



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

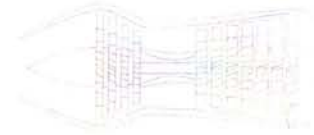
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

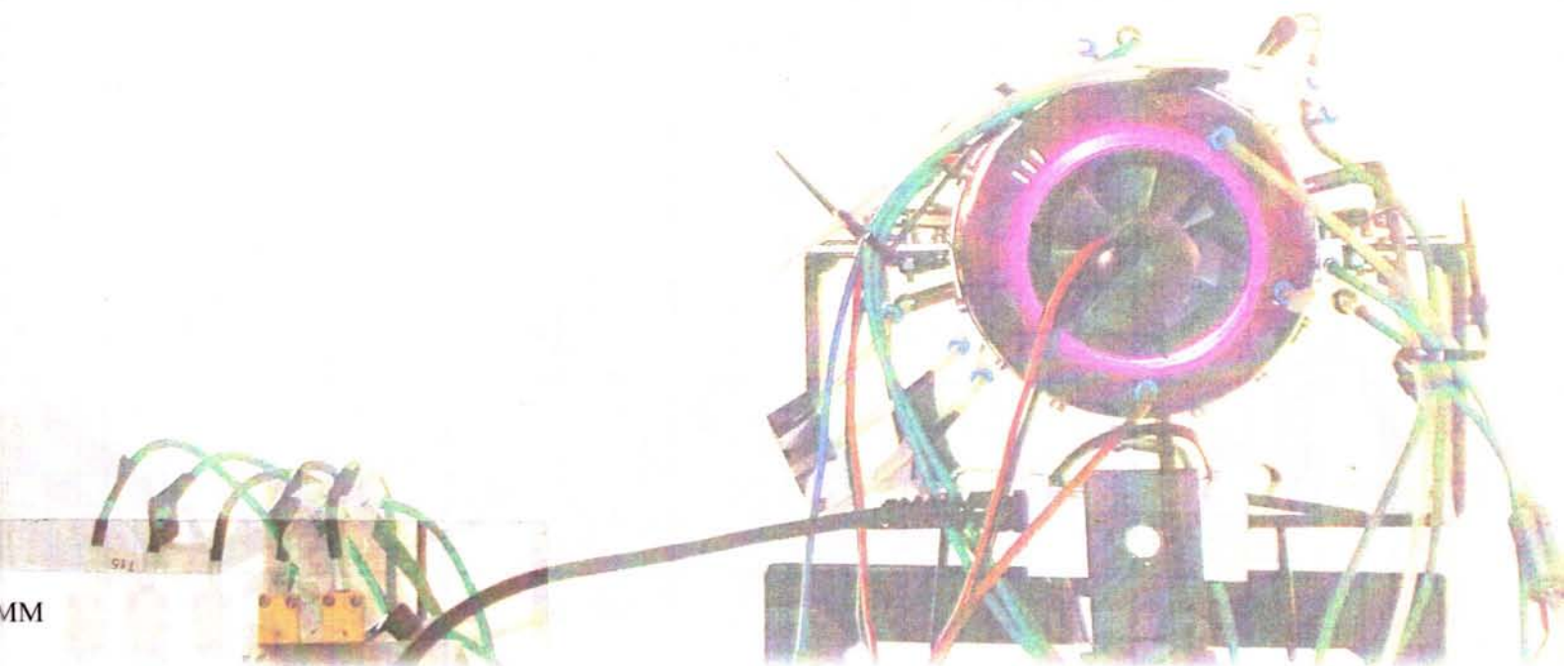
ΘΕΜΑ:

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ ΓΚΟΥΝΤΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΣΤΑΜΑΤΗΣ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του διπλώματος
Μηχανολόγου Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2012



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 11152/1
Ημερ. Εισ.: 19-11-2012
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ
2012
ΓΚΟ

© 2012 Απόστολος Γκούντας

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Σταμάτης Αναστάσιος
(Επιβλέπων) Αναπληρωτής καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Σταματέλλος Αναστάσιος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος
Αναπληρωτής καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλλαν άμεσα ή έμμεσα στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου, Νίκο, για όλα όσα μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια και την υποστήριξη με κάθε τρόπο, σε κάθε έκφανση της ζωής μου. Αισθάνομαι πως σε αυτούς οφείλω τα πάντα.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Α. Σταμάτη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Επίσης, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υπ. διδάκτορα Διαμαντή Μπακάλη για τη βοήθεια, τις υποδείξεις και τη στενή συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα όλους όσους ήταν δίπλα μου και συνέβαλαν με τον τρόπο τους στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας αλλά και τη συνολικότερη διαμόρφωσή μου με τις αξέχαστες στιγμές που ζήσαμε, τους φίλους μου, Ανδρέα Κόκκα, Παντελή Βασιλόπουλο, Γιώργο Πολύμερο, Δημήτρη Τύρη, Βαγγέλη Δημούτση, Αλέξανδρο Κουρτίνο, Χαρίκλεια και Ελένη Σούρλα, καθώς και τις Βίκυ Κικίδου και Σάσα Καραλευθέρη για τις αμέτρητες ώρες που περάσαμε μαζί στον εργαστηριακό χώρο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Έφη, για την υπομονή και τη στήριξή της όλο αυτό το διάστημα, αλλά και για την επιμέλεια του εξωφύλλου και της παρουσίασης.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή γίνεται διαμόρφωση του μικτού μοντέλου προσομοίωσης της μεταβατικής λειτουργίας του κινητήρα AMT Olympus HP ES.

Στην αρχή γίνεται η ανάπτυξη των εξισώσεων που διέπουν τη μεταβατική λειτουργία του αεριοστροβίλου και έτσι αναπτύσσονται οι εξισώσεις διατήρησης και οι εξισώσεις που αποδίδουν τη δυναμική μεταφορά θερμότητας, κατά τη μεταβατική λειτουργία του αεριοστροβίλου. Στην ενεργειακή εξίσωση των συνιστωσών εισάγεται ο όρος της ροπής αδράνειας του άξονα του αεριοστροβίλου.

Το πρόγραμμα προσομοίωσης του αεριοστροβίλου διαμορφώνεται, λεισι ώστε να αποδίδει τη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα με δεδομένη παροχή καυσίμου.

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που καταγράφηκαν και μία συγκριτική ανάλυση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αεριοστροβίλου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	11
1 Εισαγωγή	15
1.1 Παρουσίαση προβλήματος	15
1.2 Σκοπός εργασίας	16
1.3 Στροβιλοαντιδραστήρες (Turbojet)	16
1.3.1 Εισαγωγή στους στροβιλοαντιδραστήρες	16
1.3.2 Θερμοδυναμικός κύκλος	18
1.3.3 Παρουσίαση κινητήρα AMT Olympus HP ES	22
1.4 Γενικά στοιχεία μοντελοποίησης	26
1.4.1 Προσομοίωση	26
2 Παρακολούθηση λειτουργίας	28
2.1 Μεθοδολογία υπολογισμού κύκλου λειτουργίας	28
2.1.1 Χρησιμοποιούμενες σχέσεις	30
2.2 Παρακολούθηση AMT Olympus HP ES	34
2.2.1 Χρησιμοποιούμενα όργανα	34
2.2.2 Μετρούμενα θερμοδυναμικά μεγέθη	42
Εικόνα 19. Τοποθέτηση αισθητήρων πίεσης και θερμοκρασίας στις τρεις θέσεις ...	43
2.3 Περιγραφή δοκιμαστηρίου	44
2.4 Πρόσκτηση δεδομένων με τη βοήθεια λογισμικού	46
2.4.1 Κάρτα πρόσκτησης δεδομένων	48
2.4.2 Πρόσκτηση δεδομένων από την ECU	52
2.4.3 Παρουσίαση κώδικα LabVIEW για πρόσκτηση δεδομένων	52
3 Μαθηματικό μοντέλο	55
3.1 Συναρτησιακά μοντέλα	55
3.2 Εξισώσεις διατήρησης	57
3.2.1 Εξίσωση διατήρησης μάζας (συνέχειας)	57
3.2.2 Εξίσωση διατήρησης ορμής	59
3.2.3 Εξίσωση της ενέργειας	61
3.3 Απώλειες θερμότητας κατά τη μεταβατική λειτουργία	63
3.3.1 Διαφορική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας διαμέσου κυλινδρικού τοιχώματος	65
3.4 Επίλυση συστήματος εξισώσεων	65

3.5	Δυναμική της ατράκτου (shaft dynamics)	67
3.6	Δυναμικά φαινόμενα του ρευστού κατά τη διέλευση του από τις συνιστώσες του κινητήρα (gas dynamics).....	68
4	Υπολογιστικό μοντέλο.....	70
4.1	Απαιτήσεις μοντέλου.....	70
4.2	Γενικές Αρχές-Ορισμοί.....	71
4.2.1	Υπολογιστικές δυσκολίες εσωτερικής μοντελοποίησης.....	72
4.2.2	Μικτά μοντέλα	72
4.3	Διακεκριμενοποίηση συνιστωσών	73
4.4	Σύζευξη συνιστωσών	74
4.5	Δεδομένα εισόδου.....	74
4.5.1	Περιγραφή διαδικασίας επίλυσης	75
4.5.2	Μεταβλητή ελέγχου	76
4.5.3	Υποθετικά μεγέθη και συναρτήσεις σφάλματος	77
4.6	Συναρτήσεις σφάλματος.....	79
4.7	Σύνοψη διαδικασίας υπολογισμού.....	81
4.8	Χάρτες συνιστωσών.....	82
4.8.1	Δεδομένα χαρτών.....	82
4.9	Κατασκευή Χαρτών.....	84
4.10	Αποτελέσματα προσομοίωσης	88
4.11	Συζήτηση αποτελεσμάτων	93
5	Παρουσίαση πειραματικών μετρήσεων	94
5.1	Παραδοχές	94
5.1.1	Ανηγμένα μεγέθη	95
5.2	Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων.....	96
6.1	Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	100
6.1.1	Επιτάχυνση (36500-48000).....	100
6.1.2	Επιβράδυνση (96500-38000).....	104
6.2	Σχόλια- Συμπεράσματα.....	107
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	110
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	112
Π.1	Εγχειρίδιο χρήσης κινητήρα Olympus	112
Π.1.1	Περιγραφή κινητήρα Olympus HP ES	112
Π.1.2	Electronic Control Unit (ECU)	112
Π.1.3	Αντλία καυσίμου	112

Π.1.4	Καύσιμο.....	113
	Τύπος καυσίμου.....	113
Π.1.5	Αέριο εκκίνησης	113
Π.1.6	Ανάφλεξη μίγματος αέρα – προπανίου	113
Π.1.7	Περιγραφή λειτουργίας ECU.....	114
Π.1.8	Περιγραφή των εισόδων στην ECU	114
Π.1.9	Βομβητής – Ηχητικά σήματα.....	115
Π.1.10	Λειτουργία του κινητήρα	116
	Π.1.10.1 Διαδικασία εκκίνησης.....	116
	Π.1.10.2 Διαδικασία τερματισμού λειτουργίας.....	117
	Π.1.10.3 Διαδικασία τερματισμού σε έκτακτη ανάγκη	118
Π.1.11	Προληπτική συντήρηση	118
	Π.1.11.1 Εποπτικός έλεγχος του κινητήρα.....	118
	Π.1.11.2 Έλεγχος των εδράνων κύλισης του άξονα περιστροφής.....	118
	Π.1.11.3 Αποθήκευση και λίπανση	119
	Π.1.11.4 Αφαίρεση του μπροστινού καλύμματος του κινητήρα και λίπανση πριν την επαναχρησιμοποίηση	119
Π.2	Περιγραφή κώδικα	120
Π.2.1	Περιγραφή αρχείων κώδικα	121
	Π.2.1.1 Αρχείο <i>MainPro.for</i>	121
	Π.2.1.2 Αρχείο <i>GTModel.for</i>	121
	Π.2.1.3 Αρχείο <i>Engine.for</i>	121
	Π.2.1.4 Αρχείο <i>Numerical.for</i>	122
	Π.2.1.5 Αρχείο <i>Interpolation.for</i>	122
	Π.2.1.6 Αρχείο <i>Thermo.for</i>	123
Π.2.2	Περιγραφή αρχείων εισόδου-εξόδου	123
	Π.2.2.1 <i>Accuracy.txt</i>	123
	Π.2.2.2 <i>Areabl.txt</i>	123
	Π.2.2.3 <i>Cmap.txt</i>	124
	Π.2.2.4 <i>Data.txt</i>	124
	Π.2.2.5 <i>Ctmap.txt</i>	124
	Π.2.2.6 <i>Debug.txt</i>	125
	Π.2.2.7 <i>Engine.dat</i>	125
	Π.2.2.8 <i>Factors.txt</i>	125
	Π.2.2.9 <i>gtperf.txt</i>	126

Π.2.2.10	<i>input.txt</i>	126
Π.2.2.11	<i>map position.txt</i>	126
Π.2.2.12	<i>Mesurements.txt</i>	126
Π.2.2.13	<i>INSERT_DATA.txt</i>	126
Π.3	<i>Περιγραφή υπορουτινών</i>	127
Π.3.1	Υπορουτίνα GTModel	127
Π.3.2	Υπορουτίνα RESUL	127
Π.3.3	Υπορουτίνα initialization.....	127
Π.3.4	Υπορουτίνα engine	128
Π.3.5	Υπορουτίνα inlet.....	129
Π.3.6	Υπορουτίνα comprbleed	129
Π.3.7	Υπορουτίνα civol.....	129
Π.3.8	Υπορουτίνα compr.....	130
Π.3.9	Υπορουτίνα burn	130
Π.3.10	Υπορουτίνα remix.....	131
Π.3.11	Υπορουτίνα cooler	131
Π.3.12	Υπορουτίνα cturb	131
Π.3.13	Υπορουτίνα AfterBurn	132
Π.3.14	Υπορουτίνα nozzle	132
Π.3.15	Υπορουτίνα machsolversub	132
Π.3.16	Υπορουτίνα machsolver	133
Π.3.17	Υπορουτίνα thrustcalc	133

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.	Αρχή λειτουργίας στροβιλοαντιδραστήρα turbojet.....	17
Εικόνα 2.	Στάδια κύκλου Brayton και διαγράμματα P-V, T-S	19
Εικόνα 3.	Διεργασίες κύκλου Brayton.....	19
Εικόνα 4.	Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ζώνη καύσης.....	21
Εικόνα 5.	Ο κινητήρα Olympus HP ES	23
Εικόνα 6.	Ο κινητήρας Olympus HP ES σε τομή	23
Εικόνα 7.	Η ECU του κινητήρα της AMT.....	25
Εικόνα 8.	Αισθητήρες πίεσης σε διατομές του κινητήρα	28
Εικόνα 9.	Πίσω όψη κινητήρα	29
Εικόνα 10.	Αρίθμηση θέσεων κατά μήκος του κινητήρα Olympus HP	29

Εικόνα 11. Μεταλλάκτης πίεσης A-10 της WIKA	36
Εικόνα 12. Σχήμα θερμοστοιχείου	37
Εικόνα 13. Ενισχυτής των θερμοστοιχείων	38
Εικόνα 14. Κυψελίδα φόρτισης	39
Εικόνα 15. Γέφυρα Wheatstone	39
Εικόνα 16. Βάση αεριοστροβίλου	40
Εικόνα 17. Πλήρης τοποθέτηση αεριοστροβίλου	41
Εικόνα 18. Παρουσίαση πλήρους τοποθέτησης κινητήρα ως προς την κυψελίδα φόρτισης.....	42
Εικόνα 19. Τοποθέτηση αισθητήρων πίεσης και θερμοκρασίας στις τρεις θέσεις ...	43
Εικόνα 20.	45
Εικόνα 21.	45
Εικόνα 22.	46
Εικόνα 23. Front panel και block diagramm ενός απλού VI LabVIEW	47
Εικόνα 24. Η κάρτα πρόσκτησης δεδομένων USB-6229	49
Εικόνα 25. Αντιστοίχιση καναλιών στους ακροδέκτες της κάρτας	50
Εικόνα 26. Συνδεσμολογία καναλιού Ai0.....	51
Εικόνα 27. Front-panel του προγράμματος Turbo_Data.vi που παρουσιάζει τα σήματα της κάρτας	53
Εικόνα 28. Front-panel του προγράμματος Turbo_Data.vi με τα εικονικά όργανα ..	54
Εικόνα 29. Όγκος ελέγχου και η ονοματολογία που χρησιμοποιείται για τις ολοκληρωτικές εξισώσεις	58
Εικόνα 30. Συνοπτικό λογικό διάγραμμα λειτουργίας κώδικα	76

Εικόνες Παραρτήματος

Εικόνα Π. 1. Ενισχυτής θερμοστοιχείων	152
Εικόνα Π. 2. Μπροστινή όψη ενισχυτή θερμοστοιχείων.....	153
Εικόνα Π. 3. Η πίσω όψη του ενισχυτή	154
Εικόνα Π. 4. Η μετρητική αλυσίδα της διάταξης	166
Εικόνα Π. 5. Γενική άποψη πειραματικής διάταξης και δοκιμαστηρίου.....	167
Εικόνα Π. 6. Η βάση στήριξης του κινητήρα	167
Εικόνα Π. 7. Το δοκιμαστήριο εν ώρα λειτουργίας	168
Εικόνα Π. 8. Ο κινητήρας με τα μετρητικά όργανα (μπροστινή όψη).....	168
Εικόνα Π. 9. Ο κινητήρας με τα μετρητικά όργανα (πλαϊνή όψη)	169
Εικόνα Π. 10. Κυψελίδα φόρτισης και βάση του κινητήρα	169
Εικόνα Π. 11. Κυψελίδα φόρτισης της DS Europe	170
Εικόνα Π. 12. Ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου (ECU) του κινητήρα.....	170
Εικόνα Π. 13. Το χειριστήριο του κινητήρα.....	171
Εικόνα Π. 14. Το τερματικό παρακολούθησης της λειτουργίας του κινητήρα.....	171
Εικόνα Π. 15. Η αντλία καυσίμου του κινητήρα.....	172
Εικόνα Π. 16. Η βαλβίδα του καυσίμου	172

Πίνακες

Πίνακας 1. Τύποι καυσίμου για τον κινητήρα AMT Olympus HP.....	23
Πίνακας 2. Στοιχεία στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του κινητήρα	30
Πίνακας 3. Εμβαδά στις βασικές διατομές του κινητήρα.....	31
Πίνακας 4.Χρησιμοποιούμενες τιμές παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα	32
Πίνακας 5. Συνδεσμολογία αισθητήρων	51
Πίνακας Π. 1. Σύνδεση θερμοστοιχείων στον ενισχυτή	155

Σχήματα

Σχήμα 1. Χάρτης συμπίεστή (Λόγος πίεσης – Ανηγμένη παροχή)	85
Σχήμα 2. Χάρτης συμπίεστή (Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης - Ανηγμένη παροχή)	85
Σχήμα 3. Χάρτης συμπίεστή (Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης - Λόγος πίεσης).....	86
Σχήμα 4. Χάρτης στροβίλου (Ανηγμένη παροχή - λόγος πίεσης).....	86
Σχήμα 5. Χάρτης στροβίλου (Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης - λόγος πίεσης).....	87
Σχήμα 6. Χάρτης στροβίλου (Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης-ανηγμένη παροχή) ..	87
Σχήμα 7. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του συμπίεστή για επιτάχυνση	88
Σχήμα 8. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του συμπίεστή για επιτάχυνση	88
Σχήμα 9.Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του στροβίλου για επιτάχυνση	89
Σχήμα 10.Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του στροβίλου για επιτάχυνση	89
Σχήμα 11. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του στροβίλου για επιτάχυνση	90
Σχήμα 12.Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του στροβίλου για επιτάχυνση	90
Σχήμα 13.Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του συμπίεστή για επιβράδυνση	91
Σχήμα 14.Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του συμπίεστή για επιβράδυνση	91
Σχήμα 15.Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του συμπίεστή για επιβράδυνση	91
Σχήμα 16.Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη στροβίλου για επιβράδυνση	92
Σχήμα 17.Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη στροβίλου για επιβράδυνση	92
Σχήμα 18.Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη στροβίλου για επιβράδυνση.....	93
Σχήμα 19. Ισχύς συναρτήσει με το χρόνο	96
Σχήμα 20. Παροχή καυσίμου συναρτήσει με το χρόνο	97
Σχήμα 21. Στροφές συναρτήσει με το χρόνο.....	97
Σχήμα 22. Θερμοκρασία εξόδου του καυσαερίου συναρτήσει του χρόνου	98

Σχήμα 23. Επίπεδο ισχύος συναρτήσει του χρόνου	98
Σχήμα 24. Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων	99
Σχήμα 25. Στροφές στην επιβράδυνση συναρτήσει του χρόνου	99
Σχήμα 26. Παροχή καυσίμου στην επιβράδυνση	99
Σχήμα 27. Παροχή καυσίμου του πειράματος ως είσοδος στο πρόγραμμα	100
Σχήμα 28. Στροφές κινητήρα συναρτήσει του χρόνου	101
Σχήμα 29. Ώση κινητήρα	101
Σχήμα 30. Θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή	102
Σχήμα 31. Ολική πίεση εξόδου συμπιεστή	102
Σχήμα 32. Λόγος πίεσης συμπιεστή	102
Σχήμα 33. Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου	103
Σχήμα 34. Λόγος πίεσης στροβίλου	103
Σχήμα 35. Παροχή καυσίμου του πειράματος, ως μεταβλητή εισόδου της προσομοίωσης	104
Σχήμα 36. Στροφές κινητήρα σε συνάρτηση με το χρόνο για προσομοίωση και πείραμα	104
Σχήμα 37. Ολική πίεση εξόδου συμπιεστή	105
Σχήμα 38. Θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή	105
Σχήμα 39. Λόγος πίεσης συμπιεστή	106
Σχήμα 40. Πίεση εξόδου στροβίλου	106
Σχήμα 41. Λόγος πίεσης συμπιεστή	107

1 Εισαγωγή

Η ιστορία της εφαρμογής του αεριοστροβίλου τοποθετείται στις αρχές του εικοστού αιώνα. Από την περίοδο εκείνη μέχρι και σήμερα, οι αεριοστροβίλοι έχουν υποστεί τεράστια μεταμόρφωση, αφού θεωρούνται από τις ασφαλέστερες μηχανές παραγωγής ωφέλιμου έργου, ενώ επίσης χρησιμοποιούνται ως τα κύρια συστήματα πρόωσης στον κλάδο των αερομεταφορών. Οι αεριοστροβίλοι που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας είναι αρκετά περίπλοκες μηχανές με μερικά από τα καλύτερα επίπεδα αντοχής, υψηλότερες αποδόσεις και συντελεστές ασφαλείας. Η σημαντική τεχνολογική πρόοδος έχει οδηγήσει σε πρωτοποριακές τεχνικές έρευνας στο χώρο των αεριοστροβίλων, των οποίων οι εφαρμογές έχουν εξαπλωθεί πέρα από μια απλή μηχανή για την παραγωγή ενέργειας. Τις τελευταίες δεκαετίες οι αεριοστροβίλοι έχουν μεταμορφωθεί από μια ιδέα, σε ένα δημιούργημα του οποίου τα οφέλη είναι πολλαπλών χρήσεων. Τα πρακτικά οφέλη της χρήσης αεριοστροβίλων, δεν διέφυγαν της προσοχής της βιομηχανίας παραγωγής ισχύος, η οποία εισήγαγε τη χρήση τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, οι αεριοστροβίλοι χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές κινητήρων θαλάσσιας χρήσης (marine gas turbines), ως βοηθητικοί κινητήρες σε συστήματα παραγωγής ενέργειας και πλέον τείνουν να αντικαθιστούν όλο και σε μεγαλύτερο βαθμό τις παραδοσιακές μηχανές ντίζελ σε αρκετές εφαρμογές.

Οι μικροί στροβιλοκινητήρες αντιπροσωπεύουν μια ειδική κατηγορία αεριοστροβίλων, των οποίων η χρήση είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη σε επιστημονικούς εφαρμογές και έρευνα συγκεκριμένων διαδοχικών θερμοδυναμικών διεργασιών που συμβαίνουν στο μικροστροβίλο. Επιπλέον, αυτοί οι κινητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έρευνα στον τομέα των εναλλακτικών καυσίμων και νέων μεθόδων ψηφιακού ελέγχου και μέτρησης.

1.1 Παρουσίαση προβλήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μελέτη του κινητήρα Olympus HP ES της AMT Netherlands. Το πρόβλημα που κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας ήταν η μελέτη μεταβατικών φαινομένων που αναπτύσσονται κατά τη δυναμική λειτουργία του μικροστροβίλου του εργαστηρίου. Η προσομοίωση του μικροστροβίλου γίνεται για την κάλυψη αναγκών σχετικά με την παρατήρηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του.

1.2 Σκοπός εργασίας

Η μελέτη της μεταβατικής (transient) λειτουργίας του κινητήρα έχει αποτελέσει το αντικείμενο πολυάριθμων δημοσιεύσεων [1-7] εδώ και αρκετά χρόνια. Η προσομοίωση των μεταβατικών φαινομένων είναι πολύ σημαντική για τον σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου του κινητήρα, ενώ η κατανόηση της μεταβατικής συμπεριφοράς είναι πολύ σημαντική για τον καθορισμό των ασφαλών ορίων λειτουργίας. Μία τυπική επίδραση της μεταβατικής λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου είναι η μετακίνηση του σημείου λειτουργίας του συμπιεστή κοντά στα όρια λειτουργίας, διακινδυνεύοντας αυτό προσεγγίζεται σε απότομες επιταχύνσεις. Αυτό το συγκεκριμένο αποτέλεσμα και η εκτίμηση των περιθωρίων γύρω από τη γραμμή λειτουργίας κατά τη διάρκεια μεταβατικών είναι ένας από τους κύριους λόγους που η μεταβατική συμπεριφορά αποτελεί αντικείμενο σπουδών μέχρι τις μέρες μας. Ο στόχος είναι να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή λειτουργικότητα με τον καλύτερο δυνατό έλεγχο και τη μεγαλύτερη δυνατή σταθερότητα του αεριοστροβίλου κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες [8].

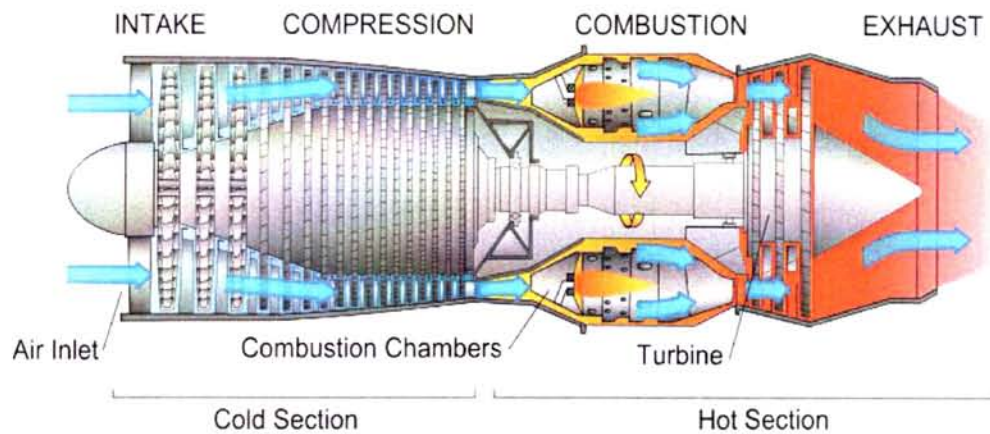
Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να εξελιχθεί το δοκιμαστήριο του κινητήρα AMT Olympus HP ES που υπάρχει στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών, να μελετηθεί η συμπεριφορά του κινητήρα κατά τη μεταβατική του λειτουργία, καθώς και να αναπτυχθεί ένα υπολογιστικό μοντέλο που θα προσομοιώνει τη λειτουργία του.

1.3 Στροβιλοαντιδραστήρες (Turbojet)

1.3.1 Εισαγωγή στους στροβιλοαντιδραστήρες

Ο αεριοθούμενος κινητήρας (turbojet) χρησιμοποιείται για την προώθηση αεροσκαφών. Βασική αρχή ενός αεριοθούμενου κινητήρα είναι να επιταχύνει μια μάζα ρευστού στην αντίθετη κατεύθυνση της κίνησης, και ως εκ τούτου να προωθείται το αεροσκάφος προς τα εμπρός μέσω της ώσης που δημιουργείται.

Οι στροβιλοκινητήρες είναι η παλαιότερη και απλούστερη μορφή των κινητήρων και παράγουν ώση από μεγάλη επιτάχυνση μιας μικρής μάζα ρευστού. Η Εικόνα 1 παρουσιάζει ένα συμβατικό στροβιλοκινητήρα ενός άξονα, με εισαγωγή, συμπιεστή, θάλαμο καύσης, στρόβιλο και συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο για τη διαφυγή των αερίων.



Εικόνα 1. Αρχή λειτουργίας στροβιλοαντιδραστήρα turbojet

Ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στην είσοδο του κινητήρα, όπου επιταχύνεται, και καταλήγει μέσω του συστήματος εισαγωγής του κινητήρα στο συμπιεστή με μια μικρή απώλεια της συνολικής του πίεσης. Ο συμπιεστής τότε αυξάνει τόσο την πίεση όσο και τη θερμοκρασία του αερίου. Για την επίτευξη του επιθυμητού λόγου πίεσης του συμπιεστή απαιτείται να προσδώσουμε έργο. Η αύξηση της θερμοκρασίας εξαρτάται από την απόδοση του συμπιεστή.

Στη συνέχεια, το εργαζόμενο μέσο διέρχεται μέσω του διαχύτη. Ο διαχύτης συμβάλει στην ανάκτηση της στατικής πίεσης καθώς και στην ομαλοποίηση της ροής του ρευστού πριν την είσοδο του στο θάλαμο καύσης. Ο βασικός σκοπός του θαλάμου καύσης είναι η καύση συγκεκριμένης ποσότητας μίγματος αέρα (ο οποίος εξέρχεται από το συμπιεστή) και καυσίμου. Τα παραγόμενα καυσαέρια αποδίδουν τη θερμική ενέργειά τους στο στρόβιλο, που βρίσκεται μετά το θάλαμο καύσης. Η διαδικασία της καύσης πραγματοποιείται στην περιορισμένη έκταση του θαλάμου καύσης και πρέπει να επιτυγχάνεται με την ελάχιστη δυνατή απώλεια πίεσης (ισοβαρής καύση). Στην πραγματικότητα, ο διαχύτης και ο θάλαμος καύσης επιβάλλουν μια μικρή απώλεια ολικής πίεσης. Στη συνέχεια, το θερμό και υψηλής πίεσης αέριο εκτονώνεται μέσω του στροβίλου και έτσι παράγεται ενέργεια από τον άξονα, οπότε τόσο η θερμοκρασία όσο και η πίεση μειώνονται. Η ισχύς του άξονα απαιτείται για να οδηγήσει-στρέψει το συμπιεστή και τυχόν βοηθητικά μέρη. Κατά την έξοδο από το στρόβιλο, το αέριο εξακολουθεί να βρίσκεται συνήθως σε πίεση τουλάχιστον διπλάσια από αυτή του περιβάλλοντος. Αυτό προκύπτει από την υψηλότερη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο. Κατάντι του στροβίλου το αέριο διαχέεται στον αεριωθούμενο σωλήνα (jet pipe), όπου επιβάλλεται μια μικρή συνολική πτώση πίεσης. Στην πορεία το εργαζόμενο μέσο εισάγεται στο προωθητικό ακροφύσιο, το οποίο είναι ένας συγκλίνων αγωγός, που επιταχύνει τη ροή για να δημιουργήσει ώση. Το σύστημα ψύξης του κινητήρα χρησιμοποιεί τον

σχετικά κρύο αέρα από το σύστημα συμπίεσης, που παρακάμπτει το θάλαμο καύσης μέσω συστήματος αγωγών της ροής αέρα για την ψύξη των σταθερών και κινούμενων περυγίων του ακροφυσίου στροβίλου, ώστε να εξασφαλιστούν αποδεκτές θερμοκρασίες μετάλλου στις υψηλές θερμοκρασίες του αερίου.

Για εφαρμογές υψηλών αριθμών Mach συχνά χρησιμοποιείται ένας μετακαυστήρας, ώστε να παράγεται υψηλότερη ώση με την ίδια διάταξη. Αυτό καλείται επίσης αναθέρμανση και περιλαμβάνει την καύση του καυσίμου σε ένα πρόσθετο καυστήρα κατάντι του αεριωθούμενου σωλήνα (jet ripe). Οι στροβιλοκινητήρες είναι αρκετά αναποτελεσματικοί σε σύγκριση με άλλους τύπους κινητήρων σε χαμηλότερους αριθμούς Mach, αλλά έχουν κυρίαρχο ρόλο στις υπερηχητικές πτήσεις και σε στρατιωτικές εφαρμογές.

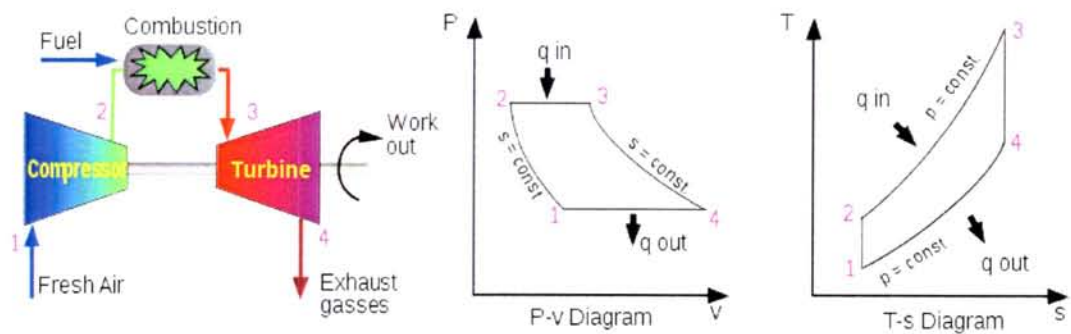
1.3.2 Θερμοδυναμικός κύκλος

Μια σύντομη ανασκόπηση των στροβιλοκινητήρων είναι απαραίτητη και για αυτό το λόγο, το συγκεκριμένο τμήμα θα ξεκινήσει με τη βασική θεωρία αεριοστροβίλων.

Αεριοστρόβιλοι:

Ο αεριοστρόβιλος είναι μια συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου σε χρήσιμο έργο, με τη μορφή είτε της ροπής είτε της ώσης (δύναμης). Ο θερμοδυναμικός κύκλος σε έναν ιδανικό αεριοστρόβιλο ονομάζεται θερμοδυναμικός κύκλος Brayton. Τα στάδια του κύκλου παρουσιάζονται παρακάτω σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-S) ή πίεσης- ειδικού όγκου (P-V) (Εικόνα 2) και είναι τα εξής:

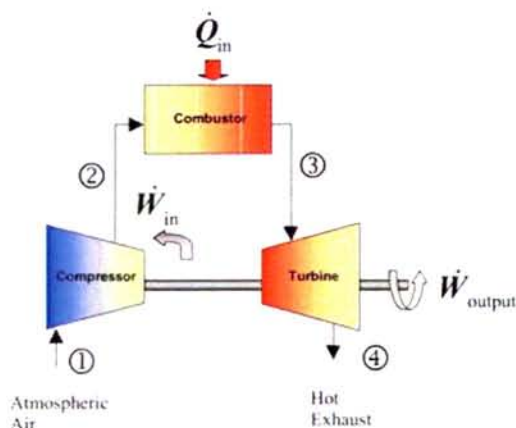
- a) 1 → 2 : Ισεντροπική συμπίεση
- b) 2 → 3 : Αντιστρεπτή ισοβαρή θέρμανση
- c) 3 → 4 : Ισεντροπική εκτόνωση
- d) 4 → 1 : Αντιστρεπτή ισοβαρή ψύξη



Εικόνα 2. Στάδια κύκλου Brayton και διαγράμματα P-V, T-S

Ένας αεροπορικού τύπου αεριοστρόβιλος περιλαμβάνει τις παρακάτω συνιστώσες (Εικόνα 3 Εικόνα 3):

- Συμπιεστή
- Θάλαμο Καύσης
- Στρόβιλο
- Ακροφύσιο



Εικόνα 3. Διεργασίες κύκλου Brayton

Το ακροφύσιο έχει παραλειφθεί από το σχήμα, δεδομένου ότι δεν απαιτείται ώστε να ολοκληρωθεί ο κύκλος για ένα βιομηχανικού τύπου κινητήρα. Πρέπει να σημειώσουμε ότι ο συμπιεστής και ο στρόβιλος δεν μπορούν να περιστρέφονται ο ένας ανεξάρτητα από τον άλλο, δεδομένου ότι είναι τοποθετημένοι στον ίδιο άξονα, έτσι ώστε να δίνεται η δυνατότητα στο παραγόμενο έργο του στρόβιλου να μεταφέρεται στο συμπιεστή, για να είναι συνεχής ο κύκλος [9].

Λόγος Πίεσης Συμπιεστή:

Ο λόγος πίεσης περιγράφει το λόγο της πίεσης του αέρα πριν από το συμπιεστή προς την πίεση του μετά από το συμπιεστή, στην είσοδο του διαχύτη. Όσο ο λόγος πίεσης αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και η απόδοση του κινητήρα. Ο κινητήρας Olympus HP ES έχει λόγο πίεσης συμπιεστή 3,8, που σημαίνει πως έχουμε αύξηση της πίεσης κατάντι του συμπιεστή. Ο λόγος πίεσης, που αναπαρίσταται ως $\frac{P_2}{P_1}$, συνδέεται επίσης με τη θερμοκρασία στην είσοδο και την έξοδο του συμπιεστή με

την παρακάτω σχέση:
$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Αυτή η εξίσωση ισχύει μόνο για ισεντροπικό κύκλο, δηλαδή για έναν ιδανικό κύκλο, στον οποίο δεν συμβαίνουν αλλαγές στα στάδια 2-3 και 3-4 (Εικόνα 2). Οι κινητήρες που εξετάζουμε δεν είναι ιδανικοί, διότι έχουμε ορισμένες απώλειες από τον ιδανικό κύκλο τις οποίες και υπολογίζουμε.

Θάλαμος Καύσης:

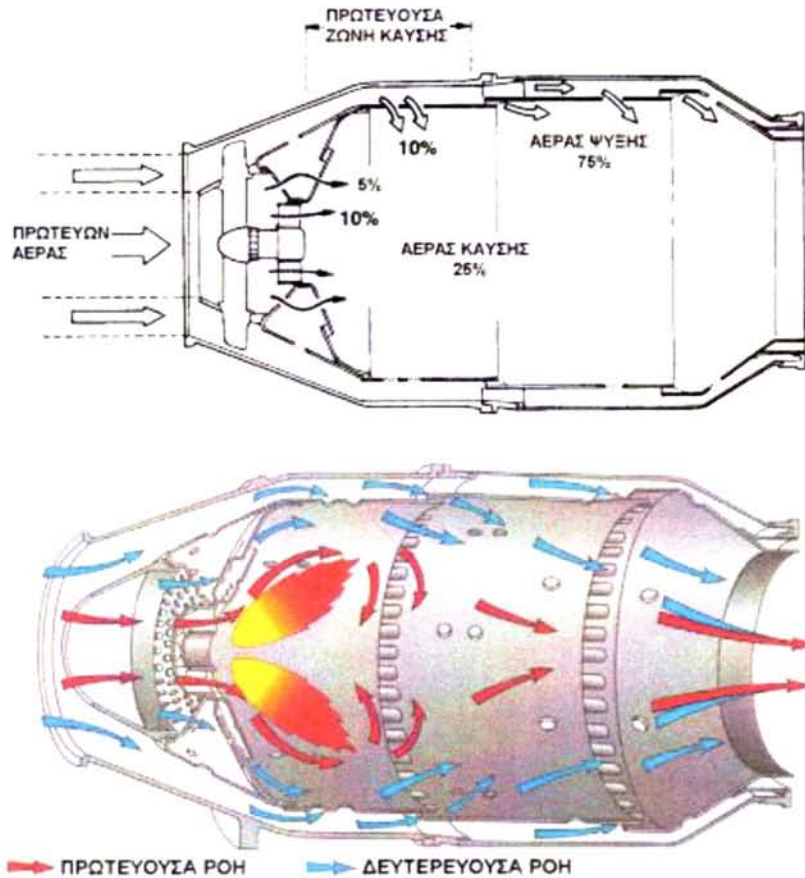
Ο ιδανικός αεριοστροβίλος είναι αυτός, ο οποίος περιέχει ένα θάλαμο καύσης που είναι όσο το δυνατό πιο αποτελεσματικός και παράγει χαμηλές εκπομπές, καταλαμβάνοντας παράλληλα τον ελάχιστο δυνατό χώρο. Ο σχεδιασμός του θαλάμου καύσης θα πρέπει να γίνεται για όλο το εύρος λειτουργίας, που περιλαμβάνει την εκκίνηση, το ρελαντί, την επιτάχυνση και την επιβράδυνση, όπως και τη λειτουργία σε πλήρη ισχύ.

Ο θάλαμος καύσης ενός αεριοστροβίλου πρέπει να εμπεριέχει τα ακόλουθα:

- την έγχυση καυσίμου στον ελάχιστο χώρο
- το μικρότερο ποσό πτώσης πίεσης κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας
- να παρέχει μια σταθερή και αποτελεσματική λειτουργία, ανεξάρτητα από το ύψος, την ταχύτητα, το επίπεδο ισχύος και τις αναλογίες αέρα-καυσίμου
- να έχει διάρκεια ζωής και να παρέχει αξιοπιστία ίση ή μεγαλύτερη από τη ζωή του κινητήρα
- να κατανέμει καλύτερα τη θερμοκρασία από την είσοδο μέχρι την έξοδο.

Γενικά, ένας τυπικός θάλαμος καύσης περιλαμβάνει δύο ζώνες, την πρωτεύουσα (ποσοστό 25%) και τη δευτερεύουσα ζώνη (ποσοστό 75%) (Εικόνα 4). Η περιοχή μεταξύ της εξόδου του συμπιεστή και της εισόδου του θαλάμου καύσης περιγράφεται ως ζώνη διαχύτη, και εισάγει τον αέρα στο θάλαμο καύσης μέσω κάποιων πτερύγιων υπό γωνία. Η περιοχή όπου γίνεται η έγχυση του καυσίμου αναφέρεται ως η πρωτεύουσα ζώνη. Στη δευτερεύουσα ζώνη, το υπόλοιπο του αέρα χρησιμοποιείται για να μειώσει τη θερμοκρασία των καυσαερίων στο θάλαμο

στην επιθυμητή θερμοκρασία εισαγωγής. Ενώ η διαδικασία μείωσης λαμβάνει χώρα, η δευτερεύουσα ζώνη παρέχει επίσης τις συνθήκες, ώστε να δημιουργηθεί μία επαρκής ανάμιξη που θα επιτυγχάνει την ομοιογενή κατανομή της θερμοκρασίας στην είσοδο του ακροφυσίου.



Εικόνα 4. Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ζώνη καύσης

Απόδοση του Στροβίλου:

Η απόδοση ενός στροβίλου είναι πάντα μικρότερη από την ιδανική λόγω των απωλειών τριβής στα πτερύγια, απώλειες μετά από τα πτερύγια και μηχανικές τριβές. Η απόδοση που συμβολίζεται ως η_τ , ορισμένες φορές αναφέρεται ως θερμικός βαθμός απόδοσης και ορίζεται από το λόγο του έργου που παράγεται από τον στρόβιλο W_{out} προς τη συνολική θερμότητα που μεταφέρεται στην τουρμπίνα, Q_{in} .

$$\eta_{\text{αυξία}} = \frac{W_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{c_p \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)}$$

Για ένα αδιαβατικό στρόβιλο τον οποίο εξετάζουμε σε κατάσταση μόνιμης ροής,

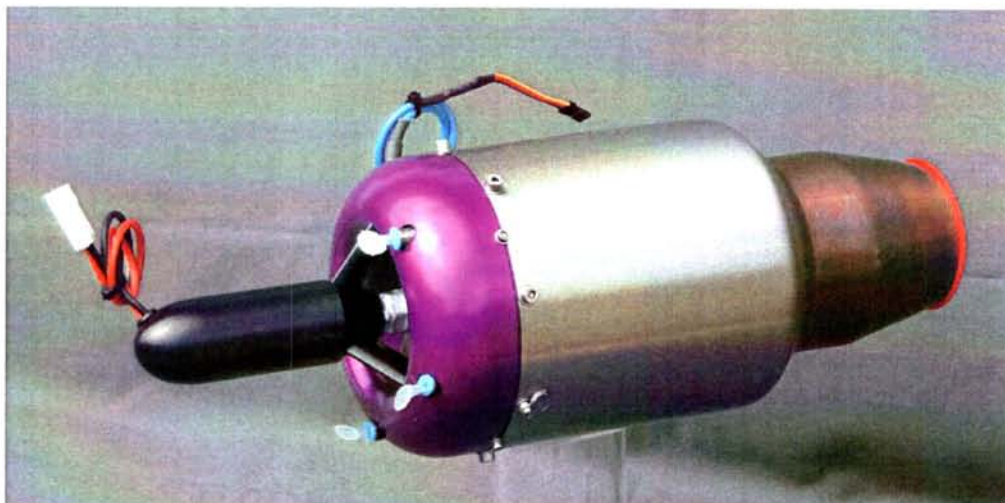
γνωρίζουμε πως οι πιέσεις της εισόδου και εξόδου είναι σταθερές. Επομένως, η εξιδανικευμένη διαδικασία για ένα στρόβιλο είναι μία ισεντροπική διαδικασία μεταξύ των πιέσεων εισόδου και εξόδου. Το επιθυμητό αποτέλεσμα (output) ενός στρόβιλου είναι η παραγωγή έργου. Ως εκ τούτου, ο ορισμός της ισεντροπικής απόδοσης του στρόβιλου είναι ο λόγος του πραγματικού παραγόμενου έργου του στρόβιλου W_a , προς το θεωρητικό έργο του στρόβιλου W_f , εφόσον στον στρόβιλο λαμβάνει χώρα μία διεργασία ισεντροπική μεταξύ των πιέσεων εισόδου και εξόδου. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου δίνεται από τον τύπο:

$$\eta_{is} = \frac{W_a}{W_f} = \frac{h_{2a} - h_1}{h_{2f} - h_1}$$

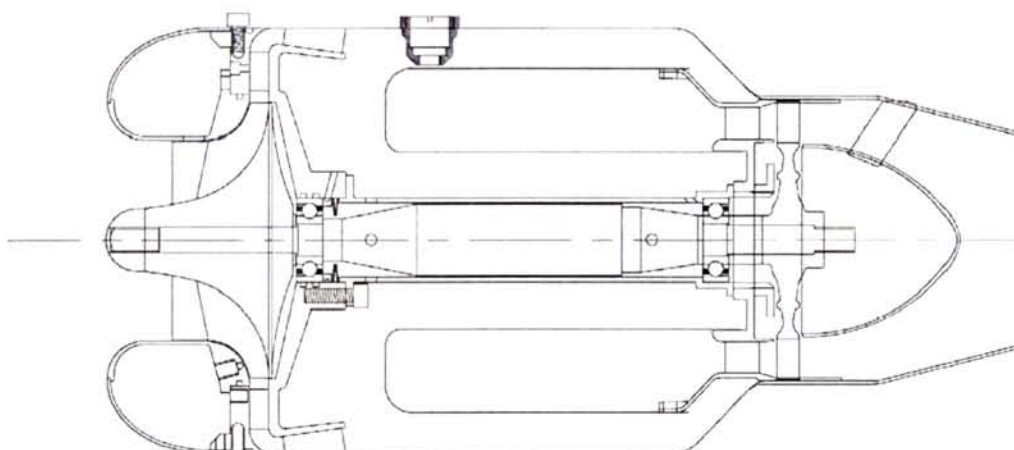
1.3.3 Παρουσίαση κινητήρα AMT Olympus HP ES

Ο κινητήρας Olympus κατασκευάζεται στην Ολλανδία από την εταιρεία AMT (Advanced Micro Turbines), η οποία αναπτύσσει μικρούς αεριοστρόβιλους για την προώθηση τηλεκατευθυνόμενων αεροπλάνων και υποβοηθούμενες μονάδες ισχύος. Πρόκειται για μια μικρογραφία αεροπορικού κινητήρα τύπου turbojet (στρόβιλοαντιδραστήρα) που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ώσης σε μοντέλα αεροσκαφών. Μια φωτογραφία του κινητήρα φαίνεται στην Εικόνα 5. Ο κινητήρας Olympus HP αποτελείται από ένα ακτινικό συμπιεστή και ένα αξονικό στρόβιλο. Ο χρόνος που απαιτείται, ώστε ο αεριοστρόβιλος να επιταχύνει από τον ελάχιστο στο μέγιστο αριθμό στροφών, είναι μικρότερος από 4 δευτερόλεπτα, και να επιβραδύνει από το μέγιστο στον ελάχιστο αριθμό στροφών μόνο 3 δευτερόλεπτα [10].

Ο θάλαμος καύσης είναι δακτυλιοειδής και η τροφοδοσία του καυσίμου γίνεται από ένα χαμηλής πίεσης σύστημα καυσίμου, που έχει αναπτύξει η κατασκευάστρια εταιρεία, το οποίο χρησιμοποιεί τα έδρανα κύλισης (ρουλεμάν) του άξονα περιστροφής, ώστε να εισάγει το καύσιμο στο θάλαμο καύσης και με αυτό τον τρόπο λειτουργεί και ως μέσο λίπανσης και ψύξης των εδράνων κύλισης. Το καύσιμο διακινείται από μια γραναζωτή αντλία, η οποία με τη σειρά της αποτελείται από δυο οδοντωτούς τροχούς, που περιστρέφονται μέσα σε ένα ειδικά διαμορφωμένο κέλυφος. Επομένως, είναι πάρα πολύ σημαντικό να χρησιμοποιείται καύσιμο απόλυτα καθαρό, ώστε να αποφευχθούν τυχούσες βλάβες στο σύστημα εισαγωγής του καυσίμου.



Εικόνα 5. Ο κινητήρα Olympus HP ES



Εικόνα 6. Ο κινητήρας Olympus HP ES σε τομή

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο λειτουργίας του κινητήρα, το οποίο μας παρέχει η εταιρεία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι καυσίμων, όπως δείχνει ο παρακάτω πίνακας:

Τύπος καυσίμου	Χρήση καυσίμου
1. JP-4 / Kerosene	Χρησιμοποιείται στα στρατιωτικά αεροσκάφη
2. Paraffin	Χρησιμοποιείται στις θερμάστρες πετρελαίου
3. Jet A-1	Χρησιμοποιείται στα πολιτικά αεροσκάφη
4. White spirit	Χρησιμοποιείται ως διαλυτικό χρωμάτων

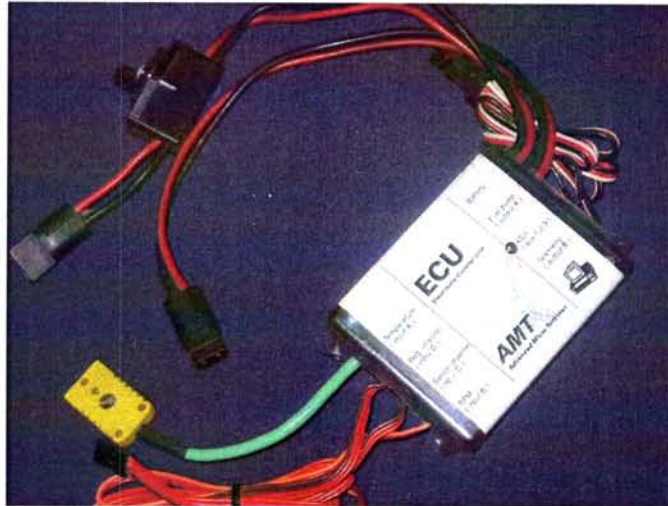
Πίνακας 1. Τύποι καυσίμου για τον κινητήρα AMT Olympus HP

Στον κινητήρα που εγκαταστάθηκε στο εργαστήριο, επιλέχθηκε εξ' αρχής να

χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο paraffin (παραφίνη), γνωστό και ως φωτιστικό πετρέλαιο, του οποίου η σύσταση είναι παραφινική και έχει ιδιότητες παρόμοιες με τα αεροπορικά καύσιμα.

Όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα εισαγωγής καυσίμου οδηγεί το καύσιμο στο θάλαμο καύσης μέσω δύο εδράνων κύλισης, το ένα μετά τον συμπιεστή και το άλλο πριν τον στρόβιλο, ώστε αυτά να λιπαίνονται. Για το λόγο αυτό το καύσιμο πριν χρησιμοποιηθεί αναμιγνύεται με 4.5 % κ.ο. λιπαντικό Aeroshell 500 (λιπαντικό για αεροπορικούς κινητήρες). Το λιπαντικό φροντίζει για την λίπανση του κινητήρα κατά τις διαδικασίες εκκίνησης (start up) και τερματισμού (power-down sequence) της λειτουργίας. Όταν ξεκινήσει η διαδικασία τερματισμού, η ροή του καυσίμου διακόπτεται και το καύσιμο που υπάρχει μέσα στη μηχανή εξατμίζεται από την υψηλή θερμοκρασία που επικρατεί και επικάθεται σε όλες τις επιφάνειες. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιεί την λίπανση, που απαιτείται για να είναι έτοιμος ο κινητήρας κατά την επομένη διαδικασία εκκίνησης [10].

Ο κινητήρας ελέγχεται και προστατεύεται από εσφαλμένη χρήση από έναν μικροεπεξεργαστή, ο οποίος αποτελεί τον εγκέφαλο της μηχανής (Engine Control Unit), και ο οποίος καθορίζει τα όρια λειτουργίας της μηχανής. Η ECU (Εικόνα 7) είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και δεν χρειάζεται ρύθμιση από το χρήστη. Πάνω σε αυτή συνδέονται όλα τα εξαρτήματα (inputs), που συνοδεύουν την μηχανή και συμβάλουν στην λειτουργία της. Κάθε παράμετρος εισόδου (έξι παράμετροι: Α. θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων, Β. στροφές κινητήρα, C. επίπεδο ισχύος, D. CTF και έλεγχος της αυτοματοποιημένης εκκίνησης του κινητήρα, E. Διακόπτης, F. Μπαταρία) έχει συγκεκριμένη θέση, στην οποία συνδέεται και η συνδεσμολογία της έχει καθοριστεί από την κατασκευάστρια εταιρεία. Η ECU τροφοδοτείται από μια μπαταρία κλειστού τύπου (αυτοκινήτου) συνολικής τάσης 12 Volt /1700 mA. Η ECU είναι αυτή που αρχικά πραγματοποιεί και την διαδικασία εκκίνησης του κινητήρα και στη συνέχεια ελέγχει την κατάσταση της μηχανής λαμβάνοντας συνεχόμενα πακέτα δεδομένων με τις στροφές και την θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων. Ως παραμέτρους εισόδου από το χρήστη (χειριστήριο) δέχεται το επίπεδο ισχύος (throttle level) και την κατάσταση της μηχανής (Running position, Auto-Stop, Stop).



Εικόνα 7. Η ECU του κινητήρα της AMT

Παρά το γεγονός ότι η ECU ελέγχει την λειτουργία του κινητήρα, ο τρόπος ελέγχου που εφαρμόζει δεν είναι γνωστός στο χρήστη. Η μόνη δυνατότητα που δίνει στο χρήστη είναι, είτε μέσω του EDT (Engine Data Terminal) είτε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, την παρακολούθηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα και της θερμοκρασίας εξόδου καυσαερίων καθώς και ορισμένων μηνυμάτων που αφορούν την κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα.

