



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Θερμική ανάλυση κινητήρα μόνιμων
μαγνητών με πεπερασμένα στοιχεία και μοντέλο
συγκεντρωμένων παραμέτρων

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΙΣΤ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Θερμική ανάλυση κινητήρα μόνιμων μαγνητών με
πεπερασμένα στοιχεία και μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άγγελος Κ. Καμπανάκης

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 25^η Ιούλη 2013

.....
Κλαδάς Αντώνιος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μανιάς Στέφανος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παπαθανασίου Σταύρος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

.....
Άγγελος Κ. Καμπανάκης

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

Copyright © Άγγελος Κ. Καμπανάκης, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία καταπιάνεται με τα θερμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των ηλεκτρικών μηχανών. Η θερμική ανάλυση της συμπεριφοράς των ηλεκτρικών μηχανών αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο στην κατασκευή τους καθώς η μετάδοση θερμότητας επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόκριση τους.

Η θερμική συμπεριφορά του κινητήρα μονίμων μαγνητών, που προορίζεται για χρήση εναλλάκτη και πρόκειται να μελετήσουμε στην εργασία αυτή, θα πραγματοποιηθεί με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και ενός ισοδύναμου θερμικού μοντέλου. Αρχικά θα αναλυθούν τα θερμικά φαινόμενα που διέπουν την λειτουργία του ηλεκτρικού κινητήρα και οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν την μετάδοση της θερμότητας στο εσωτερικό του. Στη συνέχεια θα επιλυθεί ένα απλό θερμικό πρόβλημα μέσω των αναλυτικών σχέσεων και του κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων που δίνει η συγκεκριμένη μέθοδος. Όταν γίνει σαφής προσδιορισμός των συνθηκών και των παραμέτρων του θερμικού προβλήματος, αναπτύσσεται ένα ισοδύναμο θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων που θα προσεγγίσει την θερμική συμπεριφορά του κινητήρα. Η επίλυση του θερμικού προβλήματος του κινητήρα με την συγκεκριμένη μέθοδο επιτυγχάνεται πολύ γρήγορα και με μικρή υπολογιστική ισχύ, τόσο για την μεταβατική όσο και για την μόνιμη κατάσταση. Έπειτα θα αναλυθεί ο κινητήρας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις γεωμετρίας, παρέχοντας αποτελέσματα για οποιαδήποτε σημείο του κινητήρα για την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Η εργασία μετά συγκρίνει τα αποτελέσματα και την αξιοπιστία των δύο εναλλακτικών προσεγγίσεων της θερμικής συμπεριφοράς του ηλεκτρικού κινητήρα μονίμων μαγνητών. Έμφαση δίνεται στην ανάλυση της μόνιμης κατάστασης και της ακρίβειας των δύο μεθόδων. Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδεικνύεται η καταλληλότητα των δύο μεθόδων θερμικής προσομοίωσης για του κινητήρες μονίμων μαγνητών που έχουν σχεδιαστή για την σαν εναλλάκτες στην κίνηση και τον έλεγχο διαφορετικών συστημάτων.

Λέξεις κλειδιά:

Ηλεκτρική μηχανή, κινητήρας μονίμων μαγνητών, θερμικά φαινόμενα, μετάδοση θερμότητας, θερμική ανάλυση, ισοδύναμο κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων, πεπερασμένα στοιχεία.

Abstract

This diploma thesis deals with the thermal phenomena that take place inside of electrical machines. Heat transfer affects significantly their response and that is why it is an important factor for their design process.

The thermal behavior of permanent magnets motor, which is intended for use as an actuator, will be carried out using the finite element method and an equivalent thermal model. Initially the thermal phenomena that are developed during the operation of the electric motor and the mathematical equations which describe the transmission of heat inside will be analyzed. Then a simple thermal problem will be resolved through analytical relations and the finite element code so that the reliability of the results given by this method is checked. When a clear determination of conditions and parameters of the thermal problem are made, an equivalent lumped parameter thermal model will be developed to approach the thermal behavior of the engine. Solving the problem of the thermal engine with this particular method is achieved quickly and with minimal computational power, both for the transient and the steady state. Then the engine will be analyzed with the finite element program in two-dimensional geometries, providing results for every single point of the engine for the steady state.

The paper then compares the results and the credibility of the two alternative methods used to approach the thermal behavior of the permanent magnets electric motor. Emphasis is given to the analysis of steady-state and the accuracy of the two methods. The results of this diploma thesis shows the suitability of the two methods for thermal simulation of permanent magnet motors that are designed to be used as an actuator to move and control different systems.

Key Words:

Electric motor, permanent magnet motor, thermal effects, heat transfer, thermal analysis, equivalent circuit lumped parameter, finite elements.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και χωρίς αυτούς θα ήταν δύσκολη η ολοκλήρωση της.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου κατά την ανάθεση του ενδιαφέροντος θέματος και την πολύτιμη καθοδήγηση του.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνονται στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Μίνω Μπενιακάρ για τις πολύτιμες επισημάνσεις, την καθοδήγηση και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία αυτή στους γονείς μου για την διαρκή στήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σχολικών και φοιτητικών μου χρόνων.

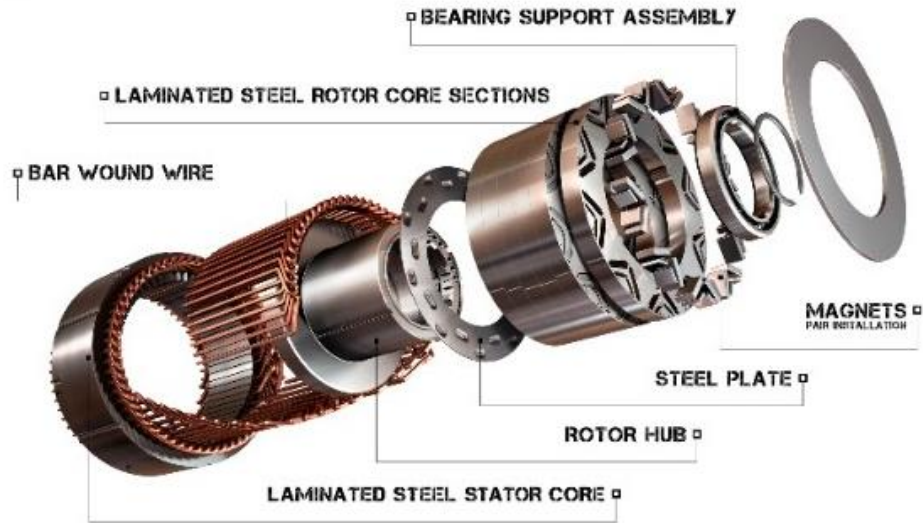
Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Κεφάλαιο 1	14
Εισαγωγή	14
1.1 Διάρθρωση παρούσας εργασίας.....	14
1.2 Γενικά για την χρήση ηλεκτρικών μηχανών	15
1.3 Θερμικά φαινόμενα στους ηλεκτροκινητήρες.....	18
1.4 Σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών	18
1.5 Ανάλυση σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών.....	22
1.6 Μέθοδοι μέτρησης και ανάλυσης των θερμικών φαινομένων.....	24
Κεφάλαιο 2	26
Θερμικά φαινόμενα	26
2.1 Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας	26
2.2 Αγωγή	27
2.3 Συναγωγή	32
2.4 Ακτινοβολία.....	38
2.5 Θερμικά φαινόμενα στις ηλεκτρικές μηχανές	39
2.6 Θερμοκρασιακοί περιορισμοί των ηλεκτρικών μηχανών.....	42
2.8 Ψύξη ηλεκτρικών μηχανών	43
2.7 Θερμική αντίσταση	44
2.8 Θερμική ανάλυση για κυλινδρική διάταξη	44

2.8.1 Προσομοίωση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	45
2.8.2 Αναλυτική επίλυση προβλήματος.....	50
2.9 Μέθοδοι θερμικής ανάλυσης	56
Κεφάλαιο 3	58
Ανάλυση με μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων	58
3.1 Παράδειγμα κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων.....	59
3.2 Αντιστοίχιση θερμικών με ηλεκτρικά μεγέθη.....	61
3.3 Χαρακτηριστικά ηλεκτρικού κινητήρα	64
3.4 Κύκλωμα του κινητήρα μονίμων μαγνητών.....	68
3.5 Υπολογισμός τιμών των στοιχείων.....	70
3.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων	78
3.7 Συμπεράσματα προσομοίωσης.....	80
Κεφάλαιο 4	82
Θερμική ανάλυση με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων	82
4.1 Μετάδοση θερμότητας στο εσωτερικό της μηχανής.....	82
4.2 Μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού της αγωγής.....	83
4.2 Μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής.....	84
4.3 Οριακές συνθήκες θερμικού προβλήματος.....	84
4.4. Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων.....	85
4.5 Σχεδίαση κινητήρα	86
4.6 Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία	96
4.7 Συμπεράσματα από αποτελέσματα δύο τομών	115
Κεφάλαιο 5	116
Παρουσίαση αποτελεσμάτων και σύγκριση των δύο μεθόδων.....	116
5.1 Πίνακες με αποτελέσματα των προσομοιώσεων	116

5.2 Αναλυτική σύγκριση αποτελεσμάτων.....	119
5.3 Συμπεράσματα	120
Κεφάλαιο 6	121
Συμπεράσματα	121
6.1 Κύρια συμπεράσματα	122
6.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης	124
6.3 Θέματα για περαιτέρω ανάλυση	124
Παραρτήματα.....	126
Βιβλιογραφία	129
Λογισμικό	130

Κεφάλαιο 1



Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος και πραγματεύεται την ανάλυση και θερμική συμπεριφορά ενός κινητήρα μόνιμων μαγνητών. Ο κινητήρας προορίζεται για χρήση σε μικρό όχημα πόλης και θα χρησιμοποιηθεί για την κίνηση.

Η ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, αλλά και με την ανάπτυξη ενός θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων θα συγκριθούν μεταξύ τους για να διαπιστωθεί η ακρίβεια της προσέγγισης πριν κατασκευαστεί ο κινητήρας, έτσι ώστε να προβλεφθούν οι στις πραγματικές συνθήκες αλλά και η κατάλληλη ψύξη του κινητήρα.

1.1 Διάρθρωση παρούσας εργασίας

Η εργασία αναπτύσσεται σε πέντε κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας εξετάζεται η χρήση κινητήρα μόνιμων μαγνητών σε οχήματα. Γίνεται μια αναφορά στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, στους τρόπους λειτουργίας των κινητήρων αυτό και στα οφέλη που έχει η χρήση τους. Επίσης

αναλύονται οι στόχοι της εργασίας και περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να γίνει η θερμική ανάλυση τους συγκεκριμένου κινητήρα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια να επιγραφούν όσο καλύτερα και αναλυτικότερα γίνεται τα θερμικά φαινόμενα που χαρακτηρίζουν τις ηλεκτρικές μηχανές. Αναλύονται οι τρόποι μετάδοσης της θερμότητας με ιδιαίτερη προσοχή στα θερμικά φαινόμενα στο εσωτερικό των μηχανών. Παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακοί περιορισμοί που υπάρχουν στην λειτουργία των μηχανών μόνιμων μαγνητών και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διατάξεις και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ψύξη τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο προσεγγίζουμε την θερμική ανάλυση του κινητήρα με την μέθοδο των συγκεντρωμένων παραμέτρων. Γίνεται ο σχεδιασμός του ισοδύναμου θερμικού μοντέλου και παρουσιάζονται οι αναλυτικοί τύποι υπολογισμού των στοιχείων του μοντέλου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η θερμική ανάλυση με την εφαρμογή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για δισδιάστατη γεωμετρία με τη χρήση διαθέσιμου κώδικα από το διαδίκτυο. Η ανάλυση γίνεται σε δύο επίπεδα:

- a. σε επίπεδο που τέμνει τη μηχανή κάθετα στον άξονα περιστροφής
- b. σε επίπεδο που τέμνει τη μηχανή παράλληλα με τον άξονα, μια αξονοσυμμετρική προσέγγιση.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων προσομοίωσης και γίνεται σύγκριση μεταξύ τους. Επίσης μελετάται η μεταβατική θερμική συμπεριφορά του κινητήρα και οι τελικές θερμοκρασίες της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας του.

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα κύρια συμπεράσματα που εξήχθησαν από την επιστημονική μελέτη της συγκεκριμένης εργασίας και θέματα που επιδέχονται περαιτέρω διερεύνηση.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθενται τα σχέδια που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας, καθώς και τα γεωμετρικά στοιχεία και παραρτήματα με ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του κινητήρα.

1.2 Γενικά για την χρήση ηλεκτρικών μηχανών

Ένας ηλεκτρικός κινητήρας είναι ένας κινητήρας που χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας, συνήθως μέσα από την αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων και αγωγών ρεύματος. Η αντίστροφη διαδικασία, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μηχανική ενέργεια, επιτυγχάνεται με μια γεννήτρια ή δυναμό. Κινητήρες έλξης που χρησιμοποιούνται σε οχήματα εκτελούν συχνά τα δύο καθήκοντα. Ηλεκτρικές κινητήρες μπορούν να λειτουργούν ως γεννήτριες και αντιστρόφως, αν και αυτό

δεν είναι πάντα αποδοτικό. Ηλεκτροκινητήρες βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές δραστηριότητες της καθημερινής μας ζωής, όπως βιομηχανίες, ανεμιστήρες και αντλίες, εργαλειομηχανές, οικιακές συσκευές, ηλεκτρικά εργαλεία, και σκληρούς δίσκους. Γύρω στο 45% από την ενέργεια που παράγεται παγκοσμίως χρησιμοποιείται στους ηλεκτρικούς κινητήρες. Το ποσοστό αυτό αντιπροσωπεύει περίπου τα δύο τρίτα της βιομηχανικής κατανάλωσης ενέργειας σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας.

Στην εποχή που ζούμε στην καθημερινή ζωή, στις βιομηχανίες, στα αυτοκίνητα και σε πολλές πτυχές της ζωής είναι αναγκαία η χρήση μηχανημάτων που να κινούν και να ελέγχουν την κίνηση διαφορετικών αντικειμένων. Τα μηχανήματα αυτά ονομάζονται εναλλάκτες. Εναλλάκτης ονομάζεται οποιαδήποτε συσκευή μετατρέπει ενέργεια σε κίνηση. Η κίνηση αυτή μπορεί να είναι σχεδόν σε οποιαδήποτε μορφή, όπως τη σύσφιξη, εξαγωγή ή το κλείδωμα. Οι εναλλάκτες είναι οι μηχανισμοί με τους οποίους ένα σύστημα ελέγχου επιδρά στο περιβάλλον.

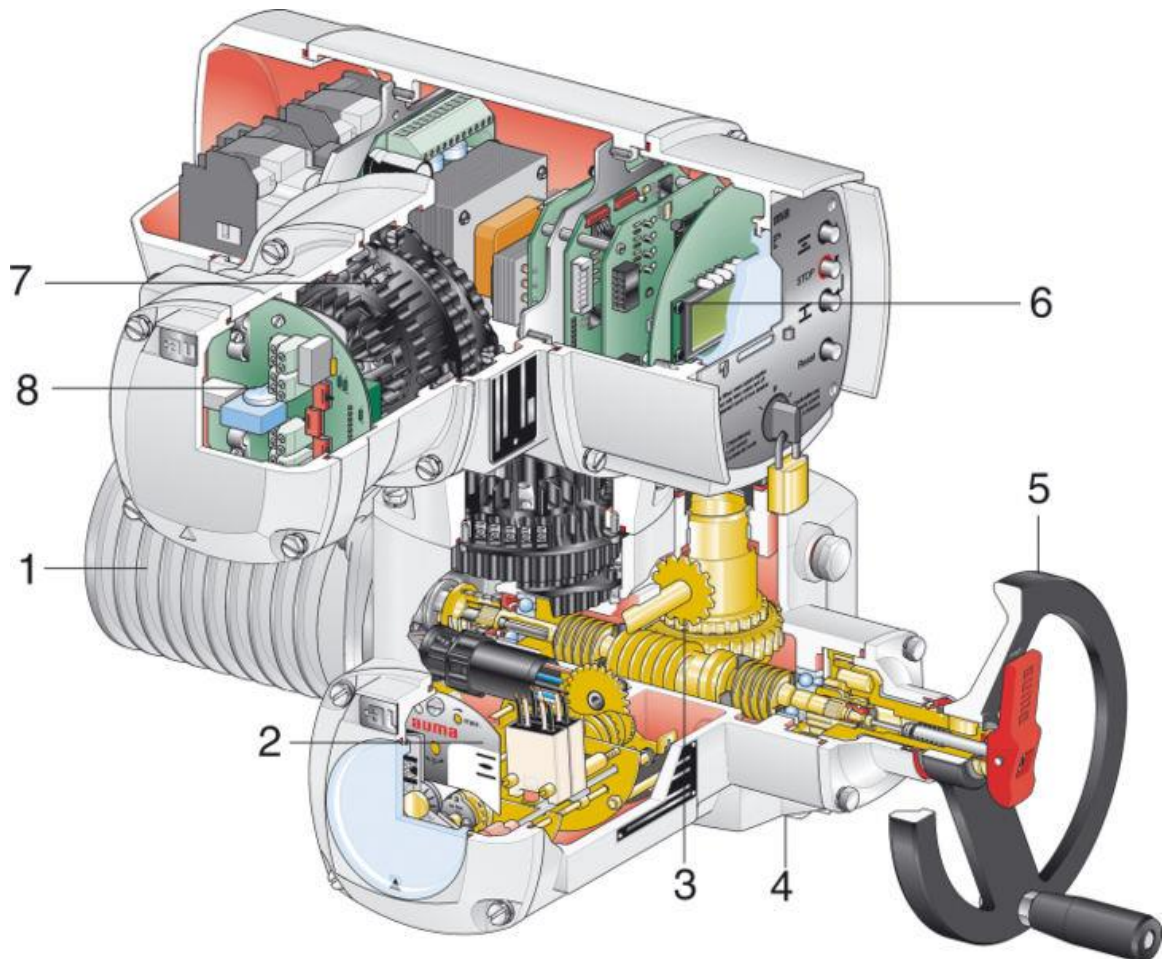
Τα είδη των εναλλακτών εξαρτώνται από την μορφή ενέργειας που χρησιμοποιούν. Οι κυριότεροι τύποι είναι οι παρακάτω:

- Υδραυλικοί εναλλάκτες: Ένας υδραυλικός εναλλάκτης αποτελείται από έναν κύλινδρο ή κινητήρα ρευστού που χρησιμοποιεί υδραυλική ισχύ για τη διευκόλυνση της μηχανικής λειτουργίας. Η μηχανική κίνηση δίνει μία έξοδο είτε σε μορφή γραμμικής, είτε περιστροφικής ή ταλαντωτικής κίνησης. Επειδή το υγρό δεν μπορεί να συμπιεστεί, οι υδραυλικοί εναλλάκτες μπορεί να ασκήσουν σημαντική δύναμη, αλλά περιορίζουν τη χρήση τους στην επιτάχυνση και την ταχύτητα.
- Πνευματικοί εναλλάκτες: Ένας πνευματικός εναλλάκτης μετατρέπει την ενέργεια που σχηματίζεται από συμπιεσμένο αέρα σε υψηλή πίεση σε γραμμική ή περιστροφική κίνηση. Η πνευματική ενέργεια είναι επιθυμητή κυρίως για τον έλεγχο κινητήρα, διότι μπορεί να ανταποκριθεί γρήγορα στην εκκίνηση και τη διακοπή, αφού η πηγή ενέργειας δεν είναι απαραίτητο να αποθηκεύεται στο αποθεματικό για τη λειτουργία του.
- Μηχανικοί εναλλάκτες: Ένας μηχανικός εναλλάκτης λειτουργεί από τη μετατροπή περιστροφικής κίνησης σε γραμμική κίνηση. Περιλαμβάνει εργαλεία, κάγκελα, τροχαλίες, αλυσίδες και άλλες συσκευές για να λειτουργήσει.
- Ηλεκτρικοί εναλλάκτες: Ένας ηλεκτρικός εναλλάκτης τροφοδοτείται από κινητήρα που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ροπή. Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για να ενεργοποιήσει τον εξοπλισμό, όπως η βαλβίδες. Είναι μία από τις καθαρότερες και πιο εύκολα διαθέσιμες μορφές εναλλάκτη, διότι δεν χρειάζεται την χρήση πετρελαίου.

Στις βαριές βιομηχανίες είναι η αναγκαία η χρήση τους για την κίνηση μηχανημάτων. Οι εναλλάκτες χρησιμοποιούνται για την αυτοματοποίηση των βιομηχανικών βαλβίδων και

μπορεί να βρεθούν σε όλα τα είδη των τεχνικών εγκαταστάσεων διαδικασίας: χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, μονάδες παραγωγής ενέργειας, ακόμα και διυλιστήρια. Σε αυτές τις λειτουργίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας ελέγχου.

Ένα ηλεκτρικός εναλλάκτης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Η χρήση εναλλακτών απαιτεί την πλήρη εξειδίκευση στο σύστημα που θα χρησιμοποιεί καθώς είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της δύναμης, της ταχύτητας και της ροπής που θα δίνει ο εναλλάκτης.

Η εναλλάκτες βρίσκουν εφαρμογή σε μια ευρεία και τόσο μεγάλη κλίμακα της σύγχρονης ζωής του ανθρώπου που η έλλειψη τους θα άλλαζε την εικόνα της καθημερινής ζωής όχι μόνο των πόλεων αλλά όλων της γης. Για αυτό το λόγο η εκτενής μελέτη και βελτίωση της λειτουργίας τους, της διάρκειας ζωής τους και της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας από αυτούς αποτελεί αντικείμενο μελέτης πολλών επιστημόνων σήμερα.

1.3 Θερμικά φαινόμενα στους ηλεκτροκινητήρες

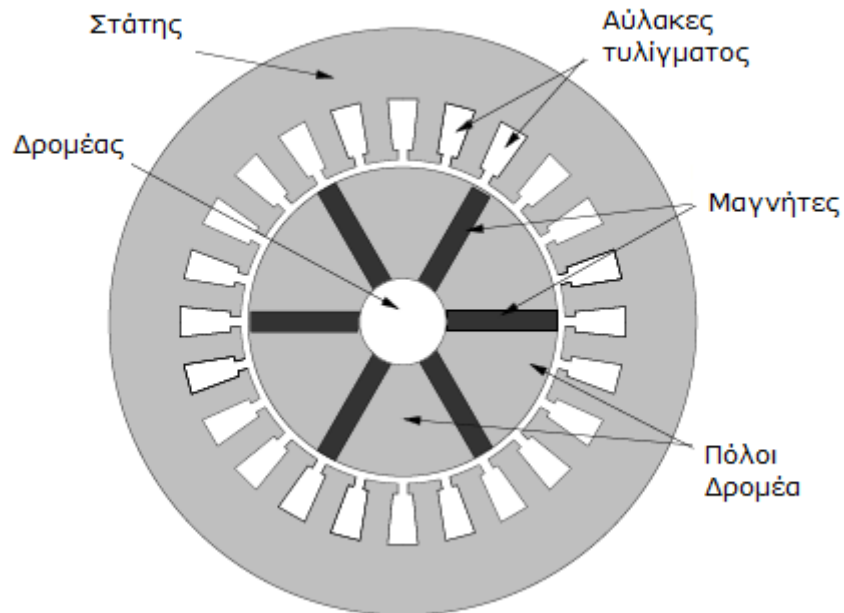
Η μετάδοση θερμότητας και η θερμοκρασία που αναπτύσσουν οι κινητήρες αποτελούν ξεχωριστό πεδίο που προβληματίζει του σχεδιαστές και κατασκευαστές τους. Στις ηλεκτρικές μηχανές οι μεταβολές στην θερμοκρασία επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση και την διάρκεια ζωής των μηχανών καθιστώντας τις αδύνατον να τις αμελήσουμε. Επιστήμονες και ερευνητές μελετούν τα θερμικά φαινόμενα, την ψύξη και τον έλεγχο των μηχανών με στόχο την εξέλιξη τους. Στον τομέα των ηλεκτρικών οχημάτων, η θερμοκρασία του κινητήρα μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία όλου το οχήματος. Η υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν όχι μόνο τον ίδιο τον κινητήρα αλλά και μηχανικά κ ηλεκτρονικά συστήματα που βρίσκονται κοντά σε αυτόν. Ο περιορισμός και ο έλεγχος της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά οχήματα επιτυγχάνεται σε καλύτερο βαθμό από ότι στις στατικές μηχανές (γεννήτριες και κινητήρες σε βιομηχανίες και στην καθημερινή ζωή) καθώς η ροή αέρα με την κίνηση του οχήματος ψύχει αξιόλογα τον κινητήρα. Τέλος συστήματα όπως οι περιοριστές ταχύτητας στρέψης και ρευμάτων συμβάλουν στην πολύ υψηλή απόδοση που έχουν οι κινητήρες και ιδιαίτερα οι κινητήρες μονίμων μαγνητών μειώνοντας τις θερμικές απώλειες σε μεγάλο βαθμό.

1.4 Σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών

Οι μηχανές μονίμων μαγνητών αποτελούν μια τοπολογία όπου τα DC τυλίγματα αντικαθίσταται από μόνιμους μαγνήτες που παράγουν σταθερή ροή με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζουν τις απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων διέγερσης, οδηγώντας σε υψηλότερη απόδοση. Η μαγνητική ενέργεια που αποθηκεύουν στο εσωτερικό τους οι μόνιμοι μαγνήτες και το μόνιμο πεδίο διέγερσης που δημιουργούν, απαλλάσσει τον κατασκευαστή από την ανάγκη παροχής συνεχούς ρεύματος μέσω ψηκτρών και δακτυλίων, συνεισφέροντας περαιτέρω στην αύξηση της απόδοσης του κινητήρα και την μείωση του μεγέθους του. Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών έχουν μεγαλύτερη ροπή, ισχύ εξόδου και μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο σε σύγκριση με τους κινητήρες που έχουν τυλίγματα διέγερσης. Μειονέκτημα τους όμως αποτελεί ο πολύπλοκος έλεγχος τους καθώς η μόνιμη τιμή μαγνήτισης τους καθιστά δύσκολο τον έλεγχο της διέγερσης. Οι μηχανικές καταπονήσεις καθώς και η αύξηση της θερμοκρασίας για τον περιορισμό του πεδίου μπορεί να οδηγήσουν σε απομαγνήτιση των μονίμων μαγνητών καταστρέφοντας τον κινητήρα.

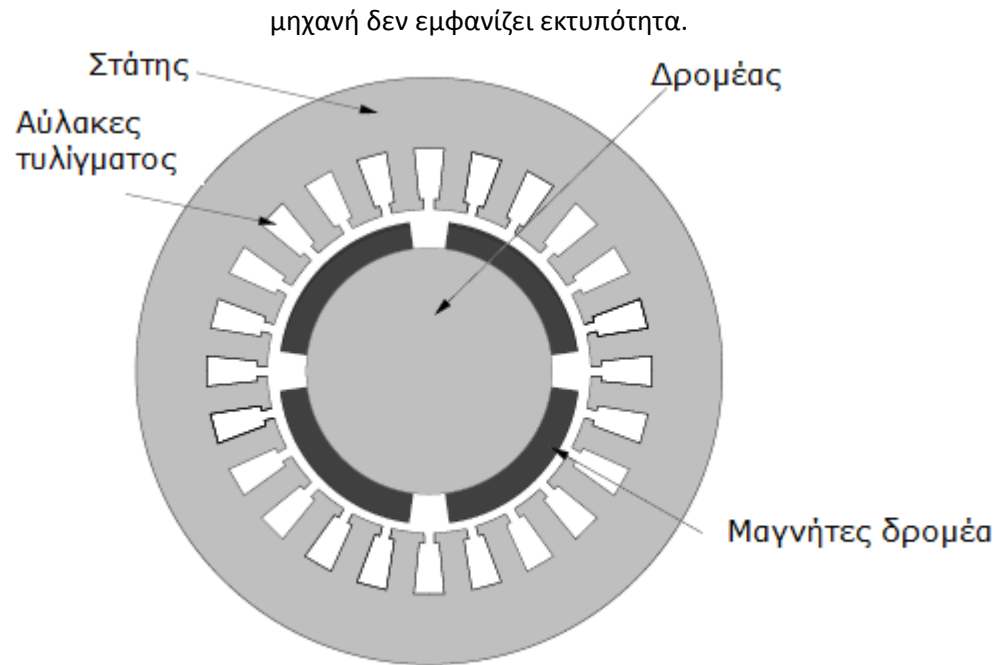
Οι μηχανές μονίμων μαγνητών κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής του πεδίου. Έχουμε τις μηχανές:

- Αξονικής ροής. Η μαγνητική ροή που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες είναι κάθετη στην ακτίνα της μηχανής και διέρχεται από το διάκενο, ακτινικά στα τυλίγματα του στάτη για να κλείσει το μαγνητικό κύκλωμα.
- Ακτινικής ροής. Η μαγνητικής ροή είναι παράλληλη στην ακτίνα της μηχανής.



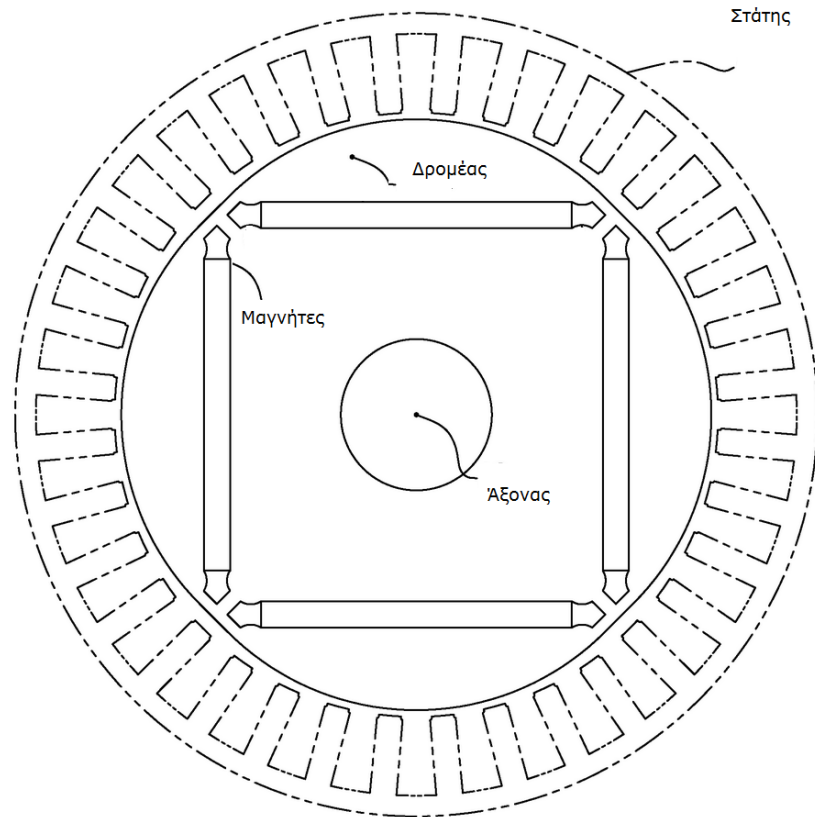
Σχήμα: Εγκάρσια τομή κινητήρα αξονικής ροής

- Επιφανειακών μόνιμων μαγνητών. Σε αυτή τη μηχανή τα τυλίγματα του στάτη μοιάζουν πολύ με τα τυλίγματα του κινητήρα επαγωγής, τα οποία βρίσκονται στην επιφάνεια του πυρήνα του στάτη. Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι κολλημένοι στην επιφάνεια του δρομέα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από διάτρητά ελάσματα ή συμπαγή σίδηρο. Η μηχανή μπορεί να στρέφεται από εξωτερική πηγή και τα τυλίγματα του στάτη παράγουν συμμετρικές τριφασικές ημιτονοειδείς τάσεις. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στο διάκενο είναι σχεδόν ίδια όπως στους μαγνήτες, προκειμένου αυτός ο τύπος μηχανής να μην έχει πυκνότητες μαγνητικής ροής μεγαλύτερες από από αυτήν της παραμένουσας μαγνήτισης. Σημαντικό είναι να επίσης ότι οι μαγνήτες σε αυτό τον σχεδιασμό είναι πραγματικά στο διάκενο της μηχανής με αποτέλεσμα να εκτίθενται συνεχώς στις αρμονικές του στάτη και να παράγουν δινορεύματα όταν έχουμε μεταβλητές στροφές. Αντιθέτως, όμως λόγω της σχετικής επιτρεπτότητας των μόνιμων μαγνητών που είναι κοντά στην μονάδα η



Σχήμα: Εγκάρσια τομή επιφανειακών μαγνητών

- Εμφυτευμένων μαγνητών. Σε αυτό τον τύπο μηχανής οι μόνιμοι μαγνήτες βρίσκονται εμφυτευμένοι στο εσωτερικό του δρομέα, όπως φαίνεται σε μία από τις πιθανές γεωμετρίες στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα: Εγκάρσια τομή μηχανής εμφυτευμένων μαγνητών 1

Με την κατασκευή αυτή οι μαγνήτες είναι προστατευμένοι στο εσωτερικό από τις υψηλές αρμονικές των πόλων και λόγω της συμπαγούς δομής μπορούν οι μηχανές αυτές να επιτύχουν υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής σε σχέση με αυτές των επιφανειακών. Η πυκνότητα ροής στο διάκενο είναι μεγαλύτερη από αυτή των μαγνητών. Το ενεργό μήκος του διακένου στον άξονα d είναι μεγαλύτερο από τον άξονα a , επομένως η μηχανή εμφανίζει εκτυπότητα. Αντιθέτως επειδή το ενεργό εύρος του διακένου είναι μικρό επικρατεί το φαινόμενο αντίδρασης τυμπάνου.

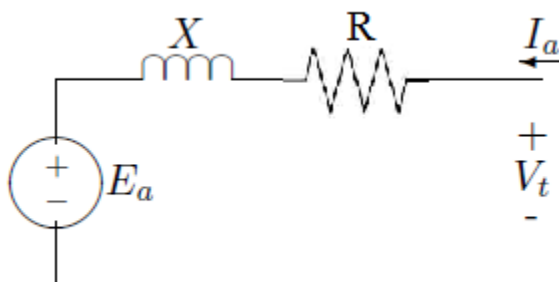
Μια άλλη κατηγοριοποίηση των μηχανών με μόνιμους μαγνήτες είναι με κριτήριο την κατανομή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής και της καμπύλης του ρεύματος διέγερσης. Κατά αυτή το διαχωρισμό έχουμε τις μηχανές:

- Σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ημιτονοειδή κατανομή της μαγνητικής ροής στο διάκενο και ημιτονοειδή κατανομή των τυλιγμάτων του στάτη.

- Σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη συνεχούς ρεύματος χωρίς ψύκτρες. Σε αυτή την κατασκευή η κατανομή της μαγνητικής ροής στο διάκενο είναι ορθογωνική όπως και οι κυματομορφές τους ρεύματος, ενώ τα τυλίγματα τους στάτη είναι συγκεντρωμένα.

1.5 Ανάλυση σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών

Για την περαιτέρω ανάλυση του κινητήρα μονίμων μαγνητών είναι απαραίτητα να παρατεθούν ισοδύναμα σχήματα, τα οποία φαίνονται παρακάτω:



Από τα ισοδύναμα κυκλώματα και εφαρμόζοντας νόμο Kirchhoff μπορούμε να πάρουμε την τύπο της τάσης εξόδου του κινητήρα:

$$V_T = E_a + (R + jX) \cdot I_A \Leftrightarrow E_A = V_T - (R + jX) \cdot I_a$$

Όπου

V_T Η τάση στα άκρα κάθε φάση του στάτη του κινητήρα

R η ωμική αντίσταση του τυλίγματος μιας φάσης

jX_s η σύγχρονη αντίδραση της κάθε φάσης του στάτη, η οποία είναι το άθροισμα της επαγωγικής αντίδρασης του τυλίγματος και της συνολικής αντίδρασης σπλισμού.

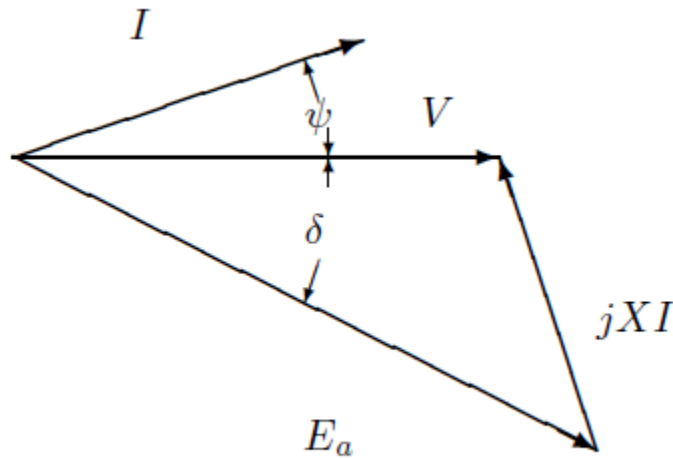
I_a το ρεύμα που διαρρέει κάθε φάση του στάτη

E_a η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται λόγω της περιστροφής του δρομέα. Η τιμή της δίνεται από τον τύπο:

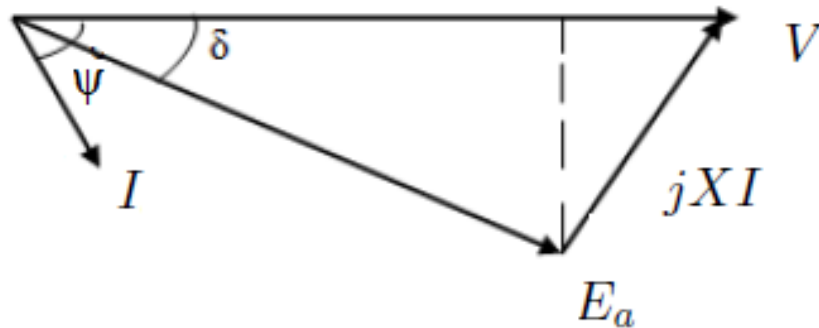
$$E_a = K \cdot \varphi \cdot \omega$$

Από τον παραπάνω τύπο φαίνεται ότι η τάση αυτή εξαρτάται από την σταθερά K η οποία εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κάθε κινητήρα, από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ω , αλλά και από την μαγνητική ροή φ .

Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα διανυσματικά διαγράμματα που περιγράφουν την παραπάνω σχέση σε περίπτωση που έχουμε υπερδιέγερση και υποδιέγερση:



Σχήμα: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα σε υπερδιέγερση



Σχήμα: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα σε υποδιέγερση

Στην περίπτωση που έχουμε υπερδιέγερση η προβολή της E_a πάνω στην V_T είναι μεγαλύτερη όπως φαίνεται στο σχήμα α και ο κινητήρας παράγει άεργο ισχύ. Όταν συμβαίνει αυτό ο κινητήρας μπορεί να βελτιώνει το συντελεστή ισχύος του δικτύου και να κινεί το φορτίο που υπάρχει στον άξονα του.

Στην περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί σε υποδιέγερση τότε η προβολή της E_a πάνω στην V_T είναι μικρότερη και το ρεύμα διέγερσης είναι χαμηλό. Σε αυτή την περίπτωση ο κινητήρας καταναλώνει άεργο ισχύ. Σχήμα 2. β

Η ταχύτητα του σύγχρονου κινητήρα εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων αλλά και από την συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα, μεγέθη τα οποία παραμένουν σταθερά ανεξάρτητα από το φορτίο. Η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας δίνεται από την σχέση:

$$T = \frac{3 \cdot V_T \cdot E_a \cdot \sin \delta}{\omega_m \cdot x_s}$$

Και για $\delta = \pi \Leftrightarrow \sin \delta = 1$ οπότε ο ο κινητήρας έχει μέγιστη ροπή. Αν ο κινητήρας ξεπεράσει την τιμή αυτή τότε αρχίζει και χάνει τον συγχρονισμό του, καθώς ο δρομέας επιβραδύνεται και αδυνατεί να ακολουθήσει το πεδίο του στάτη. Η ροπή εξαρτάται από την E_a και επομένως όσο μεγαλύτερη διέγερση έχει τόσο μεγαλύτερη η ροπή που μπορεί να αναπτύξει ο κινητήρας μας.

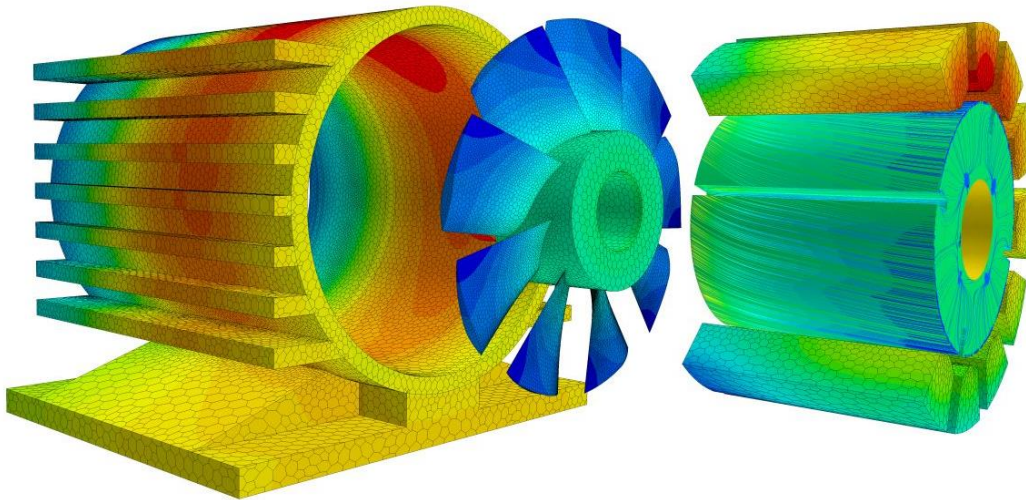
1.6 Μέθοδοι μέτρησης και ανάλυσης των θερμικών φαινομένων

Η θερμική ανάλυση και προσομοίωση στις ηλεκτρικές μηχανές έχει ως στόχο την αναπαράσταση της λειτουργίας τους, μέσω ενός μοντέλου για την επαρκή γνώση της θερμικής συμπεριφοράς τους. Πριν τη λειτουργία και τις πειραματικές μετρήσεις χρειάζεται να έχουμε πληροφορίες για την μεταφορά της θερμότητας καθώς και τον ρυθμό μεταφοράς αυτής. Η προσομοίωση θα δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα όταν η πιστότητα του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε συμπεριλαμβάνει όσο περισσότερες παραμέτρους γίνεται, που χαρακτηρίζουν την μηχανή στην πραγματικότητα. Η αναλυτική επίλυση τους θερμικού προβλήματος αυτού θα ήταν αρκετά δύσκολη λόγω των δύσκολων και περίπλοκων μαθηματικών υπολογισμών για αυτό το λόγο θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων και την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων μέσω του προγράμματος FEMM(Finite Element Method Magnetics), αναφορά [1]. Για το μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων υπάρχουν πολλοί αποδοτικοί αλγόριθμοι διαθέσιμοι στο διαδίκτυο, όμως λόγω της μαθηματικής πολυπλοκότητας τους είναι απαραίτητη μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Για το λόγο αυτό στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας άλλος τρόπος προσέγγισης του θερμικού προβλήματος, ο οποίος είναι απλούστερος και ταχύτερος και προσεγγίζει το πρόβλημα με μικρότερη ακρίβεια αλλά σε αποδεκτά επίπεδα. Ο τρόπος αυτός είναι ή εξαγωγή ενός θερμικού ισοδύναμου κυκλώματος μέσω της μεθόδου των συγκεντρωμένων παραμέτρων του οποίου η επίλυση δεν είναι πολύπλοκη και δεν απαιτεί πολύ χρόνο ή υπερ-υπολογιστή. Τα αποτελέσματα τις θα μας δώσουν θερμοκρασίες σε κρίσιμα σημεία της μηχανής που μας ενδιαφέρουν.

