



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ - ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
ΔΙΧΡΟΝΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**

ΚΑΤΙΜΕΡΤΖΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Εξεταστική Επιτροπή

Επιβλέπων: Χρ. Παπαδόπουλος, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Μέλη: Λ. Καϊκτσής, Καθηγητής ΕΜΠ

Α. Γκίνης, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	3
Επεξήγηση Συμβόλων	5
Σύνοψη	7
Abstract	8
Ευχαριστίες.....	9
1. Εισαγωγή	10
1.1 Σκοπός της Εργασίας	10
1.2 Δυναμική Ανάλυση.....	11
1.3 Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας.....	12
2. Ναυτική Εγκατάσταση Πρόωσης.....	13
2.1 Εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.....	13
2.2 Δίχρονοι Ναυτικοί Κινητήρες	16
2.2.1 Βασικά Χαρακτηριστικά Δίχρονων Ναυτικών Κινητήρων.....	16
2.2.2 Διάγραμμα Περιοχής Λειτουργίας Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα	25
2.2.3 Διάγραμμα Φόρτισης Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα	26
2.2.4 Νόμος Έλικας.....	30
2.2.5 Εργοστασιακές Δοκιμές Κινητήρα (Shor Test).....	31
2.3 Εγκατάσταση Πρόωσης Πλοίου	32
3. Στρεπτικές Ταλαντώσεις - Στοιχεία Δυναμικών Φαινομένων.....	41
3.1 Γενικά Στοιχεία Ταλαντώσεων Πλοίου.....	41
3.2 Εύρος Στροφών Συντονισμού (Barred Speed Range).....	46
3.3 Κινηματική Μηχανισμού Μετάδοσης Κίνησης	48
3.4 Δυνάμεις Αερίων	50
3.5 Αδρανειακές Δυνάμεις.....	53
3.5.1 Περιστροφικές Αδρανειακές Δυνάμεις.....	53
3.5.2 Παλινδρομικές Αδρανειακές Δυνάμεις.....	53
3.6 Επαλληλία Δυνάμεων.....	55
4. Μοντέλο Δυναμικής Ανάλυσης Εγκατάστασης Πρόωσης	56
4.1 Γενικά Στοιχεία Μοντέλου Δυναμικής Ανάλυσης.....	56
4.2 Παρουσίαση Μοντέλου.....	57
4.2.1 Σύστημα Αναφοράς.....	57
4.2.2 Βασική Εξίσωση.....	60
4.3 Ιδιοσυχνότητες Συστήματος.....	61

4.4 Ροπές Μοντέλου Δυναμικής Ανάλυσης	61
4.4.1 Ροπή Καύσης	61
4.4.2 Ροπή Φορτίου Έλικας	65
4.4.3 Ροπή Τριβών	66
4.4.4 Ροπή Αδρανειακών Μαζών	67
4.4.5 Ροπή Πεπιεσμένου Αέρα Εκκίνησης	68
5. Προσομοιώσεις	69
5.1 Προσομοιώσεις Σταθερού Φορτίου	70
5.2 Προσομοιώσεις Επιτάχυνσης με Στιγμαία Αλλαγή Ροπής	85
5.3 Προσομοιώσεις Επιτάχυνσης με Σταδιακή Αλλαγή Ροπής	92
6. Συμπεράσματα	100
6.1 Καταγραφή Συμπερασμάτων	100
6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	102
Κατάλογος Εικόνων	103
Κατάλογος Πινάκων	104
Κατάλογος Διαγραμμάτων	104
Βιβλιογραφία	106
Παράρτημα	108

Επεξήγηση Συμβόλων

Αγγλικά Σύμβολα

A: σταθερά τριβών
 A_E/A_0 : λόγος εκτεταμένης επιφάνειας
a: μήκος στροφάλου
B: πλάτος πλοίου
b: επιτάχυνση εμβόλου
 b_f : μεταβλητή τριβών
C: συντελεστής απόσβεσης
 C_2, C_1, C_0 : σταθεροί συντελεστές διαγράμματος φόρτισης
 C_f : συντελεστές τριβής
 C_b : συντελεστής γάστρας
c: σταθερά νόμου έλικας
 c_s : μέση ταχύτητα εμβόλου
 D_p : διάμετρος εμβόλου
D: κοίλο πλοίου
DWT: deadweight
 $D_s(\theta)$: παράγωγος εκτοπίσματος εμβόλου από το άνω νεκρό σημείο ως συνάρτηση της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα
F: συνολική δύναμη
 F_g : δύναμη αερίων
 F_{gN} : κάθετη στα τοιχώματα συνιστώσα δύναμης αερίων
 F_{gR} : ακτινική δύναμη αερίων στροφάλου
 F_{gS} : μεταφερόμενη στο κομβίο του διωστήρα δύναμη αερίων
 F_{gT} : στρεπτική δύναμη αερίων στροφάλου
 F_i : αδρανειακή δύναμη
 F_{iN} : κάθετη στα τοιχώματα συνιστώσα αδρανειακής δύναμης
 F_{iR} : ακτινική αδρανειακή δύναμη στροφάλου
 F_{iS} : μεταφερόμενη στο κομβίο του διωστήρα αδρανειακή δύναμη
 F_{iT} : στρεπτική αδρανειακή δύναμη στροφάλου
J: ροπή αδράνειας
K: συντελεστές στρεπτικής δυσκαμψίας
 LHV_{fuel} : κατώτερη θερμογόνο δύναμη καυσίμου
LS: lightship
 L_{OA} : ολικό μήκος πλοίου
 L_{BP} : μήκος μεταξύ καθέτων πλοίου
l: μήκος διωστήρα
MEP: μέση πραγματική πίεση
 M_{gT} : στρεπτική ροπή λόγω καυσίμου
 M_{iT} : στρεπτική ροπή λόγω αδρανειακών μαζών
 M_{rec} : παλινδρομική μάζα κυλίνδρου
m: σταθερά δυναμοδεικτικού διαγράμματος P-θ
 m_{fuel} : μάζα καυσίμου που εγχύεται στον κύλινδρο
n: στροφές κινητήρα
 n_c : γωνιακή ταχύτητα συντονισμού
 n_{comb} : βαθμός απόδοση της καύσης
 n_{MCR} : στροφές μέγιστους συνεχούς λειτουργίας
P: ισχύς
 P_e : μέση πραγματική πίεση

$P_{friction}$: πίεση τριβών
 P_{imax} : ενδεικνύμενη πίεση στο σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας
 P_{MCR} : ισχύς μέγιστους συνεχούς λειτουργίας
 p_g : πίεση αερίων
 r : μήκος στροφάλου
 S : διαδρομή εμβόλου
 $T_{friction}$: ροπή τριβών
 T_{gas} : ροπή αερίων
 T_j : ροπή αδρανειακών μαζών
 T_{prop} : ροπή έλικας
 T_{start} : ροπή πεπιεσμένου αέρα εκκίνησης
 T_{des} : βύθισμα σχεδίασης
UTS: ultimate tensile strength
 V_d : όγκος εμβολισμού κυλίνδρου
 V_c : κενός όγκος
 x : μετατόπιση εμβόλου
 Z_{cyl} : αριθμός κυλίνδρων κινητήρα

Ελληνικά Σύμβολα

A: επιφάνεια εμβόλου
ANΣ: άνω νεκρό σημείο
 α : σταθερά απόδοσης καύσης
 γ : θερμοδυναμική σταθερά αερίων
 Δ : εκτόπισμα σε βύθισμα σχεδίασης
 $\Delta\theta$: συνολική διάρκεια καύσης μετρούμενη σε γωνία
 ϵ : βαθμός συμπίεσης
 θ : γωνία στροφάλου
 θ_0 : γωνία στροφαλοφόρου άξονα στην αρχή της καύσης κάθε κυλίνδρου
K: συντελεστής δίχρονου-τετράχρονου κινητήρα
KNΣ: κάτω νεκρό σημείο
 λ_r : ιδιοσυχνότητες συστήματος
 λ : λόγος ακτίνας στροφάλου προς μήκος διωστήρα:
 λ_c : λόγος γωνιακής ταχύτητας συντονισμού προς μέγιστη γωνιακή ταχύτητα συνεχούς λειτουργίας
 ϕ : γωνία στροφάλου

Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται διερεύνηση των δυναμικών φαινομένων κατά τη σταθερή και μεταβατική λειτουργία ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel πλοίου. Η απόκριση του κινητήρα εξετάζεται μέσω της δημιουργίας ενός μοντέλου προσομοίωσης με τη μέθοδο των διακριτών μαζών. Στο μοντέλο εισάγονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, και γίνεται διακριτοποίηση στα επιμέρους στοιχεία του κινητήρα και του συστήματος πρόωσης του πλοίου. Τα στοιχεία που αποτελούν την εγκατάσταση πρόωσης του πλοίου αλληλεπιδρούν δυναμικά μεταξύ τους λόγω των δυνάμεων που ασκούνται κατά τη λειτουργία του.

Στο πλαίσιο της μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένος δίχρονος ναυτικός κινητήρας ενός εμπορικού πλοίου. Ο κινηματικός μηχανισμός του κινητήρα αναλύθηκε στα επιμέρους τμήματά του. Συγκεκριμένα, τα βασικά στοιχεία του κινητήρα και του κινηματικού μηχανισμού που μελετάται αποτελούνται από το στροφαλοφόρο άξονα, μέσω του οποίου μεταφέρεται η περιστροφική κίνηση που στρέφει την έλικα του πλοίου, και από το σύστημα στροφάλου-διωστήρα-εμβόλου, μέσω του οποίου μετατρέπεται η ηχητική ισχύς του καυσίμου σε περιστροφική κίνηση του άξονα. Στην παρούσα εργασία, ο στροφαλοφόρος άξονας θεωρήθηκε ότι αποτελείται από ένα σύστημα διακριτών μαζών που περιλαμβάνει τον αποσβεστήρα του κινητήρα, τους κυλίνδρους και το σφόνδυλο. Επιπλέον, μελετώνται και τα υπόλοιπα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης, δηλαδή, το αξονικό σύστημα το οποίο αποτελείται από τον ενδιάμεσο και τον ελικοφόρο άξονα του πλοίου, καθώς και η έλικα του πλοίου, και αυτά ως διακριτές μάζες. Τα δυναμικά φαινόμενα κατά τη λειτουργία του κινητήρα δημιουργούνται λόγω των χρονικά μεταβαλλόμενων ασκούμενων δυνάμεων κατά τη λειτουργία του κινητήρα. Αυτές οι δυνάμεις δημιουργούνται λόγω της καύσης εντός των κυλίνδρων, ενώ καθ' όλην τον κύκλο ασκούνται αδρανειακές δυνάμεις λόγω των επιταχύνσεων των μαζών. Επιπλέον, τμήμα της ισχύος του κινητήρα δαπανάται για την υπερνίκηση των δυνάμεων τριβής στα διάφορα επιμέρους τριβολογικά στοιχεία (ελατήρια εμβόλου, έδρανα στροφαλοφόρου, έδρανα διωστήρα, κλπ), ενώ το υπόλοιπο της ισχύος καλύπτει της απαίτηση φορτίου της έλικας του πλοίου. Τέλος, λόγω των ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής αναπτύσσονται δυνάμεις απόσβεσης και ακαμψίας. Αυτές οι δυνάμεις μελετώνται θεωρώντας κατάλληλους αποσβεστήρες και στρεπτικά ελατήρια τα οποία συνδέουν τις διακριτές μάζες του συστήματος.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, αρχικά μελετήθηκαν τα δυναμικά φαινόμενα κατά τη λειτουργία του κινητήρα υπό σταθερό φορτίο. Πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα του μοντέλου παρέχουν πληροφορίες για τις στρεπτικές ταλαντώσεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία του κινητήρα καθώς και για τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις λόγω καύσης και λόγω αδρανειακών δυνάμεων στα έδρανα του κινητήρα, σε 4 διαφορετικά σταθερά φορτία (25%, 50%, 75%, 100% της Μεγίστης Συνεχούς Ισχύος του Κινητήρα) που είναι και τα φορτία των δοκιμών του κινητήρα πριν παραδοθεί στο πλοίο. Τέλος, μελετήθηκαν τα δυναμικά φαινόμενα σε σενάρια μεταβατικής απόκρισης του κινητήρα μέσω της αλλαγής φορτίου που παρέχεται στους κυλίνδρους. Η αλλαγή φορτίου εξετάστηκε με βάση το διάγραμμα φόρτισης του κινητήρα και τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παρέχει σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας.

Abstract

In the present thesis, an in-depth investigation is conducted into the dynamic phenomena associated with the continuous and transient operation of a two-stroke marine Diesel engine. The study employs a simulation model based on the discrete mass method to analyze the engine's response. This model incorporates the geometric attributes of the engine, along with the discretization of its constituent components and the ship's propulsion system. The various elements comprising the ship's propulsion system interact dynamically with each other as a result of the forces encountered during operation.

Specifically, a particular two-stroke marine engine utilized in merchant vessels serves as the focal point of the modeling efforts. The kinematic mechanism of this engine is deconstructed into its individual constituents for rigorous analysis. Notably, the fundamental components of the kinematic mechanism of the engine include the crankshaft, responsible for transmitting the rotational motion that propels the ship's propeller, and the crank-connecting rod-piston system, which serves to convert the chemical energy of the fuel into rotary motion of the engine shaft. In the present study, the crankshaft is treated as a discrete mass system, encompassing components such as the engine damper, the cylinders, and the engine flywheel. Furthermore, an examination is conducted on the remaining constituents of the propulsion installation, encompassing the shafting system comprised of the intermediate and propeller shaft of the ship, in addition to the ship's propeller itself—all modeled as discrete masses. The dynamic phenomena occurring during the engine's operation are a direct consequence of temporally varying applied forces throughout its operational cycle. These forces arise primarily from the combustion process taking place within the engine's cylinders, with additional inertial forces manifesting throughout the cycle due to mass accelerations. Moreover, a portion of the engine's power is expended in overcoming frictional resistance encountered within various individual tribological elements (such as piston springs, crankshaft bearings, piston bearings, etc.), while the remainder of the power output is dedicated to fulfilling the load requirements of the ship's propeller. Finally, the material properties of construction components lead to the development of damping and stiffness forces. These forces are systematically examined by considering appropriate dampers and torsional springs that establish connections between the discrete masses of the system.

In the present thesis, initially the dynamic phenomena during the operation of the engine under constant load were studied. More specifically, the results of the model provide information on the torsional vibration that develop during the operation of the engine as well as on the forces developed due to combustion and due to inertial forces on the engine bearings, at 4 different constant loads (25%, 50%, 75% , 100% of the Engine's Maximum Continuous Power) which are also the engine test loads before being delivered to the ship. Finally, dynamic phenomena were studied in transient engine response scenarios through the change of load provided to the cylinders. The load change was considered based on the engine load diagram and the maximum power it can deliver in transient operating conditions.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί το τέλος του κύκλου σπουδών μου στη σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. με τον ιδανικότερο τρόπο, από τον οποίο έχω να θυμάμαι μόνο θετικά πράγματα. Κατά τη διάρκεια της φοίτησης στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο απέκτησα γνώσεις, φίλους και έναν τρόπο σκέψης που θα με βοηθήσει στην μετέπειτα επαγγελματική μου σταδιοδρομία.

Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή αυτής της διπλωματικής, κ. Χρήστο Παπαδόπουλο, ο οποίος μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα θέμα που με ενδιέφερε ιδιαίτερα και αφορά τη ναυτική μηχανολογία. Με τις υποδείξεις και τις συμβουλές του επί του θέματος βοήθησε στην ολοκλήρωση των στόχων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υ.Δ. Γιώργο Χάρβαλο για τη σημαντική βοήθειά του και την επικοινωνιακή συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια αυτή της διπλωματικής εργασίας, καθώς και τους Υ.Δ. Γιώργο Ρωσσόπουλο και Δημήτρη Σκαλτσά για το ενδιαφέρον και τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου για τη βοήθειά τους όλα τα χρόνια της φοίτησης στο Ε.Μ.Π., με τους οποίους περάσαμε πολλές ώρες διαβάζοντας, παρακολουθώντας και πραγματοποιώντας εργασίες κάνοντας τη φοίτηση στο ΕΜΠ μια πιο διασκεδαστική και ενδιαφέρον διαδικασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την υποστήριξή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Εργασίας

Η αποτελεσματική προσομοίωση της λειτουργίας ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα όπως επίσης και συνολικά της εγκατάστασης πρόωσης ενός πλοίου αποτελεί κύριο παράγοντα στην κατανόηση των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία μίας εγκατάστασης πρόωσης καθώς και της αλληλεπίδρασης των διαφόρων υποσυστημάτων, που συμπεριλαμβάνονται σε αυτή την εγκατάσταση.

Επιπρόσθετα, η προσομοίωση μιας εγκατάστασης πρόωσης μπορεί να αξιοποιηθεί στην καλύτερη κατανόηση και εν τέλη στη διαδικασία ανάπτυξης και βελτιστοποίησης των λειτουργιών των επιμέρους στοιχείων της εγκατάστασης, αρχικά με την αξιολόγηση των υποσυστημάτων που περιλαμβάνονται σε αυτή και τελικά με τη δοκιμή εναλλακτικών μεθόδων σχεδίασης αλλά και την εφαρμογή νέων τεχνολογιών και υλικών που θα οδηγήσουν σε αύξηση αποδοτικότητας και μείωσης του λειτουργικού κόστους.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των δυναμικών φαινομένων που αναπτύσσονται στην εγκατάσταση πρόωσης ενός πλοίου κατά τη λειτουργία ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα τόσο σε σταθερή όσο και σε μεταβατική λειτουργία. Για τη μελέτη των δυναμικών φαινομένων πραγματοποιείται μελέτη συνολικά του συστήματος πρόωσης ενός εμπορικού πλοίου, δηλαδή της κύριας μηχανής, του αξονικού συστήματος και της έλικας. Τα στοιχεία που μελετώνται αφορούν τις στρεπτικές ταλαντώσεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία του συστήματος πρόωσης καθώς και τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις σε διάφορα σημεία του συστήματος.

Η παραπάνω μελέτη καθίσταται εφικτή με την δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης τόσο του κινητήρα όσο και συνολικά της εγκατάστασης πρόωσης του πλοίου που θα αφορά τη μελέτη των δυναμικών φαινομένων που αναπτύσσονται, προκειμένου να είναι δυνατή η αξιολόγηση και παρακολούθηση της αλληλεπίδρασης των επιμέρους στοιχείων της εγκατάστασης πρόωσης. Το μοντέλο περιλαμβάνει τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, του αξονικού συστήματος και της έλικας, καθώς και τις ροπές που αναπτύσσονται και ασκούνται κατά τη λειτουργία του κινητήρα.

Η μοντελοποίηση του κινητήρα και της εγκατάστασης πρόωσης του πλοίου, όπως και οι προσομοιώσεις λειτουργίας σε σταθερό και σε μεταβατικό φορτίο πραγματοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB.

1.2 Δυναμική Ανάλυση

Η δυναμική ανάλυση κινητήρων εσωτερικής καύσης, ειδικά για τους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες, αποτελεί ουσιαστικό εργαλείο για την κατανόηση και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους. Ο λόγος που απαιτείται η δυναμική ανάλυση είναι διπλός. Καταρχάς, οι δίχρονοι ναυτικοί κινητήρες λειτουργούν σε ακραίες συνθήκες φορτίου, ταλάντωσης και κραδασμών στο περιβάλλον του ναυτικού χώρου. Η δυναμική ανάλυση μπορεί να προσδιορίσει πώς αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση, την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής των κινητήρων. Δεύτερον, η δυναμική ανάλυση μπορεί να προβλέψει κρίσιμα φαινόμενα όπως οι στρεπτικές ταλαντώσεις. Αυτές οι ταλαντώσεις μπορούν να προκαλέσουν υπερβολική φθορά, δονήσεις και ακόμα και βλάβες στα συστήματα και τις δομές γύρω από τον κινητήρα. Με τη χρήση δυναμικής ανάλυσης, μπορούν να αναδειχθούν τα σημεία ευαισθησίας και να εφαρμοστούν μέτρα για την αποφυγή των προβλημάτων αυτών.

Σε έναν εμβολοφόρο κινητήρα, άρα και σε έναν δίχρονο ναυτικό κινητήρα οι δυνάμεις και οι φορτίσεις που ασκούνται είναι χρονικά μεταβαλλόμενες. Οι δυνάμεις αυτές προέρχονται από την καύση που πραγματοποιείται και από τις αδρανειακές δυνάμεις λόγω κίνησης των μαζών (περιστροφικές και παλινδρομικές). Η δυναμική ανάλυση είναι ιδιαίτερα σημαντική για το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση ενός κινητήρα, καθώς υπολογίζονται οι μετατοπίσεις, οι επιταχύνσεις και οι δυνάμεις συναρτήσει του χρόνου ανάλογα με το δυναμικό φορτίο που ασκείται. Ο υπολογισμός των παραπάνω μεγεθών μπορεί να δώσει πολύτιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία του συστήματος, που θα οδηγήσουν σε μία βέλτιστη σχεδίαση τόσο από άποψης απόδοσης όσο και αντοχής της κατασκευής.

Συμπερασματικά, η δυναμική ανάλυση για δίχρονους ναυτικούς κινητήρες είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση αποδοτικής λειτουργίας, αξιοπιστίας και ασφάλειας των κινητήρων σε αυτό το εξαιρετικά απαιτητικό περιβάλλον, αφού μέσω αυτής της ανάλυσης, μπορούν να υπολογιστούν οι δυναμικές παράμετροι, να προβλεφθούν προβλήματα και να βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες λειτουργίας των κινητήρων.

1.3 Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

Η εγκατάσταση πρόωσης ενός πλοίου αποτελεί λειτουργία ζωτικής σημασίας για την αξιόπιστη πλεύση του στο θαλάσσιο περιβάλλον. Τις τελευταίες δεκαετίες, γίνονται έρευνες που βελτιστοποιούν την εγκατάσταση πρόωσης, για να εξασφαλιστεί η λειτουργία του πλοίου σε όλες τις συνθήκες υπηρεσίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι, μία πολύ σημαντική μελέτη της εγκατάστασης πρόωσης αφορά την ανάπτυξη ταλαντώσεων κατά τη λειτουργία του κινητήρα και πιο συγκεκριμένα την ανάπτυξη στρεπτικών ταλαντώσεων που επιφέρουν σημαντικές καταπονήσεις στο σύστημα. Η μελέτη των στρεπτικών ταλαντώσεων γίνεται μέσω της δυναμικής ανάλυσης του συστήματος. Η δυναμική ανάλυση έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη μελέτη εμβολοφόρων κινητήρων και κυρίως για τετράχρονους κινητήρες. Η μοντελοποίηση δίχρονων ναυτικών κινητήρων είναι πιο περιορισμένη στη βιβλιογραφία ωστόσο υπάρχουν μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί.

Για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας χρειάστηκε πρώτα η λεπτομερής κατανόηση των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία ενός κινητήρα και ειδικά των δυναμικών φαινομένων που αναπτύσσονται. Η θεωρία της εργασίας και τα εισαγωγικά κεφάλαια 2 και 3 της εργασίας που αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τη λειτουργία των δίχρονων ναυτικών κινητήρων και τα συστήματα της εγκατάστασης πρόωσης, όπως και η θεωρία των δυναμικών φαινομένων σε έναν κινητήρα βασίστηκε στις βιβλιογραφικές αναφορές [1] έως [6], [20], [22], [24] και [25]. Οι βιβλιογραφικές αναφορές [7] έως [9] παρουσιάζουν βασικά στοιχεία για τη λειτουργία ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα όπως το Διάγραμμα Φόρτισης και το Νόμος της Έλικας και οι βιβλιογραφικές αναφορές [10], [11] χαρακτηριστικά για το συγκεκριμένο κινητήρα που μελετάται.

Η δημιουργία του μοντέλου δυναμικής ανάλυσης βασίστηκε στις βιβλιογραφικές αναφορές [12] έως [18]. Οι προηγούμενες βιβλιογραφικές αναφορές αφορούν εργασίες όπου αναπτύσσονται και επεξηγούνται μοντέλα δυναμικής ανάλυσης κινητήρων. Οι δύο πιο σημαντικές εργασίες που βασίστηκε και η παρούσα εργασία είναι η [14] και η [15], όπου αναπτύσσεται μοντέλο δίχρονου κινητήρα συνδεδεμένο με γεννήτρια. Στην παρούσα εργασία η μελέτη γίνεται για τη διάταξη μίας εγκατάστασης πρόωσης ενός εμπορικού πλοίου. Επιπλέον στις προηγούμενες εργασίες η μελέτη αφορά τη λειτουργία του κινητήρα αποκλειστικά σε σταθερό φορτίο. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε αρχικά η λειτουργία του κινητήρα σε σταθερό φορτίο και η απόκριση ολόκληρης της εγκατάστασης πρόωσης για διάφορα φορτία λειτουργίας και επιπλέον η λειτουργία του κινητήρα σε μεταβλητό φορτίο χωρίς να υπάρχει κάποια άλλη μελέτη στην βιβλιογραφία που να μελετά μεταβατικά φαινόμενα του κινητήρα από τη σκοπιά της δυναμικής ανάλυσης. Ακόμα στην βιβλιογραφική αναφορά [17] παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος. Για τη μελέτη των τριβών του κινητήρα χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι τρόποι υπολογισμού που παρουσιάζονται στις εργασίες [16], [23] και [26]. Η κατανόηση των θερμοδυναμικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία του κινητήρα και η ανάπτυξη των Δυναμοδεικτικών Διαγραμμάτων έγινε από τις βιβλιογραφικές αναφορές [19], [21], [23]. Τέλος για το σύστημα εκκίνησης με πεπιεσμένο αέρα η θεωρία βασίστηκε στην βιβλιογραφική αναφορά [27].

2. Ναυτική Εγκατάσταση Πρόωσης

2.1 Εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

Η παραγωγή έργου με τη χρήση μίας θερμικής μηχανής βασίζεται στην πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της ενεργειακής του κατάστασης. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω της καύσης, αξιοποιώντας την αποταμιευμένη στα καύσιμα χημική ενέργεια. Μέρος αυτής της ενέργειας αποδίδεται ως μηχανικό έργο, ενώ το υπόλοιπο αποβάλλεται ξανά ως θερμότητα στο περιβάλλον.

Η πρόσδοση της θερμότητας μπορεί να γίνεται είτε εντός του κύριου τμήματος της μηχανής είτε σε ανεξάρτητο τμήμα της. Οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) διακρίνονται από τις αντίστοιχες εξωτερικής καύσης από αυτό ακριβώς το χαρακτηριστικό, ότι δηλαδή η καύση για την παραγωγή της αναγκαίας θερμότητας πραγματοποιείται εντός της μηχανής. Οι κυριότερες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης είναι οι εμβολοφόροι κινητήρες, οι αεριοστρόβιλοι, οι στροβιλοαντιδραστήρες, οι στατοί θερμοαντιδραστήρες και οι πυραυλοκινητήρες. Στις ΜΕΚ το εργαζόμενο μέσο είναι ο αέρας (με το καύσιμο).

Μία από τις πιο διαδεδομένες κινητήριες θερμικές μηχανές είναι η εμβολοφόρος ΜΕΚ. Λόγω απλής κατασκευής και της δυνατότητάς της να χρησιμοποιεί εργαζόμενο μέσο σε υψηλές θερμοκρασίες, χαρακτηρίζεται από υψηλή συγκέντρωση ισχύος, καλό βαθμό απόδοσης και χρησιμοποιείται κατά κόρον σε αυτοκίνητα και πλοία. Σε όλες τις εμβολοφόρες ΜΕΚ, το εργαζόμενο μέσο είτε είναι αέρας με καύσιμο, είτε είναι αέρας μόνο, αναρροφάται από τη μηχανή και συμπιέζεται μέχρι μια ορισμένη πίεση. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται η θερμοκρασία του και στη συνέχεια προσδίδεται σε αυτό η θερμική ενέργεια που προέρχεται από την καύση του καυσίμου με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης τους. Κατά την αποτόνωση που ακολουθεί παράγεται μηχανικό έργο. Ένα μέρος του έργου αυτού καταναλώνεται για την προηγηθείσα συμπίεση και τις τριβές, ενώ το υπόλοιπο είναι το ωφέλιμο έργο της μηχανής. Η συμπίεση, η καύση και η αποτόνωση αποτελούν τις βασικές φάσεις λειτουργίας μιας εμβολοφόρου ΜΕΚ. Εκτός των τριών βασικών φάσεων λειτουργίας, μεγάλη σημασία για τη λειτουργία του κινητήρα έχουν και οι φάσεις εναλλαγής των αερίων. Δηλαδή της κένωσης του κυλίνδρου από το καυσαέριο κατά το τέλος της εκτόνωσης και της εκ νέου πλήρωσής του με νέα γόμωση (μείγμα αέρα καυσίμου) για την εκτέλεση νέου κύκλου.

Μία βασική κατηγοριοποίηση των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης γίνεται ανάλογα τον τρόπο τον τρόπο που πραγματοποιείται η ανάφλεξη του καυσίμου. Οι δύο κατηγορίες είναι οι εξής:

1. Κινητήρες Otto
2. Κινητήρες Diesel

Στους κινητήρες Otto (από τον εφευρέτη τους Nicolas August Otto) υπάρχει πάντοτε ανάφλεξη με τη βοήθεια κάποιου εξωτερικού μέσου, συνηθέστερα ενός ηλεκτρικού σπινθήρα. Αντιθέτως, στους κινητήρες Diesel (από τον εφευρέτη τους Rudolf Diesel), υπάρχει πάντοτε αυτανάφλεξη, λόγω της κατάλληλης εισαγωγής του καυσίμου στον κύλινδρο τη στιγμή κατά την οποία το περιεχόμενό του έχει θερμανθεί σε επαρκώς υψηλή θερμοκρασία, λόγω της προηγηθείσης σχετικώς ισχυρής συμπίεσης.

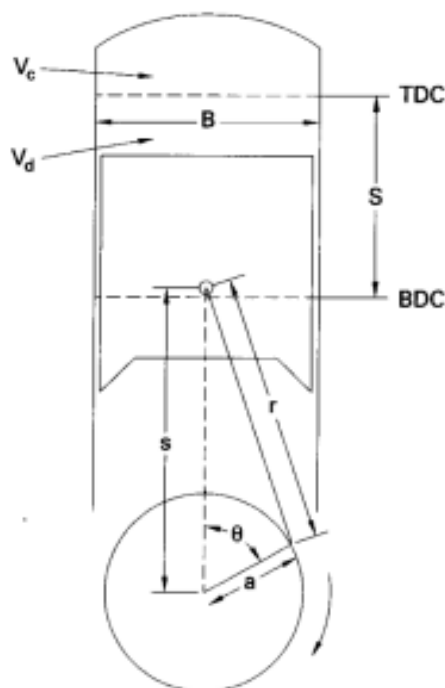
Το κυριότερο καύσιμο των κινητήρων Otto είναι η βενζίνη. Κατά κανόνα η βενζινομηχανή αναρροφά ομογενές μείγμα αέρα-καυσίμου που προετοιμάζεται σε ειδικό όργανο. Υφίστανται όμως και διατάξεις όπου γίνεται μηχανική έγχυση της βενζίνης με τη βοήθεια συστήματος αντλίας καυσίμου-εγχυτήρα, που διακρίνονται σε συστήματα συνεχούς εγχύσεως και διακοπτόμενης εγχύσεως. Τα συστήματα διακοπτόμενης εγχύσεως χωρίζονται σε εμμέσου εγχύσεως (έγχυση λίγο πριν από τη βαλβίδα εισαγωγής) και σε αμέσου εγχύσεως (έγχυση εντός του κυλίνδρου).

Ο κινητήρας Diesel, καλούμενος και πετρελαιομηχανή, αναρροφά πάντα ατμοσφαιρικό αέρα και χρησιμοποιεί σαν καύσιμα είτε ελαφριά είτε βαριά πετρέλαια. Για το σχηματισμό του μείγματος καυσίμου, το πετρέλαιο εισάγεται στον κύλινδρο διασκορπιζόμενο στη μάζα του ήδη συμπιεσμένου αέρα με τη βοήθεια μηχανικής εγχύσεως, δηλαδή υπό την επίδραση της ισχυρής πίεσεως που δημιουργείται από το σύστημα αντλίας καυσίμου-εγχυτήρα

Άλλες κατηγοριοποιήσεις των Εμβολοφόρων Μηχανών Εσωτερικής Καύσης μπορεί να γίνουν ως εξής:

1. Τον αριθμό των διαδρομών του εμβόλου για την ολοκλήρωση του κύκλου λειτουργίας:
 - Δίχρονες μηχανές (two-stroke engines)
 - Τετράχρονες μηχανές (four-stroke engines)
2. Τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα:
 - Αργόστροφες μηχανές έως 350 rpm (κύριες μηχανές πλοίων)
 - Μεσόστροφες μηχανές έως 1500 rpm (μηχανές πλοίων, τρένων και ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη)
 - Πολύστροφες μηχανές έως 5000 rpm (μηχανές τροχοφόρων)
 - Ταχύστροφες μηχανές με ταχύτητα περιστροφής άνω των 5000 rpm (αυτοκίνητα νέας τεχνολογίας, αγωνιστικά αυτοκίνητα, δίτροχα μεγάλου κυβισμού)
3. Τη διάταξη των κυλίνδρων:
 - Κατακόρυφες ή εν σειρά
 - Τύπου V, W, H, Δ, Χ
 - Οριζόντιες (boxer)
 - Αστεροειδείς (κυρίως ως κινητήρες ελικοφόρων αεροσκαφών)
 - Σταυροειδείς, πολυγωνικές, διπλών εμβόλων
4. Τον τρόπο σύνδεσης εμβόλου – διωστήρα:
 - Με βάκτρο και ζύγωμα
 - Χωρίς βάκτρο και ζύγωμα
5. Τον τρόπο, την πίεση αλλά και την ποσότητα του αέρα που εισάγεται στον κύλινδρο:
 - Ατμοσφαιρικές μηχανές ή μηχανές φυσικής αναπνοής (atmospheric-induction engines)
 - Υπερπληρωμένες (supercharged)
6. Την παραγόμενη ισχύ ανά κύλινδρο στις κανονικές στροφές λειτουργίας:
 - Μικρής ισχύος (μέχρι 20 PS)
 - Μέσης ισχύος (μέχρι 200 PS)
 - Μεγάλης ισχύος (άνω των 200 PS)

Το κύριο χαρακτηριστικό των εμβολοφόρων Μηχανών Εσωτερικής Καύσης είναι μετατροπή της παλινδρομικής κίνησης των εμβόλων σε περιστροφική κίνηση του στροφαλοφόρου άξονα. Ο μηχανισμός εμβόλου – διωστήρα – στροφάλου αποτελεί τον κύριο κινηματικό μηχανισμό που συγκροτεί την εμβολοφόρο ΜΕΚ όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1: Κινηματικός Μηχανισμός Εμβολοφόρου ΜΕΚ

Με το μηχανισμό αυτό η παλινδρομική κίνηση του εμβόλου μετατρέπεται μέσω του διωστήρα σε περιστροφική στο στρόφαλο. Λόγω της παλινδρομικής αυτής κίνησης το έμβολο λειτουργεί μεταξύ δύο ακραίων σημείων τα οποία καλούνται Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ) και Κάτω Νεκρό Σημείο (ΚΝΣ). Η απόσταση που διανύει το έμβολο από το ΑΝΣ έως το ΚΝΣ καλείται διαδρομή του εμβόλου και αντιστοιχεί σε μισή περιστροφή (180°) του στροφαλοφόρου άξονα.

Τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εμβολοφόρου κινητήρα είναι:

- Το μήκος του διωστήρα: r
- Το μήκος του στροφάλου: a
- Η διαδρομή του εμβόλου S για την οποία ισχύει: $S = 2a$
- Η διάμετρος του εμβόλου D
- Ο όγκος εμβολισμού κυλίνδρου V_d , που είναι ο όγκος που σαρώνεται από το έμβολο κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής: $V_d = \pi^2 D_p S / 4$,
- Ο κενός όγκος V_c , δηλαδή ο όγκος του κυλίνδρου άνω της κεφαλής του εμβόλου όταν το έμβολο βρίσκεται στο ΑΝΣ
- Ο βαθμός συμπίεσης: $\varepsilon = \frac{V_d + V_c}{V_c}$
- Η ταχύτητα περιστροφής n σε rpm
- Η γωνία στροφάλου θ
- Η μέση ταχύτητα του εμβόλου $c_s = \frac{2 * \pi * n}{60}$

2.2 Δίχρονοι Ναυτικοί Κινητήρες

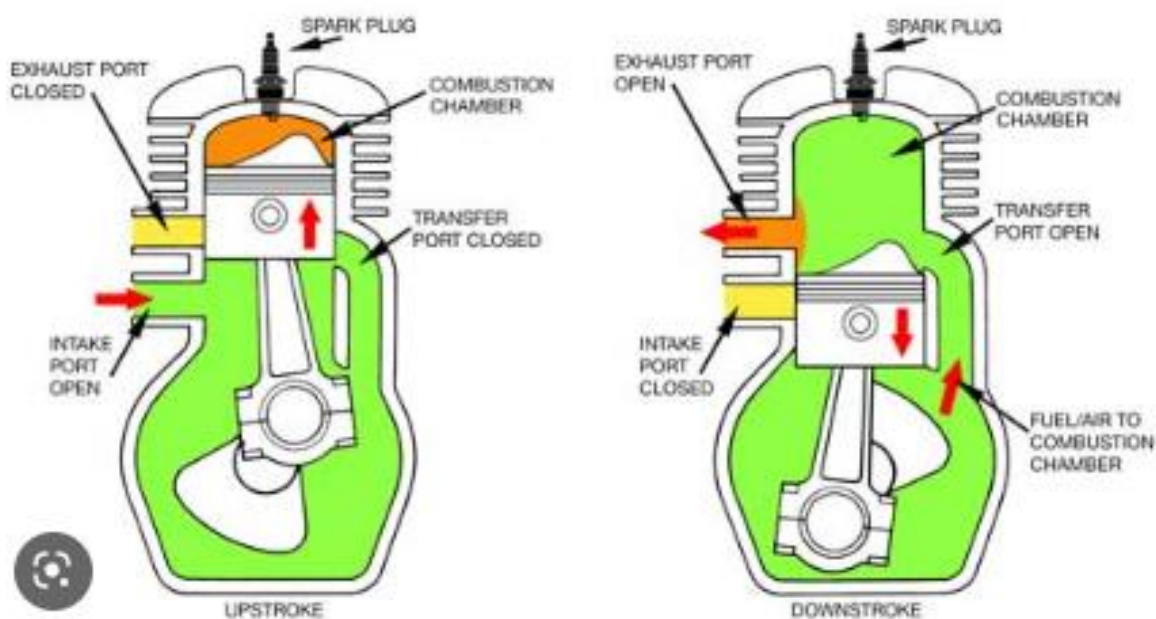
2.2.1 Βασικά Χαρακτηριστικά Δίχρονων Ναυτικών Κινητήρων

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει επικρατήσει η χρήση του εμβολοφόρου κινητήρα Diesel ως κύρια μηχανή πρόωσης των πλοίων. Οι βασικοί λόγοι είναι επειδή ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης του εμβολοφόρου κινητήρα Diesel είναι καλύτερος από αυτόν του ατμοστροβίλου ή του αεριοστροβίλου και επειδή ο εμβολοφόρος κινητήρας Diesel (όπως και ο ατμοστρόβιλος) είναι ικανός να καίει καύσιμα χαμηλής ποιότητας άρα και χαμηλότερης τιμής, αποτελεί δηλαδή την πιο οικονομική εγκατάσταση. Οι ναυτικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται ευρέως σε εμπορικά ή επιβατηγά πλοία διακρίνονται σε:

- Δίχρονους Βραδύστροφους
- Τετράχρονους Μεσόστροφους

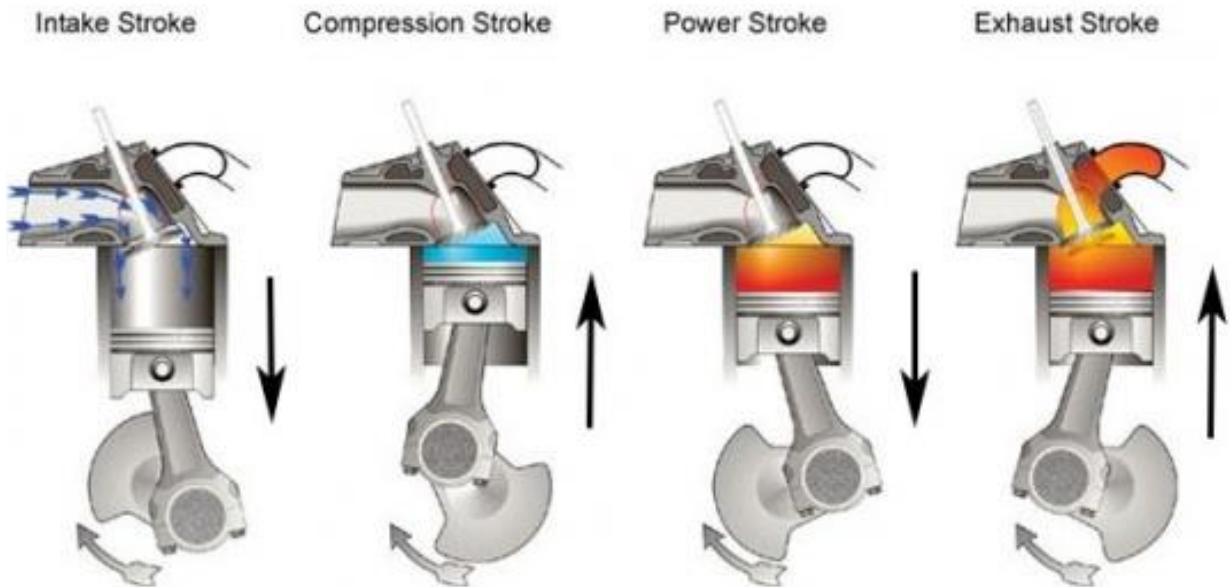
Η παραπάνω κατηγοριοποίηση των κινητήρων γίνεται ανάλογα με τις βασικές φάσεις λειτουργίας τους (συμπίεση, καύση, αποτόνωση), τις φάσεις εναλλαγής των αερίων (εισαγωγή αέρα στον κύλινδρο, εξαγωγή καυσαερίων από τον κύλινδρο), καθώς και τη ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα.

Στους δίχρονους κινητήρες η παραγωγή έργου γίνεται σε δύο χρόνους (εισαγωγή-συμπίεση, εκτόνωση-εξαγωγή), όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2 : Αρχή Λειτουργίας Δίχρονου Κινητήρα

Αντίθετα στους τετράχρονους κινητήρες η παραγωγή έργου γίνεται σε τέσσερις χρόνους (εισαγωγή, συμπίεση, εκτόνωση, εξαγωγή), όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3 : Αρχή Λειτουργίας Τετράχρονου Κινητήρα

Στα μεγάλα εμπορικά πλοία χρησιμοποιούνται κινητήρες Diesel μεγάλου μεγέθους ως κύριες μηχανές πρόωσης, έχοντας πλέον επικρατήσει η χρήση του δίχρονου βραδύστροφου υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel με βάκτρο και σταυρό. Η επικράτηση του δίχρονου κινητήρα έναντι του τετράχρονου επετεύχθη διότι ο πρώτος έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος, σε σύγκριση με το δεύτερο για το ίδιο μέγεθος μηχανής. Επίσης ο δίχρονος κινητήρας έχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης από τον τετράχρονο. Σημαντικό πλεονέκτημα του δίχρονου κινητήρα σε σχέση με τον τετράχρονο είναι η καύση χαμηλότερης ποιότητας καυσίμων και άρα χαμηλότερου κόστους. Αυτό είναι δυνατόν λόγω της αργής περιστροφικής κίνησης του δίχρονου κινητήρα που μεταφράζεται σε αργή παλινδρομική κίνηση του εμβόλου, παρέχοντας τον απαραίτητο χρόνο ώστε να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικά η καύση. Σημαντικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία αποτελεί και ο μεγάλος όγκος εμβολισμού του κυλίνδρου δίνοντας τη δυνατότητα για επαρκή παροχή αέρα για την πλήρη καύση του χαμηλής ποιότητας καυσίμου που χρησιμοποιείται στα εμπορικά πλοία.

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που αφορά την επιλογή του δίχρονου βραδύστροφου κινητήρα για την πρόωση ενός εμπορικού πλοίου είναι η ταχύτητα περιστροφής της έλικας. Τα μεγάλα πλοία, με τις μεγάλες έλικες, απαιτούν για υψηλό βαθμό απόδοσης της έλικας, χαμηλές ταχύτητες περιστροφή της. Γενικά, για δεδομένη ταχύτητα πλοίου, οι χαμηλότερες στροφές και άρα η μεγαλύτερη διάμετρος της έλικας μέσα στους περιορισμούς λόγω γεωμετρίας της γάστρας και βυθίσματος του πλοίου, οδηγούν σε υψηλότερο βαθμό απόδοσης πρόωσης και ως εκ τούτου στη μειωμένη κατανάλωση καυσίμου της εγκατάστασης πρόωσης. Για αυτό οι βραδύστροφοι δίχρονοι κινητήρες έχουν ένα ακόμα πλεονέκτημα σε σχέση με τους μεσόστροφους τετράχρονους αφού οι τελευταίοι χρειάζονται μειωτήρα στροφών για τη σύνδεσή τους με την έλικα αυξάνοντας το βάρος

κατασκευής, τα κινούμενα μέρη και τις μηχανικές απώλειες του συστήματος. Τέλος οι δίχρονοι κινητήρες λόγω του μεγέθους των κυλίνδρων τους μπορούν να παρέχουν περισσότερη ισχύ με λιγότερους κυλίνδρους σε σχέση με τους τετράχρονους μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τα κινούμενα μέρη και αυξάνοντας την αξιοπιστία τους.

Ένα χαρακτηριστικό των κινητήρων είναι ότι η μέση ταχύτητα εμβόλου δεν μπορεί να πέσει κάτω από μια ορισμένη τιμή. Για αυτό το λόγο στους δίχρονους βραδύστροφους κινητήρες η μείωση των στροφών, που είναι πολύ σημαντική για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης όπως περιεγράφηκε προηγουμένως, επιτυγχάνεται με αύξηση της διαδρομής του εμβόλου (Stroke) που οδηγεί σε μεγάλους λόγους διαδρομής/διαμέτρου εμβόλου (Stroke/D), κυρίως στους μεγάλους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες.

Ωστόσο και οι τετράχρονοι κινητήρες έχουν κάποια πλεονεκτήματα έναντι των δίχρονων, βρίσκοντας με αυτό τον τρόπο μεγάλη εφαρμογή σε κάποια εμπορικά πλοία όπως οχηματαγωγά, σε επιβατηγά πλοία καθώς και σε μικρότερα πλοία όπως θαλαμηγοί. Το βασικό πλεονέκτημα τους είναι το μέγεθός τους. Σε εμπορικά πλοία όπως οχηματαγωγά ή σε επιβατηγά πλοία όπου το εσωτερικό τους είναι διαμορφωμένο με καταστρώματα για την εξυπηρέτηση του σκοπού τους οι δίχρονοι κινητήρες είναι δύσκολο να βρουν εφαρμογή λόγω του μεγάλου ύψους τους. Επίσης σε τέτοιου είδους πλοία είναι απαραίτητη η ύπαρξη δύο μηχανών για λόγους ασφαλείας, έτσι η τοποθέτηση δύο δίχρονων μηχανών καθίσταται αδύνατη για χωροταξικούς λόγους καθώς και για λόγους αυξημένου βάρους.

Υπολογισμός Ισχύος

Το μέγεθος μιας μηχανής εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες και ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η αναπτυσσόμενη ισχύς. Ο αριθμός των κυλίνδρων καθορίζει την ισχύ της μηχανής και η ισχύς του κάθε κυλίνδρου καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη διάμετρο του εμβόλου (Bore) και τη διαδρομή του εμβόλου (Stroke).

Ο υπολογισμός της ισχύος ενός κυλίνδρου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

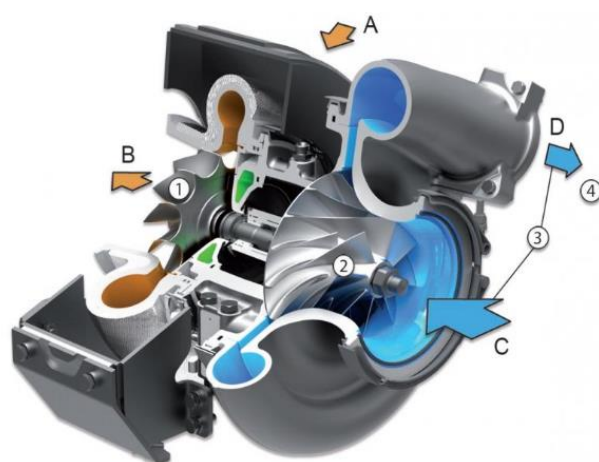
$$P = P_e * V_h * \frac{n}{30 * K}$$

- P: Ισχύς ανά κύλινδρο
- P_e : Μέση πραγματική πίεση
- V_h : Όγκος εμβολισμού κυλίνδρου, $V_h = A * Stroke$
- A: Επιφάνεια εμβόλου, $A = \frac{\pi * D^2}{4}$
- D_p : Διάμετρος εμβόλου
- Stroke: Διαδρομή εμβόλου
- n: Στροφές λειτουργίας κινητήρα
- K: συντελεστής (K=2 για δίχρονους κινητήρες, K=4 για τετράχρονους κινητήρες)

Τελικά η ισχύς του κινητήρα υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την ισχύ ενός κυλίνδρου με τον αριθμό κυλίνδρων του κινητήρα.

Για να μπορέσει ο δίχρονος ναυτικός κινητήρας να παρέχει τη ισχύ που του ζητείται είναι απαραίτητα κάποια συστήματα για τη λειτουργία του.

Όλοι οι μεγάλοι δίχρονοι ναυτικοί κινητήρες είναι υπερπληρωμένοι και φέρουν ψυγείο αέρα υπερπλήρωσης, αφενός για να αυξηθεί περαιτέρω η συγκέντρωση ισχύος για συγκεκριμένο μέγεθος μηχανής και για να επιτυγχάνεται καλύτερη σάρωση του κυλίνδρου, αφετέρου διότι έτσι επιτυγχάνεται εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω του στροβιλουπερπληρωτή. Τα καυσαέρια με την υψηλή θερμική ενέργεια που περιέχουν, κατά την έξοδό τους από το θάλαμο καύσης κινούν μια φτερωτή που είναι συνδεδεμένη με άξονα με μία άλλη φτερωτή που συμπιέζει αέρα στο θάλαμο σάρωσης. Ένας δίχρονος ναυτικός κινητήρας μπορεί να έχει από 1 μέχρι 4 στροβιλουπερπληρωτές ανάλογα τις απαιτήσεις του σε παροχή αέρα για δεδομένη παροχή καυσίμου.

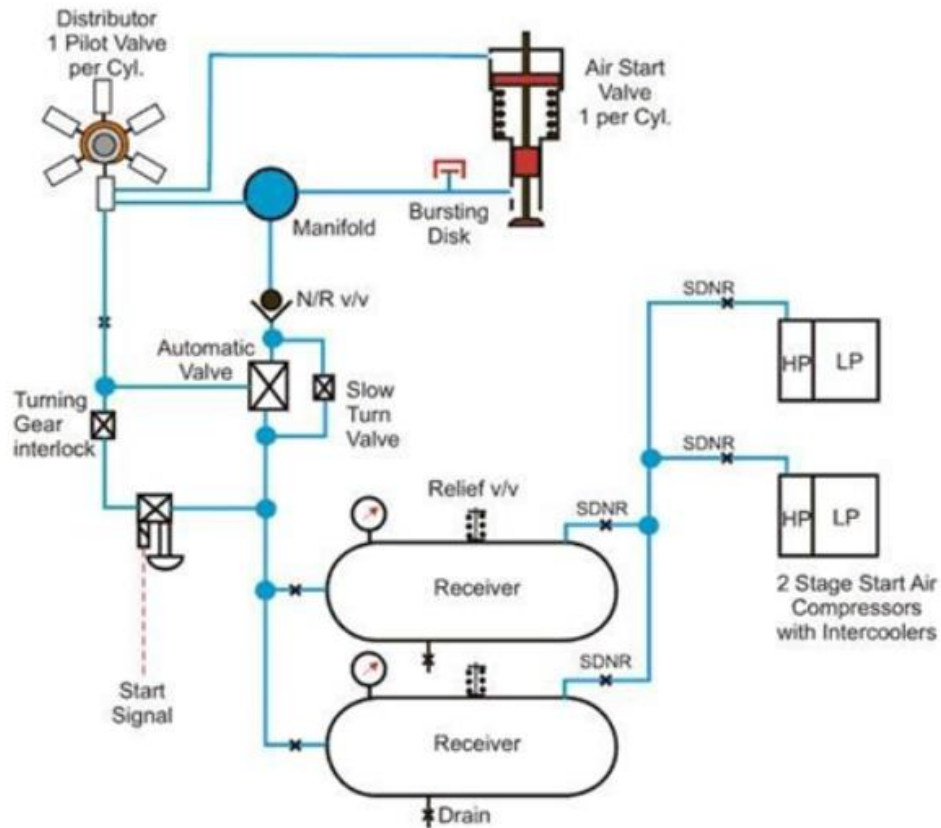


Εικόνα 4 : Στροβιλουπερπληρωτής σε Τομή

Κατά τη λειτουργία του κινητήρα σε χαμηλό φορτίο, (εκκίνηση, ελιγμοί), η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι χαμηλή, με αποτέλεσμα η ενέργεια του στροβίλου από μόνη της να μη μπορεί να παράσχει την απαιτούμενη πίεση σαρώσεως στα χαμηλά φορτία και επομένως να πρέπει υποβοηθηθεί με κάποια επιπρόσθετη ενέργεια. Αυτό μπορεί να συμβεί με ηλεκτροκίνητους φυσητήρες που παρέχουν την απαραίτητη ποσότητα αέρα ώστε η πίεση του αέρα σάρωσης να είναι τέτοια που να πραγματοποιείται ομαλά η καύση.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το σύστημα εκκίνησης των δίχρονων ναυτικών κινητήρων που γίνεται με πεπιεσμένο αέρα. Αυτό συμβαίνει λόγω των μεγάλων μαζών που πρέπει να κινηθούν και χρειάζονται μία αρχική ώθηση που δεν μπορεί να αποδοθεί από το καύσιμο ή μέσω ηλεκτρικής ενέργειας (μίζα). Έτσι υπάρχουν αεροσυμπιεστές που παρέχουν αέρα σε αεροφυλάκια και σε αυτά αποθηκεύεται ο πεπιεσμένος αέρας. Κατά την εκκίνηση ο πεπιεσμένος αέρας παρέχεται στον κύλινδρο που βρίσκεται στην κατάλληλη θέση (λίγο μετά το Άνω Νεκρό Σημείο) έτσι ώστε να αρχίσει η κίνηση του κινητήρα. Σε περίπτωση που δεν καταστεί δυνατή η εκκίνηση από την παροχή αέρα σε μόνο έναν κύλινδρο ο πεπιεσμένος αέρας παρέχεται και σε δεύτερο κύλινδρο. Ο πεπιεσμένος αέρας παρέχεται σε πίεση συνήθως ίση με 30 bar.

Ένα τυπικό σύστημα εκκίνησης δίχρονου ναυτικού κινητήρα παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5 : Σύστημα Εκκίνησης Πεπιεσμένου Αέρα

Η κύρια διάταξη ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα αποτελείται από τρία επιμέρους τμήματα:

1. Βάση
2. Σκελετός
3. Πώμα Κυλίνδρων

Υπάρχουν ουσιαστικά, τρία διαφορετικά τμήματα σε κάθε δίχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel.

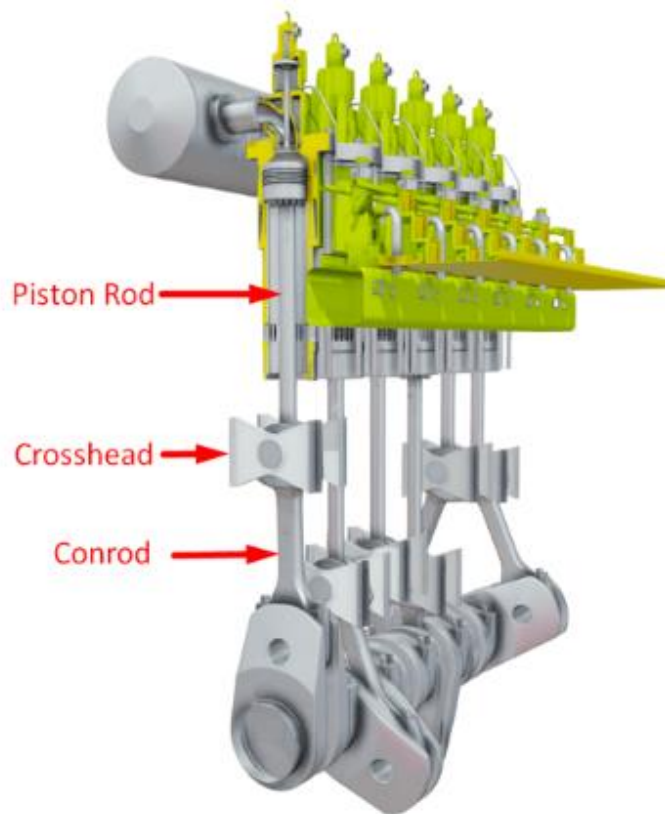
Η βάση του κινητήρα εδράζεται στον πυθμένα του πλοίου, στηρίζει τον κινητήρα και εξασφαλίζει την ευθυγράμμιση του άξονα. Η έδραση της βάσης πραγματοποιείται είτε με τάκους (σπανιότερα) είτε με ρητίνες σε υγρή μορφή που στερεοποιούνται, πληρώνοντας με αυτό τον τρόπο οποιοδήποτε κενό μεταξύ της βάσης του κινητήρα και του πυθμένα του πλοίου. Για την κατασκευή της βάσης του κινητήρα χρησιμοποιούνται κατάλληλα υλικά ώστε να την κάνουν όσο πιο ισχυρή και άκαμπτη γίνεται κρατώντας παράλληλα χαμηλά το βάρος της.

Στη βάση του κινητήρα τοποθετείται ο στροφαλοφόρος άξονας. Ο στροφαλοφόρος άξονας είναι από τα πιο βαριά και ακριβά εξαρτήματα του κινητήρα, κατασκευάζεται από τμήματα και είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή της παλινδρομικής κίνησης των εμβόλων σε περιστροφική. Το κάθε τμήμα αποτελείται από 2 βραχίονες (κιθάρες) που συνδέονται μεταξύ τους με το κάτω κομβίο διωστήρα και αποτελούν τον αγκώνα (crank throw). Οι αγκώνες συνδέονται μεταξύ τους με τα κομβία βάσεως που εδράζονται στη βάση του κινητήρα.



Εικόνα 6 : Στροφαλοφόρος Άξονας Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα

Ο σκελετός του κινητήρα συνδέει το συγκρότημα των κυλίνδρων με τη βάση του κινητήρα. Ο κάθε κύλινδρος περιλαμβάνει το έμβολο που εκτελεί παλινδρομική κίνηση, το βάκτρο που συνδέει το έμβολο με το διωστήρα και το διωστήρα που συνδέει το σύστημα εμβόλου-βάκτρου με το στροφαλοφόρο άξονα και μετατρέπει την παλινδρομική κίνηση σε περιστροφική. Επιπλέον στον σκελετό περιλαμβάνονται τα χιτώνια όπου μέσα σε αυτά πραγματοποιείται η κίνηση του εμβόλου και η καύση. Τα χιτώνια χρησιμεύουν στην καλύτερη απομόνωση του θαλάμου καύσης καθώς και στην προστασία του σώματος του κινητήρα από τις υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες εντός του θαλάμου καύσης.



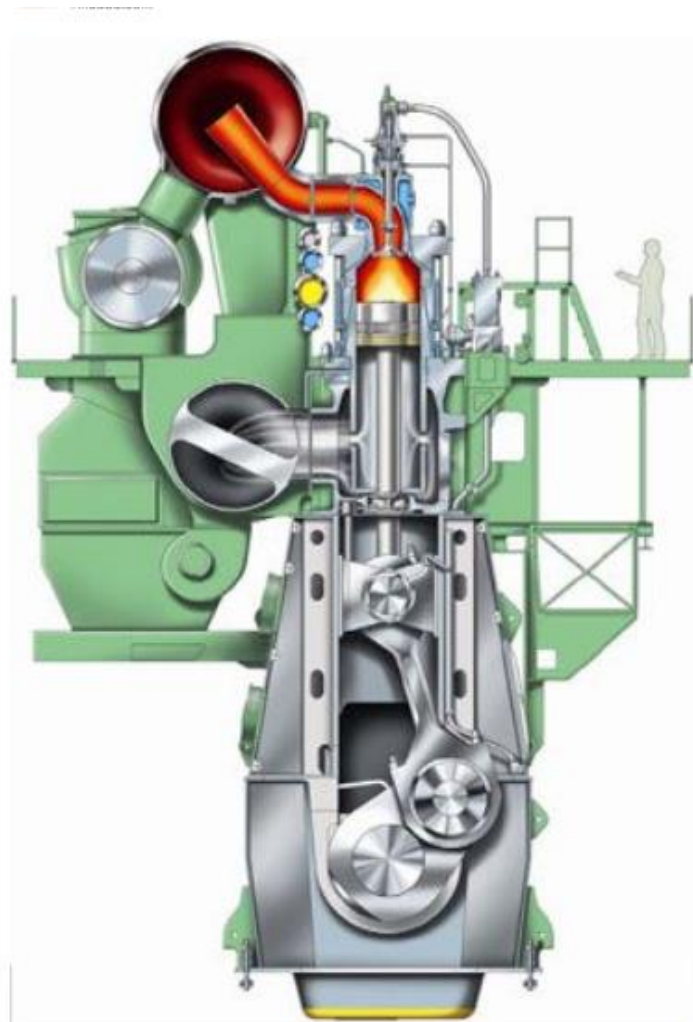
Εικόνα 7 : Σύστημα Εμβόλου-Βάκτρου-Διωστήρα.

Οι κύλινδροι χωρίζονται από το θάλαμο του στροφαλοφόρου μέσω ενός διαφράγματος, εμποδίζοντας τα προϊόντα της καύσης από τους κυλίνδρους να εισέλθουν και να αλλοιώσουν τη σύσταση του λιπαντικού ελαίου στο θάλαμο του στροφαλοφόρου άξονα. Το διάφραγμα επίσης λειτουργεί ως το κάτω όριο του θαλάμου αέρα σάρωσης το οποίο περιβάλλει το κατώτερο τμήμα του χιτωνίου. Ένα παρέμβυσμα επιτρέπει στο βάκτρο να διέρχεται διαμέσου του διαφράγματος ενώ διατηρεί τη στεγάνωση μεταξύ του θαλάμου αέρα σάρωσης και του θαλάμου του στροφαλοφόρου άξονα.

Η μετατροπή της παλινδρομικής κίνησης του συστήματος εμβόλου-βάκτρου στη περιστροφική κίνηση του στροφαλοφόρου άξονα μέσω του διωστήρα απαιτεί την ύπαρξη εδράνου το οποίο προσφέρεται από το ζύγωμα (σταυρός). Το άνω μέρος του διωστήρα συνδέεται με την κεφαλή του ζυγώματος, μέσω εδράνων, η οποία συνδέεται στο βάκτρο μέσω κοχλίων. Το κάτω μέρος του διωστήρα συνδέεται στο στροφαλοφόρο άξονα και όσο η μηχανή λειτουργεί, οι δυνάμεις στο βάκτρο και το διωστήρα ποικίλουν, ανάλογα τη γωνιακή μετατόπιση του διωστήρα που αλλάζει καθώς περιστρέφεται ο στροφαλοφόρος άξονας. Η γωνιακή αυτή μετατόπιση του διωστήρα ασκεί πλάγιες δυνάμεις στο στροφαλοφόρο άξονα και στο ζύγωμα. Οι δυνάμεις αυτές πρέπει να εξουδετερωθούν και ενώ η δύναμη στο στροφαλοφόρο άξονα αντιμετωπίζεται άμεσα από τα έδρανα του, αυτή του ζυγώματος πρέπει να αντιμετωπιστεί με τη χρήση πέδινων και ευθυντηρίων.

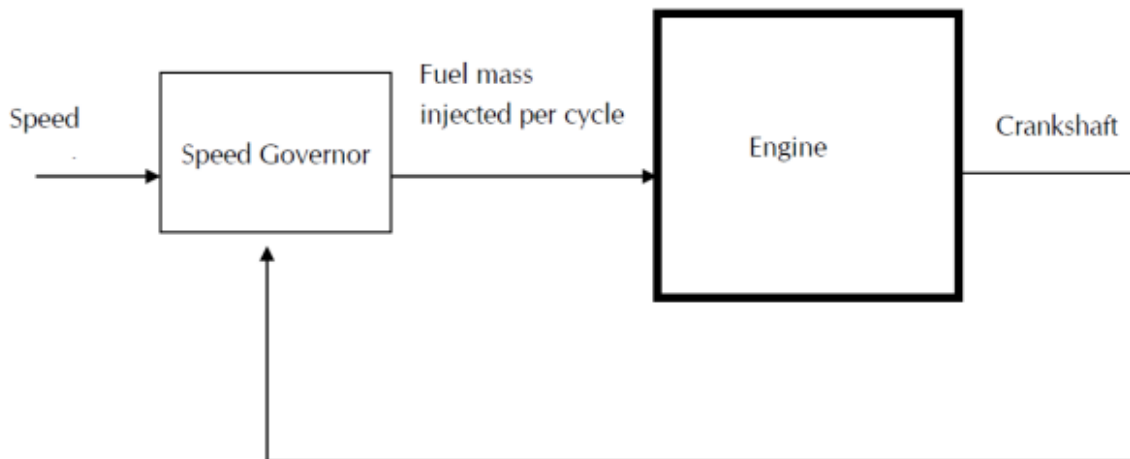
Όσον αφορά το πώμα των κυλίνδρων βρίσκονται οι αντλίες και οι εγχυτήρες καυσίμου, η βαλβίδα εξαγωγής κάθε κυλίνδρου η εισαγωγή των ηλεκτρικών φυσητήρων και η εισαγωγή αέρα για την εκκίνηση του κινητήρα. Ο χρονισμός της εγχύσεως του καυσίμου και της βαλβίδας εξαγωγής γίνεται είτε μηχανικά με τη χρήση εκκεντροφόρου άξονα, ο οποίος παίρνει κίνηση από το στροφαλοφόρο άξονα μέσω αλυσίδας σε παλαιότερες μηχανές, είτε στις πιο σύγχρονες μηχανές με ηλεκτρονικά μέσα με τη χρήση υδραυλικών επενεργητών, οπότε η χρήση του εκκεντροφόρου τείνει να εξαλειφθεί.

Τέλος στους ναυτικούς δίχρονους κινητήρες ενδιαφέρον παρουσιάζει το σύστημα λίπανσής τους. Αντίθετα με τις μεσόστροφες μηχανές χωρίς σταυρό, όπου ένα λιπαντικό λάδι χρησιμοποιείται για τη λίπανση όλης της μηχανής, οπότε πρέπει να γίνουν συμβιβασμοί ως προς τις ιδιότητες του, στις αργόστροφες μηχανές χρησιμοποιείται διαφορετικό λιπαντικό εντός του θαλάμου του στροφαλοφόρου για την λίπανση των εδράνων του και ξεχωριστό λιπαντικό (κυλινδρέλαιο) για τη λίπανση του θαλάμου καύσης, το οποίο έχει αλκαλικές ιδιότητες, για να αντιμετωπιστούν τα όξινα κατάλοιπα της καύσης. Το κυλινδρέλαιο καίγεται κι αυτό στο θάλαμο καύσης.



