

---

# 1

---

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>1.2</b>
1.1	ΑΝΟΙΧΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	1.6
1.2	ΣΥΖΕΥΞΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ	1.8
1.3	ΚΛΕΙΣΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	1.9
1.4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΣΤΗΝ ΠΡΟΩΣΗ ΤΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ	1.10
1.5	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΝΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑ	1.11

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

(Stodola (1945), Lichty (1955), Hawthorne and Olson (1960), Cohen et al (1972), Γούλιος (1980), The Jet Engine, Rolls-Royce (1987), Ρακόπουλος (2001), Boyce (2002))

Ο στρόβιλος γενικά, σε σχέση με τις άλλες διατάξεις παραγωγής μηχανικού έργου, είναι από πολλές απόψεις η πιο ικανοποιητική διάταξη. Η απουσία παλινδρομικών και τριβομένων τμημάτων συνεπάγεται μικρή κατανάλωση λιπαντικού, ελάχιστα προβλήματα ζυγοστάθμισης και εξ αυτού του λόγου οι αεριοστρόβιλοι παρουσιάζουν υψηλή αξιοπιστία λειτουργίας (Cohen et al (1972), The Jet Engine, Rolls-Royce (1987), Boyce (2002)).

Τα πλεονεκτήματα που σχετίζονται με το στρόβιλο φάνηκαν όταν χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στις αρχές του 20ου αιώνα άρχισε η χρήση ατμοστροβίλων για την κίνηση πλοίων και τρένων, καθώς και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα λειτουργούν εργοστάσια με ισχύ μεγαλύτερη των 500 MW και απόδοση της τάξεως του 40%. Οι ατμοστρόβιλοι, αν και έχουν φτάσει σε υψηλό επίπεδο εξέλιξης εμφανίζουν ένα μειονέκτημα, Stodola (1945). Αυτό σχετίζεται με την εγκατάσταση παραγωγής ατμού υψηλής πίεσεως και υψηλής θερμοκρασίας, παραγόμενου από δαπανηρές εγκαταστάσεις όπως ένας συμβατικός λέβητας ή ένας πυρηνικός αντιδραστήρας. Το βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι τα παραγόμενα θερμά αέρια, από το λέβητα ή τον αντιδραστήρα, δε χρησιμοποιούνται κατευθείαν στον στρόβιλο, αλλά έμμεσα για την παραγωγή ενός ενδιάμεσου ρευστού, του ατμού. Τα προβλήματα αυτά οδήγησαν στην ανάπτυξη και εκμετάλλευση των αεριοστροβίλων, με αποτέλεσμα η χρήση τους να είναι σήμερα δυνατή σε ένα μεγάλο πεδίο εφαρμογών (εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας, πλοία, αεροπλάνα, αυτοκίνητα), (Cohen et al (1972), The Jet Engine, Rolls-Royce (1987), Boyce (2002)).

Για τη λειτουργία του αεριοστροβίλου χρειάζεται αέριο υψηλής πίεσης το οποίο εκτονούμενο εντός των πτερυγίων ενός στροβίλου τον κινεί. Ο υψηλός λόγος συμπίεσης που απαιτείται επιτυγχάνεται μέσω της αξιοποίησης ενός συμπιεστή. Χωρίς απώλειες, λόγω τριβών στο σύστημα συμπιεστή-στροβίλου, το αποδιδόμενο από τον στρόβιλο έργο θα ήταν ίσο προς το καταναλισκόμενο από τον συμπιεστή. Αλλά και σ' αυτή την ιδανική κατάσταση δε θα μπορούσε να παραχθεί καθαρό 'ωφέλιμο' έργο και το αποτέλεσμα θα ήταν απλώς η λειτουργία του συστήματος συμπιεστής-στροβίλος. Το έργο που παράγει ο στρόβιλος αυξάνεται με την πρόσθεση ενέργειας στο εκτονούμενο αέριο που αυξάνει τη θερμοκρασία του. Όταν το αέριο είναι ο αέρας, η πρόσθεση ενέργειας πραγματοποιείται με την καύση ενός καυσίμου με τον αέρα που έχει προηγουμένα συμπιεστεί. Τα καυσαέρια εκτονούμενα παράγουν στο στρόβιλο μεγαλύτερο έργο, μέρος του οποίου κινεί τον συμπιεστή, ενώ ταυτόχρονα παράγεται και ωφέλιμο έργο. Η διαδικασία αυτή παραγωγής ωφέλιμου έργου είναι η αρχή λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου (σχ. 1.1).

Επειδή υπάρχουν απώλειες το έργο που λαμβάνεται τελικά στην έξοδο του στροβίλου είναι μικρότερο. Το ωφέλιμο έργο αυξάνεται με την προσθήκη επιπλέον καυσίμου αν και υπάρχει ένα όριο του λόγου καύσιμο/αέρα, για δεδομένη παροχή αέρα, που περιορίζει το ποσό του ωφέλιμου έργου. Η μέγιστη τιμή του λόγου καύσιμο/αέρα καθορίζεται από τη θερμοκρασία λειτουργίας των πτερυγίων του στροβίλου η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή. Η τιμή δε αυτή καθορίζεται από την αντοχή σε ερπυσμό των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή και από την επιθυμητή διάρκεια ζωής του αεριοστροβίλου.

Συνεπώς οι δύο βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τη λειτουργία των αεριοστροβίλων είναι:

1) η απόδοση κάθε τμήματος (στρόβιλος, συμπιεστής, καυστήρας, εναλλάκτης κλπ.) και

2) η θερμοκρασία λειτουργίας (που εξαρτάται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται).

Στο κεφάλαιο 2 θα δειχθεί ότι η ολική απόδοση του κύκλου ενός αεριοστροβίλου, εξαρτάται και από το λόγο συμπίεσης του συμπιεστή. Αρχικά υπήρχαν δυσκολίες στην πραγματοποίηση υψηλού λόγου συμπίεσης όμως σήμερα, ιδιαίτερα σε τελειοποιημένους κινητήρες, επιτυγχάνονται λόγοι συμπίεσης πάνω από 30:1, με απόδοση συμπιεστή 85-90% και με θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο πάνω από 1200-1500K.

Παλαιότερα είχαν προταθεί δύο δυνατά συστήματα καύσεως. Το ένα υπό σταθερό όγκο και το άλλο υπό σταθερή πίεση. Θεωρητικά η θερμική αποδοχή του κύκλου υπό σταθερό όγκο είναι μεγαλύτερη αυτού υπό σταθερή πίεση, αλλά οι μηχανικές δυσκολίες είναι πολύ μεγαλύτερες που σχεδόν αποκλείουν την εξέλιξη αεριοστροβίλου με κύκλο υπό σταθερό όγκο.

Πρέπει να τονισθεί ότι στον αεριοστρόβιλο οι διαδικασίες συμπίεση - καύση - εκτόνωση δεν γίνονται στην ίδια "μονάδα" όπως στους παλινδρομικούς κινητήρες. Οι διαδικασίες γίνονται σε ξεχωριστές "μονάδες", που λέγονται συνιστώσες του κινητήρα, και οι οποίες διαχωρίζονται με την έννοια ότι σχεδιάζονται, ελέγχονται και αναπτύσσονται χωριστά. Οι συνιστώσες αυτές όμως συνδέονται λειτουργικά (αεροδυναμικά) μεταξύ τους και σχηματίζουν τον αεριοστρόβιλο. Ο αριθμός των συνιστωσών δεν περιορίζεται σε τρεις. Είναι δυνατόν να προστεθούν επιπλέον συμπιεστές και στρόβιλοι μαζί με ψύκτες μεταξύ των συμπιεστών και αναθερμαντικών θαλάμων καύσεως μεταξύ των στροβίλων. Συνήθως χρησιμοποιούνται και εναλλάκτες που αξιοποιούν τα καυσαέρια που εξέρχονται από το στρόβιλο για να θερμάνουν τον αέρα (η το αέριο) που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης. Αυτές οι διατάξεις χρησιμοποιούνται για την αύξηση της εξερχόμενης ισχύος και απόδοσης. Η επιλογή δε του κατάλληλου συνδυασμού εξαρτάται από την ειδική περίπτωση εφαρμογής του αεριοστροβίλου.

Εκτός από τους διάφορους απλούς κύκλους, που προκύπτουν με την πρόσθεση των βοηθητικών συνιστωσών (ψύκτες, αναθερμαντήρες, εναλλάκτες), οι αεριοστροβίλοι κατατάσσονται σε δύο διακεκριμένες κατηγορίες του ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ και του ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ (Cohen et al (1972), The Jet Engine, Rolls-Royce (1987), Boyce (2002)). Στους αεριοστροβίλους ανοικτού κύκλου (σχ. 1.1), πραγματοποιείται συνεχής εισροή ατμοσφαιρικού αέρα μέσα στο συμπιεστή και η ενέργεια προστίθεται με την καύση ενός καυσίμου εντός του αέρα. Στη συνέχεια τα καυσαέρια εκτονώνονται στο στρόβιλο και εξέρχονται στην ατμόσφαιρα. Στους αεριοστροβίλους κλειστού κύκλου (βλέπε Παράγραφος 1.3) ένα αέριο ή ο αέρας ανακυκλώνεται συνεχώς μέσα στη μηχανή. Είναι φανερό ότι η καύση δεν λαμβάνει χώρα εντός του αερίου του κυκλώματος και η απαιτούμενη ενέργεια πρέπει να δοθεί από ένα θερμαντήρα (εναλλάκτη), ενώ η καύση λαμβάνει χώρα σ' ένα χωριστό κύκλωμα. Ο κλειστός κύκλος λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου μοιάζει με εκείνον του ατμοστροβίλου. Τα πλεονεκτήματα του κλειστού κύκλου λειτουργίας θα αναφερθούν στην παράγραφο 1.3. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στην περίπτωση χρησιμοποίησης πυρηνικού αντιδραστήρα σαν πηγή θερμότητας, ο κλειστός κύκλος είναι ο πιο κατάλληλος.

Τα βασικά εξαρτήματα των Αεριοστροβίλων (Cohen et al (1972), The Jet Engine, Rolls-Royce (1987)).

- Τα βασικά εξαρτήματα είναι :
- (α) Το τμήμα εισαγωγής (intake)
  - (β) Ο συμπιεστής (compressor)
  - (γ) Ο θάλαμος καύσης (combustion chamber)
  - (δ) Ο στρόβιλος (turbine)
  - (ε) Το τμήμα εξαγωγής (nozzle)
  - (στ) Οι θερμικοί εναλλάκτες (heat exchanger)

Τμήμα εισαγωγής : Προσαρμόζει τον αέρα που εισέρχεται στην μηχανή στις απαιτήσεις του συμπιεστή σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Οι πιο βασικές απαιτήσεις είναι καθαρός (από σωματίδια) αέρας, ομοιόμορφης κατανομής σε ταχύτητα και πίεση και στον κατάλληλο αριθμό Mach. Μερικές φορές περιλαμβάνει και φίλτρο κατακράτησης σωματιδίων ή απορρόφησης ηχητικών κυμάτων.

Ο συμπιεστής : Συμπιέζει τον αέρα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του θερμοδυναμικού κύκλου. Μπορεί να είναι είτε αξονικός, είτε φυγοκεντρικός, είτε παλινδρομικός. Συνήθως προτιμούνται οι δύο πρώτοι τύποι, γιατί εμφανίζουν μεγαλύτερη απόδοση, είναι πιο συμπαγείς και πιο φθηνοί. Επιτρέπουν την αναρρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ατμοσφαιρικού αέρα ( $\approx 150 \text{ kg/s/m}^2$  διατομής του αγωγού εισόδου σε αριθμό Mach  $\approx 0.4$ ). Τυπικές τιμές του (αδιαβατικού) βαθμού απόδοσης είναι  $0.7 \leq \eta_c \leq 0.9$ . Συνήθεις συμπίεσεις,  $r_c$ , είναι 1.1-1.25

ανά βαθμίδα, 8-10 ανά τύμπανο και 25-30 ανά συμπιεστή.

