



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

Θερμική Ανάλυση Σύγχρονου Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Σ. Δημολίκας

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013



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

Θερμική Ανάλυση Σύγχρονου Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Σ. Δημολίκας

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21^η Μαρτίου 2013

.....
Κλαδάς Αντώνιος	Μανιάς Στέφανος	Παπαθανασίου Σταύρος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

.....
Κωνσταντίνος Σ. Δημολίκας

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

Copyright © Κωνσταντίνος Σ. Δημολίκας, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί την μοντελοποίηση των θερμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στις ηλεκτρικές μηχανές τόσο σε μόνιμη κατάσταση όσο και σε μεταβατικές αποκρίσεις. Στόχος είναι η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς κινητήρων μονίμων μαγνητών, οι οποίοι προτείνονται για την αντικατάσταση των υδραυλικών συστημάτων ελέγχου ταχύτητας των πτερυγίων πλοήγησης των αεροσκαφών.

Η μετάδοση θερμότητας στο εσωτερικό των ηλεκτρικών μηχανών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόκρισή τους και γι' αυτόν τον λόγο αποτελεί μία από τις κρισιμότερες παραμέτρους κατά τη σχεδίαση και την ανάλυση της συμπεριφοράς τους. Η εργασία σε ένα πρώτο βήμα καταγράφει αναλυτικά τους μηχανισμούς με τους οποίους μεταδίδεται η θερμότητα στο εσωτερικό των ηλεκτρικών μηχανών καθώς και τις μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τους μηχανισμούς αυτούς. Σε ένα δεύτερο βήμα αναπτύσσεται ένα ισοδύναμο θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων, το οποίο επιτρέπει την ανάλυση των θερμικών φαινομένων τόσο σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όσο και στη διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων με μεγάλη ταχύτητα και με μικρό υπολογιστικό κόστος. Επιπλέον πραγματοποιείται μοντελοποίηση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε γεωμετρικές δύο διαστάσεων, η οποία αναπαριστά λεπτομερώς την τοπική κατανομή των θερμοκρασιών σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Οι προαναφερόμενες μεθοδολογίες εφαρμόζονται στην περίπτωση ενός εικοσαπολικού κινητήρα μονίμων μαγνητών, που προορίζεται για εφαρμογές ελέγχου ταχύτητας σε συστήματα πλοήγησης σύγχρονων αεροσκαφών. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των μεθόδων συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά σε εργαστηριακό δοκίμιο κινητήρα.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναδείχθηκε η καταλληλότητα των δύο μεθόδων προσομοίωσης που αναπτύχθηκαν για την ανάλυση των θερμικών φαινομένων σε κινητήρες μονίμων μαγνητών που προορίζονται για την οδήγηση των συστημάτων πλοήγησης των αεροσκαφών και υφίστανται σημαντικές θερμικές καταπονήσεις.

Λέξεις Κλειδιά: Σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών, μετάδοση θερμότητας, πεπερασμένα στοιχεία, ισοδύναμο κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων, θερμική ανάλυση.

Abstract

The present diploma thesis develops modeling methodologies enabling analysis of the thermal phenomena in electrical machines both under steady state and transient regimes. Scope of this analysis is to investigate the thermal behavior of permanent magnet motors which are proposed to replace hydraulic speed control systems in navigation aircraft systems.

The heat transfer phenomena in electrical machines considerably affect their electromagnetic behavior that is why their analysis constitutes one of the most critical parameters for their design and performance analysis. In a first step the present thesis describes the mechanisms of heat transfer analytically and presents the respective governing equations. In a second step an equivalent thermal model with lumped parameters has been developed, enabling analysis of the thermal phenomena involving reduced computational requirements in execution time and memory space for both steady state and transient operating conditions. Moreover, a simulation is carried out by using two dimensional finite element method which represents particularly the local thermal distribution in steady operational state. The above methodologies are applied in the case of a twenty – pole permanent magnet motor which intended for speed control applications in navigation systems of modern aircrafts. The obtained simulation results are compared to the experimental ones in a laboratory prototype motor.

Finally, the main conclusions of the work and the most significant results are reported, illustrating the proposed methodologies suitability for the analysis of the thermal phenomena developed in permanent magnet motors implemented in aircraft navigation system applications, involving significant thermal stresses.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, heat transfer, finite elements, thermal equivalent circuit with lumped parameters, thermal phenomena analysis.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του ενδιαφέροντος αυτού θέματος καθώς και για την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ τον κ. Θεμιστοκλή Κεφάλια για τις πολύτιμες επισημάνσεις του και για τη συνεργασία που είχαμε κατά τη λήψη των πειραματικών μετρήσεων.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία αυτή στους γονείς μου και να τους ευχαριστήσω για τη στήριξη, υλική και ηθική, που μου πρόσφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<i>Περίληψη</i>	5
<i>Abstract</i>	7
<i>Ευχαριστίες</i>	9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	15
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1 Διάρθρωση εργασίας	16
1.2 Λειτουργική δομή αεροσκαφών	16
1.2.1 Ηλεκτρικά συστήματα	17
1.3 Είδη ηλεκτρικών σερβοκινητήρων	19
1.3.1 Ηλεκτρικός εφεδρικός υδραυλικός σερβοκινητήρας	19
1.3.2 Ηλεκτρο – υδροστατικός σερβοκινητήρας	20
1.3.3 Ηλεκτρο – μηχανικός σερβοκινητήρας	20
1.3.4 Ενισχυμένος πιεζοηλεκτρικός σερβοκινητήρας	21
1.4 Ιδέα More Electric Aircraft	22
1.5 Εφαρμογές της ιδέας More Electric Aircraft	26
1.6 Δομή σύγχρονου κινητήρα	33
1.7 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά σύγχρονων μηχανών	34
1.8 Σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών	35
1.9 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα	37
1.9.1 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας σύγχρονου κινητήρα	40
1.10 Τεχνικές εκκίνησης σύγχρονων κινητήρων	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	43
ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	43
2.1 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας	44
2.2 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή	44
2.2.1 Αγωγή στη μόνιμη κατάσταση και σε μία διάσταση	47

2.2.2 Αγωγή στη μόνιμη κατάσταση και σε τρεις διαστάσεις.....	47
2.3 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή	49
2.3.1 Συναγωγή σε τρεις διαστάσεις.....	50
2.4 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	52
2.5 Μετάδοση θερμότητας στις ηλεκτρικές μηχανές.....	53
2.5.1 Θερμοκρασιακοί περιορισμοί στη λειτουργία ηλεκτρικών μηχανών.....	54
2.5.2 Προσδιορισμός θερμικής αντίστασης.....	55
2.5.3 Κατανομή θερμοκρασίας σε κυλινδρική διάταξη.....	55
2.5.4 Ψύξη σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών.....	57
2.6 Μέθοδοι υπολογισμού θερμικής κατανομής ηλεκτρικών μηχανών	58
2.6.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	61
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	61
3.1 Μέθοδος υπολογισμού θερμικών αντιστάσεων.....	62
3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σύγχρονου κινητήρα	63
3.3 Κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων.....	64
3.4 Υπολογισμός θερμικών αντιστάσεων - χωρητικότητων.....	66
3.5 Αποτελέσματα του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων.....	70
3.6 Συμπεράσματα	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	81
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	81
4.1 Μετάδοση θερμότητας στις ηλεκτρικές μηχανές	82
4.1.1 Μετάδοση θερμότητας με αγωγή	82
4.1.2 Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή.....	83
4.1.3 Οριακές συνθήκες.....	83
4.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	84
4.2.1 Σχεδίαση σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών.....	84

4.2.2 Ορισμός οριακών συνθηκών.....	88
4.2.3 Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	113
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	
ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ	113
5.1 Πειραματική διάταξη	114
5.2 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων	118
5.3 Σύγκριση μεθόδων.....	125
5.4 Συμπεράσματα	146
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	149
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	149
6.1 Βασικά συμπεράσματα.....	150
6.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....	154
6.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.....	155
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	157
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	158
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	159
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	165
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....	167
Υδραυλικά συστήματα αεροσκαφών	167
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.....	171
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	171
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ.....	173

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος και πραγματεύεται τη θερμική συμπεριφορά ενός εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών. Θα εστιάσουμε τη προσοχή μας στη χρήση του συγκεκριμένου κινητήρα ως σερβοκινητήρα σε σύγχρονα αεροσκάφη που χρησιμοποιούν σε ευρεία κλίμακα την ηλεκτρική ισχύ.

Η ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του συγκεκριμένου κινητήρα πραγματοποιείται με τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και με την ανάπτυξη ενός θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων. Έπειτα τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων προσομοίωσης συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια της προσέγγισης τους στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

1.1 Διάρθρωση εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών στην κατασκευή σύγχρονων αεροσκαφών των οποίων τα περισσότερα συστήματα τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ισχύ. Επίσης γίνεται αναφορά στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και στις μεθόδους εκκίνησης των σύγχρονων κινητήρων μονίμων μαγνητών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι τρόποι μετάδοσης θερμότητας με ειδική αναφορά στα θερμικά φαινόμενα που παρατηρούνται στο εσωτερικό των ηλεκτρικών μηχανών. Επιπλέον παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακοί περιορισμοί που επιβάλλονται στην λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών καθώς και οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για την απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο επιχειρείται η προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς του εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών με τη σχεδίαση και τη χρήση ενός ισοδύναμου θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται διδιάστατη θερμική ανάλυση του σύγχρονου κινητήρα με τη χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση γίνεται σε επίπεδο κάθετο στον άξονα του κινητήρα και σε επίπεδο παράλληλο στον άξονα του.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους προσομοίωσης και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά. Επίσης διερευνάται η μεταβατική θερμική συμπεριφορά του σύγχρονου κινητήρα και παρατίθενται οι τελικές θερμοκρασίες της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας του.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία καθώς και θέματα που επιδέχονται περαιτέρω διερεύνηση.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθενται πίνακες με τις ιδιότητες των υλικών του κινητήρα καθώς και σχέδια του κινητήρα για τη πληρέστερη κατανόηση της κατασκευαστικής δομής του.

1.2 Λειτουργική δομή αεροσκαφών

Ένα αεροσκάφος, είτε εμπορικό είτε πολεμικό, αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό συστημάτων ελέγχου που εξασφαλίζουν τη γρήγορη και ασφαλή μεταφορά των επιβατών του. Η ανάγκη για κατασκευή ταχύτερων και μεγαλύτερων αεροσκαφών είχε σαν συνέπεια την αύξηση της πολυπλοκότητας των συστημάτων αυτών. Σε ένα αεροσκάφος η μεγαλύτερη ποσότητα του καυσίμου μετατρέπεται σε προωθητική ισχύ από έναν αεριοστροβιλικό κινητήρα. Η εναπομείνουσα ποσότητα καυσίμου μετατρέπεται σε τέσσερις διαφορετικές μορφές ισχύος για την τροφοδότηση των επί του αεροσκάφους συστημάτων:

- Υδραυλική
- Μηχανική
- Πεπιεσμένου αέρα
- Ηλεκτρική

Θα εστιάσουμε την ανάλυση μας στα υδραυλικά (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ) και στα ηλεκτρικά συστήματα καθώς ο κινητήρας του οποίου τη θερμική συμπεριφορά μελετάμε στην παρούσα εργασία πρόκειται να αντικαταστήσει συστήματα των αεροσκαφών που τροφοδοτούνται με υδραυλική ισχύ.

1.2.1 Ηλεκτρικά συστήματα

Η αποδοτικότητα των ηλεκτρικών συστημάτων έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο με το πέρασμα των ετών με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο αριθμός των συστημάτων ενός αεροσκάφους που λειτουργούν με την παροχή ηλεκτρικής ισχύος. Η πρώτη εφαρμογή συστήματος ηλεκτρικής ισχύος πραγματοποιήθηκε τη δεκαετία του 1940 σε δικινητήρια αεροσκάφη. Ο κάθε κινητήρας τροφοδοτούσε μια γεννήτρια των 28VDC η οποία εξυπηρετούσε τα ηλεκτρικά φορτία του αεροσκάφους. Η μετέπειτα ραγδαία αύξηση του αριθμού των ηλεκτρικών συστημάτων στα αεροσκάφη οφείλεται κατά κύριο λόγο στην εισαγωγή των ηλεκτρικών συστημάτων εναλλασσομένου ρεύματος και στη χρήση τους στις εφαρμογές ελέγχου πτήσης, [1].

Τα ηλεκτρικά συστήματα ενός αεροσκάφους διαχωρίζονται σε συστήματα συνεχούς ρεύματος και συστήματα εναλλασσομένου ρεύματος. Τα ηλεκτρικά συστήματα συνεχούς ρεύματος λειτουργούν συνήθως με τάση 28VDC ενώ υπάρχουν και συστήματα που λειτουργούν με τάση 270 VDC. Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι αυτό – διεγείρομενες καθώς διαθέτουν περιστρεφόμενους ηλεκτρομαγνήτες για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Τα περισσότερα ηλεκτρικά συστήματα εναλλασσομένου ρεύματος λειτουργούν υπό ένα τριφασικό σύστημα τάσεων σε συνδεσμολογία αστέρα. Η φασική τάση τους είναι 115VAC με συχνότητα λειτουργίας στα 400Hz. Το πλεονέκτημα των συστημάτων εναλλασσομένου ρεύματος έναντι αυτών του συνεχούς ρεύματος είναι ότι λειτουργούν υπό υψηλότερη τάση και χαμηλότερο ρεύμα. Η μικρή τιμή του ρεύματος εξασφαλίζει ότι οι απώλειες χαλκού στα συστήματα εναλλασσομένου ρεύματος θα είναι μικρότερες.

Τα φορτία ενός αεροσκάφους που λειτουργούν με την παροχή ηλεκτρικής ισχύος ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες, [1]:

- Κινητήρες και σερβοκινητήρες
- Συστήματα φωτισμού
- Συστήματα θέρμανσης

- Υποσυστήματα ελέγχου και ηλεκτρονικά συστήματα

Οι σερβοκινητήρες είναι μια κατηγορία κινητήρων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ή την κίνηση ενός μηχανισμού ή ενός συστήματος και ταξινομούνται με κριτήριο την πηγή τροφοδότησης τους. Έτσι διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες σερβοκινητήρων:

- Ηλεκτρικοί
- Υδραυλικοί
- Πεπιεσμένου αέρα

Οι ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη ταξινομούνται με κριτήριο την κατεύθυνση κίνησης τους σε:

- Γραμμικούς σερβοκινητήρες: χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των μηχανών του αεροσκάφους και σε συστήματα ελέγχου πτήσης.



Σχ. 1.1 Γραμμικός ηλεκτρομηχανικός σερβοκινητήρας του αεροσκάφους F – 4, [24].

- Περιτροφικούς σερβοκινητήρες: χρησιμοποιούνται κυρίως για τον έλεγχο των πτερυγίων του αεροσκάφους.



Σχ. 1.2 Ηλεκτρικός περιστροφικός σερβοκινητήρας για τον έλεγχο της βοηθητικής μονάδας ισχύος (APU), [25].

1.3 Είδη ηλεκτρικών σερβοκινητήρων

Οι σερβοκινητήρες (actuators) που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ισχύ και χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη είναι οι ακόλουθοι :

- Ηλεκτρικός εφεδρικός υδραυλικός σερβοκινητήρας (Electrical Back – up Hydraulic Actuator)
- Ηλεκτρο – υδροστατικός σερβοκινητήρας (Electro – Hydrostatic Actuator)
- Ηλεκτρομηχανικός σερβοκινητήρας (Electro – Mechanical Actuator)
- Ενισχυμένος πιεζοηλεκτρικός σερβοκινητήρας (Amplified Piezoelectric Actuator)

1.3.1 Ηλεκτρικός εφεδρικός υδραυλικός σερβοκινητήρας

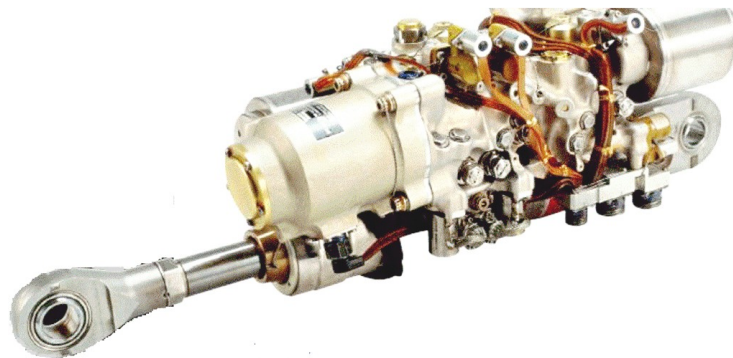
Ο συγκεκριμένος τύπος σερβοκινητήρα είναι συνδυασμός ενός FBW (fly-by-wire) σερβοκινητήρα και ενός EHA (Electro-hydrostatic Actuator) σερβοκινητήρα. Ο τελευταίος σερβοκινητήρας χρησιμοποιείται σαν εφεδρικός του FBW και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από την Airbus στο αεροσκάφος A380 για τον έλεγχο της αεροτομής των πτερυγίων. Ο σερβοκινητήρας αυτός χρησιμοποιείται στα σύγχρονα αεροσκάφη λόγω της υψηλής αξιοπιστίας του, εφαρμόζοντας όμως την ιδέα more electric aircraft δεν θα είναι χρήσιμος από τη στιγμή που θα μειωθεί ή θα εξαλειφθεί η χρήση υδραυλικής ισχύος στα αεροσκάφη.



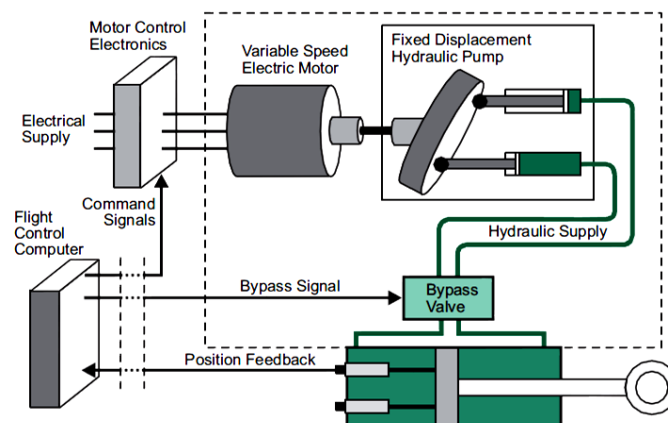
Σχ. 1.3 Ηλεκτρικός εφεδρικός υδραυλικός σερβοκινητήρας για τον έλεγχο της αεροτομής των πτερυγίων ενός Airbus – 380, [26].

1.3.2 Ηλεκτρο – υδροστατικός σερβοκινητήρας

Οι ηλεκτρο-υδροστατικοί σερβοκινητήρες αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σαν εφεδρεία των υδραυλικών. Όμως με την υιοθέτηση της ιδέας μείωσης της υδραυλικής ισχύος και αντικατάστασης των υδραυλικών συστημάτων από συστήματα που θα τροφοδοτούνται από πηγές ηλεκτρικής ισχύος η συγκεκριμένη κατηγορία σερβοκινητήρων αντικατέστησε τους αντίστοιχους υδραυλικούς προσφέροντας οφέλη όσο αναφορά το κόστος, το βάρος του αεροσκάφους, την αξιοπιστία και τη συντήρηση των σερβοκινητήρων. Ο πιλότος του αεροσκάφους στέλνει σήματα ελέγχου στους σερβοκινητήρες μέσω ενός διαύλου δεδομένων, ο σερβοκινητήρας λαμβάνει αυτά τα δεδομένα και αφού τα ελέγξει τα στέλνει στο τμήμα ηλεκτρονικού ελέγχου. Εκεί το σήμα μετατρέπεται σε αναλογικό και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των κινητήρων και των αντλιών. Οι κινητήρες παράγουν ισχύ που μεταφέρεται στην επιφάνεια ελέγχου μέσω ενός υδραυλικού κυκλώματος.



Σχ. 1.4 Ηλεκτρο – υδροστατικός σερβοκινητήρας του αεροσκάφους F – 35C, [27].

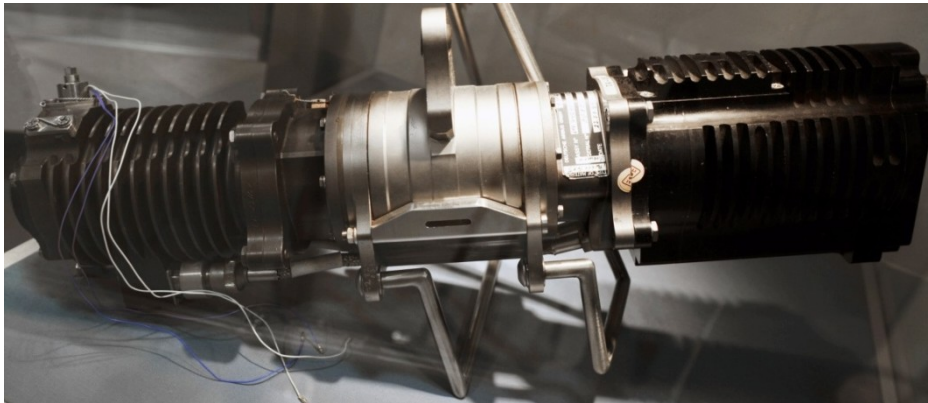


Σχ. 1.5 Διάγραμμα ελέγχου ενός ηλεκτρο – υδροστατικού σερβοκινητήρα, [34].

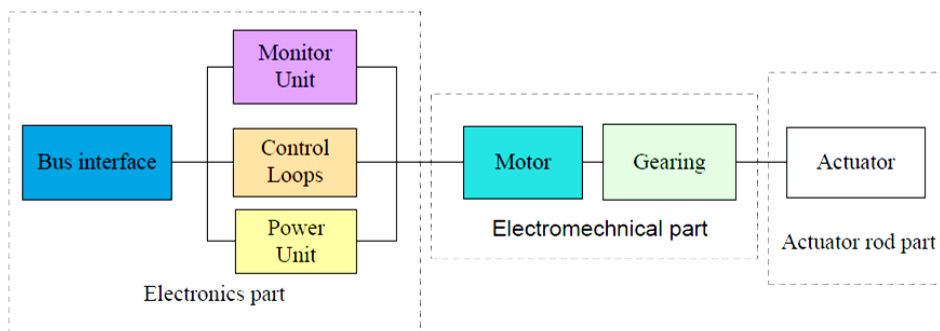
1.3.3 Ηλεκτρο – μηχανικός σερβοκινητήρας

Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου σερβοκινητήρα είναι παρόμοια με την αντίστοιχη του ηλεκτρο-υδροστατικού με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται το κιβώτιο ταχυτήτων για τη σύνδεση των κινητήρων με τους

σερβοκινητήρες αντί της χρήσης υδραυλικών συστημάτων. Χρησιμοποιήθηκαν για αρκετά χρόνια σε συστήματα σταθεροποίησης του αεροσκάφους αν και οι σερβοκινητήρες υψηλής ισχύος αυτής της κατηγορίας εξαιτίας του μεγάλου όγκου και βάρους και της χαμηλής αποδοτικότητας καθιστούσαν αποτρεπτική τη χρήση τους σε αεροσκάφη. Όμως με την τεχνολογική εξέλιξη, την αξιοποίηση των σύγχρονων κινητήρων μονίμων μαγνητών και νέων υλικών έγινε εφικτή η εφαρμογή τους σε συστήματα του αεροσκάφους.



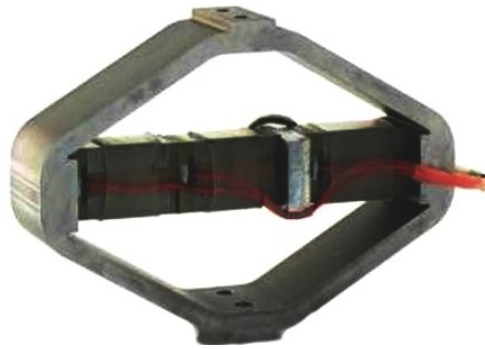
Σχ. 1.6 Ηλεκτρο – μηχανικός σερβοκινητήρας για τον έλεγχο της αεροτομής των πτερυγίων, [28].



Σχ. 1.7 Διάγραμμα ελέγχου ενός ηλεκτρο – μηχανικού σερβοκινητήρα, [34].

1.3.4 Ενισχυμένος πιεζοηλεκτρικός σερβοκινητήρας

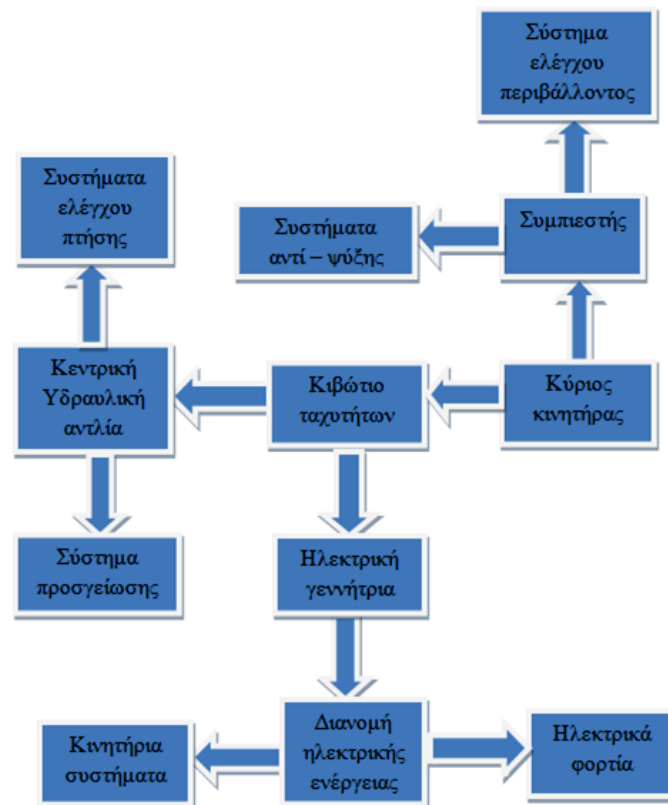
Οι σερβοκινητήρες αυτής της κατηγορίας καταγράφουν μια αυξανόμενη παρουσία σε εφαρμογές της αεροναυπηγικής. Η λειτουργία τους βασίζεται στην αντιστροφή του φαινομένου του πιεζοηλεκτρισμού δηλαδή στην παραμόρφωση που προκαλεί μια ηλεκτρική τάση σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό. Το γεγονός ότι η δύναμη που παράγεται από την τάση είναι αρκετά περιορισμένη αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα μέχρι στιγμής για τη ευρεία χρήση των συγκεκριμένων σερβοκινητήρων από τις βιομηχανίες αεροναυπηγικής.



Σχ. 1.8 Ενισχυμένος πιεζοηλεκτρικός σερβοκινητήρας, [29].

1.4 Ιδέα More Electric Aircraft

Σύμφωνα με τη παραδοσιακή αρχιτεκτονική αεροσκαφών το κύριο μέρος του καυσίμου μετατρέπεται σε προωθητική ισχύ από τον κινητήρα (πρωταρχική ισχύς) και το υπόλοιπο τμήμα της ισχύος (δευτερεύουσα ισχύς) μετατρέπεται σε μηχανική, υδραυλική, πεπιεσμένου αέρα και ηλεκτρική ισχύ. Η δευτερεύουσα ισχύς χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των επί του αεροσκάφους συστημάτων όπως για παράδειγμα το σύστημα προσγείωσης, το σύστημα πέδησης, το σύστημα ελέγχου πτήσης, το σύστημα κλιματισμού, το σύστημα συμπίεσης και τα ηλεκτρονικά συστήματα του αεροσκάφους. Η πλειοψηφία των σύγχρονων αεροσκαφών, είτε εμπορικά είτε πολεμικά, διανέμουν την δευτερεύουσα ισχύ στα συστήματα του αεροσκάφους μέσω σύνθετων δικτύων ισχύος.



Σχ. 1.9 Συμβατικό σύστημα διανομής ισχύος ενός αεροσκάφους, [4].

Τα υδραυλικά συστήματα έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος με τα κύρια μειονεκτήματά τους να είναι το μεγάλο βάρος, το σύνθετο δίκτυο αγωγών που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της υδραυλικής ισχύος και το γεγονός ότι τα περισσότερα από τα συστήματα αυτά τροφοδοτούν φορτία για μικρό χρονικό διάστημα. Επιπλέον υπάρχει ο κίνδυνος ενδεχόμενης διαρροής επικίνδυνων και διαβρωτικών υγρών.

Τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα χρησιμοποιούνται κυρίως για τη τροφοδότηση του συστήματος ελέγχου περιβάλλοντος και για τη παροχή θερμού αέρα στα συστήματα αντί - ψύξης του αεροσκάφους. Τα βασικά μειονεκτήματά τους είναι η δύσκολη ανίχνευση κάποιας διαρροής και η χαμηλή αποδοτικότητα.

Τα ηλεκτρικά συστήματα είναι εύκαμπτα και δεν απαιτούν τη κατασκευή σύνθετων δικτύων για τη διανομή της ηλεκτρικής ισχύος. Τα μειονεκτήματά τους είναι η χαμηλότερη πυκνότητα ισχύος σε σύγκριση με τα υδραυλικά συστήματα ισχύος και ο υψηλότερος κίνδυνος ανάφλεξης λόγω κάποιου βραχυκυκλώματος.

Τα προαναφερθέντα συστήματα γίνονται με το πέρασμα των ετών περισσότερο σύνθετα με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφορετικών εξοπλισμών να μειώνουν την απόδοση ολόκληρου του συστήματος. Προκειμένου να μειωθεί αυτή η πολυπλοκότητα και έχοντας ως στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης οι κατασκευαστές αεροσκαφών έχουν επικεντρώσει την προσοχή τους στην ιδέα more electric aircraft δηλαδή στην ευρύτερη χρήση ηλεκτρικών συστημάτων έναντι συστημάτων που χρησιμοποιούν άλλες μορφές ενέργειας. Τα δύο βασικά σημεία της ιδέας More Electric Aircraft(MEA) είναι:

- η περιορισμένη χρήση υδραυλικών συστημάτων και η περαιτέρω χρήση ηλεκτρικών συστημάτων.

- η αντικατάσταση των υδραυλικών σερβοκινητήρων από αντίστοιχους ηλεκτρομηχανικούς.

Στο Σχ. 1.10 απεικονίζεται η δομή του συστήματος διανομής ισχύος ενός αεροσκάφους σύμφωνα με την ιδέα More Electric Aircraft(MEA).



Σχ. 1.10 Σύστημα διανομής ισχύος σύμφωνα με την ιδέα More Electric Aircraft, [4].

Στον πίνακα 1.1 καταγράφεται η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς σε κάθε σύστημα ενός αεροσκάφους η κατασκευή του οποίου βασίζεται στην ιδέα more electric aircraft.

Σύστημα ισχύος	Επίπεδο Ισχύος
Κλιματισμός	>4x70 kW
Έλεγχος πτήσης	3 – 40kW
Αντλίες καυσίμου	10kW
Αντί – ψύξη πτερυγίων	250kW
Σύστημα προσγείωσης	25 – 70kW
Σύστημα εκκίνησης κινητήρων	>200kW

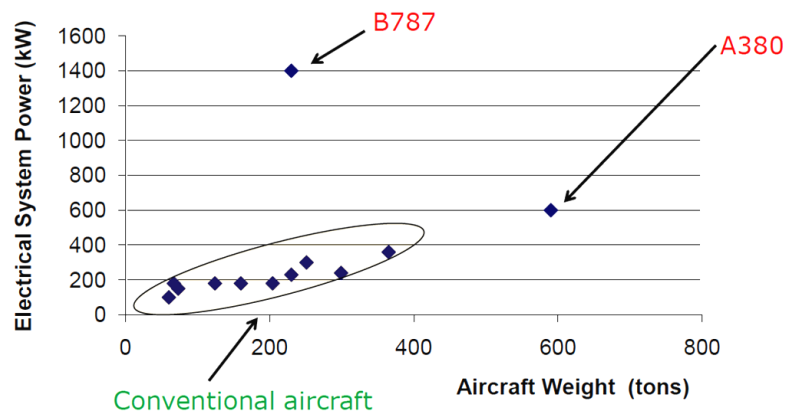
Πίνακας 1.1 Απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς για τη λειτουργία των συστημάτων ενός αεροσκάφους, [30].

Η πολεμική αεροπορία των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής και η NASA ξεκίνησαν την υλοποίηση ενός προγράμματος με τίτλο More Electric Aircraft, με στόχο να μειώσουν ή να εξαλείψουν την ανάγκη για υδραυλικά, μηχανικά και πεπιεσμένου αέρα συστήματα ισχύος αντικαθιστώντας τα με ηλεκτρικά συστήματα. Η αύξηση των αναγκών ισχύος στα σύγχρονα και μεγάλα αεροσκάφη συμπεριέλαβε στους στόχους του προγράμματος την εξοικονόμηση ενέργειας και την βελτίωση της απόδοσης. Το 2000 το πρόγραμμα της MESA (Magnetostrictive Equipment and Systems for more electric Air-craft) ξεκίνησε με στόχο τη μείωση της ισχύος που απαιτείται για την απογείωση και του βάρους των επί του αεροσκάφους συστημάτων μέσω της ανάπτυξης μαγνητοπεριοριστικών κινητήρων και σερβοκινητήρων. Το 2004 το πρόγραμμα της MESA (Magnetoelastic Energy Systems for Even More Electric Aircraft) επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη, παραγωγή και έλεγχο καινοτόμων αισθητήριων συστημάτων που βασίζονται σε ενεργά υλικά με στόχο την αύξηση της κινητήριας ροπής, τη μείωση των κραδασμών και του θορύβου και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα το θέμα ‘more electric aircraft’ διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στα ερευνητικά προγράμματα της CleanSky (αναφορά [3] – Βιβλιογραφία) που δημιουργήθηκε από την ευρωπαϊκή επιτροπή και από βιομηχανίες κατασκευής αεροσκαφών προκειμένου να επιδείξει και να επικυρώσει καινοτόμες τεχνολογίες απαραίτητες για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που έχει θέσει η ευρωπαϊκή επιτροπή τεχνολογίας για τις αερομεταφορές και την αεροναυπηγική, στόχοι που θα πρέπει να επιτευχθούν μέχρι το 2020. Οι βασικότεροι από τους στόχους αυτούς είναι, [3]:

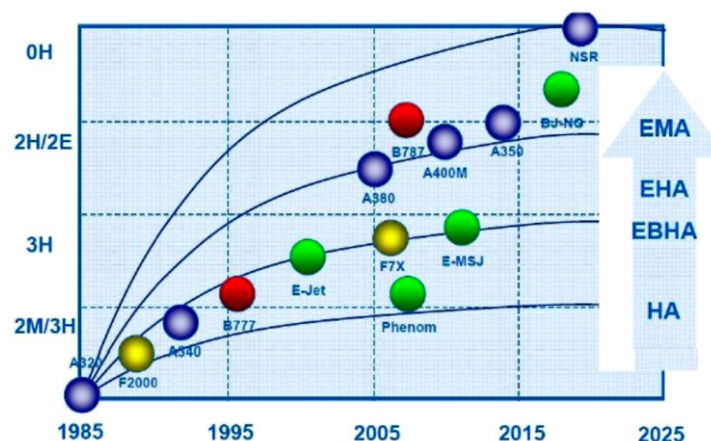
- Μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 50% (οι ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, προκαλούμενες από τις αερομεταφορές ανέρχονται σε 628 εκατομμύρια τόνους).

- Μείωση των εκπομπών οξειδίου του αζώτου κατά 80%.
- Μείωση του αντιληπτού θορύβου κατά 50%.
- Η πραγματοποίηση ουσιαστικής προόδου όσο αναφορά τη μείωση της περιβαλλοντικής επίπτωσης που προκαλούν η κατασκευή, η κυκλοφορία και η συντήρηση των αεροσκαφών.

Μελέτες της NASA αποδεικνύουν ότι η χρήση τέτοιων τεχνολογιών όπως η ΜΕΑ μπορεί να συμβάλλει σε σημαντικό βαθμό στη μείωση του βάρους του αεροσκάφους, της απαιτούμενης κινητήριας ροπής και της κατανάλωσης καυσίμου. Τα οικονομικά και τα περιβαλλοντικά οφέλη από την εφαρμογή της ιδέας more electric aircraft θα είναι σημαντικά. Οι εξελίξεις γύρω από την ιδέα ΜΕΑ έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη, από την πλευρά των βιομηχανιών αεροναυπηγικής, ηλεκτρικών συσκευών που έχουν ήδη εγκατασταθεί στα αεροσκάφη Airbus-380 και Boeing-787.



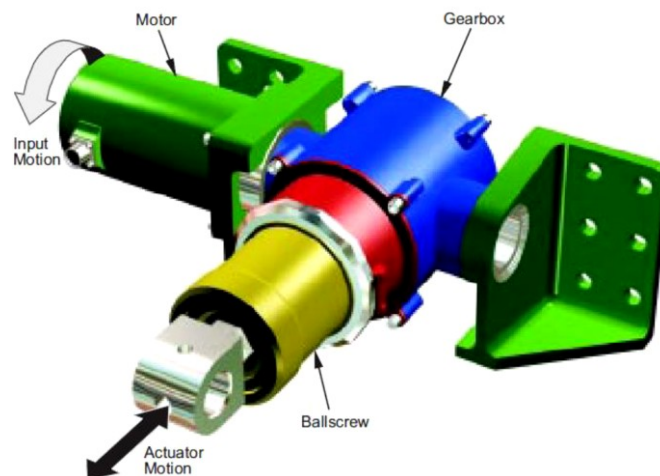
Σχ. 1.11 Σύγκριση της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος μεταξύ των συμβατικών αεροσκαφών και των αεροσκαφών B-787 και A-380, [35].



Σχ. 1.12 Εκτιμώμενη χρήση ηλεκτρο – μηχανικών σερβοκινητήρων στα συστήματα ελέγχου πτήσης ενός αεροσκάφους (Αριστερός κατακόρυφος άξονας: πηγή ισχύος (H: υδραυλική, M: μηχανική, E: ηλεκτρική), Δεξιός κατακόρυφος άξονας: τύπος σερβοκινητήρα), [31].

Η καινοτομία της ιδέας More Electric Aircraft (MEA) έγκειται στη μείωση ή την αντικατάσταση της παραγωγής υδραυλικής ισχύος. Η μείωση της χρησιμοποιούμενης υδραυλικής ισχύος θα επιφέρει και μια σημαντική μείωση στο βάρος του αεροσκάφους καθώς το δίκτυο μεταφοράς που αποτελείται από αντλίες και αγωγούς θα καταλαμβάνει μικρότερο χώρο. Η μείωση του βάρους θα έχει σαν αποτέλεσμα τη μικρότερη κατανάλωση καυσίμου και τις μειωμένες εκπομπές ρυπογόνων καυσαερίων (CO_2 και NO_x). Για να είναι ρεαλιστική η ιδέα αυτή θα πρέπει τα συστήματα του αεροσκάφους που λειτουργούν με χρήση της υδραυλικής ισχύος να αντικατασταθούν από συστήματα που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ισχύ. Πιο συγκεκριμένα με την υλοποίηση της ιδέας MEA ορισμένα από τα συστήματα που θα τροφοδοτούνται πλέον από πηγές ηλεκτρικής ισχύος είναι τα εξής :

- Σύστημα προστασίας των πτερυγίων από τον πάγο
- Σύστημα ελέγχου του περιβάλλοντος (ECS)
- Σύστημα εκκίνησης των κινητήρων του αεροσκάφους
- Ηλεκτρομηχανικοί σερβοκινητήρες (EMAs) και ηλεκτρο-υδροστατικοί σερβοκινητήρες (EHAs)
- Σύστημα πέδησης
- Σύστημα κλιματισμού
- Σύστημα συμπίεσης του αέρα της καμπίνας του αεροσκάφους



Σχ. 1.13 Ηλεκτρο – μηχανικός σερβοκινητήρας υψηλής ισχύος, [2].

1.5 Εφαρμογές της ιδέας More Electric Aircraft

Η ιδέα more electric aircraft (MEA) εφαρμόζεται ήδη στο αεροσκάφος Boeing 787 Dreamliner παρουσιάζοντας τις εξής καινοτομίες:

- Το πρώτο εμπορικό αεροσκάφος που διαθέτει ένα σύστημα διανομής ισχύος των 230 VAC μεταβλητής συχνότητας αντικαθιστώντας το συμβατικό τριφασικό σύστημα ισχύος των 115 VAC σταθερής συχνότητας (400Hz), [5].
- Το πρώτο εμπορικό αεροσκάφος που διαθέτει σύστημα κλιματισμού τροφοδοτούμενο από πηγή ηλεκτρικής ισχύος, [5].
- Το πρώτο αεροσκάφος που χρησιμοποιεί ηλεκτρο – μηχανικούς σερβοκινητήρες ελέγχου πτήσεως, [5].
- Εκτεταμένη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος στερεάς κατάστασης, [5].

Τα οφέλη από την εφαρμογή της ιδέας MEA στο Boeing 787 είναι τα ακόλουθα:

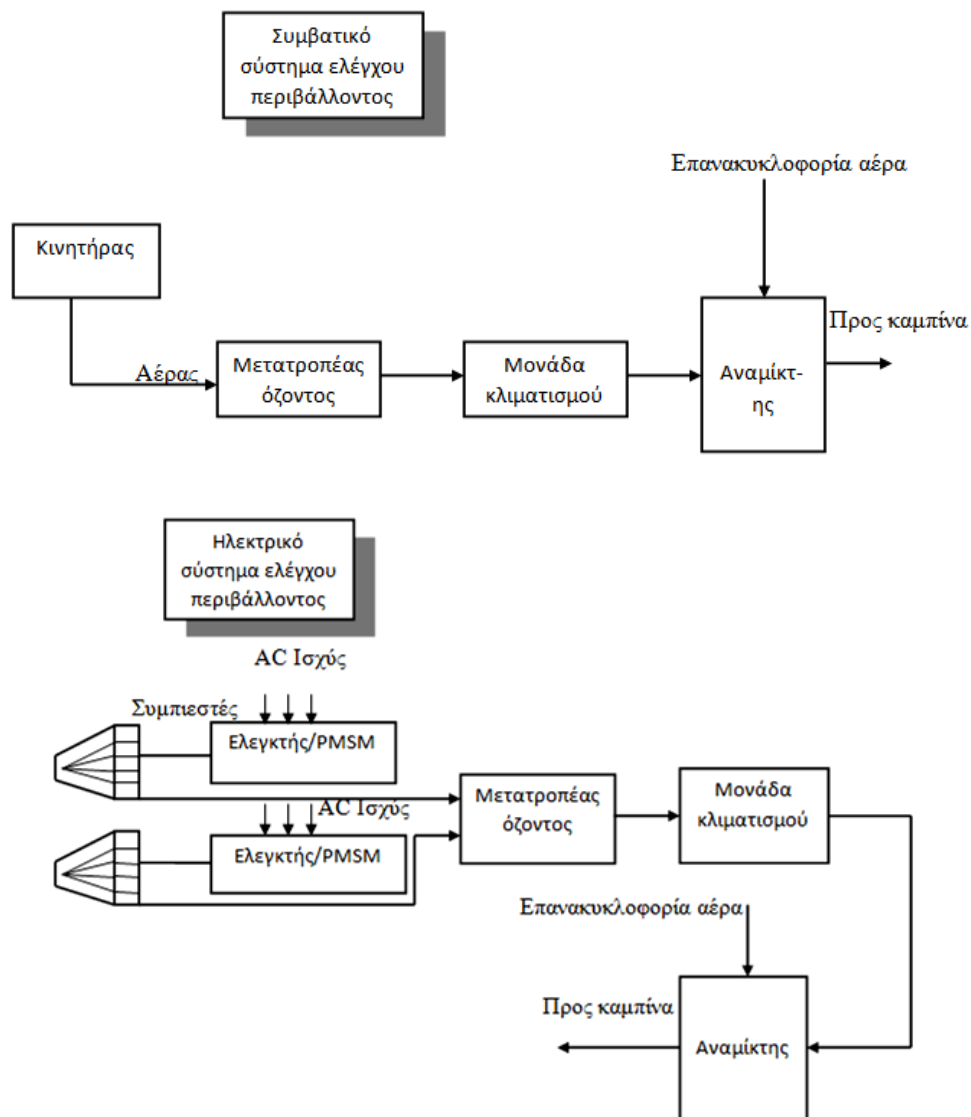
- Μείωση των απωλειών του συστήματος ισχύος λόγω της αύξησης της τάσης του στα 230 VAC.
- Μείωση κατά 20% της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε σύγκριση με την κατανάλωση του Boeing 767, [5].
- Μείωση κατά 28% των εκπομπών οξειδίων του αζώτου, [5].
- Μείωση κατά 60% του παραγόμενου θορύβου, [5].
- Μείωση κατά 50% της πολυπλοκότητας των μηχανικών συστημάτων σε σύγκριση με την πολυπλοκότητα των αντίστοιχων συστημάτων του Boeing 767.

Η συνολική καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς στο Boeing 787 είναι 1.5 MW. Η υψηλή αυτή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αντικατάσταση των συστημάτων που λειτουργούσαν με πεπιεσμένο αέρα προερχόμενο από τους κινητήρες από συστήματα που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ισχύ. Στα συστήματα του Boeing 787 Dreamliner που έχουν υποστεί αλλαγές από τη εφαρμογή της ιδέας MEA περιλαμβάνονται:

- Το σύστημα εκκίνησης των κινητήρων. Η περιορισμένη χρήση πεπιεσμένου αέρα είχε σαν αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές γεννήτριες για την εκκίνηση των κινητήρων.
- Το σύστημα εκκίνησης της βοηθητικής μονάδας ισχύος (Auxiliary Power Unit).
- Το σύστημα προστασίας των πτερυγίων από τον πάγο. Στο Boeing – 787 το συγκεκριμένο σύστημα απαιτεί ηλεκτρική ισχύ 100kVA αντικαθιστώντας το συμβατικό σύστημα που λειτουργούσε με την παροχή πεπιεσμένου αέρα.
- Τα συστήματα συμπίεσης του αέρα και το σύστημα ελέγχου περιβάλλοντος (Environmental Control System). Για τη λειτουργία αυτών των συστημάτων χρησιμοποιούνται τέσσερις μεγάλοι συμπιεστές για τον έλεγχο των οποίων απαιτείται συνολική ηλεκτρική ισχύς 500kVA.

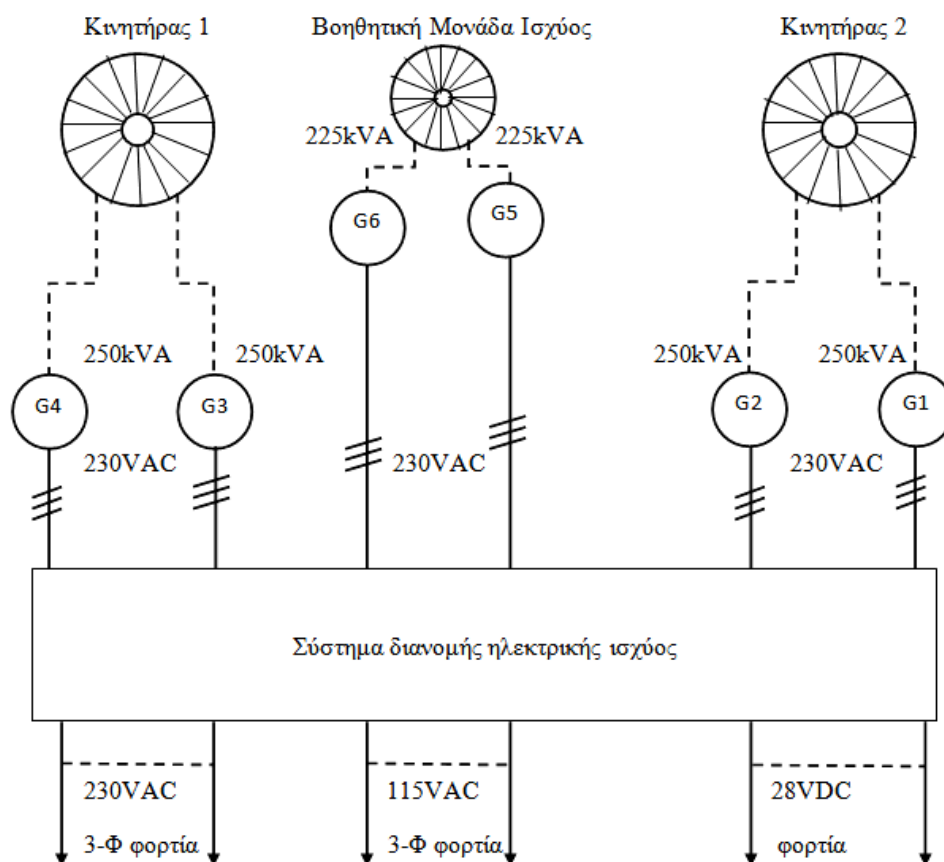
- Αντικατάσταση υδραυλικών σερβοκινητήρων από ηλεκτρικούς. Οι νέοι ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες τροφοδοτούνται με ισχύ 100kVA εξυπηρετώντας ηλεκτρικά φορτία συνολικής ισχύος 400kVA.

Πιο συγκεκριμένα για τη λειτουργία των συστημάτων ελέγχου περιβάλλοντος και συμπίεσης της καμπίνας το Boeing – 787 είναι εξοπλισμένο με δύο ομάδες κλιματιστικών μονάδων που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ισχύ. Η κάθε ομάδα διαθέτει δύο συμπιεστές ο καθένας από τους οποίους ελέγχεται από έναν κινητήρα μονίμων μαγνητών. Για τον έλεγχο των συμπιεστών ο κάθε κινητήρας μονίμων μαγνητών χρειάζεται 125kVA. Στο σχήμα 1.14 αποτυπώνονται οι διαφορές μεταξύ του συμβατικού και του ηλεκτρικού συστήματος ελέγχου περιβάλλοντος. Οι παραπάνω αλλαγές δεν βελτίωσαν μόνο την απόδοση των κινητήρων αλλά και την αξιοπιστία τους ενώ μειώθηκε σε μεγάλο βαθμό και το κόστος συντήρησης των συστημάτων του αεροσκάφους.



Σχ. 1.14 Σύγκριση συμβατικού και ηλεκτρικού συστήματος ελέγχου περιβάλλοντος, [1].

Ο προερχόμενος από τον κινητήρα πεπιεσμένος αέρας εισέρχεται στο συμβατικό σύστημα ελέγχου περιβάλλοντος με θερμοκρασία 204.44 °C και πίεση 2.068 bar. Στην έξοδο του αναμίκτη η θερμοκρασία του αέρα είναι 15.56 °C και η πίεση 0.814 bar. Η τελευταία πίεση ισοδυναμεί με την πίεση που επικρατεί στην καμπίνα ενός αεροσκάφους σε υψόμετρο 1828.8m. Στο ηλεκτρικό σύστημα ελέγχου περιβάλλοντος οι συμπιεστές διανέμουν αέρα θερμοκρασίας 93.33 °C και πίεσης 1.034 bar και ο οποίος στη συνέχεια εισέρχεται στον αναμίκτη με θερμοκρασία 15.56 °C και πίεση 0.814 bar. Η μείωση της θερμοκρασίας και της πίεσης του εισερχόμενου, στο σύστημα ελέγχου περιβάλλοντος, αέρα συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην εξοικονόμηση σημαντικής ποσότητας ενέργειας. Στο σχήμα 1.15 απεικονίζεται το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος ενός Boeing – 787.



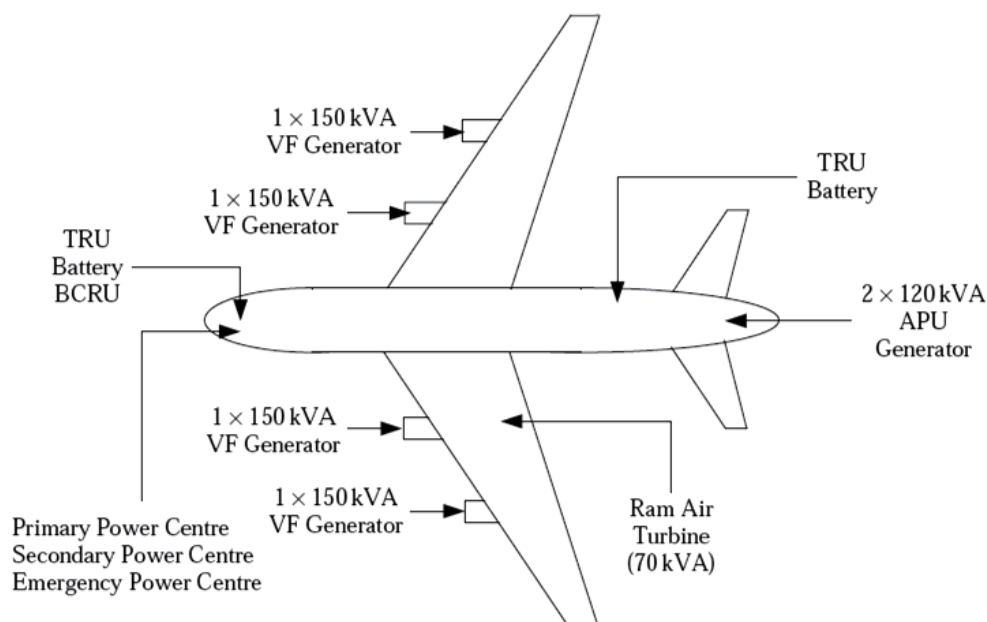
Σχ. 1.15 Σύστημα ηλεκτρικής ισχύος ενός Boeing – 787, [1].

Οι δύο γεννήτριες συνολικής ισχύος 500kVA που συνδέονται σε κάθε κινητήρα χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση των κινητήρων. Οι γεννήτριες είναι μεταβλητής συχνότητας αντικαθιστώντας τις συμβατικές γεννήτριες σταθερής συχνότητας των 400 Hz. Οι δύο γεννήτριες συνολικής ισχύος 450kVA που συνδέονται στη βοηθητική μονάδα ισχύος (Auxiliary Power Unit) χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση της APU και στη συνέχεια τροφοδοτούν ηλεκτρικά φορτία του αεροσκάφους.

Μία ακόμη περίπτωση εφαρμογής της ιδέας MEA είναι αυτή της Airbus στο αεροσκάφος A-380. Η χρήση σερβοκινητήρων που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική

ισχύ επέτρεψε στους σχεδιαστές του αεροσκάφους να διαχωρίσουν τα δίκτυα διανομής ισχύος και να μειώσουν το συνολικό βάρος του A-380. Στο συγκεκριμένο μοντέλο αεροσκάφους το σύστημα σερβοκινητήρων ελέγχου πτήσης τροφοδοτείται από τέσσερις ανεξάρτητες πηγές ισχύος – δύο υδραυλικά και δύο ηλεκτρικά κυκλώματα. Η συνολική καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς στο Airbus A-380 είναι 0.8 MW. Τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος του A – 380 είναι τα ακόλουθα:

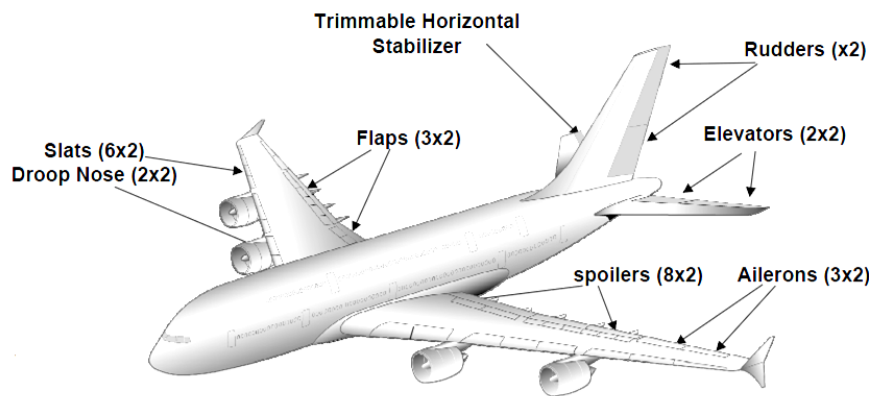
- Τέσσερις γεννήτριες μεταβλητής συχνότητας με συνολική παραγόμενη ισχύ 600 kVA. Η συχνότητα τους κυμαίνεται από 370 Hz έως 770 Hz.
- Δύο γεννήτριες σταθερής συχνότητας (400 Hz) με συνολική ισχύ 240 kVA.
- Τέσσερις μονάδες ισχύος σταθερής συχνότητας (400 Hz) για εφαρμογές εδάφους.
- Μία μονάδα ισχύος 70 kVA για χρήση σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.



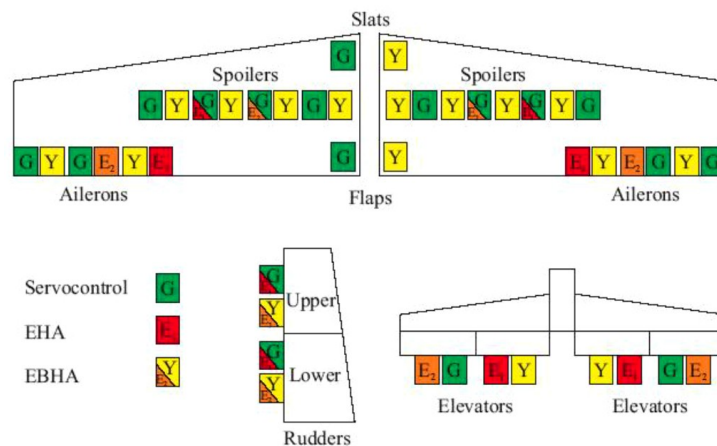
Σχ. 1.16 Σύστημα ηλεκτρικής ισχύος ενός αεροσκάφους A – 380, [1]

Το Airbus A-380 διαθέτει δύο ανυψωτήρες σε κάθε πλευρά του οριζόντιου σταθεροποιητή (Trimable Horizontal Stabilizer) της ουράς του αεροσκάφους που ελέγχονται από ένα υδραυλικό και ένα ηλεκτρο – υδροστατικό σερβοκινητήρα. Η χρήση των ηλεκτρο – υδροστατικών σερβοκινητήρων επιφέρει μια μείωση στο βάρος του αεροσκάφους κατά 1500 kg. Επίσης η κάθε μία από τις δύο επιφάνειες (rudders) που χρησιμοποιούνται για να αποφευχθεί μια πιθανή περιστροφή του αεροσκάφους γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του ελέγχεται από δύο ηλεκτρικούς εφεδρικούς υδραυλικούς σερβοκινητήρες (EBHA). Οι ηλεκτρικοί εφεδρικοί υδραυλικοί σερβοκινητήρες τροφοδοτούνται με υδραυλική ισχύ στην κανονική λειτουργία και με ηλεκτρική ισχύ στην εφεδρική λειτουργία. Σε κάθε πτερύγιο του A – 380 υπάρχουν τρεις επιφάνειες (ailerons) που ρυθμίζουν τη κλίση του αεροσκάφους. Η εσωτερική

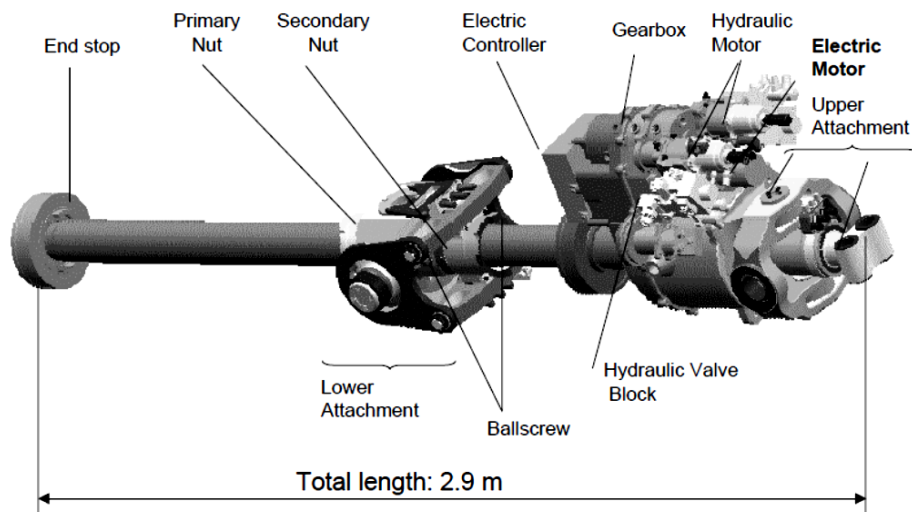
και η μεσαία επιφάνεια ελέγχονται από ένα υδραυλικό και ένα ηλεκτρο – υδροστατικό σερβοκινητήρα ενώ η εξωτερική επιφάνεια ελέγχεται από δύο υδραυλικούς σερβοκινητήρες. Οι αεροτομές (spoilers, οκτώ σε κάθε περύγιο) του A – 380 ελέγχονται από υδραυλικούς σερβοκινητήρες. Ωστόσο οι τρεις από τις αεροτομές διαθέτουν και ένα ηλεκτρο – υδροστατικό σερβοκινητήρα που χρησιμοποιείται σαν εφεδρικός. Είναι εμφανής λοιπόν η εκτεταμένη χρήση ηλεκτρικών σερβοκινητήρων στο A – 380 που σε συνδυασμό με την αύξηση της πίεσης της ροής στα υφιστάμενα υδραυλικά κυκλώματα – από 3000 psi(206 bar) σε 5000 psi(345 bar) – συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στην εξοικονόμηση βάρους. Τα κυριότερα οφέλη από τη χρήση των ηλεκτρικών σερβοκινητήρων είναι η μείωση του όγκου του εξοπλισμού παραγωγής ισχύος, η μείωση του χώρου που καταλαμβάνει το δίκτυο μεταφοράς υδραυλικής ισχύος, η μείωση της ποσότητας υγρού που χρησιμοποιείται σαν μέσο μεταφοράς της υδραυλικής ισχύος. Επίσης αυξάνεται και το περιθώριο ασφάλειας καθώς χρησιμοποιούνται διαφορετικές πηγές ισχύος.