Εικόνα 8 : Τομή Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα

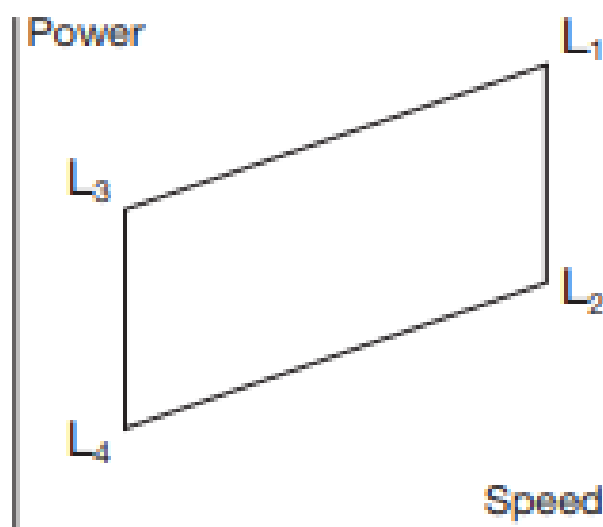
Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται και η μεταβατική απόκριση ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα. Κομβικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία έχει ο ρυθμιστής στροφών. Ο ρυθμιστής στροφών (Governor) είναι ένας μηχανισμός που ελέγχει τις στροφές του κινητήρα ανάλογα με το φορτίο του και παρεμβαίνει στην παροχή καυσίμου κάνοντας τις κατάλληλες ρυθμίσεις. Ο μηχανισμός αυτός είναι υπεύθυνος στη μόνιμη λειτουργία του κινητήρα για τη διατήρηση σταθερών στροφών και στη μεταβατική λειτουργία για την αλλαγή (αύξηση ή μείωση) των στροφών. Επιπλέον περιορίζει τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και ρυθμίζει τη σταθερότητα λειτουργίας του στις ελάχιστες στροφές. Κρίσιμο ρόλο έχει σε περίπτωση άσχημων καιρικών συνθηκών με κυματισμό που μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο του ξενερίσματος της έλικας του πλοίου. Σε αυτή την περίπτωση ο ρυθμιστής στροφών θα περιορίσει την παροχή καυσίμου ώστε να μην αυξηθούν ανεξέλεγκτα οι στροφές λειτουργίας του κινητήρα ελλείψει φορτίου από την προπέλα που θα οδηγούσε σε βλάβες του αξονικού συστήματος και των εδράνων στήριξης λόγω ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών. Ακόμα ο ρυθμιστής στροφών θέτει τους περιορισμούς για τη λειτουργία του κινητήρα σε κατάσταση υπερφόρτιση που είναι οι εξής: Περιοριστής ροπής, Περιοριστής πίεσης αέρα σάρωσης που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.2.3. Η βασική αρχή λειτουργίας του ρυθμιστή στροφών παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 9 : Βασική Αρχή Λειτουργίας Ρυθμιστή Στροφών

2.2.2 Διάγραμμα Περιοχής Λειτουργίας Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα

Στους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες, ο κατασκευαστής προσφέρει τη δυνατότητα ρυθμίσεως της ισχύος και των στροφών λειτουργίας σύμφωνα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε πλοίου. Το διάγραμμα όπου φαίνεται το εύρος δυνατότητας λειτουργίας ονομάζεται Διάγραμμα Περιοχής Λειτουργίας (Layout Diagram). Το Διάγραμμα Περιοχής Λειτουργίας περιορίζεται από δύο ευθείες μέσης πίεσης (mep) L1 - L3 και L2 - L4 και από δύο ευθείες σταθερής ταχύτητας της μηχανής, L1 - L2 και L3 - L4. Το σημείο L1 αντιστοιχεί στην ονομαστική μέγιστη συνεχή ισχύ του συγκεκριμένου τύπου μηχανής. Μέσα στο πεδίο λειτουργίας υπάρχει απόλυτη ελευθερία να επιλέξει κανείς και να ορίσει ως σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας (Maximum Continuous Rating – MCR) οποιοδήποτε σημείο εντός του διαγράμματος. Η επιλογή του σημείου γίνεται μηχανικά μέσω της ποσότητας καυσίμου που παρέχεται, τον χρονισμό των βαλβίδων εξαγωγής, το λόγο συμπίεσης και τη σύζευξη του υπερπληρωτή. Ο ιδανικός προσδιορισμός του σημείου μέγιστης συνεχούς λειτουργίας είναι κρίσιμος παράγοντας για τη λειτουργία του πλοίου. Θα πρέπει να πραγματοποιηθεί με βάση τα χαρακτηριστικά του πλοίου και την εκτιμώμενη αντίσταση, καθώς και τη ταχύτητα υπηρεσίας που απαιτείται για το πλοίο. Στην παρακάτω εικόνα ακολουθεί ποιοτικό Διάγραμμα Περιοχής Λειτουργίας δίχρονου ναυτικού κινητήρα.

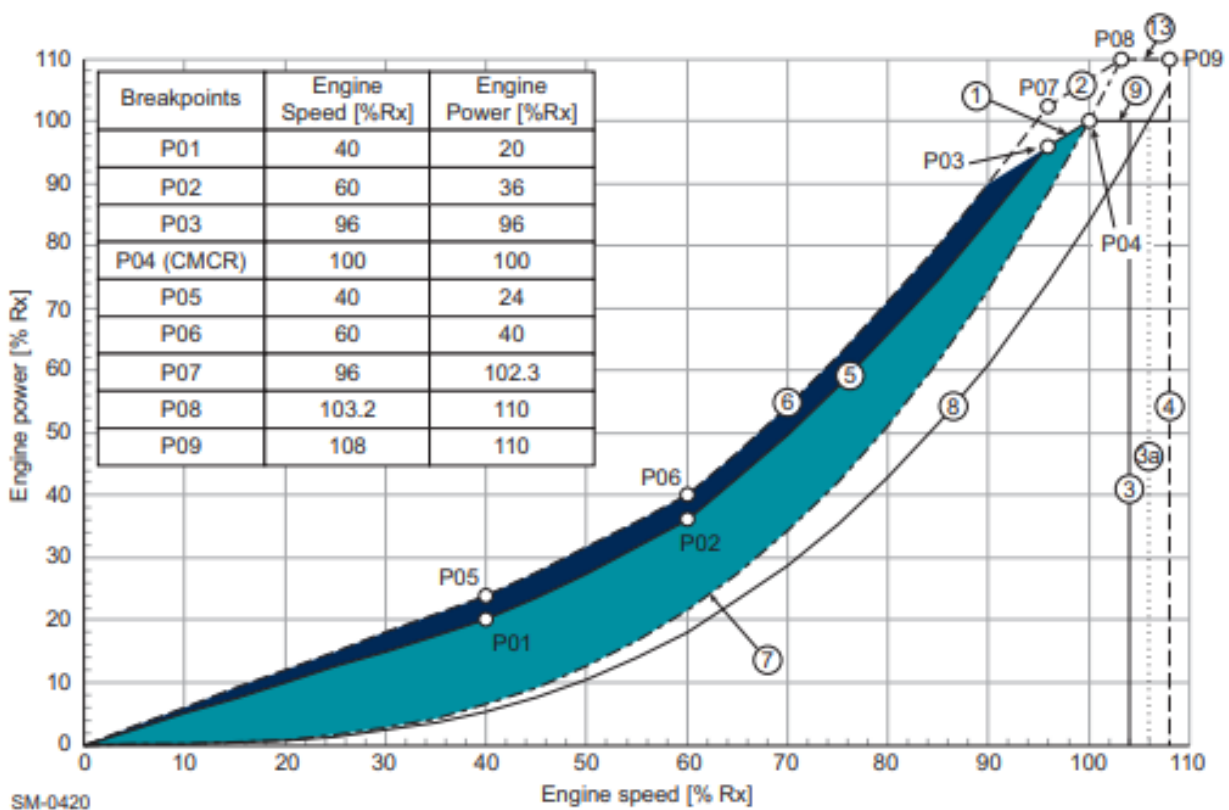


Εικόνα 10 : Διάγραμμα Περιοχής Λειτουργίας Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα

2.2.3 Διάγραμμα Φόρτισης Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα

Το διάγραμμα φόρτισης του κινητήρα (Loading Diagram) καθορίζει τα όρια ισχύος και στροφών για συνεχή και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας καθώς και για υπερφορτισμένη κατάσταση λειτουργίας, ενός εγκατεστημένου κινητήρα που έχει σημείο βέλτιστης λειτουργίας και καθορισμένο σημείο MCR που ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του πλοίου.

Στην παρακάτω εικόνα ακολουθεί ποιοτικό Διάγραμμα Φόρτισης δίχρονου ναυτικού κινητήρα, μαζί με καμπύλες λειτουργίας της έλικας που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.2.4. Το συγκεκριμένο διάγραμμα παρέχεται από την κατασκευάστρια εταιρία δίχρονων ναυτικών κινητήρων WinGD και αφορά όλους τους κινητήρες κατασκευής της.



Εικόνα 11 : Διάγραμμα Φόρτισης Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα

Παρακάτω επεξηγούνται οι καμπύλες του Διαγράμματος Φόρτισης του κινητήρα.

- Γραμμή 1: Η γραμμή 1 αντιπροσωπεύει τη μέγιστη μέση ενεργή πίεση για συνεχή λειτουργία του κινητήρα.
- Γραμμή 2: Η γραμμή 2 αφορά την υπερφόρτιση του κινητήρα. Αντιπροσωπεύει τη μέγιστη μέση ενεργή πίεση και είναι διαθέσιμη κατά τις δοκιμές του κινητήρα και σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.
- Γραμμή 3: Η γραμμή 3 αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής που μπορεί να γίνει αποδεκτή για συνεχή λειτουργία και ισούται με 104% του σημείου μέγιστης συνεχούς λειτουργίας (MCR).
- Γραμμή 4: Η γραμμή 4 αντιπροσωπεύει το όριο υπερτάχυνσης του κινητήρα. Κατά τη διάρκεια των θαλάσσιων δοκιμών, και μόνον, η μέγιστη ταχύτητα μπορεί να επεκταθεί ως το 108% του σημείου μέγιστης συνεχούς λειτουργίας (MCR).
- Γραμμή 5: Η γραμμή 5 αντιπροσωπεύει το όριο ισχύος συνεχούς λειτουργίας. Η γραμμή 5 είναι μια καμπύλη που χωρίζεται σε επιμέρους καμπύλες για να σχηματιστεί ολόκληρη. Για τη δημιουργία της υπάρχουν συντελεστές και ο τρόπος κατασκευής της περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.
- Γραμμή 6: Η γραμμή 6 αντιπροσωπεύει το μέγιστο όριο ισχύος σε μεταβατικές συνθήκες. Η γραμμή 6 είναι μια καμπύλη που χωρίζεται σε επιμέρους καμπύλες για να σχηματιστεί ολόκληρη. Για τη δημιουργία της υπάρχουν συντελεστές και ο τρόπος κατασκευής της περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.
- Γραμμή 7: Η γραμμή 7 αντιστοιχεί στην καμπύλη της έλικας που διέρχεται από το σημείο συνεχούς λειτουργίας (MCR) και ακολουθεί το νόμο της έλικας. Η γραμμή αυτή αντιστοιχεί στην καμπύλη βαριάς λειτουργίας της έλικας δηλαδή, για ρυπασμένη γάστρα και άσχημες καιρικές συνθήκες.
- Γραμμή 8: Η γραμμή 8 αντιστοιχεί στην καμπύλη ελαφριάς λειτουργίας της έλικας, δηλαδή για καθαρή γάστρα και καλές καιρικές συνθήκες και ακολουθεί το νόμο της έλικας.
- Γραμμή 9: Η γραμμή 9 αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ισχύ για συνεχή λειτουργία του κινητήρα.
- Γραμμή 13: Η γραμμή 13 αντιστοιχεί στο 110% της μέγιστους συνεχούς ισχύος του κινητήρα και είναι το όριο υπερφόρτισής του. Η γραμμή 13 είναι διαθέσιμη στις δοκιμές του κινητήρα και σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

Στο Διάγραμμα Φόρτισης του κινητήρα ορίζονται οι παρακάτω περιοχές λειτουργίας:

- Η περιοχή που σχηματίζεται από τις γραμμές 1, 3, 5 και 9 είναι η περιοχή εντός της οποίας πρέπει να λειτουργεί ο κινητήρας. Στην περιοχή αυτή επιτρέπεται η συνεχής λειτουργία του κινητήρα χωρίς χρονικούς περιορισμούς. Η περιοχή που περιορίζεται από τη γραμμή 7, τη γραμμή 9 και τη γραμμή 3 αφορά συνεχή λειτουργία του κινητήρα, ενώ η περιοχή μεταξύ της γραμμής 7, της γραμμής 5 και της γραμμής 1 αφορά τη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα.
- Η περιοχή μεταξύ της γραμμής 1, της γραμμής 5 και της γραμμής 6 που ονομάζεται «εύρος λειτουργίας με χρονικό όριο», είναι διαθέσιμη μόνο για μεταβατικές συνθήκες, π.χ. δοκιμές θαλάσσης ή κατά τη διάρκεια αναγκαίας έκτακτης επιτάχυνσης. Ο κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει σε αυτήν την περιοχή μόνο για περιορισμένες χρονικές περιόδους (1 ώρα κάθε 24 ώρες).
- Η περιοχή πάνω από τη γραμμή 1 και τη γραμμή 9 είναι το εύρος υπερφόρτωσης του κινητήρα. Η λειτουργία του κινητήρα επιτρέπεται σε αυτό το εύρος για μέγιστη διάρκεια μίας ώρας κατά τη διάρκεια δοκιμών θαλάσσης, παρουσία εξουσιοδοτημένων εκπροσώπων του κατασκευαστή του κινητήρα.
- Η περιοχή μεταξύ των γραμμών 3 και 4 είναι το εύρος υπερτάχυνσης του κινητήρα. Η λειτουργία του κινητήρα επιτρέπεται σε αυτό το εύρος μόνο κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών θαλάσσης, παρουσία εξουσιοδοτημένων εκπροσώπων του κατασκευαστή του κινητήρα.

Οι γραμμές 2,6,13 αντιπροσωπεύουν τους περιορισμούς για λειτουργία σε υπερφόρτιση, οι οποίοι υλοποιούνται μέσω ηλεκτρονικού ελεγκτή περιορισμού φορτίου (governor) και είναι οι εξής δύο:

1. Περιοριστής ροπής

Ο σκοπός της λειτουργίας του περιοριστή ροπής είναι να εξασφαλίσει την λειτουργία του κινητήρα εντός της επιτρεπτής περιοχής του διαγράμματος φόρτισης του. Ο αλγόριθμος του περιοριστή ροπής συγκρίνει την υπολογισμένη θέση του κανόνα καυσίμου (δηλαδή την ποσότητα του καυσίμου) και την πραγματικά μετρούμενη ταχύτητα του κινητήρα με μία καμπύλη αναφοράς του περιοριστή, που δίνει την μέγιστη επιτρεπτή θέση του κανόνα καυσίμου για μια δεδομένη ταχύτητα του κινητήρα. Εάν η υπολογισμένη θέση του κανόνα καυσίμου είναι πάνω από αυτήν την καμπύλη, η προκύπτουσα θέση του κανόνα θα ελαττωθεί κατάλληλα.

2. Περιοριστής πίεσης αέρα σάρωσης

Ο σκοπός του περιοριστή πίεσης του αέρα σάρωσης είναι να εξασφαλίσει ότι ο κινητήρας δεν υπερτροφοδοτείται με καύσιμο κατά την επιτάχυνση, όπως για παράδειγμα κατά τη διάρκεια ελιγμών. Ο αλγόριθμος του περιοριστή πίεσης αέρα σάρωσης συγκρίνει την υπολογισμένη θέση του κανόνα καυσίμου και τη μετρούμενη πίεση του αέρα σάρωσης με μία καμπύλη αναφοράς του περιοριστή, που δίνει τη μέγιστη επιτρεπτή θέση του κανόνα καυσίμου σε μία δεδομένη πίεση αέρα σάρωσης. Εάν η υπολογισμένη θέση του κανόνα καυσίμου είναι πάνω από αυτήν την καμπύλη, η προκύπτουσα θέση του κανόνα θα μειωθεί κατάλληλα. Αυτή η καμπύλη αναφοράς του περιοριστή ρυθμίζεται έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι επαρκής αέρας θα είναι πάντα διαθέσιμος για πλήρη καύση.

Υπολογισμός Καμπυλών Διαγράμματος Φόρτισης

Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρία δίχρονων ναυτικών κινητήρων WinGD, το διάγραμμα φόρτισης του κινητήρα κατασκευάζεται με βάση τον παρακάτω τύπο, και χωρίζεται σε πέντε περιοχές που προσδιορίζονται από τους κατάλληλους συντελεστές με βάση τον πίνακα που ακολουθεί.

$$\frac{P}{P_{MCR}} = C_2 * \left(\frac{n}{n_{MCR}}\right)^2 + C_1 * \left(\frac{n}{n_{MCR}}\right) + C_0$$

Όπου:

- P: η ισχύς λειτουργίας του κινητήρα
- P_{MCR} : η ισχύς μέγιστους συνεχούς λειτουργίας
- n: οι στροφές λειτουργίας του κινητήρα
- n_{MCR} : οι στροφές μέγιστους συνεχούς λειτουργίας
- C_2, C_1, C_0 : σταθεροί συντελεστές

Πίνακας 1 : Σταθεροί Συντελεστές Εξίσωσης Διαγράμματος Φόρτισης

Line no.	Range (n/n_{CMCR})	C2	C1	C0
Line 5	0.00 - 0.40	0.000	0.500	0.000
	0.40 - 0.60	0.500	0.300	0.000
	0.60 - 0.96	1.111	-0.067	0.000
	0.96 - 1.00	0.000	1.000	0.000
	1.00 - 1.08	0.000	0.000	1.000

Κατά την επιτάχυνση του κινητήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η περιοχή υπερφόρτισης του διαγράμματος μεταξύ της γραμμής 1, της γραμμής 5 και της γραμμής 6 εφόσον είναι περιορισμένη χρονικά η διάρκειά της. Οι συντελεστές για τη γραμμή 6 (υπερφόρτιση για σύντομο χρονικό διάστημα) δίνονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 2 : Σταθεροί Συντελεστές Εξίσωσης Διαγράμματος Υπερφόρτισης

Line no.	Range (n/n_{CMCR})	C32	C1	C0
Line 6	0.00 - 0.40	0.000	0.600	0.000
	0.40 - 0.60	0.330	0.468	0.000
	0.60 - 0.96	1.110	0.000	0.000
	0.96 - 1.032	0.000	1.066	0.000
	1.032 - 1.08	0.000	0.000	1.100

2.2.4 Νόμος Έλικας

Ο νόμος της έλικας διατυπώνεται ως εξής: “η αναγκαία ισχύς που απορροφάται από την έλικα είναι ανάλογη με την τρίτη δύναμη του ρυθμού περιστροφής της”.

Η αντίσταση R για πλοία χαμηλής ταχύτητας είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της ταχύτητας του πλοίου V , δηλαδή, $R = c \cdot V^2$, όπου c είναι μία σταθερά. Η απαιτούμενη ισχύς P είναι ανάλογη προς την τρίτη δύναμη της ταχύτητας V και συνεπώς: $P = R \cdot V = c \cdot V^3$
Για ένα πλοίο με έλικα σταθερού βήματος δηλαδή, έλικα της οποίας το βήμα δεν είναι δυνατό να μεταβληθεί η ταχύτητα V του πλοίου θα είναι ανάλογη προς τον ρυθμό περιστροφής n της έλικας, δηλαδή: $V = k \cdot n$, όπου k μία σταθερά. Έτσι προκύπτει τελικά η παρακάτω εξίσωση που προσδιορίζει το νόμο της έλικας.

$$P = c \cdot n^3$$

Πραγματικές μετρήσεις έδειξαν ότι η σχέση μεταξύ ισχύος και στροφών μηχανής για μια δεδομένη κατάσταση καιρού είναι αρκετά λογική. Ο νόμος της έλικας μπορεί, φυσικά, να χρησιμοποιηθεί για όμοιες λειτουργίες του πλοίου. Όταν για παράδειγμα, η γάστρα του πλοίου μετά από κάποιο χρόνο λειτουργίας έχει ρυπανθεί και έτσι έχει γίνει πιο τραχεία, το πεδίο του ομόρρου θα είναι διαφορετικό από αυτό ενός πλοίου με ομαλή (καθαρή) γάστρα όπως ήταν στις δοκιμές παραλαβής του. Ένα πλοίο με ρυπασμένη γάστρα θα αντιμετωπίζει συνεπώς αυξημένη αντίσταση, το οποίο θα έχει ως αποτέλεσμα “υψηλή φόρτιση της έλικας”, δηλαδή, για την ίδια ισχύ στην έλικα, ο ρυθμός περιστροφής της θα είναι χαμηλότερος. Ο νόμος της έλικας ισχύει για μία άλλη “υψηλότερη” καμπύλη έλικας από αυτή που ισχύει για μια καθαρή γάστρα. Οι ίδιες κατ’ αναλογία συνθήκες ισχύουν και όταν το πλοίο ταξιδεύει σε άσχημο καιρό ή αντίθετα στο ρεύμα. Επίσης, εάν το πλοίο πλέει σε κατάσταση ερματισμού, δηλαδή με χαμηλότερο βύθισμα, ο νόμος της έλικας ισχύει για μία “χαμηλότερη” καμπύλη έλικας, δηλαδή, για την ίδια ισχύ έλικας, ο ρυθμός περιστροφής της θα είναι υψηλότερος.

Ο νόμος της έλικας αποτελεί πολύ χρήσιμη προσέγγιση για εκπόνηση προκαταρκτικής μελέτης και εκτίμησης της ισχύος πρόωσης που απαιτείται σε ένα πλοίο.

Οπότε για ένα πλοίο με έλικα σταθερού βήματος, η ισχύς μπορεί να εκφραστεί ως μια εκθετική συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής n με εκθέτη i , δηλαδή: $P = c \cdot n^i$
Οι εκθετικές αυτές συναρτήσεις μπορούν να παρασταθούν ως γραμμικές σε λογαριθμική κλίμακα, μετασχηματίζοντας την παραπάνω σχέση στη μορφή $y = \alpha \cdot x + \beta$ ως εξής:

$$\log P = i \cdot \log n + \log c$$

Συνεπώς οι καμπύλες της έλικας θα είναι παράλληλες στις ευθείες με κλίση $i = 3$. Έτσι λοιπόν στο πεδίο λειτουργίας και στο διάγραμμα φόρτισης του κινητήρα, χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα μετατρέποντας τις διάφορες καμπύλες σε απλές ευθείες γραμμές.

Για την εύρεση της σταθεράς c χρησιμοποιείται ένα σημείο (P (ισχύς), n (στροφές)) της λειτουργίας του πλοίου.

Η καμπύλη του νόμου της έλικας παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2.2.3 (Διάγραμμα Φόρτισης Ναυτικού Κινητήρα). Η καμπύλη 8 αφορά καθαρή γάστρα και καλές καιρικές συνθήκες, ενώ η καμπύλη 7 που είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά σε σχέση με τη καμπύλη 8 αφορά ρυπασμένη γάστρα και άσχημες καιρικές συνθήκες.

2.2.5 Εργοστασιακές Δοκιμές Κινητήρα (Shop Test)

Οι εργοστασιακές δοκιμές ή Shop Test του κινητήρα πραγματοποιούνται στην ξηρά πριν ο κινητήρας παραδοθεί στο πλοίο. Αντί για έλικα ο κινητήρας συνδέεται με υδραυλική πέδη που ακολουθεί το νόμο της έλικας για τη ροπή που απαιτείται. Στις εργοστασιακές δοκιμές του κινητήρα που μελετάται έγιναν δοκιμές για τα εξής φορτία: 25%, 50%, 75%, 100%. Τα μεγέθη που μελετώνται από τις εργοστασιακές δοκιμές είναι τα εξής:

- Ισχύς κινητήρα
- Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα
- Δύναμη πέδης
- Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων από κάθε κύλινδρο
- Θερμοκρασία καυσαερίων στην είσοδο και στην έξοδο του στροβιλουπερπληρωτή
- Μέγιστη πίεση σε κάθε κύλινδρο
- Πίεση συμπίεσης σε κάθε κύλινδρο
- Θερμοκρασίες και πιέσεις νερού ψύξεως και λιπαντικών για κάθε σύστημα του κινητήρα
- Ειδική κατανάλωση καυσίμου και κυλινδρελαίου
- Πίεση και θερμοκρασία αέρα σάρωσης
- Πτώση πίεσης στο ψυγείο αέρα υπερπλήρωσης

Με βάση τις εργοστασιακές δοκιμές κατασκευάζονται τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα Πίεσης Κυλίνδρου-Γωνία στροφαλοφόρου άξονα (κεφάλαιο 3.4) για τα τέσσερα σημεία λειτουργίας (25%,50%,75%,100%), όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.4.1.

Τα κυριότερα στοιχεία των εργοστασιακών δοκιμών του κινητήρα που μελετάται (ισχύς, ταχύτητα περιστροφής κινητήρα) παρουσιάζονται παρακάτω για τα τέσσερα φορτία των δοκιμών.

Πίνακας 3 : Φορτία Κινητήρα

Φορτίο Κινητήρα (%)	Ισχύς Κινητήρα (kW)	Ταχύτητα Περιστροφής Κινητήρα (rpm)
25	1588	62.4
50	3175	78.6
75	4763	89.9
100	6350	99

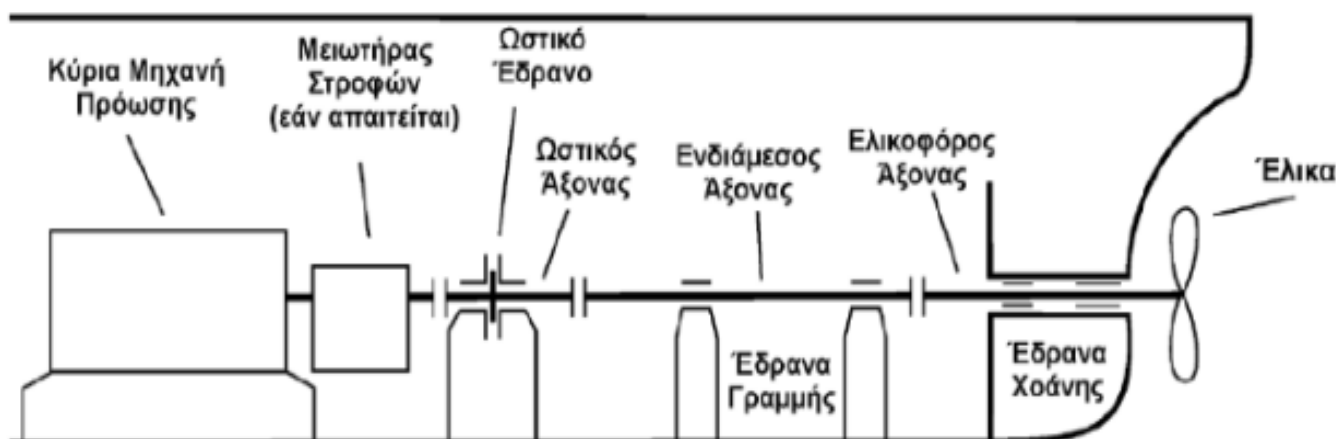
2.3 Εγκατάσταση Πρόωσης Πλοίου

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος πρόωσης για ένα συγκεκριμένο πλοίο είναι μία αρκετά πολύπλοκη διαδικασία. Προϋποθέτει την εξέταση πολλών εναλλακτικών λύσεων, που είναι τεχνολογικά διαθέσιμες τη δεδομένη χρονική στιγμή, σε συνάρτηση με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη λήψη της απόφασης είναι πολλοί, ενώ αρκετές είναι πλέον και οι εναλλακτικές επιλογές.

Οι βασικότερες επιλογές για την πρόωση ενός εμπορικού ή επιβατηγού πλοίου είναι η τοποθέτηση αργόστροφης δίχρονης πετρελαιομηχανής με απ' ευθείας σύνδεση έλικας σταθερού βήματος, είτε μεσόστροφης τετράχρονης πετρελαιομηχανής με έλικα σταθερού ή μεταβλητού βήματος, συνδεδεμένη με τη μηχανή μέσω μειωτήρα στροφών. Στα εμπορικά πλοία οι δίχρονοι ναυτικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται κατά κόρον λόγω των πλεονεκτημάτων τους, όπως αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2.2. Εκτός από την κύρια μηχανή του πλοίου μία εγκατάσταση πρόωσης περιλαμβάνει επίσης το αξονικό σύστημα του πλοίου που είναι υπεύθυνο για την μεταφορά της ισχύος από την μηχανή και τέλος την προπέλα η οποία είναι υπεύθυνη για την πρόωσή του μετατρέποντας την περιστροφική κίνηση της μηχανής σε δύναμη ώσης.

Μία τυπική εγκατάσταση πρόωσης ενός πλοίου ακολουθεί στην παρακάτω εικόνα.

Σε αυτήν παρουσιάζεται η κύρια μηχανή του πλοίου, δίχρονη ή τετράχρονη, ο μειωτήρας που σε περίπτωση δίχρονων μηχανών απουσιάζει, το ωστικό έδρανο που συνήθως βρίσκεται εντός του σώματος της κύριας μηχανής, τα ενδιάμεσα έδρανα ή έδρανα ολίσθησης που στηρίζουν το βάρος του άξονα, το αξονικό σύστημα του πλοίου, τα έδρανα χοάνης και η έλικα του πλοίου.



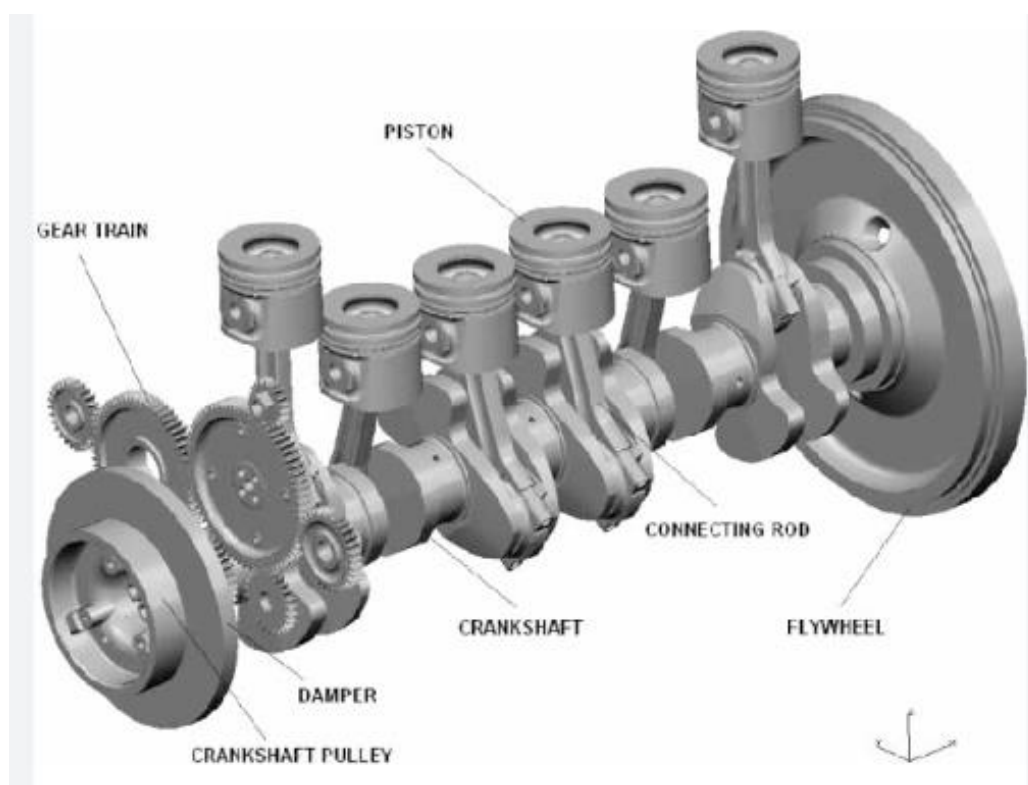
Εικόνα 12 : Τυπικό Σύστημα Εγκατάστασης Πρόωσης Πλοίου

Κύρια Μηχανή Πρόωσης

Η κύρια μηχανή πρόωσης είναι υπεύθυνη για την παραγωγή της απαιτούμενης ισχύος που θα κινήσει το πλοίο. Το στοιχείο που είναι υπεύθυνο για την περιστροφική κίνηση είναι ο στροφαλοφόρος άξονας. Ο στροφαλοφόρος άξονας μπορεί να διαχωριστεί σε επιμέρους στοιχεία:

- Διακριτό σύστημα μαζών αποτελούμενο από το τμήμα του στροφαλοφόρου που συνδέεται με το σύστημα διωστήρας-βάκτρο-έμβολο.
- Αποσβεστήρας
- Σφόνδυλος

Ο διαχωρισμός του στροφαλοφόρου άξονα στα παραπάνω επιμέρους τμήματα είναι σημαντικός για τον καθορισμό των δυναμικών φαινομένων που μελετώνται στην παρούσα εργασία, μέσω της μοντελοποίησης της εγκατάστασης πρόωσης σε ένα σύστημα διακριτών μαζών.



Εικόνα 13 : Ανάλυση Κινητήρα

Αποσβεστήρας

Λόγω των χρονικά μεταβαλλόμενων δυνάμεων που ασκούνται σε έναν δίχρονο ναυτικό κινητήρα (δυνάμεις λόγω καύσης, αδρανειακές δυνάμεις) αναπτύσσονται στο αξονικό σύστημα στρεπτικές ταλαντώσεις. Σκοπός του αποσβεστήρα είναι η μείωση του πλάτους των στρεπτικών ταλαντώσεων. Ο αποσβεστήρας συνήθως τοποθετείται στο ελεύθερο άκρο του στροφαλοφόρου και αποτελείται από ένα κύριο και ένα δευτερεύον τμήμα. Μεταξύ αυτών των τμημάτων, παρευρίσκονται χαλύβδινα φύλλα ελατηρίων σχηματίζοντας θαλάμους που είναι γεμάτοι με λάδι υπό πίεση. Τα χαλύβδινα ελατήρια είναι ρυθμισμένα για να βελτιστοποιούν τη φυσική συχνότητα κάθε συστήματος. Το λάδι χρησιμοποιείται για τη μείωση των στρεπτικών ταλαντώσεων με υδραυλική απόσβεση. Η ελαστικότητα του αποσβεστήρα καθορίζεται από το σχήμα και τον αριθμό των ελατηρίων του. Έτσι, το στρεπτικό σύστημα αποσυντονίζεται και ο πιο κρίσιμος συντονισμός εξαλείφεται, μειώνοντας παράλληλα και τις υπολειπόμενες στρεπτικές ταλαντώσεις.



Εικόνα 14 : Αποσβεστήρας Ναυτικού Κινητήρα (Geislinger Damper)

Σφόνδυλος

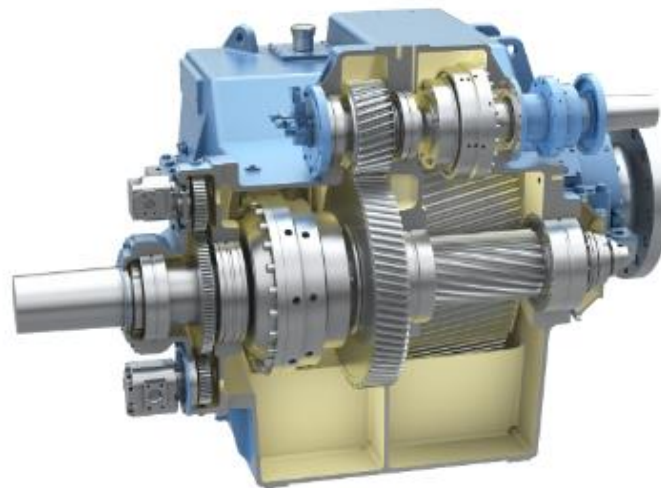
Ο σφόνδυλος είναι ένα εξάρτημα με μεγάλη μάζα και μεγάλη ροπή αδράνειας. Σκοπός της ύπαρξής του είναι να συμβάλει στην προσπάθεια του κινητήρα να τροφοδοτεί σταθερά με κινητική ενέργεια το σύστημα πρόωσης του πλοίου. Λόγω της μεγάλης του αδράνειας η κινητική ενέργεια που αποκτά μεταβάλλεται σε μικρό βαθμό από τη μη σταθερή ροπή που παρέχουν οι κύλινδροι λόγω της καύσης, επιτρέποντας στο σύστημα να διατηρεί σταθερή την ταχύτητα περιστροφής του. Η χρησιμότητα του σφονδύλου είναι ακόμα μεγαλύτερη σε μηχανές με μικρό αριθμό κυλίνδρων (5,6) όπου το χρονικό διάστημα μεταξύ της καύσης των κυλίνδρων είναι μεγαλύτερο από ότι σε πολυκύλινδρες μηχανές. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένας κινητήρας πλοίου όπου φαίνεται καθαρά ο σφόνδυλος.



Εικόνα 15 : Σφόνδυλος Ναυτικού Κινητήρα

Μειωτήρας Στροφών

Ο μειωτήρας στροφών χρησιμοποιείται σε μεσόστροφους κινητήρες, αποτελείται από ένα σύστημα γρναζιών και έχει ως στόχο την μείωση των στροφών που παραλαμβάνει η προπέλα του πλοίου από τον κινητήρα καθώς ο μέγιστος βαθμός απόδοσης της παρουσιάζεται σε χαμηλές στροφές λειτουργίας. Ο λόγος μείωσης του μειωτήρα προκύπτει από τις ιδανικές στροφές λειτουργίες της μηχανής και της έλικας του πλοίου.



