



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Προσομοίωση αισθητήρα ρεύματος ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης, Ε. Καρυδάς

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Προσομοίωση αισθητήρα ρεύματος ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης, Ε. Καρυδάς

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27^η Σεπτεμβρίου 2024.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Α. Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Δ. Αντωνόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024

.....
Ιωάννης, Ε. Καρυδάς

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

Copyright © Ιωάννης, Ε. Καρυδάς, 2024.

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.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην προσομοίωση ενός αισθητήρα ρεύματος για ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις χρησιμοποιώντας το λογισμικό CST Studio Suite 2024. Ο στόχος της μελέτης είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός μοντέλου αισθητήρα ικανό να ανιχνεύει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με ακρίβεια και αξιοπιστία. Για την επίτευξη του στόχου, καθορίστηκαν οι απαραίτητες παράμετροι και δημιουργήθηκε η βασική δομή του μοντέλου του αισθητήρα ρεύματος FCC F-65. Η διαδικασία αυτή περιελάμβανε τον αναλυτικό καθορισμό των παραμέτρων του μοντέλου, όπως η γεωμετρία του αισθητήρα, οι ιδιότητες των υλικών, και οι συνθήκες προσομοίωσης.

Μετά τη δημιουργία του μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με στόχο την αξιολόγηση της απόδοσης του αισθητήρα υπό διάφορες συνθήκες. Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού MATLAB, επιτρέποντας την επεξεργασία και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Η σωστή επιλογή και ρύθμιση των παραμέτρων, όπως το διάκενο, το πάχος του τυλίγματος και ο χρόνος διασποράς, αποδείχθηκε κρίσιμη για την επίτευξη αξιόπιστων μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι η ακριβής ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου μπορεί να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα και να βελτιώσει την απόδοση του. Επιπλέον, η προσομοίωση αποδεικνύει την ικανότητα του αισθητήρα να ανιχνεύει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με υψηλή ακρίβεια, καθιστώντας τον κατάλληλο για χρήση σε βιομηχανικές και ερευνητικές εφαρμογές. Η εργασία αυτή συνεισφέρει σημαντικά στην ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων προσομοίωσης αισθητήρων για την ανίχνευση ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, συμβάλλοντας έτσι στην προαγωγή της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και την καλύτερη προστασία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, Αισθητήρας ρεύματος, CST Studio Suite 2024, Προσομοίωση, MATLAB, Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, Μαγνητικά υλικά, Διασπορά

Abstract

This thesis focuses on the simulation of a current sensor for electrostatic discharges using the CST Studio Suite 2024 software. The aim of the study is to develop and evaluate a sensor model capable of accurately and reliably detecting electrostatic discharges. To achieve this goal, the necessary parameters were defined and the basic structure of the FCC F-65 current sensor model was created. This process included a detailed specification of model parameters, such as the sensor's geometry, material properties, and simulation conditions.

Following the creation of the model, simulations were conducted to evaluate the sensor's performance under various conditions. Data analysis was performed using MATLAB, allowing for the processing and visualization of the results. The correct selection and adjustment of parameters, such as the gap, winding thickness, and dispersion time, proved critical for achieving reliable measurements.

The study's results indicate that the precise adjustment of model parameters can minimize error and improve sensor performance. Furthermore, the simulation demonstrates the sensor's ability to detect electrostatic discharges with high accuracy, making it suitable for industrial and research applications. This work significantly contributes to the development of reliable sensor simulation models for the detection of electrostatic discharges, thus promoting electromagnetic compatibility and better protection of electronic equipment.

Keywords: Electrostatic discharges, Current probe, CST Studio Suite 2024, Simulation, MATLAB, Electromagnetic compatibility, Magnetic Materials, Dispersion

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	7
Περιεχόμενα Εικόνων.....	12
Περιεχόμενα Σχημάτων	14
Περιεχόμενα Πινάκων	20
Πρόλογος	22
Κεφάλαιο 1: Η Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) και η Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση (ESD).....	24
1.1 Χρήσιμοι Ορισμοί.....	25
1.2 Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές	26
1.3 Τομείς της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (EMC)	26
1.4 Πρότυπα και Εφαρμογές τους	27
1.5 Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	29
1.6 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο	29
1.7 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ' επαγωγής.....	32
1.8 Επιπτώσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό	33
1.9 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού	34
1.10 Μοντέλα Ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων	35
1.11 Το πρότυπο IEC 61000-4-2.....	36
Κεφάλαιο 2: Μαγνητικά Υλικά και Φαινόμενα Διασποράς	38
2.1 Συντακτικές σχέσεις στα μαγνητικά υλικά.....	38
2.1.1 Συντακτική σχέση για κενό χώρο	38
2.1.2 Ισοτροπικά μέσα	38
2.1.3 Συντακτική σχέση για ισοτροπικά μέσα	39

2.1.4	Ομογενή και ανομοιογενή μέσα.....	39
2.1.5	Ανισοτροπικά μέσα.....	39
2.1.6	Γραμμικά και μη-γραμμικά μέσα.....	40
2.2	Ταξινόμηση μαγνητικών υλικών	40
2.2.1	Διαμαγνητικά υλικά	41
2.2.2	Παραμαγνητικά υλικά.....	42
2.2.3	Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	43
2.2.4	Αντισιδηρομαγνητικά υλικά	44
2.2.5	Σιδηριμαγνητικά υλικά	45
2.2.6	Φερρίτες	46
2.3	Φαινόμενα Διασποράς	48
2.3.1	Συντακτική σχέση σε μέσα με χρονική διασπορά	48
2.3.2	Μοντέλα Φαινομένων Διασποράς	49
2.3.3	Ανάλυση μαγνητικής διασποράς με χρήση του Debye 1 st Order Model	51
Κεφάλαιο 3: Αισθητήρες ρεύματος υψηλών RF συχνοτήτων (current probes).....		53
3.1	Αισθητήρες ρεύματος RF υψηλών συχνοτήτων.....	53
3.2	Εμπέδηση μεταφοράς και βαθμονόμηση.....	55
3.3	Εμπέδηση εισαγωγής και μαγνητική φόρτωση	57
3.4	Χρήση στην ανίχνευση ανεπιθύμητων ρευμάτων	58
3.5	Αισθητήρας ρεύματος FCC F-65.....	60
Κεφάλαιο 4: Μοντέλο του αισθητήρα ρεύματος FCC F-65		62
4.1	Λογισμικό CST Studio Suite 2024	62
4.2	Βασικές δομές του μοντέλου προσομοίωσης	62

4.3	Απαιτούμενες παράμετροι για την δημιουργία του μοντέλου.....	63
4.4	Δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης.....	67
4.5	Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου	77
Κεφάλαιο 5: Προσομοιώσεις και επεξεργασία αποτελεσμάτων		78
5.1	Σκοπός των προσομοιώσεων	78
5.2	Εύρεση των patterns των υπό διερεύνηση παραμέτρων.....	78
5.2.1	Διερεύνηση της παραμέτρου του διακένου μεταξύ εσωτερικού τυλίγματος και φερρίτη «gap».....	79
5.2.2	Διερεύνηση της παραμέτρου του διακένου μεταξύ των ακροδεκτών του εσωτερικού τυλίγματος «winding_gap».....	80
5.2.3	Διερεύνηση της παραμέτρου του πάχους του εσωτερικού τυλίγματος «winding_gap»	81
5.2.4	Διερεύνηση των παραμέτρων της μαγνητικής διαπερατότητας «Mu_static» και του χρόνου διασποράς «dispersion_time»	82
5.2.5	Διερεύνηση της παραμέτρου της αντίστασης μοντελοποίησης της μη γραμμικής απόκρισης χαμηλών συχνοτήτων «Radd».....	84
5.3	Εύρεση των τιμών των υπό διερεύνηση παραμέτρων	85
5.3.1	Αρχική εκτίμηση των τιμών των υπό διερεύνηση παραμέτρων	90
5.3.2	Βελτιστοποίηση των κυματομορφών κάθε εισόδου ρεύματος	101
5.3.3	Τελικές τιμές των υπό διερεύνηση παραμέτρων.....	115
5.4	Σύγκριση της ακρίβειας των δοκιμών μέσω του deviation	125
5.5	Ποσοτικοποίηση της τελικής ακρίβειας του μοντέλου.....	130
Κεφάλαιο 6: Σύνοψη – Συμπεράσματα		132
Βιβλιογραφία.....		134

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1-1: Διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου εξαιτίας της τριβής με το δάπεδο ^[3]	30
Εικόνα 1-2: Εποπτική παρουσίαση της φόρτισης εξ επαγωγής ^[11]	33
Εικόνα 3-1: Αισθητήρας ρεύματος (current probe) RF συχνοτήτων	53
Εικόνα 3-2: Μοντελοποίηση εσωτερικού τυλίγματος current probe	55
Εικόνα 3-3: Συσκευές βαθμονόμησης current probe ^[25]	56
Εικόνα 4-1: Τα components του μοντέλου.....	62
Εικόνα 4-2: Τα solids του component2	63
Εικόνα 4-3: Θύρα ρεύματος και elements	63
Εικόνα 4-4: Παράμετροι μοντέλου (Τομή)	64
Εικόνα 4-5: Παράμετροι μοντέλου (layer1_length).....	65
Εικόνα 4-6: Παράμετροι μοντέλου (layer1_y).....	65
Εικόνα 4-7: Παράμετροι μοντέλου (Plate, xcoord_centerprobe, ycoord_centerprobe).....	66
Εικόνα 4-8: Παράμετροι μοντέλου (Plate_Thickness, zoffset).....	66
Εικόνα 4-9: Παράμετροι μοντέλου (winding_gap).....	67
Εικόνα 4-10: Δημιουργία Μοντέλου (Φερρίτης - Cylinder).....	68
Εικόνα 4-11: Δημιουργία Μοντέλου (Φερρίτης - Brick)	68
Εικόνα 4-12: Δημιουργία Μοντέλου (Φερρίτης - Extrude Face).....	69
Εικόνα 4-13: Δημιουργία Μοντέλου (Φερρίτης - History Tree).....	69
Εικόνα 4-14: Δημιουργία μοντέλου (Τύλιγμα - Brick - I)	70
Εικόνα 4-15: Δημιουργία μοντέλου (Τύλιγμα - Brick - II).....	70
Εικόνα 4-16: Δημιουργία μοντέλου (Τύλιγμα - Brick - III).....	71
Εικόνα 4-17: Δημιουργία μοντέλου (Τύλιγμα - History Tree)	71
Εικόνα 4-18: Δημιουργία μοντέλου (Elements - Rload).....	72
Εικόνα 4-19: Δημιουργία μοντέλου (Elements - Radd).....	72
Εικόνα 4-20: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - Cylinder - I).....	73
Εικόνα 4-21: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - Cylinder - II)	73
Εικόνα 4-22: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - Brick - I).....	74
Εικόνα 4-23: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - Brick - II)	74
Εικόνα 4-24: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - Cylinder - III)	75

Εικόνα 4-25: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - Extrude Face)	75
Εικόνα 4-26: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - History Tree)	76
Εικόνα 4-27: Δημιουργία μοντέλου (Πλάκα - Brick)	76
Εικόνα 4-28: Δημιουργία μοντέλου (Θύρα Ρεύματος - port2)	77

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Συνιστώσες σχεδιασμού ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας[4].....	26
Σχήμα 1-2: Παραδείγματα εκφορτίσεων (a,b,c) σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM) αντιστοίχως κι η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC[12]	35
Σχήμα 1-3: Ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το IEC 61000-4-2[13].....	37
Σχήμα 2-1: Μαγνητικό μη γραμμικό (α) και γραμμικό (β) μέσο[16]	40
Σχήμα 2-2: Διαμαγνητικό υλικό εντός μη ομογενούς μαγνητικού πεδίου[18]	41
Σχήμα 2-3: Σταδιακή ευθυγράμμιση μορίων παραμαγνητικού υλικού μέσω εξωτερικού πεδίου[18].....	42
Σχήμα 2-4: Έλξη υγρού οξυγόνου από ισχυρό μαγνήτη[18]	43
Σχήμα 2-5: Μαγνητική περιοχή ενός σιδηρομαγνητικού υλικού[18]	44
Σχήμα 2-6: Θερμοκρασία Curie TC - Επαναφορά αταξίας (παραμαγνητισμός)[16]	44
Σχήμα 2-7: Αντισιδηρομαγνητικός κρύσταλλος χρωμίου (Cr)[18]	45
Σχήμα 2-8: Μαγνητική τάξη σε σιδηριμαγνητικό κρύσταλλο[18]	45
Σχήμα 2-9: Εφαρμογές Φερριτών[19].....	47
Σχήμα 2-10: Βρόχος υστέρησης φερρίτη[16]	47
Σχήμα 2-11: Μαγνητική διασπορά - Debye 1st Order Model	52
Σχήμα 3-1: Ισοδύναμο κύκλωμα WUT και αισθητήρα μέτρησης[25].....	54
Σχήμα 3-2: Ρεύματα differential-mode (μπλε) και common-mode (κόκκινα)[25]	59
Σχήμα 3-3: Εμπέδηση μεταφοράς του FCC F-65 σε συνάρτηση με την συχνότητα[30]	61
Σχήμα 5-1: Προσομοιώσεις - Patterns (gap - I)	79
Σχήμα 5-2: Προσομοιώσεις - Patterns (gap - II)	79
Σχήμα 5-3: Προσομοιώσεις - Patterns (winding_gap - I)	80
Σχήμα 5-4: Προσομοιώσεις - Patterns (winding_gap - II)	80
Σχήμα 5-5: Προσομοιώσεις - Patterns (winding_thickness).....	81
Σχήμα 5-6: Προσομοιώσεις - Patterns (Mu_static και dispersion_time - I).....	82
Σχήμα 5-7: Προσομοιώσεις - Patterns (Mu_static και dispersion_time - II)	83
Σχήμα 5-8: Καμπύλη τιμών Mu_static.....	83
Σχήμα 5-9: Προσομοιώσεις - Patterns (Radd)	85

Σχήμα 5-10: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 438 – 8kV) – Συνολική κυματομορφή	91
Σχήμα 5-11: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 438/+8kV) – Πρώτη κορυφή.....	91
Σχήμα 5-12: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 438/+8kV) – Δεύτερη κορυφή	92
Σχήμα 5-13: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 438/+8kV) – Διάστημα 55ns-65ns	92
Σχήμα 5-14: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 438/+8kV)	93
Σχήμα 5-15: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 433/+8kV) – Συνολική κυματομορφή.....	94
Σχήμα 5-17: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 433/+8kV) – Δεύτερη κορυφή	95
Σχήμα 5-18: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 433/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns.....	95
Σχήμα 5-19: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 433/+8kV)	96
Σχήμα 5-20: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (TRA3000/+8kV) - Συνολική κυματομορφή	96
Σχήμα 5-21: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (TRA3000/+8kV) - Πρώτη κορυφή	97
Σχήμα 5-22: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (TRA3000/+8kV) – Δεύτερη κορυφή	97
Σχήμα 5-23: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (TRA3000/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns.....	98
Σχήμα 5-24: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (TRA3000/+8kV)	98
Σχήμα 5-25: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (Dito/+8kV) - Συνολική κυματομορφή	99
Σχήμα 5-26: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (Dito/+8kV) - Πρώτη κορυφή	99

Σχήμα 5-27: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (Dito/+8kV) - Δεύτερη κορυφή.....	100
Σχήμα 5-28: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (Dito/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns.....	100
Σχήμα 5-29: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (Dito/+8kV)	101
Σχήμα 5-30: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-2 (NSG 438/+8kV) - Συνολική κυματομορφή ...	102
Σχήμα 5-31: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-2 (NSG 438/+8kV) - Πρώτη κορυφή	103
Σχήμα 5-32: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-2 (NSG 438/+8kV) - Δεύτερη κορυφή	103
Σχήμα 5-33: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-2 (NSG 438/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns.....	104
Σχήμα 5-34: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-2 (NSG 438/+8kV)	104
Σχήμα 5-35: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-3 (NSG 433/+8kV) - Συνολική κυματομορφή ...	105
Σχήμα 5-36: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-3 (NSG 433/+8kV) - Πρώτη κορυφή	106
Σχήμα 5-37: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-3 (NSG 433/+8kV) - Δεύτερη κορυφή.....	106
Σχήμα 5-38: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-3 (NSG 433/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns.....	107
Σχήμα 5-39: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-3 (NSG 433/+8kV)	107
Σχήμα 5-40: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-4 (TRA3000/+8kV) - Συνολική κυματομορφή ..	109
Σχήμα 5-41: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-4 (TRA3000/+8kV) - Πρώτη κορυφή	109
Σχήμα 5-42: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-4 (TRA3000/+8kV) - Δεύτερη κορυφή.....	110

Σχήμα 5-43: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-4 (TRA3000/+8kV) – Διάστημα 55ns-65ns.....	110
Σχήμα 5-44: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-4 (TRA3000/+8kV)	111
Σχήμα 5-45: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-5 (Dito/+8kV) - Συνολική κυματομορφή	112
Σχήμα 5-46: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-5 (Dito/+8kV) - Πρώτη κορυφή	113
Σχήμα 5-47: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-5 (Dito/+8kV) - Δεύτερη κορυφή.....	113
Σχήμα 5-48: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-5 (Dito/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns.....	114
Σχήμα 5-49: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-5 (Dito/+8kV)	114
Σχήμα 5-50: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 438/+8kV) - Συνολική κυματομορφή ...	115
Σχήμα 5-51: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 438/+8kV) - Πρώτη κορυφή	116
Σχήμα 5-52: : Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 438/+8kV) - Δεύτερη κορυφή.....	116
Σχήμα 5-53: : Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 438/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns.....	117
Σχήμα 5-54: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 438/+8kV)	117
Σχήμα 5-55: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 433/+8kV) - Συνολική κυματομορφή ...	118
Σχήμα 5-56: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 433/+8kV) – Πρώτη κορυφή.....	118
Σχήμα 5-57: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 433/+8kV) – Δεύτερη κορυφή	119
Σχήμα 5-58: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 433/+8kV) – Διάστημα 55ns-65ns.....	119

Σχήμα 5-59: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 433/+8kV)	120
Σχήμα 5-60: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (TRA3000/+8kV) - Συνολική κυματομορφή ..	120
Σχήμα 5-61: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (TRA3000/+8kV) - Πρώτη κορυφή	121
Σχήμα 5-62: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (TRA3000/+8kV) - Δεύτερη κορυφή	121
Σχήμα 5-63: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (TRA3000/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns.....	122
Σχήμα 5-64: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (TRA3000/+8kV)	122
Σχήμα 5-65: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (Dito/+8kV) - Συνολική κυματομορφή	123
Σχήμα 5-66: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (Dito/+8kV) - Πρώτη κορυφή	123
Σχήμα 5-67: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (Dito/+8kV) - Δεύτερη κορυφή	124
Σχήμα 5-68: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (Dito/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns.....	124
Σχήμα 5-69: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (Dito/+8kV)	125
Σχήμα 5-70: Γραφήματα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων και των τριών δοκιμών (NSG 438/+8kV) - Πρώτη κορυφή	128
Σχήμα 5-71: Γραφήματα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων και των τριών δοκιμών (NSG 433/+8kV) - Πρώτη κορυφή	128
Σχήμα 5-72: Γραφήματα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων και των τριών δοκιμών (TRA3000/+8kV) - Πρώτη κορυφή	129
Σχήμα 5-73: Γραφήματα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων και των τριών δοκιμών (Dito/+8kV) - Πρώτη κορυφή	129

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1-1: Τριβοηλεκτρική σειρά	31
Πίνακας 1-2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης.....	31
Πίνακας 1-3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV)	32
Πίνακας 1-4: Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος εκφόρτισης μέσω επαφής	37
Πίνακας 4-1: Οι παράμετροι του μοντέλου.....	64
Πίνακας 4-2: Τιμές των γνωστών παραμέτρων του μοντέλου.....	77
Πίνακας 4-3: Υπό διερεύνηση παράμετροι του μοντέλου	77
Πίνακας 5-1: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων (1η Δοκιμή)	90
Πίνακας 5-2: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων - 2η Δοκιμή (NSG 438 - 8kV)	102
Πίνακας 5-3: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων - 2η Δοκιμή (NSG 433 - 8kV)	105
Πίνακας 5-4: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων - 2η Δοκιμή (TRA3000 - 8kV)	108
Πίνακας 5-5: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων - 2η Δοκιμή (Dito - 8kV)	112
Πίνακας 5-6: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων (Τελικές τιμές)	115
Πίνακας 5-7: Τιμές των παραμέτρων του προτύπου IEC 61000-4-2 και ποσοστιαίο σφάλμα clamp-simulation (NSG 438/+8kV)	130
Πίνακας 5-8: Τιμές των παραμέτρων του προτύπου IEC 61000-4-2 και ποσοστιαίο σφάλμα clamp-simulation (NSG 433/+8kV)	130
Πίνακας 5-9: Τιμές των παραμέτρων του προτύπου IEC 61000-4-2 και ποσοστιαίο σφάλμα clamp-simulation (TRA3000/+8kV)	131
Πίνακας 5-10: Τιμές των παραμέτρων του προτύπου IEC 61000-4-2 και ποσοστιαίο σφάλμα clamp-simulation (Dito).....	131

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2023-2024 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας είναι η προσομοίωση ενός αισθητήρα ρεύματος (FCC F-65) ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στο λογισμικό προσομοίωσης CST Studio 2024.

Αναλυτικά, η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: αναλύονται οι βασικές αρχές της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Περιλαμβάνονται χρήσιμοι ορισμοί, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, οι τομείς της EMC, τα πρότυπα και οι εφαρμογές τους, καθώς και γενικές πληροφορίες για το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης .

Κεφάλαιο 2: εστιάζει στα μαγνητικά υλικά και στα φαινόμενα διασποράς. Παρουσιάζονται οι συντακτικές σχέσεις στα μαγνητικά υλικά, η ταξινόμηση των μαγνητικών υλικών, και η ανάλυση των φαινομένων διασποράς, με αναφορά σε μοντέλα όπως το Debye 1st Order Model.

Κεφάλαιο 3: αναλύει τις αρχές λειτουργίας των αισθητήρων ρεύματος υψηλών RF συχνοτήτων. Περιγράφονται τεχνικά χαρακτηριστικά, μέθοδοι και φαινόμενα σε αυτούς τους αισθητήρες, όπως η εμπέδηση μεταφοράς, η εμπέδηση εισαγωγής, η μαγνητική φόρτωση, η βαθμονόμηση τους, η χρήση τους στον εντοπισμό ρευμάτων common-mode, καθώς και πιο λεπτομερή χαρακτηριστικά για τον αισθητήρα ρεύματος FCC F-65.

Κεφάλαιο 4: περιγράφεται η διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου του αισθητήρα ρεύματος χρησιμοποιώντας το λογισμικό CST Studio Suite 2024. Περιλαμβάνονται οι βασικές δομές του μοντέλου προσομοίωσης κι οι απαιτούμενες παράμετροι για την κατασκευή του.

Κεφάλαιο 5: περιλαμβάνει τις προσομοιώσεις και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη χρήση του MATLAB. Αναλύονται τα patterns των υπό διερεύνηση παραμέτρων, τα αποτελέσματα των προγραμμάτων MATLAB κι η ποσοτικοποίηση της τελικής ακρίβειας του μοντέλου.

Κεφάλαιο 6: γίνεται ανακεφαλαίωση της διπλωματικής εργασίας και συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη συμπαράσταση και την ανεκτίμητη βοήθειά τους, όλους όσους με στήριξαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερα :

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόννο, διδάκτορα μηχανικό και καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη συνεργασία, την καθοδήγηση, τη βοήθεια που πρόθυμα μου παρείχε καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Παναγιώτη Κ. Παπασταμάτη, υποψήφιο διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τη συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας με ουσιαστική και αμφίδρομη επικοινωνία μέσα από ένα φιλικό κλίμα συνεργασίας που δημιουργήθηκε.

Κεφάλαιο 1: Η Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) και η Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση (ESD)

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα γνωστή ως **EMC (ElectroMagnetic Compatibility)** αναφέρεται στην ικανότητα των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών να λειτουργούν αποτελεσματικά στο ηλεκτρομαγνητικό τους περιβάλλον, χωρίς να προκαλούν παρεμβολές μεταξύ τους. Καθώς ο αριθμός των ηλεκτρονικών συσκευών όπως οι τηλεοράσεις, τα πλυντήρια και τα κινητά τηλέφωνα αυξάνεται, αυξάνεται και η πιθανότητα για παρεμβολές.

Οι **ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές** επίσης γνωστές ως **EMI (Electromagnetic Interferences)** είναι το κύριο αντικείμενο προβληματισμού κατά τον σχεδιασμό κυκλωμάτων. Οι παρεμβολές αυτές είναι ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη λειτουργία μιας συσκευής ή άλλου εξοπλισμού, και μπορούν να περιλαμβάνουν θόρυβο, ανεπιθύμητα σήματα, ή αλλαγές στο μέσο διάδοσης.

Η τεχνολογική πρόοδος και η ανάγκη για μικρότερα ηλεκτρονικά κυκλώματα έχουν οδηγήσει σε πιο περίπλοκες συσκευές με πολλά κυκλώματα, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα εμφάνισης ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Η εξασφάλιση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία των συσκευών αυτών [1].

Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή αναφέρεται στο φαινόμενο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και των επιπτώσεών της, ενώ η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα είναι ένα χαρακτηριστικό των συσκευών που λειτουργούν σε περιβάλλον ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών EMI. Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα διασφαλίζει ότι διαφορετικές συσκευές λειτουργούν ομαλά στο ίδιο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, αποφεύγοντας παρεμβολές.

Κάθε ηλεκτρονικό σύστημα πρέπει να είναι ανθεκτικό σε εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές πηγές και να μην δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο που θα μπορούσε να επηρεάσει άλλα κυκλώματα. Για το λόγο αυτό, οι συσκευές πρέπει να συμμορφώνονται με εθνικά και διεθνή πρότυπα που καθορίζουν τα όρια εκπομπής και ανοχής σε ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές. Η συμμόρφωση επιβεβαιώνεται μέσω δοκιμών υπό συγκεκριμένες συνθήκες, και οι σχεδιαστές κυκλωμάτων πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους διάφορες παραμέτρους πέρα από τις ιδανικές εργαστηριακές συνθήκες. Συγκεκριμένα θα πρέπει [1]:

- Να μην δημιουργεί παρεμβολές με κάποιο άλλο σύστημα.
- Να μην είναι ευαίσθητο στις εκπομπές άλλων συστημάτων.
- Να μην προκαλεί αυτό-παρεμβολές με τον εαυτό του.

1.1 Χρήσιμοι Ορισμοί

Στη συνέχεια, δίνονται κάποιοι ορισμοί για την πληρέστερη και καλύτερη κατανόηση της έννοιας της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

- **Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (Electromagnetic Interference)** είναι κάποιο ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί είτε να προκαλέσει μείωση της απόδοσης μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος, είτε να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωτική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή μπορεί να είναι θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μία μεταβολή του ίδιου του μέσου διάδοσης.
- **Ηλεκτρομαγνητική ευαισθησία (Electromagnetic susceptibility)** είναι η αδυναμία μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητάς της σε συνθήκες παρουσίας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής, δηλαδή η έλλειψη ατρωσίας.
- **Ατρωσία (Immunity)** είναι η ικανότητα μιας συσκευής να λειτουργεί ικανοποιητικά ως προς τα κριτήρια επίδοσης που προδιαγράφονται για τη συσκευή, παρά την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής.
- **Ηλεκτρομαγνητικό Επίπεδο Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Level)** είναι το διευκρινισμένο μέγιστο επίπεδο διαταραχής στο οποίο ενδέχεται να υποβληθεί μια συσκευή, ένας εξοπλισμός ή ένα σύστημα που λειτουργεί σε συγκεκριμένες συνθήκες. Στην πράξη, το ηλεκτρομαγνητικό επίπεδο συμβατότητας δεν προσεγγίζει τις μέγιστες δυνατές τιμές, αλλά τείνει να το ξεπεράσει κατά μία μικρή πιθανότητα.
- **Περιθώριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Margin)** είναι ο λόγος της στάθμης ατρωσίας μιας διάταξης συσκευής ή συστήματος ως προς μία στάθμη διαταραχής αναφοράς.
- **Επίπεδο Ατρωσίας (Immunity level)** είναι το ανώτατο επίπεδο μίας δεδομένης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που συμβαίνει σε μία διάταξη, συσκευή ή σύστημα για την οποία αυτό παραμένει ικανό να λειτουργήσει στον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.
- **Όριο Ατρωσίας (Immunity Limit)** είναι το καθορισμένο επίπεδο ατρωσίας.
- **Περιθώριο Ατρωσίας (Immunity Margin)** είναι η διαφορά μεταξύ του ορίου ατρωσίας μιας διάταξης ή ενός συστήματος και της στάθμης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.
- **Επίπεδο διαταραχής (Interference Level)** είναι το επίπεδο ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής μιας δοσμένης μορφής, μετρημένο σε συγκεκριμένες συνθήκες.

- **Όριο διαταραχής (Interference Limit)** είναι το μέγιστο επιτρεπτό ηλεκτρομαγνητικό επίπεδο διαταραχής, μετρημένο σε συγκεκριμένες συνθήκες [2] [3].

1.2 Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές

Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή αναφέρεται σε οποιοδήποτε ανεπιθύμητο αποτέλεσμα προκαλείται από τον θόρυβο σε ένα σύστημα, δηλαδή από ένα ηλεκτρικό σήμα που υπερβαίνει το επιθυμητό και είναι παρόν στο κύκλωμα. Για αυτόν τον λόγο, η μείωση του θορύβου είναι ζωτικής σημασίας ώστε να μην προκαλεί παρεμβολές στο σύστημα.

Οι κύριες αιτίες των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών περιλαμβάνουν τη διανομή ηλεκτρικής ισχύος, τα ραδιοκύματα, την ηλεκτροστατική εκφόρτιση και τους κεραυνούς. Στη διανομή ηλεκτρικής ισχύος, πολλές διαταραχές προκαλούνται από τις λειτουργίες των κυκλωμάτων μεταγωγής. Σε δίκτυα χαμηλής τάσης, το άνοιγμα επαγωγικών κυκλωμάτων, όπως πηνία επαφών, κινητήρες και σωληνοειδείς βαλβίδες, δημιουργεί πολύ υψηλές τάσεις (μέχρι αρκετά kV) με υψηλής συχνότητας αρμονικές (από δέκα έως εκατοντάδες MHz). Σε δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης, το άνοιγμα και το κλείσιμο διακοπών παράγει κύματα με πολύ γρήγορη άνοδο (μερικά ns), τα οποία είναι ιδιαίτερα επιζήμια για συστήματα μικροεπεξεργαστών.

Τα ραδιοκύματα από συστήματα απομακρυσμένου ελέγχου, τηλεχειριστήρια, ραδιοεπικοινωνίες, τηλεοράσεις, και walkie-talkies αποτελούν πηγές διαταραχών με ένταση αρκετών V/m. Καθώς η χρήση τέτοιων πηγών αυξάνεται, καθίσταται απαραίτητο να παρέχεται αποτελεσματική προστασία στον ευαίσθητο εξοπλισμό [1].

1.3 Τομείς της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (EMC)

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα αποτελείται από τους τομείς της παραγωγής, μετάδοσης και λήψης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Οι τομείς αυτοί επίσης, απαρτίζουν και τη βάση για κάθε σχεδιασμό ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.



Σχήμα 1-1: Συνιστώσες σχεδιασμού ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας^[4]

Η ανάλυση του σχεδιασμού, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1-1**, αρχίζει από την πηγή που εκπέμπει σήματα, τα οποία μεταφέρονται σε έναν δέκτη μέσω ενός μονοπατιού σύζευξης ή μετάδοσης. Ο δέκτης επεξεργάζεται την ενέργεια, οδηγώντας σε επιθυμητή ή ανεπιθύμητη

συμπεριφορά. Η ανεπιθύμητη συμπεριφορά αποτελεί την παρεμβολή. Τόσο η πηγή όσο και ο δέκτης μπορούν να λειτουργούν με δύο τρόπους: εκούσιο και ακούσιο. Η συμπεριφορά τους εξαρτάται από το μονοπάτι σύζευξης και από την ίδια την πηγή ή τον δέκτη.

Για παράδειγμα, σε έναν AM ραδιοφωνικό πομπό, η εκπομπή που λαμβάνεται από έναν δέκτη συγχρονισμένο στη συχνότητα φέροντος του πομπού είναι εκούσια, αλλά το μονοπάτι σύζευξης μπορεί να είναι ακούσιο. Υπάρχουν εκπομπές που δεν έχουν σκοπό, όπως αυτές από τις λάμπες φθορισμού. Συνήθως, η μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσω ακούσιων μονοπατιών σύζευξης. Αυτό δεν σημαίνει ότι κάθε ακούσια μεταφορά θα προκαλέσει παρεμβολή, καθώς η πιθανότητα εμφάνισης παρεμβολών εξαρτάται από την επεξεργασία της ληφθείσας ενέργειας από τον δέκτη [4].

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) μπορούν να αποφευχθούν με τους ακόλουθους τρόπους:

- Να περιοριστούν οι εκπομπές στο σημείο της πηγής
- Το μονοπάτι σύζευξης να είναι όσον το δυνατό μη αποτελεσματικό
- Ο δέκτης να γίνει λιγότερο ευαίσθητος στις εκπομπές

1.4 Πρότυπα και Εφαρμογές τους

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. Συγκεκριμένα, θα πρέπει ο κατασκευαστής να μπορεί παρέχει στον εκάστοτε αγοραστή ή χρήστη τα πιστοποιητικά συμμόρφωσης με τους ισχύοντες κανονισμούς, που θα εγγυώνται την ασφαλή και σωστή λειτουργία της συσκευής, κάτω από ορισμένες συνθήκες. Έχοντας ο χρήστης την εκάστοτε έκθεση δοκιμών, θα γνωρίζει ότι η συσκευή που διαθέτει ανταποκρίνεται σε αυτό για το οποίο έχει πιστοποιηθεί και ότι σε αυτή έχουν γίνει κάποιες δοκιμές (σειράς ή τύπου) με σκοπό τον έλεγχο αυτής [5].

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 δοκιμών. Θα ήταν δύσκολο να υπάρξει διαφορετική δοκιμή για κάθε συσκευή που κυκλοφορεί στην αγορά.

Τα πρότυπα που έχουν διατυπωθεί από τις διεθνείς επιτροπές εξασφαλίζουν την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα με την απαίτηση από τους σχεδιαστές να την λαμβάνουν υπόψιν τους σε κάθε βήμα της σχεδιαστικής διαδικασίας. Ως επί το πλείστον, ορίζουν τις προϋποθέσεις για το σχεδιασμό και τη διαχείριση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, όπως επίσης [6]:

- Μεθόδους δοκιμής και συγκεκριμένο δοκιμαστικό εξοπλισμό
- Συγκεκριμένα όρια που πρέπει να τηρούνται
- Προδιαγραφές για δέκτες EMI μετρήσεων

Τα Πρότυπα αυτά βρίσκονται σε διαρκή διαδικασία εξέλιξης και αναβάθμισης ώστε να ικανοποιούν τις ανάγκες της βιομηχανίας και της κοινωνίας. Οι πρώτοι κανονισμοί εκδόθηκαν από τη **Διεθνή Ειδική Επιτροπή σε θέματα Ραδιοπαρεμβολών CISPR (International Special Committee on Radio Interference)** και καλύπτουν μόνο το μέγιστο αποδεκτό επίπεδο ισχύος που θα μπορούσε να εκπέμπεται από τους διαφορετικούς τύπους εξοπλισμών, κυρίως για να προστατευτεί η ραδιομετάδοση και λήψη. Αργότερα, εθνικές επιτροπές κι ιδιαίτερα η **Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή IEC (International Electrotechnical Commission)** καθιέρωσαν Πρότυπα που καλύπτουν όλες τις πτυχές της εκπομπής και της ευαισθησίας της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Η νέα σειρά προτύπων που δημιουργήθηκε από τη IEC περιλαμβάνει:

- **61000-1:** Εφαρμογή, ορισμοί
- **61000-2:** Περιβάλλον, επίπεδα συμβατότητας
- **61000-3:** Όρια διαταραχής
- **61000-4:** Τεχνικές δοκιμής και μέτρησης
- **61000-5:** Οδηγίες εγκατάστασης και μείωσης
- **61000-6:** Γενικά Πρότυπα

Η διάκριση των προτύπων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας γίνεται στις παρακάτω βασικές κατηγορίες [7]:

Βασικά Πρότυπα:

Περιγράφουν το φαινόμενο, παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά του δοκιμαστικού εξοπλισμού και τις οδηγίες για τους τρόπους που πρέπει να διεξαχθούν οι δοκιμές. Βασικά πρότυπα, όπως το **IEC 61000-4-x** αποτελούν το χαμηλότερο επίπεδο στην ιεραρχία προτύπων.

Γενικά Πρότυπα:

Καθορίζουν επίπεδα δοκιμών για συγκεκριμένο εύρος εφαρμογών, αναφερόμενα στα Βασικά Πρότυπα για γενικότερες πληροφορίες. Τα Γενικά Πρότυπα δίνουν ελάχιστες απαιτήσεις και βρίσκονται ψηλότερα στην ιεραρχία από τα Βασικά.

Πρότυπα Οικογενείας Προϊόντων:

Χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένες κατηγορίες προϊόντων. Καθορίζουν επίπεδα δοκιμών και κριτήρια απόδοσης όπως για παράδειγμα το πρότυπο **EN 61326** το οποίο αναφέρεται στις απαιτήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας εξοπλισμού για μετρήσεις, έλεγχο και εργαστηριακή χρήση.

Πρότυπα Προϊόντων:

Αποτελούν τα πιο διαδεδομένα πρότυπα διότι προσφέρουν αυστηρές απαιτήσεις για ένα συγκεκριμένο προϊόν και ορίζουν ειδικές μεθόδους δοκιμών. Βρίσκονται στο υψηλότερο επίπεδο στην ιεραρχία των προτύπων.

1.5 Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Μία από τις δοκιμές που περιλαμβάνονται στα πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι η δοκιμή ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. **Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση (ESD) (electrostatic discharge)** αποτελεί ένα από τα πιο συχνά ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα που συμβαίνουν στον ηλεκτρολογικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Δεν είναι απλώς ένα μεταβατικό φαινόμενο χωρίς σοβαρές επιπτώσεις στη λειτουργία των συστημάτων, αλλά συνιστά κίνδυνο όχι μόνο για την ασφάλεια των ηλεκτρονικών συσκευών, αλλά και για την ασφάλεια των ίδιων των ανθρώπων που τις χειρίζονται.

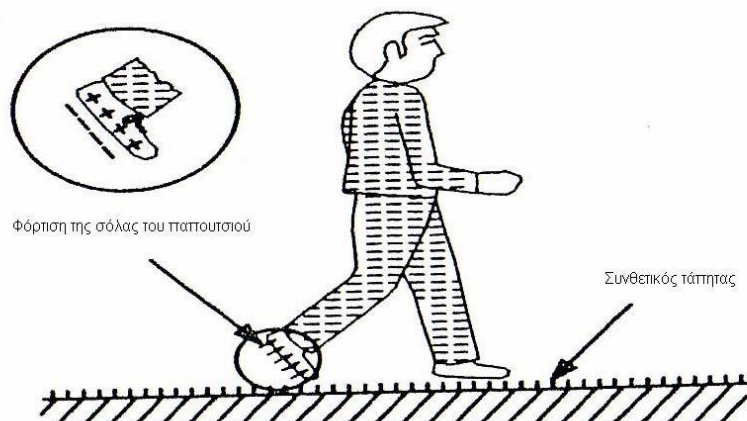
Σε ηλεκτρονικά συστήματα ή εξαρτήματα αυτό μπορεί να λάβει μέρος με δύο μηχανισμούς:

- Είτε, από **άμεσες** εκφορτίσεις πάνω στον εξοπλισμό
- Είτε από μεταβατικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος, περιπτώσεις που συνιστούν **έμμεσες** εκφορτίσεις.

1.6 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Γενικά όταν δύο υλικά έρχονται σε επαφή και στη συνέχεια διαχωρίζονται, προκαλείται ροή ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο. Το υλικό που χάνει ηλεκτρόνια φορτίζεται θετικά, ενώ το υλικό που κερδίζει ηλεκτρόνια φορτίζεται αρνητικά. Ο όρος **τριβοηλεκτρισμός** αναφέρεται στη φόρτιση που προκύπτει από την επαφή και την τριβή των υλικών. Τέτοιες

φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία υψηλών δυναμικών τάξεως **10-25 kV**, με αποθηκευμένες ενέργειες λίγων mJ. Η εκφόρτιση αυτής της ενέργειας μπορεί να προκαλέσει ρεύμα με απότομες διακυμάνσεις, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους και να προκαλέσει βλάβες σε ηλεκτρικές συσκευές.



Εικόνα 1-1: Διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου εξαιτίας της τριβής με το δάπεδο^[3]

Όσον αφορά τον άνθρωπο στην **Εικόνα 1-1**, φαίνεται το πώς πραγματοποιείται η φόρτιση του, εξαιτίας της τριβής όταν αυτός κινείται πάνω σε δάπεδο από συνθετικό τάπητα. Όμως και στο συγκεκριμένο παράδειγμα αλλά και γενικότερα, το εάν ένα υλικό θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά, δεν εξαρτάται παρά μόνο από τη φύση του υλικού. Αυτή η ιδιότητα συνοψίζεται με την τριβοηλεκτρική σειρά του **Πίνακα 1-1** όπου τα υλικά κατατάσσονται ανάλογα με το τι φόρτιση αποκτούν (θετική ή αρνητική).

Βέβαια, η σχετική θέση του υλικού στην τριβοηλεκτρική σειρά είναι μονάχα ένας παράγοντας στη διαδικασία δημιουργίας της φόρτισης. Δύο υλικά τα οποία είναι σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους δύνανται να δημιουργήσουν μία ευρεία στατική φόρτιση. Γενικώς, η **φόρτιση εξ επαφής** αποτελεί τον πιο κοινό τρόπο εμφάνισης στατικού φορτίου.

Παρόλ' αυτά, δυναμικές πηγές στατικών φορτίσεων μπορούν να αποτελέσουν και:

- Μία δέσμη φορτισμένων ιόντων
- Το **spray charging**
- Η **φωτοηλεκτρική** φόρτιση
- Η φόρτιση **CORONA**

Οι παραπάνω φορτίσεις παραμένουν στατικές σε ένα αντικείμενο για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η ξαφνική μεταφορά φορτίου από ένα σώμα σε άλλο, όταν τα σώματα είναι

αντίθετα φορτισμένα και βρίσκονται σε αρκετά κοντινή απόσταση, είναι αυτό που ορίζεται ως ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Βέβαια, όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 1-2** υπάρχουν και κάποιοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη φόρτιση και την εκφόρτιση των υλικών [8] [9].

Πίνακας 1-1: Τριβοηλεκτρική σειρά

Πολικότητα φόρτισης λόγω τριβοηλεκτρικού φαινομένου σε διάφορα υλικά	
Υλικά που φορτίζονται θετικά	Υλικά που φορτίζονται αρνητικά
Αέρας	Κερί γυαλίσματος
Ανθρώπινο δέρμα	Σκληρό λάστιχο
Γυαλί	Κόλλα συγκόλλησης
Ανθρώπινα μαλλιά	Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι
Νάιλον	Ανοξείδωτο ατσάλι
Μαλλί	Συνθετικό λάστιχο
Γούνα	Ακρυλικό
Μόλυβδος	Αφρός πολυουρεθάνης
Μετάξι	Πολυεστέρας
Αλουμίνιο	Πολυαιθυλαίνιο
Χαρτί	PVC
Πολυουρεθάνη	TEFLON
Βαμβάκι	Λάστιχο Σιλικόνης
Ξύλο	
Ατσάλι	

Πίνακας 1-2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης

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

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, ιδιαίτερα από την υγρασία. Με αυξημένη υγρασία, οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις είναι πιο συχνές αλλά πιο ήπιες (χαμηλότερο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης και μικρότερος χρόνος ανόδου). Αντίθετα, σε συνθήκες ξηρασίας, οι εκφορτίσεις συμβαίνουν λιγότερο συχνά, αλλά είναι πιο έντονες (υψηλότερο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης και μεγαλύτερος χρόνος ανόδου). Αξίζει να σημειωθεί ότι επιβλαβείς τάσεις μπορούν να προκύψουν ακόμα και με 55% σχετική υγρασία ή περισσότερο. Πιο συγκεκριμένα, στον **Πίνακα 1-3** φαίνονται διάφορες ενδεικτικές ηλεκτροστατικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια ανθρωπίνων ενεργειών.

Πίνακας 1-3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV)^[9]

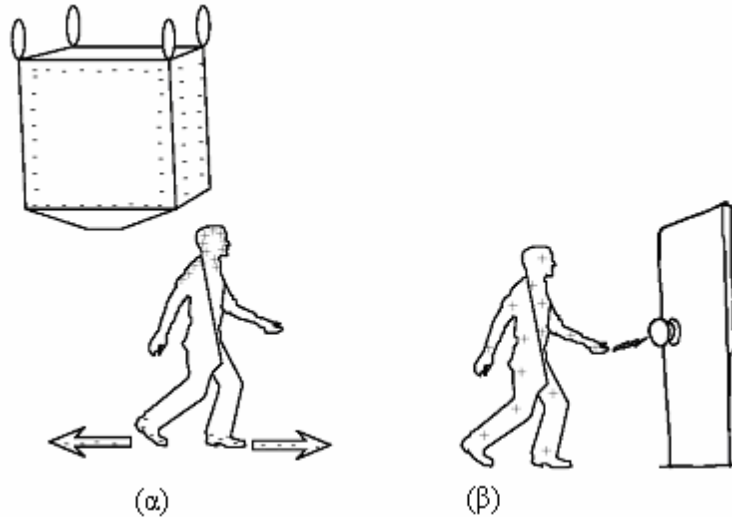
ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ		
	10%	40%	55%
Περπατώντας πάνω σε χαλί	35	15	7,5
Περπατώντας πάνω σε δάπεδο βινυλίου	12	5	3
Κινήσεις ενός εργαζομένου στο γραφείο	6	0,8	0,4

Πολλές προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας απαιτούν δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το μέγεθος ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι σταθερό από τη φύση του, άρα στις δοκιμές χρησιμοποιείται στον καθορισμό τυπικών παλμών και ρευμάτων.

1.7 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ' επαγωγής

Η φόρτιση ενός αντικειμένου μπορεί να προκύψει όχι μόνο μέσω του τριβοηλεκτρικού φαινομένου αλλά και μέσω επαγωγής. Όταν ένα αντικείμενο εκτίθεται σε ηλεκτρικό πεδίο, όπως όταν βρίσκεται κοντά σε ένα φορτισμένο σώμα, τα αντίθετα φορτία μέσα στο υλικό τείνουν να χωριστούν, κινούμενα είτε προς το φορτισμένο σώμα είτε μακριά από αυτό. Έτσι, το πλεονάζον φορτίο της ίδιας πολικότητας με το γειτονικό φορτισμένο σώμα θα διαρρεύσει, ανάλογα με την αγωγιμότητα του υλικού και τη σύνδεση του. Το αντικείμενο θα αποκτήσει έτσι περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας από το γειτονικό φορτισμένο σώμα [10].

Για να το κατανοήσουμε καλύτερα, στην **Εικόνα 1-2** απεικονίζεται ένας άνθρωπος (πολύ καλός αγωγός) δίπλα σε μια δεξαμενή που περιέχει μεγάλο φορτίο αρνητικής πολικότητας. Στο ανθρώπινο σώμα, τα αρνητικά και θετικά φορτία διαχωρίζονται μέσω των υποδημάτων και του δαπέδου, φορτίζοντάς το θετικά, αντίθετα από το γειτονικό αντικείμενο. Όταν ο άνθρωπος πλησιάσει την πόρτα και αγγίξει το μεταλλικό πόμολο με το θετικό φορτίο που έχει αποκτήσει, θα δημιουργηθεί ηλεκτροστατική εκφόρτιση, εκφορτίζοντας το σώμα του.



Εικόνα 1-2: Εποπτική παρουσίαση της φόρτισης εξ επαγωγής^[11]

1.8 Επιπτώσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

Όπως προαναφέρθηκε, η ηλεκτροστατική εκφόρτιση παρατηρείται όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάσει υψηλή τιμή, η οποία μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση στη διηλεκτρική αντοχή των ηλεκτρονικών στοιχείων των συσκευών, με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή τους. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, λαμβάνουν χώρα τα φαινόμενα [11]:

- Δευτερεύον ηλεκτρικό τόξο εντός του εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση νέων φαινομένων.
- Διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των κυκλωμάτων. Η ροή ενός υψηλού ρεύματος μπορεί να διαταράξει τις συνθήκες λειτουργίας των κυκλωμάτων:
 - ✓ Στο κέρδος **gain** του κυκλώματος
 - ✓ Στο εύρος ζώνης **bandwidth**
 - ✓ Σε αλλοιώσεις στα δημιουργούμενα σήματα
 - ✓ Στη λογική των ψηφιακών κυκλωμάτων

Οι συνέπειες ποικίλλουν από προσωρινή παρεμβολή έως καταστροφή των εξαρτημάτων.

- Ηλεκτρική επαγωγή εξαιτίας της χωρητικής σύζευξης σε μέρη του εξοπλισμού τα οποία αναπτύσσουν υψηλές τάσεις εξ επαγωγής οι οποίες οδηγούν σε προσωρινή κακή λειτουργία των κυκλωμάτων.

- **Μαγνητική επαγωγή εξαιτίας της επαγωγικής σύζευξης** από τις διαδρομές που ακολουθεί το εκχυόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

1.9 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού

Η προστασία από ενδεχόμενες ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μπορεί να γίνει τόσο με προληπτικά μέτρα, όσο και με μέσα που ελαχιστοποιούν τις συνέπειες τους όταν οι εκφορτίσεις αυτές εμφανιστούν. Τα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνουν [11]:

- **Προστασία από την εμφάνιση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου.** Επειδή το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα λόγω τριβής δύο μονωτικών υλικών ή λόγω τριβής ενός μονωτικού και ενός αγωγού, για να αποτραπεί η εμφάνισή του, είναι επιβεβλημένη η θωράκιση μίας ή και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή, με ένα αγώγιμο στρώμα.
- **Αποτροπή της ανάπτυξης της τάσης φόρτισης.** Αυτό σημαίνει ότι το αναπτυσσόμενο φορτίο στην επιφάνεια του υλικού θα πρέπει να οδηγηθεί στο έδαφος. Σε αυτό μπορούν να συνεισφέρουν αντιστατικά υλικά όπως οι αντιστατικές πλαστικές σακούλες [12].

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

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

Όταν τα ηλεκτρικά κυκλώματα τοποθετούνται σε μονωμένο πλαίσιο, μπορούν να αποτραπούν πιθανές δευτερεύουσες φορτίσεις. Για να είναι αποτελεσματικά, τα πλαίσια πρέπει να μην έχουν οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα μέσω των οποίων μπορούν να συμβούν οι κύριες εκφορτίσεις, είτε άμεσα στα εσωτερικά κυκλώματα είτε έμμεσα μέσω μιας προεξοχής, διακόπτη ή κουμπιού που διαπερνά το πλαίσιο.

Όσον αφορά τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, μερικά παραδείγματα αστοχιών στον εξοπλισμό υπό εξέταση λόγω διαφόρων διαταραχών της δοκιμής ESD είναι:

- **Εκκένωση σε κάποιο pin σύνδεσης,** ζημιώνοντας ένα κύκλωμα, όπου η ενέργεια που διαχέεται, το μέγιστο ρεύμα ή το μεταφερόμενο φορτίο θα καθορίσουν το όριο ζημιάς.

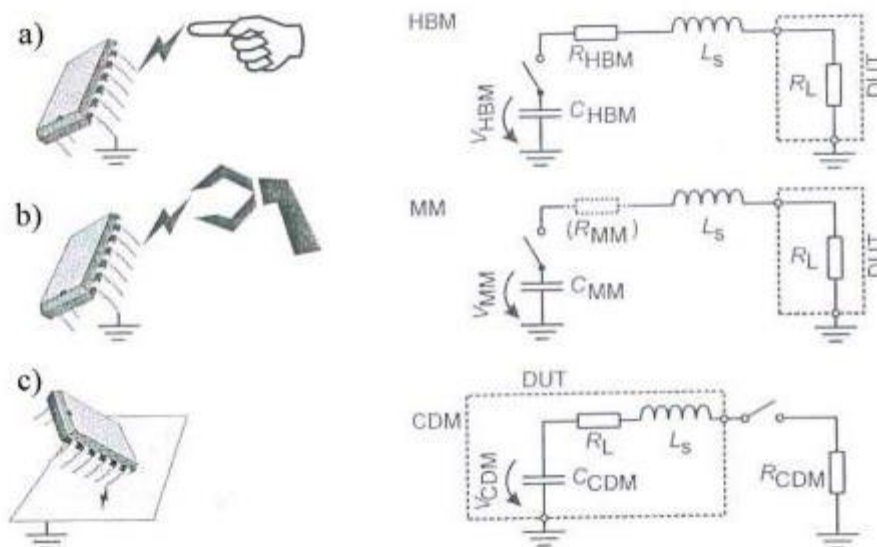
- Εκκένωση μέσω ενός κενού σε ένα πλαστικό περίβλημα που επιτρέπει σε έναν σπινθήρα να φτάσει σε ένα κύκλωμα.
- Εκκένωση σε ένα πλαίσιο της συνολικής διάταξης, με αποτέλεσμα το σύστημα που περιέχεται στο πλαίσιο να επηρεαστεί.

1.10 Μοντέλα Ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Διάφορα καθημερινά είδη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που περιλαμβάνουν διάφορα είδη σωμάτων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ομάδες, οι οποίες μπορούν να μοντελοποιηθούν ξεχωριστά. Αυτό επιτρέπει την εκτίμηση των συγκεκριμένων επιδράσεων που μπορούν να έχουν οι εκφορτίσεις στην πράξη. Τα πιο κοινά μοντέλα είναι:

- Το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος **HBM (Human Body Model)**, που προσομοιώνει εκκενώσεις που πραγματοποιούνται μεταξύ ανθρώπου, χεριού ή δαχτύλου, και αγωγού.
- Το μοντέλο της μηχανής **MM (Machine Model)**, που προσομοιώνει τις εκκενώσεις από το μηχάνημα μέσω μιας συσκευής στο έδαφος.
- Το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής **CDM (Charged Device Model)**, που προσομοιώνει εκφορτίσεις μιας συσκευής όταν φορτίζεται και εκκενώνεται σε ένα γειωμένο αγωγό.

Στο **Σχήμα 1-2** παρουσιάζονται για τα διάφορα μοντέλα ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων οι αντίστοιχες τους ισοδύναμες κυκλωματικές διατάξεις:



Σχήμα 1-2: Παραδείγματα εκφορτίσεων (a,b,c) σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM) αντίστοιχως κι η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC^[12]

Τα μοντέλα αυτά, περιγράφονται από δευτέρας τάξης διαφορικές εξισώσεις οι οποίες μοντελοποιούν μαθηματικά τα παραπάνω **RLC κυκλώματα**. Συγκεκριμένα:

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

όπου:

- **R_{esd}**: η συνολική ωμική αντίσταση σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα και της ωμικής αντίστασης **R_L** της υπό εξέταση συσκευής (**Device Under Test**)
- **C_{esd}**: η χωρητικότητα πυκνωτή ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος με τάση **V_C** και **L_S** η αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης

1.11 Το πρότυπο IEC 61000-4-2

Το **πρότυπο IEC 61000-4-2** αποτελεί το δεύτερο τμήμα (**Section 2**) του τέταρτου μέρους (**Part 4**) του **προτύπου IEC 1000:1995**, το οποίο ασχολείται με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Το διεθνές αυτό πρότυπο αφορά την ανθεκτικότητα των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και περιγράφει τη μέθοδο και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθούνται για τη διενέργεια των δοκιμών ηλεκτροστατικών εκκενώσεων σε ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα, με έμφαση στον οικιακό εξοπλισμό και τα όργανα μέτρησης [13].