Ο θάλαμος καύσης : Είναι, συνήθως, συνεχούς λειτουργίας. Η όλη διεργασία καύσης είναι σχεδόν ισοβαρής (δηλ. σταθερής πίεσης). Επειδή ο λόγος αέρα/καυσίμου είναι αισθητά μεγαλύτερος από τη στοιχειομετρική αναλογία (περίσσεια αέρα της τάξης του 250%), μόνο μέρος του αέρα καίγεται άμεσα με το καύσιμο, στην πρωτεύουσα ζώνη (primary zone), σε υψηλή θερμοκρασία. Ο υπόλοιπος αέρας εισάγεται στο θάλαμο σε δεύτερο στάδιο, ψύχοντας έτσι τα καυσαέρια στη θερμοκρασία που επιτρέπεται από το στρόβιλο. Λόγω της μεγάλης πίεσης, της μεγάλης περισσειας αέρος και του μικρού μήκους του θαλάμου (ο όγκος του θαλάμου μπορεί να είναι 10 με 20 φορές μικρότερος από τον αντίστοιχο όγκο εστίας λέβητα), απαιτείται πολύ προσεκτικός έλεγχος της ευστάθειας της καύσης. Επίσης επιβάλλεται η μικρή εκπομπή ρύπων (CO, NO<sub>x</sub>, υδρογονανθράκων) και καπνού. Σε μερικές εφαρμογές η καύση γίνεται έξω από την κύρια μηχανή και η θερμότητα μεταφέρεται στον αέρα μέσω κάποιου θερμικού εναλλάκτη.

Ο στρόβιλος : Είναι το εξάρτημα όπου παράγεται μηχανική ισχύς λόγω της εκτόνωσης των καυσαερίων μέχρι την ατμοσφαιρική πίεση. Είναι είτε φυγοκεντρικός (σπανίως) είτε αξονικός (συνήθως). Ο αδιαβατικός βαθμός απόδοσης είναι της τάξης  $0.75 \leq \eta_t \leq 0.93$ . Ο λόγος εκτόνωσης ανά βαθμίδα είναι αισθητά μεγαλύτερος από αντίστοιχη βαθμίδα συμπιεστή ( $1.35 \leq r_t \leq 2.0$  για αξονικές βαθμίδες). Συνήθως συνδέεται με το συμπιεστή με κοινό άξονα. Επιβάλλεται επομένως να ρυθμιστούν κατάλληλα οι συνθήκες λειτουργίας του συμπιεστή και του στρόβιλου ώστε να λειτουργούν στην ίδια γωνιακή ταχύτητα.

Το τμήμα εξόδου : Το τμήμα αυτό σχεδιάζεται ανάλογα με τη χρήση της μηχανής. Στους αεροπορικούς κινητήρες έχει τη μορφή συγκλίνοντος ή συγκλίνοντος - αποκλίνοντος ακροφυσίου, έτσι ώστε τα καυσαέρια να αποκτήσουν μεγάλη ταχύτητα. Στους ηλεκτροπαραγωγούς κινητήρες έχει τη μορφή διαχύτη έτσι ώστε η δυναμική πίεση στην έξοδο να είναι πολύ μικρή (της τάξης των 20 - 50 mbar). Αυτό επιτρέπει τη μέγιστη δυνατή εκτόνωση στο στρόβιλο και, επομένως, τη μεγαλύτερη θερμική απόδοση. Σε μερικούς κινητήρες περιλαμβάνει και το μετακαυστήρα (afterburner) για την αύξηση της ενέργειας των καυσαερίων.

Οι θερμικοί εναλλάκτες : Αυτοί είναι διαφορετικής μορφής ανάλογα με τη θέση τους στο θερμοδυναμικό κύκλο. Οι πιο γνωστοί τύποι είναι ο αναγεννητικός (regenerative), ο ενδιάμεσος ψύκτης (intercooler) και ο αντικαταστάτης του θαλάμου καύσης. Ο πιο συνήθης είναι ο πρώτος. Πέρα από τα παραπάνω βασικά εξαρτήματα, ο αεριοστρόβιλος έχει και συστήματα καυσίμου, λίπανσης, ελέγχου γωνιακής ταχύτητας του άξονα, βαλβίδες αναρρόφησης αέρα, έναυσης, εκκίνησης κλπ.

Είδη Αεριοστροβίλων και βασικά χαρακτηριστικά τους (Cohen et al (1972), The Jet Engine, Rolls-Royce (1987), Boyce (2002)).

Σήμερα υπάρχει μια τεραστία ποικιλία αεριοστροβίλων. Μερικές κατηγορίες διαχωρισμού των ειδών είναι και οι παρακάτω:

- (α) Κατά τον κύκλο :
- (i) Ανοικτού κύκλου (open cycle) με αναρρόφηση και επαναφορά στην ατμόσφαιρα
  - (ii) Κλειστού κύκλου (closed cycle), όπου το ρευστό παραμένει πάντα μέσα στη μηχανή. Τα ποσά θερμότητας εισέρχονται και εξέρχονται από τη μηχανή μέσω θερμικών εναλλακτών
- (β) Κατά τον άξονα :
- (i) Μονο-αξονικές (Single shaft)
  - (ii) Δι-αξονικές (Two shaft)
  - (iii) Τρι-αξονικές (Triple shaft)
  - (iv) Ελεύθερο στρόβιλο ισχύος. Εδώ η εκτόνωση γίνεται εν μέρει στο στρόβιλο που ενεργοποιεί το συμπιεστή και η υπόλοιπη στο στρόβιλο ισχύος (που κινεί το φορτίο π.χ. την ηλεκτρογεννήτρια)
- (γ) Κατά τους θερμικούς εναλλάκτες :
- (i) Αναγεννητικός (Regenerative)
  - (ii) Με ενδιάμεση ψύξη (intercooled)
  - (iii) Με αναθέρμανση (Reheated)
- (δ) Κατά την εφαρμογή :
- (i) Αεροπορικοί, που υποδιαιρούνται σε αεριοστροβίλους, Στροβιλοαντιδραστήρες (turbojet), στρόβιλο - ανεμιστήρες (turbofan) ή στρόβιλο - ελικοφόροι (turboprop)
  - (ii) Ηλεκτροπαράγωγοι
  - (iii) Βιομηχανικοί (Industrial)

Διάφορες τέτοιες τυπικές διατάξεις των βασικών εξαρτημάτων διαφόρων τύπων αεριοστροβίλων φαίνονται στο σχήμα 1.2.

Άλλα κύρια χαρακτηριστικά του κινητήρα πέρα από τα προαναφερθέντα είναι:

(i) Η διαδικασία εκκίνησης, με ή χωρίς εξωτερική βοήθεια (μέσω ηλεκτροκινητήρα, μικρής μηχανής Diesel ή μικρής μονάδας αεριοστροβίλου, APU). Εδώ επίσης προσδιορίζεται

ο ρυθμός επιτάχυνσης (κυρίως για την αποφυγή έντονων θερμικών τάσεων) και το ελάχιστο φορτίο αυτοδύναμης λειτουργίας.

(ii) Η διαδικασία διακοπής λειτουργίας, με διακοπή καυσίμου και έλεγχο του ρυθμού ψύξης των εξαρτημάτων.

(iii) Επιτρεπόμενη περιοχή στροφών ανά λεπτό του άξονα για σταθερή λειτουργία και αντίστοιχοι ρυθμοί επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης.

## **1.1 ΑΝΟΙΚΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**

Διατάξεις με απλό και διπλό άξονα (Cohen et al (1972), The Jet Engine, Rolls-Royce (1987), Boyce (2002)).

Εάν ένας αεριοστρόβιλος πρέπει να λειτουργεί με σταθερό αριθμό στροφών και υπό σταθερό φορτίο (για την παραγωγή ισχύος μεγίστου φορτίου) τότε η κατάλληλη διάταξη είναι εκείνη με τον απλό άξονα που φαίνεται στο σχήμα 1.1. Στην περίπτωση αυτή, της διατάξεως του απλού άξονα, η απόδοση του αεριοστροβίλου σε μερικό φορτίο και η ευελιξία λειτουργίας (δηλ. η ταχύτητα με την οποία η μηχανή προσαρμόζεται μόνη της στις αλλαγές του φορτίου και της ταχύτητας περιστροφής) δεν είναι σημαντικές παράμετροι. Πράγματι η αποτελεσματικά υψηλή αδράνεια, που οφείλεται στην αντίσταση του συμπιεστή, είναι ένα πλεονέκτημα επειδή ελαττώνει τον κίνδυνο υπερβολικής ταχύτητας στην περίπτωση πτώσεως του ηλεκτρικού φορτίου. Για να αυξηθεί η θερμική απόδοση του κύκλου προστίθεται ένας εναλλάκτης (σχ. 1.3 (α)) αν και οι απώλειες πίεσεως λόγω τριβής, που εμφανίζονται στον εναλλάκτη, μπορούν να ελαττώσουν την εξερχόμενη ισχύ κατά 10% περίπου.

Στο σχήμα 1.3 (β), φαίνεται ένας τροποποιημένος ανοικτός κύκλος λειτουργίας αεριοστρόβιλου. Η διάταξη αυτή εφαρμόζεται όταν το καύσιμο είναι "βρώμικο", όπως ο κονιορτοποιημένος άνθρακας, αλλά μικρού κόστους. Η τροποποίηση αυτή είναι αναγκαία επειδή τα προϊόντα της καύσεως περιέχουν συστατικά που διαβρώνουν τα πτερύγια του στροβίλου. Η απόδοση αυτού του κύκλου είναι μικρότερη από εκείνη του κανονικού, πολύ μικρότερη δε του κύκλου με εναλλάκτη. Ο εναλλάκτης του τροποποιημένου κύκλου, μεταφέρει όλη την εισερχόμενη ενέργεια στο συμπιεσμένο αέρα αντί ενός μικρού ποσοστού στην περίπτωση του κανονικού κύκλου. Μια σοβαρή προσπάθεια που έγινε (1950) για το σχεδιασμό και ανάπτυξη αεριοστροβίλων που θα χρησιμοποιούν άνθρακα είχε μικρή επιτυχία. Αντίθετα η χρησιμοποίηση του αργού πετρελαίου (residual oil) απέδειξε τη δυνατότητα εφαρμογής του στον κανονικό κύκλο.

Όταν ένας αεριοστρόβιλος πρέπει να έχει ευελιξία στη λειτουργία (π.χ. αυτοκίνητα,



τραίνα, πλοία) τότε πρέπει να υπάρχει ένας μηχανικά ανεξάρτητος (ή ελεύθερος) στρόβιλος ισχύος. Για το σκοπό αυτό είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση της διατάξεως του διπλού άξονα. Το σχήμα 1.4 δείχνει την κατάλληλη διάταξη όπου ο στρόβιλος υψηλής πίεσεως κινεί το συμπιεστή και το σύστημα αυτό λειτουργεί σα γεννήτρια αερίου για το στρόβιλο χαμηλής πίεσεως. Διατάξεις αυτής της μορφής χρησιμοποιούνται σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπου ο στρόβιλος ισχύος είναι σχεδιασμένος κατά τέτοιο τρόπο που να μπορεί να περιστρέφεται σε διαφορετικές ταχύτητες χωρίς την ανάγκη υπάρξεως ενός ακριβούς συστήματος μειώσεως των στροφών. Ένα άλλο μικρότερο προτέρημα είναι ότι ο εκκινητής θα πρέπει τώρα να θέσει σε λειτουργία μόνο τη γεννήτρια αερίου. Ωστόσο ένα μειονέκτημα αυτής της διατάξεως είναι η πιθανή ανάπτυξη υπερβολικών ταχυτήτων του στρόβιλου ισχύος σε απότομη πτώση του ηλεκτρικού φορτίου με αποτέλεσμα να απαιτείται ένα σύστημα ελέγχου που θα εμποδίζει την ανάπτυξη υπερβολικής ταχύτητας.

Η μεταβολή της ισχύος σε μονάδες με απλό ή διπλό άξονα επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της ροής του καυσίμου στο θάλαμο καύσεως. Καθώς η ισχύς εξόδου ελαττώνεται ως προς την τιμή σχεδιασμού, μειώνονται και οι τιμές του λόγου πίεσεως του κύκλου και της μέγιστης θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την πτώση της θερμικής αποδόσεως του κύκλου, ιδιαίτερα κατά τη λειτουργία με μερικό φορτίο.