Εικόνα 16 : Μειωτήρας Στροφών σε Τομή

Αξονικό Σύστημα

Το αξονικό σύστημα του πλοίου αποτελείται συνήθως από 2 ή και περισσότερους άξονες ανάλογα το μήκος του. Ο ένας άξονας ονομάζεται ελικοφόρος άξονας ή άξονας προπέλας και σε αυτόν βρίσκεται συνδεδεμένη η έλικα του πλοίου. Το πρωαίο άκρο του έχει ενσωματωμένη φλάντζα για την σύνδεση του με τους ενδιάμεσους άξονες, ενώ το πρυμναίο άκρο της ατράκτου φέρει κωνική μορφή και καταλήγει σε κατάλληλο σπείρωμα. Η έλικα με την αντίστοιχη κωνική μορφή προσαρμόζεται πάνω στην άτρακτο και σφίγγει με ένα ανεξάρτητο περικόχλιο, του οποίου η φορά συσφίξεως είναι αντίθετη από την φορά της περιστροφής της έλικας κατά την πρόσω κίνηση. Η στρεπτική ροπή μεταφέρεται από τον ελικοφόρο άξονα στην έλικα μέσω τριβής, λόγω της ισχυρής δυνάμεως συσφίξεως που πραγματοποιείται από το περικόχλιο.



Εικόνα 17 : Ελικοφόρος Άξονας

Ο άλλος άξονας ονομάζεται ενδιάμεσος και συνδέει την κύρια μηχανή του πλοίου με τον ελικοφόρο άξονα. Ο ενδιάμεσος άξονας στα άκρα του έχει ενσωματωμένες φλάντζες που κατασκευάζονται από μαλακό σφυρήλατο χάλυβα. Σε περίπτωση που η κύρια μηχανή του πλοίου δεν βρίσκεται τελείως στην πρύμνη του πλοίου, η ύπαρξη περισσότερων από έναν ενδιάμεσους άξονα κρίνεται αναγκαία. Τα πλοία που συναντάται πιο συχνά η ύπαρξη μεγάλων αξονικών συστημάτων άρα και περισσότερων του ενός ενδιάμεσους άξονα είναι τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships) όπου λόγω της λεπτόγραμμης γάστρας τους η κύρια μηχανή τοποθετείται πιο πλώρα σε σχέση με πλοία όπως φορτηγά ή δεξαμενόπλοια.



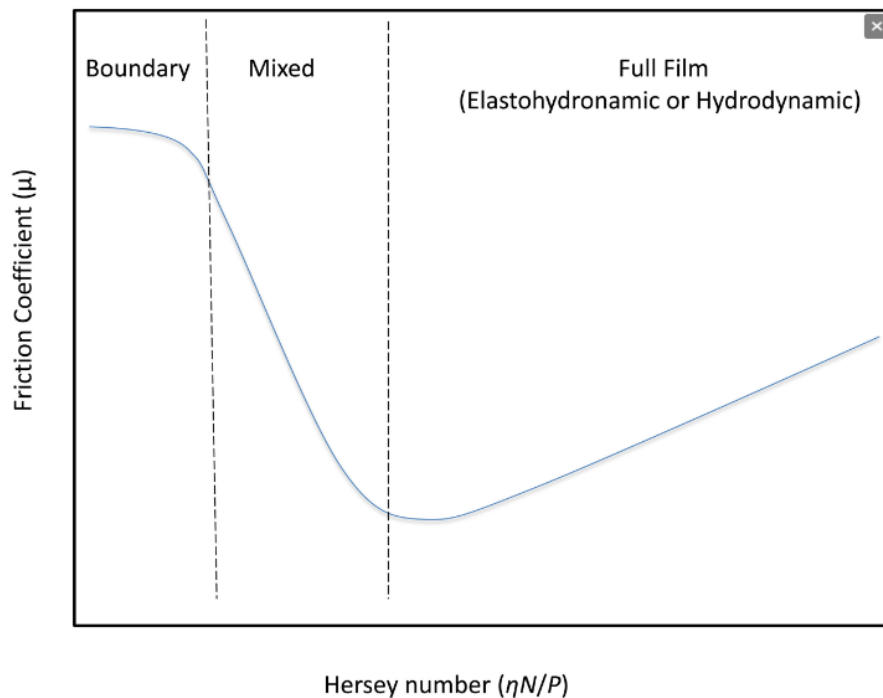
Εικόνα 18 : Ενδιάμεσος Άξονας

Ενδιάμεσα Έδρανα

Τα ενδιάμεσα έδρανα ή έδρανα ολίσθησης είναι στοιχεία αποτελούμενα από δύο κυλινδρικές επιφάνειες σε κίνηση, ανάμεσα στις οποίες παροχετεύεται λιπαντικό για τη μείωση των αναπτυσσόμενων τριβών και απαγωγή της δημιουργούμενης θερμότητας. Στο εσωτερικό ενός εδράνου ολίσθησης υπάρχει το χιτώνιο, στηριζόμενο στο εσωτερικό μίας βάσης. Ο άξονας του πλοίου έρχεται σε επαφή με το χιτώνιο. Στα απλά έδρανα ολίσθησης ο άξονας κινείται σε σχέση με την ακίνητη επιφάνεια του εδράνου. Κατά τη λειτουργία του εδράνου ολίσθησης διακρίνονται οι παρακάτω περιοχές λίπανσης:

1. Οριακή λίπανση: Οι τραχύτητες του άξονα και του εδράνου έρχονται σε επαφή μεταξύ τους. Το λιπαντικό έχει πάχος μοριακού επιπέδου.
2. Μικτή λίπανση (ημιωγρή): Ένα μέρος του φορτίου παραλαμβάνεται από το λιπαντικό μέσω της αναπτυσσόμενης πίεσης, ενώ ένα άλλο από την επαφή των τραχυτήτων του άξονα και του εδράνου.
3. Ελαστοϋδροδυναμική λίπανση: Ύπαρξη σφήνας λιπαντικού.
4. Υδροδυναμική λίπανση: Με την περιστροφή του άξονα το εισερχόμενο λάδι δημιουργεί φιλμ λιπαντικού ικανό να σηκώσει το φορτίο του άξονα. Το φιλμ δημιουργείται λόγω της κίνησης του άξονα.

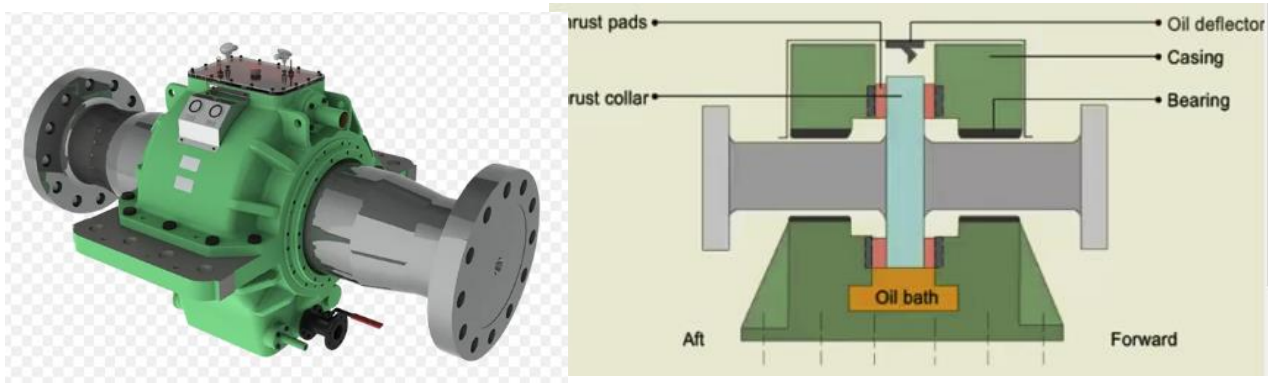
Οι περιοχές λίπανσης παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Stribeck Curve)



Εικόνα 19 : Περιοχές Λίπανσης Ενδιάμεσου Εδράνου

Ωστικό Έδρανο

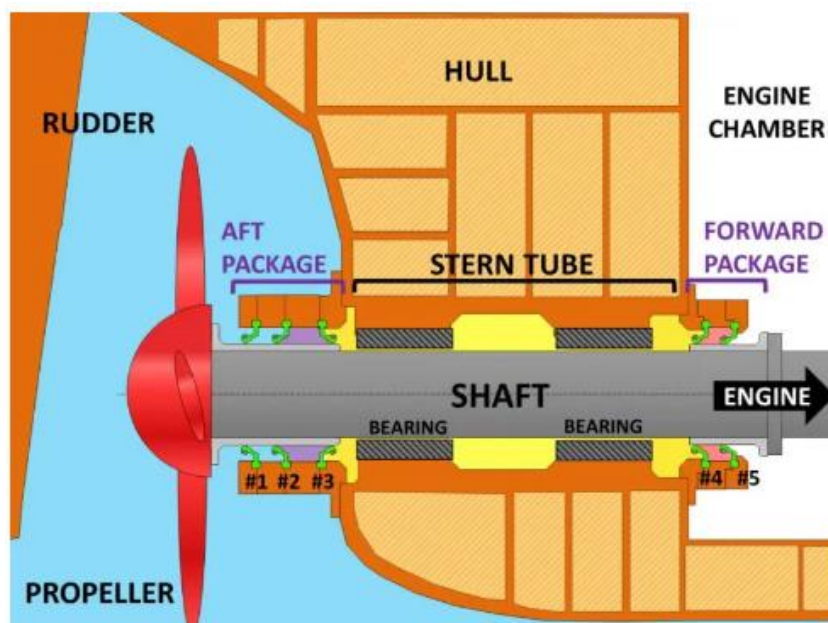
Το ωστικό έδρανο μεταφέρει την ώση από την έλικα μέσω του ελικοφόρου άξονα στη γάστρα του πλοίου, χωρίς να επιτρέπει την αξονική μετατόπιση του. Είναι κατασκευασμένο από ανθεκτικά υλικά, προκειμένου να αντέχει το ωστικό φορτίο και να το μεταφέρει στην μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Τοποθετείται συνήθως εντός του σώματος της κύριας μηχανής στο πρυμναίο άκρο της, ούτως ώστε να μην μεταφέρονται ωστικά φορτία από τον ελικοφόρο άξονα στον στροφαλοφόρο άξονα της μηχανής ή σε εγκατεστημένο μειωτήρα στροφών, ο οποίος ενδέχεται να παρεμβάλλεται. Ένα ωστικό έδρανο παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 20 : Ωστικό Έδρανο, Ωστικό Έδρανο σε Τομή

Έδρανα Χοάνης

Η χοάνη (stern tube) είναι το τμήμα της γάστρας του πλοίου, από το οποίο εξέρχεται ο ελικοφόρος άξονας. Για την στεγανοποίηση της χοάνης υπάρχουν στεγανοποιητικά συστήματα που αποτρέπουν την εισροή υδάτων στο εσωτερικό της όπως και την εκροή λιπαντικού που βρίσκεται στο εσωτερικό της για την λίπανση του αξονικού συστήματος. Τα έδρανα χοάνης είναι υπεύθυνα για την παραλαβή του βάρους του ελικοφόρου άξονα. Ο ελικοφόρος άξονας εδράζεται συνήθως σε δύο έδρανα ολίσθησης στη χοάνη του πλοίου. Το πρυμναίο έδρανο χοάνης έχει συνήθως μεγάλο λόγο μήκους προς διάμετρο ώστε να παραλαμβάνει τα μεγάλα φορτία που δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης της έλικας σε πρόβολο.

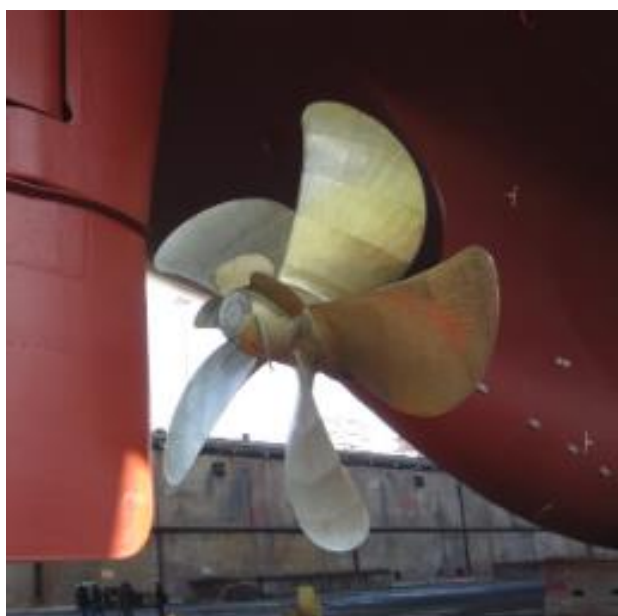


Εικόνα 21 : Χοάνη Πλοίου (Stern Tube)

Έλικα

Η έλικα του πλοίου αποτελεί το πιο διαδεδομένο σύστημα πρόωσης και είναι υπεύθυνη για την κίνηση του πλοίου. Οι έλικες μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια στον ελικοφόρο άξονα σε κινητική ενέργεια του νερού. Η περιστροφική κίνηση της έλικας αυξάνει την ορμή του νερού, που ρέει ανάμεσα στα πτερύγιά της. Ταυτόχρονα σε κάθε πτερύγιο επάγεται από το ρευστό μία δύναμη, η οποία αναλύεται σε περιφερειακή ανθιστάμενη συνιστώσα και σε αξονική ωστική δύναμη. Οι περιφερειακές συνιστώσες των δυνάμεων των πτερυγίων δημιουργούν την ανθιστάμενη ροπή στρέψεως της έλικας, η οποία υπερνικάται από τη στρεπτική ροπή του κινητήρα. Η έλικα μπορεί να είναι σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propeller – FPP) ή μεταβλητού βήματος (Controllable Pitch Propeller – CPP). Στην πρώτη περίπτωση, η κίνηση ανάποδα επιτυγχάνεται με αναστροφή της φοράς περιστροφής της μηχανής, με κακό βαθμό αποδόσεως της έλικας κατά την κίνηση ανάποδα. Στη δεύτερη περίπτωση τα πτερύγια έχουν τη δυνατότητα μεταβολής της κλίσης τους ως προς τον άξονα περιστροφής, οπότε μπορεί να βελτιστοποιείται η απόδοση της έλικας ανάλογα με την ταχύτητα του πλοίου. Με την αναστροφή της κλίσης τους επιτυγχάνεται η κίνηση ανάποδα, χωρίς την ανάγκη αλλαγής της φοράς περιστροφής της μηχανής. Έλικες μεταβλητού βήματος χρησιμοποιούνται συνήθως σε επιβατηγά-οχηματαγωγά πλοία και γενικά σε πλοία, στα οποία απαιτείται μεγάλη ικανότητα ελιγμών. Αντιθέτως στα ποντοπόρα πλοία, τα οποία κινούνται σε ανοικτές θάλασσες με σταθερή ταχύτητα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, χρησιμοποιούνται συνήθως έλικες σταθερού βήματος.

Η ισχύς που απορροφά η έλικα σε δεδομένη ταχύτητα του πλοίου εξαρτάται από την κατάσταση της έλικας, την κατάσταση της γάστρας του πλοίου, το βύθισμα, την κατάσταση της θάλασσας, τα ρεύματα, την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου. Κατά τη διάρκεια της υπηρεσίας του πλοίου αυξάνεται η απορροφούμενη ισχύς για δεδομένη ταχύτητα, λόγω της αυξήσεως της τραχύτητας της γάστρας και της φθοράς της έλικας. Το παραπάνω φαινόμενο περιγράφεται στο νόμο της έλικας μέσω του συντελεστή "C".



Εικόνα 22 : Έλικας Σταθερού Βήματος

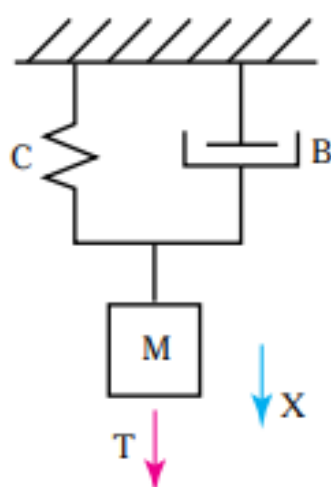


Εικόνα 23 : Έλικα Μεταβλητού Βήματος

3. Στρεπτικές Ταλαντώσεις - Στοιχεία Δυναμικών Φαινομένων

3.1 Γενικά Στοιχεία Ταλαντώσεων Πλοίου

Ως ταλάντωση χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε περιοδική κίνηση ενός σώματος η οποία γίνεται παλινδρομικά γύρω από μία θέση που ονομάζεται θέση ισορροπίας. Δηλαδή, ταλάντωση είναι η περιοδική μεταβολή ενός μεγέθους γύρω από μία τιμή. Το πιο απλό σύστημα ταλάντωσης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Όλες οι ταλαντώσεις όσο σύνθετες και αν είναι βασίζονται στην παρακάτω αρχή.



Εικόνα 24 : Απλός Ταλαντωτής

Μάζα M συνδέεται με ακίνητο σύστημα μέσω ελατηρίου σταθεράς C και αποσβεστήρα με συντελεστή αποσβέσεως B . Αν η μάζα M απομακρυνθεί από τη θέση ισορροπίας της και αφεθεί ελεύθερη, θα αρχίσει να ταλαντώνεται γύρω από τη θέση ισορροπίας της με σταθερή συχνότητα ταλάντωσης f_n , η οποία ονομάζεται φυσική συχνότητα ή ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Η ταλάντωση αυτή ονομάζεται ελεύθερη ταλάντωση. Η ιδιοσυχνότητα είναι χαρακτηριστική του συστήματος και εξαρτάται από τη μάζα M , τη σταθερά του ελατηρίου C και το συντελεστή αποσβέσεως B . Συνήθως οι ιδιοσυχνότητες υπολογίζονται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές αποσβέσεως, διότι τις περισσότερες φορές έχουν μικρή συνεισφορά στο τελικό αποτέλεσμα. Στη συνέχεια θα εξετασθεί η περίπτωση κατά την οποία η μάζα του προηγούμενου συστήματος διεγείρεται από εξωτερική περιοδική δύναμη T (διεγείρουσα δύναμη). Η ταλάντωση που προκαλείται ονομάζεται εξαναγκασμένη ταλάντωση.

Η δύναμη T μπορεί στη γενική περίπτωση να αναλυθεί σε σειρά Fourier στη μορφή:

$$T(t) = \sum_{\nu} T_{\nu} * \sin(\nu \omega t + \Psi_{\nu})$$

όπου T_{ν} η διεγείρουσα δύναμη ν τάξεως, Ψ_{ν} η γωνία φάσεως της αντίστοιχης δύναμης, ω η γωνιακή συχνότητα και t ο χρόνος. Οι όροι του παραπάνω αθροίσματος ονομάζονται αρμονικές της διεγείρουσας δύναμης. Η απόκριση του συστήματος (δηλ. η στιγμιαία απόσταση της μάζας M από τη θέση ισορροπίας) δίνεται στην αντίστοιχη μορφή:

$$X(t) = \sum_{\nu} X_{\nu} * \sin(\nu \omega t + \varphi_{\nu})$$

όπου X_{ν} το πλάτος (ή εύρος) της ταλάντωσης ν τάξεως και φ_{ν} η γωνία φάσεως ν τάξεως. Οι όροι του αθροίσματος ονομάζονται αρμονικές της ταλαντώσεως.

Ένα πλοίο (με το σύνολο του εξοπλισμού του) αποτελεί στην πραγματικότητα μία ελαστική μεταλλική κατασκευή, η οποία υπόκειται σε ταλαντώσεις. Οι ταλαντώσεις εμφανίζονται όταν το σύστημα του πλοίου διεγείρεται από δυνάμεις ή ροπές, οι οποίες μεταβάλλονται περιοδικά. Στην περίπτωση ενός πλοίου, οι κύριες πηγές περιοδικά μεταβαλλόμενων δυνάμεων και ροπών είναι η μηχανή και η έλικα του πλοίου, καθώς και ο κυματισμός. Οι επαγόμενες ταλαντώσεις, αφενός μειώνουν την άνεση των μεταφερομένων επιβατών, αφετέρου καταπονούν επικίνδυνα τον εξοπλισμό, αλλά και τη δομή του πλοίου. Για τον λόγο αυτό λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για τη μείωση των επαγομένων ταλαντώσεων από τη μηχανή και την έλικα. Στις δίχρονες αργόστροφες μηχανές το πρόβλημα των ταλαντώσεων είναι εντονότερο και ειδικότερα στις δίχρονες μηχανές με μικρό αριθμό κυλίνδρων (5 ή 6). Οι ταλαντώσεις μίας εμβολοφόρου ΜΕΚ διακρίνονται σε εσωτερικές και εξωτερικές. Οι εσωτερικές ταλαντώσεις αναφέρονται στη σχετική κίνηση των διαφόρων τμημάτων της μηχανής μεταξύ τους, προκαλώντας εσωτερικές καταπονήσεις. Οι εξωτερικές ταλαντώσεις αναφέρονται στις ταλαντώσεις της μηχανής ως συνόλου, οι οποίες μεταφέρονται στη γάστρα του πλοίου.

Οι εσωτερικές ταλαντώσεις στο προωστήριο σύστημα ενός πλοίου είναι οι εξής τρεις:

- Στρεπτικές ταλαντώσεις (Torsional Vibration)
- Αξονικές ή διαμήκειες ταλαντώσεις (Axial or Longitudinal Vibration)
- Πλάγιες (καμπτικές) ταλαντώσεις (Lateral Vibration)

Στρεπτικές ταλαντώσεις (Torsional vibration)

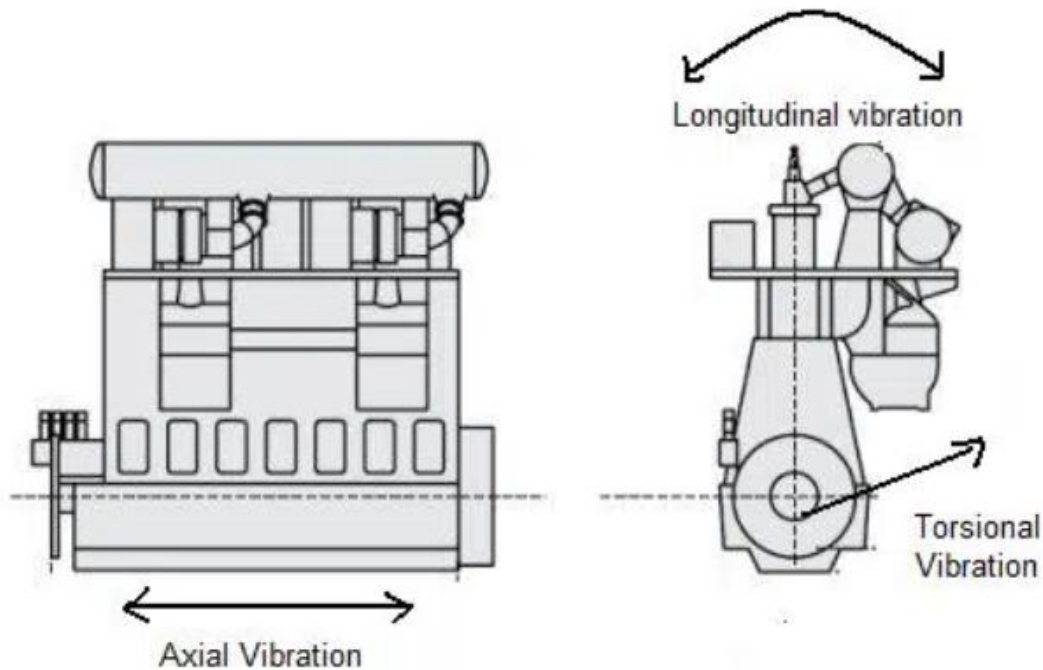
Όσον αφορά τις στρεπτικές ταλαντώσεις, αυτές αφορούν ολόκληρο το σύστημα στροφαλοφόρου άξονα, σφονδύλου, ενδιάμεσου άξονα, ελικοφόρου άξονα και έλικας. Προκαλούνται από τις αντίστοιχες διεγείρουσες δυνάμεις στους στροφάλους. Οι δυνάμεις σε κάθε στρόφαλο μεταβάλλονται χρονικά, ενώ μεταβάλλονται επίσης από στρόφαλο σε στρόφαλο. Έτσι δημιουργούνται μεταβαλλόμενες ροπές στρέψεως στον στροφαλοφόρο άξονα, οι οποίες τείνουν να «κουρδίζουν» και να «ξεκουρδίζουν» περιοδικά τον στροφαλοφόρο, τον ενδιάμεσο και τον ελικοφόρο άξονα. Αφού οι στρεπτικές ταλαντώσεις εξαρτώνται από τη μεταβολή των περιφερειακών δυνάμεων μεταξύ των στροφάλων, η επιλογή της κατάλληλης σειράς αναφλέξεως είναι καθοριστικός παράγοντας για τη μείωση των στρεπτικών ταλαντώσεων. Ο περιορισμός τους είναι ιδιαίτερα σημαντικός, διότι σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να προκληθεί ακόμη και καταστροφή του στροφαλοφόρου άξονα ή του αξονικού συστήματος του πλοίου.

Αξονικές ή διαμήκειες ταλαντώσεις (Axial or Longitudinal Vibration.)

Οι αξονικές ταλαντώσεις αφορούν στο σύστημα του στροφαλοφόρου και του ελικοφόρου άξονα. Επάγονται από τη συνδυασμένη δράση των ακτινικών δυνάμεων σε κάθε στρόφαλο και της μεταβαλλόμενης αξονικής δύναμης της έλικας, που προκαλούν εφελκυστικές-θλιπτικές ταλαντώσεις στο σύστημα. Οι ακτινικές δυνάμεις σε κάθε στρόφαλο προκαλούν περιοδική απόκλιση-σύγκλιση των παρειών του στροφάλου, με αποτέλεσμα την εμφάνιση των αντιστοίχων ταλαντώσεων. Δευτερεύουσα αξονική διέγερση προκαλείται από τη δράση των στρεπτικών ταλαντώσεων, οι οποίες «κουρδίζοντας» και «ξεκουρδίζοντας» τον στροφαλοφόρο άξονα προκαλούν αξονικές παραμορφώσεις. Το τελευταίο φαινόμενο είναι ιδιαίτερα σημαντικό, όταν οι αντίστοιχες κρίσιμες ταχύτητες περιστροφής των αξονικών και στρεπτικών ταλαντώσεων βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Οι αξονικές ταλαντώσεις αφενός αυξάνουν την καταπόνηση του στροφαλοφόρου άξονα, αφετέρου μεταφέρονται (μέσω του ωστικού εδράνου) στη γάστρα του πλοίου. Για τη μείωση των αξονικών ταλαντώσεων, τοποθετείται αποσβεστήρας στο ελεύθερο άκρο του στροφαλοφόρου άξονα (σε συνδυασμό με αντίστοιχο αποσβεστήρα στρεπτικών ταλαντώσεων). Με την προσαρμογή του, μετατοπίζεται η κρίσιμη ταχύτητα των αξονικών ταλαντώσεων πάνω από τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, ενώ παράλληλα μειώνεται το μέγιστο πλάτος των αξονικών ταλαντώσεων, μειώνεται δηλαδή η φόρτιση του στροφαλοφόρου άξονα, καθώς και του ωστικού εδράνου.

Πλάγιες (καμπτικές) ταλαντώσεις (Lateral Vibration)

Οι πλάγιες ταλαντώσεις αφορούν κυρίως σε μεγάλο μήκους ελικοφόρους άξονες και οφείλονται στις πλάγιες δυνάμεις από την έλικα. Επιφέρουν αντίστοιχες ταλαντώσεις στη γάστρα του πλοίου, μειώνοντας την άνεση των επιβαίνόντων. Ειδικά σε επιβατηγά πλοία, γίνεται ειδική μελέτη για τη μείωσή τους. Το πρόβλημα των καμπτικών ταλαντώσεων συνίσταται στον υπολογισμό των αντιστοίχων ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος ελικοφόρου άξονα-ενδιάμεσου άξονα-έλικας. Οι ιδιοσυχνότητες αυτές συγκρίνονται με τις συχνότητες των διεγειρουσών δυνάμεων από την έλικα και διαπιστώνεται αν υπάρχει κίνδυνος συντονισμού. Η αλλαγή των ιδιοσυχνοτήτων του άξονα πραγματοποιείται με την κατάλληλη επιλογή της θέσεως και του αριθμού των εδράνων του ελικοφόρου άξονα. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ακαμψία του και μετατοπίζεται η ιδιοσυχνότητά του σε υψηλότερες τιμές, αρκετά πάνω από τη βασική συχνότητα των διεγειρουσών δυνάμεων.



Εικόνα 25 : Εσωτερικές Ταλαντώσεις Δίχρονου Κινητήρα Πλοίου

Εξωτερικές ταλαντώσεις μηχανής

Οι δυνάμεις των αερίων, όπως θα επεξηγηθούν σε επόμενο κεφάλαιο, έχουν μηδενική συνιστάμενη δύναμη, επομένως δεν μεταφέρουν εξωτερική δύναμη προς τη βάση. Προκαλούν όμως ροπή ανατροπής στη μηχανή, αντίθετη της στρεπτικής δύναμης στον ελικοφόρο άξονα. Η ροπή ανατροπής αυξάνεται λόγω της παρουσίας μη ζυγοσταθμισμένων παλινδρομικών αδρανειακών δυνάμεων. Η ροπή ανατροπής παραλαμβάνεται από τους κοχλίες εδράσεως της μηχανής. Εκτός της ροπής ανατροπής μεταφέρονται και οι ελεύθερες (μη ζυγοσταθμισμένες) παλινδρομικές και περιστροφικές αδρανειακές δυνάμεις. Οι παραπάνω δυνάμεις και ροπές, λόγω της περιοδικής μεταβολής τους, προκαλούν εξωτερικές ταλαντώσεις που μεταφέρονται στη γάστρα του πλοίου. Σπανιότερα, οι εσωτερικές αξονικές και στρεπτικές ταλαντώσεις του στροφαλοφόρου άξονα μπορεί επίσης να μεταφέρουν σημαντικές ταλαντώσεις προς τη γάστρα του πλοίου. Με κατάλληλη επιλογή της σειράς αναφλέξεως και κατάλληλη σχεδίαση της μηχανής, οι περιστροφικές αδρανειακές δυνάμεις, καθώς και οι παλινδρομικές αδρανειακές δυνάμεις μπορούν να έχουν μηδενική συνιστώσα. Δεν μηδενίζονται όμως πάντα οι αντίστοιχες ροπές τους, οπότε προκύπτουν στη γενική περίπτωση 2 κατακόρυφες ροπές. Οι κατακόρυφες ροπές ονομάζονται έτσι, διότι μπορούν να αντιστοιχηθούν σε ζεύγη δυνάμεων στο κατακόρυφο επίπεδο. Η διεύθυνσή τους είναι οριζόντια, κάθετη στον άξονα της μηχανής. Το αντίστοιχο συμβαίνει για την οριζόντια ροπή, της οποίας η διεύθυνση είναι κατακόρυφη.

Οι παραπάνω ροπές διεγείρουν σημαντικές ταλαντώσεις στο πλοίο, στις ακόλουθες περιπτώσεις:

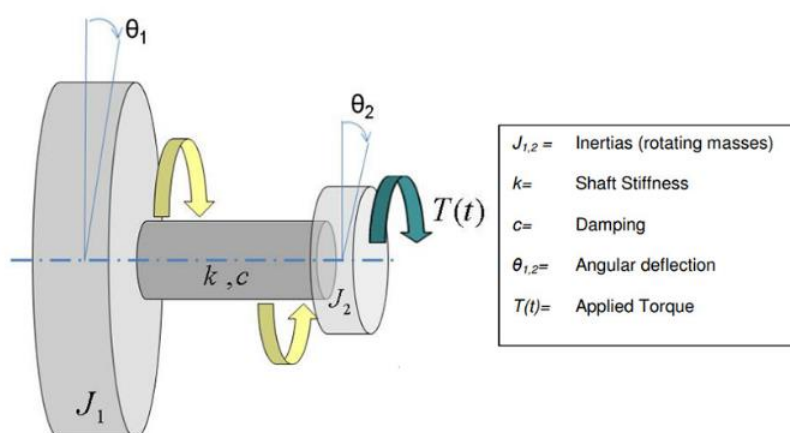
- Εάν οι συχνότητες των ροπών βρίσκονται κοντά στις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες της δομής του πλοίου (συντονισμός).
- Εάν η μηχανή βρίσκεται κοντά σε κόμβο της ταλάντωσης της δομής του πλοίου (συνεπώς παίζει σημαντικό ρόλο η θέση της μηχανής).
- Εάν τα πλάτη (οι μέγιστες τιμές) των ελευθέρων ροπών είναι μεγάλα, ενώ η ικανότητα αποσβέσεως της δομής του πλοίου δεν είναι ικανοποιητική.

Στη αυτή την εργασία θα μελετηθούν τα βασικά στοιχεία των δυναμικών φαινομένων που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία μιας εμβολοφόρου MEK, συνεπώς και ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα, και προκαλούν στρεπτικές ταλαντώσεις. Ως δυναμικά ορίζονται τα φαινόμενα που χαρακτηρίζονται από τη χρονική μεταβολή των αναπτυσσομένων δυνάμεων και ροπών. Οι συγκεκριμένες μηχανές, καταπονούνται από έντονα δυναμικά φαινόμενα, λόγω της παλινδρομικής κίνησης των εμβόλων τους, αλλά και λόγω της χρονικής μεταβολής των δυνάμεων από τη συμπίεση, την καύση και την αποτόνωση των αερίων. Η ένταση των δυναμικών φαινομένων συνδέεται άμεσα με τις βασικές σχεδιαστικές επιλογές, όπως ο τύπος του κινητήρα (δίχρονος, τετράχρονος), η διάταξη των κυλίνδρων του (εν σειρά, V κ.λπ.), ο αριθμός των κυλίνδρων του, η ταχύτητα περιστροφής του, η πίεση λειτουργίας του κ.ά.. Συνεπώς, αποφάσεις που λαμβάνονται κατά τα πρώτα στάδια σχεδιάσεως ενός νέου κινητήρα, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά κατά τη λειτουργία του, ως προς την ύπαρξη ή όχι ανεπιθύμητων ταλαντώσεων.

Θα ακολουθήσει ανάλυση των κυριότερων δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία μιας εμβολοφόρου MEK στα κεφάλαια 3.4 και 3.5, που είναι οι εξής:

- Δυνάμεις που οφείλονται στην πίεση των αερίων εντός του κυλίνδρου
- Αδρανειακές δυνάμεις που οφείλονται στην κίνηση των μαζών του κινηματικού μηχανισμού

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων των αερίων και των αδρανειακών δυνάμεων, απαιτείται η γνώση της κινηματικής του συστήματος εμβόλου-διωστήρα-στροφάλου, η οποία θα αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 3.3.

