



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης**

**Τομέας Συστημάτων Παραγωγής**

**Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ηλεκτρονικής**

**ΜΕΛΕΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ  
ΜΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
της  
**ΤΣΙΒΓΟΥΛΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ**  
**ΤΣΙΛΗ ΜΑΡΙΝΑ, Υποψ. Διδάκτωρ ΕΜΠ**  
**ΓΕΩΡΓΙΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επ. Καθηγητής**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**  
**ΚΟΥΪΚΟΓΛΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, Καθηγητής**  
**ΝΙΚΟΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, Λέκτορας**  
**ΓΕΩΡΓΙΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επ. Καθηγητής**

**ΧΑΝΙΑ**

**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2004**

*Στους γονείς μου*

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εκπόνησή της ξεκίνησε το Μάρτιο του 2004 και ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 2004, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Γεωργιλάκη Παύλου και της υποψήφιας Διδάκτορος του ΕΜΠ κας Τσίλη Μαρίνας.

Με την ευκαιρία της παρουσίασης της εργασίας μου αυτής, θεωρώ χρέος μου να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν αποφασιστικά στην όλη μου προσπάθεια. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεωργιλάκη Παύλο, ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με το αντικείμενο των μετασχηματιστών και με την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές που παρείχε, καλλιέργησε άρτιο κλίμα συνεργασίας σε όλη την πορεία της εργασίας, υπογράφοντας την επιτυχή της ολοκλήρωση. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος, την Υποψήφια Διδάκτορα του ΕΜΠ κα Τσίλη Μαρίνα, η συμβολή της οποίας σε αυτό το εγχείρημα ήταν εξαιρετικά μεγάλη και χωρίς την άψογη συνεργασία της και το ενδιαφέρον που έδειξε δε θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Επιθυμώ να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή του ΕΜΠ κ. Κλαδά Αντώνιο, οι συμβουλές του οποίου αναφορικά με τις εναλλακτικές γεωμετρίες των θωρακίσεων έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή της πλέον κατάλληλης γεωμετρίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την εταιρία Σνεντέρ Έλεκτρικ ΑΕ και ιδιαίτερα τους κκ. Παπαρήγα Δημήτριο και Σουφλάρη Αθανάσιο για την παροχή των κατασκευαστικών στοιχείων των μετασχηματιστών και τις διευκρινήσεις τους σε θέματα τεχνικής φύσεως.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου είναι το λιγότερο που θα μπορούσα να πω στους ανθρώπους εκείνους, η διαρκή υποστήριξη των οποίων στο διάστημα των πέντε χρόνων της φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο επιβεβαίωσε για άλλη μία φορά ότι είναι πάντα δίπλα μου.

Τέλος, δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους φίλους μου, για τα ανεπανάληπτα φοιτητικά χρόνια που συνέθεσαν οι αξέχαστες στιγμές που περάσαμε μαζί.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τη μελέτη μετασχηματιστών ισχύος με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά τους και ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται μετά την προσθήκη ηλεκτρικής και μαγνητικής θωράκισης, εστιάζοντας στην εκτίμηση της τάσης βραχυκύκλωσης. Στόχος της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της γεωμετρικής διαμόρφωσης των θωρακίσεων, από πλευράς κόστους και απόδοσης. Η εργασία πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με την εταιρία κατασκευής Μετασχηματιστών ισχύος Σνεντέρ Ελεκτρικ ΑΕ, η οποία είναι θυγατρική του ομίλου Schneider Electric Industries SA.

Περιλαμβάνει την ανάπτυξη δισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης τριφασικών μετασχηματιστών ισχύος τύπου τυλιχτού πυρήνα. Τα αποτελέσματα του μοντέλου επιβεβαιώνονται μέσω σύγκρισης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μεθοδολογίας του κατασκευαστή σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών, διαφορετικών επιπέδων τάσης και ισχύος.

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τη μελέτη της μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης των μετασχηματιστών μετά από την προσθήκη θωρακίσεων. Πραγματοποιείται αναλυτική μελέτη της μαγνητικής θωράκισης και δύο ειδών ηλεκτρικής θωράκισης. Ακολουθεί η βελτιστοποίηση των διαστάσεων του πιο αποδοτικού από τα τρία είδη θωράκισης που μελετήθηκαν με τη χρήση ντετερμινιστικών μεθόδων βελτιστοποίησης, σε συνδυασμό με το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων. Παρουσιάζεται συγκριτική ανάλυση των μεθόδων βελτιστοποίησης, από τις οποίες επιλέγεται η καταλληλότερη για το εξεταζόμενο πρόβλημα θωράκισης των μετασχηματιστών ισχύος.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μετασχηματιστές Ισχύος, Τάση Βραχυκύκλωσης, Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων, Ηλεκτρική και Μαγνητική Θωράκιση, Μέθοδοι Βελτιστοποίησης.

# **ABSTRACT**

The present thesis presents the study of power transformers with the use of finite element method for the evaluation of transformer characteristics and their modification due to the introduction of electric and magnetic shielding, focusing on the short circuit impedance evaluation. Its main objective relies on the optimization of the transformer shielding geometrical configuration, with respect to its cost and efficiency. The thesis was implemented in collaboration with the transformer manufacturing industry Schneider Electric AE, which is part of Schneider Electric Industries SA group.

It includes the development of a two-dimensional finite element model, which is used for the calculation of the leakage field and short-circuit impedance of three-phase, wound core, power transformers. The results of the model are verified through comparison to the ones of the manufacturer methodology in several cases of transformers, with different voltage levels and power ratings.

This model is used for the study of the transformer short-circuit impedance variation after the addition of shieldings. An extensive study of magnetic shielding and two kinds of electric shielding is realized. Next, the dimensions of the most efficient type of shielding (among the three kinds of shielding that were studied) are optimized with the use of deterministic optimization methods, in conjunction with the finite element model. A comparative analysis of the optimization methods is presented, followed by the choice of the most appropriate one for the class of the examined transformer shielding problem.

# **KEYWORDS**

Power Transformer, Short Circuit Impedance, Finite Element Method, Electric and Magnetic Shielding, Optimization Methods.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Σκοπός της εργασίας	1
1.2	Χρήση δισδιάστατης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση μαγνητικών πεδίων	3
1.3	Μελέτη ηλεκτρικών και μαγνητικών θωρακίσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	4
1.4	Περιεχόμενα της εργασίας	4
1.5	Βιβλιογραφία	7

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1	Εισαγωγή	9
2.2	Δισδιάστατη ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	10
2.3	Δισδιάστατη ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος FEMM	10
2.3.1	Δομή προγράμματος FEMM	10
2.3.2	Περιγραφή λειτουργίας και χρήσης προγράμματος FEMM	10
2.3.2.1	Εγκατάσταση FEMME.exe	10
2.3.2.2	Σχεδίαση γεωμετρίας με τη χρήση του editor FEMM 3.3	10
2.3.2.3	Ορισμός υλικών των τμημάτων της γεωμετρίας και εισαγωγή τιμών ρεύματος ή τάσης	14
2.3.2.4	Ορισμός οριακών συνθηκών	17
2.3.2.5	Ορισμός προβλήματος	18
2.3.2.6	Δημιουργία δισδιάστατου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων	18
2.3.2.7	Επίλυση προβλήματος	19
2.3.2.8	Μετεπεξεργασία αποτελεσμάτων προβλήματος	19
2.4	Περιγραφή εξεταζόμενου μετασχηματιστή	21
2.5	Μοντελοποίηση μετασχηματιστή με τη δισδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	24
2.5.1	Ισοδύναμη γεωμετρία δισδιάστατου μοντέλου μετασχηματιστή	24
2.5.2	Οριακές συνθήκες	26
2.5.3	Προσομοίωση δοκιμής βραχυκύκλωσης	26
2.5.4	Υπολογισμός της επαγωγικής πτώσης τάσης και της τάσης βραχυκύκλωσης	26
2.5.5	Περιγραφή κατασκευής μοντέλου μετασχηματιστή με τη χρήση του προγράμματος FEMM	28
2.6	Δισδιάστατη πεδιακή ανάλυση μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης	30

2.6.1	Μετασχηματιστής ισχύος 1250 kVA	30
2.6.1.1	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	30
2.6.1.2	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	31
2.6.1.3	Διαστάσεις μοντέλου FEMM	32
2.6.1.4	Δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων	32
2.6.1.5	Αποτελέσματα ανάλυσης	33
2.6.2	Μετασχηματιστής ισχύος 630 kVA	36
2.6.2.1	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	36
2.6.2.2	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	37
2.6.2.3	Διαστάσεις μοντέλου FEMM	37
2.6.2.4	Αποτελέσματα ανάλυσης	38
2.6.3	Μετασχηματιστής ισχύος 720 kVA	39
2.6.3.1	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	39
2.6.3.2	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	39
2.6.3.3	Διαστάσεις μοντέλου FEMM	40
2.6.3.4	Αποτελέσματα ανάλυσης	40
2.7	Συμπεράσματα	42
2.8	Βιβλιογραφία	43

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΛΛΑΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ**

3.1	Εισαγωγή	45
3.2	Μαγνητική θωράκιση	45
3.2.1	Περιγραφή	45
3.2.2	Προσομοίωση προσθήκης μαγνητικής θωράκισης με οριακές συνθήκες	46
3.2.3	Προσομοίωση προσθήκης μαγνητικής θωράκισης με αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρικής της διαμόρφωσης	50
3.3	Συμπεράσματα	62
3.4	Βιβλιογραφία	63

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΛΛΑΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ**

4.1	Εισαγωγή	65
4.2	Πρώτο είδος ηλεκτρικής θωράκισης	65
4.2.1	Περιγραφή	65
4.2.2	Προσομοίωση προσθήκης ηλεκτρικής θωράκισης με αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρικής της διαμόρφωσης	65
4.3	Δεύτερο είδος ηλεκτρικής θωράκισης	79

4.3.1	Περιγραφή	79
4.3.2	Προσομοίωση προσθήκης ηλεκτρικής θωράκισης με αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρικής της διαμόρφωσης	81
4.4	Συμπεράσματα	94

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ**

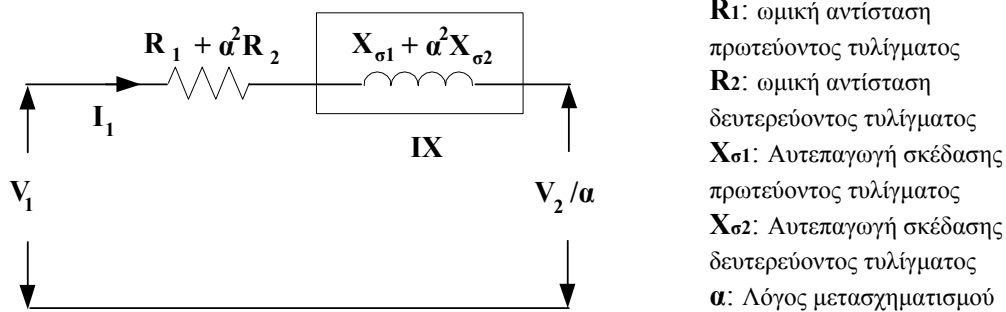
5.1	Εισαγωγή	97
5.2	Μέθοδοι βελτιστοποίησης	97
5.2.1	Μέθοδος πιο απότομης καθόδου (Steepest Descent method)	98
5.2.2	Συζευγμένη μέθοδος κλίσης Fletcher-Reeves (Conjugate Gradient Fletcher-Reeves) (CG-FR)	98
5.2.3	Μέθοδος Davidon-Fletcher-Powell (DFP)	99
5.2.4	Μέθοδος Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)	99
5.2.5	Μέθοδος αναζήτησης προτύπου (Pattern Search)	100
5.3	Βελτιστοποίηση διαστάσεων θωράκισης	100
5.3.1	Συναρτήσεις μεταβολής	100
5.3.2	Εξαγωγή αντικειμενικής συνάρτησης	106
5.3.3	Σύγκριση μεθόδων βελτιστοποίησης	107
5.4	Συμπεράσματα	109
5.5	Βιβλιογραφία	111

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ** 113



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στη μελέτη μετασχηματιστή ισχύος με χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Στόχος της εργασίας είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος ενός τριφασικού μετασχηματιστή ισχύος και η μελέτη του τρόπου με τον οποίο αυτές μεταβάλλονται με την προσθήκη ηλεκτρικών και μαγνητικών θωρακίσεων. Η ανάπτυξη του δισδιάστατου μοντέλου επικεντρώνεται στον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης μέσω της επαγωγικής πτώσης τάσης  $IX\%$ , δηλαδή της πτώσης τάσης η οποία οφείλεται στην αντίδραση σκέδασης των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή (όπως φαίνεται στο απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 1.1). Η ανάλυση εστιάζει στο πεδίο σκέδασης ειδικά για δύο λόγους. Πρώτον διότι αυτό είναι που καθορίζει τις αυτεπαγωγές σκέδασης άρα και το ρεύμα βραχυκύκλωσης που θα διαρρέει το μετασχηματιστή όταν συμβεί κάποιο σφάλμα. Δεύτερον διότι στις δυνάμεις που δημιουργούνται κατά το βραχυκύκλωμα, οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό η αστοχία στη λειτουργία μεγάλων μετασχηματιστών ισχύος.



**Σχήμα 1.1:** Απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον (αγνοείται ο κλάδος μαγνήτισης) - Επαγωγική πτώση τάσης τυλιγμάτων.

### 1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η διαδικασία απελευθέρωσης της ενέργειας και ιδιωτικοποίησης των ηλεκτρικών εταιριών έχει δημιουργήσει ένα νέο, ανταγωνιστικό περιβάλλον στην παγκόσμια αγορά ενέργειας. Οι ηλεκτρικές εταιρίες του εικοστού πρώτου αιώνα θα προσπαθήσουν να βελτιώσουν περαιτέρω την ποιότητα και την αξιοπιστία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, παραμένοντας ταυτόχρονα οικονομικά αποδοτικές. Σε αυτό το νέο και ενδιαφέρον περιβάλλον, εμφανίζεται στη βιομηχανία παραγωγής μετασχηματιστών η ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης και αξιοπιστίας των προϊόντων τους και μείωσης του κόστους δεδομένου ότι τα προϊόντα υψηλής ποιότητας και χαμηλού κόστους είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομική τους επιβίωση. Η απόδοση των μετασχηματιστών βελτιώνεται με τη μείωση των απωλειών φορτίου και κενού φορτίου. Η αξιοπιστία των μετασχηματιστών βελτιώνεται κυρίως με την ακριβή εκτίμηση του πεδίου σκέδασης, της τάσης βραχυκύκλωσης και των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα τυλίγματά τους κατά το βραχυκύκλωμα, καθώς επιτρέπουν την αποφυγή καταστροφών ή βλαβών κατά τις δοκιμές βραχυκύκλωσης και τα σφάλματα στο σύστημα

ηλεκτρικής ενέργειας. Η μείωση του κόστους των μετασχηματιστών επιτυγχάνεται κυρίως με την τεχνική και οικονομική βελτιστοποίηση της σχεδιάσής τους [1.1].

Η ακριβής εκτίμηση των απωλειών και της τάσης βραχυκύκλωσης κατά τη φάση σχεδίασης των μετασχηματιστών είναι ζωτικής σημασίας, καθώς,

- 1) Αυξάνει την αξιοπιστία των μετασχηματιστών,
- 2) Εξασφαλίζει την υψηλή απόδοση των μετασχηματιστών,
- 3) Μειώνει το κόστος των υλικών, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μικρότερο περιθώριο ασφαλείας,
- 4) Βοηθά τον κατασκευαστή να αποφύγει την πληρωμή ρητρών απωλειών,
- 5) Ελαχιστοποιεί την ανάγκη κατασκευής πρωτοτύπου μετασχηματιστών (για την επιβεβαίωση της ακρίβειας της σχεδίασης) καθώς και των δοκιμών βραχυκύκλωσης υπό ονομαστική τάση, οι οποίες είναι επίπονες και δαπανηρές,
- 6) Μειώνει το χρόνο παράδοσης των μετασχηματιστών.

Για τους παραπάνω λόγους, το πεδίο σκέδασης των μετασχηματιστών και ο υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσης τους είναι αντικείμενο συνεχούς μελέτης και έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές στη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία.

Σε περιπτώσεις όπου η διαφορά μεταξύ μετρημένης και προδιαγεγραμμένης (εγγυημένης) τιμής τάσης βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή δεν ικανοποιεί τις προδιαγραφές του Πίνακα 1.1, πρέπει να πραγματοποιηθούν τροποποιήσεις της σχεδίασης προκειμένου να τηρηθούν οι κανονισμοί. Η μείωση της τιμής της τάσης βραχυκύκλωσης μπορεί να επιτευχθεί μέσω προσθήκης ηλεκτρικής θωράκισης, η οποία εξασθενεί το πεδίο σκέδασης των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή. Αντίθετα, η προσθήκη μαγνητικής θωράκισης αυξάνει το πεδίο σκέδασης και την τάση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή, αντίστοιχα [1.2]. Η ηλεκτρική θωράκιση υλοποιείται με την προσθήκη φύλλων χαλκού στις εξωτερικές επιφάνειες του πυρήνα, πάνω από τα πηνία ή στο διάκενο μεταξύ πυρήνα και πηνίων. Η μαγνητική θωράκιση υλοποιείται με τοποθέτηση φύλλων σιδήρου (συνήθως φερρίτη) κατά μήκος των εσωτερικών τοιχωμάτων του κελύφους του μετασχηματιστή.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται δισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τον ακριβή υπολογισμό του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης τριφασικών μετασχηματιστών τύπου τυλιχτού πυρήνα. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τη μεταβολή των παραμέτρων του μετασχηματιστή με την προσθήκη μαγνητικών και ηλεκτρικών θωρακίσεων. Σκοπός της εργασίας είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης διαμόρφωσης των θωρακίσεων, από πλευρά κόστους και απόδοσης, σε συνδυασμό με τις προδιαγραφές του μετασχηματιστή. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται και συγκρίνονται διάφορες μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης, από τις οποίες επιλέγεται η καταλληλότερη για την τάξη του εξεταζόμενου προβλήματος.

**Πίνακας 1.1:** Ανοχές διάφορων χαρακτηριστικών των μετασχηματιστών κατά το πρότυπο IEC 60076 – 1 [1.3].

<i>ΜΕΓΕΘΟΣ</i>	<i>ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</i>
<b>α) Απώλειες</b>	
α <sub>1</sub> ) Συνολικές απώλειες (Fe+Cu)	<b>+10%</b> των εγγυημένων συνολικών απωλειών (Fe+Cu)
α <sub>2</sub> ) Απώλειες Fe (απώλειες Cu)	<b>+15%</b> των απωλειών Fe (απωλειών Cu) με την προϋπόθεση ότι δεν θα παραβιαστεί η ανοχή για τις συνολικές απώλειες
<b>β) Λόγος μετασχηματισμού</b>	
β <sub>1</sub> ) Λόγος μετασχηματισμού κατά την ονομαστική λήψη	Η μικρότερη από τις παρακάτω τιμές: α ) <b>±0.5%</b> του εγγυημένου λόγου μετασχηματισμού β) <b>±1/10</b> της μετρηθείσας ονομαστικής τάσης βραχυκύκλωσης (υ <sub>κ</sub> %)
β <sub>2</sub> ) Λόγος μετασχηματισμού των τάσεων των άλλων λήψεων	συμφωνείται με τον πελάτη
<b>γ) Τάση βραχυκύκλωσης (Μ/Σ δύο τυλιγμάτων)</b>	
γ <sub>1</sub> ) Ονομαστική λήψη	<b>±7.5%</b> της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης, όταν η τάση βραχυκύκλωσης είναι $\geq 10\%$  <b>±10%</b> της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης, όταν η τάση βραχυκύκλωσης είναι $< 10\%$
γ <sub>2</sub> ) Σε άλλες λήψεις	<b>±10%</b> της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης, όταν η τάση βραχυκύκλωσης είναι $\geq 10\%$  <b>±15%</b> της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης, όταν η τάση βραχυκύκλωσης είναι $< 10\%$
<b>δ) Ρεύμα κενού</b>	<b>+30%</b> του εγγυημένου ρεύματος κενού

## 1.2 ΧΡΗΣΗ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

Η συστηματική αύξηση των επιδόσεων των υπολογιστών και η εξέλιξη των αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης πεδιακών μεγεθών καθιστά δυνατή την λεπτομερέστερη ανάλυση μαγνητικού πεδίου διατάξεων με υπολογιστικά συστήματα ευρείας διάδοσης και χαμηλού κόστους. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία από τις αριθμητικές μεθόδους που έχουν επικρατήσει στην ανάλυση του πεδίου διατάξεων τρισδιάστατης γεωμετρίας που περιλαμβάνουν υλικά με μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως οι μετασχηματιστές, και μπορεί πλέον να εφαρμοσθεί σε εύλογο χρόνο χρησιμοποιώντας κατάλληλο προσωπικό υπολογιστή.

Η εξέλιξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων δίνει τη δυνατότητα λεπτομερούς υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου σε περιπτώσεις δισδιάστατων και τρισδιάστατων διαμορφώσεων, ενώ με την υπέρθεση στοιχειωδών δισδιάστατων (και τρισδιάστατων αντίστοιχα) λύσεων επιτρέπει τον υπολογισμό του πεδίου σκέδασης τριφασικών μετασχηματιστών. Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων μπορούν ακόμη να συνδυαστούν με διαδικασίες βελτιστοποίησης της σχεδίασης με στόχο τη βελτίωση του σχήματος των τυλιγμάτων για ελαχιστοποίηση των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά το βραχυκύκλωμα. Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων έχουν χρησιμοποιηθεί, εκτός από τον υπολογισμό του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης, [1.4] – [1.8], και για τον υπολογισμό των απωλειών δινορρευσμάτων στο κέλυφος του μετασχηματιστή και για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών των ελασμάτων του πυρήνα, [1.9] – [1.14].

### 1.3 ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΘΩΡΑΚΙΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μελέτη των θωρακίσεων και του τρόπου με τον οποίο επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά των διατάξεων στις οποίες τοποθετούνται συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία. Η μαγνητική θωράκιση μετασχηματιστών έχει μελετηθεί εκτενώς, τόσο με τρισδιάστατο υπολογισμό του πεδίου σκέδασης [1.15], όσο και πειραματικά [1.16]. Ανάλογη διερεύνηση έχει πραγματοποιηθεί και για τη βελτιστοποίηση των διαστάσεων μαγνητικής θωράκισης σε μετασχηματιστές ισχύος [1.17, 1.18].

Η δισδιάστατη μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ενδείκνυται για τη μελέτη και βελτιστοποίηση των θωρακίσεων σε μετασχηματιστές, καθώς μπορεί να δώσει ικανοποιητική ακρίβεια με σχετικά μικρό χρόνο επίλυσης του μαγνητικού πεδίου. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα εξέτασης πολλών εναλλακτικών διαμορφώσεων των θωρακίσεων χωρίς μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Γι αυτό το λόγο η μέθοδος υιοθετείται στην παρούσα εργασία ως εργαλείο ανάλυσης των θωρακίσεων.

### 1.4 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της θωράκισης μετασχηματιστών ισχύος έτσι ώστε να τροποποιούνται τα χαρακτηριστικά τους (αυτεπαγωγή σκέδασης) σύμφωνα με τις προδιαγραφές που επιβάλλονται από τα διεθνή πρότυπα. Στα κεφάλαια που ακολουθούν περιγράφεται η δισδιάστατη μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται για την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου των μετασχηματιστών και τα αποτελέσματά της σε διάφορες περιπτώσεις. Από τη σύγκριση με τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας του κατασκευαστή προκύπτει ότι η μέθοδος είναι αρκετά ακριβής ώστε να προβλέψει σωστά τις μεταβολές της τάσης βραχυκύκλωσης μετά την προσθήκη θωρακίσεων. Έτσι, χρησιμοποιείται σαν εργαλείο κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης της γεωμετρίας τους, σε συνδυασμό με ντετερμινιστικές μεθόδους βελτιστοποίησης.

Τα κεφάλαια της εργασίας έχουν την ακόλουθη δομή:

Στο **Κεφάλαιο 2**, περιγράφεται η ανάπτυξη και εφαρμογή δισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή. Περιγράφονται τα αποτελέσματα της μεθόδου για τρεις περιπτώσεις μετασχηματιστών, έτσι ώστε, από τη σύγκριση με τη μεθοδολογία του κατασκευαστή, να προκύψουν γενικευμένα συμπεράσματα για την ακρίβεια της μεθόδου.

Στο **Κεφάλαιο 3**, περιγράφεται αναλυτικά η προσθήκη μαγνητικής θωράκισης για την αλλαγή των παραμέτρων του μετασχηματιστή, ενώ το **Κεφάλαιο 4** περιλαμβάνει την επέκταση της διαδικασίας προσθήκης θωρακίσεων στο ενεργό μέρος του μετασχηματιστή με την αναλυτική παρουσίαση δύο ειδών ηλεκτρικής θωράκισης.

Στο **Κεφάλαιο 5**, παρατίθεται η διαδικασία βελτιστοποίησης των διαστάσεων της ηλεκτρικής θωράκισης, η οποία κρίθηκε ως το αποτελεσματικότερο από τα τρία είδη των θωρακίσεων που χρησιμοποιήθηκαν, όσον αφορά στην επίδρασή της στις μεταβολές που παρουσιάζονται στην επαγωγική πτώση τάσης και τελικά στη συμπεριφορά του μετασχηματιστή.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και εφαρμογές των προηγούμενων κεφαλαίων.

## 1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Π. Γεωργιλάκης και Α. Κλαδάς, “Βελτίωση της μεθοδολογίας σχεδίασης-πρόβλεψης χαρακτηριστικών μετασχηματιστών ισχύος χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου και πειραματική επιβεβαίωση,” *Τελική έκθεση του έργου ΠΑΒΕΤ 00ΒΕ457*, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2003.
- [1.2] M.A. Tsili, A.G. Kladas, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris and D.G. Paparigas, “Geometry Optimization of Magnetic Shunts in Power Transformers Based on a Particular Hybrid Finite Element- Boundary Element Model and Sensitivity Analysis,” *Proc. of 11<sup>th</sup> Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2004)*, Seoul, Korea, June 2004.
- [1.3] IEC 60076-1, “Power transformers – Part 1: General,” 2000.
- [1.4] I.L. Nahas, B. Szabados, R.D. Findlay, M. Poloujadoff, S. Lee, P. Burke, D. Perco, “Three dimensional flux calculation on a three-phase transformer,” *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 1, Nr. 3, 1986, pp. 156-160.
- [1.5] C. Xiang, Y. Jinsha, Z. Guoqiang, Z. Yuanlu, H. Qifan, “Analysis of Leakage Magnetic Problems in Shell-Form Power Transformer,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 33, Nr. 2, pp. 2049-2051, Mar. 1997.
- [1.6] G.E. Mechler, R.S. Girgis, “Magnetic flux distributions in transformer core joints,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 198-203, Jan. 2000.
- [1.7] K. Zakrzewski, M. Kukaniszyn, “Three-dimensional model of one- and three-phase transformer for leakage field calculation,” *IEEE Trans Magn.*, Vol. 28, No. 2, pp. 1344-1347, Mar. 1992.
- [1.8] A.G. Kladas, M.P. Papadopoulos, J.A. Tegopoulos, “Leakage Flux and Force Calculation on Power Transformer Windings under short circuit: 2D and 3D Models Based on the Theory of Images and the Finite Element Method Compared to Measurements,” *IEEE Trans. on Magnetism*, Vol. 30, Nr. 5/2, Sept. 1994, pp. 3487 - 3490.
- [1.9] J. Turowski, A. Pelikant, “Eddy current losses and hot-spot evaluation in cover plates of power transformers,” *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 144, No 6, pp. 435-440, Nov. 1997.
- [1.10] C. Lin, C. Xiang, Z. Yanlu, C. Zhingwang, Z. Guoqiang, Z. Yinhan, “Losses calculation in transformer tie plate using the finite element method,” *IEEE Trans. On Magnetism*, Vol. 34, Nr. 5, 1998, pp. 3644-3647.
- [1.11] D. Pavlik, D.C. Johnson, R.S. Girgis, “Calculation and reduction of stray and eddy losses in core-form transformers using a highly accurate finite element modelling technique,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, pp. 239-245, Jan. 1993.
- [1.12] G.F. Mechler and R.S. Girgis, “Calculation of spatial loss distribution in stacked power and distribution transformer cores,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 13, No. 2, pp. 532-537, Apr. 1998.
- [1.13] E.G. teNyenhuus, G.F. Mechler, R.S. Girgis, “Flux distribution and core loss calculation for single phase and five limb three phase transformer core designs,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 204-209, Jan 2000.
- [1.14] D.A. Koppikar, S.V. Kulkarni, P.N. Srinivas, S.A. Khaparde, R. Jain, “Evaluation of flitch plate losses in power transformers,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, pp. 996-1001, Jul. 1999
- [1.15] M. Djurovic, J. E. Monson, “3-Dimensional Computation of the Effect of Horizontal Magnetic Shunt on Transformer Leakage Field,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 13, No 5, pp. 1137-1139, Sept. 1977.
- [1.16] J.C. Olivares, Y. Liu, J.M. Canedo, R. Escarela-Perez, J. Driesen, P. Moreno, “Reducing Losses in Distribution Transformers,” *IEEE Trans. PWRD.*, vol. 18, No 3, pp. 821-826, Jul. 2003.

- [1.17] N. Takahashi, T. Kitamura, M. Horii, J. Takehara, "Optimal Design of Tank Shield Model of Transformer," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, No 4, pp. 1089-1093, Jul. 2000.
- [1.18] M. Horii, N. Takahashi, "3D Optimization of design Variables in x- y- and z- directions of Transformer Tank Shield Model," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, No 5, pp. 3631-3634, Sept. 2001.

## **ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία λεπτομερής περιγραφή της δισδιάστατης μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στη συνέχεια σε τρεις τριφασικούς μετασχηματιστές (Μ/Σ) της εταιρίας Σενντέρ Ελεκτρικ ΑΕ και τα αποτελέσματά της συγκρίνονται με τις τιμές των παραμέτρων του ισοδυνάμου κυκλώματος των μετασχηματιστών που υπολογίζονται με τη μέθοδο του κατασκευαστή.

Αρχικά, παρατίθενται οι εξισώσεις του μαγνητοστατικού πεδίου, η μέθοδος επίλυσής τους και οι βασικές αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια, περιγράφεται το πρόγραμμα Femm, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή της δισδιάστατης ανάλυσης. Δεδομένου ότι το πρόγραμμα αυτό υπήρξε το βασικό εργαλείο για τη διεξαγωγή των αναλύσεων που περιγράφονται σε αυτό αλλά και στα επόμενα κεφάλαια, κρίθηκε σκόπιμη η αναλυτική περιγραφή των λειτουργιών του και του τρόπου με τον οποίο κατασκευάζεται η γεωμετρία ενός μαγνητοστατικού προβλήματος, η επίλυσή του και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τα ηλεκτρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τριφασικού μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα. Η παράθεση των στοιχείων αυτών κρίθηκε αναγκαία καθώς θα χρησιμοποιηθούν από το πρόγραμμα για τη διεξαγωγή της ανάλυσης ενώ μερικά από αυτά (π.χ. επαγωγική πτώση τάσης τυλιγμάτων) θα αποτελέσουν καθοριστικό παράγοντα για την εξαγωγή των αντίστοιχων συμπερασμάτων.

Ακολουθεί η περιγραφή του δισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων του μετασχηματιστή και ο τρόπος με τον οποίο αυτό εξάγεται από την πραγματική του γεωμετρία. Τέλος, παρουσιάζεται η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του δισδιάστατου μοντέλου και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της για τους τρεις μετασχηματιστές. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των αυτεπαγωγών σκέδασης και της επαγωγικής πτώσης τάσης των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών. Για την ανάλυση του πεδίου προσομοιώνεται η δοκιμή βραχυκύκλωσης, αφού, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια, κατά τη δοκιμή αυτή πληρούνται οι προϋποθέσεις για απλό και ακριβή υπολογισμό της ροής σκέδασης των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή. Η επιβεβαίωση του υπολογισμού με τη βοήθεια της μεθοδολογίας του κατασκευαστή οδηγεί σε συμπεράσματα για την ακρίβεια του διδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Η εφαρμογή της μεθόδου σε τρεις περιπτώσεις μετασχηματιστών διαφορετικής ισχύος πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη γενίκευση των συμπερασμάτων αυτών.



## 2.2 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος επίλυσης μαγνητοστατικών προβλημάτων, στην οποία ανήκει και η ανάλυση του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

Μαγνητοστατικά είναι τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι χρονικά αμετάβλητο. Σε αυτή την περίπτωση, η ένταση ( $\vec{H}$ ) και η πυκνότητα ( $\vec{B}$ ) του μαγνητικού πεδίου (ή μαγνητική επαγωγή) ικανοποιούν τις σχέσεις [2.1]:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \text{ (διαφορική μορφή νόμου Ampere)} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \text{ (διαφορική μορφή νόμου Gauss)} \quad (2.2)$$

ενώ εν γένει συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση<sup>1</sup>:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.3)$$

όπου  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, η οποία συνδέεται με τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού  $\mu_0$  με τη σχέση:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2.4)$$

Αν το μαγνητικό υλικό που εξετάζεται είναι μη γραμμικό, η μαγνητική διαπερατότητα είναι συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής και δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (2.5)$$

Η επίλυση των εξισώσεων (2.1) και (2.2) στις δύο διαστάσεις γίνεται με χρήση του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού  $\vec{A}$ , το οποίο ορίζεται από τη σχέση:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.6)$$

Με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης, η (2.1) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (2.7)$$

Για γραμμικά υλικά, η παραπάνω εξίσωση καταλήγει στη σχέση:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J} \Rightarrow \nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (2.8)$$

Έτσι, ο υπολογισμός του διανυσματικού δυναμικού  $\vec{A}$  ανάγεται στην επίλυση μιας μερικής διαφορικής εξίσωσης ελλειπτικού τύπου. Στη συνέχεια, οι τιμές των  $\vec{B}$  και  $\vec{H}$  μπορούν να προκύψουν με διαφορίση του  $\vec{A}$ .

Η μοναδικότητα της λύσης που προκύπτει από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις (2.7) ή (2.8) εξασφαλίζεται με ορισμό των κατάλληλων οριακών συνθηκών, των τιμών δηλαδή του  $\vec{A}$  ή της κάθετης παραγώγου του  $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}$  στο σύνορο του εξεταζόμενου πεδίου. Οι οριακές συνθήκες μπορεί να είναι τριών ειδών:

<sup>1</sup> Εκτός από την περίπτωση μονίμων μαγνητών

1. *Dirichlet*: όταν ορίζεται η τιμή του διανυσματικού δυναμικού  $\vec{A}$  στο σύνορο. Η συνθήκη  $\vec{A}=0$  (φυσική συνθήκη *Dirichlet*) αναπαριστά τα όρια μέσα στα οποία περιορίζεται το πεδίο (έξω από αυτά το πεδίο μηδενίζεται) ή επίπεδα συμμετρίας της γεωμετρίας του προβλήματος όπου οι πηγές έχουν αντίθετη κατεύθυνση (αντισυμμετρική συνθήκη)
2. *Neumann*: όταν ορίζεται η τιμή της κάθετης παραγώγου  $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}$  στο σύνορο. Θέτοντας  $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}=0$  (φυσική συνθήκη *Neumann*) σε ένα σύνορο περιγράφεται ένα πεδίο το οποίο διαπερνά κάθετα το σύνορο αυτό. Μία τέτοια οριακή συνθήκη σχετίζεται με σύνορα μεταξύ αέρα και υλικών με μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα ή με επίπεδα συμμετρίας της γεωμετρίας του προβλήματος και των πηγών (συμμετρική συνθήκη).
3. *Robin* (ή *μεικτές*): όταν ορίζεται μία σχέση μεταξύ της τιμής του  $\vec{A}$  και της κάθετης παραγώγου του  $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}$  σε διάφορα σημεία του συνόρου. Τέτοιες οριακές συνθήκες εμφανίζονται συχνά σε προβλήματα δινορρευσμάτων.

Αν δεν ορίζονται συγκεκριμένες οριακές συνθήκες σε ένα πρόβλημα, θεωρείται από το πρόγραμμα FEMM ότι  $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}=0$  σε κάθε σύνορο.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι αριθμητική τεχνική για την επίλυση προβλημάτων που περιγράφονται με μερικές διαφορικές εξισώσεις. Το πεδίο ενδιαφέροντος αναπαρίσταται ως μία ομάδα από πεπερασμένα στοιχεία. Η διακριτοποίηση του χώρου γίνεται συνήθως με τρίγωνα ή τετράεδρα, αν το πρόβλημα είναι δισδιάστατο ή τρισδιάστατο αντίστοιχα και το πεδίο προσεγγίζεται με συναρτήσεις μορφής, με άγνωστες τιμές στις κορυφές των τριγώνων ή τετραέδρων του χώρου. Έτσι, ένα συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων με άγνωστες τιμές στους κόμβους των κορυφών τους. Η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος ανάγεται σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, ενώ οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων μπορούν να ανακτηθούν με τη βοήθεια των υπολογισμένων τιμών στις κορυφές τους.

Δύο αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής:

1. Η προσέγγιση του φυσικού πεδίου με πεπερασμένα στοιχεία παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια (ακόμη και όταν οι συναρτήσεις μορφής είναι απλές), η οποία μεγαλώνει με την αύξηση του αριθμού των στοιχείων.
2. Η προσέγγιση του πεδίου με τιμές στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί σε συστήματα εξισώσεων με “αραιές” μήτρες. Αυτό σημαίνει ότι με επιλογή κατάλληλης μεθόδου μπορούν να επιλυθούν προβλήματα με μεγάλο αριθμό αγνώστων.

Με βάση τα παραπάνω, η επίλυση ενός μαγνητοστατικού προβλήματος με τη βοήθεια προγράμματος που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται με τη διαδικασία, η οποία περιγράφεται στη συνέχεια.

Η περιοχή, στην οποία πρέπει να υπολογιστεί η μαγνητική επαγωγή  $\vec{B}$ , χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία (τρίγωνα στο επίπεδο, τετράεδρα στο χώρο, κτλ). Για τη διαδικασία διακριτοποίησης του χώρου, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που δημιουργούν αυτόματα το πλέγμα. Η πλεγματοποίηση ξεκινά συνήθως από τα σύνορα του χώρου και λαμβάνει υπόψη την απαιτούμενη ακρίβεια στις διάφορες περιοχές του πλέγματος. Ο διαχωρισμός της περιοχής του πλέγματος σε ολοένα και μικρότερα τρίγωνα περιορίζεται από τη χωρητικότητα (κατάληψη μεγάλου χώρου μνήμης του υπολογιστή) και το “κόστος” των υπολογισμών

(χρόνος υπολογισμού). Τα στοιχεία λαμβάνονται επαρκώς μικρά ώστε να μπορεί να θεωρηθεί η μαγνητική επαγωγή σταθερή στο εσωτερικό τους ενώ το μαγνητικό δυναμικό  $\vec{A}$  υπολογίζεται στις κορυφές των τριγώνων και θεωρείται ότι μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ των στοιχείων (πεπερασμένα στοιχεία πρώτου βαθμού). Μπορεί εξίσου να θεωρηθεί ότι στο εσωτερικό κάθε στοιχείου, το διανυσματικό δυναμικό ακολουθεί πολυωνυμική κατανομή, παραδοχή που μπορεί να οδηγήσει σε χρόνο υπολογισμού πιο σύντομο για δεδομένη ακρίβεια.

## 2.3 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FEMM

### 2.3.1 Δομή προγράμματος FEMM

Το πρόγραμμα FEMM αποτελείται από ένα σύνολο υποπρογραμμάτων με τα οποία επιλύονται μαγνητοστατικά προβλήματα. Τα υποπρογράμματα αυτά επιλύουν προβλήματα αξονικής συμμετρίας και είναι τα εξής [2.2]:

1. Προεπεξεργασία (preprocessing): Πρόκειται για πρόγραμμα τύπου CAD το οποίο χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της γεωμετρίας του υπό μελέτη προβλήματος καθώς και για τον καθορισμό των ιδιοτήτων των υλικών και των οριακών συνθηκών.
2. Επίλυση (Solution): Πρόκειται για πρόγραμμα το οποίο λαμβάνει ένα σύνολο δεδομένων τα οποία περιγράφουν το πρόβλημα και επιλύει τις αντίστοιχες εξισώσεις Maxwell για τον καθορισμό του μαγνητικού πεδίου στο χώρο που εξετάζεται.
3. Μετεπεξεργασία (Postprocessing): Με το πρόγραμμα αυτό επιτυγχάνεται τόσο η απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου όσο και ο υπολογισμός της μαγνητικής επαγωγής σε διάφορα τμήματα της γεωμετρίας που εξετάζεται.

Το FEMM περιλαμβάνει ξεχωριστό υποπρόγραμμα τριγωνοποίησης του πεδίου ορισμού του προβλήματος (Πλεγματοποιητής - όνομα εκτελέσιμου προγράμματος: triangle.exe). Με το πρόγραμμα αυτό επιτυγχάνεται η κατάτμηση του πεδίου ορισμού σε πολύ μικρά τριγωνικά στοιχεία, διαδικασία η οποία, όπως προαναφέρθηκε, είναι καθοριστική σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Άλλο πρόγραμμα, το οποίο χρησιμοποιείται για την απεικόνιση γραφικών παραστάσεων, οι οποίες προκύπτουν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, είναι το λεγόμενο Πρόγραμμα απεικόνισης (όνομα εκτελέσιμου προγράμματος: femmplot.exe).

### 2.3.2 Περιγραφή λειτουργίας και χρήσης προγράμματος FEMM


#### 2.3.2.1 Εγκατάσταση FEMME.exe

Χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 3.3 του λογισμικού FEMM. Η εγκατάσταση του προγράμματος γίνεται με τη βοήθεια του εκτελέσιμου αρχείου femm33bin.exe.

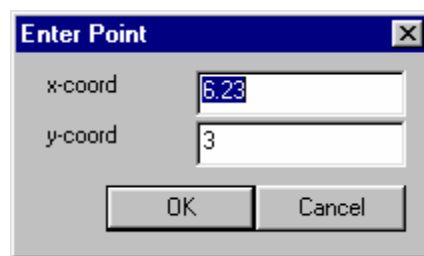
#### 2.3.2.2 Σχεδίαση γεωμετρίας με τη χρήση του editor FEMM 3.3

Η διαδικασία σχεδίασης ενός νέου μοντέλου στο πρόγραμμα γίνεται με τη βοήθεια του editor, ο οποίος ανοίγει ως εξής:

Από το μενού Start των Windows: Programs->femm 3.3->femm editor.


Η σχεδίαση της γεωμετρίας γίνεται με την εισαγωγή σημείων, γραμμών ή τόξων με τη χρήση των αντίστοιχων πλήκτρων  ή μέσω του μενού Operation-> Node (για εισαγωγή νέου κόμβου), Operation-> Segment (για εισαγωγή νέου ευθύγραμμου τμήματος) και Operation-> Arc Segment (για εισαγωγή τόξου).


Η εισαγωγή ενός νέου κόμβου μπορεί να γίνει είτε πατώντας με το ποντίκι (κάνοντας κλικ) επάνω στο πλέγμα του editor, ή, εφόσον είναι επιθυμητό να δοθούν οι ακριβείς συντεταγμένες του κόμβου, πατώντας το πλήκτρο Tab, οπότε και εμφανίζεται η ακόλουθη φόρμα εισαγωγής συντεταγμένων (Σχήμα 2.1).

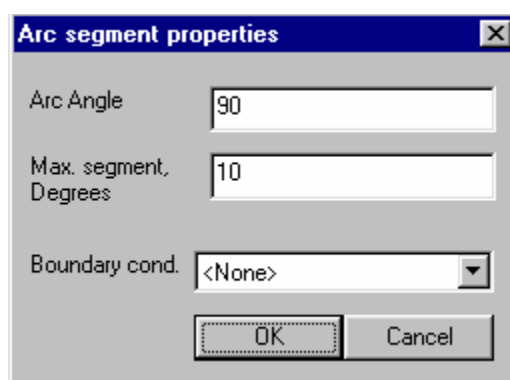


The 'Enter Point' dialog box has a title bar with a close button. It contains two input fields: 'x-coord' with the value '6.23' and 'y-coord' with the value '3'. At the bottom are 'OK' and 'Cancel' buttons.

**Σχήμα 2.1:** Φόρμα εισαγωγής συντεταγμένων νέου κόμβου.

Η εισαγωγή νέου ευθύγραμμου τμήματος γίνεται επιλέγοντας (με αριστερό κλικ) τον πρώτο και το δεύτερο κόμβο που αποτελούν τα άκρα του τμήματος (έχοντας προηγουμένως πατήσει το πλήκτρο  ή επιλέξει Operation-> Segment).

Η εισαγωγή νέου τόξου γίνεται επιλέγοντας (με αριστερό κλικ) τον πρώτο και το δεύτερο κόμβο που αποτελούν τα άκρα του τόξου (έχοντας προηγουμένως πατήσει το πλήκτρο  ή επιλέξει Operation-> Arc Segment). Μόλις γίνει κλικ στο δεύτερο κόμβο, εμφανίζεται αυτόματα η φόρμα εισαγωγής της γωνίας του τόξου, του μέγιστου μήκους τμημάτων στα οποία θα χωριστεί το τόξο κατά την πλεγματοποίηση (είναι αριθμός μεταξύ 0.1 και 10, το μέγεθος του οποίου επηρεάζει και το μέγεθος του πλέγματος: όσο πιο μικρός είναι, τόσο πιο πυκνό θα προκύψει το πλέγμα) και της οριακής συνθήκης του τόξου (Σχήμα 2.2).



The 'Arc segment properties' dialog box has a title bar with a close button. It contains three input fields: 'Arc Angle' with the value '90', 'Max. segment, Degrees' with the value '10', and 'Boundary cond.' with a dropdown menu showing '<None>'. At the bottom are 'OK' and 'Cancel' buttons.

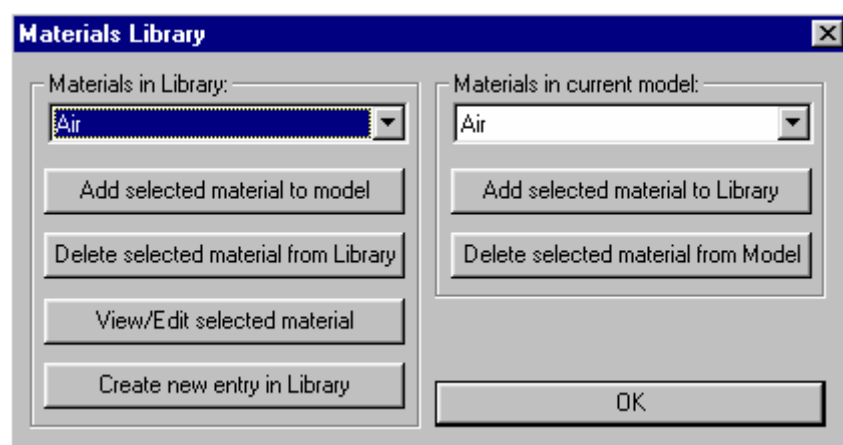
**Σχήμα 2.2:** Φόρμα εισαγωγής παραμέτρων νέου τόξου.

Με τα παραπάνω εργαλεία μπορεί να γίνει η σχεδίαση της δισδιάστατης γεωμετρίας οποιουδήποτε προβλήματος ενδιαφέρει το χρήστη. Η επιλογή οποιουδήποτε κόμβου, ευθυγράμμου τμήματος ή τόξου, μετά τη σχεδίασή του, γίνεται κάνοντας δεξί κλικ πάνω σε αυτό.

