



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**EMC Εξοπλισμού ηλεκτρικής ισχύος –
Το πρότυπο EN 61000-04-05**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΘΥΜΙΟΣ Θ. ΤΣΑΡΟΥΧΗΣ

Καθηγητής: Ι. Α. Σταθόπουλος
Επιβλέπων: Γ. Π. Φώτης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2004



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

113

**EMC Εξοπλισμού ηλεκτρικής ισχύος –
Το πρότυπο EN 61000-04-05**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΘΥΜΙΟΣ Θ. ΤΣΑΡΟΥΧΗΣ

Καθηγητής: Ι. Α. Σταθόπουλος
Επιβλέπων: Γ. Π. Φώτης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2004

Στον πατέρα μου

Wissenschaft und Kunst gehören der Welt an, und vor ihnen verschwinden die Schranken der Nationalität.

Johann Wolfgang von Goethe

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας, είναι να κάνει μια παρουσίαση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) και να ασχοληθεί ιδιαίτερα με το κεφάλαιο των παρεμβολών από κεραυνικά πλήγματα που δημιουργούν υπερτάσεις. Για τον σκοπό αυτό, γίνεται παρουσίαση του προτύπου EN 61000-4-5 που περιγράφει την διαδικασία ελέγχου και πιστοποίησης συσκευών για αντοχή σε υπερτάσεις. Η διερεύνηση της αντοχής μιας συσκευής σε υπέρταση, είναι ιδιαίτερα σημαντική, αφού οι υπερτάσεις είναι ένα σύνηθες φαινόμενο και έχουν αίτια είτε φυσικά (κεραυνικό πλήγμα) είτε ανθρωπογεννή (μεταβατικά φαινόμενα από διακόπτες φορτίων).

Συγκεκριμένα, έγινε μελέτη της διάταξης δοκιμής που ορίζει το πρότυπο EN 61000-4-5 και ειδικά του δικτύου σύζευξης που βρίσκεται μεταξύ της συσκευής που θέλουμε να ελεγχθεί και του δικτύου παροχής ισχύος. Έγιναν προσομοιώσεις με υπολογιστή του κυκλώματος με το πρόγραμμα SPICE και κατασκευάστηκε ένα απλό τριφασικό δίκτυο σύζευξης στο οποίο και έγιναν μετρήσεις.

Η κατασκευή αυτή, αλλά και η μεθοδολογία που περιγράφεται μέσα στην εργασία αυτή, μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο σε κάποιον που θέλει να πραγματοποιήσει απλές δοκιμές αντοχής μιας συσκευής σε υπέρταση, βάση του προτύπου EN 61000-4-5.

Τέλος, αποτελεί καλή βάση για κάποιον που θέλει να ασχοληθεί με μελέτη υπερτάσεων και την επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC), EN 61000-4-5, Υπερτάσεις, Προσομοίωση Κυκλώματος, SPICE, Κεραυνικό Πλήγμα, Υπερτάσεις Διακοπών, Υψηλές τάσεις, Δίκτυο Σύζευξης, Γένιο Πρότυπο Ατρωσίας, Δοκιμές Ελέγχου

ABSTRACT

The scope of this thesis was the presentation of Electromagnetic Compatibility (EMC) in relation to the interference caused by surge voltages produced by lightnings. For this purpose, the EN 61000-4-5 standard was introduced, describing the procedure of testing and verification of a device for immunity in surge voltages. The investigation of the above mentioned immunity is very important, as surge voltages are a very common and usual phenomenon. Their causes are either natural (lightnings) or man-made (switching transients).

Specifically, an investigation of the test set-up defined by the EN 61000-4-5 standard was made and thus, of the decoupling network located between the device under test and the power supply network. Simulation by computer of the above mentioned test set-up was done using SPICE and a 3-phase decoupling network was constructed. Measurements and tests were performed.

This construction and also the methodology described in this essay can become a useful tool for the one who wishes to perform simple tests to a device for immunity in surge voltages according to the EN 61000-4-5 standard.

Finally, this thesis can be a useful guide to anyone studying surge voltages and in general electromagnetic compatibility.

KEY WORDS

Electromagnetic Compatibility (EMC), EN 61000-4-5, Surge Voltages, Circuit Simulation, SPICE, Lightning, Switching Transients, High Voltages, Decoupling Network, Generic Immunity Standard, Test Set-up

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ	5
ABSTRACT	6
KEY WORDS	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	10
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	12
Πρόλογος	13
Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ (EMC)	16
1.1 Γενική επισκόπηση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας	16
1.2 Πηγές θορύβου	20
1.2.1 Φυσικές πηγές	20
1.2.2 Ανθρωπογενείς πηγές	22
1.3 Ορισμός ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC).....	28
1.4 Εσωτερικές και εξωτερικές υπερτάσεις	30
1.4.1 Εξωτερικές υπερτάσεις (κεραυνός)	30
1.4.1.1 Ατμοσφαιρικό ηλεκτρικό πεδίο υπό συνθήκες καλοκαιρίας	30
1.4.1.2 Τύποι και φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων	31
1.4.1.3 Παράγοντες που επιρρεάζουν τον κεραυνό	32
1.4.1.4 Παράμετροι κεραυνού	33
1.4.2 Εσωτερικές υπερτάσεις.....	34
1.4.2.1 Παροδικές υπερτάσεις βιομηχανικής συχνότητας	35
1.4.2.2 Υπερτάσεις χειρισμών.....	36
1.5 Η ανάγκη για τυποποίηση	36
Κεφάλαιο 2 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ EN 61000-4-5	38
2.1 Γένιο πρότυπο ατρωσίας.....	38
2.2.1 Οι διατάξεις ελέγχου των δοκιμίων	44
2.2.2 Η γεννήτρια συχνοτήτων	47
Κεφάλαιο 3 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SPICE – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	53
3.1 Εισαγωγή	53
3.1.1 Νέοι τρόποι ανάλυσης και σχεδιασμού ηλεκτρικών κυκλωμάτων	54

3.1.2	Δυνατότητες των προγραμμάτων ανάλυσης κυκλωμάτων.....	55
3.1.3	Γενική περιγραφή του προγράμματος SPICE	57
3.1.4	Περιορισμοί του προγράμματος SPICE	59
3.1.5	Οι δομικές μονάδες και τα είδη κυκλωματικής ανάλυσης του SPICE.....	59
3.2	Προσομοίωση με SPICE των κυκλωμάτων ελέγχου που αναφέρονται στο πρότυπο EN 61000-4-5	64
3.2.1	Μonoφασικά κυκλώματα ελέγχου	65
3.2.2	Τριφασικά κυκλώματα ελέγχου	70
3.3	Γενικές παρατηρήσεις για τις προσομοιώσεις	76
3.4	Λεπτομερέστερη προσομοίωση του δικτύου σύζευξης Γ που κατασκευάστηκε.....	80
3.4.1	Παρατηρήσεις στις προσομοιώσεις της περίπτωσης Γ που κατασκευάστηκε.	84
	Κεφάλαιο 4	85
4.1	Λόγος ύπαρξης κατασκευής.....	85
4.2	Μεθοδολογία κατασκευής	86
4.3	Λίστα υλικού και κόστος.....	96
4.4	Κατασκευή προσαρμογέα R-C	96
	Κεφάλαιο 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	99
5.1	Ο εξοπλισμός ελέγχου	99
5.1.1	Παλμογράφος Tektronix TDS 3052	99
5.1.2	Η γεννήτριες συχνοτήτων HP 3320B και GW GFG-8015F	100
5.1.3	Γεννήτρια ASEA-HAEFELY.....	101
5.1.3.1	Οι βασικές μονάδες της κρουστικής γεννήτριας της δοκιμής.....	103
5.1.4	Μonoφασικό δίκτυο σύζευξης Schaffner CDN 131	106
5.1.5	Σύστημα 2050 του οίκου Schaffner	107
5.2	Έλεγχος του δικτύου σύζευξης ως φίλτρο.	110
5.2.1	Παρατηρήσεις στην συμπεριφορά του δικτύου σύζευξης ως φίλτρο	117
5.3	Έλεγχος λειτουργίας του CDN με κρούστικές τάσεις.....	118
5.3.1	Παρατηρήσεις στην συμπεριφορά του δικτύου σύζευξης ως φίλτρο	136
	Κεφάλαιο 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	138
6.1	Συμπεράσματα για το πρότυπο EN 61000-4-5.	138
6.2	Συμπεράσματα για την κατασκευή.	138
6.3	Συμπεράσματα για τις υπερτάσεις.	139
	Κεφάλαιο 7 Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ	140
7.1	Προτάσεις για την κατασκευή του δικτύου σύζευξης.....	140
7.2	Προτάσεις για την μελέτη της συμπεριφοράς εξοπλισμού ισχύος σε υπερτάσεις.	141
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	142

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 3.1: ΤΥΠΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ORCAD CAPTURE.	60
ΕΙΚΟΝΑ 3.2: ΤΥΠΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ 'ΕΙΚΟΝΙΚΟ' ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ ΤΟΥ PSPICE.	61
ΕΙΚΟΝΑ 4.1: ΤΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΛΙΚΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΓΟΡΑ ΤΟΥΣ ΣΤΟΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΠΑΓΚΟ.	88
ΕΙΚΟΝΑ 4.2: ΤΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΛΙΚΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΓΟΡΑ ΤΟΥΣ ΣΤΟΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΠΑΓΚΟ. ΔΙΑΚΡΙΝΟΝΤΑΙ, ΕΚΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΚΟΥΤΙ, ΤΑ ΠΗΝΙΑ ΚΑΙ ΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ. ΣΤΑ ΣΑΚΟΥΛΑΚΙΑ ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΟΙ ΜΠΟΡΝΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΚΩΣ (ΣΥΡΤΑΡΩΤΑ ΚΑΙ ΣΤΡΟΓΓΥΛΑ).	89
ΕΙΚΟΝΑ 4.3 : Ο ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΑΓΚΟΣ ΣΤΟ ΣΠΙΤΙ ΤΟΥ ΥΠΟΓΡΑΦΟΝΤΑ ΤΗΝ ΕΝ ΛΟΓΩ ΕΡΓΑΣΙΑ.	89
ΕΙΚΟΝΑ 4.4: ΤΟ ΚΟΥΤΙ ΑΝΟΙΚΤΟ. ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ ΤΟ ΣΑΣΙ.	90
ΕΙΚΟΝΑ 4.5: ΤΟ ΣΑΣΙ, ΑΦΟΥ ΕΧΕΙ ΜΑΡΚΑΡΙΣΤΕΙ, ΠΟΝΤΑΡΕΤΑΙ ΓΙΑ ΝΑ ΤΡΥΠΗΘΕΙ.	90
ΕΙΚΟΝΑ 4.6: ΤΟ ΣΑΣΙ, ΜΟΛΙΣ ΕΧΕΙ ΤΡΥΠΗΘΕΙ.	91
ΕΙΚΟΝΑ 4.7: ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΠΗΝΙΩΝ ΣΤΟ ΣΑΣΙ.	91
ΕΙΚΟΝΑ 4.8: ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΣΤΟ ΣΑΣΙ.	92
ΕΙΚΟΝΑ 4.9: ΤΟ ΣΑΣΙ ΜΕ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΑ ΤΑ ΥΛΙΚΑ.	92
ΕΙΚΟΝΑ 4.10: ΚΑΛΩΔΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΕΠΑΝΩ ΣΤΟ ΣΑΣΙ, ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΣΤΟ ΚΟΥΤΙ.	93
ΕΙΚΟΝΑ 4.11: ΚΑΛΩΔΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΜΑΖΕΜΑ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΜΕ ΔΕΜΑΤΙΚΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΣΑΣΙ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΚΟΥΤΙ.	93
ΕΙΚΟΝΑ 4.12: Η ΣΥΣΚΕΥΗ ΕΤΟΙΜΗ. ΔΙΑΚΡΙΝΟΝΤΑΙ ΤΑ ΟΓΚΩΔΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΦΙΣ. ΕΠΙΣΗΣ ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ Ο ΟΓΚΩΔΗΣ ΑΝΤΑΠΤΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΠΟΥ ΔΙΝΕΙ ΤΗΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΕΝΟΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΔΥΟ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΙΣ L1, L3.	94
ΕΙΚΟΝΑ 4.13: Η ΜΠΡΟΣΤΙΝΗ ΟΨΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ. ΔΙΑΚΡΙΝΟΝΤΑΙ ΟΙ ΜΠΟΡΝΕΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΝΕΙ ΤΟ ΚΕΡΑΥΝΙΚΟ ΠΛΗΓΜΑ.	94
ΕΙΚΟΝΑ 4.14: Η ΠΙΣΩ ΟΨΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ.	95
ΕΙΚΟΝΑ 4.15: ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΓΟΡΑ ΣΤΟΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΠΑΓΚΟ. ΔΙΑΚΡΙΝΟΝΤΑΙ ΤΟ ΚΟΥΤΙ, Ο ΠΥΚΝΩΤΗΣ 10 mF, ΟΙ ΜΠΟΡΝΕΣ ΚΑΙ Η ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ 10 Ω.	97
ΕΙΚΟΝΑ 4.16: Ο ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑΣ ΕΤΟΙΜΟΣ ΛΙΓΟ ΠΡΙΝ ΚΛΕΙΣΕΙ ΤΟ ΚΑΠΑΚΙ. ΈΧΟΥΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΘΕΙ ΟΙ ΜΠΟΡΝΕΣ ΚΑΙ ΕΧΟΥΝ ΓΙΝΕΙ ΟΛΕΣ ΟΙ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΕΣ ΚΟΛΛΗΣΕΙΣ.	98
ΕΙΚΟΝΑ 4.17: Ο ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑΣ ΕΤΟΙΜΟΣ ΠΡΟΣ ΧΡΗΣΗ.	98
ΕΙΚΟΝΑ 5.1: Ο ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΣ ΤΕΚΤΡΟΝΙΧ TDS 3052	100
ΕΙΚΟΝΑ 5.2: GOOD WILL GFG-8015F FUNCTION GENERATOR	100
ΕΙΚΟΝΑ 5.3: HEWLETT PACKARD HP 3320B FREQUENCY SYNTHESISER	101
ΕΙΚΟΝΑ 5.4: ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ASEA-ΗΑΕFELY Type PC 6-288	102
ΕΙΚΟΝΑ 5.5: CDN 131/CDN 133 ΤΟΥ ΟΙΚΟΥ SCHAFFNER	107
ΕΙΚΟΝΑ 5.6: ΜΟΝΑΔΑ NSG 2050 ΤΗΣ SCHAFFNER	109
ΕΙΚΟΝΑ 5.7: ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 2050	110
ΕΙΚΟΝΑ 5.8: ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ 148,8 Hz. ΕΥΚΟΛΑ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ ΣΤΟ ΗΜΙΤΟΝΟ ΕΙΣΟΔΟΥ, ΛΟΓΩ ΧΡΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΑΔΥΝΑΜΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ.	112
ΕΙΚΟΝΑ 5.9: ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ 179,6 Hz. ΕΥΚΟΛΑ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ ΣΤΟ ΗΜΙΤΟΝΟ ΕΙΣΟΔΟΥ, ΛΟΓΩ ΧΡΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΑΔΥΝΑΜΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ.	112
ΕΙΚΟΝΑ 5.10: ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ 308,1 Hz. ΕΥΚΟΛΑ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ ΣΤΟ ΗΜΙΤΟΝΟ ΕΙΣΟΔΟΥ, ΛΟΓΩ ΧΡΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΑΔΥΝΑΜΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ.	113
ΕΙΚΟΝΑ 5.11: ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ 5,244 kHz. ΕΥΚΟΛΑ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ ΣΤΟ ΗΜΙΤΟΝΟ ΕΙΣΟΔΟΥ, ΛΟΓΩ ΧΡΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΑΔΥΝΑΜΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ.	113
ΕΙΚΟΝΑ 5.12: ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ 10,86 kHz.	114
ΕΙΚΟΝΑ 5.13: ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ 108,0 kHz. ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕ ΟΤΙ ΣΤΗΝ ΕΙΣΟΔΟ ΦΤΑΝΕΙ ΣΗΜΑ ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΤΩΝ mV.	114
ΕΙΚΟΝΑ 5.14: ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ 1,086 MHz. ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕ ΟΤΙ ΣΤΗΝ ΕΙΣΟΔΟ ΦΤΑΝΕΙ ΣΗΜΑ ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΤΩΝ mV.	115

ΕΙΚΟΝΑ 5.15: ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ 3,098 ΜΗΖ. ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕ ΟΤΙ ΣΤΗΝ ΕΙΣΟΔΟ ΦΤΑΝΕΙ ΣΗΜΑ ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΜV ΑΛΛΑ ΙΣΧΥΡΟΤΕΡΟ ΑΠΟ ΠΡΙΝ.	115
ΕΙΚΟΝΑ 5.16: ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ 5,102 ΜΗΖ. ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕ ΟΤΙ ΣΤΗΝ ΕΙΣΟΔΟ ΦΤΑΝΕΙ ΣΗΜΑ ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΜV ΑΛΛΑ ΑΡΚΕΤΑ ΙΣΧΥΡΟΤΕΡΟ ΑΠΟ ΠΡΙΝ.	116
ΕΙΚΟΝΑ 5.17: ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ. ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ 7,075 ΜΗΖ. ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕ ΟΤΙ ΣΤΗΝ ΕΙΣΟΔΟ ΦΤΑΝΕΙ ΣΗΜΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΣΕ ΠΛΑΤΟΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ.	116
ΕΙΚΟΝΑ 5.18: Ο ΥΠΟΓΡΑΦΩΝ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΜΠ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.	120
ΕΙΚΟΝΑ 5.19: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ. ΕΥΚΟΛΑ ΚΑΝΕΙΣ ΠΑΡΑΤΗΡΕΙ ΤΟΝ ΟΓΚΩΔΗ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ.	121
ΕΙΚΟΝΑ 5.20: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C. (1)	121
ΕΙΚΟΝΑ 5.21: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C. (2)	122
ΕΙΚΟΝΑ 5.22: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C. (3)	122
ΕΙΚΟΝΑ 5.23: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C. (4)	123
ΕΙΚΟΝΑ 5.24: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C. (5)	123
ΕΙΚΟΝΑ 5.25: ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C. (1)	124
ΕΙΚΟΝΑ 5.26: ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C. (2)	124
ΕΙΚΟΝΑ 5.27: ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C. (3)	125
ΕΙΚΟΝΑ 5.28: ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C. (4)	125
ΕΙΚΟΝΑ 5.29: ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C. (5)	126
ΕΙΚΟΝΑ 5.30: ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (1)	126
ΕΙΚΟΝΑ 5.31: ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (2)	127
ΕΙΚΟΝΑ 5.32: ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (3)	127
ΕΙΚΟΝΑ 5.33: ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (4)	128
ΕΙΚΟΝΑ 5.34: ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (5)	128
ΕΙΚΟΝΑ 5.35: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (1)	129
ΕΙΚΟΝΑ 5.36: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (2)	129
ΕΙΚΟΝΑ 5.37: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (3)	130
ΕΙΚΟΝΑ 5.38: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (4)	130
ΕΙΚΟΝΑ 5.39: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (5)	131
ΕΙΚΟΝΑ 5.40: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 0,5 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C. ΠΑΡΑΤΗΡΕΙΤΑΙ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΜΙΚΡΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΜΕΓΕΝΘΥΜΕΝΟ ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΣΤΑΛΙΟ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ.	131
ΕΙΚΟΝΑ 5.41: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 1 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (1)	132
ΕΙΚΟΝΑ 5.42: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 1 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (2)	132
ΕΙΚΟΝΑ 5.43: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 1 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (3)	133
ΕΙΚΟΝΑ 5.44: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 2 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (1)	133
ΕΙΚΟΝΑ 5.45: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 4 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (1)	134
ΕΙΚΟΝΑ 5.46: ΘΕΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 4 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (2)	134
ΕΙΚΟΝΑ 5.47: ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 4 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (1)	135
ΕΙΚΟΝΑ 5.48: ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΡΟΥΣΗ ΜΕ 4 kV ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑ R-C (2)	135

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 1.1: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΞΙΔΑΝΙΚΕΥΜΕΝΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΜΙΑΣ ΠΗΓΗΣ ΚΑΙ ΕΝΟΣ ΔΕΚΤΗ.	18
ΣΧΗΜΑ 1.2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΟΥ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΕΙ ΜΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΙΟ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΣΥΖΕΥΞΗΣ.	18
ΣΧΗΜΑ 1.3: ΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΙΑΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΝΟΣ ΚΕΡΑΥΝΟΥ.	21
ΣΧΗΜΑ 1.4: ΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΕΝΟΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΔΟΚΙΜΗΣ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΜΡ.	25
ΣΧΗΜΑ 1.5: ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΥΠΕΡΤΑΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 220 V.	27
ΣΧΗΜΑ 1.6: ΠΩΣ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΟΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΗΣ ΕΜC ΜΕ ΤΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΡΟΠΟΥΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΙΔΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΩΣ ΠΟΜΠΟΣ Η ΩΣ ΔΕΚΤΗΣ.	29
ΣΧΗΜΑ 1.7: ΦΑΣΕΙΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΕΡΑΥΝΙΚΟΥ ΤΟΞΟΥ.	32
ΣΧΗΜΑ 2.1: ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ. ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΓΗΣ.	44

ΣΧΗΜΑ 2.2 : ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ. ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΣΩ ΔΥΟ ΦΑΣΕΩΝ.	44
ΣΧΗΜΑ 2.3 : ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ. ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΓΗΣ.	45
ΣΧΗΜΑ 2.4: ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ. ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΦΑΣΕΩΝ.	46
ΣΧΗΜΑ 2.5: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗΣ ΑΝΟΙΧΤΟΚΥΚΛΩΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.	48
ΣΧΗΜΑ 2.6: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ	49
ΣΧΗΜΑ 2.7: ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΕΡΑΥΝΙΚΟΥ ΠΛΗΓΜΑΤΟΣ	50
ΣΧΗΜΑ 2.8: ΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΑΝΗΧΩΙΚΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΜΣ.	52
ΣΧΗΜΑ 3.1 : ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ. ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΣΤΟ SPICE.	66
ΣΧΗΜΑ 3.2 : ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ. ΧΡΟΝΟΣ ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ 10MS.	66
ΣΧΗΜΑ 3.3 : ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ. ΧΡΟΝΟΣ ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ 30MS.	67
ΣΧΗΜΑ 3.4 : ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ. ΧΡΟΝΟΣ ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ 10MS. ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΥΠΕΡΤΑΣΗΣ, ΕΤΣΙ ΩΣΤΕ ΝΑ ΦΑΝΕΙ Η ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ ΣΤΟΝ ΠΥΚΝΩΤΗ ΕΙΣΟΔΟΥ.	67
ΣΧΗΜΑ 3.5 : ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΓΗΣ. ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΣΤΟ SPICE.	68
ΣΧΗΜΑ 3.6 : ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΓΗΣ. ΧΡΟΝΟΣ ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ 10MS.	69
ΣΧΗΜΑ 3.7 : ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΓΗΣ. ΧΡΟΝΟΣ ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ 30MS.	69
ΣΧΗΜΑ 3.8 : ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΓΗΣ. ΧΡΟΝΟΣ ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ 10MS. ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΥΠΕΡΤΑΣΗΣ, ΕΤΣΙ ΩΣΤΕ ΝΑ ΦΑΝΕΙ Η ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ ΣΤΟΝ ΠΥΚΝΩΤΗ ΕΙΣΟΔΟΥ.	70
ΣΧΗΜΑ 3.9: ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΓΗΣ. ΧΡΟΝΟΣ ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ 10MS.	72
ΣΧΗΜΑ 3.10: ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΓΗΣ. ΧΡΟΝΟΣ ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ 30MS.	72
ΣΧΗΜΑ 3.11: ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΓΗΣ. ΧΡΟΝΟΣ ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ 10MS. ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΥΠΕΡΤΑΣΗΣ, ΕΤΣΙ ΩΣΤΕ ΝΑ ΦΑΝΕΙ Η ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ ΣΤΟΝ ΠΥΚΝΩΤΗ ΕΙΣΟΔΟΥ.	73
ΣΧΗΜΑ 3.13 : ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΦΑΣΕΩΝ. ΧΡΟΝΟΣ ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ 10MS.	75
ΣΧΗΜΑ 3.14: ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΦΑΣΕΩΝ. ΧΡΟΝΟΣ ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ 30MS.	75
ΣΧΗΜΑ 3.15 : ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ, ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΦΑΣΕΩΝ. ΧΡΟΝΟΣ ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ 10MS. ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΥΠΕΡΤΑΣΗΣ, ΕΤΣΙ ΩΣΤΕ ΝΑ ΦΑΝΕΙ Η ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ ΣΤΟΝ ΠΥΚΝΩΤΗ ΕΙΣΟΔΟΥ.	76
ΣΧΗΜΑ 3.16: ΥΠΕΡΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ ΣΤΟ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕ ΜΕΓΑΛΟ ΩΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ $R=4k\Omega$.	77
ΣΧΗΜΑ 3.17: Η ΤΑΣΗ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΙΝΑΙ ΜΕΓΕΘΟΥΣ 5 kV. Η ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗ ΟΜΩΣ ΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΔΕΝ ΞΕΠΕΡΝΑ ΤΑ 4 kV ΣΕ ΚΑΜΙΑ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ. ΕΔΩ ΕΧΟΥΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ Δ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ (ΠΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΚΕ) ΜΕ ΩΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	78
ΣΧΗΜΑ 3.18: ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	79
ΣΧΗΜΑ 3.19 : ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΠΟΥ ΔΕΙΧΝΕΙ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΟΥ ΠΑΙΡΝΟΥΜΕ ΤΗΝ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΣΤΑ ΑΚΡΑ ΤΟΥ ΠΥΚΝΩΤΗ ΕΙΣΟΔΟΥ ΓΙΑ ΝΑ ΔΟΥΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ ΣΤΗΝ ΕΙΣΟΔΟ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.	80
ΣΧΗΜΑ 3.20 : ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΠΟΥ ΔΕΙΧΝΕΙ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΟΥ ΠΑΙΡΝΟΥΜΕ ΤΗΝ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΤΑΣΗΣ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΖΟΥΜΕ ΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ.	80
ΣΧΗΜΑ 3.21: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΚΑΘΑΡΑ ΧΩΡΗΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	81
ΣΧΗΜΑ 3.22: ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕ ΚΑΘΑΡΑ ΧΩΡΗΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΗΝ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥΜΕ.	81
ΣΧΗΜΑ 3.23 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΚΑΘΑΡΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	82
ΣΧΗΜΑ 3.24: ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕ ΚΑΘΑΡΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΗΝ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥΜΕ	82
ΣΧΗΜΑ 3.25: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΚΥΚΛΩΜΑ ΦΟΡΤΙΟ R,L,C.	83

ΣΧΗΜΑ 3.26 Το κύκλωμα με φορτίο R-L-C στην θέση του εξοπλισμού που ελεγχόμαστε	83
ΣΧΗΜΑ 4.1: Προσομοίωση της απόκρισης του κυκλώματος που κατασκευάστηκε με πυκνωτές 10 mF.	86
ΣΧΗΜΑ 4.2: Προσομοίωση της απόκρισης του κυκλώματος που κατασκευάστηκε με πυκνωτές 9 mF βάση προτύπου. Παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά παραμένει σχεδόν η ίδια με την παραπάνω προσομοίωση με τους πυκνωτές 10 mF. Οι διαφορές είναι αμελητέες για τον σκοπό της παρούσης εργασίας.	87
ΣΧΗΜΑ 5.1: Γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων PC 6-288 των ASEA-HAEFELY	103
ΣΧΗΜΑ 5.2: Το σύστημα 2050 του οίκου Schaffner για δοκιμές ατρωσίας EMC	109
ΣΧΗΜΑ 5.3: Συνδεσμολογία ελέγχου του δικτύου συζευξης ως φίλτρο. Εδώ έχει συνδεθεί η γεννήτρια συχνότητας μεταξύ γης και ουδέτερου.	111
ΣΧΗΜΑ 5.4: Συνδεσμολογία ελέγχου του CDN που κατασκευάστηκε στην δοκιμή αντοχής σε κρουστικές τάσεις. Διακρίνονται ο προσαρμογέας R-C που απαιτείται από το πρότυπο και ο καταμεριστής τάσης από την μερία σύνδεσης του παροχέα ισχύος για ανίχνευση της τάσης που καταφέρνει να περάσει από το φίλτρο.	119

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 : Ατρωσία – Θύρα περιβλήματος	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2 : Ατρωσία – Θύρες για γραμμές σημάτων και γραμμές ελέγχου.	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3 : Ατρωσία – Θύρες εισόδου και εξόδου ισχύος συνεχούς ρεύματος	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4 : Ατρωσία – Θύρες εισόδου και εξόδου ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5 : Ατρωσία-Θύρες λειτουργικής γείωσης	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6: Τα στοιχεία των κυκλωμάτων συζευξης.	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.7 : Επίπεδα ελέγχου δοκιμών προτύπου EN 61000-4-5	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 : Πίνακας κόστους υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή	96

Πρόλογος

Science is organized knowledge.

Herbert Spencer

Η εργασία αυτή, αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία, για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αρχικά γίνεται μια παρουσίαση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και του φαινομένου των υπερτάσεων στα δίκτυα διανομής. Εντοπίζονται οι λόγοι που προκαλούν υπερτάσεις και περιγράφεται το πρότυπο EN 61000-4-5, το οποίο είναι το πρότυπο που περιγράφει την διαδικασία πιστοποίησης ενός εξοπλισμού ισχύος για αντοχή στις υπερτάσεις. Γίνονται προσομοιώσεις των κυκλωμάτων που αναφέρονται στο πρότυπο και κατασκευάζεται για πειραματικούς λόγους ένα δίκτυο σύζευξης εξοπλισμού που ελέγχουμε και δικτύου παροχής ισχύος, όπως ακριβώς περιγράφεται στο πρότυπο και γίνονται μετρήσεις πάνω σε αυτό.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και δίνεται ο ορισμός της. Γίνεται σαφές, ότι η μελέτη της είναι σημαντική για την κατασκευή οποιουδήποτε ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Παρουσιάζονται οι τρόποι δημιουργίας των υπερτάσεων και χωρίζονται σε ανθρωπογενείς και φυσικούς. Επίσης γίνεται ανάλυση για τον τρόπο δημιουργίας κεραυνών και παρουσιάζονται οι βασικοί παράμετροι τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του “Γένιου Προτύπου Ατρωσίας” EN 50082-1 και του προτύπου που ασχολείται ειδικά με την ατρωσία εξοπλισμού ισχύος από υπερτάσεις, του EN 61000-4-5. Περιγράφονται τα πρότυπα και γίνονται επεξηγήσεις για το τι δοκιμές γίνονται για την πιστοποίηση ενός εξοπλισμού για αντοχή στις υπερτάσεις. Τέλος, αναφέρονται τα κριτήρια επίδοσης εξοπλισμού ισχύος σε δοκιμή αντοχής σε υπερτάσεις.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τρόποι ελέγχου και εξομοίωσης κυκλωμάτων με υπολογιστή. Γίνεται παρουσίαση του προγράμματος SPICE και αναφέρονται οι δομικές μονάδες, ο τρόπος λειτουργίας, και οι περιορισμοί του. Γίνονται προσομοιώσεις για όλα τα κυκλώματα ελέγχου που αναφέρονται στο πρότυπο EN61000-4-5 και βγαίνουν χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται περιγραφή της κατασκευής του δικτύου σύζευξης εξοπλισμού που ελέγχουμε και δικτύου παροχής ισχύος. Κατασκευάστηκε το δίκτυο σύζευξης της περίπτωσης Γ που αναφέρεται στο πρότυπο, της περίπτωσης δηλαδή που ελέγχουμε υπέρταση μεταξύ φάσης και γης και έχουμε τριφασική παροχή. Ο λόγος ύπαρξης ενός τέτοιου δικτύου είναι να περιορίζεται η επιβαλλόμενη υπέρταση μεταξύ του δικτύου σύζευξης και του εξοπλισμού που ελέγχουμε και να μην διαπεράσει στο δίκτυο παροχής ισχύος. Η κατασκευή έγινε με σκοπό την σύγκριση με αντίστοιχο εξοπλισμό που προορίζεται για επαγγελματική χρήση και είναι πιστοποιημένος στον τομέα απόδοσης και φυσικά κόστους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται δοκιμές που έγιναν στο δίκτυο σύζευξης που κατασκευάστηκε με σκοπό τον έλεγχο της συμπεριφοράς του. Περιγράφονται οι δοκιμές αλλά και παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν στο δίκτυο σύζευξης και εξάγονται συμπεράσματα για αυτό.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά συμπεράσματα για τις δοκιμές ελέγχου αλλά και για το κατασκευαστικό μέρος της εργασίας. Στο έβδομο δε κεφάλαιο, γίνεται συζήτηση για 'την επόμενη μέρα' της εργασίας. Γίνεται λόγος δηλαδή για βελτιώσεις και περαιτέρω έρευνα πάνω στις υπερτάσεις και την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Επίσης, γίνονται μια σειρά προτάσεων που θα είναι χρήσιμες για μετέπειτα μελέτες.

Στο σημείο αυτό θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω θερμά όσους συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κο. Ι. Α. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την επιλογή του θέματος, τη

συμπαράστασή του και το ευχάριστο εργασιακό περιβάλλον που μας παρείχε.

Τον κο. Ι. Φ. Γκόνο, διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την βοήθεια, καθοδήγηση και συμπαράστασή του, καθώς και για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της μελέτης.

Τον κο. Γ. Π. Φώτη, υποψήφιο διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την καθοδήγηση και τα χρήσιμα σχόλιά του για την συγγραφή της παρούσης αλλά και για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε κατά την διεξαγωγή της μελέτης.

Την κα. Ηλία Λέτα, υπεύθυνη ποιότητας του εργαστηρίου για τη βοήθεια στην πραγματοποίηση της εργασίας αυτής.

Όλα τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και ιδιαίτερα τον κο Ηλία Χρήστο για την τεχνική υποστήριξη στην διεξαγωγή του πειράματος.

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ (EMC)

In science one tries to tell people, in such a way as to be understood by everyone, something that no one ever knew before. But in poetry, it's the exact opposite.

Paul Dirac

1.1 Γενική επισκόπηση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC) αποτελεί ένα πεδίο μελέτης του πώς εφαρμόζεται η βασική φυσική σε σύνθετα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα, με σκοπό την δυνατότητα αυτών να συνυπάρχουν αρμονικά. Εάν επιτυγχάνεται αυτό, τότε τα συστήματα θεωρείται ότι εκτελούν τις λειτουργίες τους με ικανοποιητικό τρόπο.[3]

Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ενός συστήματος σε ένα τμήμα του ή σε κάποιο άλλο σύστημα είναι γνωστό από τότε που άρχισε η ανάπτυξη ηλεκτρικών συστημάτων, πριν περίπου έναν αιώνα. Το πρόβλημα έγινε γενικότερου ενδιαφέροντος μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο και όλες οι προοπτικές δείχνουν ότι για τα επόμενα χρόνια θα αποτελεί μια μεγάλη περιβαλλοντική ανησυχία, καθώς η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών διευρύνεται συνεχώς σε κάθε τομέα της ζωής μας.

Ως ηλεκτρομαγνητική διαταραχή ορίζεται κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πτώση της απόδοσης μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος, ή να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωνική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή, μπορεί να είναι θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μια μεταβολή αυτού καθεαυτού του μέσου διάδοσης.

Ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία [3] ορίζεται η διάδοση στον χώρο ενέργειας με την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η οποία συνεχίζει να

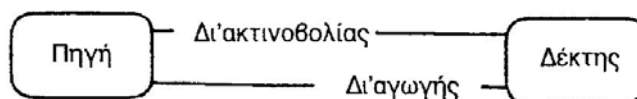
διαδίδεται και μετά το σταμάτημα της λειτουργίας της αρχικής πηγής. Κατ' επέκταση, ο όρος ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χρησιμοποιείται συχνά για να καλύψει φαινόμενα αντίδρασης μεταξύ πολύ κοντά τοποθετημένων κυκλωμάτων εξαιτίας των παραγόμενων από ρεύματα και φορτία μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων, που συνήθως περιγράφονται με τις έννοιες της αυτεπαγωγής και της χωρητικότητας.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, διαδίδονται στον ελεύθερο χώρο με την ταχύτητα του φωτός (ήτοι 3×10^8 m/s). Εάν η συχνότητα του κύματος είναι f (Hz) τότε η περίοδος ισούται με $T = 1/f$ (sec) και το κύμα κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου έχει διανύσει μια απόσταση c/f (m). Η απόσταση αυτή καλείται μήκος κύματος $\lambda = c/f$.

Πολλά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα μεταβάλλονται με την συχνότητα αλλά η ισχύς των προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς για σχεδιαστικούς σκοπούς, εξαρτάται από τις φυσικές διαστάσεις του συστήματος σε σχέση με τα μήκη κύματος των βασικών πεδίων που υπάρχουν. Αυτό σημαίνει, ότι όταν αντιμετωπίζει κανείς ένα πρόβλημα EMC, είναι σημαντικό να έχει στο νου του ότι θα υπάρχει πιθανόν μια περιοχή συχνοτήτων για την οποία τα προβλήματα θα είναι πιο σοβαρά και σε αυτή την περίπτωση, θα υπάρχει επίσης μια αντίστοιχη κλίμακα αποστάσεων μέσα στην οποία θα γίνονται διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτέλεση των υπολογισμών.

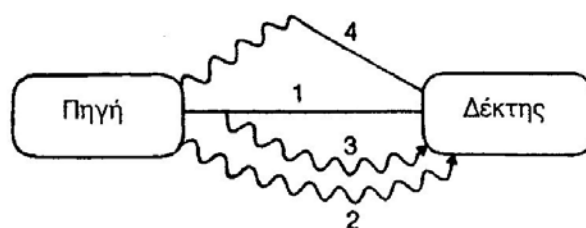
Καταλήγουμε λοιπόν, ότι η συχνότητα και το μέγεθος παίζουν σημαντικούς ρόλους.

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι όλα τα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών έχουν μια πηγή, έναν αριθμό διαδρόμων ή τρόπων σύζευξης και έναν δέκτη (Σχήμα 1.1) [3].



Σχήμα 1.1: Σχηματικό διάγραμμα εξιδανικευμένων τρόπων σύζευξης μεταξύ μιας πηγής και ενός δέκτη.

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η σύζευξη μεταξύ πομπού και δέκτη μπορεί να γίνει δι' ακτινοβολίας και δι' αγωγής. Είναι φανερό, ότι μπορούν να υπάρξουν και άλλοι πιθανοί τρόποι σύζευξης, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2 [3].



- 1 Τρόπος σύζευξης δι'αγωγής μόνον
- 2 Τρόπος σύζευξης δι'ακτινοβολίας μόνον
- 3 Τρόπος σύζευξης δι'αγωγής ακολουθούμενος και με δι'ακτινοβολίας
- 4 Τρόπος σύζευξης δι'ακτινοβολίας ακολουθούμενος και με δι'αγωγής

Σχήμα 1.2: Σχηματικό διάγραμμα που παρουσιάζει μια επιλογή πιο σύνθετων τρόπων σύζευξης.

Για να δοθεί μια ιδέα της έκτασης των προβλημάτων οι επόμενες κατηγορίες αποτελούν σημερινά θέματα προς επίλυση [3]:

(1) *Στρατιωτικά συστήματα:* Τα προβλήματα εδώ περιλαμβάνουν την προστασία έναντι των EMP και των ηλεκτρονικών αντίμετρων συμπεριλαμβανομένων της προτεινόμενης ανάπτυξης μικροκυματικών όπλων και της τεχνολογίας Stealth. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η μελέτη της συμπεριφοράς των συστοιχιών κεραιών των στρατιωτικών επικοινωνιών και των ραντάρ σε συνθήκες μάχης.

(2) *Ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις:* Στην περιοχή αυτή μεγάλο πρόβλημα παρουσιάζει η καταστροφή των μικροκυκλωμάτων (microchips) κατά τη

διάρκεια της διακίνησής τους. Επίσης, οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις στα αεροπλάνα και τα αυτοκίνητα αποτελούν πηγή επικίνδυνων προβλημάτων και πρέπει να αντιμετωπίζονται με το σωστό τρόπο.

- (3) *Σηματοδοσία μέσω του δικτύου διανομής:* Η χρήση του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για τη μετάδοση RF σημάτων στην περιοχή 3-8.5 KHz και 40-150 KHz αυξάνεται συνεχώς και μαζί με αυτό και η πιθανότητα εμφάνισης κάθε συσχετιζόμενου προβλήματος παρεμβολής.
- (4) *Διατάραξη του δικτύου διανομής:* Υπάρχουν πολλές αιτίες οι οποίες θα συζητηθούν αργότερα σ' αυτό το κεφάλαιο.
- (5) *Χρήση του φάσματος συχνοτήτων:* Η συνεχής αύξηση των νόμιμων και παράνομων χρηστών του περιορισμένου φάσματος ραδιοσυχνοτήτων οδηγεί σε πολλά προβλήματα RFI.
- (6) *Κίνδυνοι ανάφλεξης και έκρηξης:* Οι εκπομπές των ράδιο-σταθμών μπορούν να αποτελέσουν αφορμή για επικίνδυνες καταστάσεις σε βιομηχανίες πετροχημικών και άλλων παρόμοιων βιομηχανικών εγκαταστάσεων (π.χ. ανεφοδιασμού αεροσκαφών) όπου ελευθερώνονται ή υπάρχουν εύφλεκτα αέρια. Μια πιθανή αιτία κινδύνου για το μέλλον αποτελούν οι χρήσεις των ράδιο-CB ειδικά εάν υπερβαίνουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής, σε πρατήρια βενζίνης και κοντά σε λατομεία όπου χρησιμοποιούνται ηλεκτρικοί πυροκροτητές σε επιχειρήσεις ανατινάξεων.
- (7) *Κακή λειτουργία:* ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων ως αποτέλεσμα διαφόρων ειδών ηλεκτρικών παρεμβολών (προηγούμενο παράδειγμα).
- (8) *Ασφάλεια δεδομένων:* Στα μοντέρνα υπολογιστικά συστήματα η γρήγορη μεταφορά δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αρμονικών υψηλών συχνοτήτων, οι οποίες όταν εκπέμπονται είναι δυνατόν να ανιχνευτούν από μεγάλη απόσταση, θέτοντας σε κίνδυνο τα υποτιθέμενα ασφαλή συστήματα. Για παράδειγμα, δεν είναι δύσκολο να πιάσει κανείς την ακτινοβολία την προερχόμενη από τα κυκλώματα εικόνας μέσα σε μια

απομακρυσμένη οθόνη, για να ανακαλύψει τι απεικονίζει.

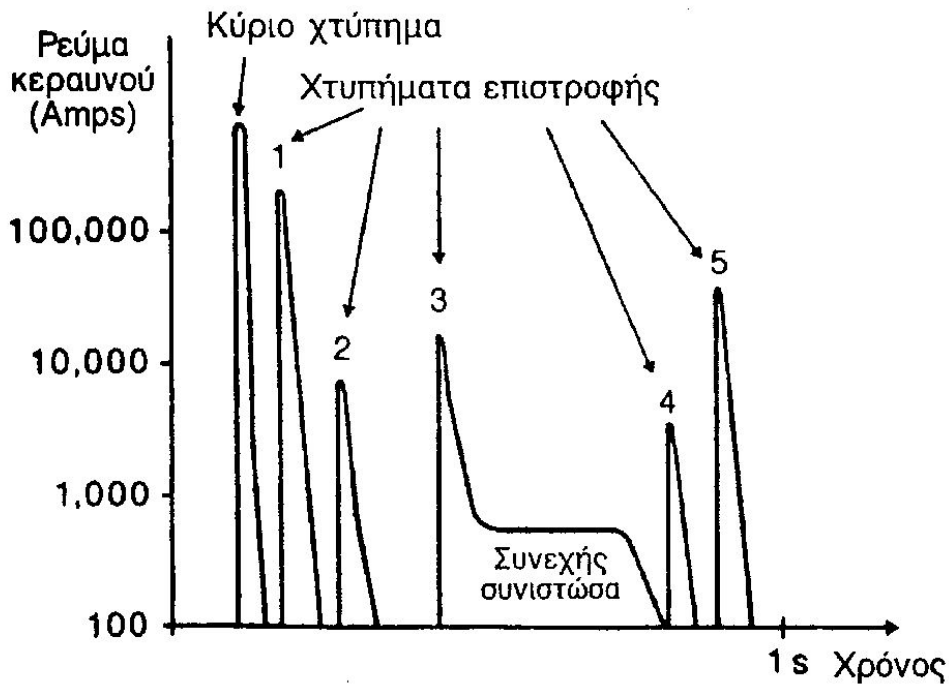
1.2 Πηγές θορύβου

Προκειμένου να προσανατολιστεί ο αναγνώστης και να πάρει μια ιδέα για τα πιθανά προβλήματα, αξίζει στο σημείο αυτό να παραταθεί ένας κατάλογος, με κάποια σύντομα σχόλια, των πιο κοινών πηγών ηλεκτρικού θορύβου και παρεμβολής. Με την έννοια *θόρυβος (noise)* περιγράφεται κάθε ανεπιθύμητο σήμα μέσα σ' ένα σύστημα, που παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά γνωρίσματα που βοηθάνε να αναγνωρίζεται η πηγή του. Κάθε σύστημα στο οποίο υπάρχουν ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία μεταβαλλόμενα με το χρόνο, (σε κάποιες περιπτώσεις ακόμη και τα στατικά πεδία μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα), μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρική παρεμβολή. Γενικά οι πηγές θορύβου διακρίνονται σε δύο είδη, τις φυσικές και τις οφειλόμενες στις ανθρώπινες δραστηριότητες (man made = ανθρωπογενείς).

1.2.1 Φυσικές πηγές

(1) *Αστραπές - Κεραυνοί*. Οι ηλεκτρικές εκφορτίσεις μεταξύ φορτισμένων σύννεφων και μεταξύ σύννεφων και εδάφους μπορούν να προκαλέσουν σε πολλές περιπτώσεις σοβαρή ηλεκτρική παρεμβολή. Έτσι, οι σχεδιαστές συσκευών θα πρέπει να έχουν πάντα στο νου τους ότι τα προϊόντα τους μπορούν να βρεθούν να λειτουργούν σε μέρη όπου οι θύελλες και καταιγίδες είναι πιο σφοδρές και συχνές από ό,τι στη χώρα τους. Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται μια τυπική κυματομορφή ρεύματος ως προς το χρόνο, ενός κεραυνού που πέφτει στο έδαφος. Ο αριθμός των δευτερευόντων χτυπημάτων οι χρόνοι ανόδου και οι στάθμες του ρεύματος ποικίλουν ανάλογα με την περίπτωση. Το κύριο χτύπημα έχει συνήθως ένα χρόνο ανόδου περίπου 1 μ S. Το σχήμα της κυματομορφής, το σχετικό μέτρο και η συχνότητα των χτυπημάτων σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία είναι όλα από τη φύση τους στατιστικά μεγέθη με μεγάλες μεταβολές στις παραμέτρους τους. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος ο σχεδιασμός γίνεται συνήθως για κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο, (ας πούμε, στην πράξη μια φορά στα 20 χρόνια). Η πιθανότητα όμως να συμβούν πιο συχνά χτυπήματα παραμένει. Η προστασία των κτιρίων

έναντι των κεραυνών γίνεται ως γνωστόν με τα αλεξικέραυνα, τα οποία όμως σπάνια προφυλάσσουν από ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα.



Σχήμα 1.3: Το σχηματικό διάγραμμα μιας τυπικής κυματομορφής του ρεύματος ενός κεραυνού.

Γενικά οι αστραπές και οι κεραυνοί έχουν ως αποτέλεσμα τριών ειδών ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές [3]:

- (α) Ένα απευθείας χτύπημα σε κάποιο αγωγό, όπως μια εναέρια γραμμή μεταφοράς ισχύος, θα προκαλέσει έναν πολύ μεγάλο παλμό σε όλο το σύστημα. Σ' αυτήν την περίπτωση είναι πολύ δύσκολη η προστασία των τμημάτων του συστήματος που βρίσκονται πολύ κοντά στο σημείο που έγινε το χτύπημα επειδή δημιουργούνται τάσεις της τάξης των 100-200 kV σε σχέση με τη γη, ανάλογα με την ενεργή σύνθετη αντίσταση που παρουσιάζει το έδαφος (ωμική και επαγωγική). Τα ρεύματα επίσης που αναπτύσσονται στο έδαφος από πτώσεις κεραυνών, μπορούν να περάσουν μέσω σύζευξης σε οποιοδήποτε σύστημα καλωδίων που βρίσκεται στο έδαφος.
- (β) Η παρουσία φορτισμένων σύννεφων μιας καταιγίδας συνοδεύεται

πάντοτε από ένα ηλεκτρικό πεδίο της τάξης των 1-10 kV/m στο επίπεδο του εδάφους. Με τις αστραπές και τους κεραυνούς γίνεται η μερική ή πλήρης εκφόρτιση των σύννεφων και η συνεπαγόμενη μεταβολή του πεδίου επάγει μεταβατικά σήματα σε γειτονικούς αγωγούς. Αυτές οι μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου, εκτός του ότι προκαλούν παρεμβολές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την ανίχνευση επερχόμενων επικίνδυνων καταιγίδων.

- (γ) Η απότομη μεταβολή του ρεύματος κατά μήκος του καναλιού εκφόρτισης έχει ως συνέπεια την εκπομπή ενός RF σήματος ευρείας ζώνης έως τα 50-100 MHz. Η ακτινοβολία αυτή αποτελεί την κύρια αιτία του ατμοσφαιρικού θορύβου αλλά χρησιμοποιείται επίσης και για την ανίχνευση και την παρακολούθηση των καταιγίδων.