Η λειτουργία ενός αεριοστροβίλου βελτιώνεται σημαντικά όταν ελαττώνεται το έργο συμπίεσης και/ή αυξάνεται το έργο εκτόνωσεως. Για γνωστό λόγο συμπίεσης, η απαιτούμενη ισχύς, ανά μονάδα ποσότητας του αερίου, είναι ανάλογη της θερμοκρασίας εισόδου. Το έργο συμπίεσης μπορεί να ελαττωθεί με τη χρησιμοποίηση δύο ή περισσότερων συμπιεστών με ενδιάμεση ψύξη. Όμοια το έργο εκτόνωσεως μπορεί να αυξηθεί με την χρησιμοποίηση δύο ή περισσότερων στροβίλων με ενδιάμεση αναθέρμανση μέχρι τη μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία. Επειδή με τη διάταξη αυτή αυξάνεται η κατανάλωση καυσίμου, και συνεπώς το κόστος της παραγόμενης ισχύος, χρησιμοποιείται εναλλάκτης. Μια πλήρης διάταξη, με ψύκτες, αναθερμαντήρες στα ενδιάμεσα στάδια και εναλλάκτη, φαίνεται στο σχήμα 1.5.

Σύνθετοι κύκλοι αυτού του τύπου προσφέρουν τη δυνατότητα μεταβολής της ισχύος εξόδου ελέγχοντας την παροχή καυσίμου στο θάλαμο αναθερμάνσεως (αναθερμαντήρας) και αφήνοντας τη γεννήτρια αερίου να λειτουργεί πλησιέστερα στις βέλτιστες συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγαλύτερη οικονομία.

Οι σύνθετοι κύκλοι εφαρμόστηκαν την εποχή αναπτύξεως των αεροσκαφών όταν δεν ήταν δυνατή η επιτυχία υψηλών θερμοκρασιών στο στρόβιλο (υλικά κατασκευής) ενώ ήταν επιθυμητή μια ικανοποιητική θερμική απόδοση. Σήμερα στις περισσότερες εφαρμογές το μικρό μέγεθος και το μικρό κόστος είναι βασικότερα στοιχεία απ' ότι η υψηλή θερμική απόδοση. Η εφαρμογή των αεριοστροβίλων ήταν περιορισμένη (εκτός από τα αεροπλάνα), μέχρι που έγινε δυνατή η επιτυχία υψηλών θερμοκρασιών που έκαναν τον απλό κύκλο

οικονομικά εφαρμόσιμο. Μέχρις ότου οι αεριοστρόβιλοι εκτοπίσουν τους ατμοστρόβιλους, στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι πιθανόν να παραμείνει η προτίμηση στον απλό κύκλο λειτουργίας με ή χωρίς εναλλάκτη.

Τα πλεονεκτήματα των αεριοστροβίλων κατέστησαν τη χρησιμοποίησή τους ιδιαίτερα ελκυστική και για ναυτικές εφαρμογές. Στις εφαρμογές πρόωσης πλοίων, όπου υπάρχουν απαιτήσεις για μικρή ή μεσαία ταχύτητα για το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου κίνησης, και για μεγάλη ταχύτητα για σχετικά μικρό ποσοστό του χρόνου, παρουσιάζουν το μειονέκτημα της υψηλής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (specific fuel consumption) για λειτουργία υπό μερικό φορτίο. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με συνδυασμό του αεριοστροβίλου με άλλες μηχανές. Κατά καιρούς έχουν προταθεί οι ακόλουθοι συνδυασμοί (Cohen et al (1972), The Jet Engine, Rolls-Royce (1987), Boyce (2002)):

- α) COSAG (Combined Steam And Gas) δηλαδή συνδυασμός ατμοστροβίλου και αεριοστροβίλου.
- β) CODAG (Combined Diesel And Gas) δηλαδή συνδυασμός μηχανής diesel και αεριοστροβίλου.
- γ) COGAG (Combined Gas And Gas) δηλαδή συνδυασμός αεριοστροβίλου με αεριοστρόβιλο.
- δ) CODOG (Combined Diesel Or Gas) δηλαδή λειτουργία μηχανής diesel ή αεριοστροβίλου.
- ε) COGOG (Combined Gas Or Gas) δηλαδή λειτουργία δύο διαφορετικών αεριοστροβίλων.

## **1.2 ΣΥΖΕΥΞΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ (Cohen et al (1972))**

Για την επιτυχία υψηλής θερμικής αποδόσεως χωρίς τη χρησιμοποίηση εναλλάκτη είναι απαραίτητη η επίτευξη υψηλού λόγου πίεσεως. Η δυσκολία που προκύπτει οφείλεται στη φύση της διαδικασίας συμπίεσης.

Επειδή η παροχή μάζας αέρα είναι συνήθως μεγάλη, στους αεριοστρόβιλους χρησιμοποιούνται πάντα συμπιεστές μη παλινδρομικοί. Αν και ένας πολυβάθμιος φυγοκεντρικός συμπιεστής είναι ικανός να παράγει υψηλό λόγο πίεσεων για μέτρια ισχύ, η απόδοσή του είναι αισθητά χαμηλότερη από αυτή των συμπιεστών αξονικής ροής. Για το λόγο αυτό οι αξονικοί συμπιεστές προτιμούνται ιδιαίτερα σε μεγάλες μονάδες. Στην περίπτωση λειτουργίας των αξονικών συμπιεστών σε συνθήκες αρκετά μετατοπισμένες από το σημείο λειτουργίας του σχεδιασμού (design operating point), ο συμπιεστής εμφανίζει αστάθεια. Όταν λοιπόν ένας αξονικός συμπιεστής λειτουργεί σε ταχύτητα περιστροφής

αρκετά κάτω από την τιμή σχεδιασμού, η πυκνότητα του αέρα στις τελευταίες βαθμίδες είναι τόσο πολύ χαμηλή και η αξονική ταχύτητα ροής γίνεται πολύ μεγάλη με αποτέλεσμα την απώλεια στήριξης (stall) των πτερυγίων. Η περιοχή αστάθειας είναι φανερή από τις ισχυρές ταλαντώσεις και πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη όταν ο αεριοστρόβιλος τίθεται σε λειτουργία ή λειτουργεί σε χαμηλά επίπεδα ισχύος.

Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται ιδιαίτερα στην περίπτωση λόγων πίεσεων πάνω από 8-10:1 με χρήση ενός μόνο συμπιεστή. Η δυσκολία όμως αυτή αντιμετωπίζεται με το διαχωρισμό του συμπιεστή σε δύο ή περισσότερα τμήματα που λέγονται "τύμπανα". Με αυτή τη διαίρεση, που λέγεται μηχανικός διαχωρισμός, μπορεί κάθε τύμπανο να στρέφεται σε διαφορετικές ταχύτητες αντίθετα προς τον ενδιάμεσα ψυχόμενο συμπιεστή του σχήματος 1.5. Όταν οι συμπιεστές είναι μηχανικά ανεξάρτητοι τότε κάθε ένας χρειάζεται το δικό του στρόβιλο, που θα τον κινεί και η αντίστοιχη διάταξη φαίνεται στο σχήμα 1.6.

Ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης κινείται από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης και ο συμπιεστής υψηλής πίεσης από το στρόβιλο υψηλής πίεσης. Η ισχύς μπορεί να λαμβάνεται από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης ή από ένα πρόσθετο ελεύθερο στρόβιλο ισχύος. Πρέπει να σημειωθεί ότι αν και τα τύμπανα είναι μηχανικώς ανεξάρτητα οι ταχύτητες τους συσχετίζονται αεροδυναμικά με μια σχέση που θα συζητηθεί στο κεφάλαιο 11.

Η διάταξη των δύο τυμπάνων χρησιμοποιείται ευρύτατα σε μονάδες ισχύος και σε κινητήρες αεροπλάνων. Μερικές φορές, ειδικά σε αεριοστρόβιλους με μικρή παροχή αέρα, ο συμπιεστής υψηλής πίεσεως είναι φυγοκεντρικός. Η εκλογή αυτή γίνεται επειδή οι υψηλές πιέσεις συνεπάγονται μικρή παροχή όγκου αέρα με αποτέλεσμα η απαιτούμενη πτερυγώση για αξονικό συμπιεστή να είναι πάρα πολύ μικρή για καλή απόδοση. Με διατάξεις δύο τυμπάνων επιτυγχάνονται λόγοι πίεσης ακόμη και πάνω από την τιμή 20:1. Για μεγαλύτερους λόγους πίεσεων πρέπει να χρησιμοποιούνται διατάξεις με τρία τύμπανα.

Ως εναλλακτική λύση της χρήσης τυμπάνων, υψηλοί λόγοι πίεσης επιτυγχάνονται και με έναν απλό συμπιεστή αλλά με τη βοήθεια πολυβάθμιας μεταβλητής ακίνητης πτερυγώσεως. Αυτή η προσπάθεια έγινε για πρώτη φορά από την General Electric Co. και πραγματοποιήθηκαν λόγοι πίεσης 15:1. Σε κινητήρες υψηλής τεχνολογίας είναι συνηθισμένοι οι συνδυασμοί των πολυβάθμιων και μεταβλητών ή ακίνητων πτερυγώσεων, (Γούλιος, 1980) (σχήμα 1.7)

Προτού ολοκληρωθεί το θέμα της σύζευξης αξίζει να αναφερθεί μια παλαιότερη πρόταση για μια διάταξη που ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης κινείται από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης και ο συμπιεστής υψηλής πίεσης από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης. Το πλεονέκτημα από αυτή τη "σταυρωτή" διάταξη είναι η καλύτερη απόδοση σε μερικό φορτίο. Δυστυχώς το αποτέλεσμα στην σταθερότητα της λειτουργίας είναι το αντίθετο εκείνου της "ευθείας διάτάξης" με αποτέλεσμα το πρόβλημα να χειροτερεύει.

### 1.3 ΚΛΕΙΣΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (Cohen et al (1972), Boyce (2002))

Μεταξύ των πολλών προτερημάτων που συγκεντρώνει ο κλειστός κύκλος λειτουργίας είναι η δυνατότητα χρησιμοποιήσεως υψηλής πίεσης μέσα στο κλειστό κύκλωμα που θα κατέληγε σε αεριοστρόβιλο μικρού μεγέθους και με τη δυνατότητα αλλαγής της εξερχόμενης ισχύος με την αλλαγή της πίεσης στο κύκλωμα. Με τον τρόπο αυτό καλύπτεται ένα ευρύ πεδίο φορτίων χωρίς μεταβολή της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου και συνεπώς με μικρή μεταβολή της ολικής αποδόσεως. Το κύριο μειονέκτημα του κλειστού κύκλου είναι η ανάγκη ύπαρξης ενός εξωτερικού συστήματος θερμάνσεως. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει ένα βοηθητικό κύκλο και προσφέρει την απαιτούμενη ενέργεια στο αέριο του κύριου κύκλου με τη βοήθεια ενός θερμαντήρα αερίου. Η επιτρεπτή θερμοκρασία λειτουργίας των επιφανειών του θερμαντήρα καθορίζει ένα ανώτατο όριο για τη μέγιστη θερμοκρασία του κύριου κύκλου. Μια τυπική διάταξη ενός κλειστού κύκλου λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου φαίνεται στο σχήμα 1.8. Ο κύκλος περιλαμβάνει έναν προψύκτη, που λειτουργεί με νερό, για το αέριο του κύριου κύκλου και είναι τοποθετημένος μεταξύ του εναλλάκτη και του συμπιεστή. Σε αυτή τη διάταξη ο θερμαντήρας αποτελεί τμήμα του κύκλου του βοηθητικού αεριοστροβίλου και η εξερχόμενη ισχύς ελέγχεται από μια βαλβίδα εκτόνωσης (blow-off valve) και από ένα βοηθητικό σύστημα συμπιεσμένου αερίου.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα του μικρότερου συμπιεστή και στροβίλου καθώς και του αποτελεσματικού ελέγχου, ο κλειστός κύκλος δεν αντιμετωπίζει προβλήματα διαβρώσεως των πτερυγίων του στροβίλου και άλλων επιβλαβών αποτελεσμάτων που οφείλονται στα προϊόντα της καύσεως. Επίσης δε χρειάζεται φιλτράρισμα του εισερχόμενου αερίου ή αέρα στο κύριο κύκλο, πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στη λειτουργία των ανοικτών κύκλων. Η μεταφορά θερμότητας στον εναλλάκτη βελτιώνεται λόγω της υψηλής πυκνότητας του αερίου. Η χρησιμοποίηση άλλων αερίων εκτός του αέρα, για το κλειστό κύκλωμα, παρέχει τη δυνατότητα εκμεταλλεύσεως αερίων με επιθυμητές θερμικές ιδιότητες. Έτσι η αντικατάσταση του αέρα, με λόγο ειδικών θερμοτήτων  $\gamma=1.4$ , από ένα μονοατομικό αέριο (π.χ. ήλιο), με  $\gamma=1.66$  αυξάνει σημαντικά την εξερχόμενη ισχύ και τη θερμική απόδοση του κύκλου. Οι απώλειες πίεσεως λόγω τριβής είναι πολύ μικρότερες με το ήλιο, οι βέλτιστοι λόγοι πίεσης του κύκλου είναι χαμηλότεροι και η μεταφορά θερμότητας καλύτερη με αποτέλεσμα το μέγεθος του εναλλάκτη και του προψύκτη να ελαττώνονται μέχρι το μισό, από εκείνο στην περίπτωση του αέρα.