### 2.3.2.3 Ορισμός υλικών των τμημάτων της γεωμετρίας και εισαγωγή τιμών ρεύματος ή τάσης

Το βήμα που ακολουθεί τη σχεδίαση της γεωμετρίας είναι ο ορισμός των υλικών στις διάφορες περιοχές της γεωμετρίας, αντίστοιχα με το είδος της διάταξης που εξετάζεται. Υπονοείται ότι για να οριστεί υλικό σε κάποια περιοχή, αυτή πρέπει να έχει κλειστά εσωτερικά ή εξωτερικά σύνορα, δηλαδή να περικλείεται από ευθύγραμμα τμήματα ή τόξα που συνδέονται μεταξύ τους.

Πριν τον ορισμό των υλικών στις περιοχές του μοντέλου, πρέπει να προηγηθεί ένα βήμα εισαγωγής των υλικών της βιβλιοθήκης του FEMM στο μοντέλο που επεξεργάζεται ο χρήστης. Το FEMM διαθέτει βιβλιοθήκη με λίστα των πλέον συνηθισμένων υλικών που συναντώνται σε ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις. Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει δικό του υλικό, δίνοντας νέες ιδιότητες σε ήδη υπάρχοντα υλικά ή δημιουργώντας υλικά με νέες ιδιότητες. Η εισαγωγή και επεξεργασία υπάρχοντων υλικών ή η δημιουργία νέων γίνεται από το Μενού Properties->Materials Library, με το πάτημα του οποίου εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος 2.3. Στην αριστερή πλευρά του μενού δίνεται η δυνατότητα προσπέλασης των υλικών της βιβλιοθήκης. Με το κουμπί “Add selected material to model”, ο χρήστης προσθέτει το υλικό στο μοντέλο που επεξεργάζεται. Με το κουμπί “Delete selected material from library” μπορεί να διαγράψει το υλικό από τη βιβλιοθήκη του FEMM (λειτουργία που δε συνιστάται, εκτός εάν πρόκειται για υλικό που έχει δημιουργήσει ο ίδιος). Με το κουμπί “View/Edit selected material” μπορεί να δει τις ιδιότητες του υλικού, μέσω της αντίστοιχης φόρμας (Σχήμα 2.4) και να τις αλλάξει, εφόσον το επιθυμεί. Με το κουμπί “Create new entry in Library” μπορεί να δημιουργήσει και να προσθέσει στη βιβλιοθήκη καινούριο υλικό, από την αρχή. Στο δεξί μέρος της φόρμας του Σχήματος 2.3 υπάρχει κουμπί το οποίο επιτρέπει τη διαγραφή κάποιου υλικού από το μοντέλο (“Delete selected material from Model”) εφόσον ο χρήστης κρίνει ότι δεν είναι απαραίτητο για το μοντέλο. Εάν πρόκειται για νέο υλικό, ο χρήστης μπορεί επιπλέον να εισάγει κατευθείαν στο μοντέλο, χωρίς να το περάσει μέσω της βιβλιοθήκης του FEMM, μέσω του μενού Properties->Materials, με το πάτημα του οποίου εμφανίζεται η φόρμα διαχείρισης (προσθήκης, τροποποίησης, διαγραφής) των υλικών του μοντέλου. Εάν θέλει να αντιγράψει το νέο υλικό από το μοντέλο στη βιβλιοθήκη μπορεί να χρησιμοποιήσει το κουμπί “Add selected material to Library” στο δεξί μέρος της φόρμας του Σχήματος 2.3.



**Σχήμα 2.3:** Φόρμα εισαγωγής νέου υλικού από τη βιβλιοθήκη του FEMM στο μοντέλο που επεξεργάζεται ο χρήστης.

**Block Property**

Name: Air

B-H Curve: Linear B-H Relationship

Linear Material Properties:

Relative  $\mu_x$ : 1      Relative  $\mu_y$ : 1

$\phi_{hx}$ , deg: 0       $\phi_{hy}$ , deg: 0

Nonlinear Material Properties:

Edit B-H Curve       $h_{max}$ , deg: 0

Coercivity:

$H_c$ , A/m: 0

Electrical Conductivity:

$\sigma$ , MS/m: 0

Source Current Density:

$J$ , MA/m<sup>2</sup>: 0 + j 0

Lamination Attributes:

Not laminated

$d_{lam}$ , mm: 0      Lam fill factor: 1

OK      Cancel

**Σχήμα 2.4:** Φόρμα ιδιοτήτων υλικών βιβλιοθήκης.

Ο ορισμός του ρεύματος και της τάσης σε περιοχές του μοντέλου (δηλαδή σε πηνία κάποιας διάταξης) προϋποθέτει ότι έχει οριστεί προηγουμένως το ρεύμα ή η τάση, υπό τη μορφή νέου κυκλώματος (Circuit). Ο ορισμός αυτός γίνεται από το μενού Properties->Circuit, μετά το πάτημα του οποίου εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος 2.5. Πριν τον ορισμό κάποιου κυκλώματος, το πεδίο “Property Name” είναι άδειο. Με το κουμπί “Add Property” εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος 2.6, η οποία επιτρέπει στο χρήστη τη δημιουργία νέου κυκλώματος, με το όνομα το οποίο επιθυμεί, δίνοντας τιμή ρεύματος ή τάσης (όχι και τα δύο). Η τάση και το ρεύμα έχουν πραγματικό και φανταστικό μέρος. Το φανταστικό μέρος εισάγεται στην περίπτωση που ο χρήστης θέλει να λάβει υπόψη του τη φασική γωνία των μεγεθών, διαφορετικά (π.χ. σε ανάλυση μίας φάσης) δίνει μόνο το μέτρο του μεγέθους στο πραγματικό του μέρος. Με τα κουμπιά “Delete Property” και “Modify Property” ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει ή να σβήσει κάποιο από τα υπάρχοντα κυκλώματα.

**Property Definition**

Property Name: Current

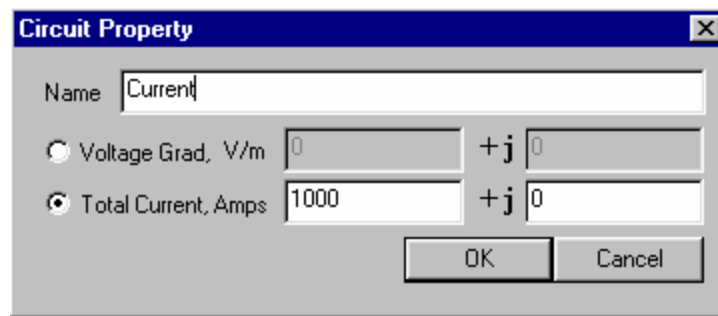
Add Property

Delete Property



Modify Property

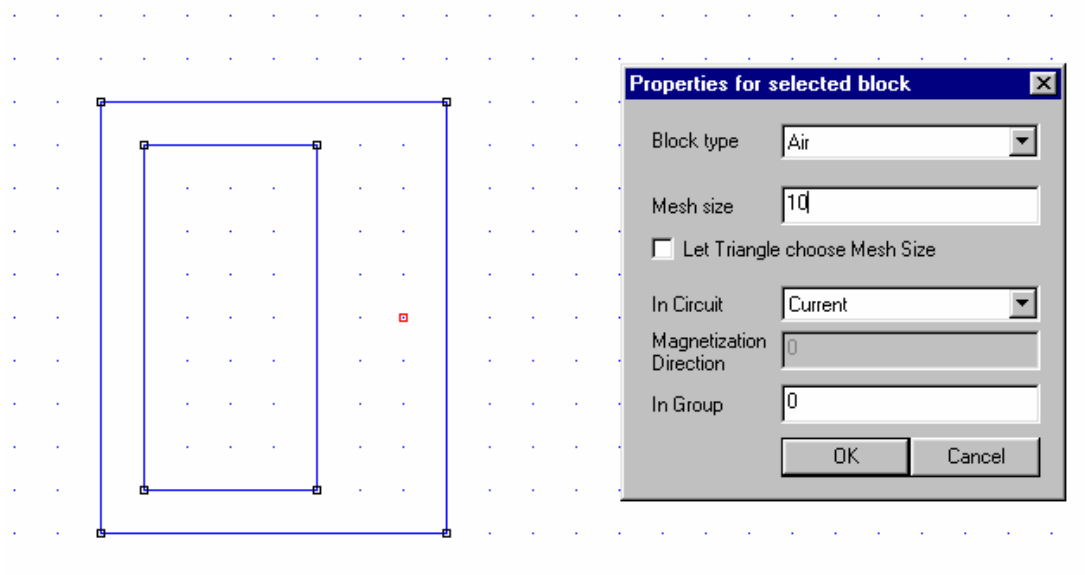
OK

**Σχήμα 2.5:** Φόρμα εισαγωγής παραμέτρων κυκλώματος.



Σχήμα 2.6: Φόρμα δημιουργίας νέου κυκλώματος.

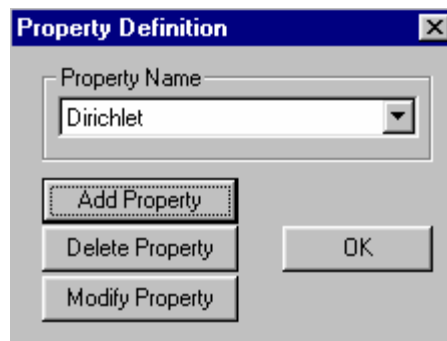
Πριν τον ορισμό του υλικού, του ρεύματος ή της τάσης μιας περιοχής πρέπει να πατηθεί το πλήκτρο  ή να επιλεγεί από το μενού Operation-> Block. Στη συνέχεια, κάνοντας κλικ πάνω στην περιοχή, εμφανίζεται ένα μικρό τετράγωνο μέσα στην περιοχή. Κάνοντας δεξί κλικ πάνω σε αυτό το τετράγωνο και πατώντας στη συνέχεια το Spacebar, εμφανίζεται μενού εισαγωγής παραμέτρων της περιοχής (Σχήμα 2.7). Στο πεδίο “Block Type” ο χρήστης επιλέγει το υλικό της περιοχής, μεταξύ των υλικών που έχει προσθέσει στο μοντέλο μέσω της φόρμας του Σχήματος 2.3. Στο πεδίο “Mesh size” ορίζει το μέγιστο μήκος της ακμής των τριγώνων του πλέγματος της περιοχής, εφόσον δεν έχει επιλεγεί το “Let Triangle choose Mesh Size” (αυτόματη επιλογή μεγέθους πλέγματος από το υποπρόγραμμα Triangle.exe). Έτσι, ο χρήστης μπορεί να επέμβει άμεσα στην πυκνότητα του πλέγματος, δεδομένου ότι η αυτόματη πλεγματοποίηση του FEMM οδηγεί συνήθως στην κατασκευή του αραιότερου πλέγματος που αρκεί για την αναπαράσταση της διάταξης με πεπερασμένα στοιχεία. Στο πεδίο “In Circuit” ο χρήστης μπορεί να επιλέξει κάποιο από τα κυκλώματα που έχει ορίσει μέσω της φόρμας του Σχήματος 2.6, εφόσον θέλει να ορίσει ρεύμα ή τάση στην περιοχή. Τέλος, με το πεδίο “In Group” μπορεί να εντάξει την περιοχή σε κάποια ομάδα περιοχών με κοινές ιδιότητες, την οποία έχει προηγουμένως ορίσει (μέσω του μενού Operation->Group ή του πλήκτρου ).



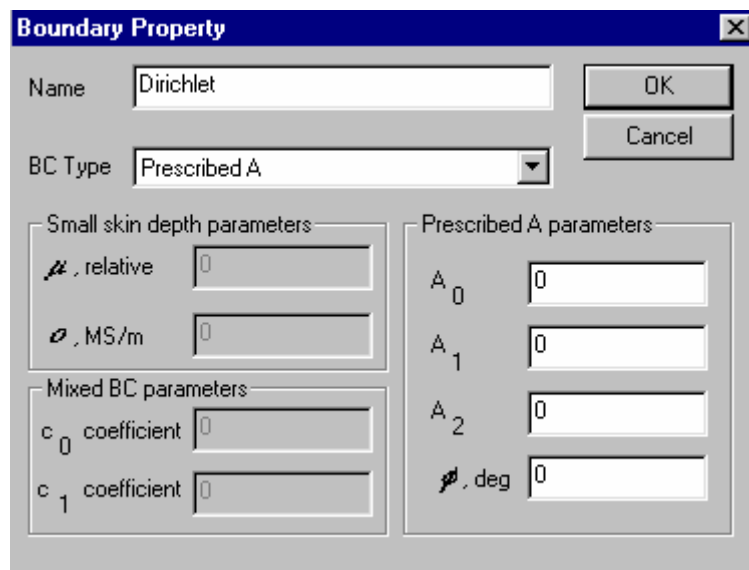
Σχήμα 2.7: Ορισμός ιδιοτήτων περιοχής της γεωμετρίας.

### 2.3.2.4 Ορισμός οριακών συνθηκών



Πριν την επιβολή οριακών συνθηκών στα σύνορα της γεωμετρίας του προβλήματος, θα πρέπει πρώτα να οριστούν από το χρήστη οι οριακές συνθήκες, όπως γίνεται και στην περίπτωση των υλικών και των κυκλωμάτων. Ο ορισμός των οριακών συνθηκών γίνεται από το μενού Properties->Boundary, με το πάτημα του οποίου εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος 2.8. Πριν τον ορισμό κάποιας οριακής συνθήκης, το πεδίο “Property Name” είναι άδειο. Με το κουμπί “Add Property” εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος 2.9, η οποία επιτρέπει στο χρήστη τη δημιουργία νέας οριακής συνθήκης, με το όνομα το οποίο επιθυμεί. Επιλέγει τον τύπο της συνθήκης (π.χ. επιβολή δυναμικού  $A$ , περιοδικότητα, αντιπεριοδικότητα, κοκ) ανάλογα με το είδος του εξεταζόμενου προβλήματος και ορίζει την αντίστοιχη τιμή που μπορεί να συμπληρώσει στα πεδία της φόρμας (ανάλογα με το είδος της συνθήκης). Η φόρμα του Σχήματος 2.8 επιτρέπει επίσης την τροποποίηση ή διαγραφή υπάρχουσών συνθηκών, ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη.



Σχήμα 2.8: Ορισμός οριακής συνθήκης.

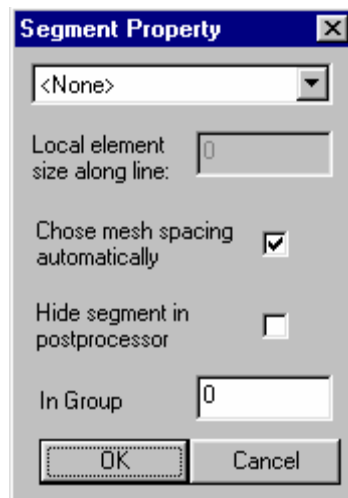


Σχήμα 2.9: Φόρμα ιδιοτήτων νέας οριακής συνθήκης.

Η επιβολή κάποιας από τις οριακές συνθήκες που έχουν δημιουργηθεί από το χρήστη σε κάποιο ευθύγραμμο τμήμα ή τόξο γίνεται με δεξί κλικ πάνω στο αντίστοιχο τμήμα ή τόξο (έχοντας προηγουμένως πατήσει το πλήκτρο  ή επιλέξει Operation-> Segment, εάν πρόκειται για ευθύγραμμο τμήμα ή έχοντας προηγουμένως πατήσει το πλήκτρο  ή επιλέξει Operation-> Arc Segment, εάν πρόκειται για τόξο), οπότε και εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος 2.10. Στο πρώτο πεδίο αυτής της φόρμας, ο χρήστης επιλέγει το όνομα της



οριακής συνθήκης που επιθυμεί να επιβάλλει. Μπορεί επιπλέον να κάνει επιλογές για τα τμήματα στα οποία χωρίζεται το ευθύγραμμο τμήμα (ή τόξο) κατά την πλεγματοποίηση ή να εντάξει το τμήμα (ή τόξο) σε κάποια ομάδα με κοινά χαρακτηριστικά.




**Σχήμα 2.10:** Φόρμα επιβολής οριακής συνθήκης σε ευθύγραμμο τμήμα ή τόξο της γεωμετρίας.

#### 2.3.2.5 Ορισμός προβλήματος

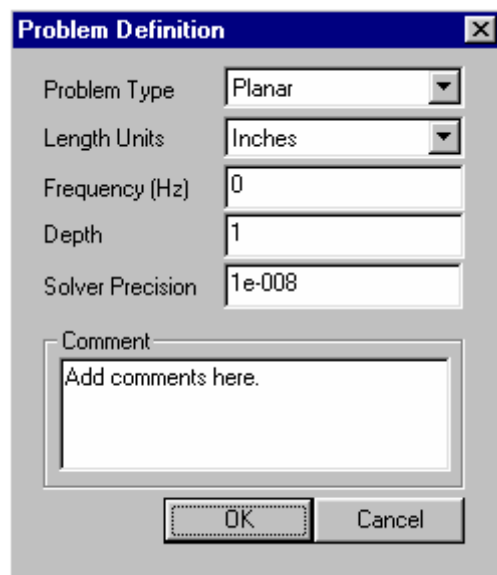
Μία από τις πλέον σημαντικές φόρμες του προγράμματος είναι αυτή του Σχήματος 2.11, η οποία εμφανίζεται με το πάτημα του μενού Problem. Στο πεδίο “Problem Type” ορίζεται ο τύπος της συμμετρίας του προβλήματος. Εάν το πρόβλημα εμφανίζει συμμετρία ως προς το  $z$  άξονα, επιλέγεται Planar. Εάν εμφανίζει κυλινδρική συμμετρία, επιλέγεται Axisymmetric. Στο πεδίο Length Units επιλέγονται οι μονάδες μήκους του μοντέλου. Η μονάδα που θα δηλωθεί σε αυτό το σημείο χρησιμοποιείται ως μονάδα μήκους κατά τη σχεδίαση της γεωμετρίας και υπονοείται σε όλες τις φόρμες του προγράμματος (π.χ. συντεταγμένες σημείου, μέγεθος πλέγματος). Στο πεδίο Frequency επιλέγεται η συχνότητα του προβλήματος. Εάν το πρόβλημα είναι μαγνητοστατικό, η συχνότητα πρέπει να δοθεί ίση με μηδέν. Για οποιαδήποτε άλλη συχνότητα το πρόβλημα θα λυθεί ως αρμονικό από το FEMM. Στο πεδίο Depth δίνεται το μήκος της γεωμετρίας κατά  $z$  άξονα, εφόσον το πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς αυτόν (ή μία τάξη μεγέθους του μήκους, για τη σωστή μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων). Στο πεδίο Solver Precision επιλέγεται η ακρίβεια επίλυσης των εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων. Η αρχική τιμή ακρίβειας ίσης με  $10^{-8}$  είναι ενδεικτική για τις περισσότερες περιπτώσεις προβλημάτων. Η φόρμα περιλαμβάνει επιπλέον ένα πεδίο στο οποίο ο χρήστης μπορεί, εφόσον επιθυμεί, να εισάγει σχόλια για να τα θυμάται στο επόμενο άνοιγμα του αρχείου.

Με την επιλογή του μενού File->Save, η γεωμετρία αποθηκεύεται στον κατάλογο του υπολογιστή, με το όνομα αρχείου που επιθυμεί ο χρήστης, το οποίο αρχείο έχει κατάληξη \*.fem. Υπονοείται ότι το μοντέλο μπορεί να αποθηκευτεί σε οποιαδήποτε από τις παραπάνω φάσεις επεξεργασίας του. Για την επεξεργασία υπάρχοντων μοντέλων επιλέγεται το File->Open για το άνοιγμα κάποιου αρχείου με κατάληξη fem.

#### 2.3.2.6 Δημιουργία δισδιάστατου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων


Το βήμα που ακολουθεί την κατασκευή της γεωμετρίας του προβλήματος είναι η πλεγματοποίησή του, η οποία γίνεται (μέσω του υποπρογράμματος Triangle.exe) με το πάτημα του κουμπιού  ή από το μενού Mesh->Create Mesh (πρέπει προηγουμένως να

έχει αποθηκευτεί το αρχείο). Η πυκνότητα του πλέγματος που θα δημιουργηθεί εξαρτάται από τις επιλογές που έχει ορίσει ο χρήστης στη φόρμα του Σχήματος 2.7. Μετά την κατασκευή του πλέγματος, δημιουργούνται στον κατάλογο, μέσα στο οποίο έχει αποθηκευτεί το αρχείο fem της γεωμετρίας, αρχεία με το ίδιο όνομα και με κατάληξεις \*.edge, \*.ele, \*.poly, \*.pbc και \*.node, τα οποία περιλαμβάνουν τις πληροφορίες του πλέγματος, σε μορφή αρχείων ASCII. Τα αρχεία αυτά είναι αναγκαία από τον επιλύτη (υποπρόγραμμα Solver.exe) κατά τους υπολογισμούς της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.




Σχήμα 2.11: Φόρμα ορισμού προβλήματος.

### 2.3.2.7 Επίλυση προβλήματος

Η επίλυση του προβλήματος γίνεται με το πάτημα του κουμπιού  ή το μενού Analysis->Analyze. Κατά τη διάρκεια της επίλυσης εμφανίζονται πληροφορίες για την πρόοδο της επίλυσης, ενώ δημιουργείται αρχείο με όνομα ίδιο με αυτό της γεωμετρίας και με κατάληξη \*.ans. Το αρχείο αυτό είναι αναγκαίο για τη μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων του προβλήματος από το υποπρόγραμμα femmplot.exe.





### 2.3.2.8 Μετεπεξεργασία αποτελεσμάτων προβλήματος

Η μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει από το μενού Analysis->View results ή το εικονίδιο . Μπορεί επίσης να γίνει με ξεχωριστό άνοιγμα του femmplot.exe από το μενού Start των Windows: Programs->femm 3.3-> femm plot. Από το μενού File->Open του femmplot ο χρήστης μπορεί να ανοίξει το αρχείο με την κατάληξη \*.ans (Σχήμα 2.12).




Το άνοιγμα του αρχείου ακολουθείται από εμφάνιση παράθυρου με χαρακτηριστικά, όπως:

- Επιλεγμένες μονάδες: mm
- 2D Planar: η γεωμετρία επεκτείνεται κατά ύψος, το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει επίπεδη τομή της γεωμετρίας
- Frequency: 0Hz, στην περίπτωση στατικού προβλήματος (π.χ. για ηλεκτρική μηχανή, θα υπήρχε συχνότητα)
- nodes (αριθμός κόμβων): π.χ. 159
- elements: π.χ. 270, (δηλαδή τρίγωνα, στο δισδιάστατο πρόβλημα).

Με τις παρακάτω επιλογές, ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιήσει απεικόνιση των αποτελεσμάτων του προβλήματος:

- View->Density Plot ή εικονίδιο  για την απεικόνιση του πεδίου με τη μορφή ισοδυναμικών γραμμών. Κατά το πάτημα του κουμπιού εμφανίζεται φόρμα στην οποία ο χρήστης επιλέγει το πλήθος των γραμμών καθώς και το άνω και κάτω όριο της τιμής της μαγνητικής επαγωγής για την κλίμακα του διαγράμματος.
- View->Contour Plot ή εικονίδιο  για την απεικόνιση του πεδίου με τη μορφή χρωματικής κατανομής. Κατά το πάτημα του κουμπιού εμφανίζεται φόρμα στην οποία ο χρήστης επιλέγει εάν θα φαίνεται έγχρωμη ή ασπρόμαυρη κατανομή όπως και το άνω και κάτω όριο της τιμής της μαγνητικής επαγωγής για την αντιστοίχιση της έντασης των χρωμάτων στις τιμές του μαγνητικού πεδίου.
- View->Vector Plot ή εικονίδιο  για την απεικόνιση του πεδίου με τη μορφή διανυσματικού διαγράμματος. Κατά το πάτημα του κουμπιού εμφανίζεται φόρμα στην οποία ο χρήστης επιλέγει εάν θα σχεδιαστεί η μαγνητική επαγωγή (B) ή η ένταση του μαγνητικού πεδίου (H) καθώς και η κλίμακα του διαγράμματος.
- View->Show Mesh ή εικονίδιο , για την εμφάνιση του πλέγματος.

Όπως και στην περίπτωση του editor, υπάρχουν στο Toolbar τα παρακάτω 3 εργαλεία:

-  αποτελέσματα σε σημείο (μενού Operation-> Point Properties)
-  αποτελέσματα σε γραμμή (μενού Operation-> Segment)
-  αποτελέσματα σε περιοχή (μενού Operation-> Areas)



Αναλυτικότερα, τα παραπάνω κουμπιά περιλαμβάνουν τις ακόλουθες λειτουργίες:

#### Αποτελέσματα σε σημείο

Πρέπει να είναι επιλεγμένο στο μενού View το Points Props  
Κάνοντας κλικ σε οποιοδήποτε σημείο, εμφανίζεται λίστα με:


- A: διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό
- |B|: μέτρο της μαγνητικής επαγωγής
- |H|: μέτρο της έντασης μαγνητικού πεδίου
- $\mu$ -x: μαγνητική διαπερατότητα κατά x
- E: πυκνότητα ενέργειας
- J: πυκνότητα ρεύματος

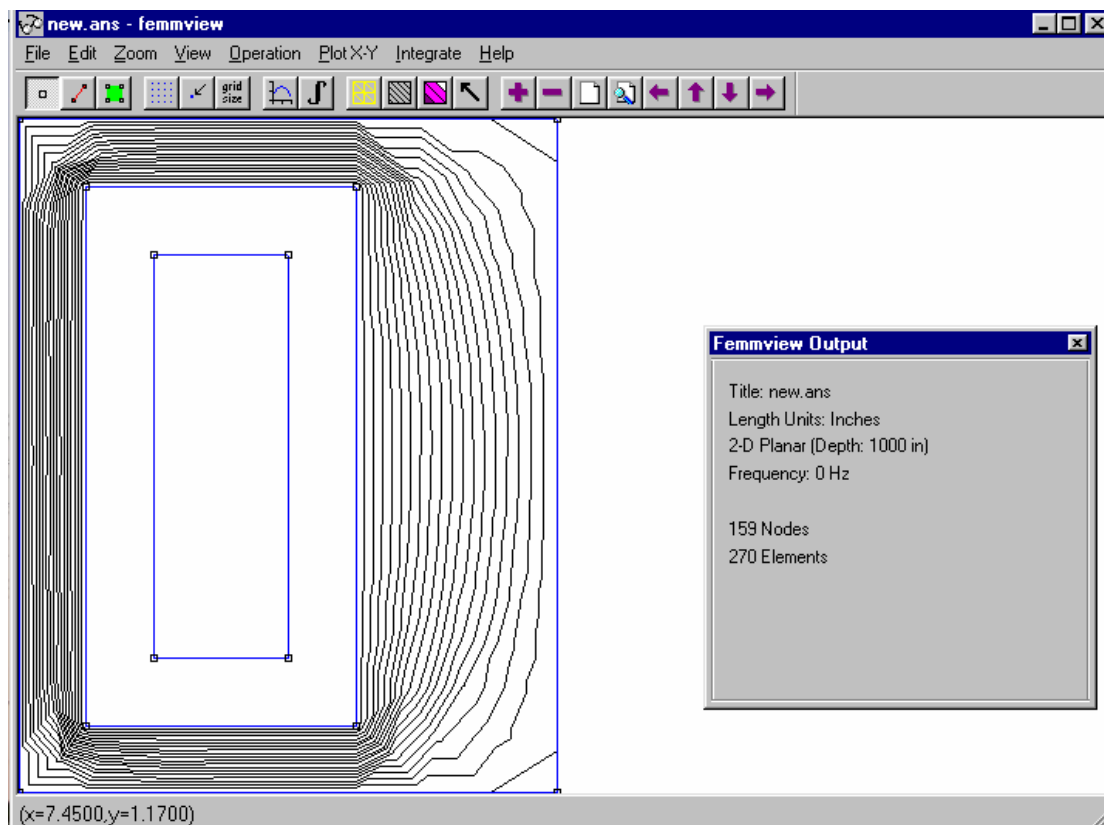
#### Αποτελέσματα σε γραμμή

Κάνοντας κλικ πάνω στα δύο άκρα της γραμμής και στη συνέχεια πατώντας το κουμπί  της γραφικής παράστασης ή το μενού Plot x-y, εμφανίζεται φόρμα στην οποία ο χρήστης επιλέγει το μέγεθος που θέλει να παρασταθεί γραφικά πάνω στη γραμμή, τον αριθμό των σημείων και τη μορφοποίηση του γραφήματος. Με πάτημα του κουμπιού  ή από το μενού Integrate, ο χρήστης μπορεί επίσης να πάρει το ολοκλήρωμα κάποιου μεγέθους πάνω στη γραμμή.

### Αποτελέσματα σε επιφάνεια

Για να επιλέξει την επιφάνεια για την ολοκλήρωση κάποιου μεγέθους, π.χ. μαγνητική ενέργεια., ο χρήστης πρέπει να ακολουθήσει τα επόμενα βήματα:

- κλικ σε σημείο της επιφάνειας (θα ληφθεί όλη η επιφάνεια)
- κλικ σε όλες τις επιφάνειες αν θέλει να επιλέξει όλο το μοντέλο
- πάτημα του κουμπιού  ή από το μενού Integrate
- επιλογή μεγέθους προς ολοκλήρωση

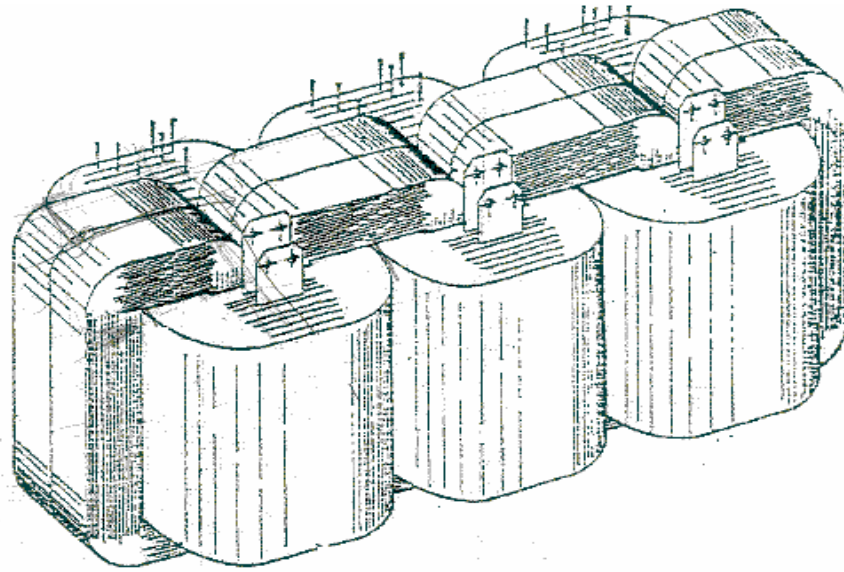


**Σχήμα 2.12:** Παράδειγμα οθόνης που εμφανίζεται με το άνοιγμα αρχείου .ans του FEMM.

## 2.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

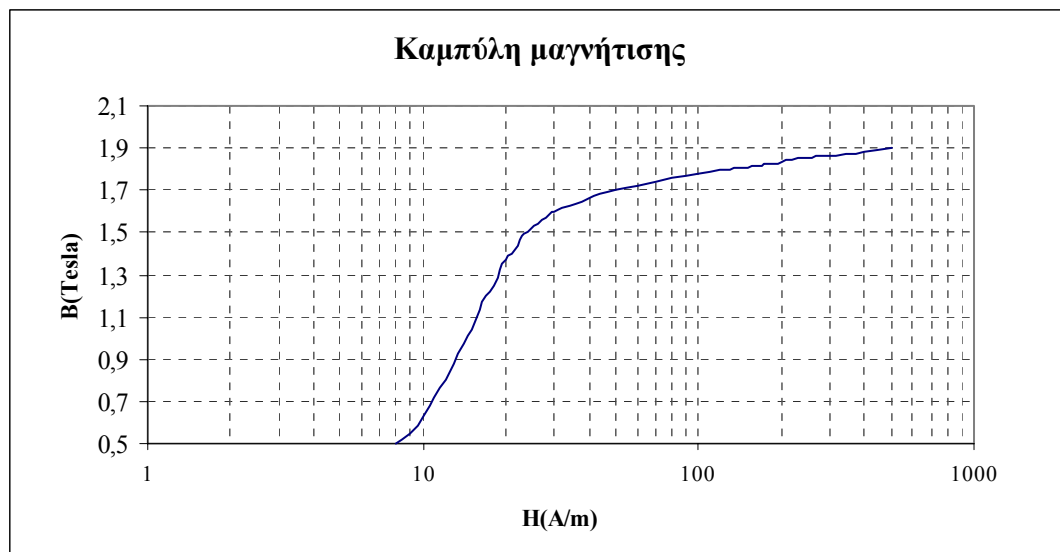
Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και τα δεδομένα της γεωμετρίας του τριφασικού μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα που θα εξεταστεί στη συνέχεια. Τα χαρακτηριστικά αυτά θα χρησιμοποιηθούν αργότερα στη μελέτη της δοκιμής βραχυκύκλωσης των μετασχηματιστών που θα εξεταστούν, για αυτό και κρίθηκε σκόπιμο να αναφερθούν σε αυτό το σημείο. Επιπλέον, για την κατανόηση του τρόπου κατασκευής του δισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, απαιτούνται λεπτομέρειες της γεωμετρίας του μετασχηματιστή. Είναι συνεπώς αναγκαία μία σύντομη περιγραφή της κατασκευής του μετασχηματιστή καθώς και μία πιο λεπτομερής παρουσίαση συγκεκριμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του, τα οποία πρόκειται να μοντελοποιηθούν στη συνέχεια [2.3].

Ο υπό μελέτη μετασχηματιστής είναι τριφασικός μετασχηματιστής διανομής, τύπου τυλιχτού πυρήνα της εταιρίας Σεντέρ Ελεκτρικ ΑΕ και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.13.



**Σχήμα 2.13:** Τριφασικός μετασχηματιστής διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα.

Η καμπύλη μαγνήτισης του μετασχηματιστή εκφράζει τη σχέση μεταξύ της διέγερσης του μετασχηματιστή (αμπερελίγματα) και της μαγνητικής ροής που αναπτύσσεται στο σιδηρομαγνητικό υλικό του πυρήνα του. Η καμπύλη αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.14.

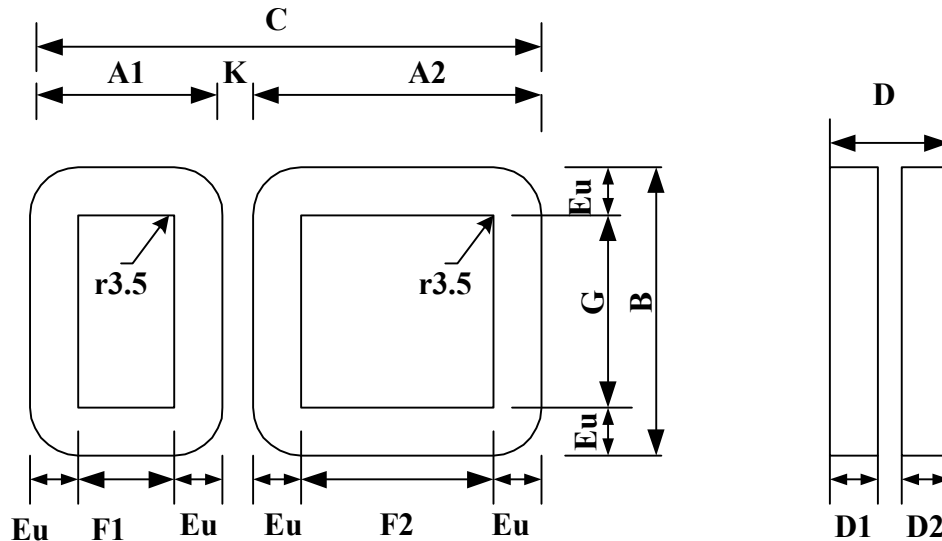


**Σχήμα 2.14:** Καμπύλη μαγνήτισης μετασχηματιστή.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη μετασχηματιστή αφορούν τόσο στον πυρήνα όσο και στα πηνία.

Για να κατασκευαστεί ένας τριφασικός μετασχηματιστής διανομής τύπου πυρήνα, πρέπει να συναρμολογηθούν δύο μικροί και δύο μεγάλοι ατομικοί πυρήνες. Οι πυρήνες είναι τεχνολογίας τυλιχτού πυρήνα (wound core) και κατασκευάζονται από μαγνητική λαμαρίνα χαμηλών απωλειών. Η διαδικασία παραγωγής τους έχει ως εξής: αρχικά κόβεται η πρώτη ύλη μαγνητικής λαμαρίνας σε λωρίδες τυποποιημένου πλάτους. Ακολουθεί η κοπή σε προκαθορισμένα μήκη και η περιέλιξη σε στρογγυλό τύμπανο, οπότε προκύπτει ο

στρογγυλός πυρήνας. Στη συνέχεια, ο στρογγυλός πυρήνας διαμορφώνεται σε ειδική πρέσα και λαμβάνει τη μορφή ορθογωνικής διατομής. Τέλος, ο τυλιχτός πυρήνας ανοπτύεται προκειμένου να ανακτηθούν πλήρως οι ηλεκτρικές και φυσικές ιδιότητες του μαγνητικού υλικού. Οι διαστάσεις και οι κατασκευαστικές παράμετροι ενός μικρού και ενός μεγάλου πυρήνα φαίνονται στο Σχήμα 2.15.



**Σχήμα 2.15:** Διαστάσεις μικρού και μεγάλου πυρήνα μετασχηματιστή.

Τα πηνία του μετασχηματιστή είναι συγκεντρικά, ορθογωνικής διατομής, με το τύλιγμα της χαμηλής τάσης να βρίσκεται πλησιέστερα στον πυρήνα.

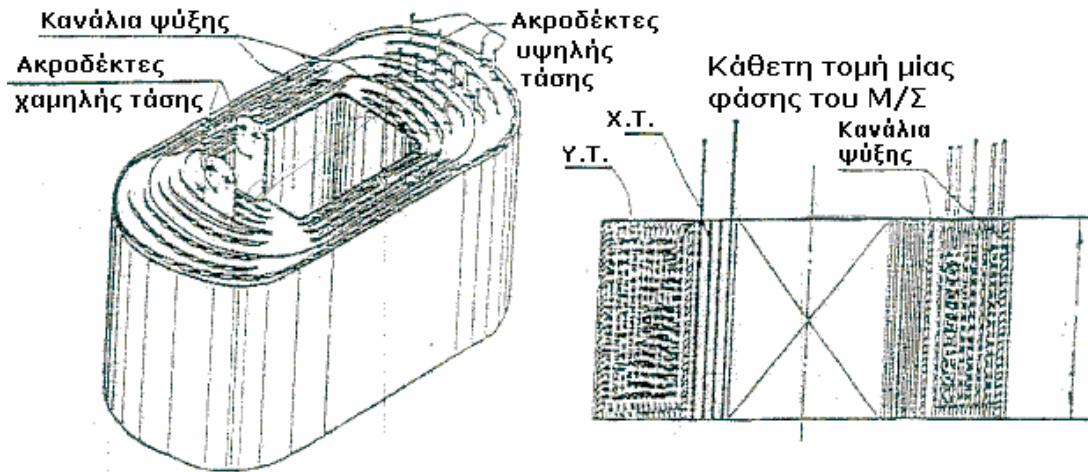
Για την κατασκευή του τυλίγματος της υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται αγωγοί από χαλκό. Η κατασκευή του τυλίγματος της χαμηλής τάσης είναι απλούστερη καθώς αποτελείται από στρώσεις φύλλου χαλκού, οι οποίες καταλήγουν σε ακροδέκτες.

Μεταξύ του τυλίγματος της υψηλής τάσης και του πυρήνα, μεταξύ των στρώσεων των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης, μεταξύ του τυλίγματος της χαμηλής τάσης και του πυρήνα, καθώς και μεταξύ των τυλιγμάτων της υψηλής και χαμηλής τάσης υπάρχει στρώμα μονωτικού χαρτιού.

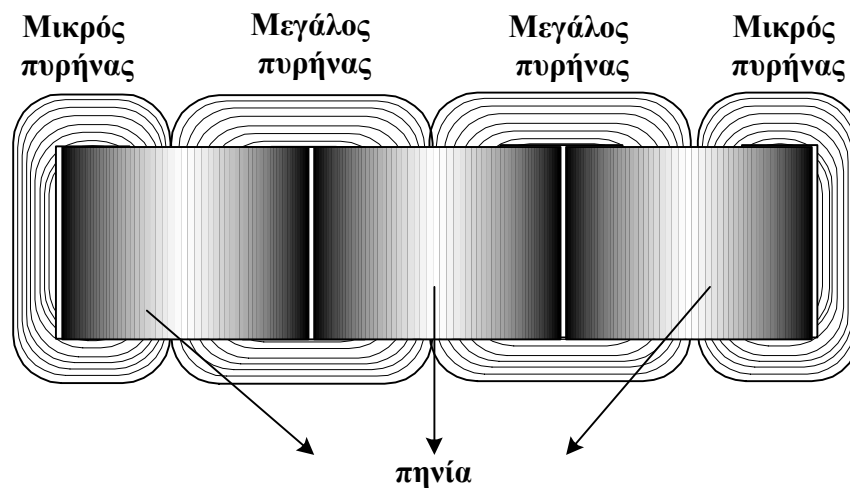
Στο Σχήμα 2.16 φαίνεται με περισσότερη λεπτομέρεια μία εκ των τριών φάσεων του μετασχηματιστή μαζί με τους ακροδέκτες της χαμηλής και της υψηλής τάσης καθώς και τα κανάλια ψύξης του μετασχηματιστή εντός των οποίων κυκλοφορεί λάδι με φυσική κυκλοφορία. Στο ίδιο σχήμα διακρίνεται μία κάθετη τομή του μετασχηματιστή.

Μία σημαντική κατασκευαστική λεπτομέρεια, η οποία είναι εμφανής και στο παραπάνω σχήμα, αφορά στην προκύπτουσα ασυμμετρία των τυλιγμάτων της κάθε φάσης ως προς το διαμήκη άξονα του μετασχηματιστή εξαιτίας του γεγονότος ότι η λήψη των ακροδεκτών της υψηλής τάσης γίνεται μόνο από τη μία πλευρά του τυλίγματος.

Στο Σχήμα 2.17 φαίνεται το συναρμολογημένο ενεργό μέρος ενός τριφασικού μετασχηματιστή διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα.



Σχήμα 2.16: Φάση τριφασικού μετασχηματιστή - κάθετη τομή μετασχηματιστή.



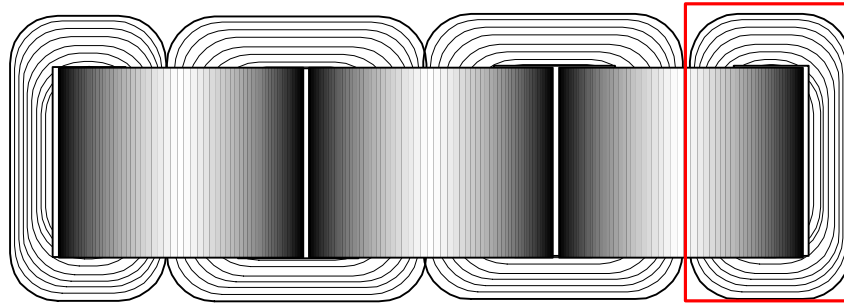
Σχήμα 2.17: Συναρμολογημένο ενεργό μέρος μετασχηματιστή.

## 2.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΜΕ ΤΗ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

### 2.5.1 Ισοδύναμη γεωμετρία δισδιάστατου μοντέλου μετασχηματιστή

Η γεωμετρία του προβλήματος που εξετάζεται στηρίζεται στη μεθοδολογία προσδιορισμού των αυτεπαγωγών σκέδασης που χρησιμοποιεί ο κατασκευαστής [2.4]. Σύμφωνα με αυτή, θεωρείται πολύ μεγάλη η διαπερατότητα του σιδήρου ενώ η μαγνητική αντίσταση που συναντά η ροή σκέδασης προσεγγίζεται θεωρώντας ότι τα τυλίγματα του μετασχηματιστή είναι κυλινδρικά και συγκεντρικά μέσα σε “παράθυρα” αέρα που περιβάλλονται από το σιδηροπυρήνα. Για να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά στις αυτεπαγωγές σκέδασης των τμημάτων των τυλιγμάτων που βρίσκονται έξω από τα “παράθυρα” θεωρείται κατάλληλη αύξηση του ύψους των τυλιγμάτων, βάσει των συντελεστών του Rogowski. Στο Σχήμα 2.19 φαίνεται το ισοδύναμο δισδιάστατο μοντέλο του μετασχηματιστή, το οποίο προκύπτει από το αντίστοιχο τμήμα του ενεργού μέρους, που σημειώνεται στο Σχήμα 2.18.





**Σχήμα 2.18:** Τμήμα του ενεργού μέρους από το οποίο προκύπτει το ισοδύναμο δισδιάστατο μοντέλο.

Στο Σχήμα 2.19 φαίνεται ότι, λόγω της προαναφερόμενης μεταβολής του ύψους των τυλιγμάτων, τα δύο τυλίγματα έχουν διαφορετικό ύψος. Τα υπόλοιπα μέρη εκτός των τυλιγμάτων στο “παράθυρο” του πυρήνα θεωρούνται ότι έχουν τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του αέρα, ενώ ο πυρήνας θεωρείται ότι αποτελείται από σιδηρομαγνητικό υλικό σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας 1.000, λόγω των χαμηλών μαγνητικών επαγωγών που εμφανίζονται κατά το βραχυκύκλωμα.

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά τα σύμβολα και οι διαστάσεις που φαίνονται στο Σχήμα 2.19:

**MD/2:** απόσταση από τον άξονα συμμετρίας μέχρι την πρώτη στρώση μονωτικού υλικού. Το υλικό που θεωρήθηκε είναι γραμμικό σιδηρομαγνητικό υλικό με σχετική μαγνητική διαπερατότητα ίση με 1.000.

**D3/2:** απόσταση από τον άξονα συμμετρίας μέχρι το τέλος του πρώτου μονωτικού υλικού (μεταξύ τυλίγματος και πυρήνα). Η μαγνητική διαπερατότητα του μονωτικού υλικού στην προσομοίωση θεωρείται περίπου ίση με αυτή του αέρα (σχετική διαπερατότητα ίση με τη μονάδα).

**D5/2:** απόσταση από τον άξονα συμμετρίας μέχρι το τέλος του τυλίγματος χαμηλής τάσης.

**D7/2:** απόσταση από τον άξονα συμμετρίας μέχρι το δεύτερο μονωτικό υλικό (μεταξύ τυλίγματος χαμηλής τάσης και υψηλής τάσης).

**D9/2:** απόσταση από τον άξονα συμμετρίας μέχρι το τύλιγμα υψηλής τάσης.

**D11/2:** απόσταση από τον άξονα συμμετρίας μέχρι το τελευταίο μονωτικό υλικό.

**D13/2:** απόσταση από τον άξονα συμμετρίας μέχρι το τέλος του τελευταίου μονωτικού.

Η οριζόντια απόσταση από τον άξονα συμμετρίας μέχρι την πρώτη στρώση μονωτικού υλικού είναι MD/2. Η συνολική οριζόντια απόσταση από τον άξονα συμμετρίας μέχρι το τελικό άκρο είναι ίση με A2+K. Η συνολική κατακόρυφη απόσταση είναι ίση με B (οι συμβολισμοί B και A2 αντιστοιχούν στις διαστάσεις του Σχήματος 2.15).