Για την εκκίνηση της μηχανής, προκειμένου να προθερμανθεί σωστά, χρησιμοποιείται αέριο, το οποίο είναι προπάνιο. Το προπάνιο βρίσκεται σε μια φιάλη του εμπορίου υπό πίεση 4 bar. Η παροχή του αερίου ελέγχεται από μία ρυθμιστική βαλβίδα την οποία χειρίζεται η ECU. Η ανάφλεξη του προπανίου γίνεται με αναφλεκτήρα (μπουζί) ο οποίος λειτουργεί με ρεύμα τάσης 1.5 ή 2 Volts. Η τροφοδοσία και καύση του προπανίου γίνεται μέχρι τη στιγμή που η θερμοκρασία της μηχανής φτάσει μια συγκεκριμένη τιμή (θερμοκρασία 88°C και στροφές 90000 rpm) και από εκείνη την στιγμή και μετά η τροφοδοσία του αερίου διακόπτεται και αρχίζει η τροφοδοσία του καυσίμου στο θάλαμο καύσης.

Η εκκίνηση ακολουθεί ειδική διαδικασία, διότι ο αεροστρόβιλος δεν μπορεί να εκκινήσει με μια απλή έγχυση και ανάφλεξη του καυσίμου. Αρχικά, ενεργοποιείται η μίζα και αρχίζει να περιστρέφει τον κινητήρα. Όταν η ταχύτητα περιστροφής φτάσει την κατάλληλη τιμή, η μίζα σταματάει και ανοίγει η βαλβίδα του προπανίου. Διοχετεύεται προπάνιο μέσα στο κινητήρα και αναφλέγεται με την ενεργοποίηση του αναφλεκτήρα (μπουζί). Στη συνέχεια ενεργοποιείται ξανά η μίζα για την επιτάχυνση της μηχανής, κλείνει η βαλβίδα του προπανίου και απενεργοποιείται ο αναφλεκτήρας. Κατόπιν ξεκινάει να λειτουργεί η αντλία καυσίμου και μετά από λίγο χρονικό διάστημα, αφού ανέβουν αρκετά οι στροφές, σταματάει η μίζα. Από αυτό το σημείο και μετά η μηχανή μπορεί να διατηρεί από μόνη της την περιστροφή της. Βέβαια προτού φτάσουν οι στροφές στο ρελαντί γίνεται μια βαθμονόμηση της ECU

ανεβάζοντας τις στροφές της μηχανής σε 50000 rpm, που είναι το σημείο αναφοράς, για 5 δευτερόλεπτα περίπου. Μετά από αυτή την βαθμονόμηση μειώνονται οι στροφές στο ρελαντί (36000 rpm) και η μηχανή είναι έτοιμη προς χρήση[10].

1.4 Γενικά στοιχεία μοντελοποίησης

1.4.1 Προσομοίωση

Η κατάσταση στην οποία ο κινητήρας δουλεύει τον περισσότερο χρόνο είναι το σημείο σχεδιασμού (design point) του κινητήρα, δηλαδή το ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας η μηχανή δουλεύει με το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Η λειτουργία στο σημείο σχεδιασμού του κινητήρα πρέπει να ορίζεται πριν από την ανάλυση όλων των άλλων συνθηκών, που μπορεί να επικρατούν.

Με τη γεωμετρία του κινητήρα να καθορίζεται από τους υπολογισμούς στο σημείο σχεδιασμού, μπορεί να εκτιμηθεί η λειτουργία σε άλλα βασικά σημεία λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή, η διαδικασία υπολογισμού είναι ο εκτός σημείου σχεδιασμού υπολογισμός (off-design performance). Σε αυτή την περίπτωση η γεωμετρία είναι καθορισμένη και οι συνθήκες λειτουργίας αλλάζουν [11]. Η μελέτη λειτουργίας σε συνθήκες εκτός σημείου σχεδιασμού παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την λειτουργία και τη συμπεριφορά του συστήματος όταν αλλάξουν οι λειτουργικές συνθήκες. Τα θερμικά συστήματα σπάνια λειτουργούν σε συνθήκες σχεδιασμού και έτσι είναι σημαντικό να καθοριστεί το εύρος των λειτουργικών συνθηκών για τις οποίες η λειτουργία του συστήματος είναι αποδεκτή. Η απόκλιση από τις συνθήκες σχεδιασμού μπορεί να συμβεί για πολλούς λόγους, όπως είναι η μεταβολή της ενέργειας που παρέχεται στο σύστημα, αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες και μεταβολή του ενεργειακού φορτίου του συστήματος. Τα αποτελέσματα που αποκτούνται σε συνθήκες διαφορετικές από αυτές του ονομαστικού σημείου λειτουργίας υποδεικνύουν την προσαρμοστικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος. Γενικά, είναι επιθυμητό να υπάρχει ένα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας πέρα των ονομαστικών, για τις οποίες η λειτουργία του συστήματος είναι ικανοποιητική. Οι εκτός σημείου σχεδιασμού υπολογισμοί χρησιμοποιούνται στην παρούσα ανάλυση.

Αναλυτικότερα η χρησιμότητα του μοντέλου ενός αεριοστροβίλου συνίσταται στα παρακάτω:

1. Γίνεται παρατήρηση της λειτουργίας του μικροστροβίλου χωρίς να είναι

απαραίτητη η λειτουργία του (προσομοίωση). Με τον τρόπο αυτό γίνονται παρατηρήσεις πρόβλεψης της λειτουργίας ώστε να προσαρμόζουμε κάθε φορά τις απαιτήσεις μας για το τελικό αποτέλεσμα. Έχουμε κέρδος στην περίπτωση αυτή για λόγους μειωμένης απαίτησης σε λειτουργία του μικροστροβίλου, αφού η λειτουργία του συνδέεται με κόστος τόσο χρηματικής αξίας όσο και χρόνου.

2. Η προσομοίωση του μικροστροβίλου σε δυναμική λειτουργία είναι σημαντική για τον έλεγχο του μικροστροβίλου σε κατάσταση επιτάχυνσης και επιβράδυνσης. Γίνονται παρατηρήσεις σχετικά με τη συμπεριφορά του σε διάφορους ρυθμούς επιτάχυνσης και επιβράδυνσης. Αυτό συμβαίνει με σκοπό να υπάρχουν τα κατάλληλα εκείνα κριτήρια για την αποφυγή κάποιου από τα χαρακτηριστικά μεγέθη να βγει από τα όρια λειτουργίας στου στροβίλου ή του συμπιεστή.

3. Κατά την επιτάχυνση του μικροστροβίλου έχουμε σημαντική αύξηση καυσίμου σε σχέση με την παροχή, οπότε έχουμε και αύξηση των θερμοκρασιών φαινόμενο που αν δεν ελεγχθεί είναι δυνατόν να προκαλέσει αστοχίες στα πτερύγια των στροβίλων [12]. Με τη βοήθεια της προσομοίωσης κάτι τέτοιο αποφεύγεται αφού γίνεται η πρόβλεψη των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά την επιτάχυνση.

4. Η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων που παίρνουμε από την προσομοίωση σε δυναμική λειτουργία του μικροστροβίλου είναι δυνατό να αποδώσουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της υγείας του αεριοστροβίλου. Έτσι μπορεί η προσομοίωση να συμβάλλει σημαντικά στην βελτίωση ή τροποποίηση ήδη υπάρχοντων συστημάτων.

5. Η προσομοίωση ενός αεριοστροβίλου έχει σημαντική συμβολή στην εύκολη και γρήγορη ανάλυση ευαισθησίας διαφόρων μεταβλητών ενός σχεδιασμού, καθώς μπορεί να προκαθορίζεται η συμπεριφορά ενός συστήματος υπό την επίδραση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου. Για παράδειγμα, εάν σε ένα αεροστρόβιλο η απομάστευση από το συμπιεστή μεταβάλλεται ποιο θα είναι το αποτέλεσμα στη συνολική συμπεριφορά του συστήματος. Τέτοιου είδους ερωτήματα σχετικά με την ευαισθησία της συμπεριφοράς του συστήματος σε μεταβολές των παραμέτρων σχεδιασμού είναι σημαντικές από πρακτική άποψη.

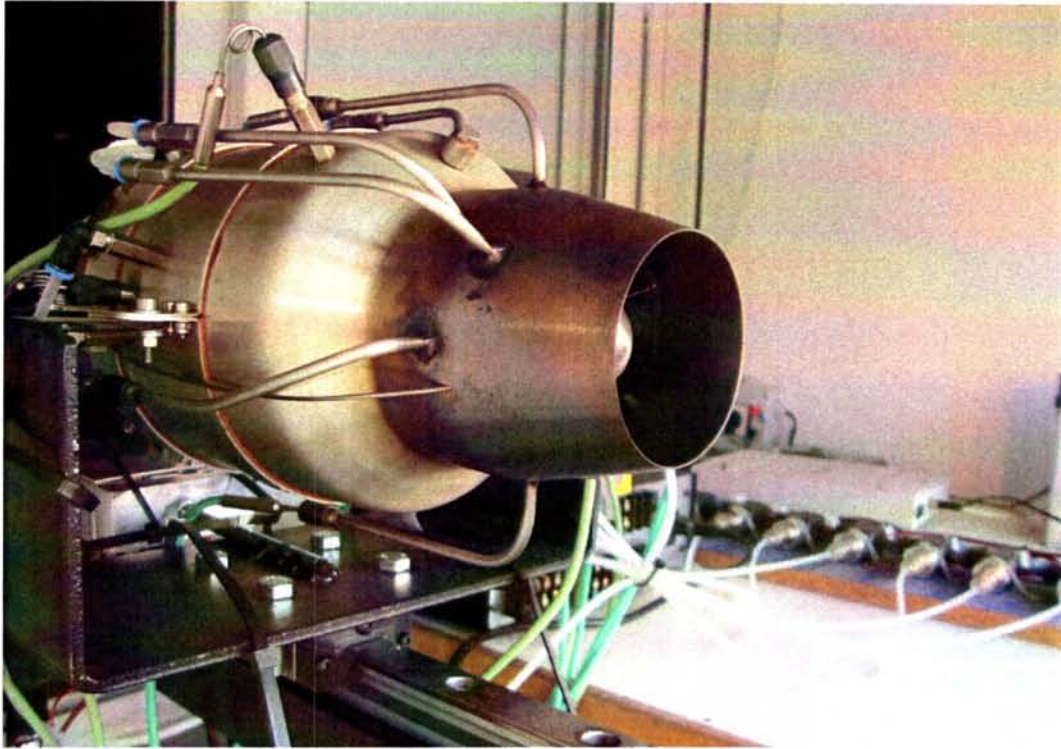
2 Παρακολούθηση λειτουργίας

2.1 Μεθοδολογία υπολογισμού κύκλου λειτουργίας

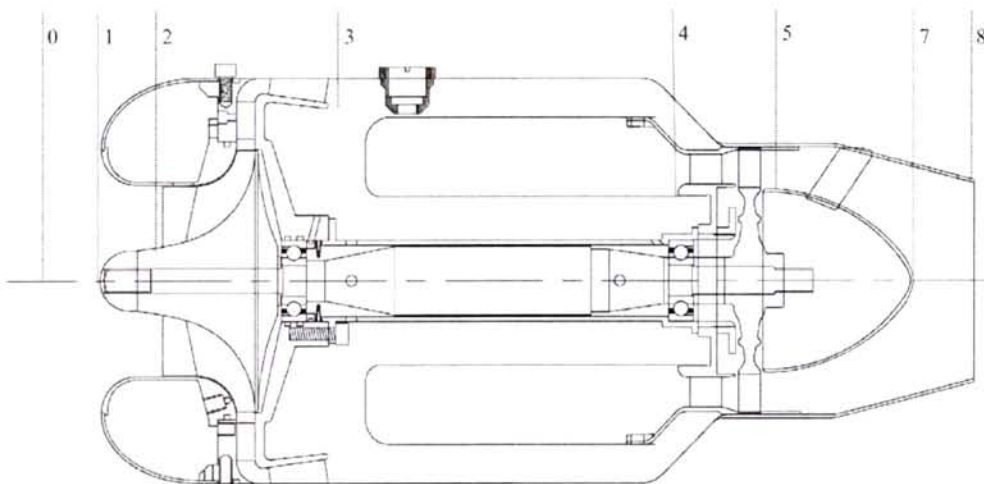
Ο κινητήρας Olympus HP ES είναι τοποθετημένος σε ειδική βάση που διαμορφώθηκε για τους πειραματικούς σκοπούς του εργαστηρίου. Πάνω στον κινητήρα είναι τοποθετημένα τα αισθητήρια όργανα που χρησιμεύουν για την παρακολούθηση της λειτουργίας του (Εικόνα 8). Η παρακολούθηση της λειτουργίας γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή ο οποίος χρησιμοποιεί κατάλληλο λογισμικό για το σκοπό αυτό. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη για την on-line επεξεργασία και απεικόνιση των μετρούμενων μεγεθών [13]. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης των μετρήσεων για μετέπειτα επεξεργασία. Για να είναι δυνατή η ανάγνωση και η κατανόηση των δεικτών των μετρούμενων μεγεθών της μηχανής από ανθρώπους που δουλεύουν σε διαφορετικές μηχανές, εφευρέθηκε ένα κοινό σύστημα αρίθμησης των δεικτών για να υποδηλώνουν τη θέση μιας διατομής κατά μήκος μιας μηχανής. Αυτή γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο SAE AS755 [14]. Η αρίθμηση των θέσεων του κινητήρα AMT Olympus HP ES φαίνεται στην Εικόνα 10 [3].



Εικόνα 8. Αισθητήρες πίεσης σε διατομές του κινητήρα



Εικόνα 9. Πίσω όψη κινητήρα



Εικόνα 10. Αρίθμηση θέσεων κατά μήκος του κινητήρα Olympus HP

2.1.1 Χρησιμοποιούμενες σχέσεις

Όπως είναι γνωστό οι απόδοση και η λειτουργία ενός κινητήρα εξαρτώνται από τις συνθήκες (θερμοκρασία, πίεση και υγρασία) που επικρατούν στον περιβάλλοντα χώρο. Για τους υπολογισμούς που ακολουθούν δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της υγρασίας, ενώ οι εξωτερικές συνθήκες λαμβάνονται ίσες με τις πρότυπες.

Πρότυπες συνθήκες:

- Θερμοκρασία περιβάλλοντος: $T_o=288\text{ K}$
- Πίεση περιβάλλοντος : $P_o=1.013\text{ bar}$

Τα στοιχεία του ονομαστικού σημείου λειτουργία του κινητήρα σύμφωνα με το εγχειρίδιο που μας παρέχει η κατασκευάστρια εταιρεία είναι :

Olympus HP gas-turbine

		Συμβολισμός μεγεθών
Ωση	230N	Thrust
Λόγος πίεσης	3,8:1	PR comp
Μαζική ροή αναρροφούμενου αέρα	0,450kg/s	\dot{m}_a
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (EGT)	973K	T_{t8}
Κατανάλωση καυσίμου	0.01067 kg/s	\dot{m}_f

Πίνακας 2. Στοιχεία στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του κινητήρα

Σε υπολογισμούς που γίνονται για αεροστροβίλους, συνήθως ενδιαφέρουν οι τιμές των ολικών πιέσεων και θερμοκρασιών, οι οποίες εκφράζουν το ενεργειακό περιεχόμενο του εργαζόμενου μέσου που διέρχεται από τις συνιστώσες του κινητήρα. Για τον υπολογισμό των στατικών μεγεθών απαιτείται η γνώση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, που μπορούν να εκφραστούν με το λόγο ειδικών θερμοχωρητικότητας, το γ , και τον αριθμό Mach στη διατομή υπολογισμού, όπως εκφράζεται στις παρακάτω εξισώσεις για την συμπιεστή ροή:

$$\frac{T_t}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (2.1)$$

$$\frac{P_t}{P} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (2.2)$$

Σε μια διατομή ο αριθμός Mach και η ταχύτητα του ρευστού δίνονται από τις σχέσεις:

$$M = \frac{V}{\sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}} \quad (2.3)$$

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} \quad (2.4)$$

Από τις προηγούμενες σχέσεις και με την βοήθεια της καταστατικής εξίσωσης, $P = \rho \cdot R \cdot T$, προκύπτει η σχέση που συνδέει τον αριθμό Mach με τα ολικά μεγέθη της ροής σε μια δεδομένη διατομή.

$$\dot{m} = \frac{A \cdot P_t}{\sqrt{T_t}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \cdot M \cdot \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M^2\right)^{\frac{1+\gamma}{2 \cdot (1-\gamma)}} \quad (2.5)$$

Για τον υπολογισμό του αριθμού Mach από αυτή τη σχέση απαιτούνται η μαζική ροή, οι ολικές συνθήκες της ροής, οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού στις συνθήκες που επικρατούν στη διατομή και το εμβαδό της διατομής. Από το σκαρίφημα της μηχανής που παρέχει ο κατασκευαστής, μετρώνται απ' ευθείας η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα των δακτυλιοειδών διατομών και υπολογίζεται το εμβαδόν τους. Τα δεδομένα αυτά φαίνονται στον πίνακα 3. Η αρίθμηση έγινε σύμφωνα με την Εικόνα 10.

Διατομή	Μήκος [m]	Διάμετρος[m]	Εμβαδό Διατομής[mm ²]	Εμβαδό διεπιφάνειας αερίου-μετάλλου [mm ²]
Συμπιεστής	0.06	0.08	5024	15072
Θάλαμος Καύσης	0.12	0.13	13266.5	48984
Στρόβιλος	0.06	0.07	3846.5	13188

Πίνακας 3. Εμβαδά στις βασικές διατομές του κινητήρα

Για την πραγματοποίηση των προκαταρκτικών υπολογισμών των συνιστωσών του κινητήρα χρησιμοποιούνται εκτιμήσεις των βαθμών απόδοσης τους, με βάση την υπάρχουσα τεχνολογία και λαμβάνοντας πάντοτε υπόψη ότι οι στροβιλομηχανές μικρού μεγέθους έχουν χαμηλούς βαθμούς απόδοσης. Επίσης, υποτίθενται τυπικές τιμές για τις απώλειες πίεσης στους αγωγούς εισόδου και εξόδου του κινητήρα. Όλες οι παραπάνω παράμετροι παρουσιάζονται

συγκεντρωτικά στον πίνακα 4. Πρέπει να σημειωθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, οι εκτιμήσεις των μεγεθών είναι συντηρητικές, ώστε οι εκτιμώμενες επιδόσεις να μην είναι υψηλότερες από τις πραγματικές, οι οποίες θα προσδιοριστούν με τη διεξαγωγή δοκιμών.

Πτώση πίεσης στον αγωγό εισόδου, r_d	0.99
Ισεντροπικός β.α. συμπίεστή, $\eta_{is,comp}$	0.60
Ισεντροπικός β.α. στροβίλου, $\eta_{is,turb}$	0.70
Β.α. θαλάμου καύσης, η_b	0.80
Συντελεστής απωλειών ολικής πίεσης στον θ.κ., PR_{burn}	0.99
Μηχανικός βαθμός απόδοσης, η_m	0.98
Ισεντροπικός β.α. ακροφυσίου, $\eta_{is,noz}$	0.95

Πίνακας 4. Χρησιμοποιούμενες τιμές παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα

Ακόμα οι τυπικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την θερμογόνο δύναμη του καυσίμου και την ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα και των καυσαερίων είναι αντίστοιχα:

$$LHV = 43.1 \text{ MJ/kg}, C_{p,a} = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot K \text{ και } C_{p,g} = 1.150 \text{ kJ/kg} \cdot K.$$

Οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του κύκλου λειτουργίας του κινητήρα προέρχονται από τη βιβλιογραφία για θερμικές στροβιλομηχανές και εδώ εμφανίζονται με τη μορφή και με τη σειρά που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή με τη σειρά που τοποθετούνται οι συνιστώσες του κινητήρα.

1. Αγωγός εισόδου

$$T_{t2} = T_{t1} = T_0 \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M_0^2 \right) \quad (2.6)$$

$$P_{t2} = r_d \cdot P_0 = r_d \cdot P_0 \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M_0^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2.7)$$

2. Συμπιεστής

$$P_{t3} = PR_C \cdot P_{t2} \quad (2.8)$$

$$T_{t3} = T_{t2} \cdot \left[1 - \frac{1}{\eta_{is,comp}} \left(PR_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right] \quad (2.9)$$

3. Θάλαμος καύσης

$$FAR = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \quad (2.10)$$

$$P_{t4} = PR_{burn} \cdot P_{t3} \quad (2.11)$$

$$T_{t4} = \frac{(FAR \cdot \eta_b \cdot LHV + Cp_a \cdot T_{t3})}{(1 + FAR) \cdot Cp_g} \quad (2.12)$$

4. Στρόβιλος

$$T_{t5} = T_{t4} - \frac{1}{\eta_m} \cdot \frac{1}{(1+f)} \cdot \frac{Cp_a}{Cp_g} \cdot (T_{t3} - T_{t2}) \quad (2.13)$$

$$P_{t5} = P_{t4} \left[1 - \frac{1}{\eta_{is,turb}} \cdot \left(1 - \frac{T_{t5}}{T_{t4}} \right) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.14)$$

5. Ακροφύσιο

Για την εξέταση της συμπεριφοράς του ακροφυσίου, πρέπει να γνωρίζουμε αν αυτό είναι στραγγαλισμένο ή όχι, διότι η λειτουργία του ακροφυσίου επηρεάζει έντονα την ώση που επιτυγχάνει ο κινητήρας. Για το λόγο αυτό υπολογίζεται ο κρίσιμος λόγος πίεσης ακροφυσίου, από τη σχέση:

$$PR_{cr} = \frac{P_{t7}}{P_g} = \left(1 - \frac{1}{\eta_{is,noz}} \cdot \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.15)$$

Αν ο λόγος πίεσης του ακροφυσίου $P_{\tau\tau}/P_{\varepsilon}$ είναι μεγαλύτερος του κρίσιμου, τότε το ακροφύσιο είναι στραγγαλισμένο και η πίεση εξόδου είναι ανάλογη της ολικής πίεσης στην είσοδο του ακροφυσίου και μεγαλύτερη της πίεσης περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια, ο όρος $(P_{\varepsilon} - P_0)$ θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στη σχέση της ώσης.

6. Χαρακτηριστικές ποσότητες

Τέλος, υπολογίζονται και ορισμένες χαρακτηριστικές ποσότητες, ενδεικτικές της λειτουργίας της μηχανής. Συγκεκριμένα υπολογίζονται:

- Ώση

$$F = \dot{m}_a [(1 + FAR) \cdot V_{\varepsilon} - V_0] + \left(1 - \frac{P_0}{P_{\varepsilon}}\right) \dot{m}_g \cdot \frac{R \cdot T_{\varepsilon}}{V_{\varepsilon}} \quad (2.16)$$

- Λόγος πίεσης στροβίλου

$$PR_{\text{turb}} = \frac{P_{\tau\tau}}{P_{\tau\varepsilon}} \quad (2.17)$$

- Λόγος πίεσης ακροφυσίου

$$PR_{\text{noz}} = \frac{P_{\tau\tau}}{P_{\varepsilon}} \quad (2.18)$$

2.2 Παρακολούθηση AMT Olympus HP ES

2.2.1 Χρησιμοποιούμενα όργανα

Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται ανάλυση του τρόπου που έγιναν οι μετρήσεις και των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν [15].

2.2.1.1 Μέτρηση Πίεσης

Υπάρχουν διάφορες αρχές με βάση τις οποίες μετατρέπεται η πίεση σε ηλεκτρικό ρεύμα, όμως οι πιο συνήθεις για αισθητήρες πίεσης είναι τρεις: λεπτού-

υμένα (thin-film), πυκνού-υμένα (thick-film) και αυτοί που βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (piezoresistive sensors). Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούμε στο δικό μας κινητήρα δουλεύουν σύμφωνα με το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και την αρχή λεπτού-υμένα.

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πίεσης ανιχνεύουν τις μεταβολές της πίεσης μέσω της μετατόπισης ενός λεπτού μεταλλικού ή ημιαγωγικού διαφράγματος. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τους Pierre και Jacques Curie το 1880 και προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρικών φορτίων αντίθετου προσήμου στις απέναντι πλευρές ενός κρυστάλλου, όταν αυτός πιέζεται (δηλαδή υφίσταται μηχανική τάση). Το φορτίο είναι ανάλογο της μηχανικής τάσης. Σε έναν αισθητήρα πίεσης που εκμεταλλεύεται αυτό το φαινόμενο, το διάφραγμα πιέζει τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, καθώς παραμορφώνεται από τις μεταβολές πίεσης που δέχεται. Τα ηλεκτρικά φορτία αντίθετου προσήμου που εμφανίζονται στις όψεις του κρυστάλλου είναι ανάλογα της εξασκούμενης μηχανικής τάσης και άρα της πίεσης. Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος είναι συνήθως ένα κομμάτι χαλαζία (quartz). Αυτός ο τύπος αισθητήρα ενσωματώνει συχνά κάποιο κύκλωμα ρύθμισης σήματος σε σφραγισμένη μονάδα, χρησιμοποιώντας τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πίεσης λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και μπορούν να έχουν μικρό μέγεθος. Το κύριο πλεονέκτημα που έχουν είναι ότι έχουν ταχεία απόκριση και σχετικά μεγάλο εύρος λειτουργίας. Έχουν πολύ υψηλή ευαισθησία και επίσης καλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα, καθώς και χαμηλή υστέρηση.

Οι αισθητήρες πίεσης λεπτού-υμένα στηρίζονται στην ίδια αρχή με τους μετρητές τάσης (strain gauge), οι οποίοι αποτελούν πεπλεγμένες δομές αντίστασης των οποίων η γεωμετρική έκταση και συμπίεση έχει ως αποτέλεσμα μετρήσιμες αλλαγές, λόγω των μεταβολών που προκαλούνται στο μήκος και στην πυκνότητα. Για έναν αισθητήρα λεπτού-υμένα, τέσσερις αντιστάσεις διατάσσονται επί ενός διαφράγματος με τη μορφή μιας γέφυρας Wheatstone (Εικόνα 15) ώστε να ανιχνεύσουν την παραμόρφωση του διαφράγματος υπό πίεση.

Η μέτρηση της πίεσης του κινητήρα AMT Olympus γίνεται με την βοήθεια μεταλλακτών πίεσης. Πάνω στον κινητήρα είναι τοποθετημένα τα αισθητήρια όργανα μέτρησης, τα οποία είναι μεταλλικοί σωλήνες, εσωτερικής διαμέτρου 1mm, κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα για την θέση 3 και κράμα Inconel για τις θέσεις 4 και 5. Για την μέτρηση της στατικής πίεσης οι σωλήνες τοποθετούνται στο περίβλημα της μηχανής έτσι ώστε το άκρο τους να βρίσκεται πάνω στο όριο της διατομής για την οποία γίνεται η μέτρηση της πίεσης και να μην παρεμβάλλονται στο πεδίο ροής. Ενώ για την μέτρηση της ολικής πίεσης οι σωλήνες σχηματίζουν στο άκρο του ένα σωλήνα Pitot, ο οποίος παρεμβάλλεται στο πεδίο ροής. Οι αισθητήρες συνδέονται με του μεταλλάκτες με την βοήθεια πλαστικών σωλήνων.

Οι μεταλλάκτες που επιλέχθηκαν για τον κινητήρα Olympus είναι οι A10 της WIKA (Εικόνα 8) με εύρος μέτρησης 0-10bar. Μπορούν να τροφοδοτηθούν με

συνεχές ρεύμα τάσης 8-30VDC. Όμως στην περίπτωση του δοκιμαστηρίου του κινητήρα Olympus επιλέχθηκε τροφοδοσία με τάση 9VDC που παρέχεται με κατάλληλο μετασχηματιστή. Οι μεταλλάκτες χρησιμοποιούν ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα για την ρύθμιση του σήματος εξόδου. Η έξοδος του μεταλλάκτη είναι ρεύμα εντάσεως 4-20mA το οποίο μεταβάλλεται γραμμικά σε όλο το εύρος μέτρησης. Αλλά για να είναι εκμεταλλεύσιμη αυτή η έξοδος από την κάρτα ανάκτησης δεδομένων πρέπει να μετατραπεί σε τάση. Για να επιτευχθεί αυτό εισάγεται μια αντίσταση στο κύκλωμα τροφοδοσίας και μετράται η τάση στα άκρα της, η οποία είναι ανάλογη της πίεσης αφού η ένταση του ρεύματος του μεταλλάκτη είναι και αυτή ανάλογη της πίεσης.

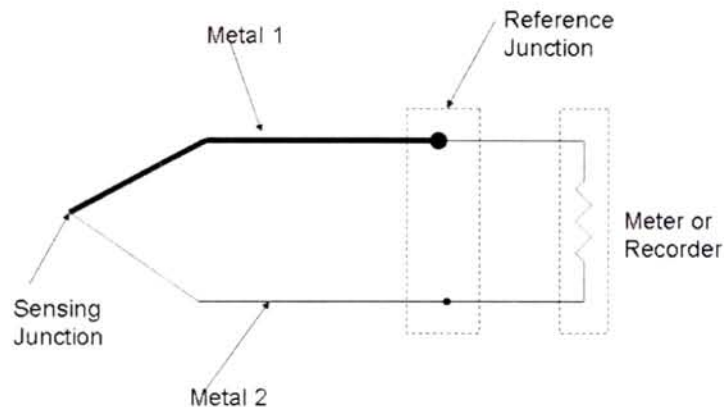


Εικόνα 11. Μεταλλάκτης πίεσης A-10 της WIKA

2.2.1.2 Μέτρηση Θερμοκρασίας

Ένα θερμοστοιχείο (thermocouple) αποτελείται από δύο ανόμοια μέταλλα που συνδέονται μεταξύ τους σε δύο σημεία και σχηματίζουν ένα κλειστό κύκλωμα. Στην Εικόνα 12 εικονίζεται μία τυπική μορφή θερμοστοιχείου. Η μία επαφή ευρίσκεται σε μία προστατευτική θήκη και αποτελεί το μετρητή του οργάνου, γιατί έρχεται σε επαφή με το σώμα άγνωστης θερμοκρασίας.

Εάν η μία επαφή διατηρείται σε διαφορετική θερμοκρασία από την άλλη, τότε θα υπάρχει ροή ρεύματος στο κύκλωμα. Το μέγεθος και η κατεύθυνση αυτού εξαρτώνται από τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται και τη διαφορά θερμοκρασίας των επαφών. Το μέγεθος της ΗΕΔ που προκύπτει είναι μικρό, της τάξης των μερικών mV. Στο ψυχρό άκρο του κυκλώματος μπορούμε να τοποθετήσουμε ένα βολτόμετρο, και να βαθμονομήσουμε κατάλληλα την κλίμακα του σε τιμές θερμοκρασίας.



Εικόνα 12. Σχήμα θερμοστοιχείου

Για τη λήψη αποτελεσμάτων ακριβείας, θα πρέπει η μία επαφή να διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία και έτσι να αποφεύγονται σφάλματα λόγω ολίσθησης. Η τελική ΗΕΔ δεν επηρεάζεται από το μέγεθος των μεταλλικών αγωγών, το εμβαδόν των επαφών και τον τρόπο σύνδεσης των επαφών.

Τυπικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των αγωγών των θερμοστοιχείων είναι το ρόδιο, κράματα νικελίου και χρωμίου, κράματα αλουμινίου και νικελίου και κράματα νικελίου και χαλκού. Τα ανόμοια μέταλλα που συνδυάζονται με αυτά περιλαμβάνουν το λευκόχρυσο, το χαλκό και το σίδηρο. Η προστατευτική επικάλυψη που τίθεται στο μετρητή μπορεί να κατασκευαστεί από διάφορα υλικά, για να παρέχει αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Κάποια από τα ζεύγη υλικών που χρησιμοποιούνται έχουν τυποποιηθεί. Έτσι έχουν προκύψει κάποιες κατηγορίες θερμοστοιχείων, που συνήθως έχουν ένα χαρακτηριστικό γράμμα, όπως είναι E, J, K, N, κ.α., για να διακρίνονται. Ο λόγος που υπάρχουν τόσες πολλές κατηγορίες θερμοστοιχείων είναι γιατί κάθε τύπος έχει εφαρμογή σε συγκεκριμένο περιβάλλον λειτουργίας και εύρος θερμοκρασιών.

Τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την μηχανή AMT Olympus είναι τύπου K. Το υλικό κατασκευής τους είναι 90% νικέλιο(Ni) και 10% χρώμιο(Cr) για το θετικό άκρο και 95% νικέλιο(Ni), 2% αργίλιο(Al), 2% μαγγάνιο(Mn) και 1% πυρίτιο(Si) για το αρνητικό άκρο. Αυτός ο τύπος θερμοστοιχείου είναι ανέξοδος, με μια σχετική ευαισθησία ανάμεσα στα δύο άκρα του περίπου $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ και με το

εύρος θερμοκρασιών που μπορεί να μετρήσει να είναι από $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, το οποίο μπορεί να επεκταθεί μέχρι τους $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ για μικρής διάρκειας μετρήσεις [16]. Σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών η ΗΕΔ που αναπτύσσεται μεταξύ των επαφών του θερμοστοιχείου είναι γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας. Αυτού του τύπου τα θερμοστοιχεία αντέχουν σε οξειδωτικά περιβάλλοντα όπως είναι αυτά των καυσαερίων των στροβιλοαντιδραστήρων. Επομένως τα θερμοστοιχεία που επιλέχθηκαν ικανοποιούν τις απαιτήσεις του δοκιμαστηρίου. Επειδή στους ακροδέκτες των θερμοστοιχείων η τιμή της τάσης που αναπτύσσεται είναι πολύ μικρή, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κρίνεται σκόπιμο το σήμα αυτό να ενισχυθεί έτσι ώστε να μπορεί να «διαβαστεί» από την συσκευή πρόσκτησης δεδομένων. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ο ενισχυτής που φαίνεται στην Εικόνα 13. Το βασικό στοιχείο της διάταξης αυτής είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα – ενισχυτής AD595AQ το οποίο πραγματοποιεί την ενίσχυση του σήματος.

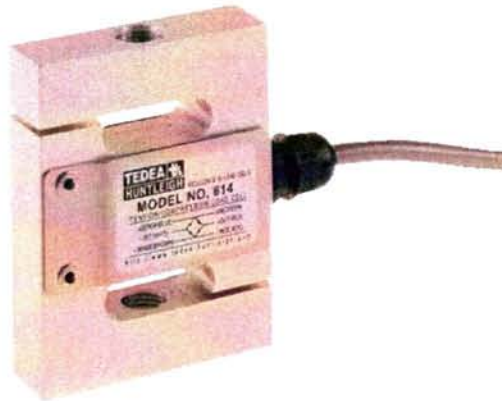


Εικόνα 13. Ενισχυτής των θερμοστοιχείων

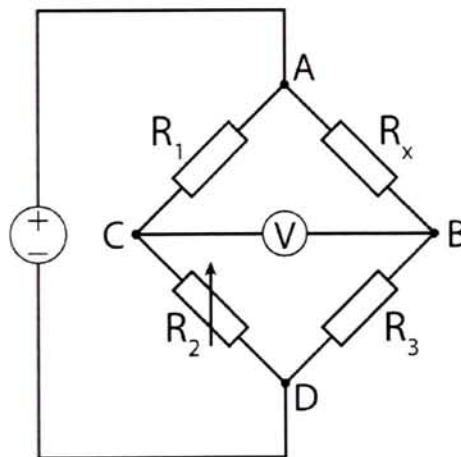
2.2.1.3 Μέτρηση ώσης

Οι κυψελίδες φόρτισης (load cells) είναι συσκευές που χρησιμοποιούν μετρητές μηχανικής τάσης για να προσδιορίζουν την τιμή μιας άγνωστης δύναμης (που συχνά ονομάζεται φορτίο) ή μάζας, και τις χρησιμοποιούμε στην περίπτωση μας ώστε να μετρήσουμε την ώση που αναπτύσσει ο κινητήρας.

Μια τυπική κυψελίδα φόρτισης με μετρητή μηχανικής τάσης εικονίζεται στην Εικόνα 14. Αυτή χρησιμοποιεί τέσσερις μετρητές μηχανικής τάσης, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι στο στοιχείο στήριξης φορτίου, το οποίο δέχεται τη δύναμη. Όταν το στοιχείο αυτό βρίσκεται υπό μηχανική τάση, τότε προκαλούνται μικρές μεταβολές στις αντιδράσεις των τεσσάρων μετρητών. Τα στοιχεία, μαζί με κατάλληλες αντιστάσεις σταθερής τιμής, συγκροτούν μία γέφυρα Wheatstone, η ακριβής φύση της οποίας εξαρτάται από την εφαρμογή και τη μορφή της μηχανικής τάσης που ασκείται. Μία τυπική γέφυρα Wheatstone εικονίζεται στην Εικόνα 15 στο οποίο μία ή περισσότερες από τις αντιστάσεις R μπορεί να είναι μετρητές μηχανικής τάσης. Η γέφυρα Wheatstone ρυθμίζει το σήμα εξόδου της ώστε να είναι ανάλογο του είδους της μηχανικής τάσης που ασκείται. Η τιμή της διαφοράς δυναμικού στην έξοδο της σχετίζεται με το μέγεθος του εφαρμοζόμενου φορτίου.



Εικόνα 14. Κυψελίδα φόρτισης



Εικόνα 15. Γέφυρα Wheatstone

Τα σφάλματα που προκαλούν οι μεταβολές θερμοκρασίας (καθώς επηρεάζονται οι τιμές των αντιστάσεων) μπορούν να ελαχιστοποιηθούν εάν οι μετρητές μηχανικής τάσης προσαρμοστούν ηλεκτρικά.

Η τεχνική είναι ακριβής, ευέλικτη, σχετικά φθηνή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ευρύ φάσμα φορτίων. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις μόνο συμπίεσης, μόνο εφελκυσμού ή σε όλες τις περιπτώσεις [15].

Οι προδιαγραφές δείχνουν ότι οι συσκευές αυτές:

- είναι ακριβείς (καλύτερα από 0.25%)
- είναι γραμμικές (καλύτερα από 90%)
- έχουν καλή επαναληψιμότητα (καλύτερα από 0.25%)
- είναι ανθεκτικές σε υπερφόρτιση (καλύτερα από 150%)

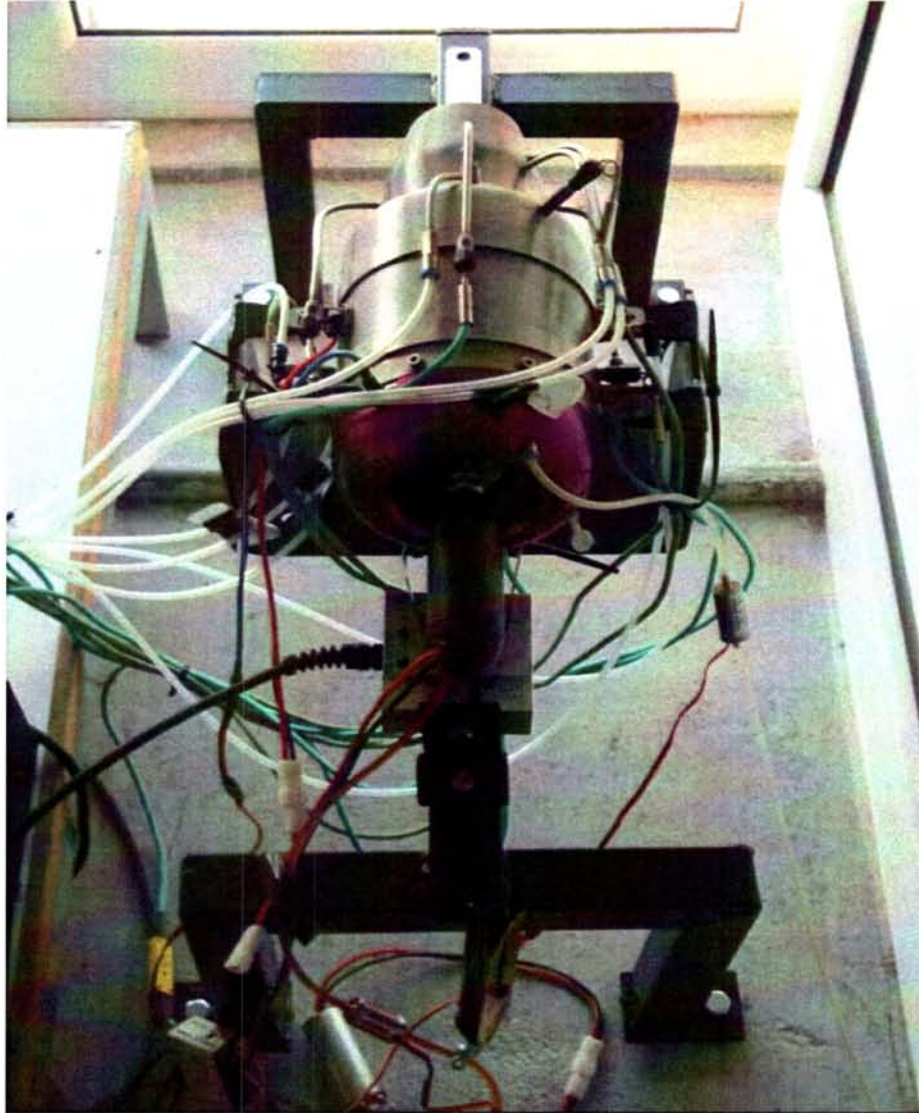
Είναι εξαιρετικά σημαντικό ότι η κυψελίδα φόρτισης απορροφά όλη την δύναμη από τον αεριοστρόβιλο. Η κυψελίδα φόρτισης που χρησιμοποιούμε για να καταγράψουμε την ώση είναι η MOD 546QD-A5 της εταιρείας DS EUROPE, η οποία μπορεί να καταγράφει ώση από -60 μέχρι 110 kg. Η ακρίβεια στη συλλογή δεδομένων είναι απαραίτητη για την παρατήρηση της συμπεριφοράς του αεριοστροβίλου. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ο στρόβιλος τοποθετείται σε μια ευθεία ράγα, που είναι ουσιαστικά χωρίς τριβές, πάνω στην οποία κινείται ελεύθερα η βάση του αεριοστροβίλου (Εικόνα 16) ώστε να αυξάνει την ακρίβεια της ώσης που καταγράφεται.



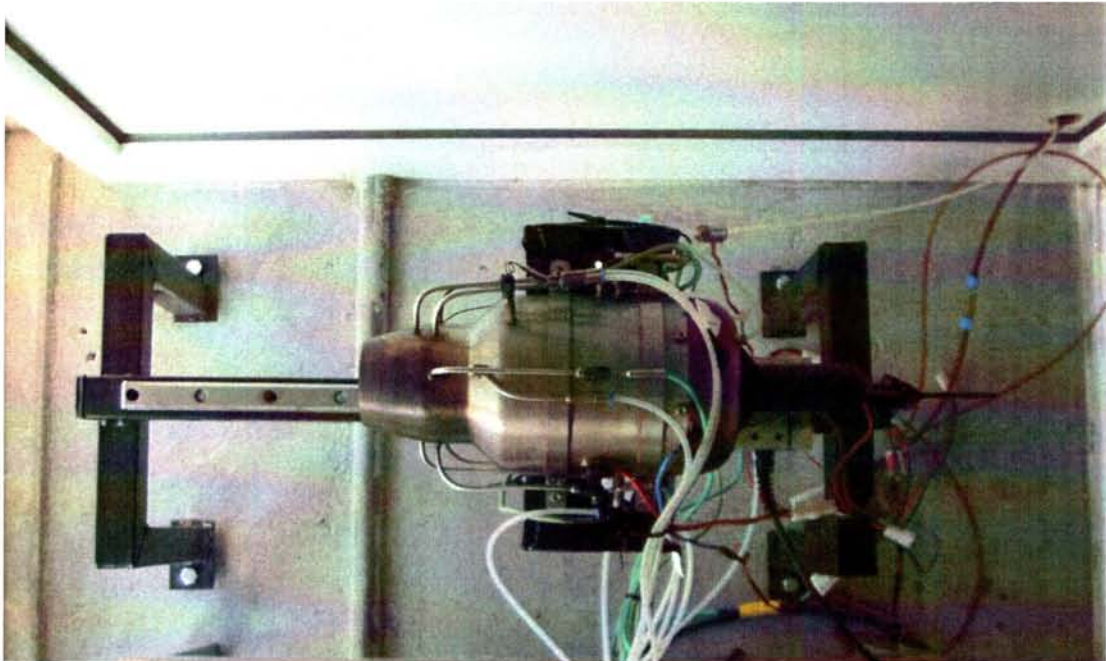
Εικόνα 16. Βάση αεριοστροβίλου

Η κυψελίδα φόρτισης θα πρέπει να τοποθετείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αντικριστά στην είσοδο του συμπιεστή. Η βάση πάνω στην οποία τοποθετείται ο αεριοστρόβιλος είναι συνδεδεμένη με μία κυλινδρική ράβδο, που είναι επέκταση

της κυψελίδας. Ως εκ τούτου, όταν η τουρμπίνα θα είναι σε λειτουργία η μετακίνηση προς βάση, πάνω στην ευθεία ράγα χωρίς τριβές, θα σπρώχνει τη ράβδο προς τη κυψελίδα φόρτισης καταγράφοντας τιμές ώσης. Η τοποθέτηση του αεριοστροβίλου παρουσιάζεται στην Εικόνα 17 και στην Εικόνα 18 παρακάτω.



Εικόνα 17. Πλήρης τοποθέτηση αεριοστροβίλου



Εικόνα 18. Παρουσίαση πλήρους τοποθέτησης κινητήρα ως προς την κυψελίδα φόρτισης

2.2.2 Μετρούμενα θερμοδυναμικά μεγέθη

Για τον υπολογισμό του θερμοδυναμικού κύκλου λειτουργίας ενός αεροστροβίλου είναι απαραίτητη η γνώση των μεγεθών της πίεσης και της θερμοκρασίας στην είσοδο και έξοδο των συνιστωσών, από τις οποίες απαρτίζεται, όπως επίσης και οι βαθμοί απόδοσης αυτών. Επιπλέον απαιτείται και η γνώση των συνθηκών περιβάλλοντος καθώς και του αριθμού Mach της πτήσης, εφόσον είναι αεροπορικός. Όμως όλα τα θερμοδυναμικά αυτά μεγέθη δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, οπότε δεν απαιτείται ο υπολογισμός όλων για την πλήρη περιγραφή του συστήματος.

Στην περίπτωση του κινητήρα Olympus είναι δύσκολο να μετρηθούν όλες εκείνες οι παράμετροι που θα καθορίσουν πλήρως τον θερμοδυναμικό κύκλο λειτουργίας του, καθώς οι μικρές διαστάσεις του κινητήρα δεν επιτρέπουν τον συνδυασμό σύνθετων μετρήσεων που απαιτούνται. Οι βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και στροβίλου προκύπτουν από την επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται, ενώ οι βαθμοί απόδοσης των συνιστωσών που δεν συναλλάσσουν έργο (αγωγός εισόδου, θάλαμος καύσης, ακροφύσιο) εκτιμώνται με βάση το υπάρχον επίπεδο τεχνολογίας και την σχετική πείρα στο αντικείμενο.

Ο κινητήρας AMT Olympus του εργαστηρίου, στον οποίο εκπονείται η παρούσα εργασία, είναι τροποποιημένος με επιπλέον μετρητικά όργανα σε κατάλληλες

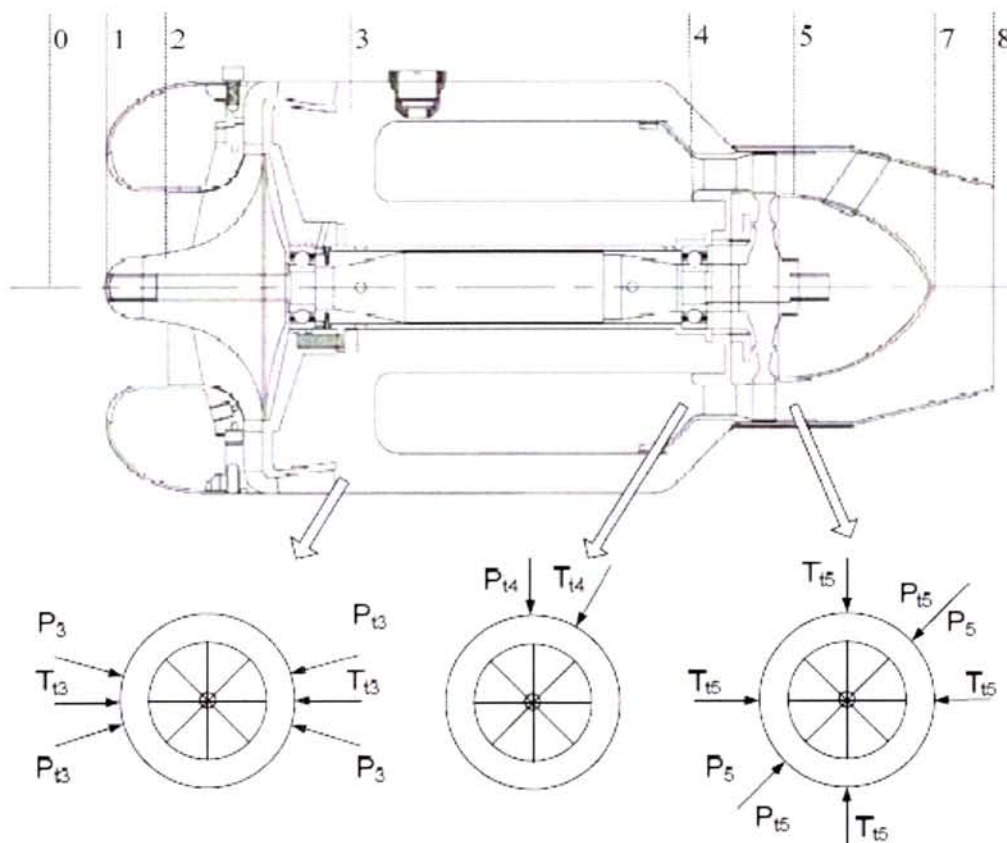
θέσεις ώστε να επιτυγχάνεται ο ακριβής υπολογισμός του κύκλου λειτουργίας. Συγκεκριμένα, το μεταλλικό κέλυφος του κινητήρα φέρει διατρήσεις ειδικής διαμόρφωσης σε συγκεκριμένες θέσεις, για την τοποθέτηση αισθητήρων θερμοκρασίας και πίεσης.

Οι θέσεις στις οποίες είναι τοποθετημένα τα επιπλέον μετρητικά όργανα φαίνονται στην έξοδο του συμπιεστή (θέση 3), στην έξοδο του θαλάμου καύσης (θέση 4) και στην έξοδο του στροβίλου (θέση 5), όπως φαίνονται στην Εικόνα 19.

Η θέση 3 αντιστοιχεί στην έξοδο του συμπιεστή. Στη θέση αυτή έχουν τοποθετηθεί δυο θερμοστοιχεία σε αντιδιαμετρικές θέσεις, οι μετρήσεις των οποίων συμβολίζονται με $T_{t3, \text{left}}$ και $T_{t3, \text{right}}$. Επίσης, σε αντιδιαμετρικές θέσεις έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες πίεσης, για την μέτρηση της τόσο της στατικής όσο και της ολικής πίεσης. Οι αισθητήρες συμβολίζονται με $P_{t3, \text{right}}$, $P_{t3, \text{left}}$, $P_{3, \text{right}}$, $P_{3, \text{left}}$.

Η θέση 4 αντιστοιχεί στην έξοδο του θαλάμου καύσης. Στη θέση αυτή έχουν τοποθετηθεί δυο αισθητήρες, ένας για την πίεση και ένας για την θερμοκρασία οι οποίοι συμβολίζονται με P_{t4} και T_{t4} αντίστοιχα.

Τέλος, η θέση 5 αντιστοιχεί στην έξοδο του στροβίλου. Στη θέση αυτή έχουν τοποθετηθεί τέσσερα θερμοστοιχεία, ενώ σε αντιδιαμετρικές θέσεις υπάρχουν αισθητήρες για την στατική και ολική πίεση και συμβολίζονται $P_{t5, \text{up}}$, $P_{t5, \text{down}}$, $P_{5, \text{up}}$ και $P_{5, \text{down}}$ αντίστοιχα, όπως δείχνει και η Εικόνα 19.

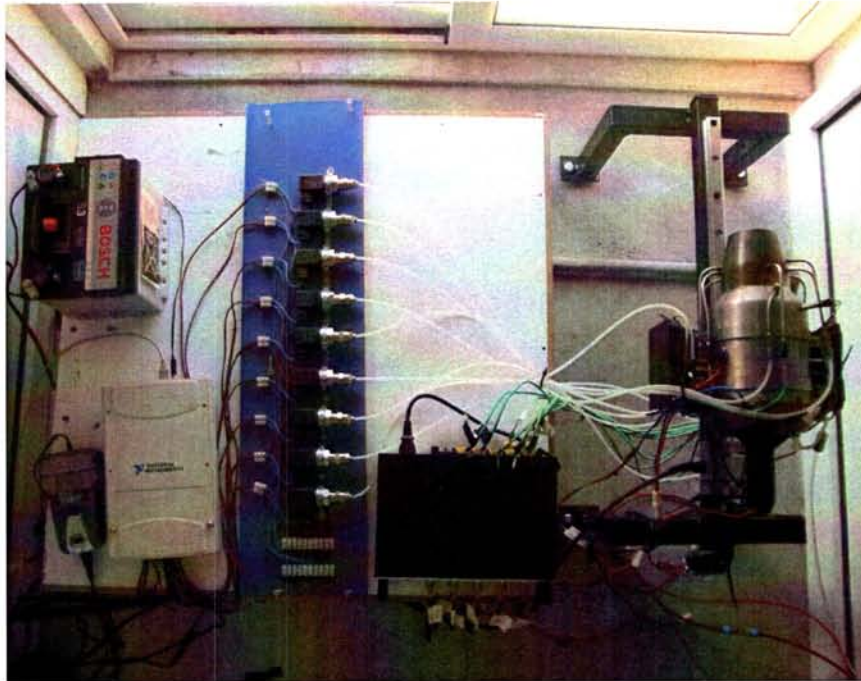


Εικόνα 19. Τοποθέτηση αισθητήρων πίεσης και θερμοκρασίας στις τρεις θέσεις

2.3 Περιγραφή δοκιμαστηρίου

Για τις ανάγκες των δοκιμών του κινητήρα είχε ήδη στηθεί κατά την εκπόνηση παλαιότερης διπλωματικής εργασίας [17], ειδικά διαμορφωμένο δοκιμαστήριο ώστε να είναι δυνατή η ασφαλής και ανεμπόδιστη λειτουργία του μικροστροβίλου του εργαστηρίου. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας το προηγούμενο δοκιμαστήριο αναβαθμίστηκε προκειμένου η μέτρηση της ώσης να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής.