Σε αυτό καθορίζονται:

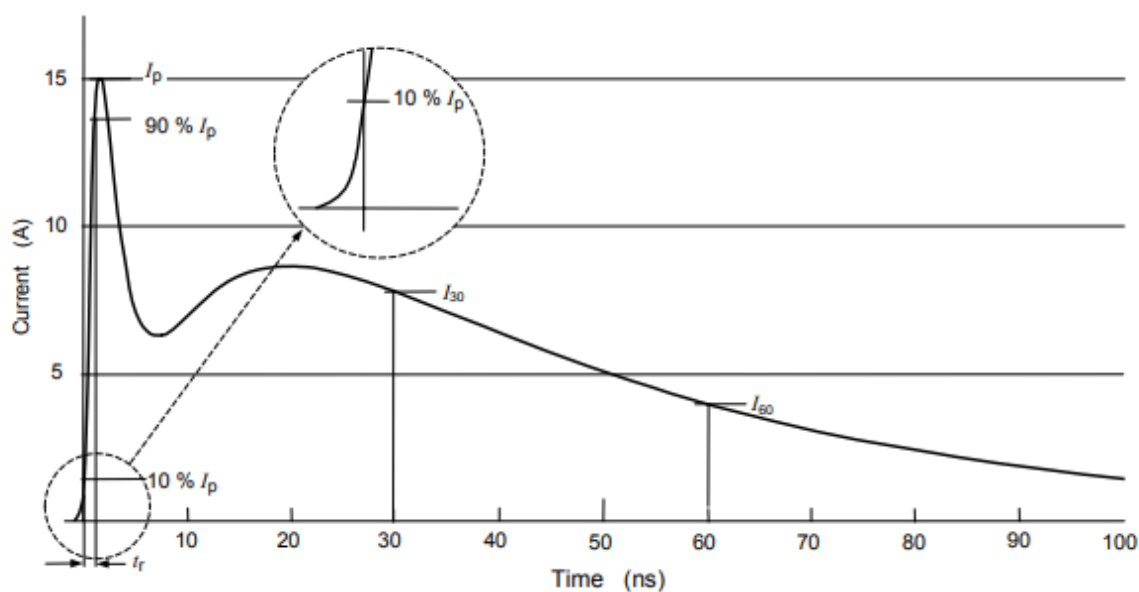
- Η **τυπική κυματομορφή του ρεύματος**.
- Τα διάφορα **επίπεδα τάσεων δοκιμής**.
- Ο **απαιτούμενος εξοπλισμός** για τις δοκιμές.
- Η **διαδικασία των δοκιμών**.

Το ρεύμα εκφόρτισης του παρακάτω σχήματος, μπορεί να χωρισθεί σε δύο μέρη:

- Το **πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος**, το οποίο ονομάζεται και «**αρχική κορυφή**» (**initial peak**) και προσομοιώνει την εκφόρτιση του χεριού.
- Το **δεύτερο μέγιστο (peak) του ρεύματος**, που προσομοιώνει την εκφόρτιση του ανθρωπίνου σώματος.

Σύμφωνα με το πρότυπο, η κυματομορφή του ρεύματος καθορίζεται από τέσσερις βασικές παραμέτρους οι οποίες είναι [14]:

- **Μέγιστο ρεύμα (I_{max}):** Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης (αρχική κορυφή).
- **Χρόνος ανόδου (t_r):** Ο χρόνος που απαιτείται, ώστε το ρεύμα εκφόρτισης να αυξηθεί από την τιμή του 10% της μέγιστης τιμής του, στο 90% της μέγιστης τιμής του.
- **Ρεύμα στα 30 ns (I_{30}):** Η τιμή του ρεύματος 30 ns μετά την χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται για πρώτη φορά κατά τη φάση ανόδου το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.
- **Ρεύμα στα 60 ns (I_{60}):** Η τιμή του ρεύματος 60 ns μετά την χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται για πρώτη φορά κατά τη φάση ανόδου το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.



Σχήμα 1-3: Ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το IEC 61000-4-2^[13]

Στον Πίνακα 1-4 δίδονται οι αναμενόμενες τιμές καθώς και τα περιθώρια απόκλισης των τεσσάρων παραμέτρων για το ρεύμα εκφόρτισης για κάθε επίπεδο τάσης.

Πίνακας 1-4: Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος εκφόρτισης μέσω επαφής

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

Κεφάλαιο 2: Μαγνητικά Υλικά και Φαινόμενα Διασποράς

Οι φερρίτες είναι μια κατηγορία μαγνητικών υλικών που χρησιμοποιούνται ευρέως στην ηλεκτρονική και τις τηλεπικοινωνίες λόγω των μοναδικών μαγνητικών τους ιδιοτήτων. Αυτά τα υλικά είναι ιδανικά για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλές ενεργειακές απώλειες σε υψηλές συχνότητες. Τα φαινόμενα διασποράς αναφέρονται στον τρόπο με τον οποίο τα σωματίδια ή τα κύματα διασκορπίζονται μέσα σε ένα μέσο. Στην περίπτωση των φερριτών, τα φαινόμενα διασποράς παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση και τη βελτίωση των μαγνητικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους. Η έρευνα σε αυτούς τους τομείς μπορεί να οδηγήσει σε νέες καινοτομίες και τεχνολογίες που βελτιώνουν την απόδοση πολλών συστημάτων στην καθημερινή μας ζωή.

2.1 Συντακτικές σχέσεις στα μαγνητικά υλικά

Οι συντακτικές σχέσεις αποτελούν έναν από τους θεμελιώδεις πυλώνες της μελέτης των μαγνητικών πεδίων, καθώς περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των μαγνητικών πεδιακών μεγεθών μέσα σε διάφορα υλικά. Αυτές οι σχέσεις είναι κρίσιμες για την κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών υπό την επίδραση μαγνητικών πεδίων και για το σχεδιασμό μαγνητικών διατάξεων και συστημάτων.

2.1.1 Συντακτική σχέση για κενό χώρο

Η συντακτική σχέση για το μαγνητικό πεδίο στον κενό χώρο έχει τη μορφή [15]:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu_o \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \quad (2.1)$$

όπου:

- μ_o : η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, οι οποίες στο κανονικοποιημένο διεθνές σύστημα μονάδων (SI), ισούται με:

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \quad (2.2)$$

2.1.2 Ισοτροπικά μέσα

Ισοτροπικά ονομάζονται τα μαγνητικά υλικά των οποίων οι μαγνητικές ιδιότητες σε οποιοδήποτε εσωτερικό τους σημείο είναι οι ίδιες προς κάθε κατεύθυνση. Στα ισοτροπικά υλικά, το διάνυσμα $\mathbf{M}$ της μαγνητικής πόλωσης (δηλαδή το αποτέλεσμα της ροής του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του υλικού) είναι ανάλογο με την ένταση $\mathbf{H}$ του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$\mathbf{M}(\mathbf{r}, t) = \chi_m \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \quad (2.3)$$

όπου:

- χ_m : αδιάστατος συντελεστής που ονομάζεται μαγνητική δεκτικότητα του υλικού.

2.1.3 Συντακτική σχέση για ισοτροπικά μέσα

Η συντακτική σχέση για το μαγνητικό πεδίο σε ισοτροπικά μέσα, έχει την παρακάτω μορφή:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \quad (2.4)$$

όπου:

- μ : η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου, η οποία δίνεται από την σχέση:

$$\mu = \mu_0 \cdot (1 + \chi_m) \quad (2.5)$$

Διαπιστώνεται πειραματικά ότι οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν στις περιπτώσεις πλείστων μαγνητικών ισοτροπικών υλικών, υπό την προϋπόθεση ότι η ένταση του πεδίου δεν είναι υπερβολικά μεγάλη. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι τα στερεά, επειδή έχουν κρυσταλλική δομή δεν μπορούν να θεωρηθούν ισοτροπικά σε ατομική κλίμακα. Για μεγαλύτερα όμως τμήματα τέτοιων υλικών τα οποία αποτελούνται από τυχαίως προσανατολισμένες στοιχειώδεις κρυσταλλικές περιοχές, δύναται να θεωρηθεί σε μακροσκοπική κλίμακα ότι παρουσιάζουν ισοτροπική συμπεριφορά.

2.1.4 Ομογενή και ανομοιογενή μέσα

Όταν οι τιμή της **μαγνητικής διαπερατότητας** μ είναι ίδια σε όλα τα σημεία του υλικού, τότε το υλικό αυτό ονομάζεται ομογενές (ή ομοιόμορφο). Στην αντίθετη περίπτωση, χαρακτηρίζεται ως ανομοιογενές (ή ανομοιόμορφο).

2.1.5 Ανισοτροπικά μέσα

Ανισοτροπικά μέσα ονομάζονται τα ανομοιογενή μαγνητικά υλικά, των οποίων οι μαγνητικές ιδιότητες εξαρτώνται από την κατεύθυνση. Υλικά που εμφανίζουν μαγνητική ανισοτροπία, όπως για παράδειγμα οι φερρίτες, περιγράφονται με σχέσεις της μορφής [16]:

$$B_x = \mu_{xx} \cdot H_x + \mu_{xy} \cdot H_y + \mu_{xz} \cdot H_z \quad (2.6)$$

$$B_y = \mu_{yx} \cdot H_x + \mu_{yy} \cdot H_y + \mu_{yz} \cdot H_z \quad (2.7)$$

$$B_z = \mu_{zx} \cdot H_x + \mu_{zy} \cdot H_y + \mu_{zz} \cdot H_z \quad (2.8)$$

Άρα, μπορούμε να ορίσουμε τον τανυστή:

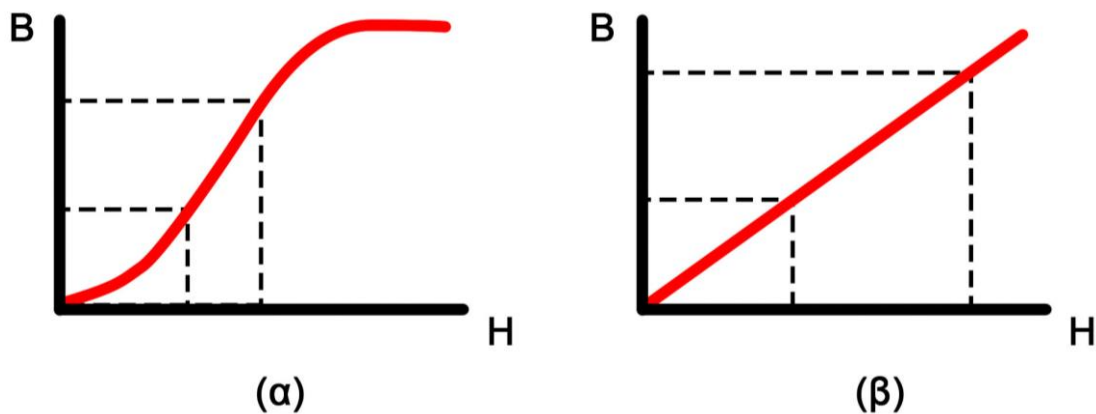
$$\bar{\mu} = \mu_{ij}, (i, j) = \{x, y, z\} \quad (2.9)$$

Ωστε:

$$B(r, t) = \bar{\mu} \cdot H(r, t) \quad (2.10)$$

2.1.6 Γραμμικά και μη-γραμμικά μέσα

Όταν μία ή περισσότερες από τις συντακτικές παραμέτρους είναι συνάρτηση των πεδιακών μεγεθών, το αντίστοιχο μέσο χαρακτηρίζεται ως μη γραμμικό. Στην αντίθετη περίπτωση, το μέσο ονομάζεται γραμμικό. Για παράδειγμα, τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι μη γραμμικά και βρίσκουν εκτεταμένη εφαρμογή στο σχεδιασμό μαγνητικών κυκλωμάτων.



Σχήμα 2-1: Μαγνητικό μη γραμμικό (α) και γραμμικό (β) μέσο^[16]

2.2 Ταξινόμηση μαγνητικών υλικών

Αναφορικά με τη μαγνητική τους συμπεριφορά, τα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες [17] [18]:

- Διαμαγνητικά (diamagnetic)
- Παραμαγνητικά (paramagnetic)
- Σιδηρομαγνητικά (ferromagnetic)
- Αντισιδηρομαγνητικά (antiferromagnetic)
- Σιδηριμαγνητικά (ferrimagnetic)

Οι διαφορές μεταξύ αυτών των πέντε κατηγοριών υλικών θα αναπτυχθούν σε επόμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου. Σε γενικές γραμμές, η εκδήλωση της μαγνητικής συμπεριφοράς μπορεί να αποδοθεί στην περιστροφή των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα,

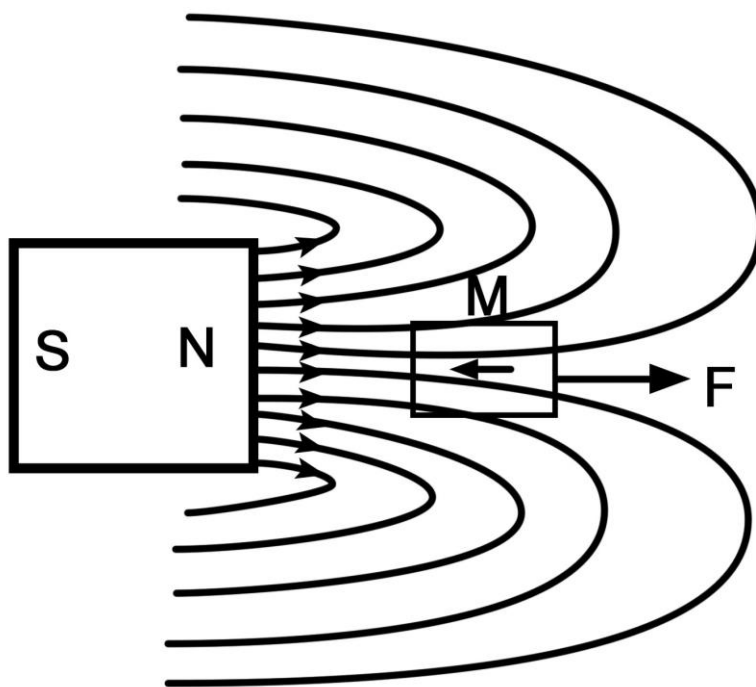
στην περιστροφή τους (spin) γύρω από τον άξονα τους και στην περιστροφή (spin) του πυρήνα γύρω από τον άξονα του. Παρακάτω αναλύονται συνοπτικά οι ιδιότητες των παραπάνω κατηγοριών μαγνητικών υλικών.

2.2.1 Διαμαγνητικά υλικά

Τα διαμαγνητικά υλικά έχουν συνήθως **αρνητική και μικρή μαγνητική επιδεκτικότητα**. Ο κρύσταλλος του πυριτίου, για παράδειγμα, είναι διαμαγνητικός και έχει:

$$\chi_m = -5,2 \cdot 10^{-6} \quad (2.11)$$

Η διαπερατότητα των διαμαγνητικών υλικών είναι **ελαφρώς μικρότερη από τη μονάδα**. Όταν μία διαμαγνητική ουσία, όπως ο κρύσταλλος του πυριτίου, τοποθετηθεί εντός ενός μαγνητικού πεδίου, τότε η **μαγνήτιση $\mathbf{M}$** του υλικού είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση από το εφαρμοζόμενο πεδίο $\mu_0 \cdot \mathbf{H}$ και το **πεδίο $\mathbf{B}$** που δημιουργείται εντός του υλικού είναι μικρότερο από το $\mu_0 \cdot \mathbf{H}$. Το γεγονός ότι η επιδεκτικότητα είναι αρνητική μπορεί να ερμηνευτεί λέγοντας ότι η διαμαγνητική ουσία τείνει να απωθήσει το εφαρμοζόμενο πεδίο. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2-2**, αν τοποθετήσουμε ένα διαμαγνητικό δείγμα εντός ενός μη ομογενούς μαγνητικού πεδίου, τότε η **μαγνήτιση $\mathbf{M}$** του υλικού είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση από το **πεδίο $\mathbf{B}$** και στο δείγμα επενεργεί μια δύναμη που το ωθεί προς τις περιοχές ασθενέστερου πεδίου.



Σχήμα 2-2: Διαμαγνητικό υλικό εντός μη ομογενούς μαγνητικού πεδίου^[18]

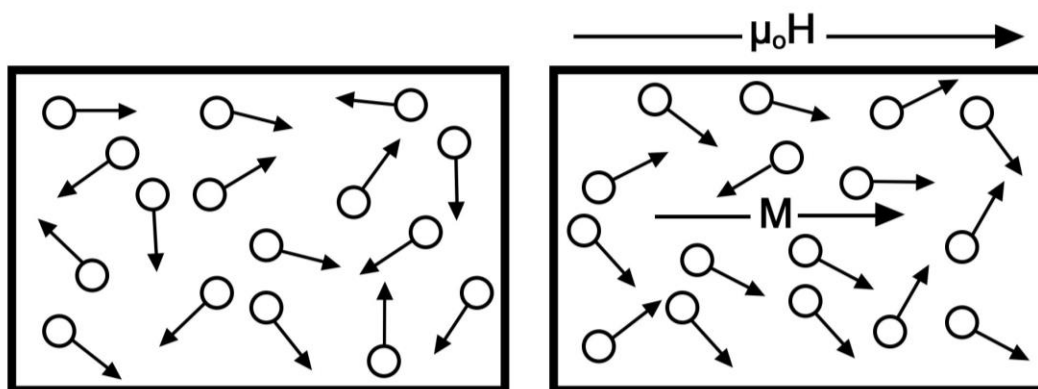
Ακόμη, μια ουσία είναι διαμαγνητική, κι όταν τα άτομα που την αποτελούν έχουν συμπληρωμένες στιβάδες και υποστιβάδες. Αυτό σημαίνει, ότι απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου κανένα άτομο δεν έχει μόνιμη μαγνητική ροπή. Οι ομοιοπολικοί κρύσταλλοι και πολλοί ιοντικοί κρύσταλλοι είναι διαμαγνητικά υλικά, αφού τα άτομά τους έχουν συμπληρωμένες υποστιβάδες.

2.2.2 Παραμαγνητικά υλικά

Η μαγνητική επιδεκτικότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι θετική και μικρή. Το αέριο διοξείδιο του αζώτου, για παράδειγμα, είναι παραμαγνητικό και έχει:

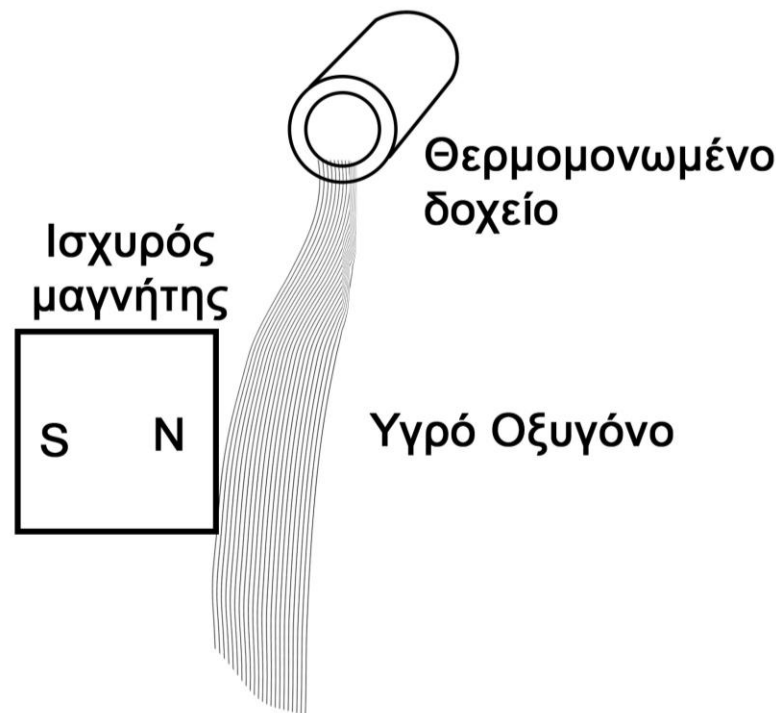
$$\chi_m = 2,1 \cdot 10^{-5} \quad (2.12)$$

Κάθε μόριο έχει μαγνητική διπολική ροπή $\mu_{\text{μορ}}$. Απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου, και λόγω των τυχαίων συγκρούσεων μεταξύ των μορίων, οι ροπές των μορίων έχουν τυχαίους προσανατολισμούς. Η μαγνήτιση του αερίου είναι μηδέν. Όταν εφαρμόζεται ένα πεδίο, τότε οι μοριακές μαγνητικές ροπές αποκτούν διάφορους προσανατολισμούς. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2-3**, ο βαθμός της ευθυγράμμισης της $\mu_{\text{μορ}}$ με το πεδίο, και επομένως η **μαγνήτιση M** , αυξάνεται όσο μεγαλώνει και το γινόμενο $\mu_o \cdot H$.



Σχήμα 2-3: Σταδιακή ευθυγράμμιση μορίων παραμαγνητικού υλικού μέσω εξωτερικού πεδίου^[18]

Επίσης, η **μαγνήτιση M** συνήθως μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτό εξηγείται με βάση το ότι στις υψηλότερες θερμοκρασίες, λαμβάνουν χώρα περισσότερες μοριακές συγκρούσεις, κι η ευθυγράμμιση των μοριακών μαγνητικών ροπών με το πεδίο καταστρέφεται. Όταν μία παραμαγνητική ουσία βρεθεί μέσα σε ένα μη ομογενές μαγνητικό πεδίο, τότε η επαγόμενη **μαγνήτιση M** είναι παράλληλη με το **πεδίο B** , και θα ασκείται συνολικά μία δύναμη προς περιοχές με ισχυρότερο πεδίο. Στο **Σχήμα 2-4**, για παράδειγμα παρατηρούμε ότι αν κουνήσουμε ένα δοχείο δίπλα σε έναν ισχυρό μαγνήτη, τότε το υγρό έλκεται από το μαγνήτη.



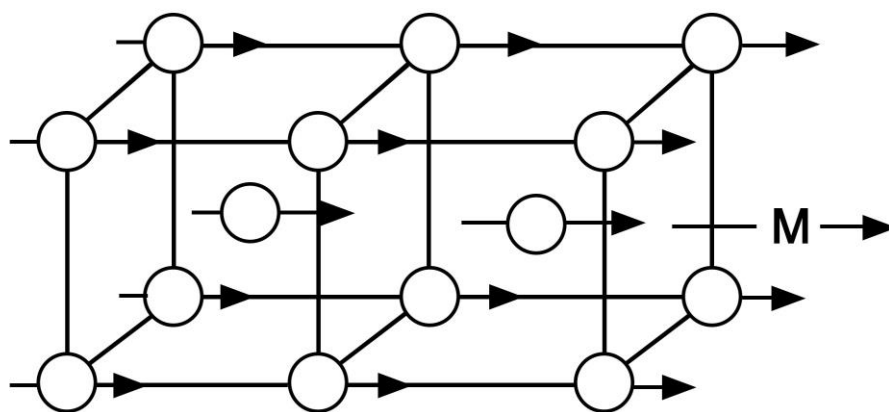
Σχήμα 2-4: Έλξη υγρού οξυγόνου από ισχυρό μαγνήτη^[18]

Τέλος, πολλά μέταλλα όπως το μαγνήσιο ($\chi_m = 1,2 \cdot 10^{-5}$) είναι επίσης παραμαγνητικά. Η προέλευση του παραμαγνητισμού σε αυτά τα μέταλλα είναι η ευθυγράμμιση των spin της πλειοψηφίας των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας με το πεδίο.

2.2.3 Σιδηρομαγνητικά υλικά

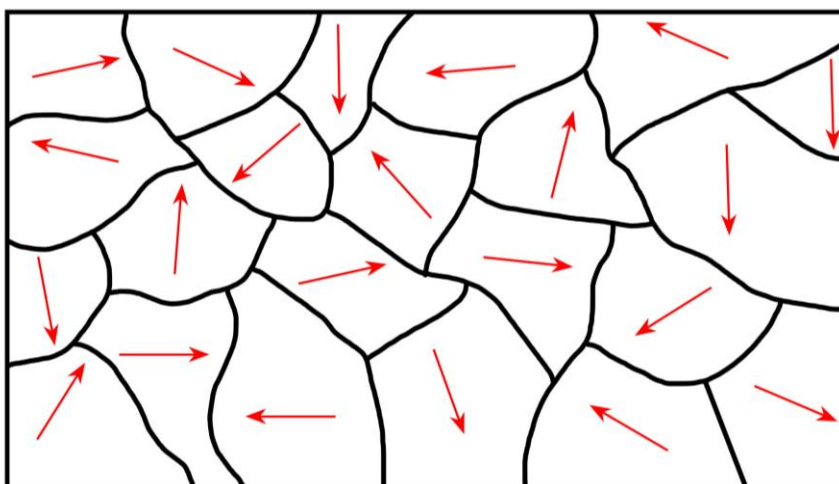
Σιδηρομαγνητικά ονομάζονται τα υλικά (π.χ. ο σίδηρος) που έχουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση ακόμα και απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η μαγνητική τους επιδεκτικότητα χ_m είναι θετική και μάλιστα, πολύ μεγάλη (συγκριτικά με άλλα υλικά άπειρη πολλές φορές) και επιπλέον εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η σχέση ανάμεσα στη **μαγνήτιση M** και το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο $\mu_0 \cdot H$ είναι εξαιρετικά μη γραμμική. Όταν το πεδίο είναι αρκετά μεγάλο, τότε η **μαγνήτιση M** του σιδηρομαγνήτη φτάνει στον κορεσμό.

Η ερμηνεία για το φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού στηρίζεται στη κβαντομηχανική αλληλεπίδραση ανταλλαγής μεταξύ των ατόμων του υλικού. Η αλληλεπίδραση αυτή προκαλεί το χωρισμό του υλικού σε περιοχές με μόνιμη μαγνήτιση. Στο **Σχήμα 2-5** απεικονίζεται μία **μαγνητική περιοχή (magnetic domain)** ενός τυπικού σιδηρομαγνητικού υλικού. Η περιοχή, λόγω του παραλληλισμού των μαγνητικών ροπών των ατόμων **Fe** έχει συνολικά ένα διάνυσμα **μαγνήτισης M** . Επειδή όλες οι ατομικές μαγνητικές ροπές είναι παράλληλες μεταξύ τους, λέμε ότι η περιοχή αυτή έχει **μαγνητική τάξη**.



Σχήμα 2-5: Μαγνητική περιοχή ενός σιδηρομαγνητικού υλικού^[18]

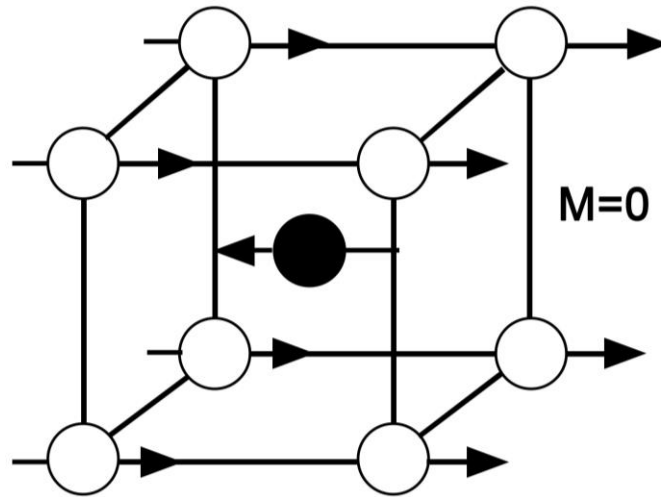
Αξίζει να αναφερθεί ότι το φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού εξαφανίζεται όταν το υλικό θερμανθεί πάνω από μία κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται **θερμοκρασία Curie T_C** , όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2-6**. Για θερμοκρασίες πάνω από την T_C , ο σιδηρομαγνητισμός χάνεται και το υλικό γίνεται παραμαγνητικό.



Σχήμα 2-6: Θερμοκρασία Curie T_C - Επαναφορά αταξίας (παραμαγνητισμός)^[16]

2.2.4 Αντισιδηρομαγνητικά υλικά

Τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά, όπως το χρώμιο, χαρακτηρίζονται από μικρή αλλά θετική μαγνητική επιδεκτικότητα. Σε αντίθεση με τα σιδηρομαγνητικά υλικά, δεν έχουν παραμένουσα μαγνήτιση απουσία μαγνητικού πεδίου. Όμως εμφανίζουν μαγνητική τάξη με τέτοιο τρόπο ώστε οι μαγνητικές ροπές των ατόμων που βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις να έχουν αντίθετη φορά και να αλληλοαναιρούνται. Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί πως οι προσανατολισμοί των ατομικών μαγνητικών ροπών των γειτονικών ατόμων είναι αντίθετοι (οφείλεται στις κβαντομηχανικές δυνάμεις ανταλλαγής). Επομένως, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2-7**, το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου δεν υπάρχει μαγνήτιση:

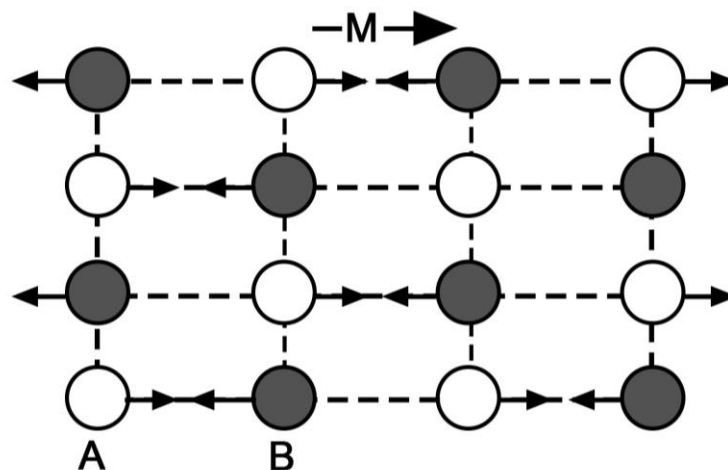


Σχήμα 2-7: Αντισιδηρομαγνητικός κρύσταλλος χρωμίου (Cr)^[18]

Τέλος, ας αναφερθεί κι ότι η αντισιδηρομαγνητική συμπεριφορά των υλικών εμφανίζεται κάτω από μία κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται **θερμοκρασία Néel T_N** . Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της T_N , τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά.

2.2.5 Σιδηριμαγνητικά υλικά

Τα σιδηριμαγνητικά υλικά, όπως οι **φερρίτες**, παρουσιάζουν κάτω από την κρίσιμη **θερμοκρασία Curie T_C** , παρόμοια μαγνητική συμπεριφορά με τους σιδηρομαγνήτες. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της **Curie T_C** , όπως οι σιδηρομαγνήτες κι αυτά γίνονται παραμαγνητικά. Γενικότερα, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2-8**, η ερμηνεία του σιδηριμαγνητισμού στηρίζεται στη μαγνητική τάξη:



Σχήμα 2-8: Μαγνητική τάξη σε σιδηριμαγνητικό κρύσταλλο^[18]

Συγκεκριμένα, τα spin όλων των ατόμων A έχουν την ίδια φορά, ενώ τα spin όλων των ατόμων B έχουν την αντίθετη φορά από τα spin των ατόμων A. Αφού η μαγνητική ροπή των

ατόμων A είναι μεγαλύτερη από τη μαγνητική ροπή των ατόμων B, θα υπάρχει μία **συνολική μαγνήτιση M** στον κρύσταλλο. Αντίθετα απ' ό,τι συμβαίνει στην περίπτωση των αντισιδηρομαγνητικών υλικών, οι μαγνητικές ροπές μολονότι έχουν αντίθετη φορά, έχουν όμως διαφορετικό μέτρο κι έτσι δεν αλληλοαναιρούνται. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι ότι ο κρύσταλλος είναι μαγνητισμένος ακόμη και απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου.

Τέλος, οι σιδηριμαγνητικοί κρύσταλλοι είναι συνήθως μονωτές κι έτσι δεν δημιουργούνται δινορεύματα απωλειών. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων.

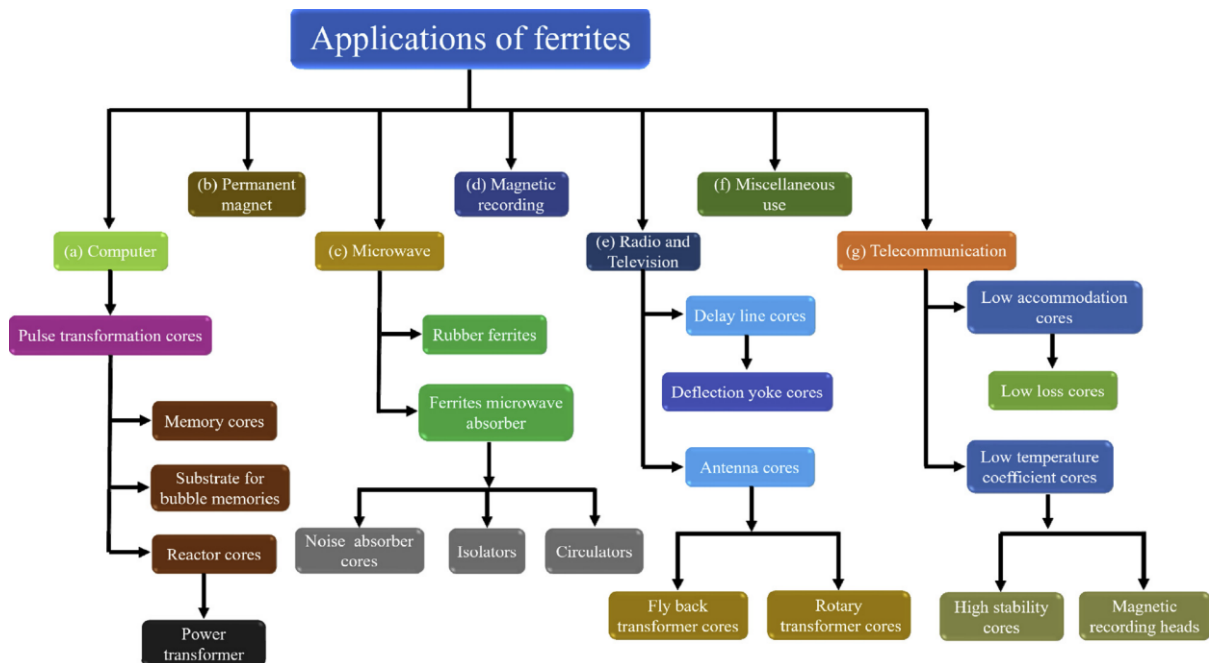
2.2.6 Φερρίτες

Εξέχουσα θέση μεταξύ των σιδηριμαγνητικών υλικών έχουν οι **φερρίτες**, μία ομάδα χημικών ενώσεων με χημικό τύπο XFe_2O_4 , όπου το X είναι ένα **δισθενές μέταλλο**, όπως **Fe, Co, Ni, Mn, Mg, Cu, Zn, Cd** (ή μείγμα απ' αυτά). Ο **φερρίτης Mn** για παράδειγμα έχει χημικό τύπο $MnFe_2O_4$. Επειδή οι ενώσεις αυτές είναι οξειδωμένες (**ανάμικτα οξειδία μεταβατικών μετάλλων**), οι ειδικές αγωγιμότητες τους είναι πολύ μικρότερες από εκείνες των μετάλλων. Ανάλογα με τη σύνθεση των φερριτών, αυτές κυμαίνονται μεταξύ **1 έως 10^{-4} S/m**, τιμές που είναι συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες των ημιαγωγών και πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερες απ' αυτήν του σιδήρου (**10^7 S/m**) [16].

Τα υλικά αυτά είναι συνήθως μονωτές και επομένως, δεν αναπτύσσονται σε αυτά δινορεύματα απωλειών. Τα υλικά αυτά είναι ιδανικά για χρήση σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, όπου οι απώλειες λόγω δινορευμάτων καθιστούν απαγορευτική τη χρήση οποιουδήποτε υλικού με μη μηδενική αγωγιμότητα. Συγκεκριμένα, συναντώνται σε **πυρήνες μετασχηματιστών** και σε **μικροκυματικές εφαρμογές**, λόγω του ότι μικροκυματικά πεδία σχηματίζουν έντονα μαγνητικά πεδία, τα οποία δύνανται να εισέλθουν σε υλικά όπως οι φερρίτες, ενώ δεν δύνανται να εισέλθουν σ' έναν αγωγό σιδήρου, επειδή το **βάθος διείσδυσης (επιδερμικό βάθος)** σ' αυτόν είναι πολύ μικρό. Ακόμη, μολονότι χαρακτηρίζονται από υψηλή αρχική διαπερατότητα και χαμηλές απώλειες, δεν έχουν το ίδιο μεγάλη μαγνήτιση κορεσμού όσο οι σιδηρομαγνήτες, και επιπλέον, η θερμοκρασία χρήσεώς τους (που καθορίζεται από τη θερμοκρασία Curie) είναι μικρότερη.

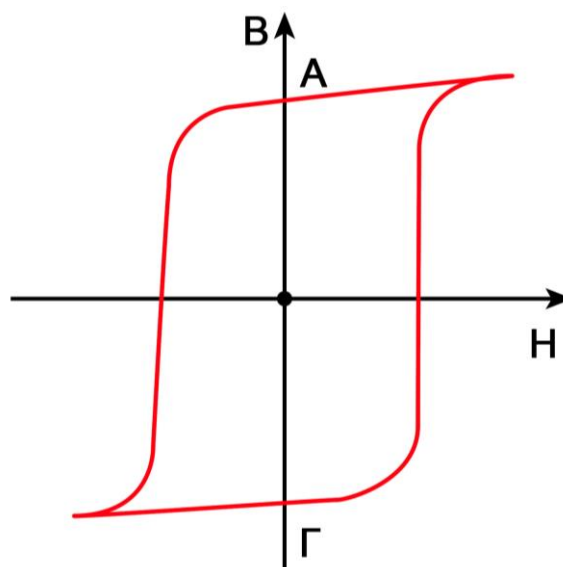
Υπάρχουν πολλοί τύποι εμπορικών φερριτών. Ανάλογα με την εφαρμογή όπου θα χρησιμοποιηθούν, διαφέρουν στις ανοχές απωλειών τους και στο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας. Οι **φερρίτες MnZn** για παράδειγμα έχουν υψηλή αρχική διαπερατότητα (συνήθως **$2 \cdot 10^3$**) αλλά το εύρος χρήσης τους δεν ξεπερνά το **1 MHz**, ενώ οι φερρίτες **NiZn**

από την άλλη έχουν μικρότερη αρχική διαπερατότητα (συνήθως. 10^2) αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι τα **200 MHz**. Η αρχική διαπερατότητα μειώνεται εν γένει στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων, αυξανόμενης της συχνότητας. Στο **Σχήμα 2-9** φαίνεται το σύνολο των εφαρμογών των φερριτών [18]:



Σχήμα 2-9: Εφαρμογές Φερριτών^[19]

Γενικότερα, υπάρχουν σκληροί και μαλακοί φερρίτες. Πολλοί φερρίτες, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2-10**, παρουσιάζουν σχεδόν ορθογωνικούς βρόχους υστέρησης:



Σχήμα 2-10: Βρόχος υστέρησης φερρίτη^[16]

Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι τα υλικά αυτά εμφανίζουν δύο δυνατές (δυναδικές) καταστάσεις μαγνήτισης, οι οποίες παρουσιάζονται στα σημεία Α και Γ του σχήματος.

2.3 Φαινόμενα Διασποράς

Οι συντακτικές σχέσεις του μαγνητικού πεδίου που αναλύθηκαν διεξοδικώς παραπάνω, θεωρώντας το μ ως σταθερή ποσότητα, ισχύουν μόνο στην στατική περίπτωση και κατά προσέγγιση για πεδία χαμηλής συχνότητας. Στην περίπτωση που έχουμε ταχέως μεταβαλλόμενα πεδία η τιμή του $\mathbf{B}$ εξαρτάται όχι μόνο από την τιμή του $\mathbf{H}$ τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, αλλά και από τις τιμές που είχαν οι ποσότητες αυτές τις προηγούμενες χρονικές στιγμές [20].

Πιο συγκεκριμένα, είναι δυνατόν κατά τη χρονική στιγμή t , η τιμή του $\mathbf{B}$ να μην εξαρτάται μόνο από την τιμή του $\mathbf{H}$, αλλά και από το φαινόμενο που ονομάζουμε ως **χρονική διασπορά**. Υπάρχουν επίσης μέσα, στα οποία η τιμή του $\mathbf{B}$ στη θέση $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ εξαρτάται όχι μόνο από την τιμή της ποσότητας $\mathbf{H}$ στη συγκεκριμένη θέση, αλλά και από τις τιμές των ποσών αυτών σε γειτονικές θέσεις. Το φαινόμενο αυτό χαρακτηρίζεται **χωρική διασπορά**. Βεβαίως υπάρχουν και άλλα είδη διασποράς που σχετίζονται με διαφορετικά μεγέθη από τον χρόνο και την θέση, όπως για παράδειγμα την θερμοκρασία. Επομένως, μιας και ειδικότερα τα φαινόμενα χρονικής διασποράς είναι υπαρκτά σε πληθώρα μέσων και εφαρμογών κρίνεται αναγκαία η λεπτομερέστερη ανάλυση τους, η οποία για λόγους απλότητας κρίνεται ότι γίνεται ευκολότερα στο πεδίο της συχνότητας. Ας δούμε, λοιπόν, την νέα μορφή των συντακτικών σχέσεων που προκύπτει με την περαιτέρω εξειδίκευση της ανάλυσής μας.

2.3.1 Συντακτική σχέση σε μέσα με χρονική διασπορά

Έστω ένα απλό μέσο, το οποίο δύναται να είναι ακόμη και ανομοιογενές, με χρονοσταθερή **μαγνητική διαπερατότητα** μ . Για τους φασιθέτες της **μαγνητικής επαγωγής** $\mathbf{B}$ και της **έντασης του μαγνητικού πεδίου** $\mathbf{H}$, ισχύει:

$$\bar{\mathbf{B}} = \text{Re}\{\mathbf{B}(\mathbf{r}) \cdot e^{j\omega t}\} = \text{Re}\{\mu \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}) \cdot e^{j\omega t}\} = \mu \cdot \text{Re}\{\mathbf{H}(\mathbf{r}) \cdot e^{j\omega t}\} = \mu \cdot \bar{\mathbf{H}} \quad (2.13)$$

Όταν, όμως, το μέσο εμφανίζει χρονική διασπορά, η παραπάνω πολλαπλασιαστική σχέση δεν είναι εφαρμόσιμη. Επειδή όμως το παραπάνω αποτέλεσμα έχει την μορφή ενός γινομένου μετασχηματισμών Fourier, αυτό σημαίνει πως η συντακτική σχέση στο πεδίο του χρόνου για μέσο με χρονική διασπορά θα προκύψει από την πράξη της συνέλιξης:

Πιο συγκεκριμένα:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^t \hat{\mu}(\mathbf{r}, t - t') \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}, t') dt' \quad (2.14)$$

όπου $\hat{\mu}$ η πραγματική χρονική συνάρτηση του χρόνου της μαγνητικής διαπερατότητας η οποία στο πεδίο συχνότητας θα δίνεται από την σχέση:

$$\mu(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \hat{\mu}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (2.15)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει η σχέση που μας δίνει την σύνθετη μαγνητική διαπερατότητα η οποία θα έχει την παρακάτω μορφή [21]:

$$\mu(\omega) = \mu'(\omega) - j \cdot \mu''(\omega) \quad (2.16)$$

Στην συνέχεια, θα γίνει μια αναφορά στα διάφορα μοντέλα που προσομοιώνουν φαινόμενα διασποράς στα μαγνητικά υλικά.

2.3.2 Μοντέλα Φαινομένων Διασποράς

Παρακάτω αναγράφονται διάφορα φαινόμενα διασποράς που έχουν χρησιμοποιηθεί στην μοντελοποίηση διαφόρων εφαρμογών, ταξινομημένα σε 3 κατηγορίες [22] [23]:

A) Χρονική Διασπορά (Temporal Dispersion):

Με τον όρο χρονική διασπορά αναφερόμαστε στον τρόπο με τον οποίο η απόκριση ενός συστήματος ή υλικού αλλάζει με το χρόνο μετά την εφαρμογή μιας διέγερσης. Τα μοντέλα σε αυτή την κατηγορία εξετάζουν την καθυστέρηση ή την εξασθένηση της απόκρισης με την πάροδο του χρόνου. Είναι σημαντικά για τη μελέτη μεταβατικών φαινομένων και τη δυναμική των υλικών σε μη σταθερές καταστάσεις.

Ειδικά Μοντέλα Χρονικής Διασποράς που χρησιμοποιούνται:

- **Αναταξινόμηση Χρονικής Διασποράς:** Μοντελοποιεί την επανεμφάνιση διασποράς υπό συγκεκριμένες συνθήκες.
- **Διασπορά Μεταβατικής Κατάστασης:** Μοντελοποιεί την συμπεριφορά του υλικού κατά τη διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων.
- **Μη Γραμμική Χρονική Διασπορά:** Μοντελοποιεί τη μη γραμμική εξάρτηση της απόκρισης από τη διέγερση.
- **Χαλαρωτική Διασπορά:** Μοντελοποιεί την εξασθένηση της απόκρισης μετά την απομάκρυνση της διέγερσης.

B) Φασματική Διασπορά (Spectral Dispersion):

Με τον όρο φασματική διασπορά αναφερόμαστε στον τρόπο με τον οποίο οι ιδιότητες ενός υλικού ή συστήματος μεταβάλλονται με τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου σήματος. Είναι κρίσιμη για την κατανόηση της απόκρισης υλικών σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, ειδικά σε εφαρμογές RF.

Ειδικά Μοντέλα Φασματικής Διασποράς που χρησιμοποιούνται:

- **Διασπορά κατά Debye:** Μοντελοποιεί την πολωτική χαλάρωση του υλικού η οποία λαμβάνει χώρα με μια χαρακτηριστική συχνότητα χαλάρωσης.
- **Διασπορά Lorentzian:** Μοντελοποιεί την συντονιστική συμπεριφορά του υλικού στις υψηλές συχνότητες.
- **Επαγωγική Διασπορά:** Μοντελοποιεί τα επαγωγικά φαινόμενα σε συστήματα ή υλικά.
- **Αντηχιακή Διασπορά:** Διασπορά από συντονιστικά φαινόμενα.
- **Διασπορά Γραμμικής Απόκρισης:** Μοντελοποιεί την διασπορά ως γραμμική συνάρτηση της διέγερσης.
- **Θερμομαγνητική Διασπορά:** Μοντελοποιεί τη μεταβολή της μαγνητικής απόκρισης με τη θερμοκρασία.
- **Διασπορά Λανθάνουσας Αντίδρασης:** Μοντελοποιεί τη διασπορά που μπορεί να εκδηλώνεται λόγω διαφόρων ειδικών συνθηκών.

Γ) Μαγνητοκρυσταλλική Ανισοτροπία (Magnetocrystalline Anisotropy):

Η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία αναφέρεται στην εξαρτώμενη από την κατεύθυνση μαγνητική απόκριση ενός υλικού λόγω της κρυσταλλικής του δομής. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει την ανάλυση της κατευθυντικής εξάρτησης των μαγνητικών ιδιοτήτων και είναι σημαντική για υλικά με κρυσταλλική δομή.

Ειδικά Μοντέλα Μαγνητοκρυσταλλικής Ανισοτροπίας που χρησιμοποιούνται:

- **Επιφανειακή Ανισοτροπία:** Μοντελοποιεί τις ιδιότητες της επιφάνειας που επηρεάζουν την ανισοτροπία.
- **Χωρική Ανισοτροπία:** Μοντελοποιεί τις ιδιότητες της κατεύθυνσης στον χώρο που επηρεάζουν την ανισοτροπία.
- **Θερμοκρασιακή Ανισοτροπία:** Μοντελοποιεί τη μεταβολή των ιδιοτήτων που σχετίζονται με την θερμοκρασία που επηρεάζουν την ανισοτροπία.

2.3.3 Ανάλυση μαγνητικής διασποράς με χρήση του Debye 1st Order Model

Ο **Peter Debye**, ένας εξέχων φυσικός της εποχής του **20^{ου} αιώνα**, εισήγαγε ένα μοντέλο για την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς των κρυστάλλων. Αν και το αρχικό μοντέλο Debye επικεντρώθηκε κυρίως στις θερμικές ιδιότητες και την ειδική θερμότητα των κρυστάλλων, οι βασικές αρχές του βρήκαν εφαρμογή και στη μαγνητική θεωρία και συγκεκριμένα, στην μαγνητική διασπορά. Η **διασπορά κατά Debye** για μαγνητικά υλικά περιγράφει πώς η μαγνητική διαπερατότητα ενός υλικού εξαρτάται από τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Η **μαγνητική διαπερατότητα μ** είναι ένα μέτρο της ευκολίας του υλικού να μαγνητιστεί [24].

Η εξίσωση που περιγράφει τη σύνθετη συχνό-εξαρτώμενη μαγνητική διαπερατότητα είναι:

$$\mu(\omega) = \mu_{\infty} + \frac{\mu_s - \mu_{\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (2.17)$$

- **$\mu(\omega)$** : η συχνό-εξαρτώμενη μαγνητική διαπερατότητα
- **μ_s** : η στατική μαγνητική διαπερατότητα (για $\omega = 0$)
- **μ_{∞}** : είναι η μαγνητική διαπερατότητα σε πολύ υψηλές συχνότητες (για $\omega \rightarrow \infty$)
- **τ** : είναι ο χρόνος χαλάρωσης (**dispersion time**)

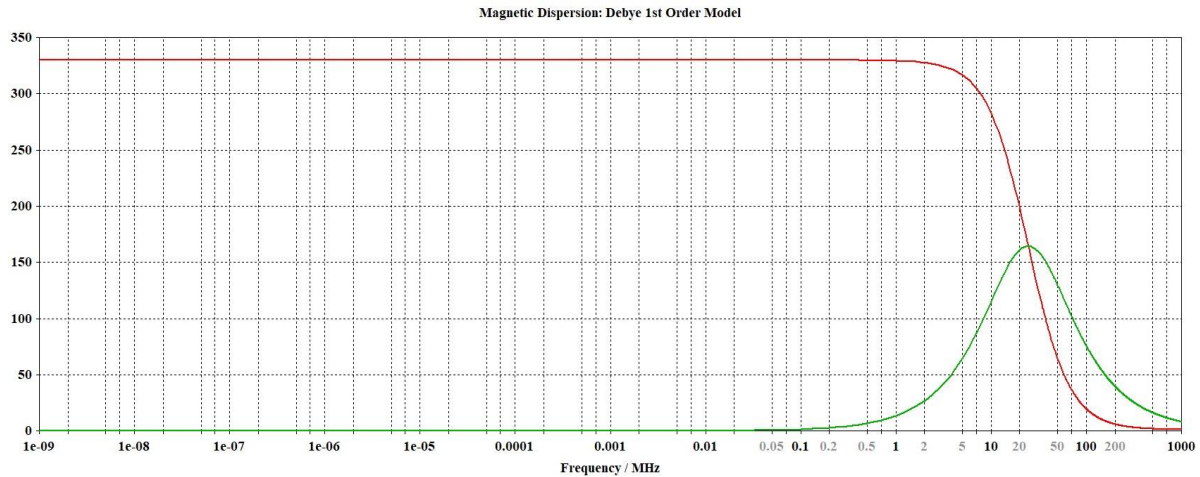
Για να κατανοήσουμε όμως, τη συμπεριφορά της μαγνητικής διαπερατότητας με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, χωρίζουμε την **$\mu(\omega)$** στο **πραγματικό και φανταστικό της μέρος**:

$$Re\{\mu(\omega)\} = \mu'(\omega) = \mu_{\infty} + \frac{\mu_s - \mu_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.18)$$

$$Im\{\mu(\omega)\} = \mu''(\omega) = \frac{(\mu_s - \mu_{\infty})\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.19)$$

όπου:

- **$\mu'(\omega)$** : το πραγματικό μέρος της μαγνητικής διαπερατότητας το οποίο αντιπροσωπεύει την αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας στο υλικό
- **$\mu''(\omega)$** : το φανταστικό μέρος της μαγνητικής διαπερατότητας το οποίο αντιπροσωπεύει τις απώλειες ενέργειας λόγω της μαγνήτισης.



Σχήμα 2-11: Μαγνητική διασπορά - Debye 1st Order Model

Γενικώς, ο **χρόνος χαλάρωσης (τ)** είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που καθορίζει την ταχύτητα με την οποία το υλικό αποκρίνεται σε αλλαγές του μαγνητικού πεδίου. Για να βρούμε, λοιπόν, τον χρόνο χαλάρωσης (**dispersion time**), θα μελετήσουμε τη κορυφή της καμπύλης $\mu''(\omega)$ (πράσινη καμπύλη στο **Σχήμα 2-11**):

$$\frac{d(\mu''(\omega))}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left[\frac{(\mu_s - \mu_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \right] = \frac{(\mu_s - \mu_\infty)\tau}{1 + (\omega\tau)^2} [1 - (\omega\tau)^2]$$

Λύνω:

$$\frac{d(\mu''(\omega))}{d\omega} = 0 \Rightarrow 1 - (\omega\tau)^2 = 0$$

Επομένως, ο χρόνος χαλάρωσης (dispersion time) μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\tau = \frac{1}{\omega_{peak}} \quad (2.20)$$

όπου:

- **ω_{peak} :** η γωνιακή συχνότητα στην κορυφή της $\mu''(\omega)$.

Κεφάλαιο 3: Αισθητήρες ρεύματος υψηλών RF συχνοτήτων (current probes)

Ένα από τα πιο πολύτιμα εργαλεία στην διάθεση ενός μηχανικού ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας EMC για τις μετρήσεις του, αποτελούν κι οι **αισθητήρες ρεύματος (current probes) υψηλών RF συχνοτήτων** ή αλλιώς γνωστοί και ως **αμπεροτσιμπίδες**. Οι αισθητήρες ρεύματος παράγουν και μετρούν ρεύματα RF συχνοτήτων, συνδυάζοντας μεγάλη διαγνωστική ικανότητα και ευκολία χρήσης. Χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανικές και επιστημονικές εφαρμογές, και έχουν σχεδιαστεί για να παράγουν και να μετρούν ρεύματα RF συχνοτήτων χωρίς να έχουν άμεση επαφή με τον αγωγό της πηγής. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να γίνουν είτε σε απλά καλώδια είτε σε σύνολο καλωδίων, καθώς και σε γειώσεις κι ιμάντες σύνδεσης. Ωστόσο, μια βασική γνώση αυτών των συσκευών είναι απαραίτητη για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητάς χρήσεως τους.

