



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

## Θερμική Ανάλυση Σύγχρονου Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Α. Μπέζας

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2016





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

## Θερμική Ανάλυση Σύγχρονου Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Α. Μπέζας

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29<sup>η</sup> Μαρτίου 2016.

.....

Κλαδάς Αντώνιος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Μανιάς Στέφανος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παπαθανασίου Σταύρος  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2016

.....

Αθανάσιος Α. Μπέζας

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

Copyright © Αθανάσιος Α. Μπέζας 2016

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 έχει ως αντικείμενο τα θερμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των ηλεκτρικών μηχανών. Η θερμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών μηχανών αποτελεί κρίσιμη παράμετρο που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη σχεδίαση τους, καθώς επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία τους αλλά και τη διάρκεια ζωής αυτών.

Ο κινητήρας που μελετάται στην παρούσα εργασία προορίζεται για εφαρμογή σε ηλεκτρικό όχημα, και η θερμική του συμπεριφορά μελετάται με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και μέσω ενός ισοδύναμου θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων. Αρχικά, μελετώνται τα θερμικά φαινόμενα που διέπουν τη λειτουργία του ηλεκτρικού κινητήρα και περιγράφονται οι μαθηματικές σχέσεις που διέπουν τη μετάδοση της θερμότητας στο εσωτερικό της μηχανής. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται το ισοδύναμο θερμικό μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων όπου περιγράφονται αναλυτικά ο τρόπος σύνδεσης των στοιχείων του κυκλώματος αλλά και το πώς υπολογίστηκαν τα διάφορα στοιχεία που το απαρτίζουν. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιτυγχάνει καλά αποτελέσματα απαιτώντας πολύ περιορισμένο χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος και μικρή υπολογιστική ισχύ. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η ανάλυση του προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τρισδιάστατη γεωμετρία, η οποία επιτυγχάνει καλύτερη ακρίβεια από την ανάλυση δύο διαστάσεων, απαιτώντας όμως μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ και χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις στον υφιστάμενο κινητήρα για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων θερμικής ανάλυσης που αναπτύχθηκαν.

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδεικνύεται η εγκυρότητα των δύο μεθόδων θερμικής ανάλυσης και επιχειρείται σύγκρισή τους ώστε να διαπιστωθούν τα σχετικά τους πλεονεκτήματα με βάση την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ και τον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος.

**Λέξεις κλειδιά :** Ηλεκτρικός κινητήρας, μόνιμοι μαγνήτες, θερμικά φαινόμενα, μετάδοση θερμότητας, θερμική ανάλυση, ισοδύναμο κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, τρισδιάστατη αναπαράσταση.



## Abstract

The purpose of this thesis is to study the thermal phenomena that take place in electrical motors. The thermal behavior of electrical motors is a critical parameter concerning their design and construction, as it greatly affects their reliability as well as their lifetime.

The motor we studied in this thesis is used in an electric vehicle, and the analysis of the thermal behavior is based on the finite element method and an equivalent thermal model with lumped parameters. Initially, the thermal phenomena that take place during the electrical motor operation are studied and the mathematical relations that describe the heat transfer in the motor are presented. Next, an equivalent thermal model with lumped parameters is developed, the respective circuit structure is explained and an analytical evaluation of the involved parameters is proposed. This method achieves results with acceptable accuracy, requiring small execution time and reduced memory space. Then, the problem is solved by using the finite element method in three dimensional configurations, which provides very accurate results at the expense of increased computational means and execution time. Finally, experimental measurements on the motor were performed for validating both thermal analysis methods developed.

The thesis highlights the suitability of both methods for thermal analysis of the motor and compares the relative advantages in terms of precision, the computational means and execution time.

**Key words:** Electric motor, permanent magnets, thermal phenomena, heat transfer, thermal analysis, equivalent circuit with lumped parameters, finite element method, 3D configuration





## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά για την ανάθεση στο πρόσωπό μου του ενδιαφέροντος θέματος και την πολύτιμη καθοδήγησή του.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνονται στον διδακτορικό φοιτητή Κρασόπουλο Χρήστο για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση της εργασίας και τις πολύτιμες επισημάνσεις του.



# Περιεχόμενα

Περίληψη	σελ. 5
Abstract	σελ. 7
Ευχαριστίες	σελ. 9
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</b>	σελ. 13
1.1 Γενικά	σελ. 13
1.2 Διάρθρωση της εργασίας	σελ. 14
1.3 Σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών	σελ. 14
1.4 Ανάλυση λειτουργίας Σύγχρονου Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών	σελ.18
1.5 Θερμικά φαινόμενα στους ηλεκτροκινητήρες	σελ.20
1.6 Μέθοδοι μέτρησης και ανάλυσης θερμικών φαινομένων	σελ.20
<b>Κεφάλαιο 2: Θερμικά Φαινόμενα</b>	σελ.23
2.1 Γενικά	σελ.23
2.2 Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας	σελ.24
2.3 Αγωγή (Conduction)	σελ.25
2.3.1 Μονοδιάστατο πρόβλημα	σελ.26
2.3.2 Τρισδιάστατο πρόβλημα	σελ.28
2.4 Συναγωγή (Convection)	σελ.30
2.5 Ακτινοβολία (Radiation)	σελ.35
2.6 Θερμικά φαινόμενα στις ηλεκτρικές μηχανές	σελ.36
2.7 Θερμοκρασιακοί περιορισμοί στην λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών	σελ.40
2.8 Ψύξη ηλεκτρικών μηχανών	σελ.41
2.9 Θερμική Αντίσταση	σελ.42
2.10 Κατανομή θερμοκρασίας σε κυλινδρική διάταξη	σελ.43
2.11 Μέθοδοι υπολογισμού μετάδοσης θερμότητας στις ηλεκτρικές μηχανές	σελ.45
<b>Κεφάλαιο 3 : Μέθοδος συγκεντρωμένων παραμέτρων</b>	σελ.47
3.1 Γενικά	σελ.47
3.2 Παραδείγματα κυκλωμάτων συγκεντρωμένων παραμέτρων	σελ.47
3.3 Θερμικά μεγέθη	σελ.50
3.4 Μέθοδος των κόμβων	σελ.52
3.5 Υπολογισμός αντιστάσεων για γενικές γεωμετρίες	σελ.54
3.6 Γεωμετρία και χαρακτηριστικά μηχανής	σελ.57
3.7 Τοποθέτηση κόμβων στο σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών	σελ.61

3.8 Το μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων _____	σελ.63
3.8.1 Υπολογισμός των πηγών θερμότητας _____	σελ.65
3.8.2 Υπολογισμός των πυκνωτών _____	σελ.65
3.8.3 Υπολογισμός των αντιστάσεων _____	σελ.68
3.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης _____	σελ.76
<b>Κεφάλαιο 4 : Θερμική ανάλυση με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων _____</b>	<b>σελ.79</b>
4.1 Γενικά _____	σελ.79
4.2 Μετάδοση θερμότητας στο εσωτερικό της μηχανής _____	σελ.80
4.2.1 Μηχανισμός της αγωγής _____	σελ.80
4.2.2 Μηχανισμός της συναγωγής _____	σελ.81
4.3 Οριακές συνθήκες _____	σελ.81
4.4 Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων _____	σελ.81
4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης _____	σελ.89
<b>Κεφάλαιο 5 : Πειραματική επιβεβαίωση και σύγκριση αποτελεσμάτων _____</b>	<b>σελ.99</b>
5.1 Πειραματική διάταξη _____	σελ.99
5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων της πειραματικής διάταξης _____	σελ.102
5.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων προσομοίωσης με τα πειραματικά _____	σελ.105
5.4 Συμπεράσματα _____	σελ.109
5.5 Πρωτότυπη συνεισφορά της εργασίας _____	σελ.110
5.6 Θέματα περαιτέρω διερεύνησης _____	σελ.110
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ _____</b>	<b>σελ.111</b>
<b>Παράρτημα Α : Κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου θερμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων _____</b>	<b>σελ.111</b>
<b>Βιβλιογραφία _____</b>	<b>σελ.117</b>

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή



### 1.1 Γενικά

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος και αφορά τη θερμική ανάλυση ενός ηλεκτρικού κινητήρα υψηλής απόδοσης και μικρού βάρους, που χρησιμοποιείται ως κινητήρας ενός πειραματικού μονοθέσιου οχήματος, το

οποίο σχεδιάστηκε στα πλαίσια της συμμετοχής στον πανευρωπαϊκό διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου Shell Eco Marathon, που διεξάγεται στο Λονδίνο. Ως εκ τούτου ο κινητήρας πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση και μειωμένο βάρος.

Η ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα γίνεται προσομοιώνοντας τον κινητήρα με διάφορα μοντέλα όπως με τη μέθοδο των συγκεντρωμένων παραμέτρων και με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών όπου στο τέλος έγινε η σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

## 1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία αναπτύσσεται σε πέντε κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται οι στόχοι της εργασίας και περιγράφεται η πορεία που ακολουθήθηκε. Επιπλέον γίνεται μια μικρή αναφορά στους Σύγχρονους Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών καθώς και στα οφέλη που φέρει η χρήση τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα θερμικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών. Αναλύονται οι τρόποι μετάδοσης της θερμότητας στις ηλεκτρικές μηχανές, παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακοί περιορισμοί που υπάρχουν και τέλος γίνεται μια αναφορά στις μεθόδους ψύξης των ηλεκτρικών μηχανών.

Στο τρίτο κεφάλαιο προσομοιώνεται η θερμική συμπεριφορά του ηλεκτρικού κινητήρα με τη μέθοδο των συγκεντρωμένων παραμέτρων όπου εξάγεται αναλυτικά το ισοδύναμο θερμικό μοντέλο καθώς και οι τρόποι υπολογισμού των στοιχείων που το απαρτίζουν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο προσεγγίζουμε τη θερμική ανάλυση του κινητήρα με την εφαρμογή του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά γίνεται μια θεωρητική περιγραφή της μεθόδου καθώς και οι οριακές συνθήκες που ισχύουν και στη συνέχεια με τη βοήθεια διαφόρων προγραμμάτων από το διαδίκτυο πραγματοποιείται η θερμική ανάλυση τόσο σε δισδιάστατη όσο και σε τρισδιάστατη γεωμετρία.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις που προέκυψαν από την πειραματική διάταξη, η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με αυτά της πειραματικής διάταξης, τα συμπεράσματα από την παρούσα εργασία καθώς και διάφορα θέματα περαιτέρω διερεύνησης που προέκυψαν.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται παράρτημα με σχέδια για την τρισδιάστατη σχεδίαση του κινητήρα που χρησιμοποιείται στη θερμική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

## 1.3 Σύγχρονος Κινητήρας Μονίμων Μαγνητών

Ως ηλεκτρική μηχανή ορίζεται η συσκευή που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και το αντίστροφο. Η μετατροπή της ενέργειας από τη μία μορφή στην άλλη γίνεται με την αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων και των αγωγών ρεύματος. Όταν μια τέτοια συσκευή χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική καλείται κινητήρας ενώ στην περίπτωση της μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζεται γεννήτρια. Γενικότερα, οι ηλεκτρικές μηχανές κατηγοριοποιούνται σε μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, τις σύγχρονες μηχανές και τις μηχανές επαγωγής (ή αλλιώς ασύγχρονες), και τις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Στην παρούσα εργασία ασχολούμαστε με τις σύγχρονες μηχανές.

Οι σύγχρονες μηχανές οφείλουν το όνομά τους στο γεγονός πως η ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας γίνεται σε μία ορισμένη ταχύτητα περιστροφής, τη σύγχρονη ταχύτητα, η οποία είναι ανάλογη με τη συχνότητα των εναλλασσόμενων ρευμάτων και τάσεων του τυμπάνου της μηχανής. Στις περισσότερες εφαρμογές το τύλιγμα τυμπάνου των σύγχρονων μηχανών είναι τριφασικό και διανέμεται στους άυλακες του στάτη ενώ το τύλιγμα πεδίου (ή τύλιγμα διέγερσης) βρίσκεται στο δρομέα και τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα μέσω δακτυλίων και ψηκτρών. Βέβαια όλο και περισσότερο γίνεται χρήση των Σύγχρονων Μόνιμων Μαγνητών όπου το πεδίο δημιουργείται με τη χρησιμοποίηση μόνιμων μαγνητών αντί για τύλιγμα τυμπάνου.

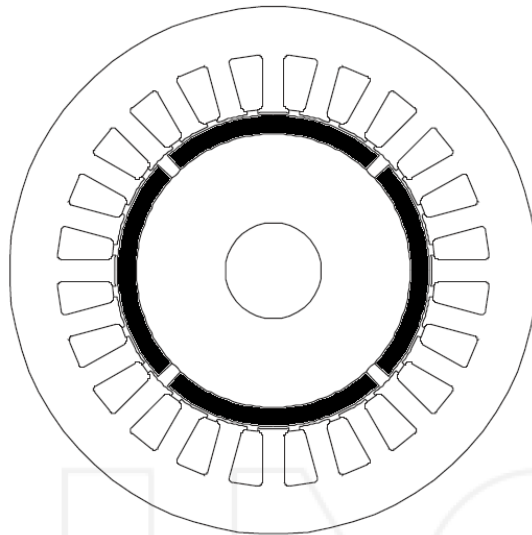
Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση των Σύγχρονων Μηχανών Μόνιμων Μαγνητών (Permanent Magnet Synchronous Machines) οφείλεται στο γεγονός ότι οι νέοι μόνιμοι μαγνήτες παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής. Τα τυλίγματα συνεχούς ρεύματος αντικαθίστανται από τους μαγνήτες επομένως οι κινητήρες δεν έχουν τις απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων διέγερσης με αποτέλεσμα να έχουν υψηλότερη απόδοση. Επιπλέον το μόνιμο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τους μαγνήτες απαλλάσσει τον κατασκευαστή από την ανάγκη παροχής συνεχούς ρεύματος μέσω ψηκτρών και δακτυλίων, συνεισφέροντας περαιτέρω στην αύξηση της απόδοσης του κινητήρα και στη μείωση του μεγέθους του. Οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών παρουσιάζουν μεγαλύτερη ροπή, ισχύ εξόδου και μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο σε σύγκριση με τους σύγχρονους κινητήρες που φέρουν τύλιγμα διέγερσης. Ως μειονεκτήματα των μηχανών μόνιμων μαγνητών αποτελούν ο πολύπλοκος έλεγχος τους καθώς η μόνιμη τιμή μαγνήτισης τους καθιστά δύσκολο τον έλεγχο της διέγερσης, και επιπλέον υπάρχει ο κίνδυνος -από τις μηχανικές καταπονήσεις και την αύξηση της θερμοκρασίας- απομαγνήτισης των μαγνητών που οδηγεί σε καταστροφή του κινητήρα.

Στις Σύγχρονες Μηχανές Μόνιμων Μαγνητών ο στάτης είναι ίδιος όπως και στις μηχανές επαγωγής. Ο δρομέας μπορεί να θεωρηθεί σε διαφορετικές τοπολογίες ανάλογα με το πώς είναι τοποθετημένοι οι μόνιμοι μαγνήτες. Έτσι διακρίνουμε τις μηχανές :

- **Επιφανειακών Μόνιμων Μαγνητών**

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι κολλημένοι στην επιφάνεια του δρομέα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από διάτρητα ελάσματα ή σίδηρο. Η μηχανή μπορεί να στρέφεται από εξωτερική πηγή και τα τυλίγματα του στάτη παράγουν συμμετρικές τριφασικές ημιτονοειδείς τάσεις. Στο

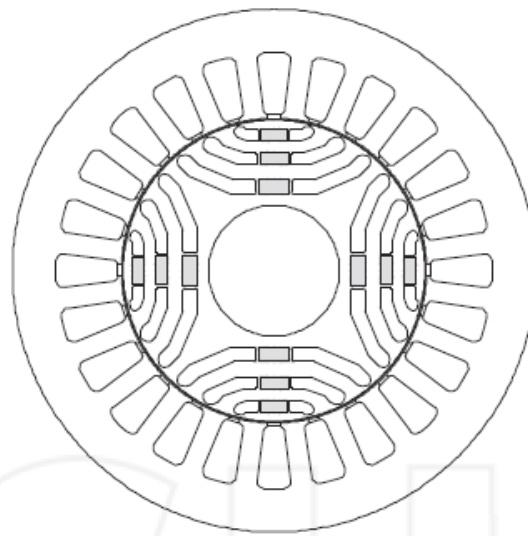
σχεδιασμό αυτό οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στο διάκενο της μηχανής , με αποτέλεσμα να εκτίθενται στις αρμονικές του στάτη και να παράγουν δινορεύματα όταν έχουμε μεταβλητές στροφές.



Σχήμα 1: Παράδειγμα Μηχανής Επιφανειακών Μαγνητών [6]

- **Εμφυτευμένων Μονίμων Μαγνητών**

Σε αυτή την τοπολογία οι μόνιμοι μαγνήτες βρίσκονται εμφυτευμένοι στο εσωτερικό του δρομέα. Έτσι οι μαγνήτες είναι προστατευμένοι από τις υψηλές αρμονικές των πόλων και είναι εφικτή η επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων περιστροφής σε σχέση με αυτές των επιφανειακών μαγνητών εξαιτίας της συμπαγούς δομής τους.

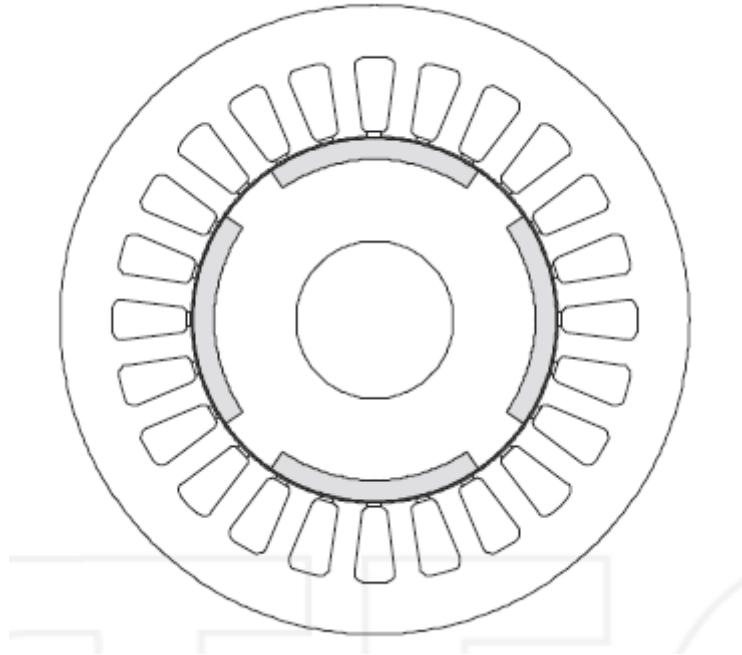




Σχήμα 2: Παράδειγμα μηχανής Εμφυτευμένων Μαγνητών [6]

- **Εσωτερικών Μονίμων Μαγνητών**

Στη τοπολογία αυτή οι μόνιμοι μαγνήτες βρίσκονται τοποθετημένοι στην εσωτερική επιφάνεια του δρομέα.



Σχήμα 3: Παράδειγμα μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών [6]

Επιπλέον οι Σύγχρονες Μηχανές Μονίμων Μαγνητών κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την διεύθυνση της μαγνητικής ροής που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες. Έτσι διακρίνουμε :

- **Αξονικής ροής (AFPM)**

Η μαγνητική ροή που παράγεται είναι κάθετη στην ακτίνα της μηχανής και διέρχεται από το διάκενο, ακτινικά στα τυλίγματα του στάτη για να κλείσει το μαγνητικό κύκλωμα.

- **Ακτινικής ροής (RFPM)**

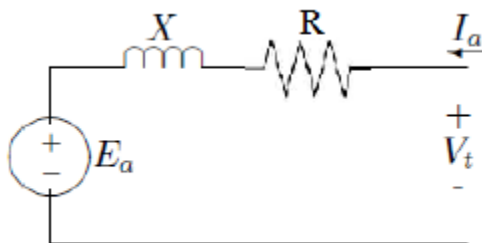
Η μαγνητική ροή είναι παράλληλη στην ακτίνα της μηχανής που είναι κυλινδρικής δομής.

Ένας ακόμα διαχωρισμός που μπορεί να γίνει στις Σύγχρονες Μηχανές Μονίμων Μαγνητών είναι ανάλογα με το πως κατανέμεται η πυκνότητα της μαγνητικής ροής και η καμπύλη του ρεύματος διέγερσης . Επομένως προκύπτουν :

- **Σύγχρονες Μηχανές Μονίμων Μαγνητών**  
Σε αυτή την κατασκευή η μαγνητική ροή και τα τυλίγματα του στάτη κατανέμονται ημιτονικά
- **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 του ρεύματος, ενώ τα τυλίγματα του στάτη είναι συγκεντρωμένα.

#### 1.4 Ανάλυση λειτουργίας Σύγχρονου Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών

Το ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας φαίνεται παρακάτω



Σχήμα 4: Ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας σύγχρονου κινητήρα

Εφαρμόζοντας τον νόμο τάσεων Kirchhoff εξάγεται η τάση εξόδου του κινητήρα

$$V_t = E_\alpha + (R + jX) \cdot I_\alpha \Leftrightarrow E_\alpha = V_t - (R + jX) \cdot I_\alpha \quad (1.1)$$

Όπου

$V_t$  η τάση στα άκρα κάθε φάσης του στάτη του κινητήρα

$R$  η ωμική αντίσταση του τυλίγματος μιας φάσης

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

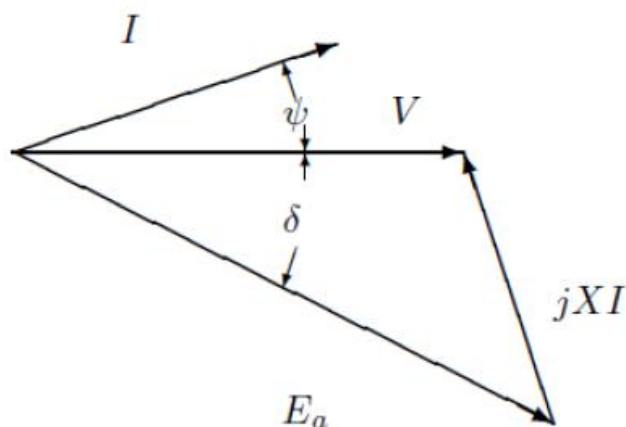
$I_\alpha$  το ρεύμα που διαρρέει κάθε φάση του στάτη

$E_\alpha$  η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται λόγω της περιστροφής του δρομέα. Η τιμή της δίνεται από τον τύπο:

$$E_\alpha = K \cdot \varphi \cdot \omega \quad (1.2)$$

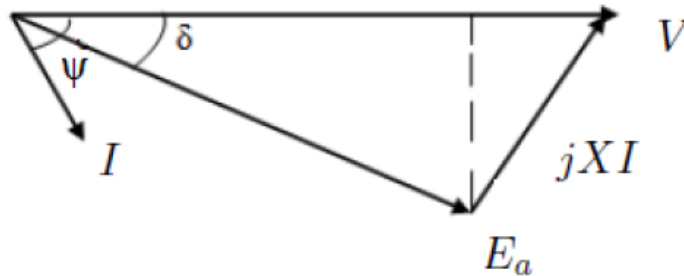
Από τον παραπάνω τύπο φαίνεται ότι η τάση αυτή εξαρτάται από την σταθερά  $K$  η οποία εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κάθε κινητήρα, από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα  $\omega$ , αλλά και από την μαγνητική ροή  $\varphi$ .

Όταν ο κινητήρας έχει χωρητική συμπεριφορά, απορροφά πραγματική ισχύ  $P$  και αποδίδει άεργο ισχύ  $Q$  στην πηγή τροφοδότησης του. Το μέτρο του διανύσματος  $E_a$  είναι μεγαλύτερο από αυτό της τάσης ακροδεκτών  $V_t$ .



Σχήμα 5: Διανυσματικό διάγραμμα Σύγχρονου κινητήρα με χωρητική συμπεριφορά

Όταν ο κινητήρας έχει επαγωγική συμπεριφορά απορροφά τόσο πραγματική όσο και άεργο ισχύ από την πηγή τροφοδότησης. Έτσι το μέτρο της τάσης διέγερσης μπορεί να είναι μικρότερο ίσο ή μεγαλύτερο από την τάση ακροδεκτών.



Σχήμα 6 : Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα με επαγωγική συμπεριφορά

### 1.5 Θερμικά φαινόμενα στους ηλεκτροκινητήρες

Η μετάδοση της θερμότητας αποτελεί σημαντικό πεδίο ενδιαφέροντος από σχεδιαστές και κατασκευαστές ηλεκτρικών μηχανών. Οι μεταβολές στη θερμοκρασία επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τη λειτουργία και τη διάρκεια ζωής των ηλεκτρικών μηχανών. Ειδικότερα, όσον αφορά τους Σύγχρονους Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών είναι απαραίτητο να μπορείς να προβλέψεις μια ακριβή κατανομή θερμοκρασιών στα πιο σημαντικά μέρη της μηχανής για να αποφευχθούν βλάβες όπως η κατάρρευση της μόνωσης των τυλιγμάτων του στάτη ή μια πιθανή απομαγνήτιση των μαγνητών. Η γνώση της θερμικής συμπεριφοράς σε διαφορετικές καταστάσεις βοηθάει στο να αποφευχθεί μια υπερθέρμανση της μηχανής, αλλά επιπλέον μπορεί να βελτιώσει τη χρήση της μηχανής σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

Όσον αφορά κινητήρες που προορίζονται για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα η θερμοκρασία του κινητήρα μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία όλου του οχήματος, όπως είναι διάφορα μηχανικά και ηλεκτρονικά συστήματα πλησίον του κινητήρα. Βέβαια, ο περιορισμός και ο έλεγχος της θερμοκρασίας είναι ευκολότερος σε κινητήρες ηλεκτρικών οχημάτων από ότι σε στατικές μηχανές, καθώς η ροή αέρα με την κίνηση του οχήματος συμβάλλει στη ψύξη του κινητήρα. Παράλληλα, περιορισμοί στη λειτουργία της μηχανής όπως είναι περιοριστές για την ταχύτητα στρέψης και τα ρεύματα, εξασφαλίζουν τη λειτουργία της μηχανής με υψηλή απόδοση, γεγονός που οδηγεί σε μείωση των απωλειών δηλαδή τις πηγές θερμότητας και τα αίτια ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών.

### 1.6 Μέθοδοι μέτρησης και ανάλυσης θερμικών φαινομένων

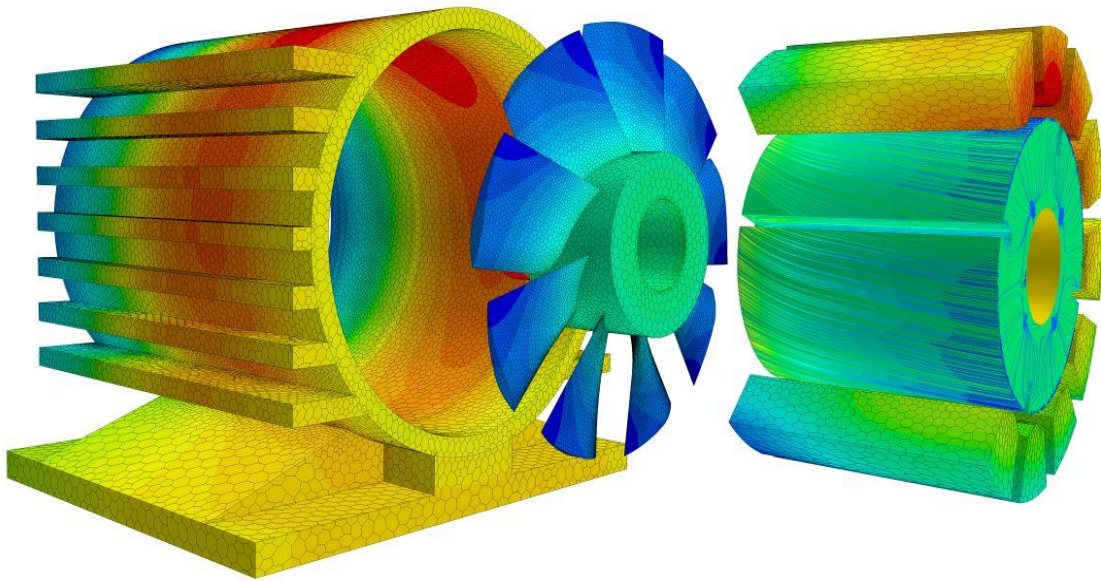
Η θερμική ανάλυση και προσομοίωση στις ηλεκτρικές μηχανές έχει ως στόχο την αναπαράσταση της λειτουργίας τους, μέσω ενός μοντέλου για την επαρκή γνώση της θερμικής συμπεριφοράς τους. Πριν τη λειτουργία και τις πειραματικές μετρήσεις χρειάζεται να έχουμε

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 του 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 ενός 3D προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Για το μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων υπάρχουν πολλοί αποδοτικοί αλγόριθμοι διαθέσιμοι στο διαδίκτυο. 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 η 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 της θα μας δώσουν θερμοκρασίες σε κρίσιμα σημεία της μηχανής που μας ενδιαφέρουν.

Για τις πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν θερμίστορ PTC που τοποθετήθηκαν σε τρία μέρη της μηχανής.



## Κεφάλαιο 2: Θερμικά Φαινόμενα



### 2.1 Γενικά

Η παραγωγή και μετάδοση θερμότητας καθώς και η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στις ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν ένα μεγάλο πεδίο έρευνας και σχεδιασμού. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση αλλά και τη διάρκεια ζωής της μηχανής καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας καθορίζει τη μέγιστη ισχύ εξόδου.

Η ακριβής πρόβλεψη της μεταφοράς θερμότητας είναι πολύ πιο δύσκολη από τη συμβατική ηλεκτρομαγνητική σχεδίαση της ηλεκτρικής μηχανής, ωστόσο διάφορα προβλήματα που προκύπτουν από τη μεταφορά θερμότητας μπορούν ως ένα βαθμό να ξεπεραστούν με διάφορες εμπειρικές γνώσεις που έχουν προκύψει.

Η παραγωγή και η μετάδοση της θερμότητας αποτελεί αντικείμενο της θερμικής μηχανικής που ασχολείται με την ανταλλαγή θερμικής ενέργειας και θερμότητας μεταξύ των φυσικών συστημάτων. Η απαραίτητη προϋπόθεση για την ύπαρξη του φαινομένου της μετάδοσης της

Θερμότητας είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των μερών ενός συστήματος, όπου η ροή θερμότητας ρέει φυσικά από τα σώματα υψηλής θερμοκρασίας προς αυτά χαμηλότερης θερμοκρασίας σύμφωνα με το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Η μεταφορά της θερμότητας ανάλογα με το ρυθμό και τον τρόπο που μεταφέρεται έχει ταξινομηθεί σε διάφορους μηχανισμούς.

## 2.2 Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας

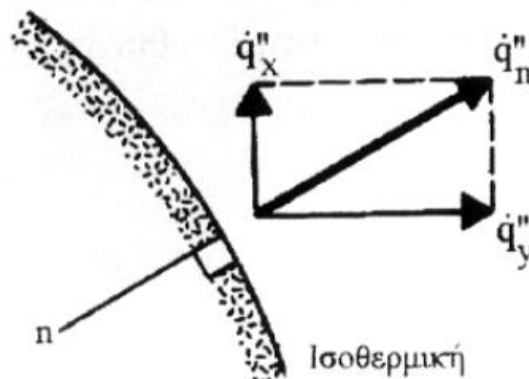
Οι μηχανισμοί που μεταδίδεται η θερμότητα από ένα μέρος σε ένα άλλο ενός συστήματος ή από ένα σύστημα σε ένα άλλο είναι οι :

- Με Αγωγή
- Με Συναγωγή
- Με Ακτινοβολία

Για την κατανόηση των παραπάνω μηχανισμών θα πρέπει πρώτα να οριστεί το μέγεθος της *πυκνότητα θερμορροής*  $q$  [ $W/m^2$ ] που για μετάδοση θερμότητας  $dQ[W]$  μέσω μια επιφάνειας  $dS [m^2]$  δίνεται από τη σχέση

$$q = \frac{dQ}{dS} \quad [W/m^2] \quad (2.1)$$

Το διάνυσμα της πυκνότητας θερμορροής είναι πάντα κάθετο στην ισοθερμική επιφάνεια μέσω της οποίας γίνεται η μετάδοση της θερμότητας.



Σχήμα 2.1 : Διάνυσμα πυκνότητας Θερμορροής



Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται μια πιο διεξοδική ανάλυση του κάθε μηχανισμού μετάδοσης θερμότητας ξεχωριστά.

### 2.3 Αγωγή ( Conduction)

*Θερμική Αγωγιμότητα* ή *αλλιώς Αγωγή* ή *Διάχυση* είναι ο μηχανισμός με τον οποίο η θερμότητα μεταδίδεται στο εσωτερικό ενός στερεού ή ενός ακίνητου ρευστού, όταν στο μέσο υπάρχει θερμοκρασιακή κλίση. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων ενός υλικού, που οδηγεί σε μεταφορά ενέργειας από τα σωματίδια μεγαλύτερης ενέργειας προς αυτά χαμηλότερης ενέργειας.

Η θερμοκρασία αποτελεί το μέτρο της κινητικής ενέργειας της τυχαίας κίνησης των σωματιδίων ενός σώματος. Έτσι όταν ένα αντικείμενο έχει υψηλότερη θερμοκρασία από το περιβάλλον ή από άλλα γειτονικά αντικείμενα τα σωματίδιά του έχουν μεγαλύτερη κινητική ενέργεια. Ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή μπορεί να οφείλεται :

- Σε μοριακή αλληλεπίδραση, κατά την οποία μόρια υψηλής κινητικής ενέργειας απελευθερώνουν ενέργεια σε γειτονικά μόρια χαμηλότερης κινητικής ενέργειας μέσω δονήσεων πλέγματος
- Μέσω των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Αυτό είναι χαρακτηριστικό των ρευστών και των καθαρών μετάλλων καθώς ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι μεγάλος σε αντίθεση με μη-μέταλλα. Η θερμική αγωγιμότητα των στερεών εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων και επομένως τα καθαρά μέταλλα είναι καλοί αγωγοί θερμότητας.

Το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας μέσω του μηχανισμού της αγωγής περιγράφεται μαθηματικά από τον νόμο Fourier που χαρακτηρίζει τόσο τα μονοδιάστατα όσο και τα πολυδιάστατα προβλήματα.

Ο γενικός τύπος του νόμου του Fourier είναι

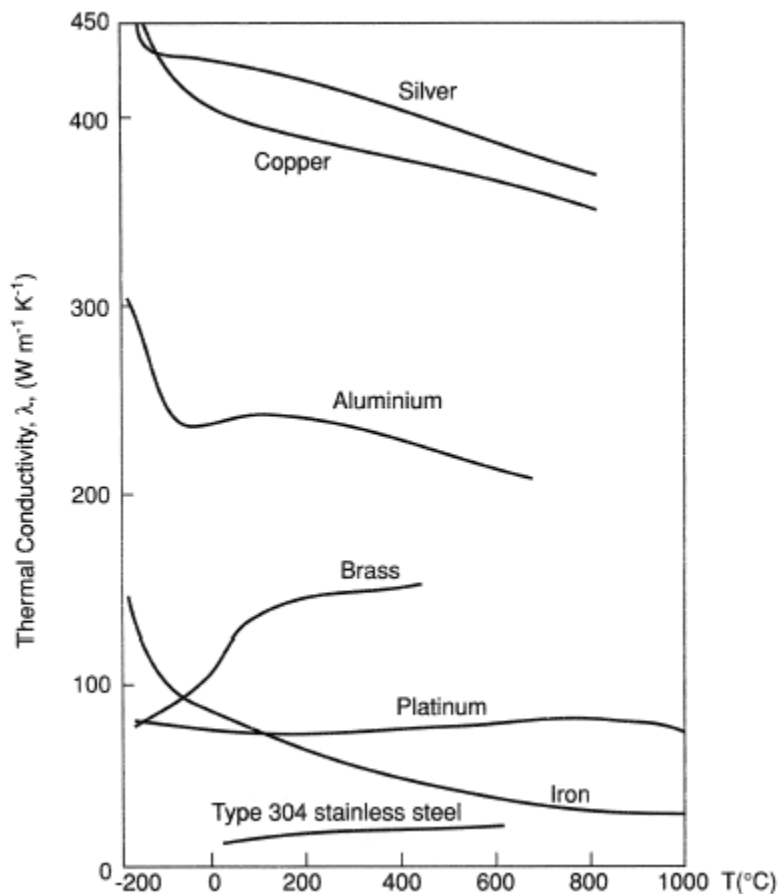
$$\Phi_{th} = -\lambda \cdot S \cdot \nabla T \quad (2.2)$$

Όπου  $\Phi_{th}$  ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας ,  $\lambda$  [W/m·K] ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας,  $S$  [m<sup>2</sup>] η επιφάνεια δια μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά θερμότητας και  $\nabla T$  η παράγωγος της θερμοκρασίας.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  [W/m·K] μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (2.3)$$

Με  $\lambda_0$  η τιμή του συντελεστή στη θερμοκρασία αναφοράς  $T_0$ ,  $\beta$  μία σταθερά που προκύπτει πειραματικά και  $\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία αναφοράς. Στο παρακάτω σχήμα 2.2 απεικονίζεται η σχέση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία για διάφορα στερεά.