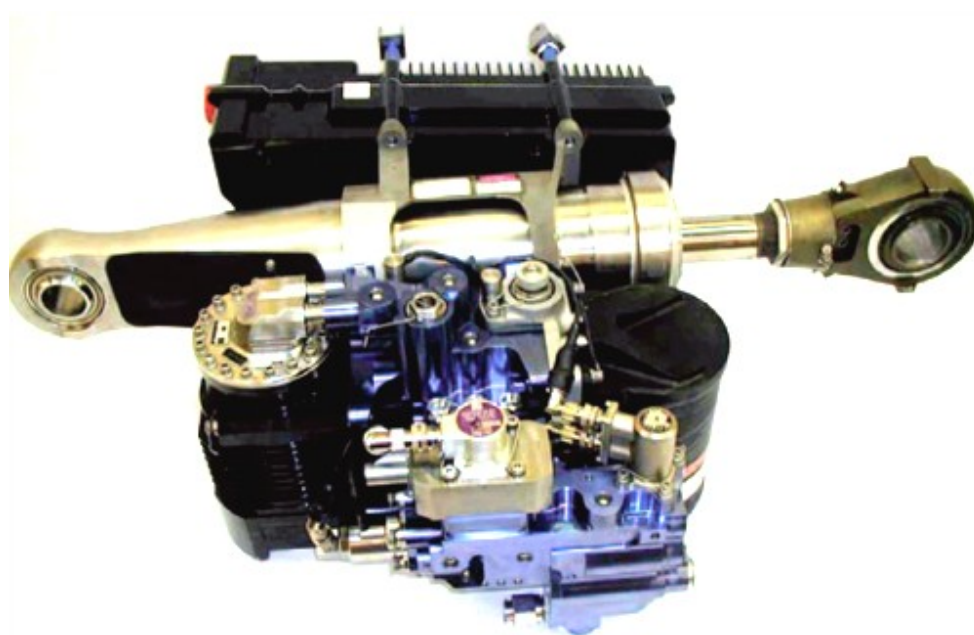
Σχ. 1.17 Επιφάνειες αεροσκάφους ελεγχόμενες από σερβοκινητήρες, [6].



Σχ.1.18 Τύποι σερβοκινητήρων για τον έλεγχο των επιφανειών ενός A-380(Servocontrol: κιβώτιο ταχυτήτων, EHA: ηλεκτρο-υδροστατικός σερβοκινητήρας, EBHA: ηλεκτρικός εφεδρικός υδραυλικός σερβοκινητήρας), [32].



Σχ. 1.19 Σερβοκινητήρας για τον έλεγχο του οριζόντιου σταθεροποιητή ενός A-380, [6].



Σχ. 1.20 Ηλεκτρο – υδραυλικός σερβοκινητήρας του αεροσκάφους Airbus A – 380, [33].

Η Airbus έχει εγκαταστήσει στο αεροσκάφος A380 σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος μεταβλητής συχνότητας απαλλάσσοντας τους σχεδιαστές από την υλοποίηση ενός σύνθετου, μεγάλου βάρους και δύσκολου στη συντήρηση εξοπλισμού για την μετατροπή της μηχανικής ισχύος που παράγεται από τους κινητήρες σε ηλεκτρική ισχύ που χρησιμοποιείται από τα συστήματα του αεροσκάφους. Η τεχνολογία μεταβλητής συχνότητας αυξάνει την αξιοπιστία του

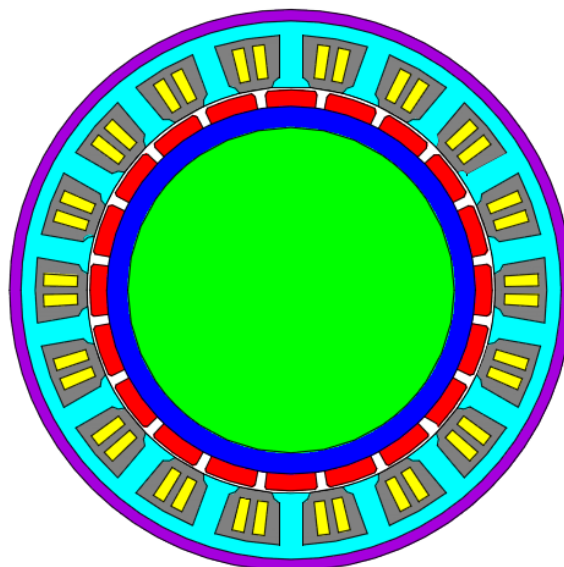
συστήματος ισχύος και μειώνει τα λειτουργικά κόστη (εκτιμάται ότι η μείωση του λειτουργικού κόστους θα είναι \$16 ανά ώρα πτήσης).

Παράλληλα με την κατασκευή αεροσκαφών που χρησιμοποιούν περισσότερη ηλεκτρική ισχύ οι βιομηχανίες αεροναυπηγικής κατασκευάζουν ατράκτους χρησιμοποιώντας συνθετικά υλικά. Το γεγονός αυτό συμβάλλει σε σημαντικό βαθμό στη μείωση του βάρους του αεροσκάφους με μόνο μειονέκτημα τη μικρότερη αγωγιμότητα που παρουσιάζουν τα συνθετικά υλικά σε σύγκριση με τα υλικά των παραδοσιακών ατράκτων. Η μειωμένη αγωγιμότητα των νέων υλικών θα έχει σαν συνέπεια τη χρήση περισσότερων καλωδίων για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στα συστήματα του αεροσκάφους.

Η Airbus προβλέπει ότι τα μελλοντικά αεροσκάφη θα αντλούν ενέργεια από ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών πηγών ενέργειας με απώτερο στόχο να μειώσουν την καταναλισκόμενη ποσότητα καυσίμου τόσο για οικονομικούς όσο και για περιβαλλοντικούς λόγους. Αυτό το φάσμα των πηγών ενέργειας περιλαμβάνει την ηλιακή ενέργεια και τη θερμότητα που εκλύεται από τα σώματα των επιβατών, από την κουζίνα του αεροσκάφους και από το σύστημα κλιματισμού. Τα οφέλη από την υλοποίηση της ιδέας *more electric aircraft* δεν θα είναι μόνο οικονομικά αλλά σε μεγάλο βαθμό περιβαλλοντικά αν λάβουμε υπόψη μας ότι η τωρινή συμμετοχή των αερομεταφορών στις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανέρχεται στο ποσοστό του 2%, [3].

1.6 Δομή σύγχρονου κινητήρα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη θερμική ανάλυση ενός εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών. Οι σύγχρονοι κινητήρες είναι μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα.



Σχ. 1.21 Εικοσαπολικός σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών

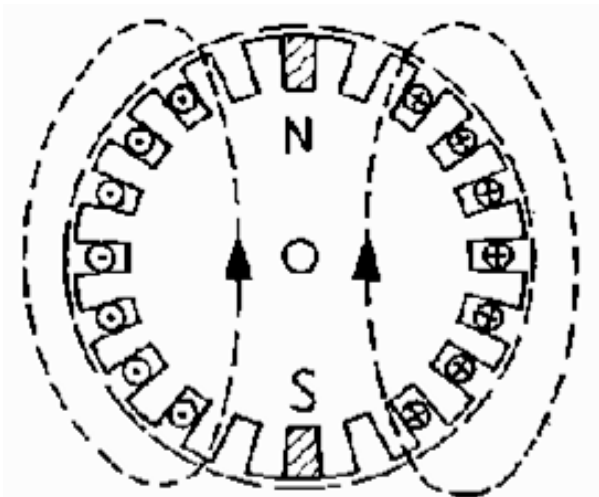
Ο στάτης ενός σύγχρονου κινητήρα φέρει ένα συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα που τροφοδοτείται από ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα τάσεων με αποτέλεσμα να δημιουργείται στο στάτη ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, χαρακτηριστικό μέγεθος ενός σύγχρονου κινητήρα, που δίδεται από τον τύπο $n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$, όπου f είναι η συχνότητα της τάσης που τροφοδοτεί τον στάτη και p είναι τα ζεύγη πόλων του κινητήρα.

Ο δρομέας ενός σύγχρονου κινητήρα τροφοδοτείται από ένα εξωτερικό κύκλωμα συνεχούς ρεύματος και περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Το γεγονός ότι ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα η οποία είναι ευθέως ανάλογη της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας καθιστά τους σύγχρονους κινητήρες ιδανικούς για εφαρμογές όπου απαιτείται σταθερή ταχύτητα. Σε περίπτωση που ο δρομέας δεν περιστρέφεται με αυτή την ταχύτητα ο κινητήρας βρίσκεται σε αποσυγχρονισμό. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στον δρομέα τείνει να ευθυγραμμιστεί με το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Η κίνηση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα προκαλεί την περιστροφή του. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία που σχηματίζουν τα δύο πεδία τόσο μεγαλύτερη είναι και η ροπή που αναπτύσσεται στον δρομέα.

1.7 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά σύγχρονων μηχανών

Με κριτήριο τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του δρομέα διακρίνουμε τα ακόλουθα είδη σύγχρονων μηχανών, [7]:

- Σύγχρονες μηχανές κυλινδρικού δρομέα ή κατανεμημένων πόλων.
- Σύγχρονες μηχανές έκτυπων πόλων.



Σχ. 1.22 Δρομέας κατανεμημένων πόλων

Ο πρώτος τύπος σύγχρονης μηχανής χρησιμοποιείται για την κατασκευή γεννητριών που κινούνται από ατμοστρόβιλους έχοντας 2 και 4 πόλους με αντίστοιχες ταχύτητες 3000 ΣΑΛ και 1500 ΣΑΛ για τη συχνότητα των 50 Hz. Και στους δύο τύπους μηχανών το τύλιγμα του στάτη αποτελείται από αγωγούς που

τοποθετούνται στις αύλακες του στάτη. Στις περισσότερες μηχανές το τύλιγμα είναι τριφασικό σε σύνδεση αστέρα και σε δύο στρώσεις. Στις μηχανές κατανεμημένων πόλων το τύλιγμα διέγερσης τοποθετείται σε αύλακες που έχουν σχηματιστεί στην επιφάνεια του δρομέα και διατηρείται στη θέση του με τη χρήση μεταλλικών σφηνών που το προστατεύουν από τις φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία της μηχανής. Σε αυτές τις μηχανές οι υψηλές μηχανικές τάσεις που αναπτύσσονται λόγω της περιστροφής του δρομέα επιβάλλουν τη σχεδίαση τους με όσο το δυνατόν μικρότερη διάμετρο. Οι υψηλές μηχανικές τάσεις σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία του κινητήρα επιβάλλουν περιορισμούς και στο μέγεθος της εφαρμοζόμενης τάσης στο τύλιγμα του πεδίου που δεν ξεπερνά τα 400 V, [7].

Ο δεύτερος τύπος σύγχρονης μηχανής (σύγχρονη μηχανή έκτυπων πόλων) χρησιμοποιείται για την κατασκευή πολύ - πολικών μηχανών μέσης και χαμηλής ταχύτητας. Βρίσκουν εφαρμογή σε σύγχρονες γεννήτριες που περιστρέφονται από υδροστροβίλους και σε σύγχρονους κινητήρες, [7].

Με κριτήριο τη μέθοδο διέγερσης του δρομέα διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες σύγχρονων μηχανών:

- Σύγχρονες μηχανές με περιέλιξη στον δρομέα: Το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς ρεύματος δημιουργώντας το μαγνητικό πεδίο διέγερσης.

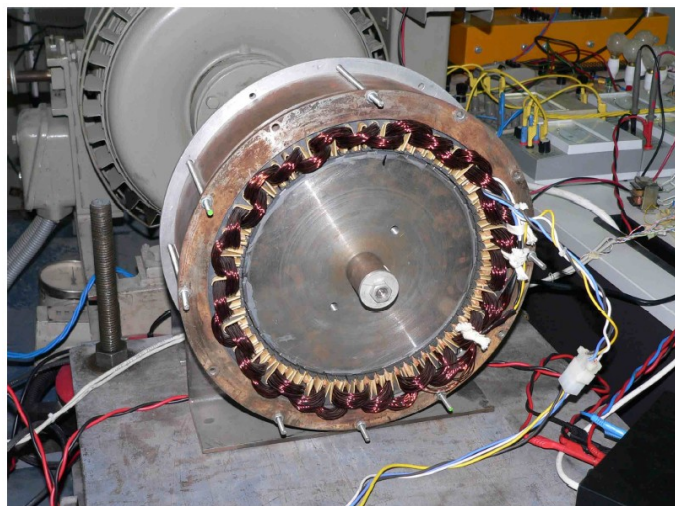
- Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών: Για την δημιουργία του πεδίου διέγερσης στον δρομέα δεν χρησιμοποιείται περιέλιξη αλλά τοποθετούνται επί της επιφάνειας του μόνιμοι μαγνήτες.

- Σύγχρονες μηχανές μαγνητικής αντίστασης: Και σε αυτές τις μηχανές δεν χρησιμοποιείται τύλιγμα διέγερσης στον δρομέα ενώ η μαγνητική ροή στο διάκενο παράγεται μόνο από την επαγόμενη από τον στάτη τάση. Ο χαμηλός συντελεστής ισχύος αυτής της κατηγορίας μηχανών τις καθιστά κατάλληλες μόνο για εφαρμογές μικρής ροπής και ισχύος.

1.8 Σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη θερμική συμπεριφορά ενός εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών. Θα ήταν σκόπιμο λοιπόν να αναφέρουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κινητήρων αυτής της κατηγορίας έναντι των σύγχρονων κινητήρων που χρησιμοποιούν τυλίγματα διέγερσης και να επισημάνουμε τα κριτήρια με βάση τα οποία ταξινομούνται οι κινητήρες αυτοί. Σε κινητήρες μονίμων μαγνητών, όπως προαναφέραμε, τοποθετούνται επί της επιφάνειας του δρομέα μόνιμοι μαγνήτες που δημιουργούν το πεδίο διέγερσης του δρομέα. Οι μόνιμοι μαγνήτες αποθηκεύουν στο εσωτερικό τους μαγνητική ενέργεια η οποία συμβάλλει με την δημιουργία του πεδίου διέγερσης στην ανάπτυξη ροπής για την περιστροφή του δρομέα.

Η αντικατάσταση των τυλιγμάτων διέγερσης με μόνιμους μαγνήτες έχει σαν αποτέλεσμα τη εξάλειψη των απωλειών χαλκού των τυλιγμάτων διέγερσης και επιπλέον δεν υπάρχει η ανάγκη παροχής συνεχούς ρεύματος μέσω ψηκτρών ή δακτυλίων για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου του δρομέα. Η εξάλειψη των απωλειών διέγερσης συνεπάγεται και μια σημαντική αύξηση της απόδοσης του κινητήρα. Επίσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη ροπή και ισχύ εξόδου καθώς και μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη των κινητήρων που χρησιμοποιούν τυλίγματα διέγερσης. Η απουσία τυλιγμάτων διέγερσης και πηγής συνεχούς ρεύματος για την τροφοδότηση των τυλιγμάτων του δρομέα απλοποιεί την κατασκευή και τη συντήρηση του κινητήρα. Ένα μειονέκτημα από τη χρήση μόνιμων μαγνητών προκύπτει από το γεγονός ότι η τιμή της μαγνήτισης τους είναι σταθερή και επομένως δεν υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της διέγερσης. Επίσης αν οι θερμοκρασίες ή οι μηχανικές καταπονήσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του κινητήρα είναι υψηλές υπάρχει ο κίνδυνος απομαγνήτισης των μαγνητών, [8].



Σχ. 1.23 Σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών, [9].

Η κατηγοριοποίηση των σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών βασίζεται στα ακόλουθα κριτήρια, [10]:

- Κατεύθυνση της μαγνητικής ροής πεδίου

Με βάση τη κατεύθυνση της μαγνητικής ροής πεδίου διακρίνουμε τους παρακάτω τύπους κινητήρων:

1. Κινητήρας αξονικού πεδίου: η μαγνητική ροή είναι κάθετη στην ακτίνα του κινητήρα.
2. Κινητήρας ακτινοειδούς πεδίου: η μαγνητική ροή είναι παράλληλη στην ακτίνα του κινητήρα. Οι κινητήρες αυτοί κατηγοριοποιούνται με κριτήριο τη θέση των μόνιμων μαγνητών σε:

- Κινητήρες επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη: σε κινητήρες του συγκεκριμένου τύπου ο κάθε μαγνήτης τοποθετείται στην επιφάνεια του δρομέα καθιστώντας τους κατάλληλους μόνο για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας διότι υπάρχει ο κίνδυνος αποκόλλησης τους αν ο δρομέας περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα.

- Κινητήρες εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη: οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στο εσωτερικό του δρομέα. Η κατασκευή αυτών των κινητήρων είναι δύσκολη λόγω της θέσης των μαγνητών αλλά θεωρούνται ιδανικοί για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας.

• Κατανομή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής

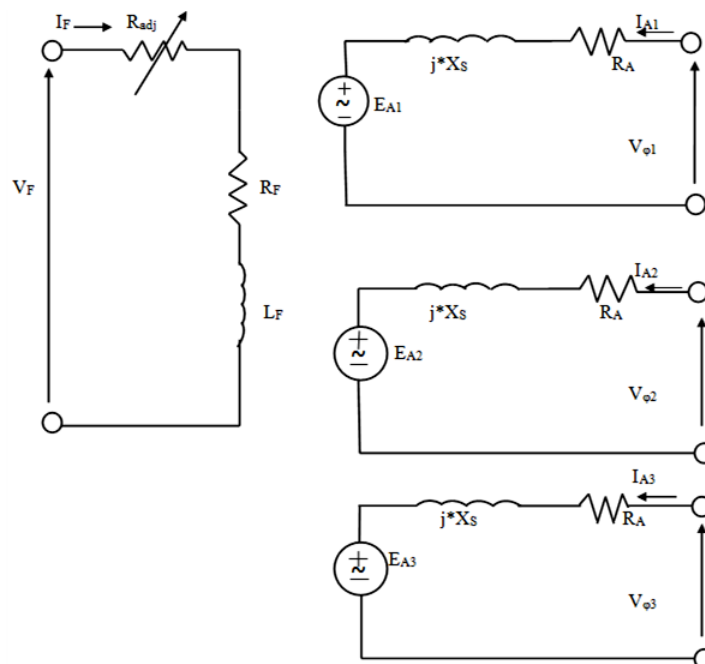
Οι τύποι σύγχρονων κινητήρων με κριτήρια την κατανομή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής και τη μορφή της καμπύλης του ρεύματος διέγερσης είναι οι ακόλουθοι:

1. Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motors): οι κινητήρες αυτής της κατηγορίας χαρακτηρίζονται από την ημιτονοειδή κατανομή της μαγνητικής ροής στο διάκενο, την ημιτονοειδή κατανομή των τυλιγμάτων του στάτη και την ημιτονοειδή κυματομορφή των ρευμάτων.

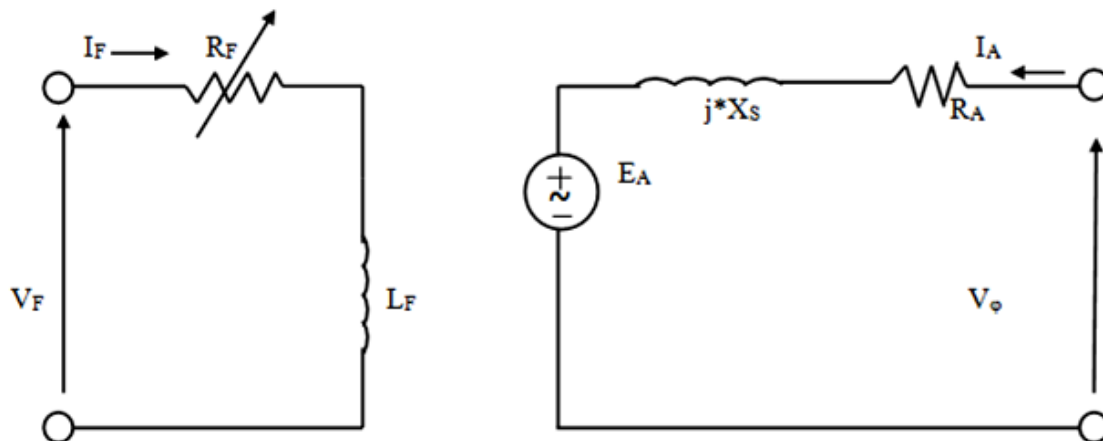
2. Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (Brushless DC Motors): σε κινητήρες αυτής της κατηγορίας η κατανομή της μαγνητικής ροής στο διάκενο έχει ορθογώνια μορφή, οι κυματομορφές ρεύματος είναι επίσης ορθογώνιες και τα τυλίγματα του στάτη είναι συγκεντρωμένα.

1.9 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα

Στα σχήματα 1.24 και 1.25 δίνονται το πλήρες τριφασικό και το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα ενός σύγχρονου κινητήρα αντίστοιχα.



Σχ. 1.24 Πλήρες τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα



Σχ. 1.25 Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα

Εφαρμόζοντας τον νόμο τάσεων Kirchhoff στο κύκλωμα του Σχ. 1.25 προκύπτει η εξίσωση που εκφράζει το ισοδύναμο κύκλωμα του σύγχρονου κινητήρα:

$$\mathbf{V}_\varphi = \mathbf{E}_A + j \cdot X_s \cdot \mathbf{I}_A + R_A \cdot \mathbf{I}_A \leftrightarrow \mathbf{E}_A = \mathbf{V}_\varphi - j \cdot X_s \cdot \mathbf{I}_A - R_A \cdot \mathbf{I}_A \quad (1.1)$$

όπου,

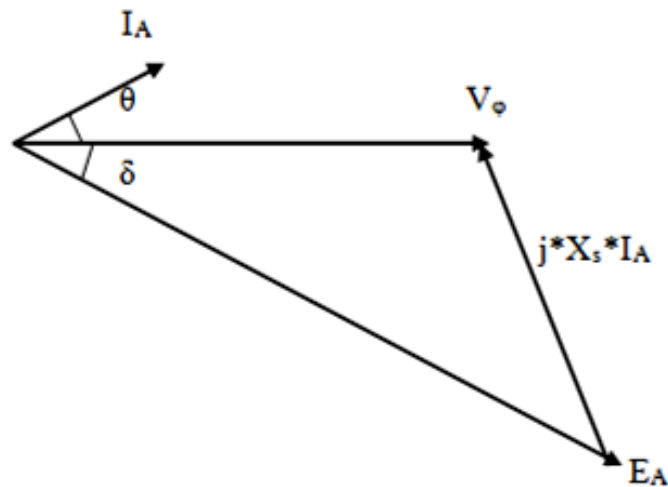
- E_A είναι η τάση που αναπτύσσεται σε κάθε φάση του στάτη λόγω της περιστροφής του δρομέα. Η τάση αυτή εξαρτάται από τη μαγνητική ροή φ , από τη συχνότητα ή την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα καθώς και από κάποια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Η τιμή της E_A δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_A = K \cdot \varphi \cdot \omega \quad (1.2)$$

όπου K σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, φ η μαγνητική ροή και ω η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

- V_φ η τάση στα άκρα κάθε φάσης του στάτη.
- X_s η σύγχρονη αντίδραση του κινητήρα. Η τιμή αυτής της αντίδρασης προκύπτει από το άθροισμα των τιμών της αντίδρασης οπλισμού και της επαγωγικής αντίδρασης του τυλίγματος μιας φάσης του στάτη.
- I_A το ρεύμα που διαρρέει κάθε φάση του στάτη.
- R_A η ωμική αντίσταση του τυλίγματος μιας φάσης του στάτη.

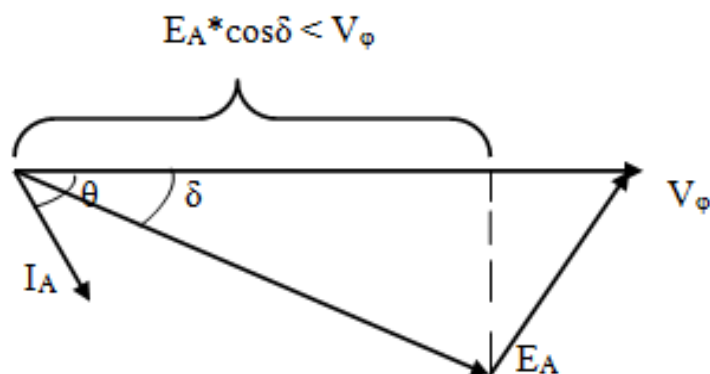
Στο Σχ. 1.26 απεικονίζεται το διανυσματικό διάγραμμα ενός σύγχρονου κινητήρα όπου δεν λαμβάνεται υπόψη η αντίσταση του τυλίγματος του στάτη.



Σχ. 1.26 Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα

Στο διανυσματικό διάγραμμα του Σχ. 1.26 παρατηρούμε ότι η προβολή της τάσης E_A πάνω στην V_ϕ είναι μεγαλύτερη από την ίδια την V_ϕ . Σε αυτή την περίπτωση ο σύγχρονος κινητήρας παράγει άεργο ισχύ και λειτουργεί με υπερδιέγερση καθώς το ρεύμα διέγερσης είναι αρκετά υψηλό. Όταν ο σύγχρονος κινητήρας λειτουργεί με υπερδιέγερση έχει τη δυνατότητα εκτός από το να κινεί το φορτίο που συνδέεται στον άξονα του, να βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος του δικτύου. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει φορτίο στον άξονα ο κινητήρας παράγει άεργο ισχύ με αποκλειστικό σκοπό να βελτιώσει το συντελεστή ισχύος. Οι κινητήρες αυτής της κατηγορίας λέγονται σύγχρονοι πυκνωτές ή σύγχρονες χωρητικότητες.

Στην αντίθετη περίπτωση δηλαδή όταν η προβολή της E_A πάνω στην V_ϕ είναι μικρότερη από την V_ϕ ο κινητήρας καταναλώνει άεργο ισχύ και λειτουργεί με υποδιέγερση καθώς το ρεύμα διέγερσης είναι αρκετά χαμηλό (Σχ. 1.27).



Σχ. 1.27 Διανυσματικό διάγραμμα κινητήρα που λειτουργεί με υποδιέγερση

1.9.1 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας σύγχρονου κινητήρα

Η ταχύτητα ενός σύγχρονου κινητήρα εξαρτάται από την συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας και από τον αριθμό των πόλων του δρομέα ενώ δεν εξαρτάται καθόλου από το φορτίο του κινητήρα. Επίσης η τάση εισόδου και η συχνότητα παραμένουν σταθερές και ανεξάρτητες από την ισχύ εξόδου του κινητήρα. Η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

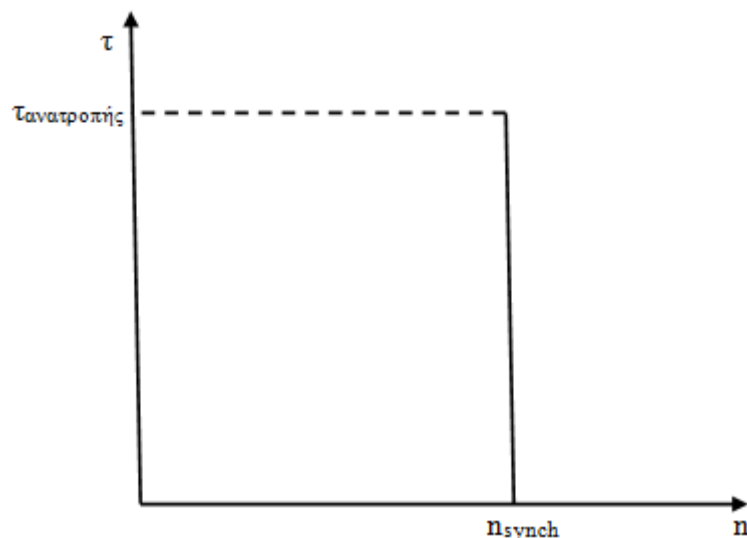
$$\tau = \frac{3 \cdot V_{\phi} \cdot E_A \cdot \sin \delta}{\omega_m \cdot X_S} \quad (1.3)$$

Όταν $\delta = 90^\circ$ ο κινητήρας αναπτύσσει την μέγιστη ροπή, η τιμή της οποίας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau_{\max} = \frac{3 \cdot V_{\phi} \cdot E_A}{\omega_m \cdot X_S} \quad (1.4)$$

Σε περίπτωση που η ροπή του κινητήρα ξεπεράσει τη μέγιστη τιμή της (ροπή ανατροπής) ο δρομέας επιβραδύνεται και το πεδίο του παύει να ακολουθεί το αντίστοιχο του στάτη. Αν το πεδίο του στάτη ξεπεράσει κατά μία περιστροφή το πεδίο του δρομέα η φορά της ροπής αλλάζει πρόσημο, γεγονός που χαρακτηρίζεται σαν απώλεια συγχρονισμού, [11]. Από τη σχέση (1.4) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα διέγερσης (ή ισοδύναμα η τάση E_A) τόσο μεγαλύτερη είναι και η τιμή της μέγιστης ροπής που παράγει ο κινητήρας. Με χρήση της (1.4) μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της μέγιστης ισχύος εξόδου ενός σύγχρονου κινητήρα:

$$P_{\max} = \tau_{\max} \cdot \omega_m = \frac{3 \cdot V_{\phi} \cdot E_A}{X_S} \quad (1.5)$$



Σχ. 1.28 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας σύγχρονου κινητήρα

1.10 Τεχνικές εκκίνησης σύγχρονων κινητήρων

Ο δρομέας ενός σύγχρονου κινητήρα περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα (σύγχρονη ταχύτητα) στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Στην ενότητα αυτή περιγράφονται κάποιες από τις τεχνικές που εφαρμόζονται για να αποκτήσει ο κινητήρας τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής.

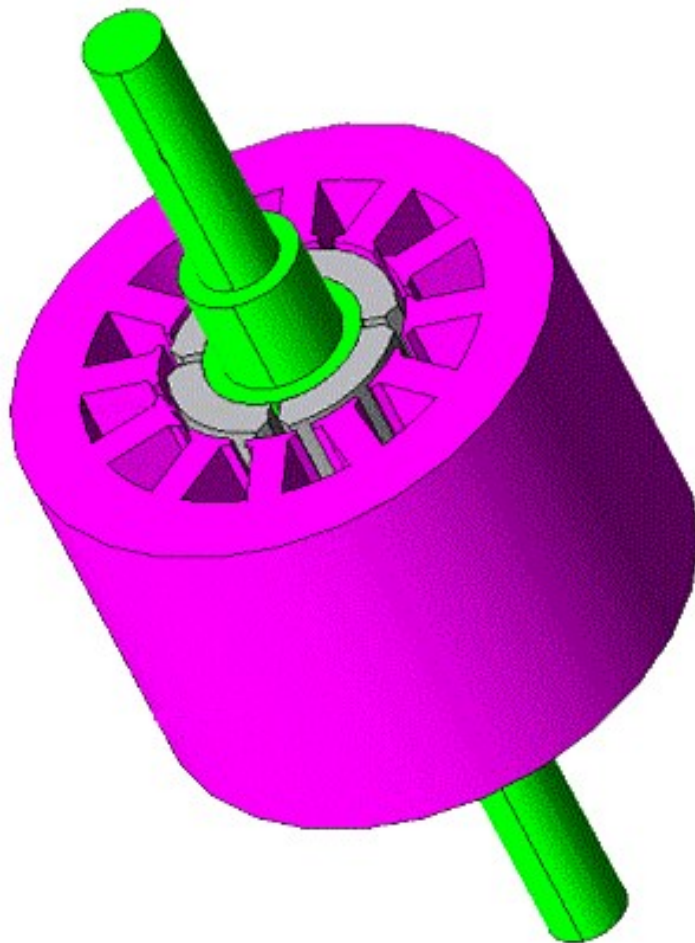
- Μείωση της ταχύτητας περιστροφής του πεδίου του στάτη: η τεχνική αυτή βασίζεται στην ιδέα ότι αν το πεδίο του στάτη περιστρέφεται με μικρή ταχύτητα τότε το πεδίο του δρομέα μπορεί εύκολα και γρήγορα να συγχρονιστεί με αυτό. Η μείωση της ταχύτητας περιστροφής του πεδίου του στάτη επιτυγχάνεται με τη μείωση της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας. Οι πηγές τάσης που χρησιμοποιούνται για τη τροφοδότηση των τυλιγμάτων του στάτη λειτουργούν με σταθερή συχνότητα (50 ή 60 Hz). Προκειμένου να μειώσουμε τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας χρησιμοποιούμε ηλεκτρονικές διατάξεις που μετατρέπουν την τάση μιας πηγής με σταθερή συχνότητα σε τάση οποιασδήποτε συχνότητας. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνουμε την εκκίνηση του κινητήρα με συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας μικρότερη από την ονομαστική έχοντας τη δυνατότητα στη συνέχεια να αυξάνουμε βαθμιαία τη συχνότητα έως ότου λάβει την ονομαστική της τιμή, [11].

- Σύνδεση κινητήριας μηχανής στον δρομέα του κινητήρα: η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου απαιτεί τη σύνδεση μιας κινητήριας μηχανής στο δρομέα του κινητήρα που θα προκαλέσει την περιστροφή του στη σύγχρονη ταχύτητα. Όταν ο δρομέας του σύγχρονου κινητήρα αποκτήσει τη σύγχρονη ταχύτητα, ο σύγχρονος κινητήρας συνδέεται στο δίκτυο ισχύος σαν γεννήτρια ενώ η κινητήρια μηχανή αποσυνδέεται. Βαθμιαία μειώνεται η ταχύτητα του άξονα του σύγχρονου κινητήρα μέχρις ότου το πεδίο του δρομέα να ακολουθεί το συνολικό μαγνητικό πεδίο αρχίζοντας η σύγχρονη μηχανή να λειτουργεί ως κινητήρας, [11].

- Χρήση τυλιγμάτων απόσβεσης: η συγκεκριμένη τεχνική εκκίνησης απαιτεί την τοποθέτηση τυλιγμάτων απόσβεσης στον δρομέα του κινητήρα. Τα τυλίγματα αυτά είναι αγωγικές ράβδοι που τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρομέα και βραχυκυκλώνονται στα άκρα τους μέσω δακτυλίων. Αρχικά το κύκλωμα διέγερσης του δρομέα του κινητήρα δεν τροφοδοτεί τον δρομέα ενώ τα τυλίγματα του στάτη τροφοδοτούνται με ένα τριφασικό σύστημα τάσεων. Καθώς το μαγνητικό πεδίο του στάτη περιστρέφεται στα άκρα των τυλιγμάτων απόσβεσης δημιουργείται τάση που εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του κάθε τυλίγματος ως προς το μαγνητικό πεδίο, από τη μαγνητική επαγωγή του πεδίου του στάτη και από το μήκος του κάθε τυλίγματος. Η επαγόμενη τάση δημιουργεί ρεύμα πάνω στις ράβδους απόσβεσης το οποίο παράγει ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από τα τυλίγματα απόσβεσης. Η σχετική κίνηση του συγκεκριμένου πεδίου ως προς το πεδίο του στάτη παράγει στον δρομέα

του κινητήρα ροπή που περιστρέφει τον άξονα του. Όταν η ταχύτητα του δρομέα προσεγγίζει τη σύγχρονη ταχύτητα συνδέεται το κύκλωμα διέγερσης στον δρομέα του κινητήρα προκειμένου τα πεδία στάτη και δρομέα να συγχρονιστούν, [11].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

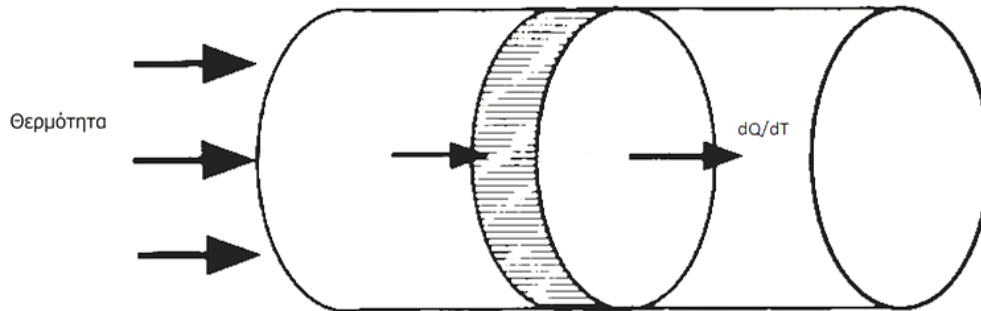


ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η θερμική ανάλυση ενός συστήματος μας δίνει τη δυνατότητα να γνωρίζουμε την κατανομή της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο του. Επίσης μας δίνει πληροφορίες για τη μεταφορά θερμότητας και το ρυθμό μεταφοράς αυτής μεταξύ περιοχών του συστήματος με διαφορετική θερμοκρασία.

Η θερμότητα είναι η ενέργεια που μεταφέρεται μέσα από το όριο ενός θερμοδυναμικού συστήματος προς ένα άλλο σύστημα ή προς το περιβάλλον λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς τους. Η θερμότητα μεταδίδεται πάντα από ένα σύστημα υψηλότερης θερμοκρασίας προς ένα άλλο σύστημα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Το

ποσό θερμότητας που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου ονομάζεται ρυθμός μεταφοράς θερμότητας και συμβολίζεται με \dot{q} . Η μονάδα μέτρησης του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) είναι το J/sec ή W. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση μεταφοράς ονομάζεται πυκνότητα θερμοροής.



Σχ. 2.1 Μεταφορά θερμότητας σε κυλινδρική επιφάνεια, [12].

2.1 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

Οι μηχανισμοί με τους οποίους πραγματοποιείται η μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό ενός συστήματος ή μεταξύ δύο συστημάτων είναι οι εξής, [13] :

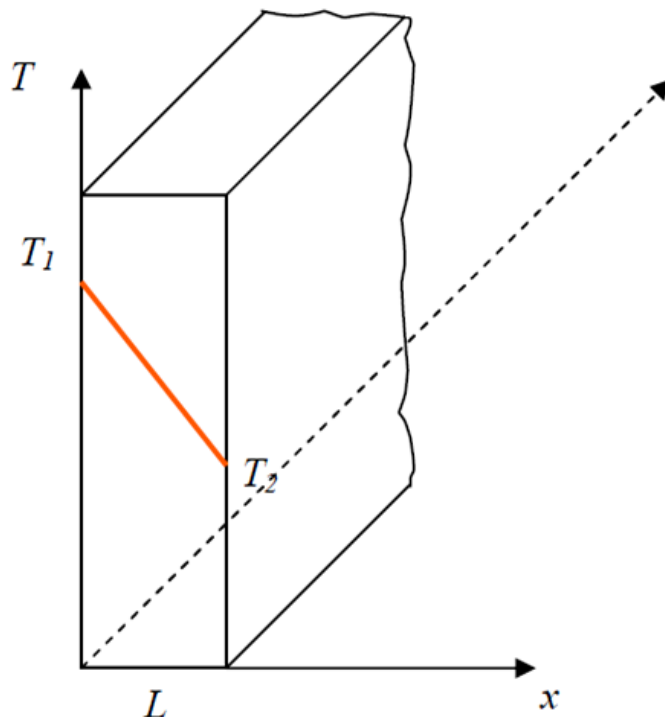
- Μεταφορά με αγωγή: Παρατηρείται στο εσωτερικό στερεών σωμάτων ή στο εσωτερικό ενός ακίνητου ρευστού όταν υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά.
- Μεταφορά με συναγωγή: Πραγματοποιείται στην επιφάνεια επαφής ενός κινούμενου ρευστού με ένα στερεό σώμα όταν υπάρχει μεταξύ τους θερμοκρασιακή απόκλιση.
- Μεταφορά με ακτινοβολία: Βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε σύστημα συγκεκριμένης θερμοκρασίας εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Μέσω της ακτινοβολίας μεταφέρεται θερμότητα μεταξύ δύο συστημάτων διαφορετικής θερμοκρασίας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις μεταφοράς θερμότητας συνυπάρχουν και οι τρεις μηχανισμοί. Για λόγους απλούστευσης λαμβάνεται υπόψη μόνο ο κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς και αγνοούνται οι άλλοι δύο.

2.2 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Όταν στο εσωτερικό ενός στερεού υπάρχουν περιοχές διαφορετικής θερμοκρασίας τότε πραγματοποιείται μετάδοση θερμότητας με τον μηχανισμό της αγωγής. Επίσης σε ένα ρευστό όπου μακροσκοπικά δεν παρατηρείται μετακίνηση της μάζας του πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας με αγωγή που προκαλείται από τις συγκρούσεις των μορίων του, [13].

Στο εσωτερικό ενός στερεού η εσωτερική ενέργεια των μορίων του είναι ίση με το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής τους ενέργειας. Η θερμοκρασία των μορίων είναι ανάλογη της κινητικής ενέργειας. Επομένως αύξηση της κινητικής ενέργειας συνεπάγεται και αύξηση της θερμοκρασίας τους.



Σχ. 2.2 Μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας με αγωγή κατά τη διεύθυνση x , [14].

Μαθηματικά το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή περιγράφεται από τον νόμο Fourier που έχει την ακόλουθη μορφή, [13] :

$$\dot{q}_x'' = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

όπου \dot{q}_x'' (W/m^2) είναι η πυκνότητα ροής θερμότητας ή πυκνότητα θερμοροής (heat flux). Ο συντελεστής k στην εξίσωση Fourier είναι χαρακτηριστικό μέγεθος του κάθε υλικού και ονομάζεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Η μονάδα μέτρησης του στο διεθνές σύστημα μονάδων είναι $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από τη θερμοκρασία μέσω της σχέσης :

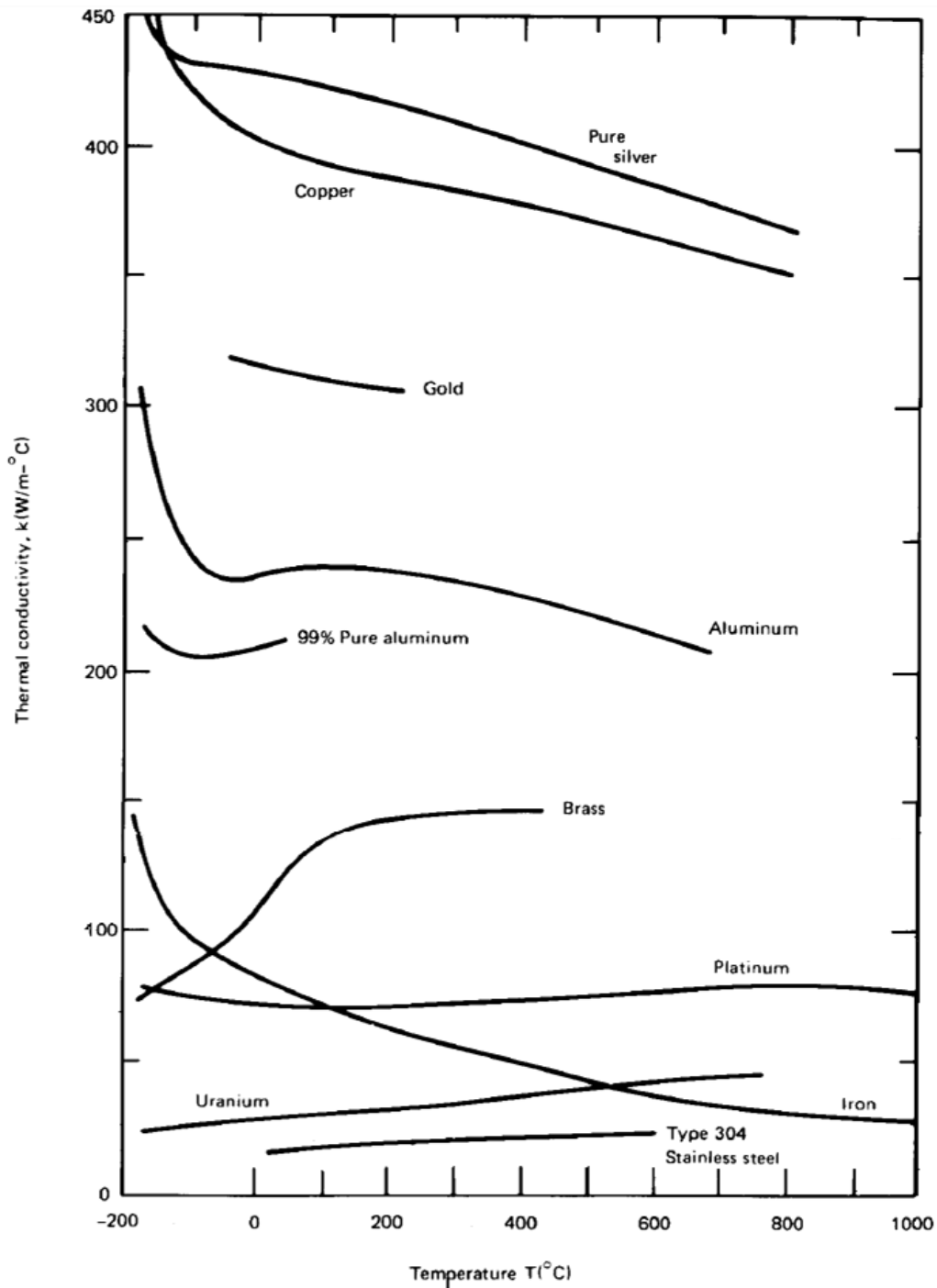
$$k = k_o \cdot (1 + b \cdot \Delta T) \quad (2.2)$$

όπου k_o : η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στη θερμοκρασία αναφοράς T_o

b : σταθερά που η τιμή της προσδιορίζεται πειραματικά

ΔT : η απόκλιση της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία αναφοράς ($T - T_o$)

Στο Σχ. 2.3 απεικονίζεται η σχέση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία για διάφορα μεταλλικά στερεά.



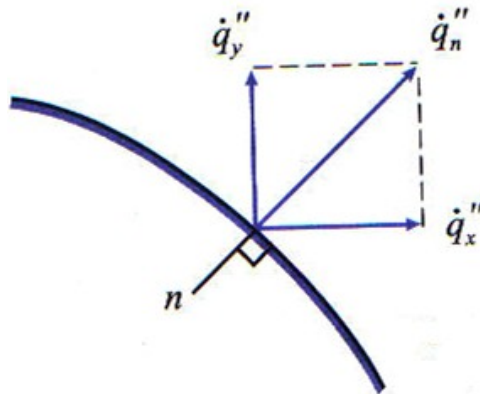
Σχ. 2.3 Μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία για διάφορα μεταλλικά στερεά, [14].

2.2.1 Αγωγή στη μόνιμη κατάσταση και σε μία διάσταση

Στη μόνιμη κατάσταση η θερμοκρασία ενός συστήματος δεν μεταβάλλεται με το χρόνο ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$). Θεωρώντας ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας δεν αλλάζει με την θερμοκρασία θα ισχύει ότι $-\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_1 - T_2}{L}$ όπου L το πάχος του τοιχώματος στο εσωτερικό του οποίου πραγματοποιείται η μεταφορά θερμότητας και T_1, T_2 οι θερμοκρασίες των δύο επιφανειών του τοιχώματος (Σχ. 2.2). Από τη σχέση (2.1) προκύπτει ότι $\dot{q}_x'' = k \cdot \frac{T_1 - T_2}{L}$ και αν θεωρήσουμε ότι η επιφάνεια του τοιχώματος είναι A τότε ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι $\dot{q}_x = \dot{q}_x'' \cdot A = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{L}$.

2.2.2 Αγωγή στη μόνιμη κατάσταση και σε τρεις διαστάσεις

Στην πραγματικότητα η πυκνότητα θερμοροής είναι ένα διάνυσμα με συνιστώσες και στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του χώρου που έχουν ίδια θερμοκρασία σχηματίζει μια ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια. Είναι αδύνατο δύο ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες να τέμνονται γιατί σε αυτή την περίπτωση το σημείο τομής θα έπρεπε να έχει δύο διαφορετικές θερμοκρασίες.



Σχ. 2.4 Διάνυσμα πυκνότητας θερμοροής κάθετο σε ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια, [13].

Υποθέτοντας ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι ανεξάρτητος της θέσης η εξίσωση Fourier λαμβάνει την εξής μορφή, [13] :

$$\dot{q}_n'' = -k \cdot \nabla T \quad (2.3)$$

όπου \dot{q}_n'' είναι το διάνυσμα της πυκνότητας θερμοροής με διεύθυνση κάθετη στην ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια και ∇T ή $\text{grad}T$ είναι η κλίση της θερμοκρασίας στο χώρο. Η θερμοκρασία $T = T(x,y,z,t)$ σε αυτή την περίπτωση εξαρτάται τόσο από τις συντεταγμένες του χώρου όσο και από τον χρόνο.

Η εξίσωση (2.3) στη μόνιμη κατάσταση λαμβάνει την ακόλουθη μορφή :

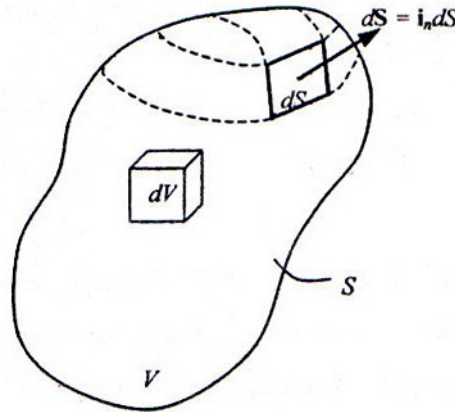
$$\dot{\mathbf{q}}_{\boldsymbol{\eta}}'' = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\eta}} \quad (2.4)$$

όπου $\boldsymbol{\eta}$ είναι το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στην ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια.

Η εξίσωση (2.4) σε καρτεσιανές συντεταγμένες μπορεί να γραφεί ως εξής :

$$\dot{\mathbf{q}}_{\boldsymbol{\eta}}'' = -k \cdot \left[\hat{x} \frac{\partial T}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial T}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (2.5)$$

όπου \hat{x} , \hat{y} και \hat{z} τα μοναδιαία διανύσματα στις διευθύνσεις x, y και z.



Σχ. 2.5 Στερεό όγκου V στο εσωτερικό του οποίου υπάρχουν πηγές θερμότητας

Υποθέτοντας ότι στο εσωτερικό του στερεού του Σχ. 2.5 υπάρχουν πηγές θερμότητας με συνολική ισχύ \dot{Q}_{Π} και η κινητική ενέργεια των μορίων του είναι E μπορούμε με χρήση της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας να υπολογίσουμε την αναλυτική μορφή της εξίσωσης θερμικής αγωγής για τρισδιάστατο πρόβλημα.

Από την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας προκύπτει η σχέση :

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \dot{Q}_{\Pi} - \dot{Q}_{\varepsilon\xi} \quad (2.6)$$

όπου $\dot{Q}_{\varepsilon\xi}$ είναι ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας που εξέρχεται από τον όγκο V. Από τη σχέση (2.6) προκύπτει ότι ένα μέρος της θερμικής ισχύος που παράγουν οι πηγές θερμότητας χρησιμοποιείται για την αύξηση της κινητικής ενέργειας των μορίων του στερεού και το υπόλοιπο μέρος εξέρχεται από τον όγκο V.

Ο ρυθμός μεταφοράς της εξερχόμενης θερμότητας υπολογίζεται με χρήση της σχέσης (2.3) :

$$\dot{Q}_{\varepsilon\xi} = \int_S (-k \cdot \nabla T) \cdot (\hat{\boldsymbol{\eta}} \cdot d\mathbf{S}) \quad (2.7)$$

Το παραπάνω ολοκλήρωμα μετατρέπεται από επιφανειακό σε ολοκλήρωμα χώρου με χρήση του θεωρήματος Gauss :

$$\dot{Q}_{\varepsilon\xi} = - \int_V \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) dV \quad (2.8)$$

Συμβολίζοντας με \dot{q} την συνολική ισχύ των πηγών θερμότητας ανά μονάδα όγκου του στερεού (W/m^3) προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$\dot{Q}_{\Pi} = \int_V \dot{q} \, dV \quad (2.9)$$

Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας των μορίων του στερεού δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \int_V \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \, dV \quad (2.10)$$

όπου ρ (kg/m^3) είναι η πυκνότητα του στερεού και c_p ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$) η ειδική θερμοχωρητικότητα του στερεού.

Αντικαθιστώντας στη σχέση (2.6) τις σχέσεις (2.8), (2.9) και (2.10) προκύπτει η εξίσωση θερμικής αγωγής για τρισδιάστατο πρόβλημα :

$$\int_V \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \, dV = \int_V \dot{q} \, dV + \int_V \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) \, dV \leftrightarrow$$

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{q} + \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) \quad (2.11)$$

Στην περίπτωση που ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι ανεξάρτητος των συντεταγμένων θέσης η εξίσωση (2.11) μπορεί να γραφεί ως εξής :

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{q} + k \cdot \nabla^2 T \leftrightarrow \nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho \cdot c_p}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.12)$$

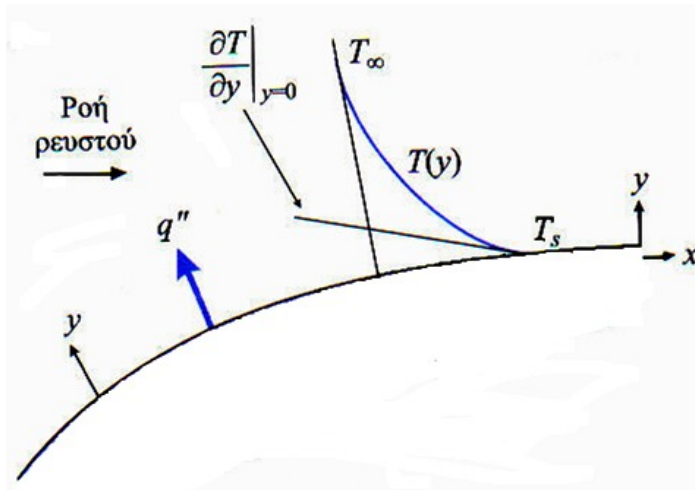
2.3 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Η μεταφορά θερμότητας μέσω του μηχανισμού συναγωγής παρατηρείται σε κινούμενα ρευστά. Η κυκλοφορία του ρευστού διακρίνεται σε, [13] :

•Εξαναγκασμένη κυκλοφορία: Σε αυτή την περίπτωση η ροή του ρευστού προκαλείται από εξωτερικούς παράγοντες (αντλίες, ανεμιστήρες).

•Φυσική κυκλοφορία: Σε αυτή την περίπτωση η θέρμανση του ρευστού προκαλεί τη διαστολή του. Έτσι δημιουργείται διαφορά πυκνότητας μεταξύ περιοχών με διαφορετική θερμοκρασία με αποτέλεσμα την κίνηση του ρευστού λόγω εμφάνισης δυνάμεων άνωσης.

•Συνδυασμένη κυκλοφορία: Παρατηρείται όταν οι δύο προαναφερθείσες μορφές κυκλοφορίας συνυπάρχουν.



Σχ. 2.6 Συναγωγή θερμότητας μεταξύ επιφάνειας – ρευστού, [13].

Η μαθηματική περιγραφή του φαινομένου της συναγωγής δίνεται από τον νόμο ψύξης του Newton, [13] :

$$\dot{q}'' = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.13)$$

όπου \dot{q}'' είναι η πυκνότητα της ροής θερμότητας που μεταδίδεται με τον μηχανισμό της συναγωγής, T_s είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με το ρευστό και T_∞ είναι η θερμοκρασία του ρευστού. Ο συντελεστής h ονομάζεται συντελεστής συναγωγής και η μονάδα μέτρησης του στο διεθνές σύστημα μονάδων είναι $\frac{W}{m^2 \cdot K}$. Η τιμή του συντελεστή συναγωγής εξαρτάται από την ταχύτητα και τη γεωμετρία της ροής και από τις ιδιότητες του ρευστού όπως αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα. Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται τιμές του συντελεστή συναγωγής για τη ροή αέριων και υγρών ρευστών.

Πεδίο ροής	$h(W/m^2 \cdot K)$
Φυσική κυκλοφορία - Αέριο	2 - 25
Φυσική κυκλοφορία - Υγρό	10 - 1000
Εξαναγκασμένη κυκλοφορία - Αέριο	25 - 250
Εξαναγκασμένη κυκλοφορία - Υγρό	50 - 20000
Βρασμός και συμπύκνωση	2500 - 100000

Πίνακας 2.1 Τυπικές τιμές του συντελεστή συναγωγής, [13].

2.3.1 Συναγωγή σε τρεις διαστάσεις

Θεωρώντας ότι δυο υλικά (ένα στερεό και ένα ρευστό) έρχονται σε επαφή μέσω μιας επιφάνειας S μπορούμε με χρήση της αρχής διατήρησης της ενέργειας να υπολογίσουμε την σχέση που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού συναγωγής.

