



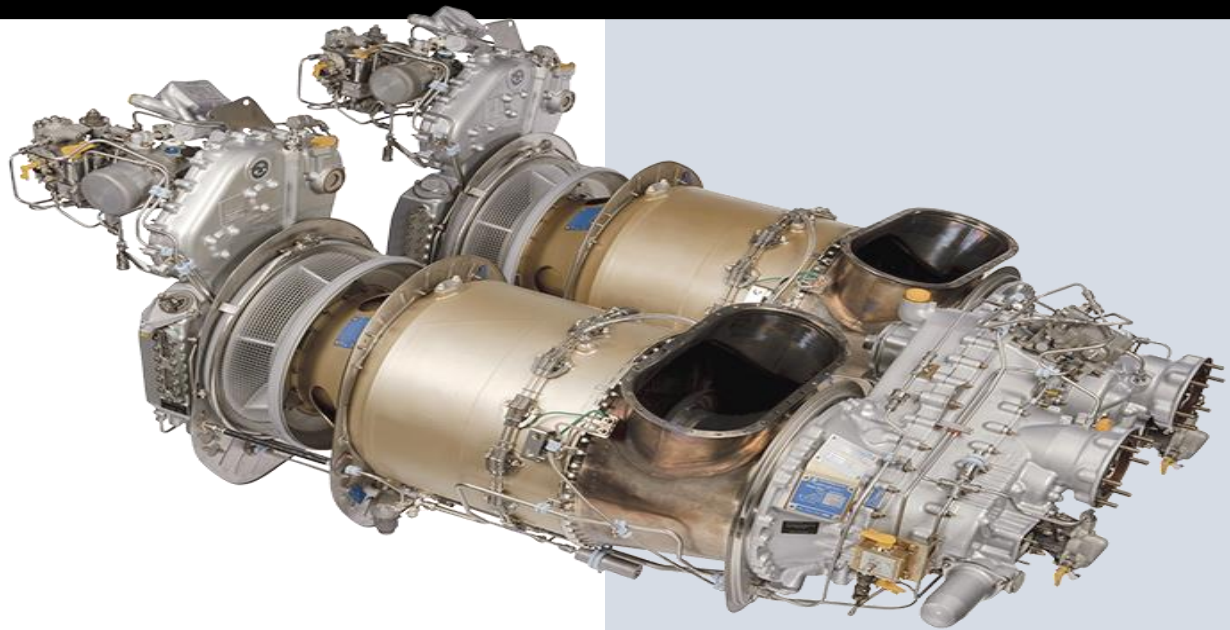
UNIVERSITY OF WEST ATTICA
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

2020

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΞΟΝΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
(TURBOSHAFT) "PRATT & WHITNEY PT6T-3B-6"**



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΘΕΟΔΩΡΑΚΑΚΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ

ΔΑΣΚΑΛΑΚΗΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ

ΑΜ: 38989

ΚΑΤΙΡΤΖΟΓΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΜ: 15971

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	4
Abstract	5
1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ.....	6
1.1.1. Εισαγωγή	6
Στροβιλοαντιδραστήρας (Turbojet Engine)	7
1.1.2. Αρχή λειτουργίας.....	7
1.1.3. Κυριότερα εξαρτήματα	11
1.1.3.1. Κώνος εισαγωγής αέρα (<i>Inlet</i>).....	11
1.1.3.2. Συμπιεστής (Compressor)	12
1.1.3.3. Θάλαμος Καύσης (combustion chamber)	12
1.1.3.4. Στρόβιλος (Turbine)	13
1.1.3.5. Κώνος ή Ακροφύσιο Εξαγωγής (Nozzle).....	14
1.1.4. Απόδοση	16
1.1.5. Μετάκαυσης (Afterburning).....	17
Στροβιλοανεμιστήρας (Turbofan Engine)	18
1.1.6. Σχεδιασμός	18
1.1.7. Απόδοση	21
Ελικοστρόβιλος (turboprop engine)	23
1.1.8. Σχεδίαση	23
1.1.9. Απόδοση	25
Αξονοστρόβιλος (Turbohaft Engine).....	26
1.1.10. Λειτουργία	26
Ειδικές μορφές	27
1.1.11. Αυλωθητήρας (ramjet)	27
1.1.12. Στροβιλοαυλωθητήρας (Turboramjet).....	29
1.1.13. Κινητήρες με περιστρεφόμενα ακροφύσια εξαγωγής.	30
Προβλήματα σχεδιασμού κινητήρων αεριώθησης.....	31
1.1.14. Γενικά.....	31
1.1.15. Επιπρόσθετα προβλήματα	32
1.1.15.1. “Ξένα Αντικείμενα”	32
1.1.16. Επίπεδα Θορύβου	32
1.1.17. Καύσιμο κινητήρων αεριώθησης	36
1.1.18. Υλικά κατασκευής στροβιλοκινητήρων.....	36
1.1.19. Ρύθμιση λειτουργίας των στροβιλοκινητήρων	38
Μελλοντικές εξελίξεις	38
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ PRATT & WHITNEY PT6T-3B/-6	39
Σύντομη περιγραφή	39

Τύποι ελικοπτέρων που χρησιμοποιείται ο κινητήρας	41
Τεχνικά χαρακτηριστικά	43
2.1.1. Γενική περιγραφή	43
2.1.2. Κύρια λειτουργία	45
2.1.3. Όργανα ελέγχου κινητήρα	49
2.1.4. Επιμέρους εξαρτήματα.	52
2.1.4.1. Βαλβίδα εξισορρόπησης- εξαέρωσης (Bleed Valve).....	52
2.1.4.2. Compressor Turbine Vane Ring.....	54
2.1.4.3. Power Turbine Vane Ring	56
2.1.4.4. Σύστημα Εξαγωγής Καυσαερίων (EXHAUST DUCT).	57
2.1.4.5. Μειωτήρας (Reduction Gear Box).....	58
2.1.4.6. Κιβώτιο Κίνησης Παρελκομένων (Accessories Gear Box).....	59
2.1.4.7. Συστήματα λίπανσης κινητήρα	60
A. Σύστημα λίπανσης ισχύος	61
B. Κύρια αντλία πίεσης και αντλίες λαδιού σάρωσης.....	61
C. Λίπανση μειωτήρα στροφών (Reduction Gearbox Oil System)	62
2.1.4.8. Θάλαμος παραγόμενων αερίων (GAS GENERATOR CASE)	63
2.1.4.9. Αντλία καυσίμου (Fuel pump).....	64
2.1.4.10. Σύστημα μέτρησης ροπής (Torque System)	65
2.1.4.11. Σύστημα ανάφλεξης (Ignition System).....	66
3. Δοκιμή κινητήρα στο δοκιμαστήριο (Engine test -test cell)	67
Σκοπός δοκιμής.	67
Εξοπλισμός και διαδικασία δοκιμής κινητήρα.	68
3.1.1. Κλίση δοκιμής (Test Bed).....	68
3.1.2. Διάταξη συγκράτησης οδήγησης	69
3.1.2.1. Δυναμόμετρο.....	69
3.1.2.2. Σύστημα ελέγχου ώσης (SERVO-THROTTLE CONTROL)	70
3.1.3. Τμήμα εισαγωγής αέρα δοκιμαστηρίου (Test Cell Air Intake)	70
3.1.3.1. Εισαγωγή αέρα	70
3.1.3.2. Σύστημα αντιστρωματοποίησης (Anti-Stratification System)	71
3.1.3.3. Ανεμιστήρας εξαγωγής αναθυμιάσεων (Fume Extracting Fan)	71
3.1.3.4. Εξαγωγή καυσαερίων (Exhaust Ducting)	71
3.1.4. Πρόσθετα συστήματα δοκιμαστηρίου	72
3.1.4.1. Σύστημα καυσίμου	73
3.1.4.2. Σύστημα ψύξης λαδιού	74
3.1.4.3. Σύστημα ψύξης νερού.....	74
3.1.5. Ρύθμιση εγκατάστασης / λειτουργίας	75
3.1.6. Περιγραφή πειραματικής διάταξης	76

3.1.6.1. Μετρούμενα μεγέθη	76
3.1.7. Περιγραφή λογισμικού.....	79
3.1.8. Διαδικασία δοκιμής.....	82
3.1.8.1. Αποτελέσματα δοκιμής.....	83
Engine Performance Results	86
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	91
Παράρτημα Α Εικόνες.	93
Παράρτημα Β Πίνακες.....	95
πηγες	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	98

Εισαγωγή

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο την περιγραφή καθώς και την πειραματική μέσω διαδικασίας δοκιμής μελέτη του δίδυμου αξονοστρόβιλου κινητήρα (Turboshaft) της κατασκευάστριας εταιρείας **“PRATT & WHITNEY”** με κωδική ονομασία **PT6T-3B/6**. Ο εν λόγω κινητήρας αποτέλεσε τεράστια επιτυχία και εγκαθίδρυσε την κατασκευάστρια εταιρεία μιας από τις κορυφαίες στο χώρο των κινητήρων και πρωτοπόρα στην παγκόσμια αγορά ελικοπτείων, εξαιτίας της υψηλής απόδοσης και αξιοπιστίας, του. Η βασική έκδοση ενός κινητήρα **PT6T** απαρτίζεται από δυο τμήματα παραγωγής ισχύος τα οποία συνεργάζονται με ένα κιβώτιο ταχυτήτων μέσω ενός συστήματος πολλαπλής σύμπλεξης, επιτρέποντας έτσι την ενιαία αλλά και μεμονωμένη λειτουργία των κινητήρων αναλόγως την βούληση και τις συνθήκες.

Στα πλαίσια της εκπόνησης πειραματικής μελέτης, περιγράφεται αναλυτικά το πιστοποιημένο δοκιμαστήριο κινητήρων (*Test Cell*) της **E.A.B** καθώς και τα όργανα ελέγχου και καταγραφής αυτού, στο οποίο απαιτείται η ένταξη του κινητήρα για την απαιτούμενη διεξαγωγή των ελέγχων που αφορούν την πιστοποίηση καλής λειτουργίας και την μέτρηση απόδοσης του πριν αποδοθεί για χρήση. Από τις δοκιμές που θα διεξαχθούν θα αντλήσουμε τα απαιτούμενα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμόν διαφόρων παραμέτρων ώστε να αξιολογηθεί ο κινητήρας ως λειτουργικός ή μη.

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμές ευχαριστίες στην **E.A.B** (Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία) και ιδιαίτερα στο προσωπικό και τους επικεφαλής των τμημάτων του “Δοκιμαστηρίου Αεροκινητήρων” 100.000lbs. και “Αεροκινητήρων “ για την πολύτιμη βοήθεια που μας παρείχανε στην αποπεράτωση αυτής της εργασίας με την συνδρομή τους σε πληροφορίες , βιβλιογραφίες και την άδεια να παραβρεθούμε στην διαδικασία δοκιμής του εν λόγω κινητήρα.

Abstract

The purpose of this thesis is to describe, as well as to test, the experimental design of a twin-axis turbocharged engine (Turboshaft) by the manufacturer "PRATT & WHITNEY" under the code name PT6T-3B / 6. This engine has been a huge success and has established itself as one of the leading engine manufacturers and pioneers in the world helicopter market because of its high performance and reliability. The basic version of a PT6T engine consists of two power generating units that work together with a gearbox via a multi-clutch system, allowing the engines to operate in a single and individual way depending on the will and circumstances.

In the limits of the experimental study, the **H.A.I** 's Certified Engine Test Cell is described in detail as well as its monitoring and recording equipment, which requires engine integration for the necessary tests to be carried out for good certification. operation and performance measurement before being assigned for use. From the tests to be carried out, we will derive the necessary data to be used in calculating various parameters to evaluate the engine as operating or not.

We would like to express our warm thanks to **H.A.I** (Hellenic Aerospace Industry) and especially to the staff and heads of the 100,000Lbs Engine Testing Departments. and "Motors" for the valuable help they have provided us in order to complete this task by contributing to information, bibliographies, and permission to attend the test process of this engine.

1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

1.1.1. Εισαγωγή

Στροβιλοκινητήρας καλείται μια μηχανή παραγωγής Έργου που στην περίπτωση που χρησιμοποιείται σε πτητικό μέσο μεταφράζεται ως Ώση προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στην αναρρόφηση αέρα από την ατμόσφαιρα, ο οποίος συμπιέζεται και εν συνεχεία θερμαίνεται με την συνεισφορά καύσιμου, στο τελικό στάδιο τα παραγόμενα αέρια που προκύπτουν διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα με αρκετή ορμή, ώστε η αντίδραση που προκύπτει έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή σημαντικής πρόωσης κατά την αντίθετη κατεύθυνση.

Η εμφάνιση του στροβιλοκινητήρα κατά τις δεκαετίες του 1940 και 1950, επέφερε ριζικές αλλαγές στην πολεμική και την πολιτική αεροπλοΐα. Πριν από την εμφάνιση του, η πρόωση των αεροσκαφών επιτυγχανόταν με εμβολοφόρους κινητήρες. Στους κινητήρες αυτούς η παλινδρομική κίνηση του εμβόλου παρήγαγε διακοπτόμενη ισχύ η οποία με μηχανικά μέσα έπρεπε να μετατραπεί σε περιστροφική, μέσου ενός στροφαλοφόρου άξονα, ο οποίος και κινούσε μια έλικα. Η ανακάλυψη του στροβιλοκινητήρα απλοποιείσαι αυτή τη διαδικασία, με αποτέλεσμα ένα μικρότερο και ελαφρότερο συγκρότημα παραγωγής ισχύος.

Όπως συνέβη και με πολλές άλλες εφευρέσεις, οι κινητήρες αερίωθησης έγιναν αντικείμενο οραματισμού πολύ πριν γίνουν πραγματικότητα. Στην αρχή οι κινητήρες αυτοί προέρχονταν από μετατροπές εμβολοφόρων κινητήρων και ήταν συνήθως βαριοί και πολύπλοκοι. Η πρώτη κατασκευή που περιείχε σχεδιασμό στροβίλου εμφανίστηκε το 1921 και οι ουσιώδεις αρχές του σύγχρονου στροβιλοκινητήρα περιέχονταν σε μια ευρεσιτεχνία του Φρανκ Γουίτλ (Frank Whittle) το 1930. Η συσκευή που μελέτησε δοκιμάστηκε για πρώτη φορά το 1937 και πραγματοποίησε την πρώτη της πτήση τον Μάιο του 1941. Στη Γερμανία εξάλλου άρχισε εντελώς ανεξάρτητα μια παράλληλη δουλειά με μια ευρεσιτεχνία που δόθηκε το 1935. Οι εργασίες προχώρησαν με πιο γρήγορο ρυθμό και έτσι τον Αύγουστο του 1939 έγινε η πρώτη πτήση ενός αεροσκάφους τύπου Χάινκελ He176 (Heinkel He 176) που κινούνταν για πρώτη φορά με στροβιλοκινητήρα.

Μέχρι το τέλος του Β' Παγκοσμίου πολέμου τα πρωτότυπα αυτά αεροσκάφη είχαν εξελιχθεί τόσο, ώστε να έχουν δημιουργηθεί αρκετά σμήνη αεροσκαφών με στροβιλοκίνητη αερίωθηση, για επιχειρήσεις στις πολεμικές αεροπορίες της Γερμανίας, της Μ. Βρετανίας και της Αμερικής. Στον στρατιωτικό τομέα τα αεριοθούμενα μαχητικά αεροσκάφη εξελίχθηκαν γρήγορα και χρησιμοποιήθηκαν στον πόλεμο της Κορέας (1950-53) πετώντας με ταχύτητα 1.000 χιλιομέτρων την ώρα. Κατά την επόμενη δεκαετία τα αεροσκάφη αυτά ξεπέρασαν την ταχύτητα του ήχου και μπορούσαν να εκτελούν συνηθισμένες επιχειρήσεις με υπερηχητικές ταχύτητες, δηλαδή ταχύτητες μεγαλύτερες μέχρι και διπλάσιες από αυτήν (2 Mach). Τα βομβαρδιστικά και τα μεταγωγικά αεριοθούμενα αεροσκάφη ήταν επίσης ικανά να κινηθούν με υπερηχητικές ταχύτητες.

Στροβιλοαντιδραστήρας (Turbojet Engine)

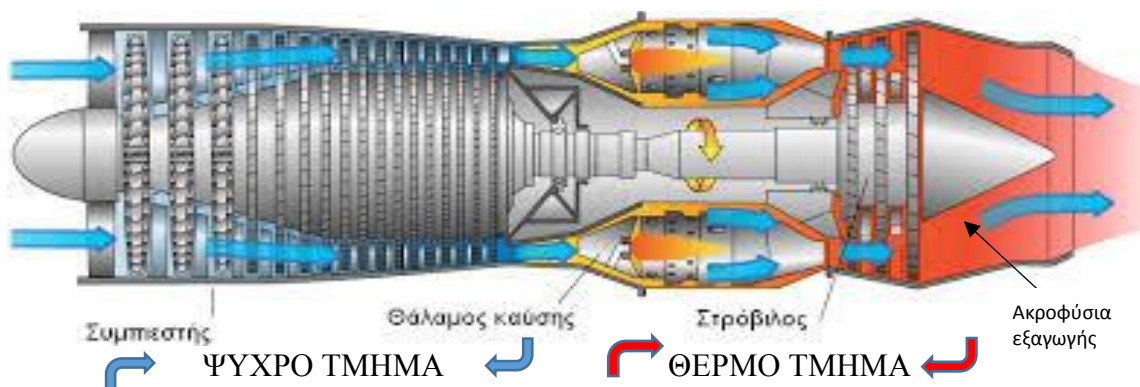
1.1.2. Αρχή λειτουργίας

Ο Στροβιλοαντιδραστήρας είναι μια μηχανή εσωτερικής καύσης, στην οποία η εκλυόμενη θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική. Κατά την διεργασία της καύσης το λειτουργούν ρευστό υπόκειται στον ακόλουθο κύκλο μεταβολών της πίεσης και της θερμοκρασίας, αρχικά λαμβάνει χώρα η συμπίεση του ατμοσφαιρικού αέρα, εν συνεχεία η συμπίεση αυτή ακολουθείται από θέρμανση αποτέλεσμα της καύσης του καυσίμου σε μια σχεδόν σταθερή υψηλή πίεση εν συνεχεία ακολουθεί εκτόνωση των προϊόντων της καύσης, κατά τη διάρκεια της οποίας η θερμική ενέργεια μετατρέπεται τελικώς σε μηχανική ή κινητική ενέργεια, και τέλος εξαγωγή σε μια σταθερή χαμηλή πίεση.

Η χρήση του στροβιλοαντιδραστήρα εντοπίζεται σε αεροσκάφη επιβατικά, εμπορικά και σε μαχητικά αεροσκάφη υπερηχητικών ταχυτήτων πρώτης και δεύτερης γενιάς. θεωρείται ως ο πιο αποτελεσματικός εν ενέργεια κινητήρας αερίωσης στην εποχή μας και ο πρώτος και πιο απλός τύπος αεροπορικού αεροστροβίλου που αναπτύχθηκε.

Διακρίνεται στα εξής βασικά μέρη:

- ο συμπιεστής,
- ο θάλαμος καύσης,
- ο στρόβιλος &
- τα ακροφύσια εξαγωγής και εικονίζονται παραστατικά στο Εικ. 1



Εικόνα 1-Βασικά μέρη στροβιλοκινητήρα

Γενικά, με έναν πιο απλό διαχωρισμό θα μπορούσαμε να πούμε ότι, ο συμπιεστής αποτελεί το ψυχρό τμήμα του κινητήρα και ο θάλαμος καύσης με το στρόβιλο, το θερμό τμήμα. Μία μάζα αέρα οδηγείται από το τμήμα εισαγωγής στο συμπιεστή. Εκεί συμπιέζεται και οδηγείται στο θάλαμο καύσης όπου και αναμιγνύεται με εγχυόμενο καύσιμο και επιτυγχάνεται καύση. Τα παραγόμενα θερμά καυσαέρια κατά την εκτόνωση τους οδηγούνται προς την εξαγωγή με αποτέλεσμα την περιστροφή του στροβίλου ο οποίος συνδέεται με το συμπιεστή με ένα κοινό άξονα, εν συνέχεια τα καυσαέρια συνεχίζουν την εκτόνωσή τους και περνώντας από το ακροφύσιο εξόδου, εξέρχονται από τον κινητήρα έχοντας πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτήν της εισερχόμενης μάζας αέρα. Η διαφορά μεταξύ των δύο ταχυτήτων προκαλεί την παραγόμενη ώση.

Ο τύπος του στροβιλοαντιδραστήρα καθορίζει και τον αριθμό των στροβίλων που χρησιμοποιούνται εντός αυτού. Ο κάθε στρόβιλος συνδέεται και με τον αντίστοιχο συμπιεστή μέσω ενός ξεχωριστού άξονα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δυο και τρεις συμπιεστές άρα και στρόβιλοι η σύνδεση μεταξύ τους πραγματοποιείται με συγκεντρικούς άξονες. Οι κατηγοριοποιήσεις τους μπορεί να γίνει ανάλογα με τον αριθμό των αξόνων τους και χωρίζονται σε:

- απλού
- διπλού &
- τριπλού άξονα ή τυμπάνου

Η παραγωγή ισχύος είναι ανάλογη της εκλυόμενης θερμότητας κατά την διάρκεια της καύσης. Για τον υπολογισμό της θερμότητας μιας και η μέτρηση της δεν είναι εφικτή συντελούν τρεις άλλες γνωστές παράμετροι :

- η θερμοκρασία
- η μάζα
- & η ειδική θερμότητα

Η διαφορά του ρόλου της θερμότητας και της θερμοκρασίας στη λειτουργία ενός στροβιλοαντιδραστήρα φαίνεται από το ακόλουθο παράδειγμα: έστω δύο στροβιλοαντιδραστήρες από τους οποίους ο ένας καταναλώνει τη δεκαπλάσια ποσότητα καυσίμου από τον άλλον. Και οι δύο κινητήρες λειτουργούν με την ίδια θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο. Όμως, ο μεγαλύτερος κινητήρας είναι σε θέση να αποδώσει περίπου δέκα φορές μεγαλύτερη ισχύ από το μικρότερο. Και αυτό διότι σε αυτόν εκλύεται δέκα φορές μεγαλύτερο ποσό θερμότητας από ότι στο μικρότερο, ενώ λειτουργούν στην ίδια θερμοκρασία. Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας καύσης οδηγεί σε μεγαλύτερη εκτόνωση των καυσαερίων. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας ώσης. Όμως, παρουσιάζεται ο περιορισμός της αντοχής των υλικών κατασκευής του θαλάμου καύσης και του στροβίλου.

Ο στροβιλοαντιδραστήρας αποτελεί την απλούστερη μορφή έκφρασης ενός αεριοστροβίλου κινητήρα διαφέροντας από έναν αεριοπαραγωγό κινητήρα ως προς την προσθήκη του συστήματος εξαγωγής μετά το τμήμα του στροβίλου και χρησιμοποιώντας τη ροή των καυσαερίων που σχηματίζεται στο ακροφύσιο εξαγωγής ως το μοναδικό μέσο παραγωγής ώσης για την κίνηση του αεροσκάφους. Η παραγωγή ώσης επιτυγχάνεται με την επιτάχυνση μικρών, σχετικά, μαζών αέρα σε υψηλές ταχύτητες. Μια από τις πιο χαρακτηριστικές παραμέτρους όσον αφορά την παραγόμενη Ώση είναι ο λόγος συμπίεσης η αλλιώς λόγος πίεσης του κινητήρα Engine Pressure Ratio (EPR). Το μέγεθος αυτό εκφράζει τον λόγο της πίεσης εξαγωγής των καυσαερίων από το στρόβιλο ως προς την πίεση του εισερχομένου αέρα στον κινητήρα. Η τιμή αυτή (EPR) αποτελεί ένδειξη της παραγόμενης ώσης για μία συγκεκριμένη παροχή ισχύος.

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα του στροβιλοαντιδραστήρα και το οποίο συνδέεται άμεσα με το EPR είναι ότι κατά την πτήση με χαμηλές ταχύτητες η παραγόμενη Ώση είναι αναλογικά μικρή, αιτία είναι η απαίτηση για επαρκή πίεση εισαγωγής αέρα (Ram Effect) στον συμπιεστή άρα και αυξημένη ταχύτητα. Κατά συνέπεια αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ένα αεροσκάφος που διαθέτει στροβιλοαντιδραστήρα χρειάζεται και έναν μεγάλο διάδρομο απογείωσης ώστε να αυξήσει σημαντικά το (Ram Effect) και κατ'επέκταση την αύξηση πίεσης εισαγωγή αέρα για την παραγωγή Ώσης.

Εν συνεχεία ένα από τα εξίσου σημαντικά μειονεκτήματα που χαρακτηρίζει τους κινητήρες αυτού του τύπου είναι η αυξημένη κατανάλωση καυσίμου. Εν κατακλείδι σε σύγκριση μεταξύ ενός στροβιλοαντιδραστήρα και ενός ελικοφόρου κινητήρα

αποδεικνύεται ότι η απόδοση του πρώτου είναι μικρότερη σε σχέση με τον δεύτερο όταν οι ταχύτητες πτήσης δεν ξεπερνούν τα 700Km/h.

Το φαινόμενο μείωσης της απόδοσης των ελικοφόρων κινητήρων σε ταχύτητες άνω των 500 Km/h, εξαιτίας του φαινομένου της απώλειας αεροδυναμικής στήριξης που εμφανίζεται στα άκρα των πτερυγίων της έλικας, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη νέων τύπων αεριοστροβίλων για την πιο αποτελεσματική λειτουργία σε αυτό το εύρος των ταχυτήτων πτήσης. Η ωστική δύναμη που αναπτύσσεται είναι αποτέλεσμα της ορμής που διαθέτει το αέριο εξαγωγής και επειδή η *OPMH* εκφράζεται από το γινόμενο της μάζας επί την ταχύτητα, πρέπει να επισημανθεί ότι στην περίπτωση μας ότι η μάζα και η ταχύτητα του αερίου εξαγωγής πρέπει να είναι μεγαλύτερες από τη μάζα και την ταχύτητα του αναρροφούμενου αέρα. Η θεωρητική ωστική δύναμη, που αποδίδει ένας κινητήρας αεριώθησης, προκύπτει ως η διαφορά του γινομένου της μάζας επί την ταχύτητα των εκτοξευόμενων προϊόντων της καύσης, μείον το γινόμενο της μάζας επί την ταχύτητα του αναρροφούμενου αέρα.

Αυτό εκφράζεται με την εξίσωση:

$$F = \dot{m}_g V_j - \dot{m}_a V_a$$

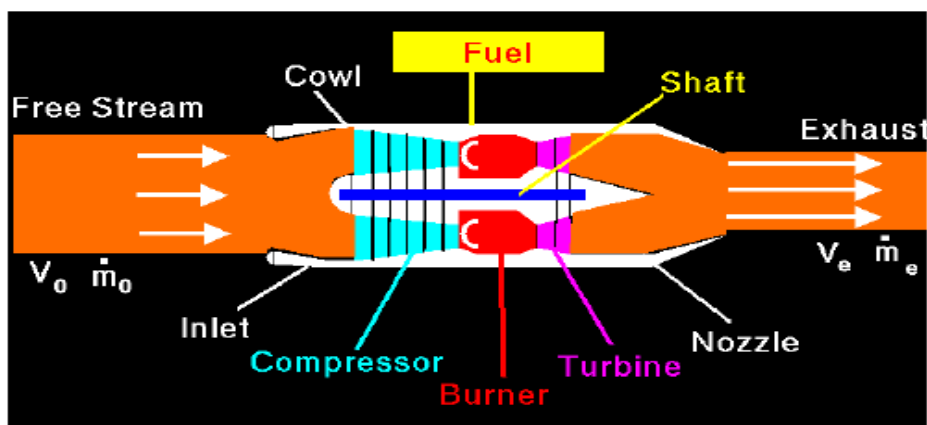
όπου το F παριστάνει τη θεωρητική ωστική δύναμη του κινητήρα σε N, \dot{m}_g είναι η παροχή μάζας του αερίου στο ακροφύσιο εξαγωγής (σε kg/s), \dot{m}_a η παροχή μάζα του αέρα που μπαίνει στο στόμιο εισαγωγής (σε kg/s), V_j η ταχύτητα του αερίου εξαγωγής και V_a η ταχύτητα του αέρα στο στόμιο εισαγωγής (σε m/s).

Αν όλο τα άλλα μεγέθη παραμείνουν σταθερά, η ωστική δύναμη θα αυξηθεί όταν αυξηθούν είτε η μάζα του εκτοξευόμενου αερίου, είτε η ταχύτητά του, είτε και τα δύο μαζί. Αυτή είναι η βάση όλων των μετατροπών που γίνονται για τη βελτίωση της απόδοσης ενός απλού κινητήρα αεριώθησης ή των παράγωγων μορφών του.



Turbojet Thrust

Glenn
Research
Center



$$\text{Thrust} = F = \dot{m}_e V_e - \dot{m}_0 V_0$$

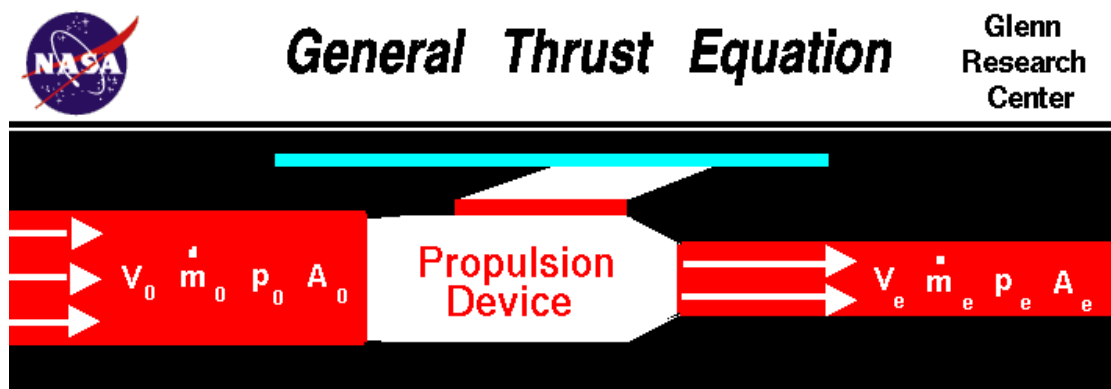
Εικόνα 2- Σχηματική αναπαράσταση υπολογισμού ώσης βάση σχετικού τύπου

Θεωρητικά ο τύπος αυτός προκύπτει από τις ακόλουθες διεργασίες οι : Όταν τα αέρια εξόδου δεν εκτονώνονται πλήρως στην πίεση περιβάλλοντος, $P_j > P_a$, (περίπτωση ενός φραγμένου συγκλίνοντος ακροφυσίου ή ενός συγκλίνοντος- αποκλίνοντος ακροφυσίου που λειτουργεί με λόγο πιέσεων μεγαλύτερο από το σημείο σχεδιασμού του), εμφανίζεται εκτός από τη δύναμη ώσης ορμής, μία πρόσθετη δύναμη ώσης, η δύναμη ώσης πίεσης επάνω στην επιφάνεια εξόδου A_2 ίση με $A_2(P_j - P_a)$.

Αυτή η δύναμη ώσης πίεσης εμφανίζεται προφανώς όταν τα καυσαέρια εξέρχονται από το ακροφύσιο με ηχητική ή υπερηχητική ταχύτητα, ενώ σχεδόν πάντα είναι σημαντικά μικρότερη της δύναμης ώσης ορμής. Τότε η καθαρή δύναμη ώσης F_N , θα είναι ίση με το άθροισμα της δύναμης ώσης ορμής και της δύναμης ώσης πίεσης και θα δίνεται από τη σχέση:

$$F_N = m(V_j - V_a) A_2 (P_j - P_1)$$

όπου θεωρείται ότι η πίεση στην είσοδο είναι ίση με την ατμοσφαιρικής, $P_a = P_1$



Thrust is a force.

Force = change in momentum with time

$$F = \frac{([mV]_2 - [mV]_1)}{(t_2 - t_1)}$$

\dot{m} = mass flow rate = mass / time

$\dot{m} = r \times V \times A$ where r = density, V = velocity, A = area

If $p_e \neq p_0$: $F = \dot{m}_e V_e - \dot{m}_0 V_0 + (p_e - p_0) A_e$

If $p_e = p_0$: $F = \dot{m}_e V_e - \dot{m}_0 V_0$

Εικόνα 3- Γενική εξίσωση ώσης

1.1.3. Κυριότερα εξαρτήματα

Τα κυριότερα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται ένας αεροστρόβιλος είναι συγκεκριμένα και η περιγραφή καθώς και η λειτουργία τους μπορεί να περιγραφεί και να αναλυθεί μεμονωμένα πράγμα που δεν συμβαίνει σε έναν εμβολοφόρο κινητήρα.

1.1.3.1. Κώνος εισαγωγής αέρα (*Inlet*)

Ο κώνος εισαγωγής επιτρέπει τη μετατροπή της ταχύτητας εισόδου σε στατική πίεση και επιτυγχάνει έτσι μια προ-συμπίεση πριν το ρεύμα φθάσει στο συμπιεστή. Η σπουδαιότητα του αυξάνεται, όσο η ταχύτητα πτήσης είναι υψηλότερη. Στους κινητήρες που προορίζονται να λειτουργούν σε ευρύ φάσμα ταχυτήτων ο κώνος εισαγωγής είναι μεταβλητού σχήματος. Χαρακτηριστική είναι η διατομή του λαιμού στους κώνους εισαγωγής των υπερηχητικών κινητήρων που έχουν σχήμα συγκλίνον-αποκλίνον. Στις υπερηχητικές ταχύτητες εμφανίζονται κρουστικά κύματα στο μπροστινό μέρος του κώνου εισαγωγής και η θέση των κυμάτων αυτών πρέπει να ρυθμίζεται ανάλογα με την ταχύτητα πτήσης. Σε μερικούς τύπους υπερηχητικών κινητήρων όπως ο κινητήρας Όλυμπος του Κονκόρντ, η μεταβολή του σχήματος (Εικ. 4 τύποι κώνων εισαγωγής αέρα) επιτυγχάνεται με παραμόρφωση των εσωτερικών τοιχωμάτων και το άνοιγμα βοηθητικών θυρίδων.

Η σχετική ταχύτητα του αναρροφούμενου αέρα ως προς τον κινητήρα εξαρτάται από τις συνθήκες πτήσης και ειδικότερα από την ταχύτητα και το ύψος του αεροσκάφους.

Η τιμή της ποικίλλει από το μηδέν μέχρι πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου. Ο κώνος εισαγωγής αέρα διαθέτει συσκευές ελέγχου για τη ρύθμιση της ταχύτητας του αέρα σε τιμές κατάλληλες για τον συμπιεστή.



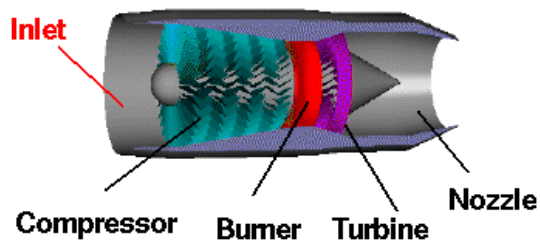
Subsonic



Axisymmetric Supersonic



Rectangular Supersonic

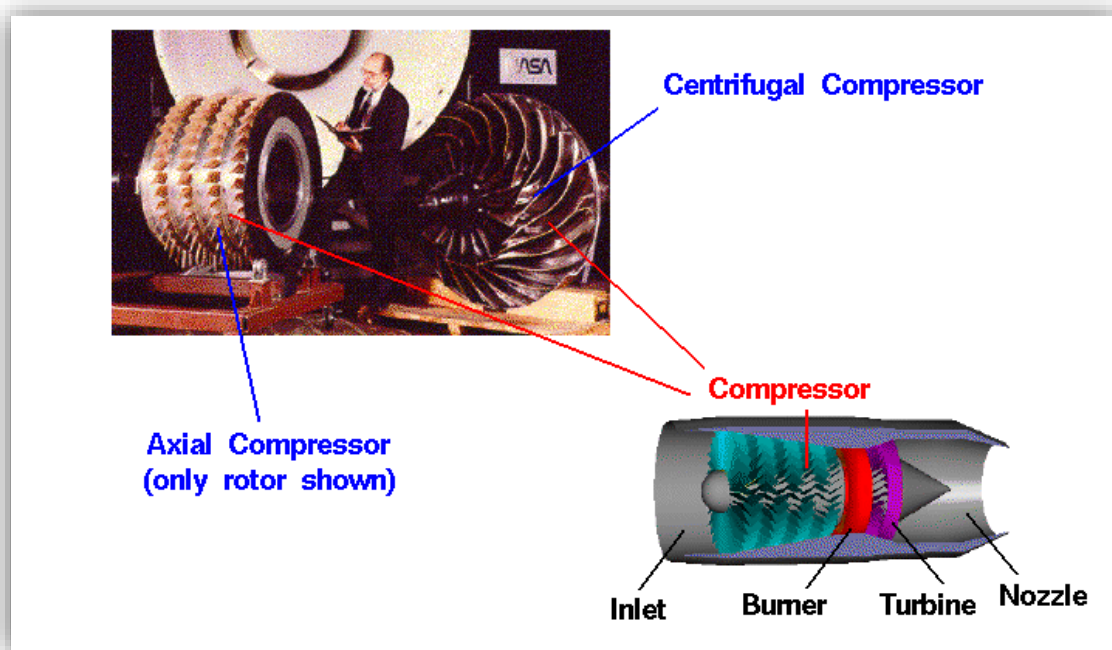


Εικόνα 4- Τύποι κώνων εισαγωγής αέρα.

1.1.3.2. Συμπιεστής (Compressor)

Οι πρώτοι στροβιλοκινητήρες Γουίτλ χρησιμοποιούσαν φυγοκεντρικούς συμπιεστές, η συμπίεση του αέρα γινόταν μέσω περιστρεφόμενων πτερυγίων ακτινικά προς τα έξω (φυγοκεντρικά) με τον ίδιο τρόπο λειτουργίας όπως ακριβώς μια φυγοκεντρική αντλία νερού. Με το πέρασμα του χρόνου και κατόπιν δοκιμών ανακαλύφθηκε ότι η διάταξη αυτή είχε χαμηλή απόδοση και απαιτούσε συμπιεστή με ανεπίτρεπτα μεγάλη διάμετρο, με αποτέλεσμα να αντικατασταθεί στη συνέχεια από τον συμπιεστή αξονικής ροής.

Σε αυτόν τον τύπο συμπιεστή ο αέρας συμπιέζεται περνώντας ανάμεσα από εναλλασσόμενες σειρές σταθερών και κινητών πτερυγίων. Κάθε σειρά πτερυγίων αυξάνει σταδιακά την πίεση με τελικό αποτέλεσμα η πίεση να αυξάνει σημαντικά. Από αεροδυναμική άποψη εμφανίζονται ορισμένοι περιορισμοί σχετικά με την επιτάχυνση του κινητήρα, όταν ο λόγος συμπίεσης γίνεται περίπου 7:1, αλλά είναι δυνατόν να αντιμετωπισθούν με μετατροπές, όπως η τοποθέτηση βαλβίδων ενδιάμεσης «εκφύσησης» αέρα (blow-off) και η χρησιμοποίηση μεταβλητών θέσεων ρυθμίσεως για τα σταθερά πτερύγια. Εναλλακτικά και συνηθέστερα αποφεύγουμε τους περιορισμούς αυτούς χρησιμοποιώντας δύο συμπιεστές που λειτουργούν ανεξάρτητα σε σειρά. Τους ονομάζουμε αντίστοιχα μονάδα χαμηλής και υψηλής πίεσης και ο ολικός λόγος συμπίεσης και των δύο μπορεί να είναι 25:1 ή και μεγαλύτερος.



Εικόνα 5- Τύποι Συμπιεστών

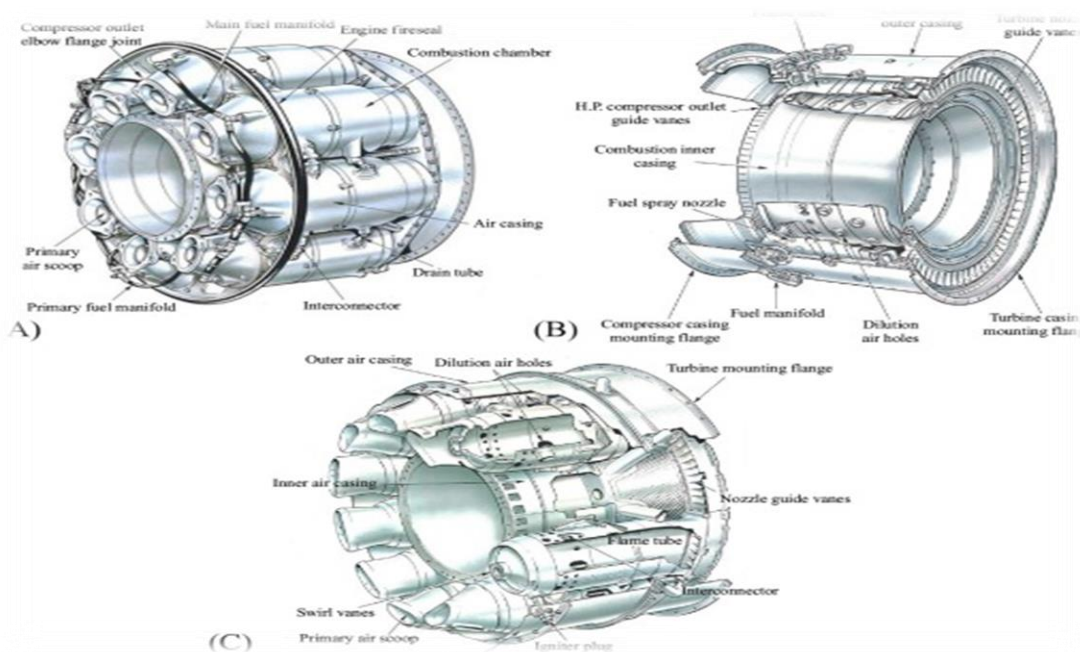
1.1.3.3. Θάλαμος Καύσης (combustion chamber)

Ο θάλαμος καύσης βρίσκεται αμέσως μετά τον συμπιεστή και παραλαμβάνει τον συμπιεσμένο αέρα αναμειγνύοντας τον με την καύσιμη ύλη. Αποστολή του θαλάμου καύσεως είναι η μετατροπή της ενέργειας του καυσίμου σε θερμική και με την ανάμειξη με τον συμπιεσμένο αέρα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αερίου υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Όλα αυτά πρέπει να γίνονται μέσα σε ευρεία όρια λειτουργιών μεταβολών με μεγίστη απόδοση, ελάχιστη πτώση πίεσης σε περιορισμένο χώρο και

χωρίς μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές στην έξοδο. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι γενικά της τάξεως των 600-700 °C και η θερμοκρασία του εξερχόμενου αέρα που εξαρτάται από τις απαιτήσεις σχεδιασμού του κινητήρα κυμαίνεται μεταξύ 930-1180 °C. Με βάση τη μορφή του κινητήρα διαπιστώθηκε ότι η λογικότερη μορφή σχεδίασης του θαλάμου καύσεως θα έπρεπε να έχει την μορφή σε σχήμα κοίλου κυκλικού δακτυλίου. Το σχήμα αυτό όμως εφαρμόστηκε σε έκταση μόλις στη δεκαετία του 60' λόγω προβλημάτων παραγωγής και συναρμολόγησης που διαπιστώθηκαν και γενικότερα λόγω του διαφορετικού τρόπου εξέλιξής που είχε υιοθετηθεί πριν από το 1960.

Οι τρεις βασικές κατηγορίες θαλάμων που βασίζονται στην μορφή σχεδίασης και φαίνονται στο Εικ.6 είναι οι ακόλουθοι:

- Τύπος μεταλλικών δοχείων καύσης (can type)
- Δακτυλιοειδής (Annular)
- Μεικτού τύπου (Can-Annular)



Εικόνα 6- Τύποι Θαλάμων Καύσεως.

1.1.3.4. Στρόβιλος (Turbine)

Σκοπός του στρόβιλου είναι η μετάδοση περιστροφικής κίνησης με την βοήθεια των καυσαερίων του συμπιεστή. Ένας στρόβιλος στην απλή έκφραση του αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο δίσκο που ονομάζεται ρότορας ή στροφείο του οποίου τα πτερύγια στηρίζονται στη στεφάνη του, καθώς και από έναν δακτύλιο σταθερών πτερυγίων ή ακροφυσίων. που είναι τοποθετημένα αντίθετα προς τη διεύθυνση ροής. Τα καυσαέρια,

που είναι αέρια υψηλής πίεσης ρέουν μέσα από τα ακροφύσια και προσκρούοντας στα πτερύγια του ρότορα αποδίδουν σε αυτά όλη τους την ενέργεια.