Υπάρχουν σήμερα αεριοστροβίλοι κλειστού κύκλου με ισχύ 2 - 20 MW που χρησιμοποιούν σαν λειτουργούν αέριο τον αέρα και σαν καύσιμο άνθρακα, φυσικά αέρια, αέρια από υψικαμίλους και πετρέλαιο. Οι πιέσεις εισόδου στο στροβίλο είναι μεγαλύτερες από 40 At. Με την αντικατάσταση του αέρα από το ήλιο είναι δυνατή η παραγωγή ισχύος

πάνω από 250 MW και συνεπώς η χρησιμοποίηση αυτού του τύπου των αεριοστροβίλων σε συνδυασμό με πυρηνικές μονάδες.

#### **1.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΣΤΗΝ ΠΡΩΩΣΗ ΤΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ** (Γούλιος (1980), Cohen et al (1972), The Jet Engine, Rolls-Royce (1987), Boyce (2002))

Τα είδη των αεριοστροβίλων ή στροβιλοκινητήρων που εξετάστηκαν μέχρι τώρα αφορούσαν την εφαρμογή τους σε μονάδες ισχύος. Αναμφισβήτητα όμως η σημαντικότερη εφαρμογή των στροβιλοκινητήρων είναι στην πρόωση των αεροσκαφών.

Το 1930 ο F. Whittle σχεδίασε με επιτυχία τον πρώτο στροβιλοκινητήρα (σχήμα 1.13β) που αποτελείται από ένα φυγοκεντρικό συμπιεστή, ένα θάλαμο καύσης και ένα στρόβιλο. Ο λόγος συμπίεσης ήταν 4:1 και η ισχύς που απέδιδε ο κινητήρας 3000 HP. Από τότε οι στροβιλοκινητήρες αντικατέστησαν στα αεροσκάφη τους εμβολοφόρους κινητήρες επειδή παρουσίαζαν πολύ μεγαλύτερο λόγο ισχύος / βάρους.

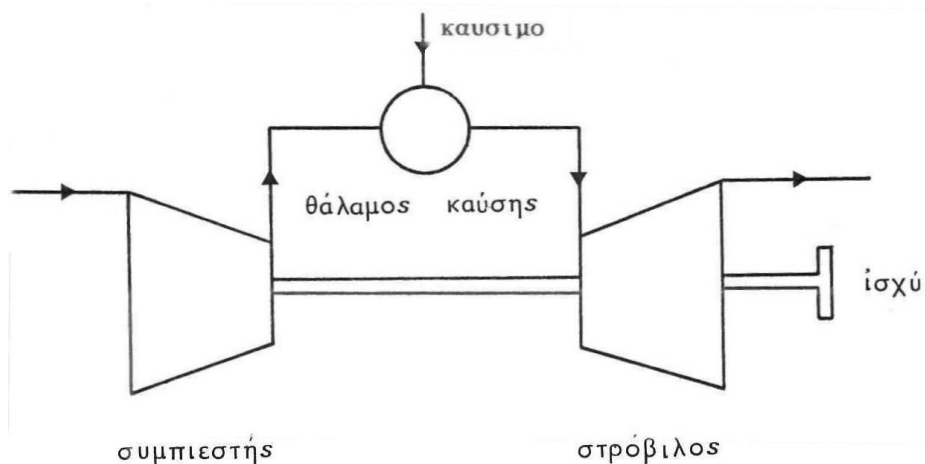
Ο κύκλος λειτουργίας ενός στροβιλοκινητήρα απλής ροής (turbojet) είναι βασικά αυτός που φαίνεται στο σχήμα 1.1 με τη διαφορά ότι ο στρόβιλος είναι σχεδιασμένος κατά τέτοιο τρόπο που κινεί μόνο το συμπιεστή. Τα καυσαέρια εκτονούνται δια μέσου ενός ακροφυσίου στην ατμοσφαιρική πίεση παράγουν την απαιτούμενη ισχύ (ώση) για την πρόωση του αεροπλάνου.

Σε ταχύτητες πτήσεως κάτω από 450 m.p.h. (σχήμα 1.9) ο στροβιλοκινητήρας απλής ροής έχει μικρότερη απόδοση από το συνδυασμό εμβολοφόρου κινητήρα - έλικας, επειδή η προωθητική του απόδοση έχει άμεση σχέση με την ταχύτητα πρόωσης. Αντίθετα η απόδοση της έλικας πέφτει πάνω από τα 350 m.p.h. λόγω της αεροδυναμικής απώλειας στήριξης των άκρων της πτέρυγας. Αυτά τα χαρακτηριστικά οδήγησαν στη χρησιμοποίηση μιας οικογένειας προωθητικών μηχανών (π.χ. turbojet, turboprop κλπ. σχήμα 1.14). Η συνεχής εξέλιξη των στροβιλοκινητήρων οδήγησε στην κατασκευή των στροβιλοκινητήρων διπλής ροής (turbofan η by-pass). Αυτό το είδος δημιουργεί ροή μεγαλύτερων μαζών αέρα, με μικρότερη επιτάχυνση, αυξάνοντας έτσι το βαθμό απόδοσης τους σε σχέση με τους στροβιλοκινητήρες απλής ροής για μεσαίες ταχύτητες πτήσης.

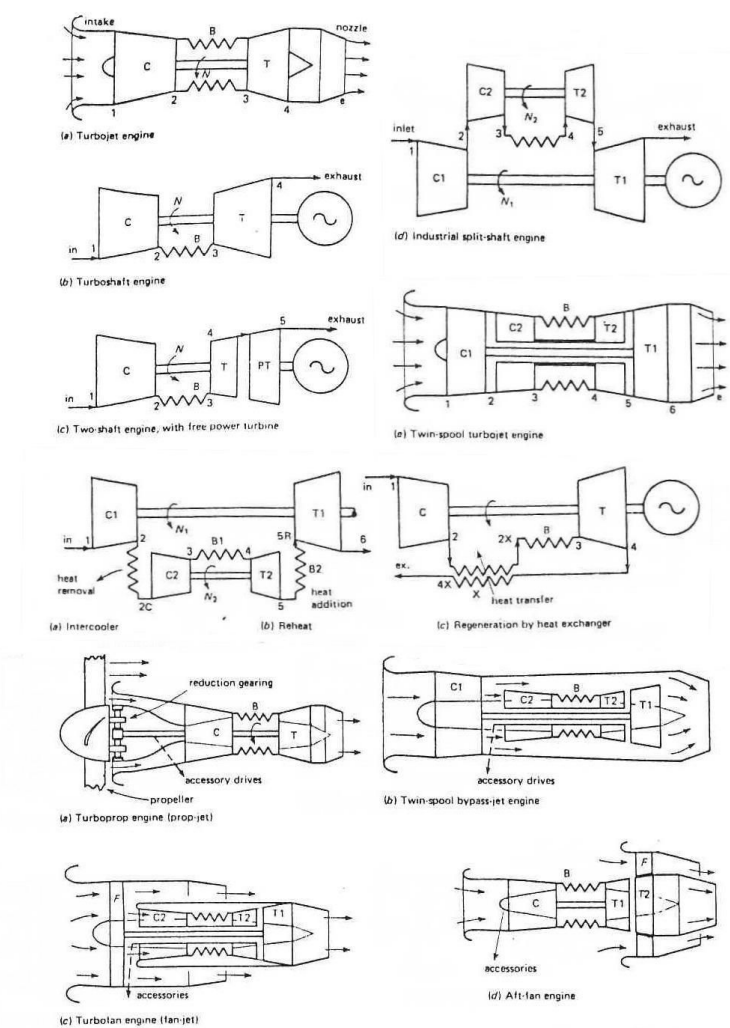
Η χρησιμοποίηση εναλλάκτη στους στροβιλοκινητήρες είναι αντιοικονομική λόγω του βάρους και του όγκου αυτών, αν και είναι δυνατή η μελλοντική χρησιμοποίησή τους στους ελικοστρόβιλους (turboprop) ιδιαίτερα για την κίνηση ελικοπτέρων.

### 1.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΝΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑ (Cohen et al (1972))

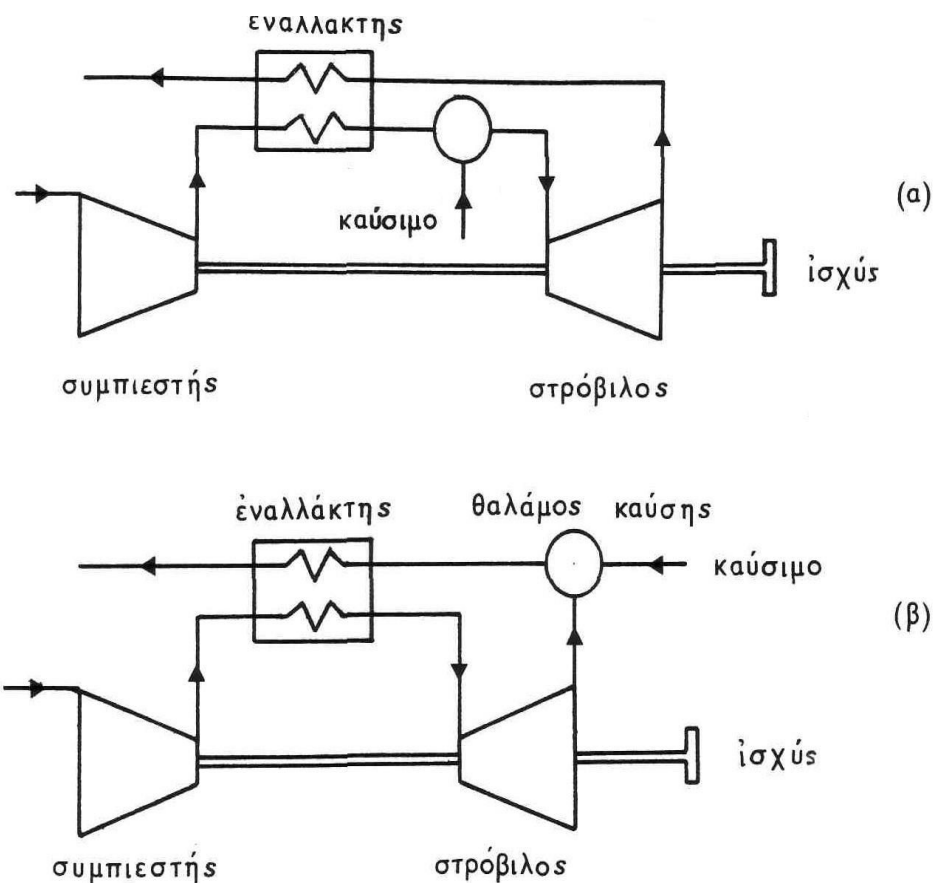
Αντικείμενο των επόμενων κεφαλαίων είναι η εισαγωγή στη βασικές αρχές της θεωρίας των αεριοστροβίλων και στο βασικό σχεδιασμό ενός αεριοστροβίλου. Το σχήμα 1.10 δίνει το αντιπροσωπευτικό διάγραμμα μιας τυπικής πορείας που ακολουθείται στο σχεδιασμό ενός αεριοστροβίλου. Οι διακεκομμένες γραμμές περιλαμβάνουν τα βασικά εσωτερικά βήματα του σχεδιασμού, ένα μέρος των οποίων θα καλυφθεί στα πλαίσια των σημειώσεων του μαθήματος. Μέσω της συνεχούς εξέλιξης και συμπλήρωσης τους το πακέτο των σημειώσεων θα επεκταθεί και σε άλλα σημαντικά τμήματα του συνολικού σχεδιασμού. Επίσης από τα μηχανικά τμήματα του αεριοστροβίλου, θα εξετασθούν μόνο εκείνα που έχουν άμεση σχέση με τις αεροθερμοδυναμικές διαδικασίες.



