

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ**

**ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

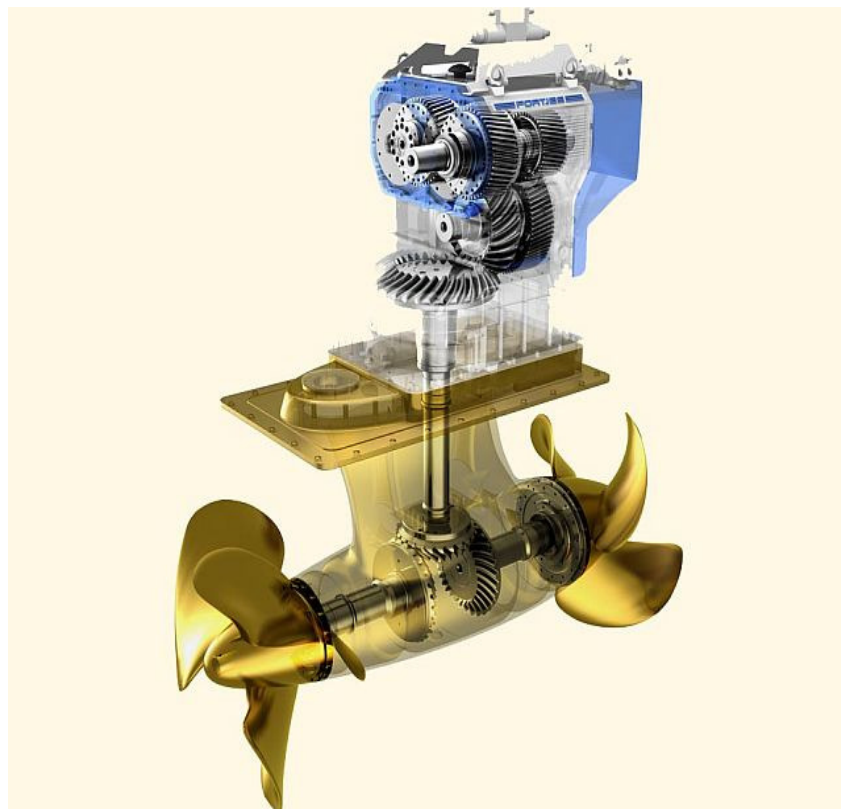
**ΘΕΜΑ:**

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟ ΚΛΙΜΑΚΑ  
ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ  
ΠΡΟΩΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΜΗΤΣΙΟΓΛΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ  
ΝΑΚΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:**

**ΓΟΥΡΓΟΥΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**



**ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ**

**2014**

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ:**

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟ ΚΛΙΜΑΚΑ  
ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ  
ΠΡΟΩΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΜΗΤΣΙΟΓΛΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ  
ΝΑΚΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ**

**ΑΜ: 4618 , 4591**

**ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ**

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

## Περίληψη

Στην παρούσα εισήγηση παρουσιάζονται οι σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία ηλεκτροπρόωσης πλοίων. Η ηλεκτρική πρόωση είναι μια νέα μορφή εγκατάστασης αλλά λόγω της αποδοτικότητας που έχει, αρχίζει να χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε εμπορικά, πολεμικά, επιβατικά πλοία αλλά και σε μικρά σκάφη τα οποία πλέουν σε θάλασσες και ποτάμια. Σε αυτά τα πλαίσια γίνεται μία ανασκόπηση των σύγχρονων τάσεων σχεδίασης και κατασκευής των ηλεκτρικών κινητήρων και των κυκλωμάτων οδήγησής τους αλλά και ανάπτυξη όλων των ειδών της ηλεκτρικής πρόωσης. Επίσης αναλύονται τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης των πλοίων και κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο συνδεσής τους που έχουν με την προπέλα, που μπορεί να είναι σύνδεση με άξονα, με έλικα μεταβλητού βήματος ή και με αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης. Γίνεται πλήρης ανάλυση των πλοίων στα οποία εφαρμόζεται αυτή η τεχνολογία και αναφορά στα πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα τα οποία είναι και τα σημαντικότερα κριτήρια εφαρμογής της. Επίσης απεικονίζεται ανα στάδιο η κατασκευή της πτυχιακής εργασίας και γίνεται λεπτομερής περιγραφή της λειτουργίας του κινητήρα. Τέλος αναφέρονται τα συμπεράσματα για την εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης στα πλοία και η σχετική βιβλιογραφία.

## **Abstract**

This suggestion presents the latest developments in technology electric propulsion of ships. The electric propulsion is a new form of establishment but due to the efficiency indicator, are beginning to use more and more at merchant ships, battleships, passenger ships and other small craft sailing in seas and rivers. In these contexts is an overview of the current trends of design and construction of electric motors and their driving circuits and develop all kinds of systems and electric propulsion. We also analyzed the electrical propulsion systems for boats and are classified into categories depending on how the connections they have with the propeller, which can be attach to shaft, propeller or variable pitch and azimuth propulsion system. Fully analyzed the ships to which this technology and reference the advantages and disadvantages which are the most important criteria for applying. Also depicted on the construction stage of the dissertation and a detailed description of the functions in the engine. Finally, referred the conclusions on the application of electric propulsion at ships and the relevant bibliography.

## Πρόλογος

Η παρούσα εργασία είχε ως στόχο να γίνει μια εισαγωγή στις σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία ηλεκτρικής πρόωσης των πλοίων. Πιο αναλυτικά :

Στο **κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>** γίνεται μια ιστορική αναδρομή της ηλεκτρικής πρόωσης πλοίων και αναλύεται η τεχνολογία από τις αρχές εφαρμογής της έως και σήμερα.

Στο **κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>** εξετάζονται τα είδη της ηλεκτρικής πρόωσης και γίνεται πλήρης ανάλυση του σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, των προηγμένων κινητήρων E.P. , των πολυβάθμιων κινητήρων εγκάρσιας και αξονικής ροής.

Στο **κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>** εξετάζονται τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης και αναλύονται πλήρως οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, οι έλικες σταθερού και μεταβλητού βήματος αλλά και η συνεργασία μεταξύ ελίκων και κινητήρων. Επίσης αναλύεται το αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης.

Στο **κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>** εξετάζεται η εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης στα διάφορα είδη πλοίων. Δηλαδή εμπορικών, επιβατικών, πολεμικών αλλά και στα μικρά σκάφη.

Στο **κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>** εξετάζεται η κατασκευή μοντέλου υπο κλίμακα αναπαράστασης της λειτουργίας ηλεκτρικής πρόωσης πλοίου αναλυτικά και απεικονίζεται με φωτογραφίες ανά στάδιο κατασκευής.

Στο **κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>** εξετάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης πλοίου.

Στο **κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>** εξετάζονται και αναλύονται τα συμπεράσματα αυτής της τεχνολογίας.

Τελος, υπάρχει η σχετική **βιβλιογραφία** στην οποία καταγράφονται οι πηγές από τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες για την ανάλυση των σχετικών θεμάτων και προβολή των εικόνων.