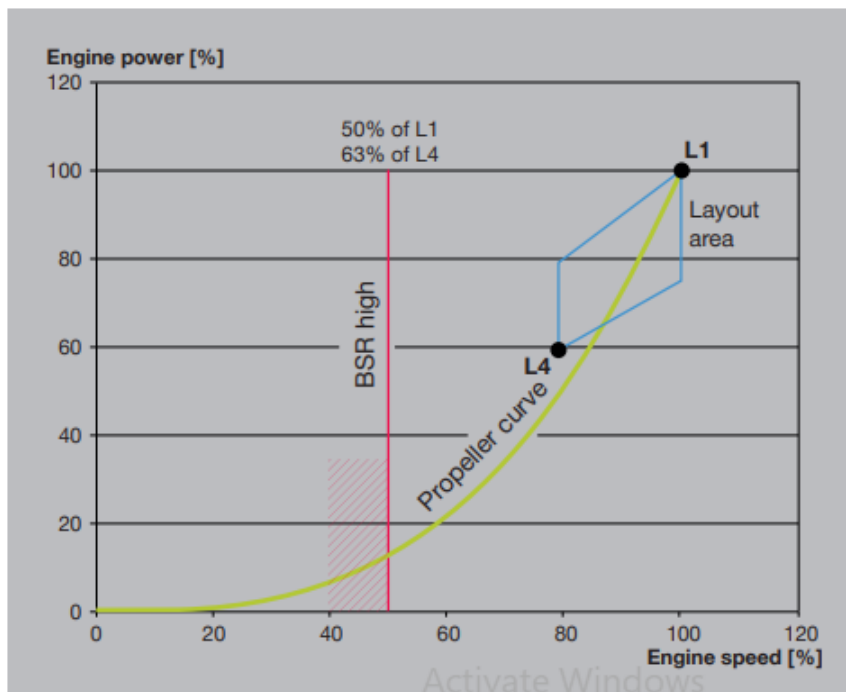


Εικόνα 26 : Στρεπτική Ταλάντωση Συστήματος 2 Μαζών

3.2 Εύρος Στροφών Συντονισμού (Barred Speed Range)

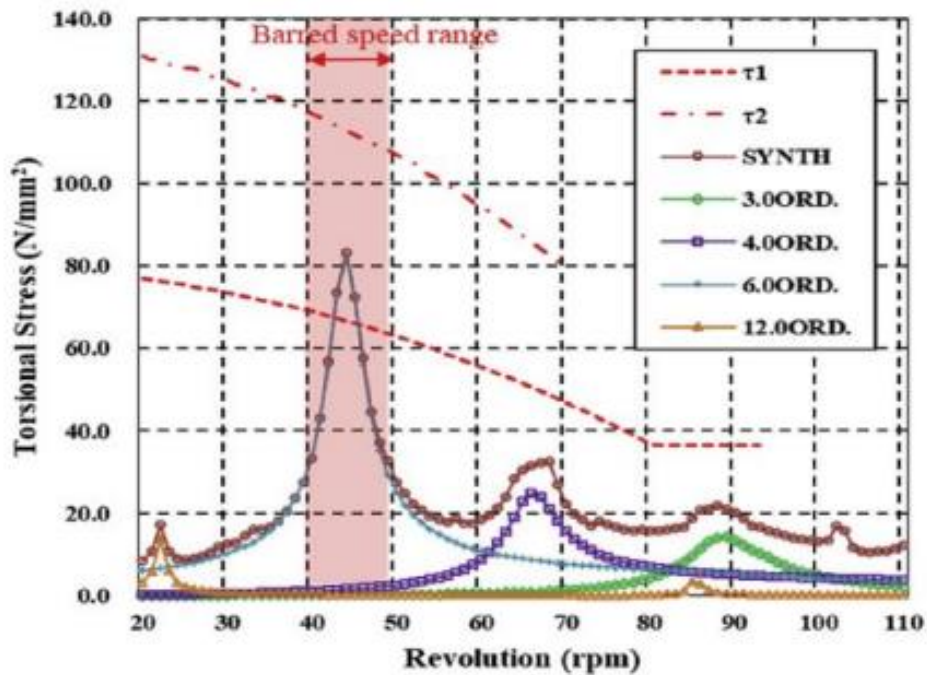
Πολύ σημαντικό κομμάτι της μελέτης των στρεπτικών ταλαντώσεων αποτελεί το κομμάτι του συντονισμού. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.1 η απόκριση μίας ταλάντωσης μπορεί να περιγραφεί ως ένα άθροισμα αρμονικών ταλαντώσεων. Εφόσον η συχνότητα κάποιας αρμονικής γίνει ίση με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος, επέρχεται συντονισμός. Στην περίπτωση συντονισμού αυξάνεται υπέρμετρα το πλάτος της ταλάντωσης. Η αύξηση αυτή περιορίζεται μόνο από τα χαρακτηριστικά του αποσβεστήρα. Η κατάσταση αυτή είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη και πρέπει να αποφεύγεται. Συντονισμός υπάρχει σε ένα συγκεκριμένο εύρος στροφών του κινητήρα (Barred Speed Range – BSR). Το πέρασμα από αυτό το εύρος στροφών είναι κρίσιμο να γίνεται σε μικρό χρονικό διάστημα για την αποφυγή έντονων καταπονήσεων.

Μία προσέγγιση του άνω ορίου του εύρους στροφών που δημιουργείται συντονισμός δίνεται από την MAN B&W στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 27 : Προσέγγιση BSR (MAN B&W)

Στην παρακάτω εικόνα δίνεται ένα τυπικό διάγραμμα Στρεπτικών Τάσεων-Στροφών λειτουργίας, όπου φαίνεται το Barred Speed Range, δηλαδή το εύρος στροφών όπου παρατηρείται συντονισμός και αυξάνεται το πλάτος των στρεπτικών ταλαντώσεων, άρα και των στρεπτικών τάσεων που ασκούνται στο αξονικό σύστημα. Στην εικόνα φαίνονται οι συντονισμοί για διάφορες αρμονικές καθώς και η σύνθεση τους που είναι και αυτή που παρουσιάζει το ενδιαφέρον για την αντοχή του συστήματος.



Εικόνα 28 : Διάγραμμα Στρεπτικών Τάσεων - Στροφών

Σύμφωνα με τον IACS (International Association of Classification Societies), M68, το όριο τ_1 μπορεί να ξεπεραστεί για σύντομο χρονικό διάστημα σε περιπτώσεις μεταβολής του φορτίου του κινητήρα (επιτάχυνση, επιβράδυνση). Το όριο τ_2 δεν επιτρέπεται να ξεπεραστεί σε καμία περίπτωση. Το εύρος του BSR δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

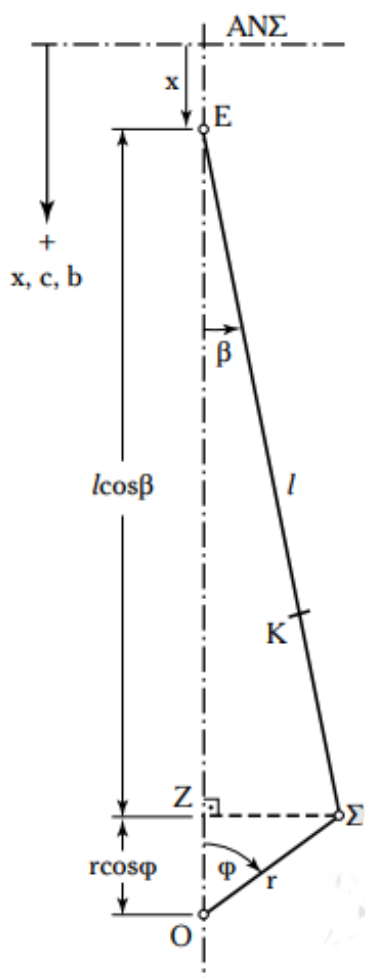
$$\frac{16 * n_c}{18 - \lambda_c} < n < \frac{(18 - \lambda_c) * n_c}{16}$$

Όπου:

- n_c : η γωνιακή ταχύτητα συντονισμού
- λ_c : ο λόγος της γωνιακής ταχύτητας συντονισμού προς τη μέγιστη γωνιακή ταχύτητα συνεχούς λειτουργίας

3.3 Κινηματική Μηχανισμού Μετάδοσης Κίνησης

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το σκαρίφημα του μηχανισμού μετάδοσης της κίνησης από το έμβολο στο στροφαλοφόρο άξονα. Δύο κύρια σημεία του κινηματικού μηχανισμού, των οποίων μας ενδιαφέρουν τα κινηματικά χαρακτηριστικά, είναι το κέντρο του πείρου του εμβόλου (σημείο E) και το κέντρο του κομβίου του διωστήρα (σημείο Σ). Το κέντρο του πείρου του εμβόλου εκτελεί ευθύγραμμη επιταχυνόμενη κίνηση (παλινδρόμηση μεταξύ του ANΣ και του ΚΝΣ), ενώ το κέντρο του κομβίου του διωστήρα διαγράφει κυκλική τροχιά ακτίνας r , με γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ω .



Εικόνα 29 : Κινηματικός Μηχανισμός Κινητήρα

Όπως προκύπτει από το παραπάνω σχήμα, όταν ο στρόφαλος απέχει γωνία φ από το ΑΝΣ, η μετατόπιση x του εμβόλου από το ΑΝΣ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$x(\varphi) = r + l - l * \cos(\beta) - r * \cos(\varphi)$$

όπου β η γωνία που σχηματίζει ο διωστήρας με την κατακόρυφη διεύθυνση, r η ακτίνα του τροφάλου (η απόσταση μεταξύ των κέντρων του κομβίου βάσεως και του κομβίου διωστήρα του τροφαλοφόρου άξονα), ενώ l είναι το μήκος του διωστήρα (η απόσταση μεταξύ των κέντρων του κομβίου διωστήρα του τροφαλοφόρου και του πείρου του εμβόλου).

Εάν συμβολισθεί με λ ο λόγος της ακτίνας του τροφάλου προς το μήκος του διωστήρα:

$$\lambda = \frac{r}{l}$$

και εκτελεσθούν οι τριγωνομετρικές πράξεις, προκύπτει τελικά για τη μετατόπιση x :

$$x(\varphi) = r * (1 - \cos(\varphi)) + l * (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 * \sin^2(\varphi)})$$

Η πρώτη παράγωγος της μετατοπίσεως x ως προς τον χρόνο δίνει την ταχύτητα του εμβόλου:

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\varphi} * \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dx}{d\varphi} * \omega$$

όπου ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του τροφάλου: $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις, που αναπτύχθηκαν για τη μετατόπιση του εμβόλου και παραγωγίζοντας ως προς φ , προκύπτει:

$$c = \omega * r * \sin(\varphi) * \left(1 + \frac{\lambda * \cos(\varphi)}{\sqrt{1 - \lambda^2 * \sin^2(\varphi)}} \right)$$

Η φορά της ταχύτητας c του εμβόλου λαμβάνεται ως θετική, όταν αυτό κατευθύνεται από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ.

Παραγωγίζοντας την ταχύτητα ως προς τον χρόνο προκύπτει η επιτάχυνση b του εμβόλου:

$$b = \frac{dc}{dt} = \frac{dc}{d\varphi} * \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dc}{d\varphi} * \omega$$

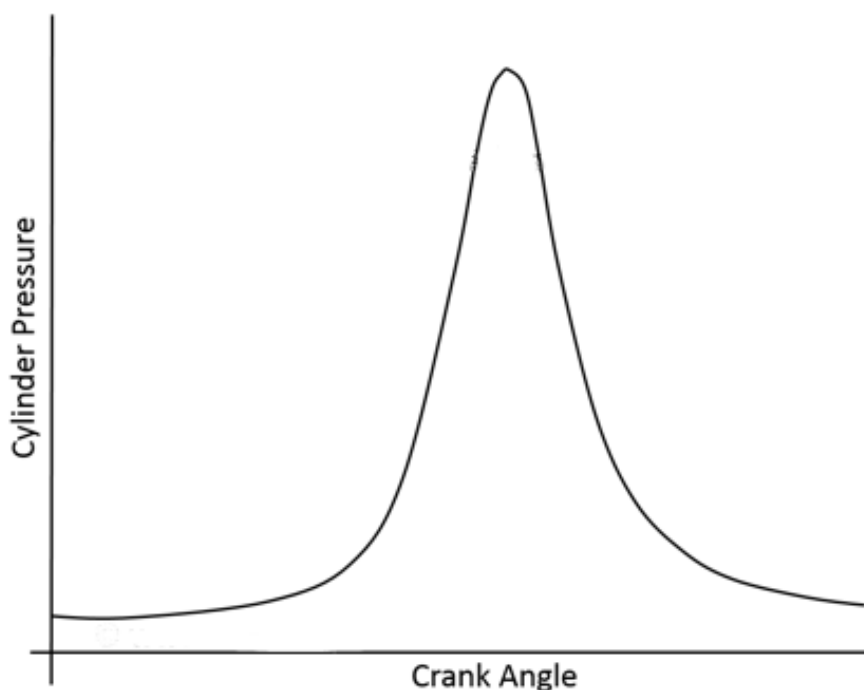
Εκτελώντας την παραγωγή της σχέσης, που δίνει τη ταχύτητα του εμβόλου ως προς τη γωνία τροφάλου φ , προκύπτει η αντίστοιχη σχέση για την επιτάχυνση b του εμβόλου:

$$b = \omega^2 * r * \{ \cos(\varphi) + \lambda * [\cos(2\varphi) + \lambda^2 * \sin^4(\varphi)] / [1 - \lambda^2 * \sin^2(\varphi)]^{\frac{3}{2}} \}$$

Όπως και για την ταχύτητα, η θετική φορά της επιταχύνσεως είναι από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ.

3.4 Δυνάμεις Αερίων

Η πίεση των αερίων εντός του κυλίνδρου που οφείλεται στην συμπίεση κατά την άνοδο του εμβόλου και στην καύση μεταβάλλεται με τη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα. Η μεταβολή αυτή δίνεται από το αντίστοιχο δυναμοδεικτικό διάγραμμα πίεσης-γωνίας στροφαλοφόρου άξονα (P-φ). Ένα τυπικό δυναμοδεικτικό διάγραμμα για δίχρονο ναυτικό κινητήρα παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 30 : Δυναμοδεικτικό Διάγραμμα Δίχρονου Κινητήρα

Η μεταβολή της πίεσης των αερίων είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Έτσι μεταβάλλεται έντονα και η δύναμη στο έμβολο, η οποία προκύπτει ως γινόμενο της πίεσης των αερίων επί τη διατομή του κυλίνδρου. Αν p_g η αντίστοιχη πίεση των αερίων, τότε η δύναμη στο έμβολο θα δίνεται ως εξής:

$$F_g = \pi * \frac{D_p^2}{4} * p_g$$

όπου D_p η διάμετρος του κυλίνδρου.

Η δύναμη αυτή αναλύεται σε δύο συνιστώσες, μία κάθετη στα τοιχώματα του κυλίνδρου και μία κατά τη διεύθυνση του στελέχους του διωστήρα. Στις μηχανές με βάκτρο (δίχρονες ναυτικές μηχανές) η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται στο κομβίο του ζυγώματος. Η κάθετη στα τοιχώματα συνιστώσα F_{gN} προκαλεί την οβάλ φθορά του χιτωνίου στους κινητήρες χωρίς βάκτρο, ενώ στους κινητήρες με βάκτρο παραλαμβάνεται από τις ευθυντηρίες του ζυγώματος. Η συνιστώσα F_{gS} κατά τη διεύθυνση του στελέχους του διωστήρα μεταβιβάζεται στο κομβίο διωστήρα του στροφάλου.

Οι δύο δυνάμεις δίνονται αντίστοιχα:

$$F_{gN} = F_g * \tan(\beta)$$

$$F_{gS} = \frac{F_g}{\cos(\beta)}$$

όπου β η γωνία που σχηματίζει ο διωστήρας με την κατακόρυφη διεύθυνση (μεταξύ ΑΝΣ και ΚΝΣ).

Η δύναμη F_{gS} , μεταφερόμενη στο κομβίο του διωστήρα, αναλύεται σε δύο συνιστώσες, μία κατά την ακτίνα του στροφάλου F_{gR} και μία κατά την περιφερειακή διεύθυνση F_{gT} (κάθετη στην προηγούμενη). Η πρώτη ονομάζεται ακτινική δύναμη στροφάλου και η δεύτερη στρεπτική δύναμη στροφάλου, αφού σε αυτήν οφείλεται η στρεπτική ροπή στον στρόφαλο, λόγω της πίεσης των αερίων. Εφαρμόζοντας τριγωνομετρικές σχέσεις, προκύπτει για τις δύο συνιστώσες:

$$F_{gT} = F_g * \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos(\beta)}$$

$$F_{gR} = F_g * \frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos(\beta)}$$

Προφανώς η στρεπτική ροπή λόγω της δράσεως των αερίων θα δίνεται ως το γινόμενο της στρεπτικής δύναμης επί την ακτίνα του στροφάλου:

$$M_{gT} = F_{gT} * r = F_g * \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos(\beta)} * r$$

Η στρεπτική ροπή από όλους τους κυλίνδρους μεταφέρεται μέσω του στροφαλοφόρου άξονα έξω από τη μηχανή, στην έλικα του πλοίου.

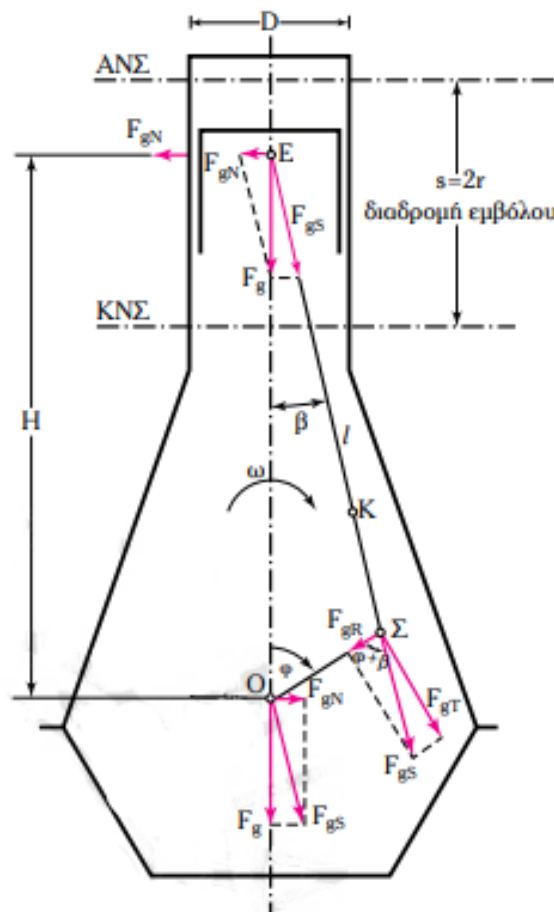
Η συνιστώσα F_{gS} μεταφέρεται και στο έδρανο βάσεως του στροφαλοφόρου άξονα (το οποίο καταπονεί) και στη συνέχεια στο σκελετό και την έδραση της μηχανής. Το σύνολο των δυνάμεων των αερίων που φορτίζουν τον σκελετό, αν μεταφερθεί σε ένα σημείο, έχει μηδενική συνιστώσα (η δύναμη στο πώμα είναι αντίθετη της δυνάμεως στο έμβολο, ενώ οι δυνάμεις που ασκούνται περιφερειακά στα τοιχώματα του κυλίνδρου είναι επίσης αντίθετες). Όμως, η ροπή στον σκελετό από την πίεση των αερίων δεν είναι μηδενική, αλλά ίση και αντίρροπη της ροπής στρέψεως (αιτία εξωτερικών ταλαντώσεων). Η ροπή αυτή τείνει να ανατρέψει τη μηχανή και παραλαμβάνεται από τους κοχλίες έδρασης της μηχανής. Λόγω της χρονικής μεταβολής της, η στρεπτική ροπή επιφέρει επίσης ταλαντώσεις, οι οποίες μεταφέρονται μέσω της έδρασης στη γάστρα του πλοίου.

Το έργο της δύναμης των αερίων πάνω στο έμβολο ισούται με το έργο της περιφερειακής συνιστώσας στο στρόφαλο (αφού οι υπόλοιπες συνιστώσες δεν παράγουν έργο, καθώς το σημείο εφαρμογής τους μετακινείται κάθετα στη διεύθυνσή τους). Εξισώνοντας τα δύο αντίστοιχα έργα σε στοιχειώδη χρόνο dt , που αντιστοιχεί σε στοιχειώδη μετακίνηση του στροφάλου κατά $d\varphi$ και στοιχειώδη μετακίνηση του εμβόλου κατά $c*dt$ προκύπτει:

$$F_g * c * dt = F_{gT} * r * d\varphi \Rightarrow F_{gT} = F_g * \frac{c}{r} * \frac{dt}{d\varphi} = F_g * \frac{c}{r * \omega}$$

Από την παραπάνω σχέση και με τη χρήση του δυναμοδεικτικού διαγράμματος είναι δυνατός ο υπολογισμός της στρεπτικής δύναμης (καθώς και της στρεπτικής ροπής) σε κάθε θέση του εμβόλου ή του στροφάλου.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένας εμβολοφόρος κινητήρας σε τομή και οι δυνάμεις των αερίων που αναλύθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 31 : Δυνάμεις Αερίων

3.5 Αδρανειακές Δυνάμεις

Ολόκληρο το έμβολο εκτελεί ευθύγραμμη επιταχυνόμενη κίνηση (μαζί με τον πείρο και τα ελατήρια του εμβόλου). Ο στρόφαλος (στο σύνολό του) εκτελεί περιστροφική κίνηση με σταθερή γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα). Αντιθέτως ο διωστήρας εκτελεί μία ιδιαίτερα σύνθετη κίνηση. Η κεφαλή του, η οποία συνδέεται στον πείρο του εμβόλου, εκτελεί ευθύγραμμη επιταχυνόμενη κίνηση, το πόδι του εκτελεί περιστροφική κίνηση μαζί με τον στρόφαλο, ενώ το στέλεχος του διωστήρα εκτελεί σύνθετη κίνηση. Ο μαθηματικός προσδιορισμός των αδρανειακών δυνάμεων δίνεται στο κεφάλαιο 4.4.4., όπου δίνεται και η μεταβλητή ροπή αδράνειας λόγω της σύνθετης κίνησης του διωστήρα.

3.5.1 Περιστροφικές Αδρανειακές Δυνάμεις

Η περιστρεφόμενη μάζα αποτελείται από την περιστρεφόμενη μάζα του διωστήρα συν την περιστρεφόμενη μάζα του στροφάλου. Η μάζα του στροφάλου δεν είναι ολόκληρη συγκεντρωμένη σε μία ακτίνα. Λόγω της μεταβολής της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα οι περιστρεφόμενες αδρανειακές δυνάμεις προκαλούν ταλαντώσεις, αφού η δράση τους μεταφέρεται στο έδρανο του κομβίου βάσεως και από εκεί στον σκελετό και την έδραση της μηχανής. Για να μπορέσει να εξουδετερωθεί η δράση της αδρανειακής δύναμης πρέπει να τοποθετηθεί αντιδιαμετρικά μία μάζα, η οποία θα δρα ως αντίβαρο. Με βάση την παραπάνω γενική αρχή υπολογίζονται τα αντίβαρα, που τοποθετούνται στους βραχίονες των στροφάλων, ώστε να εξουδετερωθούν οι περιστροφικές αδρανειακές δυνάμεις.

3.5.2 Παλινδρομικές Αδρανειακές Δυνάμεις

Οι παλινδρομικές αδρανειακές δυνάμεις οφείλονται στην παλινδρομική κίνηση του εμβόλου, του βάκτρου και τμήματος του διωστήρα. Ο κινηματικός μηχανισμός ασκεί μία δύναμη στη μάζα του εμβόλου (καθώς και στις υπόλοιπες παλινδρομούσες μάζες) και το επιταχύνει (ή το επιβραδύνει). Το έμβολο αντίστοιχα ασκεί την αντίθετη δύναμη (αντίδραση) στον κινηματικό μηχανισμό (και φυσικά στον κινητήρα). Η δύναμη αυτή είναι η αδρανειακή δύναμη F_I , η οποία δίδεται από τον νόμο του Newton:

$$F_I = -m_I * b$$

όπου b η επιτάχυνση του εμβόλου (σε κάθε θέση του στροφάλου) και m_I η παλινδρομούσα μάζα.

Η δύναμη αυτή ασκείται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (τη διεύθυνση της κινήσεως και της επιταχύνσεως του εμβόλου). Αναλύεται όπως και η δύναμη των αερίων και καταλήγει σε μία περιφερειακή συνιστώσα στο κομβίο του διωστήρα F_{IT} , που ονομάζεται στρεπτική αδρανειακή δύναμη, η οποία προκαλεί στρεπτική ροπή M_{IT} ίση με:

$$M_{IT} = F_{IT} * r$$

και προφανώς ίση και αντίρροπη ροπή ανατροπής (κατ' αναλογία με την αντίστοιχη δύναμη από τα αέρια).

Σε αντίθεση όμως με την περίπτωση των δυνάμεων από τα αέρια, η παλινδρομική αδρανειακή δύναμη μεταβιβάζεται στο σκελετό και στη συνέχεια στη βάση, αφού δεν υπάρχει αντίθετη δύναμη στο πώμα του κυλίνδρου για να την εξουδετερώσει.

Οι τριγωνομετρικές σχέσεις που δίνουν τις συνιστώσες της αδρανειακής δύναμης λόγω παλινδρομήσεως είναι προφανώς αντίστοιχες με εκείνες των αερίων και δίνονται ως εξής:

$$F_{IN} = F_l * \tan(b)$$

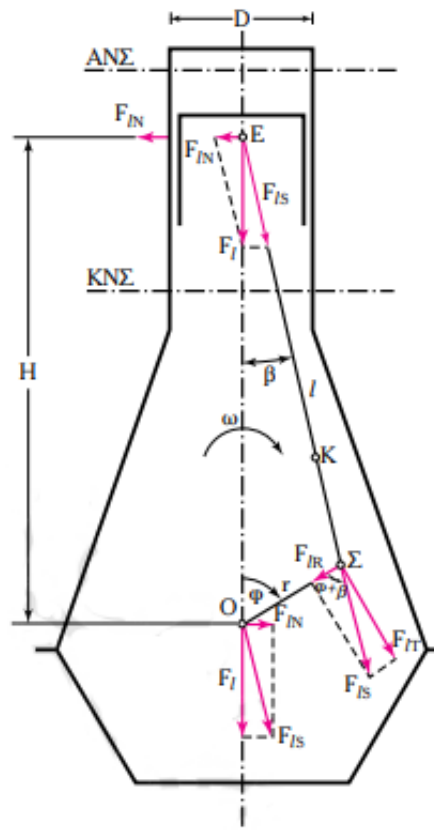
$$F_{IS} = F_l * \frac{\sin(f + b)}{\cos(b)}$$

$$F_{IT} = F_l * \frac{\sin(f + b)}{\cos(b)}$$

$$F_{IR} = F_l * \frac{\cos(f + b)}{\cos(b)}$$

$$M_{IT} = F_{IT} * r = F_l * \frac{\sin(f + b)}{\cos(b)} * r$$

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένας εμβολοφόρος κινητήρας σε τομή και οι παλινδρομικές αδρανειακές δυνάμεις που αναλύθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 32 : Παλινδρομικές Αδρανειακές Δυνάμεις

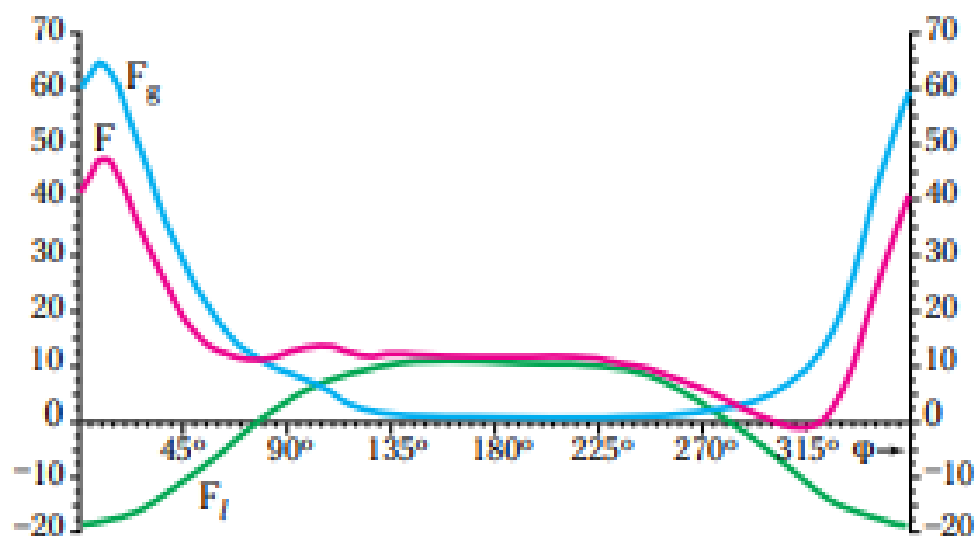
3.6 Επαλληλία Δυνάμεων

Η συνολική δύναμη στον πείρο του εμβόλου προκύπτει από την επαλληλία της αδρανειακής δύναμης λόγω της παλινδρομικής κίνησης και της δύναμης των αερίων, σε κάθε γωνία του στροφαλοφόρου άξονα. Σε μηχανές με βάκτρο η δύναμη αυτή μεταφέρεται στο κομβίο του ζυγώματος. Η συνολική δύναμη στο δίχρονο κινητήρα δεν αντιστρέφει φορά, με αποτέλεσμα να απαιτείται συνεχής υδροστατική δύναμη από την κάτω πλευρά του κομβίου του ζυγώματος, για τη διατήρηση της λιπαντικής μεμβράνης. Η απουσία αντιστροφής της δύναμης έχει ως αποτέλεσμα να μην καταπονούνται οι κοχλίες του κινηματικού μηχανισμού σε εφελκυστικές ταλαντωτικές δυνάμεις. Η συνολική αυτή δύναμη, μαζί με τις αντίστοιχες επιμέρους, δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα ως συνάρτηση της γωνίας στροφαλοφόρου άξονα.

F_g : Δύναμη αερίων

F_i : Αδρανειακή παλινδρομική δύναμη

F : Συνολική δύναμη



Εικόνα 33 : Επαλληλία Δυνάμεων

4. Μοντέλο Δυναμικής Ανάλυσης Εγκατάστασης Πρόωσης

4.1 Γενικά Στοιχεία Μοντέλου Δυναμικής Ανάλυσης

Το μοντέλο δυναμικής ανάλυσης για την εγκατάσταση πρόωσης ενός πλοίου είναι ζωτικής σημασίας για πολλές πτυχές του κινητήρα όσον αφορά την έγκαιρη διάγνωση βλαβών που μπορεί να παρουσιαστούν κατά τη λειτουργία του καθώς και τη βελτίωση της απόδοσης του. Πιο συγκεκριμένα μελετώντας τα δυναμικά φαινόμενα που αναπτύσσονται λόγω των χρονικά μεταβαλλόμενων δυνάμεων κατά τη λειτουργία ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τις καταπονήσεις που δέχονται τα επιμέρους τμήματα του κινητήρα, καθώς και ολόκληρου του συστήματος πρόωσης του πλοίου. Γνωρίζοντας τις καταπονήσεις που δέχεται το σύστημα μπορεί να γίνει σωστός προγραμματισμός των εργασιών συντήρησής του καθώς και αποφυγή ανεπιθύμητων βλαβών που οδηγούν σε αυξημένο κόστος για την επισκευή τους. Εξίσου σημαντική θεωρείται και η βέλτιστη σχεδίαση των τμημάτων του συστήματος πρόωσης που ως στόχο έχει την μέγιστη αντοχή του συστήματος με το μικρότερο δυνατόν κόστος.