Έστω ότι τα μόρια του υλικού 1 (στερεό) έχουν εσωτερική ενέργεια E_1 και τα μόρια του υλικού 2 (ρευστό) έχουν εσωτερική ενέργεια E_2 . Υποθέτουμε ότι στο εσωτερικό του στερεού υπάρχουν πηγές θερμότητας συνολικής ισχύος Q_{II} .

Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας στο στερεό προκύπτει η εξής σχέση :

$$\frac{\partial E_1}{\partial t} = \dot{Q}_{\Pi} - \dot{Q}_{\varepsilon\xi}. \quad (2.14)$$

όπου $\dot{Q}_{\varepsilon\xi}$, ο ρυθμός μεταφοράς της εξερχόμενης θερμότητας από το στερεό προς το ρευστό μέσω της επιφάνειας επαφής S.

Συμβολίζοντας με \dot{q} (W/m^3) την συνολική ισχύ των πηγών θερμότητας ανά μονάδα όγκου του στερεού η ισχύς των πηγών θερμότητας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$\dot{Q}_{\Pi} = \int_V \dot{q} dV \quad (2.15)$$

Ο ρυθμός μεταφοράς της εξερχόμενης θερμότητας από το στερεό προς το ρευστό δίνεται από τον νόμο ψύξης του Newton :

$$\dot{Q}_{\varepsilon\xi} = \int_S \dot{q}'' \cdot \hat{\eta} \cdot dS \leftrightarrow \dot{Q}_{\varepsilon\xi} = \int_S h \cdot (T_S(x, y, z, t) - T_{\rho\text{ευστου},S}(x, y, z, t)) dS \quad (2.16)$$

όπου $T_S(x, y, z, t)$ και $T_{\rho\text{ευστου},S}(x, y, z, t)$ οι θερμοκρασίες του στερεού και του ρευστού στην επιφάνεια επαφής αντίστοιχα.

Συμβολίζοντας με ρ_1 (kg/m^3) την πυκνότητα του στερεού και με $c_{p,1}$ ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$) την ειδική θερμοχωρητικότητα του μπορούμε να υπολογίσουμε την μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας των μορίων του στερεού :

$$\frac{\partial E_1}{\partial t} = \int_V \rho_1 \cdot c_{p,1} \cdot \frac{\partial T_1(x,y,z,t)}{\partial t} dV \quad (2.17)$$

Επομένως αντικαθιστώντας στον τύπο (2.14) τις σχέσεις (2.15), (2.16) και (2.17) προκύπτει για το στερεό ότι :

$$\int_V \rho_1 \cdot c_{p,1} \cdot \frac{\partial T_1(x,y,z,t)}{\partial t} dV = \int_V \dot{q} dV - \int_S h \cdot (T_S(x, y, z, t) - T_{\rho\text{ευστου},S}(x, y, z, t)) dS \quad (2.18)$$

Με παρόμοιο τρόπο θα χρησιμοποιήσουμε την αρχή διατήρησης ενέργειας για το υλικό 2 (ρευστό) για να περιγράψουμε την μεταφορά θερμότητας στον όγκο του. Το ενεργειακό ισοζύγιο για το ρευστό θα έχει την παρακάτω μορφή :

$$\frac{\partial E_2}{\partial t} = \dot{Q}_{\text{εισ.}} - \dot{Q}_{\varepsilon\xi, \rho\text{ευστου}} \quad (2.19)$$

όπου E_2 είναι η εσωτερική ενέργεια των μορίων του ρευστού, $\dot{Q}_{\text{εισ.}}$ η εισερχόμενη ισχύς στο ρευστό από το στερεό και $\dot{Q}_{\varepsilon\xi, \rho\text{ευστου}}$ η ισχύς που μεταφέρεται από το ρευστό προς το περιβάλλον.

Η εισερχόμενη ισχύς στο ρευστό από το στερεό $\dot{Q}_{\text{εισ.}}$ είναι ίση με την εξερχόμενη ισχύ από το στερεό $\dot{Q}_{\varepsilon\xi}$.

$$\dot{Q}_{\text{εισ.}} = \dot{Q}_{\text{εξ.}} = \int_S h \cdot (T_S(x, y, z, t) - T_{\rho\text{ρευστού},S}(x, y, z, t)) dS \quad (2.20)$$

Συμβολίζοντας με ρ_2 (kg/m³) την πυκνότητα του ρευστού και με $c_{\rho,2}$ (J/kg·K) την ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού μπορούμε να υπολογίσουμε την μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας των μορίων του από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\partial E_2}{\partial t} = \int_V \rho_2 \cdot c_{\rho,2} \cdot \frac{\partial T_{\rho\text{ρευστού}}(x,y,z,t)}{\partial t} dV \quad (2.21)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.20) και (2.21) στη σχέση (2.19) προκύπτει η παρακάτω εξίσωση που εκφράζει το ενεργειακό ισοζύγιο για το ρευστό :

$$\int_V \rho_2 \cdot c_{\rho,2} \cdot \frac{\partial T_{\rho\text{ρευστού}}(x,y,z,t)}{\partial t} dV = \int_S h \cdot (T_S(x, y, z, t) - T_{\rho\text{ρευστού},S}(x, y, z, t)) dS - \dot{Q}_{\text{εξ.},\rho\text{ρευστού}} \quad (2.22)$$

Στην περίπτωση που στο πρόβλημα υπάρχει συμμετρία οι θερμοκρασίες ρευστού και στερεού στην επιφάνεια επαφής τους δεν εξαρτώνται από τις συντεταγμένες θέσης. Επίσης αν ο όγκος του στερεού V_s θεωρηθεί αρκετά μικρός μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία του στερεού εξαρτάται μόνο από τον χρόνο. Εφόσον ισχύουν οι παραπάνω παραδοχές η σχέση (2.18) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\rho_1 \cdot c_{\rho,1} \cdot \frac{dT_1(t)}{dt} \cdot V_s = \dot{Q}_{\Pi} - S_{\text{επιφάνειας}} \cdot h \cdot [T_S(t) - T_{\rho\text{ρευστού},S}(t)] \quad (2.23)$$

2.4 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Ο τρίτος τρόπος μεταφοράς θερμότητας αναφέρεται στην ακτινοβολία την οποία εκπέμπουν και απορροφούν όλα τα στερεά σώματα ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται.

Ο νόμος των Stefan – Boltzmann μας δίνει τη μέγιστη θερμική ισχύ ανά μονάδα επιφανείας που είναι δυνατόν να ακτινοβολεί ένα σώμα, [13] :

$$\dot{q}_{\mu}'' = \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.24)$$

όπου T_s (K) είναι η θερμοκρασία του στερεού και σ είναι η σταθερά των Stefan – Boltzmann ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$). Η μέγιστη θερμική ισχύς που εκπέμπει ένα σώμα επιφανείας A θα δίνεται από την σχέση που ακολουθεί :

$$\dot{q}_{\mu} = A \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.25)$$

Ένα σώμα που εκπέμπει τη μέγιστη θερμική ισχύ ονομάζεται μέλαν. Στην πραγματικότητα τα περισσότερα σώματα εκπέμπουν θερμική ισχύ που είναι μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή και δίνεται από τον παρακάτω τύπο, [13] :

$$\dot{q}'' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.26)$$

όπου ε είναι ο συντελεστής εκπομπής που λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$ και εκφράζει την ακτινοβολία που εκπέμπει το σώμα σαν ποσοστό της ακτινοβολίας που εκπέμπει το μέλαν σώμα ($\varepsilon = \frac{\dot{q}''}{\dot{q}''_{\mu}}$).

Ένα μέρος της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα σώμα ανακλάται στην επιφάνεια του και το υπόλοιπο απορροφάται από το σώμα. Η θερμική ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας που απορροφάται από το στερεό δίνεται από τη σχέση :

$$\dot{q}''_{\text{απορρ.}} = \alpha \cdot \dot{q}''_{\text{προσπ.}} \quad (2.27)$$

όπου α είναι ο συντελεστής απορρόφησης που λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$ και $\dot{q}''_{\text{προσπ.}}$ η προσπίπτουσα θερμική ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας του σώματος.

Στην περίπτωση της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία μας ενδιαφέρει περισσότερο ο ρυθμός ανταλλαγής θερμότητας δηλαδή η διαφορά μεταξύ της θερμικής ισχύος που εκπέμπει ένα σώμα και της θερμικής ισχύος που απορροφά, [10].

2.5 Μετάδοση θερμότητας στις ηλεκτρικές μηχανές

Η διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς μιας ηλεκτρικής μηχανής αποσκοπεί στη γνώση της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο της μηχανής. Στις ηλεκτρικές μηχανές η αναπτυσσόμενη θερμότητα προκαλείται από τις απώλειες κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Οι κυριότερες κατηγορίες απωλειών είναι οι ακόλουθες:

• Απώλειες χαλκού των κυκλωμάτων στάτη και δρομέα:

Σε μια τριφασική μηχανή εναλλασσομένου ρεύματος οι απώλειες του κυκλώματος του στάτη είναι :

$$P_s = 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s \quad (2.28)$$

όπου I_s είναι το ρεύμα ανά φάση του κυκλώματος του στάτη και R_s η αντίσταση ανά φάση.

ενώ οι απώλειες του κυκλώματος του δρομέα δίνονται από την ακόλουθη σχέση :

$$P_R = I_F^2 \cdot R_F \quad (2.29)$$

όπου I_F είναι το ρεύμα διέγερσης και R_F η αντίσταση του τυλίγματος του δρομέα.

• Απώλειες πυρήνα: Διακρίνονται σε απώλειες υστέρησης και απώλειες δινορρευμάτων. Εξαρτώνται από τη μαγνητική ροή στο διάκενο ενώ είναι ανεξάρτητες από τη ροπή του φορτίου.

• Μηχανικές απώλειες: Οι μηχανικές απώλειες διακρίνονται σε απώλειες τριβών λόγω της περιστροφής του άξονα και σε απώλειες εξαερισμού λόγω της τριβής μεταξύ των κινούμενων μερών της μηχανής και του αέρα που υπάρχει στο διάκενο.

•Κατανεμημένες απώλειες: Αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου. Ο προσδιορισμός της τιμής τους είναι αρκετά δύσκολος. Στις περισσότερες εφαρμογές θεωρούνται ίσες με το 1% της ισχύος πλήρους φορτίου.

Από τις παραπάνω κατηγορίες απωλειών θεωρούμε σαν κυριότερες πηγές θερμότητας τις απώλειες χαλκού και τις απώλειες πυρήνα.

2.5.1 Θερμοκρασιακοί περιορισμοί στη λειτουργία 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, International Electrotechnical Commission). 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.

Κλάση μόνωσης	E	B	F	H
Μέγιστη αύξηση θερμοκρασίας	75°C	80°C	100°C	125°C
Μέση θερμοκρασία μόνωσης	115°C	120°C	140°C	165°C
Οριακή θερμοκρασία θερμότερου σημείου	120°C	130°C	155°C	180°C

Πίνακας 2.2 Αντοχή κλάσεων μόνωσης, [15].

Η λειτουργία της μηχανής σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τις μέγιστες επιτρεπτές μειώνει τη διάρκεια ζωής της μόνωσης. 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. Συνήθως επιλέγεται μόνωση κλάσης Η 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.

2.5.2 Προσδιορισμός θερμικής αντίστασης

Για την θερμική ανάλυση μιας ηλεκτρικής μηχανής είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι θερμικές αντιστάσεις όλων των μερών της. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ δυο σημείων προκαλεί τη ροή ρεύματος. Κατ' αναλογία η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σημείων προκαλεί τη ροή θερμότητας και επομένως η θερμική αντίσταση ισούται με το πηλίκο της διαφοράς θερμοκρασίας προς τη ροή θερμότητας.

Αν η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με αγωγή η θερμική αντίσταση υπολογίζεται με χρήση της σχέσης (2.1) :

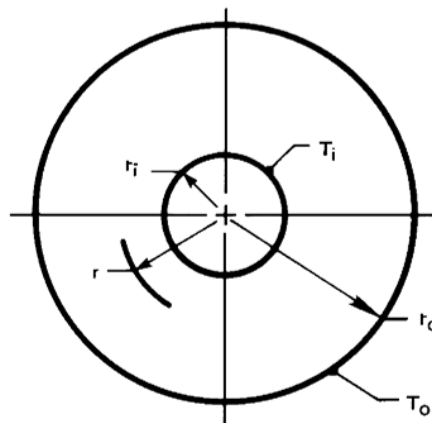
$$R_{αγ.} = \frac{T_1 - T_2}{\dot{q}_x} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (\text{K/W}) \quad (2.30)$$

Αν η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με συναγωγή η θερμική αντίσταση υπολογίζεται με χρήση της σχέσης (2.13) :

$$R_{συν.} = \frac{T_s - T_\infty}{\dot{q}_x} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (\text{K/W}) \quad (2.31)$$

2.5.3 Κατανομή θερμοκρασίας σε κυλινδρική διάταξη

Τα περισσότερα μέρη μιας ηλεκτρικής μηχανής έχουν κυλινδρική γεωμετρία, όποτε θα είναι χρήσιμο σε αυτό το σημείο να υπολογίσουμε την κατανομή της θερμοκρασίας σε μια κυλινδρική διάταξη.



Σχ. 2.7 Κυλινδρικός δακτύλιος

Ας υποθέσουμε ότι η διάταξη που μας ενδιαφέρει έχει τη μορφή του Σχ. 2.7 με εσωτερική ακτίνα r_i και εξωτερική ακτίνα r_o και θέλουμε να υπολογίσουμε την θερμοκρασιακή κατανομή και τη ροή θερμότητας που μεταφέρεται με αγωγή στο εσωτερικό του κυλινδρικού δακτυλίου. Η εξίσωση θερμικής αγωγής (2.12) σε κυλινδρικές συντεταγμένες λαμβάνει την παρακάτω μορφή :

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.32)$$

όπου a είναι ο συντελεστής θερμικής διάχυσης. Η τιμή του προκύπτει από τη σχέση $a = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$ και η μονάδα μέτρησης του στο διεθνές σύστημα μονάδων είναι m^2/s .

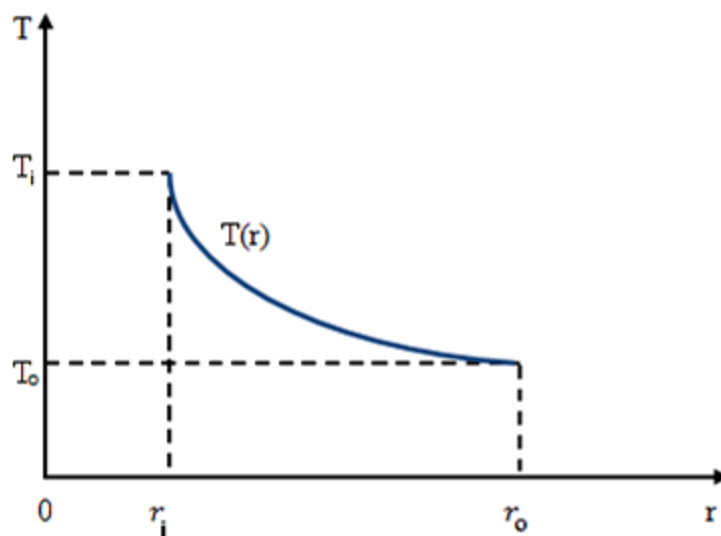
Θεωρούμε ότι η θερμότητα μεταδίδεται ακτινικά και επομένως η θερμοκρασία εξαρτάται μόνο από την ακτίνα ($\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$), δεν υπάρχουν πηγές θερμότητας ($q = 0$) και η ανάλυση μας αφορά την μόνιμη κατάσταση ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$). Έχοντας κάνει τις παραπάνω παραδοχές η σχέση (2.32) παίρνει την ακόλουθη μορφή :

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \leftrightarrow T(r) = c_1 \cdot \ln(r) + c_2 \quad (2.33)$$

Υποθέτοντας ότι οι θερμοκρασίες στις επιφάνειες ακτίνας r_i και r_o είναι T_i και T_o αντίστοιχα, μπορούμε να υπολογίσουμε τις σταθερές c_1 και c_2 της (2.33). Αντικαθιστώντας τις τιμές των δύο σταθερών στη σχέση (2.33) η κατανομή της θερμοκρασίας στον κυλινδρικό δακτύλιο θα δίνεται από την (2.34) :

$$T(r) = T_i + \frac{T_i - T_o}{\ln\left(\frac{r_i}{r_o}\right)} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_i}\right) \quad (2.34)$$

Η κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κυλινδρικού δακτυλίου θα έχει τη μορφή της καμπύλης του Σχ. 2.8.



Σχ. 2.8 Κατανομή θερμοκρασίας στο εσωτερικό κυλινδρικού δακτυλίου

Έχοντας υπολογίσει την κατανομή της θερμοκρασίας στον δακτύλιο μπορούμε με χρήση της (2.1) για κυλινδρικές συντεταγμένες να υπολογίσουμε τον ρυθμό μεταφοράς της θερμότητας στο εσωτερικό του κυλινδρικού δακτυλίου :

$$\dot{Q} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dr} = -k \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot L) \cdot \frac{dT}{dr} \quad (2.35)$$

όπου A είναι το εμβαδό της παράπλευρης επιφάνειας με ακτίνα r και L το μήκος του κυλίνδρου.

Αντικαθιστώντας την (2.34) στη (2.35) προκύπτει η ακόλουθη σχέση :

$$\dot{Q} = -2 \cdot \pi \cdot k \cdot L \cdot \frac{T_i - T_o}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (2.36)$$

Μπορούμε επίσης να υπολογίσουμε με χρήση της (2.36) τη θερμική αντίσταση για μετάδοση θερμότητας με αγωγή :

$$R_{αγ.} = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \quad (2.37)$$

2.5.4 Ψύξη σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών

Η μέθοδος ψύξης για την παραγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται σε μια ηλεκτρική μηχανή εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ της μηχανής. Καθώς αυξάνεται το μέγεθος των μηχανών το πρόβλημα της ψύξης γίνεται πιο έντονο, καθώς το εμβαδό της επιφάνειας από την οποία πρέπει να απαχθεί η θερμότητα αυξάνεται, κατά προσέγγιση, με το τετράγωνο των διαστάσεων της μηχανής ενώ η θερμότητα που αναπτύσσεται από τις απώλειες αυξάνεται, κατά προσέγγιση, με τον κύβο των διαστάσεων.

Ηλεκτρικές μηχανές ονομαστικής ισχύος μέχρι 5000 kVA ψύχονται με αέρα μέσω ενός αρκετά πολύπλοκου συστήματος αγωγών. Ο αέρας διοχετεύεται με ανεμιστήρες τοποθετημένους επί του άξονα του δρομέα ή με φυσητήρα που κινείται χωριστά. Για ηλεκτρικές μηχανές ονομαστικής ισχύος μεγαλύτερης των 5000 kVA η ψύξη επιτυγχάνεται με κλειστό κύκλωμα αερισμού. Ο θερμός αέρας αφού διέλθει μέσα από τη μηχανή διοχετεύεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας που ψύχεται με νερό και στη συνέχεια ανακυκλοφορείται στο κλειστό σύστημα, [7].

Μια διαφορετική μέθοδος ψύξης των ηλεκτρικών μηχανών βασίζεται στη χρήση υδρογόνου ως μέσου ψύξης. Το υδρογόνο έχει τις ακόλουθες ιδιότητες που το καθιστούν κατάλληλο για το σκοπό αυτό, [7]:

1. Η πυκνότητα του είναι ίση με 0.07 της πυκνότητας του αέρα σε συνθήκες ίδιας θερμοκρασίας και πίεσης. Επομένως με τη χρήση υδρογόνου μειώνονται οι απώλειες ανεμισμού και αερισμού.

2. Η ειδική θερμότητα του υδρογόνου με βάση ίσο βάρος είναι 14.5 φορές αυτής του αέρα. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια θερμοκρασία και πίεση τόσο το υδρογόνο όσο και ο αέρας είναι εξίσου αποτελεσματικά στην αποθήκευση θερμότητας ανά μονάδα όγκου. Ωστόσο η μεταφορά θερμότητας με εξαναγκασμένη κυκλοφορία μεταξύ των θερμών μερών της μηχανής και του αερίου ψύξεως είναι σε σημαντικό βαθμό μεγαλύτερη με το υδρογόνο παρά με τον αέρα.

3. Με τη χρήση υδρογόνου η διάρκεια ζωής των μονώσεων αυξάνεται και το κόστος συντήρησης μειώνεται λόγω της απουσίας ακαθαρσιών, υγρασίας και οξυγόνου.

4. Η πιθανότητα ανάφλεξης είναι πολύ μικρή. Ένα μίγμα υδρογόνου – αέρα δεν εκρήγνυται αν η περιεκτικότητά του σε υδρογόνο υπερβαίνει το 70 %.

Τα οφέλη από τις δύο πρώτες ιδιότητες του υδρογόνου είναι ότι η θερμότητα που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής ελαττώνεται ενώ η ευκολία με την οποία αυτή μπορεί να απαχθεί βελτιώνεται, [7].

Θα πρέπει να τονιστεί ότι στη περίπτωση ψύξης με εναλλάκτη θερμότητας που ψύχεται με νερό θα πρέπει η μηχανή και ο εναλλάκτης να εγκλεισθούν αεροστεγώς σε περίβλημα.

Στη συνήθη μέθοδο ψύξης των στροβιλογεννητριών η θερμότητα που αναπτύσσεται στο τύλιγμα του δρομέα μεταφέρεται μέσω του μονωτικού περιβλήματος στον πυρήνα του δρομέα. Η θερμότητα αυτή απάγεται με αξονικούς διαύλους στους οδόντες του δρομέα στους οποίους ρέει το αέριο ψύξης. Η ονομαστική ισχύς των γεννητριών που ψύχονται με υδρογόνο δεν ξεπερνά τα 250 MVA, [7].

2.6 Μέθοδοι υπολογισμού θερμικής κατανομής ηλεκτρικών μηχανών

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

1. Εφαρμογή και επίλυση των εξισώσεων αγωγής και συναγωγής. Η αξιοπιστία των λύσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος.
2. Χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων (fem) 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.
3. Σχεδίαση ισοδύναμου μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων. Χρησιμοποιείται αντί της δεύτερης μεθόδου όταν μας ενδιαφέρει εκτός από την τελική κατάσταση του θερμικού μοντέλου και η μεταβατική του συμπεριφορά.

2.6.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων μας δίνει τη δυνατότητα της δισδιάστατης θερμικής ανάλυσης μιας ηλεκτρικής μηχανής. Η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογίζει

μόνο την τελική θερμοκρασία κάθε σημείου της μηχανής χωρίς να μας δίνει πληροφορίες για τη μεταβατική συμπεριφορά του θερμικού μοντέλου.

Για την πραγματοποίηση της θερμικής ανάλυσης μιας ηλεκτρικής μηχανής δίνονται, στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, σαν παράμετροι εισόδου οι πηγές θερμότητας (W/m^3), ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας ($\frac{J}{K \cdot m^3}$) και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($\frac{W}{K \cdot m}$) των υλικών από τα οποία αποτελείται η μηχανή.

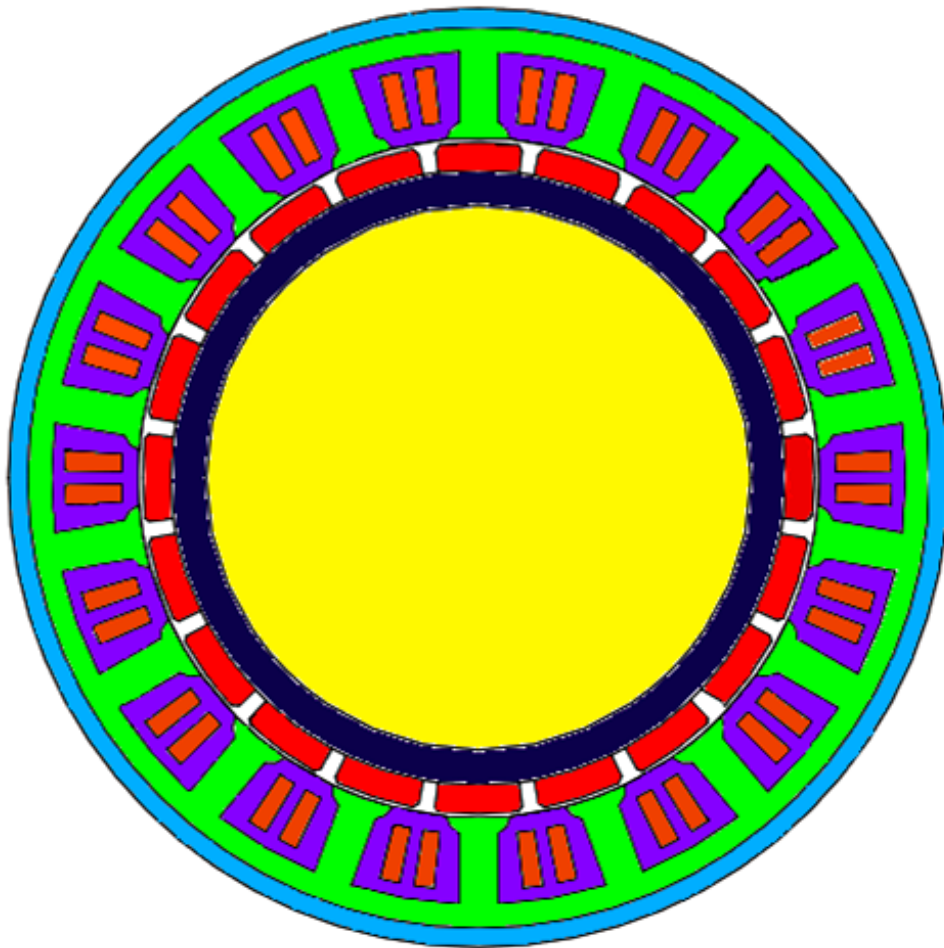
Προκειμένου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα αντίστοιχα πειραματικά θα πρέπει να ορίσουμε στο θερμικό μοντέλο τις συνθήκες στα όρια των διαφορετικών περιοχών της μηχανής οι οποίες καθορίζουν τη μετάδοση θερμότητας μεταξύ των περιοχών. Οι οριακές συνθήκες που μπορούμε να ορίσουμε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων είναι οι ακόλουθες:

1. Συνθήκη Dirichlet: Χρησιμοποιείται σε όρια του μοντέλου όπου η θερμοκρασία είναι σταθερή.
2. Συνθήκη Neumann: Χρησιμοποιείται σε όρια όπου η πυκνότητα θερμοροής (W/m^2) είναι σταθερή.
3. Συνθήκη συναγωγής: Ορίζεται στην επιφάνεια επαφής ενός ρευστού με ένα στερεό μέσω του συντελεστή συναγωγής ο οποίος καθορίζει τη θερμότητα που μεταδίδεται μεταξύ των δύο υλικών.

Εφόσον έχουμε ορίσει τις ιδιότητες των υλικών της μηχανής και τις οριακές συνθήκες το πρόγραμμα υπολογίζει τη θερμική κατανομή στο εσωτερικό της μηχανής. Εκτός από τη τελική θερμοκρασία το πρόγραμμα μας δίνει πληροφορίες για τη πυκνότητα της θερμοροής και τις ισοθερμικές καμπύλες του μοντέλου.

Στην παρούσα εργασία για τη θερμική ανάλυση του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών στη μόνιμη κατάσταση θα χρησιμοποιήσουμε τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Για την ανάλυση της μεταβατικής θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των θερμικών αντιστάσεων και των χωρητικότητων του κινητήρα καθώς και η σχεδίαση του ισοδύναμου θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3



*ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ*

Στο παρόν κεφάλαιο θα καταγράψουμε την θερμική συμπεριφορά του εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα το πρόγραμμα προσομοίωσης (αναφορά [1] – λογισμικό) μας δίνει τη δυνατότητα, εφόσον γνωρίζουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, να σχεδιάσουμε ένα ισοδύναμο θερμικό μοντέλο του αντιστοιχίζοντας τα θερμικά με ηλεκτρικά μεγέθη. Εκτός από τις τελικές τιμές της θερμοκρασίας το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων μας δίνει πληροφορίες για τη μεταβατική θερμική συμπεριφορά του κινητήρα. Στο τέλος της παρούσας εργασίας θα έχουμε τη δυνατότητα να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά και να διαπιστώσουμε αν η προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα με τη χρήση του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων είναι αξιόπιστη.

Το ισοδύναμο θερμικό μοντέλο του υπό εξέταση κινητήρα αποτελείται από αντιστάσεις, πυκνωτές και μία πηγή ρεύματος. Αφού υπολογίσουμε τις τιμές τους σχεδιάζουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα και καθορίζουμε το χρόνο προσομοίωσης. Το πρόγραμμα προσομοίωσης μας δίνει σαν έξοδο την απεικόνιση της χρονικής μεταβολής της θερμοκρασίας διαφόρων περιοχών του κινητήρα.

3.1 Μέθοδος υπολογισμού θερμικών αντιστάσεων

Για τη σχεδίαση του μοντέλου είναι απαραίτητη η αντιστοίχιση των θερμικών μεγεθών με τα ηλεκτρικά. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων προκαλεί τη ροή ρεύματος. Κατ' αντιστοιχία η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σημείων προκαλεί τη ροή θερμότητας. Επομένως η ισοδυναμία ηλεκτρικών – θερμικών μεγεθών που προκύπτει είναι η ακόλουθη:

$$\Delta V(V) \leftrightarrow \Delta T(K) \quad \text{και} \quad I(A) \leftrightarrow \dot{Q}(W)$$

Η ηλεκτρική αντίσταση είναι το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού (ΔV) προς το ρεύμα (I). Λαμβάνοντας υπόψη τις δύο προαναφερθείσες ισοδυναμίες μπορούμε να ορίσουμε τη θερμική αντίσταση σαν το πηλίκο της διαφοράς θερμοκρασίας (ΔT) προς τη ροή θερμότητας (\dot{Q}). Η σχέση υπολογισμού της τιμής της θερμικής αντίστασης εξαρτάται από τον τρόπο μετάδοσης της θερμότητας. Γι' αυτό τον λόγο διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις :

•Μετάδοση θερμότητας με αγωγή: Σε αυτή την περίπτωση η θερμική αντίσταση υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$R_{\text{θερμ.}} = \frac{T_1 - T_2}{\dot{Q}} = \frac{x}{A \cdot k} \left(\frac{K}{W} \right) \quad (3.1)$$

όπου θεωρούμε ότι η θερμότητα μεταδίδεται στο εσωτερικό ενός στερεού από μια περιοχή θερμοκρασίας T_1 σε μια περιοχή θερμοκρασίας T_2 , το μήκος του υλικού είναι x και η επιφάνεια μέσω της οποίας πραγματοποιείται η μετάδοση της θερμότητας είναι A .

•Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή: Η τιμή της θερμικής αντίστασης δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$R_{\text{θερμ.}} = \frac{T_s - T_{\infty}}{\dot{Q}} \quad (3.2)$$

Με χρήση της σχέσης (2.13) η (3.2) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή :

$$R_{\text{θερμ.}} = \frac{1}{A \cdot h} \left(\frac{K}{W} \right) \quad (3.3)$$

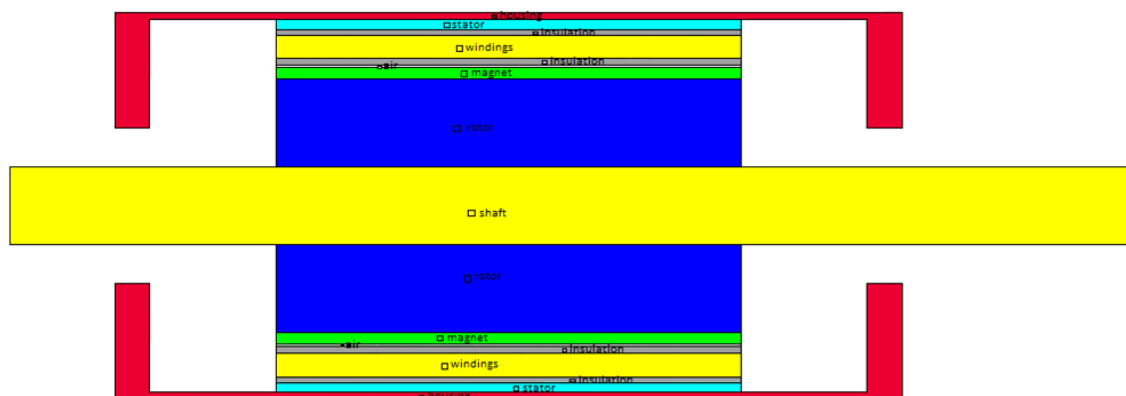
3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σύγχρονου κινητήρα

Για τη σχεδίαση του ισοδύναμου θερμικού μοντέλου του κινητήρα είναι απαραίτητη η γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του προκειμένου, με τη χρήση των σχέσεων (3.1) και (3.3), να υπολογίσουμε τις θερμικές αντιστάσεις. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα κυριότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών.

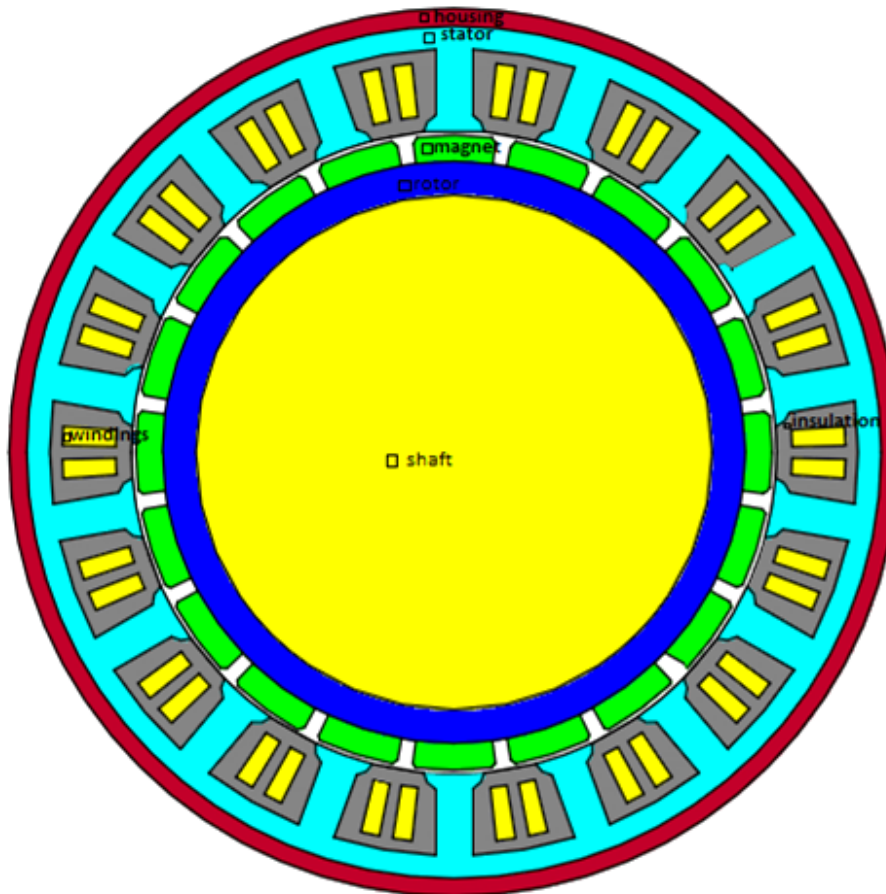
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	
Μήκος στάτη	0.12 m
Αριθμός πόλων	20
Αριθμός αυλάκων στάτη	18
Ακτίνα άξονα	0.029 m
Εξωτερική ακτίνα δρομέα	0.03575 m
Πάχος διακένου	0.0005 m
Εξωτερική ακτίνα στάτη	0.048 m
Εξωτερική ακτίνα κελύφους	0.05 m

Πίνακας 3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σύγχρονου κινητήρα

Για την καλύτερη κατανόηση της γεωμετρίας του κινητήρα ακολουθούν δύο τομές του, μία παράλληλη στον άξονα του και μία κάθετη σε αυτόν.



Σχ. 3.1 Τομή παράλληλη στον άξονα του κινητήρα



Σχ. 3.2 Τομή κάθετη στον άξονα του κινητήρα

3.3 Κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων

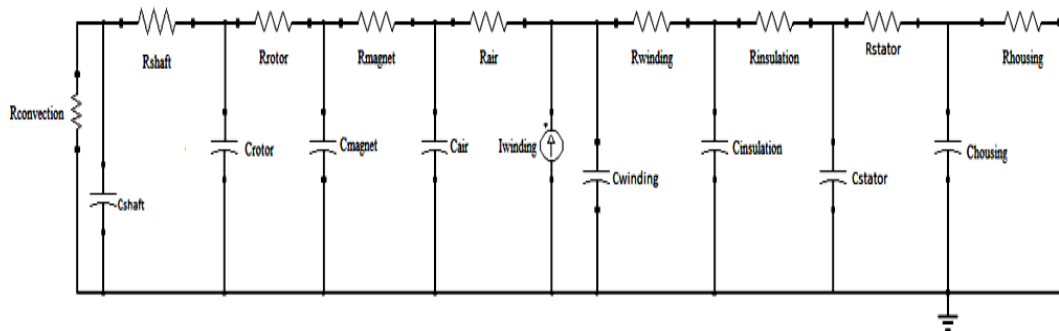
Το κύκλωμα που θα σχεδιάσουμε αποτελείται μία πηγή ρεύματος για την προσομοίωση των απωλειών θερμότητας, από αντιστάσεις για την προσομοίωση των θερμικών αντιστάσεων των διαφόρων τμημάτων του κινητήρα και από πυκνωτές, το φορτίο των οποίων αναπαριστά την ενέργεια που αποθηκεύεται στον όγκο των υλικών από τα οποία αποτελείται ο κινητήρας.

Πιο αναλυτικά, στο προτεινόμενο κύκλωμα υπάρχει μία πηγή ρεύματος που αναπαριστά τις απώλειες θερμότητας των τυλιγμάτων του στάτη. Για λόγους απλούστευσης αγνοούμε τις απώλειες του πυρήνα του στάτη και τις απώλειες του δρομέα. Διακρίνουμε δύο κατηγορίες αντιστάσεων στο κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων :

- Οι αντιστάσεις που τοποθετούνται παράλληλα στην πηγή ρεύματος. Σε αυτή την περίπτωση αναπαριστούν τις θερμικές αντιστάσεις των τμημάτων του κινητήρα όπου η μετάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται με τον μηχανισμό της συναγωγής.
- Οι αντιστάσεις που τοποθετούνται σε σειρά αναπαριστούν τις θερμικές αντιστάσεις των περιοχών του κινητήρα όπου η μετάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται με τον μηχανισμό της αγωγής.

Οι πυκνωτές του κυκλώματος αντιστοιχούν στις θερμοχωρητικότητες των υλικών της μηχανής και τοποθετούνται παράλληλα στην πηγή θερμότητας. Η θέση του κάθε στοιχείου στο κύκλωμα καθορίζεται από την γεωμετρία του κινητήρα.

Το προτεινόμενο ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα για τον εικοσαπολικό σύγχρονο κινητήρα απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα :



Σχ. 3.3 Κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων

όπου :

R_{shaft} : η θερμική αντίσταση του άξονα του κινητήρα.

R_{rotor} : η θερμική αντίσταση του πυρήνα του δρομέα.

R_{magnet} : η θερμική αντίσταση των μονίμων μαγνητών.

R_{air} : η θερμική αντίσταση του διακένου.

$R_{winding}$: η θερμική αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη.

$R_{insulation}$: η θερμική αντίσταση της μόνωσης μεταξύ τυλιγμάτων και πυρήνα στάτη.

R_{stator} : η θερμική αντίσταση του πυρήνα του στάτη.

$R_{housing}$: η θερμική αντίσταση συναγωγής του κελύφους.

$R_{convection}$: η συνολική θερμική αντίσταση συναγωγής των εσωτερικών τμημάτων του κινητήρα που έρχονται σε επαφή με τον αέρα.

$I_{winding}$: η πηγή ρεύματος που αναπαριστά τις απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων του στάτη.

C_{shaft} , C_{rotor} , C_{magnet} , C_{air} , $C_{winding}$, $C_{insulation}$, C_{stator} , $C_{housing}$: οι θερμοχωρητικότητες του άξονα, του πυρήνα του δρομέα, των μαγνητών, του διακένου, των τυλιγμάτων, της μόνωσης, του πυρήνα του στάτη και του κελύφους αντίστοιχα.

Η γείωση προσομοιώνει τον περιβάλλοντα χώρο του σύγχρονου κινητήρα. Οι τελικές τιμές των θερμοκρασιών των τμημάτων του κινητήρα καθορίζονται από τις τιμές των θερμικών αντιστάσεων του κυκλώματος. Η χρονική μεταβολή της τιμής της θερμοκρασίας εξαρτάται από τις τιμές των πυκνωτών του κυκλώματος.

3.4 Υπολογισμός θερμικών αντιστάσεων - χωρητικότητας

Για τον υπολογισμό των θερμικών αντιστάσεων του ισοδύναμου κυκλώματος θα χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις (3.1) και (3.3) ενώ οι τιμές των πυκνωτών του κυκλώματος θα υπολογιστούν με χρήση της ακόλουθης σχέσης :

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

όπου $\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$ η πυκνότητα του υλικού, $c_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού και $V \left(m^3 \right)$ ο όγκος του τμήματος του οποίου υπολογίζουμε την θερμοχωρητικότητα.

Θερμικές αντιστάσεις

- Στάτης

1. Πυρήνας του στάτη

Η αντίσταση του πυρήνα του στάτη θα υπολογιστεί με χρήση της σχέσης (3.1) $R_{\text{stator}} = \frac{x}{A \cdot k}$, όπου A το εμβαδό του πυρήνα του στάτη που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r_{\pi} \cdot L$$

όπου $r_{\pi} = 0.048 \text{ m}$ η ακτίνα ως την εξωτερική επιφάνεια του στάτη και $L = 0.12 \text{ m}$ το μήκος του στάτη. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στη σχέση υπολογισμού του εμβαδού προκύπτει ότι:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot 0.048 \cdot 0.12 \text{ m}^2 = 0.03619115 \text{ m}^2$$

Το υλικό του πυρήνα του στάτη είναι σίδηρος οπότε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του είναι $k = 80.4 \frac{W}{K \cdot m}$. Τέλος το πάχος του πυρήνα του στάτη χωρίς τα δόντια του είναι $x = 0.048 - 0.04545 \text{ m} = 0.00255 \text{ m}$. Αντικαθιστώντας τα δεδομένα που υπολογίσαμε στην (3.1) προκύπτει η τιμή της αντίστασης του στάτη:

$$R_{\text{stator}} = \frac{0.00255}{80.4 \cdot 0.03619115} \frac{K}{W} = 0.000876358 \frac{K}{W}$$

2. Δόντια του στάτη

Η αντίσταση των δοντιών του στάτη υπολογίζεται με χρήση της σχέσης (3.1). Το εμβαδό των δοντιών, θεωρώντας ότι σχηματίζουν μια κυλινδρική επιφάνεια, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot L$$

όπου $r_s = 0.03625$ m η ακτίνα της εσωτερικής επιφάνειας του στάτη και $L = 0.12$ m το μήκος του στάτη. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην σχέση του εμβαδού βρίσκουμε ότι $A = 2 \cdot \pi \cdot 0.03625 \cdot 0.12 \text{ m}^2 = 0.02733186 \text{ m}^2$. Το υλικό των δοντιών είναι ίδιο με αυτό του πυρήνα οπότε η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι $k = 80.4 \frac{W}{K \cdot m}$. Το μήκος των δοντιών του στάτη είναι $x = 0.0092$ m. Με χρήση της (3.1) υπολογίζουμε την τιμή της αντίστασης των δοντιών του στάτη

$$R_{\text{teeth}} = \frac{0.0092}{80.4 \cdot 0.02733186} \frac{K}{W} = 0.00418661 \frac{K}{W}$$

3. Μόνωση μεταξύ τυλιγμάτων και πυρήνα στάτη

Για τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης της μόνωσης θα χρησιμοποιήσουμε ξανά τη σχέση (3.1). Η επιφάνεια μέσω της οποίας πραγματοποιείται η μετάδοση της θερμότητας στο υλικό της μόνωσης θα βρεθεί από την ακόλουθη σχέση :

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r_\mu \cdot L$$

όπου $r_\mu = 0.03625$ m είναι η ακτίνα ως τη μόνωση του στάτη και $L = 0.12$ m το μήκος του στάτη. Αντικαθιστώντας τα στην παραπάνω σχέση προκύπτει ότι:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot 0.03625 \cdot 0.12 \text{ m}^2 = 0.02733186 \text{ m}^2 .$$

Το πάχος της μόνωσης από την αρχή του στάτη ως το κάτω μέρος των τυλιγμάτων λαμβάνεται ίσο με $x = 0.003658$ m ενώ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της μόνωσης (συνθετικό υλικό που αποτελείται από αέρα, βερνίκι και μαρμαρυγία ή FR4) έχει τιμή $k = 0.5 \frac{W}{K \cdot m}$. Οπότε η θερμική αντίσταση της μόνωσης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$R_{\text{insulation}} = \frac{x}{k \cdot A} = \frac{0.003658}{0.5 \cdot 0.02733186} \frac{K}{W} = 0.2677 \frac{K}{W} .$$

Στο προτεινόμενο κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων η θερμική αντίσταση της μόνωσης περιλαμβάνει και την τιμή της αντίστασης των δοντιών του στάτη. Η νέα τιμή της είναι ίση με $R_{\text{insulation}} = 0.2677 + 0.00418661 \frac{K}{W} = 0.2719 \frac{K}{W}$.

• Δρομέας

4. Άξονας

Με χρήση της (3.1) θα υπολογίσουμε την αντίσταση του άξονα του δρομέα. Η ακτίνα του άξονα είναι ίση με $r_{\text{shaft}} = 0.029$ m και το μήκος του άξονα λαμβάνεται ίσο με $L = 0.12$ m. Οπότε η επιφάνεια μέσω της οποίας μεταδίδεται η θερμότητα στο εσωτερικό του άξονα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{shaft}} \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 0.029 \cdot 0.12 \text{ m}^2 = 0.021865484 \text{ m}^2 .$$

Το πάχος του άξονα είναι ίσο με την ακτίνα του δηλαδή $x = 0.029$ m ενώ το υλικό του άξονα είναι σίδηρος οπότε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του λαμβάνεται ίσος με $k = 80.4 \frac{W}{K \cdot m}$. Η αντίσταση του άξονα προκύπτει από την σχέση (3.1) και η τιμή της είναι ίση με :

$$R_{\text{shaft}} = \frac{x}{k \cdot A} = \frac{0.029}{80.4 \cdot 0.021865484} \frac{K}{W} = 0.016496159 \frac{K}{W}$$

Στην πρώτη και στη δεύτερη σειρά των αποτελεσμάτων προσομοίωσης θα θεωρήσουμε ότι το υλικό του άξονα είναι ίδιο με το σιδηρομαγνητικό υλικό του δρομέα με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $k = 14.425 \frac{W}{K \cdot m}$ οπότε η θερμική αντίσταση του άξονα λαμβάνει την ακόλουθη τιμή:

$$R_{\text{shaft}} = \frac{0.029}{14.425 \cdot 0.021865484} \frac{K}{W} = 0.0919439 \frac{K}{W}$$

5. Πυρήνας δρομέα

Η ακτίνα του πυρήνα του δρομέα μέχρι την αρχή των μαγνητών είναι ίση με $r_{\text{rotor}} = 0.03275$ m ενώ το μήκος του δρομέα είναι ίσο με $L = 0.12$ m. Η επιφάνεια μέσω της οποίας πραγματοποιείται η μετάδοση της θερμότητας στον πυρήνα του δρομέα υπολογίζεται από την εξής σχέση :

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{rotor}} \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 0.03275 \cdot 0.12 \text{ m}^2 = 0.024692918 \text{ m}^2.$$

Το πάχος του πυρήνα του δρομέα χωρίς το τμήμα του άξονα του είναι ίσο με $x = 0.00375$ m ενώ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του είναι ίσος με $k = 80.4 \frac{W}{K \cdot m}$. Η αντίσταση του πυρήνα του δρομέα με τη χρήση της (3.1) λαμβάνει την ακόλουθη τιμή :

$$R_{\text{rotor}} = \frac{x}{k \cdot A} = \frac{0.00375}{80.4 \cdot 0.024692918} \frac{K}{W} = 0.001888873 \frac{K}{W}$$

6. Μαγνήτες

Η ακτίνα των μαγνητών είναι ίση με την εξωτερική ακτίνα του δρομέα $r_{\text{magnet}} = 0.03575$ m και το μήκος των μαγνητών είναι $L = 0.12$ m. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στη σχέση υπολογισμού της επιφάνειας προκύπτει ότι :

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{magnet}} \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 0.03575 \cdot 0.12 \text{ m}^2 = 0.026954864 \text{ m}^2.$$

Το πάχος των μαγνητών είναι $x = 0.003$ m. Το σιδηρομαγνητικό υλικό του δρομέα έχει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $k = 14.425 \frac{W}{K \cdot m}$. Με χρήση της σχέσης (3.1) υπολογίζουμε την αντίσταση των μαγνητών :

$$R_{\text{magnet}} = \frac{x}{k \cdot A} = \frac{0.003}{14.425 \cdot 0.026954864} \frac{K}{W} = 0.007715574 \frac{K}{W}$$

7. Συνολική αντίσταση συναγωγής εσωτερικών τμημάτων κινητήρα

Θα υπολογίσουμε με χρήση της σχέσης (3.3) την αντίσταση συναγωγής των τμημάτων του κινητήρα που βρίσκονται στο εσωτερικό του κελύφους και έρχονται σε επαφή με τον αέρα. Τα τμήματα αυτά είναι η παράπλευρη επιφάνεια του κινητήρα χωρίς τον άξονα, η συνολική επιφάνεια του άξονα που έρχεται σε επαφή με τον αέρα εκατέρωθεν του δρομέα και η συνολική εσωτερική επιφάνεια του κελύφους που έρχεται σε επαφή με τον αέρα εκατέρωθεν του στάτη.

• Παράπλευρη επιφάνεια του κινητήρα χωρίς τον άξονα

Η εξωτερική ακτίνα του πυρήνα του στάτη είναι $r_{\pi} = 0.048$ m και η ακτίνα του άξονα είναι $r_{shaft} = 0.029$ m. Η παράπλευρη επιφάνεια του κινητήρα χωρίς τον άξονα δίδεται από την ακόλουθη σχέση :

$$A_1 = 2 \cdot \pi \cdot (r_{\pi}^2 - r_{shaft}^2) = 2 \cdot \pi \cdot (0.048^2 - 0.029^2) \text{ m}^2 = 0.0091923 \text{ m}^2.$$

• Συνολική επιφάνεια άξονα εκατέρωθεν του δρομέα

Η ακτίνα του άξονα είναι $r_{shaft} = 0.029$ m, το μήκος του άξονα που βρίσκεται στο εσωτερικό του κελύφους εκατέρωθεν του δρομέα και έρχεται σε επαφή με τον αέρα είναι $L = 0.0415$ m. Η επιφάνεια του άξονα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$A_2 = 2 \cdot \pi \cdot r_{shaft}^2 + 2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_{shaft} \cdot L) = 2 \cdot \pi \cdot 0.029^2 + 2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0.029 \cdot 0.0415) \text{ m}^2 = 0.020407785 \text{ m}^2.$$

• Συνολική εσωτερική επιφάνεια του κελύφους εκατέρωθεν του στάτη

Η ακτίνα του κελύφους είναι $r_{housing} = 0.05$ m και το μήκος του κελύφους που έρχεται σε επαφή με τον αέρα εκατέρωθεν του στάτη είναι $L_{housing} = 0.0415$ m. Η ζητούμενη επιφάνεια θα υπολογιστεί από την εξής σχέση :

$$A_3 = 2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_{housing} \cdot L_{housing}) = 2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0.05 \cdot 0.0415) \text{ m}^2 = 0.026075219 \text{ m}^2.$$

Η συνολική επιφάνεια που βρίσκεται στο εσωτερικό του κελύφους και έρχεται σε επαφή με τον αέρα είναι ίση με το άθροισμα των τριών παραπάνω επιφανειών. Οπότε η τιμή της θα είναι ίση με :

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = 0.0091923 + 0.020407785 + 0.026075219 \text{ m}^2 = 0.055675304 \text{ m}^2.$$

Θεωρώντας ότι η τιμή του συντελεστή συναγωγής είναι ίση με $h = 20 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ υπολογίζουμε την αντίσταση συναγωγής με χρήση της (3.3) :

$$R_{convection} = \frac{1}{h \cdot A} = \frac{1}{20 \cdot 0.055675304} \frac{K}{W} = 0.9 \frac{K}{W}$$

8. Κέλυφος

Η ακτίνα του κελύφους έχει τιμή ίση με $r_{housing} = 0.05$ m και το συνολικό μήκος του κελύφους είναι ίσο με $L_h = 0.203$ m. Η επιφάνεια του κελύφους δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$A_{\text{housing}} = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{housing}} \cdot L_h = 2 \cdot \pi \cdot 0.05 \cdot 0.203 \text{ m}^2 = 0.0637743 \text{ m}^2.$$

Θεωρούμε ότι η τιμή του συντελεστή συναγωγής είναι ίση με $h = 10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ και η αντίσταση συναγωγής του κελύφους προκύπτει από τη σχέση (3.3) :

$$R_{\text{housing}} = \frac{1}{h \cdot A_{\text{housing}}} = \frac{1}{10 \cdot 0.0637743} \frac{K}{W} = 1.568 \frac{K}{W}$$

9. Διάκενο

Η ακτίνα μέχρι και το διάκενο είναι $r_{\text{air}} = 0.03625 \text{ m}$ και το μήκος του στάτη είναι ίσο με $L = 0.12 \text{ m}$. Το εμβαδό της επιφάνειας μέσω της οποίας πραγματοποιείται η μετάδοση της θερμότητας στο διάκενο υπολογίζεται από την σχέση που ακολουθεί :

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{air}} \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 0.03625 \cdot 0.12 \text{ m}^2 = 0.02733186 \text{ m}^2.$$

Το πάχος του διακένου είναι $x = 0.0005 \text{ m}$ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του διακένου λαμβάνεται ίσος με $k = 0.0285 \frac{W}{K \cdot m}$. Η αντίσταση αγωγής του διακένου θα βρεθεί από την ακόλουθη σχέση :

$$R_{\text{air}} = \frac{x}{A \cdot k} = \frac{0.0005}{0.02733186 \cdot 0.0285} \frac{K}{W} = 0.642 \frac{K}{W}$$

Η παραπάνω τιμή της θερμικής αντίστασης διακένου αποτελεί μια προσεγγιστική τιμή της πραγματικής. Η πραγματική τιμή της R_{air} εξαρτάται από την θερμοκρασία, την πίεση και την ταχύτητα του αέρα καθώς και από την ταχύτητα περιστροφής του άξονα του κινητήρα. Οι παράγοντες αυτοί καθιστούν δύσκολο τον υπολογισμό της αντίστασης διακένου. Γι' αυτό τον λόγο διατηρούμε σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων στοιχείων του κυκλώματος μεταβάλλοντας την τιμή της αντίστασης διακένου έως ότου τα αποτελέσματα προσομοίωσης προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα πειραματικά. Η τιμή που θα χρησιμοποιήσουμε στο θερμικό μοντέλο για την αντίσταση διακένου είναι $R_{\text{air}} = 1.8 \frac{K}{W}$.

Η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη λαμβάνεται ίση με $R_{\text{windings}} = 0.8 \frac{K}{W}$.

3.5 Αποτελέσματα του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων

•1^η σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Στην πρώτη σειρά των αποτελεσμάτων προσομοίωσης θεωρούμε ότι οι απώλειες των τυλιγμάτων του στάτη είναι $P_{Cu} = 850W$. Στο ισοδύναμο κύκλωμα οι παραπάνω απώλειες αναπαρίστανται από την πηγή ρεύματος I_{winding} της οποίας η τιμή τίθεται ίση με 850A. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι τιμές των χωρητικοτήτων του ισοδυνάμου κυκλώματος.

Περιοχή κινητήρα	Υλικό	Χωρητικότητα ($\frac{J}{K}$)
Αξονας	Σιδηρομαγνητικό υλικό δρομέα	1519.43
Δρομέας	Σίδηρος	300.64
Μαγνήτες	Σιδηρομαγνητικό υλικό δρομέα	256.25
Διάκενο	Αέρας	0.0311
Τυλίγματα	Χαλκός	357.75
Μόνωση τυλιγμάτων	Συνθετικό υλικό	99.98
Στάτης	Σίδηρος	626.02
Κέλυφος	Σιδηρομαγνητικό υλικό δρομέα	292.87

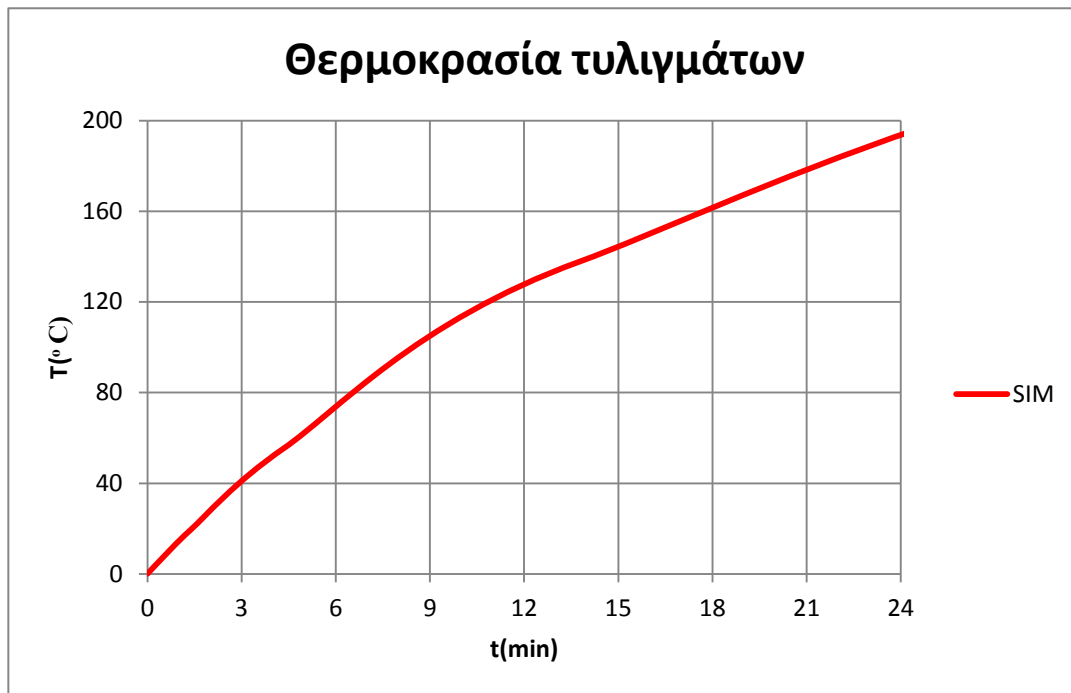
Πίνακας 3.2 Χωρητικότητες ισοδύναμου κυκλώματος

- Θερμοκρασιακή κατανομή των τυλιγμάτων του στάτη



Σχ. 3.4 Κατανομή θερμοκρασίας των τυλιγμάτων του στάτη

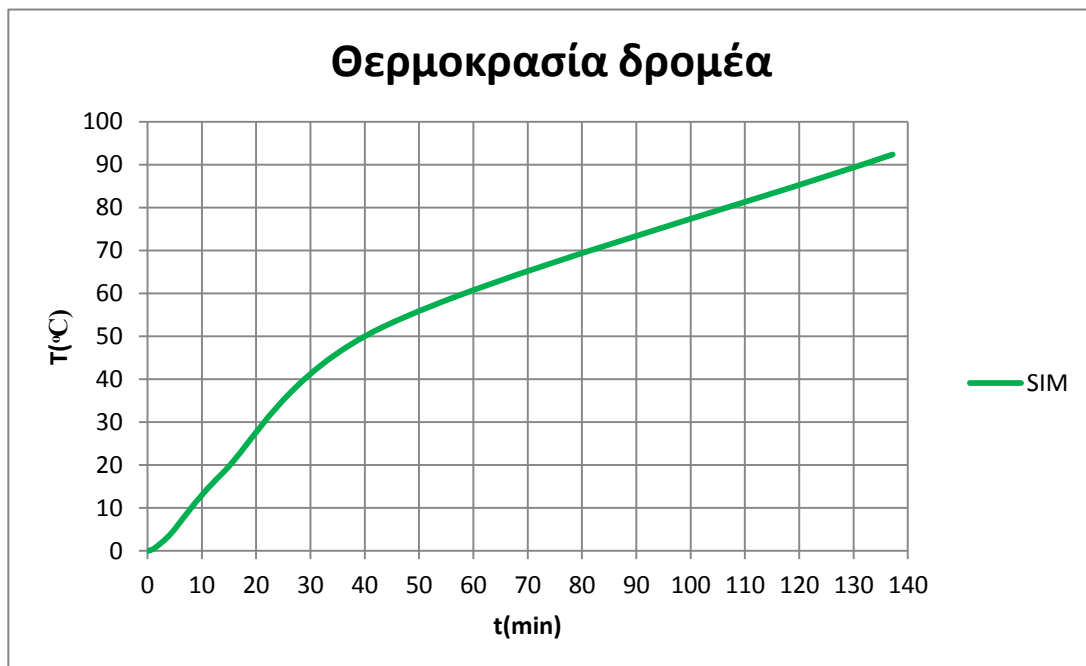
Η παραπάνω κατανομή προκύπτει για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 137.2186 \text{ min}$. Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται μια λεπτομερέστερη απεικόνιση της θερμοκρασιακής κατανομής των τυλιγμάτων για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 24 \text{ min}$.