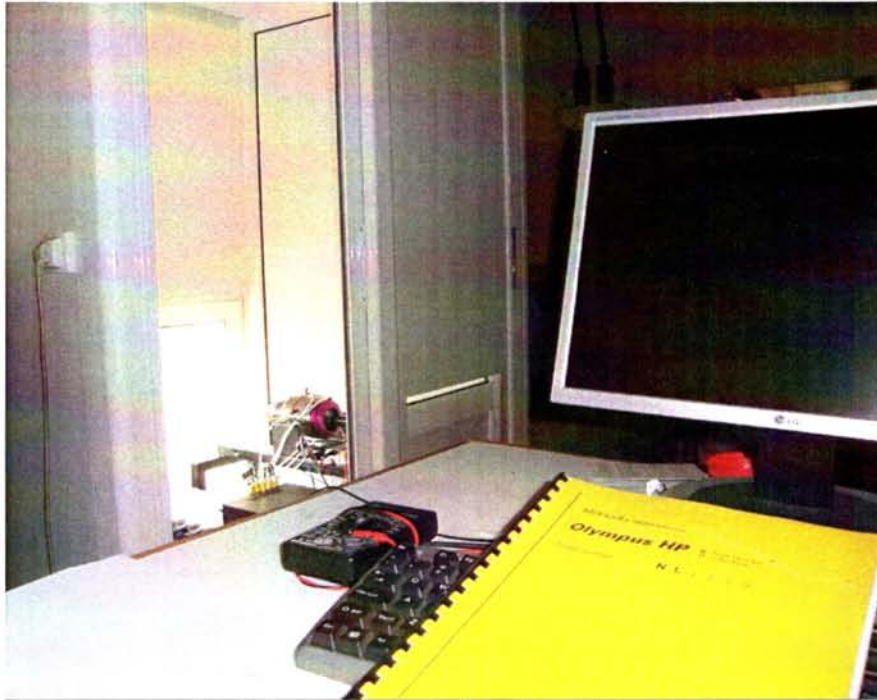
Το παρόν δοκιμαστήριο αποτελεί ένα διαμορφωμένο κέλυφος που εσωκλείει τον κινητήρα και όλο το σύστημα που είναι απαραίτητο για την λειτουργία του και την απόκτηση των δεδομένων, ενώ παράλληλα έχει κατασκευαστεί έτσι ώστε να επιτρέπει την εύκολη και ασφαλή παρακολούθηση της λειτουργίας του κινητήρα καθώς και να προστατεύει από τον έντονο ήχο που παράγεται. Το εσωτερικό του κελύφους αποτελείται από μία μεταλλική βάση, που διαμορφώθηκε ειδικά στο μηχανουργικό εργαστήριο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Π.Θ. , ώστε να στηρίζεται και να είναι δυνατή η κίνησή του κινητήρα πάνω σε μια ευθύγραμμη και χωρίς τριβές ράγα, που θα διευκολύνει την ακριβή καταγραφή των τιμών ώσης. Δίπλα στη μεταλλική βάση όπου είναι τοποθετημένη η κλίνη του κινητήρα, έχει προσαρμοστεί ένα διαμορφωμένο ξύλινο τραπέζι πάνω στο οποίο βρίσκονται τοποθετημένοι οι μεταλλάκτες πίεσης, ο ενισχυτής των θερμοστοιχείων, η μπαταρία, η κάρτα πρόσκτησης δεδομένων και τα εξαρτήματα που συνοδεύουν τον κινητήρα. Πίσω ακριβώς από τη βάση του κινητήρα βρίσκεται ένα παράθυρο και για αυτό το λόγο η βάση έχει τοποθετηθεί εκεί, ώστε να βρίσκουν διαφυγή τα καυσαέρια του μικροστροβίλου. Το δοχείο όπου υπάρχει το καύσιμο και η φιάλη του αερίου εκκίνησης (προπανίου) έχουν τοποθετηθεί, για λόγους ασφαλείας, έξω από το ειδικά διαμορφωμένο δοκιμαστήριο. Σε απόσταση ασφαλείας από τον κινητήρα βρίσκεται ένα γραφείο πάνω το οποίο έχει τοποθετηθεί ο ηλεκτρονικός υπολογιστής που κάνει την πρόσκτηση και επεξεργασία των δεδομένων λειτουργίας του κινητήρα με χρήση λογισμικού LabVIEW. Στον υπολογιστή καταγράφονται οι βασικές παράμετροι λειτουργίας του κινητήρα, δηλαδή οι στροφές, η υπολογιζόμενη τιμή της ώσης, οι θερμοκρασίες, πιέσεις και οι ενθαλπίες σε κάθε διατομή, όπως και οι βαθμοί απόδοσης των συνιστωσών του κινητήρα και οι παροχές των κινούμενων μέσων και καυσίμου.



Εικόνα 20. Πλήρης διάταξη κινητήρα και απαραίτητων οργάνων για την καταγραφή των δεδομένων



Εικόνα 21. Δοκιμαστήριο κατά τη διάρκεια λειτουργίας



Εικόνα 22. Η/Υ για την καταγραφή των μετρήσεων του κινητήρα

2.4 Πρόσκτηση δεδομένων με τη βοήθεια λογισμικού

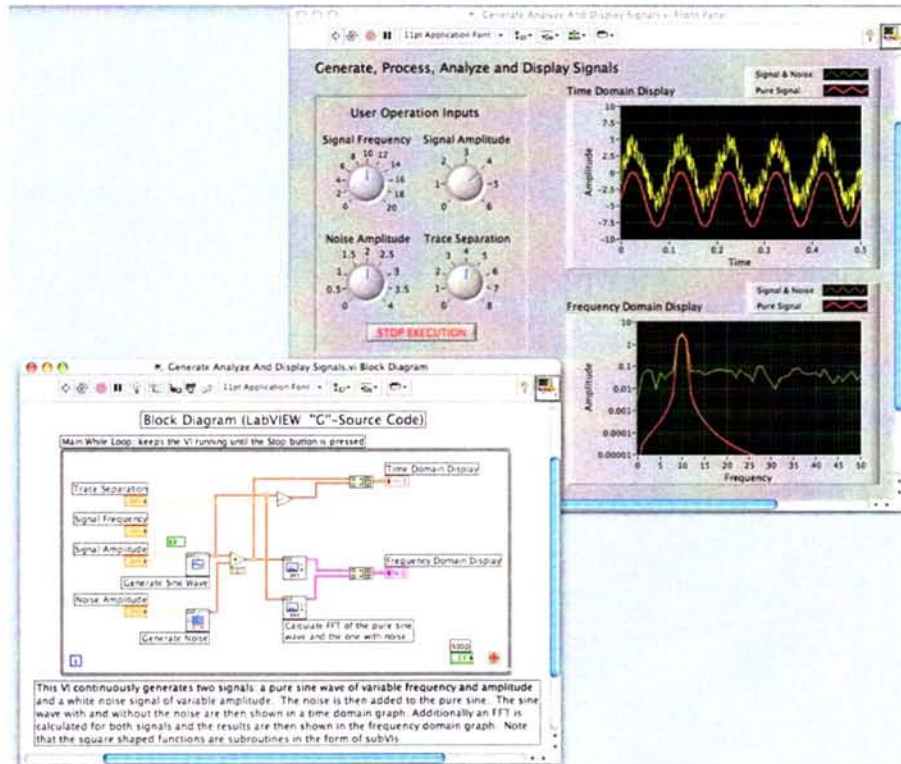
Η εισαγωγή των οργάνων μέτρησης βοηθά σε πολύ σημαντικό βαθμό την επιστήμη και την πρόοδο της τεχνολογίας. Οι επιστήμονες και οι μηχανικοί σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν τις επιστημονικές μετρήσεις για την παρατήρηση, τον έλεγχο, και την κατανόηση των φυσικών φαινομένων. Τα μετρητικά όργανα χρησιμοποιούσαν ανέκαθεν σε μεγάλο βαθμό τα διαθέσιμα μέσα της τεχνολογίας. Στις μέρες μας η πρόσκτηση των δεδομένων από οποιοδήποτε είδους αισθητήρα γίνεται με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, μέσω ειδικού λογισμικού που έχει αναπτυχθεί [18]. Έτσι και στο δοκιμαστήριο που στήθηκε στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών για τον κινητήρα Olympus HP που μελετούμε, χρησιμοποιήθηκε Η/Υ για την καταγραφή και ανάλυση όλων των δεδομένων που λαμβάναμε.

Το ειδικό λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο για την πρόσκτηση δεδομένων είναι το LabVIEW 10.0 της εταιρίας NI (National Instruments). Το LabVIEW είναι μία γραφική γλώσσα προγραμματισμού, που ονομάζεται 'G', που χρησιμοποιούνται συνήθως για την πρόσκτηση δεδομένων, τον έλεγχο οργάνων και βιομηχανικούς αυτοματισμούς που είναι συμβατό με αρκετά λειτουργικά συστήματα. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται στο LabVIEW είναι μια γλώσσα προγραμματισμού ροής δεδομένων (dataflow). Η εκτέλεση καθορίζεται από τη δομή ενός γραφικού διαγράμματος επί της οποίας ο προγραμματιστής επιλέγει τη σειρά των εντολών που εκτελούνται ανάλογα με την κάθε διαφορετική

λειτουργία.

Τα προγράμματα, καθώς και οι υπορουτίνες, του LabVIEW καλούνται VI (Virtual Instruments) και προσομοιώνουν εικονικά όργανα (Εικόνα 23). Τα VIs αποτελούνται από ένα λογικό διάγραμμα (block diagram) και μία διεπιφάνεια επικοινωνίας (front panel). Το front panel αποτελεί μία διεπιφάνεια χρήστη, ώστε ο χρήστης του προγράμματος να επικοινωνεί με τον κώδικα με όργανα-εργαλεία που του παρέχει το λογισμικό, αλλά επιπρόσθετα χρησιμεύει ώστε να καθορίζει τις παραμέτρους εισόδου και εξόδου του προγράμματος. Στο block diagram ο προγραμματιστής μπορεί να προσθέτει κώδικα με τη μορφή εικονιδίων και να ελέγχει τη ροή των δεδομένων, μέσω τερματικών και κόμβων που συνδέονται με καλώδια (wires).

Όσον αφορά την εκτέλεση, το LabVIEW περιλαμβάνει ένα μεταγλωττιστή (compiler) που παράγει εγγενή κώδικα για την πλατφόρμα CPU. Ο γραφικός κώδικας μεταφράζεται σε εκτελέσιμο κώδικα μηχανής, ερμηνεύοντας τη σύνταξη και μεταγλωττίζοντας. Η σύνταξη του LabVIEW εφαρμόζεται αυστηρά κατά τη διαδικασία της επεξεργασίας και μεταγλωττίζεται σε εκτελέσιμο κώδικα μηχανής όταν ζητηθεί να εκτελεστεί ή κατά την αποθήκευση. Στην τελευταία περίπτωση, το εκτελέσιμο και ο πηγαίος κώδικας συγχωνεύονται σε ένα ενιαίο αρχείο. Τα εκτελέσιμα τρέχει με τη βοήθεια της μηχανής χρόνου εκτέλεσης του LabVIEW (runtime engine), η οποία περιέχει κάποια προμεταγλωττισμένα κομμάτια κώδικα για να εκτελέσει συνήθεις εργασίες που καθορίζονται από την γλώσσα G [19].



Εικόνα 23. Front panel και block diagram ενός απλού VI LabVIEW

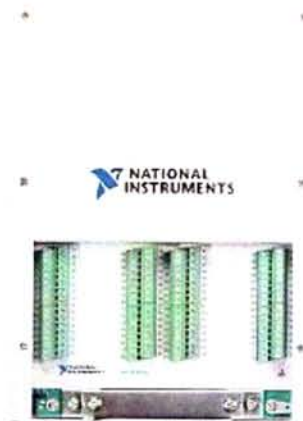
Με το LabVIEW είναι πολύ εύκολο να προγραμματίσει κανείς διαφορετικές εργασίες που εκτελούνται παράλληλα χρησιμοποιώντας πολλαπλούς παράλληλους βρόχους (while loops). Αυτό είναι μεγάλο όφελος για την αυτοματοποίηση του συστήματος ελέγχου, όπου πολύ σύνηθες να τρέχουν διαδικασίες, όπως αλληλουχία δοκιμών, καταγραφή δεδομένων και παράλληλη διασύνδεση υλικού.

Ο τρόπος προγραμματισμού σε LabVIEW πραγματοποιείται με δύο μεθοδολογίες, την Traditional NI-DAQ και την NI-DAQmx. Η μεθοδολογία NI-DAQmx είναι ο εξελιγμένος τρόπος προγραμματισμού που εξέδωσε η National Instruments και οι διαφορές σε σχέση με την Traditional NI-DAQ που χρησιμοποιούνταν σε παλαιότερες εκδόσεις LabVIEW είναι οι νέες συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται και πετυχαίνουν:

- ευκολότερη την πρόσκτηση δεδομένων
- την προσθήκη περισσότερων συσκευών πρόσκτησης δεδομένων
- την πιο αποδοτική πρόσκτηση σε περιπτώσεις παράλληλων διεργασιών
- υψηλότερους ρυθμούς πρόσκτησης των δεδομένων

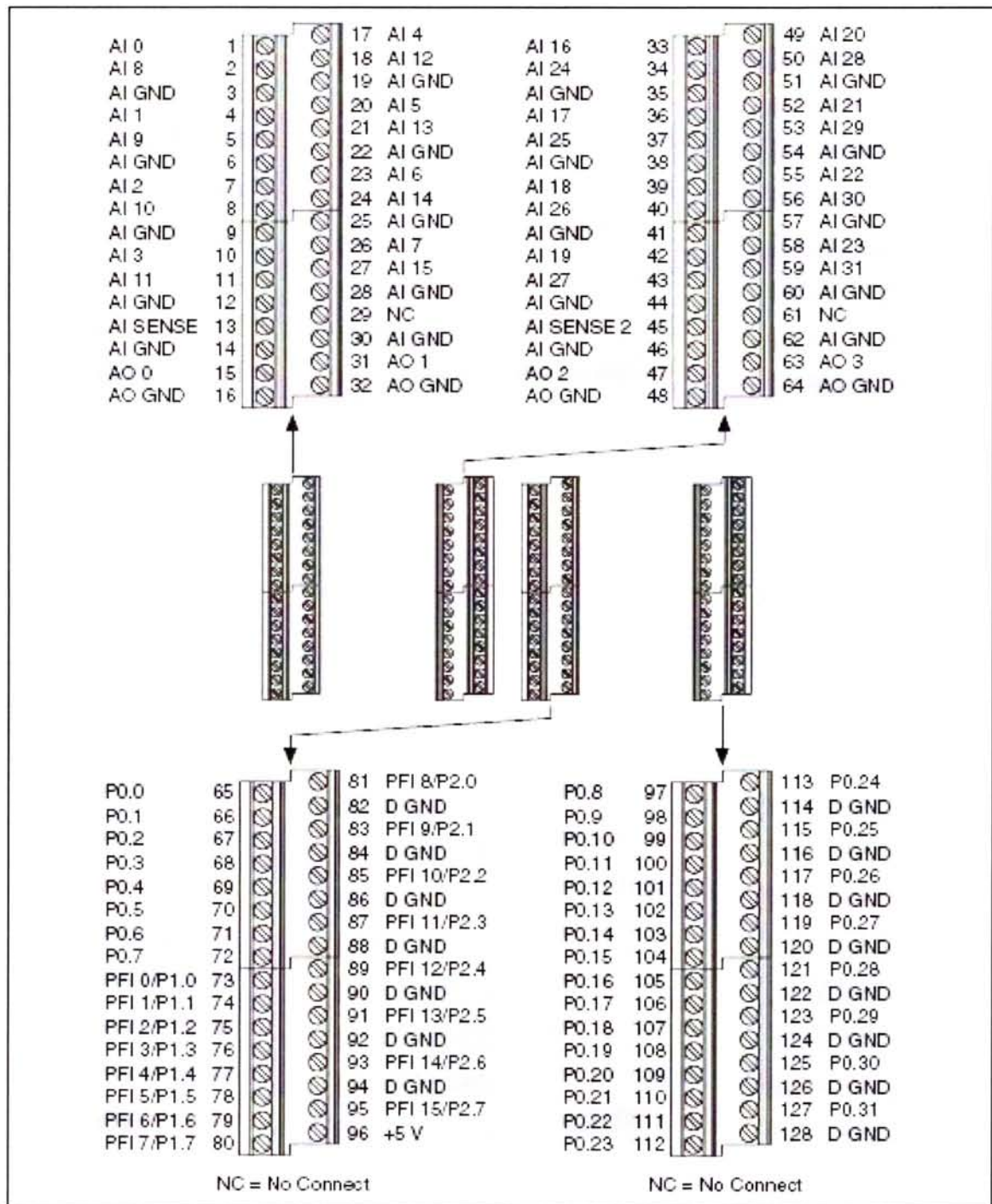
2.4.1 Κάρτα πρόσκτησης δεδομένων

Για την πρόσκτηση δεδομένων από τον υπολογιστή χρησιμοποιείται μια ειδικά κάρτα της National Instruments, η USB-6229 (Εικόνα 24), η οποία συνδέεται μέσω θύρας USB με το Η/Υ και είναι βελτιστοποιημένη για ανώτερη ακρίβεια σε γρήγορους ρυθμούς δειγματοληψίας. Η συγκεκριμένη κάρτα είναι συμβατή μόνο με την τεχνολογία DAQmx, ενώ διαθέτει 32 αναλογικά κανάλια εισόδου (16-bit), 4 αναλογικά κανάλια εξόδου και 48 ψηφιακά κανάλια εισόδου/εξόδου (τα 32 πάνω από 1 MHz). Ο ρυθμός πρόσκτησης δεδομένων είναι 250 kS/s, ο οποίος μοιράζεται στα κανάλια που χρησιμοποιούνται σε κάθε δειγματοληψία.



Εικόνα 24. Η κάρτα πρόσκτησης δεδομένων USB-6229

Η λειτουργία της κάρτας απαιτεί κατάλληλο τροφοδοτικό ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο παρέχεται μαζί με την απόκτηση της κάρτας. Οι αισθητήρες συνδέονται στους 128 ακροδέκτες (πράσινου χρώματος στην εικόνα 24) που διαθέτει η κάρτα, των οποίων η σωστή συνδεσμολογία είναι απαραίτητη προκειμένου να λαμβάνουμε τις σωστές ενδείξεις των αισθητήρων. Ο τρόπος σύνδεσης στον κάθε ακροδέκτη φαίνεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25. Αντιστοίχιση καναλιών στους ακροδέκτες της κάρτας

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στο κινητήρα Olympus HP του εργαστηρίου συνδέονται στους ακροδέκτες της κάρτας, σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, με την αντιστοιχία του Πίνακα 5.

α/α	Αισθητήρας	Κανάλι	Ακροδέκτες	
			(+)	(-)
0	P _{s3,right}	ai0	1	3
1	P _{s3,left}	ai1	4	6
2	P _{t3,right}	ai2	7	9
3	P _{t3,left}	ai3	10	12
4	P _{t4}	ai4	17	19
5	P _{s5,up}	ai5	20	22
6	P _{s5,down}	ai6	23	25
7	P _{t5,up}	ai7	26	28
8	P _{t5,down}	ai8	2	3
9	T _{t3,left}	ai9	5	6
10	T _{t3,right}	ai10	8	9
11	T _{t4}	ai11	11	12
12	T _{t5,left}	ai12	18	19
13	T _{t5,right}	ai13	21	22
14	T _{t5,up}	ai14	24	25
15	T _{t5,down}	ai15	27	28
16	Thrust	ai16	33	35

Πίνακας 5. Συνδεσμολογία αισθητήρων



Εικόνα 26. Συνδεσμολογία καναλιού Ai0

2.4.2 Πρόσκτηση δεδομένων από την ECU

Τα δεδομένα της εξόδου Telemetry που υπάρχει πάνω στην ECU μπορούν να παρακολουθούνται μέσω Η/Υ, εγκαθιστώντας το πρόγραμμα που παρέχει η κατασκευάστρια εταιρία του κινητήρα AMT. Τα δεδομένα που λαμβάνονται, δεν μπορούν να υποστούν on-line επεξεργασία ούτε να αποθηκευτούν σε κάποιο αρχείο. Αυτό όμως αποτελεί μεγάλο πρόβλημα καθώς ανάμεσα σε άλλα, στα πακέτα δεδομένων που στέλνει η ECU, εμπεριέχονται οι στροφές του κινητήρα, η θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου (EGT) και το επίπεδο ισχύος(throttle level), τα οποία είναι απαραίτητο να διαβάζονται προκειμένου να έχουμε καλή εποπτεία και ανάλυση του κινητήρα. Έτσι ο κώδικας LabVIEW που έχει δημιουργηθεί εκτός από την πρόσκτηση και επεξεργασία των δεδομένων που γίνεται από τους αισθητήρες μέσω της κάρτας USB-6229, επεκτάθηκε ώστε να λαμβάνει δεδομένα και από την ECU της μηχανής μέσω της εξόδου Telemetry, η οποία συνδέεται στην σειριακή θύρα του υπολογιστή. Όμως για να είναι εφικτή η αποκωδικοποίηση της πληροφορίας που περιέχουν τα πακέτα δεδομένων που στέλνει η ECU στον υπολογιστή, πρέπει να είναι γνωστό το πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας της ECU με Η/Υ. Το πρωτόκολλο αυτό παρέχεται από τον κατασκευαστή (Παράρτημα Π.5) και γνωρίζοντάς το μπορεί να γίνει αρχικά η πρόσκτηση και στη συνέχεια η επεξεργασία των δεδομένων από το λογισμικό του LabVIEW.

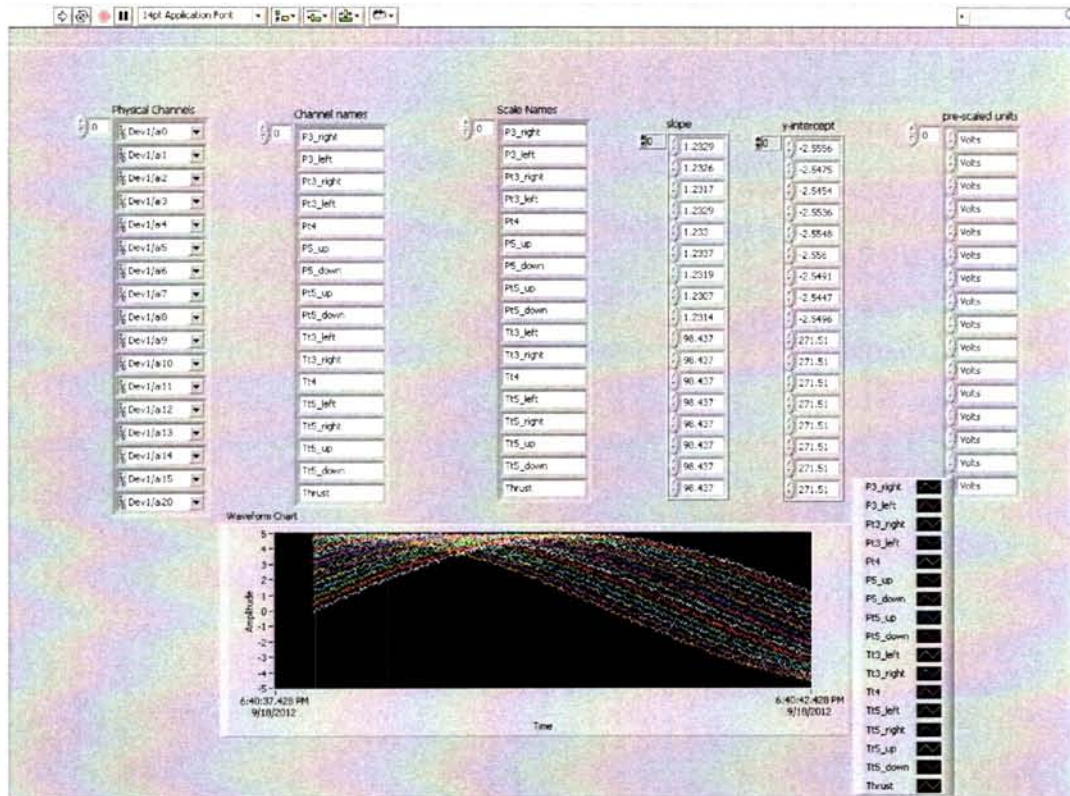
2.4.3 Παρουσίαση κώδικα LabVIEW για πρόσκτηση δεδομένων

Για την πρόσκτηση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, κατασκευάστηκε νέο πρόγραμμα στο προγραμματιστικό περιβάλλον του LabVIEW, με το όνομα Turbo_Data.vi. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιήθηκε ώστε να μετρήσουμε όλα τα μεγέθη που μας αφορούν σχετικά με τον κινητήρα, λαμβάνοντας δεδομένα τόσο από την κάρτα πρόσκτησης της NI, όσο και από την ECU. Ακόμα ο συγκεκριμένος κώδικας επεξεργάζεται τα δεδομένα πραγματοποιώντας συγκεκριμένες μαθηματικές πράξεις, ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν απεικονίζονται στο front panel και αποθηκεύονται σε αρχείο για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση.

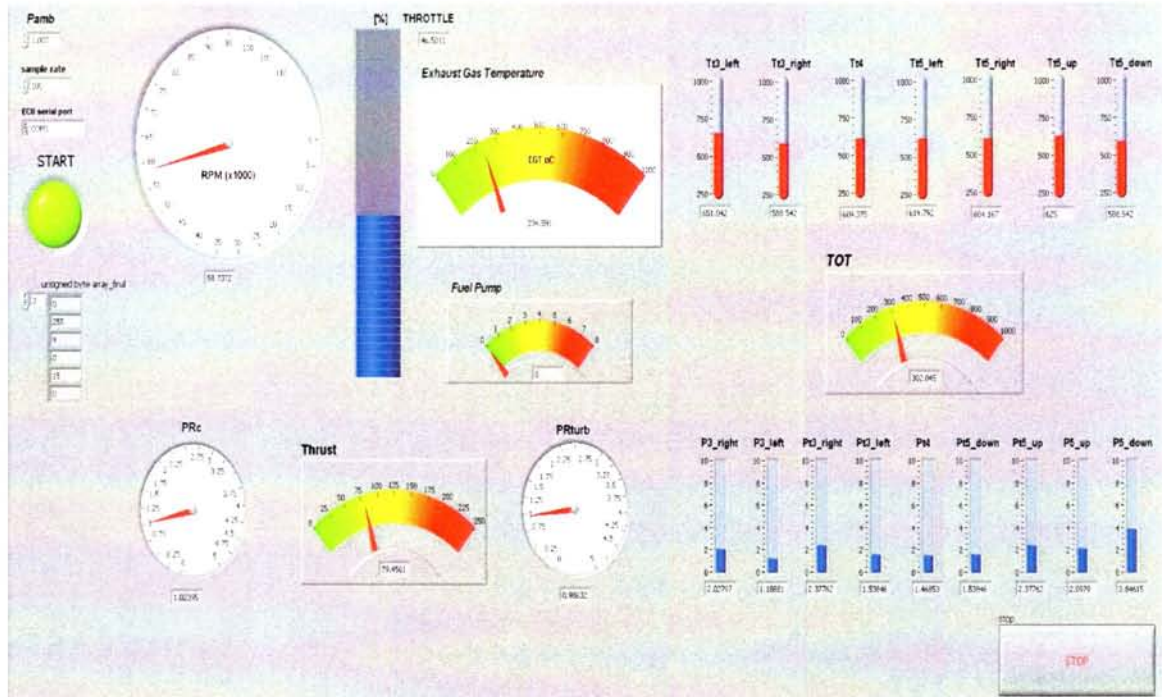
Η ανάπτυξη του συγκεκριμένου προγράμματος είχε σκοπό να επιτύχει την ταυτόχρονη μέτρηση και πρόσκτηση δεδομένων από την κάρτα πρόσκτησης (αναλογικό σήμα) και τον εγκέφαλο (σειριακό σήμα). Ακόμη, έγινε προσπάθεια λήψης των δεδομένων από την ECU με τον ταχύτερο δυνατό τρόπο, δεδομένου ότι το σειριακό σήμα είναι αρκετά πιο αργό από το αναλογικό και το ψηφιακό [19],

ώστε να μπορεί να περιγράφονται πλήρως τα μεταβατικά φαινόμενα που συμβαίνουν και απασχολούν τη συγκεκριμένη μελέτη.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες που δείχνουν το τερματικό του front panel ώστε να ελέγχονται όλοι οι παράγοντες του κινητήρα που προσμετρούνται.



Εικόνα 27. Front-panel του προγράμματος Turbo_Data.vi που παρουσιάζει τα σήματα της κάρτας



Εικόνα 28. Front-panel του προγράμματος Turbo_Data.vi με τα εικονικά όργανα

3 Μαθηματικό μοντέλο

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις οι οποίες εισάγονται στο μοντέλο κατάστασης μόνιμης λειτουργίας (steady-state operation), που έχει ήδη αναπτυχθεί για το μικροστρόβιλο του εργαστηρίου μας, έτσι ώστε να προσομοιώνεται η κατάσταση μεταβατικής λειτουργίας του μικροστροβίλου.

Η μεταβατική συμπεριφορά των κινητήρων έγκειται κυρίως σε τρεις τύπους επιδράσεων [6, 8]:

1. δυναμική της ατράκτου (shaft dynamics)
2. μεταφορά θερμότητας μεταξύ του αερίου και των τμημάτων του κινητήρα που έρχονται σε επαφή
3. δυναμική του ρευστού καθώς ρέει διαμέσου των συνιστωσών (gas dynamics)

Είναι γνωστό ότι οι δύο πρώτοι τύποι των φαινομένων συνδέονται με μεγαλύτερες χρονικές σταθερές και διέπουν μεταβατικά φαινόμενα με αργούς ρυθμούς μεταβολής, ενώ η δυναμική του ρευστού συνδέεται με μικρότερες χρονικές σταθερές και διέπουν φαινόμενα υψηλότερης ταχύτητας απόκρισης [8].

Στο μικροστρόβιλο μας, τα φαινόμενα λόγω της δυναμικής του ρευστού δε συμπεριλήφθησαν στο μοντέλο, διότι δεν προλαβαίνουν να αναπτυχθούν στις διαστάσεις ενός μικροστροβίλου. Η χρονική κλίμακα της μεταβατικής λειτουργίας μειώνεται όσο μειώνεται το μέγεθος της μηχανής, απαιτώντας εξοπλισμό υψηλότερης ταχύτητας πρόσκτησης δεδομένων, όπως και υψηλότερου κόστους [6].

3.1 Συναρτησιακά μοντέλα

Για να κατασκευάσουμε τα συναρτησιακά μοντέλα που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε προκειμένου να προσομοιώσουμε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τον κινητήρα μας απαιτείται να διαιρέσουμε το μικροστρόβιλο σε επιμέρους υποσυστήματα ώστε να εφαρμόζουμε ευκολότερα τους φυσικούς νόμους που διέπουν το κάθε ξεχωριστό υποσύστημα. Τα υποσυστήματα αυτά αποτελούν τις συνιστώσες και κάθε μία αποτελεί ένα ξεχωριστό όγκο ελέγχου, όπου μελετάμε την επίδραση του διανύσματος ελέγχου μέσα στο συγκεκριμένο χώρο και επομένως την συσχέτιση της κατάστασης του εργαζόμενου μέσου στα όρια του χώρου αυτού. Η κατάσταση του εργαζόμενου μέσου εκφράζεται σε κάθε διατομή από το διάνυσμα κατάστασης $\vec{x} = [P_t \ T_t \ \dot{m} \ P \ T \ h \ S \ M \ FAR]$, όπου:

P_t : ολική πίεση

T_t : ολική θερμοκρασία

\dot{m} : μαζική παροχή

P : στατική πίεση
 T : στατική θερμοκρασία
 h : ενθαλπία
 S : εντροπία
 M : αριθμός Mach
 FAR : λόγος καυσίμου αέρα

Τα συναρτησιακά μοντέλα που κατασκευάζουμε διατυπώνονται με τέτοιες εξισώσεις ώστε να απουσιάζουν τα περίπλοκα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και έτσι η ολική εξίσωση που θα περιγράψει κάθε συνιστώσα ξεχωριστά θα έχει τη γενική μορφή:

$$F_i(\bar{z}_{in}, \bar{z}_{out}, \bar{u}_i, \bar{x}_i) = 0 \quad (3.1)$$

όπου:

i : δείκτης της i-οστής συνιστώσας
 in : διατομή εισόδου της συνιστώσας
 out : διατομή εξόδου της συνιστώσας

Η F_i αποτελεί ένα σύνολο συναρτήσεων που περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται το εργαζόμενο μέσο καθώς επίσης δίνουν πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία της κάθε συνιστώσας. Πιο αναλυτικά οι σχέσεις αυτές διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Εξισώσεις ορισμού

$$F_{def,i}(\bar{x}_i, \bar{z}_{out,i}, \bar{z}_{in,i}, \bar{u}_i) = 0 \quad (3.2)$$

- Συσχετίσεις χαρακτηριστικών παραμέτρων

$$F_{map,i}(\bar{x}_i) = 0 \quad (3.3)$$

- Εξισώσεις διατήρησης

$$F_{con,i}(\bar{z}_{out,i}, \bar{z}_{in,i}, \bar{u}_i) = 0 \quad (3.4)$$

- Εξισώσεις συμπιεστότητας

$$F_{com,i}(\bar{z}_{in,i}) = 0 \quad (3.5)$$

$$F_{com,i}(\bar{z}_{out,i}) = 0 \quad (3.6)$$

3.2 Εξισώσεις διατήρησης

Οι τρεις θεμελιώδεις εξισώσεις της ρευστοδυναμικής (εξίσωση διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας) χρησιμοποιούνται, έτσι ώστε να συσχετίζουν ποσότητες ροής στην είσοδο και την έξοδο των επιμέρους συνιστωσών του κινητήρα. Οι εξισώσεις χρησιμοποιούνται σε μία ολοκληρωτική μορφή, δεδομένου ότι αυτή η μορφή [8]:

- a) είναι συνεπής με τα συνήθη μηδενικής-διάστασης μοντέλα λειτουργίας του κινητήρα,
- b) επιτρέπει μια σαφή κατανόηση των φυσικών νόμων και των παραδοχών που χρησιμοποιούνται στην ακόλουθη ανάπτυξη του μοντέλου

Ακόμα στις εξισώσεις αυτές περιλαμβάνονται οι φυσικοί νόμοι της μηχανικής και της θερμοδυναμικής.

- Εξίσωση διατήρησης της μάζας (Εξίσωση συνέχειας)
- Ο δεύτερος νόμος του Newton (Εξίσωση ορμής)
- Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος (Εξίσωση ενέργειας)

3.2.1 Εξίσωση διατήρησης μάζας (συνέχειας)

Η ολοκληρωτική εξίσωση διατήρησης της μάζας για δυναμική μεταβολή σε αέριο για τον όγκο ελέγχου της

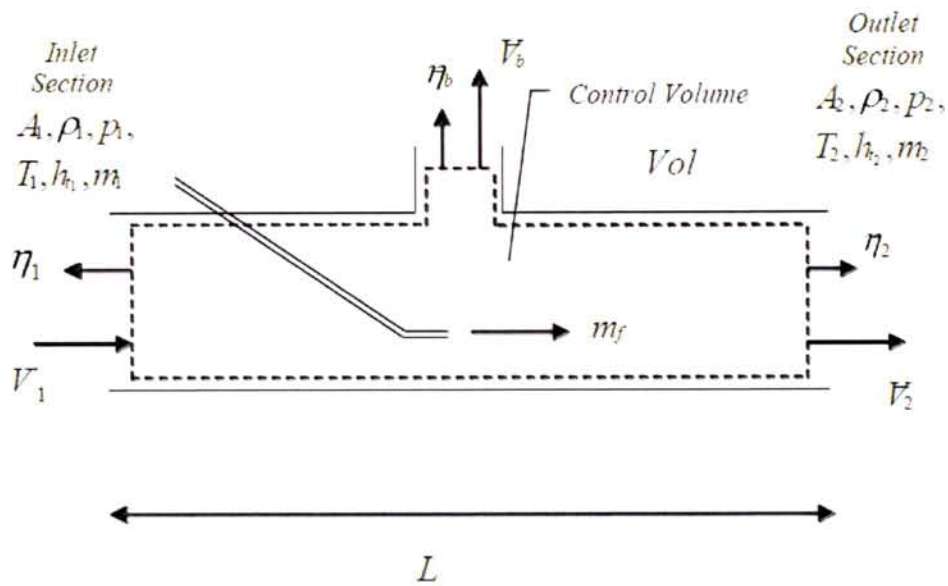
θα προσδιορίζεται από την παρακάτω έκφραση:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \cdot dV + \int_A (\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \dot{m}_f \quad (3.7)$$

όπου:

\vec{n} : το κάθετο διάνυσμα στη στοιχειώδη επιφάνεια dA

\vec{v} : η ταχύτητα του ρευστού



Εικόνα 29. Όγκος ελέγχου και η ονοματολογία που χρησιμοποιείται για τις ολοκληρωτικές εξισώσεις

Υποθέτοντας ένα σταθερό όγκο και μία καταλλήλως ορισμένη μέση πυκνότητα σε όλο τον όγκο έχουμε:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \cdot dV = \frac{d}{dt} \left(\rho \cdot \int_V dV \right) = \frac{d}{dt} (\bar{\rho} \cdot V) = V \cdot \frac{d\bar{\rho}}{dt} \quad (3.8)$$

Η καθαρή ροή μάζας μέσω του όγκου είναι:

$$\begin{aligned} & \int_A (\rho \cdot \bar{v} \cdot \bar{n}) dA \\ &= \int_{A_1} (\rho_1 \cdot \bar{v}_1 \cdot \bar{n}_1) dA_1 + \int_{A_2} (\rho_2 \cdot \bar{v}_2 \cdot \bar{n}_2) dA_2 \\ &+ \int_{A_b} (\rho_b \cdot \bar{v}_b \cdot \bar{n}_b) dA_b = -\rho_1 \cdot v_1 \cdot n_1 + \rho_2 \cdot v_2 \cdot n_2 + \rho_b \cdot v_b \cdot n_b \\ &= -\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_b \end{aligned} \quad (3.9)$$

όπου έχουν υποθεθεί κατάλληλες μέσες πυκνότητες και ταχύτητες στην είσοδο και την έξοδο των επιφανειών.

Έτσι από τις (2) και (3) προκύπτει πως η (1) γίνεται:

$$V \cdot \frac{d\bar{\rho}}{dt} - \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_b = \dot{m}_f \quad (3.10)$$

Έτσι ο ρυθμός ροής μάζας στην έξοδο δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_f - \dot{m}_b - V \cdot \frac{d\bar{\rho}}{dt} \quad (3.11)$$

Από την παραπάνω εξίσωση διαπιστώνουμε πως κατά τη διάρκεια μιας δυναμικής μεταβολής η παροχή που εισέρχεται δεν είναι ίδια με αυτή που εξέρχεται, αλλά εξαρτάται από έναν όρο ο οποίος εξελίσσεται χρονικά. Κατά την επιτάχυνση λοιπόν της ροής ο δυναμικός όρος αφαιρείται από την παροχή εισόδου καθώς παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας κατά τη χρονική εξέλιξη της επιτάχυνσης $(\rho_{i+1}-\rho_i)/dt > 0$. Μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τον όρο αυτό σαν αδράνεια της μάζας και εκφράζει την ιδιότητα της μάζας του αερίου να διατηρήσει την κατάσταση που είχε πριν από τη μεταβολή που υφίσταται.

3.2.2 Εξίσωση διατήρησης ορμής

Η γενική μορφή της εξίσωσης της διατήρησης της ορμής σε ολοκληρωτική μορφή είναι :

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \cdot \bar{v} \cdot dV + \int_A \bar{v} \cdot (\rho \cdot \bar{v} \cdot \bar{n}) dA = \bar{F}_{body} - \int_A \bar{p} \cdot \bar{n} \cdot dA \quad (3.12)$$

με την υπόθεση πως η ορμή του καυσίμου είναι αμελητέα στο θάλαμο όπου εγχύεται.

\bar{F}_{body} είναι η δύναμη που προκύπτει από τα τοιχώματα που περιλαμβάνονται στον όγκο (μηδενική για αγωγούς, προκύπτουσα δύναμη από τα πτερύγια και τα τοιχώματα των συνιστωσών των στροβιλομηχανών), αλλά και από δυνάμεις πεδίων (βαρυτικές-ηλεκτροστατικές-ηλεκτρομαγνητικές).

Όπως και προηγουμένως έχουμε:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \cdot \bar{v} \cdot dV = V \cdot \frac{d}{dt} (\rho \cdot v) \quad (3.13)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση: $\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \Leftrightarrow \rho \cdot v = \frac{\dot{m}}{A}$

παίρνουμε:

$$\frac{d}{dt} (\rho \cdot v) = \frac{1}{A} \cdot \frac{d\dot{m}}{dt} \quad (3.14)$$

Για να εκφράσουμε τον όγκο ελέγχου σε όλο το μήκος L έχουμε: $V = L \cdot A$

Οπότε ο όρος της εξίσωσης (8) γίνεται :

$$V \cdot \frac{d}{dt}(\rho \cdot v) = L \cdot \frac{dm}{dt} \quad (3.15)$$

Οι όροι της ροής πλέον γίνονται :

$$\int_A \rho \cdot \bar{v} \cdot \bar{v} \cdot \bar{\eta} \cdot dA = \rho_2 \cdot v_2 \cdot v_2 \cdot A_2 - \rho_1 \cdot v_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \dot{m}_2 \cdot A_2 - \dot{m}_1 \cdot A_1 \quad (3.16)$$

$$- \int_A \bar{p} \cdot \bar{\eta} \cdot dA = p_1 \cdot A_1 - p_2 \cdot A_2 \quad (3.17)$$

Χρησιμοποιώντας αυτές τις εξισώσεις, η ολοκληρωτική εξίσωση της ορμής (6) γίνεται:

$$L \cdot \frac{dm}{dt} + \dot{m}_2 \cdot v_2 - \dot{m}_1 \cdot v_1 = F_{body} + p_1 \cdot A_1 - p_2 \cdot A_2 \quad (3.18)$$

Ο δυναμικός όρος $V \cdot \frac{d}{dt}(\rho \cdot v)$ της εξίσωσης της ορμής εκφράζει τη μεταβολή που υφίσταται η ορμή του ρευστού κατά τη διάρκεια μιας χρονικά εξελισσόμενης μεταβολής. Το F_{body} εκφράζει το άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται πάνω στο ρευστό.

Για τους υπολογισμούς μας, η παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται για να προκύψει η εξωτερική στατική πίεση :

$$p_2 = \frac{1}{A_2} \cdot \left[\dot{m}_1 \cdot v_1 + p_1 \cdot A_1 - \dot{m}_2 \cdot v_2 + F_{body} - L \cdot \frac{dm}{dt} \right] \quad (3.19)$$

Ο όρος F_{body} υπολογίζεται από δεδομένα που προκύπτουν από τη λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση (steady-state data), με την εφαρμογή αυτής της εξίσωσης για λειτουργία σταθερής κατάστασης:

$$F_{body} = \dot{m}_2 \cdot v_2 + p_2 \cdot A_2 - \dot{m}_1 \cdot v_1 - p_1 \cdot A_1 \quad (3.20)$$

3.2.2.1 Απλοποίηση της εξίσωσης της ορμής

Μία απλοποίηση της εξίσωσης (13) μπορεί να πραγματοποιηθεί αγνοώντας τους όρους που αναφέρονται στη ροή μάζας (mV), υποθέτοντας μικρή κινητική ενέργεια μέσα στον όγκο ελέγχου. Έτσι, θα έχουμε:

$$p_2 = \frac{1}{A_2} \cdot \left[p_1 \cdot A_1 + F_{body} - L \cdot \frac{dm}{dt} \right] \quad (3.21)$$

όπου η F_{body} τώρα υπολογίζεται από τη κατάσταση μόνιμης λειτουργίας:

$$F_{body} = p_2 \cdot A_2 - p_1 \cdot A_1$$

3.2.3 Εξίσωση της ενέργειας

Η ολοκληρωτική εξίσωση διατήρησης της ενέργειας εκφράζεται από την εξίσωση:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \bar{v} \cdot \bar{v} + U \right) \cdot dV + \int_A \dot{h}_t \cdot \rho \cdot \bar{v} \cdot \bar{n} \cdot dA = PW + Q \quad (3.22)$$

Ο όρος PW είναι η ενέργεια της ατράκτου που ανταλλάσσεται με τον όγκο και Q είναι η αντίστοιχη θερμική ενέργεια. Για αγωγούς θεωρούμε πως $PW=Q=0$, για στροβιλομηχανές $Q=0$, ενώ για το θάλαμο καύσης $PW=0$.

Μία απλοποίηση που θεωρείται συχνά στα μοντέλα μηχανών είναι να υποθέτουμε πως η κινητική ενέργεια στον όγκο ελέγχου είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με την εσωτερική ενέργεια U . Έτσι ο πρώτος όρος στην παραπάνω σχέση γίνεται :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \bar{v} \cdot \bar{v} + U \right) \cdot dV &= \frac{d}{dt} \int_V \rho \cdot U \cdot dV = \frac{d}{dt} (\rho \cdot U) \cdot \int_V dV \\ &= V \cdot \frac{d}{dt} (\rho \cdot U) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Για ιδανικό αέριο:

$$U = c_v \cdot T \quad (3.24)$$

Ενώ

$$c_v = \frac{R}{\gamma - 1} \quad (3.25)$$

Χρησιμοποιώντας έτσι αυτές τις δύο εξισώσεις, παίρνουμε:

$$V \cdot \frac{d}{dt}(\rho \cdot U) = V \cdot \frac{d}{dt}(\rho \cdot c_v \cdot T) = V \cdot \frac{d}{dt}\left(\rho \cdot \frac{R}{\gamma - 1} \cdot T\right) = V \cdot \frac{d}{dt}\left(\frac{\rho \cdot R \cdot T}{\gamma - 1}\right) \quad (3.26)$$

και από την καταστατική εξίσωση:

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (3.27)$$

τελικά παίρνουμε:

$$\frac{d}{dt} \int_V \left(\frac{1}{2} \cdot \bar{v} \cdot \bar{v} + U\right) \cdot dV = V \cdot \frac{d}{dt}\left(\frac{p}{\gamma - 1}\right) \quad (3.28)$$

Οι όροι της ροής είναι της εξίσωσης:

$$\int_A h_t \cdot \rho \cdot \bar{v} \cdot \bar{\eta} \cdot dA = h_{t2} \cdot \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 + h_{tb} \cdot \rho_b \cdot v_b \cdot A_b - h_{t1} \cdot \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 \quad (3.29)$$

$$= \dot{m}_2 \cdot h_{t2} + \dot{m}_b \cdot h_{tb} - \dot{m}_1 \cdot h_{t1}$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (21) και (22), η εξίσωση (15) γίνεται:

$$V \cdot \frac{d}{dt}\left(\frac{p}{\gamma - 1}\right) + \dot{m}_2 \cdot h_{t2} + \dot{m}_b \cdot h_{tb} - \dot{m}_1 \cdot h_{t1} = PW + Q \quad (3.30)$$

Οπότε η ενθαλπία εξόδου μπορεί να προκύψει από τη σχέση:

$$h_{t2} = \frac{1}{\dot{m}_2} \cdot \left[\dot{m}_1 \cdot h_{t1} - \dot{m}_b \cdot h_{tb} + PW + Q - V \cdot \frac{d}{dt}\left(\frac{p}{\gamma - 1}\right) \right] \quad (3.31)$$

Οι όροι PW και Q υπολογίζονται από την λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση (steady-state), μέσω των σχέσεων:

$$PW = \dot{m}_2 \cdot h_{t2} - \dot{m}_1 \cdot h_{t1} + \dot{m}_b \cdot h_{tb} \quad (3.32)$$

$$Q = \dot{m}_2 \cdot h_{t2} - \dot{m}_1 \cdot h_{t1} \quad (3.33)$$

3.3 Απώλειες θερμότητας κατά τη μεταβατική λειτουργία

Οι απώλειες θερμότητας εκφράζουν το ποσό της ενέργειας που συναλλάσσεται μεταξύ του εργαζόμενου μέσου και του περιβάλλοντος, λόγω της μεταφοράς θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων της συνιστώσας μέσα από τη οποία διέρχεται το ρευστό.

Στην περίπτωση της μεταβατικής λειτουργίας του μικροστροβίλου μας ενδιαφέρει η δυναμική απώλεια θερμότητας από τα τοιχώματα των επί μέρους συνιστωσών. Έτσι στη δυναμική μοντελοποίηση, η μέθοδος για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του αερίου και του μετάλλου ορίζεται ως ακολούθως [20]:

$$(Ροή θερμότητας από το αέριο στο μέταλλο) = h \cdot A_s \cdot (T_g - T_m) \quad (3.34)$$

όπου:

h : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

T_g : θερμοκρασία αερίου

T_m : θερμοκρασία μετάλλου

Η θερμότητα που μεταφέρεται από το αέριο προκύπτει από τη σχέση:

$$(Ροή θερμότητας από το αέριο) = W_g \cdot \Delta H \quad (3.35)$$

όπου:

W_g : η ροή μάζας του αερίου

ΔH : η μεταβολή της ενθαλπίας λόγω μεταφοράς θερμότητας

Η θερμότητα που μεταφέρεται προς το μέταλλο δίνεται από τη σχέση του Fourier [21] και είναι:

$$(Ροή θερμότητας προς το μέταλλο) = c_p \cdot M \cdot \frac{dT_m}{dt} \quad (3.36)$$

όπου

c_p : ειδική θερμοχωρητικότητα μετάλλου

M : μάζα μετάλλου

t : χρόνος

Εξισώνοντας τη ροή θερμότητας από το αέριο και τη ροή θερμότητας προς το μέταλλο, προκύπτει η εξίσωση:

$$c_p \cdot M \cdot \frac{dT_m}{dt} = h \cdot A_s \cdot (T_g - T_m) \quad (3.37)$$

η οποία όταν ολοκληρωθεί θα δώσει:

$$T_{m,t} - T_g = (T_{m,t-\Delta t} - T_g) \cdot e^{-x} \quad (3.38)$$

όπου $x = (h \cdot A_s / c_p \cdot M) \cdot \Delta t$

Ο συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h = 0.0201 \cdot C \cdot Re \cdot 0.8 \cdot K/L \quad (3.39)$$

όπου

C : σταθερά

Re : αριθμός Reynolds

K : συντελεστής αγωγής

L : χαρακτηριστικό μήκος

Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως:

$$Re = \frac{W_g \cdot L}{V_{is} \cdot A} \quad (3.40)$$

όπου:

W_g : η ροή μάζας του αερίου

L : χαρακτηριστικό μήκος

V_{is} : ιξώδες αερίου

A : επιφάνεια διατομής συνιστώσας που διαπερνά το αέριο

Οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας εφαρμόζονται σε κάθε συνιστώσα της μηχανής ξεχωριστά και επηρεάζουν τα θερμοδυναμικά μεγέθη σε ένα συμπιεστή ή στρόβιλο, αλλάζοντας το λόγο πίεσης PQ για ένα δεδομένο έργο σύμφωνα με τον τύπο:

$$PQ = TQ^y$$

όπου,

$$y = Z / (1 - CF)$$

CF=(συντελεστής ψύξης)= (θερμότητα που μεταφέρεται/παραγόμενο έργο)

$$Z = \log(PQ) / \log(TQ)$$

TQ : λόγος θερμοκρασίας

3.3.1 Διαφορική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας διαμέσου κυλινδρικού τοιχώματος

Οι συνιστώσες του μικροστροβίλου που μελετούμε έχουν κυλινδρικό σχήμα και έτσι οι εξισώσεις του Fourier που περιγράφουν τη μεταφορά θερμότητας από κυλινδρικό αγωγό με αγωγή είναι [21]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.41)$$

$$k = \lambda / (\rho \cdot c)$$

όπου,

T: η θερμοκρασία του τοιχώματος της συνιστώσας

k: συντελεστής αγωγιμότητας υλικού τοιχώματος

λ : θερμική αγωγιμότητα υλικού τοιχώματος

c: ειδική θερμοχωρητικότητα υλικού

ρ : πυκνότητα υλικού

Η εξίσωση αυτή περιγράφει τη θερμότητα που μεταφέρεται μέσω των τοιχωμάτων του κινητήρα προς το περιβάλλον που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Στη δική μας περίπτωση δε συμπεριλαμβάνουμε αυτή τη μεταφορά θερμότητας διαμέσου των κυλινδρικών συνιστωσών, καθώς έχουμε πολύ λεπτό τοίχωμα ώστε να παρουσιάζει καθυστέρηση η διάχυση της θερμότητας.

3.4 Επίλυση συστήματος εξισώσεων

Οι εξισώσεις που μοντελοποιούν τη δυναμική λειτουργία των επιμέρους συνιστωσών του κινητήρα, επιλύονται ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που είναι συμβατές από το μοντέλο μόνιμης κατάστασης, καθώς και τις εξισώσεις που προκύπτουν από το κομμάτι της απορρόφησης θερμότητας. Η προσθήκη των εξισώσεων που επιδρούν στην υπάρχουσα λύση λόγω της μεταβατικής λειτουργίας περιγράφεται παρακάτω [8].

Για κάθε συνιστώσα γράφονται τρεις διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_f - \dot{m}_b - Vol \cdot \frac{d\rho}{dt} \quad (3.42)$$

$$p_2 = \frac{1}{A_2} \cdot \left[\dot{m}_1 \cdot V_1 + p_1 \cdot A_1 - \dot{m}_2 \cdot V_2 + F_{body} - L \cdot \frac{dm}{dt} \right] \quad (3.43)$$

$$h_{t_2} = \frac{1}{\dot{m}_2} \cdot \left[\dot{m}_1 \cdot h_{t_1} - \dot{m}_b \cdot h_{t_b} + PW + Q - Vol \cdot \frac{d}{dt} (\rho \cdot h_1 - p) \right] \quad (3.44)$$

Αυτές οι εξισώσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων στην έξοδο της κάθε συνιστώσας, όταν αυτές είναι γνωστές στην είσοδο. Ο υπολογισμός των ιδιοτήτων εξόδου με τον τρόπο αυτό απαιτεί τη γνώση των παραγώγων των αντίστοιχων ποσοτήτων. Τα παράγωγα υπολογίζονται χρησιμοποιώντας ένα ρητό σχήμα Euler (implicit Euler). Για οποιαδήποτε ποσότητα q , η παράγωγος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{q_{i+1} - q_i}{\Delta t} \quad (3.45)$$

Όπου το i δείχνει την τιμή της ποσότητας q στο προηγούμενο χρονικό βήμα, και το $i+1$ την τιμή της ποσότητας κατά το τρέχον χρονικό βήμα.

Επίσης πρέπει εδώ να σχολιαστεί πως η λύση που αφορά στη δυναμική της ατράκτου (shaft dynamics) και στις επιδράσεις της μετάδοσης θερμότητας είναι πλήρως ρητή.

Η λύση του συστήματος εξισώσεων για κάθε μία συνιστώσα προχωρά εφαρμόζοντας μία Newton-Raphson διαδικασία ως εξής:

Οι τρεις άγνωστοι που πρέπει να βρεθούν είναι m_2 , p_{t2} , h_{t2} . Οι τρεις αυτοί άγνωστοι παράγοντες πρέπει να ικανοποιούν τις εξισώσεις (3.42), (3.43), (3.44), που ξαναγράφονται στην ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 0 \\ Y=0 &\Leftrightarrow Y_2=0 \\ Y_3 &= 0 \end{aligned}$$

όπου

$$Y_1 = \frac{\dot{m}_2 - (\dot{m}_1 + \dot{m}_f - \dot{m}_b - Vol \cdot \frac{d\rho}{dt})}{\dot{m}_2} \quad (3.46)$$

$$Y_2 = \frac{p_2 \cdot A_2 - \left(\dot{m}_1 \cdot V_1 + p_1 \cdot A_1 - \dot{m}_2 \cdot V_2 + F_{body} - L \cdot \frac{d\dot{m}}{dt} \right)}{p_2 \cdot A_2} \quad (3.47)$$

$$Y_3 = \frac{\dot{m}_2 \cdot h_{t_2} - \left(\dot{m}_1 \cdot h_{t_1} - \dot{m}_b \cdot h_{t_b} + PW + Q - Vol \cdot \frac{d}{dt} (\rho \cdot h_1 - p) \right)}{\dot{m}_2 \cdot h_{t_2}} \quad (3.48)$$

Η συγκεκριμένη μορφοποίηση γίνεται ώστε να έχουμε τις τρεις εξισώσεις στην ίδια κλίμακα, για να μας δίνουν όρους της ίδιας τάξης μεγέθους.

Οι άγνωστοι μορφοποιούνται επίσης για τον ίδιο λόγο:

$$x_1 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_2^{initial}} \quad (3.49)$$

$$x_2 = \frac{p_{t_2}}{p_{t_2}^{initial}} \quad (3.50)$$

$$x_3 = \frac{h_{t_2}}{h_{t_2}^{initial}} \quad (3.51)$$

Για να ληφθούν οι παραπάνω άγνωστοι χρησιμοποιείται μια επαναληπτική διαδικασία. Η νέα τιμή για κάθε επανάληψη αποκτάται από την τιμή στην προηγούμενη επανάληψη μέσω της σχέσης:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k - \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}^k) \cdot \mathbf{Y}(\mathbf{x}^k) \quad (3.52)$$

Η \mathbf{J}^{-1} είναι η αντεστραμμένη Ιακωβιανή του συστήματος εξισώσεων. Η Ιακωβιανή \mathbf{J} λαμβάνεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\left(\frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right)^k = \frac{Y_i(\mathbf{x}^k + \delta x_j) - Y_i(\mathbf{x}^k)}{\delta x_j} \quad (3.53)$$

Η διαδικασία συγκλίνει όταν $\mathbf{Y}=0$, βάζοντας ένα συγκεκριμένο σφάλμα ως όριο ανοχής.

Κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων της εν λόγω εσωτερικής τεχνικής Newton-Raphson, οι παράγωγοι που υπολογίζονται από την εξίσωση (3.45) αλλάζουν σε κάθε βήμα της επανάληψης. Αυτό είναι απαραίτητο, επειδή οι μέσες ποσότητες όγκου είναι συναρτήσεις τόσο των συνθηκών εισόδου όσο και εξόδου της συνιστώσας.

Οι πραγματικές τιμές των αγνώστων προκύπτουν στη συνέχεια από τις σχέσεις:

$$\dot{m}_2 = x_1 \cdot \dot{m}_2^{initial} \quad (3.54)$$

$$p_{t_2} = x_2 \cdot p_{t_2}^{initial} \quad (3.55)$$

$$h_{t_2} = x_3 \cdot h_{t_2}^{initial} \quad (3.56)$$

3.5 Δυναμική της ατράκτου (shaft dynamics)

Τα μοντέλα που μοντελοποιούν τη δυναμική της ατράκτου, εκφράζουν την έλλειψη διατήρησης της ενέργειας στην άτρακτο, κάτι το οποίο προκαλεί τη μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας. Αυτά τα μοντέλα για να προσομοιώνουν με

ακρίβεια τον κινητήρα, πρέπει να ενσωματώσουν επίσης την μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου και της ροής καυσίμου.

Κάθε συνιστώσα του στροβιλοκινητήρα πρέπει να πληροί την εξίσωση της συνέχειας, που ορίζει εξαρτήσεις μεταξύ της ροής μάζας του αέρα διαμέσου του συμπιεστή, του θαλάμου καύσης και του στροβίλου και καμία παραμόρφωση της ατράκτου $N_C = N_T = N$. Μια άλλη συνθήκη για τη μόνιμη λειτουργία του κινητήρα που πρέπει να πληρείται, είναι η μηχανή να μην αλλάζει τον αριθμό στροφών της με το χρόνο, δηλαδή $dN/dt = 0$. Αυτή η συνθήκη θα ικανοποιείται όταν το έργο του στροβίλου θα είναι ίσο με το έργο του συμπιεστή, δηλαδή $W_C = \eta_m \cdot W_T$ [22, 23].

Μη σταθερή λειτουργία του κινητήρα είναι ένα καθεστώς λειτουργίας, κατά το οποίο σε κάθε συνιστώσα του κινητήρα συμβαίνουν χρονομεταβαλλόμενες θερμοδυναμικές διεργασίες. Τέτοια μη-σταθερή λειτουργία συμβαίνει όταν το έργο του στροβίλου και του συμπιεστή δεν είναι ίσα, δηλαδή $W_C \neq W_T$, αλλά υπάρχει μεταξύ τους μία διαφορά.

Η γωνιακή επιτάχυνση της ατράκτου εξαρτάται από αυτή τη διαφορά και δίνεται από τη σχέση (3.57). Αν ο στροβίλος παράγει περισσότερη ή λιγότερη ισχύ από αυτή που καταναλώνεται, ο κινητήρας θα επιταχύνει ή θα επιβραδύνει αντίστοιχα [22, 24].

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{W_C + W_T + W_i}{\Omega \cdot I_{\text{Rotating Components}}} \quad (3.57)$$

Η εξίσωση (3.57) για $\omega = \frac{\pi \cdot N}{30}$ και $P = M \cdot \omega$ μετατρέπεται στην παρακάτω εξίσωση, που είναι η βασική σχέση που διέπει μια μεταβατική διεργασία σε μια μηχανή:

$$P_T \cdot \eta_m - P_C = I \cdot \frac{\pi^2}{900} \cdot N \cdot \frac{dN}{dt} \quad (3.58)$$

3.6 Δυναμικά φαινόμενα του ρευστού κατά τη διέλευση του από τις συνιστώσες του κινητήρα (gas dynamics)

Τα μεταβατικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη διέλευση του κινούμενου αερίου διαμέσου των συνιστωσών, έχουν να κάνουν με τις επιπτώσεις που έχουν πάνω στο ρευστό οι σημαντικές αλλαγές των ταχυτήτων και των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται[6].

Κατά τη μόνιμη λειτουργία του κινητήρα η ροή μάζας που εισέρχεται σε μία συνιστώσα είναι ίση με αυτή που εξέρχεται, αλλά σε μεταβατικές συνθήκες η πυκνότητα σε κάθε συνιστώσα αλλάζει και έτσι η μάζα, είτε συσσωρεύεται είτε 'απλώνεται' στο χώρο, με αποτέλεσμα να έχουμε ένα διαφορετικό ρυθμός ροής εισόδου και εξόδου.

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας στον όγκο ελέγχου μιας συνιστώσας δίνεται από τη σχέση (3.59) και εφαρμόζοντας την παραδοχή ιδανικού αερίου προκύπτει η εξίσωση (3.60).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}}{V} \quad (3.59)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{(\dot{m}_{ss} - \dot{m}) R \cdot T_{ss}}{V} \quad (3.60)$$

Όμως, επίδραση στο ρευστό έχει και η εισαγωγή της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας, η οποία εφαρμόζεται. Η εξίσωση ενέργειας για τη μεταβατική λειτουργία είναι η (3.61), η οποία εφαρμόζοντας την παραδοχή ιδανικού αερίου γίνεται η (3.62).

$$\frac{\partial (\rho h - p)}{\partial t} = \frac{(\dot{m}h)_{in} - (\dot{m}h)_{out}}{V} \quad (3.61)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{RT_{ss} (\gamma_{ss} \dot{m}_{ss} T_{ss} + T \dot{m} - \gamma \dot{m} T - T \dot{m}_{ss})}{p_{ss} V} \quad (3.62)$$

Το δικό μας μοντέλο, το οποίο προσομοιώνει τη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα, δεν περιλαμβάνει τα δυναμικά φαινόμενα που υφίσταται το εργαζόμενο ρευστό, καθώς σε ένα μικροστρόβιλο των διαστάσεων του AMT Olympus, τέτοια φαινόμενα δεν προλαβαίνουν να αναπτυχθούν.

4 Υπολογιστικό μοντέλο

Ο κινητήρας χωρίζεται ως ένα σύνολο διακεκριμένων συνιστωσών (π.χ. στρόβιλος, συμπιεστής, κ.α.) που επιτελούν συγκεκριμένες θερμοδυναμικές διεργασίες (π.χ. αποτόνωση, συμπίεση). Οι διεργασίες αυτές μοντελοποιούνται υπολογιστικά με τις μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν την αντίστοιχη θερμοδυναμική μεταβολή. Οι διακεκριμένες συνιστώσες, στις οποίες ισχύει πως η έξοδος της μίας αποτελεί είσοδο της άλλης, συνδέονται μεταξύ τους με σχέσεις ισολογισμού μάζας και έργου. Η συνολική λειτουργική κατάστασή της μηχανής περιγράφεται πλέον από ένα –μη γραμμικό– σύστημα εξισώσεων. Η λύση ενός τέτοιου συστήματος επιταχύνεται από υπολογιστικά μοντέλα.

Η λύση αυτού του συστήματος μας δίνει τη γνώση των θερμοδυναμικών παραμέτρων του αεριοστροβίλου, σε κάθε σημείο του, ώστε να είναι δυνατή η διάγνωση λειτουργικών βλαβών.

4.1 Απαιτήσεις μοντέλου

Για να είναι εύχρηστο το μοντέλο και κατανοητό από τον χρήστη πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω απαιτήσεις [12]:

- a) Το μοντέλο πρέπει να βοηθά στην κατανόηση των διεργασιών που επιτελούνται στο μικροστρόβιλο. Έτσι θα πρέπει να εκφράζονται από το μοντέλο χαρακτηριστικά μεγέθη που περιγράφουν τη λειτουργία του πραγματικού συστήματος. Για παράδειγμα, ο λόγος πίεσης στο συμπιεστή και ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου είναι χαρακτηριστικά μεγέθη για την περιγραφή του μικροστροβίλου.
- b) Η δομή του μοντέλου πρέπει να πρέπει να ακολουθεί τμηματικά τη φυσική διάκριση του είδους των διεργασιών που επιτελούνται στα διάφορα υποσυστήματα της εγκατάστασης. Στο μικροστρόβιλο η τμηματική διάκριση που ακολουθείται είναι συμπίεση, καύση, αποτόνωση.
- c) Οι υπολογιστικές διαδικασίες πρέπει να είναι απλές αλλά όσο το δυνατό περισσότερο ακριβείς. Επίσης οι υπολογιστικές διαδικασίες θα πρέπει να είναι γενικές ώστε να είναι δυνατή η χρησιμοποίηση στη μοντελοποίηση άλλου συστήματος ανάλογης μορφής.

4.2 Γενικές Αρχές-Ορισμοί

Η μοντελοποίηση του μικροστροβίλου του προβλήματος μας γίνεται με τη θεώρηση του ως συστήματος. Σύστημα εννοούμε ένα συνδυασμό στοιχείων που περικλείονται μέσα σε ένα πραγματικό ή φυσικό σύνορο με την αλληλεπίδραση των οποίων παράγεται λειτουργία. Με την έννοια αυτή ο αεριοστρόβιλος αποτελείται από ένα πλήθος από επιμέρους υποσυστήματα, τα οποία αποκαλούμε συνιστώσες. Κάθε συνιστώσα χαρακτηρίζεται από την είσοδο και την έξοδό της, που αποτελεί και το τελικό αποτέλεσμα των διεργασιών μέσα στη συνιστώσα αυτή [25]. Η μοντελοποίηση του μικροστροβίλου γίνεται με βάση την ανάλυση διέλευσης αερίου, δηλαδή μελετάται η μεταβολή που υφίσταται το εργαζόμενο μέσο (αέριο) καθώς αυτό διέρχεται διαμέσου των συνιστωσών.

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μοντελοποίηση της κάθε συνιστώσας διακρίνουμε δύο είδη μοντελοποίησης, τη συναρτησιακή μοντελοποίηση ή τη φυσική μοντελοποίηση [12].

Συναρτησιακή μοντελοποίηση

Η συναρτησιακή μοντελοποίηση χρησιμοποιεί μια συνάρτησης μεταφοράς, η οποία έχει συγκροτηθεί από πειραματικά δεδομένα και προσδιορίζει μόνο την έξοδο του συστήματος.

Φυσική μοντελοποίηση

Φυσική χαρακτηρίζουμε τη μοντελοποίηση, κατά την οποία ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών του συστήματος γίνεται με αναλυτική επίλυση όλων εκείνων των εξισώσεων, οι οποίες διέπουν τις διεργασίες που πραγματοποιούνται μέσα στο σύστημα.

Για αεριοστρόβιλο, η γενική μαθηματική διατύπωση του εσωτερικού μοντέλου περιγράφεται από τα παρακάτω διανύσματα.

Z: διάνυσμα λειτουργικής κατάστασης που περιέχει χαρακτηριστικές θερμοδυναμικές παραμέτρους της λειτουργικής κατάστασης για κάθε διατομή εισόδου-εξόδου από τις συνιστώσες (στατικές πιέσεις, θερμοκρασίες, Mach, κ.ά.)

g: διάνυσμα γεωμετρικών στοιχείων (διατομές, διάρκεια κλπ που είναι απαραίτητα για τη διατύπωση των μαθηματικών σχέσεων που περιγράφουν τις θερμοδυναμικές διεργασίες)

u: διάνυσμα ελέγχου, δηλαδή διάνυσμα μετρούμενων παραμέτρων και συνθηκών λειτουργίας

Η σύνδεση όλων αυτών με μαθηματικές σχέσεις, φυσικούς νόμους, σε ένα σύστημα εξισώσεων, εκφράζεται ως εξής:

$$\underline{F}(\underline{u}, \underline{g}, \underline{Z}) = \underline{0}$$

Οι μαθηματικές σχέσεις που αναφέρθηκαν μπορούν να χωριστούν σε εξισώσεις διατήρησης, ορισμού, συμπευστότητας, συμβιβαστικότητας και σε σχέσεις που δίνονται υπό τη μορφή χαρτών για κάθε συνιστώσα.

4.2.1 Υπολογιστικές δυσκολίες εσωτερικής μοντελοποίησης

Για την πραγματοποίηση της μοντελοποίησης εμφανίζονται οι παρακάτω υπολογιστικές δυσκολίες:

1. Για την περίπτωση του αεροστροβίλου η επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν τη ροή σε τρισδιάστατη μορφή δεν έχει επιτευχθεί πλήρως, παρά την τεράστια εξέλιξη στα υπολογιστικά συστήματα.
2. Η διδιάστατη επίλυση των εξισώσεων σε συνδυασμό με ημιεμπειρικές σχέσεις απαιτούν σημαντικό πλήθος δεδομένων ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος για τα οποία συνήθως δεν έχουμε διαθέσιμες πληροφορίες, με αποτέλεσμα αυτή η μεθοδολογία να είναι αρκετά δύσχρηστη.
3. Το μονοδιάστατο μοντέλο ροής κατά το οποίο θεωρούμε ότι τα μεγέθη υπολογίζονται σε μια γραμμή ροής αντιπροσωπευτική της μέσης κατάστασης που επικρατεί σε κάθε διατομή απαιτεί επιπλέον εμπειρικές σχέσεις, που εμπεριέχουν αρκετά στοιχεία για τη γεωμετρία των πτερυγώσεων.

Από τις παραπάνω παρατηρήσεις γίνεται φανερός ο λόγος για τον οποίο η μοντελοποίηση περιορίζεται στη μονοδιάστατη θεώρηση και στη διακεκριμενοποίηση των εγκαταστάσεων (σε επίπεδο διαχωρισμού του είδους των διεργασιών π.χ. συμπίεση, καύση, αποτόνωση κλπ.), ώστε να περιορίζεται ο όγκος των δεδομένων που αφορούν τα γεωμετρικά στοιχεία.

4.2.2 Μικτά μοντέλα

Μια λύση, η οποία φέρνει σε σύγκλιση τη συναρτησιακή και τη φυσική μοντελοποίηση και συνδυάζει έτσι τα εσωτερικά μοντέλα με τα μοντέλα συναρτησιακών σχέσεων, είναι τα μικτά μοντέλα. Στα μοντέλα αυτά αν και διατηρείται η εσωτερική δομή, οι ημιεμπειρικές σχέσεις που περιέχουν λεπτομερή

γεωμετρικά μεγέθη αντικαθίστανται από τις συναρτησιακές συσχετίσεις λειτουργικών παραμέτρων, που αποδίδονται με το πεδίο χαρακτηριστικών των συνιστωσών του. Το πεδίο χαρακτηριστικών επί μέρους συνιστωσών είναι δυνατό να προσδιορισθεί είτε πειραματικά σε αντίστοιχες διατάξεις, είτε αναλυτικά με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και κατάλληλου λογισμικού.

Τα μικτά μοντέλα είναι αρκετά εύχρηστα, καθώς αποτελούν επί της ουσίας φυσικό τύπο σύζευξης μοντέλων λειτουργικών συνιστωσών που έχουν προκύψει εν μέρει από συναρτησιακές σχέσεις.

4.3 Διακεκριμενοποίηση συνιστωσών

Ο αεριοστρόβιλος θεωρείται μια συλλογή από διαφορετικές συνιστώσες. Κάθε συνιστώσα χαρακτηρίζεται από το είδος της διεργασίας που επιτελεί και αντιπροσωπεύει το μέρος της μηχανής μεταξύ δύο αριθμημένων θέσεων, έτσι που η έξοδος μιας συνιστώσας να συμπίπτει με την είσοδο της επόμενης.

Για να είναι δυνατή η προσομοίωση του κινητήρα Olympus, απαιτείται η διακεκριμενοποίηση του κινητήρα σε επιμέρους συνιστώσες, έτσι ώστε σε κάθε μία να επιτελείται μια συγκεκριμένη διεργασία. Σύμφωνα με την σειρά τοποθέτησής τους στη μηχανής, οι συνιστώσες είναι:

1. αγωγός εισόδου
2. συμπιεστής
3. διαχύτης
4. καυστήρας
5. στρόβιλος
6. ακροφύσιο

Οι συνιστώσες αυτές προσομοιώνονται από αντίστοιχες υπορουτίνες στο πρόγραμμα, οι οποίες καλούνται διαδοχικά για την επίτευξη της πλήρους προσομοίωσης. Κάθε λειτουργική συνιστώσα του κινητήρα θεωρείται σαν ένας όγκος ελέγχου, στον οποίο οι διεργασίες που επιτελούνται εκφράζονται με την συσχέτιση της κατάστασης του εργαζόμενου μέσου στα όρια του όγκου αυτού. Για μονοδιάστατη θεώρηση, που χρησιμοποιείται στον κινητήρα Olympus HP που πραγματευόμαστε, τα όρια αυτά είναι αντιπροσωπευτικά σημεία στις διατομές εισόδου και εξόδου κάθε συνιστώσας.

4.4 Σύζευξη συνιστωσών

Οι συνιστώσες από τις οποίες αποτελείται το μοντέλο του μικροστροβίλου Olympus HP της AMT επικοινωνούν μεταξύ τους με ορισμένες χαρακτηριστικές εξισώσεις, τις οποίες αποκαλούμε εξισώσεις σύζευξης. Οι συνιστώσες που αποτελούν τον μικροστρόβιλο διαδέχονται η μία την άλλη, οπότε η έξοδος της μίας αποτελεί ταυτόχρονα είσοδο της επόμενης. Η κατάσταση του εργαζόμενου μέσου κατά τη διέλευση του από τις συνιστώσες, περιγράφεται από ένα διάνυσμα κατάστασης $\vec{E} = [P_t \ T_t \ \dot{m} \ P_s \ T_s \ h \ S \ M \ FAR]$. Έτσι κατά τη σύζευξη των συνιστωσών του αεροστροβίλου απαιτείται η συμβιβαστικότητα της κατάστασης του εργαζόμενου μέσου στα όρια των συνιστωσών. Η απαίτηση αυτή εκφράζεται, από τη συνθήκη θερμοδυναμικής συμβιβαστικότητας, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\vec{E}_{out_i} = \vec{E}_{in_{i+1}}$$

Επιπρόσθετα όμως, κατά τη σύζευξη των συνιστωσών, θα πρέπει να πληρείται το ισοζύγιο της μηχανικής ενέργειας σε κάθε άξονα. Αυτό εκφράζεται με την αρχή διατήρησης της μηχανικής ισχύος σε κάθε ανεξάρτητο άξονα, που σε μόνιμη κατάσταση γράφεται ως:

$$\sum P_{comp} + P_{loss} = \sum P_{turb}$$

4.5 Δεδομένα εισόδου

Κάθε συνιστώσα του αεροστροβίλου περιγράφεται από μια ομάδα εξισώσεων, οι οποίες διέπουν την λειτουργία της και προσδιορίζουν τη συμπεριφορά του κινούμενου ρευστού. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν συνάρτηση των δεδομένων που εισάγονται στο σύστημα, δηλαδή στο υπολογιστικό πρόγραμμα επίλυσης. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν τις χαρακτηριστικές παραμέτρους κάθε συνιστώσας.

Συγκεκριμένα στο πρόγραμμα εισάγονται:

- Ο συντελεστής των απωλειών πίεσης στον αγωγό εισόδου
- Ο βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης
- Ο λόγος πίεσης στο θάλαμο καύσης
- Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του ακροφυσίου
- Η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου

Οι παράμετροι που αναφέρονται παραπάνω δεν μεταβάλλονται σε κανένα σημείο λειτουργίας του κινητήρα, αλλά παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του, και σχηματίζουν τις σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία των

αντίστοιχων συνιστωσών.

Πέρα από τις χαρακτηριστικές παραμέτρους, εισάγονται και συσχετίσεις χαρακτηριστικών παραμέτρων για τις συνιστώσες του συμπιεστή και του στροβίλου, που αποτελούν τους χάρτες. Η εισαγωγή τους γίνεται με τη μορφή διακριτών σημείων, σε ξεχωριστά αρχεία εισόδου, τα οποία δίνονται από το χρήστη.

Τέλος, είναι απαραίτητο ως δεδομένο εισόδου για το πρόγραμμα να δοθούν οι συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν όπως η πίεση, η θερμοκρασία, η υγρασία, καθώς και η ταχύτητα της πτήσης.

4.5.1 Περιγραφή διαδικασίας επίλυσης

Σε προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση της κάθε συνιστώσας. Αν και ορισμένες από τις σχέσεις αυτές είναι γραμμικές (π.χ. εξισώσεις διατήρησης) υπάρχουν και σχέσεις που είναι μη-γραμμικές. Επιπλέον το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει είναι πεπλεγμένης μορφής με αποτέλεσμα να μπορεί να επιλυθεί μόνο με επαναληπτικό τρόπο.

Το σύστημα αποτελείται από 5 ομάδες εξισώσεων για κάθε συνιστώσα. Είναι οι σχέσεις 3.2 έως 3.6. Αυτές συγκροτούν ένα σύστημα N εξισώσεων με $N+1$ αγνώστους. Επομένως η επίλυση του προϋποθέτει τον καθορισμό μιας ανεξάρτητης μεταβλητής (control variable) για τον καθορισμό των υπολοίπων N αγνώστων. Με την καθορισμό αυτής της ποσότητας, το μαθηματικό μοντέλο, μπορεί να υπολογίσει όλα τα μεγέθη που περιγράφουν τον θερμοδυναμικό κύκλο λειτουργίας του κινητήρα. Η μορφή των συναρτησιακών μοντέλων των συνιστωσών προσφέρει την αναλυτική περιγραφή μεγεθών κατάντι της συνιστώσας συναρτήσει:

- των μεγεθών ανάντι της συνιστώσας με την βοήθεια των εξισώσεων διατήρησης
- των χαρακτηριστικών παραμέτρων (χάρτες συμπιεστή, στροβίλου)

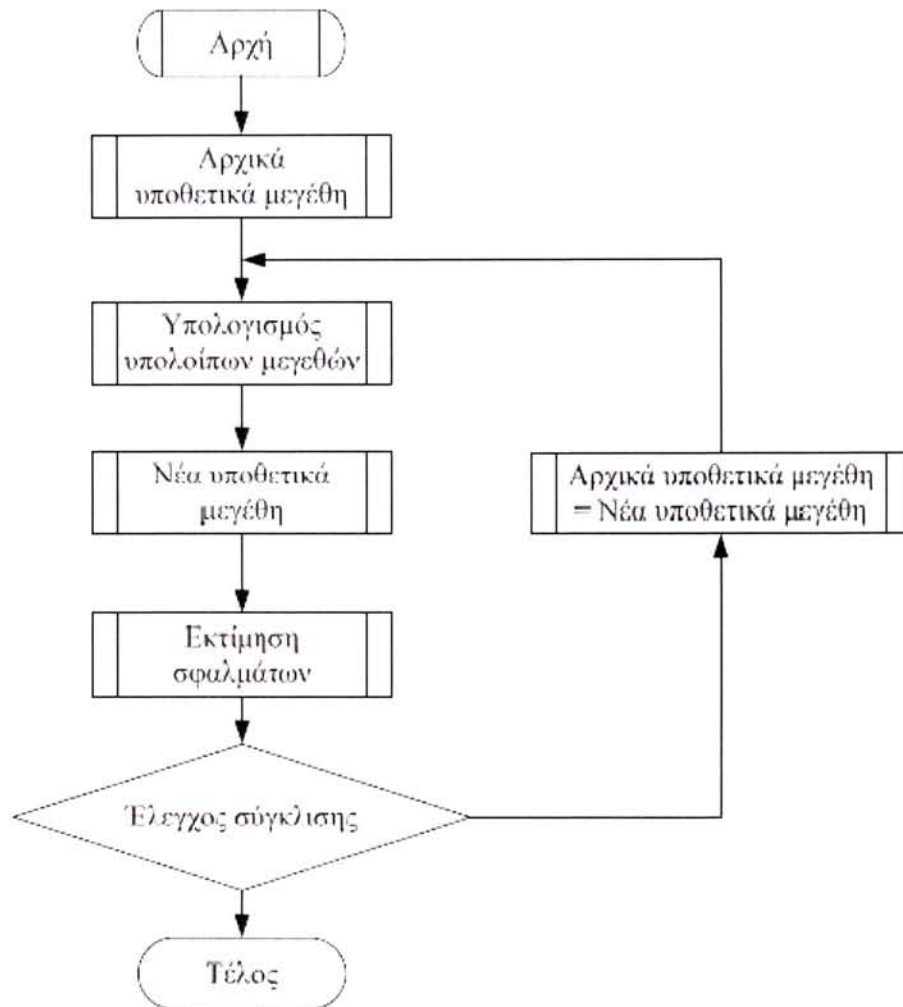
Ακόμα, σε κάθε διατομή ένας αριθμός μεγεθών εκφράζεται αναλυτικά συναρτήσει κάποιων άλλων με την βοήθεια των εξισώσεων συμπιεστότητας. Ένας αριθμός χαρακτηριστικών παραμέτρων εκφράζεται συναρτήσει των υπολοίπων με τις συσχετίσεις που υπάρχουν μεταξύ τους. Τέλος, υπάρχουν και οι οριακές συνθήκες με αποτέλεσμα ορισμένες μεταβλητές να είναι γνωστές.

Έρα από την προηγούμενη ανάλυση είναι φανερό ότι δεν χρειάζεται να γίνει υπόθεση αρχικών τιμών για όλες της εξαρτημένες μεταβλητές. Αρκούν ορισμένες από αυτές για να καθοριστούν οι υπόλοιπες.

Έστω ότι καθορίζονται M αρχικά υποθετικά μεγέθη. Τα υπόλοιπα $N-M$ μεγέθη καθορίζονται από τις από τις $N-M$ εξισώσεις. Οι M εξισώσεις που δεν έχουν

χρησιμοποιηθεί, συμβάλλουν στον έλεγχο της ορθότητας των αρχικών τιμών αντικαθιστώντας σε αυτές τα υπολογισμένα μεγέθη N-M και συγκρίνοντας τις νέες τιμές με τις προηγούμενες. Με αυτό τον τρόπο ορίζονται οι συναρτήσεις σφάλματος.

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα που περιγράφει τη διαδικασία υπολογισμού είναι το παρακάτω:



Εικόνα 30. Συνοπτικό λογικό διάγραμμα λειτουργίας κώδικα

4.5.2 Μεταβλητή ελέγχου

Ως μεταβλητή ελέγχου για την επίλυση του συστήματος μόνιμης λειτουργίας που προκύπτει από την μοντελοποίηση του αεροστροβίλου επιλέγεται ο αριθμός στροφών N, του άξονα του κινητήρα. Στη συνέχεια όμως, ως μεταβλητή εισόδου για

την επίλυση του συστήματος μεταβατικής λειτουργίας επιλέγεται η παροχή του καυσίμου που εγχύεται στο θάλαμο καύσης.

4.5.3 Υποθετικά μεγέθη και συναρτήσεις σφάλματος

Παρακάτω περιγράφεται η λογική βάσει της οποίας επιλέχθηκαν οι μεταβλητές υπόθεσης και οι συναρτήσεις σφάλματος. Αυτό γίνεται περιγράφοντας του υπολογισμούς που επιτελούνται σε κάθε συνιστώσα του αεροστροβίλου.

Αγωγός εισόδου

Στην είσοδο του αγωγού εισόδου είναι γνωστές οι συνθήκες περιβάλλοντος T_{amb} , P_{amb} , ως οριακές συνθήκες του συστήματος. Ισχύουν οι σχέσεις:

$$P_{\tau 1} = P_{amb}$$

$$T_{\tau 1} = T_{amb}$$

$$FAR_1 = 0$$

Για να προσδιοριστούν οι υπόλοιπες μεταβλητές του διανύσματος κατάστασης στη διατομή 1 του αγωγού εισόδου απαιτείται άλλη μια ποσότητα. Η ποσότητα αυτή επιλέγεται να είναι η παροχή του κινούμενου μέσου, η οποία αρχικά δίνεται έτσι ώστε να είναι ίση με την μαζική παροχή του κινούμενου μέσου στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του κινητήρα. Βέβαια, αυτή η τιμή θα αλλάξει σταδιακά κατά την επαναληπτική διαδικασία, και μέσα από τις διαδοχικές προσεγγίσεις του αλγόριθμου επίλυσης, θα υπολογιστεί η τελική της τιμή. Έτσι προκύπτει το διάνυσμα κατάστασης στη θέση 1.

Από το συναρτησιακό μοντέλο του αγωγού εισόδου προκύπτει και το διάνυσμα κατάστασης του κινούμενου \bar{x}_2 .

Συμπιεστής

Το διάνυσμα κατάστασης στην είσοδο του συμπιεστή (θέση 2) είναι γνωστό από τους υπολογισμούς στην αμέσως προηγούμενη συνιστώσα. Για τον υπολογισμό του \bar{x}_3 είναι γνωστά τα μεγέθη \dot{m}_3 και FAR_3 , τα οποία προκύπτουν από τις εξισώσεις συνέχειας (διατήρησης μάζας). Όμως απαιτούνται δυο ακόμα ποσότητες για τον προσδιορισμό του διανύσματος κατάστασης στη θέση 3. Έτσι, γίνεται υπόθεση του λόγου πίεσης του συμπιεστή:

$$PR_{comp} = V_1$$

οπότε και υπολογίζεται η P_{τ_3} .

Αφού έχει επιλεγεί ως μεταβλητή ελέγχου ο αριθμός των στροφών, και έχει γίνει υπόθεση της τιμής του λόγου πίεσης, μπορούμε από το χάρτη του συμπιεστή να υπολογίσουμε τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή. Επομένως, με την βοήθεια του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης υπολογίζεται η θερμοκρασία T_{τ_3} και με βάση αυτή την θερμοκρασία και τις τιμές των προηγούμενων παραμέτρων, υπολογίζεται το διάνυσμα \vec{z}_3 .

Θάλαμος καύσης

Ο λόγος πίεσης του θαλάμου καύσης αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οπότε εισάγεται ως δεδομένο στο πρόγραμμα. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί η πίεση εξόδου του καυστήρα P_{τ_4} . Επιπλέον χαρακτηριστική παράμετρος του καυστήρα είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ο οποίος και αυτός εισάγεται στο πρόγραμμα σαν δεδομένο. Αλλά από τα προηγούμενα δεδομένα δεν μπορεί να υπολογιστεί κάποιο επιπλέον μέγεθος ώστε να προκύψει το διάνυσμα \vec{z}_4 . Έτσι γίνεται υπόθεση της T_{τ_4} .

$$T_{\tau_4} = V_2$$

Οπότε έχουμε τις σχέσεις:

$$FAR = \frac{(h_{\tau_4} - h_g^0) - (h_{\tau_3} - h_a^0)}{\eta_b \cdot LHV - (h_{\tau_4} - h_g^0)}$$

και

$$\dot{m}_4 = (1 + FAR) \cdot \dot{m}_3$$

Επομένως είναι γνωστά τέσσερα μεγέθη και έτσι μπορεί να υπολογιστεί το διάνυσμα \vec{z}_4 .

Στρόβιλος

Οι υπολογισμοί στον στρόβιλο γίνονται με τον ίδιο τρόπο που γίνονται και στον συμπιεστή. Δηλαδή, από τις εξισώσεις συνέχειας προκύπτουν οι ποσότητες \dot{m}_5 και FAR_5 . Γίνεται υπόθεση του λόγου πίεσης του στροβίλου και έτσι υπολογίζεται η τιμή της P_{τ_5} .

$$PR_{\tau_{a \rightarrow b}} = V_3$$

Επιπλέον, έχει επιλεγεί ως μεταβλητή ελέγχου ο αριθμός των στροφών και με τη βοήθεια του λόγου πίεσης, από το χάρτη του στροβίλου, προκύπτει ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης. Γνωρίζοντας τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης μπορούμε να

υπολογίσουμε τη θερμοκρασία εξόδου του στροβίλου $T_{z\varepsilon}$.

Ακροφύσιο

Το ακροφύσιο είναι το τελευταίο τμήμα του κινητήρα και αποτελεί την έξοδο του. Αν υποθέσουμε ότι η ροή είναι χωρίς απώλειες ισχύουν οι σχέσεις

$$\begin{aligned} P_{z\varepsilon} &= P_{z\tau} \\ \dot{m}_{\varepsilon} &= \dot{m}_{\tau} \\ FAR_{\varepsilon} &= FAR_{\tau} \\ T_{z\varepsilon} &= T_{z\tau} \end{aligned}$$

Αφού είναι γνωστά τέσσερα μεγέθη μπορεί να προκύψει το διάνυσμα κατάστασης στην είσοδο και στην έξοδο του ακροφυσίου. Συνεπώς δεν είναι απαραίτητο να οριστεί κανένα νέο υποθετικό μέγεθος.

4.6 Συναρτήσεις σφάλματος

Κριτήριο για τον προσδιορισμό των συναρτήσεων σφαλμάτων αποτελεί η καλή συμπεριφορά του Ιακωβιανού πίνακα. Ο Ιακωβιανός πίνακας από τη μερική παράγωγο των σφαλμάτων σε σχέση με τα υποθετικά μεγέθη.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial V_1} & \frac{\partial e_1}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial V_i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_i}{\partial V_1} & \frac{\partial e_i}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial e_i}{\partial V_i} \end{pmatrix}$$

Από την παρατήρηση του Ιακωβιανού πίνακα διαπιστώνεται κατά πόσο τα διάφορα σφάλματα που εισάγουμε εξαρτώνται από τα υποθετικά μεγέθη. Μεγάλη τιμή της μερικής παραγώγου $\frac{\partial e_i}{\partial V_j}$ σημαίνει ότι για μικρές μεταβολές του υποθετικού μεγέθους V_j προκύπτει μεγάλη μεταβολή του σφάλματος, πράγμα που δεν είναι επιθυμητό για την επαναληπτική διαδικασία σύγκλισης.

Οι εξισώσεις σφαλμάτων e_i που διαλέγονται για τη χρησιμοποίηση στην επαναληπτική διαδικασία είναι τέτοιες ώστε οι μερικές παράγωγοι $\frac{\partial e_i}{\partial V_j}$ να

παρουσιάζουν μικρές τιμές κοντά στη μονάδα και ο δείκτης κατάστασης του Ιακωβιανού πίνακα να είναι επίσης κοντά στη μονάδα.

Στην περίπτωση που σαν μεταβλητή απόφασης είναι οι στροφές του κινητήρα οι εξισώσεις σφαλμάτων είναι:

$$\bullet e_1 = \frac{P_{t4} - P_{t4}^*}{P_{t4}}$$

όπου, P_{t4} : η ολική πίεση εισόδου στον στρόβιλο

P_{t4}^* : η ολική πίεση εισόδου στον στρόβιλο υπολογισμένη από το χάρτη

$$\bullet e_2 = \frac{\dot{m}_7 - \dot{m}_7^*}{\dot{m}_7}$$

όπου, \dot{m}_7 : η παροχή στην είσοδο του ακροφυσίου

\dot{m}_7^* : η παροχή στην είσοδο του ακροφυσίου υπολογισμένη από τη

$$\text{σχέση } \dot{m}_7 = \frac{A_7 \cdot V_7 \cdot P_7}{T_7 \cdot R}$$

$$\bullet e_3 = \frac{P_{comp} - P_{turb}}{P_{comp}}$$

όπου, P_{comp} : η ισχύς του συμπιεστή

P_{turb} : η ισχύς του στρόβιλου

Για το κομμάτι της πρώτης επανάληψης, όπου καλούμε τις υπορουτίνες για ροή μόνιμης κατάστασης το e_3 είναι αυτό που υπολογίστηκε παραπάνω, ενώ δεν υπάρχει e_4 , επειδή μεταβλητή ελέγχου αποτελούν οι στροφές του κινητήρα.

Όμως, στο κομμάτι της μεταβατικής λειτουργίας του κινητήρα, το e_3 πλέον διαμορφώνεται με την εισαγωγή της ροπής αδράνειας, λόγω της δυναμικής της ατράκτου (shaft dynamics), ως εξής:

$$\bullet e_3 = \frac{P_{comp} - P_{turb} + I \cdot \frac{d\Omega}{dt}}{P_{comp}}$$

όπου, P_{comp} : η ισχύς του συμπιεστή

P_{turb} : η ισχύς του στρόβιλου

I : η ροπή αδράνειας της ατράκτου

$\frac{d\Omega}{dt}$: μεταβολή γωνιακής ταχύτητας

Επίσης, στο κομμάτι της μεταβατικής λειτουργίας του στρόβιλου, η μεταβλητή ελέγχου αλλάζει από στροφές του κινητήρα στο καύσιμο εισαγωγής στο θάλαμο καύσης, οπότε λόγω αυτής της αλλαγής προστίθεται μία ακόμα συνάρτηση σφάλματος:

- $e_4 = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f'} - 1$

όπου, \dot{m}_f : η παροχή καυσίμου στο θάλαμο καύσης

\dot{m}_f' : η παροχή καυσίμου που υποθέτουμε αρχικά στο θάλαμο καύσης

4.7 Σύνοψη διαδικασίας υπολογισμού

Συνοψίζοντας την παραπάνω διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων έχουμε:

A. Δεδομένα

1. Βαθμοί απόδοσης θαλάμου καύσης και ακροφυσίου
2. Λόγοι πίεσης αγωγού εισόδου και θαλάμου καύσης
3. Θερμογόνος δύναμη καυσίμου
4. Χάρτες συμπίεστή και στροβίλου
5. Συνθήκες περιβάλλοντος

B. Μεταβλητές υπόθεσης

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} PR_{comp} \\ T_{t4} \\ PR_{turb} \end{bmatrix}$$

C. Συναρτήσεις σφαλμάτων

Για το κομμάτι μόνιμης λειτουργίας θα είναι:

$$\bar{e} = \begin{bmatrix} \frac{P_{t4} - P_{t4}^*}{P_{t4}} \\ \frac{\dot{m}_7 - \dot{m}_7^*}{\dot{m}_7} \\ \frac{P_{comp} - P_{turb}}{P_{comp}} \end{bmatrix}$$

ενώ, για το κομμάτι μεταβατικής λειτουργίας

$$\bar{e} = \begin{bmatrix} \frac{P_{t4} - P_{t4}^*}{P_{t4}} \\ \frac{\dot{m}_7 - \dot{m}_7^*}{\dot{m}_7} \\ \frac{P_{comp} - P_{turb} + I \cdot \frac{d\Omega}{dt}}{P_{comp}} \\ \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f^*} - 1 \end{bmatrix}$$

D. Ανεξάρτητες μεταβλητές ελέγχου

Για το κομμάτι λειτουργίας σε μόνιμες συνθήκες έχουμε μεταβλητή ελέγχου, τον αριθμό στροφών του κινητήρα N . Για το κομμάτι μεταβατικής λειτουργίας η μεταβλητή ελέγχου γίνεται η παροχή καυσίμου \dot{m}_f .

Έτσι το πρόβλημα προσομοίωσης και υπολογισμού του κύκλου λειτουργίας του κινητήρα καταλήγει στην επίλυση του πεπλεγμένου συστήματος $\bar{e}(\bar{V}) = 0$.

4.8 Χάρτες συνιστωσών

4.8.1 Δεδομένα χαρτών

Τα πεδία των χαρακτηριστικών (χάρτες), του συμπιεστή και του στροβίλου, δίνονται παραμετρικά με μορφή πινάκων που περιλαμβάνουν τις τιμές των μεγεθών που συσχετίζουν. Οι παράμετροι αυτές είναι διορθωμένες ως προς τις συνθήκες εισόδου κάθε συνιστώσας. Συγκεκριμένα για κάθε συνιστώσα ξεχωριστά ισχύει:

Συμπιεστής

Στο χάρτη του συμπιεστή η παράμετρος των στροφών N_c δίνεται από την σχέση:

$$N_c = \frac{N}{\sqrt{\frac{T_{in}}{T_{ref}}}} \quad (4.1)$$

Η παράμετρος της παροχής δίνεται από την εξίσωση:

$$W_c = \frac{\dot{m}_{in} \cdot \sqrt{\frac{T_{in}}{T_{ref}}}}{\frac{P_{in}}{P_{ref}}} \quad (4.2)$$

Επιπλέον στο χάρτη του συμπιεστή δίνεται ο λόγος πίεσης και ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης του όπως αυτοί υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$PR_{comp} = \frac{P_{t3}}{P_{t2}} \quad (4.3)$$

$$T_{t3,t5} = T_{t2} PR_{comp}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.4)$$

$$\eta_{is,comp} = \frac{h_{t3,t5} - h_{t2}}{h_{t3} - h_{t2}} \quad (4.5)$$

$$\eta_{p,comp} = \frac{\ln(PR_{comp})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\ln\left(\frac{T_{t3}}{T_{t2}}\right)} \quad (4.6)$$

Στρόβιλος

Στο χάρτη του στροβίλου η παράμετρος των στροφών N_T δίνεται από τη σχέση:

$$N_c = \frac{N/\sqrt{T_{in}}}{(N/\sqrt{T_{in}})_{des}} \quad (4.7)$$

Ενώ η παράμετρος της παροχής:

$$W_c = \frac{\dot{m}_{in} \cdot \sqrt{T_{in}}}{P_{in}} \cdot N_c \quad (4.8)$$

Ακόμα στον χάρτη δίνεται ο λόγος πίεσης και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης, όπως υπολογίζονται από τις :

$$PR_{turb} = \frac{P_{\tau 4}}{P_{\tau 5}} \quad (4.9)$$

$$\frac{T_{\tau 4}}{T_{\tau 5, is}} = PR_{turb}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.10)$$

$$\eta_{is, turb} = \frac{h_{\tau 4} - h_{\tau 5}}{h_{\tau 4} - h_{\tau 5, is}} \quad (4.11)$$

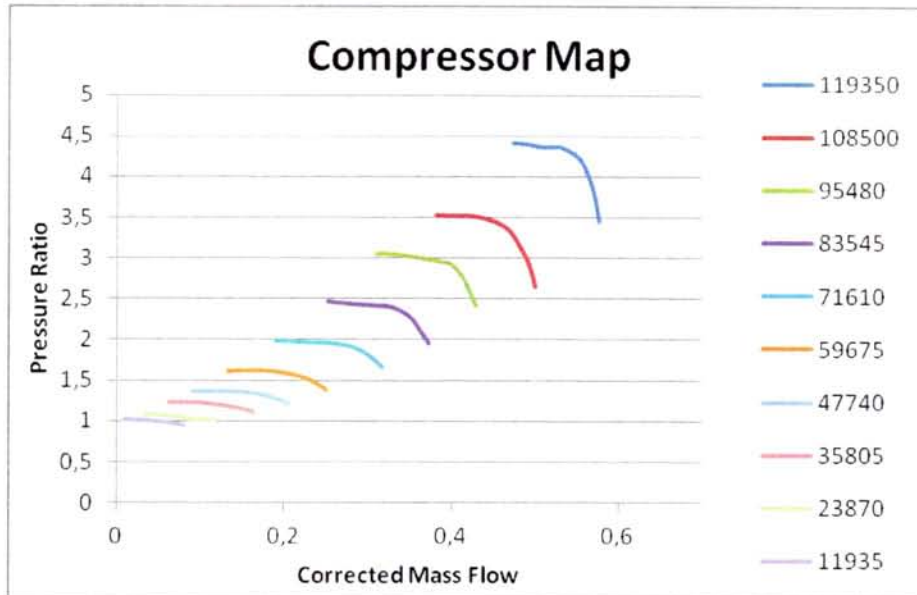
Βέβαια οι πίνακες αυτοί πρέπει να έχουν συγκεκριμένη μορφή όπως περιγράφεται στο παράρτημα Π3.

4.9 Κατασκευή Χαρτών

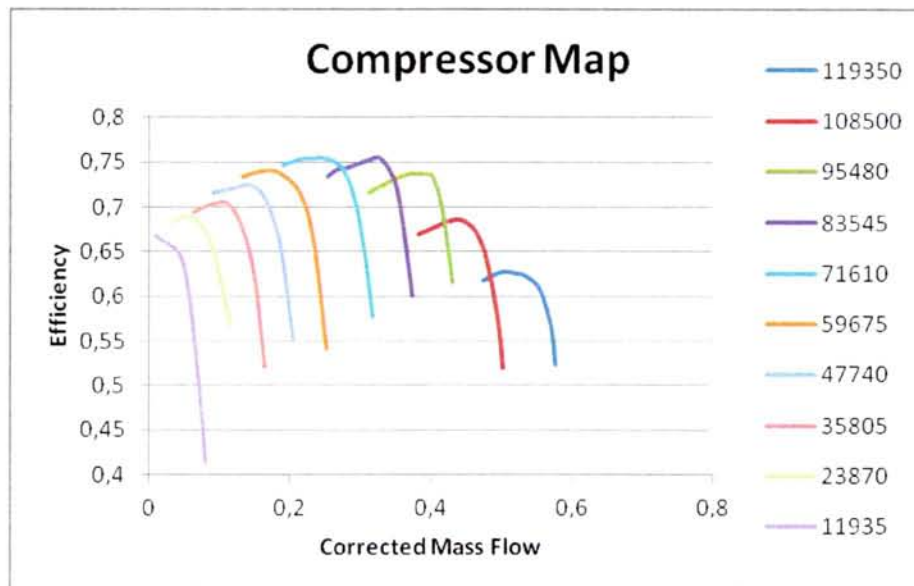
Για την κατασκευή των χαρτών έγινε αναζήτηση σε σχετική βιβλιογραφία που αφορούσε στροβιλοαντιδραστήρες παρόμοιου μεγέθους και τύπου με αυτό του Olympus [9, 13]. Σε πρώτη φάση, στους χάρτες αυτούς τοποθετήθηκαν τα σημεία λειτουργίας που λήφθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία και τροποποιήθηκαν έτσι ώστε τα πειραματικά σημεία λειτουργίας των συνιστωσών, συμπίεστή και στροβίλου, να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στα αντίστοιχα σημεία λειτουργίας των χαρτών. Τα σημεία λειτουργίας δόθηκαν με την βοήθεια των παραμέτρων που ορίστηκαν στην ενότητα 4.7.1. Η τροποποίηση αυτή ήταν με την με τη μετακίνηση των ισοταχών καμπυλών των χαρτών.

Αλλά με την χονδροειδή αυτή τροποποίηση διαπιστώθηκε γρήγορα ότι το πρόγραμμα δεν συνέκλινε στα προβλεπόμενα (πειραματικά) σημεία. Αυτό είχε σαν συνέπεια να γίνουν πιο λεπτομερές διορθώσεις στις χαρακτηριστικές καμπύλες, του συμπίεστή και του στροβίλου, μετατοπίζοντας όχι μόνο τις ισοταχείς καμπύλες αλλά μεταβάλλοντας και την μορφή τους.

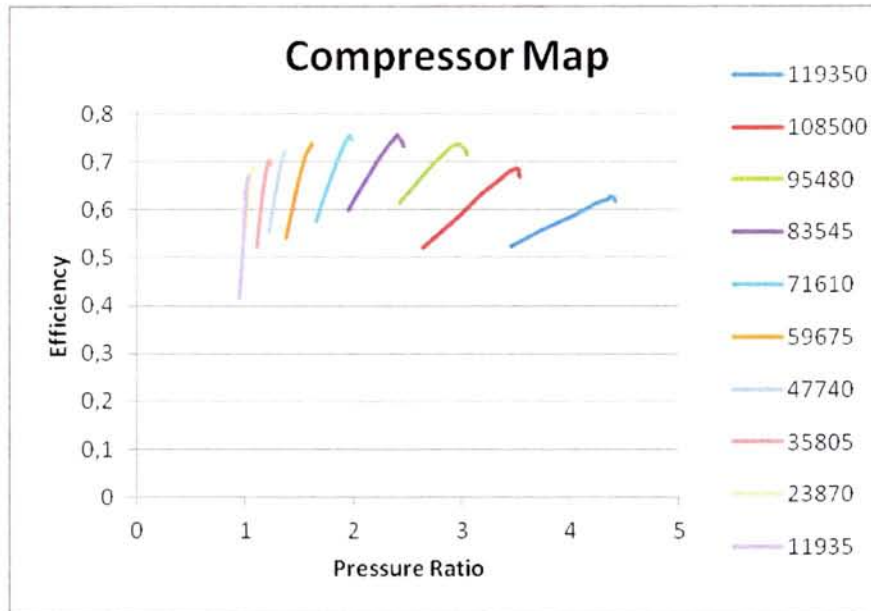
Η τελική μορφή των χαρτών φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν:



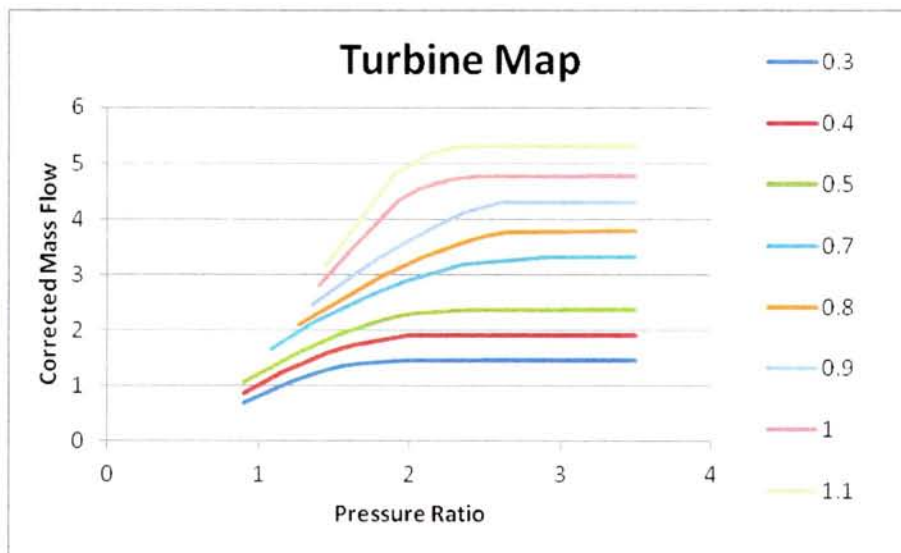
Σχήμα 1. Χάρτης συμπίεστή (Λόγος πίεσης – Ανηγμένη παροχή)



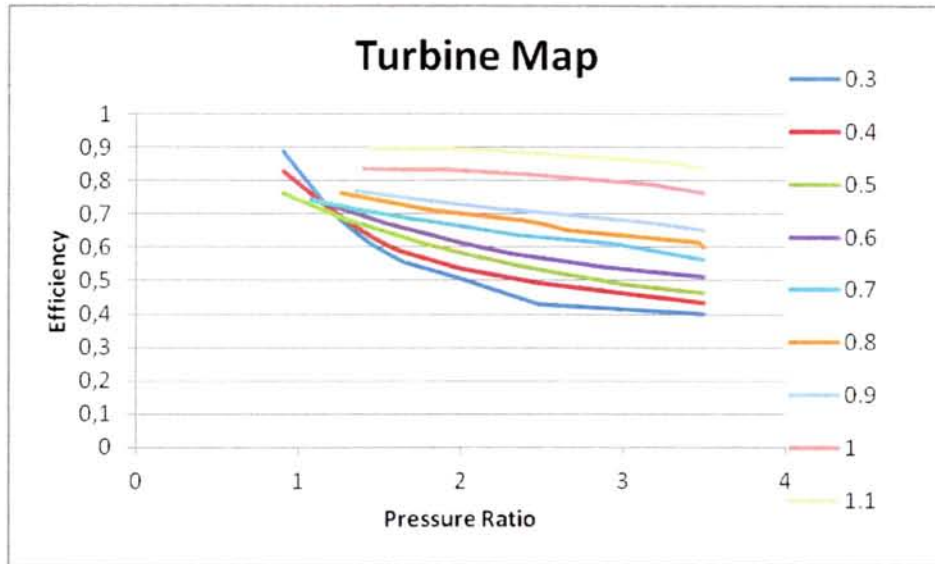
Σχήμα 2. Χάρτης συμπίεστή (Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης - Ανηγμένη παροχή)



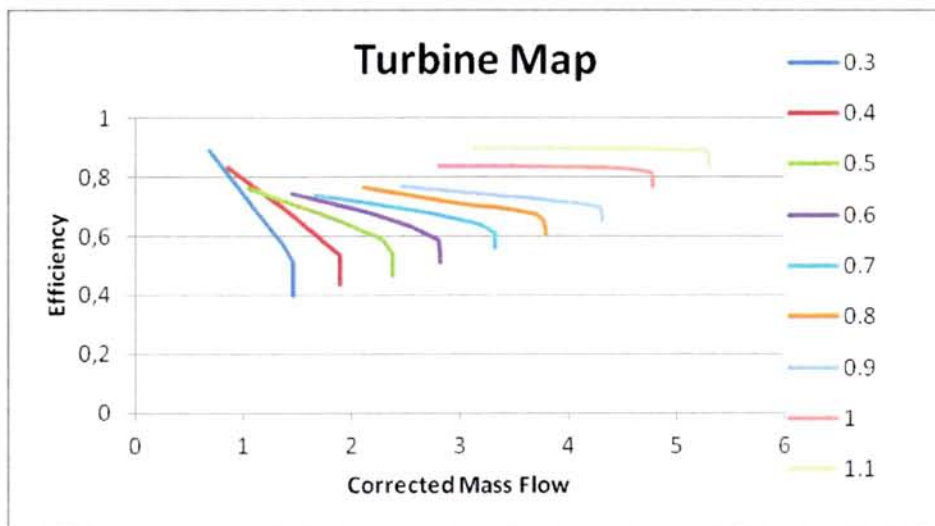
Σχήμα 3. Χάρτης συμπιεστή (Ισηντροπικός βαθμός απόδοσης - Λόγος πίεσης)



Σχήμα 4. Χάρτης στροβίλου (Ανηγμένη παροχή - λόγος πίεσης)



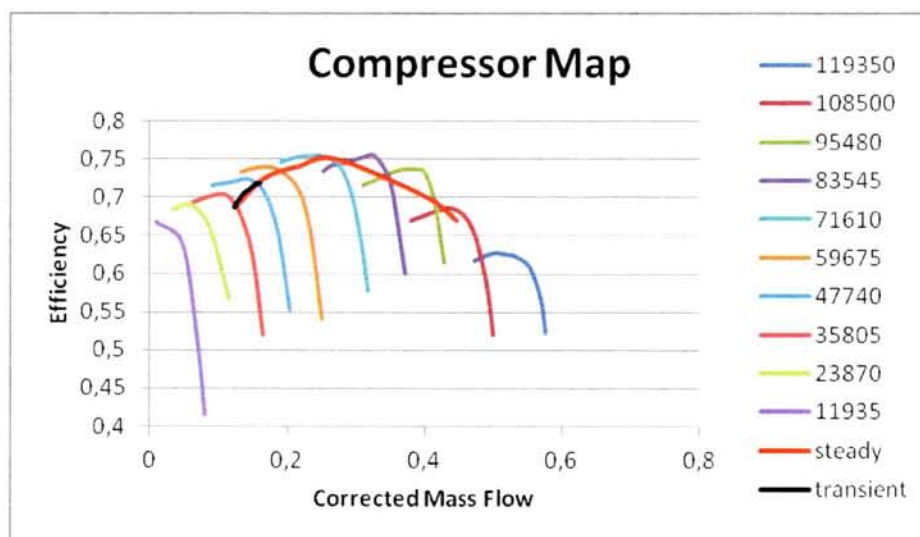
Σχήμα 5. Χάρτης στροβίλου (Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης - λόγος πίεσης)



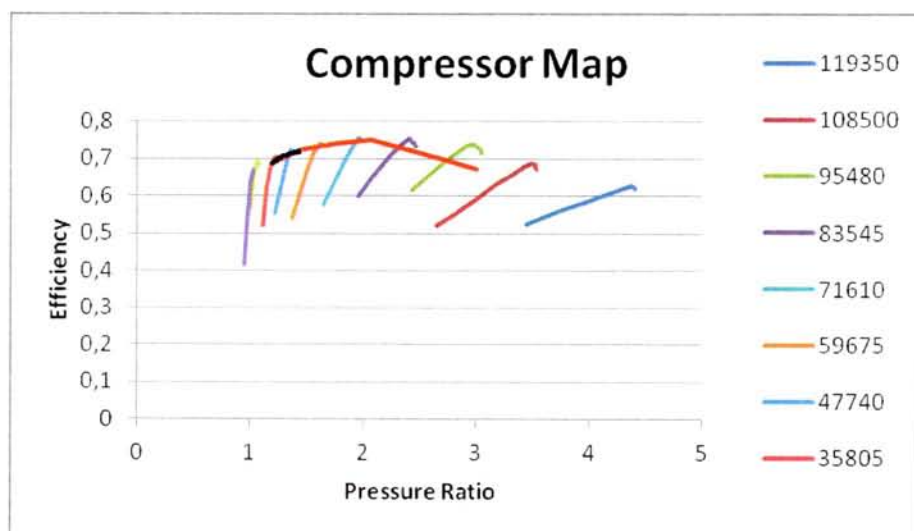
Σχήμα 6. Χάρτης στροβίλου (Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης-ανηγμένη παροχή)

4.10 Αποτελέσματα προσομοίωσης

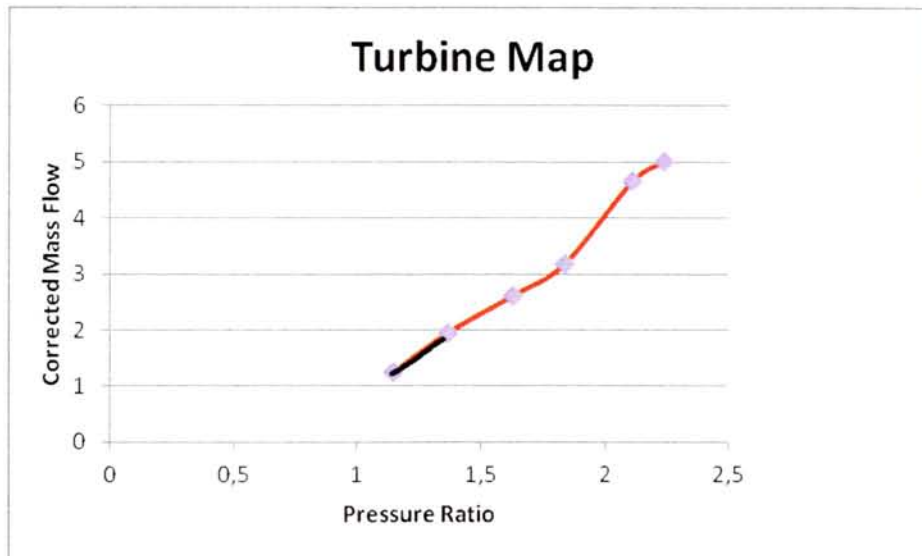
Στα διαγράμματα που ακολουθούν δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τη βοήθεια των χαρτών του συμπιεστή και του στροβίλου. Πάνω στους χάρτες έχουν τοποθετηθεί η πειραματική γραμμή λειτουργίας και η υπολογιζόμενη από το πρόγραμμα AMT. Οι κόκκινες συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν στα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ οι μαύρες στα υπολογιστικά αποτελέσματα. Οι χάρτες που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της επιτάχυνσης είναι για εύρος από 36500 (ρελαντί) έως 48000, ενώ για επιβράδυνση από 96000 έως 49000.