Επομένως οι αστραπές και οι κεραυνοί μπορούν να θεωρηθούν μια πηγή ευρείας ζώνης εν δυνάμει καταστροφική, η οποία έχει βρεθεί ότι μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην τηλεφωνία, στα συστήματα διανομής ισχύος, στα αεροπλάνα, (η προσβολή πολιτικών αεροσκαφών τουλάχιστον μια φορά το χρόνο είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο) και στα δίκτυα υπολογιστών που βρίσκονται αναπτυγμένα σε περιοχές μεγάλης έκτασης.

- (2) Πηγές ηλιακής και κοσμικής ακτινοβολίας. Οι αλλαγές στην ιονόσφαιρα που οφείλονται στη δραστηριότητα του ήλιου, μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στη διάδοση ραδιοκυμάτων, εξαιτίας των διακυμάνσεων της ιονοσφαιρικής ανάκλασης στην περιοχή συχνοτήτων 2-30 MHz και στις δορυφορικές επικοινωνίες λόγω της μεταβολής της ιονοσφαιρικής διάδοσης στα 150-500 MHz. Η ακτινοβολία από άλλες κοσμικές πηγές παράγει ένα RF υπόστρωμα θορύβου το οποίο είναι σημαντικό για την περιοχή των 100-1000 MHz.

1.2.2 Ανθρωπογενείς πηγές

- (1) Ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις (*Electrostatic discharges, ESD*). Κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο ενώ βρίσκονται 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. 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 απότομους παλμούς ρεύματος οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους και να βλάψουν ηλεκτρικές συσκευές. Μερικά σοβαρά προβλήματα που έχουν προκληθεί τα τελευταία χρόνια από ESD, είναι οι [3]:

- (α) εκρήξεις σε υπέρ-δεξαμενόπλοια κατά τη διάρκεια καθαρισμού των δεξαμενών τους,
- (β) ζημιές και καταστροφές μικροκυκλωμάτων κατά τη διάρκεια της διακίνησής τους,
- (γ) εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας με καύσιμο των αεροσκαφών,
- (δ) βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων.

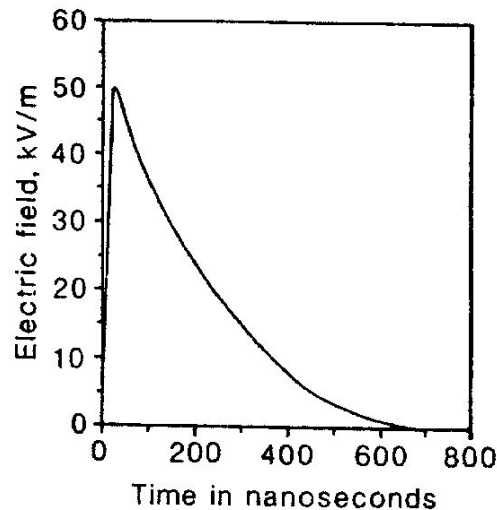
Πολλές EMC προδιαγραφές περιλαμβάνουν δοκιμές σε ESD. Το μέγεθος ενός παλμού ESD είναι στατιστικό μέγεθος από τη φύση του και έτσι συνήθως καθορίζονται τυπικοί παλμοί και ρεύματα για τις δοκιμές.

- (2) *EMP* (ή μερικές φορές *NEMP*) είναι ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός που προκαλείται από πυρηνική έκρηξη. Αυτή η πηγή θορύβου παρουσιάζει βασικά ενδιαφέρον για τους σχεδιαστές στρατιωτικών συστημάτων, αλλά όπως θα φανεί σύντομα μπορεί να έχει επίσης σοβαρές επιπτώσεις και σε πολιτικές εφαρμογές, ακόμη και σε χώρες χωρίς πυρηνικές εγκαταστάσεις.

Όταν συμβαίνει μια πυρηνική έκρηξη δημιουργείται ένας τεράστιος ηλεκτρομαγνητικός παλμός. Το μέγεθος του παλμού και η περιοχή που δέχεται τις επιπτώσεις παρουσιάζουν σοβαρό ενδιαφέρον μόνον για έξω-ατμοσφαιρικές εκρήξεις, όπως εκείνη τον Ιούλιο του 1962 από μια βόμβα 1.4 μεγατόνων περίπου 250 μίλια πάνω από το νησί Johnson, στον Ειρηνικό ωκεανό, σε μια πυρηνική δοκιμή με την επωνυμία Starfish, που έγινε ορατή σε απόσταση 3500 μιλίων μακριά, στην Αυστραλία.

Όταν μια συσκευή εκρήγνυται πέρα από την ατμόσφαιρα, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία γ και x ταξιδεύει σε ευθεία διαδρομή μέχρι να συναντήσει την κορυφή της ατμόσφαιρας, όπου κατά την πρόσκρουση διεγείρονται ισχυρά ρεύματα, σε δύο διαφορετικές διευθύνσεις λόγω του ιονισμού. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια σχηματίζουν ρεύματα που κινούνται με την ταχύτητα του φωτός, τα οποία δημιουργούν μια εκτεταμένη ράδιο-πηγή. Το μέτρο του παρατηρούμενου ηλεκτρομαγνητικού παλμού σε ένα συγκεκριμένο σημείο εξαρτάται σημαντικά από το ποσό των ακτινών γ και x που παράγονται από την έκρηξη, την απόσταση από το σημείο της έκρηξης, τη θερμοκρασία της έκρηξης και τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.

Η ράδιο-πηγή μπορεί να έχει διάμετρο μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα και να δημιουργεί ηλεκτρικά πεδία στην επιφάνεια της γης με ένταση μέχρι 50.000 V/m. Τέτοια ισχυρά πεδία μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές παρεμβολές με πολύ μεγάλα επαγόμενα ρεύματα σε εκτεθειμένους αγωγούς. Συστήματα όπως μεταφοράς ισχύος και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μπορούν να πάθουν μεγάλες ζημιές από τέτοια συμβάντα. Στο σχήμα 1.4 φαίνεται ένας τυπικό EMP παλμός δοκιμής που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της απόκρισης ενός συστήματος. Ο χρόνος ανόδου ενός παλμού EMP είναι κατά προσέγγιση 10 ns. Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα τέτοιο πεδίο δεν μπορεί να γίνει αισθητό σε όλη την περιοχή, αφού η απαιτούμενη ενέργεια θα ήταν τεράστια. Η έκταση μιας ράδιο-πηγής φτάνει πολλές εκατοντάδες χιλιόμετρα από το σημείο της έκρηξης με αποτέλεσμα περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση και δεν επηρεάζονται από το θερμικό ή το ωστικό κύμα, να δέχονται σοβαρό EMP. Γι' αυτό αμφότερες οι στρατιωτικές και οι πολιτικές αρχές πρέπει να συμπεριλάβουν την αντιμετώπιση EMP στα σχέδιά τους.



Σχήμα 1.4: Το προφίλ ενός τυπικού παλμού δοκιμής για μελέτες EMP.

(3) Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά υποσυστήματα. Αυτά αποτελούν τις περισσότερο διαδεδομένες πηγές παρεμβολής μέσα στο συνηθισμένο περιβάλλον. Μπορούν να ταξινομηθούν με σειρά σπουδαιότητας ανάλογα με την ηλεκτρομαγνητική ρύπανση που δημιουργούν γενικά στο περιβάλλον, αλλά κάτω από ειδικές συνθήκες κάθε συσκευή μπορεί να αποδειχθεί κρίσιμη. Μια τυπική ταξινόμηση δίνει την παρακάτω γενική σειρά:

- (α) πηγές θορύβου αυτοκινήτων: σύστημα ανάφλεξης, εναλλάκτες, ηλεκτρικά μοτέρ,
- (β) συστήματα διανομής ισχύος: γραμμές μεταφοράς, υποσταθμοί AC και DC, σταθμοί παραγωγής,
- (γ) βιομηχανικές εγκαταστάσεις: μηχανές συγκόλλησης, επαγωγικοί θερμαντήρες, μηχανήματα κοπής, μικροκυματικοί θερμαντήρες, γερανοί, μεταβλητής ταχύτητας οδηγοί που χρησιμοποιούν αντιστροφείς κίνησης με διαμορφωμένους κατά πλάτος παλμούς, τοπικοί ταλαντωτές, ψηφιακές συσκευές συμπεριλαμβανομένων και των υπολογιστών.

Μέσα σ' ένα τμήμα μιας συσκευής, η πραγματική πηγή μεταβατικών τάσης και ρεύματος μπορεί να οφείλεται γενικά σε τρεις πηγές:

- (i) σε ακολουθίες παλμών υψηλής συχνότητας στα ψηφιακά συστήματα,
- (ii) σε κυκλώματα ταλαντωτών υψηλών συχνοτήτων
- (iii) σε μεταβατικές καταστάσεις κυκλωμάτων που προκαλούνται από απλές λειτουργίες διακοπών.

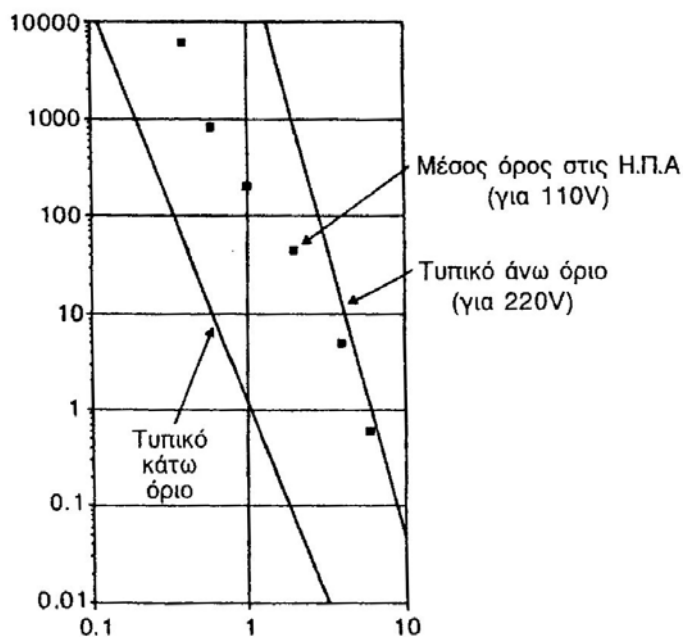
(4) *Μεταβολές της τάσης του δικτύου διανομής.* Οι μεταβολές αυτές προκαλούνται από τη φύση του δικτύου, το σύστημα διανομής και τις οποιεσδήποτε συσκευές που είναι συνδεδεμένες, μπορούν δε να υποδιαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

(α) *Μεταβολές χαμηλής συχνότητας.* Η τάση ενός τροφοδοτικού ισχύος πάντα παρουσιάζει μια πτώση όταν συνδέονται φορτία με μη μηδενική αντίσταση. Αν και το δημόσιο δίκτυο είναι σχεδιασμένο να ελαχιστοποιεί το φαινόμενο αυτό, μικρές μεταβολές είναι δύσκολο να αποφευχθούν (για το σύστημα της Μεγάλης Βρετανίας επιτρέπονται μεταβολές της τάξης του $\pm 6\%$). Επειδή μέσα σε μια εγκατάσταση μπορούν να συμβαίνουν και άλλες πτώσεις τάσης, ένας σχεδιαστής θα πρέπει να θεωρήσει ότι αυξομειώσεις της τάξης του $\pm 10\%$ είναι πολύ πιθανές για περιόδους μερικών ωρών. Εάν τα φορτία μεταβάλλονται πιο γρήγορα, τότε προφανώς οι διακυμάνσεις της τάσης αυξάνουν επίσης σε συχνότητα. Όποτε συμβαίνει ένα μεγάλο σφάλμα, εμφανίζεται μια απότομη βηματική τάση πριν γίνουν οι απαραίτητες διορθωτικές διακοπές.

Παραμορφώσεις της κυματομορφής ενός καθαρού ημιτονοειδούς κύματος μπορούν επίσης να συμβούν λόγω συνήθως μη γραμμικών φορτίων. Οι τυπικοί κανόνες σχεδιασμού για οικιακές συσκευές επιτρέπουν αρμονική παραμόρφωση μέχρι 6% ενώ οι βιομηχανικοί χρήστες θα πρέπει να αναμένουν τιμές μέχρι 10% . Τα μεταβαλλόμενα φορτία στα τριφασικά συστήματα μπορούν να οδηγήσουν σε ασυμμετρίες προκαλώντας προβλήματα σε τριφασικούς κινητήρες, κτλ.

(β) *Μεταβολές υψηλής συχνότητας.* Κάθε διαδικασία ανοίγματος ή

κλεισίματος διακοπών σε ένα σύστημα ισχύος οδηγεί στη δημιουργία γρήγορων μεταβατικών. Αν και δεν είναι δυνατόν να δοθεί μια ακριβής σχέση μεταξύ του μέγιστου πλάτους και της συχνότητας εμφάνισης, έχει βρεθεί ότι αιχμές με διπλάσιο από το μέγιστο πλάτος είναι δέκα φορές περίπου λιγότερο συχνές από αιχμές μικρότερου πλάτους. Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζεται μια τυπική διασπορά τέτοιων τιμών. Είναι προφανές ότι θεωρείται αναμενόμενη για το δίκτυο διανομής των 220 V μια αιχμή τάσης με τιμή μεταξύ 1 και 6 kV, μια φορά το χρόνο. Τέλος, επειδή τα καλώδια του δικτύου παροχής μπορούν να συμπεριφέρονται ως κεραίες, μπορούν να συλλέγουν RF σήματα καθώς και να αποτελούν το μέσο μετάδοσης για τη σηματοδότηση του δικτύου.



Σχήμα 1.5: Συχνότητα εμφάνισης μεταβατικών σημάτων υπέρτασης σε συστήματα διανομής 220 V.

- (5) *Ασύρματοι πομποί.* Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χρησιμοποιείται εκτεταμένα για τηλεπικοινωνίες και γι' αυτό το περιβάλλον ακτινοβολίας υποβάθρου πρέπει να συμπεριλαμβάνει όλους αυτούς τους χρήστες, νόμιμους και μη. Είναι σημαντικό να γίνει αντιληπτό ότι όλο

το φάσμα είναι συνωστισμένο από χρήστες και η υπέρβαση έξω από την επιτρεπόμενη περιοχή συχνοτήτων μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες. Οι σχεδιαστές μηχανημάτων θα πρέπει να θυμούνται ότι η παρεμβολή από τις παραπάνω πηγές μπορεί να είναι ιδιαίτερα σοβαρή κοντά στους πομπούς.

1.3 Ορισμός ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC)

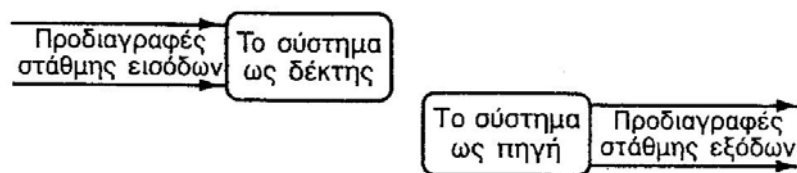
Η ιδέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αναπτύχθηκε με σκοπό να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης και χειρισμού των σύνθετων συστημάτων και να βοηθηθεί η ανάπτυξή τους. Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE)[3]:

Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC), είναι η ικανότητα μιας διάταξης, συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε σ' αυτό το περιβάλλον.

Η EMC θα πρέπει να υπάρχει σ' αμφότερα, μέσα στο σύστημα (inter-system) και μεταξύ των συστημάτων (intra-system), όπου σύστημα μπορεί να είναι παραδείγματος χάρη ένα ραδιόφωνο, ένα πλήρες ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου ή ακόμη και μια ολόκληρη πόλη. Μέσα σ' αυτό το σύστημα όλες οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συνιστώσες πρέπει να συνυπάρχουν αρμονικά. Η EMC μπορεί να θεωρηθεί με τη βοήθεια μιας απλοποιημένης έκδοσης του σχήματος 1.1, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6. Το σχήμα αυτό δείχνει ότι κάθε σύστημα που λειτουργεί ως δέκτης θα πρέπει να λειτουργεί ικανοποιητικά όταν εκτίθεται σε καθορισμένες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές (προδιαγραφές στάθμης εισόδων). Την ίδια ώρα το ίδιο σύστημα θα πρέπει να μην είναι πηγή ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής πάνω από κάποια καθορισμένα όρια (προδιαγραφές στάθμης εξόδων). Το κρίσιμο σημείο είναι ότι πολλές από αυτές τις καθορισμένες στάθμες επιβάλλονται από τη νομοθεσία, και τέτοιες νομοθετικές απαιτήσεις αναμένεται να αυξηθούν στο μέλλον, με την πιθανότητα επιβολής σοβαρών ποινών σε περιπτώσεις παράβασης.

Οι δύο γραμμές στο σχήμα 1.6 είναι για να υπενθυμίζουν ότι γενικά

υπάρχουν δύο πιθανές διαδρομές σύζευξης, προς και από κάθε δοσμένο σύστημα, αν και σε πολλές περιπτώσεις δεν χρειάζεται να θεωρηθούν και οι δύο. Συνήθως ο σχεδιαστής ενός υπο-συστήματος δεν έχει την ελευθερία να καθορίζει τα δικά του EMC όρια αλλά πρέπει να σχεδιάζει και να κατασκευάζει συσκευές σύμφωνα με εξωτερικά θεσμοθετημένα όρια, μερικά από τα οποία, όπως ήδη έχει σημειωθεί, μπορεί να αποτελούν νομικές υποχρεώσεις ή να έχουν καθαρά συμβουλευτικό χαρακτήρα. Όμως σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να μην υπάρχουν καθόλου προδιαγραφές και σ' αυτή την περίπτωση ο σχεδιασμός πρέπει να γίνει με κάποια προσοχή που να εξασφαλίζει ότι το σύστημα θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα κανονικό περιβάλλον. Ακόμη και σε περιπτώσεις που δεν συνεπάγονται σχεδιασμό προϊόντος, οι τεχνικές δοκιμών της EMC μπορούν να χρησιμεύσουν στη λύση προβλημάτων ηλεκτρικού θορύβου σε κάθε ηλεκτρικό σύστημα ή πείραμα.



Σχήμα 1.6: Πως συνδέονται οι προδιαγραφές της EMC με τους διάφορους τρόπους σύζευξης για το ίδιο σύστημα που λειτουργεί ως πομπός ή ως δέκτης.

Για τον ακριβή προσδιορισμό της EMC και άλλους ορισμούς, που συναντώνται συχνά στη βιβλιογραφία καθώς και προδιαγραφές, οι οποίες είναι χρήσιμο να δοθούν στο σημείο αυτό:

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

Ανοσία ή Ατρωσία (Immunity) σε μια διαταραχή είναι η ικανότητα μιας διάταξης, συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της

ποιότητας της/του με την παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής.

(Ηλεκτρομαγνητική) Στάθμη Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Level): Η καθορισμένη μέγιστη στάθμη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που αναμένεται να εφαρμοστεί σε μια διάταξη, συσκευή ή σύστημα που λειτουργεί σε συγκεκριμένες συνθήκες.

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

Όριο Ανοσίας ή Ατρωσίας (Immunity Limit) είναι η καθορισμένη στάθμη ανοσίας.

Περιθώριο Ανοσίας ή Ατρωσίας (Immunity Margin) είναι η διαφορά μεταξύ του ορίου ανοσίας μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος και της στάθμης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

Περιθώριο (Ηλεκτρομαγνητικής) Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Margin): είναι ο λόγος της στάθμης ανοσίας μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος ως προς μια στάθμη διαταραχής αναφοράς.

1.4 Εσωτερικές και εξωτερικές υπερτάσεις

1.4.1 Εξωτερικές υπερτάσεις (κεραυνός)

1.4.1.1 Ατμοσφαιρικό ηλεκτρικό πεδίο υπό συνθήκες καλοκαιρίας

Το ατμοσφαιρικό ηλεκτρικό πεδίο υπό συνθήκες καλοκαιρίας έχει στην επιφάνεια του εδάφους τιμές μεταξύ 100 και 400 V/m, τιμές που μειώνονται ταχύτατα όσο απομακρυνόμαστε από το έδαφος (τούτο ισχύει για μικρές σχετικά απομακρύνσεις). Η ανάπτυξη του ως άνω αναφερθέντος ηλεκτρικού πεδίου υπό συνθήκες καλοκαιρίας αποδίδεται στην ύπαρξη ενός στρώματος της ιονόσφαιρας κατειλημμένου με θετικά ηλεκτρικά φορτία, γνωστού ως στρώματος ή ζώνης Heaviside και ευρισκομένου σε μία μέση απόσταση περί

τα 100 km από την επιφάνεια του εδάφους. Όσον αφορά το ερώτημα «πώς είναι δυνατόν να υφίσταται πάντοτε το αναφερθέν ηλεκτρικό πεδίο καλοκαιρίας», μία λογικοφανής απάντηση είναι ότι η ζώνη Heaviside τροφοδοτείται με φορείς ηλεκτρικού φορτίου από τις καταιγίδες που εξελίσσονται διαρκώς γύρω από τη γη. Δεν πρέπει, πάντως, να μας διαφεύγει ότι παραδοχή των ως άνω θα σήμαινε ταυτόχρονα παραδοχή του ότι ζούμε μέσα σ' ένα πολύ μεγάλης χωρητικότητας ($\sim 0,05F$) σφαιρικό πυκνωτή.

1.4.1.2 Τύποι και φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες [1]:

- α) Μεταξύ σύννεφου και γης και αντίστροφα.
- β) Εντός του ίδιου σύννεφου.
- γ) Μεταξύ των σύννεφων.

Κεραυνοί ανάμεσα σε σύννεφα και γη

Οι κεραυνοί της κατηγορίας αυτής παρατηρούνται όταν το ηλεκτρικό πεδίο πάρει την κρίσιμη τιμή πλησίον του νέφους, οπότε έχουμε εκκένωση κατερχόμενη, ή πλησίον της γης, οπότε έχουμε εκκένωση ανερχόμενη. Σαν πολικότητα της εκκένωσης μεταξύ σύννεφου-γης, λαμβάνεται εκείνη του φορτίου του κάτω μέρους του σύννεφου που την προκάλεσε.

Κεραυνοί μέσα στα σύννεφα

Οι υπάρχουσες πληροφορίες για τους κεραυνούς του τύπου αυτού είναι λίγες και επιπλέον συχνά αντιφάσκουν μεταξύ τους. Γενικά στην περίπτωση αυτή, η εκκένωση λαμβάνει χώρα ανάμεσα στο ανώτερο θετικό και στο κατώτερο αρνητικό κέντρο του χωρικού φορτίου. Η διάρκεια της εκκένωσης είναι μεγάλη, το ρεύμα της έχει τιμές μερικές εκατοντάδες A έως 1 kA.

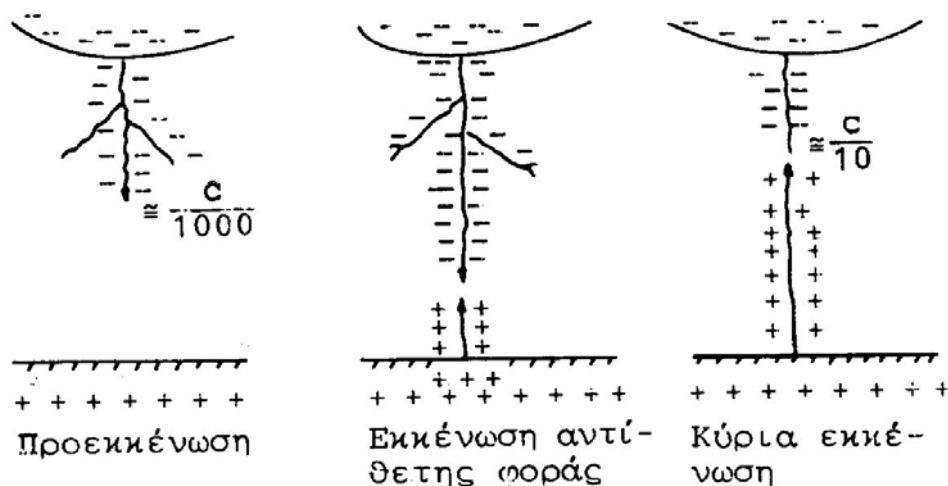
Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα

Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα εμφανίζονται σε ύψος μεγαλύτερο του 1 km και μικρότερο των 12 km. Βασικό χαρακτηριστικό των κεραυνών αυτών

είναι ότι έχουν μεγάλο μήκος κεραυνικού τόξου μέχρι και 40 km.

Οι φάσεις της εκκένωσης (Σχήμα 1.7) είναι τρεις:

- i) Προεκκένωση.
- ii) Εκκένωση αντίθετης φοράς.
- iii) Κύρια εκκένωση.



Σχήμα 1.7: Φάσεις δημιουργίας κεραυνικού τόξου.

1.4.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τον κεραυνό

Σε μία περιοχή με εύκρατο κλίμα τα χαρακτηριστικά του κεραυνού επηρεάζονται από την ορογραφική κατάσταση της περιοχής. Στις ορεινές περιοχές η ένταση του ρεύματος του κεραυνού όπως και το σχετικό φορτίο είναι μικρά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μικρή απόσταση γης-νέφους προκαλεί εκκενώσεις στη γη πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία φορτίσεως του νέφους και στο ότι το μικρό, σχετικά, μήκος του αγωγού του κεραυνού έχει σαν αποτέλεσμα τη συσσώρευση ενός μικρού μόνον φορτίου κατά μήκος αυτού [1].

Ο αριθμός των εκκενώσεων στις ορεινές περιοχές είναι πάντοτε μεγαλύτερος από εκείνον στις πεδινές. Στις πεδινές περιοχές όπου η απόσταση νέφους-

γης είναι μεγαλύτερη σημειώνονται λιγότερες εκκενώσεις αλλά με υψηλή ένταση ρεύματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σπάνια, σχετικά, το ηλεκτρικό πεδίο είναι τέτοιο ώστε να επιτρέπει κεραυνό νέφους-γης. Η μεγάλη ένταση ρεύματος οφείλεται στην παρουσία νεφών πολυφορτισμένων και οχετών εκκενώσεως μεγάλου μήκους.

Επίσης σημαντικό ρόλο στη δημιουργία κεραυνικών εκκενώσεων έχει και η εποχή. Το καλοκαίρι λόγω του σημαντικού ύψους των νεφών από το έδαφος πολλές εκκενώσεις πραγματοποιούνται εντός ενός νέφους ή μεταξύ νεφών. Αυτό έχει σαν συνέπεια μια απότομη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του εδάφους. Εάν υπάρχει κάποια αιχμηρή κατασκευή, το πεδίο πλησίον του εδάφους μπορεί να γίνει τόσο έντονο ώστε να δημιουργήσει μια ανερχόμενη εκκένωση.

Ο αριθμός των ανερχομένων εκκενώσεων κατά την καλοκαιρινή περίοδο είναι πολύ μεγαλύτερος από εκείνον των κατερχομένων. Στο άλλο διάστημα του χρόνου (άνοιξη, φθινόπωρο), τα νέφη κινούνται χαμηλότερα. Αυτό διευκολύνει την εκκένωση προς τη γη πριν ακόμη η διαδικασία φορτίσεως του νέφους ολοκληρωθεί κάνοντας λιγότερο συχνές τις εκκενώσεις μεταξύ των νεφών και περισσότερο συχνές τις εκκενώσεις μεταξύ νέφους-γης.

1.4.1.4 Παράμετροι κεραυνού

Ο κεραυνός σαν ηλεκτρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται από ορισμένες παραμέτρους: τη μέγιστη τιμή ρεύματος, τη μέγιστη κλίση μετώπου του ρεύματος $(\frac{di}{dt})_{\max}$, το μεταφερόμενο φορτίο $\int_0^{\infty} i(t)dt$ και το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος $\int_0^{\infty} i^2(t)dt$, ποσότητα ανάλογη της εκλυομένης από το κεραυνικό πλήγμα ενέργειας. Η κάθε μία από τις παραμέτρους αυτές έχει ενοχλητικές μέχρι καταστροφικές συνέπειες για ανθρώπινες ζωές και τεχνικές εγκαταστάσεις.

Έτσι, σαν συνέπεια της μέγιστης τιμής, έχουμε υπερπήδηση μονωτήρων, (λόγω ανύψωσης δυναμικού του γειωμένου πυλώνα).

Η μέγιστη κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος $(\frac{di}{dt})_{\max}$ καθορίζει τις επαγόμενες τάσεις σε βρόχους κυκλωμάτων, τάσεις, που αναπτυσσόμενες π.χ. σε λογικά κυκλώματα ή κυκλώματα που περιλαμβάνουν ευαίσθητα ηλεκτρονικά στοιχεία του συστήματος πλοήγησης ή τηλεπικοινωνίας αεροσκαφών, μπορούν να έχουν δραματικές συνέπειες.

Το ολοκλήρωμα $\int_0^{\infty} i(t)dt$, δηλαδή το μεταφερόμενο φορτίο, προκαλεί τοπική τήξη και διάτρηση μεταλλικών επιφανειών μικρού πάχους.

Τέλος το ολοκλήρωμα $\int_0^{\infty} i^2(t)dt$ είναι ανάλογο της εκλυομένης ενέργειας, η οποία προκαλεί θερμικά φαινόμενα (τήξη μετάλλων, έναυση εύφλεκτων ατμών ή αερίων).

1.4.2 Εσωτερικές υπερτάσεις

Οι εσωτερικές υπερτάσεις που αναπτύσσονται σ' ένα ηλεκτρικό δίκτυο καθορίζονται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, τη δομή και τον τρόπο της εκμετάλλευσής του. Οι εσωτερικές υπερτάσεις επιβάλλονται και στον εξοπλισμό εισόδου των υποσταθμών (Υ/Σ) (μετασχηματιστές μέτρησης, ασφαλειοαποζεύκτες, διακόπτες), επειδή δε τυχόν εσωτερικό σφάλμα ή έρπουσα εκκένωση στον εξοπλισμό αυτό δημιουργεί πολύ σοβαρότερα προβλήματα απ' ό,τι σφάλμα στη γραμμή μεταφοράς (Γ.Μ.), είναι προφανές ότι η μόνωση μιας Γ.Μ. δεν πρέπει να είναι ανώτερη από τη μόνωση του εξοπλισμού του Υ/Σ. Αντιθέτως, μέσω της μείωσης της μόνωσης μιας Γ.Μ. είναι δυνατόν να αυξηθεί εν τινί μέτρω η προστασία του εξοπλισμού του Υ/Σ. Κάτι τέτοιο μπορεί λ.χ. να γίνει με τη χρησιμοποίηση διακένων προστασίας, θέσεων δηλαδή ελαττωμένης μόνωσης, για τη μείωση του πλάτους των υπερτάσεων που φθάνουν στον Υ/Σ. Σχετικά θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το να λειτουργεί μια γραμμή των 400 kV π.χ. υπό τάση 150 kV μπορεί να αποτελέσει παράγοντα κινδύνου για τον εξοπλισμό των Υ/Σ της γραμμής. Η μόνωση της Γ.Μ. είναι πολύ υψηλή σε σχέση με τη μόνωση των Υ/Σ, άρα εσωτερικές υπερτάσεις φθάνουν ανεμπόδιστα, ούτως ειπείν, στην είσοδο των υποσταθμών.

Επειδή η μελέτη των υπερτάσεων γίνεται με αναφορά στο μέγιστο αυτών (εύρος, τιμή κορυφής) και μάλιστα μέσω μεγεθών ανηγμένων (p.u.) (στην υπό ομαλές συνθήκες επιβεβλημένη τάση βιομηχανικής συχνότητας), αναφέρουμε αρχικά τα χαρακτηριστικά μεγέθη της τάσης «ομαλής» λειτουργίας του δικτύου, που ενδιαφέρουν εν προκειμένω:

Η ενδεικνύμενη τιμή της πολικής τάσεως λειτουργίας ενός τριφασικού δικτύου, με την οποία ονομάζουμε το δίκτυο (π.χ. δίκτυο των 150, των 400 kV) χαρακτηρίζεται σαν ονομαστική τάση U_n του δικτύου.

Μεγίστη τάση λειτουργίας U_m του εξοπλισμού είναι η μέγιστη ενδεικνύμενη τιμή της πολικής τάσεως για την οποία προδιαγράφεται ο εξοπλισμός ενός δικτύου σε ό,τι αφορά τη μόνωσή του, είναι μ' άλλα λόγια εκείνη η τάση την οποία μπορεί να ανεχθεί ο εξοπλισμός διαρκώς χωρίς προβλήματα.

1.4.2.1 Παροδικές υπερτάσεις βιομηχανικής συχνότητας

Οι παροδικές υπερτάσεις βιομηχανικής συχνότητας προέρχονται από την εκδήλωση του φαινομένου Ferranti στο άκρο αφόρτιστης γραμμής μεταφοράς, από τη μετατόπιση του ουδετέρου κόμβου δικτύου κατά την εκδήλωση μονοφασικού σφάλματος προς γη και από την απόρριψη φορτίου [1].

Όσον αφορά την εκδηλούμενη υπέρταση στο άκρο αφόρτιστης Γ.Μ. (φαινόμενο Ferranti) και αν U_1 η τάση αναχωρήσεως (στην αρχή της γραμμής) και U_2 η τάση αφίξεως (στο ανοικτό άκρο της γραμμής) είναι γνωστή η προσεγγιστική σχέση (αναφερόμενη σε Γ.Μ. μήκους έως 500 km):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2 LC}{2}} \quad (1)$$

όπου L και C η ολική αυτεπαγωγή και χωρητικότητα της γραμμής αντίστοιχα.

1.4.2.2 Υπερτάσεις χειρισμών

Καθ' οποιαδήποτε αλλαγή καταστάσεως σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο (ζεύξη, απόζευξη ή , μ' άλλα λόγια, κλείσιμο άνοιγμα ενός διακόπτη) εμφανίζονται οι (γενικώς ανεπιθύμητες, αλλά αναπόφευκτες) υπερτάσεις χειρισμών, οι οποίες διαδίδονται στο θεωρούμενο ηλεκτρικό δίκτυο, υπό μορφή οδευόντων κυμάτων με σύνθετη κυματομορφή [1].

Οι συνηθέστερες περιπτώσεις ανάπτυξης και διάδοσης τέτοιων υπερτάσεων σ' ένα δίκτυο είναι οι παρακάτω:

- Διακοπή χωρητικού ρεύματος (Γ.Μ. ή αφόρτιστο καλώδιο, πυκνωτές).
- Ενεργοποίηση και επανάζευξη μιας γραμμής μεταφοράς με ανοικτό άκρο.
- Διακοπή μικρών επαγωγικών ρευμάτων.
- Διακοπή ρευμάτων βραχυκυκλώματος.

Οι υπερτάσεις χειρισμών θεωρητικά μεν μπορεί να λάβουν υψηλότερες τιμές (έως και 7,5 p.u.), συνήθως όμως το εύρος των δεν υπερβαίνει τα 4 p.u. και η χρονική τους διάρκεια είναι της τάξεως εκατοντάδων μs έως και λίγων χιλιάδων μs. Παλαιότερα και προκειμένου να ελεγχθεί η αντοχή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού σε υπερτάσεις χειρισμών, αυτός υποβάλλονταν σε εργαστηριακή καταπόνηση με συρμούς αποσβεννυμένων ταλαντώσεων, αργότερα ήρθε η καταπόνηση με διπλοεκθετικές κρουστικές τάσεις μεγάλης διάρκειας (αρχικά με την κυματομορφή 22/2000 μs και τώρα με την 250/2500 μs).

1.5 Η ανάγκη για τυποποίηση

Στην σημερινή κοινωνία, χρησιμοποιούμε καθημερινά πληθώρα ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών. Η ανάγκη να ελέγχεται η συμπεριφορά των συσκευών αυτών σε διάφορες συνθήκες με σκοπό την ασφάλεια του χρήστη αλλά και την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας αυτών έχει προ πολλού προκύψει.

Οι διεθνείς οργανισμοί τυποποίησης, σε μια προσπάθεια να θεσπίσουν δοκιμές για να πιστοποιήσουν την καλή και ασφαλή λειτουργία των συσκευών, όρισαν πρότυπα δοκιμών, με τα οποία θα πρέπει να συμμορφώνεται κάθε συσκευή που παράγεται και τελικά θα χρησιμοποιηθεί από κάποιον χρήστη.

Ο χρήστης, μπορεί να βρίσκεται είτε σε περιβάλλον ελαφριάς βιομηχανίας, είτε σε περιβάλλον κατοικίας είτε σε εμπορικό περιβάλλον. Ο κατασκευαστής, θα πρέπει να παρέχει πιστοποιητικά συμμόρφωσης με κάποιους κανονισμούς στον αγοραστή ή χρήστη που θα εγγυώνται την ασφαλή και σωστή λειτουργία της κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Έχοντας ο χρήστης στα χέρια του το εκάστοτε πιστοποιητικό δοκιμής, θα γνωρίζει ότι η συσκευή που έχει στα χέρια του ανταποκρίνεται σε αυτό για το οποίο έχει πιστοποιηθεί και ότι σε αυτή έχουν γίνει κάποιες δοκιμές (σειράς ή τύπου) με σκοπό τον έλεγχο αυτής.

Η πιστοποίηση και οι έλεγχοι γίνονται για χαρακτηριστικά τα οποία βρίσκονται μέσα στις τυπικές συνθήκες λειτουργίας της συσκευής ή σε συνθήκες λειτουργίας που μπορεί να βρεθεί η συσκευή που βρίσκονται πέρα από τις κανονικές, αλλά είναι πιθανές να συμβούν.

Οι διεθνείς οργανισμοί τυποποίησης έχουν προσπαθήσει να προσαρμόσουν τις δοκιμές έτσι ώστε να είναι εφαρμόσιμες σε μεγάλο εύρος δοκιμίων. Θα ήταν δύσκολο να υπάρχει διαφορετική δοκιμή για κάθε συσκευή που κυκλοφορεί στην αγορά.

Κεφάλαιο 2

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ EN 61000-4-5

Everything should be as simple as it is, but not simpler.

Albert Einstein

2.1 Γένιο πρότυπο ατρωσίας

Μια σημαντική παράμετρος για την οποία υπάρχει ανάγκη δοκιμής και πιστοποίησης σε μια συσκευή που προορίζεται για χρήση είναι η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Συσκευές που συνδέονται μεταξύ τους ή συσκευές που συνδέονται σε κάποιο δημόσιο δίκτυο παροχής χαμηλής τάσης ή συσκευές που τροφοδοτούνται από μπαταρία ή πηγή συνεχούς ρεύματος (DC) ή ακόμα και συσκευές που εργάζονται η μία κοντά στην άλλη, θα πρέπει να συμμορφώνονται με κάποιες δοκιμές για ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα.

Το πρότυπο για απαιτήσεις ατρωσίας EMC (ElectroMagnetic Compatibility) για συσκευές που προορίζονται για χρήση σε περιβάλλον κατοικιών, εμπορικό περιβάλλον και περιβάλλον ελαφριάς βιομηχανίας είναι το EN 50082-1. Για περιβάλλοντα βιομηχανίας υπάρχει το EN 50082-2. Όταν υπάρχει κάποιο σχετικό αποκλειστικό πρότυπο προϊόντος ή οικογένειας προϊόντων ατρωσίας EMC, θα υπερισχύει του γένιου προτύπου.

Το αντικείμενο του προτύπου είναι να ορίσει τις απαιτήσεις δοκιμής ατρωσίας των συσκευών που ορίζονται στο πεδίο εφαρμογής, σε σχέση με συνεχείς και μεταβατικές, αγόμενες και ακτινοβολούσες διαταραχές, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρομαγνητικών εκφορτίσεων [4].

Οι απαιτήσεις ατρωσίας έχουν επιλεγεί ώστε να διασφαλίζεται μια επαρκής στάθμη ατρωσίας συσκευών σε τοποθεσίες κατοικιών, εμπορίου και ελαφριάς βιομηχανίας. Οι στάθμες δεν καλύπτουν εντούτοις ακραίες περιπτώσεις που μπορεί να εμφανιστούν σε κάθε τοποθεσία αλλά με μια εξαιρετικά χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης. Δεν περιλαμβάνονται όλα τα

φαινόμενα διαταραχής για σκοπούς δοκιμής στο γένιο πρότυπο αλλά μόνο εκείνα που θεωρούνται ως σχετικά με τον εξοπλισμό που καλύπτεται από το πρότυπο.

Η ποικιλία και η διαφορετικότητα των συσκευών εντός του πεδίου εφαρμογής του προτύπου καθιστά δύσκολο τον καθορισμό συγκεκριμένων κριτηρίων για την αποτίμηση των αποτελεσμάτων ατρωσίας. Αν ως αποτέλεσμα της εφαρμογής των δοκιμών που ορίζονται στο πρότυπο η συσκευή καθίσταται μη ασφαλής ή επικίνδυνη, τότε η συσκευή πρέπει να θεωρείται ότι απέτυχε στην δοκιμή. Πρέπει επίσης να παρέχεται από τον κατασκευαστή και να σημειώνεται στην έκθεση δοκιμής μια λειτουργική περιγραφή και ένας ορισμός των κριτηρίων επίδοσης [4].

- **Κριτήριο επίδοσης Α.** Η συσκευή πρέπει να συνεχίζει να λειτουργεί όπως προορίζεται. Δεν επιτρέπεται καμία υποβάθμιση της επίδοσης ή απώλεια της λειτουργίας κάτω από μία στάθμη επίδοσης που προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή, όταν η συσκευή χρησιμοποιείται όπως προορίζεται. Η στάθμη επίδοσης μπορεί να αντικατασταθεί από μια επιτρεπτή απώλεια επίδοσης.
- **Κριτήριο επίδοσης Β.** Η συσκευή πρέπει να συνεχίζει να λειτουργεί όπως προορίζεται. Δεν επιτρέπεται καμία υποβάθμιση της επίδοσης ή απώλεια της λειτουργίας κάτω από μία στάθμη επίδοσης που προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή, όταν η συσκευή χρησιμοποιείται όπως προορίζεται. Η στάθμη επίδοσης μπορεί να αντικατασταθεί από μια επιτρεπτή απώλεια επίδοσης. Εν τούτοις, κατά την διάρκεια της δοκιμής, επιτρέπεται υποβάθμιση της επίδοσης. Δεν επιτρέπεται αλλαγή της πραγματικής λειτουργικής κατάστασης ή των αποθηκευμένων δεδομένων.
- **Κριτήριο επίδοσης Γ.** Επιτρέπεται προσωρινή απώλεια λειτουργίας, υπό την προϋπόθεση ότι η λειτουργία είναι αυτοεπανακτώμενη ή μπορεί να αποκατασταθεί με την λειτουργία κομβίων ελέγχου.

Οι δοκιμές πρέπει να γίνονται στις ζώνες συχνότητων που διερευνώνται, με την συσκευή που δοκιμάζεται στον πιο επιδεκτικό (ευαίσθητο) τρόπο λειτουργίας που είναι βέβαια συνεπής με τις κανονικές εφαρμογές. Η

διάρθρωση του δείγματος δοκιμής πρέπει να μεταβάλλεται για να επιτευχθεί η μέγιστη επιδεκτικότητα. Οι συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας πρέπει να είναι ταυτόσημες με τις συνθήκες πραγματικής λειτουργίας της συσκευής.

Οι δοκιμές που μπορούν να γίνουν είναι πολλές. Ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής της συσκευής, πρέπει να γίνονται από τον κατασκευαστή και οι ανάλογες δοκιμές. Στους παρακάτω πίνακες (2.1-2.5) φαίνεται το εύρος των δοκιμών του προτύπου [4].

Πίνακας 2.1 : Ατρωσία – Θύρα περιβλήματος

	Περιβαλλοντικά φαινόμενα	Βασικό πρότυπο	Κριτήριο Επίδοσης
1.1	Μαγνητικά πεδία συχνότητας ισχύος	EN 61000-4-8	A
1.2	Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ραδιοσυχνότητας. Διαμορφωμένο κατά πλάτος.	EN 61000-4-3	A
1.3	Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ραδιοσυχνότητας. Φέρον διαμορφωμένο με κλείδα.	ENV 50204	A
1.4	Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση	EN 61000-4-2	B

Πίνακας 2.2 : Ατρωσία – Θύρες για γραμμές σήματος και γραμμές ελέγχου.

	Περιβαλλοντικά φαινόμενα	Βασικό πρότυπο	Κριτήριο Επίδοσης
2.1	Κοινός ρυθμός ραδιοσυχνότητας	EN 61000-4-6	A
2.2	Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα	EN 61000-4-4	B

Πίνακας 2.3 : Ατρωσία – Θύρες εισόδου και εξόδου ισχύος συνεχούς ρεύματος

	Περιβαλλοντικά φαινόμενα	Βασικό πρότυπο	Κριτήριο Επίδοσης
3.1	Κοινός ρυθμός ραδιοσυχνότητας	EN 61000-4-6	A
3.2	Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα	EN 61000-4-4	B
3.3	Υπερτάσεις. Φάση προς γη. Μεταξύ φάσεων	EN 61000-4-5	B

Πίνακας 2.4 : Ατρωσία – Θύρες εισόδου και εξόδου ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος

	Περιβαλλοντικά φαινόμενα	Βασικό πρότυπο	Κριτήριο Επίδοσης
4.1	Κοινός ρυθμός ραδιοσυχνότητας	EN 61000-4-6	A
4.2	Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα	EN 61000-4-4	B
4.3	Υπερτάσεις. Φάση προς γη. Μεταξύ φάσεων	EN 61000-4-5	B
4.4	Βυθίσεις τάσης	EN 61000-4-11	B/Γ
4.5	Διακοπές τάσης	EN 61000-4-11	Γ

Πίνακας 2.5 : Ατρωσία-Θύρες λειτουργικής γείωσης

	Περιβαλλοντικά φαινόμενα	Βασικό πρότυπο	Κριτήριο Επίδοσης
5.1	Κοινός ρυθμός ραδισυχνότητας	EN 61000-4-6	A
5.2	Ταχέα μεταβατικά φαινόμενα	EN 61000-4-4	B

2.2 Το πρότυπο EN 61000-4-5

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για δοκιμές που αφορούν τις υπερτάσεις μεταξύ φάσης και γης αλλά και μεταξύ φάσεων, υπάρχει το πρότυπο EN 61000-4-5 το οποίο περιγράφει τις τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων για την δοκιμή της ατρωσίας από υπερτάσεις - υπερεντάσεις.

Είναι μια πολύ σημαντική δοκιμή αφού στην καθημερινή ζωή, υπερτάσεις μπορούν να συμβούν ανά πάσα στιγμή. Το δημόσιο δίκτυο παροχής ισχύος έχει αντικεραυνική προστασία στους υποσταθμούς. Σε περίπτωση όμως που ο καταναλωτής βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το τελευταίο εγκατεστημένο αντικεραυνικό, θα πρέπει ο ίδιος να λάβει μέτρα για την αντικεραυνική προστασία αφού τυχόν κεραυνικό πλήγμα μπορεί να βρίσκεται πλησίον του καταναλωτή. Επιπλέον, υπερτάσεις και υπερεντάσεις μπορούν να δημιουργηθούν από την έναυση ή την σβέση ενός μεγάλου κινητήρα η από την απότομη έναυση ή σβέση μεγάλων φορτίων.

Συνεπώς, μια συσκευή που προορίζεται για σύνδεση στο δημόσιο δίκτυο παροχής ισχύος, πρέπει να έχει πιστοποιηθεί ότι για συνήθεις υπερτάσεις που μπορεί να συμβούν δεν θα καταστραφεί.

Το πρότυπο περιγράφει δοκιμές για υπέρταση μεταξύ φάσης και γης αλλά και μεταξύ 2 φάσεων για μονοφασικές αλλά και τριφασικές διατάξεις. Το πρότυπο καθορίζει τις συνθήκες της δοκιμής καθώς και την μέθοδο των μετρήσεων [5].

Γενικά, το πρότυπο αποδέχεται ότι υπερτάσεις μπορούν να συμβούν είτε λόγω κάποιου κεραυνικού πλήγματος είτε λόγω μεταβατικών φαινομένων από διακόπτες φορτίων.

Συγκεκριμένα, λόγω μεταβατικών φαινομένων, το πρότυπο αναφέρει [5]:

A) την διαταραχή λόγω αποσύνδεσης σημαντικών στοιχείων ενός δικτύου όπως είναι συστοιχίες πυκνωτών.

B) την διαταραχή λόγω αποσύνδεσης φορτίων κοντά στην περιοχή του δοκιμίου ή λόγω σημαντικών αλλαγών στα φορτία του δικτύου διανομής ισχύος.

Γ) την διαταραχή λόγω κυκλωμάτων συντονισμού με διακοπτικές συσκευές όπως θυρίστορ.

Δ) τις διαταραχές λόγω σφαλμάτων στο δίκτυο, όπως βραχυκυκλώματα και σφάλματα στις γειώσεις.

Οι κυριότεροι μηχανισμοί με τους οποίους προκαλούνται υπερτάσεις από κεραυνό είναι σύμφωνα με το πρότυπο οι εξής [5]:

A) κατευθείαν πτώση κεραυνού σε ένα εξωτερικό δίκτυο στο οποίο θα εισάγει υψηλά ρεύματα τα οποία θα δημιουργήσουν υπερτάσεις τα οποία θα ρέουν είτε μέσω της αντίστασης της γης είτε μέσω της εμπέδησης του εξωτερικού δικτύου.

B) η επαγωγική δημιουργία υπέρτασης στους αγωγούς εντός ή εκτός ενός κτιρίου από ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο έχει προκληθεί από κεραυνό μεταξύ νεφών ή γενικότερα από έμμεσο κεραυνικό πλήγμα.