3.1 Αισθητήρες ρεύματος RF υψηλών συχνοτήτων

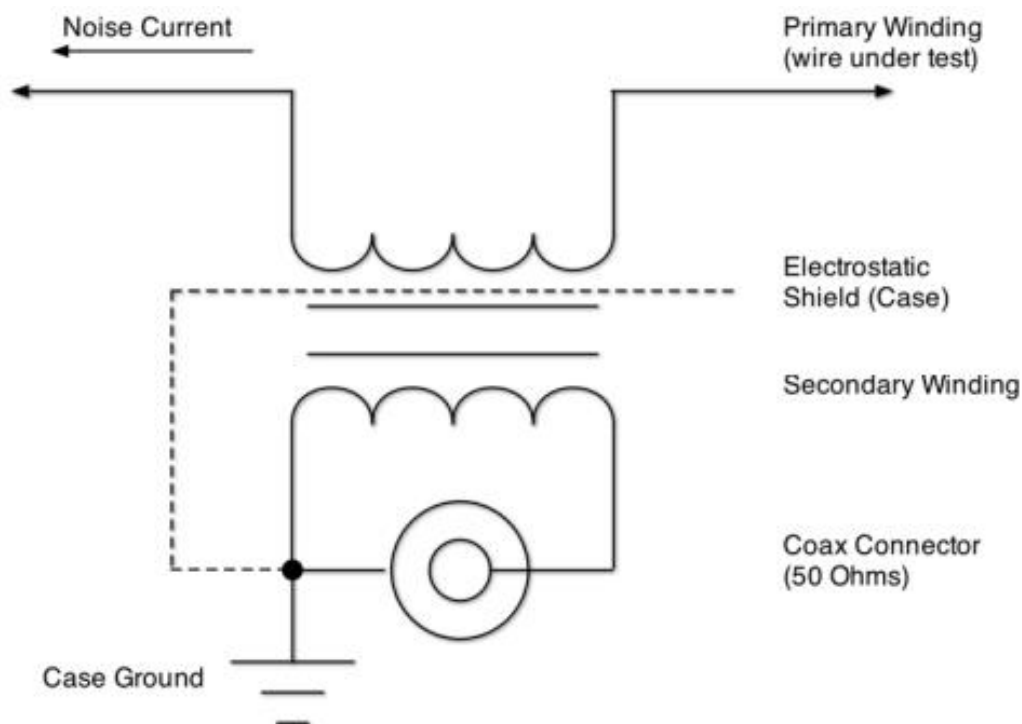
Οι αισθητήρες ρεύματος RF υψηλών συχνοτήτων αποτελούν ένα τύπο μετασχηματιστή ρεύματος που μετρά ή παράγει τάση σε ένα φορτίο (συνήθως) **50Ω**, αναλογικά με το ρεύμα που ρέει μέσα από το άνοιγμα (εσωτερική διάμετρος) του probe [25].



Εικόνα 3-1: Αισθητήρας ρεύματος (current probe) RF συχνοτήτων

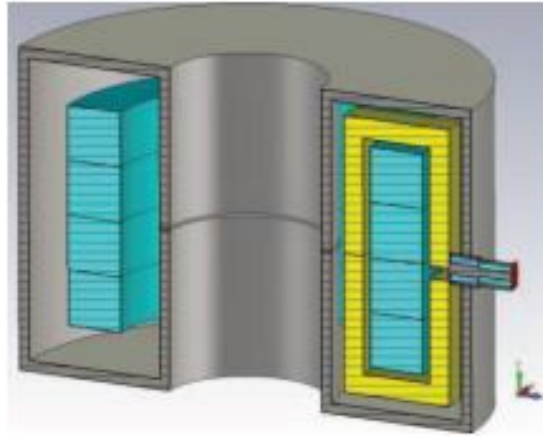
Ο τρόπος με τον οποίο είναι κατασκευασμένοι, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3-1**, μπορεί να επιτρέψει την ύπαρξη ενός αποσπώμενου τμήματος, το οποίο και κλειδώνει μέσω ενός σφικτήρα. Την ικανότητα αυτή διαθέτουν οι αρθρωτοί αισθητήρες τέτοιου τύπου, probes

δηλαδή με πυρήνα που έχει την δυνατότητα διαχωρισμού. Αυτό επιτρέπει την μέτρηση και ρευμάτων τα οποία δεν αποτελούν δέσμες, αλλά ρέουν μέσα σε αγωγούς ή καλώδια, χωρίς άμεση επαφή με τον αγωγό της πηγής. Στην περίπτωση όμως που το probe διαθέτει σταθερό πυρήνα, ο χρήστης θα χρειαστεί να διακόψει το κύκλωμα για να περάσει τις υπό μέτρηση γραμμές μέσω του ανοίγματος του αισθητήρα. Όταν, λοιπόν, το probe είναι κλειδωμένο γύρω από κάποιον αγωγό ή καλώδιο στο οποίο πρόκειται να μετρηθεί το ρεύμα, η μέτρηση επιτυγχάνεται σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας ενός μετασχηματιστή ρεύματος.



Σχήμα 3-1: Ισοδύναμο κύκλωμα WUT και αισθητήρα μέτρησης^[25]

Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3-1**, ο ίδιος ο αγωγός ή το καλώδιο λειτουργούν ως το πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή. Γενικότερα, το πρωτεύον στην προκειμένη εφαρμογή μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τύλιγμα με μία σπείρα (όπως ένα πλαίσιο για παράδειγμα), αφού τα ρεύματα ρέουν μέσω του αγωγού και επιστρέφουν στην πηγή μέσω ενός μόνο αγωγού επιστροφής. Το δευτερεύον τύλιγμα από την άλλη, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3-2**, εντοπίζεται εντός του probe και εκτός από την αντίσταση φορτίου του ομοαξονικού καλωδίου (συνήθως 50Ω), οι δευτερεύοντες τερματικοί σύνδεσμοι του είναι φορτωμένοι εσωτερικά και με μια ακόμη αντίσταση της οποίας η ύπαρξη είναι απαραίτητη για την παροχή σταθερής μεταφοράς εμπέδησης σε όσο το δυνατόν ευρύ φάσμα συχνοτήτων.



Εικόνα 3-2: Μοντελοποίηση εσωτερικού τυλίγματος current probe

Γενικότερα, το μέγιστο επίπεδο μέτρησης ρεύματος περιορίζεται από τον κορεσμό του πυρήνα του probe κι η μέγιστη απόκριση επιτυγχάνεται καλύτερα μετακινώντας τον αισθητήρα ρεύματος κατά μήκος του καλωδίου.

3.2 Εμπέδηση μεταφοράς και βαθμονόμηση

Η **εμπέδηση μεταφοράς (transfer impedance) Z_{trans}** είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την απόδοση των αισθητήρων ρεύματος (current probes). Η εμπέδηση μεταφοράς καθορίζει το πώς η τάση που μετριέται στον αισθητήρα σχετίζεται με το ρεύμα που διέρχεται από τον αγωγό και το οποίο μετριέται [26].

Η εμπέδηση μεταφοράς μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$Z_{trans} = \frac{V_{probe}}{I_{line}} \quad (3.1)$$

όπου:

- **V_{probe}** : η τάση ανάγνωσης εξόδου του probe
- **I_{line}** : το ρεύμα που διαρρέει τον υπό μέτρηση αγωγό.

Η ίδια σχέση εκφρασμένη σε dB μονάδες, όπως συνηθίζεται, είναι:

$$Z_{trans}(dB) = V_{probe}(dB) - I_{line}(dB) \quad (3.2)$$

Γενικότερα, για κάθε αισθητήρα ρεύματος η τυπική εμπέδηση μεταφοράς του σε όλο το εύρος συχνοτήτων είναι γνωστή και δύναται να καθοριστεί εργαστηριακά μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης του αισθητήρα. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- Αρχικά, θέτουμε ένα γνωστό ρεύμα RF **I_{line}** να διαρρέει τον πρωτεύοντα υπό μέτρηση αγωγό

- Έπειτα σημειώνουμε την τάση V_{probe} που αναπτύσσεται στα τερματικά του probe για φορτίο στο ομοαξονικό καλώδιο 50Ω .
- Έτσι λοιπόν, μέσω της παραπάνω εξίσωσης μπορεί να υπολογιστεί η εμπέδηση μεταφοράς Z_{trans} και να ολοκληρωθεί η διαδικασία βαθμονόμησης

Βεβαίως για μεγαλύτερη ακρίβεια, θα μπορούσε η διαδικασία αυτή να γίνει παραπάνω από μία φορές και για διαφορετικά ρεύματα εισόδου. Όμως, στην πράξη, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3-3**, για γρηγορότερη και ακριβέστερη βαθμονόμηση του αισθητήρα ρεύματος δύναται να χρησιμοποιηθεί και μια συσκευή βαθμονόμησης:



Εικόνα 3-3: Συσκευές βαθμονόμησης current probe^[25]

Με χρήση της διάταξης αυτής, ένα φορτίο 50Ω συνδέεται στη θύρα εξόδου της συσκευής βαθμονόμησης και ένας διακριβωμένος **αναλυτής δικτύου (network analyzer)** συνδέεται στη θύρα εισόδου της συσκευής βαθμονόμησης και στη θύρα του αισθητήρα ρεύματος. Ο αισθητήρας που πρόκειται να βαθμονομηθεί «σφίγγεται» γύρω από τη συσκευή βαθμονόμησης και μετριέται η έξοδος του αισθητήρα. Με δεδομένο λοιπόν, ξανά, το ρεύμα εισόδου μπορεί μέσω των παραπάνω εξισώσεων να υπολογιστεί η εμπέδηση μεταφοράς του probe. Η διαφορά τώρα είναι ότι οι μετρήσεις λαμβάνονται από διακριβωμένα όργανα, επομένως ο υπολογισμός της εμπέδησης μεταφοράς μπορεί να θεωρηθεί ακριβέστερος.

3.3 Εμπέδηση εισαγωγής και μαγνητική φόρτωση

Οι αισθητήρες ρεύματος RF υψηλών συχνοτήτων έχουν αποκτήσει μεγάλη σημασία κυρίως λόγω της ευρείας χρήσης τους σε δοκιμές εκπομπής και ευαισθησίας της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας EMC. Παρόλα αυτά, στα εγχειρίδια και τις τεχνικές σημειώσεις αφιερώνεται ελάχιστος χώρος σε αυτά τα όργανα, ως προς την περιγραφή της παραμόρφωσης του σήματος (probe loading) που εισάγουν στα συστήματα.

Συγκεκριμένα, η ακρίβεια των μετρήσεων που πραγματοποιούνται με τα παραπάνω current probes, επηρεάζεται σημαντικά από την **εμπέδηση εισαγωγής (inserted impedance) Z_{ins}** , η οποία αποτελεί την εμπέδηση που εμφανίζεται σε σειρά με την εμπέδηση του αγωγού υπό μέτρηση όταν ο αισθητήρας ρεύματος αλλά και το φορτίο του είναι στη θέση τους [27].

Η εμπέδηση εισαγωγής μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$Z_{ins} = \frac{j\omega \cdot L - j\omega \cdot L_o}{R + j\omega \cdot L_o \cdot N^2} \quad (3.3)$$

όπου:

- **N:** ο αριθμός των σπειρών του τυλίγματος εντός του probe
- **R:** η αντίσταση φορτίου της υπό μέτρηση γραμμής
- **L:** η αυτεπαγωγή του τυλίγματος του probe
- **L_o :** η αυτεπαγωγή που θα είχε το τύλιγμα του probe στο κενό.

Δηλαδή:

$$L_o = \frac{L}{\mu} \quad (3.4)$$

όπου:

- **μ :** η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνητικού υλικού του πυρήνα ($\mu \gg 1$)

Γενικότερα, η παραπάνω σχέση προκύπτει από το άθροισμα δύο συνεισφορών:

A) Εμπέδηση δευτερεύοντος (probe) ανηγμένη στο πρωτεύον (αγωγός υπό μέτρηση):

Η εμπέδηση του δευτερεύοντος κυκλώματος Z_{sec} ανάγεται στο πρωτεύον κύκλωμα μέσω της δράσης του αισθητήρα ως μετασχηματιστή ρεύματος. Αυτή η αναγωγή σύμφωνα με τις εξισώσεις που διέπουν την λειτουργία του μετασχηματιστή, δεδομένου ότι το πρωτεύον θεωρούμε ότι έχει μία σπείρα, γίνεται ως εξής:

$$Z_{sec}'' = \frac{Z_{sec}}{N^2} \quad (3.5)$$

όπου:

- **N:** ο αριθμός των σπειρών του τυλίγματος εντός του probe (δευτερεύον).

B) Εμπέδηση εισαγωγής λόγω εξωγενών υλικών:

Πρόκειται για την εμπέδηση εισαγωγής που προέρχεται από τις ιδιότητες του μαγνητικού υλικού του πυρήνα που χρησιμοποιείται στον αισθητήρα ρεύματος. Το μαγνητικό του υλικό προσθέτει μια επιπλέον επαγωγική αντίδραση Z_{core} λόγω της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού.

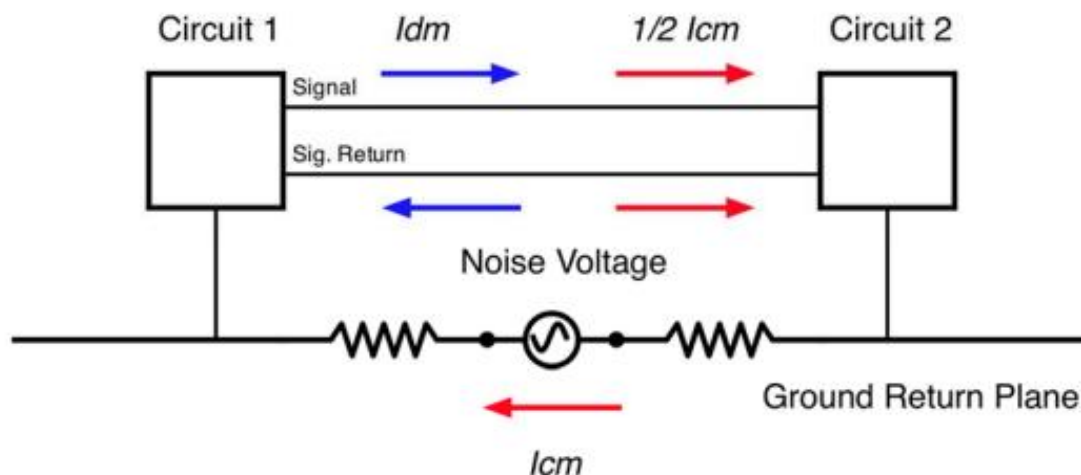
Οπότε συνολικά:

$$Z_{ins} = Z_{sec}'' + Z_{core} \quad (3.6)$$

Επομένως, με αυτό τον τρόπο προκύπτει η συνολική εμπέδηση εισαγωγής που γράφεται στην παραπάνω εξίσωση. Γενικότερα, η τιμή της εμπέδησης αυτής επηρεάζεται σημαντικά από το probe loading, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε παραμορφώσεις των μετρήσεων, ειδικότερα σε υψηλές συχνότητες, όπου η εμπέδηση εισαγωγής μπορεί να κυριαρχείται από έναν αρνητικό επαγωγικό όρο, ο οποίος αυξάνεται αναλογικά με τη συχνότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αποτελεσματικής επαγωγής του αγωγού υπό μέτρηση, οδηγώντας σε ανακρίβειες στις μετρήσεις [28].

3.4 Χρήση στην ανίχνευση ανεπιθύμητων ρευμάτων

Οι εν λόγω αισθητήρες ρεύματος, χρησιμοποιούνται για διάφορες μετρήσεις, όπως για παράδειγμα τη μέτρηση των ανεπιθύμητων ρευμάτων που ρέουν σε αγωγούς ή και καλώδια. Γενικότερα, η εμπειρία έχει αποδείξει ότι η κακώς τερματισμένη θωράκιση των καλωδίων είναι η κύρια αιτία αποτυχιών εκπομπών κατά τη διάρκεια των δοκιμών συμμόρφωσης EMC. Με τη μέτρηση των ρευμάτων διαταραχών σε αυτά τα καλώδια είναι δυνατό να αντιμετωπιστούν και να εφαρμοστούν διορθώσεις σε ένα προϊόν, ακριβώς εκεί, στο εργαστήριο ανάπτυξης του. Επίσης, μπορεί να προβλεφθεί με αρκετά καλή ακρίβεια, αν ένα συγκεκριμένο ρεύμα καλωδίου θα μπορέσει να περάσει ή αν θα αποτύχει στον θάλαμο μέτρησης. Είναι αναγκαίο, λοιπόν, να εξετάσουμε τα ρεύματα αυτά καθώς και τον τρόπο με τον οποίο παράγονται, καθώς δεν είναι διαισθητικά αυτονόητο πώς το ρεύμα διαταραχής εισάγεται και ταξιδεύει μέσα στο σύστημα [25].



Σχήμα 3-2: Ρεύματα differential-mode (μπλε) και common-mode (κόκκινα)^[25]

Στο Σχήμα 3-2, απεικονίζονται τα **differential-mode ρεύματα (DM)** (μπλε βέλη) και τα ανεπιθύμητα **common-mode ρεύματα (CM)** (κόκκινα βέλη). Τα ρεύματα **DM** είναι τα σήματα ανεπιθύμητων ρευμάτων που κατά την διέλευση τους μέσω των συσκευών ακολουθούν ολόκληρη την πορεία μέσω των συσκευών και των αγωγών επιστροφής, ενώ τα ρεύματα **CM** αποτελούν ανεπιθύμητα ρεύματα θορύβου τα οποία διαρρέουν όλο το σύστημα ταυτοχρόνως. Γενικότερα, και τα δύο είδη ρευμάτων διαταραχών μπορεί να προέρχονται από ποικιλία πηγών, στην προκειμένη περίπτωση του σχήματος, από το σύστημα γείωσης.

Συγκεκριμένα, δημιουργούνται με τον εξής μηχανισμό:

- Λόγω της πεπερασμένης αντίστασης στο σύστημα γείωσης, ανάμεσα στα δύο κυκλώματα θα υπάρξει μια **διαφορά τάσης**.
- Η διαφορά τάσης αυτή, θα παράξει ένα **ρεύμα** το οποίο διαρρέει την γείωση .
- Επομένως, μέσω καλωδιώσεων μεταξύ των υποσυστημάτων, δύναται το ρεύμα αυτό **να εισαχθεί και να διαχωριστεί μέσα στο κύκλωμα**.

Ο παραπάνω τρόπος, δεν είναι ο μοναδικός μηχανισμός εισαγωγής ανεπιθύμητων ρευμάτων σε μια διάταξη. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί όμως, είναι ότι στον εντοπισμό και στην αποφυγή των ρευμάτων αυτών μπορούν να συμβάλλουν κι οι αισθητήρες ρεύματος. Συγκεκριμένα, αυτό επιτυγχάνεται με την παρακάτω διαδικασία:

- Τοποθέτηση του αισθητήρα ρεύματος γύρω από το καλώδιο υπό μέτρηση.
- Μετακίνηση του αισθητήρα ρεύματος σε διάφορες θέσεις στο καλώδιο για τον εντοπισμό σημείων μεγιστοποίησης αρμονικών.

- Έχοντας εντοπίσει τις συχνότητες των κορυφαίων αρμονικών, στην συνέχεια μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία αντιμετώπισης, δουλεύοντας αντίστροφα, αναζητώντας δηλαδή τις πηγές που μπορεί να προκαλούν αυτές τις αρμονικές.

Με αυτό τον τρόπο, ένα μεγάλο πρόβλημα στα διάφορα ηλεκτρονικά και τηλεπικοινωνιακά συστήματα δύναται να αντιμετωπιστεί, σχετικά ανώδυνα και γρήγορα με την βοήθεια των αισθητήρων ρεύματος RF συχνοτήτων.

3.5 Αισθητήρας ρεύματος FCC F-65

Ο FCC F-65 είναι ένας αισθητήρας ρεύματος (current probe) RF υψηλών συχνοτήτων που κατασκευάζεται από την εταιρεία **Fischer Custom Communications** [29].

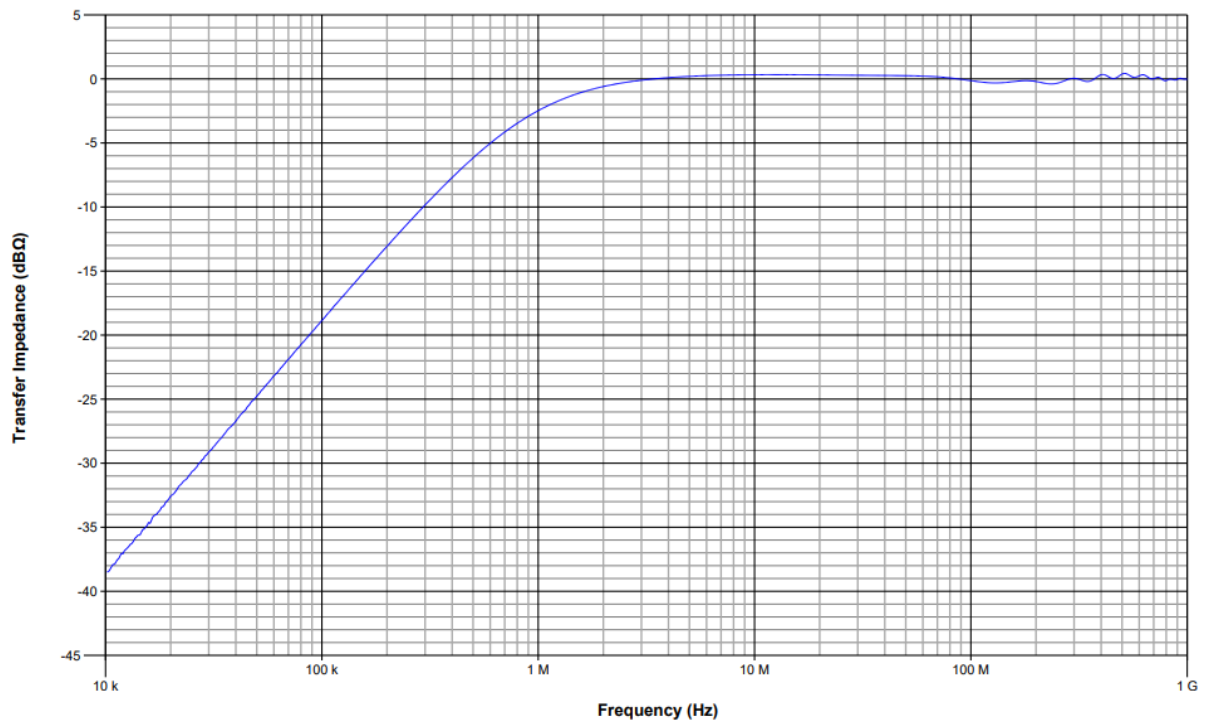
Χρησιμοποιείται κυρίως σε:

- **Εργαστηριακές δοκιμές**, για την μέτρηση και την ανάλυση ρευμάτων υψηλής συχνότητας
- **Δοκιμές πεδίου**, όπου απαιτείται η μέτρηση παλμικών ρευμάτων σε διάφορα κυκλώματα ή συσκευές
- Μετρήσεις **ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας** και **εκπομπών θορύβου**.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά:

- **Συχνότητα Λειτουργίας:** 10 kHz έως 1 GHz.
- **Διάμετρος Εσωτερική:** 32mm.
- **Διάμετρος Εξωτερική:** 71mm.
- **Ύψος:** 9mm.
- **Connector:** Τύπου N
- **Μέγιστο Ρεύμα:**
 - ✓ DC έως 400 MHz: 350A
 - ✓ RF Continuous Wave: 1A
 - ✓ Παλμός: 100A

Στο **Σχήμα 3-3**, απεικονίζεται η εμπέδηση μεταφοράς αυτού του αισθητήρα για διάφορες τιμές της συχνότητας, σύμφωνα και με την εταιρία κατασκευής του:



Σχήμα 3-3: Εμπέδηση μεταφοράς του FCC F-65 σε συνάρτηση με την συχνότητα^[30]

Παρατηρούμε, ότι η εμπέδηση μεταφοράς του FCC F-65 είναι σταθερή σε αρκετά μεγάλο φάσμα της συχνότητας λειτουργίας του. Συγκεκριμένα, από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι αν και στις χαμηλές συχνότητες πέφτει η απόδοση του αισθητήρα (**μη γραμμική συμπεριφορά**), η εμπέδηση μεταφοράς στις υψηλές συχνότητες (**1 MHz έως 1 GHz**) διατηρείται στο 1Ω . Μάλιστα, αξίζει αν σημειωθεί, ότι ως αισθητήρας στις υψηλές συχνότητες δύναται να μετρά παλμούς με χρόνο ανόδου έως και 200 ps και πλάτος παλμού έως και 35 ns. Τα παραπάνω καθιστούν τον αισθητήρα αυτό ιδανικό για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων που απαιτούν ακρίβεια και σταθερότητα στη μέτρηση ρευμάτων. Στην συνέχεια, θα γίνει η προσπάθεια μοντελοποίησης σε κατάλληλο πρόγραμμα προσομοίωσης του αισθητήρα αυτού.

Κεφάλαιο 4: Μοντέλο του αισθητήρα ρεύματος FCC F-65

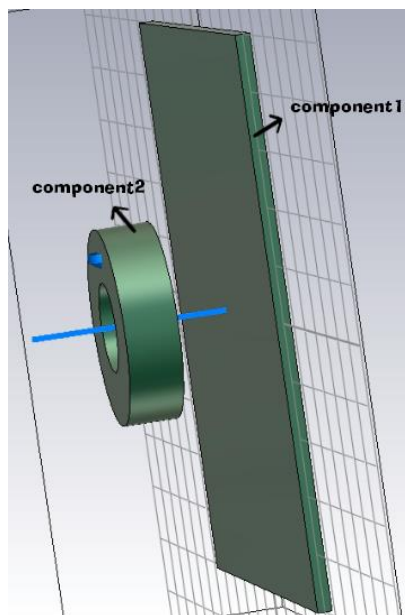
4.1 Λογισμικό CST Studio Suite 2024

Το λογισμικό CST Studio Suite 2024 είναι ένα προηγμένο εργαλείο προσομοίωσης που σχεδιάστηκε για την ανάλυση και τον σχεδιασμό ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων. Χάρη στην εκτεταμένη συλλογή αλγορίθμων και μοντέλων που διαθέτει, το CST Studio Suite επιτρέπει την ακριβή αναπαράσταση σύνθετων φαινομένων, προσφέροντας τη δυνατότητα λεπτομερούς μελέτης και βελτιστοποίησης συσκευών και συστημάτων. Στη διπλωματική αυτή εργασία, που αφορά την προσομοίωση του αισθητήρα ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφορτίσεως FCC F-65, το CST Studio Suite 2024 αναδεικνύεται ως το ιδανικό εργαλείο να χρησιμοποιήσουμε λόγω της υψηλής ικανότητάς του να μοντελοποιεί ηλεκτρομαγνητικές συμπεριφορές και αλληλεπιδράσεις με ακρίβεια. Επομένως, μας παρέχει έναν αξιόπιστο και ευέλικτο πόρο για την δημιουργία του ζητούμενου μοντέλου μας.

4.2 Βασικές δομές του μοντέλου προσομοίωσης

Το μοντέλο προσομοίωσης το οποίο δημιουργήσαμε στο παραπάνω λογισμικό, καταρχάς, αποτελείται από δύο components:

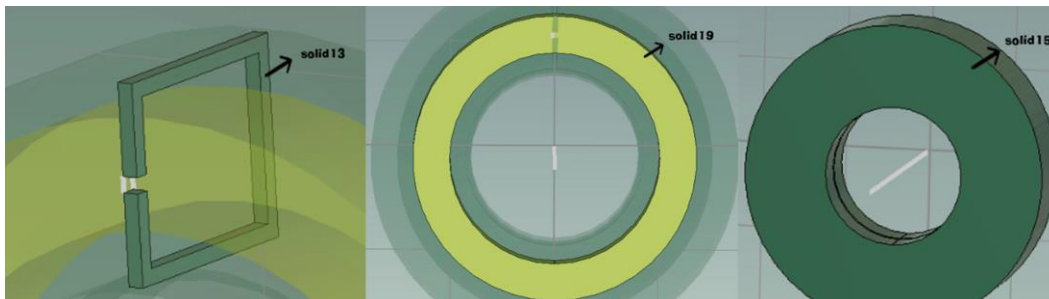
- **component1:** Πλάκα
- **component2:** Αισθητήρας ρεύματος



Εικόνα 4-1: Τα components του μοντέλου

Συγκεκριμένα, το component2 αποτελείται κι αυτό από τρεις δομές:

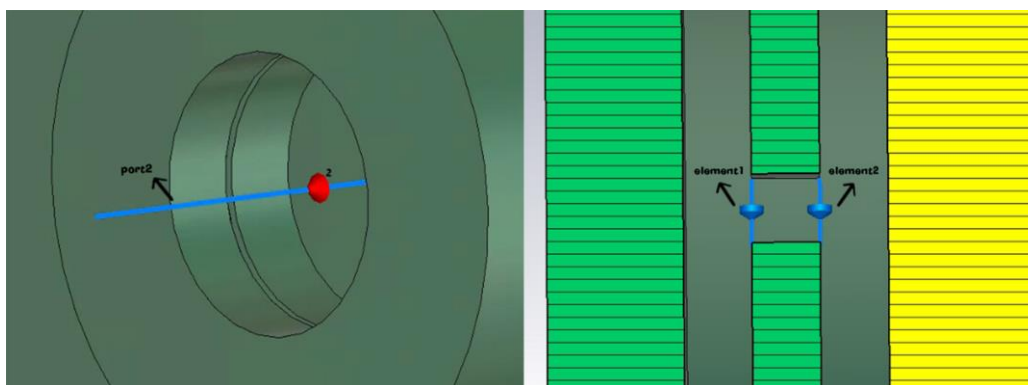
- **solid13:** Εσωτερικό τύλιγμα
- **solid15:** Εξωτερική μεταλλική επιφάνεια
- **solid19:** Φερρίτης



Εικόνα 4-2: Τα solids του component2

Επιπλέον, για την επίτευξη της προσομοίωσης έχουν χρησιμοποιηθεί και τα εξής στοιχεία:

- **port2:** Θύρα ρεύματος εισόδου
- **element1:** Βασικό μετρητικό στοιχείο κυματομορφών
- **element2:** Άλλο (μετρητικό) στοιχείο



Εικόνα 4-3: Θύρα ρεύματος και elements

Στην συνέχεια, ακολουθεί το σύνολο των παραμέτρων που χρειάστηκαν για να κατασκευαστούν σωστά τα παραπάνω βασικά δομικά στοιχεία του μοντέλου μας.

4.3 Απαιτούμενες παράμετροι για την δημιουργία του μοντέλου

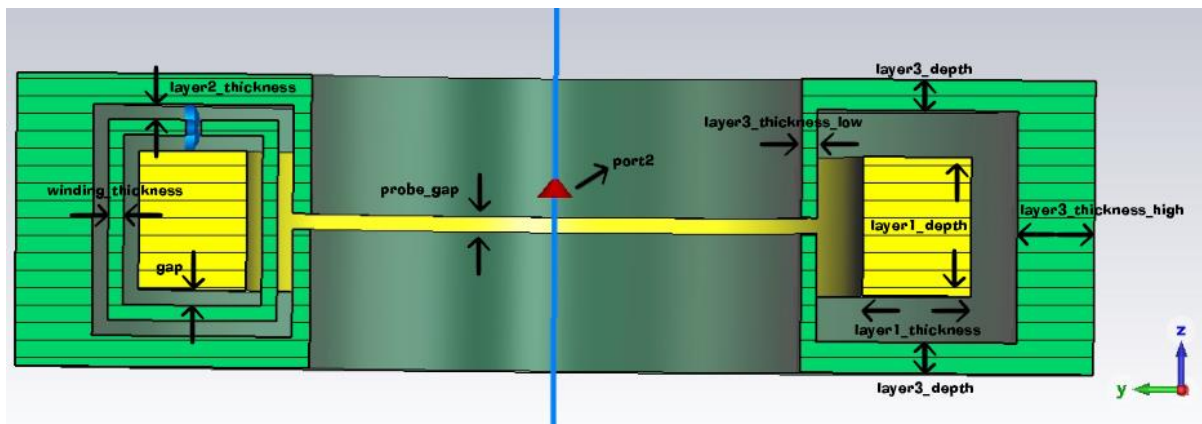
Οι παραπάνω οι βασικές δομές για να μπορέσουν να δημιουργηθούν, αλλά και για να τους προσδοθούν οι απαιτούμενες τους ιδιότητες, είναι αναγκαία η χρήση κάποιων παραμέτρων. Το λογισμικό προσομοίωσης επιτρέπει την ελεύθερη δημιουργία παραμέτρων από τις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάποιες ή και όλες για την κατασκευή του μοντέλου. Στην δική

μας περίπτωση, φαίνονται στον **Πίνακα 4-1** οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και μια μικρή περιγραφή για το τι αναπαριστά η καθεμία ξεχωριστά:

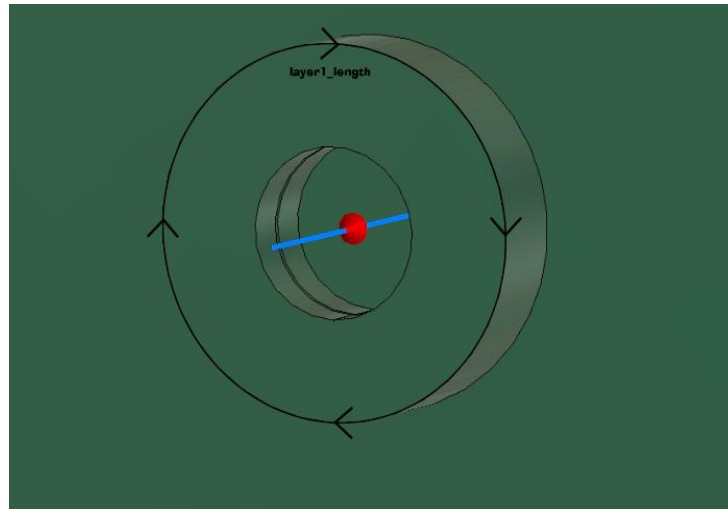
Πίνακας 4-1: Οι παράμετροι του μοντέλου

Name	Description
dispersion_time	= ferrite's relaxation time
epsilon	= ferrite's electrical permittivity
gap	= gap between winding and ferrite
layer1_depth	= ferrite's z-axis thickness
layer1_length	= outer circular length of metal surface
layer1_thickness	= ferrite's y-axis thickness
layer1_y	= inner radius of ferrite's surface
layer2_thickness	= gap between winding and metal surface
layer3_depth	= probe's z-axis inner metal surface
layer3_thickness_high	= probe's y-axis high inner metal surface
layer3_thickness_low	= probe's y-axis low inner metal surface
Mu_static	= ferrite's magnetic permeability
Plate	= discharging plate's side length
Plate_Thickness	= thickness of discharging plate
probe_gap	= gap on the inner circle of the probe
Radd	= resistance parallel to Rload that linearises low frequencies
Rload	= oscilloscope's resistance where probe's bnc is connected
t_end	= total simulation time
winding_gap	= gap on winding's terminals
winding_thickness	= x-axis winding's thickness
xcoord_centerprobe	= x-position of the center of the probe
ycoord_centerprobe	= y-position of the center of the probe
zoffset	= probe's distance from discharging plate

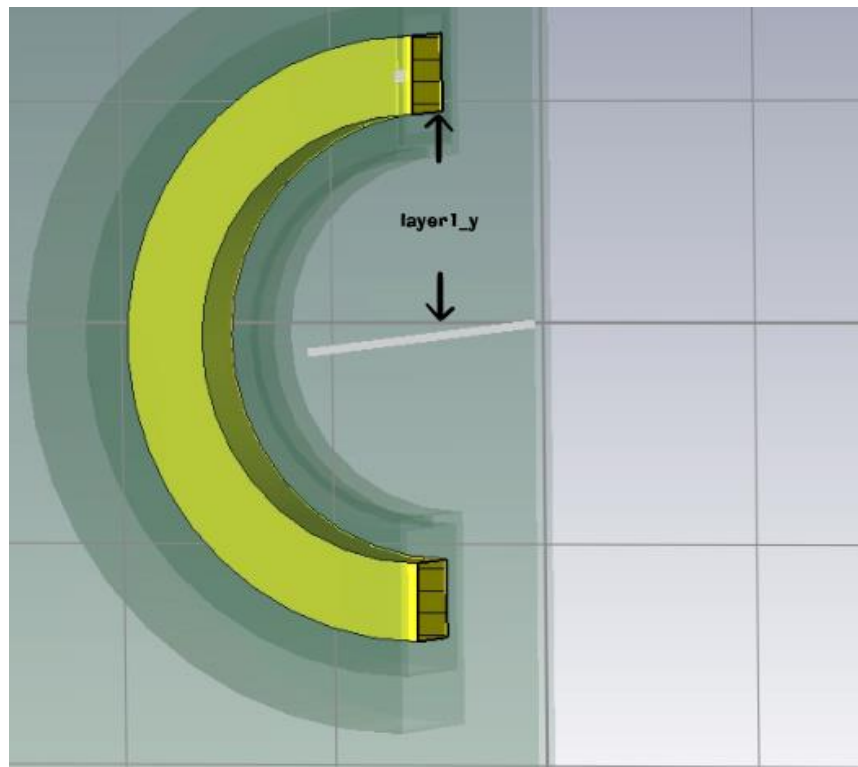
Από τις παραπάνω παραμέτρους, όσες αναπαριστούν μήκος ή κάποια διάσταση, φαίνονται καλύτερα και στις παρακάτω εικόνες:



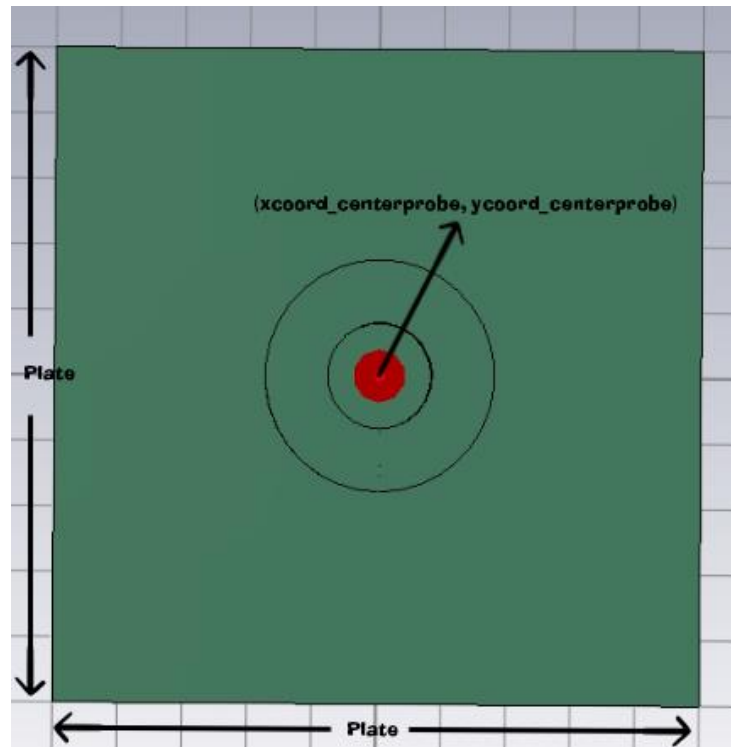
Εικόνα 4-4: Παράμετροι μοντέλου (Τομή)



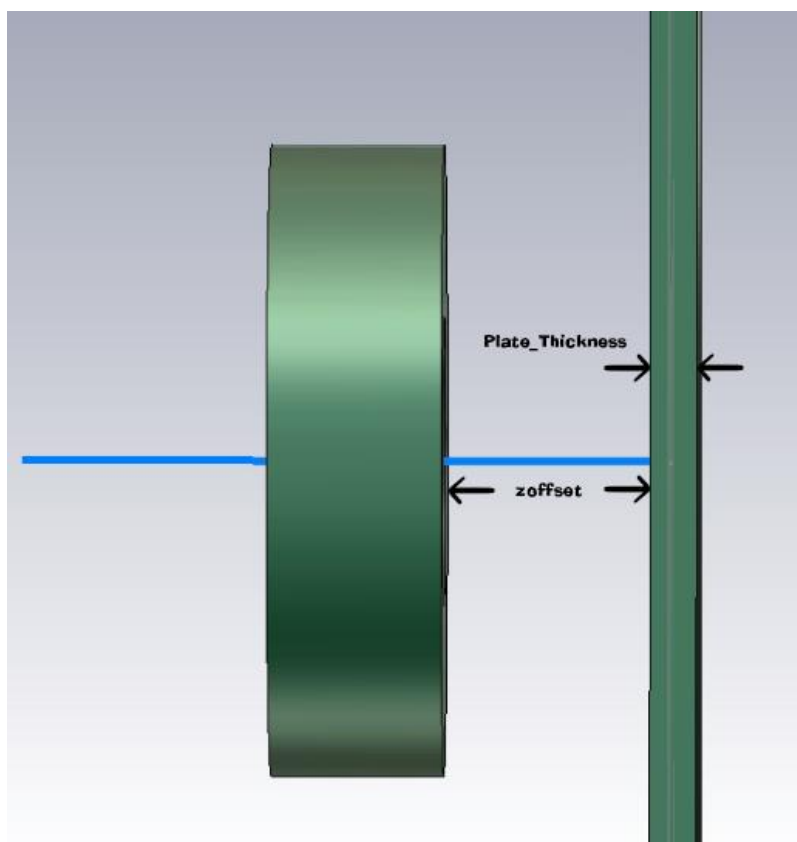
Εικόνα 4-5: Παράμετροι μοντέλου (layer1_length)



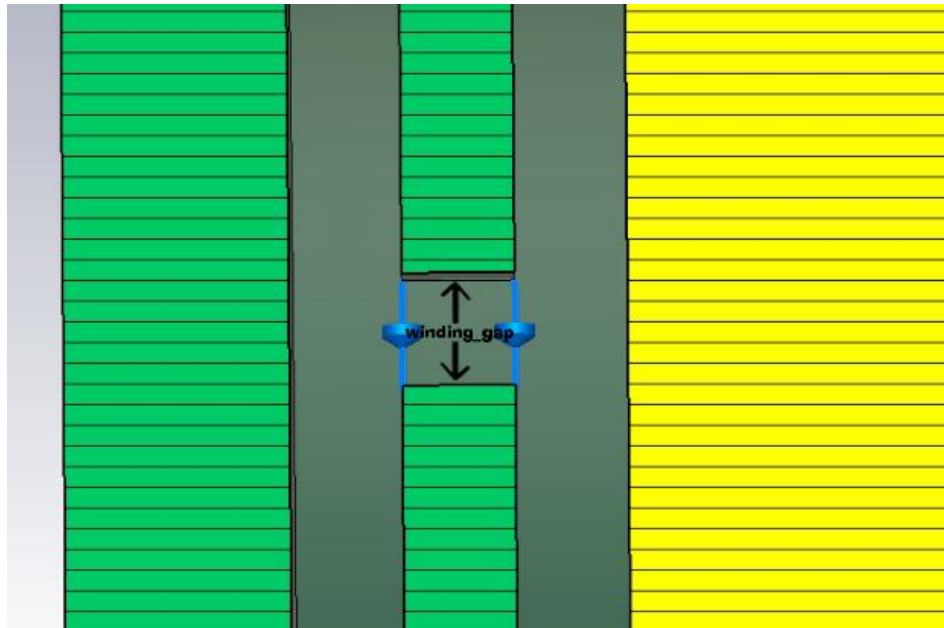
Εικόνα 4-6: Παράμετροι μοντέλου (layer1_y)



Εικόνα 4-7: Παράμετροι μοντέλου (Plate, xcoord_centerprobe, ycoord_centerprobe)



Εικόνα 4-8: Παράμετροι μοντέλου (Plate_Thickness, zoffset)



Εικόνα 4-9: Παράμετροι μοντέλου (winding_gap)

Όμως, από το σύνολο των παραμέτρων, υπάρχουν και κάποιες παράμετροι για τις οποίες δεν έχει δοθεί κάποια εξήγηση για το τι αναπαριστούν. Αυτές αναλύονται παρακάτω:

- **dispersion_time:** Χρόνος διασποράς του φερρίτη
- **epsilon:** Σχετική ηλεκτρική επιτρεπτότητα του φερρίτη
- **Mu_static:** Σχετική μαγνητική διαπερατότητα του φερρίτη
- **Rload:** Αντίσταση στον τερματισμό του παλμογράφου με την οποία, μέσω του BNC Connector του probe, μετρήθηκαν οι κυματομορφές για το probe FCC F-65
- **Radd:** Παράλληλη αντίσταση στην Rload, απαραίτητη για την μοντελοποίηση της μη-γραμμικής απόκρισης του probe στις χαμηλές συχνότητες
- **t_end:** Χρονική διάρκεια προσομοίωσης

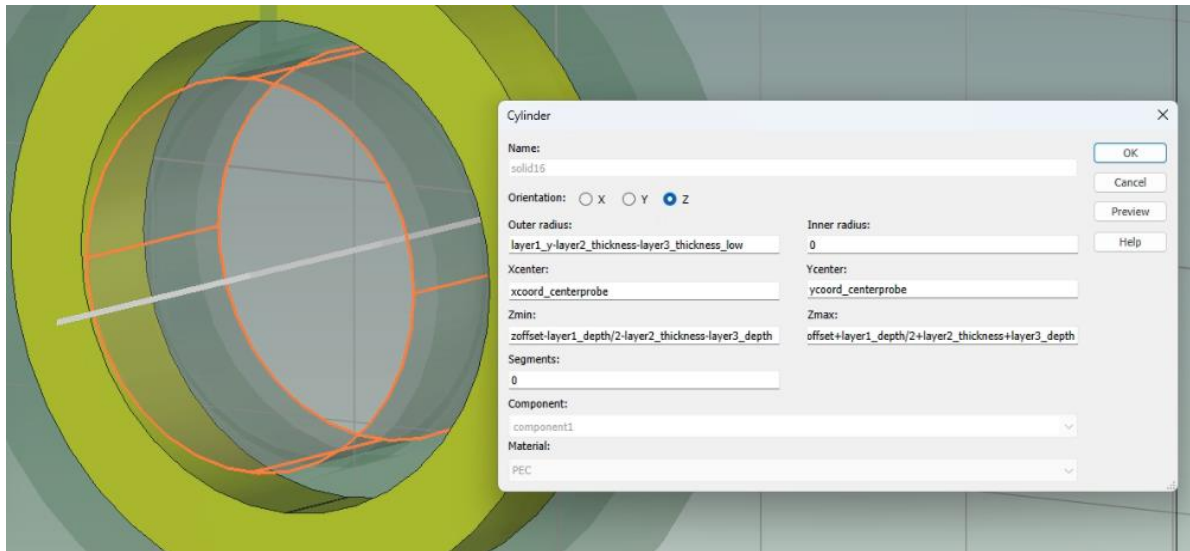
Οπότε, στην συνέχεια θα αναδειχθεί, ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω παράμετροι για την δημιουργία του μοντέλου καθώς και τα διάφορα υλικά (materials) τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή των διαφόρων βασικών δομών του.

4.4 Δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης

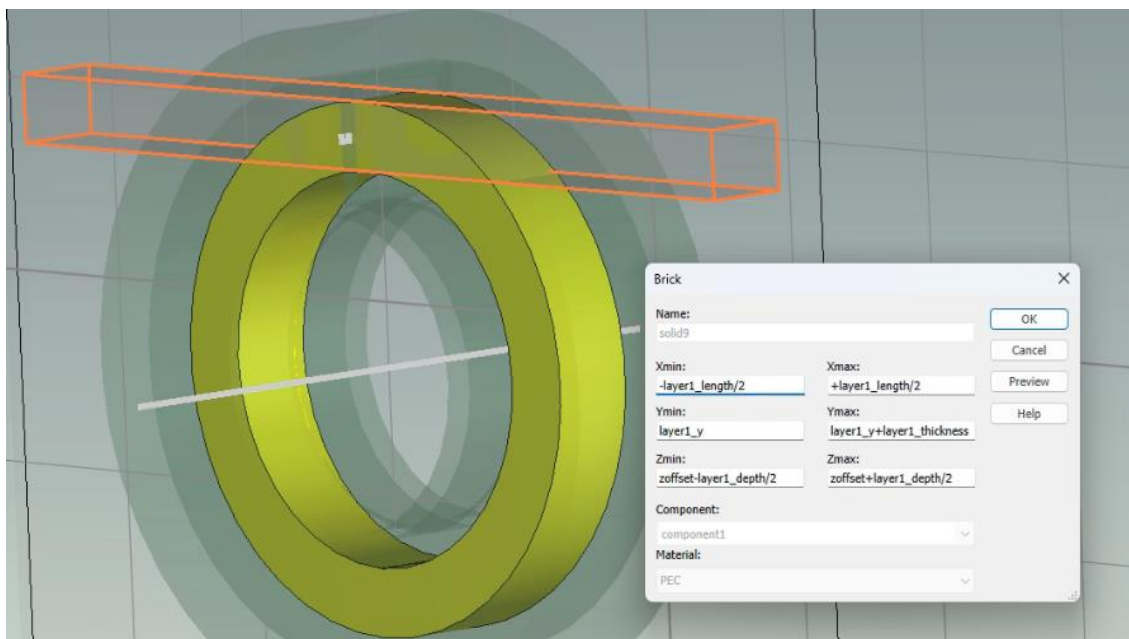
Για την δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης, γίνεται χρήση κάποιων βασικών σχημάτων (ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, κύλινδροι κ.α.) τα οποία είναι διαθέσιμα στο λογισμικό και μέσω διαφόρων διεργασιών – συνδυασμών, δημιουργήθηκαν οι βασικές δομές τις οποίες είδαμε προηγουμένως. Στην διαδικασία αυτή έγινε χρήση και των παραμέτρων του μοντέλου

για την σωστή σύσταση των components και την κατάλληλη τοποθέτηση τους στον χώρο. Όλες αυτές οι δράσεις φαίνονται στο history tree του κάθε στοιχείου του μοντέλου. Στα properties της κάθε υποδομής, φαίνεται και η ακριβής θέση της στον χώρο καθώς και το material που χρησιμοποιήθηκε κατά την δημιουργία της.

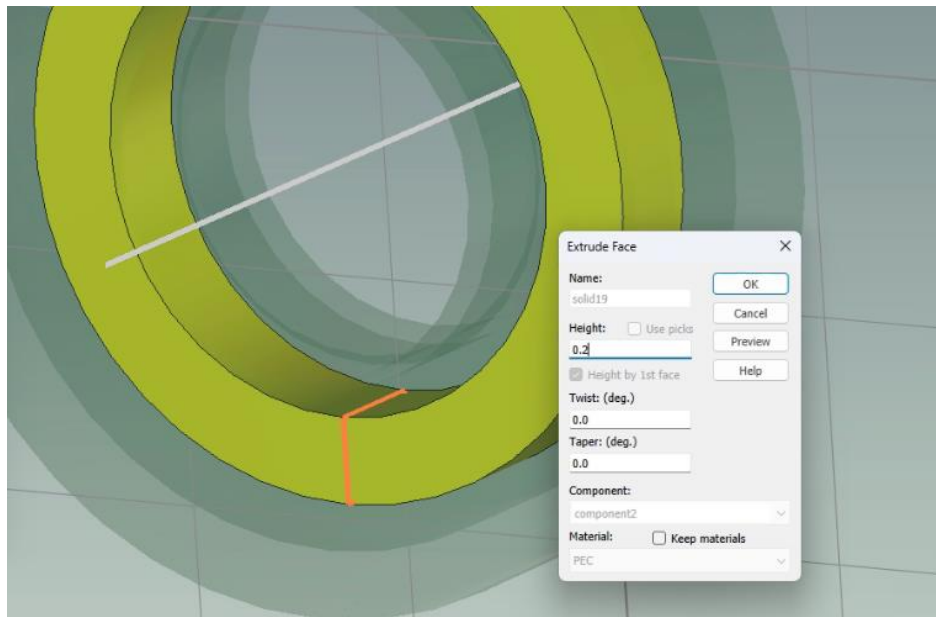
Ξεκινώντας, λοιπόν, από τον φερρίτη, παρακάτω ακολουθούν κάποιες εικόνες που δείχνουν πως έγινε η κατασκευή του:



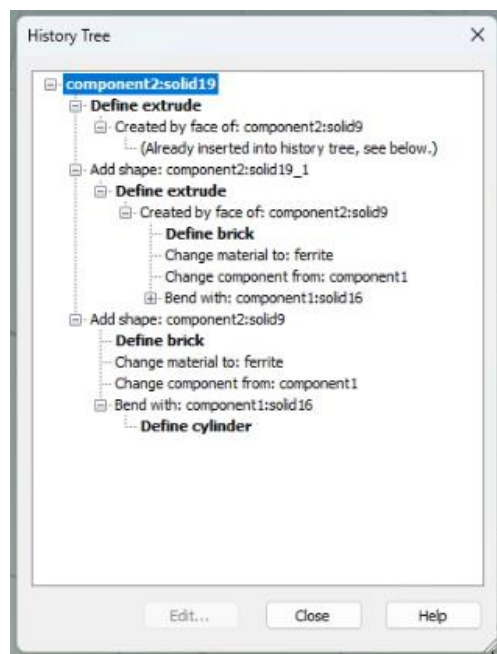
Εικόνα 4-10: Δημιουργία Μοντέλου (Φερρίτης - Cylinder)



Εικόνα 4-11: Δημιουργία Μοντέλου (Φερρίτης - Brick)



Εικόνα 4-12: Δημιουργία Μοντέλου (Φερρίτης - Extrude Face)



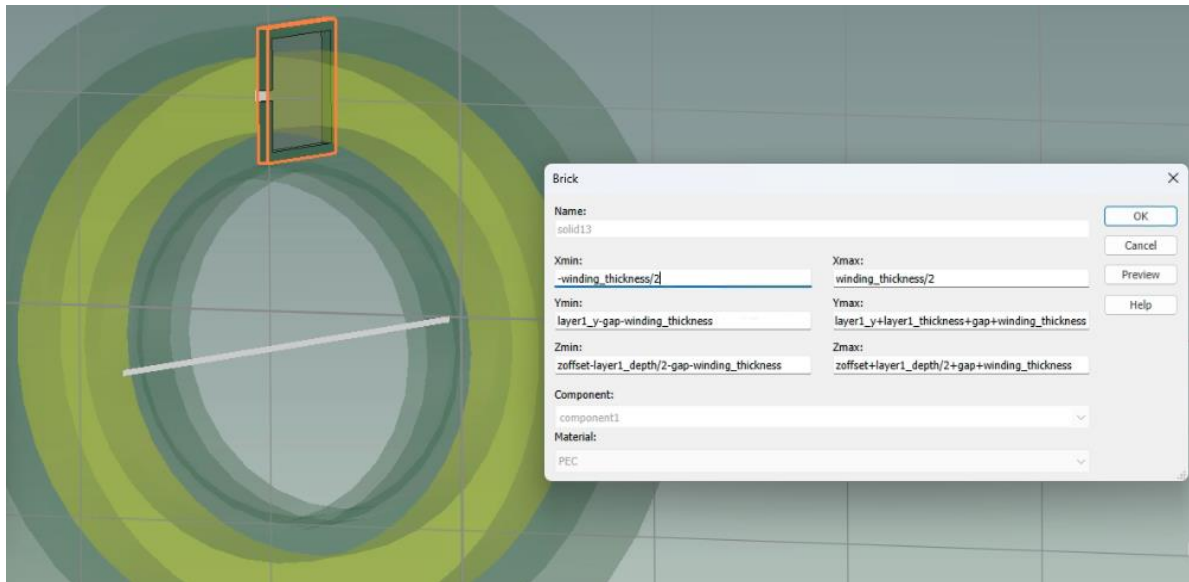
Εικόνα 4-13: Δημιουργία Μοντέλου (Φερρίτης - History Tree)

Κάπως έτσι, λοιπόν δημιουργήθηκε το solid19 (φερρίτης) και με αντίστοιχο τρόπο έχουν δημιουργηθεί και τα υπόλοιπα. Στο history tree της **Εικόνας 4-13** μπορεί να δει κανείς αναλυτικά την διαδικασία. Αξίζει να σημειωθεί ότι η δημιουργία του extrude face αποσκοπεί στο να υπάρχει στο μοντέλο η δυνατότητα του cutting plane, δηλαδή μιας τομής για να μπορεί να είναι εμφανές και το εσωτερικό του probe.