Σχ. 3.5 Κατανομή θερμοκρασίας των τυλιγμάτων για $t_{\text{simulation}} = 24 \text{ min}$

Η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 137.2186 \text{ min}$ είναι $T_{\text{windings}} = 297.9^{\circ}\text{C}$. Η σταθερά χρόνου θέρμανσης είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να λάβει η θερμοκρασία των τυλιγμάτων το 63% της τελικής της τιμής. Στην προκειμένη περίπτωση η σταθερά χρόνου είναι $\tau_{\theta} = 23 \text{ min}$.

- Θερμοκρασιακή κατανομή του δρομέα



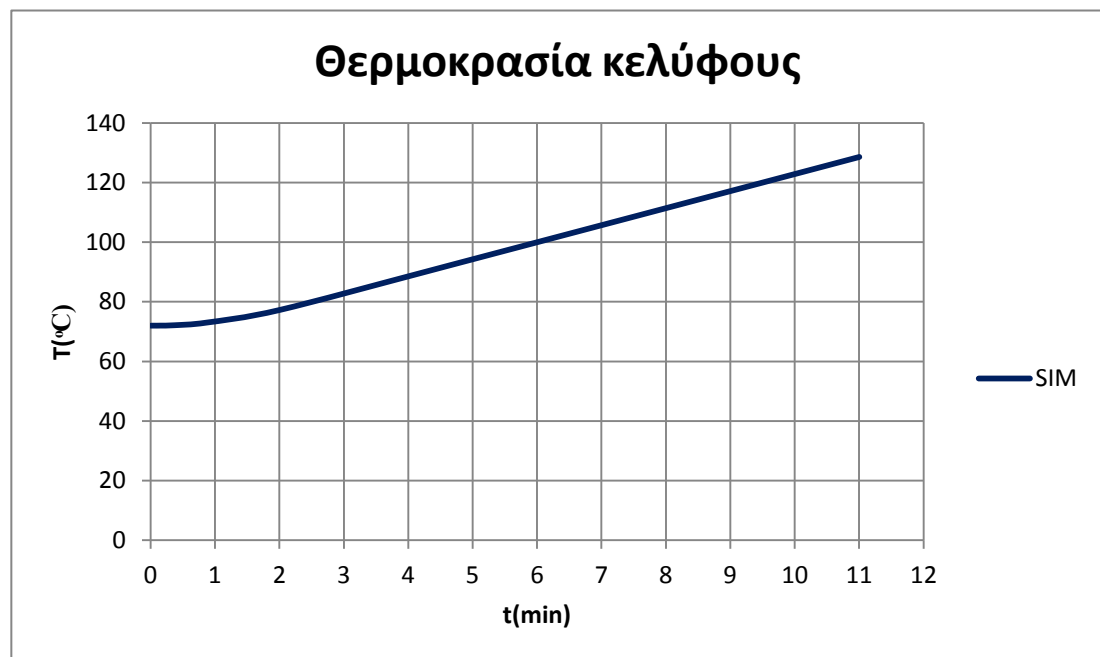
Σχ. 3.6 Κατανομή θερμοκρασίας του δρομέα

Η τελική θερμοκρασία του πυρήνα του δρομέα για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 137.2186 \text{ min}$ είναι $T_{\text{rotor}} = 92.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Η σταθερά χρόνου θέρμανσης του δρομέα είναι $\tau_{\theta} = 55 \text{ min}$. Στο Σχ. 3.7 απεικονίζεται η θερμοκρασιακή κατανομή του δρομέα για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 55 \text{ min}$.



Σχ. 3.7 Κατανομή θερμοκρασίας του δρομέα για $t_{\text{simulation}} = 55 \text{ min}$

• Θερμοκρασιακή κατανομή του κελύφους



Σχ. 3.8 Κατανομή θερμοκρασίας του κελύφους για $t_{\text{simulation}} = 11.0038 \text{ min}$

Η παραπάνω κατανομή προκύπτει έχοντας θεωρήσει ότι το ανά φάση ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη είναι $I_{windings} = 8.5A$. Η θερμική αντίσταση των τυλιγμάτων λαμβάνεται ίση με $R_{windings} = 0.8 \frac{K}{W}$ οπότε οι συνολικές απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων προκύπτουν από την ακόλουθη σχέση:

$$P_{Cu} = 3 \cdot I_{windings}^2 \cdot R_{windings} = 3 \cdot (8.5)^2 \cdot 0.8 W = 173.4 W \quad (3.5)$$

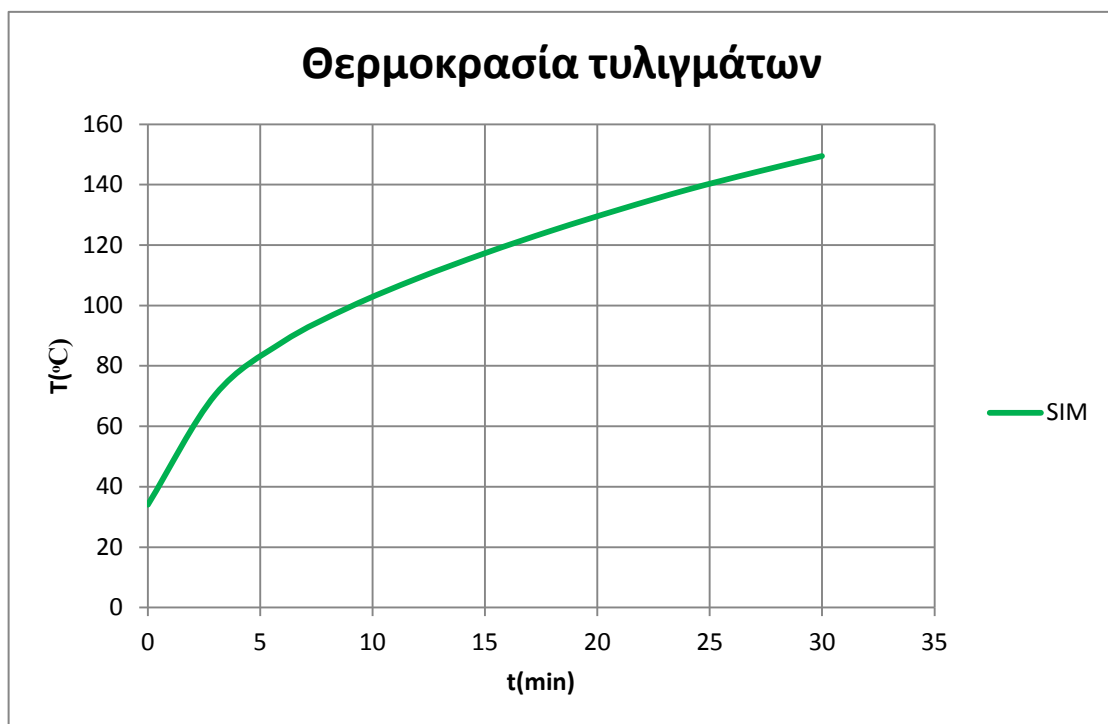
Η τελική θερμοκρασία του κελύφους για χρόνο προσομοίωσης $t_{simulation} = 11.0038$ min και αρχική θερμοκρασία κελύφους $T_{initial} = 72 \text{ }^\circ\text{C}$ είναι $T_{housing} = 128.6^\circ\text{C}$. Η σταθερά χρόνου θέρμανσης του κελύφους είναι $\tau_\theta = 3$ min.

•2^η σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Στην δεύτερη σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης θεωρούμε ότι η τιμή του ανά φάση ρεύματος των τυλιγμάτων είναι $I_{windings} = 9.25A$ οπότε οι απώλειες χαλκού λαμβάνουν την ακόλουθη τιμή:

$$P_{Cu} = 3 \cdot I_{windings}^2 \cdot R_{windings} = 3 \cdot (9.25)^2 \cdot 0.8 W = 205.35 W \quad (3.6)$$

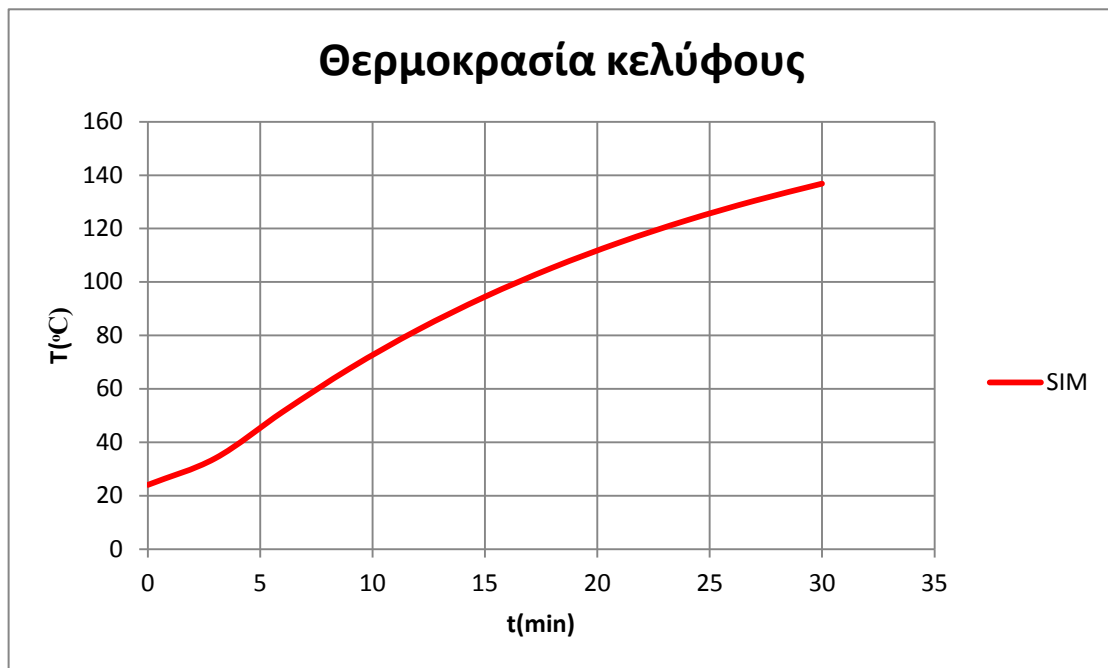
•Θερμοκρασιακή κατανομή των τυλιγμάτων του στάτη



Σχ. 3.9 Κατανομή θερμοκρασίας των τυλιγμάτων

Η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων για χρόνο προσομοίωσης $t_{simulation} = 30$ min και αρχική θερμοκρασία $T_{initial} = 34 \text{ }^\circ\text{C}$ είναι $T_{windings} = 149.5 \text{ }^\circ\text{C}$ με τη σταθερά χρόνου θέρμανσης των τυλιγμάτων να είναι ίση με $\tau_\theta = 7$ min.

•Θερμοκρασιακή κατανομή του κελύφους



Σχ. 3.10 Κατανομή θερμοκρασίας του κελύφους

Η τελική θερμοκρασία του κελύφους για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 30 \text{ min}$ και αρχική θερμοκρασία $T_{\text{initial}} = 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ είναι $T_{\text{housing}} = 136.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ με τη σταθερά χρόνου θέρμανσης του κελύφους να λαμβάνει την τιμή $\tau_{\theta} = 13 \text{ min}$.

•3^η σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Στην τρίτη σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης το ανά φάση ρεύμα των τυλιγμάτων του στάτη είναι $I_{\text{windings}} = 4.92\text{A}$ οπότε οι απώλειες χαλκού λαμβάνουν την εξής τιμή:

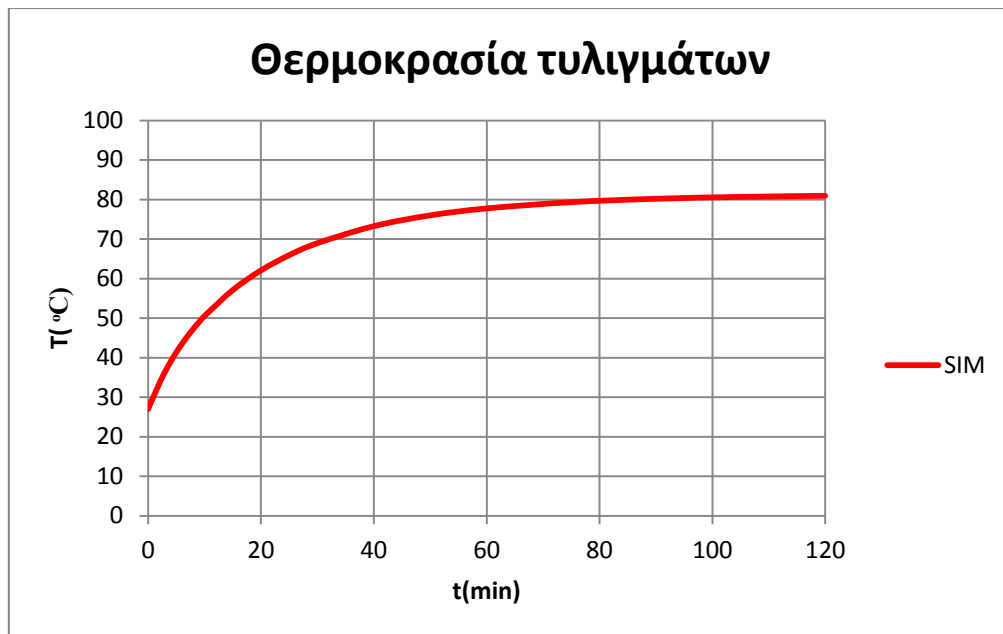
$$P_{\text{Cu}} = 3 \cdot I_{\text{windings}}^2 \cdot R_{\text{windings}} = 3 \cdot (4.92)^2 \cdot 0.8 \text{ W} = 58.095 \text{ W} \quad (3.7)$$

Στην τρίτη, τέταρτη και πέμπτη σειρά μετρήσεων θεωρούμε ότι το υλικό του άξονα και του κελύφους είναι ο σίδηρος. Η διαφοροποίηση αυτή μεταβάλλει τις τιμές των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος ως εξής:

$$\bullet R_{\text{shaft}} = 0.0165 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

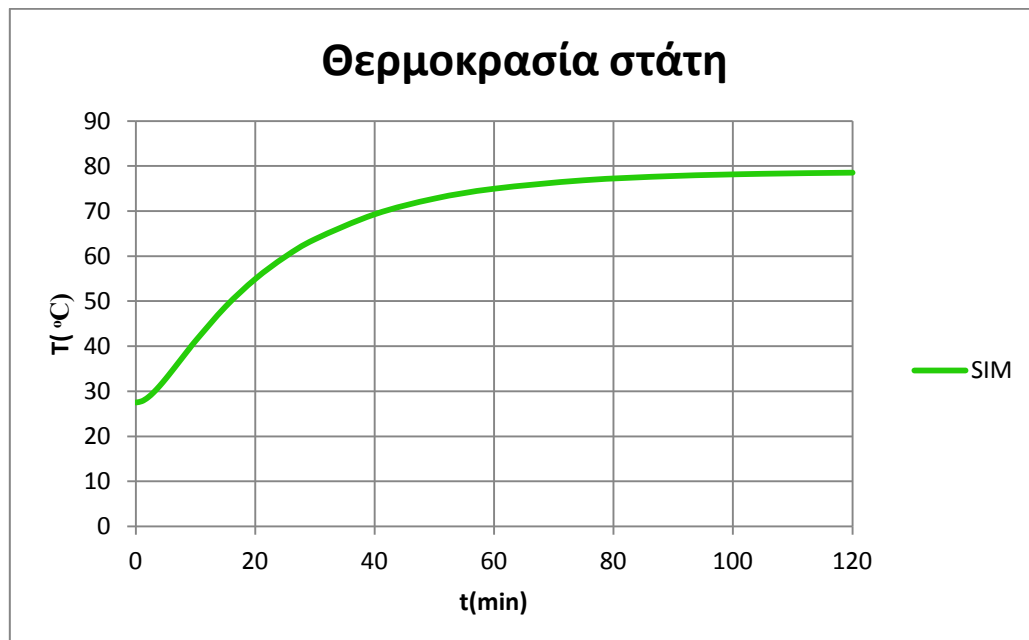
$$\bullet C_{\text{shaft}} = 1349 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$\bullet C_{\text{housing}} = 260 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

•Θερμοκρασιακή κατανομή των τυλιγμάτων

Σχ.3.11 Κατανομή θερμοκρασίας των τυλιγμάτων

Η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 120 \text{ min}$ και αρχική θερμοκρασία $T_{\text{initial}} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ είναι $T_{\text{windings}} = 80.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ με την σταθερά χρόνου θέρμανσης των τυλιγμάτων να είναι ίση με $\tau_{\theta} = 11 \text{ min}$.

•Θερμοκρασιακή κατανομή του στάτη

Σχ. 3.12 Κατανομή θερμοκρασίας του στάτη

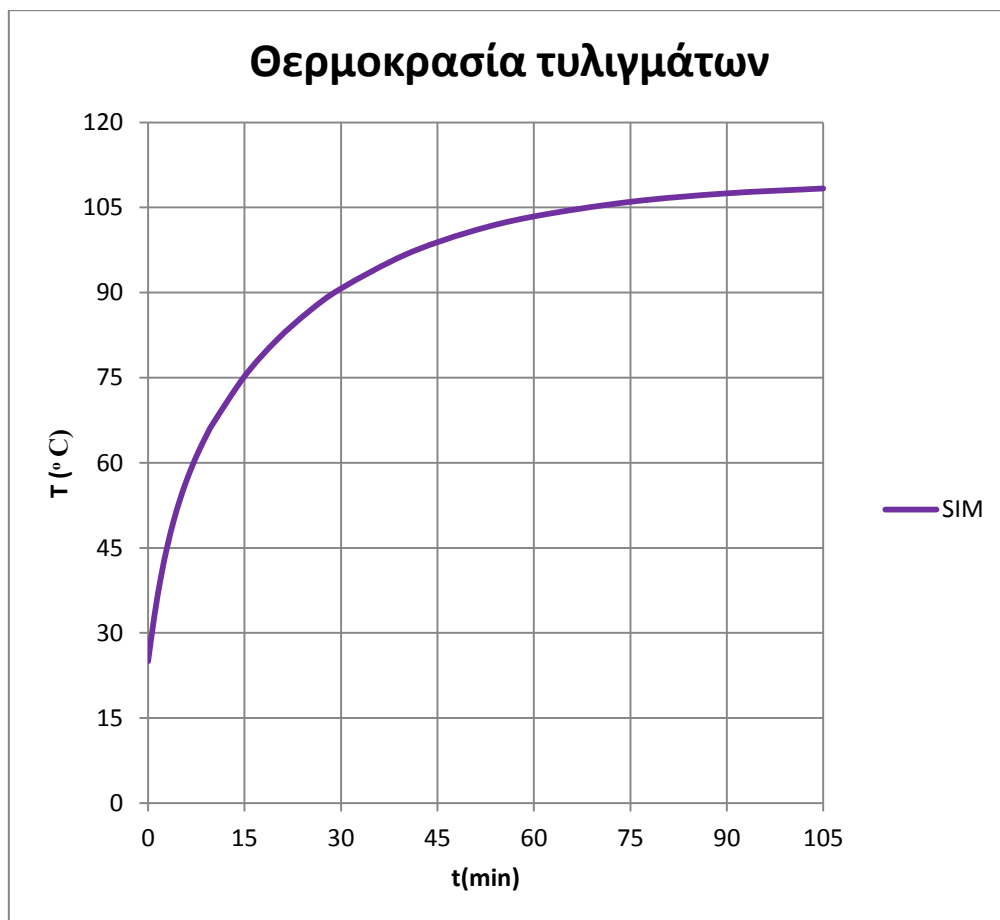
Η τελική τιμή της θερμοκρασίας του στάτη για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 120$ min και αρχική θερμοκρασία $T_{\text{initial}} = 27.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ είναι $T_{\text{stator}} = 78.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ με την σταθερά χρόνου θέρμανσης του στάτη να είναι ίση με $\tau_{\theta} = 16$ min.

•4^η σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Στην τέταρτη σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης το ανά φάση ρεύμα των τυλιγμάτων είναι $I_{\text{windings}} = 6.45$ A με τις απώλειες χαλκού να λαμβάνουν την ακόλουθη τιμή:

$$P_{\text{Cu}} = 3 \cdot I_{\text{windings}}^2 \cdot R_{\text{windings}} = 3 \cdot (6.45)^2 \cdot 0.8 \text{ W} = 99.85 \text{ W} \quad (3.8)$$

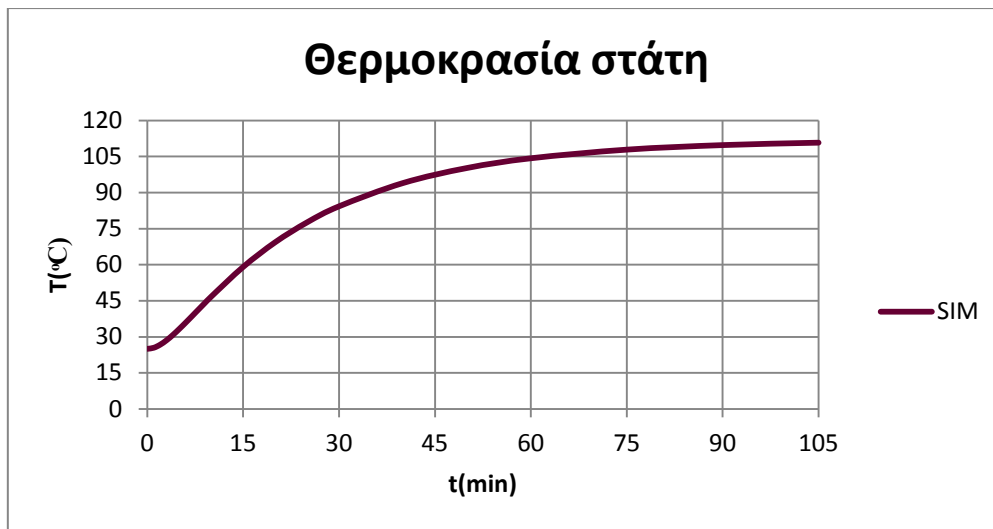
•Θερμοκρασιακή κατανομή των τυλιγμάτων



Σχ. 3.13 Κατανομή θερμοκρασίας των τυλιγμάτων

Η τελική τιμή της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 105$ min και αρχική θερμοκρασία $T_{\text{initial}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ είναι $T_{\text{windings}} = 108.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ με την σταθερά χρόνου θέρμανσης των τυλιγμάτων να λαμβάνει την τιμή $\tau_{\theta} = 11$ min.

•Θερμοκρασιακή κατανομή του στάτη



Σχ. 3.14 Κατανομή θερμοκρασίας του στάτη

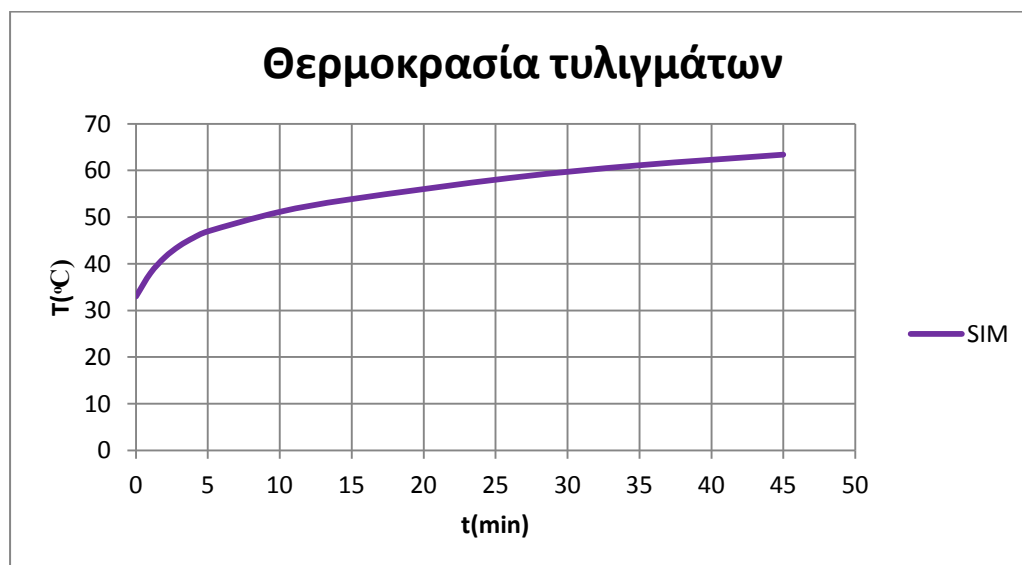
Η τελική τιμή της θερμοκρασίας του στάτη για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 105$ min και αρχική θερμοκρασία $T_{\text{initial}} = 25$ °C είναι $T_{\text{stator}} = 110.8$ °C με την σταθερά χρόνου θέρμανσης του στάτη να είναι ίση με $\tau_{\theta} = 20$ min.

•5^η σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Σε αυτή την σειρά καταγράφεται η θερμική συμπεριφορά του σύγχρονου κινητήρα για μικρή τιμή του ρεύματος τυλιγμάτων. Το φασικό ρεύμα των τυλιγμάτων είναι $I_{\text{windings}} = 3.9$ A οπότε οι απώλειες χαλκού λαμβάνουν την παρακάτω τιμή:

$$P_{\text{Cu}} = 3 \cdot I_{\text{windings}}^2 \cdot R_{\text{windings}} = 3 \cdot (3.9)^2 \cdot 0.8 \text{ W} = 36.504 \text{ W} \quad (3.9)$$

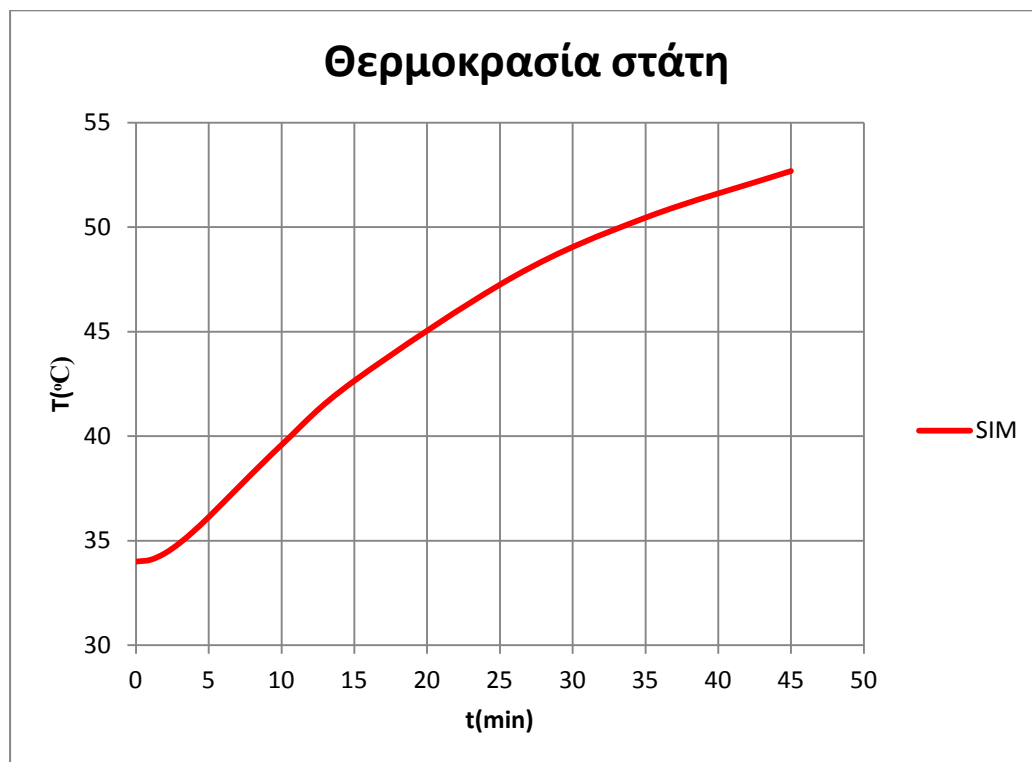
•Θερμοκρασιακή κατανομή των τυλιγμάτων



Σχ. 3.15 Κατανομή θερμοκρασίας των τυλιγμάτων

Η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 45 \text{ min}$ και αρχική θερμοκρασία $T_{\text{initial}} = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ προκύπτει ίση με $T_{\text{windings}} = 63.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ με την σταθερά χρόνου θέρμανσης των τυλιγμάτων να είναι ίση με $\tau_{\theta} = 2 \text{ min}$.

•Θερμοκρασιακή κατανομή του στάτη



Σχ. 3.16 Κατανομή θερμοκρασίας του στάτη

Η τελική τιμή της θερμοκρασίας του στάτη για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 45 \text{ min}$ και αρχική θερμοκρασία $T_{\text{initial}} = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ είναι ίση με $T_{\text{stator}} = 52.7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

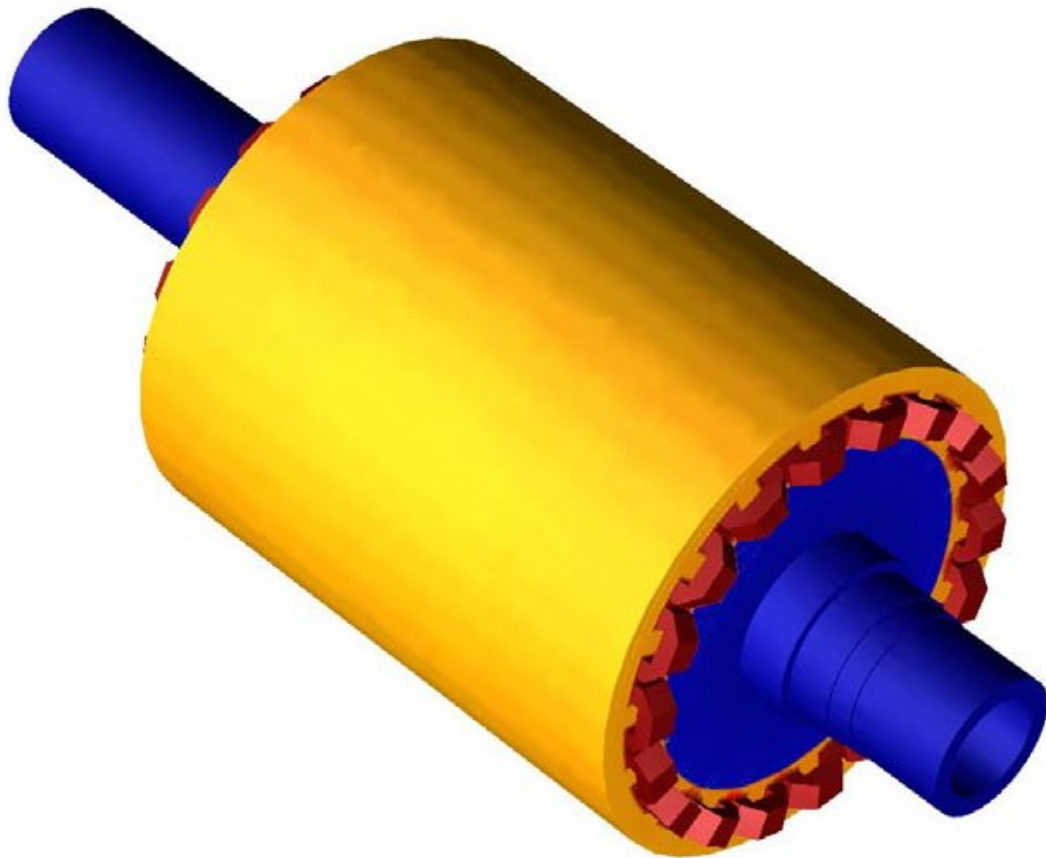
3.6 Συμπεράσματα

Η προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του σύγχρονου κινητήρα από το προτεινόμενο μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων μας δίνει μια σαφή εικόνα για την κατανομή της θερμοκρασίας στα τυλίγματα, στον πυρήνα του δρομέα, στον πυρήνα του στάτη και στο κέλυφος για διάφορες τιμές του ρεύματος τυλιγμάτων.

Αναλυτικότερα, παρατηρώντας τις θερμοκρασιακές κατανομές των τεσσάρων περιοχών του κινητήρα διαπιστώνουμε ότι στα τυλίγματα του στάτη καταγράφεται η υψηλότερη τελική τιμή της θερμοκρασίας, αναμενόμενο αν λάβουμε υπόψη ότι η μόνη πηγή θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο προσομοίωσης ήταν οι απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων του στάτη. Επίσης στα τυλίγματα του στάτη παρατηρείται και ο υψηλότερος ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας γεγονός που οφείλεται επίσης στην παραγωγή θερμότητας από τις απώλειες χαλκού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων καθώς και με τα αντίστοιχα πειραματικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4



ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η θερμική ανάλυση του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών με τη σχεδίαση του ισοδύναμου μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων είχε σαν αποτέλεσμα μια αρχική προσέγγιση της μεταβατικής θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα για διάφορες τιμές του ρεύματος των τυλιγμάτων.

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται η δισδιάστατη ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα με τη χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων μας δίνει τη

δυνατότητα να γνωρίζουμε το θερμοκρασιακό πεδίο και την πυκνότητα θερμοροής στο εσωτερικό του κινητήρα. Το μόνο μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι δεν μας δίνει καμία πληροφορία για τη μεταβατική θερμική συμπεριφορά του κινητήρα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μια αναλυτική καταγραφή των μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας και των μαθηματικών σχέσεων που περιγράφουν τους μηχανισμούς αυτούς. Στην επόμενη ενότητα θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση των μαθηματικών σχέσεων και των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιούνται από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να επιτευχθεί μια προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών.

4.1 Μετάδοση θερμότητας στις ηλεκτρικές μηχανές

Σε μια ηλεκτρική μηχανή οι απώλειες χαλκού και πυρήνα αποτελούν τις κύριες πηγές θερμότητας που προκαλούν την αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της μηχανής. Στην παρούσα θερμική ανάλυση λαμβάνουμε υπόψη μόνο τις απώλειες χαλκού διότι η τιμή τους είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την τιμή των απωλειών πυρήνα. Στο εσωτερικό της μηχανής η μετάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται με τους μηχανισμούς της αγωγής και της συναγωγής. Ακολουθεί μια σύντομη αναφορά των σχέσεων που περιγράφουν αυτούς τους δύο μηχανισμούς.

4.1.1 Μετάδοση θερμότητας με αγωγή

Η μετάδοση της θερμότητας μέσω του μηχανισμού της αγωγής παρατηρείται στο εσωτερικό ενός στερεού σώματος μεταξύ περιοχών του με διαφορετική θερμοκρασία. Η μαθηματική σχέση που περιγράφει τον παραπάνω μηχανισμό, θεωρώντας ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι ανεξάρτητος από τις συντεταγμένες θέσης, είναι η ακόλουθη:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{q} + k \cdot \nabla^2 T \leftrightarrow \nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho \cdot c_p}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

όπου ρ (kg/m^3) η πυκνότητα του στερεού, c_p ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$) η ειδική θερμοχωρητικότητα του στερεού και k ($\text{W/m} \cdot \text{K}$) ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

• Σε περίπτωση που η θερμική ανάλυση αφορά τη μόνιμη κατάσταση ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$) η (4.1) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή (εξίσωση Poisson):

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (4.2)$$

• Σε περίπτωση που στο εσωτερικό του στερεού δεν υπάρχουν πηγές θερμότητας ($\dot{q} = 0$) η (4.1) μετασχηματίζεται στην παρακάτω σχέση (εξίσωση Fourier):

$$\nabla^2 T = \frac{\rho \cdot c_p}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.3)$$

• Αν δεν υπάρχουν πηγές θερμότητας στο εσωτερικό του στερεού και η θερμική ανάλυση αφορά τη μόνιμη κατάσταση τότε η (4.1) λαμβάνει την εξής μορφή (εξίσωση Laplace):

$$\nabla^2 T = 0 \quad (4.4)$$

4.1.2 Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή

Η μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής παρατηρείται σε κινούμενα ρευστά. Μαθηματικά ο συγκεκριμένος τρόπος μετάδοσης θερμότητας περιγράφεται από τον νόμο ψύξης του Newton:

$$\dot{q}'' = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (4.5)$$

όπου \dot{q}'' (W/m²) η πυκνότητα θερμοροής μεταξύ μιας επιφάνειας θερμοκρασίας T_s και ενός ρευστού θερμοκρασίας T_∞ και h ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$) ο συντελεστής συναγωγής.

• Σε περίπτωση που η μετάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται σε μία διάσταση χ κάθετη στην επιφάνεια επαφής στερεού – ρευστού η σχέση (4.5) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$-k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (4.6)$$

όπου k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της επιφάνειας επαφής.

4.1.3 Οριακές συνθήκες

Σε προβλήματα θερμικής ανάλυσης η χρήση οριακών συνθηκών στις επιφάνειες επαφής διαφορετικών υλικών είναι απαραίτητη προκειμένου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς να προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα αντίστοιχα πειραματικά.

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται στη θερμική ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών, θεωρώντας ότι οι συνθήκες αυτές ορίζονται για μονοδιάστατο πρόβλημα και ότι η επιφάνεια επαφής βρίσκεται στη θέση $\chi = 0$, είναι οι ακόλουθες, [16]:

- Συνθήκη Dirichlet: η συνθήκη αυτή ορίζεται σε επιφάνειες επαφής σταθερής θερμοκρασίας ($T(\chi = 0, t) = T_s$).
- Συνθήκη Neumann: ορίζεται σε επιφάνειες επαφής όπου η πυκνότητα θερμοροής είναι σταθερή ($-k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} |_{\chi=0} = \dot{q}''$).
- Συνθήκη συναγωγής: ορίζεται στην επιφάνεια επαφής ενός στερεού με ένα ρευστό ($-k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} |_{\chi=0} = h \cdot [T_s(\chi = 0, t) - T_\infty]$).

- Εκπομπή ακτινοβολίας προς το περιβάλλον: κάθε σώμα ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία του εκπέμπει ακτινοβολία προς το περιβάλλον ($-k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_s^4(\chi = 0, t) - T_\infty^4]$, όπου ε ο συντελεστής εκπομπής και σ η σταθερά Stefan – Boltzmann).

4.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων (αναφορά [2] – Λογισμικό) χρησιμοποιεί τις μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τους δύο μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας και τις προαναφερθείσες οριακές συνθήκες έτσι ώστε να επιτευχθεί η προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του σύγχρονου κινητήρα.

Οι παράμετροι εισόδου του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων είναι τα υλικά από τα οποία αποτελείται ο κινητήρας και οι ιδιότητες τους, οι πηγές θερμότητας που υπάρχουν στο εσωτερικό του κινητήρα, οι οριακές συνθήκες που ορίζονται στις επιφάνειες επαφής διαφορετικών υλικών καθώς και οι συντελεστές συναγωγής που καθορίζουν τη μετάδοση θερμότητας μεταξύ ενός ρευστού και ενός στερεού. Η σχεδίαση του κινητήρα πραγματοποιείται σε δύο διαστάσεις ενώ η τρίτη διάσταση λαμβάνει μια πεπερασμένη τιμή. Αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση και καθοριστούν οι παράμετροι εισόδου το πρόγραμμα αναλύει το σχέδιο του κινητήρα σε χιλιάδες πεπερασμένα στοιχεία εφαρμόζοντας σε κάθε ένα από αυτά τις μαθηματικές σχέσεις αγωγής και συναγωγής. Η σύγκλιση των θερμοκρασιών γειτονικών πεπερασμένων στοιχείων επιτυγχάνεται μέσω της μεθόδου Newton – Raphson. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων είναι η απεικόνιση της θερμοκρασιακής κατανομής και της πυκνότητας θερμοροής σε κάθε σημείο του κινητήρα.

4.2.1 Σχεδίαση σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών

Η θερμική ανάλυση του εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων θα πραγματοποιηθεί για δύο τομές του κινητήρα, μία κάθετη στον άξονα του κινητήρα και μία παράλληλη σε αυτόν.

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά		
Γενικά	Αριθμός πόλων	20
	Μήκος κινητήρα	120 mm
Δρομέας	Ακτίνα άξονα	29 mm
	Εσωτερική ακτίνα μαγνητών	32.75 mm
	Εξωτερική ακτίνα δρομέα	35.75 mm
	Γωνία μαγνητών	15.12 deg
Στάτης	Εσωτερική ακτίνα στάτη	36.25 mm
	Εξωτερική ακτίνα στάτη	48 mm
	Ακτίνα κελύφους	50 mm
	Μήκος δοντιών στάτη	9.2 mm
	Πλάτος δοντιών στάτη	4.2 mm

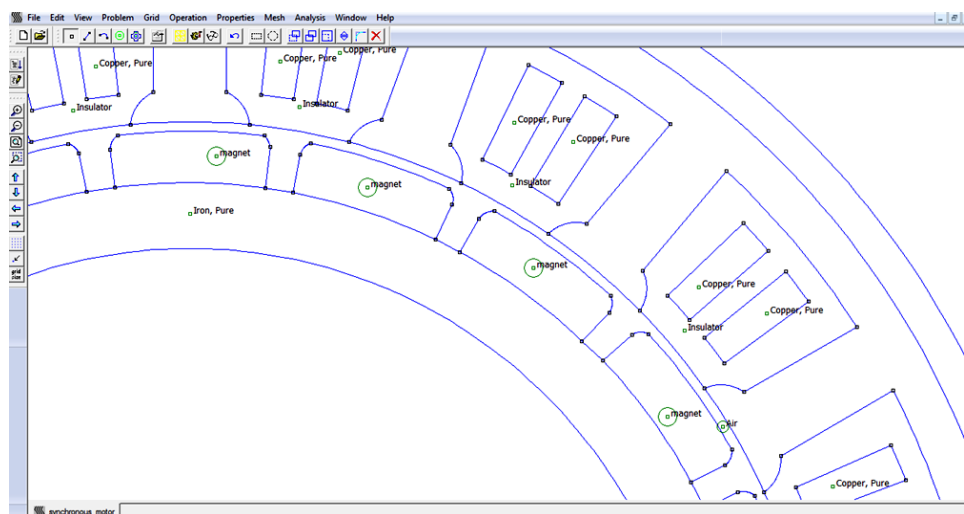
Πίνακας 4.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σύγχρονου κινητήρα, [17].

- Τομή κάθετη στον άξονα του κινητήρα



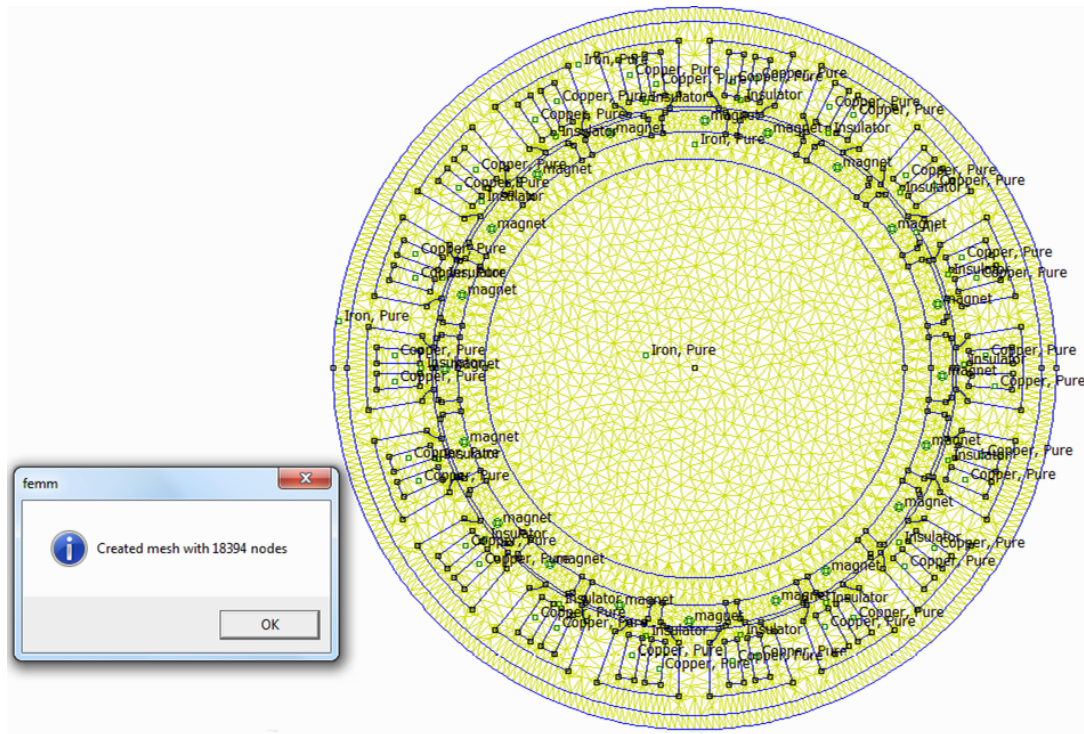
Σχ. 4.1 Τομή κάθετη στον άξονα του κινητήρα

Ακολουθεί μια πιο λεπτομερής απεικόνιση της κάθετης τομής του κινητήρα όπου διακρίνονται οι μόνιμοι μαγνήτες, το διάκενο, η μόνωση των τυλιγμάτων, τα τυλίγματα και ο πυρήνας του στάτη.

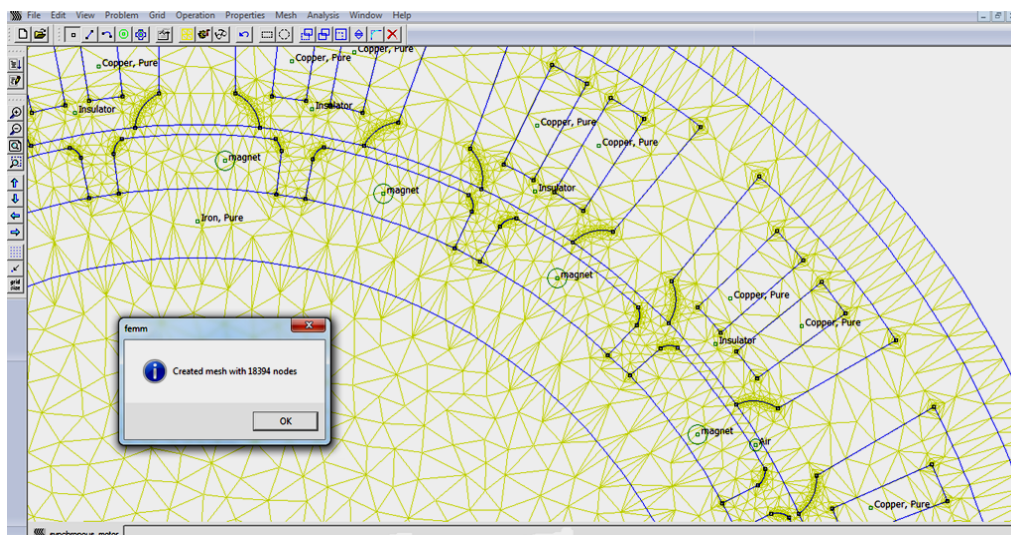


Σχ. 4.2 Λεπτομέρεια της κάθετης τομής του κινητήρα

Αφού καθορίσουμε τα υλικά από τα οποία αποτελείται ο κινητήρας, τις πηγές θερμότητας που υπάρχουν στο εσωτερικό του και ορίσουμε τις οριακές συνθήκες στις επιφάνειες επαφής των διαφορετικών υλικών το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων αναλύει το σχέδιο του κινητήρα σε πεπερασμένα στοιχεία όπως αυτά των σχημάτων 4.3 και 4.4.



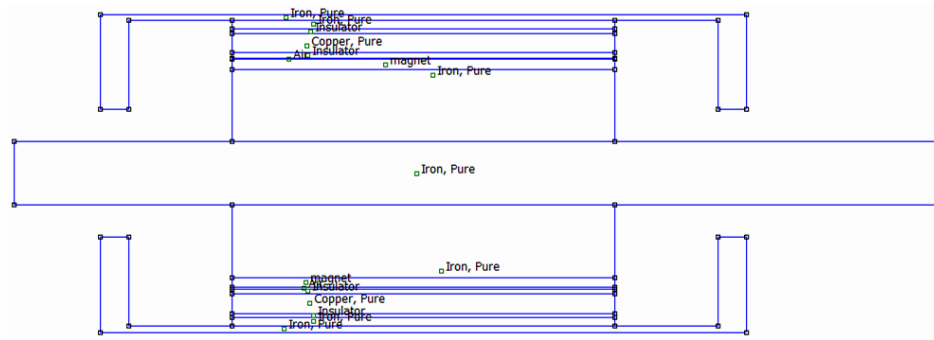
Σχ. 4.3 Ανάλυση του κινητήρα σε πεπερασμένα στοιχεία



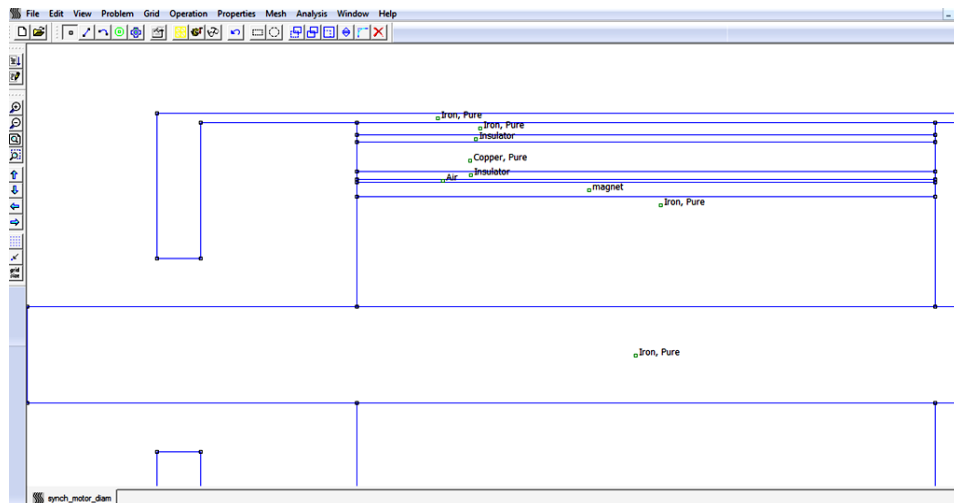
Σχ. 4.4 Λεπτομέρεια ανάλυσης του κινητήρα σε πεπερασμένα στοιχεία

Το σχέδιο του κινητήρα αναλύεται σε 18394 κόμβους και σε 36426 τριγωνικές περιοχές στις οποίες εφαρμόζονται οι εξισώσεις αγωγής και συναγωγής προκειμένου να προσδιοριστεί η θερμοκρασία κάθε σημείου του κινητήρα.

• Τομή παράλληλη στον άξονα του κινητήρα

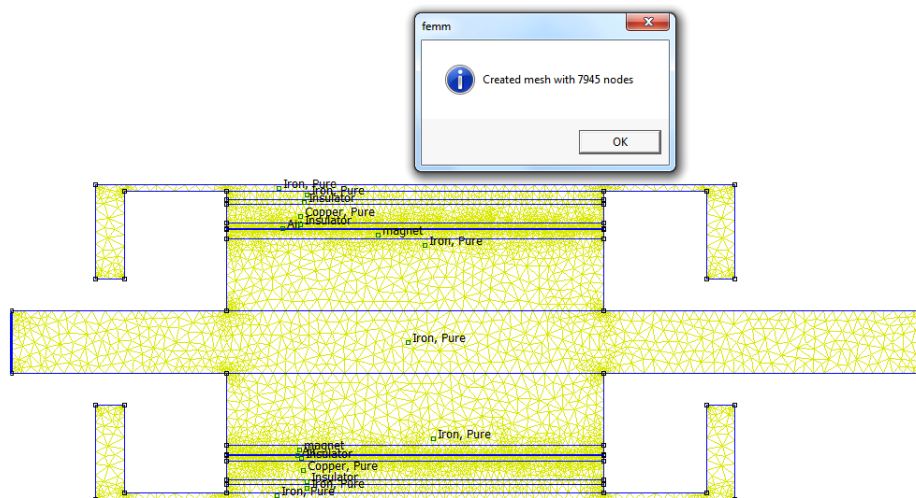


Σχ. 4.5 Τομή παράλληλη στον άξονα του κινητήρα

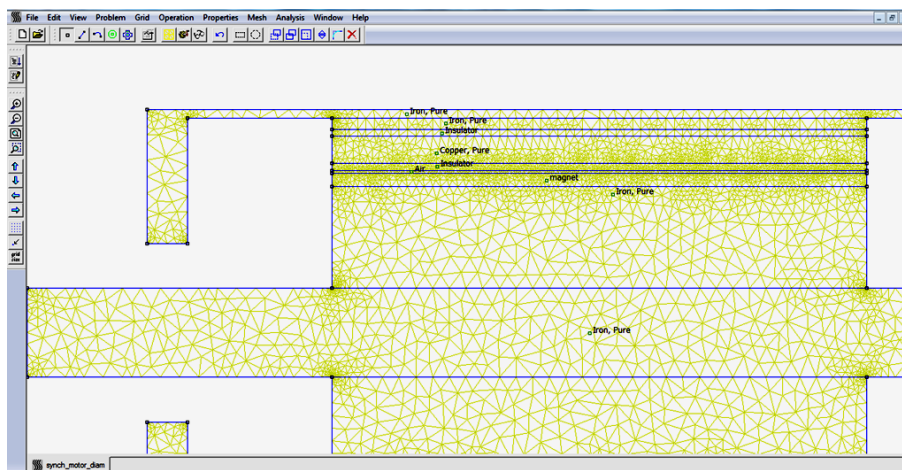


Σχ. 4.6 Λεπτομέρεια της παράλληλης τομής του κινητήρα

Για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο της παράλληλης τομής το πρόγραμμα αναλύει το παραπάνω σχέδιο σε χιλιάδες πεπερασμένα στοιχεία όπως αυτά των σχημάτων 4.7 και 4.8.



Σχ. 4.7 Ανάλυση της παράλληλης τομής σε πεπερασμένα στοιχεία



Σχ. 4.8 Λεπτομέρεια ανάλυσης της παράλληλης τομής σε πεπερασμένα στοιχεία

Η παράλληλη στον άξονα τομή αναλύεται από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων σε 7945 κόμβους και σε 14964 τριγωνικές περιοχές στις οποίες εφαρμόζονται οι εξισώσεις αγωγής και συναγωγής.

4.2.2 Ορισμός Οριακών συνθηκών

Οι οριακές συνθήκες ορίζονται σε επιφάνειες επαφής διαφορετικών περιοχών του κινητήρα ρυθμίζοντας τη μετάδοση θερμότητας. Οι επιφάνειες του εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα στις οποίες ορίσαμε οριακές συνθήκες είναι οι εξής:

- Επιφάνεια κελύφους: για την προσομοίωση της μετάδοσης θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής από το κέλυφος προς τον περιβάλλοντα χώρο ορίζουμε στην επιφάνεια του κελύφους συντελεστή συναγωγής $h = 10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

- Επιφάνεια επαφής αέρα – μαγνητών: στην επιφάνεια αυτή ορίζουμε συντελεστή συναγωγής $h = 20 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ ο οποίος ρυθμίζει τη μετάδοση θερμότητας από τον αέρα προς τους μόνιμους μαγνήτες.

- Επιφάνεια επαφής στάτη – αέρα: στη συγκεκριμένη επιφάνεια ορίζουμε συντελεστή συναγωγής $h = 10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ που ρυθμίζει τη μετάδοση θερμότητας από τον πυρήνα του στάτη προς το διάκενο.

4.2.3 Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων και για τις δύο τομές του κινητήρα χρησιμοποιώντας τις ίδιες τιμές απωλειών που χρησιμοποιήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο για τη θερμική ανάλυση με τη χρήση του ισοδύναμου θερμικού μοντέλου. Στις δύο πρώτες σειρές αποτελεσμάτων προσομοίωσης θα θεωρήσουμε ότι το υλικό του κελύφους και του άξονα είναι ίδιο με το σιδηρομαγνητικό υλικό του δρομέα.