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

### Ιστορική Αναδρομή Ηλεκτρικής Πρόωσης

Η ηλεκτρική πρόωση έχει αρχίσει να εφαρμόζεται πριν από περίπου 70 χρόνια. Επί μεγάλο διάστημα, τα συστήματα ήταν του τύπου Σ.Ρ./Σ.Ρ. (συχνά συστήματα Ward-Leonard) δηλ. παραγωγή συνεχούς ρεύματος και κίνηση με συνεχές ρεύμα. 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. Κατά την τελευταία εικοσαετία, η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων Ε.Ρ (ηλεκτρονικής ισχύος), 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 , επιβατικά και πολεμικά πλοία.

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, κ.λπ. Γενικά, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση στις ακόλουθες κατηγορίες εφαρμογών:

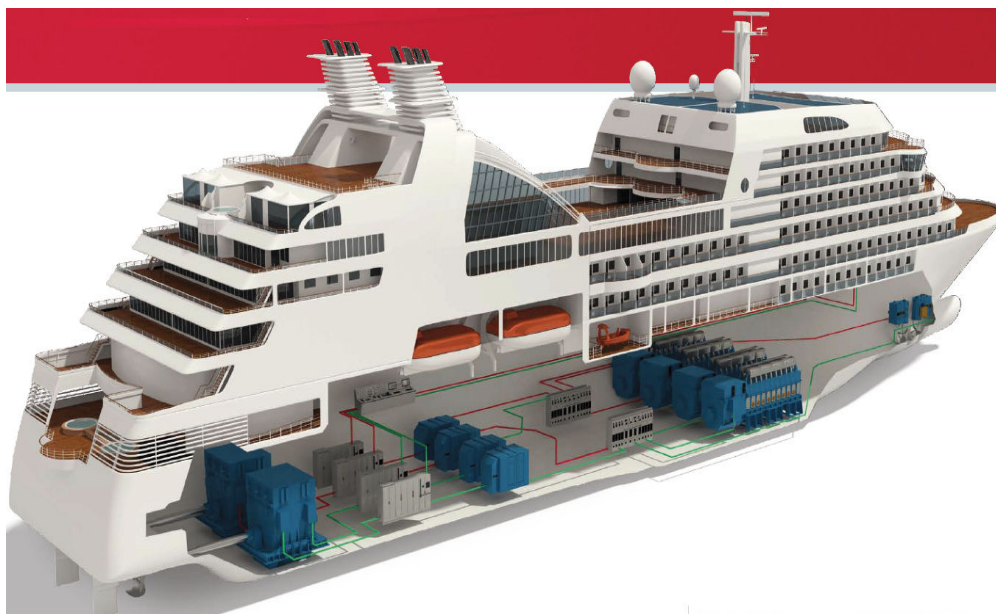
- α. Σκάφη με υψηλές απαιτήσεις ελικτικών ικανοτήτων.
- β. Σκάφη με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων.
- γ. Σκάφη με μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης.
- δ. Σκάφη εξοπλισμένα με πολλές πολύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές.
- ε. Υποβρύχια και βαθυσκάφη.

Ειδικά, όσον αφορά στα πολεμικά πλοία, η ηλεκτροπρόωση αποτελεί την βασική επιλογή για την κίνηση των Υποβρυχίων [1942-1943]. Η χρήση της σε πολεμικά πλοία επιφάνειας, που μέχρι σήμερα ήταν σχετικά περιορισμένη, προσελκύει ξανά το έντονο ενδιαφέρον των ναυτικών χωρών που κατασκευάζουν πολεμικά πλοία και εξετάζεται πλέον σαν υποψήφιο σύστημα για την προωστήρια εγκατάσταση της

επόμενης γενιάς και των μεγάλων πολεμικών πλοίων. Οι αυξημένες απαιτήσεις και οι αυστηρότερες σε σχέση με τα εμπορικά πλοία προδιαγραφές των πολεμικών ναυτικών, (τόσο από απόψεως περιορισμών χώρου αλλά και απαιτήσεων του προωστηρίου συστήματος), προϋποθέτουν περισσότερη ανάπτυξη και τελειοποίηση για την εφαρμογή της ηλεκτροπρόωσης.

Από τις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα εφαρμόζεται η ηλεκτρική πρόωση σε εμπορικά πλοία τύπου LNG – LPG εξαιτίας των παρακάτω πλεονεκτημάτων :

- Υψηλή αποδοτικότητα
- Μικρότερο μέγεθος και βάρος
- Ελαστικότητα στην λειτουργία, ασφάλεια και αξιοπιστία
- Αυξημένη ικανότητα ελιγμών
- Μείωση θορύβων και κραδασμών
- Μειωμένη Συντήρηση και εκπομπές καυσαερίων



( Ηλεκτρική εγκατάσταση σε Κρουαζιερόπλοιο )

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### Είδη ηλεκτρικής πρόωσης

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

χρησιμοποιούνται σύγχρονοι κινητήρες με βαθμό απόδοσης 96 – 98 %, 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 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 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 και μηχανικών δονήσεων. 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.

## 2.2 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) της ALSTOM. 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.

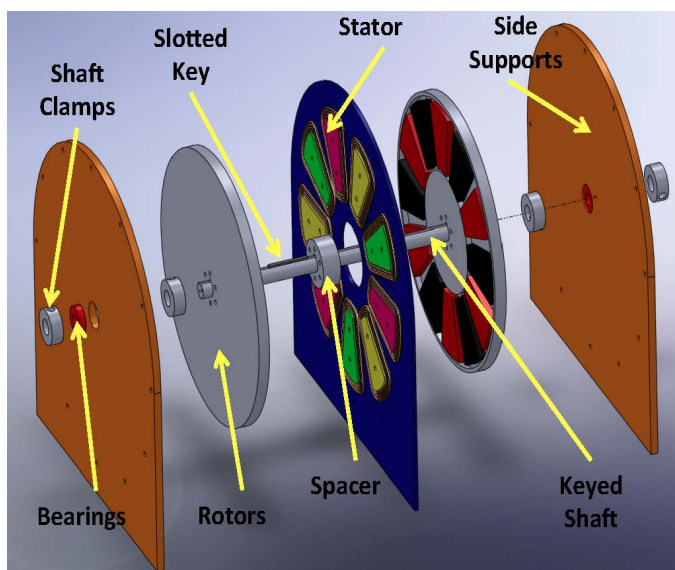
Οι προηγμένες μηχανές επαγωγής, ειδικά σχεδιασμένες για πρόωση, είναι μικρότερες και ελαφρύτερες από τις χρησιμοποιούμενες σύγχρονες μηχανές, καθιστώντας τις έτσι ιδιαίτερα κατάλληλες για ναυτικές εφαρμογές.