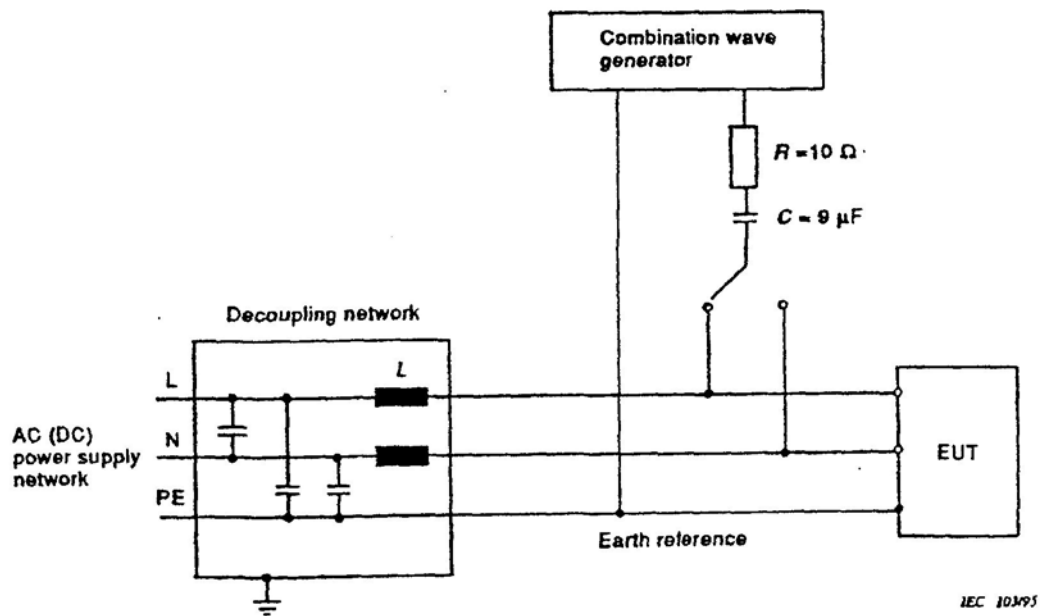
Γ) ρεύμα εντός της γης που ρέει έπειτα από κεραυνικό πλήγμα και επηρεάζει την γείωση κάποιας εγκατάστασης.

Η προσομοίωση που προτείνει το πρότυπο πρέπει να προσομοιώνει τα παραπάνω φαινόμενα πολύ καλά.

2.2.1 Οι διατάξεις ελέγχου των δοκιμών

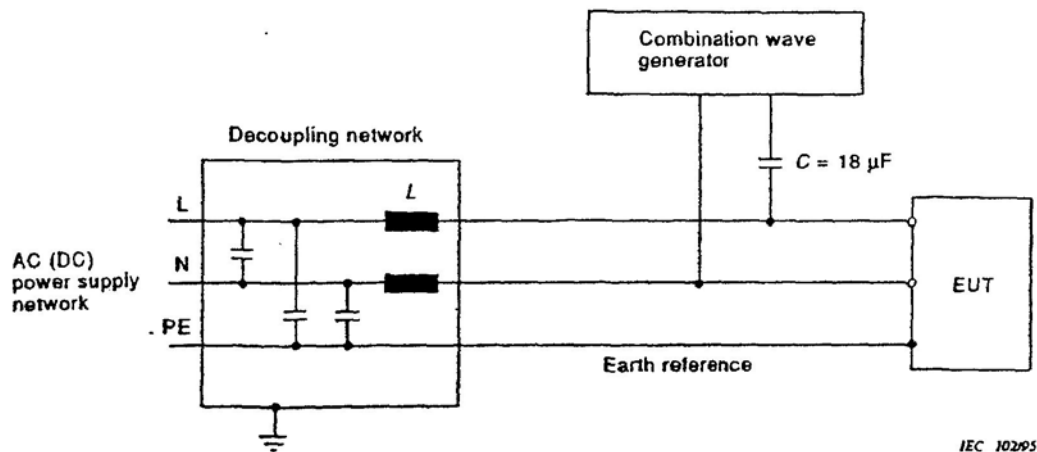
Οι διατάξεις που περιγράφει το πρότυπο για να ελεγχθούν μονοφασικά αλλά και τριφασικά δοκίμια παρουσιάζονται στα σχήματα 2.1-2.4 [5]:

A)



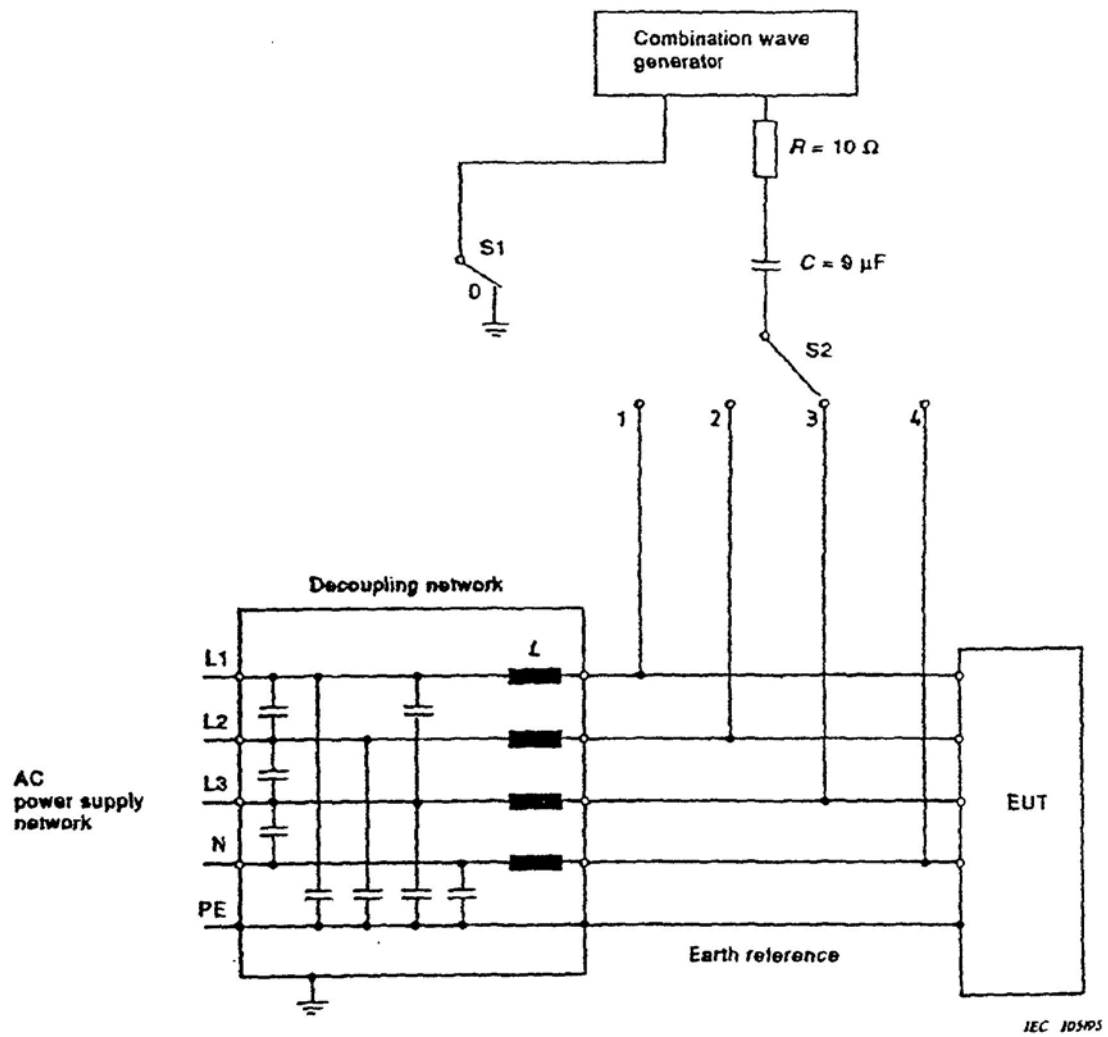
Σχήμα 2.1: Μονοφασικά δοκίμια. Υπέρταση μεταξύ φάσης και γης.

B)



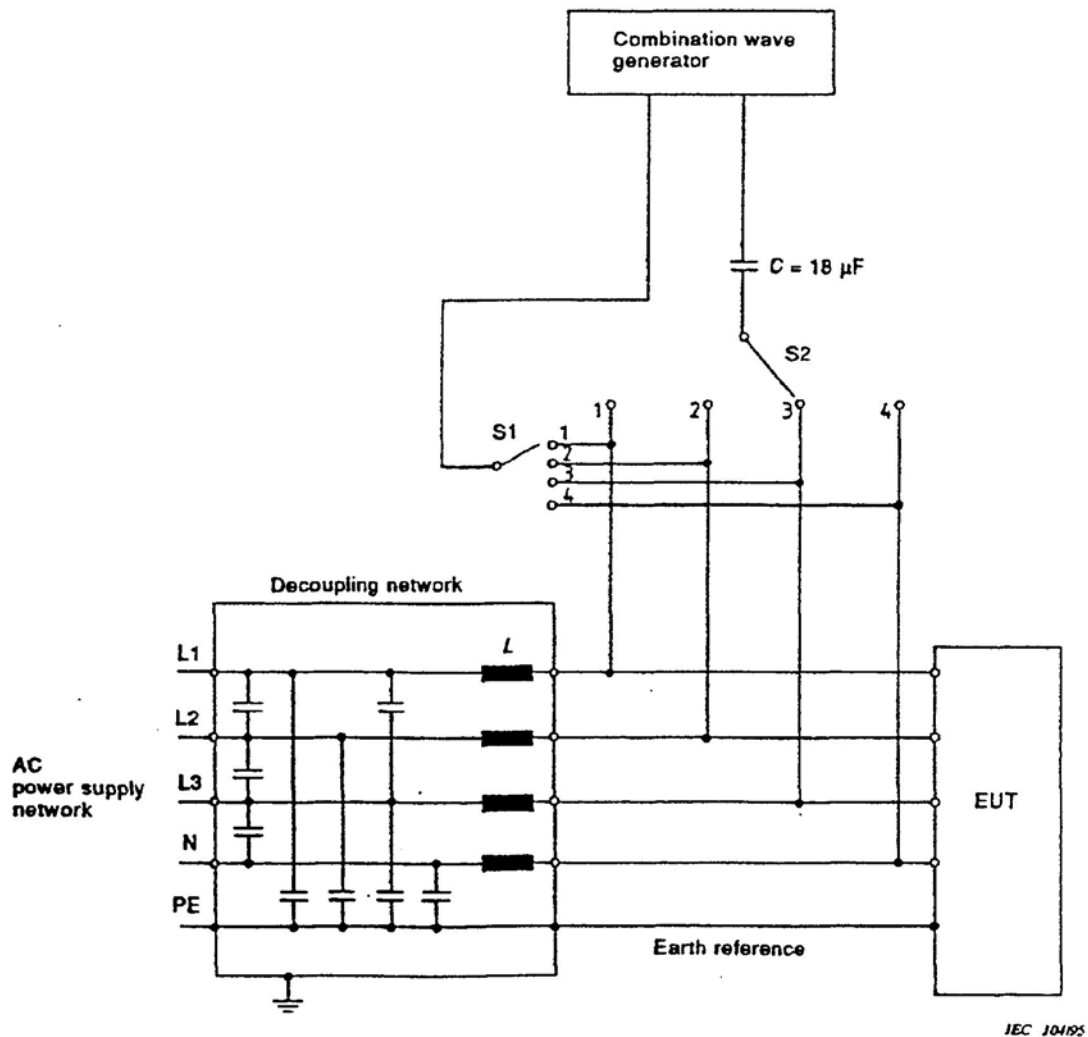
Σχήμα 2.2: Μονοφασικά δοκίμια. Υπέρταση μέσω δύο φάσεων.

Γ)



Σχήμα 2.3 : Τριφασικά δοκίμια. Υπέρταση μεταξύ φάσης και γης.

Δ)



Σχήμα 2.4: Τριφασικά δοκίμια. Υπέρταση μεταξύ δύο φάσεων.

Όπως φαίνεται στα σχήματα (2.1-2.4), στην πλευρά της τροφοδοσίας του δοκιμίου υπάρχει ένα κύκλωμα σύζευξης (Decoupling Network) το οποίο βρίσκεται εκεί έτσι ώστε να αποτρέπει να επηρεαστούν άλλες συσκευές συνδεδεμένες στο δίκτυο από την υπέρταση που επιβάλλεται στο δοκίμιο. Είναι ένα φίλτρο δηλαδή το οποίο περιορίζει το προσομοιωμένο κεραυνικό πλήγμα στο δοκίμιο και δεν το αφήνει να φύγει προς την πλευρά του δικτύου παροχής ισχύος.

Πίνακας 2.6: Τα στοιχεία των κυκλωμάτων σύζευξης.

C (coupling capacitor)	9 μ F ή 18 μ F ανάλογα με την δοκιμή
L (decoupling inductance for supply voltage)	1,5 mH

2.2.2 Η γεννήτρια συχνοτήτων

Η γεννήτρια συχνοτήτων που προσομοιώνει το κεραυνικό πλήγμα, επίσης πρέπει να συμμορφώνεται με κάποιες προδιαγραφές [5].

Η γεννήτρια συχνοτήτων που προσομοιώνει τον κεραυνό, θα πρέπει να είναι ικανή για διάφορα επίπεδα ελέγχου που βάση προτύπου θα πρέπει να είναι τα εξής:

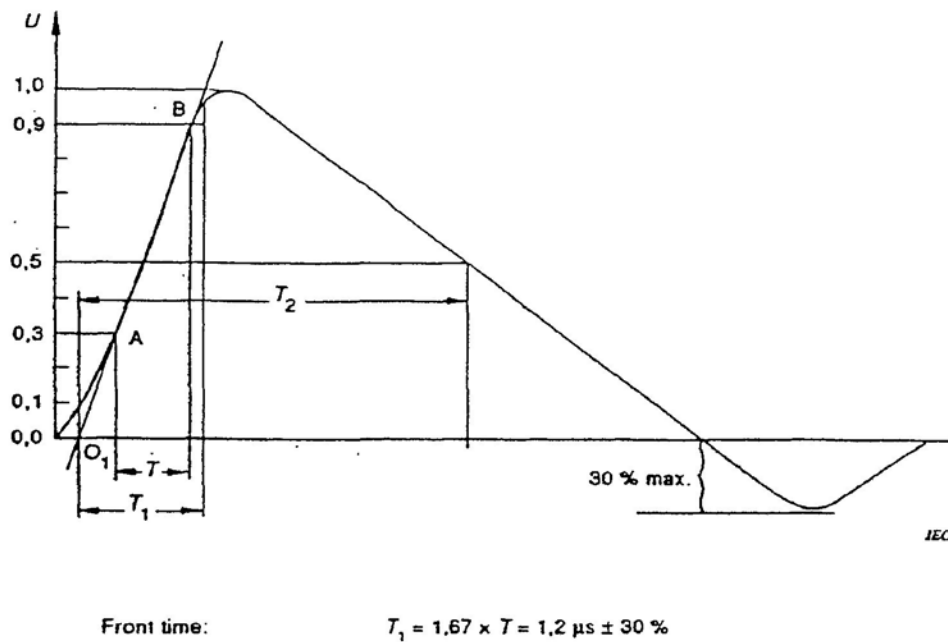
Πίνακας 2.7 : Επίπεδα ελέγχου δοκιμών προτύπου EN 61000-4-5

ΕΠΙΠΕΔΟ	ΤΑΣΗ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ± 10 % kV
1	0,5
2	1,0
3	2,0
4	4,0
x	ΕΙΔΙΚΟ (ανάλογα με δοκίμιο)

A) Τάση εξόδου ανοικτού κυκλώματος [5].

Η κυματομορφή (Σχήμα 2.5), θα πρέπει να έχει ανοχή στο ανοιχτοκύκλωμα $\pm 10\%$.

Θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ελάχιστη με 0,5 kV και τουλάχιστον μέγιστη και ίση με 4,0 kV.

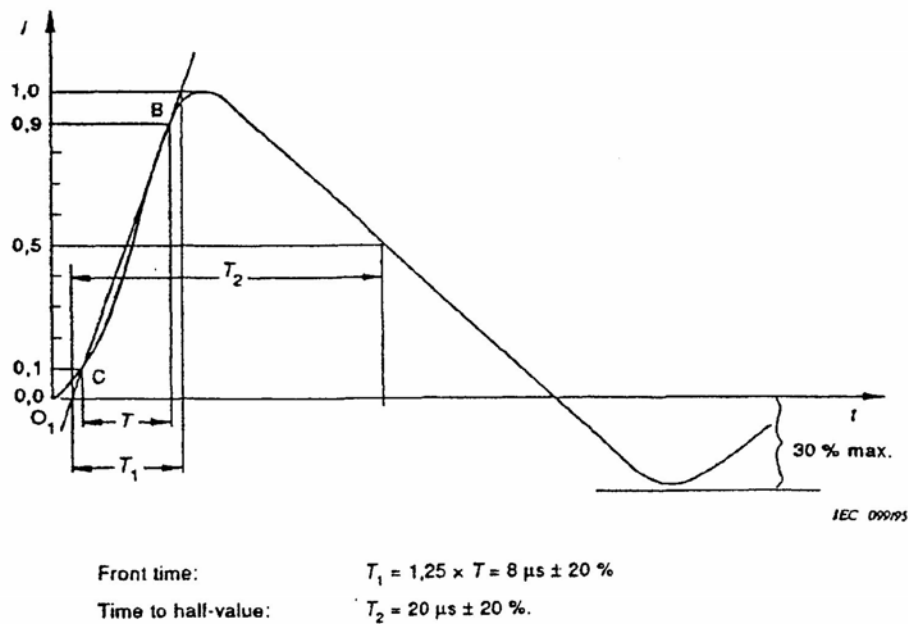


Σχήμα 2.5: Χαρακτηριστική τάσης ανοιχτοκύκλωσης της γεννήτριας.

B) Ρεύμα εξόδου βραχυκύκλωσης [5].

Η κυματομορφή (Σχήμα 2.6), θα πρέπει να έχει ανοχή στο βραχυκύκλωμα ίση με $\pm 10\%$.

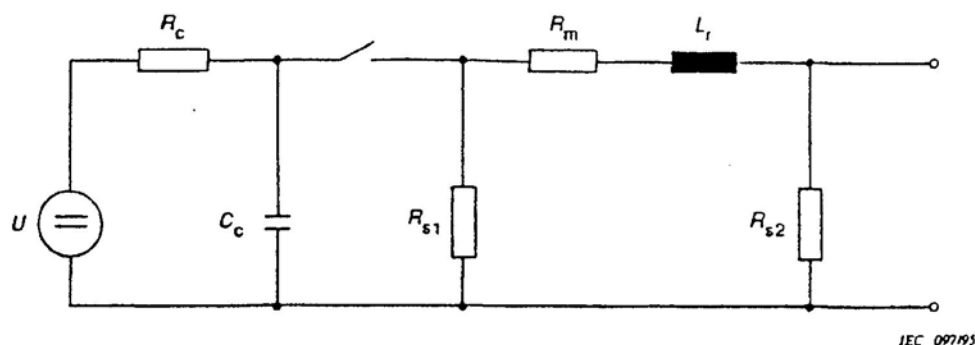
Θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ελάχιστο με 0,25 kA και τουλάχιστον μέγιστο και ίσο με 2,0 kA.



Σχήμα 2.6: Χαρακτηριστική ρεύματος βραχυκύκλωσης

Τέλος η πολικότητα θα πρέπει να μπορεί να είναι θετική ή αρνητική και θα πρέπει να μπορεί να εναλλάσσεται η φάση μεταξύ 0° και 360° από την φάση γραμμής εισόδου. Επανάληψη του πειράματος θα πρέπει να μπορεί να γίνεται τουλάχιστον κάθε ένα λεπτό. Επίσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και αντιστάσεις μετά την γεννήτρια, έτσι ώστε να αυξηθεί η εμπέδηση της πηγής και να φτάσει τα επιθυμητά επίπεδα.

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα για το πώς θα πρέπει να είναι η γεννήτρια φαίνεται στο σχήμα 2.7 [5]:



C_c Πυκνωτής αποθήκευσης ενέργειας

U Πηγή υψηλής τάσης

R_s Αντίσταση διαμόρφωσης διάρκειας παλμού

R_c Αντίσταση φόρτισης

L_f Πηνίο διαμόρφωσης χρόνου ανόδου

R_m Αντίσταση προσαρμογής εμπέδησης

Σχήμα 2.7: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας προσομοίωσης κεραυνικού πλήγματος

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες της δοκιμής, θα πρέπει να είναι οι εξής:

Θερμοκρασία : 15° έως 35° C,

υγρασία 10% έως 75% και

πίεση 860 mbar με 1060 mbar.

Επίσης, το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον του εργαστηρίου δεν θα πρέπει να επηρεάσει την δοκιμή. Με λίγα λόγια θα πρέπει οι όποιες μετρήσεις, να γίνονται μέσα σε ανηχικό θάλαμο (Σχήμα 2.8) με σκοπό να ελαχιστοποιούνται οι όποιες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από το περιβάλλον. Σημασία θα πρέπει να δίνεται ώστε οι γειώσεις του εργαστηρίου να είναι σωστές και εντός προδιαγραφών.

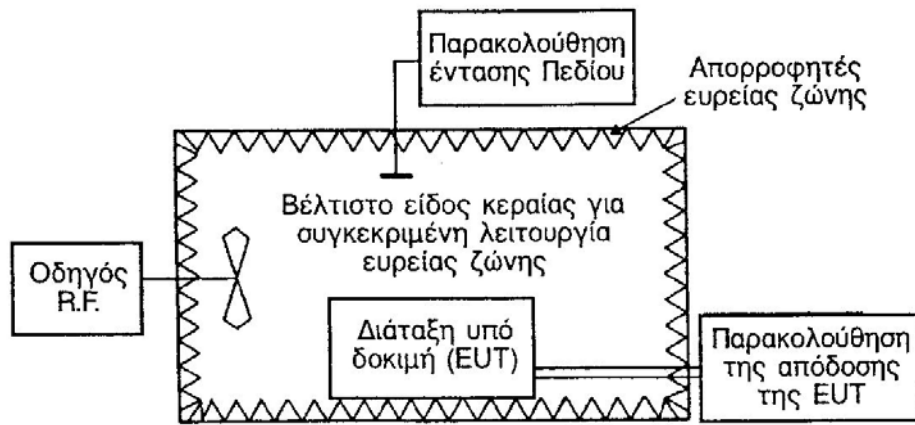
Γενικότερα, για την πραγματοποίηση μιας επιτυχούς μέτρησης είναι απαραίτητος ο ορισμός κάποιων παραμέτρων [5]:

(1) Η μέτρηση πρέπει να γίνει σε ένα γνωστό περιβάλλον. Αυτό μπορεί να είναι ένας ανοιχτός χώρος, αλλά επειδή οι στάθμες των

χρησιμοποιούμενων πεδίων μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολή σε άλλους, χρησιμοποιείται καλύτερα ένας ανηχικός θάλαμος ή ένας προστατευμένος χώρος. Το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον πρέπει να είναι καλά καθορισμένο και να διατηρείται αμετάβλητο. Οι θωρακισμένοι ανηχικοί θάλαμοι αποτελούν μια πολύ καλή λύση αλλά είναι δύσκολο να κατασκευαστούν για συχνότητες κάτω από τα 200 MHz. Οι θάλαμοι αυτοί χρησιμοποιούν ευρείας ζώνης απορροφητές σχήματος πυραμίδας, τοποθετημένους σε όλες σχεδόν τις εσωτερικές επιφάνειές τους. Σε κάθε περίπτωση το πρόβλημα είναι να εξασφαλιστεί ο πλήρης έλεγχος των ανακλάσεων και των συντονισμών.

- (2) Η πηγή διέγερσης για τις δοκιμές ευαισθησίας πρέπει να παρέχει ένα επαναλαμβανόμενο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον που να έχει τη σωστή κυματομορφή και τις συνιστώσες συχνότητας, ήτοι να δίνει μια ρεαλιστική αναπαράσταση της αναμενόμενης διαταραχής. Για παράδειγμα δεν είναι δυνατόν, όπως δείχνει και η αναφορά, να χρησιμοποιηθεί μια αστραπή ως κατάλληλη πηγή ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών παλμών για την προσομοίωση των επιδράσεων ενός EMP σε ένα αεροσκάφος, λόγω της έλλειψης υψηλών συχνοτήτων. Για τη δημιουργία της ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται συχνά κεραίες διαφόρων τύπων με αρκετό εύρος ζώνης διαφόρων τύπων με αρκετό εύρος ζώνης και συνήθως απαιτούνται περισσότερες από μια για την κάλυψη συχνοτήτων που ενδιαφέρει. Στο κεφάλαιο 5 θα αναφερθούν σε συντομία μερικά από τα συστήματα κεραιών που χρησιμοποιούνται καθώς και μερικές εναλλακτικές μέθοδοι δημιουργίας του απαραίτητου ελεγχόμενου ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος.
- (3) Είναι απαραίτητη η γνώση του τρόπου υπολογισμού των σταθμών των προδιαγραφών (στάθμες ευαισθησίας ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου) από τις μετρημένες τάσεις και ρεύματα, που συλλέγονται από κατάλληλες κεραίες λήψης ή αισθητήρες, χρησιμοποιώντας τους σωστούς παράγοντες των κεραιών.
- (4) Το σύστημα παρακολούθησης που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της συμπεριφοράς της υπό έλεγχο συσκευής (EUT) θα πρέπει να έχει τη

δυνατότητα αυτοέλεγχου και να δίνει σαφή μηνύματα εάν παρουσιάζει κάποιο πρόβλημα κακής λειτουργίας.



Σχήμα 2.8: Το σχηματικό διάγραμμα ενός ηλεκτρομαγνητικού ανηχοϊκού θαλάμου κατάλληλου για δοκιμές ευαισθησίας στην EMC.

Κεφάλαιο 3

ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SPICE – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Η επιστήμη δεν είναι τίποτε παραπάνω από αντίληψη.

Πλάτων

3.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός και η ανάλυση ενός ηλεκτρικού ή ηλεκτρονικού κυκλώματος απαιτεί ακριβείς μεθόδους με τις οποίες μπορεί να προσδιορισθεί η επίδοσή του. Παλαιότερα οι σχεδιαστές μηχανικοί, για να αναλύσουν ένα κύκλωμα, έπρεπε να γράψουν τις εξισώσεις που το περιγράφουν, τις οποίες μπορούσαν να τις λύσουν οι ίδιοι ή να αναλάβει την επίλυσή τους ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η μελέτη αυτή ήταν ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρος στις δε περιπτώσεις όπου το κύκλωμα ήταν μεγάλο και πολύπλοκο, γινόταν πρακτικώς αδύνατη. Στη συνέχεια, εφόσον κρινόταν ικανοποιητικός ο θεωρητικός σχεδιασμός, έπρεπε να κατασκευασθεί και να μελετηθεί στο εργαστήριο ένα πρωτότυπο κύκλωμα, στο οποίο σίγουρα έπρεπε να γίνουν μετατροπές, έτσι ώστε να ικανοποιηθούν τα προκαθορισμένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του [2].

Γενικά, χρειάζεται πολύς χρόνος και κόπος για να περάσει ένα κύκλωμα από τα στάδια του σχεδιασμού και των πειραματικών δοκιμών. Τα στάδια αυτά των δοκιμών θα μπορούσαν να γίνουν από ένα ειδικό πρόγραμμα υπολογιστή με δυνατότητα να προσομοιώνει τη λειτουργία των κυκλωμάτων. Έτσι, σχεδιάστηκαν ευέλικτα προγράμματα για την εκτέλεση αυτών των προσομοιώσεων, τα οποία έγιναν γνωστά ως «Προγράμματα σχεδιασμού και ανάλυσης (ηλεκτρικών κυκλωμάτων), με τη βοήθεια H/Y» ή «Computer-Aided Design and Analysis, CADA». Παρακάτω θα παρουσιάσουμε τη γενική μορφή, καθώς και ορισμένους περιορισμούς ενός από αυτά τα προγράμματα, του SPICE, το οποίο εμφανίζεται σε διάφορες εκδόσεις και σήμερα παρέχει τις περισσότερες δυνατότητες.

3.1.1 Νέοι τρόποι ανάλυσης και σχεδιασμού ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Σήμερα, με την πρόοδο της επιστήμης των υπολογιστών, χρησιμοποιούνται νέες μέθοδοι για το σχεδιασμό των κυκλωμάτων [2]. Τα προγράμματα CADA, με τις τεχνικές που έχουν βρεθεί, είναι δυνατό να προσομοιώνουν και τα πιο σύνθετα ηλεκτρικά κυκλώματα. Εμφανίσθηκαν στο προσκήνιο γύρω στο 1965, με την εισαγωγή του ECAP (Electrical Circuits Analysis Program), το οποίο μπορούσε να καταστρώνει και να λύνει σύστημα εξισώσεων αυτόματα. Το μόνο που απαιτούσε σαν είσοδο ήταν η τοπολογία των στοιχείων τα οποία αποτελούσαν το κύκλωμα. Τα προγράμματα αυτά ήρθαν να αντικαταστήσουν την κουραστική και πολλές φορές αδύνατη θεωρητική ανάλυση, καθώς και την πειραματική μελέτη των κυκλωμάτων. Πολλά πρακτικά προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της σχεδίασης ηλεκτρικών κυκλωμάτων μπορούν να λυθούν με τη χρήση των προγραμμάτων αυτών, τα οποία προσομοιώνουν και αναλύουν τα ηλεκτρικά κυκλώματα σα να λειτουργούν υπό πραγματικές συνθήκες, δίνοντας επαρκείς πληροφορίες για τη συμπεριφορά τους. Η προσομοίωση αυτή μπορεί να γίνει ακόμη και κάτω από ακραίες συνθήκες λειτουργίας και διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος. Η είσοδος του προγράμματος, εκτός από την περιγραφή της τοπολογίας του κυκλώματος, περιέχει και αναφορές για τον τύπο της ζητούμενης ανάλυσης και την κατεύθυνση των δεδομένων εξόδου. Αντίστοιχα, η έξοδος του προγράμματος περιέχει τα αριθμητικά αποτελέσματα καθώς και διάφορες κυματομορφές που βρέθηκαν κατά την ανάλυση του κυκλώματος.

Τα προγράμματα CADA, σε συνδυασμό με τις τεράστιες δυνατότητες των μοντέρνων υπολογιστών, ελαχιστοποιούν την επίπονη διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων και σε ορισμένες περιπτώσεις παρέχουν πληροφορίες, οι οποίες δεν είναι δυνατό να λυθούν εργαστηριακά. Αξιοσημείωτη είναι επίσης, η ευκολία που παρέχουν στην είσοδο των δεδομένων, αφού ένα πρόγραμμα επεξεργασίας σχημάτων αναλαμβάνει να τροφοδοτήσει το πρόγραμμα ανάλυσης με όλα τα δεδομένα της τοπολογίας των στοιχείων του κυκλώματος. Για τους λόγους αυτούς, όλες οι

βιομηχανίες ηλεκτρονικών χρησιμοποιούν σήμερα τέτοια προγράμματα για τη σχεδίαση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Πρέπει, πάντως, να τονισθεί ότι, σε καμιά περίπτωση και ανεξαρτήτως της ευκολίας που παρέχουν, τα προγράμματα CADA δεν μπορούν να υποκαταστήσουν πλήρως την εργαστηριακή μελέτη ενός κυκλώματος, η οποία αποτελεί την πειραματική επιβεβαίωση του θεωρητικού σχεδιασμού [2].

3.1.2 Δυνατότητες των προγραμμάτων ανάλυσης κυκλωμάτων

Οι σημερινές δυνατότητες των προγραμμάτων ανάλυσης κυκλωμάτων είναι τεράστιες και, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι πληροφορίες που μπορούν να δώσουν στο σχεδιαστή μηχανικό θα ήταν αδύνατο να εξαχθούν από εργαστηριακές μετρήσεις. Π.χ. στο προς ανάλυση κύκλωμα υπάρχει ευκολία να προστεθούν ή να αφαιρεθούν στοιχεία, ενώ αντίθετα, στο εργαστήριο είναι δύσκολο να γίνει αυτό γιατί, πρώτον, πρέπει να είναι διαθέσιμο το απαιτούμενο στοιχείο και δεύτερον, πρέπει να αλλάξει η συνδεσμολογία στο κύκλωμα. Αυτό δε, επαναλαμβάνεται συνεχώς μέχρι να ικανοποιηθούν τα προκαθορισμένα χαρακτηριστικά του κυκλώματος, διαδικασία ιδιαίτερα επίπονη. Σε πολλές περιπτώσεις το κύκλωμα που κατασκευάζεται στο εργαστήριο παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά. Τι μπορεί να συμβεί όμως όταν μεταβληθούν οι ανοχές των στοιχείων του; Πολλές φορές δηλαδή, ενώ το πρωτότυπο κύκλωμα λειτουργεί κανονικά, όταν αυτό τεθεί σε παραγωγή οι ανοχές είναι τέτοιες, ώστε ένα μεγάλο μέρος από τα παραγόμενα προϊόντα βρίσκονται εκτός προδιαγραφών. Τα προγράμματα αυτά έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν προσομοιώσεις όλων των δυνατών συνδυασμών ανοχών των στοιχείων, δίνοντας στο τέλος στατιστικά στοιχεία με βάση τα οποία θα επιλεγούν οι χαρακτηριστικές τιμές των διαφόρων στοιχείων του κυκλώματος.

Για διακριτά κυκλώματα σχετικά πολύπλοκα, η προσομοίωση που παρέχουν τα προγράμματα αυτά είναι απολύτως αποτελεσματική, ακόμη και στην περίπτωση που το κύκλωμα είναι αρκετά πολύπλοκο και μεγάλο ή πρόκειται να γίνει σε ολοκληρωμένη μορφή (Integrated Circuit, IC).

Στην περίπτωση που το διακριτό κύκλωμα είναι σύνθετο, οι απαραίτητες τροποποιήσεις δεν είναι φανερές. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να γίνουν πολυάριθμες εργαστηριακές μετρήσεις, οι οποίες θα αυξήσουν σημαντικά το χρόνο και την προσπάθεια που απαιτείται για να ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός.

Από την άλλη πλευρά, όταν το κύκλωμα πρόκειται να υλοποιηθεί σε ολοκληρωμένη μορφή, προκύπτουν άλλα προβλήματα. Η πιθανότητα το τελικό ολοκληρωμένο κύκλωμα να διαφέρει σημαντικά από το πειραματικό είναι μεγάλη. Οι παρασιτικές χωρητικότητες και οι αντιστάσεις της πειραματικής διάταξης θα διαφέρουν σίγουρα από αυτές που παρουσιάζονται στο τελικό ολοκληρωμένο κύκλωμα. Με τα προγράμματα CADA μπορούν να δημιουργηθούν πρωτότυπα IC's και να ελεγχθούν με άνεση, ώστε εύκολα να βρεθούν οι απαραίτητες τροποποιήσεις για να επιτευχθεί ικανοποιητικός σχεδιασμός.

Τα φαινόμενα θορύβου και παραμόρφωσης σημάτων μπορούν να προσδιορισθούν εύκολα χωρίς τη χρήση ακριβών οργάνων. Με την ανάλυση ανοχών προσδιορίζονται τα ανεκτά όρια τιμών των παραμέτρων οποιουδήποτε στοιχείου, ενώ με την ανάλυση μιας κυματομορφής κατά Fourier παρακάμπτονται οι πολύ ακριβοί αναλυτές φάσματος (Spectrum analyzers). Εξάλλου, μη γραμμικά κυκλώματα, τα οποία μέχρι σήμερα είναι δύσκολο να αναλυθούν με τις κλασικές τεχνικές, αναλύονται με μεθόδους CADA πολύ εύκολα. Τα σύγχρονα προγράμματα ανάλυσης έχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας με το πρωτότυπο κύκλωμα, από το οποίο λαμβάνονται, σε πραγματικό χρόνο, τιμές τάσεων και ρευμάτων. Στη συνέχεια συγκρίνονται οι τιμές αυτές με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση του κυκλώματος. Έτσι υπάρχουν συνεχείς δυνατότητες βελτίωσης του κυκλώματος. Όπως φαίνεται οι δυνατότητες των προγραμμάτων αυτών είναι πραγματικά απεριόριστες, και έχουν συμβάλει σημαντικά στην ελαχιστοποίηση του χρόνου των εργαστηριακών πειραμάτων. Ποτέ όμως δεν πρόκειται να αντικαταστήσουν καθολικά τις δοκιμές του κυκλώματος στο εργαστήριο [2].

3.1.3 Γενική περιγραφή του προγράμματος SPICE

Το πρόγραμμα SPICE είναι ένα γενικής εφαρμογής πρόγραμμα, το οποίο προσομοιώνει την συμπεριφορά των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Για παράδειγμα, το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει το σημείο ηρεμίας κατά τη λειτουργία ενός τρανζίστορ σε ένα κύκλωμα, την απόκριση στο πεδίο του χρόνου, την απόκριση ασθενών σημάτων στο πεδίο της συχνότητας καθώς και άλλα πολλά. Περιέχει επίσης μοντέλα στοιχείων, ενεργητικών και παθητικών, που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα [2].

Το πρόγραμμα επίλυσης SPICE έχει γραφεί, αρχικά, για τον υπολογιστή CDC 6400, χρησιμοποιώντας γύρω στις 10.000 εντολές FORTRAN IV και COMPASS, στη συνέχεια όμως διαμορφώθηκε και εξελίχθηκε από τις εταιρείες IBM, Honeywell, UNIVAC, RCA και PDP, για χρήση στους υπολογιστές τους.

Η σύνταξη του προγράμματος είναι ελεύθερη και δεν απαιτεί τα δεδομένα (τα ονόματα των στοιχείων και τις τιμές τους) να βρίσκονται σε καθορισμένες θέσεις, έχει δε τη δυνατότητα να παίρνει από αρχεία βιβλιοθήκης έτοιμα μοντέλα στοιχείων καθώς και υποκυκλώματα. Εκτός από αυτά, το πρόγραμμα επίλυσης SPICE κάνει από μόνο του έλεγχο σφαλμάτων της τοπολογίας του κυκλώματος που πρόκειται να αναλυθεί και μπορεί μέσω κατάλληλων εντολών να προσαρμοσθεί με τον τρόπο και την ακρίβεια με την οποία θα γίνει η ανάλυση. Τέλος, το βασικό πρόγραμμα επίλυσης SPICE συνήθως συνοδεύεται με βοηθητικά προγράμματα, μέσω των οποίων παράγονται οι κυματομορφές διαφόρων μεταβλητών του κυκλώματος από τις τιμές που δίνει το πρόγραμμα επίλυσης.

Σήμερα οι διάφορες εκδόσεις, προϊόντα διαφόρων εταιρειών, έχουν προσθέσει ορισμένες ιδιομορφίες και περισσότερες δυνατότητες ανάλυσης.

Αυτές είναι οι ακόλουθες [2]:

- α) Η εισαγωγή της περιγραφής του κυκλώματος και ο σχεδιασμός του να γίνεται μέσω σχεδιαστικού προγράμματος (Schematic Capture).

- β) Ο υπολογισμός της συμπεριφοράς του κυκλώματος να βασίζεται σε στατιστικές μεταβολές των ανοχών των τιμών των στοιχείων καθώς και των παραμέτρων τους (Monte Carlo Analysis).
- γ) Η δυνατότητα αυτόματης επιλογής της τιμής μιας παραμέτρου ενός στοιχείου έτσι ώστε το υπό ανάλυση κύκλωμα να παρουσιάζει βέλτιστη συμπεριφορά (Circuit Optimization).
- δ) Η εύρεση και καταγραφή των παραμέτρων του κυκλώματος οι οποίες με βάση κάποια κριτήρια δημιουργούν την δυσμενέστερη συμπεριφορά του κυκλώματος (Worst Case).
- ε) Η διαδικασία μεταβολής μιας δεδομένης παραμέτρου μέσα σε ορισμένη περιοχή τιμών και ο υπολογισμός της συμπεριφοράς του κυκλώματος όταν μεταβάλλεται αυτή η παράμετρος (Parameter Sweeping).
- στ) Η δημιουργία εργαλείων (άλλα προγράμματα ή όργανα), που χρησιμεύουν στην εύρεση των παραμέτρων των μοντέλων του SPICE (Parameter Extraction Hardware / Software).
- ι) Η επεξεργασία του αρχείου εξόδου με γραφικό τρόπο καθώς και η εκτέλεση πράξεων μεταξύ κυματομορφών, όπως ολοκλήρωση, διαφορίση, FFT, αλγεβρικές πράξεις κ.ά. (Graphics Output and Post Processing).

Σήμερα, τα βοηθητικά προγράμματα του SPICE, που παρέχουν τις παραπάνω δυνατότητες, διατίθενται από διάφορες εταιρείες, οι οποίες παρέχουν και βιβλιοθήκες με τα τελευταίου τύπου στοιχεία (δηλ. τρανζίστορ, Ics, κ.ά.), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση διαφόρων σύγχρονων κυκλωμάτων. Οι δυνατότητες αυτές απαιτούν υψηλής ταχύτητας υπολογιστές, συνήθως βασισμένους στον επεξεργαστή 80386 της Intel, που φθάνουν και ξεπερνούν πολλές φορές τους mainframe υπολογιστές.

Κατ' ομολογία όλων το SPICE είναι το καθιερωμένο πρόγραμμα για αναλογική προσομοίωση στη βιοτεχνία ηλεκτρονικών.

3.1.4 Περιορισμοί του προγράμματος SPICE

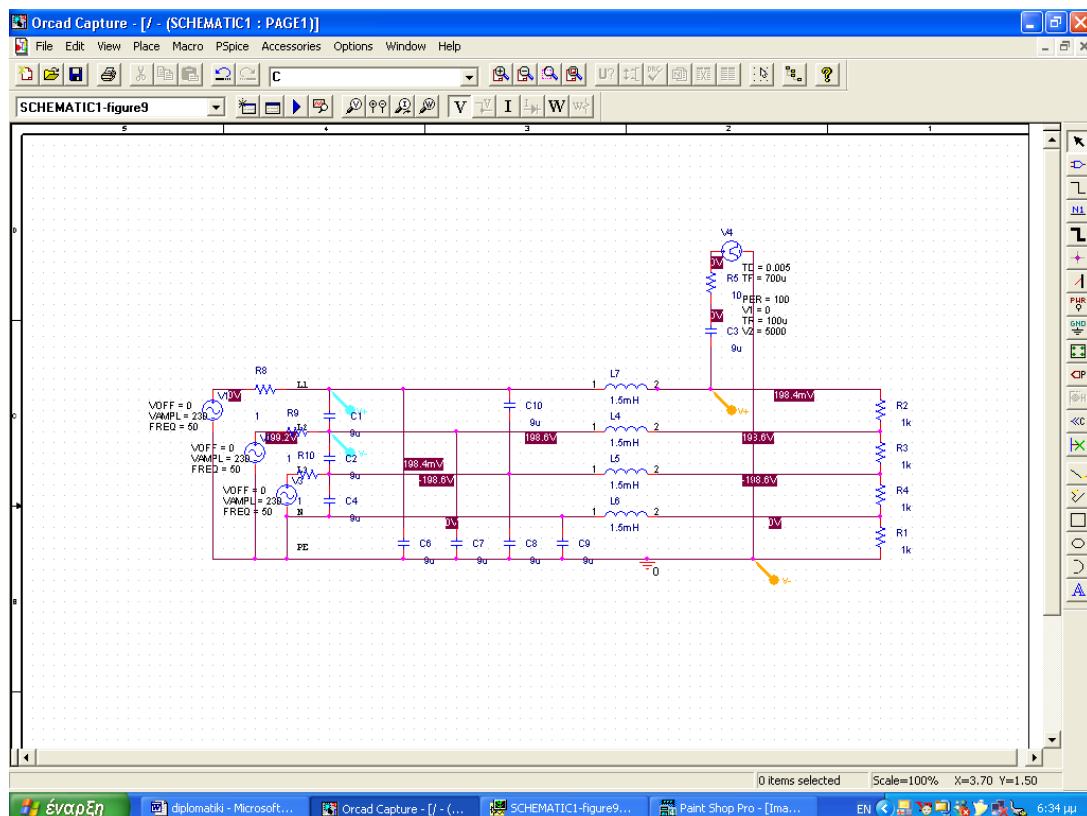
Το πρόγραμμα SPICE χρησιμοποιεί τη RAM (δυναμική μνήμη) του υπολογιστή για να αποθηκεύσει τα δεδομένα εισόδου (δηλαδή τα στοιχεία και τα μοντέλα ενός κυκλώματος) καθώς και τις τιμές εξόδου διαφόρων μεταβλητών αυτού. Η μνήμη του υπό χρήση PC καθορίζει το πόσο μεγάλο και πολύπλοκο μπορεί να είναι το υπό ανάλυση κύκλωμα. Εκτός αυτού, πρέπει να υπάρχει χώρος για την προσωρινή αποθήκευση των ενδιάμεσα υπολογιζόμενων τιμών των μεταβλητών του κυκλώματος, οι οποίες χρειάζονται για την τελική διαμόρφωση του αρχείου εξόδου. Το αρχείο αυτό περιέχει τις ζητούμενες από το χρήστη τιμές εξόδου, όπως για παράδειγμα τις τιμές των τάσεων και ρευμάτων σε ορισμένα σημεία του κυκλώματος. Θεωρητικά, ο αριθμός των κόμβων ή των στοιχείων του κυκλώματος ή ο αριθμός των σημείων συχνότητας (για ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας) είναι απεριόριστος σε αντίθεση με άλλα προγράμματα ανάλυσης κυκλωμάτων. Στην πραγματικότητα όμως οι απαιτήσεις μνήμης οι οποίες είναι δύσκολο εκ των προτέρων να εκτιμηθούν, επιβάλλουν σημαντικούς περιορισμούς. Ένα τυπικό παράδειγμα ίσως μας δώσει ένα μέτρο των απαιτήσεων αυτών. Για μεταβατική ανάλυση (transient analysis) σε ένα κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή 100 κόμβων (τύπου $\mu\text{A} 741$) απαιτούνται προσεγγιστικά 50 KB μνήμης του υπολογιστή.

3.1.5 Οι δομικές μονάδες και τα είδη κυκλωματικής ανάλυσης του SPICE

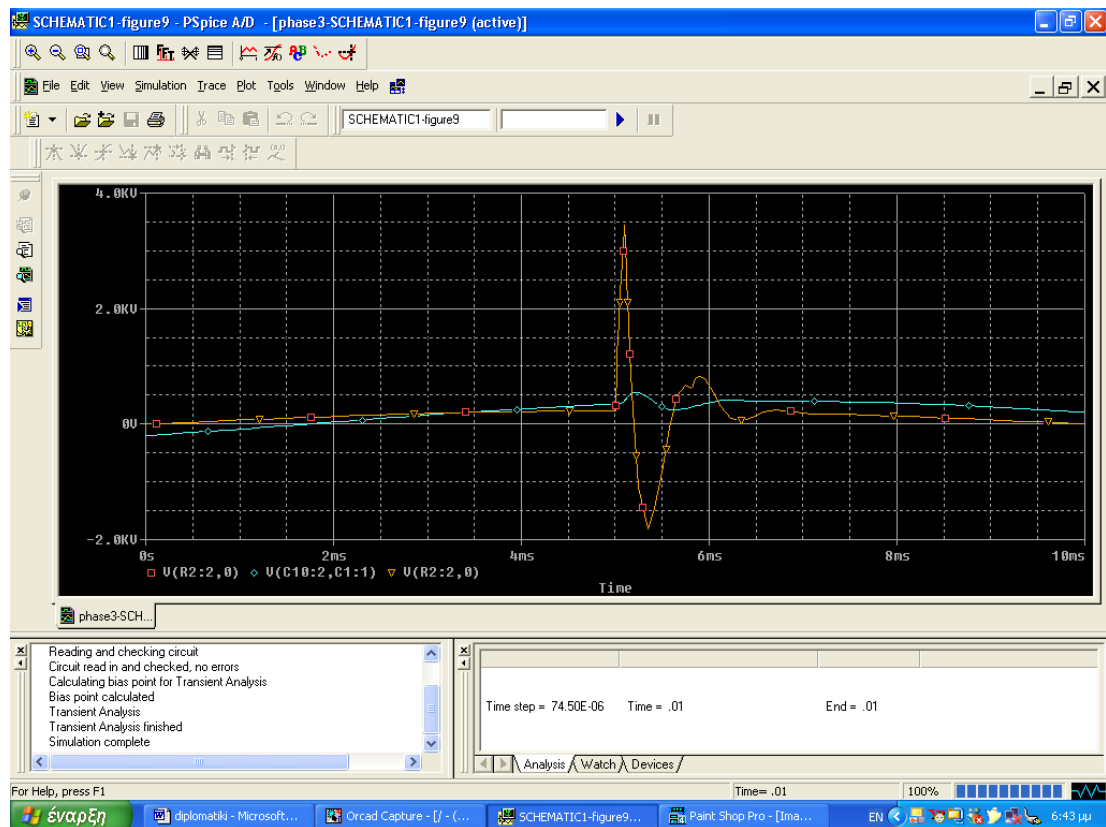
Το πρόγραμμα SPICE (*Simulation Program of Integrated Circuit Electronics*), όπως εξηγήθηκε, είναι πρόγραμμα προσομοίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της πραγματικής λειτουργίας των διατάξεων και των πιθανών σχεδιαστικών ανωμαλιών που προκύπτουν χωρίς να γίνονται αντιληπτές. Πρωτοεμφανίστηκε κατά τη διάρκεια σχεδιαστικών projects το 1971 στο Berkeley, California. Τρεις εταιρίες επένδυσαν στην εμπορική του αξιοποίηση: η MicroSim με ονομασία του προϊόντος PSPICE, η IntuSoft με ονομασία ISPICE και η MicroCap με ομώνυμη ονομασία του προϊόντος. Από τα μέσα της δεκαετίας του '80 μέχρι και το 1997 τα δικαιώματα του PSPICE ανήκουν στην εταιρία MicroSim. Το 1998 η MicroSim συγχωνεύεται με την

εταιρία OrCad και μετά από έναν χρόνο, το 1999, η Cadence αγοράζει την OrCad. Ανάλογα με την εταιρία που διαχειριζόταν τα δικαιώματα κάθε χρονική περίοδο, κυκλοφορούσαν και διάφορες εκδόσεις του προγράμματος. Έτσι, η τελευταία έκδοση του MicroSim PSPICE ήταν η v8, την οποία διαδέχτηκε η v9 του OrCad PSPICE.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε το *OrCad PSPICE, version 9.2*, της *Cadence Design Systems*.



Εικόνα 3.1: Τυπική εικόνα από το πρόγραμμα OrCad Capture.



Εικόνα 3.2: Τυπική εικόνα από τον ‘εικονικό’ παλμογράφο του PSPICE.