**L17:** ισοδύναμο ύψος τυλίγματος χαμηλής τάσης (XT) για τις περιοχές με διαμέτρους MD, D3 και D9 αντίστοιχα

**L21:** ισοδύναμο ύψος τυλίγματος υψηλής τάσης (YT) για τις περιοχές με διαμέτρους D9 και D13



**LH23 = (L17+L21)/2:** ισοδύναμο μέσο ύψος τυλιγμάτων για το τμήμα μεταξύ των δύο τυλιγμάτων (επιλέχθηκε δηλαδή η μέση τιμή).

### 2.5.2 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο εξωτερικό σύνορο είναι τύπου Dirichlet ( $\vec{A}=0$ ) και εκφράζουν το γεγονός ότι εκτός του σιδήρου η μαγνητική ροή είναι μηδενική (κατά το βραχυκύκλωμα μπορεί να θεωρηθεί ότι όλη σχεδόν η μαγνητική ροή περικλείεται στον πυρήνα).

### 2.5.3 Προσομοίωση δοκιμής βραχυκύκλωσης

Η δοκιμή βραχυκύκλωσης πραγματοποιείται με εφαρμογή κατάλληλης τάσης (συνήθως 3-10% της ονομαστικής) στο πρωτεύον τύλιγμα (τύλιγμα υψηλής τάσης) έτσι ώστε αυτό να διαρρέεται από ονομαστικό ρεύμα, ενώ το δευτερεύον τύλιγμα (τύλιγμα χαμηλής τάσης) βραχυκυκλώνεται. Υπό αυτές τις συνθήκες μπορεί να θεωρηθεί ότι τα αμπερελίγματα χαμηλής και υψηλής τάσης είναι ίσα, ενώ η ροή μαγνήτισης αμελείται (αφού το ρεύμα μαγνήτισης που την προκαλεί είναι πολύ μικρότερο από το ρεύμα των τυλιγμάτων). Έτσι, η μελέτη του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή μπορεί να περιοριστεί στον προσδιορισμό των ροών σκέδασης των τυλιγμάτων του. Επιπλέον, η αντίδραση σκέδασης είναι πρακτικά ανεξάρτητη του κορεσμού και για αυτό το λόγο έχει την ίδια τιμή για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης και για την κανονική λειτουργία. Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατός ο υπολογισμός των αντιδράσεων σκέδασης του μετασχηματιστή με ικανοποιητική ακρίβεια από τη δοκιμή βραχυκύκλωσης μόνο.

### 2.5.4 Υπολογισμός της επαγωγικής πτώσης τάσης και της τάσης βραχυκύκλωσης

Για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης, χρησιμοποιείται η τιμή της συνολικής αποθηκευμένης μαγνητικής ενέργειας του μοντέλου, όπως αυτή υπολογίζεται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η συνολική μαγνητική ενέργεια του μοντέλου προκύπτει από την ένταση του μαγνητικού πεδίου ( $H$ ) και τη μαγνητική επαγωγή ( $B$ ) σε κάθε τρίγωνο του πλέγματος αθροίζοντας το γινόμενο  $\frac{1}{2} B \cdot H \cdot S_{\text{τριγώνου}}$  όλων των τριγώνων (πραγματοποιώντας έτσι ουσιαστικά ολοκλήρωση της στοιχειώδους πυκνότητας μαγνητικής ενέργειας  $\frac{dW_m}{dS}$  σε όλη την επιφάνεια του πλέγματος) [2.5].

Στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος ισχύει:

$$W_m = \frac{1}{2} (L_{\sigma 1} I_1^2 + L_{\sigma 2} I_2^2) \quad (2.9)$$

όπου  $W_m$  είναι η συνολική αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια,  $I_1$  και  $I_2$  τα ρεύματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος και  $L_{\sigma 1}$  και  $L_{\sigma 2}$  οι αντιδράσεις σκέδασης του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος αντίστοιχα. Αν  $a=n_1/n_2$  είναι ο λόγος σπειρών πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος, η (2.9) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$W_m = \frac{1}{2} \left( L_{\sigma 1} \frac{I_1^2}{\frac{n_1^2}{n_2^2}} + L_{\sigma 2} I_2^2 \right) \quad (2.10)$$

καταλήγοντας έτσι στη μορφή:

$$\frac{2W_m}{n_2^2 I_2^2} = \frac{L_{\sigma 1}}{n_1^2} + \frac{L_{\sigma 2}}{n_2^2} \quad (2.11)$$

Αν  $NI$  είναι τα αμπερελίγματα του πηνίου χαμηλής τάσης (ίσα με τα αμπερελίγματα του πηνίου υψηλής τάσης στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος), η (2.11) γράφεται ως εξής:

$$\frac{2W_m}{(NI)^2} = \frac{L_{\sigma 1}}{n_1^2} + \frac{L_{\sigma 2}}{n_2^2} \quad (2.12)$$

οπότε η συνολική αυτεπαγωγή σκέδασης των τυλιγμάτων δίνεται από την (2.13):

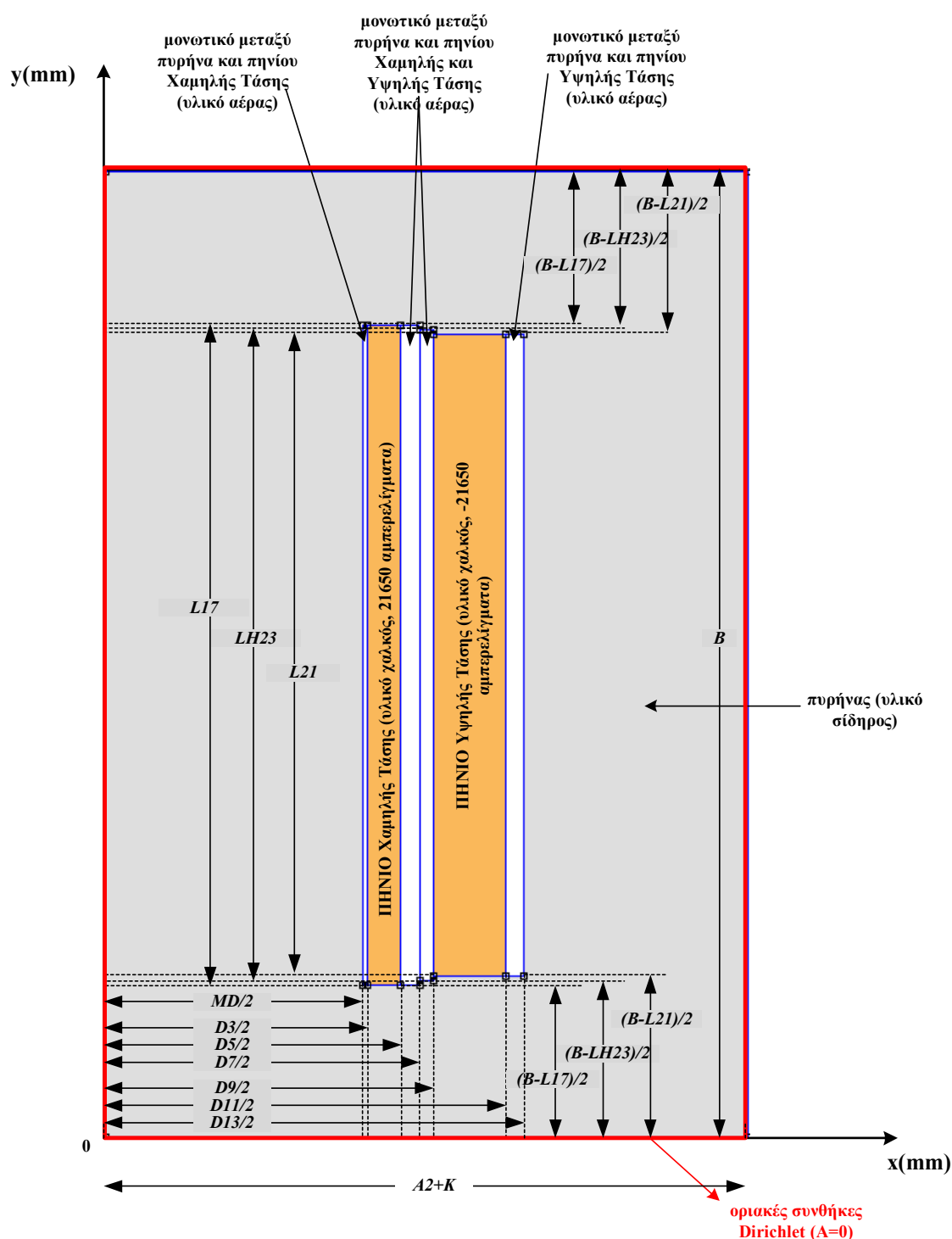
$$\frac{2W_m}{(NI)^2} = L_{\sigma \text{ολ}} \quad (2.13)$$

Έχοντας υπολογίσει τη συνολική αυτεπαγωγή σκέδασης των τυλιγμάτων, η αντίστοιχη επαγωγική πτώση τάσης δίνεται από τη σχέση:

$$IX(\%) = \frac{I_2 * 2 * \pi * 50 * n_2^2 * L_{\sigma \text{ολ}}}{V_2} \quad (2.14)$$

οπότε η τάση βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από την (2.15):

$$U_k(\%) = \sqrt{(IX)^2 + (IR)^2} \quad (2.15)$$



Σχήμα 2.19: Τροποποιημένη γεωμετρία μετασχηματιστή (κυλινδρική συμμετρία).

### 2.5.5 Περιγραφή κατασκευής μοντέλου μετασχηματιστή με τη χρήση του προγράμματος FEMM

Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζεται η γεωμετρία ενός μετασχηματιστή στο πρόγραμμα FEMM και η επεξεργασία των

αποτελεσμάτων του. Η σχεδίαση γίνεται με βάση την περιγραφή της Παραγράφου 2.3.2, ενώ χρησιμοποιείται το μοντέλο που περιγράφηκε στις Παραγράφους 2.5.1 έως 2.5.4.


- άνοιγμα του femm editor
- Problem type-> Plannar  
Problem -> Length units ->Milimetres ->OK  
Depth: 1000
- Με το Tab τοποθετούνται τα σημεία της γεωμετρίας του μετασχηματιστή  
π.χ. για τη σχεδίαση ενός συγκεκριμένου Μ/Σ 1250 kVA χρειάζονται τα εξής 24 σημεία, οι συντεταγμένες των οποίων (σε mm) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

(0,0)	(150.37, 472.64)
(150.37, 89.3)	(153.37, 472.64)
(153.37, 89.3)	(172.26, 472.64)
(172.26, 89.3)	(183.64, 470.21)
(183.64, 89.3)	(183.64, 472.64)
(183.64, 91.79)	(191.44, 470.21)
(191.44, 91.79)	(191.44, 467.71)
(191.44, 94.2)	(233.58, 467.71)
(233.58, 94.2)	(244.325, 467.71)
(244.325, 94.2)	(375, 562)
(375, 0)	(0, 281)
(0, 562)	(375, 281)


Με δεξί διπλό κλικ εμφανίζονται οι διαστάσεις του σημείου και με delete σβήνεται το σημείο.

- Για την τοποθέτηση του κελύφους (καζάνι) του Μ/Σ, χρειάζονται 4 επιπλέον σημεία, τα οποία για τη σχεδίαση ενός συγκεκριμένου Μ/Σ 1250 kVA είναι τα ακόλουθα :

(0, -50)                      (0, 612)  
(425, -50)                      (425, 612)

- Η τοποθέτηση των υλικών γίνεται με το κουμπί  και στη συνέχεια με κλικ μέσα στην περιοχή όπου θα τοποθετηθούν τα υλικά. (Θα τοποθετηθούν υλικά σε οκτώ περιοχές). Προηγουμένως, πρέπει να προστεθούν τα αντίστοιχα υλικά από τη βιβλιοθήκη του FEMM και να δημιουργηθεί ένα καινούριο υλικό.

Properties->Materials Library->  
->Air->Add selected material to model  
->Copper->Add selected material to model  
->Create new entry in Library  
Name: Iron mu 1000  
Lines B-H Relationship  
Relative  $\mu_x$ -> 1000 ->OK  
Relative  $\mu_y$ -> 1000  
->Add selected material to model  
->OK

Κλικ στο κουμπί του υλικού  -> κλικ σε μία περιοχή-> δεξί κλικ-> Spacebar  
->blocktype: air

Πριν την τοποθέτηση του υλικού στα πηνία, κατασκευάζονται τα κυκλώματα με ρεύμα:

Properties->Circuits->Add Property->

->Name: Low Voltage Ampereturns->

->Total Current, Amps: 21650 ->OK  
(φανταστικό μέρος: 0)

->Add Properties->





->Name: High Voltage Ampereturns->

->Total Current, Amps: -21650 ->OK

Περιοχή πηνίου χαμηλής τάσης: Block type: Copper

In Circuit: Low Voltage Ampereturns

Για να μη φαίνονται τα ονόματα των υλικών: View->Show block names

- Επιβολή οριακών συνθηκών (οριακή συνθήκη Dirichlet)  
 $A=0$  σε όλα τα εξωτερικά σύνορα  
 Properties->Boundary->Add Property->  
 Name: Dirichlet->OK->OK  
 Επειδή οι οριακές συνθήκες επιβάλλονται σε ακμές, χρησιμοποιείται πάλι το κουμπί των ακμών. Με δεξί κλικ επιλέγεται η κάθε ακμή -> Spacebar -> Dirichlet->OK
- Εμφάνιση πλέγματος με το κουμπί  ->π.χ. 1428 κόμβοι
- Ανάλυση με το κουμπί 
- Εμφάνιση αποτελεσμάτων με το κουμπί 
- Υπολογισμός της μαγνητικής ενέργειας  
 ->επιλογή επιφάνειας μοντέλου για την ολοκλήρωση της μαγνητικής ενέργειας.  
 - κλικ σε ένα σημείο του πυρήνα (θα ληφθεί όλος ο πυρήνας)  
 - κλικ σε όλα τα διάκενα  
 - κλικ στα πηνία  
 - κλικ στο σύμβολο του ολοκληρώματος  
 - επιλογή "Magnetic field energy" => δίνει αποτέλεσμα π.χ. 30.216 Joule
- Το πλέγμα μπορεί να γίνει πιο πυκνό (αύξηση του αριθμού των κόμβων), ως εξής:  
 κλικ στο κουμπί   
 Operation-> block  
 ->Επιλογή ενός υλικού με δεξί κλικ->spacebar  
 ->Let triangle Choose Mesh size: ανενεργό->Mesh size: 20  
 Το πλέον πυκνό πλέγμα πρέπει να είναι στα διάκενα πηνίων-πυρήνα (με την αύξηση του mesh size, το πλέγμα γίνεται πιο αραιό).

## 2.6 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΕΔΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών που μελετήθηκαν με τη χρήση του μοντέλου που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.5. Για κάθε περίπτωση μετασχηματιστή παρατίθενται τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά, οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του μαγνητικού του πεδίου και τα αποτελέσματά της ανάλυσης. Στη συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα αυτά υπολογίζονται οι αυτεπαγωγές σκέδασης και η επαγωγική πτώση τάσης των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή, η οποία και συγκρίνεται με τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που χρησιμοποιεί ο κατασκευαστής.

### 2.6.1 Μετασχηματιστής ισχύος 1250 kVA

#### 2.6.1.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή είναι τα ακόλουθα:

- Ονομαστική ισχύς  $S_{nom}=1250 \text{ kVA}$
- Τάση τυλίγματος υψηλής (πρωτεύον)  $V_{1nom}=15\text{-}20 \text{ kV}^2$
- Τάση τυλίγματος χαμηλής (δευτερεύον)  $V_{2nom}=0.4 \text{ kV}$
- Συνδεσμολογία τυλιγμάτων : **Dyn11** (τρίγωνο - αστέρας)
- Λόγος τάσεως/σπείρα  $=19.249 \text{ V/turn}$
- Σπείρες πρωτεύοντος  $N_1=1039$  (20 kV)
- Σπείρες δευτερεύοντος  $N_2=12$
- Αριθμός ενδιάμεσων λήψεων (taps) : **5**
- Τάση βραχυκύκλωσης  $U_k=6\%$
- Επαγωγική πτώση τάσης  $IX=5.85\%$
- Ωμική πτώση τάσης  $IR=1.31\%$

Από τα παραπάνω μεγέθη προκύπτουν τα εξής:

- Ονομαστική φασική τάση του δευτερεύοντος:  $V_{LV} = V_{2nom}^{phase} = \frac{V_{2nom}}{\sqrt{3}} = 230.94 \text{ V}$ .
- Ονομαστικό φασικό ρεύμα πρωτεύοντος:  $I_{HV} = I_{1nom} = \frac{S_{nom} / 3}{V_{1nom}} = 20.83 \text{ A}$
- Ονομαστικό φασικό ρεύμα δευτερεύοντος:  $I_{LV} = I_{2nom} = \frac{S_{nom} / 3}{V_{2nom}^{phase}} = 1804.22 \text{ A}$ .

#### 2.6.1.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Ο Πίνακας 2.1 περιλαμβάνει τις διαστάσεις των πυρήνων του μετασχηματιστή, σε αντιστοιχία με το Σχήμα 2.15.

**Πίνακας 2.1:** Διαστάσεις πυρήνων μετασχηματιστή 1250 kVA (σύμφωνα με το Σχήμα 2.15).

Μέγεθος	Διάσταση (mm)
Eu	101
A1	283
A2	364
F1	81
F2	162
G	360
B	562
K	11
D	254
D1	127
D2	127

Για την κατασκευή του τυλίγματος της υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται αγωγοί από χαλκό με δύο διαφορετικές διαμέτρους 2.65 mm και 3 mm, αντίστοιχα. Συνδεσμολογώντας κατάλληλα τα πηνία μεταξύ τους επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση λειτουργίας (20kV ή 15kV), καθώς και οι ενδιάμεσες λήψεις τους. Έτσι, λαμβάνονται ονομαστικές τάσεις λειτουργίας πρωτεύοντος από 14kV έως 16kV και από 19kV έως 21kV. Η κατασκευή του τυλίγματος της χαμηλής τάσης είναι απλούστερη καθώς αποτελείται από 12 στρώσεις φύλλου χαλκού διατομής  $427.5 \text{ mm}^2$ , οι οποίες καταλήγουν σε ακροδέκτες.

Μεταξύ του τυλίγματος της υψηλής τάσης και του πυρήνα, μεταξύ των στρώσεων των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης, μεταξύ του τυλίγματος της χαμηλής τάσης και

<sup>2</sup> Εάν και ο εξεταζόμενος μετασχηματιστής είναι δύο επιπέδων τάσης πρωτεύοντος (υψηλής τάσης), η ανάλυση που ακολουθεί πραγματοποιείται για το πρώτο επίπεδο τάσης, δηλαδή τα 20kV.

του πυρήνα, καθώς και μεταξύ των τυλιγμάτων της υψηλής και χαμηλής τάσης υπάρχει στρώμα μονωτικού χαρτιού.

Οι διαστάσεις των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης καθώς και των μεταξύ τους διακένων έχουν ως εξής:

- Διάκενο μεταξύ πηνίων υψηλής τάσης δύο διαδοχικών φάσεων:  $\ell_{HV-HV}=7 \text{ mm}$
- Πάχος YT:  $BLD_{HV}=42\text{mm}$
- Διάκενο μεταξύ YT και XT:  $\ell_{HV-LV}=7.81 \text{ mm}$
- Πάχος XT:  $BLD_{LV}=22\text{mm}$
- Διάκενο μεταξύ XT και πυρήνα:  $\ell_{LV-C}=1.5\text{mm}$

### 2.6.1.3 Διαστάσεις μοντέλου FEMM

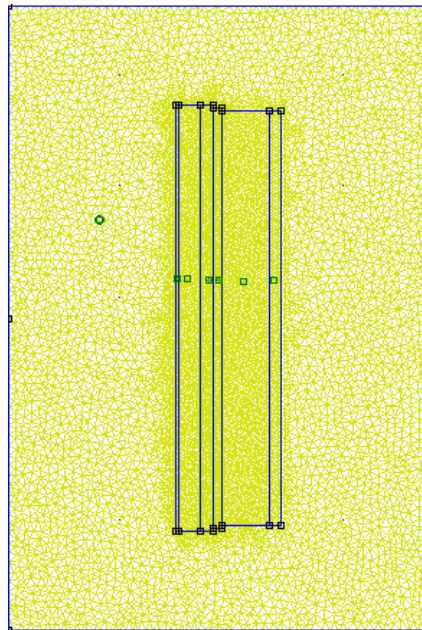
Ο Πίνακας 2.2 περιλαμβάνει τις διαστάσεις του μοντέλου FEMM που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης (σύμφωνα με το Σχήμα 2.19).

**Πίνακας 2.2:** Διαστάσεις μοντέλου FEMM Μ/Σ 1250 kVA (σύμφωνα με το Σχήμα 2.19).

Μέγεθος	Διάσταση (mm)
MD/2	150.37
D3/2	153.37
D5/2	172.26
D7/2	183.64
D9/2	191.44
D11/2	233.58
D13/2	244.325
L17	383.34
L21	373.51
LH23 = (L17+L21)/2	378.42

### 2.6.1.4 Δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε με τριγωνικά στοιχεία πρώτης τάξης. Κατασκευάστηκαν πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας για να διαπιστωθεί η επίδραση του αριθμού των κόμβων στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στο Σχήμα 2.20 εικονίζεται ένα πλέγμα ενδιάμεσης πυκνότητας, αποτελούμενο από περίπου 20000 κόμβους.



**Σχήμα 2.20:** Δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για το μετασχηματιστή 1250 kVA (πυκνότητας 20000 κόμβων).

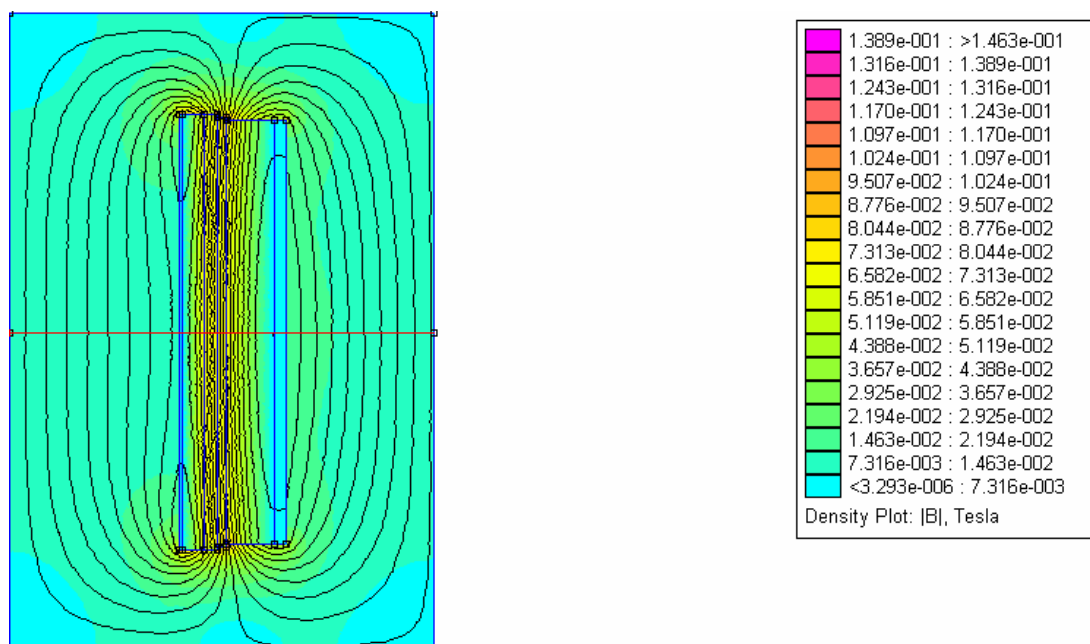
#### 2.6.1.5 Αποτελέσματα ανάλυσης

Η κατανομή της μαγνητικής ροής, όπως προέκυψε από την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος, με τη χρήση του πλέγματος του Σχήματος 2.20, εικονίζεται στο Σχήμα 2.21. Η κατανομή αυτή αντιστοιχεί στις μαγνητικές ροές σκέδασης, που εμφανίζονται κατά το βραχυκύκλωμα. Μεταξύ των ισοδυναμικών γραμμών του πεδίου κυκλοφορεί η ίδια μαγνητική ροή. Από το Σχήμα 2.21 προκύπτει ότι κατά το βραχυκύκλωμα οι μαγνητικές ροές σκέδασης περνούν μέσα από το παράθυρο του μετασχηματιστή. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο τμήμα της μαγνητικής ροής περνά μέσα από τους αγωγούς καθώς και από το διάκενο μεταξύ των τυλιγμάτων χαμηλής και υψηλής τάσης και κλείνει μέσω του σιδήρου. Στο γεγονός αυτό άλλωστε οφείλεται και η δημιουργία απωστικών δυνάμεων μεταξύ των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή.

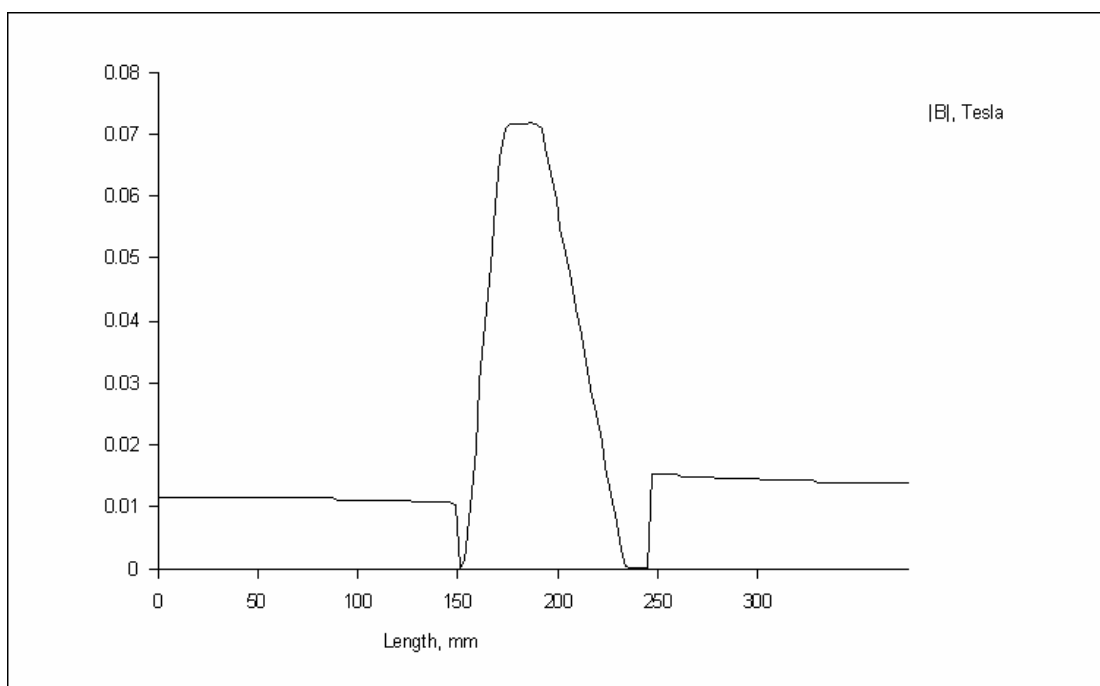
Σύμφωνα με τον τρόπο απεικόνισης της κατανομής του Σχήματος 2.19, το πεδίο είναι ελάχιστο στις περιοχές με το γαλάζιο χρώμα, ενώ μεγιστοποιείται στις περιοχές με το μωβ χρώμα.

Η μορφή της κατανομής της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της κόκκινης διαδρομής του Σχήματος 2.21 φαίνεται στο Σχήμα 2.22. Στο Σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η κάθετη συνιστώσα της επαγωγής είναι περίπου σταθερή στον πυρήνα και στα διάκενα, ενώ μεταβάλλεται γραμμικά στα τυλίγματα.





**Σχήμα 2.21:** Κατανομή του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή 1250 kVA κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης.



**Σχήμα 2.22:** Γραφική απεικόνιση της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής του Σχήματος 2.21.

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό της επαγωγικής πτώσης τάσης του μετασχηματιστή 1250 kVA, κατασκευάστηκαν πλέγματα με εύρος πυκνότητας από 2.000 έως 100.000 κόμβους. Σε κάθε περίπτωση και ανεξάρτητα από την πυκνότητα του πλέγματος, η απόσταση ανάμεσα στο κέλυφος και στον πυρήνα του μετασχηματιστή παρέμεινε σταθερή και ίση με 50 mm. Για την εκάστοτε πυκνότητα πλέγματος και με βάση την τιμή της μαγνητικής ενέργειας του μοντέλου, υπολογίστηκε η επαγωγική πτώση τάσης, ενώ ο υπολογισμός του αριθμού των κόμβων βοήθησε στην εξαγωγή της καμπύλης της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της πυκνότητας του πλέγματος.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν με τη χρήση του προγράμματος FEMM για τον αριθμό των κόμβων και την επαγωγική πτώση τάσης στο μετασχηματιστή 1250 kVA (Πίνακας 2.3):

**Πίνακας 2.3:** Τιμές της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το μετασχηματιστή 1250 kVA και για απόσταση κελύφους πυρήνα ίση με 50 mm..

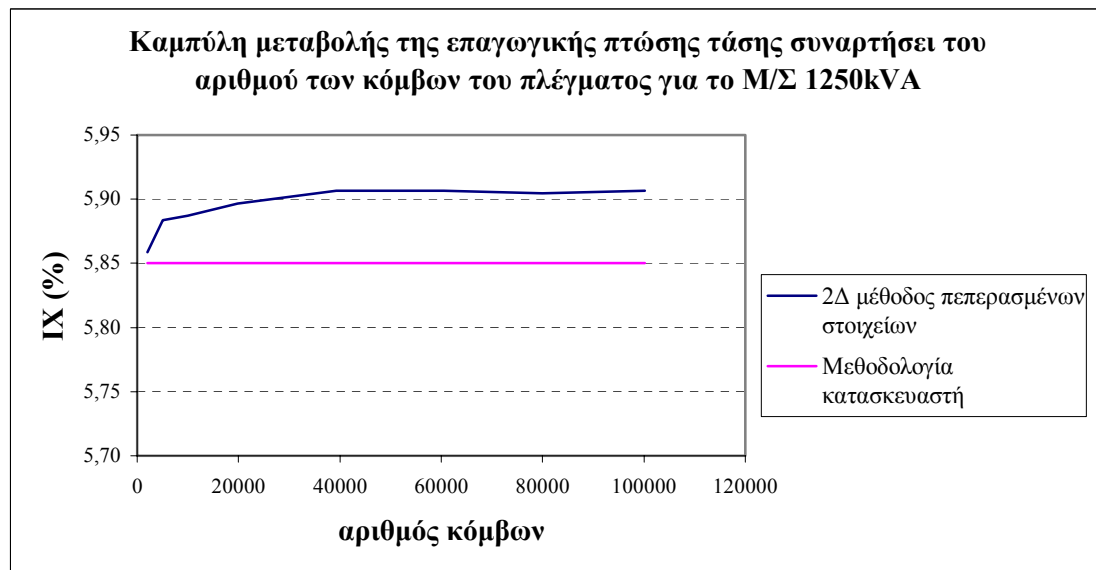
Αριθμός κόμβων	Επαγωγική πτώση τάσης (%)
1998	5,859
5000	5,883
10001	5,887
19885	5,897
39317	5,906
60490	5,906
79900	5,904
100204	5,906

Η τιμή της επαγωγικής πτώσης τάσης, η οποία υπολογίστηκε με βάση τη συνολική αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια του μοντέλου, σύμφωνα με την Παράγραφο 2.5.4, συγκρίθηκε με τη τιμή επαγωγικής πτώσης τάσης του μετασχηματιστή 1250 kVA, που υπολογίστηκε με βάση τη μεθοδολογία του κατασκευαστή. Η επαγωγική πτώση τάσης δε δίνεται απευθείας στα έντυπα της μελέτης του μετασχηματιστή, αλλά προκύπτει, με τη χρήση της σχέσης 2.15, από την τιμή της τάσης βραχυκύκλωσης και των υπολογισμένων απωλειών φορτίου του μετασχηματιστή. Στη σχέση αυτή ο μόνος άγνωστος είναι το IX, καθώς το IR υπολογίζεται ως το εκατοστιαίο ποσοστό του κλάσματος των υπολογισμένων απωλειών χαλκού διά την ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή, τα οποία λαμβάνουν τιμές  $P_{Cu}=16.400W$  και 1250 kVA, αντίστοιχα, ενώ η τιμή της τάσης βραχυκύκλωσης δίνεται από τον κατασκευαστή ίση με  $U_k=6\%$ . Έτσι, για το μετασχηματιστή 1250 kVA, η επαγωγική πτώση τάσης υπολογίζεται ίση με 5,85%.

Στο επόμενο γράφημα (Σχήμα 2.23), απεικονίζεται η καμπύλη της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του αριθμού των κόμβων σε συνδυασμό με την αντίστοιχη μετρημένη τιμή. Είναι φανερό ότι η αύξηση του αριθμού των κόμβων συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης που δίνει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η τιμή της οποίας, μετά από μία πυκνότητα πλέγματος και μετά, είναι σχεδόν σταθερή.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα είναι δυνατό να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα όσον αφορά στο μετασχηματιστή 1250 kVA:

Σύμφωνα με τη δισδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, η αύξηση του αριθμού των κόμβων προκαλεί ανάλογη αύξηση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης, με εξαίρεση την τιμή αυτής για πλέγμα της τάξης των 80.000 κόμβων, η οποία είναι ελάχιστα μικρότερη από εκείνη που αντιστοιχεί στα αμέσως αραιότερα πλέγματα της τάξης των 40.000 και 60.000 κόμβων. Επίσης, οι τιμές της επαγωγικής πτώσης τάσης για το σύνολο των περιπτώσεων πυκνότητας πλέγματος οι οποίες ελήφθησαν υπόψη, κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 5,859% έως 5,906%, γεγονός που εξασφαλίζει τη διακύμανση της επαγωγικής πτώσης τάσης περί των εγγυημένων τιμών αυτής. Σε γενικές γραμμές, η χρήση αραιού πλέγματος δίνει πολύ μικρή απόκλιση από τις τιμές επαγωγικής πτώσης τάσης που προκύπτουν με τη χρήση πυκνότερων πλεγμάτων. Έτσι, η χρήση ενός πλέγματος της τάξης των 20.000 κόμβων μπορεί να δώσει αρκετά αξιόπιστο αποτέλεσμα για το πεδίο σκέδασης και την τάση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή.



**Σχήμα 2.23 :** Καμπύλη μεταβολής της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το Μ/Σ 1250 kVA.

Όσον αφορά στη μεθοδολογία που χρησιμοποιεί ο κατασκευαστής για τον υπολογισμό των αυτεπαγωγών σκέδασης του μετασχηματιστή και η οποία βασίζεται σε θεώρηση κυλινδρικής συμμετρίας και κατάλληλης τροποποίησης της γεωμετρίας του παραθύρου του Μ/Σ, είναι εμφανές από το σχήμα ότι για μικρή πυκνότητα πλέγματος, δηλαδή για σχετικά αραιά πλέγματα με μικρό αριθμό κόμβων, η απόκλιση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης όπως αυτή υπολογίζεται από τις δύο μεθόδους, είναι μικρότερη. Ωστόσο, η μέγιστη απόκλιση των δύο μεθόδων είναι μικρότερη του 1%, γεγονός που οφείλεται στον κοινό τρόπο γεωμετρικής αναπαράστασης που υιοθετούν οι δύο μέθοδοι για τον υπολογισμό του πεδίου σκέδασης.

## 2.6.2 Μετασχηματιστής ισχύος 630 kVA

### 2.6.2.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή είναι τα ακόλουθα:

- Ονομαστική ισχύς  $S_{nom}=630 \text{ kVA}$
- Τάση τυλίγματος υψηλής (πρωτεύον)  $V_{1nom}=20 \text{ kV}$
- Τάση τυλίγματος χαμηλής (δευτερεύον)  $V_{2nom}=0.4 \text{ kV}$
- Συνδεσμολογία τυλιγμάτων : **Dyn11** (τρίγωνο - αστέρα)
- Λόγος τάσεως/σπείρα  $=15.396 \text{ V/turn}$
- Σπείρες πρωτεύοντος  $N_1=1299$  (20 kV)
- Σπείρες δευτερεύοντος  $N_2=15$
- Αριθμός ενδιάμεσων λήψεων (taps) : 5
- Τάση βραχυκύκλωσης  $U_k=3.86\%$
- Επαγωγική πτώση τάσης  $IX=3.71\%$
- Ωμική πτώση τάσης  $IR=1.05\%$

Από τα παραπάνω μεγέθη προκύπτουν τα εξής:

- Ονομαστική φασική τάση του δευτερεύοντος:  $V_{LV} = V_{2nom}^{phase} = \frac{V_{2nom}}{\sqrt{3}} = 230.94 \text{ V}.$

- Ονομαστικό φασικό ρεύμα πρωτεύοντος:  $I_{HV} = I_{1nom} = \frac{S_{nom} / 3}{V_{1nom}} = 10.5 \text{ A}$
- Ονομαστικό φασικό ρεύμα δευτερεύοντος:  $I_{LV} = I_{2nom} = \frac{S_{nom} / 3}{V_{2nom}^{phase}} = 909.4 \text{ A}$ .

### 2.6.2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Ο Πίνακας 2.4 περιλαμβάνει τις διαστάσεις των πυρήνων του μετασχηματιστή, σε αντιστοιχία με το Σχήμα 2.15.

**Πίνακας 2.4:** Διαστάσεις πυρήνων μετασχηματιστή 630 kVA (σύμφωνα με το Σχήμα 2.15)

Μέγεθος	Διάσταση (mm)
Eu	99.7
A1	265.4
A2	331.4
F1	66
F2	132
G	335
B	534.4
K	11
D	237
D1	110
D2	127

Για την κατασκευή του τυλίγματος της υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται αγωγοί από χαλκό διαμέτρου 2.46 mm. Το τυλίγμα χαμηλής τάσης αποτελείται από 15 στρώσεις φύλλου χαλκού διατομής 253.6 mm<sup>2</sup>, οι οποίες καταλήγουν σε ακροδέκτες.

Οι διαστάσεις των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης καθώς και των μεταξύ τους διακένων έχουν ως εξής:

- Διάκενο μεταξύ πηνίων υψηλής τάσης δύο διαδοχικών φάσεων:  $\ell_{HV-HV} = 4 \text{ mm}$
  - Πάχος YT:  $BLD_{HV} = 35.8 \text{ mm}$
  - Διάκενο μεταξύ YT και XT:  $\ell_{HV-LV} = 7 \text{ mm}$
  - Πάχος XT:  $BLD_{LV} = 17.8 \text{ mm}$
- Διάκενο μεταξύ XT και πυρήνα:  $\ell_{LV-C} = 1.5 \text{ mm}$

### 2.6.2.3 Διαστάσεις μοντέλου FEMM

Ο Πίνακας 2.5 περιλαμβάνει τις διαστάσεις του μοντέλου FEMM που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης (σύμφωνα με το Σχήμα 2.19).

**Πίνακας 2.5:** Διαστάσεις μοντέλου FEMM Μ/Σ 630 kVA (σύμφωνα με το Σχήμα 2.19).

Μέγεθος	Διάσταση (mm)
MD/2	142,645
D3/2	144,145
D5/2	161,925
D7/2	169,926
D9/2	177,038
D11/2	212,852
D13/2	219,202
L17	349,25
L21	334,264
LH23 = (L17+L21)/2	341,757

#### 2.6.2.4 Αποτελέσματα ανάλυσης

Η μέθοδος εφαρμόστηκε για πλέγματα της τάξης των 2.000, 15.000 και 40.000 κόμβων. Για κάθε περίπτωση πλέγματος και με βάση την τιμή της μαγνητικής ενέργειας του μοντέλου, υπολογίστηκε η επαγωγική πτώση τάσης, ενώ ακολούθησε εξαγωγή της καμπύλης της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της πυκνότητας του πλέγματος.

Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν με τη χρήση του προγράμματος FEMME για τον αριθμό των κόμβων και την επαγωγική πτώση τάσης παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακα 2.6).

**Πίνακας 2.6:** Τιμές της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το μετασχηματιστή 630 kVA.

Αριθμός κόμβων	Επαγωγική πτώση τάσης (%)
2407	3,988
14975	4,023
39554	4,030

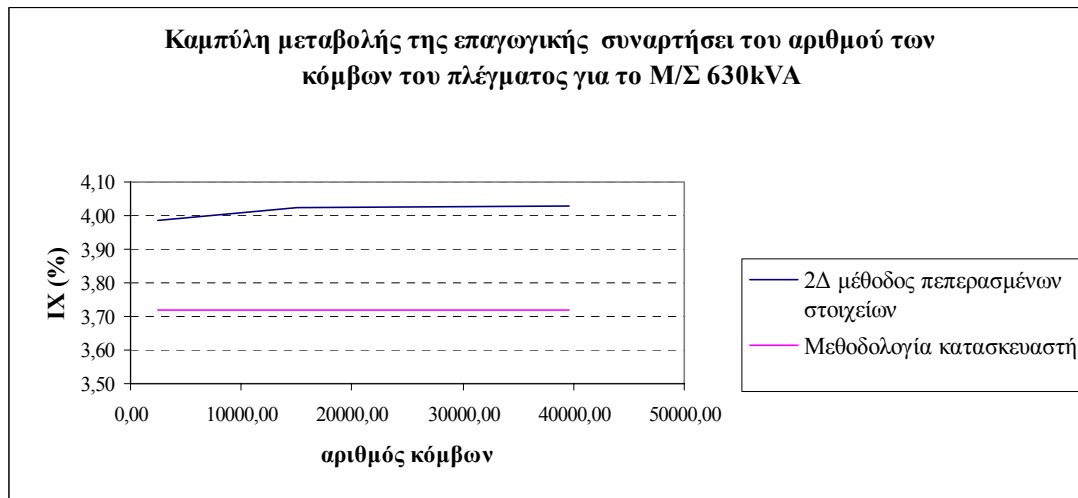
Ο υπολογισμός της αντίστοιχης τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης που προέκυψε από τη μεθοδολογία του κατασκευαστή με βάση τα έντυπα μελέτης που αφορούν στο συγκεκριμένο μετασχηματιστή των 630 kVA, ομοίως με την περίπτωση του Μ/Σ 1250 kVA, στηρίζεται στον υπολογισμό της επαγωγικής πτώσης τάσης με χρήση της σχέσης 2.15. Τώρα το IR υπολογίζεται για  $P_{Cu}=6.617$  W και 630 kVA, αντίστοιχα, ενώ η τιμή της τάσης βραχυκύκλωσης δίνεται από τον κατασκευαστή ίση με  $U_k=3,86$  %. Έτσι, η επαγωγική πτώση τάσης υπολογίζεται από τον κατασκευαστή ίση με 3,71%.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 2.24), παρουσιάζεται η καμπύλη της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του αριθμού των κόμβων, όπως υπολογίστηκαν από το μοντέλο FEMM, σε συνδυασμό με την αντίστοιχη καμπύλη η οποία προέκυψε στην περίπτωση υπολογισμού της επαγωγικής πτώσης τάσης με τη μεθοδολογία του κατασκευαστή.

Τα συμπεράσματα τα οποία αφορούν στο μετασχηματιστή 630 kVA, είναι τα εξής:

Σύμφωνα με τη δισδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, η αύξηση του αριθμού των κόμβων οδηγεί σε συνεχή αύξηση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης. Η τιμή της IX σταθεροποιείται μετά από μια πυκνότητα της τάξης των 15000 κόμβων, αφού η χρήση περισσότερο πυκνού πλέγματος δίνει πολύ κοντινή τιμή. Σε σχέση με τη μεθοδολογία που χρησιμοποιεί ο κατασκευαστής για τον υπολογισμό των αυτεπαγωγών σκέδασης του

μετασχηματιστή, παρατηρείται πιο μεγάλη απόκλιση σε σχέση με την περίπτωση του μετασχηματιστή 1250 kVA.



**Σχήμα 2.24:** Καμπύλη μεταβολής της επαγωγικής πτώσης τάσης συνάρτησε του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το Μ/Σ 630 kVA.

### 2.6.3 Μετασχηματιστής ισχύος 720 kVA

#### 2.6.3.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή είναι τα ακόλουθα:

- Ονομαστική ισχύς  $S_{nom}=720 \text{ kVA}$
- Τάση τυλίγματος υψηλής (πρωτεύον)  $V_{1nom}=20 \text{ kV}$
- Τάση τυλίγματος χαμηλής (δευτερεύον)  $V_{2nom}=0.69 \text{ kV}$
- Συνδεσμολογία τυλιγμάτων : **Dyn11** (τρίγωνο - αστέρα)
- Λόγος τάσεως/σπείρα  $=15.935 \text{ V/turn}$
- Σπείρες πρωτεύοντος  $N_1=1255$  (20 kV)
- Σπείρες δευτερεύοντος  $N_2=25$
- Αριθμός ενδιάμεσων λήψεων (taps) : 5
- Τάση βραχυκύκλωσης  $U_k=5.19\%$
- Επαγωγική πτώση τάσης  $IX=5.06\%$
- Ωμική πτώση τάσης  $IR=1.17\%$

Από τα παραπάνω μεγέθη προκύπτουν τα εξής:

- Ονομαστική φασική τάση του δευτερεύοντος:  $V_{LV} = V_{2nom}^{phase} = \frac{V_{2nom}}{\sqrt{3}} = 398.37 \text{ V}$ .
- Ονομαστικό φασικό ρεύμα πρωτεύοντος:  $I_{HV} = I_{1nom} = \frac{S_{nom} / 3}{V_{1nom}} = 12 \text{ A}$
- Ονομαστικό φασικό ρεύμα δευτερεύοντος:  $I_{LV} = I_{2nom} = \frac{S_{nom} / 3}{V_{2nom}^{phase}} = 602.5 \text{ A}$ .

#### 2.6.3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Ο Πίνακας 2.7 περιλαμβάνει τις διαστάσεις των πυρήνων του μετασχηματιστή, κατ'αντιστοιχία με το Σχήμα 2.15.

**Πίνακας 2.7:** Διαστάσεις πυρήνων μετασχηματιστή 720 kVA (σύμφωνα με το Σχήμα 2.15).

Μέγεθος	Διάσταση (mm)
Eu	98
A1	274
A2	352
F1	78
F2	156
G	310
B	506
K	10
D	237
D1	110
D2	127

Για την κατασκευή του τυλίγματος της υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται αγωγοί από χαλκό διαμέτρου 2.48 mm. Το τυλίγμα χαμηλής τάσης αποτελείται από 25 στρώσεις φύλλου χαλκού διατομής 204.4 mm<sup>2</sup>, οι οποίες καταλήγουν σε ακροδέκτες.

Οι διαστάσεις των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης καθώς και των μεταξύ τους διακένων έχουν ως εξής:

- Διάκενο μεταξύ πηνίων υψηλής τάσης δύο διαδοχικών φάσεων:  $\ell_{HV-HV}=3.7$  mm
- Πάχος YT:  $BLD_{HV}=39$ mm
- Διάκενο μεταξύ YT και XT:  $\ell_{HV-LV}=6.9$  mm
- Πάχος XT:  $BLD_{LV}=27$ mm
- Διάκενο μεταξύ XT και πυρήνα:  $\ell_{LV-C}=1.5$ mm

#### 2.6.3.3 Διαστάσεις μοντέλου FEMM

Ο Πίνακας 2.8 περιλαμβάνει τις διαστάσεις του μοντέλου FEMM που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης (σύμφωνα με το Σχήμα 2.19).