Η παρούσα μελέτη στοχεύει στη συστηματική διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση ενός μοντέλου δυναμικής ανάλυσης εγκατάστασης πρόωσης ενός πλοίου. Τέτοιοι παράγοντες είναι το είδος του κινητήρα, τα στοιχεία αδράνειας, απόσβεσης και τριβής του κινητήρα, η διαδικασία της καύσης και το φορτίο που παραλαμβάνει. Το μοντέλο επιλύει το σύστημα μέσω διαφορικών εξισώσεων. Τα μοντέλα δυναμικής ανάλυσης χρησιμοποιούνται ευρέως σε ένα ευρύ φάσμα κινητήρων εσωτερικής καύσης, συνεπώς και των δίχρονων ναυτικών κινητήρων και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως μοντέλα κατανεμημένης μάζας ή ομαδικής μάζας. Σε αυτή την εργασία το μοντέλο προσεγγίζει την κατανομή της μάζας της εγκατάστασης πρόωσης χρησιμοποιώντας διακριτές μάζες που αντιστοιχούν στα επιμέρους στοιχεία του συστήματος πρόωσης. Τα στοιχεία αυτά είναι η κύρια μηχανή του πλοίου που αναλύεται στους κυλίνδρους του κινητήρα, τον σφόνδυλο, τον αποσβεστήρα, το αξονικό σύστημα του πλοίου αποτελούμενο από τον ενδιάμεσο και τον ελικοφόρο άξονα και η έλικα του πλοίου.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- Επιλογή συστήματος αναφοράς: Επιλέγεται ένας δίχρονος ναυτικός κινητήρας και ένα σύστημα πρόωσης από ένα πλοίο και περιγράφονται τα λειτουργικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους.
- Ανάπτυξη μοντέλου δυναμικής ανάλυσης εγκατάστασης πρόωσης: Προκύπτουν οι εξισώσεις που διέπουν το μοντέλο. Μέσω διαφορικών εξισώσεων περιγράφεται η ισορροπία δυνάμεων του συστήματος.
- Μοντέλα ασκούμενων ροπών: Περιγράφονται μοντέλα ροπών καύσης, τριβής, αδράνειας παλινδρομικών μαζών, φορτίου, πεπιεσμένου αέρα εκκίνησης και ενσωματώνονται στο μοντέλο που διέπει τις εξισώσεις (Βήμα 2).
- Επίλυση του συνόλου των διαφορικών εξισώσεων του μοντέλου δυναμικής ανάλυσης εγκατάστασης πρόωσης πλοίου και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

4.2 Παρουσίαση Μοντέλου

4.2.1 Σύστημα Αναφοράς

Το σύστημα αναφοράς που εξετάζεται σε αυτή τη μελέτη είναι ένα πραγματικό σύστημα πρόωσης ενός πλοίου, αποτελούμενο από έναν ναυτικό δίχρονο κινητήρα που κινεί μία έλικα όπως σε κάθε τυπικό σύστημα πρόωσης εμπορικού πλοίου. Η μετάδοση της ισχύος από τον κινητήρα στην έλικα γίνεται μέσω του αξονικού συστήματος που περιλαμβάνει έναν ενδιάμεσο και τον ελικοφόρο άξονα. Τα χαρακτηριστικά του πλοίου και του συστήματος πρόωσης παρουσιάζονται παρακάτω:

Κύρια χαρακτηριστικά πλοίου

- Κατηγορία Πλοίου: Bulk Carrier
- Κατηγορία Bulk Carrier: Handysize
- Ολικό μήκος (L_{OA}): 180 m
- Μήκος μεταξύ καθέτων (L_{BP}): 176.75 m
- Πλάτος (B): 30 m
- Βύθισμα σχεδίασης (T_{des}): 10.304 m
- Κοίλο (D): 14.7 m
- Συντελεστής γάστρας (C_b): 0.82
- Εκτόπισμα σε βύθισμα σχεδίασης (Δ): 46073.6 t
- Deadweight (DWT): 36056 t
- Lightship (LS): 10017.6 t

Κύρια χαρακτηριστικά κινητήρα

- Κινητήρας: 5RT-flex50-D
- Εταιρία κατασκευής: Doosan Engine (Wartsila)
- Μέγιστη συνεχής ισχύς: 6350 kW
- Μέγιστες συνεχόμενες στροφές λειτουργίας: 99 rpm
- Αριθμός κυλίνδρων: 5
- Διάμετρος εμβόλου: 0.5 m
- Διαδρομή εμβόλου: 2.050 m
- Μήκος διωστήρα: 2.050 m
- Μέση πραγματική πίεση (Mean Effective Pressure-MEP) στο σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας (Maximum Continuous Rating-MCR): 19.12 bar
- Μέση ενδεικνύμενη πίεση (Mean Indicated Pressure-MIP) στο σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας (Maximum Continuous Rating-MCR): 19.97 bar
- Σειρά καύσης κυλίνδρων: 1-4-3-2-5

Κύρια χαρακτηριστικά αξονικού συστήματος

Μήκος ενδιάμεσου άξονα: 6.827 m

Διάμετρος ενδιάμεσου άξονα: 340 mm

Μάζα ενδιάμεσου άξονα: 5555 kg

Μέγιστη τάση εφελκυσμού ενδιάμεσου άξονα (Ultimate Tensile Strength-UTS): 800 N/mm^2

Μήκος ελικοφόρου άξονα: 6.565 m

Διάμετρος ελικοφόρου άξονα: 450 mm

Μάζα ελικοφόρου άξονα: 7396 kg

Μέγιστη τάση εφελκυσμού ελικοφόρου άξονα (Ultimate Tensile Strength-UTS): 600 N/mm^2

Κύρια χαρακτηριστικά έλικας

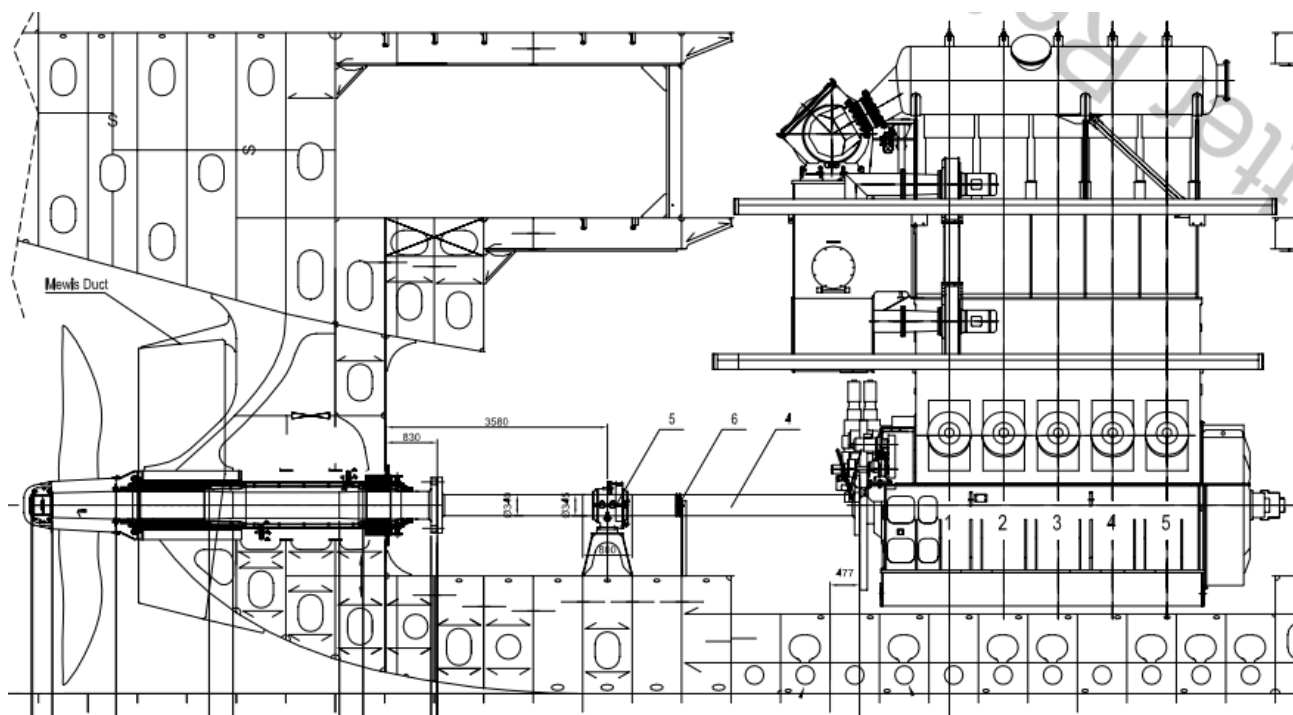
Διάμετρος έλικας: 5.9 m

Λόγος βήματος-διαμέτρου: 0.87

Αριθμός πτερυγίων: 4

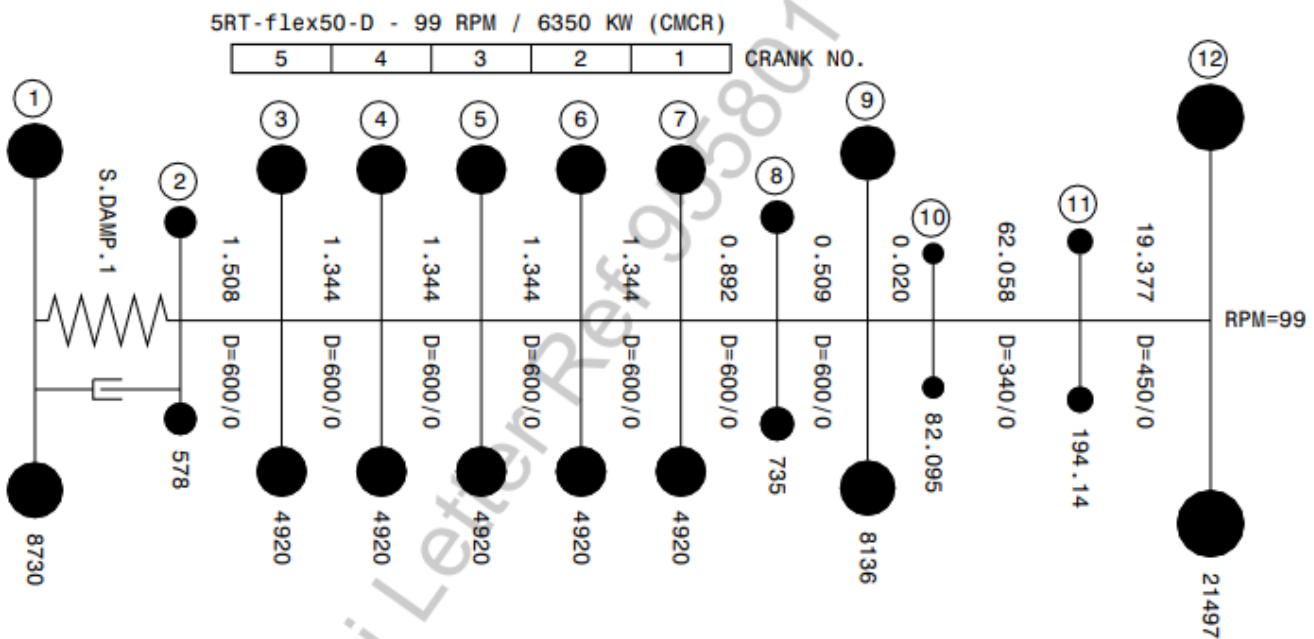
Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας A_E/A_O : 0.4

Μάζα έλικας: 11960 kg



Εικόνα 34 : Εγκατάσταση Πρόωσης Παρούσας Μελέτης

Το σύστημα πρόωσης (κινητήρας, αξονικό σύστημα πλοίου, προπέλα) μοντελοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τους N=12 βαθμούς ελευθερίας. Οι βαθμοί ελευθερίας αντιστοιχούν στο σύνολο των διακριτών μαζών του συστήματος. Ο κινητήρας αποτελείται από επιμέρους στοιχεία. Ο πρώτος βαθμός ελευθερίας αντιστοιχεί στον αποσβεστήρα κραδασμών και ο τελευταίος στην έλικα του πλοίου. Συνολικά το σύστημα περιλαμβάνει τον αποσβεστήρα του κινητήρα, την φλάντζα του κινητήρα, τους κυλίνδρους, το ωστικό έδρανο, το σφόνδυλο, το αξονικό σύστημα του πλοίου (ενδιάμεσος και ελικοφόρος άξονας) και την προπέλα. Το σύστημα παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 35 : Εγκατάσταση Πρόωσης – Σύστημα Διακριτών Μαζών

MASS-NO.	Description
1	Geislinger D250/24
2	Flange of M/E
3 TO 7	Crank 5 to 1 of M/E
8	Thrustbrg./ S.U. drive of M/E
9	Flywheel / Flange of M/E
10	Intermediate Shaft
11	Propeller Shaft
12	FP Propeller

J	IN	KGM2
H	IN	RAD/NM *E-9
D	IN	MM

Εικόνα 36 : Επεξήγηση Στοιχείων Συστήματος Εγκατάστασης Πρόωσης

Στην εικόνα 35 παρουσιάζονται τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος πρόωσης. Σε κάθε στοιχείο αναφέρεται η ροπή αδράνειας του. Η ροπή αδράνειας εκφράζει την κατανομή των υλικών σημείων ενός σώματος ως προς τον άξονα περιστροφής του. Όσον αφορά την προπέλα η τιμή της ροπή αδράνειας που αναγράφεται αφορά τη ροπή αδράνειας της προπέλας μέσα στο νερό. Η ροπή λόγω της αδράνειας των σωμάτων ισούται με $J \cdot \omega'$, δηλαδή η ροπή αδράνειας επί τη γωνιακή επιτάχυνση σύμφωνα με τον 2^ο Νόμο Νεύτωνα για περιστροφική κίνηση.

Ενδιάμεσα από τις διακριτές μάζες παρευρίσκεται ένα “ελατήριο στρέψεως” που τις συνδέει μεταξύ τους και αναγράφεται η τιμή του στην εικόνα 35. Πρακτικά το στρεπτικό ελατήριο εκφράζει τη στρεπτική δυσκαμψία και λειτουργεί ως σταθερά επαναφοράς. Τείνει να επαναφέρει δηλαδή τα δύο σώματα που είναι συνδεδεμένο στην ίδια γωνία όταν αυτά αποκτούν σχετική γωνιακή μετατόπιση λόγω των δυνάμεων που τους ασκούνται. Η ροπή λόγω δυσκαμψίας μεταξύ δύο σωμάτων ισούται με $K \cdot \theta$, δηλαδή η σταθερά της στρεπτικής δυσκαμψίας επί τη σχετική γωνιακή μετατόπιση των δύο σωμάτων.

Στο ελεύθερο άκρο του κινητήρα υπάρχει αποσβεστήρας για την απόσβεση των στρεπτικών ταλαντώσεων. Ο αποσβεστήρας είναι της εταιρίας Geislinger. Η σταθερά απόσβεσης του ισούται με: 200000 Nms/rad, ενώ η στρεπτική δυσκαμψία με: 18 MNm/rad. Η ροπή λόγω απόσβεσης ισούται με $C \cdot \omega$, δηλαδή η σταθερά απόσβεσης επί τη γωνιακή ταχύτητα. Αυτό σημαίνει ότι η απόσβεση αντιστέκεται στη ταχύτητα, δηλαδή στην κίνηση του σώματος.

4.2.2 Βασική Εξίσωση

Το σύστημα μοντελοποιείται με βάση την παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$J * \left(\frac{d\theta}{dt}\right)'' + C * \left(\frac{d\theta}{dt}\right)' + K * \theta = T_{gas} + T_{prop} + T_{friction} + T_j + T_{start}$$

Το αριστερά μέλος της εξίσωσης αντιστοιχεί στο άθροισμα της ροπής των αδρανειών των περιστρεφόμενων μαζών, της ροπής απόσβεσης και της ροπής δυσκαμψίας. Το δεξιά μέλος της εξίσωσης αντιστοιχεί στο άθροισμα της ροπής λόγω καύσης, της ροπής λόγω του φορτίου της έλικας, της ροπή λόγω τριβών του κινητήρα, της ροπή λόγω αδρανειακών μαζών και της ροπής του πεπιεσμένου αέρα κατά την εκκίνηση της μηχανής.

Τα σύμβολα του δεξιού μέλους της παραπάνω εξίσωσης αντιπροσωπεύουν πίνακες διαστάσεων $N \times 1$. Οι όροι του δεξιού μέλους της εξίσωσης περιγράφονται στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Στο αριστερά μέλος η γωνιακή μετατόπιση θ , η γωνιακή ταχύτητα $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)'$ και η γωνιακή επιτάχυνση $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)''$ αντιπροσωπεύουν πίνακες διαστάσεων $N \times 1$. Η ροπή αδράνειας J αντιπροσωπεύει διαγώνιο πίνακα διαστάσεων $N \times N$. Τέλος η απόσβεση C και η ακαμψία K αντιπροσωπεύουν τριδιαγώνιους πίνακες διαστάσεων $N \times N$.

Η κατασκευή των πινάκων J, C, K καθώς και των ασκούμενων ροπών παρατίθεται στο παράρτημα. Η διάσταση N αφορά τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος δηλαδή το σύνολο των διακριτών μαζών. Στο σύστημα που μελετάται οι βαθμοί ελευθερίας είναι δώδεκα, άρα N=12.

4.3 Ιδιοσυχνότητες Συστήματος

Οι ιδιοσυχνότητες αφορούν τις συχνότητες που ταλαντώνονται οι μάζες ενός συστήματος αν αφεθούν να ταλαντωθούν ελεύθερες από μία αρχική θέση. Οι ιδιοσυχνότητες είναι χαρακτηριστικές του συστήματος και εξαρτώνται από τις ροπές αδράνειας J των περιστρεφόμενων μαζών, τις σταθερές δυσκαμψίας K των στρεπτικών ελατηρίων που συνδέουν τις μάζες και το συντελεστή απόσβεσης C του συστήματος. Οι ιδιοσυχνότητες υπολογίζονται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής απόσβεσης, καθώς η συνεισφορά του είναι μικρή στο τελικό αποτέλεσμα. Ο αριθμός των ιδιοσυχνοτήτων ενός συστήματος ισούται με τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας του. Ωστόσο, οι ιδιοσυχνότητες που παρουσιάζουν ενδιαφέρον και μελετώνται για περιπτώσεις συντονισμού του συστήματος αφορούν συνήθως τις τρεις πρώτες. Ο υπολογισμός των ιδιοσυχνοτήτων γίνεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$\det(K - \lambda_r^2 * J) = 0$$

Όπου K, J οι πίνακες των στρεπτικών σταθερών δυσκαμψίας και ροπών αδράνειας αντίστοιχα. Με λ_r συμβολίζονται οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος.

4.4 Ροπές Μοντέλου Δυναμικής Ανάλυσης

Παρακάτω αναλύονται οι ροπές που ασκούνται κατά τη λειτουργία ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα και εισάγονται στο μοντέλο δυναμικής ανάλυσης που αναπτύσσεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

4.4.1 Ροπή Καύσης

Η ροπή καύσης κάθε κυλίνδρου του κινητήρα προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της πίεσης στον κύλινδρο και τα χαρακτηριστικά του κινηματικού μηχανισμού του κινητήρα. Η ροπή λόγω καύσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

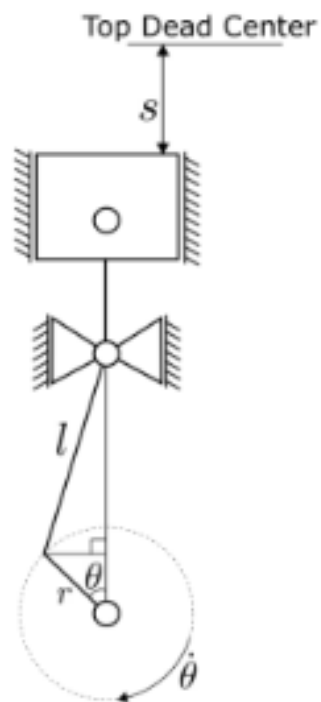
$$T_{gas}(\theta) = D_s(\theta) * \frac{\pi}{4} * B^2 * p(\theta)$$

Όπου:

- θ : η γωνία του στροφαλοφόρου άξονα
- B: η διάμετρος του εμβόλου του κυλίνδρου
- $p(\theta)$: η πίεση που αναπτύσσεται εντός του θαλάμου καύσης ως συνάρτηση της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα

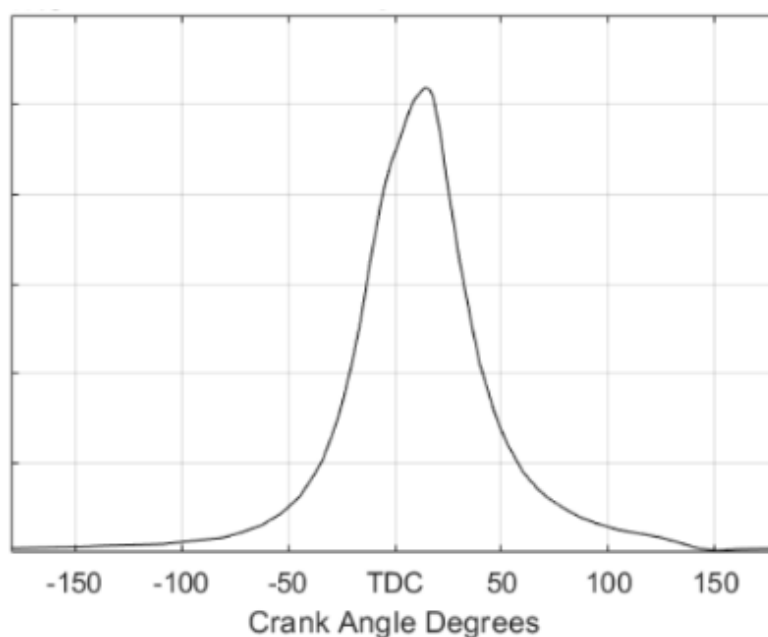
- $D_s(\theta)$: η παράγωγος του εκτοπίσματος του εμβόλου από το άνω νεκρό σημείο ως συνάρτηση της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα. Προσδιορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του κινηματικού μηχανισμού, τα οποία φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί την εξίσωση.

$$D_s(\theta) = \frac{ds(\theta)}{d\theta} = r * \sin\theta * \left(1 + \frac{\cos\theta}{\sqrt{\left(\frac{l}{r}\right)^2 - (\sin(\theta))^2}} \right)$$



Εικόνα 37 : Κινηματικός Μηχανισμός Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα

Η κατανομή της πίεσης ως συνάρτηση της γωνίας θ του στροφαλοφόρου άξονα εντός του θαλάμου καύσης παρουσιάζεται ποιοτικά στο παρακάτω δυναμοδεικτικό διάγραμμα.



Εικόνα 38 : Δυναμοδεικτικό Διάγραμμα Πίεσης-Γωνίας Στροφαλοφόρου Άξονα Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα

Τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα Πίεσης-Γωνίας στροφαλοφόρου άξονα (P- θ) για τον κινητήρα που μελετάται τα παρέιχε η εταιρία CLEOS. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CRUISE M της εταιρίας AVL. Το πρόγραμμα αυτό πραγματοποιεί θερμοδυναμική μοντελοποίηση του κινητήρα με εισαγωγή των κατάλληλων δεδομένων. Για την κατασκευή των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τις εργοστασιακές δοκιμές του κινητήρα, καθώς και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από τις εργοστασιακές δοκιμές είναι τα παρακάτω:

- Πίεση περιβάλλοντος
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος
- Πίεση αέρα σάρωσης
- Θερμοκρασία αέρα σάρωσης
- Ροή Καυσίμου (υπολογίζεται από την ειδική κατανάλωση και την ισχύ του κινητήρα)

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- Διάμετρος εμβόλου
- Διαδρομή εμβόλου
- Μήκος διωστήρα
- Αριθμός κυλίνδρων
- Σειρά καύσης κυλίνδρων
- Όγκος χώρου αέρα σάρωσης
- Όγκος χώρου πολλαπλής εξαγωγής

Η επαλήθευση των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων πραγματοποιείται μέσω του προγράμματος με τα εξής στοιχεία που παρέχονται στις εργοστασιακές δοκιμές:

- Μέγιστη πίεση κυλίνδρου
- Πίεση συμπίεσης
- Μέση πραγματική πίεση
- Θερμοκρασία καυσαερίων μετά το στροβιλουπερπληρωτή

Το πρόγραμμα CRUISE M για την κατασκευή των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων βασίζεται στο μοντέλο καύσης των Woschni-Anisits. Πρόκειται για ένα φαινομενολογικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της καύσης σε κινητήρες άμεσης έγχυσης του καυσίμου. Το μοντέλο αυτό στηρίζεται στη μονή εξίσωση σιγμοειδούς καμπύλης (single S-curve equation), η οποία υπολογίζει το κλάσμα της μάζας του καυσίμου που καίγεται m_b και την συνολική μάζα καυσίμου που εγχύεται στο κύλινδρο m_{total} . Η κύρια εξίσωση της συγκεκριμένης μεθόδου (Weibe function) είναι:

$$x_b(\theta) = \frac{m_b}{m_{total}} = 1 - \exp\left[-a * \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}\right)^{m+1}\right]$$

Όπου:

- a : σταθερά που αντιπροσωπεύει την απόδοση της καύσης, $a=6.9$
- θ : η γωνία του στροφαλοφόρου άξονα
- θ_0 : η γωνία του στροφαλοφόρου άξονα στην αρχή της καύσης κάθε κυλίνδρου
- $\Delta\theta$: η συνολική διάρκεια της καύσης μετρούμενη σε γωνία
- m : σταθερά που επηρεάζει το σχήμα του δυναμοδεικτικού διαγράμματος P- θ , $m=0.5-2$

Η καμπύλη της πίεσης με τη χρήση της συνάρτησης Weibe function παράγεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{dQ_n}{d\theta} = \frac{dx_b(\theta)}{d\theta} * m_{fuel} * LHV_{fuel} * n_{comb} - \frac{dQ_{ht}}{d\theta}$$

Όπου:

- $\frac{dQ_n}{d\theta}$: ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας
- $\frac{dx_b(\theta)}{d\theta}$: η παράγωγος ως προς τη γωνία θ της συνάρτησης Weibe function
- m_{fuel} : η μάζα καυσίμου που εγχύεται στον κύλινδρο
- LHV_{fuel} : η κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου
- n_{comb} : ο βαθμός απόδοσης της καύσης
- $\frac{dQ_{ht}}{d\theta}$: ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (υπολογίζεται με βάση κάποιο μοντέλο)

Η πίεση προκύπτει ως εξής:

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{\gamma - 1}{V} * \frac{dQ_n}{d\theta} - \gamma * \frac{P}{V} * \frac{dV}{d\theta}$$

Όπου:

- P: η πίεση σε κάθε γωνία του στροφαλοφόρου άξονα
- V: ο όγκος εμβολισμού του κυλίνδρου
- γ : η θερμοδυναμική σταθερά αερίων
- $\frac{dP}{d\theta}$: η μεταβολή της πίεσης με τη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα (δυναμοδεικτικό διάγραμμα P- θ)
- $\frac{dV}{d\theta}$: η μεταβολή του όγκου εμβολισμού με τη γωνία θ του στροφαλοφόρου άξονα

Η ροπή καύσης είναι ένας πίνακας N x 1 που έχει τιμές μόνο στα στοιχεία των κυλίνδρων. Η κατασκευή του πίνακα της ροπής καύσης T_{gas} παρατίθεται στο παράρτημα.

4.4.2 Ροπή Φορτίου Έλικας

Η έκφραση της ροπής φορτίου εξαρτάται από τον τύπο του φορτίου που κινείται από τον άξονα του κινητήρα. Για δίχρονο ναυτικό κινητήρα συνδεδεμένο με έλικα η ροπή φορτίου προσδιορίζεται με βάση το νόμο της έλικας, όπως περιγράφηκε στα κεφάλαια 2.2.3, 2.3.4, δηλαδή σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους

$$P = c * n^3, P = T_{prop} * \omega$$

Η ροπή φορτίου της έλικας είναι ένας πίνακας N x 1 και η κατασκευή του παρατίθεται στο παράρτημα.

4.4.3 Ροπή Τριβών

Για τον υπολογισμό των τριβών του κινητήρα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές προσεγγίσεις που περιγράφονται παρακάτω:

Προσέγγιση 1

Η ροπή τριβής του κινητήρα υπολογίζεται μέσω της πίεσης τριβών ($P_{friction}$) που υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$P_{friction} (bar) = 0.137 + 0.005 * P_{imax} + 0.162 * c$$

Όπου:

- $c = N(rpm) * \frac{Stroke}{30}$: η μέση ταχύτητα του εμβόλου
- P_{imax} (bar): η ενδεικνύμενη πίεση στο σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας (MCR)

Ακόμα ισχύει: $P = T * \omega$ (ισχύς=ροπή "επί" γωνιακή ταχύτητα)

Προσέγγιση 2

Ομοίως με την πρώτη προσέγγιση

$$P_{friction} = A * n^b$$

Όπου:

- n : οι στροφές λειτουργίας του κινητήρα
- b : μεταβλητή με τιμές από 1 έως 1.2
- A : σταθερά που υπολογίζεται γνωρίζοντας την πίεση απωλειών (πίεση τριβών) $P_{friction}$ και τις στροφές του κινητήρα στο σημείο Μέγιστους Συνεχούς Λειτουργίας (MCR)

Προσέγγιση 3

Ομοίως με τις προηγούμενες προσεγγίσεις

$$P_{friction} (MPa) = 0.0384 * \left(1 + \frac{1}{Z_{cyl}}\right) + \frac{3}{D_{cyl}} + 0.018 * MEP + 0.004 * c_s$$

Όπου:

- Z_{cyl} : ο αριθμός κυλίνδρων κινητήρα
- D_{cyl} (mm): η διάμετρος του εμβόλου
- MEP (MPa): η μέση πραγματική πίεση
- c_s (m/s): η μέση ταχύτητα του εμβόλου

Προσέγγιση 4

Η ροπή τριβής του κινητήρα υπολογίζεται ως ένας πίνακας συντελεστών τριβής “επί” τη γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα.

$$T_{friction} = C_f * \omega$$

Οι συντελεστές τριβής υπολογίζονται μέσω της πίεσης τριβών ($P_{friction}$) που δίνεται στο σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας από τον κατασκευαστή και τον τύπο:

$$P_{friction} = T_{friction} * \omega$$

Θεωρείται ότι οι συντελεστές τριβής παραμένουν σταθεροί για οποιοσδήποτε στροφές λειτουργίας και η τριβή αυξάνεται ανάλογα τη γωνιακή ταχύτητα. Η κατασκευή του πίνακα των συντελεστών τριβής παρατίθεται στο παράρτημα.

Η ροπή τριβών είναι ένας πίνακας $N \times 1$ με τιμές για τα στοιχεία των κυλίνδρων, αφού σε αυτά θεωρείται ότι ασκούνται οι τριβές.

4.4.4 Ροπή Αδρανειακών Μαζών

Η διακύμανση της αδράνειας κατά την περιστροφική κίνηση του κινητήρα είναι αποτέλεσμα της περιστροφικής και της παλινδρομικής κίνησης των εμβόλων, των βάκτρων, των διωστήρων και των στροφάλων του κινητήρα. Τα στοιχεία μεταβλητής αδράνειας αντιστοιχούν στους κυλίνδρους του κινητήρα και η παραγόμενη ροπή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$T_j = M_{rec} * \left(\frac{ds}{d\theta}\right)' * \frac{ds}{d\theta} * \left(\frac{d\theta}{dt}\right)'^2 - M_{rec} * \left(\frac{ds}{d\theta}\right)^2 * \left(\frac{d\theta}{dt}\right)''$$

Όπου:

- M_{rec} : η παλινδρομική μάζα κάθε κυλίνδρου
- $\frac{ds}{d\theta}$: $D_s(\theta)$, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.4.1
- $\left(\frac{ds}{d\theta}\right)'$: η παράγωγος του $D_s(\theta)$ που ισούται με :

$$\left(\frac{ds}{d\theta}\right)' = \frac{r^2 * \cos(\theta) * \left(\left(\frac{l}{r}\right)^2 - (\sin(\theta))^2\right)^{\frac{3}{2}} + r^2 * (\sin(\theta))^4 - l^2 * (\sin(\theta))^2 + l^2 * (\cos(\theta))^2}{r * \left(\left(\frac{l}{r}\right)^2 - (\sin(\theta))^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

- $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)'$: η γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα
- $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)''$: η γωνιακή επιτάχυνση του κινητήρα

Η ροπή λόγω παλινδρομικής κίνησης των μαζών είναι ένας πίνακας $N \times 1$ με τιμές στα στοιχεία που εκτελούν παλινδρομική κίνηση δηλαδή τους κυλίνδρους.

4.4.5 Ροπή Πεπιεσμένου Αέρα Εκκίνησης

Η ροπή πεπιεσμένου αέρα εκκίνησης παρέχεται συνήθως από έναν κύλινδρο του κινητήρα. Προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη την πίεση στον κύλινδρο που παρέχεται από τα αεροφυλάκια και τα χαρακτηριστικά του κινηματικού μηχανισμού του κυλίνδρου. Η ροπή πεπιεσμένου αέρα εκκίνησης δίνεται από τον παρακάτω τύπο που είναι ίδιος με την ροπή λόγω καύσης. Η διαφορά είναι στην πίεση καθώς η πίεση εκκίνησης είναι σταθερή ίση με 30 bar.

$$T_{start}(\theta) = D_s(\theta) * \frac{\pi}{4} * B^2 * p(\theta)$$

5. Προσομοιώσεις

Το μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιείται για να διερευνηθεί συνολικά η συμπεριφορά της εγκατάστασης πρόωσης σε σταθερή και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας του δίχρονου ναυτικού κινητήρα. Στόχος είναι η όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική προσομοίωση της λειτουργίας του εξεταζόμενου κινητήρα καθώς και των δυναμικών φαινομένων που αναπτύσσονται με τα υπόλοιπα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης, ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την συνολική λειτουργία και την απόδοση του υπό μελέτη συστήματος. Το σύνολο των σεναρίων των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω είναι:

- Λειτουργία σε σταθερό φορτίο 25%
- Λειτουργία σε σταθερό φορτίο 50%
- Λειτουργία σε σταθερό φορτίο 75%
- Λειτουργία σε σταθερό φορτίο 100%
- Επιτάχυνση από φορτίο 50% σε φορτίο 75% με άμεση μεταβολή της ροπής καύσης των κυλίνδρων
- Επιτάχυνση από φορτίο 25% σε φορτίο 100% με άμεση μεταβολή της ροπής καύσης των κυλίνδρων
- Επιτάχυνση από φορτίο 25% σε φορτίο 100% με σταδιακή μεταβολή της ροπής καύσης των κυλίνδρων

Αρχικά θα γίνουν 2 παραδοχές που αφορούν τη ροπή λόγω τριβών και τη ροπή φορτίου της έλικας. Μετά από δοκιμές για τις 4 περιπτώσεις υπολογισμού της ροπής τριβών προτιμήθηκε η περίπτωση 4, καθώς έδινε ακριβή αποτελέσματα στο σημείο μέγιστους συνεχούς λειτουργίας. Οι περιπτώσεις 1 και 3 είχαν απόκλιση που παρατίθεται παρακάτω, ενώ η περίπτωση 2 είναι παρόμοια με την 4 και δεν θα μελετηθεί. Ακολουθεί πίνακας με τους υπολογισμούς για τις 3 ροπές τριβής στο σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας του κινητήρα και η απόκλιση τους. Δίνεται από τον κατασκευαστή ότι η πίεση τριβών στο σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας ισούται με 0.85 bar.

Πίνακας 4 : Τρόποι Υπολογισμού Τριβών

Τρόπος υπολογισμού ροπής τριβών	Πίεση Τριβών (P_{friction} (bar))	Απόκλιση από Πραγματική Τιμή (%)
Περίπτωση 1	1.333	+36
Περίπτωση 2	0.850	0
Περίπτωση 3	1.136	+25

Για τη ροπή της έλικας γίνεται η παραδοχή ότι η καμπύλη του νόμου της έλικας που ακολουθεί υπολογίζεται από το σημείο Μέγιστης Συνεχούς Λειτουργίας για ισχύ και στροφές λειτουργίας. Δηλαδή:

$$P = c * n^3, c = \frac{P}{n^3}, c = \frac{P_{MCR}}{(n_{MCR})^3}$$

Άρα η καμπύλη που περιγράφει το νόμο της έλικας είναι: $P = \frac{P_{MCR}}{(n_{MCR})^3} * n^3$

5.1 Προσομοιώσεις Σταθερού Φορτίου

Αρχικά παρατίθενται δύο πίνακες με τις πραγματικές τιμές ισχύος και στροφών λειτουργίας του πλοίου και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που υπολογίζονται από το μοντέλο της εργασίας.