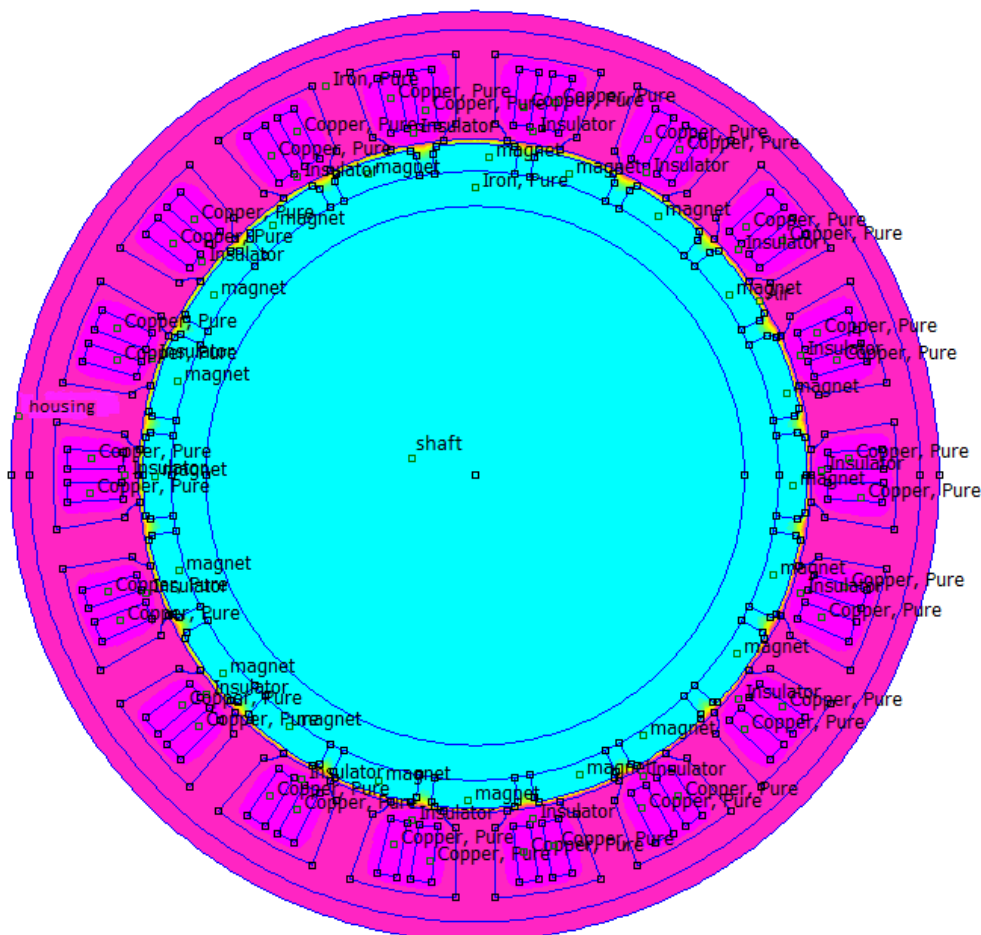
•1^η σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Στην σειρά αυτή οι απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων του στάτη είναι $P_{Cu} = 850W$. Δεδομένου ότι οι αύλακες του στάτη είναι $N = 18$ και ο όγκος της κάθε αύλακας είναι $V_s = 1.04941 \cdot 10^{-5} m^3$ προκύπτει ότι η πυκνότητα των απωλειών λαμβάνει την ακόλουθη τιμή:

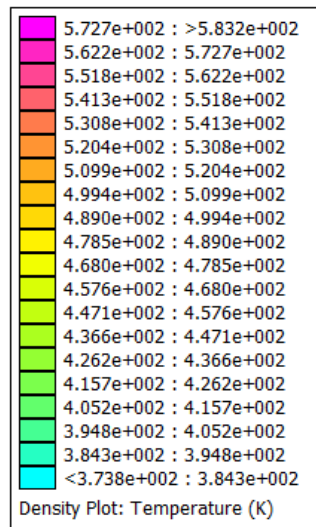
$$\text{Πυκνότητα απωλειών} = \frac{P_{Cu}}{N \cdot V_s} = \frac{850}{18 \cdot 1.04941 \cdot 10^{-5}} \frac{W}{m^3} = 4.5 \cdot 10^6 \frac{W}{m^3} \quad (4.7)$$

Η παραπάνω τιμή λαμβάνεται από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων σαν παράμετρος εισόδου αναπαριστώντας την παραγωγή θερμότητας στα τυλίγματα του στάτη.

•Τομή κάθετη στον άξονα του κινητήρα

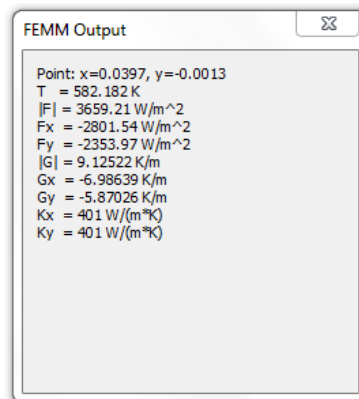


Σχ. 4.9 Θερμοκρασιακή κατανομή στην κάθετη τομή του κινητήρα

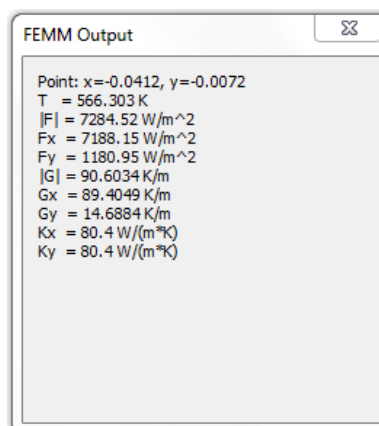
Υπόμνημα:

Από το Σχ. 4.9 και με τη βοήθεια του υπομνήματος θα υπολογίσουμε τις τελικές θερμοκρασίες στα τυλίγματα του στάτη, στον πυρήνα του στάτη και στον πυρήνα του δρομέα.

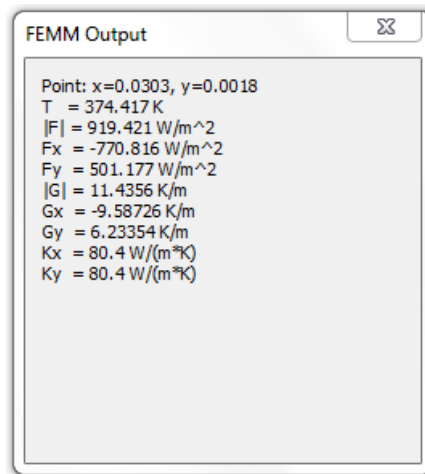
Στα τυλίγματα του στάτη η θερμοκρασία είναι ίση με 582.2K ή 309.2°C :



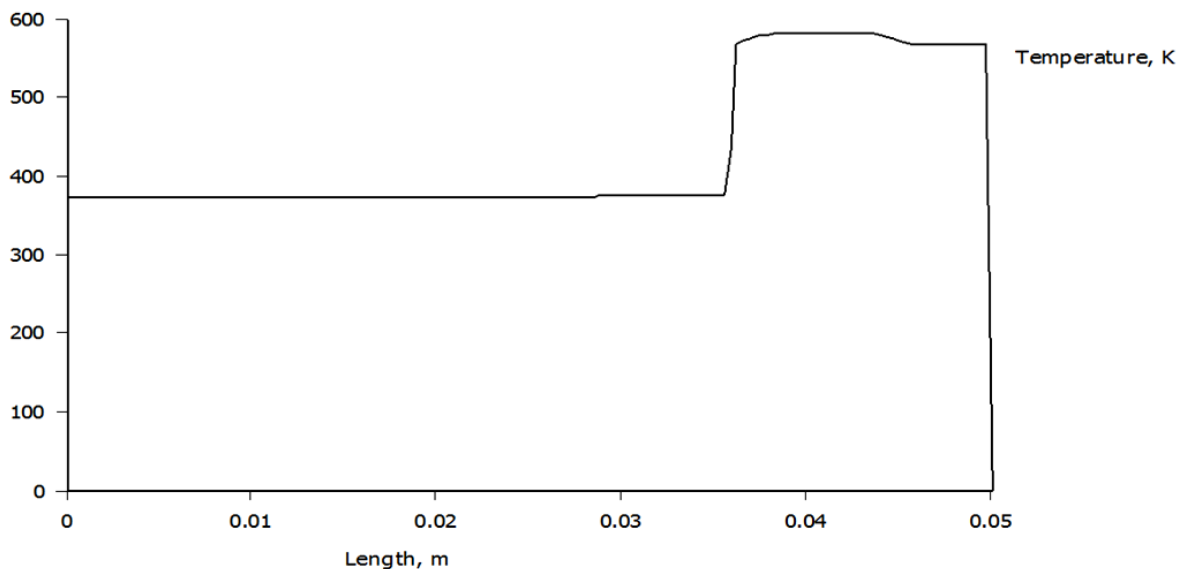
Στον πυρήνα του στάτη η θερμοκρασία είναι ίση με 566.3K ή 293.3°C :



Στον πυρήνα του δρομέα η θερμοκρασία λαμβάνει την τιμή 374.4K ή 101.4°C :

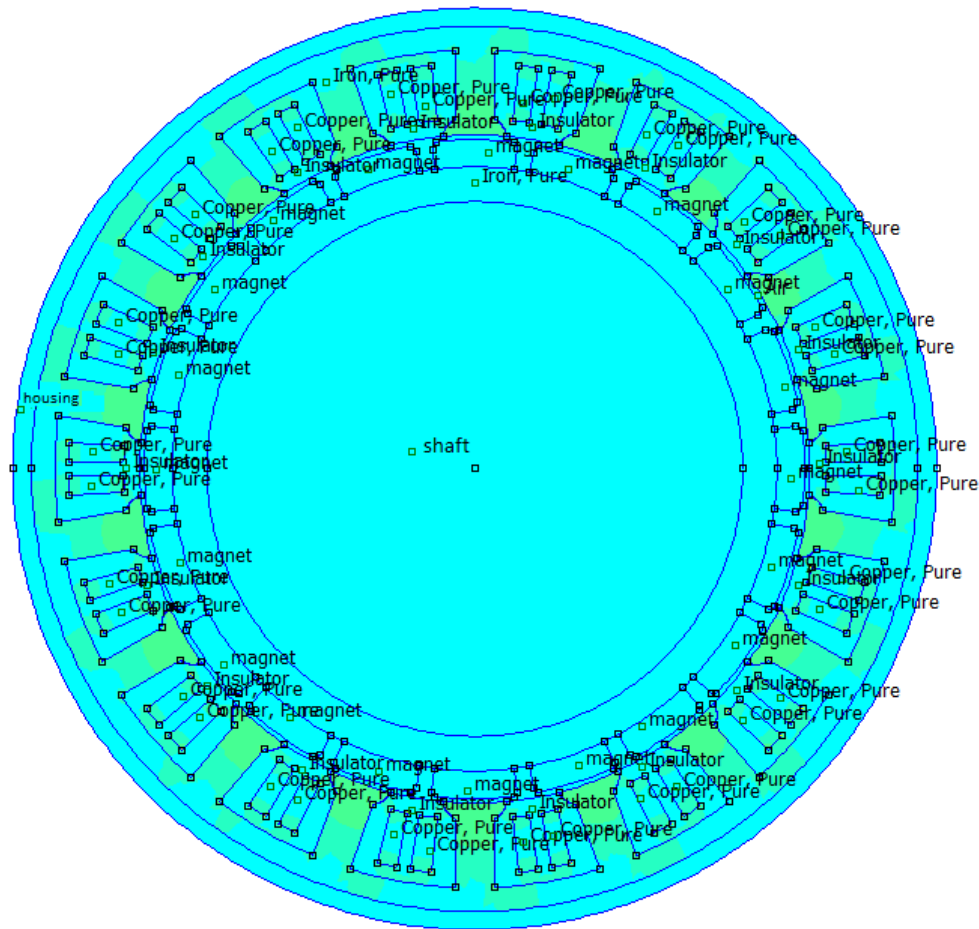


Από τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης συμπεραίνουμε ότι η υψηλότερη τιμή της θερμοκρασίας καταγράφεται στα τυλίγματα του στάτη και η χαμηλότερη στον δρομέα του σύγχρονου κινητήρα. Η κατανομή της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του κινητήρα απεικονίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα :



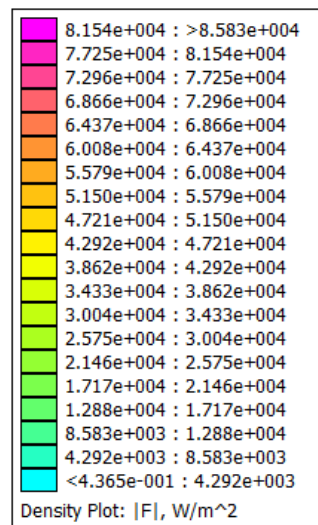
Σχ. 4.10 Κατανομή της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του κινητήρα

Στο Σχ. 4.11 απεικονίζεται η πυκνότητα θερμοροής στην κάθετη τομή του κινητήρα.

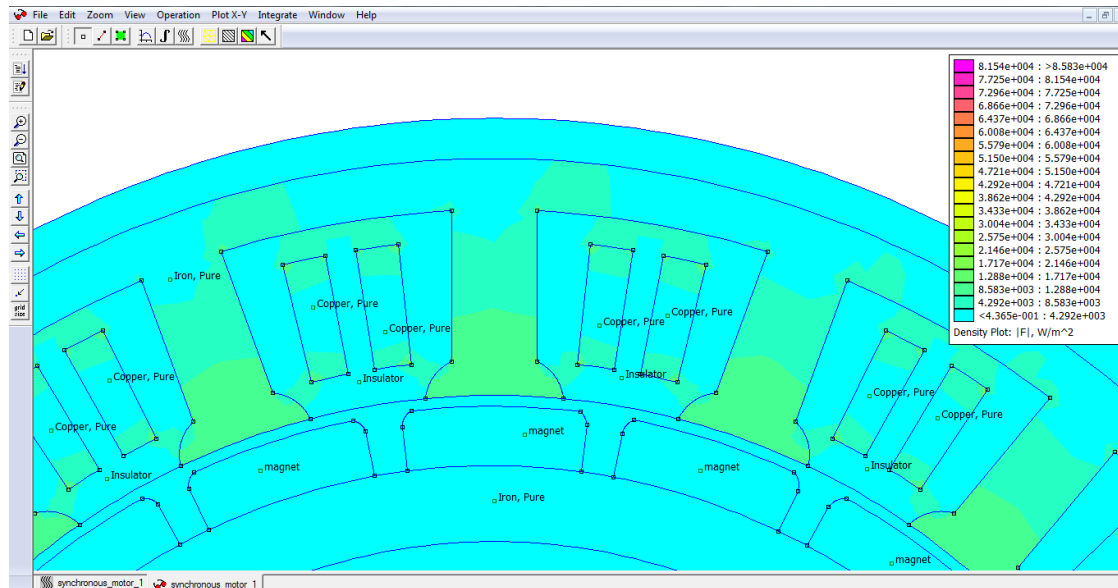


Σχ. 4.11 Πυκνότητα θερμοροής στην κάθετη τομή του κινητήρα

Υπόμνημα:

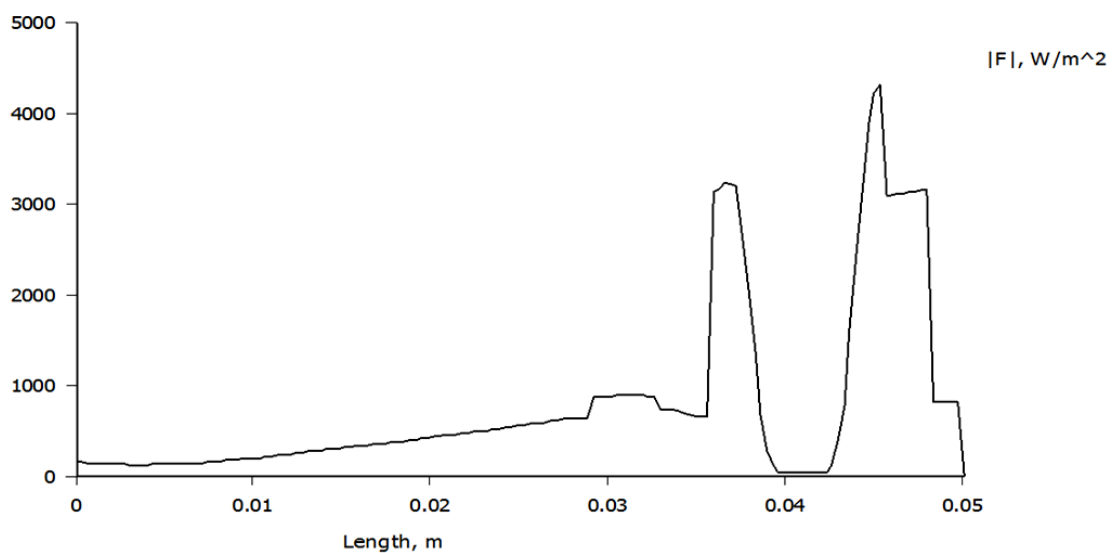


Στο Σχ. 4.12 απεικονίζεται η κατανομή της πυκνότητας θερμοροής στα τυλίγματα του στάτη, στον πυρήνα του στάτη, στο διάκενο και στους μόνιμους μαγνήτες.



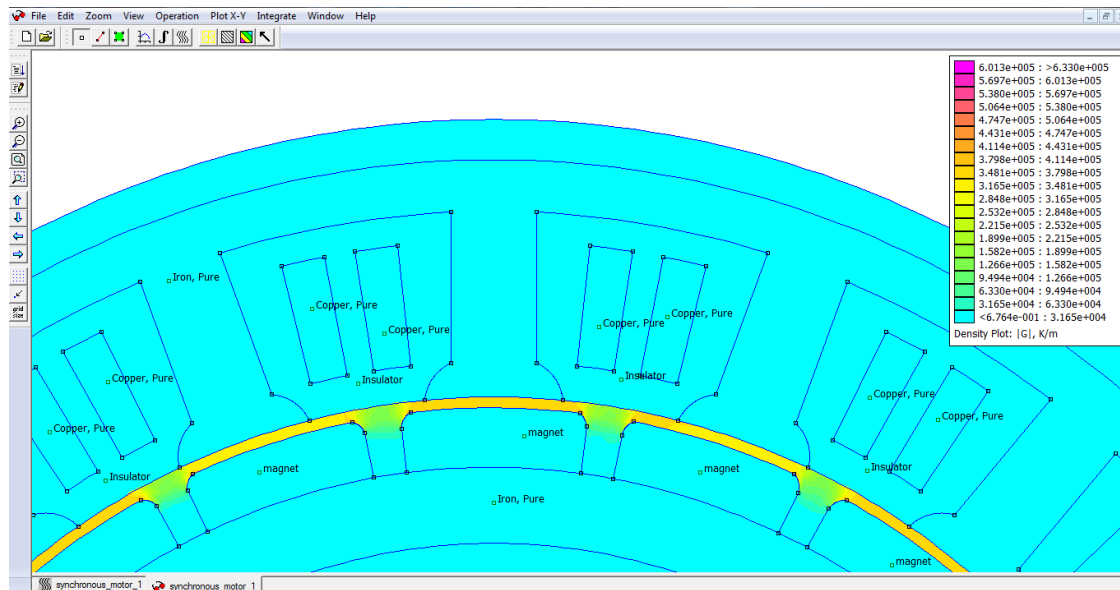
Σχ. 4.12 Λεπτομερής απεικόνιση της πυκνότητας θερμοροής

Στο Σχ. 4.13 καταγράφεται η πυκνότητα θερμοροής συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του κινητήρα.

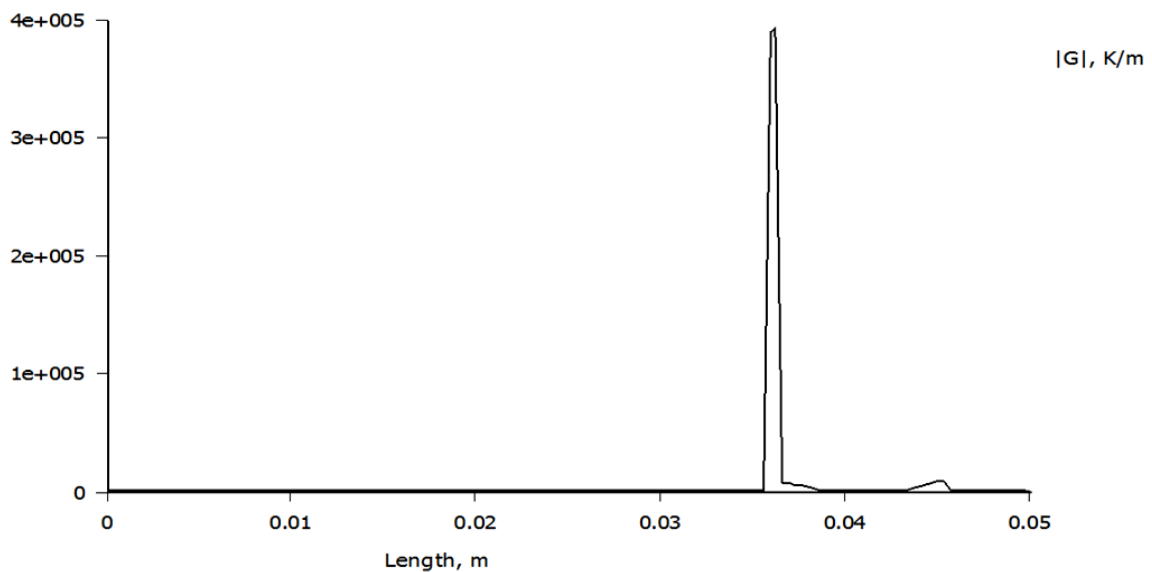


Σχ. 4.13 Πυκνότητα θερμοροής συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο

Στα Σχ. 4.14 και 4.15 απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης.



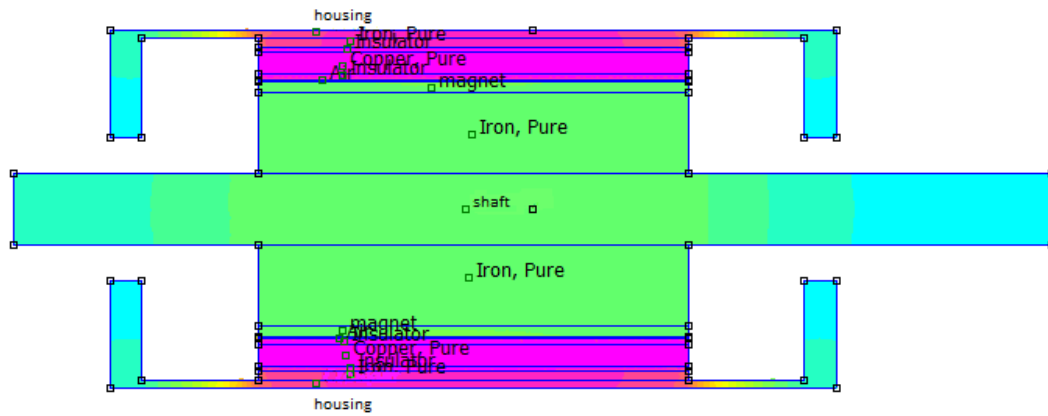
Σχ. 4.14 Μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης



Σχ. 4.15 Μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης

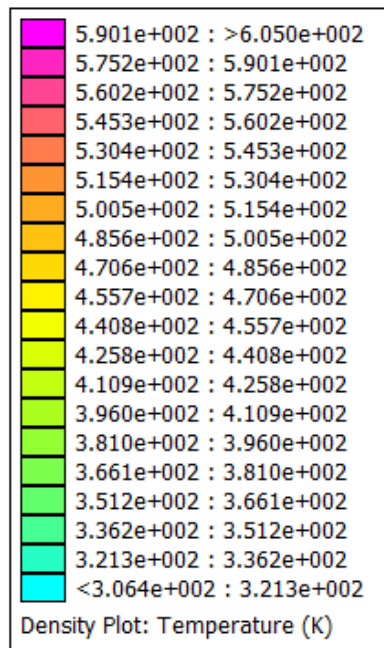
Από το Σχ. 4.15 διαπιστώνουμε ότι σημαντικές μεταβολές της θερμοκρασίας παρατηρούνται στο διάκενο του κινητήρα. Στις υπόλοιπες περιοχές του κινητήρα δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες θερμοκρασιακές διαφορές.

• Τομή παράλληλη στον άξονα του κινητήρα



Σχ. 4.16 Θερμοκρασιακή κατανομή στην παράλληλη τομή του κινητήρα

Υπόμνημα:



Μέσω του Σχ. 4.16 θα υπολογίσουμε τις τελικές θερμοκρασίες στα τυλίγματα, στον πυρήνα του στάτη και στον πυρήνα του δρομέα.

Η τελική θερμοκρασία στα τυλίγματα είναι ίση με 605K ή 332°C :

```
FEMM Output
Point: x=-0.0187, y=0.0414
T = 605.01 K
|F| = 2707.72 W/m^2
Fx = -1871.08 W/m^2
Fy = 1957.24 W/m^2
|G| = 6.75241 K/m
Gx = -4.66604 K/m
Gy = 4.88089 K/m
Kx = 401 W/(m^2K)
Ky = 401 W/(m^2K)
```

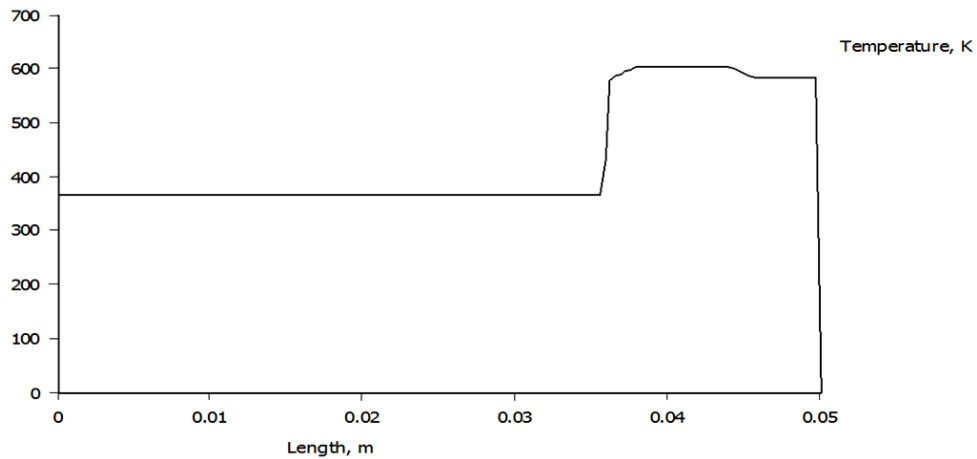
Η τελική θερμοκρασία του πυρήνα του στάτη είναι ίση με 585.6K ή 312.6°C :

```
FEMM Output
Point: x=-0.0181, y=0.0469
T = 585.62 K
|F| = 9779.31 W/m^2
Fx = -1358.8 W/m^2
Fy = 9684.45 W/m^2
|G| = 121.633 K/m
Gx = -16.9004 K/m
Gy = 120.453 K/m
Kx = 80.4 W/(m^2K)
Ky = 80.4 W/(m^2K)
```

Η τελική θερμοκρασία του πυρήνα του δρομέα είναι ίση με 365.2K ή 92.2°C :

```
FEMM Output
Point: x=-0.0244, y=0.0195
T = 365.225 K
|F| = 2153.67 W/m^2
Fx = -408.213 W/m^2
Fy = -2114.63 W/m^2
|G| = 26.7869 K/m
Gx = -5.07727 K/m
Gy = -26.3013 K/m
Kx = 80.4 W/(m^2K)
Ky = 80.4 W/(m^2K)
```

Ακολουθεί η κατανομή της θερμοκρασίας στην παράλληλη τομή του κινητήρα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του.

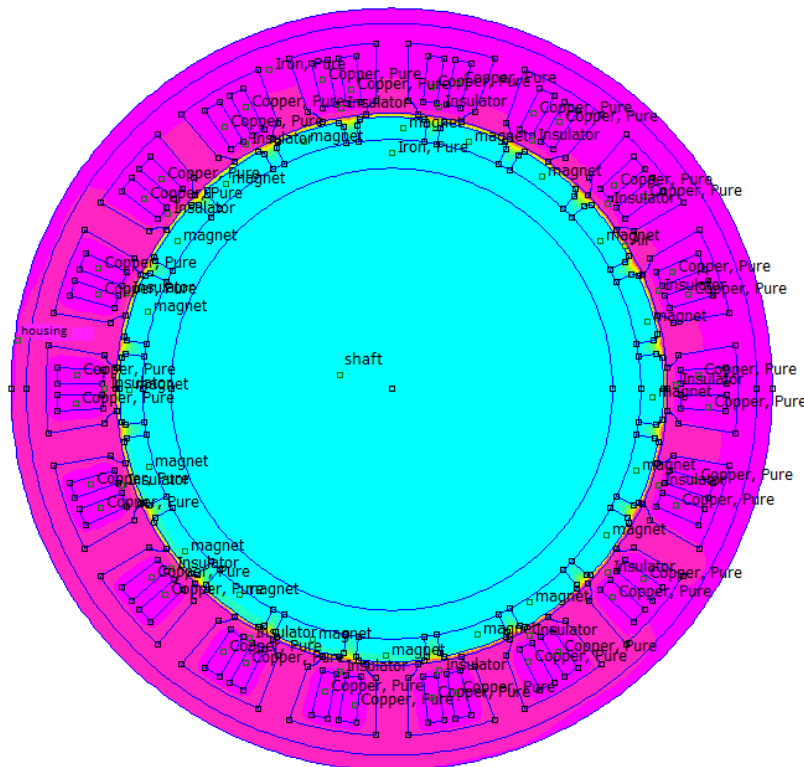


Σχ. 4.17 Κατανομή της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του κινητήρα

Θα υπολογίσουμε τη θερμοκρασιακή κατανομή στην κάθετη και στη παράλληλη τομή του κινητήρα θεωρώντας τώρα ότι το ανά φάση ρεύμα των τυλιγμάτων είναι ίσο με 8.5 A, οπότε οι απώλειες χαλκού ανέρχονται σε 173.4 W και η πυκνότητα των απωλειών υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση :

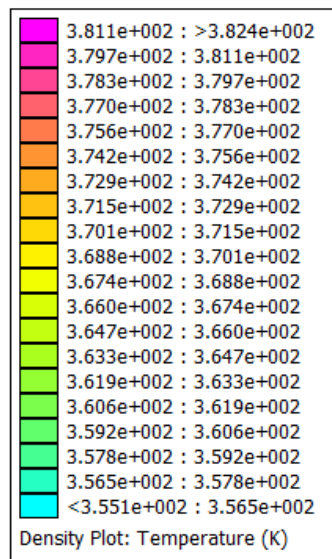
$$\text{Πυκνότητα απωλειών} = \frac{P_{Cu}}{N \cdot V_s} = \frac{173.4}{18 \cdot 1.04941 \cdot 10^{-5}} \frac{W}{m^3} = 9.1798 \cdot 10^5 \frac{W}{m^3} \quad (4.8)$$

- Τομή κάθετη στον άξονα του κινητήρα

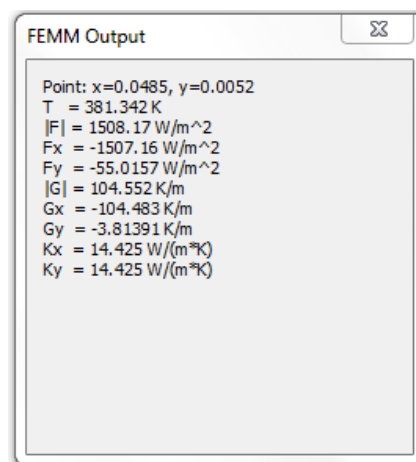


Σχ. 4.18 Κατανομή της θερμοκρασίας στην κάθετη τομή του κινητήρα

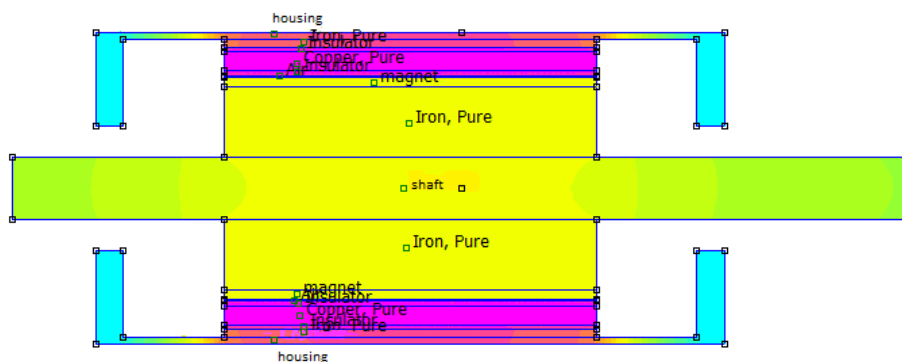
Υπόμνημα:



Η τελική τιμή της θερμοκρασίας του κελύφους είναι ίση με 381.3K ή 108.3°C :

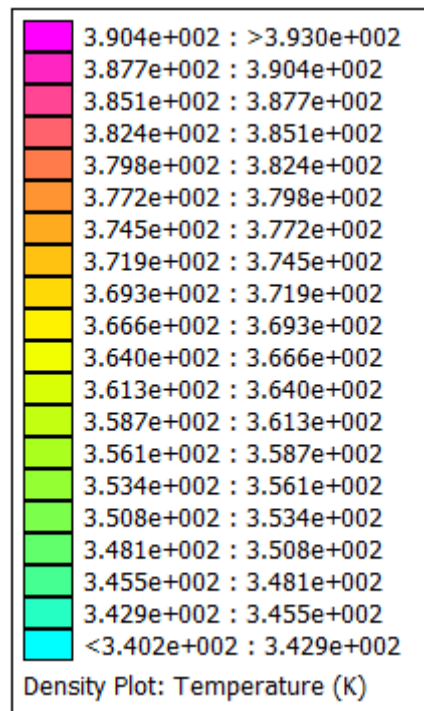


- Τομή παράλληλη στον άξονα του κινητήρα

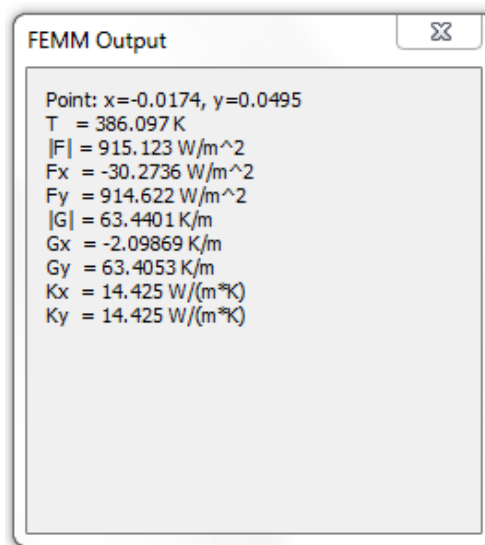


Σχ. 4.19 Κατανομή της θερμοκρασίας στην παράλληλη τομή του κινητήρα

Υπόμνημα:



Η τελική θερμοκρασία του κελύφους λαμβάνει την τιμή 386.1K ή 113.1°C :

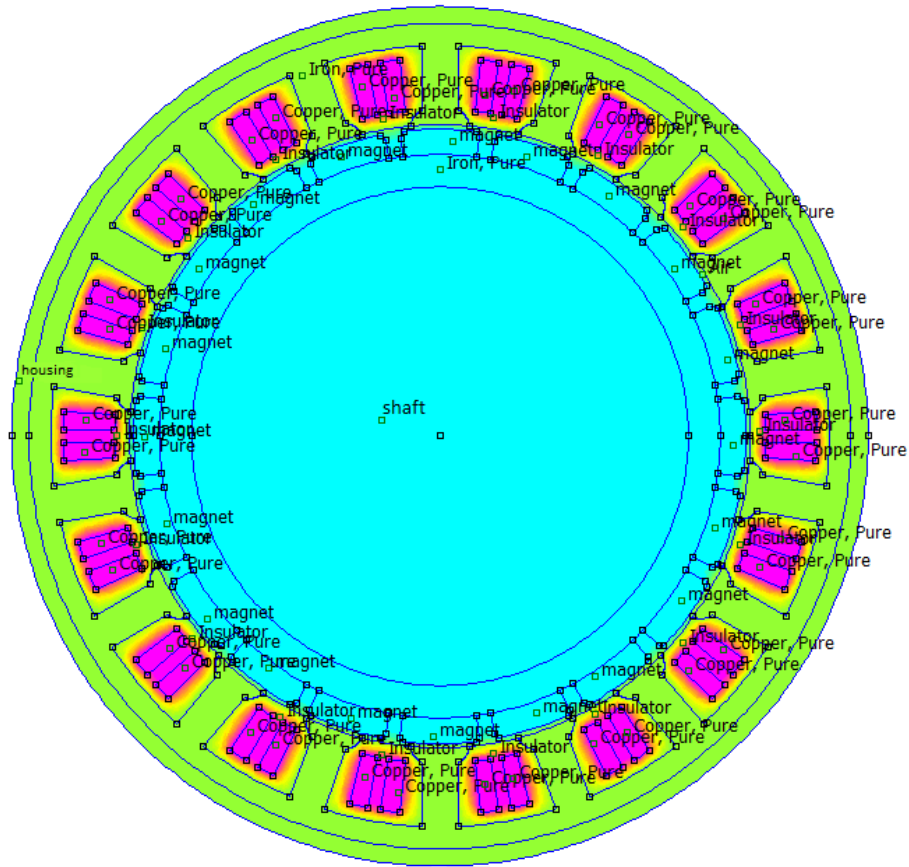


•2^η σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Στη δεύτερη σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης καταγράφεται η θερμοκρασιακή κατανομή στις δύο τομές του κινητήρα θεωρώντας ότι το ανά φάση ρεύμα των τυλιγμάτων λαμβάνει την τιμή 9.25 A. Οι απώλειες χαλκού είναι ίσες με 205.35 W και η πυκνότητα των πηγών θερμότητας προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

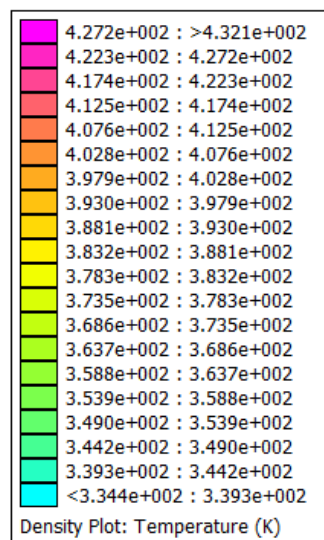
$$\text{Πυκνότητα απωλειών} = \frac{P_{Cu}}{N \cdot V_s} = \frac{205.35}{18 \cdot 1.04941 \cdot 10^{-5}} \frac{W}{m^3} = 1.0871 \cdot 10^6 \frac{W}{m^3} \quad (4.9)$$

•Τομή κάθετη στον άξονα του κινητήρα

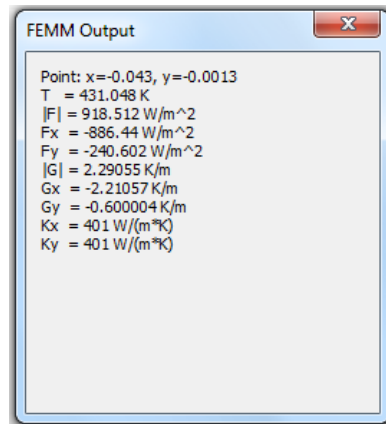


Σχ. 4.20 Κατανομή θερμοκρασίας στην κάθετη τομή του κινητήρα

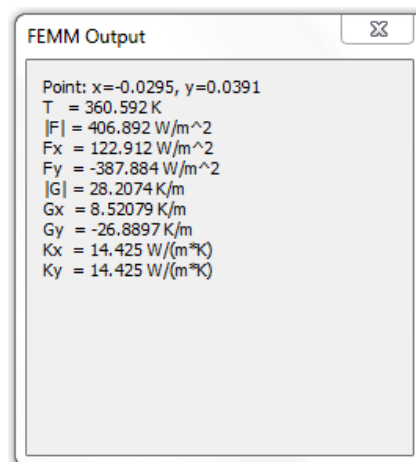
Υπόμνημα:



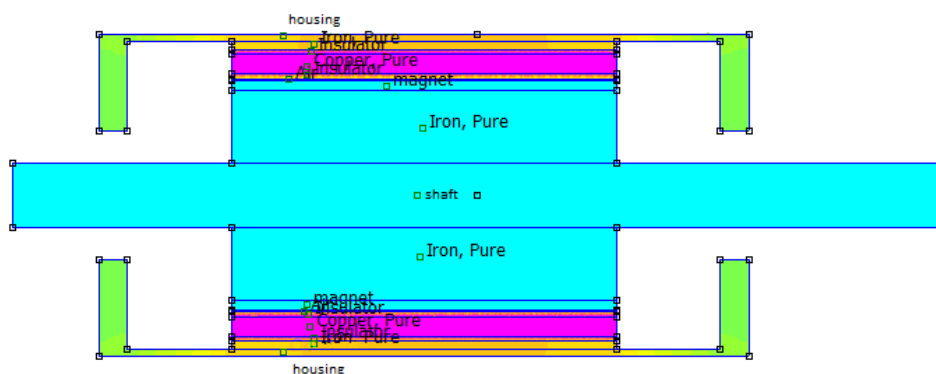
Από το Σχ. 4.20 υπολογίζουμε τις τελικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων και του κελύφους. Η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων είναι ίση με 431.1K ή 158.1°C :



Η τελική θερμοκρασία του κελύφους είναι ίση με 360.6K ή 87.6°C :

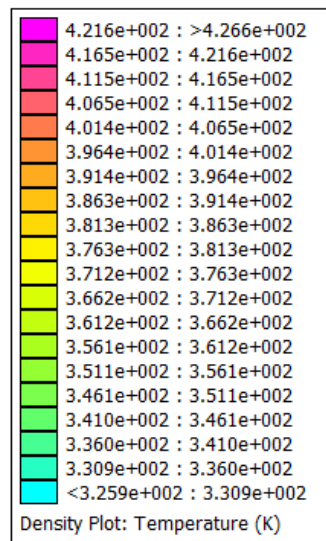


• Τομή παράλληλη στον άξονα του κινητήρα

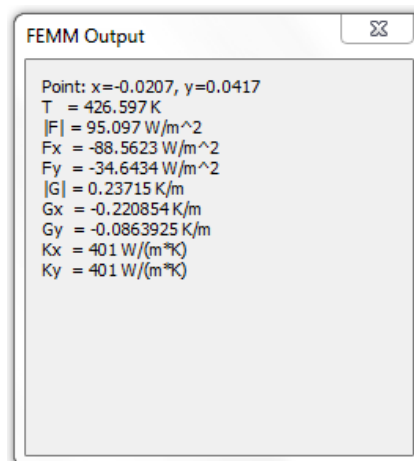


Σχ. 4.21 Κατανομή της θερμοκρασίας στην παράλληλη τομή του κινητήρα

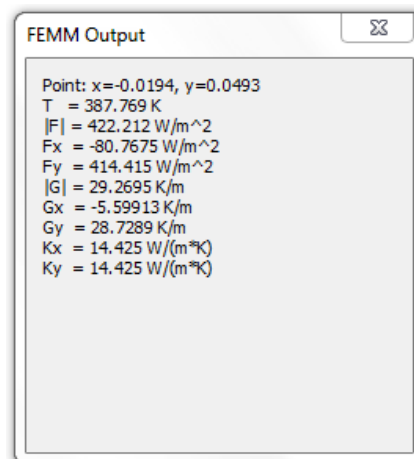
Υπόμνημα:



Μέσω του Σχ. 4.21 προκύπτει η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων ίση με 426.6K ή 153.6°C :



Η τελική θερμοκρασία του κελύφους είναι ίση με 387.8K ή 114.8°C :



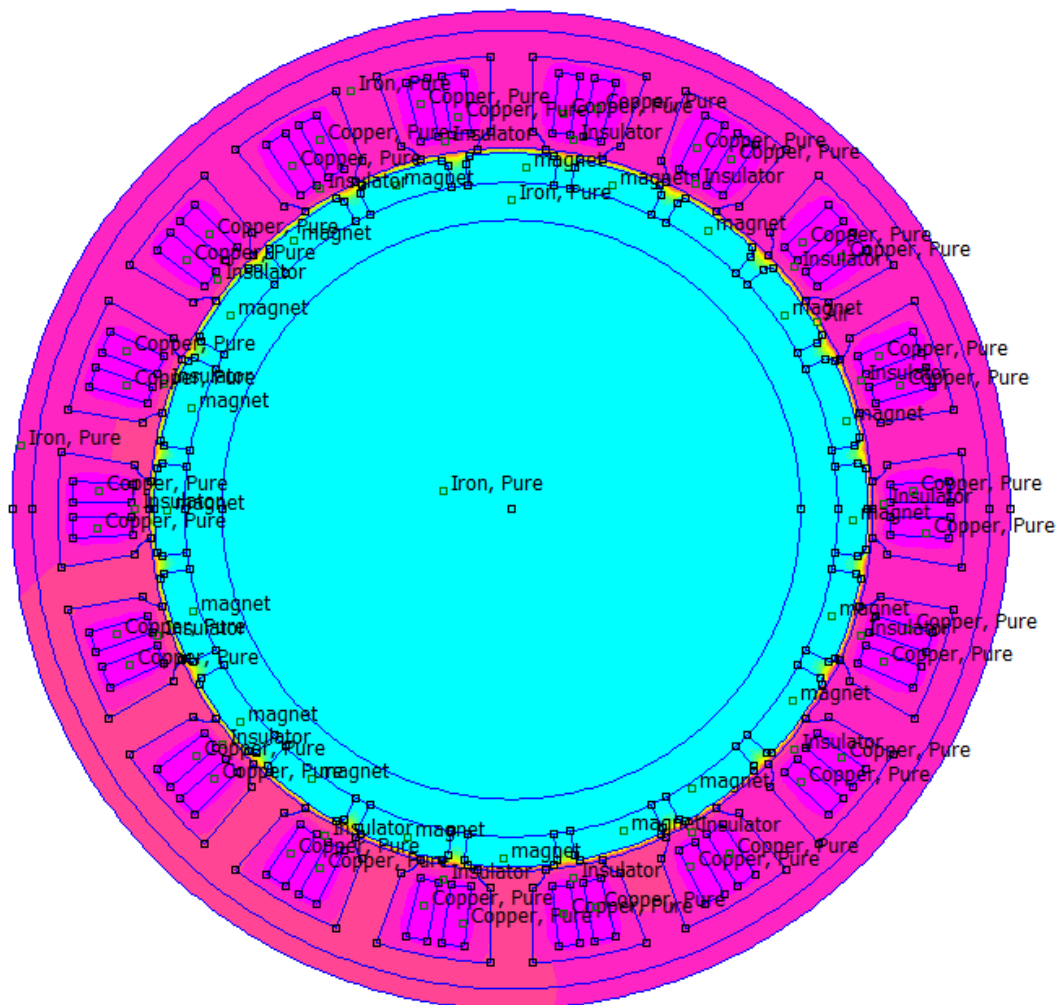
•3^η σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Στην τρίτη σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης θεωρούμε ότι το φασικό ρεύμα των τυλιγμάτων είναι ίσο με 4.92 A οπότε η τιμή των απωλειών χαλκού είναι ίση με 58.095 W. Η πυκνότητα των πηγών θερμότητας προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Πυκνότητα απωλειών} = \frac{P_{Cu}}{N \cdot V_s} = \frac{58.095}{18 \cdot 1.04941 \cdot 10^{-5}} \frac{W}{m^3} = 3.0755 \cdot 10^5 \frac{W}{m^3} \quad (4.10)$$

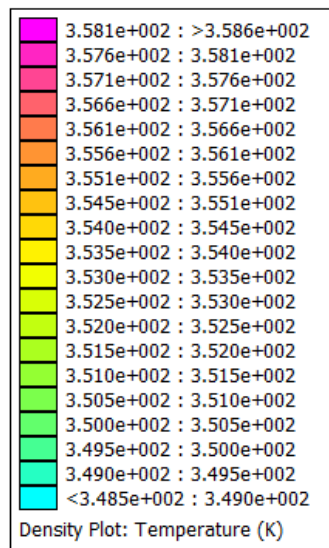
Για τις επόμενες τρεις σειρές αποτελεσμάτων προσομοίωσης θα θεωρήσουμε ότι το υλικό του άξονα και του κελύφους είναι ο σίδηρος.

•Τομή κάθετη στον άξονα του κινητήρα

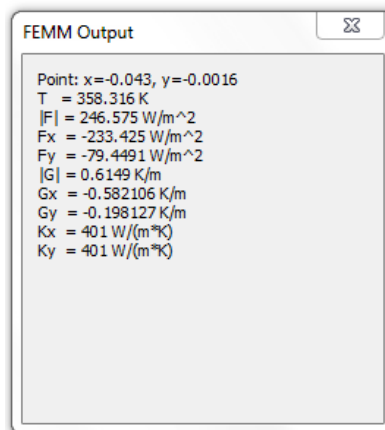


Σχ. 4.22 Κατανομή της θερμοκρασίας στην κάθετη τομή του κινητήρα

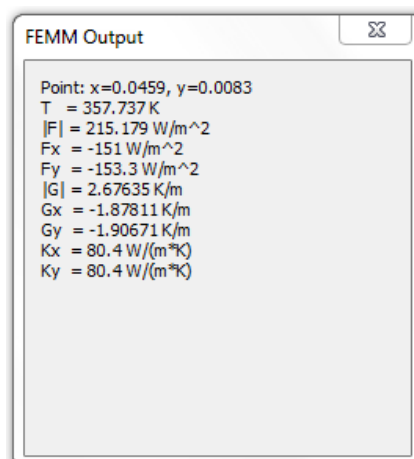
Υπόμνημα:



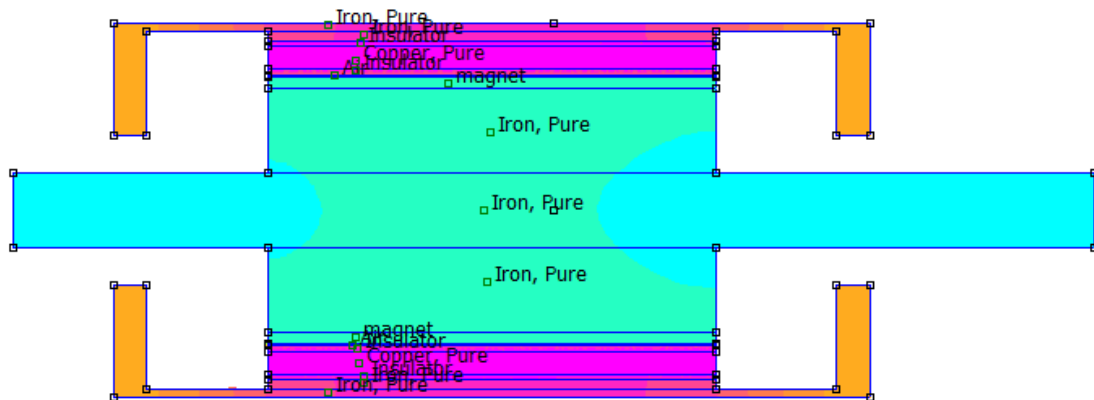
Από την κατανομή του Σχ. 4.22 προκύπτουν οι τελικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων και του πυρήνα του στάτη. Η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων είναι ίση με 358.3K ή 85.3°C :



Η τελική θερμοκρασία του πυρήνα του στάτη είναι ίση με 357.7K ή 84.7°C :

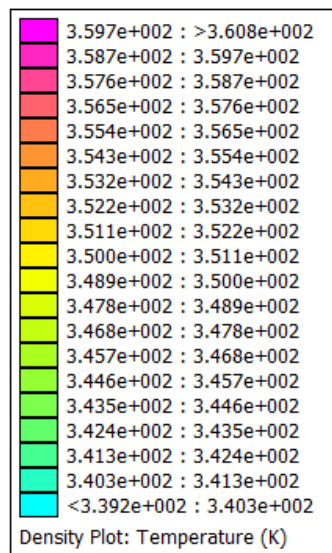


• Τομή παράλληλη στον άξονα του κινητήρα

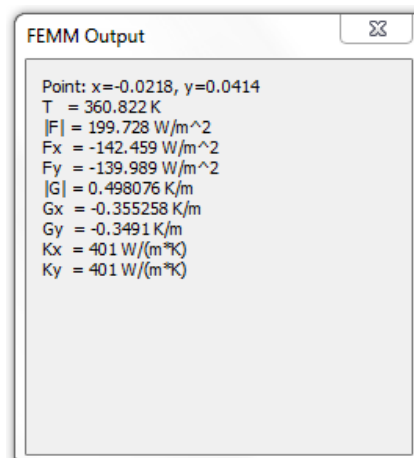


Σχ. 4.23 Κατανομή της θερμοκρασίας στην παράλληλη τομή του κινητήρα

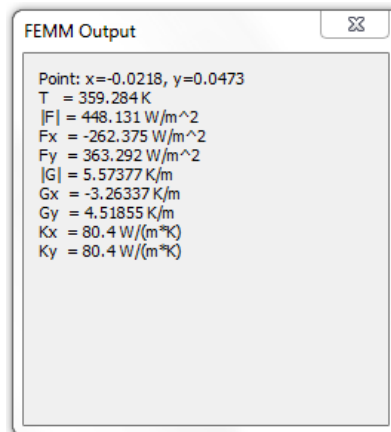
Υπόμνημα:



Η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων είναι ίση με 360.8K ή 87.8°C :



Η τελική θερμοκρασία του πυρήνα του στάτη είναι ίση με 359.3K ή 86.3°C :

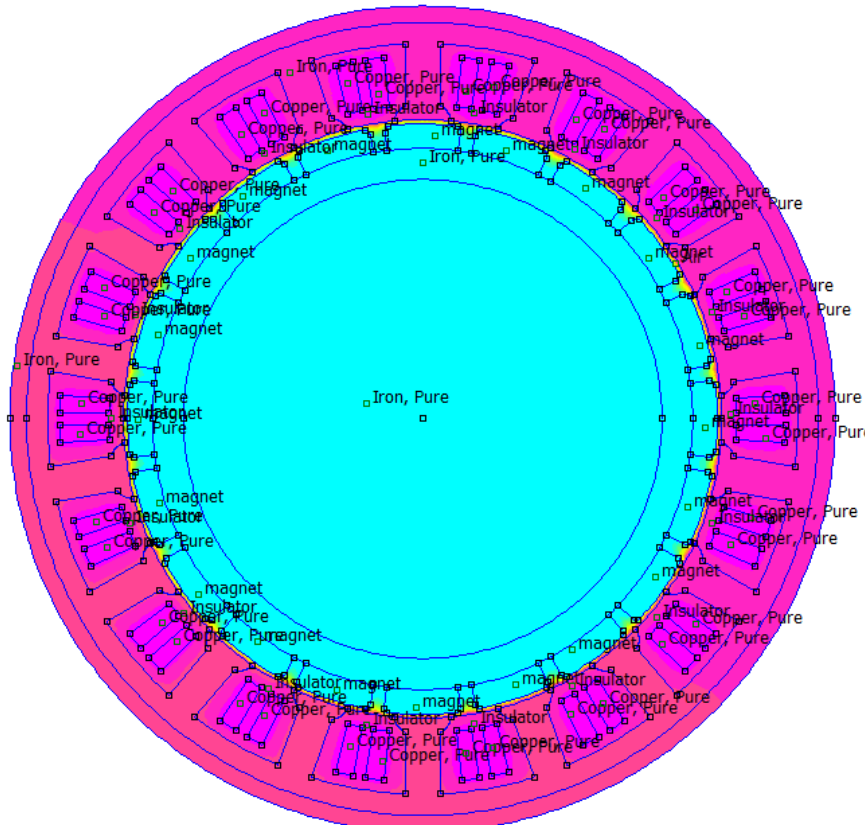


•4^η σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Στην τέταρτη σειρά των αποτελεσμάτων προσομοίωσης η τιμή του ρεύματος τυλιγμάτων είναι ίση με 6.45 A με τις απώλειες χαλκού να ανέρχονται σε 99.846 W. Η πυκνότητα των πηγών θερμότητας λαμβάνει την ακόλουθη τιμή :

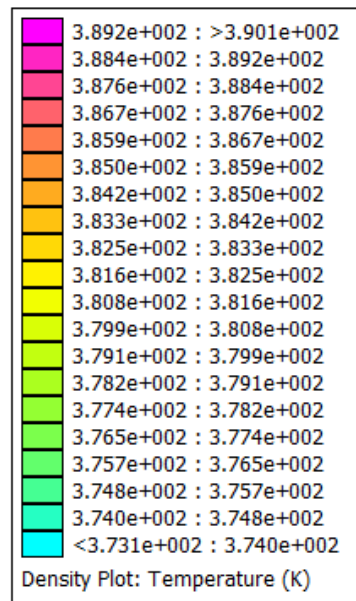
$$\text{Πυκνότητα απωλειών} = \frac{P_{Cu}}{N \cdot V_s} = \frac{99.846}{18 \cdot 1.04941 \cdot 10^{-5}} \frac{W}{m^3} = 5.2858 \cdot 10^5 \frac{W}{m^3} \quad (4.11)$$

•Τομή κάθετη στον άξονα του κινητήρα

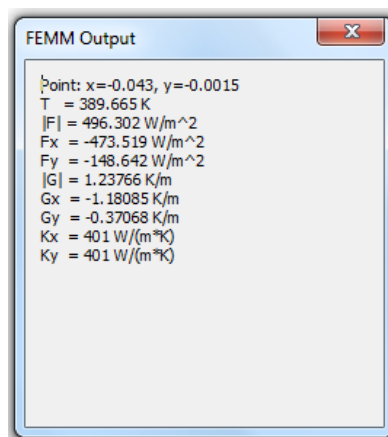


Σχ. 4.24 Κατανομή της θερμοκρασίας στην κάθετη τομή του κινητήρα

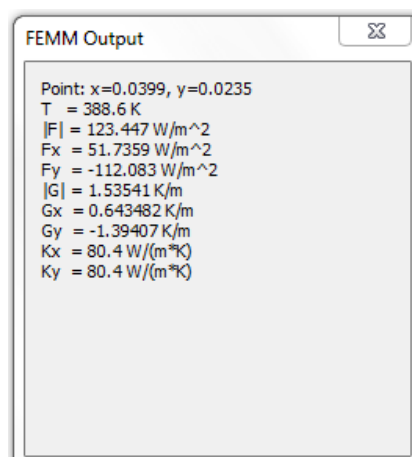
Υπόμνημα:



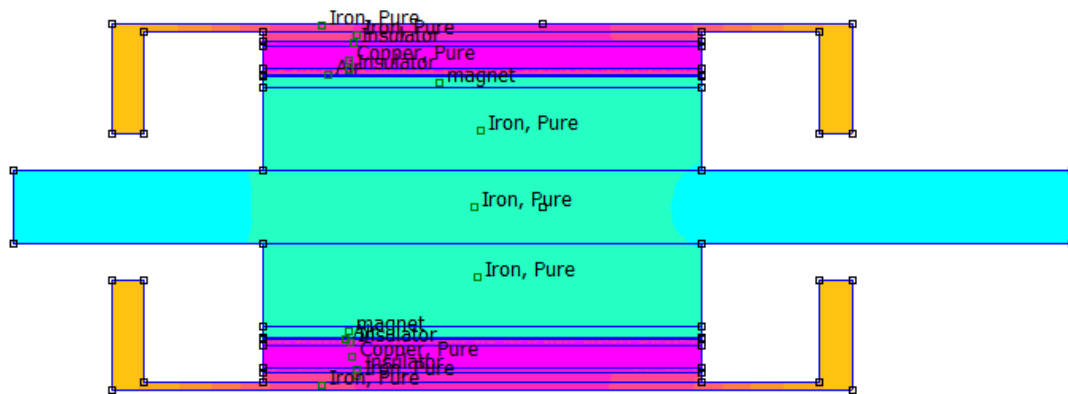
Από το Σχ. 4.24 προκύπτει ότι η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων είναι ίση με 389.7K ή 116.7°C :



Η τελική θερμοκρασία του πυρήνα του στάτη είναι ίση με 388.6 K ή 115.6 °C :