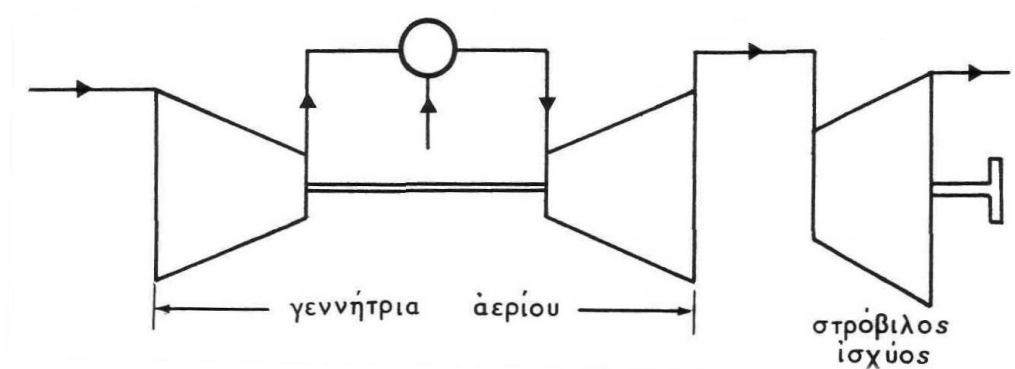
Σχήμα 1.1 Αρχή λειτουργίας αεροστροβίλου



Σχήμα 1.2 Τυπικές διατάξεις τμημάτων αεροστροβίλων (Cohen et al (1972))

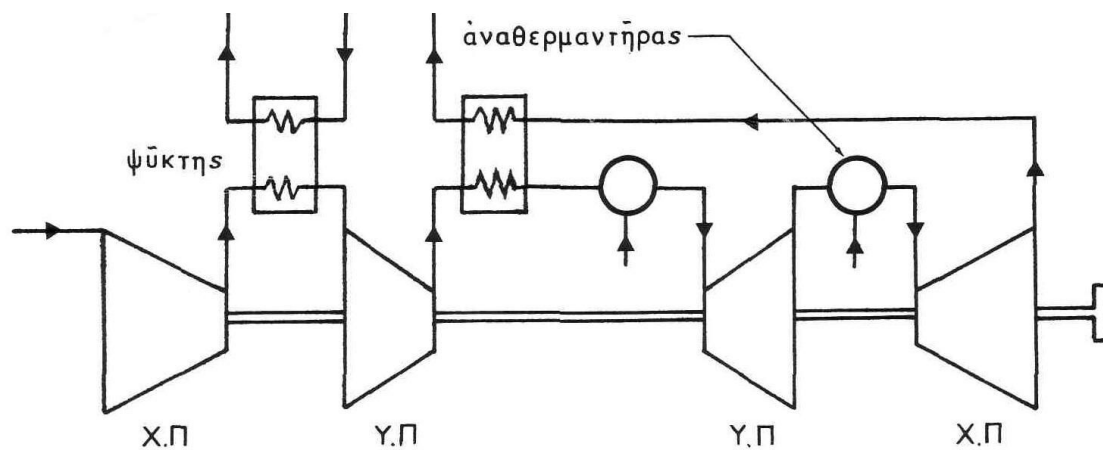


Σχήμα 1.3 Μονοαξονικός ανοιχτός κύκλος αεριοστροβίλου ισχύος με εναλλάκτη θερμότητας

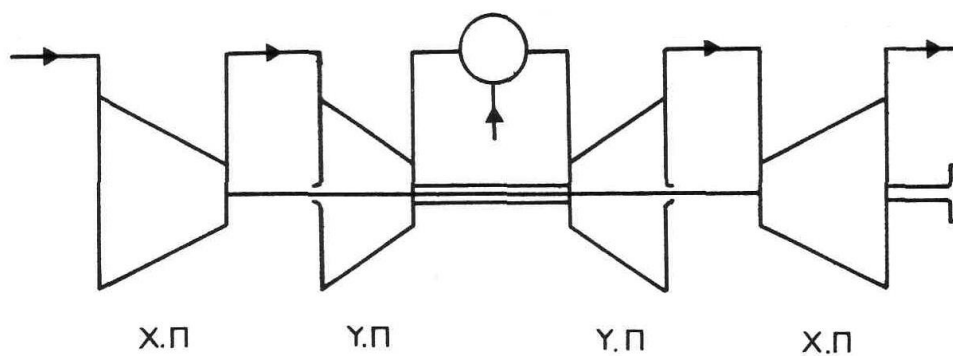


Σχήμα 1.4 Αεριοστρόβιλος με χωριστό στρόβιλο ισχύος

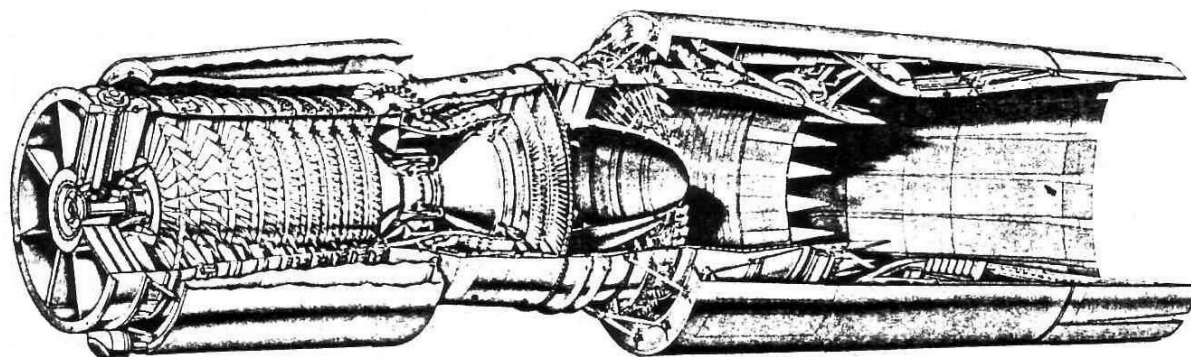




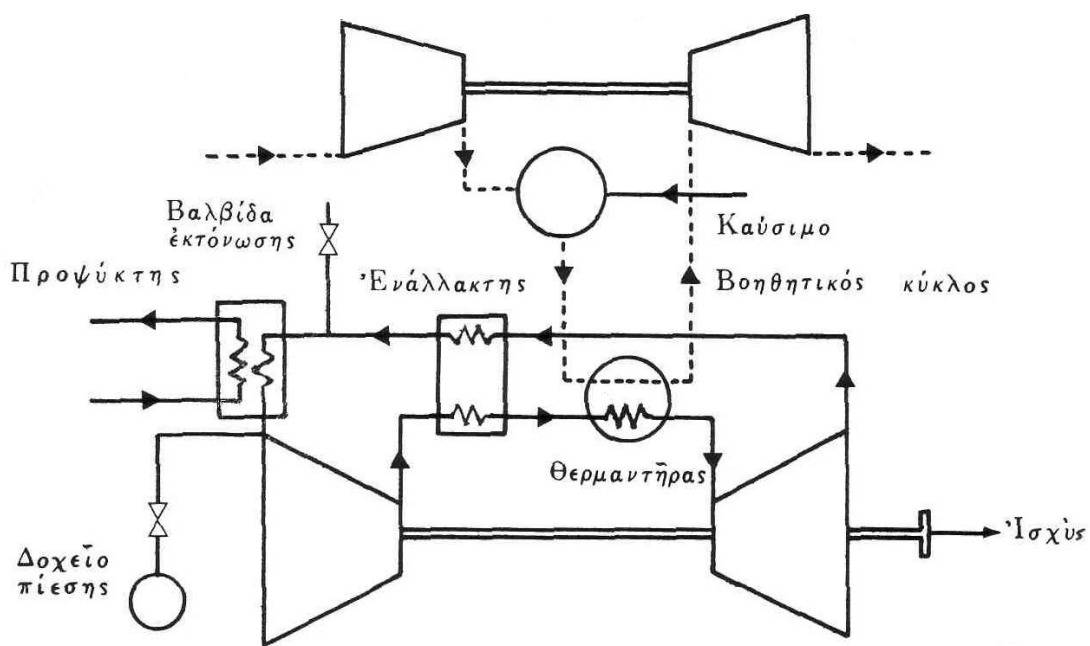
Σχήμα 1.5 Σύνθετος κύκλος με ενδιάμεση ψύξη, εναλλάκτη θερμότητας και αναθέρμανση