**Πίνακας 2.8:** Διαστάσεις μοντέλου FEMM Μ/Σ 720 kVA (σύμφωνα με το Σχήμα 2.19).

Μέγεθος	Διάσταση (mm)
MD/2	141,248
D3/2	142,748
D5/2	169,672
D7/2	178,435
D9/2	185,293
D11/2	224,282
D13/2	233,172
L17	336,296
L21	317,246
LH23 = (L17+L21)/2	326,771

#### 2.6.3.4 Αποτελέσματα ανάλυσης

Η μέθοδος εφαρμόστηκε, όπως και στην περίπτωση του μετασχηματιστή 630 kVA, για πλέγματα της τάξης των 2.000, 15.000 και 40.000 κόμβων. Για κάθε περίπτωση

πλέγματος και με βάση την τιμή της μαγνητικής ενέργειας του μοντέλου, υπολογίστηκε η επαγωγική πτώση τάσης, ενώ ακολούθησε εξαγωγή της καμπύλης της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της πυκνότητας του πλέγματος.

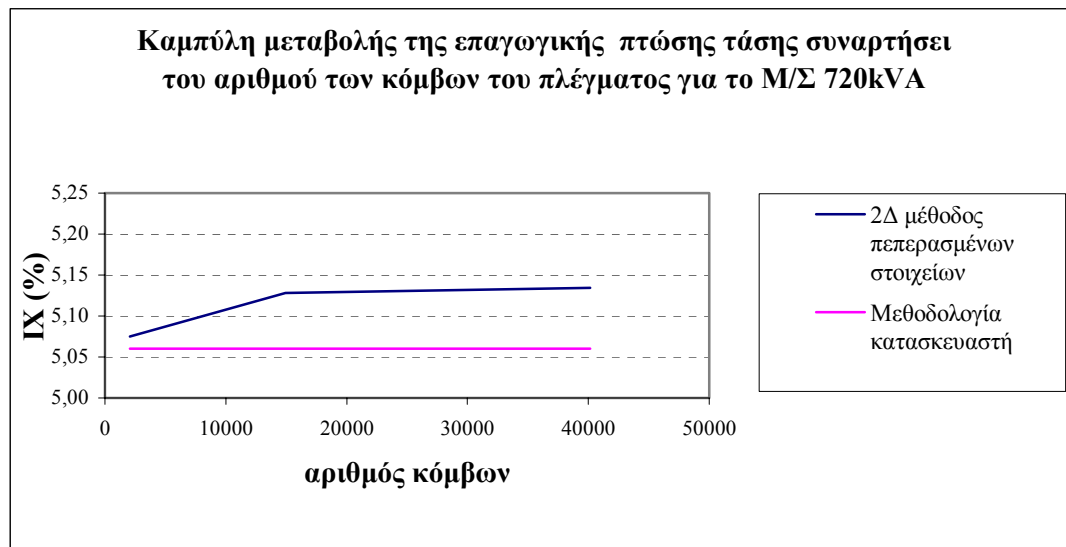
Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν με τη χρήση του προγράμματος FEMME για τον αριθμό των κόμβων και την επαγωγική πτώση τάσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.9.

**Πίνακας 2.9:** Τιμές της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το μετασχηματιστή 720 kVA.

Αριθμός κόμβων	Επαγωγική πτώση τάσης (%)
2088	5,075
14918	5,128
40161	5,134

Ο υπολογισμός της αντίστοιχης τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης που προέκυψε από τη μεθοδολογία του κατασκευαστή με βάση τα έντυπα υπολογισμού πυρήνα που αφορούν στο συγκεκριμένο μετασχηματιστή των 720 kVA, ομοίως με την περίπτωση των Μ/Σ 1250 kVA και 630 kVA, στηρίζεται στον υπολογισμό της επαγωγικής πτώσης τάσης με χρήση της σχέσης 2.15. Τώρα το IR υπολογίζεται για  $P_{Cu}=7.397$  W και 720 kVA, αντίστοιχα, ενώ η τιμή της τάσης βραχυκύκλωσης δίνεται από τον κατασκευαστή ίση με  $U_k=5,19\%$ . Έτσι, η επαγωγική πτώση τάσης υπολογίζεται ίση με 5,06%.

Η καμπύλη της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του αριθμού των κόμβων, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο FEMM, σε συνδυασμό με την αντίστοιχη καμπύλη η οποία προέκυψε στην περίπτωση υπολογισμού της επαγωγικής πτώσης τάσης με τη μεθοδολογία του κατασκευαστή, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.25.



**Σχήμα 2.25:** Καμπύλη μεταβολής της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το Μ/Σ 720 kVA.

Τα συμπεράσματα τα οποία αφορούν στο μετασχηματιστή 720kVA, είναι τα εξής:

Ως προς τα αποτελέσματα της δισδιάστατης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, η αύξηση του αριθμού των κόμβων συνοδεύεται από ολοένα μεγαλύτερη τιμή της επαγωγικής πτώσης τάσης, ενώ σε σχέση με τη μεθοδολογία που χρησιμοποιεί ο κατασκευαστής για τον υπολογισμό των αυτεπαγωγών σκέδασης του μετασχηματιστή, παρατηρείται πολύ καλή



προσέγγιση. Η μορφή της καμπύλης είναι παρόμοια με αυτή του Σχήματος 2.23. Τα πλέγματα των 15000 και 40000 κόμβων δίνουν και πάλι παρόμοια τιμή επαγωγικής πτώσης τάσης, αποδεικνύοντας έτσι ότι από τους 15000 κόμβους και πάνω, η ακρίβεια των υπολογισμών δεν επηρεάζεται σημαντικά από την πυκνότητα του πλέγματος.

## 2.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο, έγινε εφαρμογή της δισδιάστατης μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε τρεις διαφορετικούς τριφασικούς μετασχηματιστές της εταιρίας Σνεντέρ Ελεκτρικ ΑΕ. Η δισδιάστατη μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αυτεπαγωγής σκέδασης των μετασχηματιστών κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης, με σκοπό την εξαγωγή καμπυλών της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της πυκνότητας του πλέγματος. Η μέθοδος συγκρίθηκε με τη μεθοδολογία που χρησιμοποιεί ο κατασκευαστής για τον υπολογισμό των αυτεπαγωγών σκέδασης του εκάστοτε μετασχηματιστή και η οποία βασίζεται σε θεώρηση κυλινδρικής συμμετρίας και κατάλληλης τροποποίησης της γεωμετρίας του παραθύρου του Μ/Σ, παρουσιάζοντας μικρές αποκλίσεις για καθεμιά από τις περιπτώσεις των υπό μελέτη κατασκευασμένων μετασχηματιστών.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου για διάφορες πυκνότητες πλέγματος έδειξε ότι η μέθοδος δίνει καλή ακρίβεια με τη χρήση ενός μέσου αριθμού κόμβων, της τάξης των 15000 κόμβων. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται από το γεγονός ότι η υπολογιζόμενη τιμή επαγωγικής πτώσης τάσης είναι περίπου σταθερή από τους 15000 κόμβους και πάνω.

Η μόνη ατέλεια της μεθοδολογίας αυτής θα μπορούσε να οφείλεται στην προσέγγιση που υιοθετείται κατά την τροποποίηση της γεωμετρίας με βάση τους συντελεστές του Rogowski. Η εκτίμηση του σφάλματος που εισάγεται απαιτεί πλήρη τρισδιάστατη πεδιακή ανάλυση του Μ/Σ, η οποία δε θα αποτελέσει αντικείμενο αυτής της εργασίας. Έτσι, η δισδιάστατη μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υιοθετείται στα επόμενα κεφάλαια για τη μελέτη προσθήκης θωρακίσεων στο μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα με σκοπό την τροποποίηση των παραμέτρων του.

## 2.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] P. P. Silvester, R. L. Ferrari, “*Finite Elements for electrical engineers*”, Cambridge University Press.
- [2.2] D. Meeker, “*Finite Element Method Magnetics – Version 3.0 – User’s Manual*”. March 10, 2001
- [2.3] Schneider Electric, “*Τεχνικό Τετράδιο No.2 – Μετασχηματιστές Διανομής Λαδιού ΕΛΒΗΜ*”
- [2.4] Χ. Δικαιάκος, Κ. Μόφορη, “*Σχεδίαση Μετασχηματιστή Τυλιχτού Πυρήνα και Μελέτη Δυνάμεων σε Βραχυκύκλωμα*”. ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2001.
- [2.5] P. Hunter, A. Pullan, “*FEM / BEM Notes*”. Dept. of Engineering Science, Univ. of Auckland, N. Zealand, February 2001.

## ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΛΛΑΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετά τη μελέτη του μαγνητικού πεδίου των μετασχηματιστών 1250 kVA, 630kVA και 720kVA υπό συνθήκες βραχυκυκλώματος και χωρίς την προσθήκη θωρακίσεων, στο παρόν κεφάλαιο μελετώνται οι θωρακίσεις. Με την έννοια θωράκιση εννοείται η προσθήκη κάποιου υλικού μέσα ή γύρω από το μετασχηματιστή, το οποίο θα δράσει έτσι ώστε να προσελκύσει ή να απομακρύνει τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές του πεδίου σκέδασης των πηνίων, αυξομειώνοντας αντίστοιχα την τάση βραχυκύκλωσης [3.1]-[3.3].

Πιο συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η μαγνητική θωράκιση. Στα πλαίσια της μελέτης του πρώτου αυτού είδους θωράκισης, επιχειρείται η μοντελοποίηση της προσθήκης της μαγνητικής θωράκισης τόσο με οριακές συνθήκες όσο και με αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρικής της διαμόρφωσης υπό την έννοια της προσθήκης φύλλων σιδήρου στο κέλυφος του μετασχηματιστή [3.4].

### 3.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΩΡΑΚΙΣΗ

#### 3.2.1 Περιγραφή

Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση προσομοίωσης της μαγνητικής θωράκισης με οριακές συνθήκες. Κατά την κατασκευή του αντίστοιχου μοντέλου FEMM έχουν θεωρηθεί τρεις θωρακίσεις, μία πάνω και μία κάτω από το ενεργό μέρος και μία δίπλα από το ενεργό μέρος, γεγονός που προσομοιώνεται με την αφαίρεση των οριακών συνθηκών Dirichlet ( $\bar{A} = 0$ ) από τις τρεις αντίστοιχες εξωτερικές επιφάνειες του κελύφους του μετασχηματιστή. Έτσι, δεν επιβάλλεται καμμία οριακή συνθήκη στις εξωτερικές επιφάνειες του κελύφους. Ωστόσο, στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η μη επιβολή κάποιας άλλης οριακής συνθήκης στα εξωτερικά σύνορα της γεωμετρίας του μοντέλου ισοδυναμεί με επιβολή οριακής συνθήκης Neumann ( $\frac{\partial \bar{A}}{\partial n} = 0$ ) στις αντίστοιχες επιφάνειες. Η συνθήκη αυτή

αναπαριστά την ύπαρξη φύλλων σιδήρου πολύ μικρού πάχους στα εξωτερικά τοιχώματα του κελύφους, δεδομένου ότι, επιβάλλοντας σε αυτά μηδενική κάθετη παράγωγο του δυναμικού, περιγράφεται μαγνητικό πεδίο το οποίο διαπερνά κάθετα τις επιφάνειές τους (αναπαριστώντας έτσι το σύνορο μεταξύ αέρα και υλικού με μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα όπως είναι ο σίδηρος). Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης της μαγνητικής θωράκισης με αναπαράσταση της γεωμετρικής της διαμόρφωσης, θεωρώντας ότι υπάρχει κάποιο πάχος σιδήρου στο κέλυφος του μετασχηματιστή. Το συγκεκριμένο υλικό τοποθετείται με σκοπό να δράσει έτσι ώστε να προσελκύσει τις δυναμικές γραμμές του πεδίου σκέδασης των πηνίων, αυξάνοντας αντίστοιχα την τάση βραχυκύκλωσης. Στο Σχήμα 3.1 αναπαρίσταται η προσθήκη φύλλων σιδήρου στο κέλυφος στο μοντέλο FEMM. Στο μοντέλο αυτό έχουν θεωρηθεί τρία στρώματα σιδήρου, ένα πάνω και ένα κάτω από το ενεργό

μέρος και ένα δίπλα από το ενεργό μέρος. Το πάχος και των τριών στρώματων είναι ίσο με 5 mm και το πλάτος ίδιο με αυτό του ενεργού μέρους (375 mm). Η επιλογή των διαστάσεων έγινε κατά εκτίμηση, θα μπορούσε δηλαδή να θεωρηθεί ότι τα στρώματα σιδήρου φτάνουν μέχρι το τέλος του κελύφους ή να ληφθεί υπόψη λίγο μικρότερο ή μεγαλύτερο πάχος σιδήρου. Το υλικό του σιδήρου δεν είναι ίδιο με αυτό του πυρήνα (Iron mu 1000: σίδηρος με γραμμική καμπύλη μαγνήτισης και μαγνητική διαπερατότητα ίση με 1000) αλλά είναι ένα άλλο υλικό της βιβλιοθήκης του προγράμματος (M45 steel). Αυτή η αλλαγή έγινε για να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι το υλικό έχει διαφορετικό  $\mu$  (μαγνητική διαπερατότητα) από αυτή του πυρήνα και η σχέση B-H είναι μη γραμμική. Επιπλέον, το πλέγμα στα στρώματα σιδήρου είναι αναγκαστικά πιο πυκνό, επειδή το πάχος του είναι μικρό και χρειάζονται μερικές επιπλέον στρώσεις τριγώνων πλέγματος για τη σωστή αναπαράσταση του υλικού. Επισημαίνεται ότι, όταν η προσθήκη θωρακίσεων μοντελοποιείται με την πραγματική γεωμετρία του Σχήματος 3.1, γίνεται επαναφορά των συνθηκών Dirichlet στο κέλυφος (σε αντίθεση με τη μοντελοποίηση της θωράκισης με τον πρώτο τρόπο).

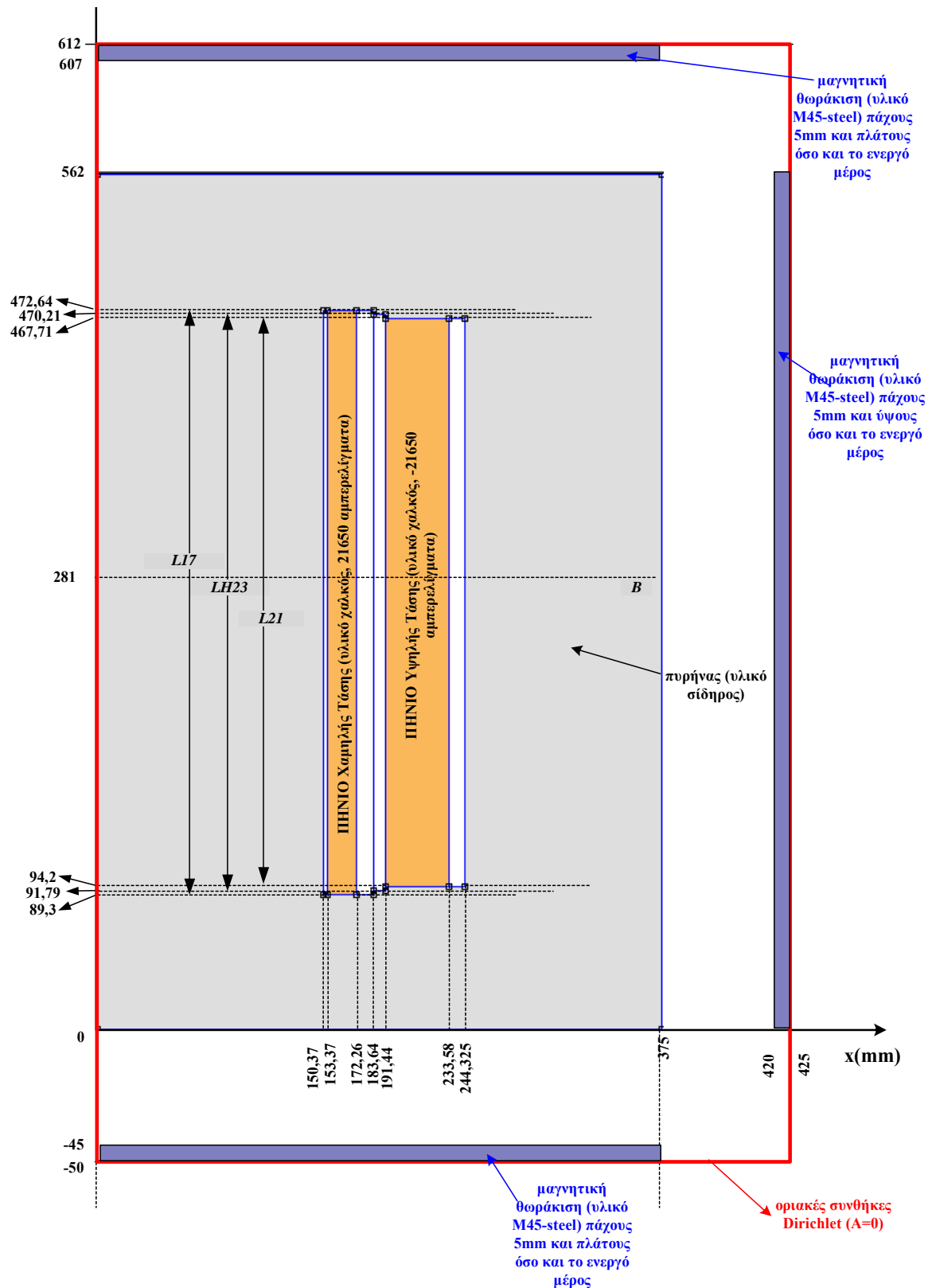
### 3.2.2 Προσομοίωση προσθήκης μαγνητικής θωράκισης με οριακές συνθήκες

Για την προσομοίωση της μαγνητικής θωράκισης με οριακές συνθήκες κατασκευάστηκε αρχικά αραιό πλέγμα (περίπου 2000 κόμβων) με βάση το μοντέλο FEMM M/Σ 1250 kVA (το οποίο περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2) και για απόσταση ανάμεσα στο κέλυφος και στον πυρήνα του μετασχηματιστή ίση με 20 mm. Στη συνέχεια, το αρχικό αυτό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή πυκνότερων πλεγμάτων (περίπου 15000 και 40000 κόμβων). Επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή νέων μοντέλων μαγνητικής θωράκισης με αύξηση των αποστάσεων του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή (50 mm και 100 mm) του αρχικού μοντέλου και διαδοχικά κατασκευή πυκνότερου πλέγματος 15.000 κόμβων και 40.000 κόμβων. Σε κάθε περίπτωση έγινε η απαραίτητη σύγκριση με τα αντίστοιχα μοντέλα χωρίς θωρακίσεις, τα οποία προέκυψαν με επαναφορά των οριακών συνθηκών Dirichlet στις τρεις επιφάνειες του κελύφους του μετασχηματιστή. Η χρήση διαφορετικών πυκνοτήτων πλέγματος έγινε για να διαπιστωθεί η επίπτωση του αριθμού των κόμβων στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων (η χρήση τριών πλεγμάτων μικρής, μέσης και μεγάλης πυκνότητας υιοθετείται στη μελέτη κάθε είδους θωράκισης, τόσο του παρόντος όσο και του επόμενου κεφαλαίου, έτσι ώστε από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους να προκύπτουν ασφαλή συνολικά συμπεράσματα για τη μεταβολή των παραμέτρων του μετασχηματιστή).

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, για δεδομένη πυκνότητα πλέγματος και με βάση την τιμή της μαγνητικής ενέργειας του μοντέλου, υπολογίστηκε η επαγωγική πτώση τάσης, για την περίπτωση της μαγνητικής θωράκισης με οριακές συνθήκες, ενώ ο υπολογισμός των ποσοστιαίων μεταβολών της επαγωγικής πτώσης τάσης βοήθησε στην εξαγωγή καμπυλών μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους και κατά επέκταση των τριών μαγνητικών θωρακίσεων από τον πυρήνα για τις τρεις περιπτώσεις πλεγμάτων των 2.000 κόμβων, 15.000 κόμβων και 40.000 κόμβων. Η μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης προέκυψε από τη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης, παραγωγίζοντας τη σχέση (3.1), η οποία δίνει την τάση βραχυκύκλωσης (και λαμβάνοντας υπόψη ότι η ωμική πτώση τάσης παραμένει σταθερή). Έτσι, προέκυψε ότι η μεταβολή στην τάση βραχυκύκλωσης  $\Delta U_k$  είναι ίση με την υπολογιζόμενη  $\Delta IX$ .

$$U_k (\%) = \sqrt{(IX)^2 + (IR)^2} \Rightarrow \Delta U_k = \Delta IX \quad (3.1)$$

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη μελέτη της μαγνητικής θωράκισης οδήγησε στην κατασκευή των ακόλουθων συγκεντρωτικών πινάκων και στην εξαγωγή συμπερασμάτων.



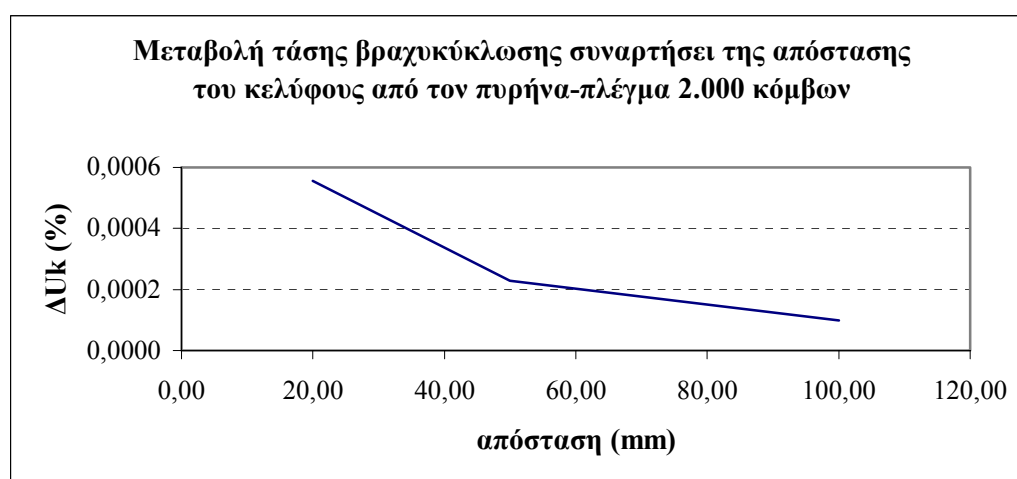
**Σχήμα 3.1:** Μοντέλο FEMM για την αναπαράσταση της μαγνητικής θωράκισης.

Για την περίπτωση του αραιού πλέγματος των 2.000 κόμβων, στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 3.1) παραθέτονται οι αποστάσεις (20 έως 100 mm) του κελύφους του μετασχηματιστή από τον πυρήνα, οι οποίες αποτελούν τις μεταβαλλόμενες παραμέτρους του αντίστοιχου μοντέλου, οι προκύπτουσες τιμές της επαγωγικής πτώσης τάσης με θωράκιση

και χωρίς θωράκιση, καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης, η οποία είναι ίση με την ποσοστιαία μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης. Επίσης, στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται το διάγραμμα που προέκυψε για τη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης ως συνάρτησης της απόστασης του κελύφους, δηλαδή των μαγνητικών θωρακίσεων από τον πυρήνα, από το οποίο είναι εμφανές το γεγονός ότι η αύξηση της απόστασης συνεπάγεται μείωση της μεταβολής (αύξησης) της τάσης βραχυκύκλωσης.

**Πίνακας 3.1:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα της τάξης των 2.000 κόμβων.

2.000 κόμβοι			
απόσταση του κελύφους από τον πυρήνα σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	$\Delta IX$
20	5,866240	5,866208	5,550091E-04
50	5,859684	5,859671	2,287881E-04
100	5,852338	5,852332	9,817499E-05

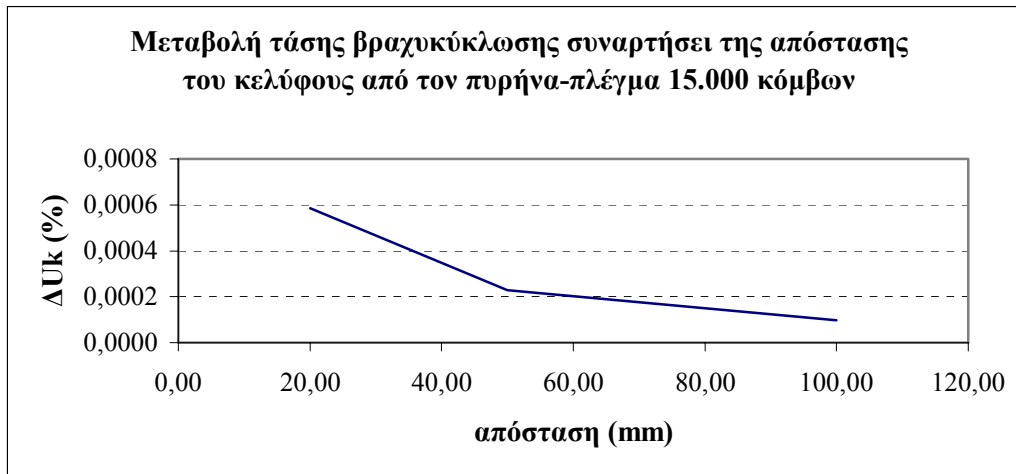


**Σχήμα 3.2 :** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα 2.000 κόμβων.

Επαναλαμβάνοντας την προηγούμενη διαδικασία για την περίπτωση πλέγματος της τάξης των 15.000 κόμβων, το οποίο είναι ένα ενδιάμεσο πλέγμα με καλή πυκνότητα και χωρίς μεγάλο χρόνο εκτέλεσης, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα για την περίπτωση μεταβολής της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή, τα οποία υπό μορφή πίνακα (Πίνακας 3.2), αλλά και γραφήματος (Σχήμα 3.3), παρουσιάζονται ως εξής:

**Πίνακας 3.2:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα της τάξης των 15.000 κόμβων.

15.000 κόμβοι			
απόσταση του κελύφους από τον πυρήνα σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	$\Delta IX$
20	5,896776	5,896741	5,846137E-04
50	5,894677	5,894663	2,274299E-04
100	5,903787	5,903781	9,731943E-05

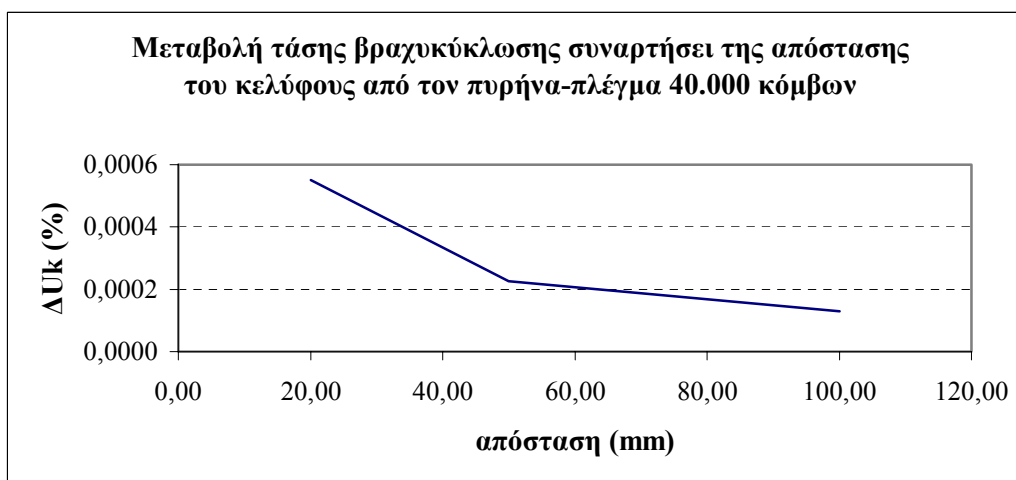


**Σχήμα 3.3:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα 15.000 κόμβων.

Με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν για την περίπτωση πυκνού πλέγματος (40.000 κόμβοι), ολοκληρώνεται η αναφορά στην προσομοίωση της προσθήκης μαγνητικής θωράκισης με οριακές συνθήκες. Ακολουθούν ο πίνακας και το γράφημα που αφορούν στις μεταβαλλόμενες αποστάσεις του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή, καθώς και στις προκύπτουσες τιμές για την επαγωγική πτώση τάσης:

**Πίνακας 3.3:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα της τάξης των 40.000 κόμβων.

40.000 κόμβοι			
απόσταση του κελύφους από τον πυρήνα σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
20	5,907125	5,907093	5,511676E-04
50	5,907058	5,907045	2,269532E-04
100	5,907047	5,907039	1,296877E-04



**Σχήμα 3.4:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα 40.000 κόμβων.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Η αύξηση της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή για την περίπτωση του αραιού πλέγματος, από την τιμή των 20 mm έως τα 100 mm συνεπάγεται αντίστοιχα μείωση της μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης. Η μέγιστη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης δίνεται στην περίπτωση που η απόσταση γίνεται ελάχιστη και ίση με 20 mm.

Τα αποτελέσματα για το ενδιάμεσο πλέγμα της τάξης των 15.000 κόμβων είναι παρόμοια με αυτά που προέκυψαν με τη χρήση του αραιού πλέγματος: η αύξηση της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή από 20 mm έως 100 mm συνεπάγεται αντίστοιχα ολοένα και μικρότερη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης. Η μεγαλύτερη μεταβολή (αύξηση) της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης παρουσιάζεται και πάλι στην περίπτωση της ελάχιστης απόστασης κελύφους πυρήνα, η οποία λήφθηκε ίση με 20 mm.

Όπως και στο αραιό και ενδιάμεσο πλέγμα, έτσι και στην περίπτωση του πυκνού πλέγματος, η μέγιστη μεταβολή (αύξηση) της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης παρουσιάζεται στην περίπτωση της ελάχιστης απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή, η οποία λήφθηκε ίση με 100 mm. Επίσης, η αύξηση της απόστασης συνεπάγεται την ολοένα μικρότερη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης.

Σε κάθε περίπτωση πλέγματος, η προσθήκη μαγνητικής θωράκισης έδωσε πολύ μικρές μεταβολές στην τάση βραχυκύκλωσης (κάτω του 0,001%). Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν η μοντελοποίηση με οριακές συνθήκες επηρέασε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων (δεδομένου ότι αποτελεί προσεγγιστική αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρίας των θωρακίσεων), κρίθηκε σκόπιμη η επανάληψη της ανάλυσης, με αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρικής τους διαμόρφωσης, η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

### 3.2.3 Προσομοίωση προσθήκης μαγνητικής θωράκισης με αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρικής της διαμόρφωσης

Για την ανάλυση αυτής της παραγράφου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο FEMM του Σχήματος 3.1. Αρχικά κατασκευάστηκε αραιό πλέγμα περίπου 4000 κόμβων για τον εξεταζόμενο Μ/Σ 1250 kVA<sup>1</sup>. Στη συνέχεια, με βάση το αρχικό αυτό μοντέλο κατασκευάστηκαν πυκνότερα πλέγματα (περίπου 15000 και 40000 κόμβων). Επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή νέων μοντέλων με μείωση των αποστάσεων του κελύφους (και κατά επέκταση της μαγνητικής θωράκισης που βρίσκεται στις εξωτερικές επιφάνειές του) από τον πυρήνα του μετασχηματιστή του αρχικού μοντέλου και διαδοχικά με αύξηση του πάχους των αρχικών θωρακίσεων με τις αρχικές αποστάσεις του κελύφους από τον πυρήνα. Ακολούθησε αύξηση του πάχους των αρχικών θωρακίσεων με μειωμένες αποστάσεις κελύφους από τον πυρήνα (συνδυασμένη μεταβολή παραμέτρων θωράκισης) και για τις τρεις προαναφερόμενες πυκνότητες πλέγματος των 4.000, 15.000 και 40.000 κόμβων. Σε κάθε περίπτωση αλλαγής των διαστάσεων της θωράκισης έγινε προσπάθεια να διατηρηθεί η αρχική δομή του πλέγματος, έτσι ώστε να μην υπάρχουν μεταβολές που οφείλονται σε αλλαγή του πλέγματος. Σε κάθε περίπτωση έγινε η απαραίτητη σύγκριση με τα αντίστοιχα μοντέλα χωρίς θωρακίσεις, τα οποία προέκυψαν με την προσθήκη αέρα στο υλικό των περιοχών όπου

<sup>1</sup> Το πλέγμα αυτό έχει πιο πολλούς κόμβους από το αντίστοιχο αραιό πλέγμα της Παραγράφου 3.2.2 (των 2000 κόμβων), επειδή, η καλύτερη αναπαράσταση των περιοχών της θωράκισης (που είναι φύλλα σιδήρου πολύ μικρού πάχους σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις του μοντέλου) απαιτούσε περισσότερες στρώσεις τριγώνων και κατά συνέπεια μεγαλύτερο αριθμό κόμβων.



υπάρχουν θωρακίσεις, έτσι ώστε να μην αλλάζει η γεωμετρία του μοντέλου και υπάρχουν μεταβολές που οφείλονται σε αλλαγή του πλέγματος.

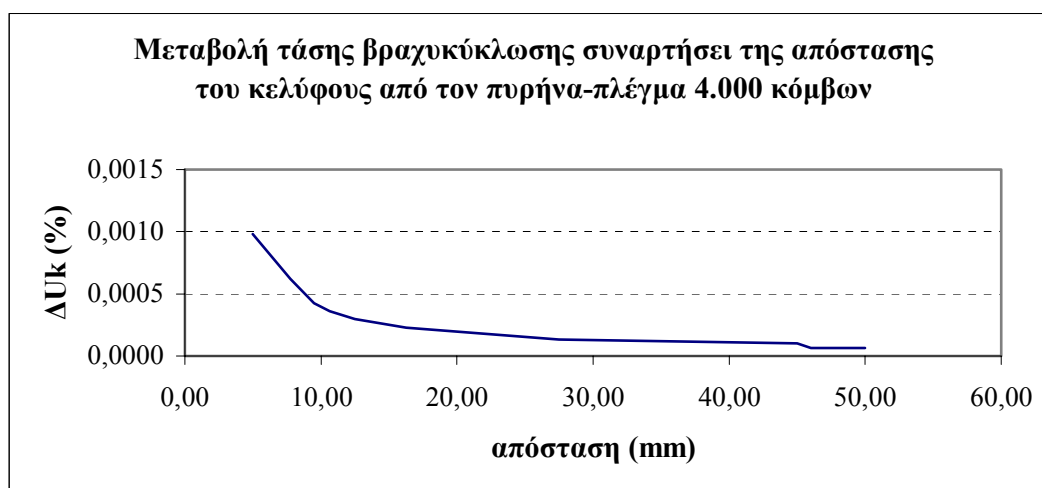
Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, για δεδομένη πυκνότητα πλέγματος και με βάση την τιμή της μαγνητικής ενέργειας του μοντέλου, υπολογίστηκε η επαγωγική πτώση τάσης, για την περίπτωση της μαγνητικής θωράκισης, ενώ ο υπολογισμός των ποσοστιαίων μεταβολών της μαγνητικής ενέργειας βοήθησε στην εξαγωγή καμπυλών μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης των μαγνητικών θωρακίσεων από τον πυρήνα καθώς και της αύξησης του πάχους τους για τις τρεις περιπτώσεις πλεγμάτων των 4.000 κόμβων, 15.000 κόμβων και 40.000 κόμβων. Η μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης προέκυψε από τη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης, σύμφωνα με τη σχέση (3.1), όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.2.2.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη μελέτη της μαγνητικής θωράκισης οδήγησε στην κατασκευή των ακόλουθων συγκεντρωτικών πινάκων και στην εξαγωγή συμπερασμάτων.

Για την περίπτωση του αραιού πλέγματος των 4.000 κόμβων, στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 3.4) παραθέτονται οι αποστάσεις (6 έως 50 mm) του κελύφους του μετασχηματιστή από τον πυρήνα, οι οποίες αποτελούν τις μεταβαλλόμενες παραμέτρους του αντίστοιχου μοντέλου, οι προκύπτουσες τιμές της επαγωγικής πτώσης τάσης με θωράκιση και χωρίς θωράκιση, καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης, η οποία είναι ίση με την ποσοστιαία μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης. Επίσης, στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται το διάγραμμα που προέκυψε για τη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης ως συνάρτησης της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα, από το οποίο είναι εμφανές το γεγονός ότι η αύξηση της απόστασης συνεπάγεται μείωση της μεταβολής (αύξησης) της τάσης βραχυκύκλωσης.

**Πίνακας 3.4:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα της τάξης των 4.000 κόμβων (πλάτος θωράκισης ίσο με 375 mm και πάχος ίσο με 5 mm).

4.000 κόμβοι			
απόσταση του κελύφους από τον πυρήνα σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
6	5,858193	5,858135	9,807774E-04
7,75	5,857315	5,857279	6,212498E-04
9,5	5,859089	5,859064	4,249362E-04
10,625	5,857327	5,857306	3,596693E-04
12,5	5,859077	5,859060	2,941868E-04
16,25	5,857208	5,857195	2,288848E-04
27,5	5,858505	5,858497	1,307622E-04
45	5,856909	5,856904	9,809836E-05
46	5,858503	5,858499	6,538110E-05
49	5,856909	5,856906	6,539889E-05
50	5,857248	5,857245	6,539510E-05

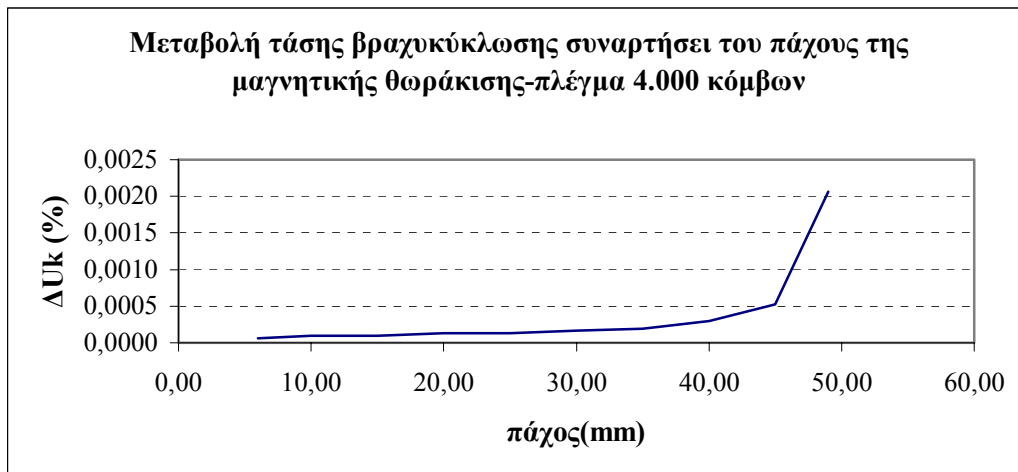


**Σχήμα 3.5:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα 4.000 κόμβων (πλάτος θωράκισης ίσο με 375 mm και πάχος ίσο με 5 mm).

Στη συνέχεια, εξετάζεται η περίπτωση στην οποία ως μεταβαλλόμενη παράμετρος και κριτήριο που δύναται να επιδράσει στη συμπεριφορά του μετασχηματιστή λαμβάνεται η αύξηση του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων. Έτσι, για αύξηση του πάχους από 6 έως 49 mm και πάντα για την περίπτωση αραιού πλέγματος, προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5 και στο γράφημα του Σχήματος 3.6 που ακολουθούν:

**Πίνακας 3.5:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του πάχους της μαγνητικής θωράκισης για πλέγμα της τάξης των 4.000 κόμβων (απόσταση κελύφους από πυρήνα ίση με 50 mm).

4.000 κόμβοι			
πάχος θωράκισης σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
6	5,855890	5,855887	6,541027E-05
10	5,856986	5,856980	9,809708E-05
15	5,859342	5,859336	9,805764E-05
20	5,860700	5,860692	1,307133E-04
25	5,857934	5,857926	1,307750E-04
30	5,857871	5,857861	1,634705E-04
35	5,858235	5,858223	1,961525E-04
40	5,856237	5,856220	2,943294E-04
45	5,856844	5,856814	5,231993E-04
49	5,861278	5,861157	2,058571E-03



**Σχήμα 3.6:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του πάχους της μαγνητικής θωράκισης για πλάτος ίσο με 375 mm και πλέγμα 4.000 κόμβων (απόσταση κελύφους από τον πυρήνα ίση με 50 mm).

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση της μελέτης της μαγνητικής θωράκισης για την περίπτωση του αραιού πλέγματος, έγινε ένας συνδυασμός των παραμέτρων που ελήφθησαν μέχρι τώρα υπόψη, δηλαδή της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή και του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης, καθώς και για τις τιμές της με και χωρίς θωράκιση παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6 που ακολουθεί.

**Πίνακας 3.6:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων με μειωμένες αποστάσεις του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα της τάξης των 4.000 κόμβων.

4.000 κόμβοι			
συνδυασμός παραμέτρων	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔΙΧ
πάχος θωράκισης=6 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,855599	5,855596	6,541352E-05
πάχος θωράκισης=10 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,857691	5,857687	6,539016E-05
πάχος θωράκισης=15 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,858727	5,858723	6,537860E-05
πάχος θωράκισης=20 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,857988	5,857980	1,307738E-04
πάχος θωράκισης=25 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,857924	5,857915	1,634690E-04
πάχος θωράκισης=30 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,857800	5,857790	1,634725E-04
πάχος θωράκισης=35 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,855691	5,855676	2,616505E-04
πάχος θωράκισης=40 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,859039	5,859012	4,576276E-04
πάχος θωράκισης=6 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=27,5mm	5,855665	5,855657	1,308257E-04
πάχος θωράκισης=10 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=27,5mm	5,856649	5,856641	1,308037E-04
πάχος θωράκισης=15 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=27,5mm	5,856298	5,856285	2,289204E-04
πάχος θωράκισης=20 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=27,5mm	5,858271	5,858250	3,596113E-04
πάχος θωράκισης=6 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=12,5mm	5,858838	5,858819	3,268877E-04

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Η αύξηση της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή από την τιμή των 6 mm έως τα 46 mm συνεπάγεται αντίστοιχα μείωση της μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης, ενώ η περαιτέρω αύξηση της απόστασης του κελύφους μέχρι την τιμή των 50 mm συνοδεύεται από αμελητέα αύξηση της μεταβολής της επαγωγικής πτώσης τάσης, οφειλόμενη σε μεταβολές του πλέγματος, (ουσιαστικά, για απόσταση μεταξύ 46 και 50 mm, η μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης παραμένει περίπου σταθερή και ίση με την ελάχιστη τιμή της). Η μέγιστη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης δίνεται στην περίπτωση που η απόσταση γίνεται ελάχιστη και ίση με 6 mm.

Όσον αφορά στο πάχος της μαγνητικής θωράκισης για αύξηση από 6 mm έως 49 mm, παρατηρείται ολοένα μεγαλύτερη μεταβολή της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης, δηλαδή στο μέγιστο πάχος θωράκισης, η μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης γίνεται μέγιστη.

Η ταυτόχρονη μεταβολή των παραμέτρων της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα και του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων, ως κριτήριο για την αξιολόγηση των

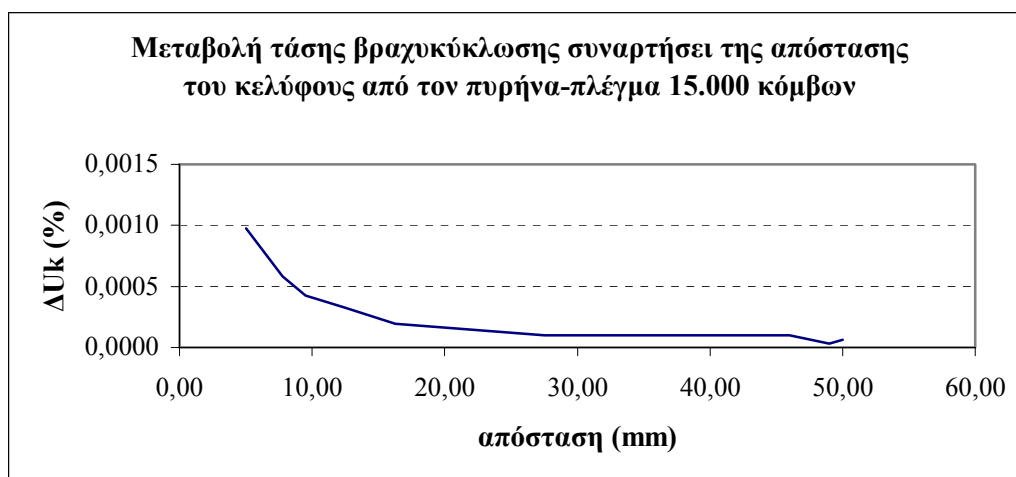
αποτελεσμάτων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στην περίπτωση που η απόσταση του κελύφους από τον πυρήνα διατηρείται σταθερή και μεταβάλλεται μόνο το πάχος των μαγνητικών θωρακίσεων, σημειώνεται μικρή αυξητική μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης. Εναλλακτικά, η διατήρηση της διάστασης του πάχους των θωρακίσεων σταθερού με ταυτόχρονη αύξηση της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα προκαλεί μείωση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης, ενώ η μέγιστη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης αντιστοιχεί στην περίπτωση που η απόσταση του κελύφους από τον πυρήνα μειώνεται στην τιμή των 46 mm και ταυτόχρονα σημειώνεται αύξηση του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων κατά 35 mm.

Επαναλαμβάνοντας την προηγούμενη διαδικασία για την περίπτωση πλέγματος της τάξης των 15.000 κόμβων, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα για την περίπτωση μεταβολής της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή, τα οποία υπό μορφή πίνακα (Πίνακας 3.7), αλλά και γραφήματος (Σχήμα 3.7), παρουσιάζονται ως εξής:

**Πίνακας 3.7:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα της τάξης των 15.000 κόμβων (πλάτος θωράκισης ίσο με 375 mm και πάχος ίσο με 5 mm).

15.000 κόμβοι			
απόσταση του κελύφους από τον πυρήνα σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
6	5,896519	5,896462	9,744024E-04
7,75	5,896563	5,896529	5,846348E-04
9,5	5,896688	5,896663	4,222267E-04
10,625	5,897754	5,897731	3,896771E-04
12,5	5,896680	5,896661	3,247898E-04
16,25	5,896827	5,896816	1,948688E-04
27,5	5,897051	5,897046	9,743059E-05
45	5,897159	5,897153	9,742882E-05
46	5,897044	5,897038	9,743072E-05
49	5,897092	5,897090	3,247662E-05
50	5,897281	5,897277	6,495118E-05

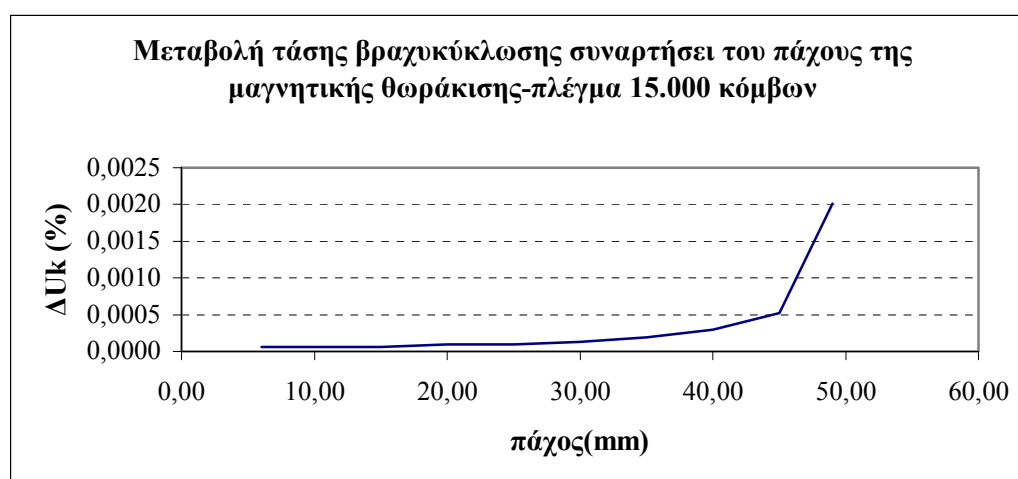
**Σχήμα 3.7:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα 15.000 κόμβων (πλάτος θωράκισης ίσο με 375 mm και πάχος ίσο με 5 mm).