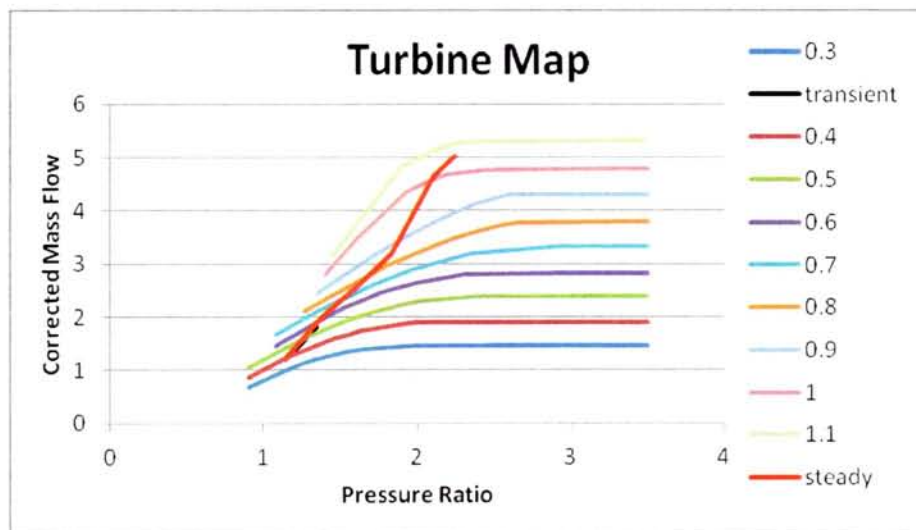
Σχήμα 7. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του συμπιεστή για επιτάχυνση



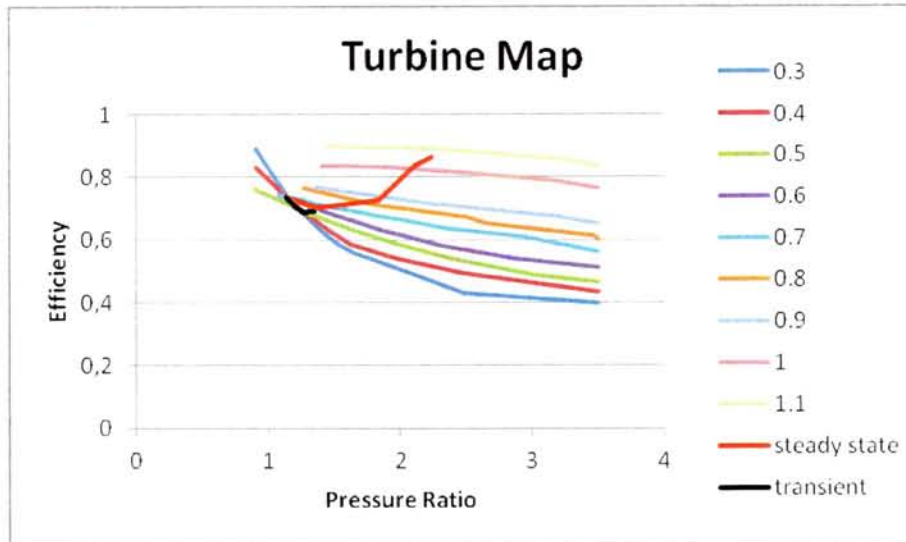
Σχήμα 8. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του συμπιεστή για επιτάχυνση



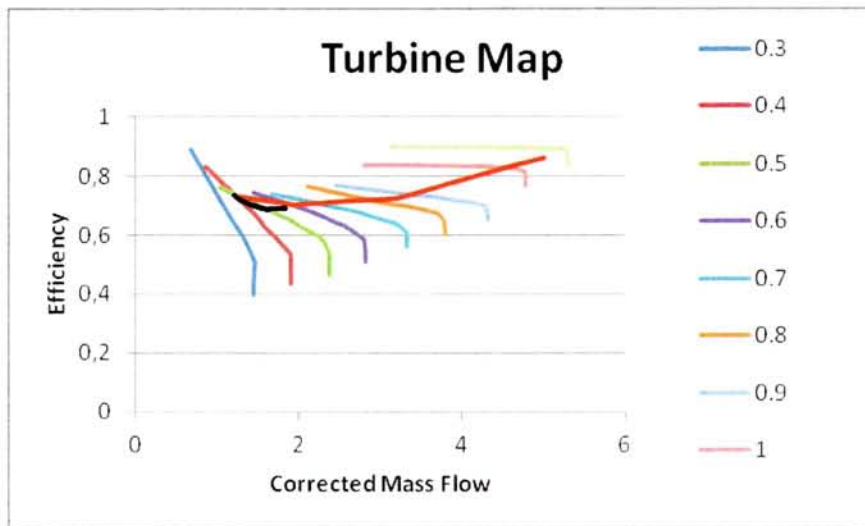
Σχήμα 9. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του στροβίλου για επιτάχυνση



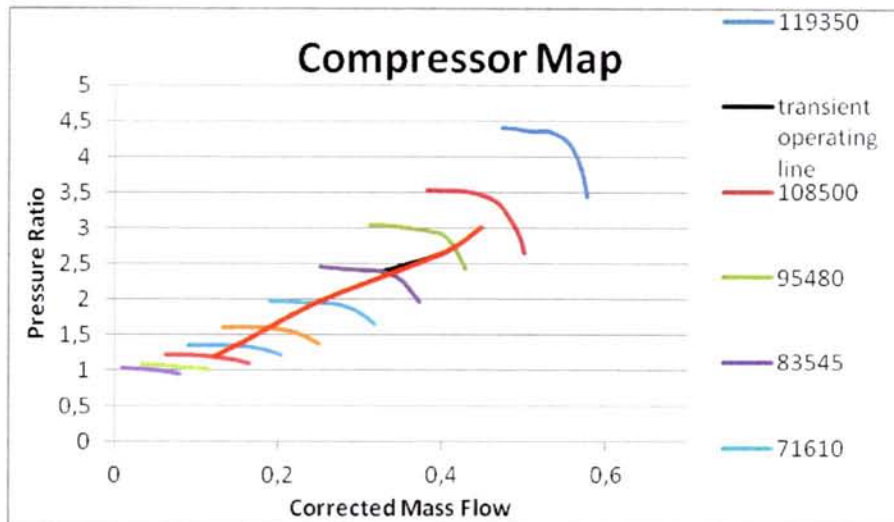
Σχήμα 10. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του στροβίλου για επιτάχυνση



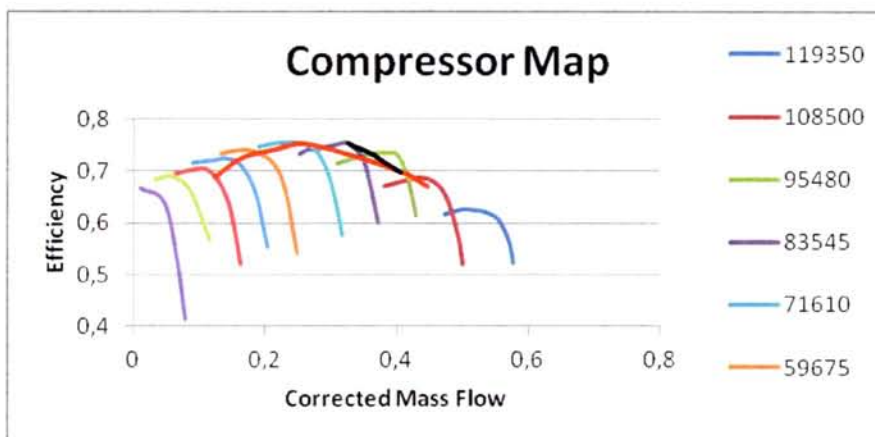
Σχήμα 11. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του στροβίλου για επιτάχυνση



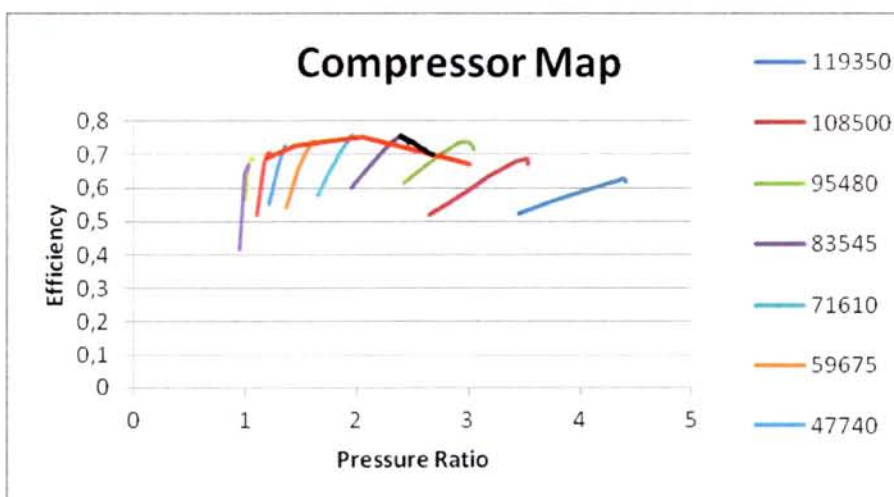
Σχήμα 12. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του στροβίλου για επιτάχυνση



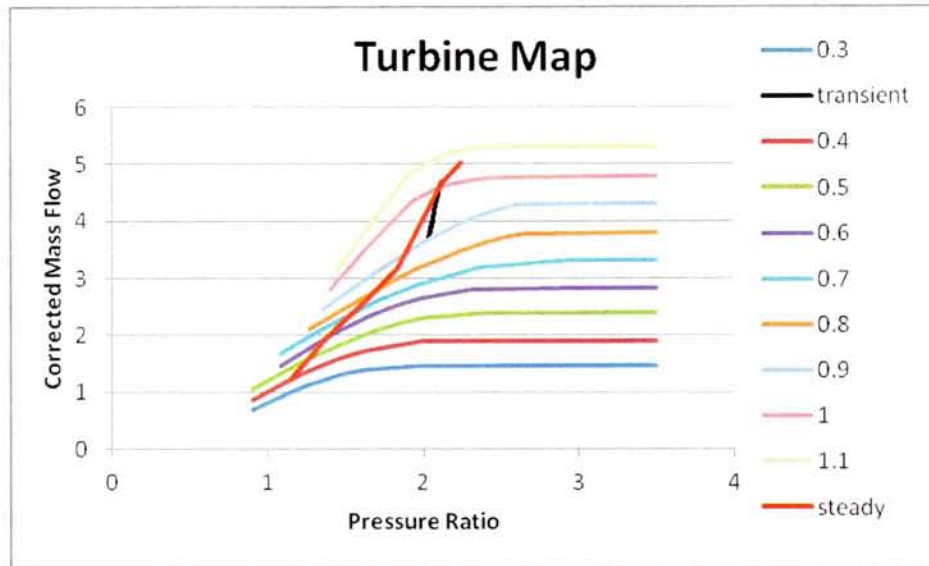
Σχήμα 13. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του συμπιεστή για επιβράδυνση



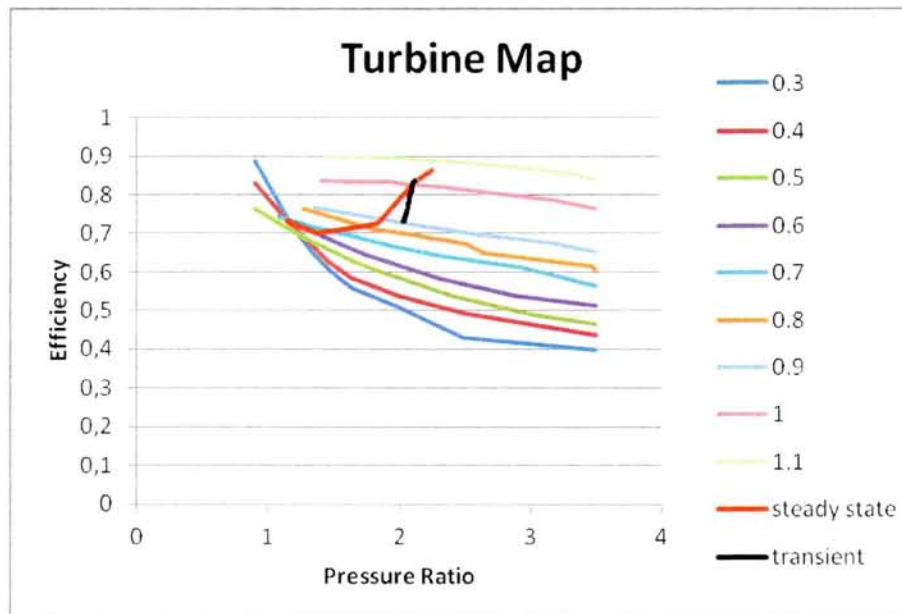
Σχήμα 14. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του συμπιεστή για επιβράδυνση



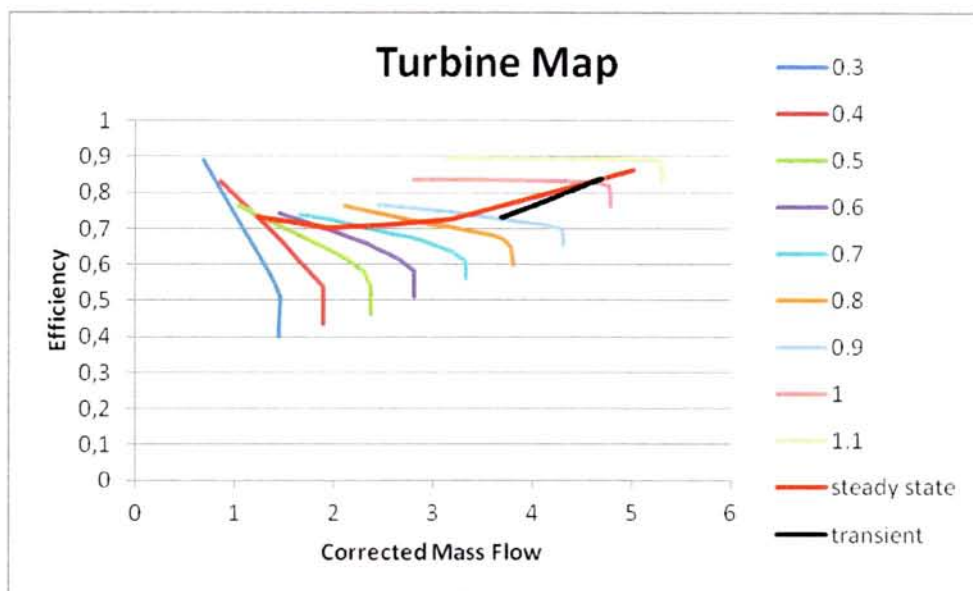
Σχήμα 15. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη του συμπιεστή για επιβράδυνση



Σχήμα 16. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη στροβίλου για επιβράδυνση



Σχήμα 17. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη στροβίλου για επιβράδυνση



Σχήμα 18. Αποτελέσματα προσομοίωσης-πειραμάτων στο χάρτη στροβίλου για επιβράδυνση

4.11 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Όσον αφορά στην επιτάχυνση, βλέποντας τα προηγούμενα αποτελέσματα φαίνεται ότι ο κώδικας προσομοιώνει αρκετά καλά τον αεριοστρόβιλο στις χαμηλές στροφές. Όσο όμως επιταχύνει, δε συγκλίνει τόσο καλά έτσι ώστε να έχει τη σωστή συμπεριφορά μεταβατικής λειτουργίας. Ο λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό είναι επειδή οι χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν δεν είχαν προσαρμοστεί πλήρως στο μοντέλο που εξετάζαμε. Αυτό είχε σαν συνέπεια να μην είναι γνωστό πως ακριβώς θα έπρεπε να τροποποιηθούν οι χαρακτηριστικές λειτουργίας των συνιστωσών στις υψηλές στροφές.

Από την άλλη, στους χάρτες του στροβίλου, τα αποτελέσματα για επιτάχυνση, φαίνεται πως προσαρμόζονται ευκολότερα απ' ό,τι σε αυτούς του συμπιεστή, αφού κινείται πιο ομαλά.

Όσον αφορά στην επιβράδυνση, από τα γραφήματα του συμπιεστή βλέπουμε ορισμένες περίεργες συμπεριφορές, αφού η γραμμή της μεταβατικής λειτουργίας σχεδόν ταυτίζεται με τη γραμμή λειτουργίας σε μόνιμες συνθήκες. Αντίθετα, στο χάρτη του στροβίλου βλέπουμε πως η μεταβατική συμπεριφορά είναι όπως την περιμέναμε και φαίνεται να μην έχει πρόβλημα σε κανένα σημείο λειτουργίας.

5 Παρουσίαση πειραματικών μετρήσεων

5.1 Παραδοχές

Για τη σωστή επεξεργασία των μετρήσεων που λαμβάνονται μέσω του προγράμματος που αναπτύχθηκε στο LabVIEW γίνονται κάποιες παραδοχές οι οποίες αναφέρονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

Η πρώτη σημαντική παραδοχή που γίνεται είναι ότι η ροή είναι μονοδιάστατη, δηλαδή ότι λαμβάνουμε υπόψη φαινόμενα που συμβαίνουν μόνο σε μία διεύθυνση κατά τη διέλευση του κινούμενου μέσου από τις συνιστώσες του κινητήρα και αμελούνται αυτά που συμβαίνουν στις υπόλοιπες διευθύνσεις. Η κατάσταση σε κάθε διατομή περιγράφεται από κατάλληλα υπολογισμένες μέσες τιμές. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες ενότητες, μετρήσεις γίνονται σε περισσότερα από ένα σημεία σε κάθε διατομή. Από τις διαφορετικές αυτές μετρήσεις, στην επεξεργασία λαμβάνονται υπόψη η μέση τιμή τους, η οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική για τη διατομή στο εκάστοτε σημείο λειτουργίας.

Η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου (LHV) θεωρείται σταθερή και δεν μεταβάλλεται με την αλλαγή των συνθηκών του περιβάλλοντος. Επιπλέον η ποσότητα του λιπαντικού που προστίθεται στο καύσιμο θεωρείται αμελητέα (4,5% κ.ο.) και δεν έχει καμία επιρροή στη τελική θερμογόνο δύναμη του καυσίμου μίγματος παραφινελαίου-λιπαντικού.

Συμφωνά με τις πληροφορίες που δίνει ο κατασκευαστής στο εγχειρίδιο του κινητήρα, 1% τις ποσότητας του εισερχόμενου αέρα περνάει διαμέσου των εδράνων κύλισης για ψύξη. Επειδή αυτή το ποσοστό είναι πολύ μικρό δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Ο αέρας θεωρείται μίγμα αερίων, τα ποσοστά των οποίων είναι: $x_{N_2} = 0.7552$, $x_{O_2} = 0.2315$, $x_{CO_2} = 0.0005$, $x_{Ar} = 0.0128$, $x_{Ne} = 0.00001$, $x_{H_2O} = 0$, $x_{SO_2} = 0$. Στις τιμές αυτές παρατηρούμε ότι η ποσότητα του νερού είναι μηδενική, αυτό προκύπτει γιατί αμελείται η υγρασία του αέρα. Επιπλέον είναι μηδενική και η ποσότητα του διοξειδίου του θείου, η οποία αναφέρεται για λόγου πληρότητας γιατί όπως θα φανεί στη συνέχεια η ποσότητα αυτή μεταβάλλεται στα καυσαέρια.

Τέλος, κατά τη διάρκεια των υπολογισμών θεωρούνται μεταβλητές οι ιδιότητες του αέρα και των καυσαερίων και στις αναγωγές που γίνονται για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της υγρασίας του περιβάλλοντος στις επιδόσεις του κινητήρα.

5.1.1 Ανηγμένα μεγέθη

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες έχουν σημαντική επίπτωση στις θερμοκρασίες και στις πιέσεις στη διαδρομή της ροής καυσίμου οποιουδήποτε αεροστροβίλου. Για να κάνουμε πειραματικά δεδομένα, που λαμβάνουμε, συγκρίσιμα μεταξύ τους απαιτείται διόρθωση αυτών των δεδομένων, ώστε να αναχθούν στις τυποποιημένες συνθήκες τυπικής ημέρας (Standard Day conditions). Ο σκοπός της διόρθωσης των δεδομένων που μετρώνται από ένα αεροστρόβιλο είναι να κάνει τα αποτελέσματα συγκρίσιμα με εκείνα από άλλες μηχανές ή να ελέγξουμε τη μηχανή μας σύμφωνα με κάποια κριτήρια αποδοχής που θέτουμε [26].

Οι συνθήκες τυπικής ημέρας αντιστοιχούν σε πίεση $P_{ref} = 101.325 \text{ kPa} = 1 \text{ bar}$ και σε θερμοκρασία $T_{ref} = 288.15 \text{ K}$.

Για να γίνει η διόρθωση όλων των χαρακτηριστικών θερμοδυναμικών μεγεθών που περιγράφουν τη λειτουργία μιας μηχανής χρησιμοποιούνται δύο νέες ποσότητες που ορίζονται ως εξής:

$$\delta = \frac{P_1}{P_{ref}}$$

και

$$\theta = \frac{T_1}{T_{ref}}$$

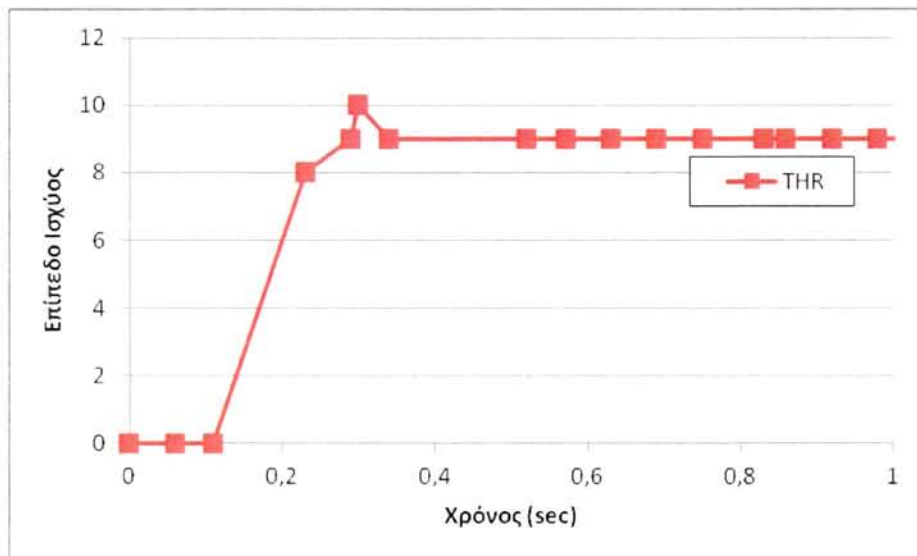
Αυτές τις ποσότητες τις χρησιμοποιούμε για να ορίσουμε και όλα τα υπόλοιπα ανηγμένα μεγέθη που περιγράφουν τη λειτουργία του αεροστροβίλου. Όλα αυτά τα μεγέθη παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετρος	Ανηγμένο μέγεθος
Πίεση	$P_c = \frac{P}{\delta}$
Θερμοκρασία	$T_c = \frac{T}{\theta}$
Αριθμός στροφών	$N_c = \frac{N}{\sqrt{\theta}}$
Παροχή εργαζόμενου μέσου	$W_c = \frac{W \cdot \sqrt{\theta}}{\delta}$
Παροχή καυσίμου	$W_{f,c} = \frac{W_f}{\sqrt{\theta} \cdot \delta}$

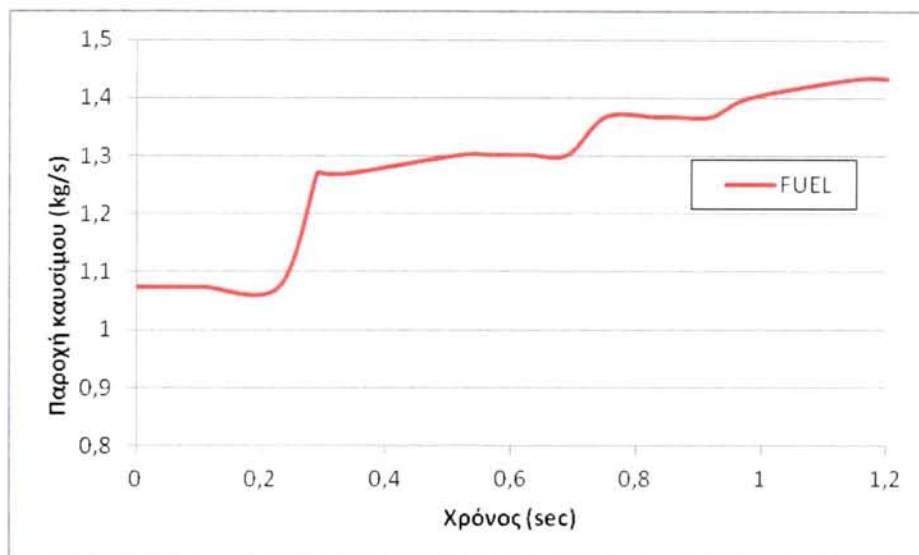
Ωση	$F_{Nc} = \frac{F_N}{\delta}$
Ισχύς	$PW_c = \frac{PW}{\sqrt{\theta} * \delta}$

5.2 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων

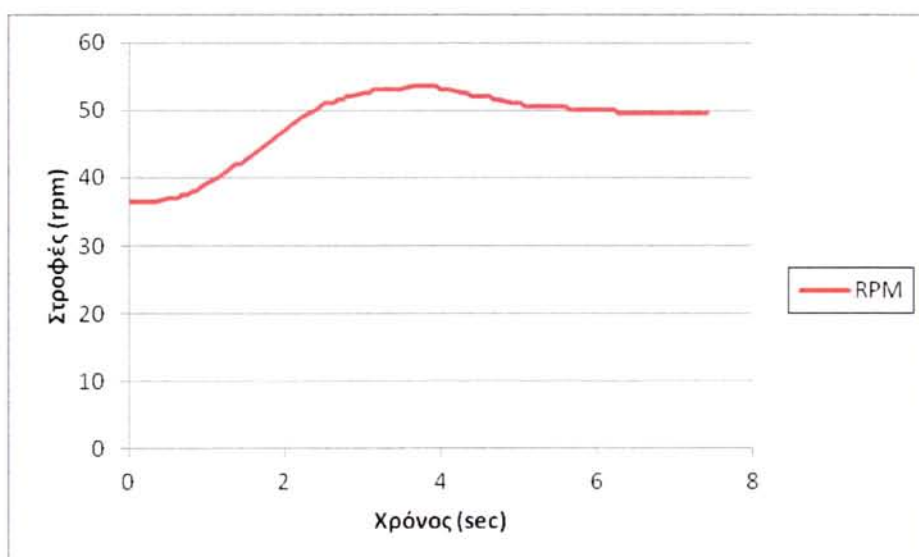
Τα διαγράμματα των πειραματικών μετρήσεων για την επιτάχυνση απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα:



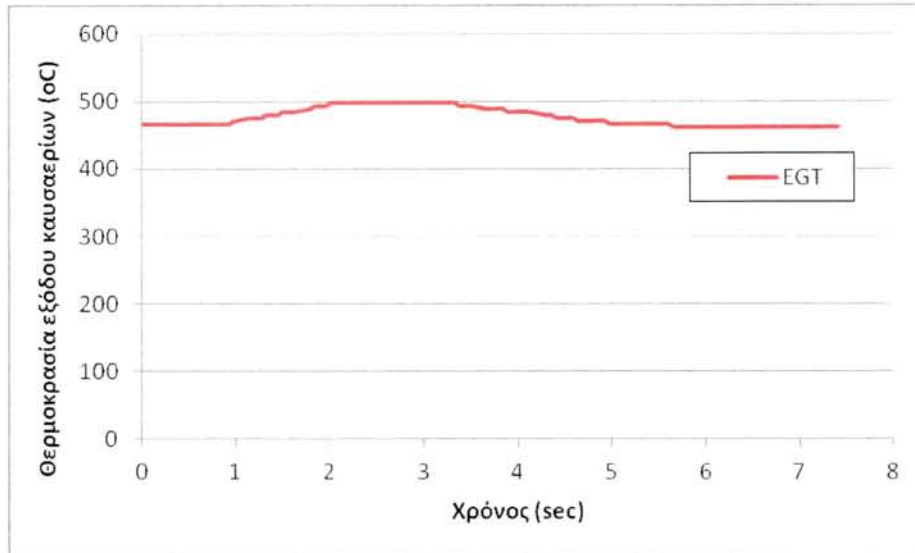
Σχήμα 19. Ισχύς συναρτήσει με το χρόνο



Σχήμα 20. Παροχή καυσίμου συναρτήσει με το χρόνο

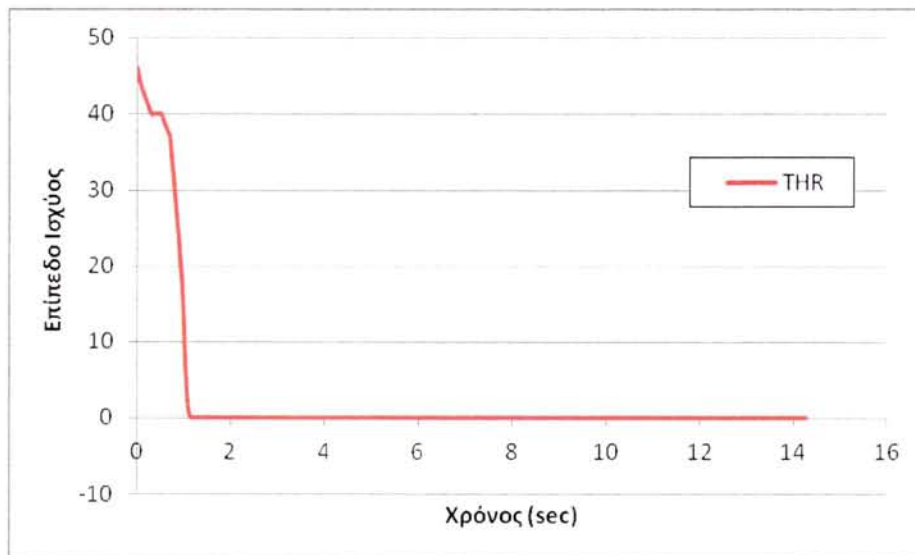


Σχήμα 21. Στροφές συναρτήσει με το χρόνο

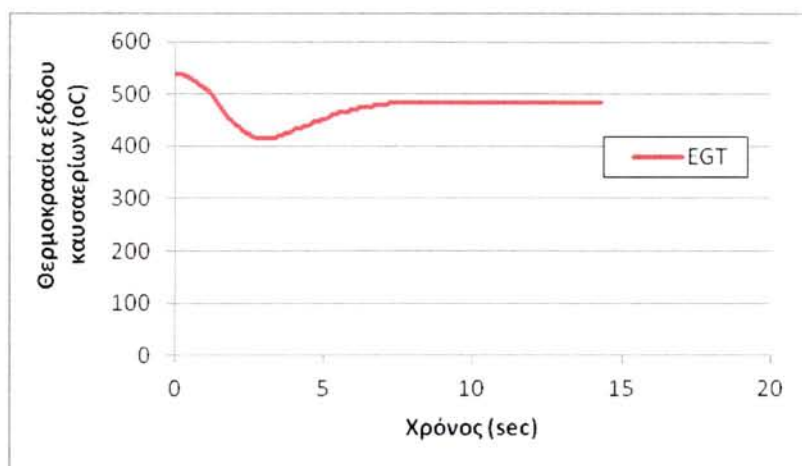


Σχήμα 22. Θερμοκρασία εξόδου του καυσαερίου συναρτήσει του χρόνου

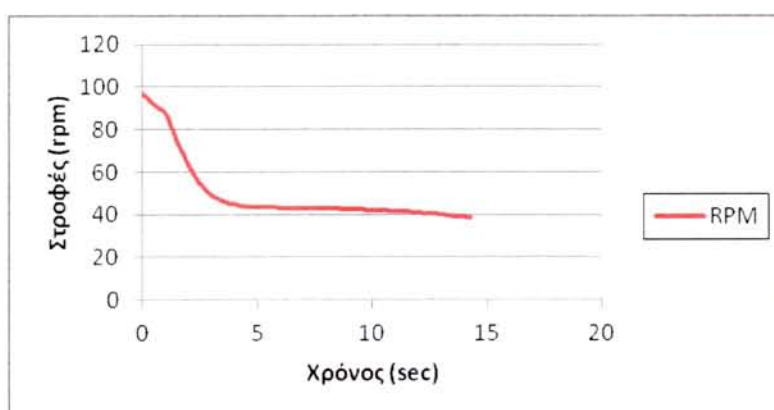
Ενώ για επιβράδυνση:



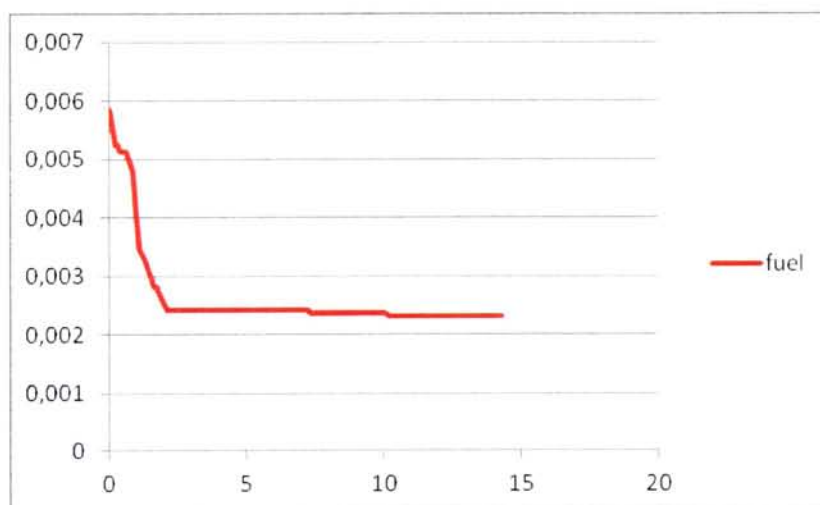
Σχήμα 23. Επίπεδο ισχύος συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 24.Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων



Σχήμα 25.Στροφές στην επιβράδυνση συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 26.Παροχή καυσίμου στην επιβράδυνση

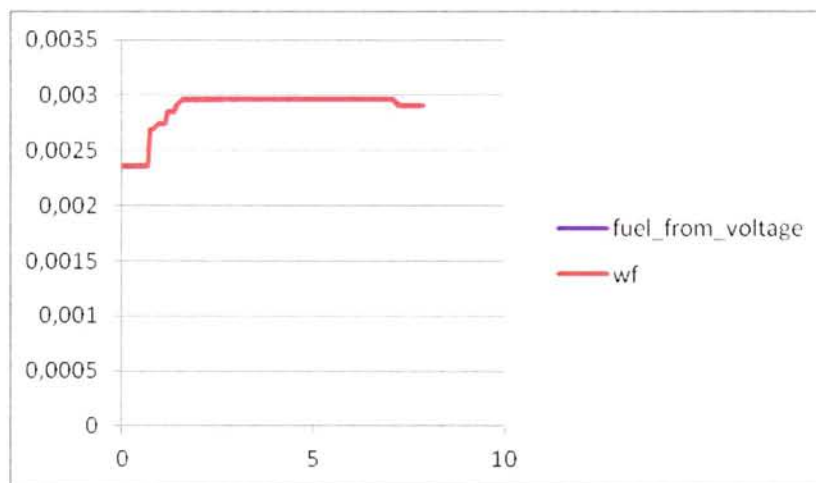
6 Συγκριτικά Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται συγκριτική παρουσίαση των μετρήσεων που προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία με τις τιμές που προκύπτουν από το πρόγραμμα προσομοίωσης. Η παρουσίαση γίνεται για κάθε συνιστώσα του αεροστροβίλου ξεχωριστά, με σκοπό να γίνουν πιο συγκεκριμένες οι παρατηρήσεις και σχολιασμοί.

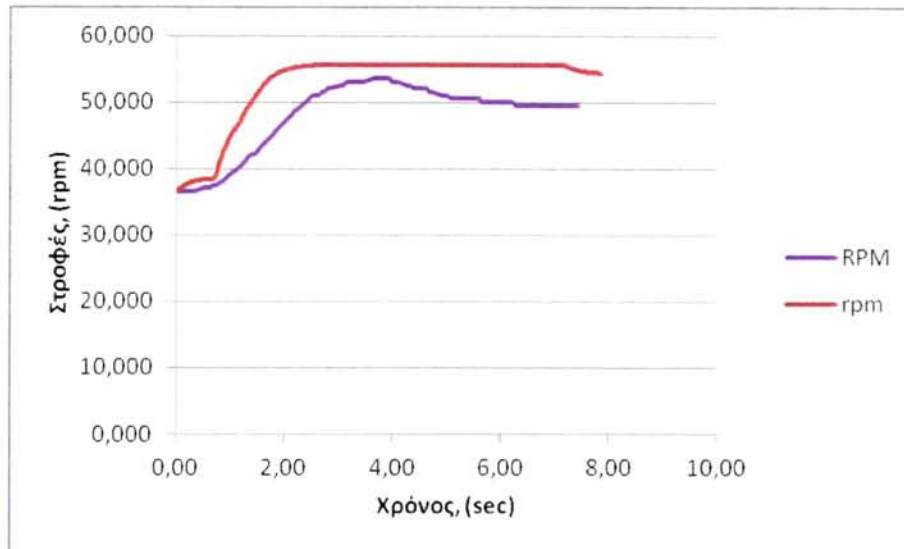
6.1 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

6.1.1 Επιτάχυνση (36500-48000)

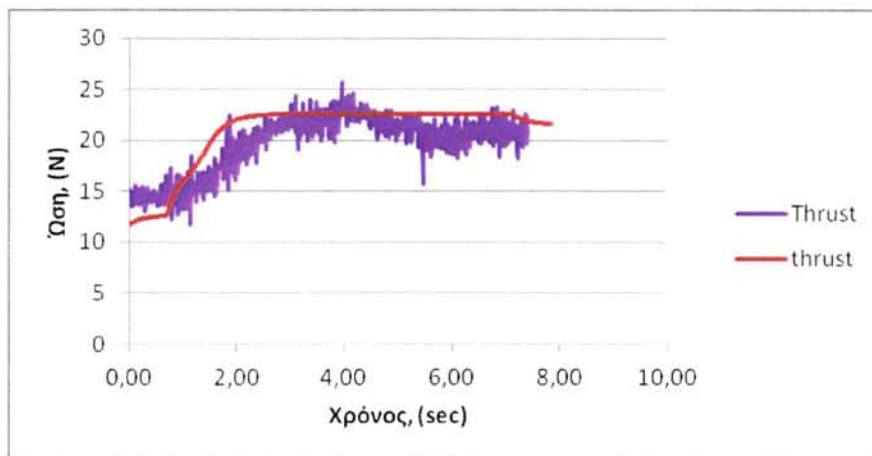
Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου του αεροστροβίλου στην επιτάχυνση, ενώ με μωβ τα αντίστοιχα του πειράματος.



Σχήμα 27. Παροχή καυσίμου του πειράματος ως είσοδος στο πρόγραμμα



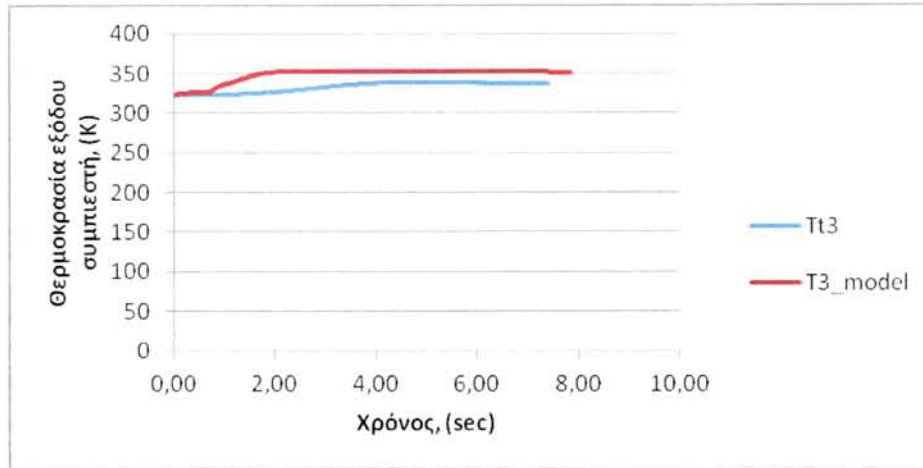
Σχήμα 28. Στροφές κινητήρα συναρτήσει του χρόνου



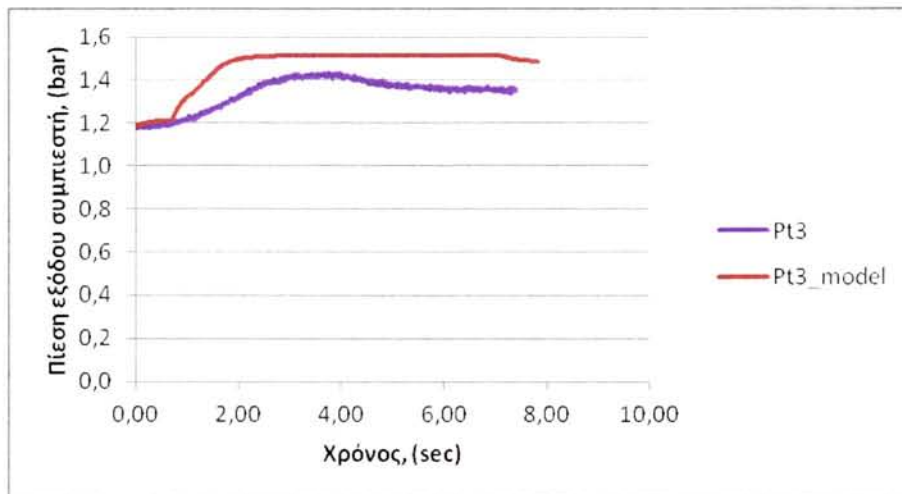
Σχήμα 29. Ώση κινητήρα

6.1.1.1 Συμπιεστής

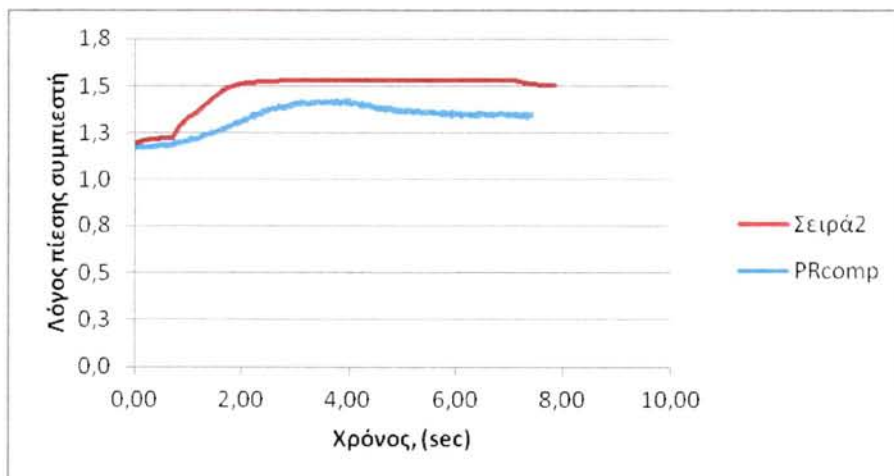
Οι μετρήσεις που υπάρχουν για τον συμπιεστή είναι η ολική πίεση και θερμοκρασία εξόδου. Βέβαια, έχει μετρηθεί και η στατική πίεση στην έξοδο του συμπιεστή, ωστόσο δε λαμβάνεται υπόψη στη σύγκριση διότι μόνο η ολική πίεση αρκεί για την σύγκριση των δεδομένων.



Σχήμα 30.Θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή



Σχήμα 31.Ολική πίεση εξόδου συμπιεστή

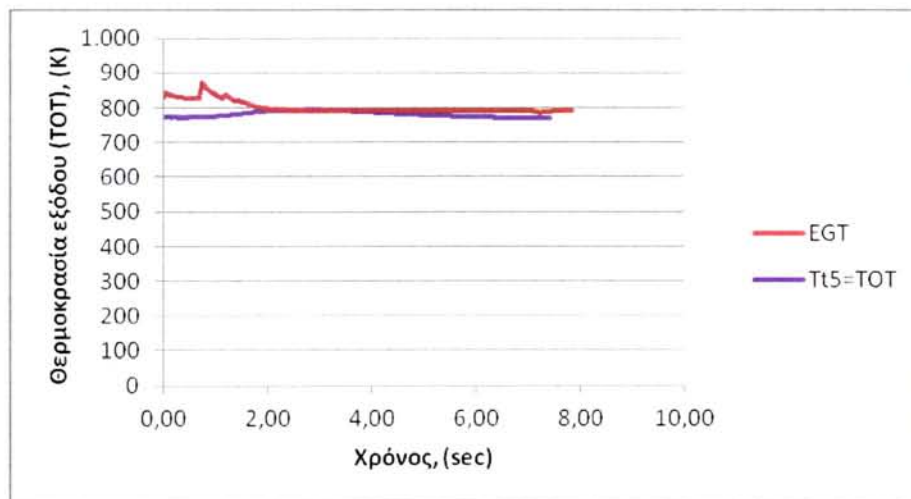


Σχήμα 32. Λόγος πίεσης συμπιεστή

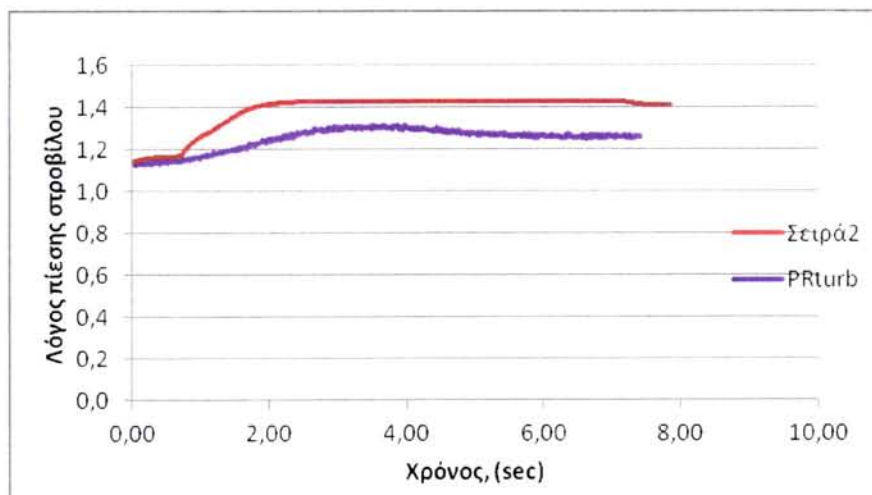
Παρατηρώντας τα προηγούμενα διαγράμματα φαίνεται ότι ο κώδικας προσομοιώνει πολύ καλά την λειτουργία του συμπιεστή όσον αφορά στη θερμοκρασία, ενώ στις πιέσεις προκύπτει πρόβλημα όταν σταθεροποιείται η παροχή καυσίμου.

6.1.1.2 Στρόβιλος

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έχουν να κάνουν με την λειτουργία του στροβίλου..



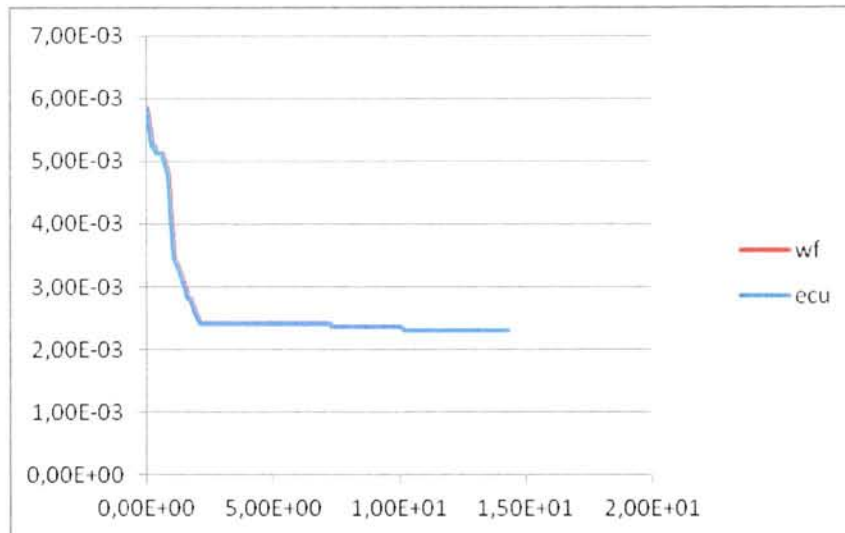
Σχήμα 33. Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου



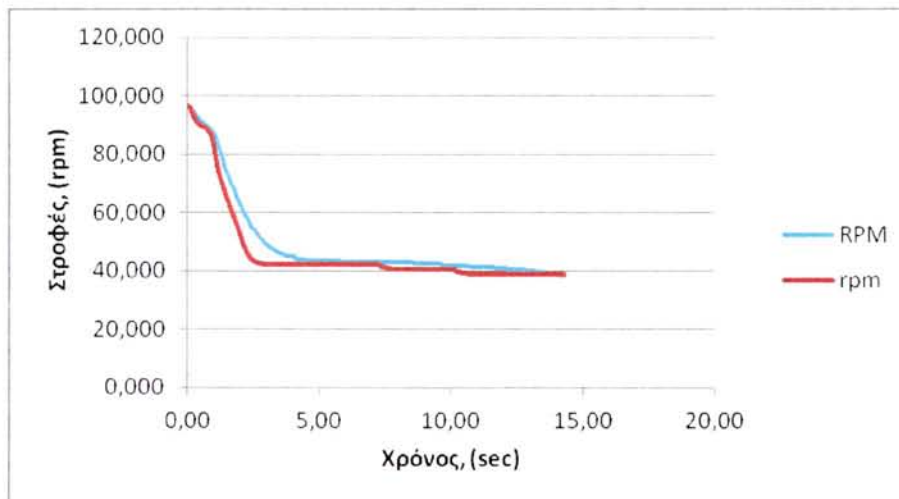
Σχήμα 34. Λόγος πίεσης στροβίλου

6.1.2 Επιβράδυνση (96500-38000)

Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου του αεριοστροβίλου στην επιβράδυνση, ενώ με μπλε τα αντίστοιχα του πειράματος.