Πίνακας 5 : Διαφορές Ισχύος Πραγματικού Συστήματος – Μοντέλου

Φορτίο (%)	Πραγματική Ισχύς (kW)	Ισχύς Μοντέλου (kW)	Απόκλιση (%)
25	1588	1373	- 13.54
50	3175	3267	+2.90
75	4763	4727	-0.76
100	6350	6332	-0.28

Πίνακας 6 : Διαφορές Στροφών Πραγματικού Συστήματος - Μοντέλου

Φορτίο (%)	Πραγματικές Στροφές (rpm)	Στροφές Μοντέλου (rpm)	Απόκλιση (%)
25	62.4	59.3	-4.97
50	78.6	79.4	+1.02
75	89.9	89.7	-0.22
100	99	98.9	-0.10

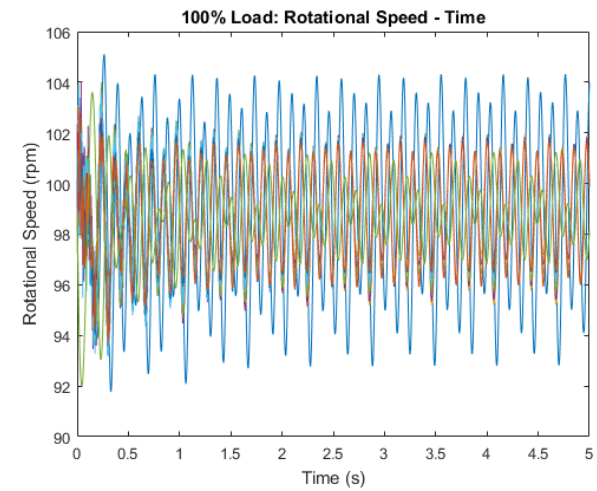
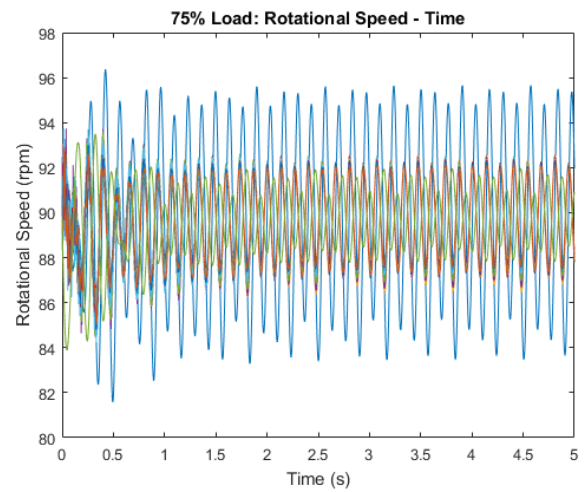
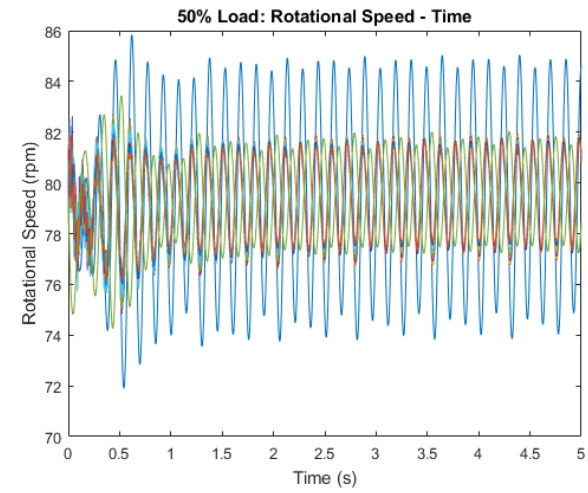
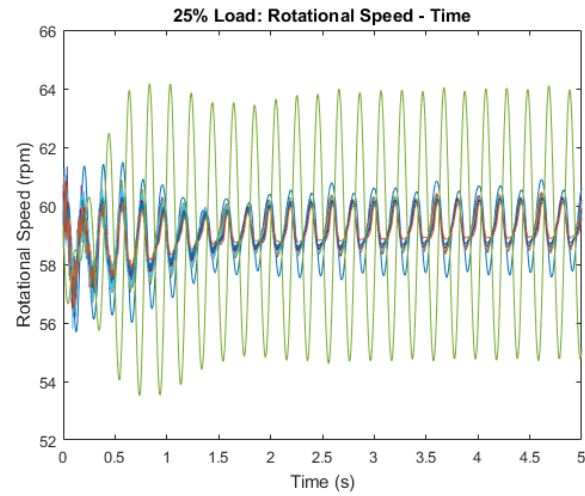
Παρατηρείται ότι το μοντέλο δίνει αποτελέσματα που προσεγγίζουν αρκετά τις πραγματικές τιμές του συστήματος. Μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στο Φορτίο 25% που πιθανόν να οφείλεται στη μέθοδο υπολογισμού των τριβών καθώς αυτή είναι προσαρμοσμένη στο σημείο Μέγιστης Συνεχούς Λειτουργίας (Φορτίο 100%), οπότε το Φορτίο 25% έχει τη μεγαλύτερη απόκλιση από το Φορτίο 100%. Ένας δεύτερος λόγος που πιθανόν να οφείλεται η διαφορά στο Φορτίο 25% είναι οι παραδοχές που μπορεί να έγιναν κατά τον υπολογισμό του αντίστοιχου Δυναμοδεικτικού Διαγράμματος Πίεσης – Γωνίας Στροφαλοφόρου Άξονα.

Οι προσομοιώσεις αυτού του κεφαλαίου αφορούν τη λειτουργία του κινητήρα σε σταθερό φορτίο. Πραγματοποιείται η προσομοίωση για κάθε φορτίο ξεχωριστά θέτοντας ως αρχική συνθήκη στο μοντέλο την αντίστοιχη ταχύτητα λειτουργίας. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα δυναμικά φαινόμενα που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία του κινητήρα. Τα κύρια διαγράμματα που θα παρουσιαστούν και για τα 4 φορτία λειτουργίας είναι:

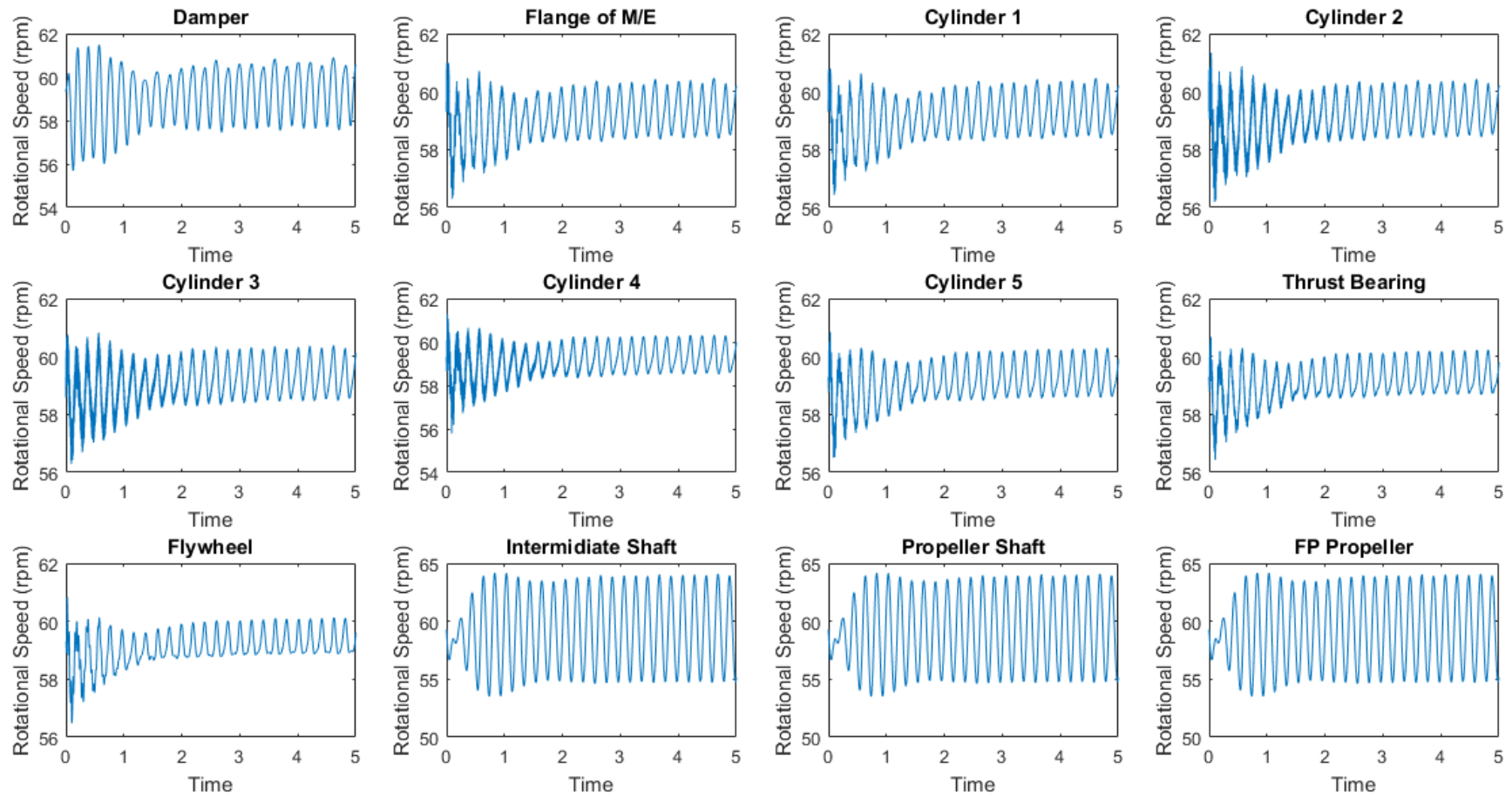
- Διάγραμμα Περιστροφικής Ταχύτητας – Χρόνου για όλα τα επιμέρους στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης στο ίδιο διάγραμμα
- Διάγραμμα Περιστροφικής Ταχύτητας – Χρόνου για όλα τα επιμέρους στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε ξεχωριστά διαγράμματα
- Διάγραμμα Πίεσης Κυλίνδρου – Γωνίας Περιστροφής Στροφαλοφόρου Άξονα για έναν κύλινδρο
- Διάγραμμα Ροπής λόγω Καύσης - Γωνίας Περιστροφής Στροφαλοφόρου Άξονα για έναν κύλινδρο

Ακόμα θα παρουσιαστούν τα εξής διαγράμματα για το επιλεγμένο φορτίο 100% (Φορτίο Μέγιστης Συνεχούς Λειτουργίας):

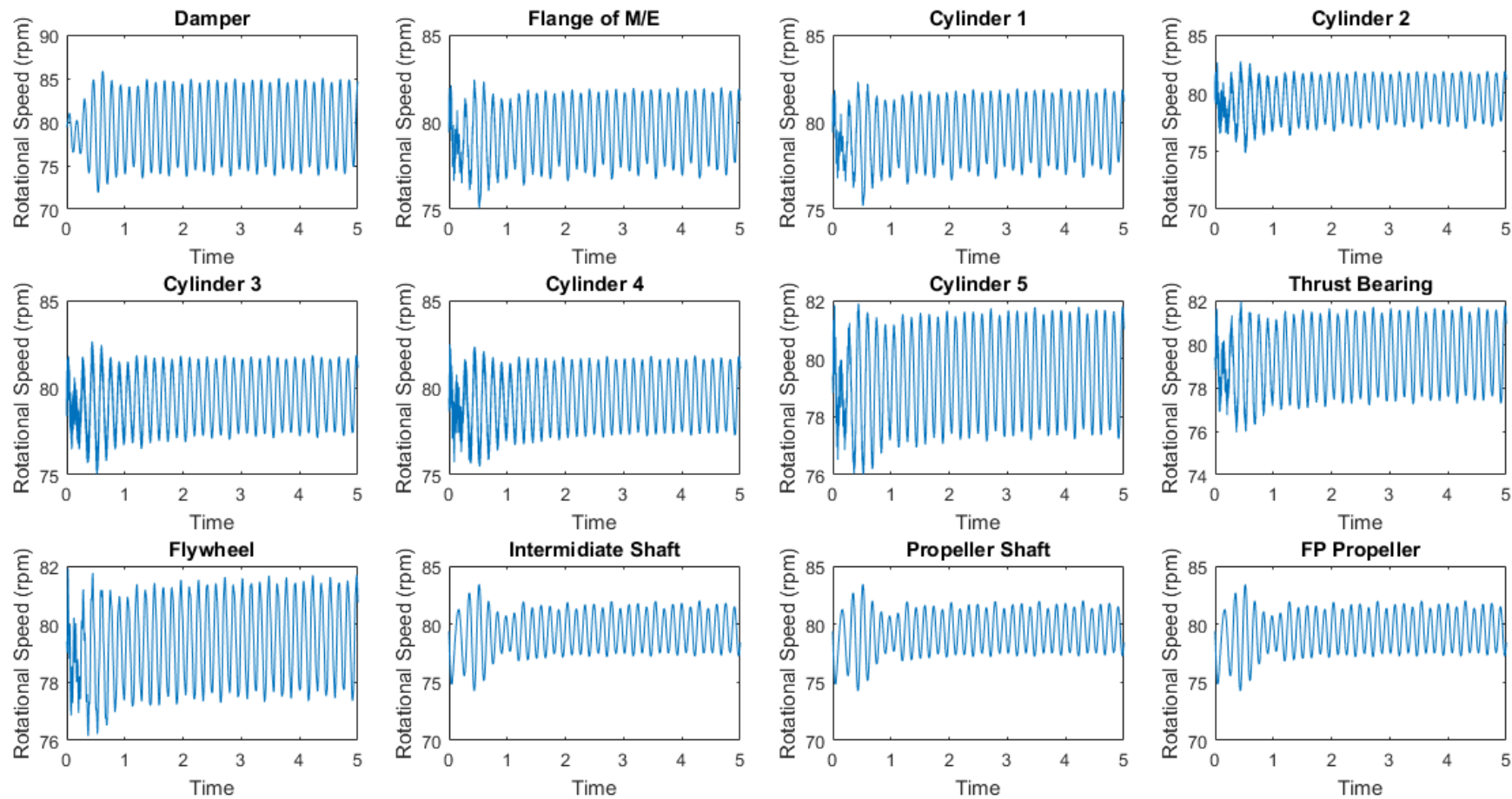
- Διάγραμμα Πίεσης Κυλίνδρου – Γωνίας Περιστροφής Στροφαλοφόρου Άξονα για όλους τους κυλίνδρους
- Διάγραμμα Ροπής λόγω Καύσης - Γωνίας Περιστροφής Στροφαλοφόρου Άξονα για όλους τους κυλίνδρους
- Διάγραμμα Ροπής Έλικας – Χρόνου
- Διάγραμμα Ροπής Τριβών – Χρόνου
- Διάγραμμα Ροπής Αδράνειας Παλινδρομικών Μαζών – Χρόνου
- Διάγραμμα Ταχύτητας Εμβόλων – Χρόνου
- Διάγραμμα Ροπής πριν και μετά το Σφόνδυλο - Χρόνου
- Διαγράμματα των παρακάτω δυνάμεων συναρτήσει του χρόνου:
 - Δύναμη Αερίων στο Έμβολο (Piston Gas Force)
 - Δύναμη Αερίων κάθετη στα Τοιχώματα (Lateral Guide Gas Force)
 - Δύναμη Αερίων κατά τη διεύθυνση του Διωστήρα (Crankpin Gas Force)
 - Ακτινική Δύναμη Στροφάλου λόγω Δύναμης Αερίων (Radial Crankpin Gas Force)
 - Στρεπτική Δύναμη Στροφάλου λόγω Δύναμης Αερίων (Tangential Crankpin Gas Force)
 - Δύναμη λόγω Αδράνειας Παλινδρομικών Μαζών στο Έμβολο (Piston Inertia Force of the Reciprocating Masses)
 - Δύναμη κάθετη στα Τοιχώματα λόγω Αδράνειας Παλινδρομικών Μαζών (Lateral Guide Inertia Force of the Reciprocating Masses)
 - Δύναμη κατά τη διεύθυνση του Διωστήρα λόγω Αδράνειας Παλινδρομικών Μαζών (Crankpin Inertia Force of the Reciprocating Masses)
 - Ακτινική Δύναμη Στροφάλου λόγω Αδράνειας Παλινδρομικών Μαζών (Radial Crankpin Inertia Force of the Reciprocating Masses)
 - Στρεπτική Δύναμη Στροφάλου λόγω Αδράνειας Παλινδρομικών Μαζών (Tangential Crankpin Inertia Force of the Reciprocating Masses)
 - Συνολική Δύναμη στο Έμβολο (Piston Total Force)
 - Συνολική Δύναμη κάθετη στα Τοιχώματα (Lateral Guide Total Force)
 - Συνολική Δύναμη κατά τη διεύθυνση του Διωστήρα (Crankpin Total Force)
 - Συνολική Ακτινική Δύναμη Στροφάλου (Radial Crankpin Total Force)
 - Συνολική Στρεπτική Δύναμη Στροφάλου (Tangential Crankpin Total Force)



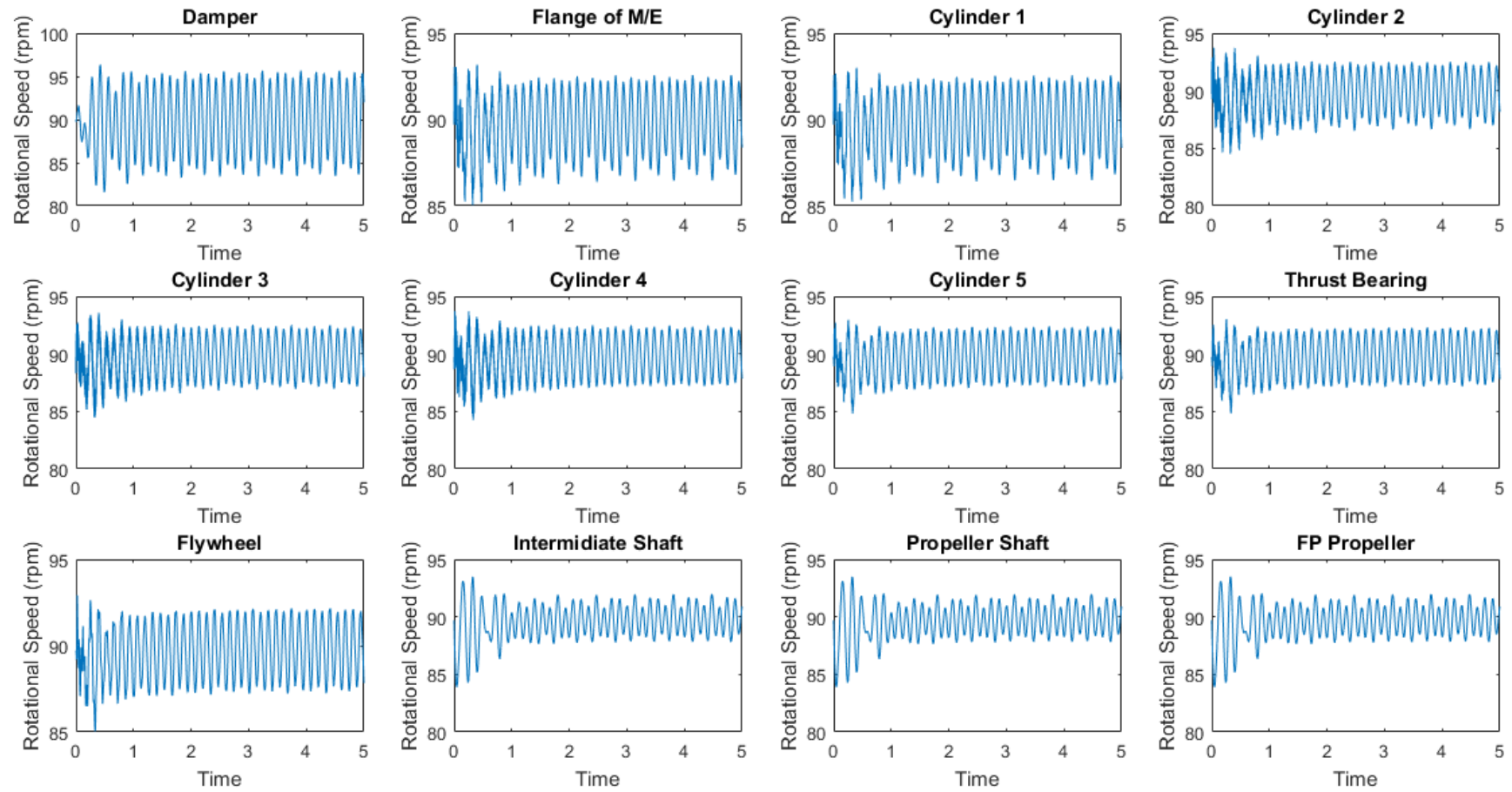
Διάγραμμα 1 : Ταχύτητα Περιστροφής – Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε ένα διάγραμμα) για τα 4 Φορτία



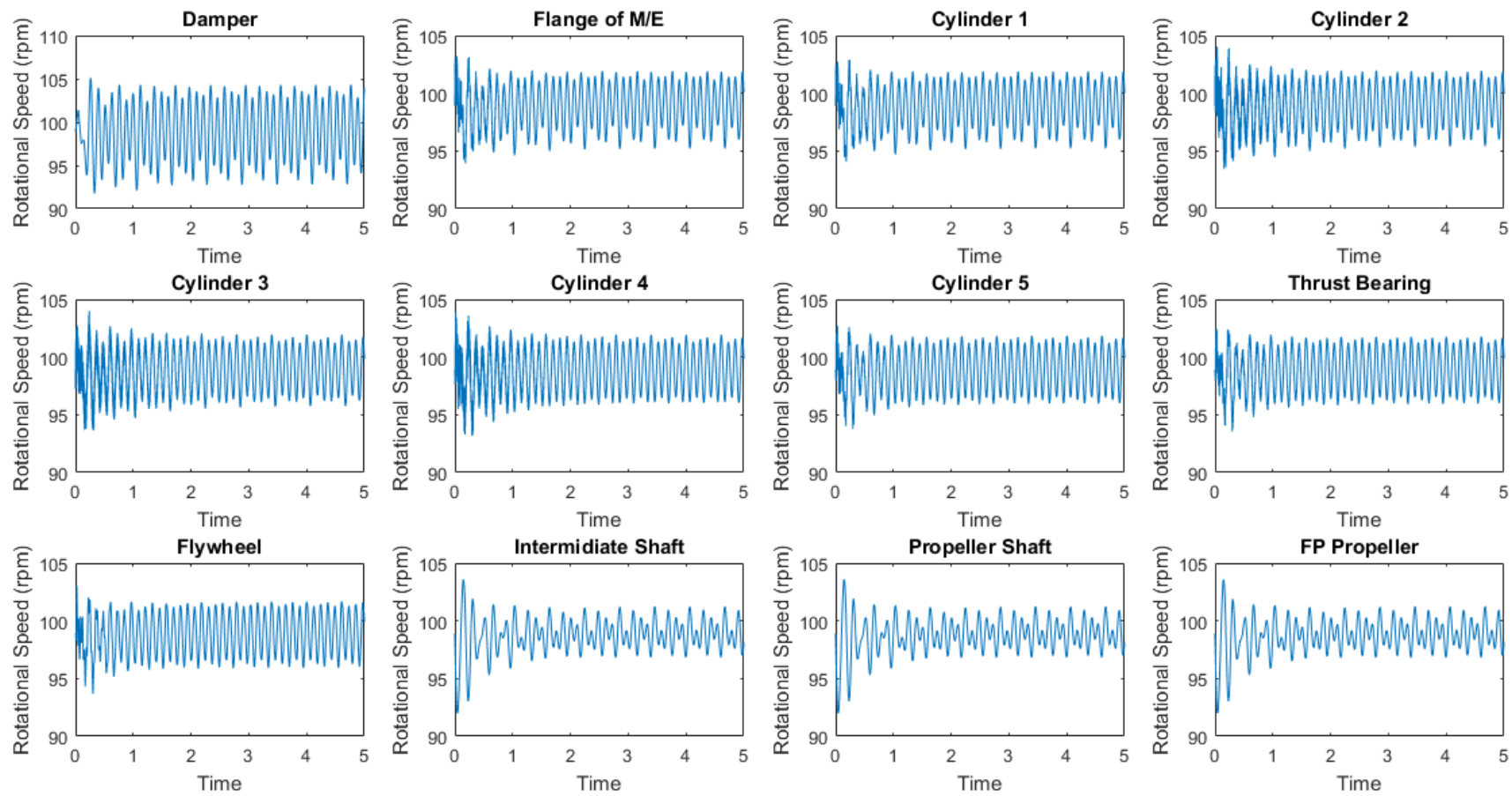
Διάγραμμα 2 : Ταχύτητα Περιστροφής - Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε διαφορετικά διαγράμματα) για Φορτίο 25%



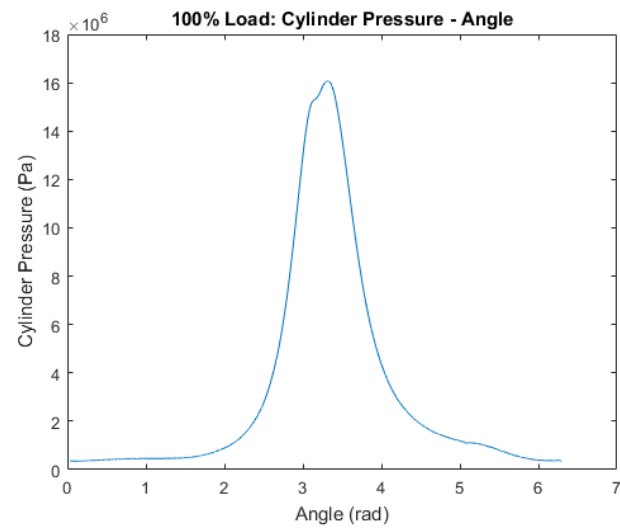
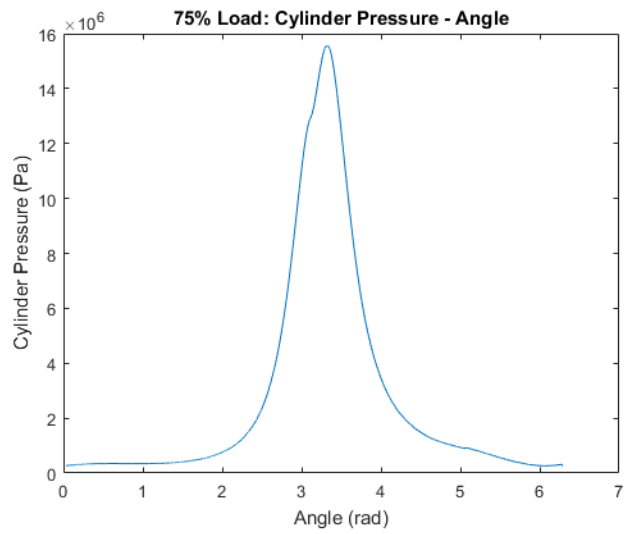
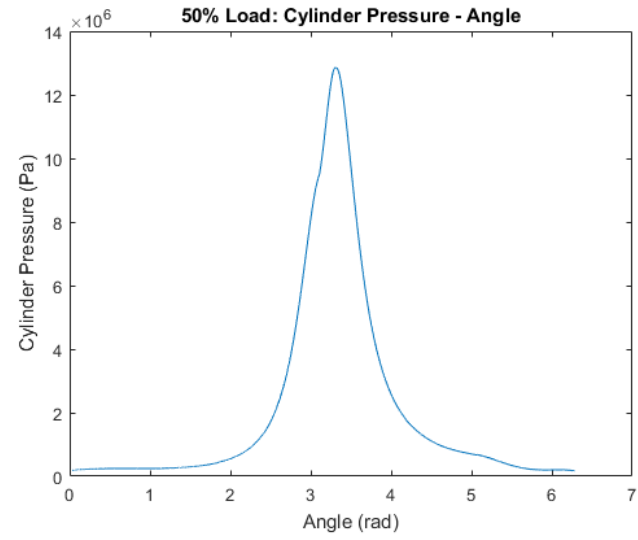
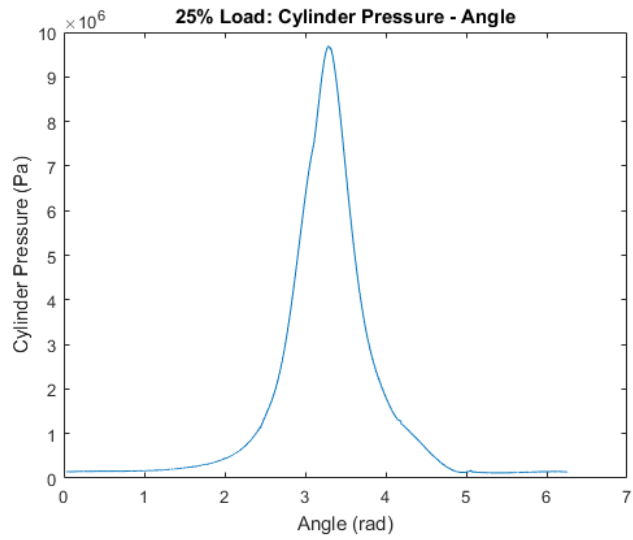
Διάγραμμα 3 : Ταχύτητα Περιστροφής - Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε διαφορετικά διαγράμματα) για Φορτίο 50%



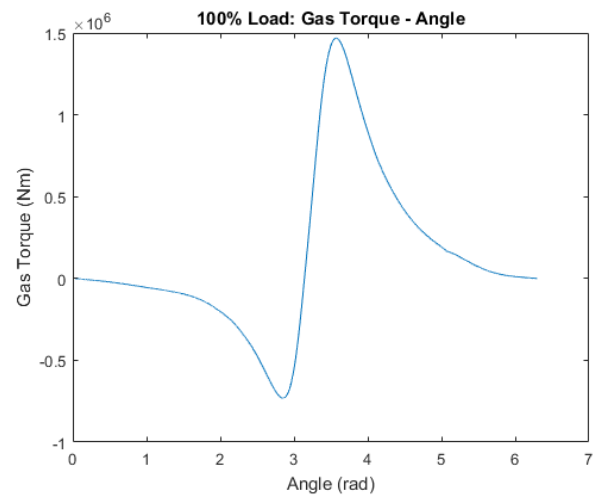
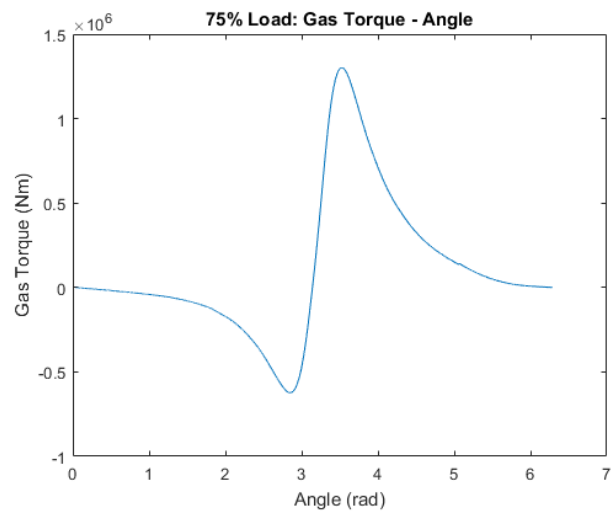
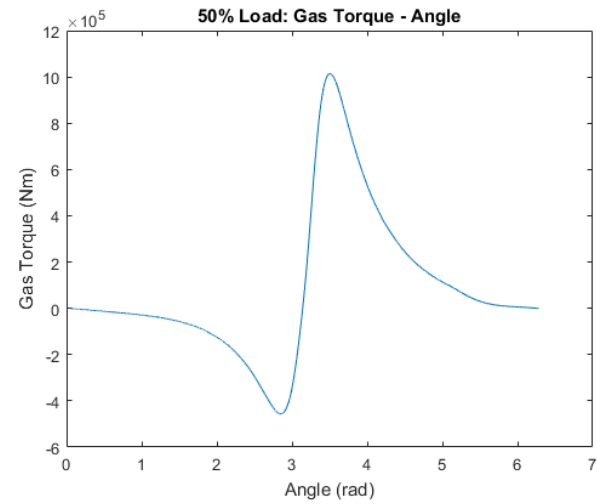
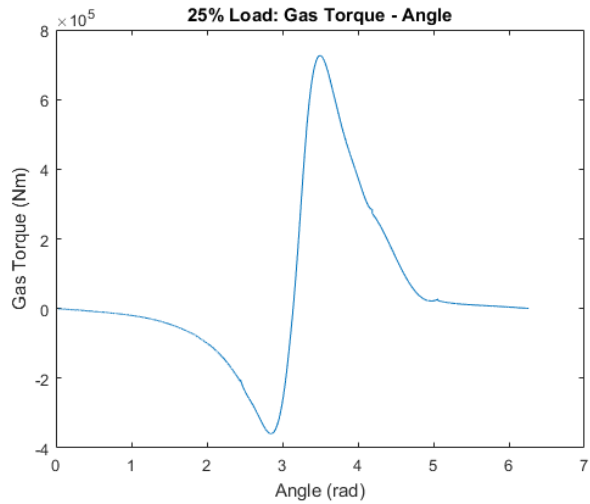
Διάγραμμα 4 : Ταχύτητα Περιστροφής – Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε διαφορετικά διαγράμματα) για Φορτίο 75%



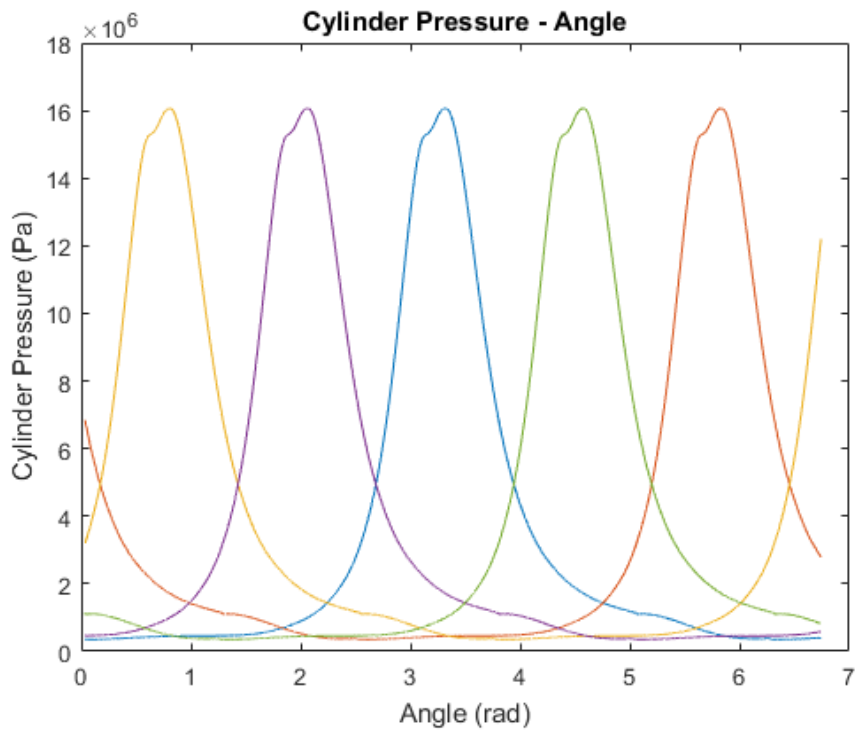
Διάγραμμα 5 : Ταχύτητα Περιστροφής - Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε διαφορετικά διαγράμματα) για Φορτίο 100%



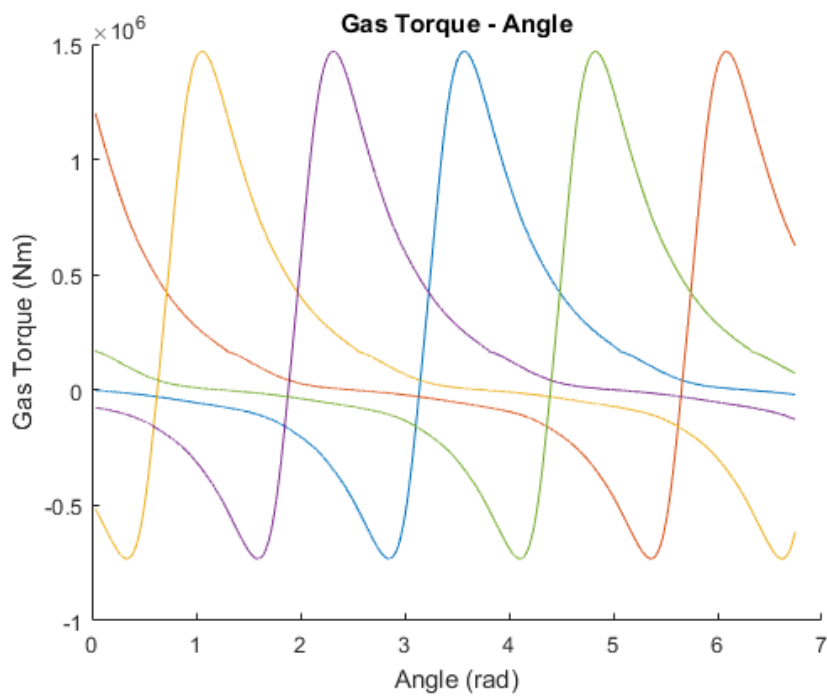
Διάγραμμα 6 : Δυναμοδεικτικά Διαγράμματα Πίεσης - Γωνίας Στροφαλοφόρου Άξονα για τα 4 Φορτία