Προχωρώντας στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν από τη μελέτη της γεωμετρίας της μαγνητικής θωράκισης για την περίπτωση του κανονικού πλέγματος, τα αποτελέσματα στα οποία οδήγησε η αύξηση του πάχους των θωρακίσεων διαμορφώνονται στον Πίνακα 3.8 και στο Σχήμα 3.8, ως εξής:

**Πίνακας 3.8:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του πάχους της μαγνητικής θωράκισης για πλέγμα της τάξης των 15.000 κόμβων (απόσταση κελύφους από πυρήνα ίση με 50 mm).

15.000 κόμβοι			
πάχος θωράκισης σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
6	5,896760	5,896757	6,495691E-05
10	5,896274	5,896270	6,496227E-05
15	5,897048	5,897044	6,495375E-05
20	5,896699	5,896693	9,743642E-05
25	5,896645	5,896640	9,743730E-05
30	5,896552	5,896544	1,299185E-04
35	5,897182	5,897170	1,948571E-04
40	5,896684	5,896666	2,923106E-04
45	5,896270	5,896239	5,197009E-04
49	5,897124	5,897005	2,013579E-03



**Σχήμα 3.8:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του πάχους της μαγνητικής θωράκισης για πλάτος ίσο με 375 mm και πλέγμα 15.000 κόμβων (απόσταση κελύφους από τον πυρήνα ίση με 50 mm).

Όπως και στο αραιό πλέγμα, το τελευταίο κριτήριο το οποίο λαμβάνεται ως παράγοντας που επιδρά στα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή, ο οποίος εξοπλίζεται με μαγνητική θωράκιση, αποτελεί η συνδυασμένη μεταβολή των παραμέτρων που λήφθηκαν μέχρι τώρα υπόψη, δηλαδή της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή και του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αφορούν στη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης, καθώς και στις τιμές της με και χωρίς θωράκιση παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα, (Πίνακας 3.9):

**Πίνακας 3.9:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων με μειωμένες αποστάσεις του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα της τάξης των 15.000 κόμβων.

15.000 κόμβοι			
συνδυασμός παραμέτρων	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
πάχος θωράκισης=6 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,897207	5,897203	6,495200E-05
πάχος θωράκισης=10 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,897076	5,897071	9,743018E-05
πάχος θωράκισης=15 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,897674	5,897668	9,742031E-05
πάχος θωράκισης=20 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,896513	5,896506	1,299194E-04
πάχος θωράκισης=25 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,896808	5,896801	1,299129E-04
πάχος θωράκισης=30 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,897534	5,897524	1,623711E-04
πάχος θωράκισης=35 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,896552	5,896536	2,598374E-04
πάχος θωράκισης=40 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,896019	5,895992	4,547573E-04
πάχος θωράκισης=6 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=27,5mm	5,897128	5,897122	9,742933E-05
πάχος θωράκισης=10 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=27,5mm	5,896961	5,896952	1,623869E-04
πάχος θωράκισης=15 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=27,5mm	5,896923	5,896910	2,273433E-04
πάχος θωράκισης=20 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=27,5mm	5,896749	5,896730	3,247860E-04
πάχος θωράκισης=6 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=12,5mm	5,897645	5,897624	3,572105E-04

Τα συμπεράσματα, τα οποία προκύπτουν για το ενδιαμέσο πλέγμα της τάξης των 15.000 κόμβων είναι παρόμοια με αυτά του αραιού πλέγματος και συνοψίζονται στα εξής:

Η αύξηση της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή από 6 mm έως 50 mm συνεπάγεται αντίστοιχα ολοένα και μικρότερη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης, εκτός από την περίπτωση που η απόσταση λαμβάνεται ίση με 46 mm, όπου η τάση βραχυκύκλωσης, είναι ελάχιστη μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση απόστασης ίσης με 45 mm. Η ελάχιστη μεταβολή της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης αντιστοιχεί σε απόσταση 49 mm και όχι στη μέγιστη απόσταση των 50 mm, ενώ η μεγαλύτερη μεταβολή-αύξηση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης παρουσιάζεται στην περίπτωση της ελάχιστης απόστασης κελύφους πυρήνα, η οποία λήφθηκε ως ίση με 6 mm.

Όσον αφορά στη μεταβολή της παραμέτρου του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αύξηση του πάχους από 1 mm έως 44 mm, συνοδεύεται από αυξητική μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης. Η μέγιστη τιμή που λαμβάνεται για τη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης αντιστοιχεί σε μέγιστο πάχος ίσο με 49 mm.

Η ταυτόχρονη μεταβολή δύο παραμέτρων, του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων και της απόστασης μεταξύ του κελύφους και του πυρήνα του μετασχηματιστή, ως κριτήριο

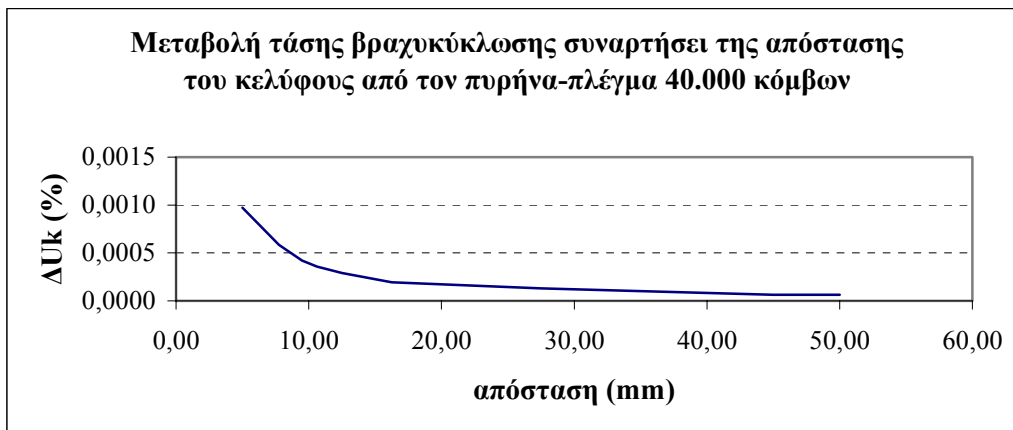
για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μαγνητικής θωράκισης, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι όταν η απόσταση κελύφους - πυρήνα διατηρείται σταθερή και μεταβάλλεται μόνο το πάχος των θωρακίσεων, σημειώνεται μικρή αυξητική μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης. Εναλλακτικά, εάν το πάχος των θωρακίσεων παραμείνει σταθερό, η αύξηση της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα οδηγεί όπως και στην περίπτωση του αραιού πλέγματος σε μείωση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης, ενώ και πάλι η μέγιστη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης αντιστοιχεί σε μειωμένη απόσταση του κελύφους από τον πυρήνα ίση με 46 mm και ταυτόχρονη αύξηση του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων στην τιμή των 40 mm.

Με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν για την περίπτωση πυκνού πλέγματος (40.000 κόμβοι), ολοκληρώνεται η αναφορά στην προσομοίωση της προσθήκης μαγνητικής θωράκισης, η οποία βασίστηκε σε αναπαράσταση της πραγματικής της διαμόρφωσης. Ακολουθούν οι πίνακες και τα γραφήματα που αφορούν στις μεταβαλλόμενες κάθε φορά παραμέτρους οι οποίες ελήφθησαν υπόψη, καθώς και στις προκύπτουσες τιμές για την επαγωγική πτώση τάσης:

**Πίνακας 3.10:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα της τάξης των 40.000 κόμβων (πλάτος θωράκισης ίσο με 375 mm και πάχος ίσο με 5 mm).

40.000 κόμβοι			
απόσταση του κελύφους από τον πυρήνα σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
6	5,906229	5,906172	9,728005E-04
7,75	5,906252	5,906217	5,836758E-04
9,5	5,906202	5,906177	4,215465E-04
10,625	5,906239	5,906217	3,566907E-04
12,5	5,906194	5,906177	2,918399E-04
16,25	5,906231	5,906219	1,945585E-04
27,5	5,906164	5,906156	1,297071E-04
45	5,906193	5,906189	6,485318E-05
46	5,906160	5,906156	6,485353E-05
49	5,906194	5,906191	6,485316E-05
50	5,906212	5,906208	6,485297E-05



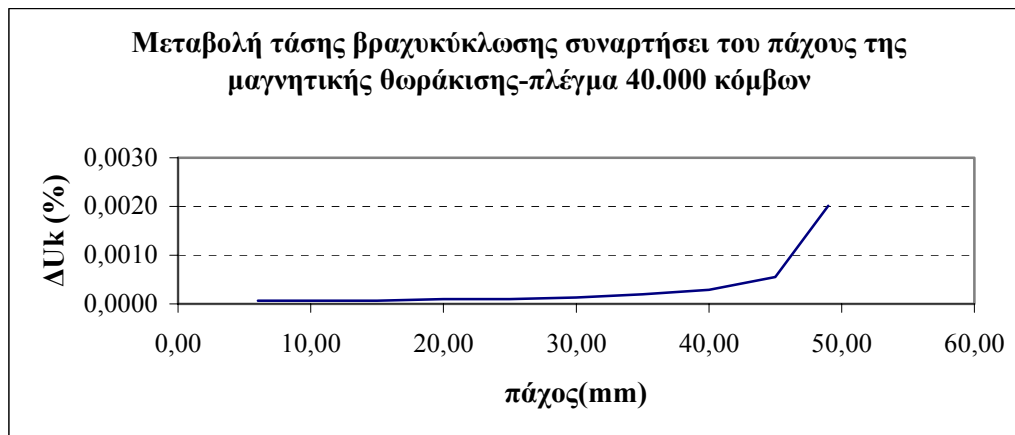


**Σχήμα 3.9:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα 40.000 κόμβων (πλάτος θωράκισης ίσο με 375 mm και πάχος ίσο με 5 mm).

Μετά τη μελέτη του τρόπου μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν με βάση τις μεταβολές του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων για την περίπτωση του πυκνού πλέγματος, (Πίνακας 3.11 και Σχήμα 3.10):

**Πίνακας 3.11:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του πάχους της μαγνητικής θωράκισης για πλέγμα της τάξης των 40.000 κόμβων (απόσταση κελύφους από πυρήνα ίση με 50 mm).

40.000 κόμβοι			
πάχος θωράκισης σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
6	5,906210	5,906206	6,485299E-05
10	5,906290	5,906286	6,485210E-05
15	5,906208	5,906204	6,485301E-05
20	5,906248	5,906242	9,727888E-05
25	5,906194	5,906189	9,727977E-05
30	5,906240	5,906233	1,297054E-04
35	5,906227	5,906216	1,945586E-04
40	5,906193	5,906175	2,918400E-04
45	5,906210	5,906177	5,512531E-04
49	5,906296	5,906177	2,010452E-03



**Σχήμα 3.10:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του πάχους της μαγνητικής θωράκισης για πλάτος ίσο με 375 mm και πλέγμα 40.000 κόμβων (απόσταση κελύφους από τον πυρήνα ίση με 50 mm).

**Πίνακας 3.12:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων με μειωμένες αποστάσεις του κελύφους από τον πυρήνα για πλέγμα της τάξης των 40.000 κόμβων.

40.000 κόμβοι			
συνδυασμός παραμέτρων	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
πάχος θωράκισης=6 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,906294	5,906290	6,485206E-05
πάχος θωράκισης=10 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,906217	5,906214	6,485290E-05
πάχος θωράκισης=15 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,906254	5,906248	9,727879E-05
πάχος θωράκισης=20 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,906179	5,906172	1,297067E-04
πάχος θωράκισης=25 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,906189	5,906179	1,621332E-04
πάχος θωράκισης=30 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,906262	5,906252	1,621312E-04
πάχος θωράκισης=35 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,906187	5,906172	2,594135E-04
πάχος θωράκισης=40 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=46mm	5,906208	5,906183	4,215461E-04
πάχος θωράκισης=6 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=27,5mm	5,906239	5,906231	1,297054E-04
πάχος θωράκισης=10 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=27,5mm	5,906183	5,906175	1,297066E-04
πάχος θωράκισης=15 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=27,5mm	5,906242	5,906231	1,945581E-04
πάχος θωράκισης=20 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=27,5mm	5,906204	5,906185	3,242661E-04
πάχος θωράκισης=6 mm & απόσταση κελύφους-πυρήνα=12,5mm	5,906239	5,906217	3,566907E-04

Το τελευταίο κριτήριο το οποίο λαμβάνεται υπόψη και στη μελέτη της περίπτωσης του μοντέλου πυκνού πλέγματος, αποτελεί ο συνδυασμός των παραμέτρων που ελήφθησαν μέχρι τώρα υπόψη, δηλαδή των αποστάσεων του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή και της αύξησης του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αφορούν στη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης, καθώς και στις τιμές της με και χωρίς θωράκιση παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.12.

Τα συμπεράσματα για το μοντέλο των 40.000 κόμβων, είναι παρόμοια με αυτά των δύο προηγούμενων πλεγμάτων, με πολύ μικρές διαφοροποιήσεις:

Η μέγιστη μεταβολή - αύξηση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης παρουσιάζεται στην περίπτωση της ελάχιστης απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή, η οποία λήφθηκε ίση με 6 mm. Επίσης, όπως ίσχυε και για το ενδιάμεσο πλέγμα των 15.000 κόμβων, η αύξηση της απόστασης συνεπάγεται την ολοένα μικρότερη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης, με εξαίρεση την περίπτωση που η απόσταση λαμβάνεται ίση με 46 mm, όπου σημειώνεται αμελητέα αύξηση της τιμής της μεταβολής της επαγωγικής πτώσης τάσης, καθώς είναι ελάχιστη μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση της αμέσως μικρότερης απόστασης κελύφους - πυρήνα (45 mm).

Επίσης, η αύξηση του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων από 1 έως 44 mm συνοδεύεται από αυξητική μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης. Η μέγιστη τιμή που αποκτά το πάχος είναι ίση με 44mm και προκαλεί τη μεγαλύτερη αύξηση στην τιμή της τάσης βραχυκύκλωσης.

Η ταυτόχρονη μεταβολή των παραμέτρων της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα του μετασχηματιστή και του πάχους των μαγνητικών θωρακίσεων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι όταν η απόσταση κελύφους - πυρήνα διατηρείται σταθερή και μεταβάλλεται μόνο το πάχος των θωρακίσεων, σημειώνεται μικρή αυξητική μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης. Από την άλλη πλευρά, η διατήρηση του πάχους των θωρακίσεων αμετάβλητου, συνοδευόμενη όμως από αύξηση της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα προκαλεί μείωση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης. Αξιοσημείωτο είναι ότι και στην περίπτωση του πυκνού πλέγματος η μέγιστη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης εμφανίζεται για μείωση της απόστασης του κελύφους από τον πυρήνα κατά 4 mm σε σχέση με την αρχική της τιμή (50 mm) και ταυτόχρονα για αύξηση του πάχους των θωρακίσεων κατά 35 mm.

Η σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της παραγράφου 3.2.2 οδηγεί στη διαπίστωση ότι η μοντελοποίηση των θωρακίσεων με αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρίας τους δίνει ελάχιστα μεγαλύτερη μεταβολή από αυτήν που παρατηρήθηκε κατά τη μοντελοποίηση με οριακές συνθήκες. Η μέγιστη μεταβολή είναι τώρα ίση με 0,002%, η οποία δίνεται στο μέγιστο πάχος θωράκισης (ενώ στην περίπτωση της Παραγράφου 3.2.2, μέσω των οριακών συνθηκών, δε μπορούσε να μελετηθεί αύξηση πάχους των θωρακίσεων). Επιπλέον, στην παρούσα παράγραφο ελήφθησαν αποτελέσματα για απόσταση θωρακίσεων μικρότερη των 20 mm (η οποία ήταν και η ελάχιστη που μελετήθηκε στην παράγραφο 3.2.2), η οποία και έδωσε μεταβολή τάσης βραχυκύκλωσης μέχρι 0,001% περίπου. Εάν και οι μεταβολές αυτές είναι μεγαλύτερες από αυτές της Παραγράφου 3.2.2, παραμένουν πολύ μικρές, οδηγώντας στο συνολικό συμπέρασμα ότι αυτό το είδος της μαγνητικής θωράκισης δε μπορεί να συνεισφέρει περαιτέρω στη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης, ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο μοντελοποιείται (οριακές συνθήκες ή μοντελοποίηση της πραγματικής γεωμετρίας).

### 3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο η χρήση του δισδιάστατου μοντέλου FEMM επεκτάθηκε στην περίπτωση της προσθήκης μαγνητικής θωράκισης για την αλλαγή των παραμέτρων του μετασχηματιστή. Συγκεκριμένα, η προσθήκη της μαγνητικής θωράκισης, αποτελεί μία προσπάθεια αλλαγής της τάσης βραχυκύκλωσης, καθώς τοποθετείται με σκοπό να δράσει έτσι ώστε να προσελκύσει τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές σκέδασης των πηνίων, αυξάνοντας αντίστοιχα την τάση βραχυκύκλωσης.

Έγινε αναφορά στην προσομοίωση της προσθήκης της μαγνητικής θωράκισης με δύο διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι διαφοροποιούνται στο γεγονός ότι ο πρώτος τρόπος προσέγγισης της προσθήκης της μαγνητικής θωράκισης βασίζεται στην αλλαγή των οριακών συνθηκών στις εξωτερικές επιφάνειες, στο κέλυφος του μετασχηματιστή, ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιεί την αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρικής της διαμόρφωσης, μέσω της προσθήκης φύλλων σιδήρου στο κέλυφος του μετασχηματιστή.

Με βάση τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν συνολικά, κρίνεται ότι η προσθήκη μαγνητικής θωράκισης στο κέλυφος του μετασχηματιστή δεν αποδείχθηκε καθοριστική όσον αφορά στην επίδρασή της στις μεταβολές που παρουσιάζονται στην επαγωγική πτώση τάσης. Σύμφωνα με τις καμπύλες μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει των διάφορων παραμέτρων που ελήφθησαν κάθε φορά υπόψη, παρατηρείται ότι είναι δυνατή μία ποσοστιαία αύξηση μόνο της τάξης του  $10^{-4}$ . Επομένως, η αναζήτηση ενός πιο επιτυχούς τρόπου μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης του εξεταζόμενου μετασχηματιστή, καθιστά αναγκαία τη συνέχεια της μελέτης του θέματος των θωρακίσεων, όπως αυτή παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

### 3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] J. C. Olivares, J. Canedo, P. Moreno, J. Driesen, R. Escarela, S. Palanivasagam, “Experimental study to reduce the distribution-transformers stray losses using electromagnetic shields,” *Elec. Power Sys. Research*, Vol. 63, pp. 1-7, 2002.
- [3.2] T. Renyan, L. Yan, L. Feng, T. Lijian, “Resultant Magnetic Fields due to Both Windings and Heavy Current Leads in Large Power Transformers,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 32, No 3, pp. 1641-1644, May 1996.
- [3.3] A. Basak, H. G. Kendall, “Leakage Flux in Steel Tank of a 2.5 kVA Single Phase Transformer,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 23, No 5, pp. 3831-3835, Sept. 1987.
- [3.4] K. Hameyer, R. Belmans, “*Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices*,” WIT Press, June 1999.

## ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΛΛΑΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μελέτη ενός άλλου είδους θωράκισης, της ηλεκτρικής θωράκισης. Με την έννοια ηλεκτρική θωράκιση εννοείται η προσθήκη φύλλων χαλκού σε διάφορα σημεία του μετασχηματιστή. Το συγκεκριμένο υλικό τοποθετείται με σκοπό να δράσει έτσι ώστε να απομακρύνει τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές του πεδίου σκέδασης των πηνίων, μειώνοντας αντίστοιχα την τάση βραχυκύκλωσης.

### 4.2 ΠΡΩΤΟ ΕΙΔΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ

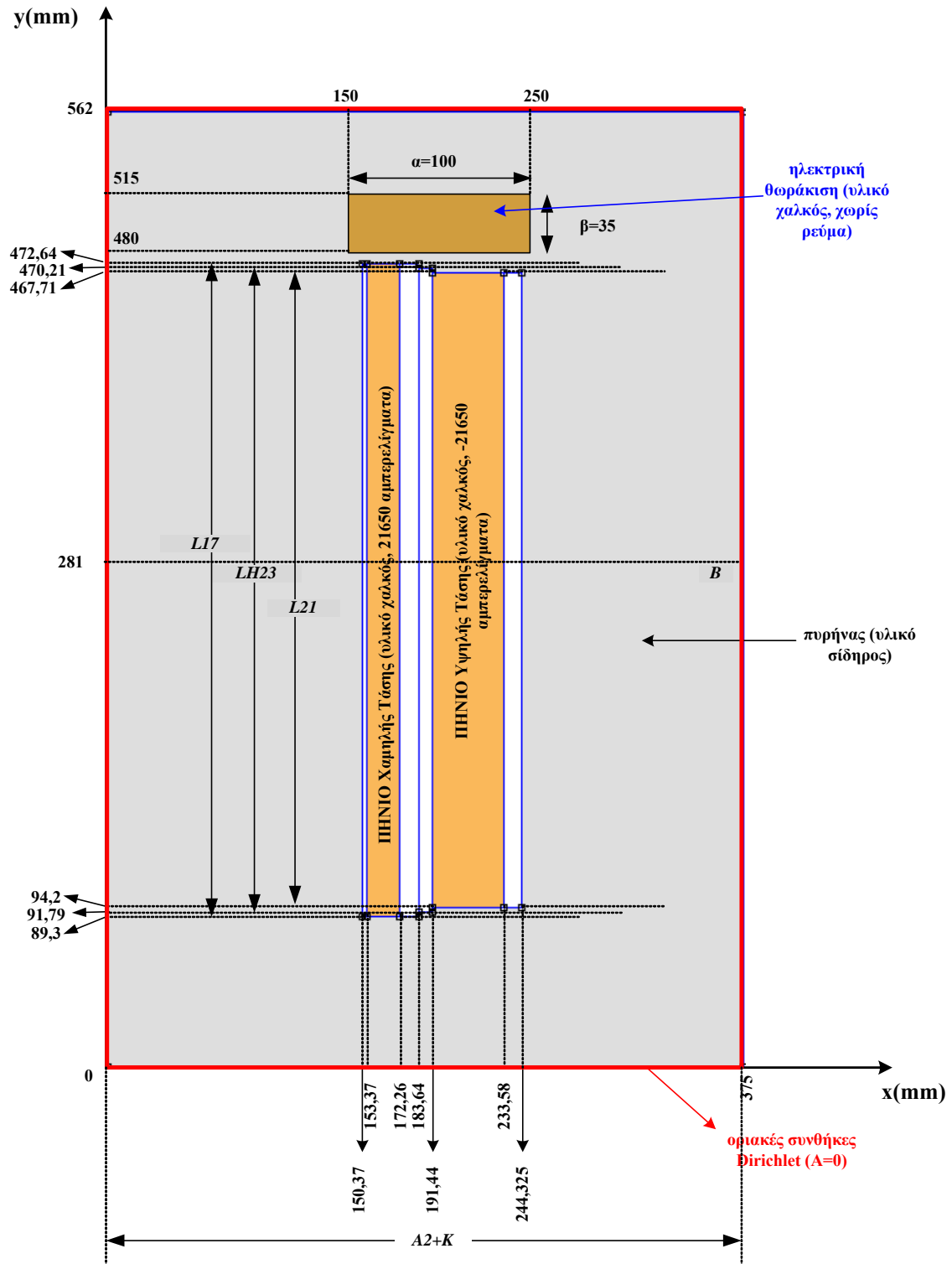
#### 4.2.1 Περιγραφή

Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση προσθήκης φύλλων χαλκού πάνω από τα πηνία και μέσα στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Το συγκεκριμένο είδος ηλεκτρικής θωράκισης τοποθετείται μέσα στο μετασχηματιστή με στόχο να απωθήσει τις δυναμικές γραμμές που βγαίνουν από τα πηνία και να μειώσει την τάση βραχυκύκλωσης. Στο Σχήμα 4.1 αναπαρίσταται η προσθήκη φύλλων χαλκού πάνω από τα πηνία στο μοντέλο FEMM. Στο μοντέλο αυτό δεν έχει ληφθεί υπόψη το κέλυφος, αλλά μόνο το ενεργό μέρος. Έχει θεωρηθεί ένα φύλλο χαλκού (υλικό Copper χωρίς ρεύμα, δηλαδή σε κανένα Circuit) πλάτους  $\beta=35$  mm και μήκους  $\alpha=100$  mm σε απόσταση 7,36 mm πάνω από τα πηνία. Το πλάτος του είναι λίγο μεγαλύτερο από το συνολικό πάχος των πηνίων και των διακένων τους. Η επιλογή των διαστάσεων αυτών έγινε πάλι κατά εκτίμηση, δηλαδή θα ήταν δυνατό να θεωρηθεί ότι το φύλλο χαλκού έχει μεγαλύτερο ή μικρότερο εμβαδόν και βρίσκεται πιο κοντά ή πιο μακριά από τα πηνία.

Για την προσομοίωση τόσο αυτού όσο και του επόμενου είδους ηλεκτρικής θωράκισης που θα μελετηθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου χρησιμοποιείται μόνο η μοντελοποίηση της πραγματικής γεωμετρικής τους διαμόρφωσης (και όχι η αλλαγή των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκε εναλλακτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο για τη μαγνητική θωράκιση). Η επιλογή αυτή έγινε διότι από την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου φάνηκε ότι αυτός ο τρόπος μοντελοποίησης επιτρέπει τη λεπτομερέστερη εξέταση της αλλαγής των διαστάσεων της θωράκισης και των επιπτώσεών της στην τάση βραχυκύκλωσης.

#### 4.2.2 Προσομοίωση προσθήκης ηλεκτρικής θωράκισης με αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρικής της διαμόρφωσης

Η μελέτη του μοντέλου FEMM για την περίπτωση της ηλεκτρικής θωράκισης, το οποίο κατασκευάστηκε αρχικά με αραιό πλέγμα για M/Σ 1250 kVA, οδήγησε μετά από εκτέλεση των υπολογισμών στη διαπίστωση ότι η μορφή των δυναμικών γραμμών πάνω από τα πηνία αλλάζει πολύ σε σχέση με την αντίστοιχη μορφή των απλών μοντέλων. Στη



Σχήμα 4.1: Μοντέλο FEMM για την αναπαράσταση του πρώτου είδους ηλεκτρικής θωράκισης

συνέχεια, το αρχικό αυτό μοντέλο προσαρμόστηκε στην περίπτωση πυκνότερων πλεγμάτων (περίπου 15000 και 40000 κόμβοι). Επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή νέων μοντέλων ηλεκτρικής θωράκισης με αύξηση της διάστασης του μήκους  $a$  και διαδοχικά του πλάτους  $\beta$  του φύλλου χαλκού του αρχικού μοντέλου, καθώς και με μείωση της απόστασης του χαλκού από τα πηνία, κρατώντας μία ελάχιστη απόσταση 1 mm. Ακολούθηθηκε μείωση της

απόστασης του χαλκού από τα πηνία με μεγαλύτερα  $\alpha$  και  $\beta$ , κρατώντας επίσης μία ελάχιστη απόσταση 1 mm και διαδοχικά προσαρμογή του μοντέλου στην περίπτωση του πυκνότερου πλέγματος των 15.000 κόμβων και των 40.000 κόμβων (αύξηση της διάστασης  $\alpha$  και διαδοχικά της  $\beta$  του φύλλου χαλκού, μείωση της απόστασης του χαλκού από τα πηνία και επανάληψη διαδικασίας με μεγαλύτερα  $\alpha$  και  $\beta$ ). Σε κάθε περίπτωση έγινε η απαραίτητη σύγκριση με τα αντίστοιχα μοντέλα χωρίς θωράξεις, τα οποία προέκυψαν με την προσθήκη σιδήρου (Iron mu 1000) στην περιοχή της θωράκισης (η οποία εξάλλου βρίσκεται μέσα στο σίδηρο), έτσι ώστε να μην αλλάζει η γεωμετρία του μοντέλου και υπάρχουν μεταβολές που οφείλονται σε αλλαγή του πλέγματος.

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, για δεδομένη πυκνότητα πλέγματος και με βάση την τιμή της μαγνητικής ενέργειας του μοντέλου, υπολογίστηκε η επαγωγική πτώση τάσης, για την περίπτωση της εν λόγω ηλεκτρικής θωράκισης, ενώ ο υπολογισμός των ποσοστιαίων μεταβολών της μαγνητικής ενέργειας βοήθησε στην εξαγωγή καμπυλών μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει των διαστάσεων του μήκους και του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης, καθώς και της απόστασης ανάμεσα στο χαλκό και στα πηνία για τις τρεις περιπτώσεις, πλεγμάτων των 8.000 κόμβων, 15.000 κόμβων και 40.000 κόμβων. Η μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης προέκυψε από τη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης, παραγωγίζοντας τη σχέση (4.1), η οποία δίνει την τάση βραχυκύκλωσης (και λαμβάνοντας υπόψη ότι η ωμική πτώση τάσης παραμένει σταθερή). Έτσι, προέκυψε ότι η μεταβολή στην τάση βραχυκύκλωσης  $\Delta U_k$  είναι ίση με την υπολογιζόμενη  $\Delta IX$ .

$$U_k (\%) = \sqrt{(IX)^2 + (IR)^2} \Rightarrow \Delta U_k = \Delta IX \quad (4.1)$$

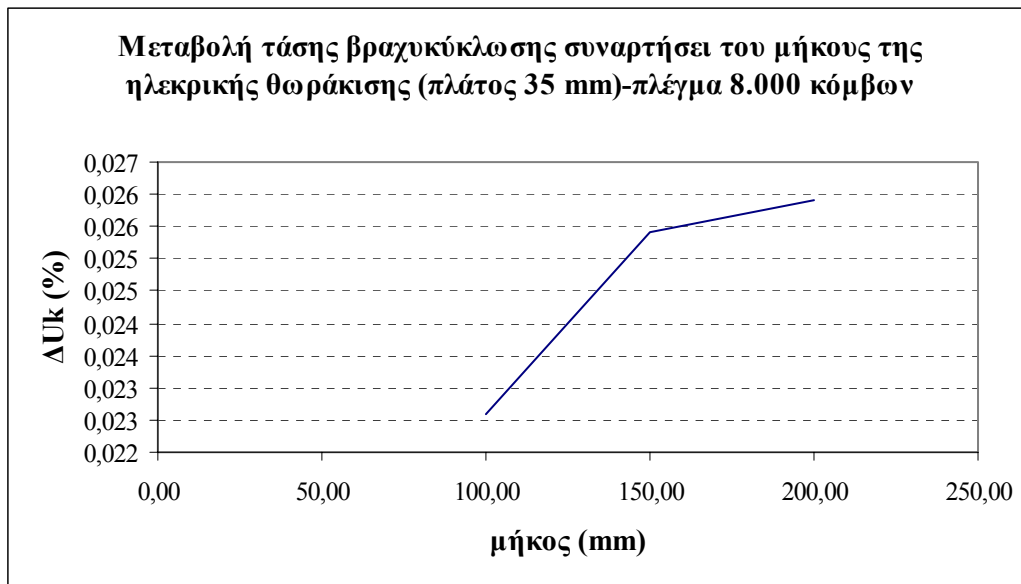
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη μελέτη του πρώτου είδους της ηλεκτρικής θωράκισης οδήγησε στην κατασκευή των ακόλουθων συγκεντρωτικών πινάκων και στην εξαγωγή συμπερασμάτων.

Για την περίπτωση του αραιού πλέγματος των 8.000 κόμβων, στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 4.1) παραθέτονται οι διαστάσεις του μήκους και του πλάτους της θωράκισης, οι οποίες αποτελούν τις μεταβαλλόμενες παραμέτρους του αντίστοιχου μοντέλου, οι προκύπτουσες τιμές της επαγωγικής πτώσης τάσης με θωράκιση και χωρίς θωράκιση, καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης, η οποία είναι ίση με την ποσοστιαία μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης. Επίσης, στα Σχήματα 4.2 και 4.3 απεικονίζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν για τη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης ως συνάρτησης του μήκους και του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης, από τα οποία είναι εμφανές το γεγονός ότι η αύξηση των διαστάσεων της ηλεκτρικής θωράκισης, (αύξηση του μήκους και αύξηση του πλάτους), συνεπάγεται αύξηση της μεταβολής (μείωσης) της τάσης βραχυκύκλωσης.

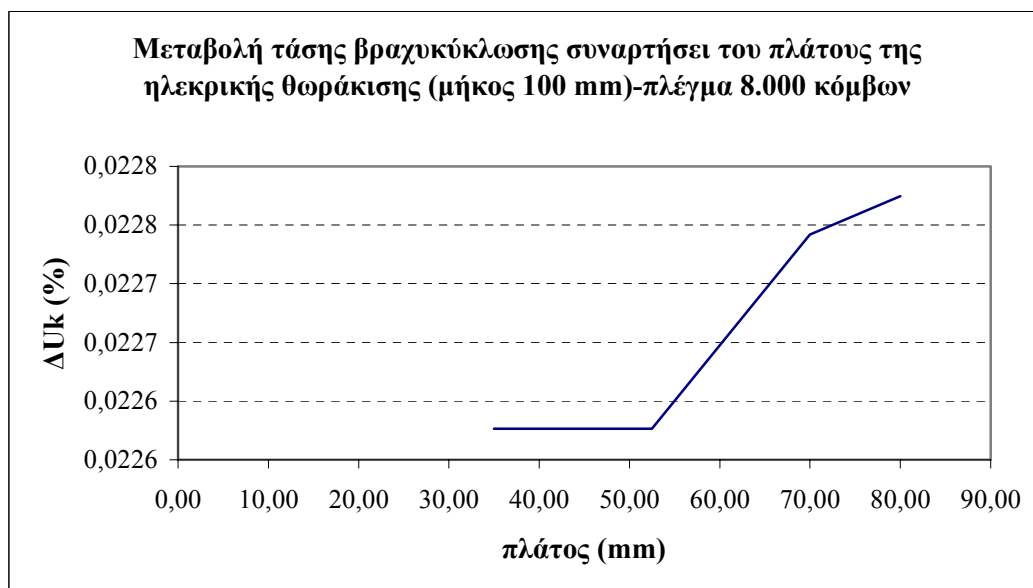
**Πίνακας 4.1:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του μήκους και του πλάτους της θωράκισης για πλέγμα της τάξης των 8.000 κόμβων (απόσταση φύλλου χαλκού από τα πηνία ίση με 7,36 mm).

8.000 κόμβοι			
μήκος ( $\alpha$ ) και πλάτος ( $\beta$ ) θωράκισης σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	$\Delta IX$
$\alpha=100, \beta=35$	5,785450	5,786756	2,26E-02
$\alpha=150, \beta=35$	5,785895	5,787366	2,54E-02
$\alpha=200, \beta=35$	5,785868	5,787367	2,59E-02
$\alpha=100, \beta=52,5$	5,785456	5,786762	2,26E-02
$\alpha=100, \beta=70$	5,785481	5,786797	2,27E-02
$\alpha=100, \beta=80$	5,785561	5,786879	2,28E-02





**Σχήμα 4.2:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για πλάτος ίσο με 35 mm και πλέγμα 8.000 κόμβων (απόσταση φύλλου χαλκού από τα πηνία ίση με 7,36 mm).

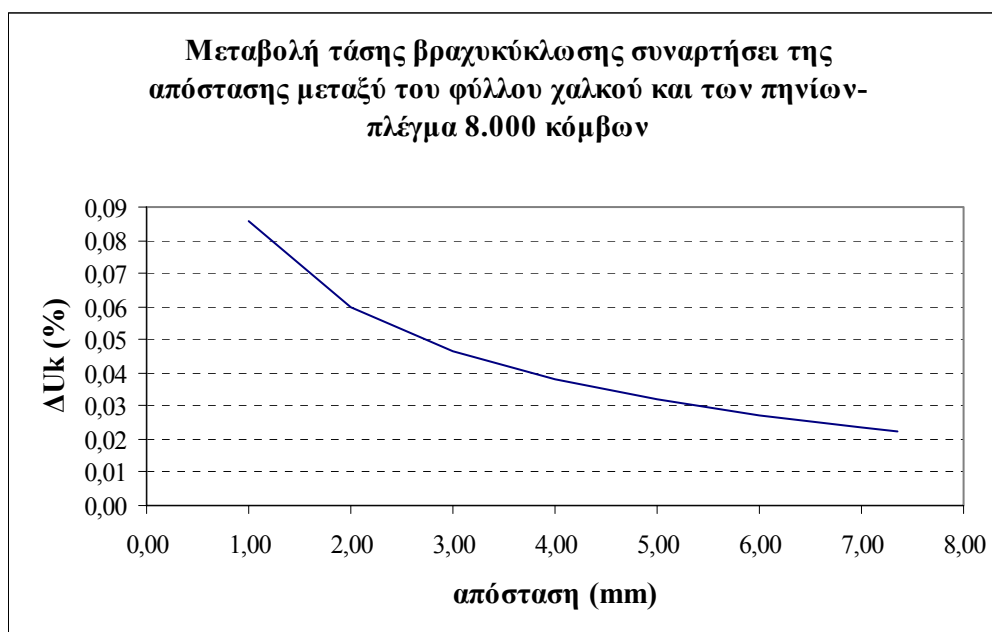


**Σχήμα 4.3:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 100 mm και πλέγμα 8.000 κόμβων (απόσταση φύλλου χαλκού από τα πηνία ίση με 7,36 mm).

Στη συνέχεια, εξετάζεται η περίπτωση στην οποία ως μεταβαλλόμενη παράμετρος και κριτήριο που δύναται να επιδράσει στη συμπεριφορά του μετασχηματιστή λαμβάνεται η απόσταση του φύλλου χαλκού από τα πηνία. Έτσι, για αποστάσεις 1 έως 7,36 mm και πάντα για την περίπτωση αραιού πλέγματος, προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 και στο γράφημα του Σχήματος 4.4, που ακολουθούν:

**Πίνακας 4.2:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ του φύλλου χαλκού και των πηνίων για πλέγμα της τάξης των 8.000 κόμβων (μήκος φύλλου χαλκού ίσο με 100 mm και πλάτος ίσο με 35 mm).

8.000 κόμβοι			
απόσταση φύλλου χαλκού και πηνίων σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	$\Delta IX$
1	5,782436	5,787387	8,56E-02
2	5,784056	5,787523	5,99E-02
3	5,783943	5,786640	4,66E-02
4	5,784661	5,786862	3,80E-02
5	5,784960	5,786799	3,18E-02
6	5,785355	5,786925	2,71E-02
7	5,785466	5,786833	2,36E-02
7,36	5,785450	5,786756	2,26E-02



**Σχήμα 4.4:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ του φύλλου χαλκού και των πηνίων για πλέγμα 8.000 κόμβων (μήκος φύλλου χαλκού ίσο με 100 mm και πλάτος ίσο με 35 mm).

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση της μελέτης της ηλεκτρικής θωράκισης για την περίπτωση του αραιού πλέγματος, έγινε ένας συνδυασμός των παραμέτρων που έχουν ληφθεί μέχρι τώρα υπόψη, δηλαδή των διαστάσεων του μήκους και του πλάτους της θωράκισης και της απόστασης από τα πηνία και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης, καθώς και για τις τιμές της με και χωρίς θωράκιση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 που ακολουθεί:

**Πίνακας 4.3:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει των διαστάσεων της ηλεκτρικής θωράκισης σε συνδυασμό με την απόσταση μεταξύ του φύλλου χαλκού και των πηνίων για πλέγμα της τάξης των 8.000 κόμβοι.

8.000 κόμβοι			
συνδυασμός παραμέτρων	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=1mm	5,782639	5,787867	9,04E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=2mm	5,783123	5,786858	6,46E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=3mm	5,784351	5,787279	5,06E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=4mm	5,784594	5,786998	4,16E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=5mm	5,784853	5,786891	3,52E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=6mm	5,784860	5,786622	3,05E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=7mm	5,785831	5,787375	2,67E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=1mm	5,782120	5,787454	9,22E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=2mm	5,783112	5,786923	6,59E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=3mm	5,783748	5,786747	5,19E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=4mm	5,784782	5,787245	4,26E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=5mm	5,785230	5,787297	3,57E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=6mm	5,785623	5,787421	3,11E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=7mm	5,785571	5,787151	2,73E-02

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Η αύξηση του μήκους της ηλεκτρικής θωράκισης από την τιμή των 100 mm έως τα 200 mm συνεπάγεται αντίστοιχα αύξηση της μεταβολής (μείωσης) της τάσης βραχυκύκλωσης. Επίσης, η αύξηση του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης προκαλεί ολοένα και μεγαλύτερη μεταβολή της τιμής της τάσης βραχυκύκλωσης, δηλαδή στο μέγιστο πλάτος θωράκισης, η μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης γίνεται μέγιστη. Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι η αύξηση συνολικά των διαστάσεων της ηλεκτρικής θωράκισης είναι δυνατό να οδηγήσει σε αύξηση της μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης.

Όσον αφορά την απόσταση ανάμεσα στο φύλλο του χαλκού και στα πηνία, για αύξηση από 1 mm έως 7,36 mm, πραγματοποιείται μείωση της μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης, με αποτέλεσμα η μέγιστη μεταβολή να εμφανίζεται στην περίπτωση που η απόσταση γίνεται ελάχιστη και ίση με 1 mm.

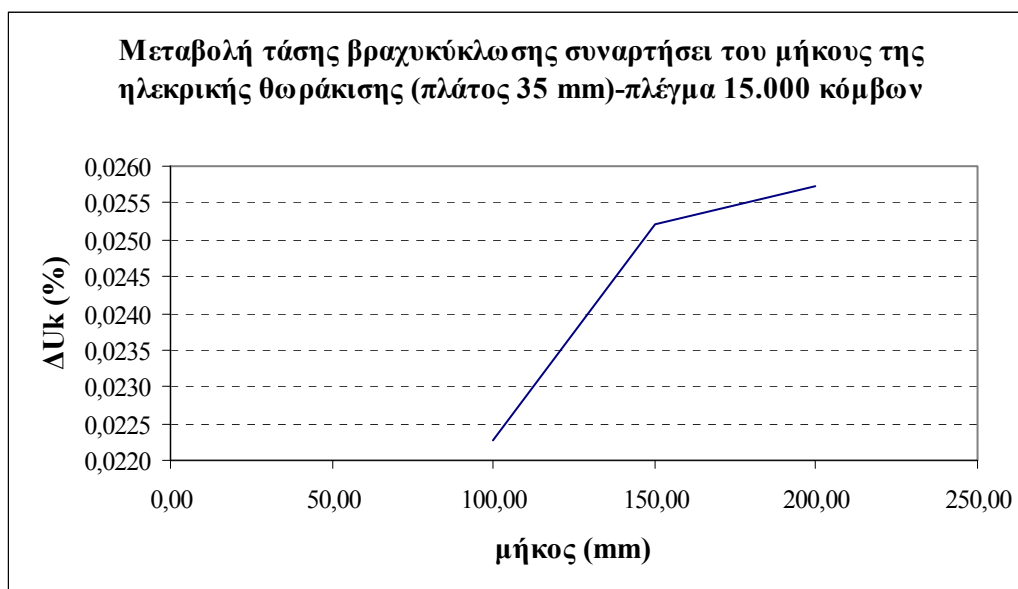
Η ταυτόχρονη μεταβολή των παραμέτρων του μήκους και του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης, καθώς και της απόστασης ανάμεσα στο φύλλο χαλκού και στα πηνία

ως κριτήριο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μεγαλύτερη μεταβολή (μείωση) της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης αντιστοιχεί στην περίπτωση που το μήκος και το πλάτος της θωράκισης λαμβάνουν αντίστοιχα τιμές  $\alpha=200$  mm και  $\beta=70$  mm και για απόσταση χαλκού πηνίων ίση με 1 mm, ενώ διατηρώντας σταθερές τις τιμές του μήκους και του πλάτους της θωράκισης και μεταβάλλοντας μόνο την απόσταση ανάμεσα στο φύλλο χαλκού και στα πηνία, παρατηρείται ότι η μεταβολή στις τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης γίνεται μικρότερη όσο μεγαλώνει το μέγεθος της απόστασης.

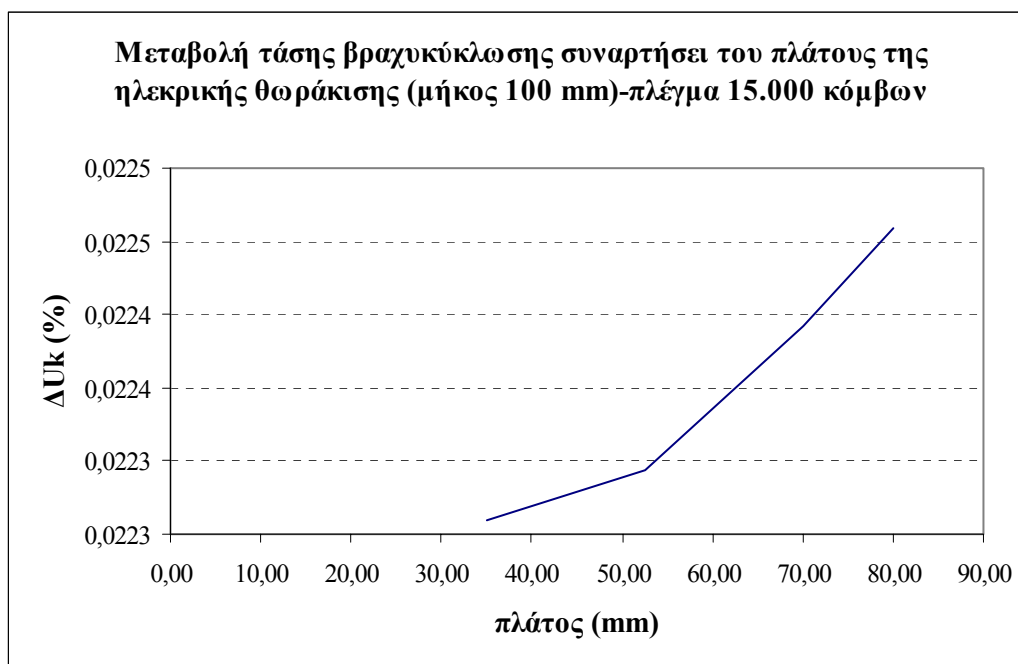
Επαναλαμβάνοντας την προηγούμενη διαδικασία για την περίπτωση πλέγματος της τάξης των 15.000 κόμβων, το οποίο είναι ένα ενδιάμεσο πλέγμα με καλή πυκνότητα και χωρίς μεγάλο χρόνο εκτέλεσης, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα, τα οποία υπό μορφή πίνακα (Πίνακας 4.4), αλλά και γραφημάτων (Σχήματα 4.5 και 4.6), παρουσιάζονται ως εξής:

**Πίνακας 4.4:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του μήκους και του πλάτους της θωράκισης για πλέγμα της τάξης των 15.000 κόμβων (απόσταση φύλλου χαλκού από τα πηνία ίση με 7,36 mm).

15.000 κόμβοι			
μήκος ( $\alpha$ ) και πλάτος ( $\beta$ ) θωράκισης σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	$\Delta IX$
$\alpha=100, \beta=35$	5,790233	5,791521	2,23E-02
$\alpha=150, \beta=35$	5,790460	5,791920	2,52E-02
$\alpha=200, \beta=35$	5,790430	5,791920	2,57E-02
$\alpha=100, \beta=52,5$	5,790108	5,791399	2,23E-02
$\alpha=100, \beta=70$	5,790154	5,791451	2,24E-02
$\alpha=100, \beta=80$	5,790240	5,791541	2,25E-02



**Σχήμα 4.5:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για πλάτος ίσο με 35 mm και πλέγμα 15.000 κόμβων (απόσταση φύλλου χαλκού από τα πηνία ίση με 7,36 mm).