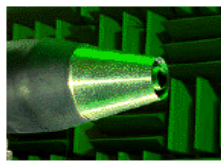
Αυτή η μεταβίβαση ενέργειας είναι δυνατό να γίνει απλώς με μεταβολή της διεύθυνσης της ταχύτητας του αερίου στο σημείο πρόσκρουσης μέσα στα πτερύγια είτε με ταυτόχρονη μεταβολή της ταχύτητας και της πίεσης. Στην πράξη ο ρότορας είναι μελετημένος έτσι ώστε να παράγει ένα συνδυασμό των δύο φαινομένων. Για να πάρουμε μεγαλύτερη ισχύ στην έξοδο, είναι δυνατό το αέριο να περάσει και από μια δεύτερη ή και τρίτη βαθμίδα στροβίλου στερεωμένη στον ίδιο ρότορα. Τέλος στην περίπτωση που θέλουμε να κινήσει έναν δεύτερο συμπιεστή, μπορούμε να υποχρεώσουμε τα αέρια να περάσουν και από μια ανεξάρτητη βαθμίδα στροβίλου.

Η βάση όλων των στροβιλοκινητήρων αποτελείται από το υποσύνολο του συμπιεστή, του θαλάμου καύσης και του στροβίλου και καλούνται με μια λέξη αεριογεννήτρια (Gas generator). Με απλά λόγια η αεριογεννήτρια προσθέτει ενέργεια στον αέρα με συμπίεση και καύση, αλλά περισσότερο από το 60% της ενέργειας αυτής καταναλώνεται πάλι από τον στρόβιλο για την κίνηση του συμπιεστή με αποτέλεσμα μόνο η απομένουσα ενέργεια (δηλ. 40% ή λιγότερο) να διατίθεται για την παραγωγή ωφέλιμου έργου.

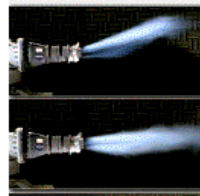
1.1.3.5. Κώνος ή Ακροφύσιο Εξαγωγής (Nozzle)

Είναι τα τελικά στοιχεία του κινητήρα, στα οποία η ενέργεια των αερίων υπολειμμάτων μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και αυτά εκτοξεύονται ως ένα ρεύμα αερίων υψηλής ταχύτητας. Ο κώνος εξαγωγής είναι το τμήμα του στροβιλοκινητήρα μέσα στο οποίο αναπτύσσεται στην πραγματικότητα η ώση. Η απομένουσα ενέργεια των καυσαερίων, τα οποία εκτονώνονται μέσα στον στρόβιλο, χρησιμοποιείται για την αύξηση της ταχύτητας εκτόξευσης των αερίων αυτών.

Το άριστο σχήμα του ακροφυσίου εξαγωγής είναι τέτοιο ώστε η πίεση της δέσμης των καυσαερίων στο επίπεδο του στομίου εξόδου να είναι ακριβώς ίση με την πίεση του περιβάλλοντος. Συμπεραίνεται τότε ότι ο σωλήνας εξαγωγής είναι προσαρμοσμένος στις συνθήκες λειτουργίας του. Το σχήμα αυτό εξαρτάται λοιπόν από την κατάσταση λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα και από το ύψος πτήσης του. Το ίδιο συμβαίνει και για τον κώνο εισαγωγής, μερικοί στροβιλοκινητήρες είναι εφοδιασμένοι με ακροφύσιο εξαγωγής μεταβλητού σχήματος, ώστε να είναι δυνατή η προσαρμογή της διατομής εξόδου στις συνθήκες πίεσεως. Η μεταβολή της διατομής μπορεί να επιτευχθεί με απόκλιση περιφερειακών πτερυγίων ή με διαμήκη μετατόπιση ενός σώματος κωνικού σχήματος κατά μήκος του άξονα του ακροφυσίου.



Co-annular



Maneuvering



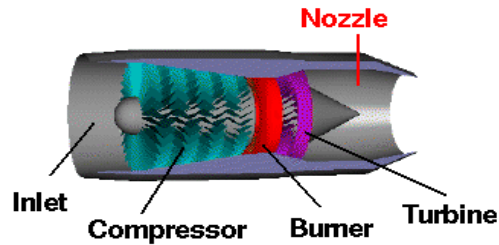
External Geometry



Convergent

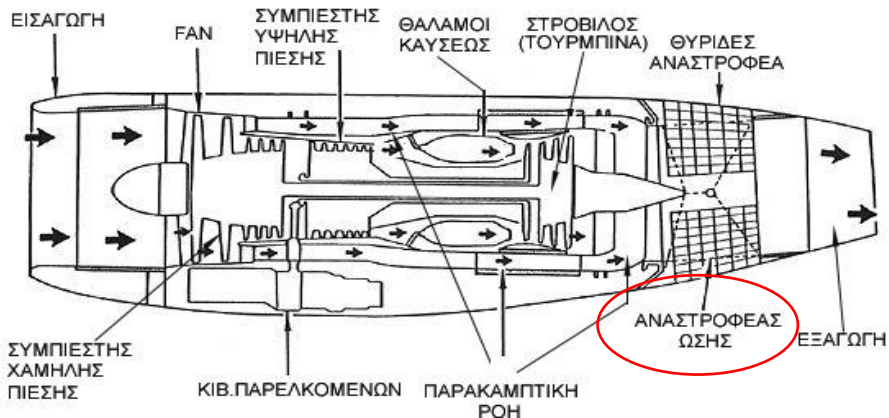


Convergent-Divergent (CD)



Εικόνα 7- Ακροφύσια Εξαγωγής.

Σχετικός με τον κώνο εξαγωγής είναι και ο αναστροφέας ώσης, ο οποίος επιτρέπει την επίτευξη δραστηκής πέδησης του αεροπλάνου κατά την προσγείωση. Η αρχή στην οποία στηρίζεται είναι η εισαγωγή μέσα στη διατομή εκτόξευσης των καυσαερίων ενός μηχανικού εμποδίου. Το εμπόδιο αυτό εκτρέπει τη δέσμη προς τις σχάρες αναστροφής που είναι τοποθετημένες στην περίμετρο του ακροφυσίου. Οι ώσεις που επιτυγχάνονται ξεπερνούν σημαντικά το 50% της βασικής ώσης, για αύξηση του βάρους του κινητήρα της τάξεως του 2% Εικ.8 & Εικ.9.



Εικόνα 8- Αναστροφέας Ωσης



Type I



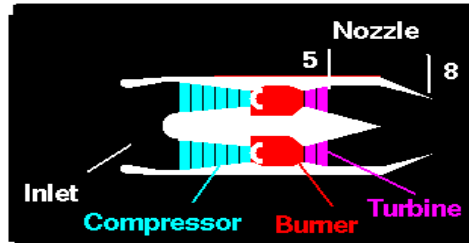
Type II

Εικόνα 9- Τύποι Αναστροφής Ωσης

1.1.4. Απόδοση

Τα κυριότερα κριτήρια απόδοσης ενός στροβιλοκινητήρα είναι η ωστική δύναμη F (σε N), η κατανάλωση καυσίμου Q_f (σε kg/h) και το βάρος του κινητήρα W (σε kg). Τα μεγέθη αυτά αντικαθίστανται στους υπολογισμούς από τα αντίστοιχα ανηγμένα μεγέθη: ειδική ώση (δηλ. ώση διαιρεμένη με την παροχή αέρα F/ma σε N/kgs), ειδική κατανάλωση (Q_f/F σε kg/hN) και ανηγμένο βάρος (W/F).

p = pressure
 T = temperature
 h = specific enthalpy
 V = velocity
 c_p = specific heat
 γ = specific heat ratio
 η_n = adiabatic nozzle efficiency
NPR = nozzle pressure ratio = p_8/p_5



station 5 – turbine exit
 station 8 – nozzle throat

Nozzle Total Temperature & Pressure

$$\frac{pt_8}{pt_5} = \left(\frac{Tt_8}{Tt_5}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 1$$

Nozzle Energy Equation

$$h = c_p T \quad ht_8 = h_8 + \frac{V_8^2}{2 \eta_n}$$

$$V_e = V_8 = \sqrt{2 c_p Tt_8 \eta_n [1 - \{1 / NPR\}^{(\gamma-1) / \gamma}]}$$

Εικόνα 10- Υπολογισμός απόδοσης ακροφυσίου

Τα συγκεκριμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τη μέγιστη πίεση και θερμοκρασία του αερίου που αναπτύσσονται στον κινητήρα, τους επιμέρους βαθμούς απόδοσης των τμημάτων του κινητήρα, τη μηχανική σχεδίαση και τις εξωτερικές συνθήκες της πτήσης, δηλαδή την ταχύτητα της πτήσης, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και το υψόμετρο. Η αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας αυξάνει την ειδική ώση και η αύξηση του λόγου συμπίεσης (ERP) βελτιώνει την ειδική κατανάλωση, όταν όμως οι δύο αυξήσεις γίνουν ταυτόχρονα, προκύπτει βέλτιστη λειτουργία σε διαφορετικές τιμές των μεταβλητών. Άρα η μελέτη του κινητήρα αποτελεί έναν συμβιβασμό αλληλοαντικρουόμενων καταστάσεων και ακολουθεί μια κατεύθυνση που εξαρτάται από το μέγεθος που θεωρούμε αξιολογότερο: ώση ή κατανάλωση καυσίμου. Βελτιώσεις του λόγου συμπίεσης επιτεύχθηκαν αρχικά με την προσθήκη περισσότερων βαθμίδων στον συμπιεστή και στο στρόβιλο και αργότερα με τη χρήση δύο ανεξάρτητων συστημάτων ροτόρων. Οι αυξήσεις της θερμοκρασίας επιτεύχθηκαν με την ανάπτυξη βελτιωμένων υλικών για υψηλές θερμοκρασίες και πρόσφατα με την εισαγωγή μεθόδων ψύξεως των πτερυγίων του στροβίλου. Αυτές οι καινοτομίες ανέβασαν τις θερμοκρασίες σχεδιασμού λειτουργίας των κινητήρων από 750 σε 1180°C και προβλέπεται ότι στους μελλοντικούς κινητήρες θα ξεπεραστούν και οι 1380°C.

Παράλληλα με τις βελτιώσεις αυτές η τιμή του ανηγμένου βάρους έχει μειωθεί από 0,5 kg ανά kg ώσης, που ήταν στους παλαιούς κινητήρες, σε 0,2 kg ανά kg ώσης περίπου στους σύγχρονους κινητήρες. Σε μερικούς ειδικούς τύπους κινητήρων, που είναι σχεδιασμένοι για κατακόρυφες προσαπογειώσεις, έχουν επιτευχθεί τιμές χαμηλότερες από 0,1 kg ανά kg ώσης.

Το υψόμετρο επιδρά ανασταλτικά στην ωστική δύναμη, επειδή ο αέρας που μπαίνει στον κινητήρα έχει μικρότερη πυκνότητα. Αυτό μειώνει την παροχή μάζας του αέρα και

συνεπώς και την ορμή της δέσμης. Κατά τον ίδιο τρόπο η αύξηση της ταχύτητας πτήσεως αυξάνει την ορμή του αέρα που μπαίνει στον κινητήρα και μειώνει την ώση. Ταυτόχρονα όμως, η συγκριτικά μεγαλύτερη κινητική ενέργεια του αέρα αυτού, αφού μετατραπεί σε ενέργεια πίεσης, τείνει να αυξήσει την ώση. Το αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι πρώτα η πτώση και ύστερα η αύξηση της ωστικής δύναμης. Αυτό συνεχίζεται ώσπου η αύξηση της θερμοκρασίας, που συνοδεύει την αύξηση της πίεσης, να φθάσει σε ένα σημείο όπου τα καύσιμα το οποίο προστίθεται στον θάλαμο καύσης θα πρέπει να μειωθεί για λόγους αποφυγής υπέρβασης της μέγιστης επιτρεπτής θερμοκρασίας του αερίου. Στο στάδιο αυτό, η ωστική δύναμη αρχίζει πάλι να μειώνεται, αλλά αυτό συμβαίνει μόνο για υψηλές υπερηχητικές ταχύτητες πτήσης.

1.1.5. Μετάκαυσης (Afterburning)

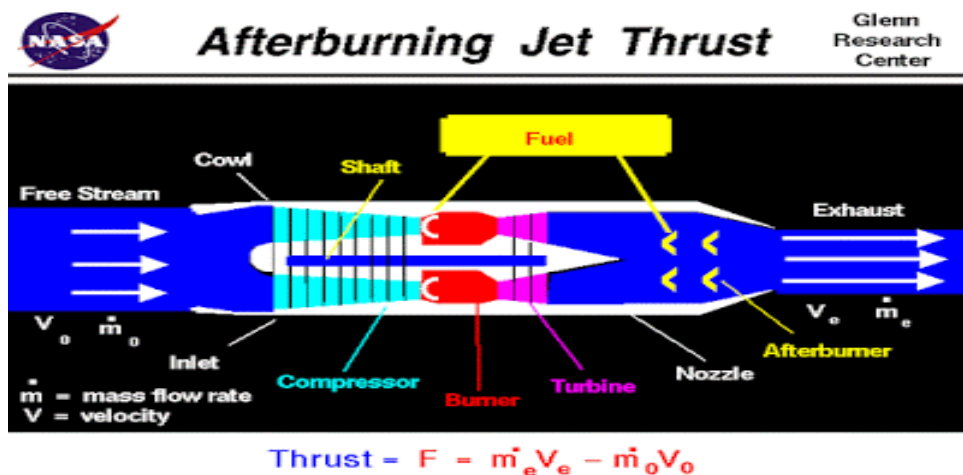
Η μετάκαυση ή αναθέρμανση συνίσταται στην έγχυση καυσίμου μέσα στο καυτό μίγμα αέρα και αερίου που μπαίνει στο σύστημα εξαγωγής, έτσι ώστε η θερμοκρασία να υψωθεί ακόμα περισσότερο. Αυτό έχει ως συνέπεια την επιτάχυνση του αερίου στη δέσμη εξαγωγής και συνεπάγεται αύξηση της ορμής του και κατά συνέπεια της ώσης. Πλεονέκτημα της μετάκαυσης είναι ότι δεν επηρεάζει τις διεργασίες που γίνονται στις προηγούμενες βαθμίδες και μπορεί να συντελέσει σε αύξηση της στατικής ώσης κατά

40% ή και περισσότερο. Αυτή η αύξηση της ώσης γίνεται αναλογικά μεγαλύτερη με την αύξηση της ταχύτητας πτήσης. Το κυριότερο μειονέκτημα της μετάκαυσης είναι το βάρος και η πολυπλοκότητα του ακροφυσίου μεταβλητής διατομής που απαιτείται για να αντιμετωπισθεί ο μεγαλύτερος όγκος του αερίου (συγκριτικά με την απλή χωρίς μετάκαυση περίπτωση), καθώς και η μικρή διαρκής απώλεια ώσης που προξενούν τα επί πλέον εξαρτήματα της καύσης.

Η διάταξη της μετάκαυσης είναι εγκατεστημένη υπήνεμα, δηλαδή πίσω από τον στρόβιλο, πράγμα που επιτρέπει να αγνοήσουμε τον περιορισμό των πτερυγίων του στρόβιλου. Έτσι η θερμοκρασία της αναθέρμανσης μπορεί να φθάσει τους 1700 °C και στην πραγματικότητα δεν περιορίζεται παρά μόνο από την αντοχή των τοιχωμάτων του ακροφυσίου εξαγωγής.

Ο λόγος μετάκαυσης εκφράζει το πηλίκο της διαιρέσεως των ώσεων, που παράγει ο κινητήρας όταν είναι ακίνητος, με ή χωρίς μετάκαυση και μπορεί να ρυθμιστεί από τον χειριστή μεταξύ της μονάδας (1=μετάκαυση σβηστή) και μιας μέγιστης τιμής, που είναι γύρω στο 1,4. Είναι προφανές ότι η χρήση μετάκαυσης προκαλεί αυξημένη κατανάλωση καυσίμου και πτώση της προωθητικής αποδόσεως. Από την άλλη μεριά όμως, για δεδομένη μετωπική επιφάνεια κινητήρα, η μετάκαυση επιτρέπει αύξηση της ώσης. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο στην απογείωση ή για την παροχή αυξημένης ώσης σε ορισμένες φάσεις της πτήσης. Τέλος, η μετάκαυση χρησιμοποιείται κυρίως στους κινητήρες που προορίζονται για τα στρατιωτικά αεροπλάνα.

Η ενίσχυση της ώσης με υδρομεθανόλη συνίσταται στην έγχυση της ουσίας κατά την εισαγωγή ή αμέσως μετά τη συμπίεση. Το υγρό εξατμίζεται και μειώνει τη θερμοκρασία του αέρα, αυξάνοντας έτσι την πυκνότητα του και την παροχή μάζας. Η αύξηση της ωστικής δύναμης που επιτυγχάνεται με τον τρόπο αυτό ανέρχεται μόλις σε 10% και συνήθως εφαρμόζεται μόνο κατά την απογείωση. Αν και μπορούμε να αυξήσουμε αισθητά την ώση με μετάκαυση (afterburning) και με έγχυση υδρομεθανόλη, οι μέθοδοι αυτές δεν προσφέρονται για συνεχή χρήση εξαιτίας της συγκριτικά υψηλής πρόσθετης καταναλώσεως καυσίμου.



Εικόνα 11- γενικός τύπος παραγόμενης Ώσης με μετάκαυσης



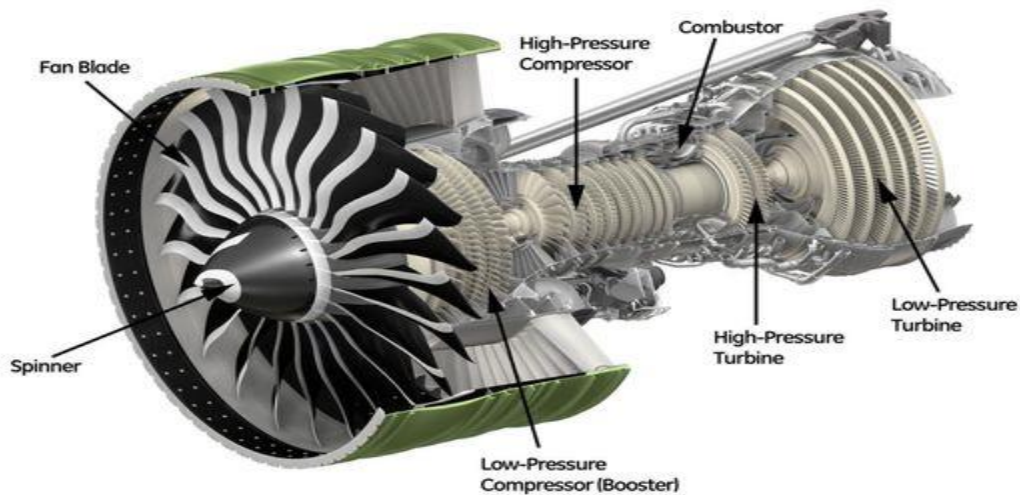
Εικόνα 12- Μετάκαυσης μαχητικού JET για τις ανάγκες απογείωσης.

Στροβιλοανεμιστήρας (Turbofan Engine)

1.1.6. Σχεδιασμός

Η παραλλαγή αυτή του στροβιλοαντιδραστήρα αποτελεί μία από τις σπουδαιότερες τεχνικές εξελίξεις του αεριοστρόβιλου και είναι συνδυασμός των τεχνικών χαρακτηριστικών στροβιλοαντιδραστήρα και ελικοστρόβιλου. Ένας στροβιλοανεμιστήρας επιταχύνει μικρότερη μάζα αέρα από τον ελικοστρόβιλο αλλά μεγαλύτερη από το στροβιλοαντιδραστήρα αναπτύσσει μεγάλες ταχύτητες πτήσης και σε μεγάλα ύψη (όπως ο στροβιλοαντιδραστήρας) ενώ, παράλληλα, δεν απαιτεί μεγάλο διάδρομο για την απογείωση επειδή δεν επηρεάζεται από το (Ram Effect) (όπως ο ελικοστρόβιλος κινητήρας). Επιπρόσθετα, ο περιορισμός της ταχύτητας πτήσης του ελικοστρόβιλου σε τιμές 550 έως 650 km/h δεν ισχύει.

Τα πτερύγια του ανεμιστήρα σε αυτήν την περίπτωση είναι σχεδιασμένα με τρόπο τέτοιο ώστε να μην επηρεάζονται ιδιαίτερα από την ταχύτητα του αεροσκάφους. Σημαντικά πλεονεκτήματα πιστώνονται, επίσης, η αυξημένη παροχή ισχύος ανά μονάδα βάρους, η καλή ειδική κατανάλωση καυσίμου και ο μειωμένος θόρυβος κατά την απογείωση και την προσγείωση.

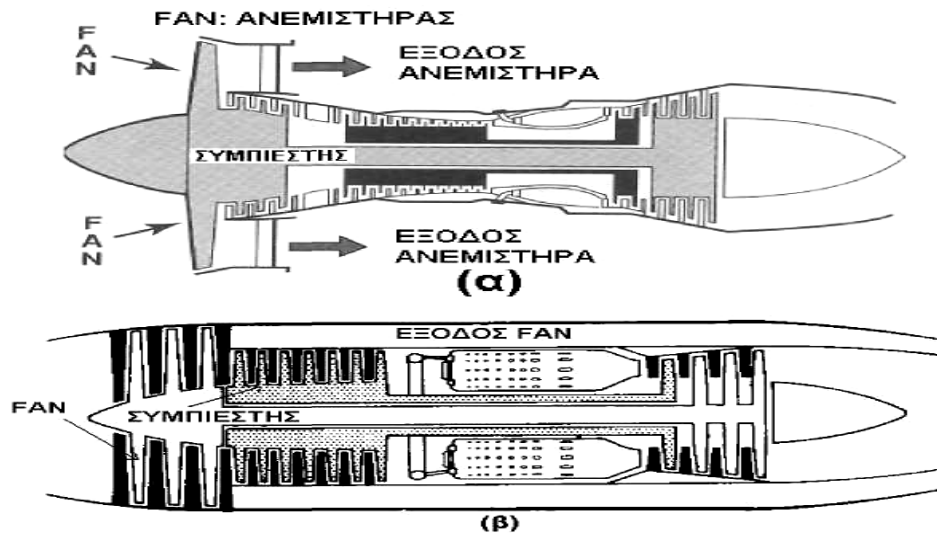


Εικόνα 13- Στροβιλοανεμιστήρας (Turbofan Engine) σε τομή

Στις μέρες μας τα περισσότερα αεριωθούμενα αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας φέρουν στροβιλοανεμιστήρες που συνδυάζουν χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου με σημαντικά μειωμένο επίπεδο θορύβου. Οι στροβιλοανεμιστήρες αποτελούν μία βελτιωμένη παραλλαγή του απλού στροβιλοαντιδραστήρα. Σε αυτού του τύπου στροβιλοαντιδραστήρα ο εισερχόμενος στο διαχύτη (diffuser) αέρας διακλαδώνεται σε δύο ρεύματα, το «ψυχρό» που συμπιέζεται από ένα ξεχωριστό συμπιεστή χαμηλής συμπίεσης και βρίσκεται κυρίως στο πρόσθιο (ή στο πίσω σε μερικούς τύπους μηχανών) μέρος του κινητήρα και δεν λαμβάνει μέρος στη καύση, αλλά παροχετεύεται στο τέλος του ακροφυσίου του ουραίου σωλήνα, όπου και αναμιγνύεται με τα «καυτά» εξερχόμενα καυσαέρια του ταχυρεύματος. Το άλλο, το ονομαζόμενο και «θερμό» είναι αυτό, που περνώντας πρώτα μέσα από τον κανονικό υψηλής πίεσεως αεροσυμπιεστή εξασφαλίζει στο θάλαμο καύσεως οξυγόνο για την καύση και κινεί τον στρόβιλο ο οποίος παράγει, αφενός ισχύ για την κίνηση και των δύο συμπιεστών αφετέρου δε το «θερμό» εκτοξευόμενο προς τα πίσω ρεύμα του ταχυρεύματος.

Κατ' αυτόν τον τρόπο η απόδοση ενός στροβιλωθητή βελτιώνεται διπλά, πρώτα επειδή το σχετικά αργό και «ψυχρό» ρεύμα ψύχει τον κινητήρα καλύτερα και στη συνέχεια, επειδή με την πρόσμιξη του «ψυχρού» αυτού ρεύματος με τα «καυτά» καυσαέρια, το τελικό προϊόν είναι ένα βραδύτερα κινούμενο και με αρκετά μειωμένο επίπεδο θορύβου ταχύρευμα στην έξοδο. Επιπροσθέτως, το «ψυχρό» ρεύμα αέρα που παροχετεύεται στο άκρο του ουραίου σωλήνα στους στροβιλωθητές διπλής ροής εξασφαλίζει μία πρόσθετη ωστική δύναμη που οφείλεται στο ρεύμα αυτό.

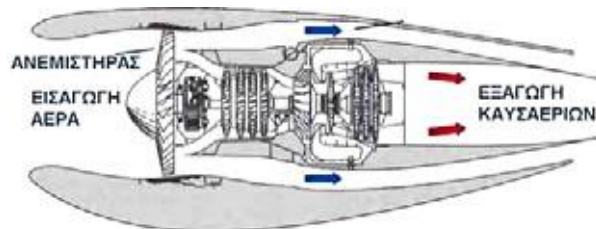
Η έξοδος του αέρα παράκαμψης πραγματοποιείται από ειδικό αγωγό (duct) που βρίσκεται περιφερειακά του κύριου σώματος του κινητήρα. Το μήκος του αγωγού είναι μικρό συνήθως στην περίπτωση χρήσης ανεμιστήρα μεγάλης διαμέτρου, ή μεγάλο όταν ο αγωγός εκτείνεται σε όλο το μήκος του κινητήρα, περίπτωση κατά την οποία επιτυγχάνεται μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης και του θορύβου του κινητήρα.



Εικόνα 14- Έξοδ. αέρα παράκαμψης από αγωγό (A) μικρού και (B) μεγάλου μήκους

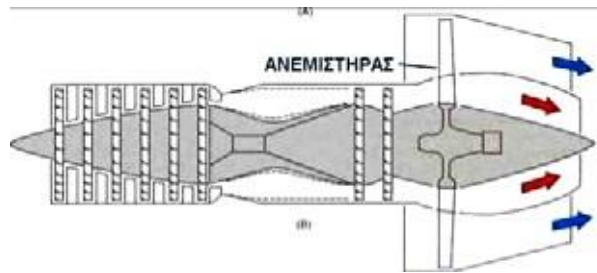
Ο λόγος ροής μάζας αέρα παροχέτευσης/ροή μάζας αέρα καύσης ($bpr = \text{bypass Ratio}$) είναι γνωστός και σαν λόγος αέρα παράκαμψης. Στροβιλοανεμιστήρες με $1,5 < bpr < 3,5$ θεωρούνται χαμηλής παράκαμψης, ενώ υπάρχουν υψηλής παράκαμψης που το bpr υπερβαίνει και το 10. Αεριοθούμενα χαμηλών ταχυτήτων έχουν στροβιλοανεμιστήρες με υψηλό λόγο παράκαμψης, ενώ στα αεροσκάφη υψηλών απαιτήσεων σε ταχύτητα ο λόγος αέρα παράκαμψης πρέπει να είναι χαμηλός.

Για υψηλές τιμές του λόγου παράκαμψης, απαιτούνται μόνο μία ή δύο βαθμίδες ανεμιστήρα, αλλά για μικρότερους χρειαζόμαστε μεγαλύτερη ταχύτητα του ρεύματος και περισσότερη συμπίεση. Για το τελικό ρεύμα αερίωσης είναι απαραίτητη η εξίσωση των πιέσεων των δύο επιμέρους ρευμάτων στο τμήμα ανάμιξης και ο κινητήρας σχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί να γίνει αυτή η εξίσωση.



Εικόνα 15- Τοποθέτηση του ανεμιστήρα εμπρόσθιο τμήμα του κινητήρα

Στην περίπτωση τοποθέτησης του ανεμιστήρα στο πίσω μέρος κερδίζουμε το πλεονέκτημα ότι μπορεί να τον ανεξαρτητοποιήσει από την αεριογεννήτρια, με την οποία μπορεί να συνδεθεί μόνο με αεριαγωγούς. Βέβαια δημιουργούνται προβλήματα συναρμολόγησης, που επιλύονται συγκριτικά δυσκολότερα και αυτός είναι ο λόγος που το σύστημα αυτό δεν έχει χρησιμοποιηθεί σε έκταση.



Εικόνα 16- Τοποθέτηση του ανεμιστήρα στο πίσω τμήμα του κινητήρα

Στις περισσότερες μορφές στροβιλοανεμιστήρα, χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας στρόβιλοι για την κίνηση αποκλειστικά και μόνον του ανεμιστήρα. Ο συμπιεστής ή οι συμπιεστές του κινητήρα λαμβάνουν κίνηση ξεχωριστό/ούς στρόβιλους.

Αρκετά σύγχρονα πολεμικά αεροσκάφη φέρουν στροβιλωθητές διπλής ροής με χαμηλό (λόγω των υψηλών απαιτήσεων) bpr και μετακαυστήρα που εξασφαλίζει μεγάλα αποθέματα ισχύος. Έτσι, μπορούν σε συνήθεις διαδρομές να ταξιδεύουν οικονομικά, ενώ όταν το απαιτούν οι περιστάσεις, ενεργοποιώντας τον μετακαυστήρα να μπορούν να αποκτούν τις υψηλές ταχύτητες που χρειάζονται. Γενικά, παρά το ότι ένα αεροσκάφος κινείται με ταχύτητα $M > 1$, ο εισερχόμενος στον στροβιλωθητή αέρας, πρέπει να έχει ταχύτητα $M < 1$ για να μπορεί να λειτουργεί ο κινητήρας αποδοτικά. Αυτό ακριβώς προσδιορίζει και τη μορφή του πρόσθιου τμήματος εισόδου στο διαχύτη που οφείλει να υποβιβάζει την υπερηχητική ροή του αέρα σε υποηχητική.

1.1.7. Απόδοση

Στους στροβιλοανεμιστήρες η παραγόμενη ωστική δύναμη είναι τελικά αυξημένη πάρα τη μικρή αύξηση σε ποσότητα καυσίμου που απαιτείται για την παραγωγή από τον στρόβιλο της επιπλέον ισχύος που καταναλώνει ο συμπιεστής χαμηλής συμπίεσης. Το “ψυχρό” ρεύμα αέρα το οποίο παροχετεύεται στην έξοδο του ουραίου σωλήνα με ταχύτητα μεγαλύτερη αυτής του αεροσκάφους παράγει μία πρόσθετη ωστική δύναμη η οποία αθροιστικά με την ωφέλιμη δημιουργεί συνισταμένη ωστική δύναμη μεγαλύτερου μεγέθους, σε σχέση με την αντίστοιχη που παράγεται από απλό στροβιλωθητή ίδιας κατανάλωσης καυσίμου. Έχει παρατηρηθεί, ότι στροβιλοανεμιστήρες με υψηλό bpr, έχουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης συγκριτικά με τους αντίστοιχους των ελικοστρόβιλων, οι οποίοι αν και διαθέτουν χαμηλό bpr έχουν βελτιωμένο βαθμό απόδοσης εν αντιθέση με τους απλούς στροβιλοαντιδραστήρες.

Με την βοήθεια του ανεμιστήρα επιτυγχάνεται ψυχρό αέρα προς το οπίσθιο τμήμα του κινητήρα, χωρίς αυτός να αναμειγνύεται με καύσιμο και να καίγεται με αποτέλεσμα την παραγωγή ώσης η οποία προστίθεται στην ολική ώση του κινητήρα. Η συνεισφορά του “ψυχρού” ρεύματος στην συνολικά παραγόμενη ώση είναι της τάξεως του 30 - 80% της ολικής ώσης του κινητήρα ανάλογα με το λόγο παράκαμψης.

$$FT_{fan} = m_{fan} (V_{fan} - V_0) + m_0 (1 + c_k) V_e - m_0 V_0$$

ΑΠΟ ΨΥΧΡΟ ΡΕΥΜΑ ΑΠΟ ΚΑΥΤΟ ΡΕΥΜΑ

Όπου:

- m_{fan} και V_{fan} αντίστοιχα, η ροή μάζας και η ταχύτητα στην έξοδο του «ψυχρού ρεύματος»

- m_0 , V_0 είναι η ροή μάζας του «καυτού» ρεύματος αέρα και η ταχύτητα του αεροσκάφους αντίστοιχα
- V_e είναι η ταχύτητα των «καυτών» καυσαερίων στην έξοδο του ουραίου σωλήνα
- $B_{pr} = m_{fan} / m_0$ είναι ο λόγος παράκαμψης αέρα
- $C_k = m_k / m_0$ είναι ο λόγος ροής καυσίμου προς ροή «καυτού» ρεύματος αέρα

Το κύριο χαρακτηριστικό λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα διπλής ροής είναι η μικρή ειδική κατανάλωση καυσίμου που μπορεί να είναι 25% μικρότερη συγκριτικά με την αντίστοιχη των στροβιλοκινητήρων. Η κατανάλωση για μια απογείωση από τη στάθμη της θάλασσας, με λόγο παροχέτευσης 5:1, είναι της τάξεως των 0,46 kgf or daN/hour και αυξάνει για υπερηχητική πτήση σε μεγάλο υψόμετρο μέχρι 0,66 kgf or daN/hour. Έτσι για παράδειγμα η ειδική κατανάλωση ενός κινητήρα CF-6 του κατασκευαστή GENERAL ELECTRIC, ο οποίος κινεί το αεροπλάνο Airbus είναι μικρότερη από 0,5kgf or daN/hour.

Λόγω της μείωσης της ειδικής καταναλώσεως (για ίση ώση), ή της αύξησης της προωθητικής απόδοσης, η χρήση των στροβιλοκινητήρων διπλής ροής τείνει να γενικευθεί στα αεροσκάφη πολιτικής αεροπορίας, στα οποία η μείωση κόστους συνεπάγεται αύξηση κέρδους και είναι πρωτεύουσας σημασίας. Εξάλλου οι στροβιλοκινητήρες διπλής ροής είναι λιγότερο θορυβώδεις από τους στροβιλοκινητήρες απλής ροής. Αυτό οφείλεται στην ελάττωση της μέσης ταχύτητας εκτόξευσης των καυσαερίων, που παρατηρείται στην έξοδο του σωλήνα εξαγωγής, εξαιτίας της ανάμιξης της δέσμης των καυσαερίων με τη δευτερεύουσα ροή του ψυχρού αέρα. Όπως αναφέρθηκε, οι στροβιλοκινητήρες διπλής ροής έχουν μεγάλη μετωπική επιφάνεια λόγω της ύπαρξης του ανεμιστήρα με αποτέλεσμα η αυξημένη επιφάνεια να επιβάλλει την εγκατάσταση των κινητήρων σε ατράκτια θέση εξωτερικά από το σκάφος, ένα παράδειγμα αποτελεί ο κινητήρας «JT-9D», που φέρουν τα Μπόινγκ 747 και του οποίου η ώση είναι της τάξης των 20.000daN και η εξωτερική διάμετρο αγγίζει τα 2,5 μέτρα.

Σε κινητήρες διπλής ροής μπορεί επίσης να εφαρμοστεί η λειτουργία της μετάκαυσης με εφαρμογή είτε στη θερμή ροή μόνο, είτε και στις δύο ροές, όπως στην περίπτωση του κινητήρα Pratt and Whitney JTF-10A, ο οποίος κινεί το αμερικανικό μαχητικό-βομβαρδιστικό αεροπλάνο με πτέρυγες μεταβαλλόμενου βέλους F111.



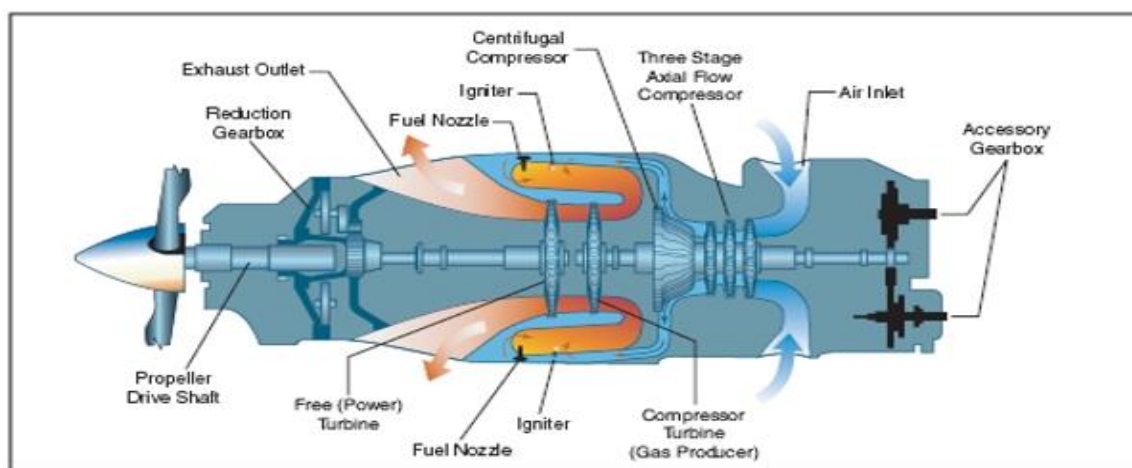
Εικόνα 17- F111 με πτέρυγες μεταβαλλόμενου βέλους

Τέλος, αν και η διάταξη της διπλής ροής είναι λιγότερο ενδιαφέρουσα για υπερηχητικές πτήσεις μεγάλης διάρκειας, έχει εφαρμοστεί στους κινητήρες του σοβιετικού υπερηχητικού αεροσκάφους πολιτικής αεροπορίας Tu 144.

Ελικοστρόβιλος (*turboprop engine*)

1.1.8. Σχεδίαση

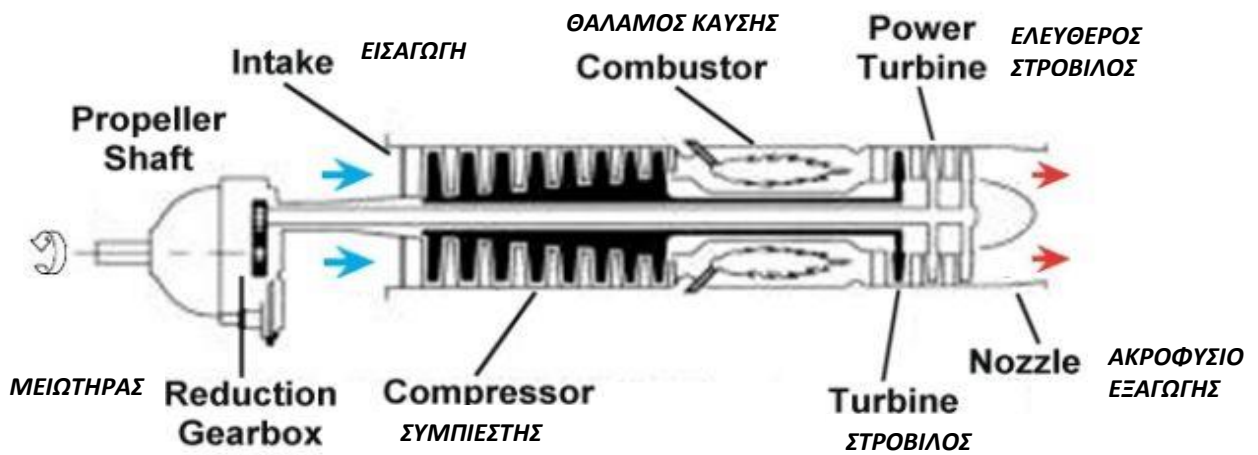
Η εφαρμογή του συγκεκριμένου τύπου στροβιλοαντιδραστήρα Εικ. 18, έχει ευρεία εφαρμογή στον χώρο της αεροπλοΐας με την διαφορά σε σχέση με τους άλλους τύπους την κατανομή χρήσης της παραγόμενης ενέργειας. Ουσιαστικά, είναι όμοιος με το στροβιλοαντιδραστήρα με τη διαφορά ότι στον ελικοστρόβιλο, σχεδόν όλη η ενέργεια των παραγόμενων καυσαερίων χρησιμοποιείται για την κίνηση του έλικα. Για το λόγο αυτό, η προσφερόμενη από τα καυσαέρια ώση είναι πολύ μικρή. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια των καυσαερίων ενός ελικοστρόβιλου κινητήρα αποδίδεται -σε ποσοστό έως 90%- ως ισχύς στον άξονα που κινεί τον έλικα και μόνο το υπόλοιπο 10% της ενέργειας των καυσαερίων παρέχεται υπό μορφή ώσης.



Εικόνα 18 ελικοστρόβιλος κινητήρας (TURBOPROP)

Ο ελικοστρόβιλος είναι δυνατό να θεωρηθεί ως ακραία μορφή στροβιλοκινητήρα διπλής ροής στον οποίο ο λόγος παράκαμψης έχει αυξηθεί από περίπου 5:1 σε 50:1, ενώ η απομένουσα ενεργεία του θερμού ρεύματος εξαγωγής έχει μειωθεί κατά πολύ. Ο ανεμιστήρας στην περίπτωση αυτή αντικαθίσταται από τον έλικα και είναι σε ανοικτό περιβάλλον και όχι περιβαλλόμενος από αεριαγωγό.

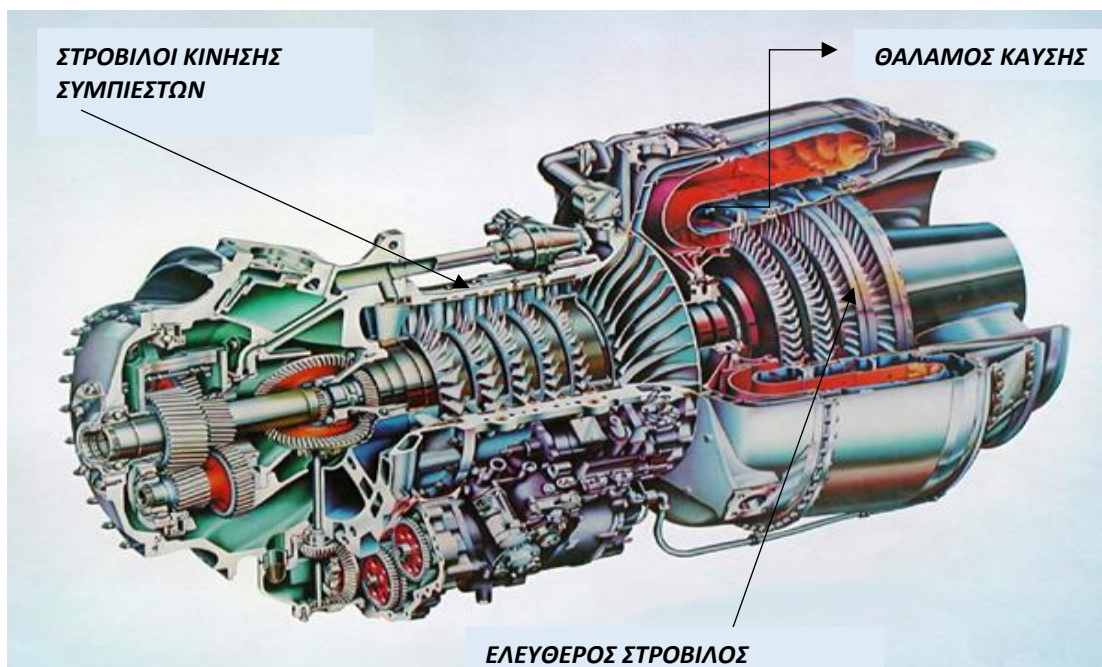
Τη μετάδοση κίνησης σε έναν έλικα αναλαμβάνει ένα κιβώτιο μετάδοσης (Gear Box) που αποτελείται από ένα σύστημα γραναζιών ως μειωτήρας στροφών. Ο μειωτήρας στροφών είναι απαραίτητος καθώς η βέλτιστη απόδοση της έλικας επιτυγχάνεται σε πολύ μικρότερες στροφές από αυτές της λειτουργίας του κινητήρα Εικ. 19.



Εικόνα 19- βασικά μέρη αξονοστρόβιλου κινητήρα

Η σύζευξη συμπιεστή - στροβίλου μπορεί να υλοποιηθεί είτε μέσω ενός κοινού άξονα όπως συμβαίνει και στους στροβιλοκινητήρες μιας βαθμίδας είτε ανεξάρτητα όπως στους κινητήρες δυο βαθμίδων. Στην δεύτερη περίπτωση ο κινητήρας ορίζεται ως κινητήρας “ελευθέρου στροβίλου” Εικ. 20 (Free Turbine ή Power Turbine) και είναι συνδεδεμένος με ξεχωριστό άξονα με το μειωτήρα στροφών επιτρέποντας μεγαλύτερη ευελιξία στη διαδικασία ελέγχου.

Και στις δύο περιπτώσεις, η ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου ισχύος είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που χρειάζεται και για αυτό απαιτείται μειωτήρα στροφών. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την ύπαρξη συστήματος λίπανσης και συστήματος ψύξης του λιπαντικού, πράγμα που αυξάνει την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και το βάρος.