Σχήμα 2.2 : Μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για διάφορα μεταλλικά στερεά

### 2.3.1 Μονοδιάστατο πρόβλημα

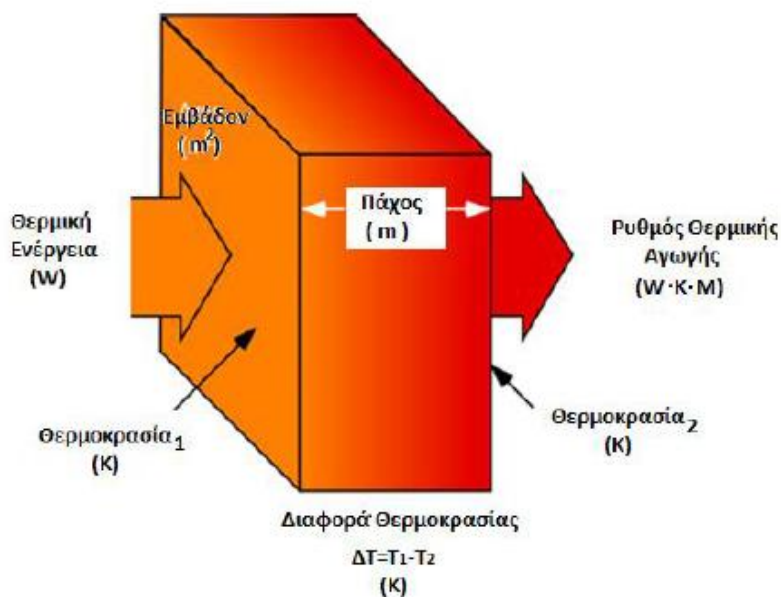
Για τα μονοδιάστατα προβλήματα ο νόμος του Fourier γίνεται :

$$\mathbf{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad [W/m^2] \quad (2.4)$$

Δηλαδή η πυκνότητα θερμορροής  $q$  [ $W/m^2$ ] είναι ανάλογη του αρνητικού γινομένου του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  [ $W/m \cdot K$ ] και της κλίσης της θερμοκρασίας [ $K$ ]. Άρα η θερμορροή θα δίνεται από τη σχέση

$$Q = S \cdot q = -S \cdot \lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad [W] \quad (2.5)$$

Όπου  $S$  [ $m^2$ ] το εμβαδόν της κάθετης επιφάνειας μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά της θερμότητας.



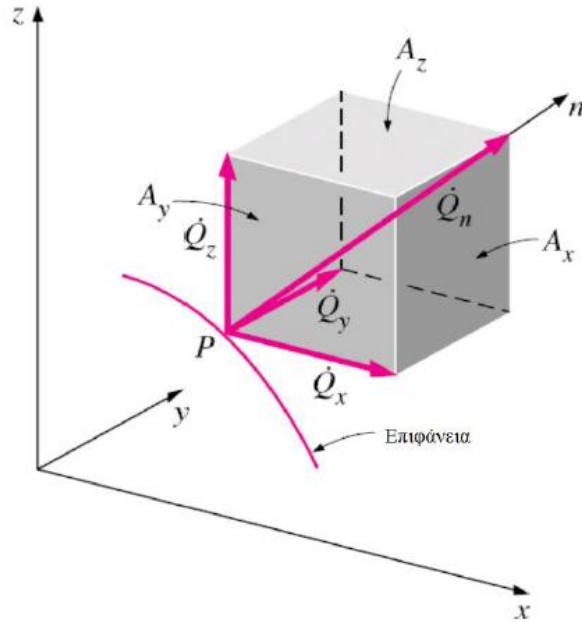
Σχήμα 2.3 : Μηχανισμός αγωγής σε μονοδιάστατο πρόβλημα

Επιπλέον στη περίπτωση που έχουμε αγωγή στη μόνιμη κατάσταση και η θερμοκρασία του ενός συστήματος μένει αμετάβλητη με την πάροδο του χρόνου τότε θα ισχύει  $\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$  όπου  $L$  το πάχος του τοιχώματος που γίνεται η μεταφορά θερμότητας.

Άρα η θερμορροή θα δίνεται από τη σχέση

$$Q = -S \cdot \lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{L} \quad [W] \quad (2.6)$$

### 2.3.2 Τρισδιάστατο πρόβλημα



Σχήμα 2.4 : Μηχανισμός αγωγής σε τρισδιάστατο πρόβλημα

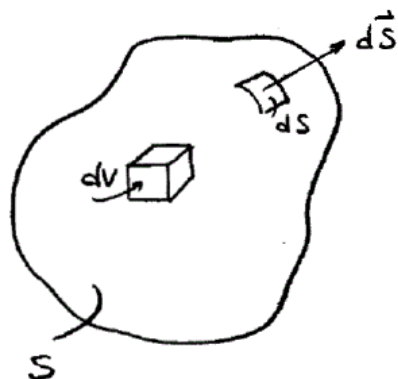
Στην περίπτωση τρισδιάστατου προβλήματος ο νόμος Fourier γίνεται :

$$\mathbf{q}_n = -\lambda \cdot \frac{dT}{dn} \quad (2.7)$$

όπου  $n$  το κάθετο διάνυσμα στην ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4. Με τον όρο ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια εννοούμε τον γεωμετρικό τόπο των σημείων που έχουν την ίδια θερμοκρασία . Επομένως η θερμοκρασία θα είναι μια συνάρτηση των τριών διαστάσεων και επιπλέον και του χρόνου.

Έτσι η (2.7) σε καρτεσιανές συντεταγμένες θα έχει την ακόλουθη μορφή :

$$\vec{q}_n = -\lambda \left[ \hat{i}_x \frac{dT}{dx} + \hat{i}_y \frac{dT}{dy} + \hat{i}_z \frac{dT}{dz} \right] \quad (2.8)$$



Σχήμα 2.5 : Θεωρούμενος όγκος σε τρισδιάστατο πρόβλημα

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:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.9)$$

Όπου με  $E$  συμβολίζουμε την συνολική ενέργεια που υπάρχει στον όγκο  $V$ . Αν συμβολίσουμε με  $q [W/m^3]$  την συνολική ισχύ των πηγών θερμότητας αν μονάδα όγκου τότε προκύπτει ότι :

$$Q_{in} = \int_V q \cdot dV \quad (2.10)$$

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

$$Q_{out} = \int_S \hat{n} \cdot (-\lambda \cdot \nabla T) dS \quad (2.11)$$

Όμως από νόμο Gauss

$$Q_{out} = \int_V \nabla \cdot (\lambda \nabla T) dV \quad (2.12)$$

Ο ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας δίνεται από τη σχέση

$$\frac{dE}{dt} = \int_V \left( \rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \right) dV \quad (2.13)$$

με  $C_p [J/Kg \cdot K]$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού και  $\rho [Kg/m^3]$  η πυκνότητα του υλικού.

Άρα η (2.9) γίνεται

$$\int_V \left( p \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \right) dV = \int_V q dV + \int_V \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) dV \quad (2.14)$$

$$\text{Ή αλλιώς} \quad \nabla (\lambda \cdot \nabla T) + q = p \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.15)$$

Η (2.15) αποτελεί τη γενική εξίσωση θερμικής αγωγής για επίλυση ενός πολυδιάστατου προβλήματος.

Σε πολλές περιπτώσεις ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας θεωρείται σταθερός επομένως η (2.15) απλοποιείται περαιτέρω.

$$\lambda \cdot \nabla^2 T + q = p \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.16)$$

Ορίζοντας ως  $\alpha = \frac{\lambda}{p \cdot C_p}$  το συντελεστή θερμικής διάχυσης του υλικού η (2.16) γράφεται ανάλογα με το σύστημα συντεταγμένων ως :

$$\text{- Καρτεσιανές συντεταγμένες} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.17)$$

- Κυλινδρικές συντεταγμένες

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.18)$$

- Σφαιρικές συντεταγμένες

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r T) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.19)$$

## 2.4 Συναγωγή (Convection)

Συναγωγή είναι ο μηχανισμός εκείνος κατά τον οποίο η θερμότητα μεταδίδεται μεταξύ μιας επιφάνειας ενός στερεού και ενός κινούμενου ρευστού, υγρού ή αερίου, σε επαφή με την στερεή επιφάνεια, όταν αυτά βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία. 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). 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.

Η συναγωγή μπορεί να διακριθεί ανάλογα της ροής του ρευστού σε :

- *Ελεύθερη ή φυσική συναγωγή* : όταν η ροή προκαλείται από τις διαφορετικές πυκνότητες που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές μέσα στον όγκο του ρευστού. Η διαφορά στην πυκνότητα συνεπάγεται δυνάμεις άνωσης που τελικά προκαλούν τη ροή .
- *Εξαναγκασμένη συναγωγή* : όταν η ροή προκαλείται από ανεμιστήρες, αντλίες ή γενικότερα εξωτερικά μέσα
- *Συνδυασμένη συναγωγή* : Όταν οι δύο παραπάνω μορφές συναγωγής συνυπάρχουν. Αυτό συμβαίνει όταν οι δυνάμεις άνωσης λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών είναι μεγάλες, ενώ η ταχύτητα του ρευστού λόγω της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας είναι μικρή.

Η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής περιγράφεται από τον νόμο του Νεύτωνα για τη ψύξη, με την προϋπόθεση πως ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι ανεξάρτητος ή σχετικά ανεξάρτητος από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του στερεού και του περιβάλλοντος.

Ο νόμος του Νεύτωνα αναφέρει πως ο ρυθμός απώλειας θερμότητας ενός σώματος είναι ανάλογος με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντος του. Δηλαδή ο μηχανισμός της συναγωγής μπορεί να περιγραφεί από τον ακόλουθο τύπο :

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot (T - T_{env}) \quad (2.20)$$

Όπου  $h$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] ο συντελεστής συναγωγής,  $T$  [K] η θερμοκρασία του σώματος και  $T_{env}$  [K] η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Αν θεωρήσουμε πως το περιβάλλον είναι ένα ρευστό και ρέει γύρω από ένα στερεό σώμα και  $q$  [ $W/m^2$ ] η πυκνότητα θερμορροής τότε η (2.20) γίνεται

$$q = h \cdot (T_{solid} - T_{fluid}) \quad (2.21)$$

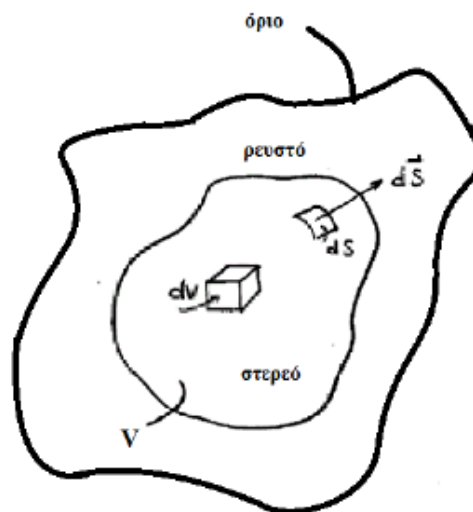
Ο συντελεστής συναγωγής  $h$  σε αντίθεση με το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας δεν αποτελεί ιδιότητα του υλικού καθαυτού αλλά εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες. Εξαρτάται από την ταχύτητα του ρευστού, τη γεωμετρία του προβλήματος, τις ιδιότητες των υλικών, όπως η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα κ.α, αλλά και από το πώς κινείται το ρευστό.

Ο ακριβής υπολογισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι μια πολύ δύσκολη διαδικασία για αυτό αρκετά συχνά χρησιμοποιούνται εμπειρικές τιμές. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τυπικές τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής συναγωγής για μερικά ρευστά. Που όπως φαίνεται υπάρχει ένα μεγάλο εύρος τιμών

Ρευστό συναγωγής	Συντελεστής συναγωγής $h$ [W/m <sup>2</sup> ·K]
Αέρας Φυσική Συναγωγή	5-25
Αέρας Εξαναγκασμένη Συναγωγή	10-200
Νερό	20-100
Νερό Εξαναγκασμένη Συναγωγή	50-10000
Λάδι	50-2000

Πίνακας 2.3.1 : Τυπικές τιμές συντελεστή συναγωγής

Κατά τη θερμική ανάλυση των μηχανών ο συντελεστής συναγωγής παίζει μεγάλο ρόλο στο διάκενο του κινητήρα, το οποίο θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 2.6 : Συναγωγή μεταξύ επιφάνειας ρευστού

Η μετάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής μπορεί να υπολογιστεί μέσω της αρχής διατήρησης της ενέργειας αν θεωρήσουμε ένα στερεό που καταλαμβάνει όγκο  $V$  και ένα ρευστό τα οποία έρχονται σε επαφή μέσω της επιφάνειας  $S$  του στερεού όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6

Θεωρώντας πως  $Q_{out}$  [W] είναι η ροή θερμότητας που εξέρχεται από την επιφάνεια των υλικών,  $Q_g$  η ισχύς που παράγεται από πηγές θερμότητας που βρίσκονται μέσα στο στερεό και  $E_1, E_2$  οι εσωτερικές κινητικές ενέργειες των μορίων των δύο περιοχών στερεού και ρευστού αντίστοιχα.

Εξετάζοντας το στερεό :



Στην επιφάνεια επαφής των δύο υλικών από την αρχή διατήρησης της ενέργειας έχουμε ότι η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια της μάζας του υλικού (κινητική ενέργεια των μορίων) ισούται με τη θερμική ισχύ που παράγεται από τις πηγές θερμότητας μέσα στο στερεό μείον τη ροή θερμότητας που διαδίδεται προς το εξωτερικό του στερεού προς το ρευστό.

Δηλαδή

$$\frac{dE_1}{dt} = Q_g - Q_{out,solid} \quad (2.22)$$

Ορίζοντας ως  $q[W/m^3]$  τις αποδόσεις ισχύος των πηγών θερμότητας ανά μονάδα όγκου, τότε η συνολική ισχύ  $Q_g$  που παράγεται σε όλο τον όγκο του στερεού είναι :

$$Q_g = \int_V q dV \quad (2.23)$$

Η θερμοροή  $Q_{out,solid}$  που μεταδίδεται από το στερεό στο ρευστό υπολογίζεται εφαρμόζοντας το νόμο ψύξης του Newton, θεωρώντας ότι η επιφάνεια επαφής βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T_{solid}$  και  $T_{fluid}$  η θερμοκρασία του ρευστού κοντά στην επιφάνεια επαφής.

Τότε προκύπτει :

$$Q_{out,solid} = \int_S \hat{n} \cdot \vec{q} dS \quad (2.24)$$

Όμως οι θερμοκρασίες  $T_{solid}$  και  $T_{fluid}$  είναι συναρτήσεις θέσης στο χώρο και του χρόνου.

Επομένως ο νόμος ψύξης του Newton δίνει :

$$Q_{out,solid} = \int_S h \cdot [T_{solid}(x,y,z,t) - T_{fluid}(x,y,z,t)] dS \quad (2.25)$$

Όπως και στην περίπτωση της αγωγής στην προηγούμενη ενότητα η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του στερεού μπορεί να εκφραστεί με τη βοήθεια της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας του στερεού. Έτσι :

$$\frac{dE_1}{dt} = \int_V (\rho_{solid} \cdot c_{p_{solid}} \cdot \frac{dT_{solid}(x,y,z,t)}{dt}) dV \quad (2.26)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.23), (2.25) και (2.26) η (2.22) μας δίνει :

$$\int_V (\rho_{solid} \cdot c_{p_{solid}} \cdot \frac{dT_{solid}(x,y,z,t)}{dt}) dV = \int_V q dV - \int_S h \cdot [T_{solid}(x,y,z,t) - T_{fluid}(x,y,z,t)] dS \quad (2.27)$$

Εξετάζοντας το ρευστό :

$$\frac{dE_2}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.28)$$

Όπου  $Q_{in}$  η θερμορροή που εισέρχεται στο ρευστό από το στερεό ,  $Q_{out}$  η θερμορροή που μεταφέρεται από το ρευστό προς το περιβάλλον και  $E_2$  η εσωτερική ενέργεια του ρευστού.

Έτσι θα έχουμε :

$$Q_{in} = Q_{out,solid} = \int_S h \cdot [ T_{solid}(x, y, z, t) - T_{fluid}(x, y, z, t) ] dS \quad (2.29)$$

Και όπως και πριν η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του ρευστού θα εκφραστεί συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho_{fluid}$  και της ειδικής θερμοχωρητικότητας του ρευστού  $Cp_{fluid}$ . Άρα :

$$\frac{dE_2}{dt} = \int_V \left( \rho_{fluid} \cdot Cp_{fluid} \cdot \frac{dT_{fluid}(x,y,z,t)}{dt} \right) dV \quad (2.30)$$

Έτσι η (2.28) από τις (2.29) και (2.30) μας δίνει :

$$\int_V \left( \rho_{fluid} \cdot Cp_{fluid} \cdot \frac{dT_{fluid}(x,y,z,t)}{dt} \right) dV = \int_S h \cdot [ T_{solid}(x, y, z, t) - T_{fluid}(x, y, z, t) ] dS - Q_{out} \quad (2.31)$$

Η σχέση (2.31) περιγράφει πλήρως το φαινόμενο της μετάδοσης της θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής για ένα τρισδιάστατο πρόβλημα σαν αυτό που θεωρήθηκε. Θα πρέπει να τονιστεί πως οι θερμοκρασίες του ρευστού και του στερεού είναι πάρα πολύ κοντά στην επιφάνεια όπου παρατηρείται το φαινόμενο της μετάδοσης της θερμότητας ειδάλλως τα αποτελέσματα δε θα είναι ορθά.

Συχνά, τα προβλήματα παρουσιάζουν συμμετρίες και οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να απλοποιηθούν περαιτέρω. Έτσι, αν οι επιφανειακές θερμοκρασίες θεωρηθούν πως είναι ανεξάρτητες του χώρου , το στερεό αρκετά μικρότερο από το ρευστό, δηλαδή οι περιπτώσεις που το ρευστό είναι το περιβάλλον και το στερεό πολύ καλός αγωγός της θερμότητας, τότε η θερμοκρασία του στερεού δεν εξαρτάται από το χώρο.

Άρα η (2.27) μπορεί να γραφεί :

$$\rho_{solid} \cdot Cp_{solid} \cdot \frac{dT_{solid}(x,y,z,t)}{dt} = Q_g - h \cdot [ T_{solid}(t) - T_{fluid}(t) ] \quad (2.32)$$

## 2.5 Ακτινοβολία (Radiation)

Η ακτινοβολία είναι ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας από ένα σώμα σε ένα άλλο μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, σύμφωνα με την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία, ή από φωτόνια, σύμφωνα με την κβαντομηχανική. Η θερμική ακτινοβολία είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται από τη 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 αυτός αντιπροσωπεύει τη 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 Kelvin εξ ορισμού αποτελείται από σωματίδια που έχουν κινητική ενέργεια και τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτά τα άτομα και τα μόρια αποτελούνται από φορτισμένα σωματίδια, πρωτόνια και ηλεκτρόνια, και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων της 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 αυτόν τον τρόπο, έχουμε την εκπομπή φωτονίων, γεγονός που εκπέμπει ενέργεια μέσω ακτινοβολίας μακριά από το σώμα. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως το φως, σε αντίθεση με την αγωγή και τη συναγωγή, δεν απαιτεί την παρουσία 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 πολλαπλούς παράγοντες, όπως οι διάφορες ιδιότητες της επιφάνειας από την οποία προέρχονται, η θερμοκρασία του σώματος, η φασματική απορροφητικότητα και η φασματική εκπομπή ισχύος, όπως εκφράζονται από το νόμο του Kirchhoff. Η ένταση της ροής ενέργειας που εκπέμπεται εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος και τη φύση της επιφάνειας του.

Η μέση ανταλλαγή ακτινοβολίας μεταξύ δύο επιφανειών με διαφορά θερμοκρασίας είναι συνάρτηση της απόλυτης θερμοκρασίας, του συντελεστή εκπομπής και της γεωμετρίας της κάθε επιφάνειας. Αν η θερμότητα μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας μεταξύ δύο επιφανειών πεπερασμένου μεγέθους,  $A_1$  και  $A_2$ , και θερμοκρασίας,  $T_1$  και  $T_2$  (σε βαθμούς Κελσίου), ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας,  $\Delta Pr$ , γράφεται ως εξής:

$$\Delta P_r = \sigma \cdot \frac{(T_1+273)^4 - (T_2+273)^4}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (2.33)$$

όπου  $\sigma$  είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann,  $F_{12}$  ένας παράγοντας που λαμβάνει υπόψη του τη σχετική κατεύθυνση των δύο επιφανειών και  $\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$  οι αντίστοιχοι συντελεστές εκπομπής, οι οποίοι εξαρτώνται από την επιφάνεια.

Μερικές χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών εκπομπής υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κινητήρων μονίμων μαγνητών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4.1

Υλικό	Συντελεστής εκπομπής $\varepsilon$
Αλουμίνιο	0,09
Χαλκός	0,03
Σίδηρος	0,14-0,38
Νερό	0,95
Πλαστικό	0,91
Ατσάλι	0,79

Πίνακας 2.4.1 : Τυπικές τιμές συντελεστή εκπομπής

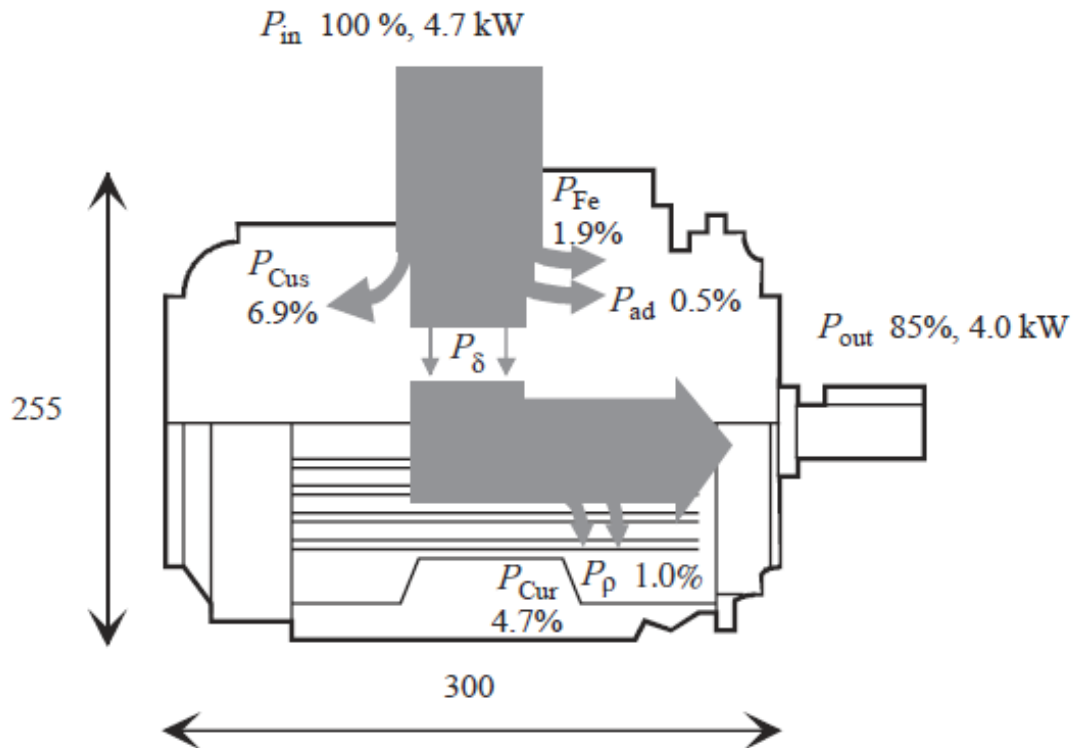
Στην περίπτωση της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία μας ενδιαφέρει ο ρυθμός ανταλλαγής της θερμότητας, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της θερμικής ισχύος που εκπέμπει και που απορροφά ένα σώμα.

## 2.6 Θερμικά φαινόμενα στις ηλεκτρικές μηχανές

Η θερμική ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι κατά τη σχεδίαση και κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών, που στόχο έχει την όσο πιο δυνατόν ακριβή πρόβλεψη των θερμοκρασιών της μηχανής και ειδικότερα στα κρίσιμα σημεία αυτής, την μόνωση στα τυλίγματα του στάτη καθώς και στους μόνιμους μαγνήτες.

Η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα και με τους τρεις μηχανισμούς, αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Το φαινόμενο της αγωγής παρατηρείται στα στερεά σώματα που απαρτίζουν τη μηχανή ενώ αυτό της συναγωγής παρατηρείται κυρίως στο διάκενο, στα εσωτερικά μέρη της μηχανής με τον αέρα, και στις επιφάνειες του κελύφους και του άξονα που έρχονται σε επαφή με τον αέρα. Τέλος όσον αφορά το μηχανισμό της ακτινοβολίας επειδή η θερμική ακτινοβολία δεν απορροφάται από τον αέρα λόγω του 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.

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 και οι οποίες ενσωματώνονται στις απώλειες χαλκού. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει το ισοζύγιο δυνάμεων ενός τυπικού κλειστού τύπου επαγωγικό κινητήρα 4KW.



Σχήμα 2.7 : Παράδειγμα ισοζυγίου ισχύος για κινητήρα επαγωγής 4KW [4]

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.

Πιο συγκεκριμένα ο υπολογισμός των απωλειών δίνεται από τις σχέσεις :

- Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού σε ένα τυλίγμα  $m$  φάσεων που διαρρέεται από ρεύμα  $I$  δίνονται από την

$$P_{cu} = m \cdot I^2 \cdot R_{ac} \quad (2.34)$$

όπου  $R_{ac}$  είναι η AC αντίσταση της φάσης του τυλίγματος. Η AC αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$R_{ac} = k_r \cdot \frac{N l_{av}}{\sigma S_c} \quad (2.35)$$

με  $k_r$  ο συντελεστής επιδερμικού φαινομένου,  $N$  ο αριθμός των ελιγμάτων,  $l_{av}$  το μέσο μήκος ενός τυλίγματος,  $S_c$  το εμβαδόν διατομής του αγωγού η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του αγωγού.

Μία άλλη έκφραση για τις απώλειες χαλκού δίνεται αν θεωρήσουμε την μάζα του αγωγού. Θα είναι :

$$m_{cu} = \rho \cdot N \cdot l_{av} \cdot S_c \quad (2.36)$$

με  $\rho$  την πυκνότητα του αγωγού.

Έτσι προκύπτει

$$P_{cu} = m \cdot I^2 \cdot R_{ac} = \frac{k_r}{\rho \sigma} \cdot J^2 \cdot m_{cu} \quad (2.37)$$

με  $J = \frac{I}{S_c}$  η πυκνότητα ρεύματος.

- Απώλειες Πυρήνα

Οι απώλειες πυρήνα διακρίνονται σε απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων. Είναι ανεξάρτητες από τη ροπή του φορτίου και εξαρτώνται από τη μαγνητική ροή στο διάκενο.

Υπολογίζονται από τις σχέσεις :

$$P_{Fe} = \sum_n k_{Fe,n} \cdot P_{10} \cdot \left(\frac{B_n}{1 T}\right)^2 \cdot m_{Fe,n} \quad (2.38)$$

$$P_{Fe} = \sum_n k_{Fe,n} \cdot P_{15} \cdot \left(\frac{B_n}{1.5 T}\right)^2 \cdot m_{Fe,n} \quad (2.39)$$

όπου  $k_{fe,n}$  ο συντελεστής διόρθωσης,  $m_{Fe,n}$  οι μάζες των σωμάτων στις διαφορετικές περιοχές,  $B_n$  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.

- Μηχανικές απώλειες

Οι μηχανικές απώλειες σε μία ηλεκτρική μηχανή οφείλονται είτε σε απώλειες λόγω τριβής από τα περιστρεφόμενα μέρη είτε σε απώλειες εξαερισμού λόγω του αέρα στο διάκενο.

Οι απώλειες τριβής εξαρτώνται από την ταχύτητα του άξονα, τον τύπο του ρουλεμάν, και τις ιδιότητες του λιπαντικού που χρησιμοποιήθηκε. Οι απώλειες τριβής υπολογίζονται από τον τύπο :

$$P_{p,bearing} = 0.5 \cdot \Omega \cdot \mu \cdot F \cdot D_{bearing} \quad (2.40)$$

όπου  $\Omega$  η γωνιακή συχνότητα του άξονα που στηρίζεται στο ρουλεμάν,  $\mu$  ο συντελεστής τριβής ο οποίος τυπικά κυμαίνεται σε τιμές 0,0010–0,0050 ,  $F$  το φορτίο 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 ροής ενός περιστρεφόμενου κυλίνδρου

$$P_{p,w1} = \frac{1}{32} \cdot k \cdot C_m \cdot \pi \cdot p \cdot \Omega^3 \cdot D_r^4 \cdot L_r \quad (2.41)$$

όπου  $k$  ο είναι ένας συντελεστής τραχύτητας (για μια ομαλή επιφάνεια  $k = 1$ , συνήθως  $k = 1 - 1,4$ ),  $C_m$  ο συντελεστής ροής,  $p$  η πυκνότητα του ψυκτικού ρευστού,  $\Omega$  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

$$P_{p,w2} = \frac{1}{64} \cdot C_m \cdot p \cdot \Omega^3 \cdot (D_r^5 - D_{ri}^5) \quad (2.42)$$

όπου  $D_{ri}$  η εσωτερική διάμετρος του άξονα.

Συνολικά οι απώλειες εξαερισμού θα είναι:

$$P_{p,w} = P_{p,w1} + P_{p,w2} \quad (2.43)$$

- Κατανεμημένες απώλειες

Οι κατανεμημένες απώλειες αθροίζουν όλες εκείνες τις ηλεκτρομαγνητικές απώλειες που δεν περιλαμβάνονται στις απώλειες χαλκού και πυρήνα που υπολογίζονται όπως περιγράφηκαν παραπάνω. Οι κατανεμημένες απώλειες είναι πού δύσκολο να υπολογιστούν και να μετρηθούν.

Οι κατανεμημένες απώλειες είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος του φορτίου και με τη δύναμη εις την 1,5 της συχνότητας.

Δηλαδή

$$P_{ad} \sim I^2 \cdot f^{1.5} \quad (2.44)$$

### 2.7 Θερμοκρασιακοί περιορισμοί στη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών

Οι θερμοκρασίες τήξης των υλικών μιας ηλεκτρικής μηχανής και η αντοχή της μόνωσης θέτουν περιορισμούς στη λειτουργία της.

Το υλικό των τυλιγμάτων του στάτη της μηχανής είναι ο χαλκός. Το σημείο τήξης του χαλκού είναι οι 1083 °C . Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα τυλίγματα λόγω των απωλειών χαλκού δεν πρέπει να ξεπερνά το συγκεκριμένο όριο.

Οι πυρήνες του δρομέα και του στάτη κατασκευάζονται από σίδηρο. Το σημείο τήξης του σιδήρου είναι 1535 °C .

Ένας ακόμη παράγοντας που μπορεί να θέσει σημαντικούς περιορισμούς στη λειτουργία μιας μηχανής είναι η αντοχή της μόνωσης του χαλκού. Στις περισσότερες μηχανές η μόνωση αποτελείται από πολυεστέρα, πολυουρεθάνη, βερνίκι, πολυβινύλιο. Η αντοχή της μόνωσης καθορίζεται από την κλάση της. Οι διάφορες κλάσεις μόνωσης έχουν οριστεί από την Διεθνή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνίας , IEC. Οι κλάσεις E,B,F και H είναι οι κλάσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται στη μόνωση των τυλιγμάτων. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται για κάθε μία από τις προαναφερθείσες κλάσεις η μέγιστη επιτρεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας, η μέση θερμοκρασία της μόνωσης για θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C και η οριακή θερμοκρασία του θερμότερου σημείου της μόνωσης.

Η λειτουργία της μηχανής σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τις μέγιστες επιτρεπτές μειώνει τη διάρκεια ζωής της μόνωσης. Η μερική ή ολική καταστροφή της μόνωσης είναι ζωτικής σημασίας καθώς σε αυτή την περίπτωση χάνει την διηλεκτρική ικανότητα της και έχουμε διαρροή ρεύματος. Γνωρίζοντας τη θερμοκρασιακή διαφορά των τυλιγμάτων με το περιβάλλον έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε τον κατάλληλο τύπο μόνωσης έτσι ώστε να αποφύγουμε την υπερθέρμανση του εσωτερικού της μηχανής. Αφού η κλάση της μόνωσης αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό της μηχανής και το κόστος για την επανατοποθέτηση του βερνικιού είναι ιδιαίτερα υψηλό συνήθως επιλέγεται μόνωση κλάσης H, διότι επιτρέπει τη λειτουργία της μηχανής στην υψηλότερη δυνατή θερμοκρασία και έχει την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής με την προϋπόθεση να μην λειτουργεί για μεγάλο χρονικό διάστημα σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τις επιτρεπτές.



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

Πίνακας 2.7.1 : Αντοχή κλάσεων Μόνωσης

## 2.8 Ψύξη ηλεκτρικών μηχανών

Για την αποφυγή των προβλημάτων υπερθέρμανσης μιας ηλεκτρικής μηχανής και την πιθανότητα επακόλουθης βλάβης, είναι επιθυμητή η ψύξη της μηχανής με διάφορες τεχνικές. Αναλόγως το μέγεθος και την ονομαστική ισχύ της μηχανής, χρησιμοποιούνται διαφορετικές διατάξεις στην ψύξη τους. Γενικότερα, όσο περισσότερο αυξάνονται το μέγεθος της μηχανής και η ονομαστική της ισχύς τόσο δυσκολότερη γίνεται η απαγωγή της θερμότητας. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι ψύξης των σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών είναι οι εξής :

- *Φυσική ψύξη:* Σε μηχανές χαμηλής ισχύος χρησιμοποιείται ο περιβάλλον αέρας και η φυσική ροή του μέσω του μηχανισμού της συναγωγής για την ψύξη της μηχανής.
- *Ψύξη με εξαναγκασμένη ροή αέρα:* Στο εσωτερικό της μηχανής τοποθετείται ένα περίπλοκο σύστημα αγωγών, περσίδων και ανεμιστήρων για την ψύξη της μηχανής. Στην περίπτωση των μηχανών ανοιχτού τύπου, η ροή αέρα διευκολύνεται με την τοποθέτηση περσίδων στο κέλυφος της μηχανής. 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 των μηχανών έγκλειστου τύπου, υπάρχει ένα ειδικά διαμορφωμένο κέλυφος, έτσι ώστε ο αέρας να οδηγείται στο περιβάλλον, καθώς και ανεμιστήρες για την οδήγηση του αέρα.
- *Σύστημα υδρόψυξης, για μηχανές ισχύος 1MW έως 100MW:* Η ροή αέρα που απαιτείται στις μηχανές αυτές είναι πολύ μεγάλη και προκαλεί φαινόμενα στροβιλισμού και σπηλαιώσης, τα οποία επηρεάζουν αρνητικά τη σωστή λειτουργία της μηχανής.
- *Ψύξη με υγρό υδρογόνο, για μηχανές ισχύος μεγαλύτερης των 100MW:* Η μικρή πυκνότητα και η μεγάλη ειδική θερμοχωρητικότητα του υδρογόνου σε σχέση με τον αέρα το καθιστούν ιδανικό για την ψύξη μηχανών μεγάλης ισχύος, καθώς μειώνονται σε μεγάλο

βαθμό οι καταπονήσεις των μονώσεων, αυξάνοντας κατά συνέπεια τη διάρκεια ζωής της μηχανής σε σημαντικό βαθμό. Η στεγανοποίηση της μηχανής είναι απαραίτητη για την χρήση αυτού του συστήματος, ενώ αξίζει να σημειωθεί πως η πιθανότητα ανάφλεξης είναι πολύ μικρή.

