

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ**  
**ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ:** ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΜΕ ΕΛΙΚΕΣ  
ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:** ΚΑΛΟΥΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ / 4322

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:** ΧΙΛΙΤΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

**ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ :** ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2013

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ**  
**ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ:** ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΜΕ ΕΛΙΚΕΣ  
ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:** ΚΑΛΟΥΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ / 4322

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:** ΧΙΛΙΤΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

**ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ :** .....

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο Καθηγητής

.....

# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ ΕΛΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ

## Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας ήταν η περιγραφή των συστημάτων αναστροφής των πλοίων, με χρήση ελίκων μεταβλητού βήματος.

Αρχικά αναλύονται τα κυριότερα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης πλοίων.

Στη συνέχεια, ακολουθεί μια ιστορική αναδρομή, πάνω στην ηλεκτροπρόωση στα πλοία.

Έπειτα, περιγράφονται οι κυριότεροι κινητήρες ηλεκτροπρόωσης πλοίων .

Στη συνέχεια, αναλύονται τα χαρακτηριστικά των ελίκων και κυρίως αυτών με μεταβλητό βήμα.

Επίσης, γίνεται ανάλυση του τρόπου με τον οποίο συνεργάζεται ο κινητήρας με την έλικα μεταβλητού βήματος.

## Summary

The aim of this study is the description of the systems, which enable the inversion of the ship, with the use of controllable pitch propellers (CPP).

Initially, the main systems of ships electropropulsion are analysed. Then, after a brief historical presentation, the characteristics of the propellers, and especially those of controllable pitch, are analysed.

Also, an analysis is made of the way through which the cooperation between the engine of the ship and the propeller is implemented.

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία, είχε σαν στόχο την περιγραφή των συστημάτων αναστροφής των πλοίων, χρησιμοποιώντας έλικες μεταβλητού βήματος.

Για το σκοπό αυτό, στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στην ηλεκτρική πρόωση πλοίων. Ύστερα από μια σύντομη ιστορική αναδρομή, αναλύονται όλα τα επιμέρους συστήματα που συνθέτουν την εγκατάσταση ηλεκτρικής πρόωσης σε ένα πλοίο.

Παρουσιάζεται η ορολογία της πρόωσης των πλοίων, οι διάφορες μορφές ηλεκτρικής πρόωσης και οι συνηθέστεροι τύποι ηλεκτροκινητήρων που χρησιμοποιούνται για την πρόωση των πλοίων(Κεφάλαιο 1).

Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτική παρουσίαση των διαφόρων τύπων ελίκων, με έμφαση στις έλικες μεταβλητού βήματος.

Επίσης, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο συνεργάζεται ο κινητήρας με την έλικα μεταβλητού βήματος.

Δίνεται μια σύντομη περιγραφή των συνθηκών ροής γύρω από την έλικα, με έμφαση στον συντελεστή ποσοστού ομόρρου  $w$ . Δεν δόθηκε αναλυτικότερη παρουσίαση των συνθηκών ροής, επειδή το θέμα αυτό ξεφεύγει από τον σκοπό της διπλωματικής εργασίας.

Στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης των πλοίων, καθώς και της χρήσης των ελίκων μεταβλητού βήματος (Κεφάλαιο 2).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα (Κεφάλαιο 3) και τέλος δίνεται η σχετική βιβλιογραφία.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΠΡΟΩΣΗ ΠΛΟΙΩΝ

## 1.1. Ηλεκτρική πρόωση πλοίων

Οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι παρούσες σε οποιοδήποτε σκάφος, από την τροφοδότηση του εξοπλισμού επικοινωνίας και ναυσιπλοΐας, του συναγερμού και του συστήματος παρακολούθησης, των αντλιών, των ανεμιστήρων, των βαρούλκων, μέχρι την εγκατάσταση υψηλής ισχύος για την ηλεκτρική πρόωση.

Η ηλεκτρική πρόωση αποτελεί μία αναδυόμενη περιοχή έρευνας για τους κλάδους της μηχανικής.

Ναυπηγοί, μηχανολόγοι και ηλεκτρολόγοι μηχανικοί συνεργάζονται γύρω από κατασκευαστικά, λειτουργικά και οικονομικά ζητήματα.

Η κοινή γλώσσα επικοινωνίας και η αμοιβαία κατανόηση μεταξύ των μηχανικών είναι απαραίτητα για την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού μιας εγκατάστασης ηλεκτρικής πρόωσης [1].

Ως ηλεκτροπρόωση ορίζεται το είδος εκείνο της πρόωσης στο οποίο οι άξονες του πλοίου κινούνται απ' ευθείας (ή και σπανιότερα μέσω μειωτήρων) από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως μηχανές Diesel, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους.

Οι συμβατικοί κινητήρες εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης, αλλά αντί να κινούν απ' ευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης.

Η προωστήρια εγκατάσταση συμπληρώνεται από κάποιο σύστημα ελέγχου για τον χειρισμό της, δηλαδή την κράτηση – εκκίνηση, την αυξομείωση στροφών και την αλλαγή φοράς περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων [2].

Η ηλεκτροπρόωση δεν αποτελεί καινούρια έννοια, η ιδέα δημιουργήθηκε περισσότερο από 100 έτη πριν. Επί μεγάλο διάστημα, τα συστήματα ήταν του τύπου Σ.Ρ./Σ.Ρ. (συχνά συστήματα Ward – Leonard) δηλ. παραγωγή συνεχούς τάσης και κίνηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

Το εναλλασσόμενο ρεύμα αρχίζει να χρησιμοποιείται στα πλοία στις αρχές της δεκαετίας του 1950, αλλά τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης εξακολουθούν να στηρίζονται σε κινητήρες Σ.Ρ., ελεγχόμενους από διατάξεις με θυρίστωρς.

Τα τελευταία 20 έτη η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος έφερε επανάσταση στον έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων.

Η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων E.P., που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της πρόωσης από πλευράς τόσο ευελιξίας όσο και οικονομίας καυσίμου, έδωσε τη δυνατότητα για ευρύτερη διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης σε εμπορικά πλοία και έτσι στις μέρες μας εκατοντάδες πλοίων χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες ως μέσο πρόωσης.

Το 2002 η εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης ήταν 6 – 7 GW, εκτός των εγκαταστάσεων σε εφαρμογές πολεμικών σκαφών υποβρυχίων και επιφάνειας [1], [2].

Τη δεκαετία του '90, η ανάπτυξη των αζιμουθιακών προωστήρων, προσέφερε στα πλοία ευελιξία στις κινήσεις, ευκολία στις διελεύσεις από περιοχές υψηλής κινητικότητας και επικινδυνότητας και τη δυνατότητα δυναμικής τοποθέτησής τους (Dynamic Positioning – D.P.) [1].

Ενώ παλαιότερα η ηλεκτρική πρόωση έβρισκε μόνον πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές (παγοθραυστικά, ερευνητικά σκάφη, σκάφη πόντισης καλωδίων), κατά τη δεκαετία του '90 παρουσιάζει μια έντονα αυξανόμενη διάδοση σε πλοία όπως μεγάλα επιβατηγά, οχηματαγωγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια, κλπ.

## **1.2. Ιστορική αναδρομή ηλεκτροπρόωσης**

Μία σειρά πειραματικών εφαρμογών ηλεκτρικής πρόωσης πραγματοποιήθηκαν στο τέλος του 19ου αιώνα σε Ρωσία και Γερμανία όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης τροφοδοτούταν απευθείας από συστοιχίες συσσωρευτών.

Η πρώτη γενιά ηλεκτροπρόωσης εφαρμόστηκε περί το 1920. Ήταν αποτέλεσμα του μεγάλου ανταγωνισμού για μείωση του χρόνου των υπερατλαντικών ταξιδιών, μεταξύ των ναυτιλιακών εταιριών επιβατηγών πλοίων.

Οι μεγάλες απαιτήσεις σε ισχύ πρόωσης καλύπτονταν τότε από στρόβιλο – ηλεκτρικά συστήματα. Το πλοίο S/S Normandie (Εικόνα 1) χρησιμοποιούσε ένα τέτοιο σύστημα, ήταν το πρώτο σκάφος που διέσχισε τον Ατλαντικό Ωκεανό (1935) κινούμενο με 30 και πλέον κόμβους [1], [5].

Στρόβιλοι ατμού τροφοδοτούσαν τους σύγχρονους ηλεκτρικούς κινητήρες ισχύος 29 MW σε καθέναν από τους τέσσερις άξονες μετάδοσης κίνησης.

Η περιστροφική ταχύτητα δινόταν από την ηλεκτρική συχνότητα των γεννητριών.

Σε κανονική λειτουργία οι γεννήτριες τροφοδοτούσαν κάθε μηχανή πρόωσης ξεχωριστά, υπήρχε όμως και η δυνατότητα τροφοδότησης δύο μηχανών από μία γεννήτρια για ταξίδι χαμηλότερης ταχύτητας [1].



Εικόνα 1. S/S Normandie (1935) [5].

Με την εισαγωγή των μηχανών Diesel στο μέσο του 20ου αιώνα, η τεχνολογία ατμοστροβίλων και η ηλεκτρική πρόωση εξαφανίστηκαν λίγο πολύ από την εμπορική ναυτιλία μέχρι τη δεκαετία του '80 [1].

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος και συγκεκριμένα των συστημάτων οδήγησης των ηλεκτρικών κινητήρων, έφεραν τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα πάλι στα πλοία.

Αρχικά περί το 1970 μέσω των ανορθωτών (E.P./Σ.P.) για τον έλεγχο μηχανών πρόωσης Σ.P. και στη συνέχεια το 1980 με τη χρήση των μετατροπέων E.P./E.P. για τον έλεγχο μηχανών E.P., έχουμε τη δεύτερη γενιά ηλεκτροπρόωσης.

Το προωστήριο σύστημα τροφοδοτείται πλέον από ένα ισχυρό δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας. Μέσω του ελέγχου των στροφών των ηλεκτρικών κινητήρων στρέφονται οι έλικες σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propellers – FPP).

Αυτές οι λύσεις αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σε ειδικές κατηγορίες πλοίων όπως ερευνητικά και παγοθραυστικά πλοία αλλά και σε κρουαζιερόπλοια.

Το “S/S Queen Elizabeth II”, μετατράπηκε σε ηλεκτροκίνητο περί το 1975, στη συνέχεια ακολούθησαν και άλλα πλοία όπως τα κρουαζιερόπλοια Fantasy και Princess, shuttle tankers κ.α.. Σημειωτέον, στην άμεσα οδηγούμενη πετρελαιοκίνητη πρόωση η ώση συνήθως ελέγχεται μέσω ενός υδραυλικού συστήματος αλλαγής του βήματος των ελίκων.