## 2.3 Πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transverse flux motors)

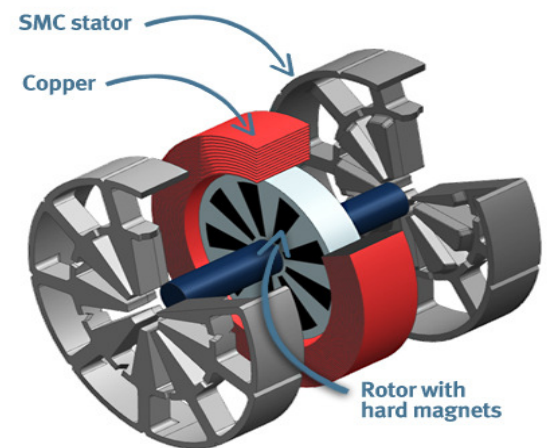
Οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, προσανατολισμένους μάλιστα κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει μέσα στο διάκενο σε διεύθυνση εν μέρει κατά την αξονική διεύθυνση και κυρίως κάθετη – εγκάρσια προς τον άξονα της μηχανής,

## 2.4 Πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motors)

Οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα, προσανατολισμένους κατά τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει σε διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της μηχανής (αξονική)



( Πολυβάθμιος κινητήρας αξονικής ροής )



Πολυβάθμιος κινητήρας εγκάρσιας ροής

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Συστήματα Ηλεκτρικής Πρόωσης

#### 3.1 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος για οδήγηση ηλεκτρικών κινήτρων πρόωσης

Ο κυρίαρχος τύπος κύριας κίνησης για τις εγκαταστάσεις πρόωσης δυναμικής τοποθέτησης των πλοίων DP (dynamic positioning) είναι η ηλεκτρική κίνηση. Σχεδόν κάθε σύστημα DP που εγκαθίσταται στα σύγχρονα πλοία οδηγείται από μια ηλεκτρική μηχανή .

Στην αρχή της εφαρμογής της τεχνολογίας δυναμικής τοποθέτησης, η οποία συνέπεσε με την εμφάνιση της τεχνολογίας των ανορθωτών με θυρίστωρες (SCR – Silicon Controlled Rectifiers), χρησιμοποιούνταν είτε μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος (E.P.) ελέγχοντας προωστήρες με έλικες μεταβλητού βήματος (Controllable Pitch Propellers – CPP) με σταθερή ταχύτητα περιστροφής ή ελεγχόμενες από ανορθωτές (SCR) μηχανές συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.) που με τη σειρά τους ελέγχουν προωστήρες με έλικες σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propellers – FPP) με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής. Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη των αντιστροφέων (inverters) χρησιμοποιούνται και μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνδυασμό με έλικες σταθερού βήματος οπότε και με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής για τον έλεγχο της ώσης.

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση ηλεκτρικών κινήτρων πρόωσης είναι:

- α. Μετατροπείς Σ.Ρ./Σ.Ρ. ή ελεγχόμενοι ανορθωτές E.P./Σ.Ρ. για οδήγηση κινήτρων
- β. Μετατροπείς Σ.Ρ./E.P. για την οδήγηση ασύγχρονων και σύγχρονων κινήτρων.
- γ. Κυκλομετατροπείς (E.P./E.P.) (cycloconverters ή cyclo) για οδήγηση κυρίως σύγχρονων κινήτρων.

### 3.2.1 Συνεργασία έλικας και κινητήρα πρόωσης

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

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 πτερυγίων της (έλικα μεταβλητού βήματος).

### 3.2.2 Έλικα σταθερού βήματος

Καθώς η υπερτάχυνση δεν είναι δυνατή, η έλικα σχεδιάζεται έτσι ώστε να απορροφά τη μέγιστη συνεχή ισχύ (σημείο MCR) σε κατάσταση δοκιμών, δηλ. πλήρες φορτίο, καθαρή γάστρα και ήρεμο καιρό. Προκειμένου να είναι δυνατή η λειτουργία με πλήρη ισχύ σε δυσμενείς συνθήκες, το σύστημα πρόωσης συνήθως υπολογίζεται για τιμή κατά 10 – 20 % μεγαλύτερη της ονομαστικής, χωρίς αύξηση της ισχύος πέρα από τη μέγιστη συνεχή (MCR). Αυτό σημαίνει αυξημένο μέγεθος έλικας αξονικού συστήματος – μειωτήρα – κινητήρα – μετατροπέα κατά 10 – 20 %.

### 3.2.3 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.

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

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

- α. Γεννήτριες που τροφοδοτούν το δίκτυο σταθερής τάσης (4160 - 6000 V) 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.

η. Σε απευθείας σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο ο ηλεκτρικός κινητήρας παρουσιάζει υψηλό ρεύμα εκκίνησης, 5 – 6 φορές πάνω από το ονομαστικό. 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.

### 3.2.5 Συνδυασμός κινητήρα Σ.Ρ. με έλικα σταθερού βήματος

Ο συνδυασμός κινητήρα Σ.Ρ. με έλικα σταθερού βήματος (FPP) έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- α. Εναλλασσόμενη τάση σταθερού πλάτους και συχνότητας παράγεται από τις ντιζελογεννήτριες.
- β. Έλικες σταθερού βήματος (FPP) κινούνται από κινητήρες πρόωσης Σ.Ρ.. Αλλάζοντας τις στροφές και τη φορά περιστροφής της έλικας ελέγχεται το πλάτος και η διεύθυνση της ώσης.
- γ. Αυτό το είδος πρόωσης συνδυάζει, το αποδοτικό και αξιόπιστο δίκτυο Ε.Ρ. με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των μηχανών Σ.Ρ., δηλαδή της υψηλής ροπής σε χαμηλές στροφές και της πολύ καλής δυνατότητας ελέγχου τους.
- δ. Ελεγχόμενοι ανορθωτές γέφυρας με θυρίστορς (Silicon Controlled Rectifier – SCR) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των κινητήρων Σ.Ρ.
- ε. Οι στροφές της μηχανής πρόωσης εξαρτώνται από την τάση στο τύμπανο του κινητήρα.
- στ. Η τιμή της συνεχούς τάσης στην έξοδο της γέφυρας ελέγχεται καθυστερώντας την έναυση των θυρίστορς μέσω της γωνίας έναυσης  $\alpha$ . Οι τιμές που μπορεί να πάρει η γωνία έναυσης είναι από 0ο έως 180ο οπότε και η τάση στο τύμπανο του κινητήρα πρόωσης παίρνει τιμές, +1,35 έως -1,35 Us (πολική τάση).
- ζ. Η ροπή ελέγχεται ακριβώς και με χαμηλή κυμάτωση (εάν η επαγωγή Ld είναι μεγάλη, βέβαια αυτό επιδρά αρνητικά στην δυναμική απόκριση του συστήματος

καθώς αυξάνεται η σταθερά χρόνου στο τύμπανο της μηχανής Σ.Ρ.).

η. Πρακτικά, η γωνία έναυσης  $\alpha$  είναι μεγαλύτερη από 15ο για να είναι δυνατός ο έλεγχος της μηχανής σε περίπτωση βύθισης της τάσης του δικτύου και μικρότερη από 150ο θεωρώντας ένα περιθώριο φάσης για το φαινόμενο της μετάβασης που εμφανίζεται στην τριφασική γέφυρα.