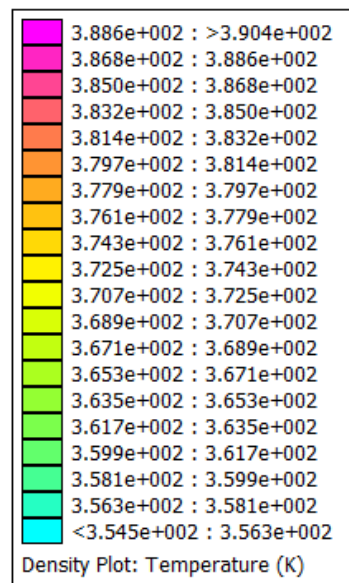


• Τομή παράλληλη στον άξονα του κινητήρα

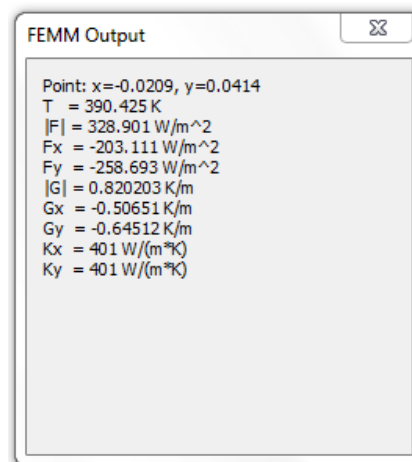


Σχ. 4.25 Κατανομή της θερμοκρασίας στην παράλληλη τομή του κινητήρα

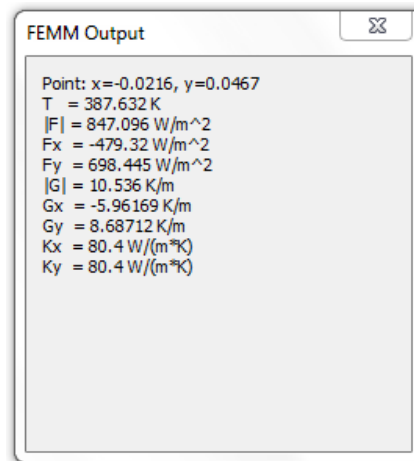
Υπόμνημα:



Η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων λαμβάνει την τιμή 390.4K ή 117.4°C :



Η τελική θερμοκρασία του πυρήνα του στάτη είναι ίση με 387.6K ή 114.6°C :

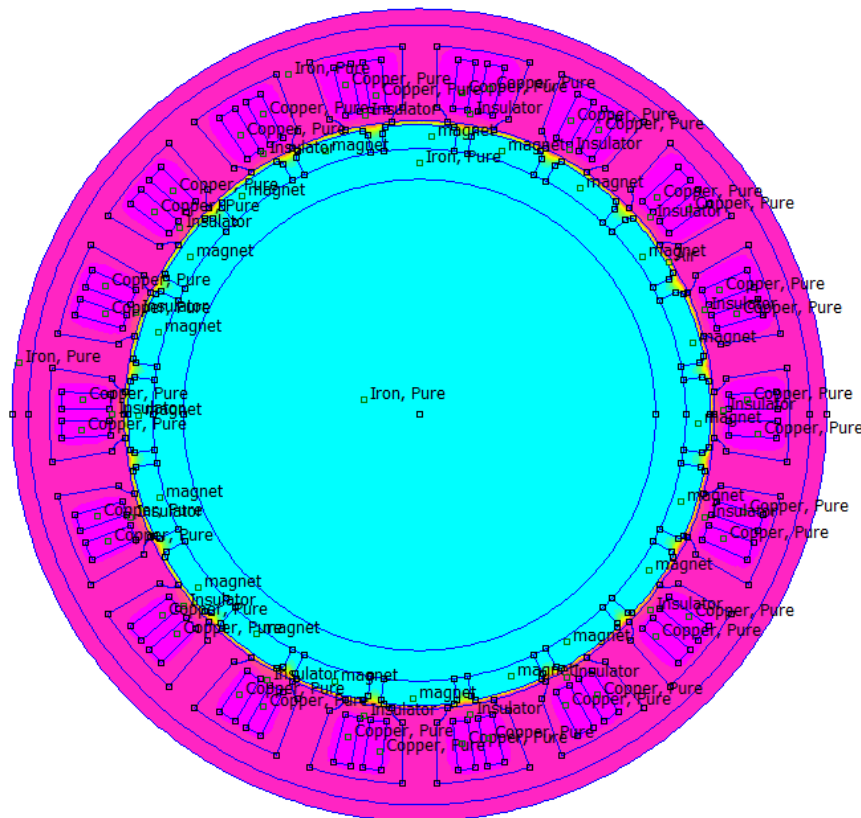


•5^η σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Στη συγκεκριμένη σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης το ανά φάση ρεύμα των τυλιγμάτων είναι ίσο με 3.9 A και οι απώλειες χαλκού ανέρχονται σε 36.504 W. Η πυκνότητα των πηγών θερμότητας υπολογίζεται ως εξής:

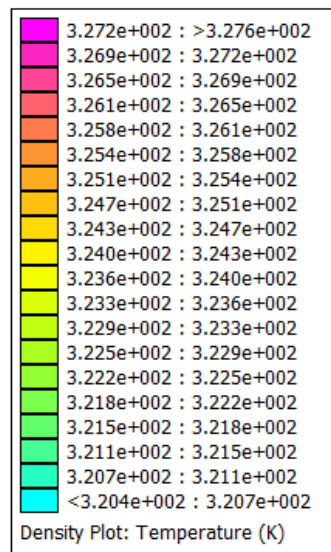
$$\text{Πυκνότητα απωλειών} = \frac{P_{Cu}}{N \cdot V_s} = \frac{36.504}{18 \cdot 1.04941 \cdot 10^{-5}} \frac{W}{m^3} = 1.93251 \cdot 10^5 \frac{W}{m^3} \quad (4.12)$$

•Τομή κάθετη στον άξονα του κινητήρα

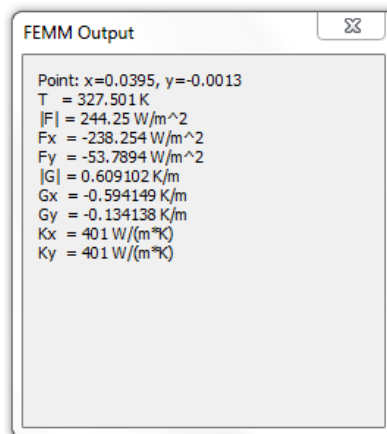


Σχ. 4.26 Κατανομή της θερμοκρασίας στην κάθετη τομή του κινητήρα

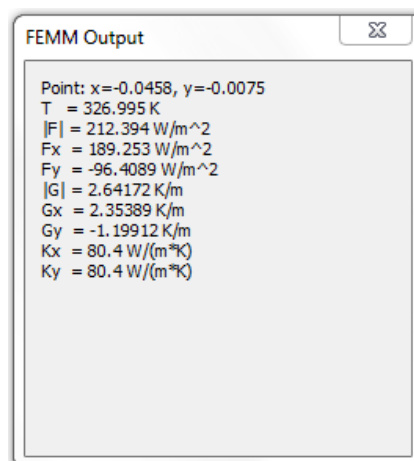
Υπόμνημα:



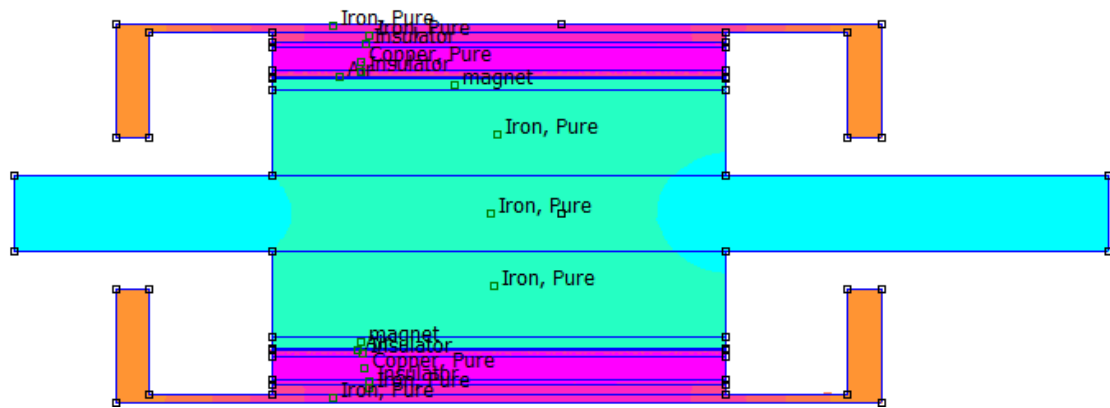
Από το Σχ. 4.26 θα υπολογίσουμε τις τελικές θερμοκρασίες στα τυλίγματα και στον πυρήνα του στάτη. Η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων είναι ίση με 327.5K ή 54.5 °C :



Η τελική θερμοκρασία του πυρήνα του στάτη είναι ίση με 327K ή 54°C :

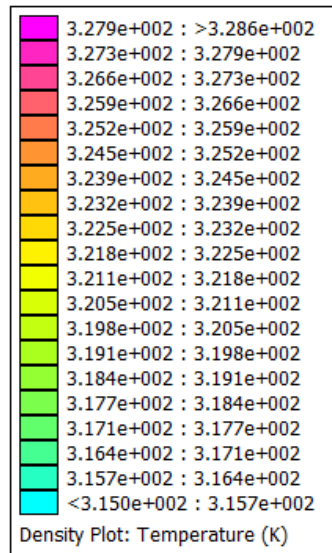


• Τομή παράλληλη στον άξονα του κινητήρα

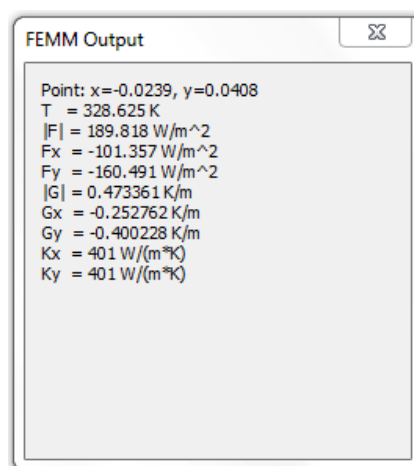


Σχ. 4.27 Κατανομή της θερμοκρασίας στην παράλληλη τομή του κινητήρα

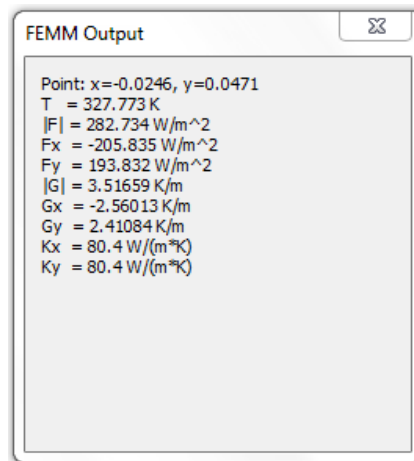
Υπόμνημα:



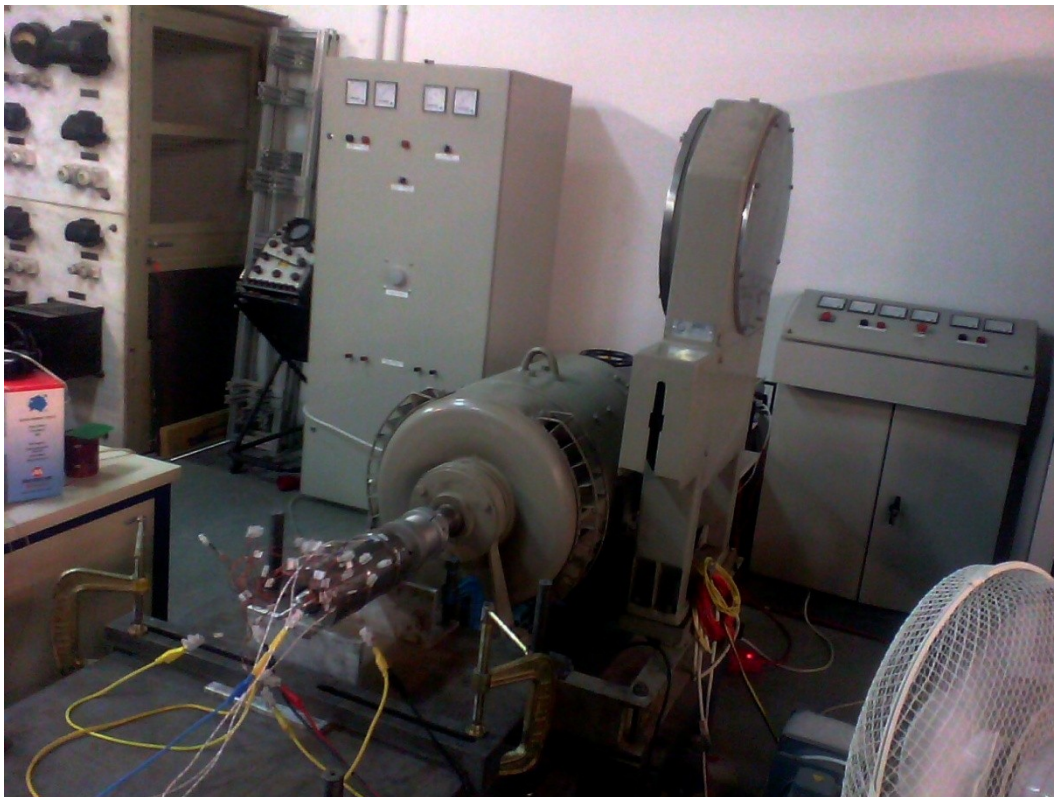
Από το Σχ. 4.27 προκύπτει ότι η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων είναι ίση με 328.6K ή 55.6°C :



Η τελική θερμοκρασία του πυρήνα του στάτη είναι ίση με 327.8K ή 54.8°C :



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

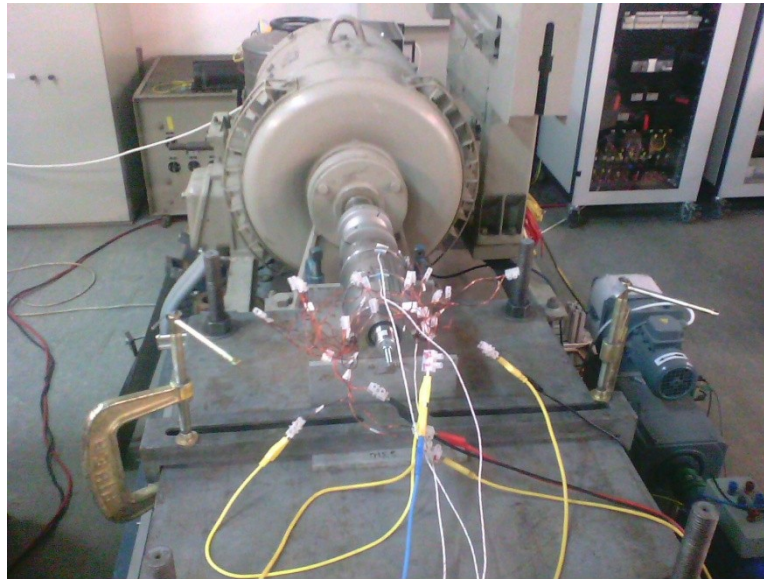


ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων που έχουν ληφθεί για διάφορες συνθήκες λειτουργίας του εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών. Έπειτα πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης που προκύπτουν από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και από το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων.

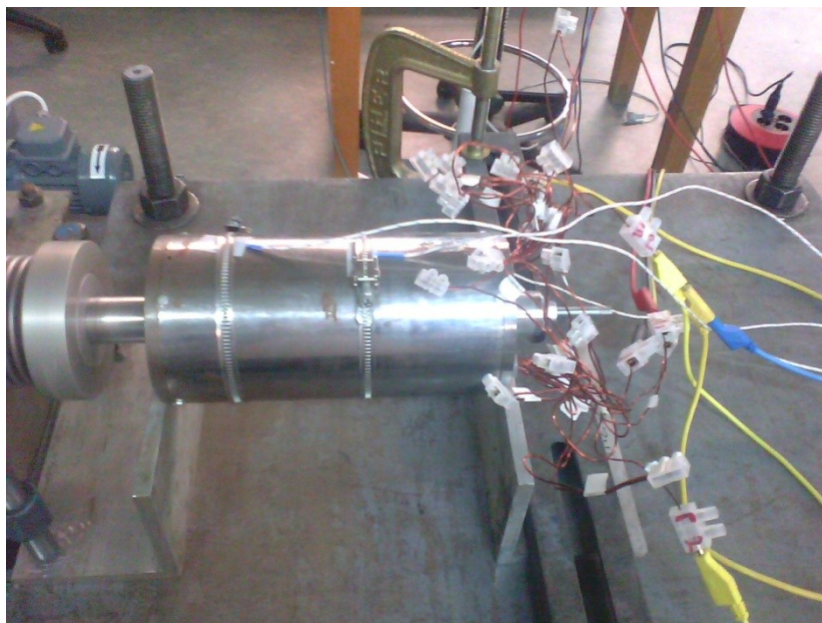
5.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των πειραματικών μετρήσεων παρουσιάζεται στο Σχ. 5.1.



Σχ. 5.1 Πειραματική διάταξη

Η μέτρηση των θερμοκρασιών τμημάτων του σύγχρονου κινητήρα πραγματοποιείται με τη χρήση θερμοστοιχείων. Στο Σχ. 5.2 απεικονίζεται ο εικοσαπολικός σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών τη θερμική ανάλυση του οποίου πραγματοποιείται η παρούσα εργασία. Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε τα θερμοστοιχεία που συνδέονται στο κέλυφος, στον πυρήνα του στάτη και στα τυλίγματα του στάτη για τη μέτρηση των θερμοκρασιών των αντίστοιχων περιοχών του κινητήρα.



Σχ. 5.2 Εικοσαπολικός σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών

Μέσω των πειραματικών μετρήσεων καταγράφεται η θερμική συμπεριφορά του σύγχρονου κινητήρα τόσο σε υψηλές όσο και σε μικρές ταχύτητες περιστροφής του άξονα. Η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του άξονα είναι οι 1200 ΣΑΛ και η ελάχιστη οι 300 ΣΑΛ. Για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής συνδέουμε τον άξονα του σύγχρονου κινητήρα στην κινητήρια μηχανή του Σχ. 5.3. Για τη λήψη των πειραματικών μετρήσεων ο σύγχρονος κινητήρας θα λειτουργήσει σαν σύγχρονη γεννήτρια τροφοδοτώντας τα φορτία του Σχ. 5.4. Η μέγιστη τιμή του φασικού ρεύματος τυλιγμάτων είναι ίση με 9.25 A και η ελάχιστη ίση με 3.9 A.



Σχ. 5.3 Κινητήρια DC μηχανή ξένης διέγερσης για τον έλεγχο της ταχύτητας



Σχ. 5.4 Τριφασικά φορτία που τροφοδοτούνται από τη σύγχρονη μηχανή

Τα πολύμετρα του Σχ. 5.5 συνδέονται με τα θερμοστοιχεία για την καταγραφή των θερμοκρασιών.



Σχ. 5.5 Πολύμετρα για την καταγραφή των θερμοκρασιών

Η διάταξη του Σχ. 5.6 χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του φασικού ρεύματος τυλιγμάτων της σύγχρονης μηχανής.



Σχ. 5.6 Διάταξη για τη μέτρηση του ρεύματος τυλιγμάτων της σύγχρονης μηχανής

Τα πολύμετρα του Σχ. 5.7 χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των φασικών τάσεων των τυλιγμάτων του στάτη.



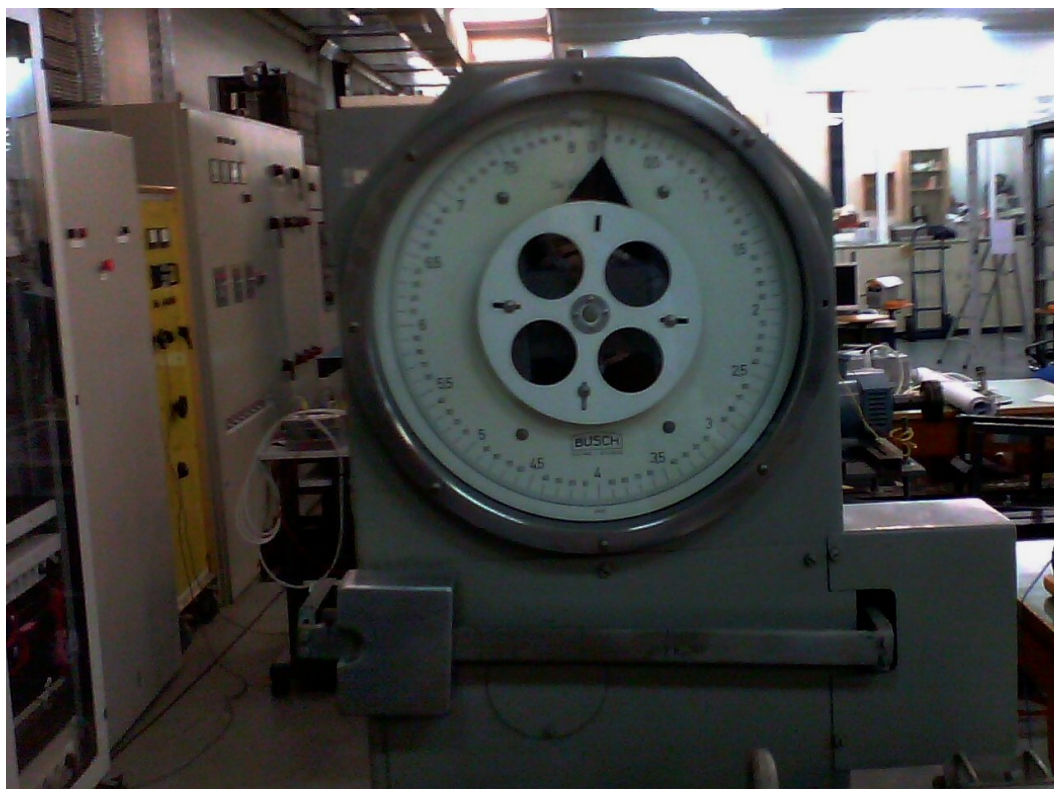
Σχ. 5.7 Πολύμετρα για τη μέτρηση των φασικών τάσεων των τυλιγμάτων

Η κινητήρια μηχανή του Σχ. 5.3 τροφοδοτείται από τον DC – DC Converter του Σχ. 5.8.



Σχ. 5.8 DC – DC Converter για την τροφοδότηση της κινητήριας μηχανής

Τέλος, το όργανο του Σχ. 5.9 χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ροπής που αναπτύσσει ο κινητήρας κατά την περιστροφή του.



Σχ. 5.9 Όργανο μέτρησης της ροπής του κινητήρα

5.2 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων

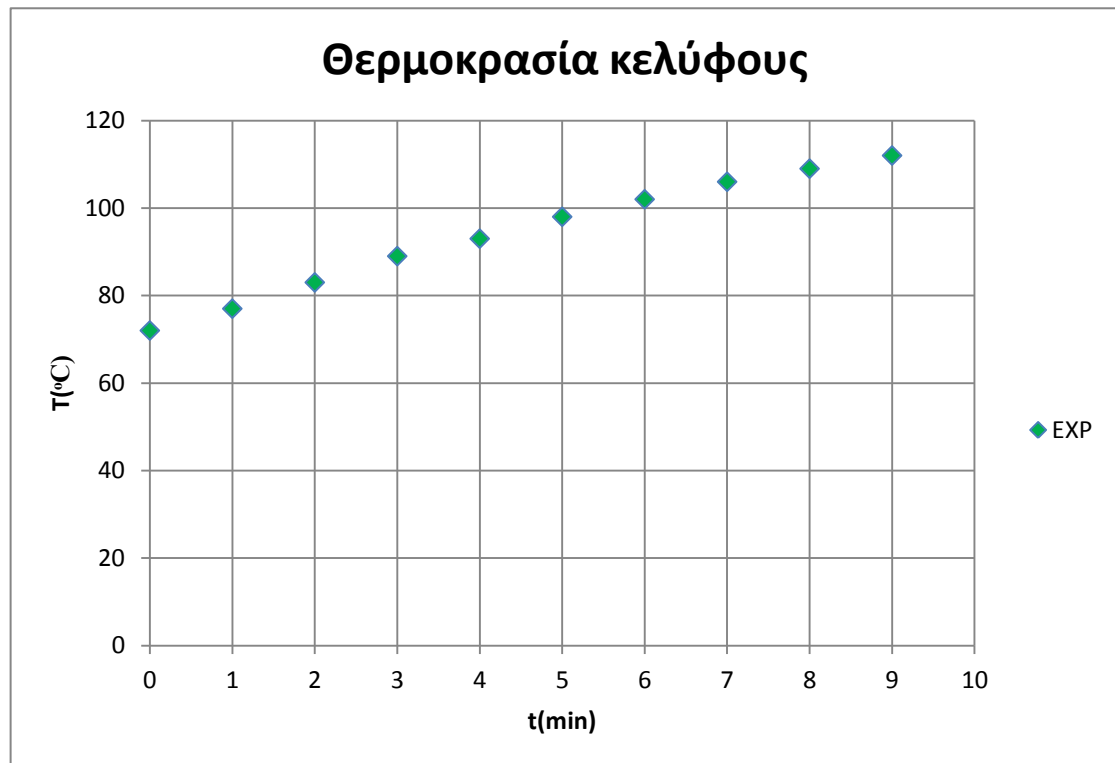
Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μια γραφική παρουσίαση, με τη χρήση προγράμματος υπολογιστικών φύλλων (αναφορά [3] – Λογισμικό), των πειραματικών μετρήσεων που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος. Στο τέλος της εργασίας παρατίθενται αναλυτικοί πίνακες με τα πειραματικά δεδομένα των μετρήσεων.

• 1^η σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων

Στην πρώτη σειρά των πειραματικών μετρήσεων καταγράφεται η θερμοκρασία του κελύφους του σύγχρονου κινητήρα. Στον Πίνακα 5.1 παρατίθενται τα κύρια δεδομένα διεξαγωγής της πρώτης σειράς πειραματικών μετρήσεων.

Πειραματικά δεδομένα	
Ένταση ρεύματος τυλιγμάτων	8.5 A
Ταχύτητα περιστροφής	1200 ΣΑΛ
Χρονική διάρκεια πειράματος	9 min
Αρχική θερμοκρασία κελύφους	72 °C
Τελική θερμοκρασία κελύφους	112 °C

Πίνακας 5.1 Δεδομένα της πρώτης σειράς μετρήσεων



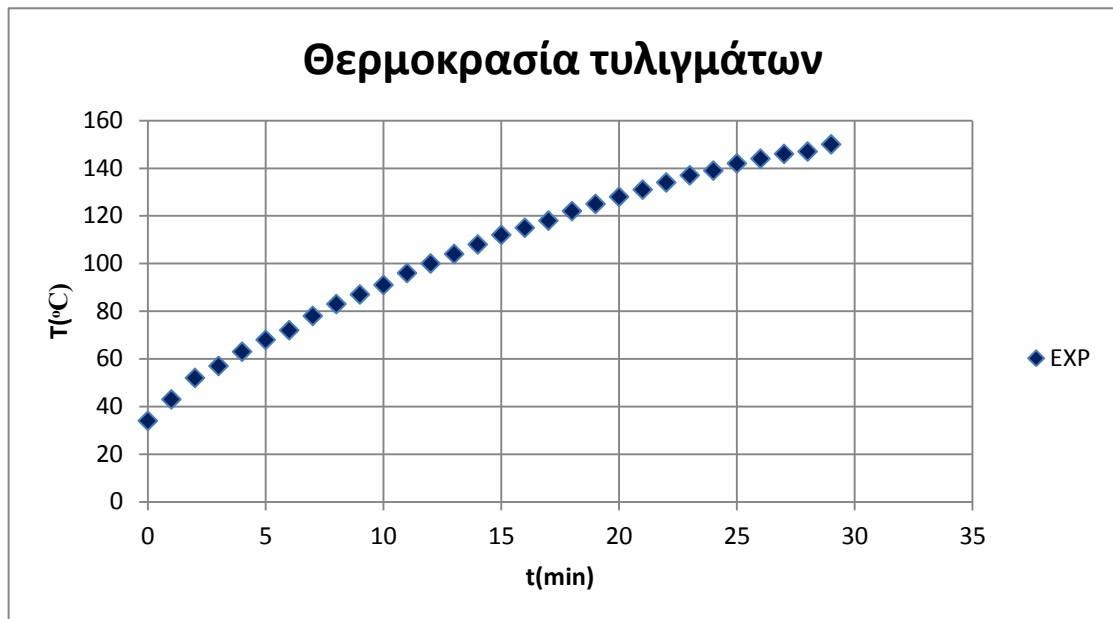
Σχ. 5.10 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας του κελύφους

• 2^η σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων

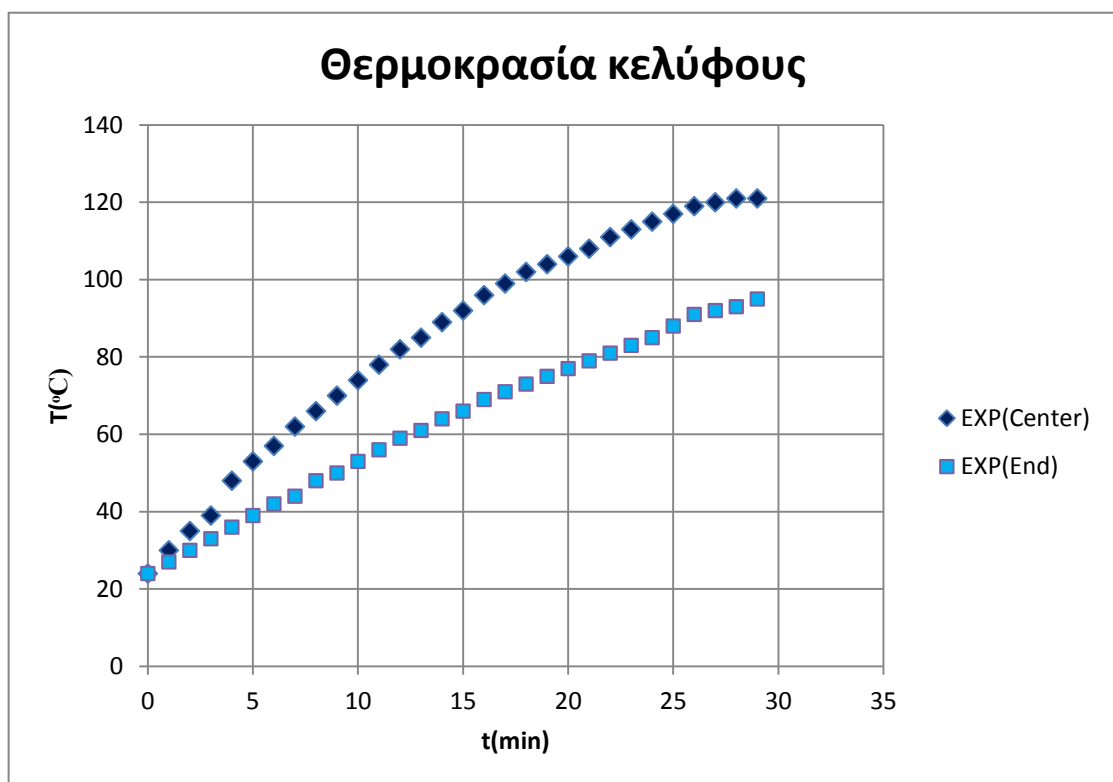
Στην δεύτερη σειρά των πειραματικών μετρήσεων καταγράφονται οι θερμοκρασίες του κελύφους και των τυλιγμάτων. Για την μέτρηση της θερμοκρασίας του κελύφους τοποθετήσαμε θερμοστοιχεία τόσο στο κέντρο όσο και στο ένα άκρο του κελύφους. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα βασικότερα δεδομένα της δεύτερης σειράς πειραματικών μετρήσεων

Πειραματικά δεδομένα	
Ένταση ρεύματος τυλιγμάτων	9.25 A
Ταχύτητα περιστροφής	1200 ΣΑΛ
Χρονική διάρκεια πειράματος	29 min
Αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων	34 °C
Τελική θερμοκρασία τυλιγμάτων	150 °C
Αρχική θερμοκρασία κελύφους	24 °C
Τελική θερμοκρασία κελύφους (κέντρο)	121 °C
Τελική θερμοκρασία κελύφους (άκρο)	95 °C

Πίνακας 5.2 Δεδομένα της δεύτερης σειράς μετρήσεων



Σχ. 5.11 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων



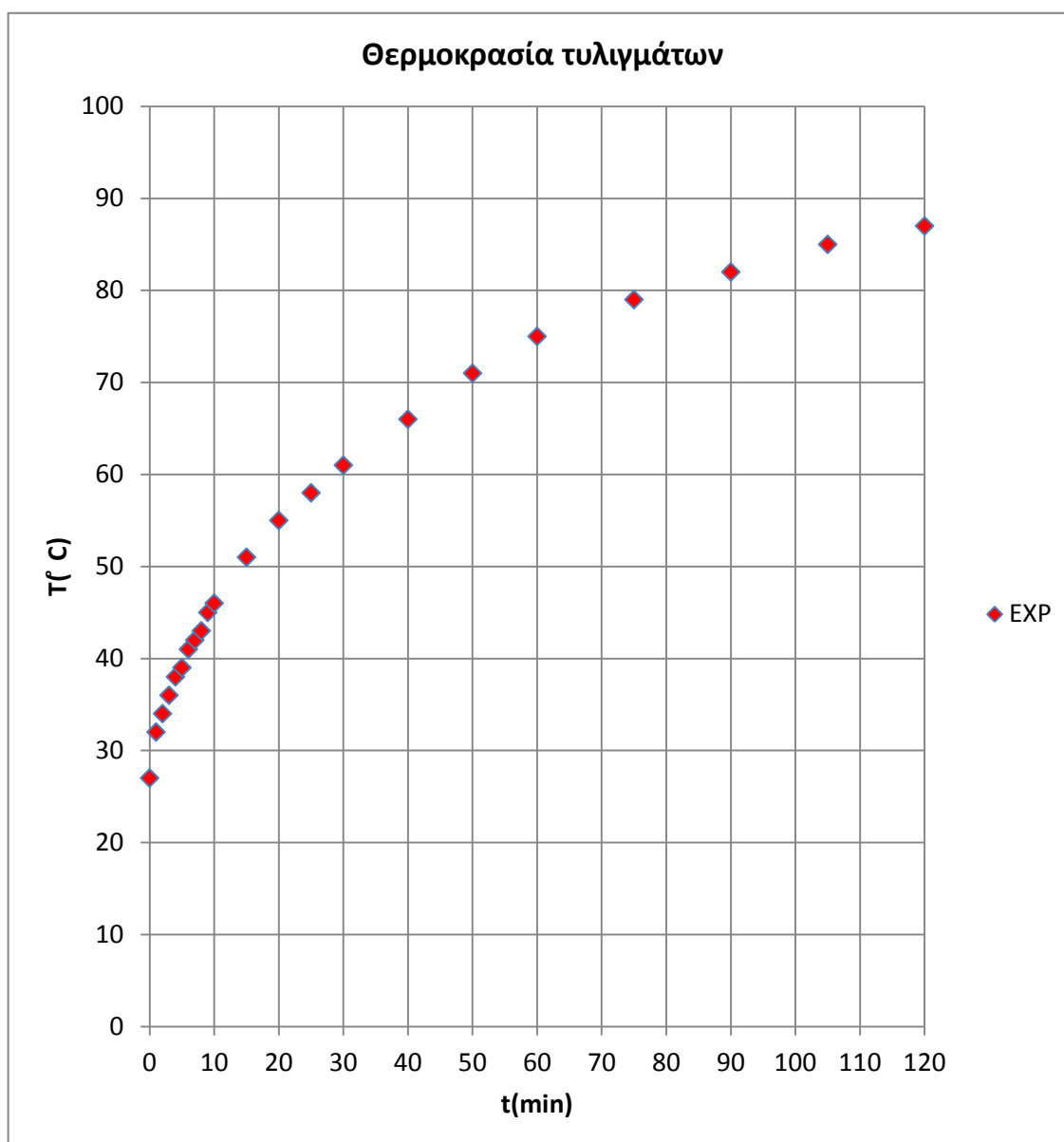
Σχ. 5.12 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας του κελύφους

• 3^η σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων

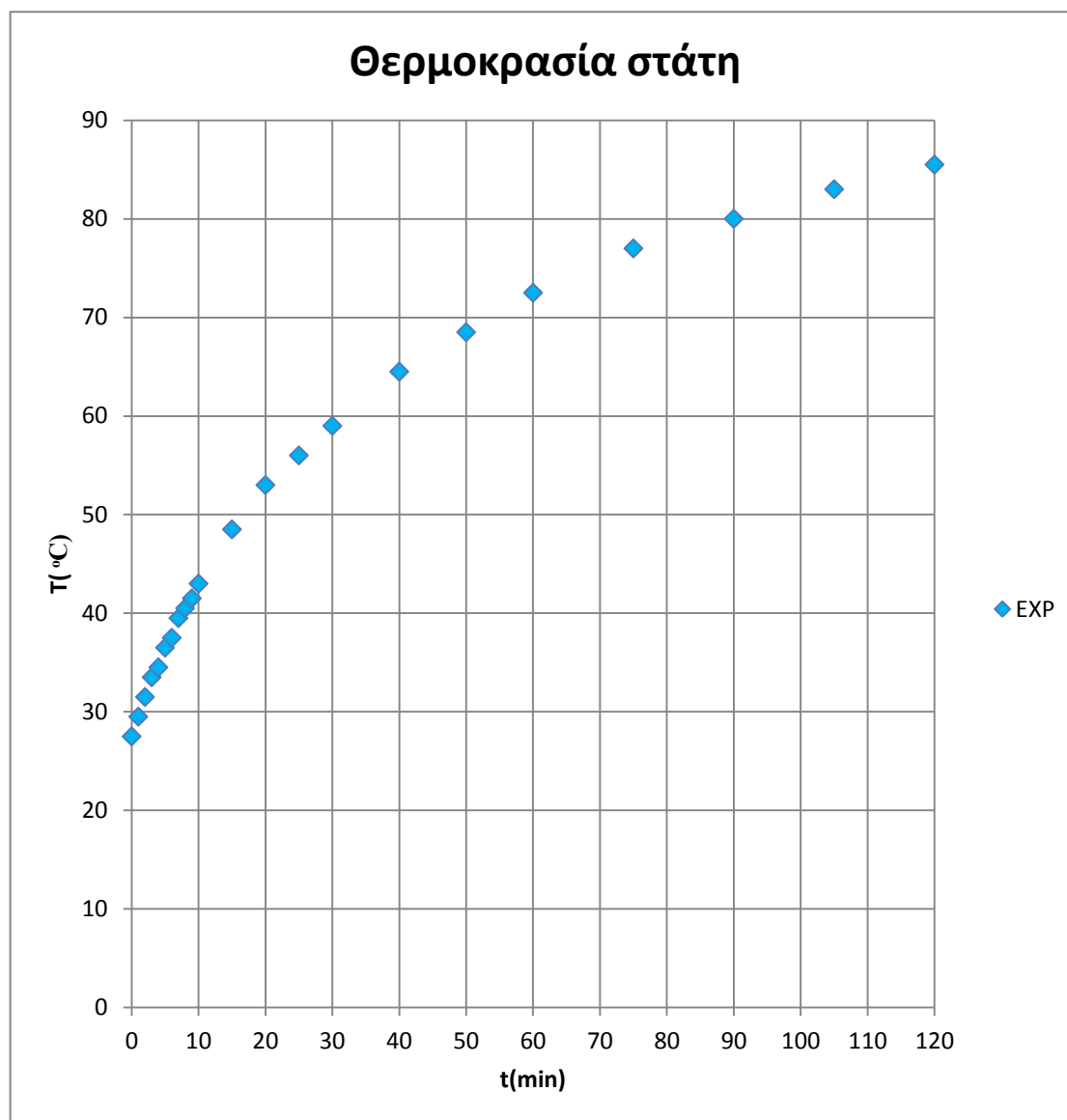
Στην τρίτη σειρά των πειραματικών μετρήσεων καταγράφονται οι θερμοκρασίες των τυλιγμάτων και του σάτη με τα δεδομένα διεξαγωγής του πειράματος να παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πειραματικά δεδομένα	
Ένταση ρεύματος τυλιγμάτων	4.92 A
Ταχύτητα περιστροφής	750 ΣΑΛ
Χρονική διάρκεια πειράματος	120 min
Αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων	27 °C
Τελική θερμοκρασία τυλιγμάτων	87 °C
Αρχική θερμοκρασία στάτη	27.5 °C
Τελική θερμοκρασία στάτη	85.5 °C

Πίνακας 5.3 Δεδομένα της τρίτης σειράς μετρήσεων



Σχ. 5.13 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων



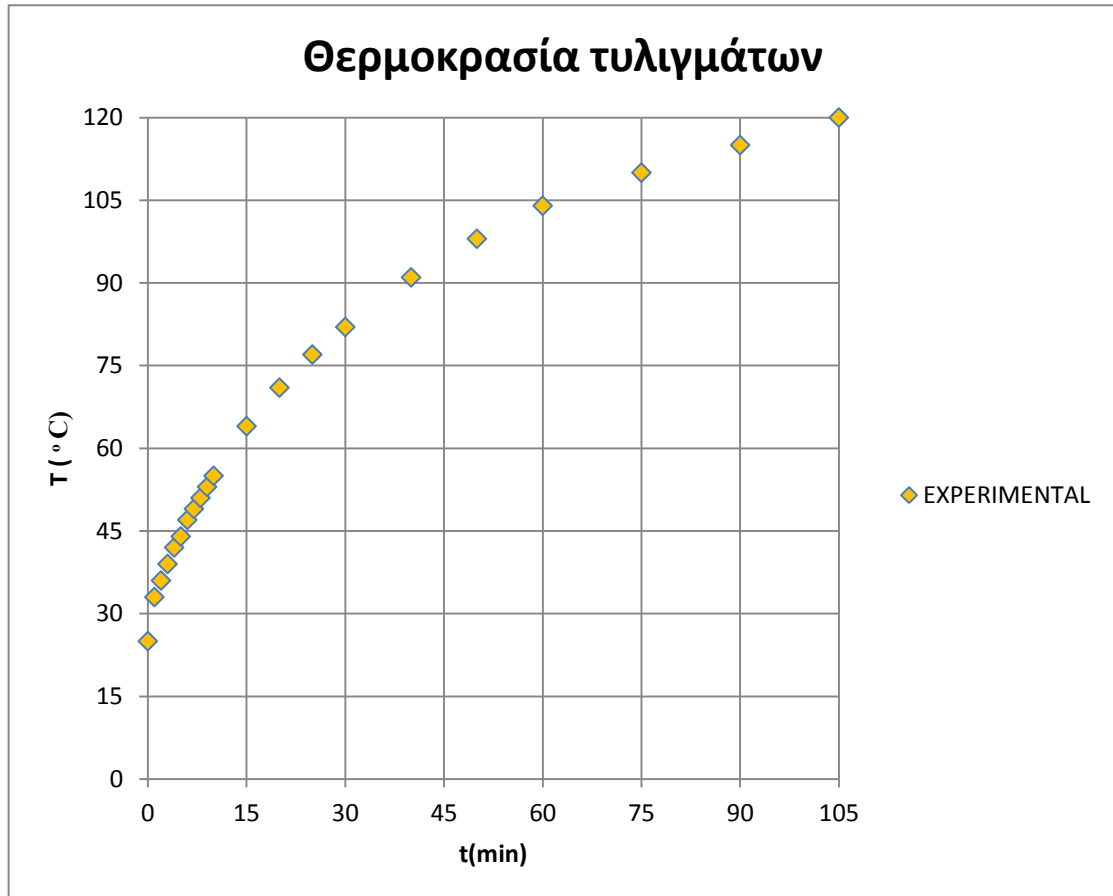
Σχ. 5.14 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας του στάτη

• 4^η σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων

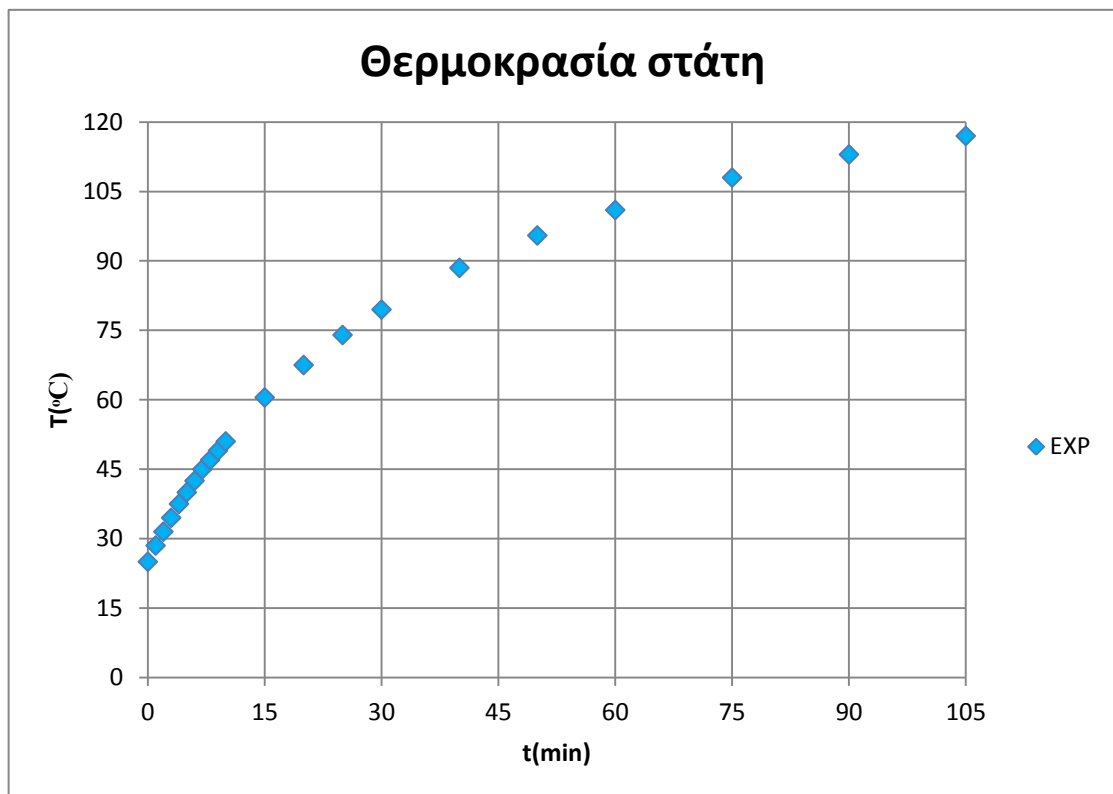
Σε αυτή τη σειρά πειραματικών μετρήσεων καταγράφονται οι θερμοκρασίες των τυλιγμάτων και του στάτη του σύγχρονου κινητήρα. Ο Πίνακας 5.4 περιέχει τα κύρια δεδομένα διεξαγωγής του πειράματος.

Πειραματικά δεδομένα	
Ένταση ρεύματος τυλιγμάτων	6.45 A
Ταχύτητα περιστροφής	998 ΣΑΛ
Χρονική διάρκεια πειράματος	105 min
Αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων	25 °C
Τελική θερμοκρασία τυλιγμάτων	120 °C
Αρχική θερμοκρασία στάτη	25 °C
Τελική θερμοκρασία στάτη	117 °C

Πίνακας 5.4 Δεδομένα της τέταρτης σειράς μετρήσεων



Σχ. 5.15 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων



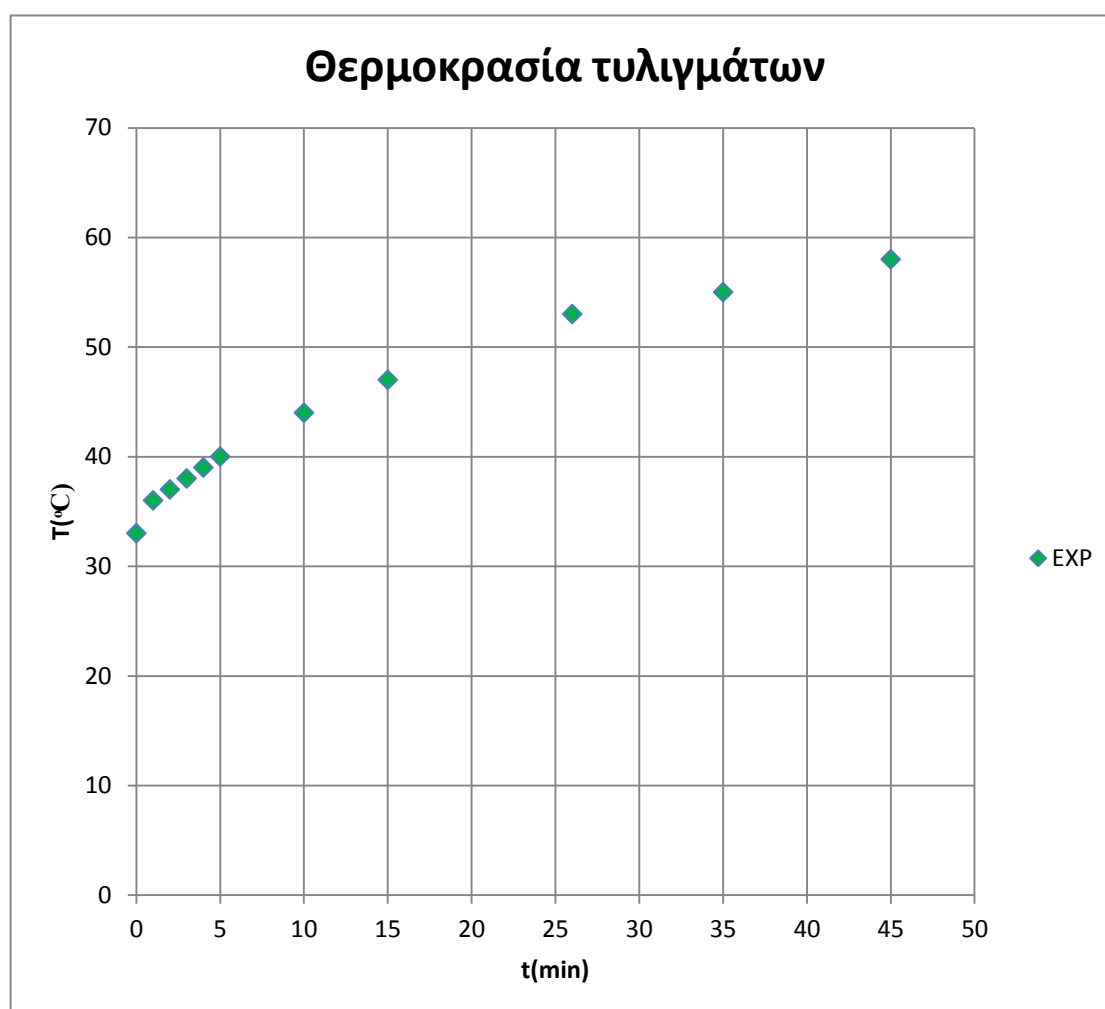
Σχ. 5.16 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας του στάτη

• **5^η σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων**

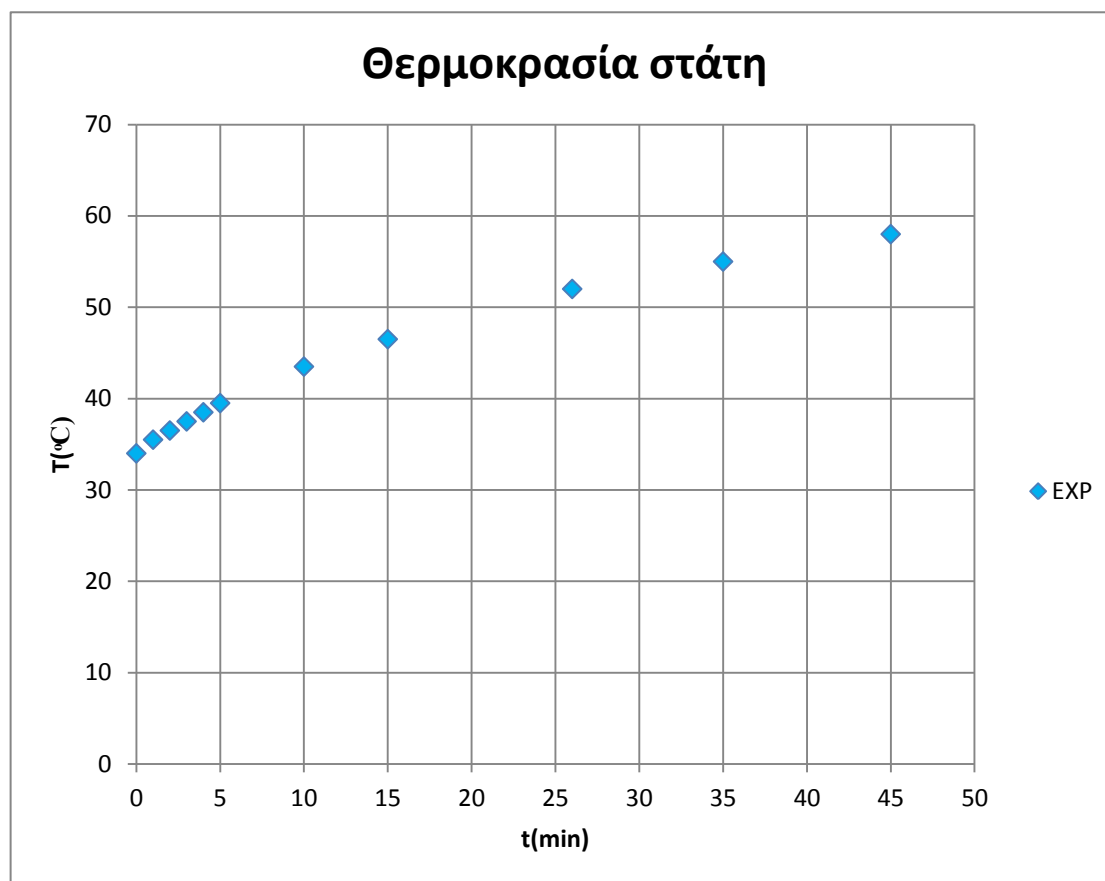
Η πέμπτη σειρά των πειραματικών μετρήσεων περιλαμβάνει τις θερμοκρασίες των τυλιγμάτων και του στάτη του σύγχρονου κινητήρα με τα δεδομένα διεξαγωγής του πειράματος να παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.

Πειραματικά δεδομένα	
Ένταση ρεύματος τυλιγμάτων	3.9 A
Ταχύτητα περιστροφής	300 ΣΑΛ
Χρονική διάρκεια πειράματος	45 min
Αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων	33 °C
Τελική θερμοκρασία τυλιγμάτων	58 °C
Αρχική θερμοκρασία στάτη	34 °C
Τελική θερμοκρασία στάτη	58 °C

Πίνακας 5.5 Δεδομένα της πέμπτης σειράς μετρήσεων



Σχ. 5.17 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων



Σχ. 5.18 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας του στάτη

5.3 Σύγκριση μεθόδων

Στην συγκεκριμένη ενότητα συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων προσομοίωσης. Επιπλέον για τις δύο πρώτες σειρές των αποτελεσμάτων θα έχουμε τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων της παρούσας θερμικής ανάλυσης με τα αντίστοιχα της τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης που προκύπτουν με τη χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, [18].

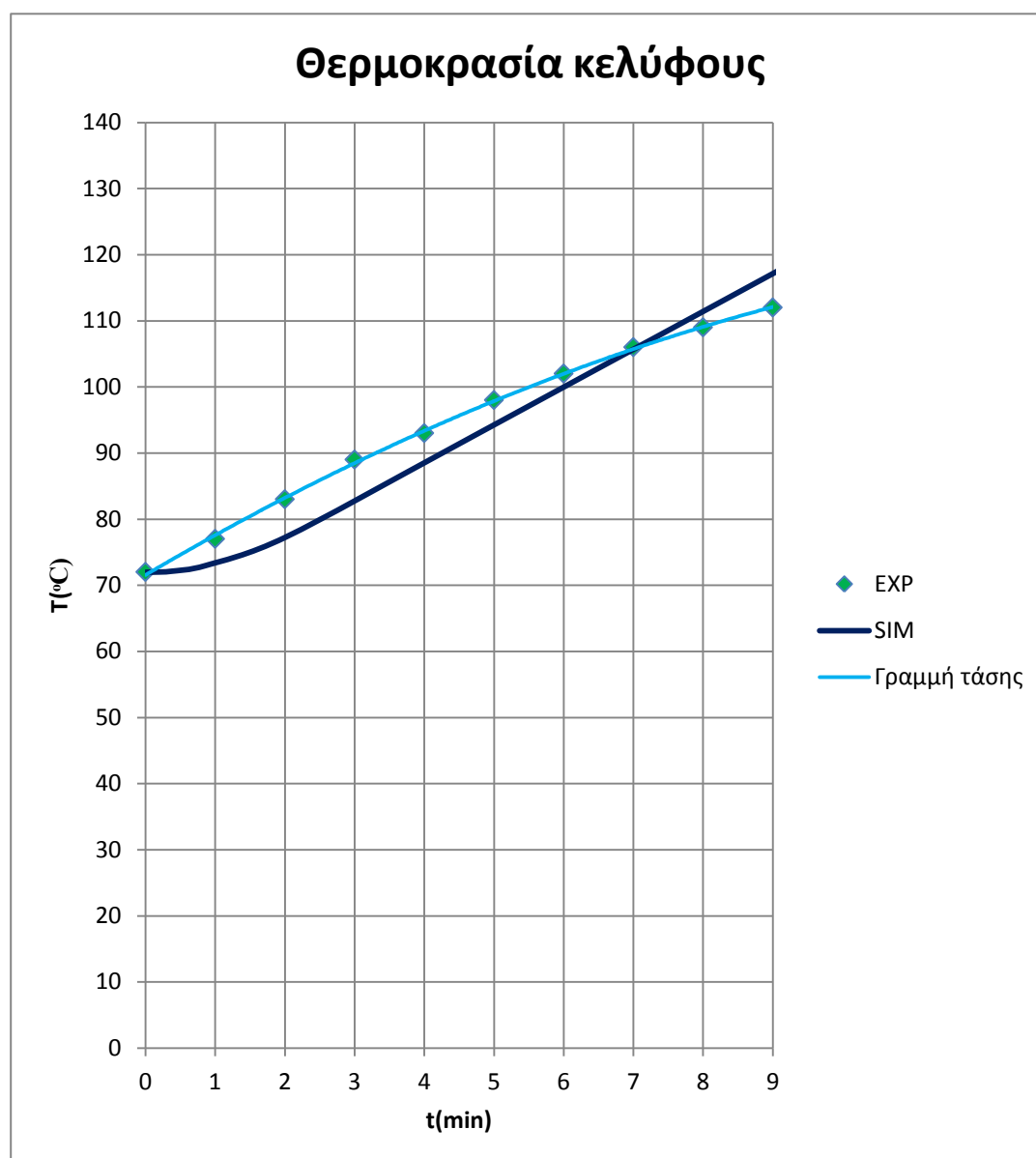
• 1^η σειρά αποτελεσμάτων

Οι συνθήκες λειτουργίας κατά τη λήψη των πειραματικών θερμοκρασιών του κελύφους είναι οι ακόλουθες:

Ταχύτητα περιστροφής	1200 ΣΑΛ
Ένταση ρεύματος τυλιγμάτων	8.5 A
Αρχική θερμοκρασία κελύφους	72 °C

Πίνακας 5.6 Συνθήκες λειτουργίας κατά την πειραματική διαδικασία

-Θερμοκρασία κελύφους



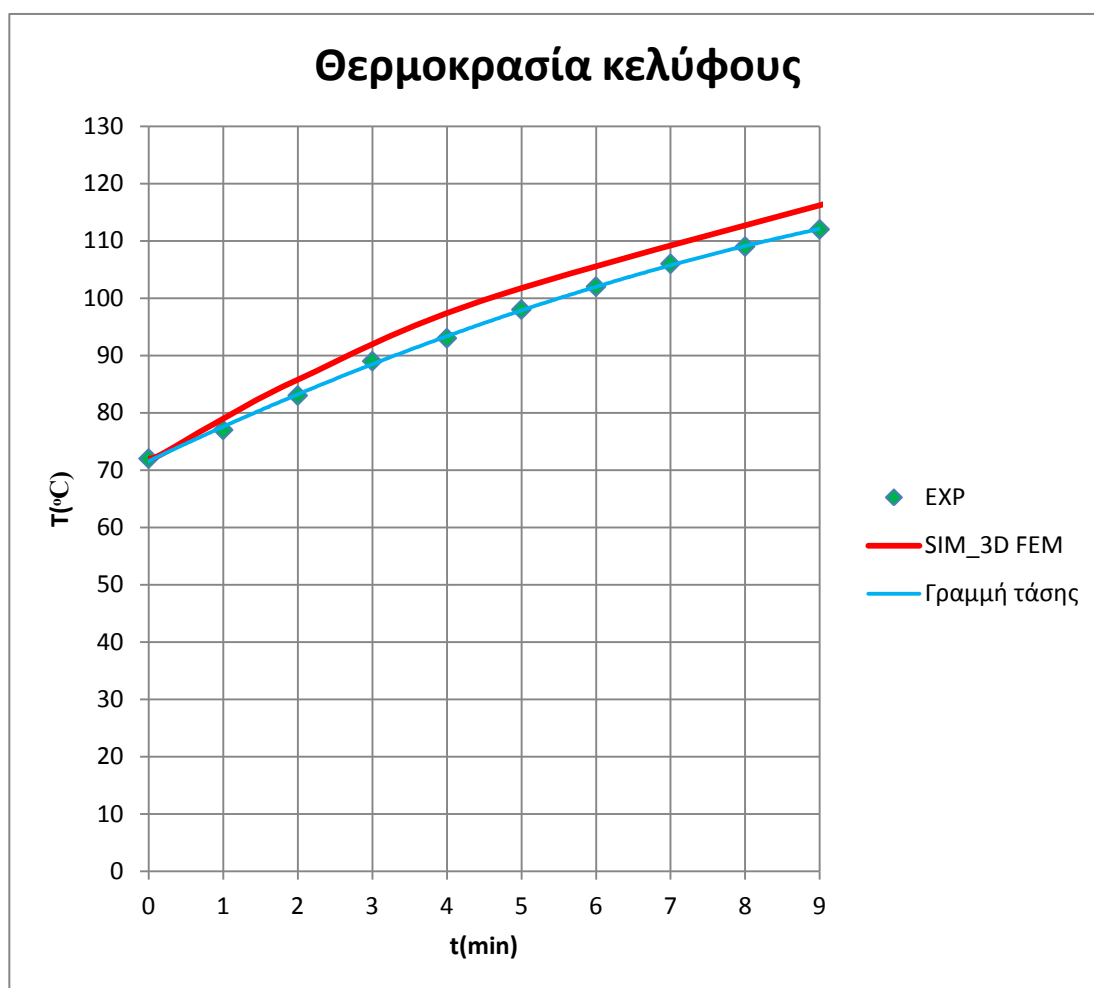
Σχ. 5.19 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου για τη θερμοκρασία του κελύφους

Στο Σχ. 5.19 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης που προκύπτουν από τη μέθοδο του ισοδύναμου θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων. Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή της απόκλισης των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.19.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	7.92%	0.45%	3.97%
Χρονική στιγμή(min)	3	7	-

Πίνακας 5.7 Απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων του θερμικού μοντέλου

Στο Σχ. 5.20 συγκρίνουμε τις πειραματικές θερμοκρασίες του κελύφους με τις προσομοιωμένες θερμοκρασίες όπως προέκυψαν από τη τρισδιάστατη θερμική ανάλυση με τη χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων.