Εικόνα 20- T-53 Ελικοστρόβιλος κινητήρας με ελεύθερο στρόβιλο

Σε άλλους τύπους ελικοστρόβιλων δεν υπάρχει ξεχωριστός ελεύθερος στρόβιλος και η κίνηση του έλικα επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση μέρους της ενέργειας των καυσαερίων που εκτονώνονται σε στρόβιλο, ο οποίος κινεί και το συμπιεστή.

Το μέγεθος κατασκευής ενός ελικοστρόβιλου κινητήρα οριοθετείται αυστηρά από την τάξη μεγέθους ισχύς που έχει ικανότητα η έλικα να απορροφήσει αποδοτικά. Η ισχύς αυτή είναι της τάξης των 3.000 KW περίπου 4.000 ίππων, αλλά μπορεί να αυξηθεί αν χρησιμοποιηθούν έλικες αντίθετης περιστροφής. Ένας τρόπος που συνηθίζεται πολύ είναι η σύζευξη δυο κινητήρων στον ίδιο άξονα (διάταξη tandem) μέσω μιας διάταξης περιστροφής μιας κατεύθυνσης συγκεντρικών ελίκων. Με τον τρόπο αυτό, αν δεν απαιτείται η πλήρης ισχύς και των δύο κινητήρων μαζί, το μερικό φορτίο μπορεί να επιτευχθεί με σταμάτημα του ενός κινητήρα και χρήση του άλλου κοντά στο σημείο πλήρους φορτίου έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απόδοση ακόμα και σε ταχύτητες κάτω των 800 km/h.

1.1.9. Απόδοση

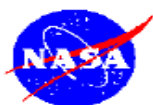
Η ισχύς που αποδίδει ένας ελικοστρόβιλος εκφράζεται ως ισχύς επί της ατράκτου ή σε περιπτώσεις που απομένει στο ρεύμα εξαγωγής ένα ωφέλιμο τμήμα ενέργειας, ως ισοδύναμη ισχύς. Αυτή η τελευταία είναι το άθροισμα της ισχύος στην άτρακτο και μιας θεωρητικής ισχύος που προκύπτει από την παραδοχή ότι σχεδόν 13,3N της απομένουσας ωστικής δύναμης της αερίωθης ισοδυναμούν με έναν ίππο ισχύος στην άτρακτο κατά την απογείωση.

Το μεγάλο πλεονέκτημα του ελικοστρόβιλου κινητήρα είναι ότι επιτυγχάνει την καλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου συγκριτικά με οποιονδήποτε άλλου τύπου αεριοστρόβιλο κινητήρα. Η συμβολή του έλικα επιτρέπει την επιτάχυνση μεγάλων μαζών αέρα όταν το αεροσκάφος κινείται με μικρές, ως προς το έδαφος, ταχύτητες. Η παραγόμενη ώση είναι μεγάλη και το αεροσκάφος έχει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά κατά την απογείωση και την άνοδο. Επιπρόσθετα η απόδοση του είναι ικανοποιητική ακόμη και σε σχετικά μεγάλα ύψη πτήσεων (6.000 m).

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα φθίνουν όταν έχουμε αύξηση της ταχύτητας (άνω των 650 km/h) και του ύψους πτήσης (άνω των 7.000 m). Ένα επιπλέον μειονέκτημα του ελικοστρόβιλου κινητήρα, είναι η πολυπλοκότητα της κατασκευής του πράγμα που συμβάλει στην δυσκολία συντήρησης και τέλος το αυξημένο βάρος κατασκευής συγκριτικά με έναν στροβιλοαντιδραστήρα ισοδύναμης ώσης.

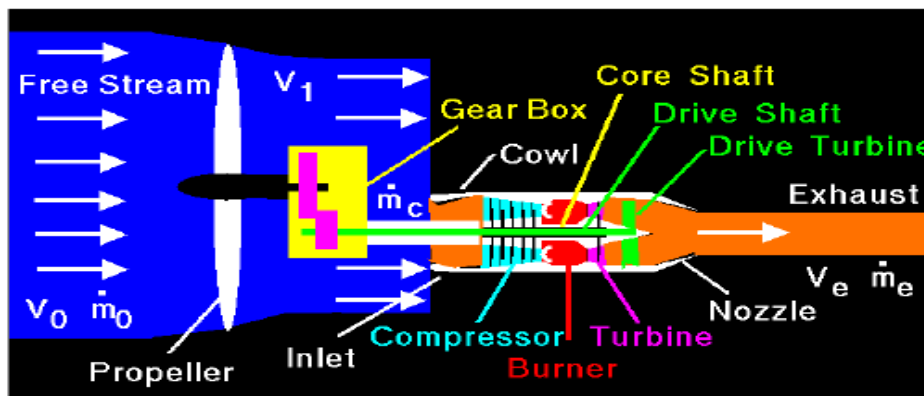
Προσεγγιστικά η ειδική κατανάλωση των κινητήρων είναι περί τα 0,27 Kgr/h και ίππο ισοδύναμης ισχύος κατά την απογείωση, αυτό όμως ισχύει για σχετικά χαμηλούς λόγους συμπίεσης. Γενικά δεν έχουν αναπτυχθεί τύποι ελικοστρόβιλων με λόγους συμπίεσης συγκρίσιμους με τους λόγους των στροβιλοκινητήρων διπλής ροής, παρ' όλο που κάτι τέτοιο θα μείωνε την ειδική κατανάλωση καυσίμου σε χαμηλά επίπεδα, δηλαδή περίπου 0,18 χιλιόγραμμα ανά ώρα για κάθε ίππο ισχύος στην άτρακτο. Το δεύτερο χαρακτηριστικό του ελικοστρόβιλου είναι η υψηλή ισχύς εξόδου σε χαμηλές ταχύτητες πτήσης, πράγμα που μπορεί να φθάσει μέχρι 353 ίππους ατράκτου για κάθε χιλιόγραμμο αέρα που ρέει ανά δευτερόλεπτο μέσα από την αεριογεννήτρια. Το τρίτο χαρακτηριστικό είναι το ανηγμένο βάρος που μπορεί να ανέλθει σε 0,20 Kgr βάρους ανά ισοδύναμη ισχύ ενός ίππου. Έχουμε έτσι συγκριτικά βαριές κατασκευές, με εξαίρεση βέβαια τις χαμηλές ταχύτητες πτήσης, κυρίως λόγω του βάρους των μειωτήρων στροφών που

απαιτούνται για την έλικα. Παρ' όλα αυτά, συγκριτικά με έναν εμβολοφόρο κινητήρα το βάρος ενός ελικοστρόβιλου είναι το 1/3 του πρώτου.



Turboprop Thrust

Glenn
Research
Center



Thrust = Thrust of Propeller + Thrust of Core

$$F = \dot{m}_o V_1 - \dot{m}_o V_o + \dot{m}_e V_e - \dot{m}_c V_1$$

$$F = \dot{m}_o (V_1 - V_o) + \dot{m}_e (V_e - V_1)$$

(Large)

(Small)

Mass Flows

$$\dot{m}_o > \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_e \sim \dot{m}_c$$

Εικόνα 21- γενικός τύπος υπολογισμού ώσης για ελικοστρόβιλους κινητήρες

Αξονοστρόβιλος (Turboshaft Engine)

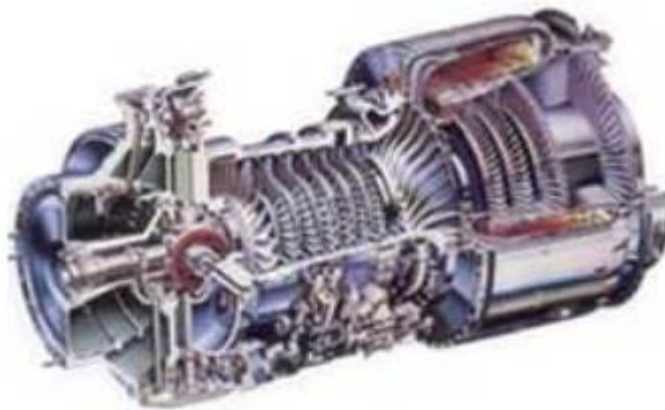
1.1.10. Λειτουργία

Αυτός ο τύπος αεριοστρόβιλου παρέχει ισχύ σχεδόν αποκλειστικά στον άξονά του ενώ ελάχιστη είναι η παραγωγή ώσης. Ευκολά γίνεται αντιληπτό η μεγάλη ομοιότητα του με τον ελικοστρόβιλο κινητήρα. Η σύνδεση του ελευθέρου στρόβιλου με το στροφέιο που παραλαμβάνει την κίνηση και όχι απευθείας με έλικα είναι και αυτό που τον διαφοροποιεί από τον ελικοστρόβιλο και τελικά τον κατατάσσει στους αξονοστρόβιλους κινητήρες. Η χρήση του έχει και εναλλακτικές εφαρμογές όπως την παροχή ισχύος για λειτουργικά συστήματα του αεροσκάφους είτε κατά την πτήση είτε στην στάθμευση και σε κατάσταση αναμονής, στην περίπτωση αυτή χαρακτηρίζεται ως κινητήρας εναλλακτικής παροχής ισχύος αλλιώς APU (Auxiliary Power Unit). Από αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η χρήση αυτού του είδους των κινητήρων δεν έχει αποκλειστική εφαρμογή μόνο στον αεροπορικό τομέα αλλά το φάσμα εφαρμογής είναι πιο ευρύ, για παράδειγμα σύνδεση με άξονα στροφείου πλοίου, αυτοκινήτου και ηλεκτρογεννήτριας. Η ισχύς του ορίζεται από την παραγόμενη ισχύ στην έξοδο του άξονα του ελευθέρου στρόβιλου, εξού και αξονική ισχύς.

Σε έναν αξονοστρόβιλο κινητήρα, το κιβώτιο ταχυτήτων όπως προαναφέραμε δεν είναι συνδεδεμένο με έλικα, αλλά σε κάποια άλλη συσκευή μονάδας δίσκου η δίσκων σύμπλεξης. Το κιβώτιο ταχυτήτων συνδέεται με τη δομή του οχήματος και υποστηρίζει τα φορτία που δημιουργούνται αντί του κινητήρα. Τα μεγάλα ελικόπτερα χρησιμοποιούν δύο ή τρεις κινητήρες στροβιλοσυμπιεστών για επιπλέον ισχύ και για λόγους ασφαλείας. Το

Mil Mi-26 χρησιμοποιεί δύο Lotarev D-136 σε 11.400 hp το καθένα, ενώ ο Sikorsky CH-53E Super Stallion χρησιμοποιεί τρία General Electric T64 σε 4.380 hp το καθένα.

Οι πρώτοι κινητήρες στροβιλοσυμπιεστών ήταν προσαρμογές των κινητήρων με στροβιλοκινητήρες, παρέχοντας ισχύ μέσω ενός άξονα που οδηγούσε απευθείας από τους άξονες της γεννήτριας αερίου, μέσω ενός μειωτήρα κιβωτίου ταχυτήτων. Παραδείγματα στροβιλοφόρων αξόνων άμεσης κίνησης περιλαμβάνουν τους ναυτικής χρήσης ή βιομηχανικούς κινητήρες Rolls-Royce Dart. Η χρήση τους βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε ελικόπτερα αλλά και σε σκάφη, αγωνιστικά αυτοκίνητα (τέλη δεκαετίας 1960), Hover Craft αλλά και ως μονάδα άντλησης σε δεξαμενές μεγάλου κυβισμού με ανάγκη υψηλής απόδοσης και ταχύτητας.



Εικόνα 22- Τομή Αξονοστρόβιλου Κινητήρα (Turboshaft)

Ειδικές μορφές

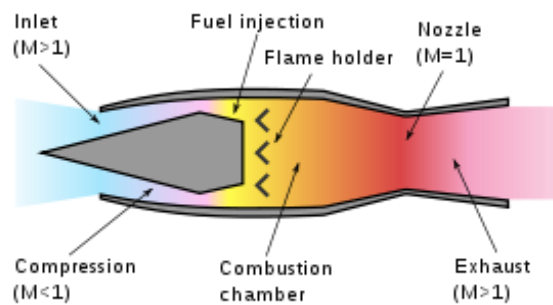
1.1.11. Αυλωθητήρας (ramjet)

Αποτελεί πιθανότατα την απλούστερη έκφραση στροβιλοαντιδραστήρα και γενικά κινητήρα αερίωθησης με αναρρόφηση αέρα και με το μικρότερο βάρος συγκριτικά με τους προαναφερθέντες μη έχοντας στην δομή του σημαντικά περιστρεφόμενα μέρη. Παρόλα αυτά το πεδίο εφαρμογής του είναι περιορισμένο από το γεγονός ότι ο λόγος συμπίεσης εξαρτάται αποκλειστικά από την ταχύτητα πτήσης του αεροσκάφους. Με απλά λόγια δεν αναπτύσσει στατική ώση αναγκαία για τη διαδικασία της απογείωσης, ενώ η ώση που παράγει στις υποηχητικές ταχύτητες είναι πολύ μικρή. Επομένως τα αεροσκάφη, που χρησιμοποιούν αυλωθητήρα, πρέπει πρώτα να αποκτήσουν μια ορισμένη ταχύτητα με τη βοήθεια ενός άλλου μέσου, όπως πχ. με ένα άλλο αεροσκάφος.

Η μορφή του είναι παραπλήσια με τη μορφή ενός στροβιλοκινητήρα, με την διαφορά ότι εδώ έχει αφαιρεθεί το σύστημα του ρότορα. Για το λόγο αυτό δεν υπάρχει πια ο ίδιος περιορισμός στη μέγιστη θερμοκρασία του αερίου και έτσι επιτρέπονται θερμοκρασίες πάνω και από 1930 °C. Η ιδέα αυτού του τύπου προωθητή, που χρονολογείται από το 1910, οφείλεται στον Γάλλο Rene Lorin, αλλά η τελική υλοποίηση του έγινε από τον Γάλλο Rene Leduc, λίγο πριν από τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο, ο οποίος μεταξύ 1945 και 1958 κατασκεύασε δύο πειραματικά πρωτότυπα αεροπλάνα προωθούμενα με αυλωθητήρα, τα Λεντύκ 016 και 021.

Ο αυλωθητήρας αποτελείται βασικά από έναν κώνο εισαγωγής, μέσα στον οποίο ο αέρας υφίσταται συμπίεση, έναν θάλαμο καύσης και ένα ακροφύσιο εξαγωγής μέσα στο

οποίο τα καυσαέρια εκτονώνονται παράγοντας την προωθητική δύναμη. Χαρακτηρίζεται, όπως αναφέρθηκε και προτύτερα, από το ότι δεν περιλαμβάνει κανένα κινούμενο μέρος. Εξάλλου, η παροχή αέρα που αναρροφά ο κινητήρας είναι ανάλογη με την ταχύτητα κίνησής του και επειδή αυτό ισχύει και για την ώση του, η ώση αυτή είναι μηδενική όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος. Αυτό είναι το κύριο μειονέκτημα του αυλωθητήρα, το οποίο επιβάλλει να του προσθέσουμε έναν άλλο τύπο κινητήρα για την απογείωση. Έτσι, ως τώρα, οι αυλωθητήρες έχουν ως αποκλειστική σχεδόν εφαρμογή τη χρήση τους σε κατευθυνόμενα βλήματα, τα οποία ξεκινούν με πυραυλοκινητήρα. Στη Γαλλία όμως η εταιρεία Αεροσπείαλ, υλοποίησε σε συνεργασία με την SNECMA ένα συνδυασμένο στροβιλοαυλωθητήρα (turboramjet), πάνω στον οποίο βασίστηκε και η κατασκευή του αεροπλάνου Griffon, που το 1959 πέταξε με ταχύτητα 2,2 Mach.



Εικόνα 23- Αυλωθητήρας (Ramjet)

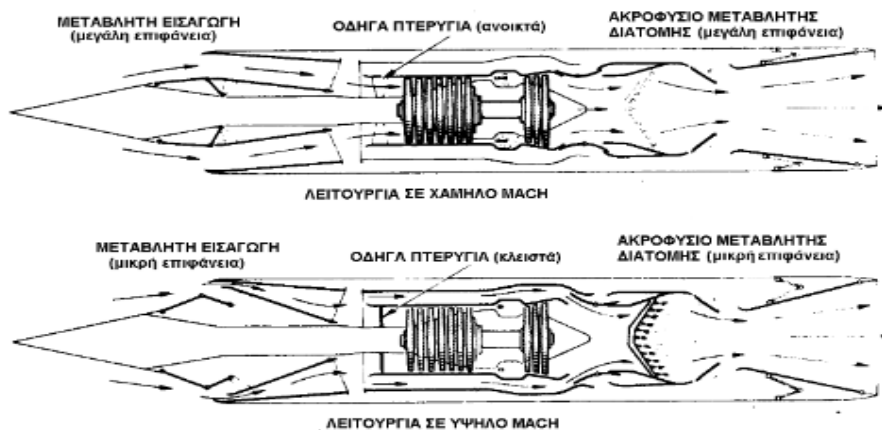
Η ανακάλυψη του αυλωθητήρα θα αποτελέσει συνδυαστικά μια προέκταση του στροβιλοκινητήρα με σκοπό την χρήση του κατά την διάρκεια των πτήσεων με υψηλές ταχύτητες μιας και αυτό αποτελεί και τον σημαντικό περιορισμό του δεύτερου. Ο περιορισμός αυτός εντοπίζεται, στις συνθήκες θερμικής φύσης, αφού η θερμοκρασία του αέρα κατά την είσοδό του στον κώνο εισαγωγής είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας. Στον αντίποδα ο περιορισμός αυτός άρετε στην περίπτωση του αυλωθητήρα, ο οποίος εκτός των άλλων παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα της απλότητας και της ελαφρότητας που προέρχονται από την αρχή λειτουργίας του.

1.1.12. Στροβιλοαυλωθητήρας (Turboramjet)

Μια άλλη μορφή πιο εξελιγμένη από αυτή του αυλωθητήρα αποτελεί ο στροβιλοαυλωθητήρας. Η εξέλιξη αυτή αποτελεί έναν συνδυασμό στροβιλοκινητήρα-αυλωθητήρα με χαρακτηριστικό γνώρισμα την διάταξη. Η διάταξη αυτού του κινητήρα περιγράφεται από την θέση του στροβιλοκινητήρα να βρίσκεται εντός του αυλωθητήρα και ο κώνος εισαγωγής καθώς και το ακροφύσιο εξαγωγής είναι κοινά και για τους δύο κινητήρες. Επιπρόσθετα αυτό συνεπάγεται στους υπερηχητικούς στροβιλοκινητήρες την προσαρμογή του σχήματος των δύο αυτών τμημάτων του κινητήρα στην ταχύτητα πτήσης. Οι σημαντικότερες δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπιστούν έχουν να κάνουν με τη σταθεροποίηση της καύσης ενώ η ροή είναι υπερηχητική καθώς και με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ροών που διαπερνούν τους δύο αυτούς κινητήρες.

Το σύστημα έχει ως απαραίτητη προϋπόθεση μηχανισμούς ανακοπής του ρεύματος του αέρα για το στρόβιλο και μια διάταξη ρύθμισης του βήματος των πτερυγίων του ανεμιστήρα. Με τη βοήθεια αυτής της διάταξης τα πτερύγια του ανεμιστήρα μπορούν να στραφούν λίγο σε σχέση με την κανονική τους θέση για να ελαχιστοποιήσουν την αεροδυναμική αντίσταση. Ακόμη όμως και με αυτές τις ρυθμίσεις υπάρχουν μερικές αεροδυναμικές απώλειες κατά τη λειτουργία του κινητήρα αυτού, εκτός από το επί πλέον βάρος. Το σύνολο δύναται να λειτουργεί κατά τρεις τρόπους:

- ως αμιγής στροβιλοκινητήρας στις χαμηλές ταχύτητες πτήσης,
- ως συνδυασμός στροβιλοκινητήρα-αυλωθητήρα στις ενδιάμεσες ταχύτητες.
- & ως αμιγής αυλωθητήρας στις υψηλές υπερηχητικές ταχύτητες.



Εικόνα 24- Λειτουργία Στροβιλοαυλωθητήρα (Turboramjet)

Κατά αυτόν τον τρόπο έχουμε την δυνατότητα διατήρησης μικρής ειδικής κατανάλωσης στις χαμηλές ταχύτητες.

Μέσω της εξέλιξης έχουμε συνεχώς αύξηση των ταχυτήτων πτήσης, αυτό σε πλήρη συνδυασμό με τις απαιτήσεις που θα δημιουργηθούν θα συμβάλει στην πλήρη εξέλιξη αυτού του είδους κινητήρων μέσα στα προσεχή χρόνια.

1.1.13. Κινητήρες με περιστρεφόμενα ακροφύσια εξαγωγής.

Αναφερόμαστε πλέον σε μια εξέλιξη των συστημάτων που μας δίνουν την επιθυμητή κατεύθυνση στην παραγόμενη ώση ώστε να επιλύσουν προβλήματα ή να ικανοποιήσουν ανάγκες που προέκυψαν με την πάροδο των χρόνων.

Αποτέλεσμα της εξέλιξης αυτής είναι η χρήση των ίδιων συγκροτημάτων κινητήρων είτε μιας οριζόντιας ώσεως για προώθηση, είτε μιας κατακόρυφης ώσεως, που μπορεί να συμβάλει στη στήριξη του αεροσκάφους για την περίπτωση αεροπλάνων βραχείας ή κατακόρυφης απογειώσεως και προσγειώσεως.

Η αρχή αυτή βασίζεται σε κατάλληλη σχεδίαση του ακροφυσίου εκτόξευσης των καυσαερίων, ώστε με την περιστροφή του ο άξονας της δέσμης των καυσαερίων να αλλάζει διεύθυνση κατά 90° . Η ιδέα αυτή συνδέεται με τη λύση της διπλής ροής, έτσι ώστε οι κινητήρες με περιστρεφόμενα ακροφύσια εξαγωγής, να είναι στροβιλοκινητήρες διπλής ροής, εφοδιασμένοι με τέσσερα εγκάρσια ακροφύσια. Στην διάταξη των ακροφυσίων αυτών παρατηρείται ότι τα δύο που είναι τοποθετημένα στο μπροστινό μέρος του κινητήρα, εξασφαλίζουν την εκτόξευση της ψυχρής ροής, ενώ τα άλλα δύο στο πίσω μέρος επιτυγχάνουν την εκτόξευση της θερμής ροής.

Ο ROLLS ROYCE BS-53 παραγόμενης ώσης 8400 daN ήταν ο πρώτος κινητήρας αυτού του είδους που κατασκευάστηκε και προορίστηκε για χρήση στα κατακόρυφης απογείωσης Βρετανικά αεροσκάφη HAWKER P-1127. Ο συγκεκριμένος κινητήρας είχε δυνατότητα περιστροφής ως προς τον άξονα ώσης της τάξεως των 1000 με αποτέλεσμα τη δυνατότητα της δημιουργίας μικρής άντωσης προς τα πίσω. Μόνον η βρετανική εταιρεία έχει μέχρι σήμερα κατασκευάσει τέτοιους κινητήρες για τον εξοπλισμό πολεμικών αεροπλάνων, επιπλέον πρέπει να αναφερθεί ότι ο εν λόγω κινητήρας μπορεί να συνδυαστεί με σύστημα μετάκαυσης στη μια από τις δυο ροές.



Εικόνα 25- Ακροφύσιο μεταβλητής διεύθυνσης εξαγωγής καυσαερίων (A/K F119 της P&W)*

1.1.14. Γενικά.

Οι κινητήρες αερίωθησης των αεροσκαφών λειτουργούν κάτω από ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και ταχύτητας περιστροφής, ώστε και σε συνδυασμό με ελάχιστο βάρος να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ισχύς εξόδου. Όλα αυτά όμως συνεπάγονται ανάπτυξη καταπονήσεων και δονήσεων καθώς και άλλων φαινομένων που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν για την πραγματοποίηση μιας επιτυχημένης και αξιόπιστης κατασκευής. Η επίτευξη αυτού του σκοπού μπορεί να υλοποιηθεί με δυο κυρίως τρόπους:

- ✓ με το σύστημα επιθεωρήσεων και συντήρησης, το οποίο ισχύει για τους κινητήρες προκειμένου να εντοπισθεί και να διορθωθεί κάθε αστοχία που εμφανίζεται στα εξαρτήματα &
- ✓ με τα τμήματα μελέτης σχεδιασμού και τεχνολογικής ανάπτυξης που διαθέτουν οι μεγάλες κατασκευάστριες εταιρείες αεροκινητήρων και συμβάλουν στον περιορισμό των κινδύνων και των συνεπειών από τις τυχόν αστοχίες που θα προκύψουν καθώς και την βελτίωση όσον αφορά την αποδοτικότητα και την ασφάλεια των κινητήρων.

Η πρακτική που εφαρμοζόταν μέχρι και σήμερα περιλάμβανε τον χρονικό προσδιορισμό μεταξύ δυο διαδοχικών γενικών επισκευών (OVERHAUL), με συγκρατημένη αύξηση του χρονικού αυτού ορίου, βασιζόμενοι στην εμπειρία και τα στοιχεία που εντοπιζόταν και θέτονταν υπό μελέτη μετά το πέρας τέτοιου είδους συντηρήσεων. Η αλλαγές σε σχεδιασμό, διαφορετικά κράματα υλικών η ακόμα και σε φιλοσοφία είναι μερικά παραδείγματα. Σήμερα ένας δοκιμασμένος κινητήρας αναμένεται ότι θα λειτουργήσει πάνω από 5.000 ώρες μεταξύ δύο γενικών επισκευών. Μια εναλλακτική μέθοδος περιλαμβάνει την πραγματοποίηση συνεχών γενικών επισκευών ή συντηρήσεων όταν χρειάζεται. Με τη βοήθεια εξάλλου ενσωματωμένων συσκευών επιθεώρησης και οργάνων συνεχούς καταγραφής είναι δυνατός ο εντοπισμός όλων των ανωμαλιών που εμφανίζονται στον κινητήρα και στη συνέχεια η λήψη μέτρων για την αντιμετώπισή τους. Αυτό διευκολύνεται στους σύγχρονους κινητήρες με την κατά τμήματα (module) κατασκευή, που επιτρέπει την αφαίρεση και αντικατάσταση σημαντικών τμημάτων, ενώ ο υπόλοιπος κινητήρας παραμένει στερεωμένος στο αεροσκάφος.

Η πιο σοβαρή και αναπάντεχη βλάβη που μπορεί κατά την διάρκεια της λειτουργίας ενός κινητήρα είναι το ενδεχόμενο αποκόλλησης ενός πτερυγίου από το τμήμα του στροβίλου. Η μεγάλη ορμή που διαθέτει το πτερύγιο λόγω του βάρους και της μεγάλης ταχύτητας περιστροφής κατά την αποκόλληση του από τον ρότορα είναι η αιτία για την πρόκληση σοβαρής ζημίας σε οποιαδήποτε επιφάνεια πρόσκρουσης. Η μείωση ή και η αποφυγή του κινδύνου αυτού επιτυγχάνεται πλέον με την προσθήκη ενός περιφερειακού στο εργαζόμενο περιβάλλον προφυλακτήρα που αποτρέπει την εισχώρηση θραυσμάτων στο περίβλημα του κινητήρα. Επιπρόσθετα με βάση τις μελέτες στο σχεδιασμό αποφεύγεται πλέον η τοποθέτηση οποιουδήποτε σημαντικού τμήματος σωληνώσεων για καύσιμο ή λιπαντικό να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο περιστροφής με αυτό των πτερυγίων.

1.1.15. Επιπρόσθετα προβλήματα

1.1.15.1. “ Ξένα Αντικείμενα”

Το ακροφύσιο εισαγωγής αποτελεί την είσοδο εισχώρησης του αέρα αλλά και ξένων σωμάτων κατά την λειτουργία του κινητήρα επι του εδάφους αλλά κυρίτερα κατά την διάρκεια της πτήσης, με κίνδυνο τα εισερχόμενα σε αυτό ξένα σώματα να προσκρούσουν στα πτερύγια του συμπιεστή και να προκαλέσουν βλάβη ή και την πτώση του πτητικού μέσου. Πιθανά ξένα σώματα αποτελούν τα πτηνά, εξού και «Bird Strike» και για αυτό όλοι οι κινητήρες πρέπει να διαθέτουν μεγάλη αντοχή στην κατασκευή τους , ώστε να μπορούν να αντισταθούν στην πιθανή είσοδο ενός ογκώδους πτηνού με μεγάλη ταχύτητα, χωρίς αυτό να έχει καταστρεπτικές συνέπειες για τα πτερύγια του συμπιεστή. Επι του εδάφους, προσθετά προληπτικά μετρά που λαμβάνονται για την αντιμετώπιση του φαινομένου σμήνους πουλιών κατά την απογείωση η προσγείωση, είναι συσκευές εκδίωξης αυτών μέσω εκκωφαντικού θορύβου (ηχητικά κανονάκια).

Παρόμοιο πρόβλημα, μπορεί να προκληθεί από κομμάτια πάγου που είναι σχηματισμένα λόγω ψύχους στα ακίνητα μέρη του κώνου εισαγωγής και των ρυθμιστικών βαλβίδων του συμπιεστή. Τα κομμάτια πάγου , εκτός από τον περιορισμό της ενεργού επιφάνειας διέλευσης του αέρα, δηλαδή τη μείωση της ώσης. μπορεί να αποκολληθούν και να εισχωρήσουν στο συμπιεστή. Η προστασία εξασφαλίζεται με μια διάταξη σωληνώσεων η με συστοιχία αντιστάσεων που βασίζεται συνήθως στην παροχή θερμότητας στην ευαίσθητη περιοχή γνωστό και ως “Anti -Ice System” το οποίο δεν πρέπει να συγχέεται με το “De-Ice” System. Αναφορικά με αυτά τα δύο συστήματα σαν πληροφορία πρέπει να πούμε ότι, το μεν πρώτο δεν επιτρέπει τον σχηματισμό πάγου ενώ το δεύτερο, βοηθάει στην απόρριψη του είδη σχηματισμένου (αποπαγοποίηση).

1.1.16. Επίπεδα Θορύβου

Τα υψηλά επίπεδα θορύβου αποτελούν εξίσου ένα από τα σημαντικά προβλήματα των στροβιλοκινητήρων και παρά τις βελτιώσεις που επέφερε η λύση της διπλής ροής, το πρόβλημα του θορύβου παραμένει σημαντικό. Το πρόβλημα γίνεται μεγαλύτερο σε ότι αφορά τα αεροσκάφη του πολιτικού νηολογίου , στα οποία επιβάλλονται πολύ αυστηρά όρια επιπέδου θορύβου κατά την διαδικασία της απογείωσης και της προσγείωσης μιας και η ύπαρξη αεροδρομίων πλησίον αστικών κέντρων είναι μια πραγματικότητα.

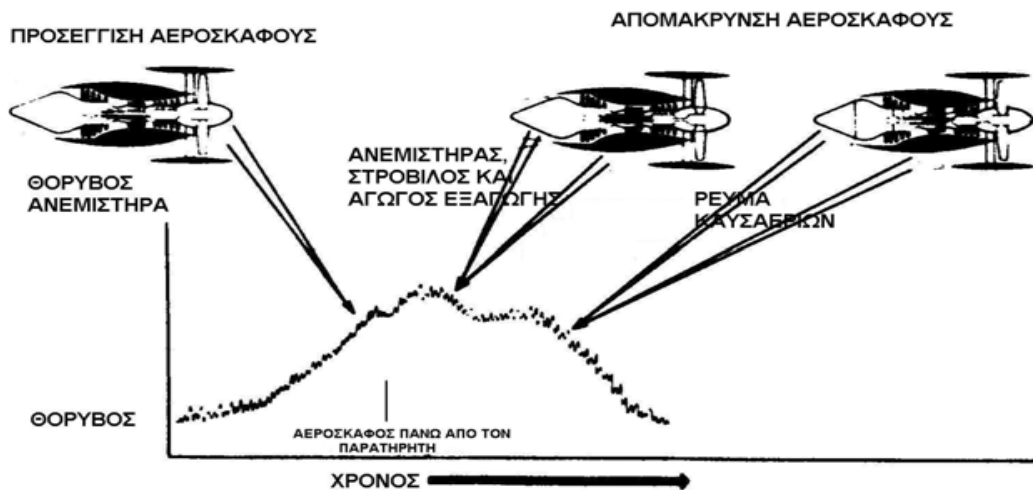


Εικόνα 26- Επίπεδα Παραγόμενου Θορύβου Από Στροβιλοκινητήρες.

Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, γίνονται διαρκώς προσπάθειες ώστε να βρεθούν μέθοδοι που θα συντελέσουν στην μείωση των επιπέδων θορύβου μιας και οι τιμές τους τείνουν σε συνεχή μείωση. Στη προσπάθεια βελτίωσης του φαινομένου, καταλήγουμε στην επιμέρους ανάλυση του με βάση την πηγή παραγωγής θορύβου σε τρεις κατηγορίες, των οποίων η κρισιμότητα εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του κινητήρα που παράγει τον θόρυβο:

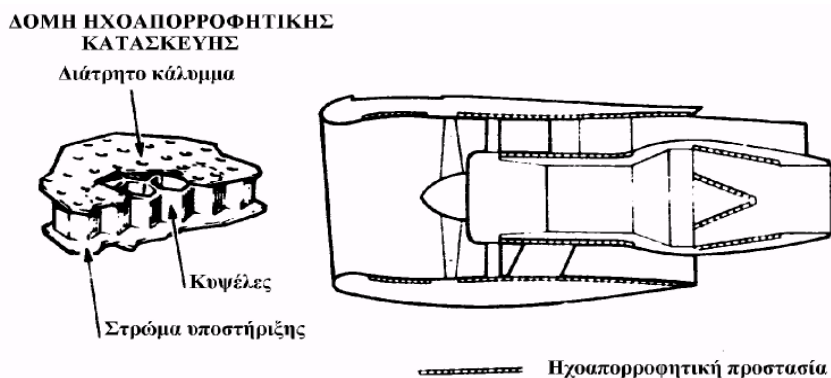
- ❖ ο θόρυβος της δέσμης, που οφείλεται βασικά στη διαφορά ταχύτητας μεταξύ της δέσμης και του περιβάλλοντα αέρα και ο οποίος είναι πολύ μειωμένος στους στροβιλοκινητήρες διπλής ροής,
- ❖ ο θόρυβος του στροβίλου & τέλος
- ❖ ο θόρυβος του συμπιεστή και του ανεμιστήρα.

Οι δυο τελευταίες κατηγορίες είναι αποτέλεσμα που οφείλεται στο φαινόμενο αλληλεπίδρασης των ροών όπως μας παρουσιάζει και το Εικ. 27 παρακάτω.



Εικόνα 27- Οι Κύριες Πηγές Θορύβου Κατά Το "Πέρασμα" Ενός Αεροσκάφους

Στα υποηχητικά αεροπλάνα ο θόρυβος της δέσμης μειώνεται με τη βοήθεια σιγαστήρων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο εσωτερικό του σωλήνα εξαγωγής, με σκοπό την τροποποίηση του πίσω μέρους προς όφελος, την μείωση του θορύβου. Μία από τις πιο διαδεδομένες διατάξεις είναι η κατασκευή του πίσω μέρους του ακροφυσίου εξαγωγής σε σχήμα δέσμης σωλήνων (αυλών Εικ. 28) μικρής διαμέτρου. Οι σιγαστήρες του σωλήνα εξαγωγής βρίσκουν εφαρμογή μόνο στους απλούς στροβιλοκινητήρες, σε αντίθεση, στους στροβιλοκινητήρες διπλής ροής αρκεί η ανάμειξη με τη ψυχρή ροή έτσι ώστε να επιτύχει μικρή ταχύτητα εκτόξευσης. Από την άλλη πλευρά στα υπερηχητικά αεροπλάνα πολιτικής αεροπορίας, η μείωση του θορύβου της δέσμης επιτυγχάνεται με αύξηση της διατομής του ακροφυσίου κατά την απογείωση, πράγμα που ελαττώνει την ταχύτητα εκτόξευσης.

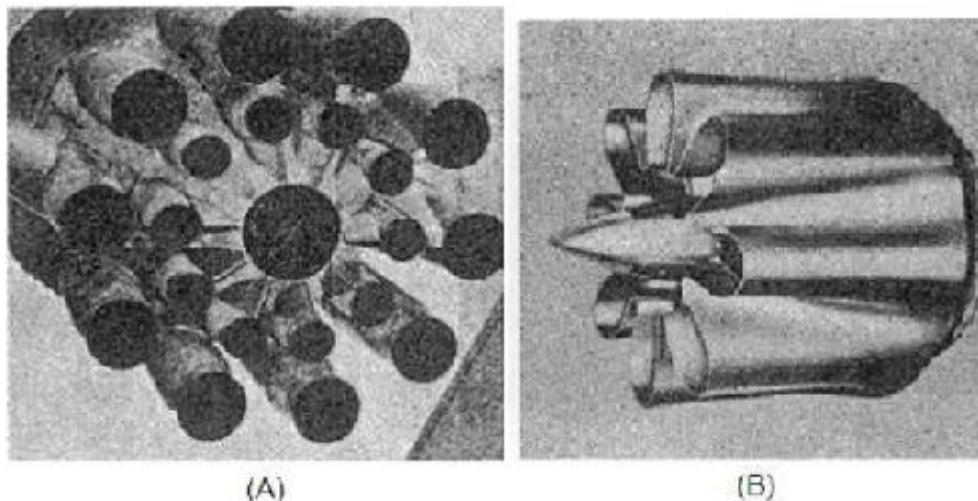


Εικόνα 28- Εφαρμογή Ηχομονωτικής Επένδυσης

Ο θόρυβος ο οποίος οφείλεται στην ταχύτητα είναι ανάλογος προς την ταχύτητα υψωμένη σε δύναμη εις την 6η. σαν τρανταχτό παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε την περίπτωση του αεροσκάφους τύπου CONCORD στο οποίο η αύξηση της διατομής επιτυγχάνεται ανοίγοντας στο μέγιστο «βλέφαρα» εγκατεστημένα στο αποκλίνον μέρος του δευτερεύοντος ακροφυσίου. Οι εσωτερικοί θόρυβοι που παράγονται από τους ανεμιστήρες, συμπιεστές και στροβίλους μπορούν να μειωθούν με κατάλληλη

αεροδυναμική μελέτη των διαφόρων βαθμίδων (θέση των πτερυγίων, αποστάσεις μεταξύ των σταθερών και κινουμένων βαθμίδων κτλ.).

Όμως η πιο αποτελεσματική μέθοδος μείωσης θορύβου οφειλόμενη στην ταχύτητα, είναι η επικάλυψη των εσωτερικών τοιχωμάτων του διαύλου της εισόδου του αέρα και του διαύλου εξαγωγής με ηχομονωτικές επενδύσεις και γενικότερα με πορώδη υλικά, όπως υφάσματα από ίνες γυαλιού ή μεταλλικές ίνες και πλάκες κυψελοειδούς κατασκευής. Στον κινητήρα Όλυμπος του CONCORD ένας εσωτερικός θόρυβος που προέρχεται από τον στρόβιλο υπερಿಸχύει του θορύβου της δέσμης κατά τις υπερηχητικές ταχύτητες.



Εικόνα 29- Πολλαπλοί Αγωγοί Εξαγωγής Για Τη Μείωση Του Θορύβου

Εκτός από τις προαναφερθείσες μεθόδους, αξίζει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια της έρευνας και της συνεχούς βελτίωσης, η Γαλλική εταιρεία “SNECMA” έχει προχωρήσει στην μελέτη για κατασκευή αναδιπλούμενων σιγαστήρων, των οποίων η εφαρμογή συνίσταται μέσα στην εισαγωγή με την μορφή δέσμης μηχανικών εμποδίων. Για την ώρα η προσπάθεια αυτή έχει ευοδωθεί στα αεροσκάφη υποηχητικού τύπου με επίτευξη μείωσης θορύβου της τάξης του 25% με τιμές να κυμαίνονται στα 90 dB κατά την διάρκεια της διαδικασίας απογείωσης και προσγείωσης, σε σχέση πάντα με τα αεριωθούμενα 1ης γενιάς. Στο ίδιο πλαίσιο αξίζει να αναφερθεί ότι η NASA έχει σε εξέλιξη ένα πρόγραμμα στροβιλοκινητήρα χαμηλού θορύβου (Quiet Engine Program).

Για τη μέτρηση της στάθμης των διαφόρων θορύβων και της αποτελεσματικότητας των μεθόδων μείωσής τους, χρησιμοποιούνται αντηχητικοί θάλαμοι, των οποίων τα τοιχώματα έχουν επενδυθεί με υλικά που απορροφούν τον θόρυβο, κατά τρόπο ώστε οι μετρήσεις να μην επηρεάζονται από ανακλάσεις επάνω στα τοιχώματα. Στη Γαλλία το κέντρο δοκιμής προωθητικών συστημάτων διαθέτει για τη μελέτη των θορύβων της δέσμης έναν τέτοιο θάλαμο, ο οποίος είναι αν-ηχητικός (ή ηχομονωτικός) με προσέγγιση ακρίβειας 1 dB. Τέλος, δοκιμές εκτελούνται επίσης με ολοκληρωμένους κινητήρες σε εγκαταστάσεις στο ύπαιθρο, όπου ο κινητήρας είναι τοποθετημένος σε κάποια απόσταση επάνω από μια επιφάνεια από σκυροδέματος, ή οποία ανακλά πλήρως τα ακουστικά κύματα και επιτρέπει την εκτίμηση του θορύβου στον ελεύθερο χώρο.

1.1.17. Καύσιμο κινητήρων αερίωσης

Η πρώτη καύσιμη ύλη που χρησιμοποιήθηκε στους στροβιλοκινητήρες κατά την ανακάλυψη τους και το οποίο παραμένει μέχρι και σήμερα η βάση κάθε τύπου καυσίμου κινητήρων αερίωσης είναι η κηροζίνη. Η κηροζίνη περιγράφεται ως ένας υγρός υδρογονάνθρακας παρόμοιος με τη βενζίνη που παρουσιάζει μερικές σημαντικές διαφορές στις φυσικές του ιδιότητες. Πηγή παραγωγής του είναι το αργό πετρέλαιο το οποίο σε συγκεκριμένο φάσμα θερμοκρασιών (150-265 °C) έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή της κηροζίνης. Σε αντίθεση, η απλή βενζίνη παράγεται σε πολύ μικρότερες θερμοκρασίες της τάξεως των (25 – 150 °C). Αποτέλεσμα αυτής της θερμοκρασιακής διαφοράς κατά την απόσταξη είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα ως προς την χρήση της στους στροβιλοκινητήρες, προσδίδοντας της τις ακόλουθες φυσικές ιδιότητες:

- *το υψηλότερο σημείο ανάφλεξης,*
- *υψηλότερο σημείο πήξεως,*
- *και το μεγαλύτερο ειδικό βάρος.*

το πρώτο από τα τρία βασικά χαρακτηριστικά εξασφαλίζει μεγαλύτερη ασφάλεια σε περίπτωση ατυχήματος, με βασικό μειονέκτημα στον αντίποδα, την δυσκολία στην ανάφλεξη κατά την λειτουργία, φαινόμενο που είναι ορατό από έναν απλό παρατηρητή με την παρουσία καπνού κατά την έξοδο των καυσαερίων.

Το δεύτερο χαρακτηριστικό κατατάσσεται και αυτό στα μειονεκτήματα της χρήσης της κηροζίνης, κυρίως κατά την διάρκεια της πτήσης σε μεγάλα υψόμετρα αλλά και σε συνθήκες πολύ χαμηλών θερμοκρασιών του περιβάλλοντος, αλλά αντιμετωπίζεται με συστήματα προθέρμανσης του καυσίμου για την αποφυγή διακοπής τροφοδοσίας κατά την διάρκεια της πτήσης με αποτέλεσμα την διακοπή λειτουργίας του κινητήρα. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν επίσης και σαν επίλυση του πρώτου χαρακτηριστικού που αφορά το υψηλό σημείο ανάφλεξης.

Και τέλος το τρίτο χαρακτηριστικό αυτού του καυσίμου λογίζεται σαν καθαρό πλεονέκτημα μιας και σε μια δεξαμενή συγκεκριμένης χωρητικότητας μπορεί να αποθηκευτεί περισσότερη ποσότητα καυσίμου συγκριτικά με άλλα καύσιμα μικρότερου ειδικού βάρους. Επιπρόσθετα, συγκριτικά πάντα με άλλα καύσιμα και δεδομένου ότι η κηροζίνη διαθέτει μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη, αυτόματα προστίθεται 10% επιπλέον χρόνος καύσης, ένας λόγος ακόμα που την καθιστά καταλληλότερο σε σχέση με άλλα.

1.1.18. Υλικά κατασκευής στροβιλοκινητήρων.