θ. Σχετικά με τον συντελεστή ισχύος (Power Factor – PF). Το ρεύμα τυμπάνου λόγω της καθυστέρησης της έναυσης θα είναι μετατοπισμένο σε σχέση με την τάση του δικτύου, η διαφορά φάσης αυτή και ανάλογα με τη γωνία έναυσης  $\alpha$ , αλλάζει τον συντελεστή ισχύος μεταξύ 0 – 0,96. Θεωρητικά ο συντελεστής ισχύος υπολογίζεται από την Εξίσωση . Στην πράξη, για την μικρότερη γωνία έναυσης των 15ο η μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος είναι, σύμφωνα με την Εξίσωση 0,92.

$$PF = 3 \cos \alpha \approx 0,955 \cos \alpha$$

ι. Σχετικά με τη απόδοση του συστήματος: Γεννήτριες Ε.Ρ., 97 %, ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, 98 %, κινητήρες πρόωσης Σ.Ρ. 94 %, μηχανικό σύστημα υποβιβασμού στροφών, 98 % (το οποίο δεν είναι πάντοτε απαραίτητο). Προκύπτει ένας συνολικός βαθμός απόδοσης 88%.

Μειονεκτήματα:

α. Υπάρχουν όρια στην τάση, τα μέγιστα όρια είναι 600 VAC/750 VDC. Αυτό οδηγεί σε μεγάλες και ακριβές μηχανές και σε καλώδια μεγάλων διατομών.

β. Η χρήση ψηκτρών στους κινητήρες Σ.Ρ., η οποίες απαιτούν τακτική συντήρηση.

γ. Το πρακτικό όριο ονομαστικής ισχύος για τους κινητήρες Σ.Ρ. είναι τα 2 – 3 MW.

δ. Ο συντελεστής ισχύος ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 0 και 0,92 (για το πρακτικό κάτω όριο των 15ο για την γωνία έναυσης) για 0 έως 100 % των στροφών του κινητήρα.

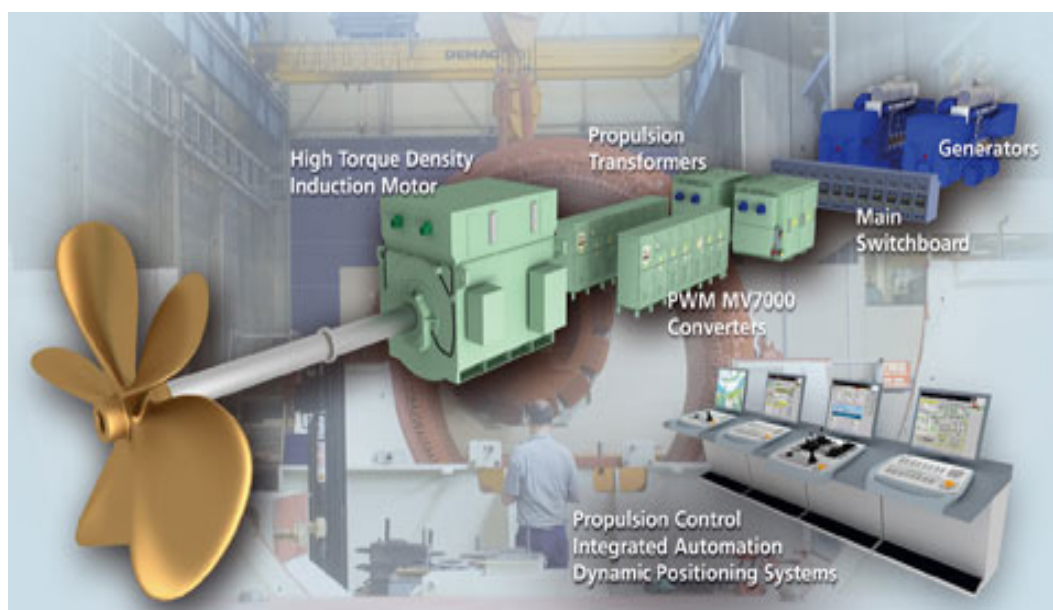
ε. Ο χώρος στον οποίον θα τοποθετηθούν τα ηλεκτρονικά ισχύος θα πρέπει να είναι καθαρός και να ψύχεται.

στ. Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (Electromagnetic Interference – EMI) δρα ανεπιθύμητα στον υπόλοιπο ηλεκτρονικό εξοπλισμό του πλοίου.

### 3.2.6 Κίνηση της έλικας με άξονα (shaft propulsion)

Σε αυτό το είδος πρόωσης οι έλικες ελέγχονται συνήθως από κινητήρες πρόωσης μεταβλητής ταχύτητας. 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.

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 ελικτικές 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.



( Κίνηση της έλικας με άξονα )



### 3.2.7 Αζιμουθιακοί προωστήρες (azimuth thrusters)

Αυτό το είδος προωστήρων μέσω της περιστροφής τους παράγουν ώση σε οποιαδήποτε διεύθυνση. 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.

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.

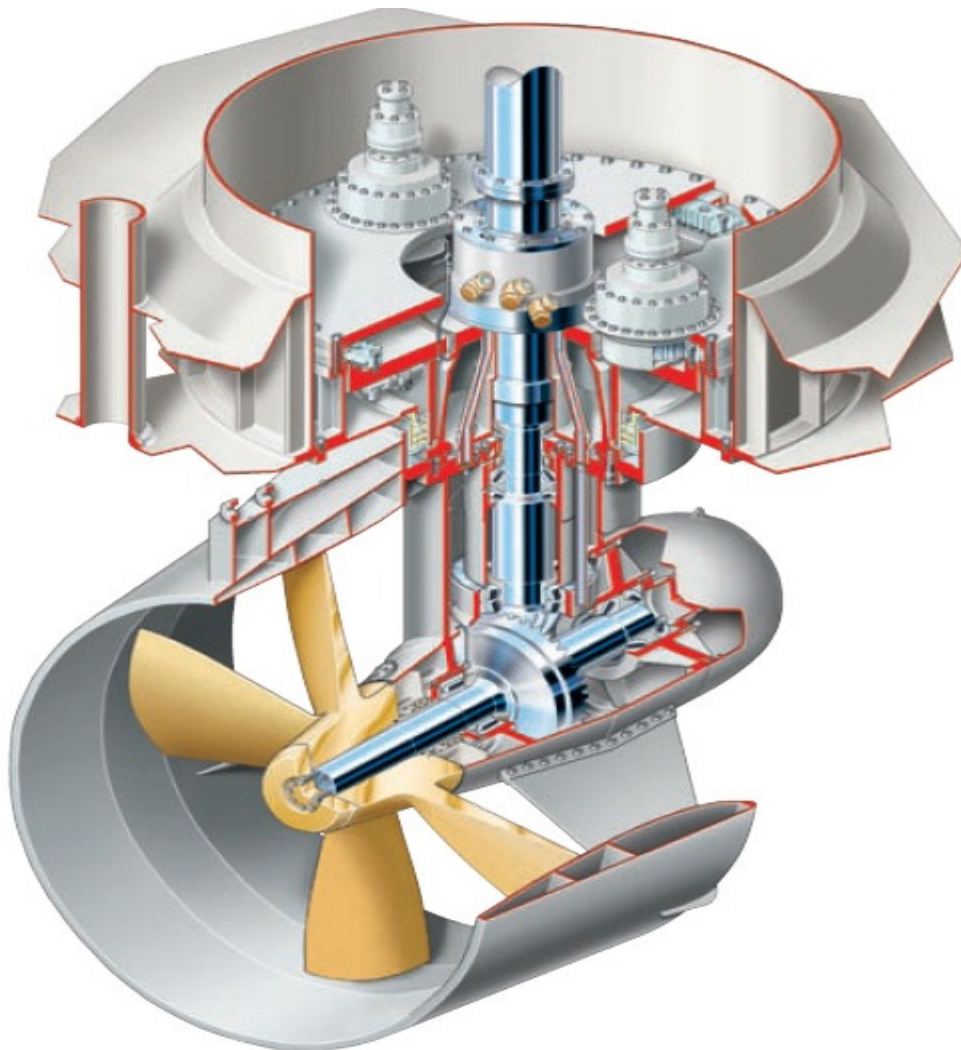
### 3.2.8 Αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod (podded propulsion)