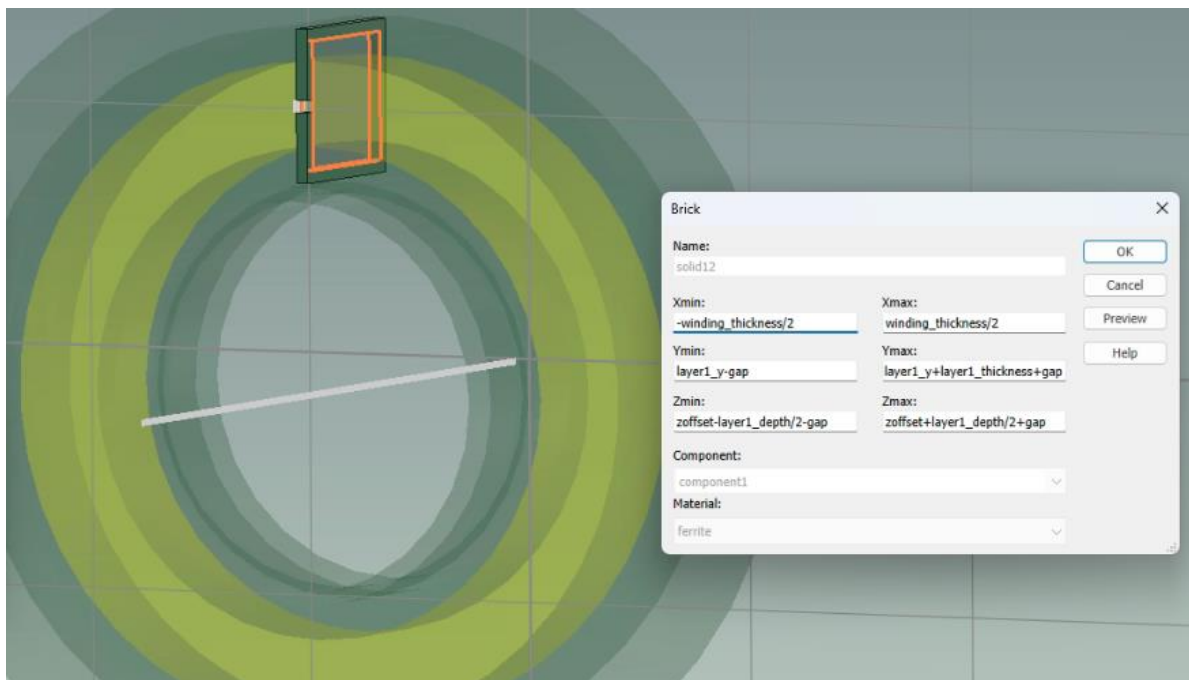
Στην δημιουργία όμως του φερρίτη, προέκυψε μία δυσκολία. Από όσες πληροφορίες γνωρίζουμε για το probe FCC F-65, μας είναι άγνωστο το ποιος είναι ακριβώς ο φερρίτης ο

οποίος περιέχεται στο αληθινό probe. Συνεπώς, θα γίνει η χρήση ενός default ferrite του οποίου οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες θα ερευνηθούν στην συνέχεια.

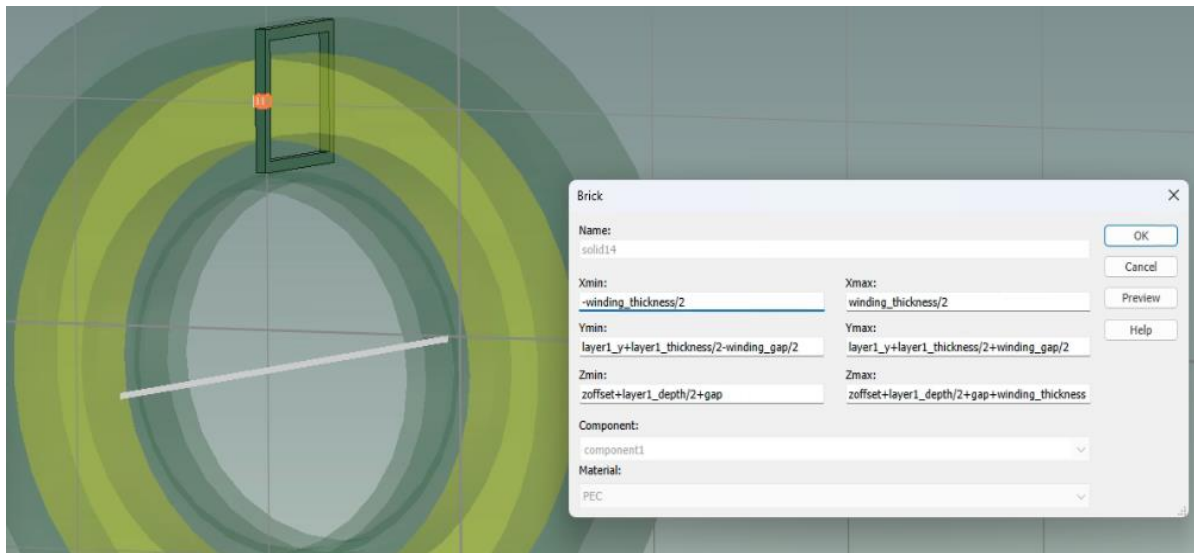
Με την ίδια, λοιπόν, λογική, ακολουθούν και κάποιες εικόνες που παρουσιάζουν και την κατασκευή του εσωτερικού τυλίγματος του probe:



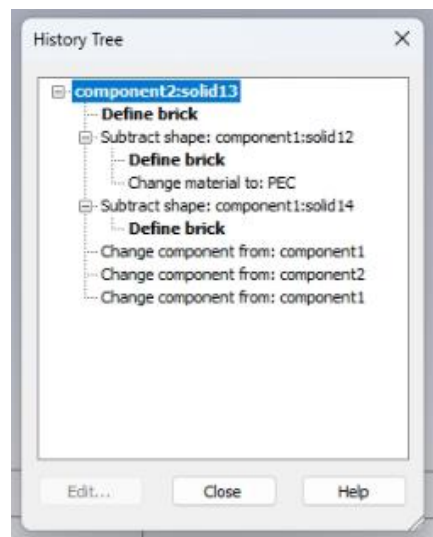
Εικόνα 4-14: Δημιουργία μοντέλου (Τύλιγμα - Brick - I)



Εικόνα 4-15: Δημιουργία μοντέλου (Τύλιγμα - Brick - II)



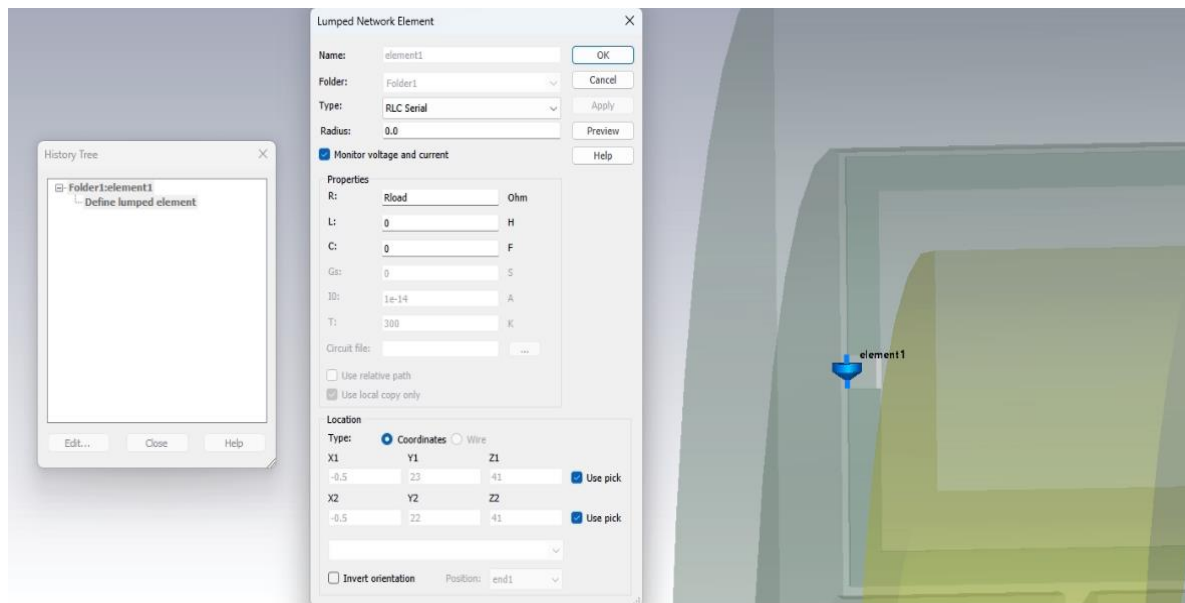
Εικόνα 4-16: Δημιουργία μοντέλου (Τύλιγμα - Brick - III)



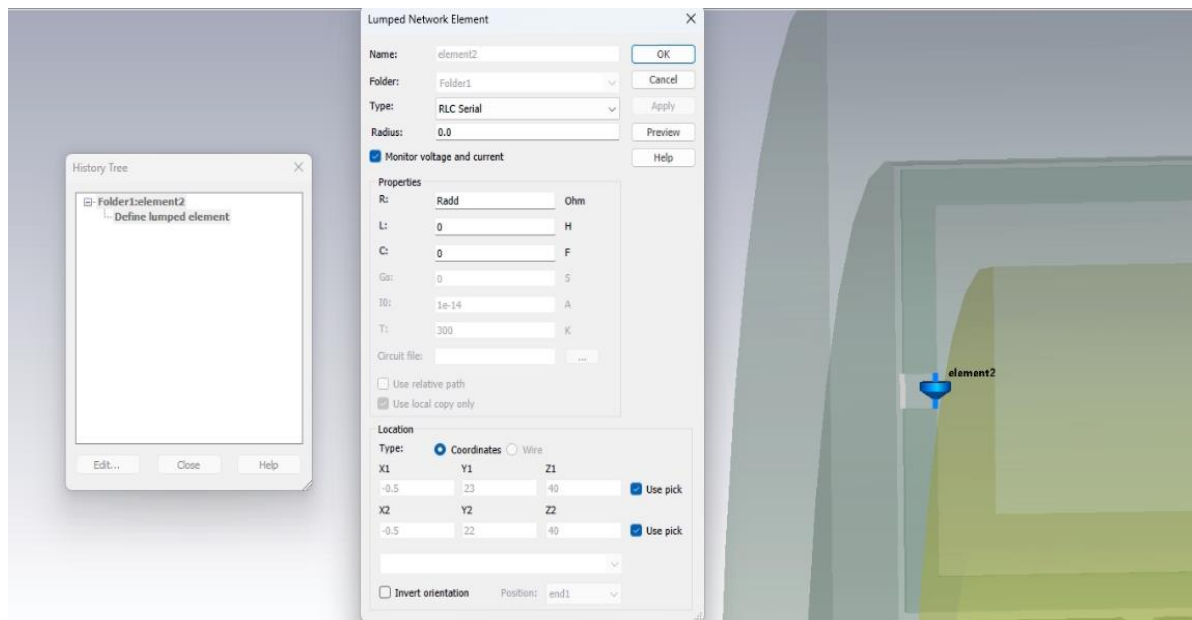
Εικόνα 4-17: Δημιουργία μοντέλου (Τύλιγμα - History Tree)

Στην προκειμένη περίπτωση, οι απαραίτητες παραδοχές ήταν σημαντικότερες, καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμες πληροφορίες είτε για τη γεωμετρία του τυλίγματος είτε για τη σχετικά του θέση με τις υπόλοιπες δομές. Παρόλα αυτά, στηριζόμενοι στην βιβλιογραφία και βασιζόμενοι σε κάποιες αρχικές προσεγγίσεις, θα προσεγγιστεί η πραγματική διάταξη του τυλίγματος, μέσω της μελέτης που ακολουθεί.

Συμπληρώνεται, λοιπόν, η δημιουργία του τυλίγματος και με την προσθήκη των δύο elements στα άκρα τους, των οποίων η θέση και οι ιδιότητες φαίνονται στις παρακάτω εικόνες:



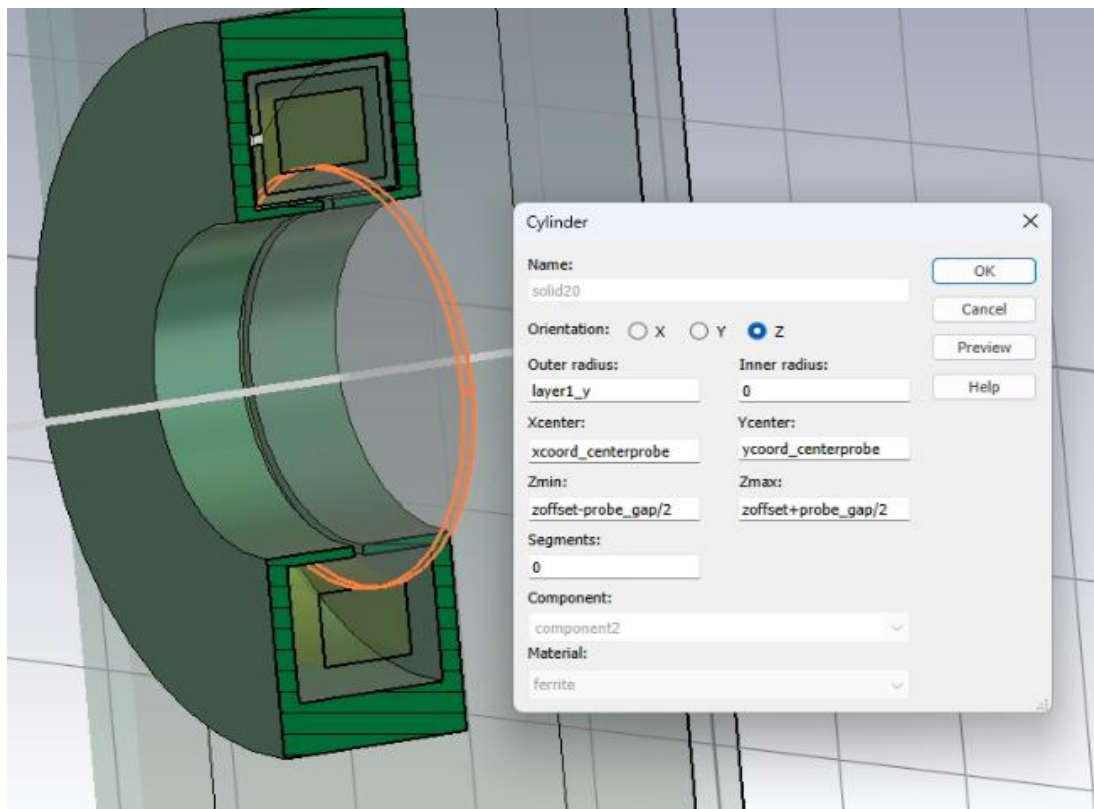
Εικόνα 4-18: Δημιουργία μοντέλου (Elements - Rload)



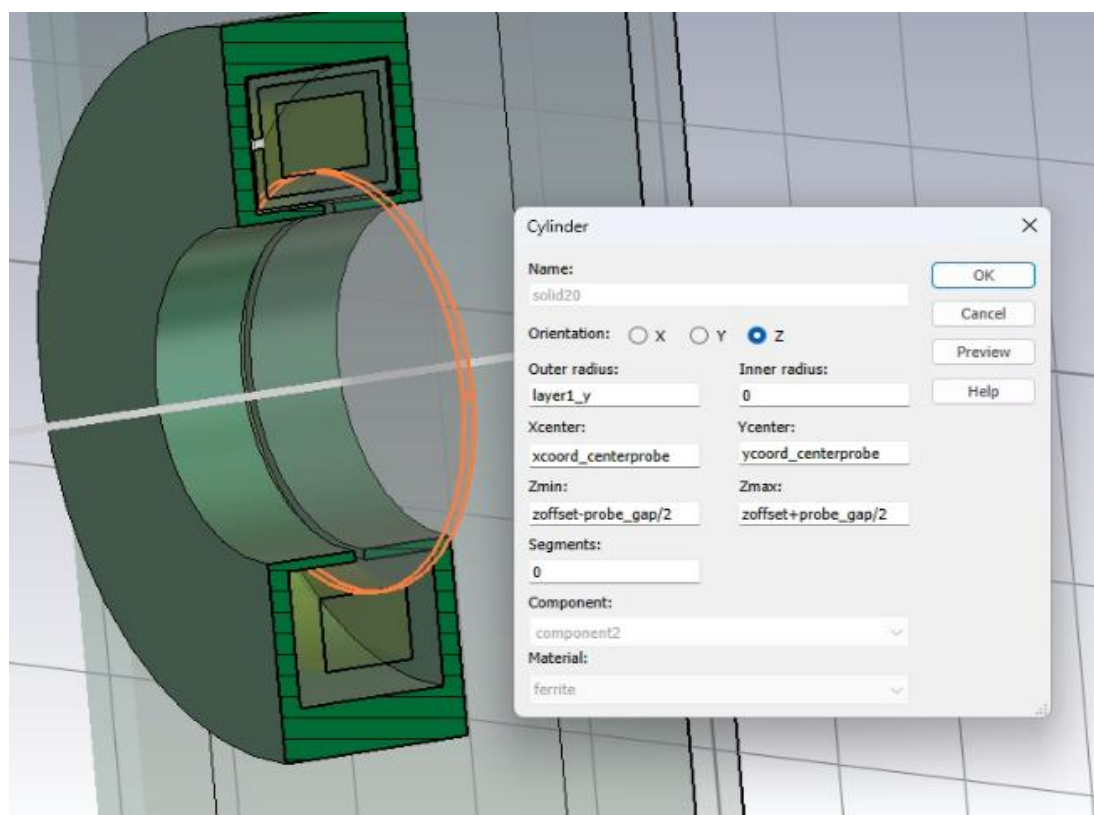
Εικόνα 4-19: Δημιουργία μοντέλου (Elements - Radd)

Ολοκληρώνοντας την δημιουργία του component2, θα πρέπει να κατασκευαστεί και η εξωτερική μεταλλική επιφάνεια (solid15), της οποίας η δομή και τα υλικά κατασκευής είναι γνωστά.

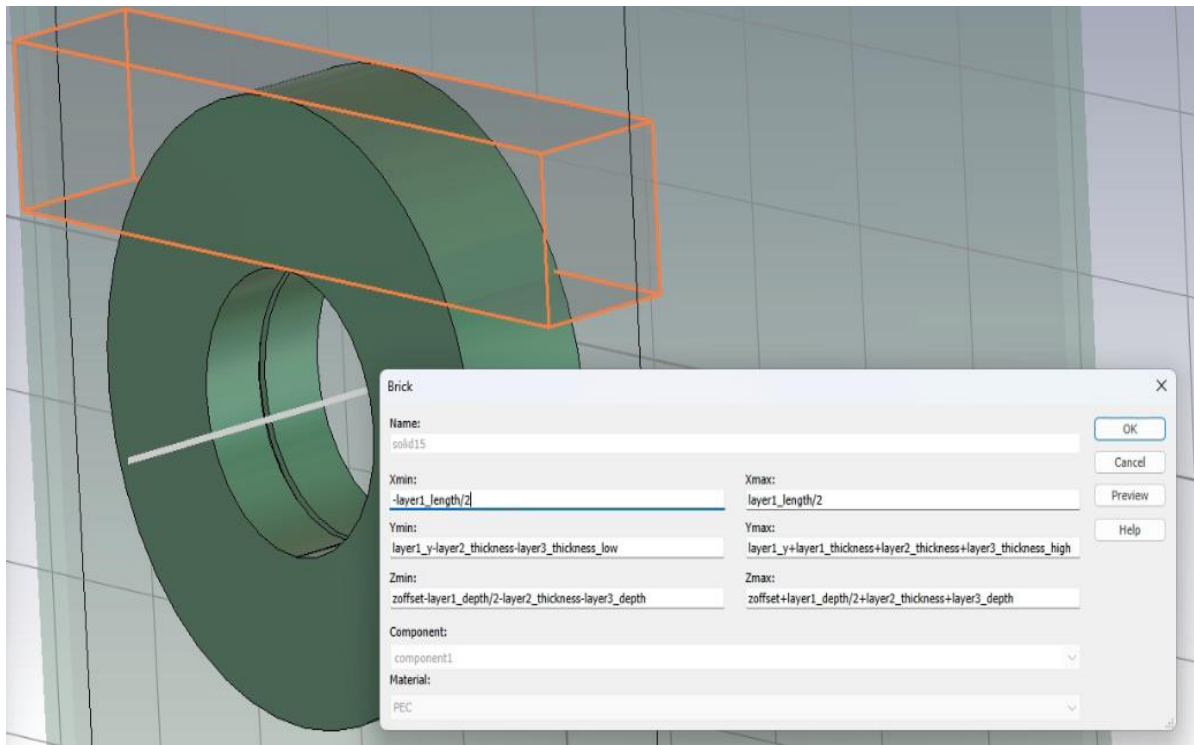
Παρακάτω, λοιπόν, παρατίθενται οι αντίστοιχες εικόνες που υποδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάστηκε και η υποδομή αυτή:



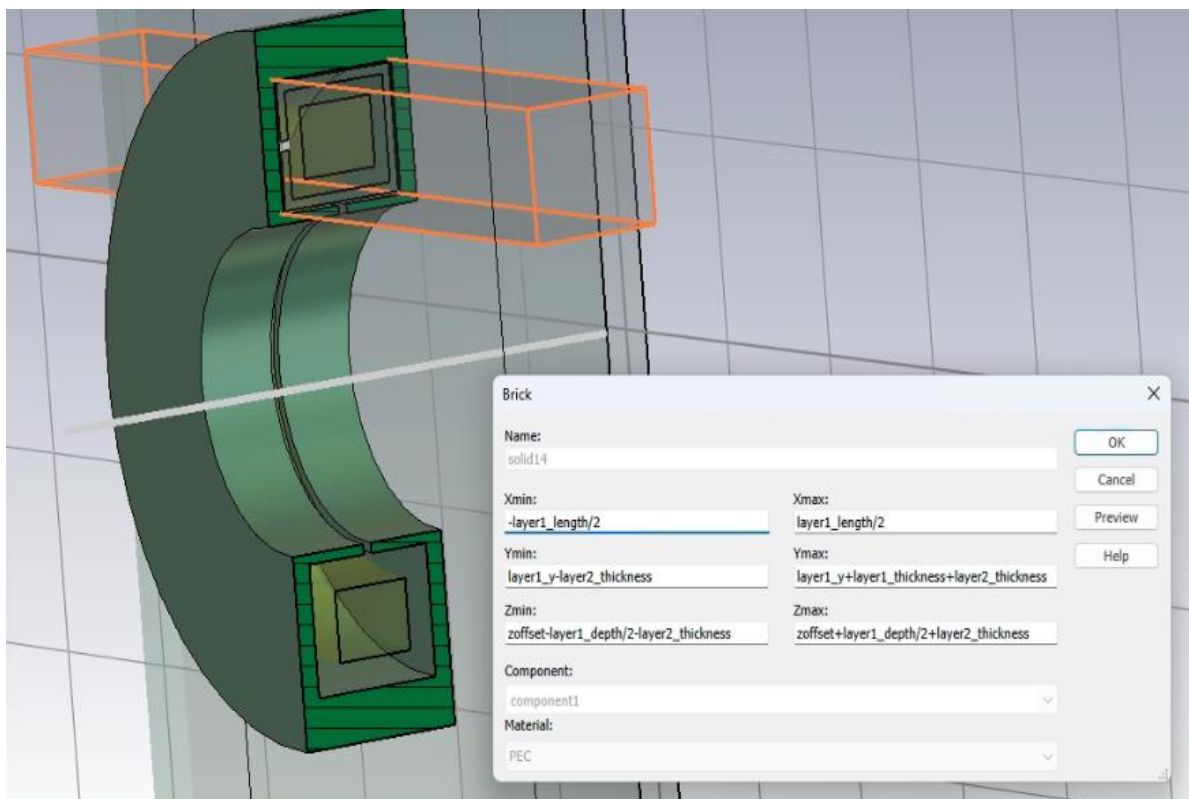
Εικόνα 4-20: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - Cylinder - I)



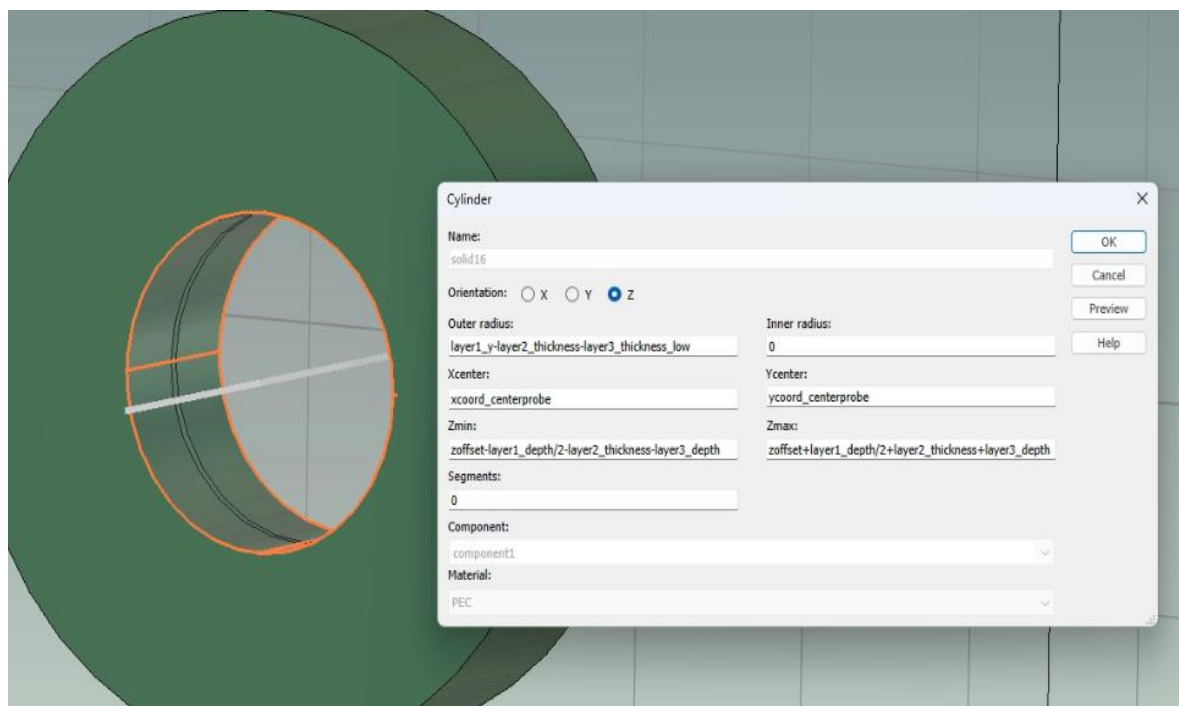
Εικόνα 4-21: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - Cylinder - II)



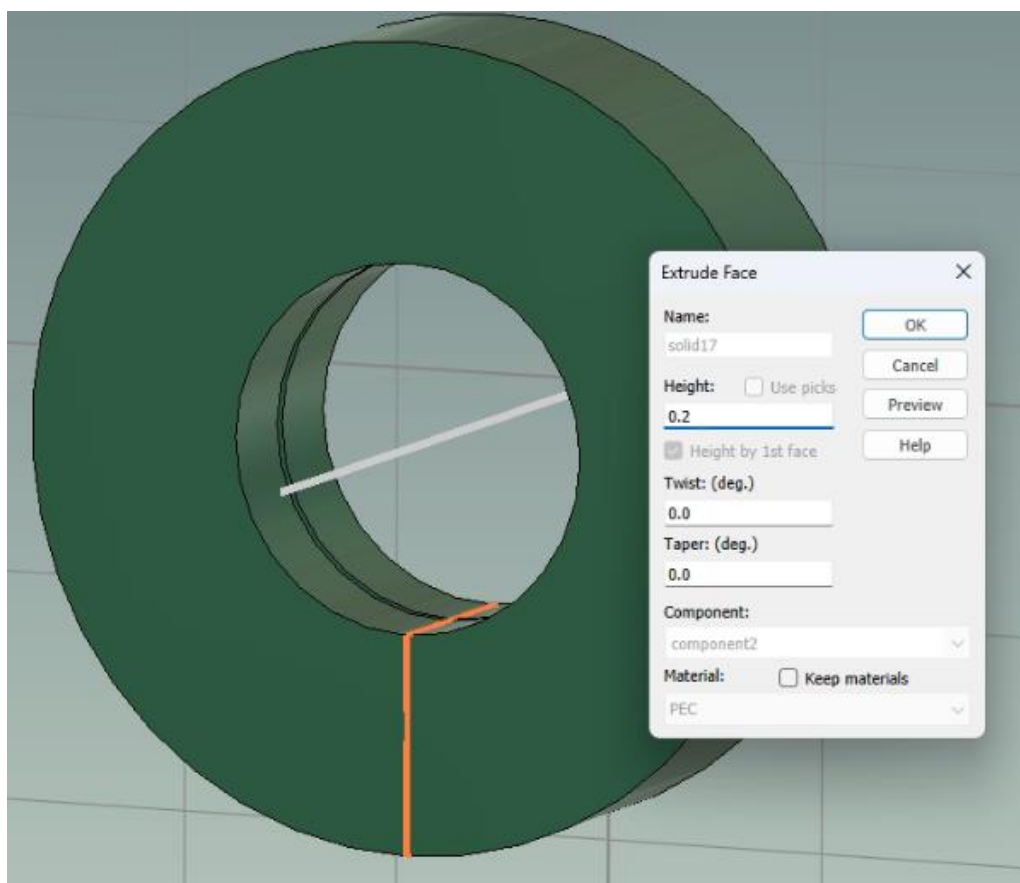
Εικόνα 4-22: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - Brick - I)



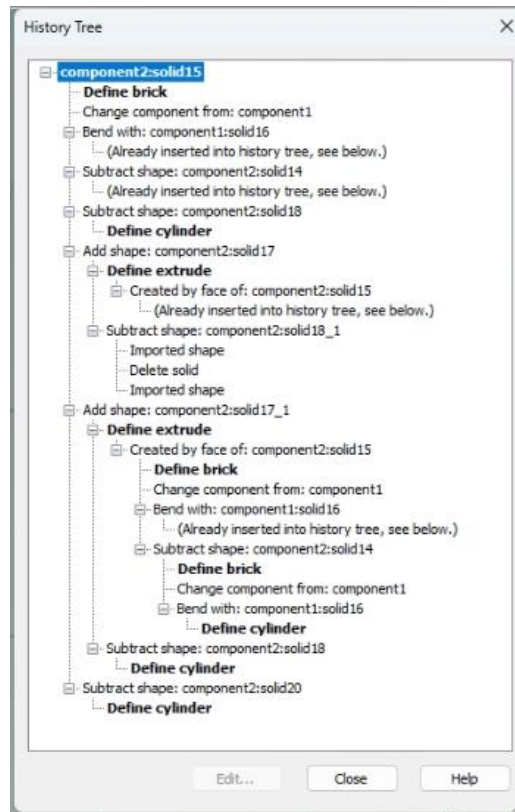
Εικόνα 4-23: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - Brick - II)



Εικόνα 4-24: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - Cylinder - ΙΙΙ)

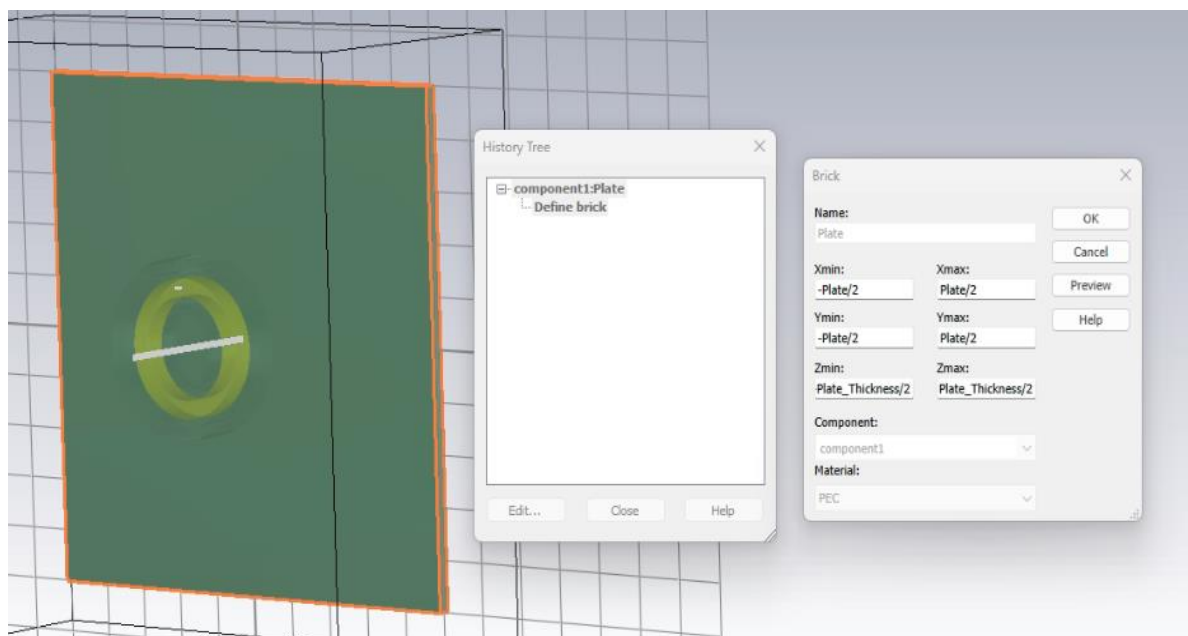


Εικόνα 4-25: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - Extrude Face)

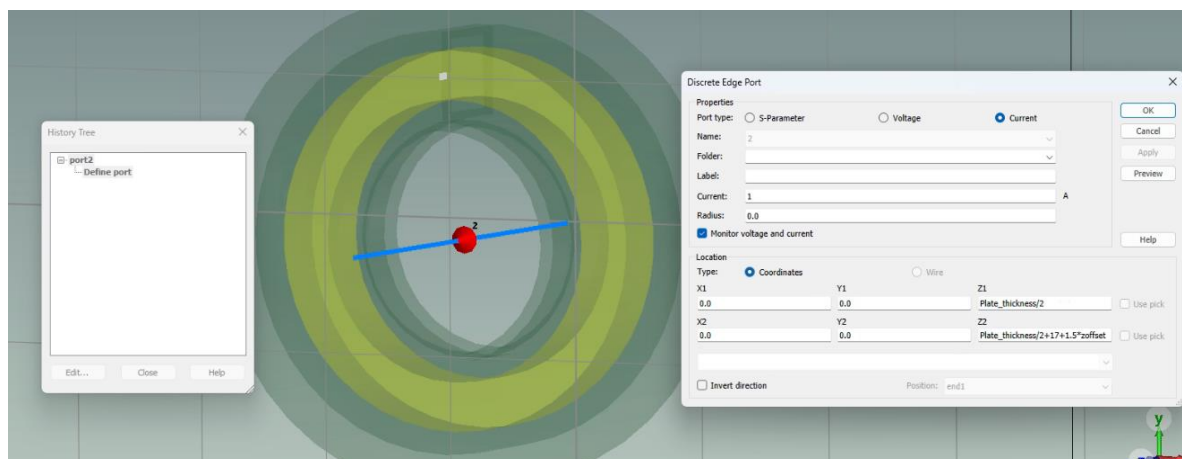


Εικόνα 4-26: Δημιουργία μοντέλου (Εξωτερική Μεταλλική Επιφάνεια - History Tree)

Τέλος, φαίνονται παρακάτω και ο τρόπος κατασκευής της πλάκας (component1) καθώς και της θύρας ρεύματος εισόδου (port2):



Εικόνα 4-27: Δημιουργία μοντέλου (Πλάκα - Brick)



Εικόνα 4-28: Δημιουργία μοντέλου (Θύρα Ρεύματος - port2)

Στην συνέχεια, μετά και την δομική δημιουργία του μοντέλου, θα δοθούν οι τιμές των παραμέτρων (values) και θα καθοριστούν ποιων παραμέτρων οι τιμές είναι υπό διερεύνηση.

4.5 Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου

Η χρήση των σωστών τιμών των παραμέτρων του μοντέλου αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες δυσκολίες της μελέτης μας, διότι μπορεί από την μία κάποιες διαστάσεις να είναι γνωστές ή να δύνανται να μετρηθούν από εμάς (μέσω για παράδειγμα ενός ακριβούς παχυμέτρου), από την άλλη όμως υπάρχουν και τιμές που είναι εντελώς άγνωστες, και ο μόνος τρόπος να βρεθούν είναι μέσω επανειλημμένων δοκιμών και προσομοιώσεων.

Στον **Πίνακα 4-2**, λοιπόν, φαίνονται οι γνωστές παράμετροι του μοντέλου:

Πίνακας 4-2: Τιμές των γνωστών παραμέτρων του μοντέλου

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
layer1_depth	9	layer3_depth	2
layer1_length	100,4	layer3_thickness_high	5
layer1_thickness	7	layer3_thickness_low	1
layer1_y	20	probe gap	1
layer2_thickness	3	Rload	50

Από το σύνολο, λοιπόν, των παραμέτρων, στον **Πίνακα 4-3**, φαίνονται οι παράμετροι εκείνοι οι οποίοι είναι υπό διερεύνηση και των οποίων οι τιμές θα προσεγγιστούν στην συνέχεια.

Πίνακας 4-3: Υπό διερεύνηση παράμετροι του μοντέλου

Παράμετροι – Υπό Διερεύνηση					
dispersion_time	gap	Mu_static	Radd	winding_gap	winding_thickness

Κεφάλαιο 5: Προσομοιώσεις και επεξεργασία αποτελεσμάτων

5.1 Σκοπός των προσομοιώσεων

Η ανάγκη για προσομοιώσεις προκύπτει από τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου της αμπεροτσιμπίδας. Συγκεκριμένα, όπως είδαμε και παραπάνω, για την αμπεροτσιμπίδα είναι άγνωστες οι παράμετροι του υλικού του φερρίτη και του εσωτερικού τυλίγματος.

Για την εύρεσή τους λοιπόν, θα ακολουθηθούν τα εξής στάδια:

- Καταρχάς, θα γίνει η προσπάθεια να βρεθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι υπό διερεύνηση παράμετροι αυτοί, την λειτουργία του μοντέλου (patterns). Αυτό θα φανεί συγκρίνοντας τις κυματομορφές διαφόρων προσομοιώσεων, αλλάζοντας κάθε φορά τις τιμές αυτές.
- Έπειτα, αφού ευρεθούν τα παραπάνω patterns, θα γίνει η προσπάθεια προσέγγισης των σωστών τιμών των παραπάνω παραμέτρων για μία κυματομορφή ρεύματος εισόδου, κατά προσέγγιση μέσα από το λογισμικό και στην συνέχεια με περισσότερη ακρίβεια.
- Τέλος, με βάση τις τιμές του προηγούμενου βήματος, θα επαληθευθούν οι τιμές και πιθανώς θα τροποποιηθούν για διαφορετικές κυματομορφές ρεύματος εισόδου, προσομοιώνοντας διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

5.2 Εύρεση των patterns των υπό διερεύνηση παραμέτρων

Για την εύρεση των ζητούμενων patterns, αρχικά θα μελετηθούν οι υπό διερεύνηση παράμετροι οι οποίες αφορούν το εσωτερικό τύλιγμα του αισθητήρα:

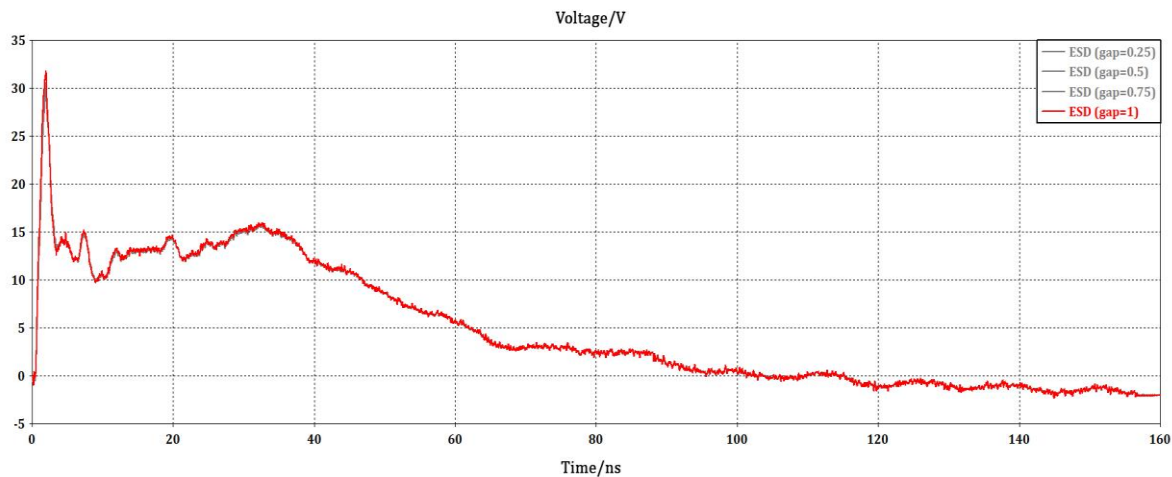
- **gap** (διάκενο μεταξύ εσωτερικού τυλίγματος και φερρίτη)
- **winding_gap** (διάκενο μεταξύ των ακροδεκτών του εσωτερικού τυλίγματος)
- **winding_thickness** (πάχος εσωτερικού τυλίγματος)

Εν συνεχεία, θα διερευνηθούν οι παράμετροι που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του φερρίτη, καθώς και την απόκριση του αισθητήρα, οι οποίες φαίνονται παρακάτω:

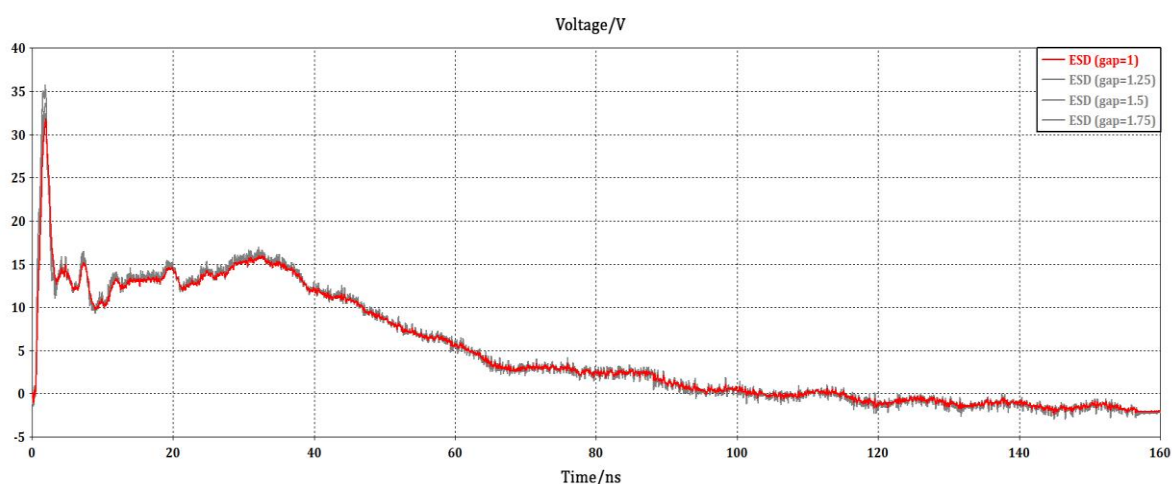
- **dispersion_time** (χρόνος διασποράς φερρίτη)
- **Mu_static** (μαγνητική διαπερατότητα φερρίτη)
- **Radd** (αντίσταση που μοντελοποιεί την μη γραμμική απόκριση στις χαμηλές συχνότητες)

5.2.1 Διερεύνηση της παραμέτρου του διακένου μεταξύ εσωτερικού τυλίγματος και φερρίτη «gap»

Στα παρακάτω σχήματα, παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τα οποία προέκυψαν με διερεύνηση της τιμής της παραμέτρου «gap» (δυνατές τιμές $0 < \text{gap} < 2\text{mm}$):



Σχήμα 5-1: Προσομοιώσεις - Patterns (gap - I)

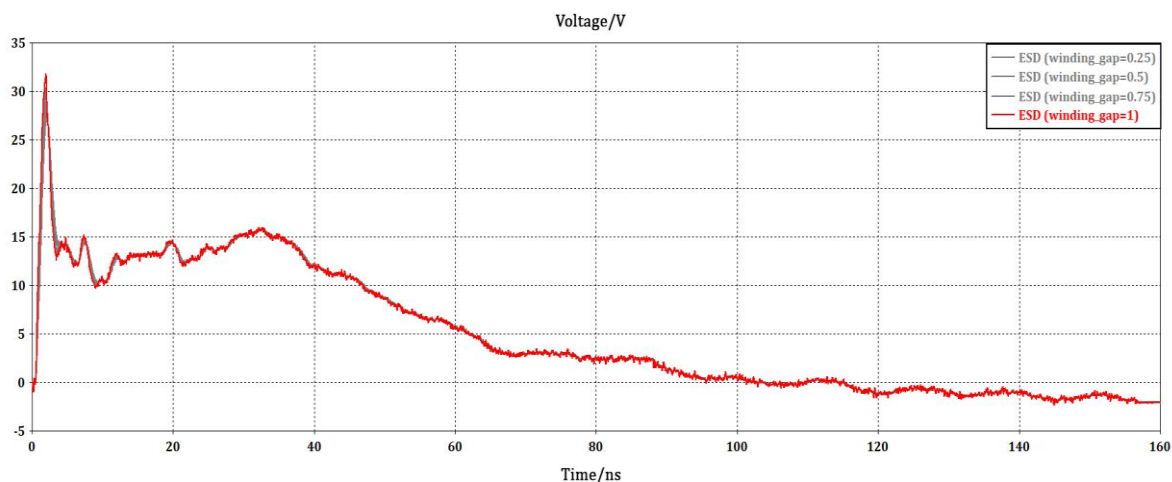


Σχήμα 5-2: Προσομοιώσεις - Patterns (gap - II)

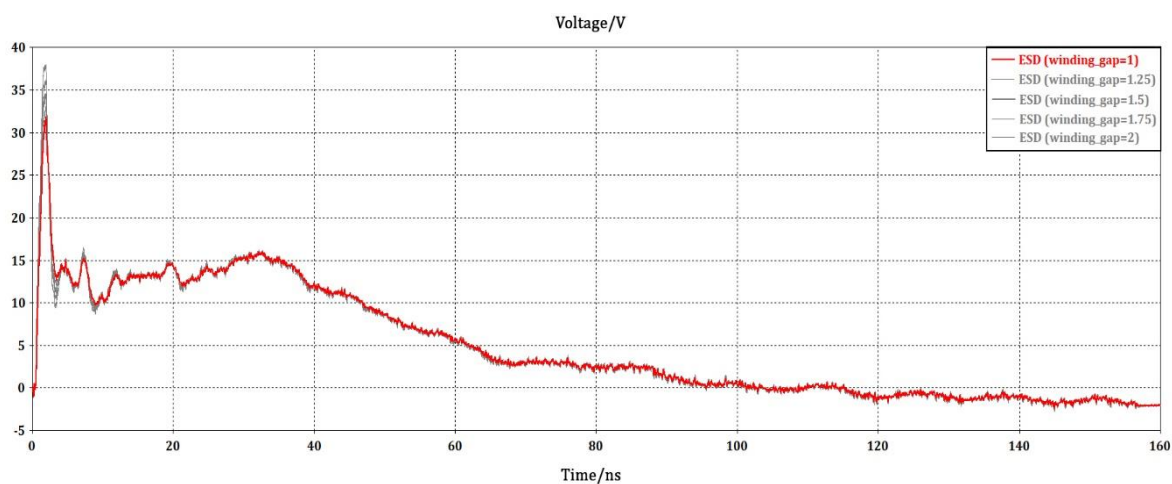
Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι, για $0 < \text{gap} < 1\text{mm}$, οι μεταβολές στην κυματομορφή είναι αμελητέες, ενώ για $1\text{mm} < \text{gap} < 2\text{mm}$, οι μεταβολές είναι πάλι μικρές αλλά όχι εντελώς ανεπαίσθητες. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι με αύξηση της τιμής της παραμέτρου «gap» υπάρχει μια μικρή αύξηση στη μέγιστη τιμή του ρεύματος της πρώτης κορυφής της κυματομορφής, χωρίς να επηρεάζεται ιδιαίτερα η υπόλοιπη κυματομορφή (εκτός από την εισαγωγή αμελητέου θορύβου). Η παραπάνω παρατήρηση αναδεικνύει την ικανότητα ελέγχου της μέγιστης αυτής τιμής για μικρές, όμως, μεταβολές μέσω αυτής της παραμέτρου.

5.2.2 Διερεύνηση της παραμέτρου του διακένου μεταξύ των ακροδεκτών του εσωτερικού τυλίγματος «winding_gap»

Στην συνέχεια, παρατίθενται στα παρακάτω σχήματα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τα οποία προέκυψαν με μεταβολή της τιμής της παραμέτρου «winding_gap» (δεν υπάρχει περιορισμός για τις τιμές του):



Σχήμα 5-3: Προσομοιώσεις - Patterns (winding_gap - I)



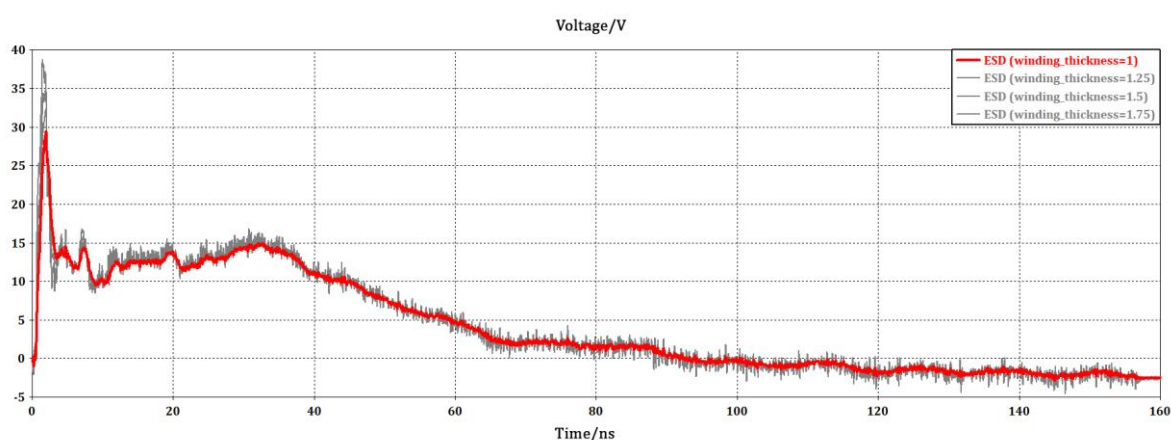
Σχήμα 5-4: Προσομοιώσεις - Patterns (winding_gap - II)

Όπως και προηγουμένως, παρατηρείται ότι για $0 < \text{winding_gap} < 1\text{mm}$, οι μεταβολές στην κυματομορφή είναι αμελητέες, ενώ για $1\text{mm} < \text{winding_gap} < 2\text{mm}$, οι μεταβολές στη μέγιστη τιμή του ρεύματος πρώτης κορυφής είναι λίγο εντονότερες σε σχέση με την παράμετρο «gap» με την εξής διαφοροποίηση: ενώ η υπόλοιπη κυματομορφή φαίνεται να είναι εντελώς απαλλαγμένη από την αύξηση του θορύβου, παρατηρείται στο πέρας της πρώτης κορυφής μία απότομη «βύθιση» της τιμής του ρεύματος, η οποία γίνεται εντονότερη με την αύξηση της τιμής της παραμέτρου. Οι παραπάνω παρατηρήσεις αναδεικνύουν την

ικανότητα ελέγχου αυτής της παραμέτρου όχι μόνο στην τιμή του ρεύματος πρώτης κορυφής, όπως και προηγουμένως, αλλά και στην τιμή του ρεύματος και της μορφής της κυματομορφής ακριβώς μετά το πέρας της πρώτης κορυφής.

5.2.3 Διερεύνηση της παραμέτρου του πάχους του εσωτερικού τυλίγματος «winding_gap»

Ολοκληρώνοντας την διερεύνηση που αφορά το τύλιγμα, παρακάτω φαίνονται και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τα οποία προέκυψαν με μεταβολή της τιμής της παραμέτρου «winding_thickness» (για την συγκεκριμένη παράμετρο το μοντέλο εισήγαγε από μόνο του τον περιορισμό $1\text{mm} \leq \text{winding_thickness} < 2\text{mm}$):



Σχήμα 5-5: Προσομοιώσεις - Patterns (winding_thickness)

Από το παραπάνω σχήμα, είναι αντιληπτό ότι με μεταβολή της τιμής της συγκεκριμένης παραμέτρου, η συμπεριφορά της κυματομορφής είναι παρόμοια με την περίπτωση της διερεύνησης της παραμέτρου «winding_gap», με την διαφορά όμως ότι καθώς αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου «winding_thickness» εισάγεται πολύ εντονότερος θόρυβος σε ολόκληρη την κυματομορφή, το οποίο είναι ανεπιθύμητο. Ίσως, για μια πολύ μικρή μεταβολή, να ήταν εφικτή η ρύθμιση της κυματομορφής με μεταβολή αυτής της παραμέτρου, αλλά αφού ίδια ή έστω παρόμοια ρύθμιση μπορεί να επιτευχθεί και με μεταβολή των παραμέτρων «winding_gap» ή «gap», η συγκεκριμένη παράμετρος θα αναχθεί ως ακατάλληλη για την διαδικασία ρύθμισης της βελτιστοποίησης του μοντέλου.

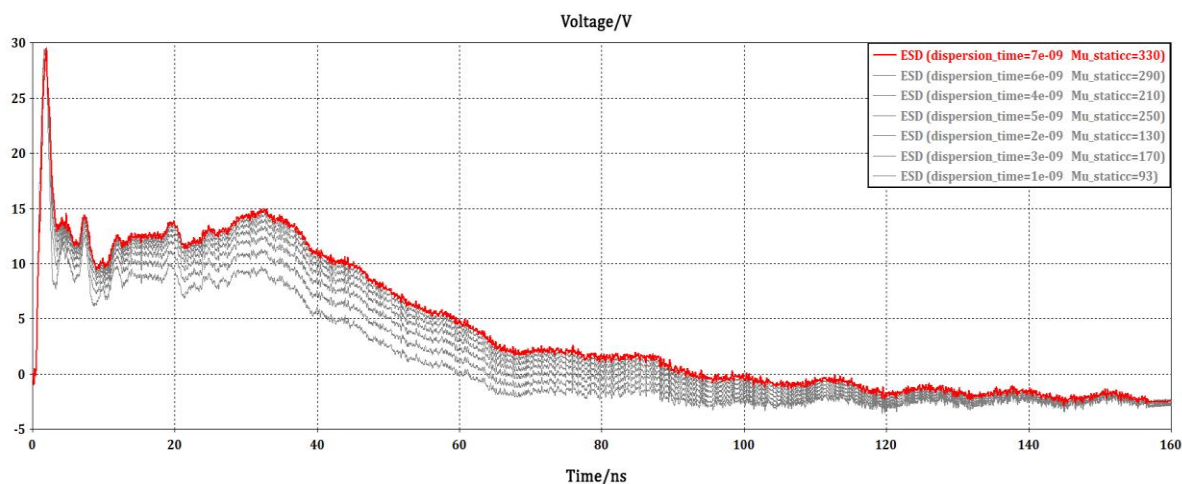
Επομένως, η τιμή της παραμέτρου «winding_thickness» θα παραμείνει σταθερή στην αρχικά ορισμένη τιμή (**winding_thickness = 1mm**).