## 2.9 Θερμική Αντίσταση

Κατά τη θερμική ανάλυση ορίζεται το μέγεθος της θερμικής αντίστασης, όπου κατά τη θερμική ανάλυση πρέπει να γνωρίζουμε τη θερμική αντίσταση κάθε μέρους της μηχανής. Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο μέρη της μηχανής είναι αυτή που προκαλεί τη ροή θερμότητας. Όπως και στην ηλεκτρομαγνητική ανάλυση η διαφορά δυναμικού είναι αυτή που προκαλεί τη ροή ρεύματος και ορίζεται το μέγεθος της ηλεκτρικής αντίστασης, ως το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα, έτσι και κατά τη θερμική ανάλυση ορίζεται η θερμική αντίσταση ως το πηλίκο της διαφοράς θερμοκρασίας προς τη θερμοροή. Ανάλογα με το μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας που αναπτύχθηκαν παραπάνω η θερμική αντίσταση υπολογίζεται διαφορετικά. Έτσι

- Για το μηχανισμό της αγωγής η θερμική αντίσταση ορίζεται ως

$$R_{th,cond} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{l}{\lambda S} \quad [\text{K/W}] \quad (2.45)$$

Όπου  $l$  : το μήκος του υλικού

$\lambda$  : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

$S$  : η επιφάνεια κατά την οποία γίνεται η μετάδοση της θερμότητας

- Για το μηχανισμό της συναγωγής η θερμική αντίσταση ορίζεται ως

$$R_{th,conv} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{h S} \quad [\text{K/W}] \quad (2.46)$$

Όπου  $h$  : ο συντελεστής συναγωγής

$S$  : η επιφάνεια κατά την οποία γίνεται η μετάδοση της θερμότητας

- Για το μηχανισμό της ακτινοβολίας η θερμική αντίσταση ορίζεται ως

$$R_{th,rad} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{\alpha_r \cdot S} \quad [\text{K/W}] \quad (2.47)$$

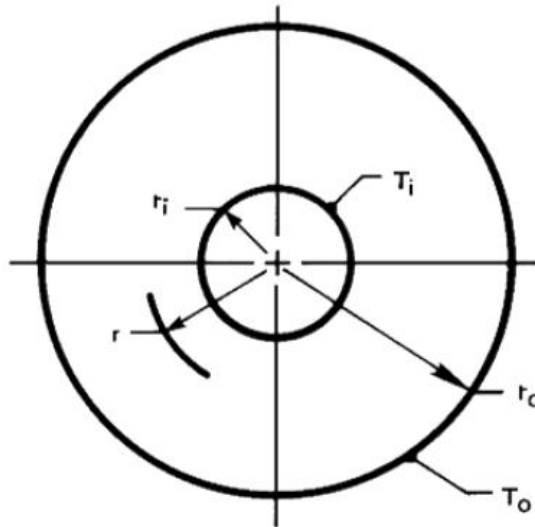
Όπου  $\alpha_r$  : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για το μηχανισμό της ακτινοβολίας  $\alpha_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}$

$S$  : η επιφάνεια κατά την οποία γίνεται η μετάδοση της θερμότητας

## 2.10 Κατανομή θερμοκρασίας σε κυλινδρική διάταξη

Τα περισσότερα μέρη των ηλεκτρικών μηχανών έχουν κυλινδρική γεωμετρία οπότε σε αυτή την ενότητα γίνεται μια προσπάθεια υπολογισμού της κατανομής της θερμοκρασίας σε μια κυλινδρική διάταξη.

Θεωρούμε κυλινδρικό δακτύλιο εσωτερικής ακτίνας  $r_i$  και εξωτερικής ακτίνας  $r_o$  όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω.



Σχήμα 2.8 : Κυλινδρικός δακτύλιος

Θέλουμε να υπολογίσουμε την κατανομή θερμοκρασίας και τη ροή θερμότητας που μεταφέρεται στο εσωτερικό του κυλινδρικού δακτυλίου. Αφού μελετάμε το εσωτερικό του δακτυλίου μελετάται ο μηχανισμός της αγωγής.

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.3.2 η μετάδοση της θερμότητας δίνεται από τη σχέση (2.18)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.18)$$

Θεωρώντας πως η θερμότητα μεταδίδεται μόνο κατά την ακτινική διεύθυνση η θερμοκρασία θα είναι συνάρτηση μόνο της ακτίνας, όσον αφορά τα διανύσματα θέσης. Επομένως  $\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$ .

Επιπλέον θεωρούμε πως στο εσωτερικό δεν υπάρχουν πηγές θερμότητας άρα  $q = 0$ .

Και τέλος θέλουμε να μελετήσουμε την μόνιμη κατάσταση οπότε  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ .

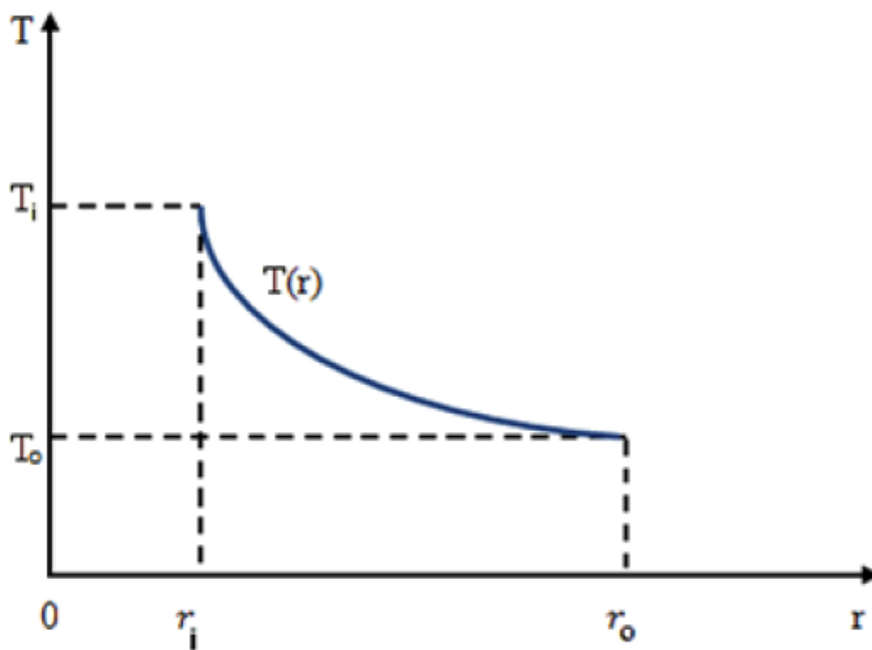
Έτσι (2.18) για τις συνθήκες του προβλήματος μας δίνει

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \Leftrightarrow T(r) = c_1 \cdot \ln(r) + c_2 \quad (2.48)$$

Αν υποθέσουμε πως οι θερμοκρασίες στην εξωτερική επιφάνεια ακτίνας  $r_0$  είναι  $T_0$  και στην εσωτερική επιφάνεια ακτίνας  $r_i$  είναι  $T_i$  τότε η (2.48) γίνεται :

$$T(r) = T_i + \frac{T_i - T_0}{\ln\left(\frac{r_i}{r_0}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_i}\right) \quad (2.49)$$

Και η κατανομή της θερμοκρασίας απεικονίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 2.9



Σχήμα 2.9 : Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κυλινδρικού δακτυλίου συναρτήσει της ακτίνας

Έχοντας υπολογίσει την κατανομή της θερμοκρασίας εφαρμόζοντας το νόμο Fourier όπως ειπώθηκε και κατά την ανάλυση του μηχανισμού της αγωγής προκύπτει η θερμοροή.

$$q = -\lambda S \frac{dT}{dr} = -\lambda \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot L) \cdot \frac{dT}{dr} \quad (2.50)$$

όπου  $S$  είναι το εμβαδόν της παράπλευρης επιφάνειας με ακτίνα  $r$  και  $L$  το μήκος του κυλίνδρου.

Από τις (2.28) και (2.29) προκύπτει

$$q = -2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L \cdot \frac{T_i - T_0}{\ln\left(\frac{r_i}{r_0}\right)} \quad (2.51)$$

Και όπως ορίστηκε η θερμική αντίσταση θα έχουμε τελικά

$$R_{th,cond} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{\ln \left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2 \pi \lambda L} \quad (2.52)$$

### 2.11 Μέθοδοι υπολογισμού μετάδοσης θερμότητας στις ηλεκτρικές μηχανές

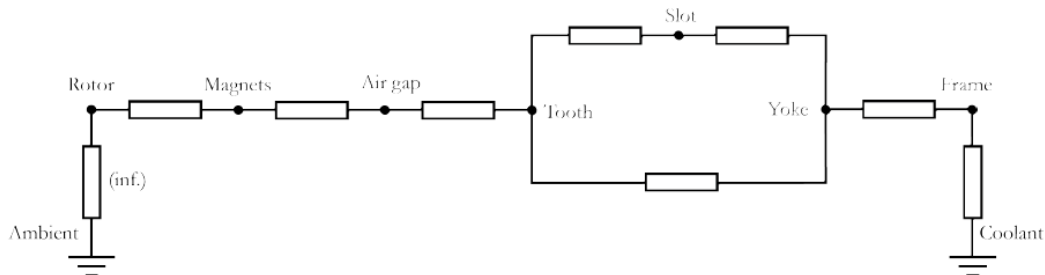
Οι συνηθέστερες μέθοδοι θερμικής ανάλυσης μιας ηλεκτρικής μηχανής είναι οι εξής :

- Εφαρμογή και επίλυση των εξισώσεων αγωγής και συναγωγής. Η αξιοπιστία των λύσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος.
- Χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της θερμικής κατανομής στο εσωτερικό της ηλεκτρικής μηχανής. Και σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να γνωρίζουμε τις οριακές συνθήκες του προβλήματος.
- Σχεδίαση ισοδύναμου μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων, μέθοδος που αποσκοπεί σε μια γρήγορη προσέγγιση του θερμικού προβλήματος.

Στις ενότητες που ακολουθούν θα αναπτυχθούν οι μέθοδοι των συγκεντρωμένων παραμέτρων και των πεπερασμένων στοιχείων όπου θα αναλυθούν πιο διεξοδικά.



## Κεφάλαιο 3 : Μέθοδος των συγκεντρωμένων παραμέτρων



### 3.1 Γενικά

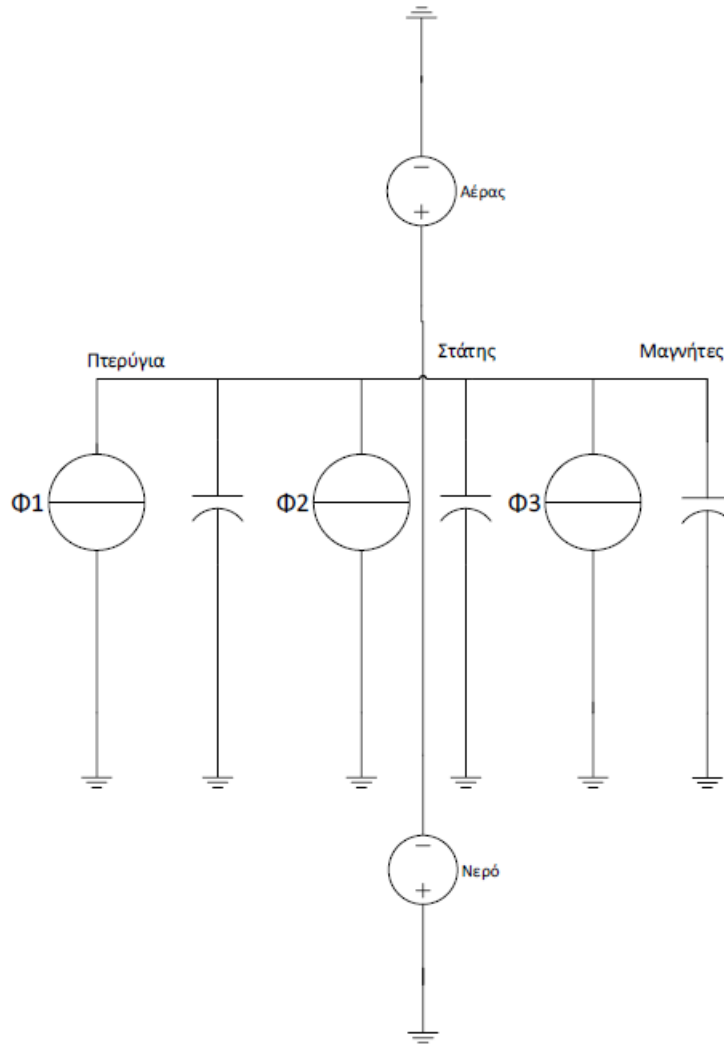
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει μια προσπάθεια θερμικής ανάλυσης του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών με τη μέθοδο των συγκεντρωμένων παραμέτρων.

Η χρήση μοντέλων συγκεντρωμένων παραμέτρων χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να απλοποιήσουμε τη συμπεριφορά χωρικά κατανεμημένων συστημάτων ως μία τοπολογία που αποτελείται από διακριτές ποσότητες και η οποία προσεγγίζει τη συμπεριφορά των κατανεμημένων συστημάτων κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η ανάλυση με τη μέθοδο των συγκεντρωμένων παραμέτρων μας δίνει αποτελέσματα τόσο για τη μόνιμη κατάσταση όσο και για τη μεταβατική κατάσταση. Στη συνέχεια θα δοθούν κάποια παραδείγματα κυκλωμάτων συγκεντρωμένων παραμέτρων που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς και στην εξέλιξη του κεφαλαίου θα αναπτυχθεί διεξοδικά πως θα προκύψει το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε κατά τη θερμική ανάλυση.

### 3.2 Παραδείγματα κυκλωμάτων συγκεντρωμένων παραμέτρων

Το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων όπως το ξέρουμε σχεδιάστηκε από τους Arnot και Chari με στόχο την ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας στο δρομέα μεγάλων γεννητριών τουρμπίνας. Και κατά τη δική μας ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί μια παραλλαγή αυτού του κυκλώματος.

Ένα κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων ενός σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 3.1.

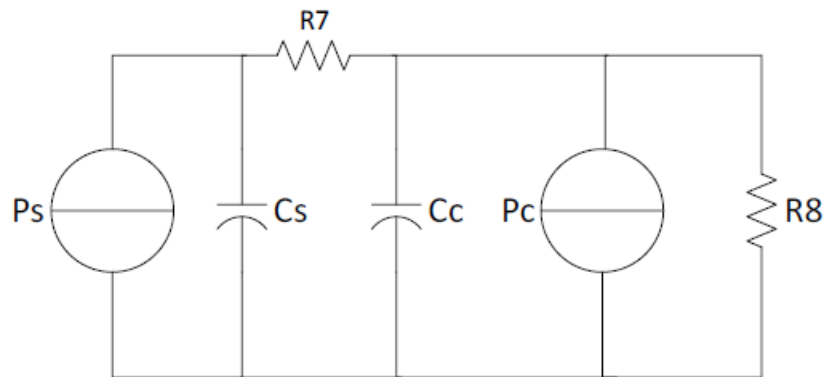


Σχήμα 3.1 : Κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών

όπου  $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$  και  $\Phi 3$  οι πηγές θερμότητας των πτερυγίων, του στάτη και των μονίμων μαγνητών αντίστοιχα.

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





Σχήμα 3.2 : Θερμικό μοντέλο Στάτη κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων

Όπου  $P_s$  : απώλειες επαφών στάτη

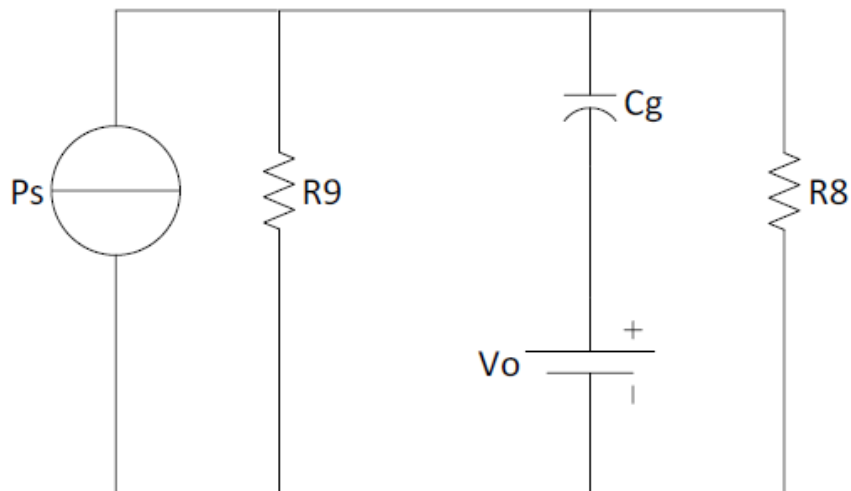
$P_c$ : απώλειες πυρήνα στάτη

$C_s$ : Θερμική χωρητικότητα επαφών στάτη

$C_c$ : Θερμική χωρητικότητα πυρήνα

$R_7$ : Θερμική αντίσταση μόνωσης

$R_8$ : Θερμική αντίσταση στο περιβάλλον



Σχήμα 3.3 : Θερμικό μοντέλο δρομέα κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων

- Όπου Pr : απώλειες επαφών δρομέα
- R9: Θερμική αντίσταση δρομέα στο περιβάλλον
- Vo: Θερμοκρασία περιβάλλοντος
- Cg: Θερμική χωρητικότητα επαφών δρομέα
- R8: Θερμική αντίσταση στο περιβάλλον
- Υ : Αύξηση θερμοκρασίας πυρήνα
- Χ: Αύξηση θερμοκρασίας επαφών στάτη
- Z : Αύξηση θερμοκρασίας επαφών δρομέα

### 3.3 Θερμικά μεγέθη

Η θερμική μοντελοποίηση έχει σκοπό να περιγράψει τη θερμική συμπεριφορά ενός συστήματος χρησιμοποιώντας μαθηματικούς όρους. Έτσι επιτρέπει σε κάποιον να γνωρίζει το πως μεταδίδεται η θερμότητα ανάλογα με τη γεωμετρία και τις ιδιότητες των υλικών του προβλήματος καθώς και πως θα αποκριθεί το σύστημα στις μεταβολές της εισόδου του.

Καθώς υπάρχει εξοικείωση στην κατανόηση ηλεκτρικών μεγεθών τα θερμικά συστήματα μπορούν να εκφραστούν σε αναλογία με τα ηλεκτρικά κυκλώματα. Αυτό ισχύει για όλα τα δυναμικά συστήματα τα οποία περιγράφονται από διαφορικές εξισώσεις, έτσι επομένως και για τα θερμικά συστήματα. Αυτό σημαίνει πως οι εξισώσεις και οι οριακές συνθήκες που διέπουν τη συμπεριφορά του ενός συστήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν το άλλο με μια απλή αντικατάσταση των συμβόλων των μεταβλητών.

Η αντιστοίχιση των βασικών θερμικών μεγεθών με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 3.1

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σημείων είναι αυτή που προκαλεί τη ροή θερμότητας, όπως και στα ηλεκτρικά κυκλώματα η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων είναι αυτή που προκαλεί τη ροή ρεύματος. Άρα υπάρχει η αναλογία μεταξύ τάσης-θερμοκρασίας και ροής θερμότητας-ρεύματος.

Η θερμική αντίσταση περιγράφει τη δυσκολία που συναντά η θερμότητα κατά τη διάδοση της σε αναλογία με την ηλεκτρική αντίσταση που περιγράφει τη δυσκολία που συναντά το ρεύμα κατά τη

διάδοση του . Άρα η θερμική αντίσταση ορίζεται ως το πηλίκο της διαφοράς θερμοκρασίας – ανάλογο της διαφοράς δυναμικού- προς τη θερμότητα που διαδίδεται –ανάλογο του ρεύματος.

Ηλεκτρικά μεγέθη	Θερμικά μεγέθη
Δυναμικό V [V]	Θερμοκρασία T [K]
Ρεύμα [A]	Θερμότητα Q [W]
Πυκνότητα ρεύματος J [A/m <sup>2</sup> ]	Ροή θερμότητας q [W/m <sup>2</sup> ]
Ηλεκτρική αγωγιμότητα σ [S/m]	Θερμική αγωγιμότητα λ [W /mK]
Ηλεκτρική αντίσταση R [Ω]	Θερμική αντίσταση R <sub>th</sub> [K/W]
Ηλεκτρική χωρητικότητα [F ]	Θερμική χωρητικότητα C <sub>th</sub> [ J /K ]

Πίνακας 3.1 : Αντιστοίχιση θερμικών και ηλεκτρικών μεγεθών.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η θερμική αντίσταση ανάλογα με το μηχανισμό που μεταδίδεται υπολογίζεται και από διαφορετική σχέση.

- Για το μηχανισμό της αγωγής η θερμική αντίσταση ορίζεται ως

$$R_{th,cond} \frac{\Delta T}{q} = \frac{l}{\lambda \cdot S} \quad [K/W] \quad (2.45)$$

Όπου l : το μήκος του υλικού

λ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

S: η επιφάνεια κατά την οποία γίνεται η μετάδοση της θερμότητας

- Για το μηχανισμό της συναγωγής η θερμική αντίσταση ορίζεται ως

$$R_{th,conv} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{h \cdot S} \quad [K/W] \quad (2.46)$$

Όπου h : ο συντελεστής συναγωγής

S: η επιφάνεια κατά την οποία γίνεται η μετάδοση της θερμότητας

- Για το μηχανισμό της ακτινοβολίας η θερμική αντίσταση ορίζεται ως

$$R_{th,rad} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{\alpha_r \cdot S} \quad [K/W] \quad (2.47)$$

Πιο συγκεκριμένα είναι,

η θερμική αντίσταση που συναντάει η θερμότητα όταν μεταδίδεται σε διαδρομή μεταξύ στερεών μπορεί να δοθεί από τη σχέση

$$R = \int_0^L \frac{1}{\lambda \cdot A \cdot (l_{\text{path}})} dl_{\text{path}} \quad (3.1)$$

Όπου  $\lambda$  η θερμική αγωγιμότητα

$A$  η διατομή της επιφάνειας του στερεού

$L$  η απόσταση που παρατηρείται μετάδοσης θερμότητας

$l_{\text{path}}$  η διαδρομή ολοκλήρωσης

Η θερμική αντίσταση που συναντάει η θερμότητα όταν μεταδίδεται από διαδρομές που περιλαμβάνουν ρευστά πρέπει να θεωρηθεί ο μηχανισμός της συναγωγής. Η μοντελοποίηση του αέρα είναι μια πολύπλοκη διαδικασία καθώς η κίνηση του ρευστού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η περιστροφική ταχύτητα, η γεωμετρία των επιφανειών, οι διαστάσεις της μηχανής κ.α.

Τότε η θερμική αντίσταση μεταξύ μιας επιφάνειας στερεού και του ρευστού θα δίνεται από την

$$R = \frac{1}{\alpha A} \quad (3.2)$$

Όπου  $A$  η επιφάνεια που συμπεριλαμβάνεται στη συναγωγή

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{air}} \cdot Nu}{2 \cdot L} \quad \text{συντελεστής συναγωγής}$$

$Nu = 2$ , όταν πρόκειται για στρωτή ροή και επομένως προκύπτει η πιο πάνω εξίσωση.

Οι πυκνωτές αντιστοιχούν στις θερμοχωρητικότητες, δηλαδή στη συσσωρευμένη θερμότητα των υλικών. Και επομένως θα δίνεται από τη σχέση

$$C = p \cdot C_p \cdot V \quad [\text{J/K}] \quad (3.3)$$

### 3.4 Μέθοδος των κόμβων

Όταν πρόκειται να σχεδιάσουμε ένα θερμικό μοντέλο που αποτελείται από θερμικές αντιστάσεις θα πρέπει να μας απασχολεί το πως θα διαιρεθεί το κάθε σώμα του συστήματος, πως θα τοποθετηθούν οι κόμβοι , πως θα υπολογιστούν οι ισοδύναμες θερμικές αντιστάσεις για τις διάφορες γεωμετρίες.

Η μέθοδος των κόμβων είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα σύστημα διαιρείται σε υποστοιχεία , όπου κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία παρουσιάζεται από ένα μόνο κόμβο. Η έννοια της μεθόδου των συγκεντρωμένων παραμέτρων αποσκοπεί στην απλοποιημένη αναπαράσταση των ιδιοτήτων ενός σώματος όπως η θερμοκρασία, ο όγκος η μάζα κλπ.

Για το πως θα διαιρεθεί ένα αντικείμενο σε κόμβους θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν παράγοντες όπως , σε ποια σημεία χρειαζόμαστε ακριβή πρόβλεψη της θερμοκρασίας, το πως θα μοιάζει η κατανομή της θερμοκρασίας, και την πολυπλοκότητα των υπολογισμών.

Τα πιθανά σημεία τοποθέτησης κόμβων μπορεί να είναι :

- Γεωμετρικό μέσο  $r_{rad,mid}$  όπου η επιφάνεια χωρίζεται στη μέση
- Ογκομετρικό μέσο  $r_{vol,mid}$ , όπου ο όγκος χωρίζεται στη μέση
- Μέσο αντίστασης  $r_{res,mid}$ , είναι το σημείο κατά μήκος της διαδρομής θερμότητας όπου χωρίζεται σε δύο ίσα μέρη θερμικής αντίστασης

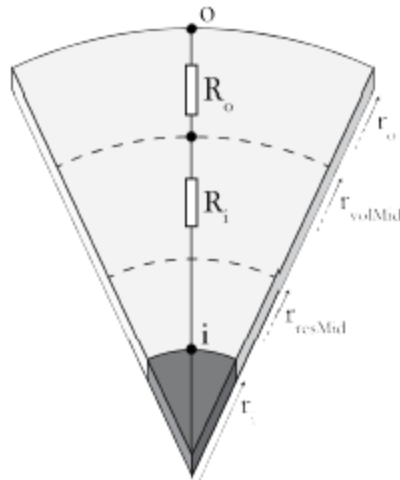
Αν θεωρήσουμε μια κυλινδρική επιφάνεια με εξωτερική ακτίνα  $r_0$  και εσωτερική ακτίνα  $r_i$  τότε τα παραπάνω σημεία θα δίνονται από τις εξισώσεις

$$R_{rad,mid} = \frac{r_0 + r_i}{2} \quad (3.4)$$

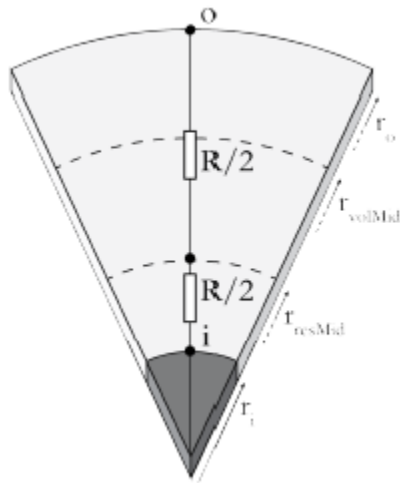
$$R_{res,mid} = \sqrt{r_0 \cdot r_i} \quad (3.5)$$

$$R_{vol,mid} = \sqrt{\frac{r_0^2 + r_i^2}{2}} \quad (3.6)$$

Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζεται η τοποθέτηση του κόμβου στο μέσο αντίστασης και στο ογκομετρικό μέσο.



Σχήμα 3.4 : Τοποθέτηση του κόμβου στο ογκομετρικό μέσο [7]



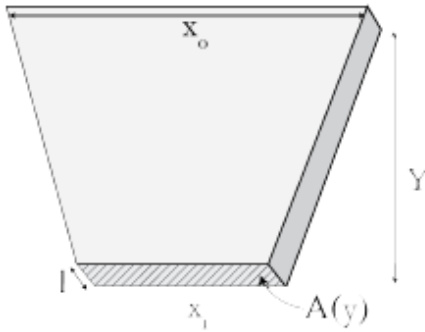
Σχήμα 3.5 : Τοποθέτηση του κόμβου στο μέσο αντίστασης [7]

Στη θερμική ανάλυση που θα πραγματοποιήσουμε θα χρησιμοποιήσουμε το γεωμετρικό μέσο  $r_{rad,mid}$  για τοποθέτηση των κόμβων καθώς για κυλινδρικές γεωμετρίες είναι αυτός που περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη πρόβλεψη θερμοκρασίας.

### 3.5 Υπολογισμός αντιστάσεων για γενικές γεωμετρίες

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν οι τρόποι υπολογισμού θερμικών αντιστάσεων για μερικές γεωμετρίες που συναντώνται στις ηλεκτρικές μηχανές.

- Εξάεδρο



Σχήμα 3.6 : Γεωμετρία εξάεδρου [7]

Ένα εξάεδρο αποτελείται από έξι επιφάνειες, όπου όλες οι γωνίες μεταξύ τους δεν είναι ορθογώνιες. Η θερμική αντίσταση θα δίνεται από τη σχέση :

$$R = y \frac{\ln \left( \frac{x_0}{x_1} \right)}{\lambda \cdot l \cdot (x_0 - x_1)} \quad (3.7)$$

Όπου  $\lambda$  η θερμική αγωγιμότητα

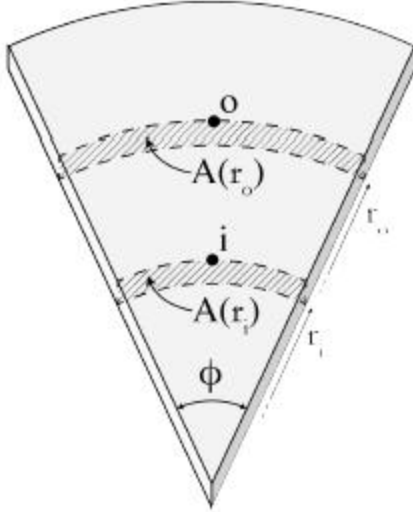
$l$  το πάχος

$x_0$  το εξωτερικό πλάτος

$x_1$  το εσωτερικό πλάτος

$y$  το μήκος

- Κοίλοι κύλινδροι



Σχήμα 3.7 : Γεωμετρία κυλίνδρου [7]

Η θερμική αντίσταση για ακτινική ροή θερμότητας θα δίνεται από τη σχέση

$$R = \frac{2\pi}{\varphi} \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l} \quad (3.8)$$

Όπου  $\lambda$  η θερμική αγωγιμότητα

$\varphi$  η γωνία σε rad του κυκλικού δίσκου

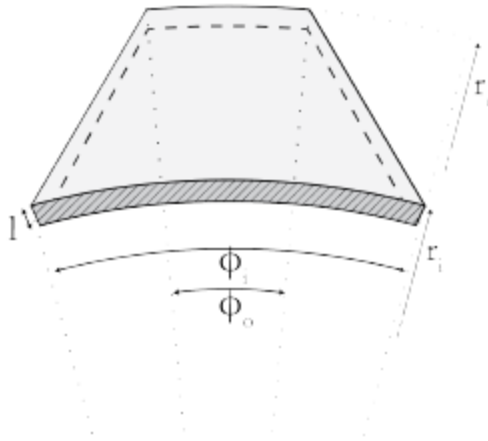
$r_o$  η εξωτερική ακτίνα

$r_i$  η εσωτερική ακτίνα

$l$  το ενεργό μήκος

- Κοίλα κυλινδρικά τμήματα συναρτήσει των γωνιών





Σχήμα 3.8 : Γεωμετρία κυλινδρικού τμήματος, όπου οι γωνίες μεταβάλλονται με την ακτίνα [7]

Η θερμική αντίσταση θα δίνεται από την

$$R = \frac{1}{\lambda \cdot l \cdot b} \cdot \ln \left( \frac{r_o}{r_i} \cdot \frac{a \cdot r_i + b}{a \cdot r_o + b} \right) \quad (3.9)$$

Όπου  $\lambda$  η θερμική αγωγιμότητα

$r_o$  η εξωτερική ακτίνα

$r_i$  η εσωτερική ακτίνα

$l$  το ενεργό μήκος

$a, b$  μεταβλητές που εκφράζουν την εξάρτηση της γωνίας από την ακτίνα  $\theta(r) = a r + b$

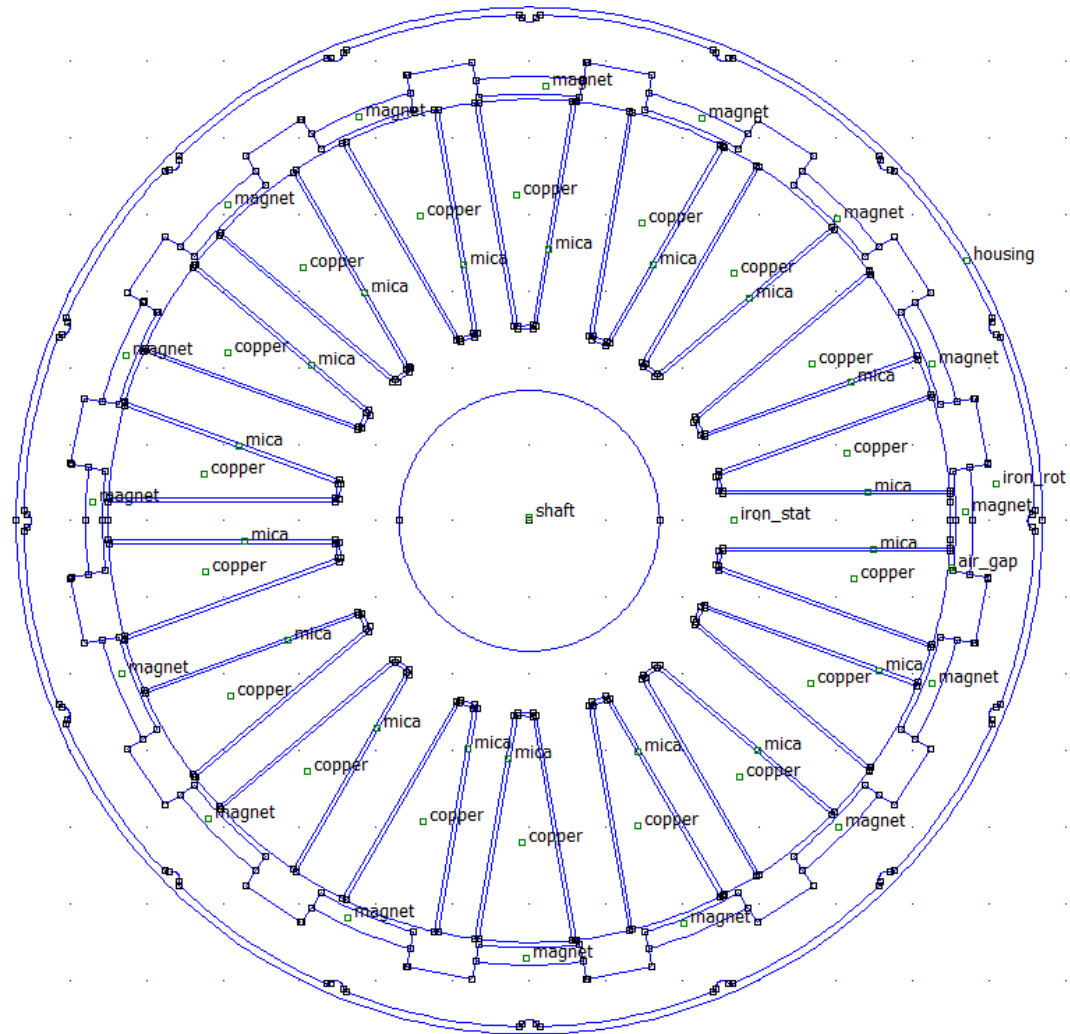
### 3.6 Γεωμετρία και χαρακτηριστικά μηχανής

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω για την εξαγωγή του κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων θα πρέπει να γνωρίζουμε τη γεωμετρία της μηχανής. Στο σχήμα 3.9 απεικονίζεται η γεωμετρία της μηχανής σε τομή κάθετη στον άξονά της.

Ο συγκεκριμένος σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών έχει την ιδιαιτερότητα ο στάτης να βρίσκεται στο εσωτερικό και ο δρομέας στο εξωτερικό της μηχανής σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις κινητήρων. Οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρομέα

και βρίσκονται στο διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα. Γύρω από το δρομέα τοποθετείται το κέλυφος του κινητήρα.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται και τα μπλοκ διαγράμματα με τα υλικά της μηχανής.