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 στο πρυμναίο μέρος του πλοίου, όπως στις εξωλέμβιες. Το σύστημα μπορεί να φέρει μία ή δύο έλικες και έχει τη δυνατότητα να στρέφεται σχεδόν κατά 360ο 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.

Το αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα δύο ελίκων SSP (Siemens – Schottel Propulsor) και τα επιμέρους στοιχεία του.

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



( Αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης )

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης στα πλοία και σε ποια είδη πλοίων

#### 4.1 Εφαρμογή Ηλεκτρικής πρόωσης σε Εμπορικά, Επιβατικά και Πολεμικά πλοία.

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. 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.

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. (συνγά 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 Ε.Ρ., 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 . 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.).

Σύγκριση αναγκών περιορισμού διαστάσεων (ή βάρους) σε σχέση με την ηλεκτρική ισχύ για διαφόρους τύπους πλοίων (εμπορικών και πολεμικών).

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.

Γενικά, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση στις ακόλουθες κατηγορίες εφαρμογών :

α. Σκάφη με υψηλές απαιτήσεις ελκτικών ικανοτήτων.

Οχηματαγωγά, παγοθραυστικά, ρυμουλκά, ωκεανογραφικά, σκάφη πόντισης καλωδίων είναι τυπικά παραδείγματα σκαφών αυτής της κατηγορίας. Στις περιπτώσεις αυτές, η μεταβολή της ταχύτητας και της φοράς περιστροφής της έλικας είναι συχνά ζωτικής σημασίας για την επιτυχημένη λειτουργία του σκάφους.

β. Σκάφη με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων.

Σκάφη με δικά τους μέσα φόρτο – εκφόρτωσης, πυροσβεστικά σκάφη, μεγάλα δεξαμενόπλοια, κ.ά. έχουν μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων, που δε συμπίπτει χρονικά με τη μέγιστη ισχύ πρόωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν ορισμένα δεξαμενόπλοια (π.χ. εκείνα που μεταφέρουν πετρέλαιο από τις εξέδρες εξόρυξης στη στεριά), τα οποία ξοδεύουν μεγάλο μέρος του χρόνου στη φόρτωση (4 – 10 μέρες) ενώ το ταξίδι είναι σχετικά σύντομο. Κατά τη διάρκεια της φόρτωσης η

ηλεκτρική ισχύς, που απαιτείται για την κίνηση των διαφόρων μηχανημάτων, μπορεί να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ισχύ πρόωσης. Αναφέρεται, π.χ., η περίπτωση δεξαμενοπλοίου με ισχύ πρόωσης 19000 kW, και απαιτήσεις ισχύος 17000 kW – 22000kW κατά τη διάρκεια της φόρτωσης. Τα 6800 kW απαιτούνται από τις έλικες πλευρικής ώσης (τρεις στην πλώρη και δύο στην πρύμνη), που χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση του σκάφους στην κατάλληλη θέση (δυναμική τοποθέτηση – dynamic positioning – D.P.). Ας σημειωθεί ότι το πλοίο θα πρέπει να μπορεί να φορτώνει ακόμη και με κύματα ύψους 5 – 7 m. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το συγκρότημα ηλεκτρογεννητριών προσφέρει ισχύ είτε για πρόωση είτε για την κίνηση αντλιών ή μεγάλων μηχανημάτων διακίνησης φορτίου.

γ. Σκάφη με μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης. Τέτοιες συνθήκες παρουσιάζονται σε μεγάλα επιβατηγά πλοία και ιδιαίτερα στα κρουαζιερόπλοια, όπου οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις άνεσης και εξυπηρέτησης των επιβατών συντελούν σε αύξηση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος, η οποία αρχίζει να αποτελεί σοβαρό ποσοστό της ισχύος πρόωσης φθάνοντας το 30 – 40 %. Επιπλέον, τα σύγχρονα κρουαζιερόπλοια έχουν μέγιστη ταχύτητα 21 – 22 κόμβων, στην οποία ταξιδεύουν κατά πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, ενώ κατά το μεγαλύτερο χρόνο κινούνται με ταχύτητα 9 – 14 κόμβων.

δ. Σκάφη εξοπλισμένα με πολλές ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές. Οι αεριοστροβίλοι και πολλές ταχύστροφες μηχανές Diesel έχουν σταθερή φορά περιστροφής και συχνά εγκαθίστανται δύο, τρεις ή και περισσότερες μονάδες, που παράγουν την απαιτούμενη συνολική ισχύ. Σε τέτοιες περιπτώσεις η ηλεκτρική πρόωση προσφέρει έναν εύκολο τρόπο (ηλεκτρικής και όχι μηχανικής) σύνδεσης ενός κινητήρα πρόωσης με πολλές κύριες μηχανές, καθώς και ρύθμισης της ταχύτητας και της φοράς περιστροφής της έλικας.

ε. Υποβρύχια και βαθυσκάφη.

Ηλεκτρική ενέργεια αποθηκευμένη σε συσσωρευτές καθώς και συστήματα κυψελών καυσίμου πρόσφατης τεχνολογίας χρησιμοποιούνται για την κίνηση ενός ή περισσότερων κινητήρων πρόωσης του σκάφους με σχετικά χαμηλή ταχύτητα. Σε πολλές από τις προηγούμενες εφαρμογές (π.χ., σε μεγάλα επιβατηγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια, κλπ), είναι ενεργειακά και οικονομικά αποδοτική η συνολική αντιμετώπιση των αναγκών με ένα ολοκληρωμένο σύστημα, που θα παρέχει προωστήρια, ηλεκτρική και θερμική ενέργεια από τις ίδιες τις μηχανές (κινητήρες Diesel ή αεριοστροβίλους που κινούν γεννήτριες και τα υψηλής

θερμοκρασίας καυσαερίά τους προσφέρουν χρήσιμη θερμότητα). Έτσι, π.χ., για το δεξαμενόπλοιο που αναφέρθηκε παραπάνω, επιλέχθηκε ηλεκτρική πρόωση με ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος κυκλομετατροπέα (cycloconverter) και ενεργειακό σύστημα αποτελούμενο από τέσσερα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη συνολικής ισχύος 25100 kW και ένα ακόμη ισχύος 1200 kW.