Οι έλικες αυτές είναι γνωστές ως έλικες μεταβλητού βήματος (Controllable Pitch Propellers – CPP) [1].

Το 1990 έκανε την εμφάνισή του το αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης (podded propulsion). Σε αυτό ο ηλεκτρικός κινητήρας βρίσκεται μέσα σε μια λοβοειδή κατασκευή ποντισμένη στη θάλασσα.

Η έλικα, που είναι απευθείας συνδεδεμένη με τον κινητήρα, είναι σταθερού βήματος και το όλο σύστημα έχει τη δυνατότητα περιστροφής κατά 360ο προσφέροντας στο πλοίο ευκινησία και ευελιξία (maneuverability).

Από την πρώτη εφαρμογή στο κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation”, τα αποτελέσματα ήταν τόσο ενθαρρυντικά ώστε να καθιερωθεί η αζιμουθιακή πρόωση στα νέα κρουαζιερόπλοια (Σχ. 1) [1].



Σχήμα 1. Κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation” με azipod (κάτω δεξιά) με σημαντικό ελεύθερο χώρο [1].

### 1.3.Ορολογία ηλεκτρικής πρόωσης

Η έρευνα γύρω από την ηλεκτρική πρόωση αναπτύσσεται ραγδαία στις μέρες μας, μια σειρά από επιστημονικούς όρους εντοπίζει κανείς στη σχετική βιβλιογραφία [2].

α. Πλήρης ηλεκτροπρόωση (Full Electric Propulsion – F.E.P.).

Η εγκατάσταση πρόωσης κατά την οποία το πλοίο κινείται αποκλειστικά από ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα ζεύγη κινητηρίων μηχανών – γεννητριών που τροφοδοτούν τους κινητήρες πρόωσης υπάρχουν αποκλειστικά για το σκοπό αυτό καθώς δεν τροφοδοτούν άλλα φορτία. Η



ηλεκτρική ισχύς για όλους τους άλλους καταναλωτές του πλοίου παράγεται από άλλες γεννήτριες.

β. Ολοκληρωμένη πλήρης ηλεκτροπρόωση (Integrated Full Electric Propulsion –I.F.E.P.).

Η εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης στην οποία τα ίδια ζεύγη κινητηρίων μηχανών – γεννητριών, τροφοδοτούν τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης, όσο και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου.

γ. Πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship – A.E.S.).

Το πλοίο που διαθέτει ολοκληρωμένη πλήρη ηλεκτροπρόωση και που επιπλέον σε ευρεία έκταση επιτελεί τις λειτουργίες του μέσω ηλεκτρικών μηχανημάτων και συστημάτων.

δ. Ηλεκτρικό δίκτυο πρόωσης (Propulsion Network).

Το τμήμα εκείνο (ανεξάρτητο ή ενσωματωμένο) του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου που τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία που σχετίζονται με την πρόωση.

ε. Ηλεκτρικό δίκτυο χρήσης (Ship Service System).

Το υπόλοιπο, πλην δικτύου πρόωσης, ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου.

#### **1.4. Ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης**

Στις πρώτες εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος Σ.Ρ., ο οποίος και χρησιμοποιείται ακόμα σε πολλά πλοία διαφόρων τύπων.

Στις περισσότερες σύγχρονες εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης χρησιμοποιούνται σύγχρονοι κινητήρες με βαθμό απόδοσης 96 – 98 %, 3 – 4 % περισσότερο από τους ασύγχρονους με ονομαστική τάση λειτουργίας τα 3,3 – 6,6 kV.

Μια νέα κατηγορία σύγχρονων κινητήρων έρχεται να προστεθεί στους παραπάνω, οι σύγχρονοι κινητήρες μονίμου μαγνήτη με απόδοση πάνω από 98 %.

Στους σύγχρονους κινητήρες μονίμου μαγνήτη το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα αντικαθίσταται από μόνιμους μαγνήτες οι οποίοι παράγουν το ίδιο μαγνητικό πεδίο που στρέφεται στο χώρο σύγχρονα με τον δρομέα [2].

### 1.4.1 Σύγχρονος κινητήρας μονίμου μαγνήτη

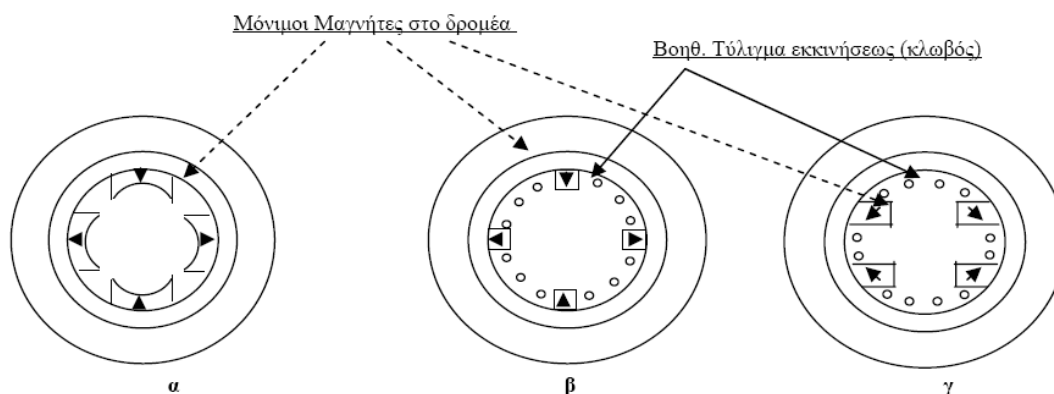
Οι σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη δεν έχουν ανάγκη από μια έξτρα παροχή Σ.Ρ. για το τύλιγμα διέγερσης, ακόμη μειώνονται και οι συνολικές θερμικές απώλειες (Joule), έτσι εξηγείται και ο μεγάλος βαθμός απόδοσης.

Η ιδέα της χρήσης μονίμων μαγνητών είναι παλιά αλλά η τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια είναι που κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων μονίμων μαγνητών (κράματα σαμαρίου – κοβαλτίου, SmCo και νεοβιδίου – σιδήρου – βορείου, NdFeB) που έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτισή τους για αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, όπως είναι αυτές που αναπτύσσονται στο εσωτερικό μίας στρεφόμενης μηχανής.

Οι κινητήρες αυτοί με κατάλληλη επιλογή τυλίγματος στάτη και πόλων δρομέα μπορούν να παράγουν ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, συναγωνίζεται έτσι με μία συμβατική σύγχρονη μηχανή στα χαμηλά επίπεδα απότομων αιχμών ροπής (torque ripples) και μηχανικών δονήσεων (vibrations) (Σχ. 2).

Τα τελευταία χρόνια ερευνάται η χρησιμοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων με υπεραγώγιμα υλικά ως κινητήρες πρόωσης, κυρίως στην Αμερική. Οι κινητήρες αυτοί, λόγω του ότι το υπεραγώγιμο υλικό παρουσιάζει μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, έχουν πολύ μεγάλη ισχύ ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες.

Θεωρούνται έτσι ιδανικοί για την πρόωση πολεμικών πλοίων όπου ο χώρος είναι περιορισμένος σε συνδυασμό με τις αυξημένες ανάγκες ισχύος. Η εταιρεία American Superconductor Inc. χρηματοδοτείται από το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό για να κατασκευάσει έναν κινητήρα πρόωσης ονομαστικής ισχύος 25 MW [2].



α) οι μόνιμοι μαγνήτες στην εξωτερική επιφάνεια του δρομέα β) οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα

γ) οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα με διεύθυνση ροής εγκάρσια στον άξονα

Σχήμα 2. Διατάξεις σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες [2].

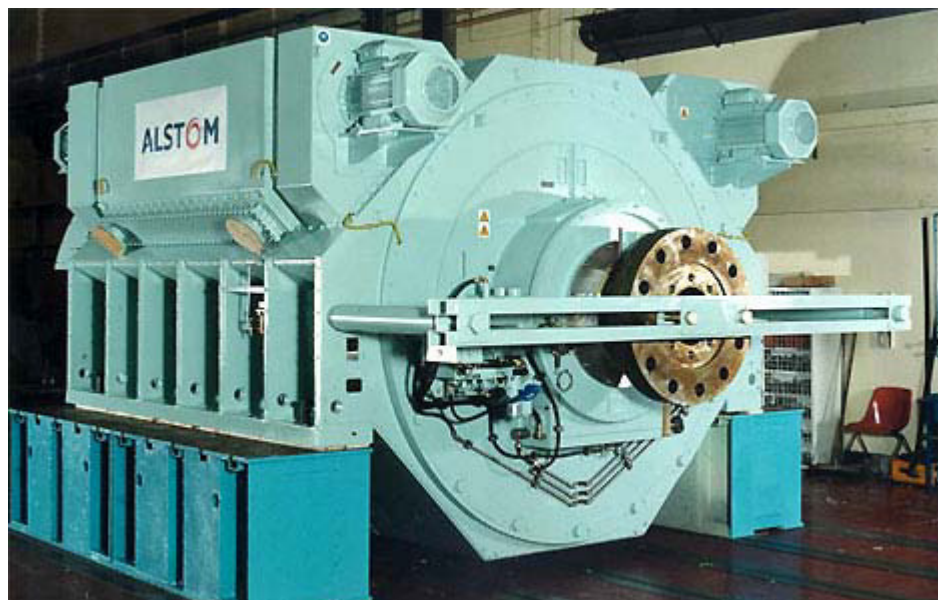
## 1.5. Προηγμένοι κινητήρες E.P.

Πρόκειται για κινητήρες στους οποίους η ωφέλιμη μαγνητική ροή είναι κατά την ακτινική διεύθυνση δηλαδή όπως στις συνήθεις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές.

Αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις τέτοιων κινητήρων είναι ο κινητήρας PERMASYN της εταιρείας SIEMENS, με μόνιμους μαγνήτες SmCo που βρίσκει εφαρμογές πρόωσης μεταξύ άλλων σε υποβρύχια του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού.

Ένας άλλος τύπος ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης είναι ο εξελιγμένος επαγωγικός κινητήρας (Advanced Induction Motor – AIM) (Εικόνα 2) της ALSTOM ο οποίος έχει επιλεγεί για την πρόωση φρεγάτας (Frigate Type 45) του Βρετανικού Πολεμικού Ναυτικού.

Προσφέρει υψηλή πυκνότητα ισχύος και ροπής σε σύγκριση με έναν συμβατικό επαγωγικό κινητήρα ίδιας ονομαστικής ισχύος. Η διαφορά με τον κοινό τριφασικό επαγωγικό κινητήρα είναι ότι προσφέρει την δυνατότητα λειτουργίας με 5, 10 ή 15 φάσεις με την βοήθεια εξελιγμένων ηλεκτρονικών ισχύος για να αυξηθεί η ισχύς του κινητήρα [2].