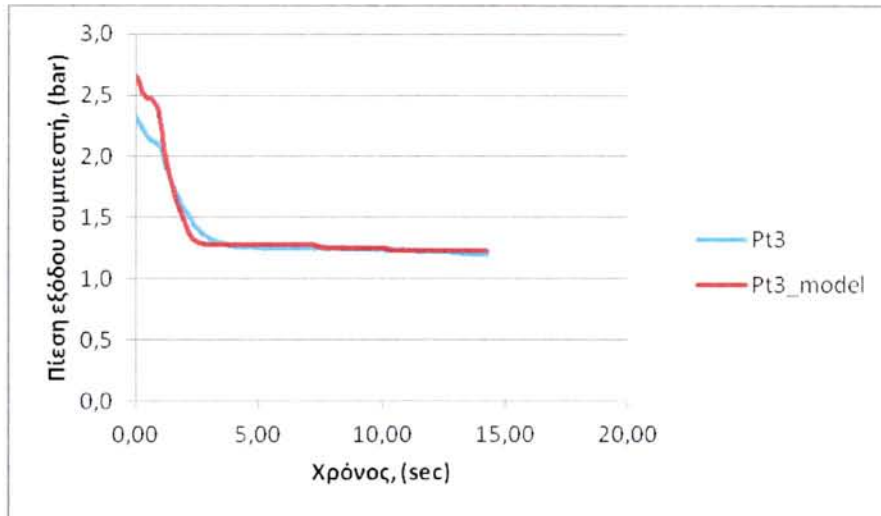


Σχήμα 35. Παροχή καυσίμου του πειράματος, ως μεταβλητή εισόδου της προσομοίωσης

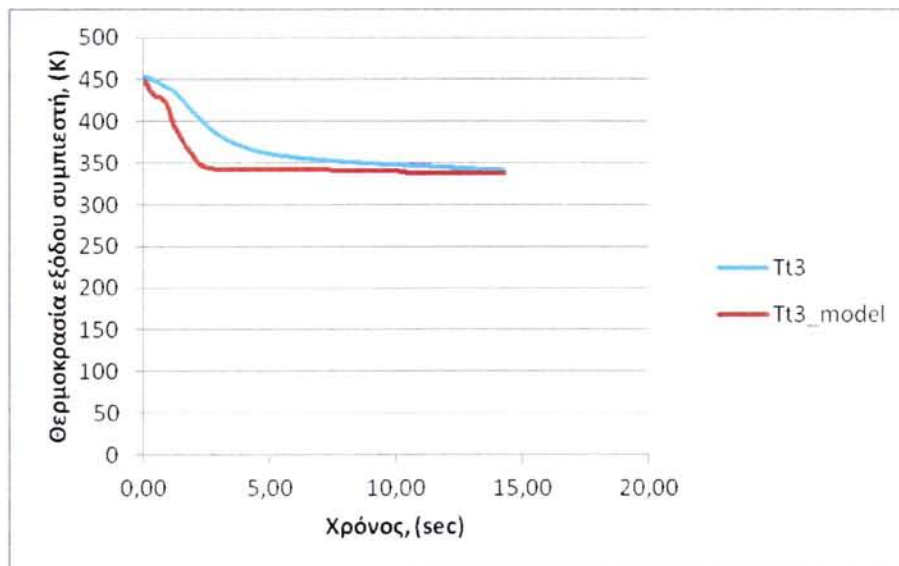


Σχήμα 36. Στροφές κινητήρα σε συνάρτηση με το χρόνο για προσομοίωση και πείραμα

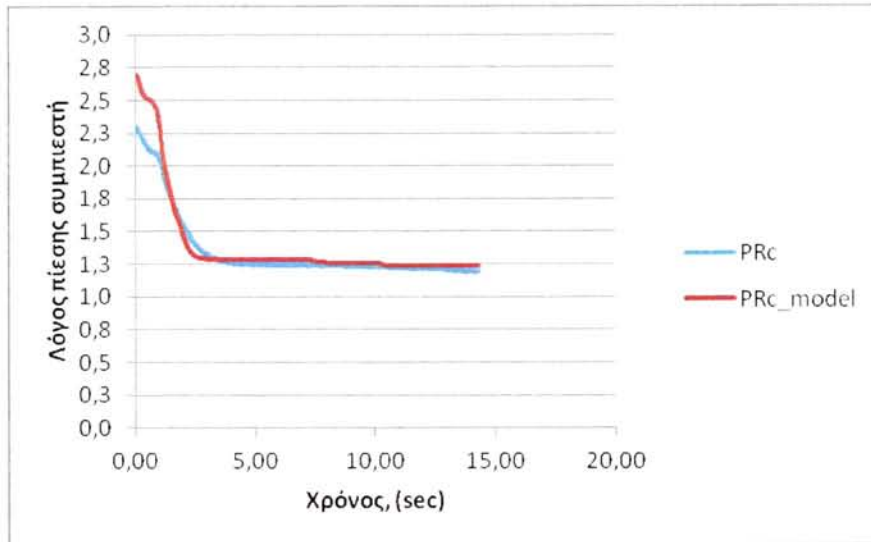
6.1.2.1 Συμπιεστής



Σχήμα 37. Ολική πίεση εξόδου συμπιεστή

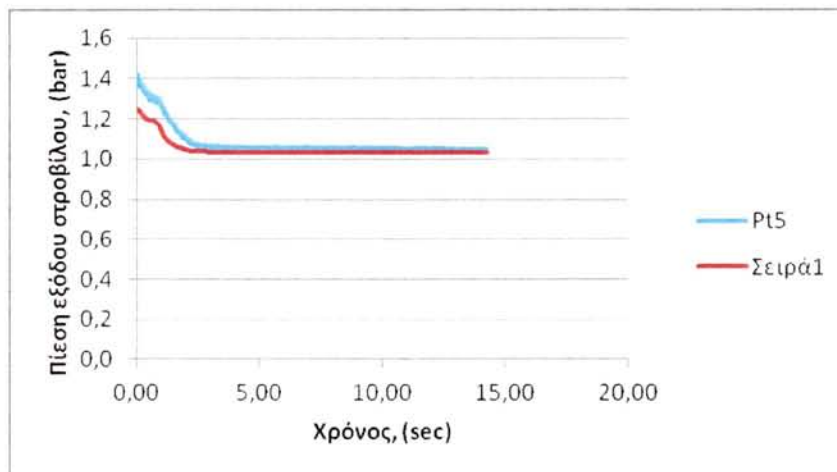


Σχήμα 38. Θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή

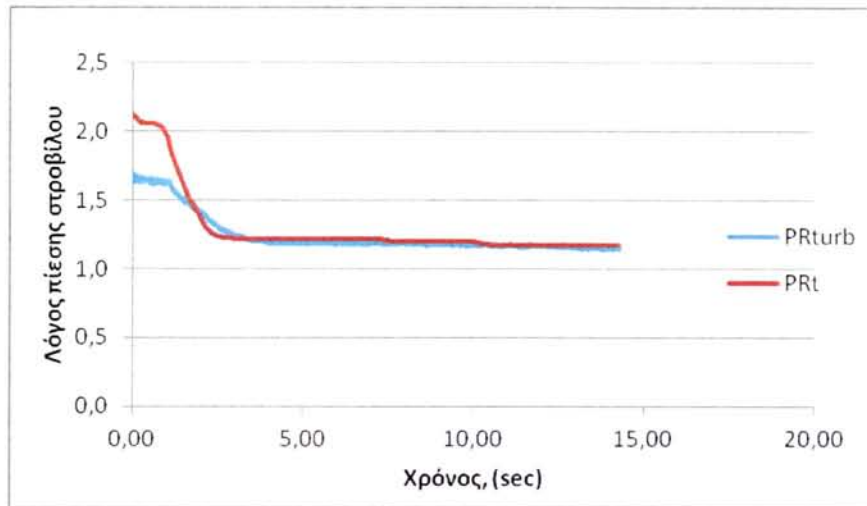


Σχήμα 39. Λόγος πίεσης συμπιεστή

6.1.2.2 Στρόβιλος



Σχήμα 40. Πίεση εξόδου στρόβιλου



Σχήμα 41. Λόγος πίεσης συμπιεστή

6.2 Σχόλια- Συμπεράσματα

Όσον αφορά στην επιτάχυνση, μπορούμε να παρατηρήσουμε πως παρόλο που η παροχή καυσίμου στο πείραμα και στο μοντέλο προσομοίωσης είναι η ίδια, οι στροφές δεν συγκλίνουν όπως επιθυμούμε, αλλά έχουν πιο απότομη κλίση και δείχνουν να επιταχύνει περισσότερο από ότι στην πραγματικότητα ο κινητήρας. Αυτό πιθανότατα να συμβαίνει λόγω της μη-καλής προσέγγισης της ροπής αδράνειας ή των θερμικών απωλειών κατά την επιτάχυνση. Επιπλέον, βλέπουμε πως οι πιέσεις σε συμπιεστή και στρόβιλο, αλλά και οι θερμοκρασίες ακολουθούν την τάση των στροφών κατά την επιτάχυνση και αποκλίνουν κάπως από το μοντέλο μας.

Στην επιβράδυνση, παρατηρούμε πως το μοντέλο δουλεύει πολύ αποδοτικότερα, καθώς προσομοιώνει αρκετά καλά τις στροφές, με ένα σφάλμα της τάξης του 6%. Παρατηρούμε, όμως, πως στις πιέσεις, τόσο στο συμπιεστή όσο και στο στρόβιλο, υπάρχει μια μικρή διαφορά από την αρχή του διαγράμματος, αν και λαμβάνουν την ίδια μεταβλητή ως δεδομένο εισόδου. Αυτό, πιθανότατα, να συμβαίνει λόγω κάποιας ασυνέχειας που υπήρξε κατά τη διάρκεια λήψης των δεδομένων του πειράματος.

Παρατηρώντας τις προηγούμενες εικόνες προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο κώδικας προσομοιώνει αρκετά καλά την λειτουργία του κινητήρα κατά την επιβράδυνση. Το μόνο πρόβλημα απόκλισης από τα πειραματικά δεδομένα συναντάται στις πιέσεις, όπου πιθανότατα, μελετώντας τις μετρήσεις που καταγράφηκαν, συνέβη κάποιο συστημικό λάθος κατά τις μετρήσεις.

Κατά την επιτάχυνση, μπορούμε να παρατηρήσουμε πως το μοντέλο δεν προσεγγίζει όπως θα θέλαμε τα πειραματικά δεδομένα, κάτι το οποίο θα αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας, ώστε να προσεγγιστούν ακριβέστερα τα μεταβατικά φαινόμενα σε αυτούς τους ρυθμούς που επιταχύνεται ο κινητήρας.

7 Ανακεφαλαίωση – Προτάσεις

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η θεωρητική και πειραματική μελέτη της λειτουργίας του κινητήρα, καθώς και η κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου του κινητήρα για την προσομοίωση της λειτουργίας του.

Η εργασία είχε δύο βασικούς πυλώνες:

1. Την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης του κινητήρα σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας
2. Την ανάπτυξη λογισμικού με στόχο την πρόσκτηση των δεδομένων με τον ταχύτερο δυνατό τρόπο, καθώς πρόκειται για μεταβατική λειτουργία που φαινόμενα εκτυλίσσονται με υψηλούς ρυθμούς ταχύτητας.

Για την κατασκευή τόσο του μοντέλου προσομοίωσης, όσο και αυτό της πρόσκτησης των δεδομένων χρειάστηκε να γίνει έρευνα σε αρκετή βιβλιογραφία και εγχειρίδια χρήσης λογισμικού, προκειμένου να επιτευχθούν όσο το δυνατόν καλύτερες εκτιμήσεις αρκετών παραμέτρων που εισάγονται στο μοντέλο μέσα από εμπειρικές σχέσεις. Επίσης, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας βελτιώθηκε το δοκιμαστήριο του κινητήρα, με σκοπό την λήψη ακριβέστερων αποτελεσμάτων, όπως της ώσης και της παροχής καυσίμου του κινητήρα.

Από τη βελτίωση του δοκιμαστηρίου και την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης και πρόσκτησης δεδομένων για τον κινητήρα Olympus προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

1. Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων έγινε φανερό ότι απαιτείται ο πιο ακριβής προσδιορισμός μιας βασικής μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη λειτουργία του κινητήρα. Αυτή είναι η κατανάλωση του καυσίμου, η οποία αυτή τη στιγμή εκτιμάται μέσω της τάσης (Voltage) που παίρνουμε από τον εγκέφαλο του κινητήρα. Θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε ακριβέστερα αυτή τη μέτρηση, γνωρίζοντας τη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος ελέγχου του εγκεφάλου, όπως και να ελέγχουμε τις τιμές αυτές μέσω ενός ηλεκτρονικού μετρητή καυσίμου (fuel meter)
2. Για την βελτίωση του μαθηματικού μοντέλου του κινητήρα, θα πρέπει να ληφθούν μετρήσεις σε περισσότερα σημεία λειτουργίας, με περισσότερες αυξομειώσεις του επιπέδου ισχύος (throttle).
3. Επίσης θα πρέπει να προσομοιωθούν ακριβέστερα οι επιδράσεις των θερμικών μεταβατικών φαινομένων και της ροπής αδράνειας του άξονα
4. Ακόμα, όπως παρατηρήσαμε, στην επιβράδυνση σημειώνεται μία ανεξήγητη διαφορά στις πιέσεις συμπίεστή και στροβίλου. Θα πρέπει να προσδιοριστεί ο λόγος της ύπαρξης της και να διορθωθεί ή να γίνει κάποιου είδους βαθμονόμηση ώστε να παίρνουμε πιο ακριβείς τιμές πιέσεων.

5. Τέλος, για να προσομοιωθεί πλήρως η μεταβατική λειτουργία του κινητήρα, θα πρέπει να εισαχθεί και ο όρος συμπίεσότητας που υφίσταται το εργαζόμενο μέσο, λόγω της αλληλεπίδρασης με τα τοιχώματα του κινητήρα, κάτι το οποίο αγνοήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, αν και γενικά συνήθως δε λαμβάνεται υπόψη στη μελέτη μικροστροβίλων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. U. Rahman and J. F. Whidborne, "A numerical investigation into the effect of engine bleed on performance of a single-spool turbojet engine," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2008.
- [2] A. G. Stamatias and K. Mathioudakis, "The influence of heat transfer effects on turbine performance characteristics " *ASME Conference Proceedings*, 2006.
- [3] A. G. S. Diamantis P. Bakalis, "Extended instrumentation and model calibration for a small micro-turbine," in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2010*, 2010.
- [4] J. J. Chin Hoong Leong, William W. Liou, "Development of a Turbojet Engine Lab For Propulsion Education," *ASME*, vol. 4085, 2004.
- [5] S. M. Camporeale, et al., "A Modular Code for Real Time Dynamic Simulation of Gas Turbines in Simulink," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 128, pp. 506-517, 2006.
- [6] A. M. B. Craig R. Davison, "Comparison of transient modeling techniques for a micro turbine engine," in *ASME Turbo Expo 2006*, 2006.
- [7] J. Kurzke, "Correlations Hidden In Compressor Maps," in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2011*.
- [8] K. Mathioudakis, et al., "Effects of Gas dynamics on Transient Performance of Turbofan Engines," National Technical University of Athens, Laboratory of Thermal Turbomachines, Athens 2002.
- [9] J. D. Mattingly, Ed., *Elements of Gas Turbine Propulsion*. 1996, p. ^pp. Pages.
- [10] O. H. AMT, "Manual & ENGINE LOG," ed.
- [11] P. P. Walsh and P. Fletcher, Eds., *Gas Turbine Performance*. 1998, p. ^pp. Pages.
- [12] A. Γ. Σταμάτης, "Η διαγνωστική στις εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων και η εφαρμογή της στην προληπτική συντήρηση " Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 1990.
- [13] Δ. Μπακάλης, "Μελέτη εγκαταστάσεων μικρών αεριοστροβίλων," Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2008.
- [14] SAE, "Aircraft propulsion system performance station designation and nomenclature."
- [15] P. Elgar, Ed., *ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ*. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 1998, p. ^pp. Pages.
- [16] <http://www.thermometricscorp.com/>.
- [17] Μ. Διαμαντής, "Μελέτη εγκαταστάσεων μικρών αεριοστροβίλων," Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2008.
- [18] N. Instruments. (2000). *LabVIEW Measurements Manual*.
- [19] N. Instruments, "Using the LabVIEW Run-Time Engine," 2001.
- [20] K. M. A. Stamatias, J. Ruiz, B. Curnock, "REAL TIME ENGINE MODEL IMPLEMENTATION FOR ADAPTIVE CONTROL & PERFORMANCE MONITORING

- OF LARGE CIVIL TURBOFANS," in *ASME TURBO EXPO 2001* 2001.
- [21] Y. A. Çengel, Ed., *Heat Transfer, A Practical Approach*. 2005, p. ^pp. Pages.
- [22] R. Andoga, et al., "Situational modeling and control of a small turbojet engine MPM 20," in *Computational Cybernetics, 2006. ICC 2006. IEEE International Conference on*, 2006, pp. 1-5.
- [23] G. R. H Cohen, Hih Saravanamutoo, "Gas Turbine Theory " *4th Edition*, vol. T.J. Press 1996.
- [24] C. R. D. A.M. Birk, "Comparison of transient modeling techniques for a micro turbine engine," *ASME Turbo Expo 2006*.
- [25] N. I. Κρικέλης, *Μοντελοποίηση και βέλτιστος συστημάτων*, 2007.
- [26] D. J. Kurzke, "MODEL BASED GAS TURBINE PARAMETER CORRECTIONS," in *ASME TURBO EXPO*, Atlanta, Georgia, USA, 2003.
- [27] Y. L. Michael Lichtsinder, "Jet Engine Model for Control and Real-Time Simulations," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* vol. 128, 2006.
- [28] M. S. Y. E. Qusai Z. Al-Hamdan, "Modeling and Simulation of a Gas Turbine Engine for Power Generation " *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 128, 2006.
- [29] N. J. V. Rajasekar Varadharajan, Y.G. Srinivasa, "Reduced order state-space modelling of a two-shaft turbopfan engine for control and off-design performance analysis," *Int. J. Automation and Control*, vol. 4, 2010.
- [30] B. Mody, "Digital Simulation of gas turbine steady-state and transient performance for current and advanced marine propulsion systems," *Phd Thesis*, 2009.
- [31] D. R. J. Peirs, F.Verplaetsen, , "A microturbine for electric power generation " *Elsevier*, 2003.
- [32] K. Hunecke, "Jet Engines: Fundamentals of Theory, Design and Operation " *Motorbooks International*, 2006.
- [33] Δ. Π. Ψωινός, "Στατιστική," *Εδόσεις Ζήτη*, 1999.
- [34] Κ. Δ. Ρακόπουλος, "Αρχές Βιομηχανικών Αεριοστροβίλων," *Εκδόσεις Φούντας*, 2001.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Π.1 *Εγχειρίδιο χρήσης κινητήρα Olympus*

Στις σελίδες που ακολουθούν περιγράφεται ο κινητήρας, τα εξαρτήματα που τον συνοδεύουν και δίνονται οδηγίες για τον τρόπο χρήσης του.

Π.1.1 *Περιγραφή κινητήρα Olympus HP ES*

Ο κινητήρας Olympus HP ES αποτελείται από ένα μονοβάθμιο ακτινικό συμπιεστή και ένα μονοβάθμιο αξονικό στρόβιλο.

Ο θάλαμος καύσης είναι δακτυλιοειδούς μορφής και τροφοδοτείται από ένα χαμηλής πίεσης σύστημα καυσίμου. Τα έδρανα της ατράκτου λιπαίνονται από την διέλευση του καυσίμου το οποίο είναι αναμιγμένο με το λιπαντικό.

Ο κινητήρας προστατεύεται από λανθασμένο χειρισμό ή καταστροφή από ένα σύστημα ελέγχου, που στο εξής θα αναφέρεται ως ECU (Engine Control Unit), το οποίο καθορίζει τις παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα και τον εξαναγκάζει να λειτουργήσει εντός των ορίων που επιβάλλει ο κατασκευαστής. Η ECU είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και δεν χρειάζεται καμιά παρέμβαση από το χρήστη.

Π.1.2 *Electronic Control Unit (ECU)*

Η ECU είναι ένα σύστημα ελέγχου με μικροεπεξεργαστή, το οποίο τροφοδοτείται από την μπαταρία του συστήματος. Έχει εισόδους για την σύνδεση του χειριστηρίου του κινητήρα, καθώς και εισόδους για τα αισθητήρια όργανα της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων και των στροφών του κινητήρα, τα οποία χρησιμοποιεί για να ελέγξει αν έχουν υπερβεί τις προκαθορισμένες μέγιστες τιμές.

Π.1.3 *Αντλία καυσίμου*

Η αντλία καυσίμου είναι γραναζωτού τύπου. Αποτελείται από δυο οδοντωτούς τροχούς, οι οποίοι περιστρέφονται μέσα στο κέλυφός της. Όλα τα τμήματα της αντλίας είναι κατασκευασμένα με μεγάλη ακρίβεια, για αυτό το λόγο απαιτείται το καύσιμο που θα χρησιμοποιηθεί να είναι καθαρό, χωρίς σωματίδια ή άλλες διαλυμένες ουσίες, οι οποίες θα βλάψουν τη λειτουργία της αντλίας.

Π.1.4 Καύσιμο

Για την λειτουργία της μηχανής μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι καυσίμων. Ωστόσο ο κατασκευαστής συστήνει την χρήση ενός μόνο καυσίμου και να μην γίνονται αλλαγές στο είδος του καυσίμου.

Τύπος καυσίμου

- | | |
|--------------------|--|
| 1. JP-4 / Kerosene | Χρησιμοποιείται στα στρατιωτικά αεροσκάφη |
| 2. Paraffin | Χρησιμοποιείται στις θερμάστρες πετρελαίου |
| 3. Jet A-1 | Χρησιμοποιείται στα πολιτικά αεροσκάφη |

Ο κινητήρας Olympus HP ES χρησιμοποιεί το καύσιμο για λίπανση, οπότε το καύσιμο πριν χρησιμοποιηθεί αναμιγνύεται με 4.5 % κ.ο. λιπαντικό Aeroshell 500. Το λιπαντικό φροντίζει για την λίπανση του κινητήρα κατά τις διαδικασίες εκκίνησης και τερματισμού της λειτουργίας. Όταν ξεκινήσει η διαδικασία τερματισμού, η ροή του καυσίμου διακόπτεται και το καύσιμο που υπάρχει μέσα στη μηχανή εξατμίζεται από την υψηλή θερμοκρασία που επικρατεί και επικάθεται σε όλες τις επιφάνειες. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιεί την λίπανση, η οποία απαιτείται για να είναι έτοιμος ο κινητήρας κατά την επομένη διαδικασία εκκίνησης.

Π.1.5 Αέριο εκκίνησης

Το αέριο εκκίνησης που χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του κινητήρα είναι προπάνιο. Η χρήση μίγματος βουτανίου/προπανίου δεν είναι αξιόπιστη επιλογή, ειδικά στα ψυχρά κλίματα.

Η φιάλη προπανίου πρέπει να είναι εφοδιασμένη με ένα ρυθμιστή πίεσης, ο οποίος είναι απαραίτητος για τον έλεγχο της ποσότητας του προπανίου που διοχετεύεται στην μηχανή κατά τη διαδικασία εκκίνησης. Επιπλέον, η φιάλη πρέπει να βρίσκεται σε ορθή θέση για να παρέχεται αέριο στον κινητήρα. Αν η φιάλη ανατραπεί, υπάρχει κίνδυνος να φτάσει υγρό προπάνιο στη μηχανή, το οποίο είναι άκρως επικίνδυνο.

Π.1.6 Ανάφλεξη μίγματος αέρα – προπανίου

Η ανάφλεξη του μίγματος αέρα – προπανίου γίνεται με την βοήθεια ενός εναυστήρα τύπου πυρακτώσεως. Αυτού του τύπου οι εναυστήρες πυρακτώνονται αφού τροφοδοτηθούν με κατάλληλη τάση. Ο εναυστήρας που χρησιμοποιεί ο κινητήρας Olympus λειτουργεί με τάση 1.5 ή 2 Volts. Είναι πολύ σημαντικός ο

έλεγχος της σωστής λειτουργίας του εναυστήρα πριν από κάθε εκκίνηση του κινητήρα. Με ένα χαλασμένο εναυστήρα υπάρχει κίνδυνος να συγκεντρωθεί μεγάλη ποσότητα προπανίου μέσα στη μηχανή, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε φωτιά. Όταν υπάρχει πρόβλημα στην εκκίνηση της μηχανής αυτό που πρέπει να ελέγχεται πρώτα είναι ο εναυστήρας καύσης.

Π.1.7 Περιγραφή λειτουργίας ECU

Η ECU ελέγχει την λειτουργία της μηχανής και την περιορίζει μέσα στα όρια που έχουν προκαθοριστεί από τον κατασκευαστή. Υπάρχουν υποδοχές για την σύνδεση των συνοδευτικών εξαρτημάτων του κινητήρα που ελέγχουν την λειτουργία του.

Οι είσοδοι της ECU είναι:

- A. Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (EGT)
- B. Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου (RPM)
- C. Επίπεδο ισχύος του κινητήρα (throttle level)
- D. Είσοδος CTF
- E. Κατάσταση του κινητήρα (running, power – down sequence, stop)
- F. Μπαταρία τροφοδοσίας

Οι έξοδοι της ECU είναι:

- A. Βαλβίδα καυσίμου
- B. Σύνδεση εναυστήρα πυρακτώσεως
- C. Βαλβίδα αερίου εκκίνησης
- D. Σύνδεση μίζας
- E. Σύνδεση αντλίας καυσίμου
- F. Σύνδεση EDT (Engine Data Terminal)

Π.1.8 Περιγραφή των εισόδων στην ECU

Παρακάτω αναλύονται οι είσοδοι της ECU με την σειρά που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

- Στην είσοδο A της ECU συνδέεται ένα θερμοστοιχείο τύπου K. Το θερμοστοιχείο τοποθετείται στην ειδική οπή που υπάρχει στο ακροφύσιο του κινητήρα (1-2 mm μέσα στο ακροφύσιο). Προσοχή χρειάζεται στην πολικότητα του θερμοστοιχείου, η πρίζα έχει μια πλατιά και μια στενή επαφή.
- Στην είσοδο B της ECU συνδέεται ο μετρητής στροφών την ατράκτου του κινητήρα.
- Στην είσοδο C συνδέεται το καλώδιο του χειριστηρίου που μεταφέρει το σήμα

για το επίπεδο ισχύος της μηχανής.

- Στην είσοδο D συνδέεται το κουμπί που χρησιμεύει για την ρύθμιση ασύρματου χειριστηρίου στην περίπτωση που ο κινητήρας τοποθετηθεί σε κάποιο μοντέλο αεροπλάνου.
- Στην είσοδο E συνδέεται το καλώδιο του χειριστηρίου που μεταφέρει το σήμα για την κατάσταση της μηχανής
- Στην είσοδο F συνδέεται η μπαταρία που τροφοδοτεί όλα τα εξαρτήματα του κινητήρα.

Στην συνέχεια περιγράφονται οι έξοδοι της ECU με την σειρά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

- Στην έξοδο A συνδέεται η βαλβίδα καυσίμου. Όταν συνδέεται η βαλβίδα καυσίμου πρέπει να δοθεί προσοχή στην διεύθυνση ροής, ώστε να τοποθετηθεί με σωστό τρόπο.
- Στην έξοδο B συνδέεται ο εναυστήρας πυρακτώσεως. Ο θετικός πόλος της εξόδου συνδέεται στον εναυστήρα και ο αρνητικός γειώνεται πάνω στην μηχανή. Δηλαδή, συνδέεται πάνω σε έναν από τους οκτώ κοχλίες του καλύμματος του κινητήρα.
- Στην έξοδο C συνδέεται η βαλβίδα του προπανίου. Όταν συνδέεται η βαλβίδα θα πρέπει να προσεχθεί η φορά με την οποία τοποθετείται ώστε να είναι αυτή που πρέπει.
- Η έξοδος D πρέπει να συνδεθεί με το καλώδιο της μίζας του κινητήρα.
- Στην έξοδο E συνδέεται με την αντλία καυσίμου του κινητήρα. Το εμβαδό των καλωδίων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1.5mm². Το μέγιστο μήκος του καλωδίου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 50cm.
- Η έξοδος F συνδέεται με το τερματικό ενδείξεων της μηχανής (EDT), ή με της σειριακή θύρα ενός Η/Υ, για την απεικόνιση δεδομένων λειτουργίας στην οθόνη του.

Π.1.9 Βομβητής – Ηχητικά σήματα

Η ECU περιέχει ένα ενσωματωμένο βομβητή, ο οποίος με ηχητικά σήματα προειδοποιεί το χρήστη για την κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα. Τα διάφορα είδη ηχητικών σημάτων είναι:

- OK : Ήχος υψηλής συχνότητας που ακολουθείται αμέσως από ήχο χαμηλής συχνότητας.
- Εκκίνηση : Όταν ξεκινάει η διαδικασία εκκίνησης ακούγεται μια σειρά από 5 ήχους, μετά τον πέμπτο ήχο αρχίζει η διαδικασία εκκίνησης.

- Έλλειψη σήματος : Αυτός ο ήχος είναι χαμηλής συχνότητας με μικρές παύσεις. Συμβαίνει όταν δεν είναι συνδεδεμένο το κανάλι (είσοδος E) που καθορίζει την κατάσταση του κινητήρα.
- Αδυναμία εκκίνησης : Αυτός ο ήχος είναι υψηλής συχνότητας με μικρές παύσεις. Εκπέμπεται όταν επιχειρείται εκκίνηση της μηχανής και η θερμοκρασία του κινητήρα είναι υψηλή ή το θερμοστοιχείο που συνδέεται στο ακροφύσιο είναι αποσυνδεδεμένο.
- Κατάσταση ασφαλείας : Αυτός ο ήχος είναι υψηλής/χαμηλής συχνότητας. Εκπέμπεται όταν η ECU είναι σε κατάσταση ασφαλείας.
- Βλάβη : Αυτό ο ήχος εκπέμπεται όταν υπάρχει βλάβη στο σύστημα. Αποτελείται από έξι ήχους μικρής διάρκειας υψηλής ή χαμηλής συχνότητας. Ο υψηλής ή χαμηλής συχνότητας ήχος υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει σφάλμα ή υπάρχει. Η θέση του χαμηλής συχνότητας ήχου (δηλαδή 1ος, 2ος, 3ος κλπ) στη ακολουθία των έξι ήχων υποδεικνύει το είδος της βλάβης.
 1. Θέση 1: Σφάλμα κατά την διαδικασία εκκίνησης ή χαμηλή ταχύτητα περιστροφής
 2. Θέση 2: Βλάβη στο κανάλι εισόδου E (διακόπτης κατάστασης)
 3. Θέση 3: Βλάβη στο κανάλι εισόδου C (επίπεδο ισχύος)
 4. Θέση 4: Βλάβη κατά τη λήψη της EGT
 5. Θέση 5: Υψηλός αριθμός στροφών
 6. Θέση 6: Αφόρτιστη μπαταρία

Όταν παρουσιαστεί κάποιο σφάλμα αυτό εμφανίζεται στο τερματικό ενδείξεων (EDT). Για να συνεχιστεί η λειτουργία του κινητήρα θα πρέπει αυτό να διαγραφεί. Η διαγραφή του σφάλματος γίνεται θέτοντας τον διακόπτη τριών θέσεων του χειριστηρίου στη θέση “Stop” και το διακόπτη για το επίπεδο ισχύος της μηχανής στο “Max 100%”.

Π.1.10 Λειτουργία του κινητήρα

Π.1.10.1 Διαδικασία εκκίνησης

Παρακάτω αναφέρονται τα βήματα για την εκκίνηση της μηχανής:

1. Στρέψτε το διακόπτη για το επίπεδο ισχύος της μηχανής στη θέση “Min 0%”.
2. Τοποθετήστε το διακόπτη τριών θέσεων του χειριστηρίου στη θέση “Stop”
3. Ανοίξτε την φιάλη προπανίου.
4. Για να ξεκινήσει ο μικροστρόβιλος τοποθετείστε το διακόπτη τριών θέσεων στη θέση “Running Position”. Θα ακουστούν 5 χαρακτηριστικοί ήχοι από την ECU, και

στη συνέχεια θα ξεκινήσει η διαδικασία εκκίνησης. Θα ενεργοποιηθεί η μίζα για να περιστρέψει τον κινητήρα και θα αρχίσει η διοχέτευση του αερίου εκκίνησης στο θάλαμο καύσης.

5. Στη συνέχεια, όταν οι στροφές φτάσουν τις 9000RPM και η EGT τους 88 °C, διακόπτεται η παροχή του αερίου εκκίνησης, και η ECU θέτει σε λειτουργία την αντλία καυσίμου ανοίγοντας παράλληλα και την βαλβίδα. Η φιάλη του προπανίου πρέπει να παραμείνει ανοιχτή μέχρι η μηχανή να ξεπεράσει τις 36000RPM.

6. Η ECU θα αυξήσει αυτόματα τις στροφές του κινητήρα στο σημείο βαθμονόμησης του, περίπου 50000RPM. (Τώρα μπορεί να κλείσει η φιάλη προπανίου). Η ECU θα κρατήσει την μηχανή στις 50000RPM για περίπου 5 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια θα μειώσει τις στροφές στο ρελαντί (36000RPM).

7. Μετά από αυτές τις λειτουργίες ο χρήστης μπορεί να λειτουργήσει την μηχανή σύμφωνα με τις ανάγκες του.

Παρατηρήσεις

- ✓ Πριν από κάθε εκκίνηση θα πρέπει η μπαταρία της μηχανής να είναι πλήρως φορτισμένη για να μπορέσει να τροφοδοτηθεί επαρκώς η μίζα και ο εναυστήρας και να είναι ασφαλής η εκκίνηση.
- ✓ Εάν γίνει απόπειρα για εκκίνηση της μηχανής και ακούγεται ένας συνεχής οξύς ήχος με μικρές διακοπές, η θερμοκρασία εξάτμισης της μηχανής είναι πολύ υψηλή για να ξεκινήσει η μηχανή (πάνω από 88°C). Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα θα πρέπει ο διακόπτης του χειριστηρίου να τοποθετηθεί στη μεσαία θέση για να ψυχθεί η μηχανή. Όταν ψυχθεί επαρκώς η μηχανή μπορεί να ξεκινήσει πάλι.
- ✓ Κατά την αύξηση του επιπέδου ισχύος για πρώτη φορά μετά την εκκίνηση της μηχανής, υπάρχει περιορισμός της ισχύος της μηχανής στο 90% για 3-4 δευτερόλεπτα, ώστε να ρυθμιστεί η ECU. Επομένως όταν απαιτείται η μέγιστη ισχύς θα πρέπει πρώτα η μηχανή να έχει δουλέψει για 4 δευτερόλεπτα στο σημείο, στο οποίο το επίπεδο ισχύος είναι μέγιστο.

Π.1.10.2 Διαδικασία τερματισμού λειτουργίας

Για τον ομαλό τερματισμό της λειτουργίας, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η αυτόματη διαδικασία διακοπής της λειτουργίας, η οποία αποτελείται από τα εξής βήματα:

- ✓ Τοποθετήστε το διακόπτη τριών θέσεων του χειριστηρίου στην μεσαία θέση "Auto Stop" για να ενεργοποιηθεί η αυτόματη διαδικασία διακοπής της λειτουργίας
- ✓ Η ECU μετά από αυτή την πράξη θα επιβραδύνει τον κινητήρα στις 60000RPM για

περίπου 5 δευτερόλεπτα και θα περιμένει μέχρι η θερμοκρασία των καυσαερίων να σταθεροποιηθεί.

Προσοχή: υπάρχουν ακόμα 2 kg ώσης σε αυτές τις στροφές

- ✓ Στη συνέχεια η ECU θα σταματήσει τη μηχανή
- ✓ Μετά η ECU θα ενεργοποιήσει και θα απενεργοποιήσει αρκετές φορές τη μίζα, μέχρι η EGT να πέσει κάτω από 88°C.

Πλέον η ECU είναι έτοιμη για μια νέα εκκίνηση.

Π.1.10.3 Διαδικασία τερματισμού σε έκτακτη ανάγκη

Αν παρουσιαστεί έκτακτη ανάγκη για διακοπή της λειτουργίας, και η μηχανή πρέπει να σταματήσει αμέσως, τοποθετήστε τον διακόπτη τριών θέσεων του χειριστηρίου στη θέση "Stop". Η ECU μετά από αυτή την κίνηση, θα σταματήσει τη μηχανή αμέσως, σε οποιοδήποτε στροφές και αν λειτουργεί. Η μέθοδος αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο σε περίπτωση ανάγκης.

Π.1.11 Προληπτική συντήρηση

Για την καλύτερη λειτουργία της μηχανής θα πρέπει να γίνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα προληπτική συντήρηση καθώς και επιθεώρηση για την ύπαρξη βλαβών.

Π.1.11.1 Εποπτικός έλεγχος του κινητήρα

Ο εποπτικός έλεγχος του κινητήρα θα πρέπει να πραγματοποιείται κάθε 1 ώρα λειτουργίας του κινητήρα. Κατά τη διάρκεια του ελέγχου αυτού θα πρέπει να επιθεωρούνται:

- ✓ Το κέλυφος του κινητήρα εξωτερικά, ειδικά για μεταβολές του χρώματος του, το οποίο υποδεικνύει μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του κινητήρα.
- ✓ Οι βάσεις του κινητήρα για πιθανές ρωγμές.
- ✓ Η εισαγωγή του κινητήρα και η πτερωτή του συμπιεστή
- ✓ Η αντλία καυσίμου για τυχόν διαρροές από το κέλυφος της.
- ✓ Το δοχείο καυσίμου για τυχόν διαρροές.
- ✓ Οι πτερωτές του συμπιεστή και του στροβίλου για τυχόν επαφή με το κέλυφος του κινητήρα.
- ✓ Το φίλτρο του καυσίμου.

Π.1.11.2 Έλεγχος των εδράνων κύλισης του άξονα περιστροφής

Η κατάσταση των εδράνων κύλισης μπορεί να ελεγχθεί περιστρέφοντας τον

άξονα του κινητήρα με το χέρι. Ωστόσο και κατά την λειτουργία του κινητήρα θα πρέπει ελέγχεται:

- ✓ Αν ο κινητήρας παράγει υψηλότερα επίπεδα θορύβου από τα κανονικά, τότε πιθανόν τα έδρανα κύλισης του είναι φθαρμένα από ακαθαρσίες στο καύσιμο ή στον αναρροφούμενο αέρα. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να αντικατασταθεί το καύσιμο (και/ή το φίλτρο) και να γίνει δοκιμαστική λειτουργία του κινητήρα σε περιοχή απαλλαγμένη, όσο είναι αυτό εφικτό, από σκόνη.
- ✓ Αν η απόδοση του κινητήρα κατά τη δοκιμαστική λειτουργία είναι κανονική, δεν είναι απαραίτητο να αντικατασταθούν τα έδρανα κύλισης. Αλλά είναι απαραίτητο να ελέγχονται πιο συχνά.
- ✓ Αν παρατηρούνται ανωμαλίες σε ορισμένα σημεία κατά την περιστροφή του άξονα με το χέρι, τότε ένα από τα δύο έδρανα κύλισης είναι φθαρμένο. Αυτό μπορεί να έχει προκληθεί, για παράδειγμα, από σωματίδια σκόνης ή άμμου τα οποία έχουν απορροφηθεί από τη μηχανή (περίπου 1% του αναρροφούμενου αέρα διέρχεται από τα έδρανα κύλισης για ψύξη) ή από ακαθαρσίες στο καύσιμο.

Π.1.11.3 Αποθήκευση και λίπανση

Αν η μηχανή δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για διάστημα 3 μηνών ή και μεγαλύτερο θα πρέπει να λιπανθεί με ένα μίγμα καυσίμου και 20% Aeroshell 500 λιπαντικό. Το μίγμα αυτό εισάγεται με την βοήθεια μια ιατρικής σύριγγας (ποσότητα 3ccm) στην υποδοχή L που βρίσκεται κάτω από το μπροστινό κάλυμμα του κινητήρα. Αυτή η διαδικασία γίνεται για αποτραπεί η διάβρωση των εδράνων κύλισης, σε περίπτωση που η μηχανή αποθηκευτεί σε περιβάλλον με υγρασία.

Αν ο κινητήρας δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για μεγαλύτερο διάστημα (6-12 μήνες), θα πρέπει να τοποθετηθεί σε κατακόρυφη θέση, με τον συμπιεστή προς τα πάνω, και την είσοδο και έξοδο καλυμμένες για την αποφυγή εισόδου της σκόνης. Μετά από αυτή την περίοδο αποθήκευσης, ο κινητήρας θα πρέπει να λιπανθεί πριν την επαναχρησιμοποίηση του.

Π.1.11.4 Αφαίρεση του μπροστινού καλύμματος του κινητήρα και λίπανση πριν την επαναχρησιμοποίηση

Η διαδικασία αφαίρεσης του μπροστινού καλύμματος και της λίπανσης πριν την επαναχρησιμοποίηση του κινητήρα περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- a) Αφαίρεση των συνδετήρων του αέρα και του αερίου εκκίνησης

χρησιμοποιώντας ένα κλειδί τύπου Allen 2.5mm το οποίο εισάγεται στην οπή του συνδετήρα και περιστρέφεται αριστερόστροφα.

Σημείωση: Ο συνδετήρας του καυσίμου δεν μπορεί να αφαιρεθεί. Εάν επιχειρηθεί η αφαίρεση του με την διαδικασία που προαναφέρθηκε το πιο πιθανό είναι να καταστραφεί και να προκληθεί διαρροή καυσίμου.

- b) Ξέσφιγμα των 7 από τις 8 βίδες που συγκρατούν το κάλυμμα του κινητήρα γυρίζοντας τες μισή στροφή. Προσοχή: να μην ξεσφιχτεί η 8η βίδα γιατί θα πάψει να ισχύει η εγγύηση του κινητήρα.
- c) Το μπροστινό κάλυμμα θα πρέπει τώρα να έχει 'χαλαρώσει', οπότε μπορεί να αφαιρεθεί, εισάγοντας 2 κλειδιά Allen, ή κάτι παρόμοιο, σε 2 από τις οπές που χρησιμοποιούνται για να το ασφαλίσουν στην μηχανή και τραβώντας το προς τα έξω. Προσοχή: να μην τραυματιστεί το καλώδιο του αισθητήρα στροφών.
- d) Αφαιρώντας το σωληνάκι που είναι στον συνδετήρα του καυσίμου και χρησιμοποιώντας μια ιατρική σύριγγα στην οποία έχει προσαρμοστεί ένα σωληνάκι μικρού μήκους, εισάγονται 5 ή 6cc καυσίμου και 20% λιπαντικού Aeroshell 500 στην οπή με την ένδειξη 'Lube'.
- e) Στη συνέχεια επανατοποθετείται το σωληνάκι του καυσίμου και προσαρμόζεται το κάλυμμα του κινητήρα αντιστρέφοντας την προηγούμενη διαδικασία.

Π.2 Περιγραφή κώδικα

Το πρόγραμμα TJ είναι γραμμένος σε κώδικα FORTRAN 77. Έχει δημιουργηθεί από τον καθηγητή Α. Σταμάτη με σκοπό την προσομοίωση των πιο κοινών τύπων κινητήρων turbojet. Αποτελείται από οκτώ αρχεία τύπου *.for* τα οποία είναι τα *MainPro.for*, *GTModel.for*, *Engine.for*, *Interpolation.for*, *Numerical.for*, *Thermo.for*, *obiheat.for* και *obtransi.for*, στα οποία περιλαμβάνονται όλες οι υπορουτίνες που προσομοιώνουν την λειτουργία του αεριοστροβίλου.

Πέρα από τα αρχεία που περιέχουν τον κώδικα, για να τρέξει το πρόγραμμα απαιτούνται και κάποια αρχεία εισόδου-εξόδου. Αυτά είναι τα *Accuracy.txt*, *areabl.txt*, *Cmap.txt*, *Ctmap.txt*, *data.txt*, *debug.txt*, *engine.dat*, *Factors.txt*, *gtperf.dat*, *input.txt*, *map_position.txt*, *INSERT_DATA.txt*, *Measurements.txt*, και *Thermodynamic_quantities.txt*.

Π.2.1 Περιγραφή αρχείων κώδικα

Π.2.1.1 Αρχείο MainPro.for

Στο αρχείο αυτό γίνεται η ανάγνωση των αρχείων εισόδου *Cmap.txt*, *Ctmap.txt*, *data.txt*, *areabl.txt*, *Accuracy.txt*, *input.txt*, *data.txt*, *INSERT_DATA.txt*, καθώς και η εγγραφή των αρχείων εξόδου *Thermodynamic_quantities.txt*, *map_position.txt*, *guessing_variables.txt*, *Factors.txt*. Όσον αφορά στο αρχείο *Measurements.txt*, αυτό μπορεί να είναι, είτε εξόδου είτε εισόδου, ανάλογα με τη λειτουργία του προγράμματος, η οποία μπορεί να είναι ή ευθεία (simulation) ή αντίστροφη (adaptive) λειτουργία.

Επίσης γίνεται κλήση της υπορουτίνας GTModel.

Π.2.1.2 Αρχείο GTModel.for

Στο αρχείο αυτό υπάρχουν οι εξής υπορουτίνες:

- GTModel
- RESULT
- Initialization

Π.2.1.3 Αρχείο Engine.for

Σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι υπορουτίνες που αφορούν την προσομοίωση συνιστωσών στροβιλοαντιδραστήρα ενός άξονα. Οι υπορουτίνες αυτές με την σειρά που εμφανίζονται στο αρχείο είναι:

- engine
- inlet
- comprbleed
- civol
- compr
- difsr
- burn
- remix
- cooler
- cturb
- AfterBurn
- nozzle
- machsolversup

- machsolversub
- machsolver
- thrustcalc
- dummy
- cvchart

Π.2.1.4 Αρχείο Numerical.for

Σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι υπορουτίνες που πραγματοποιούν τους υπολογιστικούς αλγορίθμους που απαιτούνται για την προσομοίωση του αεριοστροβίλου.

Οι υπορουτίνες αυτές με την σειρά που εμφανίζονται στο αρχείο είναι:

- amoeba
- obifunct
- J79NR
- LUDCMP
- LUBKSB
- J79FUNCT
- J79FDJAC
- J79GVAR
- J79ERVAR
- svdcmp
- svdsrt

Π.2.1.5 Αρχείο Interpolation.for

Οι υπορουτίνες που υπάρχουν σε αυτό το αρχείο χρησιμεύουν για παρεμβολή στις χαρακτηριστικές καμπύλες των χαρτών των συνιστωσών καθώς και των συντελεστών που χρησιμεύουν για την εκτίμηση των υποθετικών μεγεθών.

Οι υπορουτίνες κατά σειρά εμφάνισης στο αρχείο είναι:

- map
- afquir
- OBICUR
- SURFINTER
- EXPAND
- BISECT
- splint
- spline
- mapevo

Π.2.1.6 Αρχείο Thermo.for

Σε αυτό το αρχείο οι υπορουτίνες που υπάρχουν υπολογίζουν τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου και του καυσίμου.

Οι υπορουτίνες με τη σειρά που εμφανίζονται στο αρχείο είναι:

- synthesis
- SteamSatPress
- procom
- combustion
- therprop
- fuelhu
- gasfuelsynthesis
- gasfuelhu
- thermo
- thturb
- qays0
- qays

Π.2.2 Περιγραφή αρχείων εισόδου-εξόδου

Στις σελίδες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αρχεία που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για την εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων.

Π.2.2.1 Accuracy.txt

Στο αρχείο αυτό εισάγονται τα δεδομένα που αφορούν τον επαναληπτικό αλγόριθμο επίλυσης του μη – γραμμικού συστήματος που προκύπτει από την προσομοίωση του αεριοστροβίλου. Πιο συγκεκριμένα εισάγονται: ο αριθμός των επαναλήψεων, η ακρίβεια για την σύγκλιση των συναρτήσεων σφάλματος και το βήμα για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα.

Π.2.2.2 Areabl.txt

Σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι χαρακτηριστικές που προσδιορίζουν την μεταβολή του εμβαδού του ακροφυσίου συναρτήσεων των απομαστεύσεων του συμπιεστή.

Π.2.2.3 Cmap.txt

Σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του συμπιεστή. Η είσοδος γίνεται με την παρακάτω μορφή:

A		
B		
C		
D	E	F
D	E	F
D	E	F
B		
C		
D	E	F

όπου:

A : Αριθμός ισοταχών του χάρτη

B : Ανηγμένος αριθμός στροφών κάθε ισοταχούς

C : Αριθμός δεδομένων που προσδιορίζουν κάθε ισοταχή

D : Ανηγμένη παροχή

E : Λόγος πίεσης

F : Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης

Π.2.2.4 Data.txt

Σε αυτό το αρχείο ορίζονται οι συνθήκες περιβάλλοντος του αεροστροβίλου. Δηλαδή η πίεση και η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η υγρασία, το υψόμετρο και ο αριθμός Mach. Εκτός από τις συνθήκες περιβάλλοντος ορίζεται και η μεταβλητή απόφασης (π.χ. στροφές, παροχή καυσίμου κλπ.) και οι παράμετροι προσαρμογής του μοντέλου.

Π.2.2.5 Cmap.txt

Σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του στοβίλου. Η είσοδος γίνεται με την παρακάτω μορφή:

A		
B		
C		
D	E	F
D	E	F
D	E	F
B		
C		
D	E	F

όπου:

A : Αριθμός ισοταχών του χάρτη

B : Ανηγμένος αριθμός στροφών κάθε ισοταχούς

C : Αριθμός δεδομένων που προσδιορίζουν κάθε ισοταχή

D : Λόγος πίεσης

E : Ανηγμένη παροχή

F : Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης

Π.2.2.6 Debug.txt

Στο αρχείο αυτό παρατίθενται οι καμπύλες με τις οποίες γίνεται εκτίμηση των μεγεθών υπόθεσης.

Π.2.2.7 Engine.dat

Στο αρχείο αυτό δίνονται όλες οι παράμετροι που απαιτούνται για τον καθορισμό του τύπου του αεροστροβίλου. Επίσης δίνονται στοιχεία που αφορούν τις διαστάσεις της μηχανής, το καύσιμο και τιμές για τον καθορισμό των σημείων λειτουργίας.

Π.2.2.8 Factors.txt

Στο αρχείο αυτό τυπώνονται οι αποκλίσεις των δεικτών λειτουργικής κατάστασης. Όταν εκτελείται το ευθύ μέρος του προγράμματος έχουν την τιμή 0.

Π.2.2.9 gtpperf.txt

Σε αυτό το αρχείο παρατίθεται το σύνολο των θερμοδυναμικών μεγεθών του εργαζόμενου μέσου που περιγράφουν την λειτουργία του αεροστροβίλου. Παρατίθενται, επίσης, τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη του αεροστροβίλου όπως βαθμοί απόδοσης, ισχύς στροβίλου και συμπιεστή, κατανάλωση καυσίμου κλπ.

Π.2.2.10 input.txt

Σε αυτό το αρχείο καθορίζεται η είσοδος του προγράμματος, δηλαδή η μεταβλητή απόφασης που θα δέχεται σαν είσοδο το πρόγραμμα. Ο τρόπος – προσομοίωση (simulation) ή αντίστροφα (adaptive)- με το οποίο λειτουργεί το πρόγραμμα. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιεί κατά την αντίστροφη λειτουργία και οι αλγόριθμοι με τους οποίους θα γίνει το τρέξιμο του κώδικα.

Π.2.2.11 map position.txt

Στο αρχείο αυτό τυπώνονται τα σημεία του χάρτη του συμπιεστή και του στροβίλου, πάνω στα οποία «κινείται» το πρόγραμμα για τον προσδιορισμό του κάθε σημείου λειτουργίας.

Π.2.2.12 Measurements.txt

Σε αυτό το αρχείο εισάγονται οι πειραματικές μετρήσεις από την λειτουργία του αεροστροβίλου για την λειτουργία του προγράμματος σε αντίστροφο τρέξιμο. Όταν το πρόγραμμα κάνει προσομοίωση τυπώνει τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίζει.

Π.2.2.13 INSERT DATA.txt

Στο αρχείο INSERT_DATA.txt εισάγονται όλα τα δεδομένα που επηρεάζουν τη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα, όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συνιστωσών, οι συντελεστές συναγωγής και θερμικής αγωγιμότητας για τα μέταλλα, καθώς και η ροπή αδράνειας που εισάγεται κατά τη λειτουργία αυτή.

Π.3 Περιγραφή υπορουτινών

Στο παράρτημα αυτό περιγράφονται οι σημαντικότερες υπορουτίνες του κώδικα και ρόλος τους στην επίλυση του συστήματος.

Π.3.1 Υπορουτίνα *GTModel*

1. Σκοπός

Πραγματοποιεί τον ορισμό των παραμέτρων λειτουργίας του αεροστροβίλου, και ξεκινά την κύρια διαδικασία υπολογισμού του κύκλου λειτουργίας ανάλογα με την χρήση του κώδικα σε ευθεία λειτουργία ή αντίστροφη.

2. Κάλεσμα

call *GTModel* (*arpmc*, *amap*, *arpmm*, *arpmc*, *arpmr*, *iercd*)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
<i>arpmc</i>	structure	Περιέχει τις μεταβλητές εξόδου
<i>amap</i>	structure	Περιέχει τα δεδομένα των χαρτών
<i>arpmm</i>	structure	Περιέχει τις μετρήσεις
<i>arpmc</i>	structure	Περιέχει τις μεταβλητές εισόδου
<i>arpmr</i>	structure	Περιέχει τα δεδομένα των αρχείων <i>input.txt</i> και <i>accuracy.txt</i>
<i>iercd</i>	integer	Δείκτης σφάλματος

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: *initialization*, *J79NR*, *amoeba*, *resul*

Π.3.2 Υπορουτίνα *RESUL*

1. Σκοπός

Τυπώνει τα αποτελέσματα της λειτουργίας του αεροστροβίλου στο αρχείο *gtperf.dat*.

2. Κάλεσμα

call *RESUL*

Π.3.3 Υπορουτίνα *initialization*

1. Σκοπός

Καθορίζει τις συνθήκες εισόδου στον αεροστρόβιλο καθώς και τα υποθετικά μεγέθη για την λειτουργία του προγράμματος.

2. Κάλεσμα

call initialization (initial, npinit, speedtd, prctb, t6tb, prcttb, setopvar, setabvar,x)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
initial	integer	Καθορίζει αν η εκτίμηση αρχικών τιμών θα γίνει χρησιμοποιώντας την γραμμή λειτουργίας ή τις πινακοποιημένες τιμές (τιμή 1 ή 2 αντίστοιχα)
npinit	integer	Αριθμός των σημείων των καμπύλων αρχικών τιμών
speedtd	real 1D array	Διάνυσμα με τις τιμές της ταχύτητας των καμπύλων αρχικών τιμών
prctb	real 1D array	Διάνυσμα με τις τιμές του λόγου πίεσης συμπίεσής των καμπύλων αρχικών τιμών
t6tb	real 1D array	Διάνυσμα με τις τιμές της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο των καμπύλων αρχικών τιμών
prcttb	real 1D array	Διάνυσμα με τις τιμές του λόγου πίεσης στροβίλου των καμπύλων αρχικών τιμών
setopvar	real	Μεταβλητή απόφασης για την λειτουργία της μηχανής
setabvar	real	Μεταβλητή απόφασης για την λειτουργία του μετακαυστήρα
x	real 1D array	Συντελεστές που καθορίζουν τα υποθετικά μεγέθη

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: inlet, spline, splint, mareno, procom, thermo

Π.3.4 Υπορουτίνα engine

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή οργανώνει τη διαδοχική κλήση των υπορουτινών των συνιστωσών του αεροστροβίλου.

2. Κάλεσμα

call engin

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: synthesis, inlet, comprbleed, civol, compr, difsr, burn, remix, cturb, Afterburn, nozzle, ThrustCalc, dummy

Π.3.5 Υπορουτίνα inlet

1. Σκοπός

Θερμοδυναμική προσέγγιση των δεδομένων εισόδου της μηχανής, λαμβάνοντας υπόψη το υψόμετρο και την ταχύτητα πτήσης.

2. Κάλεσμα

call inlet (j, iflag)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
j	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα
iflag	integer	Σταθερά που χρησιμοποιείται από την υπορουτίνα procom

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom

Π.3.6 Υπορουτίνα comprbleed

1. Σκοπός

Υπολογίζει τις απομαστεύσεις του συμπιεστή σε σχέση με το φορτίο της μηχανής ή την ταχύτητα.

2. Κάλεσμα

call comprbleed

Π.3.7 Υπορουτίνα civol

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί τον αγωγό εισόδου του κινούμενου μέσου στο συμπιεστή.

2. Κάλεσμα

call civol (j)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
j	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα

3. Σχόλια

Καλείται η υπορουτίνα qays

Π.3.8 Υπορουτίνα *compr*

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί την συνιστώσα του συμπιεστή

2. Κάλεσμα

call compr (j)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
j	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom, mareno, qays

4. Χαρακτηριστικά

Στην υπορουτίνα αυτή υπολογίζονται τα θερμοδυναμικά μεγέθη και το έργο που καταναλώνει ο συμπιεστής. Στην είσοδο του συμπιεστή είναι γνωστά όλα τα θερμοδυναμικά μεγέθη καθώς και ο αριθμός στροφών και ο λόγος πίεσης. Με τα προηγούμενα μεγέθη υπολογίζονται με την βοήθεια του χάρτη η ανηγμένη παροχή και ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης.

Με βάση τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης και τον λόγο πίεσης υπολογίζεται επαναληπτικά η θερμοκρασία (ισεντροπική και πραγματική) εξόδου από τον συμπιεστή και στη συνέχεια οι αντίστοιχες ενθαλπίες και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή.

Π.3.9 Υπορουτίνα *burn*

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί την συνιστώσα του καυστήρα του αεροστροβίλου.

2. Κάλεσμα

call burn (i)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom, qays

Π.3.10 Υπορουτίνα *remix*

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί την συνιστώσα του επαναμίκτη.

2. Κάλεσμα

call remix (i, ir)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα
lr	integer	Σταθερά που καθορίζει τον αύξοντα αριθμό του διαχύτη

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: cooler, thermo, qays

Π.3.11 Υπορουτίνα *cooler*

1. Σκοπός

Υπολογίζει την ψύξη που πραγματοποιείται στον επαναμίκτη.