Για τις πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν θερμικές επαφές τύπου θερμίστορ για την λήψη θερμοκρασιακών τιμών σε συγκεκριμένα σημεία του κινητήρα. Τα θερμίστορ κατασκευάζονται από ημιαγωγά υλικά, έχουν μεγάλο συντελεστή θερμοκρασίας, είναι χημικά σταθερά, δεν επηρεάζονται από την γήρανση του υλικού, ισχυρά πεδία και την ραδιενέργεια, έχουν μικρή μηχανική αντοχή. Έχουν μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 150 °C. Τα θερμίστορ με θετικό συντελεστή θερμοκρασίας ονομάζονται τύπου PTC και με αρνητικό NTC. Για θερμοκρασίες ~50 °C από την μέση θερμοκρασία λειτουργίας έχει ακρίβεια ~0.02 °C. Για να

μετατραπεί η μη γραμμική συμπεριφορά των θερμίστορ σε γραμμική χρησιμοποιούμε δύο ή περισσότερα στοιχεία με αντισταθμιστικές αντιστάσεις ή χρησιμοποιούμε μικροεπεξεργαστή. Τα θερμίστορ λειτουργούν σε περιορισμένη περιοχή θερμοκρασιών, έχουν μικρή θερμική μάζα γι' αυτό έχουν ταχεία απόκριση, παρουσιάζοντας σφάλματα αυτοθέρμανσης. Τα θερμίστορ είναι παθητικά στοιχεία για αυτό έχουν ανάγκη από σταθεροποιημένη πηγή τάσης. Οι μετρήσεις με αυτή τη μέθοδο έχουν πολύ καλή ακρίβεια αλλά αδυνατούν να δώσουν αποτελέσματα για τον δρομέα, και τους μαγνήτες όταν αυτά στρέφονται. Για τον μέτρηση αυτών χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό θερμόμετρο με υπέρυθρες ακτίνες laser που έχουν μικρότερη ακρίβεια από τα θερμίστορ αλλά μπορούν να παρατηρήσουν τις θερμοκρασίες των στρεφόμενων μερών της μηχανής.

Κεφάλαιο 2



Θερμικά φαινόμενα

Η μετάδοση θερμότητας είναι ένα φαινόμενο της θερμικής μηχανικής που αφορά την παραγωγή, την χρήση, την μετατροπή και την ανταλλαγή θερμικής ενέργειας και θερμότητας μεταξύ φυσικών συστημάτων. Η απαραίτητη προϋπόθεση για την ύπαρξη του φαινομένου αυτού είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των σωμάτων. Η μεταφορά της θερμότητας έχει ταξινομηθεί σε διάφορους μηχανισμούς ανάλογα με τον ρυθμό και τον τρόπο που μεταφέρεται. Οι μηχανισμοί αυτοί σύμφωνα με την επιστήμη της θερμοδυναμικής, που ασχολείται με την μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο συστημάτων με στόχο την παρατήρηση της μεταφοράς ενέργειας, λαμβάνουν υπόψη τους όχι μόνο την διαφορά θερμοκρασίας αλλά την μεταφορά μάζας, την πίεση και πολλούς άλλους συντελεστές για την πλήρη κατανόηση του φαινομένου.

2.1 Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας

Οι μηχανισμοί με τους οποίους μεταδίδεται η θερμότητα από ένα σώμα σε ένα άλλο ή πιο γενικά από ένα σύστημα σε ένα άλλο είναι οι:

- Με αγωγή
- Με συναγωγή
- Μέσω ακτινοβολίας

2.2 Αγωγή

Θερμική αγωγιμότητα, που αναφέρεται και αλλιώς με τον ορισμό διάχυση, είναι η άμεση μικροσκοπική ανταλλαγή κινητικής ενέργειας των σωματιδίων, μέσω του ορίου μεταξύ των δύο συστημάτων. Όταν ένα αντικείμενο είναι σε μία διαφορετική θερμοκρασία από άλλον οργανισμό ή το περιβάλλον του, η θερμότητα ρέει έτσι ώστε το σώμα και το περιβάλλον να φθάσουν στην ίδια θερμοκρασία, σημείο στο οποίο βρίσκονται σε θερμική ισορροπία. Τέτοια αυθόρμητη μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα πάντα από μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας σε μια άλλη περιοχή της χαμηλότερης θερμοκρασίας, όπως περιγράφεται από το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής.

Υπάρχουν δύο μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας με αγωγή:

- Η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί από μοριακή αλληλεπίδραση, στην οποία τα μόρια από ένα υψηλότερο επίπεδο ενέργειας (σε υψηλότερη θερμοκρασία) απελευθερώνουν ενέργεια στα γειτονικά μόρια που βρίσκονται σε χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας μέσω δονήσεων πλέγματος. Η μεταφορά θερμότητας με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή μεταξύ στερεών, υγρών και αερίων.
- Το δεύτερο μέσο της αγωγιμότητας είναι η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Αυτό είναι χαρακτηριστικό των υγρών και των καθαρών μετάλλων πιο συγκεκριμένα. Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε κράματα ποικίλλει σημαντικά, ενώ σε υλικά (όχι μέταλλα), ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι μικρός. Η θερμική αγωγιμότητα των στερεών εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Τα καθαρά μέταλλα είναι οι καλύτεροι αγωγοί θερμότητας. Ο νόμος Fourier μας δίνει την μεταφορά ενέργειας μέσω αγωγής τόσο για μονοδιάστατα όσο και για πολυδιάστατα προβλήματα.

Ο γενικός τύπος είναι

$$\Phi_{th} = -\lambda S \nabla T \quad 2.1$$

όπου Φ_{th} ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας, $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, S η επιφάνεια που μεταφέρεται η θερμότητα και η παράγωγος της θερμοκρασίας.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$\lambda = \lambda_o (1 + \beta \cdot \Delta T) \quad 2.2$$

Όπου λ_o είναι η τιμή του συντελεστή στην θερμοκρασία T_o (αναφορά), β μία σταθερά που προσδιορίζεται πειραματικά και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας από την κατάσταση αναφοράς.

Στην περίπτωση που έχουμε μονοδιάστατο πρόβλημα τότε ο νόμος του Fourier για την μετάδοση της θερμότητας απλοποιείται με τον τύπο

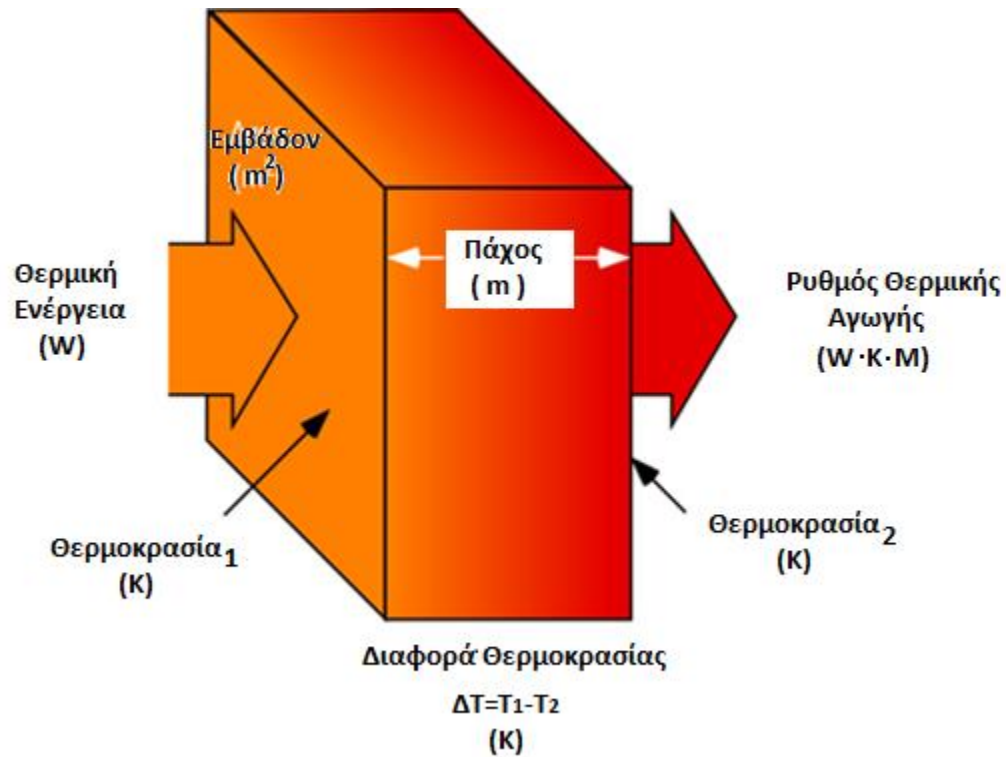
$$\vec{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad 2.3$$

Όπου με $q \left[\frac{W}{m^2} \right]$ συμβολίζουμε την πυκνότητα ροής της θερμότητας, η οποία όπως φαίνεται είναι ανάλογη του αρνητικού γινομένου του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ και της κλίσης της θερμοκρασίας. Επομένως αν η πυκνότητα θερμορροής ρέει προς μία κατεύθυνση μόνο, τότε η θερμοροή δίνεται από τον τύπο:

$$Q = S \cdot \vec{q} = -S \cdot \lambda \frac{dT}{dx} \quad 2.4$$

Όπου $S[m^2]$ το εμβαδό την κάθετης επιφάνειας μέσω της οποίας παρατηρείται το φαινόμενο της μεταφοράς της θερμότητας.

Απλοποιώντας ακόμη περισσότερο και θεωρώντας την περίπτωση όπου έχουμε αγωγή σε μόνιμη κατάσταση και η θερμοκρασία του ενός συστήματος δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου θα έχουμε $\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$ όπου L το πάχος του τοιχώματος μέσω του οποίου γίνεται η μεταφορά θερμότητας, όπως φαίνεται κ στο σχήμα:



Σχήμα 2.1 : Μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής σε μία διάσταση

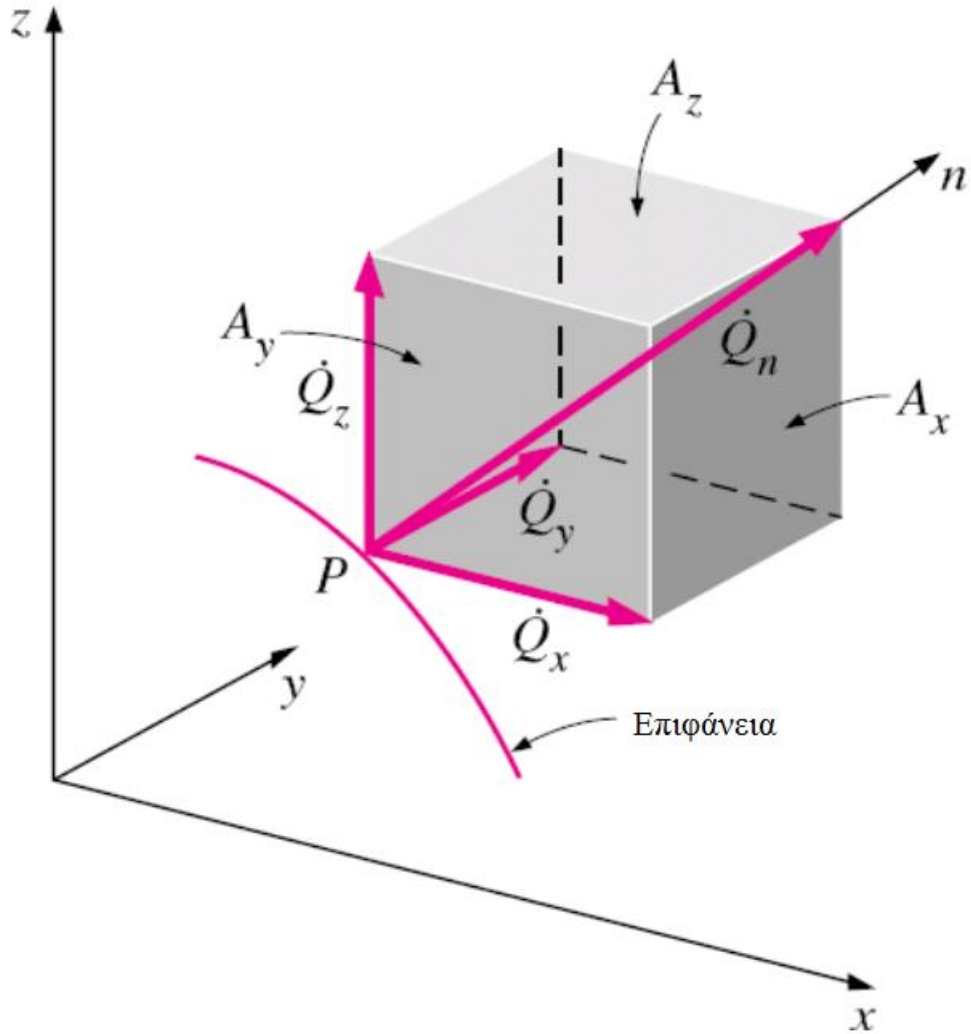
Επομένως η ζητούμενη θερμοροή απλοποιήθηκε στον τύπο:

$$Q = -S \cdot \lambda \frac{T_2 - T_1}{L} \quad 2.5$$

Στην περίπτωση που έχουμε τρισδιάστατο πρόβλημα ο νόμος του Fourier θα γίνει:

$$\vec{q}_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad 2.6$$

Όπου n το διάνυσμα που είναι κάθετο στη επιφάνεια στην ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2: Διάνυσμα πυκνότητας θερμοροής κάθετο σε μια επιφάνεια για 3 διαστάσεις

Η ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν την ίδια θερμοκρασία και μέσω της οποίας γίνεται η διάδοση της θερμότητας. Η θερμοκρασία T είναι μια συνάρτηση και των τριών διαστάσεων και του χρόνου. Επομένως η πυκνότητα θερμοροής αν αναλυθεί το διάνυσμα n θα έχει την μορφή:

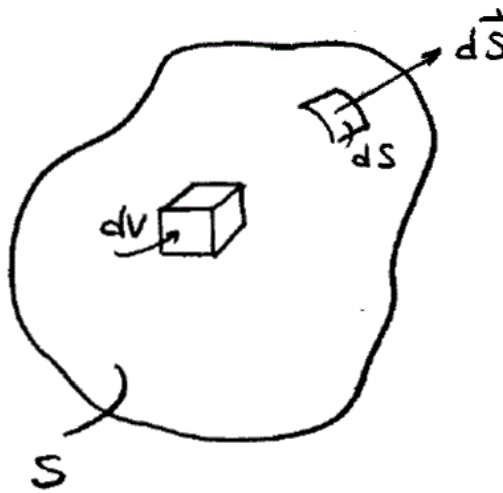
$$\vec{q}_n = -\lambda \cdot \left[\hat{i}_x \frac{\partial T}{\partial x} + \hat{i}_y \frac{\partial T}{\partial y} + \hat{i}_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad 2.6$$

σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Αν υποθέσουμε τώρα σύστημα όγκου V και στο εσωτερικό υπάρχει πηγή θερμότητας με συνολική ισχύ Q_{in} και ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας που εξέρχεται από τον όγκο V είναι Q_{out} , από αρχή διατήρησης της ενέργειας θα έχουμε:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad 2.7$$

Όπου με E συμβολίζουμε την συνολική ενέργεια που υπάρχει στον όγκο V (κινητική ενέργεια των μορίων). Αν συμβολίσουμε με $q \left[\frac{W}{m^3} \right]$ την συνολική ισχύ των πηγών θερμότητας αν μονάδα όγκου τότε προκύπτει ότι :

$$Q_{in} = \int_V q dV \quad 2.8$$



Σχήμα 2.3: Εξεταζόμενος όγκος σε τρισδιάστατο πρόβλημα αγωγής

Από τον νόμο Fourier ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας που εξέρχεται από τον όγκο V θα δίνεται από τον τύπο:

$$Q_{out} = \int_S \hat{i}_n \cdot (-\lambda \nabla T) dS \quad 2.9$$

Και από θεώρημα Gauss θα έχουμε:

$$Q_{out} = \int_V \nabla(\lambda \nabla T) dV \quad 2.10$$

Οπότε για να υπολογίσουμε το ενεργειακό ισοζύγιο του τύπου 2.7 χρειάζεται να προσδιορίσουμε ρυθμό μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας. Αν θεωρήσουμε ότι $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ την πυκνότητα και $c_p \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$ την ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού από το οποίο αποτελείται ο όγκος V τότε θα έχουμε:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \int_V \left(\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) dV \quad 2.11$$

Και από τους τύπους 2.7, 2.10 και 2.11 θα έχουμε:

$$\int_V \left(\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) dV = \int_V q dV + \int_V \nabla(\lambda \nabla T) dV \Leftrightarrow$$

$$\nabla(\lambda \nabla T) + q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2.12$$

Η οποία είναι η γενική εξίσωση θερμικής αγωγής για επίλυση ενός πολυδιάστατους προβλήματος. Ο τύπος αυτός περιγράφει το ενεργειακό ισοζύγιο για κάθε σύστημα σε πολυδιάστατο χώρο για τον μηχανισμό της θερμικής αγωγής. Στις παραπάνω εξισώσεις που αναλύσαμε ο συντελεστής αγωγιμότητας λ ήταν εξίσωση της θέσης και περιγράφεται από τους χωρικούς συντελεστές, σε περίπτωση όμως που είναι ανεξάρτητος από το σημείο του υλικού στο οποίο βρίσκεται τότε ο τύπος του ισοζυγίου απλοποιείται στον :

$$\lambda \cdot \nabla^2 T + q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \Leftrightarrow$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{\rho}{\lambda} \cdot \frac{c_p}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2.13$$

2.3 Συναγωγή

Η διάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής, που συχνά αναφέρεται και απλά ως συναγωγή, είναι η μεταφορά της θερμότητας από το ένα μέρος στο άλλο με την κίνηση των ρευστών. Συναγωγή είναι συνήθως η κυρίαρχη μορφή της μεταφοράς θερμότητας σε υγρά και αέρια. Αν και συχνά θεωρείται ως ξεχωριστή μέθοδος μεταφοράς θερμότητας, η συναγωγή περιλαμβάνει τις συνδυασμένες διεργασίες της αγωγιμότητας (διάχυση θερμότητας) και οριζόντιας μεταφοράς (μεταφορά θερμότητας με μαζική ροή ρευστού).

Ο όρος συναγωγή μπορεί να αναφέρεται στην μεταφορά θερμότητας με οποιαδήποτε κίνηση ρευστού, αλλά η μεταγωγή (advection) είναι ο πιο ακριβής όρος για τη μεταφορά οφείλεται μόνο στη συνολική ροή ρευστού. Η διαδικασία της μεταφοράς της θερμότητας από ένα στερεό σε ένα υγρό, ή το αντίστροφο, απαιτεί όχι μόνο τη μεταφορά της θερμότητας από το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης του ρευστού, αλλά επίσης και τη διάχυση (diffusion) της θερμότητας μέσω του σταθερού ορίου δίπλα στο στερεό. Επομένως σαν συναγωγή ορίζουμε την μεταγωγή και την διάχυση της ενέργειας που προέρχεται από τα ρευστά.

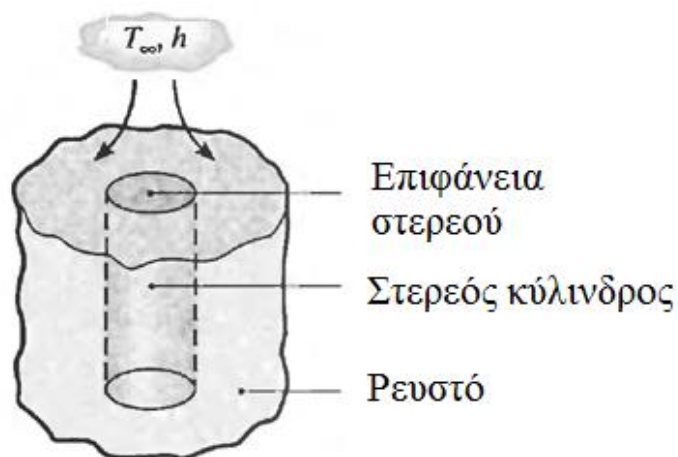
Η συναγωγή μπορεί να διακριθεί επίσης βάσει της ροής του ρευστού. Ελεύθερη ή φυσική συναγωγή έχουμε όταν η ρευστή κίνηση προκαλείται από τις δυνάμεις πλευστότητας που προκύπτουν από τις διακυμάνσεις πυκνότητας που οφείλονται με την σειρά τους σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στο ρευστό. Η απουσία εξωτερικής πηγής, όταν το ρευστό είναι σε επαφή με μία θερμή επιφάνεια, τα μόρια διαχωρίζονται και διασκορπίζονται, προκαλώντας το ρευστό να είναι λιγότερο πυκνό. Κατά συνέπεια, ο θερμότερος όγκος τους ρευστού μεταφέρει θερμότητα στον ψυχρότερο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, φυσικές δυνάμεις άνωσης και μόνο είναι εξ ολοκλήρου υπεύθυνες για την κίνηση ρευστού όταν το ρευστό θερμαίνεται, και αυτή η διαδικασία ονομάζεται φυσική συναγωγή. Όταν υπάρχουν διαφορές θερμοκρασίας μέσα στον όγκο του ρευστού τότε έχουμε μεταφορά ενέργειας μέσα στο ρευστό. Στη φυσική συναγωγή, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μία μείωση στην πυκνότητα, η οποία προκαλεί ρευστή κίνηση λόγω των πιέσεων και των δυνάμεων όταν υγρά διαφορετικών πυκνοτήτων επηρεάζονται από τη βαρύτητα (ή οποιαδήποτε g-force). Έχουμε την "αναγκαστική" ή αλλιώς εξαναγκασμένη συναγωγή από την κίνηση ενός ρευστού από μια εξωτερική πηγή όπως ανεμιστήρες, με ανάδευση και αντλίες, δημιουργώντας μια τεχνητή ρευμάτων μεταφοράς). Τέλος υπάρχει και ο συνδυασμός εξαναγκασμένης και φυσικής συναγωγής, όπου οι δυο μορφές συνυπάρχουν. Αυτό παρατηρείται όταν η ταχύτητα του ρευστού, λόγω της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας είναι μικρή και οι δυνάμεις άνωσης λόγω της φυσικής συναγωγής μεγάλες.

Η ψύξη μέσω συναγωγής μπορεί μερικές φορές να περιγραφεί από το νόμο του Νεύτωνα για την ψύξη σε περίπτωση που ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι ανεξάρτητος ή σχετικά ανεξάρτητος από τη διαφορά θερμοκρασίας, μεταξύ του αντικειμένου και του περιβάλλοντος. Αυτό όμως δεν συμβαίνει πάντα. Ο νόμος του Νεύτωνα, ο οποίος απαιτεί ένα σταθερό συντελεστή συναγωγής, αναφέρει ότι ο ρυθμός απώλειας θερμότητας ενός σώματος είναι ανάλογος προς τη διαφορά της θερμοκρασίας, μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντος του. Ο νόμος αυτός περιγράφεται από τον τύπο:

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot (T - T_{env}) \quad 2.14$$

Επομένως αν θεωρήσουμε ένα σώμα και περιβάλλον το ρευστό που ρέει γύρω του η πυκνότητα της θερμοροής $q \left[\frac{W}{m^2} \right]$ θα είναι:

$$q = h \cdot (T_{solid} - T_{fluid}) \quad 2.15$$

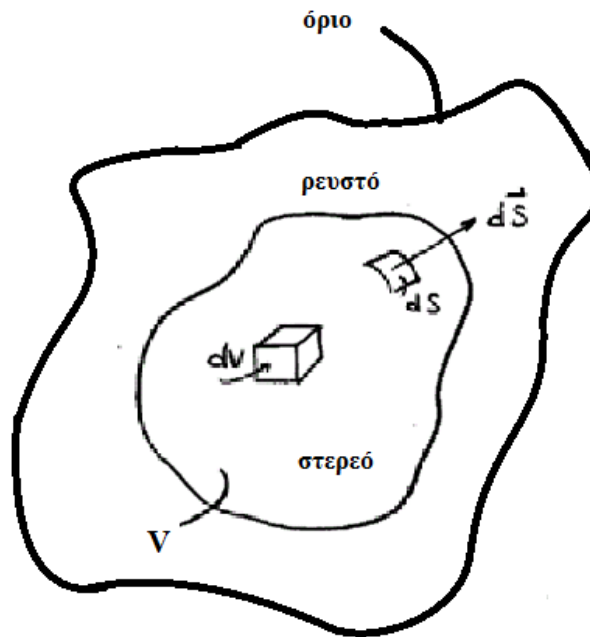


Σχήμα 2.4 Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή από στερεό που βρίσκεται στο κέντρο ρευστού

Όπου h ο συντελεστής συναγωγής με μονάδες μέτρησης στο διεθνές σύστημα μονάδων $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$. Ο συντελεστής h εξαρτάται από φυσικές ιδιότητες του ρευστού και τη φυσική κατάσταση στην οποία συναγωγή λαμβάνει χώρα. Ως εκ τούτου, ένας μοναδικός συντελεστής που επηρεάζει την μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής (ένας που δεν θα διαφέρει σημαντικά μεταξύ των διαφορά θερμοκρασίας) πρέπει να προέρχεται από εμπειρικούς τύπους ή να βρεθεί πειραματικά για κάθε σύστημα για το οποίο πραγματοποιείται θερμική ανάλυση. Παρακάτω φαίνονται μερικά παραδείγματα για τις τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής συναγωγής σε γνωστά ρευστά:

Ρευστό συναγωγής	Συντελεστής συναγωγής (W/m^2K)
Αέρας	5 - 25
Εξαναγκασμένη ροή αέρα	10-200
Νερό	20-100
Εξαναγκασμένη ροή νερού	50-10000
Λάδι	50-2000

Αν θεωρήσουμε δύο υλικά(συστήματα) ένα στερεό και ένα ρευστό, όπως στο σχήμα 2.5 τα οποία έρχονται σε επαφή τότε μπορούμε μέσω της αρχής διατήρησης της ενέργειας να βρούμε την σχέση που περιγράφει την μετάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής.



Σχήμα 2.5: Συναγωγή θερμότητας μεταξύ επιφάνειας ρευστού

Αν τα δυο υλικά έρχονται σε επαφή μέσω μιας επιφάνειας S και συμβολίσουμε $Q_{out}[W]$ την ροή της εξερχόμενης θερμότητας από την επιφάνεια των δύο υλικών, Q_g τη συνολική ισχύ που παράγεται λόγω των πηγών θερμότητας που βρίσκονται στο εσωτερικό του στερεού και E_1 και E_2 τις ενέργειες για το ρευστό και το υγρό θα έχω για το στερεό:

$$\frac{\partial E_1}{\partial t} = Q_g - Q_{out,solid} \quad 2.16$$

Αν $q \left[\frac{W}{m^3} \right]$ είναι η συνολική ισχύ που παράγουν οι πηγές θερμότητας ανά μονάδα όγκου του στερεού η Q_g θα δίνεται από τον τύπο:

$$Q_g = \int_V q dV \quad 2.17$$

Ενώ ο ρυθμός της εξερχόμενης θερμότητας από το στερεό προς το ρευστό θα υπολογιστεί από τον νόμο ψύξης του Νεύτωνα. Αν θεωρήσουμε T_{solid} την θερμοκρασία της επιφάνειας επαφής των δύο υλικών και T_{fluid} την θερμοκρασία του ρευστού κοντά στην επαφή θα έχουμε:

$$Q_{out,solid} = \int_S \hat{t}_n \cdot \vec{q} \, dS \quad 2.18$$

Και οι αφού θερμοκρασίες T_{solid} και T_{fluid} είναι συνάρτηση της θέσης στο χώρο και του χρόνου
 θα έχουμε:

$$Q_{out,solid} = \int_S h \cdot [T_{solid}(x, y, z, t) - T_{fluid}(x, y, z, t)] dS \quad 2.19$$

Όπως και στην συναγωγή για να περιγράψουμε την σχέση αρκεί να εκφράσουμε την μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του στερεού $\frac{\partial E_1}{\partial t}$. Αν θεωρήσουμε $\rho_{solid} [\frac{kg}{m^3}]$ την πυκνότητα και $c_{p_{solid}} [\frac{kJ}{kg \cdot K}]$ την ειδική θερμοχωρητικότητα του στερεού τότε προκύπτει:

$$\frac{\partial E_1}{\partial t} = \int_V \left(\rho_{solid} \cdot c_{p_{solid}} \cdot \frac{\partial T_{solid}(x, y, z, t)}{\partial t} \right) dV \quad 2.20$$

Και εν συνεχεία από την εξίσωση για την διατήρηση της ενέργειας στο στερεό υπολογίζουμε:

$$\begin{aligned} \int_V \left(\rho_{solid} \cdot c_{p_{solid}} \cdot \frac{\partial T_{solid}(x, y, z, t)}{\partial t} \right) \\ = \int_V q \, dV - \int_S h \cdot [T_{solid}(x, y, z, t) - T_{fluid}(x, y, z, t)] dS \end{aligned} \quad 2.21$$

Ομοίως για το ρευστό θα έχουμε:

$$\frac{\partial E_2}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad 2.22$$

Όπου Q_{in} είναι η θερμοροή που εισέρχεται στο ρευστό από το στερεό, Q_{out} η ισχύς που μεταφέρεται από το ρευστό προς το περιβάλλον και E_2 η ενέργεια των μορίων του ρευστού. Όμως η θερμοροή που εξέρχεται από το στερεό ισούται με αυτή που εισέρχεται στο ρευστό. Επομένως θα έχουμε:

$$Q_{in} = Q_{out,solid} = \int_S h \cdot [T_{solid}(x, y, z, t) - T_{fluid}(x, y, z, t)] dS$$

Και αν θεωρήσουμε όπως πριν $\rho_{fluid} [\frac{kg}{m^3}]$ την πυκνότητα και $c_{pfluid} [\frac{kJ}{kg \cdot K}]$ την ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού τότε η μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{\partial E_2}{\partial t} = \int_V \left(\rho_{fluid} \cdot c_{pfluid} \cdot \frac{\partial T_{fluid}(x, y, z, t)}{\partial t} \right) dV \quad 2.23$$

Οπότε θα έχουμε από την σχέση 2.21 :

$$\begin{aligned} \int_V \left(\rho_{fluid} \cdot c_{pfluid} \cdot \frac{\partial T_{fluid}(x, y, z, t)}{\partial t} \right) dV \\ = \int_S h \cdot [T_{solid}(x, y, z, t) - T_{fluid}(x, y, z, t)] dS - Q_{out} \end{aligned}$$

Με την παραπάνω σχέση και την σχέση μπορούμε να καθορίσουμε πλήρως την μεταβολή και μετάδοση θερμότητας ανάμεσα στα δύο συστήματα που θεωρήσαμε στην αρχή του τρισδιάστατου προβλήματος, μέσω του μηχανισμού της συναγωγής. Επαναλαμβάνουμε ότι οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στους τύπους είναι των δύο υλικών, ρευστού και στερεού και είναι θερμοκρασίες κοντά στην επιφάνεια, όπου παρατηρείται το φαινόμενο της μετάδοσης της θερμότητας.

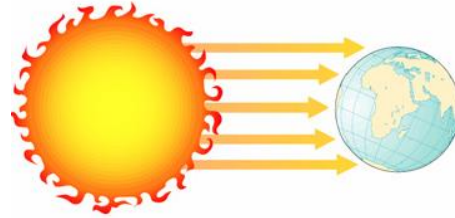
Ο παραπάνω σχέσεις για την μετάδοση της θερμότητας μπορούν να απλοποιηθούν αν γίνει η παραδοχή ότι το πρόβλημα μας έχει συμμετρία. Στην περίπτωση αυτή οι επιφανειακές θερμοκρασίες των δύο υλικών είναι ανεξάρτητες του χώρου και επομένως δεν εξαρτώνται από την θέση τους στον τρισδιάστατο χώρο. Επιπροσθέτως, αν θεωρήσουμε τον όγκο του στερεού V_{solid} αρκετά μικρό και το στερεό πολύ καλώς αγωγό της θερμότητας τότε και η θερμοκρασία του στερεού σταματάει να εξαρτάται από τον χώρο. Συνοψίζοντας όλες οι θερμοκρασίες είναι συναρτήσεως μόνο του χρόνου και όχι των συντεταγμένων x, y, z . Επομένως με τις παραπάνω παραδοχές η αρχή διατήρησης της ενέργειας για το στερεό θα μας δίνει:

$$\int_V \left(\rho_{solid} \cdot c_{psolid} \cdot \frac{\partial T_{solid}(x, y, z, t)}{\partial t} \right) = \int_V q dV - \int_S h \cdot [T_{solid}(t) - T_{fluid}(t)] dS \Leftrightarrow$$

$$\rho_{solid} \cdot c_{psolid} \cdot \frac{\partial T_{solid}(x, y, z, t)}{\partial t} \cdot V_{solid} = Q_g - h \cdot [T_{solid}(t) - T_{fluid}(t)] \cdot S \quad 2.23$$

2.4 Ακτινοβολία

Θερμική ακτινοβολία είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται από την θερμική κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων στην ύλη. Όλη η ύλη με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπει θερμική ακτινοβολία μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο μηχανισμός αντιπροσωπεύει την μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρομαγνητική. Η θερμική ενέργεια είναι ουσιαστικά η κινητική ενέργεια των ατόμων και μορίων στην ύλη. Όλη η ύλη που έχει μια θερμοκρασία άνω των μηδέν βαθμών στην κλίμακα Κέλβιν εξ ορισμού αποτελείται από σωματίδια τα οποία έχουν κινητική ενέργεια και τα οποία αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτά τα άτομα και τα μόρια αποτελούνται από φορτισμένα σωματίδια, τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια, και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων ύλης έχουν ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση των φορτίων αυτών και της διπολικής ταλάντωσης τους. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί στην ηλεκτροδυναμική παραγωγή των ηλεκτροδυναμικά συζευγμένων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Με αυτό τον τρόπο έχουμε την εκπομπή φωτονίων, «ακτινοβολώντας» ενέργεια μακριά από το σώμα. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως το φως, δεν απαιτεί την παρουσία της ύλης για να διαδοθεί και ταξιδεύει στο κενό του διαστήματος απείρως μακριά, αν δεν παρεμποδιστεί από κάποιο σώμα ή συγκέντρωση μάζας.



Τα χαρακτηριστικά της θερμικής ακτινοβολίας εξαρτώνται από διάφορες ιδιότητες της επιφάνειας από την οποία προέρχονται, από την θερμοκρασία του σώματος, από την φασματική απορροφητικότητα και την φασματική εκπομπή ισχύος, όπως εκφράζονται από το νόμο του Kirchhoff. Η ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική, δηλαδή, δεν συνίσταται από μια μόνο συχνότητα, αλλά περιλαμβάνει μια συνεχή διασπορά των φωτονίων ενέργειας, το χαρακτηριστικό φάσμα της. Εάν το σώμα που ακτινοβολεί και η επιφάνειά του είναι σε θερμοδυναμική ισορροπία και η επιφάνεια έχει τέλεια απορροφητικότητα σε όλα τα μήκη κύματος, χαρακτηρίζεται ως ένα μαύρο σώμα ή αλλιώς μέλαν. Η μέγιστη πυκνότητα θερμική ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας μετρημένη σε $\frac{W}{m^2}$ που μπορεί να εκπεμφθεί σύμφωνα με το νόμο των *Stefan – Boltzmann* θα είναι:

$$q = \sigma \cdot T^4 \quad 2.24$$

Όπου $T[K]$ η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος και σ η σταθερά *Stefan – Boltzmann* η οποία είναι ίση με $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$. Η μέγιστη θερμική ισχύ που μπορεί να εκπέμπει ένα σώμα επιφάνειας S θα είναι:

$$q = S \cdot \sigma \cdot T^4 \quad 2.25$$

Στην πραγματικότητα όμως τα περισσότερα σώματα εκπέμπουν θερμότητα μικρότερη από αυτή το μέλανος σώματος και αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad 2.26$$

Όπου ε ο συντελεστής εκπομπής και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1, $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

Η ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα σώμα όμως δεν απορροφάται ολόκληρη από το σώμα. Ένα μέρος ανακλάται και το υπόλοιπο μέρος που απορροφάται από το σώμα σε μορφή θερμικής ενέργειας περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$q_{absorption} = a \cdot q_{incident} \quad 2.27$$

Όπου a ο συντελεστής απορρόφησης ο οποίος λαμβάνει και αυτός τιμές μεταξύ 0 και 1.

Στην περίπτωση που έχουμε $\varepsilon = a$ η καθαρή μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας που ακτινοβολεί και του περιβάλλοντος προέρχεται από τον τύπο:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{environment}^4) \quad 2.28$$

Η πυκνότητα της θερμότητας που προκύπτει από το φαινόμενο αυτό επηρεάζει το ποσό της μεταδιδόμενης θερμότητας μόνο σε περίπτωση που η θερμοκρασία τους σώματος είναι μεγάλη.

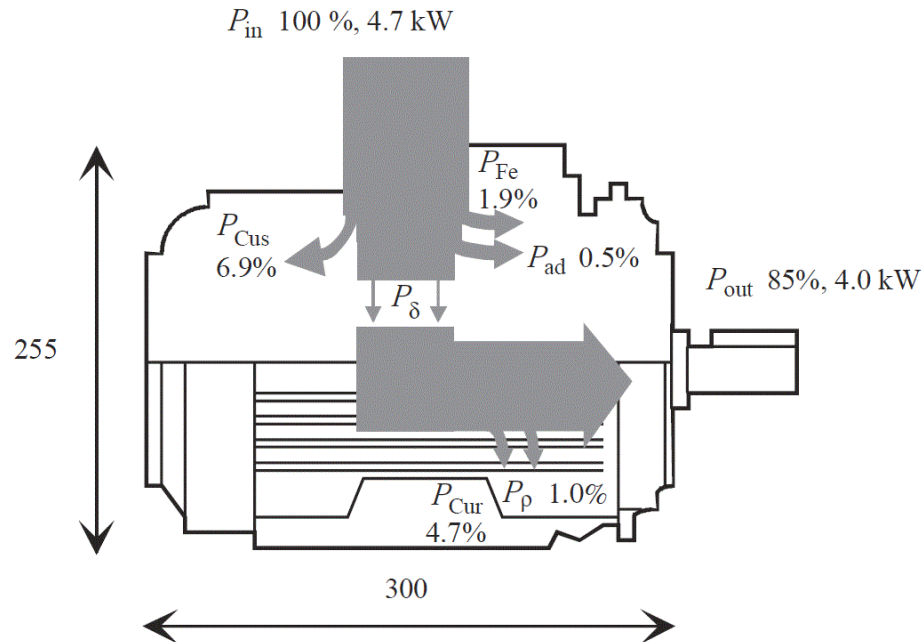
Στην περίπτωση της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία μας ενδιαφέρει ο ρυθμός ανταλλαγής της θερμότητας, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της θερμικής ισχύος που εκπέμπει και που απορροφά ένα σώμα. Τέλος επειδή η θερμική ακτινοβολία δεν απορροφάται από τον αέρα λόγω τους μικρού μήκους κύματος της και επειδή οι θερμοκρασίες που θα εξεταστούν στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν είναι μεγάλες, η ακτινοβολία θα θεωρηθεί προσεγγιστικά αμελητέα. Αυτή η παραδοχή δεν θα επηρεάσει την ακρίβεια των υπολογισμών καθώς δεν είναι στόχος η μεγάλη ακρίβεια.

2.5 Θερμικά φαινόμενα στις ηλεκτρικές μηχανές

Η μελέτη και διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς των ηλεκτρικών μηχανών πραγματοποιείται με στόχο την γνώση και πρόβλεψη των θερμοκρασιακών τιμών σε κάθε σημείο της μηχανής.

Οι κυριότερες πηγές θερμότητας σε μια ηλεκτρική μηχανή οφείλονται στις απώλειες της. Η αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της μηχανής οφείλεται κύρια στις απώλειες χαλκού

και σιδήρου και σε μικρότερο βαθμό στις μηχανικές απώλειες. Επίσης παρατηρούνται και απώλειες λόγω αντιστάσεων στους αγωγούς που χρησιμοποιούνται, οι οποίες ονομάζονται απώλειες Joule οι οποίες ενσωματώνονται στις απώλειες χαλκού. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει το ισοζύγιο δυνάμεων ενός τυπικού κλειστού τύπου επαγωγικό κινητήρα 4kW.



Σχήμα 2.6 Ισοζύγιο ισχύων κινητήρα 4kW

Το 15% της ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα κατά την ονομαστική λειτουργία της μηχανής. Η αναλογία των απωλειών αντίστασης σε αυτή την περίπτωση είναι υψηλή: το 77% των συνολικών απωλειών και 11,8% της ονομαστικής ισχύος. Το ποσοστό των απωλειών σιδήρου παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, 1,9% της ονομαστικής ισχύος, αν και τα κυκλώματα σιδήρου έχουν αυστηρές διαστάσεις. Οι απώλειες τριβής είναι επίσης χαμηλά, 1% της ονομαστικής ισχύος.

Οι απώλειες χαλκού των κυκλωμάτων του στάτη και του δρομέα μπορούν να δοθούν από την ακόλουθη σχέση:

$$P_{cu} = R \cdot I^2 \quad 2.29$$

Οι οποίες μπορούν να διακριθούν σε απώλειες στάτη και δρομέα. Οι σχέσεις που τις περιγράφουν είναι:

$$P_{cu \text{ stator}} = R_{stator} \cdot I_{stator}^2 \quad 2.30$$

$$P_{cu \text{ rotor}} = R_{F \text{ rotor}} \cdot I_{F \text{ rotor}}^2 \quad 2.31$$

Όπου $I_{F\ rotor}$ το ρεύμα διέγερσης και $R_{F\ rotor}$ η αντίσταση διέγερσης του τυλίγματος του δρομέα.