Όσον αφορά στη δομή και στη λειτουργία του PSPICE, μπορούμε να διακρίνουμε 4 δομικές μονάδες του προγράμματος:

- **Schematic Capture**

Επιτρέπει στο χρήστη να σχεδιάζει γραφικά τα οποία είναι συμβατά με τον εσωτερικό κώδικα λειτουργίας, όπως επίσης, να κατασκευάζει νέα σύμβολα και μοντέλα. Η εισαγωγή αυτής της δομικής μονάδας είναι το στοιχείο που διαφοροποίησε τις εκδόσεις της OrCad από τις εκδόσεις της MicroSim.

- **Text Editor**

Είναι η μονάδα η οποία επιτρέπει στο χρήστη να βλέπει και να επεξεργάζεται τον κώδικα του προγράμματος (*output file*) καθώς και να ειδοποιείται για τα σχεδιαστικά σφάλματα και, γενικότερα, για τις εσωτερικές διεργασίες που επιτελούνται.

- **Simulator**

Είναι το πρόγραμμα το οποίο προσομοιώνει-περιγράφει το σχεδιασμένο κύκλωμα με ένα σύνολο αριθμητικών εξισώσεων και, κατόπιν, καθορίζει επαναληπτικά και κάτω από δεδομένες προδιαγραφές τη λύση τους.

- **Graphics Post Processor**

Μετατρέπει τις αριθμητικές λύσεις εξόδου του simulator σε σύνολα γραφικά απεικονιζόμενων σημείων. Έχει τη δυνατότητα να αναπαριστά σε μικρό χρονικό διάστημα τις αριθμητικά περίπλοκες εξόδους του simulator σε γραφικές παραστάσεις.

Η λειτουργία προσομοίωσης αρχίζει με την αυθαίρετη απόδοση αρχικών τιμών από το πρόγραμμα στις τάσεις κόμβων του κυκλώματος, και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες κυκλωματικές εξισώσεις των στοιχείων που χρησιμοποιούνται, υπολογίζονται οι αρχικές τιμές των ρευμάτων κλάδων. Οι τιμές των ρευμάτων χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν πάλι οι τιμές των κομβικών τάσεων και αρχίζει η αναδρομική ακολουθία επίλυσης. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να επιλυθούν οι κυκλωματικές εξισώσεις με δεδομένη από τον χρήστη ακρίβεια, οπότε και συγκλίνει (*convergence*) η χρησιμοποιούμενη από τον simulator αναδρομική μέθοδος. Το SPICE χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Newton-Raphson για την επίλυση της μήτρας των κυκλωματικών εξισώσεων όταν το κύκλωμα περιέχει μη γραμμικά στοιχεία. Όταν το κύκλωμα περιέχει μόνο γραμμικά στοιχεία, το SPICE χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο απαλοιφής του Gauss για την επίλυση της κυκλωματικής μήτρας.

Ο simulator του προγράμματος στην ουσία αποτελείται από δύο μονάδες προσομοίωσης, μία αναλογική και μία ψηφιακή. Η αναλογική μονάδα προσομοίωσης επιλύει αριθμητικά τους νόμους του Kirchhoff στους κόμβους και στους κλάδους του κυκλώματος και η ψηφιακή μονάδα εκτελεί πράξεις Boolean δυαδικής λογικής όπου και εάν είναι εφικτό [2].

Το SPICE μπορεί να παρέχει 3 είδη κυκλωματικής ανάλυσης:

1. DC Analysis

Η DC ανάλυση πραγματοποιείται πάντα, πριν αρχίσει οποιαδήποτε άλλη απαιτούμενη ανάλυση, και αυτό γίνεται για να καθοριστεί το σημείο DC λειτουργίας του κυκλώματος. Πρέπει να επιτυγχάνεται σύγκλιση της αριθμητικής μεθόδου για τον καθορισμό του σημείου λειτουργίας, διαφορετικά καμία άλλη διεργασία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί. Κατά τη DC ανάλυση, το SPICE αντικαθιστά τις αυτεπαγωγές με βραχυκυκλώματα και τις χωρητικότητες με ανοιχτοκυκλώματα. Αν το κύκλωμα περιέχει ημιαγωγικά στοιχεία, η σύγκλιση της επαναληπτικής μεθόδου είναι πολλές φορές αμφίβολη, διότι παρουσιάζονται περιοχές μηδενικής αγωγιμότητας, οι οποίες ενδεχομένως έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μηδενικών παρονομαστών κατά τον υπολογισμό της κυκλωματικής μήτρας. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί αφού το SPICE προσφέρει την επιλογή τοποθέτησης μίας ελάχιστης διαγωγιμότητας GMIN παράλληλα σε κάθε PN ημιαγωγική επαφή. Όσο μεγαλύτερη είναι η GMIN τόσο ταχύτερα συγκλίνει η μέθοδος Newton-Raphson.

2. Transient Analysis

Η transient ανάλυση γίνεται στο πεδίο του χρόνου και αφού έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς η DC ανάλυση. Ο καθορισμός του DC σημείου λειτουργίας είναι στην ουσία το διάνυσμα των κομβικών τάσεων του κυκλώματος τη χρονική στιγμή $T=0$. Από εκείνη τη στιγμή και μετά, το SPICE εισάγει προς επεξεργασία τις I-V σχέσεις των αυτεπαγωγών και των χωρητικοτήτων και χρησιμοποιεί μια ρουτίνα αριθμητικής ολοκλήρωσης για να δημιουργήσει μία ισοδύναμη μήτρα κόμβων για όλο το κύκλωμα πλέον¹. Σε κάθε χρονικό βήμα, η μήτρα κόμβων του κυκλώματος αλλάζει και αρχική τιμή για την επανάληψη του αλγορίθμου Newton-Raphson στην τρέχουσα μήτρα είναι το αμέσως προηγούμενο διάνυσμα κομβικών τάσεων. Σε κάθε χρονικό βήμα, το πρόγραμμα που εκτελεί την transient ανάλυση καθορίζει το σημείο λειτουργίας, με αποτέλεσμα να έχουμε την επίλυση του κυκλώματος για κάθε χρονική στιγμή, όσο το βήμα διατηρείται μικρό (η

¹ Κατά τη DC ανάλυση το SPICE αντικαθιστά τις αυτεπαγωγές με βραχυκυκλώματα και τις χωρητικότητες με ανοιχτοκυκλώματα.

απαίτηση για μικρό βήμα έχει ιδιαίτερη σημασία σε διακοπτικά κυκλώματα, όπου όσο μεγαλύτερο είναι το βήμα τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να μην προσομοιωθεί καλά η λειτουργία του κυκλώματος κατά τις διακοπτικές μεταβάσεις). Αν επιτευχθεί σύγκλιση της ακολουθίας με την επιθυμητή ακρίβεια η διαδικασία τερματίζεται. Αν όμως υπάρχει περιθώριο και για άλλες επαναλήψεις μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, η διαδικασία συνεχίζεται με ελαττωμένο βήμα κατά 1/8. Η transient ανάλυση έχει αποδειχθεί ότι είναι το είδος ανάλυσης στο SPICE που φτάνει δυσκολότερα σε σύγκλιση.

3. AC Analysis

Στην AC ανάλυση, αφού έχει ολοκληρωθεί ο καθορισμός του σημείου λειτουργίας του κυκλώματος, τα μη γραμμικά στοιχεία του κυκλώματος αντικαθίστανται με τα ισοδύναμα γραμμικά μοντέλα ασθενούς σήματος. Δημιουργούνται τα αντίστοιχα διαγράμματα Bode και οι αντίστοιχες φασματικές αποκρίσεις. Επίσης, παράγονται όλες οι πληροφορίες σχετικά με το πλάτος, τη φάση, τα πραγματικά και τα φανταστικά μέρη όλων των μεγεθών σε συνάρτηση με τη συχνότητα.

3.2 Προσομοίωση με SPICE των κυκλωμάτων ελέγχου που αναφέρονται στο πρότυπο EN 61000-4-5

Κοινά χαρακτηριστικά που είναι σημαντικό να αναφερθούν όσον αφορά τις προσομοιώσεις σε υπολογιστή και που έχουν εφαρμογή και στις τέσσερις περιπτώσεις υπέρτασης που αναφέρονται στο πρότυπο (Μονοφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και ουδέτερου – Μονοφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και γης – Τριφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και ουδέτερου – Τριφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και γης), είναι τα εξής:

- Οι πηγές παροχής ισχύος είναι ιδανικές 230 V AC, 50 Hz και στην περίπτωση των τριφασικών παροχών έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 120°. Λόγω της ιδανικότητάς τους, έχει προστεθεί σε κάθε περίπτωση μια μικρή αντίσταση $R = 1\Omega$ εν σειρά με αυτές για να προσομοιωθεί κάποια τυπική αντίσταση γραμμής.

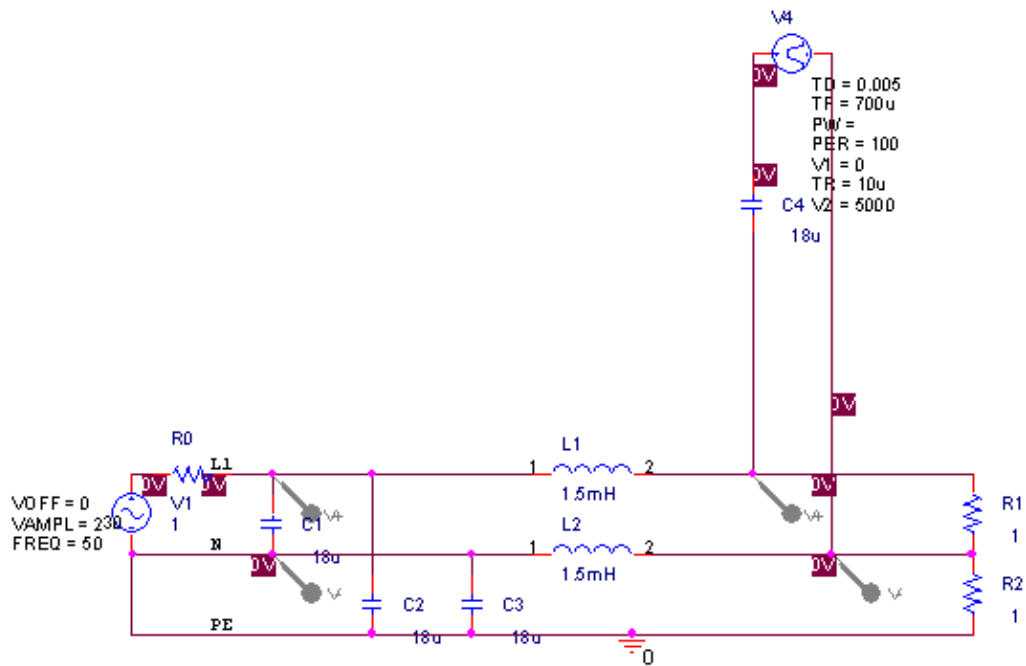
- Τα φορτία του ‘εξοπλισμού που ελέγχουμε’ θεωρούνται ωμικά και έχουν τιμές είτε $R_l = 1\Omega$ είτε $R_l = 1k\Omega$ ανάλογα με την περίπτωση, έτσι ώστε να παίρνουμε πιο ρεαλιστικές κυματομορφές στην προσομοίωση όπως θα εξηγηθεί παρακάτω.
- Η γεννήτρια της υπέρτασης είναι και αυτή ιδανική και ο παλμός που βγάζει είναι μεγέθους $5 kV$ και μορφής (ρυθμός ανόδου, χρόνος ουράς, κλπ) όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 2, σχήμα 2.5. Το μέγεθος $5 kV$ επελέγη έτσι ώστε η προσομοίωση να γίνει με ελαφρά πιο δυσμενείς συνθήκες από τις απαιτούμενες από το πρότυπο EN 61000-4-5 για επίπεδο δοκιμής 4. Το πρότυπο επιτρέπει και μεγαλύτερα μεγέθη δοκιμών ανάλογα με το δοκίμιο που έχουμε. (Επίπεδο δοκιμής X.)
- Τα probe ελέγχου τοποθετούνται, ένα ζεύγος στην έξοδο της γεννήτριας του παλμού και ένα ζεύγος στην είσοδο του κυκλώματος, έτσι ώστε να παρακολουθείται η διαταραχή που προκαλείται λόγω της υπέρτασης στα άκρα του πυκνωτή εισόδου.
- Η γείωση θεωρείται ιδανική και τέλεια.

3.2.1 Μονοφασικά κυκλώματα ελέγχου

Κύκλωμα ελέγχου συσκευής ισχύος.

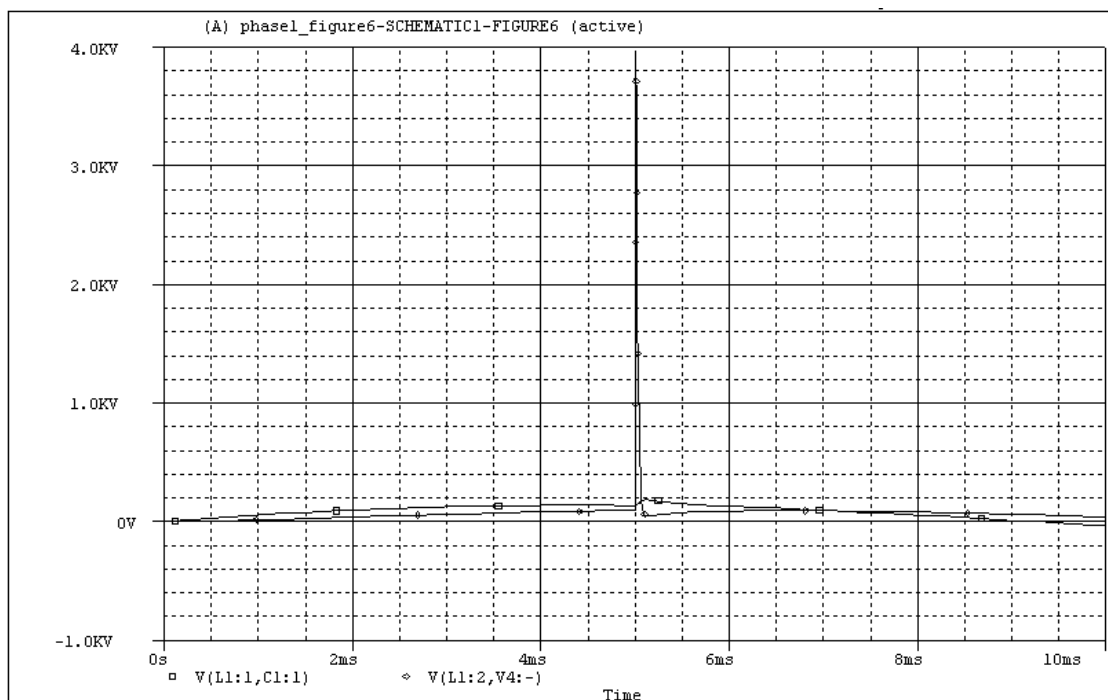
Υπέρταση μεταξύ φάσης και ουδετέρου (Περίπτωση Α).

Σχεδιάστηκε το κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 3.1, με βάση το πρότυπο 61000-4-5, στο οποίο αναφέρεται η συνδεσμολογία και οι τιμές των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην παραπάνω δοκιμή. Συγκεκριμένα, οι χωρητικότητες είναι $C = 18 \mu F$ και τα πηνία $L = 1,5 mH$.

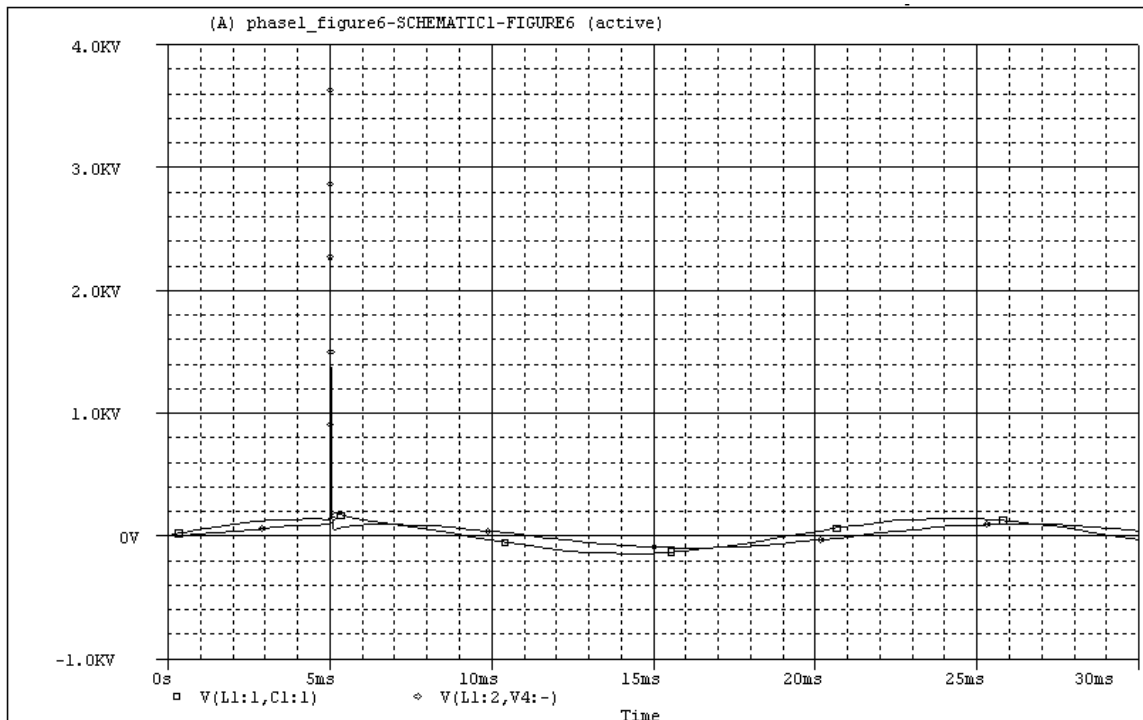


Σχήμα 3.1 : Μονοφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και ουδέτερου. Κύκλωμα σχεδιασμένο στο SPICE.

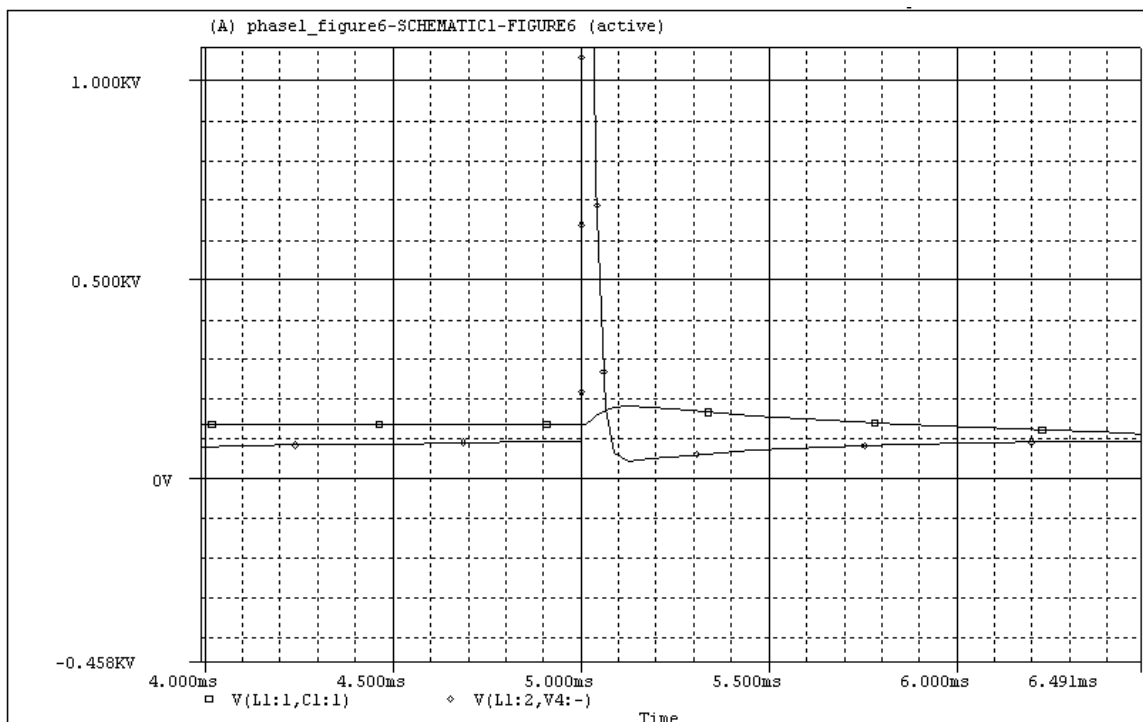
Τρέχοντας την προσομοίωση, πήραμε τις κυματομορφές που φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 3.2 : Μονοφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και ουδέτερου. Χρόνος τρεξίματος 10mS.



Σχήμα 3.3 : Μονοφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και ουδέτερου. Χρόνος τρεξίματος 30mS.

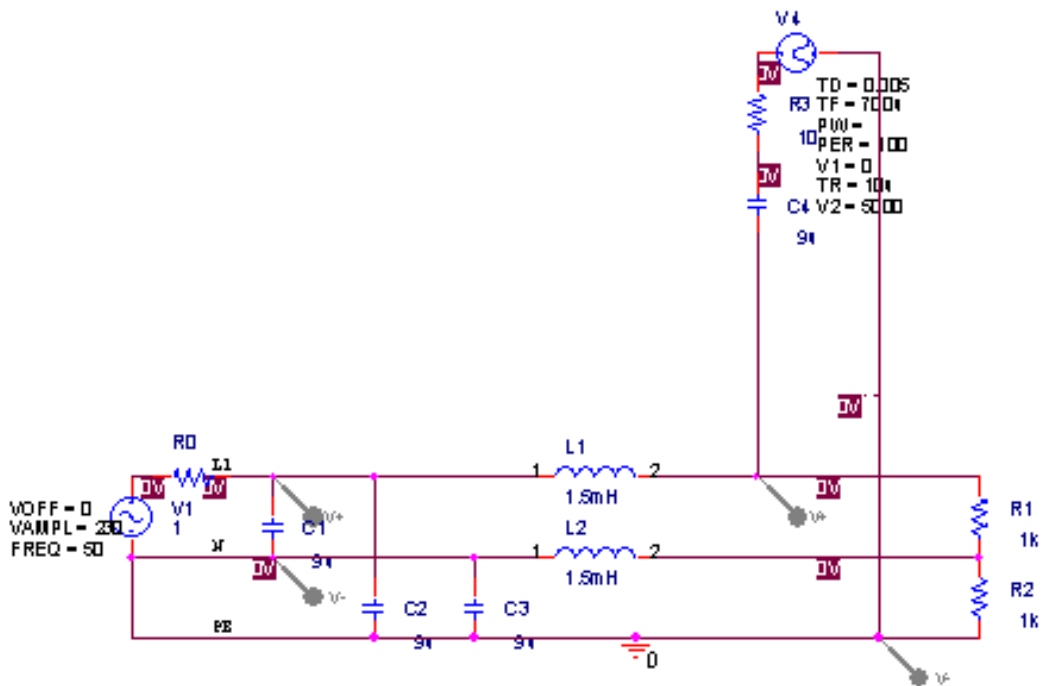


Σχήμα 3.4 : Μονοφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και ουδέτερου. Χρόνος τρεξίματος 10mS. Μεγέθυνση της περιοχής της υπέρτασης, έτσι ώστε να φανεί η διαταραχή στον πυκνωτή εισόδου.

Κύκλωμα ελέγχου συσκευής ισχύος.

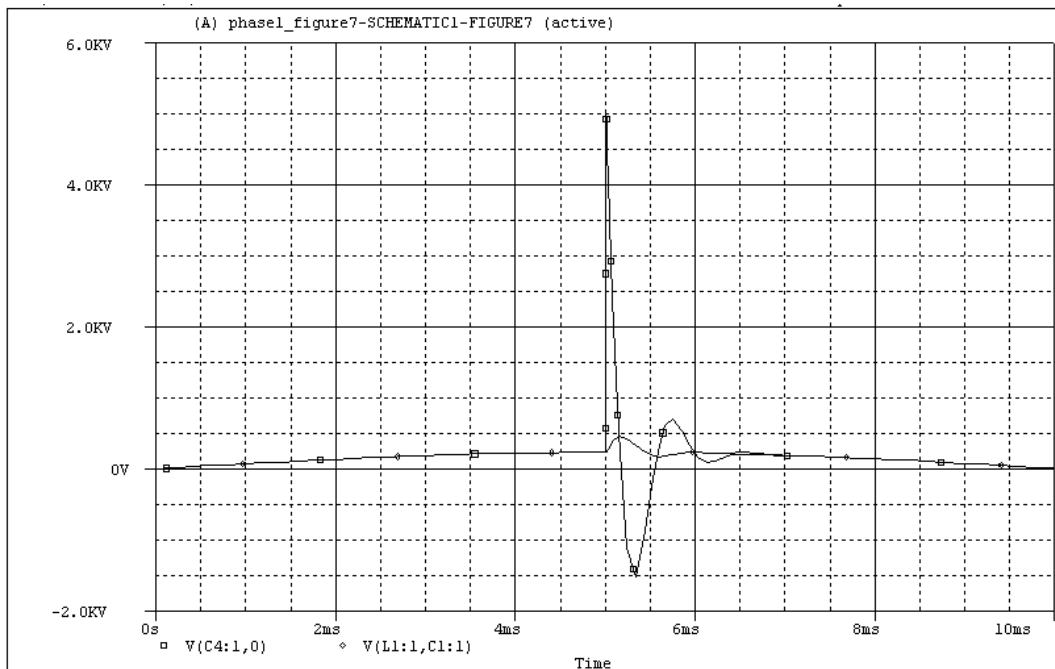
Υπέρταση μεταξύ φάσης και γής. (Περίπτωση Β)

Σχεδιάστηκε το κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 3.5, με βάση το πρότυπο 61000-4-5, στο οποίο αναφέρεται η συνδεσμολογία και οι τιμές των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην παραπάνω δοκιμή. Συγκεκριμένα, οι χωρητικότητες είναι $C = 9 \mu F$ και τα πηνία $L = 1,5 mH$.

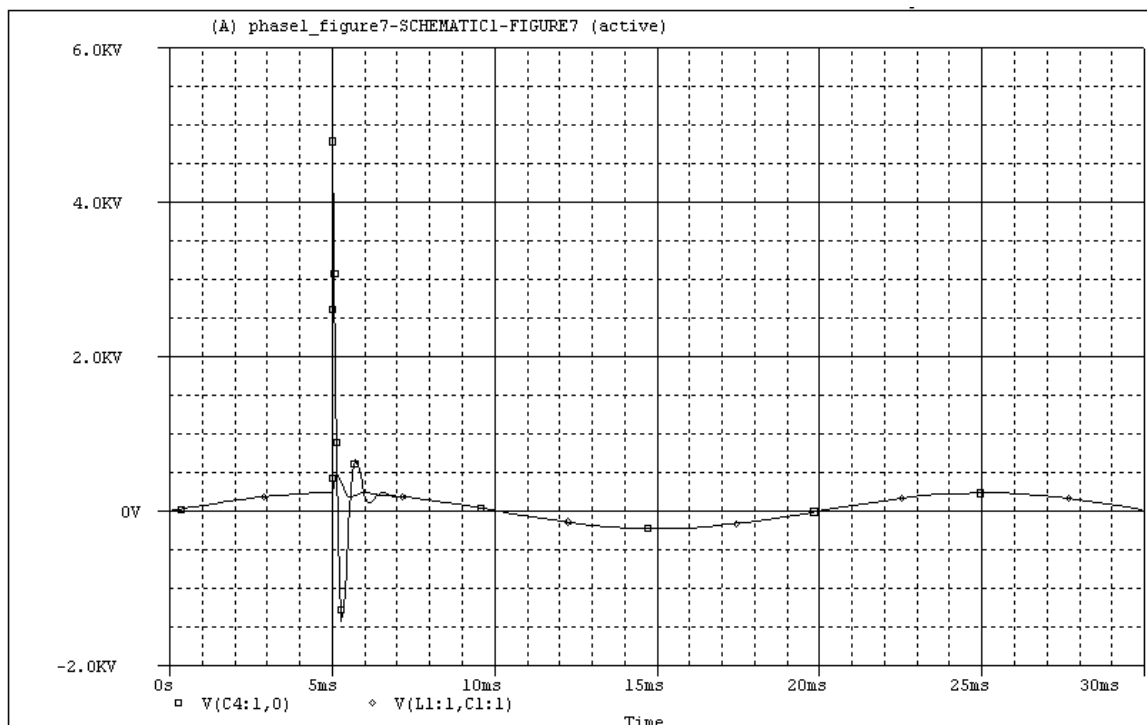


Σχήμα 3.5 : Μονοφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και γής. Κύκλωμα σχεδιασμένο στο SPICE.

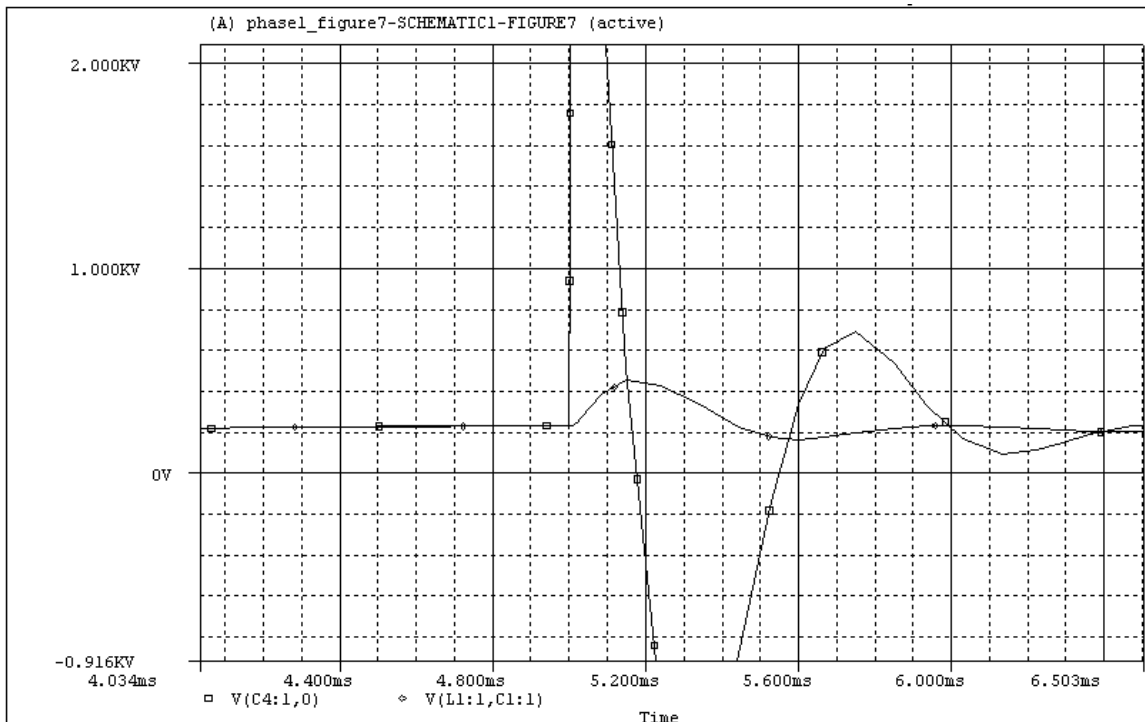
Τρέχοντας την προσομοίωση, πήραμε τις κυματομορφές που φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 3.6 : Μονοφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και γης. Χρόνος τρεξίματος 10mS.



Σχήμα 3.7 : Μονοφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και γης. Χρόνος τρεξίματος 30mS.



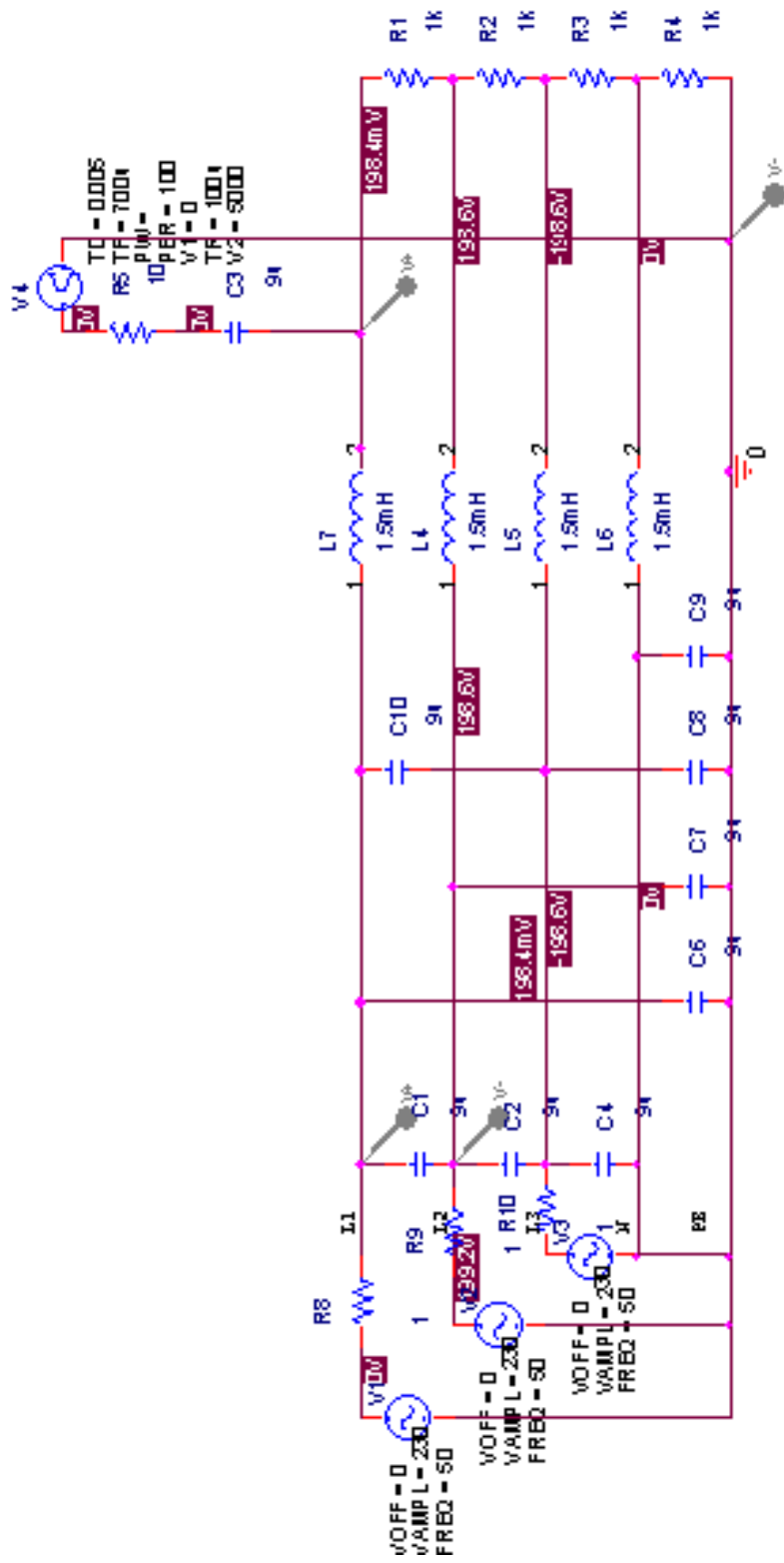
Σχήμα 3.8 : Μονοφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και γης. Χρόνος τρεξίματος 10mS. Μεγέθυνση της περιοχής της υπέρτασης, έτσι ώστε να φανεί η διαταραχή στον πυκνωτή εισόδου.

3.2.2 Τριφασικά κυκλώματα ελέγχου

Κύκλωμα ελέγχου συσκευής ισχύος.

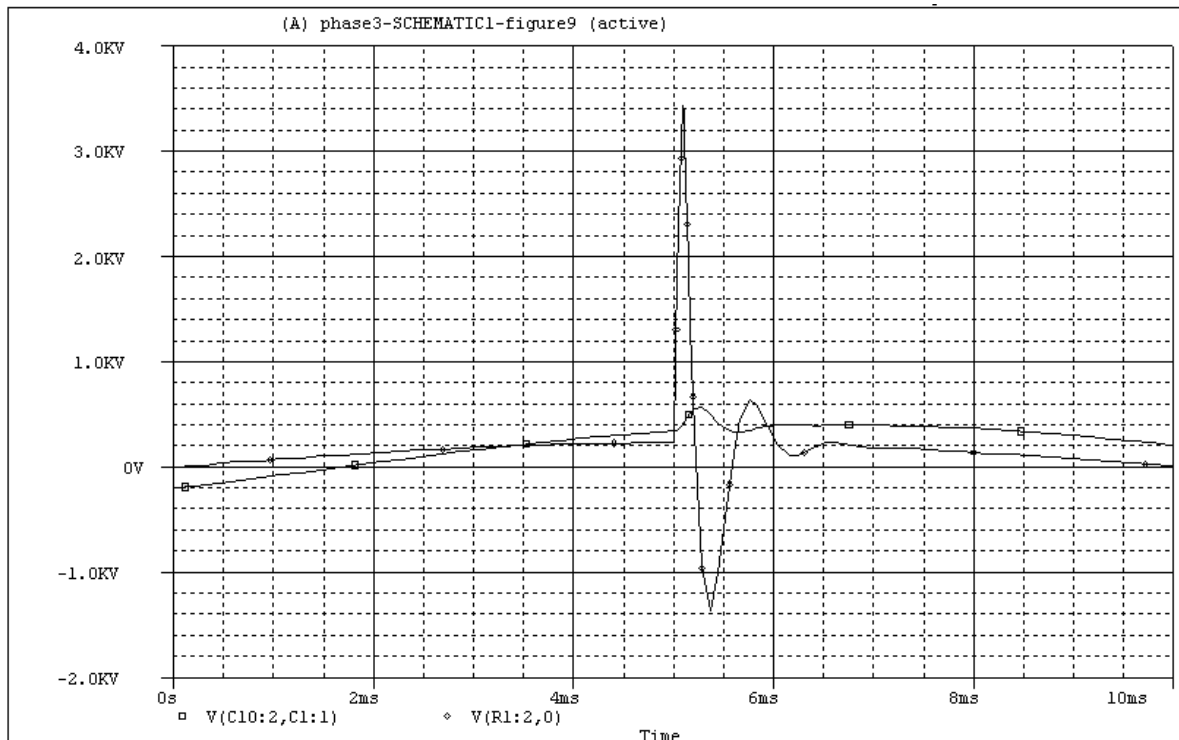
Υπέρταση μεταξύ φάσης και γης. (Περίπτωση Γ)

Σχεδιάστηκε το κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 3.9, με βάση το πρότυπο 61000-4-5, στο οποίο αναφέρεται η συνδεσμολογία και οι τιμές των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην παραπάνω δοκιμή. Συγκεκριμένα, οι χωρητικότητες είναι $C = 9 \mu F$ και τα πηνία $L = 1,5 mH$.

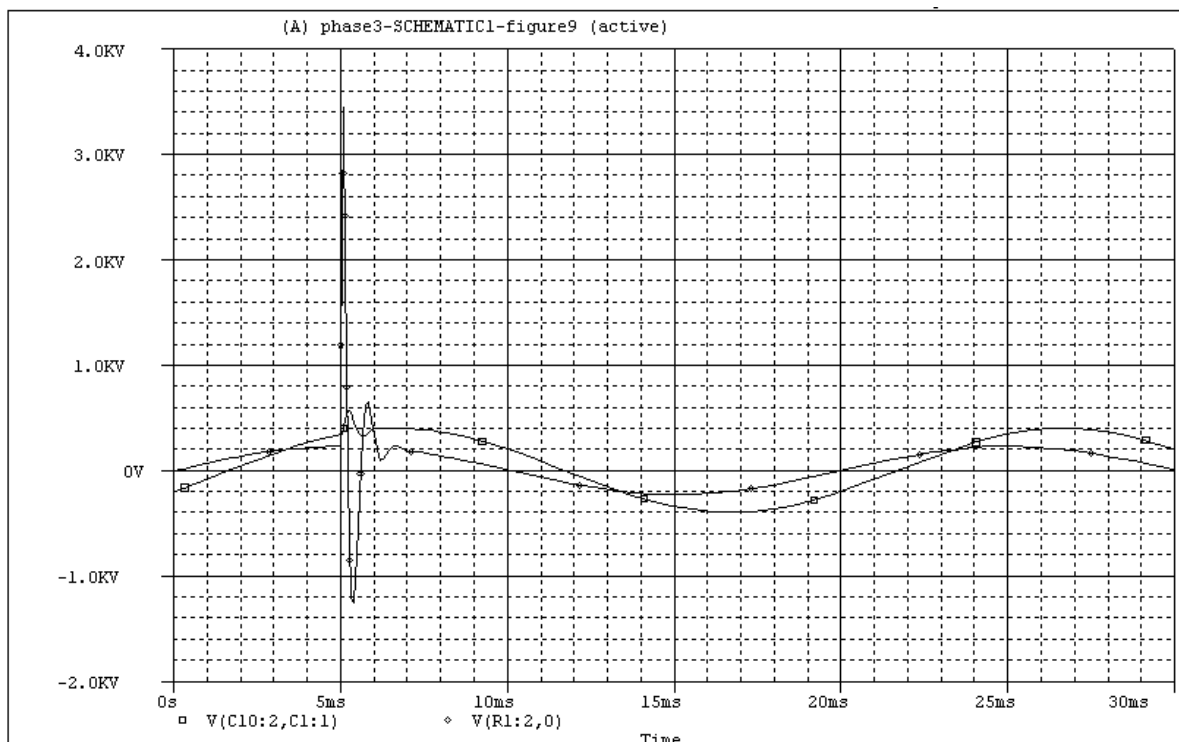


Σχήμα 3.9: Τριφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και γης. Κύκλωμα σχεδιασμένο στο SPICE.

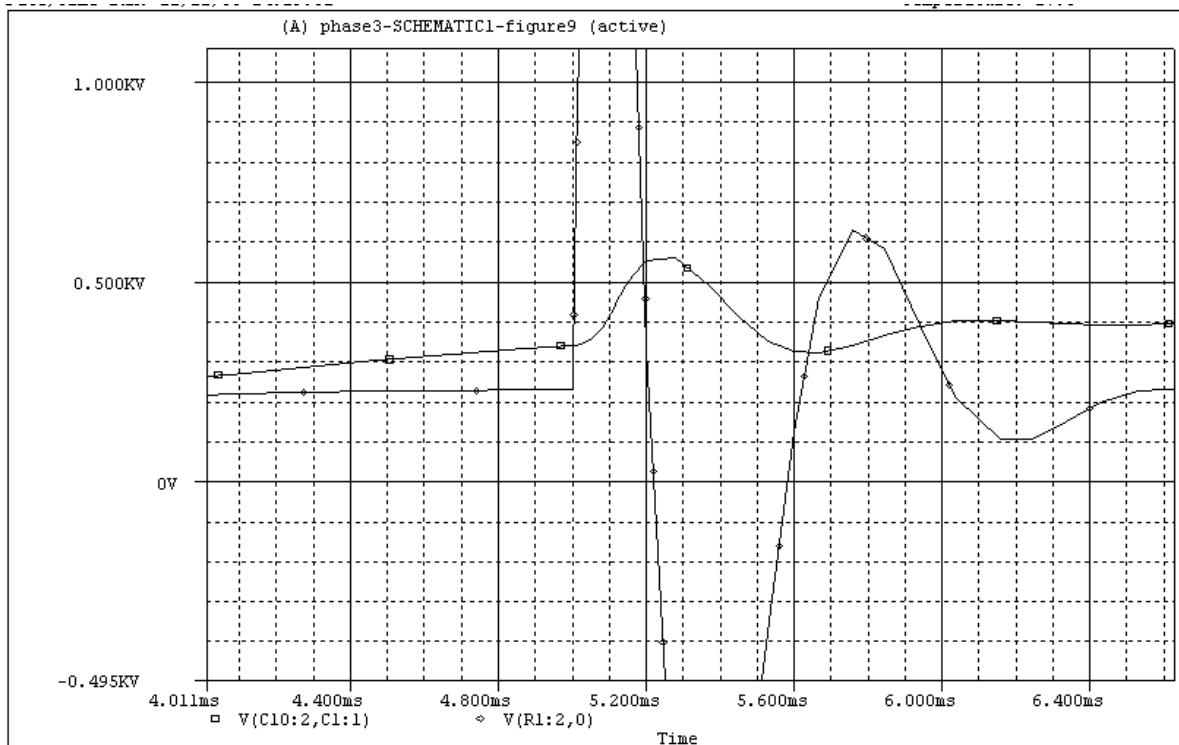
Τρέχοντας την προσομοίωση, πήραμε τις κυματομορφές που φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 3.9: Τριφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και γης. Χρόνος τρεξίματος 10mS.



Σχήμα 3.10: Τριφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και γης. Χρόνος τρεξίματος 30mS.

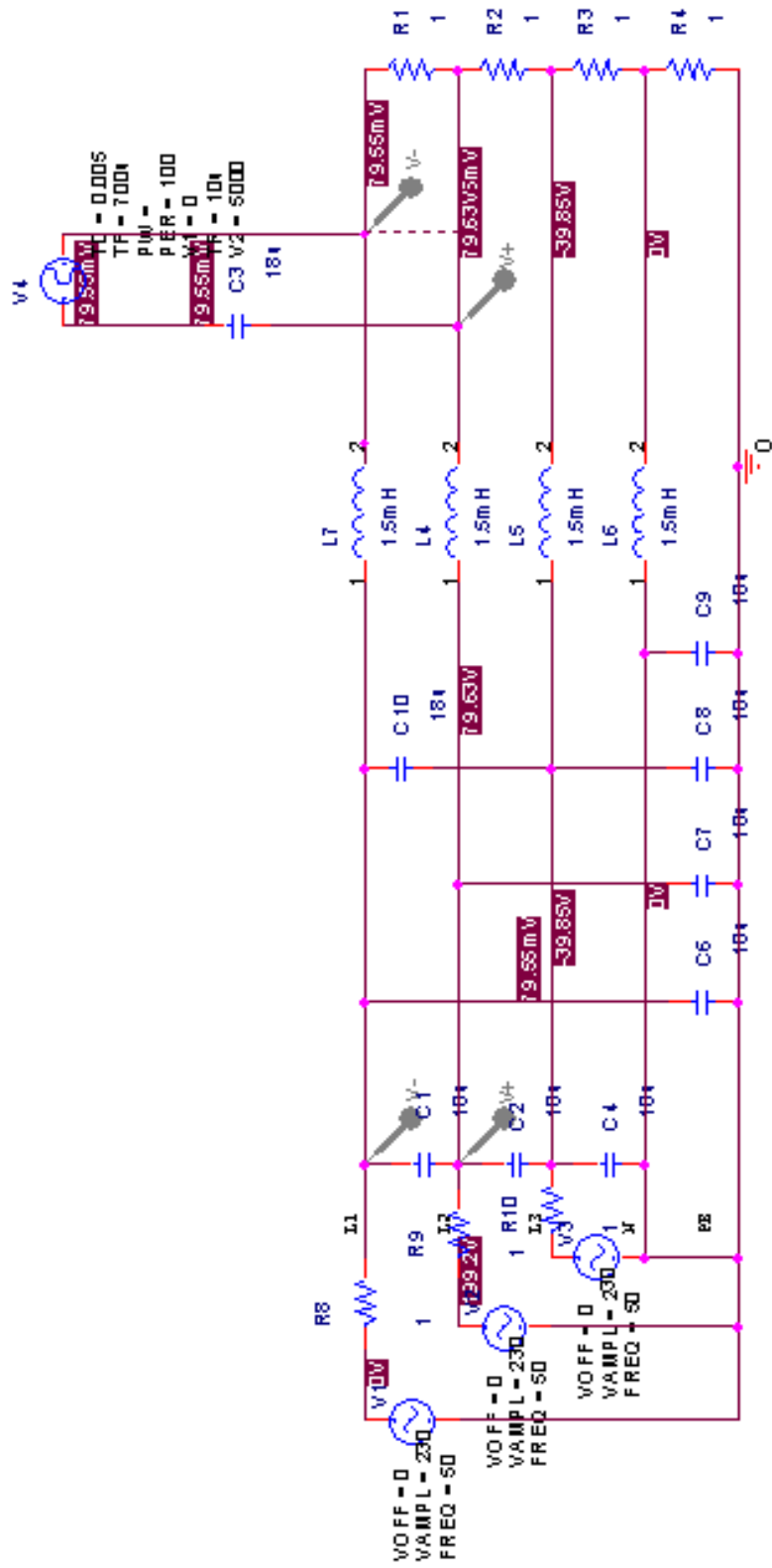


Σχήμα 3.11: Τριφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ φάσης και γης. Χρόνος τρεξίματος 10ms. Μεγέθυνση της περιοχής της υπέρτασης, έτσι ώστε να φανεί η διαταραχή στον πυκνωτή εισόδου.

Κύκλωμα ελέγχου συσκευής ισχύος.

