



Εθνικό Μέτσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Εξάμηνο 6^ο: Ηλεκτρικές Μηχανές Ι

Μονοφασικός Μετασχηματιστής

Περίληψη

Η παρούσα εργαστηριακή αναφορά αφορά την εκτέλεση της 1^{ης} εργαστηριακής άσκησης με τίτλο «Μονοφασικός Μετασχηματιστής» στα πλαίσια του εργαστηρίου του μαθήματος Ηλεκτρικές Μηχανές Ι. Στην άσκηση αυτή μελετήθηκε σε Η/Υ το μαγνητικό πεδίο ενός μονοφασικού μετασχηματιστή κατά τις δοκιμές ανοικτού κυκλώματος και βραχυκύκλωσης, καθώς και σε συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας, με τη βοήθεια προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων.

ΟΝΟΜΑ: Γεώργιος

ΕΠΙΘΕΤΟ: Βυζηργιαννάκης

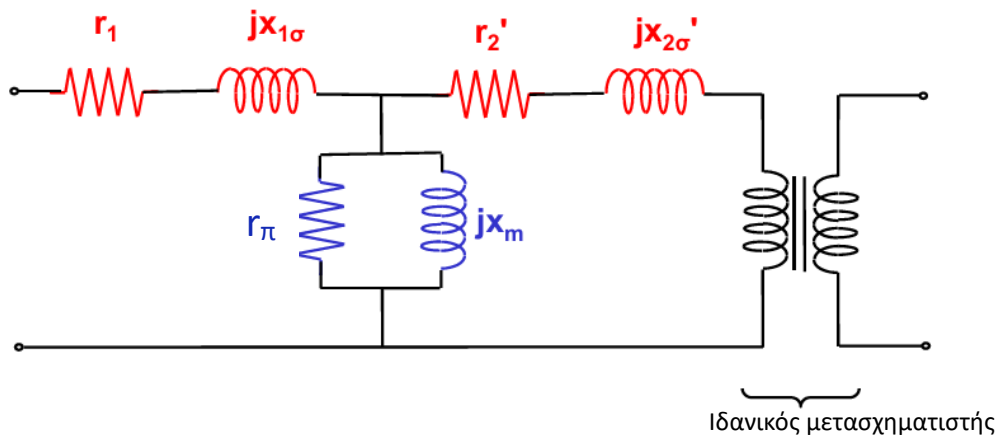
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ	3
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ	4
ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ	5
Α' ΦΑΣΗ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	5
Β' ΦΑΣΗ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ, ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	6
Γ' ΦΑΣΗ: ΠΛΕΓΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ..	7
Δ' ΦΑΣΗ: ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	7
1. Δοκιμή ανοικτού κυκλώματος.....	7
➤ Κατανομή μαγνητικής επαγωγής	8
➤ Απώλειες στο πεδίο ορισμού του προβλήματος.....	9
➤ Κατανομή μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB.....	10
2. Δοκιμή βραχυκύκλωσης υπό ονομαστικό ρεύμα.....	11
➤ Κατανομή μαγνητικής επαγωγής	11
➤ Απώλειες στο πεδίο ορισμού του προβλήματος.....	12
➤ Κατανομή μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB.....	14
3. Ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.....	15
➤ Κατανομή μαγνητικής επαγωγής	15
➤ Απώλειες στο πεδίο ορισμού του προβλήματος.....	16
➤ Κατανομή μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB.....	17

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Ο μονοφασικός μετασχηματιστής είναι μια συσκευή που μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) μεταξύ δύο κυκλωμάτων, τα οποία λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης. Η λειτουργία του βασίζεται στην αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, σύμφωνα με την οποία η μεταβολή της μαγνητικής ροής στο πρωτεύον τυλίγμα (εξαιτίας του εναλλασσόμενου ρεύματος) επάγει τάση στο δευτερεύον, επιτρέποντας την μετατροπή της τάσης και του ρεύματος με αναλογία καθορισμένη από τον λόγο των τυλιγμάτων N_1/N_2 , διατηρώντας σταθερή την ισχύ.

Ένας από τους βασικούς τρόπους με τον οποίο αναλύεται η συμπεριφορά του μονοφασικού μετασχηματιστή είναι μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος του. Το ισοδύναμο κύκλωμα επιτρέπει την κατανόηση της λειτουργίας, της απώλειας ισχύος και της κατανομής της μαγνητικής ροής του μετασχηματιστή υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης, χρησιμοποιώντας τις τάξεις μεγεθών όλων των στοιχείων. Το ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή

όπου:

- r_1 : αντίσταση απωλειών χαλκού πρωτεύοντος τυλίγματος
- $x_{1\sigma}$: αυτεπαγωγή σκέδασης πρωτεύοντος τυλίγματος
- r_2' : αντίσταση απωλειών χαλκού δευτερεύοντος τυλίγματος
- $x_{2\sigma}'$: αυτεπαγωγή σκέδασης δευτερεύοντος τυλίγματος
- r_π : αντίσταση απωλειών πυρήνα
- x_m : αυτεπαγωγή μαγνήτισης

και ισχύει ότι

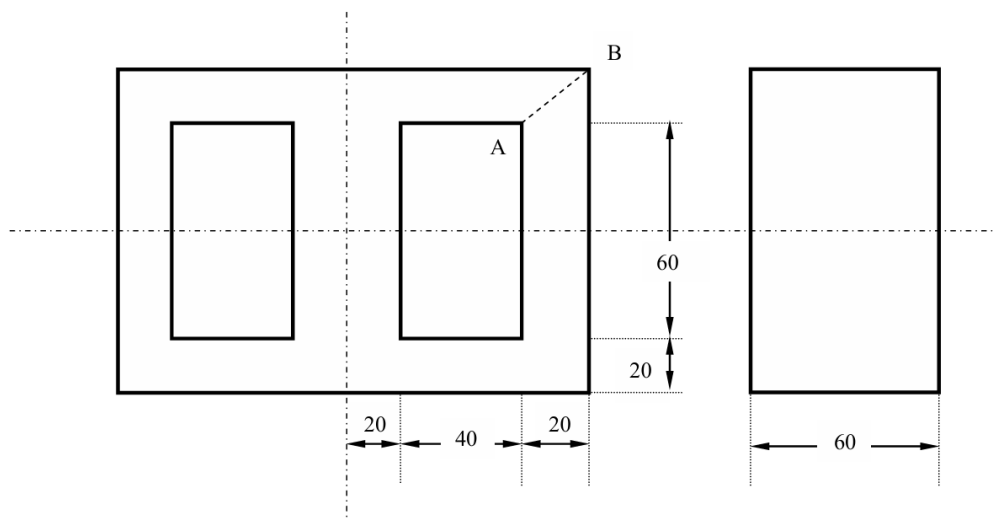
$$r_\pi \gg jx_m \gg j(x_{1\sigma} + x_{2\sigma}') \gg (r_1 + r_2')$$
$$x_{1\sigma} \approx x_{2\sigma}' \quad , \quad r_1 \approx r_2'$$

Σκοπός της άσκησης είναι η μελέτη της κατανομής του μαγνητικού πεδίου σε μονοφασικό μετασχηματιστή, των απωλειών σε όλο το πεδίο ορισμού τού και της κατανομής της μαγνητικής επαγωγής σε διάφορα σημεία του, κατά τις δοκιμές

ανοικτού κυκλώματος, βραχυκύκλωσης, καθώς και σε συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Η γεωμετρία του μαγνητικού κυκλώματος του μετασχηματιστή δίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2 : Γεωμετρία μαγνητικού κυκλώματος μετασχηματιστή (οι διαστάσεις δίνονται σε mm)

Από την γεωμετρία του μετασχηματιστή, παρατηρούμε ότι πρόκειται για έναν μονοφασικό μετασχηματιστή τύπου κελύφους ή μανδύα ο οποίος αποτελείται από τρία σκέλη.