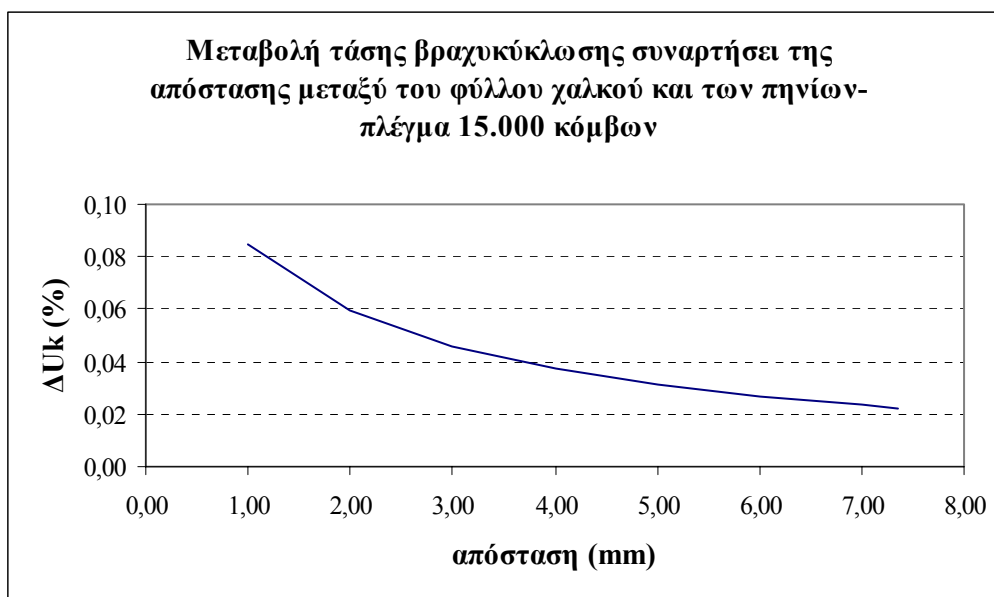


**Σχήμα 4.6:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 100 mm και πλέγμα 15.000 κόμβων (απόσταση φύλλου χαλκού από τα πηνία ίση με 7,36 mm).

Προχωρώντας στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν από τη μελέτη της γεωμετρίας της ηλεκτρικής θωράκισης για την περίπτωση του δεύτερου πλέγματος, τα αποτελέσματα στα οποία οδήγησαν οι μεταβολές της απόστασης ανάμεσα στο φύλλο χαλκού και στα πηνία διαμορφώνονται στον Πίνακα 4.5 και στο Σχήμα 4.7, ως εξής:

**Πίνακας 4.5:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ του φύλλου χαλκού και των πηνίων για πλέγμα της τάξης των 15.000 κόμβων (μήκος φύλλου χαλκού ίσο με 100 mm και πλάτος ίσο με 35 mm).

15.000 κόμβοι			
απόσταση φύλλου χαλκού και πηνίων σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
1	5,786421	5,791318	8,46E-02
2	5,788532	5,791977	5,95E-02
3	5,788804	5,791472	4,61E-02
4	5,789363	5,791537	3,75E-02
5	5,789729	5,791546	3,14E-02
6	5,789993	5,791552	2,69E-02
7	5,790166	5,791520	2,34E-02
7,36	5,790233	5,791521	2,23E-02



**Σχήμα 4.7:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ του φύλλου χαλκού και των πηνίων για πλέγμα 15.000 κόμβων (μήκος φύλλου χαλκού ίσο με 100 mm και πλάτος ίσο με 35 mm).

Όπως και στο αραιό πλέγμα, το τελευταίο κριτήριο το οποίο λαμβάνεται υπόψη στη μελέτη της περίπτωσης του μοντέλου κανονικού πλέγματος και το οποίο μπορεί να αποτελέσει παράγοντα που επιδρά στη συμπεριφορά του μετασχηματιστή, ο οποίος εξοπλίζεται με ηλεκτρική θωράκιση, αποτελεί ο συνδυασμός των παραμέτρων που έχουν ληφθεί μέχρι τώρα υπόψη, δηλαδή των διαστάσεων του μήκους και του πλάτους της θωράκισης και της απόστασης από τα πηνία. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αφορούν στη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης, καθώς και στις τιμές της με και χωρίς θωράκιση παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα, (Πίνακας 4.6):

**Πίνακας 4.6:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει των διαστάσεων της ηλεκτρικής θωράκισης σε συνδυασμό με την απόσταση μεταξύ του φύλλου χαλκού και των πηνίων για πλέγμα της τάξης των 15.000 κόμβων.

15.000 κόμβοι			
συνδυασμός παραμέτρων	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=1mm	5,786634	5,791841	9,00E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=2mm	5,787636	5,791349	6,42E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=3mm	5,788892	5,791801	5,03E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=4mm	5,789371	5,791763	4,13E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=5mm	5,789685	5,791707	3,49E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=6mm	5,789723	5,791470	3,02E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=7mm	5,790436	5,791968	2,65E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=1mm	5,786130	5,791451	9,20E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=2mm	5,787651	5,791437	6,54E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=3mm	5,788637	5,791598	5,11E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=4mm	5,789465	5,791897	4,20E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=5mm	5,789903	5,791964	3,56E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=6mm	5,789997	5,791780	3,08E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=7mm	5,790238	5,791807	2,71E-02

Ομοίως με την περίπτωση του αραιού πλέγματος, τα συμπεράσματα, τα οποία προκύπτουν είναι τα εξής:

Η αύξηση του μήκους της ηλεκτρικής θωράκισης από την τιμή των 100 mm στα 200 mm συνεπάγεται αντίστοιχα μεγαλύτερη μεταβολή-μείωση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης, ενώ είναι αξιοσημείωτο ότι η μέγιστη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης προκύπτει όταν το μήκος αυξάνεται στα 200 mm, όπως και στο μοντέλο των 8.000 κόμβων.

Επίσης, η αύξηση του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης προκαλεί μεγαλύτερη μεταβολή της τιμής της τάσης βραχυκύκλωσης, δηλαδή στο μέγιστο πλάτος θωράκισης, η μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης γίνεται μέγιστη. Τέλος, η αύξηση της απόστασης ανάμεσα στο φύλλο χαλκού και στα πηνία από 1 mm έως 7,36 mm, προκαλεί ολοένα και μικρότερη μεταβολή της τιμής της τάσης βραχυκύκλωσης, με αποτέλεσμα η μέγιστη μεταβολή να εμφανίζεται στην περίπτωση που η απόσταση γίνεται ελάχιστη και ίση με 1 mm.

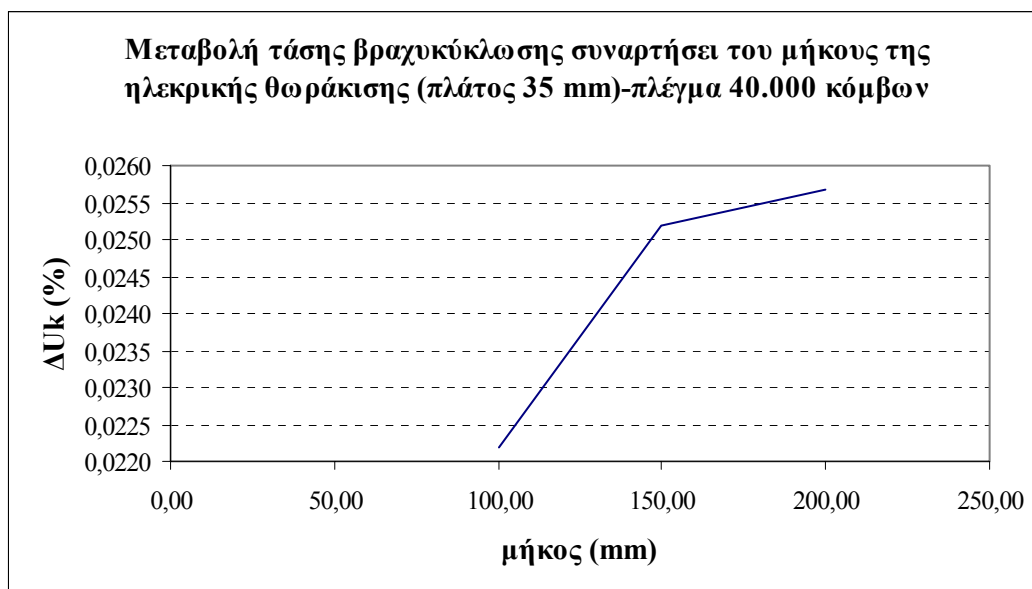
Η ταυτόχρονη μεταβολή των παραμέτρων του μήκους και του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης, καθώς και της απόστασης ανάμεσα στο φύλλο χαλκού και στα πηνία ως κριτήριο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η

μεγαλύτερη μεταβολή-μείωση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης αντιστοιχεί στην περίπτωση που το μήκος και το πλάτος της θωράκισης λαμβάνουν αντίστοιχα τιμές  $\alpha=200$  mm και  $\beta=70$  mm και για απόσταση χαλκού πηνίων ίση με 1 mm, όπως ίσχυε και για το πλέγμα των 8.000 κόμβων, ενώ διατηρώντας σταθερές τις τιμές του μήκους και του πλάτους της θωράκισης και μεταβάλλοντας μόνο την απόσταση ανάμεσα στο φύλλο χαλκού και στα πηνία, παρατηρείται ότι η μεταβολή στις τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης γίνεται μικρότερη όσο αυξάνεται η απόσταση.

Με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν από τη μελέτη της γεωμετρίας του μετασχηματιστή με προσθήκη ηλεκτρικής θωράκισης για την περίπτωση πυκνού πλέγματος (40.000 κόμβοι), ολοκληρώνεται η αναφορά στο πρώτο είδος ηλεκτρικής θωράκισης. Ακολουθούν οι πίνακες και τα γραφήματα που αφορούν στις μεταβαλλόμενες κάθε φορά παραμέτρους οι οποίες λήφθηκαν υπόψη, καθώς και στις προκύπτουσες τιμές για την επαγωγική πτώση τάσης:

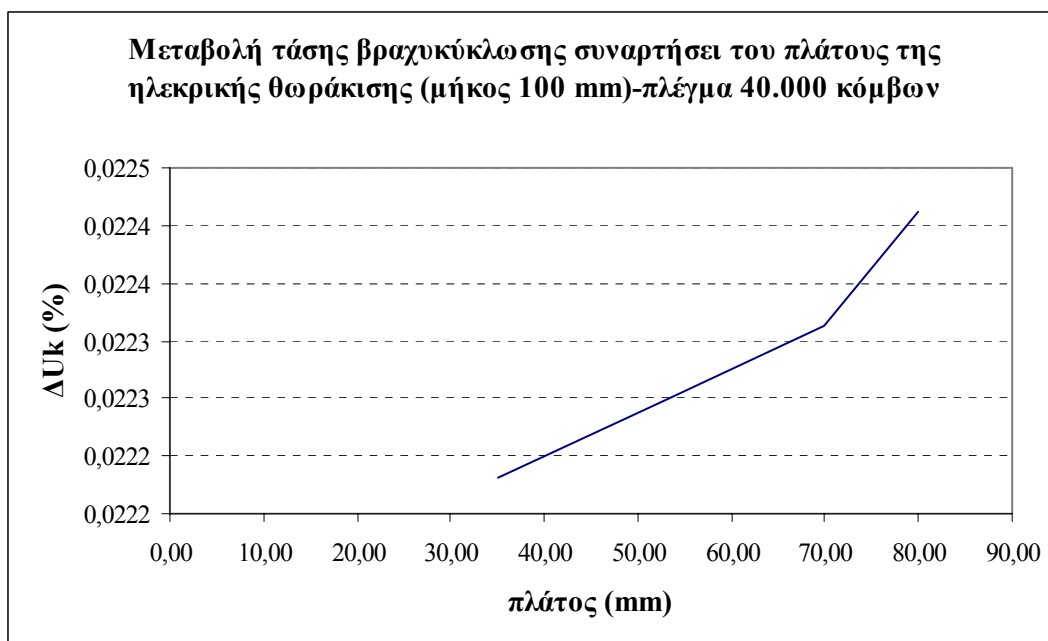
**Πίνακας 4.7:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του μήκους και του πλάτους της θωράκισης για πλέγμα της τάξης των 40.000 κόμβων (απόσταση φύλλου χαλκού από τα πηνία ίση με 7,36 mm).

40.000 κόμβοι			
μήκος ( $\alpha$ ) και πλάτος ( $\beta$ ) θωράκισης σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	$\Delta IX$
$\alpha=100, \beta=35$	5,802120	5,803407	2,22E-02
$\alpha=150, \beta=35$	5,801911	5,803373	2,52E-02
$\alpha=200, \beta=35$	5,801883	5,803373	2,57E-02
$\alpha=100, \beta=52,5$	5,802153	5,803443	2,22E-02
$\alpha=100, \beta=70$	5,802176	5,803470	2,23E-02
$\alpha=100, \beta=80$	5,802147	5,803447	2,24E-02



**Σχήμα 4.8:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για πλάτος ίσο με 35 mm και πλέγμα 40.000 κόμβων (απόσταση φύλλου χαλκού από τα πηνία ίση με 7,36 mm).



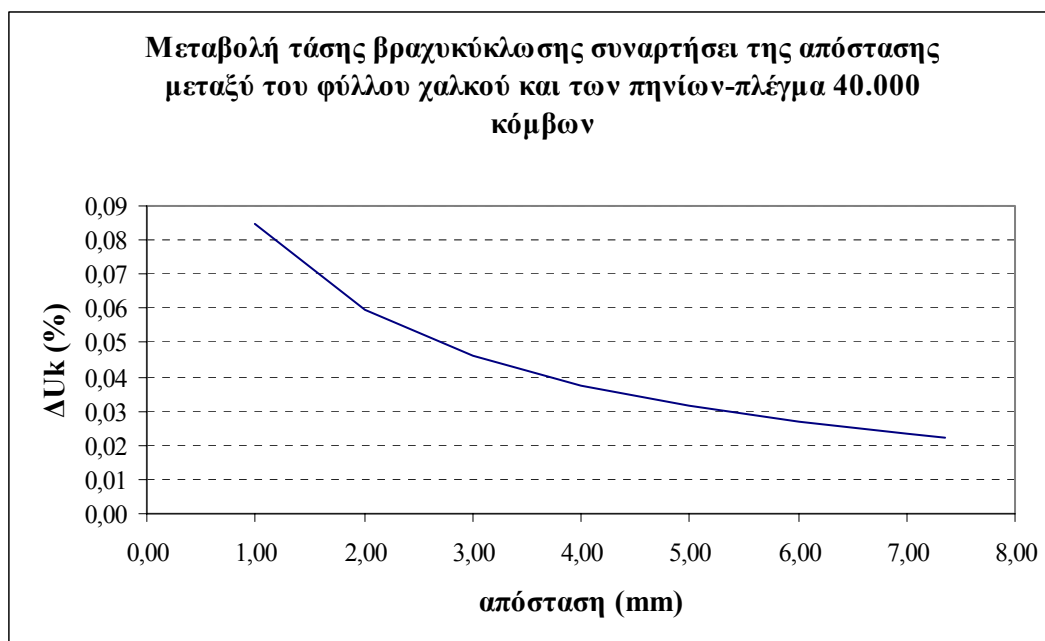


**Σχήμα 4.9:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 100 mm και πλέγμα 40.000 κόμβων (απόσταση φύλλου χαλκού από τα πηνία ίση με 7,36 mm).

Μετά τη μελέτη του τρόπου μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει των διαστάσεων της ηλεκτρικής θωράκισης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν με βάση τις μεταβολές της απόστασης ανάμεσα στο φύλλο χαλκού και στα πηνία, (Πίνακας 4.8 και Σχήμα 4.10):

**Πίνακας 4.8:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ του φύλλου χαλκού και των πηνίων για πλέγμα της τάξης των 40.000 κόμβων (μήκος φύλλου χαλκού ίσο με 100 mm και πλάτος ίσο με 35 mm).

40.000 κόμβοι			
απόσταση φύλλου χαλκού και πηνίων σε mm	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
1	5,798663	5,803576	8,47E-02
2	5,800010	5,803464	5,96E-02
3	5,800724	5,803401	4,62E-02
4	5,801201	5,803378	3,75E-02
5	5,801540	5,803359	3,14E-02
6	5,801798	5,803353	2,68E-02
7	5,802040	5,803390	2,33E-02
7,36	5,802120	5,803407	2,22E-02



**Σχήμα 4.10:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ του φύλλου χαλκού και των πηνίων για πλέγμα 40.000 κόμβων (μήκος φύλλου χαλκού ίσο με 100 mm και πλάτος ίσο με 35 mm).

Το τελευταίο κριτήριο το οποίο λαμβάνεται υπόψη και στη μελέτη της περίπτωσης του μοντέλου πυκνού πλέγματος, αποτελεί ο συνδυασμός των παραμέτρων που έχουν ληφθεί μέχρι τώρα υπόψη, δηλαδή των διαστάσεων του μήκους και του πλάτους της θωράκισης και της απόστασης από τα πηνία. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αφορούν στη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης, καθώς και στις τιμές της με και χωρίς θωράκιση παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα, (Πίνακας 4.9):

**Πίνακας 4.9:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει των διαστάσεων της ηλεκτρικής θωράκισης σε συνδυασμό με την απόσταση μεταξύ του φύλλου χαλκού και των πηνίων για πλέγμα της τάξης των 40.000 κόμβων.

40.000 κόμβοι			
συνδυασμός παραμέτρων	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=1mm	5,798096	5,803313	9,00E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=2mm	5,799605	5,803325	6,41E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=3mm	5,800507	5,803417	5,02E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=4mm	5,801063	5,803457	4,13E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=5mm	5,801423	5,803445	3,49E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=6mm	5,801697	5,803443	3,01E-02
$\alpha=150, \beta=52.5$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=7mm	5,801919	5,803451	2,64E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=1mm	5,798046	5,803380	9,20E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=2mm	5,799663	5,803453	6,54E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=3mm	5,800546	5,803516	5,12E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=4mm	5,800890	5,803325	4,20E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=5mm	5,801341	5,803405	3,56E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=6mm	5,801582	5,803369	3,08E-02
$\alpha=200, \beta=70$ & απόσταση χαλκού-πηνίων=7mm	5,801884	5,803455	2,71E-02

Συμπερασματικά, το εν λόγω μοντέλο των 40.000 κόμβων, οδηγεί στη διατύπωση των ακόλουθων παρατηρήσεων:

Η αύξηση του μήκους της ηλεκτρικής θωράκισης από την τιμή των 100 mm έως τα 200 mm, συνεπάγεται αντίστοιχα μεγαλύτερη μεταβολή-μείωση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης. Επίσης, η αύξηση του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης προκαλεί αύξηση της μεταβολής της τιμής της τάσης βραχυκύκλωσης, δηλαδή στο μέγιστο πλάτος θωράκισης, η μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης γίνεται μέγιστη. Επομένως, η αύξηση, συνολικά των διαστάσεων της ηλεκτρικής θωράκισης, είναι δυνατό να οδηγήσει σε αύξηση της μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης.

Επίσης, η αύξηση της απόστασης ανάμεσα στο φύλλο χαλκού και στα πηνία από 1 mm έως 7,36 mm προκαλεί ολοένα και μικρότερη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης, με αποτέλεσμα η μέγιστη μεταβολή να εμφανίζεται στην περίπτωση που η απόσταση γίνεται ελάχιστη και ίση με 1 mm.

Η ταυτόχρονη μεταβολή των παραμέτρων του μήκους και του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης, καθώς και της απόστασης ανάμεσα στο φύλλο χαλκού και στα πηνία

ως κριτήριο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μεγαλύτερη μεταβολή-μείωση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης αντιστοιχεί στην περίπτωση που το μήκος και το πλάτος της θωράκισης λαμβάνουν αντίστοιχα τιμές  $\alpha=200$  mm και  $\beta=70$  mm και για απόσταση χαλκού πηνίων ίση με 1 mm, όπως συμβαίνει τόσο στο μοντέλο των 8.000 κόμβων όσο και στο μοντέλο των 15.000 κόμβων, ενώ διατηρώντας σταθερές τις τιμές του μήκους και του πλάτους της θωράκισης και μεταβάλλοντας μόνο την απόσταση ανάμεσα στο φύλλο χαλκού και στα πηνία, παρατηρείται ότι η μεταβολή στις τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης γίνεται μικρότερη όσο αυξάνεται η τιμή της απόστασης.

Τα παραπάνω συμπεράσματα είναι παρόμοια με τα συμπεράσματα που προέκυψαν με τη χρήση του αραιού και ενδιάμεσου πλέγματος (πυκνότητας περίπου 8.000 και 15.000 κόμβων αντίστοιχα). Η μορφή των καμπυλών μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης είναι παρόμοια και στις τρεις περιπτώσεις, ενώ οι τιμές της μεταβολής είναι πολύ μικρές (κάτω του 0,1%), οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι αυτό το είδος θωράκισης δεν είναι αποδοτικό στην περίπτωση των εξεταζόμενων μετασχηματιστών. Έτσι, στη συνέχεια, μελετάται ένα δεύτερο είδος ηλεκτρικής θωράκισης, το οποίο, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν, επιδρά περισσότερο στην τιμή της τάσης βραχυκύκλωσης.

### 4.3 ΔΕΥΤΕΡΟ ΕΙΔΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ

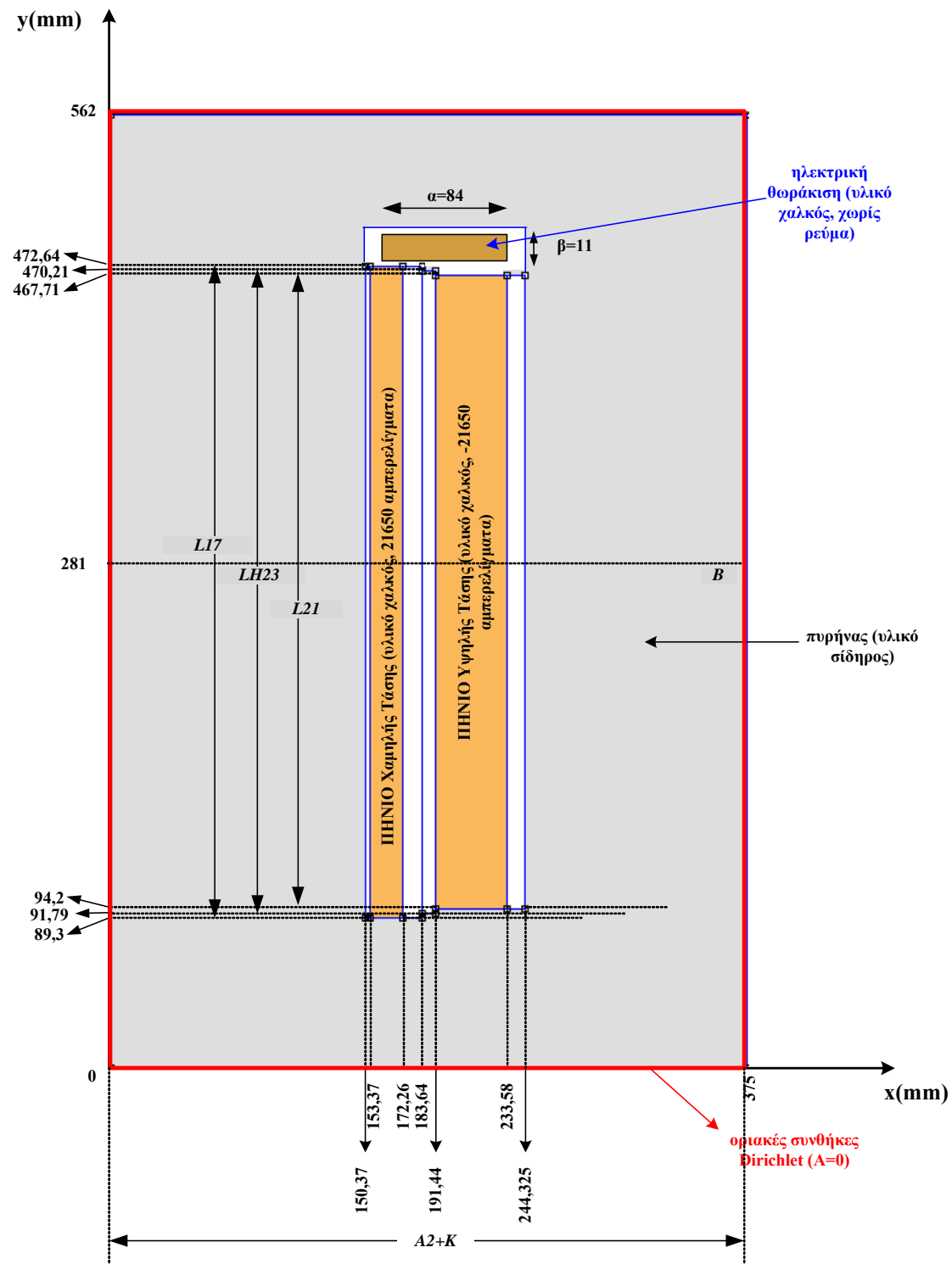
#### 4.3.1 Περιγραφή

Αναζητώντας έναν αποδοτικότερο τρόπο μεταβολής της επαγωγικής πτώσης τάσης του εξεταζόμενου μετασχηματιστή, κρίθηκε αναγκαίο να μελετηθεί ένα δεύτερο είδος ηλεκτρικής θωράκισης. Το συγκεκριμένο είδος ηλεκτρικής θωράκισης (όπως και το πρώτο), τοποθετείται μέσα στο μετασχηματιστή με στόχο να απωθήσει τις δυναμικές γραμμές που βγαίνουν από τα πηνία και να μειώσει την τάση βραχυκύκλωσης. Αποτελείται από φύλλο χαλκού (υλικό Copper χωρίς ρεύμα, δηλαδή σε κανένα Circuit) πλάτους 11 mm και μήκους 84 mm, το οποίο τοποθετείται πάνω από τα πηνία, αλλά αυτή τη φορά μέσα σε περιβάλλον αέρα και όχι απευθείας μέσα στο υλικό του πυρήνα, όπως προηγουμένως (Σχήμα 4.11). Το πλάτος του είναι λίγο μικρότερο από το συνολικό πάχος των πηνίων και των διακένων τους. Η επιλογή των διαστάσεων έγινε πάλι κατά εκτίμηση, δηλαδή θα ήταν δυνατό να θεωρηθεί ότι το φύλλο χαλκού έχει μεγαλύτερο ή μικρότερο εμβαδόν και βρίσκεται πιο κοντά ή πιο μακριά από τα πηνία.

Στην περίπτωση αυτή το χρησιμοποιούμενο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων είναι αρμονικό (με συχνότητα 50 Hz). Επίσης, στην περίπτωση αυτή, εκτός από τη μαγνητική ενέργεια, υπολογίζονται και οι απώλειες της θωράκισης. Τα αποτελέσματα που δίνει το πρόγραμμα, τόσο για τη μαγνητική ενέργεια, όσο και για τις απώλειες πρέπει να πολλαπλασιαστούν με τον παράγοντα 2 εξαιτίας του τρόπου με τον οποίο το FEMM υπολογίζει τις μεταβλητές όταν το πρόβλημα δεν είναι στατικό. Η ενέργεια (και οι απώλειες) προκύπτουν από την RMS τιμή των μεταβλητών αυτών ( $RMS = \text{root mean square}$ , δηλαδή ενεργός τιμή του εναλλασσόμενου μεγέθους, που ισούται με  $\sqrt{2}$  επί το πλάτος του μεγέθους). Έτσι, επειδή η ενέργεια είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος, η ρίζα απαλείφεται και μένει ο παράγοντας δύο (στο στατικό πρόβλημα το FEMM αγνοεί το γεγονός ότι τα μεγέθη είναι εναλλασσόμενα και χρησιμοποιεί μόνο τα πλάτη των μεγεθών, για αυτό και δεν είναι απαραίτητος ο πολλαπλασιασμός με το 2).

Οι απώλειες υπολογίζονται με στόχο να υπάρχει ένα ακόμη κριτήριο για την επιλογή της θωράκισης: μεγιστοποίηση της μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης αλλά με τις μικρότερες δυνατές απώλειες στη θωράκιση. Ο υπολογισμός αυτός δεν έγινε στην περίπτωση των δύο άλλων θωρακίσεων που εξετάστηκαν (μαγνητική θωράκιση, Κεφάλαιο 3 και πρώτο

είδος ηλεκτρικής θωράκισης, Παράγραφος 4.2) δεδομένου ότι, αφού έδιναν μικρές μεταβολές στην τάση βραχυκύκλωσης, δεν κρίθηκε σκόπιμη η περαιτέρω διερεύνησή τους.



**Σχήμα 4.11:** Μοντέλο FEMM για την αναπαράσταση του δεύτερου είδους ηλεκτρικής θωράκισης.

#### 4.3.2 Προσομοίωση προσθήκης ηλεκτρικής θωράκισης με αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρικής της διαμόρφωσης

Η μελέτη του μοντέλου FEMM για την περίπτωση του δεύτερου είδους ηλεκτρικής θωράκισης, το οποίο κατασκευάστηκε αρχικά με αραιό πλέγμα (2.500 κόμβοι) για M/Σ 1250 kVA, οδήγησε μετά από εκτέλεση των υπολογισμών στη διαπίστωση ότι η μορφή των δυναμικών γραμμών πάνω από τα πηνία αλλάζει πολύ σε σχέση με την αντίστοιχη μορφή των απλών μοντέλων. Στη συνέχεια, το αρχικό αυτό μοντέλο προσαρμόστηκε στην περίπτωση πυκνότερων πλεγμάτων (της τάξης των 15000 και 40000 κόμβων). Επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή νέων μοντέλων ηλεκτρικής θωράκισης με αύξηση και διαδοχικά μείωση της διάστασης του μήκους και εν συνεχεία του πλάτους του φύλλου χαλκού του αρχικού μοντέλου, καθώς και με ταυτόχρονη μεταβολή των διαστάσεων του μήκους και του πλάτους. Ακολουθήθηκε η προσαρμογή του μοντέλου στην περίπτωση του πυκνότερου πλέγματος των 15.000 κόμβων και των 40.000 κόμβων. Σε κάθε περίπτωση έγινε η απαραίτητη σύγκριση με τα αντίστοιχα μοντέλα χωρίς θωρακίσεις, τα οποία προέκυψαν με την προσθήκη αέρα στην περιοχή της θωράκισης (η οποία εξάλλου βρίσκεται μέσα σε περιοχή με αέρα), έτσι ώστε να μην αλλάζει η γεωμετρία του μοντέλου και υπάρχουν μεταβολές που οφείλονται σε αλλαγή του πλέγματος.

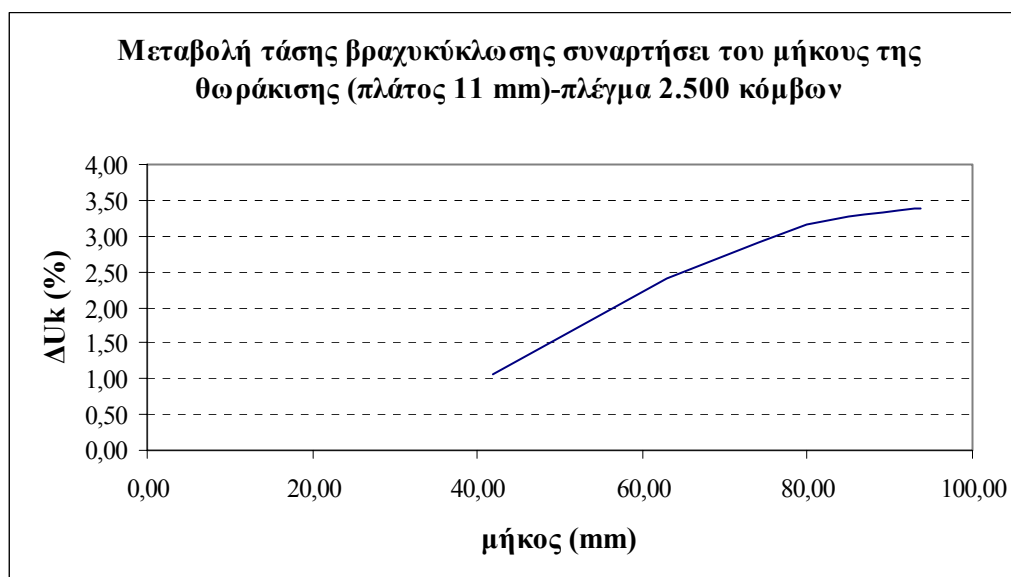
Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω εργασιών, με βάση τις τιμές του αριθμού των κόμβων και της μαγνητικής ενέργειας, υπολογίστηκαν οι τιμές της επαγωγικής πτώσης τάσης, για την περίπτωση της δεύτερης ηλεκτρικής θωράκισης, ενώ από τις ποσοστιαίες μεταβολές της μαγνητικής ενέργειας, καθώς και από τον υπολογισμό των απωλειών του μη στατικού προβλήματος, χαράχθηκαν οι καμπύλες μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης (η οποία, όπως εξηγήθηκε στην Παράγραφο 4.2.2, είναι ίση με τη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης) και των απωλειών συναρτήσει των διαστάσεων του μήκους και του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης για τις τρεις περιπτώσεις, των 2.500 κόμβων, των 15.000 κόμβων και των 40.000 κόμβων.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη μελέτη του δεύτερου είδους της ηλεκτρικής θωράκισης οδήγησε στην κατασκευή των ακόλουθων συγκεντρωτικών πινάκων και στην εξαγωγή συμπερασμάτων.

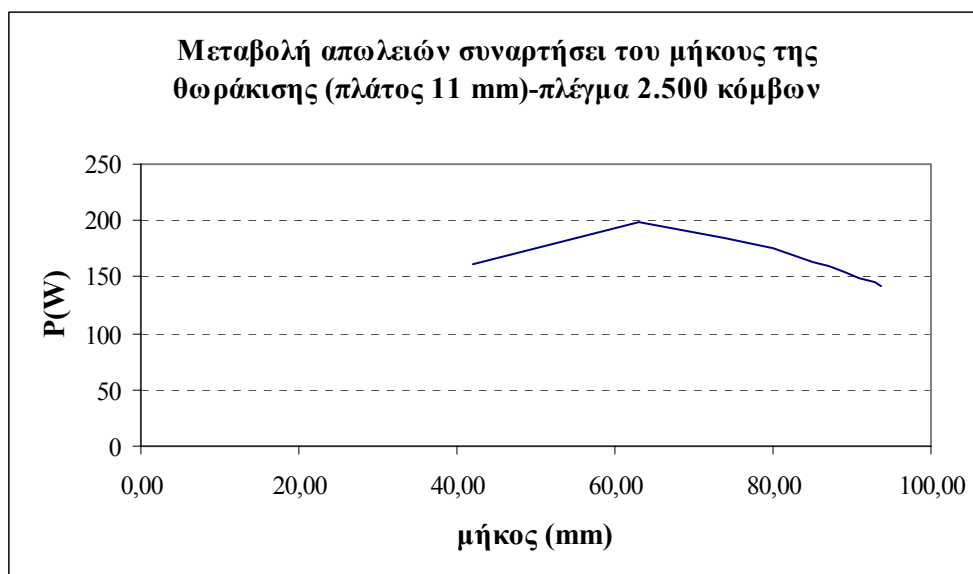
Ξεκινώντας από την περίπτωση του αραιού πλέγματος των 2.500 κόμβων, στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 4.10) παραθέτονται οι τιμές που λαμβάνει η διάσταση του μήκους της θωράκισης (42 έως 93,7 mm), οι προκύπτουσες τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης με θωράκιση και χωρίς θωράκιση, οι απώλειες του προβλήματος, καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης. Επίσης, στα Σχήματα 4.12 και 4.13 απεικονίζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν για τη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης και των απωλειών ως συναρτήσεων του μήκους της ηλεκτρικής θωράκισης. Από τα διαγράμματα αυτά είναι εμφανές το γεγονός ότι η αύξηση του μήκους της ηλεκτρικής θωράκισης, όταν το πλάτος παραμένει σταθερό, συνεπάγεται αύξηση της μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης, ενώ η γραφική παράσταση της μεταβολής των απωλειών παρουσιάζει μέγιστο για μήκος περί της μέσης τιμής των μηκών που λήφθηκαν υπόψη.

**Πίνακας 4.10:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης και των απωλειών συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για πλάτος ίσο με 11 mm και για πλέγμα της τάξης των 2.500 κόμβων.

2.500 κόμβοι				
πλάτος θωράκισης= 11 mm				
μήκος θωράκισης σε (mm)	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	$\Delta IX(\%)$	P (Watt)
9,370000E+01	5,472779	5,658283	3,389574E+00	1,425560E+02
9,300000E+01	5,465229	5,650794	3,395378E+00	1,449379E+02
9,100000E+01	5,460874	5,644424	3,361191E+00	1,488202E+02
8,900000E+01	5,455891	5,637580	3,330141E+00	1,538743E+02
8,700000E+01	5,470779	5,651246	3,298744E+00	1,588881E+02
8,500000E+01	5,470458	5,648933	3,262528E+00	1,633629E+02
8,000000E+01	5,475219	5,648259	3,160421E+00	1,754463E+02
7,400000E+01	5,493995	5,654219	2,916340E+00	1,848954E+02
6,300000E+01	5,517655	5,650201	2,402206E+00	1,992940E+02
4,200000E+01	5,587655	5,647224	1,066093E+00	1,605746E+02



**Σχήμα 4.12:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για πλάτος ίσο με 11 mm και πλέγμα 2.500 κόμβων.



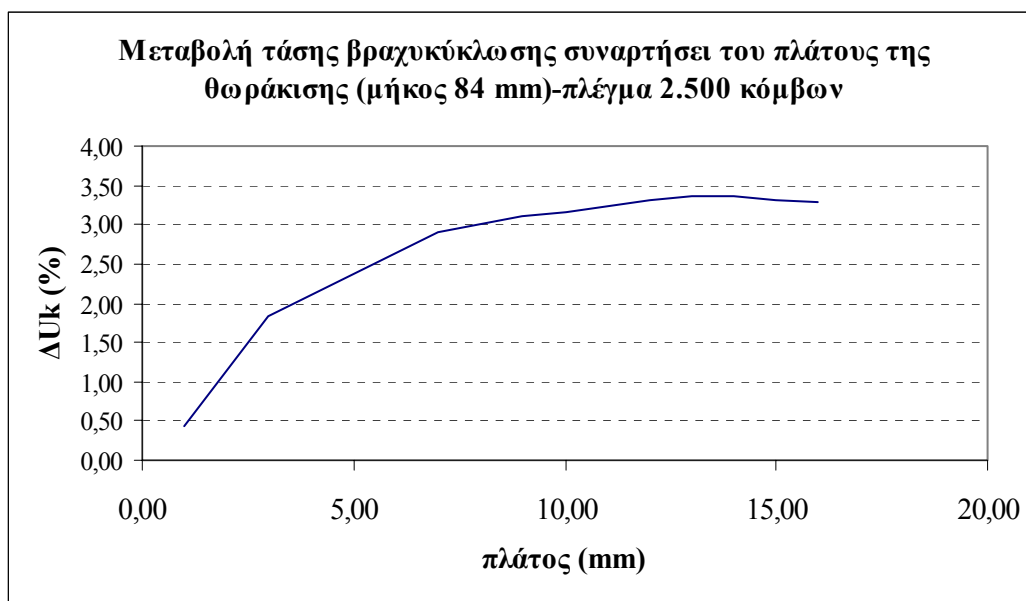
**Σχήμα 4.13:** Καμπύλη μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για πλάτος ίσο με 11 mm και πλέγμα 2.500 κόμβων.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η περίπτωση στην οποία ως μεταβαλλόμενη παράμετρος και κριτήριο που δύναται να επιδράσει στη συμπεριφορά του μετασχηματιστή λαμβάνεται η μεταβολή του πλάτους του φύλλου χαλκού. Έτσι, για πλάτη 1 έως 16 mm και πάντα για την περίπτωση αραιού πλέγματος, προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11 και στα γραφήματα που ακολουθούν, (Σχήματα 4.14 και 4.15):

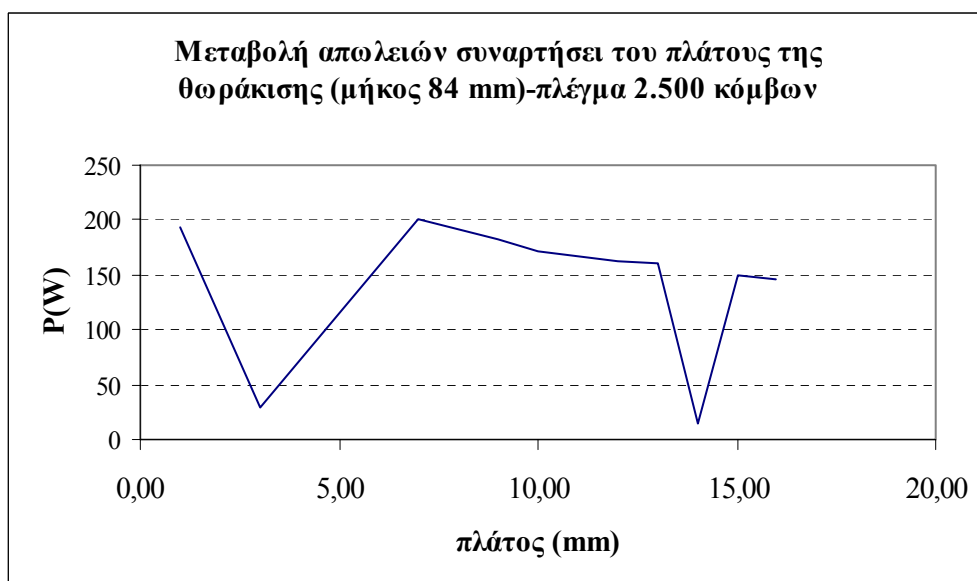
**Πίνακας 4.11:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης και των απωλειών συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 84 mm και για πλέγμα της τάξης των 2.500 κόμβων.

2.500 κόμβοι				
μήκος θωράκισης= 84 mm				
πλάτος θωράκισης (mm)	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX(%)	P (Watt)
1,600000E+01	5,477820	5,658179	3,292546E+00	1,463716E+02
1,500000E+01	5,472641	5,654537	3,323728E+00	1,494420E+02
1,400000E+01	5,462406	5,645700	3,355550E+00	1,527168E+01
1,300000E+01	5,472334	5,656674	3,368571E+00	1,598293E+02
1,200000E+01	5,478532	5,659386	3,301137E+00	1,618882E+02
1,000000E+01	5,473258	5,646470	3,164702E+00	1,712488E+02
9,000000E+00	5,469286	5,639219	3,107052E+00	1,825304E+02
7,000000E+00	5,479597	5,639395	2,916244E+00	2,009575E+02
3,000000E+00	5,549340	5,650994	1,831816E+00	2,860640E+01
1,000000E+00	5,632478	5,656433	4,253016E-01	1,941735E+02





**Σχήμα 4.14:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 84 mm και πλέγμα 2.500 κόμβων.



**Σχήμα 4.15:** Καμπύλη μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 84 mm και πλέγμα 2.500 κόμβων.

Η παρουσίαση της μελέτης του δεύτερου είδους της ηλεκτρικής θωράκισης για την περίπτωση του αραιού πλέγματος ολοκληρώνεται με την περίπτωση της ταυτόχρονης μεταβολής των διαστάσεων του φύλλου χαλκού, δηλαδή του μήκους και του πλάτους, και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης και των απωλειών, καθώς και για τις τιμές της επαγωγικής πτώσης τάσης με και χωρίς θωράκιση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12 που ακολουθεί:

**Πίνακας 4.12:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης και των απωλειών συναρτήσει του μήκους και του πλάτους της θωράκισης για πλέγμα της τάξης των 2.500 κόμβων.

2.500 κόμβοι				
διαστάσεις θωράκισης (mm)	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	$\Delta IX(\%)$	P (Watt)
μήκος=93,7 mm και πλάτος=12 mm	5,457568	5,646455	3,460994E+00	1,407282E+02
μήκος=91 mm και πλάτος=13 mm	5,457595	5,647385	3,477540E+00	1,458323E+02
μήκος=89 mm και πλάτος= 14 mm	5,468094	5,656057	3,437450E+00	1,452840E+02
μήκος=87 mm και πλάτος= 15 mm	5,474790	5,659673	3,376995E+00	1,455749E+02
μήκος=85 mm και πλάτος=16 mm	5,472273	5,653633	3,314152E+00	1,453981E+02
μήκος=74 mm και πλάτος=3 mm	5,563374	5,639744	1,372720E+00	2,673850E+02
μήκος=63 mm και πλάτος=7 mm	5,535202	5,641873	1,927146E+00	2,276684E+02
μήκος=42 mm και πλάτος=9 mm	5,605160	5,655475	8,976639E-01	1,632742E+02
μήκος=89 mm και πλάτος=7 mm	5,488116	5,654571	3,033019E+00	1,949007E+02
μήκος=74 mm και πλάτος=14 mm	5,491283	5,658620	3,047312E+00	1,707631E+02

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Η αύξηση του μήκους της ηλεκτρικής θωράκισης από την τιμή των 42 mm έως τα 93,7 mm συνεπάγεται αντίστοιχα μεγαλύτερη μεταβολή (μείωση) της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης, ενώ είναι αξιοσημείωτο ότι η μέγιστη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης δεν προκύπτει για το μέγιστο μήκος (93,7 mm), αλλά για την αμέσως μικρότερη τιμή που ισούται με 93 mm. Επίσης, η αύξηση του μήκους της ηλεκτρικής θωράκισης από 42 έως 63 mm προκαλεί ανάλογη αύξηση των τιμών των απωλειών, ενώ η περαιτέρω αύξηση του μήκους από 63 έως 93,7 mm, οδηγεί σε μείωση των απωλειών του προβλήματος, με αποτέλεσμα η καμπύλη της μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του μήκους της θωράκισης όταν το πλάτος παραμένει σταθερό να παρουσιάζει μέγιστο στο μήκος 63 mm .

Η αύξηση του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης από 1 έως 16 mm συνεπάγεται ανάλογη αύξηση της μεταβολής της επαγωγικής πτώσης τάσης, ενώ η μέγιστη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης δεν προκύπτει όταν το πλάτος είναι μέγιστο (16 mm), αλλά για τιμή αυτού ίση με 13 mm. Επίσης, η αύξηση του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης προκαλεί ανομοιόμορφη κατανομή των τιμών των απωλειών, με δύο ελάχιστα που αντιστοιχούν σε πλάτη 3 mm και 14 mm.