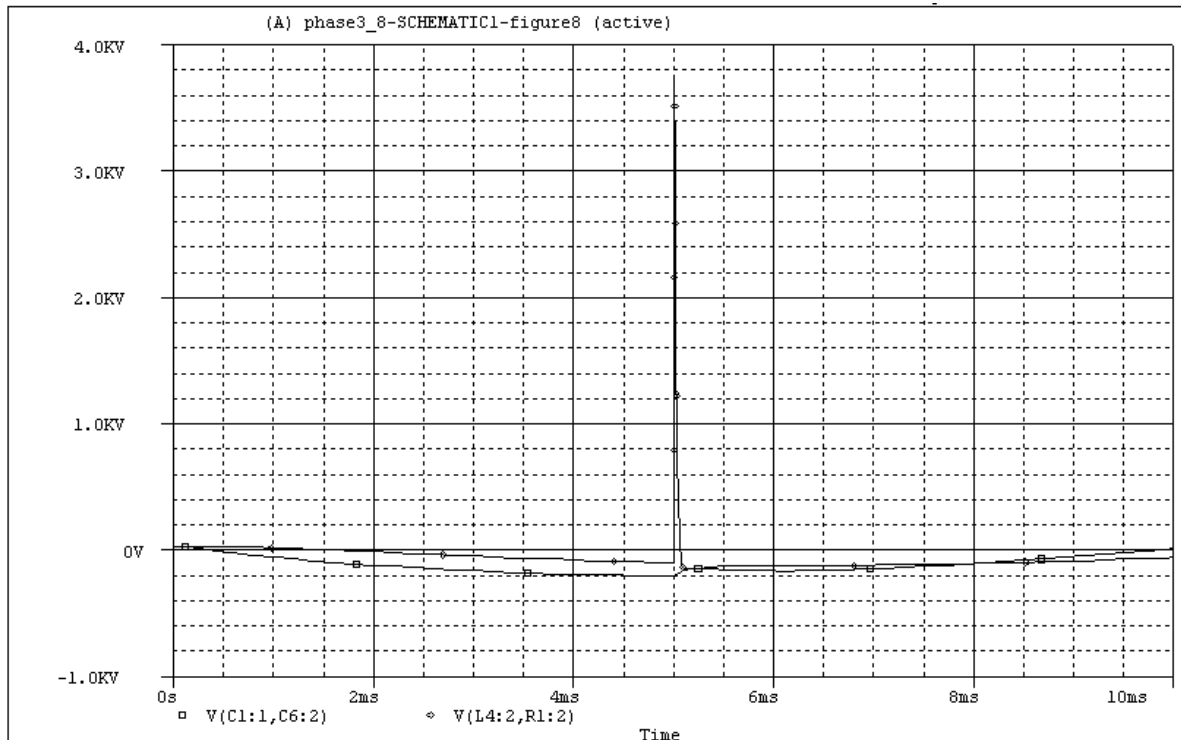
Υπέρταση μεταξύ δυο φάσεων. (Περίπτωση Δ)

Σχεδιάστηκε το κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 3.12, με βάση το πρότυπο 61000-4-5, στο οποίο αναφέρεται η συνδεσμολογία και οι τιμές των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην παραπάνω δοκιμή. Συγκεκριμένα, οι χωρητικότητες είναι $C = 18 \mu F$ και τα πηνία $L = 1,5 mH$.

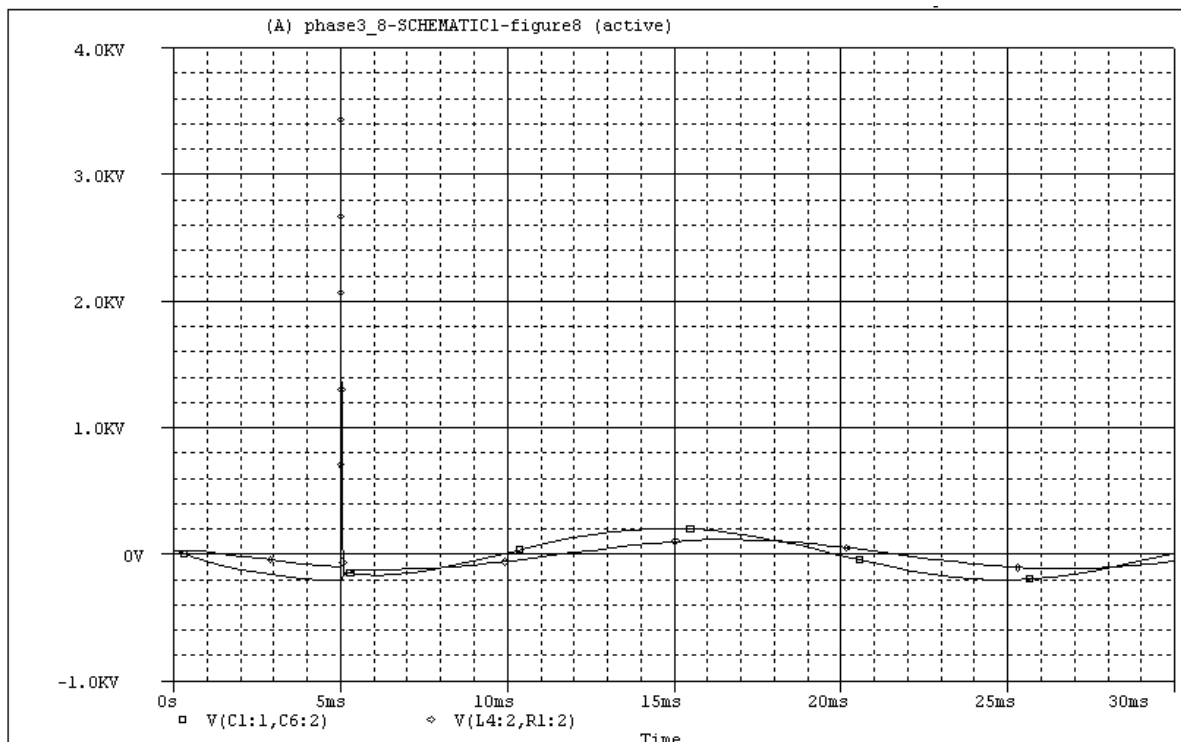


Σχήμα 3.12: Τριφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ δύο φάσεων. Κύκλωμα σχεδιασμένο στο SPICE.

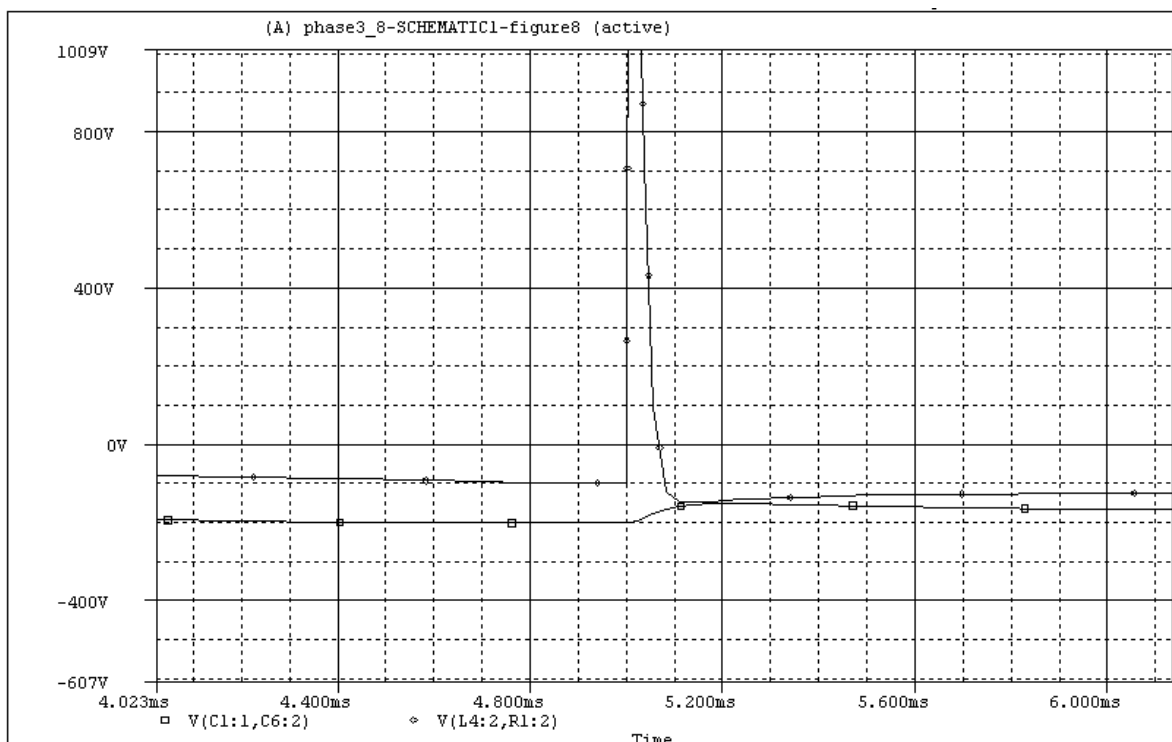
Τρέχοντας την προσομοίωση, πήραμε τις κυματομορφές που φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 3.13 : Τριφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ δυο φάσεων. Χρόνος τρεξίματος 10mS.



Σχήμα 3.14: Τριφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ δυο φάσεων. Χρόνος τρεξίματος 30mS.



Σχήμα 3.15 : Τριφασική παροχή, υπέρταση μεταξύ δυο φάσεων. Χρόνος τρεξίματος 10mS. Μεγέθυνση της περιοχής της υπέρτασης, έτσι ώστε να φανεί η διαταραχή στον πυκνωτή εισόδου.

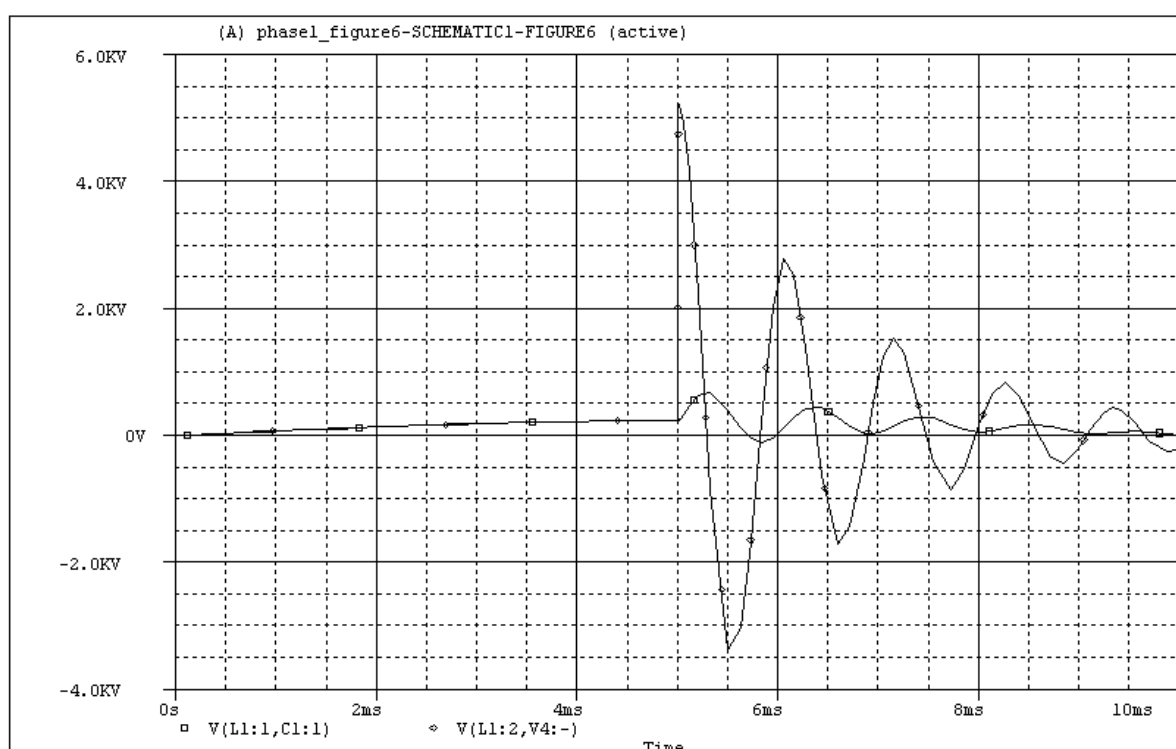
3.3 Γενικές παρατηρήσεις για τις προσομοιώσεις

Μια πρώτη παρατήρηση που μπορεί κανείς να κάνει για τις κυματομορφές εξόδου των παραπάνω προσομοιώσεων, είναι ότι στην περίπτωση των υπερτάσεων μεταξύ φάσης και γης (και στο μονοφασικό κύκλωμα αλλά και στο τριφασικό), υπάρχει ένας έντονος αρνητικός παλμός έπειτα από την επιβαλλόμενη υπέρταση και μέχρι να αποσβεσθεί το φαινόμενο τελείως. Αυτό συμβαίνει ενδεχομένως διότι υπάρχει ταλάντωση στο R-L-C κύκλωμα που υπάρχει εν σειρά με την γεννήτρια της υπέρτασης.

Το φίλτρο που προτείνει το πρότυπο, έχει λόγο ύπαρξης για να περιορίζει τον παλμό της υπέρτασης στην περιοχή της συσκευής που ελέγχουμε και να μην τον αφήνει να βγει στην πλευρά του δικτύου διανομής, είτε αυτό είναι τριφασικό είτε μονοφασικό. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρούμε ότι το φίλτρο δεν είναι τέλειο και ότι η διαταραχή φτάνει και μετριέται στα άκρα του πυκνωτή εισόδου. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα, η τάση στα άκρα

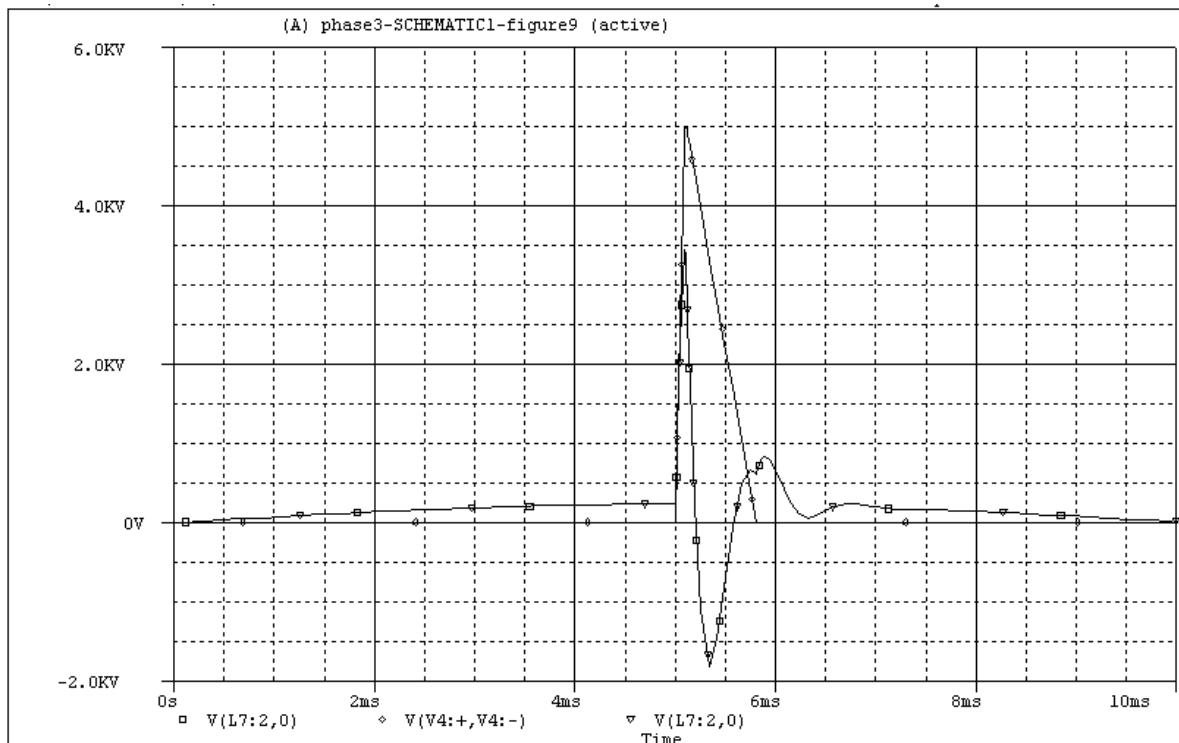
του πυκνωτή εισόδου, μπορεί στιγμιαία να ανέβει μέχρι και περίπου τα 550V –από 380V που είναι η τάση λειτουργίας στο τριφασικό κύκλωμα -για έναν παλμό μεγέθους 5kV.

Αν δοκιμάζαμε στην περίπτωση υπέρτασης μεταξύ δύο φάσεων ή στην περίπτωση μεταξύ φάσης και ουδετέρου να βάλουμε για έλεγχο ένα φορτίο μεγάλο, έστω για παράδειγμα ωμικό 4 kΩ, τότε μετά τον παλμό της υπέρτασης είχαμε μία έντονη ταλάντωση στο R-L κύκλωμα, όπως φαίνεται στο παλμογράφημα του σχήματος 3.16, που επηρέαζε φυσικά και την τάση στην είσοδο.



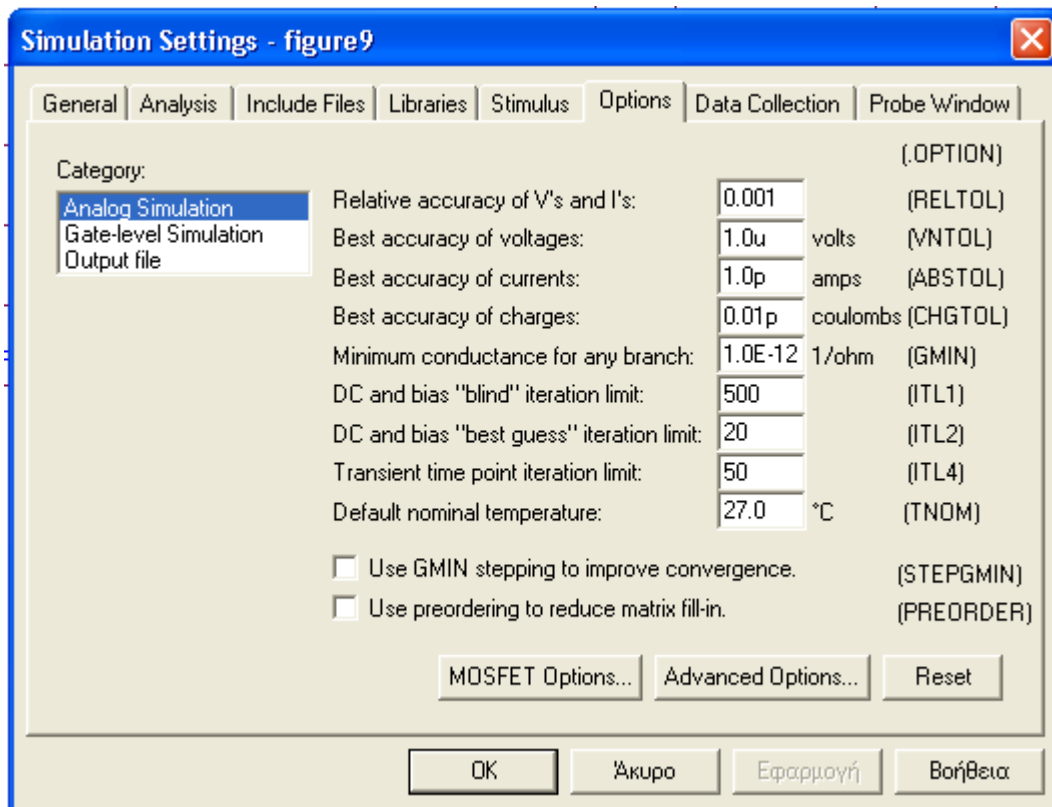
Σχήμα 3.16: Υπέρταση μεταξύ φάσης και ουδετέρου στο μονοφασικό κύκλωμα με μεγάλο ωμικό φορτίο $R=4k\Omega$.

Στην περίπτωση των τριφασικών προσομοιώσεων, παρατηρούμε ότι αν και η κορυφαία τάση της γεννήτριας της υπέρτασης είναι 5 kV, η τάση που εφαρμόζεται τελικά στο κύκλωμα μετριέται όχι μεγαλύτερη των 4 kV (Σχήμα 3.17). Αυτό πιθανόν να συμβαίνει λόγω της πτώσης τάσης στα στις αντιστάσεις του ‘εξοπλισμού που ελέγχουμε’ ή λόγω του ότι έχουμε μεγαλύτερη πτώση τάσης επάνω στα στοιχεία του φίλτρου, που στην περίπτωση του τριφασικού φορτίου είναι περισσότερα.



Σχήμα 3.17: Η τάση που παράγεται από την γεννήτρια είναι μεγέθους 5 kV. Η εφαρμοζόμενη όμως στο κύκλωμα δεν ξεπερνά τα 4 kV σε καμία περίπτωση. Εδώ έχουμε προσομοίωση της Δ περίπτωσης (που κατασκευάστηκε) με ωμικό φορτίο.

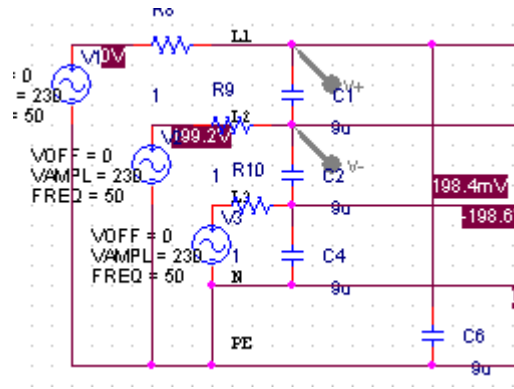
Οι ρυθμίσεις ακρίβειας με τις οποίες πήραμε τα δεδομένα είναι οι εξής:



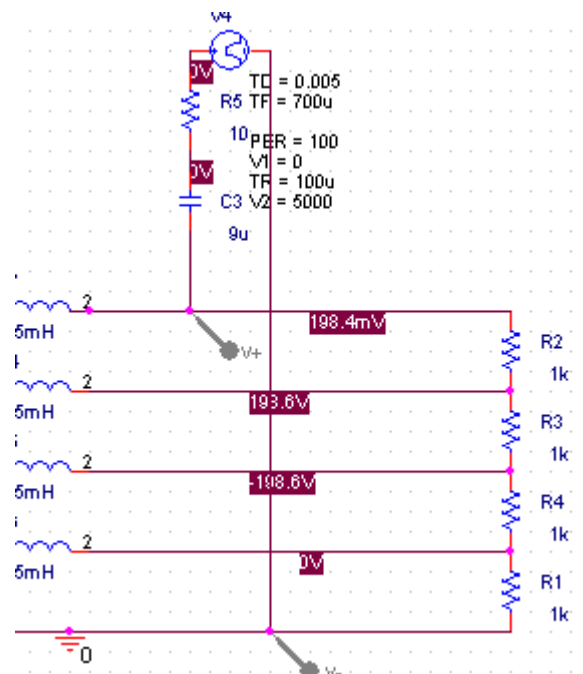
Σχήμα 3.18: Ρυθμίσεις προσομοιώσεων

Μελλοντικά, και για τον μελετητή που τον ενδιαφέρει ο έλεγχος συγκεκριμένου εξοπλισμού ισχύος, θα μπορούσε να γίνει προσομοίωση με το αντίστοιχο φορτίο και με πολύ πιο μικρό βήμα στην επαναληπτική μέθοδο, με τίμημα στον χρόνο τρεξίματος φυσικά.

Τα σφάλματα που μπορεί να έχουν προκύψει στις παραπάνω προσομοιώσεις, έχουν σχέση με την ιδανικότητα των στοιχείων που θεωρούνται από το πρόγραμμα. Ήδη, για να γίνουν οι προσομοιώσεις πιο ρεαλιστικές, έχει προστεθεί τυπική αντίσταση γραμμής 1Ω μετά τις πηγές ημιτονοειδούς τάσης που θεωρούνται ιδανικές. Επίσης, οι ανοχές των στοιχείων θεωρούνται μηδενικές και οι αντιστάσεις των καλωδίων σύνδεσης αμελούνται. Οι EMC παρεμβολές, δεν λαμβάνονται υπ' όψη και βέβαια στην πράξη, η τροφοδοσία δεν θα γίνεται από τόσο τέλειες πηγές.



Σχήμα 3.19 : Λεπτομέρεια που δείχνει το σημείο που παίρνουμε την κυματομορφή στα άκρα του πυκνωτή εισόδου για να δούμε την μεταφορά της διαταραχής στην είσοδο του κυκλώματος.

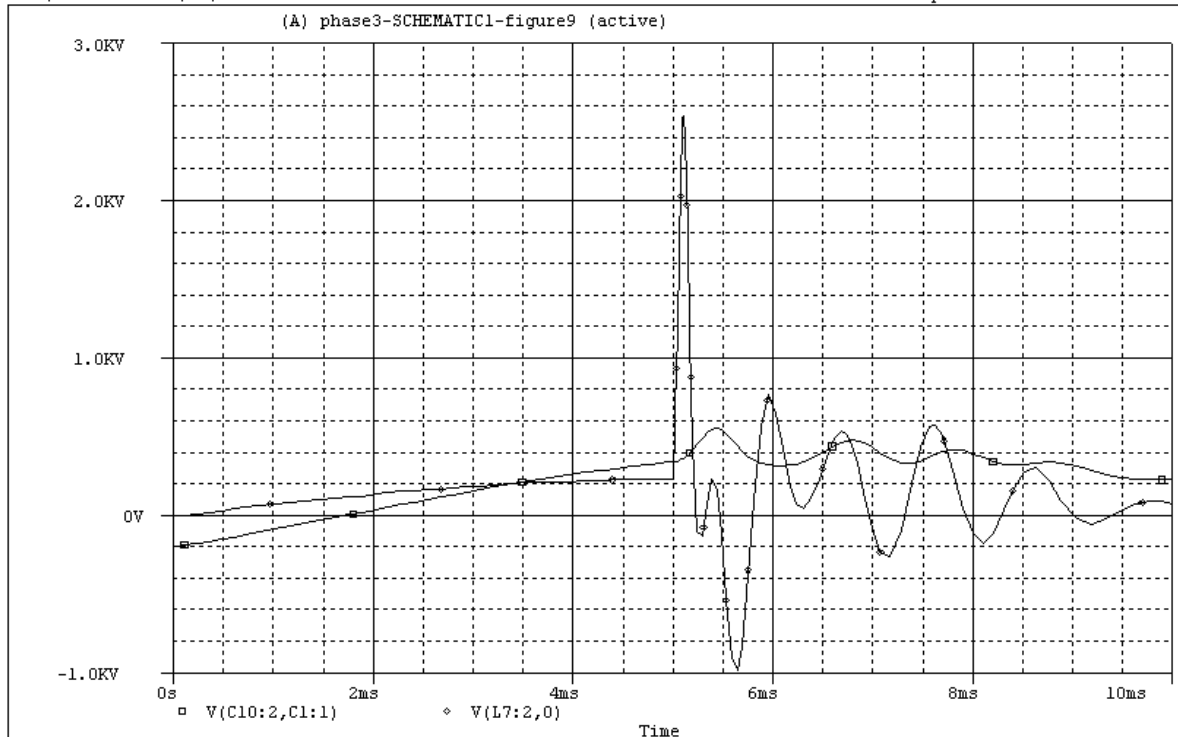


Σχήμα 3.20 : Λεπτομέρεια που δείχνει το σημείο που παίρνουμε την κυματομορφή της υπέρτασης που εφαρμόζουμε στο κύκλωμα.

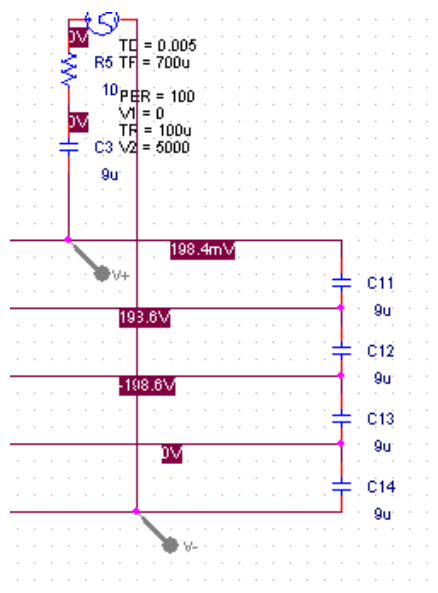
3.4 Λεπτομερέστερη προσομοίωση του δικτύου σύζευξης Γ που κατασκευάστηκε

Ειδικότερα για το δίκτυο σύζευξης Γ (Σχήμα 3.9), δηλαδή της περίπτωσης τριφασικού δικτύου με βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσης και γης που τελικά κατασκευάστηκε, έγιναν μερικές περαιτέρω προσομοιώσεις. Αυτό που άλλαξε ήταν το είδος του εξοπλισμού που ελέγχουμε. Έγινε προσομοίωση με

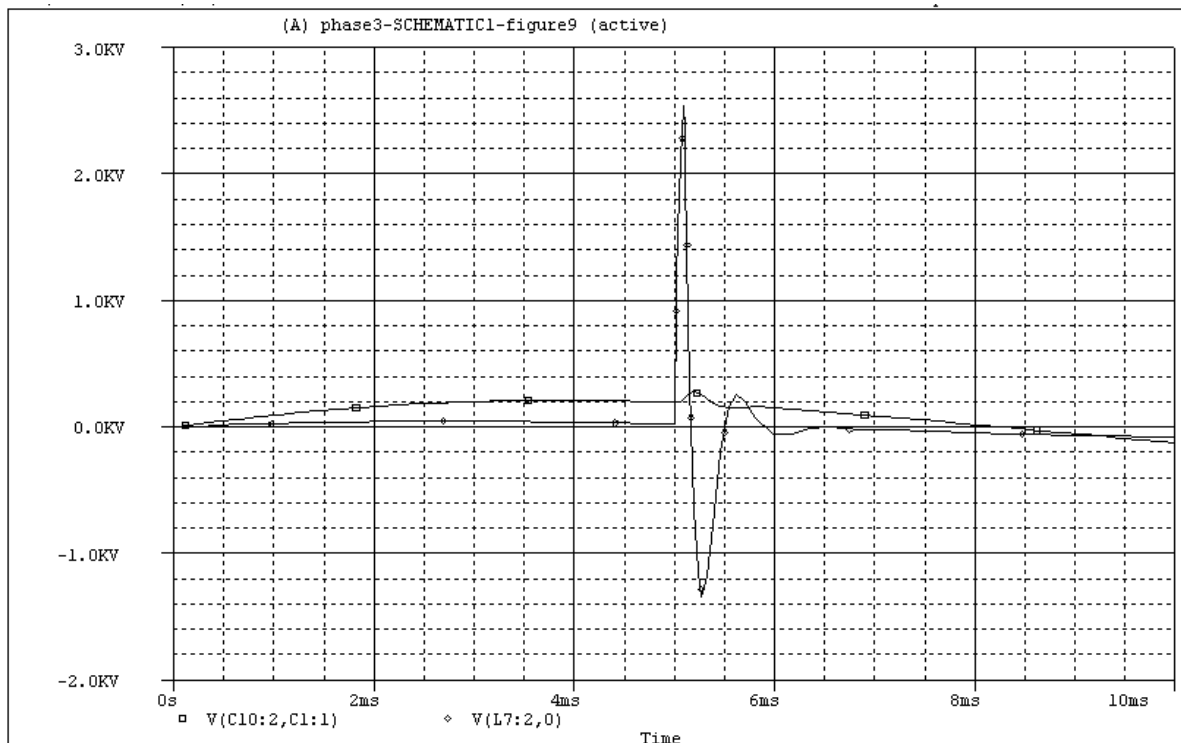
καθαρά χωρητικό φορτίο (Σχήμα 3.21-3.22), προσομοίωση με καθαρά επαγωγικό φορτίο (Σχήμα 3.23-3.24) και προσομοίωση με φορτίο συνδυασμού R,L,C (Σχήμα 3.25-3.26).



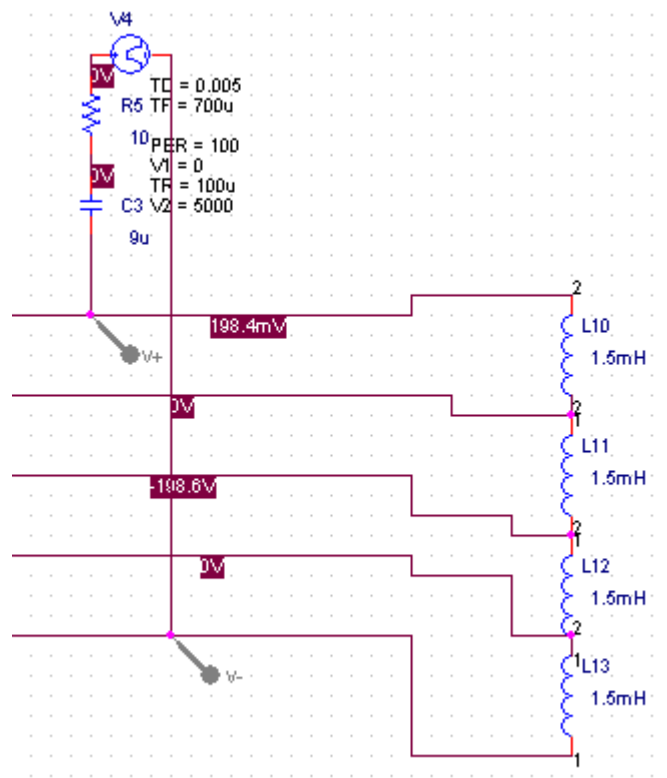
Σχήμα 3.21: Προσομοίωση με καθαρά χωρητικό φορτίο.



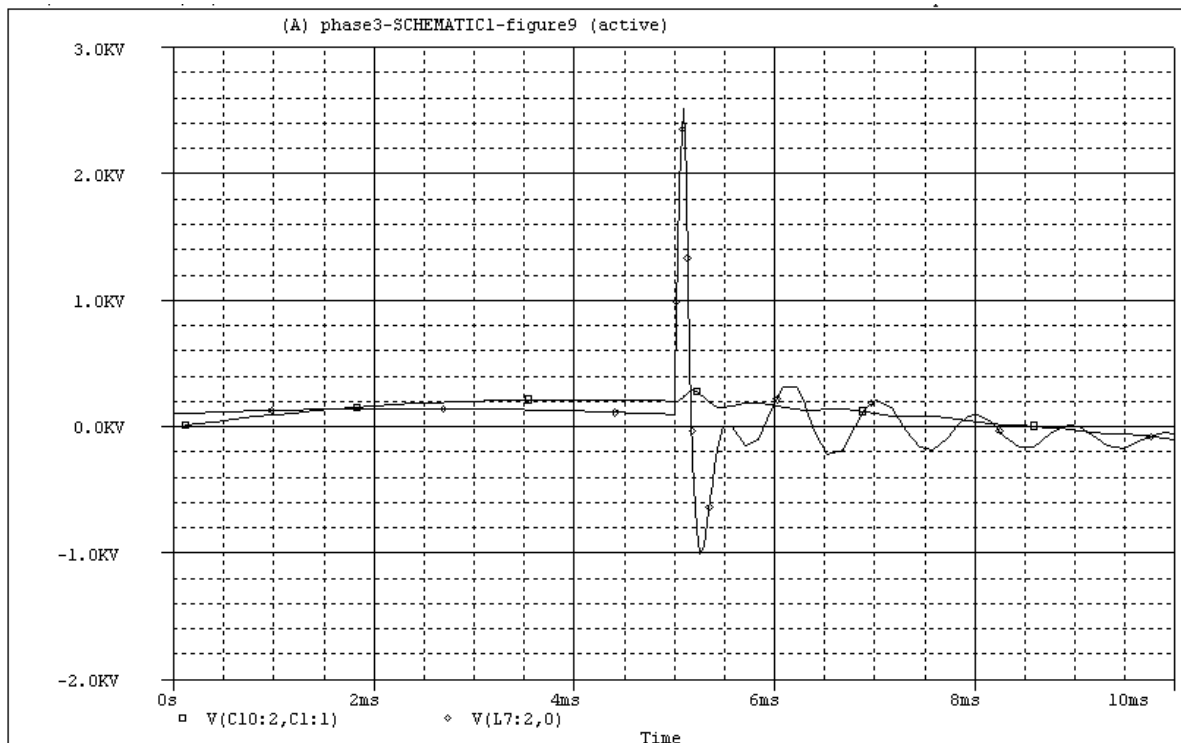
Σχήμα 3.22: Το κύκλωμα με καθαρά χωρητικό φορτίο στην θέση του εξοπλισμού που ελέγχουμε.



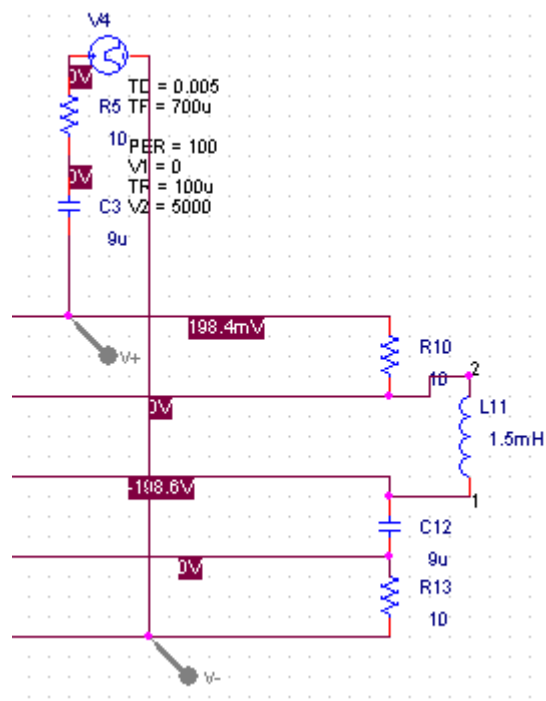
Σχήμα 3.23 : Προσομοίωση με καθαρά επαγωγικό φορτίο.



Σχήμα 3.24: Το κύκλωμα με καθαρά επαγωγικό φορτίο στην θέση του εξοπλισμού που ελέγχουμε



Σχήμα 3.25: Προσομοίωση με κύκλωμα φορτίο R,L,C.



Σχήμα 3.26 Το κύκλωμα με φορτίο R-L-C στην θέση του εξοπλισμού που ελέγχουμε

3.4.1 Παρατηρήσεις στις προσομοιώσεις της περίπτωσης Γ που κατασκευάστηκε.

- Στην περίπτωση του καθαρά χωρητικού φορτίου παρατηρούμε ένα έντονο μεταβατικό φαινόμενο απόσβεσης της υπέρτασης. Επίσης παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της υπέρτασης δεν ξεπερνά τα 2.5 kV.
- Στην περίπτωση με καθαρά επαγωγικό φορτίο παρατηρούμε ένα μικρό μεταβατικό φαινόμενο απόσβεσης της υπέρτασης. Επίσης παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της υπέρτασης δεν ξεπερνά τα 2.5 kV παρότι η εφαρμοζόμενη υπέρταση είναι διπλάσια.
- Στην περίπτωση με φορτίο R-L-C, παρατηρούμε ότι και πάλι η μέγιστη τιμή της υπέρτασης είναι μικρότερη της παραγόμενης και σχεδόν η μισή αυτής. Επίσης, το μεταβατικό φαινόμενο είναι μικρότερο από αυτό που παρατηρήθηκε στην περίπτωση του καθαρά χωρητικού φορτίου και μεγαλύτερο από αυτό που παρατηρήθηκε στην περίπτωση του καθαρά επαγωγικού.

Κεφάλαιο 4

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΗ ΥΠΕΡΤΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΓΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ EN 61000-4-5

Έρευνα είναι η τέχνη του να βλέπεις όλα όσα έχουν δει οι υπόλοιποι και να κάνεις κάτι εντελώς διαφορετικό.

Ανώνυμος

4.1 Λόγος ύπαρξης κατασκευής

Ο βασικότερος λόγος κατασκευής ενός δικτύου σύζευξης είναι η απόκτηση της τεχνογνωσίας κατασκευής του και η σύγκριση με κάποιο αντίστοιχο που υπάρχει στην αγορά και προορίζεται για επαγγελματική χρήση. Έτσι λοιπόν, επελέγη να κατασκευαστεί το δίκτυο σύζευξης Γ του προτύπου EN 61000-4-5, δηλαδή το δίκτυο της περίπτωσης της υπέρτασης μεταξύ φάσης και γης με τριφασική παροχή. Ο λόγος ήταν ότι στο εμπόριο μπορούσε εύκολα να βρεθεί μια χωρητικότητα 10 μF ($\approx 9 \mu\text{F}$) που απαιτείται για την κατασκευή ενώ στην περίπτωση Δ (βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων, τριφασική παροχή) θα χρειαζόμαστε να κατασκευάσουμε την απαιτούμενη χωρητικότητα βάζοντας πυκνωτές σε σειρά και παράλληλα, ανεβάζοντας την πολυπλοκότητα και το κόστος κατασκευής. Επίσης, φτιάχνοντας ένα τέτοιο τριφασικό δίκτυο, πρακτικά έχουμε και το αντίστοιχο μονοφασικό, αν στην έξοδο τροφοδοτήσουμε μονοφασικό εξοπλισμό από μια φάση και ουδέτερο.

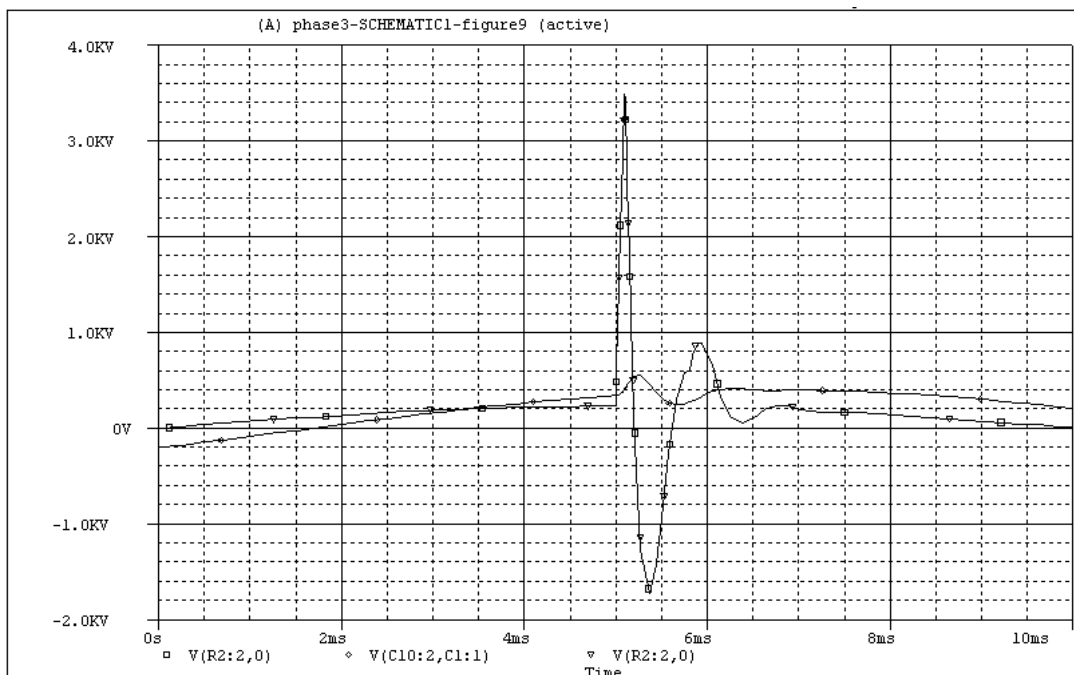
Έτσι, φτιάχνοντας μια τέτοια κατασκευή, έχουμε μια φτηνή και απλή έκδοση του αντίστοιχου δικτύου σύζευξης που προορίζεται για χρήση σε εργαστήρια για την πιστοποίηση εξοπλισμού βάση του παραπάνω προτύπου. Η κατασκευή αποτελεί μέτρο σύγκρισης για το κόστος αλλά και για την απόδοση του δικτύου σύζευξης ως φίλτρο σε σχέση με την συσκευή που προορίζεται για επαγγελματική χρήση.

Τέλος, η συσκευή αποτελεί εργαλείο για ένα εργαστήριο που θέλει να πειραματιστεί πάνω στην διάταξη που ορίζει το πρότυπο EN 61000-4-5

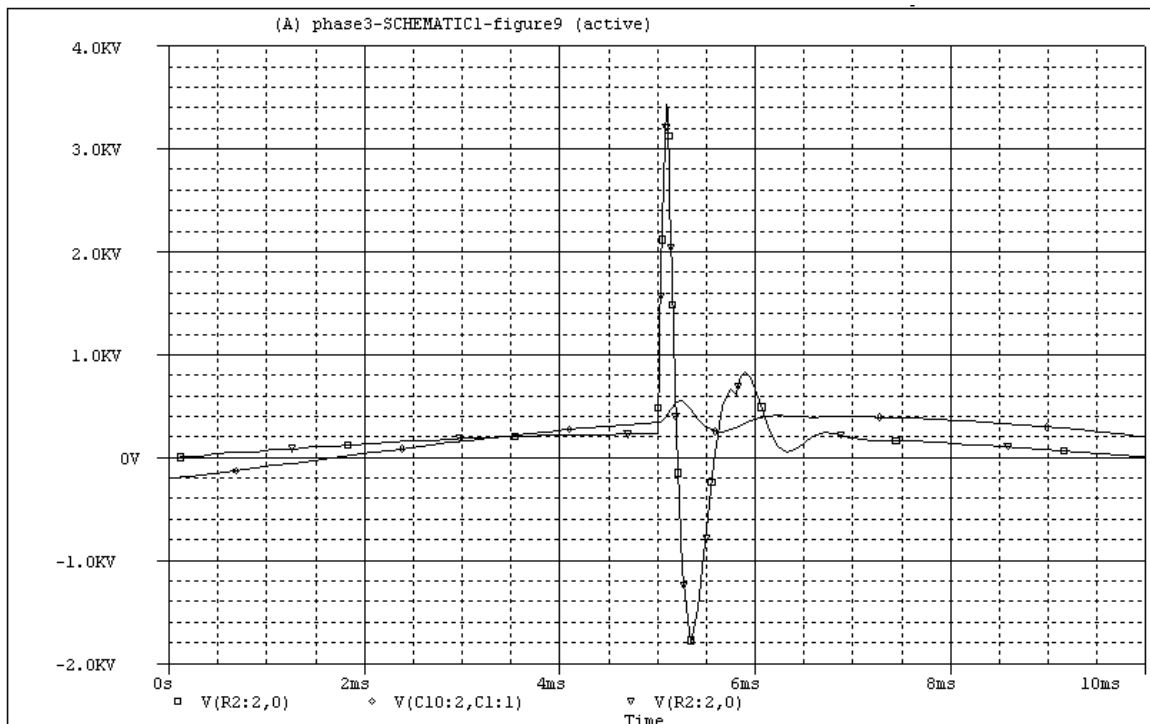
χωρίς βέβαια την ακρίβεια και την πιστότητα ενός επαγγελματικού δικτύου σύζευξης αλλά και χωρίς το ρίσκο μιας δαπανηρής ζημιάς σε ακριβό εξοπλισμό.

4.2 Μεθοδολογία κατασκευής

Αρχικά το πρόβλημα εντοπίστηκε στο να βρεθούν τα υλικά στο εμπόριο. Ο αρχικός στόχος ήταν το δίκτυο σύζευξης να μπορεί να αντέξει ρεύματα τροφοδοσίας συσκευής μέχρι και 16 A. Στο εμπόριο, εκτός εάν κανείς κατέφευγε στην –ακριβή– λύση της ειδικής κατασκευής, μπορούσαν να βρεθούν πηνία αντοχής μέχρι 7 A (πάχους 1,6 mm). Επίσης, πυκνωτές 9 μF αντοχής 400 VAC, ήταν αδύνατο να βρεθούν και θα έπρεπε να μπουν 4 πυκνωτές (2 εν σειρά, παράλληλα με άλλους 2 εν σειρά) για κάθε απαραίτητο πυκνωτή, για να προσεγγίσουμε την πιο πάνω χωρητικότητα. Εύκολα βρέθηκαν όμως πυκνωτές 10 μF , οι οποίοι για λόγους κόστους αλλά και πρακτικής προτιμήθηκαν με μηδαμινές συνέπειες στην απόκριση του φίλτρου, έπειτα από σχετική δοκιμή στο SPICE (Σχήμα 4.1-4.2). Όσον αφορά το κουτί, επελέγη κάποιο με σασί, έτσι ώστε να μπορέσουν να βιδωθούν εύκολα τα στοιχεία του κυκλώματος



Σχήμα 4.1: Προσομοίωση της απόκρισης του κυκλώματος που κατασκευάστηκε με πυκνωτές 10 μF .



Σχήμα 4.2: Προσομοίωση της απόκρισης του κυκλώματος που κατασκευάστηκε με πυκνωτές $9 \mu F$ βάση προτύπου. Παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά παραμένει σχεδόν η ίδια με την παραπάνω προσομοίωση με τους πυκνωτές $10 \mu F$. Οι διαφορές είναι αμελητέες για τον σκοπό της παρούσης εργασίας.

Ανοίγοντας το κουτί, ξεβιδώθηκε το σασί, έτσι ώστε να μπορέσει εύκολα να μαρκαριστεί και έπειτα να πονταριστεί για να τρυπηθεί.

Οι τρύπες που ήταν μεγαλύτερες των 4 mm , ανοίχτηκαν πρώτα με 3 mm τρυπάνι και σταδιακά με μεγαλύτερο νούμερο τρυπάνι.

Αρχικά τοποθετήθηκαν και βιδώθηκαν τα πηνία και έπειτα οι πυκνωτές. (βλέπε εικόνες 4.7,4.8,4.9) Πριν βιδωθεί το σασί ξανά μέσα στο κουτί, έγινε η καλωδίωσή του εκτός για λόγους ευκολίας (βλέπε εικόνα 4.10). Χρησιμοποιήθηκε καλώδιο $2,5 \text{ mm}$, ένα νούμερο δηλαδή μεγαλύτερο από το απαιτούμενο ($1,5 \text{ mm}$). Όσον αφορά τα χρώματα, χρησιμοποιήθηκε μαύρο για τις 3 φάσεις (L1,L2,L3), μπλε για τον ουδέτερο (N) και κίτρινο-πράσινο για την γη (PE).

Έπειτα, τρυπήθηκε το κουτί, για να περάσουν μέσα τα καλώδια NYMHY / 5X2.5 εισόδου και εξόδου. Επίσης έγιναν στην μπροστά πλευρά του κουτιού οι τρύπες για τις 5 μπόρνες σύνδεσης της γεννήτριας συχνοτήτων που θα προσομοιώνει το κεραυνικό πλήγμα.

Αφού ετοιμάστηκαν τα καλώδια εισόδου και εξόδου και βιδώθηκαν τα αντίστοιχα φισ, μπήκε στο κουτί το καλωδιωμένο σασί και βιδώθηκε. Έγιναν οι συνδέσεις με τα καλώδια εισόδου και εξόδου καθώς και με τις 5 μπόρνες και τα καλώδια μαζεύτηκαν με δεματικά (βλέπε εικόνα 4.11).

Με ετικετογράφο, έγινε σήμανση του υλικού επάνω στο σασί, αλλά και σήμανση των εισόδων και της εξόδου από την έξω πλευρά του κουτιού.