5.2.4 Διερεύνηση των παραμέτρων της μαγνητικής διαπερατότητας «Mu_static» και του χρόνου διασποράς «dispersion_time»

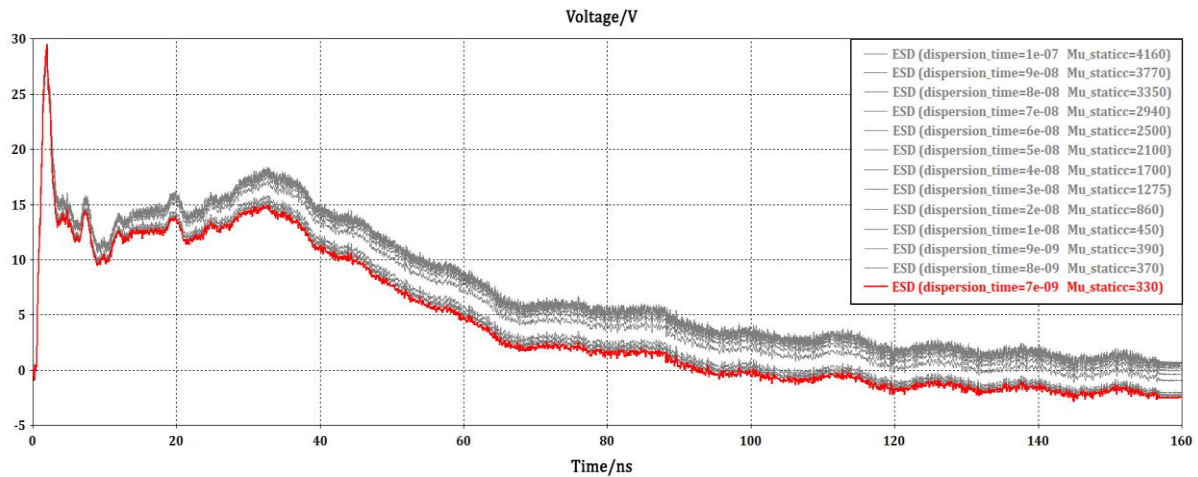
Ακολουθώς, θα γίνει η διερεύνηση των τιμών των παραμέτρων που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του φερρίτη. Ως γνωστόν, οι παράμετροι «dispersion_time» και «Mu_static» σε ένα φερρίτη παρουσιάζουν κάποια εξάρτηση μεταξύ τους, η οποία συνήθως είναι και αρκετά περίπλοκη. Οπότε, λοιπόν, και στην προκειμένη περίπτωση για την εύρεση της εξάρτησης που παρουσιάζουν ακολουθήθηκε η παρακάτω ιδιαίτερη μέθοδος:

- Καταρχάς, επιλέχθηκε ένα «ικανοποιητικό» ως προς την παραγόμενη του κυματομορφή ζευγάρι τιμών των παραμέτρων «Mu_static» και «dispersion_time»
- Έπειτα, έγινε η προσπάθεια για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος τιμών της παραμέτρου «dispersion_time», να επιλέγεται κάθε φορά μία τιμή της παραμέτρου «Mu_static», η οποία θα παρουσιάζει, όσο είναι εφικτό, την ίδια μέγιστη τιμή ρεύματος πρώτης κορυφής με το αρχικά επιλεγμένο ζευγάρι τιμών «Mu_static» και «dispersion_time».

Παρακάτω, λοιπόν, παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τα οποία προέκυψαν με εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου (οι περιορισμοί των τιμών των παραμέτρων θα προκύψουν με την εφαρμογή της μεθόδου):

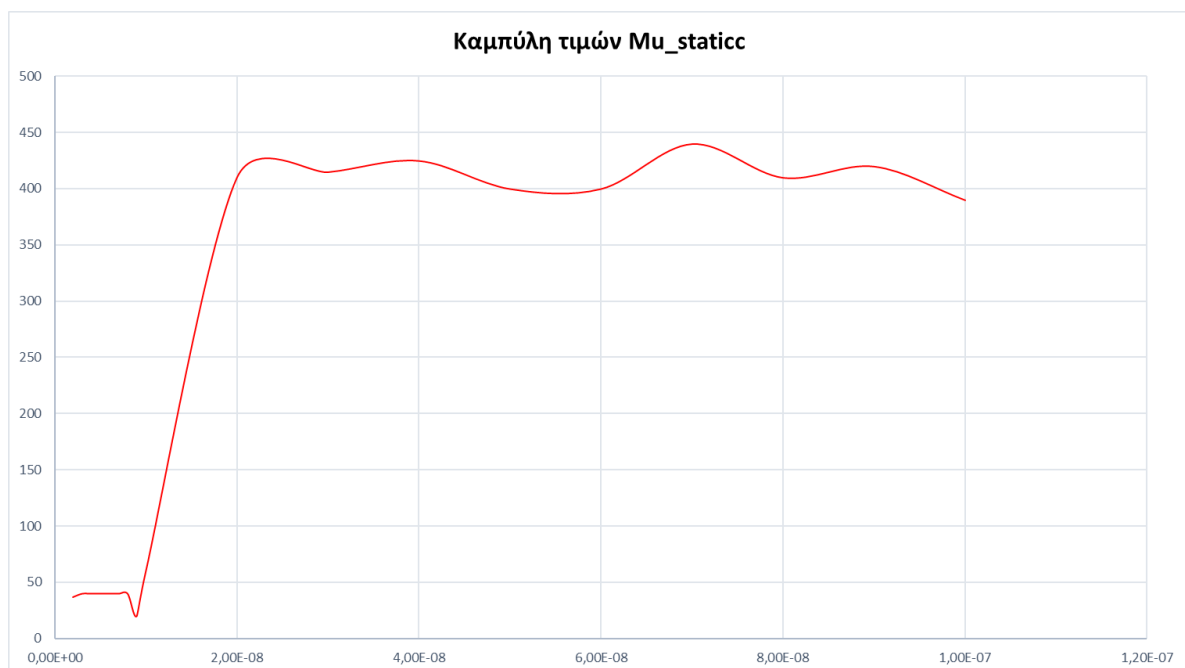


Σχήμα 5-6: Προσομοιώσεις - Patterns (Mu_static και dispersion_time - I)



Σχήμα 5-7: Προσομοιώσεις - Patterns (Mu_static και dispersion_time - II)

Καταρχάς, το πρώτο που αναδεικνύεται από τα παραπάνω αποτελέσματα, είναι ότι η παράμετρος «**Mu_static**» με την αύξηση της, ενισχύει ολόκληρη την κυματομορφή, με μη γραμμικό όμως τρόπο. Μάλιστα, μέσω της αύξησης αυτής αποδεικνύεται ότι όταν **dispersion_time** > 10ns και **Mu_static** > 450, αρχίζει να παρουσιάζεται κάποιου είδους κορεσμός. Αυτό φαίνεται και στην παρακάτω καμπύλη, η οποία αποτυπώνει τον ρυθμό αύξησης των τελικών τιμών της παραμέτρου «**Mu_static**» κατά την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου:



Σχήμα 5-8: Καμπύλη τιμών Mu_static

Επιπλέον, κάτι ακόμη το οποίο είναι αντιληπτό από τις παραπάνω δοκιμές, είναι ότι οι μικρές τιμές της παραμέτρου «**dispersion_time**» συνδυάζονται με μικρές τιμές της παραμέτρου

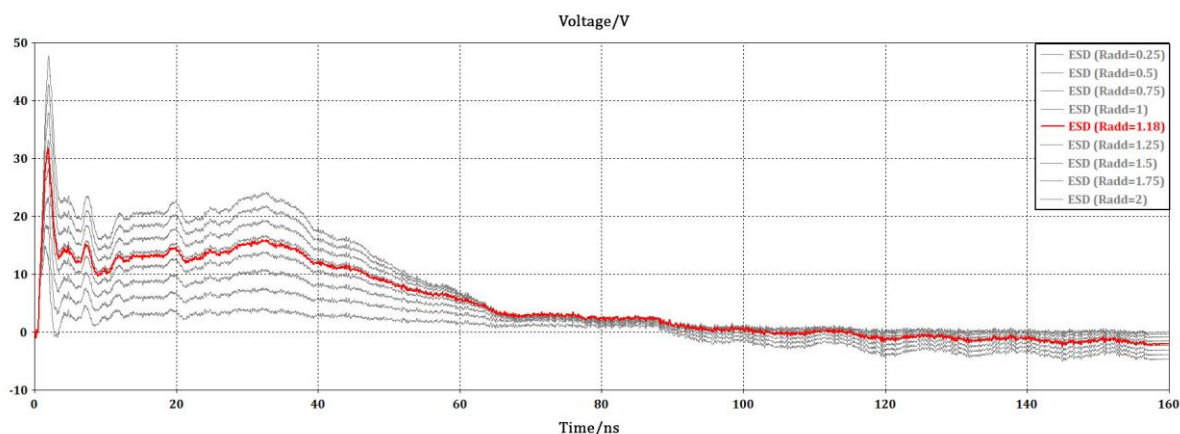
«**Mu_static**» και οι μεγάλες τιμές της παραμέτρου «**dispersion_time**» με μεγάλες τιμές της παραμέτρου «**Mu_static**». Αυτή η συμπεριφορά είναι φυσιολογική και αναμενόμενη, δεδομένου ότι το «**dispersion_time**» καθορίζει την ικανότητα απόκρισης του μοντέλου. Επομένως, όσο πιο ικανό στην απόκριση του είναι ένα μαγνητικό υλικό, δηλαδή όσο μικρότερη είναι η τιμή του «**dispersion_time**», τόσο λιγότερη ενίσχυση θα χρειάζεται, δηλαδή τόσο μικρότερη θα είναι η τιμή της παραμέτρου «**Mu_static**» και αντίστροφα.

Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι με εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου, προέκυψε και το μέγιστο δυνατό εύρος των τιμών της παραμέτρου «**dispersion_time**». Συγκεκριμένα, μέσω των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν καταδείχθηκε ότι $1\text{ns} < \text{dispersion_time} < 100\text{ns}$. Αναλυτικότερα, όταν $\text{dispersion_time} < 1\text{e-}09$ η κυματομορφή κατά τις δοκιμές παρουσίασε εντονότερα φαινόμενα αποσβεννύμενων ταλαντώσεων (**ringing effect**) το οποίο δεν εξομαλύνθηκε ακόμη και με μικρότερες τιμές της παραμέτρου «**Mu_static**». Αντίθετα, για $\text{dispersion_time} > 100\text{ns}$ παρουσιάστηκε μια αδυναμία ικανοποιητικής απόκρισης του μοντέλου στις υψηλές συχνότητες του ρεύματος ακόμα και για αρκετά μεγάλες τιμές της παραμέτρου «**Mu_static**».

Σημαντικότερο εύρημα των ανωτέρω δοκιμών είναι η διαπίστωση ότι είναι αδύνατη η εύρεση παραπάνω από μίας λύσεων για τις τιμές αυτών των παραμέτρων (άρα για και όλων των υπό διερεύνηση παραμέτρων του μοντέλου), διότι όπως φαίνεται είναι αδύνατο για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων, να επιτευχθεί αρκετά ακριβής προσομοίωση της πρώτης κορυφής της κυματομορφής χωρίς μετατόπιση της υπόλοιπης κυματομορφής, είτε θετική είτε αρνητική, στον άξονα $y'y$. Συνεπώς ο αναζητούμενος συνδυασμός τιμών των υπό διερεύνηση παραμέτρων θα πρέπει να είναι σε πλήθος **μοναδικός**.

5.2.5 Διερεύνηση της παραμέτρου της αντίστασης μοντελοποίησης της μη γραμμικής απόκρισης χαμηλών συχνοτήτων «**Radd**»

Ολοκληρώνοντας την διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι παράμετροι οι οποίοι είναι άγνωστοι επηρεάζουν το μοντέλο (εύρεση των patterns), παρακάτω φαίνονται και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τα οποία προέκυψαν με μεταβολή της τιμής της παραμέτρου «**Radd**» (δεν υπάρχει περιορισμός για τις τιμές της):



Σχήμα 5-9: Προσομοιώσεις - Patterns (Radd)

Η χρήση της συγκεκριμένης παραμέτρου, αποσκοπεί στην μοντελοποίηση της μη γραμμικής απόκρισης των χαμηλών συχνοτήτων που παρουσιάζει ο πραγματικός αισθητήρας ρεύματος FCC F-65. Σαν παράμετρος φαίνεται να επηρεάζει αναλογικά το ύψος ολόκληρης της κυματομορφής και να μην επηρεάζει καθόλου την μορφή της. Συνεπώς, αρκεί να βρεθεί η τιμή για την οποία επιτυγχάνεται ο κατάλληλος «λόγος» απόκρισης κι αυτή η ρύθμιση θα διατηρηθεί για κάθε πιθανή είσοδο ρεύματος. Η τιμή η οποία μετά από δοκιμές επελέγη ως τελική είναι **Radd = 1,18Ω**.

Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω patterns, απαιτείται στη συνέχεια να γίνουν αναλυτικότερες προσομοιώσεις για την ακριβή εύρεση των τιμών και των παρακάτω (υπό διερεύνηση) παραμέτρων:

- **dispersion_time**
- **Mu_static**
- **gap**
- **winding_gap**

5.3 Εύρεση των τιμών των υπό διερεύνηση παραμέτρων

Για την εύρεση των τιμών των παραπάνω υπό διερεύνηση παραμέτρων, είναι απαραίτητη η σύγκριση των παραγόμενων αποτελεσμάτων προσομοίωσης (simu) με μετρήσεις που έχουν ληφθεί με μία πραγματική αμπεροτσιμπίδα FCC F-65 στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων (clamp) για διαφορετικές κυματομορφές ηλεκτροστατικής εκφορτίσης με χρήση διαφορετικών γεννητριών. Σε αυτές τις μετρήσεις πραγματοποιήθηκε και ταυτόχρονη καταγραφή της κυματομορφής με χρήση ενός στόχου Pellegrini, όπως καθορίζεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2:2008. Για τη μελέτη και σύγκριση των παραπάνω κυματομορφών

αναπτύχθηκε το παρακάτω πρόγραμμα στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, με σκοπό τον πιο ακριβή οπτικό αλλά και ποσοτικό έλεγχο του κατά πόσο το αποτέλεσμα της προσομοίωσης (simu) προσεγγίζει την πραγματική μετρούμενη από την αμπεροτσιμπίδα κυματομορφή (clamp), καθώς και την ανάδειξη της απόκλισης και των δύο παραπάνω κυματομορφών από την ιδανική κυματομορφή (στόχος Pellegrini).

Στη συνέχεια, λοιπόν, παρουσιάζεται και αναλύεται το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε, με τα απαραίτητα σχόλια για την περιγραφή της λειτουργίας του:

```
% Καθαρισμός της κονσόλας, της μνήμης (από μεταβλητές) και κλείσιμο όλων
των ανοιχτών παραθύρων

clc;

close all;

clear all;

% Φόρτωση αρχείων clamp και Pellegrini

A = load('clamp_file.txt');

C = load('Pellegrini_file.txt');

% Άνοιγμα του αρχείου simulation για ανάγνωση σε μορφή κειμένου (τα δεδομένα
θεωρούνται συμβολοσειρές με διαχωριστικό το newline)

fid = fopen('simu_file.txt', 'rt');

data = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', '\n');

fclose(fid);

% Εύρεση του τελευταίου διαχωριστικού γραμμής

delimiter = '#-----
-----';

delimiterIndex = find(contains(data{1}, delimiter), 1, 'last');

% Λήψη των δεδομένων μετά το διαχωριστικό και μετατροπή των συμβολοσειρών
σε αριθμούς και σε πίνακα

numericData = data{1}(delimiterIndex+1:end);

B = cell2mat(cellfun(@(x) str2num(x), numericData, 'UniformOutput',
false));

% Υπολογισμός των χρόνων του clamp και του simulation

time1 = 10e8 * A(:, 1); % Αναλόγως το clamp προστίθεται κι ένας χρόνος
για κατακόρυφη ευθυγράμμιση με το simulation

time2 = B(:, 1);
```

```

% Τιμές ρεύματος από clamp, simulation και Pellegrini

clamp = A(:, 2);

simu = B(:, 2);

pele = C(:, 2);

% Δημιουργία γραμμικής κλίμακας για τον χρόνο

x = linspace(0, max(time2), length(time2));

% Παρεμβολή των τιμών pele και clamp στις νέες χρονικές στιγμές και
υπολογισμός απόκλισης clamp και simulation

peleInterp = transpose(interp1(time1, pele, x, 'linear'));

clampInterp = transpose(interp1(time1, clamp, x, 'linear'));

deviation = clampInterp - simu;

% Σχεδιασμός σε κοινό γράφημα των κυματομορφών Pellegrini, clamp και
simulation (για όλη την χρονική τους διάρκεια)

figure(1)

% Σχεδιασμός του clamp με παρεμβολή

p1 = plot(time2, clampInterp, 'LineWidth', 2);

% Εμφάνιση πλέγματος

grid on;

hold on;

% Σχεδιασμός του simulation με παρεμβολή

p2 = plot(time2, simu, 'LineWidth', 2);

% Σχεδιασμός του pellegrini με παρεμβολή

p3 = plot(time2, peleInterp, 'LineWidth', 2);

hold off;

% Προσθήκη υπομνήματος

legend('Clamp Measured','Simulation', 'Pellegrini Measured');

% Ετικέτα άξονα y

ylabel('Current (A)');

% Ετικέτα άξονα x

xlabel('Time (ns)');

% Όρια άξονα x

xlim([0 156.8]);

```

```

% Όρια άξονα y
ylim([-5 35]);

% Τίτλος γραφικής παράστασης
title('Current Waveforms (Whole)');

% Ρύθμιση της θέσης και του μεγέθους του παραθύρου
set(gcf, 'Position', [80 200 900 600]); %set(gca, 'fontsize', 18);

% Αποθήκευση της γραφικής παράστασης ως TIFF αρχείο
print(gcf, '-dtiff', 'Whole.tiff');

% Σχεδιασμός σε κοινό γράφημα των κυματομορφών Pellegrini, clamp και
simulation (zoom στο 1st peak - χρονική διάρκεια 0ns έως 7ns)

% Η δημιουργία του figure(2) είναι όμοια με του figure(1) οπότε όλες οι
εντολές που θα χρησιμοποιηθούν έχουν επεξηγηθεί

figure(2)

p1 = plot(time2, clampInterp, 'LineWidth', 2);

grid on;

hold on;

p2 = plot(time2, simu, 'LineWidth', 2);

p3 = plot(time2, peleInterp, 'LineWidth', 2);

hold off;

legend('Clamp Measured','Simulation', 'Pellegrini Measured');

ylabel('Current (A)');

xlabel('Time (ns)');

xlim([0 7]);

title('Current Waveforms (1st peak zoom)');

set(gcf, 'Position', [80 300 900 600]);

set(gca, 'fontsize', 18);

print(gcf, '-dtiff', '1stPeakZoom.tiff');

% Σχεδιασμός σε κοινό plot των κυματομορφών Pellegrini, clamp και simulation
(zoom στο 2nd peak)

% Η δημιουργία του figure(3) είναι όμοια με του figure(1) οπότε όλες οι
εντολές που θα χρησιμοποιηθούν έχουν επεξηγηθεί

figure(3)

p1 = plot(time2, clampInterp, 'LineWidth', 2);

```

```

grid on;

hold on;

p2 = plot(time2, simu, 'LineWidth', 2);

p3 = plot(time2, peleInterp, 'LineWidth', 2);

hold off;

legend('Clamp Measured','Simulation', 'Pellegrini Measured');

ylabel('Current (A)');

xlabel('Time (ns)');

xlim([10 40]);

title('Current Waveforms (2nd peak zoom)');

set(gcf, 'Position', [80 400 900 600]);

set(gca, 'fontsize', 18);

print(gcf, '-dtiff', '2ndPeakZoom.tiff');

% Σχεδιασμός σε κοινό plot των κυματομορφών Pellegrini, clamp και simulation
% (zoom στα 60ns)

% Η δημιουργία του figure(4) είναι όμοια με του figure(1) οπότε όλες οι
% εντολές που θα χρησιμοποιηθούν έχουν εξηγηθεί

figure(4)

p1 = plot(time2, clampInterp, 'LineWidth', 2);

grid on;

hold on;

p2 = plot(time2, simu, 'LineWidth', 2);

p3 = plot(time2, peleInterp, 'LineWidth', 2);

hold off;

legend('Clamp Measured','Simulation', 'Pellegrini Measured');

ylabel('Current (A)');

xlabel('Time (ns)');

xlim([55 65]);

title('Current Waveforms (60ns zoom)');

set(gcf, 'Position', [80 400 900 600]);

set(gca, 'fontsize', 18);

print(gcf, '-dtiff', '60nsZoom.tiff');

```

```
% Σχεδιασμός της απόκλισης των κυματομορφών clamp και simulation (για όλη
την χρονική διάρκεια)

% Η δημιουργία του figure(5) είναι όμοια με του figure(1) οπότε όλες οι
εντολές που θα χρησιμοποιηθούν έχουν επεξηγηθεί

figure(5)

plot(time2 - time2(1) + 1, deviation, 'LineWidth', 1.5, 'Color',
'#A2142F');

grid on;

ylabel('Current (A)');

xlabel('Time (ns)');

xlim([1 156.8]);

ylim([-7 5]);

title('Clamp - Simulation Current Value Deviation');

set(gcf, 'Position', [1000 200 900 600]);

set(gca, 'fontsize', 18);

print(gcf, '-dtiff', 'Deviation.tiff');
```

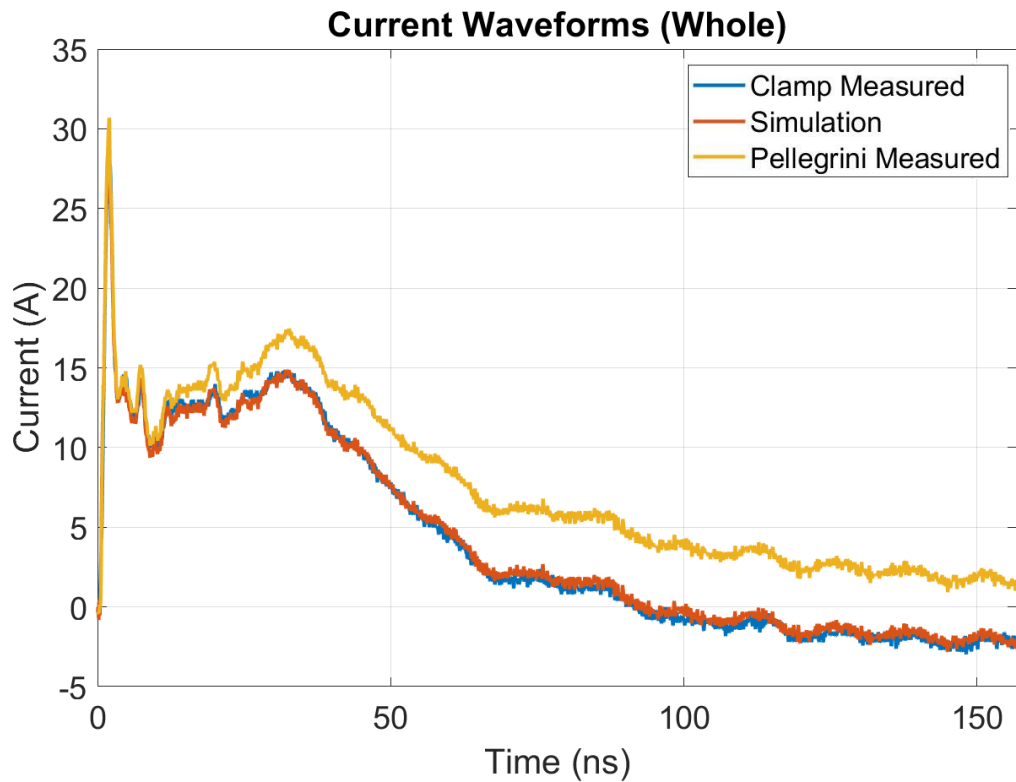
5.3.1 Αρχική εκτίμηση των τιμών των υπό διερεύνηση παραμέτρων

Η εκτέλεση του προγράμματος MATLAB, αρχικά πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των υπό διερεύνηση παραμέτρων του μοντέλου, για είσοδο ρεύματος μόνο από την γεννήτρια **NSG 438** για επίπεδο τάσης +8kV. Λαμβάνοντας υπόψιν τα προαναφερθέντα patterns των παραμέτρων, μέσα από το λογισμικό προσομοίωσης, έγινε ο ορισμός της (οπτικά) καταλληλότερης πρώτης δοκιμής των τιμών των παραμέτρων αυτών. Επομένως, οι τιμές που επιλέχθηκαν, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

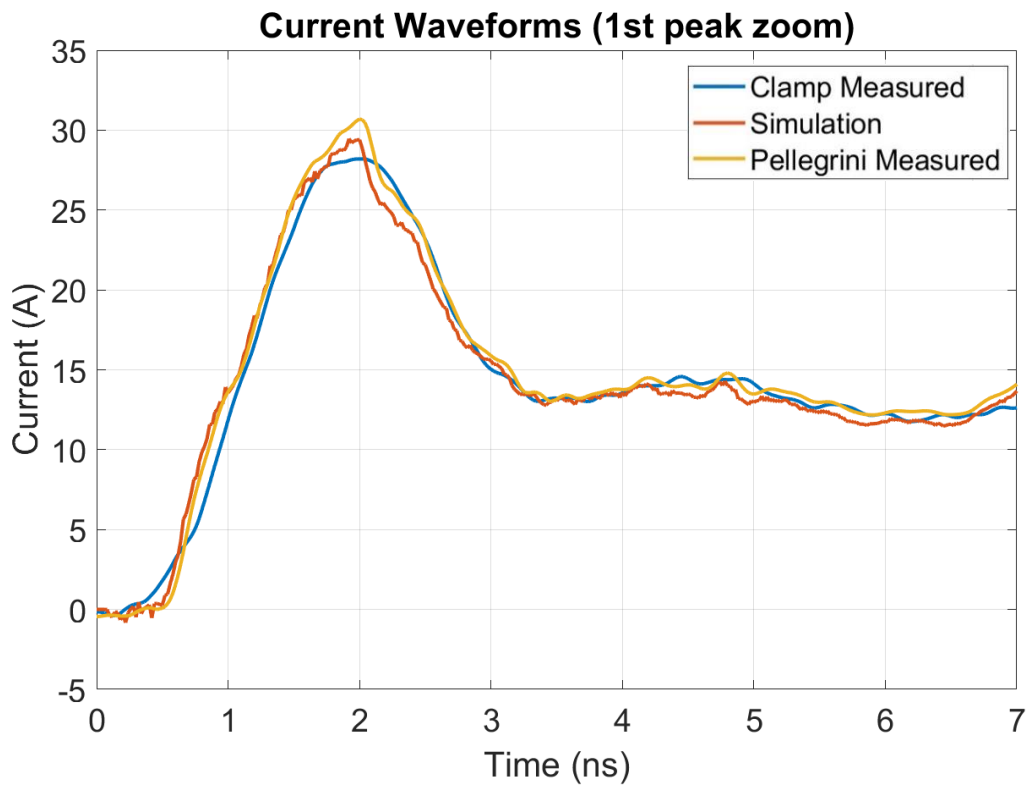
Πίνακας 5-1: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων (1η Δοκιμή)

Παράμετροι – Υπό διερεύνηση			
Mu_static	dispersion_time (ns)	gap (mm)	winding_gap (mm)
330	7	1	1

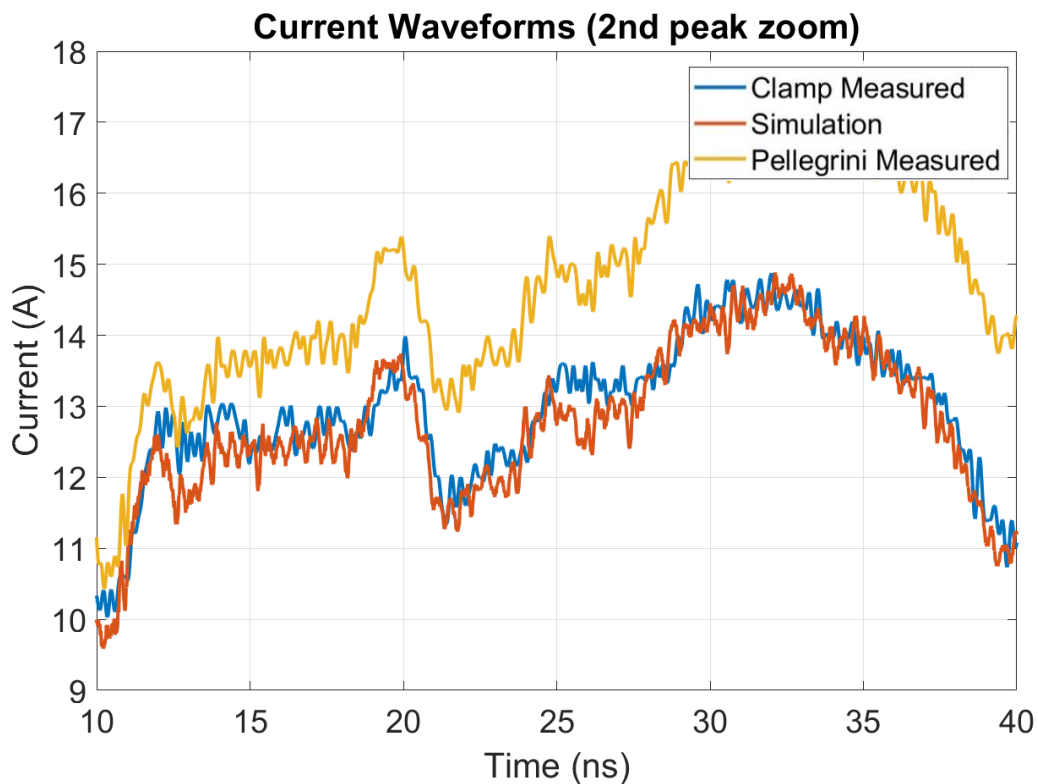
Λαμβάνοντας λοιπόν, το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για τις παραπάνω τιμές και εκτελώντας το πρόγραμμα MATLAB, προκύπτουν τα παρακάτω γραφήματα:



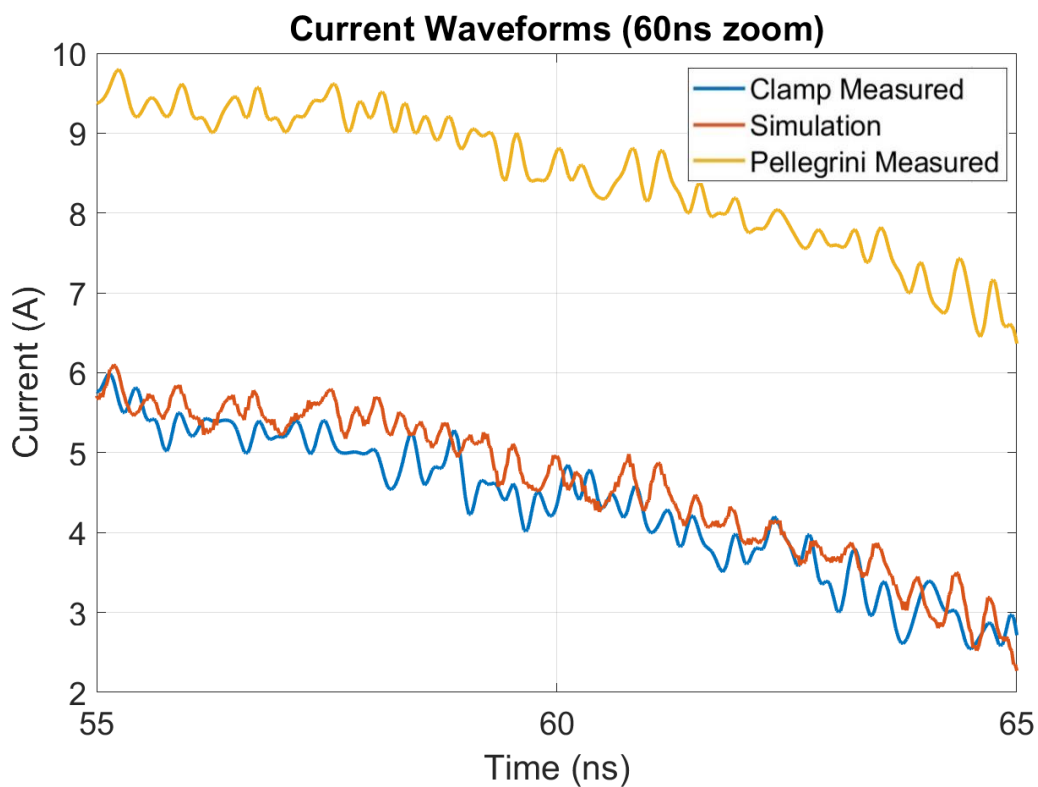
Σχήμα 5-10: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 438 – 8kV) – Συνολική κυματομορφή



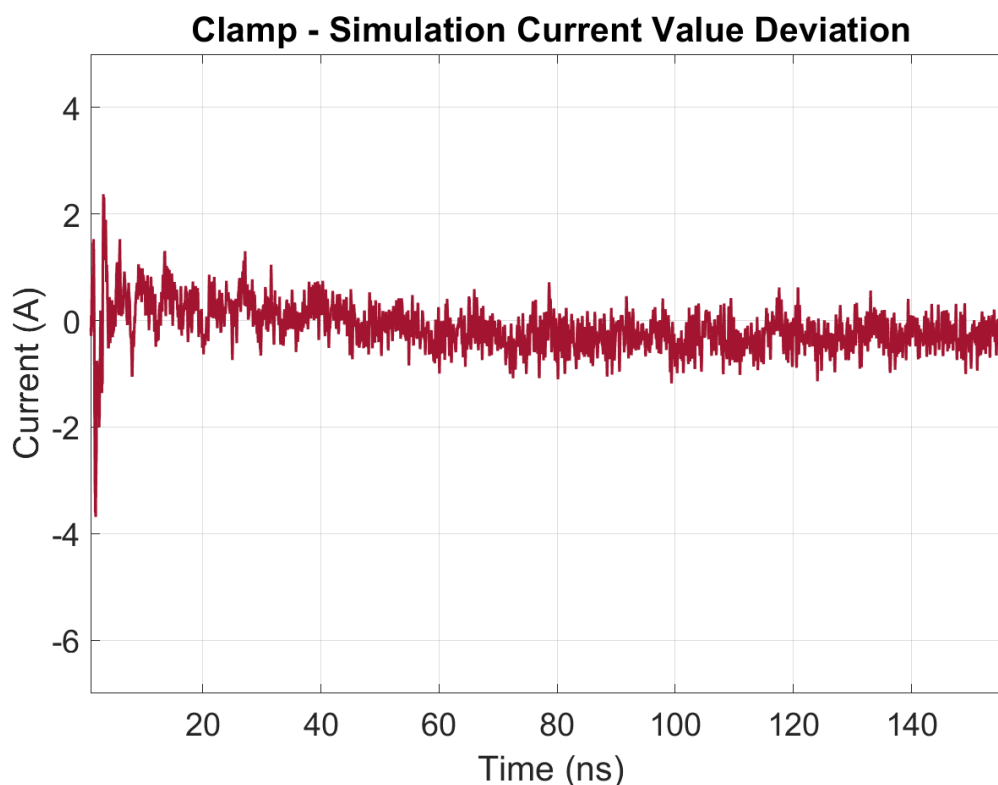
Σχήμα 5-11: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 438/+8kV) – Πρώτη κορυφή



Σχήμα 5-12: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 438/+8kV) – Δεύτερη κορυφή



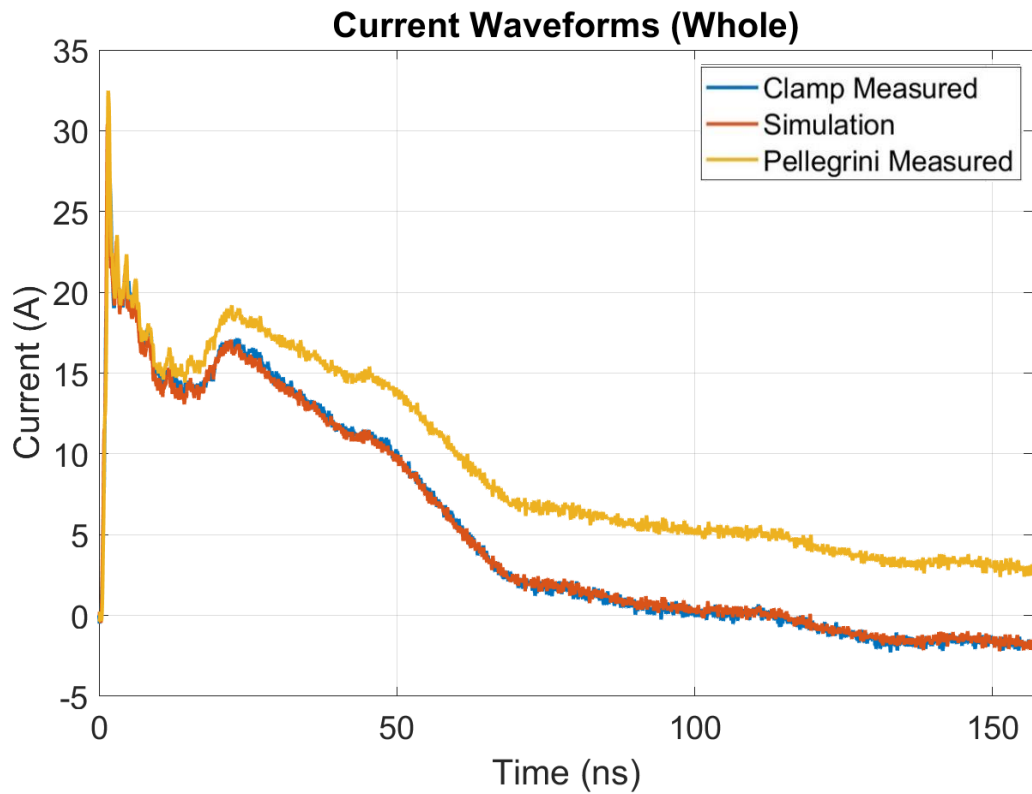
Σχήμα 5-13: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 438/+8kV) – Διάστημα 55ns-65ns



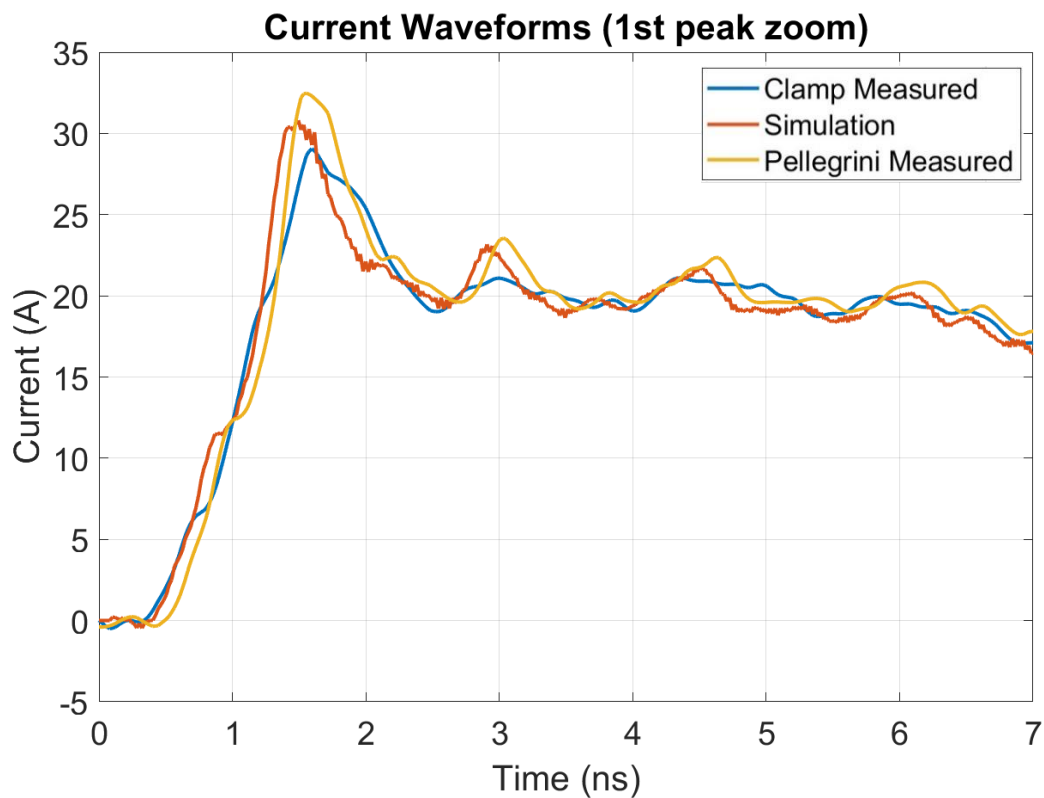
Σχήμα 5-14: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 438/+8kV)

Από την πρώτη αυτή δοκιμή, φαίνεται πως η προσέγγιση των γραφημάτων “Simulation” (πορτοκαλί χρώμα) και “Clamp Measured” (μπλε χρώμα) είναι ικανοποιητική. Αυτή η συμπεριφορά, προμηνύει πως η λύση του προβλήματος της εύρεσης των τιμών των υπό διερεύνηση παραμέτρων του μοντέλου είναι παραπλήσια των τιμών της πρώτης δοκιμής. Οπότε στην συνέχεια, για τις παραπάνω τιμές των παραμέτρων του **Πίνακα 5-1** δοκιμάστηκε η επιτυχία του μοντέλου και για άλλες τρεις ακόμη εισόδους ρευμάτων (**NSG 433/+8kV, TRA3000/+8kV, Dito/+8kV**). Οι συγκεκριμένες είσοδοι αντιστοιχούν σε πραγματικές κυματομορφές εκφόρτισης των γεννητριών Schaffner NSG 433, EMC Partner TRA 3000 και EM TEST Dito.

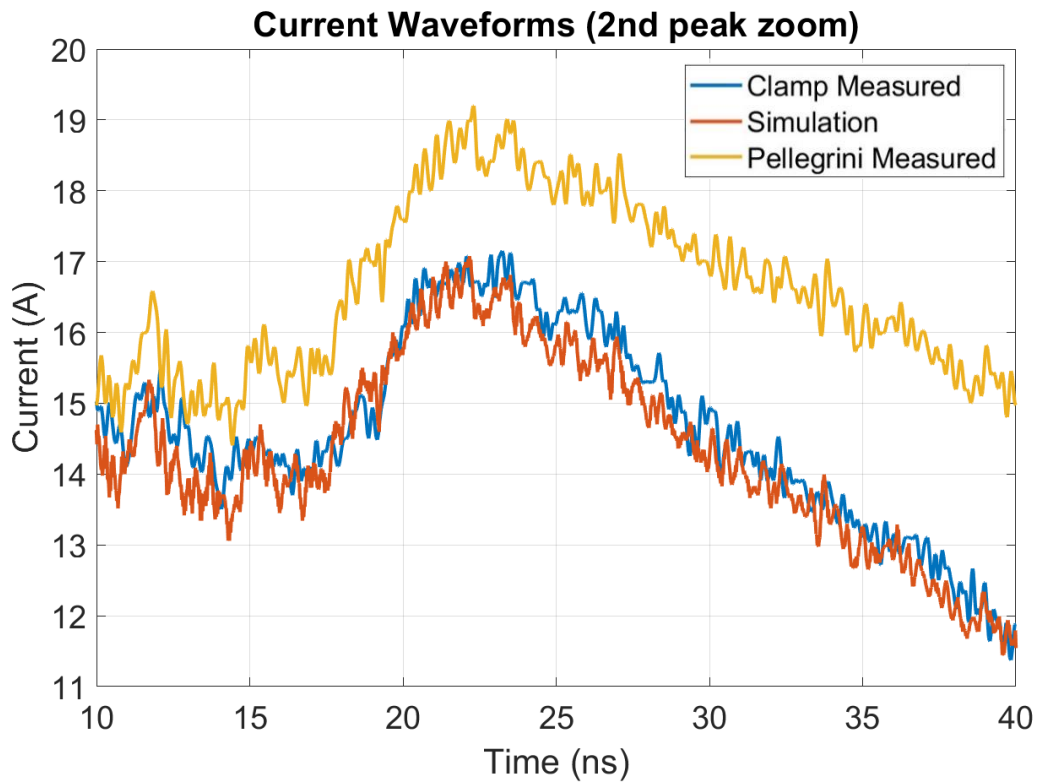
Εκτελώντας λοιπόν, το πρόγραμμα MATLAB, για κάθε είσοδο ξεχωριστά και για τις παραπάνω τιμές παραμέτρων προκύπτουν τα παρακάτω γραφήματα:



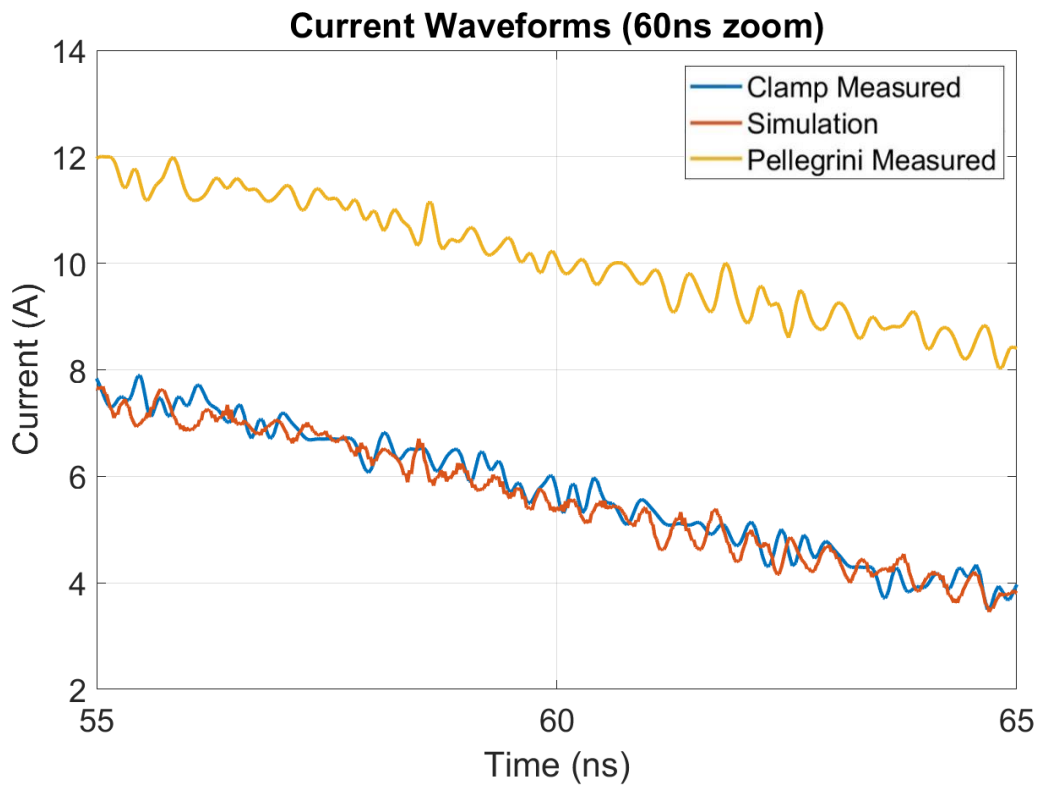
Σχήμα 5-15: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 433/+8kV) – Συνολική κυματομορφή



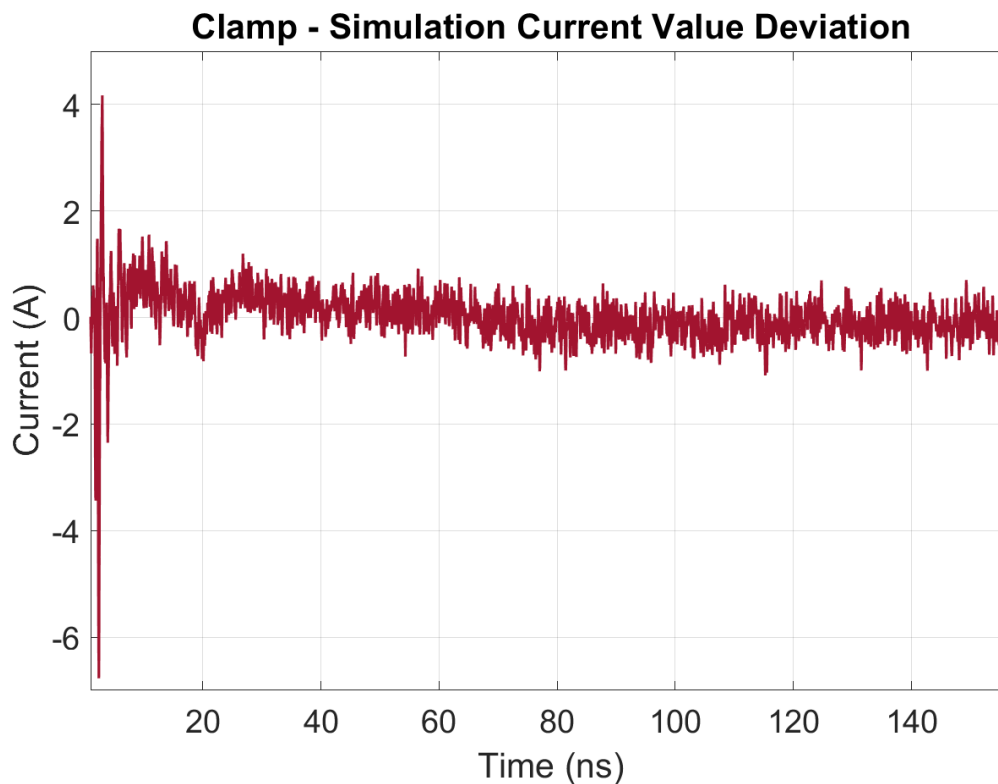
Σχήμα 5-16: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 433/+8kV) - Πρώτη κορυφή



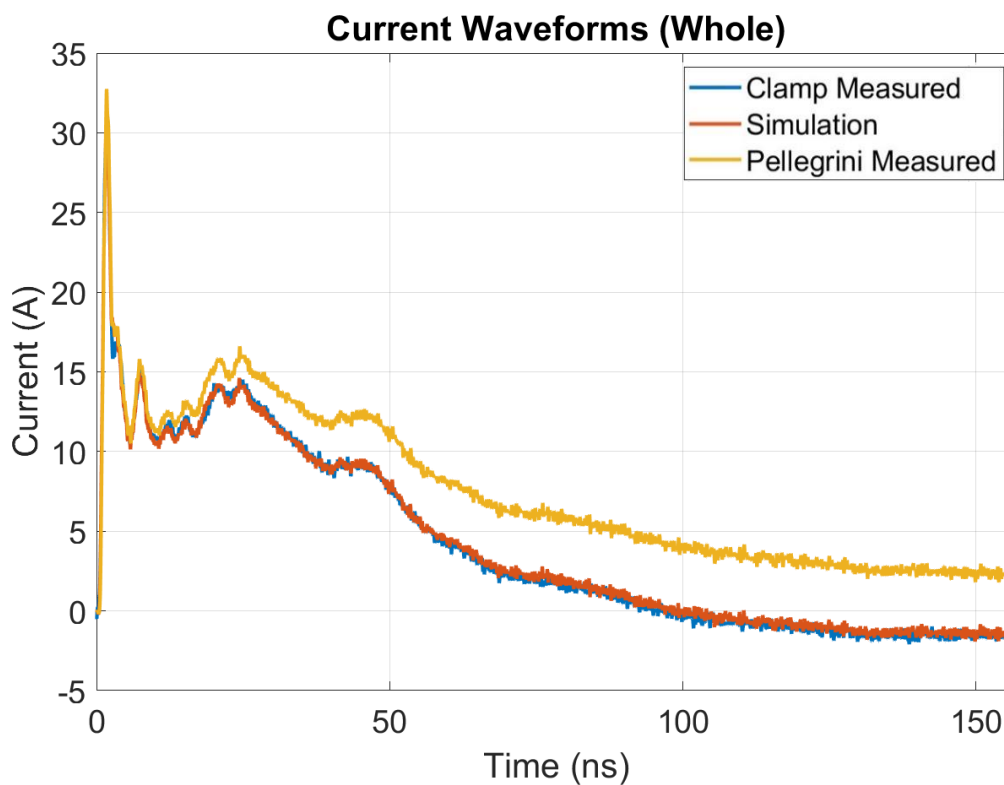
Σχήμα 5-17: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 433/+8kV) – Δεύτερη κορυφή



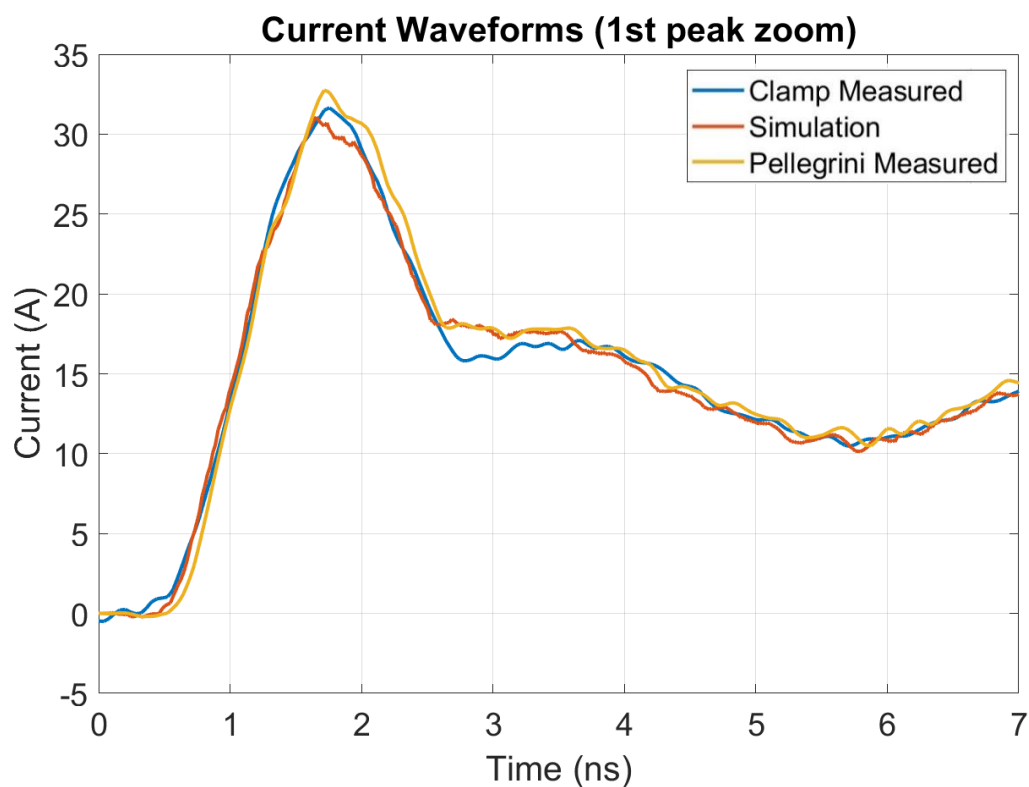
Σχήμα 5-18: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 433/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns



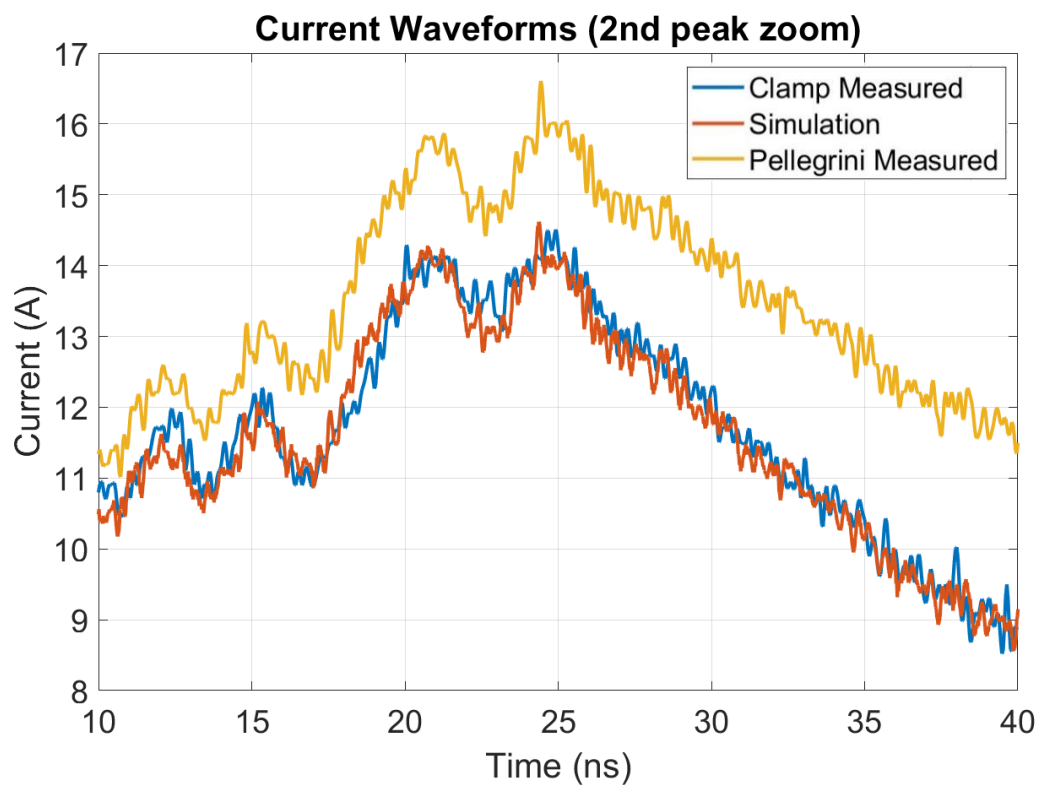
Σχήμα 5-19: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (NSG 433/+8kV)



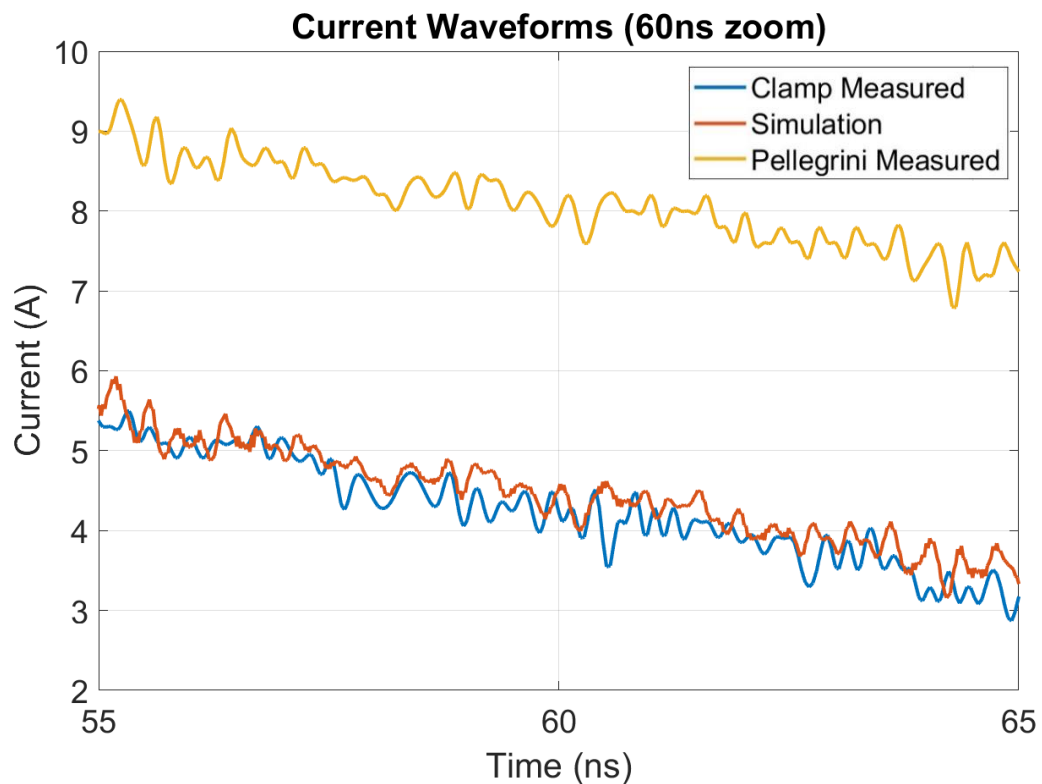
Σχήμα 5-20: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (TRA3000/+8kV) - Συνολική κυματομορφή



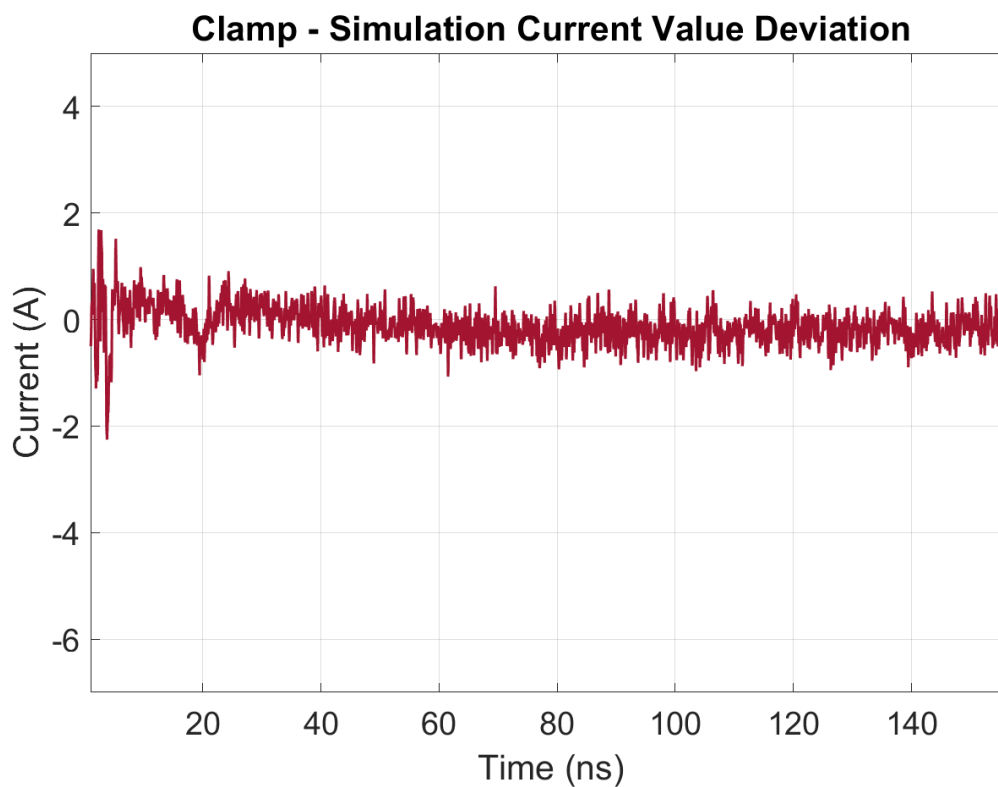
Σχήμα 5-21: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (TRA3000/+8kV) - Πρώτη κορυφή



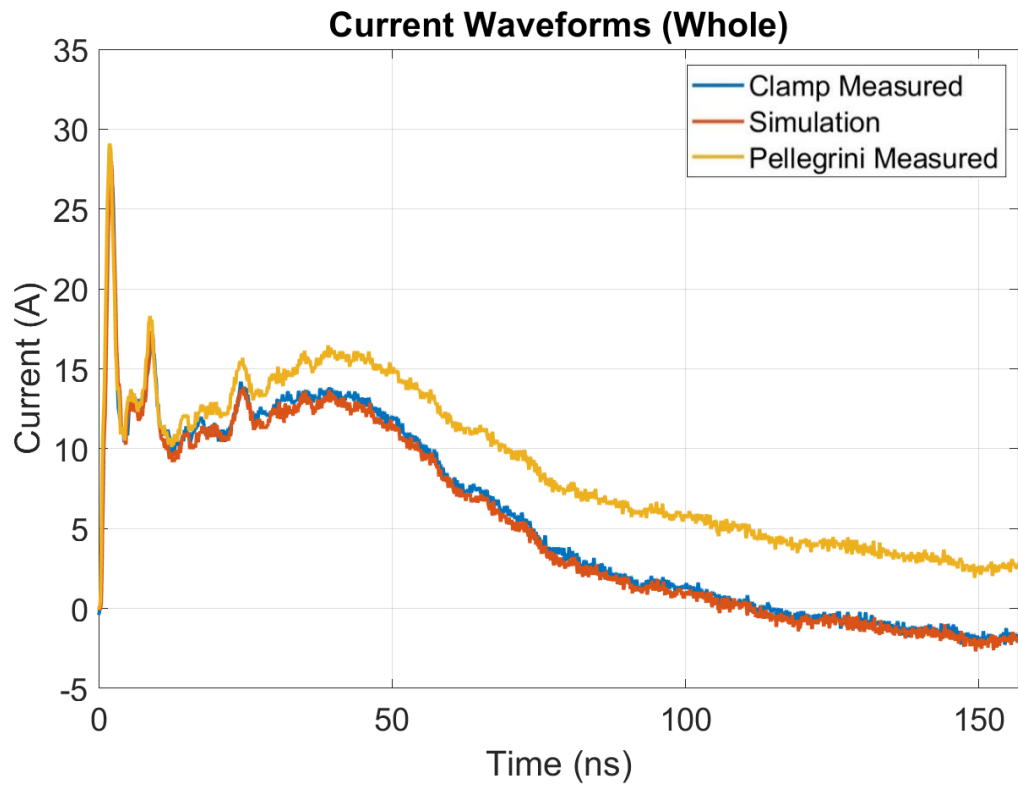
Σχήμα 5-22: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (TRA3000/+8kV) – Δεύτερη κορυφή



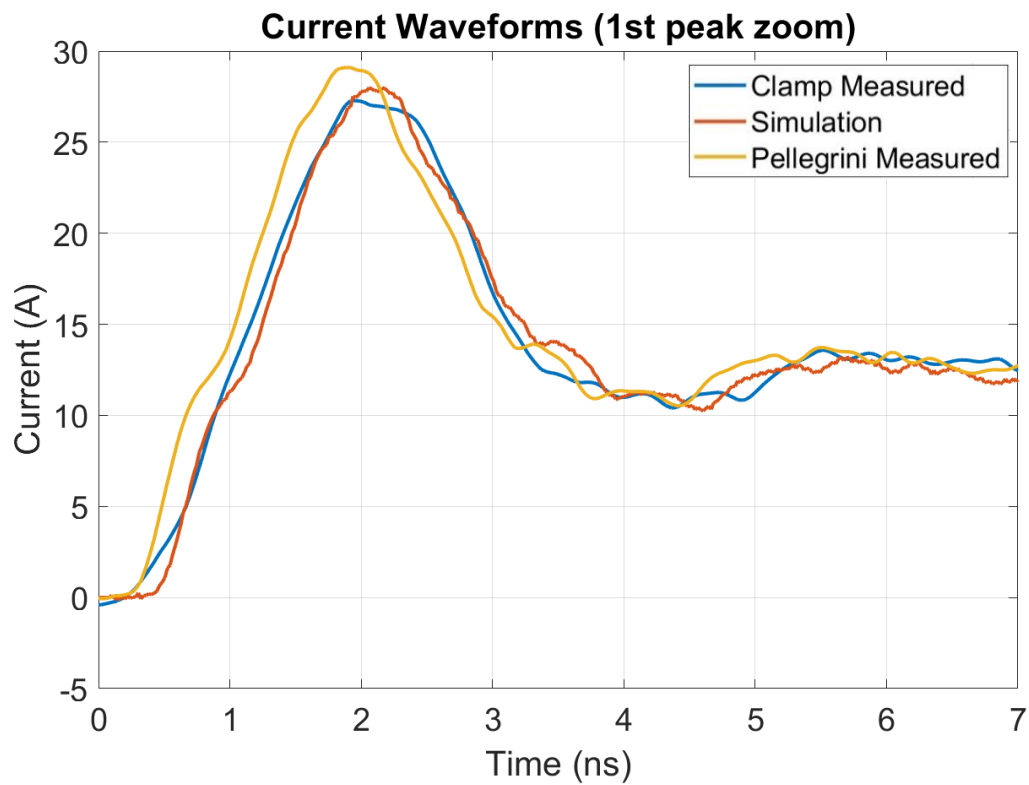
Σχήμα 5-23: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (TRA3000/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns



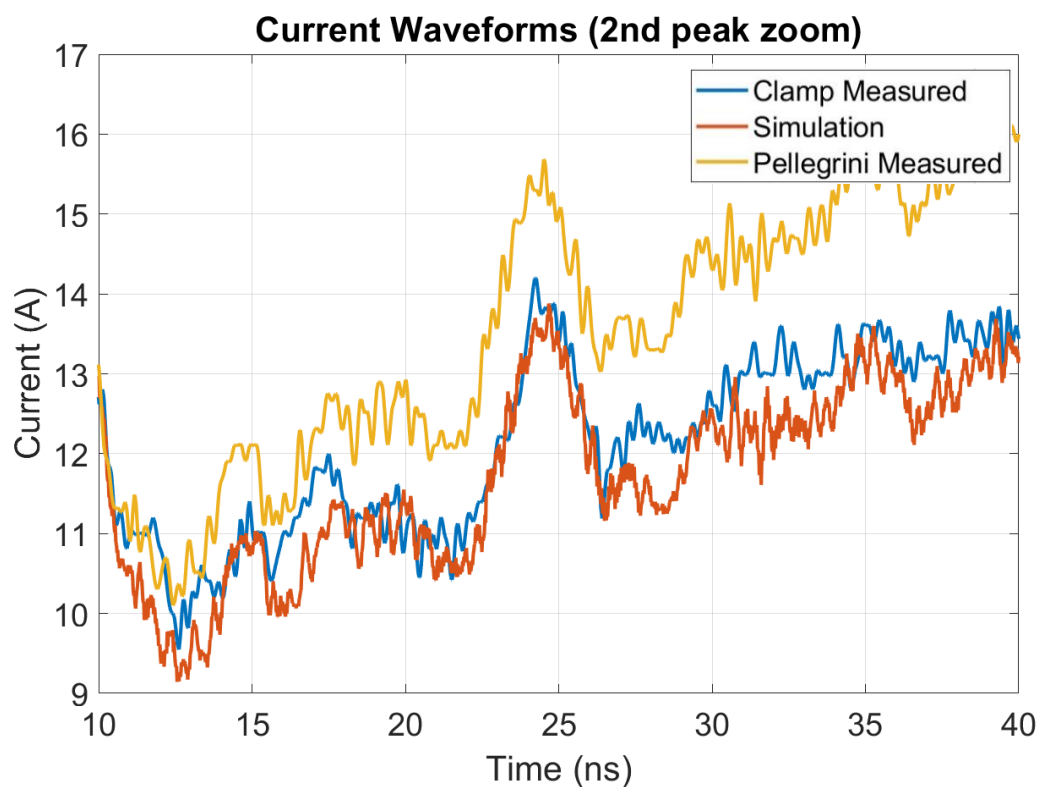
Σχήμα 5-24: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (TRA3000/+8kV)



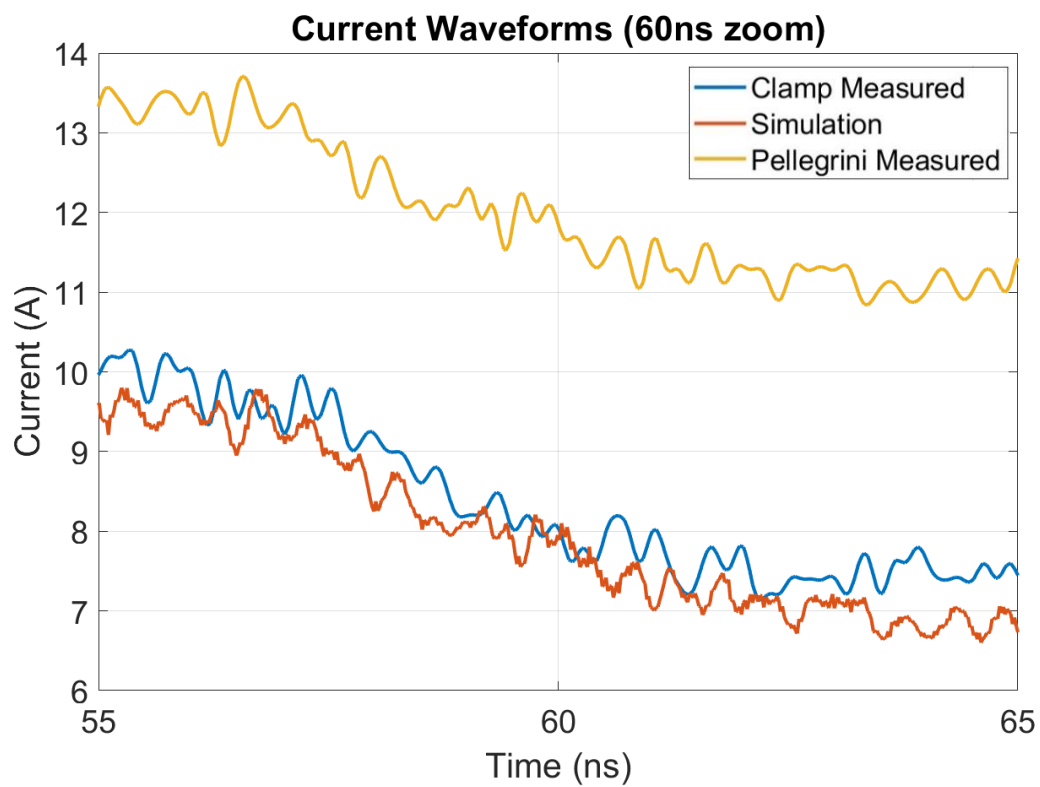
Σχήμα 5-25: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (Dito/+8kV) - Συνολική κυματομορφή



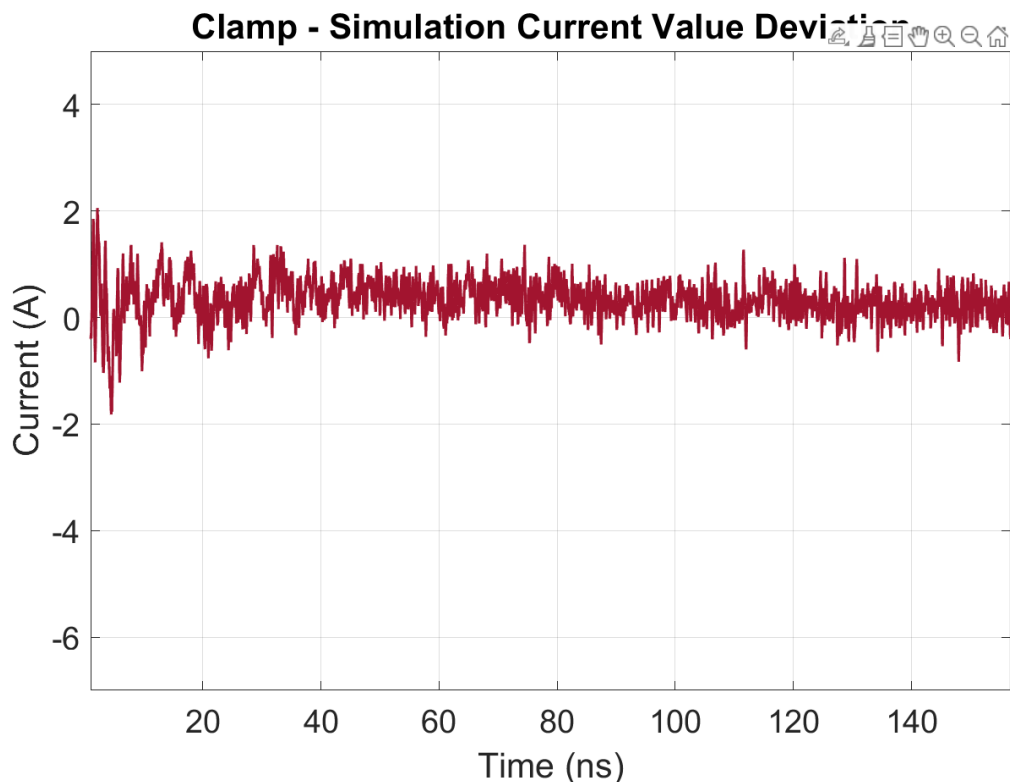
Σχήμα 5-26: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (Dito/+8kV) - Πρώτη κορυφή



Σχήμα 5-27: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (Dito/+8kV) - Δεύτερη κορυφή



Σχήμα 5-28: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (Dito/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns



Σχήμα 5-29: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-1 (Dito/+8kV)

Από τα παραπάνω σχήματα, είναι αντιληπτό ότι η προσέγγιση των γραφημάτων “Simulation” και “Clamp Measured” και για τις εισόδους ρευμάτων από τις ηλεκτροστατικές γεννήτριες **TRA3000** και **Dito** είναι ικανοποιητική. Παρόλα αυτά, φαίνεται πως η προσέγγιση της μέγιστης τιμής του ρεύματος πρώτης κορυφής για είσοδο από την γεννήτρια **NSG 433**, δεν είναι τόσο ικανοποιητική. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η δοκιμή κάποιων μικρών αλλαγών στις τιμές των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων.

5.3.2 Βελτιστοποίηση των κυματομορφών κάθε εισόδου ρεύματος

Η μέθοδος που θα ακολουθηθεί είναι η εύρεση, αν είναι εφικτό, της βέλτιστης προσέγγισης για κάθε είσοδο ρεύματος, με μικρές τροποποιήσεις των υπό διερεύνηση παραμέτρων. Στην συνέχεια, οι τελικές τιμές των παραμέτρων θα προσδιοριστούν από τον μέσο όρο των τροποποιήσεων που κάναμε ώστε η γενικότερη ακρίβεια του μοντέλου για τις διαθέσιμες εισόδους ρευμάτων να βελτιστοποιηθεί. Οι τροποποιήσεις θα πραγματοποιηθούν ακολουθώντας τα patterns τα οποία έχουν καθοριστεί στην **Ενότητα 5.2**.

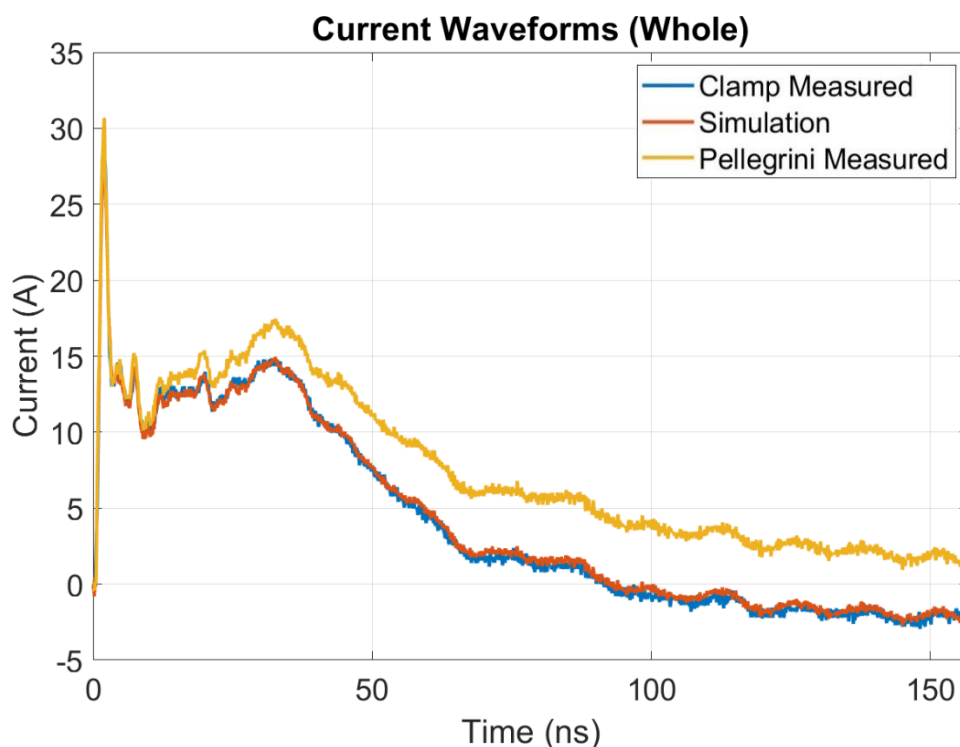
Καταρχάς, διερευνάται η κυματομορφή που προέκυψε από την είσοδο **NSG 438/+8kV**. Από τα διάφορα τμήματα της κυματομορφής, εκείνο το οποίο φαίνεται να φέρει περιθώρια

βελτίωσης είναι το τμήμα της πρώτης κορυφής ρεύματος. Συγκεκριμένα, η διορθωτική κίνηση η οποία εκτιμάται ότι απαιτείται είναι ο συνδυασμός μιας μικρής μείωσης της μέγιστης τιμής του ρεύματος πρώτης κορυφής με μια επίσης μικρή αύξηση της ικανότητας απόκρισης του αισθητήρα ώστε η μείωση του ρεύματος κορυφής να μην προκαλέσει και μειώσεις στο εύρος του «παλμού» πρώτης κορυφής. Επομένως, επειδή το πλάτος της υπόλοιπης κυματομορφής δεν πρέπει να επηρεαστεί, αναγκαστικά η τιμή του «**Mu_static**» θα πρέπει να διατηρηθεί σταθερή. Για την μείωση της μέγιστης τιμής του ρεύματος πρώτης κορυφής, θα πραγματοποιηθεί μια συνδυασμένη μείωση των παραμέτρων «**gap**», «**winding_gap**». Τέλος, για την αύξηση της ικανότητας απόκρισης θα πραγματοποιηθεί μια μικρή μείωση της τιμής της παραμέτρου «**dispersion_time**». Συνεπώς, οι τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

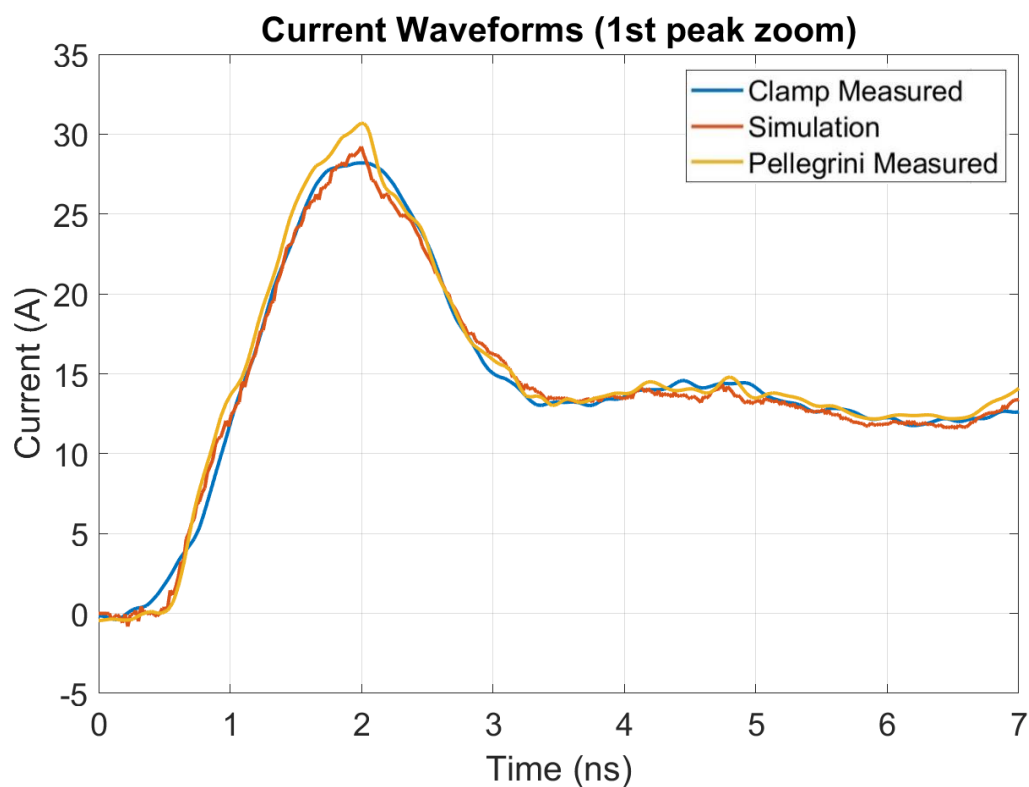
Πίνακας 5-2: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων - 2η Δοκιμή (NSG 438 - 8kV)

Παράμετροι – Υπό διερεύνηση			
Mu_static	dispersion_time (ns)	gap (mm)	winding_gap (mm)
330	6	0.85	0.75

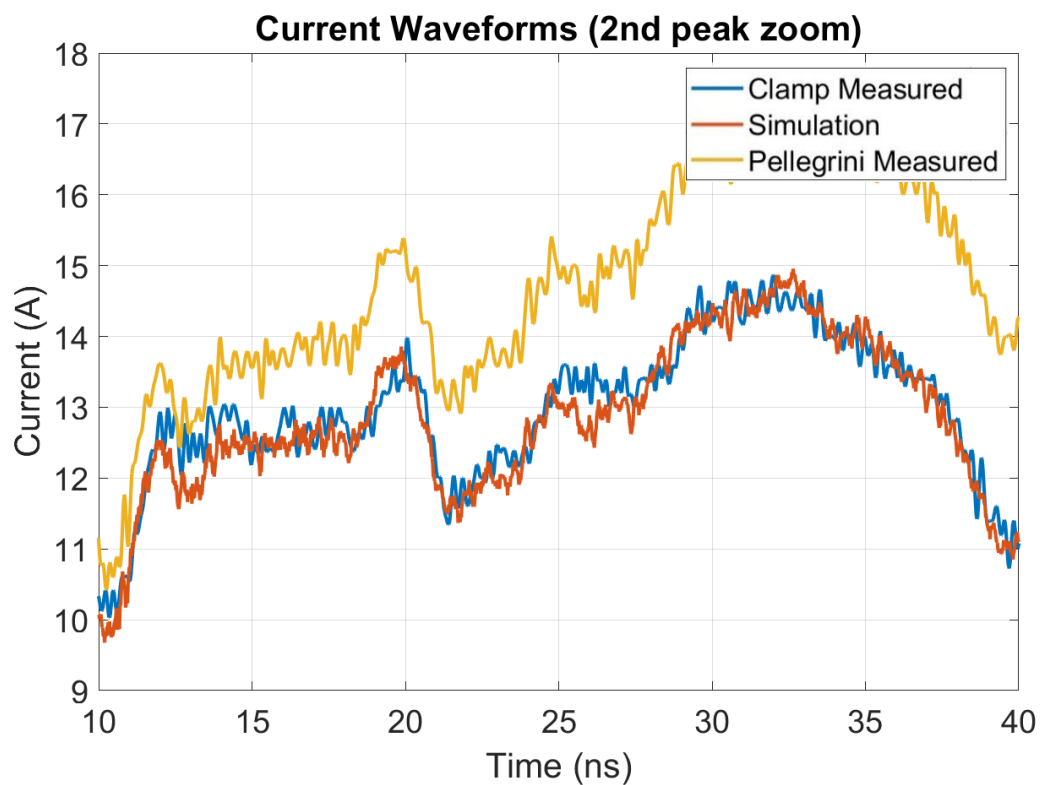
Με τις παραπάνω αλλαγές, προκύπτουν τα παρακάτω βελτιωμένα γραφήματα για την είσοδο ρεύματος **NSG 438/+8kV**:



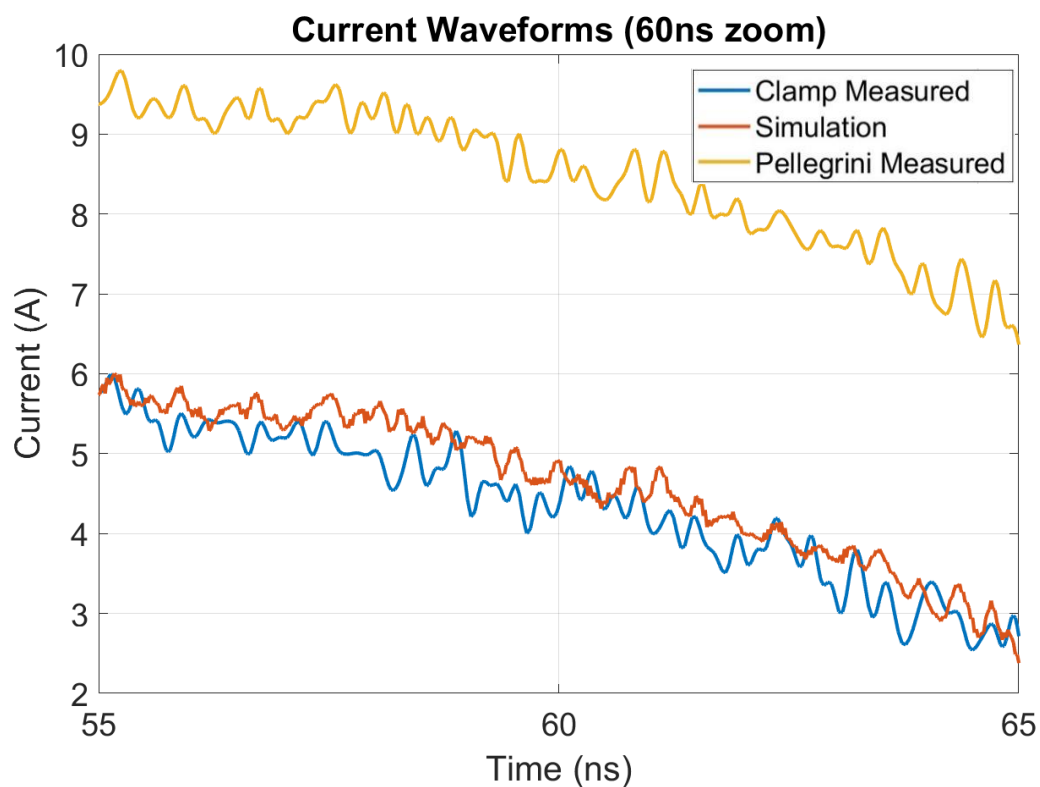
Σχήμα 5-30: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-2 (NSG 438/+8kV) - Συνολική κυματομορφή



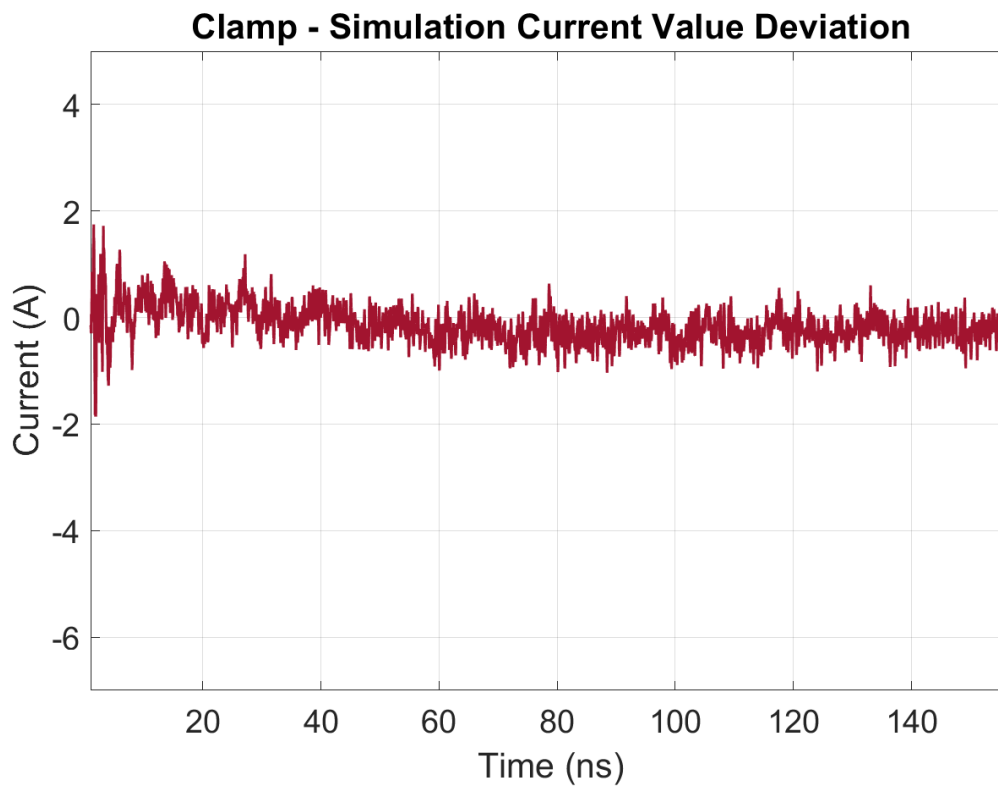
Σχήμα 5-31: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-2 (NSG 438/+8kV) - Πρώτη κορυφή



Σχήμα 5-32: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-2 (NSG 438/+8kV) - Δεύτερη κορυφή



Σχήμα 5-33: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-2 (NSG 438/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns



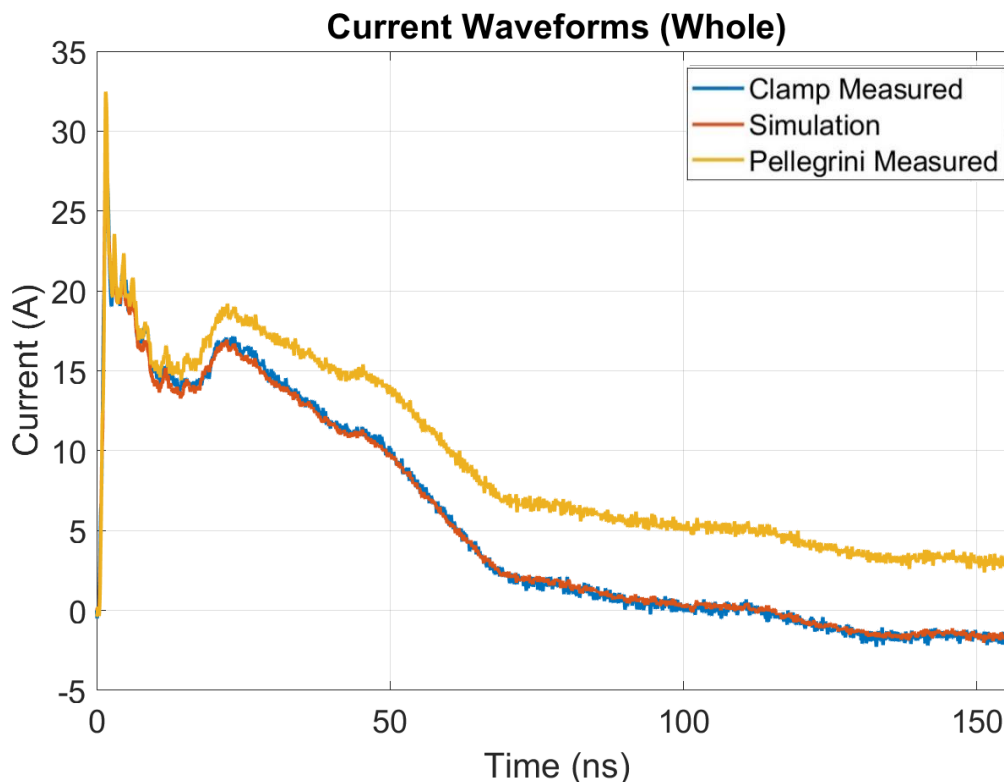
Σχήμα 5-34: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-2 (NSG 438/+8kV)

Είναι αντιληπτό πως η προσέγγιση των γραφημάτων “Simulation” και “Clamp Measured” είναι πολύ πιο ικανοποιητική. Στην συνέχεια, διερευνάται η βελτιστοποίηση της κυματομορφής ρεύματος με είσοδο την **NSG 433/+8kV**. Και στην περίπτωση αυτή, είναι εμφανής η ανάγκη μείωσης της μέγιστης τιμής του ρεύματος πρώτης κορυφής, αλλά και κάποιων άλλων ακόμη κορυφών που εμφανίζονται μετά από αυτή. Με την ίδια, λοιπόν, λογική θα επιχειρηθεί μια λίγο μεγαλύτερη σε σχέση με προηγουμένως συνδυασμένη μείωση των παραμέτρων «**gap**», «**winding_gap**» με ταυτόχρονη μείωση και της τιμής της παραμέτρου «**dispersion_time**», για τους ίδιους λόγους με προηγουμένως. Το «**Mu_static**» και σε αυτή την περίπτωση θα παραμείνει σταθερό. Επομένως, οι τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

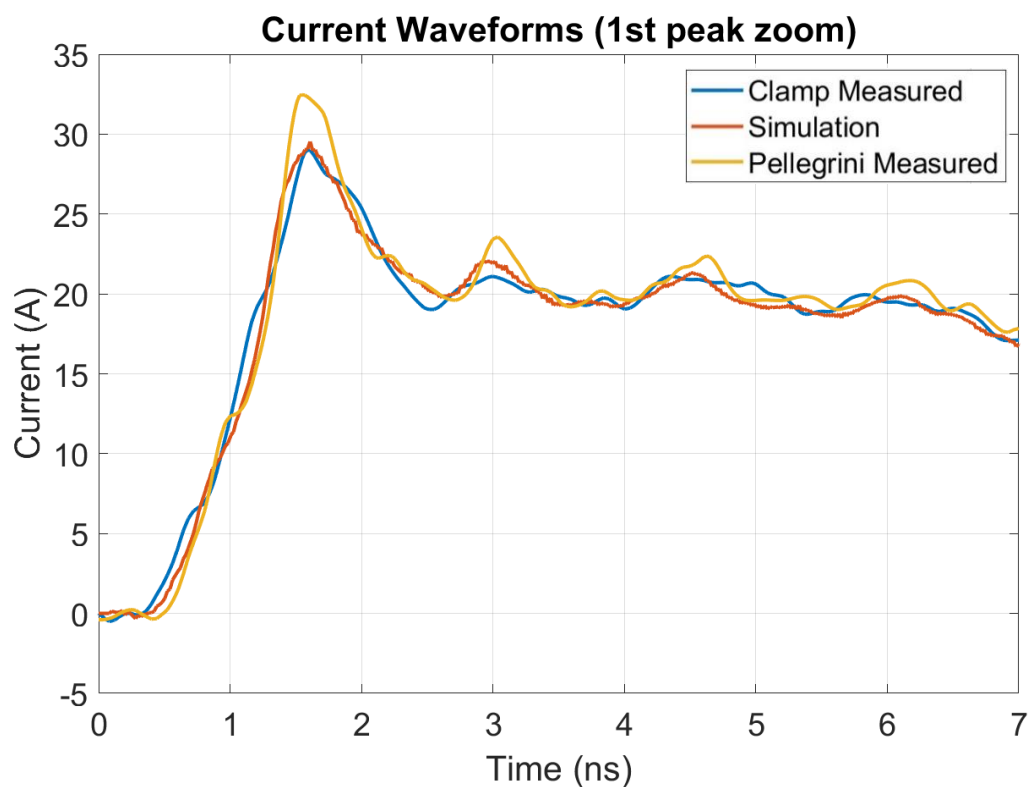
Πίνακας 5-3: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων - 2η Δοκιμή (NSG 433 - 8kV)

Παράμετροι – Υπό διερεύνηση			
Mu_static	dispersion_time (ns)	gap (mm)	winding_gap (mm)
330	5	0.5	0.6

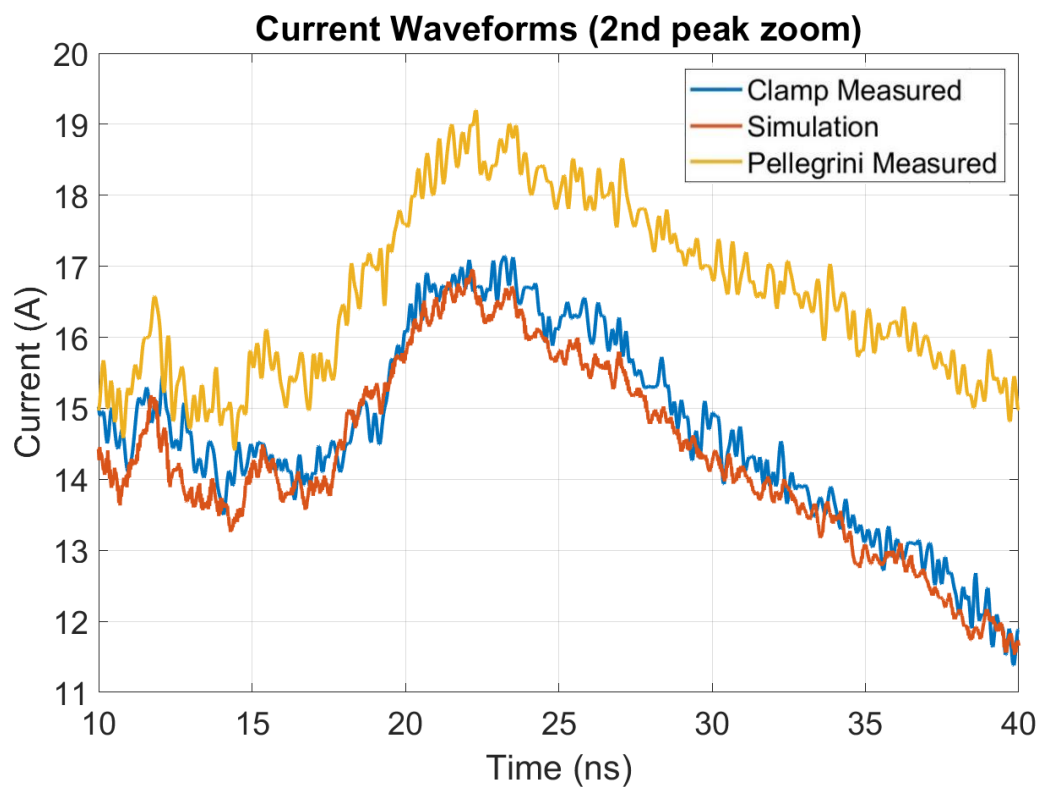
Με τις παραπάνω αλλαγές, προκύπτουν τα παρακάτω βελτιωμένα γραφήματα για την είσοδο ρεύματος **NSG 433/+8kV**:



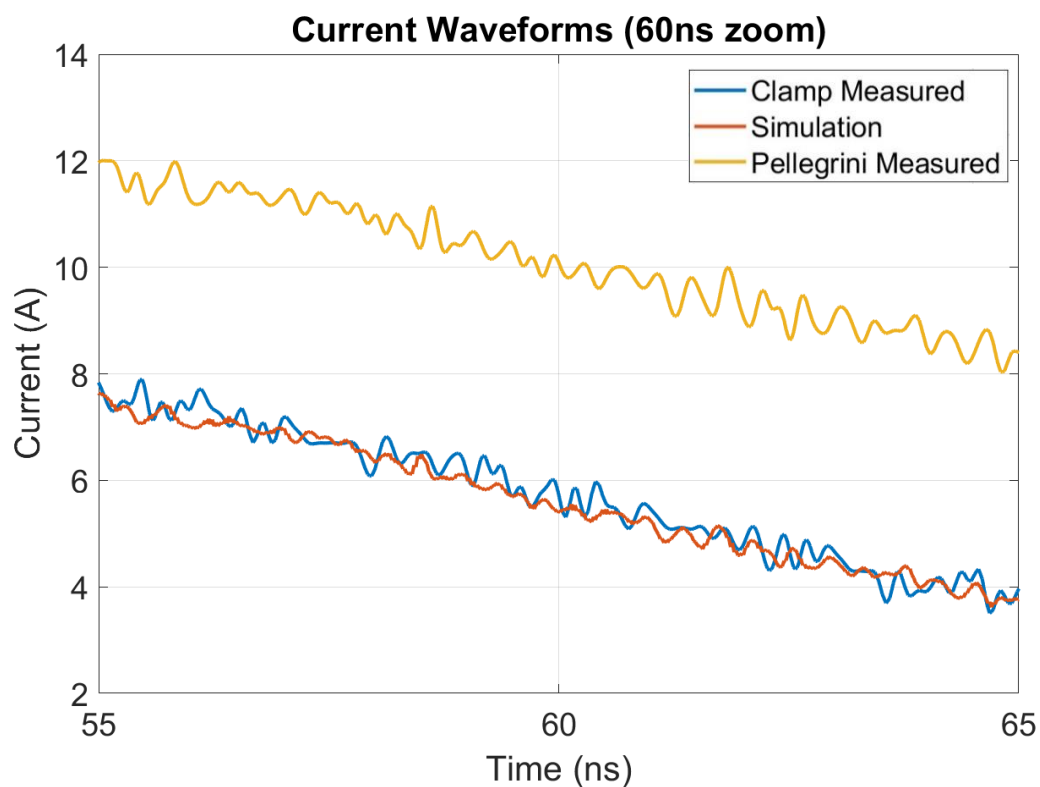
Σχήμα 5-35: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-3 (NSG 433/+8kV) - Συνολική κυματομορφή



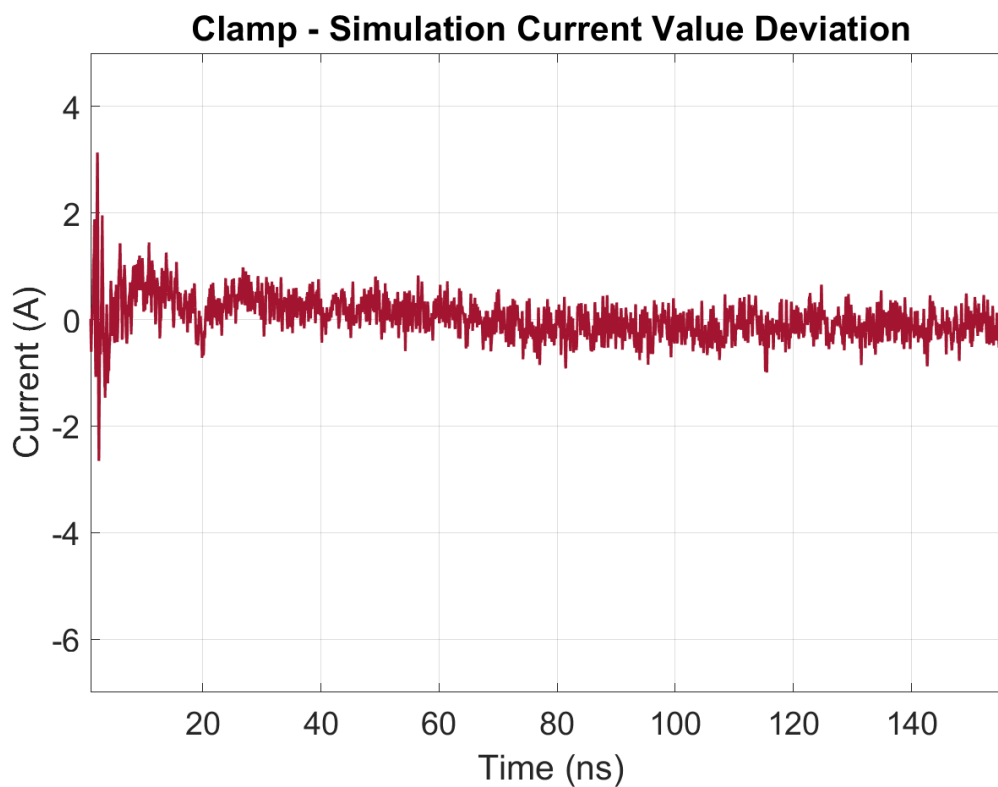
Σχήμα 5-36: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-3 (NSG 433/+8kV) - Πρώτη κορυφή



Σχήμα 5-37: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-3 (NSG 433/+8kV) - Δεύτερη κορυφή



Σχήμα 5-38: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-3 (NSG 433/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns



Σχήμα 5-39: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-3 (NSG 433/+8kV)

Είναι αντιληπτό πως για άλλη μια φορά, η προσέγγιση των γραφημάτων “Simulation” και “Clamp Measured” βελτιώθηκε αισθητά. Επομένως, η διερεύνηση συνεχίζεται με την είσοδο ρεύματος **TRA3000/+8kV**. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται η ανάγκη περαιτέρω κάλυψης της μέγιστης τιμής του ρεύματος πρώτης κορυφής καθώς και η ανάγκη μείωσης της τιμής του ρεύματος ακριβώς μετά την πρώτη κορυφή.

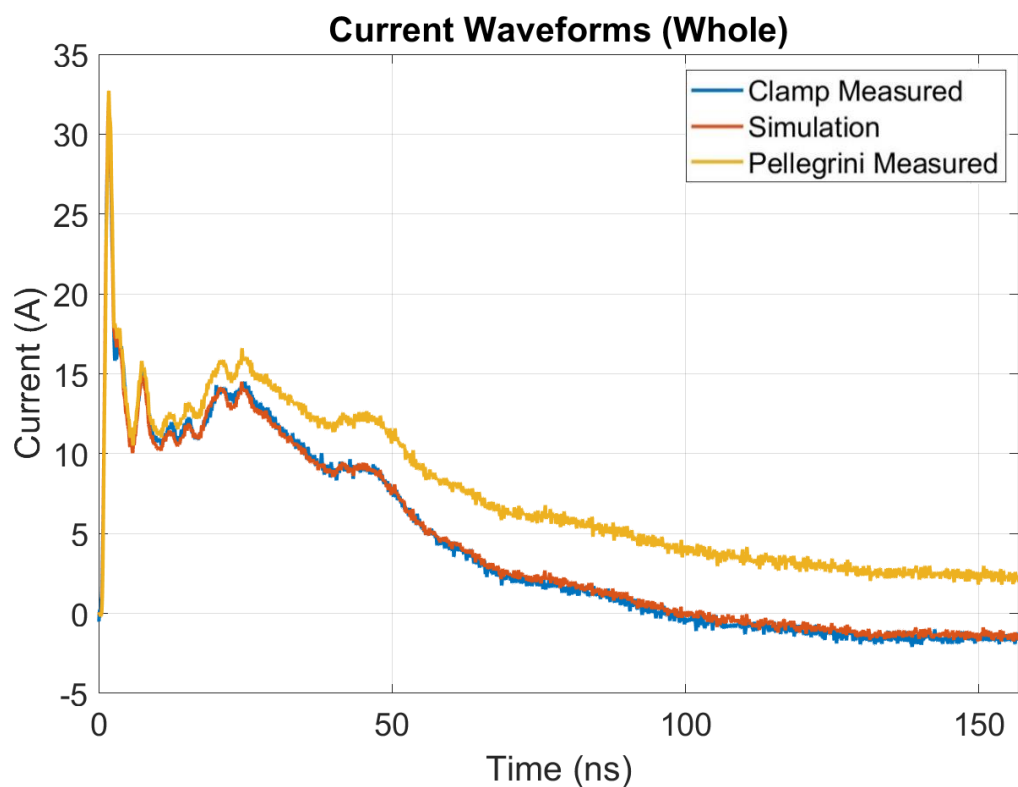
Μια πρώτη σκέψη, θα μπορούσε να αποτελέσει η αύξηση της παραμέτρου «**winding_gap**» καθώς, όπως έχει αποδειχθεί προηγουμένως, μια τέτοια αύξηση θα μπορούσε να βελτιώσει και τα δύο αυτά προβλήματα. Όμως, η κίνηση αυτή απορρίφθηκε καθώς η παράμετρος «**winding_gap**» φαίνεται να συμπεριφέρεται με περισσότερη ευαισθησία στην αύξηση της μέγιστης τιμής του ρεύματος πρώτης κορυφής, παρά στην μείωση της τιμής του ρεύματος ακριβώς μετά την πρώτη κορυφή. Συνεπώς, η πρώτη σκέψη αυτή θα οδηγούσε σε μια γρηγορότερη βελτίωση του ρεύματος πρώτης κορυφής, δίχως ανάλογη μείωση του ρεύματος μετά από αυτή.