Οι απώλειες σιδήρου ή δινορρευμάτων θα δίνονται από τον τύπο:

$$P_{FE} = \sum_n k_{Fe,n} \cdot P_{10} \cdot \left(\frac{\widehat{B}_n}{1\ T}\right)^2 \cdot m_{Fe,n} \quad 2.32$$

$$P_{FE} = \sum_n k_{Fe,n} \cdot P_{15} \cdot \left(\frac{\widehat{B}_n}{1.5\ T}\right)^2 \cdot m_{Fe,n} \quad 2.33$$

Όπου $k_{Fe,n}$ ο συντελεστής διόρθωσης, $m_{Fe,n}$ οι μάζες των σωμάτων στις διαφορετικές περιοχές, \widehat{B}_n η πυκνότητα της μαγνητικής ροής και P_{10} και P_{15} οι τιμές απωλειών, οι οποίες στα στρεφόμενα συστήματα ισχύουν μόνο για ημιτονοειδή μεταβολή της πυκνότητας ροής.

Οι μηχανικές απώλειες που συναντάμε στις ηλεκτρικές μηχανές διακρίνονται σε απώλειες λόγω τριβής από τα περιστρεφόμενα μέρη και απώλειες εξαερισμού λόγω του αέρα στο διάκενο. Οι απώλειες τριβής εξαρτώνται από την ταχύτητα του άξονα, από τον τύπο του ρουλεμάν και τις ιδιότητες του λιπαντικού που χρησιμοποιήθηκε. Οι απώλειες αυτές περιγράφονται από τον τύπο:

$$P_{\rho,bearing} = 0.5\Omega \cdot \mu \cdot F \cdot D_{bearing} \quad 2.34$$

Όπου Ω η γωνιακή συχνότητα του άξονα που στηρίζεται στο ρουλεμάν, μ ο συντελεστής τριβής ο οποίος τυπικά κυμαίνεται σε τιμές 0.0010 – 0.0050, F η το φορτίου του ρουλεμάν και η $D_{bearing}$ η εσωτερική διάμετρος του άξονα.

Οι απώλειες εξαερισμού γίνονται όλο και πιο σημαντικές με την αυξανόμενη ταχύτητα των μηχανών. Ο Saari (1995) περιέγραψε με την παρακάτω εξίσωση την δύναμη που σχετίζεται με την αντίσταση ροπής ενός περιστρεφόμενου κυλίνδρου:

$$P_{\rho,w1} = \frac{1}{32} k \cdot C_M \cdot \pi \cdot \rho \cdot \Omega^3 \cdot D_r^4 \cdot L_r \quad 2.35$$

Όπου k ο είναι ένας συντελεστής τραχύτητας (για μια ομαλή επιφάνεια $k = 1$, συνήθως $k = 1 - 1,4$), C_M ο συντελεστής ροπής, ρ η πυκνότητα του ψυκτικού ρευστού, Ω η γωνιακή ταχύτητα και D_r η Εξωτερική διάμετρος του δρομέα.

Οι ακραίες επιφάνειες του δρομέα δημιουργούν επίσης απώλειες τριβής. Τα μέρη αυτά μπορούν να θεωρηθούν σαν δίσκοι που περιστρέφονται σε ελεύθερο χώρο, με την προϋπόθεση

ότι δεν υπάρχουν πτερύγια ανεμιστήρα. Οι απώλειες ισχύος για αυτές κατά τον Saari θα δίνονται από τον τύπο :

$$P_{\rho,w2} = \frac{1}{64} C_M \cdot \rho \cdot \Omega^3 \cdot (D_r^5 - D_{ri}^5) \quad 2.36$$

Όπου D_{ri} η εσωτερική διάμετρος του άξονα.

Συνολικά οι απώλειες εξαερισμού θα είναι:

$$P_{\rho,w} = P_{\rho,w1} + P_{\rho,w2}$$

Τέλος υπάρχουν και κάποιες άλλες κατανεμημένες απώλειες που αυξάνονται ανάλογα με το φορτίο. Ο ακριβείς προσδιορισμός τους είναι δύσκολος και τις περισσότερες φορές είναι περίπου 1% της ισχύς πλήρους φορτίου.

Συνοψίζοντας σαν κυριότερες πηγές θερμότητας στην διπλωματική αυτή εργασία θα θεωρήσουμε τις απώλειες χαλκού και της απώλειες πυρήνα.

2.6 Θερμοκρασιακοί περιορισμοί των ηλεκτρικών μηχανών

Οι θερμοκρασίες τήξης και η αντοχή των μονώσεων σε ορίζουν τους περιορισμούς λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών από την πλευρά της θερμοκρασίας.

Το σημείο τήξης του χαλκού, υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένα τα τυλίγματα αλλά και ο στάτης είναι η θερμοκρασία των 1084,6°C. Η αντοχή μονώσεως του πυρήνα και του στάτη που κατασκευάζονται απο σίδηρο είναι η θερμοκρασία των 1535°C. Η μόνωση του χαλκού αποτελεί τον κρισιμότερο περιορισμό για την λειτουργία της μηχανής. Στις περισσότερες περιπτώσεις μηχανών η μόνωση αυτή αποτελείται από βερνίκι, πολυεστέρα, πολυουρεθάνη ή πολυβινύλιο. Η μόνωση ανάλογα με την θερμοκρασία αντοχής της έχει ταξινομηθεί σε κλάσεις σύμφωνα με την Διεθνή επιτροπή Ηλεκτροτεχνίας. Οι κλάσεις αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Κλάση μόνωσης	Μέγιστη θερμοκρασίας	αύξηση	Μέση θερμοκρασία μόνωσης	Οριακή θερμοκρασία θερμότερου σημείου
A	60		90	100
E	70		115	120
B	80		120	130
F	100		140	155
H	125		165	180

Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία στο εσωτερικό της μηχανής και οι μονώσεις καταπονούνται, τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής του της μόνωσης και κατά επέκταση της ηλεκτρικής μηχανής. Η μερική ή ολική καταστροφή της μόνωσης είναι ζωτικής σημασίας καθώς σε αυτή την περίπτωση χάνει την διηλεκτρική ικανότητα της και έχουμε διαρροή ρεύματος.

Αφού η κλάση της μόνωσης αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό της μηχανής και το κόστος για την επανατοποθέτηση του βερνικιού είναι ιδιαίτερα υψηλό, οι κατασκευαστές επιλέγουν την τοποθέτηση μόνωσης κλάσης τύπου H. Η ανθεκτικότερη δυνατή μόνωση η οποία θα επιτρέψει στην μηχανή να λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες και να έχει κα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, εφόσον βέβαια δεν λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τις επιτρεπτές για μεγάλο χρονικό διάστημα.

2.8 Ψύξη ηλεκτρικών μηχανών

Για την αποφυγή των προβλημάτων υπερθέρμανσης μια ηλεκτρικής μηχανής και την πιθανότητα βλάβης λόγω της θερμότητας θα προσπαθήσουμε να ψύξουμε την μηχανής με κάποιες τεχνικές. Για να είναι αποτελεσματική η ψύξη της μηχανής θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας την ονομαστική ισχύ της μηχανής και το μέγεθος της μηχανής. Όσο αυξάνονται οι δύο αυτοί συντελεστές τόσο δυσκολότερα πραγματοποιείται η απαγωγή θερμότητας. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι ψύξης των σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών είναι:

- Η φυσική ψύξη. Σε ηλεκτρικές μηχανές μέχρι 300 W μπορούν να ψυχθούν με τον αέρα που περιβάλλει την μηχανή μέσω του μηχανισμού συναγωγής που προαναφέραμε.
- Ψύξη με εξαναγκασμένη ροή αέρα. Η ηλεκτρικές μηχανές αυτές ψύχονται μέσω πολύπλοκου συστήματος αγωγών, περσίδων και ανεμιστήρων που τοποθετούμε στο εσωτερικό τους. Στην περίπτωση που έχουμε μηχανές ανοιχτού τύπου, στο κέλυφος της υπάρχουν περσίδες για να διευκολύνεται η ροή αέρα. Ο αέρας διοχετεύεται με ανεμιστήρες τοποθετημένους στον άξονα του δρομέα ή με φυσητήρα που κινείται ξεχωριστά σχεδόν σε όλα τα διαθέσιμα μέρη και μετά στο περιβάλλον μέσω των περσίδων. Στην περίπτωση που έχουμε μηχανές έγκλειστου τύπου έχουμε ειδικά διαμορφωμένο κέλυφος έτσι ώστε ο αέρας να οδηγείται στο περιβάλλον. Όπως και του ανοιχτού τύπου έχουν και αυτές ανεμιστήρες για την οδήγηση του αέρα.
- Σε μηχανές ισχύος 1 MW ως 100 MW χρησιμοποιούμε σύστημα υδρόψυξης. Αυτό συμβαίνει γιατί η ροή αέρα που απαιτείται για να ψύξη την μηχανή είναι πολύ μεγάλη και προκαλεί φαινόμενα στροβιλισμού και σπηλαιώσης που επηρεάζουν την σωστή λειτουργία της μηχανής. Μηχανές που χρησιμοποιούν αυτό τον τρόπο ψύξης είναι συνήθως της τάξης
- Τέλος ένας τρόπος για την ψύξη μηχανών ισχύος μεγαλύτερης από 100 MW είναι η ψύξη με υγρό υδρογόνο. Η μικρή πυκνότητα του υδρογόνου σε σχέση με

τον αέρα, η μεγάλη ειδική θερμότητα του σε σχέση με τον αέρα και η σημαντική αύξηση ζωής των μηχανών λόγω της μικρής καταπόνησης των μονώσεων το καθιστούν ιδανικού για ψύξη μηχανών μεγάλης ισχύος. Για την χρήση του είναι απαραίτητη η στεγανοποίηση της μηχανής ενώ η πιθανότητα ανάφλεξης είναι εξαιρετικά μικρή.

2.7 Θερμική αντίσταση

Η θερμική ανάλυση ενός κινητήρα και γενικά μια ηλεκτρικής μηχανής απαιτεί να γνωρίζουμε την θερμική αντίσταση κάθε μέρους της. Η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο μέρη θα δημιουργεί ροή θερμότητας όπως εξηγήσαμε παραπάνω και η θερμική αντίσταση θα εξαρτάται από την ροή αυτή. Η θερμική αντίσταση για κάθε μηχανισμό μεταφοράς της θερμοκρασίας υπολογίζεται διαφορετικά.

- Στον μηχανισμό της αγωγής η θερμική αντίσταση θα είναι:

$$R_{th,cond} = \frac{T_1 - T_2}{\vec{q}} = \frac{L}{k \cdot S} \quad 2.37$$

- Στον μηχανισμό της συναγωγής θα είναι

$$R_{th,conv} = \frac{T_{solid} - T_{envi}}{\vec{q}} = \frac{1}{h \cdot S} \quad 2.38$$

- Στον μηχανισμό της ακτινοβολίας θα είναι:

$$R_{th,rad} = \frac{T_1 - T_2}{\vec{q}} = \frac{1}{a_r \cdot S} \quad 2.39$$

Όπου $a_r = \varepsilon \cdot \sigma \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}$ ο συντελεστής μεταφοράς θερμοκρασίας για το μηχανισμό της ακτινοβολίας.

2.8 Θερμική ανάλυση για κυλινδρική διάταξη

Θα πραγματοποιήσουμε θερμική ανάλυση για ένα απλό κύλινδρο καθώς τα περισσότερα μέρη μιας ηλεκτρικής μηχανής έχουν κυλινδρική γεωμετρία. Η μελέτη αυτή θα μας βοηθήσει στην ανάλυση του κινητήρα που θα γίνει στα επόμενα κεφάλαια και θα βοηθήσει να αποδείξουμε πόσο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των αναλυτικών σχέσεων.

Το παράδειγμα που θα αναλυθεί είναι ένας κύλινδρος αλουμινίου με ύψος και διάμετρο 10 mm. Στην κατάσταση ηρεμίας ο κύλινδρος βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου ή αλλιώς στους 300 °K. Θεωρούμε ότι ο κύλινδρος είναι πηγή θερμότητας ισχύος 1 W.

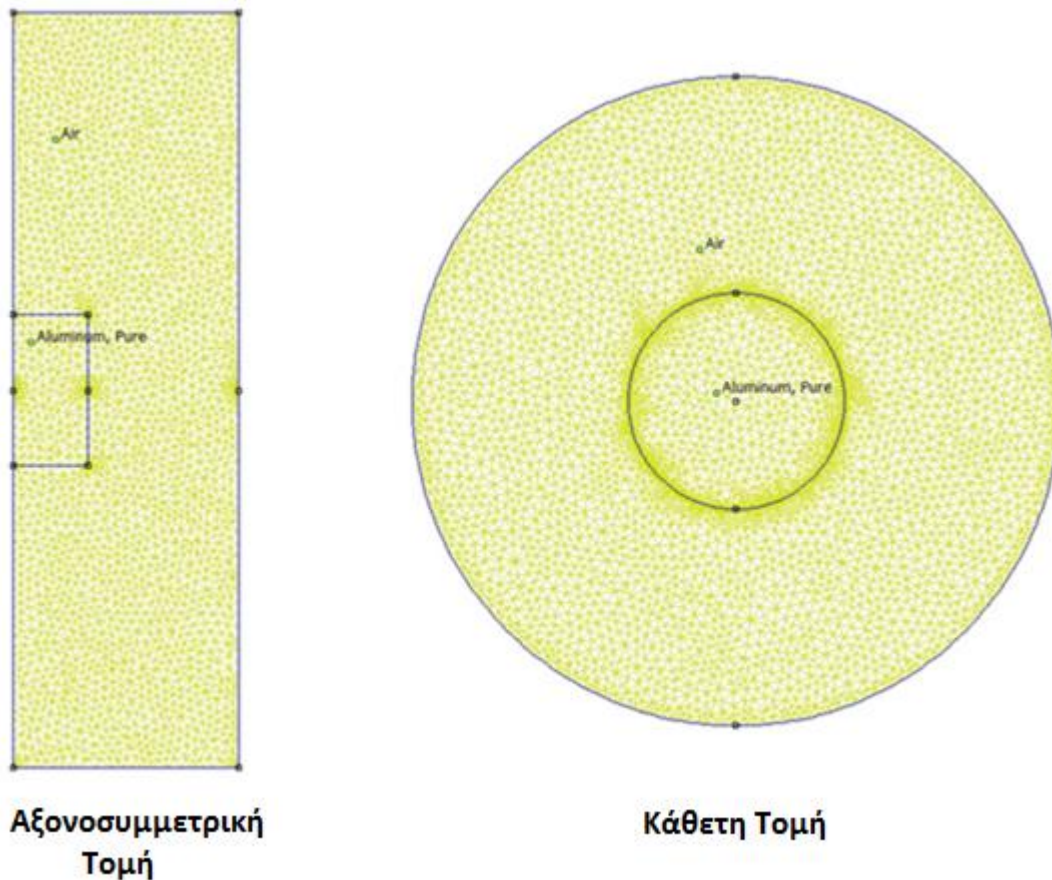
Για να βρούμε την θερμοροή πρέπει να υπολογίσουμε τον όγκο του κυλίνδρου. Ο όγκος του θα δίνεται από τον τύπο:

$$V_{ex} = \pi \cdot r^2 \cdot L = \pi \cdot 10^2 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-3} = \pi \cdot 10^{-6} m^3$$

$$\text{Και η ζητούμενη θερμοροή θα είναι } q = \frac{1 W}{\pi \cdot 10^{-6} m^3} = 318309,99 \frac{W}{m^3} \approx 318,3 \frac{kW}{m^3}$$

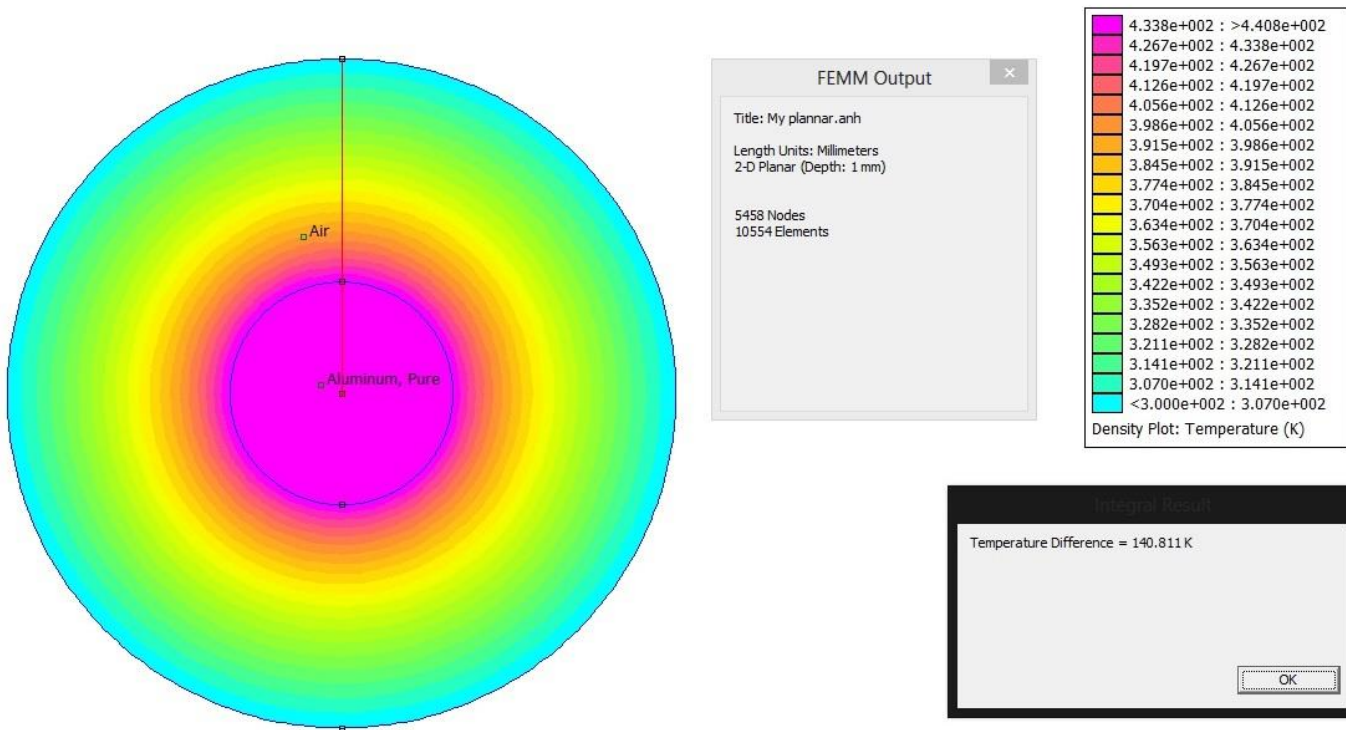
2.8.1 Προσομοίωση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η προσομοίωση του παραπάνω προβλήματος έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEMM. Το πρόβλημα μελετήθηκε με μοντέλα. Το πρώτο ήταν το πρόβλημα σαν έχουμε κόψει μία φέτα του κυλίνδρου (planar) και του χώρου που το περιβάλλει και το δεύτερο μοντέλο ήταν το αξονοσυμμετρικό πρόβλημα. Τα πλέγματα που δημιουργήθηκαν για τα δύο μοντέλα από το πρόγραμμα, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



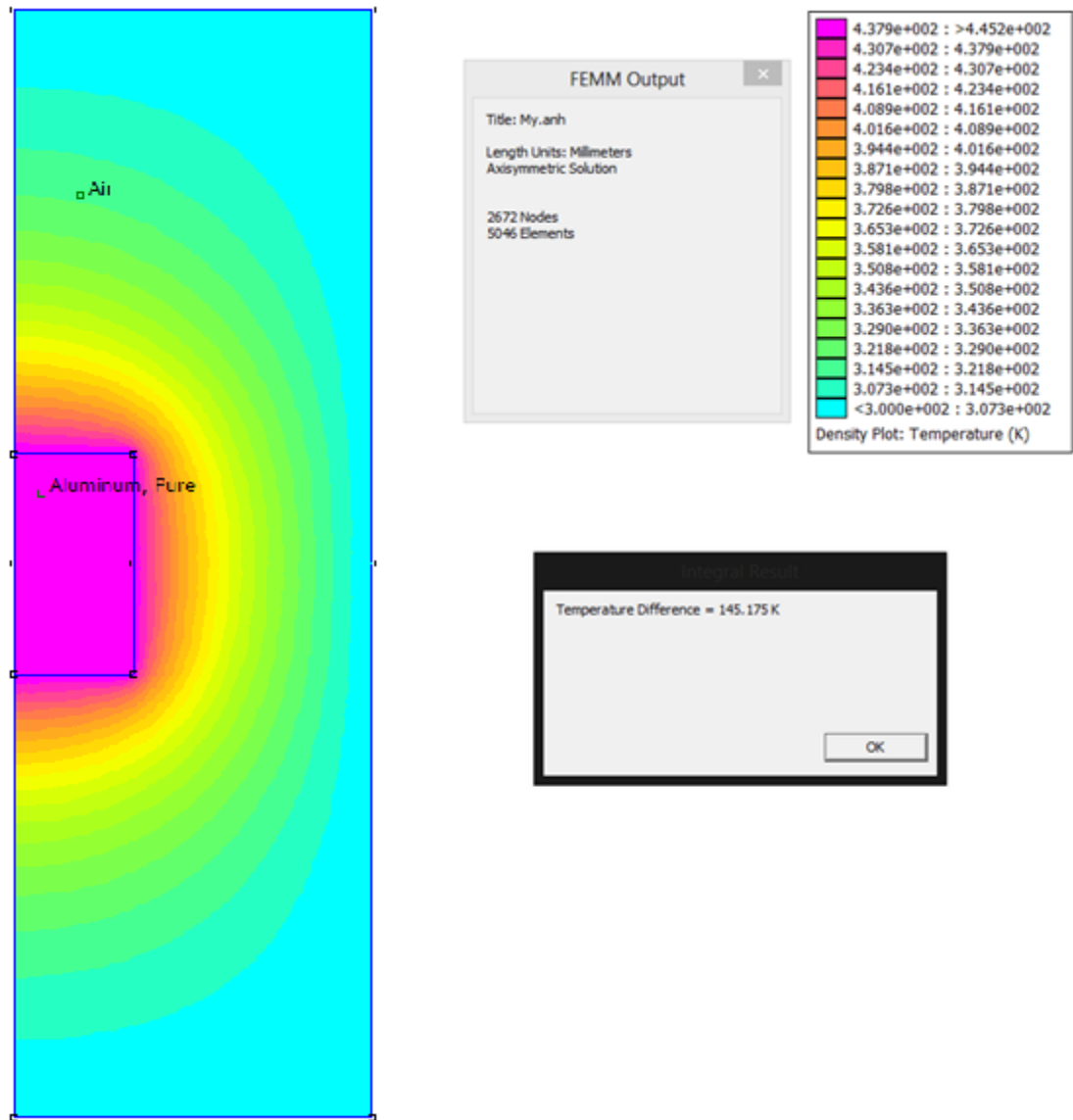
Σχήμα 2.7 Πλέγματα του στοιχειώδους θερμικού προβλήματος για α) αξονοσυμμετρική γεωμετρία και β) για κάθετη τομή στον άξονα

Το planar μοντέλο που δημιουργήθηκε από το πρόβλημα αποτελείται από 5458 κόμβους και 10554 πεπερασμένα στοιχεία. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας, η διαφορά θερμοκρασίας από τον κύλινδρο-πηγή θερμότητας μέχρι το εξωτερικό όριο (το εξωτερικό όριο θεωρήθηκε ότι είναι σε απόσταση 10 mm από τον κύλινδρο):



Σχήμα 2.8 Θερμοκρασιακό πεδίο σε κάθετη τομή του στοιχειώδους θερμικού προβλήματος, υπόμνημα και διαφορά θερμοκρασίας

Το αξονοσυμμετρικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από 2672 κόμβους και 5046 στοιχεία. Η κατανομή θερμοκρασίας, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εξωτερικού ορίου και κυλίνδρου φαίνεται παρακάτω:

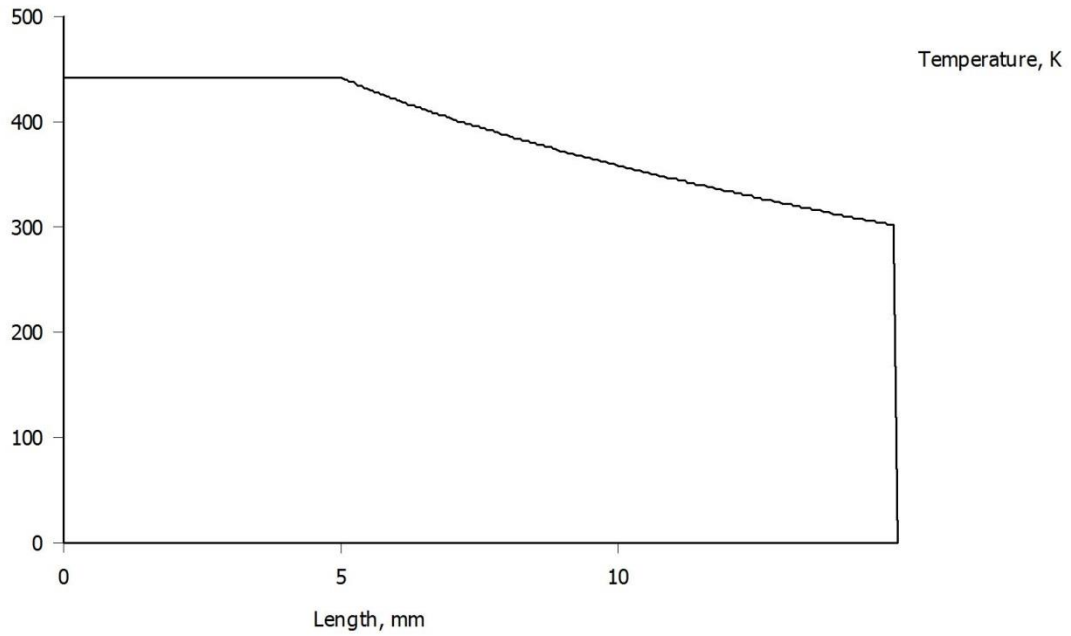


Σχήμα 2.7 Θερμοκρασιακό πεδίο σε αξονοσυμμετρική τομή του στοιχειώδους θερμικού προβλήματος, υπόμνημα και διαφορά θερμοκρασίας

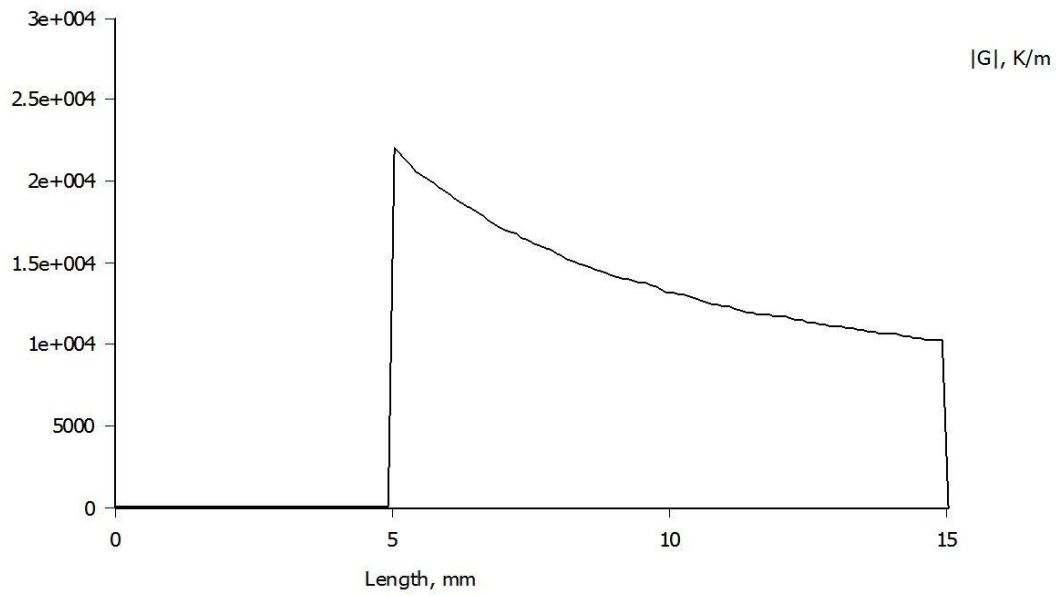
Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στο κέντρο του κυλίνδρου οι θερμοκρασίες είναι αρκετά υψηλές και φτάνουν τους $440\text{ }^\circ\text{K}$ στα δύο μοντέλα. Υπάρχει μια μικρή διαφορά στα δύο μοντέλα που οφείλεται στις διαφορές που παρουσιάζουν οι δύο γεωμετρίες.

Μέσα από την προσομοίωση μπορούμε να παράγουμε τα διαγράμματα θερμοκρασίας, πυκνότητας θερμότητας και θερμοκρασιακής μεταβολής σε σχέση με την απόσταση, τα οποία παραθέτουμε ακριβώς από κάτω:

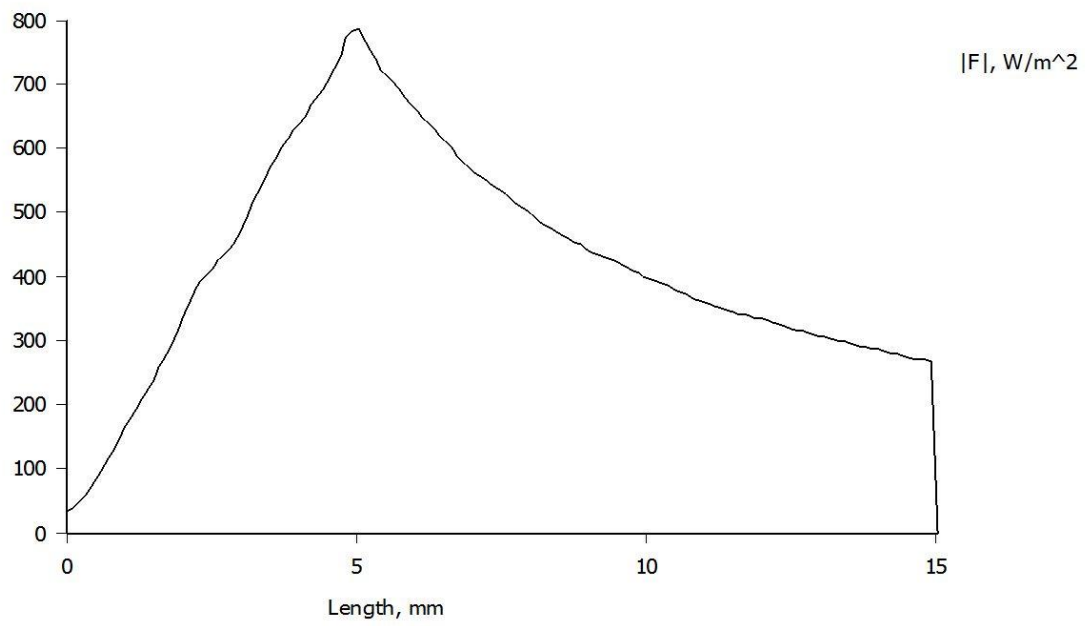
Για το planar μοντέλο:



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει απόστασης

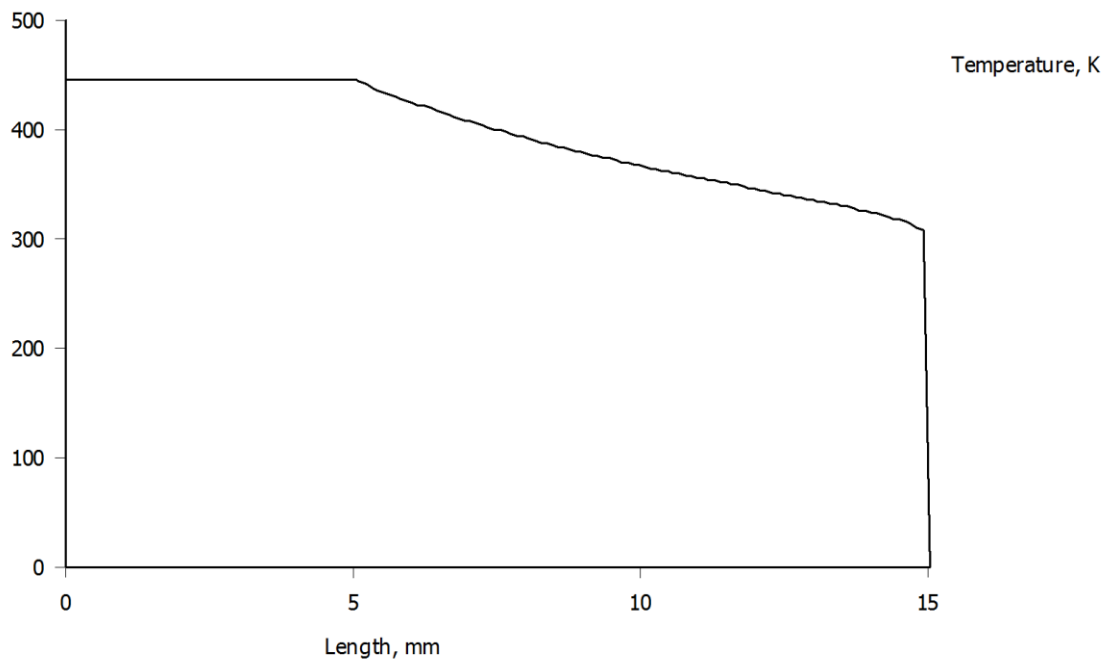


Σχήμα 2.6 Διάγραμμα πυκνότητας θερμοροής συναρτήσει της απόστασης

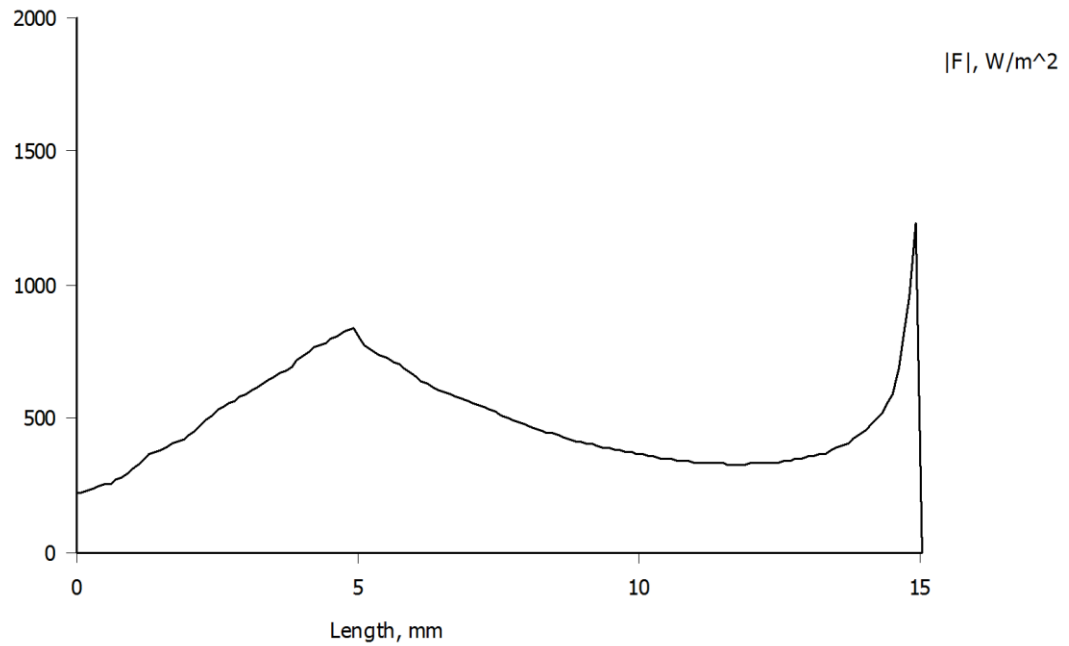


Σχήμα 2.7 Διάγραμμα θερμοκρασιακής μεταβολής συναρτήσει της απόστασης

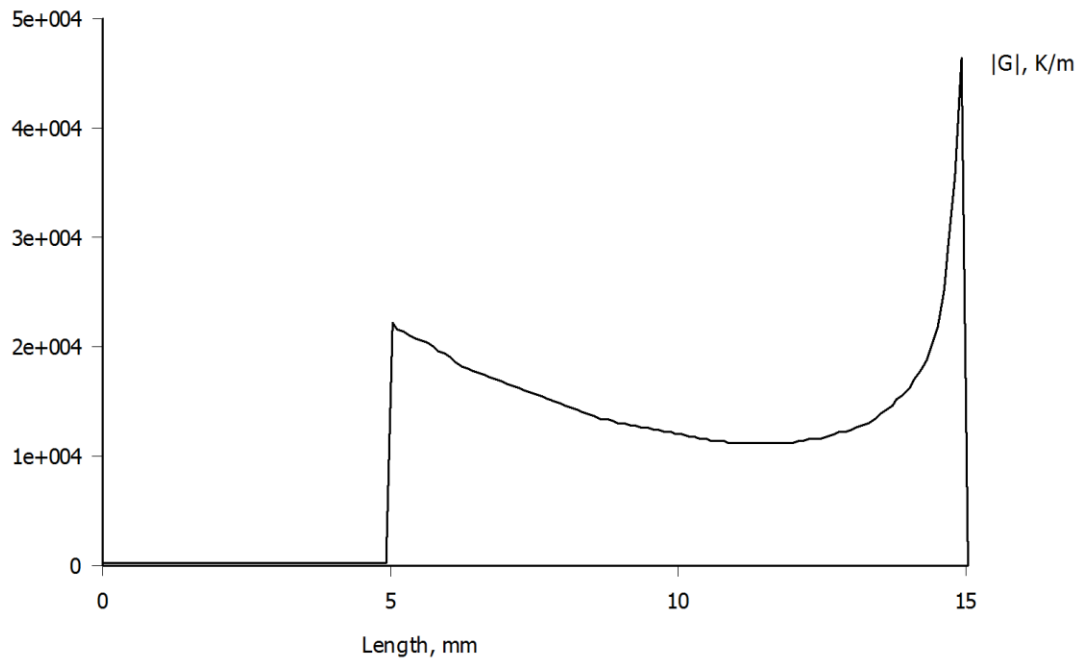
Για το axisymmetric μοντέλο:



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει απόστασης



Σχήμα 2.9 Διάγραμμα πυκνότητας θερμοροής συναρτήσει της απόστασης



Σχήμα 2.10 Διάγραμμα θερμοκρασιακής μεταβολής σε σχέση με την απόσταση

2.8.2 Αναλυτική επίλυση προβλήματος

Σε αυτή την ενότητα θα προσεγγίσουμε το θερμικό πρόβλημα του κυλίνδρου μέσω των εξισώσεων που παραθέσαμε στην αρχή του κεφαλαίου. Για την χρήση τους αλλά και την

ευκολότερη επίλυση τους θα θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία μέσα στον κύλινδρο είναι ανεξάρτητη της θέσης του και ότι η μετάδοση της θερμότητας θα γίνεται μόνο ακτινικά.

Το πρόβλημα μάς έχει κυλινδρική συμμετρία οπότε η θερμοκρασία πάνω στα σημεία επαφής του αέρα με τον κύλινδρο είναι ανεξάρτητη του από τη θέση της. Επίσης στο όριο των 15 mm έχουμε θέσει οριακή συνθήκη σταθερής θερμοκρασίας $300\text{ }^\circ\text{K}$. Επομένως για πηγή θερμότητας

$$q = 318.3 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Και όγκο κυλίνδρου } V_{ex} = \pi \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Ο όγκος του αέρα θα είναι:

$$V_{air} = (\pi \cdot 15^2 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-3}) - (\pi \cdot 10^{-6} \text{ m}^3) = 1.25\pi \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Αν θεωρήσουμε τα αλουμίνιο και τον αέρα ομογενή υλικά τότε θα έχω τις παρακάτω θερμοχωρητικότητες και πυκνότητες υλικών:

$$\rho_{air} = 1.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_{p_{air}} = 1.05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\rho_{alu} = 2685 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad c_{p_{alu}} = 0.897 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Οι παραπάνω τιμές θεωρούνται σταθερές καθώς έχουμε μικρές μεταβολές θερμοκρασίας και πίεσης στο σύστημα που μελετάμε.