Αφού βιδώθηκε το πάνω μέρος του κουτιού, συνδέθηκε στην έξοδο ένας αντάπτορας που βγάζει μια τριφασική έξοδο αλλά και δύο μονοφασικές (L1 και N, L3 και N), έτσι ώστε να έχουμε την δυνατότητα να τροφοδοτήσουμε και να πειραματιστούμε με τυχόντα μονοφασικά φορτία (συσκευές προς έλεγχο).



Εικόνα 4.1: Τα απαιτούμενα για την κατασκευή υλικά μετά την αγορά τους στον εργαστηριακό πάγκο.



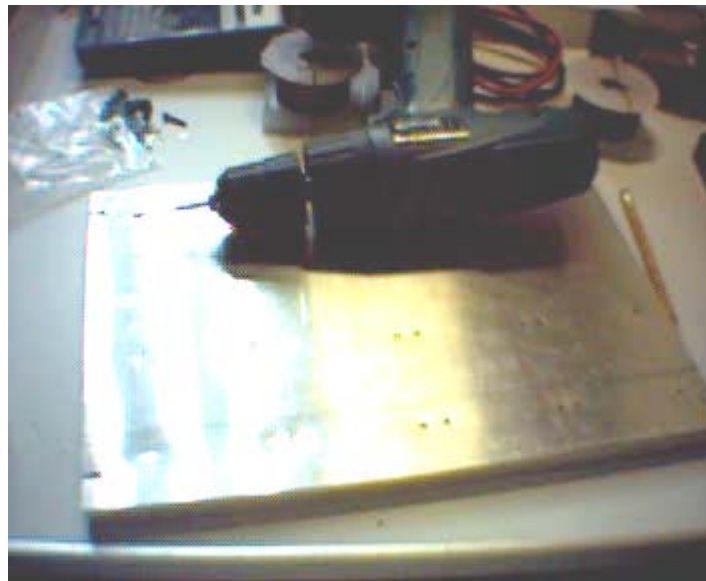
Εικόνα 4.2: Τα απαιτούμενα για την κατασκευή υλικά μετά την αγορά τους στον εργαστηριακό πάγκό. Διακρίνονται, εκτός από το κουτί, τα πηνία και οι πυκνωτές. Στα σακουλάκια βρίσκονται οι μπόρνες και τα κώξ (συρταρωτά και στρογγυλά).



Εικόνα 4.3 : Ο εργαστηριακός πάγκός στο σπίτι του υπογράφοντα την εν λόγω εργασία.



Εικόνα 4.4: Το κουτί ανοιχτό. Διακρίνεται το σασί.



Εικόνα 4.5: Το σασί, αφού έχει μαρκιαριστεί, ποντάρεται για να τρυπηθεί.



Εικόνα 4.6: Το σασί, μόλις έχει τρυπηθεί.



Εικόνα 4.7: Τοποθέτηση των πηνίων στο σασί.



Εικόνα 4.8: Τοποθέτηση των πυκνωτών στο σασί.



Εικόνα 4.9: Το σασί με τοποθετημένα τα υλικά.



Εικόνα 4.10: Καλωδίωση του υλικού επάνω στο σασί, πριν την τοποθέτηση του στο κουτί.



Εικόνα 4.11: Καλωδίωση του υλικού και μάζεμα καλωδίων με δεματικά μετά την τοποθέτηση του σασί μέσα στο κουτί.



Εικόνα 4.12: Η συσκευή έτοιμη. Διακρίνονται τα ογκώδη τριφασικά φισ. Επίσης διακρίνεται ο ογκώδης αντάπτορας στην έξοδο της συσκευής που δίνει την δυνατότητα σύνδεσης ενός τριφασικού φορτίου και δύο μονοφασικών φορτίων στις L1, L3.



Εικόνα 4.13: Η μπροστινή όψη της συσκευής. Διακρίνονται οι μπόρνες σύνδεσης της γεννήτριας συχνοτήτων που προσομοιώνει το κεραυνικό πλήγμα.



Εικόνα 4.14: Η πίσω όψη της συσκευής.

4.3 Λίστα υλικού και κόστος

Πίνακας 4.1 : Πίνακας κόστους υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΙΔΟΥΣ	ΤΕΜΑΧΙΑ	ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΤΕΜΑΧΙΟ (€)	ΑΞΙΑ (€)
ΠΗΝΙΟ 1.5Mh/1.20mm	4	10.00	40.00
ΠΥΚΝΩΤΗΣ 10 μF 400 VAC	8	3.00	24.00
ΚΟΥΤΙ ΜΕΤΑΛΙΚΟ	1	26.55	26.55
ΚΑΛΩΔΙΟ ΕΥΚΑΜΠΤΟ ΝΥΜΗΥ/5Χ2.5	6	1.81	10.86
5Χ16 ΦΙΣ ΘΗΛΥΚΟ	1	5.00	5.00
5Χ16 ΦΙΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟ	1	3.50	3.50
ΑΝΤΑΠΤΟΡΑΣ ΔΥΟ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΙΑΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ	1	30.00	30.00
ΜΠΟΡΝΕΣ, ΚΩΣ, ΚΑΙ ΛΟΙΠΟ ΥΛΙΚΟ		10.00	10.00
ΣΥΝΟΛΟ			€149.91

4.4 Κατασκευή προσαρμογέα R-C

Βάση προτύπου, για να γίνει η δοκιμή Δ (και Β η αντίστοιχη μονοφασική),

θα πρέπει σε σειρά με την γεννήτρια συχνοτήτων που προσομοιώνει το κεραυνικό πλήγμα να μπει ένας πυκνωτής 9 μF και μια αντίσταση 10 Ω . Όπως και στα παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε πυκνωτής 10 μF με ελάχιστες επιπτώσεις στην συμπεριφορά του κυκλώματος.

Το κόστος της εν λόγω συσκευής δεν ξεπέρασε τα €10. Τα ακριβότερα στοιχεία ήταν το κουτί (€5) και ο πυκνωτής 10 μF (€3).

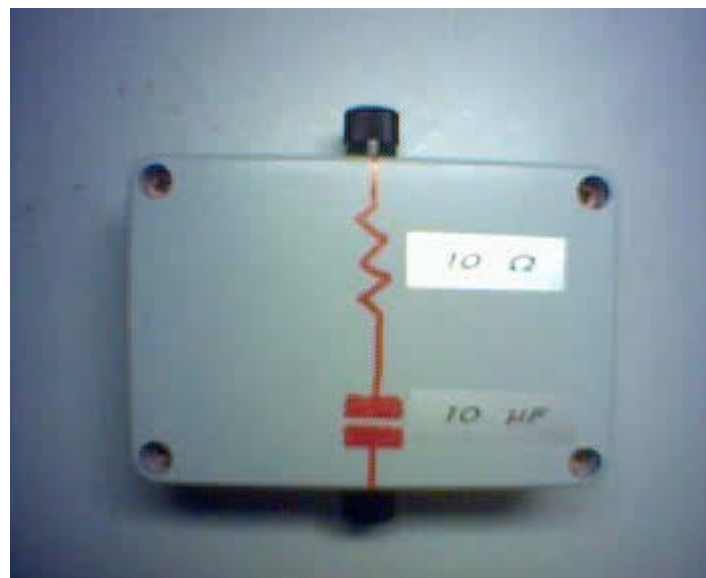
Τα στάδια της κατασκευής αυτής είναι τα εξής:



Εικόνα 4.15: Τα υλικά μετά την αγορά στον εργαστηριακό πάγκο. Διακρίνονται το κουτί, ο πυκνωτής 10 μF , οι μπόρνες και η αντίσταση 10 Ω .



Εικόνα 4.16: Ο προσαρμογέας έτοιμος λίγο πριν κλείσει το καπάκι. Έχουν τοποθετηθεί οι μπόρνες και έχουν γίνει όλες οι απαραίτητες κολλήσεις.



Εικόνα 4.17: Ο προσαρμογέας έτοιμος προς χρήση.

Κεφάλαιο 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Έρευνα είναι να ανεβαίνει κανείς σοκάκια για να δει αν είναι τυφλά.

Πλούταρχος

5.1 Ο εξοπλισμός ελέγχου

5.1.1 Παλμογράφος Tektronix TDS 3052

Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήσαμε για τον έλεγχο των κυματομορφών στα πειράματά ελέγχου που έγιναν, ήταν ο ψηφιακός παλμογράφος του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Tektronix 3052 (Εικόνα 5.1), με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [7]:

- 500 Mhz Bandwidth
- Δειγματοληψία 5 GS/s
- 2 κανάλια εισόδου
- Έγχρωμη VGA οθόνη LCD
- Υποστήριξη πολλών γλωσσών
- Δυνατότητα εκτύπωσης κυματομορφών σε εκτυπωτή ή σε δισκέτα



Εικόνα 5.1: Ο παλμογράφος Tektronix TDS 3052

5.1.2 Η γεννήτριες συχνοτήτων HP 3320B και GW GFG-8015F

Στον έλεγχο του δικτύου σύζευξης που κατασκευάστηκε χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές γεννήτριες συχνοτήτων για να μπορέσουμε να καλύψουμε μεγάλο εύρος συχνοτήτων στις μετρήσεις μας κατά τον έλεγχο του δικτύου ως φίλτρο [8], [10].

➤ Good Will GFG-8015F Function Generator

Η γεννήτρια αυτή (Εικόνα 5.2), χρησιμοποιήθηκε για παραγωγή χαμηλών σχετικά συχνοτήτων. Το ημίτονο που παρήγαγε ήταν καλό μέχρι που συνδέαμε το δίκτυο σύζευξης όπου και παρατηρούσαμε κάποια διαταραχή στην κυματομορφή. Ο λόγος ήταν ότι πρόκειται για μια σχετικά αδύναμη γεννήτρια συχνοτήτων μη ικανή να αντέξει το μεγάλο φορτίο του δικτύου σύζευξης.



Εικόνα 5.2: Good Will GFG-8015F Function Generator

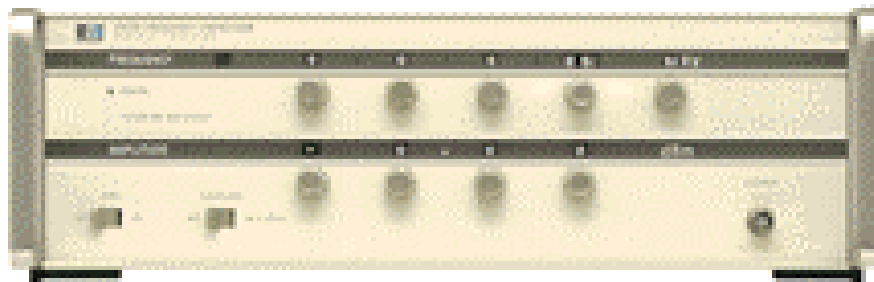
➤ *Hewlett Packard HP 3320B Frequency Synthesiser*

Η γεννήτρια αυτή (Εικόνα 5.3) του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο του δικτύου σύζευξης που κατασκευάστηκε σε περιοχή υψηλών σχετικά συχνοτήτων. Λόγω προβλήματος της, σε συχνότητες χαμηλές, χρειάστηκε να χρησιμοποιήσουμε την GW που αναφέρθηκε παραπάνω. Σε υψηλές πάντως συχνότητες, η συμπεριφορά της γεννήτριας ήταν πολύ καλή και όταν συνδέαμε το φορτίο, καμία παραμόρφωση δεν παρατηρούσαμε στην κυματομορφή εξόδου της.

Το εύρος των συχνοτήτων της είναι 0.01 Hz με 13 MHz .

Η έξοδός της μπορεί να ρυθμιστεί με ανάλυση 0.01 dB σε ένα εύρος $+29,99 \text{ dBm}$ με $-66,99 \text{ dBm}$.

Η τάση τροφοδοσίας και των δυο γεννητριών συχνοτήτων είναι $230\text{V}/50\text{Hz}$.



Εικόνα 5.3: Hewlett Packard HP 3320B Frequency Synthesiser

5.1.3 Γεννήτρια ASEA-HAEFELY

Η κρουστική γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Πολυτεχνείου είναι η Type PC 6-288 των ASEA HAEFELY, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σαν γεννήτρια παραγωγής κρουστικών τάσεων, είτε σαν γεννήτρια παραγωγής κρουστικών ρευμάτων.



Εικόνα 5.4: Γεννήτρια ASEA-HAEFELY Type PC 6-288

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κρουστικής γεννήτριας είναι [6]:

- η αντίστασή της, που προκύπτει από τη σχέση $Z_S = \frac{V_{\text{ανοιχτοκυκλωμα}}}{i_{\text{βραχυκυκλωμα}}}$ έχει τιμή $2\Omega \pm 10\%$,
- η μέγιστη ενέργεια εκφορτίσεώς της είναι $216\text{Ws} \pm 10\%$,
- η τάση τροφοδοσίας της μπορεί να είναι 115 ή 230V,
- η συχνότητα με την οποία τροφοδοτείται από το δίκτυο είναι 50 ή 60Hz,
- η μέγιστη ισχύς με την οποία μπορεί να τροφοδοτηθεί είναι 250VA,
- οι διαστάσεις της είναι $500 \times 400 \times 160\text{mm}^3$,
- το βάρος της είναι περίπου 40Kgr, και
- η γεννήτρια πληροί τους κανονισμούς ασφαλείας I.E.C. 348.

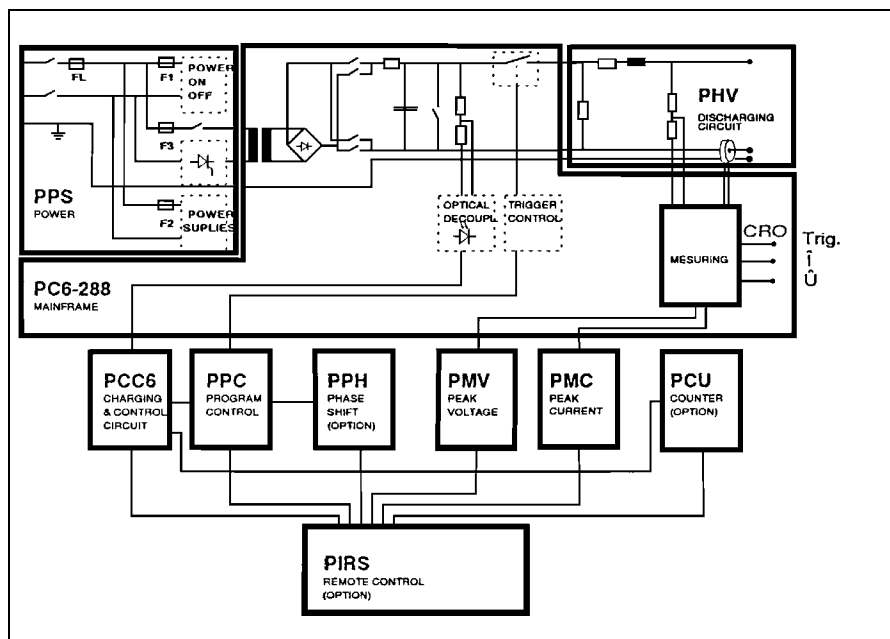
Όταν λειτουργεί σαν γεννήτρια παραγωγής ρεύματος δύναται να τροφοδοτεί με ρεύμα, του οποίου η κορυφή μπορεί να κυμαίνεται από 0,25 έως 3kA, ενώ η κυματομορφή του κρουστικού ρεύματος κατά το βραχυκύκλωμα είναι η $8/20\mu\text{s} \pm 30\%$.

Όταν λειτουργεί σαν γεννήτρια παραγωγής τάσης έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτεί με τάση, της οποίας η κορυφή μπορεί να κυμαίνεται από 0,5 έως 6kV \pm 10%, ενώ η κυματομορφή της κρουστικής τάσης στο ανοικτοκύκλωμα είναι η 1,2/50 μ s \pm 30%.

5.1.3.1 Οι βασικές μονάδες της κρουστικής γεννήτριας της δοκιμής

Το σύστημα δοκιμής PC 6-288 αποτελείται από έναν αριθμό ανεξαρτήτων τμημάτων (μονάδων). Αυτά είναι [6]:

- το τμήμα υψηλής τάσης (αποτελείται από τη μονάδα PC 6-288),
- το τμήμα μετρήσεων και ελέγχου (αποτελείται από τις μονάδες PCC6, PPC, PMV, PMC),
- το τμήμα παροχής των κυματομορφών (υψηλής τάσης-ρεύματος), (αποτελείται από τη μονάδα PHV).



Σχήμα 5.1: Γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων PC 6-288 των ASEA-HAEFELY

Μονάδα PC 6-288

Αποτελεί την καρδιά του μετρητικού συστήματος και περιλαμβάνει τα κύρια στοιχεία του συστήματος φόρτισης-εκφόρτισης (πυκνωτή κρούσης, διακόπτες φόρτισης και εκφόρτισης). Εδώ λαμβάνει χώρα η ανύψωση της εναλλασσόμενης τάσης, με τη βοήθεια μετασχηματιστή, και η δημιουργία της τάσης φόρτισης του πυκνωτή κρούσης. Το σύστημα ανόρθωσης αποτελείται από μία διάταξη θυρίστορ, στην οποία ελέγχεται ηλεκτρονικά (αυτόματα) η γωνία έναυσης, άρα και η τιμή της ανορθωμένης (συνεχούς) τάσης.

Μονάδα PHV

Η High Voltage Plug (PHV) περιλαμβάνει δύο εξόδους, την HIGH VOLTAGE και την COMMON. Η έξοδος HIGH VOLTAGE δίνει, με τη βοήθεια ενός αγωγού (υψηλής τάσης), την υψηλή τάση (μορφής 1,2/50μs), ενώ το υψηλό ρεύμα (μορφής 8/20μs) λαμβάνεται με τη χρήση δύο ειδικών αγωγών (υψηλής τάσης) βραχυκυκλώνοντας τις εξόδους HIGH VOLTAGE και COMMON.

Τμήμα της μονάδας PHV αποτελεί και η μονάδα μετρήσεων (CRO Measuring Unit), η οποία έχει τρεις εξόδους:

- την έξοδο 1 (CRO TRIGGER), που παρέχει την τάση σκανδαλισμού (έναρξη μέτρησης) του παλμογράφου, μέγιστη τιμή της οποίας είναι τα 10V,
- τη BNC έξοδο 2 (IMPULSE I), που δίνει ένα σήμα ανάλογο του ρεύματος στην COMMON line (κοινή γραμμή). Το ρεύμα μετριέται με τη χρήση ενός μαγνητικού probe, του οποίου ο λόγος μετατροπής είναι 10A/V, και
- τη BNC έξοδο 3 (IMPULSE U), που δίνει ένα σήμα ανάλογο της τάσης και το οποίο είναι γαλβανικά αποσυνδεδεμένο από το κύκλωμα υψηλής τάσης. Η τάση μετριέται με τη χρήση ενός ωμικού καταμεριστή που έχει λόγο καταμερισμού ίσο με 1:730.

Μονάδα PCC

Η Charging Control Module PCC 1.1 παρέχει τη δυνατότητα:

- τροφοδοσίας της γεννήτριας,
- ρύθμισης του κυκλώματος υψηλής τάσης της γεννήτριας σε κατάσταση ON/OFF,
- ρύθμισης της τάσης φόρτισης της γεννήτριας (0-6,99kV),
- ρύθμισης του χρόνου φόρτισης της γεννήτριας (10-99sec), και
- επαναφοράς (Reset).

Επίσης, πάνω στην Charging Control Module PCC 1.1 υπάρχουν leds και ψηφιακές ενδείξεις που πληροφορούν για:

- εάν το κύκλωμα υψηλής τάσης είναι ON/OFF,
- την τάση φόρτισης της γεννήτριας,
- εάν επιτεύχθηκε η τάση φόρτισης που ζητήθηκε, και
- εάν έχει κάποιο πρόβλημα η γεννήτρια.

Μονάδα PPC

Η Program Control Module PPC 1.1 περιλαμβάνει τα πιο σημαντικά κυκλώματα για τη λειτουργία της γεννήτριας που είναι το κύκλωμα ασφαλείας, μετασχηματιστές, ανορθωτές, κανονικοποιητές, καθώς και το βασικό κύκλωμα ελέγχου.

Με την Program Control Module PPC 1.1 μπορούμε να ρυθμίζονται:

- η πολικότητα της εκκένωσης (θετική, αρνητική ή εναλλάξ), και
- η έναυση της εκκένωσης (αυτόματη, εξωτερική ή χειροκίνητη).

Πάνω στη μονάδα Program Control Module PPC 1.1 βρίσκονται leds και ψηφιακές ενδείξεις που δείχνουν:

- την πολικότητα της εκκένωσης, και
- την έναυση της εκκένωσης.

Μονάδα PMV

Η Peak Voltage Module PMV 1.1 δίνει σε ψηφιακή μορφή τη μέγιστη τιμή της τάσης και την πολικότητά της. Η τάση, που μετρείται με τη βοήθεια ωμικού καταμεριστή έχοντα λόγο καταμερισμού 1:730, εμφανίζεται στην οθόνη με τα τρία πιο σημαντικά ψηφία της (σε kV).

Μονάδα PMC

Η Peak Current Module PMC 1.1 δίνει σε ψηφιακή μορφή τη μέγιστη τιμή του ρεύματος και την πολικότητά του. Το ρεύμα, που μετρείται με τη βοήθεια ενός μαγνητικού αισθητήρα (magnetic probe) έχοντα λόγο μετατροπής 10A/V, εμφανίζεται στην οθόνη με τα τρία πιο σημαντικά ψηφία του και ένδειξη σε A ή kA, μιας και η μονάδα PMC παρέχει τη δυνατότητα επιλογής, μέσω ενός διακόπτη, της κλίμακας μέτρησης (10kA, ή 1kA, ή 100A).

5.1.4 Μονοφασικό δίκτυο σύζευξης Schaffner CDN 131

Το μονοφασικό δίκτυο σύζευξης CDN 131 του οίκου SHAFFNER που χρησιμοποιήσαμε είναι η μονοφασική ‘εμπορική’ έκδοση του δοκιμίου που κατασκευάστηκε. Ο ίδιος οίκος προσφέρει και το αντίστοιχο τριφασικό δίκτυο σύζευξης CDN 133 [9]. Το πιο πάνω δίκτυο σύζευξης, είναι ειδικό για δοκιμές πιστοποίησης για αντοχή σε υπερτάσεις βάση του προτύπου EN 61000-4-5. Περιέχει δε και τον προσαρμογέα R-C εσωτερικά. Τα πηνία σύζευξης είναι ειδικά σχεδιασμένα για να αντέχουν απότομα ρεύματα που απαντώνται συχνά σε εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος, που δύναται να τροφοδοτηθούν μέσω των δικτύων σύζευξης CDN 131 ή CDN 133.

Έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [9]:

- Τάση τροφοδοσίας 115/230 Vac
- Τροφοδοσία εξοπλισμού προς έλεγχο μονοφασική με:
 - Τάση AC 24-240 V
 - Τάση DC 1-50 V
 - Ρεύμα 25 A συνεχόμενα ή 30 A για 30 min.
- Τροφοδοσία από γεννήτρια συχνοτήτων μεταξύ φάσεων αλλά και μεταξύ φάση και γης.
- Διαστάσεις 310X449X510
- Βάρος 22 kg
- Το CDN 133 έχει τα ίδια χαρακτηριστικά λειτουργίας αλλά είναι τριφασικό δίκτυο σύζευξης.



Εικόνα 5.5: CDN 131/CDN 133 του οίκου Schaffner

5.1.5 Σύστημα 2050 του οίκου Schaffner

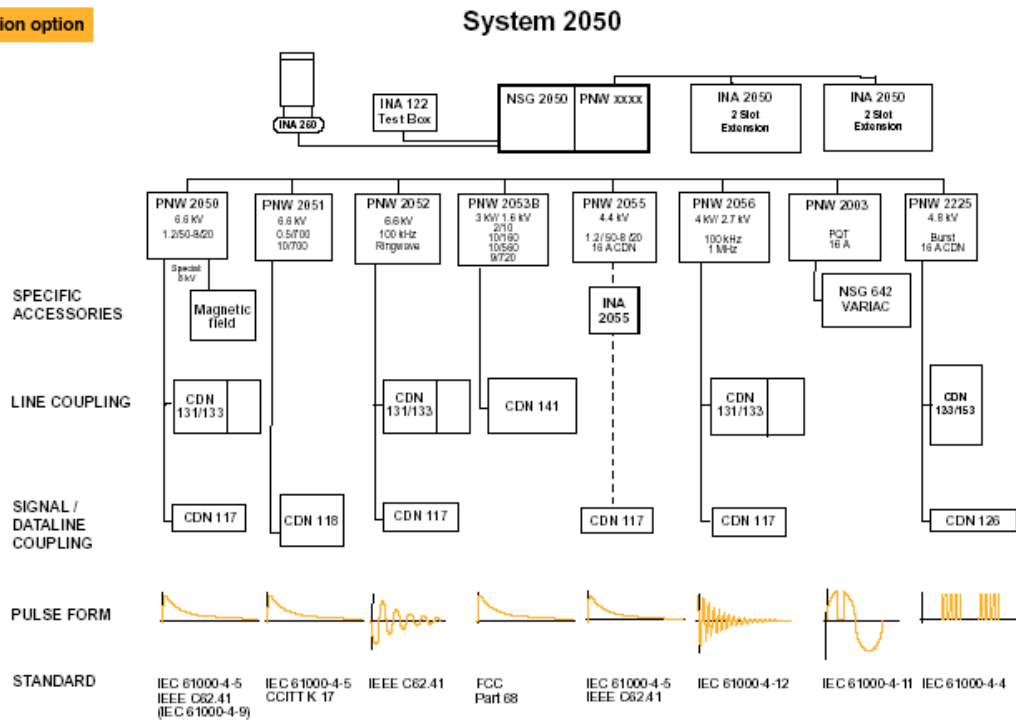
Στον εξοπλισμό του εργαστηρίου υψηλών τάσεων του Ε.Μ.Π. μεταξύ άλλων, βρίσκονται οι μονάδες NSG 2050 και PNW 2050 του οίκου SCHAFFNER οι οποίες αποτελούν πρόταση του πιο πάνω οίκου για δοκιμές πιστοποίησης ατρωσίας EMC.

Η μονάδα NSG 2050 αποτελεί τον ελεγκτή του συστήματος δοκιμών. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την μονάδα PNW 2050 για την παραγωγή κυματομορφής 1,2/50 μ s για έλεγχο βάση προτύπου EN 61000-4-5. Σε συνδυασμό με άλλες μονάδες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για δοκιμές πιστοποίησης EMC βάση άλλων προτύπων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο βασικός λόγος που ο κατασκευαστής έχει επιλέξει την παρακάτω μορφή, την μορφή δηλαδή ενός ελεγκτή που μπορεί να ελέγχει διαφορετικές γεννήτριες κυματομορφών για ελέγχους EMC βάση διαφορετικών προτύπων, είναι η μείωση του κόστους αγοράς. Ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε εργαστηρίου, αγοράζονται μονάχα οι απαραίτητες γεννήτριες κυματομορφών αλλά είναι απαραίτητος μονάχα ένας ελεγκτής.

Ο NSG 2050, έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [9]:

- Τάση τροφοδοσίας 100-240 Vac 50/60Hz
- Μικροεπεξεργαστής που αναγνωρίζει όλα τα πρόσθετα στοιχεία του συστήματος
- Λειτουργία μέσω πληκτρολογίου και οθόνης
- Έξοδος με συνδέσμους αντοχής 10 kV
- Έξοδος σκανδαλισμού παλμογράφου
- Έλεγχος μεγίστου ρεύματος
- Σήμα τέλους δοκιμής
- Έξοδος RS232
- Βάρος 20 kg
- Διαστάσεις 310X449X510
- Τοποθέτηση σε rack ή πάνω σε τραπέζι
- Μπορεί να στεγάσει μια μονάδα PNW ή και μέχρι 5 με βοηθητικό σασί.

UKAS Calibration option



Σχήμα 5.2: Το σύστημα 2050 του οίκου Schaffner για δοκιμές απρωσίας EMC



Εικόνα 5.6: Μονάδα NSG 2050 της Schaffner

Η μονάδα PNW 2050 έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [9]:

- Βγάζει υβριδικό παλμό 1,2/50 μs ή 8/20 μs
- Τάση εξόδου 200V έως 6600V

- Έξοδος μέχρι 3300 A
- Εμπέδηση 2Ω ή 12Ω
- Επανάληψη παλμού κάθε 10s έως 10000s

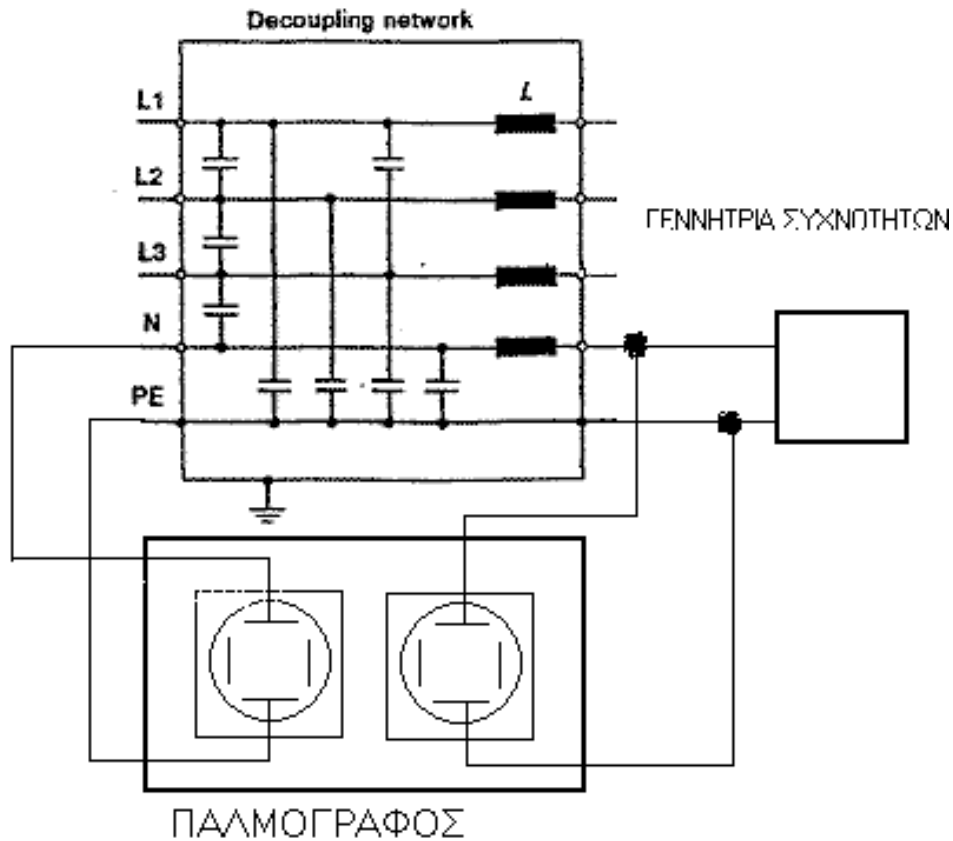


Εικόνα 5.7: Το σύστημα 2050

5.2 Έλεγχος του δικτύου σύζευξης ως φίλτρο.

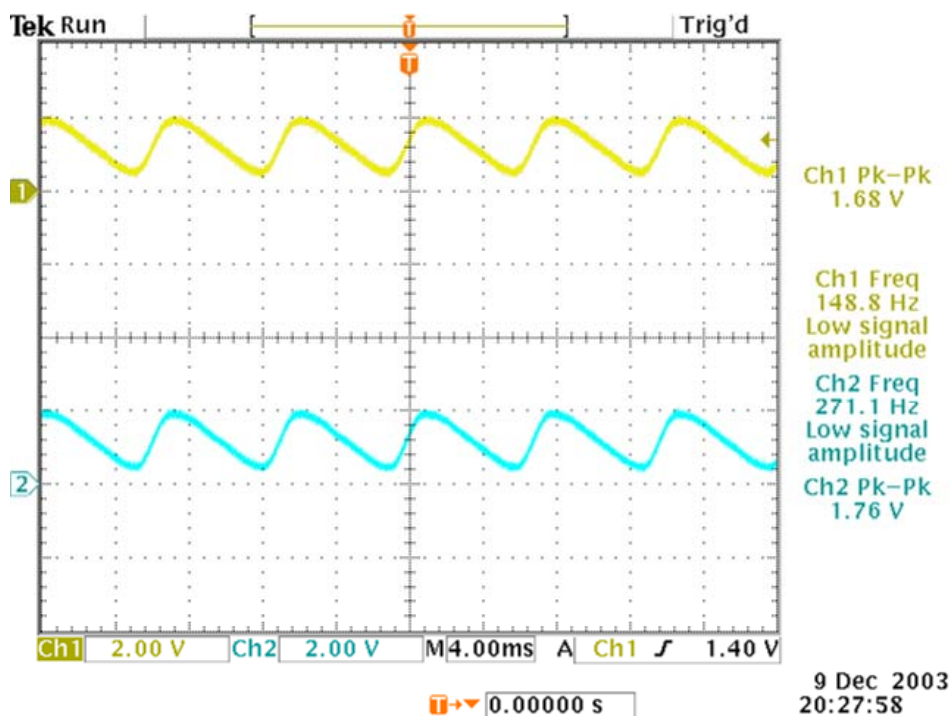
Με σκοπό να διερευνηθεί η συμπεριφορά του δικτύου σύζευξης που κατασκευάστηκε ως φίλτρο, συνδέσαμε εναλλάξ τις δύο γεννήτριες συχνοτήτων που αναφέρονται παραπάνω (HP 3320B και GW GFG-8015F) στην έξοδο του δικτύου σύζευξης και ελέγχουμε τις συχνότητες που το δίκτυο σύζευξης αποκόπτει προς την πλευρά του δικτύου παροχής ισχύος. Βάση προτύπου, το δίκτυο σύζευξης θα πρέπει να είναι ικανό να αποκόπτει παλμούς 1,2/50 μs ή 8/20 μs ενώ το ημίτονο βιομηχανικής συχνότητας θα πρέπει να περνά ανεμπόδιστο. Ο έλεγχος για την αποκοπή συχνοτήτων έγινε εφαρμόζοντας ημιτονικές κυματομορφές στην έξοδο του δικτύου σύζευξης.

Συγκεκριμένα συνδέσαμε την εκάστοτε γεννήτρια μεταξύ γης και κάποιας φάσης (ή ουδετέρου) και παρατηρούσαμε την κυματομορφή που επέτρεπε το δίκτυο σύζευξης να περάσει προς την πλευρά τροφοδοσίας.

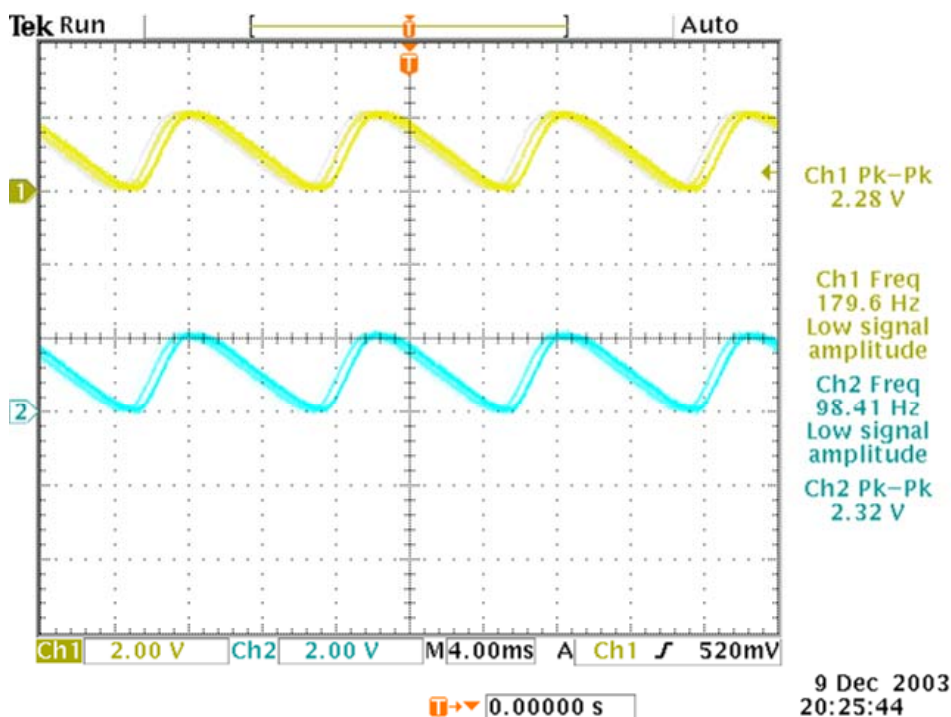


Σχήμα 5.3: Συνδεσμολογία ελέγχου του δικτύου σύζευξης ως φίλτρο. Εδώ έχει συνδεθεί η γεννήτρια συχνοτήτων μεταξύ γης και ουδετέρου.

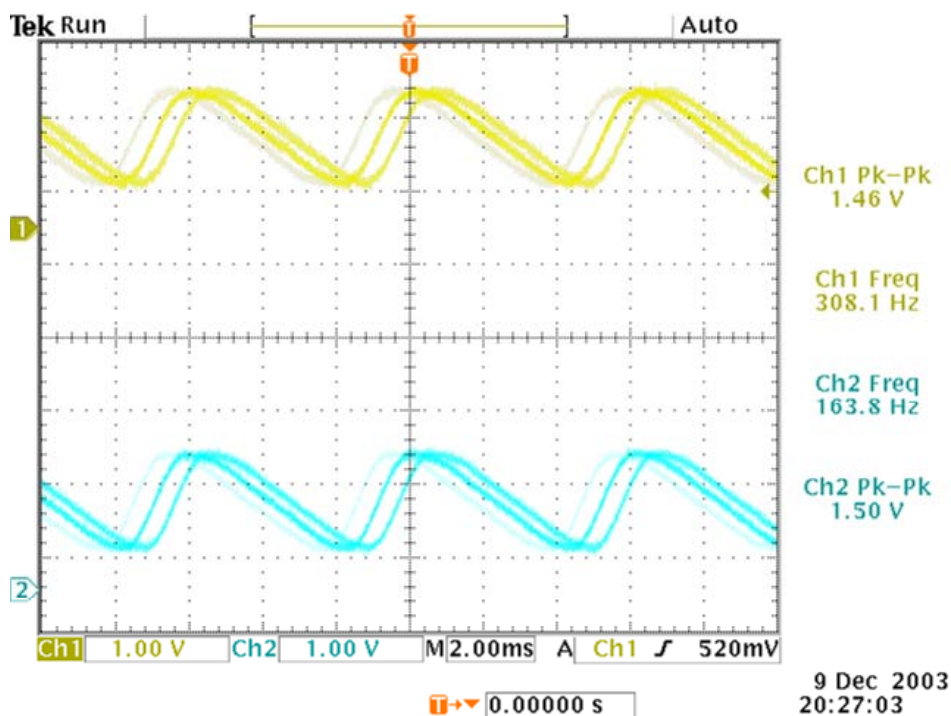
Χρησιμοποιώντας τον ψηφιακό παλμογράφο, πήραμε τις παρακάτω κυματομορφές. Στο κανάλι 1 φαίνεται η κυματομορφή εισόδου και στο κανάλι 2 η κυματομορφή στην είσοδο του δικτύου σύζευξης που κατασκευάστηκε. Δίπλα από τα παλμογραφήματα, φαίνονται αριθμητικά οι peak to peak τάσεις των εισόδων καθώς και η συχνότητά τους. Επίσης διακρίνεται ο χρόνος διεξαγωγής της εκάστοτε μέτρησης.



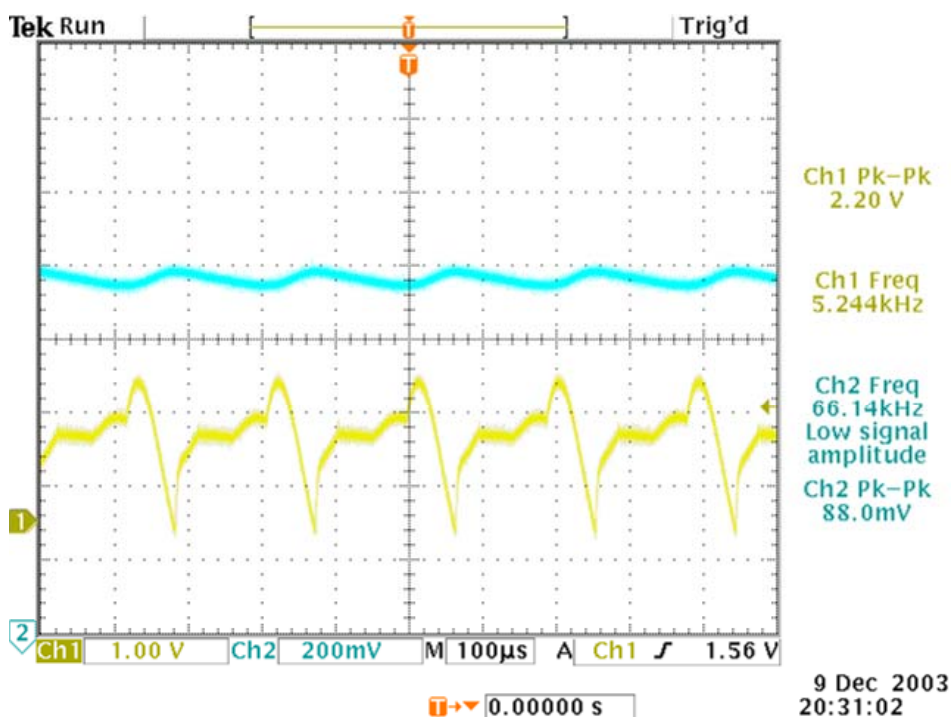
Εικόνα 5.8: Εικόνα από τον ψηφιακό παλμογράφο. Συχνότητα εισόδου 148,8 Hz. Εύκολα παρατηρούμε την διαταραχή στο ημίτονο εισόδου, λόγω χρήσεως της αδύναμης γεννήτριας συχνοτήτων.



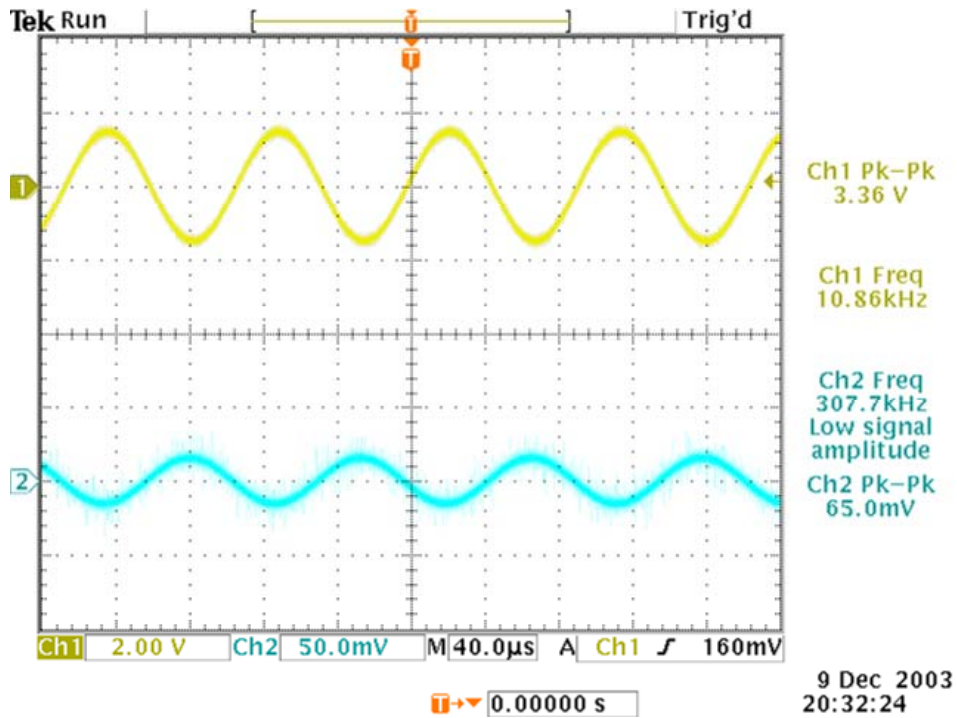
Εικόνα 5.9: Εικόνα από τον ψηφιακό παλμογράφο. Συχνότητα εισόδου 179,6 Hz. Εύκολα παρατηρούμε την διαταραχή στο ημίτονο εισόδου, λόγω χρήσεως της αδύναμης γεννήτριας συχνοτήτων.



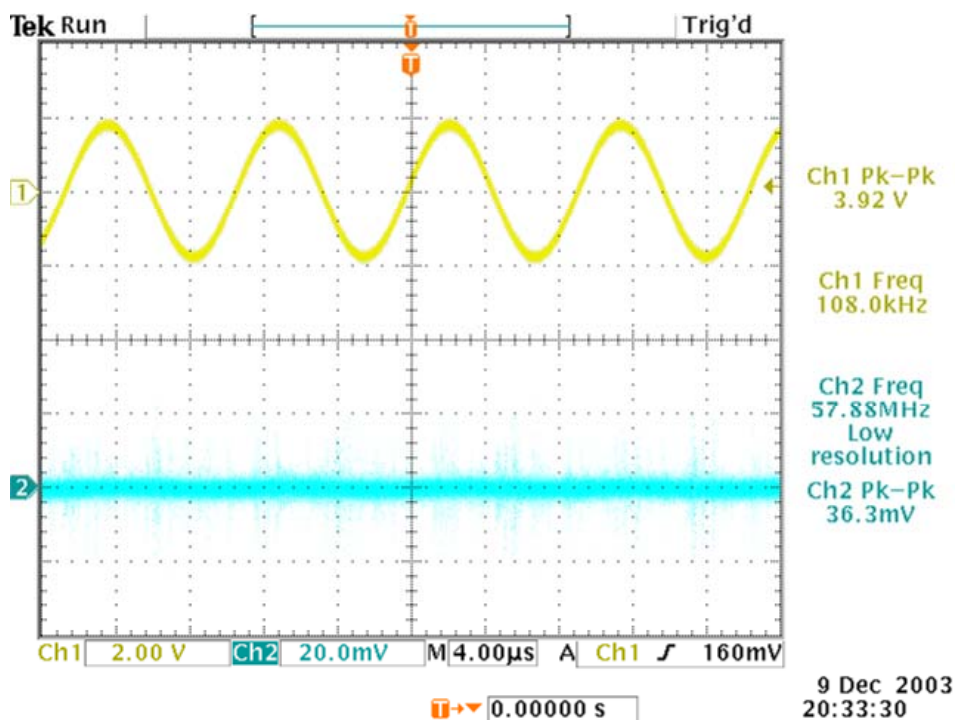
Εικόνα 5.10: Εικόνα από τον ψηφιακό παλμογράφο. Συχνότητα εισόδου 308,1 Hz. Εύκολα παρατηρούμε την διαταραχή στο ημίτονο εισόδου, λόγω χρήσεως της αδύναμης γεννήτριας συχνοτήτων.



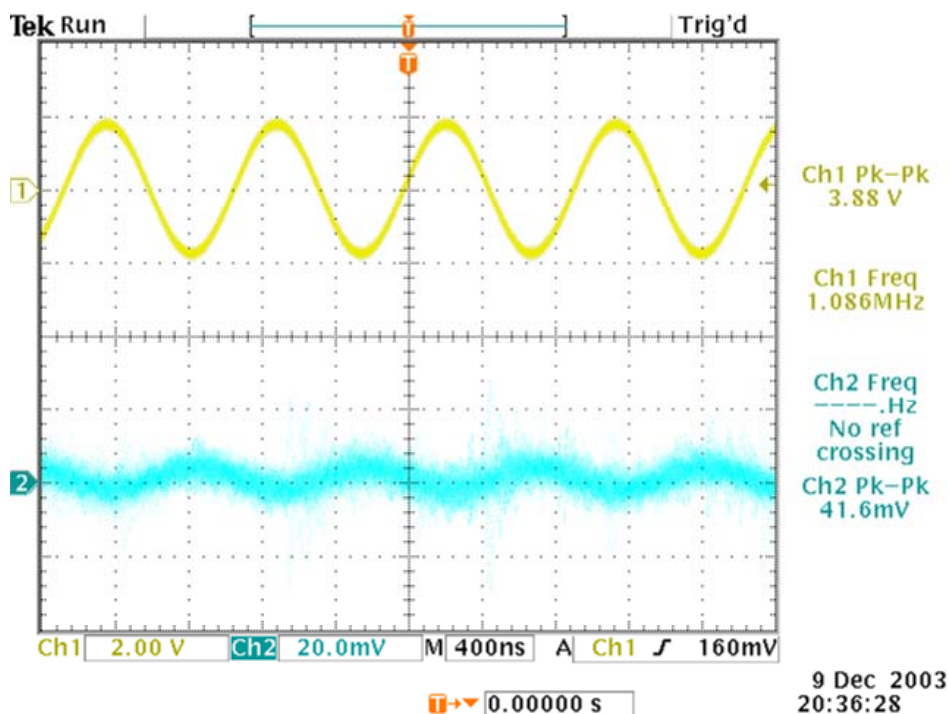
Εικόνα 5.11: Εικόνα από τον ψηφιακό παλμογράφο. Συχνότητα εισόδου 5,244 kHz. Εύκολα παρατηρούμε την διαταραχή στο ημίτονο εισόδου, λόγω χρήσεως της αδύναμης γεννήτριας συχνοτήτων.