Ειδικά, όσον αφορά στα πολεμικά πλοία, η ηλεκτροπρόωση αποτελεί την βασική επιλογή για την κίνηση των υποβρυχίων. Η χρήση της σε πολεμικά πλοία επιφάνειας, που μέχρι σήμερα ήταν σχετικά περιορισμένη, προσελκύει ξανά το έντονο ενδιαφέρον των ναυτικών χωρών που κατασκευάζουν πολεμικά πλοία και εξετάζεται πλέον σαν υποψήφιο σύστημα για την προωστήρια εγκατάσταση της επόμενης γενιάς των μεγάλων πολεμικών πλοίων. Οι αυξημένες απαιτήσεις και οι αυστηρότερες, σε σχέση με τα εμπορικά πλοία, προδιαγραφές του πολεμικού ναυτικού διαφόρων χωρών, τόσο από άποψης περιορισμού χώρου αλλά και απαιτήσεων του προωστήριου συστήματος, προϋποθέτουν περισσότερη ανάπτυξη και τελειοποίηση υποσυστημάτων για να πραγματοποιηθούν τα εν δυνάμει πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης. Οι κύριες αιτίες της αναζωπύρωσης του ενδιαφέροντος των πολεμικών ναυτικών για τη χρήση της ηλεκτροπρόωσης είναι:

- α. Η αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία και η τάση για την «ηλεκτροποίηση» των πλοίων με αποκορύφωση το πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship – A.E.S.), δηλαδή η τάση όλες οι λειτουργίες, κύριες και βοηθητικές, να στηρίζονται σε ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας.
  - β. Η ανάγκη για περισσότερο «αθόρυβη» λειτουργία των πλοίων.
  - γ. Η αναζήτηση συστημάτων πρόωσης με χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και μειωμένων απαιτήσεων προσωπικού.
  - δ. Και κυρίως η ωρίμανση τεχνολογιών που απαιτούνται για να αξιοποιηθούν πλήρως τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης. Τέτοιες τεχνολογίες είναι κυρίως των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχό τους.
- Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή συστήματος ηλεκτροπρόωσης για ένα πλοίο, προσφέρει περισσότερη ελευθερία στη σχεδίαση και στην επιλογή των υποσυστημάτων και της διάταξης όλης της προωστήριας και ηλεκτρικής εγκατάστασης. Σε κάθε περίπτωση αξίζει να σημειωθεί, ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι μόνη λύση για τη βοηθητική πρόωση (το σύστημα των πλευρικών προωστήρων που επαυξάνουν την ελικτική ικανότητα των σκαφών ιδίως εντός των λιμένων) με αξιοποίηση κυρίως επαγωγικών κινητήρων μεγάλης ισχύος (0.5 – 2.5 mw)

## 4.2 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης σε μικρά σκάφη

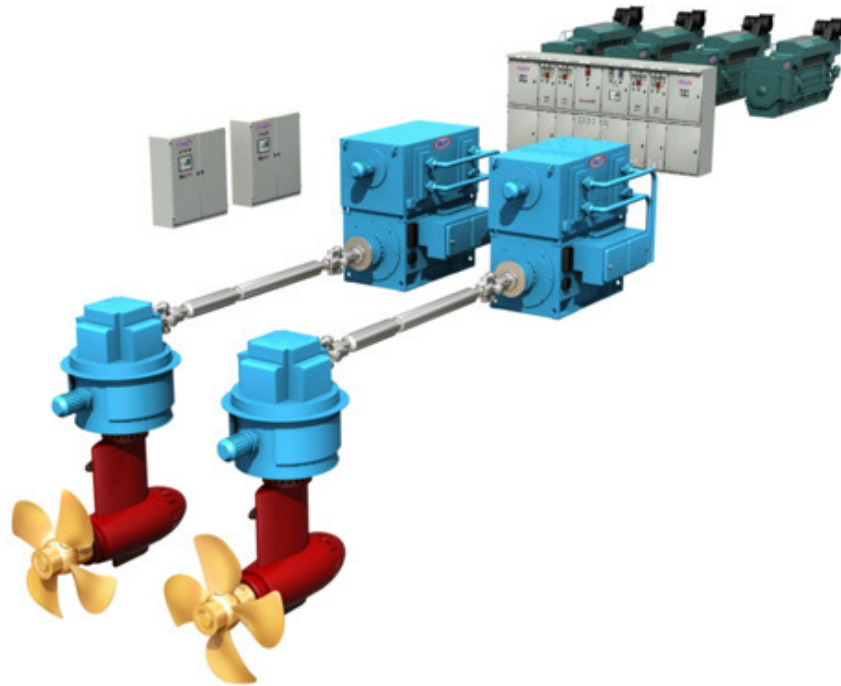
Εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης έχουμε όπως είναι φυσικό και σε μικρότερα σκάφη, όπως σε μικρού και μεσαίου μεγέθους σκάφη αναψυχής, σε ιστιοπλοϊκά, σε αλιευτικές βάρκες κ.ά.. Χρησιμοποιούνται σαν βοηθητική αλλά και σαν κύρια πρόωση. Τα συστήματα πρόωσης είναι όμοια με αυτά των ηλεκτροκίνητων πλοίων, βέβαια μειώνεται κατά πολύ η ονομαστική ισχύς λειτουργίας και ο βαθμός πολυπλοκότητας τους.

Τα μικρά σκάφη μέχρι 6 – 7 μέτρα χρησιμοποιούν αμιγώς ηλεκτρική πρόωση, όπου μπαταρίες ή και κυψέλες καυσίμου (ανάλυση σχετικών συστημάτων ακολουθεί

σε επόμενο κεφάλαιο) τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος Σ.Ρ/Σ.Ρ ή Σ.Ρ./Ε.Ρ., αναλόγως τον ηλεκτρικό κινητήρα της εφαρμογής, ελέγχουν τις στροφές της έλικας. Η ντιζελοηλεκτρική πρόωση χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερα σκάφη και έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την αντίστοιχή της στα πλοία.