Εφόσον έχουμε κυλινδρική συμμετρία από αρχή διατήρηση της ενέργειας στο στερεό για τον μηχανισμό συναγωγής θα έχουμε:

$$\rho_{solid} \cdot c_{p_{solid}} \cdot \frac{\partial T_{solid}(t)}{\partial t} \cdot V_{solid} = Q_g - h \cdot [T_{solid}(t) - T_{fluid}(t)] \cdot S$$

Και ο συντελεστής συναγωγής h για κυλινδρική συμμετρία θα είναι:

$$h \cong 1.32 \cdot \left(\frac{T_{solid}(t) - T_{fluid}(t)}{D} \right)^{0.25} = 1.32 \cdot \left(\frac{T_{alu}(t) - T_{air}(t)}{20 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.25} \\ \approx 0.5 [T_{alu}(t) - T_{air}(t)]^{0.25}$$

επομένως

$$\rho_{alu} \cdot c_{p_{alu}} \cdot \frac{\partial T_{alu}(t)}{\partial t} \cdot V_{alu} = Q_g - h \cdot [T_{alu}(t) - T_{air}(t)] \cdot S \Leftrightarrow$$

$$2.685 \cdot 0.897 \cdot \frac{\partial T_{alu}(t)}{\partial t} \cdot \pi \cdot 10^{-6} = 1 - 0.5 \cdot [T_{alu}(t) - T_{air}(t)]^{1.25} \cdot \pi \cdot 10^{-4} \Leftrightarrow$$

$$0.0076 \cdot \frac{\partial T_{alu}(t)}{\partial t} = 1 - 0.00157 \cdot [T_{alu}(t) - T_{air}(t)]^{1.25}$$

Για το ρευστό με το φαινόμενο της συναγωγής θα έχουμε:

$$\frac{\partial E_2}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \Leftrightarrow$$

$$\int_V \left(\rho_{fluid} \cdot c_{pfluid} \cdot \frac{\partial T_{fluid}(x, y, z, t)}{\partial t} \right) dV$$

$$= \int_S h \cdot [T_{solid}(x, y, z, t) - T_{fluid}(x, y, z, t)] dS - Q_{out}$$

Εφόσον είπαμε ότι οι θερμοκρασίες είναι ανεξάρτητες της θέσης τους, λόγω των παραδοχών που προαναφέραμε ο παραπάνω τύπος γίνεται:

$$\int_V \left(\rho_{air} \cdot c_{p_{air}} \cdot \frac{\partial T_{air}(r, t)}{\partial t} \right) dV = \int_S h \cdot [T_{alu}(t) - T_{air}(t)] dS - Q_{out} \Leftrightarrow$$

$$\int_{5 \cdot 10^{-2}}^{15 \cdot 10^{-2}} \left(1.1 \cdot 1.05 \cdot \frac{\partial T_{air}(r, t)}{\partial t} \right) 2\pi \cdot L \cdot r \cdot dr$$

$$= \int_{5 \cdot 10^{-2}}^{15 \cdot 10^{-2}} 0.5 \cdot [T_{alu}(t) - 300]^{1.25} 2\pi \cdot L \cdot dr - Q_{out} \Leftrightarrow$$

$$Q_{out} = \int_{5 \cdot 10^{-2}}^{15 \cdot 10^{-2}} 0.0726 \cdot \frac{\partial T_{air}(r, t)}{\partial t} \cdot r \cdot dr + \int_{5 \cdot 10^{-2}}^{15 \cdot 10^{-2}} 0.0314 \cdot [T_{alu}(t) - 300]^{1.25} dr$$

Η παραπάνω σχέση περιγράφει ένα σύστημα το οποίο η ισχύς που εξέρχεται με μορφή θερμότητας μεταφέρεται σε άγνωστο υλικό σταθερής θερμοκρασίας 300 °K. Επομένως

$$\text{Για } r \geq 15mm \quad \frac{\partial T_{air}(r, t)}{\partial t} = 0$$

$$T_{air}(r, t) = 300 \text{ } ^\circ K$$

Επομένως ανεξαρτήτου θέσης η θερμοκρασία θα έχει τιμή $300 \text{ }^\circ\text{K}$

Η επίλυση του παραπάνω προβλήματος στην μεταβατική κατάσταση είναι δύσκολη με αριθμητικό τρόπο και για αυτό θα λύσουμε το πρόβλημα με το ένα ισοδύναμο μοντέλο. Θα γίνει επίλυση στην μόνιμη κατάσταση όπου: $\frac{\partial T_{air}(r,t)}{\partial t} = 0$ και $\frac{\partial T_{alu}(t)}{\partial t} = 0$, όπως άλλωστε κάνει και το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Επομένως θα είμαστε σε θέση να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων.

Στην μόνιμη κατάσταση θα έχουμε:

$$Q_{env} = Q_{in} - Q_{out}$$

$$Q_{in} = Q_{out,solid} = \int_S h \cdot [T_{solid}(r,t) - T_{fluid,surface}(r,t)] dS$$

Και αντικαθιστώντας τον συντελεστή συναγωγής με την τιμή του για το στοιχειώδες πρόβλημα με κυλινδρική συμμετρία:

$$h \cong 1.32 \cdot \left(\frac{T_{solid}(t) - T_{fluid}(t)}{D} \right)^{0.25}$$

επομένως

$$Q_{in} = \int_S 1.32 \cdot \left(\frac{T_{solid}(t) - T_{fluid,surface}(t)}{D} \right)^{0.25} \cdot [T_{solid}(r,t) - T_{fluid,surface}(r,t)] dS$$

Και

$$Q_{env} = \int_V \left(\rho_{air} \cdot c_{p_{air}} \cdot \frac{\partial T_{air}(r,t)}{\partial t} \right) dV$$

Στο περιβάλλον πού έχουμε θέσει, έχουμε σταθερή θερμοκρασία ίση με 300°K και επομένως θα έχουμε:

$$Q_{out} = \int_{5 \cdot 10^{-2}}^{15 \cdot 10^{-2}} 0.0726 \cdot \frac{\partial T_{air}(r,t)}{\partial t} \cdot r \cdot dr + \int_{5 \cdot 10^{-2}S}^{15 \cdot 10^{-2}} 0.0314 \cdot [T_{alu}(t) - 300]^{1.25} dr$$

και στην μόνιμη κατάσταση $Q_{env} = 0$ οπότε $Q_{in} = Q_{out}$.

Από τα παραπάνω και για αποστάσεις r γνωστές θα γίνουν οι παρακάτω υπολογισμοί:

$$\begin{aligned}
Q_{out} &= \int_{r=15} 1.32 \cdot \left(\frac{T_{solid}(15, t) - T_{fluid, surface}(15, t)}{D} \right)^{0.25} \\
&\quad \cdot [T_{solid}(15, t) - T_{fluid, surface}(15, t)] dS \\
&= 1 \stackrel{t=\infty}{\Leftrightarrow} T_{fluid, surface}(15, \infty) = 300^\circ K
\end{aligned}$$

Ομοίως

$$\begin{aligned}
Q_{in} &= \int_{r=5} 1.32 \cdot \left(\frac{T_{solid}(5, t) - T_{fluid, surface}(5, t)}{D} \right)^{0.25} \cdot [T_{solid}(5, t) - T_{fluid, surface}(5, t)] dS \\
&= 1 \stackrel{t=\infty}{\Leftrightarrow} 12.4 \cdot (T_{solid}(5, \infty) - T_{fluid, surface}(5, \infty))^{1.25}
\end{aligned}$$

Οι θερμοκρασίες του αέρα για τις δύο αποστάσεις $r = 5mm$ και $r = 15mm$ θα υπολογιστούν από τις σχέσεις αγωγής. Στην μόνιμη κατάσταση και αφού ο αέρας δεν μπορεί να απορροφήσει και άλλη θερμότητα έχει ως αποτέλεσμα την μετάδοση όλης της θερμότητας που παράγεται από την πηγή θερμότητας, το αλουμίνιο. Επομένως από αρχή διατήρησης τη ενέργειας στην μόνιμη κατάσταση για το αλουμίνιο θα έχουμε:

$$\frac{\partial E_{solid}}{\partial t} = 0 \Leftrightarrow Q_{out, solid} = Q_{in, fluid} = 1W$$

$$\frac{\partial E_{fluid}}{\partial t} = 0 \Leftrightarrow Q_{out, fluid} = Q_{in, fluid} = Q_{fluid} = 1W$$

$$Q_{fluid} = S \cdot q_r = S \cdot \left[-\lambda_{fluid} \cdot \frac{\partial T_{fluid}(r)}{\partial r} \right]_r$$

Και αν έχουμε:

$$\lambda_{fluid} = \frac{0.026W}{m \cdot K}$$

$$L = 10 mm$$

Άρα

$$T_{fluid}(r) = -0.001633628 \cdot r \cdot \frac{\partial T_{fluid}(r)}{\partial r} \Leftrightarrow$$

$$T_{fluid}(r) = -612.13 \ln r + c$$

Και με την τιμή που υπολογίστηκε για την το εξωτερικό όριο θα έχουμε:

$$T_{fluid}(15) = 300$$

Επομένως

$$c = 2270.22$$

Επομένως έχουμε την σχέση:

$$T_{fluid}(r) = -612.13 \ln r + 2270.22$$

Και για την απόσταση $r=10\text{mm}$ στην μόνιμη κατάσταση προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$T_{fluid}(10) = 383.6^\circ K$$

$$T_{fluid}(15) = 300^\circ K$$

$$T_{solid}(10) = 400.3^\circ K$$

Με αυτά τα αποτελέσματα είμαστε σε θέση να συγκρίνουμε κατμά πόσο τα αποτελέσματα με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων πλησιάζουν την αριθμητική ανάλυση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

	Μαθηματική ανάλυση	Κάθετη Τομή	Αξονοσυμμετρική Τομή
Αλουμίνιο	400.4	433.8	437.9
Αέρας στα 5 mm	383.6	405.6	408.9
Αέρας στα 15 mm	300	300	300

Και σε ποσοστά:

	Κάθετη Τομή	Αξονοσυμμετρική Τομή
Αλουμίνιο	8.563598995	7.699400645
Αέρας στα 5 mm	6.187331866	5.424063116

2.9 Μέθοδοι θερμικής ανάλυσης

Το παραπάνω παράδειγμα επιβεβαιώνει ότι ένας επιστήμονας μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετικές μεθόδους και προσεγγίσεις για την γνώση των θερμοκρασιακών τιμών σε μια ηλεκτρική μηχανή. Οι μέθοδοι αυτές είναι:

- Η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Μέθοδος που χρειάζεται μεγάλη υπολογιστική ισχύ καθώς οι σχέσεις είναι περίπλοκες και τα αποτελέσματα θα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήσε.
- Με την χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Πρόγραμμα που κάνει προσομοίωση της ηλεκτρικής μηχανής δίνοντας του τις οριακές συνθήκες και τις απώλειες θερμότητας των διαφόρων μερών της.
- Με την μέθοδο των συγκεντρωμένων παραμέτρων. Δημιουργείται ένα μοντέλο που μας δίνει αποτελέσματα όχι μόνο για την τελική μόνιμη κατάσταση αλλά και για την μεταβατικής κατάσταση του θερμικού προβλήματος.

Το πρόγραμμα FEMM μας δίνει τη δυνατότητα να κάνουμε μια προσομοίωση με τη χρήση του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων. Σχεδιάζουμε την ηλεκτρική μηχανή στις δύο διαστάσεις και το πρόγραμμα με χρήση της μεθόδου Newton-Raphson μας δίνεται τα τελικά αποτελέσματα πολύ γρήγορα. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν μας δίνει αποτελέσματα για την μεταβατική κατάσταση.

Το πρόγραμμα για να μπορέσει να πραγματοποιήσει την θερμική ανάλυση μιας ηλεκτρικής μηχανής, είναι απαραίτητο να του παρέχουμε τις πηγές θερμότητας, τους συντελεστές θερμοχωρητικότητας και την πυκνότητα των διαφόρων υλικών που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα όρια θερμικά όρια.

Για να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα τα οποία να προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό θα πρέπει οι οριακές συνθήκες να καθοριστούν για όλες τις περιοχές όπου έχουμε μετάδοση θερμοκρασίας. Οι οριακές συνθήκες μπορούν να έχουν τις ακόλουθες μορφές:

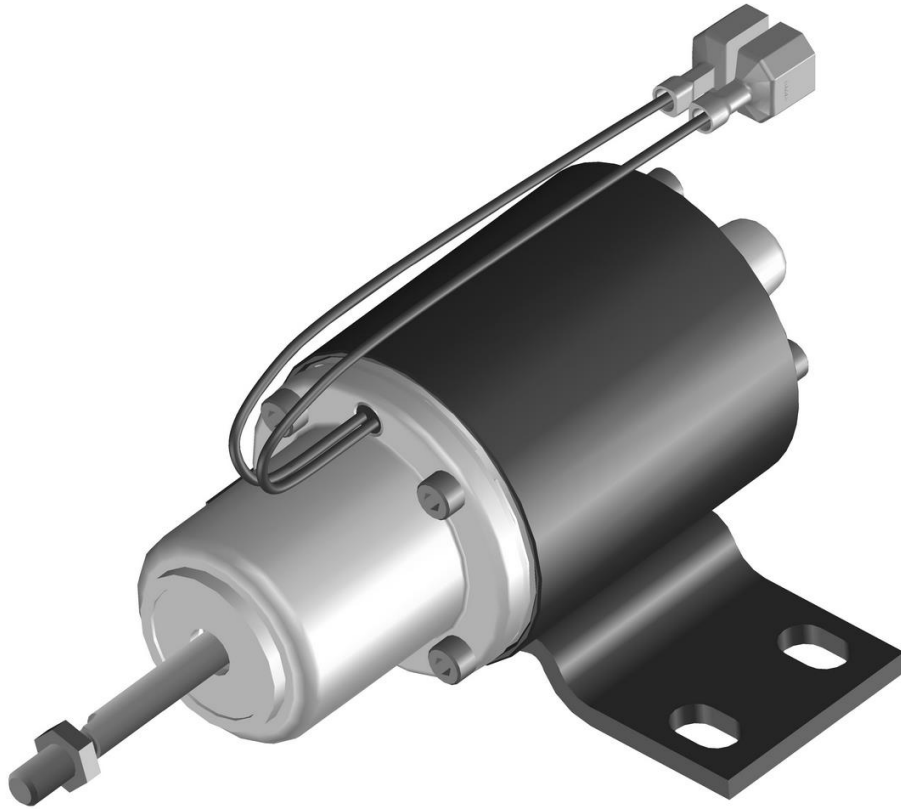
- Συνθήκη Dirichlet. Τα όρια του θερμικού μας μοντέλου έχουν σταθερή θερμοκρασία
- Συνθήκη Neumann. Τα όρια του θερμικού μοντέλου έχουν σταθερή πυκνότητα θερμοροής
- Συνθήκη συναγωγής. Στην επιφάνεια επαφής ρευστών και στερεών ορίζεται ο συντελεστής συναγωγής, ο οποίος καθορίζει την ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει θερμική ανάλυση του κινητήρα μόνιμων μαγνητών με τον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτός θα μας δώσει αποτελέσματα για την μόνιμη

κατάσταση, ενώ για την μεταβατική θα χρησιμοποιήσουμε ένα μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων στο κεφάλαιο 4. Για την ανάλυση αυτή θα χρειαστεί να υπολογίσουμε θερμικές αντιστάσεις και χωρητικότητες και να καθορίσουμε τις πηγές θερμότητας μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων.

Κεφάλαιο 3

Ανάλυση με μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων



Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα πραγματοποιήσουμε την θερμική ανάλυση του 12 πολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών που θα αναλύσουμε στην παρούσα διπλωματική με τη χρήση του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων.

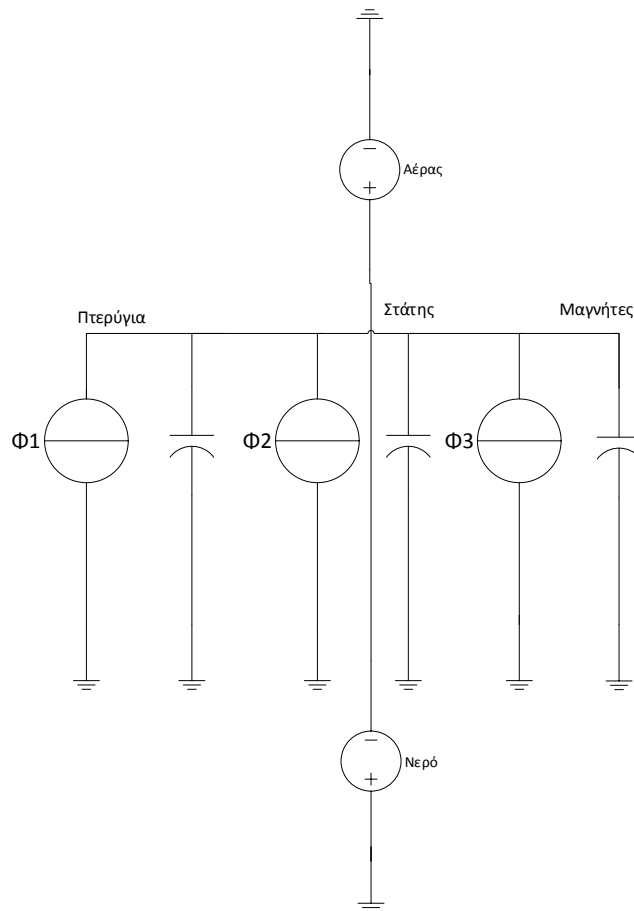
Γενικά το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων είναι ένας τρόπος απλοποίησης της συμπεριφοράς χωρικά κατανεμημένων συστημάτων, ως μια τοπολογία που αποτελείται από διακριτές ποσότητες και η οποία προσεγγίζει την συμπεριφορά των κατανεμημένων συστημάτων υπό κάποιες συνθήκες. Η θερμική ανάλυση με το συγκεκριμένο τρόπο μπορεί να μας δώσει αποτελέσματα για την θερμική συμπεριφορά του κινητήρα όχι μόνο για την τελική κατάσταση, αλλά και για την μεταβατική. Το ισοδύναμο θερμικό μοντέλο που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα προσομοίωσης αντιστοιχίζει θερμικά με ηλεκτρικά μεγέθη, οι τιμές των οποίων καθορίζονται από τύπους και από πειραματικές μετρήσεις. Η ηλεκτρική μηχανή χωρίζεται γεωμετρικά σε ένα αριθμό συγκεντρωμένων στοιχείων, το καθένα από τα οποία περιλαμβάνει μια πηγή θερμότητας που συνδέεται με τα γειτονικά στοιχεία μέσω θερμικών αντιστάσεων και χωρητικότητων. Όλες οι πηγές θερμότητας θεωρούνται συγκεντρωμένες σε ένα σημείο για κάθε στοιχείο, εξού και το όνομα της. Το θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων έχει τη

δυνατότητα να εξάγει αποξέσματα λαμβάνοντας υπόψιν όλους τους μηχανισμούς μετάδοσης της θερμότητας. Το πρόγραμμα προσομοίωσης θα μας δώσει στο τέλος μια απεικόνιση της μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου στις διάφορες περιοχές του κινητήρα. Αποτελέσματα τα οποία θα συγκριθούν με τα πειραματικά για να ελεγχθεί η ορθότητα και η αξιοπιστία της μεθόδου.

3.1 Παράδειγμα κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων

Το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων όπως το ξέρουμε σχεδιάστηκε από τους Armor και Charé με στόχο την ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας στο δρομέα μεγάλων γεννητριών τουρμπίνας. Το κύκλωμα που θα χρησιμοποιήσουμε και εμείς στο πρόβλημα μας είναι μια παραλλαγή αυτού το Armor.

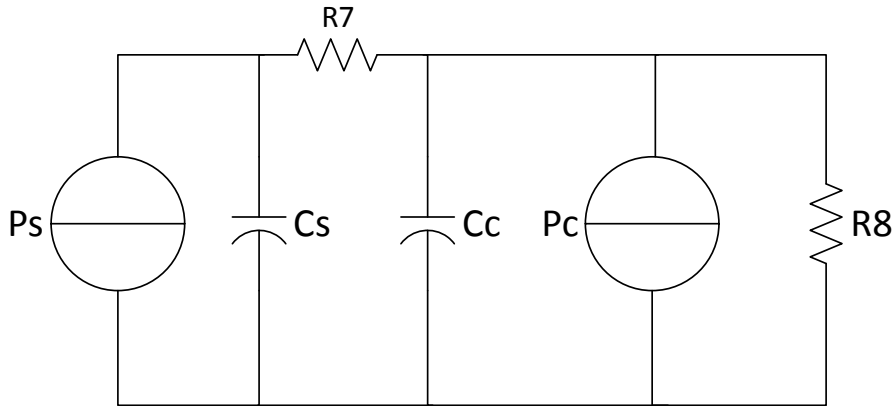
Ένα παράδειγμα κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων ενός σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών φαίνεται παρακάτω:



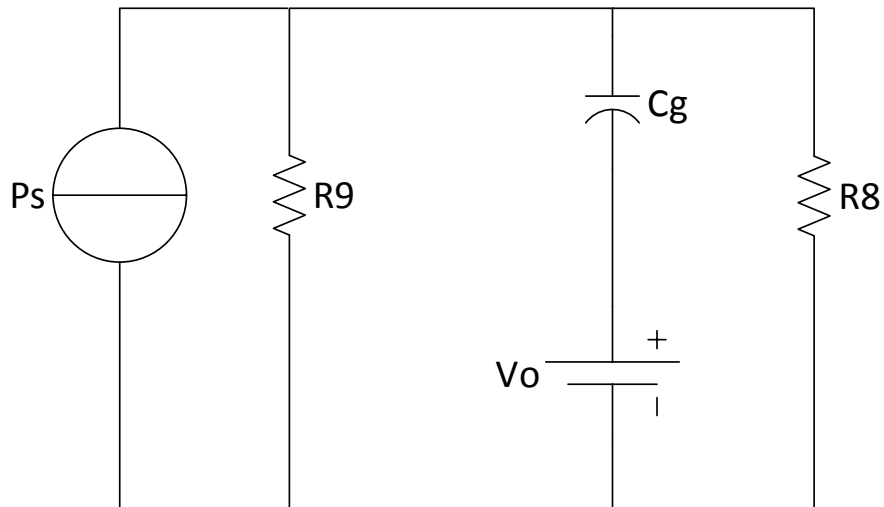
Σχήμα 3.1: Κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων σύγχρονου κινητήρα

Όπου Φ_1, Φ_2 και Φ_3 οι πηγές θερμότητας των πτερυγίων, του στάτη και των μονίμων μαγνητών.

Αν αναλύσουμε περαιτέρω το κύκλωμα του στάτη και του δρομέα θα έχουμε τα παρακάτω κυκλώματα:



Θερμικό μοντέλο Στάτη



Θερμικό μοντέλο Δρομέα

Σχήμα 3.2: Κύκλωμα Συγκεντρωμένων παραμέτρων ασύγχρονου κινητήρα

Όπου

P_s : Απώλειες επαφών στάτη

P_c : Απώλειες πυρήνα

C_s : Θερμική χωρητικότητα επαφών στάτη

C_c : Θερμική χωρητικότητα πυρήνα

R_7 : Θερμική αντίσταση μόνωσης

R_8 : Θερμική αντίσταση στο περιβάλλον

P_r : Απώλειες επαφών δρομέα

R_9 : Θερμική αντίσταση δρομέα στο περιβάλλον

V_0 : Θερμοκρασία περιβάλλοντος

C_g : Θερμική χωρητικότητα επαφών δρομέα

R_8 : Θερμική αντίσταση στο περιβάλλον

Y : Αύξηση θερμοκρασίας πυρήνα

X : Αύξηση θερμοκρασίας επαφών στάτη

Z : Αύξηση θερμοκρασία επαφών δρομέα

3.2 Αντιστοίχιση θερμικών με ηλεκτρικά μεγέθη

Για τον σχεδιασμό του ισοδύναμου κυκλώματος για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα μονίμων μαγνητών είναι απαραίτητη η αντιστοίχιση των θερμικών μεγεθών με ηλεκτρικά. Ροή θερμότητας έχουμε λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δύο σημείων, ομοίως στο ηλεκτρικό ισοδύναμο αυτό που προκαλεί τη ροή ρεύματος είναι η διαφορά δυναμικού. Επομένως θα έχουμε την αντιστοιχία:

$$\Delta T (K) \leftrightarrow \Delta V (V)$$

$$Q (W) \leftrightarrow I (A)$$

Η θερμική αντίσταση περιγράφει τη δυσκολία που συναντά η θερμότητα κατά την διάδοση της. Οι θερμικές αντιστάσεις τοποθετούνται στο κύκλωμα των συγκεντρωμένων παραμέτρων στις διαδρομές όπου από τις οποίες μεταδίδεται η θερμότητα. Με βάση την παραπάνω αντιστοιχία μπορούμε να ορίσουμε την θερμική αντίσταση ως το πηλίκο της διαφοράς θερμοκρασίας προς την ροή θερμότητας, ακριβώς όπως ορίζουμε από το νόμο του *Ohm* την ηλεκτρική αντίσταση, $R = \frac{\Delta V}{I}$. Ο υπολογισμός της θερμικής αντίστασης, όμως θα εξαρτάται και από τον αντίστοιχο μηχανισμό διάδοσης της θερμότητας. Επομένως η θερμική αντίσταση για την μετάδοση της θερμοκρασίας μέσω του μηχανισμού:

- Αγωγής θα είναι:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{T_1 - T_2}{Q} = \frac{L}{\lambda \cdot S} \left(\frac{K}{W} \right) \quad 3.1$$

Όπου θεωρούμε ότι η θερμότητα μεταδίδεται μεταξύ δύο σημείων ενός στερεού τα οποία έχουν θερμοκρασίες T_1 και T_2 . Το μήκος του υλικού θα είναι L , λ ο συντελεστής αγωγιμότητας και S θα είναι η επιφάνεια μέσω της οποίας μεταδίδεται η θερμότητα Q .

- Συναγωγής θα είναι:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{T_s - T_{fluid}}{Q} \xleftrightarrow{Q=S \cdot h \cdot (T_s - T_{fluid})} R_{th} = \frac{1}{S \cdot h} \left(\frac{K}{W} \right) \quad 3.2$$

Όπου T_s η θερμοκρασία του στερεού υλικού, T_{fluid} η θερμοκρασία του ρευστού και h ο συντελεστής συναγωγής, ο οποίος προέρχεται από προηγούμενες αναλύσεις. Η τιμή για τις διαφορετικές γεωμετρίες προέρχεται από την τεχνική βιβλιογραφία σχετική με την μεταφορά της θερμότητας.

- Ακτινοβολίας θα είναι:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{T_{surface} - T_{environment}}{Q} \xleftrightarrow{Q=S \cdot h \cdot (T_{surface} - T_{environment})} R_{th} = \frac{1}{S \cdot h} \left(\frac{K}{W} \right) \quad 3.3$$

Όπου h ο συντελεστής θερμικής ακτινοβολίας $h = \sigma \cdot \varepsilon \cdot F_{1-2} \cdot (T^4 - T_{\text{environment}}^4)$, σ η σταθερά Stefan–Boltzmann, ε η σταθερά εκπομπής και F_{1-2} ο παράγοντας προβολής που εξαρτάται από την επιφάνεια και την γεωμετρία της.

Η θερμική αντίσταση μέσω ακτινοβολίας θα αμεληθεί στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία καθώς είναι πολύ μικρή και θεωρείται σχεδόν αμελητέα.

Στο μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων οι πυκνωτές αντιστοιχούν στις θερμοχωρητικότητες, δηλαδή στην συσσωρευμένη θερμότητα των υλικών. Οι τιμές των πυκνωτών αυτών θα δίνονται από τον τύπο:

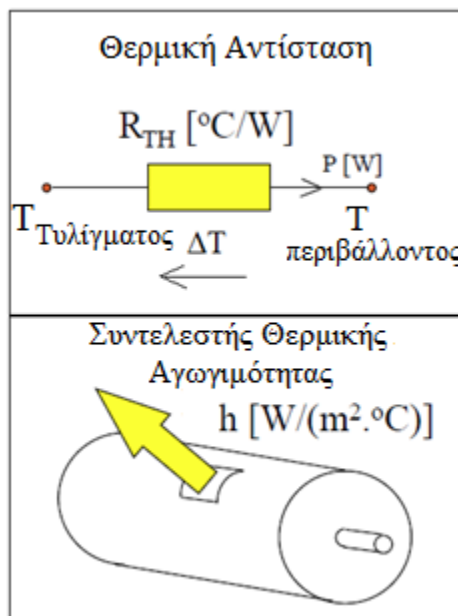
$$C = \rho \cdot c_p \cdot V \left(\frac{J}{K} \right) \quad 3.4$$

Όπου ρ η πυκνότητα του υλικού, c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού και V ο όγκος του κομματιού του κινητήρα του οποίου υπολογίζουμε την θερμοχωρητικότητα.

Ο νόμος του Ohm για την μεταφορά θερμότητας αναφέρει ότι σε ένα θερμικό δίκτυο η ροή θερμότητας δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{\Delta T}{R}$$

Όπου P η ισχύς μετρημένη σε W , ΔT η διαφορά θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου και R η θερμική αντίσταση σε $\frac{C}{W}$. Παρακάτω φαίνεται το θερμικό ισοδύναμο του νόμου του Ohm:



Σχήμα 3.3 Θερμικό ισοδύναμο του νόμου του Ohm

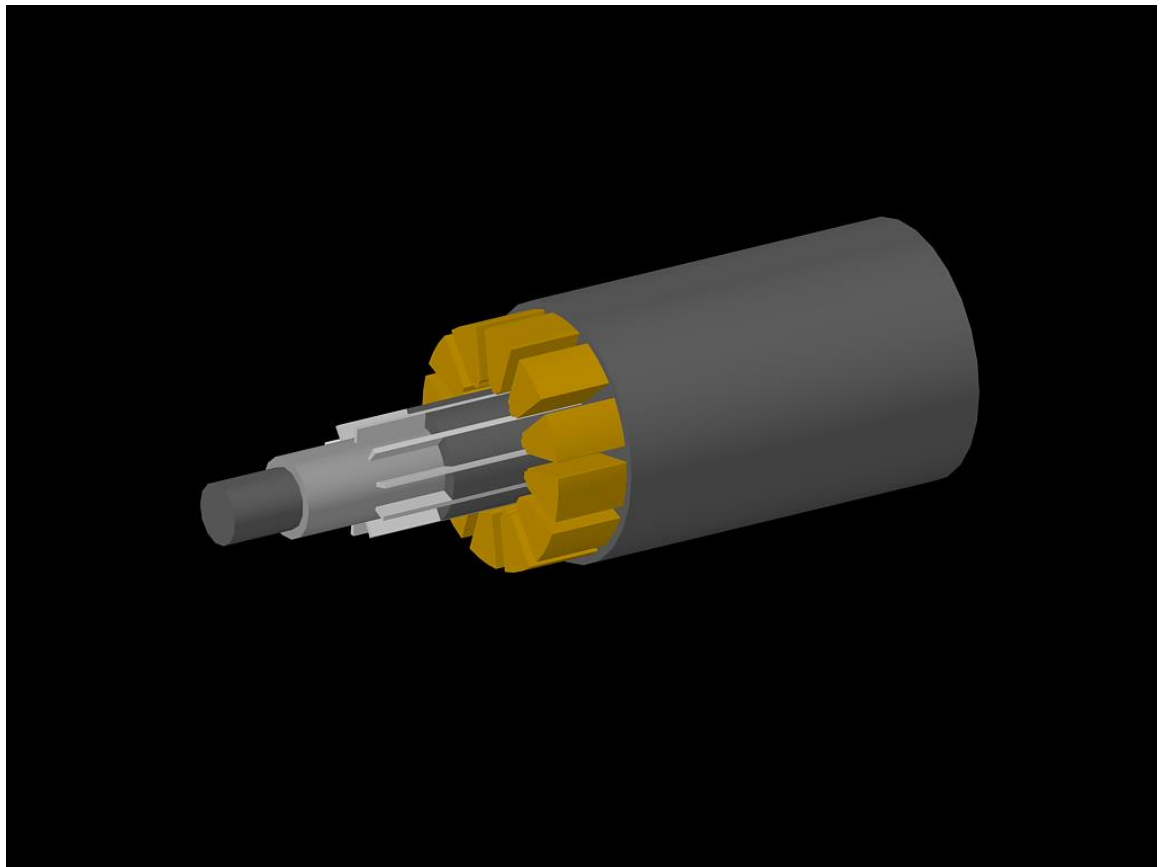
Σε περίπτωση που έχουμε άνοδο στην θερμοκρασία του ρευστού τότε τα παραπάνω μεγέθη υπολογίζονται από τον τύπο:

$$\Delta T = \frac{\text{διαχεόμενη ισχύς}}{\text{ρυθμός ροής όγκου} \cdot \text{πυκνότητα} \cdot C_p}$$

Όπου C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα.

3.3 Χαρακτηριστικά ηλεκτρικού κινητήρα

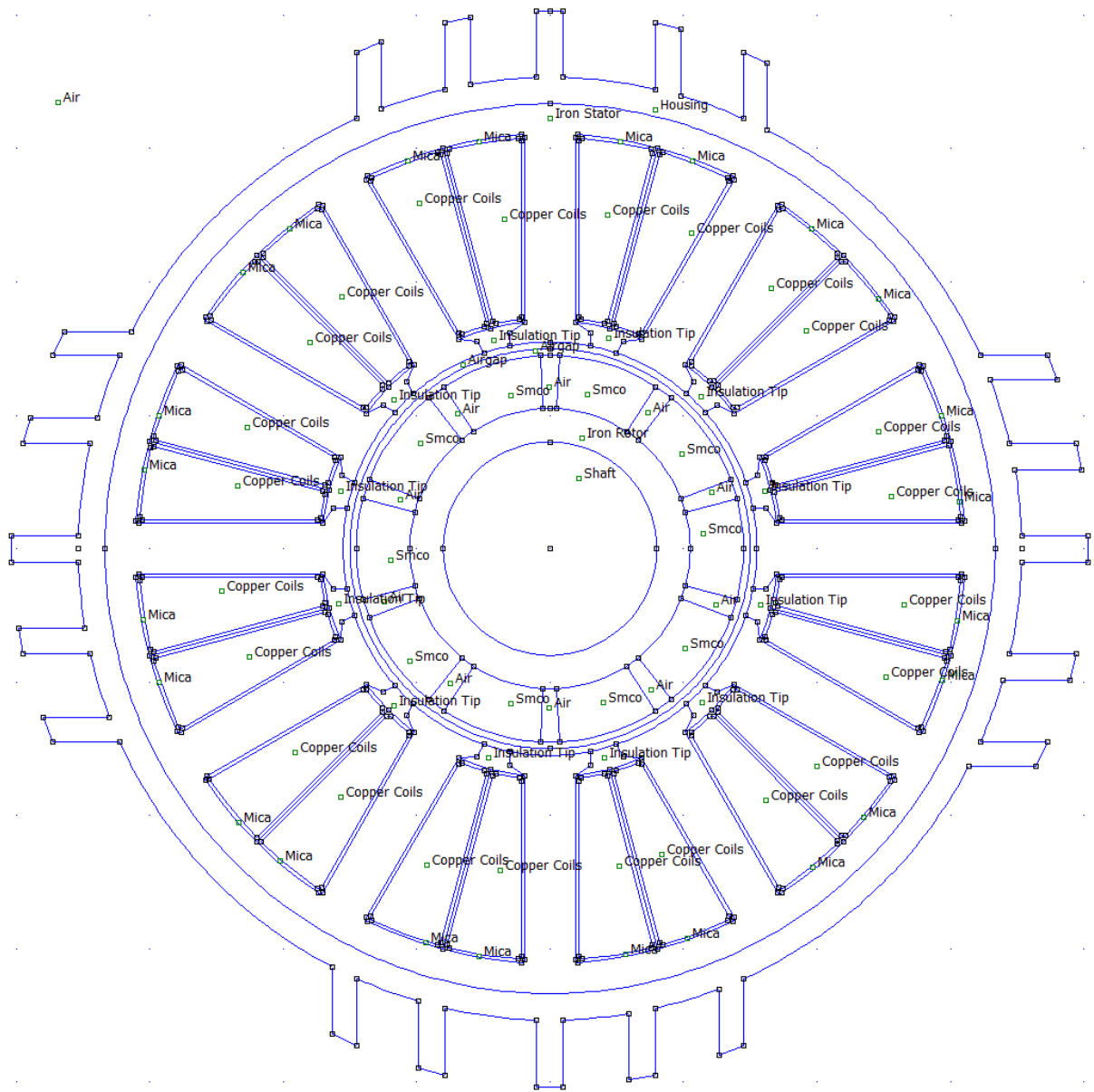
Για τον σχεδιασμό του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων είναι απαραίτητη, όπως προαναφέραμε, η γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κινητήρα που αναλύουμε. Το σχέδιο του κινητήρα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



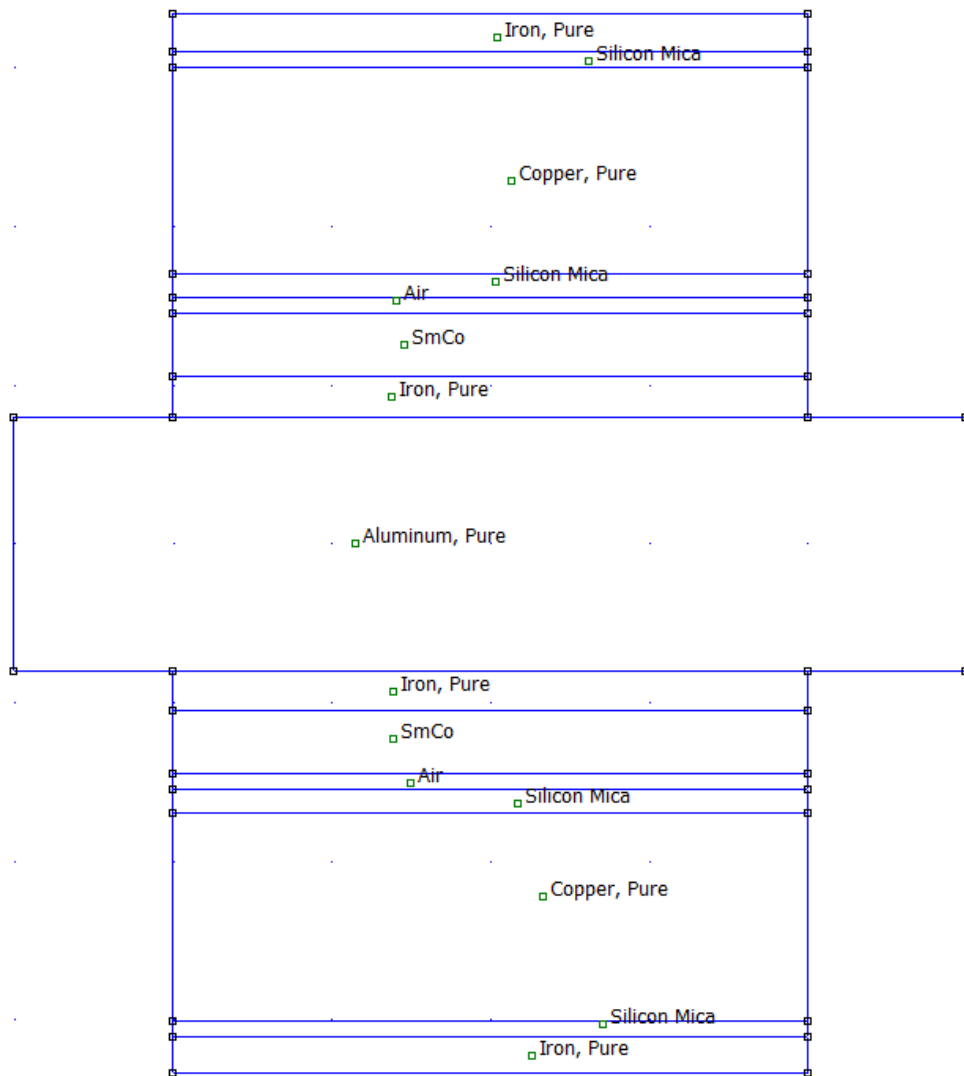
Σχήμα 3.4: Μοντέλο κινητήρα προς ανάλυση σχεδιασμένο σε περιβάλλον AutoCAD

Το σχήμα έχει δημιουργηθεί σε λογισμικό περιβάλλοντος AutoCAD Αναφορά [3].

Στη συνέχεια παραθέτουμε τον κινητήρα με τομές κάθετα και παράλληλα στον άξονα. Τα σχέδια αυτά έχουν δημιουργηθεί από το πρόγραμμα FEMM.

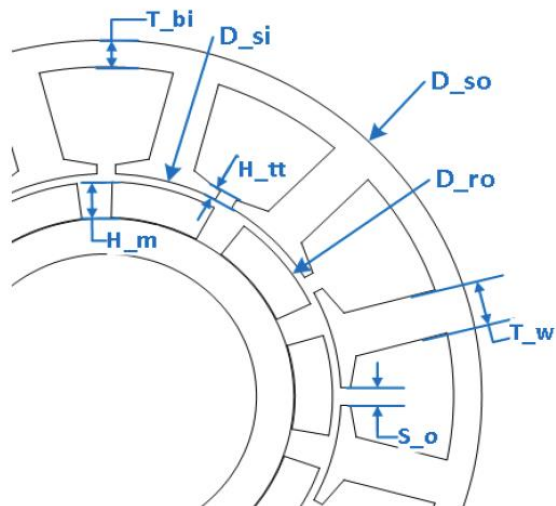


Σχήμα 3.5: Γεωμετρία κινητήρα με τομή κάθετη στον άξονα του



Σχήμα 3.6: Γεωμετρία κινητήρα με τομή παράλληλη στον άξονα του

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα που αναλύουμε καθώς και ένα με την ανάλυση του κάθε μεγέθους για την πλήρη κατανόηση του πίνακα:



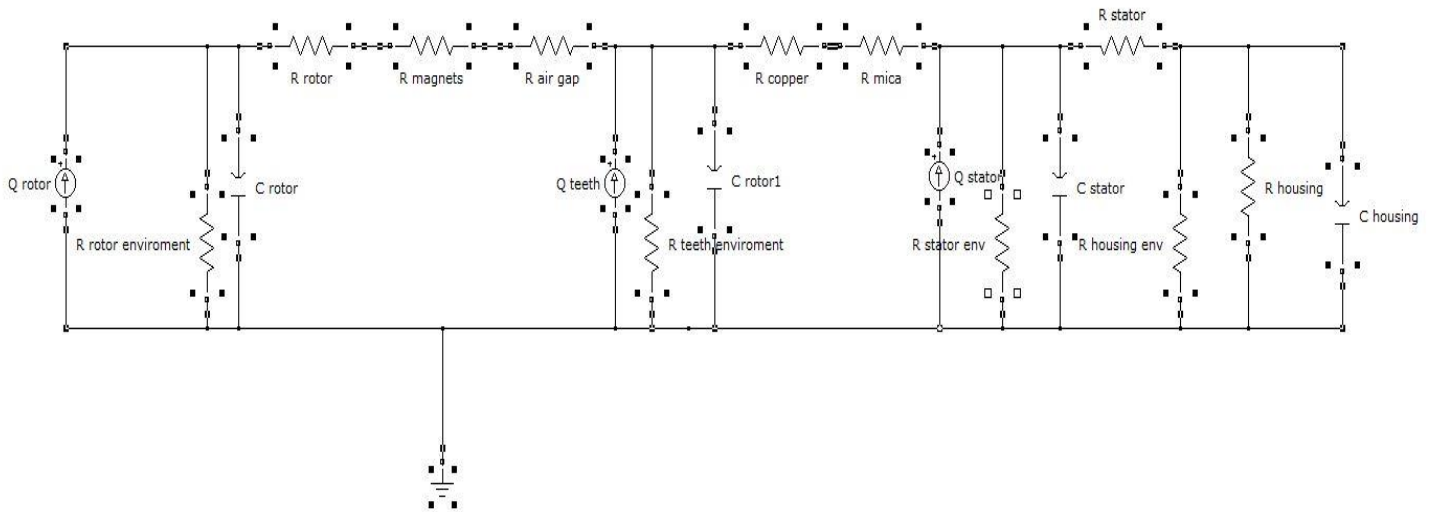
Σχήμα 3.7: Υπόμνημα για γεωμετρικά χαρακτηριστικά κινητήρα

Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά κινητήρα		
Αριθμός αυλάκων	N	12
Αριθμός πόλων	p	10
Fill factor	ff	0.45
Διάμετρος διακένου	D_{ag} (mm)	32.15
Πάχος διακένου	H_{ag} (mm)	0.85
Εσωτερική διάμετρος στάτη	D_{si} (mm)	33
Εξωτερική διάμετρος στάτη	D_{so} (mm)	66.7
Εξωτερική διάμετρος δρομέα	D_{ro} (mm)	31.3
Πάχος μαγνητών	H_m (mm)	4
Πλάτος δοντιού	T_w (mm)	3.4
Πάχος σιδήρου μετά το τύλιγμα	T_{bi} (mm)	2.4
Αριθμός ελίξεων σε κάθε φάση	N_{ph}	42
Ενεργό μήκος	L (mm)	102
Τόξο μαγνητών	M_a	0.84
Άνοιγμα αυλάκων	S_o (mm)	3
Πάχος άκρης δοντιού	H_{tt} (mm)	1

3.4 Κύκλωμα του κινητήρα μονίμων μαγνητών

Στο κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων που θα σχεδιάσουμε όπως φάνηκε στα υποκεφάλαια 3.2 και 3.3 πηγές τάσεις θα αντιστοιχούν σε θερμοκρασίες, τα ρεύματα σε πηγές θερμότητας, οι αντιστάσεις σε θερμικές αντιστάσεις και οι πυκνωτές στην θερμοχωρητικότητα του κάθε υλικού.