Η συνεχής ανάγκη για βελτίωση της απόδοσης των στροβιλοκινητήρων αυτόματα συνεπάγεται και αύξηση των θερμοκρασιών λειτουργίας. Η επίτευξη αυτού του στόχου δεν θα μπορούσε να υλοποιηθεί αν ταυτόχρονα δεν υπήρχε και η δημιουργία κραμάτων τα οποία θα συντελούσαν, στην κατασκευή εξαρτημάτων ικανά σε αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας των στροβιλοκινητήρων. Τα τμήματα του κινητήρα που υφίστανται τις μεγαλύτερες καταπονήσεις είναι τα στρεφόμενα και από αυτά, πιο συγκεκριμένα τα περύγια του στροβίλου τα οποία υπόκεινται στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Τα εξαρτήματα αυτά χρειάζεται να αντιστέκονται στην οξείδωση, να διατηρούν τη μηχανική τους αντοχή παρά την κόπωση που υφίστανται, να αποφεύγουν

την ψαθυροποίηση (σπάσιμο λόγω προχωρημένης ψαθυρότητας) και να έχουν αξιόλογες ιδιότητες θερμικής και μηχανικής κατεργασίας για τη βιομηχανία.

Από νωρίς διαπιστώθηκε μέσα από μελέτες και πειράματα, ότι τα χρωμονικελιούχα κράματα διαθέτουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με αυτά του χάλυβα και για αυτόν το λόγο η χρήση κραμάτων με περιεκτικότητα 80% νικέλιο και 20% χρώμιο έγινε ευρέως διαδεδομένη.

Βελτιώσεις των κραμάτων αυτών επέτρεψαν την αύξηση των ανωτάτων θερμοκρασιών του αερίου 10 °C κατά μέσον όρο κάθε χρόνο, αλλά τώρα πια φθάσαμε σε μια οριακή κατάσταση που δεν επιδέχεται άλλες βελτιώσεις. Τα χυτά υλικά, σε σύγκριση με τα σφυρήλατα, έχουν μετατοπίσει το όριο θερμοκρασίας στους 1025 °C, αλλά πέρα από την τιμή αυτή η επιτυχής χρησιμοποίησή τους γίνεται πάντα σε συνδυασμό με ψύξη ή χρήση και άλλων πυρίμαχων υλικών. Η χρήση συστημάτων ψύξης επέτρεψε την αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του αερίου κατά 200 °C ακόμη, χωρίς ανύψωση της θερμοκρασίας του μετάλλου. Τα εξαρτήματα από κράματα μολυβδαινίου, βολφραμίου και νιόβιου θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε ακόμη υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες, αλλά δεν έχουν ακόμη επιλυθεί όλα τα προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση τους.

Επιπλέον στην κατασκευή των συμπιεστών και των ανεμιστήρων, προκειμένου να μειωθεί το βάρος, έγινε αντικατάσταση των χαλύβων με κράματα τιτανίου ή ακόμη και με σύνθετα υλικά με βάση ρητίνες και ενίσχυση από ίνες άνθρακα ή βορίου. Τέτοια είναι η περίπτωση του **Hyfil**, υλικού που μελέτησε ή εταιρεία Rolls-Royce για τα πτερύγια ανεμιστήρα, του οποίου η εξέλιξη συνεχίζεται, ιδιαίτερα στο θέμα της αντοχής σε κρούση. Υλικά του είδους αυτού θα πρέπει μελλοντικά να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή στροβιλοκινητήρων κατακόρυφης απογείωσης, στους οποίους ο λόγος της ώσης προς το βάρος είναι ένα από τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά, σημειωτέον ότι η καλύτερη τιμή του λόγου αυτού που έχει επιτευχθεί μέχρι και σήμερα είναι της τάξεως του 16 στο στροβιλοκινητήρα RB 162 της Rolls-Royce.

Παρότι τα παραγόμενα υπέρθερμα αέρια δεν προσκρούουν απευθείας στους δίσκους του στροβίλου, εντούτοις υπόκεινται σε θερμοκρασίες που φτάνουν ή και ξεπερνούν τους 625 °C στο περιφερειακό τους χείλος, ενώ οι πλήμνες τους μπορούν να έχουν θερμοκρασίες 450 °C περίπου χαμηλότερες με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ισχυρών τάσεων. Για την αντιμετώπιση των τάσεων που αναπτύσσονται, οι δίσκοι κατασκευάζονται πάντοτε με τόννευση σφυρήλατου υλικού, και πιο κατάλληλα τέτοια υλικά θεωρούνται οι χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο και χρώμιο. Στην αντίπερα όχθη, αν και οι συμπιεστές βρίσκονται στο άκρο εισαγωγής αέρα του ρότορα, τα πτερύγια υπόκεινται σε όλο και μεγαλύτερες θερμοκρασίες, καθώς αυξάνουν η ταχύτητα πτήσης και ο λόγος συμπίεσης. Έτσι οι θερμοκρασίες μπορούν να φθάσουν μέχρι 400°C. Κανονικά για τα πτερύγια χρησιμοποιείται κράμα αλουμινίου, η αντοχή όμως του κράματος αυτού αρχίζει να μειώνεται για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 180°C και απαιτείται η αντικατάστασή του με χάλυβα για ορισμένα στάδια υψηλής πίεσης, με αρνητικό αποτέλεσμα την αύξηση του βάρους. Οι προσπάθειες που έγιναν για τη μείωση του βάρους, ειδικά των μεγαλύτερων πτερυγίων του ανεμιστήρα που χρησιμοποιούνται σήμερα, οδήγησαν στη χρησιμοποίηση τιτανίου καθώς επίσης και πειραματικών σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα. Και οι δύο αυτοί τρόποι είναι δαπανηροί, αλλά τίποτα δεν αποκλείει η εφαρμογή τους να γενικευθεί στο μέλλον.

1.1.19. Ρύθμιση λειτουργίας των στροβιλοκινητήρων

Στην επίτευξη της άριστης λειτουργίας και της μεγίστης απόδοσης ενός στροβιλοκινητήρα απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο έλεγχος ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων καθόλη την διάρκεια της λειτουργίας του κυρίως κατά την πτήση. Ιδιαίτερη σημασία, αυτό έχει για τους κινητήρες των υπερηχητικών αεροσκαφών, τα οποία διαθέτουν κώνο εισαγωγής και ακροφύσιο εξαγωγής καυσαερίων μεταβλητής γεωμετρίας. Για τον έλεγχο και την μέτρηση των παραμέτρων αυτών (θερμοκρασίες, ταχύτητες περιστροφής, πιέσεις) καθώς και την ρύθμιση των κινητήρων καταφεύγουμε σε ηλεκτρονικά σύνολα κυκλωμάτων τα οποία υπερτερούν σε σχέση με τα συνηθισμένα μηχανικά μέσα. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα έχουν μικρότερο βάρος και όγκο από ό,τι οι μηχανικές λύσεις και διευκολύνουν τη μεταβίβαση των σημάτων των μετρήσεων.

Ο κύριος προορισμός του ρυθμιστή είναι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του κινητήρα, δηλαδή η προσαρμογή του βαθμού εκτόνωσης του στροβίλου στην παροχή του καυσίμου. Για το σκοπό αυτό ο ρυθμιστής επενεργεί στη διατομή εξόδου του ακροφυσίου εξαγωγής, που ρυθμίζει τη μεταβολή των πιέσεων μέσα στον σωλήνα αυτόν και συνεπώς την τιμή της πίεσης εξαγωγής του στροβίλου. Πρέπει επίσης η θερμοκρασία στην εισαγωγή του στροβίλου να διατηρείται μέσα στα όρια που επιτρέπει η καλή συμπεριφορά των υλικών. Τέλος, ο ρυθμιστής εξασφαλίζει τη μεταβολή της διατομής του λαιμού του κώνου εισαγωγής, όταν η διατομή αυτή είναι μεταβλητή.

Μελλοντικές εξελίξεις

Η εξέλιξη των πτητικών μέσων, είτε αυτή αφορά το στρατιωτικό είτε το πολιτικό νηολόγιο δεν έχει φτάσει στα όρια της, βλέπουμε συνεχώς νέες τεχνολογίες να αναπτύσσονται και αυτό με την σειρά του δεν μπορεί να είναι διαφορετικό σε ότι αφορά τους στροβιλοκινητήρες. Πρωτίστως θα υπάρξει απαίτηση για αύξηση της ώσης-Έργου σε συνδυασμό με μείωση του βάρους και του μεγέθους, καθώς και η ικανότητα λειτουργίας σε μεγαλύτερες υπερηχητικές ταχύτητες και εν συνεχεία τουλάχιστον στο πολιτικό νηολόγιο που ο ανταγωνισμός είναι αυξημένος, μείωση του κόστους συντήρησης και κατανάλωσης σε καύσιμο.

Από τεχνικής απόψεως αυτό ισούται με βελτίωση όσον αφορά τον σχεδιασμό πάρα την μερική μετατροπή των είδη υπάρχοντων κινητήρων. Αυτό συμβαίνει διότι η πραγματική απόδοση πλησιάζει ολοένα την ιδανική του θεωρητικού κύκλου. Στην παρούσα φάση οι λόγοι συμπίεσης είναι της τάξης του 25:1 και πιθανολογείτε ότι θα αυξηθούν μέχρι και 40:1, ενώ αντίστοιχα οι λόγοι παροχέτευσης από 5:1 αναμένεται να φτάσουν έως και το διπλάσιο (10:1) σε συνδυασμό με αύξηση των ανώτατων θερμοκρασιών των αέριων από 1180 °C σε 1500 °C. Οι αλλαγές δεν σταματήσουν εκεί, καθώς όπως διαφαίνεται αλλαγές έστω και μικρότερου μεγέθους θα λάβουν και οι αποδόσεις των συμπιεστών, των στροβίλων και των συστημάτων καύσης. Απόρροια όλων των παραπάνω θα είναι η μειωμένη κατά 15% ειδική κατανάλωση καυσίμου και επομένως και η μείωση του ανηγμένου βάρους. Η μείωση του βάρους θα οφείλεται μερικώς και στη χρησιμοποίηση νέων συνθέτων, μη μεταλλικών υλικών. Μπορεί να προβλεφθεί η κατασκευή κινητήρων με ώση κατά 50% μεγαλύτερη από εκείνη των κινητήρων των αρχών της δεκαετίας του 1970, καθώς επίσης και κινητήρων κατάλληλων για λειτουργία σε ταχύτητες 3,5 φορές μεγαλύτερες από την ταχύτητα του ήχου. Σε πολλές περιπτώσεις η αναγκαιότητα μικροεπισκευών και συντήρησης θα εκτιμάται, σε ευρεία κλίμακα, βάσει αρχείου από ηλεκτρονικούς υπολογιστές και θα καθιερωθεί μια νέα αντίληψη για τη ζωή του

κινητήρα. Τελικά θα επιτευχθεί σημαντική μείωση της στάθμης των θορύβων με τη βοήθεια της αύξησης των λόγων παραχέτευσης και της εντατικής έρευνας.

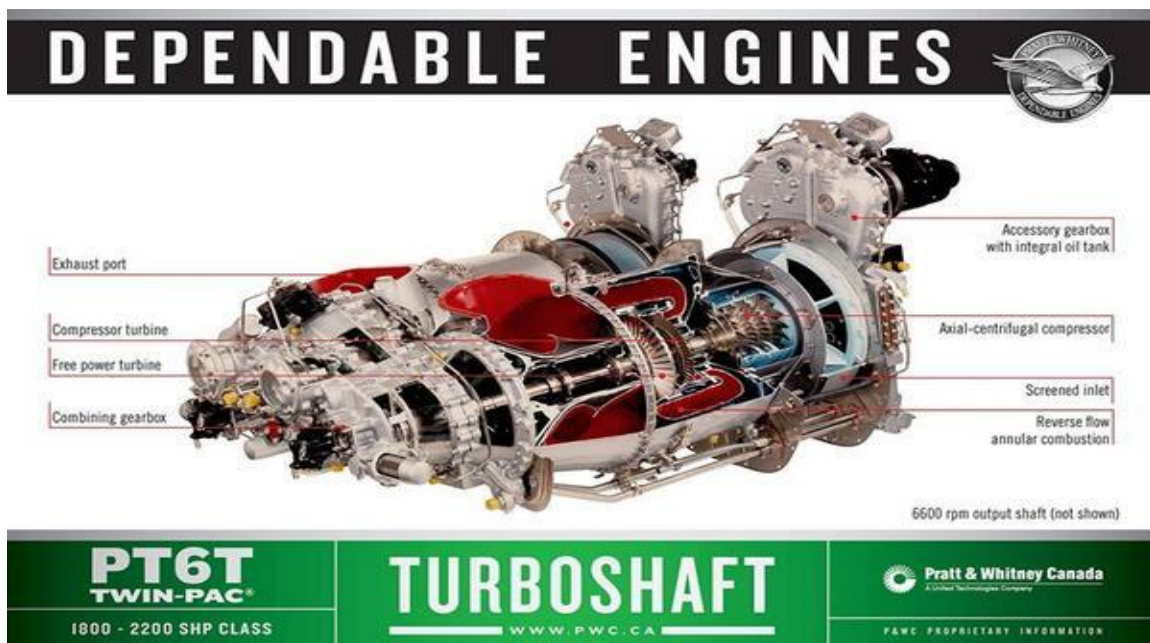
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ PRATT & WHITNEY PT6T-3B/-6

Σύντομη περιγραφή

Η κατασκευή του δίδυμου κινητήρα Twin-Pac® PT6T από την Pratt & Whitney, αποτέλεσε τεράστια επιτυχία στην παγκόσμια αγορά ελικοπτέρων, λόγω της υψηλής απόδοσης και της αξιοπιστίας του. Η γραμμή παραγωγής της Pratt & Whitney, έχει διανέμει πάνω από 6000 Τεμ. σε 12 διαφορετικές εκδόσεις με την ιπποδύναμη να ξεκινά από 1800 shp και να ανέρχεται μέχρι και τους 2000 shp. Σε αντιστοιχία ωρών πτήσης ισοδυναμούν σε 33 εκατομμύρια ωρες που πραγματοποιήθηκαν από ελικόπτερα που φέρουν τον εν λόγω κινητήρα με αποστολές διάσωσης, έκτακτης ιατρικής βοήθειας – διακομιδής θαλασσιά περίπολο και πολλά άλλα.

Οι κινητήρες αυτοί ενσωματώνουν τις πιο πρόσφατες τεχνολογίες όσον αφορά την κίνηση, την απόδοση, την αξιοπιστία, τη διάρκεια ζωής, την κατανάλωση καυσίμων και είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Η εφαρμογή των τελευταίων ερευνητικών αποτελεσμάτων στην αεροδυναμική και τις τεχνολογίες υλικών, έχουν επιτρέψει στους κινητήρες PT6T, να αποκτήσουν περισσότερη δύναμη χωρίς να αυξηθούν σημαντικά σε μέγεθος σε συνδυασμό με καινοτομίες που έχουν βελτιώσει σημαντικά τη λειτουργία τους, όπως η εισαγωγή του ηλεκτρονικού ελέγχου σε κάποιες εκδόσεις.

Η βασική διαμόρφωση ενός κινητήρα PT6T αποτελείται από δύο τμήματα παραγωγής ισχύος που συνδέονται με ένα κιβώτιο ταχυτήτων μέσω ενός συστήματος συμπλεκτών, επιτρέποντας τη ξεχωριστή και την ενιαία λειτουργία των κινητήρων. Οι διαμορφώσεις των δύο τμημάτων ισχύος είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές ενός συμβατικού αξονοστρόβιλου κινητήρα, δηλ. μια διαμόρφωση δύο-αξόνων που αποτελείται από έναν πολυβάθμιο συμπιεστή που οδηγείται από έναν στρόβιλο μίας βαθμίδας, τον στρόβιλο ισχύος στον άξονα παραγωγής και μια ανεξάρτητη σύζευξη αξόνων μέσω ενός μειωτήρα.



Εικόνα 30- Κινητήρας Pratt & Whitney Pt6t

Στους παρακάτω πίνακες (1 & 2) μεταφέραμε μέσα από την βιβλιογραφία της κατασκευάστριας εταιρίας τις διάφορες παραλλαγές καθώς και τα “γεωμετρικά χαρακτηριστικά” του κινητήρα PT6T της Pratt & Whitney:

PT6T-3	Βασικό μοντέλο παραγωγής
PT6T-3A	Όπως ο PT6T-3 αλλά κατασκευασμένος από αλουμίνιο (αντί για μαγνήσιο) το κιβώτιο ταχυτήτων. Δεν χρησιμοποιείται πλέον.
PT6T-3B	Όπως ο PT6T-3 εκτός από τη δυνατότητα λειτουργίας του ενός τμήματος παραγωγής ισχύος καθώς και ότι έχει τμήματα στροβίλου του κινητήρα PT6T-6.
PT6T-3BE	Όπως ο PT6T-3B με την απομάκρυνση της λειτουργίας διαμοίρασης ροπής και το κιβώτιο PT6T-3BE τοποθετημένο με δύο τμήματα παραγωγής ισχύος PT6T-3B.
PT6T-3BF	Όπως ο PT6T-3B με μικρές παραλλαγές.
PT6T-3BG	Όπως ο PT6T-3BE με μικρές παραλλαγές.
PT6T-3D	Όπως ο PT6T-3B εκτός από βελτιωμένης αντοχής καυτό τμήμα του κινητήρα που επιτυγχάνει αυξημένη αντοχή.
PT6T-3DE	Όπως ο PT6T-3D με μικρές παραλλαγές.
PT6T-3DF	Όπως ο PT6T-3DE με μικρές παραλλαγές.
PT6T-6	Όπως ο PT6T-3 με βελτιωμένα τμήματα κινητήρα.
PT6T-6B	Όπως ο PT6T-6 με την απομάκρυνση της λειτουργίας διαμοίρασης ροπής και το κιβώτιο PT6T-6B τοποθετημένο με δύο τμήματα παραγωγής ισχύος PT6T-6.
PT6T-9	Όπως ο PT6T-3DF εκτός από βελτιωμένης αντοχής καυτό τμήμα και σύστημα ηλεκτρονικού ελέγχου κινητήρα.
T400-C-400	Στρατιωτικός κινητήρας PT6T-3
T400-CP-401	Στρατιωτικός κινητήρας που χρησιμοποιείται στο VH-1N παραλλαγή του UH-1N.
T400-WV-402	Στρατιωτικός κινητήρας PT6T-6, συναρμολογημένος από την Pratt & Whitney Engine Services, Inc. στην West Virginia.

Πίνακας 1- παραλλαγές κινητήρα.

Τύπος	Ιπποδύναμη άξονα	Ταχύτητα άξονα (Περιστροφή/λεπτό)
PT6T-9 Series	2243	1855
PT6T-6 Series	1970	1875
PT6T-3 Series	1820~1920	1820~1875

Πίνακας 2-. Γεωμετρικά στοιχεία

Τύποι ελικοπτέρων που χρησιμοποιείται ο κινητήρας

Όπως προαναφέραμε, η επιτυχία του συγκεκριμένου αξονοστρόβιλου κινητήρα βασίστηκε στην υψηλή απόδοση και την αξιοπιστία του γιαυτο και η χρήση του από γνωστές κατασκευάστριες εταιρίες ελικοπτέρων ήταν ευρέως διαδεδομένη. Πέρα από την τεχνολογική του εξέλιξη μέσα στα χρόνια που πέρασαν ένας ακόμα λόγος της ανάπτυξης πολλών παραλλαγών του εν λόγω κινητήρα ήταν και η ανάγκη για προσαρμογή του στις ανάγκες πολλών κατασκευαστριών εταιριών ελικοπτέρων. Ο παρακάτω πίνακας (3) μας παρουσιάζει του τύπους των τύπων ελικοπτέρων που κάνουν χρήση του εν λόγω κινητήρα.

VARIANT	APPLICATION
PT6T-3	Leonardo Helicopters AB212 Sikorksy S-58T Bell Model 212
PT6T-3B	Bell Model 412/SP/HP/EP Leonardo Helicopters AB412 Bell Model 412/SP/HP/EP
PT6T-3BE	Leonardo Helicopters AB412
PT6T-3BF	Bell Model 412/SP/HP/EP
PT6T-3BG	Bell Model 412/SP/HP/EP Bell Model 412/SP/HP/EP Bell CFUTTH CH-146
PT6T-3D	Griffon Leonardo Helicopters AB412 Bell Model 412/SP/HP/EP
PT6T-3DF	Leonardo Helicopters AB412
PT6T-3G	Leonardo Helicopters AB412 Leonardo Helicopters AB212
PT6T-6	Leonardo Helicopters AB412
PT6T-9	Sikorsky S-58T Bell Model 412 EPI

Πίνακας 3- τύποι κινητήρα ανά ελικόπτερο.



Εικόνα 31- AGUSTA BELL 212



Εικόνα 32- SIKORSKY S58-T



Εικόνα 33- LEONARDO AB-412

Τεχνικά χαρακτηριστικά

2.1.1. Γενική περιγραφή

Ο κινητήρας που θα μελετήσουμε στην παρούσα πτυχιακή κατατάσσεται όπως προαναφέραμε στην κατηγορία των αξονοστρόβιλων κινητήρων και αποτελείται από δυο κυρίως τμήματα αξονοστρόβιλων κινητήρων οι οποίοι καταλήγουν σε ένα κοινό κιβώτιο μείωσης στροφών (μειωτήρας- reduction gear box) και εν συνεχεία καταλήγουν σε ένα κοινό άξονα που παραλαμβάνει την ισχύ των δυο κινητήρων και την αποδίδει στο στροφέιο. Τα κυρία τεχνικά χαρακτηριστικά του TWIN PACK κινητήρα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4- Τεχνικά χαρακτηριστικά PT6T

Ιπποδύναμη	1800 hp
Μήκος	66 ίντσες (1700 mm)
Πλάτος	44 ίντσες (1117 mm)
Ύψος	33 ίντσες (838 mm)
Καθαρό Βάρος	690 λίβρες (310 kg)
Μέγιστη Ταχύτητα N1	38100 rpm
Μέγιστη Ταχύτητα N2	33000 rpm
Μέγιστη Ταχύτητα Κυρίως Άξονα	6600 rpm
Φορά Περιστροφής	Δεξιόστροφη
Μέγιστη Παροχή	6,6 lbs/sec
Σχέση Συμπίεσης	7:1
Σχέση Μετάδοσης	1:5

Τα κύρια στοιχεία από τα οποία αποτελείται ο κινητήρας μαζί με τον σκοπό του κάθε ενός από αυτά αναφέρονται παρακάτω :

❖ **Βοηθητικό κιβώτιο ταχυτήτων :**

- έχει ως σκοπό την υποστήριξη των επιμέρους εξαρτημάτων του κινητήρα και παίρνει κίνηση από τον άξονα του συμπιεστή.

❖ **Συμπιεστής :**

- είναι τριών αξονικών βαθμίδων και μιας φυγοκεντρικής και παρέχει την απαιτούμενη παροχή αέρα υπό πίεση με σκοπό την επίτευξη της καύσης καθώς και την χρήση του αέρα αυτού στην διαδικασία της ψύξης των θερμών τμημάτων του κινητήρα.

❖ **Θάλαμος καύσης:**

- Έχει διάταξη δακτυλιοειδής αντίστροφης ροής με σκοπό την μείωση του βάρους του κινητήρα και
- διαθέτει την περιοχή καύσης του μείγματος αέρα- καυσίμου.

❖ **Στρόβιλος συμπιεστή:**

- είναι στρόβιλος μιας βαθμίδας με φορά περιστροφής αυτής του ρολογιού (δεξιόστροφη), είναι ανεξάρτητος από τον στρόβιλο που κινεί τον συμπιεστή και
- τέλος παρέχει την απαιτούμενη ισχύ για την περιστροφή του κυρίως άξονα μετάδοσης του κινητήρα.

❖ **Μειωτήρας- Reduction Gear Box:**

- διαθέτει ένα κιβώτιο με δυο βαθμίδες με δυνατότητα ελεύθερης περιστροφής
- ενσωματωμένο σύστημα μέτρησης της ροπής (Torque meter) το οποίο δίνει τα απαραίτητα στοιχεία για την αντιστάθμιση της ροπής από κάθε κινητήρα ,
- μειώνει την ταχύτητα περιστροφής του στρόβιλου σε ταχύτητα που είναι κατάλληλη για την κύρια μετάδοση κίνησης του ελικοπτερου
- παρέχει ισχύ στις δυο αντλίες των ελαιοψυκτικών και τέλος
- παρέχει ισχύ στους δυο ρυθμιστές των στρόβιλων ισχύος.

❖ **Σύστημα ρύθμισης καυσίμου:** Αυτό διαθέτει δυο ξεχωριστά συστήματα υδροπνευματικού ελέγχου και για το κάθε τμήμα :

- δύο θερμοαντήρες καυσίμου,
- δύο αντλίες καυσίμου,
- δύο αυτόματες μονάδες ελέγχου καυσίμου,
- δύο μηχανικές μονάδες ελέγχου καυσίμου,
- δύο ρυθμιστές ελέγχου στρόβιλου N2,
- μία κοινή μονάδα ελέγχου ροπής).

- Το σύστημα διαθέτει δυο είδη λειτουργίας το πρώτο αυτόματο που χρησιμοποιείται υπό κανονικές συνθήκες πτήσης και το δεύτερο μηχανικό για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης σε όλα τα παραπάνω προστίθενται επιπλέον:
- Ρυθμιστής λειτουργίας.
- Περιοριστής ροπής &
- Διαμεριστής ροπής (εκτός από τις περιπτώσεις 412 HP/EP και SB5227).

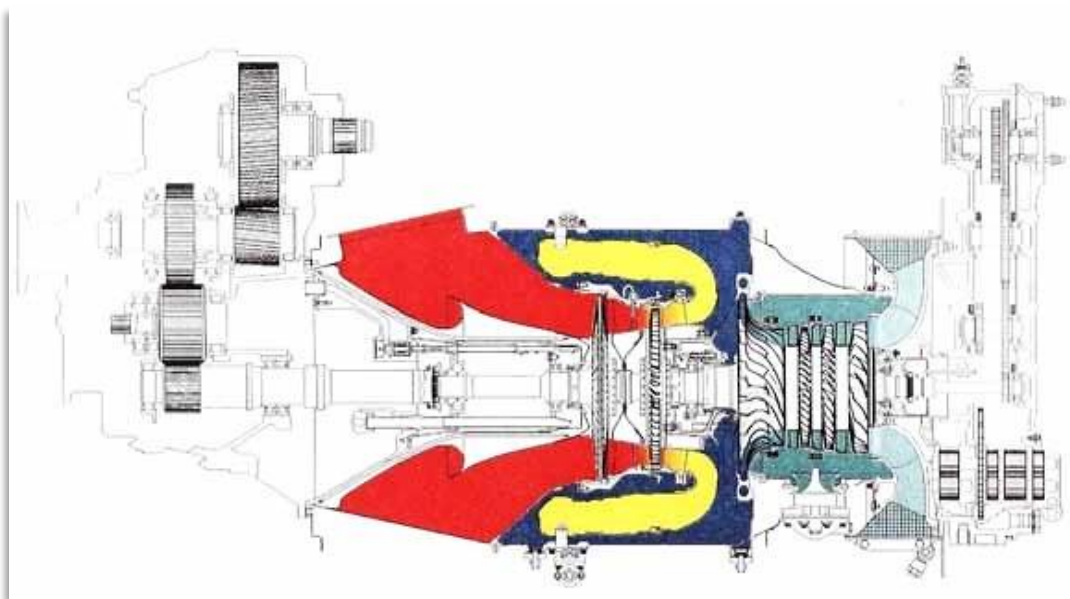
2.1.2. Κύρια λειτουργία

Ο κινητήρας PT6T (Twin-Pac®) είναι μία ελαφριά κατασκευή κινητήρα με ελεύθερο στρόβιλο. Ο άξονας παραγωγής ισχύος συνδέεται μέσω ενός διβάθμιου μειωτήρα. Ο κινητήρας αποτελείται από δύο μεγάλα τμήματα:

- Το τμήμα του άξονα του συμπιεστή – στρόβιλου.
- Το τμήμα του άξονα παραγωγής ισχύος.

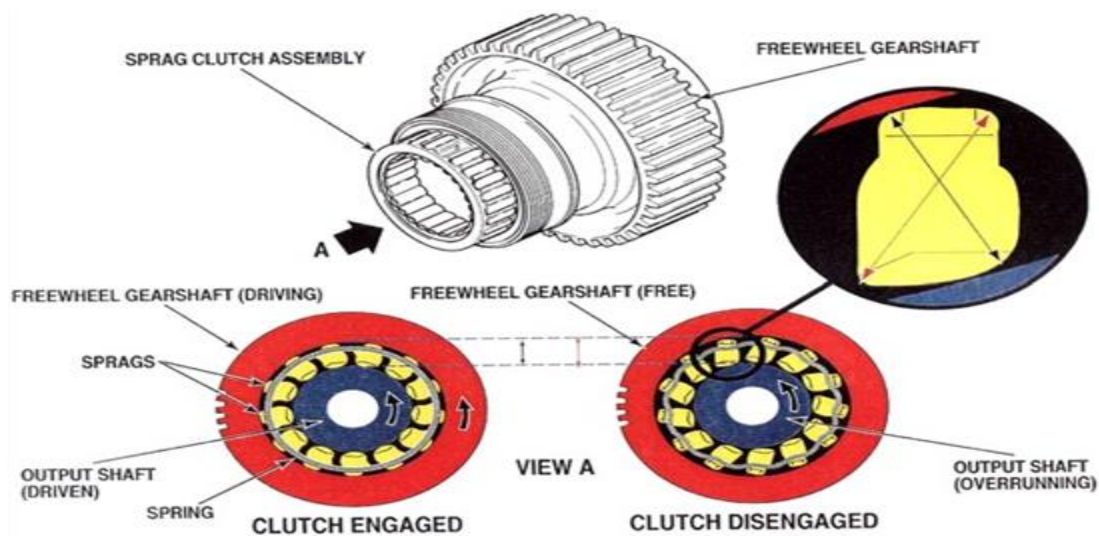
Το πρώτο τμήμα αποτελείται από έναν συμπιεστή και έναν στρόβιλο ενώ το δεύτερο τμήμα αποτελείται από έναν ρότορα που έχει τον στρόβιλο παραγωγής ισχύος και τον άξονα. Τα δύο τμήματα δεν είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους. Μπορούν να περιστραφούν σε διαφορετικές ταχύτητες και σε αντίθετες κατευθύνσεις.

Ο σχεδιασμός αυτός αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως κινητήρας ελεύθερου στρόβιλου. Επιτρέπει τον στρόβιλο ισχύος και τον ρότορα να περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα, ενώ το σύστημα ελέγχου καυσίμου προσαρμόζει κατάλληλα την ταχύτητα N1 του συμπιεστή, ανάλογα με τις ανάγκες.



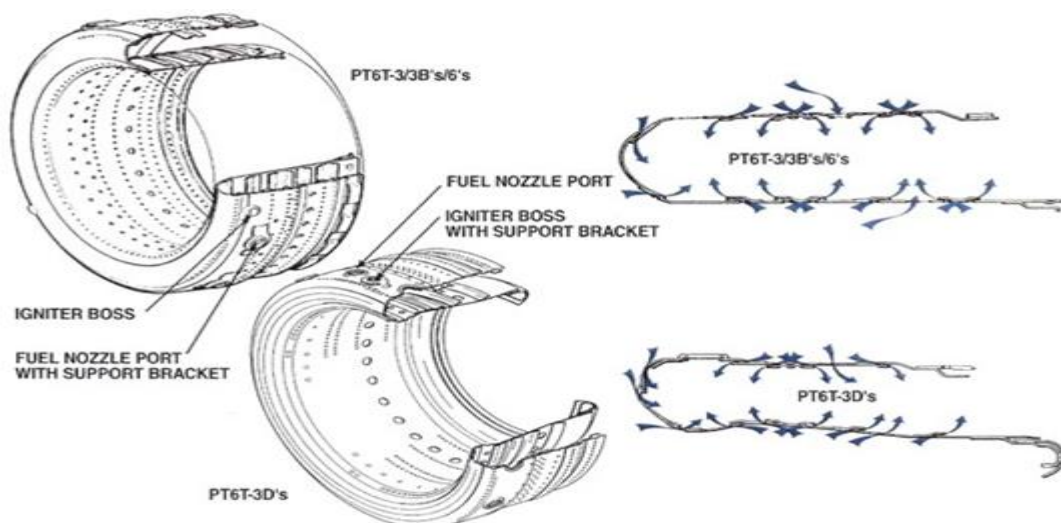
Εικόνα 34- Τομή Κινητήρα PT6T-3B-6

Κατά την διάρκεια της εκκίνησης η ροπή είναι μικρή μιας και το μόνο περιστρεφόμενο μέρος σε αυτή την φάση είναι ο ρότορας του συμπιεστή. Με την βοήθεια της γεννήτριας και με την σύμπλεξη του βοηθητικού κιβωτίου έχουμε την εκκίνηση του τμήματος ισχύος



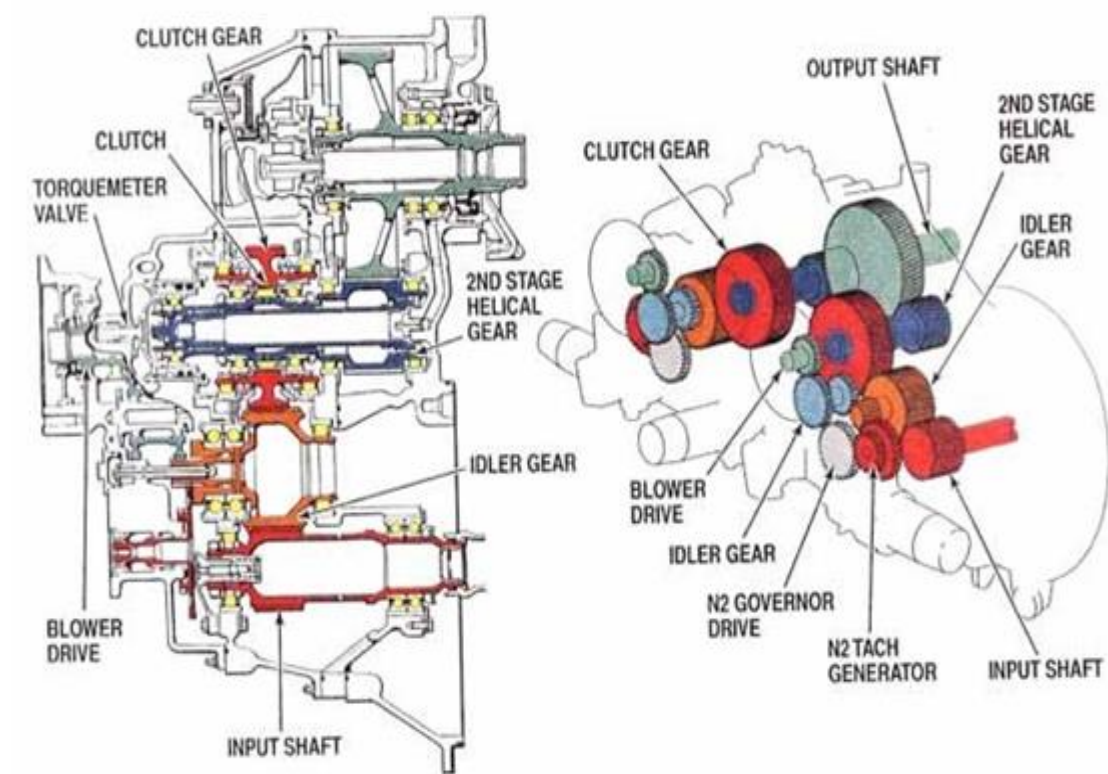
Εικόνα 35- Εξαρτήματα Σύμπλεξης – Αποσύμπλεξης Άξονα

Ο συμπιεστής αναρροφά αέρα στον κινητήρα μέσω ενός δακτυλιοειδούς θαλάμου (εισαγωγή). Η πίεση αυξάνεται κατά μήκος τριών αξονικών σταδίων και ενός φυγοκεντρικού στροφείου. Ο αέρας κατευθύνεται στο θάλαμο καύσης και εισάγεται μέσα σε αυτόν μέσω μικρών οπών και στην κατάλληλη ταχύτητα του συμπιεστή, όταν αυτό συμβεί το καύσιμο ψεκάζεται στο θάλαμο καύσης από 14 μικρά ακροφύσια (Fuel Nozzles) αναμειγνύεται με τον αέρα και από κει αναλαμβάνουν δράση οι δύο σπινθηριστήρες που βρίσκονται στο θάλαμο καύσης και αναφλέγουν το μίγμα αέρα-καυσίμου. Αποτέλεσμα όλων αυτών των διεργασιών είναι η παραγωγή καυσαερίων τα οποία με την σειρά τους οδηγούνται στον στρόβιλο .



Εικόνα 36- Θάλαμος καύσης κινητήρα PT6T

Έπειτα από αυτό, η λειτουργία των σπινθηριστών παύει μιας και η καύση λαμβάνει χώρα εκείνη την στιγμή και τα καυσαέρια αποκτούν ταχύτητα μέσω των πτερυγίων από τα οποία οδηγούνται και αναγκάζουν τον στρόβιλο να περιστρέφει. Η επιτάχυνση τους όμως δεν σταματά εκεί καθώς συνεχίζει μέσω της ροής τους μέσα από το δακτυλίδι του ελεύθερου στρόβιλου ο οποίος παρέχει κινητική (περιστροφική) ενέργεια στον κύριο στρόβιλο η οποία οδηγείται μέσω του μειωτήρα. Τα αέρια που εξέρχονται από τον ελεύθερο στρόβιλο αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα μέσω του αγωγού εξαγωγής καυσαερίων (tail pipe). Αποστολή του μειωτήρα (Εικ.37), από την στιγμή που θα “παραλάβει” την κινητική ενέργεια με μορφή περιστροφικής κίνησης είναι να προσαρμόσει τις στροφές του ελεύθερου στρόβιλου σε στροφές κατάλληλες για την λειτουργία του ελικοπτερου (6600rpm/min). Η λειτουργία του μειωτήρα έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων τριβών και κατ’ επέκταση μεγάλων θερμοκρασιών μιας και αποτελείται από σύστημα γραναζιών που περιστρέφονται. Για την αντιμετώπιση των δυο αυτών φαινομένων έχουν αναπτυχθεί συστήματα λίπανσης (Εικ.38) τα οποία παίρνουν κίνηση από τους επιμέρους άξονες στους οποίους είναι συνδεδεμένα τα γρανάζια του μειωτήρα. Το λιπαντικό τοποθετείται σε τρία ελαιοδοχεία, τα οποία πραγματοποιούν τη λίπανση και ψύξη όλα των συνδέσεων και των οδοντωτών τροχών.



Εικόνα 37- Σύστημα Μειωτήρα Άξονα Ισχύος.

1 Oil Level

2 Oil Filters

3 Pressure Regulating Valve & Pressure Adjusting Valve

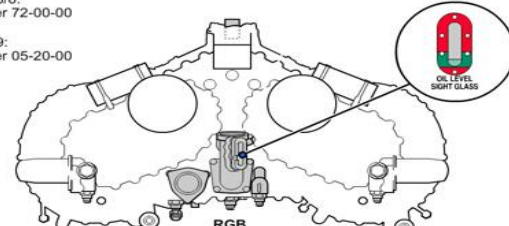
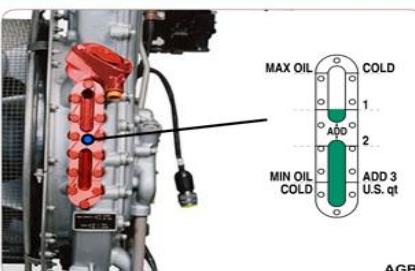
4 AGB/RGB Chip Detectors

5 Oil Type

Visual check of oil level at engine shutdown.

PT6T-3/6: Chapter 72-00-00

PT6T-9: Chapter 05-20-00

Click on each tab to display the maintenance task(s) associated with that component.

Visual check of oil level at engine shutdown.

PT6T-3/6: Chapter 72-00-00

PT6T-9: Chapter 05-20-00

Menu

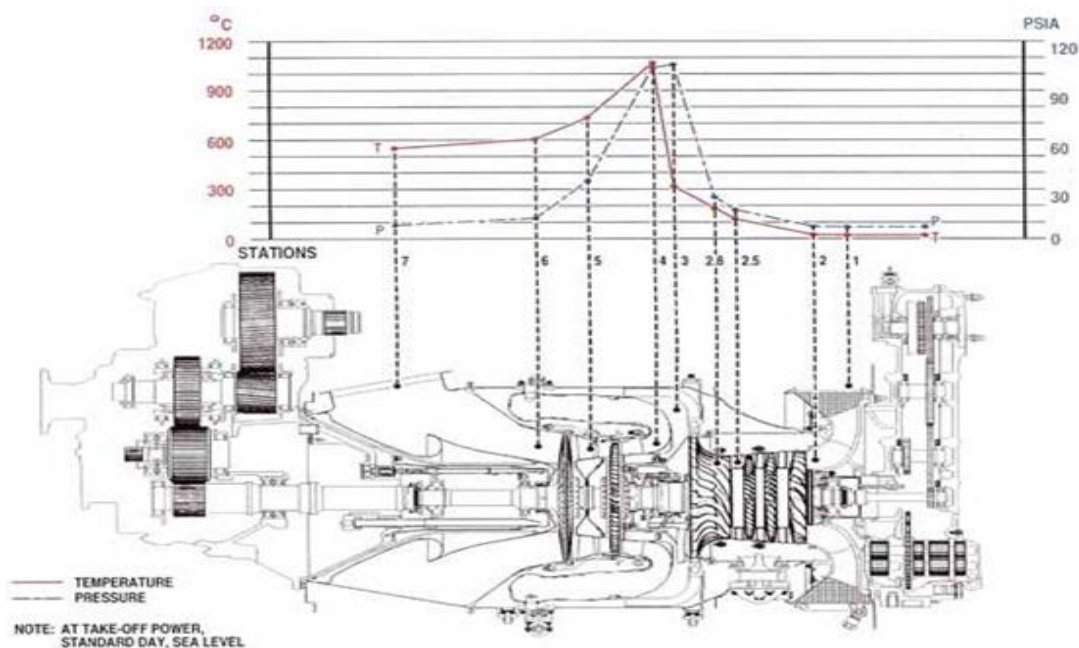
Copyright 2014 FlightSafety International, Inc.

304 00:12 Prev. 18 of 43 Next

Copyright Pratt & Whitney Canada Corp. Sample only – not to be used for training purposes.

Εικόνα 38- Σύστημα λίπανσης -ελαιοδοχεία.

Με την βοήθεια ενός υδροπνευματικού συστήματος ελέγχου καυσίμου το οποίο εγκαθίσταται στο κιβώτιο παρελκομένων ρυθμίζετε η παροχή καυσίμων στα ακροφύσια, σε συνάρτηση πάντα με τις απαιτήσεις ισχύος κατά την πτήση. Το σύστημα καυσίμου ελέγχει την ταχύτητα του κύριου στροφέα, μεταβάλλοντας την παραγόμενη ισχύ του κινητήρα, ως συνάρτηση της απαιτήσης φορτίου που τίθεται από τον πιλότο. Αντίστροφα δε πραγματοποιείται η διακοπή λειτουργίας του κινητήρα, δηλαδή, με την διακοπή του συστήματος παροχής καυσίμου. Από την έναρξη λειτουργίας του κινητήρα, η μεταβολή των πιέσεων και της θερμοκρασίας του αέρα και κατ' επέκταση των ταχυτήτων (πίνακας), ποικίλουν πράγμα που χαρακτηρίζει και τον θερμοδυναμικό κύκλο λειτουργίας του κινητήρα όπως βλέπουμε και στο Εικ. 39.



Εικόνα 39- Μεταβολές Πίεσης – Θερμοκρασίας Κατά Μήκος Του Κινητήρα.