2. Κάλεσμα

call cooler (tx, hx)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
tx	real	Θερμοκρασία εισόδου στη συνιστώσα
hx	real	Ενθαλπία εισόδου στη συνιστώσα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom

Π.3.12 Υπορουτίνα *cturb*

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί την συνιστώσα του στροβίλου πυρήνα του αεριοστροβίλου.

2. Κάλεσμα

call cturb (i)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom, mareno, thturb, qays

Π.3.13 Υπορουτίνα AfterBurn

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί την συνιστώσα του μετακαυστήρα

2. Κάλεισμα

call AfterBurn (i)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom, qays, thermo

Π.3.14 Υπορουτίνα nozzle

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί την συνιστώσα του ακροφυσίου.

2. Κάλεισμα

call nozzle (i, kind)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα
kind	integer	Στα που καθορίζει το είδος του ακροφυσίου, συγκλίνον ή συγκλίνον-αποκλίνον (kind = 1 ή 2 αντίστοιχα)

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom, thermo, machsolver, machsolversub

Π.3.15 Υπορουτίνα machsolversub

1. Σκοπός

Επιλύει την μη γραμμική εξίσωση του αριθμού Mach για υποηχητικές ροές.

2. Κάλεισμα

call machsolversub (a, w, t, p, ama, gama, r, tol)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
a	real	Εμβαδό διατομής του ακροφυσίου
w	real	Μαζική παροχή
t	real	Ολική θερμοκρασία
p	real	Ολική πίεση
ama	real	Αριθμός Mach
gama	real	Λόγος ειδικών θερμοτήτων, γ
r	real	Παγκόσμια σταθερά αερίων
tol	real	Ακρίβεια

Π.3.16 Υπορουτίνα machsolver

1. Σκοπός

Επιλύει την μη γραμμική εξίσωση του αριθμού Mach συναρτήσει του λόγου εμβαδών και των συνθηκών του αέρα.

2. Κάλεσμα

call machsolver (ain, aout, amain, amaout, gama, r, tol)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
ain	real	Εμβαδό διατομής εισόδου
aout	real	Εμβαδό διατομής εξόδου
amain	real	Αριθμός Mach εισόδου
amaout	real	Αριθμός Mach εξόδου
gama	real	Λόγος ειδικών θερμοτήτων, γ
r	real	Παγκόσμια σταθερά αερίων
tol	real	Ακρίβεια

Π.3.17 Υπορουτίνα thrustcalc

1. Σκοπός

Υπολογίζει την ώση που παράγει ο κινητήρας.

2. Κάλεσμα

call thustcalc

Π.3.18 Υπορουτίνα map

1. Σκοπός

Σκοπός της υπορουτίνας αυτής είναι ο προσδιορισμός τιμών με παρεμβολή στους χάρτες λειτουργίας των συνιστωσών του αεριοστροβίλου. Δηλαδή κάνει παρεμβολή σε μια οικογένεια καμπυλών με δυο ανεξάρτητες μεταβλητές.

2. Κάλεσμα

call map (p, a, b, c, d, ax, na, bx, cx, dx, no, nam, nom, ncode)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
p	real	Αναλογία εισόδου μεταξύ 0 και 1, εάν δεν είναι είσοδος τότε παίρνει την τιμή -1
a	real	Ανεξάρτητη μεταβλητή εισόδου
b	real	Ανεξάρτητη μεταβλητή εισόδου (αν $p = -1$) ή εξαρτημένη αν ($0 < p < 1$)
c	real	Εξαρτημένη μεταβλητή
d	real	Εξαρτημένη μεταβλητή
ax	real 1D	Διάγραμμα όπου περιλαμβάνονται οι τιμές των ισογραμμών
na	integer	Αριθμός ισογραμμών
bx	real 2D	Σημεία πάνω σε κάθε ισογραμμή
cx	real 2D	Σημεία πάνω σε κάθε ισογραμμή
dx	real 2D	Σημεία πάνω σε κάθε ισογραμμή
no	integer 1D	Αριθμός σημείων πάνω σε κάθε ισογραμμή
nam	integer	Διάσταση του ax - πρώτη διάσταση των bx, cx, dx
nom	integer	Δεύτερη διάσταση των bx, cx, dx
ncode	integer	Δείκτης εξόδου

3. Σχόλια

Καλείται η υπορουτίνα afquir

Π.3.19 Υπορουτίνα afquir

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή χρησιμοποιείται από την υπορουτίνα map για τετραγωνική παρεμβολή στους χάρτες των συνιστωσών.

2. Κάλεσμα

call afquir (x, aind, depend, ans, maj, tol, dir, anew, icon)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
x	real 1D	Διάγραμμα λειτουργίας
aind	real	Ανεξάρτητη μεταβλητή
depend	real	Εξαρτημένη μεταβλητή
ans	real	Αποτέλεσμα στο οποίο θα πρέπει να συγκλίνει
maj	integer	Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων
tol	real	Επί τοις εκατό όριο σύγκλισης
dir	real	Διεύθυνση και ποσοστό για την αρχική υπόθεση

anew	real	Υπολογιζόμενη τιμή της επόμενης δοκιμής για την ανεξάρτητη μεταβλητή
icon	integer	Δείκτης ελέγχου

Π.3.20 Υπορουτίνα *synthesis*

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τη σύνθεση του αέρα με υγρασία, δεδομένων της θερμοκρασίας, πίεση και σχετικής υγρασίας του μίγματος.

2. Κάλεσμα

call synthesis (t, p, rh, xn2, xo2, xh2o, xco2, xso2, xar, xneon)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
t	real	Θερμοκρασία του αέρα σε K
p	real	Πίεση του αέρα σε bar
rh	rea	Σχετική υγρασία
xn2	real	Κλάσμα μάζας του αζώτου
xo2	real	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου
xh2o	real	Κλάσμα μάζας των υδρατμών
xco2	real	Κλάσμα μάζας του διοξειδίου του άνθρακα
xso2	real	Κλάσμα μάζας του διοξειδίου του θείου
xar	real	Κλάσμα μάζας του αργού
xneon	real	Κλάσμα μάζας του νέου

3. Σχόλια

Καλείται η υπορουτίνα: SteamSatPress

Π.3.21 Υπορουτίνα *SteamSatPres*

1. Σκοπός

Δεδομένης της θερμοκρασίας, υπολογίζει την πίεση κορεσμού του ατμού.

2. Κάλεσμα

call SteamSatPres (t, psat)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
t	real	Θερμοκρασία του αέρα σε K
psat	real	Πίεση κορεσμού του ατμού σε bar

Π.3.22 Υπορουτίνα *procom*

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του κινούμενου μέσου, του αεροστροβίλου, με την βοήθεια πολυωνυμίων προσεγγίσεων.

2. Κάλεισμα

call procom (far, tg, sspeed, gamg, cpg, rg, rhig, hg, iflag)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
far	real	Λόγος καυσίμου-αέρα
tg	real	Θερμοκρασία
sspeed	real	Ταχύτητα του ήχου
gamg	real	Ισεντροπικός εκθέτης
cpg	real	Ειδική θερμότητα
rg	real	Σταθερά αερίου R
rhig	real	Παράμετρος Keenan-Kaye
hg	real	Ενθαλπία
iflag	integer	Σταθερά που έχει να κάνει με την σύσταση του αέρα, 0: τυπική σύσταση του ξηρού αέρα, 1: υπολογιζόμενη σύσταση του αέρα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: therprop, combustion

Π.3.23 Υπορουτίνα *combustion*

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή μοντελοποιεί τη διαδικασία της καύσης.

2. Κάλεισμα

call combustion (cfar, xn2, xo2, xh2o, xco2, xso2, xar, xneon)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
cfar	real	Λόγος καυσίμου-αέρα
xn2	real	Κλάσμα μάζας του αζώτου
xo2	real	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου
xh2o	real	Κλάσμα μάζας των υδρατμών
xco2	real	Κλάσμα μάζας του διοξειδίου του άνθρακα
xso2	real	Κλάσμα μάζας του διοξειδίου του θείου
xar	real	Κλάσμα μάζας του αργού
xneon	real	Κλάσμα μάζας του νέου

Π.3.24 Υπορουτίνα *therprop*

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τις θερμοδυναμικές ιδιότητες ενός μίγματος αερίων. Ο υπολογισμός γίνεται για κάθε αέριο ξεχωριστά με τη βοήθεια πολυωνυμικών σχέσεων. Τα δεδομένα εισόδου της υπορουτίνας, είναι η θερμοκρασία σε K και η σύσταση του μίγματος των αερίων.

2. Κάλεσμα

call therprop (tg, xn2, xo2, xh2o, xco2, xar, xneon, cp, h, phi, r, gam)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
tg	real	Θερμοκρασία
xn2	real	Κλάσμα μάζας του αζώτου
xo2	real	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου
xh2o	real	Κλάσμα μάζας των υδρατμών
xco2	real	Κλάσμα μάζας του διοξειδίου του άνθρακα
xso2	real	Κλάσμα μάζας του διοξειδίου του θείου
xar	real	Κλάσμα μάζας του αργού
xneon	real	Κλάσμα μάζας του νέου
xn2	real	Κλάσμα μάζας του αζώτου
cp	real	Ειδική θερμότητα
h	real	Ενθαλπία
phi	real	Παράμετρος Keenan-Kaye
gam	real	Ισεντροπικός εκθέτης

Π.3.25 Υπορουτίνα *fuelhu*

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου, όταν είναι γνωστή η σύνθεσή του.

2. Κάλεσμα

call fuelhu (cfr, hfr, ofr, nfr, sfr, hu)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
cfr	real	Κλάσμα μάζας του άνθρακα στο καύσιμο
hfr	real	Κλάσμα μάζας του υδρογόνου στο καύσιμο
ofr	real	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου στο καύσιμο
nfr	real	Κλάσμα μάζας του αζώτου στο καύσιμο
sfr	real	Κλάσμα μάζας του θείου στο καύσιμο

hu	real	Θερμογόνος δύναμη καυσίμου
----	------	----------------------------

Π.3.26 Υπορουτίνα *gasfuelsynthesis*

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τη σύνθεση κατ' όγκο και τα συνολικά κλάσματα μάζας του άνθρακα, υδρογόνου, οξυγόνου, αζώτου και θείου ενός αερίου καυσίμου σε περίπτωση που είναι γνωστή η σύνθεσή του.

2. Κάλεσμα

call gasfuelsynthesis (isflag)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
isflag	integer	Σχετίζεται με τον τρόπο που είναι δεδομένη η σύνθεση του καυσίμου: 0: κατά βάρος 1: κατ' όγκο

Π.3.27 Υπορουτίνα *gasfuelhu*

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τη θερμογόνο δύναμη ενός αερίου καυσίμου όταν είναι γνωστή η σύνθεση του κατ' όγκο.

2. Κάλεσμα

call gasfuelhu (hu)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
hu	real	Θερμογόνος δύναμη

Π.3.28 Υπορουτίνα *thermo*

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του κινούμενου μέσου, όταν είναι γνωστή η θερμοκρασία ή η ενθαλπία. Σε περίπτωση που είναι γνωστή η θερμοκρασία υπολογίζονται η ενθαλπία, η εντροπία και η σταθερά R. Ενώ σε περίπτωση που είναι γνωστή η ενθαλπία υπολογίζονται η θερμοκρασία, η εντροπία και η σταθερά R.

2. Κάλεσμα

call thermo (hx, tx, sx, rx, fx, k)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
hx	real	Ενθαλπία
tx	real	Θερμοκρασία
sx	real	Εντροπία
rx	real	Σταθερά αερίου R
fx	real	Λόγος καυσίμου-αέρα (δεδομένο εισόδου)
k	integer	Σχετίζεται με τα δεδομένα της υπορουτίνας 0: δεδομένη θερμοκρασία 1: δεδομένη ενθαλπία

3. Σχόλια

Καλείται η υπορουτίνα procom

Π.3.29 Υπορουτίνα thturb

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα δεδομένα εξόδου του στροβίλου, δεδομένων των συνθηκών εισόδου (πίεση και θερμοκρασία), του λόγου πίεσης και του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης. Τα δεδομένα που υπολογίζει είναι η πίεση, η θερμοκρασία, η ενθαλπία και η εντροπία.

2. Κάλεσμα

call thturb (farx, pt3, tt3, prt, eftis, pt4, tt4, h4, s4)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
farx	real	Λόγος καυσίμου - αέρα
pt3	real	Ολική πίεση εισόδου
tt3	real	Ολική θερμοκρασία εισόδου
prt	real	Λόγος πίεσης
eftis	real	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης
pt4	real	Ολική πίεση εξόδου
tt4	real	Ολική θερμοκρασία εξόδου
h4	real	Ενθαλπία εξόδου
s4	real	Εντροπία εξόδου

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες procom και thermo.

Π.3.30 Υπορουτίνα qays0

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τις στατικές από τις ολικές συνθήκες, χρησιμοποιώντας τις ισεντροπικές σχέσεις και τον μέσο ισεντροπικό εκθέτη.

2. Κάλεσμα

call qays0 (i, mode)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Θέση
mode	integer	0: Υπολογισμοί για ολική θερμοκρασία και στατική πίεση 1: Υπολογισμοί για ολική θερμοκρασία και ολική πίεση

3. Σχόλια

Καλείται η υπορουτίνα procom.

Π.3.31 Υπορουτίνα qays

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τις στατικές από τις ολικές συνθήκες, χρησιμοποιώντας τις ισεντροπικές σχέσεις και μαζική παροχή.

2. Κάλεσμα

call qays (i, mode)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Θέση
mode	integer	0: Υπολογισμοί για ολική θερμοκρασία και στατική πίεση 1: Υπολογισμοί για ολική θερμοκρασία και ολική πίεση

3. Σχόλια

Καλείται η υπορουτίνα procom

Π.3.32 Υπορουτίνα J79NR

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή χρησιμοποιείται και στο ευθύ και στο αντίστροφο μέρος του κώδικα. Λύνει ένα σύστημα της μορφής $F(X) = 0$, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο Newton-Raphson.

2. Κάλεσμα

call J79NR (N, X, ITERMAX, TOL, EPS, ITER, IERROR)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
N	integer	Αριθμός εξισώσεων
X	real 1D	Διάνυσμα υποθετικών μεγεθών
ITERMAX	integer	Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων
TOL	real	Ακρίβεια σύγκλισης
EPS	real	Βήμα για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα
IERROR	integer	Δείκτης σφάλματος

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες J79FUNCT, J79FDJAC, LUDCMP, LUBKSB.

4. Χαρακτηριστικά

Έξοδος της υπορουτίνας είναι το διάνυσμα X, το οποίο αποτελεί και τη λύση του συστήματος, το διάνυσμα Y που περιέχει τα σφάλματα και τον αριθμό επαναλήψεων ITER και, τέλος, τον δείκτη IERROR που υποδεικνύει τον τύπο του σφάλματος σε περίπτωση που αυτό συμβεί. Οι τιμές που παίρνει είναι:

1: εάν υπολογιστεί μια φορά η Ιακωβιανή ορίζουσα

2: εάν έχει ξεπεραστεί ο αριθμός των επαναλήψεων και δεν έχει συγκλίνει ο αλγόριθμος

Π.3.33 Υπορουτίνα LUDCMP

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή πραγματοποιεί παραγοντοποίηση LU ενός πίνακα.

2. Κάλεσμα

call LUDCMP (A, N, INDX, D, IERROR)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
A	real 2D	Ο πίνακας A(NxN)
N	integer	Η διάσταση του πίνακα
INDX	integer 1D	Το διάνυσμα οδήγησης
D	real	Δείκτης εναλλαγών
IERROR	integer	Δείκτης σφάλματος

3. Χαρακτηριστικά

Η υπορουτίνα αυτή πραγματοποιεί παραγοντοποίηση LU ενός πίνακα A διαστάσεων NXN. INDX είναι ένα διάνυσμα εξόδου που περιέχει τις εναλλαγές γραμμών του πίνακα, που γίνονται εξ' αιτίας της μερικής οδήγησης (partial

rioting). D είναι έξοδος που παίρνει την τιμή -1 ή 1, ανάλογα με το αν ο αριθμός των εναλλαγών του πίνακα ήταν άρτιος ή περιττός, αντίστοιχα. Αυτή η υπορουτίνα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την LUBSKB για να λυσει γραμμικές εξισώσεις.

Π.3.34 Υπορουτίνα LUBKSB

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή λύνει ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων.

2. Κάλεσμα

call LUBKSB (A, N, INDX, B)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
A	real 2D	Ο πίνακας A(NxN)
N	integer	Η διάσταση του πίνακα
INDX	integer 1D	Το διάνυσμα οδήγησης
B	real 1D	Συντελεστές εξισώσεων ή λύση συστήματος

3. Χαρακτηριστικά

Η υπορουτίνα αυτή λύνει ένα σύστημα N γραμμικών εξισώσεων, $AX=B$. Εισάγεται ο πίνακας A που έχει δημιουργηθεί έπειτα από παραγοντοποίηση LU, με την υπορουτίνα LUDCMP. Το διάνυσμα INDX είναι είσοδος που προέρχεται από την υπορουτίνα LUDCMP. Το διάνυσμα B μπαίνει σαν είσοδος και περιέχει το δεξί μέρος της εξίσωσης $AX=B$ και εξέρχεται με τη λύση του συστήματος (X διάνυσμα).

Π.3.35 Υπορουτίνα J79FUNCT

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει την εξίσωση $Y(I)=YI(X)$, για $I=1$ έως N. Δέχεται ως είσοδο τα υποθετικά μεγέθη $X(I)$ και επιστρέφει κα σφάλματα $Y(I)$.

2. Κάλεσμα

call J79FUNCT (X, Y)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
X	real 1D	Διάνυσμα με τις μεταβλητές υπόθεσης
Y	real 1D	Διάνυσμα με τα σφάλματα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες J79GVAR, ENGIN, J79ERVAR

Π.3.36 Υπορουτίνα J79FDJAC

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τον Ιακωβιανό πίνακα για τα υποθετικά μεγέθη X.

2. Κάλεσμα

call J79FDJAC (N, X, Y, EPS, DY)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
N	integer	Διάσταση των διανυσμάτων
X	real 1D	Ανεξάρτητο διάνυσμα, (διάνυσμα υποθετικών μεγεθών)
Y	real 1D	Εξαρτημένο διάνυσμα, (διάνυσμα σφαλμάτων)
EPS	real	Βήμα για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα
DY	real 2D	Ιακωβιανός πίνακας

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες svdcmp, svdsrt

Π.3.37 Υπορουτίνα J79GVAR

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα υποθετικά μεγέθη. Δέχεται ως είσοδο το διάνυσμα X που περιέχει του υποθετικούς συντελεστές x_i και υπολογίζει τα υποθετικά μεγέθη με σχέσεις της μορφής:

(υποθετικό μέγεθος) = $x_i \times$ (τιμή του μεγέθους στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας)

2. Κάλεσμα

call J79GVAR (X)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
X	real 1D	Διάνυσμα που περιέχει τους συντελεστές για την εκτίμηση των υποθετικών μεγεθών

Π.3.38 Υπορουτίνα J79ERVAR

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα υποθετικά μεγέθη. Δέχεται ως είσοδο το διάνυσμα X, το οποίο περιέχει του υποθετικούς συντελεστές x_i και υπολογίζει τα υποθετικά μεγέθη με σχέσεις της μορφής:

(υποθετικό μέγεθος) = $x_i \times$ (τιμή του μεγέθους στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας)

2. Κάλεσμα

call J79GVAR (X)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
X	real 1D	Διάνυσμα που περιέχει τους συντελεστές για την εκτίμηση των υποθετικών μεγεθών

Π.4 Στοιχεία μεταλλάκτη πίεσης

Electronic
Pressure Measurement

Pressure transmitter for general industrial applications Model A-10

WIKA Data Sheet PE 81.60



Applications

- Mechanical engineering
- Machine tools
- Control and feedback control systems
- Hydraulics / Pneumatics
- Pumps / Compressors

Special Features

- Pressure ranges: from 0 ... 1 bar up to 0 ... 600 bar
- Non-linearity: 0,3 % or 0,6 %
- Signal output: 4-20 mA, 0-10 V, 0-5 V and others
- Electrical connection: DIN 175301-803 A and C, M12x1, Flying leads 2m
- Pressure connection: G1/4 DIN 3852-E, 1/4NPT and others

Description

Simple - reliable - competitive

The WIKA A-10 can be used for a multitude of functions across many different applications. Exceptionally simple installation, set-up and operation with an excellent price/performance ratio set this highly-reliable product apart.



Pressure transmitter A-10

WIKA Data Sheet PE 81.60 - 05/2007

Seite 1 von 4

Data Sheets for related models:
Pressure transmitter for general applications; Model S-10; see Data Sheet PE 81.01



Specifications

Model A-10

Pressure ranges	bar	1	1.6	2.5	4	6	10	16	25
Over pressure safety	bar	2	3.2	5	8	12	20	32	50
Burst pressure	bar	5	10	10	17	34	34	100	100
Pressure ranges	bar	40	60	100	160	250	400	600	
Over pressure safety	bar	80	120	200	320	500	800	1200	
Burst pressure	bar	400	550	800	1000	1200	1700	2400	
MPa and kg/cm ² are available (Absolute pressure: 0 ... 1 bar up to 0 ... 25 bar)									
Pressure ranges	psi	15	20	30	50	100	150	200	300
Over pressure safety	psi	30	40	60	100	200	290	400	600
Burst pressure	psi	75	75	150	250	500	500	1500	1500
Pressure ranges	psi	500	1000	1500	2000	3000	5000	10000	
Over pressure safety	psi	1000	1740	2900	4000	6000	10000	17400	
Burst pressure	psi	2500	7975	11600	14500	17400	24650	34800	
(Absolute pressure: 0 ... 15 psi up to 0 ... 300 psi)									
Vacuum resistance		As of 0 ... 10 bar							
Fatigue life		10 Mio. max. load cycles							
Materials									
■ Wetted parts		316 L							
- Pressure Connection		316 L (as of 0 ... 10 bar rel XM-13)							
- Pressure sensor									
■ Internal transmission fluid		Silicone oil (only with pressure ranges up to 0 ... 6 bar and 0 ... 25 bar abs)							
■ Case		316 L							
Power supply UB	UB in VDC	8 ... 30 (14 ... 30 with signal output 0 ... 10 V) {8 ... 36 and 14 ... 36 with signal output 0 ... 10 V}							
maximum ohmic load RA		0 ... 10 V, 3-wire $R_{th} > 10 \text{ k}$ 0 ... 5 V, 3-wire $R_{th} > 5 \text{ k}$ 1 ... 5 V, 3-wire $R_{th} > 5 \text{ k}$ 0.5 ... 4.5 V, 3-wire $R_{th} > 4.5 \text{ k}$ {Other signal output on request}							
Response time	ms	< 4							
Current consumption	mA	Signal current (max. 25) for current output Max. 8 for voltage output signal							
Insulation voltage	VDC	500 ¹⁾							
¹⁾ For power supply, use a circuit with energy limitation (EN/UL/IEC 61010-1, section 9.3) with the following maximum values for the current: bei UB = 30 V (DC): 5 A. Alternative for North America: The connection may also be made to „Class 2 Power Units“ (UL 1310) or „Class 2 Transformers“ (UL 1585)									
Non-linearity	% of span	$\leq \pm 0.3$ $\leq \pm 0.6$	according to IEC 61298-2						
Accuracy ²⁾	% of span	$\leq \pm 0.5$ $\leq \pm 0.6$ $\leq \pm 1.0$	Adjusted in vertical mounting position with lower pressure connection (with non-linearity 0.3 %) (with non-linearity 0.3 % and with signal output 0 ... 5 V) (with non-linearity 0.6 %)						
²⁾ Including non-linearity, hysteresis, zero point and full scale error (corresponds to error of measurement per IEC 61298-2)									
Zero offset	% of span	$\leq 0.15 \text{ typ.}, \leq 0.4 \text{ max.}$ $\leq 0.5 \text{ typ.}, \leq 0.8 \text{ max.}$	(with non-linearity 0.3 %) (with non-linearity 0.6 %)						
Hysteresis	% of span	≤ 0.16							
Non-repeatability	% of span	≤ 0.1							
Long-term drift	% of span	≤ 0.1	according to IEC 61298-2						
Signal noise	% of span	≤ 0.3							
Permissible temperature of									
■ Medium	°C	0 ... +80 (-30 ... +100)							
■ Ambience	°C	0 ... +80 (-20 ... +80)							
■ Storage	°C	-20 ... +80 (-40 ... +80)							
Operating temperature range	°C	0 ... +80							
Temperature error within operating temperature range	% of span	$\leq 1.0 \text{ typ.}, \leq 2.5 \text{ max.}$							

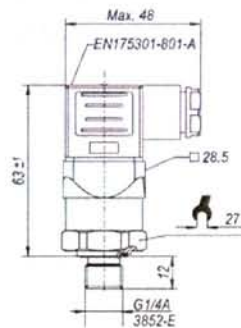
Specifications		Model A-10
Approvals		
RoHS-conformity		On request
CE-conformity		
■ Pressure equipment directive		97/23/EC
■ EMC directive		89/336/EEC emission (class B) and immunity according to EN 61 326
Shock resistance	g	500 according to IEC 60068-2-27 (mechanical shock)
Vibration resistance	g	10 according to IEC 60068-2-6 (vibration under resonance)
Wiring protection	VDC	
■ Overvoltage protection		32, 36 with 4 ... 20 mA
■ Short-circuit proofness		Sig+ towards UB-
■ Reverse polarity protection		UB+ towards UB-
Reference conditions		According to IEC 61298-1
■ Relative humidity	%	45 ... 75
Weight	g	Approx. 80

[] Remo-v curved brackets are optional extras for additional price.

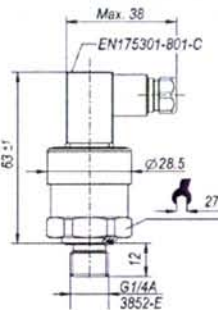
Dimensions in mm

Ingress protection IP per IEC 60529. The ingress protection classes specified only apply while the pressure transmitter is connected with female connectors that provide the corresponding ingress protection.

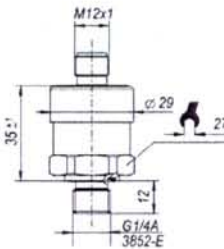
DIN 175301-803 A
L-connector
for conductor cross section up
to max. 1.5 mm²,
conductor outer diameter
6-8 mm
IP 65



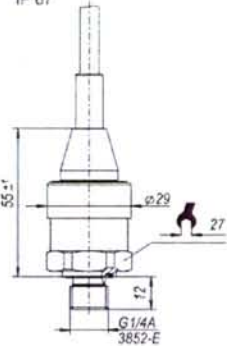
DIN 175301-803 C
L-connector
for conductor cross section up
to max. 0.75 mm²,
conductor outer diameter 4.5-6
mm
IP 65



M 12x1, 4-pin
IP 67



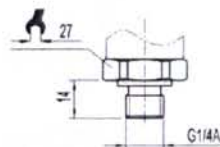
Flying leads,
conductor cross section
3x 0.34 mm²,
conductor outer diameter
6.6 mm,
PUR cable - unshielded,
IP 67



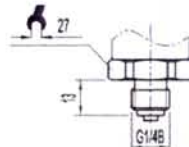
For tapped holes and welding sockets please see Technical Information IN 00.14 for download at www.wika.de

Pressure connections

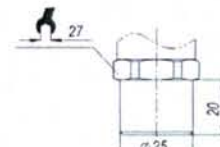
G 1/4
DIN 3852-E
with sealing NBR (FKM)
Over pressure safety max. 600 bar



G 1/4
EN 837
with sealing
Copper (Stainless steel)

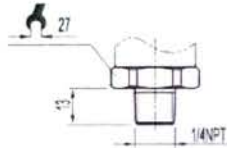


G 1/4female
EN 837
with sealing
Copper (Stainless steel)

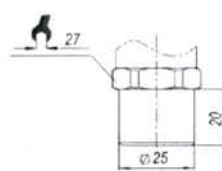


Pressure connections

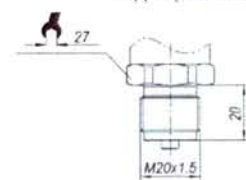
1/4 NPT



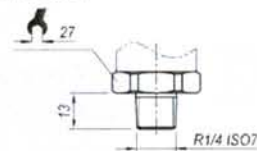
1/4 NPT female



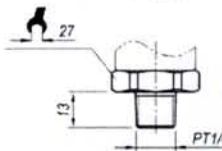
M 20 x 1.5
with sealing
Copper (Stainless steel)



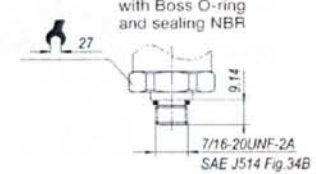
R 1/4 ISO 7



PT 1/4



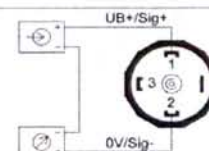
7/16-20 UNF
with Boss O-ring
and sealing NBR



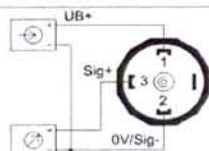
Electrical connections

DIN 175301-803 A
L-connector

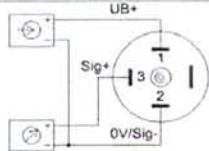
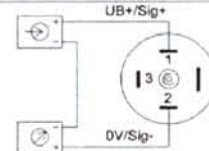
2-wire



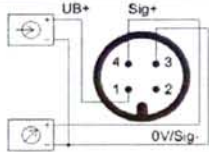
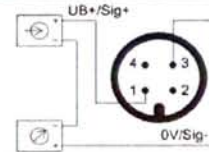
3-wire



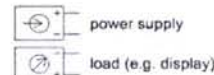
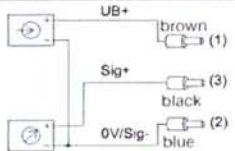
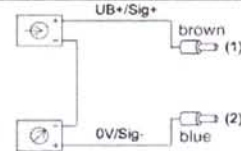
DIN 175301-803 C
L-connector



M 12x1, 4-pin
without angle socket or
female cable connectors



Flying leads



Specifications and dimensions given in this leaflet represent the state of engineering at the time of printing. Modifications may take place and materials specified may be replaced by others without prior notice.



WIKA Alexander Wiegand GmbH & Co. KG
Alexander-Wiegand-Straße 30
63911 Klingenberg/Germany
Tel. (+49) 9372/132-0
Fax (+49) 9372/132-406
E-mail info@wika.de
www.wika.de

Π.5 Πρωτόκολλο επικοινωνίας με ECU

1.1 EDT data

The ECU reports its status and condition via a serial protocol. This serial protocol is based on the industrial standard RS232.

After power up the ECU transmitted the software version, the software date and a number of settings. After this, the normal serial data is transmitted

1.1.1 General specifications

Item	Description
Level	Standard RS232 level -12V to 12V
Baud rate	Standard the ECU setting is 2400. This gives an average of 48 bytes per second Other settings are 2400-4800-9600-19200-38400-57600-115200
Protocol setup	8 data bits, no parity, 1 stop-bit
Data stream*	0xFF, {data1}, {data2}, {data3}, {data4}, {data5}

*Value of the data bytes 1 to 5 is always between 0 and 0xFE (254). After 10 data sets of normal information an alternating data set is send

1.1.2 Normal information data set

Byte	Unit	Description																																																																																																																																																																		
Leader		Value always 0xFF (255)																																																																																																																																																																		
Data 1 (Status)		This data byte describes the state of the ECU and which type of engine is installed If B2, B1 and B0 are zero (low) then the bits B7 to B3 will indicated which engine is installed <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Bits</th> <th>Description</th> </tr> <tr> <th>7</th> <th>6</th> <th>5</th> <th>4</th> <th>3</th> <th>2</th> <th>1</th> <th>0</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Error (See Error information set)</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>Operator Switch in Emergency stop mode</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>Operator Switch in Auto stop mode</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Operator Switch in Running mode</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>PEGASUS engine ID (older versions)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>OLYMPUS engine ID (older versions)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>MERCURY engine ID (older versions)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>MERCURY engine ID</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>PEGASUS engine ID</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>OLYMPUS engine ID</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>TITAN engine ID</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>Start clearance</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>Starting</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>Started up</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>Idle calibration</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>Maximum RPM reached</td> </tr> </tbody> </table>	Bits								Description	7	6	5	4	3	2	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	Error (See Error information set)	X	X	X	X	X	0	0	1	Operator Switch in Emergency stop mode	X	X	X	X	X	0	1	0	Operator Switch in Auto stop mode	X	X	X	X	X	1	0	0	Operator Switch in Running mode	0	0	0	0	0	0	1	1	PEGASUS engine ID (older versions)	0	0	0	0	0	1	1	0	OLYMPUS engine ID (older versions)	0	0	0	0	0	1	1	1	MERCURY engine ID (older versions)	0	0	0	0	1	0	0	0	MERCURY engine ID	0	0	0	1	0	0	0	0	PEGASUS engine ID	0	0	0	1	1	0	0	0	OLYMPUS engine ID	0	0	1	0	0	0	0	0	TITAN engine ID	X	X	X	X	1	S	S	S	Start clearance	X	X	X	1	X	S	S	S	Starting	X	X	1	X	X	S	S	S	Started up	X	1	X	X	X	S	S	S	Idle calibration	1	X	X	X	X	S	S	S	Maximum RPM reached
Bits								Description																																																																																																																																																												
7	6	5	4	3	2	1	0																																																																																																																																																													
0	0	0	0	0	0	0	0	Error (See Error information set)																																																																																																																																																												
X	X	X	X	X	0	0	1	Operator Switch in Emergency stop mode																																																																																																																																																												
X	X	X	X	X	0	1	0	Operator Switch in Auto stop mode																																																																																																																																																												
X	X	X	X	X	1	0	0	Operator Switch in Running mode																																																																																																																																																												
0	0	0	0	0	0	1	1	PEGASUS engine ID (older versions)																																																																																																																																																												
0	0	0	0	0	1	1	0	OLYMPUS engine ID (older versions)																																																																																																																																																												
0	0	0	0	0	1	1	1	MERCURY engine ID (older versions)																																																																																																																																																												
0	0	0	0	1	0	0	0	MERCURY engine ID																																																																																																																																																												
0	0	0	1	0	0	0	0	PEGASUS engine ID																																																																																																																																																												
0	0	0	1	1	0	0	0	OLYMPUS engine ID																																																																																																																																																												
0	0	1	0	0	0	0	0	TITAN engine ID																																																																																																																																																												
X	X	X	X	1	S	S	S	Start clearance																																																																																																																																																												
X	X	X	1	X	S	S	S	Starting																																																																																																																																																												
X	X	1	X	X	S	S	S	Started up																																																																																																																																																												
X	1	X	X	X	S	S	S	Idle calibration																																																																																																																																																												
1	X	X	X	X	S	S	S	Maximum RPM reached																																																																																																																																																												
Data 2 (RPM value)	RPM	Motor type : PEGASUS, OLYMPUS, TITAN RPM = value * 500 Motor type : MERCURY RPM = value * 700																																																																																																																																																																		
Data 3 (EGT value)	°C	EGT = value * 4.6 - 50																																																																																																																																																																		
Data 4 (Throttle setting)	%	THR = value / 2																																																																																																																																																																		
Data 5 (Vout value)	Volt	VOUT = value * 6.25 / 255 (Engine ID: MERCURY, PEGASUS) VOUT = value * 8.30 / 255 (Engine ID: OLYMPUS, TITAN)																																																																																																																																																																		

1.1.3 Error information data set

Byte	Unit	Description																																																																																										
Leader		Value always 0xFF (255)																																																																																										
Data 1 (Status)		This data byte describes the state of the ECU and when it's in the error mode this value is ZERO																																																																																										
Data 2 (Error code)		RPM value is overruled with the error code of the ECU. Next table gives the relation between error code and the bits which are set																																																																																										
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Bits</th> <th>Description</th> </tr> <tr> <th>7</th> <th>6</th> <th>5</th> <th>4</th> <th>3</th> <th>2</th> <th>1</th> <th>0</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>rpm low</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>switch channel not present</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>throttle channel not present</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>EGT error</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>rpm high</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>supply low</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>supply low for Auto Start System</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>X = don't care 1 or 0</p>	Bits								Description	7	6	5	4	3	2	1	0		X	X	X	X	X	X	X	1	rpm low	X	X	X	X	X	X	1	X	switch channel not present	X	X	X	X	X	1	X	X	throttle channel not present	X	X	X	X	1	X	X	X	EGT error	X	X	X	1	X	X	X	X	rpm high	X	X	1	X	X	X	X	X	supply low	X	1	X	X	X	X	X	X	supply low for Auto Start System	1	X	X	X	X	X	X	X	
Bits								Description																																																																																				
7	6	5	4	3	2	1	0																																																																																					
X	X	X	X	X	X	X	1	rpm low																																																																																				
X	X	X	X	X	X	1	X	switch channel not present																																																																																				
X	X	X	X	X	1	X	X	throttle channel not present																																																																																				
X	X	X	X	1	X	X	X	EGT error																																																																																				
X	X	X	1	X	X	X	X	rpm high																																																																																				
X	X	1	X	X	X	X	X	supply low																																																																																				
X	1	X	X	X	X	X	X	supply low for Auto Start System																																																																																				
1	X	X	X	X	X	X	X																																																																																					
Data 3 (EGT value)	°C	EGT = value * 4.6 - 50																																																																																										
Data 4 (Throttle setting)	%	THR = value / 2																																																																																										
Data 5 (Vout value)	Volt	VOUT = value * 6.25 / 255 (Engine ID: MERCURY, PEGASUS) VOUT = value * 8.30 / 255 (Engine ID: OLYMPUS, TITAN)																																																																																										

1.1.4 Alternate information data set (transmitted every 3 seconds)

Byte	Unit	Description																																																																																	
Leader		Value always 0xFF (255)																																																																																	
Data 1 (Engine ID)		If B2, B1 and B0 are zero (low) then the bits B7 to B3 will indicate which engine is installed																																																																																	
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Bits</th> <th>Description</th> </tr> <tr> <th>7</th> <th>6</th> <th>5</th> <th>4</th> <th>3</th> <th>2</th> <th>1</th> <th>0</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>PEGASUS engine ID (older versions)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>OLYMPUS engine ID (older versions)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>MERCURY engine ID (older versions)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>MERCURY engine ID</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>PEGASUS engine ID</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>OLYMPUS engine ID</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>TITAN engine ID</td> </tr> </tbody> </table>	Bits								Description	7	6	5	4	3	2	1	0		0	0	0	0	0	0	1	1	PEGASUS engine ID (older versions)	0	0	0	0	0	1	1	0	OLYMPUS engine ID (older versions)	0	0	0	0	0	1	1	1	MERCURY engine ID (older versions)	0	0	0	0	1	0	0	0	MERCURY engine ID	0	0	0	1	0	0	0	0	PEGASUS engine ID	0	0	0	1	1	0	0	0	OLYMPUS engine ID	0	0	1	0	0	0	0	0	TITAN engine ID
Bits								Description																																																																											
7	6	5	4	3	2	1	0																																																																												
0	0	0	0	0	0	1	1	PEGASUS engine ID (older versions)																																																																											
0	0	0	0	0	1	1	0	OLYMPUS engine ID (older versions)																																																																											
0	0	0	0	0	1	1	1	MERCURY engine ID (older versions)																																																																											
0	0	0	0	1	0	0	0	MERCURY engine ID																																																																											
0	0	0	1	0	0	0	0	PEGASUS engine ID																																																																											
0	0	0	1	1	0	0	0	OLYMPUS engine ID																																																																											
0	0	1	0	0	0	0	0	TITAN engine ID																																																																											
Data 2 (idle voltage)	Volt	PWOMIN = value * 6.25 / 255 (Engine ID: MERCURY, PEGASUS) PWOMIN = value * 8.30 / 255 (Engine ID: OLYMPUS, TITAN)																																																																																	
Data 3 (max rpm voltage)	Volt	PWOMAX = value * 6.25 / 255 (Engine ID: MERCURY, PEGASUS) PWOMAX = value * 8.30 / 255 (Engine ID: OLYMPUS, TITAN)																																																																																	
Data 4 (battery voltage)	Volt	SUPLVAL = value * 10.0 / 255 (Engine ID: MERCURY, PEGASUS) SUPLVAL = value * 10.0 / 255 (Engine ID: OLYMPUS, TITAN)																																																																																	
Data 5 (ext batt voltage)	Volt	Vout = 7 + (value * 6.25 / 255) (Engine ID: MERCURY, PEGASUS) Vout = 7 + (value * 8.30 / 255) (Engine ID: OLYMPUS, TITAN)																																																																																	

1.1.5 ECU set-up data set

Byte	Unit	Description
Leader		Value always 0xFF (255)
Data 1 (ECU set-up)		Value always 0x05 (5)
Data 2 (high byte)	ms	Input pulse width information from the switch channel
Data 3 (low byte)		
Data 4 (pulse difference)	ms	Pulse width minimum. $PW_{min} = ((255 * PWTH) + PWTL) - 62464$ $PW_{max} = PW_{min} + PWIDIFF * 16$
Data 5...17		A string of 12 bytes is transmitted (ASCII) which containing the software version and the production date. Format: "X NN YYMMDD " (old) "XX NN YYMMDD " (new) Software version and engine type: 1 NN: Pegasus engine (obsolete) 2 NN: Pegasus engine (obsolete) 3 NN: Olympus engine 4 NN: Pegasus engine 5 NN: Mercury engine 6 NN: Olympus engine 7 NN: Pegasus engine 8 NN: Mercury engine 9 NN: Olympus engine 10 NN: Titan engine

Π.6 Εγχειρίδιο χρήσης του ενισχυτή θερμοστοιχείων

Επειδή η τάση των θερμοστοιχείων είναι μικρή της τάξης των mV πρέπει να ενισχυθεί για να μπορεί να εκμεταλλευτεί από την κάρτα πρόσκτησης δεδομένων. Για τον σκοπό αυτό φτιάχτηκε ο ενισχυτής της παρακάτω εικόνας. Το βασικό στοιχείο αυτό του ενισχυτή είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα AD595AQ, του οποίου τα χαρακτηριστικά δίνονται στο παράρτημα Π8.

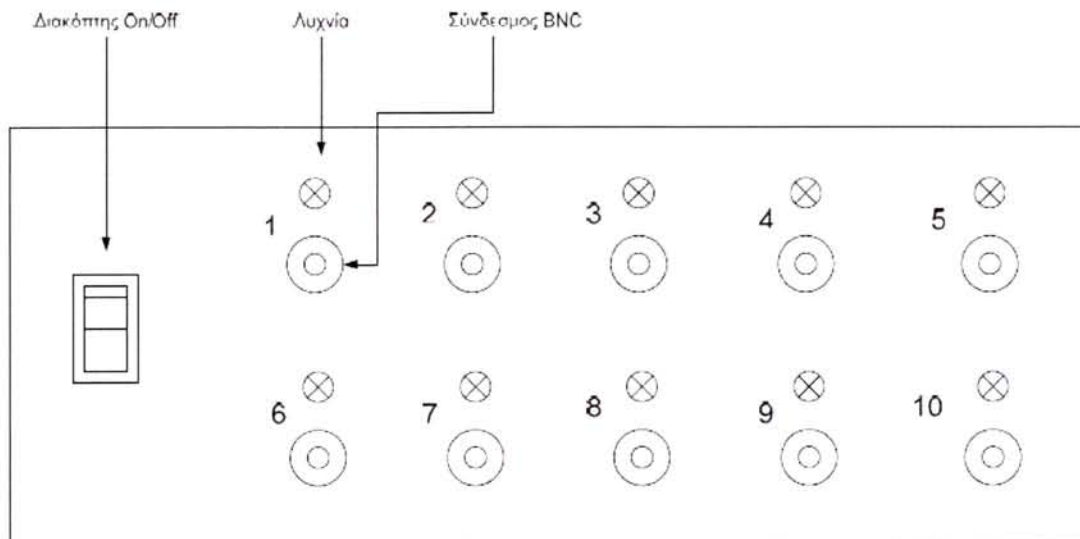


Εικόνα Π. 1. Ενισχυτής θερμοστοιχείων

Π.6.1 Η μπροστινή όψη του ενισχυτή

Στην μπροστινή όψη του ενισχυτή διακρίνονται ο διακόπτης για την ενεργοποίηση της λειτουργίας του ενισχυτή. Οι λυχνίες, που ανάβουν σε περίπτωση που υπάρχει κάποια βλάβη σε κάποιο θερμοστοιχείο ή όταν δεν είναι ενεργοποιημένη η κάρτα πρόσκτησης δεδομένων. Και τέλος υπάρχουν οι σύνδεσμοι BNC για την σύνδεση με την κάρτα πρόσκτησης δεδομένων.

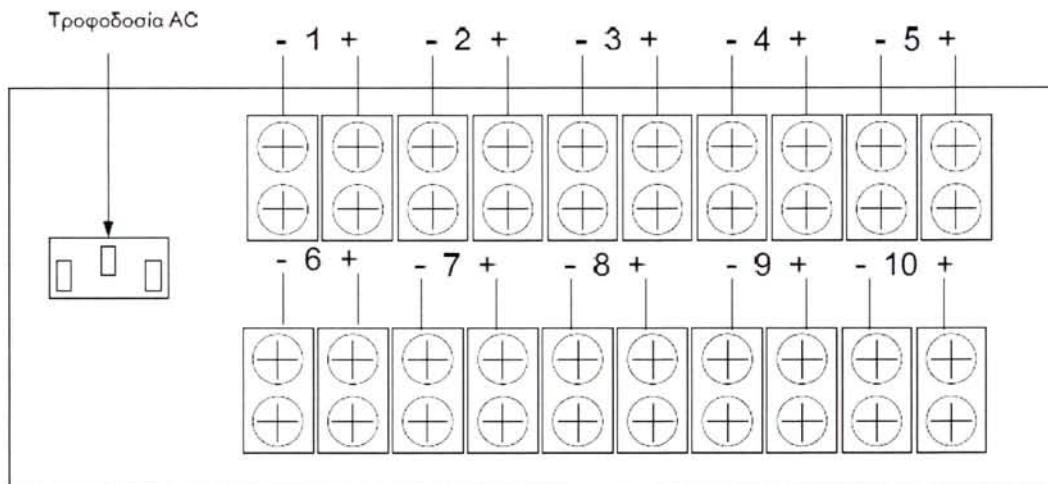
Επίσης στο σχήμα φαίνεται και η αρίθμηση των εξόδων του ενισχυτή.



Εικόνα Π. 2. Μπροστινή όψη ενισχυτή θερμοστοιχείων

Π.6.2 Η πίσω όψη του ενισχυτή

Στην πίσω όψη του ενισχυτή διακρίνονται οι κλέμες πάνω στις οποίες συνδέονται οι ακροδέκτες των θερμοστοιχείων. Στο σχήμα διακρίνονται οι θέσεις που συνδέεται το κάθε θερμοστοιχείο καθώς και η πολικότητα που θα πρέπει να έχουν.



Εικόνα Π. 3. Η πίσω όψη του ενισχυτή

Π.6.3 Συνδεσμολογία των θερμοστοιχείων της εγκατάστασης του κινητήρα Olympus

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι θέσεις που είναι συνδεδεμένα τα θερμοστοιχεία της εγκατάστασης.

Θερμοστοιχείο	Θέση
$T_{t3, left}$	1
$T_{t3, right}$	2
T_{t4}	3
$T_{t5, left}$	4
$T_{t5, right}$	5
$T_{t5, up}$	6
$T_{t5, down}$	7

Πίνακας Π. 1. Σύνδεση θερμοστοιχείων στον ενισχυτή

Π.7 Το ολοκληρωμένο κύκλωμα – ενισχυτής AD595AQ



Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation

AD594/AD595

FEATURES

Pretrimmed for Type J (AD594) or

Type K (AD595) Thermocouples

Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs

Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C

Built-In Ice Point Compensation

Wide Power Supply Range: +5 V to ±15 V

Low Power: <1 mW typical

Thermocouple Failure Alarm

Laser Wafer Trimmed to 1°C Calibration Accuracy

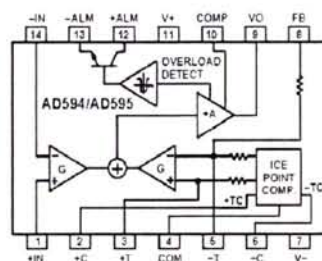
Setpoint Mode Operation

Self-Contained Celsius Thermometer Operation

High Impedance Differential Input

Side-Brazed DIP or Low Cost Cerdip

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



PRODUCT DESCRIPTION

The AD594/AD595 is a complete instrumentation amplifier and thermocouple cold junction compensator on a monolithic chip. It combines an ice point reference with a precalibrated amplifier to produce a high level (10 mV/°C) output directly from a thermocouple signal. Pin-strapping options allow it to be used as a linear amplifier-compensator or as a switched output setpoint controller using either fixed or remote setpoint control. It can be used to amplify its compensation voltage directly, thereby converting it to a stand-alone Celsius transducer with a low impedance voltage output.

The AD594/AD595 includes a thermocouple failure alarm that indicates if one or both thermocouple leads become open. The alarm output has a flexible format which includes TTL drive capability.

The AD594/AD595 can be powered from a single ended supply (including +5 V) and by including a negative supply, temperatures below 0°C can be measured. To minimize self-heating, an unloaded AD594/AD595 will typically operate with a total supply current 160 µA, but is also capable of delivering in excess of +5 mA to a load.

The AD594 is precalibrated by laser wafer trimming to match the characteristic of type J (iron-constantan) thermocouples and the AD595 is laser trimmed for type K (chromel-alumel) inputs. The temperature transducer voltages and gain control resistors

are available at the package pins so that the circuit can be recalibrated for the thermocouple types by the addition of two or three resistors. These terminals also allow more precise calibration for both thermocouple and thermometer applications.

The AD594/AD595 is available in two performance grades. The C and the A versions have calibration accuracies of ±1°C and ±3°C, respectively. Both are designed to be used from 0°C to +50°C, and are available in 14-pin, hermetically sealed, side-brazed ceramic DIPs as well as low cost cerdip packages.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD594/AD595 provides cold junction compensation, amplification, and an output buffer in a single IC package.
2. Compensation, zero, and scale factor are all precalibrated by laser wafer trimming (LWT) of each IC chip.
3. Flexible pinout provides for operation as a setpoint controller or a stand-alone temperature transducer calibrated in degrees Celsius.
4. Operation at remote application sites is facilitated by low quiescent current and a wide supply voltage range +5 V to dual supplies spanning 30 V.
5. Differential input rejects common-mode noise voltage on the thermocouple leads.

REV. C

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>
Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

AD594/AD595—SPECIFICATIONS (@ +25°C and $V_{CC} = 5\text{ V}$, Type J (AD594), Type K (AD595) Thermocouple, unless otherwise noted)

Model	AD594A			AD594C			AD595A			AD595C			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS													
+ V_{CC} to - V_{EE}		36			36			36			36		Volts
Common-Mode Input Voltage	- $V_{EE} - 0.15$	+ V_{CC}		- $V_{EE} - 0.25$	+ V_{CC}		- $V_{EE} - 0.15$	+ V_{CC}		- $V_{EE} - 0.15$	+ V_{CC}		Volts
Differential Input Voltage	V_{CC}	+ V_{CC}		V_{CC}	+ V_{CC}		V_{CC}	+ V_{CC}		V_{CC}	+ V_{CC}		Volts
Alarm Voltage:													
+ALM	V_{CC}	- $V_{EE} + 35$		V_{CC}	- $V_{EE} + 35$		V_{CC}	- $V_{EE} + 35$		V_{CC}	- $V_{EE} + 35$		Volts
-ALM	V_{CC}	- V_{EE}		V_{CC}	- V_{EE}		V_{CC}	- V_{EE}		V_{CC}	- V_{EE}		Volts
Operating Temperature Range	-55	+125		-55	+125		-55	+125		-55	+125		°C
Output Short Circuit to Common	Indefinite												
TEMPERATURE MEASUREMENT (Specified Temperature Range: 0°C to +50°C)													
Offset Error at +25°C ¹		±3			±1			±3			±1		°C
Stability vs. Temperature ²		±0.05			±0.025			±0.05			±0.025		°C/°C
Gain Error		±1.5			±0.75			±1.5			±0.75		%
Nominal Transfer Function		10			10			10			10		mV/°C
AMPLIFIER CHARACTERISTICS													
Closed Loop Gain ³	193.4			193.4			247.3			247.3			
Input Offset Voltage	(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			
Input Bias Current	0.1			0.1			0.1			0.1			μA
Differential Input Range	-10	+50		-10	+50		-10	+50		-10	+50		mV
Common-Mode Range	- $V_{EE} - 0.15$	- $V_{EE} - 4$		- $V_{EE} - 0.15$	- $V_{EE} - 4$		- $V_{EE} - 0.15$	- $V_{EE} - 4$		- $V_{EE} - 0.15$	- $V_{EE} - 4$		Volts
Common-Mode Sensitivity - KTC	10			10			10			10			mV/V
Power Supply Sensitivity - KTC	10			10			10			10			mV/V
Output Voltage Range													
Dual Supply	- $V_{EE} + 2.5$	+ $V_{CC} - 2$		- $V_{EE} + 2.5$	+ $V_{CC} - 2$		- $V_{EE} + 2.5$	+ $V_{CC} - 2$		- $V_{EE} + 2.5$	+ $V_{CC} - 2$		Volts
Single Supply	0	+ $V_{CC} - 2$		0	+ $V_{CC} - 2$		0	+ $V_{CC} - 2$		0	+ $V_{CC} - 2$		Volts
Max Output Current ⁴	±5			±5			±5			±5			mA
3-dB Bandwidth	15			15			15			15			kHz
ALARM CHARACTERISTICS													
V_{OLIMIT} at 2 mA	0.3			0.3			0.3			0.3			Volts
Leakage Current	±1			±1			±1			±1			μA max
Operating Voltage w/ -ALM	- $V_{EE} - 4$			- $V_{EE} - 4$			- $V_{EE} - 4$			- $V_{EE} - 4$			Volts
Short Circuit Current	20			20			20			20			mA
POWER REQUIREMENTS													
Specified Performance	+ $V_{CC} = 5$, - $V_{EE} = 0$			+ $V_{CC} = 5$, - $V_{EE} = 0$			+ $V_{CC} = 5$, - $V_{EE} = 0$			+ $V_{CC} = 5$, - $V_{EE} = 0$			Volts
Operating ⁵	+ V_{CC} to - $V_{EE} ± 30$			+ V_{CC} to - $V_{EE} ± 30$			+ V_{CC} to - $V_{EE} ± 30$			+ V_{CC} to - $V_{EE} ± 30$			Volts
Quiescent Current (No Load)													
+ V_{CC}	160	300		160	300		160	300		160	300		μA
- V_{EE}	100			100			100			100			μA
PACKAGE OPTION													
TO-116 (D-14)	AD594AD			AD594CD			AD595AD			AD595CD			
Cardip (Q-14)	AD594AQ			AD594CQ			AD595AQ			AD595CQ			

NOTES

¹Calibrated for minimum error at +25°C using a thermocouple sensitivity of 51.7 μV/°C. Since a J type thermocouple deviates from the straight line approximation, the AD594 will normally read 3.1 mV when the measuring junction is at 0°C. The AD595 will normally read 2.7 mV at 0°C.

²Defined as the slope of the line connecting the AD594/AD595 errors measured at 0°C and 50°C ambient temperature.

³Pin 8 shorted to Pin 5.

⁴Current Sink Capability in single supply configuration is limited to current drawn to ground through a 50 Ω resistor at output voltages below 2.5 V.

⁵- V_{EE} must not exceed -16 V.

Specifications shown in **boldface** are tested on all production units at final electrical test. Results from these tests are used to calculate output quality levels. All min and max specifications are guaranteed, although only those shown in **boldface** are tested on all production units.

Specifications subject to change without notice.