Επομένως, θα ακολουθηθεί μια τελείως διαφορετική προσέγγιση. Θα γίνει ερμηνεία και των δύο προβλημάτων ως αδυναμία απόκρισης, οπότε θα επιχειρηθεί η αύξηση της ικανότητας απόκρισης, μειώνοντας την τιμή της παραμέτρου «**dispersion_time**». Αυξάνοντας όμως την ικανότητα απόκρισης, η επιθυμητή επίτευξη μιας μειωμένης τιμής του ρεύματος μετά την πρώτη κορυφή, εκτιμάται ότι θα συνοδευτεί και με μια υπεραύξηση του ρεύματος πρώτης κορυφής, το οποίο όμως στην προκειμένη περίπτωση μπορεί να αντιμετωπιστεί με μείωση της τιμής της παραμέτρου «**gap**». Συνεπώς, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των άλλων δύο παραμέτρων «**winding_gap**» και «**Mu_static**» είναι δυνατόν να επιτευχθεί το ζητούμενο αποτέλεσμα. Οι τιμές, λοιπόν, των παραμέτρων που επιλέχθηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

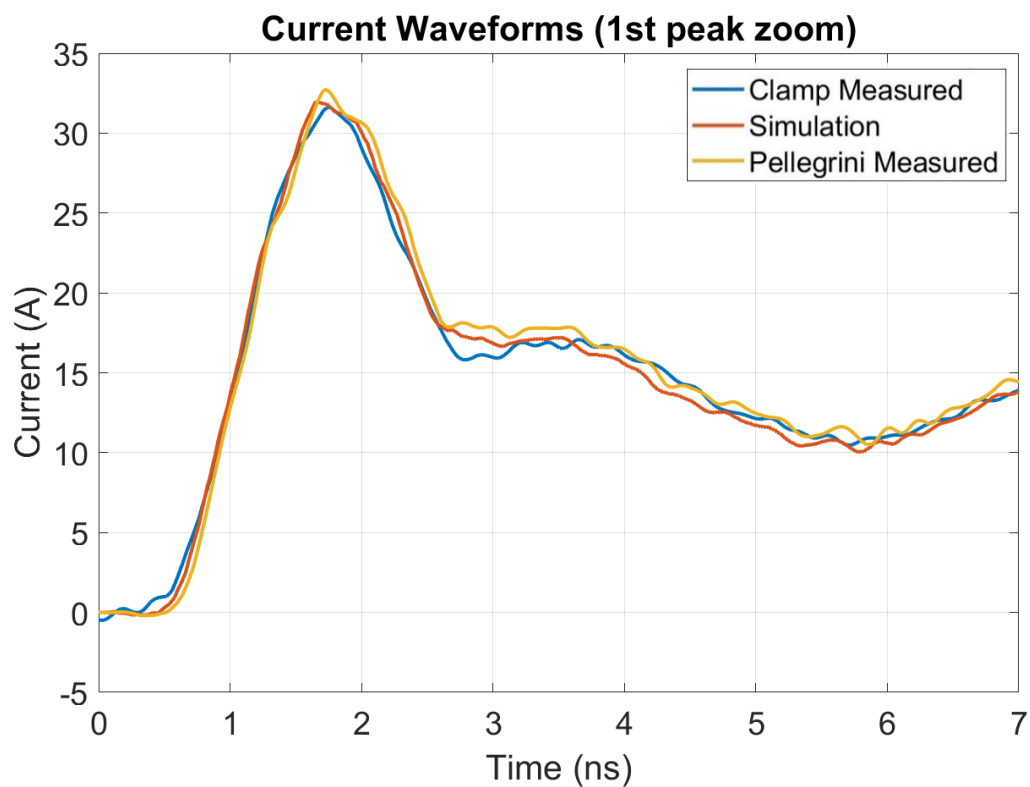
Πίνακας 5-4: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων - 2η Δοκιμή (TRA3000 - 8kV)

Παράμετροι – Υπό διερεύνηση			
Mu_static	dispersion_time (ns)	gap (mm)	winding_gap (mm)
330	5.3	0.2	1

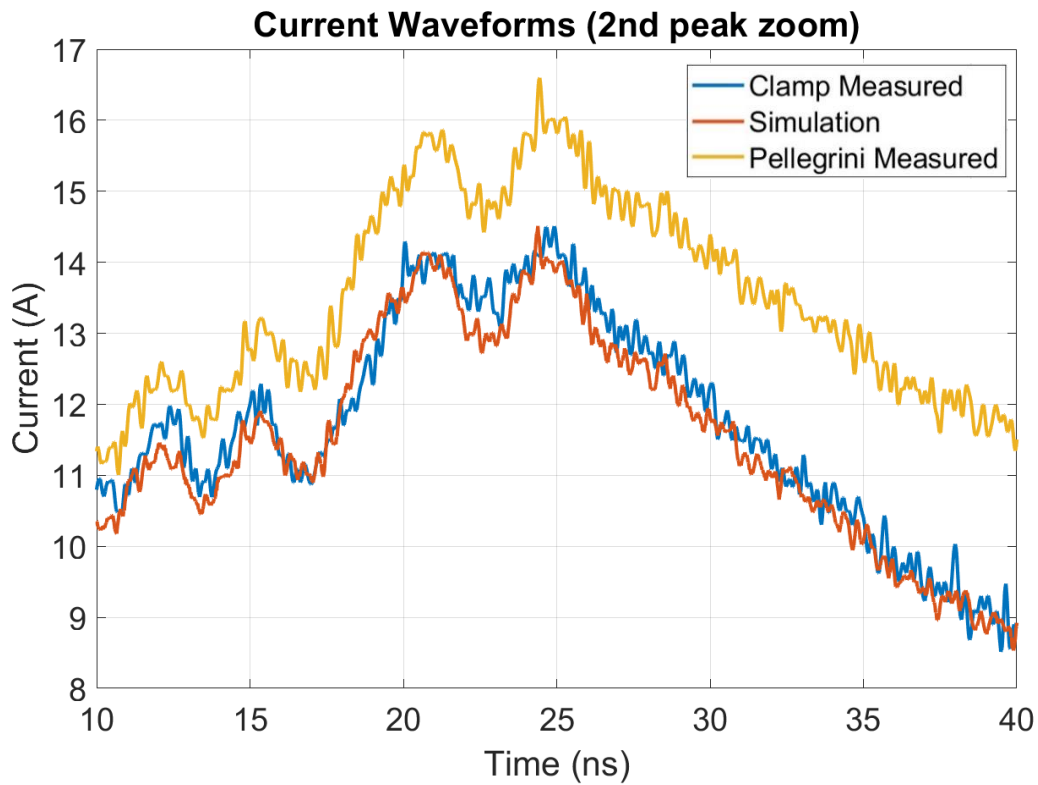
Με τις παραπάνω αλλαγές, προκύπτουν τα παρακάτω βελτιωμένα γραφήματα για την είσοδο ρεύματος **TRA3000/+8kV**:



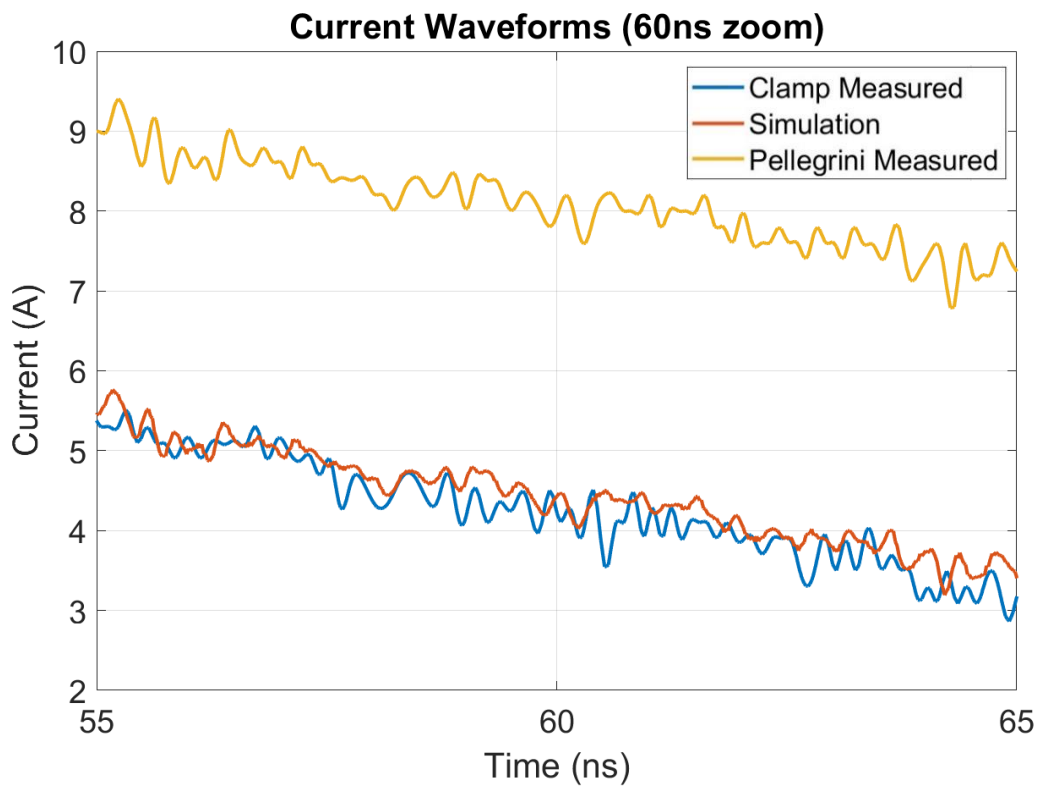
Σχήμα 5-40: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-4 (TRA3000/+8kV) - Συνολική κυματομορφή



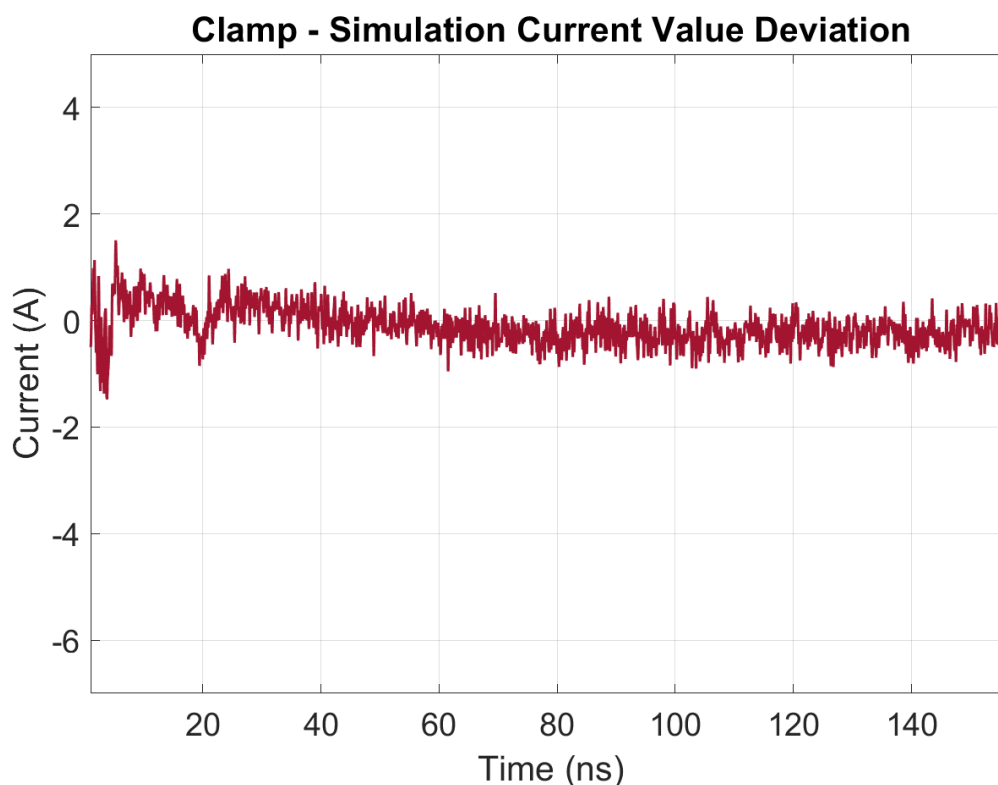
Σχήμα 5-41: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-4 (TRA3000/+8kV) - Πρώτη κορυφή



Σχήμα 5-42: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-4 (TRA3000/+8kV) - Δεύτερη κορυφή



Σχήμα 5-43: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-4 (TRA3000/+8kV) – Διάστημα 55ns-65ns



Σχήμα 5-44: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-4 (TRA3000/+8kV)

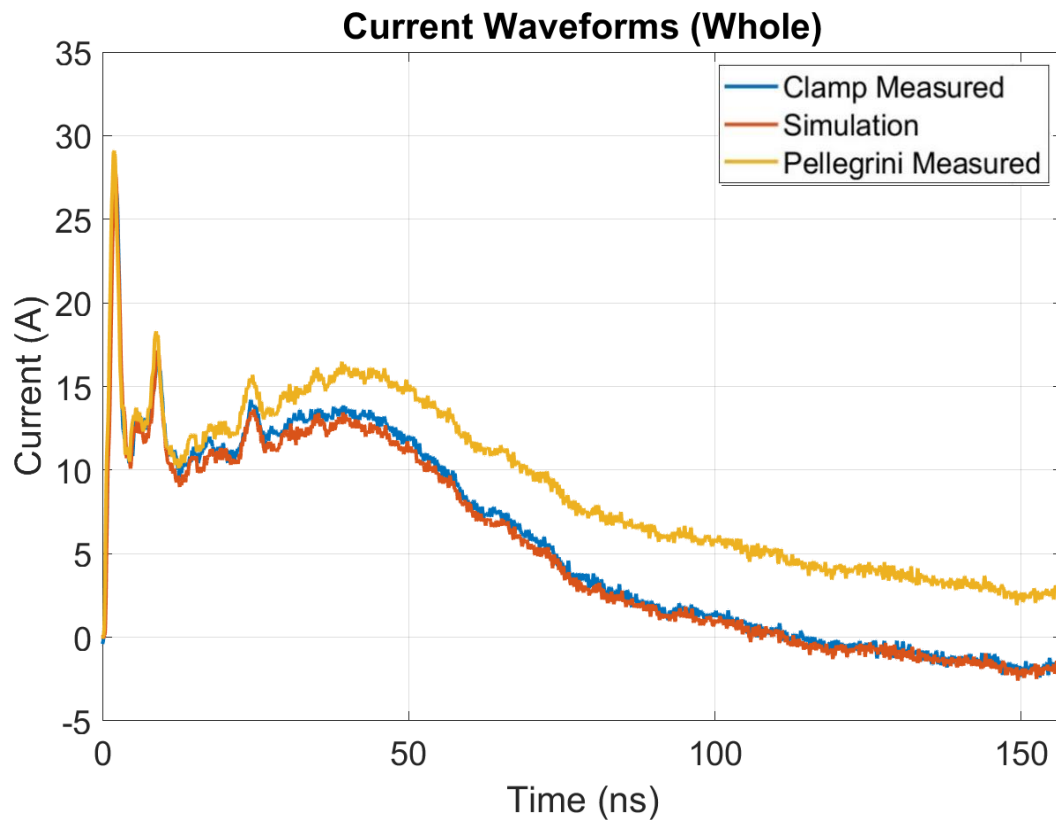
Και στην περίπτωση αυτή, είναι αντιληπτό πως η προσέγγιση των γραφημάτων “Simulation” και “Clamp Measured” είναι αρκετά βελτιωμένη. Τέλος, θα διερευνηθεί κι η κυματομορφή ρεύματος της εισόδου **Dito/+8kV**.

Στην εν λόγω κυματομορφή, παρατηρείται η ανάγκη μείωσης του ρεύματος πρώτης κορυφής, σε συνδυασμό με την μείωση του ρεύματος ακριβώς μετά την πρώτη κορυφή. Αυτό θα επιτευχθεί με τρεις κινήσεις. Καταρχάς, θα πραγματοποιηθεί μια μικρή βελτίωση στην ικανότητα απόκρισης μειώνοντας την τιμή της παραμέτρου «**dispersion_time**». Στην συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί μια μικρή αύξηση στην τιμή της παραμέτρου «**winding_gap**» με σκοπό την του ρεύματος ακριβώς μετά την πρώτη κορυφή. Τέλος, θα πραγματοποιηθεί μια μεγάλη μείωση στην τιμή της παραμέτρου «**gap**», με σκοπό η μέγιστη τιμή του ρεύματος πρώτης κορυφής να αποκτήσει την κατάλληλη τιμή, αντισταθμίζοντας τις περαιτέρω αυξήσεις που θα προκληθούν λόγω μείωσης της τιμής του «**dispersion_time**» και της αύξησης της τιμής του «**winding_gap**». Επομένως, οι τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

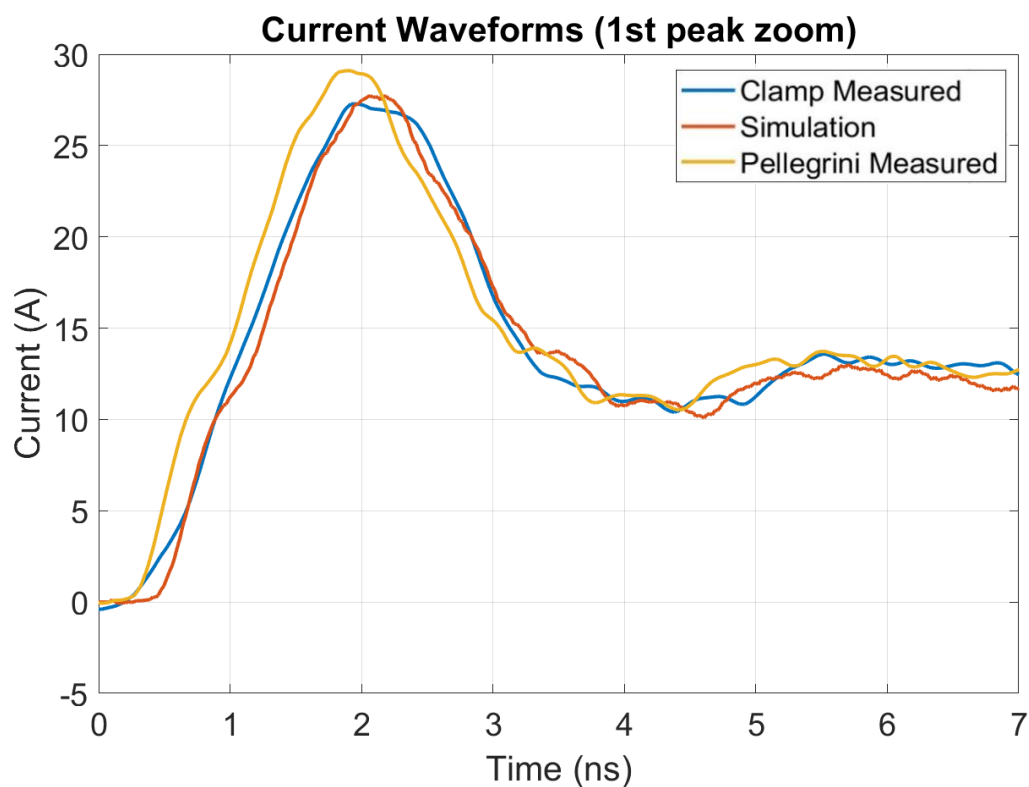
Πίνακας 5-5: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων - 2η Δοκιμή (Dito - 8kV)

Παράμετροι – Υπό διερεύνηση			
Mu_static	dispersion_time (ns)	gap (mm)	winding_gap (mm)
330	6.5	0.25	1.2

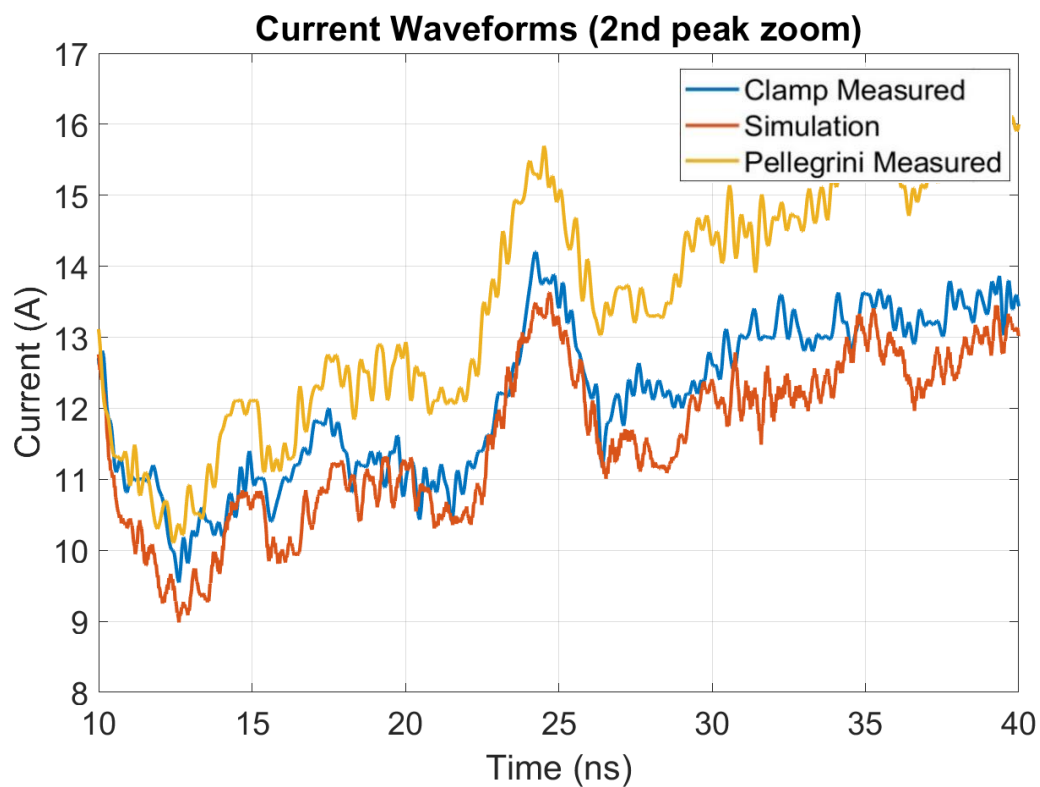
Με τις παραπάνω αλλαγές, προκύπτουν και τα παρακάτω βελτιωμένα γραφήματα για την είσοδο ρεύματος **Dito/+8kV**:



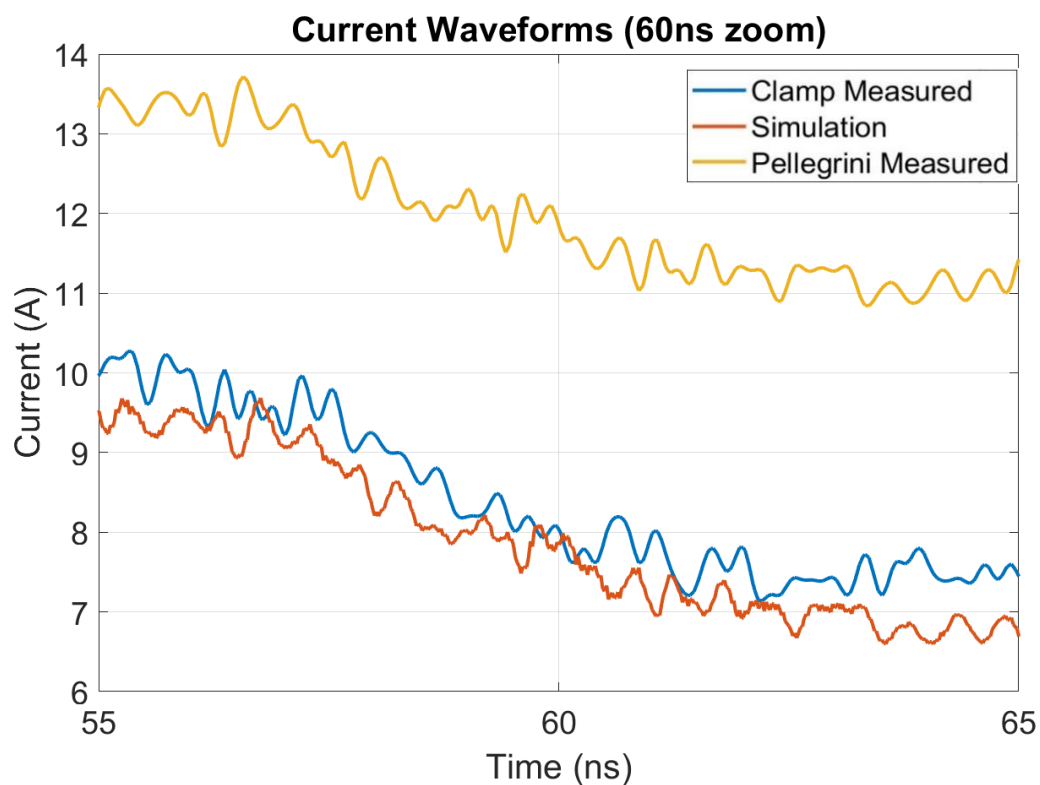
Σχήμα 5-45: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-5 (Dito/+8kV) - Συνολική κυματομορφή



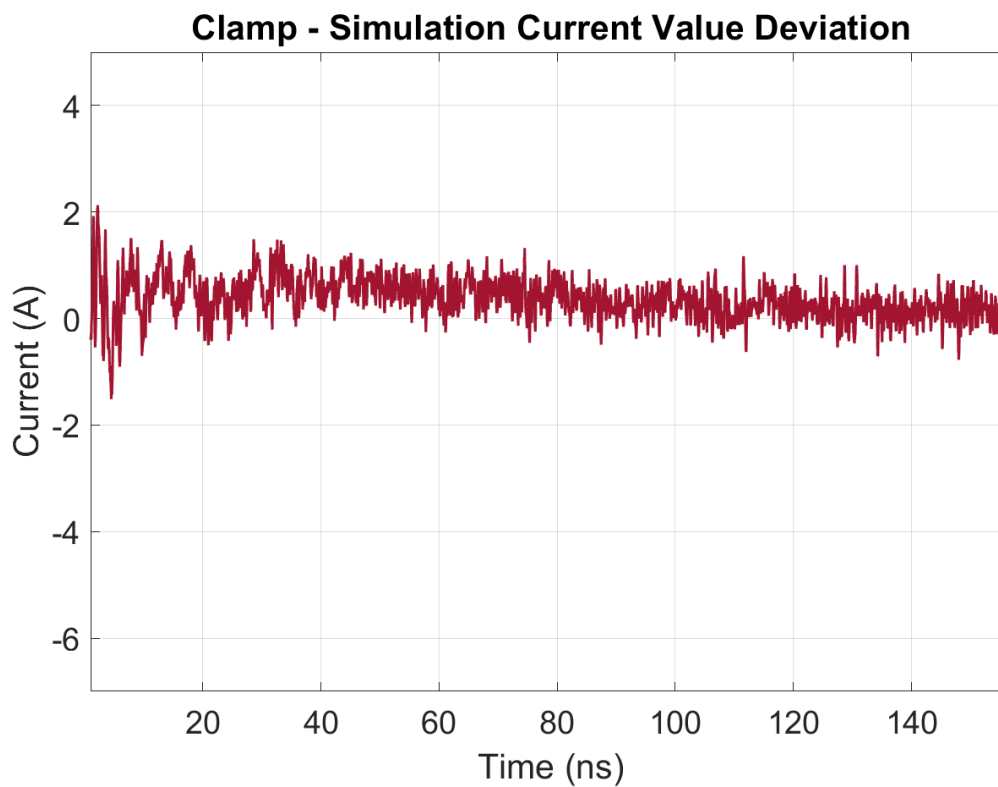
Σχήμα 5-46: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-5 (Dito/+8kV) - Πρώτη κορυφή



Σχήμα 5-47: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-5 (Dito/+8kV) - Δεύτερη κορυφή



Σχήμα 5-48: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-5 (Dito/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns



Σχήμα 5-49: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-5 (Dito/+8kV)

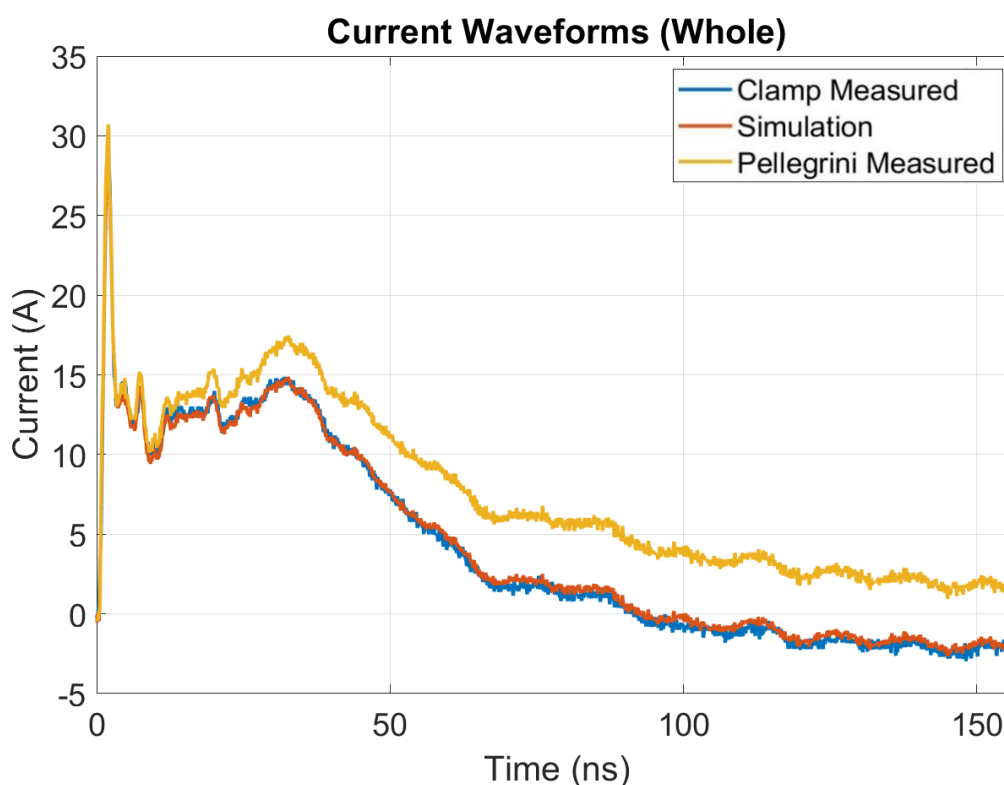
5.3.3 Τελικές τιμές των υπό διερεύνηση παραμέτρων

Μετά την βελτίωση των γραφημάτων “Simulation” σε σχέση με τις κυματομορφές “Clamp Measured” όλων των διαθέσιμων εισόδων ρεύματος, δύνανται να προσδιοριστούν οι τελικές τιμές των υπό διερεύνηση παραμέτρων. Συγκεκριμένα, ως τελικές τιμές των παραμέτρων αυτών, αναγκαστικά για την συνολική βελτιστοποίηση του μοντέλου μας, θα επιλεγεί ο μέσος όρος των τροποποιημένων τιμών των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε διαθέσιμη είσοδο ρεύματος. Επομένως, οι τελικές τιμές των υπό διερεύνηση παραμέτρων, αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

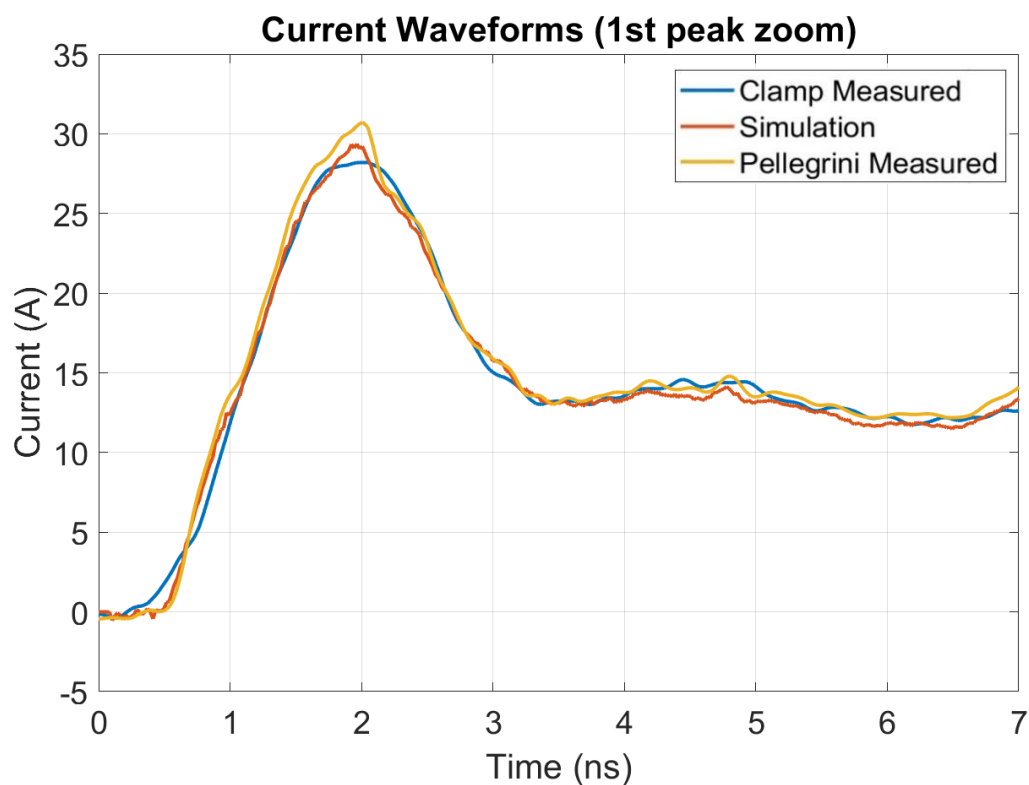
Πίνακας 5-6: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων (Τελικές τιμές)

Παράμετροι – Υπό διερεύνηση			
Mu_static	dispersion_time (ns)	gap (mm)	winding_gap (mm)
330	5.7	0.45	0.8875

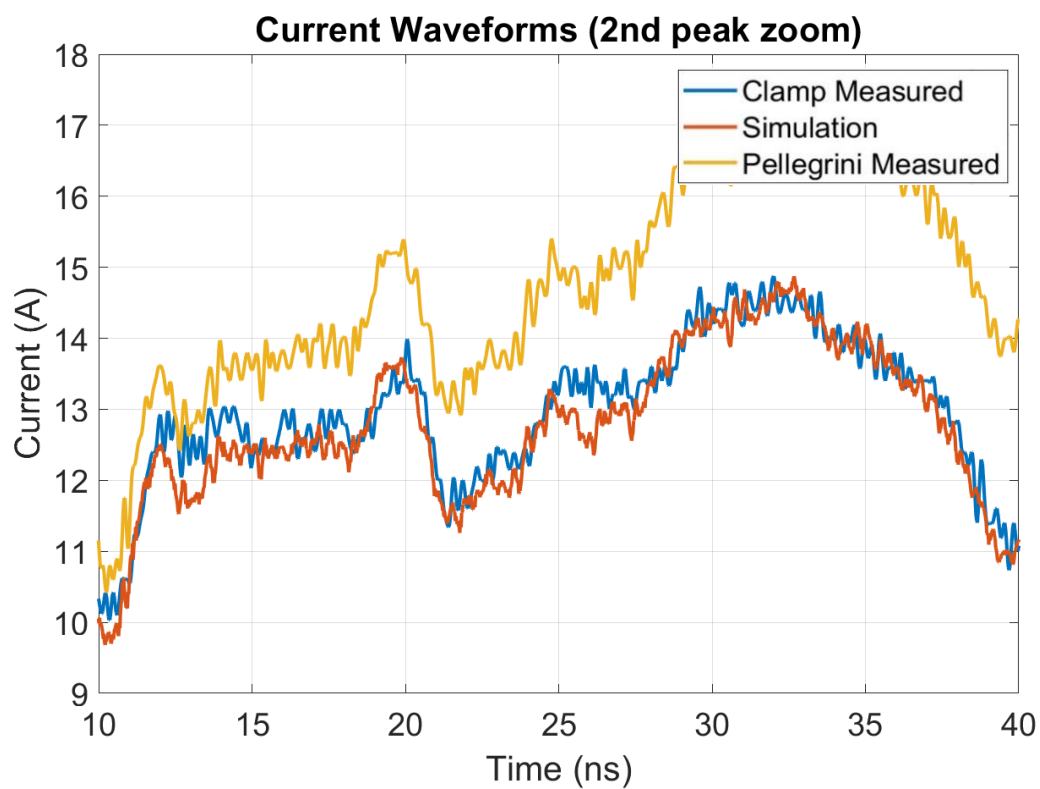
Συνεπώς, τα γραφήματα που προέκυψαν για τις τελικές τιμές των παραμέτρων για κάθε είσοδο ρεύματος φαίνονται παρακάτω:



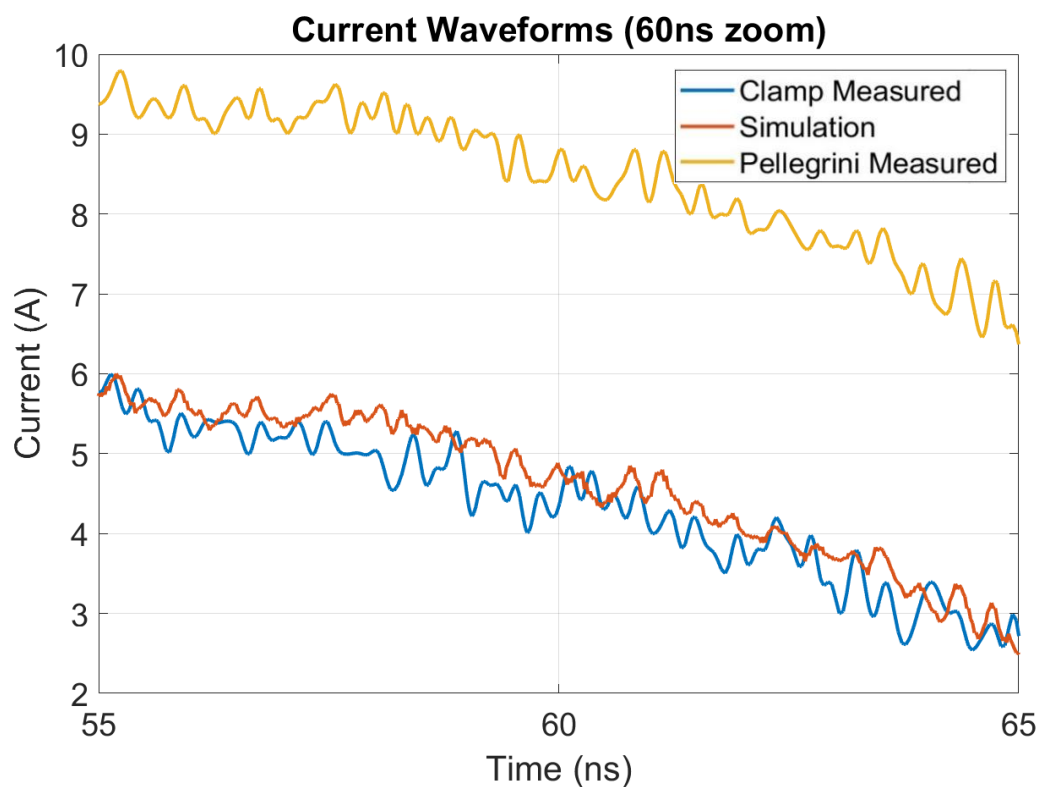
Σχήμα 5-50: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 438/+8kV) - Συνολική κυματομορφή



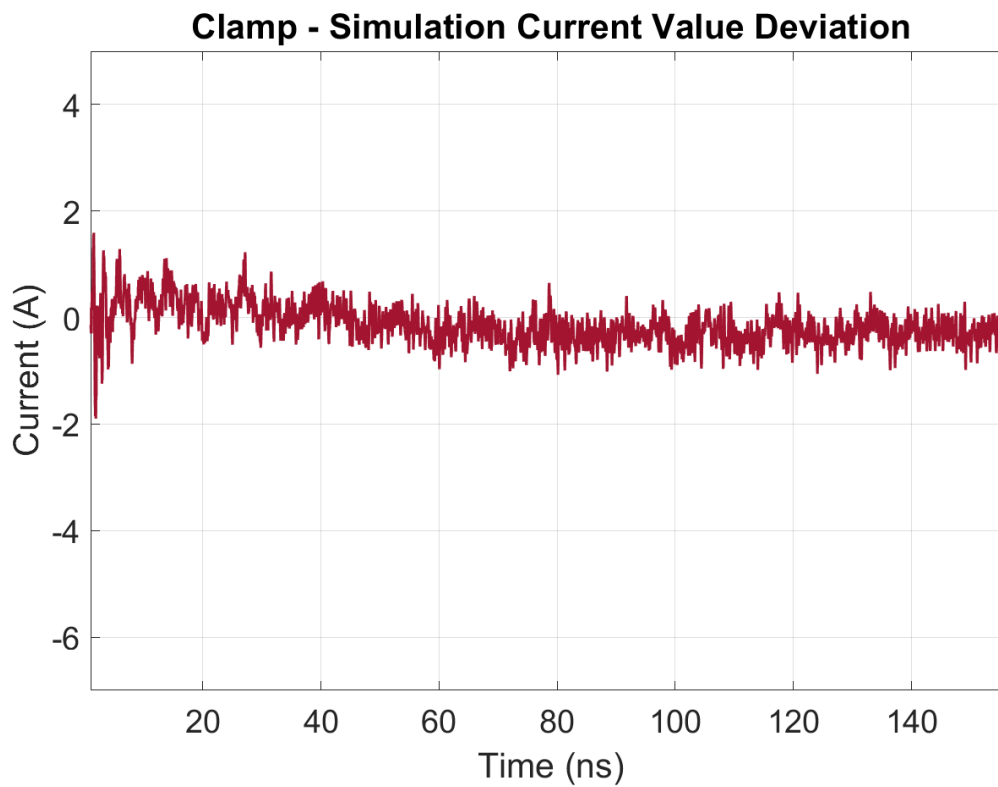
Σχήμα 5-51: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 438/+8kV) - Πρώτη κορυφή



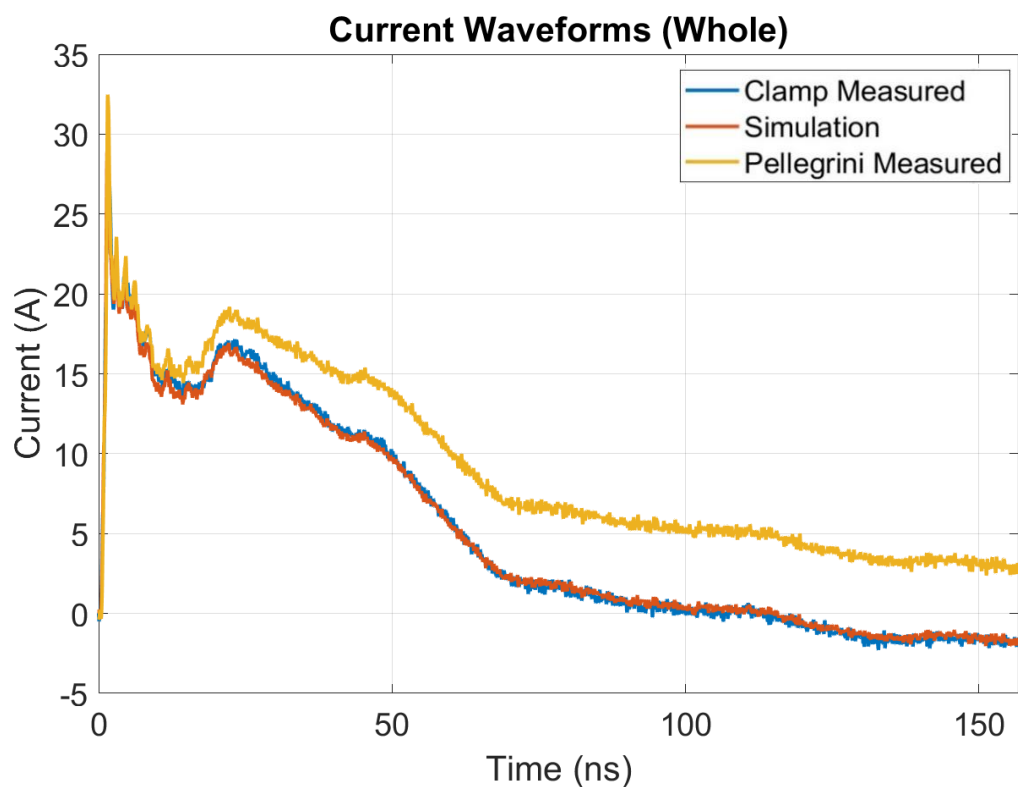
Σχήμα 5-52: : Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 438/+8kV) - Δεύτερη κορυφή



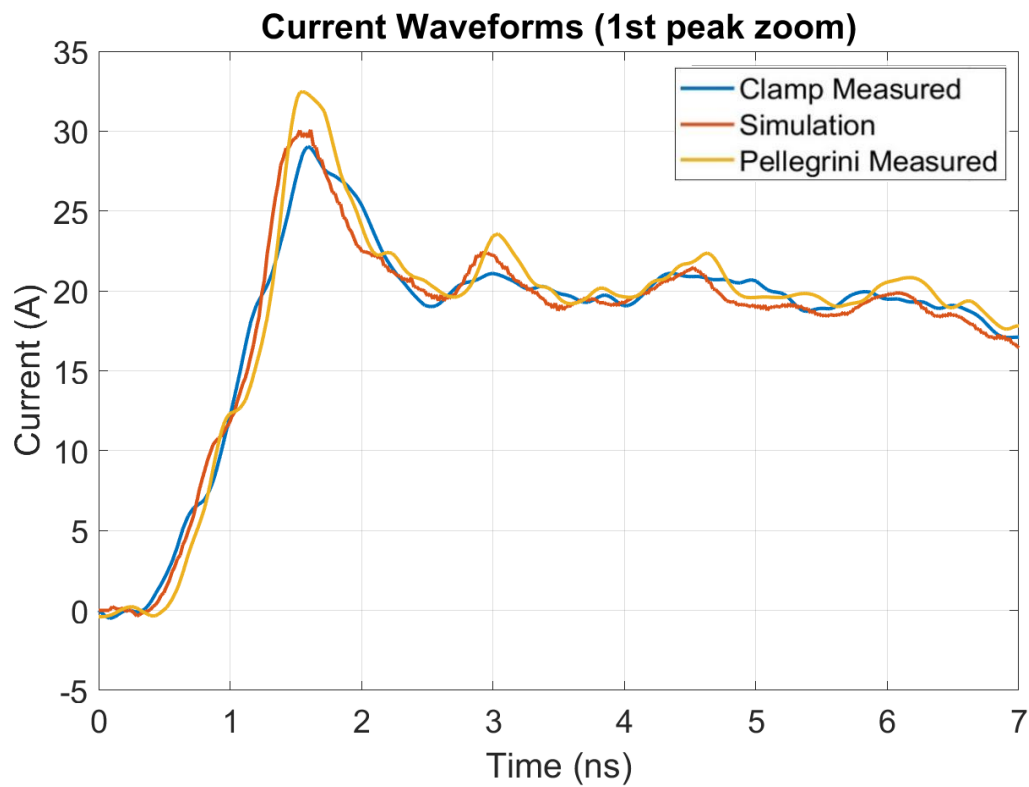
Σχήμα 5-53: : Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 438/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns



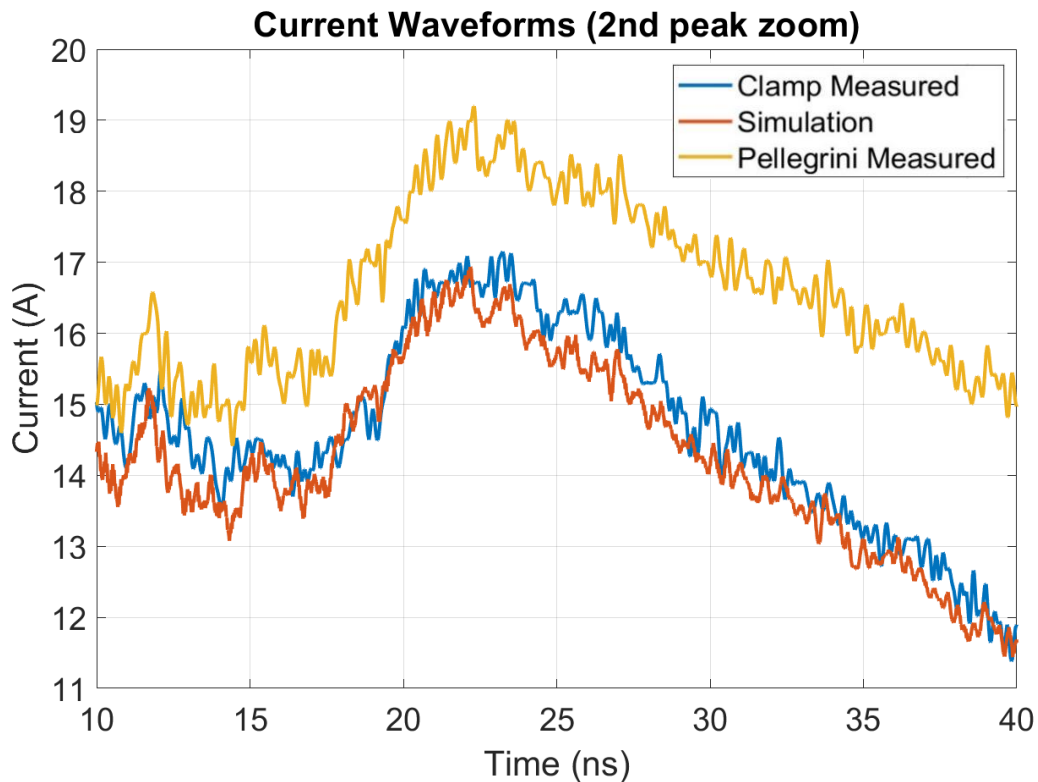
Σχήμα 5-54: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 438/+8kV)



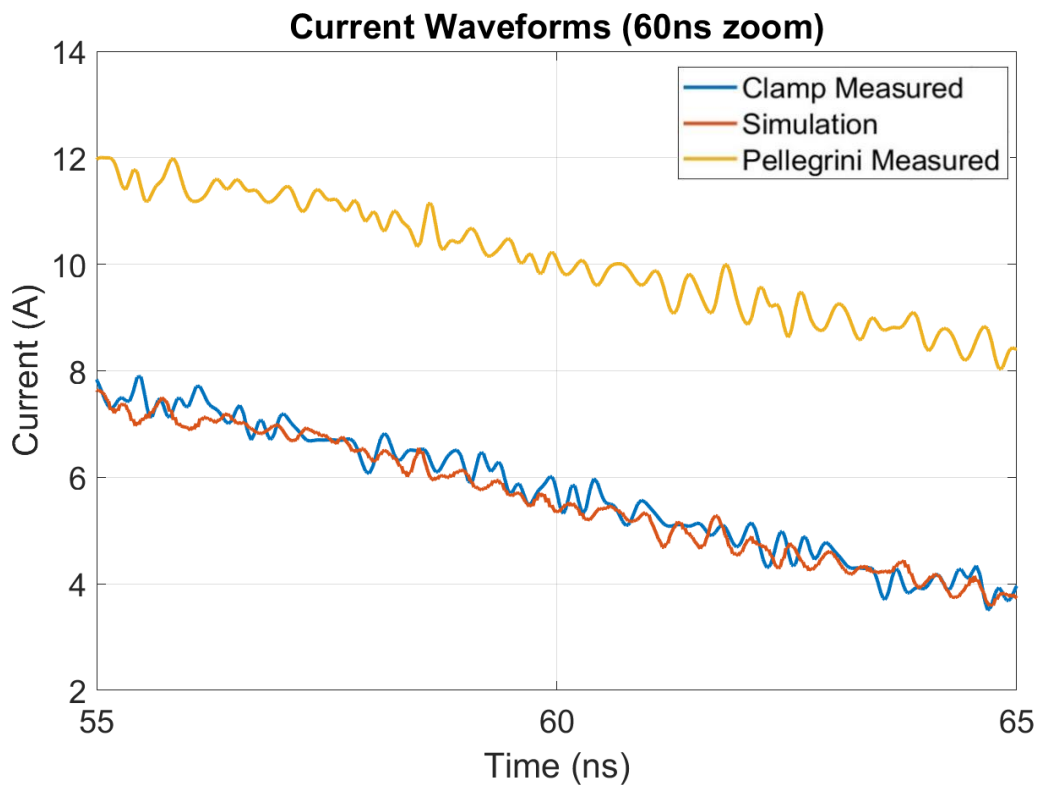
Σχήμα 5-55: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 433/+8kV) - Συνολική κυματομορφή



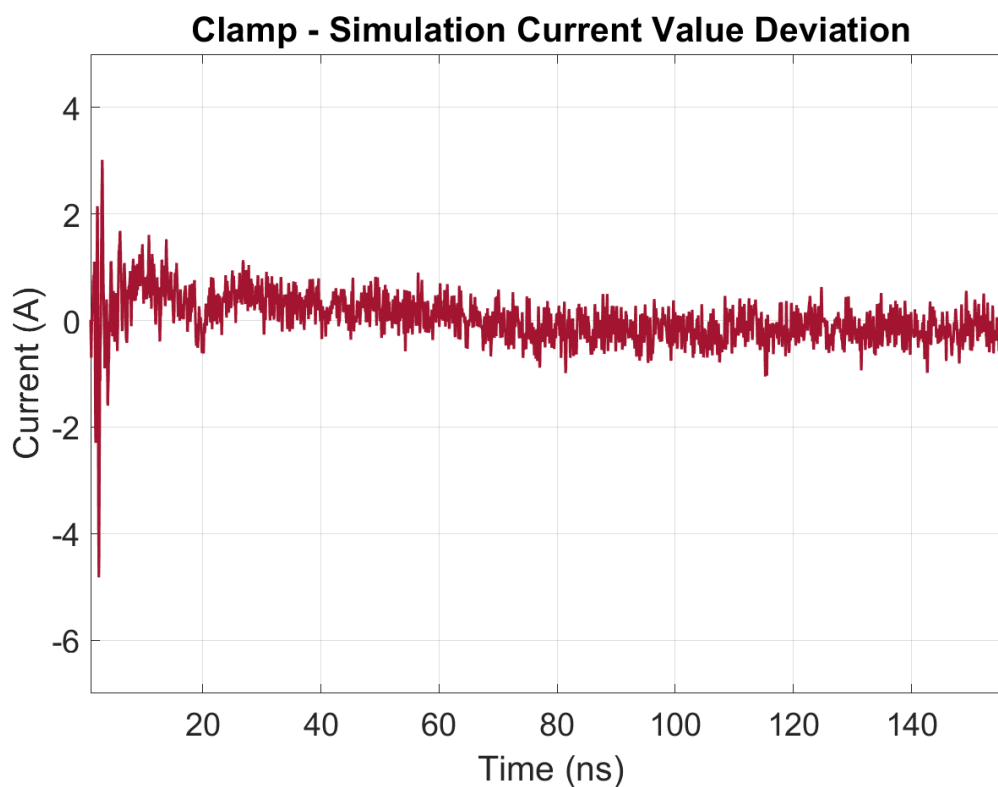
Σχήμα 5-56: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 433/+8kV) – Πρώτη κορυφή



