογικά Φίλτρα", Εκδόσεις Συμμετρία, 1987.
- [17] "Κατάλογος προϊόντων της εταιρείας Analog Devices" διαθέσιμος στην ιστοσελίδα <u>www.analog.com</u>.
- [18] S.P. Voinigescu, R. Beerkens, T. O. Dickson, and T. Chalvatzis, "Design Methodology and Applications of SiGe BiCMOS Cascode Opamps with up to 37-GHz Unity Gain Bandwidth" IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium, Technical Digest, pp.283-286, Nov. 2005
- [19] Darlington S., "Synthesis of Reactance 4-Poles", J. Math. Phys. 18 (1939), pp. 257-353.