INTERPRETING AD594/AD595 OUTPUT VOLTAGES

To achieve a temperature proportional output of 10 mV/°C and accurately compensate for the reference junction over the rated operating range of the circuit, the AD594/AD595 is gain trimmed to match the transfer characteristic of J and K type thermocouples at 25°C. For a type J output in this temperature range the TC is 51.70 μV/°C, while for a type K it is 40.44 μV/°C. The resulting gain for the AD594 is 193.4 (10 mV/°C divided by 51.7 μV/°C) and for the AD595 is 247.3 (10 mV/°C divided by 40.44 μV/°C). In addition, an absolute accuracy trim induces an input offset to the output amplifier characteristic of 16 μV for the AD594 and 11 μV for the AD595. This offset arises because the AD594/AD595 is trimmed for a 250 mV output while applying a 25°C thermocouple input.

Because a thermocouple output voltage is nonlinear with respect to temperature, and the AD594/AD595 linearly amplifies the

compensated signal, the following transfer functions should be used to determine the actual output voltages:

$$AD594 \text{ output} = (\text{Type J Voltage} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4$$

$$AD595 \text{ output} = (\text{Type K Voltage} + 11 \mu\text{V}) \times 247.3 \text{ or conversely:}$$

$$\text{Type J voltage} = (AD594 \text{ output} / 193.4) - 16 \mu\text{V}$$

$$\text{Type K voltage} = (AD595 \text{ output} / 247.3) - 11 \mu\text{V}$$

Table 1 lists the ideal AD594/AD595 output voltages as a function of Celsius temperature for type J and K ANSI standard thermocouples, with the package and reference junction at 25°C. As is normally the case, these outputs are subject to calibration, gain and temperature sensitivity errors. Output values for intermediate temperatures can be interpolated, or calculated using the output equations and ANSI thermocouple voltage tables referred to zero degrees Celsius. Due to a slight variation in alloy content between ANSI type J and DIN Fe-CuNi

Table I. Output Voltage vs. Thermocouple Temperature (Ambient +25°C, $V_S = -5\text{ V}, +15\text{ V}$)

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV	Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
-200	-7.890	-1521	-5.891	-1454	500	27.388	5300	20.640	5107
-180	-7.402	-1428	-5.550	-1370	520	28.511	5517	21.493	5318
-160	-6.821	-1316	-5.141	-1269	540	29.642	5736	22.346	5529
-140	-6.159	-1188	-4.669	-1152	560	30.782	5956	23.198	5740
-120	-5.426	-1046	-4.138	-1021	580	31.933	6179	24.050	5950
-100	-4.632	-891	-3.553	-876	600	33.096	6404	24.902	6161
-80	-3.785	-729	-2.920	-719	620	34.273	6632	25.751	6371
-60	-2.892	-556	-2.243	-552	640	35.464	6862	26.599	6581
-40	-1.960	-376	-1.527	-375	660	36.671	7095	27.445	6790
-20	-0.995	-189	-0.777	-189	680	37.893	7332	28.288	6998
10	0.501	94	0.392	91	700	39.130	7571	29.128	7206
0	0	3.1	0	2.7	720	40.382	7813	29.965	7413
10	0.507	101	0.397	101	740	41.647	8058	30.799	7619
20	1.019	200	0.798	200	750	42.283	8181	31.214	7722
25	1.277	250	1.000	250	760	-	-	31.629	7825
30	1.536	300	1.203	300	780	-	-	32.455	8029
40	2.058	401	1.611	401	800	-	-	33.277	8232
50	2.585	503	2.022	503	820	-	-	34.095	8434
60	3.115	606	2.436	605	840	-	-	34.909	8636
80	4.186	813	3.266	810	860	-	-	35.718	8836
100	5.268	1022	4.095	1015	880	-	-	36.521	9035
120	6.359	1233	4.919	1219	900	-	-	37.322	9233
140	7.457	1445	5.733	1420	920	-	-	38.122	9430
160	8.560	1659	6.539	1620	940	-	-	38.915	9626
180	9.667	1873	7.338	1817	960	-	-	39.703	9821
200	10.777	2087	8.137	2015	980	-	-	40.488	10015
220	11.887	2302	8.938	2213	1000	-	-	41.269	10209
240	12.998	2517	9.745	2413	1020	-	-	42.045	10400
260	14.108	2732	10.560	2614	1040	-	-	42.817	10591
280	15.217	2946	11.381	2817	1060	-	-	43.585	10781
300	16.325	3160	12.207	3022	1080	-	-	44.349	10970
320	17.432	3374	13.039	3227	1100	-	-	45.108	11158
340	18.537	3588	13.874	3434	1120	-	-	45.863	11345
360	19.640	3801	14.712	3641	1140	-	-	46.612	11530
380	20.743	4015	15.552	3849	1160	-	-	47.356	11714
400	21.846	4228	16.395	4057	1180	-	-	48.095	11897
420	22.949	4441	17.241	4266	1200	-	-	48.828	12078
440	24.054	4655	18.088	4476	1220	-	-	49.555	12258
460	25.161	4869	18.938	4686	1240	-	-	50.276	12436
480	26.272	5084	19.788	4896	1250	-	-	50.993	12524

thermocouples Table I should not be used in conjunction with European standard thermocouples. Instead the transfer function given previously and a DIN thermocouple table should be used. ANSI type K and DIN NiCr-Ni thermocouples are composed

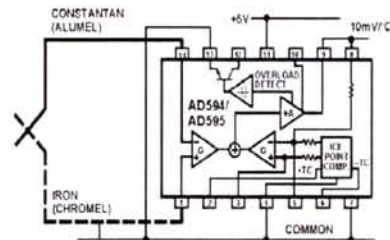


Figure 1. Basic Connection, Single Supply Operation

of identical alloys and exhibit similar behavior. The upper temperature limits in Table I are those recommended for type J and type K thermocouples by the majority of vendors.

SINGLE AND DUAL SUPPLY CONNECTIONS

The AD594/AD595 is a completely self-contained thermocouple conditioner. Using a single +5 V supply the interconnections shown in Figure 1 will provide a direct output from a type J thermocouple (AD594) or type K thermocouple (AD595) measuring from 0°C to +300°C.

Any convenient supply voltage from +5 V to +30 V may be used, with self-heating errors being minimized at lower supply levels. In the single supply configuration the +5 V supply connects to Pin 11 with the V- connection at Pin 7 strapped to power and signal common at Pin 4. The thermocouple wire inputs connect to Pins 1 and 14 either directly from the measuring point or through intervening connections of similar thermocouple wire type. When the alarm output at Pin 13 is not used it should be connected to common or -V. The precalibrated feedback network at Pin 8 is tied to the output at Pin 9 to provide a 10 mV/°C nominal temperature transfer characteristic.

By using a wider ranging dual supply, as shown in Figure 2, the AD594/AD595 can be interfaced to thermocouples measuring both negative and extended positive temperatures.

AD594/AD595

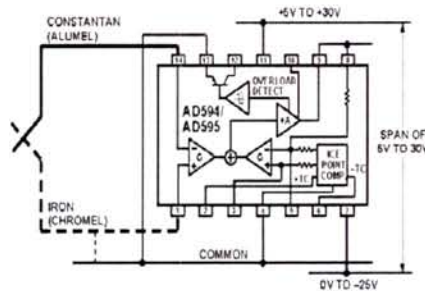


Figure 2. Dual Supply Operation

With a negative supply the output can indicate negative temperatures and drive grounded loads or loads returned to positive voltages. Increasing the positive supply from 5 V to 15 V extends the output voltage range well beyond the 750°C temperature limit recommended for type J thermocouples (AD594) and the 1250°C for type K thermocouples (AD595).

Common-mode voltages on the thermocouple inputs must remain within the common-mode range of the AD594/AD595, with a return path provided for the bias currents. If the thermocouple is not remotely grounded, then the dotted line connections in Figures 1 and 2 are recommended. A resistor may be needed in this connection to assure that common-mode voltages induced in the thermocouple loop are not converted to normal mode.

THERMOCOUPLE CONNECTIONS

The isothermal terminating connections of a pair of thermocouple wires forms an effective reference junction. This junction must be kept at the same temperature as the AD594/AD595 for the internal cold junction compensation to be effective.

A method that provides for thermal equilibrium is the printed circuit board connection layout illustrated in Figure 3.

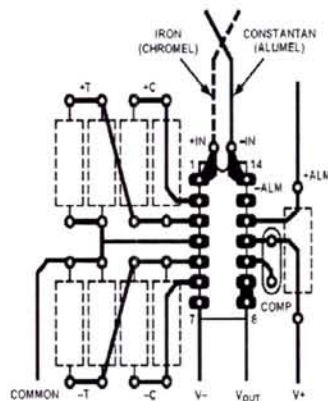


Figure 3. PCB Connections

Here the AD594/AD595 package temperature and circuit board are thermally contacted in the copper printed circuit board tracks under Pins 1 and 14. The reference junction is now composed of a copper-constantan (or copper-alumel) connection and copper-iron (or copper-chromel) connection, both of which are at the same temperature as the AD594/AD595.

The printed circuit board layout shown also provides for placement of optional alarm load resistors, recalibration resistors and a compensation capacitor to limit bandwidth.

To ensure secure bonding the thermocouple wire should be cleaned to remove oxidation prior to soldering. Noncorrosive rosin flux is effective with iron, constantan, chromel and alumel and the following solders: 95% tin-5% antimony, 95% tin-5% silver or 90% tin-10% lead.

FUNCTIONAL DESCRIPTION

The AD594 behaves like two differential amplifiers. The outputs are summed and used to control a high gain amplifier, as shown in Figure 4.

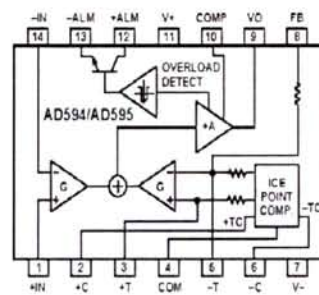


Figure 4. AD594/AD595 Block Diagram

In normal operation the main amplifier output, at Pin 9, is connected to the feedback network, at Pin 8. Thermocouple signals applied to the floating input stage, at Pins 1 and 14, are amplified by gain G of the differential amplifier and are then further amplified by gain A in the main amplifier. The output of the main amplifier is fed back to a second differential stage in an inverting connection. The feedback signal is amplified by this stage and is also applied to the main amplifier input through a summing circuit. Because of the inversion, the amplifier causes the feedback to be driven to reduce this difference signal to a small value. The two differential amplifiers are made to match and have identical gains, G. As a result, the feedback signal that must be applied to the right-hand differential amplifier will precisely match the thermocouple input signal when the difference signal has been reduced to zero. The feedback network is trimmed so that the effective gain to the output, at Pins 8 and 9, results in a voltage of 10 mV/°C of thermocouple excitation.

In addition to the feedback signal, a cold junction compensation voltage is applied to the right-hand differential amplifier. The compensation is a differential voltage proportional to the Celsius temperature of the AD594/AD595. This signal disturbs the differential input so that the amplifier output must adjust to restore the input to equal the applied thermocouple voltage.

The compensation is applied through the gain scaling resistors so that its effect on the main output is also 10 mV/°C. As a result, the compensation voltage adds to the effect of the thermocouple voltage a signal directly proportional to the difference between 0°C and the AD594/AD595 temperature. If the thermocouple reference junction is maintained at the AD594/AD595 temperature, the output of the AD594/AD595 will correspond to the reading that would have been obtained from amplification of a signal from a thermocouple referenced to an ice bath.

The AD594/AD595 also includes an input open circuit detector that switches on an alarm transistor. This transistor is actually a current-limited output buffer, but can be used up to the limit as a switch transistor for either pull-up or pull-down operation of external alarms.

The ice point compensation network has voltages available with positive and negative temperature coefficients. These voltages may be used with external resistors to modify the ice point compensation and recalibrate the AD594/AD595 as described in the next column.

The feedback resistor is separately pinned out so that its value can be padded with a series resistor, or replaced with an external resistor between Pins 5 and 9. External availability of the feedback resistor allows gain to be adjusted, and also permits the AD594/AD595 to operate in a switching mode for setpoint operation.

CAUTIONS:

The temperature compensation terminals (+C and -C) at Pins 2 and 6 are provided to supply small calibration currents only. The AD594/AD595 may be permanently damaged if they are grounded or connected to a low impedance.

The AD594/AD595 is internally frequency compensated for feedback ratios (corresponding to normal signal gain) of 75 or more. If a lower gain is desired, additional frequency compensation should be added in the form of a 300 pF capacitor from Pin 10 to the output at Pin 9. As shown in Figure 5 an additional 0.01 μ F capacitor between Pins 10 and 11 is recommended.

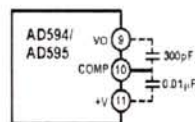


Figure 5. Low Gain Frequency Compensation

RECALIBRATION PRINCIPLES AND LIMITATIONS

The ice point compensation network of the AD594/AD595 produces a differential signal which is zero at 0°C and corresponds to the output of an ice referenced thermocouple at the temperature of the chip. The positive TC output of the circuit is proportional to Kelvin temperature and appears as a voltage at +T. It is possible to decrease this signal by loading it with a resistor from +T to COM, or increase it with a pull-up resistor from +T to the larger positive TC voltage at +C. Note that adjustments to +T should be made by measuring the voltage which tracks it at -T. To avoid destabilizing the feedback amplifier the measuring instrument should be isolated by a few thousand ohms in series with the lead connected to -T.

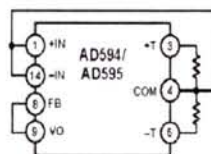


Figure 6. Decreased Sensitivity Adjustment

Changing the positive TC half of the differential output of the compensation scheme shifts the zero point away from 0°C. The zero can be restored by adjusting the current flow into the negative input of the feedback amplifier, the -T pin. A current into

this terminal can be produced with a resistor between -C and -T to balance an increase in +T, or a resistor from -T to COM to offset a decrease in +T.

If the compensation is adjusted substantially to accommodate a different thermocouple type, its effect on the final output voltage will increase or decrease in proportion. To restore the nominal output to 10 mV/°C the gain may be adjusted to match the new compensation and thermocouple input characteristics. When reducing the compensation the resistance between -T and COM automatically increases the gain to within 0.5% of the correct value. If a smaller gain is required, however, the nominal 47 k Ω internal feedback resistor can be paralleled or replaced with an external resistor.

Fine calibration adjustments will require temperature response measurements of individual devices to assure accuracy. Major reconfigurations for other thermocouple types can be achieved without seriously compromising initial calibration accuracy, so long as the procedure is done at a fixed temperature using the factory calibration as a reference. It should be noted that intermediate recalibration conditions may require the use of a negative supply.

EXAMPLE: TYPE E RECALIBRATION—AD594/AD595

Both the AD594 and AD595 can be configured to condition the output of a type E (chromel-constantan) thermocouple. Temperature characteristics of type E thermocouples differ less from type J, than from type K, therefore the AD594 is preferred for recalibration.

While maintaining the device at a constant temperature follow the recalibration steps given here. First, measure the device temperature by tying both inputs to common (or a selected common-mode potential) and connecting FB to VO. The AD594 is now in the stand alone Celsius thermometer mode. For this example assume the ambient is 24°C and the initial output VO is 240 mV. Check the output at VO to verify that it corresponds to the temperature of the device.

Next, measure the voltage -T at Pin 5 with a high impedance DVM (capacitance should be isolated by a few thousand ohms of resistance at the measured terminals). At 24°C the -T voltage will be about 8.5 mV. To adjust the compensation of an AD594 to a type E thermocouple a resistor, R1, should be connected between +T and +C, Pins 2 and 3, to raise the voltage at -T by the ratio of thermocouple sensitivities. The ratio for converting a type J device to a type E characteristic is:

$$r(\text{AD594}) = (60.9 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) / (51.7 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) = 1.18$$

Thus, multiply the initial voltage measured at -T by r and experimentally determine the R1 value required to raise -T to that level. For the example the new -T voltage should be about 9.8 mV. The resistance value should be approximately 1.8 k Ω .

The zero differential point must now be shifted back to 0°C. This is accomplished by multiplying the original output voltage VO by r and adjusting the measured output voltage to this value by experimentally adding a resistor, R2, between -C and -T, Pins 5 and 6. The target output value in this case should be about 283 mV. The resistance value of R2 should be approximately 240 k Ω .

Finally, the gain must be recalibrated such that the output VO indicates the device's temperature once again. Do this by adding a third resistor, R3, between FB and -T, Pins 8 and 5. VO should now be back to the initial 240 mV reading. The resistance value

AD594/AD595

of R3 should be approximately 280 k Ω . The final connection diagram is shown in Figure 7. An approximate verification of the effectiveness of recalibration is to measure the differential gain to the output. For type E it should be 164.2.

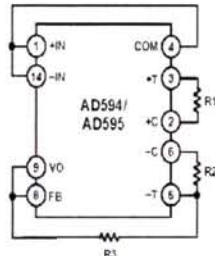


Figure 7. Type E Recalibration

When implementing a similar recalibration procedure for the AD595 the values for R1, R2, R3 and r will be approximately 650 Ω , 84 k Ω , 93 k Ω and 1.51, respectively. Power consumption will increase by about 50% when using the AD595 with type E inputs.

Note that during this procedure it is crucial to maintain the AD594/AD595 at a stable temperature because it is used as the temperature reference. Contact with fingers or any tools not at ambient temperature will quickly produce errors. Radiational heating from a change in lighting or approach of a soldering iron must also be guarded against.

USING TYPE T THERMOCOUPLES WITH THE AD595

Because of the similarity of thermal EMFs in the 0°C to +50°C range between type K and type T thermocouples, the AD595 can be directly used with both types of inputs. Within this ambient temperature range the AD595 should exhibit no more than an additional 0.2°C output calibration error when used with type T inputs. The error arises because the ice point compensator is trimmed to type K characteristics at 25°C. To calculate the AD595 output values over the recommended -200°C to +350°C range for type T thermocouples, simply use the ANSI thermocouple voltages referred to 0°C and the output equation given on page 2 for the AD595. Because of the relatively large nonlinearities associated with type T thermocouples the output will deviate widely from the nominal 10 mV/°C. However, cold junction compensation over the rated 0°C to +50°C ambient will remain accurate.

STABILITY OVER TEMPERATURE

Each AD594/AD595 is tested for error over temperature with the measuring thermocouple at 0°C. The combined effects of cold junction compensation error, amplifier offset drift and gain error determine the stability of the AD594/AD595 output over the rated ambient temperature range. Figure 8 shows an AD594/AD595 drift error envelope. The slope of this figure has units of °C/°C.

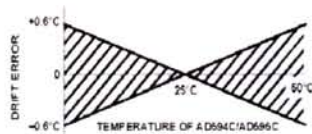


Figure 8. Drift Error vs. Temperature

THERMAL ENVIRONMENT EFFECTS

The inherent low power dissipation of the AD594/AD595 and the low thermal resistance of the package make self-heating errors almost negligible. For example, in still air the chip to ambient thermal resistance is about 80°C/watt (for the D package). At the nominal dissipation of 800 μ W the self-heating in free air is less than 0.065°C. Submerged in fluorinert liquid (unstirred) the thermal resistance is about 40°C/watt, resulting in a self-heating error of about 0.032°C.

SETPOINT CONTROLLER

The AD594/AD595 can readily be connected as a setpoint controller as shown in Figure 9.

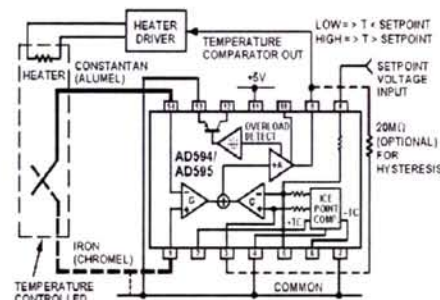


Figure 9. Setpoint Controller

The thermocouple is used to sense the unknown temperature and provide a thermal EMF to the input of the AD594/AD595. The signal is cold junction compensated, amplified to 10 mV/°C and compared to an external setpoint voltage applied by the user to the feedback at Pin 8. Table 1 lists the correspondence between setpoint voltage and temperature, accounting for the nonlinearity of the measurement thermocouple. If the setpoint temperature range is within the operating range (-55°C to +125°C) of the AD594/AD595, the chip can be used as the transducer for the circuit by shorting the inputs together and utilizing the nominal calibration of 10 mV/°C. This is the centigrade thermometer configuration as shown in Figure 13.

In operation if the setpoint voltage is above the voltage corresponding to the temperature being measured the output swings low to approximately zero volts. Conversely, when the temperature rises above the setpoint voltage the output switches to the positive limit of about 4 volts with a +5 V supply. Figure 9 shows the setpoint comparator configuration complete with a heater element driver circuit being controlled by the AD594/AD595 toggled output. Hysteresis can be introduced by injecting a current into the positive input of the feedback amplifier when the output is toggled high. With an AD594 about 200 nA into the +T terminal provides 1°C of hysteresis. When using a single 5 V supply with an AD594, a 20 M Ω resistor from V_{CC} to +T will supply the 200 nA of current when the output is forced high (about 4 V). To widen the hysteresis band decrease the resistance connected from V_{CC} to +T.

ALARM CIRCUIT

In all applications of the AD594/AD595 the ALM connection, Pin 13, should be constrained so that it is not more positive than $(V+) - 4V$. This can be most easily achieved by connecting Pin 13 to either common at Pin 4 or $V-$ at Pin 7. For most applications that use the alarm signal, Pin 13 will be grounded and the signal will be taken from +ALM on Pin 12. A typical application is shown in Figure 10.

In this configuration the alarm transistor will be off in normal operation and the 20 k pull up will cause the +ALM output on Pin 12 to go high. If one or both of the thermocouple leads are interrupted, the +ALM pin will be driven low. As shown in Figure 10 this signal is compatible with the input of a TTL gate which can be used as a buffer and/or inverter.

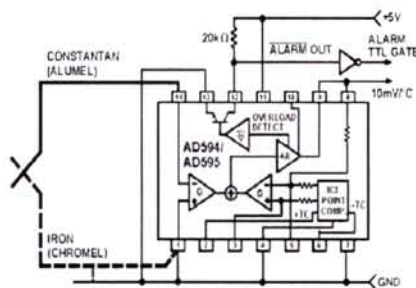


Figure 10. Using the Alarm to Drive a TTL Gate ("Grounded" Emitter Configuration)

Since the alarm is a high level output it may be used to directly drive an LED or other indicator as shown in Figure 11.

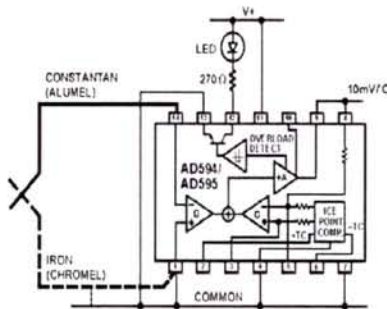


Figure 11. Alarm Directly Drives LED

A 270 Ω series resistor will limit current in the LED to 10 mA, but may be omitted since the alarm output transistor is current limited at about 20 mA. The transistor, however, will operate in a high dissipation mode and the temperature of the circuit will rise well above ambient. Note that the cold junction compensation will be affected whenever the alarm circuit is activated. The time required for the chip to return to ambient temperature will depend on the power dissipation of the alarm circuit, the nature of the thermal path to the environment and the alarm duration.

The alarm can be used with both single and dual supplies. It can be operated above or below ground. The collector and emitter of the output transistor can be used in any normal switch configuration. As an example a negative referenced load can be driven from -ALM as shown in Figure 12.

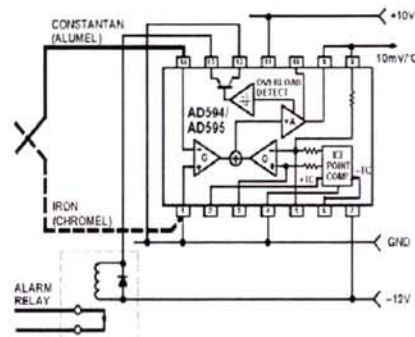


Figure 12. -ALM Driving A Negative Referenced Load

The collector (+ALM) should not be allowed to become more positive than $(V-) + 36V$, however, it may be permitted to be more positive than $V+$. The emitter voltage (-ALM) should be constrained so that it does not become more positive than 4 volts below the $V+$ applied to the circuit.

Additionally, the AD594/AD595 can be configured to produce an extreme upscale or downscale output in applications where an extra signal line for an alarm is inappropriate. By tying either of the thermocouple inputs to common most runaway control conditions can be automatically avoided. A +IN to common connection creates a downscale output if the thermocouple opens, while connecting -IN to common provides an upscale output.

CELSIUS THERMOMETER

The AD594/AD595 may be configured as a stand-alone Celsius thermometer as shown in Figure 13.

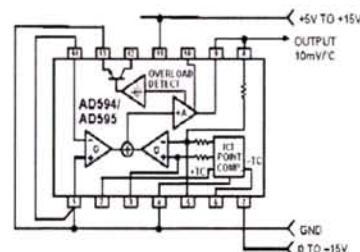


Figure 13. AD594/AD595 as a Stand-Alone Celsius Thermometer

Simply omit the thermocouple and connect the inputs (Pins 1 and 14) to common. The output now will reflect the compensation voltage and hence will indicate the AD594/AD595 temperature with a scale factor of 10 mV/C. In this three terminal, voltage output, temperature sensing mode, the AD594/AD595 will operate over the full military $-55^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$ temperature range.

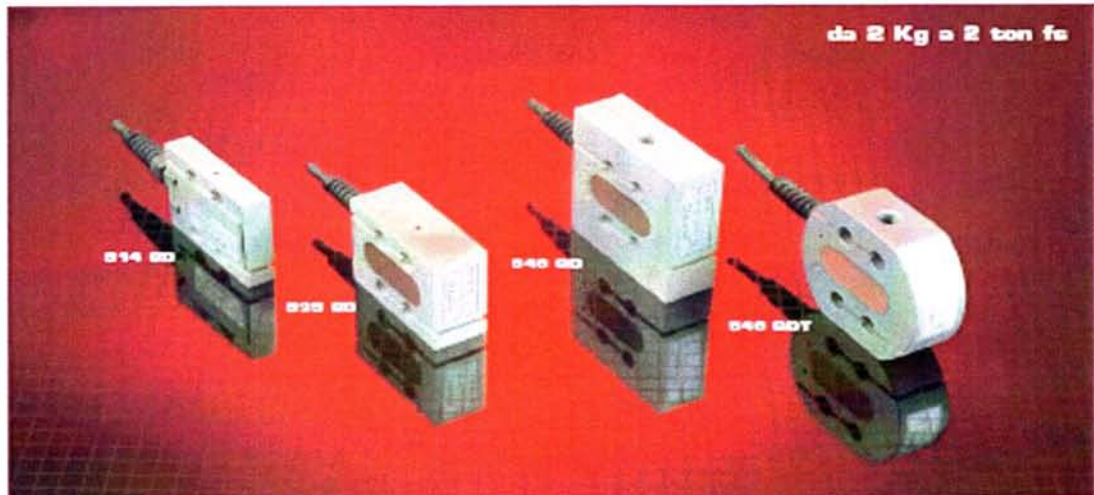
Π.8 Κυψελίδα φόρτισης

I.P.

CELLE di CARICO

anche con ELETTRONICA A/D INTERNA SERIE 500 QD

da 2 Kg a 2 ton fe



IMPIEGHI E CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

Sono celle di carico per uso industriale da lungo tempo sul mercato che hanno subito successivi miglioramenti, di completa affidabilità ed adatte anche per condizioni ambientali estremamente faticose.

Migliaia di queste celle funzionano ininterrottamente da anni, sottoposte a miliardi di cicli/anno.

Le principali migliorie introdotte sono state: scelta di leghe metalliche di elevata qualità e tenacità, disposizioni circuitali interne per resistere a funzionamento dinamico e gravoso, riempimento della cavità interna con gel e gomme siliconiche per funzionamento anche in ambienti aggressivi e con formazione di condensa.

Principio di funzionamento:

si basa sulla flessione di un parallelogramma, tipico delle celle per pesatura legale, dove il piano di pesatura si espone parallelamente a se stesso.

Questo principio consente valori di precisione e di insensibilità ai carichi fuoriasse (fino a 7-10 cm) impossibili da raggiungere con celle a zeta similari, ma con principi di funzionamento diversi (sollecitazione a taglio) e qualità inferiori.

Altre particolarità costruttive:

- Corpo della cella: in lega di alluminio per i Mod. 514-535-546 QD ed in lega di acciaio per il Mod. 546 QDT.
- Calibratore interno: per tutti i modelli senza condizionatore di segnale interno. Esso permette di simulare elettricamente un carico il cui valore preciso è indicato sul certificato di calibrazione: per una facile calibrazione del sistema di pesatura da parte del Cliente.
- Certificato di calibrazione: fornito insieme ad ogni cella ed eseguito con riferimento a campioni secondari certificati dall'NPL (= National Physical Laboratory - Inghilterra).

VANTAGGI DELL'ELETTRONICA A/D INTERNA (opzioni):

- Elettronica analogica (-A): insensibilità alla lunghezza del cavo di interconnessione e maggiore insensibilità ai disturbi elettrici esterni.
- Elettronica digitale (-D): tutte le regolazioni a distanza mediante computer: espressione di zero (tara), conversione in unità meccaniche (Kg, ton, ecc.), calibrazione e controllo funzionale di tutto il sistema di misure, livelli di allarme e regolazione dell'intervallo di intervento (CAN), taratura personalizzabile con l'attivazione fino a 8 punti di linearizzazione, possibilità di interconnessione fino a 32 trasduttori su un'unica linea fortemente immune ai disturbi elettrici. [Richiedere il bollettino "Trasduttori con elettronica digitale".]

Tutte le elettroniche interne sono certificate a norma CE per l'essenzialità e l'immunità ai disturbi elettromagnetici.

CELLE DI CARICO: CARATTERISTICHE TECNICHE

Campi di misura: Mod. 514 QD: 0-2-3 Kg; Mod. 535 QD: 0-6-12-25 Kg; Mod. 546 QD (alluminio): 0-60-110 Kg;
Mod. 546 QDT (T = tondo in acciaio): 0-220-330-550 Kg - 1 - 2 Ton.

Errore totale: (non-linearità + isteresi + variazione della sensibilità con la temperatura):
per Mod. 514 QD-535 QD: C8 = 3000 divisioni: $\leq \pm 0,003\%$ FS;
per Mod. 546 QD-546 QDT: C 1,5 = 1500 divisioni: $\leq \pm 0,046\%$ FS;

Sensibilità: 2 m V/V FS, tipica. Errore di ripetibilità: $\leq \pm 0,003\%$ FS
Errore di variazione termica dello zero entro 5° K: per Mod. C 3: $\leq \pm 0,023\%$ FS; per Mod. C 1,5: $\leq \pm 0,046\%$ FS.
Sbilanciamento dallo zero: $\leq \pm 2\%$ FS.

Impedenza del ponte: 350 ohm nominali. Resistenza d'isolamento: >5000 ohm

Alimentazione normalizzata: 10 V cc/cca; massima: 20 V cc/cca.

Carico limite di sicurezza: 50 % oltre il FS.

Rottura: 3 volte circa il FS, con carico secondo l'asse di pesatura.

Campi di temperatura: di compensazione (CML - 60): -10 + +40°C; operativa: -15+ +75°C; RH < 95% (NB8-44).

Protezione ambientale: secondo norme DIN 40060; grado di protezione IP65 (escluso Mod. 514 QD-2Kg, 514QD-3 Kg e 535QD-6Kg che hanno IP54).
A norme CE.

Nota: a trazione, per carichi dinamici ed in presenza di colpi e vibrazioni, difficili da valutare, il carico max applicabile deve essere ridotto onde evitare danneggiamenti a fatica.

OPZIONE ELETTRONICA INTERNA (escluso mod. 514QD):

• Elettronica analogica (suffisso: -A):

Amplificatori di tensione: - A5 = alimentazione: da 10,5 a 28 Vcc; uscita: 0-5 V.

- A10 = alimentazione: da 1E a 28 Vcc; uscita: 0-10 V.

Amplificatore di corrente: - A4 = alimentazione: da 1E a 40 Vcc; uscita: 4-20 mA.

• Elettronica digitale: (suffisso: -D):

- Alimentazione: da 5 a 28 Vcc; 20 mA tipici a 24 Vcc.

- Uscite digitali: -D2x = RS 422 ed RS 485. -D4x = CAN.

- Protocolli (x): -D20 = DSBbus, -D21 = Modbus, -D40 = CAN layer 2; -D41 = CAN open (D5P 406); -D42 = DeviceNet.

- Conversione A/D: 24 bit max (Sigma Delta).

- Banda passante: da zero a 1,94 Hz fino a 390 Hz (-3 dB) in funzione della frequenza di aggiornamento A/D.

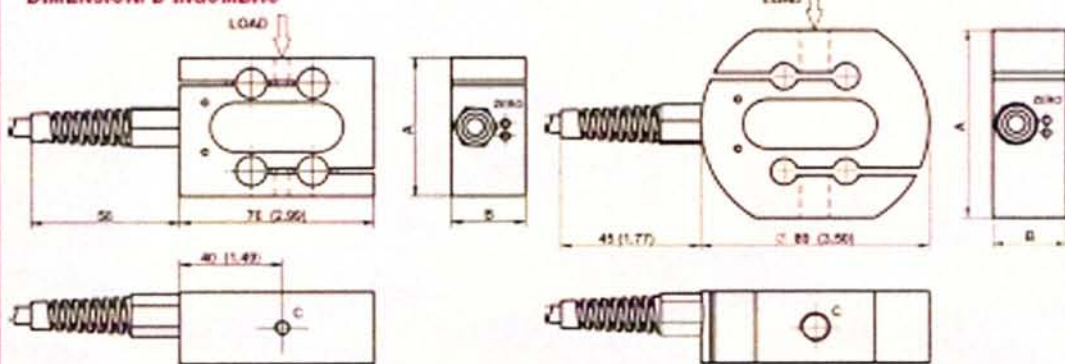
- Frequenza di aggiornamento interna A/D: da 7,5 a 1600 Hz (disponibile mediante CAN).

- Baud rate: impostabile da 1200 a 115.200 baud (RS 485/442) ed 1 Mbit max per CAN.

- Uscite analogica (opzionale): 0-5 V (D/A 12 bit).

- Temperatura di funzionamento: -20+ +70°C; RH < 95 %.

DIMENSIONI D'INGOMBRO



MODEL	RANGE	A	B	C	RANGE	A	B	C
Units	Kg	mm	mm	mm	lbs	inches	inches	inches
514 QD	0-2-3	50	14.5	50	0-5-7	2.2	0.58	1.97
535 QD	0-6-12-25	70	20	50	0-15-25-55	2.2	1.14	1.97
546 QD	0-60-110	70	20	50	0-150-250	2.89	1.14	3.94

MODEL	RANGE	A	B	C	RANGE	A	B	C
Units	kg	mm	mm	mm	lbs	inches	inches	inches
546 QDT	0-220-330-550-1100	70	20	50	0-500-750-1250-2500	2.89	1.14	3.94
546 QDT	0-220-330-550-1100	70	20	50	0-500-750-1250-2500	2.89	2.25	6.11

Caratteristiche tecniche e prezzi possono cambiare senza preavviso.

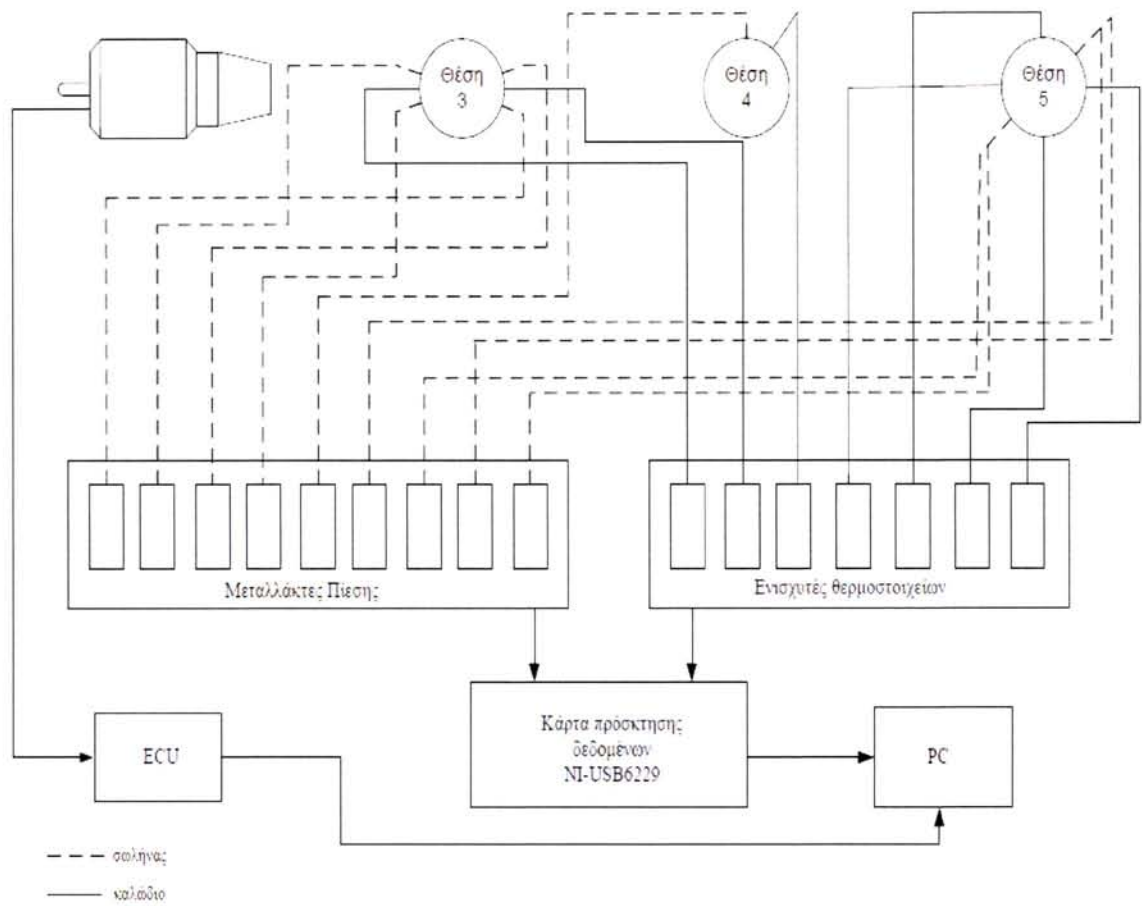
Bollettino: 240105-1



DSEUROPE S.p.A.

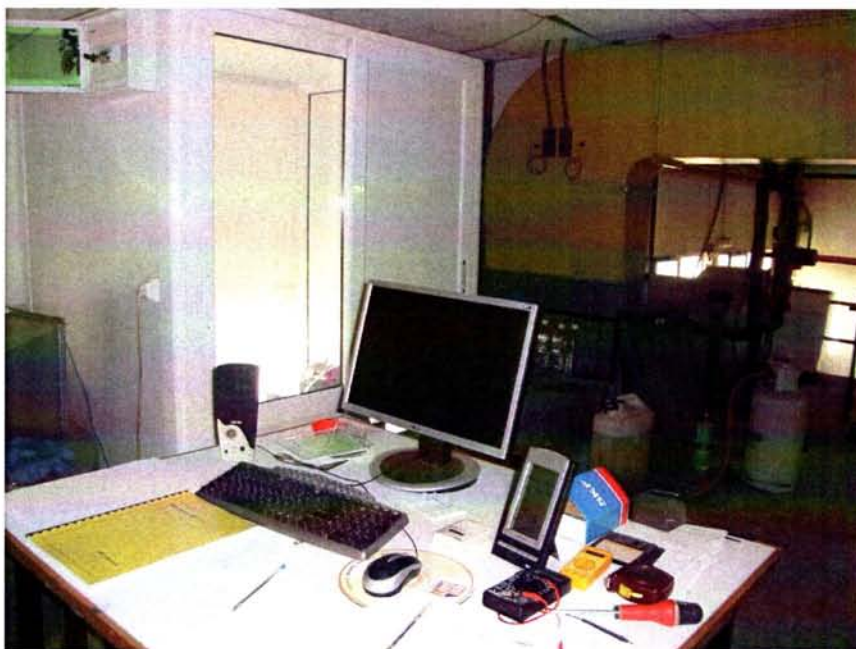
Via F. Russoli, 6 - 20143 Milano
Telefono: 02 - 8910142 (4 linee r.a.)
Fax: 02 - 89124848 - 8910145
dseurope@dseurope.com - www.dseurope.it

Π.9 Η μετρητική αλυσίδα

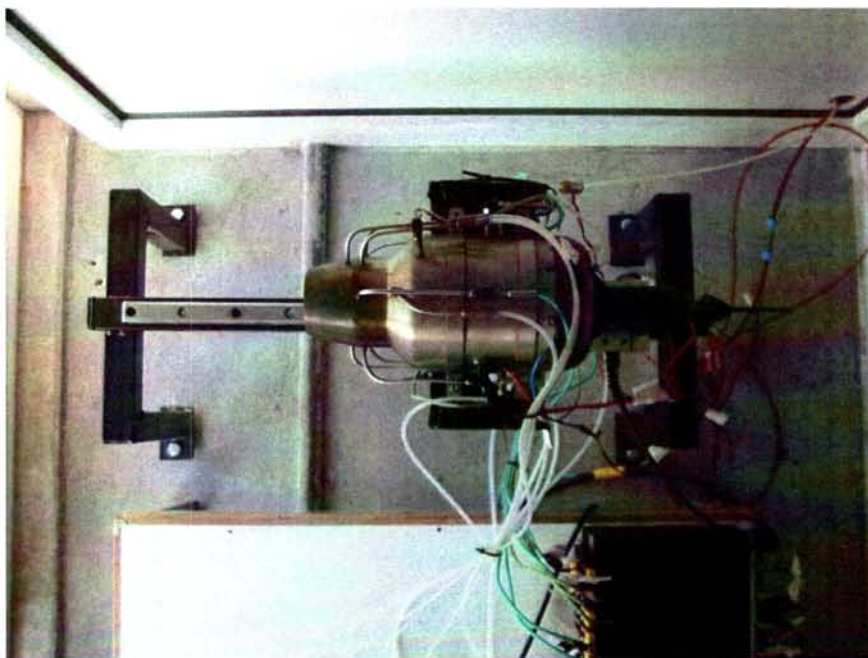


Εικόνα Π. 4. Η μετρητική αλυσίδα της διάταξης

Π.10 Φωτογραφίες δοκιμαστηρίου



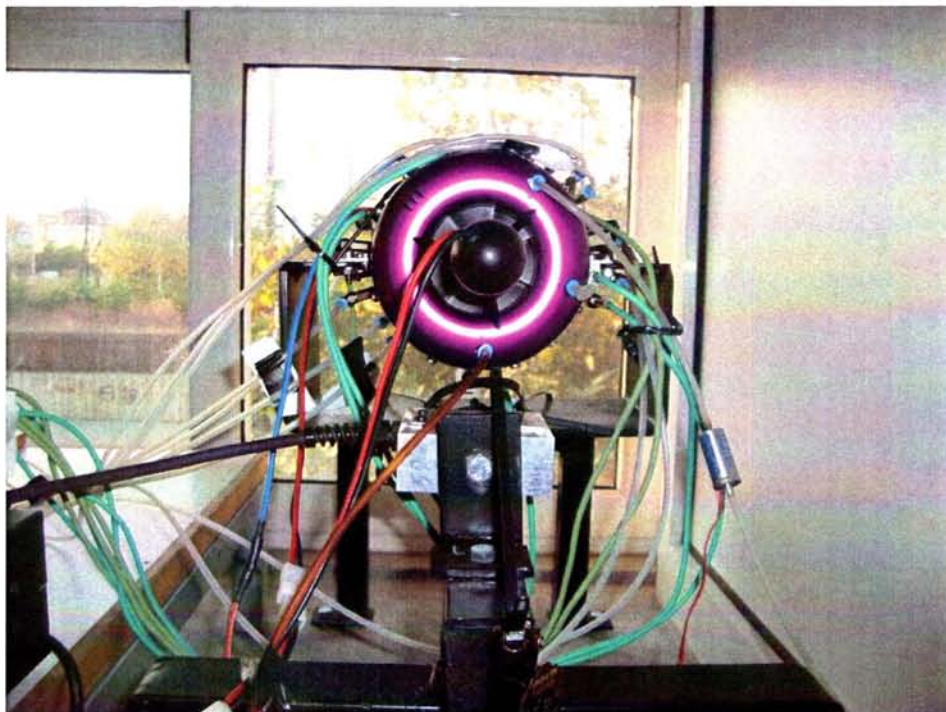
Εικόνα Π. 5. Γενική άποψη πειραματικής διάταξης και δοκιμαστηρίου



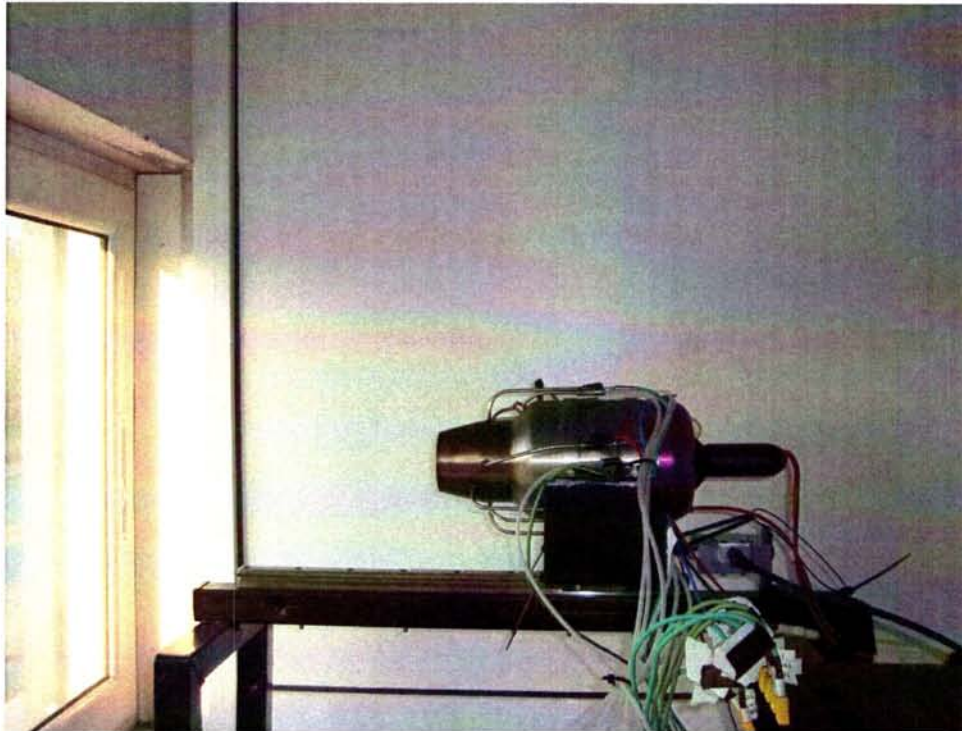
Εικόνα Π. 6. Η βάση στήριξης του κινητήρα



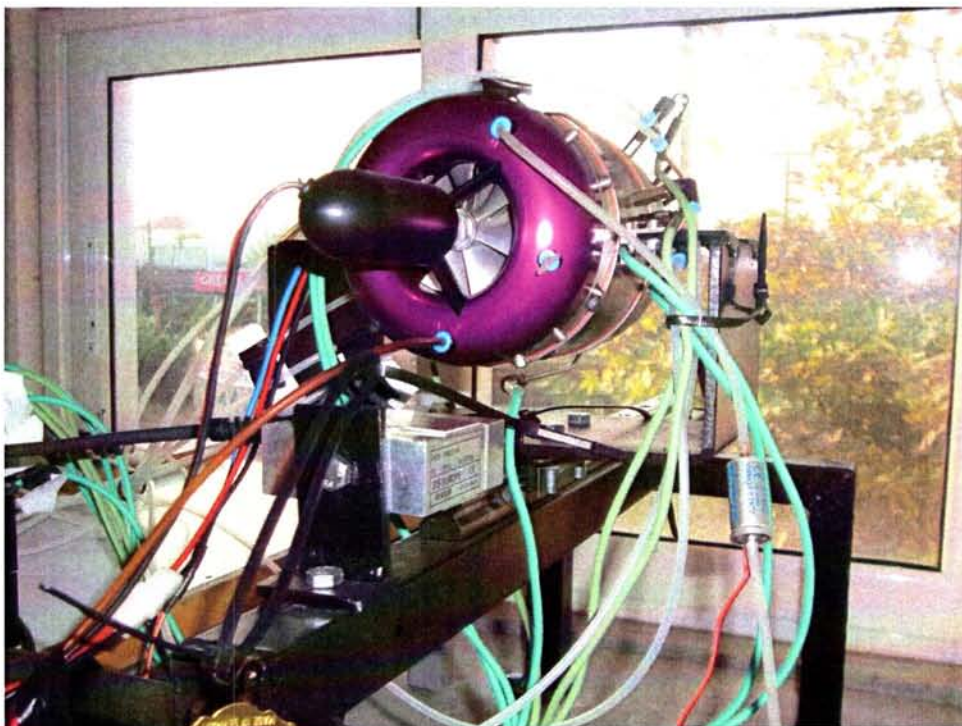
Εικόνα Π. 7. Το δοκιμαστήριο εν ώρα λειτουργίας



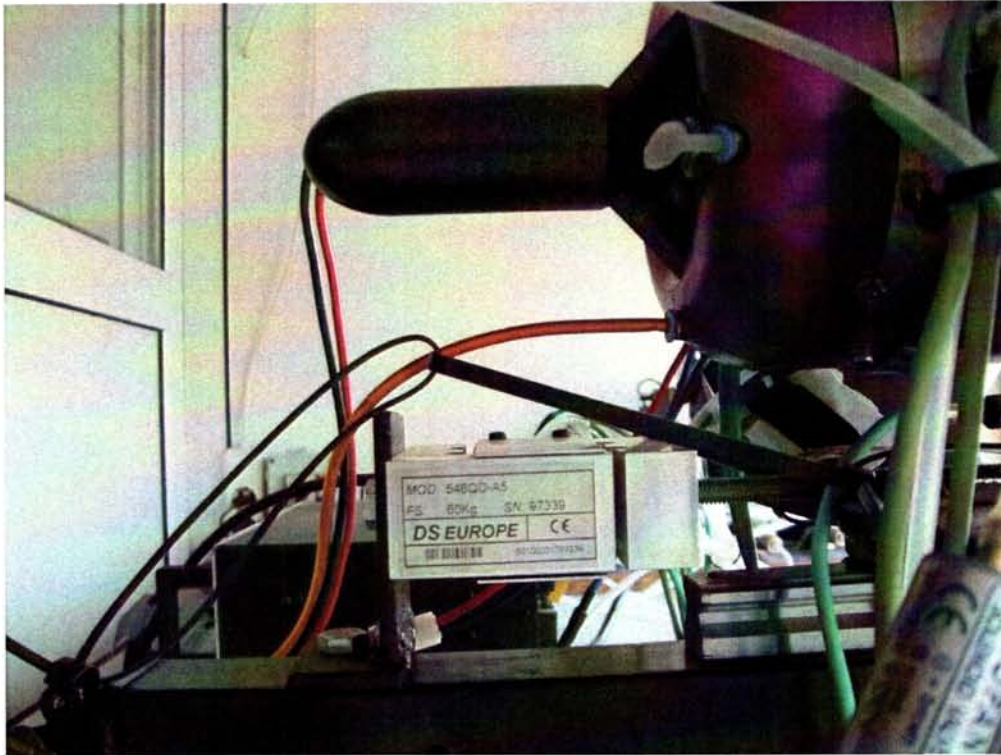
Εικόνα Π. 8. Ο κινητήρας με τα μετρητικά όργανα (μπροστινή όψη)



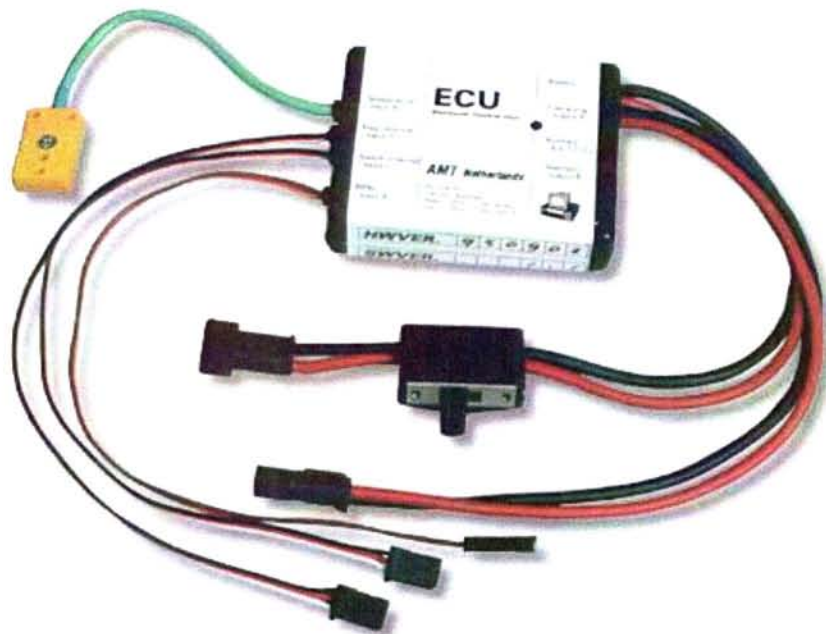
Εικόνα Π. 9. Ο κινητήρας με τα μετρητικά όργανα (πλαϊνή όψη)



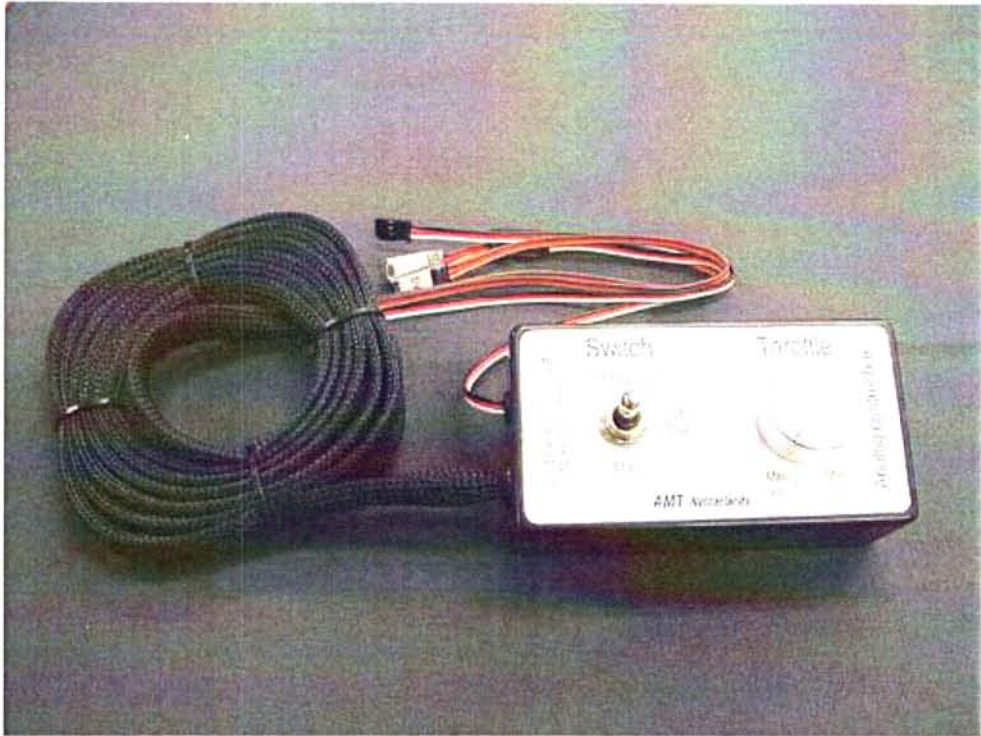
Εικόνα Π. 10. Κυψελίδα φόρτισης και βάση του κινητήρα



Εικόνα Π. 11. Κυψελίδα φόρτισης της DS Europe



Εικόνα Π. 12. Ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου (ECU) του κινητήρα



Εικόνα Π. 13. Το χειριστήριο του κινητήρα



Εικόνα Π. 14. Το τερματικό παρακολούθησης της λειτουργίας του κινητήρα



Εικόνα Π. 15. Η αντλία καυσίμου του κινητήρα



Εικόνα Π. 16. Η βαλβίδα του καυσίμου



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000114102