Με τις μεταβολές σε πίεση & θερμοκρασία έχουμε και αλλαγή στις ταχύτητες περιστροφής σε διάφορα τμήματα του άξονα μετάδοσης ισχύς, παραδείγματα βλέπουμε στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 5 ταχύτητες και φορά περιστροφής αξόνων

	Ταχύτητα N2	Κατεύθυνση
Input Shaft	33,000	CCW
Idler Gear	22,338	CW
Clutch Gear	16,499	CCW
Output Shaft	6,600	CW
N2 Governor Drive	4.219	CW
Tacho-Generator Drive	4,219	CCW
Oil Cooler Blower Drive	9,269	CW

*CW: Clock Wise  **CCW: Counter Clock Wise 

2.1.3. Όργανα ελέγχου κινητήρα

Όλοι οι κινητήρες έχουν από κατασκευής μελετημένες θέσεις που σε αυτές τοποθετούνται είτε αισθητήρια ελέγχου και ένδειξης διάφορων μεταβλητών είτε συσκευές ελέγχου και χειρισμού του κινητήρα αλλά και των επιμέρους συσκευών που ολοκληρώνουν ένα μηχανικό σύνολο. Οι πληροφορίες των μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν είτε οι ενδείξεις της κατάστασης ή θέσης του κάθε εξαρτήματος περνάν σαν μορφή πληροφοριών προς τους χειριστές μέσω των οργάνων ελέγχου του κινητήρα. Τέτοια χαρακτηριστικά παραδείγματα πληροφοριών κατά την λειτουργία του κινητήρα είναι :

- Ροπή άξονα
- Θερμοκρασία στον εσωτερικό του στροβίλου (ITT)
- Θερμοκρασία καυσαερίου (EGT)
- Ταχύτητα στροφείου συμπιεστή (N1)
- Ταχύτητα ελεύθερου στροβίλου (N2)
- Πίεση και θερμοκρασία λιπαντικού
- Εντοπισμός μεταλλικών σωματιδίων (chip detector)

Όλα τα παραπάνω σήματα, στέλνονται ηλεκτρονικά στον πίνακα ελέγχου του πιλοτηρίου σαν και αυτόν που βλέπουμε στο Εικ.40

OIL PRESSURE	PART SEP OFF	TEST RESET		PART SEP OFF	OIL PRESSURE
ENGINE CHIP	GOV MAN	E N G 1	E N G 2	GOV MAN	ENGINE CHIP
FUEL VALVE	DC GENERATOR			DC GENERATOR	FUEL VALVE
No. 1 FUEL BOOST	No.1 GEN OVHT			No.2 GEN OVHT	No. 2 FUEL BOOST
No.1 FUEL TRANS	AFCS	C'BOX OIL PRESSURE	XMSN OIL PRESSURE		No.2 FUEL TRANS
BATTERY TEMP	ROTOR BRAKE	C'BOX OIL TEMP	XSMSN OIL TEMP	ROTOR BRAKE	BATTERY
No.1 FUEL FILTER		C'BOX CHIP	XMSN CHIP	CAUTION PANEL	No.2 FUEL FILTER
FUEL LOW	No.1 INVERTER	No.1 HYDRAULIC	No.2 HYDRAULIC	No.2 INVERTER	FUEL INTCON
	HEATER AIR LINE	EXTERNAL POWER	42/90 BOX CHIP	DOOR LOCK	FUEL XFEED
FDR FAIL					

Εικόνα 40- Οθόνη Προβολής Σημάτων- Πληροφοριών Ελέγχου Κινητήρα εντός πιλοτήριου



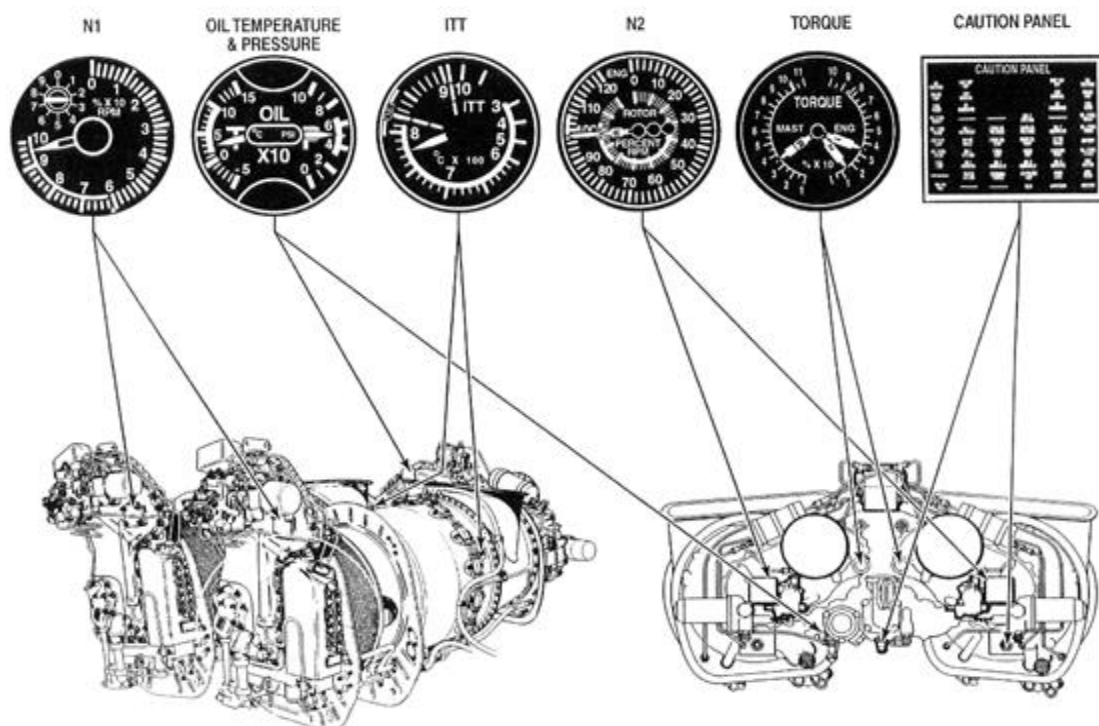
Εικόνα 41 Οθόνες Προβολής Σημάτων Ελέγχου Κινητήρα Στο Πιλοτήριο

Τα όργανα ελέγχου και παρακολούθησης της λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου κινητήρα βρίσκονται στην κονσόλα του θαλάμου διακυβέρνησης όπως βλέπουμε και από πάνω στο Εικ. 41. βοηθούν τον χειριστή να γνωρίζει τις ταχύτητες περιστροφής των στροφείων του κινητήρα και του έλικα, τις τιμές πίεσης και θερμοκρασίας σε διάφορα κρίσιμα σημεία του κινητήρα και των παρελκομένων και να έχει μία καλή

γενική άποψη της συμπεριφοράς του κινητήρα. Πρόκειται για συσκευές, οι οποίες συνήθως παρέχουν μετρήσεις και απαιτούν, ως εκ τούτου περιοδικό έλεγχο για την αξιοπιστία τους. Η ρύθμισή τους γίνεται με διαδικασίες που συνήθως παρέχονται από τον κατασκευαστή του αεροσκάφους.

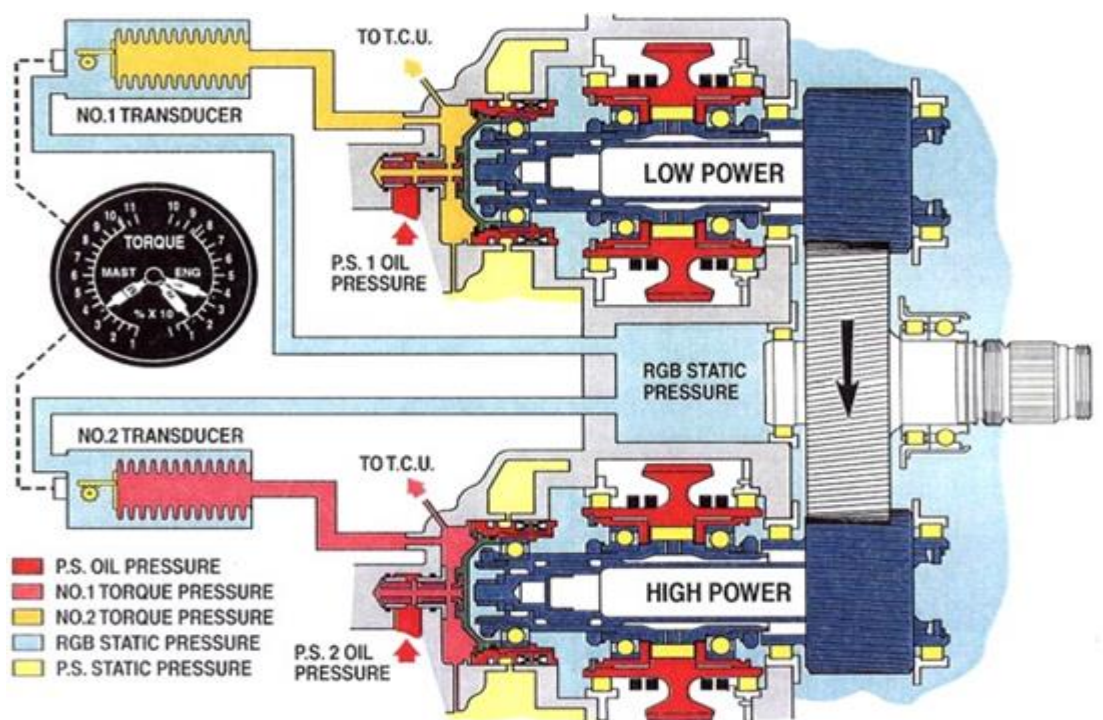
Τα κυριότερα όργανα ελέγχου τα οποία συναντάμε στο χειριστήριο του πιλοτηρίου ενός αεροσκάφους είναι τα ακόλουθα (Εικ. 42):

- *Στροφόμετρο (tachometer) .*
- *Ενδείκτες πίεσης και θερμοκρασίας λιπαντικού (Oil pressure & Oil temperature gages).*
- *Ενδείκτες θερμοκρασίας, παροχής και στάθμης καυσίμου (fuel temperature, fuel flow & fuel level gages).*
- *Ενδείκτης λόγου συμπίεσης κινητήρα (Engine Pressure Ratio indicator – σε στροβιλοαντιδραστήρες και στροβιλοανεμιστήρες).*
- *Όργανο μέτρησης θερμοκρασίας εξόδου καυσαερίων (Exhaust Gas Temperature) ή θερμοκρασίας εισόδου στροβίλου (Turbine Inlet Temperature).*
- *Ενδείκτης ροπής (Torquemeter indicator – σε αξονοστρόβιλους και ελικοστρόβιλους).*
- *Ενδείκτης κραδασμών (Vibration indicator).*



Εικόνα 42- Διάταξη Οργάνων Ελέγχου

Ακολουθεί επίσης σχεδιάγραμμα τομής κινητήρα με την θέση των εξαρτημάτων ελέγχου που μεταδίδουν τα σήματα – ένδειξης στα όργανα ελέγχου Εικ.43.



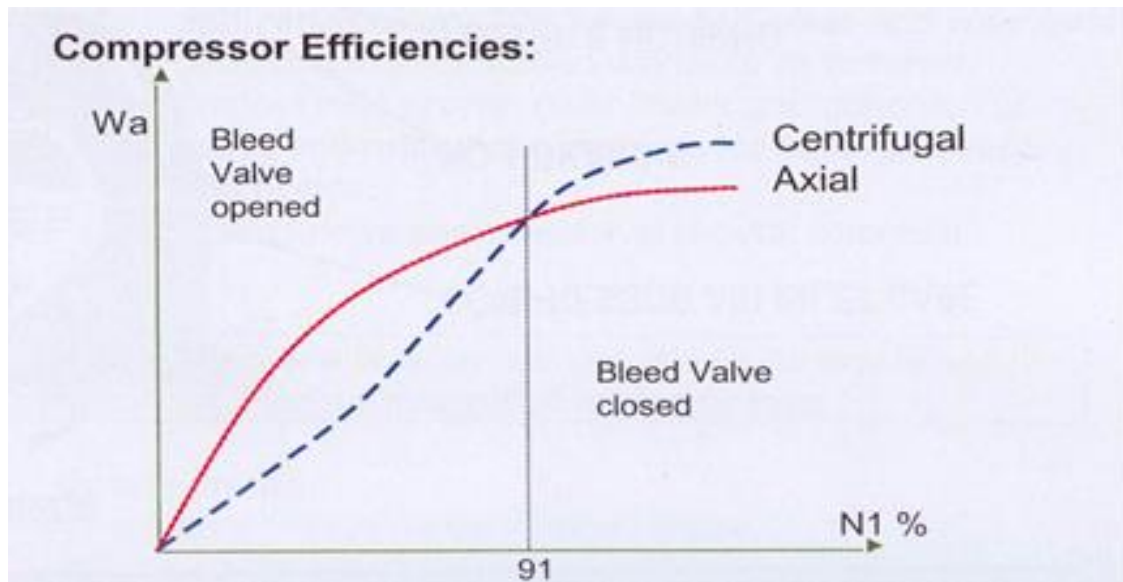
Εικόνα 43- μετρητές ελέγχου ροπής

2.1.4. Επιμέρους εξαρτήματα.

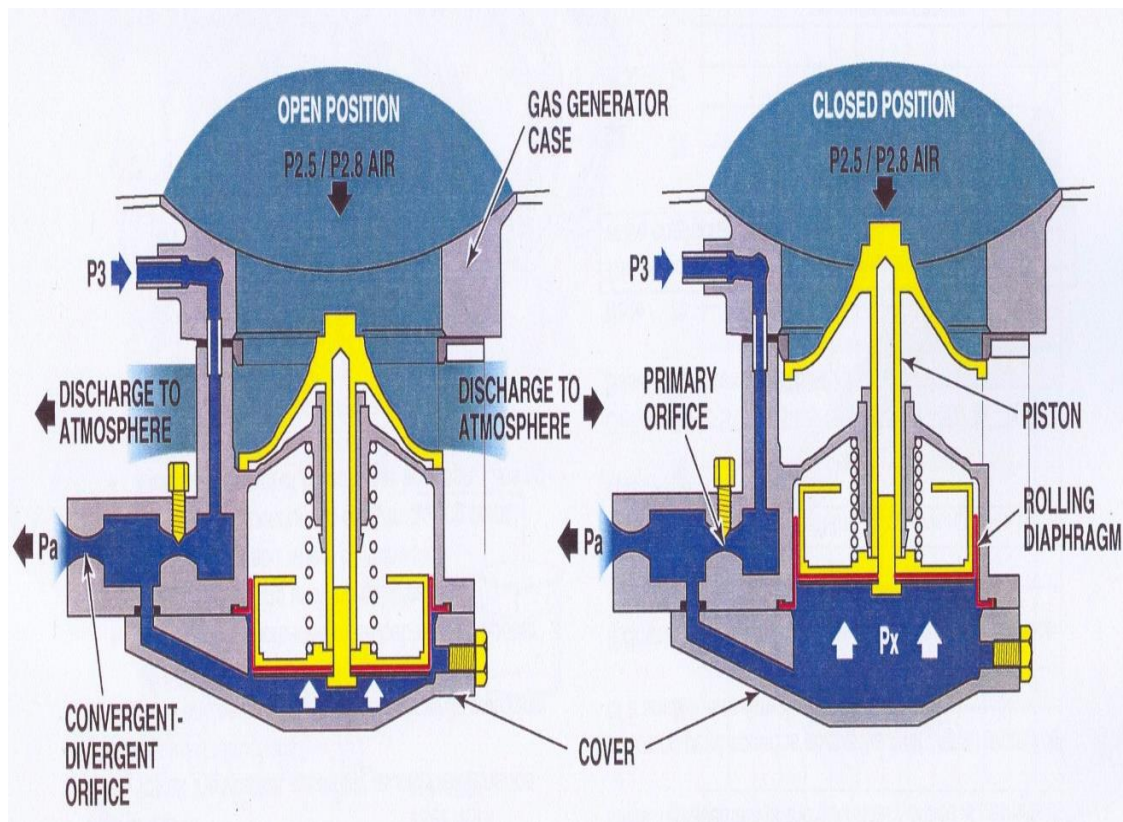
2.1.4.1. Βαλβίδα εξισορρόπησης- εξαέρωσης (Bleed Valve).

Είναι τοποθετημένη στο εμπρός και κάτω μέρος κάθε τμήματος κινητήρα και εδράζεται στον κορμό του συμπιεστή. Σκοπός της είναι να αποτρέπει τον συμπιεστή να «Στολάρει», δηλαδή να αδρανήσει και να σταματήσει την περιστροφή και την αναρρόφηση σε ποσοστό κάτω του 91% (Εικ.44) του άξονα N1(συμπιεστή) του λογο αντίθετων δυνάμεων που μπορεί να προέρχονται από την διαφορετική επάρκεια σε δυναμική μεταξύ αξονικών και φυγοκεντρικού συμπιεστή .

Αποτελείται (Εικ. 45) από ένα έμβολο το οποίο κινείται μέσα σε έναν οδηγό και έχει στην άκρη του μια βελονοειδής ακίδα η οποία έχει την δυνατότητα βάση ρύθμισης να κρατάει κλειστή την βαλβίδα αυτή μεταξύ 2.5~2.8 atm. Το έμβολο αυτό είναι διπλής ενέργειας και καθώς επιδρούν πάνω του δυο δυνάμεις μια αυτής του εμβόλου 3atm μένει κλειστό και μιας δεύτερης, αυτή της ενδιάμεσης πίεσης από τον συμπιεστή η οποία όταν ξεπεράσει τις 2.5~2.8 atm αρχίζει να ανοίγει σταδιακά με βάση την πίεση που ασκείτε με σκοπό να ισορροπεί – εξαερώνει το σύστημα.



Εικόνα 44- Διάγραμμα Πίεσεων Βαλβίδα Εξισορρόπησης- Εξαέρωσης (Bleed Valve).



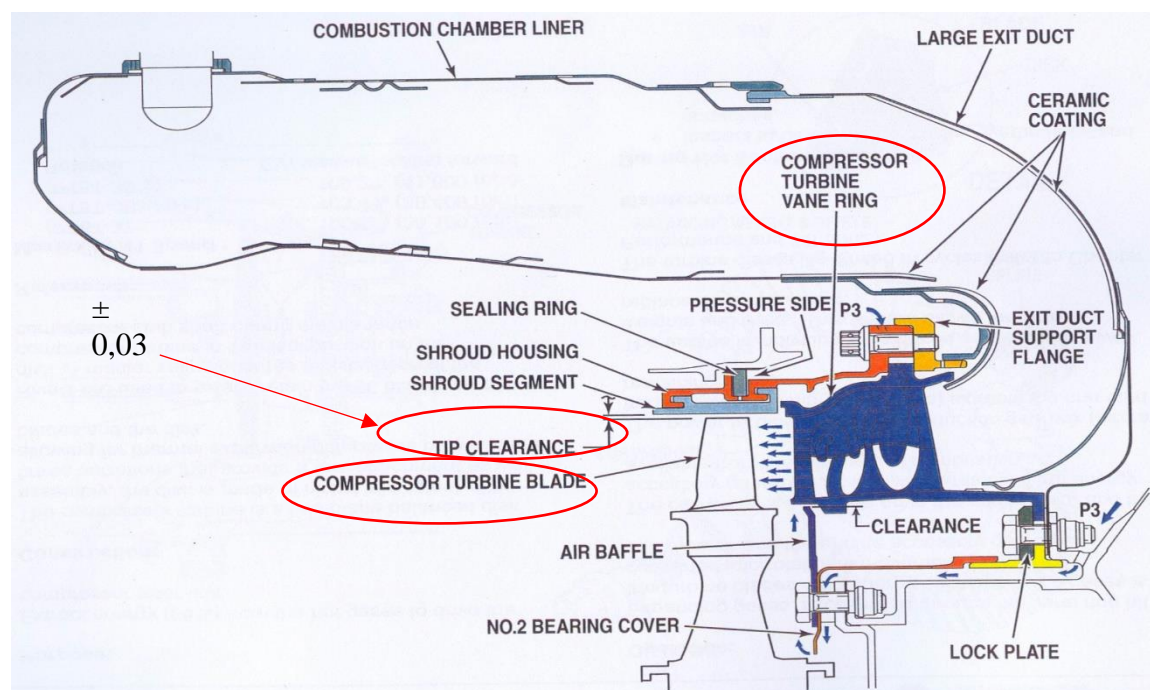
Εικόνα 45- Τομή Bleed Valve

2.1.4.2. Compressor Turbine Vane Ring

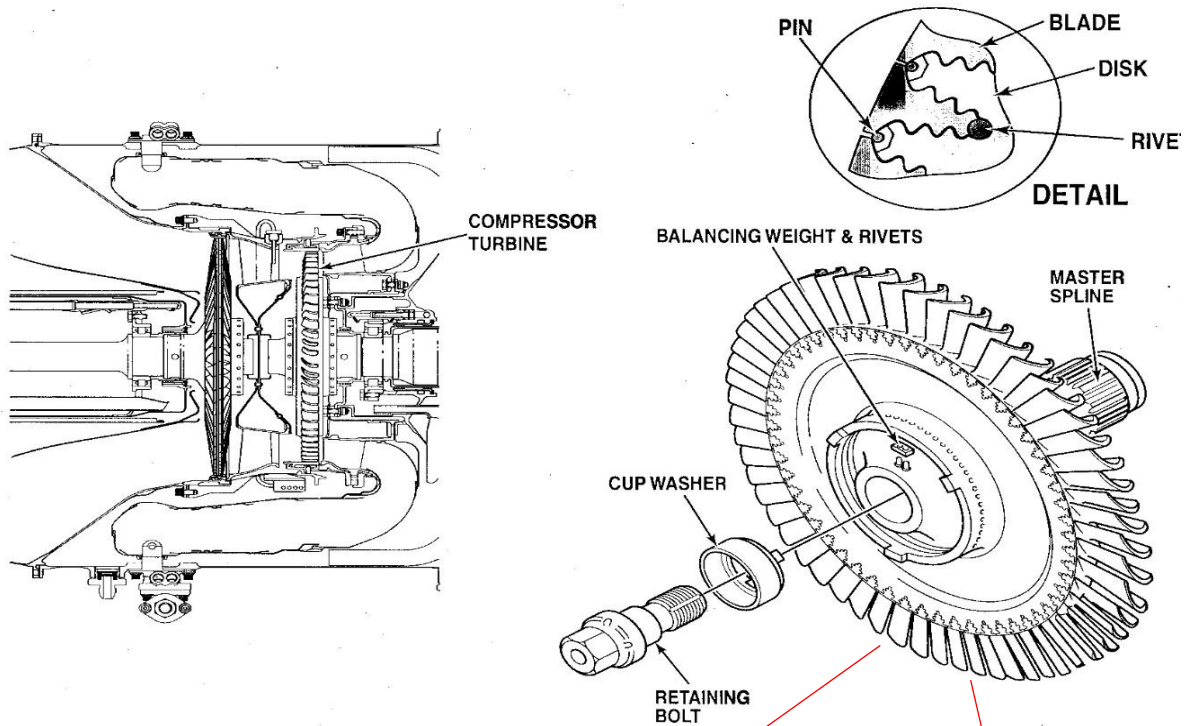
Ο δακτύλιος οδήγησης αέριων του συμπιεστή (Εικ.46) λαμβάνει θερμό αέρα από τον θάλαμο του συμπιεστή και με την βοήθεια των συγκλινόντων ακροπτερυγίων που διαθέτει, οδηγούν τα αέρια προς τον θάλαμο καύσης χαμηλώνοντας την ταχύτητα του και κρατώντας την πίεση ψηλά.

Ο δακτύλιος του πτερυγίου πιέζεται μεταξύ της μικρής εξόδου αγωγών και περιβλήματος του σκελετού. Οι λαιμοί στο δακτύλιο του πτερυγίου συναρμολογούνται σε εγκοπές (πχ τύπος χελιδονο-ουρας) στο περίβλημα για να αποφευχθεί περιστροφική κίνηση. Ο δακτύλιος των πτερυγίων (σταθερά) καθορίζει τη συνολική έκταση όλων των ανοιγμάτων μεταξύ των πτερυγίων που βρίσκονται στα άκρα (κινητά). Ένα μικρότερος δακτύλιος πτερυγίων (μικρότερος χώρος) επιταχύνει περισσότερο τον αέρα και ως εκ τούτου αυξάνει την ταχύτητα του στροβίλου του συμπιεστή (N1 Εικ. 47). Ένα υψηλότερο N1 παρέχει περισσότερο αέρα στον κινητήρα, περισσότερη ψύξη και χαμηλότερο ΙΤΤ. Ο δακτύλιος του πτερυγίου του στροβίλου του συμπιεστή υπόκειται σε ακραίες θερμοκρασίες εντός του κινητήρα. Η ψύξη του δακτυλίου του πτερυγίου θα προκαλέσει την αύξηση του ορίου ζωής αυτού (Εικ.48). Ο αέρας P_{3atm} που ταξιδεύει μέσα στο διάκενο των πτερυγίων τα κρατά σε θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτή των αέρια που ρέουν στο εξωτερικό. Μετά την ψύξη, ο αέρας αποβάλλεται μέσω της εξαγωγής των καυσαερίων.

Τα τμήματα διατίθενται σε διαφορετικές κατηγορίες (πάχος) για να ταιριάζουν (matching) σε διαφορετικές διαμέτρους του στροβίλου συμπιεστών και να διατηρούν την απαραίτητη απόσταση μεταξύ των πτερυγίων του αεροσυμπιεστή και των τμημάτων. Ο δακτύλιος του πτερυγίου αντικατάστασης πρέπει να έχει έναν αριθμό κλάσης πανομοιότυπο με την αρχική ανοχή δακτυλίου πτερυγίων $\pm 0,03$ (Εικ. 46).



Εικόνα 46- Βαλβίδα οδήγησης αέριων (Compressor Turbine Vane Ring)



Εικόνα 47- Συμπιεστής (Compressor Turbine)

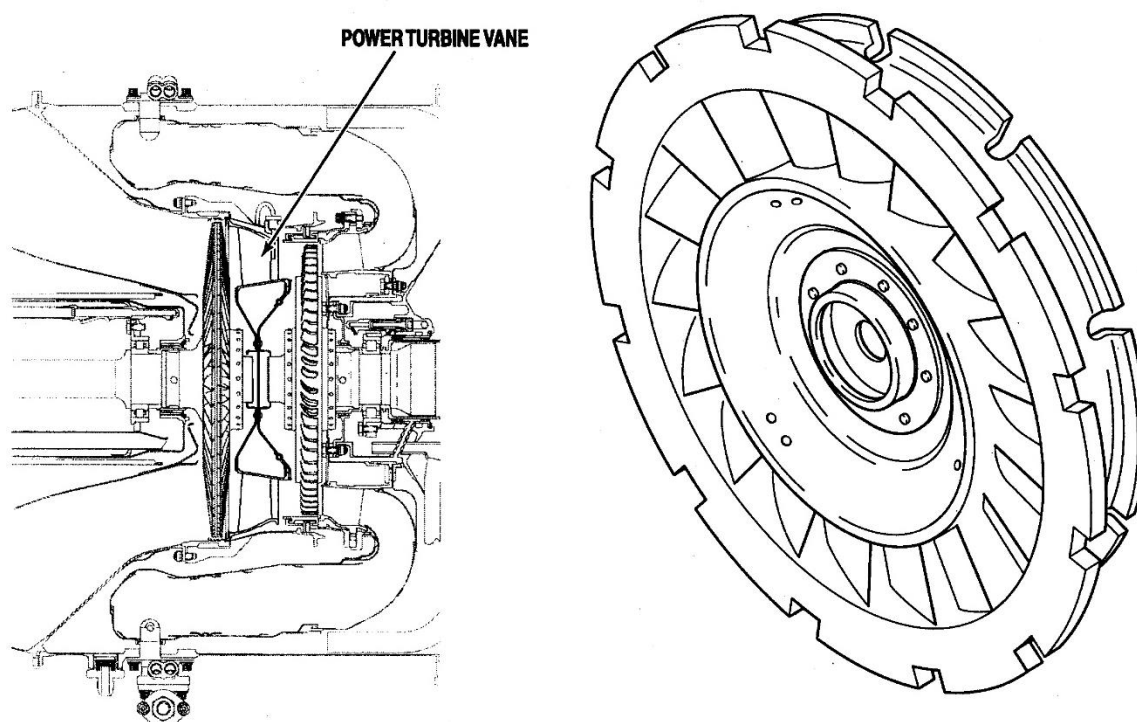


Εικόνα 48- Οξειδωση Πτερυγίων Λογο Υψηλών Θερμοκρασιών.

2.1.4.3. Power Turbine Vane Ring

Σκοπός του είναι η επίδραση της αλλαγής κλάσης δακτυλιδιών των πτερυγίων οδηγώντας απευθείας τα αέρια στον στρόβιλο ισχύος με συνέπεια την αλλαγή της στατικής πίεσης σε ταχύτητα. Το υλικό κατασκευής του, λογο υψηλών θερμοκρασιών είναι χύτευση κράματος νικελίου συγκρατούμενο από πριτσίνια στο κεντρικό διάφραγμα. Η περιοχή εξόδου (λαιμός) του δακτυλίου πτερυγίων είναι ταξινομημένη σε συγκεκριμένη διάταξη και υποστηρίζεται από το περίβλημα του στροβίλου ισχύος. Ένας ειδικός σχεδιασμός στα κέντρα των υποδοχών εμποδίζει τις κινήσεις του δακτυλίου των πτερυγίων.

Όσον αφορά την λειτουργία του, τα αέρια που εξέρχονται από τον στρόβιλο του συμπιεστή επιταχύνονται μέσω του δακτυλιδιού των πτερυγίων ισχύος του στροβίλου και προκαλούν την περιστροφή του στροβίλου ισχύος. Ο δακτύλιος των πτερυγίων κρατιέται στη θέση του με γλωττίδες τοποθετημένες στο περίβλημα του τουρμπίνας ισχύος. Ο εσωτερικός διαχωριστικός δακτύλιος κατευθύνει τον αέρα κοντά στους δίσκους στροβίλων ισχύος και συμπιεστή για ψύξη. Κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης του κινητήρα, η επιλογή της σωστής κατηγορίας δακτυλίου πτερυγίων (περιοχή) θα επιτρέψει τη βελτιστοποίηση (matching) των παραμέτρων N1 και ITT κατά συνέπεια και την απόδοση του κινητήρα Εικ.49.

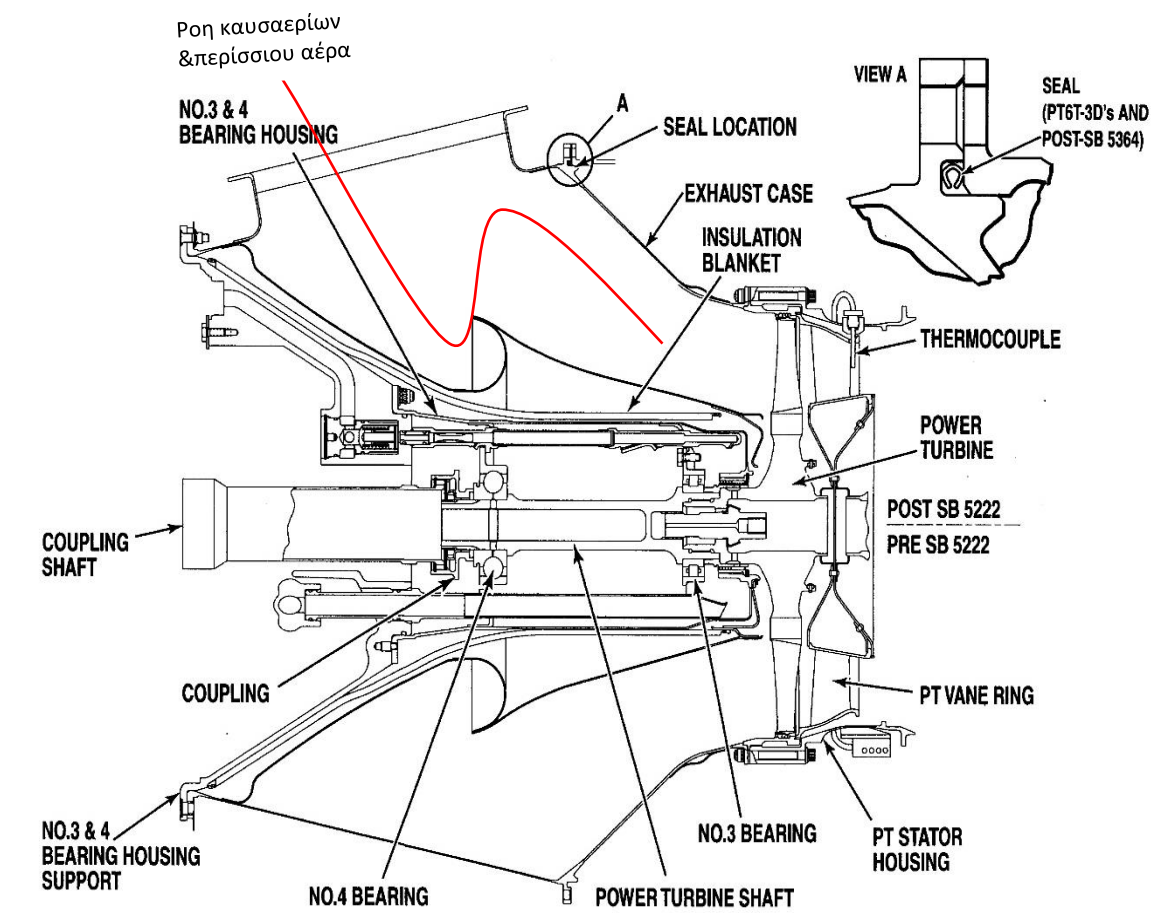


Εικόνα 49- Δακτύλιος οδήγησης αερίων στροβίλου ισχύος (Power Turbine Vane Ring)

2.1.4.4. Σύστημα Εξαγωγής Καυσαερίων (EXHAUST DUCT).

Οι κινητήρες στροβιλοσυμπιεστών της Pratt & Whitney προσφέρουν μια σειρά από διαμορφώσεις συστημάτων εξαγωγής. Ο διαχυτήρας "άλματος σκι" έχει εξελιχθεί από πολύ πρώιμους κυλίνδρους εξάτμισης PT6 για καλύτερη έλεγχο της διάχυσης και της ροής εξόδου του στροβίλου. Οι κινητήρες σειράς PT6C είναι εφοδιασμένοι με αγωγό συνεχούς σάρωσης (Εικ.50) και τα συστήματα εξαγωγής των καυσαερίων χαρακτηρίζονται είτε ως σχήματος C είτε ως σχήματος S ανάλογα με τη θέση του στροβίλου ισχύος. Η ροή των καυσαερίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εγχυτήρας για την οδήγηση της ροής καθαρισμού μέσω του IPS, εναλλακτικά, τα καυσαέρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εγχυτήρες για να εξασφαλιστεί επαρκής αερισμός και ψύξη του διαμερίσματος του κινητήρα.

Οι μέθοδοι αεροδυναμικής ανάλυσης έχουν εξελιχθεί δραματικά από τους πρώτους κινητήρες Pratt & Whitney στροβιλοσυμπιεστών. Σήμερα, οι γραμμές παραγωγής του συστήματος εξάτμισης σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας πλήρως τρισδιάστατες αναλύσεις ιξώδους ροής για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες πίεσης και να μεγιστοποιηθεί η ανάκτηση πίεσης. Η διαδικασία βελτιστοποίησης ολοκληρώνεται χωρίς την ανάγκη διεξαγωγής δοκιμών μιας και για ευκολία χρησιμοποιούνται τα ίδια αριθμητικά εργαλεία με αυτά για την παροχή καθοδήγησης στο σχεδιασμό συστημάτων εισαγωγής αέρα του ρότορα.

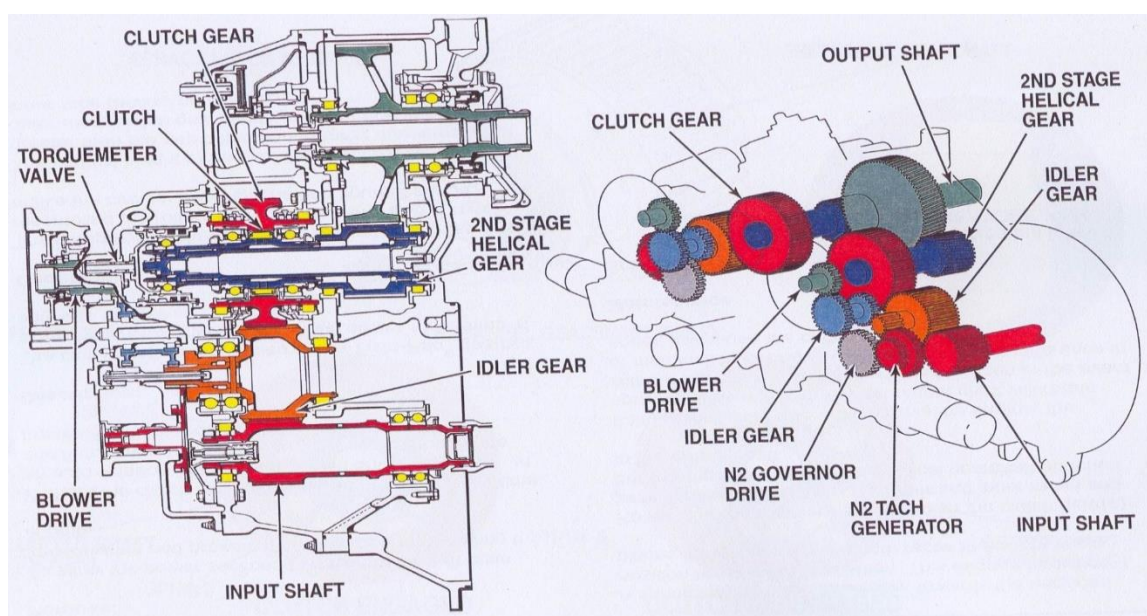


Εικόνα 50- Σύστημα Εξαγωγής Καυσαερίων (Exhaust Duct).

2.1.4.5. Μειωτήρας (Reduction Gear Box).

Αναφερθήκαμε στον μειωτήρα (Εικ. 51) και στο προηγούμενο κεφάλαιο αλλά έχει μεγάλη σημασία για τον κινητήρα μιας και κάνει την διανομή της ισχύος στον έλικα. Όπως αναφέραμε σκοπός του είναι η μείωση της ταχύτητας του στροβίλου ισχύος σε ταχύτητα κατάλληλη για τη λειτουργία του ελικοπτέρου. Αποτελείται από ένα σύστημα αλλαγής δύο ταχυτήτων με οδοντωτό τροχό, 5 περιβλήματα από κράμα μαγνησίου και 25 κύρια ρουλεμάν. Ακολουθεί εξωτερικός άξονας εξόδου για την παροχή κίνησης και έλεγχο από τον κυβερνήτη του στροβίλου ισχύος (N2).

Επιπλέον πάνω του συνδέονται και περνούν κίνηση επιμέρους εξάρτημα όπως οι γεννήτριες του ταχομέτρου N2, οι εγχυτήρες ψύξης ελαίου, το σύστημα μέτρησης ροπής (torque meter), 2 βάσεις υποστήριξης του κινητήρα (Engine mount) και τέλος 3 ή 5 ανιχνευτές τσιπ μετάλλου με σκοπό να προειδοποιούν για την ύπαρξη μεταλλικών αποβλήτων που μπορεί να προέρχονται από τα τριβόμενα μέρη του μειωτήρα και συνιστά άμεση παύση λειτουργίας και επισταμένος έλεγχος για την αφαίρεση τους αλλά και για το από που προήλθαν.



Εικόνα 51- Μειωτήρας Στροφών (Reduction Gear Box)

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Ποσοστό μείωσης στροφών 5:1
- Ταχύτητα εξωτ. Άξονα στο 100% 6.600 rpm
- Φορά περιστροφής δεξιόστροφη ↻
- Ταχύτητα Nr ρότορα 324 rpm
- Ποσοστό μείωσης στη μετάδοση 20,4:1

2.1.4.6. Κιβώτιο Κίνησης Παρελκομένων (Accessories Gear Box).

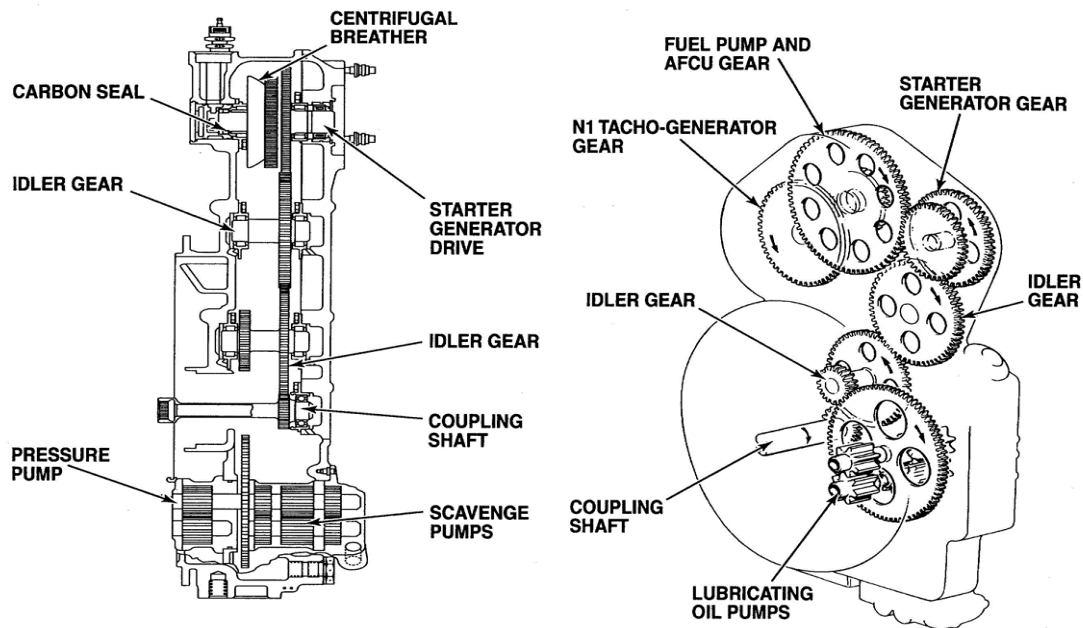
Από την ονομασία καταλαβαίνουμε ότι σχετίζεται με την μετάδοση κίνησης σε παρελκόμενες υποστηρικτικές συσκευές οι οποίες είναι απαραίτητες για την λειτουργία του ζεύγους κινητήρων μέσω ενός υποδεέστερου σε διαστάσεις κιβωτίου. Το κιβώτιο ταχυτήτων περιλαμβάνει ένα κάλυμμα από κράμα αλουμινίου και ένα περίβλημα που περιέχει τα διάφορα γρανάζια, άξονες και βάσεις τοποθέτησης που συνδέονται με τις αντλίες καυσίμου και λαδιού του κινητήρα, τη γεννήτρια στροβιλομέτρου, τη γεννήτρια εκκίνησης και τον φυγόκεντρο αναπνευστήρα. Το κάλυμμα στερεώνεται στο περίβλημα με καρφιά και το πλήρες συγκρότημα ασφαρίζεται στην θήκη εισόδου του συμπιεστή με πείρους στη φλάντζα G. Το κιβώτιο ταχυτήτων κινείται από τον συμπιεστή μέσω ενός άξονα ζεύξης ο οποίος εδράζεται σε ένα ρουλεμάν στο κάλυμμα. Τα υπόλοιπα του γρανάζια υποστηρίζονται από ρουλεμάν τύπου *“roller type”* στο κάλυμμα και στο περίβλημα. Το άνω μέρος του κιβωτίου ταχυτήτων περιλαμβάνει το γρανάζι κίνησης της γεννήτριας ταχυμέτρου, το γρανάζι της αντλίας καυσίμου και της μονάδας ελέγχου καυσίμου (FCU) καθώς και το γρανάζι φυγόκεντρικού αναπνευστήρα και γεννήτριας εκκίνησης. Αυτά τα γρανάζια κινούνται από τον άξονα ζεύξης μέσω δύο οδοντωτών τροχών. Το κάτω μέρος του κιβωτίου ταχυτήτων περιέχει τρεις αντλίες (scavenge) ελαίου και μία κύρια αντλία πίεσης, τα οποία κινούνται από τον κάτω κινητήρα και είναι τοποθετημένα σε έναν κοινό άξονα. Το περίβλημα περιέχει επίσης μια ενσωματωμένη δεξαμενή λαδιού. Οι σωλήνες και τα ανοίγματα πλήρωσης λαδιού είναι σε εμφανή σημεία με οπτικούς μετρητές στάθμης περιεχομένου και στις δύο πλευρές του κιβωτίου ταχυτήτων.

Οι εσωτερικές δίοδοι και οι σωλήνες πίεσης στέλνουν λαδί στο No. 1 που φέρει στο περίβλημα εισαγωγής και το λάδι επιστρέφεται με βαρύτητα στο κέλυφος του κιβωτίου ταχυτήτων. Το λάδι πίεσης για την τροφοδοσία του τμήματος και το κιβώτιο εισόδου μειωτήρα καθώς και το λάδι απορρόφησης μεταφέρονται μέσω εξωτερικών σωλήνων. Μια πτερωτή φυγόκεντρου αναπνευστήρα τοποθετημένη πάνω σε οδοντωτό άξονα κίνησης της γεννήτριας εκκίνησης, διαχωρίζει το λάδι από τον αέρα στο περίβλημα του κιβωτίου ταχυτήτων και εν συνεχεία ο αέρας εξαερώνεται από ένα πέρασμα με σπείρωμα (ανακουφιστικό) στην κορυφή του περιβλήματος.