Σχήμα 3.9 : Γεωμετρία της μηχανής με τομή κάθετα στον άξονα της

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

<b>Αριθμός αυλακών</b>		18
<b>Αριθμός πόλων</b>		16
<b>Ενεργό μήκος</b>		35 mm
<b>Διάμετρος διακένου</b>		110 mm
<b>Πάχος μαγνήτη</b>		2.24 mm
<b>Ποσοστό γωνίας μαγνήτη επί πολικού βήματος</b>		60%
<b>Γωνία μαγνήτη</b>		13,5°
<b>Πάχος διακένου</b>		0,7 mm
<b>Πλάτος κύριου δοντιού (τυλιγμένο)</b>		7 mm
<b>Πλάτος ενδιάμεσου δοντιού(μη τυλιγμένου)</b>		4,8 mm
<b>Αριθμός ελιγμάτων</b>		64
<b>Διάμετρος καλωδίου</b>		1,4 mm
<b>Συντελεστής πληρότητας τυλίγματος</b>		0,43
<b>Βάρος μηχανής</b>		2,8 kg
	<b>Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας</b>	<b>Εκκίνηση</b>
<b>Πυκνότητα ρεύματος</b>	1 A/mm <sup>2</sup>	4 A/mm <sup>2</sup>
<b>Μέγιστη ροπή</b>	1,9 Nm	7,4 Nm
<b>Κυμάτωση ροπής</b>	4,3%	1,3 %
<b>Ρεύμα Γραμμής</b>	1,77 A	7,1 A
<b>Απώλειες χαλκού</b>	2,45 W	39,2 W
<b>Απώλειες σιδήρου</b>	1,39 A	1,5 W

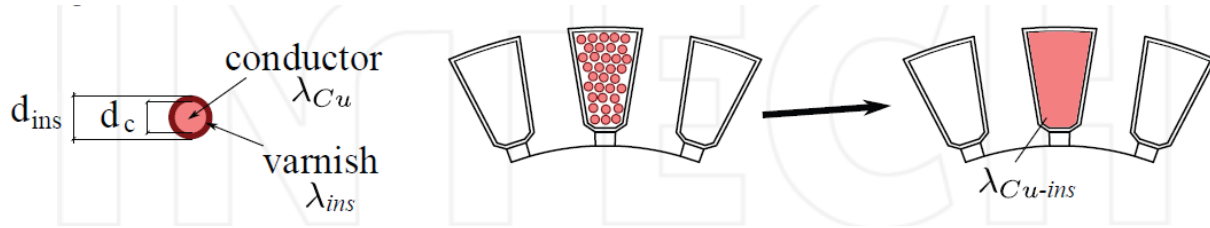
Πίνακας 3.6.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα

Όπως έχει αναφερθεί πέρα από τη γεωμετρία της μηχανής στη θερμική ανάλυση σημαντικό ρόλο παίζουν και τα υλικά με τα οποία είναι κατασκευασμένος ο κινητήρας και οι ιδιότητες που τα χαρακτηρίζουν. Στον πίνακα 3.6.2 απεικονίζονται τα υλικά του συγκεκριμένου κινητήρα και μερικές ιδιότητες αυτών.

Ο άξονας και το κέλυφος του κινητήρα είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο, ο στάτης και ο δρομέας είναι κατασκευασμένοι από σίδηρο M235\_35A , και οι μόνιμοι μαγνήτες είναι μαγνήτες Σιδήρου Νεοδμίου Βορίου.

Τα τυλίγματα είναι κατασκευασμένα από αγωγούς με χαλκό τα οποία μεταξύ τους είναι μονωμένα. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεαστεί η θερμική αγωγιμότητα κατά πολύ, και ένας

τρόπος υπολογισμού της θερμικής αγωγιμότητας συμπεριλαμβανομένου και της μόνωσης είναι ο ακόλουθος.



Σχήμα 3.10 : Θερμικό ισοδύναμο κύκλωμα της αύλακας.[6]

$$\lambda_{cu-ins} = F \cdot \lambda_{ins} \quad (3.10)$$

όπου  $\lambda_{ins}$  η θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης και

F ένας πολλαπλασιαστικός παράγοντας που δίνεται από τη σχέση

$$F = 37,5 x^2 - 43,75 x + 14, \quad x = \frac{d_c}{d_{ins}} \quad (3.11)$$

Επομένως για διάμετρο καλωδίου  $d_c = 1.4 \text{ mm}$ , διάμετρο μόνωσης  $d_{ins} = 1.8 \text{ mm}$  και θερμική αγωγιμότητα μόνωσης  $\lambda_{ins} = 0,71 \text{ [W/mK]}$  (το μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται είναι mica) η σχέση (3.11) μας δίνει πως  $\lambda_{cu-ins} = 1,88 \text{ [W/mK]}$ .

Κατά τη θερμική ανάλυση πολύ σημαντικό ρόλο παίζει το διάκενο και η ροή αέρα που υπάρχει μέσα σε αυτό. Η ροή αέρα είναι τυρβώδης και η μεταφορά θερμότητας μέσα σε αυτό περιγράφεται από συντελεστή θερμικής αγωγιμότητα  $\lambda_{gap}$  όπου ορίζεται ως η θερμική αγωγιμότητα που ο "στατικός" αέρας έχει έτσι ώστε να μεταφέρει το ίδιο ποσό θερμότητας με τον "κινούμενο" αέρα.

Η τιμή του εξαρτάται από από τη γωνιακή ταχύτητα  $\omega_m$  μεταξύ του στάτη(Di η διάμετρος του στάτη) και του δρομέα καθώς και από το πλάτος του διακένου g. Υπολογίζεται ως

$$\lambda_{gap} = 0.0019 \eta^{-2,9084} Re^{0.4614 \ln(3,3361 \eta)} \quad (3.12)$$

$$\eta = \frac{Di-2 \cdot g}{Di} \quad (3.13)$$

$$Re = \frac{\omega m \cdot g}{\nu} \quad (3.14)$$

με  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του αέρα. Προφανώς αν ο κινητήρας δεν κινείται η θερμική αγωγιμότητα του διακένου θα είναι ίδια με αυτή του αέρα.

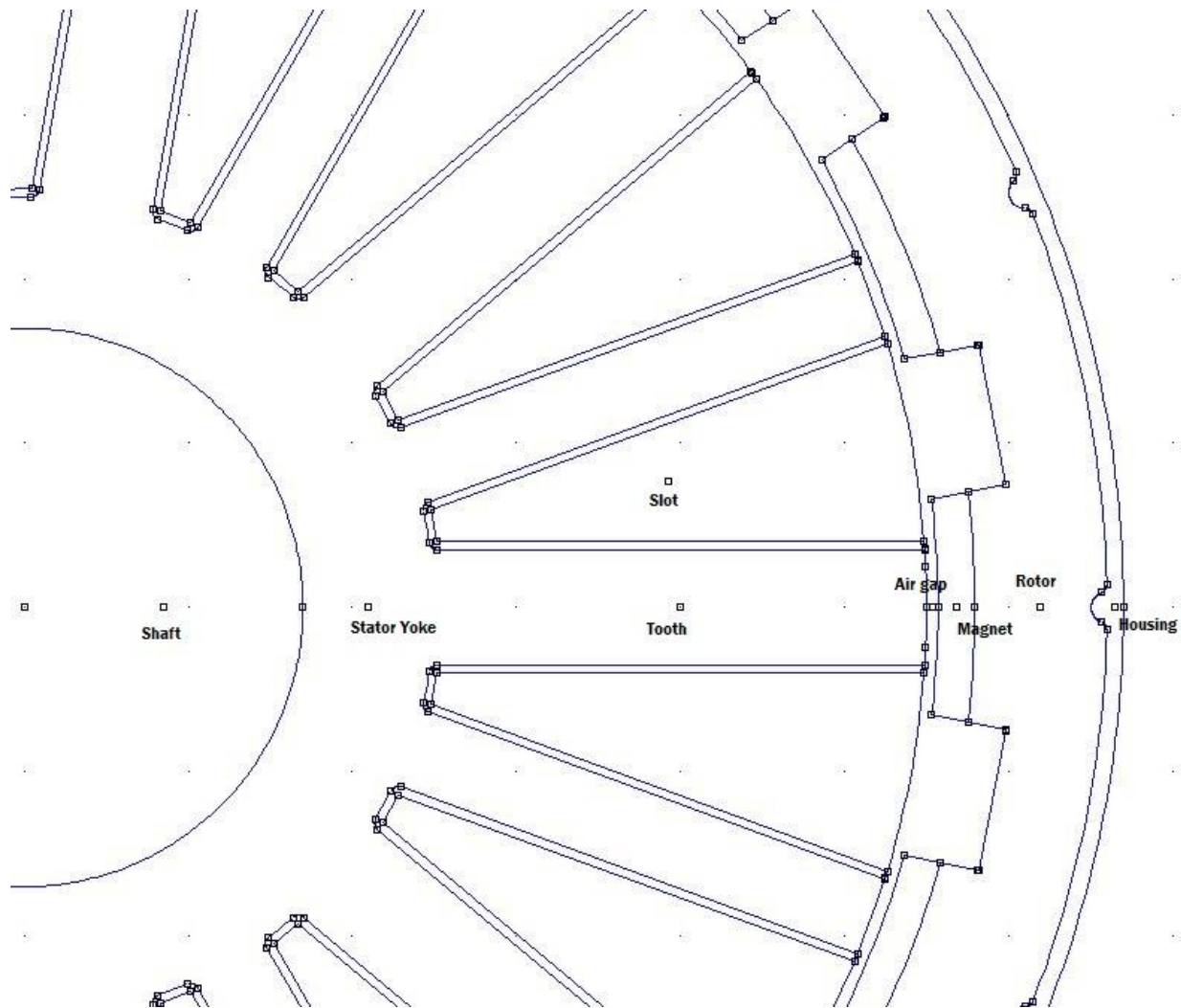
Υλικό	Πυκνότητα $\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Θερμική Αγωγιμότητα $\lambda$ [ W/ m K ]	Ειδική Θερμοχωρητική Ικανότητα $C_p$ [ J / Kg K ]
Αλουμίνιο	2700	121	910
Σίδηρος	7600	42	460
Χαλκός με μόνωση	8960	1,88	360
Αέρας	1,2	0,0255	1000
Μαγνήτες Nd Feb	7500	8,932	502

Πίνακας 3.6.2 : Υλικά και μερικές ιδιότητες αυτών

### 3.7 Τοποθέτηση κόμβων στον Σύγχρονο Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών

Το προτεινόμενο κύκλωμα αποτελείται από 8 κόμβους. Όσο πιο πολλοί κόμβοι τοποθετηθούν τόσο πιο ακριβής θα είναι η πρόβλεψη της θερμοκρασίας και επιπλέον τόσο πιο ακριβέστερα θα μοντελοποιηθούν οι "διαδρομές θερμότητας" μαζί με τις θερμικές αντιστάσεις.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα τμήμα της τομής κάθετα στον άξονα του κινητήρα και το πως θα τοποθετηθούν οι κόμβοι. Όπως είναι φυσικό, εκμεταλλευόμαστε τις συμμετρίες που εμφανίζονται και όπως αναφέρθηκε θα χρησιμοποιηθεί ο γεωμετρικός μέσος  $R_{rad,mid}$



Σχήμα 3.11 : Τοποθέτηση των κόμβων στη γεωμετρία της μηχανής

Κάθε στοιχείο που απαρτίζει τη μηχανή, όπως οι μόνιμοι μαγνήτες , ο στάτης κλπ προσδιορίζεται από τον αντίστοιχο κόμβο που έχει οριστεί παραπάνω , στον οποίο κόμβο συνδέεται ο πυκνωτής που είναι το ανάλογο της θερμοχωρητικότητας, η πηγή ρεύματος – το ανάλογο της πηγής θερμότητας που μπορεί να υπάρχει στο συγκεκριμένο μέρος της μηχανής- και αντιστάσεις που συνδέονται με τους γειτονικούς κόμβους και προσομοιώνουν τις διαδρομές θερμότητας. Το δυναμικό του κόμβου είναι αυτό που παριστάνει τη θερμοκρασία του συγκεκριμένου μέρους της μηχανής, σύμφωνα με τις αναλογίες που έχουμε παραθέσει πιο πάνω.

Έτσι οι κόμβοι που ορίστηκαν, από το κέντρο της μηχανής βρίσκονται σε απόσταση με ακτίνα την ακόλουθη :

$$r_{\text{node\_shaft}} = 8,5 \text{ mm}$$

$$r_{\text{node\_stator\_yoke}} = 21 \text{ mm}$$

$$r_{\text{node\_tooth}} = 40 \text{ mm}$$

$$r_{\text{node\_slot}} = 40,1 \text{ mm}$$

$$r_{\text{node\_air\_gap}} = 55,35 \text{ mm}$$

$$r_{\text{node\_magnet}} = 56,82 \text{ mm}$$

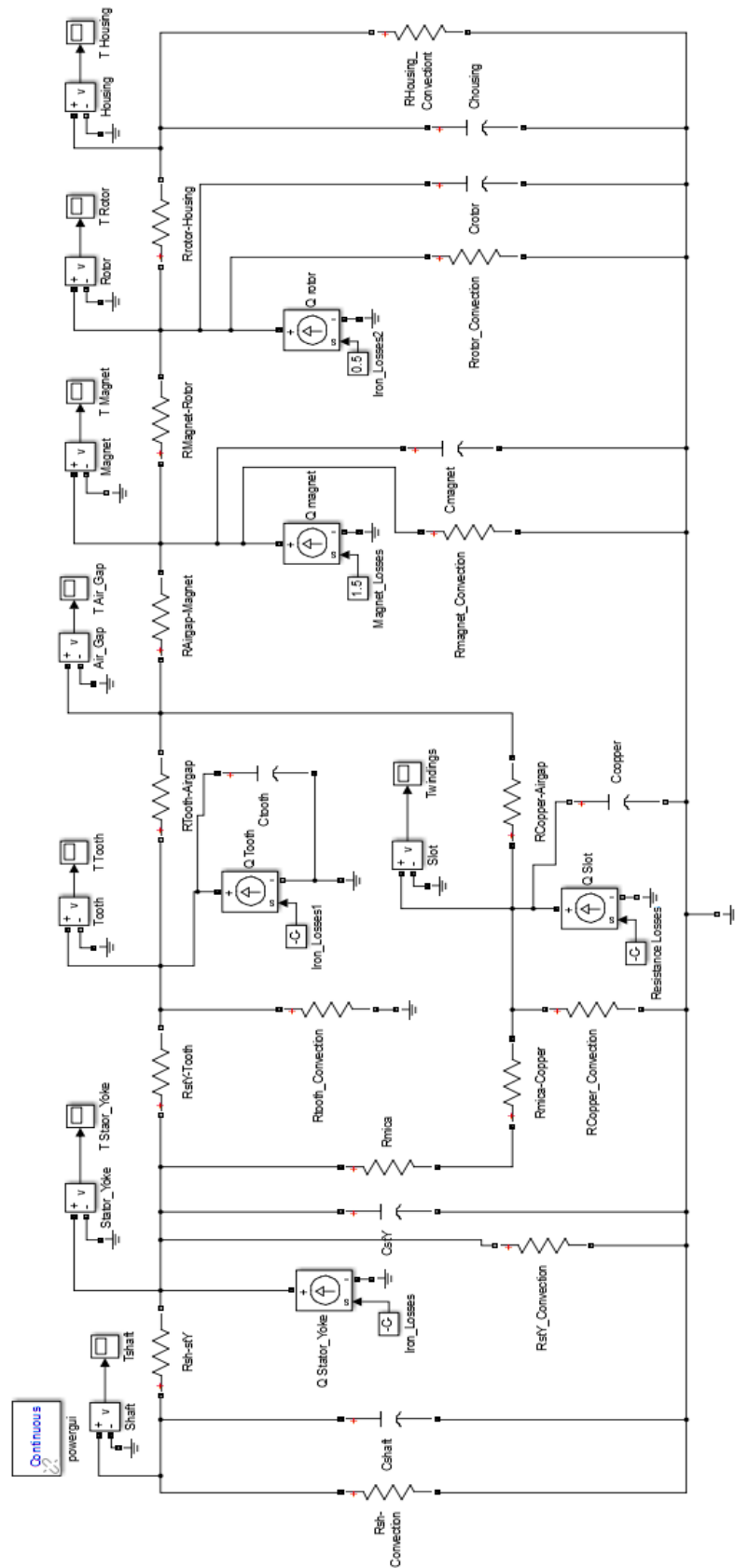
$$r_{\text{node\_rotor}} = 61,97 \text{ mm}$$

$$r_{\text{node\_housing}} = 67,5 \text{ mm}$$

### 3.8 Το μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων.

Η ροή θερμότητας είναι ακτινική και αυτό γιατί το ενεργό μήκος της μηχανής είναι μικρό και δρομέας και στάτης είναι κατασκευασμένοι από λαμαρίνες.

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτουν και οι διαδρομές θερμότητας και επομένως οι αντιστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων. Αν υποθέσουμε σχηματικά μια διαδρομή ακτινική από το κέντρο προς τα έξω η ροή θερμότητας από τον άξονα πηγαίνει προς το σώμα του στάτη, από το σώμα του στάτη ένα μέρος προς τα δόντια του στάτη και ένα άλλο προς τις αύλακες, στη συνέχεια προς το διάκενο αέρα, από το διάκενο αέρα στους μαγνήτες και από εκεί προς το δρομέα του κινητήρα, και τελικά προς το κέλυφος. Αυτές οι διαδρομές προσομοιώνονται από τις αντιστάσεις που στη συνέχεια θα γίνει αναλυτικά ο υπολογισμός τους. Επιπλέον στο κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων χρησιμοποιούνται και αντιστάσεις που προσομοιώνουν το μηχανισμό της συναγωγής και τοποθετούνται στους αντίστοιχους κόμβους. Το μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων απεικονίζεται στο Σχήμα 3.12



Σχήμα 3.12 : Το μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων



### 3.8.1 Υπολογισμός των πηγών θερμότητας:

Οι πηγές θερμότητας οφείλονται στις απώλειες του κινητήρα και πηγές ρεύματος είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων για να τις προσομοιώσουν. Έτσι οι απώλειες σιδήρου του στάτη προσομοιώνονται από δύο πηγές ρεύματος, μία στο σώμα του στάτη και μία στα δόντια του στάτη. Οι απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων προσομοιώνονται από μία πηγή ρεύματος η οποία τοποθετείται στον κόμβο της αύλακας. Οι απώλειες στο δρομέα είναι πάνω στον μαγνήτη και στο σώμα του δρομέα. Επομένως μία πηγή ρεύματος τοποθετείται στον κόμβο του μαγνήτη και μία στον κόμβο που αναπαριστά το δρομέα.

Οι τιμές των απωλειών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία είναι οι τιμές που προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις για ρεύμα γραμμής 10 A. Πρέπει να τονίσουμε όμως πως τα ονομαστικά μεγέθη της μηχανής είναι ρεύμα γραμμής 7,5 A.

Από τις μετρήσεις της μηχανής έχουμε  $P_{\text{iron\_stator}} = 1 \text{ W}$

$$P_{\text{cu}} = 91,84 \text{ W}$$

$$P_{\text{magnet}} = 1,5 \text{ W}$$

$$P_{\text{iron\_rotor}} = 0,5 \text{ W}$$

Οι απώλειες στο στάτη, δηλαδή στο σώμα και στα δόντια θεωρούμε πως είναι ομοιόμορφες επομένως στο σώμα του στάτη θα είναι  $\frac{V_{\text{st\_yoke}}}{V_{\text{st}}} \cdot P_{\text{stator}}$  και στα δόντια του στάτη θα είναι  $\frac{V_{\text{tooth}}}{V_{\text{st}}} \cdot P_{\text{stator}}$

Και από την αναλογία ηλεκτρικών-θερμικών μεγεθών στο μοντέλο θα έχουμε τις ακόλουθες πηγές ρεύματος.

$$Q_{\text{stator\_Yoke}} = 0,246 \text{ A}$$

$$Q_{\text{tooth}} = 0,754 \text{ A}$$

$$Q_{\text{slot}} = 91,84 \text{ A}$$

$$Q_{\text{magnet}} = 1,5 \text{ A}$$

$$Q_{\text{rotor}} = 0,5 \text{ A}$$

### 3.8.2 Υπολογισμός των πυκνωτών

Οι πυκνωτές προσομοιώνουν τη θερμοχωρητικότητα των διαφόρων στοιχείων των μηχανών. Οι τιμές τους υπολογίζονται από τη σχέση (3.3)  $C = \rho \cdot C_p \cdot V \text{ [J/K]}$ , όπου  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] η πυκνότητα του υλικού,  $C_p$  [J/Kg K] η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού και  $V$  [m<sup>3</sup>] ο όγκος του μέρους του κινητήρα που υπολογίζουμε. Ο όγκος υπολογίστηκε από τα σχεδιαστικά προγράμματα.

Στο μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων η τιμή του πυκνωτή θα είναι σε [F]. Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται στο μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων και είναι αυτοί που μας δίνουν πληροφορίες για τη μεταβατική κατάσταση της θερμικής ανάλυσης του κινητήρα. Όταν δεν μας ενδιαφέρει αυτή αλλά μόνο η μόνιμη κατάσταση τότε παραλείπονται από το κύκλωμα.

Ως αρχική τιμή στους πυκνωτές τίθεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος, δηλαδή 22°C .

- Άξονας

$$C_p = 910 \text{ [J/Kg K]}$$

$$\rho = 2700 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$V = 0.000072492 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\text{Άρα } C_{\text{shaft}} = 171 \text{ [J/K]}$$

- Σώμα Στάτη

$$C_p = 460 \text{ [J/Kg K]}$$

$$\rho = 7600 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$V = V_{\text{st\_yoke}}/V_{\text{st}} = 0.246 * 0.00014891 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\text{Άρα } C_{\text{stator\_yoke}} = 128 \text{ [J/K]}$$

- Δόντια

$$C_p = 460 \text{ [J/Kg K]}$$

$$\rho = 7600 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$V = V_{\text{tooth}}/V_{\text{st}} = 0.754 * 0.00014891 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\text{Άρα } C_{\text{tooth}} = 396 \text{ [J/K]}$$

- Τυλίγματα

$$C_p = 360 \text{ [J/Kg K]}$$

$$\rho = 8960 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$V = 0.00022166 \text{ [m}^3\text{]}, \text{ ο όγκος και των 18 τυλιγμάτων}$$

$$\text{Άρα } C_{\text{slot}} = 715 \text{ [J/K]}$$

- Μαγνήτες

$$C_p = 502 \text{ [J/Kg K]}$$

$$\rho = 7500 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$V = 0.000015528 \text{ [m}^3\text{]}, \text{ ο όγκος κατω 16 μαγνητών}$$

$$\text{Άρα } C_{\text{magnet}} = 58 \text{ [J/K]}$$

- Δρομέας

$$C_p = 460 \text{ [J/Kg K]}$$

$$\rho = 7600 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$V = 0.00009769 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\text{Άρα } C_{\text{rotor}} = 336 \text{ [J/K]}$$

- Κέλυφος

$$C_p = 910 \text{ [J/Kg K]}$$

$$\rho = 2700 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$V = 0,00015588 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\text{Άρα } C_{\text{shaft}} = 560 \text{ [J/K]}$$

### 3.8.3 Υπολογισμός αντιστάσεων

Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται πάνω σε τομή κάθετη στον άξονα της μηχανής η τοποθέτηση των κόμβων και στο Σχήμα 3.12 το μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων και πως οι κόμβοι αυτοί συνδέονται μέσω αντιστάσεων. Έτσι θα υπολογίσουμε κάθε αντίσταση που χρησιμοποιείται με τη βοήθεια των γεωμετριών που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 3.5

- Άξονας – Σώμα στάτη

Μεταξύ των δύο κόμβων περιλαμβάνονται τα υλικά του άξονα και του στάτη. Επομένως

$$R_{sh\_stY} = R'_{sh\_stY} + R''_{sh\_stY} \quad (3.15)$$

Για τον υπολογισμό των αντιστάσεων  $R'_{sh\_stY}$ ,  $R''_{sh\_stY}$  θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.8).

$$\begin{aligned} \text{Έτσι έχουμε } R'_{sh\_stY} : \quad & \phi = 2\pi \\ & r_o = 17 \text{ mm} \\ & r_i = 8,5 \text{ mm} \\ & l = 35 \text{ mm} \\ & \lambda = 121 \text{ [W/mK]} \end{aligned}$$

$$\text{και επομένως } R'_{sh\_stY} = 0,0260 \ \Omega$$

$$\begin{aligned} \text{και } R''_{sh\_stY} : \quad & \phi = 2\pi \\ & r_o = 21 \text{ mm} \\ & r_i = 17 \text{ mm} \\ & l = 35 \text{ mm} \\ & \lambda = 42 \text{ [W/mK]} \end{aligned}$$

$$\text{και επομένως } R''_{sh\_stY} = 0,02288 \ \Omega$$

$$\text{Άρα } R_{sh\_stY} = 0,04893 \ \Omega$$

- Σώμα Στάτη – Δόντια

Μεταξύ των δύο κόμβων περιλαμβάνονται τα υλικά του σώμα στάτη και των δοντιών. Επομένως

$$R_{stY\_Tooth} = R'_{stY\_Tooth} + \frac{1}{18} \cdot R''_{stY\_Tooth} \quad (3.16)$$

Η ροή θερμότητας ακολουθώντας ακτινική πορεία διέρχεται παράλληλα από τα 18 δόντια του κινητήρα για αυτό και η αντίσταση διαιρείται με τον αριθμό των αυλακών.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης  $R'_{stY\_Tooth}$  θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.8) και για την  $R''_{stY\_Tooth}$  (2.44)

$$\begin{aligned} \text{Έτσι έχουμε } R'_{stY\_Tooth} : \quad & \phi = 2\pi \\ & r_o = 25 \text{ mm} \\ & r_i = 21 \text{ mm} \\ & l = 35 \text{ mm} \\ & \lambda = 42 \text{ [W/mK]} \end{aligned}$$

$$\text{και επομένως } R'_{stY\_Tooth} = 0,01888 \Omega$$

$$\begin{aligned} \text{και } R''_{stY\_Tooth} : \quad & l = 40 - 25 = 15 \text{ mm} \\ & \lambda = 42 \text{ [W/mK]} \\ & S = 2 \pi r L = 0,245 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Και επομένως } R''_{stY\_Tooth} = 1,4578 \Omega$$

$$\text{Άρα } R_{stY\_Tooth} = 0,09986 \Omega$$

- Σώμα Στάτη – Τυλίγματα

Μεταξύ των δύο κόμβων περιλαμβάνονται τα υλικά του σώμα στάτη, της μόνωσης και των τυλιγμάτων. Έτσι έχουμε τις αντιστάσεις  $R_{stY\_Mica}$ ,  $R_{mica}$  και  $R_{mica\_Copper}$ .

Η ροή θερμότητας ακολουθώντας ακτινική πορεία διέρχεται παράλληλα από τις 18 αύλακες του κινητήρα για αυτό και η αντίσταση  $R_{mica\_Copper}$  διαιρείται με τον αριθμό των αυλακών δηλαδή

$$R_{mica\_Copper} = \frac{1}{18} \cdot R'_{mica\_Copper} \quad (3.17)$$

Για τον υπολογισμό της αντίστασης  $R_{stY\_Mica}$  θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.8), για την  $R_{mica}$  η (3.8) και για την  $R'_{mica\_Copper}$  η (3.8).

Έτσι έχουμε  $R_{stY\_Mica}$  :

$$\begin{aligned} \phi &= 2\pi \\ r_o &= 25 \text{ mm} \\ r_i &= 21 \text{ mm} \\ l &= 35 \text{ mm} \\ \lambda &= 42 \text{ [W/mK]} \end{aligned}$$

και επομένως  $R_{stY\_Mica} = 0,01888 \text{ } \Omega$

και  $R'_{mica}$  :

$$\begin{aligned} \phi &= 12,79^\circ \\ r_o &= 25,2 \text{ mm} \\ r_i &= 25 \text{ mm} \\ l &= 35 \text{ mm} \\ \lambda &= 0,71 \text{ [W/mK]} \end{aligned}$$

Και επομένως  $R'_{mica} = 0,0797 \text{ } \Omega$

Άρα  $R_{mica} = R'_{mica} + R_{stY\_Mica} = 0,09858 \text{ [ W/mK]}$

και  $R'_{micaCopper}$  :

$$\begin{aligned} \phi &= 12,79^\circ \\ r_o &= 40,1 \text{ mm} \\ r_i &= 25 \text{ mm} \\ l &= 35 \text{ mm} \\ \lambda &= 1,88 \text{ [W/mK]} \end{aligned}$$

και επομένως  $R'_{micaCopper} = 23,529 \text{ } \Omega$ .

Άρα  $R_{micaCopper} = 1,307 \text{ } \Omega$ .

- Δόντια- Διάκενο

Μεταξύ των δύο κόμβων περιλαμβάνονται τα υλικά του στάτη και του αέρα στο διάκενο της μηχανής.

Επομένως  $R_{Tooth\_airGap} = \frac{1}{18} \cdot R'_{Tooth\_airGap} + R''_{Tooth\_airGap}$  (3.18)

Η ροή θερμότητας ακολουθώντας ακτινική πορεία διέρχεται παράλληλα από τα 18 δόντια του κινητήρα για αυτό και η αντίσταση διαιρείται με τον αριθμό των αυλακών.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης  $R'_{\text{Tooth\_airGap}}$  θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (2.44) και για την  $R''_{\text{Tooth\_airGap}}$  η (3.8)

$$\begin{aligned} \text{Έτσι έχουμε } R'_{\text{Tooth\_airGap}} : \quad & l = 55 - 40 = 15 \text{ mm} \\ & \lambda = 42 \text{ [W/mK]} \\ & S = 2 \pi r L = 0,508 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{και επομένως } R'_{\text{Tooth\_airGap}} = 1,4577 \text{ } \Omega$$

$$\begin{aligned} \text{και } R''_{\text{Tooth\_airGap}} : \quad & \phi = 2\pi \\ & r_0 = 55,35 \text{ mm} \\ & r_i = 55 \text{ mm} \\ & l = 35 \text{ mm} \\ & \lambda = 0,0255 \text{ [W/mK]} \end{aligned}$$

$$\text{Και επομένως } R''_{\text{Tooth\_airGap}} = 1,1312 \text{ } \Omega$$

$$\text{Άρα } R_{\text{Tooth\_airGap}} = 1,2122 \text{ } \Omega$$

- Τυλίγματα- Διάκενο

Μεταξύ των δύο κόμβων περιλαμβάνονται τα υλικά του χαλκού και του αέρα στο διάκενο.

$$\text{Επομένως} \quad R_{\text{Copper\_airGap}} = \frac{1}{18} \cdot R'_{\text{Copper\_airGap}} + R''_{\text{Copper\_airGap}} \quad (3.19)$$

Η ροή θερμότητας ακολουθώντας ακτινική πορεία διέρχεται παράλληλα από τις 18 αύλακες του κινητήρα για αυτό και η αντίσταση διαιρείται με τον αριθμό των αυλακών.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης  $R'_{\text{Copper\_airGap}}$  θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.8) και για την  $R''_{\text{Copper\_airGap}}$  η (3.8)

Έτσι έχουμε  $R'_{\text{Copper\_airGap}}$  :

$$\begin{aligned} \phi &= 12,79^\circ \\ r_0 &= 55 \text{ mm} \\ r_i &= 40,1 \text{ mm} \\ l &= 35 \text{ mm} \\ \lambda &= 1,88 \text{ [W/mK]} \end{aligned}$$

και επομένως  $R'_{\text{Copper\_airGap}} = 21,38 \Omega$

και  $R''_{\text{Copper\_airGap}}$  :

$$\begin{aligned} \phi &= 2 \pi \\ r_0 &= 55,35 \text{ mm} \\ r_i &= 55 \text{ mm} \\ l &= 35 \text{ mm} \\ \lambda &= 0.0255 \text{ [W/mK]} \end{aligned}$$

και επομένως  $R'_{\text{Copper\_airGap}} = 1,1312 \Omega$

Άρα  $R_{\text{Copper\_airGap}} = 2,319 \Omega$

- Διάκενο-Μαγνήτες

Μεταξύ των δύο κόμβων περιλαμβάνονται τα υλικά του αέρα του διακένου και των μαγνητών.

Επομένως  $R_{\text{airGap\_magnet}} = R'_{\text{airGap\_magnet}} + \frac{1}{16} \cdot R''_{\text{airGap\_magnet}}$  (3.20)

Η ροή θερμότητας ακολουθώντας ακτινική πορεία διέρχεται παράλληλα από τους 16 μαγνήτες του κινητήρα για αυτό και η αντίσταση διαιρείται με τον αριθμό των μαγνητών.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης  $R'_{\text{airGap\_magnet}}$  θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.8) και για την  $R''_{\text{airGap\_magnet}}$  η (3.8)

Έτσι έχουμε  $R'_{\text{airGap\_magnet}}$  :

$$\begin{aligned} \phi &= 2\pi \\ r_0 &= 35,7 \text{ mm} \\ r_i &= 35,35 \text{ mm} \\ l &= 35 \text{ mm} \\ \lambda &= 0,0255 \text{ [W/mK]} \end{aligned}$$

και επομένως  $R'_{\text{airGap\_magnet}} = 1,124 \Omega$

και  $R''_{\text{airGap\_magnet}}$  :  $\phi = 13,5^\circ$



$$\begin{aligned}
r_0 &= 56,8204 \text{ mm} \\
r_i &= 55,7 \text{ mm} \\
l &= 35 \text{ mm} \\
\lambda &= 8,932 \text{ [W/mK]}
\end{aligned}$$

$$\text{Και επομένως } R''_{\text{airGap\_magnet}} = 0,2704 \text{ } \Omega$$

$$\text{Άρα } R_{\text{airGap\_magnet}} = 1,141 \text{ } \Omega$$

- Μαγνήτες-Δρομέας

Μεταξύ των δύο κόμβων περιλαμβάνονται τα υλικά των μαγνητών και του δρομέα.

$$\text{Επομένως } R_{\text{magnet\_rotor}} = \frac{1}{16} \cdot R'_{\text{magnet\_rotor}} + R''_{\text{magnet\_rotor}} \quad (3.21)$$

Η ροή θερμότητας ακολουθώντας ακτινική πορεία διέρχεται παράλληλα από τους 16 μαγνήτες του κινητήρα για αυτό και η αντίσταση διαιρείται με τον αριθμό των μαγνητών.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης  $R'_{\text{magnet\_rotor}}$  θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.8) και για την  $R''_{\text{magnet\_rotor}}$  η (3.8)

$$\begin{aligned}
\text{Έτσι έχουμε } R'_{\text{magnet\_rotor}} : \quad & \phi = 13,5^\circ \\
& r_0 = 57,9408 \text{ mm} \\
& r_i = 56,8204 \text{ mm} \\
& l = 35 \text{ mm} \\
& \lambda = 8,932 \text{ [W/mK]}
\end{aligned}$$

$$\text{και επομένως } R'_{\text{magnet\_rotor}} = 0,2651 \text{ } \Omega$$

$$\begin{aligned}
\text{και } R''_{\text{magnet\_rotor}} : \quad & \phi = 2 \pi \\
& r_0 = 61,9704 \text{ mm} \\
& r_i = 56,8204 \text{ mm} \\
& l = 35 \text{ mm} \\
& \lambda = 42 \text{ [W/mK]}
\end{aligned}$$

$$\text{Και επομένως } R''_{\text{magnet\_rotor}} = 0,00728 \text{ } \Omega$$

$$\text{Άρα } R_{\text{magnet\_rotor}} = 0,02385 \text{ } \Omega$$

- Δρομέας-Κέλυφος

Μεταξύ των δύο κόμβων περιλαμβάνονται τα υλικά του δρομέα και του κελύφους.

$$\text{Επομένως } R_{\text{rotor\_housing}} = R'_{\text{rotor\_housing}} + R''_{\text{rotor\_housing}} \quad (3.22)$$

Για τον υπολογισμό της αντίστασης  $R'_{\text{rotor\_housing}}$  θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.8) και για την  $R''_{\text{rotor\_housing}}$  η (3.8)

$$\begin{aligned} \text{Έτσι έχουμε } R'_{\text{rotor\_housing}} : \quad & \phi = 2\pi \\ & r_0 = 66 \text{ mm} \\ & r_i = 61,9704 \text{ mm} \\ & l = 35 \text{ mm} \\ & \lambda = 42 \text{ [W/mK]} \end{aligned}$$

$$\text{και επομένως } R'_{\text{rotor\_housing}} = 0,006821 \text{ } \Omega$$

$$\begin{aligned} \text{και } R''_{\text{rotor\_housing}} : \quad & \phi = 2\pi \\ & r_0 = 67,5 \text{ mm} \\ & r_i = 66 \text{ mm} \\ & l = 35 \text{ mm} \\ & \lambda = 121 \text{ [W/mK]} \end{aligned}$$

$$\text{Και επομένως } R''_{\text{rotor\_housing}} = 0,0008445 \text{ } \Omega$$

$$\text{Άρα } R_{\text{rotor\_housing}} = 0,00766 \text{ } \Omega$$

Όλες οι παραπάνω αντιστάσεις περιγράφουν το μηχανισμό της αγωγής μέσω του οποίου υπάρχει ροή θερμότητας στα μέρη της μηχανής. Όμως και ο μηχανισμός της συναγωγής είναι αυτός που πρέπει να ληφθεί υπόψιν καθώς επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη θερμική συμπεριφορά του κινητήρα. Ο μηχανισμός της συναγωγής προσομοιώνεται στο μοντέλο μας με ηλεκτρικές αντιστάσεις που συνδέουν τον κόμβο, δηλαδή το σημείο ενδιαφέροντος, με την γείωση, δηλαδή τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Σαν συντελεστή συναγωγής επιλέγεται για τις εσωτερικές επιφάνειες της μηχανής που έρχονται σε επαφή με τον αέρα η τιμή  $h = 5 \text{ [W/m}^2\text{K]}$  και για τις εξωτερικές επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με τον αέρα τιμή συντελεστή συναγωγής  $h = 10 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ .