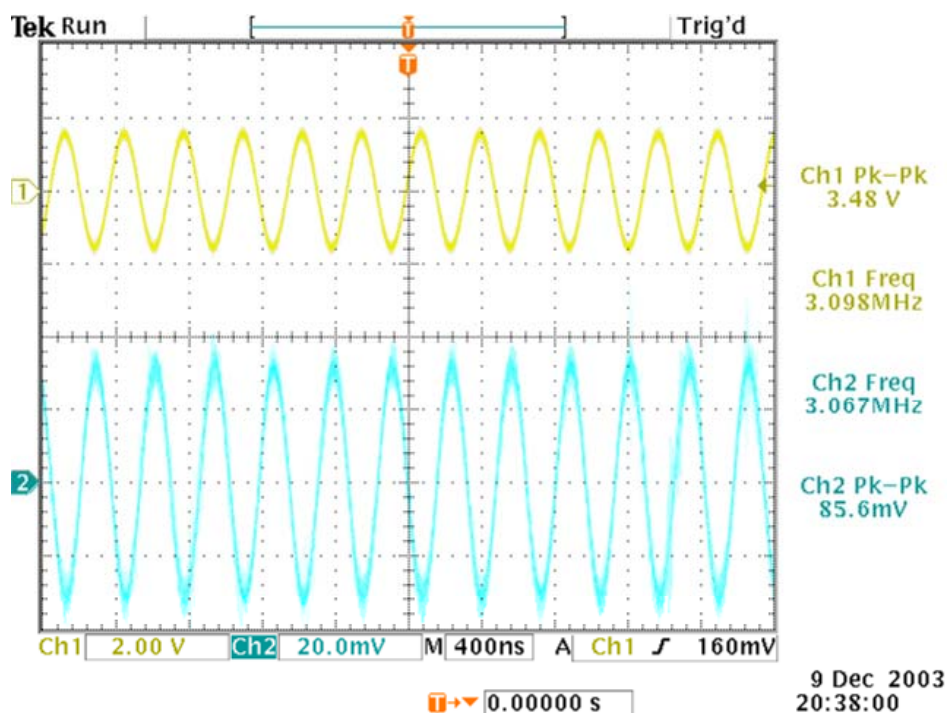
Εικόνα 5.12: Εικόνα από τον ψηφιακό παλμογράφο. Συχνότητα εισόδου 10,86 kHz.



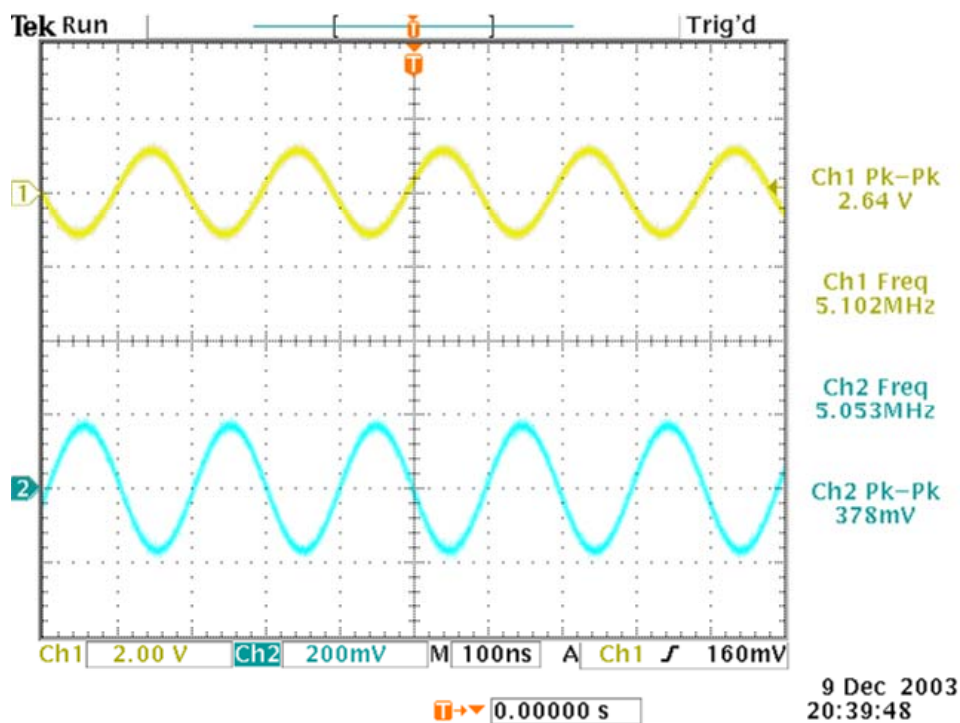
Εικόνα 5.13: Εικόνα από τον ψηφιακό παλμογράφο. Συχνότητα εισόδου 108,0 kHz. Παρατηρούμε ότι στην είσοδο φτάνει σήμα της τάξης των mV.



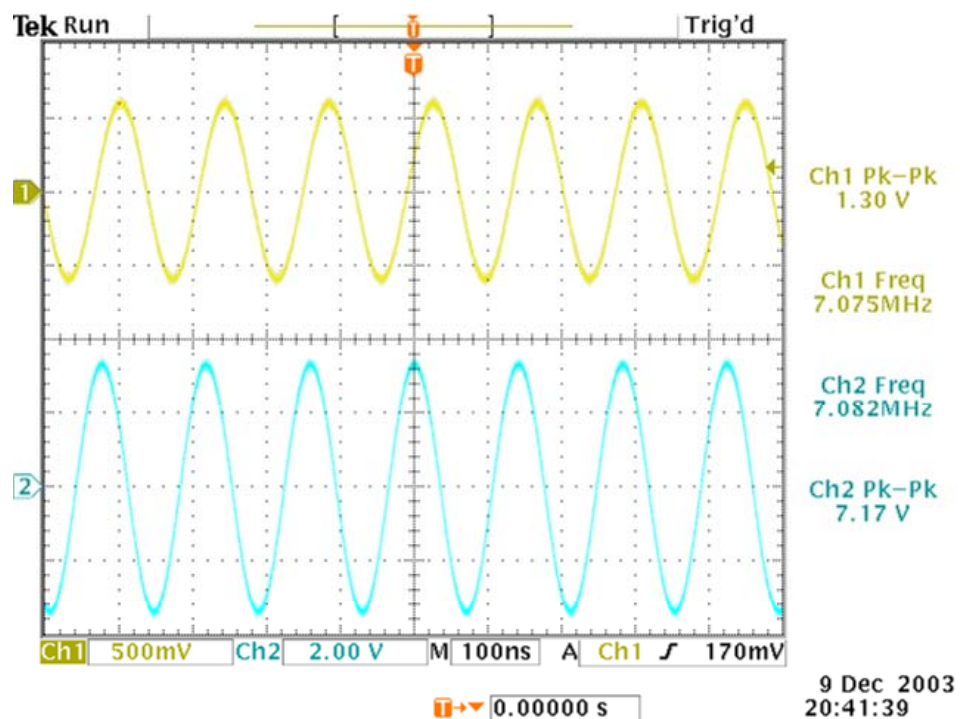
Εικόνα 5.14: Εικόνα από τον ψηφιακό παλμογράφο. Συχνότητα εισόδου 1,086 MHz. Παρατηρούμε ότι στην είσοδο φτάνει σήμα της τάξης των mV.



Εικόνα 5.15: Εικόνα από τον ψηφιακό παλμογράφο. Συχνότητα εισόδου 3,098 MHz. Παρατηρούμε ότι στην είσοδο φτάνει σήμα της τάξης των mV αλλά ισχυρότερο από πριν.



Εικόνα 5.16: Εικόνα από τον ψηφιακό παλμογράφο. Συχνότητα εισόδου 5,102 MHz. Παρατηρούμε ότι στην είσοδο φτάνει σήμα της τάξης των mV αλλά αρκετά ισχυρότερο από πριν.



Εικόνα 5.17: Εικόνα από τον ψηφιακό παλμογράφο. Συχνότητα εισόδου 7,075 MHz. Παρατηρούμε ότι στην είσοδο φτάνει σήμα ενισχυμένο σε πλάτος σε σχέση με το σήμα εισόδου.

5.2.1 Παρατηρήσεις στην συμπεριφορά του δικτύου σύζευξης ως φίλτρο

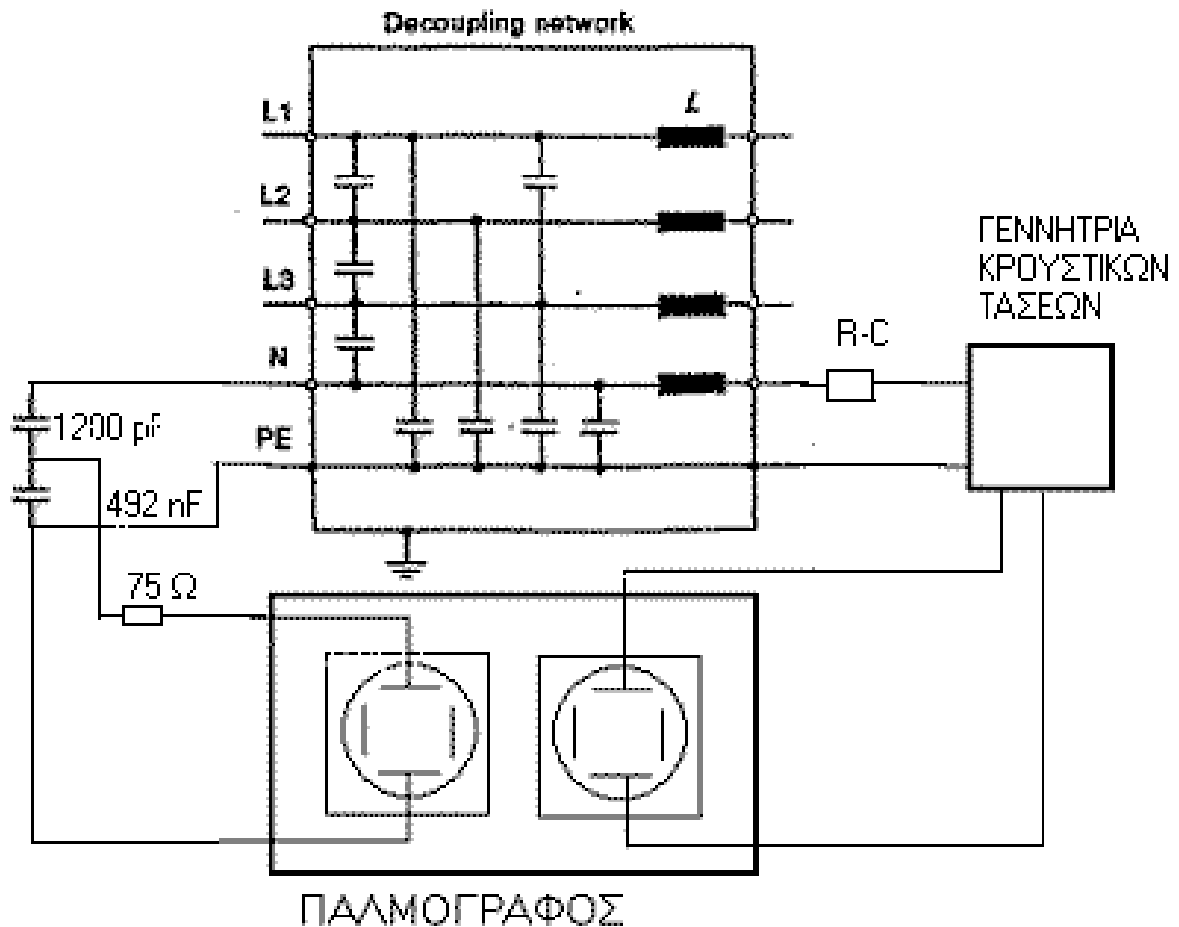
- Όπως μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε από τά πιο πάνω παλμογραφήματα, το εν λόγω φίλτρο, είναι ένα ζωνοπερατό φίλτρο, σχεδιασμένο να αποκόπτει σήματα με συχνότητες αντίστοιχες των κυματομορφών $1,2/50 \mu\text{s}$ και $8/20 \mu\text{s}$ που αναφέρονται στο πρότυπο.
- Ημιτονοειδείς κυματομορφές χαμηλών συχνοτήτων περνούν ανεπηρέαστες, όπως πολύ σωστά πρέπει να συμβαίνει, αφού το ημίτονο βιομηχανικής συχνότητας πρέπει να περνά ανεπηρέαστο.
- Κυματομορφές πολύ υψηλών συχνοτήτων, όπως φαίνεται στο τελευταίο παράδειγμα δείχνουν να ενισχύονται από το φίλτρο. Το φαινόμενο αυτό, μπορεί να αποδοθεί στα μεταβατικά φαινόμενα των πυκνωτών και των πηνίων που υπάρχουν στο δίκτυο σύζευξης. Η απόκρισή τους είναι τέτοια που λόγω της πολύ υψηλής συχνότητας έχουμε ενίσχυση του σήματος από την γεννήτρια συχνοτήτων σε πλάτος.
- Σήματα της τάξης των Hz περνούν ανεπηρέαστα. Σήματα της τάξης των kHz εμποδίζονται ενώ σήματα της τάξης των MHz περνούν και εν γένει ενισχύονται.
- Σε υψίσυχνες εισόδους παρατηρούμε αλλαγή της φάσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις έχουμε και πλήρη αντιστροφή. Το φαινόμενο δεν παρατηρείται σε εισόδους βιομηχανικής συχνότητας.
- Τα πρώτα παλμογραφήματα έγιναν με την βοήθεια της GW γεννήτριας συχνοτήτων. Παρατηρούμε εύκολα την διαταραχή στο ημίτονο εισόδου που προκαλείται από την ύπαρξη του φορτίου. Το ημίτονο ήταν τέλειο όταν αποσυνδέαμε το δίκτυο σύζευξης. Η HP γεννήτρια συχνοτήτων 'άντεχε' καλύτερα το φορτίο με αποτέλεσμα να μην έχουμε καμία διαταραχή στο ημίτονο εισόδου.

5.3 Έλεγχος λειτουργίας του CDN με κρούστικές τάσεις.

Με σκοπό να ερευνηθεί η λειτουργία μιας πιστοποιημένης διάταξης ελέγχου συσκευών βάση του προτύπου EN 61000-4-5, χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός του εργαστηρίου υψηλών τάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου που αποτελείται από το μονοφασικό δίκτυο σύζευξης CDN131/151, την γεννήτρια κρουστικών τάσεων PNW 2050 και τον ελεγκτή NSC 2050. Πραγματοποιήθηκε δοκιμή με τυπικό φορτίο με 5 θετικούς και 5 αρνητικούς παλμούς. Σκοπός των εν λόγω δοκιμών δεν ήταν η πιστοποίηση του εξοπλισμού (ταμειακή μηχανή) που είχαμε συνδέσει στο δίκτυο σύζευξης αλλά η εξοικείωση με την συνδεσμολογία της δοκιμής, η εξοικείωση με την χρήση του εν λόγω εξοπλισμού και η απόκτηση εμπειρίας στην πραγματοποίηση δοκιμών με κρουστικές τάσεις.

Έχοντας την εμπειρία και την εξοικείωση με την λειτουργία του επαγγελματικού εξοπλισμού, συνδέσαμε το CDN που κατασκευάστηκε βάση του προτύπου για δοκιμές πιστοποίησης για υπέρταση μεταξύ φάσης και γής στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσης διπλωματικής εργασίας με τον τρόπο που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Για να μπορέσει να μετρηθεί η τάση εξόδου της γεννήτριας κρουστικών τάσεων ASEA-HAEFELY PC 6-288 που χρησιμοποιήθηκε, από παλμογράφο, έχει προβλεφθεί έξοδος από την γεννήτρια μέσω χωρητικού καταμεριστή τάσης με λόγο καταμερισμού 1/730. Η έξοδος της γεννήτριας, συνδέθηκε στο πρώτο κανάλι του παλμογράφου. Παρομοίως, για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την τάση που καταφέρνει να περάσει από το φίλτρο που κατασκευάστηκε, χρησιμοποιούμε χωρητικό καταμεριστή τάσης με λόγο καταμερισμού 1/410. Ο καταμεριστής τάσης αυτός κατασκευάστηκε με σκοπό την προστασία του παλμογράφου σε περίπτωση αστοχίας του φίλτρου. Όπως φαίνεται στο σχήμα, έχει τοποθετηθεί και μια αντίσταση προσαρμογής 75 Ω πριν το ομοαξονικό καλώδιο 75 Ω που πάει στο δεύτερο κανάλι του παλμογράφου.

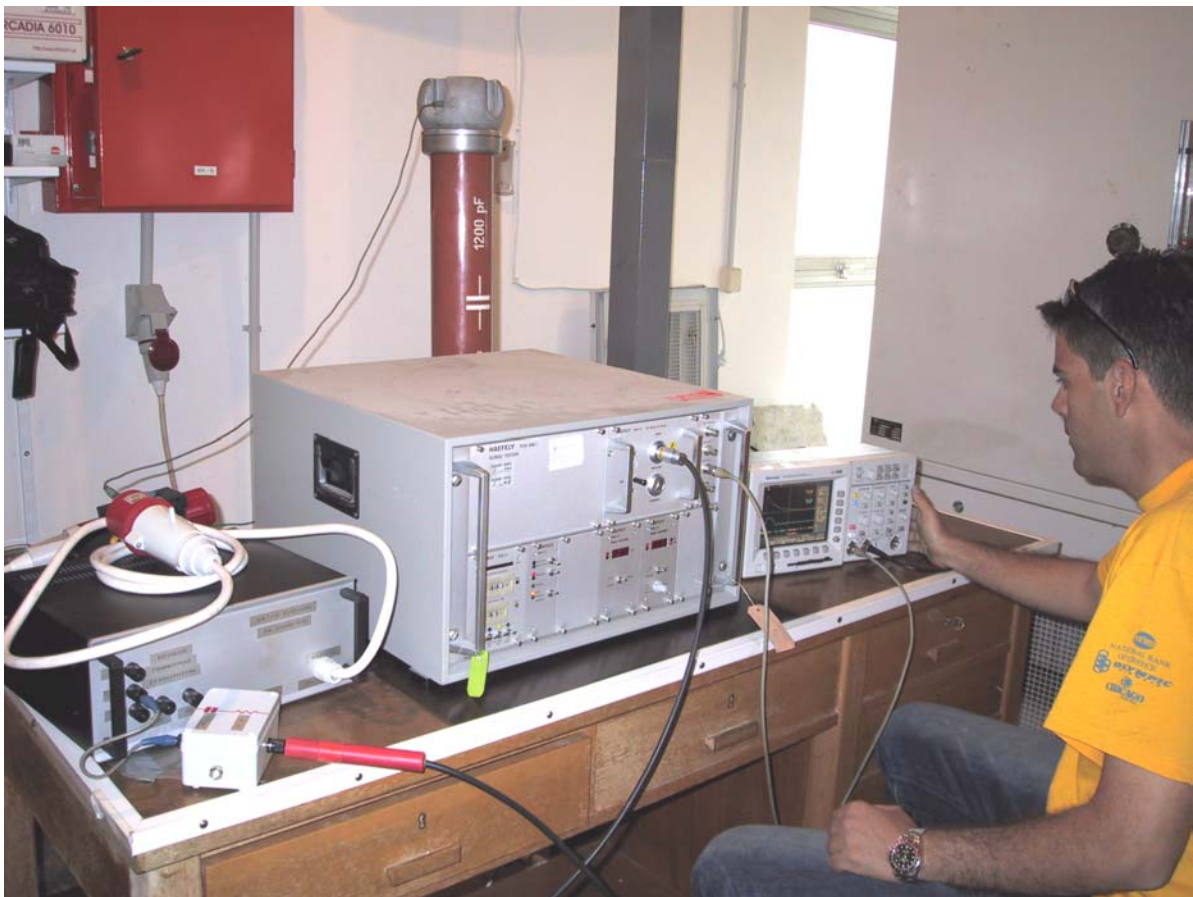


Σχήμα 5.4: Συνδεσμολογία ελέγχου του CDN που κατασκευάστηκε στην δοκιμή αντοχής σε κρουστικές τάσεις. Διακρίνονται ο προσαρμογέας R-C που απαιτείται από το πρότυπο και ο καταμεριστής τάσης από την μεριά σύνδεσης του παροχέα ισχύος για ανίχνευση της τάσης που καταφέρνει να περάσει από το φίλτρο.

Για να διαπιστωθεί η αντοχή του κυκλώματος του δικτύου σύζευξης πραγματοποιήθηκαν αρχικά κρούσεις χωρίς τον προσαρμογέα R-C. Έπειτα πραγματοποιήθηκαν οι κανονικές κρούσεις στα 0.5 kV, 1 kV, 2 kV και 4 kV αφού σιγουρευτήκαμε για την αντοχή του κυκλώματος. Σε καμία περίπτωση το CDN δεν είχε συνδεθεί στο δίκτυο παροχής ισχύος, διότι τότε η διαδικασία μέτρησης της τάσης δεν θα ήτο απλή μέσω του χωρητικού καταμεριστή που κατασκευάστηκε. Επίσης, το ενδιαφέρον ήταν η αντοχή σε κρουστική τάση και η ικανότητα φιλτραρίσματος αυτής.

Παρακάτω φαίνονται τα παλμογραφήματα που πήραμε από τις δοκιμές. Η μέτρηση του πρώτου καναλιού πρέπει να πολλαπλασιάζεται με 730 ενώ του δευτέρου με 410 για να βρίσκουμε την πραγματική τιμή αφού οι τιμές είναι υποβιβασμένες από τους χωρητικούς καταμεριστές.

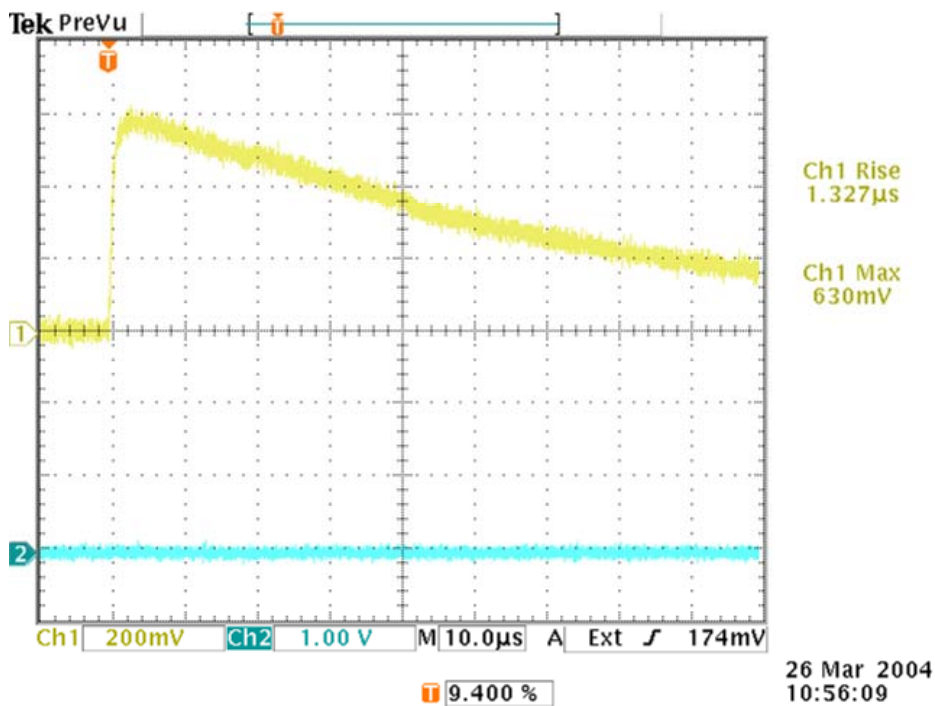
Οι δοκιμές, όπως φαίνεται και στο σχήμα, πραγματοποιήθηκαν μεταξύ ουδετέρου και γης. Η ίδια διαδικασία θα μπορούσε να έχει γίνει και μεταξύ γης και οποιαδήποτε φάσης.



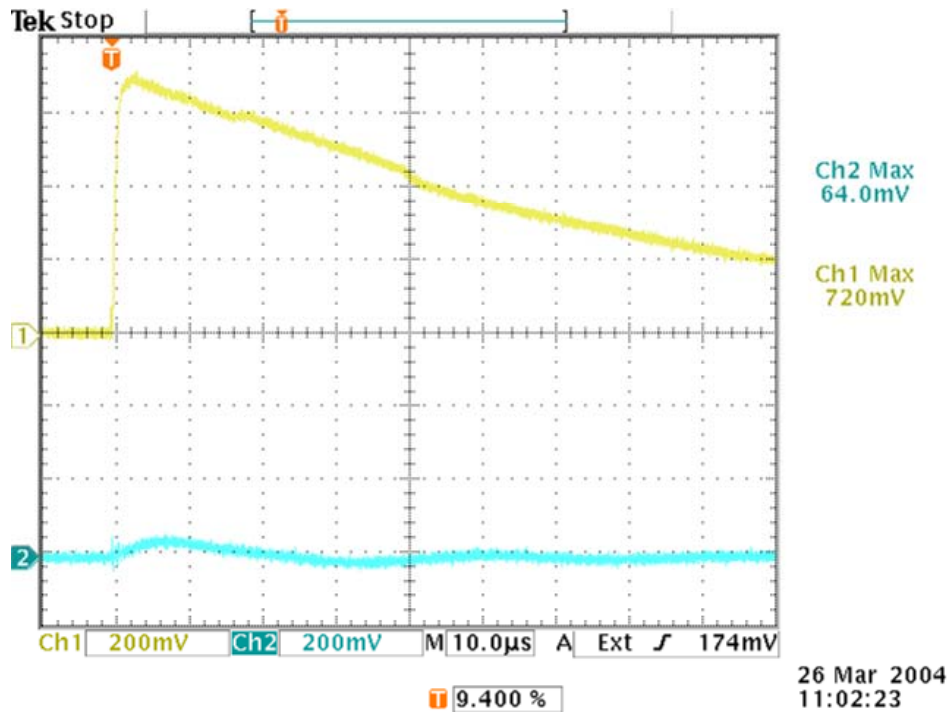
Εικόνα 5.18: Ο υπογράφων την παρούσα διπλωματική εργασία στο εργαστήριο υψηλών τάσεων του ΕΜΠ κατά την διάρκεια των μετρήσεων με την γεννήτρια κρουστικών τάσεων.



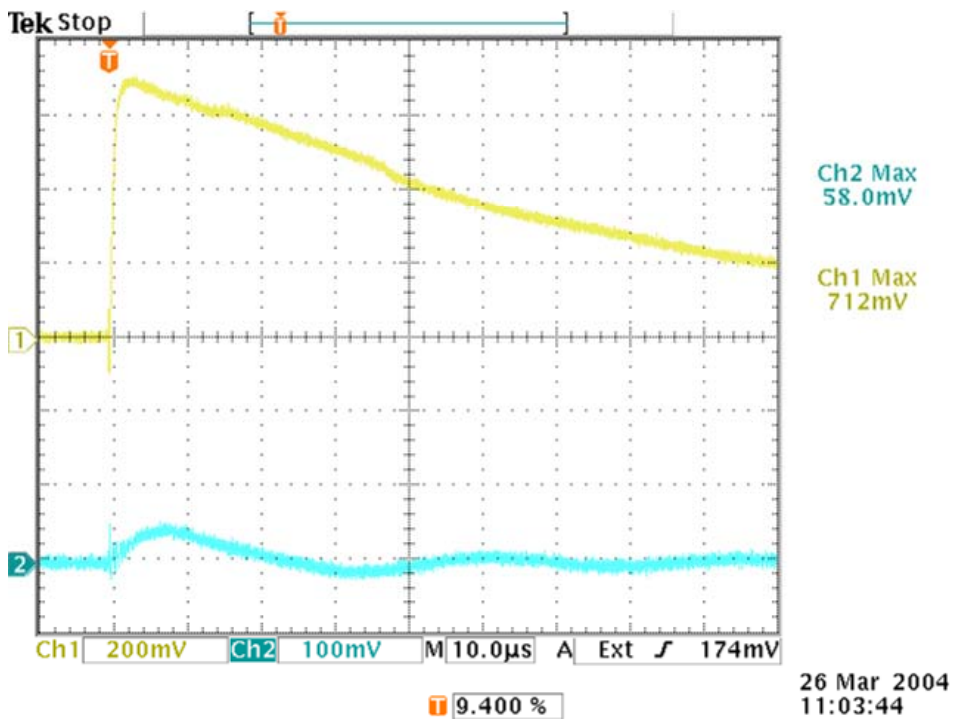
Εικόνα 5.19: Φωτογραφία της διάταξης δοκιμής με την κρουστική γεννήτρια. Εύκολα κανείς παρατηρεί τον ογκώδη καταμεριστή τάσης.



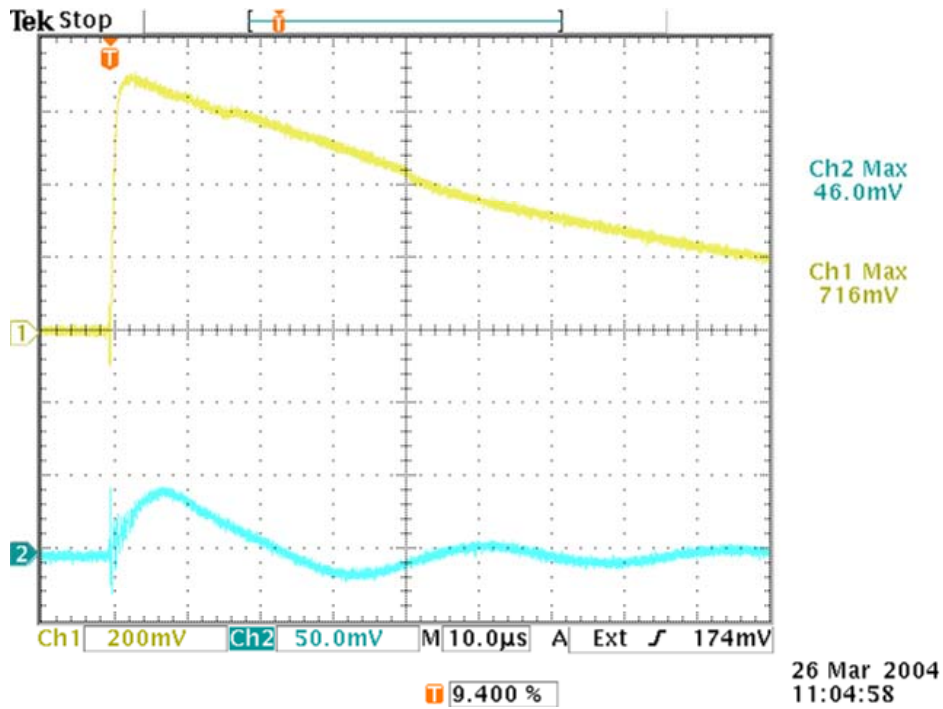
Εικόνα 5.20: Θετική κρούση με 0,5 kV χωρίς προσαρμογέα R-C. (1)



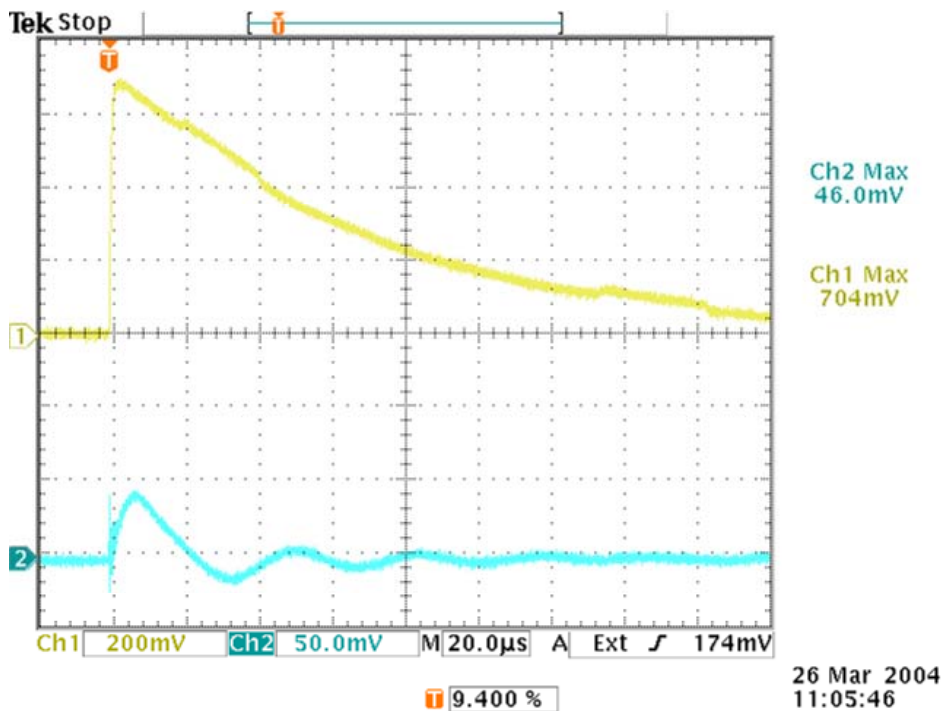
Εικόνα 5.21: Θετική κρούση με 0,5 kV χωρίς προσαρμογή R-C. (2)



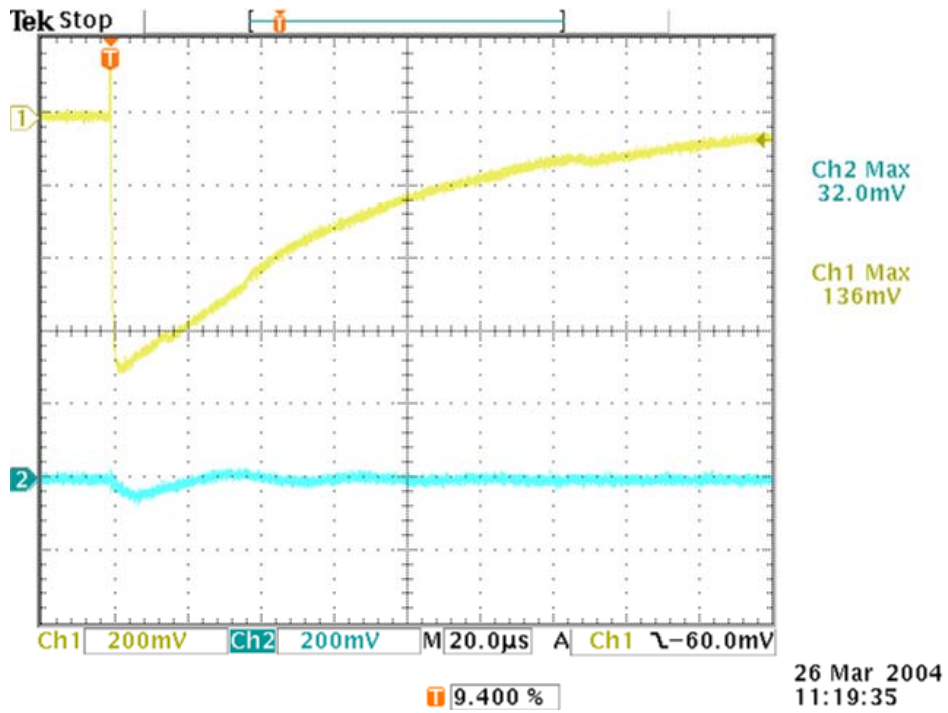
Εικόνα 5.22: Θετική κρούση με 0,5 kV χωρίς προσαρμογή R-C. (3)



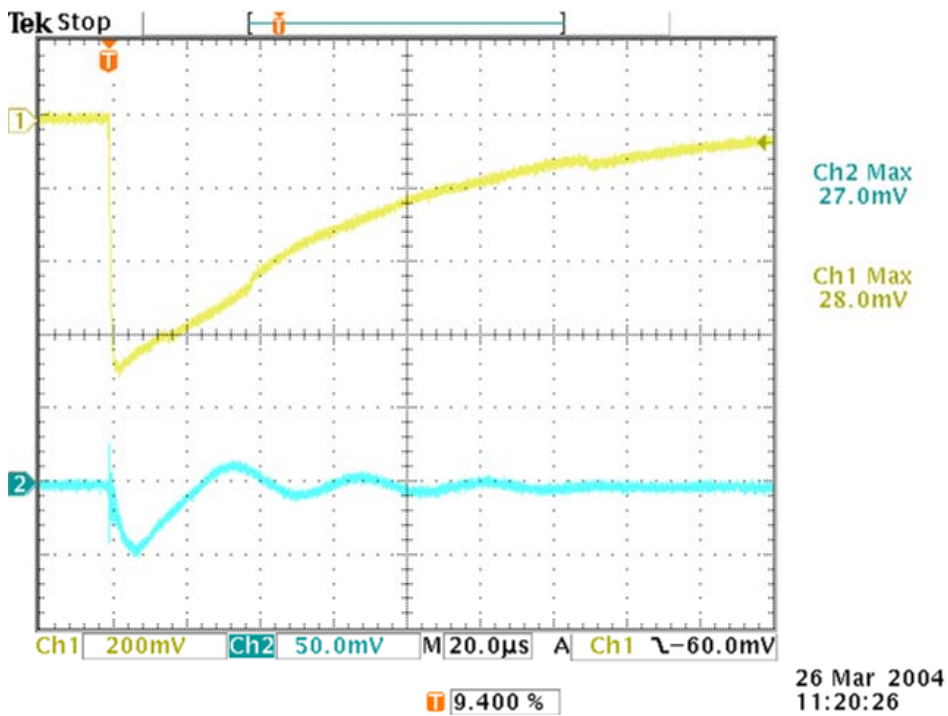
Εικόνα 5.23: Θετική κρούση με 0,5 kV χωρίς προσαρμογή R-C. (4)



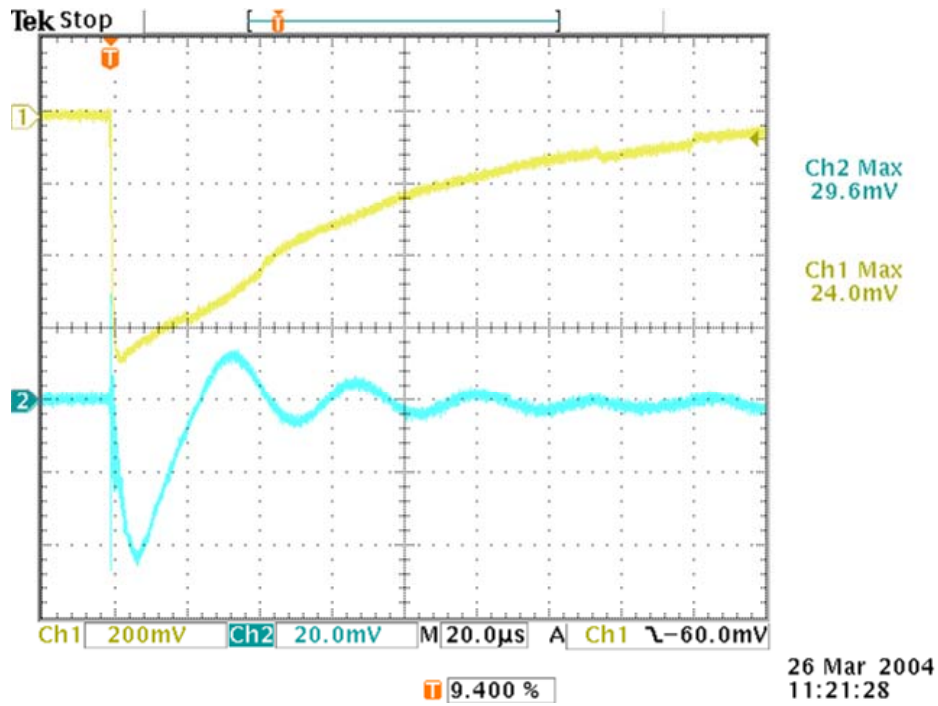
Εικόνα 5.24: Θετική κρούση με 0,5 kV χωρίς προσαρμογή R-C. (5)



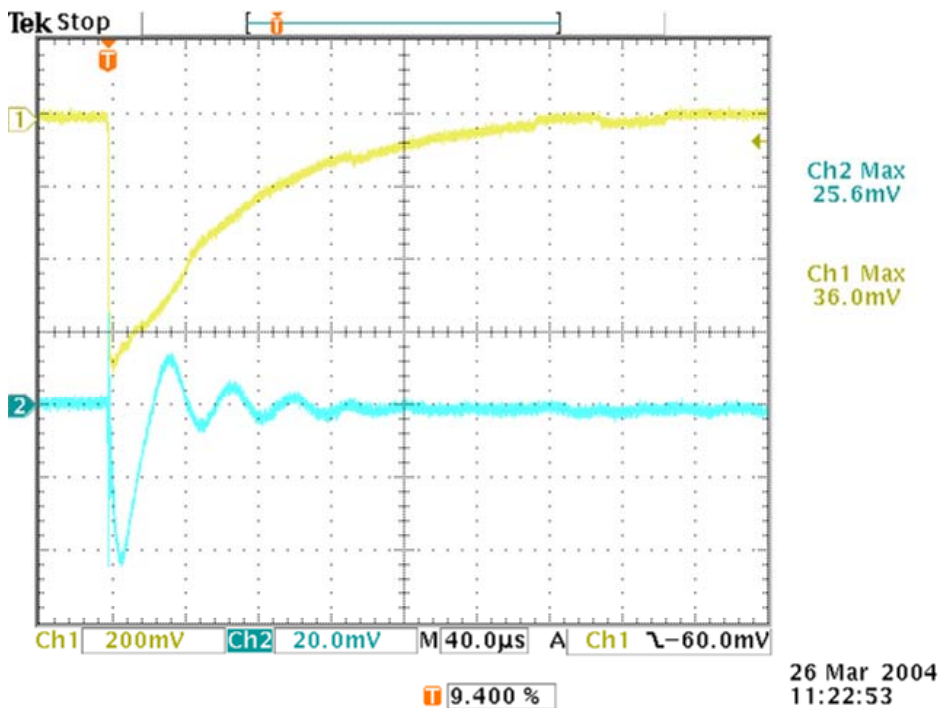
Εικόνα 5.25: Αρνητική κρούση με 0,5 kV χωρίς προσαρμογέα R-C. (1)



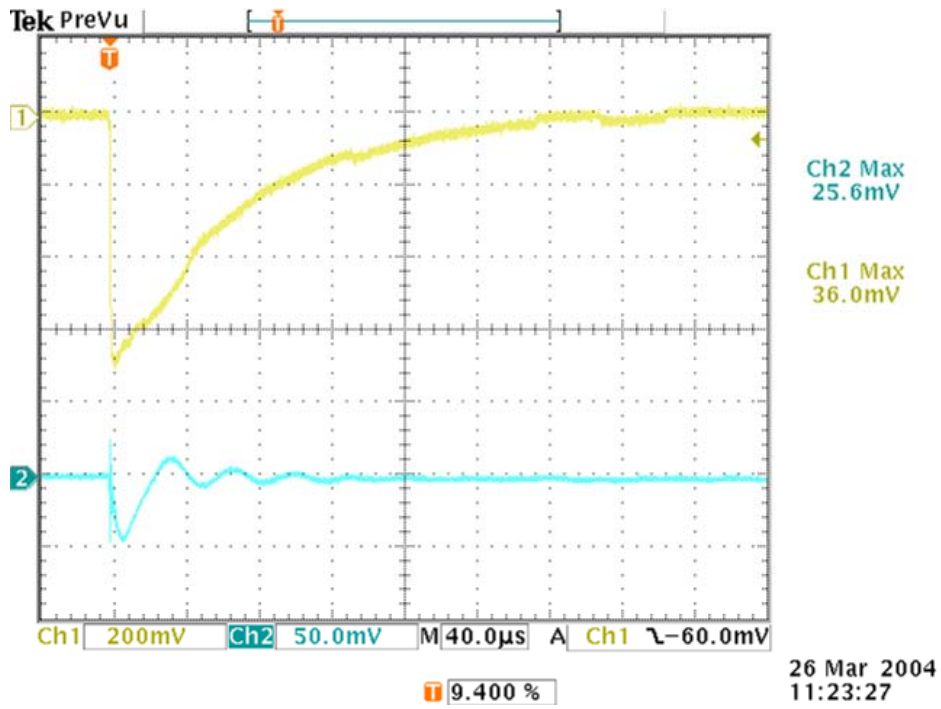
Εικόνα 5.26: Αρνητική κρούση με 0,5 kV χωρίς προσαρμογέα R-C. (2)



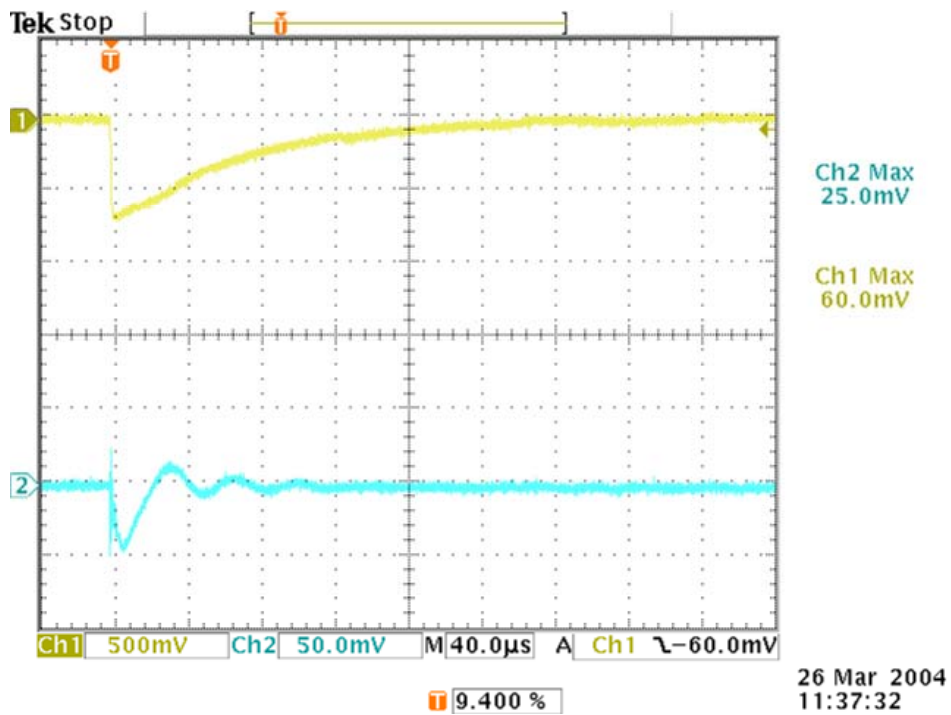
Εικόνα 5.27: Αρνητική κρούση με 0,5 kV χωρίς προσαρμογέα R-C. (3)



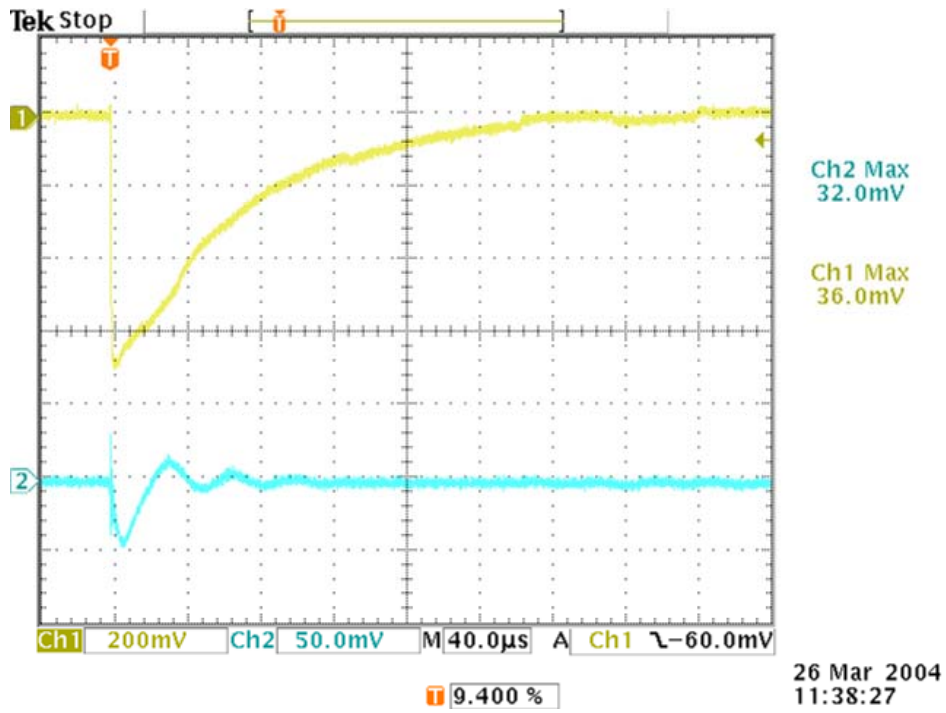
Εικόνα 5.28: Αρνητική κρούση με 0,5 kV χωρίς προσαρμογέα R-C. (4)



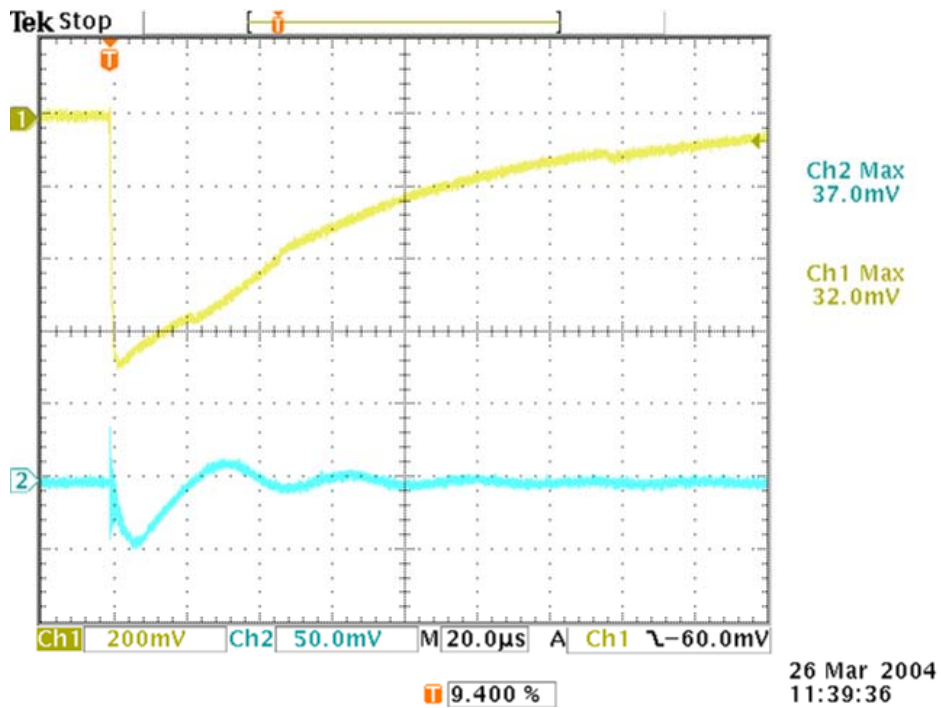
Εικόνα 5.29: Αρνητική κρούση με 0,5 kV χωρίς προσαρμογέα R-C. (5)