Εικόνα 2. Οι προηγμένες μηχανές επαγωγής (AIM) της Alstom – Converteam, ειδικά σχεδιασμένες για πρόωση, είναι μικρότερες και ελαφρύτερες από τις χρησιμοποιούμενες σύγχρονες μηχανές, καθιστώντας τις έτσι ιδιαίτερα κατάλληλες για ναυτικές εφαρμογές [6].

### 1.5.1. Κίνηση της έλικας με άξονα (shaft propulsion)

Σε αυτό το είδος πρόωσης οι έλικες ελέγχονται συνήθως από κινητήρες πρόωσης μεταβλητής ταχύτητας (Σχ. 3 – 4).

Οι ηλεκτρικές μηχανές συνδέονται είτε άμεσα στον άξονα της έλικας, τρόπος απλός και στιβαρός, είτε μέσω μειωτήρων.

Η χρήση μειωτήρων, οδηγεί στη χρήση μηχανών σχετικά υψηλών ονομαστικών στροφών, άρα και σε πιο συμπαγείς μηχανές.

Το μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι περιλαμβάνουν αρκετά μηχανικά υποσυστήματα, οπότε και περισσότερες μηχανικές απώλειες (βλ. Σχ. 3).

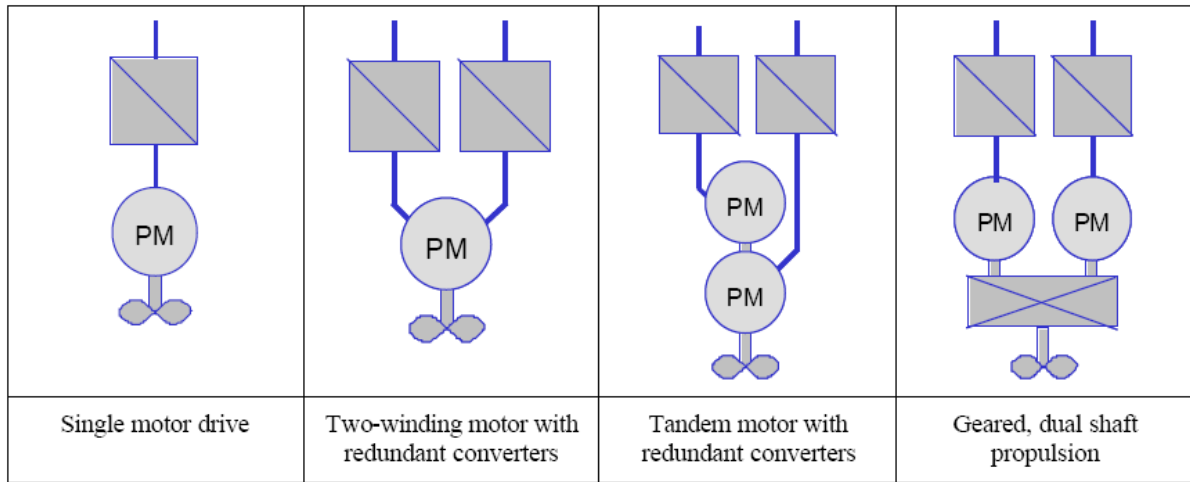
Η κίνηση της έλικας με άξονα (shaft propulsion) εφαρμόζεται σε ντιζελοηλεκτρικά συστήματα πρόωσης όπου η ισχύς τους είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να προσφέρει ένα αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης, μειώνονται όμως οι ελκτικές του ικανότητες και χρειάζονται βοηθητικά μέσα ελιγμών (π.χ. έλικες πλευρικής ώσης).

Επίσης είναι απαραίτητη η χρήση πηδαλίων για κάθε έλικα.

Συνήθως χρησιμοποιούνται έλικες σταθερού βήματος (FPP). Σε ορισμένες εφαρμογές παρόλο που οι στροφές τις έλικας είναι μεταβλητές χρησιμοποιούνται και έλικες μεταβλητού βήματος (CPP), συνδυασμός ο οποίος οδηγεί σε μεγαλύτερες αποδόσεις έλικας [1].



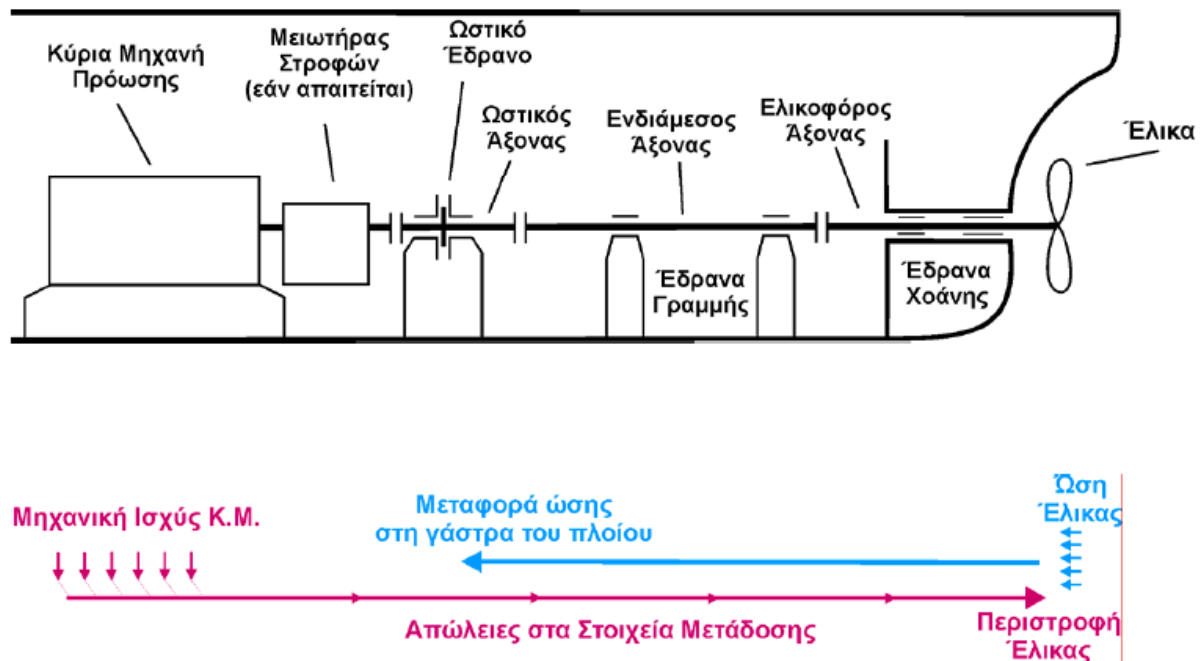
Σχήμα 3. Σύστημα ηλεκτροπρόωσης της Converteam [7].



Σχήμα 4. Διάφορα είδη αξονικής πρόωσης [1].

### 1.5.2. Αζιμουθιακοί προωστήρες (azimuth thrusters)

Αυτό το είδος προωστήρων μέσω της περιστροφής τους παράγουν ώση σε οποιαδήποτε διεύθυνση (Σχ. 6). Η ώση μπορεί να ελέγχεται είτε από προωστήρες με έλικες ελεγχόμενου βήματος CPP με σταθερή ταχύτητα περιστροφής είτε από προωστήρες με έλικες σταθερού βήματος FPP με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής είτε ακόμα και με προωστήρες μεταβλητού βήματος και στροφών.



Σχημα 5. Γενική περιγραφή αξονικού συστήματος μεταξύ κύριας μηχανής πρόωσης και έλικας [12].



Σχήμα 6. Azimuth thruster της εταιρίας Rolls Royce [13].

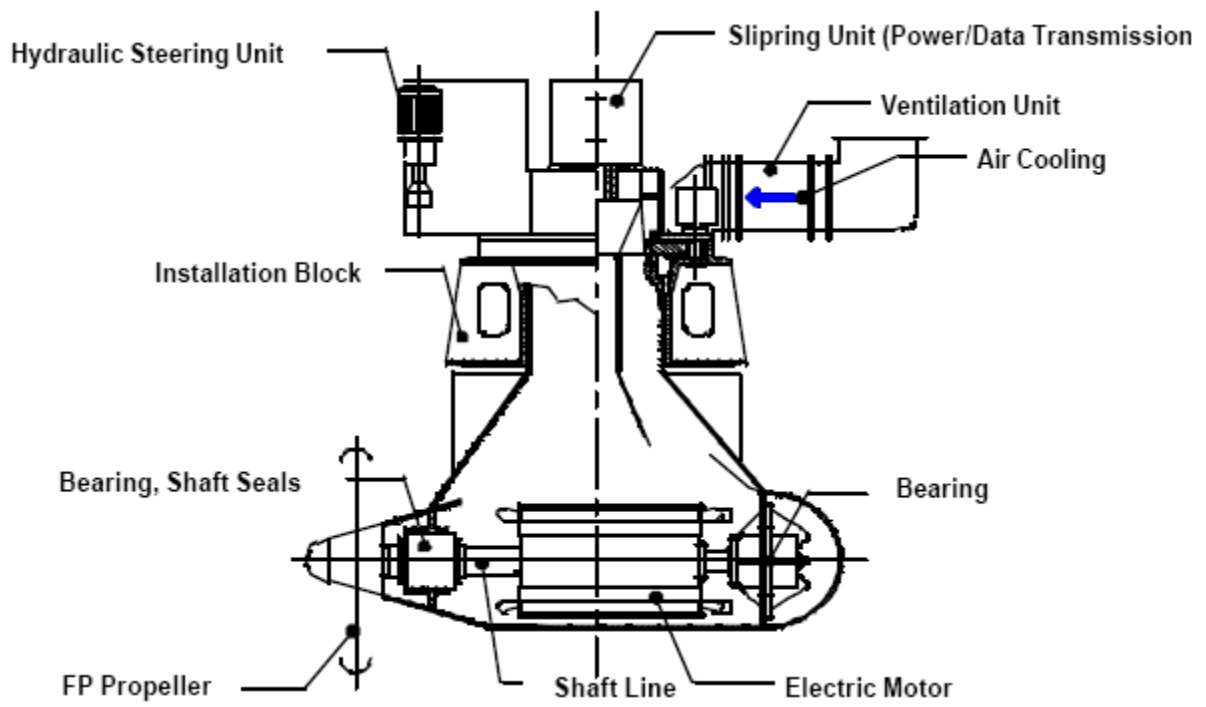
Οι αζιμουθιακοί προωστήρες αρχικά χρησιμοποιούνταν για να κρατούν σταθερή τη θέση ενός πλοίου και για τους ελιγμούς του. Τα τελευταία χρόνια ο συνδυασμός τους με την ηλεκτρική πρόωση οδήγησε και στην εφαρμογή τους ως κύρια μέσα πρόωσης σε εφαρμογές της τάξης των 6 – 7 MW [1].