Έτσι διακρίνουμε τις εξής αντιστάσεις συναγωγής:

- Άξονα

Η συνολική επιφάνεια του άξονα που έρχεται σε επαφή με τον αέρα είναι

$$S = 2 \cdot (0,000452 + 0,003393) = 0,0013572 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } R_{\text{sh\_Convection}} = \frac{1}{h S} = 13,01 \Omega$$

- Σώματος Στάτη

Η συνολική επιφάνεια του σώματος στάτη που έρχεται σε επαφή με τον αέρα είναι

$$S = 2 \cdot 0,00104768 = 0,00209536 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } R_{\text{stY\_Convection}} = \frac{1}{h S} = 95 \Omega$$

- Δοντιών

Η συνολική επιφάνεια του άξονα που έρχεται σε επαφή με τον αέρα είναι

$$S = 9 \cdot 0,00320667 + 18 \cdot 0,000245 = 0,010823 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } R_{\text{tooth\_Convection}} = \frac{1}{h S} = 18,5 \Omega$$

- Τυλιγμάτων

Η συνολική επιφάνεια του άξονα που έρχεται σε επαφή με τον αέρα είναι

$$S = 9 \cdot 0,002877 = 0,02589 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } R_{\text{copper\_Convection}} = \frac{1}{h S} = 8,1 \Omega$$

- Μαγνητών

Η συνολική επιφάνεια του άξονα που έρχεται σε επαφή με τον αέρα είναι

$$S = 16 \cdot 0,000721 = 0,011536 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } R_{\text{magnet\_Convection}} = \frac{1}{h S} = 17,3 \Omega$$

- Δρομέα

Η συνολική επιφάνεια του άξονα που έρχεται σε επαφή με τον αέρα είναι

$$S = 2 \cdot 0,002744 + 16 \cdot 0,000533 = 0,014016 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } R_{\text{rotor\_Convection}} = \frac{1}{h S} = 14,3 \Omega$$

- Κελύφους

Η συνολική επιφάνεια του άξονα που έρχεται σε επαφή με τον αέρα είναι

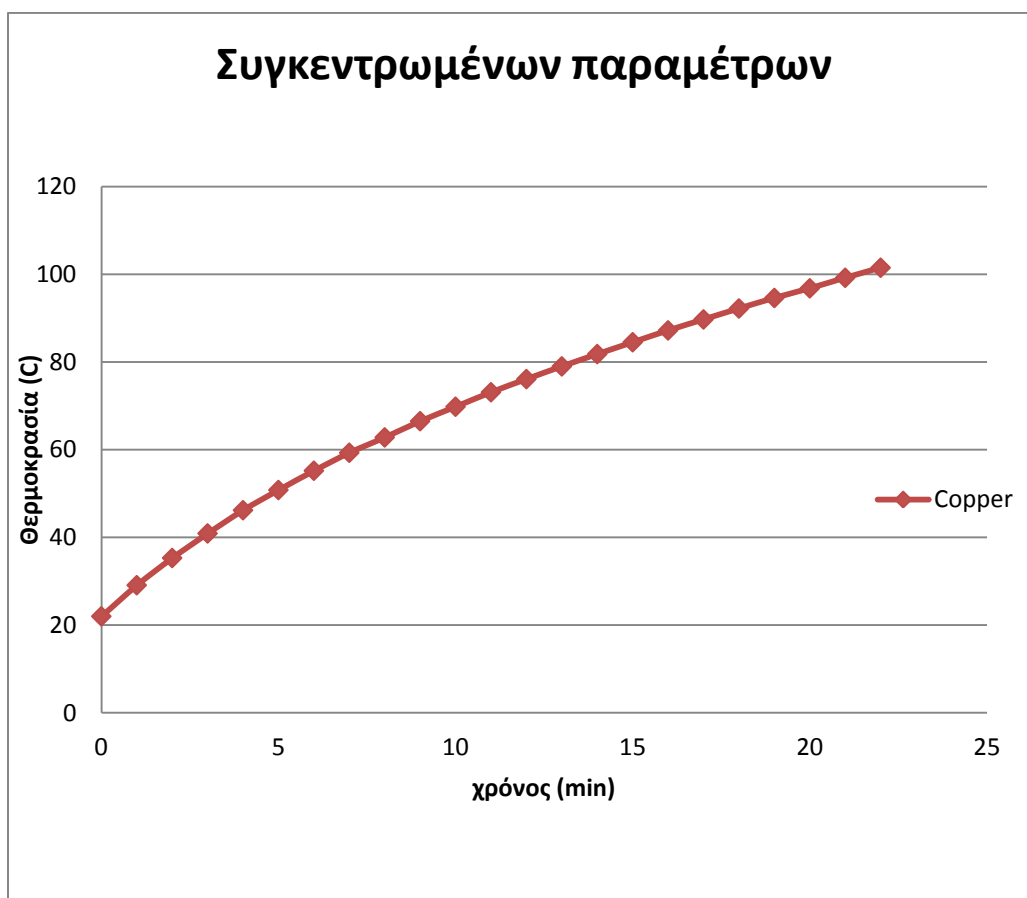
$$S = 0,015974 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } R_{\text{housing\_Convection}} = \frac{1}{h S} = 6 \Omega$$

### 3.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις στον 16-πολικό κινητήρα. Για αυτό το λόγο ο χρόνος προσομοίωσης είναι ο ίδιος με αυτόν του πειράματος, δηλαδή στα 22 λεπτά. Τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

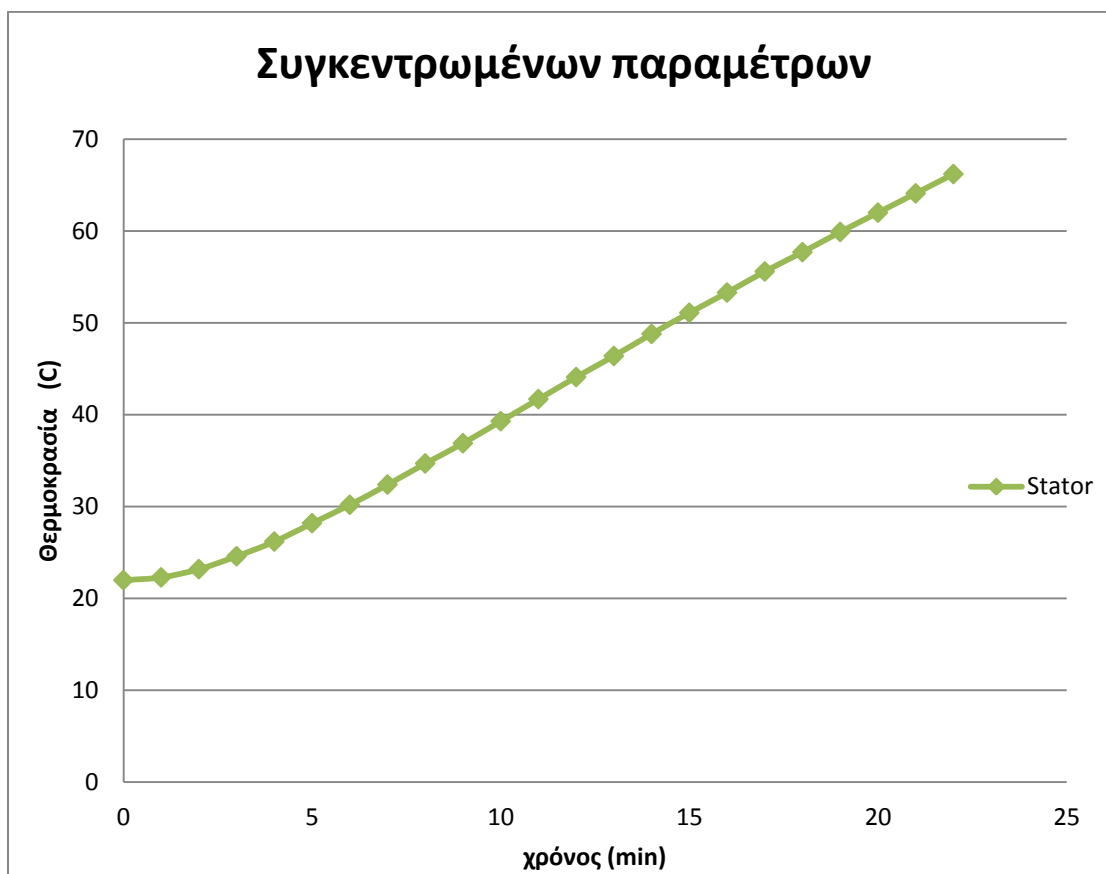
Η θερμοκρασία των τυλιγμάτων συναρτήσει του χρόνου είναι



Σχήμα 3.13 : Διάγραμμα θερμοκρασίας τυλιγμάτων συναρτήσει του χρόνου

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως τα τυλίγματα στο διάστημα των 22 λεπτών έχουν φτάσει σε θερμοκρασία λίγο πάνω από τους 100° C , δηλαδή μια αύξηση θερμοκρασίας κατά 80 ° C. Η θερμοκρασία των τυλιγμάτων αυξάνεται ραγδαία από την αρχή της προσομοίωσης γεγονός που αιτιολογείται από το ότι οι απώλειες των τυλιγμάτων είναι ουσιαστικά η κύρια πηγή θερμότητας. Η καμπύλη προδίδει πως τα τυλίγματα έχουν φτάσει στην πρώτη σταθερά χρόνου.

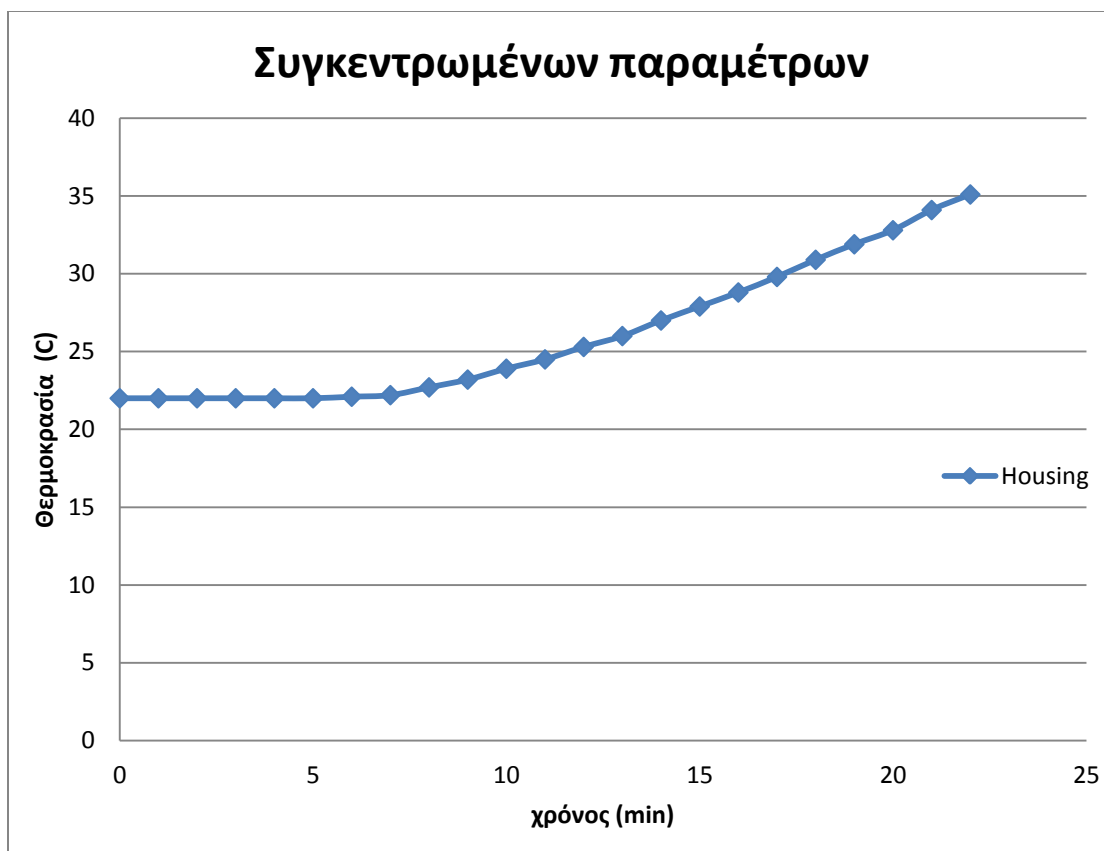
Η θερμοκρασία του σώματος στάτη συναρτήσει του χρόνου είναι



Σχήμα 3.14 : Διάγραμμα θερμοκρασίας σώματος στάτη συναρτήσει του χρόνου

Η θερμοκρασία του σώματος του στάτη φτάνει κοντά στους 70 ° C και στην αρχή του φαινομένου δεν μεταβάλλεται ραγδαία. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται στο ότι οι απώλειες σιδήρου του στάτη είναι πολύ μικρές σε σχέση με αυτές των τυλιγμάτων ,και επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας στο σώμα του στάτη ακολουθεί αυτή των τυλιγμάτων. Επίσης, από την καμπύλη φαίνεται πως ο στάτης στο διάστημα των 22 λεπτών δεν έχει φτάσει στην πρώτη σταθερά χρόνου, καθώς το διάστημα είναι αρκετά μικρό για τις δεδομένες θερμοχωρητικότητες.

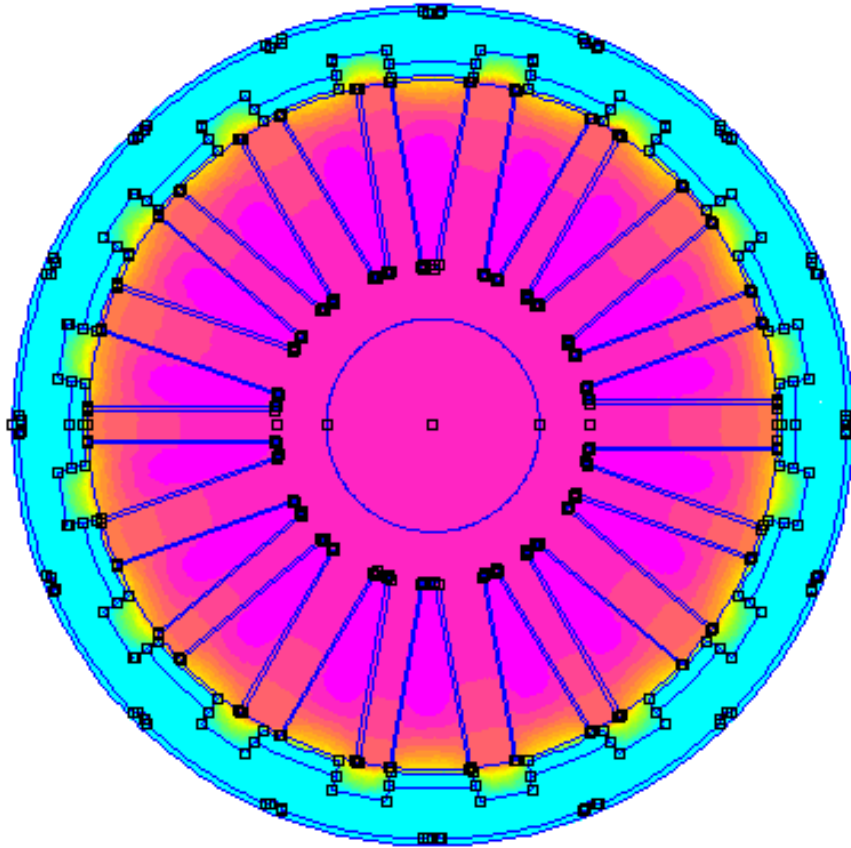
Η θερμοκρασία του κελύφους συναρτήσει του χρόνου είναι



Σχήμα 3.15 : Διάγραμμα θερμοκρασίας κελύφους συναρτήσει του χρόνου

Το κέλυφος φτάνει σε θερμοκρασία των 35 ° C, θερμοκρασία αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με αυτές που προέκυψαν από τις δύο παραπάνω προσομοιώσεις. Στην αρχή της προσομοίωσης δεν υπάρχει ουσιαστική μεταβολή στη θερμοκρασία του κελύφους και αυτό διότι η κύρια πηγή θερμότητας που είναι αυτή των τυλιγμάτων, στο μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων συνδέεται με τον κόμβο του κελύφους μέσω αντιστάσεων που αναπαριστούν τον αέρα στο διάκενο, και άρα μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και μέσω των αντιστάσεων συναγωγής. Από την καμπύλη διαπιστώνουμε πως σε διάστημα 22 λεπτών η θερμοκρασία του κελύφους δεν έχει φτάσει στην πρώτη σταθερά χρόνου.

## Κεφάλαιο 4 : Θερμική ανάλυση με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων



### 4.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια προσπάθεια θερμικής ανάλυσης του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών με πεπερασμένα στοιχεία. Η μέθοδος αυτή παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τη μέθοδο των συγκεντρωμένων παραμέτρων, και μια λεπτομερή εικόνα για το θερμοκρασιακό επίπεδο και την πυκνότητα θερμορροής στον κινητήρα. Η θερμική ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί θα αφορά τρισδιάστατη γεωμετρία. Θα πρέπει να τονίσουμε πως όπως και στην προηγούμενη ενότητα ο μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας δε λαμβάνεται υπόψιν.

## 4.2 Μετάδοση θερμότητας στο εσωτερικό της μηχανής

Όπως έχει σημειωθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια η διαφορά θερμοκρασίας σε δύο σημεία της μηχανής έχει ως αποτέλεσμα τη ροή θερμότητας. Στον σύγχρονο κινητήρα που μελετάμε εδώ ως πηγές θερμότητας θεωρούνται οι απώλειες που εμφανίζει ο κινητήρας, δηλαδή οι απώλειες χαλκού και σιδήρου. Η θερμότητα διαδίδεται στα διαφορετικά μέρη της μηχανής μέσω των μηχανισμών της αγωγής και της συναγωγής. Πολύ επιγραμματικά υπενθυμίζονται οι μηχανισμοί αυτοί καθώς και οι μαθηματικές εξισώσεις που τους περιγράφουν.

### 4.2.1 Μηχανισμός της αγωγής

Ο γενικός τύπος που περιγράφει το μηχανισμό της αγωγής σε τρισδιάστατο πρόβλημα δίνεται από τη σχέση (2.16)

$$\lambda \cdot \nabla^2 T + q = \rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.16)$$

όπου  $\lambda$  [W/m·K] ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας,  $C_p$  [J/Kg·K] η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού και  $\rho$  [Kg/m<sup>3</sup>] η πυκνότητα του υλικού.

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες η (2.17) μας περιγράφει το μηχανισμό της αγωγής και είναι

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.17)$$

Σε πολλές εφαρμογές αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η μόνιμη κατάσταση επομένως  $\frac{dT}{dt} = 0$ , και επομένως η (2.16) παίρνει τη μορφή της εξίσωσης Poisson και γίνεται

$$\nabla^2 T + \frac{q}{\lambda} = 0 \quad (4.1)$$

Αν θεωρηθεί πως στο εσωτερικό του στερεού δεν υπάρχουν πηγές θερμότητας ( $q=0$ ) τότε η (2.16) παίρνει τη μορφή της εξίσωσης Fourier και γίνεται :

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.2)$$

Τέλος, στη μόνιμη κατάσταση και με απουσία πηγών θερμότητας προκύπτει η εξίσωση Laplace και επομένως έχουμε

$$\nabla^2 T = 0 \quad (4.3)$$



#### 4.2.2 Μηχανισμός της συναγωγής

Η μεταφορά θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής γίνεται μεταξύ ρευστών. Ο μηχανισμός αυτός περιγράφεται από τον τύπο του Newton για την ψύξη των σωμάτων:

$$q = h \cdot (T_{solid} - T_{fluid}) \quad (2.21)$$

όπου  $q$  [ $W/m^2$ ] η πυκνότητα της θερμορροής,  $h$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής,  $T_{solid}$  η θερμοκρασία του σώματος και  $T_{fluid}$  η θερμοκρασία του ρευστού που έρχεται σε επαφή.

#### 4.3 Οριακές συνθήκες

Η χρήση οριακών συνθηκών στις επιφάνειες επαφής διαφορετικών υλικών είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση της θερμικής ανάλυσης και την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων. Για μονοδιάστατο πρόβλημα και επιφάνεια επαφής που βρίσκεται στη θέση  $x=0$  έχουμε τις εξής οριακές συνθήκες στη γενική περίπτωση:

- Συνθήκη σταθερής θερμοκρασίας ή Dirichlet:

$$T(0, t) = T_{solid} \quad (4.4)$$

- Συνθήκη σταθερής πυκνότητας θερμορροής ή Neumann:

$$\left[ -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \right]_{x=0} = q \quad (4.5)$$

- Συνθήκη συναγωγής στην επιφάνεια:

$$\left[ -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \right]_{x=0} = h \cdot [T(0, t) - T_{fluid}] \quad (4.6)$$

- Εκπομπή ακτινοβολίας προς το περιβάλλον:

$$\left[ -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \right]_{x=0} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot [T(0, t)^4 - T_{fluid}^4] \quad (4.7)$$

όπου  $\sigma$  η σταθερά Stephan-Boltzmann και  $\varepsilon$  ο συντελεστής ακτινοβολίας.

#### 4.4 Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων

Τα προγράμματα με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων δέχονται σαν 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

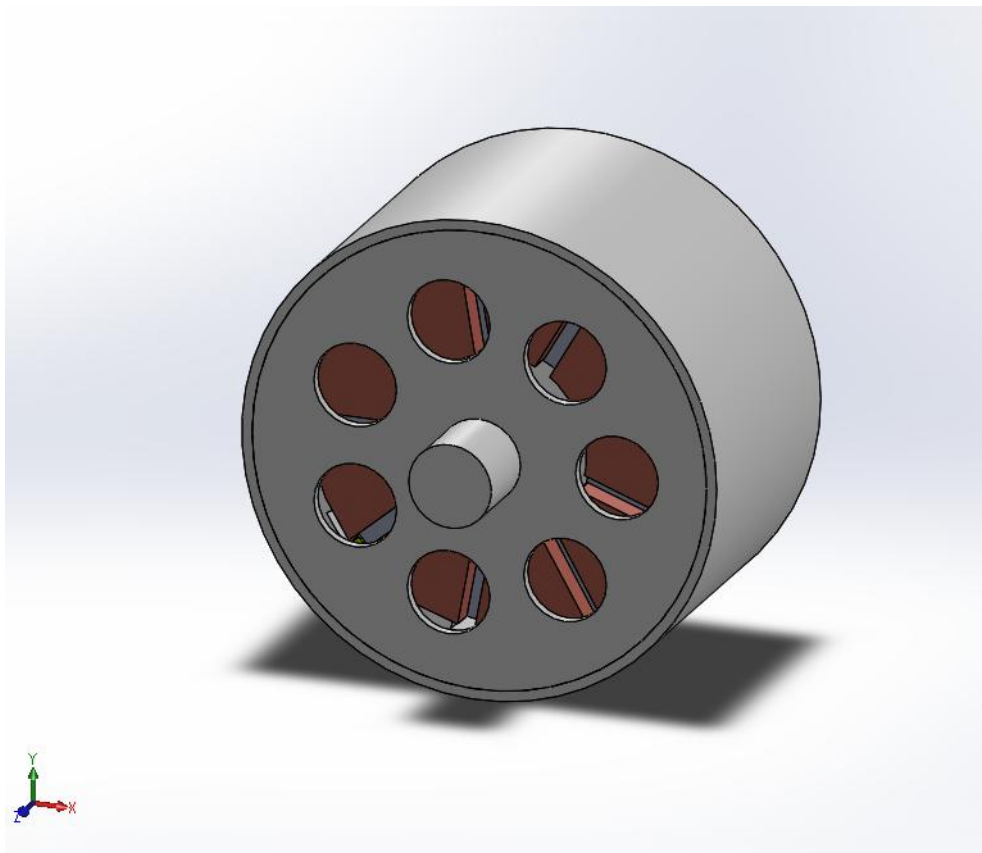
- Γνωστές θερμοκρασίες αν υπάρχουν για κάποιο μέρος του κινητήρα ή του περιβάλλοντος
- Οι συντελεστές συναγωγής που καθορίζουν την μετάδοση θερμότητας μεταξύ στερεών και ρευστών

Για τη θερμική ανάλυση σχεδιάζεται ο κινητήρας σύγχρονων μαγνητών σύμφωνα με τα πραγματικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής, και στη συνέχεια εισάγονται τα υλικά και οι ιδιότητες αυτών στα μέρη της μηχανής. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα στερεά μέρη του κινητήρα και στα ακίνητα ρευστά είναι αυτά που περιγράφουν το μηχανισμό της αγωγής. Σε επόμενο βήμα εισάγονται τα θερμικά φορτία που λαμβάνονται υπόψη κατά τη θερμική ανάλυση, δηλαδή οι πηγές θερμότητας και ο μηχανισμός της συναγωγής. Ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας μέσω του μηχανισμού της ακτινοβολίας δε λαμβάνεται υπόψη. Εισάγονται οι οριακές συνθήκες καθώς και αποσαφηνίζεται ο τρόπος με τον οποίο τα διάφορα μέρη της μηχανής συνδέονται μεταξύ τους.

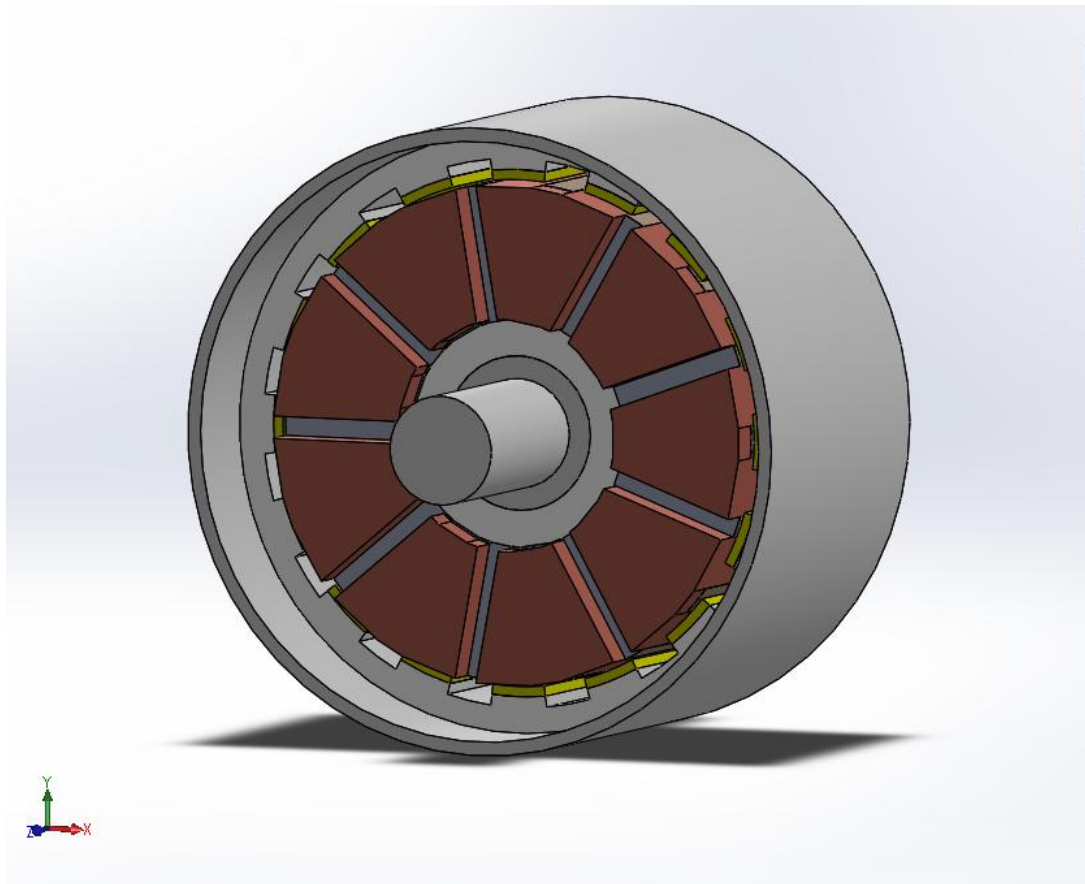
Έχοντας προσδιορίσει τα παραπάνω επιλέγουμε τη δημιουργία του πλέγματος και την ποιότητα αυτού. Τέλος επιλύεται το πρόβλημα έχοντας προσδιορίσει τον χρόνο προσομοίωσης και τα ενδιάμεσα βήματα που θα καταγράφονται τα αποτελέσματα.

Πιο συγκεκριμένα,

Η γεωμετρία της μηχανής φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα4.1 : Άποψη του Σύγχρονου κινητήρα Μονίμων Μαγνητών



Σχήμα4.2 : Άποψη του εσωτερικού του Σύγχρονου κινητήρα Μονίμων Μαγνητών

Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται παράρτημα με τα σχήματα κάθε ενός από τα μέρη που απαρτίζουν τον κινητήρα.

Τα υλικά με τα οποία κατασκευάστηκε ο κινητήρας είναι τα ίδια που περιγράφηκαν και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Έτσι,

Υλικό	Πυκνότητα $\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Θερμική Αγωγιμότητα $\lambda$ [ W/ m K ]	Ειδική Θερμοχωρητική Ικανότητα $C_p$ [ J / Kg K ]
Αλουμίνιο	2700	121	910
Σίδηρος	7600	42	460
Χαλκός με μόνωση	8960	1,88	360
Αέρας	1,2	0,0255	1000
Μαγνήτες Nd Feb	7500	8,932	502

Πίνακας 3.6.2 : Υλικά και μερικές ιδιότητες αυτών

Όπου η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας που χρησιμοποιείται για τα τυλίγματα περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 πως υπολογίστηκε. Κατά την εκτέλεση της πειραματικής επιβεβαίωσης ο κινητήρας ήταν ακινητοποιημένος οπότε ο συντελεστής αγωγιμότητας του αέρα στο διάκενο λαμβάνεται ίδιος με αυτόν του αέρα.

Ως πηγές θερμότητας λαμβάνονται οι απώλειες χαλκού, σιδήρου στο στάτη και στον δρομέα και οι απώλειες μαγνητών. Πιο συγκεκριμένα, από πειραματικές μετρήσεις έχουν προκύψει οι παρακάτω απώλειες

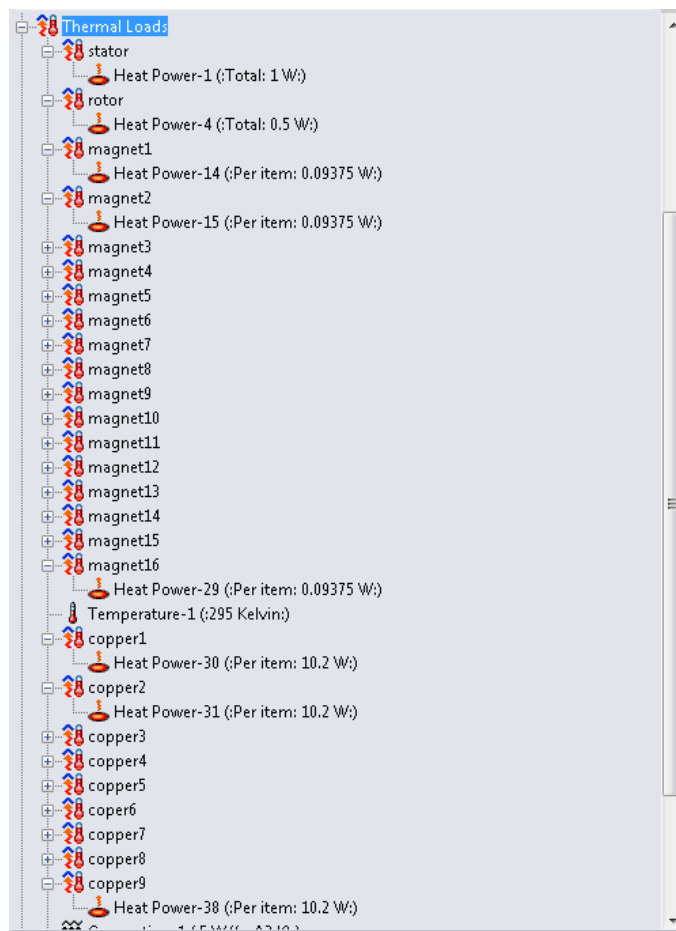
$$P_{\text{iron\_stator}} = 1 \text{ W}$$

$$P_{\text{Cu}} = 91.84 \text{ W}$$

$$P_{\text{magnet}} = 1.5 \text{ W}$$

$$P_{\text{iron\_rotor}} = 0.5 \text{ W}$$

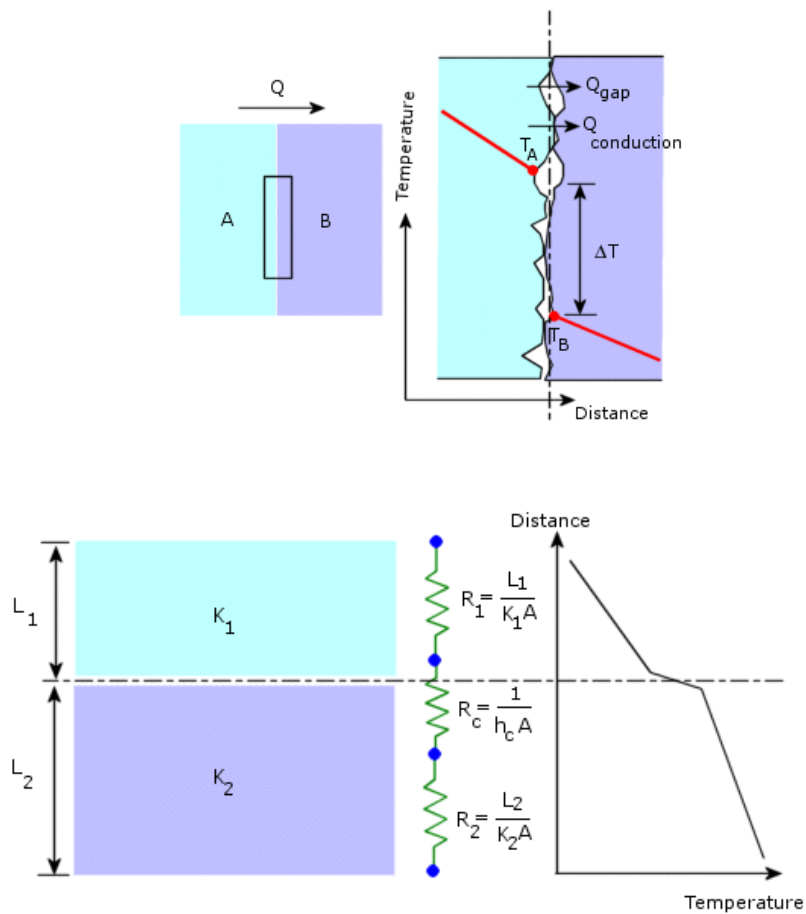
Οι πηγές θερμότητας κατανέμονται ομοιόμορφα στα μέρη της μηχανής όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3



Σχήμα 4.3 : Οι πηγές θερμότητας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Ο μηχανισμός της συναγωγής προσδιορίζεται μέσα από τον συντελεστή συναγωγής στις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με τον αέρα. Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο στις εξωτερικές επιφάνειες της μηχανής που έρχονται σε επαφή με τον αέρα επιλέγεται συντελεστής συναγωγής  $h = 10[\text{w}/\text{m}^2\text{K}]$  ενώ στις εσωτερικές επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με τον αέρα επιλέγεται συντελεστής  $h = 5[\text{w}/\text{m}^2\text{K}]$ . Η θερμοκρασία του αέρα είναι  $22^\circ\text{C}$ .