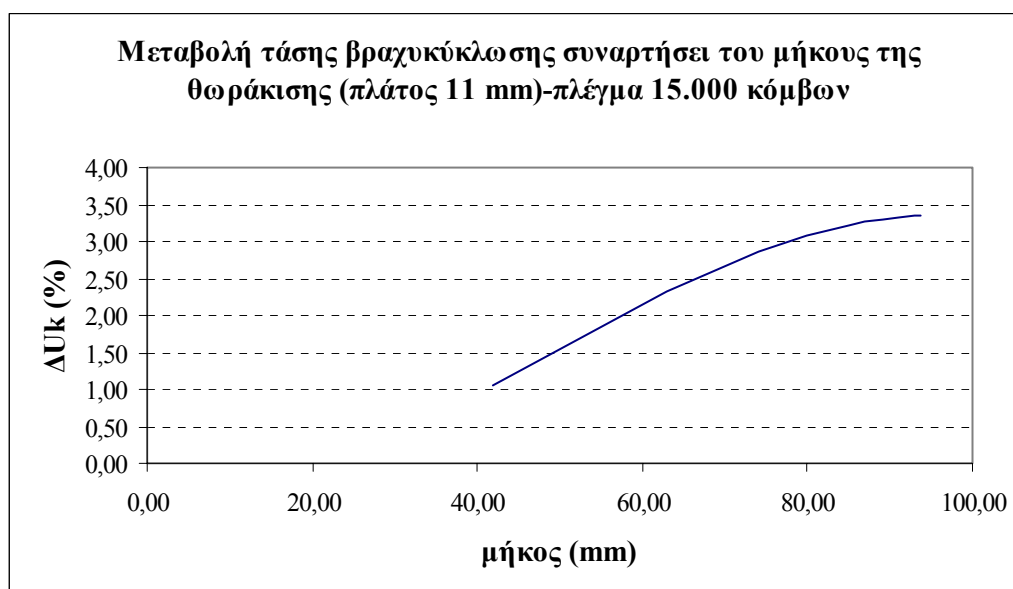
Η ταυτόχρονη μεταβολή (αύξηση, μείωση ή συνδυασμός αυτών) των παραμέτρων του μήκους και του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης, ως κριτήριο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μεγαλύτερη μεταβολή-μείωση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης αντιστοιχεί στην περίπτωση της ταυτόχρονης αύξησης του μήκους και του πλάτους της θωράκισης κατά 7 mm και 2 mm, δηλαδή για τιμές μήκους και πλάτους

91 mm και 13 mm, αντίστοιχα. Οι μεγαλύτερες απώλειες παρατηρούνται κατά την ταυτόχρονη μείωση του μήκους και του πλάτους της θωράκισης κατά 10 mm και 8 mm, αντίστοιχα, δηλαδή για μήκος ίσο με 74 mm με και πλάτος ίσο με 3 mm, ενώ όταν οι δύο παράμετροι αυξάνονται κατά 9,7 mm το μήκος και 1 mm το πλάτος, οι απώλειες γίνονται ελάχιστες.

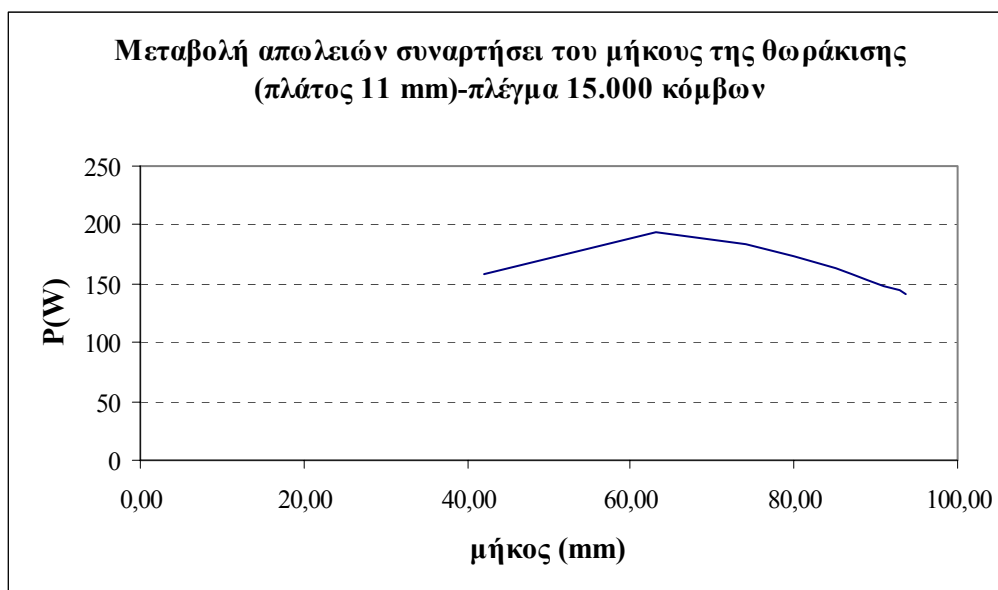
Επαναλαμβάνοντας την προηγούμενη διαδικασία για την περίπτωση πλέγματος της τάξης των 15.000 κόμβων, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα, τα οποία υπό μορφή πίνακα (Πίνακας 4.13), αλλά και γραφημάτων (Σχήματα 4.16 και 4.17), παρουσιάζονται ως εξής:

**Πίνακας 4.13:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης και των απωλειών συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για πλάτος ίσο με 11 mm και για πλέγμα της τάξης των 15.000 κόμβων.

15.000 κόμβοι				
πλάτος θωράκισης= 11 mm				
μήκος θωράκισης σε (mm)	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	$\Delta IX(\%)$	P (Watt)
9,370000E+01	5,543407	5,729305	3,353505E+00	1,417988E+02
9,300000E+01	5,543836	5,729313	3,345646E+00	1,442106E+02
9,100000E+01	5,545061	5,729278	3,322180E+00	1,485136E+02
8,900000E+01	5,546586	5,729248	3,293229E+00	1,535959E+02
8,700000E+01	5,548459	5,729297	3,259257E+00	1,579426E+02
8,500000E+01	5,550228	5,729160	3,223850E+00	1,624926E+02
8,000000E+01	5,557870	5,729205	3,082754E+00	1,726816E+02
7,400000E+01	5,569675	5,729248	2,865022E+00	1,833030E+02
6,300000E+01	5,598522	5,729182	2,333847E+00	1,935099E+02
4,200000E+01	5,669732	5,729221	1,049242E+00	1,576521E+02



**Σχήμα 4.16:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για πλάτος ίσο με 11 mm και πλέγμα 15.000 κόμβων.

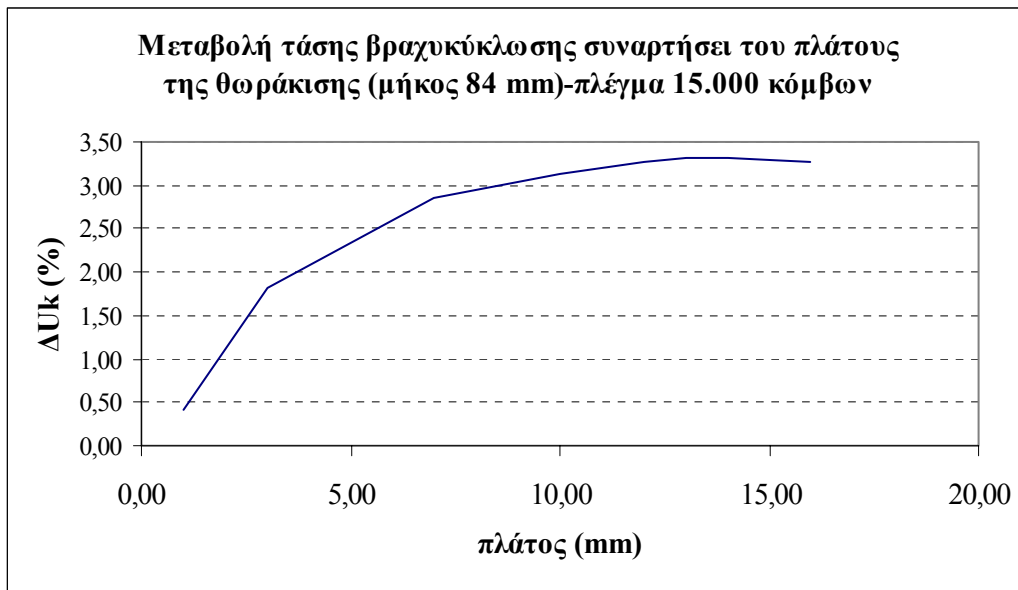


**Σχήμα 4.17:** Καμπύλη μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για πλάτος ίσο με 11 mm και πλέγμα 15.000 κόμβων.

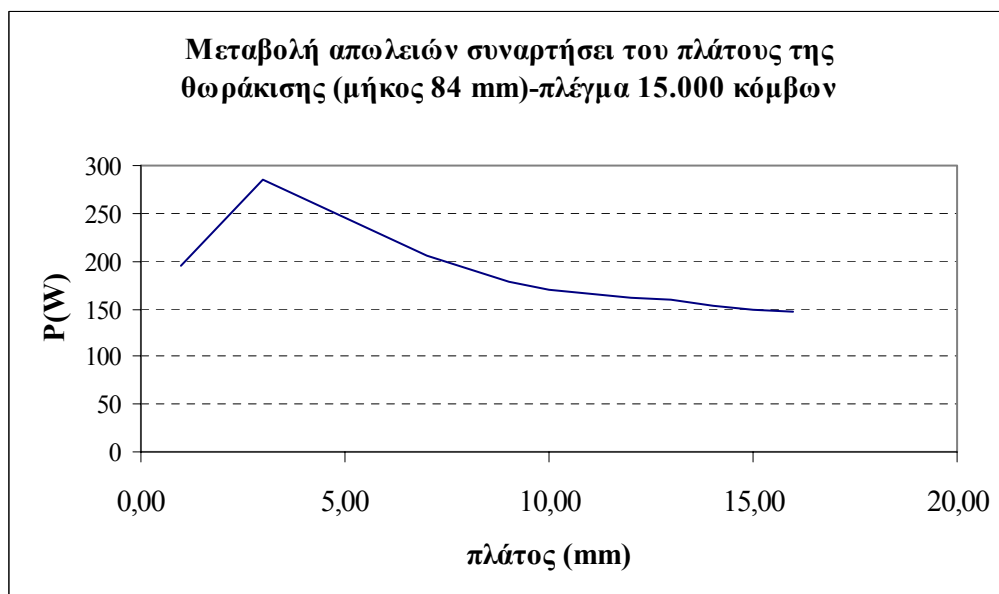
Προχωρώντας στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν από τη μελέτη της γεωμετρίας της ηλεκτρικής θωράκισης για την περίπτωση του ενδιάμεσου πλέγματος, τα αποτελέσματα στα οποία οδήγησαν οι μεταβολές της διάστασης του πλάτους του φύλλου χαλκού, διαμορφώνονται στον Πίνακα 4.14 και στα Σχήματα 4.18 και 4.19, ως εξής:

**Πίνακας 4.14:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης και των απωλειών συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για μήκος ίσο με 84 mm και για πλέγμα της τάξης των 15.000 κόμβων.

15.000 κόμβοι				
μήκος θωράκισης= 84 mm				
πλάτος θωράκισης σε (mm)	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX(%)	P (Watt)
1,600000E+01	5,548432	5,729336	3,260446E+00	1,461154E+02
1,500000E+01	5,547053	5,729240	3,284389E+00	1,492472E+02
1,400000E+01	5,545996	5,729267	3,304561E+00	1,528253E+02
1,300000E+01	5,544724	5,729167	3,326457E+00	1,588669E+02
1,200000E+01	5,548164	5,729221	3,263365E+00	1,615171E+02
1,000000E+01	5,555457	5,729194	3,127323E+00	1,708844E+02
9,000000E+00	5,559712	5,729248	3,049351E+00	1,789740E+02
7,000000E+00	5,570139	5,729271	2,856876E+00	2,049368E+02
3,000000E+00	5,627161	5,729068	1,810975E+00	2,847778E+02
1,000000E+00	5,705162	5,729370	4,243143E-01	1,953822E+02



**Σχήμα 4.18:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 84 mm και πλέγμα 15.000 κόμβων.



**Σχήμα 4.19:** Καμπύλη μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 84 mm και πλέγμα 15.000 κόμβων.

Όπως και στο αραιό πλέγμα, ως τελευταίο κριτήριο το οποίο λαμβάνεται υπόψη στη μελέτη της περίπτωσης του μοντέλου κανονικού πλέγματος και το οποίο μπορεί να αποτελέσει παράγοντα που επιδρά στη συμπεριφορά του μετασχηματιστή, αποτελεί η ταυτόχρονη μεταβολή των παραμέτρων που έχουν ληφθεί μέχρι τώρα υπόψη, δηλαδή των διαστάσεων του μήκους και του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αφορούν τόσο στη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης και στις τιμές της με και χωρίς θωράκιση όσο και στις απώλειες της θωράκισης, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα, (Πίνακας 4.15):

**Πίνακας 4.15:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης και των απωλειών συναρτήσει του μήκους και του πλάτους της θωράκισης για πλέγμα της τάξης των 15.000 κόμβων.

15.000 κόμβοι				
διαστάσεις θωράκισης σε (mm)	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX(%)	P (Watt)
μήκος=93,7 mm και πλάτος=12 mm	5,540519	5,729366	3,408486E+00	1,397299E+02
μήκος=91 mm και πλάτος=13 mm	5,538841	5,729278	3,438217E+00	1,454265E+02
μήκος=89 mm και πλάτος= 14 mm	5,541499	5,729351	3,389911E+00	1,446206E+02
μήκος=87 mm και πλάτος= 15 mm	5,544318	5,729290	3,336235E+00	1,435114E+02
μήκος=85 mm και πλάτος=16 mm	5,547471	5,729389	3,279309E+00	1,444725E+02
μήκος=74 mm και πλάτος=3 mm	5,652238	5,729205	1,361710E+00	2,673002E+01
μήκος=63 mm και πλάτος=7 mm	5,623231	5,729033	1,881515E+00	2,203514E+02
μήκος=42 mm και πλάτος=9 mm	5,678901	5,729163	8,850632E-01	1,570760E+02
μήκος=89 mm και πλάτος=7 mm	5,562941	5,729152	2,987815E+00	1,924563E+02
μήκος=74 mm και πλάτος=14 mm	5,562283	5,729225	3,001322E+00	1,685432E+02

Ομοίως με την περίπτωση του αραιού πλέγματος, τα συμπεράσματα, τα οποία προκύπτουν είναι τα εξής:

Η αύξηση του μήκους της ηλεκτρικής θωράκισης από 42 έως 93,7 mm, συνεπάγεται αντίστοιχα ολοένα και μεγαλύτερη μεταβολή (μείωση) της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης, με τη μέγιστη μεταβολή να δίνεται για το μέγιστο μήκος (93,7 mm). Επίσης, η καμπύλη της μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του μήκους της θωράκισης όταν το πλάτος παραμένει σταθερό παρουσιάζει, όπως και στην περίπτωση του αραιού πλέγματος μέγιστο στο μήκος 63 mm.

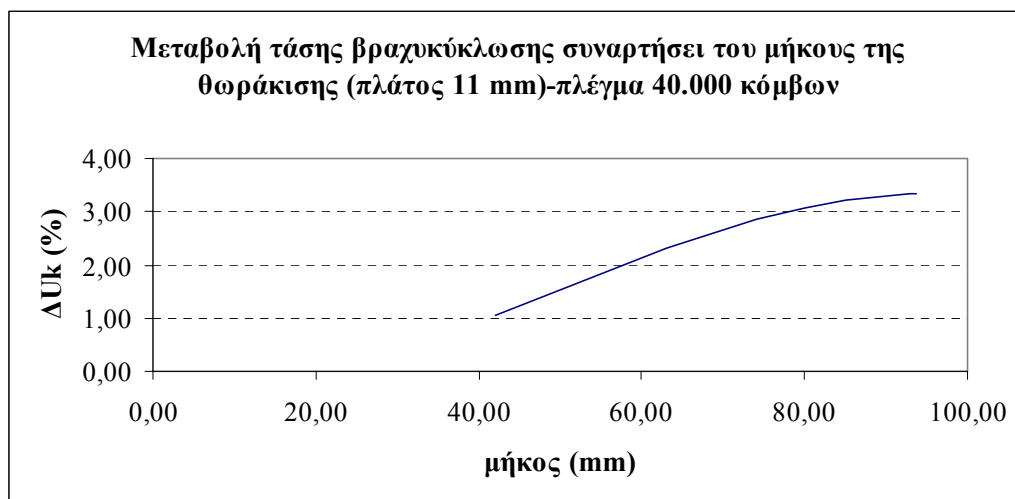
Η αύξηση του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης από 1 έως 16 mm συνεπάγεται ανάλογη αύξηση της μεταβολής της επαγωγικής πτώσης τάσης, ενώ είναι αξιοσημείωτο ότι η μέγιστη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης δεν προκύπτει από το μέγιστο πλάτος (16 mm), αλλά για τιμή αυτού ίση με 13 mm, όπως συμβαίνει και στο αρχικό μοντέλο του αραιού πλέγματος. Επίσης, η καμπύλη μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης παρουσιάζει αρχικά ένα μέγιστο για τιμή του πλάτους ίση με 3 mm και στη συνέχεια η περαιτέρω αύξηση του πλάτους οδηγεί σε ανάλογη μείωση των τιμών των απωλειών. Η μορφή αυτής της καμπύλης είναι αρκετά διαφορετική από την καμπύλη του Σχήματος 4.15 (η οποία αντιστοιχεί σε αραιό πλέγμα), γεγονός που αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό σε σφάλματα υπολογισμών λόγω της χρήσης αραιού πλέγματος. Σημειώνεται ότι στο πρώτο είδος ηλεκτρικής θωράκισης δεν παρατηρήθηκαν τόσο μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των πλεγμάτων, δεδομένου ότι το αραιό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την περίπτωση ήταν της τάξης των 8.000 κόμβων, πυκνότητα αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των 2.500 κόμβων.

Η ταυτόχρονη μεταβολή (αύξηση, μείωση ή συνδυασμός αυτών) των παραμέτρων του μήκους και του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης, ως κριτήριο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μεγαλύτερη μεταβολή-μείωση της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης αντιστοιχεί στην περίπτωση της ταυτόχρονης αύξησης του μήκους και του πλάτους της θωράκισης κατά 7 mm και 2 mm, αντίστοιχα, δηλαδή για τιμές μήκους και πλάτους 91 mm και 13 mm, αντίστοιχα, όπως ίσχυε και για το αραιό πλέγμα. Οι μεγαλύτερες απώλειες παρατηρούνται κατά την ταυτόχρονη μείωση του μήκους και του πλάτους της θωράκισης κατά 21 mm και 4 mm, αντίστοιχα, ενώ όταν οι δύο παράμετροι μειώνονται κατά 10 mm το μήκος και 8 mm το πλάτος, οπότε λαμβάνουν τιμές 74 mm και 3 mm, αντίστοιχα, οι απώλειες γίνονται ελάχιστες.

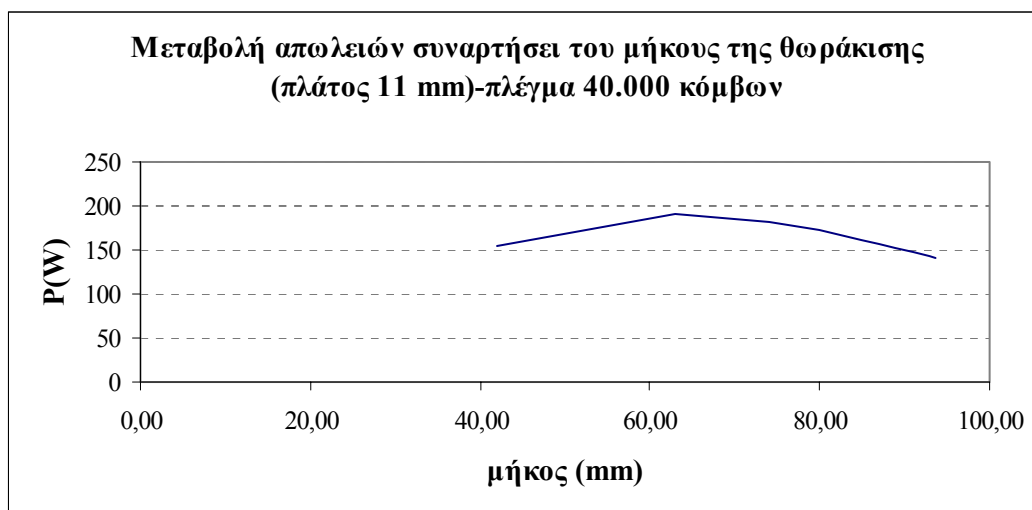
Η αναφορά στο δεύτερο είδος ηλεκτρικής θωράκισης ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν από τη μελέτη της περίπτωσης πυκνού πλέγματος (40.000 κόμβοι). Ακολουθούν οι πίνακες και τα γραφήματα που αφορούν στις μεταβαλλόμενες κάθε φορά παραμέτρους οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη, καθώς και στις προκύπτουσες τιμές για την τάση βραχυκύκλωσης και τις απώλειες της θωράκισης:

**Πίνακας 4.16:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης και των απωλειών συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για πλάτος ίσο με 11 mm και για πλέγμα της τάξης των 40.000 κόμβων.

40.000 κόμβοι				
πλάτος θωράκισης= 11 mm				
μήκος θωράκισης σε (mm)	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX(%)	P (Watt)
9,370000E+01	5,547214	5,732756	3,344782E+00	1,418878E+02
9,300000E+01	5,547693	5,732752	3,335794E+00	1,438021E+02
9,100000E+01	5,549003	5,732714	3,310708E+00	1,485128E+02
8,900000E+01	5,550581	5,732795	3,282785E+00	1,531761E+02
8,700000E+01	5,552385	5,732741	3,248260E+00	1,573115E+02
8,500000E+01	5,554610	5,732733	3,206756E+00	1,616010E+02
8,000000E+01	5,561892	5,732729	3,071572E+00	1,720758E+02
7,400000E+01	5,573601	5,732703	2,854551E+00	1,825423E+02
6,300000E+01	5,602743	5,732649	2,318621E+00	1,905127E+02
4,200000E+01	5,673493	5,732810	1,045508E+00	1,556144E+02



**Σχήμα 4.20:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για πλάτος ίσο με 11 mm και πλέγμα 40.000 κόμβων.



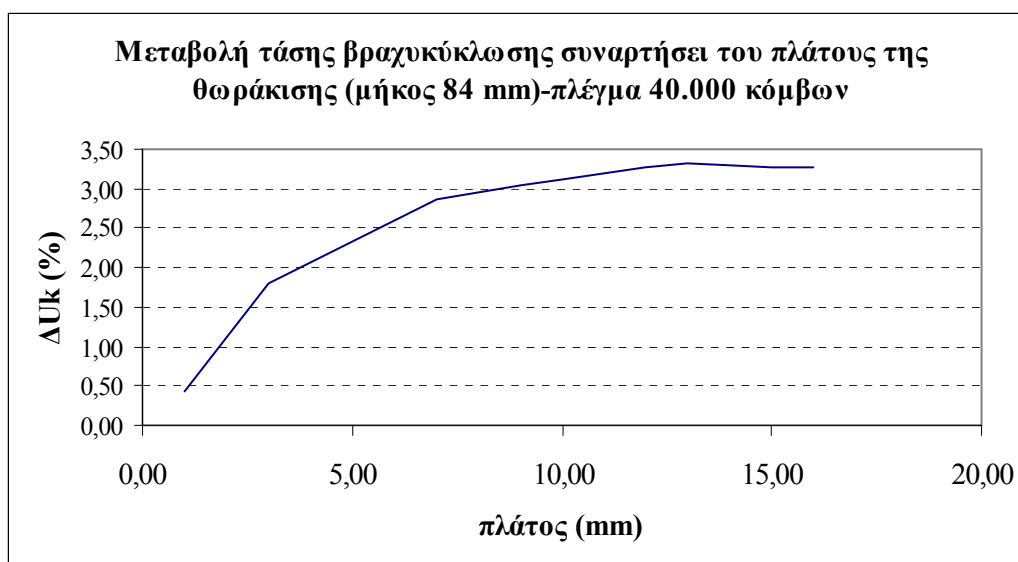
**Σχήμα 4.21:** Καμπύλη μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για πλάτος ίσο με 11 mm και πλέγμα 40.000 κόμβων.

Μετά τη μελέτη του τρόπου μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης και των απωλειών συναρτήσει του μήκους της ηλεκτρικής θωράκισης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν με βάση τις μεταβολές της διάστασης του πλάτους του φύλλου χαλκού, (Πίνακας 4.17 και Σχήματα 4.22 και 4.23):

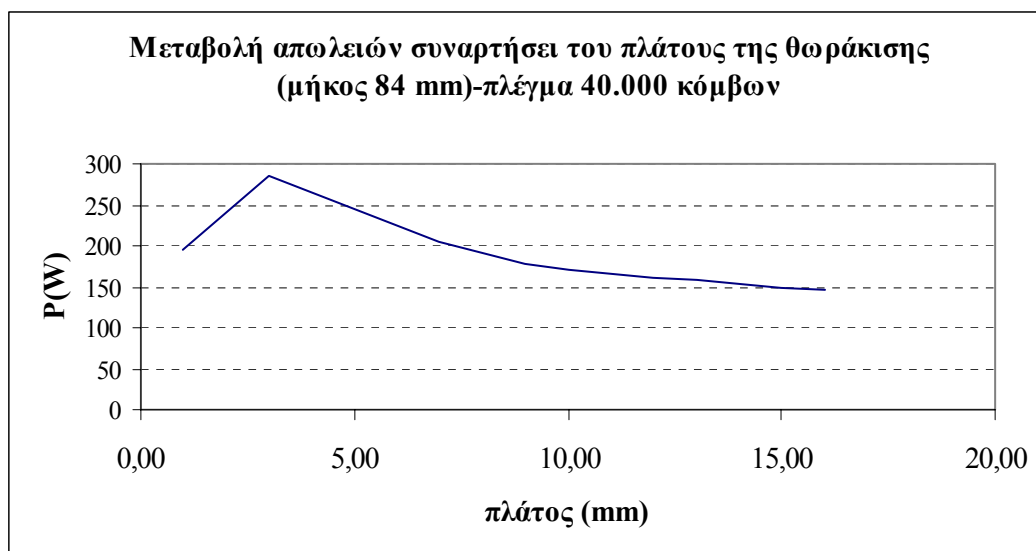


**Πίνακας 4.17:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης και των απωλειών συναρτήσει του μήκους της θωράκισης για μήκος ίσο με 84 mm και για πλέγμα της τάξης των 40.000 κόμβων.

40.000 κόμβοι				
μήκος θωράκισης= 84 mm				
πλάτος θωράκισης σε (mm)	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	$\Delta IX(\%)$	P (Watt)
1,600000E+01	5,552059	5,732756	3,254591E+00	1,456828E+02
1,500000E+01	5,550991	5,732745	3,274262E+00	1,484286E+02
1,400000E+01	5,554212	5,732756	3,214572E+00	1,472470E+02
1,300000E+01	5,553247	5,732768	3,232720E+00	1,528406E+02
1,200000E+01	5,556414	5,732683	3,172350E+00	1,545052E+02
1,000000E+01	5,559678	5,732779	3,113512E+00	1,698305E+02
9,000000E+00	5,563826	5,732718	3,035531E+00	1,779393E+02
7,000000E+00	5,574762	5,732710	2,833275E+00	2,024040E+02
3,000000E+00	5,630861	5,732756	1,809581E+00	2,820160E+02
1,000000E+00	5,708487	5,732729	4,246710E-01	1,954605E+02



**Σχήμα 4.22:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 84 mm και πλέγμα 40.000 κόμβων.



**Σχήμα 4.23:** Καμπύλη μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 84 mm και πλέγμα 40.000 κόμβων.

Το τελευταίο κριτήριο το οποίο λαμβάνεται υπόψη και στη μελέτη της περίπτωσης του μοντέλου πυκνού πλέγματος, αποτελεί η ταυτόχρονη μεταβολή των διαστάσεων του μήκους και του πλάτους της θωράκισης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αφορούν στη μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης και στις τιμές της με και χωρίς θωράκιση, καθώς και στις τιμές των απωλειών της θωράκισης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.18.

**Πίνακας 4.18:** Μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης και των απωλειών συναρτήσει του μήκους και του πλάτους της θωράκισης για πλέγμα της τάξης των 40.000 κόμβων.

40.000 κόμβοι				
διαστάσεις θωράκισης σε (mm)	IX% με θωράκιση	IX% χωρίς θωράκιση	ΔIX(%)	P (Watt)
μήκος=93,7 mm και πλάτος=12 mm	5,544134	5,732802	3,403016E+00	1,398266E+02
μήκος=91 mm και πλάτος=13 mm	5,542683	5,732802	3,430098E+00	1,454410E+02
μήκος=89 mm και πλάτος= 14 mm	5,545299	5,732810	3,381441E+00	1,444013E+02
μήκος=87 mm και πλάτος= 15 mm	5,548045	5,732760	3,329368E+00	1,437701E+02
μήκος=85 mm και πλάτος=16 mm	5,551125	5,732879	3,274183E+00	1,441673E+02
μήκος=74 mm και πλάτος=3 mm	5,655693	5,732699	1,361555E+00	2,636972E+02
μήκος=63 mm και πλάτος=7 mm	5,627418	5,732703	1,870927E+00	2,172808E+02
μήκος=42 mm και πλάτος=9 mm	5,682540	5,732687	8,824743E-01	1,530856E+02
μήκος=89 mm και πλάτος=7 mm	5,567706	5,732772	2,964688E+00	1,899338E+02
μήκος=74 mm και πλάτος=14 mm	5,566213	5,732733	2,991634E+00	1,679864E+02

Συμπερασματικά, το μοντέλο των 40.000 κόμβων, οδηγεί στη διατύπωση των ακόλουθων παρατηρήσεων:

Η αύξηση του μήκους της ηλεκτρικής θωράκισης από 42 έως 93,7 mm, συνεπάγεται αντίστοιχα ολοένα και μεγαλύτερη μεταβολή (μείωση) της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης, με τη μέγιστη μεταβολή να δίνεται για το μέγιστο μήκος (93,7 mm). Επίσης, η καμπύλη της μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του μήκους της θωράκισης όταν το πλάτος παραμένει σταθερό παρουσιάζει, όπως και στην περίπτωση του αραιού και του ενδιάμεσου πλέγματος, μέγιστο στο μήκος 63 mm.

Η αύξηση του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης από 1 έως 16 mm συνεπάγεται ανάλογη αύξηση της μεταβολής της επαγωγικής πτώσης τάσης, ενώ είναι αξιοσημείωτο ότι η μέγιστη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης δεν προκύπτει από το μέγιστο πλάτος (16 mm), αλλά για τιμή αυτού ίση με 15 mm. Επίσης, η καμπύλη μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης παρουσιάζει αρχικά ένα μέγιστο για τιμή του πλάτους ίση με 3 mm και στη συνέχεια η περαιτέρω αύξηση του πλάτους οδηγεί σε ανάλογη μείωση των τιμών των απωλειών, ομοίως με την περίπτωση του κανονικού πλέγματος.

Η ταυτόχρονη μεταβολή (αύξηση, μείωση ή συνδυασμός αυτών) των παραμέτρων του μήκους και του πλάτους της ηλεκτρικής θωράκισης, ως κριτήριο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μεγαλύτερη μεταβολή (μείωση) της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης αντιστοιχεί στην περίπτωση της ταυτόχρονης αύξησης του μήκους και του πλάτους της θωράκισης κατά 7 mm και 2 mm, αντίστοιχα, όπως ίσχυε και στο αραιό και στο κανονικό πλέγμα. Οι μεγαλύτερες απώλειες παρατηρούνται κατά την ταυτόχρονη μείωση του μήκους και του πλάτους της θωράκισης κατά 10 mm και 8 mm, αντίστοιχα, οπότε το μήκος ισούται με 74 mm και το πλάτος με 3 mm, ενώ όταν οι δύο παράμετροι αυξάνονται κατά 9,7 mm το μήκος και 1 mm το πλάτος, οι απώλειες γίνονται ελάχιστες.

Στην περίπτωση του δεύτερου είδους ηλεκτρικής θωράκισης, οι καμπύλες μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης και απωλειών για το ενδιάμεσο και το πυκνότερο πλέγμα είναι παρόμοιες, ενώ παρουσιάζουν διαφορές, κυρίως ως προς τις απώλειες, με τις τιμές που προκύπτουν με τη χρήση του αραιού πλέγματος. Σε κάθε περίπτωση, οι μεταβολές της τάσης βραχυκύκλωσης κυμαίνονται από 0,5% έως 3,5%, αποδεικνύοντας ότι το είδος αυτό της θωράκισης είναι πολύ πιο αποδοτικό από το πρώτο είδος που μελετήθηκε.

#### 4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μελέτη της προσθήκης ηλεκτρικής θωράκισης, δηλαδή φύλλων χαλκού μέσα στο μετασχηματιστή, ως μία δεύτερη προσπάθεια αλλαγής των χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή, και ειδικότερα της τάσης βραχυκύκλωσης. Το συγκεκριμένο υλικό τοποθετείται με σκοπό να δράσει έτσι ώστε να απομακρύνει τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές σκέδασης των πηνίων, μειώνοντας αντίστοιχα την τάση βραχυκύκλωσης.

Έγινε αναφορά σε δύο είδη ηλεκτρικής θωράκισης, τα οποία διαφοροποιούνται στο γεγονός ότι στο πρώτο είδος ο χαλκός τοποθετείται απευθείας μέσα στο υλικό του πυρήνα του μετασχηματιστή, ενώ στο δεύτερο είδος, μεταξύ του υλικού του πυρήνα (σίδηρος) και του φύλλου χαλκού μεσολαβεί αέρας. Με βάση τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν συνολικά, το δεύτερο είδος ηλεκτρικής θωράκισης κρίθηκε ως αποτελεσματικότερο και πιο “αποδοτικό”, όσον αφορά στην επίδρασή του στις μεταβολές που παρουσιάζονται στην επαγωγική πτώση τάσης.

Σύμφωνα με τις καμπύλες μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει των διαστάσεων της θωράκισης, παρατηρείται ότι είναι δυνατή μία αύξηση από 0,5% μέχρι 3,5%. Εντούτοις, πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη η αύξηση στην απώλεια ισχύος της θωράκισης,

ώστε να υπάρχει ένα ακόμη κριτήριο για την επιλογή της θωράκισης, το οποίο είναι η μεγιστοποίηση της μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης, αλλά με τις μικρότερες δυνατές απώλειες στη θωράκιση.

## ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η βελτιστοποίηση των διαστάσεων του δεύτερου είδους ηλεκτρικής θωράκισης, το οποίο κρίθηκε ως το αποτελεσματικότερο από τα τρία είδη των θωράκισων που χρησιμοποιήθηκαν, όσον αφορά στην επίδρασή τους στις μεταβολές που παρουσιάζονται στην επαγωγική πτώση τάσης και τελικά στη συμπεριφορά του μετασχηματιστή. Σύμφωνα με τις καμπύλες μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει των διαστάσεων της θωράκισης όπως παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρατηρείται ότι είναι δυνατή μία αύξηση από 0,5% μέχρι 3,5%. Εντούτοις, πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη η αύξηση στην απώλεια ισχύος της θωράκισης, ώστε να υπάρχει ένα ακόμη κριτήριο για την επιλογή της θωράκισης, το οποίο είναι η μεγιστοποίηση της μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης, αλλά με τις μικρότερες δυνατές απώλειες ισχύος στη θωράκιση. Επιπλέον, περαιτέρω αλλαγές στη γεωμετρία της θωράκισης μπορούν να παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα στην μεταβολή της  $U_k$ , βελτιστοποιώντας κατά συνέπεια το συνολικό υλικό θωράκισης που απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής μεταβολής στην τάση βραχυκύκλωσης. Επομένως, η αναζήτηση της βέλτιστης διαμόρφωσης της ηλεκτρικής θωράκισης αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία, κατά την οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μεταβολές δύο μεταβλητών, δηλαδή, του πλάτους και του μήκους της θωράκισης. Έτσι, η διαδικασία αυτή μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μη γραμμικό, πολυκριτηριακό, πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς.

### 5.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η γενική μαθηματική μορφή βελτιστοποίησης της γεωμετρίας της ηλεκτρικής θωράκισης συνίσταται στην ελαχιστοποίηση ή τη μεγιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης  $F(X_i)$ , όπου  $X_i$  είναι το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος. Στην περίπτωση της ηλεκτρικής θωράκισης, οι μεταβλητές σχεδίασης περιλαμβάνουν τις γεωμετρικές παραμέτρους της θωράκισης, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση ελέγχεται από την επιθυμητή αλλαγή στη σκέδαση του πεδίου του μετασχηματιστή. Το διάνυσμα  $X_i$  υπόκειται στους περιορισμούς που επιβάλλονται από τη γεωμετρία του μετασχηματιστή (διαστάσεις ενεργού μέρους και κελύφους).

Η βελτιστοποίηση ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων με ντετερμινιστικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία, [5.1]–[5.4]. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τέτοιου είδους εφαρμογές. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που έχουν εξεταστεί στην περίπτωση βελτιστοποίησης της ηλεκτρικής θωράκισης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε αυτούς που στηρίζονται σε βαθμωτή μεταβολή και σε εκείνους που δεν είναι βασισμένοι σε κάποια βαθμωτή μεταβολή. Αναλυτικά περιγράφονται στη συνέχεια [5.5].

Οι βασισμένες σε βαθμωτή μεταβολή μέθοδοι είναι μέθοδοι πρώτης τάξης. Οι κατευθύνσεις αναζήτησης κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας την κλίση της αντικειμενικής

συνάρτησης. Δεδομένου ότι οι κλίσεις υπολογίζονται, οι συνθήκες Kuhn-Tucker (Συνθήκες Πρώτης Τάξης  $\nabla f = 0$ ) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν τη σύγκλιση. Οι Συνθήκες Δεύτερης Τάξης (που περιλαμβάνουν τον υπολογισμό της Χεσσιανής μήτρας της αντικειμενικής συνάρτησης) δεν εφαρμόζονται. Επομένως, το σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών των μεθόδων είναι ότι βρίσκουν μόνο τοπικά ελάχιστα και ο χρήστης πρέπει να επαληθεύσει ότι η λύση δεν είναι ένα σαγματικό σημείο μέσω της διαταραχής στις μεταβλητές σχεδιασμού και της εκτέλεσης της μεθόδου από διάφορα διακριτά σημεία.

### 5.2.1 Μέθοδος πιο απότομης καθόδου (Steepest Descent method)

Η πιο απότομη κάθοδος είναι μία μέθοδος βασισμένη σε βαθμωτή μεταβολή, δηλαδή η κατεύθυνση αναζήτησης  $S_i$  για τη βέλτιστη λύση κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας την κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης. Η κατεύθυνση καθόδου λαμβάνεται αντιστρέφοντας την κλίση, σύμφωνα με τη σχέση (5.1):

$$S_i = -\nabla F(\mathbf{X}_i) \quad (5.1)$$

### 5.2.2 Συζευγμένη μέθοδος κλίσης Fletcher-Reeves (Conjugate Gradient Fletcher-Reeves) (CG-FR)

Αυτή η μέθοδος είναι μία παραλλαγή της μεθόδου της πιο απότομης καθόδου, όπου η κατεύθυνση αναζήτησης για τη λύση δίνεται από τη σχέση (5.2):

$$S_i = -\nabla F(\mathbf{X}_i) + \frac{\nabla F(\mathbf{X}_i)^T \nabla F(\mathbf{X}_i)}{\nabla F(\mathbf{X}_{i-1})^T \nabla F(\mathbf{X}_{i-1})} \nabla F(\mathbf{X}_{i-1}) \quad (5.2)$$

Η ανωτέρω τροποποίηση της κατεύθυνσης αναζήτησης αποδίδει την ιδιότητα της τετραγωνικής σύγκλισης στη μέθοδο.

Μία σύγκριση μεταξύ της μεθόδου της πιο απότομης καθόδου και της CG αποκαλύπτει ότι η δεύτερη έχει έναν επιπλέον υπολογισμό και τη διαδοχική ρύθμιση της

κατεύθυνσης αναζήτησης που ενσωματώνει αυτήν την τιμή. Ο όρος  $\frac{\nabla f(\mathbf{X}_i)^T \nabla f(\mathbf{X}_i)}{\nabla f(\mathbf{X}_{i-1})^T \nabla f(\mathbf{X}_{i-1})}$

αντιπροσωπεύει την αναλογία του τετραγώνου του τρέχοντος διανύσματος κλίσης ως προς το τετράγωνο του προηγούμενου διανύσματος κλίσης. Ένας βαθμός ευρωστίας αυξάνεται στη μέθοδο από τις πληροφορίες που μεταφέρονται από την προηγούμενη επανάληψη, δεδομένου ότι οι συνθήκες πρώτης τάξης βασίζονται στο μήκος του διανύσματος κλίσης πλησιάζοντας στο μηδέν στη λύση. Εάν η προηγούμενη επανάληψη είναι κοντά στη λύση, τότε ο όρος

$\frac{\nabla f(\mathbf{X}_i)^T \nabla f(\mathbf{X}_i)}{\nabla f(\mathbf{X}_{i-1})^T \nabla f(\mathbf{X}_{i-1})}$  είναι μεγάλος και η προηγούμενη επανάληψη διαδραματίζει έναν

σημαντικό ρόλο στην τρέχουσα επανάληψη. Αφ' ετέρου, εάν ο όρος  $\frac{\nabla f(\mathbf{X}_i)^T \nabla f(\mathbf{X}_i)}{\nabla f(\mathbf{X}_{i-1})^T \nabla f(\mathbf{X}_{i-1})}$

είναι μικρός και η λύση είναι ακόμα μακριά, τότε η τρέχουσα τιμή της κλίσης καθορίζει τη νέα κατεύθυνση αναζήτησης.

### 5.2.3 Μέθοδος Davidon-Fletcher-Powell (DFP)

Η DFP είναι μία ημι-Newton, με μετρικές μεταβλητές (VM) μέθοδος, βασισμένη στη βαθμωτή μεταβολή. Οι ημι-Newton μέθοδοι VM έχουν επίσης την ιδιότητα της τετραγωνικής σύγκλισης. Καθώς η λύση προσεγγίζεται, συμπεριφέρονται όπως η μέθοδος Newton (Μέθοδος Δεύτερης Τάξης).

Η βελτίωση της CG ως προς την Steepest Descent είναι δυνατή λόγω του συνυπολογισμού της ιστορίας από την προηγούμενη επανάληψη. Στις ημι-Newton μεθόδους, η ιστορία από όλες τις προηγούμενες αναγωγές είναι διαθέσιμη. Αυτές οι πληροφορίες συλλέγονται μέσα σε μια μήτρα  $n \times n$   $[A_i]$ , αποκαλούμενη μετρική, η οποία ενημερώνεται με κάθε επανάληψη και χρησιμοποιείται για να καθιερώσει την κατεύθυνση αναζήτησης  $S_i$  ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} S_i &= -[A_i] \nabla F(\mathbf{x}_i), \quad Y = \nabla F(\mathbf{x}_{i+1}) - \nabla F(\mathbf{x}_i) \\ Z &= [A_i] Y, \quad [A_{i+1}] = [A_i] + \frac{\Delta X \Delta X^T}{\Delta X^T Y} - \frac{Z Z^T}{Y^T Z} \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Απαιτείται επίσης μία αρχική επιλογή για τη μετρική, η οποία πρέπει να είναι μία θετικά καθορισμένη μήτρα. Για τη σύγκλιση της μεθόδου, η μετρική πρέπει να διατηρήσει τη θετικά καθορισμένη ιδιότητά της μέσω των αναγωγών. Στη μέθοδο DFP, η μετρική προσεγγίζει την αντίστροφη της αντικειμενικής συνάρτησης της Χεσσιανής μήτρας στη λύση.

### 5.2.4 Μέθοδος Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)

Η BFGS είναι μία άλλη ημι-Newton, VM μέθοδος και η διαφορά της έναντι της DFP βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο ενημερώνεται η μετρική της. Αυτή η μετρική, σύμφωνα με τη σχέση (5.4), συγκλίνει στη Χεσσιανή της αντικειμενικής συνάρτησης (και όχι στην αντίστροφη της Χεσσιανής όπως στη μέθοδο DFP) καθώς προσεγγίζεται η λύση. Για τη σύγκλιση, η μετρική πρέπει να είναι θετικά καθορισμένη. Μία αρχική επιλογή θετικά καθορισμένης μήτρας για τη μετρική είναι συνήθως επαρκής για να εξασφαλίσει αυτήν την ιδιότητα για τα τετραγωνικά προβλήματα. Ο μοναδιαίος πίνακας είναι συνήθως η προκαθορισμένη επιλογή.

$$\left. \begin{aligned} S_i &= -[A_i] \nabla F(\mathbf{x}_i), \quad Y = \nabla F(\mathbf{x}_{i+1}) - \nabla F(\mathbf{x}_i) \\ [A_{i+1}] &= [A_i] + \frac{Y Y^T}{Y^T \Delta X} - \frac{\nabla F(\mathbf{x}_i) \nabla F(\mathbf{x}_i)^T}{\nabla F(\mathbf{x}_i)^T S_i} \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

Οι μέθοδοι μη-κλίσης αναφέρονται ως μέθοδοι μηδενικής τάξης, σύμφωνα με την τάξη της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης, που απαιτείται για να επαληθεύσει την κατεύθυνση αναζήτησης κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης. Δεδομένου ότι δε χρησιμοποιούνται παράγωγοι, χρησιμοποιούνται μόνο οι τιμές της συνάρτησης για να καθιερώσουν το διάνυσμα αναζήτησης. Επομένως, οι Συνθήκες Πρώτης Τάξης δεν εφαρμόζονται σε αυτές τις μεθόδους και μόνο οι αλλαγές στην αντικειμενική συνάρτηση ή οι μεταβλητές σχεδιασμού μπορούν να παρέχουν σύγκλιση ή/και κριτήρια τερματισμού.

### 5.2.5 Μέθοδος αναζήτησης προτύπου (Pattern Search)

Σε αυτήν τη μέθοδο βελτιστοποίησης μη-βαθμωτής μεταβολής, η κατεύθυνση αναζήτησης ανακυκλώνεται μέσω του αριθμού μεταβλητών  $n$ , διαδοχικά, και η  $n+1$  κατεύθυνση αναζήτησης συναντάται ως γραμμικός συνδυασμός των προηγούμενων  $n$  κατευθύνσεων αναζήτησης σύμφωνα με τη σχέση (5.5):

$$S_i = \sum_{j=1}^n a_j^{\wedge} e_j \quad (5.5)$$

Έπειτα, υπολογίζεται ένα μονοδιάστατο βέλτιστο μέγεθος βήματος και αρχίζει ο επόμενος κύκλος επανάληψης. Η μέθοδος Pattern Search έχει μερικά επιπλέον κριτήρια τερματισμού, τα οποία είναι βασισμένα στο πόσο μειώνεται σε κάθε κύκλο η συνάρτηση και πόσο μεγάλη μεταβολή πραγματοποιείται στην ίδια τη μεταβλητή σχεδιασμού (μήκος της μεταβολής στο ίδιο το διάλυμα σχεδιασμού).

## 5.3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ

### 5.3.1 Συναρτήσεις μεταβολής

Όπως ήδη έχει αναφερθεί παραπάνω, η μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης και οι απώλειες είναι συναρτήσεις δύο μεταβλητών, του μήκους ( $x$ ) της ηλεκτρικής θωράκισης και του πλάτους ( $y$ ) της θωράκισης. Για το συγκεκριμένο, λοιπόν, είδος θωράκισης, και πιο ειδικά για περίπτωση πυκνότητας πλέγματος της τάξης των 15.000 κόμβων περίπου, το οποίο είναι πλέγμα ενδιάμεσης πυκνότητας, υπολογίστηκε η μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης καθώς και οι απώλειες, μεταβάλλοντας τη διάσταση του πλάτους της θωράκισης για τρία διαφορετικά μήκη, 42 mm, 84 mm και 93,7 mm. Ο λόγος που επιλέχθηκαν οι 15000 κόμβοι, είναι η ανάγκη να υπάρχει ως σημείο αναφοράς ένα ενδιάμεσο πλέγμα με καλή πυκνότητα, χωρίς μεγάλο χρόνο εκτέλεσης. Πάνω στις προκύπτουσες καμπύλες μεταβολής τάσης βραχυκύκλωσης και απωλειών συναρτήσει του πλάτους έχουν χαραχθεί με μια πλατιά μαύρη γραμμή συναρτήσεις μεταβολής, οι οποίες προσεγγίζουν τις καμπύλες μαζί με τον τύπο της αντίστοιχης συνάρτησης. Οι συναρτήσεις αυτές προέκυψαν με τη μέθοδο της πολυωνυμικής παρεμβολής 2<sup>ου</sup> βαθμού. Η τάξη της παρεμβολής επιλέχθηκε με κριτήριο την ακριβή προσέγγιση των καμπυλών, διατηρώντας ταυτόχρονα χαμηλό βαθμό πολυπλοκότητας.