### **1.5.3. Αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod (podded propulsion)**

Την τελευταία δεκαετία και παράλληλα με την εισαγωγή της ηλεκτρικής πρόωσης εμφανίστηκε μία εναλλακτική λύση για το προωστήριο σύστημα που έχει πολλαπλά πλεονεκτήματα.

Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα ηλεκτρικού κινητήρα και έλικας είναι μία ενιαία μονάδα, εμβαπτισμένη στο νερό (Εικ.3) στο πρυμναίο μέρος του πλοίου, όπως στις εξωλέμβιες (Σχ. 7 και 8). Το σύστημα μπορεί να φέρει μία ή δύο έλικες και έχει τη δυνατότητα να στρέφεται σχεδόν κατά  $360^{\circ}$  κατά την αζιμουθιακή διεύθυνση (από όπου προέρχεται και το όνομά του), δηλ. στο οριζόντιο επίπεδο, αυξάνοντας σε μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες ελιγμών του πλοίου, ενώ αφενός πρακτικά εκμηδενίζεται το αξονικό σύστημα και αφετέρου δεν υφίσταται μηχανισμός πηδαλίου.

Επιπλέον, επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση χώρου, καθώς οι κινητήριες μηχανές έχουν μικρές διαστάσεις και το μεγαλύτερο μέρος του είναι εκτός του πλοίου, ενώ και αυτό ακόμη το αξονικό σύστημα ουσιαστικά εκμηδενίζεται οδηγώντας και σε μειωμένες ανάγκες συντήρησης.



Σχήμα 7. Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα με μία έλικα Aziprod της ABB και τα επιμέρους στοιχεία του [1].

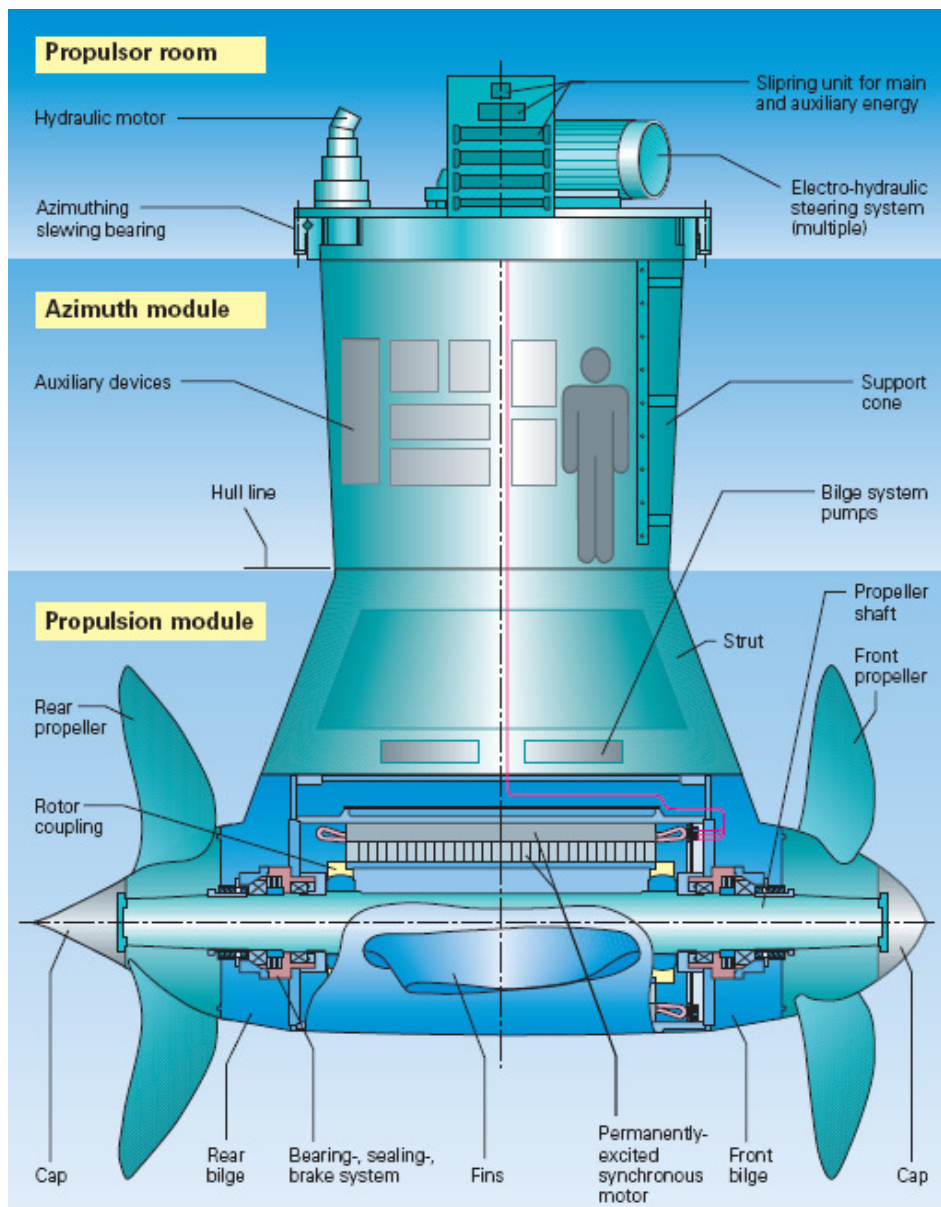


Εικόνα 3. Azipod thruster, ABB Marine [14].

Το ενοποιημένο σύστημα κινητήρα – άξονα – έλικα έχει εξαιρετικά μικρούς χρόνους απόκρισης σε εντολές ελιγμών κάτι που ελαχιστοποιεί και τον χρόνο αποφυγής σύγκρουσης (crash – stop time).

Ο προωστήριος κινητήρας έχει περιορισμένες ανάγκες ψύξης καθώς ψύχεται από το θαλασσινό νερό στο οποίο είναι εμβαπτισμένος.

Το αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod χρησιμοποιείται σήμερα σε εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης της τάξης των 1 – 25 MW [1], [3].



Σχήμα 8. Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα δύο ελικών SSP (Siemens – Schottel Propulsor) και τα επιμέρους στοιχεία του [4].



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΕΛΙΚΕΣ

### 2.1. Έλικες-Τύποι ελίκων

Το παραδοσιακό μέσο που χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός πλοίου είναι η έλικα, μερικές φορές δύο και , σε σπανιότερες περιπτώσεις, περισσότερες από δύο.

Οι έλικες , όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως,(βλ. Ιστορική αναδρομή), μπορούν να χωριστούν στις δύο ακόλουθες κατηγορίες,( σχήμα 3) :

1. Έλικες σταθερού βήματος – fixed pitch propeller (FP-propeller)

2. Έλικες μεταβλητού βήματος – controllable pitch propeller (CP-propeller)

Οι έλικες σταθερού βήματος είναι ενιαία χυτά κομμάτια και συνήθως κατασκευάζονται απο κράμα χαλκού.

Η θέση των πτερυγίων, και συνεπώς το βήμα της έλικας, είναι ίση και σταθερή για όλα, με ένα δεδομένο βήμα που δεν μπορεί να αλλάξει κατα την λειτουργία. Αυτό σημαίνει ότι όταν η έλικα λειτουργεί σε συνθήκες, για παράδειγμα άσχημου καιρού, οι καμπύλες απόδοσης της έλικας, δηλαδή ο συνδιασμός ισχύος και ταχύτητας (  $r/min$ ), θα αλλάζουν ακολουθώντας τους φυσικούς νόμους, και η πραγματική καμπύλη της έλικας δεν μπορεί να μεταβληθεί απο το πλήρωμα.

Τα περισσότερα πλοία που δεν χρειάζονται ειδικές καλές ελιγκτικές ικανότητες είναι εφοδιασμένα με έλικες σταθερού βήματος.

Οι έλικες μεταβλητού βήματος έχουν μεγαλύτερη πλύμνη σε σχέση με τις έλικες σταθερού βήματος, επειδή η πλύμνη πρέπει να έχει αρκετό χώρο για τον υδραυλικό μηχανισμό ελέγχου της γωνίας (βήματος) των πτερυγίων.

Οι έλικες μεταβλητού βήματος είναι σχετικά ακριβές, ίσως 3 με 4 φορές ακριβότερες σε σχέση με τις έλικες σταθερού βήματος. Επιπλέον, λόγω της μεγαλύτερης πλύμνης, η απόδοση της έλικας είναι ελαφρώς χαμηλότερη.

Οι έλικες μεταβλητού βήματος συνήθως χρησιμοποιούνται στα κρουαζιερόπλοια και στα ferries που απαιτούν υψηλές ελεγκτικές ικανότητες. Για τα συνηθισμένα πλοία, όπως τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, φορτίου χύδην και τα δεξαμενόπλοια, που πλέον για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε κανονική θάλασσα και με δεδομένη ταχύτητα, θα ήταν γενικά αντισυμβατικό να εγκατασταθούν έλικες μεταβλητού βήματος αντί για σταθερού.

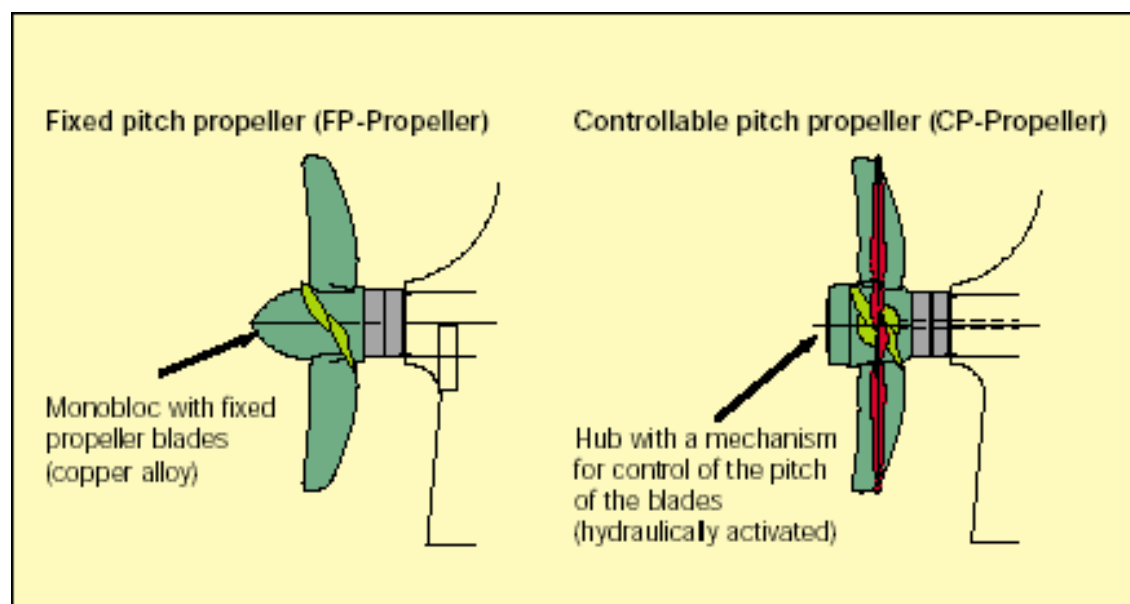
Επίσης, μια έλικα μεταβλητού βήματος είναι πιο περίπλοκη και συνοδεύεται απο υψηλότερο ρίσκο εμφάνισης προβλημάτων κατα την λειτουργία.