Το πρωτεύον τύλιγμα έχει $N_1 = 412$ σπείρες και το δευτερεύον τύλιγμα έχει $N_2 = 206$ σπείρες. Η ονομαστική τάση του πρωτεύοντος είναι $V_{1N} = 220\text{ V}$ και η ονομαστική ισχύς είναι $S_N = 500\text{ VA}$. Άρα, το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος είναι:

$$I_{1N} = \frac{S_N}{V_{1N}} = \frac{500\text{ VA}}{220\text{ V}} \approx 2.273\text{ A}$$

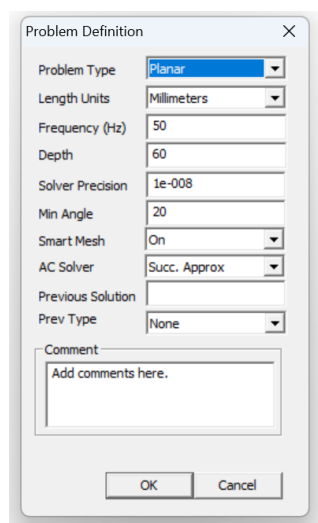
Επίσης, η ονομαστική συχνότητα είναι $f_N = 50\text{ Hz}$.

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Η άσκηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου, FEMM, το οποίο βασίζεται στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Η ανάλυση της άσκησης γίνεται σε τέσσερις φάσεις:

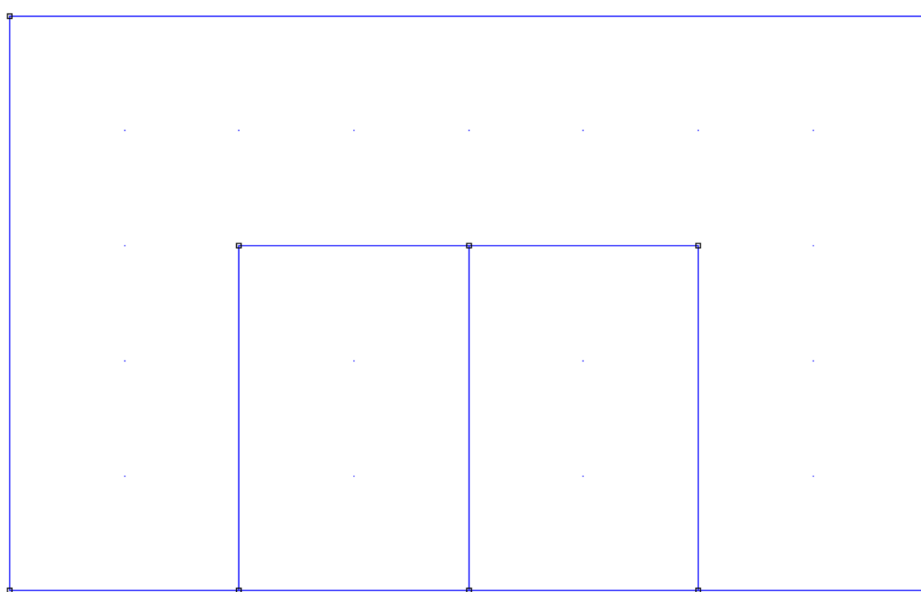
Α' ΦΑΣΗ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Ο μετασχηματιστής της άσκησης είναι συμμετρικός ως προς τον άξονα x και ως προς τον άξονα y, οπότε θα περιορίσουμε την ανάλυση μας στο $\frac{1}{4}$ της γεωμετρίας του. Έπειτα, εισάγουμε στο πρόγραμμα τα χαρακτηριστικά του προβλήματος:



Σχήμα 3: Χαρακτηριστικά του προβλήματος

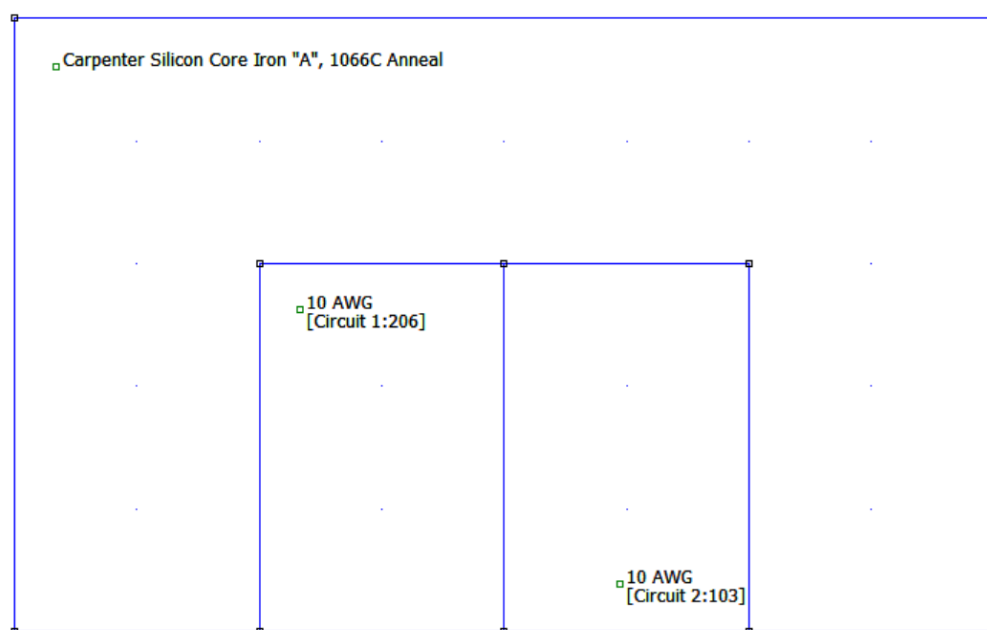
και την γεωμετρία τού μέσω σημείων και ευθύγραμμων τμημάτων βάσει του Σχήματος 2, και προκύπτει το Σχήμα 3.



Σχήμα 4: Γεωμετρία του προβλήματος

Β' ΦΑΣΗ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ, ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Προσδιορίζουμε τα χαρακτηριστικά των υλικών όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Όσον αφορά τις περιοχές των δυο τυλιγμάτων, ορίζουμε το Number of turns για το πρωτεύον τύλιγμα (Circuit 1) ίσο με 206 και για το δευτερεύον (Circuit 2) ίσο με 103, αφού $N_1 = 412$ σπείρες, $N_2 = 206$ σπείρες και εξετάζουμε το $\frac{1}{4}$ της γεωμετρίας του μετασχηματιστή.