Μια τσιμούχα στεγανοποίησης από άνθρακα στο άκρο του κιβωτίου ταχυτήτων του αποτρέπει τη διαρροή λαδιού μέσω του συγκροτήματος εδράνου. Μια εξωτερική γραμμή παίρνει λάδι υπό πίεση από τον έλεγχο και τη ρυθμιστική βαλβίδα στο κάτω μέρος του καλύμματος του κιβωτίου ταχυτήτων, η οποία είναι συνδεδεμένη με τη θέρμανση λαδιού-καυσίμου με μια εσωτερική δίοδο. Ένα συγκρότημα βαλβίδων ρύθμισης της πίεσης λαδιού είναι τοποθετημένο στην κορυφή του κιβωτίου ταχυτήτων και μια προεξοχή στο κάτω μέρος του κιβωτίου ταχυτήτων περιλαμβάνει ένα συγκρότημα ανιχνευτών μαγνητικών τσιπ για την δέσμευση τυχών μεταλλικών ρινισμάτων. Εικ. 52 στον πίνακα 6 αναφέρονται τα κυριότερα περιγραφόμενα μέρη για την καλύτερη αναγνώριση τους επι της εικόνας.

PRESSURE ADJUSTMENT VALVE BOSS	ανακουφιστικό	MAGNETIC CHIP DETECTOR	μαγνητικών τσιπ
STARTER GENERATOR MOUNTING PAD	Βάση γεννήτρια εκκίνησης	CENTRIFUGAL BREATHER	Φυγόκεντρος αναπνευστήρας
FUEL PUMP AND FCU DRIVE	Μονάδας ελέγχου καυσίμου (FCU)	SCAVENGE PUMPS	αντλίες (scavenge) ελαίου
TACHOMETER GENERATOR DRIVE	γεννήτρια στροβιλομέτρου	PRESSURE PUMP	κύρια αντλία πίεσης

Πίνακας 6 κυριότερα μέρη κιβωτίου παρελκομένων.



Εικόνα 52- Κιβώτιο Κίνησης Παρελκομένων (Accessories Gear Box).

2.1.4.7. Συστήματα λίπανσης κινητήρα

Ο κινητήρας έχει τρία ξεχωριστά συστήματα λίπανσης πανομοιότυπα για να λιπάνουν κάθε τμήμα ισχύος και το αντίστοιχο τμήμα εισόδου του μειωτήρα. Ένα τρίτο σύστημα λιπαίνει το τμήμα εξόδου του κιβωτίου ταχυτήτων και πρόσθετη λίπανση για το ρουλεμάν No.10-1 / 2.

Για τα κύρια ρουλεμάν του κινητήρα χρησιμοποιούνται ακροφύσια βαθμονομημένου λαδιού για τη διατήρηση της βέλτιστης ροής λαδιού. Κάθε σύστημα τροφοδοτείται από την κύρια αντλία πίεσης, στη συνέχεια το λάδι ανασύρεται από την τροφοδοσία στα ρουλεμάν με αντλίες σάρωσης. Κάθε σύνολο περιλαμβάνει πέντε ανιχνευτές chip detector, τρεις στο κιβώτιο ταχυτήτων και ένα στο κάθε κιβώτιο παρελκομένων. Οι ανιχνευτές chip detector, ενσωματώνουν συσκευές αυτόματου κλεισίματος που εξαλείφουν την ανάγκη αποστράγγισης λαδιού κατά την αφαίρεση των ανιχνευτών για επιθεώρηση. Κάθε σύστημα περιλαμβάνει ένα φίλτρο λαδιού. Και τα τρία φίλτρα είναι τοποθετημένα στο κιβώτιο ταχυτήτων (μειωτήρας).

A. Σύστημα λίπανσης ισχύος

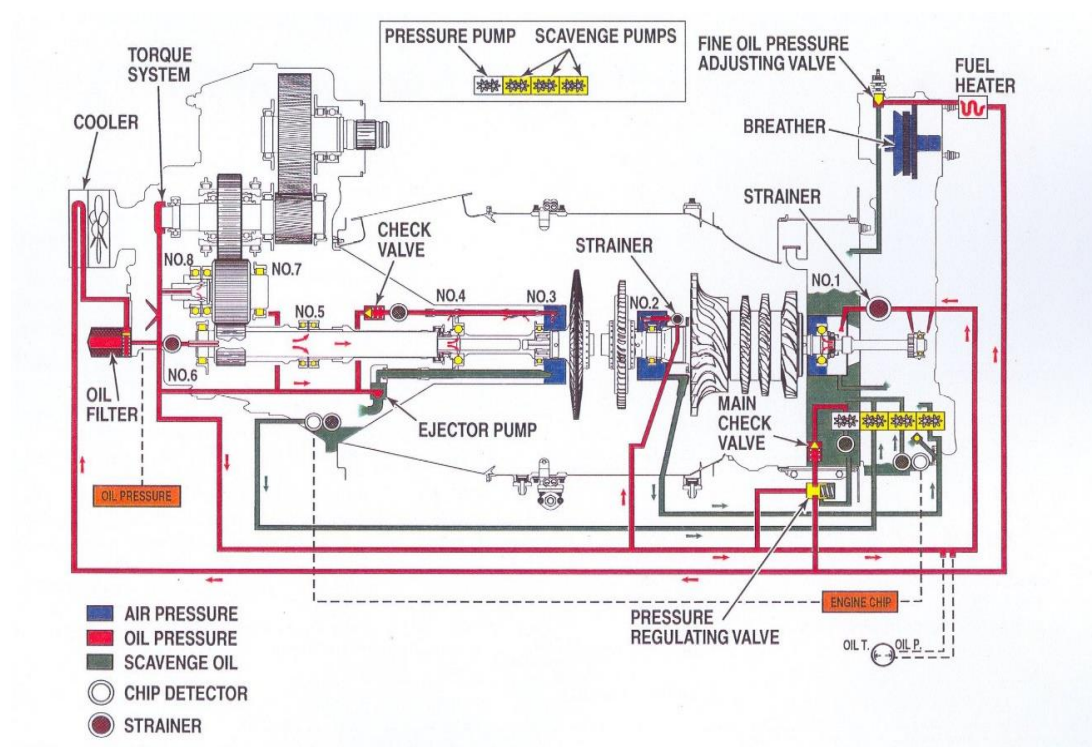
Η αντλία πίεσης του συστήματος λίπανσης ισχύος και τρεις αντλίες σάρωσης είναι τοποθετημένες στο κιβώτιο παρελκομένων που περιλαμβάνει επίσης μια ενσωματωμένη δεξαμενή λαδιού με το συγκρότημα φίλτρου να είναι τοποθετημένο σε ένα κάλυμμα του μειωτήρα. Η συνδυασμένη διάταξη ελέγχου και ρύθμισης και βαλβίδας εκτόνωσης πίεσης, η ο θερμαντήρας λαδιού-καυσίμου και ο φυγοκεντρικός αναπνευστήρας είναι όλα παρελκόμενα τοποθετημένα στο αντίστοιχο κιβώτιο παρελκομένων .

B. Κύρια αντλία πίεσης και αντλίες λαδιού σάρωσης

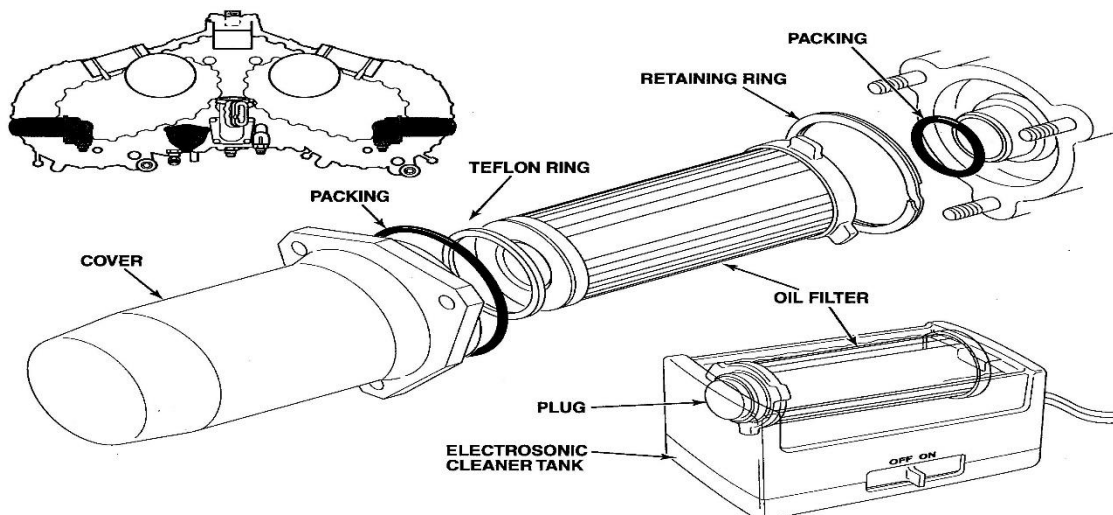
Το λάδι πίεσης κυκλοφορεί από κάθε ενσωματωμένη δεξαμενή λαδιού μέσω του αντίστοιχου συστήματος λίπανσης του τμήματος ισχύος μέσω μίας ανεξάρτητης αντλίας πίεσης τοποθετημένης σε μια προεξοχή στην πίσω πλευρά της χύτευσης του κιβωτίου παρελκομένων. Η είσοδος της αντλίας πεπιεσμένου λαδιού τροφοδοτείται με λάδι από το χαμηλότερο τμήμα της δεξαμενή και η έξοδος τροφοδοτεί λάδι πίεσης σε μια εσωτερική δίοδο στο περίβλημα που συνδέεται με την κύρια βαλβίδα ρύθμισης πίεσης και τη βαλβίδα ρύθμισης πίεσης που είναι τοποθετημένη κάτω από το περίβλημα.

Το σύστημα λαδιού σάρωσης για κάθε τμήμα ισχύος περιλαμβάνει τρεις αντλίες σάρωσης. Μία αντλία σαρώνει λάδι από τα ρουλεμάν No.3 και No.4 και το τμήμα εισαγωγής μειωτήρα, η δεύτερη αντλία σάρωσης λαδιού από το No.2 και η τρίτη σαρώνει το λάδι από το κάλυμμά του κιβωτίου παρελκομένων στο κύριο δοχείο λαδιού. Μια αντλία σάρωσης τοποθετείται εξωτερικά στο εξάρτημα του κιβωτίου παρελκομένων και τα άλλα δύο τοποθετούνται μέσα στο κιβώτιο παρελκομένων.

Η κύρια αντλία πίεσης και οι τρεις αντλίες σάρωσης είναι γραναζωτού τύπου και όλες είναι τοποθετημένες σε έναν κοινό άξονα.



Εικόνα 53- Συστήματα λίπανσης κινητήρα



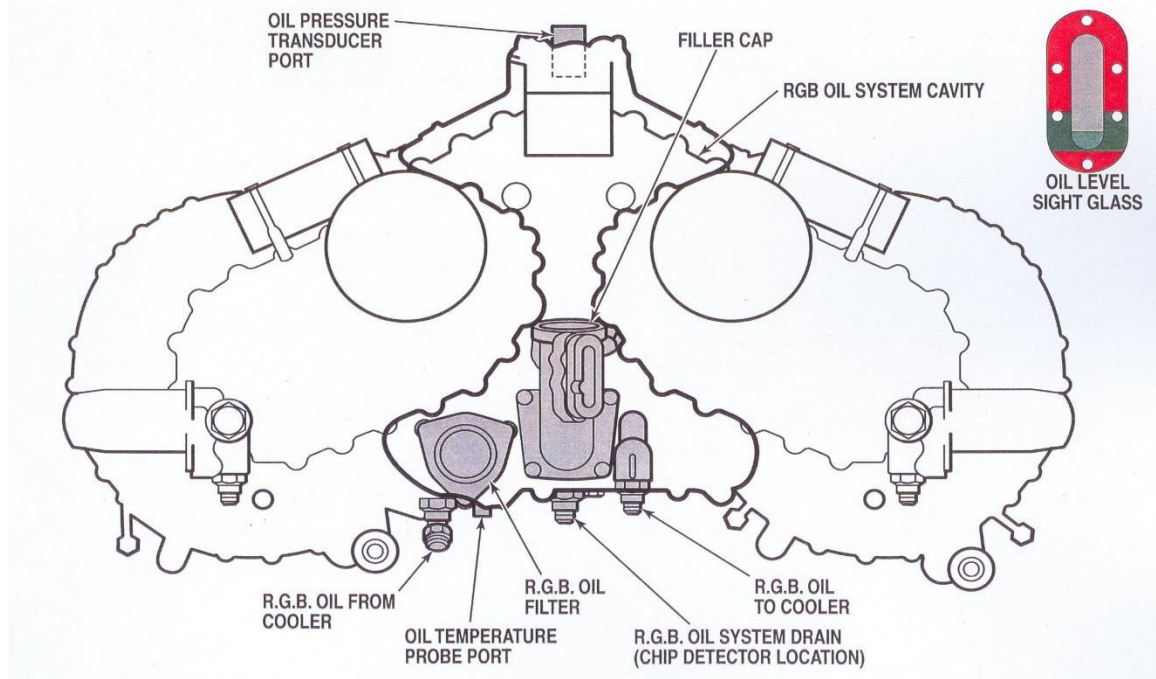
Εικόνα 54-φίλτρα ελαίου.

C. Λίπανση μειωτήρα στροφών (*Reduction Gearbox Oil System*)

Οι δίοδοι χύτευσης λαμβάνουν πίεση λαδιού από το φίλτρο μέσω ενός δακτυλίου στο περίβλημα εξόδου, ένα μέρος λαδιού περνάει από αυτές τις δίοδοι παρέχει λάδι ως μέσο ψύξης στους δύο μειωτήρες κιβωτίου ταχυτήτων και πιο συγκεκριμένα στο τρίτο στάδιο γραναζώσης καθώς και στον οδοντωτό άξονα εξόδου. Δύο θυρίδες από τον δακτύλιο στο περίβλημα εξόδου στέλνουν λάδι στα ακροφύσια για να λιπάνουν τα δύο ρουλεμάν No.10 κάτω από τη φυγοκεντρική ροή και συλλέγοντας σε ενσωματωμένες δεξαμενές κάθε συμπλέκτη. Από τις δεξαμενές συμπλέκτη, το λάδι ρέει προς τα έξω για να λιπάνει τα ρουλεμάν αριθ. 10-1 / 2, 11, 12 και 12-1 / 2.

Πρόσθετη λίπανση για κάθε ρουλεμάν 10-1 / 2 παρέχεται μέσω πίεσης λαδιού από το σύστημα μειωτήρα κιβωτίου ταχυτήτων και οδηγείται από μια σειρά σωλήνων μεταφοράς και εσωτερικών γραμμών σε οπές που έχουν κατασκευαστεί στο περίβλημα εισόδου κοντά σε κάθε έδρανο γραναζιού συμπλέκτη. Οι οπές αυτές κατευθύνουν ένα πίδακα λαδιού σε κάθε ρουλεμάν αρ. 10-1 / 2. Τα ρουλεμάν με αριθμούς 13 και 14 λιπαίνονται από τα σπρέι που κατευθύνονται στο σύμπλεγμα γραναζιών του άξονα εξόδου. Τα έδρανα αριθ. 15, 16 και 17 λιπαίνονται από τον δακτύλιο.

Το σύστημα (Εικ. 55) βασίζεται στη βαρύτητα για να αποστραγγιστεί το λάδι λίπανσης από τα έδρανα, το λάδι που επιστρέφει απευθείας στη δεξαμενή λαδιού του κιβωτίου ταχυτήτων. Τσιμούχες στεγανοποίησης άνθρακα συναρμολογημένες στον συμπλέκτη ταχυτήτων και συμπιέζονται από τον αέρα P3, εμποδίζοντας το λάδι να εισέρχεται στο τμήμα εισαγωγής μειωτήρα κιβωτίου ταχυτήτων. Οι στεγανοποιήσεις συμπιέζονται από τον αέρα P3 προερχόμενος από το τμήμα ισχύος που έχει την υψηλότερη πίεση λειτουργίας. Ένας σωλήνας αναρρόφησης στο περίβλημα εξόδου εξαερίζει τα κατάλοιπα στην ατμόσφαιρα.



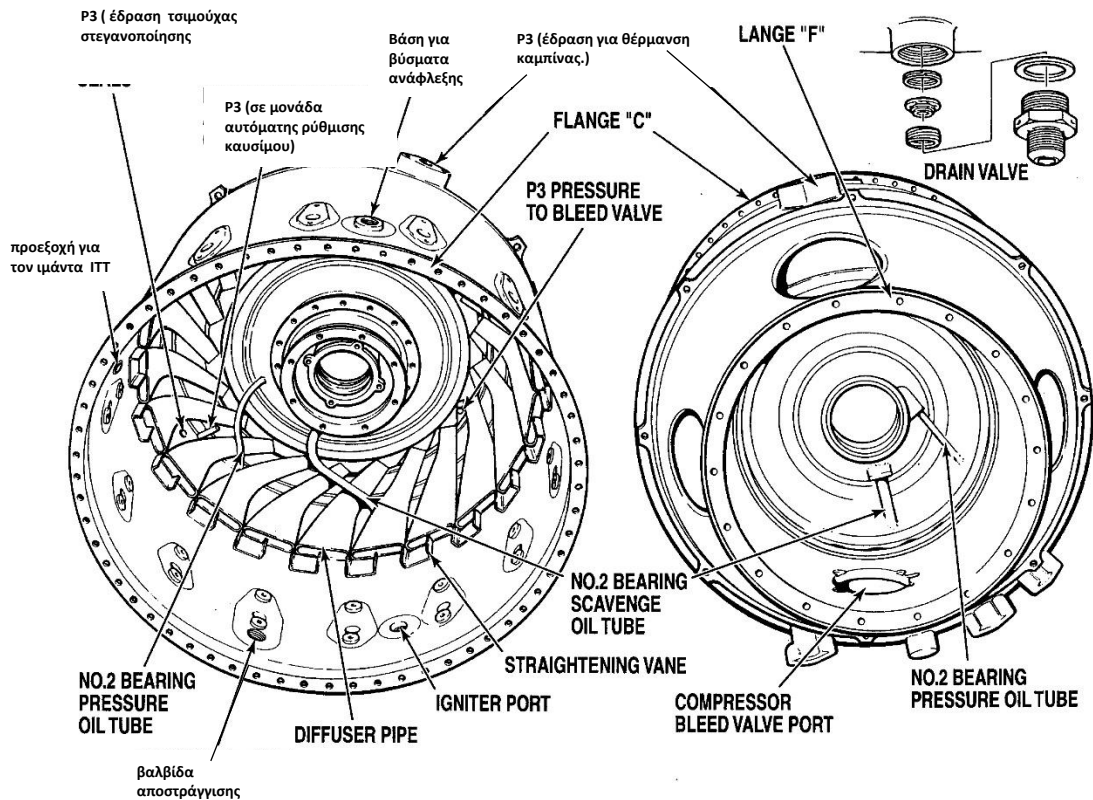
Εικόνα 55-Συστημα λίπανσης μειωτήρα στροφών (Reduction Gear Box Oil System)

2.1.4.8. Θάλαμος παραγόμενων αερίων (GAS GENERATOR CASE)

Ο θάλαμος παραγόμενων αερίων (Εικ. 56), εδράζει και υποστηρίζει διάφορα εξαρτήματα του κινητήρα. Οι σωλήνες διαχύτη αλλάζουν την υψηλή ταχύτητα πίεσης σε στατική πίεση και αναγκάζουν τον αέρα του συμπιεστή να αλλάξει κατεύθυνση κατά 90 °. Η κατασκευή του αποτελείται από την συγκολλημένη συναρμολόγηση μηχανικών εξαρτημάτων και μεταλλικών φύλλων από κράμα χάλυβα με επιστροφή ανθεκτική στη διάβρωση από αλουμίνιο και συμπληρώνεται από 21 συγκολλημένους σωλήνες διάχυσης.

Πιο συγκεκριμένα το περίβλημα του προσφέρει στήριξη- συγκράτηση σε:

- μέρη του στάτορα του συμπιεστή
- Υποστήριξη του ρουλεμάν αριθ. 2
- 14 ακροφύσια για ακροφύσια καυσίμων
- 2 ακροφύσια για βύσματα ανάφλεξης
- 2 προεξοχές για βαλβίδες αποστράγγισης
- 1 προεξοχή για αέρα P3 (σε μονάδα αυτόματης ρύθμισης καυσίμου)
- 1 προεξοχή για τον αέρα P3 (έδραση τσιμούχας στεγανοποίησης για τα γρανάζια)
- 1 προεξοχή για τον αέρα P3 (έδραση για θέρμανση καμπίνας.)
- 1 προεξοχή για τον μάντα ΙΤΤ



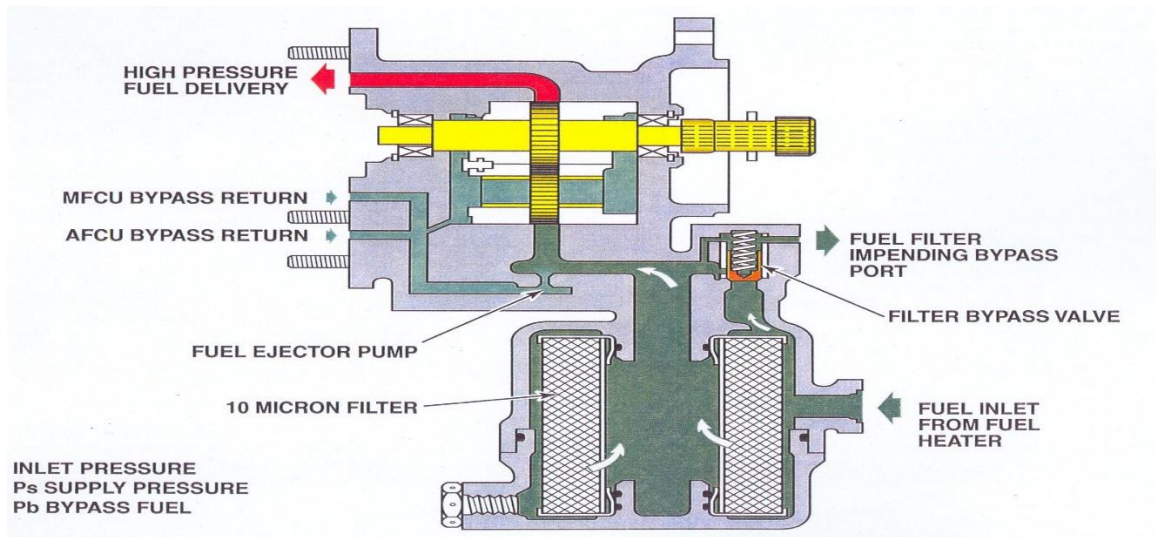
Εικόνα 56-Θάλαμος παραγόμενων αερίων (GAS GENERATOR CASE)

Δύο βαλβίδες αποστράγγισης παρέχονται στη θήκη της γεννήτριας αερίου για την αποστράγγιση του καυσίμου από το θάλαμο καύσης σε περίπτωση ψευδούς εκκίνησης ή μετά το κλείσιμο του τμήματος ισχύος.

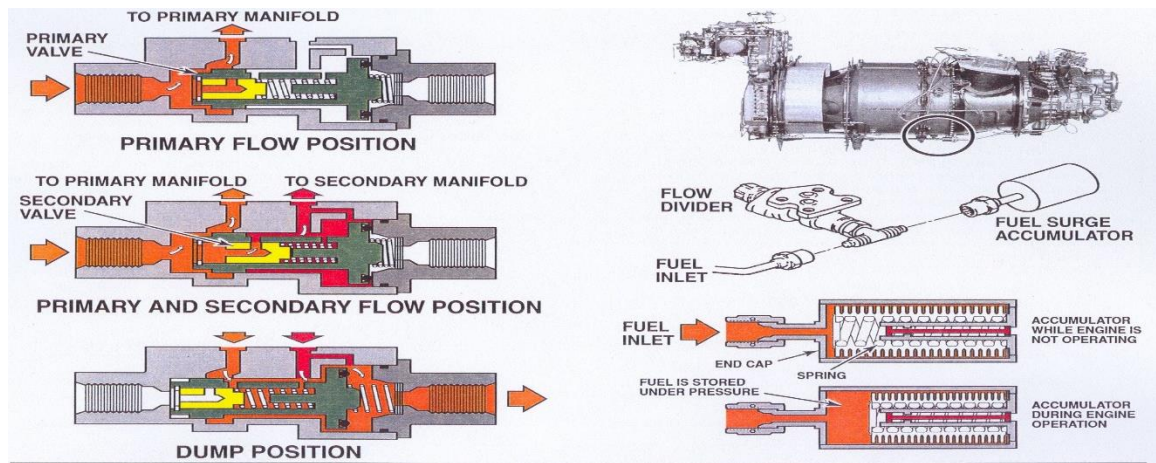
2.1.4.9. Αντλία καυσίμου (Fuel pump)

Σκοπός της (Εικ. 57) είναι η παροχή καθαρού καυσίμου υπό πίεση στην μονάδα ελέγχου καυσίμου. Είναι διπλής βαθμίδας γραναζωτού τύπου με δυνατότητα απόρριψης του πλεονάζοντος καυσίμου και πάνω της βρίσκονται τοποθετημένα δυο φίλτρα 10 micron non-metallic. Το σύστημα γραναζιών που εσωκλείει στο κέλυφος της είναι στεγανοποιημένο με δακτυλίδια από μπρούντζο και η στεγανοποίηση συμπληρώνεται επιτυχώς από τσιμούχες που έχουν ως υλικό κατασκευής τον άνθρακα, πράγμα που του δίνει εξαιρετική αντοχή, μιας και αστοχίες στην λειτουργία εν ώρα πτήσης δεν είναι “αποδεκτές” και μπορούν να αποβούν καταστροφικές.

Η λειτουργία της ξεκινά με την είσοδο καυσίμου το οποίο έχει πρώτα περάσει από τα φίλτρα τα οποία μπλοκάρουν τυχόν ξένα σωματίδια που υπάρχουν και μπορούν να προκαλέσουν μπλοκάρισμα της λειτουργίας και διακοπή της ροής καυσίμου. Ένας εναλλακτικός τρόπος απόρριψης του αφιλτράριστου καυσίμου είναι μέσω ενός μηχανισμού ελατήριου – εμβόλου προ φορτισμένο με συγκεκριμένη δύναμη 1.4-1.8 Psid & το οποίο συνδέεται με μια βαλβίδα παράκαμψης. Ο γραναζωτός μηχανισμός της αντλίας συντελεί στην αύξηση πίεσης του καυσίμου μια συνθήκη η οποία είναι απαραίτητη για να φτάσει στην μονάδα ελέγχου του καυσίμου (Εικ. 58). Το πλεονάζον καύσιμο επιστρέφει στην αντλία καυσίμου μέσω του συστήματος απόρριψης που προαναφέραμε το οποίο λειτουργεί στα 2.7-3.0 Psid.



Εικόνα 57-Αντλία καυσίμου (Fuel pump)



Εικόνα 58-Μοναδα ελέγχου καυσίμου M.F.C.U

Πρέπει να επισημάνουμε ότι για την σωστή λειτουργία του παραπάνω συστήματος, απαιτείται η ύπαρξη μιας επιπλέον συσκευής. Αναφερόμαστε στην συσκευή προθέρμανσης καυσίμου (*Fuel heater*) μιας και όπως έχουμε αναφέρει στο 1ο κεφάλαιο, ο τύπος καυσίμου που χρησιμοποιείτε έχει συγκεκριμένη θερμοκρασία για την σωστή ρευστότητα λειτουργίας έτσι δεδομένου των καιρικών συνθηκών που μπορεί να επικρατούν και σε συνδυασμό με το υψόμετρο, το καύσιμο απαιτεί μια προθέρμανση.

2.1.4.10. Σύστημα μέτρησης ροπής (Torque System)

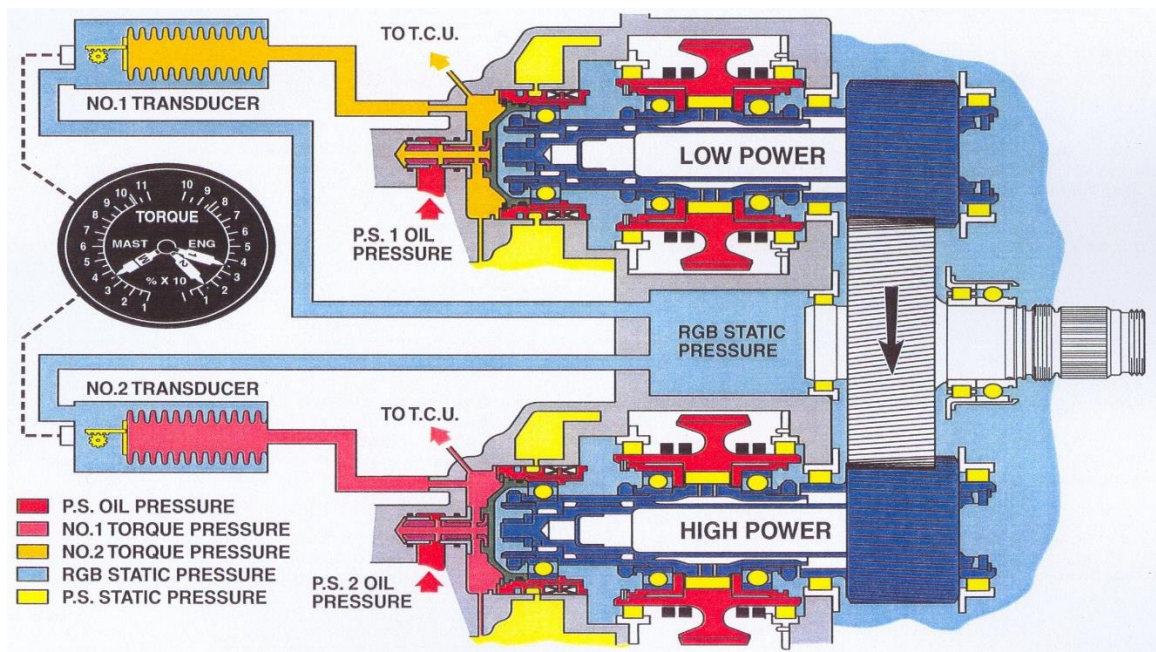
Το μηχανο-υδραυλικό σύστημα αυτό (Εικ. 59) παρέχει την ένδειξη της ροπής που ασκείται στο άξονα εξόδου ισχύος του κινητήρα και αποτελείται από :

- Έναν γραναζωτό άξονα
- Ένα έμβολο με τον κύλινδρο του,

- & υδραυλική βαλβίδα λαδιού μέτρησης ροπής,

Κατά την άσκηση ροπής στρέψης που ασκείτε στον άξονα του μειωτήρα, προκαλείτε μια αξονική δύναμη λογο φυγόκεντρου από την υψηλή περιστροφή, η οποία είναι ανάλογη της ροπής που παραλαμβάνεται από την περιστροφή του κινητήρα. Το έμβολο και η βαλβίδα ελέγχου είναι τοποθετημένη στο άλλο άκρο το γραναζωτού άξονα και κινούνται με την ίδια ταχύτητα καθώς αυξάνεται η ροπή. Με την έναρξη λειτουργίας της βαλβίδας ελέγχου αποκαλύπτεται ταυτόχρονα μια οπή από την οποία διέρχεται λαδί με υψηλή πίεση στον θάλαμο που βρίσκεται ο γραναζωτός άξονας.

Η πίεση λαδιού ασκεί δύναμη περιφερειακά του άξονα αποτρέποντας την αξονική κίνηση αυτή λογο της φυγοκέντρου δύναμης, το ποσό της πίεσης που χρειάστηκε για να εξομαλυνθεί η κίνηση μεταφέρεται στα όργανα μέτρησης ροπής (torque transmitter) τα οποία βάση μιας μαθηματικής εξίσωσης μετατρέπουν την πίεση λαδιού σε μέτρηση ροπής και αυτή με την σειρά της μεταφέρεται στα όργανα ελέγχου σαν ένδειξη.



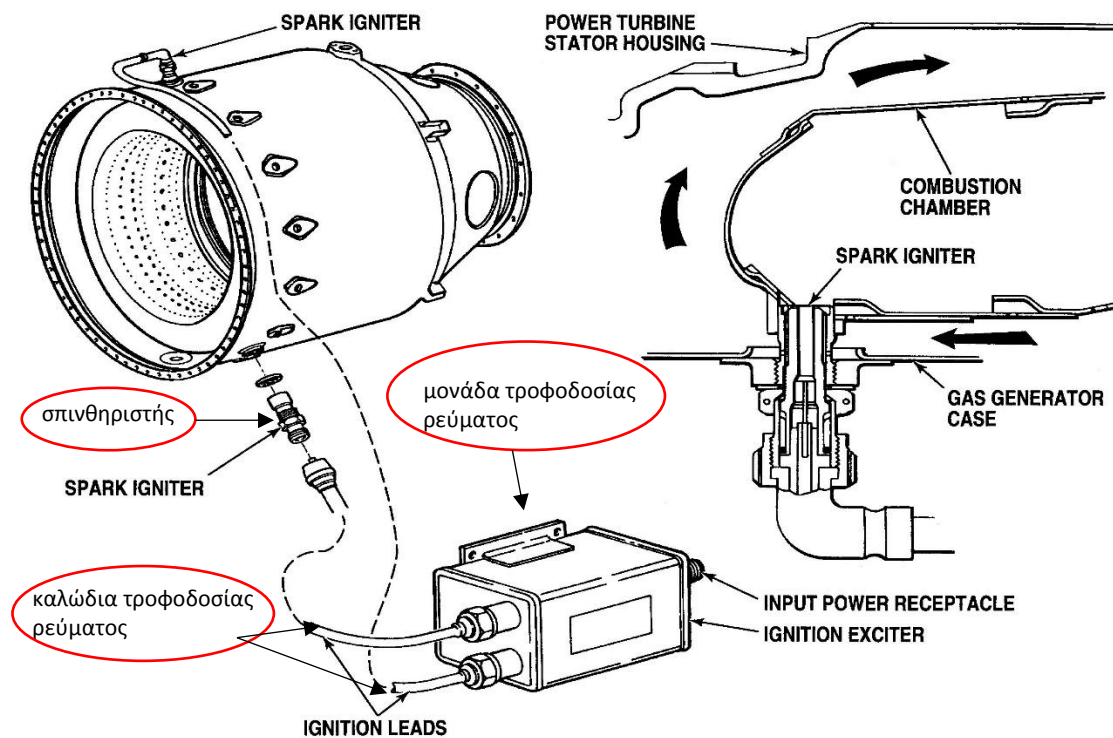
Εικόνα 59- Σύστημα μέτρησης ροπής (Torque System)

2.1.4.11. Σύστημα ανάφλεξης (Ignition System)

Για την έναυση της καύσης και κατά συνέπεια του θερμοδυναμικού κύκλου, απαραίτητο είναι η δημιουργία σπινθήρα ο οποίος σε συνδυασμό με την αυξημένη πίεση του αέρα που εισέρχεται στον θάλαμο καύσης και την ύπαρξη καυσίμου θα προκαλέσει την έκρηξη του μείγματος, την δημιουργία καυσαερίων και εν τέλει την κίνηση των περυνγιών που βρίσκονται στον άξονα.

Τον ρόλο αυτό αναλαμβάνει το σύστημα ανάφλεξης (Εικ. 60) το οποίο εδράζεται στον θάλαμο παραγωγής αερίων. Αποτελείται από τους σπινθηριστές (*μπουζί- spark*) και τα δυο καλώδια που τα τροφοδοτούν ρεύμα προερχόμενο από την μονάδα τροφοδοσίας ρεύματος (*exciter box*). Η μονάδα τροφοδοσίας ρεύματος είναι ένα

στεγανοποιημένο κουτί το οποίο τροφοδοτείται από χαμηλής τάσης συνεχές (DC) ρεύμα και το μετατρέπει σε υψηλής τάσης. Με την βοήθεια ενός πυκνωτή ο οποίος αποθηκεύει ρεύμα προοδευτικά αποκτά μια επαρκής ποσότητα ρεύματος η οποία όταν χρειαστεί θα διοχετευθεί με σκοπό να διεγείρει τον σπινθηριστή και θα προκληθεί η ανάφλεξη. Η θέση των σπινθηριστών πάνω στον θάλαμο παραγωγής αερίων είναι στην θέση 4 & 11 με βάση το σύστημα του ρολογιού.



Εικόνα 60- Σύστημα ανάφλεξης (Ignition System)

- Input voltage :..... 9-30 VDC
- Input current :..... 3.5 Amp
- Spark rate 10 VDC :..... 1 spark/sec
- 30 VDC :..... 4 spark/sec
- Output voltage :..... 8.000 Volts
- Stored energy :..... 4.7 Joules

Πίνακας 7- χαρακτηριστικά συστήματος ανάφλεξης.

3. Δοκιμή κινητήρα στο δοκιμαστήριο (Engine test -test cell)

Σκοπός δοκιμής.

Η δοκιμή του κινητήρα μετα από προληπτική συντήρηση ή επισκευή, αποτελεί το τελικό και ίσως ένα από τα πιο σημαντικά βήματα στον κύκλο εργασιών ενός κινητήρα, και αυτό γιατί πέρα την κατά γράμμα τήρηση των διαδικασιών που ορίζει το εγχειρίδιο συντήρησης ή επισκευής είναι το μόνο που μπορεί μέσω των λειτουργικών ελέγχων που θα διεξαχθούν, να πιστοποιήσει την ευχρηστικότητα του κινητήρα καθώς και την εγγυημένη απόδοση μέσα στα αποδεκτά πλαίσια που ορίζει ο κατασκευαστής. Μέσα από τις διαδικασίες ελέγχου όπως αναφέραμε παραπάνω, θα μετρηθεί με μεγάλη

ακρίβεια η απόδοση του κινητήρα και θα εκδοθεί έντυπο αναφοράς που συνοδεύει το μητρώο του κινητήρα το οποίο αποτελεί εν μέρει και οδηγό χρήσης του από τους χείριστες.

Κατά την διάρκεια της δοκιμής οποιοσδήποτε λειτουργικός έλεγχος αποτύχει συνιστά την παύση και επιτόπου επιδιόρθωση αν αυτό είναι εφικτό. Σε αντίθετη περίπτωση ο κινητήρας επιστρέφει στο κτήριο συντήρησης και συναρμολόγησης, για την επίλυση του προβλήματος, με βάση τα σχόλια του υπεύθυνου δοκιμής και σε συνδυασμό με το εγχειρίδιο βλαβολογίας της κατασκευάστριας εταιρείας (*troubleshooting manual*).

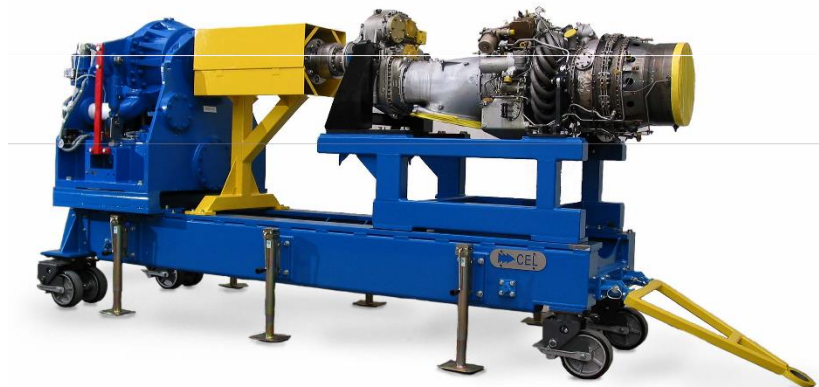
Πέρα του ελέγχου απόδοσης και καλής λειτουργίας, κατά την διάρκεια της δοκιμής γίνονται και οι τελικές ρυθμίσεις, μιας και η δοκιμή στην πραγματικότητα συνιστά εξομοίωση λειτουργίας σχεδόν υπό κανονικές συνθήκες.

Εξοπλισμός και διαδικασία δοκιμής κινητήρα.

3.1.1. Κλίνη δοκιμής (Test Bed)

Μετα το πέρας της διαδικασίας γενικής επισκευής το επόμενο στάδιο είναι η μεταφορά του στο δοκιμαστήριο για την διεξαγωγή της δοκιμής. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείτε η ειδική κλίνη πρόσδεσης του κινητήρα για μεταφορά και δοκιμή του.

Η ειδική κλίνη πρόσδεσης (test bed) Εικ.61 είναι μια στιβαρή μεταλλική κατασκευή στην οποία είναι τοποθετημένη η βάση στήριξης του κινητήρα μαζί με τα εξαρτήματα μετάδοσης κίνησης. Ο σχεδιασμός της κλίνης επιτρέπει την ευελιξία για τις διαδικασίες προετοιμασίας και ευθυγράμμισης πριν την δοκιμή. Η κλίνη εδράζεται πάνω σε τέσσερις τροχούς βαρέως τύπου, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα περιστροφής και ασφάλισης. Η μεταφορά μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με όχημα ρυμούλκησης, είτε μέσω ανυψωτικού μηχανήματος (βαρούλκου) αν η γραμμή παραγωγής είναι σε σειρά. Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας είναι η ευγράμμιση της κλίνης σε σχέση με την επιπεδότητα για αυτο και διαθέτει ρυθμιστικούς μηχανισμούς επιπεδότητα με ένδειξη. Τέλος αφού τοποθετηθεί στο επιθυμητό σημείο προσδένεται στο έδαφος με τέσσερα ειδικά άγκιστρα για την συγκράτηση της κατά την διάρκεια της δοκιμής, λογο της μεγάλης ανάπτυξης δυνάμεων και κραδασμών κατά την λειτουργία.



Εικόνα 61-Κλίνη δοκιμής

3.1.2. Διάταξη συγκράτησης οδήγησης

Η διάταξη συγκράτησης οδήγησης περιλαμβάνει όλα τα εξαρτήματα που απαιτούνται για τη δημιουργία των επιθυμητών συνθηκών πτήσης για τον έλεγχο της μηχανής και την πιστοποίηση της. Τα κυριότερα εξαρτήματα είναι η δυναμομετρική μηχανή, ο άξονας ζεύξης που μεταδίδει τη ροπή στρέψης και ο αισθητήρας ροπής που δίνει στους χειριστές την ακριβή ροπή που παράγεται από τον κινητήρα.

3.1.2.1. Δυναμόμετρο

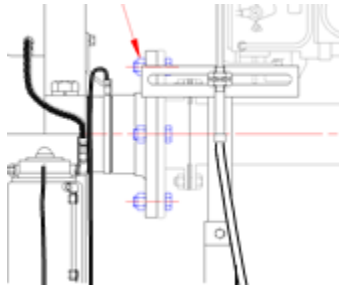
Αυτή η εγκατάσταση χρησιμοποιεί την υδραυλική δυναμομετρική μονάδα απορρόφησης δυναμομέτρου και το σύστημα μέτρησης ροπής του κινητήρα της Froude Consine. Το υδραυλικό δυναμόμετρο απορροφά την ισχύ μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια σε θερμότητα. Το νερό που διέρχεται από το δυναμόμετρο θερμαίνεται με τριβή. Ο ελεγκτής TEXCEL V100 του Froude Consine, είναι εγκατεστημένος στον πίνακα οργάνων του CELL και ελέγχει τις παραμέτρους του δυναμομέτρου. Το Texcel είναι ένα υδραυλικό σύστημα ελέγχου που βασίζεται σε μικροεπεξεργαστές και παρέχει γρήγορη δυναμική απόκριση και ακριβή έλεγχο. Ο ελεγκτής (Texcel) συνδέεται με εξωτερική μονάδα δίσκου ή με την καταγραφή δεδομένων στο σύστημα λήψης δεδομένων "CELDAS200".

Για την διεξαγωγή της δοκιμής του κινητήρα στην κλίση δοκιμής με την βοήθεια του δυναμομέτρου το οποίο διαθέτει έναν άξονα σύνδεσης με τον κινητήρα Εικ.62, είναι απαραίτητη η χρήση ενός προσαρμογέα και ο λόγος είναι ότι η συσκευή του δυναμομέτρου είναι κοινή για πολλά είδη κινητήρα. Έτσι η προσαρμογή της ανά κινητήρα επιτυγχάνεται με τον ειδικό προσαρμογέα που προαναφέραμε. Για τον κινητήρα PT6T ο άξονας είναι εφοδιασμένος με δυο εύκαμπτες συνδέσεις, η μια πλευρά διαθέτει μια σταθερή θηλυκή σφήνα ενώ η άλλη έχει μια φλάντζα η οποία ταιριάζει και προσαρμόζεται στο δυναμόμετρο. Επιπλέον στην κατασκευή αυτή υπάρχει ένα προστατευτικό άξονα, καθαρά για λόγους ασφαλείας και προστασίας του χειριστή από τα περιστρεφόμενα μέρη παρέχοντας ταυτόχρονα στήριξη του άξονα σε περίπτωση αποσύνδεσης του κινητήρα και μετακίνησης του.