### 2.1.1. Συνθήκες ροής γύρω από την έλικα

#### Συντελεστής ποσοστού ομόρρου $w$

Όταν το πλοίο κινείται, η τριβή της γάστρας θα δημιουργήσει μία λεγόμενη ζώνη τριβής ή οριακό στρώμα νερού γύρω από την γάστρα.

Στην ζώνη αυτή, η ταχύτητα του νερού στην επιφάνεια της γάστρας είναι ίση με αυτή του πλοίου, αλλά μειώνεται με την απόσταση από την επιφάνεια της γάστρας.



Σχήμα 9. Τύποι ελίκων. Αριστερά : Έλικα σταθερού βήματος (FPP). Δεξιά : Έλικα μεταβλητού βήματος (CPP).

Σε μία ορισμένη απόσταση από την γάστρα και, εξ' ορισμού, ίση με την απόσταση της εξωτερικής επιφάνειας της ζώνης τριβής, η ταχύτητα του νερού, σε σχέση με την περιβάλλουσα υδάτινη μάζα είναι ίση με μηδέν.

Το πάχος της ζώνης τριβής αυξάνει με την απόστασή του από το προωαίο τμήμα της γάστρας.

Η ζώνη τριβής είναι, λοιπόν, παχύτερη στο πρυμναίο άκρο της γάστρας και το πάχος της είναι σχεδόν ανάλογο με το μήκος του πλοίου [3].

Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρχει κάποια ταχύτητα του ομόρρου που προκαλείται από την τριβή κατά μήκος των πλευρών της γάστρας. Επιπλέον, το εκτοπιζόμενο νερό από το πλοίο θα προκαλέσει επίσης κύματα τόσο προς την πλώρα όσο και την πρύμνη. Όλα αυτά σημαίνουν ότι η έλικα πίσω από την γάστρα θα λειτουργεί σε ένα πεδίο ομόρρου.

Συνεπώς, το νερό στην έλικα θα έχει μία πραγματική ταχύτητα ομόρρου  $V_w$ , που έχει την ίδια κατεύθυνση όπως και η ταχύτητα του πλοίου  $V$ , κυρίως λόγω του ομόρρου τριβής.

Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα με την οποία φθάνει το νερό στην έλικα  $V_A$  (ίση με την ταχύτητα προχώρησης της έλικας), εκφραζόμενη ως μέση ταχύτητα στον δίσκο της έλικας, είναι κατά  $V_w$  χαμηλότερη από την ταχύτητα του πλοίου  $V$ .

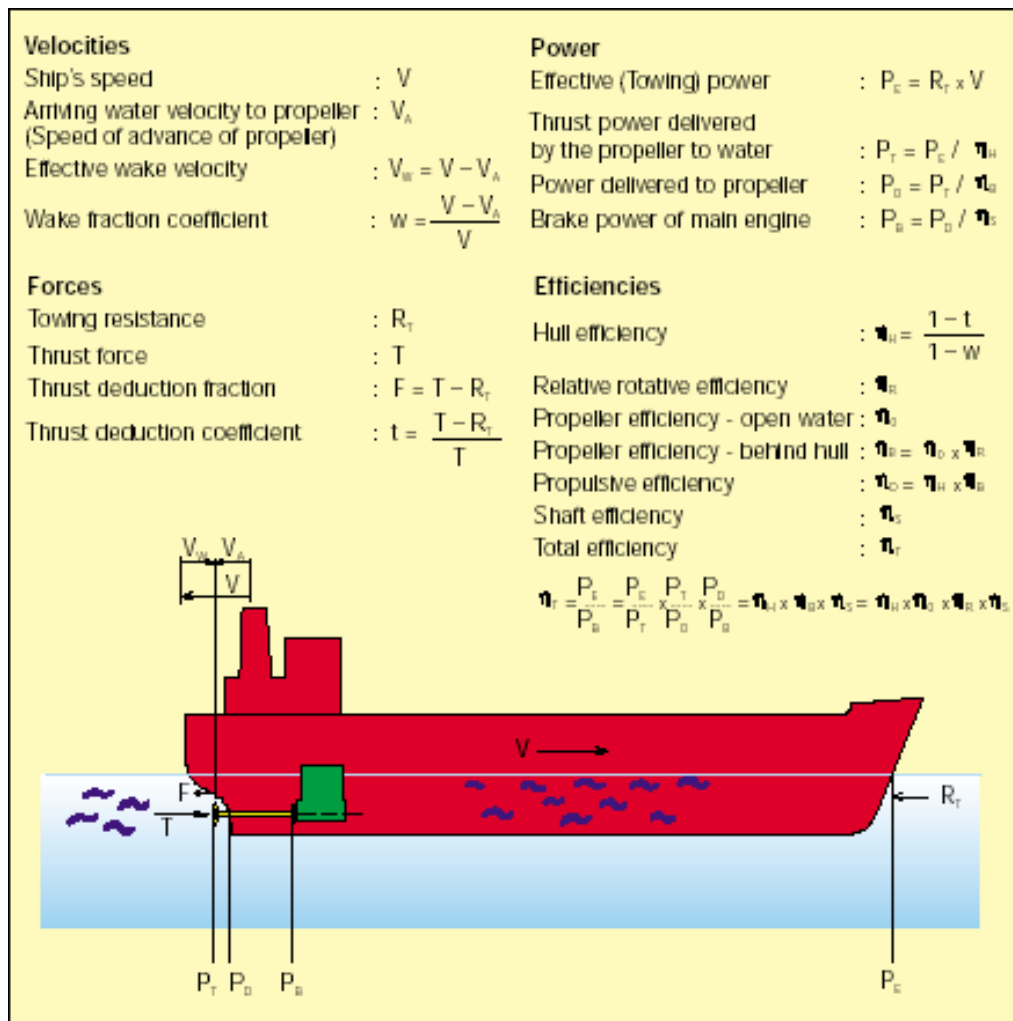
Η πραγματική ταχύτητα του ομόρρου στην έλικα είναι, συνεπώς, ίση με  $V_w = V - V_A$  και μπορεί να εκφραστεί σε αδιάστατη μορφή μέσω του συντελεστή ποσοστού του ομόρρου  $w$ . Ο συνήθως χρησιμοποιούμενος συντελεστής ποσοστού ομόρρου  $w$  που δίνεται από τον Taylor ορίζεται ως :

$$w = \frac{V_w}{V} = \frac{V - V_A}{V}$$

Η τιμή του συντελεστή ποσοστού ομόρρου εξαρτάται σημαντικά από το σχήμα της γάστρας αλλά επίσης και από την θέση της έλικας και το μέγεθος της και επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή της.

### Συντελεστής μείωσης ώσης $t$

Η περιστροφή της έλικας προκαλεί την αναρρόφηση του νερό που βρίσκεται μπροστά της πίσω προς την έλικα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία επιπλέον αντίσταση στην γάστρα που συνήθως ονομάζεται "αύξηση αντίστασης" (augment of resistance) ή, σε σχέση με την συνολική απαιτούμενη δύναμη ώσης  $T$  στην έλικα, "ποσοστό μείωσης ώσης"  $F$ , Σχήμα 10. Αυτό σημαίνει ότι η ώση  $T$  στην έλικα πρέπει να υπερνικήσει και την αντίσταση του πλοίου  $R$  και αυτή την "απώλεια ώσης"  $F$ .



Σχήμα 10. Η πρόωση του πλοίου – θεωρία [1].

Το ποσοστό μείωσης ώσης  $F$  μπορεί να εκφραστεί σε αδιάστατη μορφή μέσω του συντελεστή μείωσης ώσης  $t$ , που ορίζεται ως:

$$\frac{F}{T} = \frac{T - R}{T}$$

Γενικά το μέγεθος του συντελεστή μείωσης ώσης  $t$  αυξάνει όταν ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου  $w$  αυξάνει.

Το σχήμα της γάστρας μπορεί να έχει σημαντική επίδραση, για παράδειγμα, μία βολβοειδής πρόρα μπορεί, κάτω από ορισμένες συνθήκες (χαμηλές ταχύτητες πλοίου), να μειώσει το  $t$ .

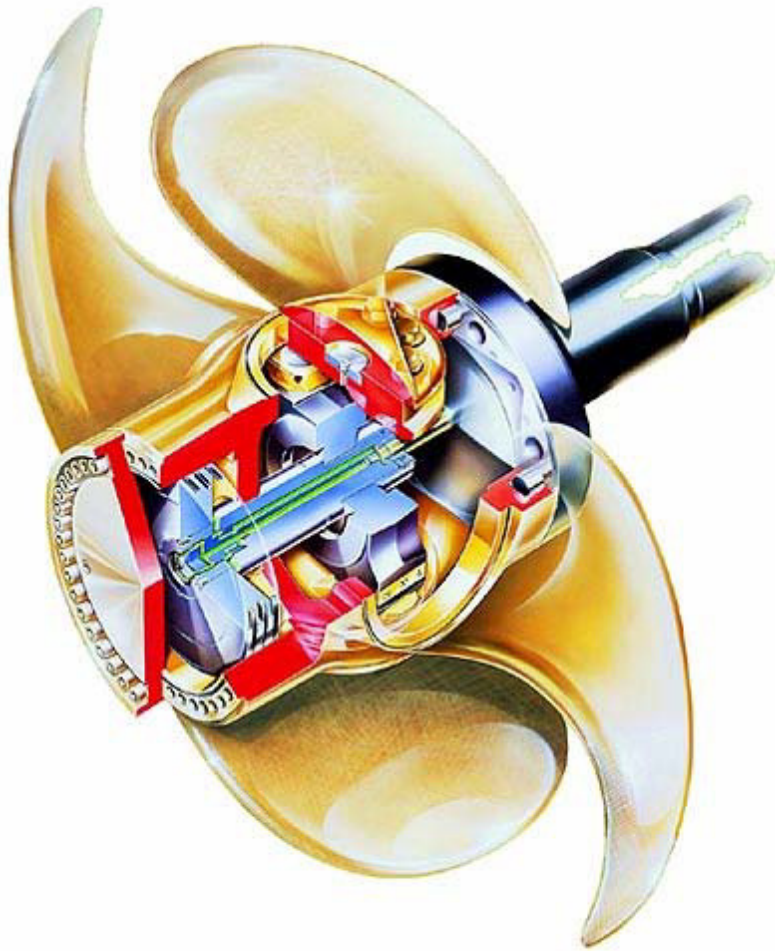
Το μέγεθος του συντελεστή μείωσης ώσης  $t$  για ένα πλοίο με μία έλικα κυμαίνεται, κανονικά, στην περιοχή από 0.12 έως 0.30, καθώς ένα πλοίο με ένα μεγάλο συντελεστή γάστρας έχει ένα μεγάλο συντελεστή μείωσης ώσης.