Σχήμα 5: Χαρακτηριστικά των υλικών

Έπειτα, προσδιορίζουμε τις πυκνότητες ρεύματος στα τυλίγματα για τις διάφορες δοκιμές. Πιο συγκεκριμένα, για την δοκιμή ανοικτού κυκλώματος, ορίζουμε το ρεύμα μαγνήτισης στο πρωτεύον, I_1 , ίσο με $0.115A$ και στο δευτερεύον, I_2 , ίσο με $0A$, αφού το δευτερεύον τύλιγμα είναι ανοιχτοκυκλωμένο. Για την δοκιμή βραχυκύκλωσης υπό ονομαστικό ρεύμα, ορίζουμε το ρεύμα σκέδασης στο πρωτεύον $I_1 = I_{1N} \approx 2.273A$ και χρησιμοποιώντας τον λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή, ορίζουμε το ρεύμα στο δευτερεύον ίσο με

$$I_2 = -I_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} \approx -2.273A \cdot \frac{412 \text{ σπείρες}}{206 \text{ σπείρες}} = -4.546A$$

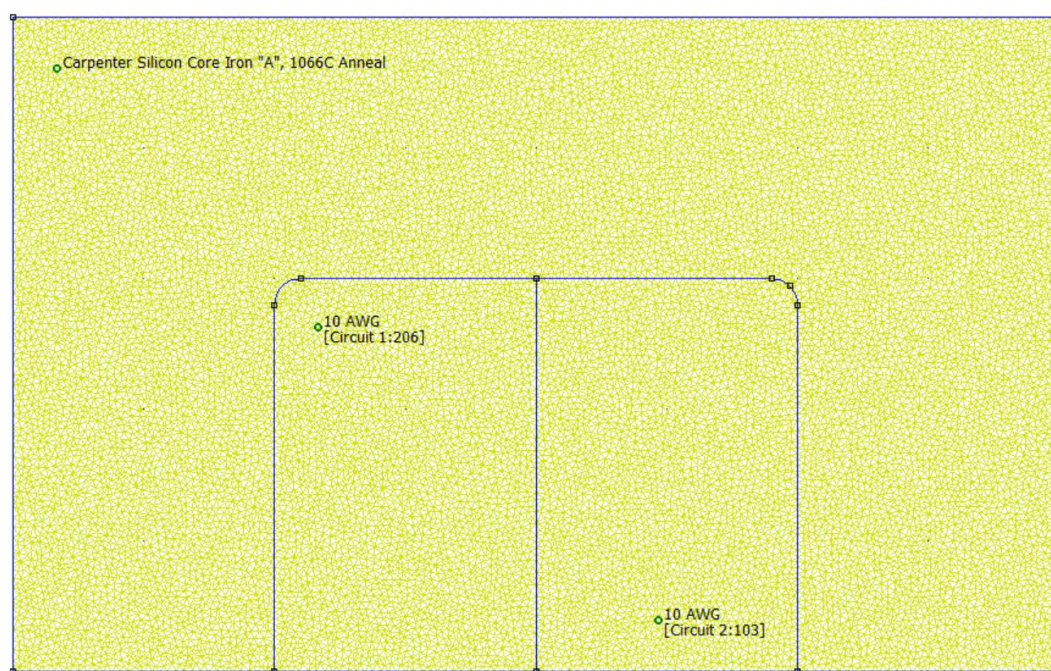
όπου το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στην αντίθετη φορά του ρεύματος στα δύο τυλίγματα. Για ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, ορίζουμε το ρεύμα στα δυο τυλίγματα ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων μαγνήτισης και ρευμάτων σκέδασης που υπολογίσαμε στις δοκιμές ανοικτού κυκλώματος και βραχυκύκλωσης, αντίστοιχα. Άρα, θέτουμε :

$$I_1 = 0.115A + 2.273A = 2.388A \text{ και } I_2 = 0 - 4.546A = -4.546A$$

Τέλος, ορίζουμε οριακές συνθήκες για τον μετασχηματιστή του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζουμε οριακές συνθήκες Dirichlet ($A = 0$) για τις τρεις εξωτερικές πλευρές του μετασχηματιστή (αριστερή, επάνω και δεξιά), αφού το μαγνητικό του πεδίο περιορίζεται στο εσωτερικό του. Επίσης, για την κάτω πλευρά του μετασχηματιστή εφαρμόζονται από το πρόγραμμα by default συνθήκες Neumann ($dA/dn = 0$).

Γ' ΦΑΣΗ: ΠΛΕΓΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Κατασκευάζουμε το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, επειδή θέλουμε μεγαλύτερη ακρίβεια για τις μετρήσεις μας στις εσωτερικές γωνίες του μετασχηματιστή, δηλαδή στο σημείο A, και στο αντιδιαμετρικό τού στην άλλη εσωτερική γωνία, αυξάνουμε την διακριτοποίηση και κάνουμε το πλέγμα πιο πυκνό γύρω από αυτά τα σημεία. Το τελικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από 16125 nodes και φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Δ' ΦΑΣΗ: ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Επιλύουμε το πρόβλημα για την δοκιμή ανοικτού κυκλώματος, την δοκιμή βραχυκύκλωσης υπό ονομαστικό ρεύμα και σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.

1. Δοκιμή ανοικτού κυκλώματος

Στην δοκιμή ανοικτού κυκλώματος ορίζουμε το ρεύμα μαγνήτισης στο πρωτεύον:

$$I_1 = 0.115A$$

και στο δευτερεύον:

$$I_2 = 0A$$

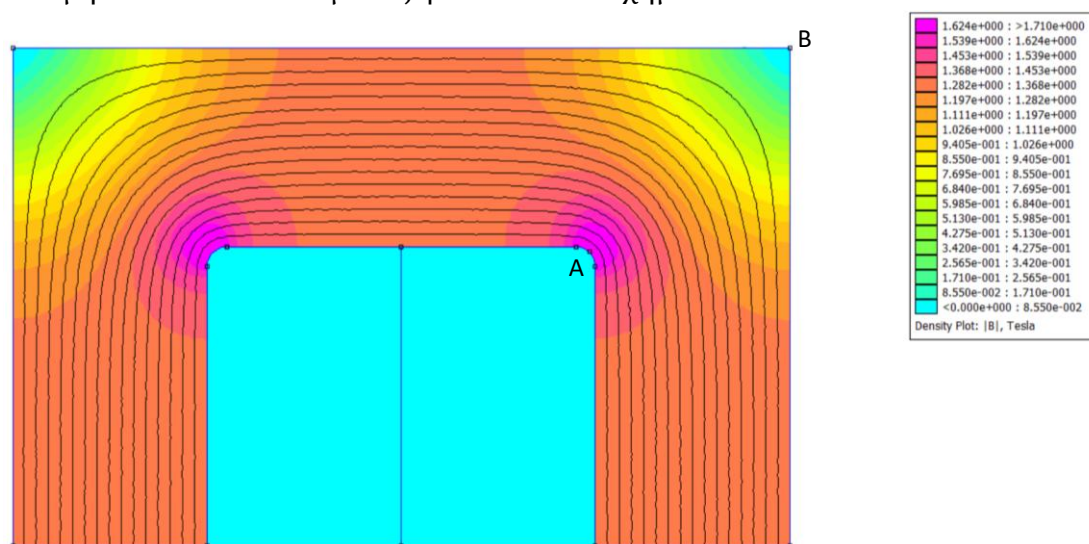
➤ Κατανομή μαγνητικής επαγωγής

Θεωρητικό πλαίσιο:

Η αντίσταση απωλειών πυρήνα r_{π} και η αυτεπαγωγή μαγνήτισης X_m είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από την αντίσταση απωλειών χαλκού r_1 και την αυτεπαγωγή σκέδασης $X_{1\sigma}$ του πρωτεύοντος τυλίγματος. Στην δοκιμή ανοικτού κυκλώματος, ο εγκάρσιος κλάδος πυρήνα συνδέεται σε σειρά με την αντίσταση r_1 και την αυτεπαγωγή $X_{1\sigma}$, ενώ το δευτερεύον τυλίγμα δεν διαρρέεται από ρεύμα. Επομένως, λόγω της μεγάλης αυτεπαγωγής μαγνήτισης, η πτώση τάσης στα άκρα της r_1 και της $X_{1\sigma}$ είναι αμελητέα, οπότε η πτώση τάσης στα άκρα του εγκάρσιου κλάδου είναι περίπου ίση με την τάση που εφαρμόζεται στο πρωτεύον, δηλαδή την ονομαστική τάση του πρωτεύοντος. Συνεπώς, η συνολική μαγνητική ροή του μετασχηματιστή διέρχεται μέσα από τον πυρήνα.