Σχ. 5.20 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης για τη θερμοκρασία του κελύφους

Ο Πίνακας 5.8 περιέχει τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση τιμή της απόκλισης των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.20.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	5.38%	2.75%	3.24%
Χρονική στιγμή(min)	4	8	-

Πίνακας 5.8 Απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων της τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης

Στον Πίνακα 5.9 παρατίθενται οι τελικές τιμές (πειραματικές και προσομοίωσης) της θερμοκρασίας κελύφους τη χρονική στιγμή $t = 9 \text{ min}$. Ο Πίνακας 5.9 περιέχει και τη θερμοκρασία του κελύφους όπως προκύπτει από τη δισδιάστατη θερμική ανάλυση που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο τόσο για την εγκάρσια όσο και για την παράλληλη τομή του σύγχρονου κινητήρα.

Θερμοκρασία κελύφους τη στιγμή $t = 9 \text{ min}$	
Πειραματικά αποτελέσματα	112 °C
Αποτελέσματα 3D FEM	116 °C
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	117.9°C
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	108.3°C
Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)	113.1°C

Πίνακας 5.9 Τελικές θερμοκρασίες του κελύφους

Στον Πίνακα 5.10 παρουσιάζεται η απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων για την ίδια χρονική στιγμή.

Απόκλιση αποτελεσμάτων (%)	Αποτελέσματα 3D FEM	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)
Πειραματικά αποτελέσματα	3.57%	5.3%	3.38%	0.98%
Αποτελέσματα 3D FEM	-	1.67%	7.07%	2.57%
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	1.67%	-	8.86%	4.28%
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	7.07%	8.86%	-	4.39%

Πίνακας 5.10 Απόκλιση αποτελεσμάτων τη χρονική στιγμή $t = 9 \text{ min}$

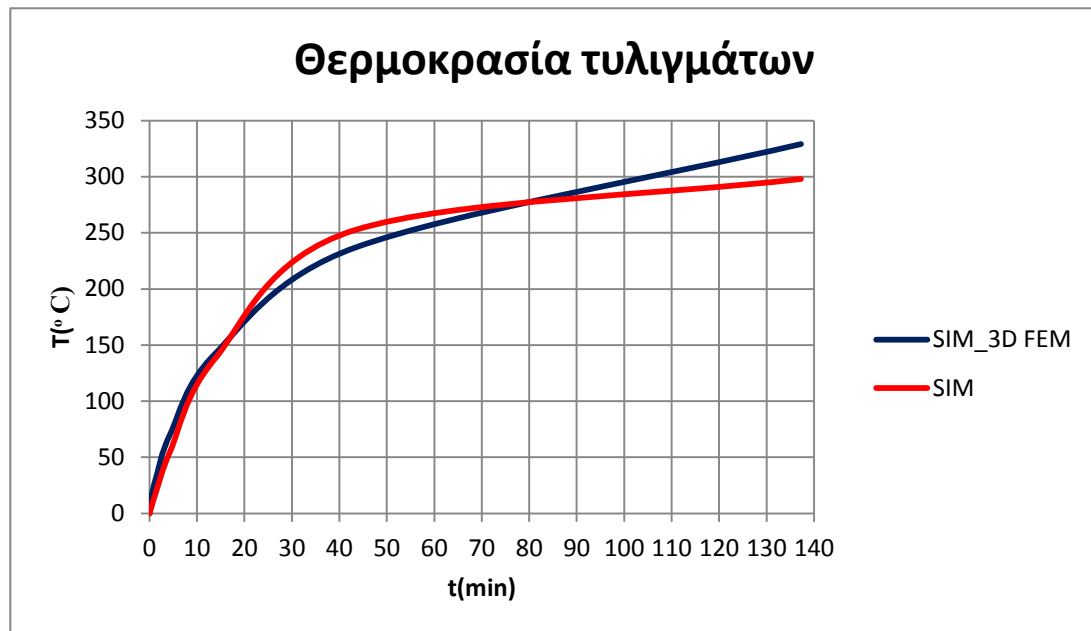
Από τον Πίνακα 5.10 παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή τη μεγαλύτερη απόκλιση από τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζει το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων ενώ τη μικρότερη απόκλιση παρουσιάζει το δισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (παράλληλη τομή).

-Θερμοκρασία τυλιγμάτων

Στο Σχ. 5.21 συγκρίνουμε τη μεταβατική θερμική συμπεριφορά των τυλιγμάτων για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 137.2186 \text{ min}$ όπως αυτή προκύπτει από τη τρισδιάστατη θερμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με την αντίστοιχη συμπεριφορά των τυλιγμάτων όπως αυτή εξάγεται από την προσομοίωση με τη χρήση του ισοδύναμου μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων. Στον Πίνακα 5.11 καταγράφουμε τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση τιμή της απόκλισης μεταξύ των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.21.

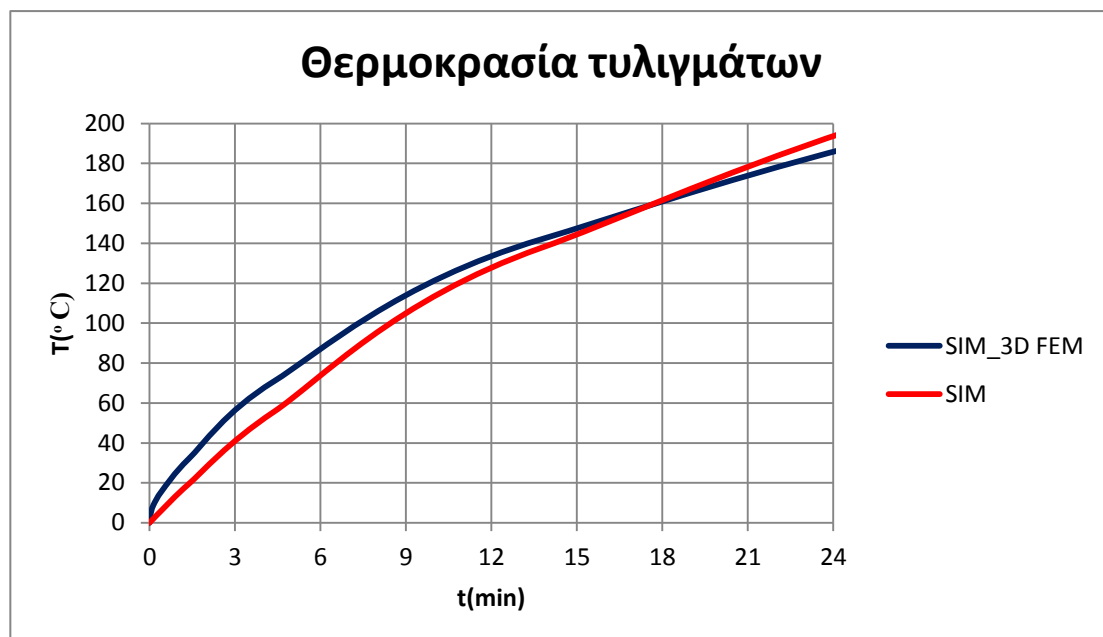
Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	10.45%	0%	4.41%
Χρονική στιγμή(min)	137.2186	80	-

Πίνακας 5.11 Απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της τρισδιάστατης ανάλυσης και των αντίστοιχων του θερμικού μοντέλου



Σχ. 5.21 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων

Στο Σχ. 5.22 απεικονίζονται οι δύο καμπύλες του Σχ. 5.21 στα πρώτα 24 min της προσομοίωσης.



Σχ. 5.22 Σύγκριση αποτελεσμάτων για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 24 \text{ min}$

Από το Σχ. 5.21 παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των δύο μεθόδων προσομοίωσης παρουσιάζονται στα χρονικά διαστήματα [20 min, 50 min] και [100 min, 137.2186 min].

Στον Πίνακα 5.12 καταγράφονται οι θερμοκρασίες των τυλιγμάτων τη χρονική στιγμή $t = 137.2186 \text{ min}$ όπως προέκυψαν από τις τρεις μεθόδους προσομοίωσης.

Θερμοκρασία τυλιγμάτων τη στιγμή $t = 137.2186 \text{ min}$	
Αποτελέσματα 3D FEM	329°C
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	297.9°C
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	309.2°C
Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)	332°C

Πίνακας 5.12 Τελικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων

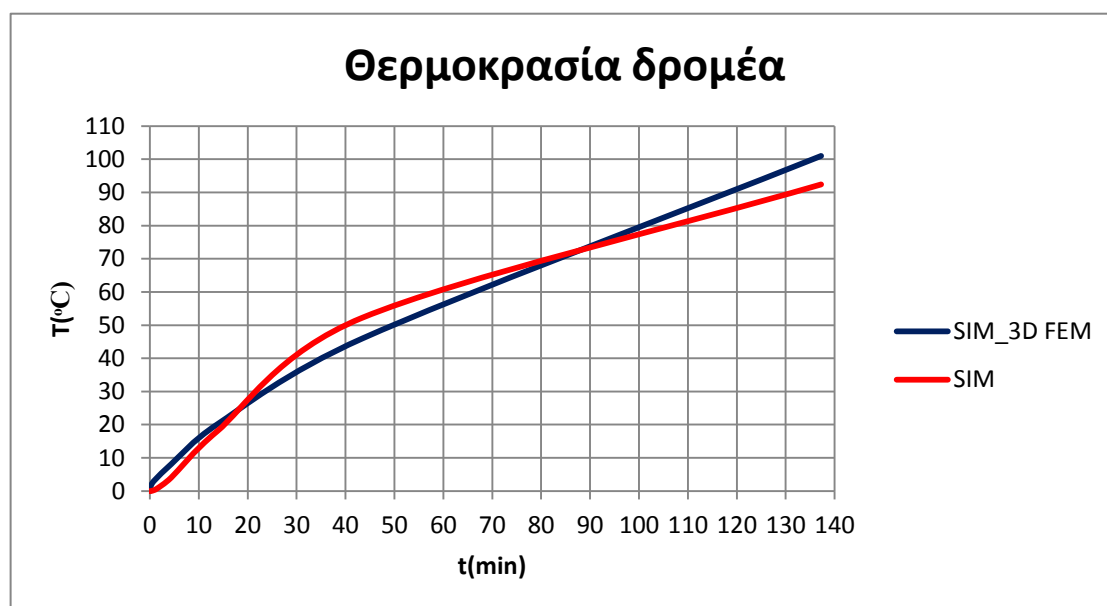
Στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις μεταξύ των τριών μεθόδων προσομοίωσης για την ίδια χρονική στιγμή.

Απόκλιση αποτελεσμάτων (%)	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)
Αποτελέσματα 3D FEM	10.45%	6.41%	0.91%
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	-	3.8%	11.46%
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	3.8%	-	7.38%

Πίνακας 5.13 Απόκλιση αποτελεσμάτων τη χρονική στιγμή $t = 137.2186 \text{ min}$

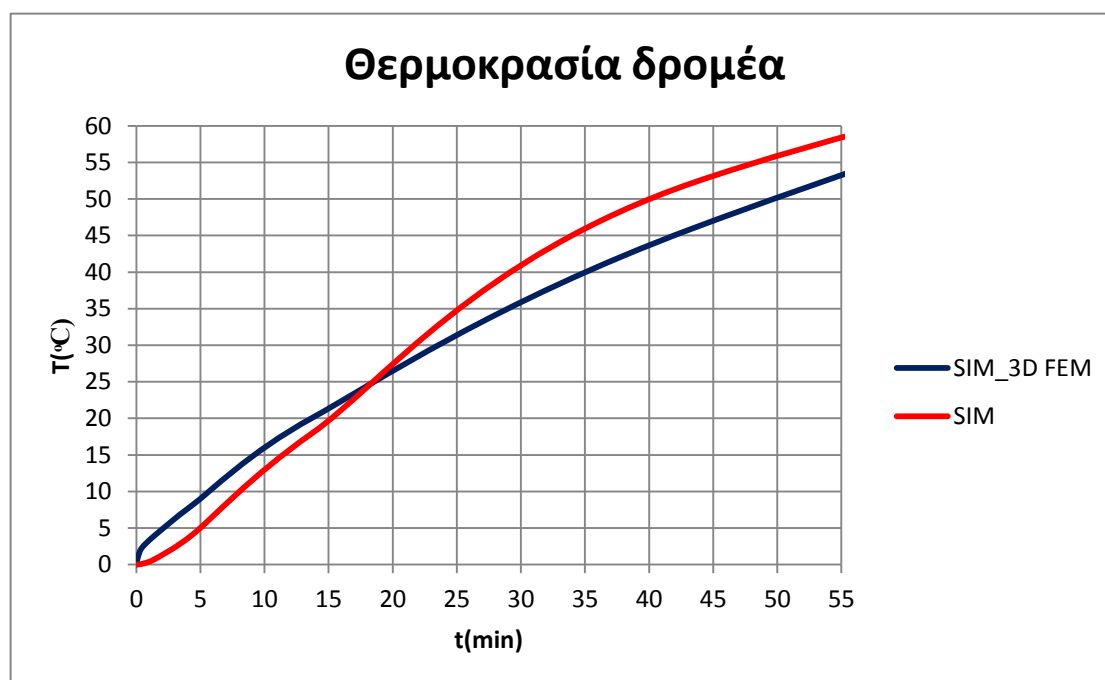
-Θερμοκρασία δρομέα

Στο Σχ. 5.23 απεικονίζονται η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας του δρομέα του σύγχρονου κινητήρα όπως προέκυψε από την τρισδιάστατη θερμική ανάλυση καθώς και η αντίστοιχη μεταβολή που εξάγεται από το ισοδύναμο θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων.



Σχ. 5.23 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τη θερμοκρασία του δρομέα

Στο Σχ. 5.24 απεικονίζονται οι καμπύλες του Σχ. 5.23 τα πρώτα 55 min της προσομοίωσης.



Σχ. 5.24 Σύγκριση αποτελεσμάτων για χρόνο προσομοίωσης $t_{\text{simulation}} = 55 \text{ min}$

Στον Πίνακα 5.14 παρουσιάζονται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή της απόκλισης μεταξύ των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.23.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	16.28%	1.35%	6.65%
Χρονική στιγμή(min)	40	90	-

Πίνακας 5.14 Απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της τρισδιάστατης ανάλυσης και των αντίστοιχων του θερμικού μοντέλου

Στον Πίνακα 5.15 καταγράφονται οι θερμοκρασίες του δρομέα τη χρονική στιγμή $t = 137.2186 \text{ min}$.

Θερμοκρασία δρομέα τη στιγμή $t = 137.2186 \text{ min}$	
Αποτελέσματα 3D FEM	101°C
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	92.4°C
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	101.4°C
Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)	92.2°C

Πίνακας 5.15 Τελικές θερμοκρασίες δρομέα

Ο Πίνακας 5.16 περιέχει τις αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του Πίνακα 5.15.

Απόκλιση αποτελεσμάτων (%)	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)
Αποτελέσματα 3D FEM	9.32%	0.41%	9.51%
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	-	9.77%	0.18%
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	9.77%	-	9.97%

Πίνακας 5.16 Απόκλιση αποτελεσμάτων τη χρονική στιγμή $t = 137.2186 \text{ min}$

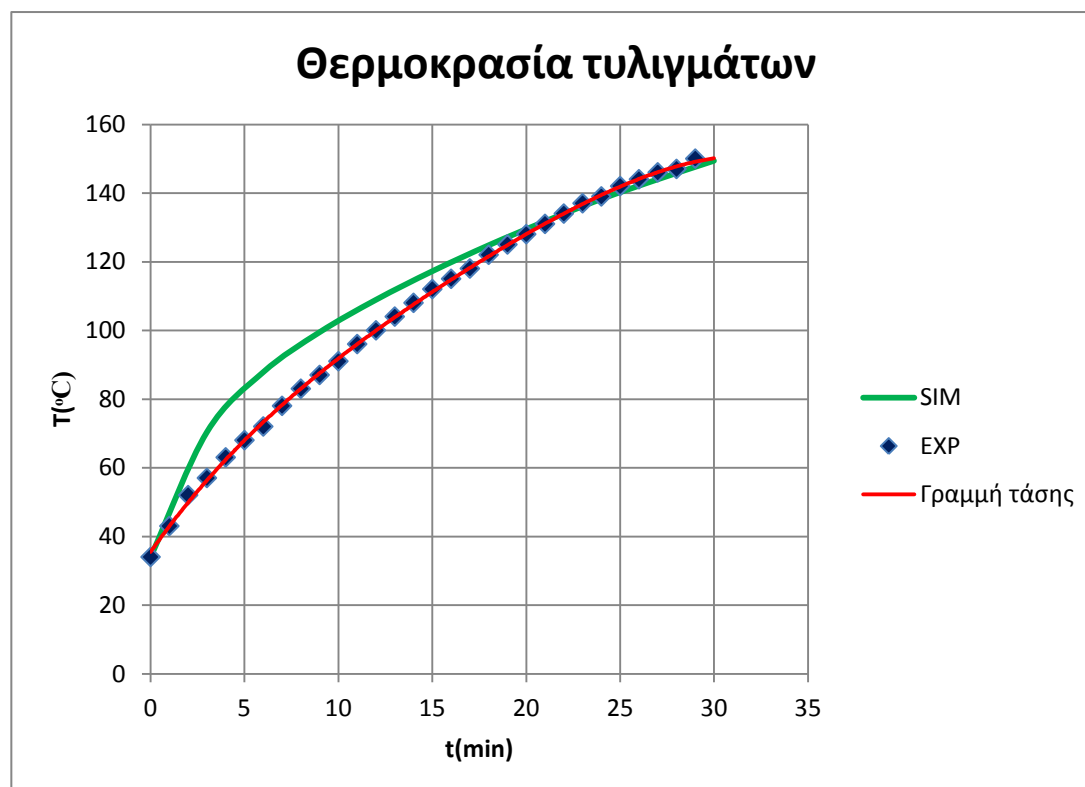
•2^η σειρά αποτελεσμάτων

Οι συνθήκες λειτουργίας κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας είναι οι ακόλουθες:

Ταχύτητα περιστροφής	1200 ΣΑΛ
Ένταση ρεύματος τυλιγμάτων	9.25 Α
Αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων	34 °C
Αρχική θερμοκρασία κελύφους	24 °C

Πίνακας 5.17 Συνθήκες λειτουργίας κατά την πειραματική διαδικασία

-Θερμοκρασία τυλιγμάτων



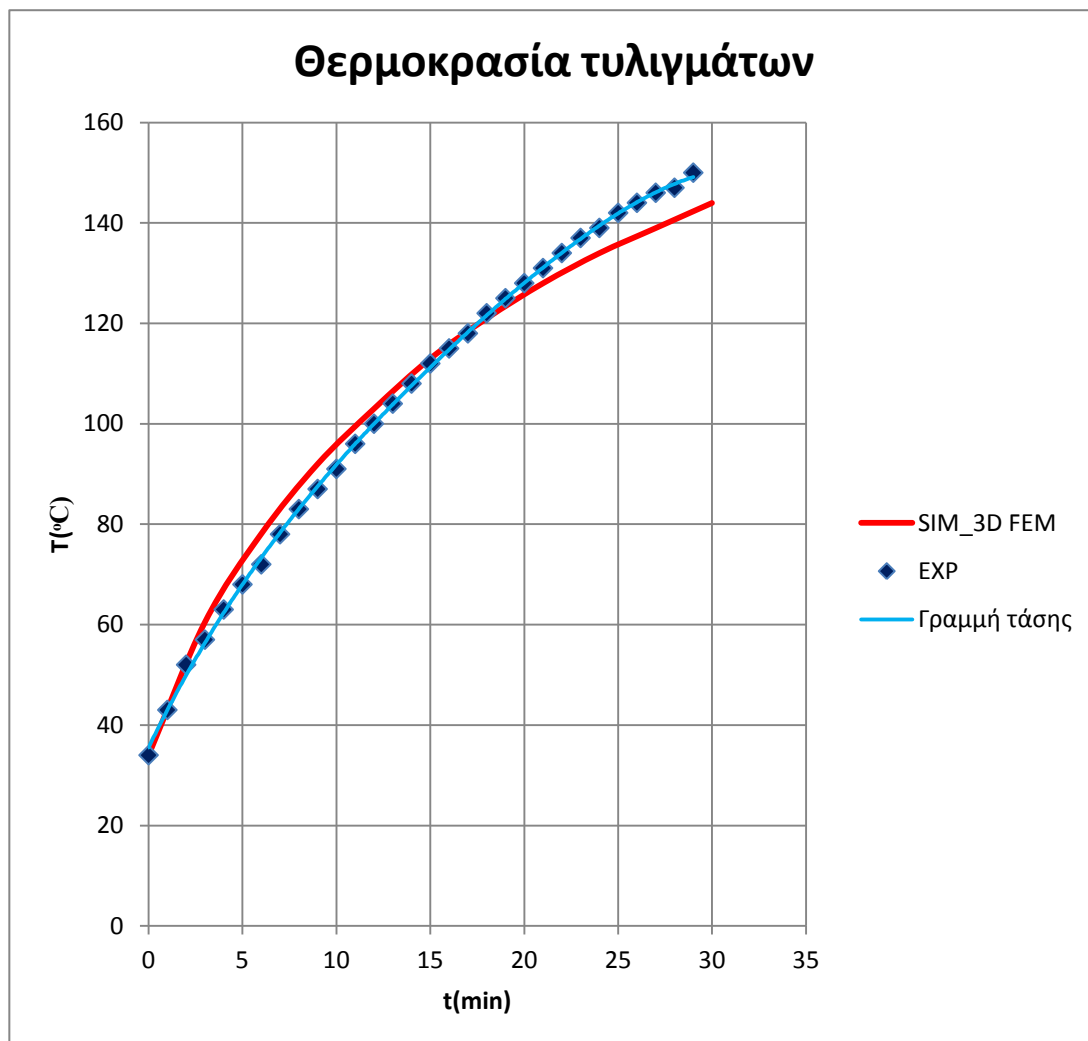
Σχ. 5.25 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου για τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων

Στον Πίνακα 5.18 παρουσιάζονται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή της απόκλισης μεταξύ των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.25.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	23.54%	0.36%	7.14%
Χρονική στιγμή(min)	3	30	-

Πίνακας 5.18 Απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων του θερμικού μοντέλου

Στο Σχ. 5.25 συγκρίνονται οι πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του ισοδύναμου μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων. Η απόκλιση μεταξύ των πειραματικών θερμοκρασιών και των αντίστοιχων του θερμικού μοντέλου μειώνεται κάτω από το 10% μετά το δέκατο λεπτό. Στο Σχ. 5.26 απεικονίζεται η προσέγγιση των πειραματικών θερμοκρασιών από τον κώδικα της τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης.



Σχ. 5.26 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης για τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων

Ο Πίνακας 5.19 περιέχει τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση τιμή της απόκλισης μεταξύ των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.26.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	8.47%	0.83%	3.67%
Χρονική στιγμή(min)	6	18	-

Πίνακας 5.19 Απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων της τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης

Είναι εμφανές από τα Σχ. 5.25 και 5.26 ότι τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων παρουσιάζουν μικρότερη απόκλιση από τις πειραματικές θερμοκρασίες.

Στον Πίνακα 5.20 καταγράφονται οι τελικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων με τη διάρκεια προσομοίωσης να είναι ίση με 30 min.

Θερμοκρασία τυλιγμάτων τη στιγμή $t = 30 \text{ min}$	
Πειραματικά αποτελέσματα	150 °C
Αποτελέσματα 3D FEM	144 °C
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	149.5°C
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	158.1°C
Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)	153.6°C

Πίνακας 5.20 Τελικές θερμοκρασίες τυλιγμάτων

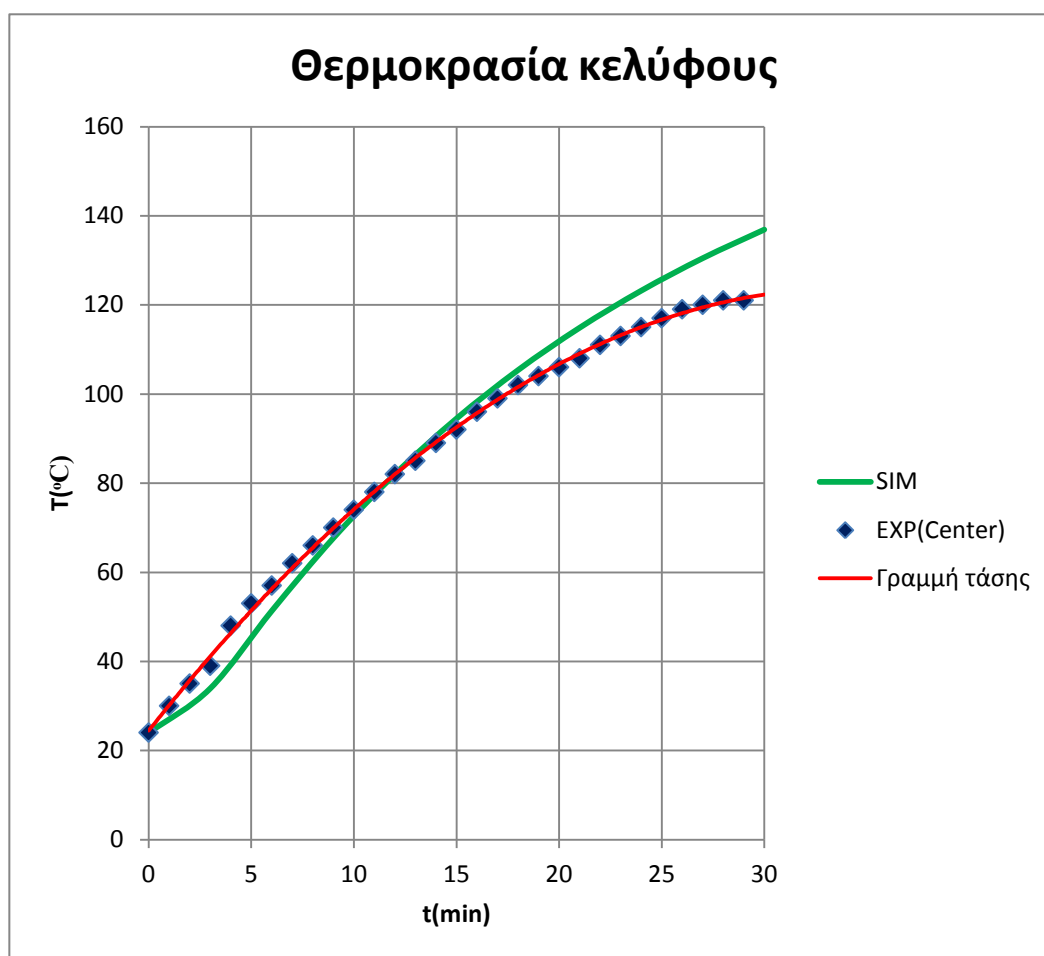
Στον Πίνακα 5.21 καταγράφονται οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων του Πίνακα 5.20.

Απόκλιση αποτελεσμάτων (%)	Αποτελέσματα 3D FEM	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)
Πειραματικά αποτελέσματα	4.17%	0.36%	5.37%	2.4%
Αποτελέσματα 3D FEM	-	3.79%	9.76%	6.66%
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	3.79%	-	5.75%	2.77%
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	9.76%	5.75%	-	2.9%

Πίνακας 5.21 Απόκλιση τελικών θερμοκρασιών των τυλιγμάτων

Από τον Πίνακα 5.21 παρατηρούμε ότι τη μικρότερη απόκλιση από την τελική πειραματική θερμοκρασία παρουσιάζει το αποτέλεσμα του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων και τη μεγαλύτερη απόκλιση από την πειραματική τιμή παρουσιάζει το αποτέλεσμα της δισδιάστατης θερμικής ανάλυσης (εγκάρσια τομή).

-Θερμοκρασία κελύφους



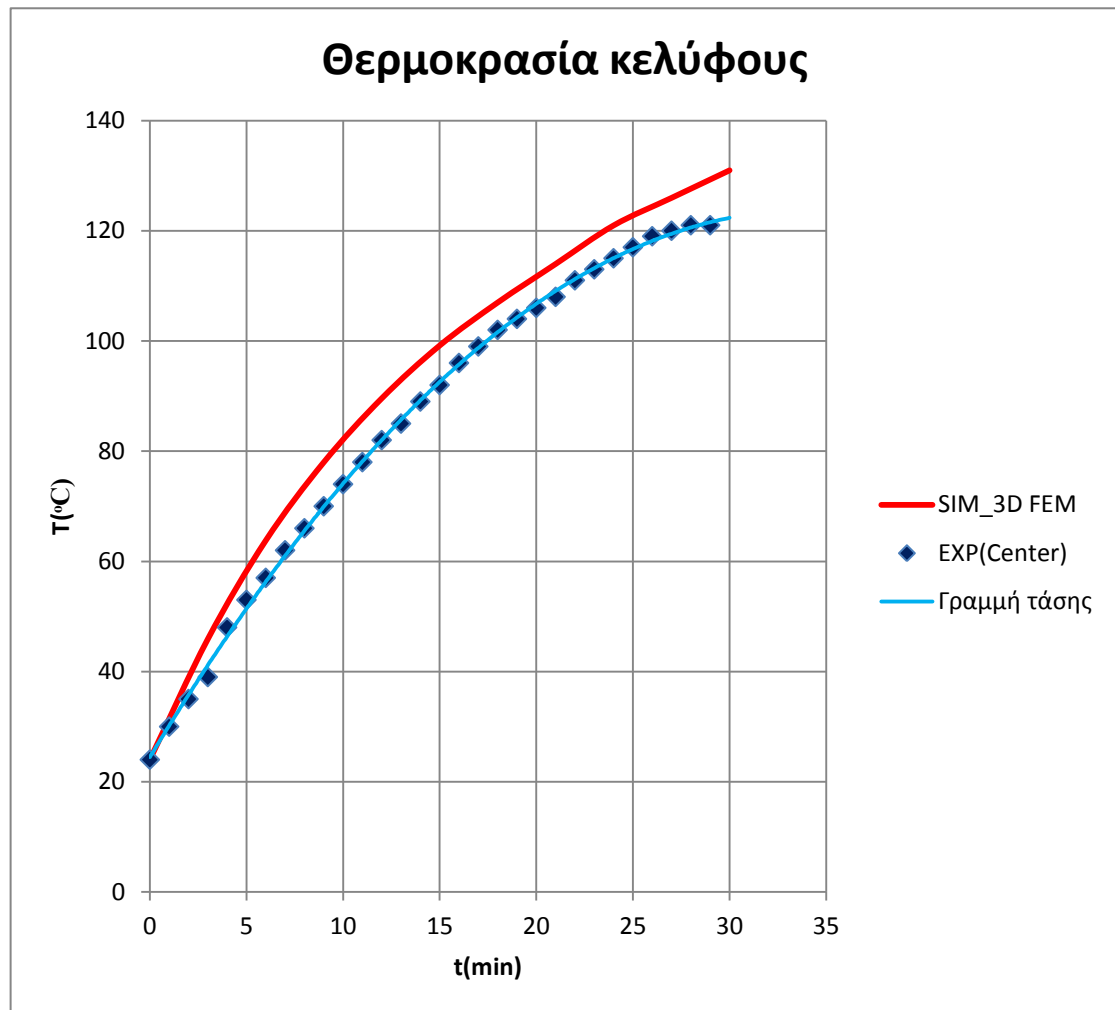
Σχ. 5.27 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου για τη θερμοκρασία του κελύφους

Στο Σχ. 5.27 συγκρίνουμε τις πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας του κέντρου του κελύφους με τις θερμοκρασίες που προκύπτουν από το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων. Η απόκλιση μεταξύ των πειραματικών τιμών και των αντίστοιχων της προσομοίωσης δεν ξεπερνά παρά σε ελάχιστες περιπτώσεις το 10%. Στον Πίνακα 5.22 παρατίθενται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή της απόκλισης των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.27.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	14.81%	0.026%	6.24%
Χρονική στιγμή(min)	3	12	-

Πίνακας 5.22 Απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων του θερμικού μοντέλου

Στο Σχ. 5.28 συγκρίνονται οι πειραματικές θερμοκρασίες του κελύφους με τις αντίστοιχες της τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης.



Σχ. 5.28 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης για τη θερμοκρασία του κελύφους

Ο Πίνακας 5.23 περιέχει τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση τιμή της απόκλισης των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.28.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	17.69%	4.9%	7.76%
Χρονική στιγμή(min)	3	18	-

Πίνακας 5.23 Απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων της τρισδιάστατης ανάλυσης

Παρατηρώντας τα Σχ. 5.27 και 5.28 διαπιστώνουμε την καλύτερη προσέγγιση της μεταβατικής θερμικής συμπεριφοράς του κελύφους από το προτεινόμενο μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων

Στον Πίνακα 5.24 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες του κελύφους τη χρονική στιγμή $t = 30 \text{ min}$.

Θερμοκρασία κελύφους τη στιγμή $t = 30 \text{ min}$	
Πειραματικά αποτελέσματα	123°C
Αποτελέσματα 3D FEM	131°C
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	136.9°C
Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)	114.8°C

Πίνακας 5.24 Τελικές θερμοκρασίες του κελύφους

Στον Πίνακα 5.25 δίνονται οι αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του Πίνακα 5.24.

Απόκλιση αποτελεσμάτων (%)	Αποτελέσματα 3D FEM	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)
Πειραματικά αποτελέσματα	6.5%	11.28%	7.17%
Αποτελέσματα 3D FEM	-	4.49%	14.14%
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	4.49%	-	19.27%

Πίνακας 5.25 Απόκλιση τελικών θερμοκρασιών του κελύφους

Τη χρονική στιγμή $t = 30 \text{ min}$ η θερμοκρασία που προκύπτει από το θερμικό μοντέλο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόκλιση από την αντίστοιχη πειραματική ενώ το αποτέλεσμα της τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική θερμοκρασία.

•3^η σειρά αποτελεσμάτων

Οι συνθήκες λειτουργίας κατά τη λήψη των πειραματικών δεδομένων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.26.

Ταχύτητα περιστροφής	750 ΣΑΛ
Ένταση ρεύματος τυλιγμάτων	4.92 A
Αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων	27 °C
Αρχική θερμοκρασία στάτη	27.5 °C

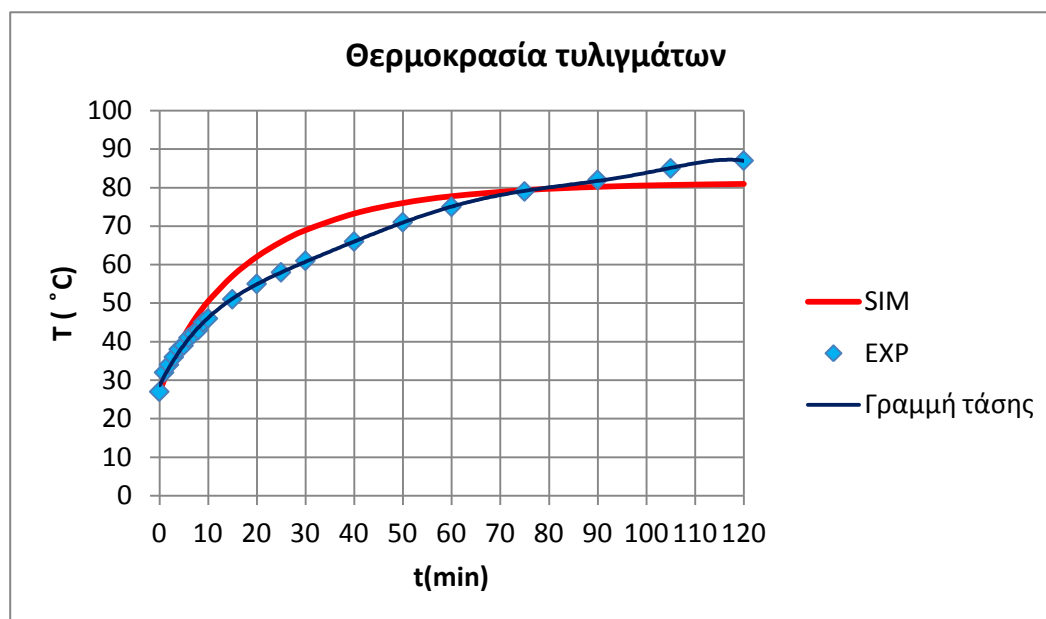
Πίνακας 5.26 Συνθήκες λειτουργίας κατά την πειραματική διαδικασία

-Θερμοκρασία τυλιγμάτων

Στον Πίνακα 5.27 παρουσιάζονται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή της απόκλισης μεταξύ των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.29.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	13.67%	0.42%	6.75%
Χρονική στιγμή(min)	25	75	-

Πίνακας 5.27 Απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων του θερμικού μοντέλου



Σχ. 5.29 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων

Στο Σχ. 5.29 απεικονίζονται οι πειραματικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων και οι θερμοκρασίες προσομοίωσης που προκύπτουν από το θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων. Το ποσοστό απόκλισης μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων δεν ξεπερνά το 10% παρά μόνο στο χρονικό διάστημα [15 min, 40 min].

Στον Πίνακα 5.28 παρατίθενται οι θερμοκρασίες των τυλιγμάτων τη χρονική στιγμή $t = 120$ min.

Θερμοκρασία τυλιγμάτων τη στιγμή $t = 120$ min	
Πειραματικά αποτελέσματα	87°C
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	80.9°C
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	85.3°C
Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)	87.8°C

Πίνακας 5.28 Τελικές θερμοκρασίες τυλιγμάτων

Στον Πίνακα 5.29 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του Πίνακα 5.28.

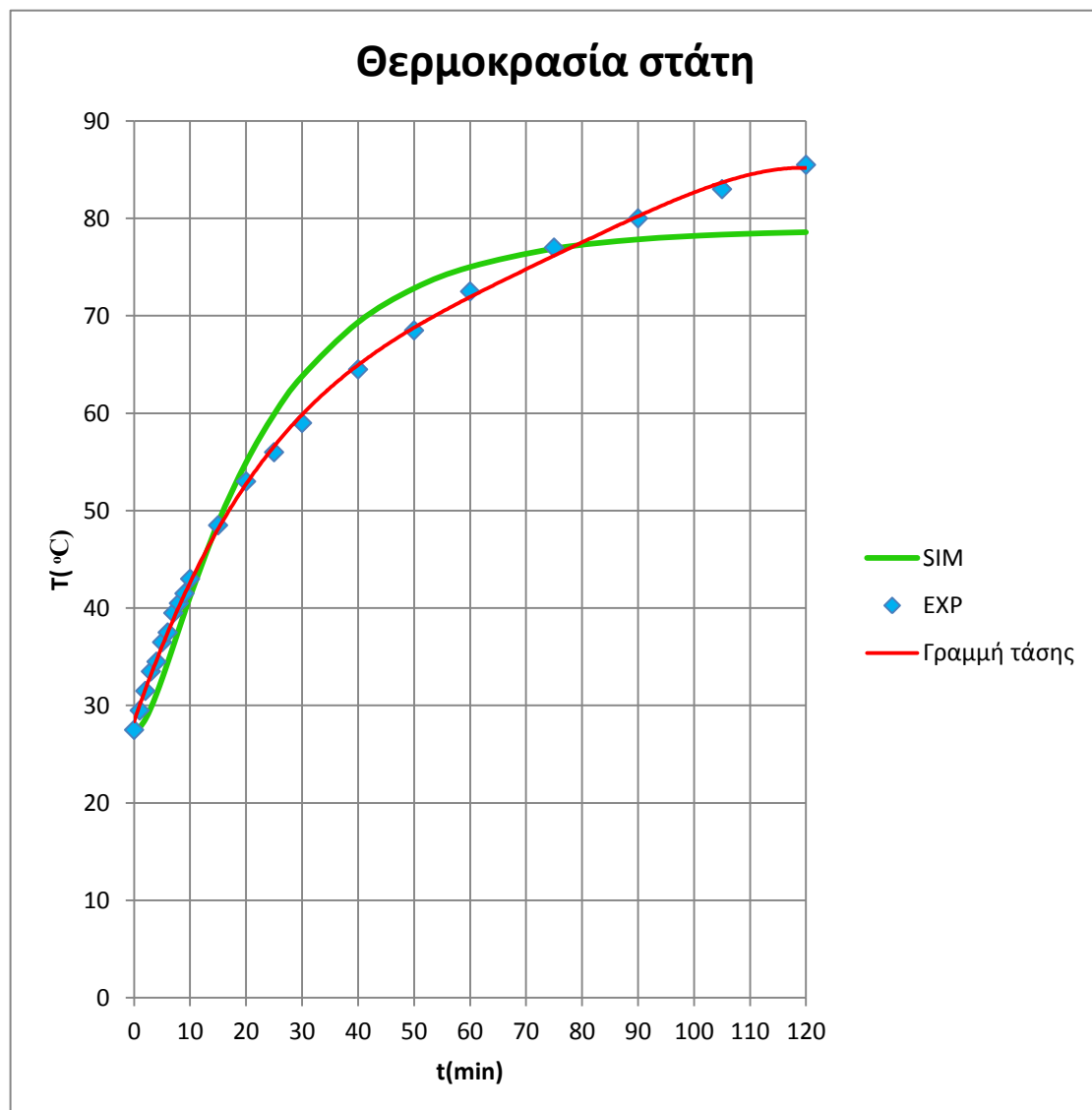
Απόκλιση αποτελεσμάτων (%)	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)
Πειραματικά αποτελέσματα	7.49%	1.97%	0.94%
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	-	5.41%	8.5%
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	5.41%	-	2.94%

Πίνακας 5.29 Απόκλιση αποτελεσμάτων τη χρονική στιγμή $t = 120$ min

Τη χρονική στιγμή $t = 120 \text{ min}$ τη μικρότερη απόκλιση από την πειραματική θερμοκρασία παρουσιάζει το αποτέλεσμα της δισδιάστατης θερμικής ανάλυσης (παράλληλη τομή) ενώ τη μεγαλύτερη απόκλιση από την πειραματική τιμή παρουσιάζει η θερμοκρασία του θερμικού μοντέλου.

-Θερμοκρασία στάτη

Στο Σχ. 5.30 συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα του στάτη με τα αποτελέσματα του ισοδύναμου θερμικού μοντέλου. Η προσέγγιση των πειραματικών θερμοκρασιών από το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων κρίνεται ικανοποιητική καθώς το ποσοστό απόκλισης δεν ξεπερνά το 10% με εξαίρεση το χρονικό διάστημα [2 min, 5 min] όπου η απόκλιση κυμαίνεται ελάχιστα πάνω από το 10%.



Σχ. 5.30 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τη θερμοκρασία του στάτη

Ο Πίνακας 5.30 περιέχει τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση τιμή της απόκλισης των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.30.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	12.45%	0.17%	6.33%
Χρονική στιγμή(min)	3	75	-

Πίνακας 5.30 Απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων του θερμικού μοντέλου

Στον Πίνακα 5.31 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες του στάτη τη χρονική στιγμή $t = 120 \text{ min}$.

Θερμοκρασία στάτη τη στιγμή $t = 120 \text{ min}$	
Πειραματικά αποτελέσματα	85.5°C
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	78.6°C
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	84.7°C
Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)	86.3°C

Πίνακας 5.31 Τελικές θερμοκρασίες στάτη

Στον Πίνακα 5.32 παρατίθενται τα ποσοστά απόκλισης μεταξύ των αποτελεσμάτων του Πίνακα 5.31.

Απόκλιση αποτελεσμάτων (%)	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)
Πειραματικά αποτελέσματα	8.83%	0.9%	0.92%
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	-	7.87%	9.83%
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	7.87%	-	1.82%

Πίνακας 5.32 Απόκλιση αποτελεσμάτων τη χρονική στιγμή $t = 120 \text{ min}$

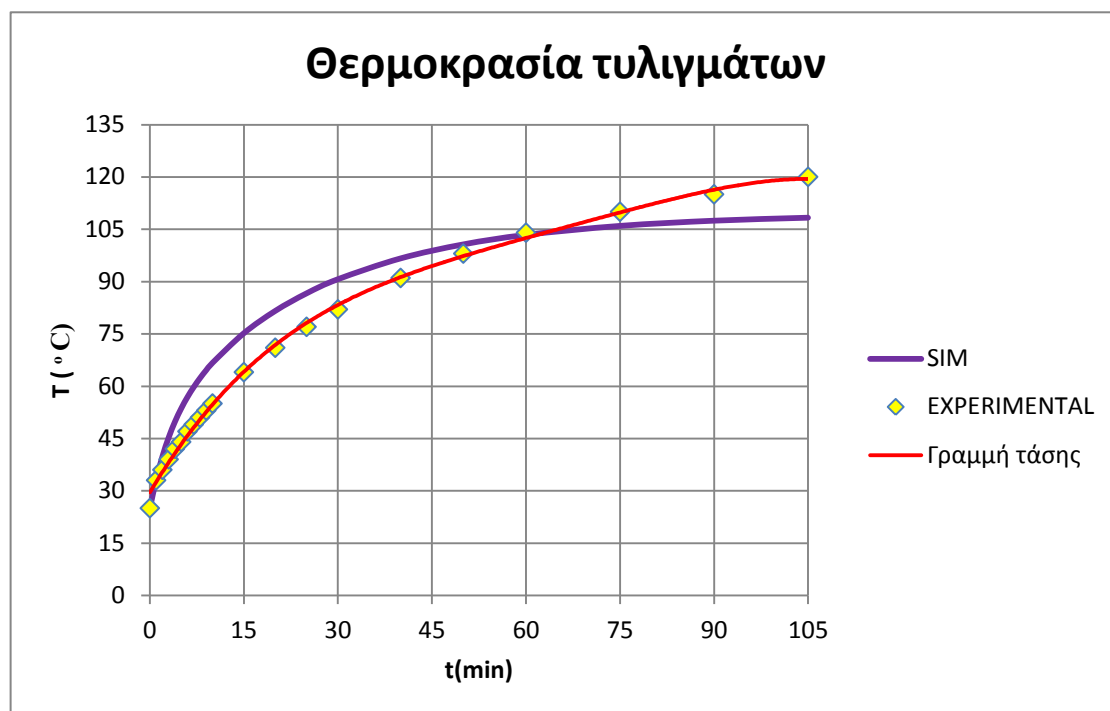
Από τον Πίνακα 5.32 διαπιστώνουμε ότι τη μικρότερη απόκλιση από την πειραματική τελική θερμοκρασία παρουσιάζει το αποτέλεσμα της δισδιάστατης θερμικής ανάλυσης (εγκάρσια τομή) ενώ τη μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζει το αποτέλεσμα του θερμικού μοντέλου.

•4^η σειρά αποτελεσμάτων

Οι συνθήκες λειτουργίας κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.33.

Ταχύτητα περιστροφής	998 ΣΑΛ
Ένταση ρεύματος τυλιγμάτων	6.45 A
Αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων	25 °C
Αρχική θερμοκρασία στάτη	25 °C

Πίνακας 5.33 Συνθήκες λειτουργίας κατά την πειραματική διαδικασία

-Θερμοκρασία τυλιγμάτων

Σχ. 5.31 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων

Η συγκεκριμένη σειρά πειραματικών μετρήσεων διήρκησε 105 min. Σε αυτό το χρονικό διάστημα οι θερμοκρασίες προσομοίωσης που προέκυψαν από το θερμικό μοντέλο αποκλίνουν από τις αντίστοιχες πειραματικές περισσότερο από 10% στο διάστημα [2 min, 30 min].

Στον Πίνακα 5.34 καταγράφονται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή της απόκλισης των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.31.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	22.24%	0.42%	12.54%
Χρονική στιγμή(min)	8	1	-

Πίνακας 5.34 Απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων του θερμικού μοντέλου

Στον Πίνακα 5.35 καταγράφονται οι θερμοκρασίες των τυλιγμάτων τη χρονική στιγμή $t = 105$ min.

Θερμοκρασία τυλιγμάτων τη στιγμή $t = 105$ min	
Πειραματικά αποτελέσματα	120°C
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	108.3°C
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	116.7°C
Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)	117.4°C

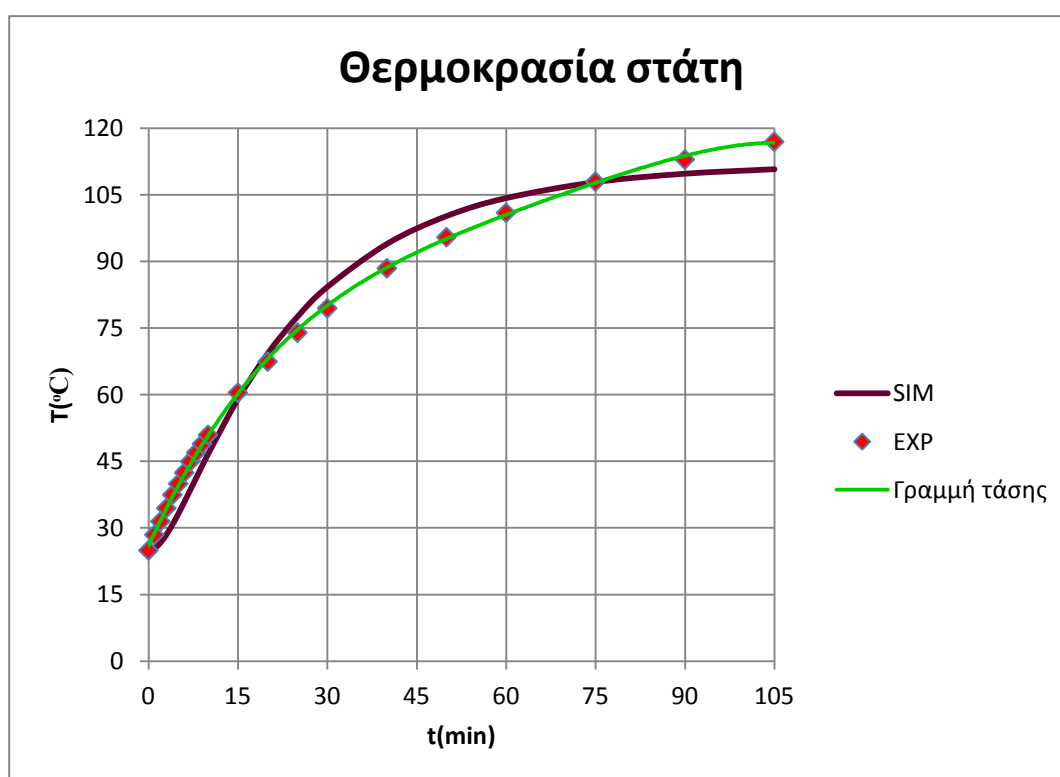
Πίνακας 5.35 Τελικές θερμοκρασίες τυλιγμάτων

Στον Πίνακα 5.36 συγκρίνονται οι θερμοκρασίες του Πίνακα 5.35.

Απόκλιση αποτελεσμάτων (%)	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)
Πειραματικά αποτελέσματα	10.76%	2.86%	2.19%
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	-	7.68%	8.39%
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	7.68%	-	0.65%

Πίνακας 5.36 Απόκλιση αποτελεσμάτων τη χρονική στιγμή $t = 105 \text{ min}$

-Θερμοκρασία στάτη



Σχ. 5.32 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τη θερμοκρασία του στάτη

Το ποσοστό απόκλισης των θερμοκρασιών προσομοίωσης του Σχ. 5.32 από τις πειραματικές θερμοκρασίες ξεπερνά το όριο του 10% μόνο στο χρονικό διάστημα [1 min, 9 min]. Ο Πίνακας 5.37 περιέχει τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση τιμή της απόκλισης των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.32.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	21.83%	0.13%	9.57%
Χρονική στιγμή(min)	4	75	-

Πίνακας 5.37 Απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων του θερμικού μοντέλου

Στον Πίνακα 5.38 δίνονται οι θερμοκρασίες του στάτη τη χρονική στιγμή $t = 105$ min.

Θερμοκρασία στάτη τη στιγμή $t = 105$ min	
Πειραματικά αποτελέσματα	117°C
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	110.8°C
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	115.6°C
Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)	114.6°C

Πίνακας 5.38 Τελικές θερμοκρασίες στάτη

Στον Πίνακα 5.39 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του Πίνακα 5.38.

Απόκλιση αποτελεσμάτων (%)	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)
Πειραματικά αποτελέσματα	5.63%	1.21%	2.07%
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	-	4.37%	3.5%
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	4.37%	-	0.84%

Πίνακας 5.39 Απόκλιση αποτελεσμάτων τη χρονική στιγμή $t = 105$ min

Τη χρονική στιγμή $t = 105$ min η θερμοκρασία που προκύπτει από τη διδιάστατη θερμική ανάλυση (εγκάρσια τομή) παρουσιάζει τη μικρότερη απόκλιση από την αντίστοιχη πειραματική ενώ τη μεγαλύτερη απόκλιση από το πειραματικό αποτέλεσμα παρουσιάζει το αποτέλεσμα του θερμικού μοντέλου.

•5^η σειρά αποτελεσμάτων

Οι συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα κατά τη λήψη των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι οι ακόλουθες:

Ταχύτητα περιστροφής	300 ΣΑΛ
Ένταση ρεύματος τυλιγμάτων	3.9 A
Αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων	33 °C
Αρχική θερμοκρασία στάτη	34 °C

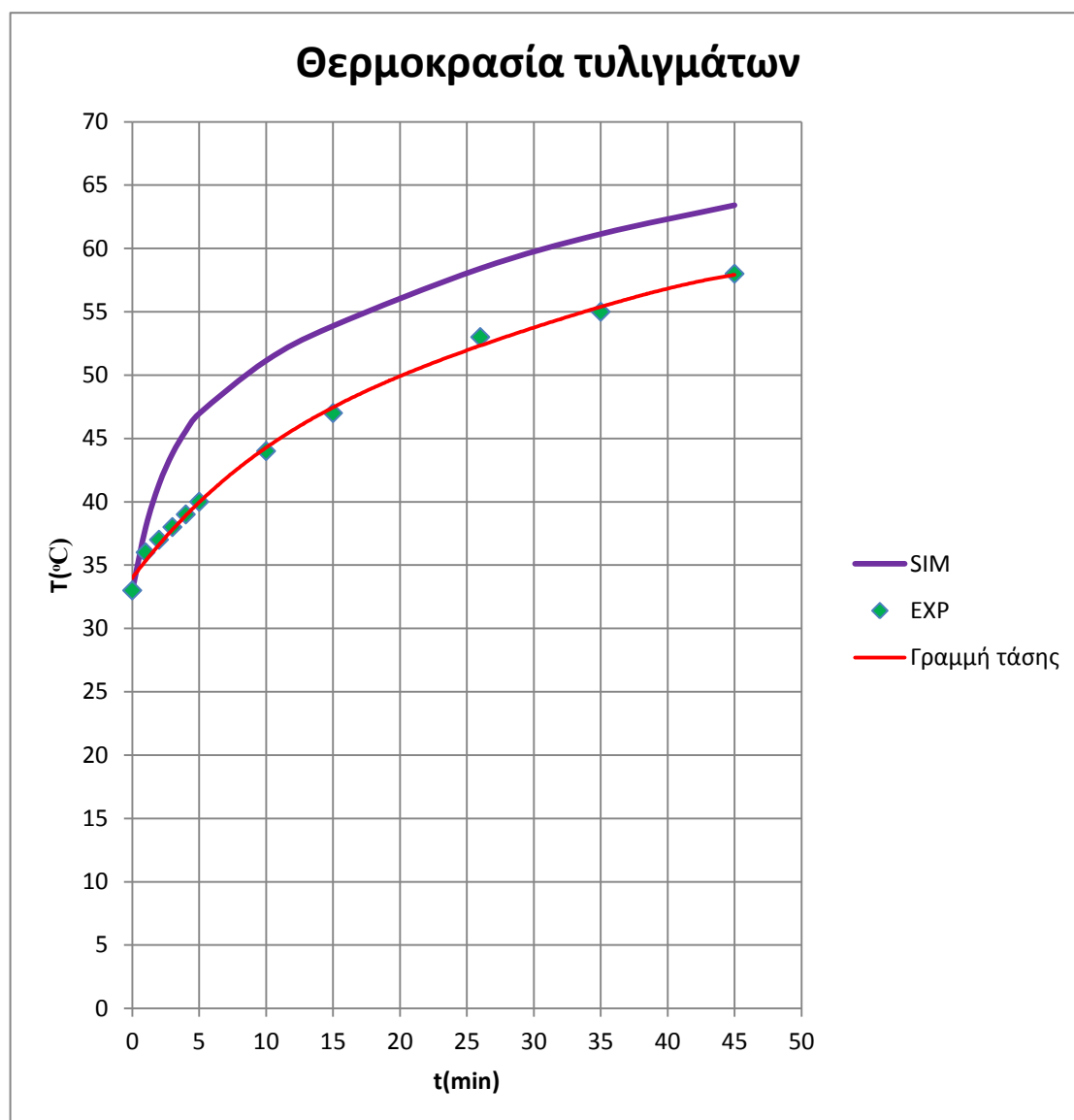
Πίνακας 5.40 Συνθήκες λειτουργίας κατά την πειραματική διαδικασία

-Θερμοκρασία τυλιγμάτων

Στον Πίνακα 5.41 παρουσιάζονται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή της απόκλισης των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.33.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	17.42%	5.51%	11.69%
Χρονική στιγμή(min)	5	1	-

Πίνακας 5.41 Απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων του θερμικού μοντέλου



Σχ. 5.33 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων

Το ποσοστό απόκλισης των αποτελεσμάτων προσομοίωσης από τα αντίστοιχα πειραματικά υπερβαίνει το όριο του 10% στο χρονικό διάστημα [2 min, 35 min].