Για πλοία με δύο έλικες, ο συντελεστής μείωσης ώσης  $t$  θα είναι πολύ μικρότερος καθώς οι έλικες "αναρροφούν" μακρύτερα από την γάστρα.

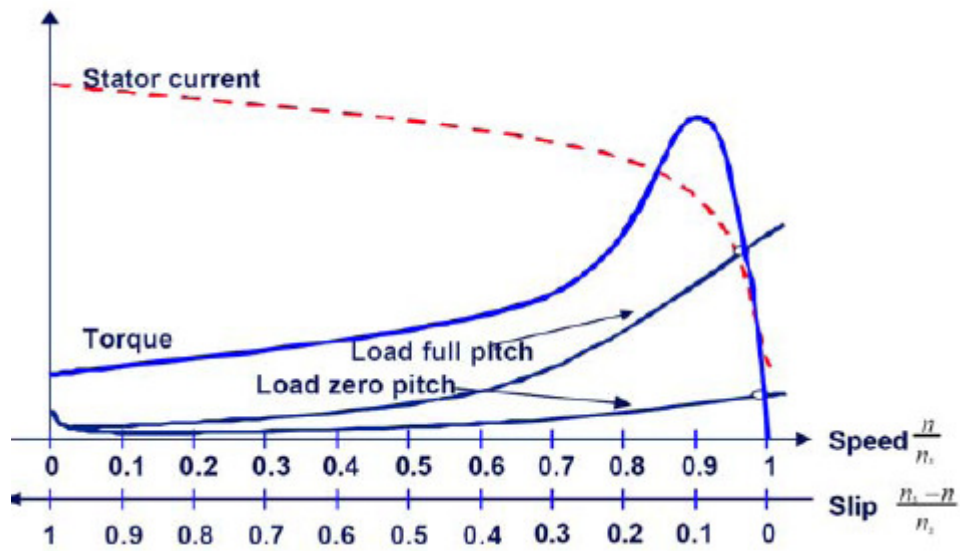
## 2.2. Συνδυασμός κινητήρα E.P. με έλικα μεταβλητού βήματος

Ο συνδυασμός κινητήρα E.P. με έλικα μεταβλητού βήματος (CPP) έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά [4]:

- α. Γεννήτριες που τροφοδοτούν το δίκτυο σταθερής τάσης (4160 - 6000 VAC) και συχνότητας.
  - β. Οι έλικες στρέφονται από κινητήρες σταθερής ταχύτητας περιστροφής.
  - γ. Πρόκειται για ένα σχετικά απλό ηλεκτρικό σύστημα.
  - δ. Μέγιστη απόδοση μετατροπών για το σημείο ονομαστικής λειτουργίας.
  - ε. Ο προωστήρας CPP είναι λιγότερο αποδοτικός από τον προωστήρα FPP για μερικές αλλαγές στο φορτίο της έλικας.
  - στ. Το ηλεκτρικό κομμάτι ενός συστήματος E.P. – CPP αποτελεί μια απλή και αξιόπιστη λύση.
  - ζ. Οι έλικες σταθερού βήματος FPP είναι πολύ πιο απλές στην κατασκευή και τη χρήση τους από τις έλικες ελεγχόμενου βήματος CPP (Σχ. 11).
  - η. Σε απευθείας σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο ο ηλεκτρικός κινητήρας παρουσιάζει υψηλό ρεύμα εκκίνησης, 5 – 6 φορές πάνω από το ονομαστικό (Σχ.12).  
Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη, ώστε να επιλεγούν οι κατάλληλες γεννήτριες που θα εκκινήσουν ένα κινητήρα μεγάλης ισχύος.
- Η εκκίνηση με τρίγωνο και το πέρασμα σε αστέρα χρησιμοποιείται αλλά δεν είναι η καλύτερη λύση. Συσκευές ομαλής εκκίνησης χρησιμοποιούνται όπως αυτομετασχηματιστές για καλύτερα αποτελέσματα.
- Οι ομαλοί εκκινήτες στερεάς κατάστασης (solid state soft starters) δεν χρησιμοποιούνται ευρέως για υψηλές στάθμες ισχύος.



Σχήμα 11. Έλικα μεταβλητού βήματος της Schottel [4].



Σχήμα 12. Χαρακτηριστικές ασύγχρονου κινητήρα απευθείας συνδεδεμένου στο δίκτυο και φορτίου με έλικα μεταβλητού βήματος (CPP) [4].

## 2.3. Συνεργασία έλικας και κινητήρα πρόωσης

Στα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης συγκαταλέγεται και η ουσιαστική μείωση του αξονικού συστήματος των πλοίων, βλ. Σχ.13.



Σχήμα 13. Συγκριτική παρουσίαση αξονικών συστημάτων πλοίων [2].

Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης έχουν το πλεονέκτημα συνεχούς μεταβολής των στροφών σχεδόν σε όλο το διάστημα 0 – 100%.

Επιπλέον, το 100% της ροπής μπορεί συνήθως να χρησιμοποιηθεί σε όλο το πεδίο λειτουργίας.

Για λόγους ασφαλείας, η έλικα κινείται από δύο (ή και περισσότερους) ηλεκτροκινητήρες ίσης ισχύος.

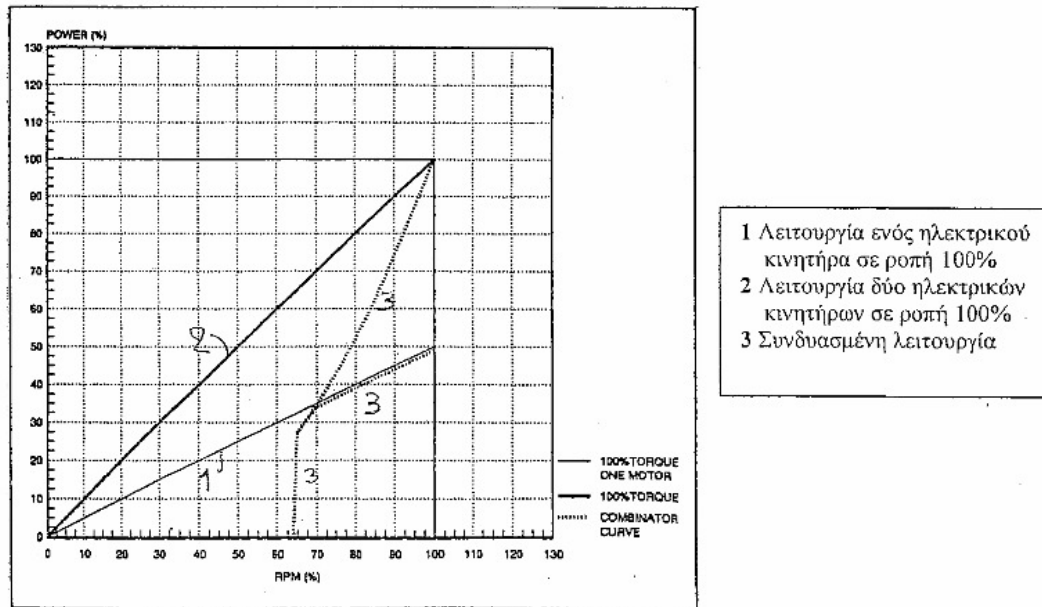
Όσον αφορά την έλικα ως μηχανικό φορτίο, ακολουθεί τον λεγόμενο «νόμο της έλικας» δηλ. η μηχανική ροπή ανάλογη του τετραγώνου της μηχανικής ταχύτητας όπως περίπου και οι φυγοκεντρικές αντλίες και οι ανεμιστήρες, αλλά μπορεί η χαρακτηριστική αυτή να είναι σταθερή (έλικα σταθερού βήματος) ή να μεταβάλλεται με αλλαγή της κλίσης των περυγίων της (έλικα μεταβλητού βήματος) [2].

### 2.3.1. Έλικα ρυθμιζόμενου ή μεταβλητού βήματος

Το σύστημα είναι συχνά (ή θα έπρεπε να είναι) εφοδιασμένο με διάταξη αυτόματης επιλογής του συνδυασμού βήματος – στροφών έλικας στο διάστημα 65 – 100% των στροφών, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη λειτουργία και η καλύτερη δυνατή απόκριση κατά τους χειρισμούς.

Όταν η έλικα είναι ρυθμιζόμενου βήματος δεν απαιτείται περιθώριο ροπής, διότι η μέγιστη ισχύς μπορεί σχεδόν πάντοτε να απορροφηθεί με ρύθμιση του βήματος [3].

Το Σχ. 14 απεικονίζει την καμπύλη της έλικας που προκύπτει με διάταξη αυτόματης επιλογής του συνδυασμού βήματος – στροφών, καθώς και τα όρια του πεδίου λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες συνδεδεμένους στην ίδια έλικα.



Σχήμα 14. . Πεδίο λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες πρόωσης και έλικα ρυθμιζόμενου βήματος [3].

## 2.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

### 2.4.1. Πλεονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης, στα οποία οφείλεται και η διάδοσή της στις εφαρμογές που προαναφέρθηκαν, είναι τα ακόλουθα [2]:

- Συνεχής μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας και της ταχύτητας του πλοίου σε όλο το πεδίο 0 – 100 %.
- Γρήγορη απόκριση κατά τη διάρκεια χειρισμών και δυναμικής τοποθέτησης του σκάφους.
- Χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.
- Οικονομία καυσίμου, καθώς είναι δυνατή η επιλογή των μηχανών που θα λειτουργούν έτσι, ώστε η κάθε μια να λειτουργεί κοντά στο βέλτιστο σημείο.



➤ Ελευθερία στην τοποθέτηση των επιμέρους μηχανημάτων του ενεργειακού συστήματος, που προσφέρει ευελιξία στον σχεδιασμό του σκάφους και εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου.