Η χρήση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος Σ.Ρ. είναι ευρέως διαδεδομένη στις εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης χαμηλής ισχύος όπως και των σύγχρονων κινητήρων, κυρίως μονίμου μαγνήτη και για τα δύο είδη κινητήρων. Δε λείπουν όμως και οι ασύγχρονοι κινητήρες. Η μηχανή πρόωσης συνδέεται απευθείας ή μέσω μειωτήρων (τροχαλίες – μάντες) με τον άξονα της έλικας. Η αζιμουθιακή πρόωση (azimuth thrusters) σε αυτά τα συστήματα βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην βοηθητική πρόωση (bow thrusters) σκαφών αναψυχής. Διαδεδομένοι είναι και οι εξωλέμβιοι ηλεκτρικοί κινητήρες, στους οποίους ο ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να είναι έξω από το νερό, αντίστοιχα με τους συμβατικούς εξωλέμβιους κινητήρες, αλλά και μέσα στο νερό. υπάρχει ένα σύστημα ηλεκτροπρόωσης της ολλανδικής εταιρείας Vetus, το οποίο βρίσκει εφαρμογές σε εγκαταστάσεις αμιγώς ηλεκτρικής αλλά και υβριδικής πρόωσης, όπου ο κινητήρας οδηγούμενος από τον κινητήρα Diesel δρα και ως δυναμό, φορτίζοντας τους συσσωρευτές. Ο κινητήρας που χρησιμοποιείται στην εφαρμογή είναι ένας σύγχρονος κινητήρας ονομαστικής τάσης 24 V και ισχύος 2.2 kW με ονομαστικό αριθμό στροφών 1200 rpm. Δοκιμές έγιναν με το παραπάνω σύστημα σε ένα σκάφος 6 μέτρων με εκτόπισμα 1.2 τόνους (4 άτομα και 4 συσσωρευτές μέσα στο σκάφος). Στα 24 V το ρεύμα που χρειάστηκε για να κινηθεί με 4.8 κόμβους ήταν 50 A. Με ονομαστική χωρητικότητα τα 352 Ah (24 V –

352 Ah (5 h)) και θεωρώντας ένα βάθος εκφόρτισης 80 % θα μπορούσε να ταξιδεύει με την ταχύτητα των 4.8 κόμβων για 6 ώρες. Για χαμηλότερες ταχύτητες αυξάνεται και η αυτονομία.



*( Ηλεκτρική εγκατάσταση πρόωσης )*



*( Ηλεκτρική εγκατάσταση πρόωσης σε μικρά σκάφη )*



## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### Κατασκευή μοντέλου υπό κλίμακα αναπαράστασης της λειτουργιάς ηλεκτρικής πρόωσης Πλοίου

Οι πολλές αρετές και η ευχαρίστηση της ηλεκτρικής πρόωσης είναι εκτός από την θάλασσα είναι γνωστές και στο ποτάμι και στα κανάλια κωπηλασίας. Οι ηλεκτροκινητήρες είναι σχεδόν αθόρυβοι, δεν έχουν δύσοσμα καυσίμων και δεν παράγουν εκπομπές ρύπων. Με άλλα λόγια, αυτές οι μονάδες πρόωσης είναι πραγματικά «πράσινες» και φιλικές προς το περιβάλλον. Κάνοντας καλή χρήση της σύγχρονης εξέλιξης στην ηλεκτρική σχεδίαση κινητήρα, κατασκευάστηκε η ιδανική μονάδα ηλεκτρικής πρόωσης. Έχει πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, συνεχώς μεταβαλλόμενη ταχύτητα, χαμηλό βάρος και μικρές διαστάσεις.

Ο ηλεκτροκινητήρας χωρίς ψήκτρες δεν χρησιμοποιεί καρβουνάκια, γεγονός που τον καθιστά αθόρυβο και χωρίς απαιτήσεις συντήρησης. Στις χαμηλές στροφές, η απόδοση αυτού του κινητήρα χωρίς ψήκτρες είναι σημαντικά υψηλότερη από τα συμβατικά ηλεκτρικά μοτέρ που είναι εξοπλισμένα με καρβουνάκια. Ο κινητήρας χωρίς ψήκτρες έχει επίσης μια πολύ θετική δύναμη στην αναλογία βάρους. Ένα άλλο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του κινητήρα είναι ο πολύ χαμηλός αριθμός στροφών το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να συζευχθεί απευθείας με τον άξονα της έλικας, χωρίς την ανάγκη για ένα κιβώτιο ταχυτήτων μείωσης. Η πλήρης εγκατάσταση έχει φθηνή συντήρηση και λειτουργεί ουσιαστικά χωρίς κραδασμούς.

Στις παραπάνω φωτογραφίες απεικονίζεται βήμα βήμα η κατασκευή υπο κλίμακα για την αναπαράσταση ηλεκτρικής πρόωσης :