Επίλυση προβλήματος:

Πράγματι, επιλύοντας το πρόβλημα ανοικτού κυκλώματος στο πρόγραμμά μας, διαπιστώνουμε ότι η μαγνητική ροή του μετασχηματιστή διέρχεται κυρίως μέσα από τον πυρήνα του μετασχηματιστή, ενώ η ροή που διαπερνά τα δυο τυλίγματα είναι πρακτικά αμελητέα. Η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής κατά την δοκιμή ανοικτού κυκλώματος φαίνεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Κατανομή της μαγνητικής επαγωγής κατά την δοκιμή ανοικτού κυκλώματος

Επίσης, από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε όλο το πεδίο ορισμού του προβλήματος κυμαίνονται κυρίως μεταξύ $8.550 \cdot 10^{-2}$ και 1.71 Tesla.

➤ **Απώλειες στο πεδίο ορισμού του προβλήματος**

Θεωρητικό πλαίσιο:

Οι απώλειες σε κάθε περιοχή του προβλήματος είναι ανάλογες της αντίστασης της περιοχής και του τετραγώνου του ρεύματος που την διαρρέει. Στην δοκιμή ανοικτού κυκλώματος, εφαρμόζουμε ονομαστική τάση στο πρωτεύον τυλίγμα, όμως το ρεύμα που το διαρρέει είναι τάξεις μεγέθους μικρότερο από το ονομαστικό ρεύμα οπότε οι απώλειες σε όλο το πεδίο ορισμού του μετασχηματιστή είναι σημαντικά μικρότερες από την ονομαστική του ισχύ. Επίσης, οι απώλειες πυρήνα είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τις απώλειες χαλκού λόγω της αντίστοιχης διαφοράς στην τάξη μεγέθους της αντίστασης πυρήνα r_{π} και της αυτεπαγωγής μαγνήτισης X_m ως προς την σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος τυλίγματος $r_1 + jx_{1\sigma}$.

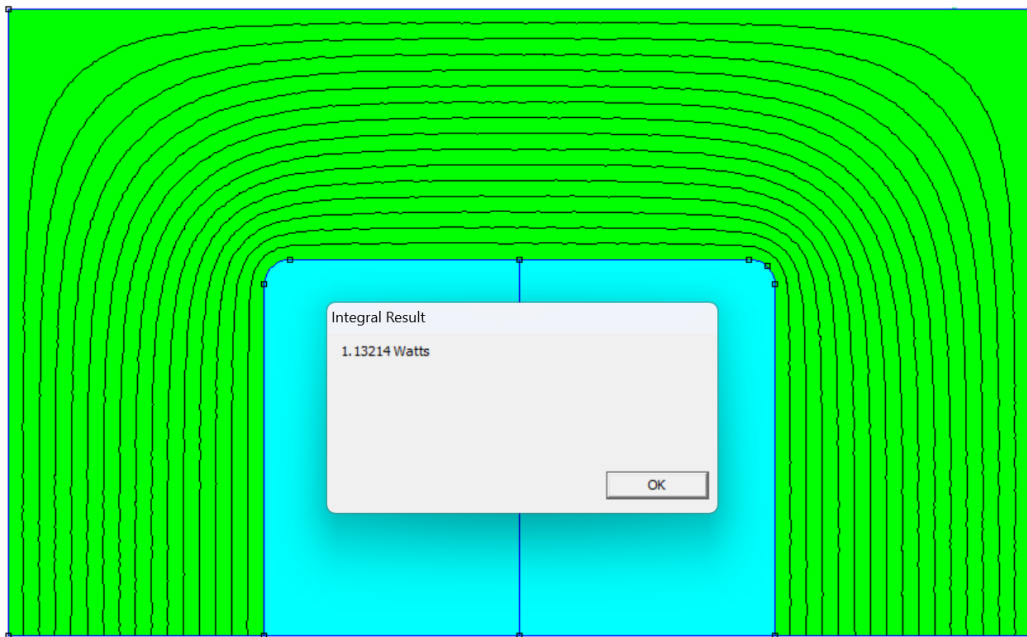
Επίλυση προβλήματος:

Υπολογίζουμε στο πρόγραμμα μας τις απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων, επιλέγοντας τις αντίστοιχες περιοχές όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.1



Σχήμα 8.1: Απώλειες χαλκού κατά την δοκιμή ανοικτού κυκλώματος

αλλά και τις απώλειες πυρήνα όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.2.



Σχήμα 8.2: Απώλειες πυρήνα κατά την δοκιμή ανοικτού κυκλώματος

Παρατηρούμε ότι οι απώλειες σε όλο το πεδίο ορισμού του μετασχηματιστή είναι σημαντικά μικρότερες από την ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή (500VA) αλλά και ότι οι απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων, $P_{\text{χαλκου}} = 0.02721 \text{ Watts}$, είναι περίπου 40 φορές μικρότερες από τις απώλειες πυρήνα, $P_{\text{πυρήνα}} = 1.13214 \text{ Watts}$.

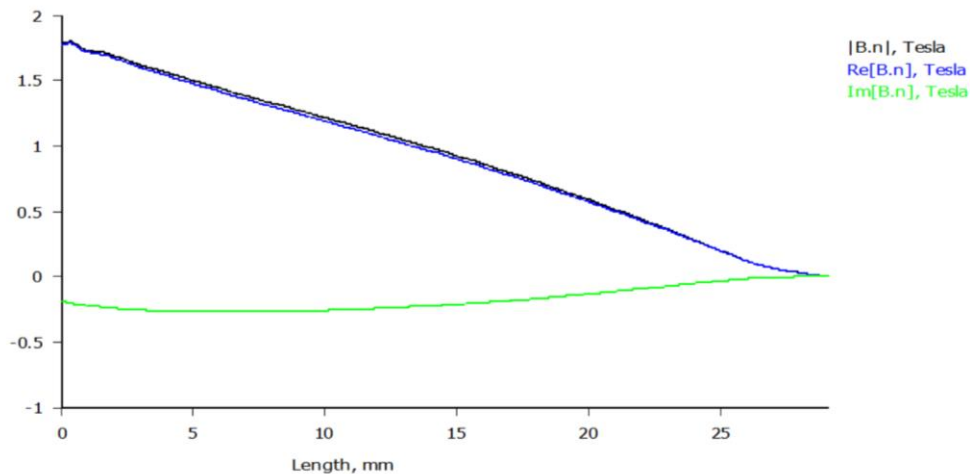
➤ **Κατανομή μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB**

Θεωρητικό πλαίσιο:

Τα σημεία A και B βρίσκονται στην επάνω δεξιά πλευρά του μετασχηματιστή, με το A να βρίσκεται στην στρογγυλεμένη εσωτερική του γωνία και το B στην εξωτερική του γωνία (βλ. Σχήμα 7). Οι μαγνητικές γραμμές ακολουθούν την διαδρομή με την μικρότερη μαγνητική αντίσταση. Στις εσωτερικές γωνίες, η διαδρομή που πρέπει να διανύσει η μαγνητική ροή είναι μικρότερη σε σύγκριση με αυτή που πρέπει να διανύσει στις εξωτερικές γωνίες. Έτσι, συγκεντρώνονται περισσότερες μαγνητικές γραμμές στις εσωτερικές γωνίες και λιγότερες στις εξωτερικές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο σημείο A να έχουμε μέγιστη πυκνότητα μαγνητικών γραμμών, και άρα μέγιστη μαγνητική επαγωγή, η οποία μειώνεται κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB, δηλαδή καθώς απομακρυνόμαστε από την εσωτερική γωνία A και πλησιάζουμε την εξωτερική γωνία B.