➤ Πλήρης εκμετάλλευση της στρεπτικής ροπής σε όλο το πεδίο λειτουργίας.

➤ Ευκολία αυτοματισμού.

➤ Αυξημένη αξιοπιστία (πολλά συστήματα συνδεδεμένα παράλληλα) και, επομένως, αυξημένη ασφάλεια.

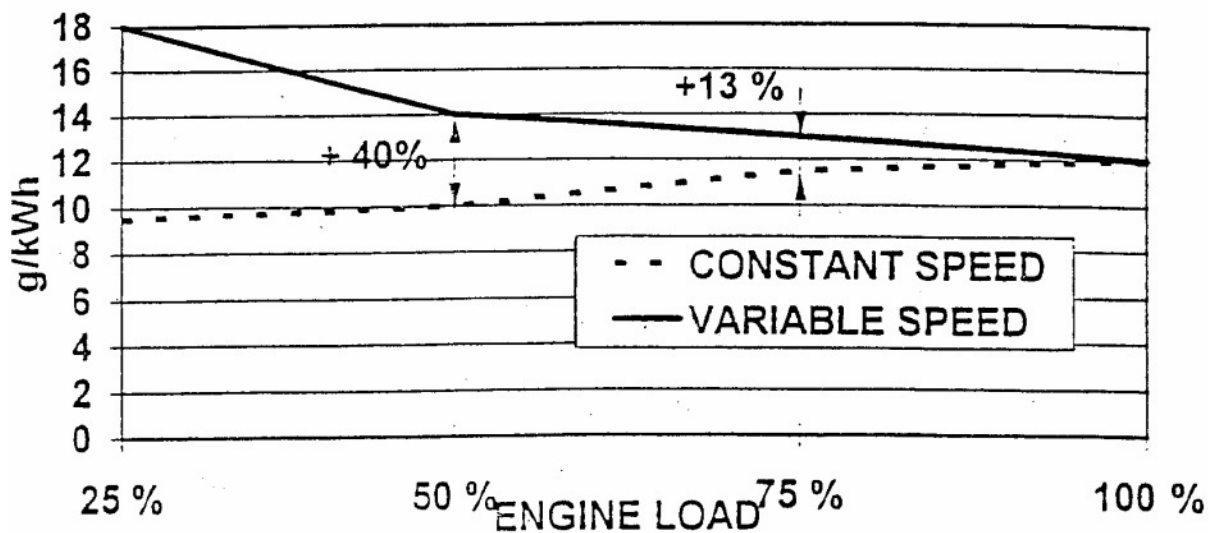
➤ Περιορισμός των εκπεμπόμενων ρύπων διότι:

α. η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερη, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως,

β. ιδιαίτερα οι εκπομπές NOx είναι αισθητά χαμηλότερες όταν, π.χ., ένας μεσόστροφος κινητήρας Diesel λειτουργεί με σταθερές στροφές, όπως συμβαίνει στα νέα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης (βλ. Σχ. 15).

γ. σε εφαρμογές αμιγώς ηλεκτρικής πρόωσης με συσσωρευτές ή κυψέλες καυσίμου δεν υπάρχουν ρύποι ή είναι πολύ λιγότεροι (π.χ. σε εφαρμογές με κυψέλες καυσίμου με καύσιμο διαφορετικό του καθαρού υδρογόνου)

➤ Περιορισμός του κινδύνου ρύπανσης του περιβάλλοντος από ατυχήματα όπως αυτά των δεξαμενόπλοιων, χάρη στην ταχύτερη απόκριση του συστήματος κατά τους χειρισμούς και τη δυναμική τοποθέτηση του σκάφους.



Σχήμα 15. Εκπομπές NOx μεσόστροφων κινητήρων Diesel με βαρύ καύσιμο [3].

## 2.4.2. Μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Τα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι τα εξής [2]:

α. Το υψηλό κόστος επένδυσης. Αυτό γίνεται η προσπάθεια να μειωθεί κατά το δυνατόν, αξιοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία των ηπειρωτικών ηλεκτρικών δικτύων (Commercial Off The Shelf – COTS), ωστόσο το υψηλό κόστος των κινητήρων και των διατάξεων ελέγχου τους δεν δείχνει να υπερκερνάται εύκολα.

β. Υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε σύγκριση με το μηχανικό σύστημα. Π.χ., σε ένα συμβατικό σύστημα κινητήρα Diesel – έλικας ρυθμιζομένου βήματος, οι απώλειες του συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 4 %: 2 % στην έλικα και 2 % στον μειωτήρα, όταν η έλικα λειτουργεί στον βέλτιστο συνδυασμό ταχύτητας/βήματος.

Σε εγκατάσταση ντιζελοηλεκτρικής πρόωσης, το σύστημα μετάδοσης προκαλεί απώλειες 7 – 8 %: 3 % στις γεννήτριες, 2 % στους μετασχηματιστές και μετατροπείς συχνότητας και 2 – 3 % στους προωστήριους ηλεκτροκινητήρες.

Επομένως, ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης μόνον όταν κάθε μηχανή λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής και επί μεγάλα χρονικά διαστήματα στη βέλτιστη περιοχή.

γ. Ένα πρόβλημα που προκύπτει από την εκτεταμένη χρησιμοποίηση των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι ότι εμφανίζονται προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς πέραν των χρήσιμων συχνοτήτων αναπτύσσεται και μεγάλο πλήθος αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσης.

Οι αρμονικές αυτές αφενός προσαυξάνουν τη συνολική κυκλοφορούσα άεργο ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά επιπλέον δημιουργούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

Έτσι ο «ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος» που παράγεται επηρεάζει αρνητικά όλες τις ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις, πρωτίστως τα κυκλώματα ελέγχου των ίδιων των ηλεκτρονικών ισχύος, ενώ σε περιπτώσεις στρατιωτικών εφαρμογών αυξάνει τα επίπεδα της ηλεκτρομαγνητικής υπογραφής των πλοίων.

Τέλος, είναι δυνατόν οι αρμονικές παραμορφώσεις των ηλεκτρικών μεγεθών να διεγείρουν ιδιοσυχνότητες ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, όπως είναι τα φαινόμενα σιδηροσυντονισμού στους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η σειρά αυτή των προβλημάτων λόγω της εξηλέκτρισης των συστημάτων του πλοίου αντιμετωπίζεται με εξειδικευμένες αναλύσεις και μελέτες κυρίως κατά της φάση της σχεδίασης τους ηλεκτρολογικού συστήματος.

## **2.5. Αναστροφή με χρήση ελίκων μεταβλητού βήματος(CPP)**

Με το σύστημα αυτό εφοδιάζονται συνήθως πλοία με μηχανές μέσου αριθμού στροφών, οι οποίες στρέφονται πάντα κατά την ίδια φορά.

Τα πτερύγια της έλικας δεν είναι σταθερά, αλλά έχουν τη δυνατότητα, με τη βοήθεια ενός υδραυλικού ή ηλεκτρικού μηχανισμού να στρέφονται γύρω από ένα άξονα, μεταβάλλοντας το βήμα τους τόσο σε θετικές όσο και σε αρνητικές γωνίες.

Το σύστημα αυτό είναι ευρύτατα διαδεδομένο, λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει, ιδιαίτερα δε σε πλοία που η συχνότητα χειρισμών είναι πολύ μεγάλη (π.χ. παράκτια ναυτιλία).

Παρέχει τη δυνατότητα απόλυτου ελέγχου των χειρισμών του πλοίου από τη γέφυρα, ενώ προσφέρει ταχύτατη απόκριση στην αλλαγή της κινήσεως και επίσης, πολύ μεγάλη ικανότητα ελιγμών.

Όταν τα πτερύγια της έλικας τεθούν σε θέση μηδενικού βήματος, τότε δεν παρέχεται ώθηση στο πλοίο.

## **2.6. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έλικας μεταβλητού βήματος**

Η έλικα μεταβλητού βήματος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για σκάφη που διενεργούν κοντινά ταξίδια και απαιτούνται πολυάριθμοι ελιγμοί και όχι μόνο διότι η κύρια μηχανή βρίσκεται κατά τους χειρισμούς σε κανονική λειτουργία, γέφυρα εξασφαλίζει ανεξαρτησία και αμεσότητα στις κινήσεις.

Επίσης, μπορεί να διατηρήσει σταθερή την ελάχιστη επιθυμητή ταχύτητα κατά την ώρα των κινήσεων.

Η μηχανή δεν καταπονείται με συνεχή αναβοσβησίματα, οπότε επιτυγχάνεται και μεγάλη οικονομία στην συντήρηση και στις επισκευές της.

Σε σύγκριση με την έλικα σταθερού βήματος, έχουμε καλύτερα αποτελέσματα στους χειρισμούς, διότι έχουμε μικρότερο χρόνο εναλλαγής των κινήσεων.

Όλα τα παραπάνω δείχνουν σαφώς, ότι οι έλικες μεταβλητού βήματος έχουν μεγαλύτερη ευελιξία εφαρμογών, σε σχέση με τις έλικες σταθερού βήματος.

Κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού, οι συνθήκες λειτουργίας της έλικας μεταβάλλονται.

Οι συνθήκες λειτουργίας της έλικας διαφέρουν πολύ από τις συνθήκες με τις οποίες γίνονται συνήθως οι υπολογισμοί για την άριστη απόδοση της πρίν την τοποθέτησή της.

Σε όλες τις περιπτώσεις, κατά τις οποίες χρησιμοποιούνται έλικες μεταβλητού βήματος, και αντιμετωπίζονται συνθήκες όπως θαλασσοταραχή, ρύπανση της γάστρας κ.λ.π., έχουμε την δυνατότητα να ρυθμίζουμε το βήμα της έλικας ώστε να απορροφάται όλη η παραγόμενη υποδύναμη για την υπερνίκηση της αντίστασης του νερού κατά την πορεία του πλοίου.

Κατά την περίοδο της εκκίνησης του πλοίου μέχρι να αποκτήσει την πλήρη ταχύτητα (περίοδος επιτάχυνσης) έχουμε την δυνατότητα να ρυθμίζουμε το βήμα ώστε να εκμεταλλευόμαστε όλη την ισχύ και να αποφεύγεται η περίπτωση υπερφόρτωσης της μηχανής.

Επίσης, μείωση του κόστους των καυσίμων και της κατανάλωσης επιτυγχάνεται με την κανονική σταθερή ταχύτητα στροφής του άξονα της ατράκτου.

Ο κύριος μηχανισμός λειτουργεί κάτω από άριστες συνθήκες ανά τόννο καυσίμου που καταναλώνεται.