Τα όρια ευθυγράμμισης είναι ένα παράγοντας που συνιστά μεγάλη προσοχή, γιαυτό και ο κατασκευαστής δίνει και συγκεκριμένες τιμές Πίν. 8 οι οποίες πρέπει να τηρηθούν αυστηρά. Με βάση ότι οι άξονες είναι κατασκευασμένοι με συγκεκριμένες προδιαγραφές σε αυτό προστίθενται και οι προδιαγραφές των μέσων σύνδεσης λογο συγκεκριμένης αντοχής σε ροπή (115-130 FT-LB (DRY)).

Engine Model	Shaft Model	Misalignment Angular Max	Misalignment Axial Max	Max Torque (IN-LB)	Critical Speed (RPM)
PT6T-3/6	1115612	0.250 Per End	Parallel Offset 0.161" (4.1mm)	50,000 Continuous 88,000 Momentary	18,900

Πίνακας 8-προδιαγραφές σχεδίασης άξονα



Εικόνα 62-προσαρμογέας σύνδεσης (φλάντζα)

3.1.2.2. Σύστημα ελέγχου ώσης (SERVO-THROTTLE CONTROL)

Το σύστημα ελέγχου ώσης χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρικό σύστημα άμεσης απόκρισης για να ελέγχει κατά την διάρκεια της δοκιμής το μοχλό ισχύς και τον μοχλό κατάστασης του κινητήρα. Οι δυο αυτοί μοχλοί είναι τοποθετημένοι υπό γωνιά, εξού και οι ονομασίες τους Power Level Angle & Condition Lever Angle , σύστημα αποτελείται από τα ακόλουθα:

Συγκρότημα μοχλού:

- Από ένα ποτενσιόμετρο το οποίο μέσω ηλεκτρικής υποβοήθησης ελέγχει την θέση του μοχλού ώσης μεταφέροντας το σήμα από & στην κονσόλα του χειριστή.

Συγκρότημα σερβοκινητήρα:

- Αυτό το συγκρότημα αποτελείται από ένα σερβοκινητήρα και έναν μειωτήρα. Είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε η αμεσότητα στην απόκριση των κινήσεων να είναι πλήρη εξομοίωση των πραγματικών με αποτέλεσμα να μπορεί να μετακινήσει τον μοχλό κατά 90° μέσα σε 0,5 sec.

Το rigging η αλλιώς η ρύθμιση όλων των μέσων μεταφοράς κίνησης των χειριστηρίων μοχλών είτε αυτή γίνεται με την βοήθεια συρματόσχοινων είτε μέσω μοχλών (ωστήρια) πρέπει να εκτελείται βάση των οδηγιών που περιέχονται μέσα στο βιβλίο του κατασκευαστή.

3.1.3. Τμήμα εισαγωγής αέρα δοκιμαστηρίου (Test Cell Air Intake)

3.1.3.1. Εισαγωγή αέρα

Το τμήμα εισαγωγής αέρα έχει πολλαπλή χρησιμότητα. Πρωτίστως χρησιμοποιείται για την εισαγωγή ροής αέρα η οποία είναι ισοδύναμη με το άθροισμα της ροής αέρα του κινητήρα, της δευτερεύουσας ροής T / C, της ροής του ποσού αντιστρωματοποίησης και της ροής εξαγωγής καυσαερίων. Ο σχεδιασμός της κατασκευής θα πρέπει να εξυπηρετεί την ομαλή ομοιόμορφη κατατομή ροής στην εισαγωγή αέρα του κινητήρα.

Η σταθερότητα της πίεσης, η κατανομή θερμοκρασίας και η διαδρομή ροής αέρα είναι κρίσιμες κατά την δοκιμή ενός κινητήρα. Ως εκ τούτου, η εισαγωγή αέρα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η απώλεια πίεσης (τυπικά λιγότερο από 1" H₂O σε πλήρη ροή) και να αποφεύγεται η εκ νέου απορρόφηση των καυσαερίων. Επιπρόσθετα σκοπός της εισαγωγής αέρα είναι να αποτρέψει την εισροή ξένων αντικειμένων.

3.1.3.2. Σύστημα αντιστρωματοποίησης (Anti-Stratification System)

Η σταθερότητα και η ομοιομορφία της θερμοκρασίας περιβάλλοντος εντός του θαλάμου δοκιμής είναι επίσης μια πολύ σημαντική παράμετρος στην αξιολόγηση της απόδοσης ενός κινητήρα προκειμένου να αποφευχθούν οι θερμές περιοχές. Συγκεκριμένα, η εξάπλωση της θερμοκρασίας εισόδου πρέπει να ελαχιστοποιείται και να ελέγχεται. Παρόλο που το σύστημα εξαγωγής των καυσαερίων έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί ως αντλία υποπίεσης, είναι εγκατεστημένος συνήθως ένας ανεμιστήρας αντιστρωματοποίησης, εγκατεστημένος συνήθως στον πίσω τοίχο, επιτρέποντας την κυκλοφορία καθαρού αέρα μέσα στον δοκιμαστικό θάλαμο, προκειμένου να αποφευχθεί η ανακυκλοφορία και οι “νεκρές” ζώνες γύρω από τον κινητήρα κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

3.1.3.3. Ανεμιστήρας εξαγωγής αναθυμιάσεων (Fume Extracting Fan)

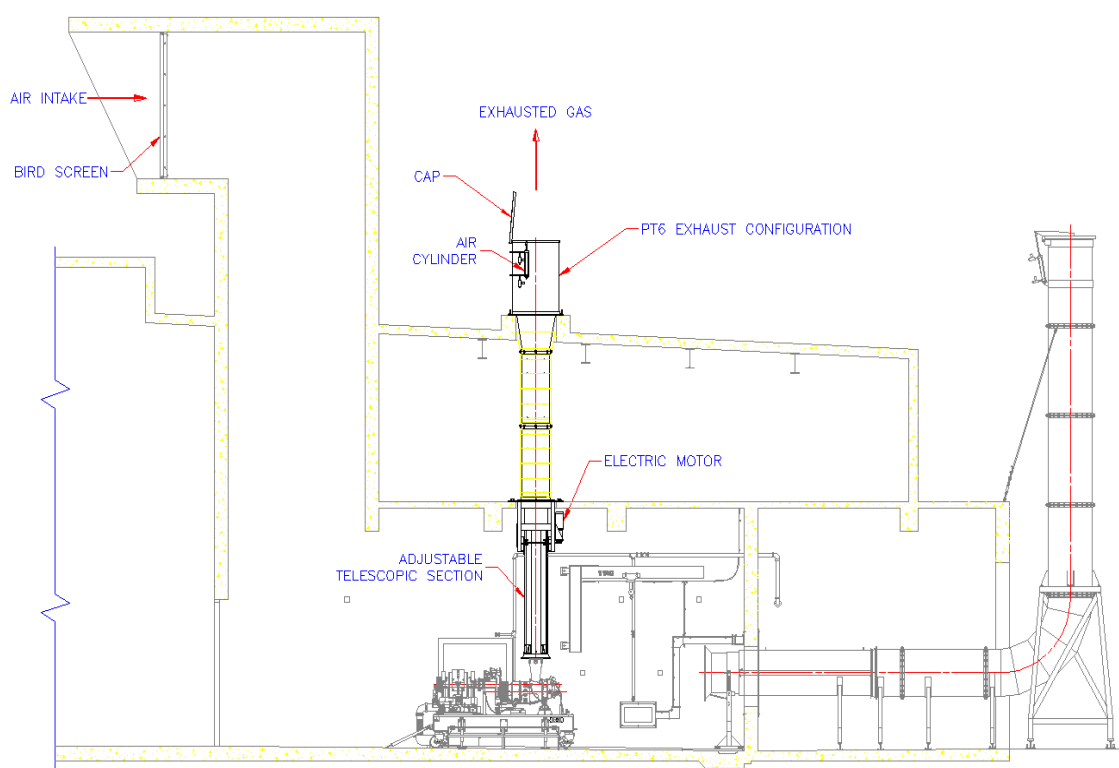
Σκοπός του συγκεκριμένου ανεμιστήρα είναι να αποφευχθεί η συσσώρευση αναθυμιάσεων αερίου στο επίπεδο δαπέδου μέσα στο θάλαμο δοκιμής, φαινόμενο που μπορεί να συμβεί συχνά και για λόγους υγείας και ασφάλειας, είναι πολύ σημαντικό να εκκενωθεί ο αέρας, ο οποίος μπορεί να περιέχει αναθυμιάσεις αερίων. Ο ανεμιστήρας εξαγωγής αερίων αποτελείται από έναν αγωγό αέρα, ο οποίος δημιουργεί μια μικρή ροή αέρα στο επίπεδο του δαπέδου. Η είσοδος του αγωγού εξαγωγής αναθυμιάσεων δεν πρέπει να βρίσκεται περισσότερο από 18" πάνω από το πάτωμα και στο τέλος αυτού βρίσκεται ο ανεμιστήρας.

3.1.3.4. Εξαγωγή καυσαερίων (Exhaust Ducting)

Τα καυσαέρια που εκπέμπονται από τον κινητήρα κατά τη διάρκεια της δοκιμής εξάγονται από τον θάλαμο δοκιμής μέσω συστήματος εξάτμισης. Το σύστημα εξάτμισης περιλαμβάνει απορροφητήρα, σιγαστήρα και σε ορισμένες περιπτώσεις, τα τμήματα αγωγών διαθέτουν ειδικό κάλυμμα ενάντια στις καιρικές συνθήκες. Ο σχεδιασμός του απορροφητήρα είναι κρίσιμος δεδομένου ότι πρέπει να δημιουργήσει επαρκή δευτερεύουσα ροή αέρα για να αποφευχθούν οι θερμές μάζες και η επαναρρόφηση του αερίου στον κινητήρα καθώς και για να ψυχθεί ο αέρας που διέρχεται από τον αγωγό. Η είσοδος του εγχετήρα πρέπει να διαθέτει αλλαγή διατομής (αύξηση) για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες εισόδου. Στον συγκεκριμένο θάλαμο δοκιμής (δοκιμαστήριο) ο σχεδιασμός επιτυγχάνει την δημιουργία μιας δευτερεύουσας ροής ψυχρού αέρα, με δυνατότητα να αναμειχθεί και να μειώσει τη θερμοκρασία καυσαερίων περίπου στους 288⁰ C.

Ο αγωγός εξαγωγής είναι εφοδιασμένος με ένα ηλεκτρικό μηχανισμό ανύψωσης που απαιτείται όχι μόνο όταν αφαιρείται ένας κινητήρας αλλά και για να τοποθετείται ο αγωγός εξαγωγής προς το στέλεχος του κινητήρα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η θέση του απορροφητήρα σε σχέση με το στέλεχος του κινητήρα είναι σημαντική. Υποθέτουμε ότι το στέλεχος του κινητήρα έχει ήδη κεντραριστεί με τον αγωγό εξαγωγής κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης μέσα στον θάλαμο δοκιμής. Για τον ελάχιστο και τον μέγιστο έλεγχο ύψους καυσαερίων χρησιμοποιείται ένας διακόπτης οριοθέτησης δύο κατευθύνσεων, στερεωμένος στο σύστημα ανύψωσης. Ένα σύστημα σήμανσης βέλους, τοποθετημένο στον μηχανισμό ανύψωσης, χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση και επανάληψη της θέσης ύψους εξάτμισης για κάθε διάταξη κινητήρα.

Τα καυσαέρια εξάγονται στην ατμόσφαιρα μέσω ενός αγωγού εξαγωγής εξοπλισμένο με ένα κάλυμμα, ο οποίος τροφοδοτείται από δυο αγωγούς με αέρα και δύο βαλβίδες ρυθμίζουν την ροή. Εικ.63



Εικόνα 63-Διάταξη συστήματος εξαγωγής καυσαερίων δοκιμαστηρίου.

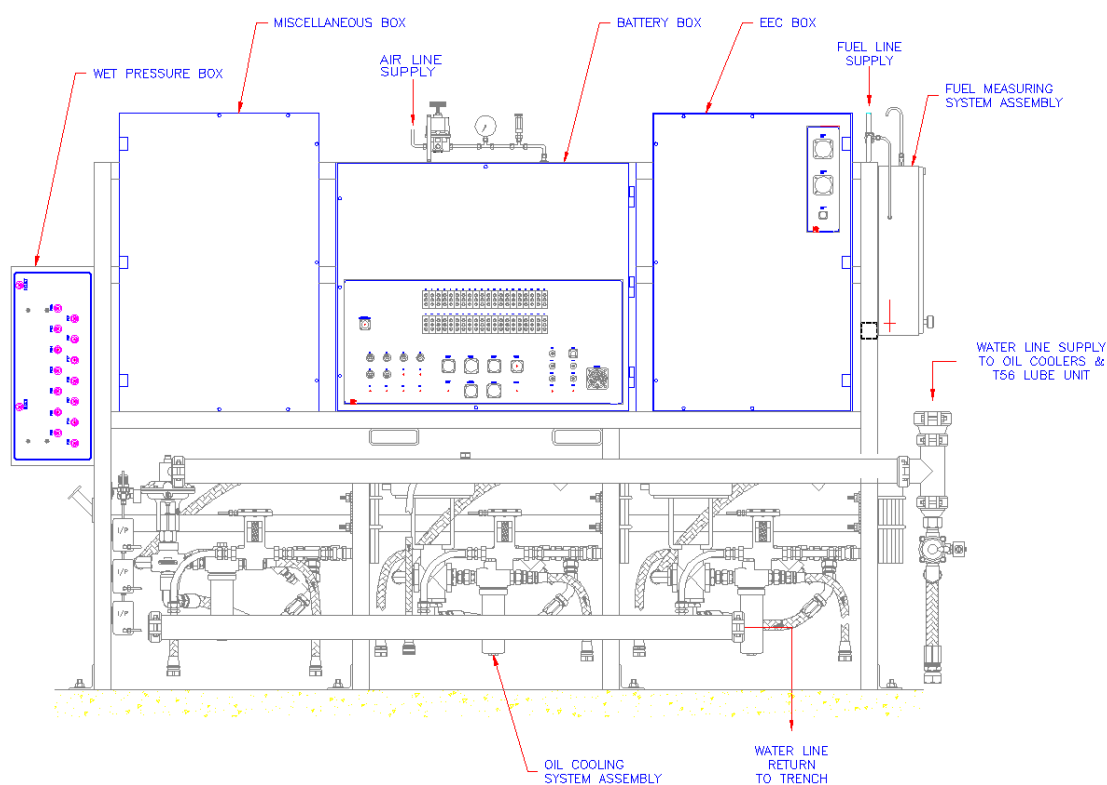
3.1.4. Πρόσθετα συστήματα δοκιμαστηρίου

Στην προσπάθεια για εύχρηστες, ευκολοσυντήρητες εγκαταστάσεις και σε συνδυασμό με την επιθυμία μείωσης του όγκου των πρόσθετων συστημάτων που είναι απαραίτητα για την διενέργεια των δοκιμών, έχουμε συστήματα τα οποία εγκαθίστανται στον περιβάλλοντα χώρο του δοκιμαστήριου, μεταφέροντας μόνο το απαραίτητο κομμάτι τους το οποίο και πρέπει να συνδεθεί στο εργοσύνολο του κινητήρα. Έχει γίνει μια συγχώνευση των απαραίτητων όπως προαναφέραμε μερών της κάθε εγκατάστασης που πρέπει να συνδεθούν σε έναν μικρό χώρο εσωτερικά.

Αυτή η συγχώνευση ονομάζεται “κέντρο σύνδεσης κινητήρα” (Engine Connection Center =ECC) Εικ. 64 και περιλαμβάνει τα ακόλουθα συστήματα:

- Συγκρότημα μπαταρίας - Battery Box Assembly
- Συγκρότημα λοιπών εξαρτημάτων- Miscellaneous Box Assembly
- Κέντρο σύνδεσης κινητήρα- EEC Box Assembly
- Συγκρότημα υδραυλικής πίεσης- Wet Pressure Box Assembly
- Συγκρότημα ψύξης λαδιού- Oil Cooling System Assembly
- Συγκρότημα μέτρησης τροφοδοσίας καυσίμου-Fuel Measuring System Assembly

Όλες οι ηλεκτρικές καλωδιώσεις δρομολογούνται σε έναν αγωγό εγκατάστασης NEMA 12, από την αίθουσα ελέγχου μέσω όλων των ηλεκτρικών κιβωτίων και από έναν αναρτημένο ανοιχτό δίσκο από το ECC στην κλίνη δοκιμής . Σε κάθε κλίνη δοκιμής, οι αγωγοί NEMA 1 παρέχονται για να υποστηρίξουν όλα τα καλώδια που μπορούν να υποστούν βλάβη και επιπλέον να είναι σε θέα παρατήρησης από τον χειριστή αλλά ταυτόχρονα να μην παρεμβάλλονται στον κινητήρα.



Εικόνα 64-“κέντρο σύνδεσης κινητήρα” (*Engine Connection Center =ECC*)

3.1.4.1. Σύστημα καυσίμου

Το σύστημα καυσίμου αποτελείται από δύο διαφορετικά συστήματα, τις δεξαμενές καυσίμου - "Fuel Farm" και το "σύστημα μέτρησης καυσίμου". Οι δεξαμενές χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση και την τροφοδοσία καυσίμου στο δοκιμαστήριο και διαθέτουν συστήματα αντλιών για την προώθηση του καυσίμου, βάνες διακοπής και σύστημα διαχωρισμού καυσίμου από το νερό. Το σύστημα

μέτρησης καυσίμου προορίζεται για την παροχή καυσίμου στους κινητήρες υπό κατάλληλες συνθήκες (πιέσεις, θερμοκρασίες, ροές) ανά τύπο και κινητήρα και με βάση τις προδιαγραφές που ορίζονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Για τον συγκεκριμένο κινητήρα το σύστημα διαθέτει μια ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδα διακοπής η οποία τοποθετείται απευθείας στην κλίνη δοκιμής, κοντά στον κινητήρα. Σκοπός της είναι να διακόψει πλήρως την παροχή καυσίμου στον κινητήρα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

3.1.4.2. Σύστημα ψύξης λαδιού

Το σύστημα ψύξης λαδιού δοκιμής χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του λαδιού που χρησιμοποιείται στο σύστημα λίπανσης των κινητήρων ΡΤ6Τ. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν ρυθμιστή θερμοκρασίας που ρυθμίζει μια πνευματική βαλβίδα ανάμιξης 3 δρόμων προκειμένου να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του λαδιού στο απαιτούμενο σημείο. Η βαλβίδα ανάμιξης 3 κατευθύνσεων αναμιγνύει το λάδι που προέρχεται από την σάρωση του κινητήρα με λάδι που προέρχεται από τον ψύκτη νερού / λαδιού για να επιτευχθεί το επιθυμητό σημείο θερμοκρασίας. Το σύστημα χωρίζεται σε δύο κύρια κύκλωμα:

- **Κύκλωμα λαδιού:**
Αυτό το κύκλωμα περιλαμβάνει μια βαλβίδα ανάμιξης τριών δρόμων, ανιχνευτές chip, φίλτρα και εναλλάκτες θερμότητας.
- **Κύκλωμα νερού:**
Το νερό χρησιμοποιείται ως μέσο ψύξης μέσω του εναλλάκτη θερμότητας και είναι εφοδιασμένο με βαλβίδες ρύθμισης ροής και φίλτρα ροής.

Η συλλογή των χρησιμοποιημένων πετρελαιοειδών και καυσίμων πραγματοποιείται με τη χρήση μιας λεκάνης από ανοξείδωτο χάλυβα που συνδέεται με την κλίνη δοκιμής ΡΤ6Τ κάτω από τον κινητήρα. Η απόρριψη των συλλεγόμενων υγρών αποβλήτων πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τους τοπικούς περιβαλλοντικούς νόμους και κανονισμούς

3.1.4.3. Σύστημα ψύξης νερού.

Η διαδικασία ψύξης του νερού μέσω αυτού του συστήματος είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία του δυναμόμετρου καθώς και για την ψύξη του συστήματος λαδιού. Σκοπός του η απορρόφηση της ενέργειας που έχει παραχθεί από την τριβή λόγω της παραγόμενης θερμότητας που έχει προκύψει. Η απορρόφηση της θερμότητας από το μέσο ψύξης (νερό) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού το οποίο πρέπει να περάσει από ένα κλειστό κύκλωμα για να ψυχθεί. Το κύκλωμα αυτό βρίσκεται εντός μιας κατασκευής που ονομάζεται πύργος απαγωγής θερμότητας. Το εν λόγω σύστημα διαθέτει δεξαμενή νερού μεγάλης χωρητικότητας με ειδικούς διακόπτες μέτρησης του επιπέδου στάθμης για την αποφυγή υπερχειλίσσης η έλλειψης νερού , αντλία παροχής του νερού και ειδική βαλβίδα σε περίπτωση που διακόπτης μέτρησης υπερχειλίσσης ενεργοποιηθεί.

3.1.5. Ρύθμιση εγκατάστασης / λειτουργίας

Κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της πτυχιακής εργασίας, είχαμε την τύχη να παραβρεθούμε στην διενέργεια δοκιμής του κινητήρα PT6T και να παρακολουθήσουμε την διαδικασία προετοιμασίας και την ρύθμιση της εγκατάστασης για την λειτουργία του κινητήρα. Η διαδικασία αυτή είναι σημαντική, μιας και τυχόν παραλείψεις μπορούν να αποβούν καταστροφικές για τον κινητήρα, να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια του προσωπικού και τέλος να μην έχουμε τις σωστές μετρήσεις και αποτελέσματα.

Για τους παραπάνω λόγους όλη η διαδικασία που θα αναφέρουμε παρακάτω αναγράφεται σε πλάνο εργασίας όπως άλλωστε και όλες οι εργασίες που εκπονούνται, όχι μόνο για την έγγραφη τεκμηρίωση της διαδικασίας όπως ορίζει το ποιοτικό σύστημα αλλά και για την υπενθύμιση των βημάτων που πρέπει να υλοποιηθούν κατά γράμμα σε περίπτωση αναθεώρησης μιας εργασίας άσχετα αν η διαδικασία έχει υλοποιηθεί από τον χειριστή πολλές φορές. Για τον λόγο αυτό απαραίτητη και επιβεβλημένη είναι και η παρουσία επιθεωρητή, που θα επιθεωρήσει την υλοποίηση κατά βήμα και θα πιστοποιήσει την ορθότητα τους. Η σειρά των εργασιών πριν την έναρξη της δοκιμής θα παρουσιαστεί με μορφή λίστας (*Check List*), πανομοιότυπα με αυτή του πλάνου εργασίας.

1. Τοποθέτηση του άξονα ζεύξης στον κινητήρα και ασφάλιση του προσαρμογέα (φλάντζα) μεταφοράς ροπής, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή.
2. Τοποθέτηση του κινητήρα PT6T στην αποκλειστική του, δοκιμαστική κλίνη δυναμόμετρου με βάση το σχέδιο.
3. Χρησιμοποιώντας τα μπουλόνια που χρησιμοποιούνται στο αεροσκάφος, στερέωση τις μπροστινές και οπίσθιες βάσεις του κινητήρα στην κλίνη δοκιμής δυναμομέτρου.
4. Εγκατάσταση του εξοπλισμού του κινητήρα (παρελκόμενα) σύμφωνα με το εγχειρίδιο γενικής επισκευής OEM.
5. Μεταφορά της δοκιμαστικής κλίνης με τον κινητήρα στον θάλαμο δοκιμής με το ανυψωτικό όχημα.
6. Σύνδεση της δοκιμαστικής κλίνης με το βαρούλκο μεταφοράς εντός του θαλάμου.
7. Ευθυγράμμιση και τοποθέτηση της κλίνης δοκιμής στην ίδια ευθεία με το σύστημα εξαγωγής καυσαερίων.
8. Ρύθμιση των τεσσάρων πελμάτων ισοπέδωσης, σε κάθε γωνία, για ρύθμιση της κλίνης κατά τις δυο διευθύνσεις.
9. Ασφάλιση της κλίνης δοκιμής στο πάτωμα χρησιμοποιώντας τους παρεχόμενους κρίκους.
10. Ρύθμιση της θέσης εκτοξευτήρων της εξαγωγής καυσαερίων με βάση την βιβλιογραφία.
11. Σύνδεση της παροχής νερού με το δυναμόμετρο σύμφωνα με το σχέδιο και περιστροφή της βαλβίδας πεταλούδας με το χέρι στη θέση "ON".
12. Τοποθέτηση του "δοχείου αποστράγγισης νερού" στη θέση του και διασφάλιση ότι ο εύκαμπτος σωλήνας επιστροφής νερού είναι

τοποθετημένος στην οπή καθώς και ότι οι άλλες οπές επιστροφής, στην τάφρο, είναι σωστά καλυμμένες.

13. Διασφάλιση ότι οι άλλες βαλβίδες μορφής πεταλούδας που τροφοδοτούνται από το νερό της dyho είναι σβηστές θέση "OFF"
14. Σύνδεση της γραμμής καυσίμου στο θάλαμο δοκιμής.
15. Σύνδεση του εύκαμπτου σωλήνα αερίου στην κλίνη δοκιμής.
16. Σύνδεση των μοχλών ενεργοποίησης του σερβοκινητήρα στους μοχλούς του κινητήρα και ρύθμιση της ελάχιστης και μέγιστης διαδρομής (**rigging**) ανάλογα με τις κινήσεις των μοχλών χειρισμού στο δωμάτιο ελέγχου.
17. Σύνδεση του αναπνευστικού συγκροτήματος παροχής αέρα με το σύστημα εξαγωγής καυσαερίων.
18. Υλοποίηση σύνδεσης όλων των ηλεκτρικών συνδέσεων με τις απαραίτητες συσκευές.
19. Τέλος υλοποίηση της διαδικασίας δοκιμής με βάση το εγχειρίδιο γενικής επισκευής του κατασκευαστή.

3.1.6. Περιγραφή πειραματικής διάταξης

3.1.6.1. Μετρούμενα μεγέθη

Ανάλογα όργανα με αυτά της παραγράφου 2.3.3 (Όργανα Ελέγχου Κινητήρα) συναντώνται και στα δοκιμαστήρια των κινητήρων. Σε πολλές μάλιστα περιπτώσεις ένα δοκιμαστήριο είναι υποχρεωμένο να ελέγχει περισσότερες παραμέτρους της λειτουργίας του κινητήρα και είναι συνεπώς εφοδιασμένο με επιπλέον εξοπλισμό. Στην Εικ 65 παρουσιάζεται μία αναλογική κονσόλα ελέγχου από δοκιμαστήριο αξονοστρόβιλων / ελικοστρόβιλων κινητήρων, E.A.B Test Cell. Στο σύγχρονο δοκιμαστήριο κινητήρων της E.A.B τα όργανα ελέγχου λειτουργίας έχουν αντικατασταθεί από λογισμικό παρακολούθησης και καταγραφής της λειτουργίας του κινητήρα (Data Acquisition System) Εικ. 66



Εικόνα 65-Αναλογική κονσόλα ελέγχου.

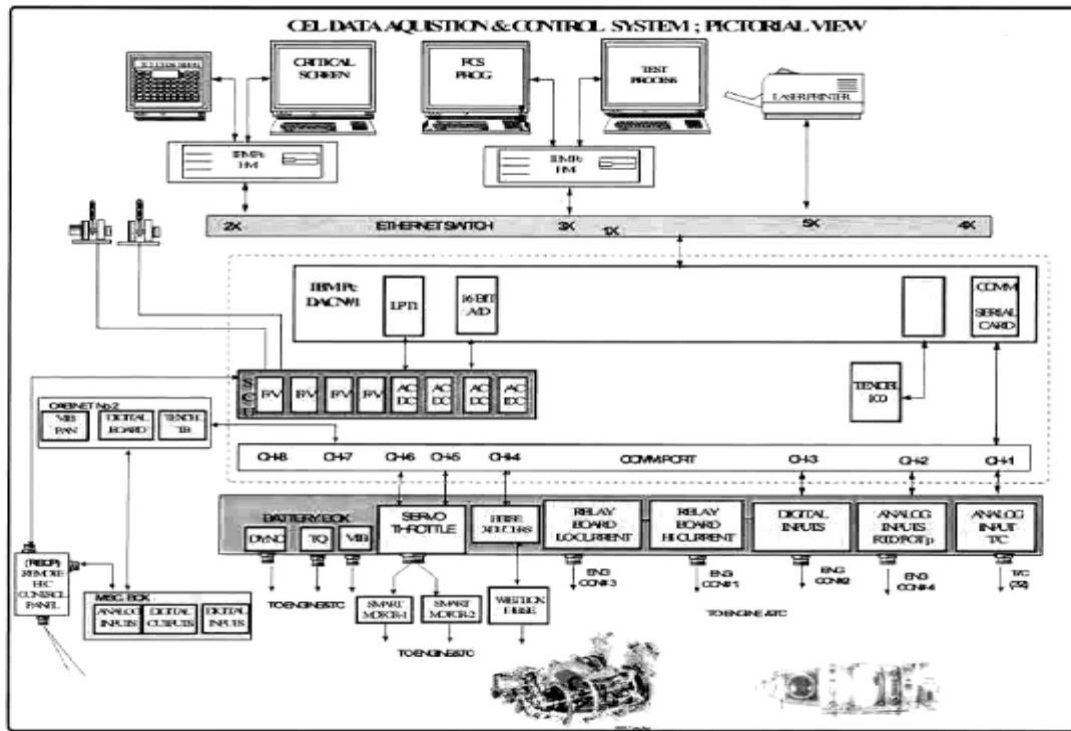


Εικόνα 66- ψηφιακή κονσόλα ελέγχου

Το σύστημα λήψης δεδομένων και ελέγχου συστήματος, συλλέγει και επεξεργάζεται δεδομένα από τον κινητήρα, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, επιτυγχάνοντας γρήγορη απόκριση και ακριβή καταγραφή κατά τις μεταβατικές συνθήκες μίας επιτάχυνσης. Το σύστημα αυτό μπορεί να πραγματοποιήσει τις ακόλουθες εργασίες:

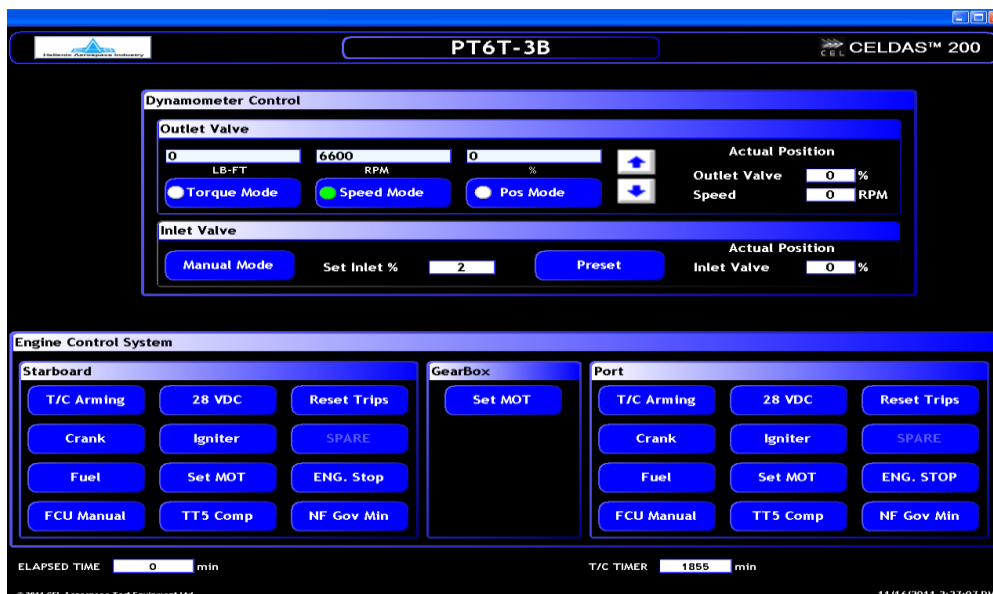
- Μέτρηση και διόρθωση τιμών παραμέτρων κινητήρα
- Εμφάνιση όλων των τιμών των παραμέτρων σε κάθε δοκιμή
- Καταγραφή των συναγεμίων σε πραγματικό χρόνο
- Επεξεργασία και υπολογισμός σημείων μετρήσεων σε σχέση με άλλη παράμετρο (πχ. ταλάντωση – στροφές κινητήρα)
- Έλεγχος των συστημάτων κινητήρα σε κανονική λειτουργία ή λειτουργία εκτάκτου ανάγκης
- Καταγραφή και έλεγχος του εξοπλισμού δοκιμών
- Αποθήκευση και εκτύπωση των μετρήσεων
- Πραγματοποίηση απλών υπολογισμών
- Καταγραφή τιμών υψηλής απόκρισης μεταβατική λήψη δεδομένων
- Καταγραφή τιμών υψηλής απόκρισης για προστασία του κινητήρα

Μία γενική μορφή της διάταξης του συστήματος δίνεται στην παρακάτω Εικ. 67



Εικόνα 67-Διάταξη συνδεσμολογίας συστήματος

Το σύστημα λειτουργεί με τρία επίπεδα πρόσβασης: Λειτουργία (Operation) Εικ. 68, Διακρίβωση (Calibration) Εικ. 69 και Συντήρηση (Maintenance). Κατά τη *Λειτουργία*, ο χειριστής ελέγχει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες για τον έλεγχο του κινητήρα μέσω μετρήσεων. Κατά τη *Διακρίβωση*, δίνεται πρόσβαση στη βάση δεδομένων διακρίβωσης, και αυτομάτως καλούνται τα επιλεγμένα κανάλια που θα καλιμπραριστούν όπως απαιτείται. Κατά τη *Συντήρηση*, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις διαδικασίες συντήρησης.



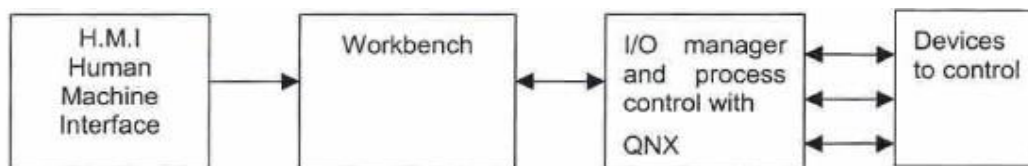
Εικόνα 68- Επιλογή λειτουργία



Εικόνα 69- Οθόνη διακρίβωσης

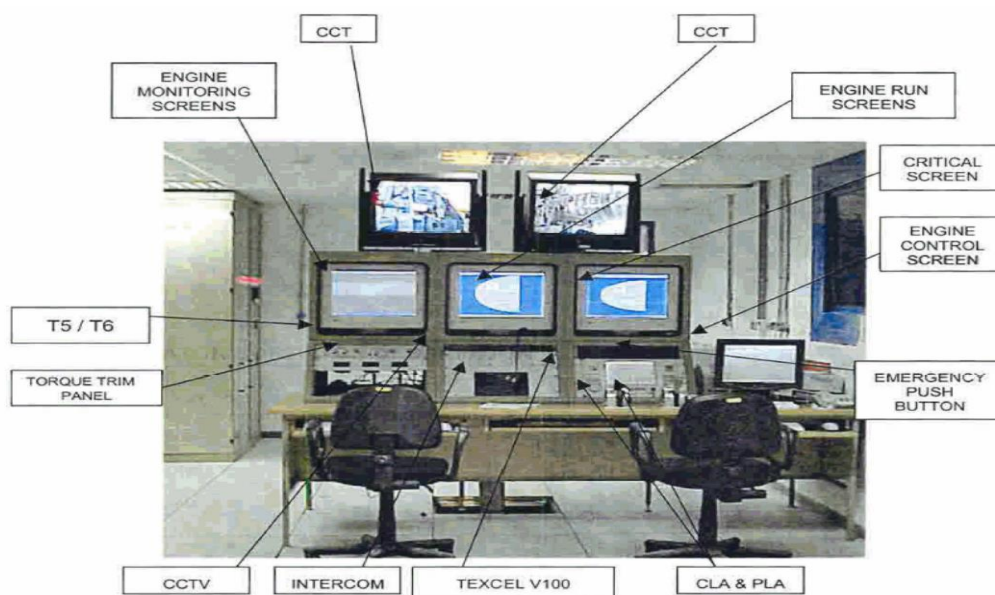
3.1.7. Περιγραφή λογισμικού

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία ISAGRAF ENHANCED 2.4. Συνδυάζει απόδοση και αξιοπιστία, είναι παραμετροποιήσιμο και φιλικό προς το χρήστη, λειτουργεί σε περιβάλλον Windows και το λογισμικό χαρακτηρίζεται κυρίως από αμφίδρομη επικοινωνία όπως περιγράφει η Εικ. 70.



Εικόνα 70-διάγραμμα περιγραφής λειτουργίας λογισμικού

Στην Εικ. 71 φαίνεται η κονσόλα χειρισμού η οποία φιλοξενεί το λογισμικό, τις οθόνες που περιγράψαμε παραπάνω αλλά και πολλές άλλες καθώς και τα χειριστήρια.

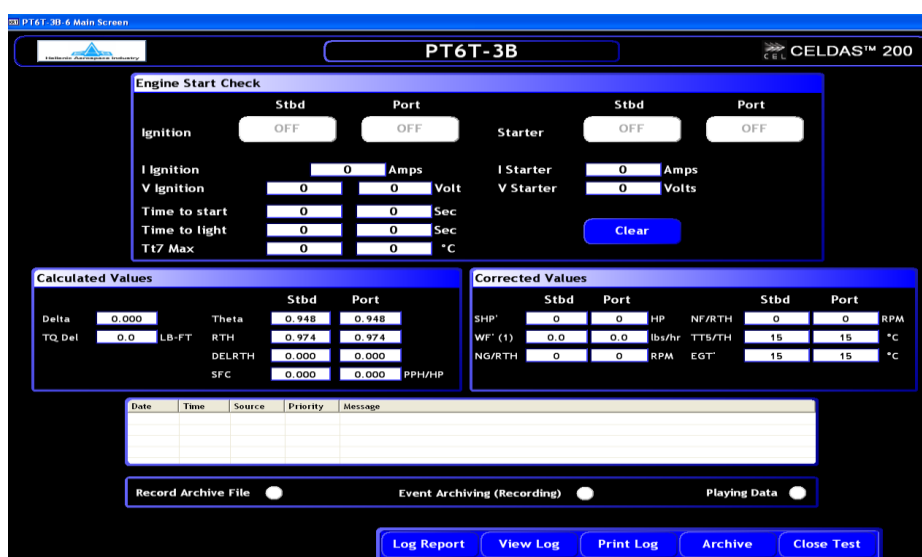


Εικόνα 71-Κονσόλα χειρισμού

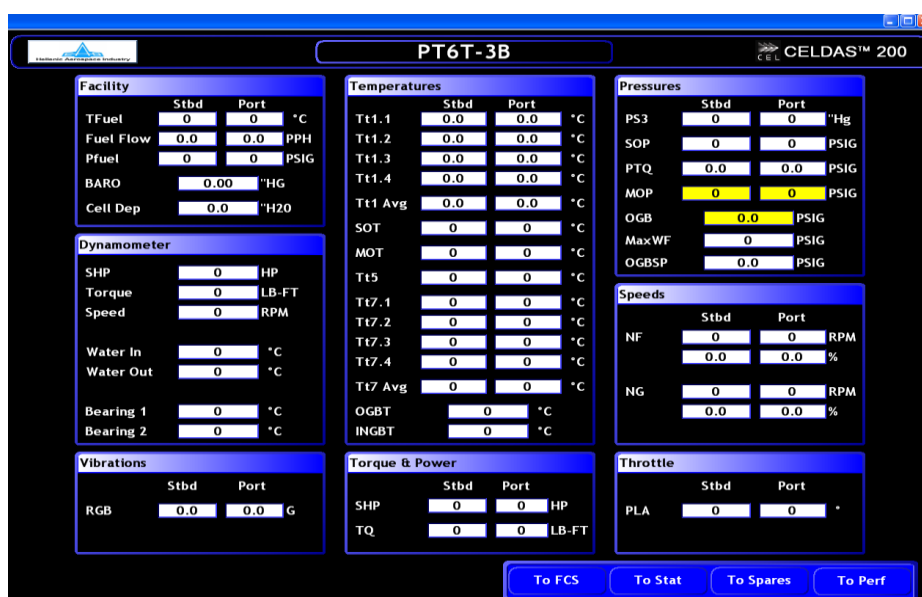
Η χρήση της οθόνης που αφορά την παρακολούθηση του κινητήρα (Engine Monitoring Screen) Εικ. 72 , παραπέμπει στα ακόλουθα στοιχεία:

- Παρακολούθηση κινητήρα
- Οθόνη ελέγχου εξοπλισμού
- Στατιστικά στοιχεία
- Πρόσθετα στοιχεία
- Απόδοση
- Ειδικά διαγράμματα κινητήρα

Αντίστοιχα η οθόνη λειτουργίας κατά την δοκιμή (Engine run Screen) Εικ. 73 χρησιμεύει στην επόπτευση και την παρουσίαση των δεδομένων κατά την λειτουργία του κινητήρα στην φάση της δοκιμής, η οθόνη αυτή μπορεί να εναλλαχθεί μέσω επιλογής ανά πάσα στιγμή με την οθόνη μέτρησης απόδοσης (Performance Screen) Εικ. 74.



Εικόνα 72-Monitoring Screen

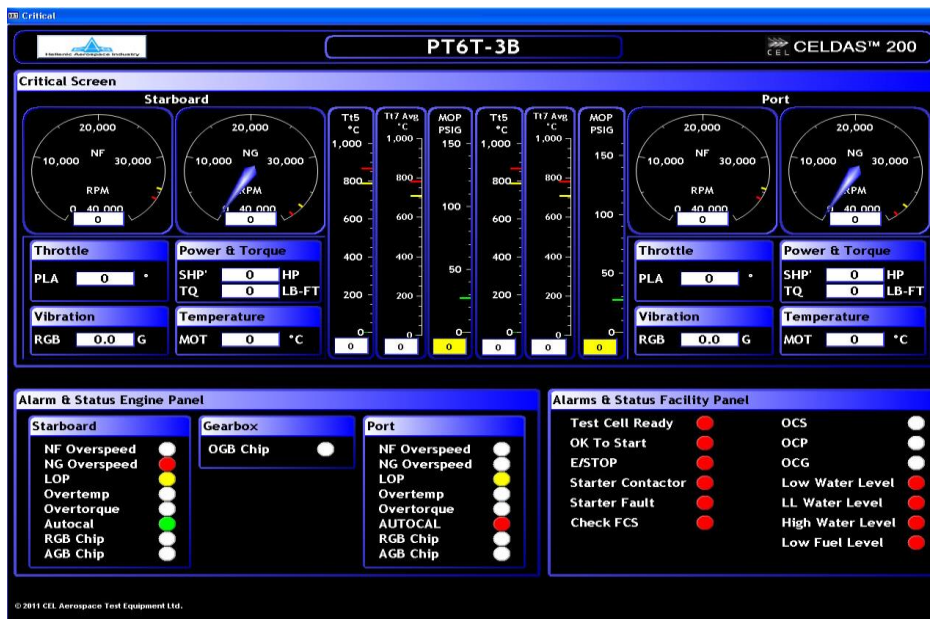


Εικόνα 73-Engine run Screen



Εικόνα 74-Performance Screen

Η κρίσιμη οθόνη (Critical Screen) Εικ. 75 είναι αυτή που προβάλλει όλα τα κρίσιμα στοιχεία του κινητήρα όπως στροφές (rpm) , ταλάντωση (Vibration) , θερμοκρασία εξαγωγής καυσαερίων και τελικώς αυτή που ειδοποιεί με συναγερμό για την οποιαδήποτε δυσλειτουργία μπορεί να συμβεί έτσι ώστε χρησιμοποιώντας το κουμπί έκτακτης ανάγκης (Emergency button) να κάνουμε ακαριαία παύση του κινητήρα για προστασία.



Εικόνα 75-Critical Screen

Τέλος τα PANEL Torque Trim & τα PANEL T5/T6 ελέγχουν την ρύθμιση αντίστασης ροπής και τις ειδικές ρυθμίσεις του κινητήρα αντίστοιχα.

Εκτός από τα προαναφερθέντα, που αφορούν τις ενδείξεις – μετρήσεις κατά την λειτουργία του κινητήρα, θα θέλαμε να αναφέρουμε την επικοινωνία του δωμάτιου οπού βρίσκεται η κονσόλα χειρισμού με τον θάλαμο δοκιμής. Αυτή επιτυγχάνεται μέσω επικοινωνίας Intercom. Η ύπαρξη κλειστού κυκλώματος παρακολούθησης με την βοήθεια του τμήματος CCTV & CNTL περιστρέφει την κάμερα στο επιθυμητό σημείο για εστίαση και παρατήρηση, καθώς με τη βοήθεια του συστήματος CLA ελέγχεται η γωνία της Μανέτας και με το σύστημα PLA ελέγχετε η μονάδα παροχής καυσίμου.

3.1.8. Διαδικασία δοκιμής.