Το προτεινόμενο κύκλωμα που θα χρησιμοποιήσουμε στη συγκεκριμένη εργασία φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 3.8: Κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων κινητήρα

Στο παραπάνω κύκλωμα οι πηγές θερμότητας είναι:

- Οι απώλειες του δρομέα, που είναι οι μισές από τις μηχανικές απώλειες
- Οι απώλειες πυρήνα του στάτη, οι οποίες αποτελούνται από τις απώλειες σιδήρου και τις υπόλοιπες μηχανικές απώλειες
- Οι απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του στάτη

Στο παραπάνω ηλεκτρικό κύκλωμα η πηγή ρεύματος:

- I_1 περιγράφει τις απώλειες δρομέα
- I_2 περιγράφει τις απώλειες των δοντιών στο στάτη
- I_3 περιγράφει τις απώλειες πυρήνα στάτη

Η τάση:

- V_{rotor} αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του δρομέα
- V_{teeth} αντιστοιχεί στην θερμοκρασία των δοντιών του στάτη
- V_{core} αντιστοιχεί στην θερμοκρασία πυρήνα του στάτη

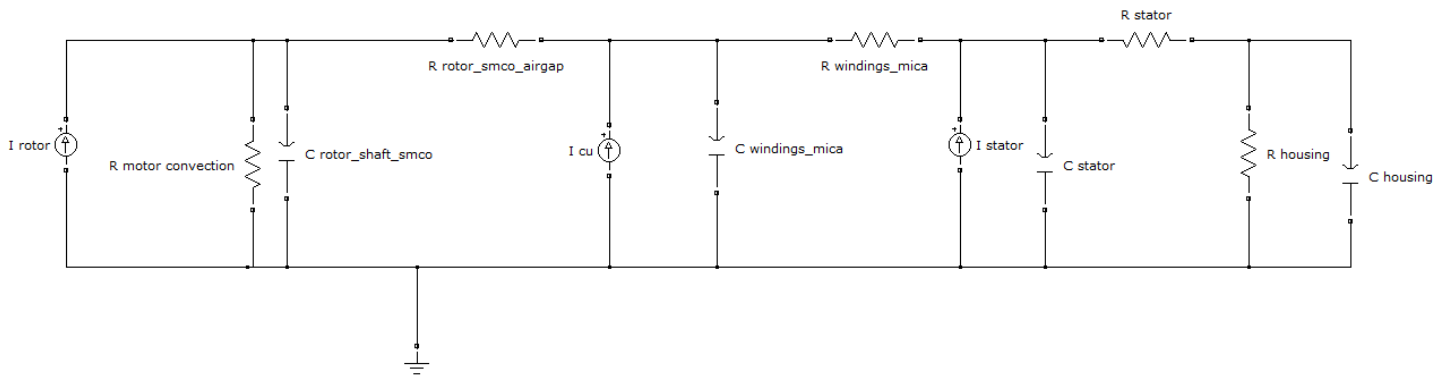
Η γείωση αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Οι θερμικές αντιστάσεις που συνδέονται σε σειρά με τις πηγές θερμότητας αντιπροσωπεύουν την δυσκολία που παρουσιάζουν τα διάφορα τμήματα της μηχανής στη μετάδοση της θερμότητας μέσω του μηχανισμού αγωγής. Είναι αναγκαίο η αντιστάσεις να βρίσκονται στο κύκλωμα σύμφωνα με τη γεωμετρία της μηχανής καθώς η ροή θερμότητας πρέπει να ρέει από τον στάτη προς περιβάλλον. Οι αντιστάσεις που είναι παράλληλες με τις πηγές θερμότητας αντιστοιχούν στις θερμικές αντιστάσεις των μερών της μηχανής στην περίπτωση μετάδοσης μέσω συναγωγής. Οι τιμές που έχουν οι θερμικές αντιστάσεις και οι αγωγιμότητες του κυκλώματος θα καθορίσουν τις θερμοκρασιακές τιμές της μόνιμης κατάστασης της μηχανής.

Οι πυκνωτές συνδέονται παράλληλα στις θερμικές πηγές και αντιπροσωπεύουν όπως είπαμε την θερμοχωρητικότητα κάθε υλικού της μηχανής. Το φορτίο που έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει ο κάθε πυκνωτής αντιπροσωπεύει την θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται σε κάθε μέρος της μηχανής. Οι τιμές των χωρητικότητων θα επηρεάσουν την μεταβατική κατάσταση, δηλαδή την ταχύτητα και το χρόνο που χρειάζεται οι θερμοκρασίες στα διάφορα μέρη του κινητήρα για να φτάσουν στην τελική τιμή τους.

Το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα είναι η θερμороή που ρέει στα διάφορα μέρη της μηχανής. Η θερμότητα δεν διαδίδεται σε όλα τα μέρη αλλά μέσω του αέρα διοχετεύεται στο περιβάλλον.

Το παραπάνω κύκλωμα είναι λίγο περίπλοκο και οι υπολογισμοί δύσκολοι, για το λόγο αυτό θα προβούμε σε κάποιες παραδοχές που θα διευκολύνουν στην εξαγωγή ενός πιο απλού ισοδύναμου θερμικού κυκλώματος. Οι αντιστάσεις συναγωγής μπορεί να αντικατασταθούν από μία συνολική αντίσταση συναγωγής για ολόκληρη τη μηχανή. Αυτή η απλοποίηση βασίζεται στη θεώρηση ότι ο κινητήρας είναι ένα και μόνο σώμα το οποίο περιβάλλεται από αέρα και έχουμε μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής. Οι θερμικές αντιστάσεις των μετάλλων μπορούν να αγνοηθούν ή να ενσωματωθούν με τις γειτονικές τους αντιστάσεις. Επομένως το νέο κύκλωμα φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 3.9: Απλοποιημένο κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων

Όπου με τις απλοποιήσεις έχω:

$R_{motor\ convection}$: η θερμική αντίσταση συναγωγής του κινητήρα

$R_{rotor_smco_airgap}$: η θερμική αντίσταση του δρομέα, των μονίμων μαγνητών και του διακένου

R_{teeth_mica} : η θερμική αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη και τις μόνωσης τους

R_{stator} : η θερμική αντίσταση του στάτη

$R_{housing}$: η θερμική αντίσταση του κελύφους της μηχανής

C_{rotor} : η θερμοχωρητικότητα του δρομέα

C_{teeth} : η θερμοχωρητικότητα των δοντιών του στάτη

C_{stator} : η θερμοχωρητικότητα του στάτη

$C_{housing}$: η θερμοχωρητικότητα του κελύφους

I_{rotor} : οι απώλειες δρομέα

I_{cu} : οι απώλειες χαλκού

I_{stator} : οι απώλειες στάτη

3.5 Υπολογισμός τιμών των στοιχείων

3.5.1 Θερμικές αντιστάσεις

Η θερμική αντίσταση του πυρήνα του στάτη θα υπολογιστεί από τον τύπο:

$$R_{stator} = \frac{x}{\lambda \cdot S}$$

Όπου x είναι το πάχος του πυρήνα του στάτη, δηλαδή η απόσταση μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής επιφάνειάς του. λ είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του στάτη και S είναι του εμβαδόν του πυρήνα του στάτη και υπολογίζεται από τον τύπο

$$S = 2\pi \cdot r_{stator} \cdot L$$

Όπου r_{stator} είναι η ακτίνα του στάτη ως την εξωτερική επιφάνειά του και L είναι το μήκος του στάτη.

Επομένως θα έχω για:

$$r_{stator} = 30.95 \text{ mm}$$

$$L = 102 \text{ mm}$$

$$x = 15.45 \text{ mm}$$

$$\lambda = 19 \frac{W}{m \cdot K}$$

Άρα $S = 0.019835388 \text{ m}^2$ και η θερμική αντίσταση

$$R_{stator} = 0.040995311 \Omega$$

- Η θερμική αντίσταση των δοντιών του στάτη θα υπολογιστεί με τη χρήση της ίδιας σχέσης με την αντίσταση του πυρήνα του στάτη. Θεωρούμε ότι τα δόντια του στάτη σχηματίζουν μια κυλινδρική επιφάνεια επομένως το εμβαδόν θα είναι

$$S = 2\pi \cdot r_{teeth} \cdot L$$

και για

$$r_{teeth} = 15.5 \text{ mm}$$

$$L = 102 \text{ mm}$$

$$x = 15.2 \text{ mm}$$

$$\lambda = 19 \frac{W}{m \cdot K}$$

Άρα

$$S = 0.009933716 \text{ m}^2$$

$$R_{teeth} = 0.080533811 \Omega$$

- Η θερμική αντίσταση για της μόνωσης του στάτη, θα χρησιμοποιήσουμε τον ίδιο τύπο με παραπάνω. Επομένως θα έχουμε :

$$r_{mica} = 15.45 \text{ mm}$$

$$L = 102 \text{ mm}$$

$$x = 0.25 \text{ mm}$$

$$\lambda = 0.71 \frac{W}{m \cdot K}$$

Άρα

$$S = 0.009901672 \text{ m}^2$$

$$R_{mica} = 0.035560932 \Omega$$

Για να υπολογίσουμε τις θερμικές αντιστάσεις στα διάφορα μέρη του δρομέα θα ακολουθήσουμε ακριβώς την ίδια διαδικασία με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω.

- Για τον άξονα αν r_{shaft} είναι η ακτίνα ως το τέλος του αλουμινένιου άξονα, δηλαδή η απόσταση από το κέντρο μέχρι την επιφάνεια σιδήρου του δρομέα, L το μήκος του δρομέα τότε το εμβαδόν της επιφάνειας θα είναι:

$$S = 2\pi \cdot r_{shaft} \cdot L$$

Και αφού ο άξονας μας είναι συμπαγής το πάχος του θα είναι το ίδιο με την ακτίνα του. Επομένως θα έχουμε:

$$r_{shaft} = 8 \text{ mm}$$

$$L = 102 \text{ mm}$$

$$x = 8 \text{ mm}$$

$$\lambda = 235 \frac{W}{m \cdot K}$$

Άρα

$$S = 0.005127079 \text{ m}^2$$

$$R_{shaft} = 0.006639756 \Omega$$

- Για το σώμα του δρομέα θα έχω r_{rotor} την ακτίνα μέχρι το εξωτερικό του δρομέα και L το μήκος του δρομέα. Οπότε το εμβαδόν θα είναι:

$$S = 2\pi \cdot r_{rotor} \cdot L$$

Το πάχος του ασάλινου δρομέα θα είναι η απόστασης μεταξύ άξονα και μαγνητών. Επομένως θα έχουμε:

$$r_{rotor} = 10.5 \text{ mm}$$

$$L = 102 \text{ mm}$$

$$x = 2.5 \text{ mm}$$

$$\lambda = 19 \frac{W}{m \cdot K}$$

Άρα

$$S = 0.006729291 \text{ m}^2$$

$$R_{rotor} = 0.019553165 \Omega$$

- Για τους μαγνήτες θα έχω r_{smco} την ακτίνα μέχρι το εξωτερικό των μαγνητών και L το μήκος του δρομέα. Οπότε το εμβαδόν θα είναι:

$$S = 2\pi \cdot r_{rotor} \cdot L$$

Το πάχος του μαγνήτη θα είναι η απόσταση μεταξύ δρομέα και του διακένου.

Επομένως θα έχουμε:

$$r_{smco} = 14.5 \text{ mm}$$

$$L = 102 \text{ mm}$$

$$x = 4 \text{ mm}$$

$$\lambda = 8.407375422 \frac{W}{m \cdot K}$$

Ο συντελεστής αγωγιμότητας είναι συνδυασμός των μαγνητών και του αέρα που υπάρχει μεταξύ τους.

Άρα

$$S = 0.009292831 \text{ m}^2$$

$$R_{smco} = 0.051197825 \Omega$$

- Για το διάκενο θα έχω r_{airgap} την ακτίνα μέχρι το εξωτερικό του διακένου, δηλαδή μέχρι το στάτη και L το μήκος του διακένου. Οπότε το εμβαδόν θα είναι:

$$S = 2\pi \cdot r_{airgap} \cdot L$$

Το πάχος του διακένου θα είναι η απόσταση μεταξύ δρομέα και του στάτη.

Επομένως θα έχουμε:

$$r_{airgap} = 15.5 \text{ mm}$$

$$L = 102 \text{ mm}$$

$$x = 1 \text{ mm}$$

$$\lambda = 0.026 \frac{W}{m \cdot K}$$

Άρα

$$S = 0.009933716 \text{ m}^2$$

$$R_{airgap} = 1.471817815 \Omega$$

Παρατηρούμε ότι η τιμή της θερμικής αντίστασης του διακένου είναι αρκετά υψηλή σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η τιμή αυτή είναι μια προσέγγιση της πραγματικής και δεν μπορούμε σε καμία περίπτωση να την θεωρήσουμε αξιόπιστη. Για να υπολογιστεί η θερμική αντίσταση του διακένου χρειάζονται αναλυτικοί υπολογισμοί, αφού επηρεάζεται από παράγοντες, όπως η πίεση και η ταχύτητα του αέρα, από την επιφάνεια του δρομέα και του στάτη, από την ταχύτητα που στρέφεται ο δρομέας αλλά και από την ίδια την θερμοκρασία.

Τελικά οι συνολικές θερμικές αντιστάσεις του απλοποιημένου κυκλώματος θα είναι:

$$R_{rotor_smco_airgap} = R_{rotor} + R_{smco} + R_{airgap} = 1.542568804 \Omega$$

$$R_{teeth_mica} = R_{teeth} + R_{mica} = 0.116094743 \Omega$$

Θα υπολογίσουμε μέσω της σχέσης $R = \frac{1}{S \cdot h}$ την αντίσταση συναγωγής για όλα τα τμήματα του κινητήρα που βρίσκονται στο εσωτερικό του κελύφους και έρχονται σε άμεση επαφή με τον αέρα. Η αντίσταση αυτή υπολογίζεται προσεγγιστικά από την ψύξη των πλαϊνών επιφανειών του κινητήρα και την της επιφάνειας του άξονα που δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα εκατέρωθεν του δρομέα.

Αν $r_{housing}$ η εξωτερική ακτίνα του κελύφους, δηλαδή ολόκληρης της μηχανής και $L_{housing}$ το μήκος του κελύφους που έρχεται σε επαφή με τον αέρα θα έχω:

- Παράπλευρο εμβαδό κινητήρα χωρίς τον άξονα:

$$S_{sides} = 2\pi \cdot (r_{stator}^2 - r_{shaft}^2) = 0.005616555 \text{ m}^2$$

- Το συνολικό εμβαδό του άξονα που έρχεται σε επαφή με τον αέρα:

$$S_{free_shaft} = 2\pi \cdot r_{shaft}^2 + 2 \cdot (2\pi \cdot r_{shaft} \cdot L) = 0.010656282 \text{ m}^2$$

- Το συνολικό εσωτερικό εμβαδόν του κελύφους που βρίσκεται σε επαφή με τον αέρα:

$$S_{housing} = 2(2\pi \cdot r_{housing} \cdot L_{free}) = 0.006885429 \text{ m}^2$$

Επομένως η συνολική επιφάνεια του κελύφους η οποία έρχεται σε επαφή με τον αέρα και συμβάλλει στην μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής είναι:

$$S = S_{sides} + S_{free_shaft} + S_{housing} = 0.023158266 \text{ m}^2$$

Αν θεωρήσουμε την τιμή του συντελεστή συναγωγής ίση με $h = 10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ θα υπολογίσουμε την θερμική αντίσταση συναγωγής από τον τύπο:

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot S} = 7.044381222 \Omega$$

Θα πρέπει ακόμη να υπολογίσουμε την αντίσταση συναγωγής του κελύφους με το εξωτερικό περιβάλλον η οποία θα είναι προκύπτει πάλι με τον τύπο 3.24234. Οπότε για $r_{housing}$, $L_{housing}$ ίδια με πριν και συντελεστή συναγωγής ίσο με $h = 22 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ προκύπτει ότι:

$$S = 2\pi \cdot r_{housing} \cdot L_{housing} = 0.051583439 m^2$$

$$R_{housing} = \frac{1}{h \cdot S} = 0.881184864 \Omega$$

3.52 Θερμοχωρητικότητες

Οι τιμές των θερμοχωρητικότητων του απλοποιημένου κυκλώματος θα υπολογιστούν από τον τύπο:

$$C_i = \rho \cdot c_p \cdot V \left[\frac{J}{K} \right]$$

Όπου $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ η πυκνότητα του υλικού, $c_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού και $V [m^3]$ ο όγκος του μέρους της μηχανής που υπολογίζουμε την θερμοχωρητικότητα. Οι όγκοι των κομματιών του κινητήρα που ήταν δύσκολο να υπολογιστούν λόγω γεωμετρίας με μαθηματικούς τύπους έχουν υπολογιστεί από το AutoCAD αναφορά [3]. Επομένως θα έχουμε για τις ζητούμενες θερμοχωρητικότητες των υλικών που ενδιαφερόμαστε:

Για τον δρομέα της μηχανής, αν $r_{rotor} = 10.5 mm$ η εξωτερική ακτίνα του δρομέα, $8 mm$ η εσωτερική ακτίνα και $L = 102 mm$ το μήκος του θα έχουμε για τον όγκο:

$$V_{rotor} = \pi \cdot (r_{rotor}^2 - 8^2) \cdot L = 0.00001482 m^3$$

Και για

$$c_p = 450 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\rho = 7874 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Θα

έχουμε

$$C_{rotor} = 52.51334776 \frac{J}{K}$$

Για τον άξονα θα έχουμε:

$$V_{shaft} = \pi \cdot (r_{shaft}^2) \cdot L = 0.000020508 m^3$$

και για

$$c_p = 897 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\rho = 2700 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$C_{shaft} = 49.66909256 \frac{J}{K}$$

Για τους μαγνήτες θα έχουμε όγκο:

$$V_{smco} = 0.000026917 m^3$$

Και για

$$c_p = 370 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\rho = 8200 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Θα

έχουμε

$$C_{smco} = 81.66674839 \frac{J}{K}$$

Για τα τυλίγματα θα έχουμε:

$$V_{windings} = 0.000129304 m^3$$

Και για

$$c_p = 390 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\rho = 8940 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Θα

έχουμε

$$C_{windings} = 450.830802 \frac{J}{K}$$

Για την μόνωση θα έχουμε:

$$V_{mica} = 0.000021999 \text{ m}^3$$

Και για

$$c_p = 500 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\rho = 2883 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Θα

έχουμε

$$C_{mica} = 450.830802 \frac{J}{K}$$

Για τον στάτη θα έχω:

$$V_{stator} = 0.000122694 \text{ m}^3$$

$$C_{stator} = 434.7406553 \frac{J}{K}$$

Για το κέλυφος θα έχω:

$$V_{housing} = 0.000099731 \text{ m}^3$$

Και για

$$c_p = 897 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\rho = 2700 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$C_{housing} = 241.5393162 \frac{J}{K}$$

Στο απλοποιημένο επομένως έχουμε 4 χωρητικότητες η οποίες θα είναι οι:

$$C_{rotor-shaft-smco} = C_{rotor} + C_{shaft} + C_{smco} = 183.8554913 \frac{J}{K}$$

$$C_{windings-mica} = 482.5322851 \frac{J}{K}$$

$$C_{stator} = 434.7406553 \frac{J}{K}$$

$$C_{housing} = 241.5393162 \frac{J}{K}$$

3.5.3 Υπολογισμός πηγών ρευμάτων κυκλώματος

Στην πρώτη προσομοίωση για να επιλέξουμε τιμές για τις πηγές ρεύματος θα χρησιμοποιήσουμε τα χαρακτηριστικά του κινητήρα για την κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα στις 750 ΣΑΛ. Σε αυτή την περίπτωση έχω πυκνότητα ρεύματος στα πηνία $J = 8A/mm^2$ και απώλειες σιδήρου και χαλκού:

$$P_{fe} = 1.23 W$$

$$P_{cu} = 121.1 W$$

Επομένως οι πηγές ρεύματος του κυκλώματος θα έχουν αντιστοιχία ένα προς ένα $A - W$. Άρα οι πηγές μας θα είναι:

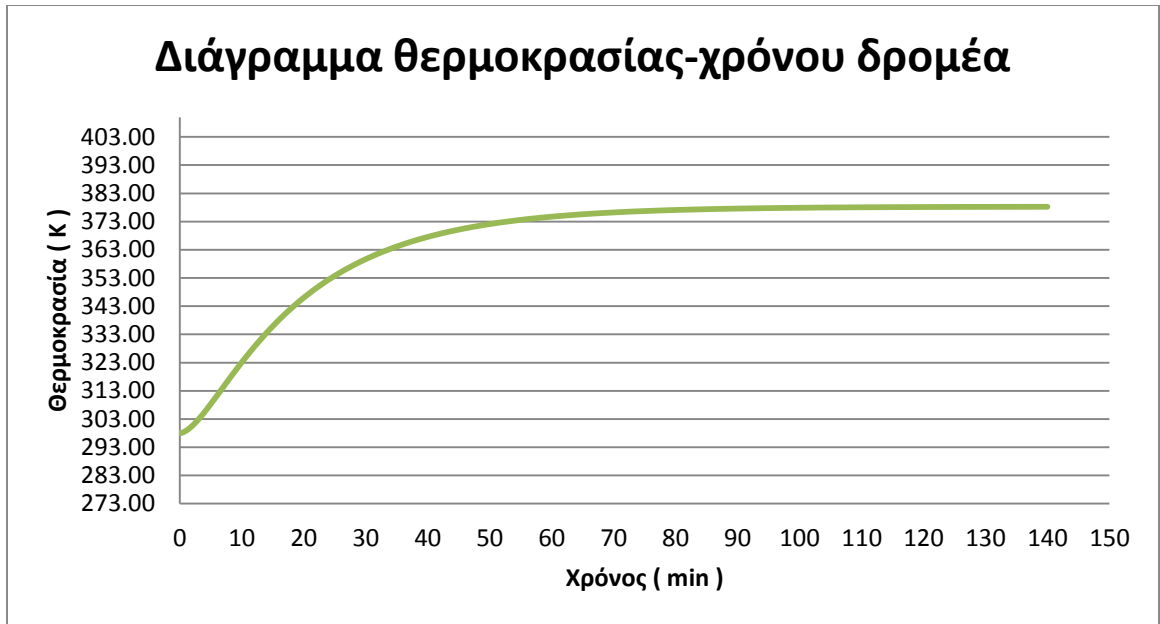
$$I_{rotor} = 0.1 \cdot 1.23 = 0.123 A$$

$$I_{cu} = 121.1 A$$

$$I_{stator} = 0.9 \cdot 1.23 = 1.107 A$$

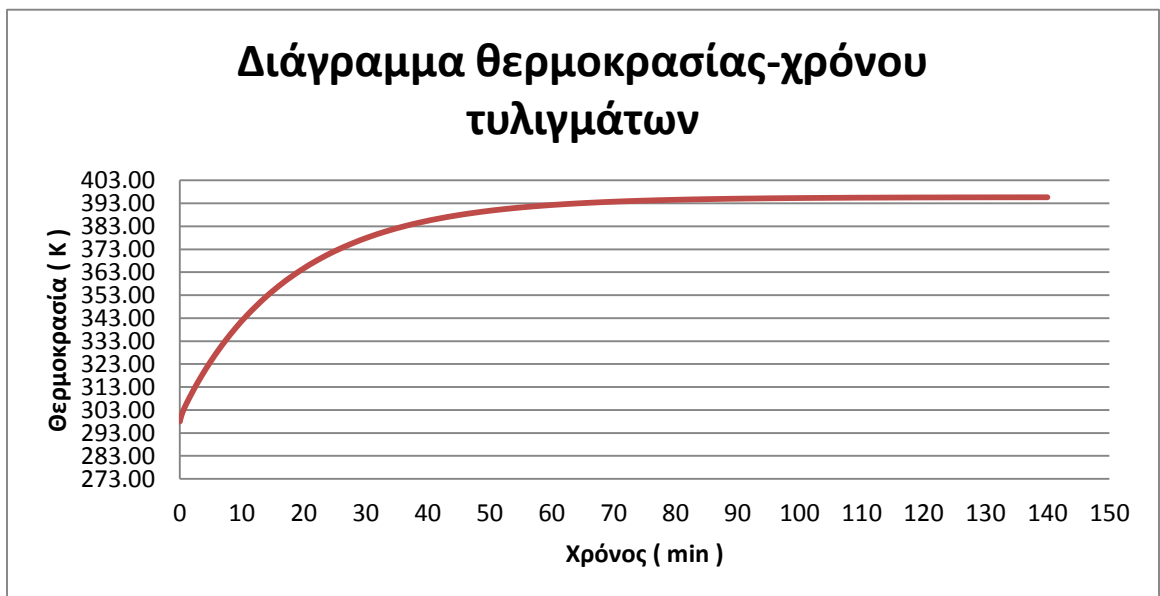
3.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων:



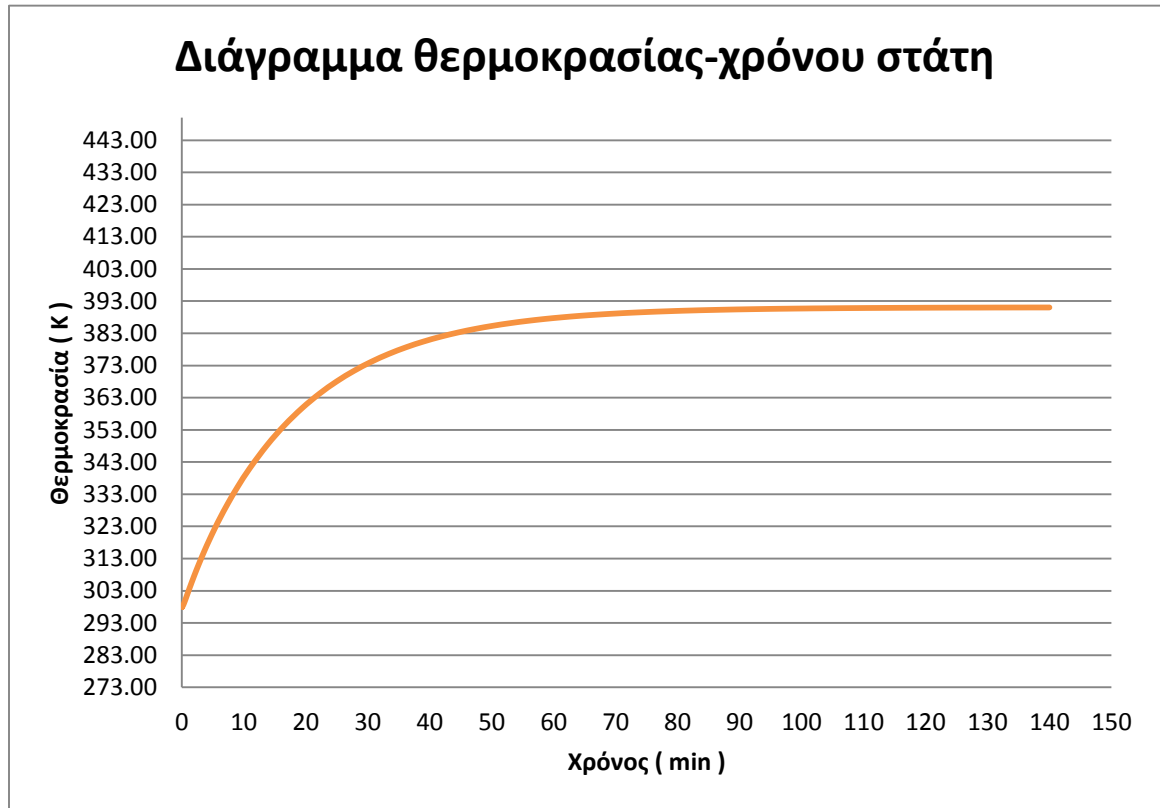
Σχήμα 3.10: Θερμοκρασιακή κατανομή δρομέα

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται για χρόνο προσομοίωσης 140 λεπτών η θερμοκρασιακή κατανομή του δρομέα. Η τελική τιμή της θερμοκρασίας είναι $T_{rotor} = 378.24 \text{ }^\circ\text{K}$, ενώ η σταθερά χρόνου θέρμανσης της είναι $\tau_{63\%} = 21 \text{ min}$, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται ο δρομέας για να φτάσει στο 63% της τελικής θερμοκρασίας του.



Σχήμα 3.11 Θερμοκρασιακή κατανομή τυλιγμάτων στάτη

Στο παραπάνω διάγραμμα έχουμε την κατανομή της θερμοκρασίας για τα τυλίγματα του στάτη. Η τελική τιμή της θερμοκρασίας είναι η $T_{windings} = 395.64^{\circ}K$ και η σταθερά χρόνου $\tau_{63\%} = 17.9 \text{ min}$.



Σχήμα 3.12: Θερμοκρασιακή κατανομή στάτη

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή θερμοκρασία για τον στάτη και πως εξελίσσεται αυτή για 140 λεπτά. Η θερμοκρασία του στάτη παίρνει τελική τιμή στην θερμοκρασία $T_{stator} = 391.04^{\circ}K$ και η σταθερά χρόνου του είναι $\tau_{63\%} = 18.3 \text{ min}$.

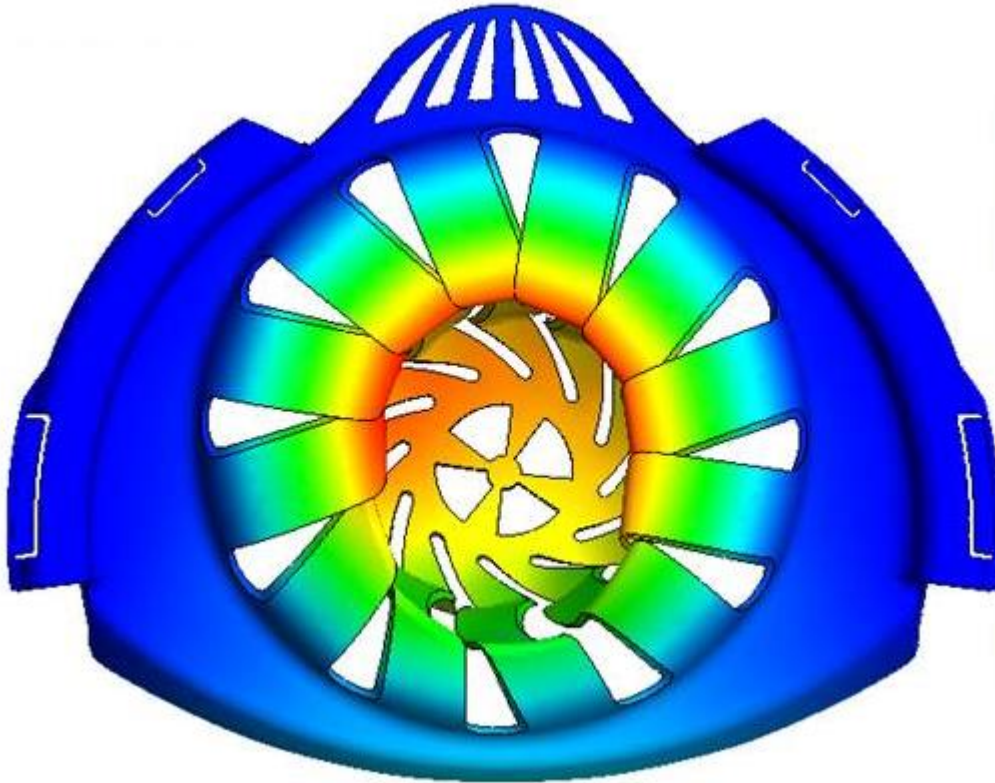
3.7 Συμπεράσματα προσομοίωσης

Μελετώντας τα διαγράμματα που μας έδωσε η προσομοίωση συμπαιρένεται πως το απλοποιημένο κύκλωμα που χρησιμοποιήσαμε παρουσιάζει ορθά αποτελέσματα. Η θερμοκρασία παίρνει τελικές τιμές μετά από 80 λεπτά περίπου, όπως αναμενόταν. Οι τελικές τιμές της θερμοκρασίας κάθε μέρους της μηχανής είναι αξιόπιστες και αποδεκτές.

Οι θερμοκρασίες στην μόνιμη κατάσταση του στάτη και των τυλιγμάτων δεν διαφέρουν πολύ σε αντίθεση με την αυτήν μεταξύ δρομέα και χαλκού. Αυτό είναι λογικό καθώς οι απώλειες χαλκού είναι περίπου 10 φορές παραπάνω από αυτές των μηχανικών απωλειών και η θερμοκρασία που θα έχουν τα τυλίγματα θα είναι πολύ υψηλότερη από κάθε άλλο μέρος του κινητήρα.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων στο 5^ο κεφάλαιο της διπλωματικής. Στο επόμενο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η θερμική ανάλυση κινητήρα με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων.

Κεφάλαιο 4



Θερμική ανάλυση με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων

Η θερμική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο με την μέθοδο των συγκεντρωμένων παραμέτρων προσέγγισε την θερμοκρασιακή συμπεριφορά του κινητήρα μονίμων μαγνητών δίνοντας αποτελέσματα τόσο για την μεταβατική κατάσταση όσο και για την μόνιμη.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί θερμική ανάλυση του κινητήρα σε δύο διαστάσεις με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων μας δίνει αποτελέσματα μόνο για την μόνιμη κατάσταση των θερμοκρασιών που επικρατούν στα διάφορα μέρη του κινητήρα. Τα αποτελέσματα όμως αυτά είναι πιο ακριβή από την μέθοδο συγκεντρωμένων παραμέτρων και επίσης μπορεί να μας δώσει μια εικόνα για το θερμοκρασιακό πεδίο και την πυκνότητα της θερμοροής που επικρατεί στον κινητήρα.

4.1 Μετάδοση θερμότητας στο εσωτερικό της μηχανής

Σε μια ηλεκτρική μηχανή οι κύριες πηγές θερμότητας είναι απώλειες χαλκού και σιδήρου. Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται μέσω των μηχανισμών της αγωγής και της συναγωγής (με τη βοήθεια του αέρα) στα διάφορα μέρη της μηχανής. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει

μια παρουσίαση των μηχανισμών αυτών, των τύπων που τους χαρακτηρίζουν αλλά και των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιούνται από την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την αξιολόγηση προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα.

4.2 Μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού της αγωγής

Η μετάδοση της θερμότητας μέσω αγωγής παρατηρείται στο εσωτερικό ενός στερεού σώματος μεταξύ δύο περιοχών με διαφορετική θερμοκρασία. Στο 2^ο κεφάλαιο είχε γίνει αναλυτική παρουσίαση στο συγκεκριμένο μηχανισμό. Συνοπτικά θα αναφερθούν ξανά οι τύποι που διέπουν το φαινόμενο της αγωγής.

Ο γενικός τύπος για την αγωγή σε τρισδιάστατο πρόβλημα είναι από αρχή διατήρησης της ενέργειας:

$$\nabla(\lambda \nabla T) + q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad 4.1$$

Όπου $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ η πυκνότητα και $c_p \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού.

Αν θεωρήσουμε το υλικό μέσο ομογενές και επομένως τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ανεξάρτητο από τη θέση στο χώρο τότε η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί στην:

$$\begin{aligned} \lambda \cdot \nabla^2 T + q &= \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \Leftrightarrow \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} &= \frac{\rho}{\lambda} \cdot \frac{c_p}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad 4.2$$

Αν θεωρήσουμε ότι η θερμική ανάλυση πραγματοποιείται μόνο για την μόνιμη κατάσταση τότε η παράγωγος της θερμοκρασίας θα είναι ίση με το μηδέν $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ και επομένως ο τύπος 4.2 θα έχει την μορφή της εξίσωσης Poisson:

$$\nabla^2 T + \frac{q}{\lambda} = 0 \quad 4.3$$

Σε περίπτωση που θεωρήσουμε ότι στο εσωτερικό του στερεού δεν έχουμε πηγές θερμότητας τότε η σχέση 4.2 παίρνει την μορφή της εξίσωσης Fourier:

$$\nabla^2 T = \frac{\rho \cdot c_p}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad 4.4$$

Σε περίπτωση που έχουμε μόνιμη κατάσταση και δεν υπάρχουν πηγές θερμότητας στο εσωτερικό του στερεού υλικού θα πάρουμε από την σχέση 4.2 την εξίσωση Laplace:

$$\nabla^2 T = 0 \quad 4.5$$

4.2 Μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής

Η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής παρουσιάζεται μεταξύ ρευστών όπως αναφέραμε και στο δεύτερο κεφάλαιο. Ο μηχανισμός αυτός περιγράφεται από τον μαθηματικό τύπο του Newton για την ψύξη των σωμάτων:

$$q = h \cdot (T_{solid} - T_{fluid}) \quad 4.6$$

Όπου $q \left[\frac{W}{m^2} \right]$ πυκνότητα της θερμοροής, $h \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ ο συντελεστής, T_{solid} η θερμοκρασία του σώματος και T_{fluid} η θερμοκρασία του ρευστού που έρχεται σε επαφή.

Αν θεωρήσουμε ότι η μετάδοση της θερμότητας γίνεται μόνο σε μία διάσταση, κάθετη στην επιφάνεια του ρευστού τότε θα έχω τον τύπο:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = h \cdot (T_{solid} - T_{fluid}) \quad 4.7$$

Όπου λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της επιφάνειας αυτής.

4.3 Οριακές συνθήκες θερμικού προβλήματος

Για να πραγματοποιηθεί μια θερμική ανάλυση είναι απαραίτητη η χρήση οριακών συνθηκών στις επιφάνειες επαφής των διαφόρων υλικών. Οι οριακές συνθήκες είναι ζωτικής σημασίας για να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα. Για μονοδιάστατο πρόβλημα και επιφάνεια επαφής που βρίσκεται στη θέση $x = 0$ θα έχω τις παρακάτω οριακές συνθήκες:

- Συνθήκη σταθερής θερμοκρασίας ή Dirichlet:

$$T(0, t) = T_{solid}$$
- Συνθήκη σταθερής πυκνότητας θερμοροής ή Neumann:

$$\left[-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} = q$$
- Συνθήκη συναγωγής στην επιφάνεια:

$$\left[-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right]_{x=0} = h \cdot [T(0, t) - T_{fluid}]$$

- Εκπομπή ακτινοβολίας προς το περιβάλλον:

$$\left[-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right]_{x=0} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot [T(0, t)^4 - T_{environment}^4]$$

Όπου σ η σταθερά Stephan-Boltzman και ε ο συντελεστής ακτινοβολίας.

4.4. Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων

Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιήσουμε για την θερμική ανάλυση του κινητήρα μονίμων μαγνητών στη συγκεκριμένη διπλωματική χρησιμοποιεί τις παραπάνω μαθηματικές σχέσεις και οριακές συνθήκες.

Στο πρόγραμμα που χρησιμοποιείται θα σχεδιαστεί η μηχανή σε δύο διαστάσεις με δύο τρόπους, ενώ η τρίτη διάσταση θα υπάρχει σαν πεπερασμένη τιμή. Ο ένας είναι ο αξονοσυμμετρικός τρόπος και ο άλλος είναι με μια τομή κάθετη στον άξονα. Οι δύο αυτές γεωμετρίες θα δέχονται ως παραμέτρους εισόδου:

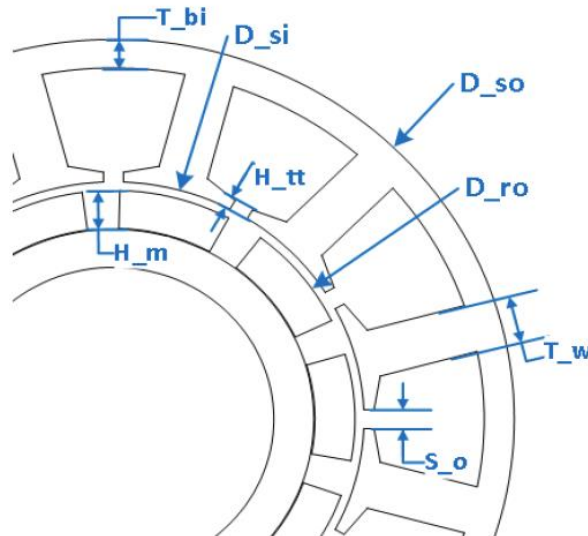
- Τα υλικά από τα οποία είναι φτιαγμένος ο κινητήρας, καθώς και τις ιδιότητές τους
- Οι πηγές θερμότητας που υπάρχουν στο εσωτερικό του κινητήρα, δηλαδή οι απώλειες που θα έχει κάθε μέρος του κινητήρα.
- Οι οριακές συνθήκες
- Γνωστές θερμοκρασίες αν υπάρχουν για κάποιο μέρος του κινητήρα ή του περιβάλλοντος
- Οι συντελεστές συναγωγής που καθορίζουν την μετάδοση θερμότητας μεταξύ στερεών και ρευστών

Στη συνέχεια μόλις έχει σχεδιαστεί η γεωμετρία του κινητήρα και έχουν καθοριστεί πλήρως οι παραπάνω συντελεστές το πρόγραμμα θα αναλύσει το σχέδιο της μηχανής σε χιλιάδες μικρά πεπερασμένα στοιχεία. Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο εφαρμόζονται οι σχέσεις αγωγής και συναγωγής και μέσω της μεθόδου Newton-Raphson επιτυγχάνεται ή σύγκλιση για τις τελικές τιμές της θερμοκρασίας κάθε σημείου του κινητήρα. Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η πλήρης γνώση του θερμοκρασιακού πεδίου, της πυκνότητας θερμοροής και της θερμοκρασίας σε κάθε μέρος του κινητήρα.

Το μόνο μειονέκτημα της μεθόδου είναι δεν παράγει αποτελέσματα για την μεταβατική κατάσταση της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα.