Όταν δύο μέρη της μηχανής σε διαφορετικές θερμοκρασίες έρχονται σε επαφή τότε υπάρχει μεταφορά θερμότητας μεταξύ τους. Οι επιφάνειες των μερών που έρχονται σε επαφή- όπως για παράδειγμα ο σάτης με τον άξονα- μπορεί να περιέχει μερικά κενά και επομένως δεν μεταφέρεται η συνολική θερμότητα. Το φαινόμενο αυτό προσομοιώνεται με τη θερμική αντίσταση επαφής, η οποία χαρακτηρίζεται από το συντελεστή  $h_c$  όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4



Σχήμα 4.4 : Ορισμός της θερμικής αντίστασης επαφής [9]

Τυπικές τιμές του συντελεστή  $h_c$  φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

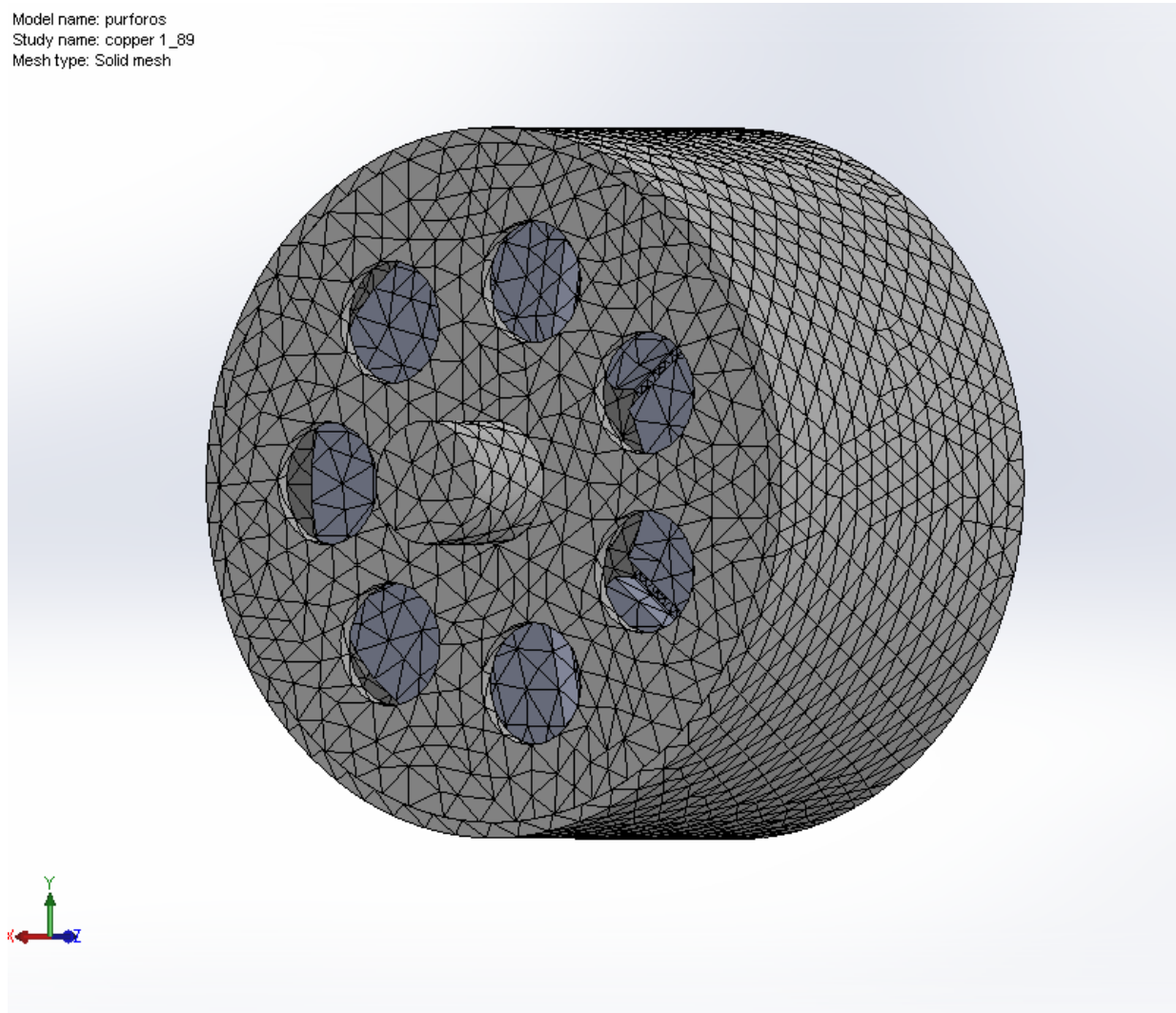
Επιφάνειες επαφής	Συντελεστής $h_c$ ( $W/m^2K$ )
Σίδηρος /Αλουμίνιο	45,000
Χαλκός/Χαλκός	10,000-25,000
Αλουμίνιο/Αλουμίνιο	2200-12000
Ανοξειδωτο ατσάλι/ Ανοξειδωτο ατσάλι	2000-3700
Ανοξειδωτο ατσάλι/ Ανοξειδωτο ατσάλι (άδεια κενά)	200-1100
Κεραμικός/κεραμικός	500-3000

Πίνακας 4.1 : Τυπικές τιμές του συντελεστή  $h_c$  για τη θερμική αντίσταση επαφής.[9]

Η αρχική θερμοκρασία τόσο του περιβάλλοντος αλλά και των μερών του κινητήρα τίθεται στη θερμοκρασία των 22°C.

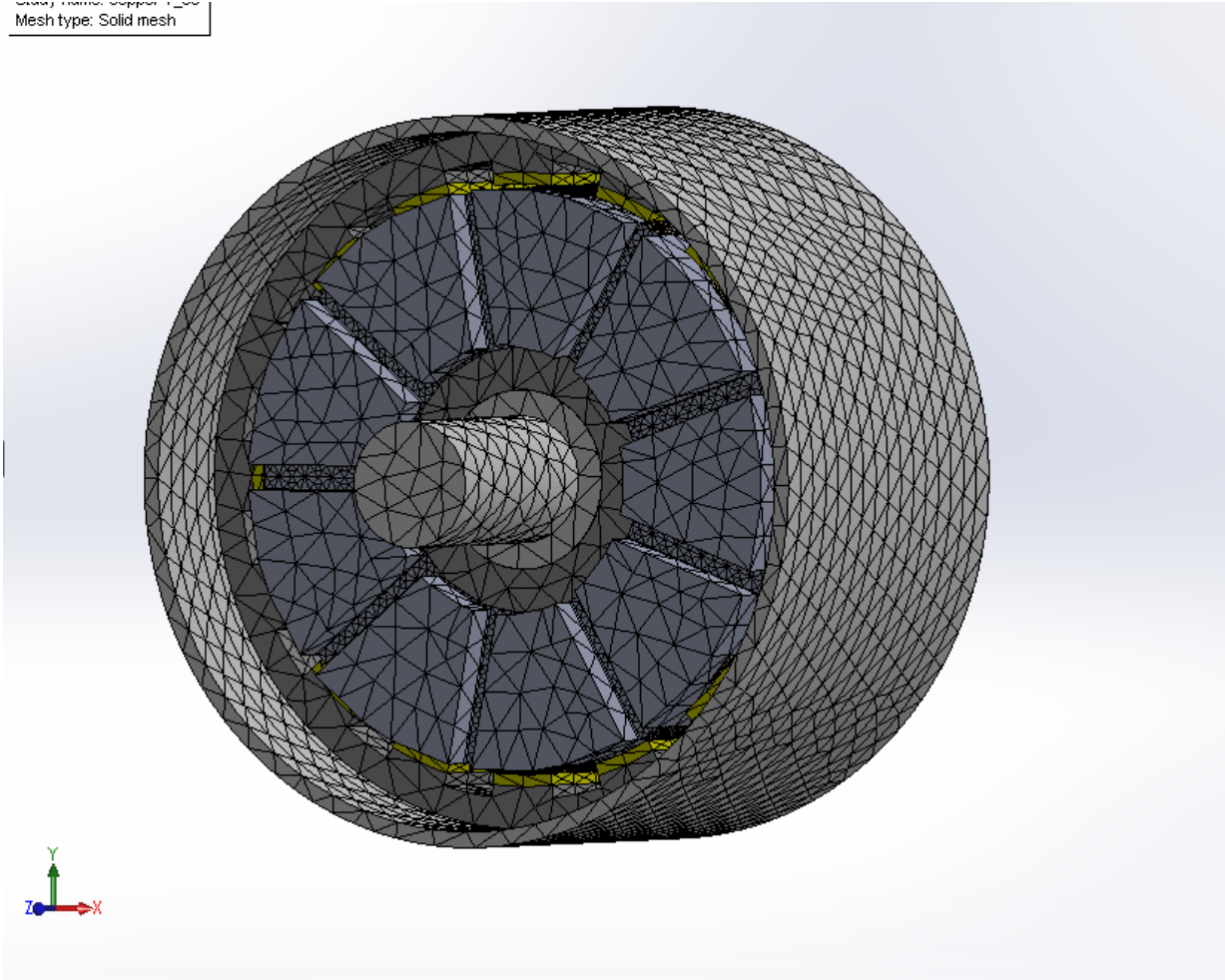
Έχοντας προσδιορίσει το πρόβλημα στη συνέχεια δημιουργείται το πλέγμα το οποίο φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

Model name: purforos  
Study name: copper 1\_89  
Mesh type: Solid mesh



Σχήμα 4.5 : Απεικόνιση του πλέγματος

Mesh type: Solid mesh



Σχήμα 4.6 : Απεικόνιση του πλέγματος στο εσωτερικό του κινητήρα

Οι λεπτομέρειες του πλέγματος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα



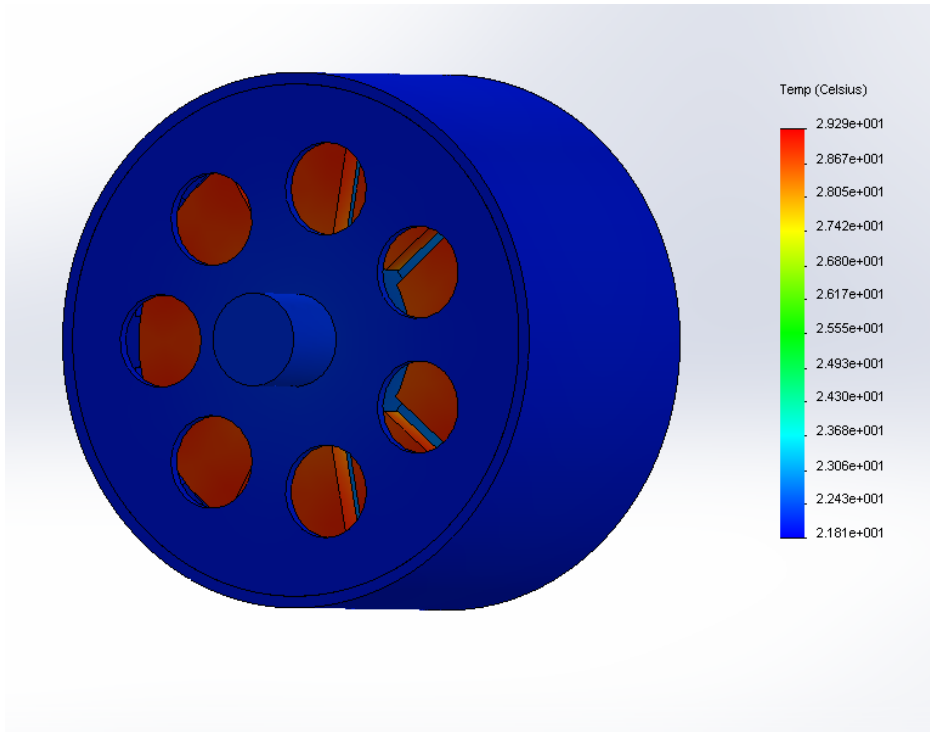
Τύπος πλέγματος	Solid Mesh
Jacobian σημεία	4
Μέγιστο μέγεθος στοιχείου	6,32335 mm
Ελάχιστο μέγεθος στοιχείου	2,10776 mm
Ποιότητα πλέγματος	Υψηλή
Σύνολο κόμβων	343708
Σύνολο στοιχείων	168942
Μέγιστη αναλογία απεικόνισης (Max aspect ratio)	1339
Ποσοστό στοιχείων με αναλογία απεικόνισης < 3	20,5
Ποσοστό στοιχείων με αναλογία απεικόνισης > 10	72,5
Χρόνος ολοκλήρωσης πλέγματος (hh:mm:ss)	00:01:21

Πίνακας 4.2 : Λεπτομέρειες πλέγματος

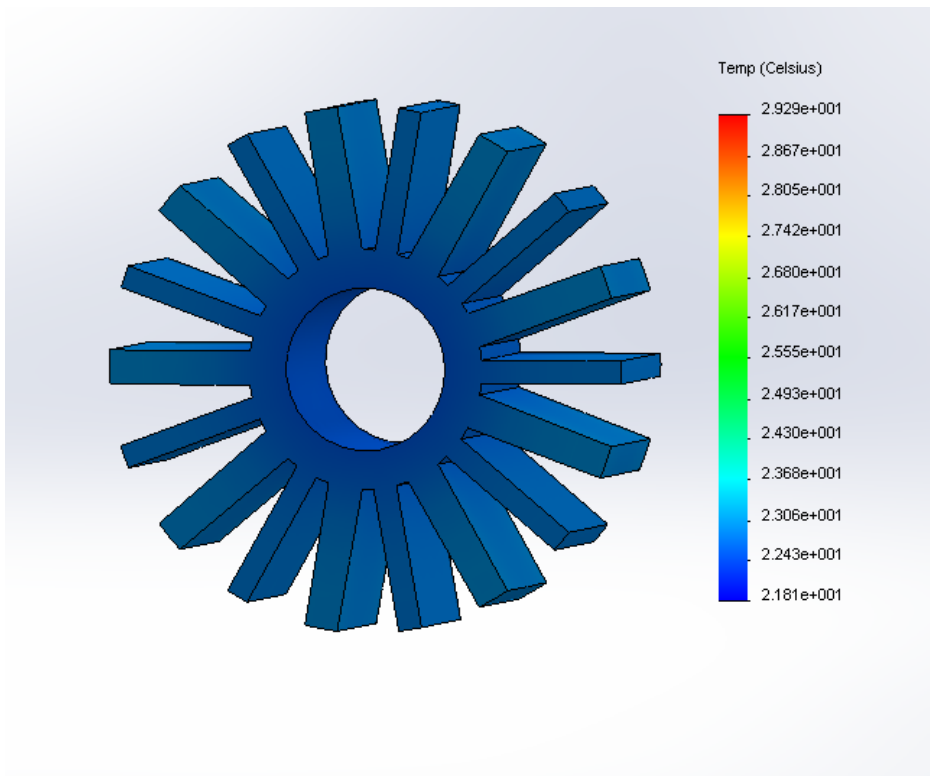
#### 4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης για τις χρονικές στιγμές  $t_1=1 \text{ min}$  ,  $t_2= 11 \text{ min}$  και  $t_3= 22 \text{ min}$  για τον κινητήρα συνολικά αλλά και μεμονωμένα για τα τυλίγματα και τον στάτη

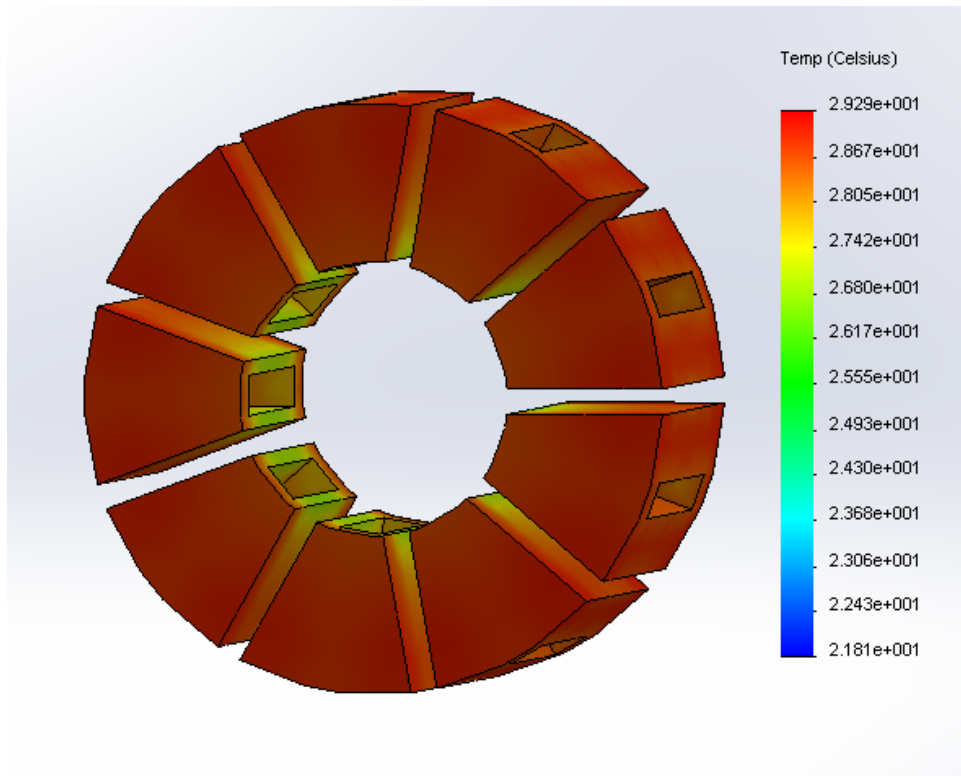
- Για την  $t_1 = 1 \text{ min}$



Σχήμα 4.7 : Κατανομή θερμοκρασιών στον κινητήρα την  $t_1 = 1 \text{ min}$



Σχήμα 4.8 : Κατανομή θερμοκρασίας στο στάτη την  $t_1 = 1 \text{ min}$



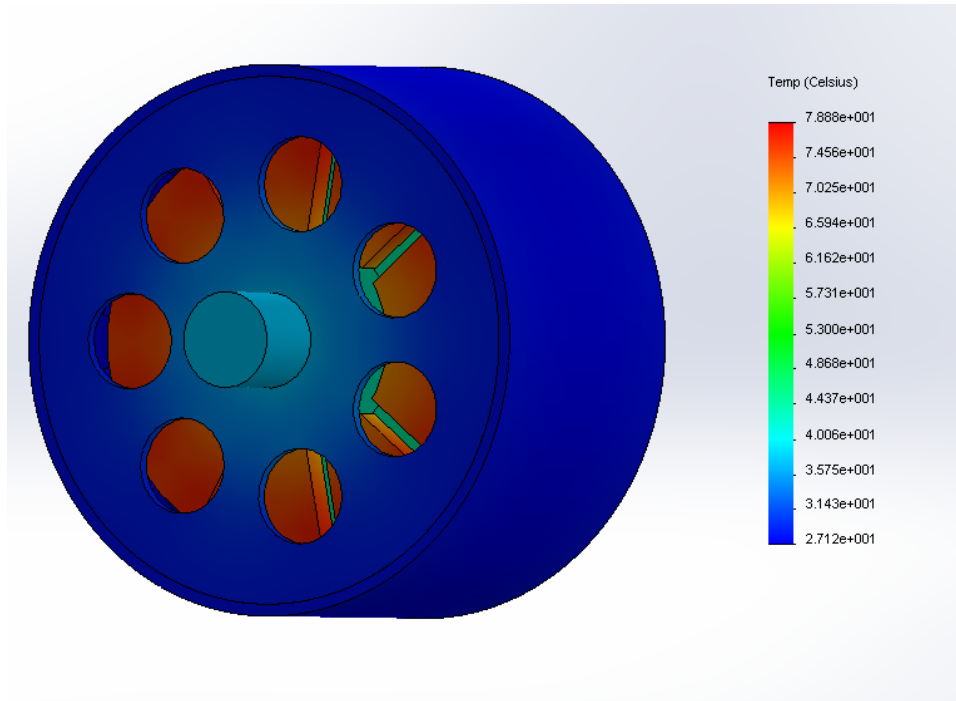
Σχήμα 4.9 : Κατανομή θερμοκρασίας στα τυλίγματα την  $t_1 = 1 \text{ min}$

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα στο πρώτο λεπτό λειτουργίας του κινητήρα η αύξηση της θερμοκρασίας στα τυλίγματα είναι ραγδαία καθώς έχει φτάσει κατά μέσο όρο στους  $28^\circ\text{C}$ , ενώ οι θερμοκρασίες των υπόλοιπων μερών του κινητήρα δεν έχει αυξηθεί σημαντικά. Η θερμοκρασία στο κέλυφος ουσιαστικά είναι αμετάβλητη ενώ αυτή του στάτη αυξήθηκε κατά μία μονάδα.

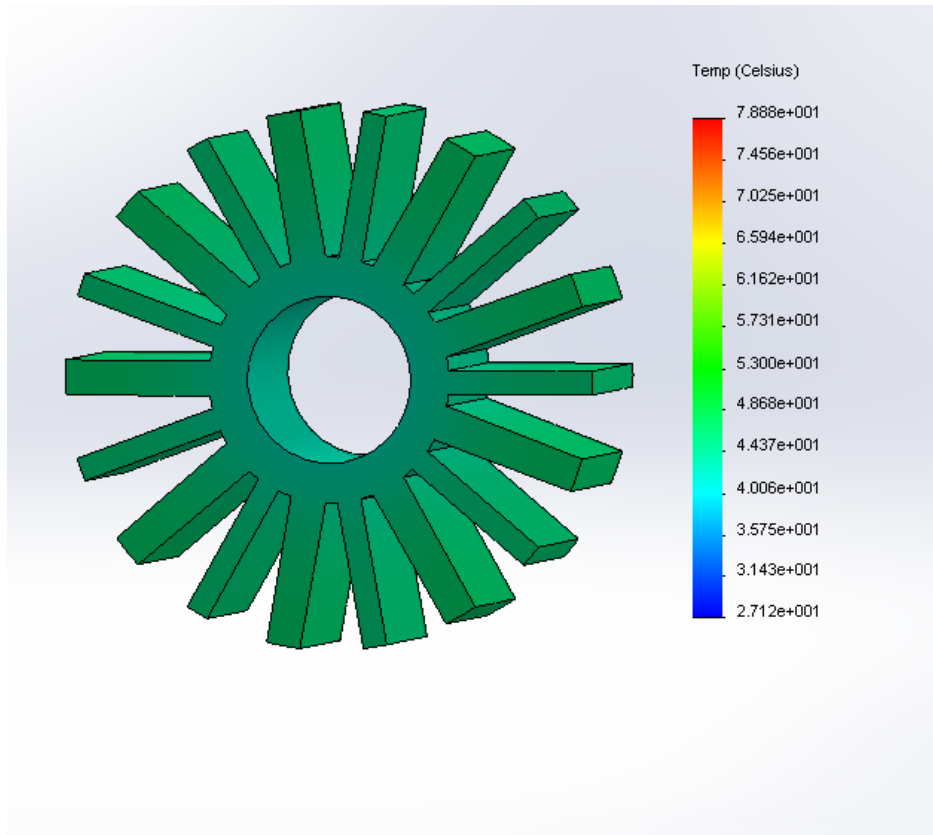
Αυτό είναι λογικό καθώς οι απώλειες των τυλιγμάτων είναι οι κύριες πηγές θερμότητας του προβλήματος και στη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι αρκετά υψηλές.

Από τα παραπάνω σχήματα γίνεται φανερό και το πώς γίνεται η ροή θερμότητας, και κατ' επέκταση η θερμοκρασία που έχουν τα μέρη της μηχανής δεν είναι η ίδια. Για παράδειγμα στα τυλίγματα υψηλότερη θερμοκρασία έχουν τα σημεία που θεωρείται μεγαλύτερη η μάζα του χαλκού, ενώ στο στάτη τα μέρη εκείνα που είναι πιο κοντά στα τυλίγματα. Από την άλλη είναι ενδεικτικό του φαινομένου πως σε κάθε πηνίο του κινητήρα η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφη, όπως αναμενόταν αφού εφαρμόζεται συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων.

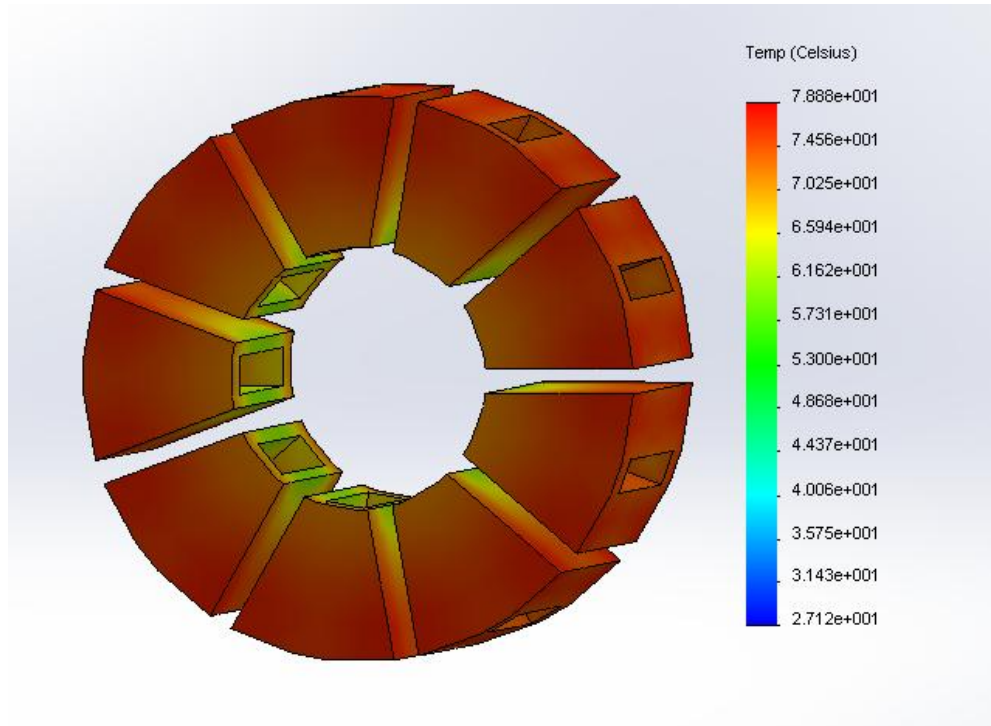
- Για  $t_2 = 11 \text{ min}$



Σχήμα 4.10 : Κατανομή θερμοκρασιών στον κινητήρα την  $t_2 = 11 \text{ min}$



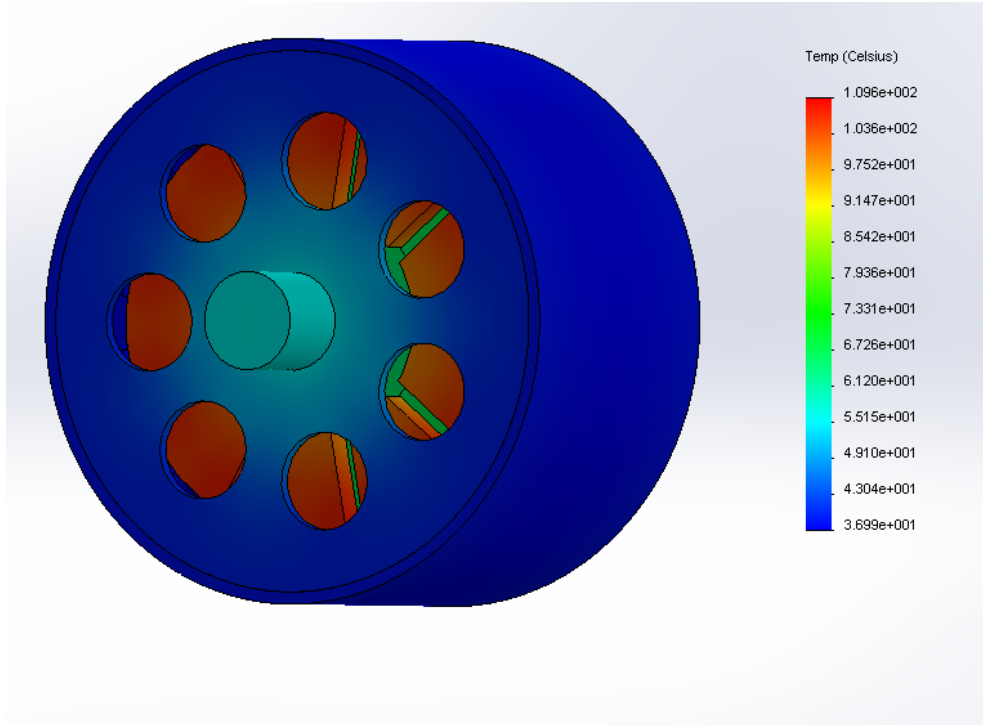
Σχήμα 4.11 : Κατανομή θερμοκρασίας στο στάτη την  $t_2 = 11 \text{ min}$



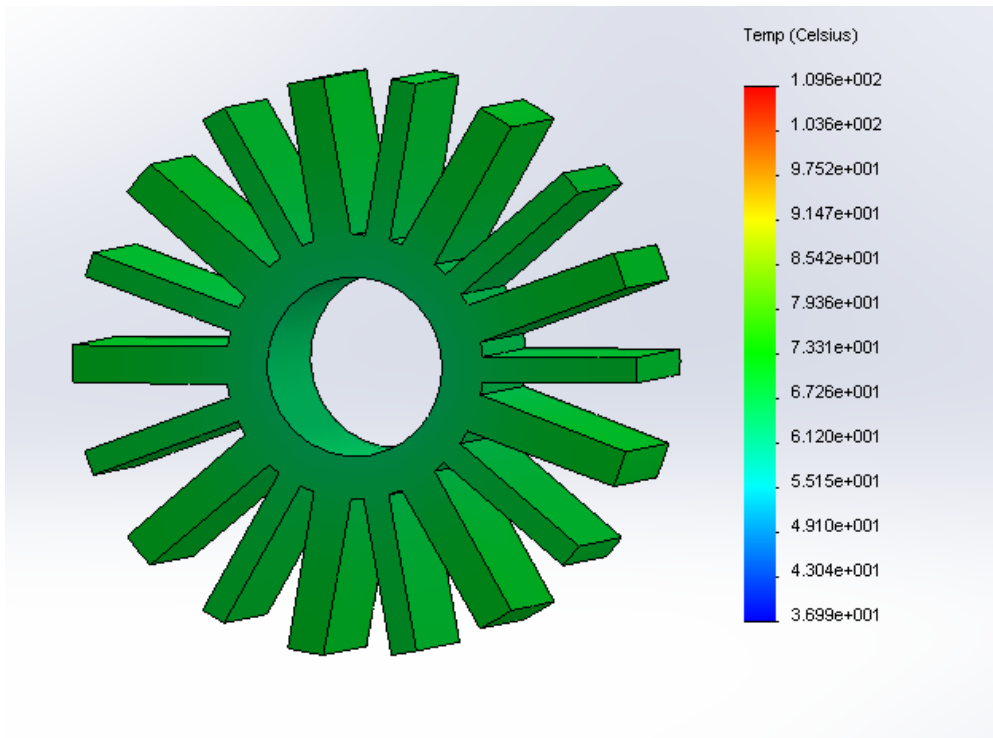
Σχήμα 4.12: Κατανομή θερμοκρασίας στα τυλίγματα την  $t_2 = 11 \text{ min}$

Μετά από 11 λεπτά λειτουργίας παρατηρούμε πως η θερμοκρασία στα τυλίγματα έχει φτάσει περίπου 3,5 φορές πάνω από την αρχική θερμοκρασία, ενώ αυτή του σάτη έχει διπλασιαστεί. Η θερμοκρασία του κελύφους δεν έχει αυξηθεί σημαντικά, και είναι εμφανές ο τρόπος που μεταδίδεται η θερμότητα από ένα μέρος της μηχανής στο άλλο. Συγκεκριμένα, οι μικρές τιμές των πηγών θερμότητας στο σίδηρο του δρομέα αλλά και στους μόνιμους μαγνήτες, καθώς και η παρουσία του αέρα στο διάκενο της μηχανής έχει ως αποτέλεσμα η αύξηση της θερμοκρασίας στο κέλυφος του κινητήρα να μην είναι μεγάλη. Από την άλλη η επαφή του άξονα με τα πλαϊνά μέρη του κελύφους μέσω των ρουλεμάν αλλά και η επαφή του άξονα με το σίδηρο του σάτη και μέσω του μονωτικού με τα τυλίγματα έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρείται ροή θερμότητας μέσω του άξονα στα πλαϊνά μέρη του κελύφους και στη συνέχεια μέσω του συντελεστή αγωγιμότητας του αλουμινίου και της συσσωρευμένης θερμοχωρητικότητας στο σύνολο του κελύφους.

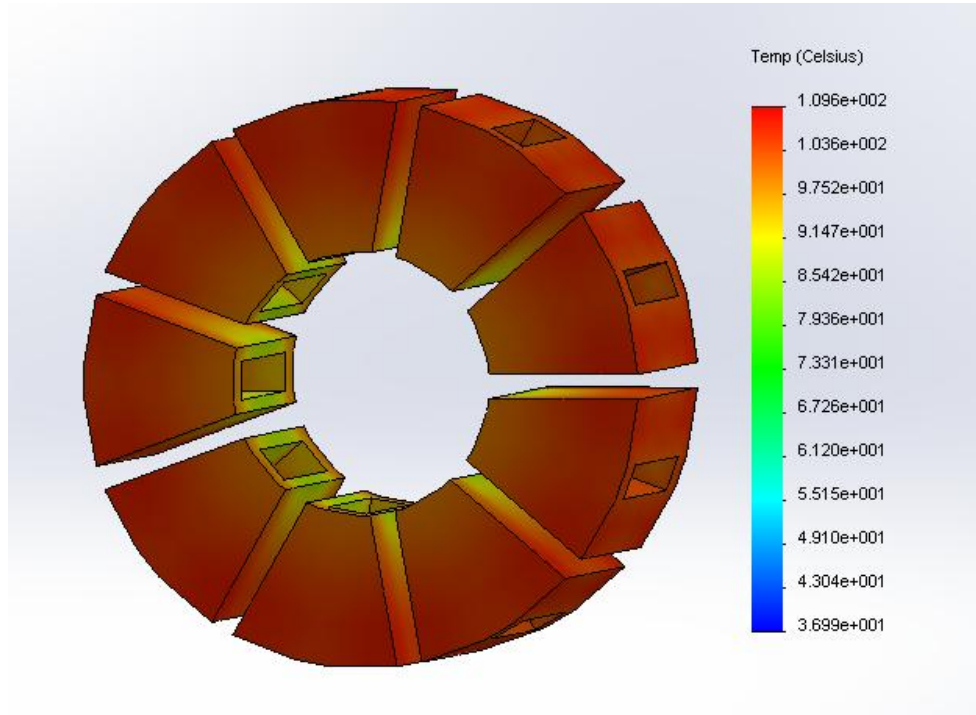
- Για  $t_3 = 22 \text{ min}$



Σχήμα 4.13 : Κατανομή θερμοκρασιών στον κινητήρα την  $t_3 = 22 \text{ min}$



Σχήμα 4.14 : Κατανομή θερμοκρασίας στο στάτη την  $t_3 = 22 \text{ min}$

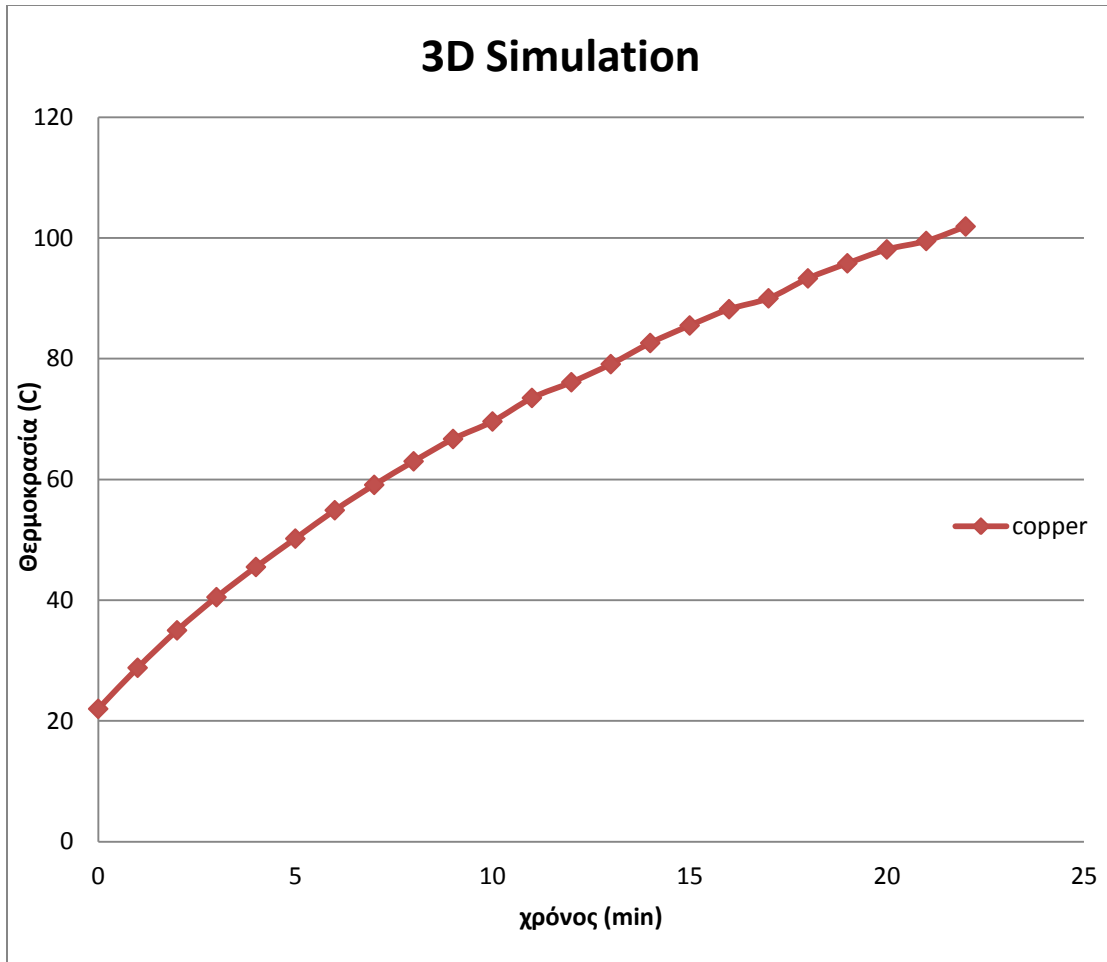


Σχήμα 4.15 : Κατανομή θερμοκρασίας στα τυλίγματα την  $t_3 = 22 \text{ min}$

Η χρονική στιγμή  $t_3 = 22 \text{ min}$  είναι η τελευταία μέτρηση της προσομοίωσης. Σε αυτή τη στιγμή τα τυλίγματα έφτασαν στη θερμοκρασία λίγο πάνω από  $100^\circ\text{C}$ , ο σάτης γύρω στους  $70^\circ\text{C}$ , ενώ στο κέλυφος λίγο κάτω από τους  $40^\circ\text{C}$ .