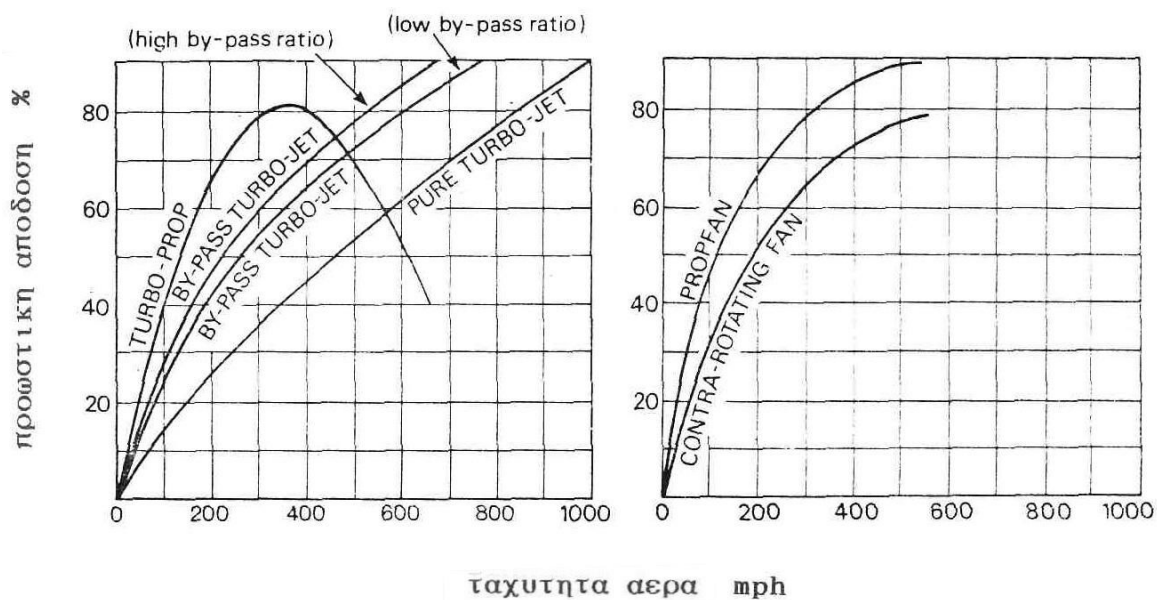
Σχήμα 1.6 Αεριοστρόβιλος δύο τυμπάνων



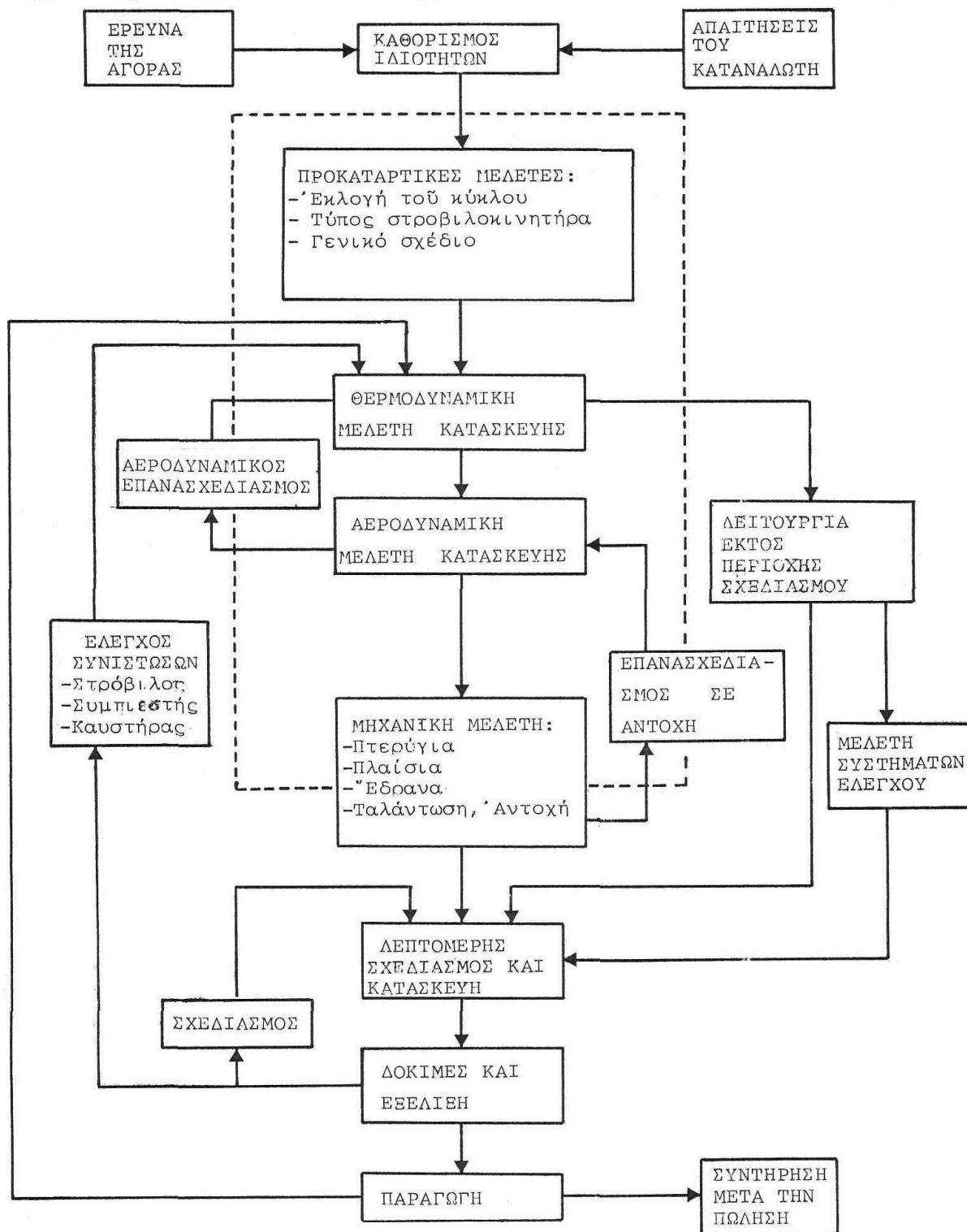
Σχήμα 1.7 Κινητήρας General Electric GE4 Turbojet



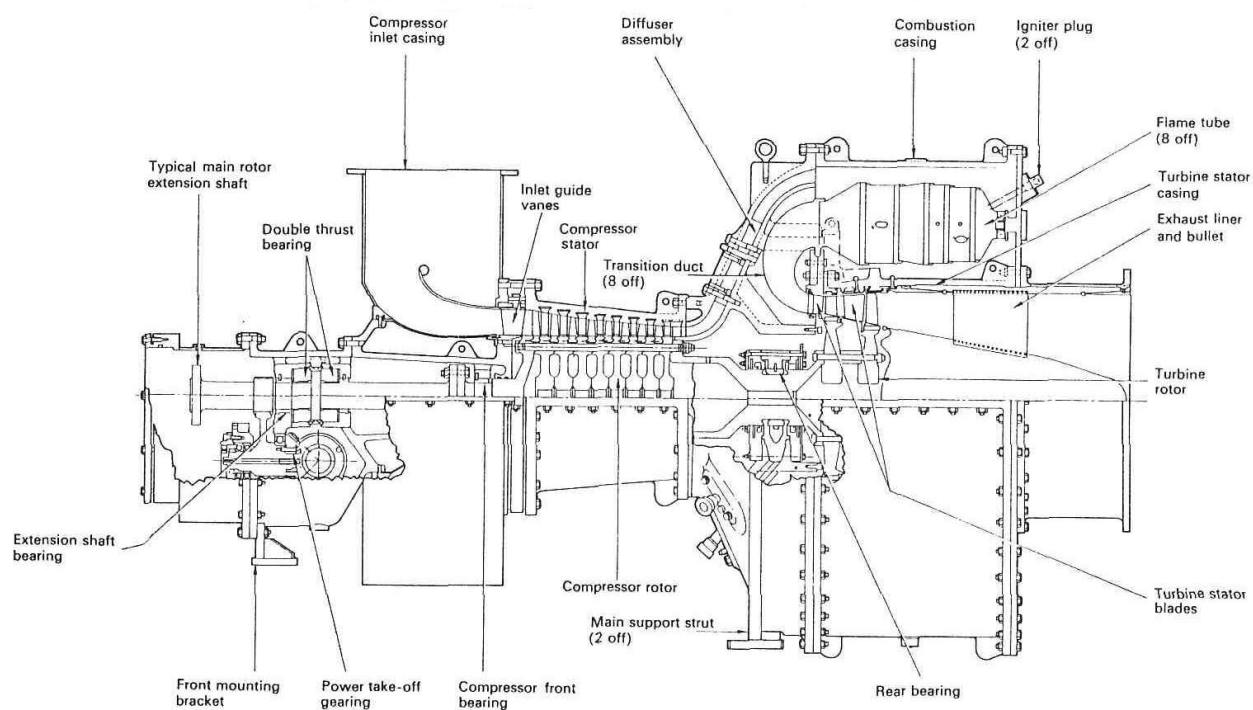
Σχήμα 1.8 Απλός κλειστός κύκλος αεροστροβίλου ισχύος



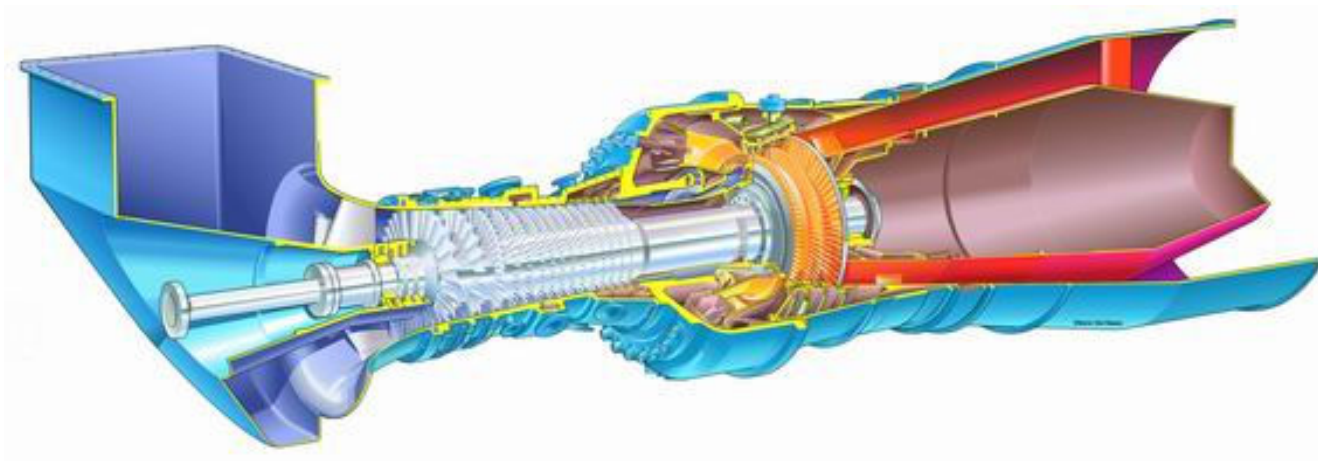
Σχήμα 1.9 Προωστική απόδοση διαφόρων τύπων στροβιλοκινητήρων (Cohen et al (1972))



Σχήμα 1.10 Τυπικό διάγραμμα διαδικασίας σχεδιασμού αεροστροβίλου (Cohen et al (1972))

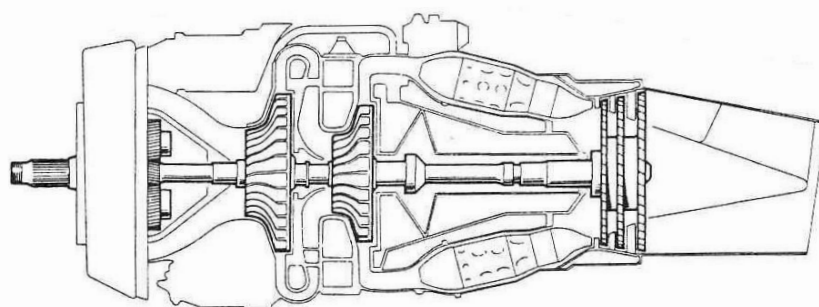
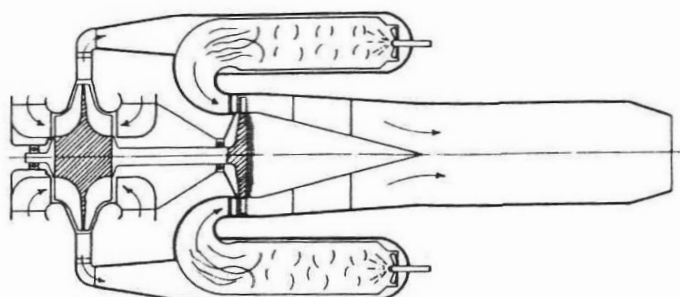


Σχήμα 1.11 Μονοαξονικός αεριοστρόβιλος ισχύος



Σχήμα 1.12 Αεριοστρόβιλος ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος

Σφαίρα του Ήρωνος του Αλεξανδρέως, που περιστρέφεται με ατμό. Η συσκευή αυτή θεωρείται πρόδρομος των συγχρόνων ατμοστροβίλων.