4.5 Σχεδίαση κινητήρα

Η σχεδίαση κινητήρα στο πρόγραμμα θα γίνει με δύο γεωμετρίες. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα μονίμων μαγνητών που θα αναλυθεί:

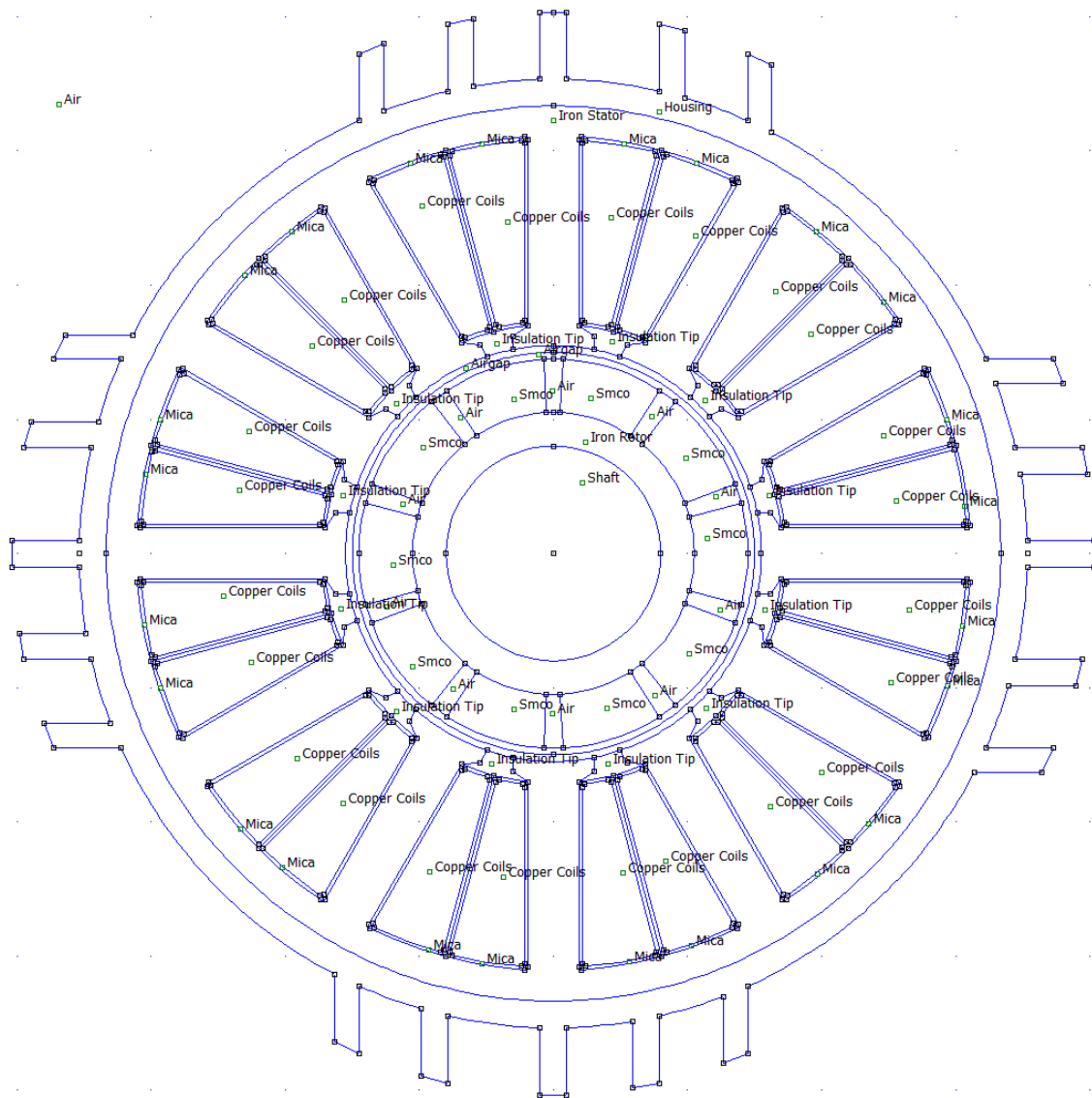


Υπόμνημα για γεωμετρικά χαρακτηριστικά κινητήρα

Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά κινητήρα		
Αριθμός αυλάκων	N	12
Αριθμός πόλων	p	10
Fill factor	ff	0.45
Διάμετρος διακένου	D_{ag} (mm)	32.15
Πάχος διακένου	H_{ag} (mm)	0.85
Εσωτερική διάμετρος στάτη	D_{si} (mm)	33
Εξωτερική διάμετρος στάτη	D_{so} (mm)	66.7
Εξωτερική διάμετρος δρομέα	D_{ro} (mm)	31.3
Πάχος μαγνητών	H_m (mm)	4
Πλάτος δοντιού	T_w (mm)	3.4
Πάχος σιδήρου μετά το τύλιγμα	T_{bi} (mm)	2.4
Αριθμός ελίξεων σε κάθε φάση	N_{ph}	42
Ενεργό μήκος	L (mm)	102
Τόξο μαγνητών	M_a	0.84
Άνοιγμα αυλάκων	S_o (mm)	3
Πάχος άκρης δοντιού	H_{tt} (mm)	1

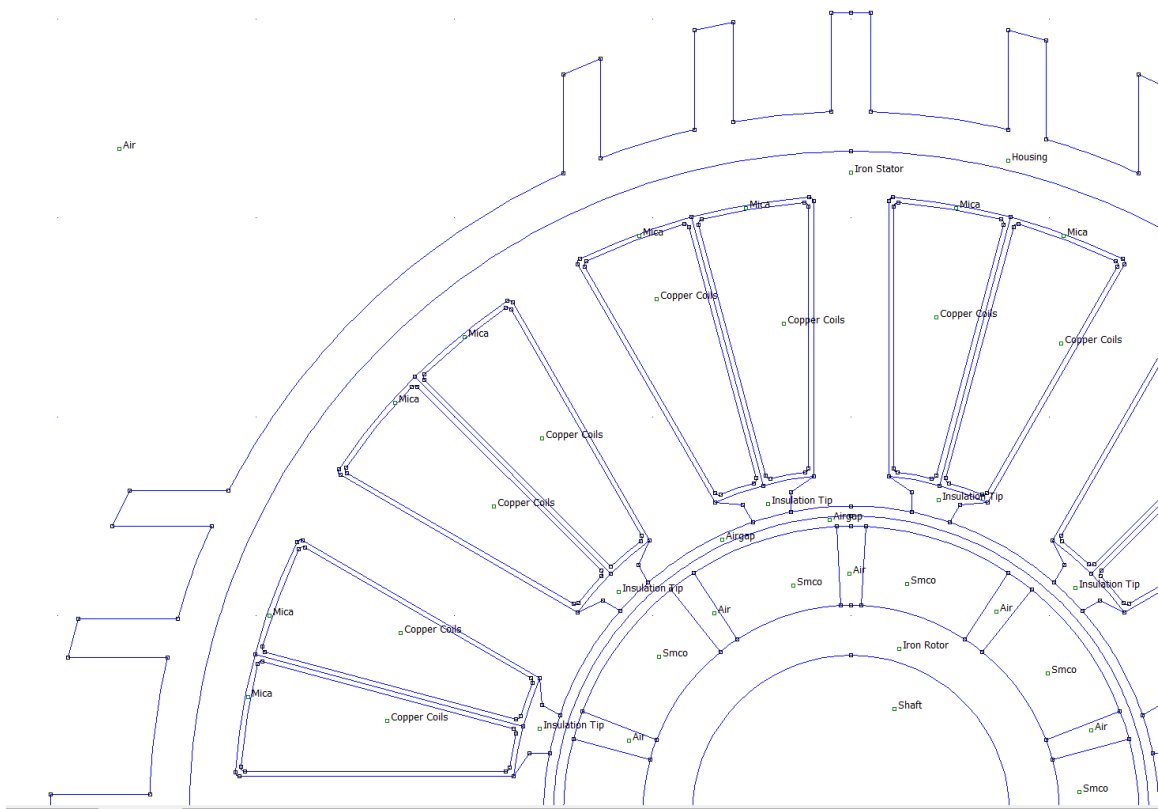
4.5.1 Κάθετη τομή στον άξονα (planar)

Το σχέδιο της κάθετης τομής στον άξονα του κινητήρα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



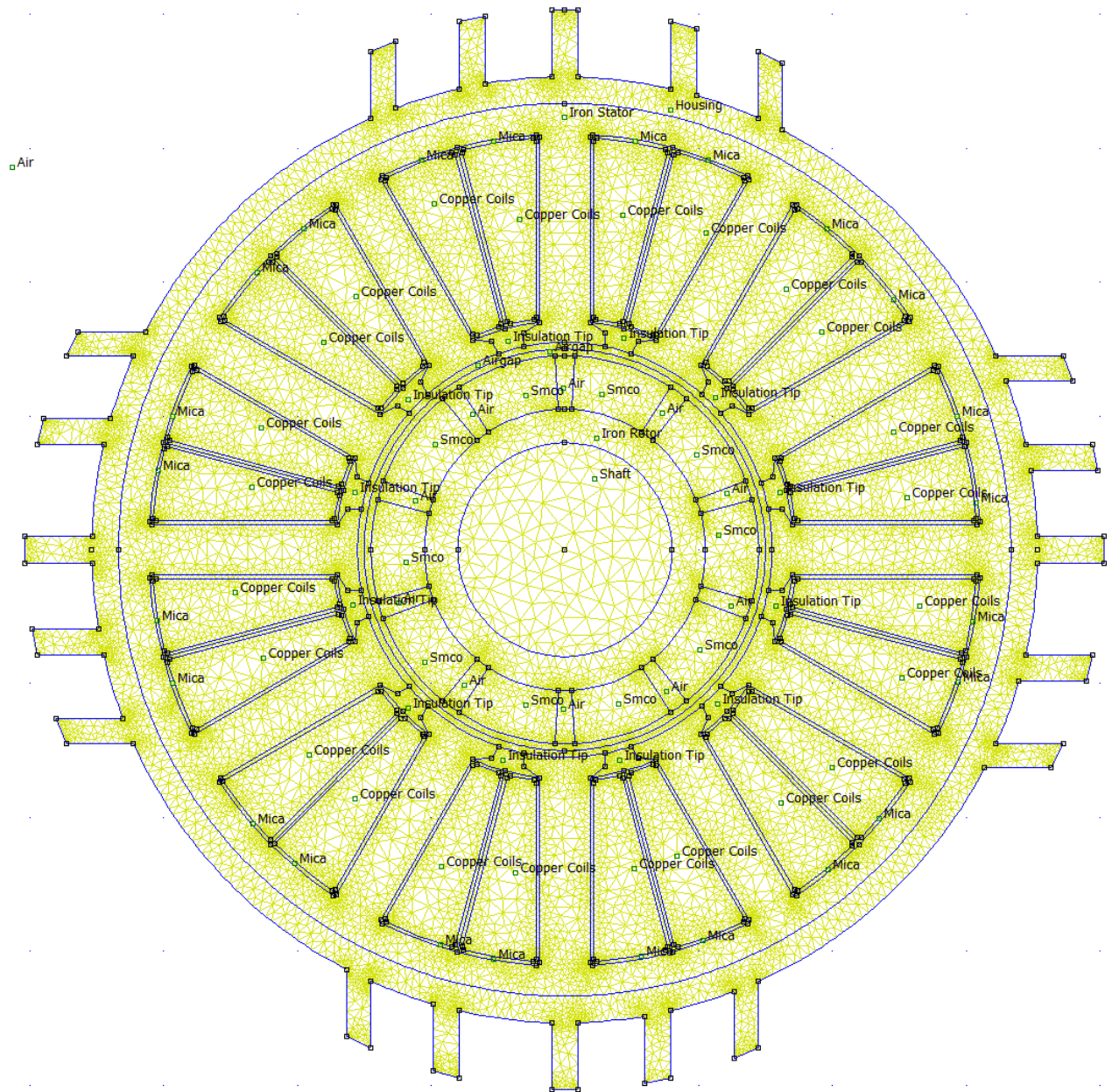
Σχήμα 5.1: Κάθετη τομή στον άξονα του κινητήρα

Παρακάτω υπάρχει μια πιο λεπτομερής απεικόνιση της κάθετης τομής του κινητήρα όπου φαίνεται το διάκενο, οι αύλακες των τυλιγμάτων και οι μαγνήτες:

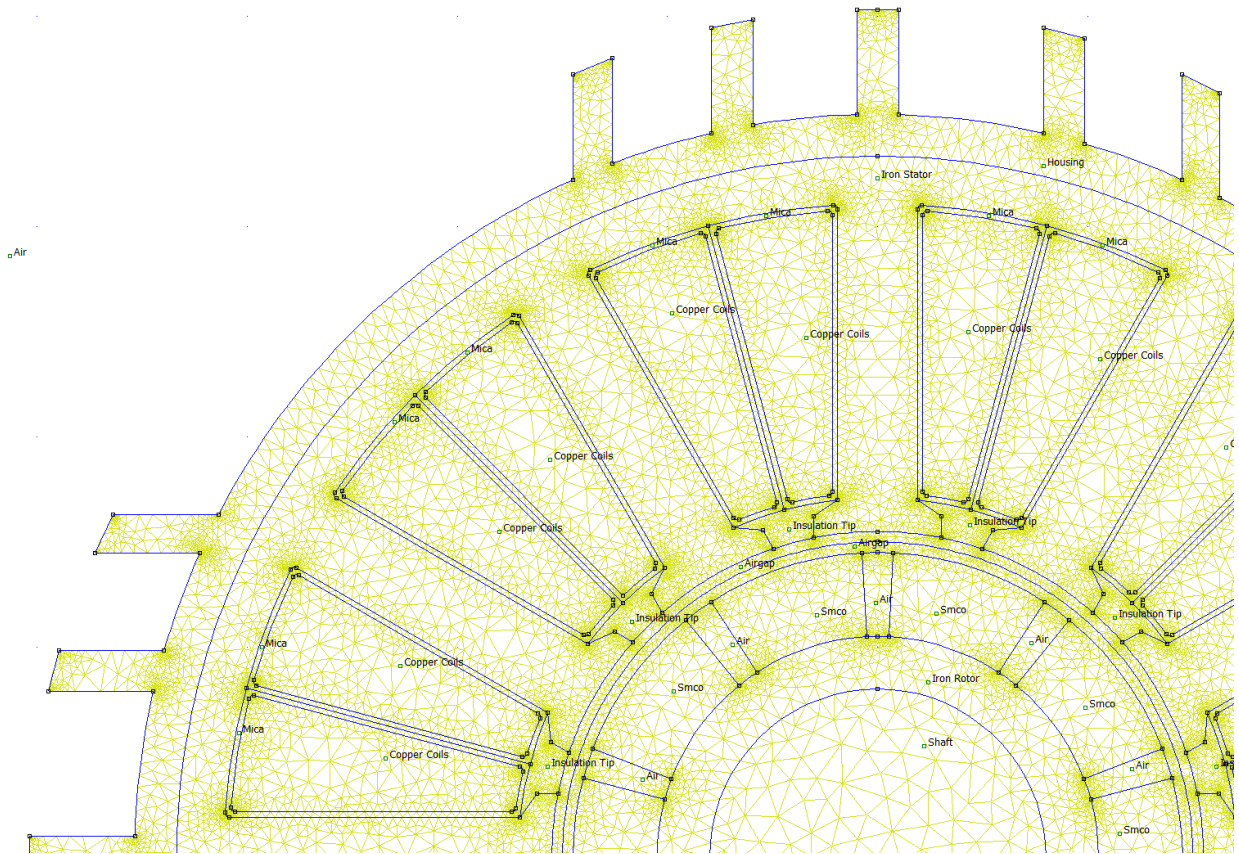


Σχήμα 5.2: Λεπτομέρεια στην κάθετη τομή 1

Εφόσον έχουμε καθορίσει πλήρως τα υλικά του κινητήρα, τις οριακές συνθήκες και τις πηγές θερμότητας που υπάρχουν στο εσωτερικό του κινητήρα το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων θα αναλύσει το σχέδιο και δημιουργήσει το πλέγμα του κινητήρα. Το πλέγμα φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 5.3: Πλέγμα κάθετης τομής

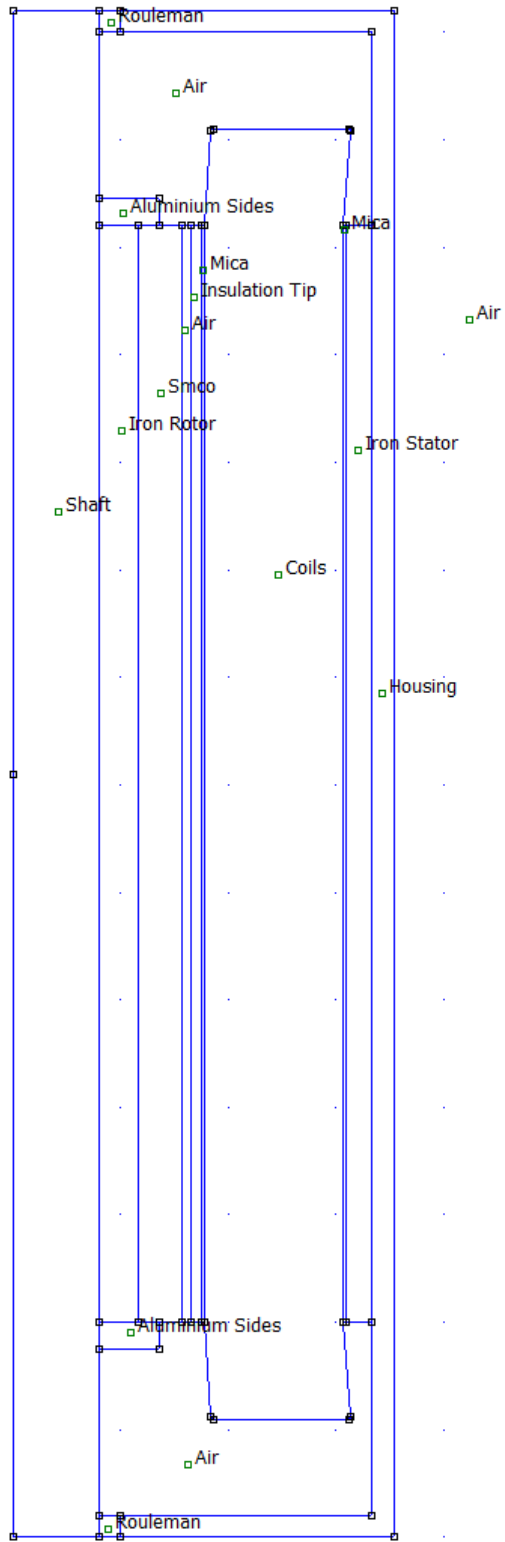


Σχήμα 5.4: Λεπτομέρεια πλέγματος κάθετης τομής

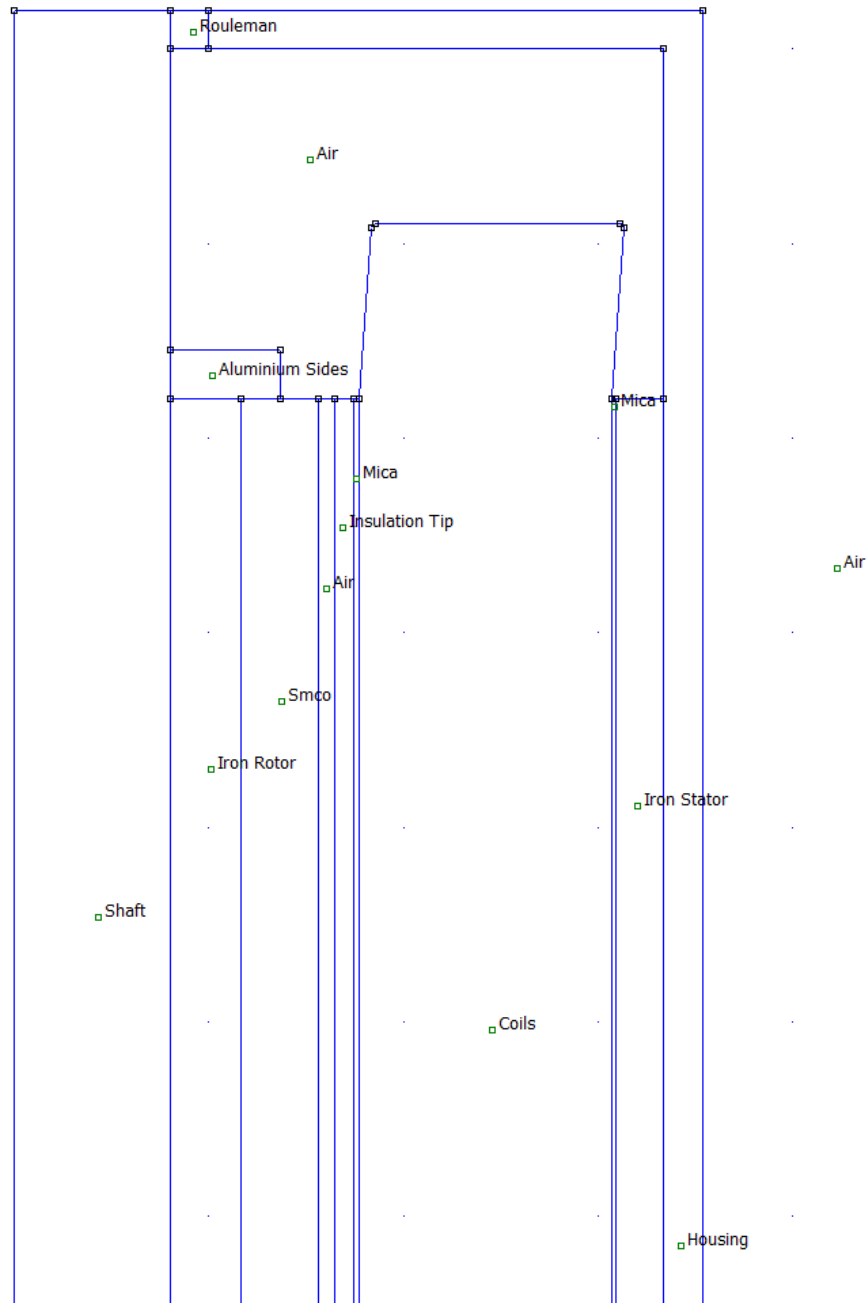
Το σχέδιο του κινητήρα αναλύθηκε σε 53462 κόμβους και σε 105247 τριγωνικές περιοχές (πεπερασμένα στοιχεία) στις οποίες εφαρμόζονται οι μαθηματικές σχέσεις αγωγής και συναγωγής για να προσδιοριστεί το θερμοκρασιακό πεδίο του κινητήρα. Απαραίτητος περιορισμός για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση από τον κώδικα είναι να υπάρχουν τουλάχιστον δύο πεπερασμένα στοιχεία σε κάθε κρίσιμη περιοχή του σχεδίου.

4.5.2 Αξονοσυμμετρική τομή

Παρακάτω φαίνεται το σχέδιο της αξονοσυμμετρικής τομής στη μηχανή, η οποία είναι μια τομή παράλληλη με τον άξονα και κόβει το κινητήρα στην μέση:

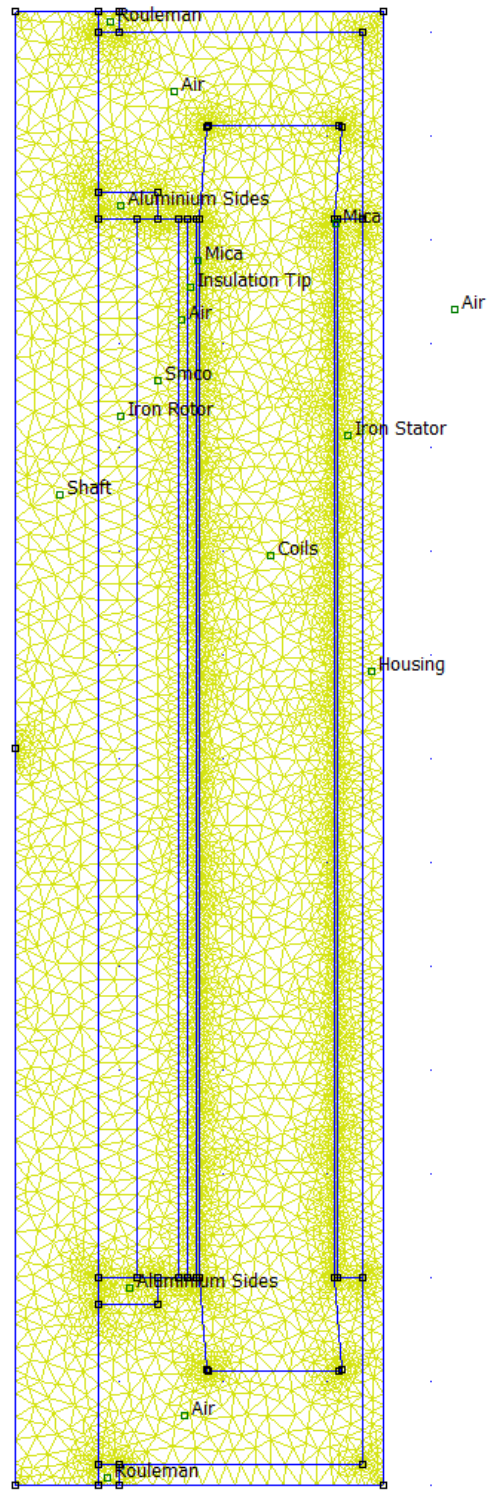


Σχήμα 5.5: Αξονοσυμμετρική τομή του κινητήρα

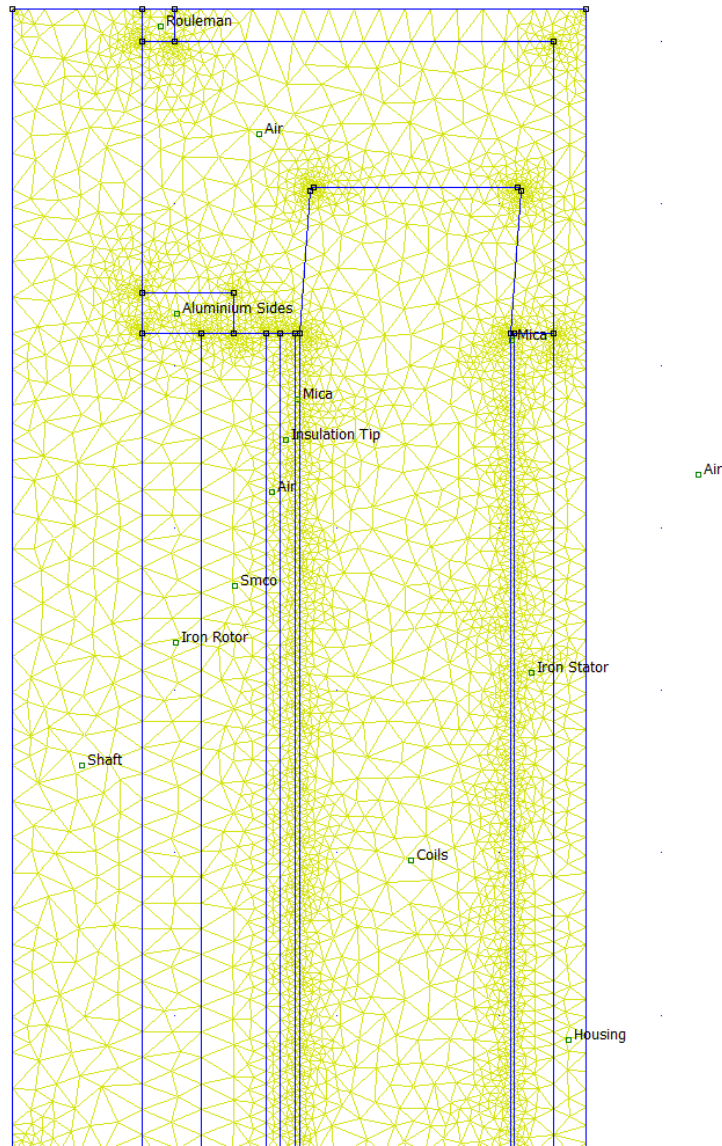


Σχήμα 5.6: Λεπτομέρεια αξονοσυμμετρικής τομής

Η αξονοσυμμετρική τομή αναλύεται από τον κώδικα σε 9463 κόβους και 18577 τριγωνικές περιοχές στις οποίες εφαρμόζονται οι σχέσεις αγωγής και συναγωγής. Το πλέγμα φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 5.7: Πλέγμα αξονοσυμμετρικής τομής



Σχήμα 5.8:Λεπτομέρεια πλέγματος αξονοσυμμετρικής τομής

4.5.3 Ορισμός οριακών συνθηκών προβλήματος

Η θερμική ανάλυση για να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα θέλει να έχει καλώς ορισμένες οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες που ορίστηκαν στην ανάλυση του συγκεκριμένου κινητήρα είναι:

- Επιφάνεια διακένου: για τον αέρα που υπάρχει στο διάκενο ανάμεσα στο στάτη και τους μαγνήτες θα ορίσουμε τον συντελεστή θερμικής συναγωγής h για ρευστό που δεν κινείται εξαναγκασμένα.

- Επιφάνεια επαφής στάτη αέρα και επιφάνειας εσωτερικού κελύφους θα ορίσουμε συντελεστή θερμικής συναγωγής h .
- Εξωτερική επιφάνεια κελύφους κινητήρα θα ορίσουμε συντελεστή θερμικής συναγωγής όπως τις προηγούμενες φορές για ελεύθερη ροή.

Γενικά ο συντελεστής θερμικής συναγωγής για ελεύθερη ροή αέρα κυμαίνεται μεταξύ 5 και $25 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, ενώ για εξαναγκασμένη μεταξύ 25-200.

Οι συντελεστές συναγωγής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα για τις δύο γεωμετρίες:

Διαλέγουμε ξεχωριστούς καθώς κάθε γεωμετρία έχει την ιδιοτροπία της.

4.5.4 Στοιχεία λειτουργίας κινητήρα

Με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων θα πραγματοποιηθούν θερμικές αναλύσεις για διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του κινητήρα, όπως ακριβώς και με την μέθοδο συγκεντρωμένων παραμέτρων. Μέσω διαγραμμάτων έχουν προκύψει για διάφορες στροφές του κινητήρα, τα αντίστοιχα ρεύματα τυλιγμάτων και οι αντίστοιχες απώλειες χαλκού, δινορρευμάτων και μηχανικές που επηρεάζουν την παραγωγή θερμότητας στο εσωτερικό του κινητήρα. Οι εξεταζόμενες λειτουργίες στη συγκεκριμένη διπλωματική είναι:

- Για 750 ΣΑΛ (στροφές ανά λεπτό) θα έχουμε:
Πυκνότητα ρεύματος:

$$J = 8 \frac{A}{mm^2}$$

Απώλειες:

$$P_{fe} = 1.23 W$$

$$P_{cu} = 121.1 W$$

Οι παραπάνω απώλειες σιδήρου θα χωριστούν στο στάτη και στο δρομέα με συντελεστές ανάλογα με τον όγκο τους.

$$P_{rotor} = 0.1 \cdot 1.23 = 0.123 W$$

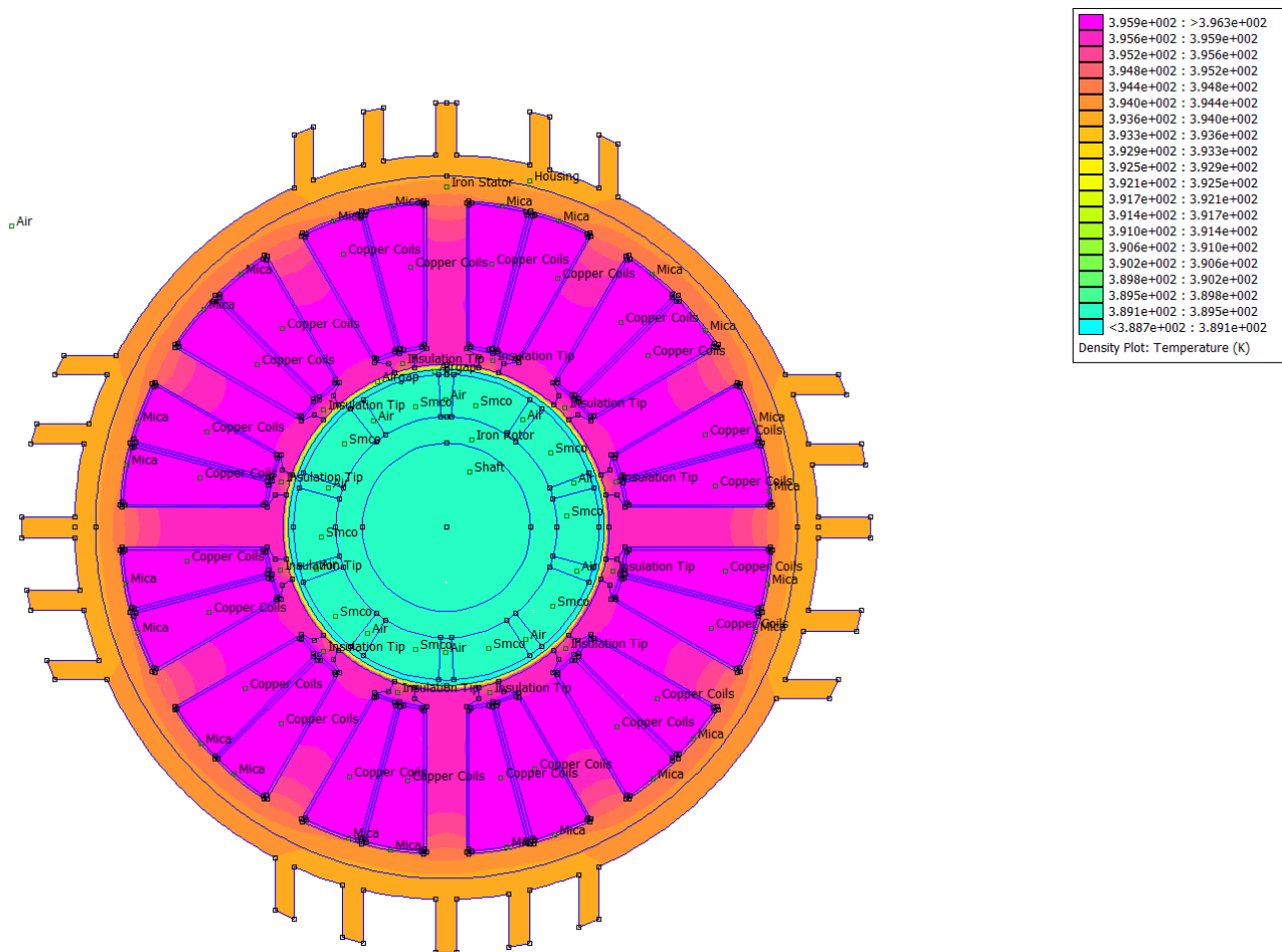
$$P_{cu} = 121.1 W$$

$$P_{stator} = 0.9 \cdot 1.23 = 1.107 W$$

4.6 Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία

Στο συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης που προκύπτει από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων και για τις δύο τομές του κινητήρα. Θα χρησιμοποιήσουμε όλα τα στοιχεία και τις οριακές συνθήκες που ορίστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου αυτού. Τα αποτελέσματα για την κάθετη τομή στον άξονα φαίνονται παρακάτω:

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το θερμικό πεδίο που προκύπτει από την προσομοίωση, καθώς και το υπόμνημα της θερμοκρασίας για κάθε χρώμα:



Σχήμα 5.9: Θερμοκρασιακό πεδίο κάθετης τομής

Στα επόμενα σχήματα φαίνεται βασικά θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά για σημαντικά μέρη του κινητήρα:

Στον δρομέα θα έχουμε:


```
FEMM Output
Point: x=-2.7, y=8.7
T = 389.314 K
|F| = 8.8167 W/m^2
Fx = -2.43328 W/m^2
Fy = 8.47428 W/m^2
|G| = 0.464037 K/m
Gx = -0.128067 K/m
Gy = 0.446015 K/m
Kx = 19 W/(m*K)
Ky = 19 W/(m*K)
```

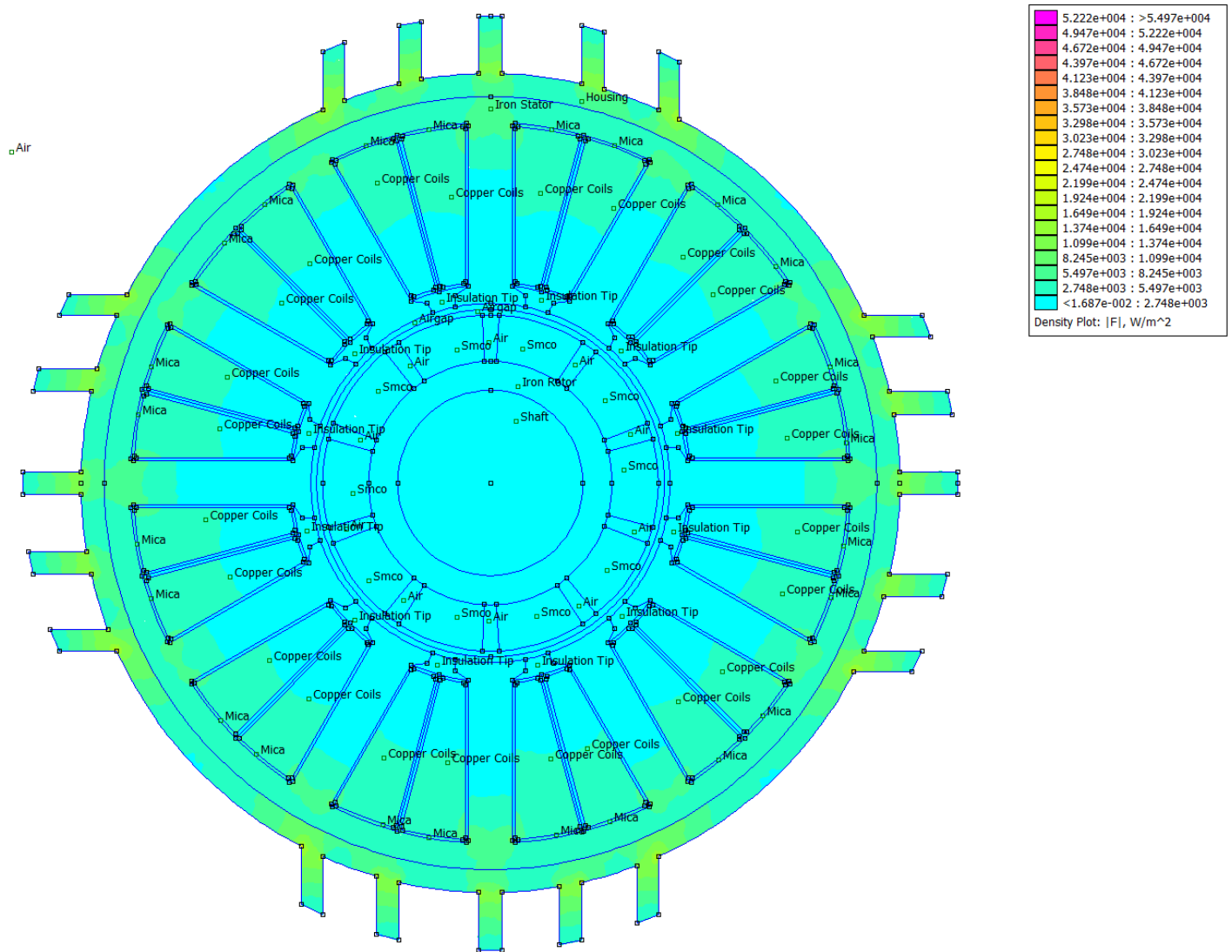
Στο εσωτερικό του πυρήνα του στάτη θα έχουμε:

```
FEMM Output
Point: x=-0.7, y=33.2
T = 393.939 K
|F| = 5593.59 W/m^2
Fx = -131.462 W/m^2
Fy = 5592.05 W/m^2
|G| = 294.4 K/m
Gx = -6.91903 K/m
Gy = 294.318 K/m
Kx = 19 W/(m*K)
Ky = 19 W/(m*K)
```

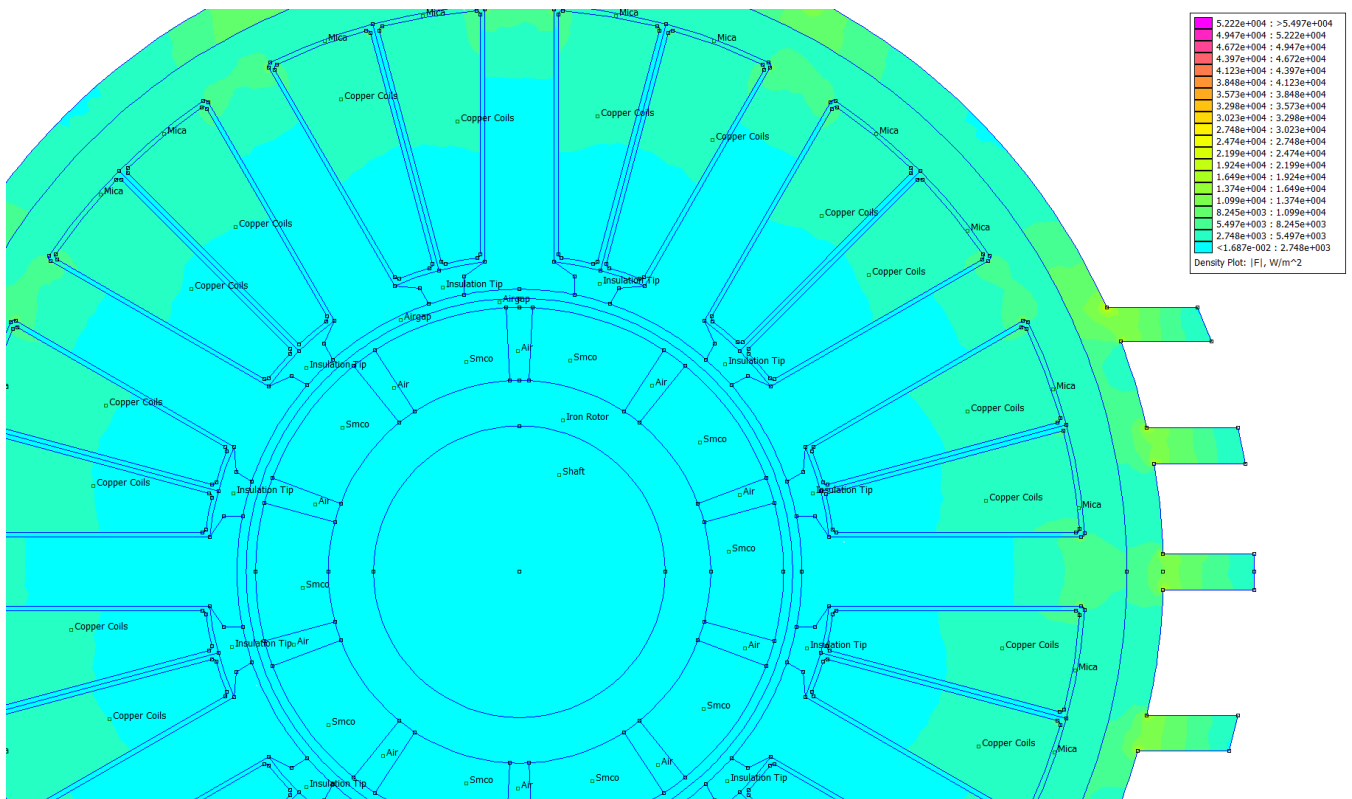
Στα τυλίγματα του στάτη θα έχουμε:

Από το διάγραμμα αυτό συμπαίρνεται ότι στον δρομέα οι μηχανικές απώλειες είναι σχετικά μικρές, η θερμοκρασία είναι γύρω στους βαθμούς 385. Όσο πλησιάζουμε στα τυλίγματα του στάτη βλέπουμε ότι η θερμοκρασία ανεβαίνει και ξεπερνάει τους 395. Αυτό συμβαίνει γιατί κοντά στον άξονα οι στροφές της μηχανής είναι χαμηλές, ενώ στα τυλίγματα λόγω των υψηλών ρευμάτων θα έχουμε θέρμανση της μηχανής. Οι θερμοκρασίες που υπάρχουν στο στάτη είναι λίγο μεγαλύτερες από του δρομέα λόγω των απωλειών δινορρευμάτων. Η θερμοκρασία πέφτει πολύ όσο μεγαλώνει η απόσταση από τον κινητήρα.