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων μας δίνει τη δυνατότητα να μετράμε τη θερμοκρασία σε όποιο σημείο μας ενδιαφέρει. Έτσι για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα αποτελέσματα της πειραματικής διάταξης μετράμε τη θερμοκρασία στα σημεία όπου τοποθετήθηκαν τα θερμίστορ PTC κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων.

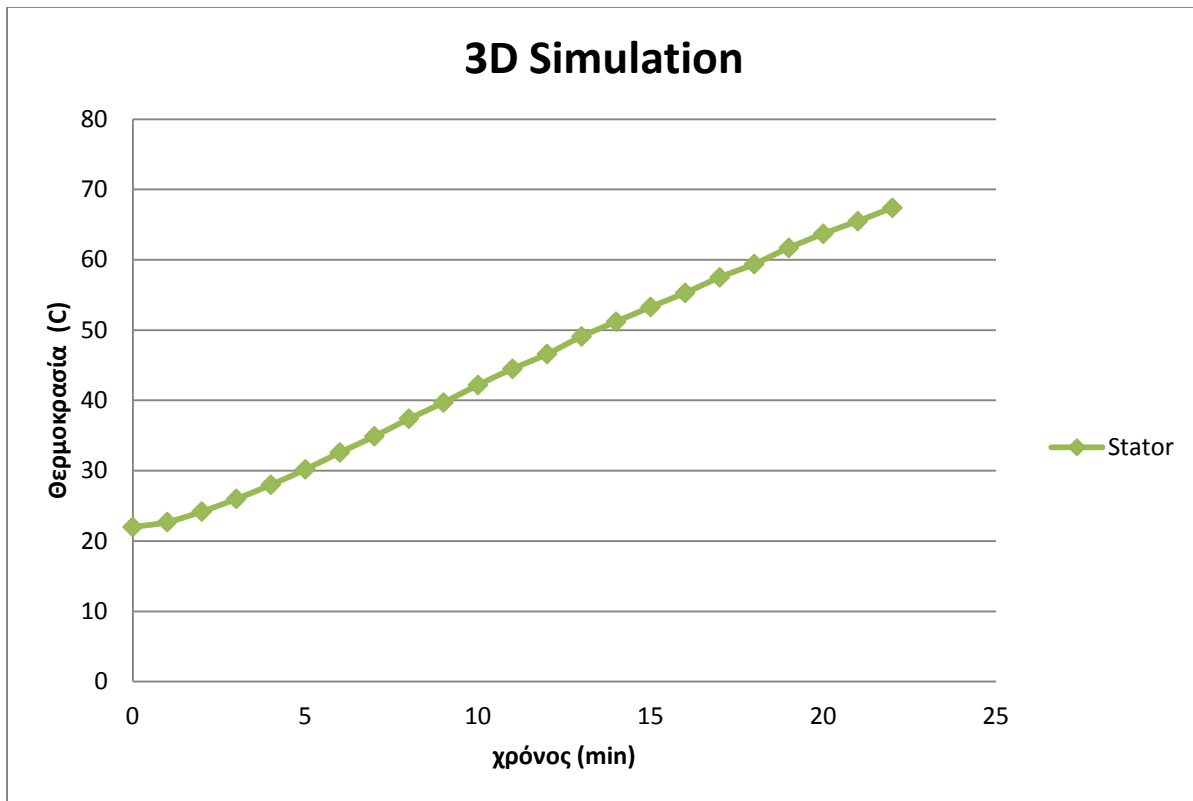
Έτσι προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα θερμοκρασίας



Σχήμα 4.16 : Διάγραμμα θερμοκρασίας τυλιγμάτων συναρτήσει του χρόνου

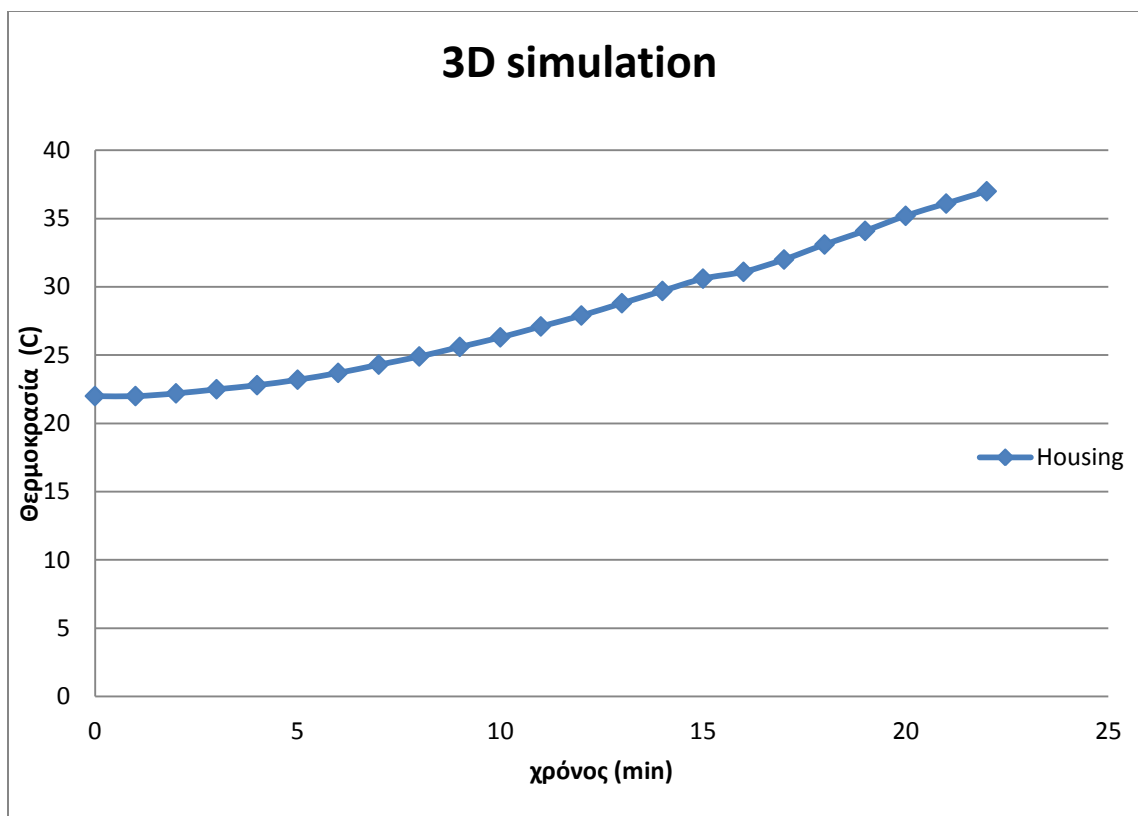
Παρατηρείται μεγάλη αύξηση στη θερμοκρασία των τυλιγμάτων της τάξης των  $79^{\circ}\text{C}$ . Είναι ενδεικτική η μεγάλη κλίση που παρουσιάζει η καμπύλη στα πρώτα λεπτά της προσομοίωσης σε σχέση με την κλίση της με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που προδίδει την εξέλιξη του φαινομένου φτάνοντας σε μία τιμή μόνιμης κατάστασης χωρίς όμως αυτή να έχει συμβεί στο διάστημα των 22 λεπτών με τις συγκεκριμένες πηγές θερμότητας.





Σχήμα 4.17 : Διάγραμμα θερμοκρασίας στάτη συναρτήσει του χρόνου

Η τιμή στο μετρούμενο σημείο του στάτη είναι αρκετά χαμηλότερη από την τιμή που προέκυψε στα τυλίγματα του κινητήρα. Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως ο στάτης δεν έχει φτάσει στο διάστημα των 22 λεπτών στην πρώτη σταθερά χρόνου ωστόσο η καμπύλη είναι ενδεικτική του φαινομένου μετάδοσης της θερμότητας στο σίδηρο του στάτη.



Σχήμα 4.18 : Διάγραμμα θερμοκρασίας κελύφους συναρτήσει του χρόνου

Η θερμοκρασία του κελύφους είναι σε όλα τα σημεία της προσομοίωσης αρκετά χαμηλότερη από τις αντίστοιχες θερμοκρασίες στο σιδηρο του στάτη και στα τυλίγματα. Όπως αναλύθηκε και πιο πάνω σημαντικό ρόλο στην αύξηση της θερμοκρασίας του κελύφους παίζει σημαντικό ρόλο η επαφή των πλαϊνών μερών του κελύφους μέσω των ρουλεμάν με τον άξονα του κινητήρα. Επομένως, η θερμοκρασία ακολουθεί αυτή των τυλιγμάτων παραμένοντας όμως σε αρκετά χαμηλές τιμές. Όμοια με το στάτη και το διάγραμμα της θερμοκρασίας του κελύφους με το στάτη φαίνεται πως στο ίδιο διάστημα δεν έχει πιάσει την πρώτη σταθερά χρόνου.

Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις και η σύγκριση των διάφορων μεθόδων της θερμικής ανάλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος.

## Κεφάλαιο 5: Πειραματική Επιβεβαίωση και Σύγκριση αποτελεσμάτων



### 5.1 Η πειραματική διάταξη

Για την πειραματική επιβεβαίωση της θερμικής ανάλυσης του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών χρησιμοποιήθηκαν επαφές θερμίστορ PTC. Αρχικός σκοπός ήταν η μέτρηση της θερμοκρασίας στα διάφορα μέρη της μηχανής με τη χρήση θερμοκάμερας αλλά όπως έγινε αντιληπτό οι μετρήσεις δεν ήταν αξιόπιστες λόγω της σιλιπνότητας των επιφανειών της μηχανής που οδηγούν την θερμοκάμερα σε λανθασμένες ενδείξεις.

Τα θερμίστορ PTC (Positive Temperature Coefficient, θετικού συντελεστή θερμοκρασίας) χαρακτηρίζονται από τον υψηλό θετικό συντελεστή θερμοκρασίας δηλαδή από την αύξηση της τιμής της αντίστασης τους με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό βέβαια γίνεται μόνο για ορισμένες περιοχές θερμοκρασίας αφού για άλλες περιοχές ο συντελεστής είναι ή μηδέν ή αρνητικός. Τα υλικά κατασκευής των PTC είναι μείγματα ανθρακικού βαρίου ή οξειδία στροντίου και τιτανίου τα οποία ανακατεύονται μ' άλλα υλικά μαζί με συγκρατική ύλη. Το υλικό μπαίνει σε καλούπια, θερμαίνεται, προστίθενται οι ακροδέκτες και τα διάφορα χρώματα και δίνονται στο εμπόριο.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ακινητοποιημένο το δρομέα μέσα από το σύστημα φρένων που διαθέτει το όχημα, τα τυλίγματα του στάτη τροφοδοτήθηκαν από έναν αυτομετασχηματιστή και οι μετρήσεις ελήφθησαν μέσω ψηφιακών πολυμέτρων. Το ρεύμα που διαρρέει την κάθε γραμμή του κινητήρα ρυθμίστηκε μέσω του αυτομετασχηματιστή μέσα από αντιστάσεις να είναι στα 10 A. Κατά την εκτέλεση του πειράματος ο δρομέας ήταν ακινητοποιημένος καθώς σε αντίθετη περίπτωση θα ήταν αδύνατη η τοποθέτηση των θερμίστορ.

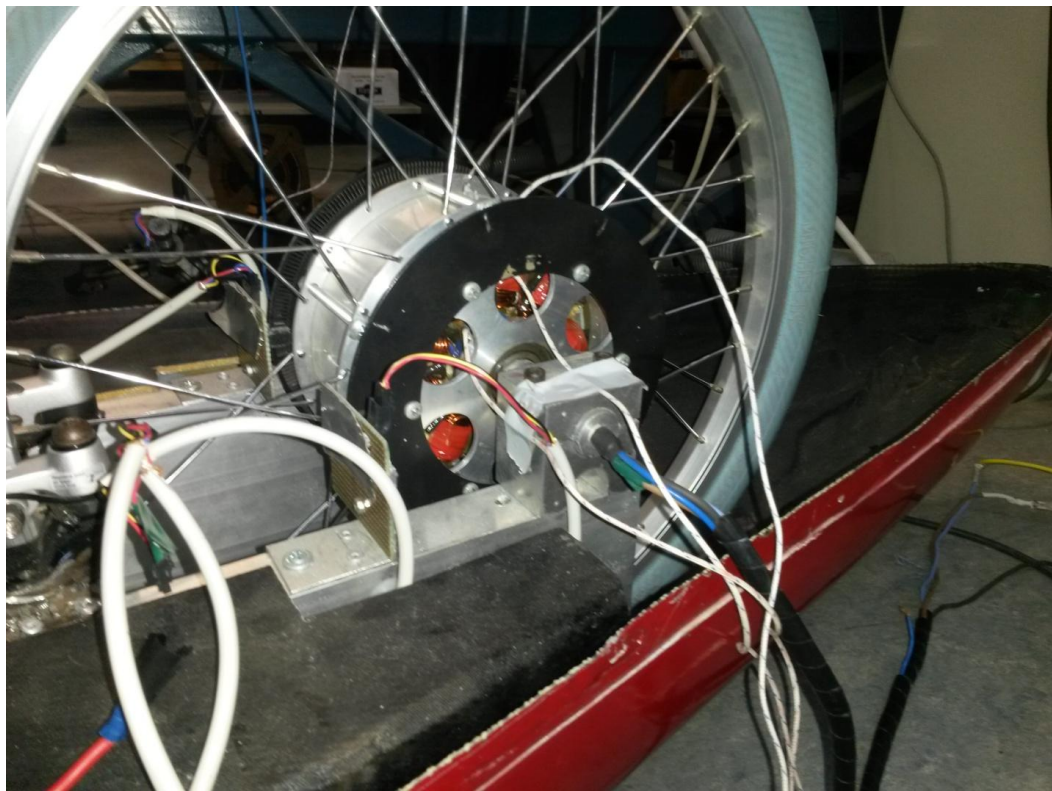
Λόγω της γεωμετρίας της μηχανής τα θερμίστορ μπορούν να τοποθετηθούν μόνο σε τρία διαφορετικά μέρη της μηχανής και επομένως να έχουμε τις τιμές θερμοκρασιών για αυτά τα μέρη της μηχανής. Έτσι τα θερμίστορ τοποθετούνται στο κέλυφος της μηχανής, στο στάτη και σε ένα από τα πηνία της μηχανής. Παρακάτω παρατίθενται οι εικόνες για την πειραματική διάταξη.



Σχήμα 5.1 : Άποψη της πειραματικής διάταξης



Σχήμα 5.2 : Αντιστάσεις για επιθυμητό ρεύμα γραμμής



Σχήμα 5.3 : Τοποθέτηση των PTC στον κινητήρα



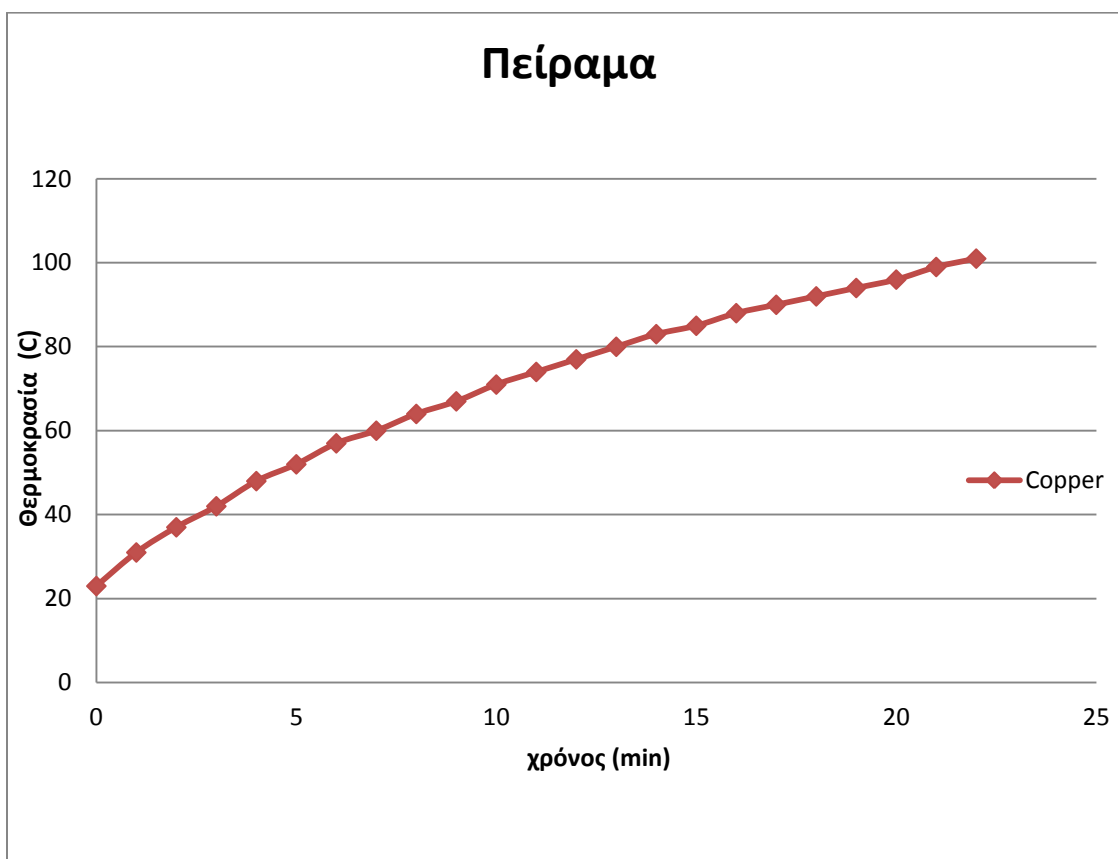
Σχήμα 5.4 : Καταγραφή θερμοκρασιών μέσω ψηφιακών πολυμέτρων

## 5.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διάταξης

Σύμφωνα με την παραπάνω πειραματική διάταξη καταγράφηκαν οι μεταβολές στη θερμοκρασία του στάτη, του κελύφους και ενός από τα τυλίγματα του κινητήρα, όταν εκείνα διαρρέονται από ρεύμα γραμμής 10 A. Οι μετρήσεις που λήφθηκαν καταγράφηκαν για κάθε ένα λεπτό. Αρχικός σκοπός ήταν η καταγραφή των αποτελεσμάτων για λειτουργία του κινητήρα διάρκειας 40 λεπτών όσο είναι και η διάρκεια του αγώνα, αλλά όπως έχει ειπωθεί οι θερμοκρασιακοί περιορισμοί είναι αυτοί που τελικά καθορίζουν τη λειτουργία και απόδοση του κινητήρα. Έτσι για να μην υπάρξει κάποια βλάβη όταν η θερμοκρασία των τυλιγμάτων έφτασε στους 100 °C ο κινητήρας έπαψε να τροφοδοτείται. Αντικειμενικός σκοπός του πειράματος αυτού ήταν να λειτουργήσει ο κινητήρας σε καταστάσεις αρκετά πιο απαιτητικές από αυτές του αγώνα ώστε να εξεταστούν και οι πραγματικές του

δυνατότητες. Όσον αφορά τη λειτουργία του κινητήρα κατά τη διάρκεια του αγώνα δεν υπάρχουν θέματα θερμοκρασιακών περιορισμών καθώς λειτουργεί σε πολύ χαμηλότερο μέσο ρεύμα.

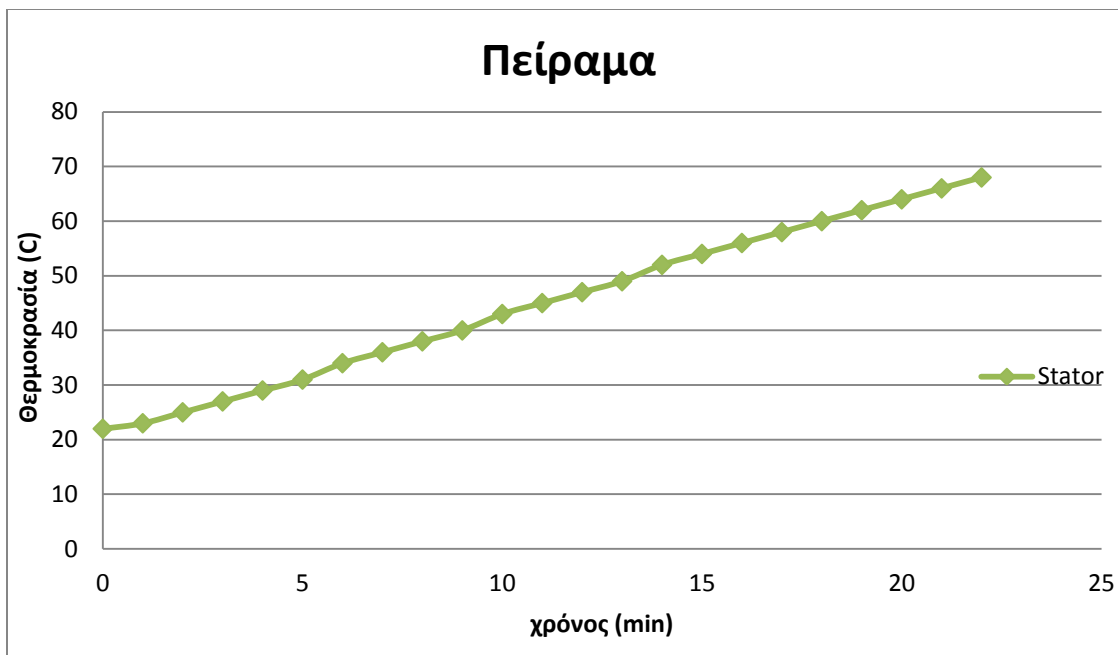
Έτσι, η μεταβολή της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων συναρτήσει του χρόνου φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα



Σχήμα 5.5 : Διάγραμμα θερμοκρασίας τυλιγμάτων

Τα τυλίγματα από τη θερμοκρασία των 22 ° C φτάνουν σε θερμοκρασία 101 ° C.. Παρατηρείται μεγάλη αύξηση θερμοκρασίας γεγονός που δικαιολογείται από το μεγάλο ρεύμα γραμμής σε κάθε φάση του κινητήρα. Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως τα τυλίγματα έχουν φτάσει στην πρώτη σταθερά χρόνου

Η μεταβολή στη θερμοκρασία του σώματος του στάτη φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα

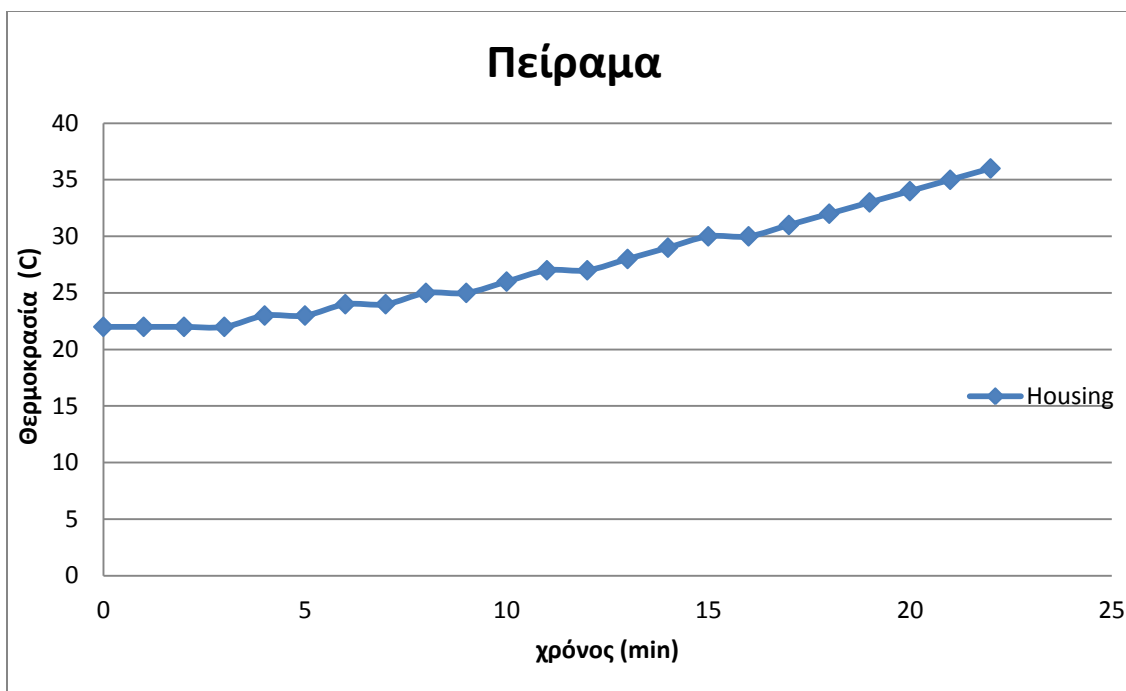


Σχήμα 5.6 : Διάγραμμα θερμοκρασίας σώματος στάτη

Το σώμα του στάτη από τη θερμοκρασία των 22 ° C φτάνει σε θερμοκρασία 68 ° C. Η θερμοκρασία του σιδήρου του στάτη είναι κατά 33° C χαμηλότερη από αυτή των τυλιγμάτων γεγονός που δικαιολογείται από τις απώλειες σιδήρου του στάτη που είναι πολύ πιο μικρές από αυτές των τυλιγμάτων. Έτσι, η αύξηση της θερμοκρασίας στο σώμα του στάτη ακολουθεί αυτή των τυλιγμάτων μέσω του μηχανισμού της αγωγής, έχοντας σαν κύρια πηγή θερμότητας τις απώλειες χαλκού. Η καμπύλη του διαγράμματος θερμοκρασίας στάτη-χρόνος μας προδίδει πως ο στάτης δεν έχει φτάσει σε πρώτη σταθερά χρόνου, και αυτό διότι ο χρόνος εκτέλεσης του πειράματος είναι στα 22 λεπτά και οι θερμοχωρητικότητες των υλικών αρκετά ψηλές.

Τέλος , το τρίτο θερμίστορ τοποθετήθηκε στο κέλυφος και τα αποτελέσματα είναι τα εξής.





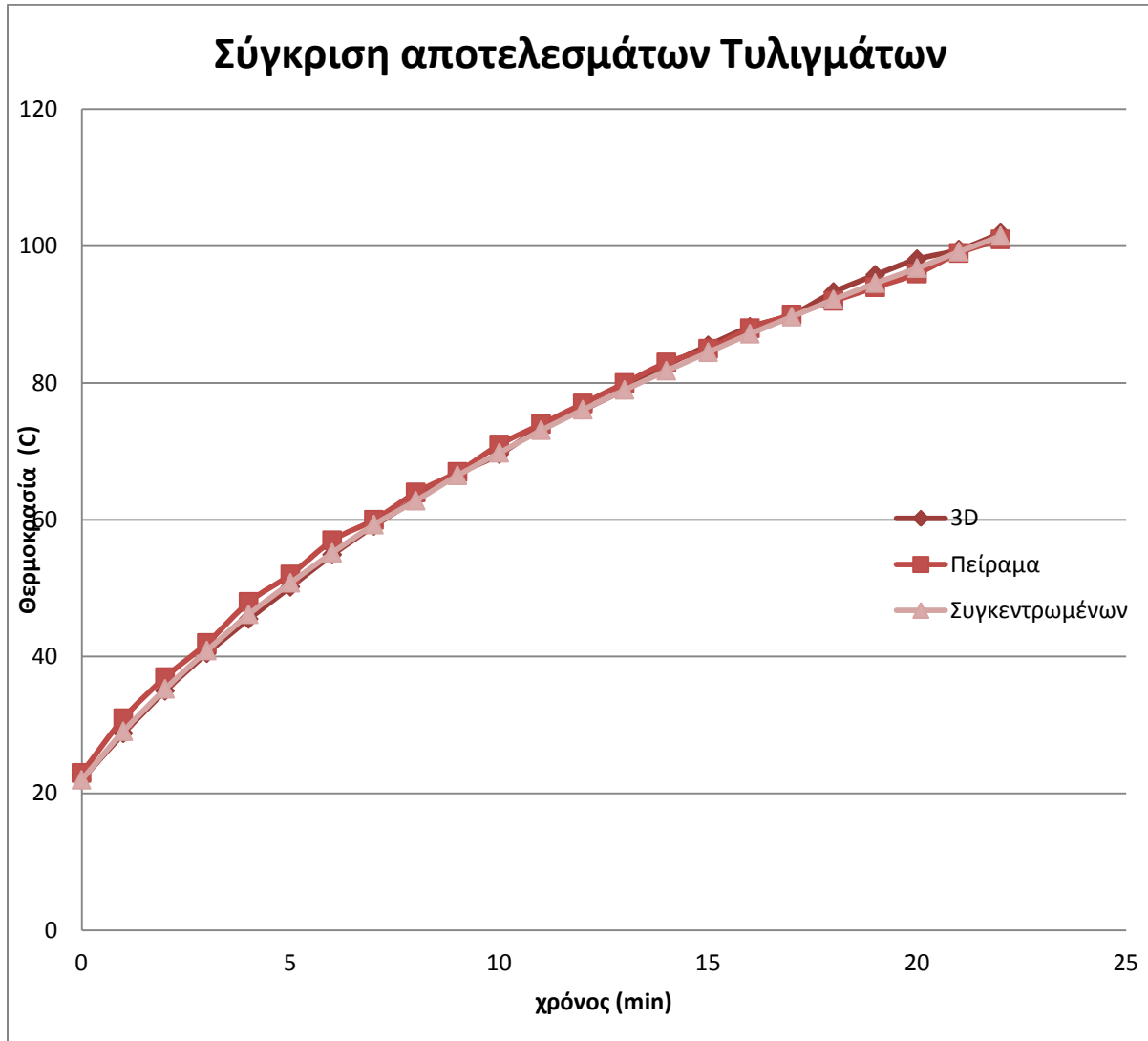
Σχήμα 5.7 : Διάγραμμα θερμοκρασίας κελύφους.

Η θερμοκρασία του κελύφους από τους 22 ° C φτάνει στους 36 ° C σε διάστημα 22 λεπτών. Σαφώς και η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι πιο μικρή και πιο αργή σε σχέση με τις μετρήσεις στα προηγούμενα μέρη του κινητήρα. Το ρεύμα γραμμής σε κάθε φάση του κινητήρα και κατ' επέκταση οι απώλειες χαλκού είναι αυτές που καθορίζουν το μέγεθος της αύξησης της θερμοκρασίας και σε αυτό το μέρος της μηχανής. Μεταξύ κελύφους και τυλιγμάτων υπάρχει το διάκενο αέρος οπότε η αγωγή της θερμότητας γίνεται με μεγαλύτερη δυσκολία, ενώ οι απώλειες σιδηρού του δρομέα και αυτές των μαγνητών είναι αρκετά μικρές ώστε να συνεισφέρουν κατά πολύ στην αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, μεγάλο μέρος του κελύφους έρχεται σε άμεση επαφή με τον εξωτερικό αέρα και επομένως έχει καλύτερη ψύξη από τα υπόλοιπα μέρη της μηχανής. Από τη καμπύλη φαίνεται πως στο διάστημα αυτό το κέλυφος δεν έχει φτάσει στην πρώτη σταθερά χρόνου.

### 5.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων προσομοίωσης με τα πειραματικά

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις τρεις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τη θερμική ανάλυση του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών.

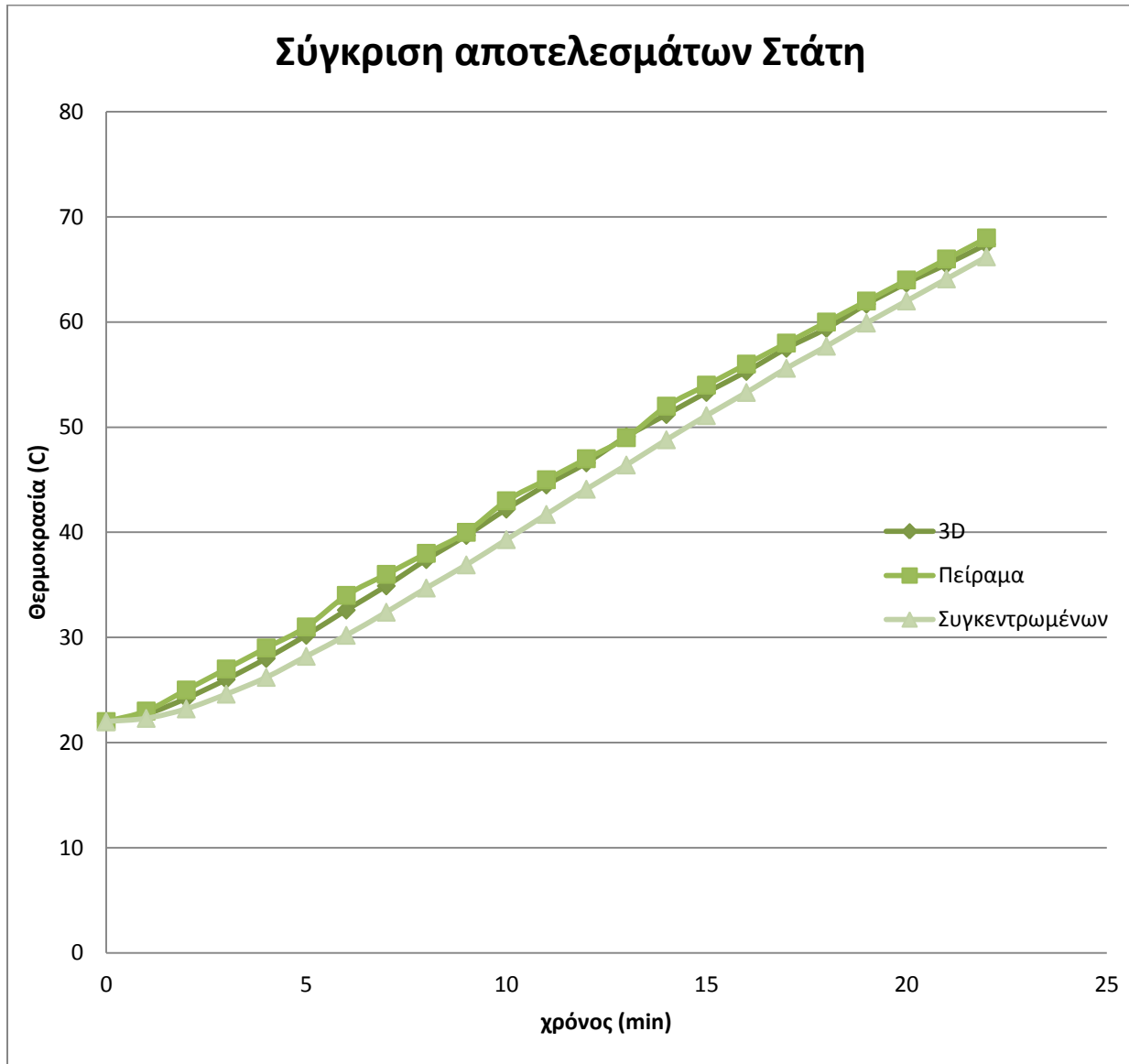
Για τα τυλίγματα έχουμε



Σχήμα 5.8 : Διαγράμματα θερμοκρασίας τυλιγμάτων για τις τρεις μεθόδους

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως και οι δύο μέθοδοι προσέγγισης του θερμικού προβλήματος δίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα συγκρινόμενα με αυτά των πειραματικών μετρήσεων. Συγκεκριμένα, παρατηρείται σχεδόν ταύτιση των πειραματικών μετρήσεων με τα αποτελέσματα της μεθόδου με τα πεπερασμένα στοιχεία και οφείλεται στο γεγονός πως σαν πηγές θερμότητας χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές τιμές, στο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας των τυλιγμάτων λήφθηκε υπόψιν και το μονωτικό στρώμα με το οποίο είναι περιτυλιγμένοι οι αγωγοί, και οι ακριβείς γεωμετρικές διαστάσεις των τυλιγμάτων στο τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Παρόμοια και στο μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές καθώς η μοντελοποίηση ξεκίνησε από την πηγή θερμότητας των τυλιγμάτων.