Επίλυση προβλήματος:

Υπολογίζουμε στο πρόγραμμα μας την κατανομή της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB και προκύπτει η γραφική παράσταση που φαίνεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Μαγνητική επαγωγή κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB κατά την δοκιμή ανοικτού κυκλώματος

Παρατηρούμε ότι η μαγνητική επαγωγή μειώνεται καθώς κινούμαστε από το A προς το B πάνω στο ευθύγραμμο AB, όπως ήταν αναμενόμενο.

2. Δοκιμή βραχυκύκλωσης υπό ονομαστικό ρεύμα

Στην δοκιμή βραχυκύκλωσης ορίζουμε το ρεύμα σκέδασης στο πρωτεύον ίσο με το ονομαστικό ρεύμα, δηλαδή :

$$I_1 = I_{1N} \approx 2.273A$$

και το ρεύμα στο δευτερεύον:

$$I_2 = -I_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} \approx -2.273A \cdot \frac{412 \text{ σπείρες}}{206 \text{ σπείρες}} = -4.546A$$

όπου το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στην αντίθετη φορά του ρεύματος στα δύο τυλίγματα.

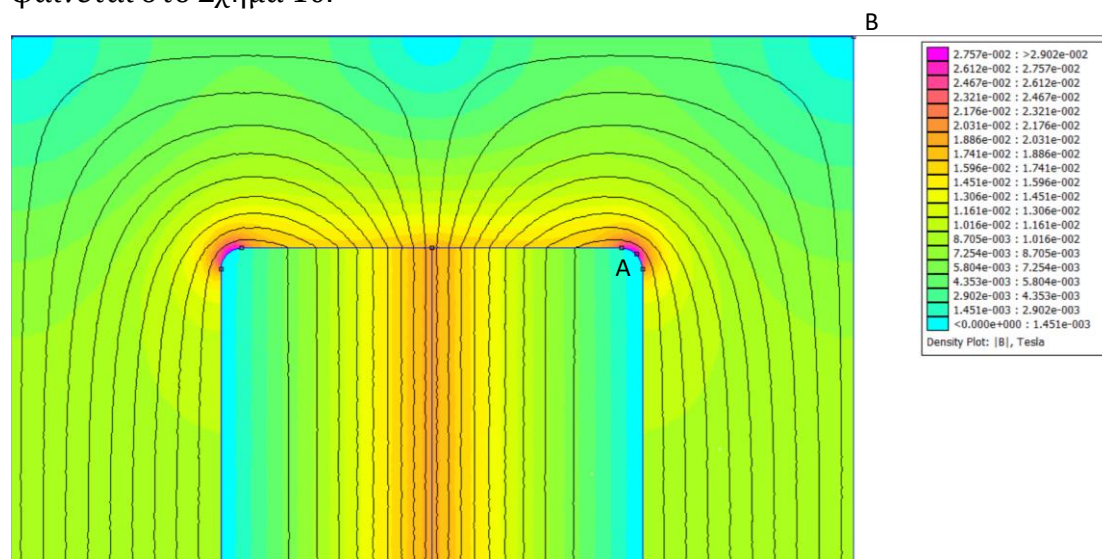
➤ Κατανομή μαγνητικής επαγωγής

Θεωρητικό πλαίσιο:

Στην δοκιμή βραχυκύκλωσης, ο εγκάρσιος κλάδος πυρήνα διαρρέεται από ρεύμα αμελητέας έντασης λόγω της διαφοράς στην τάξη μεγέθους της αντίστασης απωλειών πυρήνα Γ_π και της αυτεπαγωγής μαγνήτισης X_m ως προς τις σύνθετες αντιστάσεις των δυο τυλιγμάτων, οι οποίες διαρρέονται από ονομαστικό ρεύμα. Επομένως, η μαγνητική ροή του μετασχηματιστή διέρχεται κυρίως μέσα από το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα του, ενώ η ροή που διαπερνά τον πυρήνα μέσω του εγκάρσιου κλάδου είναι αμελητέα.

Επίλυση προβλήματος:

Επιλύουμε το πρόβλημα βραχυκύκλωσης στο πρόγραμμά μας. Η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής κατά την δοκιμή βραχυκύκλωσης υπό ονομαστικό ρεύμα φαίνεται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Κατανομή της μαγνητικής επαγωγής κατά την δοκιμή βραχυκύκλωσης

Από το σχήμα 10, διαπιστώνουμε ότι η μαγνητική ροή εμπλέκει κυρίως τα δύο τυλίγματα του μετασχηματιστή και η μαγνητική ροή στον πυρήνα (εγκάρσιο κλάδο) είναι αμελητέα, όπως προβλέπεται. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε όλο το πεδίο ορισμού του προβλήματος κυμαίνονται, κυρίως, μεταξύ $1.451 \cdot 10^{-3}$ και $2.902 \cdot 10^{-2}$ Tesla. Αυτές οι τιμές είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές της μαγνητικής επαγωγής στην δοκιμή ανοικτού κυκλώματος, οι οποίες κυμαίνοντουσαν μεταξύ $8.550 \cdot 10^{-2}$ και 1.71 Tesla.

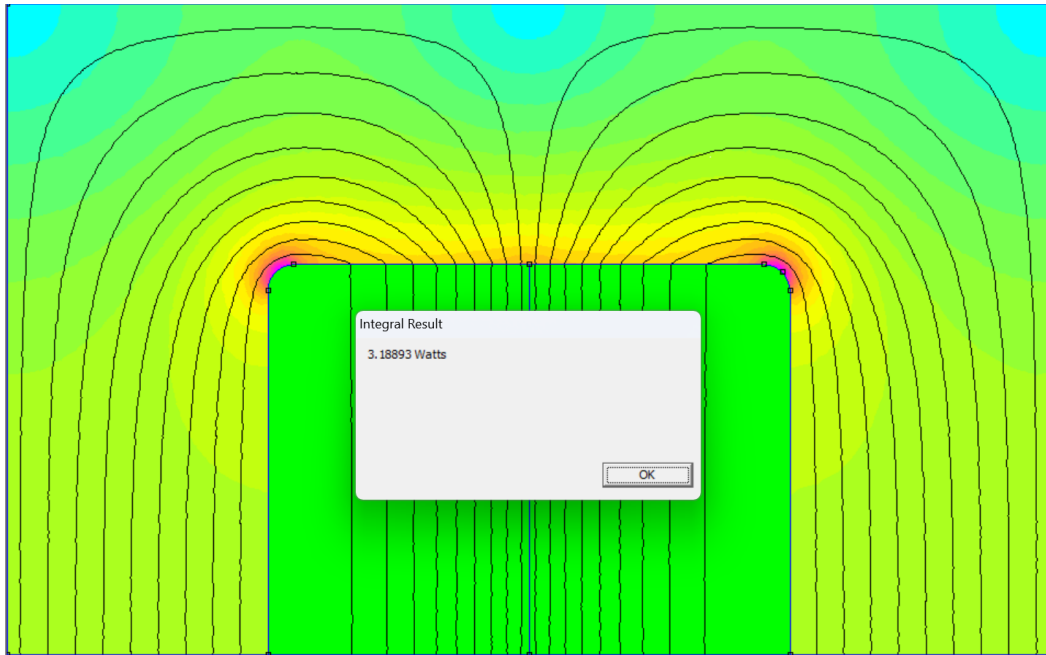
➤ Απώλειες στο πεδίο ορισμού του προβλήματος