Έτσι, από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι :

- Γίνεται υπερβολική οικονομία σε καύσιμα Diesel με τη χρήση εναλλακτικών του άξονα της ατράκτου που είναι ενωμένα με τον περιστροφικό άξονα σταθερής κίνησης. Βοηθητικές γεννήτριες δεν είναι απαραίτητες, αν και ακόμα τις μεταφέρουν, για τα κανονικά φορτία που θα περιμέναμε να υπάρχουν πάνω σε ένα συμβατικό σκάφος με σταθερή προπέλα.
- Αν η έλικα καταστραφεί, υπάρχουν εφεδρικά πτερύγια που μπορούν να αντικατασταθούν σχετικά εύκολα, αφού πρώτα το πλοίο ανέβει σε ειδική δεξαμενή.
- Ένα βασικό προτέρημα στον χειρισμό πλοίων με έλικα μεταβλητού βήματος αποκτάται από τη δυνατότητα να σταματούν τις κύριες μηχανές και χωρίς να πραγματοποιείται αναστροφή αυτών.
- Μειώνεται πολύ η ανάγκη για συμπιεστές και για πεπιεσμένο αέρα.
- Ο αξιωματικός επιφυλακής αποκτά μεγαλύτερο απ' ευθείας έλεγχο της ταχύτητας του σκάφους, με σκοπό την αποφυγή συγκρούσεως.

Το βασικότερο μειονέκτημα των ελικών μεταβλητού βήματος είναι το πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασης στο στάδιο ανέγερσης και το ακόμα υψηλότερο κόστος εγκατάστασης δομικής αλλαγής σε ένα υπάρχον σκάφος.

Επίσης, ελάχιστη ιπποδύναμη άξονα πρέπει να υπάρχει από την κυρίως μηχανή για να έχουμε οικονομία καυσίμων και αποτελεσματική λειτουργία.

Απαιτείται συχνή και επιμελημένη συντήρηση, διότι οποιαδήποτε βλάβη κατά την ώρα του χειρισμού μπορεί να ισούται με ατύχημα, το οποίο ίσως να έχει απρόβλεπτες συνέπειες.

Επίσης κατά την ώρα των χειρισμών δεν πρέπει να πλησιάζει τίποτα την έλικα(κάβος, βάρκα κ.λ.π), διότι αυτή στρέφει συνέχεια και υπάρχει μεγάλος κίνδυνος εμπλοκής σ' αυτήν.

Τέλος, οι κατασκευαστές έχουν δεχθεί τις ανάγκες της βιομηχανίας ενσωματώνοντας πολλά χαρακτηριστικά για να βελτιώσουν το σύστημα.

Η αυτόματη αποδέσμευση των πτερυγίων της έλικας μπορεί τώρα να επιτευχθεί σε μερικά σχέδια.

Αυτό είναι ιδιαίτερα επιθυμητό, (π.χ. στα μικρά λιμάνια), όπου οι δίνες των πλοίων από τον σταθερό περιστρεφόμενο άξονα προκαλούν ρεύματα που έχουν σαν αποτέλεσμα την ανησυχία στους μικρούς πλοιοκτήτες ή στα αγκυροβολημένα σκάφη κοντά στην πρύμνη.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

### **3.1. Συμπεράσματα**

Από τα όσα παρουσιάσθηκαν παραπάνω, τα συμπεράσματα της διπλωματικής αυτής εργασίας , μπορούν να έχουν δύο άξονες κατεύθυνσεις :

Όσον αφορά την ηλεκτρική πρόωση των πλοίων, αυτή είναι η ενδεδειγμένη λύση, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος λειτουργίας (μειωμένο πλήρωμα, οικονομικότερη συντήρηση, γρηγορότερα ταξίδια, μη αναγκαιότητα ρυμούλκησης κ.ο.κ.).

Η ηλεκτροπρόωση αποτελεί μία αρκετά δελεαστική επιλογή για τα πλοία και τα μικρότερα σκάφη που συνεχώς κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια μεταξύ των άλλων λόγω και της γενικά εντατικής εξέλιξης όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων και κυρίως στον τομέα των διατάξεων ελέγχου των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος.

Η έρευνα κατά την τρέχουσα περίοδο επικεντρώνεται στη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης αλλά και στην αύξηση των επιδόσεων του συνολικού συνδυασμού των διατάξεων που αξιοποιούνται από συστήματα ηλεκτροπρόωσης.

Όσον αφορά τις έλικες μεταβλητού βήματος, σύμφωνα και με όσα αναλύθηκαν στην παράγραφο 2.6., με τη χρήση τους γίνεται υπερβολική οικονομία σε καύσιμα Diesel, σε συμπιεστές για παροχή πεπιεσμένου αέρα.

Επίσης, είναι πιο ευέλικτες και οικονομικές στη συντήρησή τους.

Βέβαια, στην τελική επιλογή της έλικας που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα σκάφος, την ευθύνη έχει η κατασκευάστρια εταιρεία, που θα κάνει την μελέτη της επιλογής της, με βάση όσα εξετάθησαν στο αντίστοιχο κεφάλαιο περί ελίκων.

### **3.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Σαν προτάσεις για μελλοντική έρευνα θα μπορούσαν να αναφερθούν τα εξής :

- Θα μπορούσε να γίνει μία έρευνα αγοράς, με χρήση ειδικής βιβλιογραφίας και του Διαδικτύου, όσον αφορά εταιρείες που διακινούν έλικες μεταβλητού βήματος.
- Μπορεί να γίνει, με τη βοήθεια των τεχνικών οδηγιών των κατασκευαστριών εταιρειών, μία συγκριτική μελέτη των τρόπων λειτουργίας, των αποδόσεών τους, των τιμών τους κ.ά.
- Στη συνέχεια, τα συμπεράσματα αυτά θα ετίθεντο στην κρίση ειδικών μηχανικών με εμπειρία στα συστήματα αυτά
- Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω θα ήταν η συγγραφή εγχειριδίου, που θα ήταν χρήσιμο σε ανθρώπους που εμπλέκονται στην ναυτιλία καθ' οιονδήποτε τρόπο.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. K. Adnanes, «Maritime electrical installations and diesel – electric propulsion», Tutorial Report/Textbook, ABB Marine AS, Oslo, Norway, 2003.
- [2] Ι. Κ. Χατζηλάου, Ι. Μ. Προυσαλίδης, Γ. Αντωνόπουλος, Ι. Κ. Γύπαρης, Π. Βαλλιανάτος, «Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο», Διήμερο TEE: «Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη Κατάσταση και Προοπτικές», Αθήνα, 12 – 13 Ιανουαρίου 2006.
- [3] Χ. Α. Φραγκόπουλος, Ι. Μ. Προυσαλίδης, «Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου, Τεύχος Α', Ηλεκτρολογικές Εγκαταστάσεις – Εισαγωγή στον Αυτοματισμό», ΕΜΠ, Αθήνα, 2005.
- [4] D. Radan, «Power electronic converters for ship propulsion electric motors», Marine Cybernetics – Energy Management Systems, Part of the NTNU project: All Electric Ship, Department of Marine Technology, NTNU, Trondheim, Norway, 2004.
- [5] <http://www.greatships.net/normandie.html>, 2/2011.
- [6] <http://www.naval-technology.com>, 5/2009.
- [7] Αθανάσιος Ν. Σαφάκας, «Ηλεκτρονικά Ισχύος, Θυρίστρον, Μετατροπείς, Εφαρμογές», Τμήμα εκτυπώσεων τυπογραφείου Πανεπιστημίου Πατρών, 2006.
- [8] Εμμανουήλ Κ. Τατάκης, «Σημειώσεις Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος Ι», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2007.
- [9] Εμμανουήλ Κ. Τατάκης, «Σημειώσεις μαθήματος, Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2003.
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/Power\\_semiconductor\\_device](http://en.wikipedia.org/wiki/Power_semiconductor_device), 2/2011.
- [11] <http://www.convertteam.com>, 2/2011.
- [12] Ν. Π. Κυρτάτος, «Ηλεκτρονικές σημειώσεις μαθήματος Εγκαταστάσεων Πρόωσης – Κεφάλαιο 3, Απαιτήσεις Πρόωσης / Ναυτικοί Κινητήρες», ΣΝΜΜ, ΕΜΠ, 2009, [http://www.lme.ntua.gr/les\\_egatastaseis.html](http://www.lme.ntua.gr/les_egatastaseis.html), 2/2011.
- [13] <http://www.rolls-royce.com/marine>, 2/2011.
- [14] <http://www.abb.com/marine>, 2/2011.
- [15] <http://www.vetus.nl>, 2/2011.
- [16] Χ. Α. Φραγκόπουλος, «Προηγμένα Ναυτικά και Θαλάσσια Ενεργειακά Συστήματα», Δ.Π.Μ.Σ. Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006.
- [17] J. Larminie, A. Dicks, «Fuel Cell Systems Explained», J. Wiley & Sons, Enland, 2003.
- [18] N. Monanteras, L. G. Nakos, C. A. Frangopoulos, «Marine Applications of Fuel Cells – An Overview», International Association of Mechanical Engineers (IASME), Issue 2, Volume 1, April 2004, pp. 330 – 336.
- [19] Σ. Βουτετάκης, Ε. Κικκινίδης, Γ. Μαρνέλλος, Λ. Ντζιαχρήστος, Ι. Παναπακίδης, «Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του “καυσίμου του μέλλοντος” - H<sub>2</sub>», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΤΕΕ), Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, Μόνιμη Επιτροπή Ενέργειας, Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2010.
- [20] <http://ec.europa.eu/research>, 12/2010.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<u>ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ</u>	<u>ΣΕΛΙΔΑ</u>
Περίληψη-Summary.....	1
Πρόλογος.....	2
Κεφάλαιο 1 : Ηλεκτροπρόωση.....	3
Ιστορική αναδρομή.....	4
Ορολογία.....	7
Ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης.....	7
Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη.....	8
Προηγμένοι κινητήρες E.P.....	9
Κίνηση της έλικας με άξονα (shaft propulsion).....	10
Αζιμουθιακοί προωστήρες (azimuth thrusters).....	11
Κεφάλαιο 2 : Έλικες.....	16
Συνθήκες ροής γύρω από την έλικα.....	17
Συνδυασμός κινητήρα E.P. με έλικα μεταβλητού βήματος.....	20
Συνεργασία έλικας με κινητήρα πρόωσης.....	22
Έλικα μεταβλητού βήματος .....	22
Πλεονεκτήματα –Μειονεκτήματα Ηλεκτροπρόωσης .....	23
Αναστροφή με χρήση ελίκων μεταβλητού βήματος.....	26
Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα έλικας μεταβλητού βήματος.....	26
Κεφάλαιο 3 : Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	29
Βιβλιογραφία.....	31
Πίνακας Περιεχομένων.....	32