Μετα το πέρας της προετοιμασίας σύνδεσης όλων των αισθητήριων οργάνων και των συσκευών πάνω στον κινητήρα, ορίζονται οι ρόλοι του προσωπικού κατά την διάρκεια της δοκιμής. Στην συγκεκριμένη δοκιμή χρειάστηκε η συμμετοχή τεσσάρων ατόμων εκ των οποίων δυο ήταν στο κοντρόλ του δοκιμαστηρίου και οι υπόλοιποι δυο είχαν τον ρόλο των παρατηρητών, εντός του θαλάμου που βρισκόταν η κλίνη δοκιμής με τον κινητήρα ΡΤ6Τ.

Ο πρώτος χειριστής αναλαμβάνει τον ρόλο του συντονιστή και με την βοήθεια της βιβλιογραφίας υπαγορεύει τα βήματα που ορίζει το εγχειρίδιο του εν λογο κινητήρα και ταυτόχρονα είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση του πάνελ οργάνων που ελέγχουν την θερμοκρασία καυσίμου T.F, την ροή του καυσίμου F.F καθώς και την εξαιρετικά σημαντική, θερμοκρασία των πτερυγίων της τουρμπίνας T5. Αντίστοιχα ο δεύτερος χειριστής επιφορτίζεται με τον χειρισμό της μανέτας που ρυθμίζει την ώση PCL(Power control lever), και την παρακολούθησή των πιέσεων λαδιού, των στροφών του κινητήρα και το σύστημα ελέγχου δονήσεων (Vibration).

Η διαδικασία με βάση των κατασκευαστή ορίζει η πρώτη εκκίνηση να διεξαχθεί σε AutoStart mode, η μανέτα ώσης στη θέση μηδέν μοίρες, εκκίνηση των συστημάτων ροής καυσίμου MFC και την ενεργοποίηση των συστημάτων λαδιού. Με τις ενδείξεις ροής καυσίμου και πίεση λαδιού να έχουν φτάσει στα επιθυμητά από τον κατασκευαστή επίπεδα, ξεκινά η διαδικασία έναυσης του κινητήρα.

Όταν όλα αυτά τα συστήματα κατοπιν εντολής του χειριστή Α' υλοποιηθούν από τον χειριστή Β' και ταυτόχρονα επιβεβαιωθούν δια ζώσης τότε το starter αναλαμβάνει το γύρισμα του κινητήρα μέχρι να φτάσει στις 8000 rpm. Ο κινητήρας έχει μπει σε λειτουργία και μόλις επιβεβαιωθεί από τον χειριστή Α' ότι υπάρχει ροή καυσίμου στα 5- 20 psig, η μανέτα ανεβαίνει προοδευτικά μέχρι τις 200 και παραμένει μέχρι η θερμοκρασία T5 να φτάσει στους 850 °C, σε περίπτωση που αυτή η θερμοκρασία αυξάνει ανεξέλεγκτα όπως συνέβηκε στην πρώτη δοκιμή, τότε έχουμε το φαινόμενο **Hot Start** και η δοκιμή κόβεται ακαριαία. Σε τέτοιες περιπτώσεις υπάρχει σημαντική πιθανότητα σε συνδυασμό με πιθανή διαρροή καυσίμου να προκληθεί πυρκαγιά εντός του κινητήρα οπότε πέραν του ακαριαίου κλεισίματος της μανέτας για να κοπεί η παροχή καυσίμου, δίνουμε ταυτόχρονα έναυση του starter έτσι ώστε με γύρισμα του κινητήρα να έχουμε ροή φρέσκου αέρα που θα ψύχει τον κινητήρα για να αποφευχθεί ζημιά στην τουρμπίνα.

Μετά την παύση της δοκιμής διεξάγεται οπτικός έλεγχος από τους παρατηρητές εντός του θαλάμου δοκιμής και αφού διαπιστώθηκε ότι το φαινόμενο **Hot Start** προήλθε από μια μικρή διαρροή η οποία επιδιορθώθηκε επιτόπου η δοκιμή ξανάρχισε με την διαδικασία να επαναλαμβάνεται μέχρι το σημείο όπου είχε διακοπεί. Το επόμενο βήμα βάση εγχειριδίου ήταν η μανέτα να ανεβεί σε θέση IDLE η θέση η οποία ο κινητήρας δουλεύει ενώ το ελικόπτερο είναι στο έδαφος με συγκεκριμένες πιέσεις θερμοκρασίες και στροφές. Σε αυτή την θέση γίνεται μέσω του λειτουργικού καταγραφή όλων των δεδομένων και εφόσον όλα είναι εντός ορίων και δεν θα κινδυνέψει η συνέχεια της δοκιμής προχωράμε σε θέση Max Power αλλά και σε ενδιάμεσες καταστάσεις με βάση πάντα τις οδηγίες του κατασκευαστή. Παράλληλα γίνεται καταγραφή όλων των απαραίτητων δεδομένων τα οποία εν συνέχεια θα επεξεργαστούμε για να κρίνουμε την καταλληλότητα του κινητήρα.

3.1.8.1. Αποτελέσματα δοκιμής

Ο κινητήρας βάση του κατασκευαστή έχει συγκεκριμένα όρια λειτουργίας και με βάση αυτά κρίνονται τα αποτελέσματα της δοκιμής. Οι τρεις βασικοί συντελεστές που έχουμε ως αναφορά και πρέπει να αποφευχθούν ώστε ο κινητήρας να θεωρηθεί σε πρώτη φάση λειτουργικός είναι:

- ⊗ Υπερθέρμανση (*Over Temperature*)
- ⊗ Υπερστροφή (*Over Speed*)
- ⊗ Παραβίαση του ορίου ροπής (*Over Torque*)

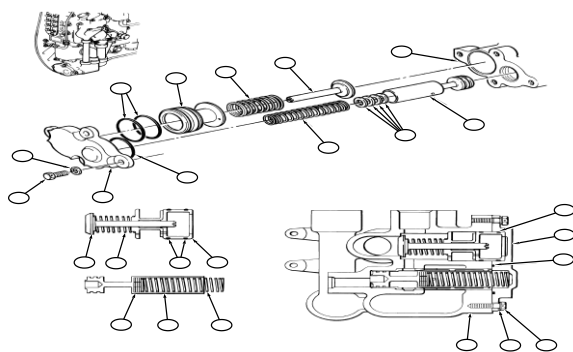
Τα όρια αυτά δίνονται από τον παρακάτω πίνακα.

Parameter:	Performance Limits		
	LIMITS	PT6T-3, Pre-SB5112	PT6T-3, Post-SB5112
		Rating: 900 SHP	Rating: 910 SHP
For Post-SB5126 or 5178 or 5214 or 5261	Min:	N/A	N/A
	Max:	37800	37800
For Post-SB5136 or 5179 or 5215 or 5357	Min:	N/A	N/A
	Max:	37800	37800
Ng FOR REPAIRED POWER SECTION:			
For Post-SB5126 or 5178 or 5214 or 5261	Min:	N/A	N/A
	Max:	Ref. Fig. 721	Ref. Fig. 721
For Post-SB5136 or 5179 or 5215 or 5357	Min:	N/A	N/A
	Max:	Ref. Fig. 721	Ref. Fig. 721
Tt5 FOR OVERHAULED POWER SECTION:			
For Post-SB5126 or 5178 or 5214 or 5261	Trimmed	1870	1870
For Post-SB5136 or 5179 or 5215 or 5357	Trimmed	1905	1905
Tt5 FOR REPAIRED POWER SECTION:			
	Trimmed	Ref. Fig. 723	Ref. Fig. 723
SFC FOR OVERHAULED POWER SECTION:			
	Max:	0.615	0.615
SFC FOR REPAIRED POWER SECTION:			
	Max:	0.635	0.635

Πίνακας 9-Όρια λειτουργίας PT6T

Εκτός από αυτές τις τρεις βασικές παραμέτρους που ελέγχονται όμως έχουμε και λειτουργικούς ελέγχους που πρέπει να περάσουν επιτυχώς τα τεστ για να κριθεί λειτουργικός ο κινητήρας. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με την πρώτη ρύθμιση είτε με κάποιες μικρορυθμίσεις που θα λάβουν χώρα κατά την διάρκεια της δοκιμής και είναι οι ακόλουθοι:

- Έλεγχος της πίεσης λαδιού στο τμήμα ισχύος και στον μειωτήρα, εάν παραστεί ανάγκη ρύθμισης γίνεται με την βοήθεια προσθήκης αποστατών στις αντλίες λαδιού



Εικόνα 76-ρύθμιση πίεσης λαδιού

- Έλεγχος της βαλβίδας εξισορρόπησης αερίων (*Bleed Valve*), η ρύθμιση της επιτυγχάνεται με την αλλαγή εξαρτήματος ροοσυστολής (*retain ring or orifich*) και πρέπει να ανοιγοκλείνει με βάση το διάγραμμα της [Εικ. 44](#) και την εξωτερική θερμοκρασία.
- Έλεγχος σωστής επιτάχυνσης -επιβράδυνσης χωρίς στολαρισματα του κινητήρα και με βάση τους προβλεπόμενους χρόνους απόκρισης από τον κατασκευαστή. Αυτό ουσιαστικά μας καταμαρτυρά ότι η ροη αέρα κατά μήκος του κινητήρα έχει τις σωστές πιέσεις και δεν δημιουργείται πουθενά αρνητική πίεση ως προς το ζητούμενο, κατάσταση που έχει ως αποτέλεσμα το φρενάρισμα η την Υπερστροφή του κινητήρα.
- Έλεγχος απόκρισης μανέτας (*Handling Check*), με αυτόν τον έλεγχο επιβεβαιώνουμε ότι έχει γίνει το σωστό *rigging* το οποίο θα μας εξασφαλίσει ότι όλοι οι χειρισμοί και οι εντολές που θα δίνουμε θα εκτελούνται επακριβώς. Μιας και όπως έχουμε προαναφέρει η μανέτα λειτουργεί με διαβάθμιση μοιρών πράγμα που αντιστοιχεί σε ποσοστό ώσης που απαιτούμε από τον κινητήρα κατά την λειτουργία.
- Έλεγχος εύρους λειτουργίας Torque Meter. Σε αυτήν την περίπτωση και με βάση κάποιες μετρήσεις, καταχωρούνται σε ειδικό ταμπελακία πάνω στον κινητήρα οι τιμές οι οποίες θα διαβάσει μέσω ηλεκτρικού σήματος το **Tranduser** για την ροπή του κινητήρα. Δίδεται έτσι το πραγματικό σημείο μηδέν, το εύρος και ο δείκτης απόκλισης ώστε να καλιμπραρεται το όργανο ένδειξης ροπής.
- Έλεγχος μειωτήρα (RGB). Με την εναλλάξ λειτουργία των κινητήρων γίνεται έλεγχος των πιέσεων του Torquemeter καθώς και η λειτουργία του συστήματος σύμπλεξης χωρίς την ύπαρξη κραδασμών στον κινητήρα.

- Έλεγχος μονάδας καυσίμου. Μέσω της λειτουργίας σε εύρος στροφών ανιχνεύεται αν η ροή καυσίμου είναι η προκαθορισμένη όπως ορίζεται από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

Αφού ολοκληρωθήκαν όλοι οι έλεγχοι κατά την διάρκεια της δοκιμής και έγιναν οι απαιτούμενες καταγραφές, στην επόμενη σελίδα παρατίθεται η αναφορά της δοκιμής (*Engine Performance Results*)*

* Στο παρακάτω έγγραφο όπως και στο υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί στην εν λογο πτυχιακή, αποκρύπτονται ευαίσθητα δεδομένα με βάση την Πολιτική Απορρήτου & προστασίας που διατηρεί η E.A.B.

Engine Performance Results

PWC - PT6 ENGINE PERFORMANCE PROGRAM

```

-----
TEST DATE      TEST TIME      TEST CELL      TEST TYPE      WORK ORDER
              11:18              HAI GREC      Repair          41000000
ENG S/N  BUILD  COND  TSG (F)  SG    SG BASE  LHV (Btu/lb )
              1    10    63.     0.798  0.800    18545.
1ST STAGE VANE AREA  2ND STAGE VANE AREA  COLD HARNESS RESIS. (ohms)
              0.00              0.00              0.00
    
```

REMARK:

Left (Port) side of twin

```

TSO          TBO
  0.          0.
    
```

```

NG          NF
 37851.    32985.
BARO (in.Hg)  P1000 (in.Hg)  P3 (in.Hg)
 29.33          29.33          215.93
    
```

```

TEMPERATURE TRIM DELTA (C)
  0.
    
```

```

WF1 (lb/h)  WF2 (lb/h)  TF1 (C)  TF2 (C)  ITT (C)
 536.0      536.0      17.2     17.2     757.3
    
```

```

DYNQ TQ (lbf-ft)  ENG TQ (psid )
 714.270          49.005
    
```

```

T1 (C)      :   18.1   14.3   15.7   16.5
T1 AVG      :   16.2
    
```

```

T7 (C) PORT: 632.5  632.1  626.0  636.4
T7          STBD:
T7 AVG      : 631.7
    
```

PT6T-3B

TWIN ENGINE RESULTS, LEFT SIDE

DYNAMOMETER		TORQUE METER		WF (NCA)	W1N
SHPN	SFC (CA)	SHPN	SFC (CA)		
913.56	0.603	864.95	0.637	551.0	6.9828
N1N	P3N	T5DN	T5AN	T7N	
37773.8	108.21	1949.	1848.	1617.2	

T7: AVG. = 631.7, SPRD. = 10.4

```

ITT TRIM (T5DN - T5AN) = 101.
ITT TRIM TARGET       = 105. +/- 5.
    
```

GOOD ITT TRIM

Πίνακας 10-Αποτελέσματα δοκιμής

ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

- NG= ΣΤΡΟΦΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ
- NF = ΣΤΡΟΦΕΣ ΤΟΥΡΜΠΙΝΑΣ
- WF1 = ΡΟΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
- ITT ή TT5=ΘΕΡΜ. ΤΟΥΡΜΠΙΝΑΣ
- DYNQ TQ= ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
- ENG TQ = ΡΟΠΗ ΜΕΙΩΤΗΡΑ *
- T1 & T2 = ΘΕΡΜ. ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ
- T7 =ΘΕΡΜ. ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ.
- N1N= ΣΤΡΟΦΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
- TF1 & TF2= ΘΕΡΜ. ΚΑΥΣΙΜΟΥ
- T5DN=ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΥΠΟΛ. ΘΕΡΜ.
- T5AN=ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΘΕΡΜ.
- ITT TRIM=ΡΥΘΜΙΣΗ Της T5
- ITT TARGET=ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΔΙΑΦΟΡΑ

S/N:
Operator Name:
Date:
Reason for test: Repair
Remark:
Work Order: 4.1E+11

Time: 8:47:53 AM
Elapsed Time (min): 400.4831543
Cond#: 1
Comment: take off

Engine Run	Values
Stbd - Tfuel (DegC)	11
Stbd - Fuel Flow (pph)	0
Stbd - Pfuel (psig)	-2
Port - Tfuel (DegC)	7
Port - Fuel Flow (pph)	601.1
Port - Pfuel (psig)	12
Baro ("HG)	29.39
Cell Dep ("H2O)	0
Torque & Power	
Stbd - SHP (HP)	0
Stbd - TQ (lbsft)	18
Port - SHP (HP)	1007
Port - TQ (lbsft)	802
SHP Dyno (HP)	1044
Torque Dyno (lbsft)	834
Speed, Vibration	
Stbd - NF (RPM)	0
Stbd - NF (%)	0
Stbd - NG (RPM)	0
Stbd - NG (%)	0
Stbd - RGB Vib (G)	7
Port - NF (RPM)	32994
Port - NF (%)	99.5
Port - NG (RPM)	38720
Port - NG (%)	101.6
Port - RGB Vib (G)	20

Πίνακας 11- Μετρούμενα μεγέθη

Throttle	
Stbd - PLA (Deg)	-2
Port - PLA (Deg)	91
Temperatures	
Stbd - Tt1.1 (DegC)	6.5
Stbd - Tt1.2 (DegC)	5.7
Stbd - Tt1.3 (DegC)	5.8
Stbd - Tt1.4 (DegC)	5.9
Stbd - Tt1 Avg (DegC)	5.9
Stbd - SOT (DegC)	12
Stbd - MOT (DegC)	6
Stbd - Tt5 (DegC)	6
Stbd - Tt7.1 (DegC)	8
Stbd - Tt7.2 (DegC)	8
Stbd - Tt7.3 (DegC)	8
Stbd - Tt7.4 (DegC)	8
Stbd - Tt7 Avg (DegC)	8
Port - Tt1.1 (DegC)	10.3
Port - Tt1.2 (DegC)	5.9
Port - Tt1.3 (DegC)	6.7
Port - Tt1.4 (DegC)	7.8
Port - Tt1 Avg (DegC)	7.5
Port - SOT (DegC)	33
Port - MOT (DegC)	75
Port - Tt5 (DegC)	787
Port - Tt7.1 (DegC)	646
Port - Tt7.2 (DegC)	644
Port - Tt7.3 (DegC)	640
Port - Tt7.4 (DegC)	655
Port - Tt7 Avg (DegC)	646
OGBT (DegC)	92
INGBT (DegC)	83
Pressures	
Stbd - Ps3 ("Hg)	29
Stbd - SOP (psig)	0
Stbd - PTQ (psig)	1.3
Stbd - MOP (psig)	1
Port - Ps3 ("Hg)	233
Port - SOP (psig)	163
Port - PTQ (psig)	58
Port - MOP (psig)	92
OGB (psig)	71.8
MaxWF (psia)	998

Πίνακας 12-Μετρούμενα μεγέθη

Calculated Value

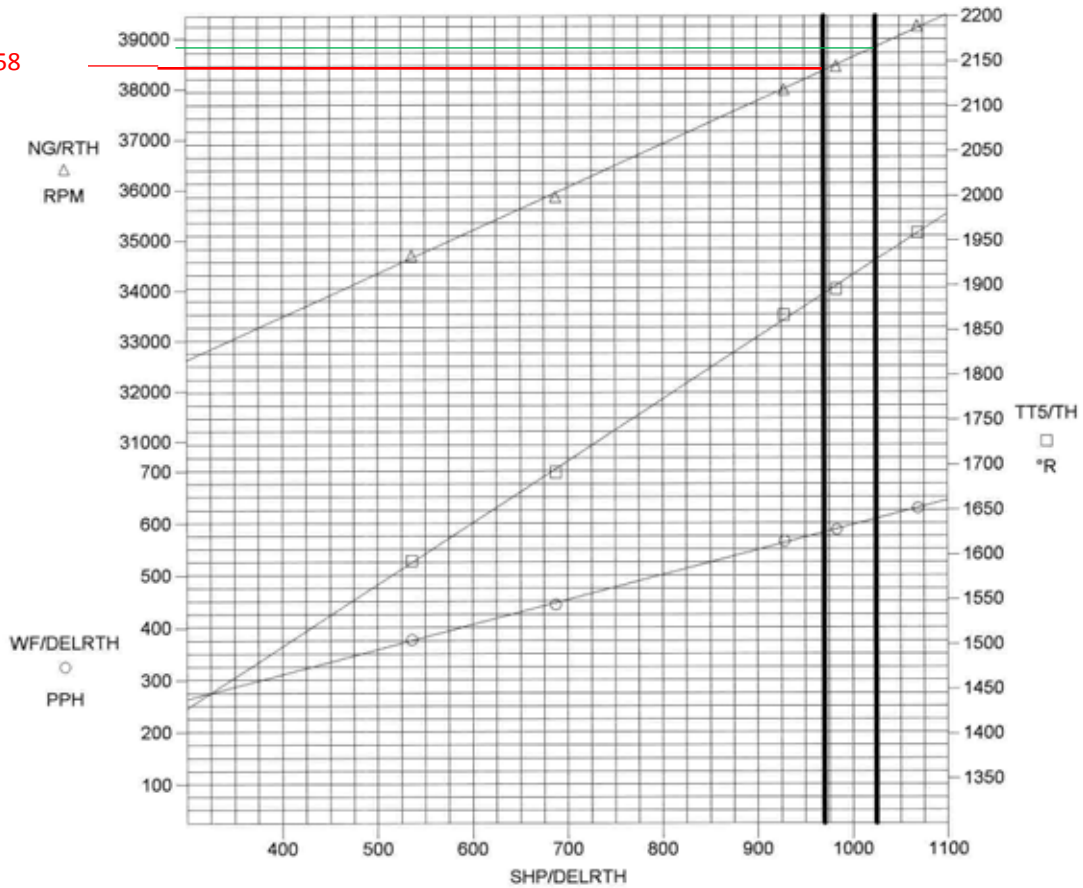
Delta	0.982
Tq Del (Lbsft)	820.8
Stbd - Theta	0.969
Stbd - RTH	0.984
Stbd - DELRTH	0.967
Stbd - SFC (pph/HP)	0
Stbd - SHP' (HP)	0
Stbd - WF' (lbs/hr)	0
Stbd - NG/RTH (RPM)	0
Stbd - NF/RTH (RPM)	0
Stbd - TT5/TH (DegC)	15
Stbd - EGT' (DegC)	17
Port - Theta	0.974
Port - RTH	0.987
Port - DELRTH	0.969
Port - SFC (pph/HP)	0.577
Port - SHP' (HP)	1083
Port - WF' (lbs/hr)	624.9
Port - NG/RTH (RPM)	39231
Port - NF/RTH (RPM)	33430
Port - TT5/TH (DegC)	816
Port - EGT' (DegC)	671

Engine Start Check

Stbd - Time to start (Sec)	0
Stbd - Time to light (Sec)	0
Stbd - Tt7 Max (DegC)	0
Port - Time to start (Sec)	16
Port - Time to light (Sec)	9
Port - Tt7 Max (DegC)	220

Πίνακας 13-υπολογισμένες τιμές

38458



SUMMARY: ACCEPTANCE PERFORMANCE - CORRECTED TO SEA LEVEL CONDITIONS

DATE: ENGINE MODEL: PT6T-3B SIDE: PORT
 PORT S/N: STBD S/N: GEARBOX S/N:

AT 970 SHP/DELRTH	TT5/TH: 1890	AT 1025 SHP/DELRTH	TT5/TH: 1928
NG/RTH: 38354	SFC: .60084	NG/RTH: 38825	SFC: .59417

ACCEPTED....
 REJECTED.... X INSPECTOR:.....
 DATE:.....

Πίνακας 14-Διάγραμμα σύγκρισης μετρούμενων τιμών

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τα οποία τα τοποθετούμε στο παραπάνω διάγραμμα ο κινητήρας κρίθηκε μη λειτουργικός και θα προωθηθεί για αποσυναρμολόγηση και εκ νέου επισκευή. Ο λόγος της απόρριψης ήταν η Υπερστροφή κατά 104 rpm με βάση τα όρια που δίνει ο κατασκευαστής για μερική επισκευή του. Οσον αφορά τις θερμοκρασίες, ειδική κατανάλωση καυσίμου είναι εντός ορίων.

Βάση των παραπάνω αποτελεσμάτων και με την βοήθεια του κεφαλαίου βλαβολογίας (Trouble Shooting) του εγχειριδίου βγαίνει το συμπέρασμα, ότι εντοπίζεται πιθανό πρόβλημα στα διάκενα μεταξύ των σταθερών και κινητών πτερυγίων του συμπιεστή. Με βάση αυτά και από την στιγμή που η θερμοκρασία ΙΤΤ είναι εντός των ορίων μπορούμε με την αντικατάσταση των πτερυγίων (σταθερών – κινητών) και το κατάλληλο matching (2.1.4.2& 2.1.4.3) να μειώσουμε τις στροφές που είναι εκτός ορίων με συνεπακόλουθο την αύξηση της θερμοκρασίας. Η διαδικασία αυτή είναι επίπονη γιατί απαιτεί αποσυναρμολόγηση και λεπτομερή μελέτη καθώς όλα πρέπει να παραμείνουν εντός ορίων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας κάναμε μια ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των στροβιλοκινητήρων που αφορούν την εφαρμογή τους στα πτητικά μέσα. Μέσα από την αναδρομή αυτή αναφέρθηκαν τα είδη στροβιλοκινητήρων διαχωριζόμενα κυρίως ως προς το μέσο παραγωγής Ώσης αλλά και την μορφολογία τους. Ενισχύθηκε η αντίληψη ότι πρόκειται για μια εφεύρεση η οποία ήταν ανατρεπτική και συντέλεσε στον εκμηδενισμό σχεδόν των αποστάσεων αλλά χρησιμοποιήθηκε και στην ανάπτυξη της πολεμικής βιομηχανίας μιας και η υπεροχή από αέρος ήταν ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την έκβαση ενός πολέμου.

Όλα τα παραπάνω συντέλεσαν ώστε πέρα από την ανακάλυψη αυτής της εφεύρεσης να υπάρχει ένας συνεχής αγώνας βελτίωσης των μηχανών αυτών. Ο αγώνας διεξάγεται μέσω των νέων τεχνολογιών που έχουν αναπτυχθεί στην κατασκευή νέων υλικών ανθεκτικών στις υψηλές θερμοκρασίες, στην αντοχή οσον αφορά την κατασκευή αλλά με γνώμονα πάντα το μειωμένο βάρος. Το μειωμένο βάρος είναι ένας από τους σημαντικούς παράγοντες στην αεροπλοΐα, τόσο για την επίτευξη της εύκολης πτητικότητας όσο και για την εξοικονόμηση σε καύσιμα μιας και αυτό εξασφαλίζει αυτομάτως μεγαλύτερη αυτονομία σε συνδυασμό με μειωμένο κόστος.

Στην συγκεκριμένη εργασία πέραν των προαναφερθέντων, εστίασαμε στην παρουσίαση του αξονοστρόβιλου κινητήρα (Turboshaft) της κατασκευάστριας εταιρείας “PRATT & WHITNEY” με κωδική ονομασία PT6T-3B-6. Ο εν λόγω κινητήρας αποτέλεσε τεράστια επιτυχία και εγκαθίδρυσε την κατασκευάστρια εταιρεία μιας από τις κορυφαίες στο χώρο των κινητήρων και πρωτοπόρα στην παγκόσμια αγορά ελικοπτέρων, εξαιτίας της υψηλής απόδοσης και αξιοπιστίας, του. Η βασική έκδοση ενός κινητήρα PT6T απαρτίζεται από δυο τμήματα παραγωγής ισχύος τα οποία συνεργάζονται με ένα κιβώτιο ταχυτήτων μέσω ενός συστήματος πολλαπλής σύμπλεξης, επιτρέποντας έτσι την ενιαία αλλά και μεμονωμένη λειτουργία των κινητήρων αναλόγως την βούληση και τις συνθήκες. Στα πλαίσια αυτής της παρουσίασης είχαμε την τύχη να παραστούμε σε δοκιμή του συγκεκριμένου κινητήρα και να βιώσουμε μια αξέχαστη εμπειρία που περιλάμβανε την προετοιμασία, την δοκιμή τους ελέγχους αλλά και να αφουγκραστούμε από κοντά τον προβληματισμό για τα αποτελέσματα αλλά ακόμα και να συμμετάσχουμε στην αντιμετώπιση του προβλήματος με την βοήθεια της βλαβολογίας που παρουσιάζεται αναλυτικά μέσα στο εγχειρίδιο.

Αυτή η εμπειρία μας βοήθησε να καταλάβουμε σε αρκετά μεγάλο βαθμό την αρχή λειτουργίας όχι μόνο του συγκεκριμένου κινητήρα αλλά γενικά των στροβιλοκινητήρων και μας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι οι αρχές της θερμοδυναμικής και της φυσικής είναι το A & το Ω για την σωστή λειτουργία του. Πέρα αυτού όμως, ένα εξίσου σημαντικό που αποκομίσαμε με βάση την λειτουργία του δοκιμαστηρίου αλλά κυρίως του προσωπικού της, είναι ότι η πιστή τήρηση των οδηγιών και το υψηλό αίσθημα αεροπορικής συνείδησης στην εργασία, είναι τα σημαντικότερα για να εξασφαλιστούν η ασφάλεια του προϊόντος αλλά κυριότερα η ασφάλεια του εμπύχου δυναμικού είτε αυτό συντηρεί τον κινητήρα-ες, είτε θα τον χρησιμοποιήσει εντός του πτητικού μέσου.

Οι ανοχές και τα όρια είναι αυστηρά και πολύ περιορισμένα μιας και έτσι επιτυγχάνεται η εύρυθμη λειτουργία σε συνδυασμό με την μέγιστη απόδοση. Οι παρατηρήσεις που προκύπτουν, είτε αυτές είναι από τον χρήστη είτε από τον τεχνικό

σε συνδυασμό με τις ερευνητικές ομάδες είναι αυτές που συντελούν στην διαρκή εξέλιξη των κινητήρων προς όφελος όλων εμάς.

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τους κ. **Ζέρβα Χρήστο** Διευθυντή εργοστασίου κινητήρων και δοκιμαστηρίου, τον κ. **Θεοδόσιο Λιόκαρη** Προϊστάμενο τμήματος δοκιμαστηρίου αλλά ειδικότερα τον κ. **Λιάρο Στυλιανό** δοκιμαστή κινητήρων ο οποίος ήταν από την αρχή δίπλα μας σε κάθε βήμα παρέχοντας μας τις απαραίτητες πληροφορίες, βιβλιογραφίες και επιλύοντας τις τυχόν απορίες μας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΕΙΚΟΝΕΣ.

ΕΙΚΟΝΑ 1-ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑ	7
ΕΙΚΟΝΑ 2- ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΩΣΗΣ ΒΑΣΗ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ	9
ΕΙΚΟΝΑ 3- ΓΕΝΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΩΣΗΣ	10
ΕΙΚΟΝΑ 4- ΤΥΠΟΙ ΚΩΝΩΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΑΕΡΑ	11
ΕΙΚΟΝΑ 5- ΤΥΠΟΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ.....	12
ΕΙΚΟΝΑ 6- ΤΥΠΟΙ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΕΩΣ	13
ΕΙΚΟΝΑ 7- ΑΚΡΟΦΥΣΙΑ ΕΞΑΓΩΓΗΣ	15
ΕΙΚΟΝΑ 8- ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑΣ ΩΣΗΣ.....	15
ΕΙΚΟΝΑ 9- ΤΥΠΟΙ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΗΣ.....	15
ΕΙΚΟΝΑ 10- ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ.....	16
ΕΙΚΟΝΑ 11- ΓΕΝΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΩΣΗΣ ΜΕ ΜΕΤΑΚΑΥΣΗΣ	18
ΕΙΚΟΝΑ 12- ΜΕΤΑΚΑΥΣΗΣ ΜΑΧΗΤΙΚΟΥ JET ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΑΠΟΓΕΙΩΣΗΣ	18
ΕΙΚΟΝΑ 13- ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ (TURBOFAN ENGINE) ΣΕ ΤΟΜΗ.....	19
ΕΙΚΟΝΑ 14- ΞΕΟΔ. ΑΕΡΑ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ ΑΠΟ ΑΓΩΓΟ (Α) ΜΙΚΡΟΥ ΚΑΙ (Β) ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ..	20
ΕΙΚΟΝΑ 15- ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ ΕΜΠΡΟΣΘΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	20
ΕΙΚΟΝΑ 16- ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ ΣΤΟ ΠΙΣΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	21
ΕΙΚΟΝΑ 17- F111 ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΕΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΒΕΛΟΥΣ	22
ΕΙΚΟΝΑ 18 ΕΛΙΚΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ (TURBOPROP).....	23
ΕΙΚΟΝΑ 19- ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΑΞΟΝΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	24
ΕΙΚΟΝΑ 20- T-53 ΕΛΙΚΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΣΤΡΟΒΙΛΟ	24
ΕΙΚΟΝΑ 21- ΓΕΝΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΩΣΗΣ ΓΙΑ ΕΛΙΚΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	26
ΕΙΚΟΝΑ 22- ΤΟΜΗ ΑΞΟΝΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ (TURBOSHAFT)	27
ΕΙΚΟΝΑ 23- ΑΥΛΩΘΗΤΗΡΑΣ (RAMJET).....	28
ΕΙΚΟΝΑ 24- ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΥΛΩΘΗΤΗΡΑ (TURBORAMJET)	29
ΕΙΚΟΝΑ 25- ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ (A/K F119 ΤΗΣ P&W)*	30
ΕΙΚΟΝΑ 26- ΕΠΙΠΕΔΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΑΠΟ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	33
ΕΙΚΟΝΑ 27- ΟΙ ΚΥΡΙΕΣ ΠΗΓΕΣ ΘΟΡΥΒΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ "ΠΕΡΑΣΜΑ" ΕΝΟΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ.....	34
ΕΙΚΟΝΑ 28- ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΗΧΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ	34
ΕΙΚΟΝΑ 29- ΠΟΛΛΑΠΛΟΙ ΑΓΩΓΟΙ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ	35
ΕΙΚΟΝΑ 30- ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ PRATT & WHITNEY PT6T	39
ΕΙΚΟΝΑ 31- AGUSTA BELL 212.....	42
ΕΙΚΟΝΑ 32- SIKORSKY S58-T	42
ΕΙΚΟΝΑ 33- LEONARDO AB-412	42
ΕΙΚΟΝΑ 34- ΤΟΜΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ PT6T-3B-6.....	45
ΕΙΚΟΝΑ 35- ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΛΕΞΗΣ – ΑΠΟΣΥΜΠΛΕΞΗΣ ΆΞΟΝΑ	46
ΕΙΚΟΝΑ 36- ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ PT6T	46
ΕΙΚΟΝΑ 37- ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΙΩΤΗΡΑ ΆΞΟΝΑ ΙΣΧΥΟΣ	47
ΕΙΚΟΝΑ 38- ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΙΠΑΝΣΗΣ -ΕΛΑΙΟΔΟΧΕΙΑ	48
ΕΙΚΟΝΑ 39- ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΠΙΕΣΗΣ – ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	48
ΕΙΚΟΝΑ 40- ΟΘΟΝΗ ΠΡΟΒΟΛΗΣ ΣΗΜΑΤΩΝ- ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΝΤΟΣ ΠΙΛΟΤΗΡΙΟΥ	50

EIKONA 41-(40) ΟΘΟΝΕΣ ΠΡΟΒΟΛΗΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΤΟ ΠΙΛΟΤΗΡΙΟ	50
EIKONA 42- ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΡΓΑΝΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ	51
EIKONA 43- ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΠΗΣ.....	52
EIKONA 44- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΒΑΛΒΙΔΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ- ΕΞΑΕΡΩΣΗΣ (BLEED VALVE).....	53
EIKONA 45- ΤΟΜΗ BLEED VALVE	53
EIKONA 46- ΒΑΛΒΙΔΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ (COMPRESSOR TURBINE VANE RING)	54
EIKONA 47- ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ (COMPRESSOR TURBINE).....	55
EIKONA 48- ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΛΟΓΟ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ.....	55
EIKONA 49- ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΙΣΧΥΟΣ (POWER TURBINE VANE RING)	56
EIKONA 50- ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ (EXHAUST DUCT).	57
EIKONA 51- ΜΕΙΩΤΗΡΑΣ ΣΤΡΟΦΩΝ (REDUCTION GEAR BOX).....	58
EIKONA 52- ΚΙΒΩΤΙΟ ΚΙΝΗΣΗΣ ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΩΝ (ACCESSORIES GEAR BOX).....	60
EIKONA 53- ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	61
EIKONA 54-ΦΙΛΤΡΑ ΕΛΑΙΟΥ	62
EIKONA 55-ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΜΕΙΩΤΗΡΑ ΣΤΡΟΦΩΝ (REDUCTION GEAR BOX OIL SYSTEM)...	63
EIKONA 56-ΘΑΛΑΜΟΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΑΕΡΙΩΝ (GAS GENERATOR CASE).....	64
EIKONA 57-ΑΝΤΛΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (FUEL PUMP).....	65
EIKONA 58-ΜΟΝΑΔΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ M.F.C.U	65
EIKONA 59- ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΡΟΠΗΣ (TORQUE SYSTEM).....	66
EIKONA 60- ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ (IGNITION SYSTEM)	67
EIKONA 61-ΚΛΙΝΗ ΔΟΚΙΜΗΣ.....	68
EIKONA 62-ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ (ΦΛΑΝΤΖΑ)	70
EIKONA 63-ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΔΟΚΙΜΑΣΤΗΡΙΟΥ.	72
EIKONA 64-“ΚΕΝΤΡΟ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ” (<i>ENGINE CONNECTION CENTER =ECC</i>)	73
EIKONA 65-ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ ΚΟΝΣΟΛΑ ΕΛΕΓΧΟΥ.	76
EIKONA 66- ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΟΝΣΟΛΑ ΕΛΕΓΧΟΥ	77
EIKONA 67-ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	78
EIKONA 68- ΕΠΙΛΟΓΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	78
EIKONA 69- ΟΘΟΝΗ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ	79
EIKONA 70-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	79
EIKONA 71-ΚΟΝΣΟΛΑ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ	79
EIKONA 72-MONITORING SCREEN	80
EIKONA 73-ENGINE RUN SCREEN.....	80
EIKONA 74-PERFORMANCE SCREEN	81
EIKONA 75-CRITICAL SCREEN	81
EIKONA 76-ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΛΑΔΙΟΥ.....	84

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΠΙΝΑΚΕΣ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1- ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 2- ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 3- ΤΥΠΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΑΝΑ ΕΛΙΚΟΠΤΕΡΟ	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 4- ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΡΤ6Τ	43
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΦΟΡΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΑΞΟΝΩΝ	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΜΕΡΗ ΚΙΒΩΤΙΟΥ ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΩΝ	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 7- ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 8-ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΑΞΟΝΑ	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 9-ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΡΤ6Τ	83
ΠΙΝΑΚΑΣ 10-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	86
ΠΙΝΑΚΑΣ 11- ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ.....	87
ΠΙΝΑΚΑΣ 12-ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ.....	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 13-ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 14-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΩΝ ΤΙΜΩΝ	90

ΠΗΓΕΣ

- Εικ. 1 <https://www.experoinc.com/post/data-and-digital-twins>
- Εικ. 2 <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/turbth.html>
- Εικ. 3 http://www.pilotfriend.com/outside_link/general%20thrust%20equation1.htm
- Εικ. 4 <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/inlet.html>
- Εικ. 5 <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/compress.html>
- Εικ. 6 <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/annular-combustor>
- Εικ. 7 <https://askeyphysics.org/2016/02/26/#jp-carousel-15593>
- Εικ. 8 <http://www.360aviationworld.com/b727.html>
- Εικ. 9 <https://valadis-kotorlos.blogspot.com/2015/11/slowng-down-aircraft-systems.html>
- Εικ. 10 <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/burnth.html>
- Εικ. 11 https://valadis-kotorlos.blogspot.com/2016/07/blog-post_22.html
- Εικ. 12 https://valadis-kotorlos.blogspot.com/2016/07/blog-post_22.html
- Εικ. 13 <https://gr.pinterest.com/pin/608267493400595730/?autologin=true>
- Εικ. 14 http://www.pi-schools.gr/download/lessons/tee/mechanical/1b/kin_aeroskafon_1/kef_2a.pdf
- Εικ. 15 http://www.pischools.gr/download/lessons/tee/mechanical/1b/kin_aeroskafon_1/kef_2a.pdf
- Εικ. 16 http://www.pi-schools.gr/download/lessons/tee/mechanical/1b/kin_aeroskafon_1/kef_2a.pdf
- Εικ. 17 <https://medium.com/war-is-boring/the-f-111-was-a-muscular-bomber-that-nearly-killed-gaddafi-cba142a0fbbf>
- Εικ. 18 <http://www.flyinhighokc.com/flyinghandbook/images/Fig14-5.jpg>
- Εικ. 19 <http://www.aerospaceweb.org/question/propulsion/q0209.shtml>
- Εικ. 20 <http://www.aviation-history.com/engines/t53.html>
- Εικ. 21 <https://www.grc.nasa.gov/www/k->
- Εικ. 22 http://www.pi-schools.gr/download/lessons/tee/mechanical/1b/kin_aeroskafon_1/kef_2a.pdf
- Εικ. 23 https://en.wikipedia.org/wiki/Ramjet#Missiles_using_ramjets
- Εικ. 24 http://www.pi-schools.gr/download/lessons/tee/mechanical/1b/kin_aeroskafon_1/kef_2a.pdf
- Εικ. 25 <https://gr.pinterest.com/pin/161003755398409142/?autologin=true>
- Εικ. 26 <http://digilib.teiimt.gr/jspui/bitstream/123456789/2178/1/012011029.pdf>
(Πτυχ. Εργασία ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ)
- Εικ. 27 <http://digilib.teiimt.gr/jspui/bitstream/123456789/2178/1/012011029.pdf>
(Πτυχ. Εργασία ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ)
- Εικ. 28 <http://digilib.teiimt.gr/jspui/bitstream/123456789/2178/1/012011029.pdf>
(Πτυχ. Εργασία ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ)
- Εικ. 29 <http://digilib.teiimt.gr/jspui/bitstream/123456789/2178/1/012011029.pdf>
(Πτυχ. Εργασία ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ)
- Εικ. 30 <https://twitter.com/pt6nation/status/439165356540559360>
- Εικ. 31 <http://www.aerospace.sener/press-releases/sener-babcock-deliver-sixth-upgraded-ab-212-helicopter-unit>
- Εικ. 32 <https://www.airliners.net/photo/Indonesia-Air-Force/Sikorsky-S-58T/1294332>
- Εικ. 33 <https://www.helis.com/database/modelorg/Finland-Coast-Guard-Bell-412/>
- Εικ. 34 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 35 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 36 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 37 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 38 <https://elearning.flightsafety.com/courses/maintenance/pwc-pt6t-level1.html>
- Εικ. 39 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 40 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 41 www.aerospace-technology.com/wp-content/uploads/sites/15/2017/10/3-ab412-cockpit.jpg
- Εικ. 42 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 43 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 44 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 45 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 46 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 47 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 48 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ
- Εικ. 49 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο Ε.Α.Β για τον κινητήρα ΡΤ6Τ ΡΑΤΤ & ΧΑΙΤΝΕΥ

Εικ. 50 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο E.A.B για τον κινητήρα PT6T PRATT & WHITNEY
Εικ. 51 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο E.A.B για τον κινητήρα PT6T PRATT & WHITNEY
Εικ. 52 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο E.A.B για τον κινητήρα PT6T PRATT & WHITNEY
Εικ. 53 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο E.A.B για τον κινητήρα PT6T PRATT & WHITNEY
Εικ. 54 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο E.A.B για τον κινητήρα PT6T PRATT & WHITNEY
Εικ. 55 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο E.A.B για τον κινητήρα PT6T PRATT & WHITNEY
Εικ. 56 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο E.A.B για τον κινητήρα PT6T PRATT & WHITNEY
Εικ. 57 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο E.A.B για τον κινητήρα PT6T PRATT & WHITNEY
Εικ. 58 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο E.A.B για τον κινητήρα PT6T PRATT & WHITNEY
Εικ. 59 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο E.A.B για τον κινητήρα PT6T PRATT & WHITNEY
Εικ. 60 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο E.A.B για τον κινητήρα PT6T PRATT & WHITNEY
Εικ. 61 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό.
Εικ. 62 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό.
Εικ. 63 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό.
Εικ. 64 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό.
Εικ. 65 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό.
Εικ. 66 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό.
Εικ. 67 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό.
Εικ. 68 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό.
Εικ. 69 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό.
Εικ. 70 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό
Εικ. 71 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό
Εικ. 72 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό
Εικ. 73 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό
Εικ. 74 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό
Εικ. 75 Προσωπικό φωτογραφικό υλικό
Εικ. 76 Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο E.A.B για τον κινητήρα PT6T PRATT & WHITNEY

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Jennings B.H., Rogers W L, “Gas Turbine Analysis and Practice”, Dover Publications, 1953.
- Morgan N.E., “Turbojet Fundamentals”, McGraw-Hill Publishing, 1958.
- National Aeronautics and Space Administration, “The Beginner's Guide to Aeronautics”, www.nasa.gov, 2010
- Papyros - Larousse - Britannica Encyclopedia, 2000.
- Silverstein, “Progress in Aircraft Gas Turbine Engine Development”, 1966.
- Γιαννάκογλου Κ, “Εισαγωγή στις Θερμικές Στροβιλομηχανές, Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος”, 2000
- Κανδύλας Ι., “Στροβιλοκινητήρες. Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος”, 2007.
- Πολυζάκης Α., “Αεριοστρόβιλοι. Εισαγωγή στη λειτουργία”, Κοζάνη 2008.
- https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82_%CE%B1%CE%B5%CF%81%CE%B9%CF%8E%CE%B8%CE%B7%CF%83%CE%B7%CF%82
- Εκπαιδευτικό εγχειρίδιό Ε.Α.Β για αξονοστρόβιλο κινητήρα PRATT & WHITNEY PT6T
- Προσωπικές σημειώσεις από συνεντεύξεις με εργαζόμενους στο εργοστάσιο Αεροκινητήρων Ε.Α.Β
- Προσωπικές σημειώσεις από συνεντεύξεις με εργαζόμενους στο δοκιμαστήριο κινητήρων (TEST CELL) Ε.Α.Β