Θεωρητικό πλαίσιο:

Ομοίως με την δοκιμή ανοικτού κυκλώματος, οι απώλειες σε κάθε περιοχή του προβλήματος είναι ανάλογες της αντίστασης της περιοχής και του τετραγώνου του ρεύματος που την διαρρέει. Στην δοκιμή βραχυκύκλωσης, τα τυλίγματα διαρρέονται από το ονομαστικό τους ρεύμα με αποτέλεσμα, οι απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων να είναι οι κυρίαρχες απώλειες. Αντίθετα, ο εγκάρσιος κλάδος πυρήνα διαρρέεται από αμελητέο ρεύμα, οπότε και οι απώλειες πυρήνα είναι αμελητέες.

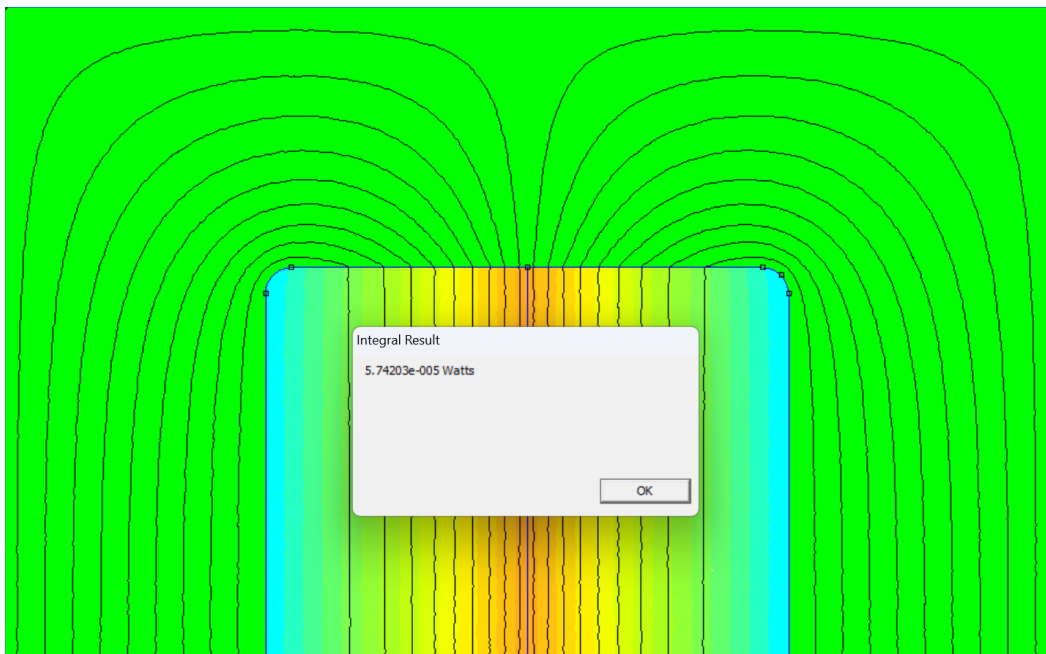
Επίλυση προβλήματος:

Υπολογίζουμε στο πρόγραμμα μας τις απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων, επιλέγοντας τις αντίστοιχες περιοχές όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.1 .



Σχήμα 11.1: Απώλειες χαλκού κατά την δοκιμή βραχυκυκλώματος

αλλά και τις απώλειες πυρήνα όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.2.



Σχήμα 11.2: Απώλειες πυρήνα κατά την δοκιμή βραχυκυκλώματος

Παρατηρούμε ότι οι απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων $P_{\text{χαλκου}} = 3.18893 \text{ Watts}$, είναι οι κυρίαρχες απώλειες σε όλο το πεδίο ορισμού του προβλήματος, ενώ οι απώλειες πυρήνα $P_{\text{πυρηνα}} = 5.74203 \cdot 10^{-5} \text{ Watts}$ είναι πρακτικά μηδενικές.

➤ **Κατανομή μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB**

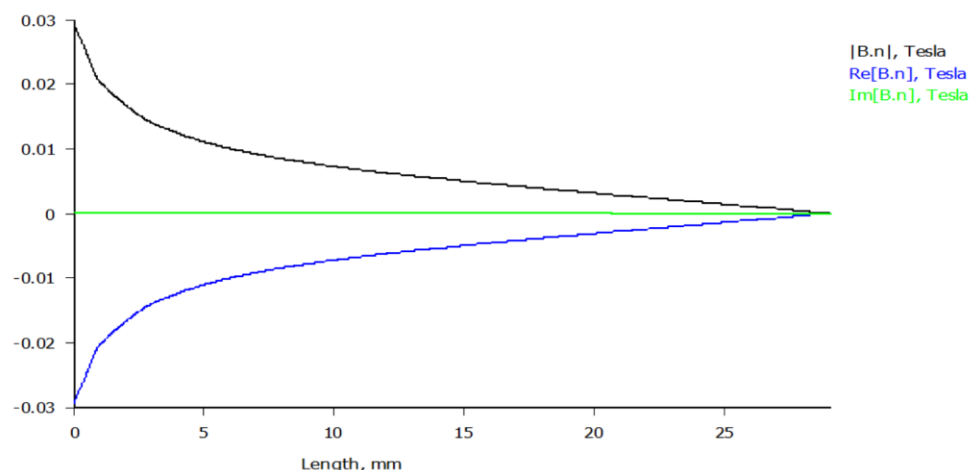
Θεωρητικό πλαίσιο:

Η μαγνητική επαγωγή κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB ακολουθεί την ίδια κατανομή με αυτήν της δοκιμής ανοικτού κυκλώματος, δηλαδή στο σημείο A έχουμε μέγιστη πυκνότητα μαγνητικών γραμμών, και άρα μέγιστη μαγνητική επαγωγή, η οποία μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από την εσωτερική γωνία A και πλησιάζουμε την εξωτερική γωνία B.

Ωστόσο, όπως παρατηρήσαμε και από το σχήμα 10, στην δοκιμή βραχυκύκλωσης, η μαγνητική επαγωγή σε όλο το πεδίο ορισμού, άρα και κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB, είναι τάξεις μεγέθους μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη μαγνητική επαγωγή στην δοκιμή ανοικτού κυκλώματος.

Επίλυση προβλήματος:

Υπολογίζουμε στο πρόγραμμα μας την κατανομή της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB και προκύπτει η γραφική παράσταση που φαίνεται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12: Μαγνητική επαγωγή κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB κατά την δοκιμή βραχυκύκλωσης

Παρατηρούμε ότι η μαγνητική επαγωγή μειώνεται καθώς κινούμαστε από το A προς το B πάνω στο ευθύγραμμο AB αλλά και ότι είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με αυτήν του Σχήματος 9.

3. Ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας

Σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας ορίζουμε το ρεύμα στα δυο τυλίγματα ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων μαγνήτισης και ρευμάτων σκέδασης που υπολογίσαμε στις δοκιμές ανοικτού κυκλώματος και βραχυκύκλωσης, αντίστοιχα. Άρα, ορίζουμε το ρεύμα στο πρωτεύον:

$$I_1 = 0.115A + 2.273A = 2.388A$$

και το ρεύμα στο δευτερεύον:

$$I_2 = 0 + (-4.546A) = -4.546A$$

➤ Κατανομή μαγνητικής επαγωγής

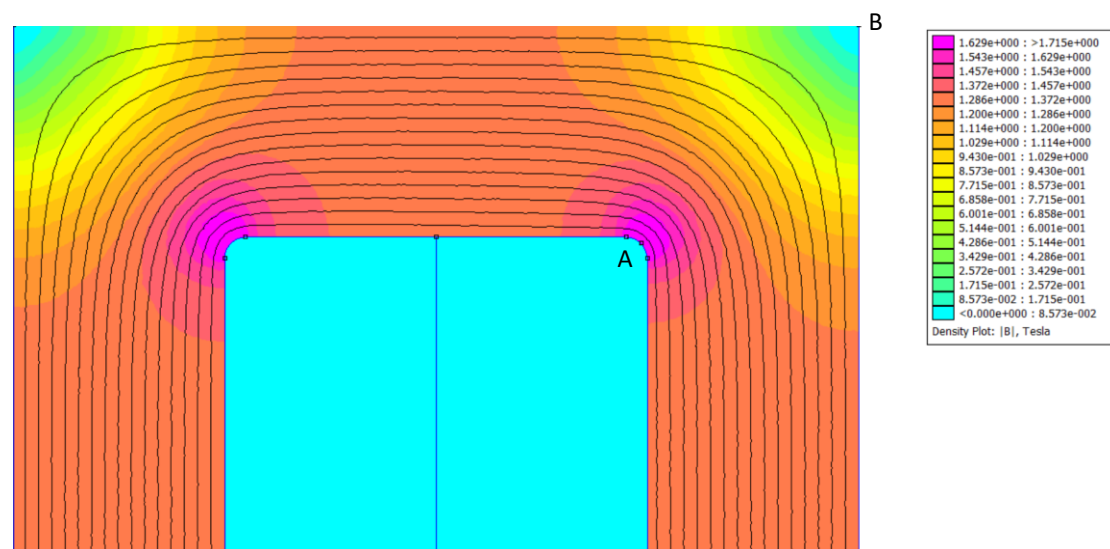
Θεωρητικό πλαίσιο:

Σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή διαρρέεται από ονομαστικό ρεύμα και του εφαρμόζεται ονομαστική τάση. Άρα, ο εγκάρσιος κλάδος πυρήνα διαρρέεται από σημαντικό ρεύμα μαγνήτισης, όπως στην δοκιμή ανοικτού κυκλώματος, και οι σύνθετες αντιστάσεις των δύο τυλιγμάτων διαρρέονται από το ονομαστικό τους ρεύμα.

Επομένως, η συνολική μαγνητική ροή του μετασχηματιστή προκύπτει από επαλληλία της μαγνητικής ροής της δοκιμής ανοικτού κυκλώματος και της δοκιμής βραχυκύκλωσης. Επειδή, όμως, οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε όλο το πεδίο ορισμού στην δοκιμή ανοικτού κυκλώματος είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές στην δοκιμή βραχυκυκλώματος (λόγω της μεγάλης μαγνητικής αντίστασης του εγκάρσιου κλάδου), η μαγνητική επαγωγή σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας έχει παρόμοια κατανομή και εμφανίζει ίδια τάξη μεγέθους με αυτήν της δοκιμής ανοικτού κυκλώματος.

Επίλυση προβλήματος:

Επιλύουμε το πρόβλημα στο πρόγραμμά μας σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας. Η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής φαίνεται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13: Κατανομή της μαγνητικής επαγωγής σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας

Παρατηρούμε ότι η μαγνητική ροή του μετασχηματιστή διέρχεται κυρίως μέσα από τον πυρήνα του, ενώ η ροή που διαπερνά τα δυο τυλίγματα είναι πρακτικά αμελητέα, όπως ήταν αναμενόμενο. Επίσης, οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε όλο το πεδίο ορισμού του προβλήματος κυμαίνονται κυρίως μεταξύ $8.573 \cdot 10^{-2}$ και 1.715 Tesla, περίπου όσο και στην δοκιμή ανοικτού κυκλώματος.

➤ **Απώλειες στο πεδίο ορισμού του προβλήματος**

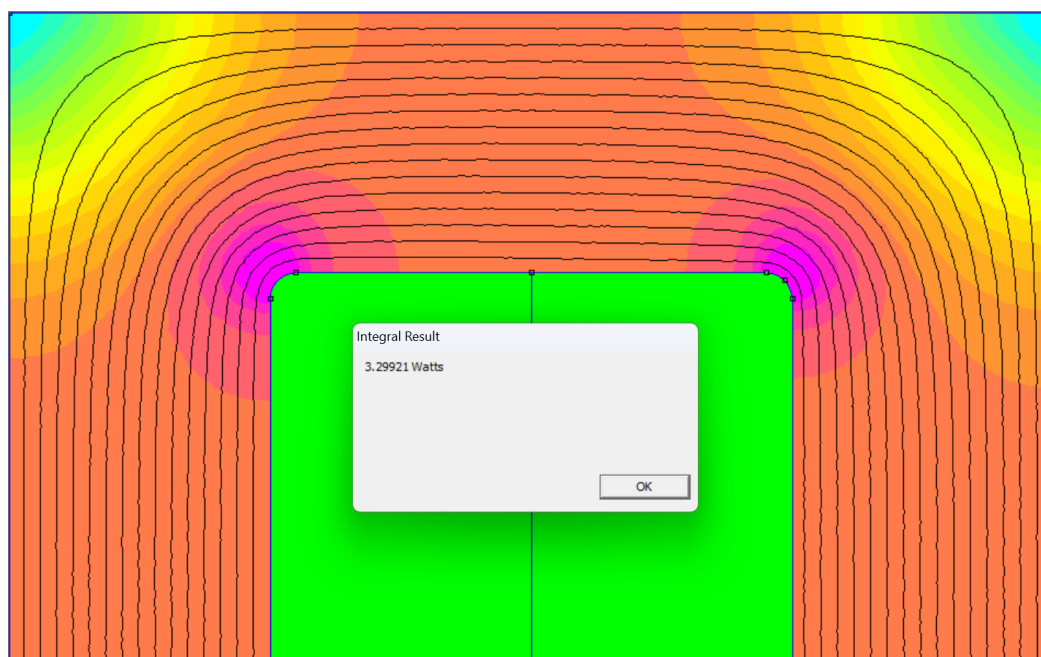
Θεωρητικό πλαίσιο:

Ομοίως με την δοκιμή ανοικτού κυκλώματος και την δοκιμή βραχυκύκλωσης, οι απώλειες σε κάθε περιοχή του προβλήματος είναι ανάλογες της αντίστασης της περιοχής και του τετραγώνου του ρεύματος που την διαρρέει. Σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, ο εγκάρσιος κλάδος πυρήνα διαρρέεται από σημαντικό ρεύμα μαγνήτισης, όπως στην δοκιμή ανοικτού κυκλώματος, οπότε οι απώλειες πυρήνα είναι περίπου ίσες με τις απώλειες πυρήνα που υπολογίσαμε στην δοκιμή ανοικτού κυκλώματος.