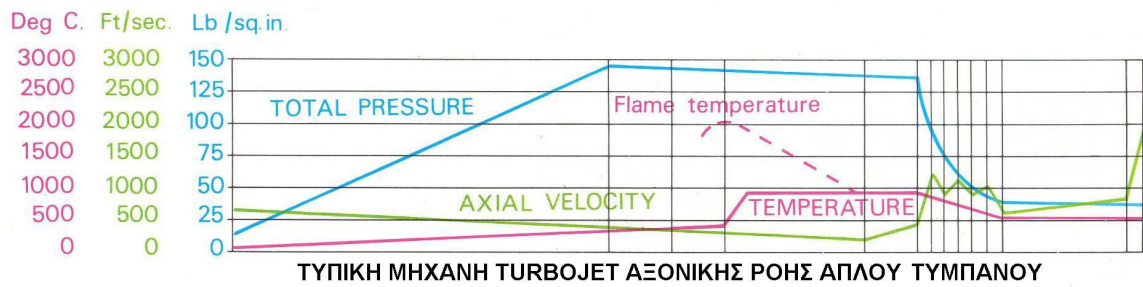
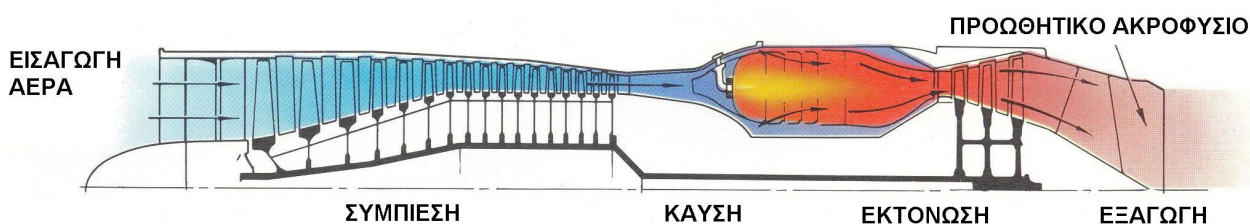


Σχήμα 1.13 Ιστορική εξέλιξη αεροστροβίλων

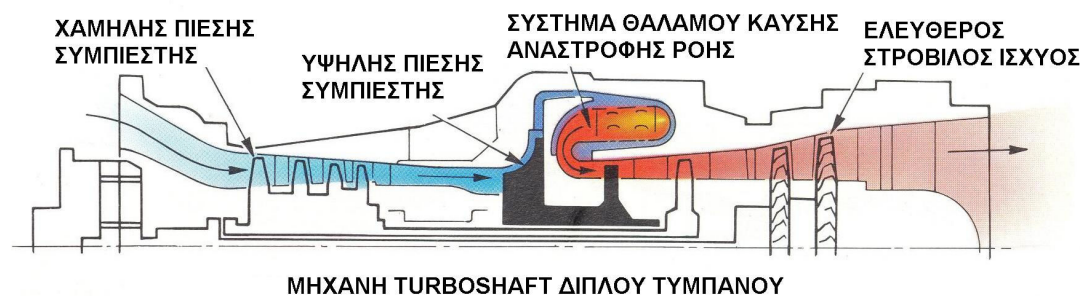
α) Η σφαίρα του Ήωνα του Αλεξανδρινού

β) Διάγραμμα του πειραματικού αεροστροβίλου που σχεδίασε ο Whittle το 1930

γ) Μονοαξονικός στροβιλοκινητήρας τύπου ελικοστροβίλο (turbo-prop) Rolls-Royce Dart, 1945, (Cohen et al (1972), Γούλιος (1980), The Jet Engine, Rolls-Royce (1987))

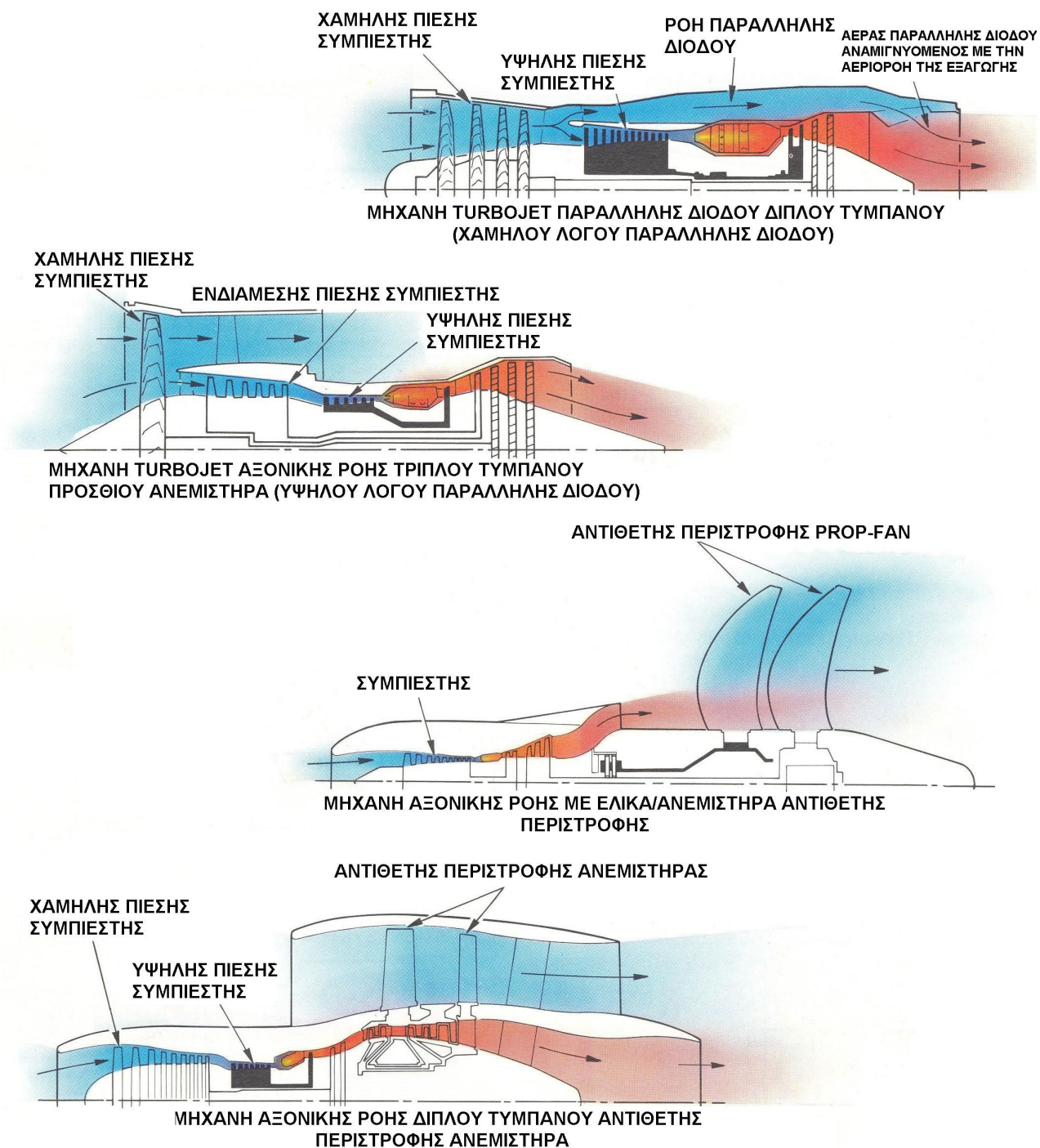


ΤΥΠΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ TURBOJET ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΑΠΛΟΥ ΤΥΜΠΑΝΟΥ

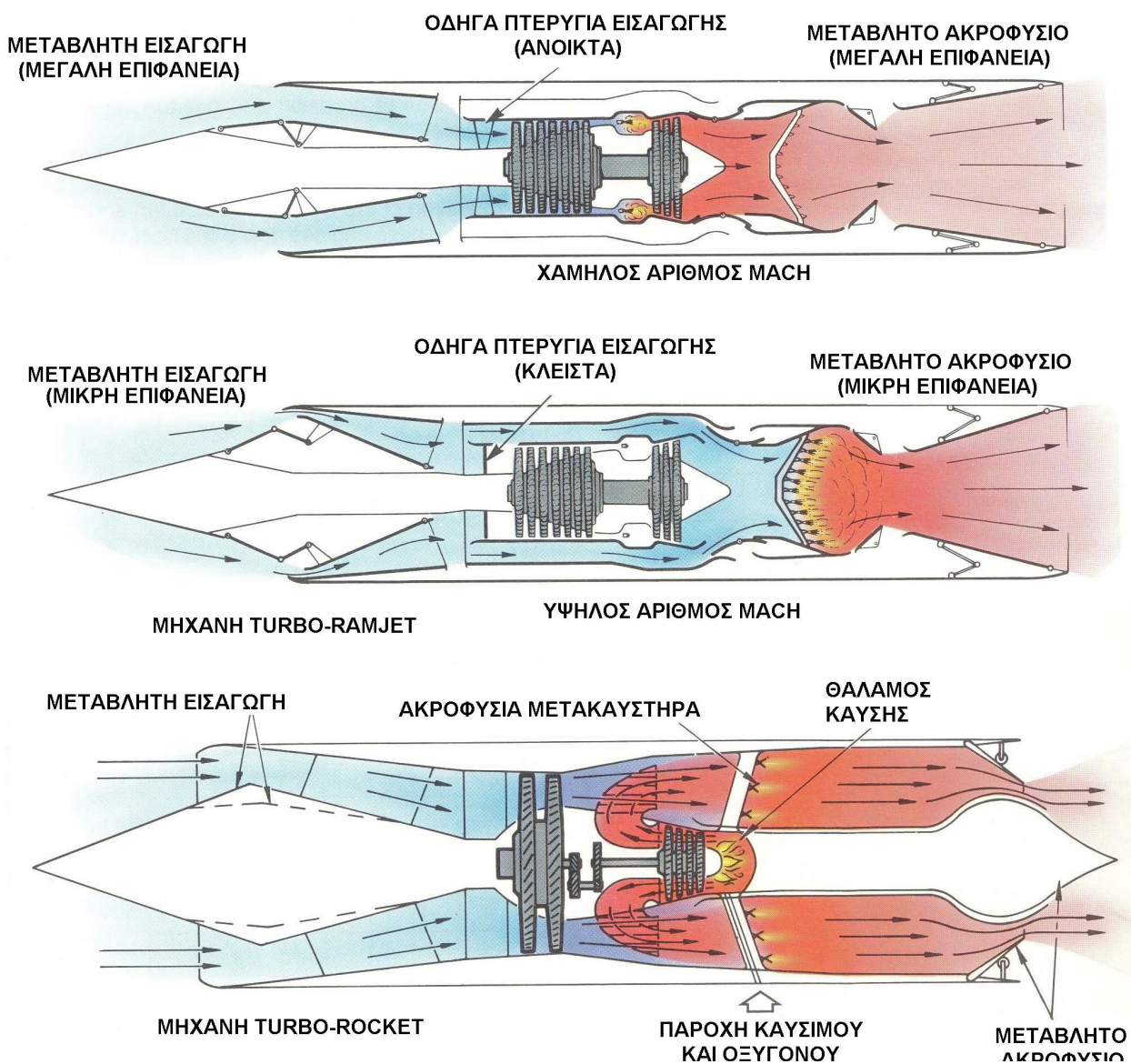


Σχήμα 1.14 Τυπικές διατάξεις σύγχρονων στροβιλοκινητήρων (Από το βιβλίο, *The Jet Engine*, Rolls-Royce (1987))



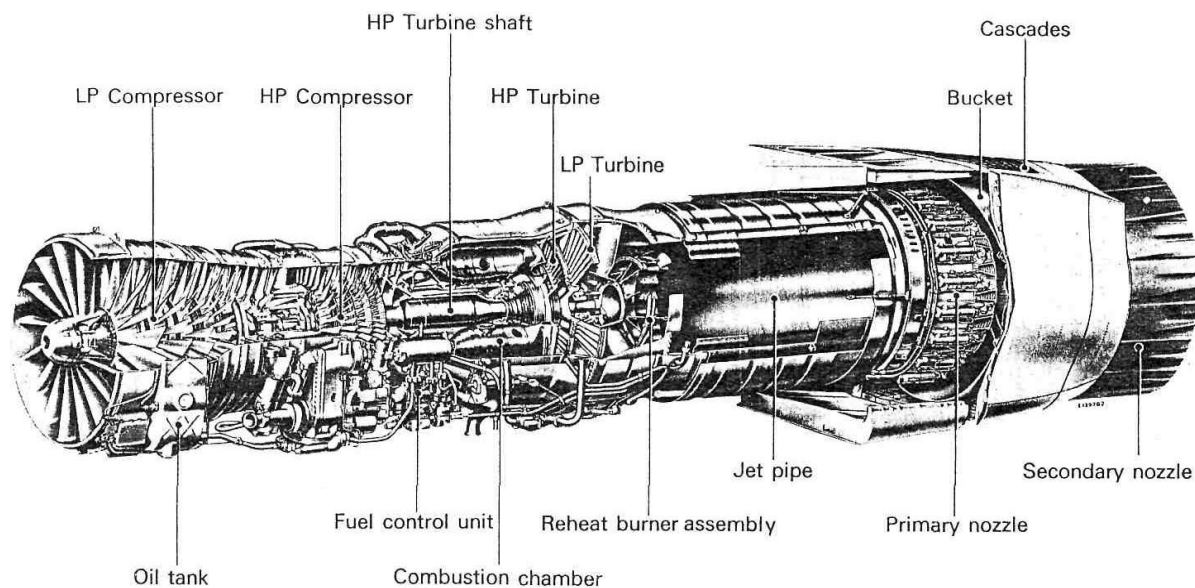


Σχήμα 1.14 (Συνεχίζεται)