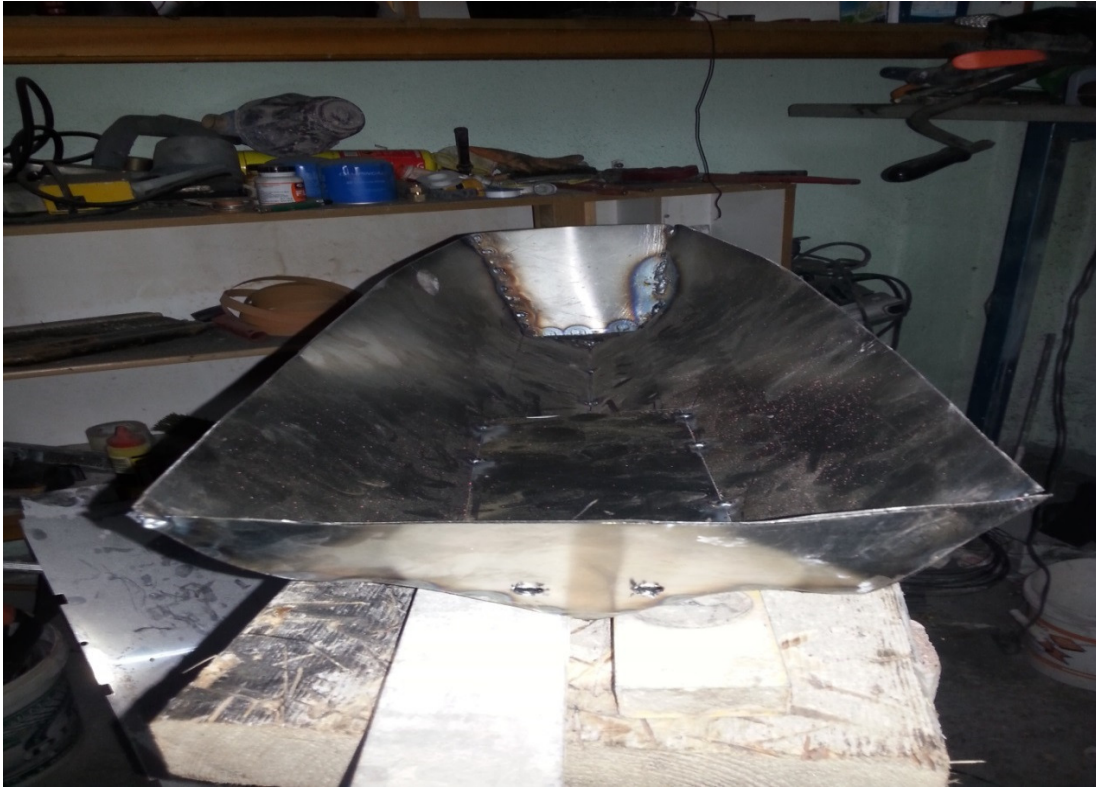


*( Πρώτη φάση κατασκευής του πλοίου )*



*( Απόδοση μορφής στο πλοίο και τοποθέτηση πλώρης και πρύμνης )*





*( Ολοκλήρωση της κατασκευής (πάνω όψη απο Πρύμνη )*



*( Ολοκλήρωση της κατασκευής (πάνω όψη απο Πλώρη )*



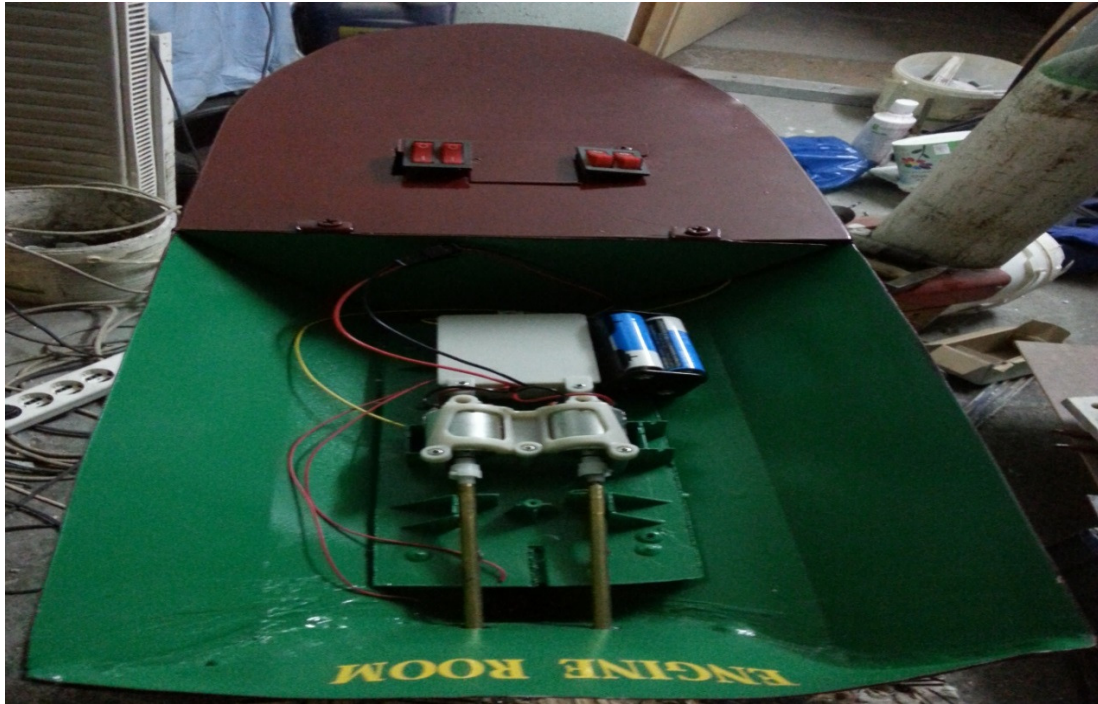


*( Προετοιμασία της κατασκευής για βάψιμο )*



*( Ολοκλήρωση βαψίματος του Μηχανοστασίου )*





*( Ολοκλήρωση του βαψίματος και τοποθέτηση της εγκατάστασης Ηλεκτρικής Πρόωσης )*



*( Ολοκλήρωση της Πτυχιακής εργασίας )*

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

#### 6.1 Πλεονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

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

- 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.
- 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.
  - 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.

## 6.2 Μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Τα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι τα εξής:

- 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 υπερνικάτε εύκολα.
- β. Υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε σύγκριση με το μηχανικό σύστημα. Π.χ., σε ένα συμβατικό σύστημα κινητήρα Diesel – έλικας ρυθμιζόμενου 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.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα

Σε πολλές εφαρμογές, η συνισταμένη πλεονεκτημάτων - μειονεκτημάτων είναι θετική, οπότε η ηλεκτρική πρόωση 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 .



## Βιβλιογραφία

<http://www.nauticexpo.com/prod/sam-electronics/electric-propulsion-systems-ship-27595-305914.html>

<http://www.yachtforums.com/forums/technical-discussion/2229-diesel-electric-propulsion-11.html>

<http://www.defence-point.gr/news/?p=25809>

<http://www.vetus.gr/>

<http://www.boatdesign.net/gallery/showphoto.php/photo/195>

<http://www.kathimerini.gr/464039/article/oikonomia/die8nhs-oikonomia/to-hlektriko-ploio-ths-epomenhs-genias>

<http://www.ship-technology.com/contractors/propulsion/stadt/stadt5.html>

[http://flyingv.ucsd.edu/nima/Axial\\_Flux/Axial\\_Flux.html](http://flyingv.ucsd.edu/nima/Axial_Flux/Axial_Flux.html)

<http://www.dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/4594>

<http://www.gkn.com/sintermetals/capabilities/soft-magnetic-pm/news/Pages/GKN-Sinter-Metals-to-display-innovative-Transversal-Flux-Motor-at-the-CWIEME-2013.aspx>

<http://www.em-gear.com/Industries.html>

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract .....	4
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> .....	6
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> .....	8
2.1 Σύγχρονος κινητήρας μονίμου μαγνήτη .....	8
2.2 Προηγμένοι κινητήρες E.P.....	9
2.3 Πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transverse flux motors) .....	10
2.4 Πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motors) .....	10
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> .....	11
3.1 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος για οδήγηση ηλεκτρικώνκινητήρων πρόωσης.....	11
3.2.1 Συνεργασία έλικας και κινητήρα πρόωσης.....	12
3.2.2 Έλικα σταθερού βήματος .....	12
3.2.3 Έλικα ρυθμιζόμενου ή μεταβλητού βήματος.....	13
3.2.4 Συνδυασμός κινητήρα E.P. με έλικα μεταβλητού βήματος .....	13
3.2.5 Συνδυασμός κινητήρα Σ.Ρ. με έλικα σταθερού βήματος.....	14
3.2.6 Κίνηση της έλικας με άξονα (shaft propulsion).....	16
3.2.7 Αζιμουθιακοί προωστήρες (azimuth thrusters) .....	16
3.2.8 Αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod (podded propulsion).....	17
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> .....	19
4.1 Εφαρμογή Ηλεκτρικής πρόωσης σε Εμπορικά, Επιβατικά και Πολεμικά πλοία. ....	19
4.2 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης σε μικρά σκάφη .....	23
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> .....	25
Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> .....	30
6.1 Πλεονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης.....	30
6.2 Μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης .....	31
Κεφάλαιο 7 <sup>ο</sup> .....	32
Βιβλιογραφία .....	33