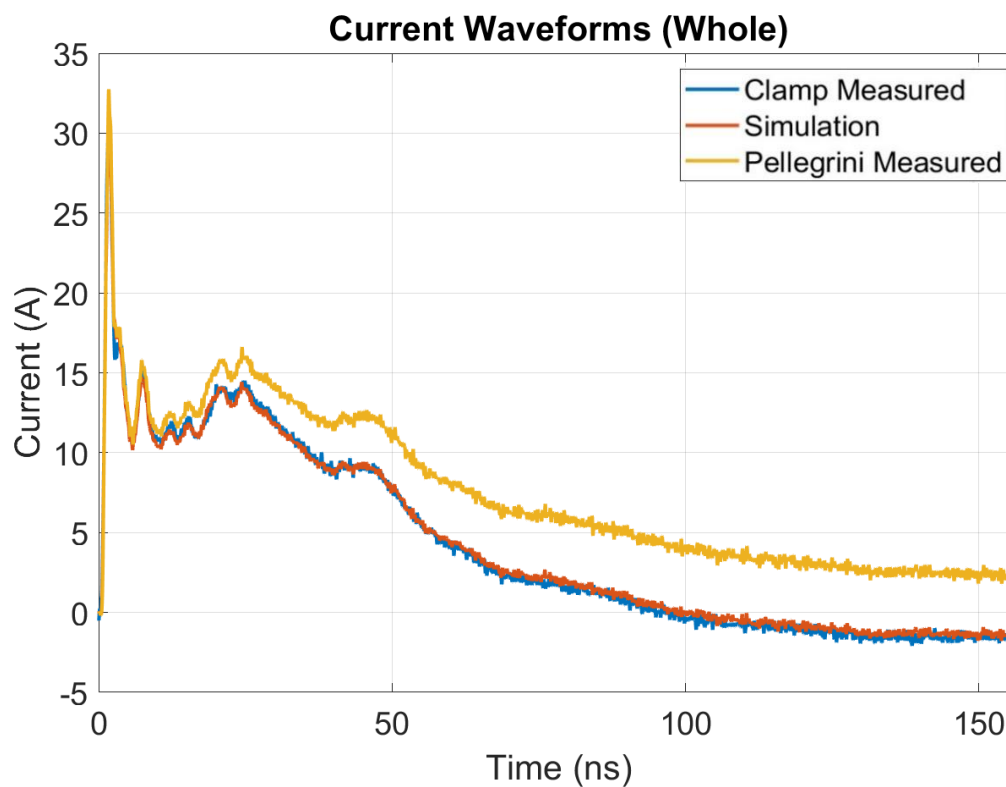
Σχήμα 5-57: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 433/+8kV) – Δεύτερη κορυφή



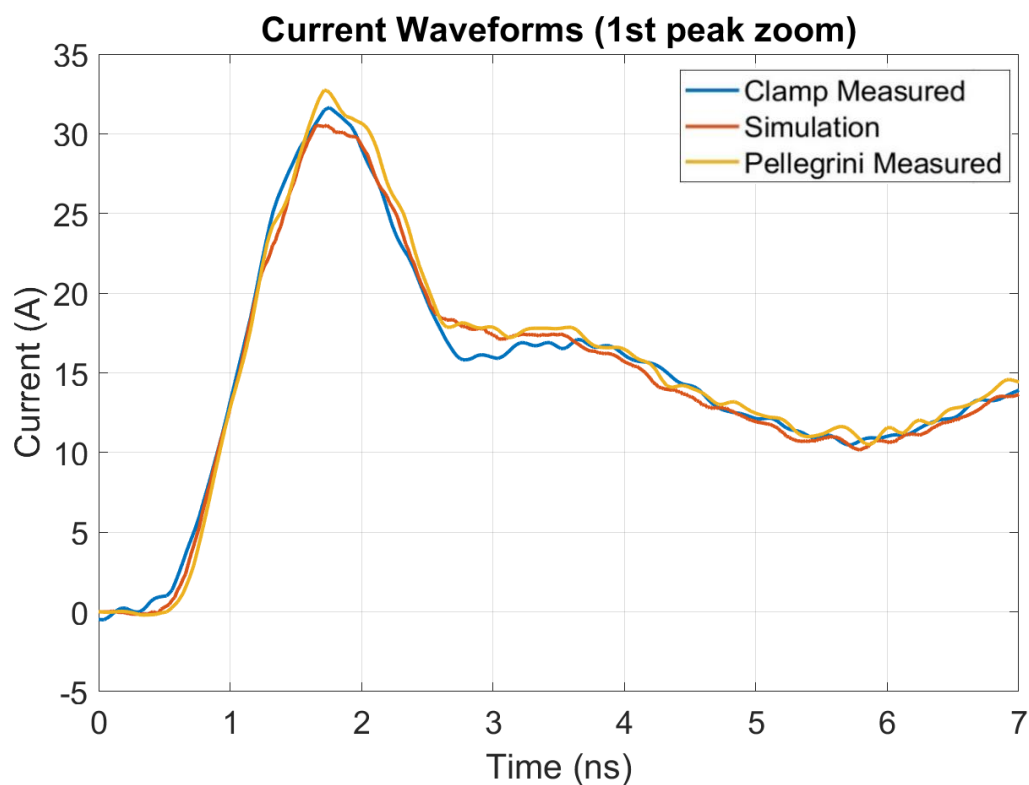
Σχήμα 5-58: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 433/+8kV) – Διάστημα 55ns-65ns



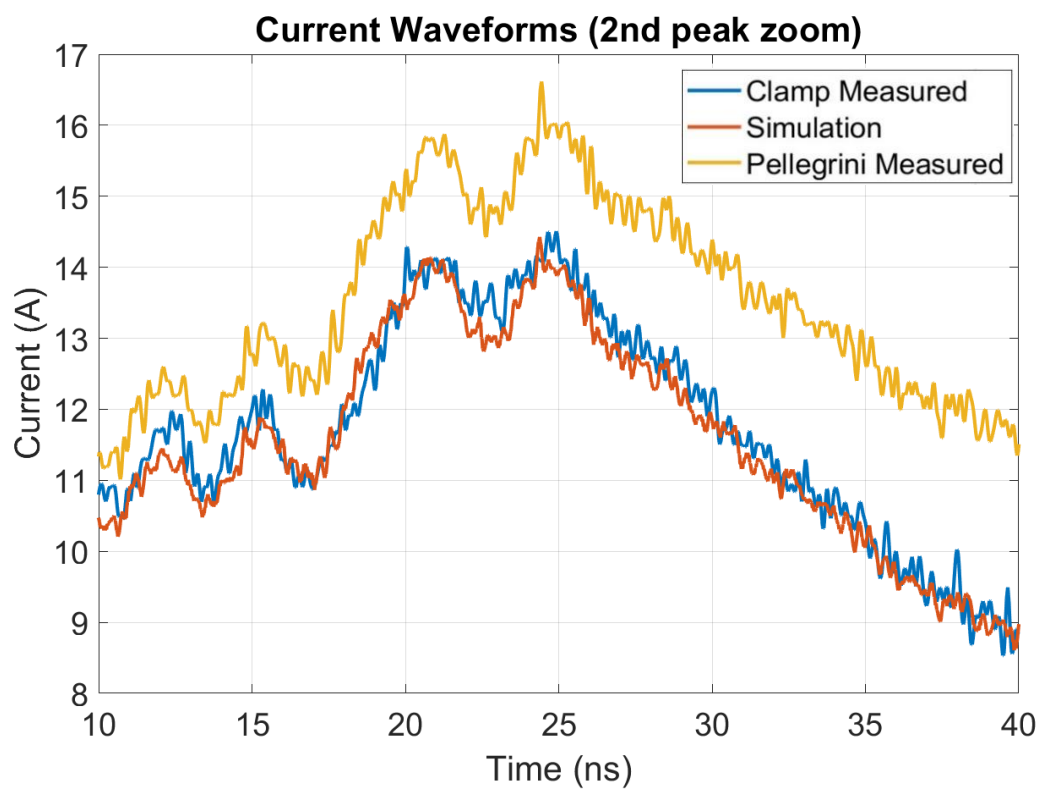
Σχήμα 5-59: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (NSG 433/+8kV)



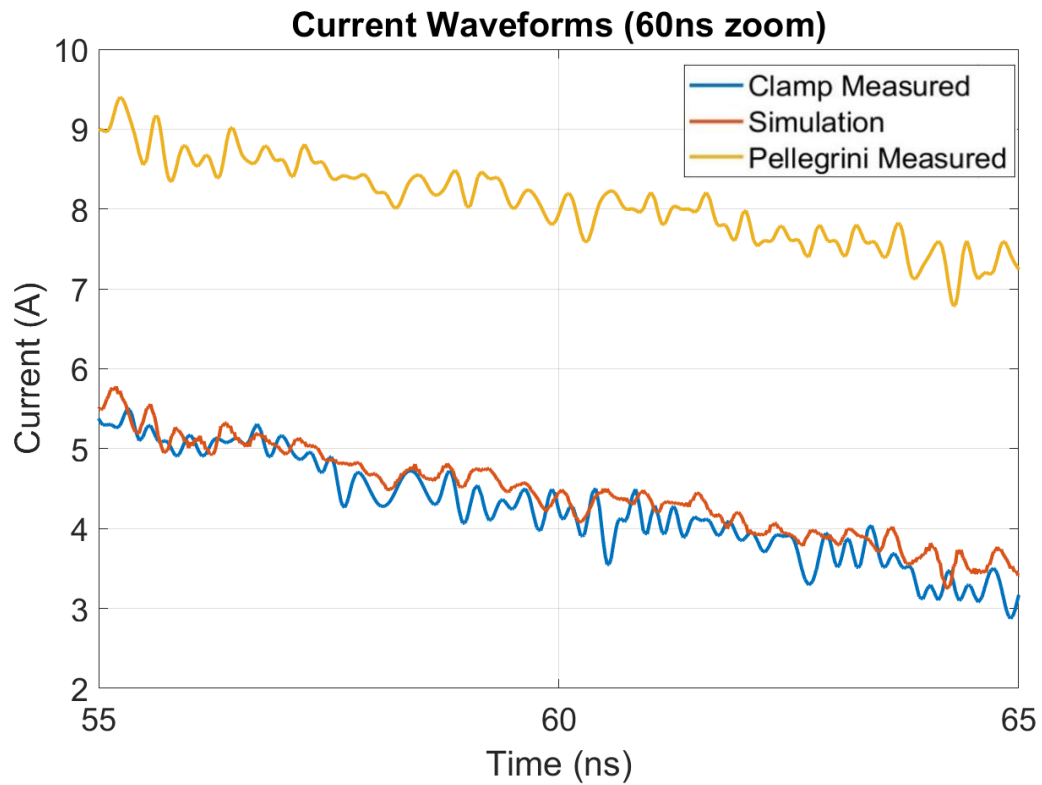
Σχήμα 5-60: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (TRA3000/+8kV) - Συνολική κυματομορφή



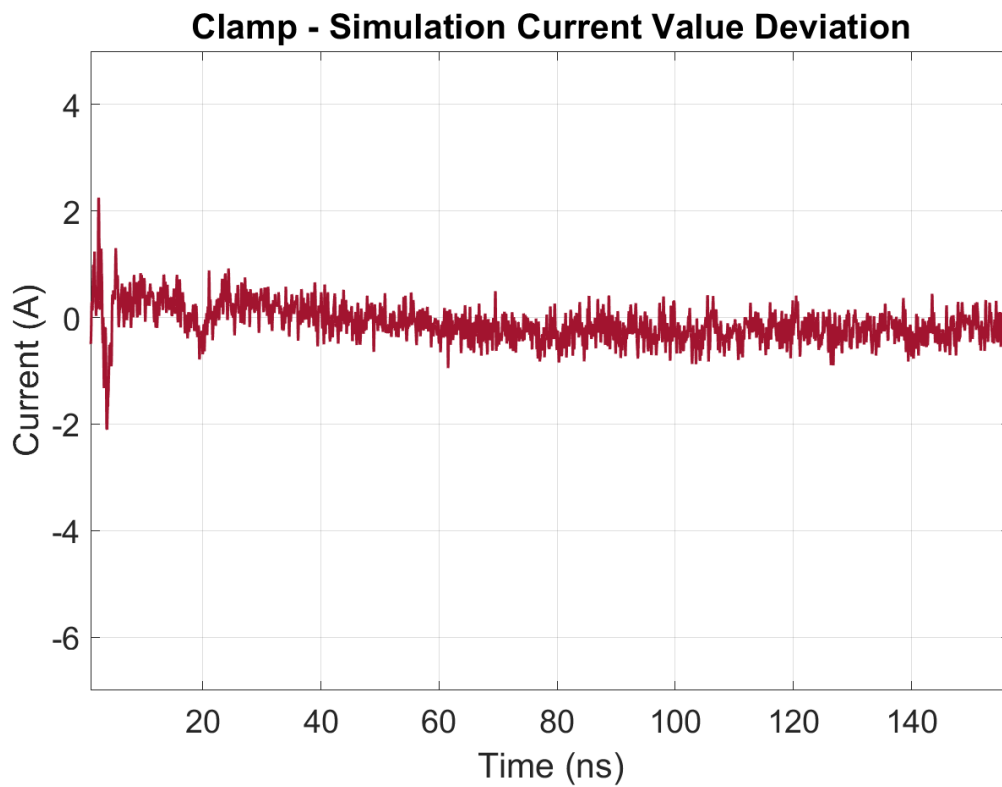
Σχήμα 5-61: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (TRA3000/+8kV) - Πρώτη κορυφή



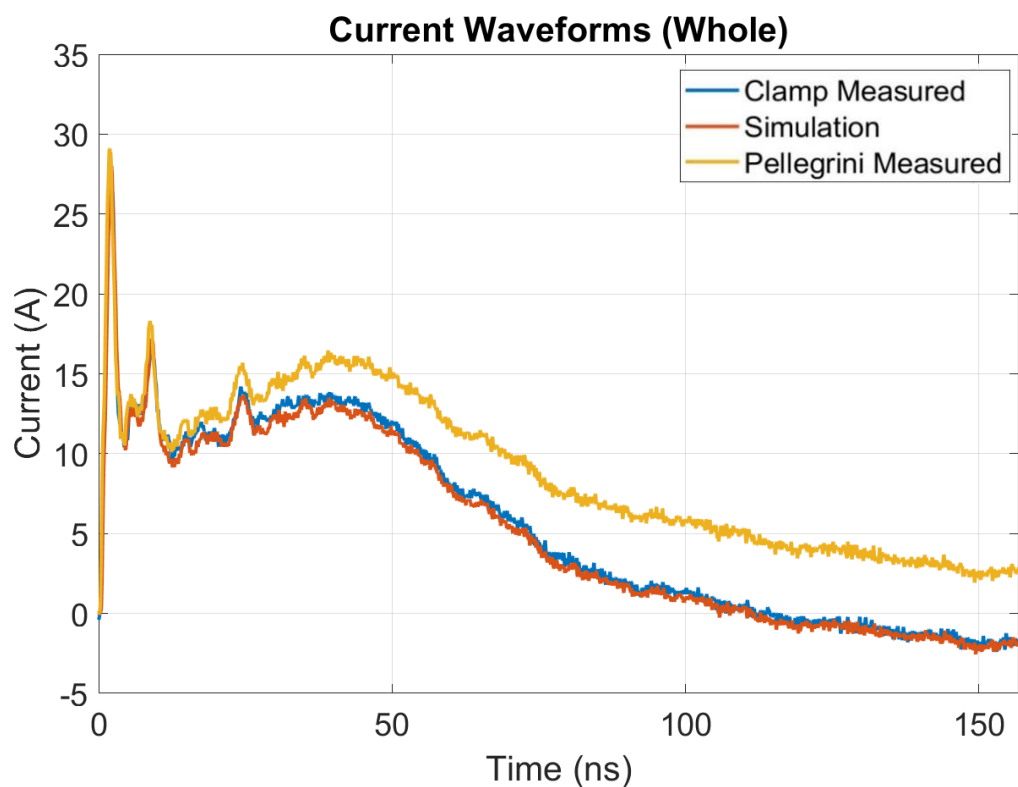
Σχήμα 5-62: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (TRA3000/+8kV) - Δεύτερη κορυφή



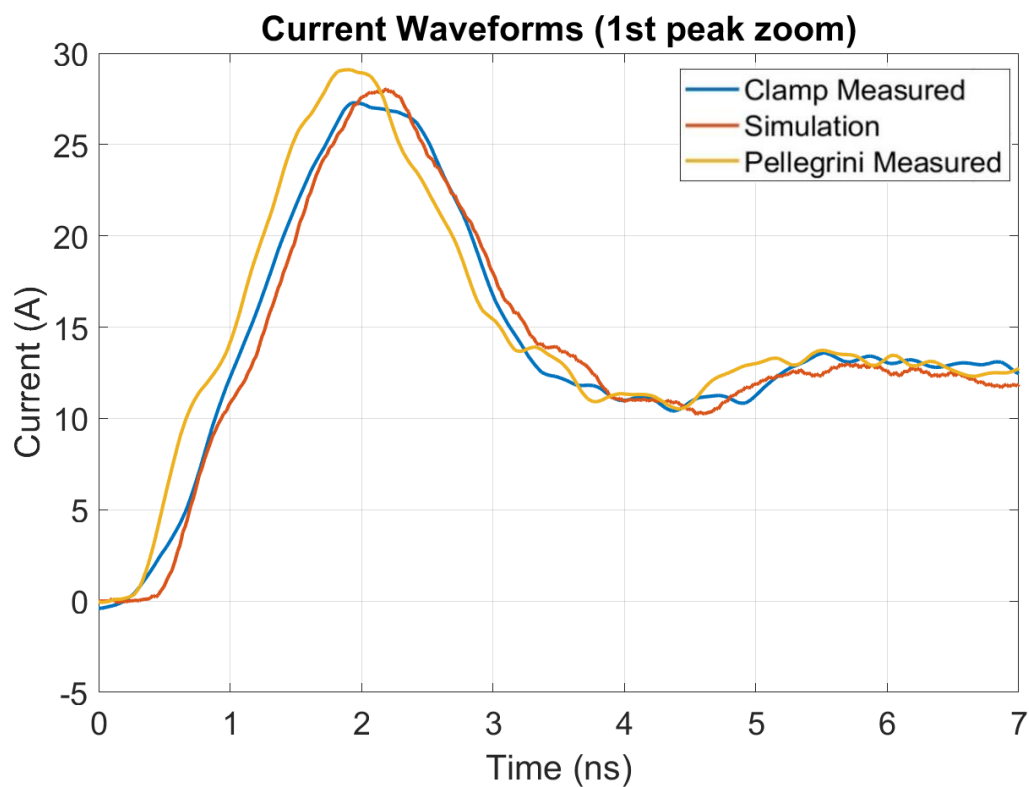
Σχήμα 5-63: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (TRA3000/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns



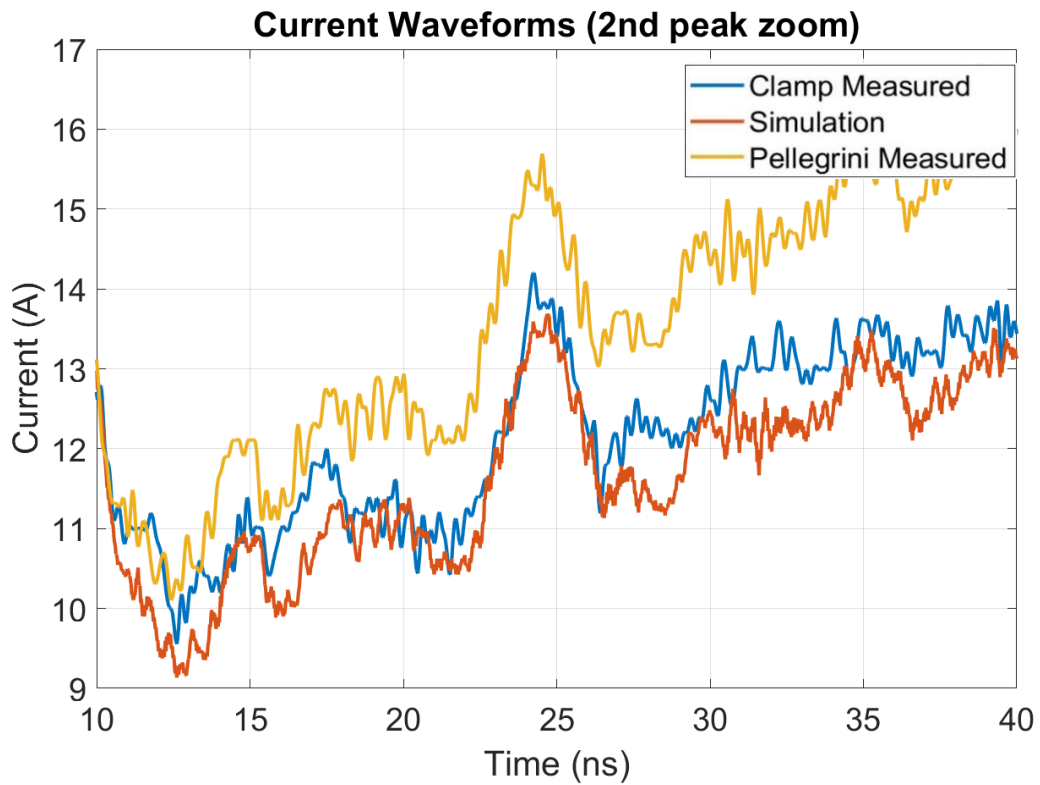
Σχήμα 5-64: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (TRA3000/+8kV)



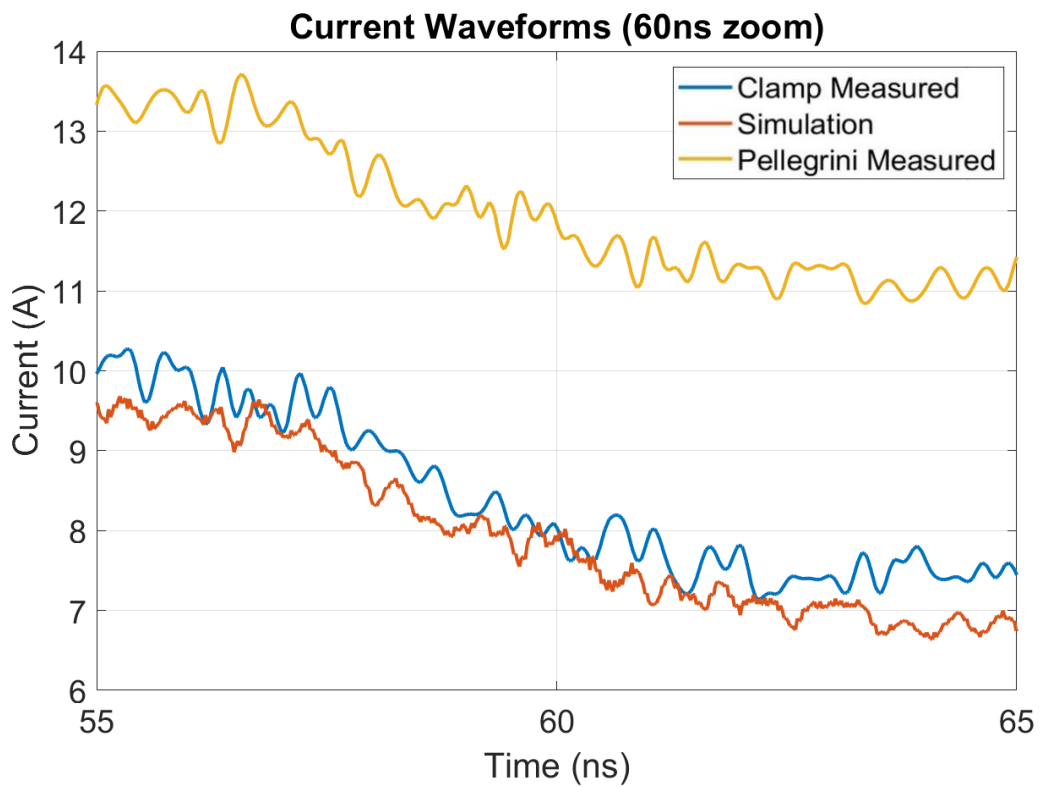
Σχήμα 5-65: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (Dito/+8kV) - Συνολική κυματομορφή



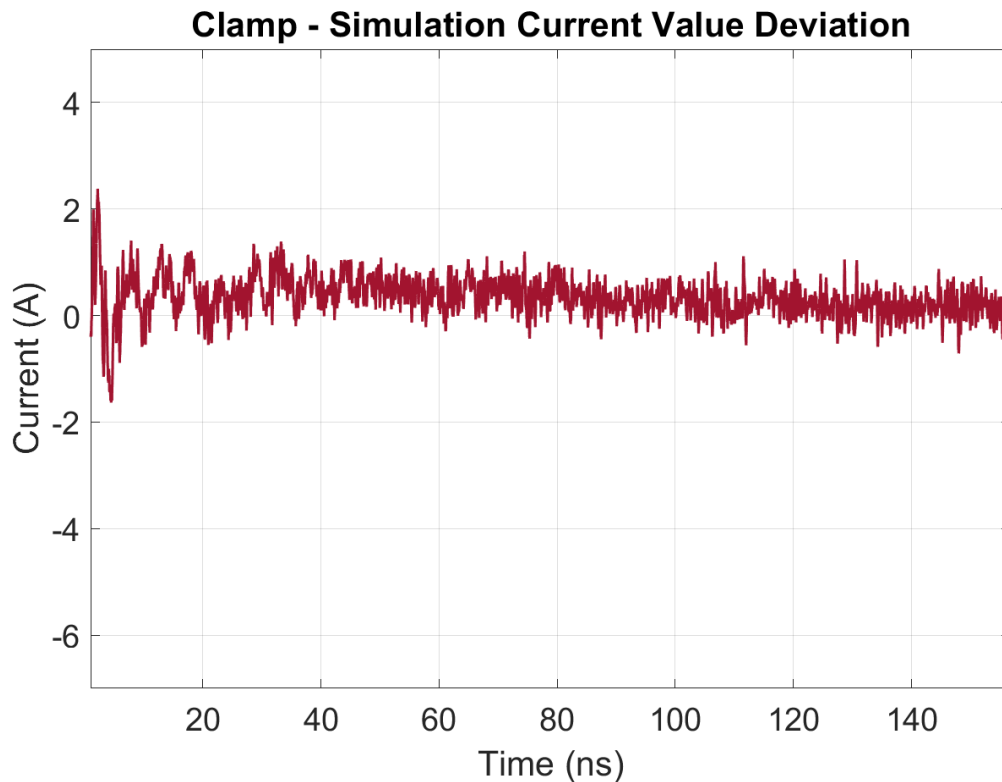
Σχήμα 5-66: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (Dito/+8kV) - Πρώτη κορυφή



Σχήμα 5-67: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (Dito/+8kV) - Δεύτερη κορυφή



Σχήμα 5-68: Γράφημα MATLAB (pellegrini, clamp, simu) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (Dito/+8kV) - Διάστημα 55ns-65ns



Σχήμα 5-69: Γράφημα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 5-6 (Dito/+8kV)

Οι παραπάνω τελικές τιμές, φαίνεται ότι μπορεί να οδηγούν το μοντέλο σε χειρότερα αποτελέσματα από την προηγούμενη δοκιμή, αλλά στατιστικά φαίνεται να ελαχιστοποιείται το συνολικό σφάλμα για κάθε είδος εισόδου. Αυτό θα αναδειχθεί και στην συνέχεια που θα εκτιμηθεί η τελική ακρίβεια του μοντέλου, συνολικά, με οπτικό αλλά και ποσοτικό τρόπο.

5.4 Σύγκριση της ακρίβειας των δοκιμών μέσω του deviation

Για την σύγκριση και τον οπτικό έλεγχο της πορείας της ακρίβειας του μοντέλου, αναπτύχθηκε κι ένα ακόμη πρόγραμμα στο περιβάλλον MATLAB. Με το πρόγραμμα αυτό συγκρίνονται στο ίδιο γράφημα τα deviation για κάθε δοκιμή. Αυτό πραγματοποιήθηκε για κάθε διαφορετική είσοδο ρεύματος. Επειδή, όπως φαίνεται και παραπάνω, οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις παρουσιάστηκαν γύρω από τη μέγιστη του ρεύματος πρώτης κορυφής, και για αυτά τα γραφήματα επιλέχθηκε η ίδια χρονική διάρκεια **0ns έως 7ns** (Πρώτη κορυφή). Στη συνέχεια, αναγράφεται το πρόγραμμα αυτό (επεξήγηση εντολών στην **Ενότητα 5-3**):

```
clc;

close all;

clear all;
```

```

A = load('clamp_file.txt');

fid1 = fopen('simu_file_1.txt', 'rt');
data1 = textscan(fid1, '%s', 'Delimiter', '\n');
fclose(fid1);

delimiter = '#-----
-----';

delimiterIndex1 = find(contains(data1{1}, delimiter), 1, 'last');
numericData1 = data1{1}(delimiterIndex1+1:end);

B1 = cell2mat(cellfun(@(x) str2num(x), numericData1, 'UniformOutput',
false));

time1 = 10e8 * A(:, 1);
time2_1 = B1(:, 1);
clamp = A(:, 2);
simu1 = B1(:, 2);

x1 = linspace(0, max(time2_1), length(time2_1));
clampInterp1 = transpose(interp1(time1, clamp, x1, 'linear'));
deviation1 = clampInterp1 - simu1;

fid2 = fopen('simu_file_2.txt', 'rt');
data2 = textscan(fid2, '%s', 'Delimiter', '\n');
fclose(fid2);

delimiterIndex2 = find(contains(data2{1}, delimiter), 1, 'last');
numericData2 = data2{1}(delimiterIndex2+1:end);

B2 = cell2mat(cellfun(@(x) str2num(x), numericData2, 'UniformOutput',
false));

time2_2 = B2(:, 1);
simu2 = B2(:, 2);

x2 = linspace(0, max(time2_2), length(time2_2));
clampInterp2 = transpose(interp1(time1, clamp, x2, 'linear'));
deviation2 = clampInterp2 - simu2;

fid3 = fopen('simu_file_3.txt', 'rt');
data3 = textscan(fid3, '%s', 'Delimiter', '\n');
fclose(fid3);

delimiterIndex3 = find(contains(data3{1}, delimiter), 1, 'last');

```

```

numericData3 = data3{1}(delimiterIndex3+1:end);

B3 = cell2mat(cellfun(@(x) str2num(x), numericData3, 'UniformOutput',
false));

time2_3 = B3(:, 1);

simu3 = B3(:, 2);

x3 = linspace(0, max(time2_3), length(time2_3));

clampInterp3 = transpose(interp1(time1, clamp, x3, 'linear'));

deviation3 = clampInterp3 - simu3;

figure(1)

plot(time2_1 - time2_1(1) + 1, deviation1, 'LineWidth', 2, 'Color',
'#A2142F');

hold on;

plot(time2_2 - time2_2(1) + 1, deviation2, 'LineWidth', 2, 'Color',
'#0072BD');

plot(time2_3 - time2_3(1) + 1, deviation3, 'LineWidth', 2, 'Color',
'#77AC30');

hold off;

grid on;

ylabel('Current (A)');

xlabel('Time (ns)');

xlim([1 7]);

ylim([-7 5]);

legend('Deviation (1st try)', 'Deviation (2nd try)', 'Deviation
(final)');

title('Clamp - Simulation Current Value Deviations (1st Peak Zoom)');

set(gcf, 'Position', [1000 200 900 600]);

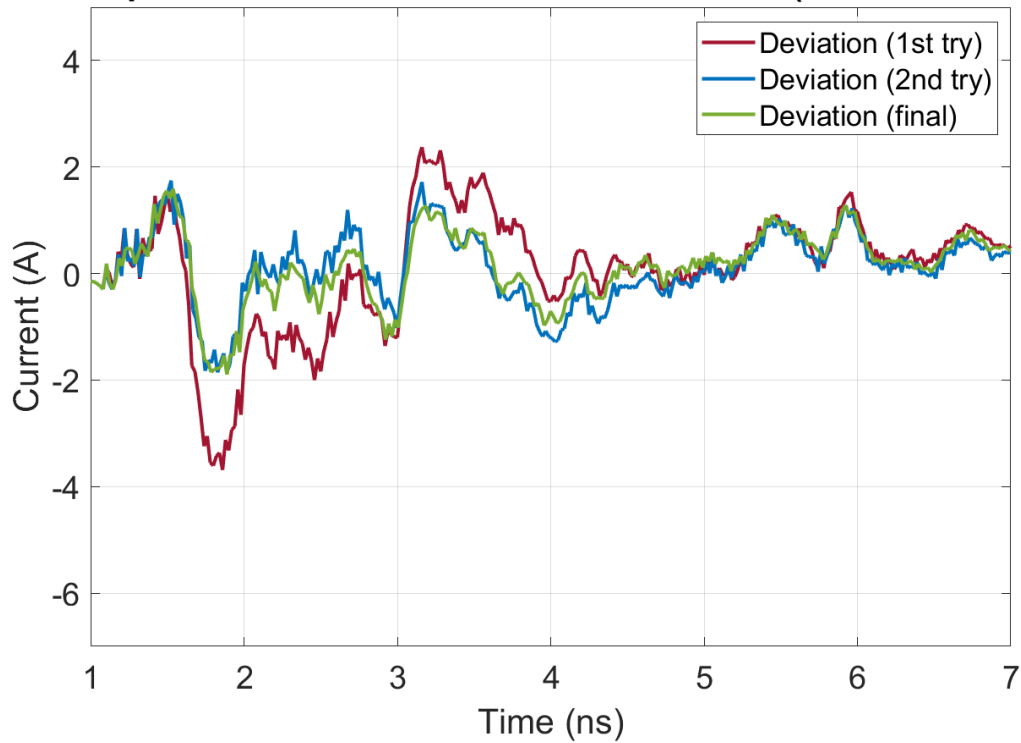
set(gca, 'fontsize', 18);

print(gcf, '-dtiff', 'Deviation_Comparison.tiff');

```

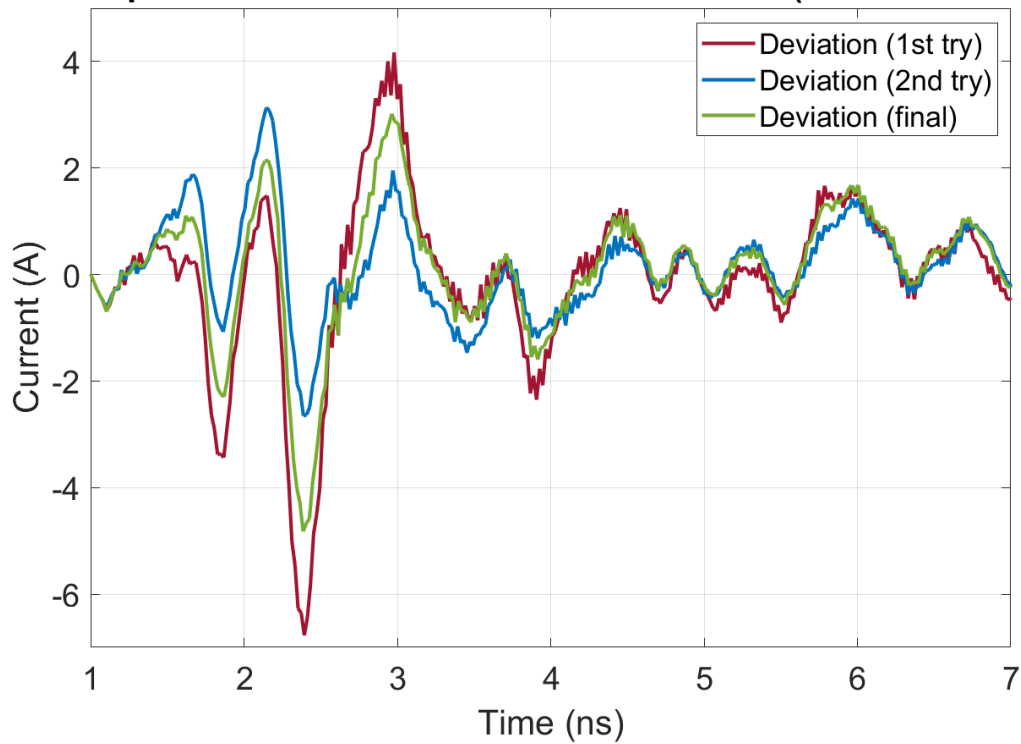
Επομένως, με το συγκεκριμένο πρόγραμμα, παράγονται τα προαναφερθέντα γραφήματα, μέσω των οποίων αποδεικνύεται οπτικά ότι η μέση ακρίβεια με τις τιμές των παραμέτρων της τελικής δοκιμής βελτιώνεται. Στην συνέχεια όμως, θα εκτιμηθεί και ποσοτικά η τελική ακρίβεια του μοντέλου.

Clamp - Simulation Current Value Deviations (1st Peak Zoom)

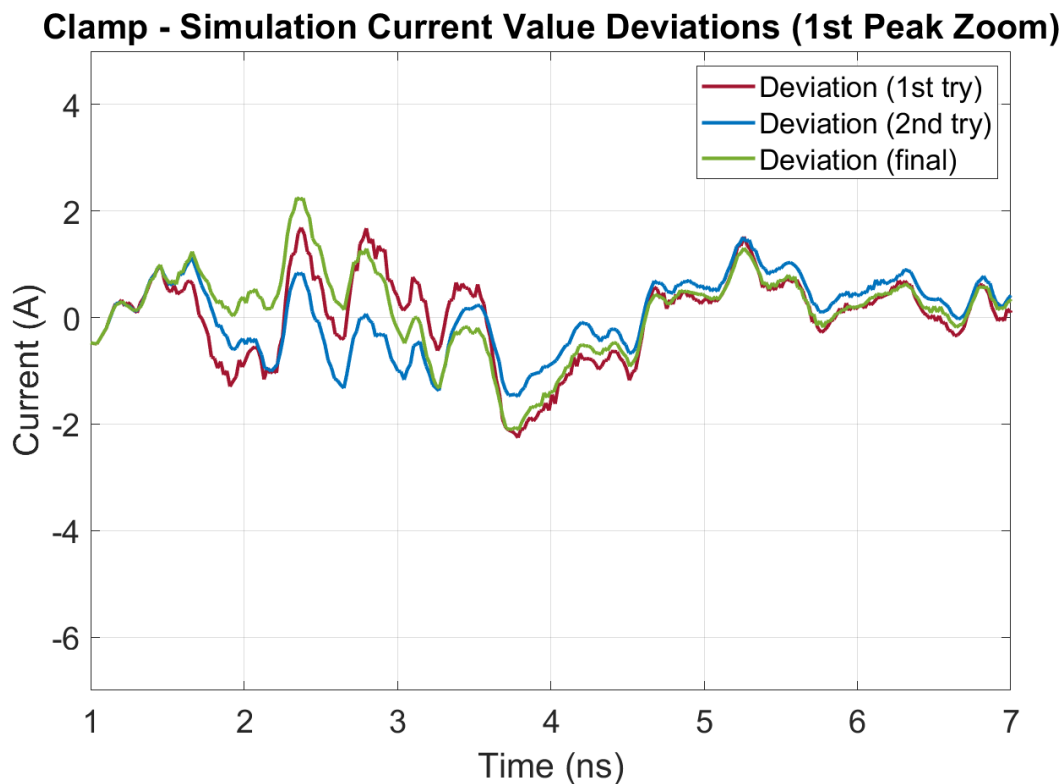


Σχήμα 5-70: Γραφήματα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων και των τριών δοκιμών (NSG 438/+8kV) - Πρώτη κορυφή

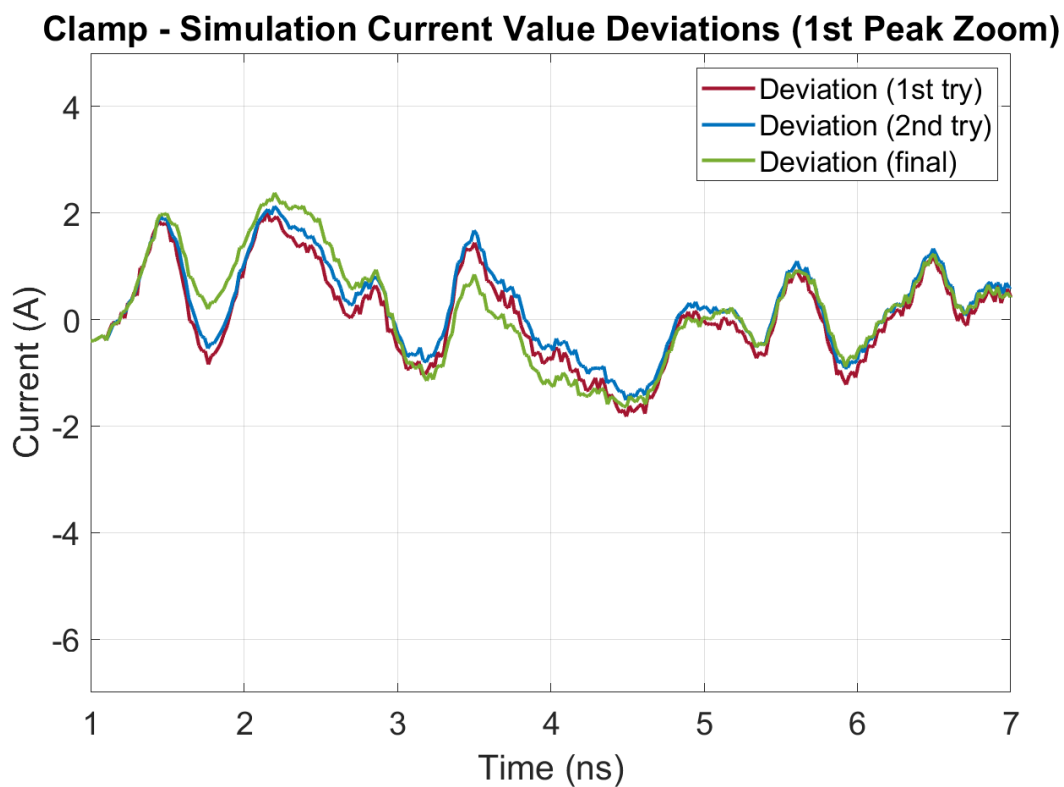
Clamp - Simulation Current Value Deviations (1st Peak Zoom)



Σχήμα 5-71: Γραφήματα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων και των τριών δοκιμών (NSG 433/+8kV) - Πρώτη κορυφή



Σχήμα 5-72: Γραφήματα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων και των τριών δοκιμών (TRA3000/+8kV) - Πρώτη κορυφή



Σχήμα 5-73: Γραφήματα MATLAB (deviation) με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων και των τριών δοκιμών (Dito/+8kV) - Πρώτη κορυφή

5.5 Ποσοτικοποίηση της τελικής ακρίβειας του μοντέλου

Για την επίτευξη κάποιας ποσοτικοποίησης της ακρίβειας του μοντέλου, θα συλλεχθούν δεδομένα από τις κυματομορφές “Clamp Measured” και τις τελικές “Simulation” για την εύρεση των τιμών:

- Μέγιστη τιμή ρεύματος (πρώτη κορυφή)
- Χρόνος ανόδου
- Τιμή ρεύματος 30 ns από τη χρονική στιγμή που το ρεύμα έλαβε τιμή ίση με το 10% του μέγιστου ρεύματος
- Τιμή ρεύματος 60 ns από τη χρονική στιγμή που το ρεύμα έλαβε τιμή ίση με το 10% του μέγιστου ρεύματος

Αυτές οι τιμές θα αναζητηθούν ξεχωριστά για κάθε κυματομορφή και για κάθε διαφορετική είσοδο ρεύματος και μέσω αυτών θα εκτιμήσουμε την ακρίβεια του μοντέλου, διότι σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2:2008, αυτές οι τιμές είναι που ποσοτικά χαρακτηρίζουν τα ρεύματα ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Παρακάτω λοιπόν, παρατίθενται οι πίνακες οι οποίοι εμπεριέχουν τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν για την εύρεση των τιμών αυτών:

Πίνακας 5-7: Τιμές των παραμέτρων του προτύπου IEC 61000-4-2 και ποσοστιαίο σφάλμα clamp–simulation (NSG 438/+8kV)

NSG 438/+8kV				
Κυματομορφή	Ρεύμα 1 st peak (A)	Χρόνος ανόδου (ns)	Ρεύμα 30ns (A)	Ρεύμα 60ns (A)
Clamp	28,20	0,99	14,77	4,46
Simulation	29,37	1,01	14,00	4,51
Ποσοστιαίο Σφάλμα	-4,15%	-2,02%	5,21%	-1,12%

Πίνακας 5-8: Τιμές των παραμέτρων του προτύπου IEC 61000-4-2 και ποσοστιαίο σφάλμα clamp–simulation (NSG 433/+8kV)

NSG 433/+8kV				
Κυματομορφή	Ρεύμα 1 st peak (A)	Χρόνος ανόδου (ns)	Ρεύμα 30ns (A)	Ρεύμα 60ns (A)
Clamp	29,03	0,82	14,45	5,51
Simulation	30,09	0,78	14,29	5,44
Ποσοστιαίο Σφάλμα	-3,65%	4,88%	1,11%	1,27%

Πίνακας 5-9: Τιμές των παραμέτρων του προτύπου IEC 61000-4-2 και ποσοστιαίο σφάλμα clamp-simulation (TRA3000/+8kV)

TRA3000/+8kV				
Κυματομορφή	Ρεύμα 1 st peak (A)	Χρόνος ανόδου (ns)	Ρεύμα 30ns (A)	Ρεύμα 60ns (A)
Clamp	31,64	0,85	11,67	4,09
Simulation	30,55	0,82	11,70	4,30
Ποσοστιαίο Σφάλμα	3,45%	3,53%	-0,26%	-5,13%

Πίνακας 5-10: Τιμές των παραμέτρων του προτύπου IEC 61000-4-2 και ποσοστιαίο σφάλμα clamp-simulation (Dito)

Dito/+8kV				
Κυματομορφή	Ρεύμα 1 st peak (A)	Χρόνος ανόδου (ns)	Ρεύμα 30ns (A)	Ρεύμα 60ns (A)
Clamp	27,28	1,20	13,06	7,80
Simulation	28,05	1,20	12,35	7,38
Ποσοστιαίο Σφάλμα	-2,82%	0,00%	5,44%	5,38 %

Συνεπώς, από τα παραπάνω ποσοστιαία σφάλματα μπορεί να συναχθεί η εκτίμηση ότι το συγκεκριμένο μοντέλο θα παρουσιάσει στην χειρότερη περίπτωση απόκλιση της τάξεως του 5,44%. Αυτή η ποσοτική εκτίμηση, δεν αντιπροσωπεύει την απόλυτη ακρίβεια του μοντέλου, αλλά επιβεβαιώνει και ποσοτικά αυτό που φαίνεται και οπτικά, την αρκετά ικανοποιητική και αξιόπιστη προσέγγιση που τελικά πετυχαίνει το συγκεκριμένο μοντέλο.

Κεφάλαιο 6: Σύνοψη – Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση ενός αισθητήρα ρεύματος για ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Η διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου του αισθητήρα ρεύματος FCC F-65 ήταν περίπλοκη και περιλάμβανε διάφορα στάδια. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CST Studio Suite 2024 για την κατασκευή των βασικών δομών του μοντέλου προσομοίωσης. Οι παράμετροι που θεωρήθηκαν απαραίτητες για τη δημιουργία του μοντέλου καθορίστηκαν με ακρίβεια και η διαδικασία προσομοίωσης ξεκίνησε με την εισαγωγή αυτών των παραμέτρων. Σημαντική προσοχή δόθηκε στην ακρίβεια των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, όπως η γεωμετρία του αισθητήρα, οι ιδιότητες των υλικών, και οι συνθήκες προσομοίωσης. Η σωστή ρύθμιση αυτών των παραμέτρων ήταν κρίσιμη για την επιτυχία της προσομοίωσης και την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Η προσομοίωση περιλάμβανε μια σειρά από δοκιμές με στόχο την αξιολόγηση της απόδοσης του αισθητήρα υπό διάφορες συνθήκες. Διερευνήθηκαν διάφορες παράμετροι, όπως το διάκενο μεταξύ του εσωτερικού τυλίγματος και του φερρίτη «gar», το διάκενο μεταξύ των ακροδεκτών του εσωτερικού τυλίγματος «winding_gap», ο χρόνος διασποράς του φερρίτη «dispersion_time», και η μαγνητική διαπερατότητα «Mu_static» για να διαπιστωθεί η επίδρασή τους στην ακρίβεια του αισθητήρα. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του MATLAB, επιτρέποντας την ανάλυση των δεδομένων και την οπτικοποίηση των παραμέτρων μέσω γραφημάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παράμετροι του μοντέλου είχαν σημαντική επίδραση στην ακρίβεια των μετρήσεων. Οι τιμές των παραμέτρων ρυθμίστηκαν κατάλληλα ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό σφάλμα και να βελτιωθεί η απόδοση του αισθητήρα.

Από την ανάλυση και τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, ως συμπέρασμα προκύπτει, πρώτον, ότι η ακρίβεια του μοντέλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακριβή ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου. Η σωστή επιλογή των τιμών για τα διάκενα, τη μαγνητική διαπερατότητα και τον χρόνο διασποράς είναι κρίσιμη για την επίτευξη ικανοποιητικής και αξιόπιστης ακρίβειας του μοντέλου. Και δεύτερον, ότι παρά τα θετικά αποτελέσματα, υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης του μοντέλου. Σε αυτό θα συμβάλλει η περαιτέρω ανάλυση του μοντέλου και η χρήση πιο προηγμένων τεχνικών προσομοίωσης καθώς και βελτιωμένων αλγορίθμων επεξεργασίας που δύνανται να αυξήσουν ακόμα περισσότερο την ακρίβεια και την αξιοπιστία του αισθητήρα. Ως προς την περαιτέρω ανάλυση, αναγκαία κρίνεται η δοκιμή του μοντέλου σε μεγαλύτερη πληθώρα γεννητριών

ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων των οποίων η ακρίβεια και ικανότητα παραγωγής ηλεκτροστατικών ρευμάτων είναι διακριβωμένη.

Επομένως, συνοψίζοντας, η εργασία αυτή αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης ακριβών και αξιόπιστων μοντέλων προσομοίωσης αισθητήρων για την ανίχνευση ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, συμβάλλοντας έτσι στην προαγωγή του τομέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και στην καλύτερη προστασία του μελλοντικού ηλεκτρονικού εξοπλισμού, που θα αναπτυχθεί και θα βγει στην αγορά προς χρήση και βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης της σύγχρονης κοινωνίας.

Βιβλιογραφία

- [1] Henry W.OTT, "Electromagnetic Compatibility Engineering", John Wiley & Sons Inc. Publication, August 2009.
- [2] Paul A. Chatterton, Michael A. Houlden, "Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό", Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1992.
- [3] ANSI C63.14 – 1998, "Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD)".
- [4] Clayton R. Paul, "Introduction to Electromagnetic Compatibility", John Wiley & Sons Inc. Publication, Second Edition, 2009.
- [5] Ευθύμιος Θ. Τσαρούχης, " EMC Εξοπλισμού ηλεκτρικής ισχύος – Το πρότυπο EN 61000-04-05", Διπλωματική εργασία, Φεβρουάριος 2004, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [6] Dag Bjoerkloef, "EMC Standards and Their Application", 1999 Annual Reference, διαθέσιμο εδώ: <http://www.ce-mag.com/99ARG/EMCStandards61.html>
- [7] EMTEST "The structure of EMC standards", διαθέσιμο εδώ: http://www.emtest.com/fr/what_is/standards.php
- [8] EN 61000-4-2:2009: "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part4 - 2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test", 2009.
- [9] ΕΛΟΤ EN 61000.06.01: "Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Μέρος 6.1: Γένια Πρότυπα – Ατρωσία για κατοικήσιμα, εμπορικά και ελαφρής βιομηχανίας περιβάλλοντα",2001
- [10] Paul Cartwright, "Electrostatic Hazards in the aerosol industry", διαθέσιμο εδώ: <http://www.chilworth.co.uk/publications/publications.asp>.
- [11] Theodore Dangelmayr, "ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control", Van Noshand Ranhold, New York, 1990.
- [12] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, "Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development", Elsevier, 2003.

- [13] IEC 61000-4-2: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication”, 2008
- [14] “Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-433”, Instruments Schaffner, Publ. 1303E.
- [15] D. J. Griffiths, "Introduction to Electrodynamics", 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Addison-Wesley, 2012.
- [16] Τσαλαμέγκας Ι., Ρουμελιώτης Ι. "Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Τόμος Β", Εκδόσεις Τζιόλα 2010.
- [17] A. Smith, "Ideal Types of Magnetic Materials," ResearchGate, διαθέσιμο εδώ: https://www.researchgate.net/publication/236247518_Ideal_Types_of_Magnetic_Materials.
- [18] S. O. Kasap, Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων, Δεύτερη Έκδοση, Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2004.
- [19] Jadhav, V. v., Shirsat, S. D., Tumberphale, U. B., & Mane, R. S. (2020). Properties of ferrites. In Spinel Ferrite Nanostructures for Energy Storage Devices (pp. 35–50). Elsevier, διαθέσιμο εδώ: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819237-5.00003-1>
- [20] Τσαλαμέγκας Ι., Ρουμελιώτης Ι. "Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Τόμος Α", Εκδόσεις Τζιόλα 2010.
- [21] Alenyà, M., Advisor, S., & Lousa Rodríguez, A. (n.d.). Permeability characterization of ferrites in the radio frequency range.
- [22] Rumpf, R. C. (n.d.). Electromagnetic Properties of Materials-Part I Lorentz and Drude Models.
- [23] Grassi, F. (n.d.). "Accurate Modeling of Ferrite-Core Effects in Probes for Bulk Current Injection".
- [24] Liu, X., Grassi, F., Spadacini, G., Pignari, S. A., Trotti, F., Mora, N., & Hirschi, W. (2021). Behavioral Modeling of Complex Magnetic Permeability with High-Order Debye Model and Equivalent Circuits. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 63(3), 730–738, διαθέσιμο εδώ: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9179829>

- [25] K. Wyatt, "Using the RF Current Probe," Com-Power, διαθέσιμο εδώ: <https://www.com-power.com/uploads/technote/UsingtheCurrentProbe.pdf>.
- [26] K. Wyatt, "The HF Current Probe: Theory and Application," Interference Technology EMC Directory & Design Guide, 2012, διαθέσιμο εδώ: https://www.interferencetechnology.com/wpcontent/uploads/2012/04/Wyatt_NA_DD12.pdf
- [27] Carobbi, C. F. M., & Millanta, L. M. (2010). Circuit loading in radio-frequency current measurements: The insertion impedance of the transformer probes. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 59(1), 200–204, διαθέσιμο εδώ: <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2022450>
- [28] Carobbi, C. F. M., & Millanta, L. M. (2006). "The Loading Effect of Radio-Frequency Current Probes."
- [29] Fischer Custom Communications, Inc., "F-65 Current Probe Measurement," Calibration Number: 2037320, 2019.
- [30] Fischer Custom Communications, Inc., "F-65 Current Probe Specifications," 2015.