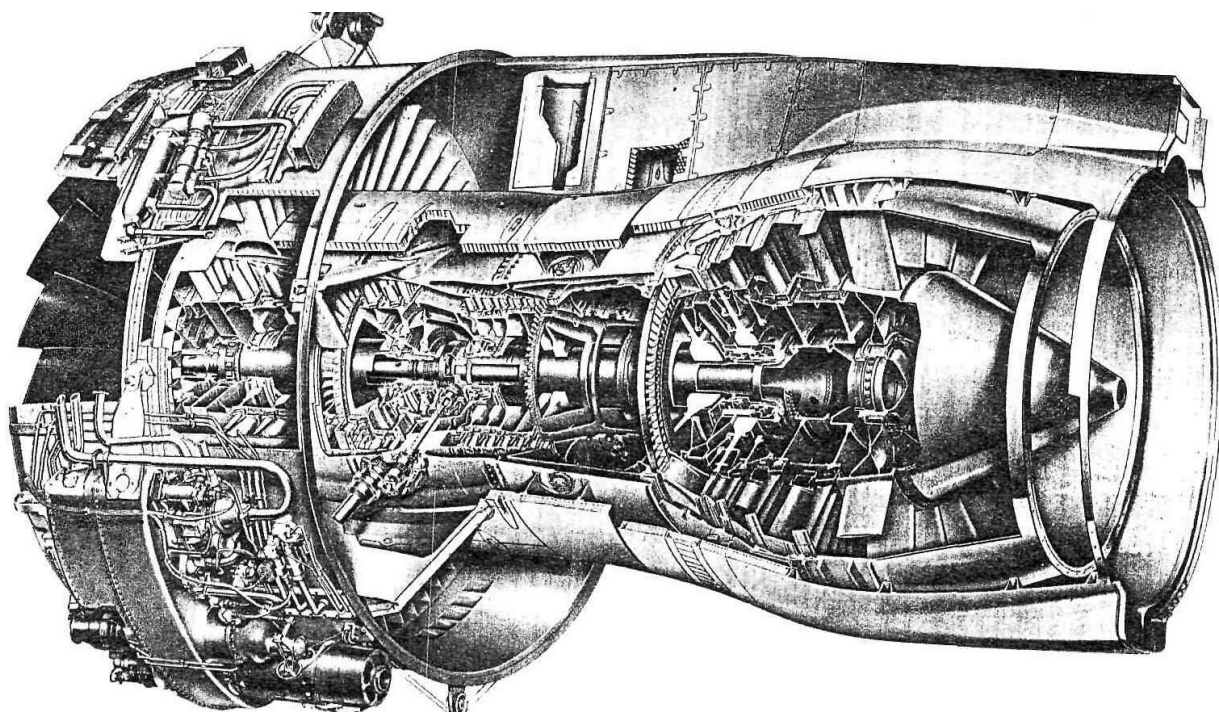


Σχήμα 1.14 (Συνεχίζεται)

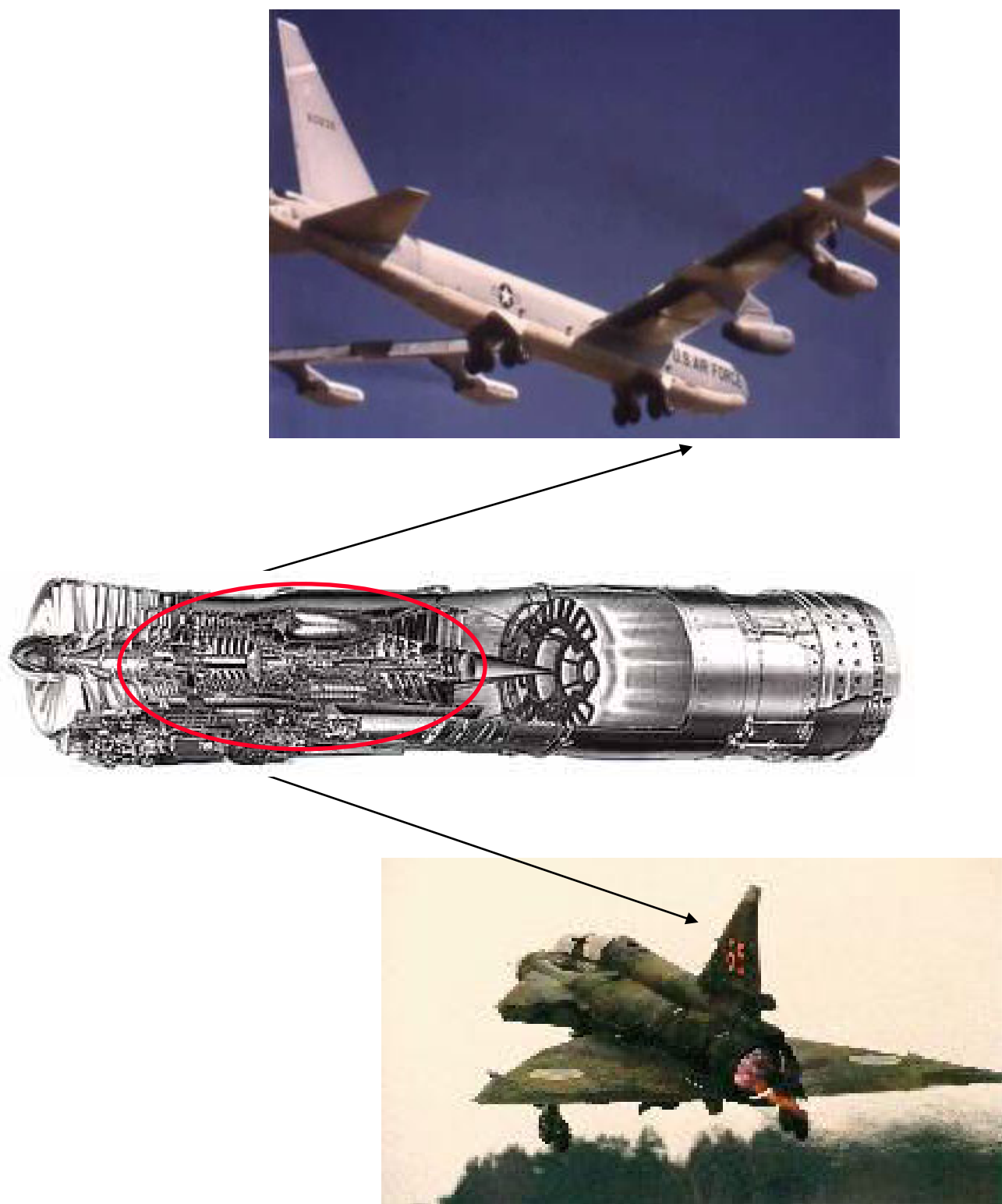




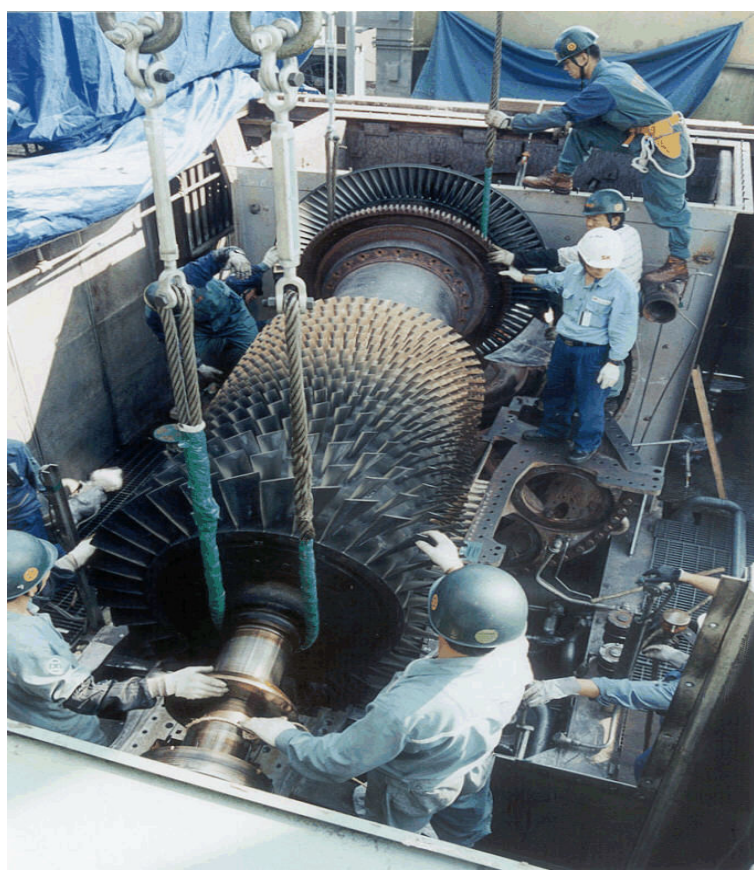
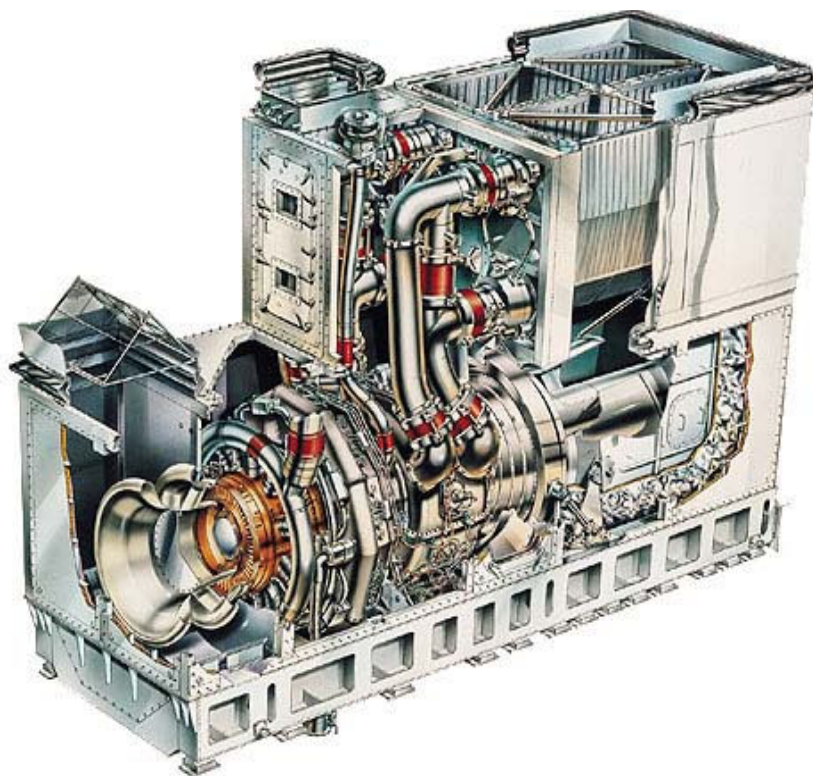
Σχήμα 1.15 Ο πρώτος στροβιλοκινητήρας διπλού τυμπάνου (turbojet, RR Olympus) (The Jet Engine, Rolls-Royce (1987))



Σχήμα 1.16 Στροβιλοκινητήρας τριπλού τυμπάνου τύπου turbofan (RR RB-211)  
(Από το βιβλίο, The Jet Engine, Rolls-Royce (1987))



Σχήμα 1.17 Χρησιμοποίηση του ίδιου βασικού πυρήνα στροβιλοκινητήρα σε εμπορικές και στρατιωτικές εφαρμογές



Σχήμα 1.18 Διατάξεις βιομηχανικών αεροστροβίλων