Ακολουθούν οι πίνακες αποτελεσμάτων της μεταβολής της μαγνητικής ενέργειας και των απωλειών (Πίνακες 5.1 έως 5.3) και τα αντίστοιχα γραφήματα (Σχήματα 5.1 έως 5.6) για τα τρία παραπάνω διαφορετικά μήκη ηλεκτρικής θωράκισης και για μεταβολές του πλάτους της. Η μεταβολή στην τάση βραχυκύκλωσης η οποία εμφανίζεται στα Σχήματα 5.1, 5.3 και 5.5 προκύπτει από τη μεταβολή της μαγνητικής ενέργειας που εμφανίζεται στους Πίνακες 5.1 έως 5.3, ως εξής: δεδομένου ότι η επαγωγική πτώση τάσης, σύμφωνα με τις σχέσεις (5.6) και (5.7), είναι ανάλογη της μαγνητικής ενέργειας του μοντέλου, η μεταβολή της επαγωγικής πτώσης τάσης  $\Delta IX$  είναι ίση με τη μεταβολή της μαγνητικής ενέργειας  $\Delta W_m$ . Έτσι, παραγωγίζοντας τη σχέση (5.8), η οποία δίνει την τάση βραχυκύκλωσης (και λαμβάνοντας υπόψη ότι η ωμική πτώση τάσης παραμένει σταθερή) προκύπτει ότι η μεταβολή στην τάση βραχυκύκλωσης  $\Delta U_k$  είναι ίση με τη  $\Delta IX$  άρα και με τη μεταβολή της μαγνητικής ενέργειας του μοντέλου.

$$IX(\%) = \frac{I_2^2 * 2 * \pi * 50 * n_2^2 * L_{\text{σολ}}}{V_2} \quad (5.6)$$



$$\frac{2W_m}{(NI)^2} = L_{\text{σολ}} \quad (5.7)$$

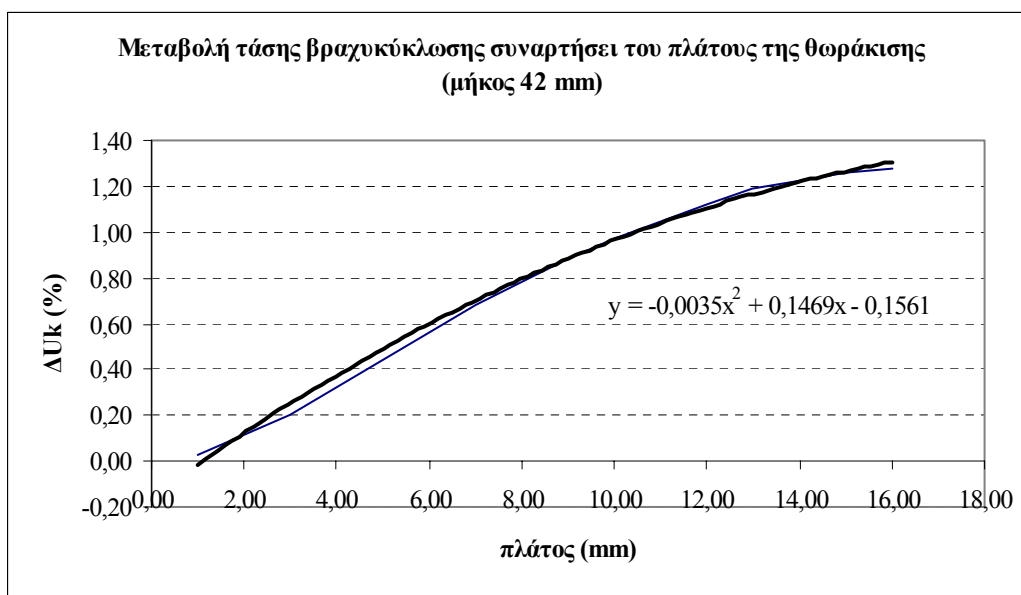
$$U_k (\%) = \sqrt{(IX)^2 + (IR)^2} \Rightarrow \Delta U_k = \Delta IX = \Delta W_m \quad (5.8)$$

Αρχικά, το μήκος της θωράκισης λήφθηκε ίσο με 42 mm, οπότε και προέκυψαν οι ακόλουθες τιμές για τα μεγέθη της μαγνητικής ενέργειας (με και χωρίς θωρακίσεις, ποσοστιαία μεταβολή) και των απωλειών.

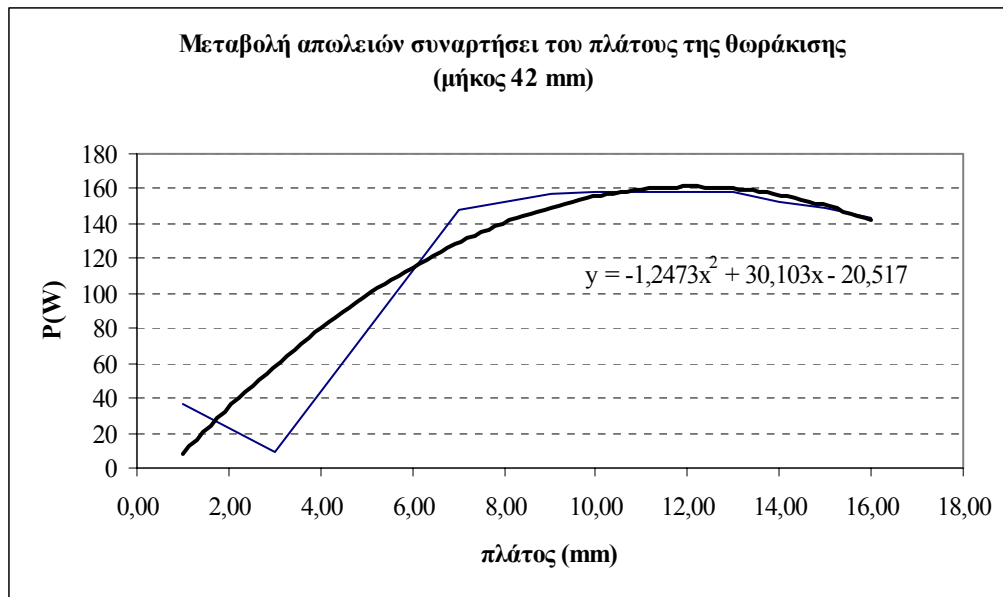
**Πίνακας 5.1:** Μεταβολή μαγνητικής ενέργειας και απωλειών συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 42 mm

Μήκος θωράκισης= 42 mm				
Πλάτος (mm)	Μαγνητική ενέργεια μοντέλου με θωράκιση Wm (Joule)	Μαγνητική ενέργεια μοντέλου χωρίς θωράκιση Wm (Joule)	Μείωση μαγνητικής ενέργειας μοντέλου λόγω θωράκισης ΔWm (Joule)	Απώλειες θωράκισης P (Watt)
1,600000E+01	2,953678E+01	2,991490E+01	1,280167E+00	1,432660E+02
1,500000E+01	2,954346E+01	2,991538E+01	1,258891E+00	1,487694E+02
1,400000E+01	2,955212E+01	2,991494E+01	1,227729E+00	1,527899E+02
1,300000E+01	2,956282E+01	2,991486E+01	1,190820E+00	1,587634E+02
1,200000E+01	2,958120E+01	2,991380E+01	1,124363E+00	1,582849E+02
1,000000E+01	2,962656E+01	2,991482E+01	9,729783E-01	1,576934E+02
9,000000E+00	2,965226E+01	2,991468E+01	8,849916E-01	1,571823E+02
7,000000E+00	2,971124E+01	2,991500E+01	6,858011E-01	1,480088E+02
3,000000E+00	2,985414E+01	2,991446E+01	2,020490E-01	9,578536E+00
1,000000E+00	2,990712E+01	2,991552E+01	2,808696E-02	3,664130E+01

Στα Σχήματα 5.1 και 5.2 φαίνεται η μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης και των απωλειών συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για σταθερό μήκος (42 mm), ενώ με μαύρο χρώμα απεικονίζονται οι αντίστοιχες συναρτήσεις μεταβολής που προσεγγίζουν τις καμπύλες, καθώς και ο τύπος αυτών.



**Σχήμα 5.1:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 42 mm.

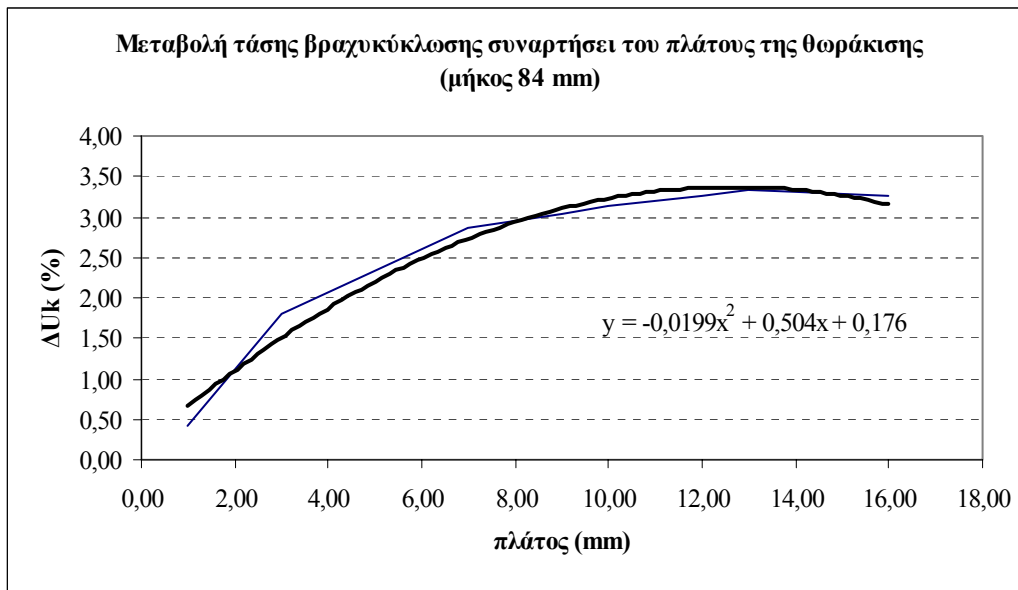


**Σχήμα 5.2:** Καμπύλη μεταβολής απωλειών συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 42 mm.

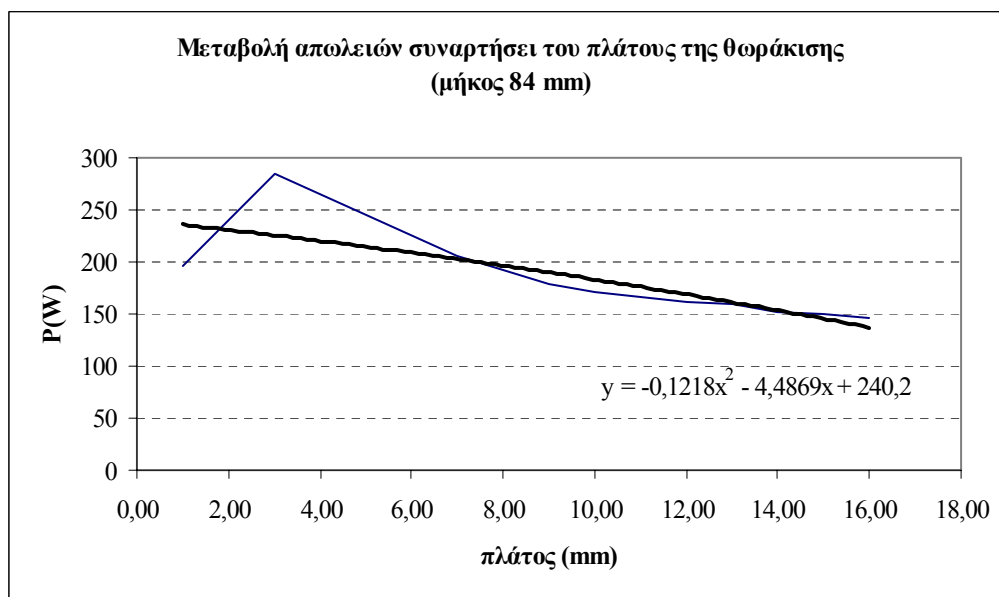
Αντίστοιχα, για μήκος ίσο με 84 mm τα αποτελέσματα περιλαμβάνονται στον Πίνακα 5.2 και τα αντίστοιχα γραφήματα στα Σχήματα 5.3 έως 5.4.

**Πίνακας 5.2:** Μεταβολή μαγνητικής ενέργειας και απωλειών συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 84 mm.

μήκος θωράκισης= 84 mm				
Πλάτος (mm)	Μαγνητική ενέργεια μοντέλου με θωράκιση Wm (Joule)	Μαγνητική ενέργεια μοντέλου χωρίς θωράκιση Wm (Joule)	Μείωση μαγνητικής ενέργειας μοντέλου λόγω θωράκισης ΔWm (Joule)	Απώλειες θωράκισης P (Watt)
1,600000E+01	2,897088E+01	2,991546E+01	3,260446E+00	1,461154E+02
1,500000E+01	2,896368E+01	2,991496E+01	3,284389E+00	1,492472E+02
1,400000E+01	2,895816E+01	2,991510E+01	3,304561E+00	1,528253E+02
1,300000E+01	2,895152E+01	2,991458E+01	3,326457E+00	1,588669E+02
1,200000E+01	2,896948E+01	2,991486E+01	3,263365E+00	1,615171E+02
1,000000E+01	2,900756E+01	2,991472E+01	3,127323E+00	1,708844E+02
9,000000E+00	2,902978E+01	2,991500E+01	3,049351E+00	1,789740E+02
7,000000E+00	2,908422E+01	2,991512E+01	2,856876E+00	2,049368E+02
3,000000E+00	2,938196E+01	2,991406E+01	1,810975E+00	2,847778E+02
1,000000E+00	2,978924E+01	2,991564E+01	4,243143E-01	1,953822E+02



**Σχήμα 5.3:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 84 mm.

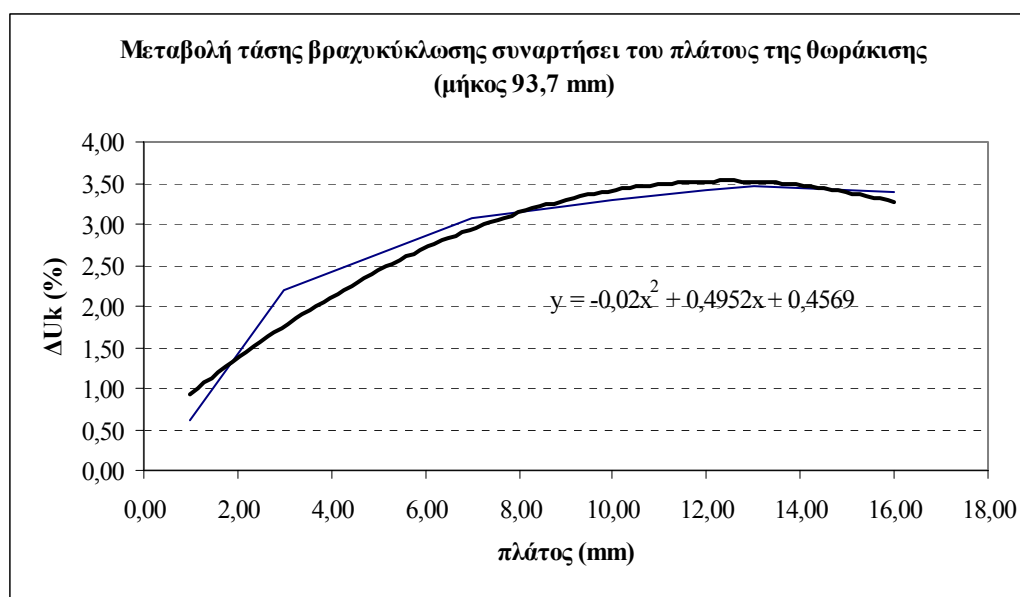


**Σχήμα 5.4:** Καμπύλη μεταβολής απωλειών συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 84 mm.

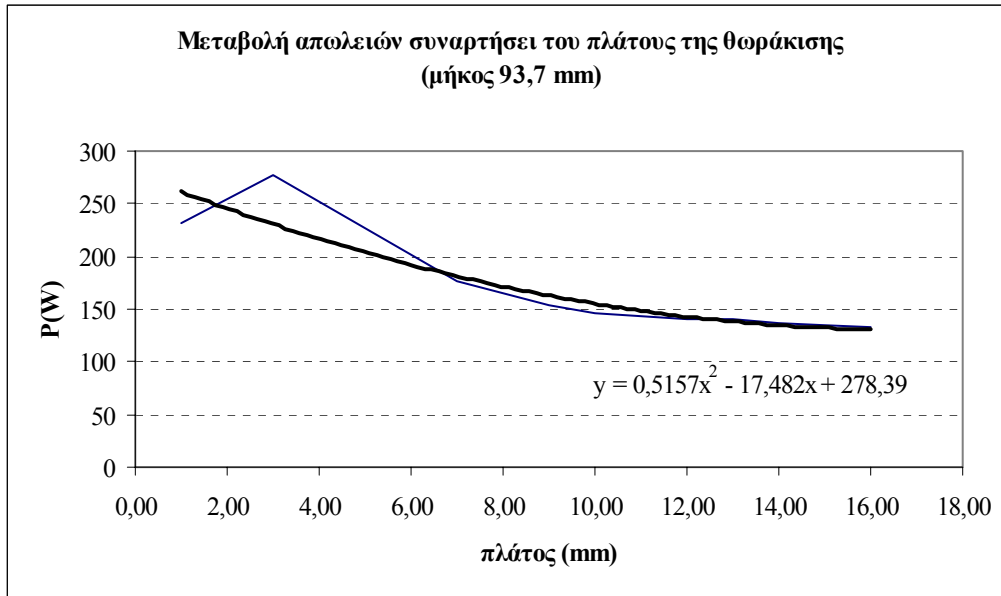
Τέλος, για την περίπτωση που το μήκος της ηλεκτρικής θωράκισης ισούται με 93,7 mm τα αποτελέσματα που προέκυψαν περιλαμβάνονται στον Πίνακα 5.3 και τα Σχήματα 5.5 και 5.6.

**Πίνακας 5.3:** Μεταβολή μαγνητικής ενέργειας και απωλειών συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 93,7 mm

μήκος θωράκισης= 93,7 mm				
Πλάτος (mm)	Μαγνητική ενέργεια μοντέλου με θωράκιση Wm (Joule)	Μαγνητική ενέργεια μοντέλου χωρίς θωράκιση Wm (Joule)	Μείωση μαγνητικής ενέργειας μοντέλου λόγω θωράκισης ΔWm (Joule)	Απώλειες θωράκισης P (Watt)
1,600000E+01	2,893354E+01	2,991584E+01	3,395022E+00	1,336660E+02
1,500000E+01	2,892760E+01	2,991564E+01	3,415562E+00	1,342959E+02
1,400000E+01	2,892080E+01	2,991562E+01	3,439808E+00	1,365757E+02
1,300000E+01	2,891262E+01	2,991558E+01	3,468935E+00	1,399392E+02
1,200000E+01	2,892942E+01	2,991556E+01	3,408779E+00	1,399270E+02
1,000000E+01	2,896166E+01	2,991538E+01	3,293043E+00	1,464304E+02
9,000000E+00	2,898058E+01	2,991570E+01	3,226713E+00	1,533986E+02
7,000000E+00	2,902592E+01	2,991514E+01	3,063538E+00	1,769310E+02
3,000000E+00	2,927506E+01	2,991478E+01	2,185205E+00	2,776778E+02
1,000000E+00	2,973258E+01	2,991568E+01	6,158228E-01	2,311546E+02



**Σχήμα 5.5:** Καμπύλη μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 93,7 mm.



**Σχήμα 5.6:** Καμπύλη μεταβολής απωλειών συναρτήσει του πλάτους της θωράκισης για μήκος ίσο με 93,7 mm.

Στο σημείο αυτό και με τη βοήθεια των αναλυτικών τύπων των συναρτήσεων μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης και των απωλειών συναρτήσει του πλάτους ( $y$ ) για διάφορες τιμές του  $x$  και για το ενδιάμεσο πλέγμα των 15.000 κόμβων περίπου, μπορεί να γίνει εξαγωγή του αναλυτικού τύπου των συναρτήσεων μεταβολής των παραπάνω μεγεθών συναρτήσει των δύο μεταβλητών σχεδίασης, δηλαδή του μήκους και του πλάτους της θωράκισης. Όσον αφορά τη συνάρτηση μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης, συμβολίζεται ως  $\Delta U_k(\%) = f(x, y)$ , ενώ συλλέγοντας τα δεδομένα από τα προηγούμενα γραφήματα, προκύπτει:

$$\text{για } x = 42 \text{ mm: } f(x, y) = -0,0035x^2 + 0,1469x - 0,1561$$

$$\text{για } x = 84 \text{ mm: } f(x, y) = -0,0199x^2 + 0,504x + 0,176$$

$$\text{για } x = 93,7 \text{ mm: } f(x, y) = -0,02x^2 + 0,4952x + 0,4569.$$

Ο τύπος της συνάρτησης μπορεί να γραφεί αναλυτικά ως  $f(x, y) = p_2y^2 + p_1y + p_0$ , ενώ η μεταβολή των συντελεστών  $p_2$ ,  $p_1$  και  $p_0$  συναρτήσει του μήκους ( $x$ ) φαίνεται στον Πίνακα 5.4.

**Πίνακας 5.4:** Μεταβολή συντελεστών συνάρτησης  $f(x, y)$  συναρτήσει του μήκους της θωράκισης.

$x$	$p_2$	$p_1$	$p_0$
<b>42</b>	-0,0035	0,1469	-0,1561
<b>84</b>	-0,0199	0,504	0,176
<b>93,7</b>	-0,02	0,4952	0,4569

Στη συνέχεια ακολουθώντας διαδικασία παρεμβολής, παρόμοια με αυτή που ακολουθήθηκε στις καμπύλες των Σχημάτων 5.1 έως 5.3, καθένας από τους συντελεστές της συνάρτησης  $f(x, y) = p_2y^2 + p_1y + p_0$ , δηλαδή τα  $p_2$ ,  $p_1$ ,  $p_0$ , εκφράζονται ως συναρτήσεις του μήκους  $x$  και γίνεται προσπάθεια προσέγγισης με κάποιες νέες συναρτήσεις μεταβολής με τους τύπους των σχέσεων (5.9) έως (5.11). Στην περίπτωση των συντελεστών της  $f(x, y)$  προτιμήθηκε η γραμμική παρεμβολή (έναντι της πολυωνυμικής παρεμβολής 2<sup>ου</sup> βαθμού), λόγω της μορφής των καμπυλών, οι οποίες προσεγγίζονταν καλύτερα με γραμμική συνάρτηση, από ότι με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού.

$$p_0(x) = 0,0107x - 0,6228 \quad (5.9)$$

$$p_1(x) = 0,0073x - 0,15 \quad (5.10)$$

$$p_2(x) = -0,0003x + 0,0105 \quad (5.11)$$

Άρα, η συνάρτηση  $f(x, y) = p_2y^2 + p_1y + p_0$  γράφεται ως εξής:

$$f(x, y) = (-0,0003x + 0,0105)y^2 + (0,0073x - 0,15)y + (-0,0003x + 0,0105). \quad (5.12)$$

Ακολούθως, στην προσπάθεια εξαγωγής του τύπου της συνάρτησης των απωλειών ως συνάρτηση δύο μεταβλητών, η οποία συμβολίζεται ως  $P = g(x, y)$ , προέκυψαν οι παρακάτω αναλυτικοί τύποι:

$$\text{για } x = 42 \text{ mm: } g(x, y) = -1,2473x^2 + 30,103x - 20,517$$

$$\text{για } x = 84 \text{ mm: } g(x, y) = -0,1218x^2 - 4,4869x + 240,2$$

$$\text{για } x = 93,7 \text{ mm: } g(x, y) = 0,5157x^2 - 17,482x + 278,39.$$

Αν ο τύπος της συνάρτησης γραφεί αναλυτικά ως  $g(x, y) = p_2'y^2 + p_1'y + p_0'$ , τότε η μεταβολή των συντελεστών  $p_2'$ ,  $p_1'$  και  $p_0'$  συναρτήσει του μήκους ( $x$ ) φαίνεται στον Πίνακα 5.5.

**Πίνακας 5.5:** Μεταβολή συντελεστών συνάρτησης  $g(x, y)$  συναρτήσει του μήκους της θωράκισης.

$x$	$p_2'$	$p_1'$	$p_0'$
<b>42</b>	-1,2473	30,103	-20,517
<b>84</b>	-0,1218	-4,4869	240,2
<b>93,7</b>	0,5157	-17,482	278,39

Στη συνέχεια ακολουθώντας διαδικασία παρεμβολής, καθένας από τους συντελεστές της συνάρτησης  $g(x, y) = p_2'y^2 + p_1'y + p_0'$ , δηλαδή τα  $p_2'$ ,  $p_1'$ ,  $p_0'$ , εκφράζονται ως συναρτήσεις του μήκους  $x$  με τους τύπους των σχέσεων (5.13) έως (5.15). Στην περίπτωση των συντελεστών της  $f(x, y)$  προτιμήθηκε η πολυωνυμική παρεμβολή 2<sup>ου</sup> βαθμού, λόγω της μορφής των καμπυλών, οι οποίες προσεγγίζονταν καλύτερα με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού.

$$p_0'(x) = -0,0439x^2 + 11,741x - 436,17 \quad (5.13)$$

$$p_1'(x) = -0,01x^2 + 0,4343x + 29,472 \quad (5.14)$$

$$p_2'(x) = 0,0008x^2 - 0,0681x + 0,2834 \quad (5.15)$$

Άρα, η συνάρτηση  $g(x, y) = p_2'y^2 + p_1'y + p_0'$  γράφεται ως εξής:

$$g(x, y) = (0,0008x^2 - 0,0681x + 0,2834)y^2 + (-0,01x^2 + 0,4343x + 29,472)y + (-0,0439x^2 + 11,741x - 436,17) \quad (5.16)$$

### 5.3.2 Εξαγωγή αντικειμενικής συνάρτησης

Η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να λάβει υπόψη τρεις παράγοντες: την επιθυμητή μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης, τον περιορισμό της αύξησης στην απώλεια ισχύος της θωράκισης και την ελαχιστοποίηση του υλικού της θωράκισης. Για να ληφθούν υπόψη οι παραπάνω παράγοντες, η αναλυτική έκφραση της αντικειμενικής συνάρτησης δίνεται από τη σχέση (5.17):

$$F = w_1 \frac{|\Delta U_k^{\text{spec}} - \Delta U_k^{\text{calc}}|}{\Delta U_k^{\text{spec}}} + w_2 \left| \frac{P_{\text{shunt}}^{\text{calc}}}{P_{\text{shunt}}^{\text{min}}} \right| + w_3 \frac{S_{\text{shunt}}^{\text{calc}}}{S_{\text{shunt}}^{\text{max}}} \quad (5.17)$$

όπου,

$\Delta U_k^{\text{calc}}$ :	υπολογιζόμενη μεταβολή στην τάση βραχυκύκλωσης,
$\Delta U_k^{\text{spec}}$ :	προδιαγεγραμμένη (επιθυμητή) μεταβολή στην τάση βραχυκύκλωσης,
$P_{\text{shunt}}^{\text{calc}}$ :	υπολογιζόμενη απώλεια ισχύος της θωράκισης,
$P_{\text{shunt}}^{\text{min}}$ :	ελάχιστη παρατηρούμενη τιμή απώλειας ισχύος της θωράκισης,
$S_{\text{shunt}}^{\text{calc}}$ :	επιφάνεια θωράκισης που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της τρέχουσας επανάληψης,
$S_{\text{shunt}}^{\text{max}}$ :	μέγιστη επιφάνεια θωράκισης,
$w_1, w_2, w_3$ :	συντελεστές βάρους των συνιστωσών της αντικειμενικής συνάρτησης, οι οποίοι λαμβάνονται ως: $w_1 = 0.8$ , $w_2 = 0.1$ , $w_3 = 0.1$ .

Η επιλογή των βαρών έγινε με κριτήριο την επίτευξη μεγάλης ακρίβειας στη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης, δίνοντας μικρότερη σημασία στην ελαχιστοποίηση των απωλειών και του υλικού. Έτσι, δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση στη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή (επαγωγική πτώση τάσης) με μεγαλύτερη επίπτωση αντίστοιχα στο κόστος και την απόδοση της θωράκισης (από πλευράς απωλειών). Για την προσέγγιση της βελτιστοποίησης με βασικό κριτήριο το κόστος και λιγότερο την απόδοση του μετασχηματιστή, θα έπρεπε να επιλεγούν βάρη μεγαλύτερα στους δύο τελευταίους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης και μικρότερο στον όρο που αντιστοιχεί στη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης.

### 5.3.3 Σύγκριση μεθόδων βελτιστοποίησης

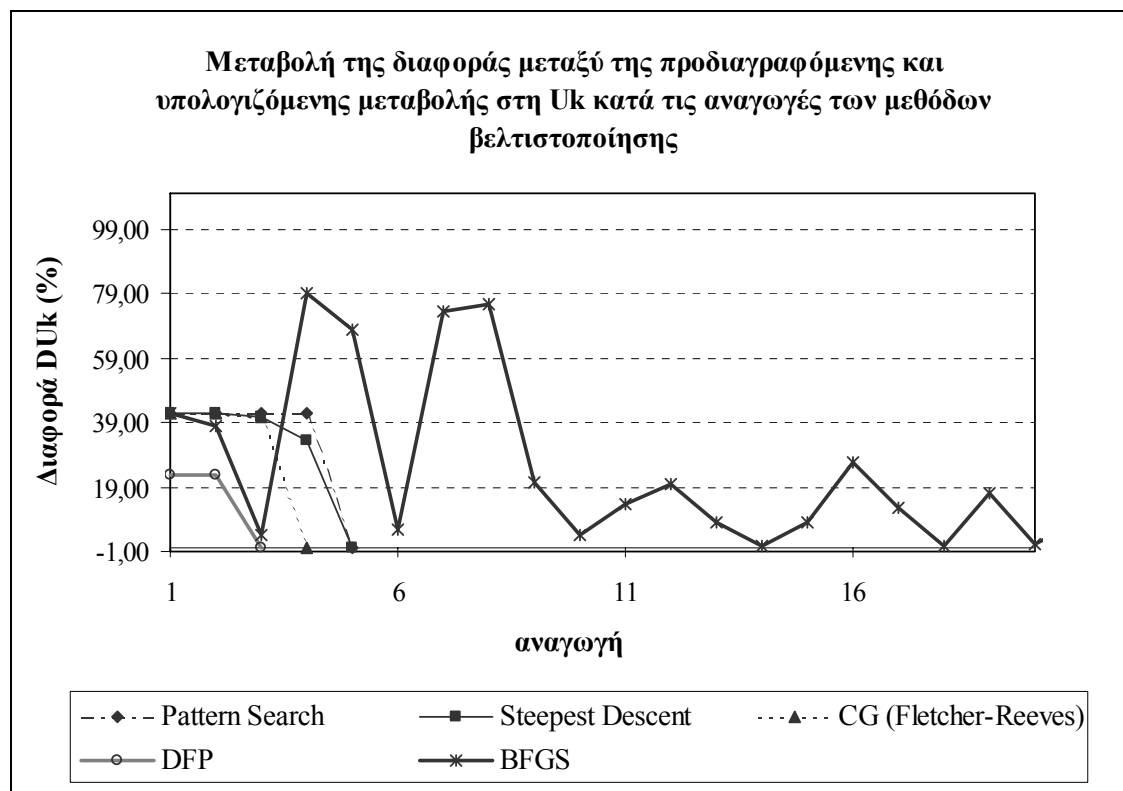
Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.2 χρησιμοποιήθηκαν για να ελαχιστοποιήσουν την αντικειμενική συνάρτηση (5.17) για:

$\Delta U_k^{\text{spec}} = 3.5\%$   $P_{\text{shunt}}^{\text{min}} = 100\text{W}$  και  $S_{\text{shunt}}^{\text{max}} = 2.000\text{mm}^2$ . Σε κάθε αναγωγή της χρησιμοποιούμενης μεθόδου, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προέκυπτε με τη βοήθεια των αναλυτικών τύπων (5.12) και (5.16).

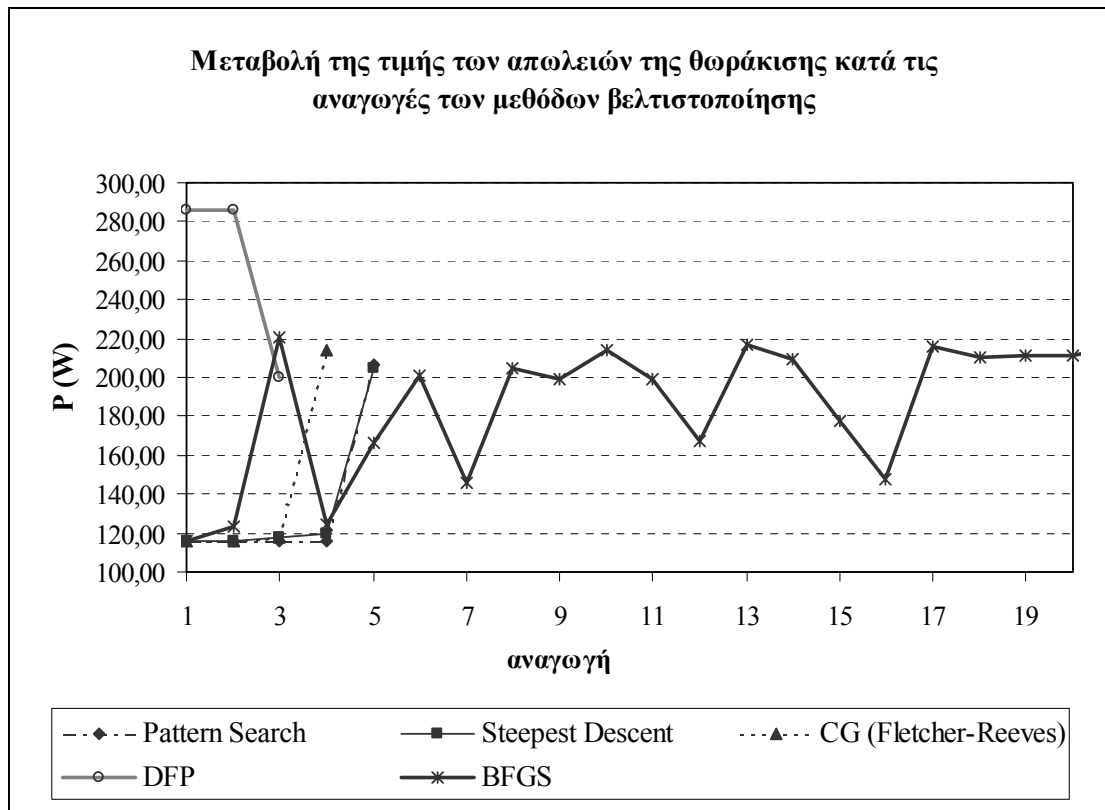
Ο Πίνακας 5.6 συνοψίζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη βέλτιστη γεωμετρία της ηλεκτρικής θωράκισης, την υπολογισμένη μεταβολή στη σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώματος και στην απώλεια ισχύος της θωράκισης (που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση που δίνεται με κάθε μέθοδο) και τον αριθμό αναγωγών που απαιτούνται για τη σύγκλιση κάθε μεθόδου. Τα Σχήματα 5.7 και 5.8 απεικονίζουν τη μεταβολή της διαφοράς μεταξύ της προδιαγεγραμμένης και υπολογιζόμενης μεταβολής στο  $U_k$  και των απωλειών της θωράκισης αντίστοιχα, κατά τις αναγωγές των μεθόδων του Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα διαφόρων μεθόδων βελτιστοποίησης ηλεκτρικής θωράκισης.

Σύγκριση μεθόδων βελτιστοποίησης για $\Delta U_k=3,5\%$						
Μέθοδος	Μήκος (x)	Πλάτος (y)	Επιφάνεια (S)	$\Delta U_k(\%)$	P(W)	Αριθμός αναγωγών
BFGS	76,0	17,1	1293,96	3,5	203,2	26
DFP	77,6	19,1	1481,19	3,5	200,0	3
CG-FR	76,6	14,4	1105,24	3,5	214,4	4
Steepest Descent	79,2	19,8	1568,75	3,5	204,6	5
Pattern search	79,6	20,0	1588,81	3,5	206,4	5

Σχήμα 5.7: Μεταβολή της διαφοράς μεταξύ της προδιαγραφόμενης και υπολογιζόμενης μεταβολής στη  $U_k$  κατά τις αναγωγές των μεθόδων του Πίνακα 5.6.





**Σχήμα 5.8:** Μεταβολή της τιμής των απωλειών της θωράκισης κατά τις αναγωγές των μεθόδων του Πίνακα 5.6.

Η παρατήρηση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 5.6 και οι καμπύλες του Σχήματος 5.7 και 5.8 οδηγούν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- i) Η μέθοδος DFP είναι η γρηγορότερη σε σύγκλιση μέθοδος, καθώς παρέχει τη βέλτιστη λύση στο μικρότερο αριθμό αναγωγών. Ωστόσο, αυτή η λύση είναι κατώτερη από αυτές που παρέχονται από τις μεθόδους CG και BFGS, καθώς αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη αύξηση του εμβαδού της θωράκισης.
- ii) Μεταξύ των βασισμένων σε βαθμωτές μεταβολές μεθόδων, η CG και η DFP είναι αυτές που καταλήγουν στη βέλτιστη λύση στο λιγότερο αριθμό αναγωγών. Η λύση της CG είναι αποτελεσματικότερη από την άποψη του κόστους κατασκευής, καθώς αντιστοιχεί στην ελάχιστη συνολική περιοχή.
- iii) Οι μέθοδοι αναζήτησης προτύπου και απότομης καθόδου εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς την ταχύτητα σύγκλισης και την ποιότητα της βέλτιστης λύσης.

Σύμφωνα με τις ανωτέρω παρατηρήσεις, η μέθοδος CG-FR εμφανίζεται να είναι η αποτελεσματικότερη για τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης της γεωμετρίας των ηλεκτρικών θωρακίσεων.

## 5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο η χρήση του δισδιάστατου μοντέλου FEMM, επεκτείνεται στη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας ηλεκτρικής θωράκισης των μετασχηματιστών ισχύος. Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας συνδυάζεται με την ελαχιστοποίηση της απώλειας ισχύος των θωρακίσεων, που οδηγεί στη μείωση του συνολικού κόστους της ηλεκτρικής θωράκισης.

Το πρόβλημα λύθηκε ως μη γραμμικό, πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης, με περιορισμούς, και η προτεινόμενη μέθοδος συνδυάστηκε με διάφορους αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος CG-FR παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα από την άποψη του ρυθμού σύγκλισης και της ποιότητας της βέλτιστης λύσης.

## 5.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] Y. Yao, C. S. Koh, J. S. Ryu, D. Xie, "Utilizing design sensitivity analysis for 3D optimization of transformer tank shields considering eddy currents," *COMPEL*, Vol. 23, No 2, pp. 506-517.
- [5.2] J. A. Ramirez, E. M. Freeman, C. Chat-uthai, D. A. Lowther, "Sensitivity Analysis for the Automatic Shape Design of Electromagnetic Devices in 3D Using FEM," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, No 2, pp. 1856-1859, Mar. 1997.
- [5.3] S. Wang, J. Kang, "Shape Optimization of BLDC Motor Using 3D Finite Element Method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, No 4, pp. 1119-1123, Jul. 2000.
- [5.4] J. M. Biedinger, D. Lemoine, "Shape Sensitivity Analysis of Magnetic Forces," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, No 3, pp. 2309-2316, May 1997.
- [5.5] P. Venkataraman, "*Applied Optimization with MATLAB Programming*," Wiley-Interscience, 2002.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε η μελέτη τριφασικού μετασχηματιστή ισχύος τύπου τυλιχτού πυρήνα, η οποία υλοποιήθηκε με χρήση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Η δισδιάστατη μεθοδολογία πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόστηκε σε τρεις διαφορετικούς τριφασικούς μετασχηματιστές της κατασκευάστριας εταιρίας μετασχηματιστών Σενεντέρ Ελεκτρικ ΑΕ του ομίλου Schneider Electric Industries SA. Η δισδιάστατη μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αυτεπαγωγής σκέδασης των μετασχηματιστών κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης, με σκοπό την εξαγωγή καμπυλών μεταβολής της τιμής της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει της πυκνότητας του πλέγματος. Η μέθοδος συγκρίθηκε με τη μεθοδολογία που χρησιμοποιεί ο κατασκευαστής για τον υπολογισμό των αυτεπαγωγών σκέδασης του εκάστοτε μετασχηματιστή και η οποία βασίζεται σε θεώρηση κυλινδρικής συμμετρίας και κατάλληλης τροποποίησης της γεωμετρίας του παραθύρου του Μ/Σ, παρουσιάζοντας μικρές αποκλίσεις για καθεμιά από τις περιπτώσεις των υπό μελέτη κατασκευασμένων μετασχηματιστών.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου για διάφορες πυκνότητες πλέγματος έδειξε ότι η μέθοδος δίνει καλή ακρίβεια με τη χρήση ενός μέσου αριθμού κόμβων, της τάξης των 15.000 κόμβων, καθώς η υπολογιζόμενη τιμή επαγωγικής πτώσης τάσης είναι περίπου σταθερή από τους 15.000 κόμβους και πάνω. Η μόνη ατέλεια της μεθοδολογίας αυτής θα μπορούσε να οφείλεται στην προσέγγιση που υιοθετείται κατά την τροποποίηση της γεωμετρίας με βάση τους συντελεστές του Rogowski. Η εκτίμηση του σφάλματος που εισάγεται απαιτεί πλήρη τρισδιάστατη πεδιακή ανάλυση του Μ/Σ, η οποία όμως δεν αποτέλεσε αντικείμενο αυτής της εργασίας. Έτσι, η δισδιάστατη μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επεκτάθηκε στη μελέτη προσθήκης θωρακίσεων στο μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα με σκοπό την τροποποίηση των παραμέτρων του.

Πρώτη μελετήθηκε η περίπτωση της προσθήκης μαγνητικής θωράκισης για την αλλαγή των παραμέτρων του μετασχηματιστή. Συγκεκριμένα, η προσθήκη της μαγνητικής θωράκισης είχε σκοπό να δράσει έτσι ώστε να προσελκύσει τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές σκέδασης των πηνίων, αυξάνοντας αντίστοιχα την τάση βραχυκύκλωσης. Έγινε αναφορά στην προσομοίωση της προσθήκης της μαγνητικής θωράκισης με δύο διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι διαφοροποιούνται στο γεγονός ότι ο πρώτος τρόπος προσέγγισης της προσθήκης της μαγνητικής θωράκισης βασίστηκε στην αλλαγή των οριακών συνθηκών στις εξωτερικές επιφάνειες, στο κέλυφος του μετασχηματιστή, ενώ ο δεύτερος χρησιμοποίησε την αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρικής της διαμόρφωσης μέσω της προσθήκης φύλλων σιδήρου στο κέλυφος του μετασχηματιστή.

Η διαπίστωση ότι η προσθήκη μαγνητικής θωράκισης στο κέλυφος του μετασχηματιστή δεν αποδείχθηκε καθοριστική όσον αφορά στην επίδρασή της στις μεταβολές που παρουσιάζονται στην επαγωγική πτώση τάσης, οπότε κατέστησε αναγκαία την αναζήτηση ενός πιο επιτυχούς τρόπου μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης του εξεταζόμενου μετασχηματιστή. Ακολούθησε η μελέτη της προσθήκης ηλεκτρικής θωράκισης, δηλαδή φύλλων χαλκού μέσα στο μετασχηματιστή, ως μία δεύτερη προσπάθεια αλλαγής των χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή, και ειδικότερα της τάσης βραχυκύκλωσης. Το συγκεκριμένο υλικό τοποθετήθηκε με σκοπό να δράσει έτσι ώστε να απομακρύνει τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές σκέδασης των πηνίων, μειώνοντας αντίστοιχα την τάση βραχυκύκλωσης. Έγινε αναφορά σε δύο είδη ηλεκτρικής θωράκισης, τα οποία διαφοροποιούνται στο γεγονός ότι στο πρώτο είδος ο χαλκός τοποθετήθηκε απευθείας

μέσα στο υλικό του πυρήνα του μετασχηματιστή, ενώ στο δεύτερο είδος, μεταξύ του υλικού του πυρήνα (σίδηρος) και του φύλλου χαλκού μεσολαβούσε αέρας.

Η βελτιστοποίηση του δεύτερου είδους ηλεκτρικής θωράκισης, το οποίο κρίθηκε ως το αποτελεσματικότερο από τα τρία είδη των θωρακίσεων που μελετήθηκαν, όσον αφορά στην επίδρασή τους στις μεταβολές της επαγωγικής πτώσης τάσης και τελικά στη συμπεριφορά του μετασχηματιστή, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ντετερμινιστικών μεθόδων βελτιστοποίησης, σε συνδυασμό με το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων. Παρουσιάστηκε συγκριτική ανάλυση των μεθόδων βελτιστοποίησης, από τις οποίες επιλέχθηκε η καταλληλότερη για το εξεταζόμενο πρόβλημα θωράκισης των μετασχηματιστών ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις καμπύλες μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει των διαστάσεων της θωράκισης, παρατηρήθηκε μία αύξηση από 0,5% μέχρι 3,5%. Εντούτοις, κρίθηκε ότι πρέπει να ληφθεί υπόψη η αύξηση στην απώλεια ισχύος της θωράκισης, ώστε να υπάρξει ένα ακόμη κριτήριο για την επιλογή της θωράκισης, το οποίο είναι η μεγιστοποίηση της μεταβολής της τάσης βραχυκύκλωσης, αλλά με τις μικρότερες δυνατές απώλειες στη θωράκιση.

Ο συνδυασμός της βελτιστοποίησης της γεωμετρίας με την ελαχιστοποίηση της απώλειας ισχύος και του υλικού των θωρακίσεων, οδήγησε στη μείωση του συνολικού κόστους της ηλεκτρικής θωράκισης. Το πρόβλημα λύθηκε ως μη γραμμικό, πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης, με περιορισμούς, και η προτεινόμενη μέθοδος συνδυάστηκε με διάφορους αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος CG-FR παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα από την άποψη του ρυθμού σύγκλισης και της ποιότητας της βέλτιστης λύσης.

Η μελέτη της επίπτωσης των θωρακίσεων στο πεδίο σκέδασης και την τάση βραχυκύκλωσης των μετασχηματιστών επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη των χαρακτηριστικών τους και του τρόπου με τον οποίο μπορούν να τροποποιηθούν σε περιπτώσεις που δεν ικανοποιούν τις προδιαγραφές των προτύπων. Η ακρίβεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων την καθιστά αξιόπιστο εργαλείο για τη βέλτιστη επιλογή και γεωμετρική διαμόρφωση των θωρακίσεων, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της αξιοπιστίας (μέσω της βελτίωσης των λειτουργικών χαρακτηριστικών των μετασχηματιστών) και την εξοικονόμηση πρώτων υλών (μέσω της βελτιστοποίησης του υλικού και της απόδοσης των θωρακίσεων).