Επίσης, σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, το πρωτεύον τύλιγμα διαρρέεται από ρεύμα μεγαλύτερο κατά 0.115A από το ονομαστικό, λόγω της ροής μαγνήτισης, ενώ το δευτερεύον τύλιγμα διαρρέεται από το ονομαστικό του ρεύμα. Αντίθετα, στην δοκιμή βραχυκύκλωσης και τα δύο τυλίγματα διαρρέονται από το ονομαστικό τους ρεύμα. Επομένως, οι απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων είναι λίγο μεγαλύτερες από τις απώλειες χαλκού που υπολογίσαμε στην δοκιμή βραχυκύκλωσης.

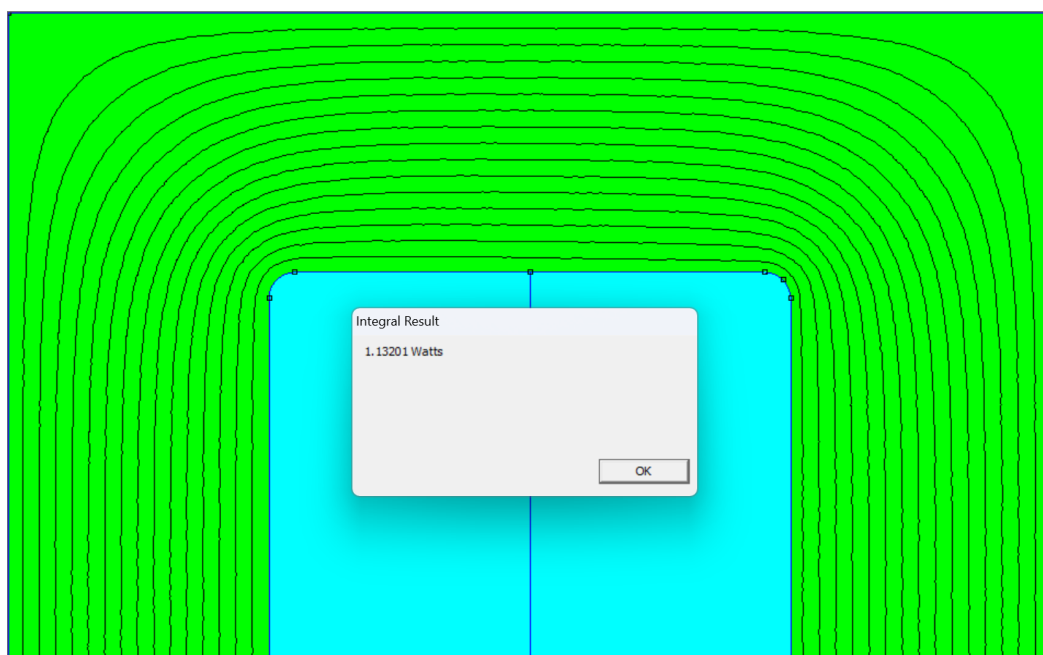
Επίλυση προβλήματος:

Υπολογίζουμε στο πρόγραμμα μας τις απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων, επιλέγοντας τις αντίστοιχες περιοχές όπως φαίνεται στο Σχήμα 14.1 .



Σχήμα 14.1: Απώλειες χαλκού σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας

αλλά και τις απώλειες πυρήνα όπως φαίνεται στο Σχήμα 14.2.



Σχήμα 14.2: Απώλειες πυρήνα σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας

Παρατηρούμε ότι οι απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων $P_{\text{χαλκου}} = 3.29921 \text{ Watts}$ είναι λίγο μεγαλύτερες από τις απώλειες χαλκού $P_{\text{χαλκου}} = 3.18893 \text{ Watts}$ που υπολογίσαμε στην δοκιμή βραχυκύκλωσης, και οι απώλειες πυρήνα $P_{\text{πυρηνα}} = 1.13201 \text{ Watts}$ είναι περίπου ίσες με τις απώλειες πυρήνα $P_{\text{πυρηνα}} = 1.13214 \text{ Watts}$ που υπολογίσαμε στην δοκιμή ανοικτού κυκλώματος.

➤ **Κατανομή μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB**

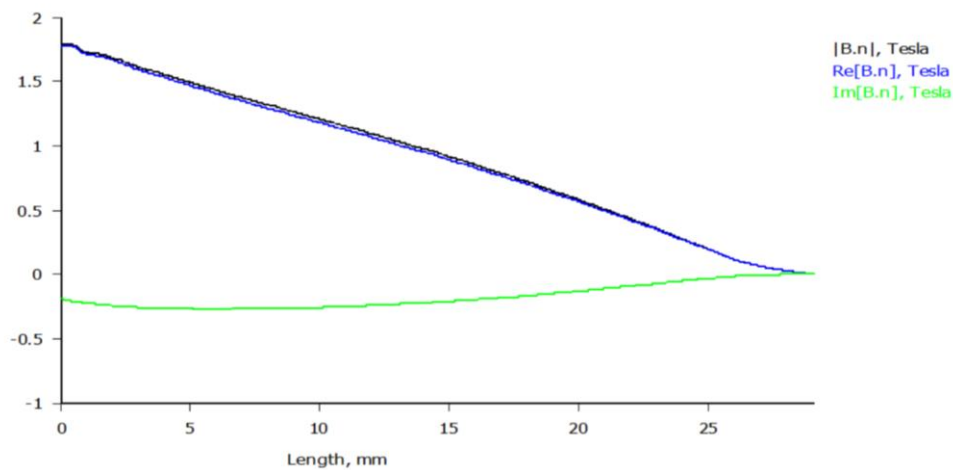
Θεωρητικό πλαίσιο:

Η μαγνητική επαγωγή κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB ακολουθεί την ίδια κατανομή με αυτήν των δοκιμών ανοικτού κυκλώματος και βραχυκύκλωσης, δηλαδή στο σημείο A έχουμε μέγιστη πυκνότητα μαγνητικών γραμμών, και άρα μέγιστη μαγνητική επαγωγή, η οποία μειώνεται κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB.

Προηγουμένως, δείξαμε ότι σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας η μαγνητική επαγωγή σε όλο το πεδίο ορισμού του προβλήματος έχει παρόμοια κατανομή και εμφανίζει ίδια τάξη μεγέθους με αυτήν της δοκιμής ανοικτού κυκλώματος. Άρα και η μαγνητική επαγωγή κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB έχει την ίδια τάξη μεγέθους με αυτήν της δοκιμής ανοικτού κυκλώματος.

Επίλυση προβλήματος:

Υπολογίζουμε στο πρόγραμμα μας την κατανομή της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB και προκύπτει η γραφική παράσταση που φαίνεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 15: Μαγνητική επαγωγή κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας

Παρατηρούμε ότι η μαγνητική επαγωγή μειώνεται καθώς κινούμαστε από το A προς το B πάνω στο ευθύγραμμο AB αλλά και ότι είναι σχεδόν ίδια με αυτήν του Σχήματος 9.