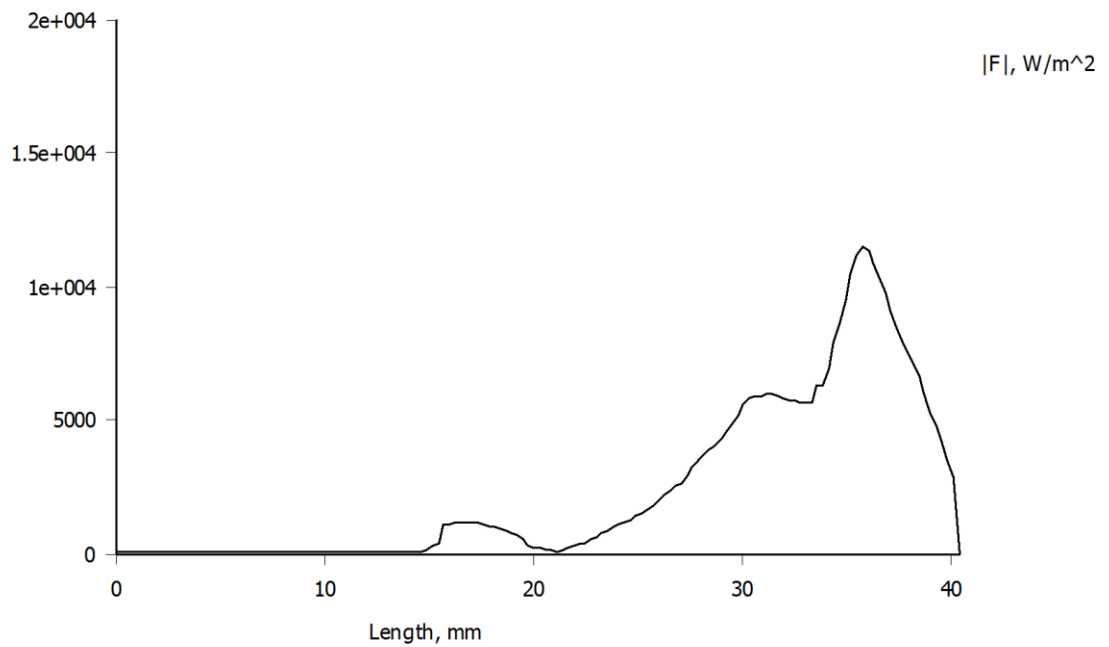
Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα πυκνότητας θερμοροής, καθώς και το διάγραμμα της πυκνότητας θερμοροής συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του κινητήρα:



Σχήμα 5.12: Πυκνότητα θερμοροής στην κάθετη τομή του κινητήρα

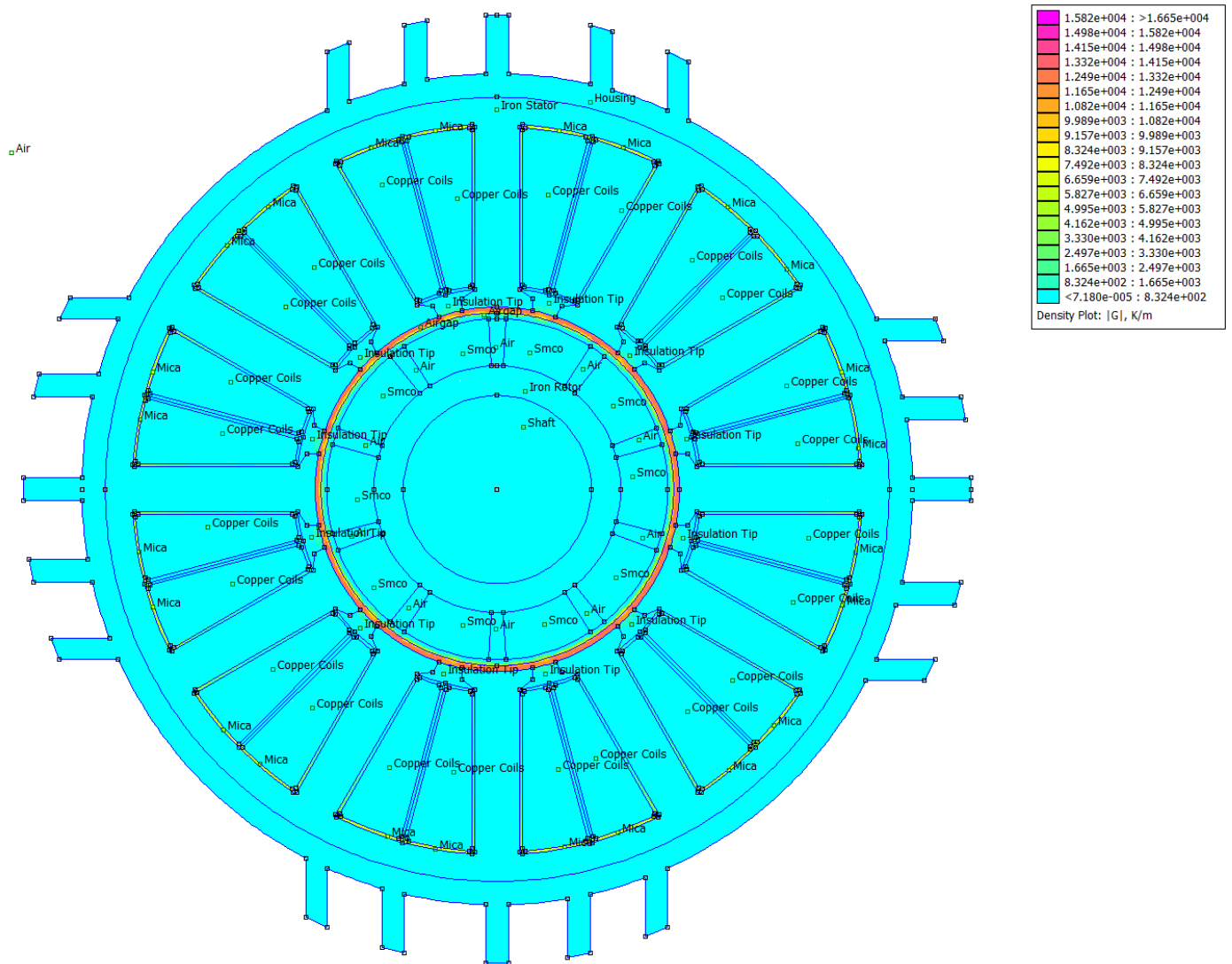


Σχήμα 5.13: Λεπτομέρεια στην πυκνότητα θερμορροής στον κινητήρα

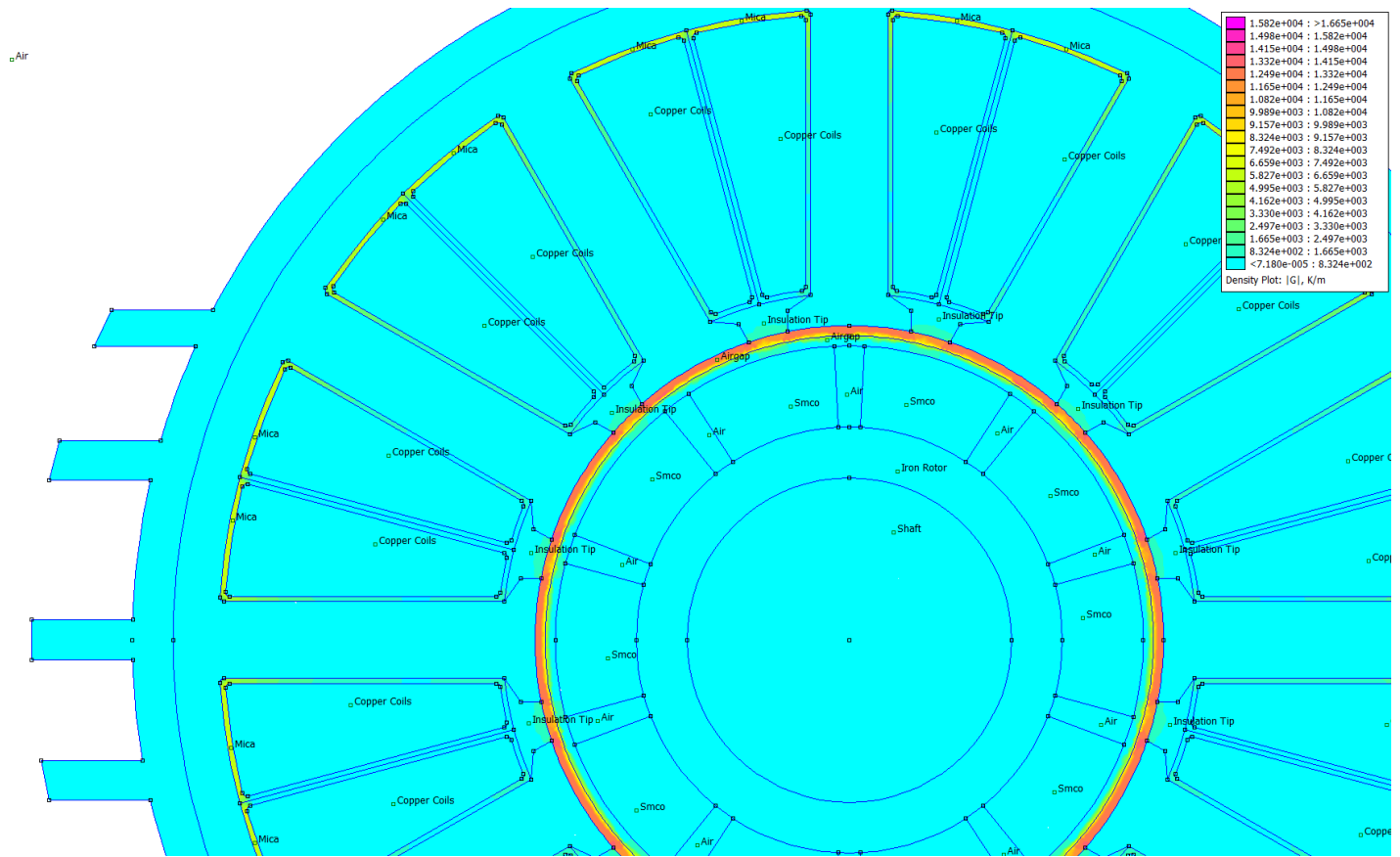


Σχήμα 5.14: Διάγραμμα πυκνότητας θερμορροής σε συνάρτηση με την απόσταση

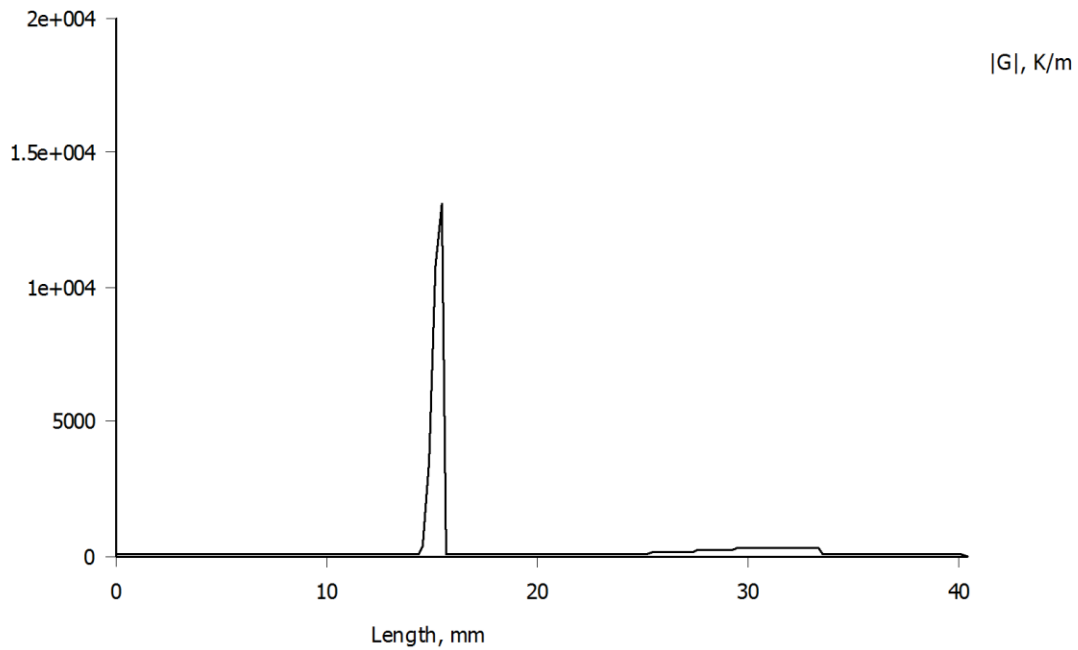
Έπειτα παρουσιάζονται τα ίδια διαγράμματα για την παράγωγο της θερμοκρασίας, δηλαδή το πόσο γρήγορα μεταβάλλεται η θερμοκρασία:



Σχήμα 5.16: Μεταβολή της θερμοκρασίας στην κάθετη τομή



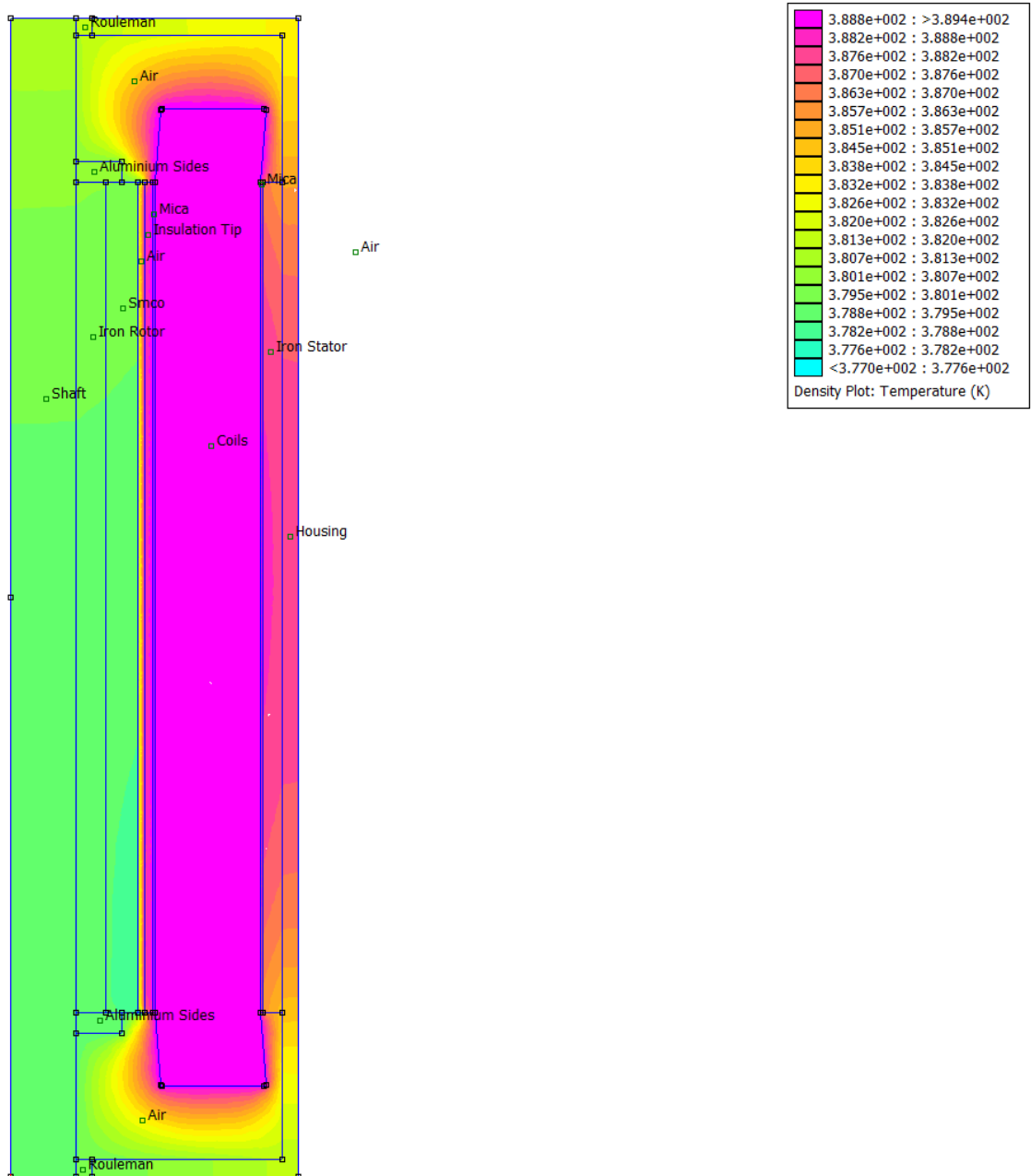
Σχήμα 5.17: Λεπτομερής παρουσίαση μεταβολής της θερμοκρασίας στην κάθετη τομή



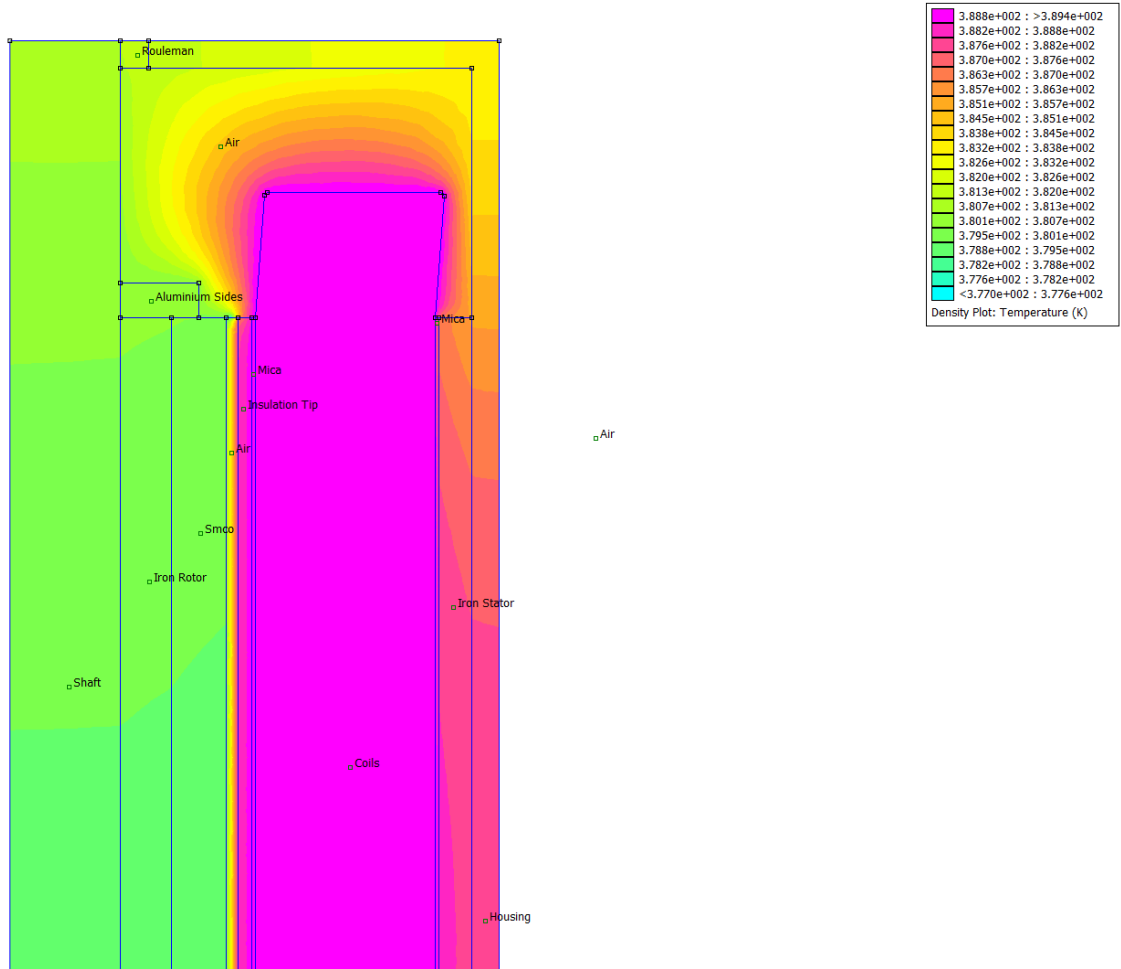
Σχήμα 5.18: Διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση

Η θερμοκρασία φαίνεται από το παραπάνω διαγράμματα ότι κοντά στα τυλίγματα μεταβάλλεται πολύ γρήγορα σε αντίθεση με τα υπόλοιπα τμήματα της μηχανής.

Για την αξονοσυμμετρική γεωμετρία θα έχουμε:

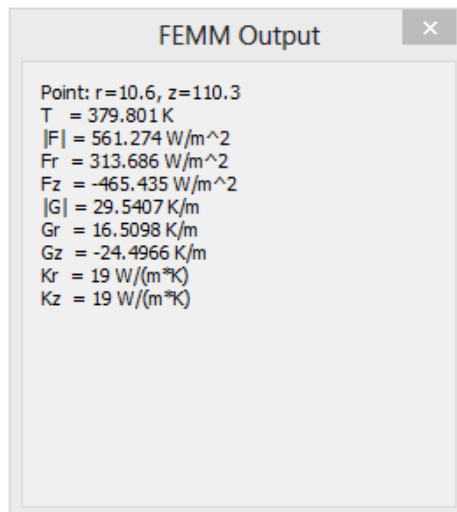


Σχήμα 5.19:Θερμοκρασιακό πεδίο αξονοσυμμετρικής τομής κινητήρα

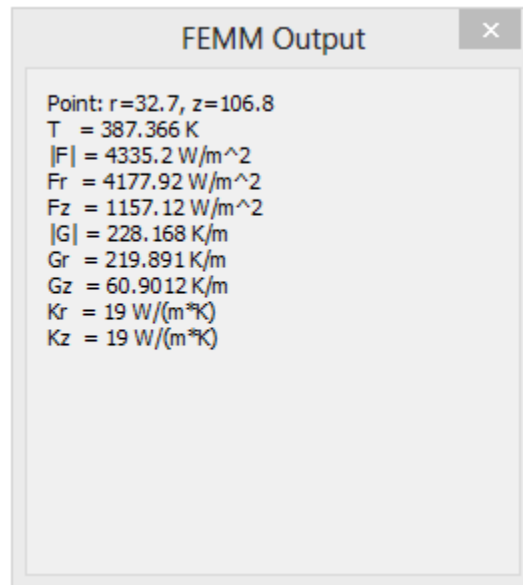


Σχήμα 5.20: Λεπτομέρεια θερμοκρασιακού πεδίου αξονοσυμμετρικής τομής

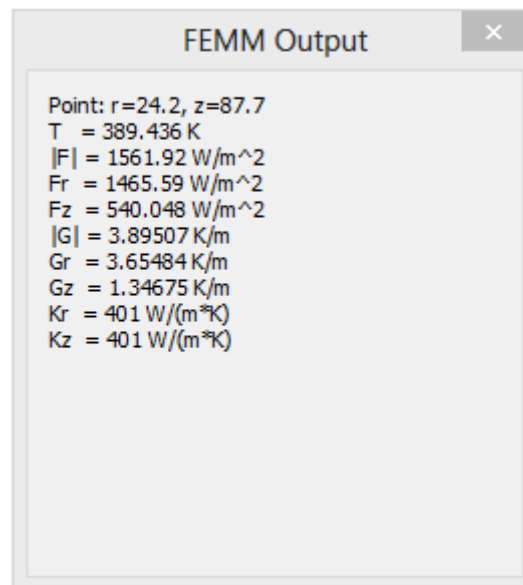
Στον δρομέα θα έχουμε:



Στο εσωτερικό του πυρήνα του σάτη θα έχουμε:

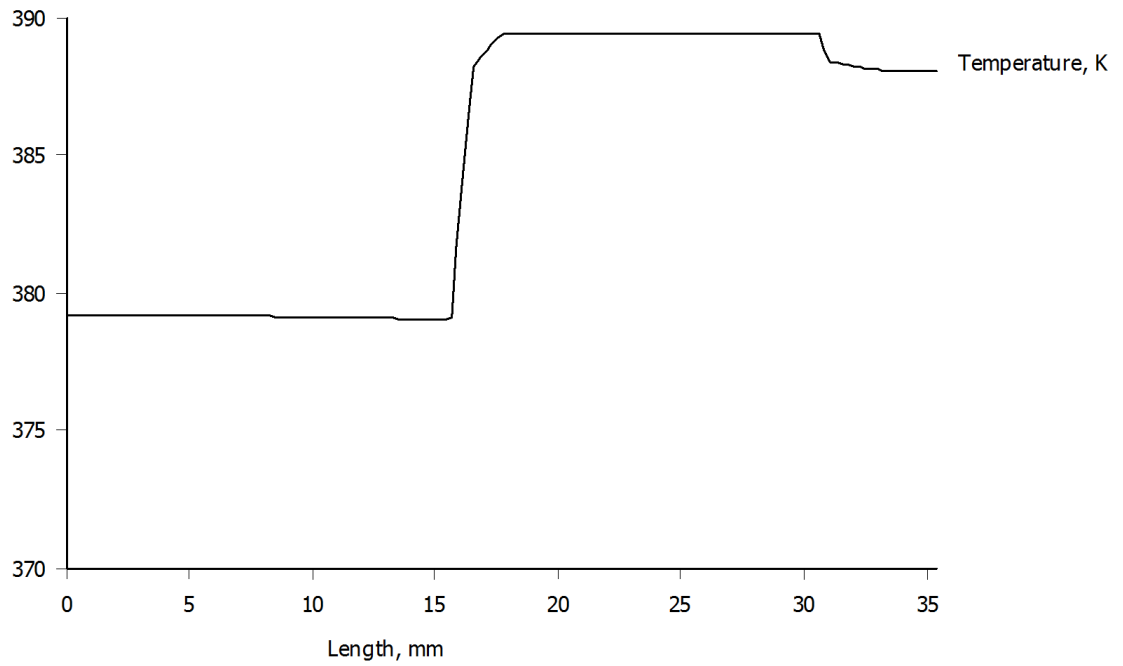


Στα τυλίγματα του σάτη θα έχουμε:



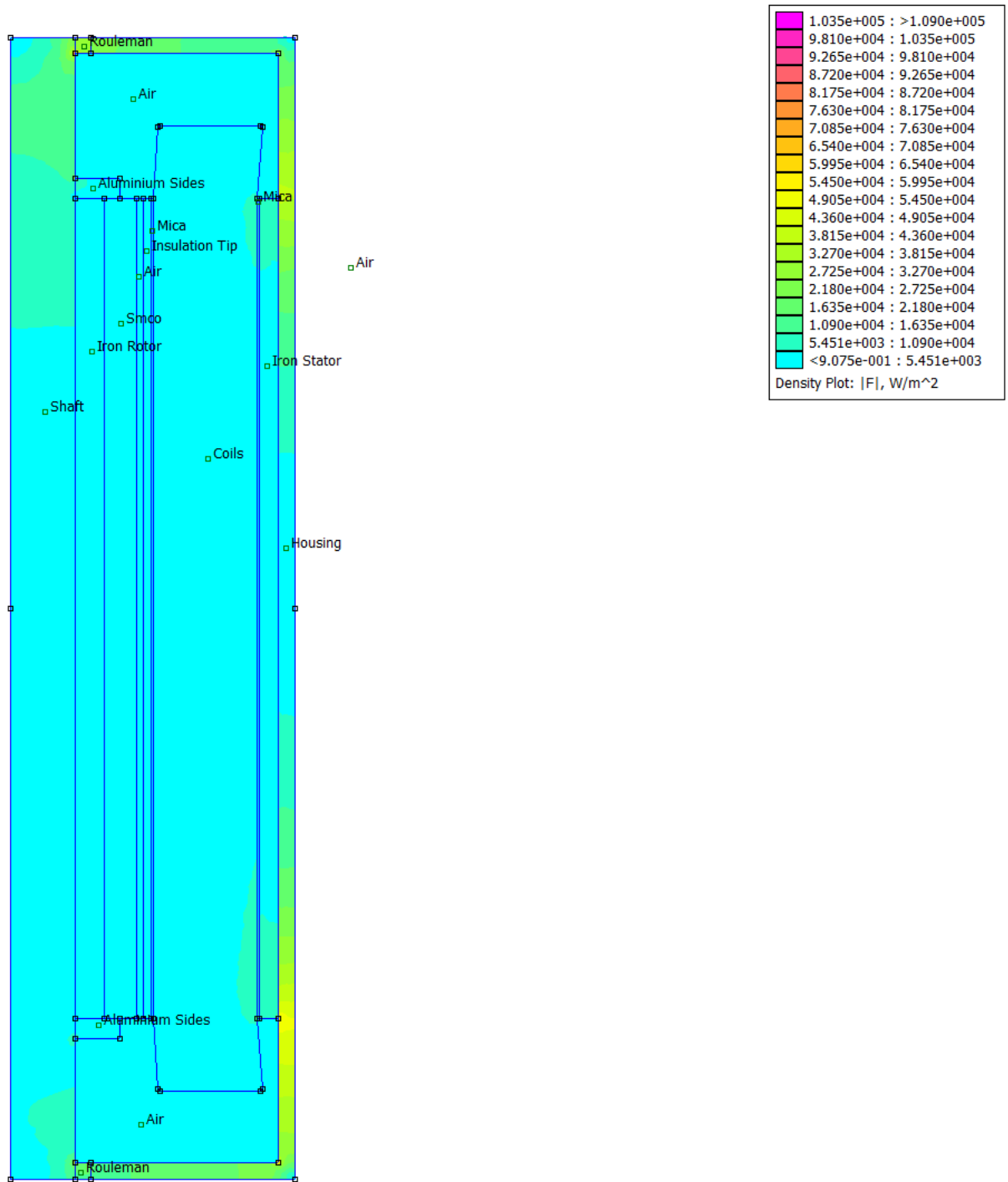
Παρακάτω φαίνεται το θερμοκρασιακό πεδίο στο περιβάλλον της μηχανής:

Το διάγραμμα της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του κινητήρα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

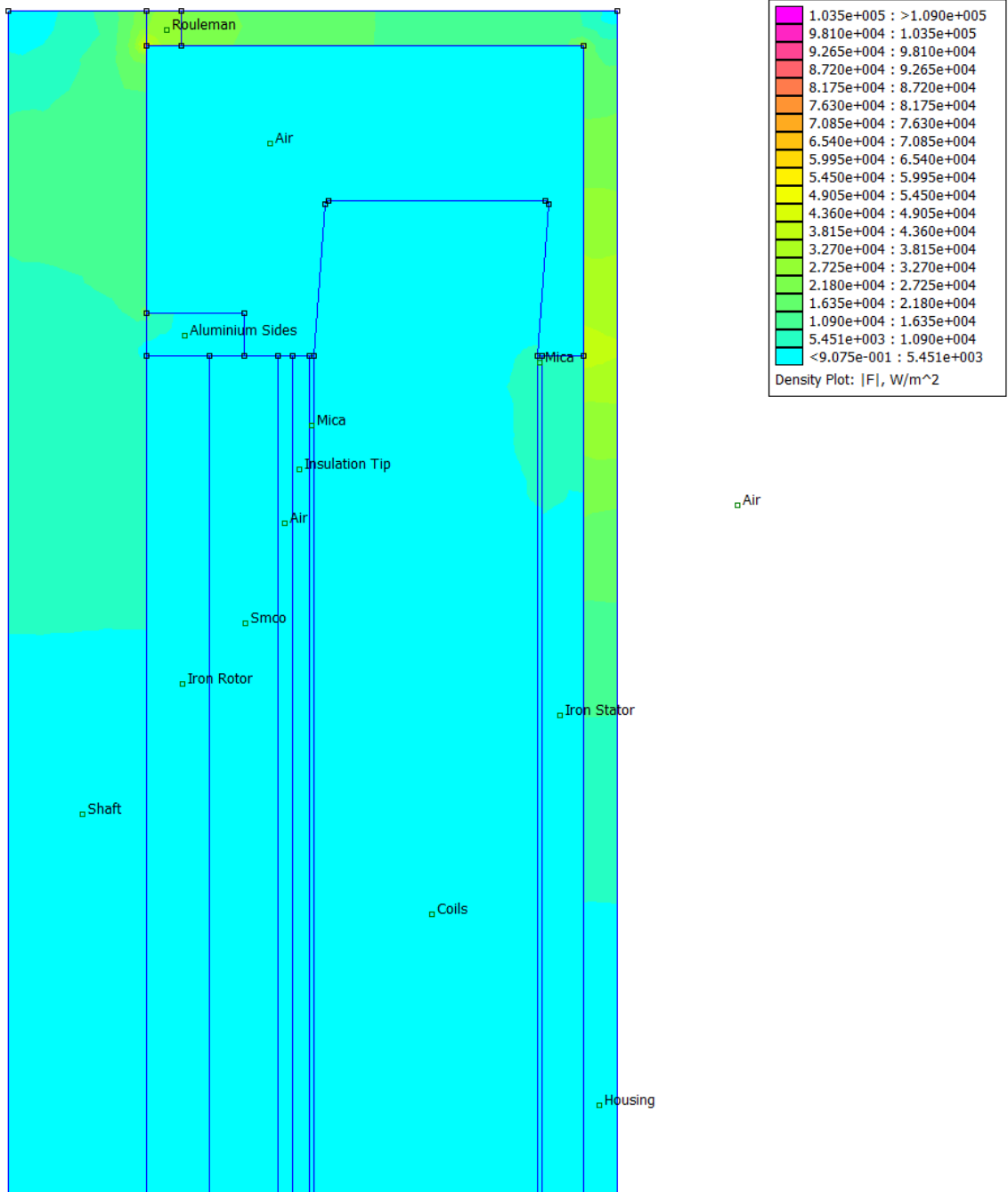


Σχήμα 5.21: Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση από το κέντρο του κινητήρα

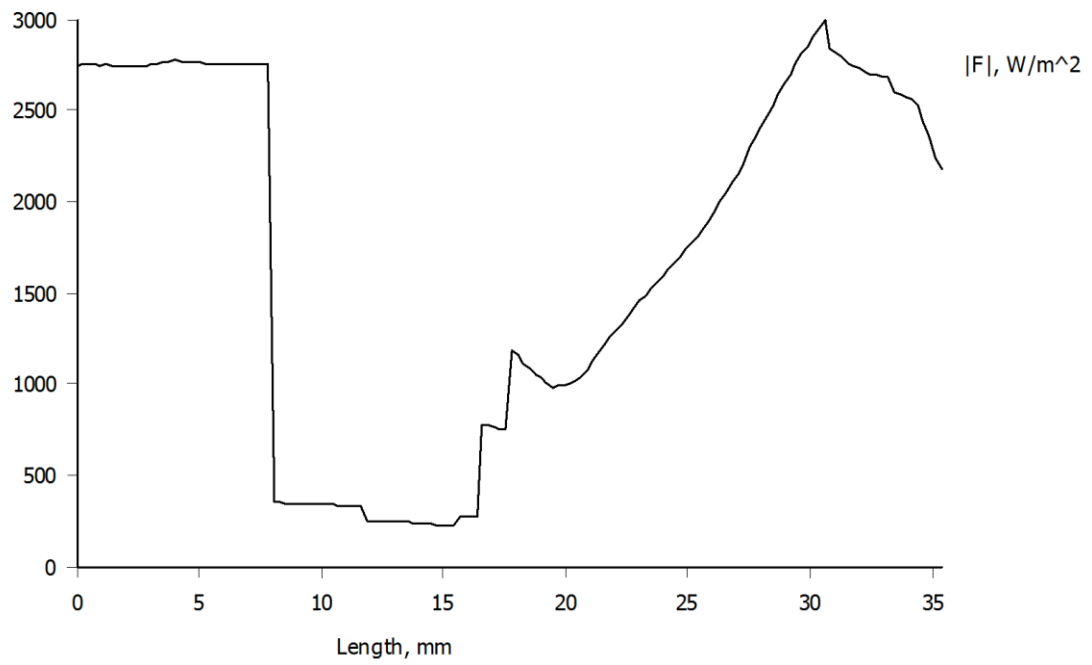
Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα πυκνότητας θερμοροής, καθώς και η κατανομή της πυκνότητας θερμοροής συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του κινητήρα:



Σχήμα 5.22: Πυκνότητα θερμορροής στην αξονοσυμμετρική τομή του κινητήρα

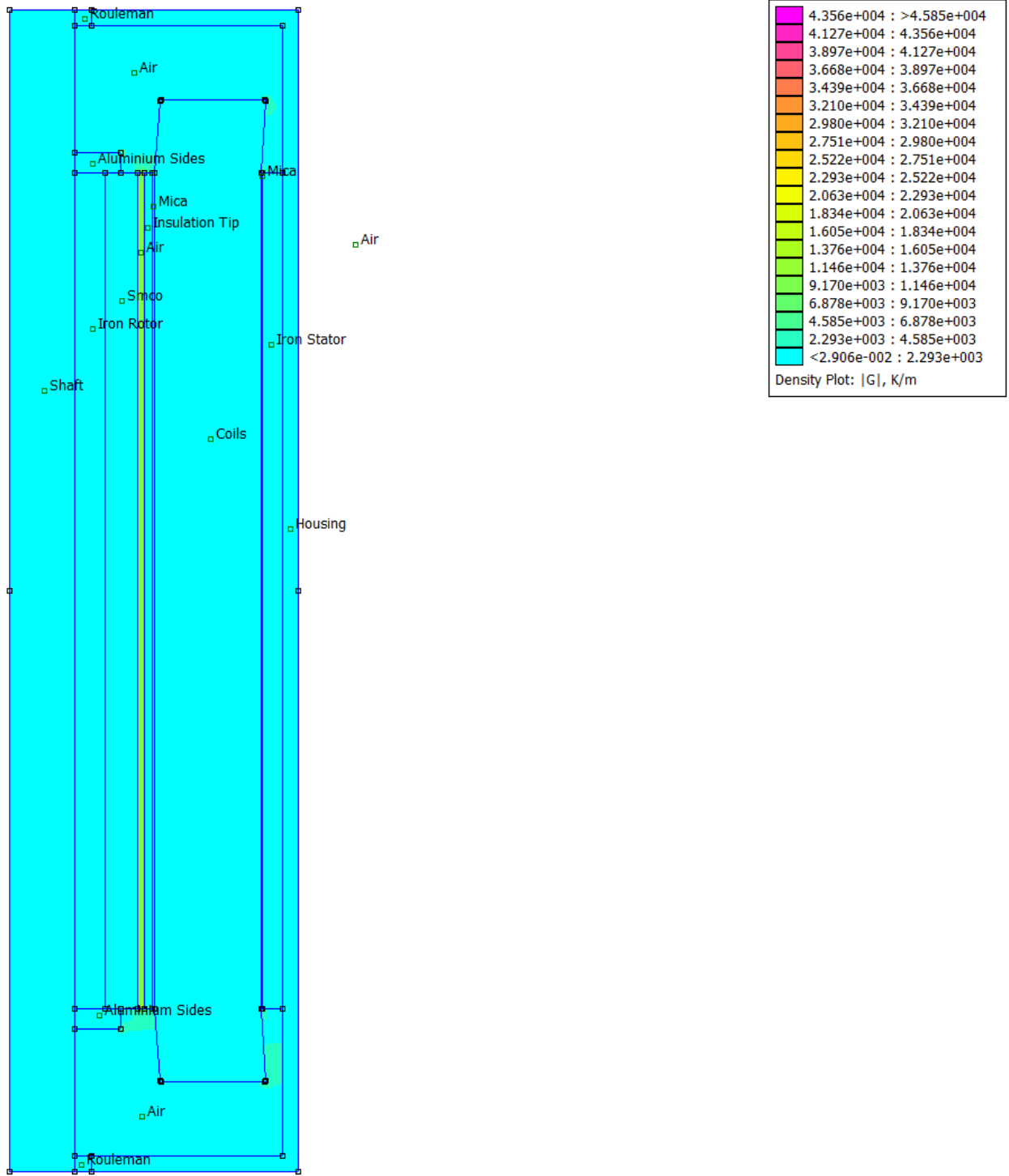


Σχήμα 5.23: Λεπτομέρεια της πυκνότητα θερμορροής στην αξονοσυμμετρική τομή του άξονα