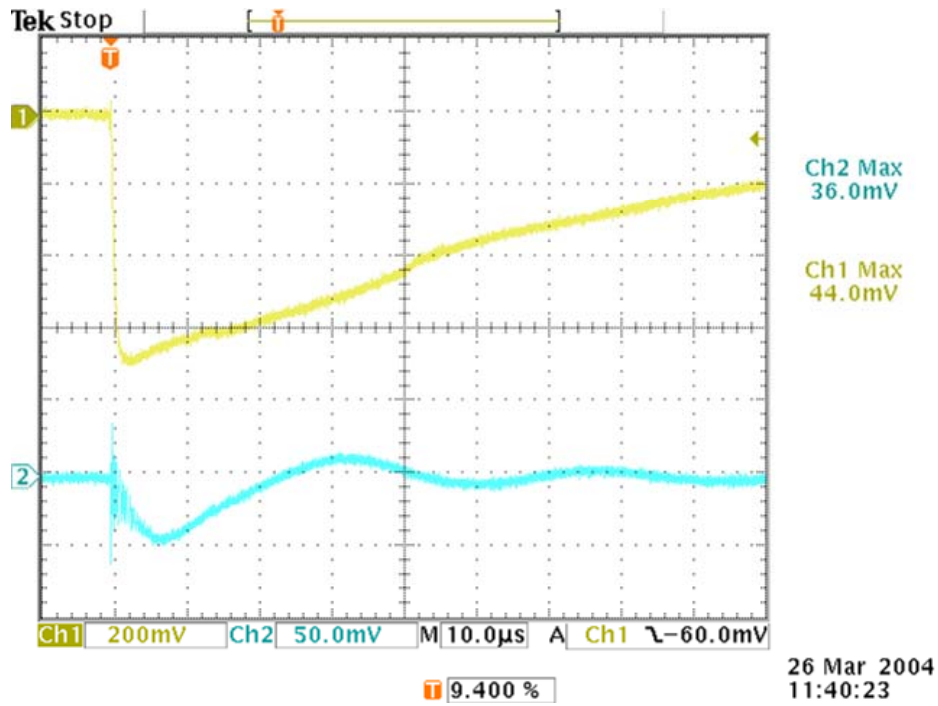
Εικόνα 5.30: Αρνητική κρούση με 0,5 kV με προσαρμογέα R-C (1)



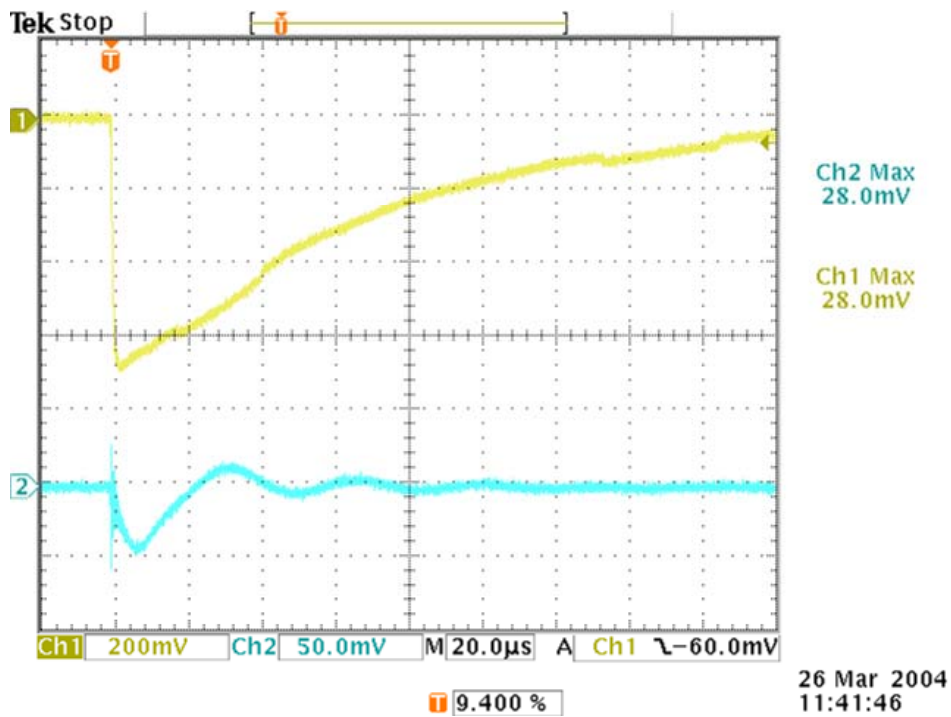
Εικόνα 5.31: Αρνητική κρούση με 0,5 kV με προσαρμογέα R-C (2)



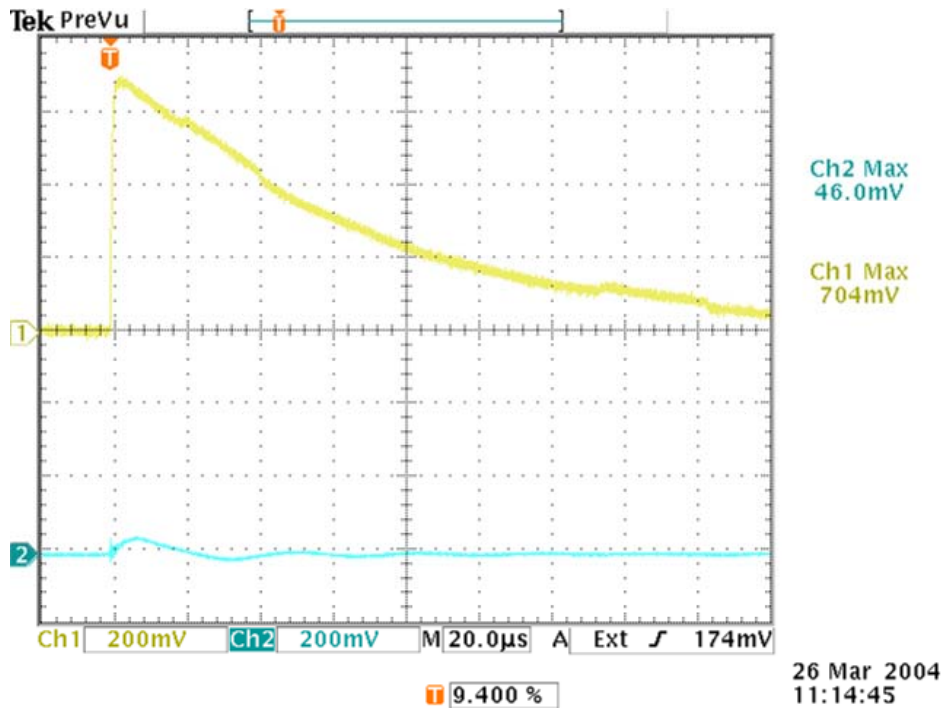
Εικόνα 5.32: Αρνητική κρούση με 0,5 kV με προσαρμογέα R-C (3)



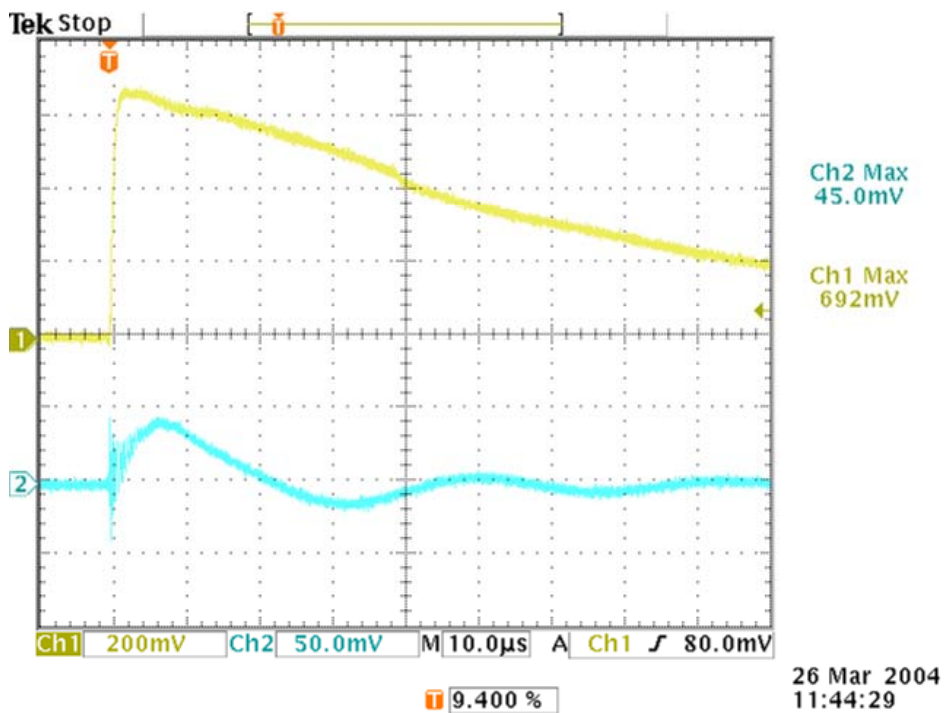
Εικόνα 5.33: Αρνητική κρούση με 0,5 kV με προσαρμογέα R-C (4)



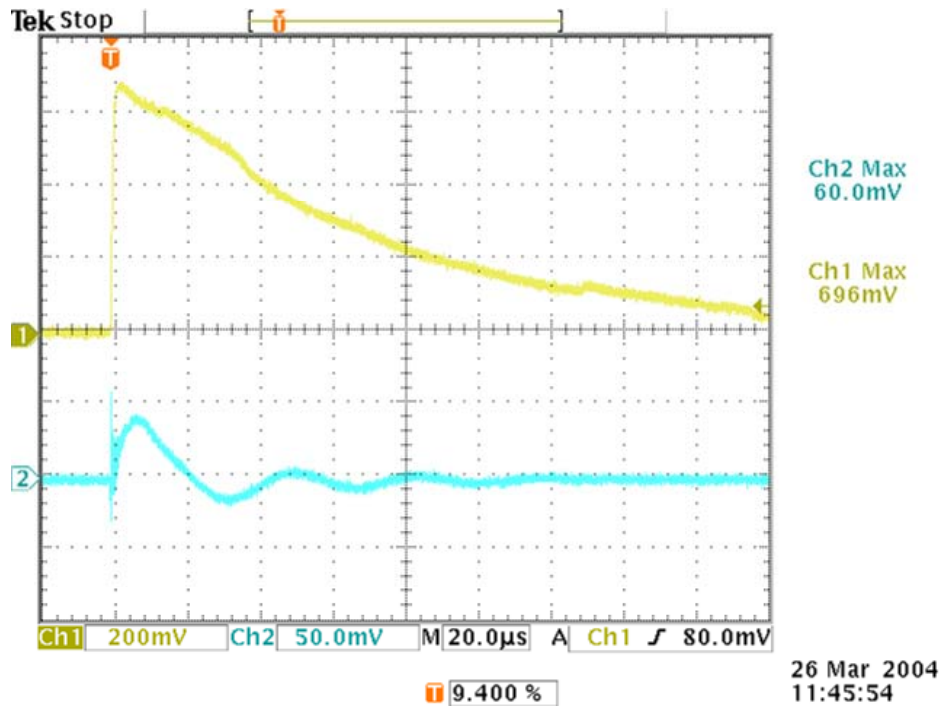
Εικόνα 5.34: Αρνητική κρούση με 0,5 kV με προσαρμογέα R-C (5)



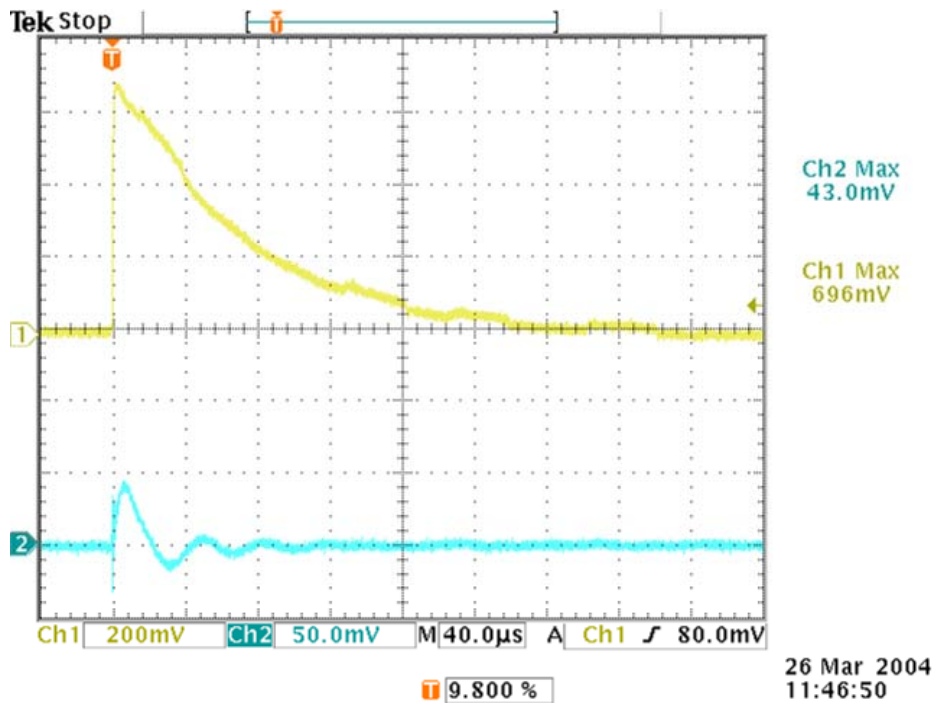
Εικόνα 5.35: Θετική κρούση με 0,5 kV με προσαρμογή R-C (1)



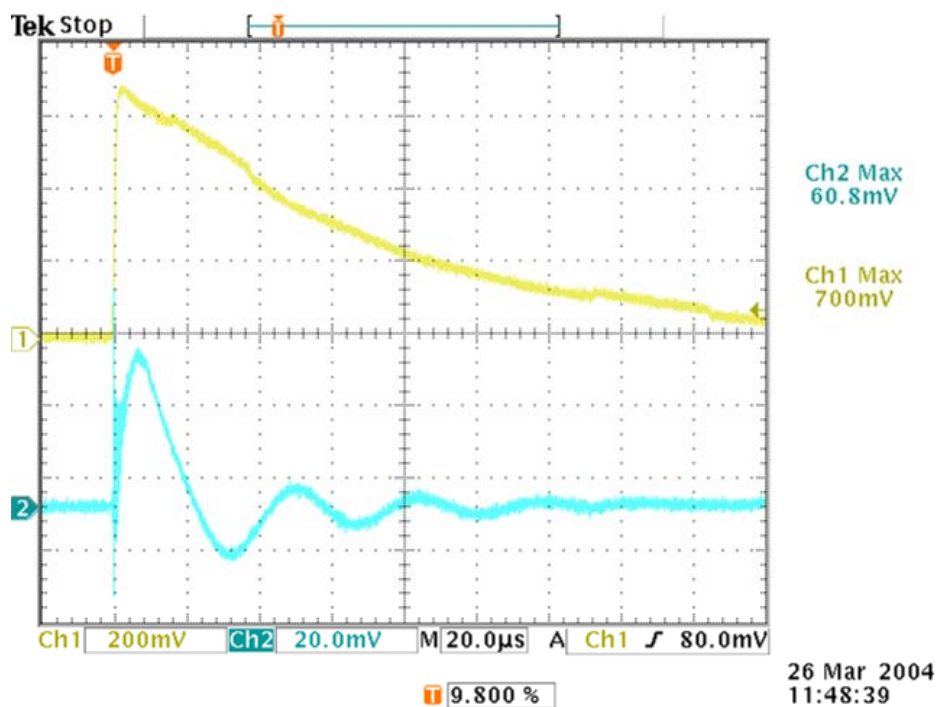
Εικόνα 5.36: Θετική κρούση με 0,5 kV με προσαρμογή R-C (2)



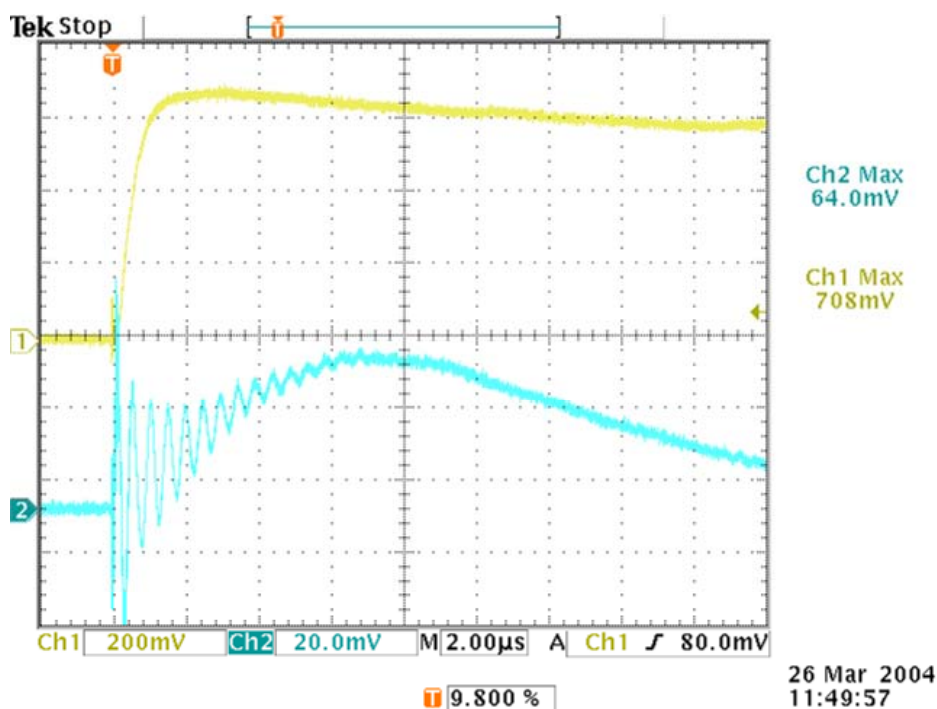
Εικόνα 5.37: Θετική κρούση με 0,5 kV με προσαρμογή R-C (3)



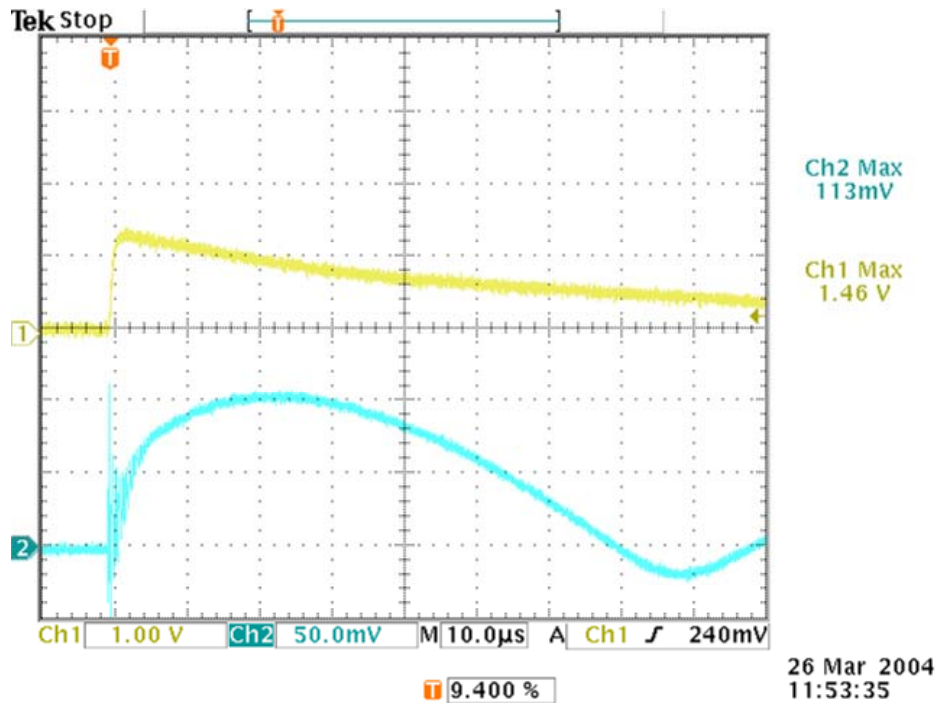
Εικόνα 5.38: Θετική κρούση με 0,5 kV με προσαρμογή R-C (4)



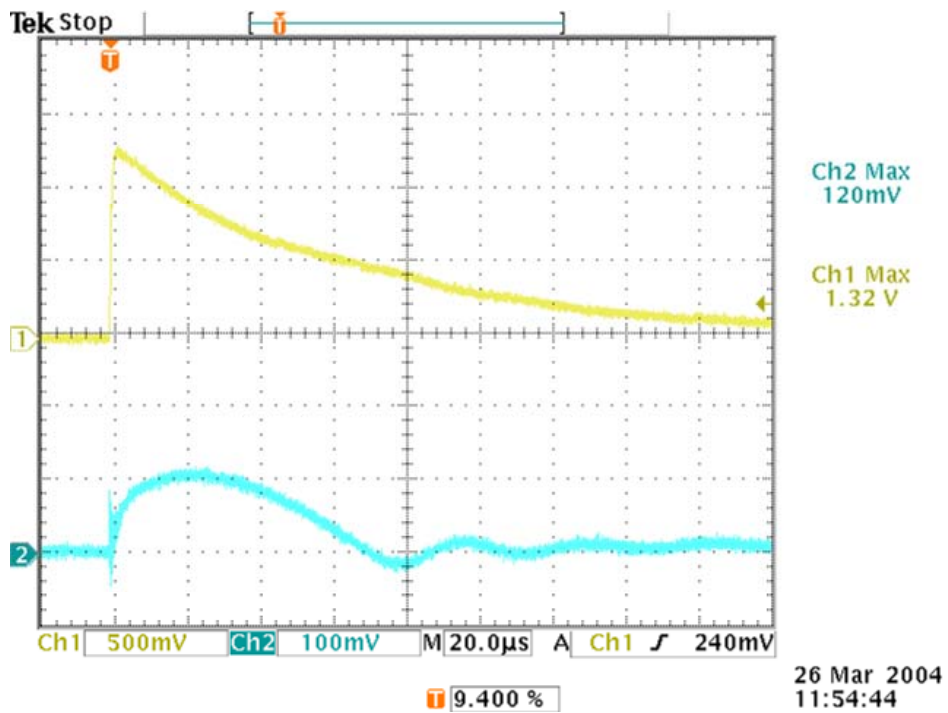
Εικόνα 5.39: Θετική κρούση με 0,5 kV με προσαρμογή R-C (5)



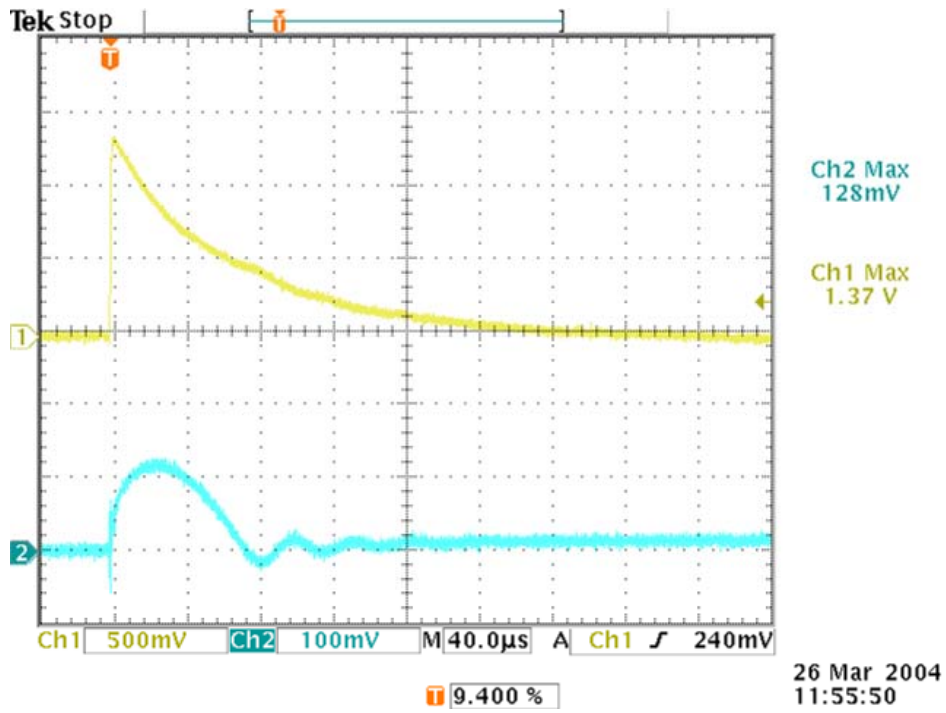
Εικόνα 5.40: Θετική κρούση με 0,5 kV με προσαρμογή R-C. Παρατηρείται λόγω της μικρής χρονικής κλίμακας μεγενθυμένο το αρχικό στάδιο του φαινομένου.



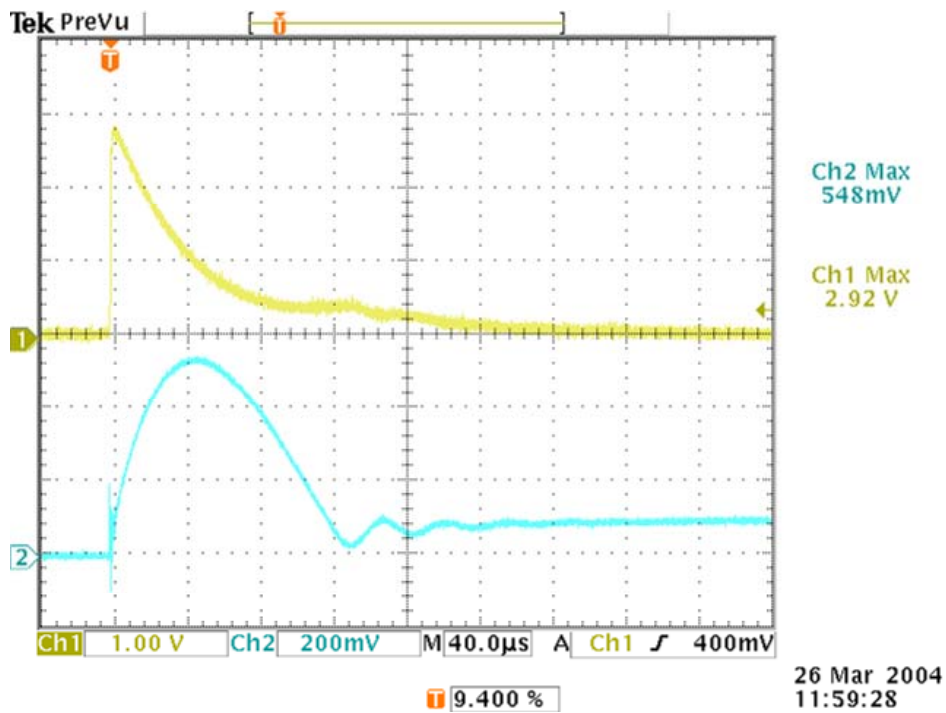
Εικόνα 5.41: Θετική κρούση με 1 kV με προσαρμογή R-C (1)



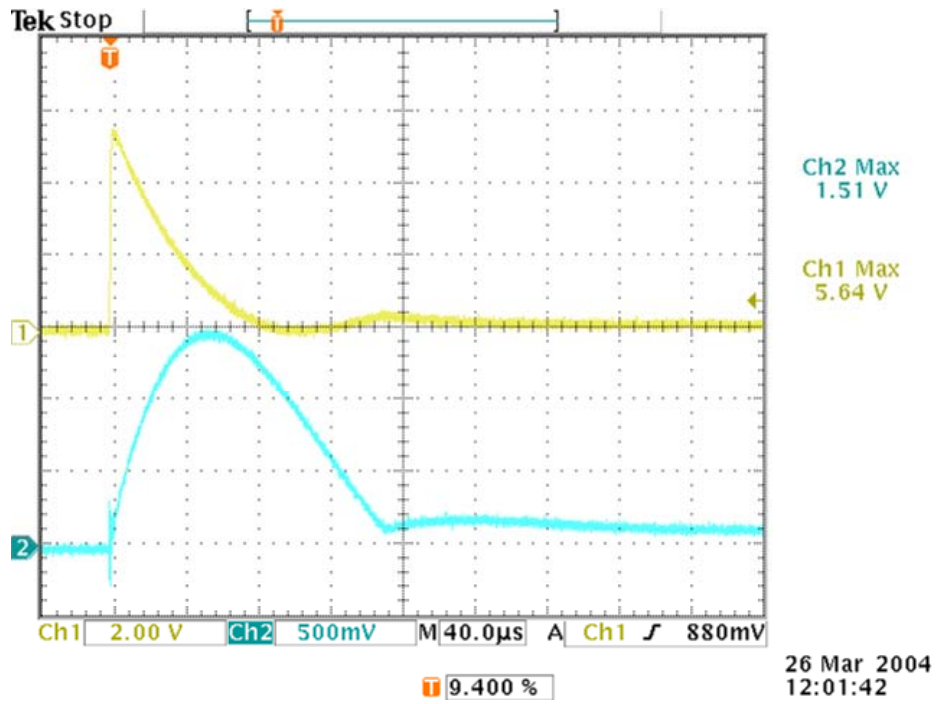
Εικόνα 5.42: Θετική κρούση με 1 kV με προσαρμογή R-C (2)



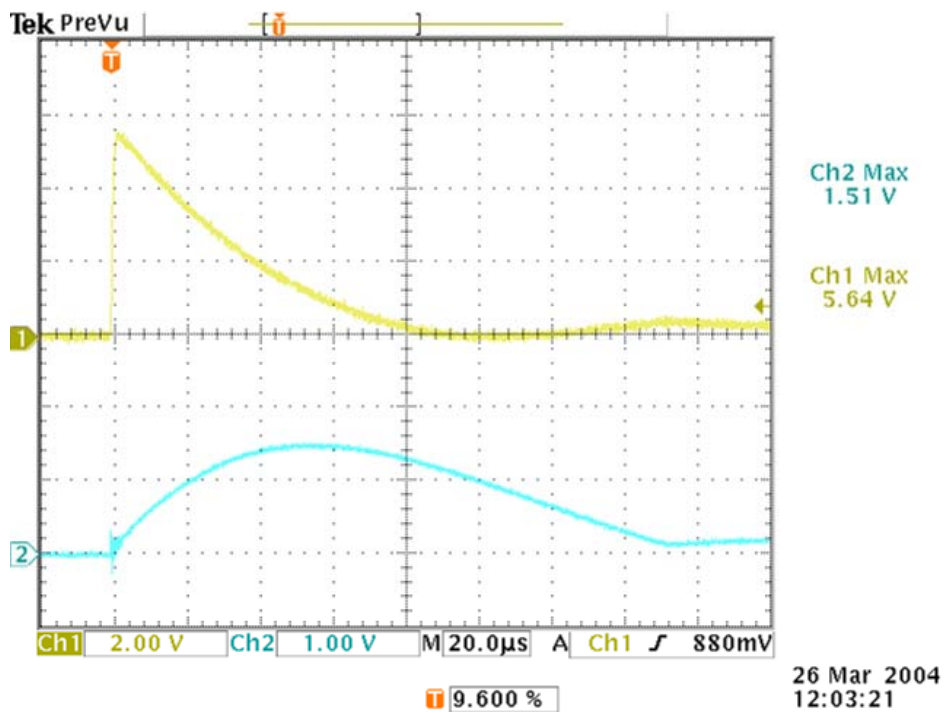
Εικόνα 5.43: Θετική κρούση με 1 kV με προσαρμογή R-C (3)



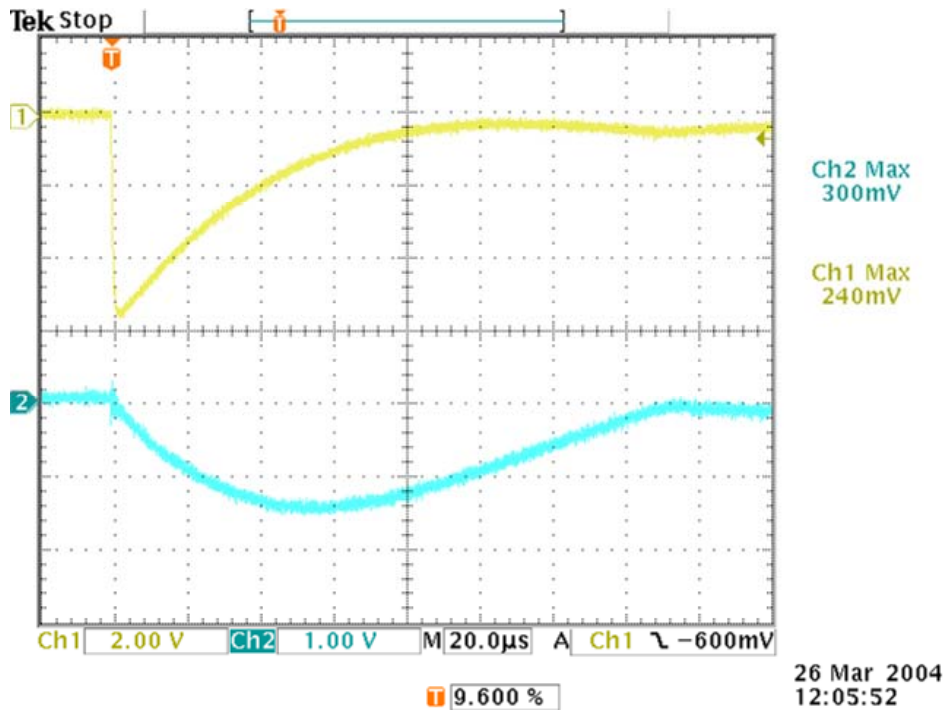
Εικόνα 5.44: Θετική κρούση με 2 kV με προσαρμογή R-C (1)



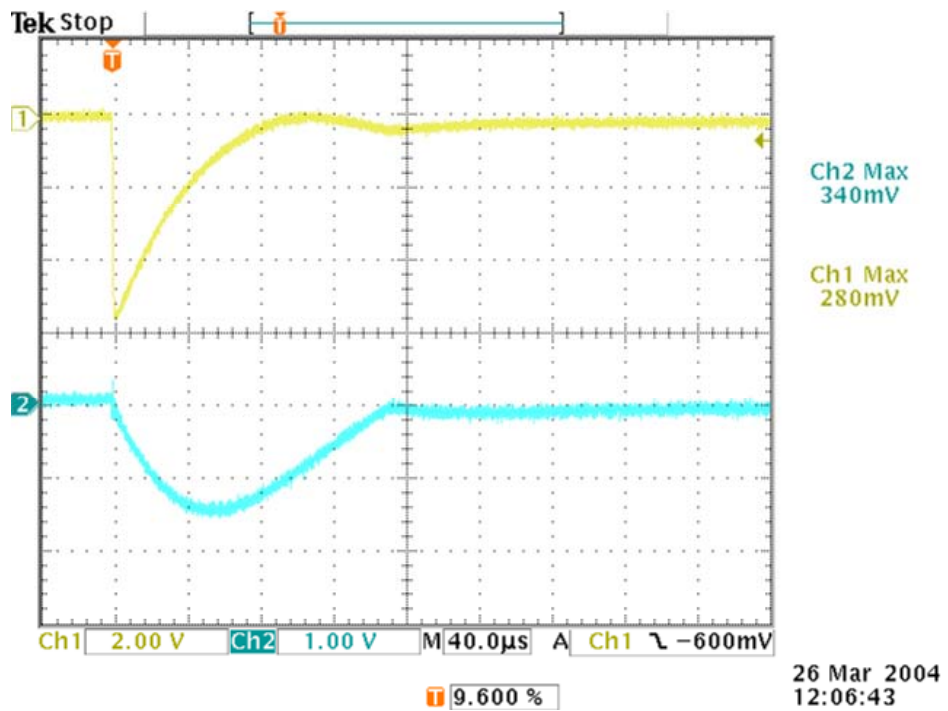
Εικόνα 5.45: Θετική κρούση με 4 kV με προσαρμογή R-C (1)



Εικόνα 5.46: Θετική κρούση με 4 kV με προσαρμογή R-C (2)



Εικόνα 5.47: Αρνητική κρούση με 4 kV με προσαρμογή R-C (1)



Εικόνα 5.48: Αρνητική κρούση με 4 kV με προσαρμογή R-C (2)

5.3.1 Παρατηρήσεις στην συμπεριφορά του δικτύου σύζευξης ως φίλτρο

- Όπως μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε από τά πιο πάνω παλμογραφήματα, το εν λόγω CDN, αποκόπτει προς την πλευρά του παροχέα ισχύος με πολύ ικανοποιητικό τρόπο την επιβαλλόμενη υπέρταση. Στην δοκιμή με παλμό 4 kV καταφέρνουμε να μετρήσουμε στην πλευρά του παροχέα ισχύος 619 V ενώ στις δοκιμές με 0,5 kV η μέγιστη τιμή είναι μόλις 26 V. Στις ενδιάμεσες κρούσεις, είχαμε για την δοκιμή με 1 kV μια απομένουσα κυματομορφή από την πλευρά του παροχέα ισχύος, ύψους 53 V και στην περίπτωση κρούσης με 2 kV πέραγε παλμός ύψους 225 V. Το πρότυπο ορίζει ως αποδεκτή απομένουσα κυματομορφή από την πλευρά του παροχέα ισχύος την κυματομορφή αυτή που δεν θα ξεπερνά το 15% της επιβαλλόμενης κρούσης. Το κριτήριο αυτό πιάνεται με άνεση με το CDN μας μέχρι τις κρούσεις 2 kV ενώ στα 4 kV που το όριο είναι 600 V, το υπερβαίνει λίγο (κατά 19 V).
- Στην περίπτωση των δοκιμών χωρίς τον προσαρμογέα R-C εύκολα παρατηρεί κανείς ότι από την πλευρά του παροχέα ισχύος, η απόσβεση του φαινομένου αργεί πολύ σε σχέση με τις αντίστοιχες δοκιμές με τον προσαρμογέα. Αυτό παρατηρείται εύκολα με σύγκριση στις κυματομορφές των εικόνων 5.20 και 5.34.
- Στις ίδιες κυματομορφές, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η επιβαλλόμενη υπέρταση στο κύκλωμα είναι λίγο μεγαλύτερη στην περίπτωση χρήσης του προσαρμογέα άσχετα αν η γεννήτρια βγάζει ακριβώς τον ίδιο παλμό.
- Το δίκτυο σύζευξης που κατασκευάστηκε δείχνει να αντέχει υπερτάσεις ακόμα και 4 kV. Η καταπόνηση θα ήταν μεγαλύτερη αν το είχαμε συνδέσει στον παροχέα ισχύος αλλά για λόγους ευκολίας των μετρήσεων προτιμήθηκε να μην γίνει η σύνδεση. Για δοκιμές μέχρι και 2 kV, θεωρητικά δεν πρέπει να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής. Το σημαντικό είναι να τηρηθεί η ένταση του ρεύματος κάτω από τα 7 A.

- Η κατασκευή αποδείχτηκε ικανή να αντέξει υπερτάσεις μέχρι και 4 kV είτε θετικές είτε αρνητικές. Αποτελεί λοιπόν ένα καλό εργαλείο για κάποιον που θέλει να πειραματιστεί πάνω στις δοκιμές εξοπλισμού ισχύος για αντοχή σε υπερτάσεις βάση του προτύπου EN 61000-4-5 χωρίς να ανησυχεί για τυχόν καταστροφή ακριβού εξοπλισμού. Επίσης λειτουργεί με πολύ ικανοποιητικό τρόπο.
- Το μεταβατικό φαινόμενο που παρατηρείται στην εικόνα 5.40 στην κυματομορφή που λαμβάνουμε από την πλευρά του παροχέα ισχύος (κανάλι 2 στον παλμογράφο), είναι παρόν σε όλα τα παλμογραφήματα και προφανώς πρόκειται για συντονισμό μέσα στο CDN.

Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

If facts don't fit theory, change the facts.

Albert Einstein

6.1 Συμπεράσματα για το πρότυπο EN 61000-4-5.

Όπως έχει αναφερθεί, το πρότυπο EN 61000-4-5, διαπραγματεύεται τις μεθόδους που πρέπει να ακολουθηθούν για την πιστοποίηση εξοπλισμού ισχύος για αντοχή σε υπερτάσεις. Το πρότυπο θεωρεί συγκεκριμένους μηχανισμούς δημιουργίας υπερτάσεων ως υπαρκτούς ενώ άλλους τους αγνοεί. Σαφώς δεν ξεφεύγει από τον σκοπό του αφού αυτό που ενδιαφέρει δεν είναι τόσο το αίτιο, αλλά το αποτέλεσμα.

Τα κριτήρια επίδοσης του προτύπου είναι τέτοια που μπορούν να πιστοποιήσουν μια οποιαδήποτε συσκευή, ανάλογα με το ποιες μπορεί να είναι οι απαιτήσεις του χρήστη.

Τέλος, ο εξοπλισμός που απαιτείται για την πιστοποίηση περιγράφεται με αρκετή σαφήνεια και μπορεί όπως αποδείχτηκε να κατασκευαστεί με μικρό σχετικά κόστος.

6.2 Συμπεράσματα για την κατασκευή.

Η κατασκευή του δικτύου σύζευξης που έχει περιγραφεί πιο πάνω, έγινε με σκοπό να φτιαχτεί ένα δοκίμιο με το οποίο κανείς θα μπορεί να πειραματιστεί, όσον αφορά το πρότυπο EN 61000-4-5, και τις διαδικασίες που θα πρέπει να ακολουθηθούν για να πιστοποιηθεί εξοπλισμός ισχύος για αντοχή σε υπερτάσεις, με μικρό πάντα κόστος.

Η συσκευή, έδειξε να συμπεριφέρεται σαν φίλτρο όπως θεωρητικά έπρεπε να συμπεριφερθεί. Να αποκόπτει δηλαδή υψίσυχνα σήματα της τάξης των kHz.

Επίσης, αποκόπτει σε ικανοποιητικό βαθμό κρουστικές τάσεις που επιβάλλονται, έχει δε αποδεδειγμένα αντοχή σε κρούσεις 4 kV.

Αποτελεί δε, χρήσιμο εργαλείο για το εργαστήριο υψηλών τάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για πειραματισμό πάνω στις δοκιμές πιστοποίησης για αντοχή σε υπερτάσεις, αλλά και για πειραματισμό και έρευνα στον ίδιο τον εξοπλισμό που προτείνει το πρότυπο EN 61000-4-5 ότι πρέπει να χρησιμοποιείται για πιστοποίηση αντοχής σε υπερτάσεις. Το μικρό κόστος του αλλά και η λειτουργικότητα του με μικρές σχετικά αποκλίσεις σε απόδοση από το αντίστοιχο μηχάνημα που πωλείται για επαγγελματική χρήση, το κάνουν προσιτό για κάθε δυνατό πείραμα .

6.3 Συμπεράσματα για τις υπερτάσεις.

Οι υπερτάσεις αποτελούν σημαντικό κεφάλαιο για τον ηλεκτρολόγο μηχανικό και η οποιαδήποτε έρευνα στο κεφάλαιο της προστασίας από αυτές αλλά και στο κεφάλαιο της πιστοποίησης για αντοχή σε αυτές, είναι σημαντική.

Οι υπερτάσεις έχουν αίτια είτε ανθρωπογεννή είτε φυσικά. Συνεπώς είναι δύσκολο να πούμε ότι θα καταφέρουμε ποτέ να απαλλαγούμε από αυτές σε τέτοιο βαθμό που δεν θα χρειάζεται να προδιαγράψουμε τα μηχανήματά μας για να έχουν αντοχή σε αυτές. Το ποια θα είναι η συμπεριφορά του εκάστοτε εξοπλισμού ισχύος σε μία υπέρταση εξαρτάται πάντα από την φύση του και την χρησιμότητά του. Εξοπλισμός που προορίζεται για την συντήρηση καρδιοπαθούς στην ζωή θα έχει σαφώς διαφορετικές προδιαγραφές από ένα απλό ραδιοφανάκι.

Συμπερασματικά, οποιαδήποτε προσπάθεια γίνεται για έλεγχο και πιστοποίηση κάποιας συσκευής πριν αυτή έρθει στα χέρια του χρήστη είναι θετική και αποσκοπεί στην καλύτερη ποιότητα και απόδοση αυτής.

Κεφάλαιο 7

Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ

A little inaccuracy sometimes saves a ton of explanation

H. H. Munro Sakki

7.1 Προτάσεις για την κατασκευή του δικτύου σύζευξης.

- Οι γραμμές εισόδου, θα πρέπει να ασφαλιστούν για τον απρόσεκτο χρήστη που θα προσπαθήσει να τροφοδοτήσει εξοπλισμό ισχύος με ρεύμα μεγαλύτερο των 7 A. Αυτό μπορεί να γίνει με ασφάλειες στην είσοδο του δικτύου. Αν οι ασφαλειοθήκες δεν χωρέσουν στο κουτί, θα πρέπει να κοπεί το καλώδιο εισόδου και να μπουν σε ένα ξεχωριστό κουτί. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ένας τριφασικός αυτόματος ασφαλειοαποζεύκτης αλλά πρόκειται για ακριβή λύση.
- Μπορεί να ενσωματωθεί στο κουτί ο προσαρμογέας R-C. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να τοποθετηθεί επιλογικός διακόπτης ο οποίος θα τον προσαρμόζει στην επιθυμητή θέση.
- Για να τροφοδοτηθούν μεγαλύτερα φορτία, θα πρέπει να αλλαγούν τα 4 πηνία εξόδου του δικτύου σύζευξης. Λόγω χώρου, θα είναι δύσκολο να μπουν ιδιαίτερα μεγαλύτερα πηνία.
- Τα καλώδια εισόδου από την γεννήτρια συχνοτήτων καλό θα ήταν να αντικατασταθούν από καλώδια 2,5 mm με μόνωση 3 kV.
- Ο προσαρμογέας R-C είναι ευπαθής σε εφαρμοζόμενες υπερτάσεις μεγαλύτερες του 0.5 kV. Καλό θα ήταν να βρεθεί πυκνωτής με μεγαλύτερη αντοχή αλλά και αντίσταση μεγαλύτερης ισχύος και να κατασκευαστεί ο προσαρμογέας εξ' αρχής.
- Μπορεί να γίνει σύγκριση με ένα πιστοποιημένο CDN, όσον αφορά την ικανότητά του σαν φίλτρο αποκοπής της υπέρτασης.

7.2 Προτάσεις για την μελέτη της συμπεριφοράς εξοπλισμού ισχύος σε υπερτάσεις.

- Μεγαλύτερης έκτασης διερεύνηση μπορεί να γίνει στην συμπεριφορά του δικτύου σύζευξης ως φίλτρο. Μπορούν να γίνουν δοκιμές με άλλες συχνότητες, άλλες κυματομορφές αλλά και DC. Τέτοια διερεύνηση ίσως να είναι βέβαια περιττή, αφού σκοπός του δικτύου σύζευξης είναι να αποκόπτει πολύ συγκεκριμένες συχνότητες και δη αυτές που αναφέρονται στο πρότυπο.
- Στον χώρο της προσομοίωσης των κυκλωμάτων που αναφέρονται στο πρότυπο, μπορεί να γίνει αρκετή δουλειά με διαφορετικό εξοπλισμό που ελέγχουμε αλλά και με διαφορετική ακρίβεια στην επαναληπτική μέθοδο. Επίσης μπορεί κανείς να ψάξει την απόκριση ενός δικτύου σύζευξης με διαφορετικές τιμές για τα L και C και να κρίνει αν οι τιμές που ορίζονται στο πρότυπο είναι ιδανικές.
- Μεγαλύτερη έρευνα μπορεί επίσης να γίνει και στους μηχανισμούς δημιουργίας των υπερτάσεων από φυσικά αλλά και από ανθρωπογεννή αίτια.
- Περαιτέρω ανάλυση ίσως να θέλει και ο τομέας της ανάγκης για τυποποίηση των δοκιμών και ενδεχομένως να γίνουν προτάσεις στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μέχρι τώρα υπάρχόντων προτύπων που περιγράφουν μεθόδους πιστοποίησης εξοπλισμών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ Ι.Α. (1989), ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΥΠΕΡΤΑΣΕΩΝ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ
- [2] ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΜΑΝΙΑΣ - ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ ΣΤΑΜΠΙΑΣ (1991), ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ Η/Υ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ SPICE, ΠΡΩΤΗ ΕΚΔΟΣΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ
- [3] PAUL A. CHATTERTON – MICHAEL A. HOULDEN (1992), ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ (EMC), Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΣΤΟΝ ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
- [4] ΕΛΟΤ, ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ EN 50082-1 (27/4/1999), ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ, ΓΕΝΙΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΑΤΡΩΣΙΑΣ, ΜΕΡΟΣ 1 (ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ, ΕΜΠΟΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΛΑΦΡΙΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
- [5] ΕΛΟΤ, ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ EN 61000-4-5 (3/1/1996), ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ (EMC), ΜΕΡΟΣ 4: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ- ΤΜΗΜΑ 5: ΔΟΚΙΜΗ ΑΤΡΩΣΙΑΣ ΑΠΟ ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ – ΥΠΕΡΕΝΤΑΣΕΙΣ.
- [6] ASEA HAEFELY, IMPULSE TESTER TYPE PC 6-288 USERS MANUAL
- [7] WEB: www.tektronics.com
- [8] WEB: [http://used-line.com/cgi-in/a_view/view_item.cfm?
itemID=4317581](http://used-line.com/cgi-in/a_view/view_item.cfm?itemID=4317581)
- [9] WEB: www.schaffner.com
- [10] GOOD WILL GFG-8015F FUNCTION GENERATOR USERS MANUAL



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

.....

.....

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**EMC Εξοπλισμού ηλεκτρικής ισχύος –
Το πρότυπο EN 61000-04-05**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΘΥΜΙΟΣ Θ. ΤΣΑΡΟΥΧΗΣ

Επιβλέπων : Ιωάννης Α. Σταθόπουλος

Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31^η Μήνα Έτος.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2004

.....
Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π
Ιδιότητα Μέλους Δ.Ε.Π

.....
Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π
Ιδιότητα Μέλους Δ.Ε.Π

.....
Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π
Ιδιότητα Μέλους Δ.Ε.Π

.....
Ευθύμιος Θ. Τσαρούχης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ευθύμιος Τσαρούχης 2004

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.