Για το στάτη είναι

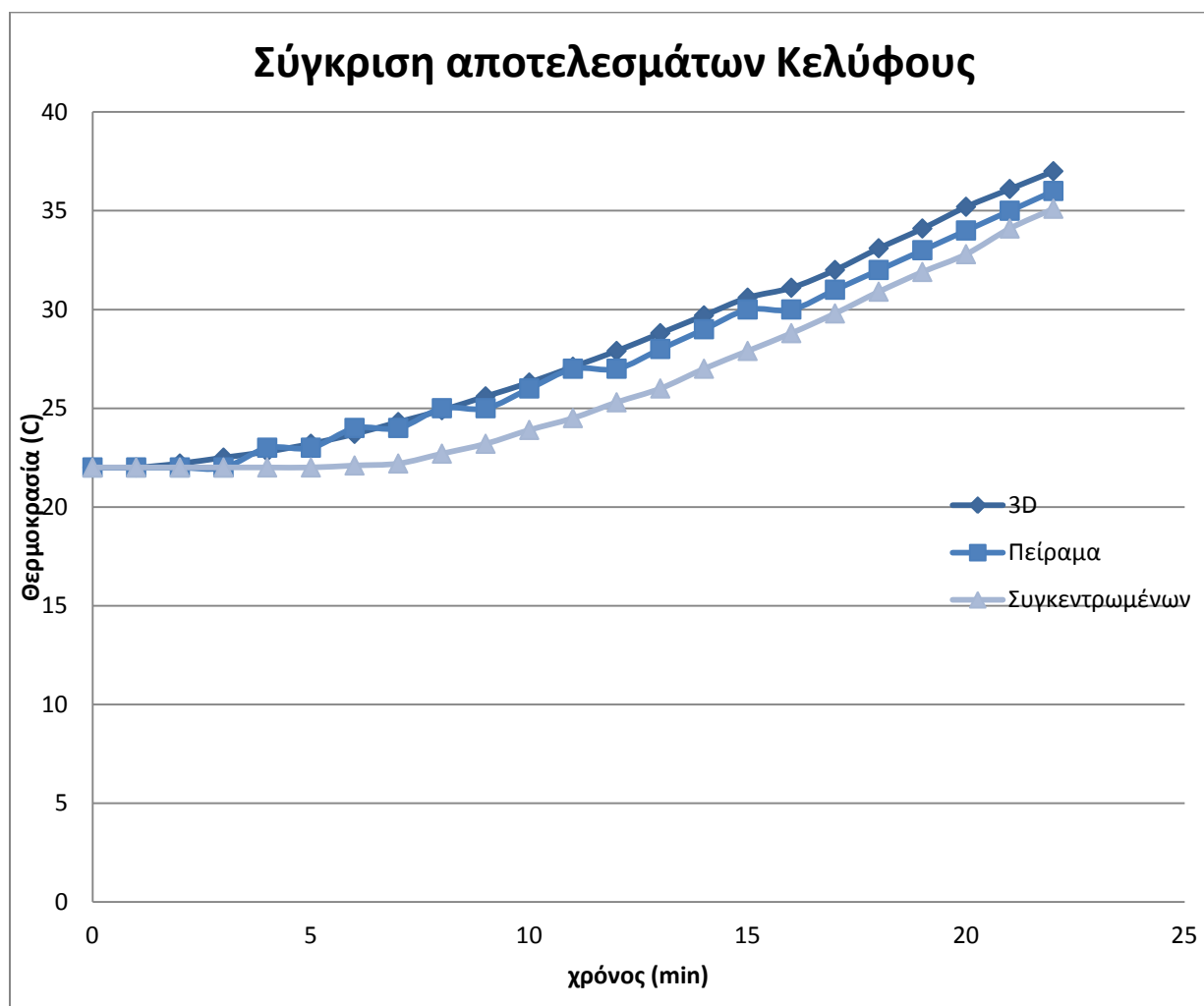


Σχήμα 5.9 : Διαγράμματα θερμοκρασίας στάτη για τις τρεις μεθόδους

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως η τρισδιάστατη ανάλυση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων μας δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά σε αυτά των πειραματικών μετρήσεων, και η καμπύλη της θερμοκρασίας από τη τρισδοάστατη ανάλυση ακολουθεί αυτή του πειράματος. Σημαντικό ρόλο παίζει πως το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με τρισδιάστατη ανάλυση μας δίνει τη δυνατότητα

να μετρήσουμε τη θερμοκρασία στο σίδηρο του σιάτη στο σημείο που τοποθετήθηκε και το θερμίστορ PTC κατά την εκτέλεση του πειράματος. Από την άλλη τα αποτελέσματα της μεθόδου των συγκεντρωμένων παραμέτρων έχουν μια μικρή απόκλιση που η μέγιστη τιμή της είναι στους 3,8 °C, αλλά με την πάροδο του χρόνου τείνει να μικραίνει προδίδοντας μια πολύ καλή προσέγγιση στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα.

Και τέλος για το κέλυφος παίρνουμε



Σχήμα 5.10 : Διαγράμματα θερμοκρασίας κελύφους για τις τρεις μεθόδους

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως και στο κέλυφος η ανάλυση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά σε αυτά των πειραματικών μετρήσεων. Η καμπύλη της θερμοκρασίας του κελύφους από το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζει μέγιστη απόκλιση 1,2 °C από την καμπύλη της θερμοκρασίας του κελύφους που προέκυψε από το πείραμα. Από την άλλη η μέθοδος των συγκεντρωμένων στοιχείων έχει μια μεγαλύτερη απόκλιση, κυρίως στα πρώτα λεπτά της προσομοίωσης, και η μέγιστη τιμή της είναι στους 2,5 °C. Αυτό οφείλεται

εν μέρει στην πολύπλοκη κατασκευή του κελύφους η οποία δεν είναι εύκολο να αναπαρασταθεί ως ένα σώμα.

#### 5.4 Συμπεράσματα

Φτάνοντας στο τέλος της εργασίας κρίνεται σκόπιμο να ανακεφαλαιωθούν τα κύρια συμπεράσματα που εξήχθησαν. Αυτά είναι :

- Η θερμική ανάλυση με τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρέχει πολύ καλά αποτελέσματα. Το πλεονέκτημα της είναι πως μπορούμε να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία οποιουδήποτε σημείου της μηχανής, πράγμα αρκετά σημαντικό στα κρίσιμα σημεία αυτής όπως είναι η μόνωση του στάτη και οι μαγνήτες. Από την άλλη πλευρά απαιτείται χρόνος για την πλήρη πιστότητα της κατασκευής του μοντέλου και αρκετή υπολογιστική ισχύς.
- Η ανάλυση των θερμικών φαινομένων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε δισδιάστατη γεωμετρία θεωρώντας καρτεσιανή είτε αξονική συμμετρία απαιτεί σημαντικές παραδοχές.
- Το μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, αν και περιλαμβάνει κάποιες παραδοχές δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με την υπολογιστική ισχύ και τον χρόνο που απαιτεί. Η προσπάθεια που έγινε για τον υπολογισμό των θερμικών αντιστάσεων αναλυτικά με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κρίνεται ικανοποιητική. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει το διάκενο και η προκύπτουσα ροή αέρα κατά την περιστροφή του δρομέα, πράγμα που δεν διερευνήθηκε πειραματικά καθώς ο δρομέας του κινητήρα ήταν ακινητοποιημένος κατά την πειραματική επιβεβαίωση.
- Και στα δύο μοντέλα που αναπτύχθηκαν σημαντικό ρόλο παίζουν οι ιδιότητες των υλικών του κινητήρα. Συγκεκριμένα, η προσέγγιση που υιοθετήθηκε για τη θερμική αγωγιμότητα των μονώσεων των τυλιγμάτων κρίνεται ικανοποιητική.
- Όπως αναμενόταν η υψηλότερη θερμοκρασία εμφανίζεται στα τυλίγματα του κινητήρα και συγκεκριμένα στις τερματικές συνδέσεις (κεφαλές). Από τις πειραματικές μετρήσεις για ρεύμα στάτη 10 A και διάρκεια 22 λεπτών η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας που εμφανίστηκε στα τυλίγματα ήταν 101° C και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συμφωνούν με αυτά του πειράματος εμφανίζοντας μέγιστη απόκλιση 2,5° C για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και 1,9 ° C για το μοντέλο των συγκεντρωμένων παραμέτρων. Όσον αφορά τον σίδηρο του στάτη η μέγιστη απόκλιση της πειραματικής τιμής με αυτή των πεπερασμένων στοιχείων είναι 1,4 ° C ενώ με αυτή του μοντέλου των συγκεντρωμένων παραμέτρων είναι 3.8 ° C. Τέλος όσον αφορά το κέλυφος του κινητήρα η απόκλιση των αποτελεσμάτων είναι 1,2 ° C στη θερμοκρασία που προέκυψε από το πείραμα σε σχέση με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ενώ είναι 2,5 ° C με το ισοδύναμο θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων.
- Οι λειτουργικές συνθήκες του κινητήρα όταν θα συμμετέχει το όχημα στον διαγωνισμό θα είναι πολύ λιγότερο απαιτητικές από τις συνθήκες που θεωρήθηκαν στη

συγκεκριμένη εργασία. Επομένως, κατά τη διάρκεια του αγώνα δεν αναμένεται να απαιτηθεί συγκεκριμένη μέθοδος εξαναγκασμένης ψύξης.

#### 5.5 Πρωτότυπη συνεισφορά της εργασίας

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική εργασία διαπιστώνονται τα εξής σημεία πρωτότυπης συνεισφοράς της:

- Η τρισδιάστατη θερμική ανάλυση του κινητήρα του οχήματος «Πυρφόρος» με χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Όπως έγινε αντιληπτό τα θερμικά φαινόμενα που αναπτύσσονται στη συγκεκριμένη ηλεκτρική μηχανή είναι τρισδιάστατα. Έτσι η ανάλυση τους με πεπερασμένα στοιχεία σε δισδιάστατες γεωμετρίες θα απαιτούσε εκτεταμένες παραδοχές.
- Η ανάπτυξη ενός κατάλληλου ισοδύναμου θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων. Συγκεκριμένα, στο προτεινόμενο μοντέλο που λαμβάνονται υπόψιν ρεαλιστικά οι συμμετρίες που εμφανίζει η μηχανή και υπολογίζονται αναλυτικά οι αντίστοιχες θερμικές αντιστάσεις.
- Η πειραματική επιβεβαίωση των μεθοδολογιών θερμικής ανάλυσης που αναπτύχθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα στον 16-πολικό σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών που μελετήθηκε.

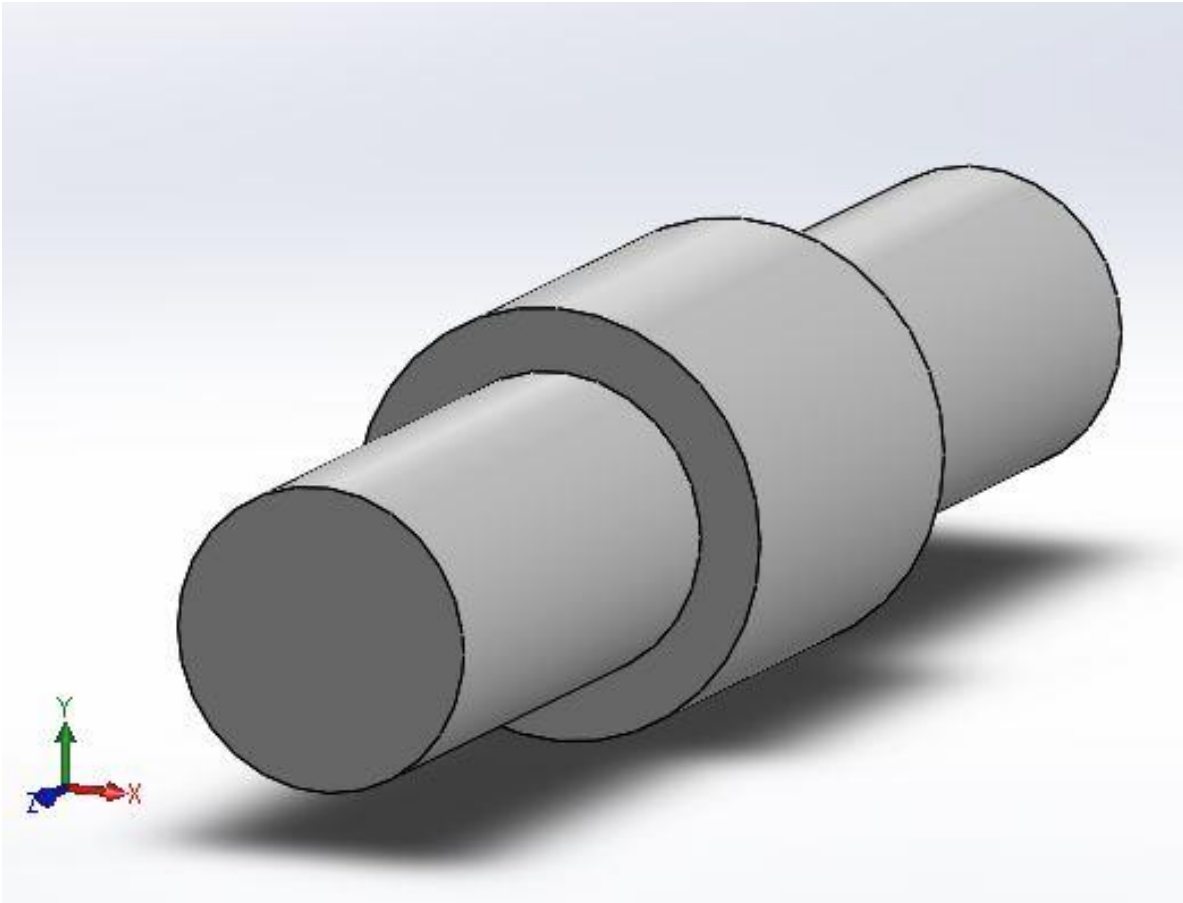
#### 5.6 Θέματα περαιτέρω διερεύνησης

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναδείχθηκαν τα παρακάτω θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.:

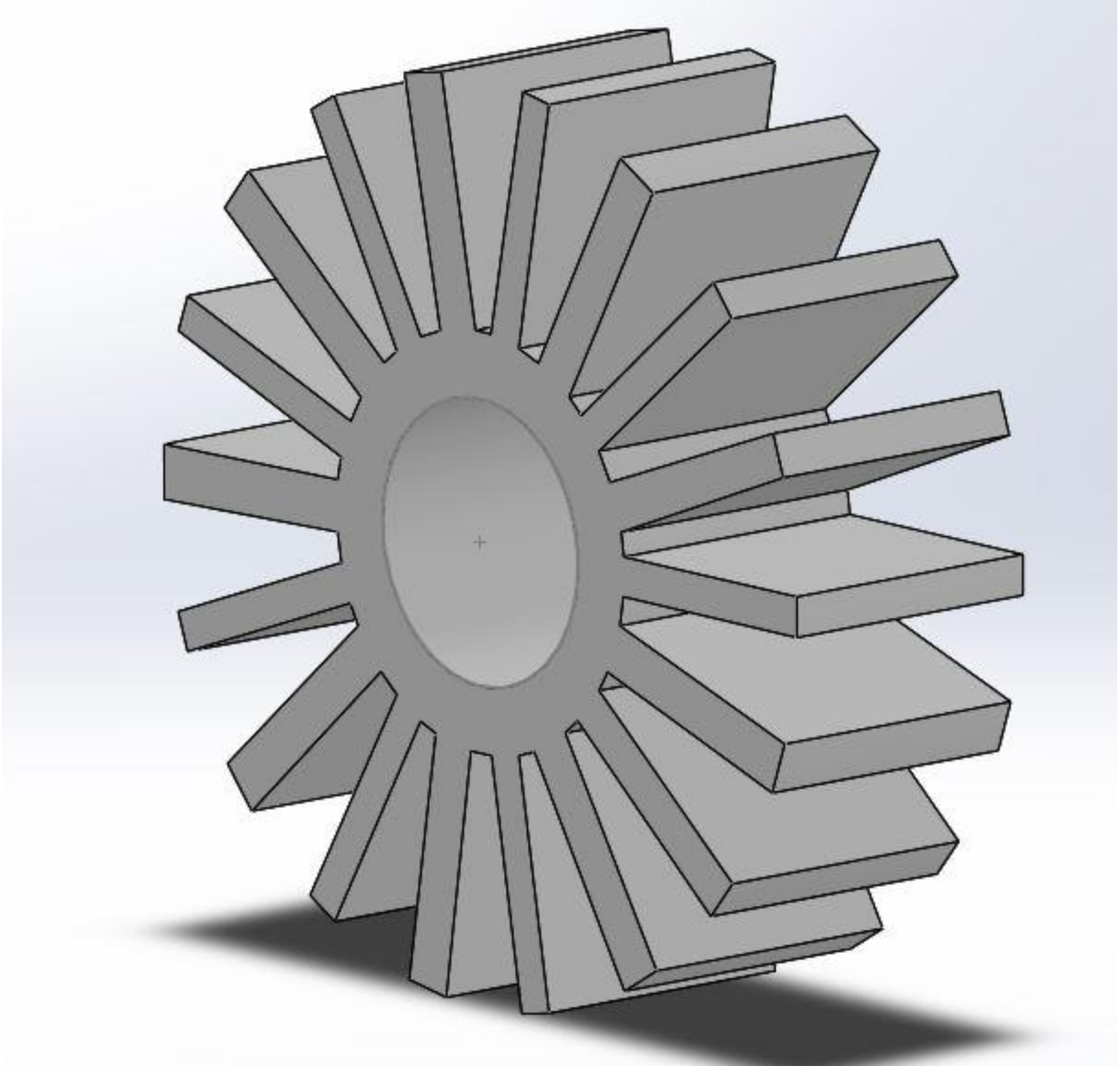
- Πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των μοντέλων που αναπτύχθηκαν όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε πραγματικές συνθήκες αγώνα
- Ανάπτυξη ενός λεπτομερέστερου ισοδύναμου θερμικού κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων όπου θα λαμβάνεται υπόψιν το διάκενο αέρος, κατά την περιστροφή του δρομέα.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α : Κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου θερμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

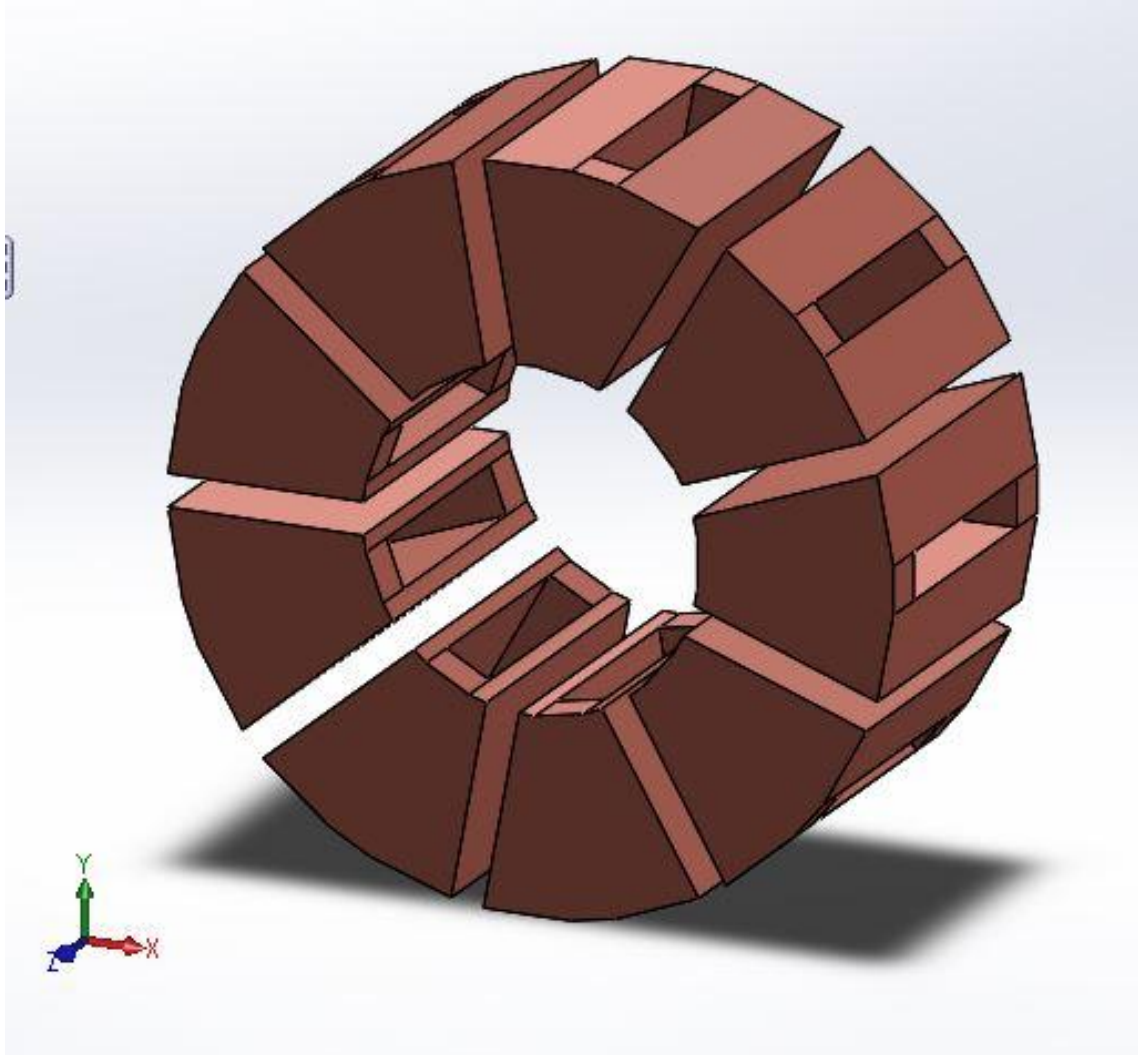


Σχήμα Α.1 : Αποψη του άξονα

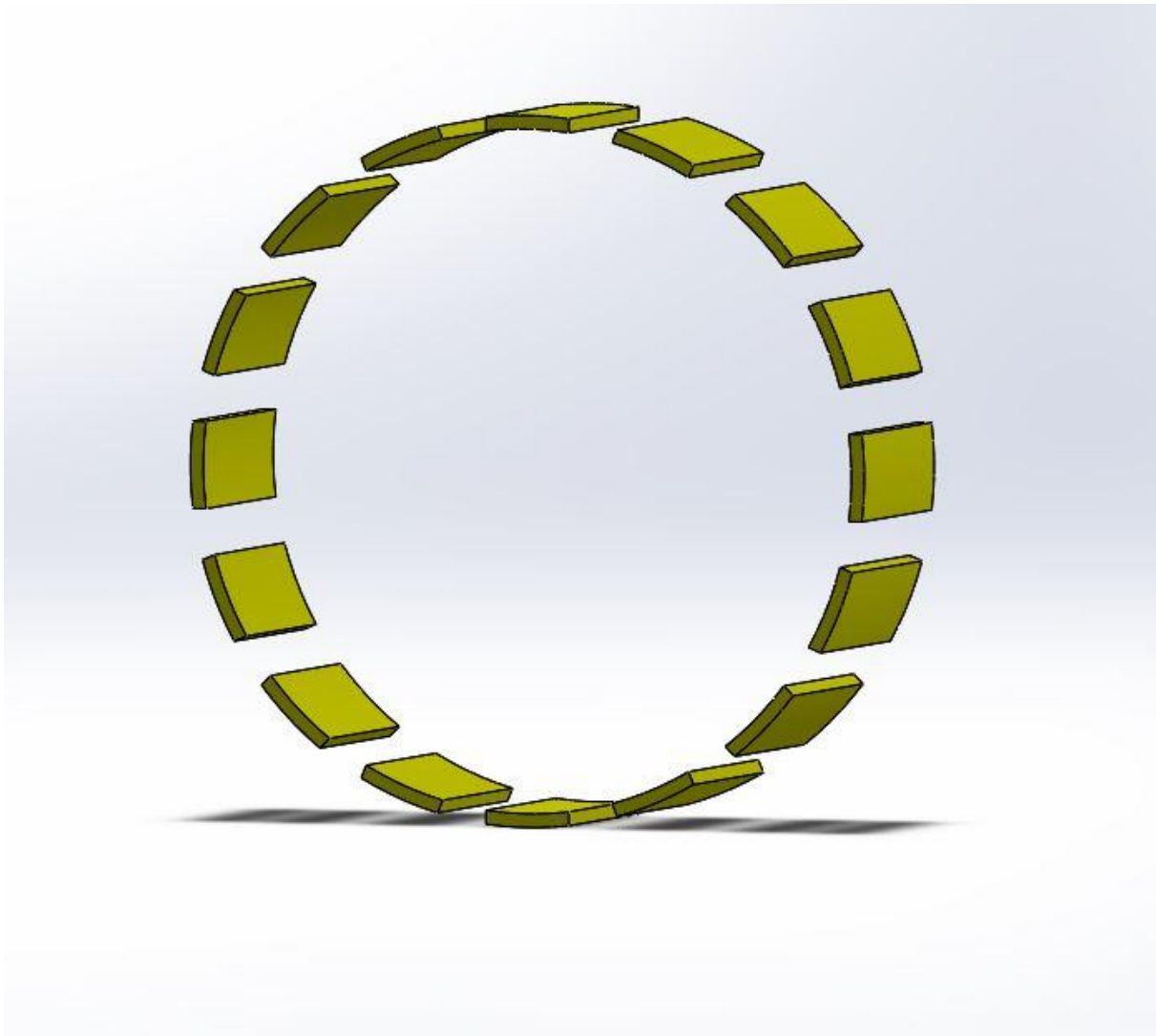


Σχήμα Α.2 : Άποψη του στάτη

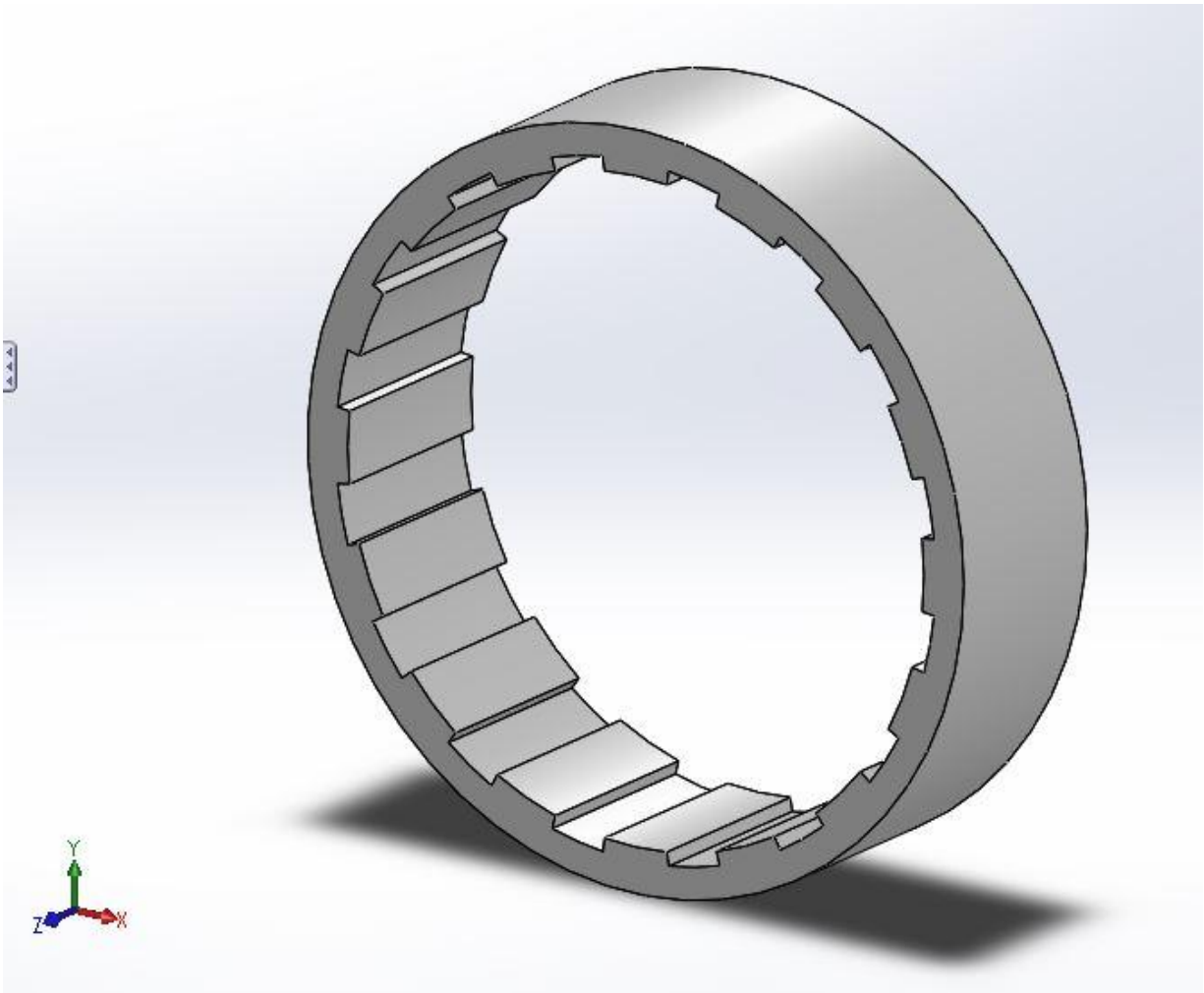




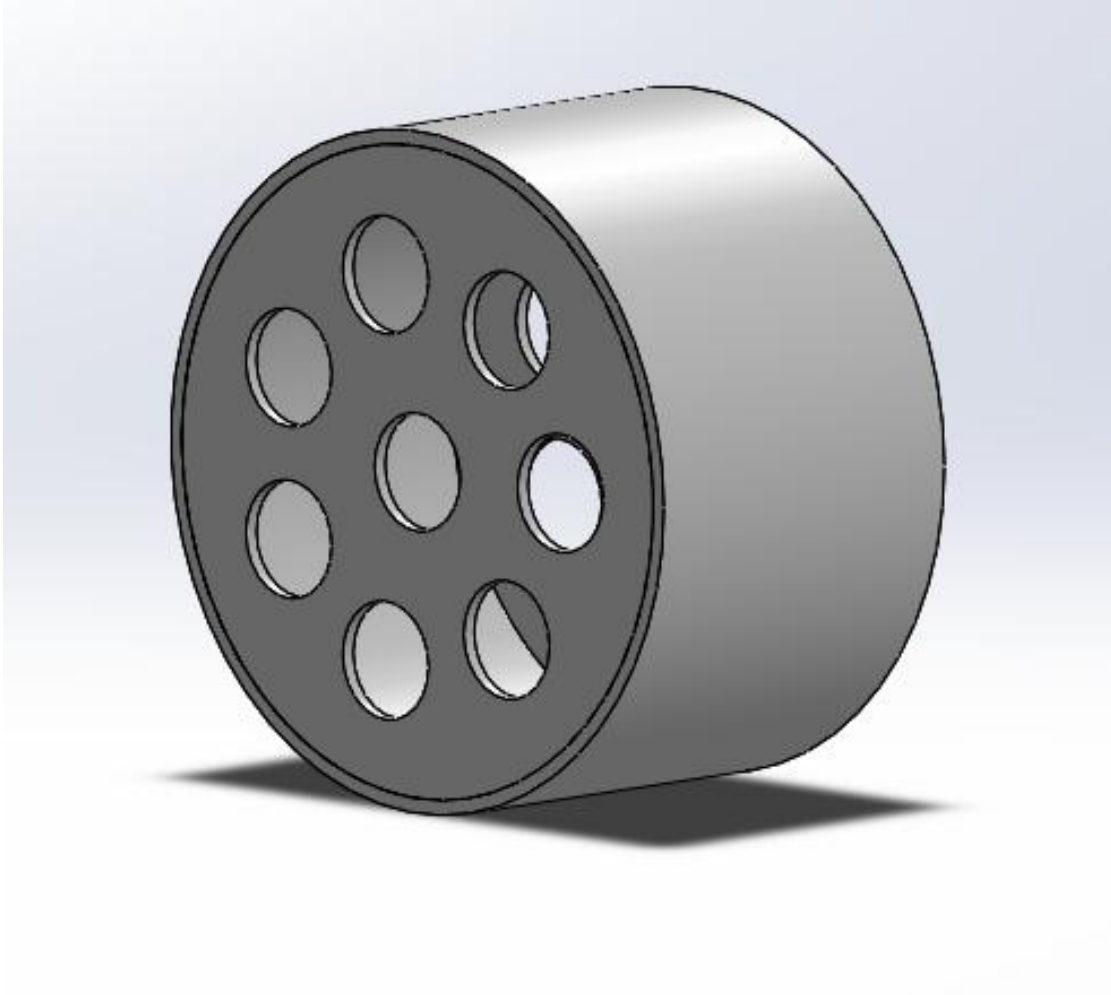
Σχήμα Α.3 : Άποψη των τυλιγμάτων



Σχήμα Α.4 : Άποψη των μαγνητών



Σχήμα Α.5 : Άποψη του δρομέα



Σχήμα Α.6 : Άποψη του κελύφους

## **Βιβλιογραφία**

- [1] Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας , Βουρνάς Κ, Κονταξής Γ. , Εκδόσεις Συμμετρία 2010
- [2] Ι. Α. Τεγόπουλος, «Ηλεκτρικές Μηχανές», Μέρος Β', Εκδόσεις Συμμετρία, 1991
- [3] Electric Machinery Fundamentals, 4<sup>th</sup> edition, Stephen J. Chapman, McGraw-Hill, 2005
- [4] Design of Rotating Electrical Machines, Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Valeria Hrabovcova 2008, John Wiley & Sons
- [5] Heat Transfer, Tenth Edition, J. P. Holman, Department of Mechanical Engineering Southern Methodist University.
- [6] Electromagnetic and Thermal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machines, Nicola Bianchi, Massimo Barcaro and Silverio Bolognani Department of Electrical Engineering, University of Padova, Italy.
- [7] Lumped Parameter Thermal Modelling of Electric Machines, Analysis of an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine for Vehicle Applications, Master of Science Thesis Bjorn Andersson, Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2013.
- [8] Thermal Analysis with Solid works simulation, 2014, Paul M. Kurowski, PhD, P. Eng, SDC Publications.
- [9] [http://help.solidworks.com/2012/English/SolidWorks/cworks/Thermal\\_Contact\\_Resistance.htm](http://help.solidworks.com/2012/English/SolidWorks/cworks/Thermal_Contact_Resistance.htm)
- [10] Novel lumped-parameter thermal model for electrical systems Dieter Gerling, Gurakuq Dajaku Institute for Electrical Drives, University of Federal Defense Munich.
- [11] An Improved Lumped Parameter Thermal Model for Electrical Machines G. Dajaku, D. Gerling Institute for Electrical Drives, University of Federal Defense Munich.
- [12] Thermal Network Modelling Handbook, K&K Associates, 2000.
- [13] Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μονίμων μαγνητών για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα, Χρ. Κρασόπουλος, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Οκτώβριος 2013.
- [14] Θερμική Ανάλυση Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών, Ευάγγελος Λ. Λαναράς, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, 2011.