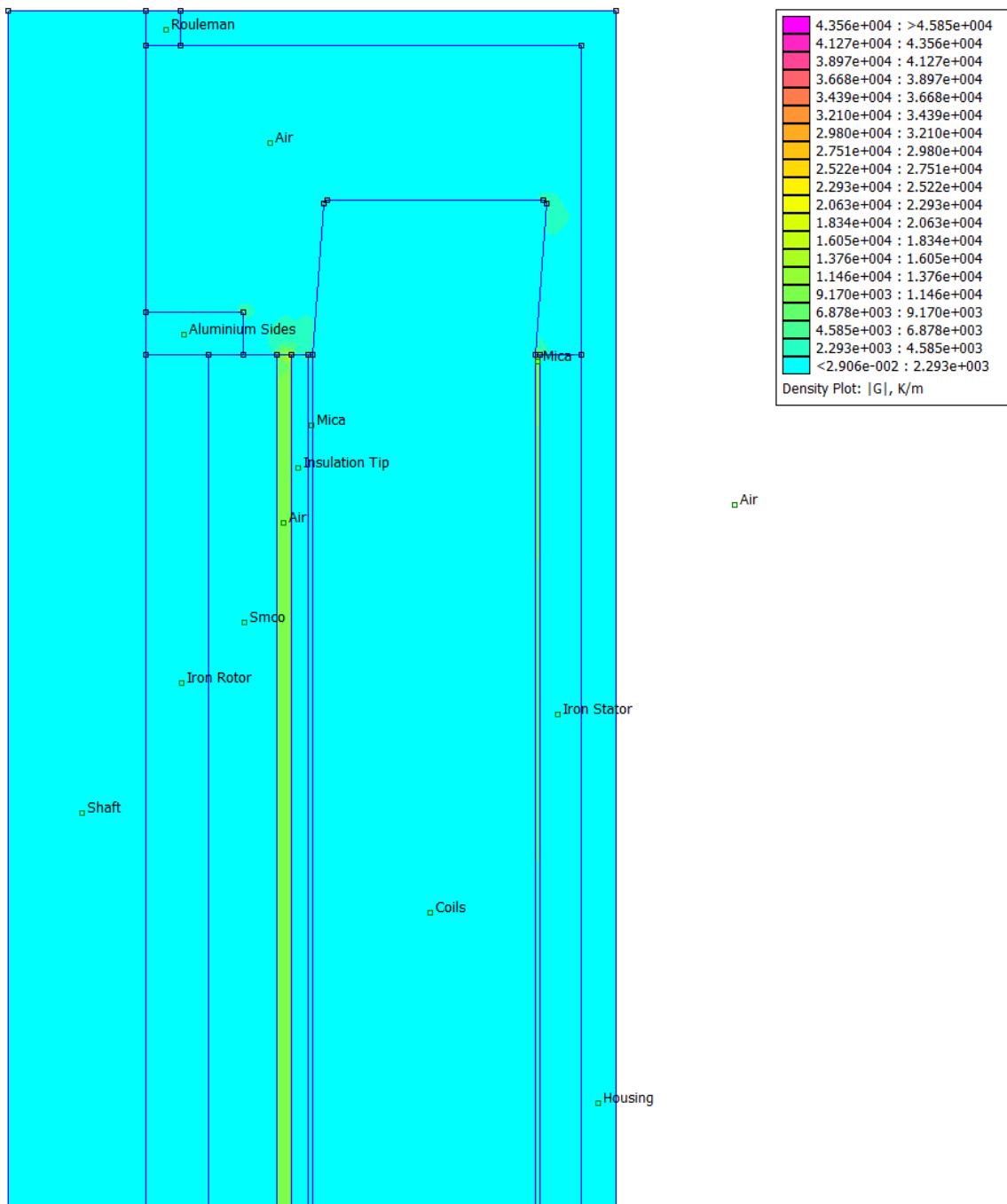


Σχήμα 5.24: Διάγραμμα πυκνότητας θερμορροής σε συνάρτηση με την απόσταση

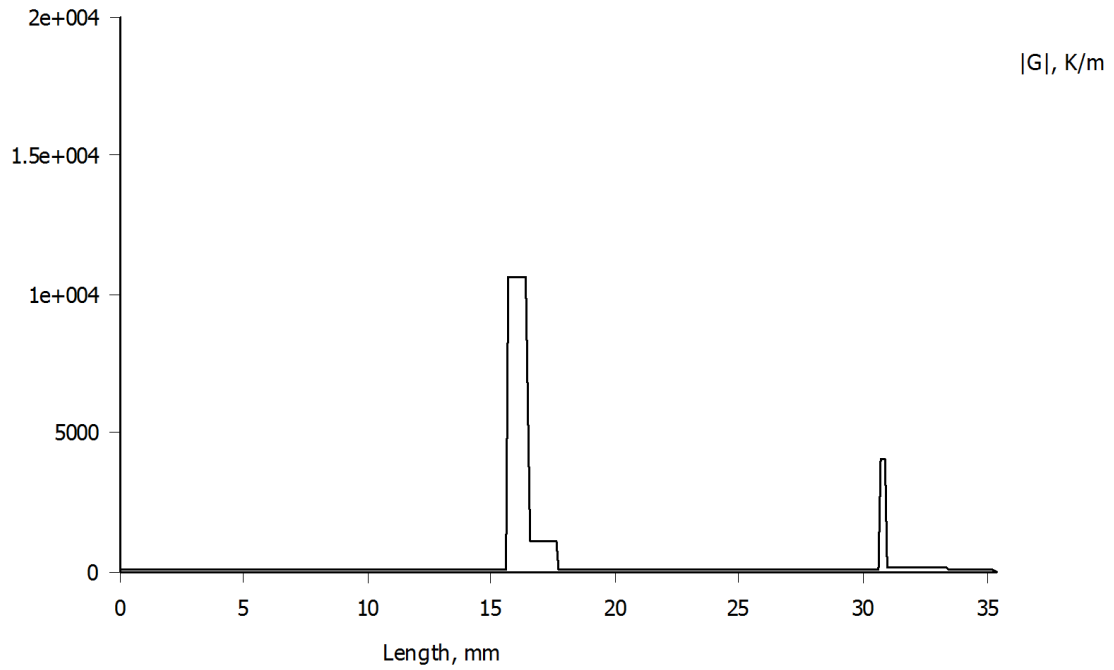
Έπειτα παρουσιάζονται τα ίδια διαγράμματα για την παράγωγο της θερμοκρασίας, δηλαδή το πόσο γρήγορα μεταβάλλεται η θερμοκρασία:



Σχήμα 5.25: Μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση το κέντρο του κινητήρα

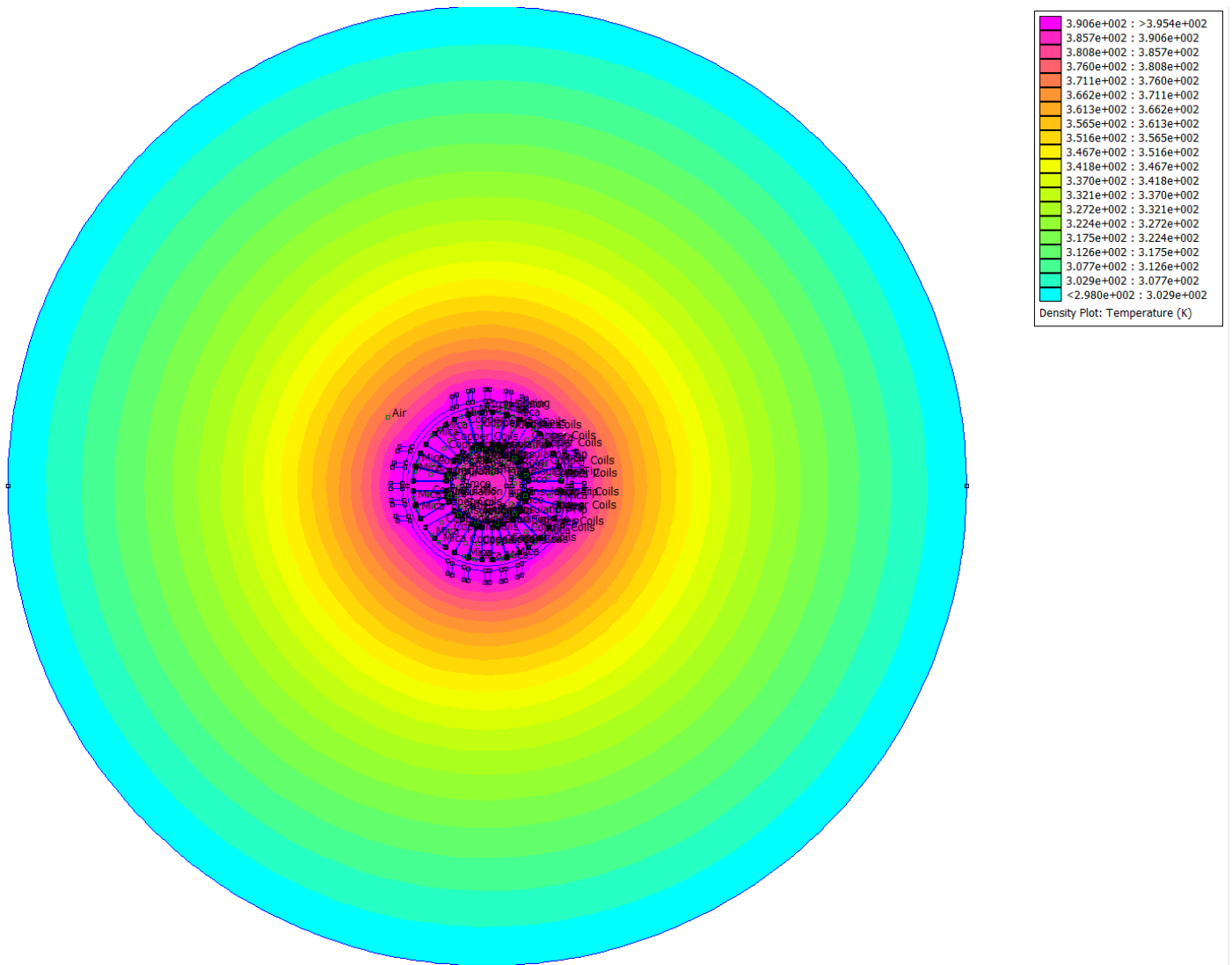


Σχήμα 5.26: Λεπτομέρεια μεταβολής της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση από το κέντρο του κινητήρα

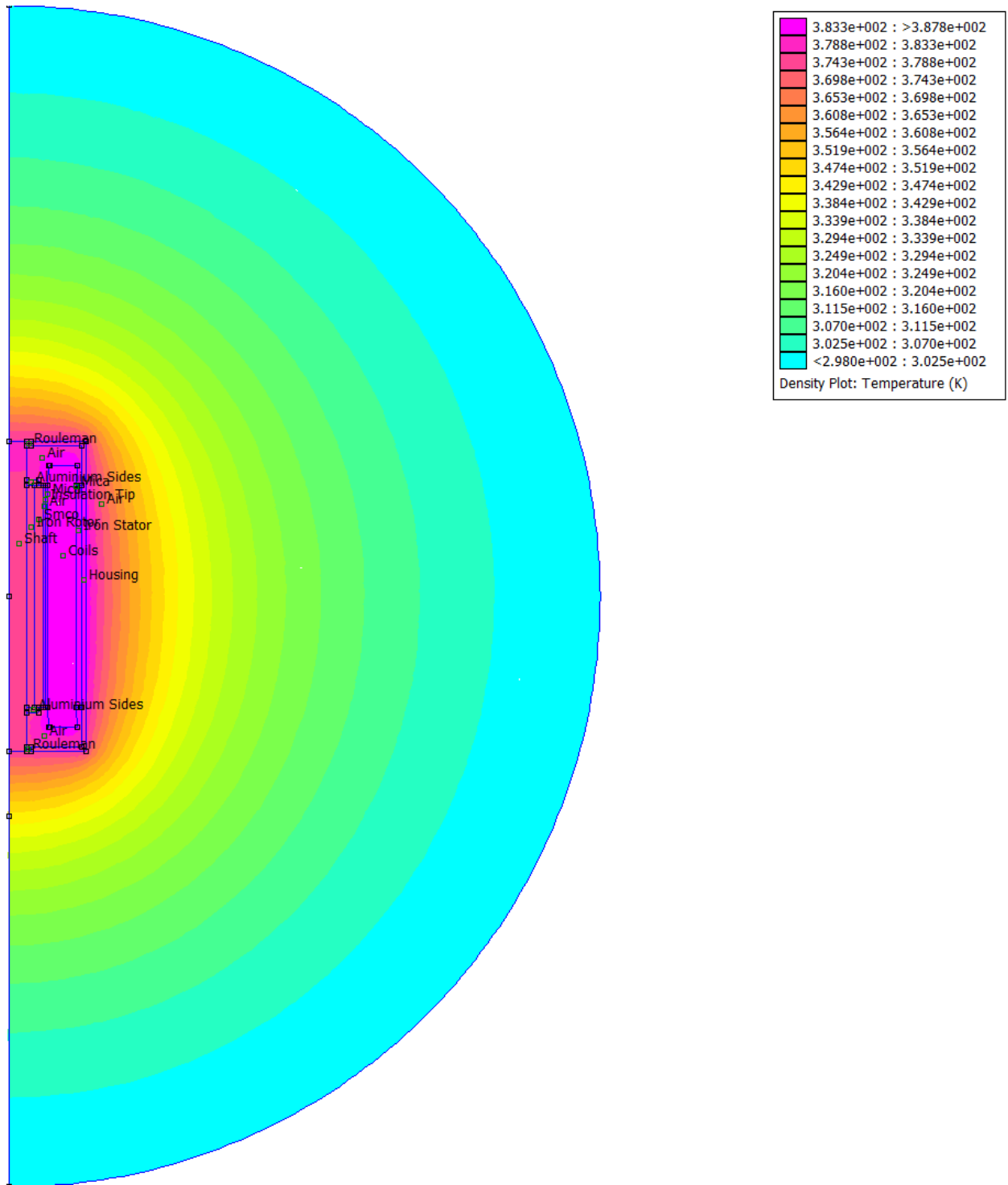


Σχήμα 5.27: Μεταβολή της θερμοκρασίας θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση

Τέλος παρουσιάζονται τα θερμοκρασιακά πεδία και στο περιβάλλον για τις δύο γεωμετρίες:



Σχήμα 5.28 Θερμοκρασιακό πεδίο στο περιβάλλον της μηχανής για την κάθετη τομή



Σχήμα 5.29: Θερμοκρασιακό πεδίο στο περιβάλλον της μηχανής για την αξονοσυμμετρική τομή

4.7 Συμπεράσματα από αποτελέσματα δύο τομών

Μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα διαγράμματα και τις κατανομές του θερμοκρασιακού πεδίου και της πυκνότητας θερμοροής για τις δύο τομές πως τα αποτελέσματα συμφωνούν πλήρως μεταξύ τους. Οι πολύ μικρές διαφορές οφείλονται στην ιδιαίτερη μορφή της γεωμετρίας της κάθε τομής, καθώς κάθε τομή παραλείπει λόγω της δισδιάστατης επίλυσης κάποιες παραμέτρους του προβλήματος. Παρά ταύτα βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια και αποτελούν μια αξιόπιστη προσομοίωση του κινητήρα μονίμων μαγνητών που αναλύεται στην διπλωματική.

Κεφάλαιο 5

Παρουσίαση αποτελεσμάτων και σύγκριση των δύο μεθόδων

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης του κινητήρα των δύο μεθόδων και θα γίνει σύγκριση μεταξύ τους. Ο κινητήρας δεν κατασκευάστηκε οπότε δεν υπάρχει η δυνατότητα λήψης και παρουσίασης πειραματικών αποτελεσμάτων.

5.1 Πίνακες με αποτελέσματα των προσομοιώσεων

5.1.1 Αποτελέσματα συγκεντρωμένων παραμέτρων

Δρομέας		Τυλίγματα		Στάτης	
Χρόνος Προσομοίωσης (min)	Θερμοκρασία (°K)	Χρόνος Προσομοίωσης (min)	Θερμοκρασία (°K)	Χρόνος Προσομοίωσης (min)	Θερμοκρασία
0.00	298.00	0.00	298.00	0.00	298.00
0.00	298.00	0.00	298.01	0.00	298.00
0.00	298.00	0.00	298.04	0.00	298.00
0.01	298.00	0.01	298.07	0.01	298.00
0.01	298.00	0.01	298.12	0.01	298.00
0.01	298.00	0.01	298.16	0.01	298.00
0.02	298.00	0.02	298.21	0.02	298.01
0.02	298.00	0.02	298.25	0.02	298.01
0.02	298.00	0.02	298.29	0.02	298.01
0.02	298.00	0.02	298.33	0.02	298.02
0.03	298.00	0.03	298.37	0.03	298.02
0.03	298.00	0.03	298.43	0.03	298.02
0.04	298.00	0.04	298.48	0.04	298.03
0.04	298.00	0.04	298.54	0.04	298.04
0.05	298.00	0.05	298.61	0.05	298.05
0.05	298.01	0.05	298.69	0.05	298.06
0.06	298.01	0.06	298.78	0.06	298.07
0.07	298.01	0.07	298.89	0.07	298.09
0.08	298.01	0.08	299.03	0.08	298.12
0.10	298.02	0.10	299.19	0.10	298.16
0.12	298.02	0.12	299.40	0.12	298.22
0.14	298.03	0.14	299.66	0.14	298.30
0.17	298.04	0.17	299.90	0.17	298.39

0.20	298.06	0.20	300.23	0.20	298.53
0.24	298.08	0.24	300.54	0.24	298.68
0.28	298.10	0.28	300.90	0.28	298.87
0.32	298.13	0.32	301.24	0.32	299.07
0.38	298.17	0.38	301.63	0.38	299.32
0.43	298.21	0.43	302.01	0.43	299.59
0.50	298.27	0.50	302.49	0.50	299.95
0.57	298.34	0.57	302.94	0.57	300.31
0.66	298.44	0.66	303.54	0.66	300.82
0.78	298.58	0.78	304.24	0.78	301.45
0.93	298.77	0.93	305.10	0.93	302.25
1.13	299.05	1.13	306.20	1.13	303.31
1.41	299.50	1.41	307.70	1.41	304.79
1.76	300.14	1.76	309.54	1.76	306.60
2.12	300.86	2.12	311.32	2.12	308.36
2.60	301.94	2.60	313.69	2.60	310.71
3.09	303.12	3.09	315.98	3.09	312.97
3.74	304.83	3.74	318.95	3.74	315.89
4.39	306.64	4.39	321.78	4.39	318.68
5.28	309.21	5.28	325.42	5.28	322.27
6.16	311.84	6.16	328.87	6.16	325.66
7.41	315.59	7.41	333.42	7.41	330.13
8.96	320.18	8.96	338.60	8.96	335.22
10.98	325.86	10.98	344.67	10.98	341.16
13.78	333.08	13.78	352.01	13.78	348.35
16.58	339.42	16.58	358.28	16.58	354.48
19.38	344.93	19.38	363.64	19.38	359.73
22.18	349.67	22.18	368.22	22.18	364.22
24.98	353.76	24.98	372.15	24.98	368.06
27.78	357.26	27.78	375.52	27.78	371.36
30.58	360.27	30.58	378.40	30.58	374.18
33.38	362.85	33.38	380.88	33.38	376.60
36.18	365.05	36.18	382.99	36.18	378.67
38.98	366.95	38.98	384.81	38.98	380.44
41.78	368.57	41.78	386.36	41.78	381.96
44.58	369.96	44.58	387.70	44.58	383.27
47.38	371.15	47.38	388.84	47.38	384.39
50.18	372.17	50.18	389.82	50.18	385.34
52.98	373.05	52.98	390.66	52.98	386.16

55.78	373.80	55.78	391.37	55.78	386.87
58.58	374.44	58.58	391.99	58.58	387.47
61.38	374.99	61.38	392.52	61.38	387.99
64.18	375.46	64.18	392.97	64.18	388.43
66.98	375.87	66.98	393.36	66.98	388.81
69.78	376.21	69.78	393.69	69.78	389.13
72.58	376.51	72.58	393.97	72.58	389.41
75.38	376.76	75.38	394.22	75.38	389.65
78.18	376.98	78.18	394.43	78.18	389.85
80.98	377.17	80.98	394.60	80.98	390.03
83.78	377.33	83.78	394.76	83.78	390.18
86.58	377.46	86.58	394.89	86.58	390.31
89.38	377.58	89.38	395.00	89.38	390.42
92.18	377.68	92.18	395.10	92.18	390.51
94.98	377.77	94.98	395.18	94.98	390.59
97.78	377.84	97.78	395.25	97.78	390.66
100.58	377.91	100.58	395.31	100.58	390.72
103.38	377.96	103.38	395.37	103.38	390.77
106.18	378.01	106.18	395.41	106.18	390.82
108.98	378.05	108.98	395.45	108.98	390.85
111.78	378.08	111.78	395.48	111.78	390.89
114.58	378.11	114.58	395.51	114.58	390.91
117.38	378.14	117.38	395.53	117.38	390.94
120.18	378.16	120.18	395.56	120.18	390.96
122.98	378.18	122.98	395.57	122.98	390.97
125.78	378.19	125.78	395.59	125.78	390.99
128.58	378.21	128.58	395.60	128.58	391.00
131.38	378.22	131.38	395.61	131.38	391.01
134.18	378.23	134.18	395.62	134.18	391.02
136.98	378.24	136.98	395.63	136.98	391.03
139.78	378.24	139.78	395.64	139.78	391.04
140.00	378.24	140.00	395.64	140.00	391.04

5.1.2 Αποτελέσματα κώδικα πεπερασμένων στοιχείων

Από την προσομοίωση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων θα έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα για τις τελικές τιμές της θερμικής ανάλυσης του κινητήρα:

Για την κάθετη τομή στον άξονα για τα διάφορα σημεία του κινητήρα θα έχουμε:

Κάθετη τομή		
Θερμοκρασίες (°K)		
Δρομέας	Τυλίγματα	Στάτης
389.31	396.13	393.94

Για την αξονοσυμμετρική τομή για τα διάφορα σημεία του κινητήρα θα έχουμε:

Αξονοσυμμετρική Τομή		
Θερμοκρασίες (°K)		
Δρομέας	Τυλίγματα	Στάτης
379.80	389.44	387.37

5.2 Αναλυτική σύγκριση αποτελεσμάτων

Η σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο για τις τελικές τιμές καθώς ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων όπως έχει προαναφερθεί δεν εξάγει αποτελέσματα για την μεταβατική κατάσταση. Επομένως θα έχουμε τον παρακάτω πίνακα που παρουσιάζει αναλυτικά τις τελικές θερμοκρασίες σε βαθμούς Κελσίου των δύο μεθόδων:

	Κάθετη Τομή	Αξονοσυμμετρική τομή	Συγκεντρωμένων Παραμέτρων
Δρομέας	116.31	106.80	105.24
Τυλιγματα Στάτη	123.13	116.44	122.64
Στάτης	120.94	114.37	118.04

Από τον πίνακα παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες είναι όλες πολύ κοντινές. Υψηλότερες θερμοκρασίες από τις τρεις προσεγγίσεις παρουσιάζει η μέθοδος κάθετης τομής στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, ενώ τις χαμηλότερες η αξονοσυμμετρική τομή. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του δρομέα και των τυλιγμάτων του στάτη είναι 6.82°C στην κάθετη τομή, 9.64°C στην αξονοσυμμετρική και 17.4°C στην συγκεντρωμένων παραμέτρων. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ στάτη και τυλιγμάτων στάτη είναι μικρότερη και είναι στους 2.19°C για την κάθετη τομή, 2.07°C για την αξονοσυμμετρική και στους 4.6°C για την συγκεντρωμένων παραμέτρων. Παρατηρείται ότι η διαφορά στις δυο γεωμετρίες του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων είναι μικρή, σε αντίθεση όμως με τη διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων προσομοίωσης. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος συγκεντρωμένων

παραμέτρων χρησιμοποιεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα, βασισμένο σε αρκετές παραδοχές και αρκετά απλοποιημένο. Οι μικρές διαφορές μεταξύ των δύο γεωμετριών στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων οφείλεται στην ιδιαιτερότητα κάθε γεωμετρίας. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αναλύει τον κινητήρα σε δισδιάστατο πρόβλημα θεωρώντας την τρίτη διάσταση πεπερασμένη.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα πίνακας με τις αποκλίσεις των δύο γεωμετριών του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων με την μέθοδο συγκεντρωμένων παραμέτρων:

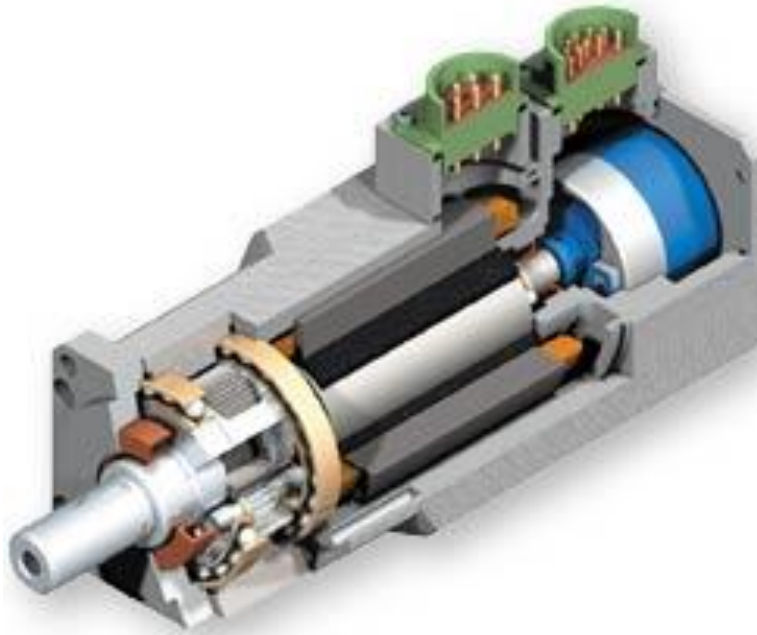
	Κάθετη Τομή	Αξονοσυμμετρική τομή
Δρομέας	2.93%	0.41%
Τυλίγματα Στάτη	0.12%	1.57%
Στάτης	0.74%	0.94%

Οι διαφορές για τις θερμοκρασίες του δρομέα είναι της τάξης του 3% με για την κάθετη τομή και του 0.5% για την αξονοσυμμετρική. Στα τυλίγματα του στάτη οι ποσοστιαίες διαφορές είναι μικρότερες, 0.12% και 1.57%, ενώ στάτη και για τις δύο τομές δεν υπερβαίνει το 1%.

5.3 Συμπεράσματα

Οι θερμοκρασίες που παρουσιάζουν και οι δύο μέθοδοι συμφωνούν μεταξύ τους, καθώς η οριακή θερμοκρασία για τα τυλίγματα φτάνει τους 123°C. Η υψηλή οριακή θερμοκρασία οφείλεται στην ψύξη με φυσική ροή αέρα που επιλέξαμε. Σε περίπτωση που επιλεγεί μια πιο αποδοτική μέθοδος, εξαναγκασμένη ροή αέρα ή υδρόψυξη, οι θερμοκρασίες θα αρχίσουν να κινούνται σε πιο αποδεκτά επίπεδα και θα πέσουν κάτω από 100°C. Αυτές οι θερμοκρασίες κρίνονται ικανοποιητικές για έναν εναλλάκτη που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο συστημάτων κίνησης. Η οριακή θερμοκρασία του ακόμα και για συνεχή χρήση. Η θερμική προσέγγιση του συγκεκριμένου κινητήρα μονίμων μαγνητών κρίνεται αρκετά ικανοποιητική και θα χρησιμεύσει για μικρές βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν κατά την κατασκευή του κινητήρα.

Κεφάλαιο 6



Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η θερμική ανάλυση ενός κινητήρα μονίμων μαγνητών για την χρήση σαν εναλλάκτης. Η θερμική συμπεριφορά της μηχανής που μελετήθηκε έγινε με τη χρήση της μεθόδου του ισοδύναμου κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων και με την προσομοίωση μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο τρόπος λειτουργίας των κινητήρων μονίμων μαγνητών και αναλύθηκε ο ρόλος και η χρήση τους ως εναλλάκτες στην καθημερινή ζωή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε μια εκτενής ανάλυση των θερμικών φαινομένων που παρατηρούνται στις ηλεκτρικές μηχανές και αναλύθηκε ένα απλό θερμικό πρόβλημα για την κατανόηση των φαινομένων αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο προσεγγίστηκε η θερμική συμπεριφορά του κινητήρα μέσω ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού μοντέλου που δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τις θερμοκρασίες των ηλεκτρικών μηχανών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο επιχειρήθηκε η θερμική ανάλυση του κινητήρα μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση έγινε με δύο δισδιάστατες τομές, μία κάθετη στον άξονα του κινητήρα και μία αξονοσυμμετρική.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων προσομοίωσης. Η σύγκριση έγινε μόνο για την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα καθώς ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων δεν παρέχει αποτελέσματα για την μεταβατικής κατάσταση.

6.1 Κύρια συμπεράσματα

- Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων μας παρέχει αξιόπιστες τελικές τιμές για την θερμοκρασία του κινητήρα σε οποιοδήποτε σημείο του. Ωστόσο όμως η αδυναμία του να παρέχει αποτελέσματα για την μεταβατική κατάσταση και η υπολογιστική ισχύ που χρειάζεται όταν η γεωμετρία του κινητήρα γίνεται πολύ λεπτομερής και με πολλές παραμέτρους την καθιστά ελλιπή και δυσχερή.
- Με το μοντέλο του ισοδύναμου κυκλώματος των συγκεντρωμένων παραμέτρων αναπτύχθηκε για αυτό το λόγο, το οποίο με αρκετές παραδοχές και απλοποιήσεις μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τα σημαντικότερα σημεία της μηχανής. Μπορεί να υπολογίσει τη θερμοκρασία στα τυλίγματα του στάτη, στο δρομέα αλλά και στον στάτη τόσο για την μόνιμη όσο και για την μεταβατική κατάσταση. Στο μοντέλο αυτό υπάρχει η δυνατότητα να έχουμε θερμοκρασίες και για παραπάνω μέρη του κινητήρα, απλά στην συγκεκριμένη διπλωματική κρίθηκε ότι αυτά τα τρία είναι τα σημεία που χρήζουν εκτενής μελέτης.
- Στον συγκεκριμένο μοντέλο για να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι ισοδύναμες θερμικές αντιστάσεις και θερμοχωρητικότητες που χρησιμοποιούνται. Ιδιαίτερη δυσκολία παρουσιάστηκε στον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης του διακένου καθώς όταν η μηχανή περιστρέφεται είναι δύσκολος ο υπολογισμός της πίεσης και της ειδικής θερμικής χωρητικότητας. Η ταχύτητα που περιστρέφεται ο κινητήρας αλλά και η τραχύτητα των εσωτερικών επιφανειών αλλάζουν την τιμή της αντίστασης επηρεάζοντας όλα τα αποτελέσματα της μεθόδου προσομοίωσης.
- Για την λειτουργία του κινητήρα στις 750 ΣΑΛ υπολογίστηκε η τιμή του διακένου ότι λαμβάνει τιμή της τάξης του 1.47Ω .
- Για την συγκεκριμένη λειτουργία των 750 ΣΑΛ όπου έχουμε ένταση ρεύματος $8A/mm^2$ στα τυλίγματα, το μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα τα οποία είναι:

<u>Συγκεντρωμένων Παραμέτρων</u>	Θερμοκρασία μόνιμη κατάσταση	Σταθερά Χρόνου
Δρομέας	105.24°C	21 min
Τυλίγματα Στάτη	122.64°C	17.9 min
Στάτης	118.04°C	18.3min

- Η προσομοίωση για την ίδια κατάσταση λειτουργίας με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα:

<u>Κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων</u>	Κάθετη Τομή	Αξονοσυμμετρική τομή
Δρομέας	116.31°C	106.8°C
Τυλίγματα Στάτη	123.13°C	116.44°C
Στάτης	120.94°C	114.37°C

- Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από τις δύο προσομοιώσεις:

Μέρη κινητήρα	Κάθετη Τομή	Αξονοσυμμετρική τομή	Συγκεντρωμένων Παραμέτρων
Δρομέας	116.31	106.80	105.24
Τυλίγματα Στάτη	123.13	116.44	122.64
Στάτης	120.94	114.37	118.04

Βάση χρωμάτων μπορούμε να παρατηρήσουμε τις διαφορές μεταξύ των θερμοκρασιών που παράγουν οι δύο μέθοδοι. Σε όλες τις προσομοιώσεις η κατανομή των θερμοκρασιών ανάλογα με το μέρος του κινητήρα συμφωνούν.

- Οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρουσιάζονται στα τυλίγματα, ενώ οι χαμηλότερες στο δρομέα. Το εύρος των θερμοκρασιών για τις δύο γεωμετρίες του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων είναι σχεδόν ίδιο 7°C και 9°C αντίστοιχα, ενώ στην συγκεντρωμένων παραμέτρων είναι λίγο υψηλότερο στους 17°C.
- Οι τιμές της αξονοσυμμετρικής τομής είναι λίγο χαμηλότερες από τις άλλες δύο προσομοιώσεις. Οι τιμές των συγκεντρωμένων παραμέτρων συμφωνούν σε πολύ μεγάλο βαθμό με την κάθετη τομή του πεπερασμένου κώδικα, εκτός από την θερμοκρασία του δρομέα όπου υπάρχει μια απόκλιση.
- Οι διαφορές που παρουσιάζει η μέθοδος των συγκεντρωμένων παραμέτρων με τις δύο τομές του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων οφείλεται στις παραδοχές και στην απλοποιημένη μορφή του ισοδύναμου θερμικού κυκλώματος.
- Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων και με δεδομένο ότι ο συγκεκριμένος κινητήρας προορίζεται για εναλλάκτης και θα είναι αναγκαίο να λειτουργεί συνεχώς κρίνεται ότι η ψύξη δεν θα επαρκεί. Για αυτό προτείνεται κατά την κατασκευή του να υπάρχει ανεμιστήρας ή αεραγωγός για την κατάλληλη ψύξη του.

6.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Ολοκληρώνοντας την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τα σημεία πρωτότυπης συνεισφοράς της:

- Η θερμική ανάλυση σε δύο διαστάσεις του κινητήρα μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο γεωμετρίες, στην αξονοσυμμετρική τομή του κινητήρα και στην κάθετη τομή στον άξονα.
- Η θερμική ανάλυση με τη χρήση ενός ισοδύναμου θερμικού-ηλεκτρικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων, στην οποία λάβηκαν υπόψιν οι επιδράσεις από όλα τα σημεία του κινητήρα, προσδιορίζοντας ορθά τις θερμικές αντιστάσεις και τις θερμοχωρητικότητες τους.

6.3 Θέματα για περαιτέρω ανάλυση

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναδείχθηκαν τα παρακάτω θέματα που χρήζουν περαιτέρω μελέτης:

- Η ανάπτυξη ενός αναλυτικότερου ισοδύναμου θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων, το οποίο θα κάνει εκτενέστερη μελέτη για τις θερμική συμπεριφορά του διακένου σε όλες τις στροφές τις λειτουργίας του κινητήρα.
- Η ανάπτυξη μιας ανάλυσης Computational Fluid Dynamics και η σύγκριση της με τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν.
- Η ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου μοντέλου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και μια συζευγμένης ηλεκτρομαγνητικής θερμικής ανάλυσης που θα παρουσιάζει καλύτερη σύγκλιση και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για όλα τα σημεία του κινητήρα και για όλες τις καταστάσεις λειτουργίας του.

Παραρτήματα

Πίνακας με ιδιότητες μαγνητών Σαμαρίου-Κοβαλτίου:

Samarium Cobalt - Magnetic Properties									
Grade	Type ²	Br (kGauss)	Hc (kOersteds)	Hci (kOersteds)	BHmax (MGOe)	Temperature Coefficients (%/°C)		Maximum Operating Temp @ Pc = 2 ⁽²⁾	
		Range	Typical	Minimum	Range	of Br	of Hci	(°C)	(°F)
<u>S3410</u>	2:17	11,3 ~ 12,1	10,0	10,0	29 ~ 34	-0.03	-0.22	~ 300	~ 570
<u>S3320</u>	2:17	11,2 ~ 12,0	10,6	20,0	28 ~ 33	-0.04	-0.27	~ 325	~ 610
<u>S3310</u>	2:17	11,2 ~ 12,0	9,0	10,0	28 ~ 33	-0.04	-0.25	~ 300	~ 570
<u>S3120</u>	2:17	10,7 ~ 11,5	10,3	20,0	25 ~ 31	-0.04	-0.20	~ 350	~ 660
<u>S3018</u>	2:17	10,2 ~ 11,2	9,8	18,0	24 ~ 30	-0.04	-0.20	~ 400	~ 750
<u>S3007</u>	2:17	10,5 ~ 11,2	8,25	7,00	24 ~ 30	-0.04	-0.17	~ 250	~ 480
<u>S2909</u>	2:17	10,2 ~ 11,0	9,25	9,00	25 ~ 29	-0.03	-0.17	~ 300	~ 570
<u>S2809</u>	2:17	10,0 ~ 10,8	9,25	9,00	24 ~ 28	-0.03	-0.19	~ 300	~ 570

Πίνακας συντελεστών συναγωγής διαφόρων υλικών:

Metal	$k = \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Misc.solids	$k = \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Aluminium	237	Asphalt	1.26
Antimony	18.5	Bitumen	0.17
Beryllium	218	Br'ze Block	0.15
Brass	110	Brickwork	0.6
Cadmium	92	Brick-Dense	1.6
Cobalt	69	Carbon	1.7
Constantan	22	Conc-LD	0.2
Copper	398	Conc-MD	0.5
Gold	315	Conc-HD	1.5
Iridium	147	Firebrick	1.09
Cast Iron	55	Glass	1.05
Pure Iron	80.3	Glass -Boro.	1.3
Wr't Iron	59	Ice	2.18
Lead	35.2	Limestone	1.1
Magnesium	156	Mica	0.75
Molybdenum	138	Cement	1.01
Monel	26	Parafin Wax	0.25
Nickel	90.5	Porcelain	1.05
Platinum	73	Sand	0.06
Silver	427		
C.Steel	50	Insulation	$k = \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
St.Steel	25	Balsa	0.048
Tin	67	Straw-Comp	0.09
Zinc	113	Cotton Wool	0.029
		Polystyrene-Exp'd	0.03
Plastics		Felt	0.04
Acrylic	0.2	Glass Wool	0.04(20° C
Nylon 6	0.25;	Kapok	0.034
Polythene High Den	0.5	Magnesia	0.07
PTFE	0.25	Plywood	0.13
PVC	0.19	Rock Wool	0.045
		Sawdust	0.06
Misc.solids	$k = \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Liquids	$k = \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Asphalt	1.26	Benzene	0.16
Bitumen	0.17	Carb Tet'ide	0.11

Br'ze Block	0.15	Acetone	0.16
Brickwork	0.6	Ether	0.14
Brick-Dense	1.6	Glycerol	0.28
Carbon	1.7	Kerosene	0.15
Conc-LD	0.2	Mercury	8
Conc-MD	0.5	Methanol	0.21
Conc-HD	1.5	Machine Oil	0.15
Firebrick	1.09	Water	0.58
Glass	1.05	Sodium	84
Glass -Boro.	1.3		
Ice	2.18	Gases	$k = Wm^{-1}K^{-1}$
Limestone	1.1	Air	0.024
Mica	0.75	Ammonia	0.022
Cement	1.01	Argon	0.016
Parafin Wax	0.25	Carbon Dio	0.015
Porcelain	1.05	Carbon Mon	0.023
Sand	0.06	Helium	0.142
		Hydrogen	0.168
Insulation	$k = Wm^{-1}K^{-1}$	Methane	0.030
Balsa	0.048	Nitrogen	0.024
Straw-Comp	0.09	Oxygen	0.024
Cotton Wool	0.029	Water Vap.	0.016
Polystyrene-Exp'd	0.03		
Felt	0.04		
Glass Wool	0.04(20° C		
Kapok	0.034		
Magnesia	0.07		
Plywood	0.13		
Rock Wool	0.045		

Βιβλιογραφία

1. Design of Rotating Electrical Machines / Juha Pyrhonen, Topani Jokinen, Valeria Hrabovcova / Δθδόξης Wiley – 2009
2. Ι. Α. Τεγόπουλος, «Ηλεκτρικές Μηχανές», Μέρος Β', Εκδόσεις Συμμετρία, 1991
3. J. K. Gieras and M. Wing, «Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications», New York: Marcel Dekker, 1997.
4. Enrique L. Carrillo Arroyo, «Modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor drive system», Thesis, Puerto Rico, 2006.
5. Stephen J. Chapman, «Electric Machinery Fundamentals», third edition, McGraw – Hill, 2000.
6. S. O. Kasap, «Principles of electronic materials and devices», second edition, McGraw – Hill, 2002.
7. Διονύσης Κ. Ασημακόπουλος, Βασιλική Ι. Λυγερού, Γεώργιος Α. Αραμπατζής, «Μεταφορά Θερμότητας», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2009.
8. M. Beniakar, T. Kefalas, A. Kladas, «Investigation of the Impact of the Operational Temperature on the Performance of a Surface Permanent Magnet Motor», Journal of Materials Science Forum, vol. 670, pp. 259-264, 2011.
9. T. D. Kefalas and A. G. Kladas, «Finite Element Transient Thermal Analysis of PMSM for Aerospace Applications», Proceedings of the 20th International Conference on Electrical Machines ICEM 2012, Marseille, France, September 2-5, 2012.
10. T. D. Kefalas, «Intermediate Deliverable Report D3.2 : Motor Thermal Model», 2011.
11. Θερμική Ανάλυση Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών / Ευάγγελος Λ. Λαναράς 2011
12. Introduction to Power Systems Class Notes / J.L. Kirtley Jr / MIT - Department of Electrical Engineering and Computer Science
13. Overview of Recent Progress in Sm-Co Based Magnets / LID Jin-fang, Payal Vora, Michael Walmer
14. Control Systems Division – Military, «Electrohydrostatic Actuation Systems», Parker Aerospace, Parker Hannifin Corporation, Irvine, CA, 2006
15. Meng Fanliang, «Actuation system design with electrically powered actuators», Cranfield University, 2011.
16. Overview of Recent Progress in Sm-Co Based Magnets / LID Jin-fang, Payal Vora, Michael Walmer / (Electron Energy Corporation, 924 Links Ave, Landisville, PA 17528, USA)

17. Measurements and Simulations of the Convective Heat Transfer Coefficients on the End Windings of an Electrical Machine / Martin Hettegger, Bernhard Streibl, Oszkár Bíró, and Harald Neudorfer
18. Improving Motor Efficiency and Motor Miniaturisation The Role of Thermal Simulation / Dr David Staton Motor Design Ltd Presentation
19. <http://www.wikipedia.org/>
20. <http://www.engineeringtoolbox.com/>
21. http://www.roymech.co.uk/Related/Thermos/Thermos_HeatTransfer.html

Λογισμικό

1. Διαδικτυακά διαθέσιμος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων / υπολογιστικό πρόγραμμα: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>
2. Αριθμητικό περιβάλλον υπολογισμών: Matlab (Mathworks)
Εργαλείο μοντελοποίησης, προσομοίωσης και ανάλυσης δυναμικών συστημάτων: Simulink (Mathworks) / Έκδοση 2011a
<http://www.mathworks.com/>
3. Σχεδιαστικό πρόγραμμα: AutoCAD 2013 (Autodesk)
<http://www.autodesk.com/products/autodesk-autocad/overview>
4. Πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων: Office-Excel 2013 (Microsoft)
<http://office.microsoft.com/el-gr/excel/>
5. Επαγγελματικό λογισμικό σχεδίασης διαγραμμάτων - Microsoft Visio 2013
<http://office.microsoft.com/el-gr/visio/>