Στον Πίνακα 5.42 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες των τυλιγμάτων τη χρονική στιγμή $t = 45$ min. Στον Πίνακα 5.43 συγκρίνουμε τις θερμοκρασίες του Πίνακα 5.42.

Θερμοκρασία τυλιγμάτων τη στιγμή $t = 45 \text{ min}$	
Πειραματικά αποτελέσματα	58°C
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	63.4°C
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	54.5°C
Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)	55.6°C

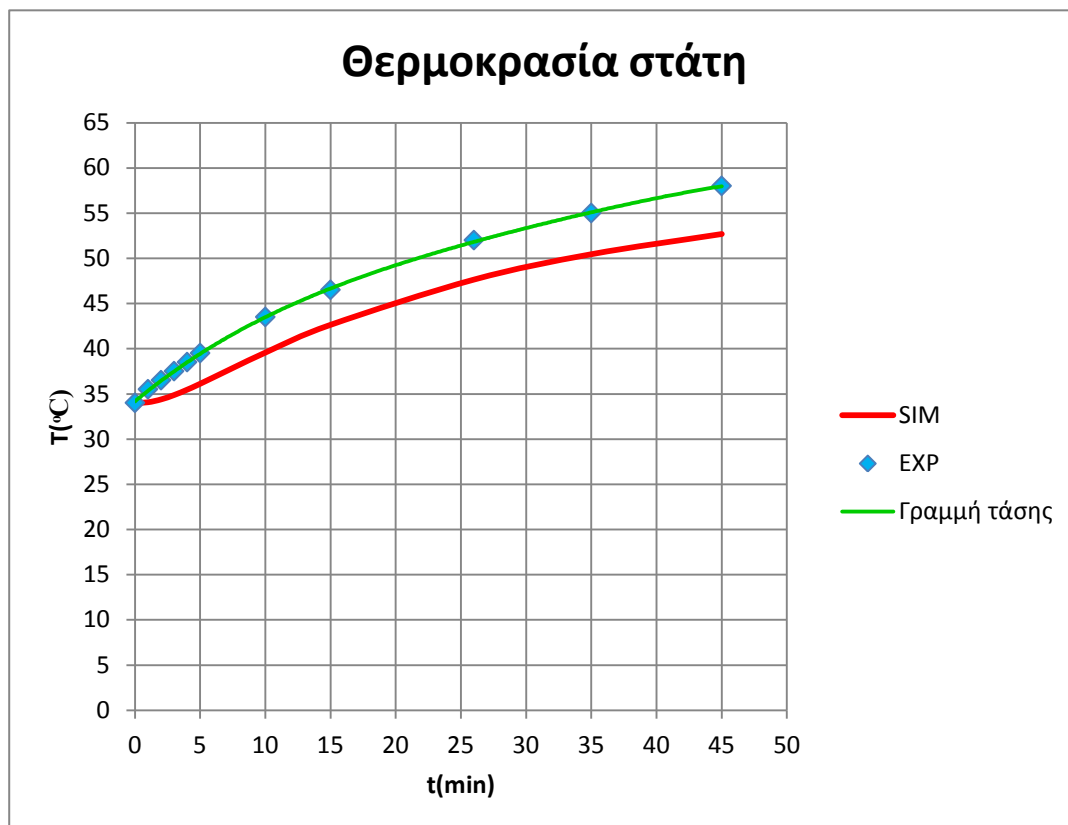
Πίνακας 5.42 Τελικές θερμοκρασίες τυλιγμάτων

Απόκλιση αποτελεσμάτων (%)	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)
Πειραματικά αποτελέσματα	9.33%	6.42%	4.27%
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	-	16.35%	14%
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	16.35%	-	2.06%

Πίνακας 5.43 Απόκλιση αποτελεσμάτων τη χρονική στιγμή $t = 45 \text{ min}$

Από τον Πίνακα 5.43 προκύπτει ότι τη μικρότερη απόκλιση από την τελική πειραματική θερμοκρασία παρουσιάζει το αποτέλεσμα της δισδιάστατης θερμικής ανάλυσης (παράλληλη τομή) ενώ τη μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζει το αποτέλεσμα του ισοδύναμου θερμικού μοντέλου.

-Θερμοκρασία στάτη



Σχ. 5.34 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τη θερμοκρασία του στάτη

Στον Πίνακα 5.44 παρουσιάζονται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή της απόκλισης των αποτελεσμάτων του Σχ. 5.34.

Απόκλιση αποτελεσμάτων	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή
Ποσοστό απόκλισης	10.1%	4.14%	7.52%
Χρονική στιγμή(min)	45	1	-

Πίνακας 5.44 Απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων του θερμικού μοντέλου

Η προσέγγιση των πειραματικών θερμοκρασιών του στάτη από το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων κρίνεται ικανοποιητική καθώς το ποσοστό απόκλισης των αποτελεσμάτων προσομοίωσης από τα αντίστοιχα πειραματικά δεν υπερβαίνει το 10% με εξαίρεση την απόκλιση μεταξύ των τελικών θερμοκρασιών του στάτη.

Στον Πίνακα 5.45 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες του στάτη τη χρονική στιγμή $t = 45 \text{ min}$.

Θερμοκρασία στάτη τη στιγμή $t = 45 \text{ min}$	
Πειραματικά αποτελέσματα	58°C
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	52.7°C
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	54°C
Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)	54.8°C

Πίνακας 5.45 Τελικές θερμοκρασίες στάτη

Στον Πίνακα 5.46 παρατίθενται οι αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του Πίνακα 5.45.

Απόκλιση αποτελεσμάτων (%)	Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	Αποτελέσματα 2D FEM (παράλληλη)
Πειραματικά αποτελέσματα	10.1%	7.42%	5.89%
Αποτελέσματα θερμικού μοντέλου	-	2.49%	3.97%
Αποτελέσματα 2D FEM (εγκάρσια)	2.49%	-	1.44%

Πίνακας 5.46 Απόκλιση αποτελεσμάτων τη χρονική στιγμή $t = 45 \text{ min}$

Από τον Πίνακα 5.46 διαπιστώνουμε ότι τη μικρότερη απόκλιση από την τελική θερμοκρασία του στάτη παρουσιάζει το αποτέλεσμα της δισδιάστατης θερμικής ανάλυσης (παράλληλη τομή) ενώ τη μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζει το αποτέλεσμα του θερμικού μοντέλου.

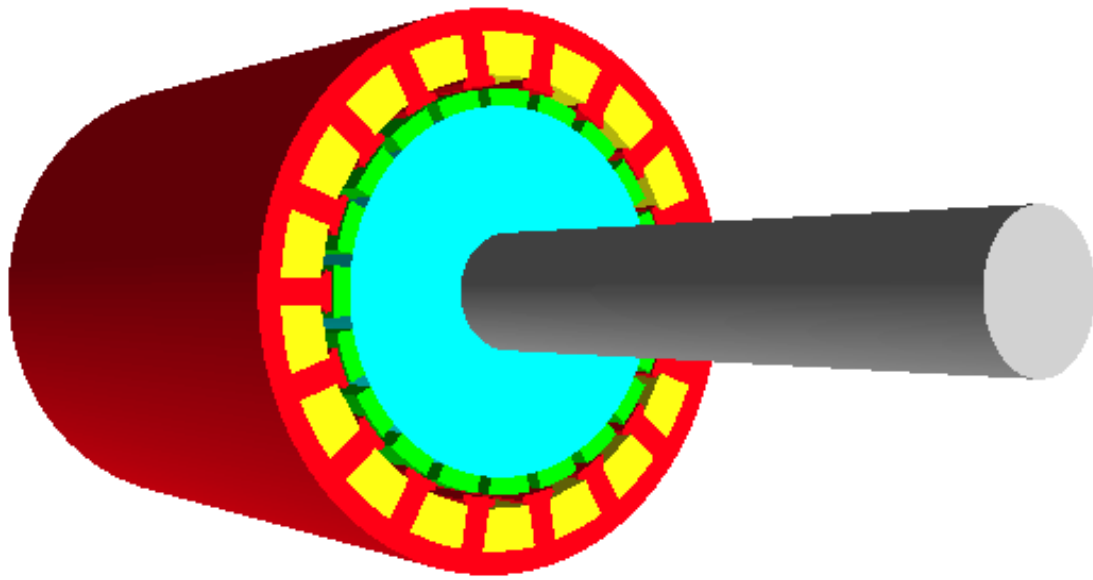
5.4 Συμπεράσματα

Η οριακή θερμοκρασία των τυλιγμάτων για τον συγκεκριμένο σύγχρονο κινητήρα είναι οι **120 °C**. Παρατηρούμε ότι στις δύο πρώτες σειρές αποτελεσμάτων

τόσο οι πειραματικές θερμοκρασίες όσο και οι θερμοκρασίες προσομοίωσης των τυλιγμάτων ξεπερνούν το όριο αυτό. Η υπέρβαση της οριακής θερμοκρασίας οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι για τη θερμική ανάλυση επιλέξαμε τη φυσική ψύξη του κινητήρα ως τρόπο απαγωγής της θερμότητας από το εσωτερικό του. Αν είχαμε επιλέξει έναν περισσότερο αποδοτικό τρόπο ψύξης του κινητήρα οι θερμοκρασίες των τυλιγμάτων δεν θα ξεπερνούσαν το όριο των 120 °C. Επιπλέον αν λάβουμε υπόψη ότι ο συγκεκριμένος κινητήρας θα χρησιμοποιηθεί ως σερβοκινητήρας σε συστήματα σύγχρονων αεροσκαφών και ο χρόνος χρήσης του θα είναι αισθητά μικρότερος από τον χρόνο προσομοίωσης που επιλέξαμε στην παρούσα εργασία μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στο εσωτερικό του κινητήρα δεν θα ξεπεράσουν το όριο των 120 °C.

Η προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς του σύγχρονου κινητήρα από τις μεθόδους προσομοίωσης κρίνεται ικανοποιητική καθώς η απόκλιση μεταξύ των πειραματικών θερμοκρασιών και των αντίστοιχων της προσομοίωσης δεν ξεπερνά παρά σε ελάχιστες περιπτώσεις το 10%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε η ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς ενός εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών με τη χρήση δύο μεθόδων προσομοίωσης, της μεθόδου του ισοδύναμου θερμικού μοντέλου και της μεθόδου της δισδιάστατης θερμικής ανάλυσης με τη χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αναλύθηκε ο ρόλος και η λειτουργία των σύγχρονων κινητήρων μονίμων μαγνητών σε συστήματα σύγχρονων αεροσκαφών και με ποιο τρόπο η χρήση σύγχρονων κινητήρων συμβάλλει στην

υλοποίηση της ιδέας more electric aircraft.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφηκαν οι τρόποι μετάδοσης θερμότητας εστιάζοντας την ανάλυση μας στα θερμικά φαινόμενα που συμβαίνουν στο εσωτερικό των ηλεκτρικών μηχανών.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύχθηκε ένα ισοδύναμο θερμικό μοντέλο του σύγχρονου κινητήρα έχοντας σαν στόχο την προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς του σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας επιχειρήθηκε η θερμική ανάλυση του κινητήρα με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο τομές του κινητήρα, μία κάθετη στον άξονα του και μία παράλληλη σε αυτόν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων και των αντίστοιχων των δύο μεθόδων προσομοίωσης. Η σύγκριση αφορά σε περιπτώσεις τόσο μεταβατικής όσο και μόνιμης κατάστασης λειτουργίας του κινητήρα.

6.1 Βασικά συμπεράσματα

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη θερμική ανάλυση του σύγχρονου κινητήρα είναι τα ακόλουθα:

- Η προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς του σύγχρονου κινητήρα από το προτεινόμενο μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων κρίνεται ικανοποιητική και μας δίνει τη δυνατότητα να γνωρίζουμε τη θερμοκρασιακή κατανομή στο εσωτερικό του κινητήρα σε οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας. Ακολουθεί η παρουσίαση των προσομοιωμένων και πειραματικών θερμοκρασιών για διάφορες συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα:

-Για λειτουργία του κινητήρα με ένταση ρεύματος 8.5 A, ταχύτητα περιστροφής 1200 ΣΑΛ και αρχική θερμοκρασία κελύφους 72°C κατεγράφη η θερμοκρασιακή κατανομή του κελύφους με την πειραματική διαδικασία να διαρκεί 9 min. Η μέγιστη τιμή της απόκλισης μεταξύ των πειραματικών θερμοκρασιών και των αντίστοιχων της προσομοίωσης κατά τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας είναι 7.92 %, η ελάχιστη 0.45% και η μέση τιμή 3.97%. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η τιμή της απόκλισης λαμβάνει την τιμή 5.3%. Πιο συγκεκριμένα τη χρονική στιγμή 9 min η πειραματική θερμοκρασία κελύφους είναι 112 °C και η αντίστοιχη της προσομοίωσης 117.9 °C.

-Για λειτουργία του κινητήρα με ένταση ρεύματος 9.25 A, ταχύτητα περιστροφής 1200 ΣΑΛ, αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων 34°C και αρχική θερμοκρασία κελύφους 24°C κατεγράφησαν οι θερμοκρασίες των τυλιγμάτων και του κελύφους με την

πειραματική διαδικασία να διαρκεί 30 min. Κατά τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας η μέγιστη τιμή της απόκλισης μεταξύ των πειραματικών θερμοκρασιών των τυλιγμάτων και των αντίστοιχων της προσομοίωσης είναι 23.54%, η ελάχιστη 0.36% και η μέση τιμή 7.14%. Όσο αναφορά τη μεταβατική θερμική συμπεριφορά του κελύφους η μέγιστη τιμή της απόκλισης μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων της προσομοίωσης είναι 14.81%, η ελάχιστη 0.026% και η μέση 6.24%. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας παρατηρείται μια θερμοκρασιακή απόκλιση μεταξύ των τυλιγμάτων και του κελύφους της τάξης των 27 °C. Αναλυτικότερα οι τελικές πειραματικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων και του κελύφους είναι 150°C και 123°C αντίστοιχα. Οι θερμοκρασίες τυλιγμάτων και κελύφους όπως προέκυψαν από το θερμικό μοντέλο αποκλίνουν από τις αντίστοιχες πειραματικές κατά 0.36% και 11.28% αντίστοιχα. Η τελική θερμοκρασία των τυλιγμάτων είναι 149.5°C και η τελική θερμοκρασία του κελύφους 136.9°C.

-Για λειτουργία του κινητήρα με ένταση ρεύματος 4.92 A, ταχύτητα περιστροφής 750 ΣΑΛ, αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων 27°C και αρχική θερμοκρασία στάτη 27.5°C κατεγράφησαν οι θερμοκρασιακές μεταβολές στα τυλίγματα και στον πυρήνα του στάτη με την πειραματική διαδικασία να διαρκεί 120 min. Κατά τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας η προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς των τυλιγμάτων από το θερμικό μοντέλο παρουσιάζει μέγιστη απόκλιση από τις πειραματικές θερμοκρασίες 13.67%, ελάχιστη απόκλιση 0.42% και μέση απόκλιση 6.75%. Οι αντίστοιχες τιμές απόκλισης που αφορούν τη θερμική συμπεριφορά του στάτη είναι 12.45%, 0.17% και 6.33%. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των τυλιγμάτων και του στάτη είναι 1.5°C με την πειραματική θερμοκρασία των τυλιγμάτων να είναι 87°C και τη θερμοκρασία του στάτη να είναι 85.5°C. Οι τελικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων και του στάτη όπως προέκυψαν από το θερμικό μοντέλο αποκλίνουν από τις αντίστοιχες πειραματικές κατά 7.49% και 8.83% αντίστοιχα με τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων να είναι 80.9°C και τη θερμοκρασία του στάτη να είναι 78.6°C.

-Για λειτουργία του κινητήρα με ένταση ρεύματος 6.45 A, ταχύτητα περιστροφής 998 ΣΑΛ, αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων 25°C και αρχική θερμοκρασία στάτη 25°C κατεγράφησαν οι θερμοκρασιακές μεταβολές στα τυλίγματα και στον στάτη με τη χρονική διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας να είναι ίση με 105 min. Κατά τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των πειραματικών θερμοκρασιών των τυλιγμάτων και των αντίστοιχων της προσομοίωσης είναι 22.24%, η ελάχιστη 0.42% και η μέση απόκλιση 12.54%. Οι αντίστοιχες τιμές απόκλισης που αφορούν τον στάτη είναι 21.83%, 0.13% και 9.57%. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας παρατηρείται θερμοκρασιακή απόκλιση μεταξύ των τυλιγμάτων και του στάτη της τάξης των 3°C με τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων να είναι 120°C και τη θερμοκρασία του στάτη 117°C. Η απόκλιση μεταξύ των τελικών πειραματικών θερμοκρασιών τυλιγμάτων και στάτη και των αντίστοιχων της προσομοίωσης είναι

10.76% και 5.63% αντίστοιχα με τη τελική προσομοιωμένη θερμοκρασία των τυλιγμάτων να είναι 108.3°C και τη θερμοκρασία του στάτη 110.8°C.

-Για λειτουργία του κινητήρα με ένταση ρεύματος 3.9 A, ταχύτητα περιστροφής 300 ΣΑΛ, αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων 33°C και αρχική θερμοκρασία στάτη 34°C κατεγράφη η θερμική συμπεριφορά των τυλιγμάτων και του στάτη με τη χρονική διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας να είναι ίση με 45 min. Κατά τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των πειραματικών θερμοκρασιών των τυλιγμάτων και των αντίστοιχων της προσομοίωσης είναι 17.42%, η ελάχιστη 5.51% και η μέση 11.69%. Οι αντίστοιχες τιμές απόκλισης που προκύπτουν από τη προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς του στάτη από το θερμικό μοντέλο είναι 10.1%, 4.14% και 7.52%. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τόσο η θερμοκρασία των τυλιγμάτων όσο και η θερμοκρασία του στάτη είναι 58°C. Οι τελικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων και του στάτη όπως προέκυψαν από το θερμικό μοντέλο αποκλίνουν από τις αντίστοιχες πειραματικές κατά 9.33% και 10.1% αντίστοιχα με τη προσομοιωμένη θερμοκρασία των τυλιγμάτων να είναι 63.4°C και την αντίστοιχη του στάτη 52.7°C.

Από τη παραπάνω σύντομη παρουσίαση των αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι όσο μικρότερη είναι η ένταση του ρεύματος των τυλιγμάτων τόσο μικρότερες είναι οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις μεταξύ διαφορετικών περιοχών του κινητήρα. Επιπλέον επιβεβαιώνεται η καταλληλότητα της συγκεκριμένης μεθόδου προσομοίωσης για την ανάλυση των θερμικών φαινομένων στο εσωτερικό του κινητήρα μόνιμων μαγνητών καθώς η μέση τιμή απόκλισης μεταξύ των πειραματικών θερμοκρασιών και των αντίστοιχων της προσομοίωσης δεν ξεπερνά παρά σε ελάχιστες περιπτώσεις το 10%.

- Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του ισοδύναμου θερμικού μοντέλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμική συμπεριφορά του διακένου. Η τιμή της θερμικής αντίστασης του διακένου, όπως αναφέραμε και στο τρίτο κεφάλαιο, εξαρτάται από τα θερμοδυναμικά μεγέθη του αέρα (πίεση, θερμοκρασία), από την ταχύτητα του αέρα και από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα με συνέπεια ο μαθηματικός υπολογισμός της να καθίσταται δύσκολος. Προκειμένου να προσδιορίσουμε την τιμή της αντίστασης διακένου που θα χρησιμοποιήσουμε στο ισοδύναμο κύκλωμα μεταβάλλουμε την τιμή της, διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους του κυκλώματος, έως ότου το ποσοστό απόκλισης μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων της προσομοίωσης προσεγγίσει το 10%.

- Η δισδιάστατη θερμική ανάλυση με τη χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων προσεγγίζει ικανοποιητικά τη θερμική συμπεριφορά του κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Προς επιβεβαίωση του παραπάνω ισχυρισμού παραθέτουμε τις προσομοιωμένες και πειραματικές θερμοκρασίες μόνιμης κατάστασης για διάφορες συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα:

-Για λειτουργία του κινητήρα με ένταση ρεύματος 8.5 A, ταχύτητα περιστροφής 1200ΣΑΛ και αρχική θερμοκρασία κελύφους 72°C η τελική πειραματική θερμοκρασία του κελύφους τη χρονική στιγμή 9 min είναι 112°C. Οι τελικές θερμοκρασίες του κελύφους όπως προέκυψαν από την εγκάρσια και τη παράλληλη τομή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων αποκλίνουν από την αντίστοιχη πειραματική κατά 3.38% και 0.98% αντίστοιχα με τη θερμοκρασία κελύφους της εγκάρσιας τομής να είναι 108.3°C και της παράλληλης τομής 113.1°C.

-Για λειτουργία του κινητήρα με ένταση ρεύματος 9.25 A, ταχύτητα περιστροφής 1200 ΣΑΛ, αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων 34°C και αρχική θερμοκρασία κελύφους 24°C οι πειραματικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων και του κελύφους τη χρονική στιγμή 30 min είναι 150°C και 123°C αντίστοιχα. Οι τελικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων όπως προέκυψαν από την εγκάρσια και τη παράλληλη τομή του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων αποκλίνουν από την αντίστοιχη πειραματική κατά 5.37% και 2.4% αντίστοιχα με τη θερμοκρασία τυλιγμάτων της εγκάρσιας τομής να είναι 158.1°C και της παράλληλης τομής 153.6°C. Όσο αναφορά τη προσέγγιση της τελικής θερμοκρασίας του κελύφους από την παράλληλη τομή της μεθόδου προσομοίωσης παρατηρείται απόκλιση από την πειραματική θερμοκρασία 7.14% με τη θερμοκρασία προσομοίωσης να είναι ίση με 114.8°C.

Παρατηρούμε ότι αυξάνοντας την ένταση του ρεύματος τυλιγμάτων από τα 8.5A στα 9.25A και διατηρώντας σταθερή τη ταχύτητα περιστροφής στις 1200 ΣΑΛ η απόκλιση μεταξύ της πειραματικής θερμοκρασίας κελύφους και της αντίστοιχης προσομοιωμένης αυξάνεται από 0.98% σε 7.14%.

-Για λειτουργία του κινητήρα με ένταση ρεύματος 4.92 A, ταχύτητα περιστροφής 750 ΣΑΛ, αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων 27°C και αρχική θερμοκρασία στάτη 27.5°C οι πειραματικές θερμοκρασίες τυλιγμάτων και στάτη τη χρονική στιγμή 120 min είναι 87°C και 85.5°C αντίστοιχα. Οι τελικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων όπως προέκυψαν από την εγκάρσια και τη παράλληλη τομή της μεθόδου προσομοίωσης αποκλίνουν από την αντίστοιχη πειραματική κατά 1.97% και 0.94% αντίστοιχα με τη θερμοκρασία τυλιγμάτων της εγκάρσιας τομής να είναι 85.3°C και της παράλληλης τομής 87.8°C. Η προσέγγιση της τελικής πειραματικής θερμοκρασίας του στάτη από την εγκάρσια και τη παράλληλη τομή παρουσιάζει απόκλιση 0.9% και 0.92% αντίστοιχα με τη θερμοκρασία στάτη της εγκάρσιας τομής να είναι 84.7°C και της παράλληλης τομής 86.3°C.

-Για λειτουργία του κινητήρα με ένταση ρεύματος 6.45 A, ταχύτητα περιστροφής 998 ΣΑΛ, αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων 25°C και αρχική θερμοκρασία στάτη 25°C οι πειραματικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων και του στάτη τη χρονική στιγμή 105 min είναι 120°C και 117°C αντίστοιχα. Η προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς των τυλιγμάτων την ίδια χρονική στιγμή από την εγκάρσια και τη παράλληλη τομή

αποκλίνει από τη πειραματική θερμοκρασία κατά 2.86% και 2.19% αντίστοιχα με τη θερμοκρασία τυλιγμάτων της εγκάρσιας τομής να λαμβάνει την τιμή 116.7°C και την αντίστοιχη τιμή της παράλληλης τομής να είναι 117.4°C. Οι προσομοιωμένες τελικές θερμοκρασίες του στάτη όπως προκύπτουν από την εγκάρσια και τη παράλληλη τομή αποκλίνουν από την αντίστοιχη πειραματική κατά 1.21% και 2.07% αντίστοιχα με τη θερμοκρασία στάτη της εγκάρσιας τομής να είναι 115.6°C και την αντίστοιχη της παράλληλης τομής 114.6°C.

-Για λειτουργία του κινητήρα με ένταση ρεύματος 3.9 A, ταχύτητα περιστροφής 300 ΣΑΛ, αρχική θερμοκρασία τυλιγμάτων 33°C και αρχική θερμοκρασία στάτη 34°C οι πειραματικές θερμοκρασίες τόσο των τυλιγμάτων όσο και του στάτη τη χρονική στιγμή 45 min είναι 58°C. Οι τελικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων όπως προέκυψαν από την εγκάρσια και τη παράλληλη τομή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων αποκλίνουν από την αντίστοιχη πειραματική κατά 6.42% και 4.27% αντίστοιχα με τη θερμοκρασία τυλιγμάτων της εγκάρσιας τομής να λαμβάνει την τιμή 54.5°C και την αντίστοιχη της παράλληλης να είναι 55.6°C. Οι προσομοιωμένες θερμοκρασίες του στάτη όπως προέκυψαν από την εγκάρσια και τη παράλληλη τομή αποκλίνουν από τη πειραματική θερμοκρασία στάτη κατά 7.42% και 5.89% αντίστοιχα με τη θερμοκρασία στάτη της εγκάρσιας τομής να είναι 54°C και την αντίστοιχη της παράλληλης τομής 54.8°C.

- Από την παραπάνω παράθεση των αποτελεσμάτων των δύο μεθοδολογιών ανάλυσης θερμικών φαινομένων και τη σύγκριση τους με τα αντίστοιχα πειραματικά είναι εμφανής η καλύτερη προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας από τη διδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

- Το θερμοκρασιακό όριο του εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα είναι οι 120 °C. Κατά τη λήψη των πειραματικών μετρήσεων και έχοντας επιλέξει σαν μέθοδο απαγωγής της θερμότητας τη φυσική ψύξη του κινητήρα παρατηρήθηκε σε ορισμένες περιπτώσεις η υπέρβαση του παραπάνω ορίου. Προκειμένου να αποφύγουμε την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών προτείνεται η χρήση ανεμιστήρων που θα διοχετεύουν με αέρα το εσωτερικό του κινητήρα.

6.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Τα βασικότερα σημεία πρωτότυπης συνεισφοράς της παρούσας εργασίας είναι τα ακόλουθα:

- Η σχεδίαση ενός ισοδύναμου θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του εικοσαπολικού σύγχρονου κινητήρα λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της θερμικής συμπεριφοράς του διακένου στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

- Η δισδιάστατη θερμική ανάλυση του σύγχρονου κινητήρα με τη χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο τομές του κινητήρα, μία εγκάρσια στον άξονα του και μία παράλληλη σε αυτόν.
- Η εφαρμογή των δύο μεθόδων προσομοίωσης και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τα πειραματικά αποτελέσματα για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα.

6.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Τα θέματα που προέκυψαν με την περάτωση της παρούσας εργασίας και χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης είναι τα εξής:

- Ανάπτυξη συζευγμένης ηλεκτρομαγνητικής θερμικής ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την καλύτερη σύγκλιση με τα πειραματικά αποτελέσματα σε όλες τις περιοχές του μοντέλου και για διάφορες συνθήκες φόρτισης και λειτουργίας του σύγχρονου κινητήρα.
- Την ανάπτυξη ανάλυσης CFD (Computational Fluid Dynamics) και τη σύγκριση της συγκεκριμένης μεθόδου με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (δισδιάστατη και τρισδιάστατη ανάλυση) και με τα μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α•Ιδιότητες υλικών του κινητήρα

Υλικό	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$c_p(\text{J/kg}\cdot\text{K})$	$k(\text{W/m}\cdot\text{K})$
Σιδηρομαγνητικό υλικό δρομέα	7670	519.4	14.425
Iron Fe	7874	449.46	80.4
Air	1.067	1009	0.0285
Copper Cu	8940	384.6	401
Winding Insulation	-	$10^6 \text{ J/K}\cdot\text{m}^3$	0.5

Πίνακας Α.1 Ιδιότητες των υλικών του σύγχρονου κινητήρα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**•1^η σειρά πειραματικών μετρήσεων**

Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	72
1	77
2	83
3	89
4	93
5	98
6	102
7	106
8	109
9	112

Πίνακας Β.1 Πειραματικές θερμοκρασίες κελύφους για ταχύτητα περιστροφής 1200 ΣΑΛ και ρεύμα τυλιγμάτων 8.5 Α

•2^η σειρά πειραματικών μετρήσεων

-Τυλίγματα του στάτη

Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	34
1	43
2	52
3	57
4	63
5	68
6	72
7	78
8	83
9	87
10	91
11	96
12	100
13	104
14	108
15	112
16	115
17	118
18	122
19	125
20	128
21	131
22	134
23	137
24	139
25	142

Πίνακας Β.2 (συνέχεια)	
Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
26	144
27	146
28	147
29	150

Πίνακας Β.2 Πειραματικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων για ταχύτητα περιστροφής 1200 ΣΑΛ και ρεύμα τυλιγμάτων 9.25 Α

-Κέλυφος

Χρόνος (min)	Θερμοκρασία κέντρου(°C)	Θερμοκρασία άκρου(°C)
0	24	24
1	30	27
2	35	30
3	39	33
4	48	36
5	53	39
6	57	42
7	62	44
8	66	48
9	70	50
10	74	53
11	78	56
12	82	59
13	85	61
14	89	64
15	92	66
16	96	69
17	99	71
18	102	73
19	104	75
20	106	77
21	108	79
22	111	81
23	113	83
24	115	85
25	117	88
26	119	91
27	120	92
28	121	93
29	121	95

Πίνακας Β.3 Πειραματικές θερμοκρασίες του κέντρου και του άκρου του κελύφους για ταχύτητα περιστροφής 1200 ΣΑΛ και ρεύμα τυλιγμάτων 9.25 Α

•3^η σειρά πειραματικών μετρήσεων-Τυλίγματα του στάτη

Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	27
1	32
2	34
3	36
4	38
5	39
6	41
7	42
8	43
9	45
10	46
15	51
20	55
25	58
30	61
40	66
50	71
60	75
75	79
90	82
105	85
120	87

Πίνακας Β.4 Πειραματικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων για ταχύτητα περιστροφής 750 ΣΑΛ και ρεύμα τυλιγμάτων 4.92 Α

-Πυρήνας του στάτη

Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	27.5
1	29.5
2	31.5
3	33.5
4	34.5
5	36.5
6	37.5
7	39.5
8	40.5
9	41.5
10	43
15	48.5

Πίνακας Β.5 (συνέχεια)	
Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
20	53
25	56
30	59
40	64.5
50	68.5
60	72.5
75	77
90	80
105	83
120	85.5

Πίνακας Β.5 Πειραματικές θερμοκρασίες του στάτη για ταχύτητα περιστροφής 750 ΣΑΛ και ρεύμα τυλιγμάτων 4.92 Α

•4^η σειρά πειραματικών μετρήσεων

-Τυλίγματα του στάτη

Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	25
1	33
2	36
3	39
4	42
5	44
6	47
7	49
8	51
9	53
10	55
15	64
20	71
25	77
30	82
40	91
50	98
60	104
75	110
90	115
105	120

Πίνακας Β.6 Πειραματικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων για ταχύτητα περιστροφής 998 ΣΑΛ και ρεύμα τυλιγμάτων 6.45 Α

-Πυρήνας του στάτη

Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	25
1	28.5
2	31.5
3	34.5
4	37.5
5	40
6	42.5
7	45
8	47
9	49
10	51
15	60.5
20	67.5
25	74
30	79.5
40	88.5
50	95.5
60	101
75	108
90	113
105	117

Πίνακας Β.7 Πειραματικές θερμοκρασίες του στάτη για ταχύτητα περιστροφής 998 ΣΑΛ και ρεύμα τυλιγμάτων 6.45 Α

•5^η σειρά πειραματικών μετρήσεων-Τυλίγματα του στάτη

Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	33
1	36
2	37
3	38
4	39
5	40
10	44
15	47
26	53
35	55
45	58

Πίνακας Β.8 Πειραματικές θερμοκρασίες των τυλιγμάτων για ταχύτητα περιστροφής 300 ΣΑΛ και ρεύμα τυλιγμάτων 3.9 Α

-Πυρήνας του στάτη

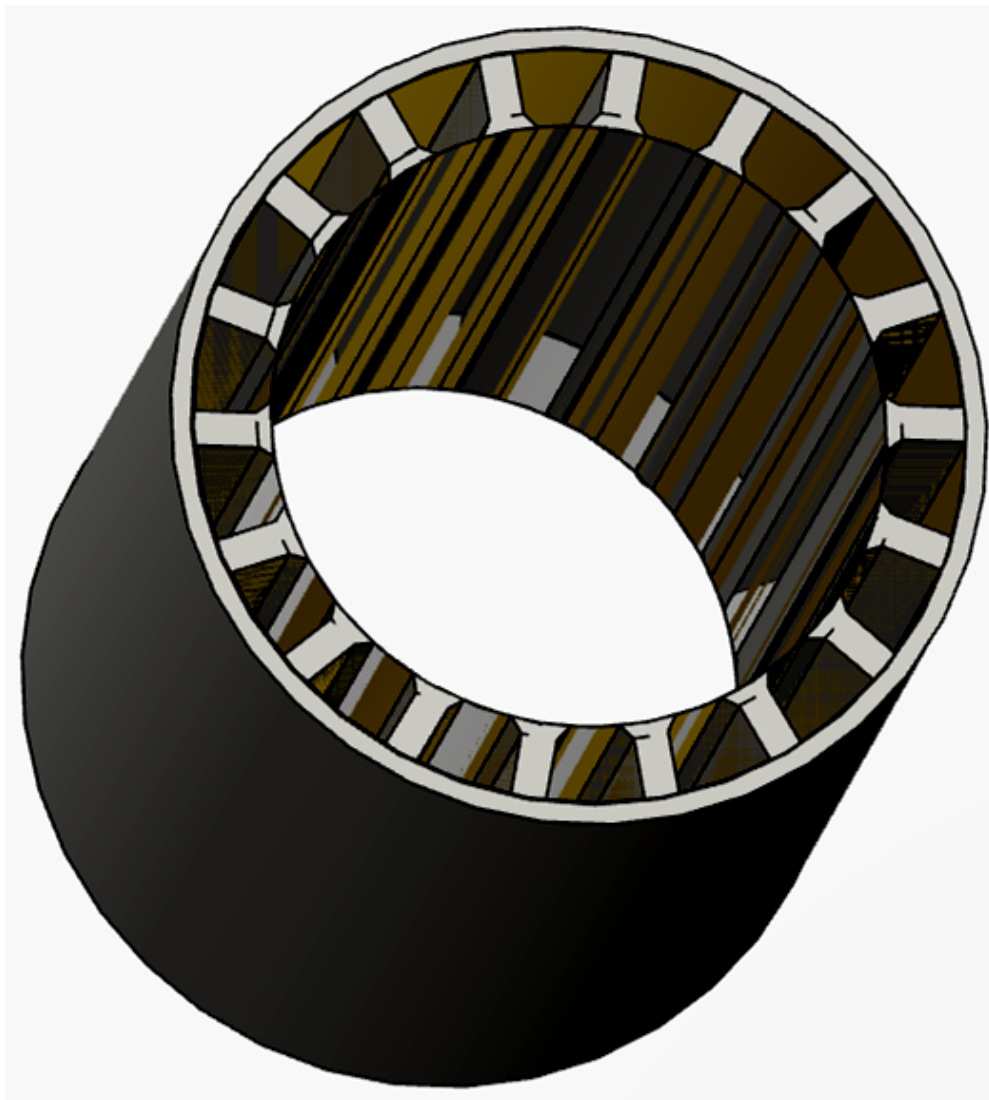
Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	34
1	35.5
2	36.5
3	37.5
4	38.5
5	39.5
10	43.5
15	46.5
26	52
35	55
45	58

Πίνακας Β.9 Πειραματικές θερμοκρασίες του στάτη για ταχύτητα περιστροφής 300 ΣΑΛ και ρεύμα τυλιγμάτων 3.9 Α

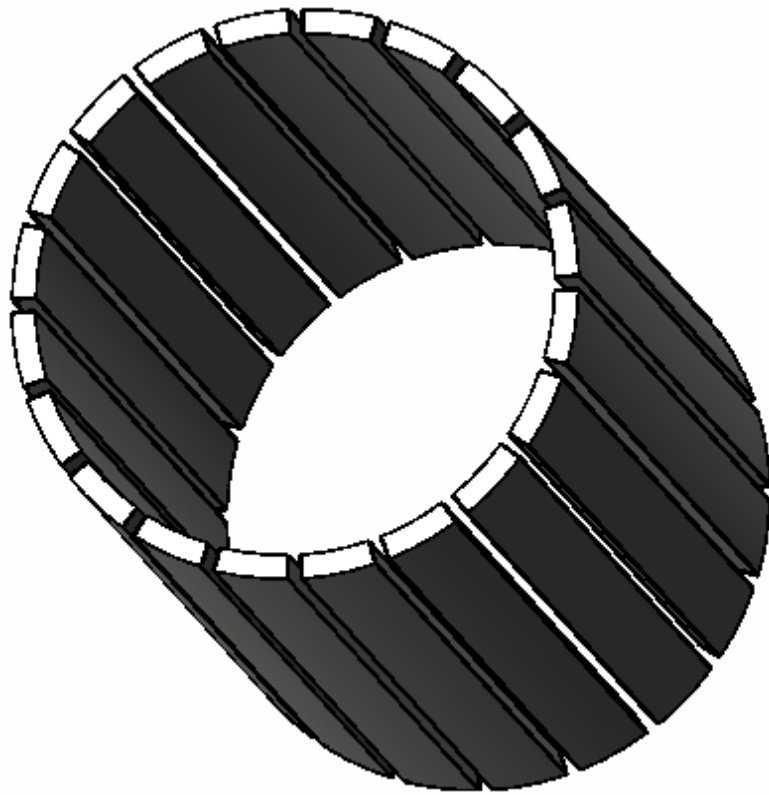
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται σχέδια τμημάτων του σύγχρονου κινητήρα που δημιουργήθηκαν με τη χρήση του Inventor Fusion 2013 (αναφορά [4] – Λογισμικό).

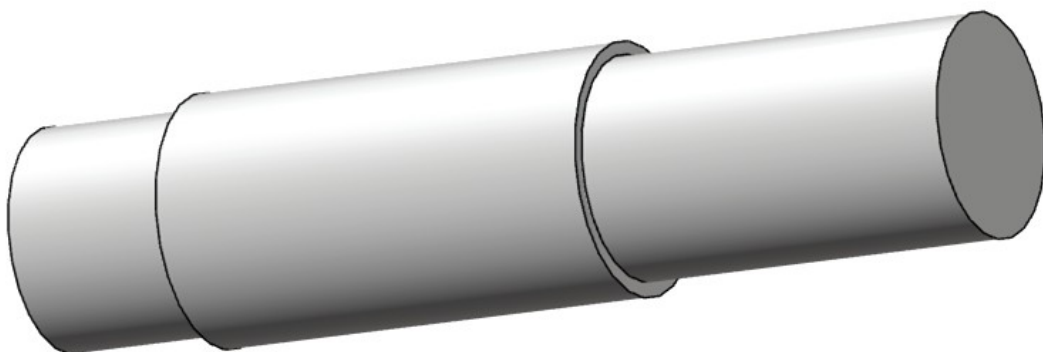
-Πυρήνας του στάτη



Σχ. Γ.1 Πυρήνας του στάτη του σύγχρονου κινητήρα

-Μόνιμοι μαγνήτες

Σχ. Γ.2 Μόνιμοι μαγνήτες του σύγχρονου κινητήρα

-Άξονας και πυρήνας δρομέα

Σχ. Γ.3 Άξονας και πυρήνας δρομέα του σύγχρονου κινητήρα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Υδραυλικά συστήματα αεροσκαφών

Τα υδραυλικά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στα αεροσκάφη στις αρχές της δεκαετίας του 1930 για τη δημιουργία του ανασυρόμενου συστήματος προσγείωσης. Έπειτα ένας μεγάλος αριθμός από λειτουργίες του αεροσκάφους πραγματοποιείται με τη χρήση υδραυλικής ισχύος. Η ευρεία χρήση της υδραυλικής ισχύος οφείλεται στην ευχέρεια που δίνεται στον πιλότο να διεκπεραιώσει εφαρμογές μεγάλης ισχύος με μικρές κινήσεις μέσα από το πιλοτήριο, [1].

Στα περισσότερα σύγχρονα αεροσκάφη η υδραυλική ισχύς χρησιμοποιείται τόσο για πρωταρχικούς όσο και για δευτερεύοντες ελέγχους πτήσης. Κάποιοι από τους πρωταρχικούς ελέγχους πτήσης που πραγματοποιούνται με την εφαρμογή υδραυλικής ισχύος είναι οι εξής, [1]:

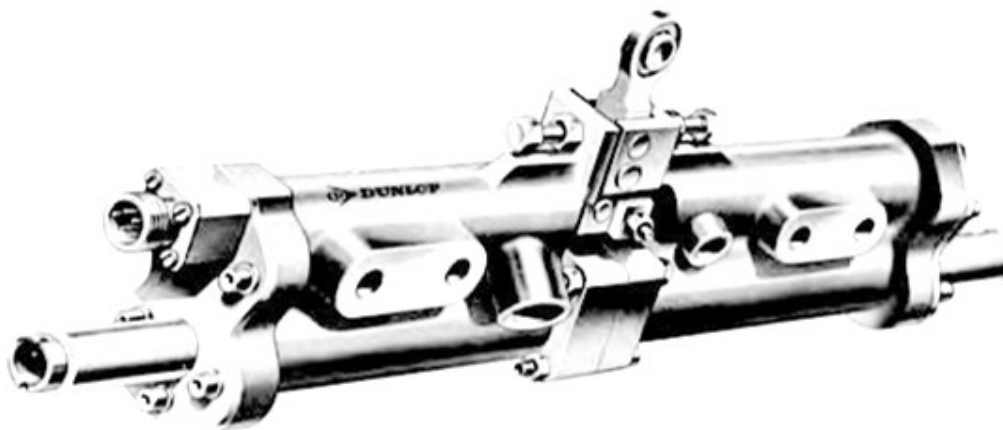
- Έλεγχος του προσανατολισμού του αεροσκάφους μέσω της κίνησης ανυψωτήρων (elevators) που βρίσκονται στο πίσω μέρος της ατράκτου.
- Έλεγχος του πηδαλίου του αεροσκάφους.
- Έλεγχος των πτερυγίων του αεροσκάφους.

Ορισμένοι από τους δευτερεύοντες ελέγχους πτήσης που χρησιμοποιούν την υδραυλική ισχύ είναι οι ακόλουθοι, [1]:

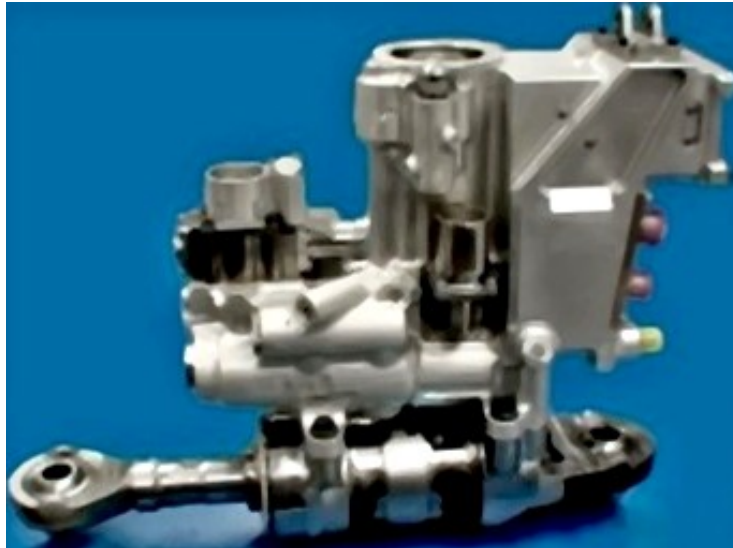
- Έλεγχος του συστήματος πέδησης.
- Έλεγχος του συστήματος σταθεροποίησης του αεροσκάφους.

Οι παραπάνω έλεγχοι πραγματοποιούνται με τη χρήση υδραυλικών σερβοκινητήρων.

Στα Σχ. Δ.1 – Δ.4 παρουσιάζονται ορισμένοι υδραυλικοί σερβοκινητήρες που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη για τον έλεγχο των συστημάτων τους.



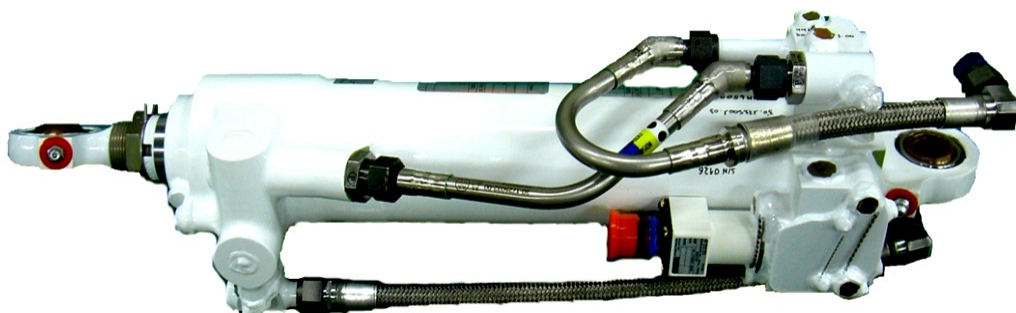
Σχ. Δ.1 Υδραυλικός σερβοκινητήρας ελέγχου πτήσης, [1]



Σχ. Δ.2 Υδραυλικός σερβοκινητήρας του αεροσκάφους F-35C, [21].



Σχ. Δ.3 Υδραυλικός σερβοκινητήρας για τον έλεγχο της πόρτας φορτίων, [22].

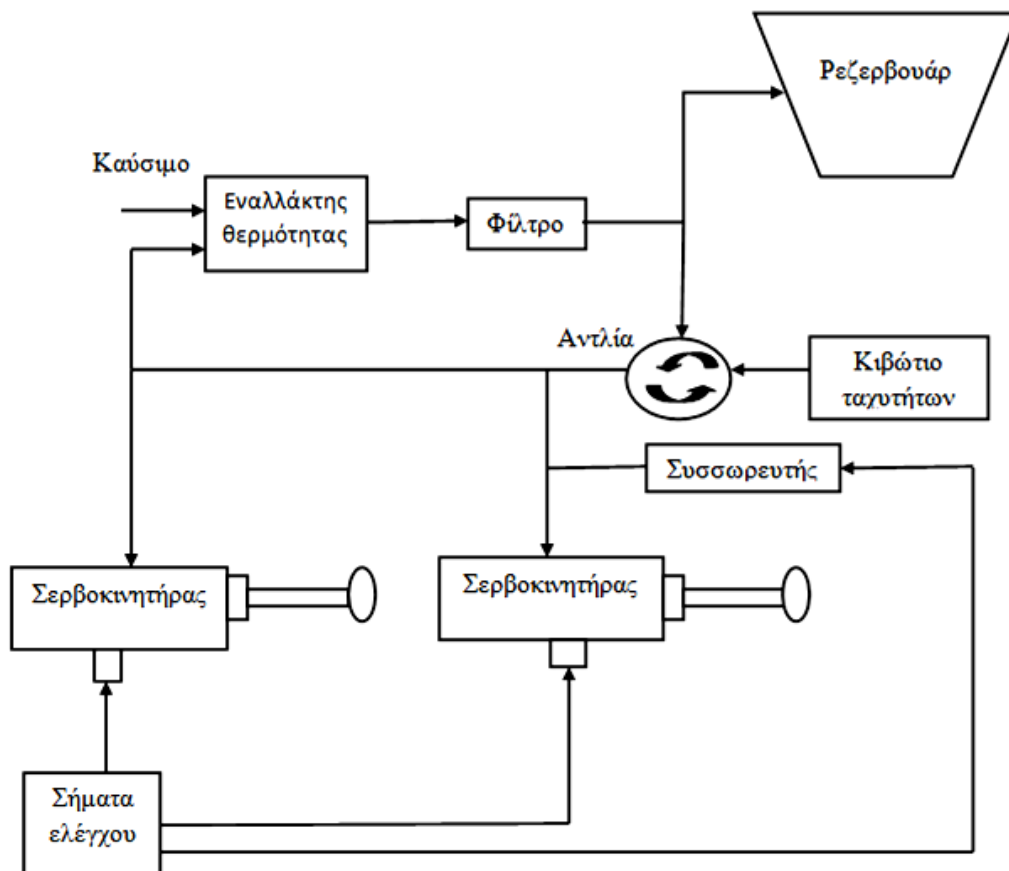


Σχ. Δ.4 Υδραυλικός σερβοκινητήρας για τον έλεγχο της πόρτας του αεροσκάφους, [23].

Στα πολεμικά αεροσκάφη ένας υδραυλικός σερβοκινητήρας ελέγχου πτήσης συνήθως αποτελείται από δύο παράλληλους κυλίνδρους που συνδέονται σε ένα κοινό έμβολο. Για να επιτευχθεί η τροφοδότηση του υδραυλικού σερβοκινητήρα με ρευστό οι δύο κύλινδροι συνδέονται σε διαφορετικά υδραυλικά συστήματα του αεροσκάφους. Η φιλοσοφία χρήσης των σερβοκινητήρων στα εμπορικά αεροσκάφη είναι διαφορετική. Η κάθε επιφάνεια ελέγχου διαχωρίζεται σε δύο ή περισσότερα ανεξάρτητα τμήματα. Το κάθε τμήμα διαθέτει τον δικό του σερβοκινητήρα ελέγχου που τροφοδοτείται από διαφορετικό υδραυλικό σύστημα, [1].

Η πλειονότητα των σερβοκινητήρων ελέγχει συστήματα δύο καταστάσεων λειτουργίας όπως για παράδειγμα τα αερόφρενα, οι ανιχνευτές ανεφοδιασμού και οι τροχοί προσγείωσης. Γι' αυτό τον λόγο οι σερβοκινητήρες μπορούν να βρεθούν σε δύο θέσεις, είτε πλήρως παρατεταμένοι είτε πλήρως κλειστοί. Σε καθεμία από τις δύο θέσεις ο σερβοκινητήρας λαμβάνει κάποιο σήμα ελέγχου το οποίο προκαλεί τη μετακίνηση μιας βαλβίδας. Η μετακίνηση αυτή επιτρέπει στο ρευστό να εισέλθει στον σερβοκινητήρα με μια ορισμένη πίεση και να μεταβάλλει τη θέση του εμβόλου προς την επιθυμητή κατεύθυνση.

Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται η δομή ενός απλού υδραυλικού συστήματος.



Σχ. Δ.5 Δομή ενός απλού υδραυλικού συστήματος

Η πρωταρχική πηγή ισχύος σε ένα αεροσκάφος είναι ο κινητήρας. Ένα μέρος της ισχύος αυτής μεταφέρεται μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων σε μια υδραυλική αντλία. Η αντλία προκαλεί τη ροή ενός ρευστού το οποίο μέσω ανοξείδωτων αγωγών μεταφέρεται σε υδραυλικούς σερβοκινητήρες. Με την τροφοδότηση των σερβοκινητήρων επιτυγχάνεται ο έλεγχος συστημάτων του αεροσκάφους. Το ρεζερβουάρ εξασφαλίζει την επάρκεια ρευστού σε οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας, [1].

Στην πραγματικότητα τα υδραυλικά συστήματα σε ένα σύγχρονο αεροσκάφος αποτελούνται από έναν μεγάλο αριθμό αντλιών και αγωγών έτσι ώστε μια πιθανή τοπική διαρροή ρευστού να μην προκαλέσει την κατάρρευση ολόκληρου του συστήματος ισχύος.

*ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ*

- [1] Ian Moir and Allan Seabridge, «Aircraft Systems», third edition, Wiley, 2008.
- [2] L. S. Botten, R. C. Whitley and D. A. King, «Flight Control Actuation Technology for Next – Generation All – Electric Aircraft», Technology review, pp. 55-68, 2000.
- [3] <http://www.cleansky.eu/>, «Aviation and Environment», 2011.
- [4] A. J. Rosero, J. Ortega, E. Aldabas and L. Romeral, «Moving towards a more electric aircraft», Aerospace and Electronics Systems Magazine, IEEE, vol: 22, Issue: 3, Page(s): 3 – 9, 2007.
- [5] Kamiar J. Karimi, «Future Aircraft Power Systems – Integration Challenges», The Boeing Company, 2007.
- [6] Xavier L. t., «A380 Flight Controls Overview», 2007.
- [7] Ι. Α. Τεγόπουλος, «Ηλεκτρικές Μηχανές», Μέρος Β', Εκδόσεις Συμμετρία, 1991.
- [8] J. K. Gieras and M. Wing, «Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications», New York: Marcel Dekker, 1997.
- [9] M. Beniakar, T. Kefalas, A. Kladas, «Investigation of the Impact of the Operational Temperature on the Performance of a Surface Permanent Magnet Motor», Journal of Materials Science Forum, vol. 670, pp. 259-264, 2011.
- [10] Enrique L. Carrillo Arroyo, «Modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor drive system», Thesis, Puerto Rico, 2006.
- [11] Stephen J. Chapman, «Electric Machinery Fundamentals», third edition, McGraw – Hill, 2000.
- [12] S. O. Kasap, «Principles of electronic materials and devices», second edition, McGraw – Hill, 2002.
- [13] Διονύσης Κ. Ασημακόπουλος, Βασιλική Ι. Λυγερού, Γεώργιος Α. Αραμπατζής, «Μεταφορά Θερμότητας», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2009.
- [14] Ιωάννης Κ. Νικολός, «Σημειώσεις μαθήματος μετάδοση θερμότητας», Πολυτεχνείο Κρήτης, 2007.
- [15] International Electrotechnical Commission, «Thermal evaluation and classification of electrical insulation», 1984.
- [16] Ε. Α. Λαναράς, «Θερμική ανάλυση κινητήρα μονίμων μαγνητών», 2011.
- [17] «TEIP Proposed Design Configuration of the Motor», 2010.

- [18] T. D. Kefalas, «Intermediate Deliverable Report D3.2 : Motor Thermal Model», 2011.
- [19] R. A. McCurrie, «Ferromagnetic materials: structure and properties» Academic, 1994.
- [20] T. D. Kefalas and A. G. Kladas, «Finite Element Transient Thermal Analysis of PMSM for Aerospace Applications», Proceedings of the 20th International Conference on Electrical Machines ICEM 2012, Marseille, France, September 2-5, 2012.
- [21] <http://www.woodward.com/default.aspx>, «Woodward Primary Flight Controls».
- [22] <http://www.sitec-aerospace.com/index.html?PHPSESSID=4281c945e3545087071d940c7d67ba43>, «HYDRAULICS».
- [23] Energy & Machinery Korea, «Door actuator for aircraft».
- [24] http://www.bpbsurplus.com/lc/cart.php?target=product&product_id=18589
- [25] <http://jasc-controls.com/jasc-industry-listing/aerospace/aerospace-actuators/high-temperature-em-rotary-actuator-part-101347-1/>
- [26] http://www.liebherr.com/AE/en-GB/products_ae.wfw/id-14817-0
- [27] Control Systems Division – Military, «Electrohydrostatic Actuation Systems», Parker Aerospace, Parker Hannifin Corporation, Irvine, CA, 2006.
- [28] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromechanical_spoiler_actuator_hg.jpg
- [29] <http://www.cedrat-technologies.com/en/technologies/actuators/piezo-actuators-electronics.html>
- [30] Ilan Berlowitz, «All/More Electric Aircraft Engine and Airframe Systems Implementation», BEDEK Aviation Group, Aircraft and Programs Divisions Israel Aerospace Industries.
- [31] Nicola Bianchi, «Azionamenti Elettrici Aerospaziale – More Electric Aircraft», 2011.
- [32] A-380 Flight Controls Overview, Airbus, 2007.
- [33] <http://skyzag.com/2012/05/11/whaddy-know/>
- [34] Meng Fanliang, «Actuation system design with electrically powered actuators», Cranfield University, 2011.
- [35] Jon Clare, «Examples of More Electric Aircraft Research in the Aerospace Research Centre», The University of Nottingham.

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

[1] Αριθμητικό περιβάλλον υπολογισμών: Matlab (Mathworks)

Εργαλείο μοντελοποίησης, προσομοίωσης και ανάλυσης δυναμικών συστημάτων :
Simulink (Mathworks) / Έκδοση R2011a

[MathWorks - MATLAB and Simulink for Technical Computing.](#)

[2] Διαδικτυακά διαθέσιμος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων / υπολογιστικό πρόγραμμα: [Finite Element Method Magnetics: HomePage.](#)

[3] Πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων: Office – Excel 2007 (Microsoft)

[Spreadsheet Software, Microsoft Excel - Office.com.](#)

[4] Πρόγραμμα σχεδίασης: Inventor Fusion 2013 (Autodesk)

[http://labs.autodesk.com/technologies/fusion.](http://labs.autodesk.com/technologies/fusion)