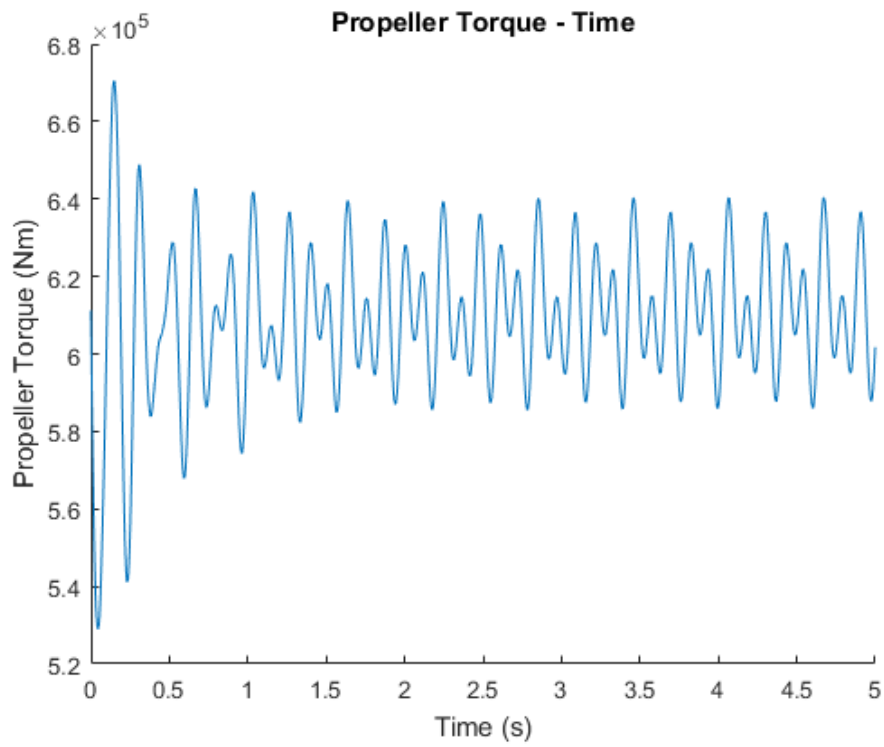
Διάγραμμα 7 : Ροπή Καύσης - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (για τα 4 Φορτία)



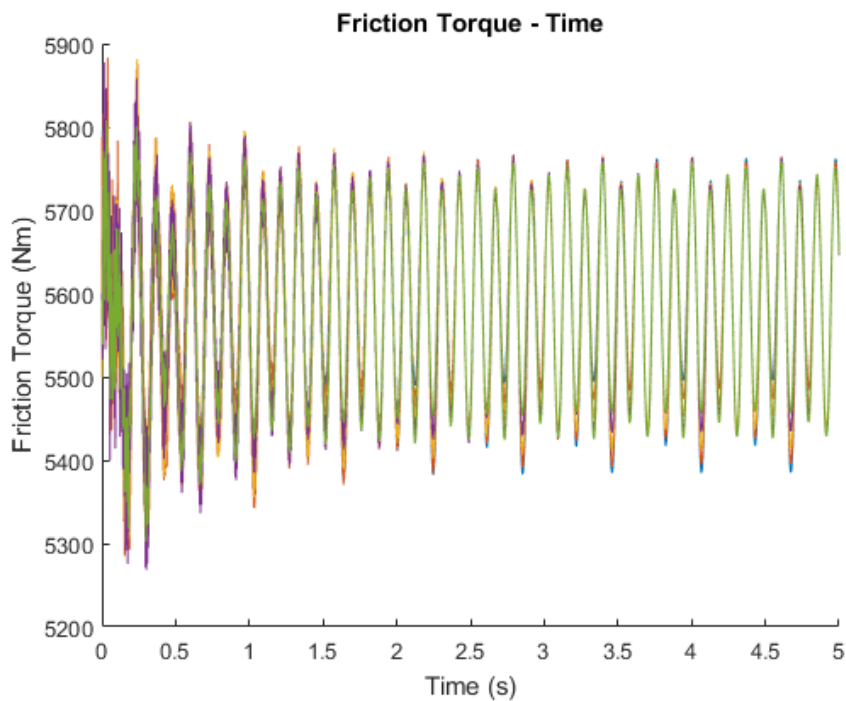
Διάγραμμα 8 : Πίεση - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (για όλους τους κυλίνδρους), Φορτίο 100%



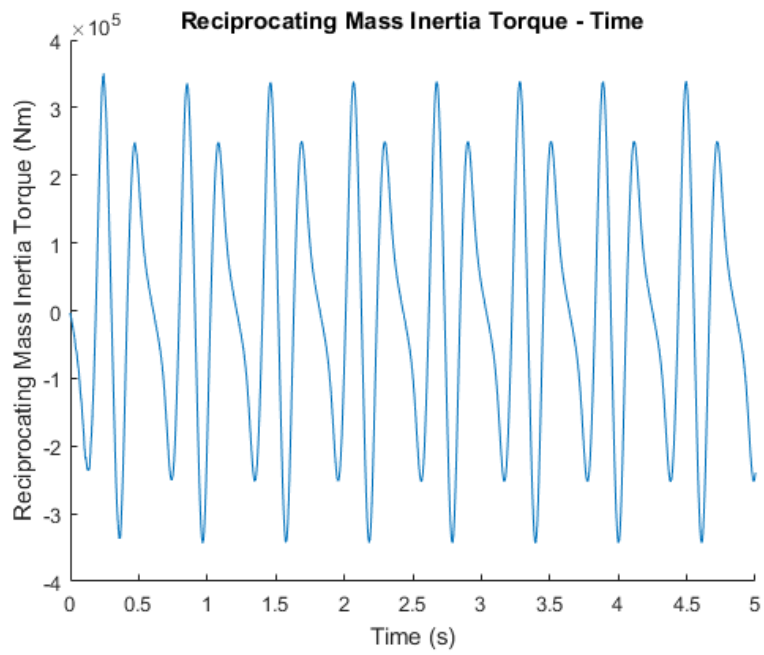
Διάγραμμα 9 : Ροπή Καύσης - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (για όλους τους κυλίνδρους), Φορτίο 100%



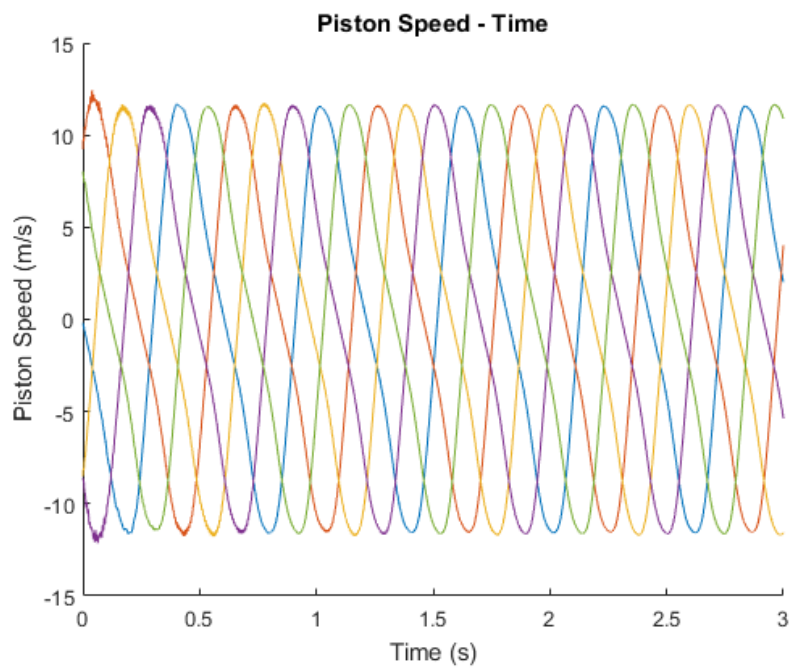
Διάγραμμα 10 : Ροπή Έλικας - Χρόνος, Φορτίο 100%



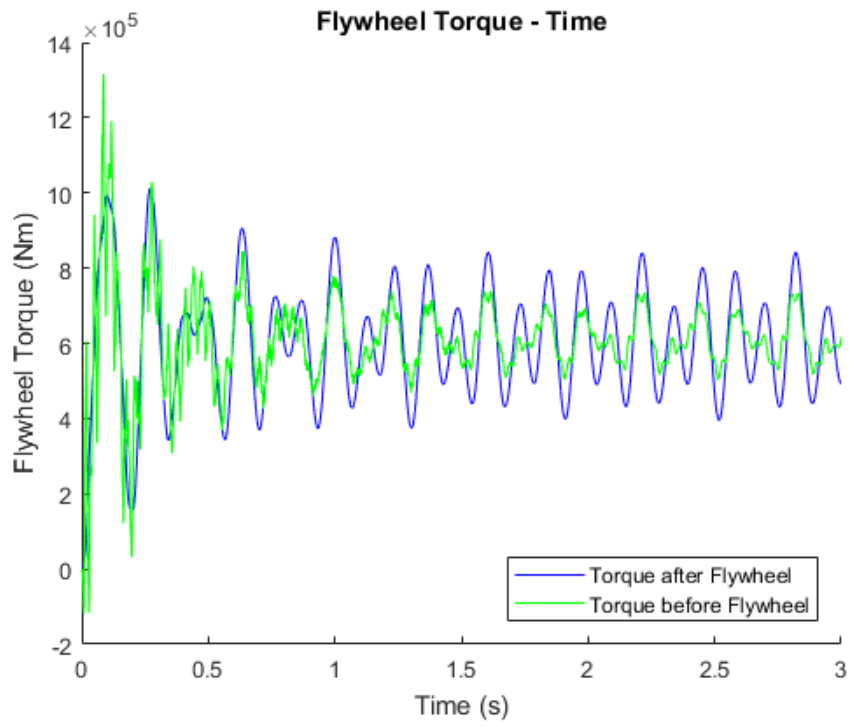
Διάγραμμα 11 : Ροπή Τριβών – Χρόνος (για όλους τους κυλίνδρους ξεχωριστά) , Φορτίο 100%



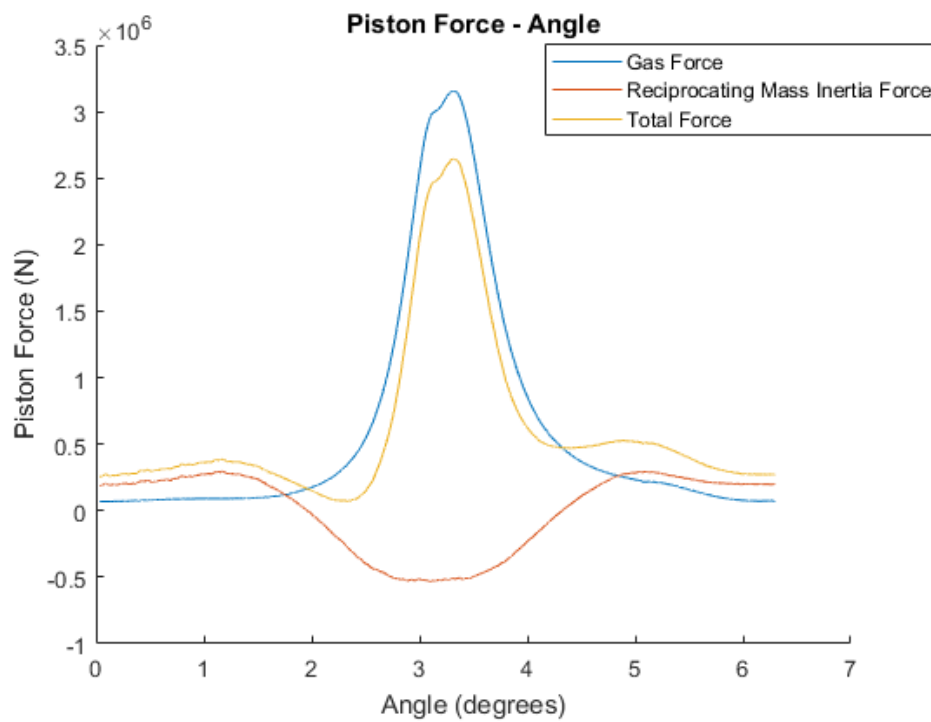
Διάγραμμα 12 : Ροπή λόγω Αδράνειας Παλινδρομικών Μαζών (1 κύλινδρος), Φορτίο 100%



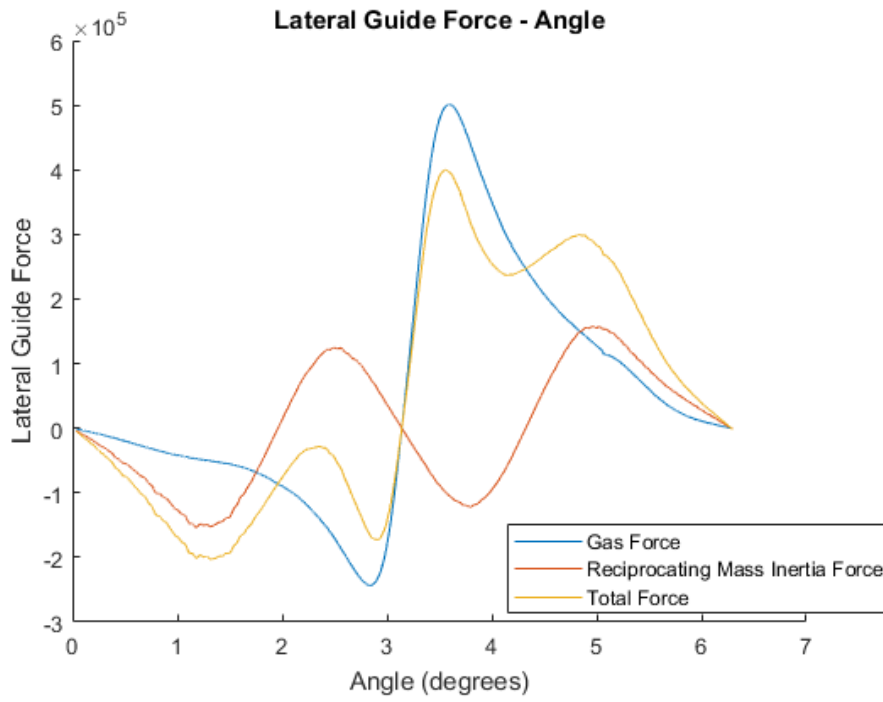
Διάγραμμα 13 : Ταχύτητα Εμβόλων - Χρόνος, Φορτίο 100%



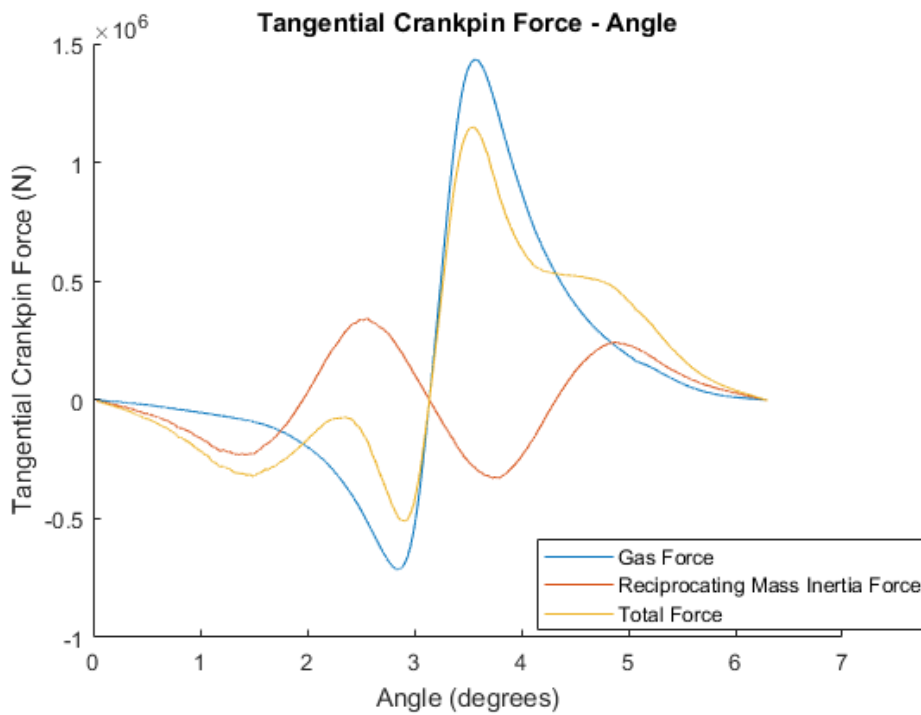
Διάγραμμα 14 : Ροπή πριν και μετά το Σφόνδυλο - Χρόνος



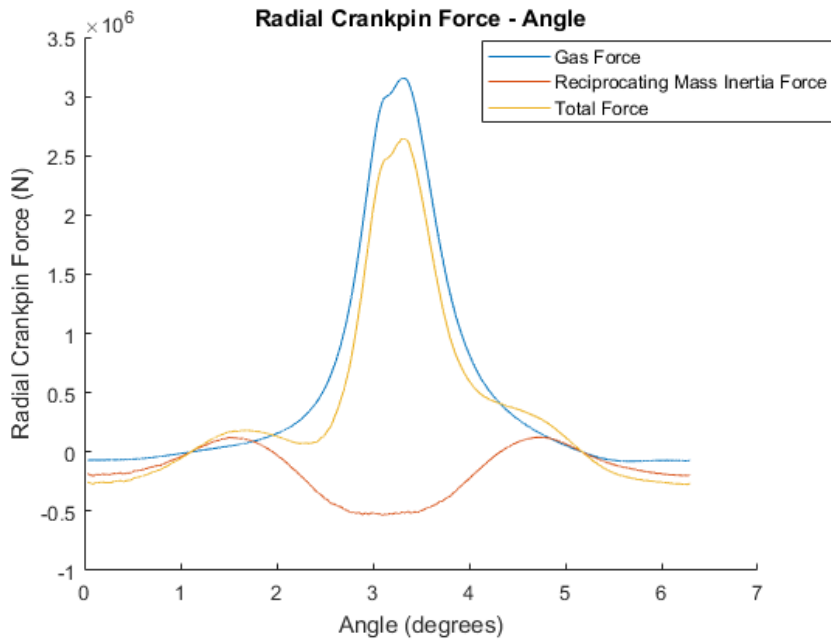
Διάγραμμα 15 : Δυνάμεις στο Έμβολο



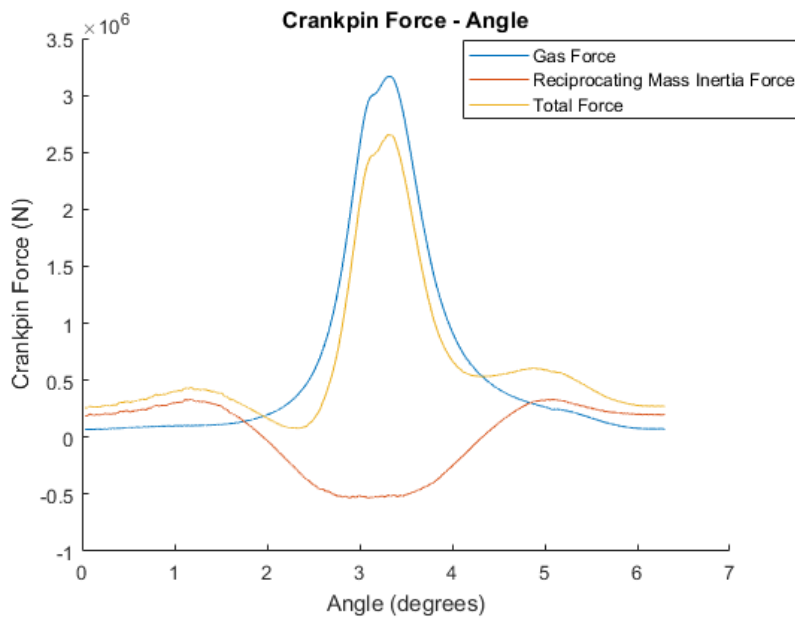
Διάγραμμα 16 : Δυνάμεις κάθετες στα τοιχώματα



Διάγραμμα 17 : Στρεπτική Δύναμη Στροφάλου



Διάγραμμα 18 : Ακτινική Δύναμη Στροφάλου



Διάγραμμα 19 : Δύναμη κατά τη Διεύθυνση του Διωστήρα

5.2 Προσομοιώσεις Επιτάχυνσης με Στιγμαία Αλλαγή Ροπής

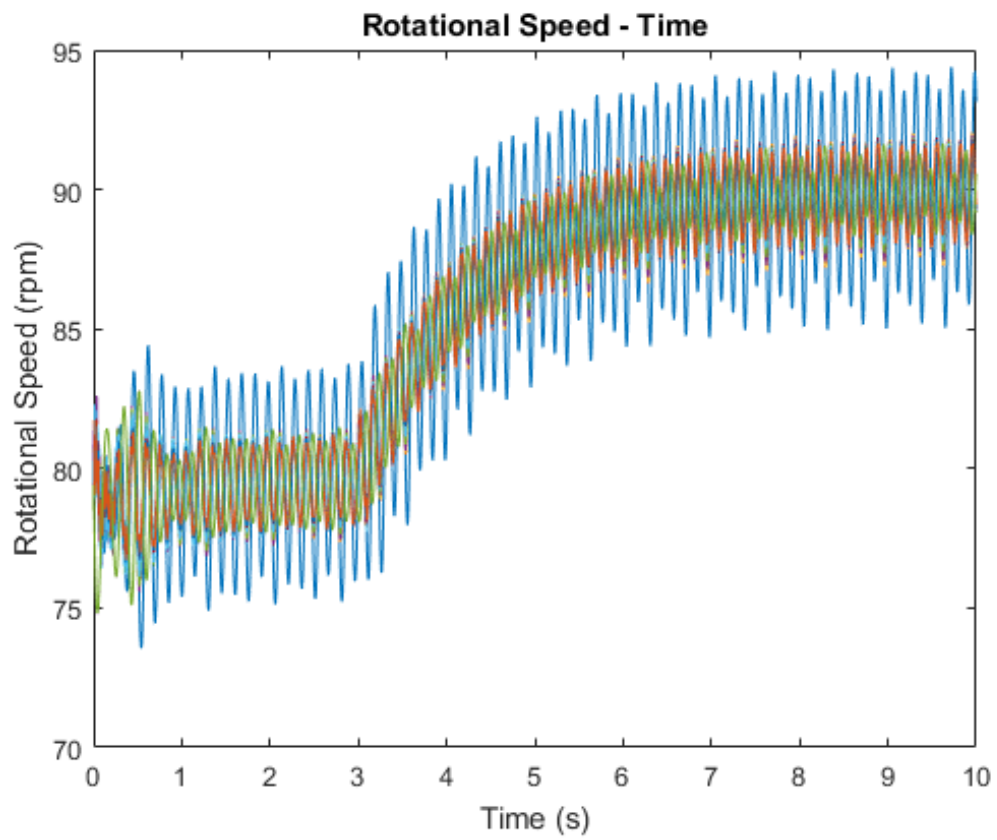
Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθούν 2 προσομοιώσεις επιτάχυνσης με βάση τα υπάρχοντα στοιχεία για τα 4 φορτία του κινητήρα. Το σημαντικότερο στοιχείο κατά την επιτάχυνση είναι η επιπλέον ροπή που ασκεί ο κινητήρας μέσω της καύσης, δηλαδή τελικά η πίεση στο θάλαμο καύσης, ώστε να υπερνικηθεί η αδράνεια του συστήματος, οι τριβές και η αντίσταση της έλικας.

Η πρώτη προσομοίωση θα αφορά μικρότερη μεταβολή, ενώ η δεύτερη μεγαλύτερη. Συγκεκριμένα στην πρώτη προσομοίωση το σύστημα που μελετάται λειτουργεί σε φορτίο 50% και επιταχύνει έως ότου βρεθεί σε φορτίο 75%, ενώ στη δεύτερη προσομοίωση το σύστημα λειτουργεί σε φορτίο 25% και επιταχύνει έως ότου βρεθεί σε φορτίο 100%. Και στις 2 περιπτώσεις θεωρείται ότι η καινούργια (τελική) ροπή λόγω καύσης των κυλίνδρων ασκείται στιγμιαία, δηλαδή ότι η καινούργια πίεση στο θάλαμο καύσης αναπτύσσεται στιγμιαία μόλις δοθεί η εντολή για αύξηση των στροφών του κινητήρα. Στην προσομοίωση θεωρείται ότι η αλλαγή ροπής πραγματοποιείται τη στιγμή: 3 sec.

Τα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν για τα παραπάνω σενάρια επιτάχυνσης είναι:

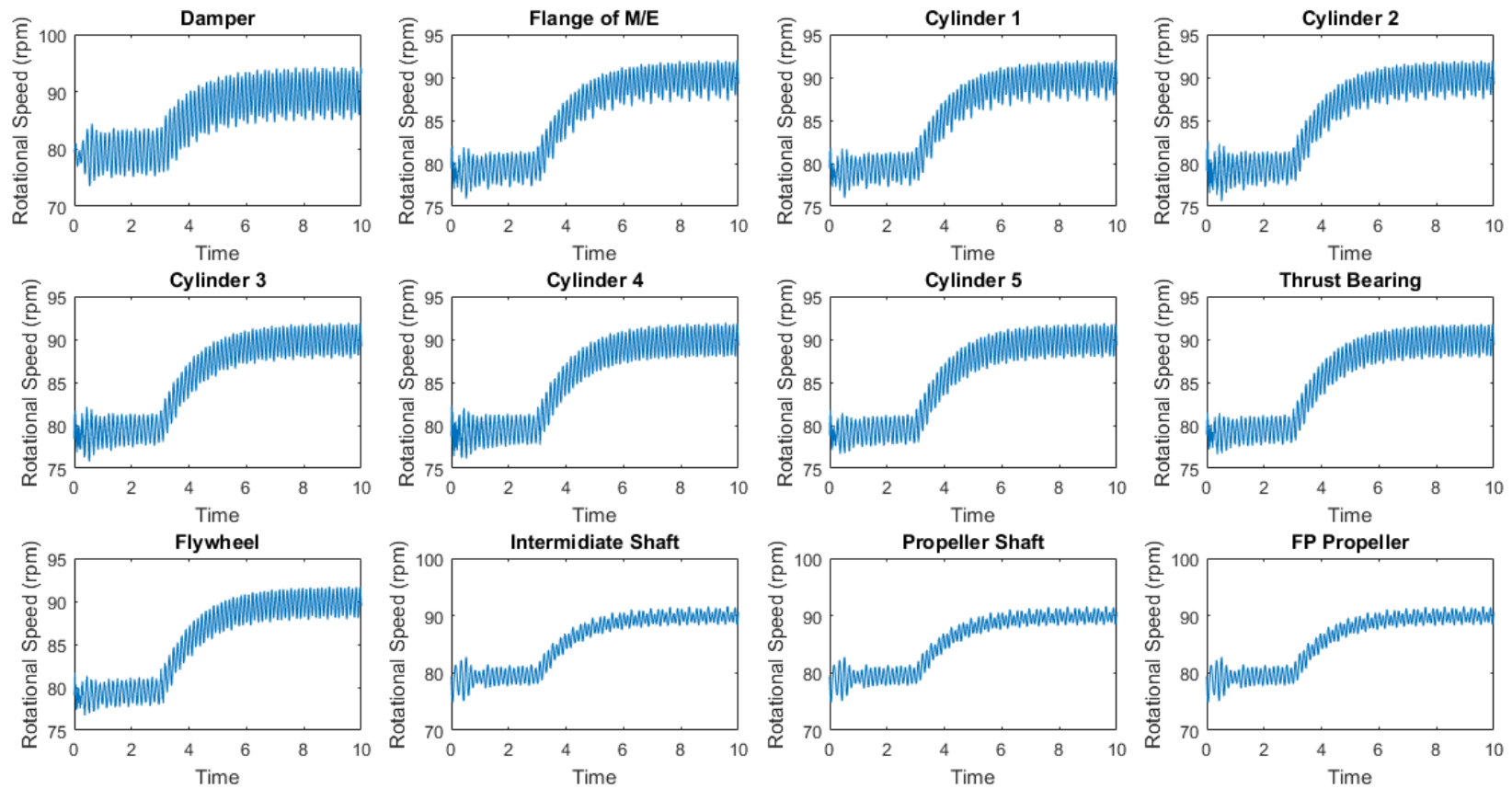
- Διάγραμμα Περιστροφικής Ταχύτητας – Χρόνου για όλα τα επιμέρους στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης στο ίδιο διάγραμμα
- Διάγραμμα Περιστροφικής Ταχύτητας – Χρόνου για όλα τα επιμέρους στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε ξεχωριστά διαγράμματα
- Διάγραμμα Πίεσης Κυλίνδρου – Γωνίας Περιστροφής Στροφαλοφόρου Άξονα για έναν κύλινδρο
- Διάγραμμα Ροπής λόγω Καύσης - Γωνίας Περιστροφής Στροφαλοφόρου Άξονα για έναν κύλινδρο
- Διάγραμμα Ροπής Έλικας – Χρόνου
- Διάγραμμα Φόρτισης Κινητήρα (Loading Diagram)

Περίπτωση 1: Επιτάχυνση από Φορτίο 50% σε Φορτίο 75%

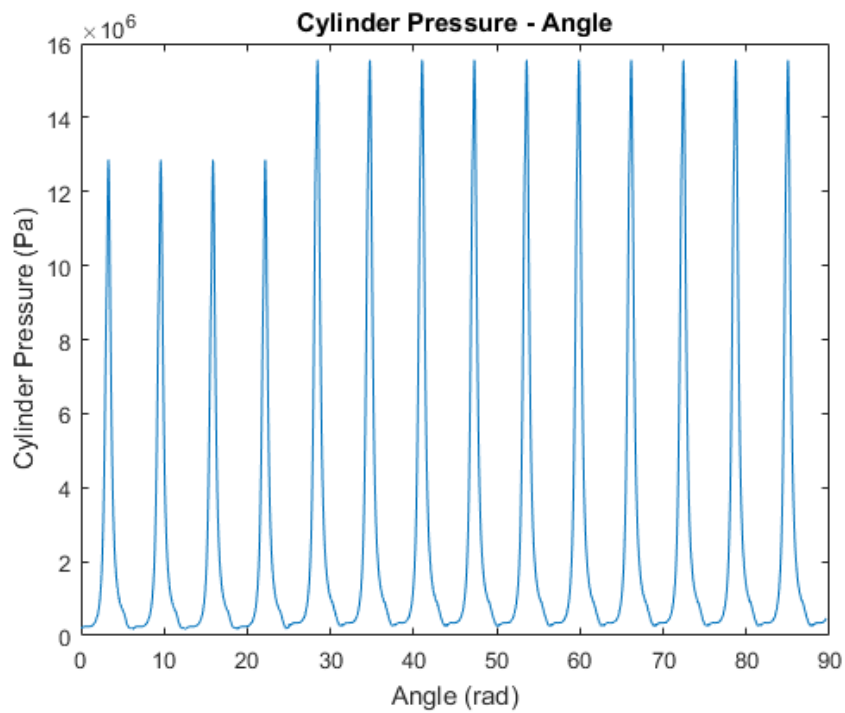


Διάγραμμα 20 : Ταχύτητα Περιστροφής – Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε ένα διάγραμμα)

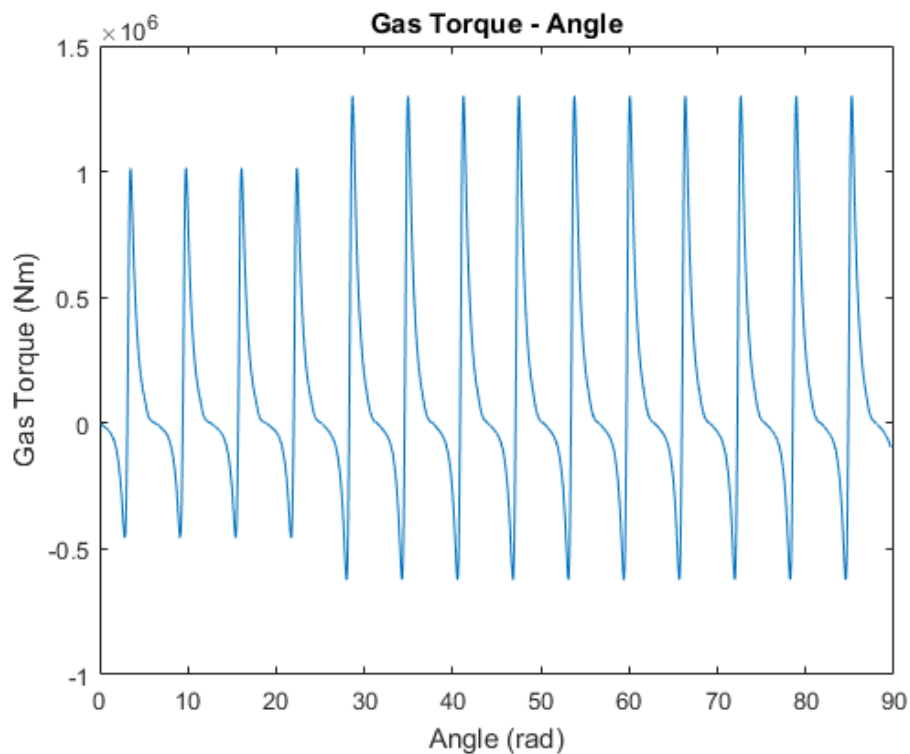
Στοιχείο με το μεγαλύτερο εύρος ταλάντωσης: Αποσβεστήρας Στρεπτικών Ταλαντώσεων



Διάγραμμα 21 : Ταχύτητα Περιστροφής - Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε διαφορετικά διαγράμματα)

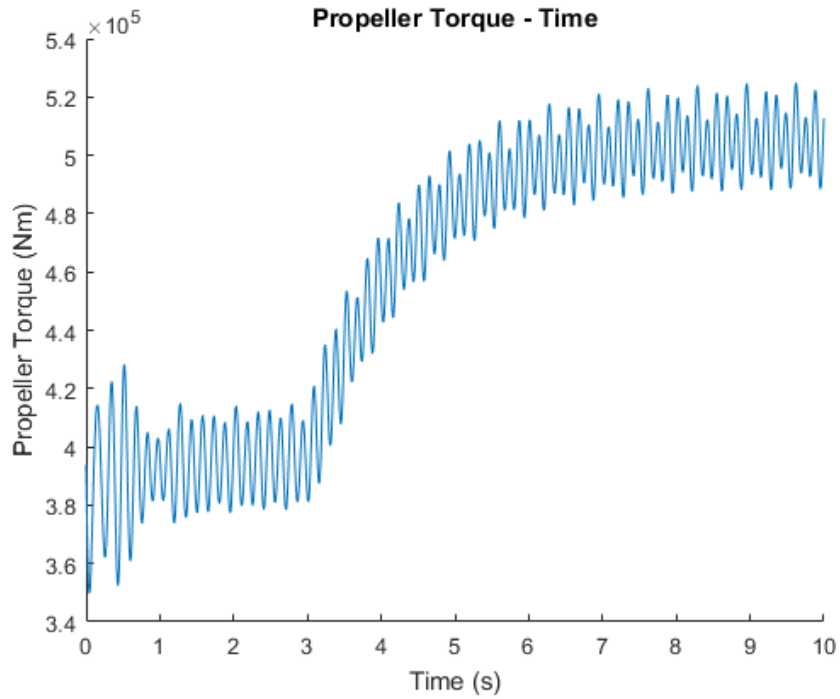


Διάγραμμα 22 : Πίεση - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (1 κύλινδρος)

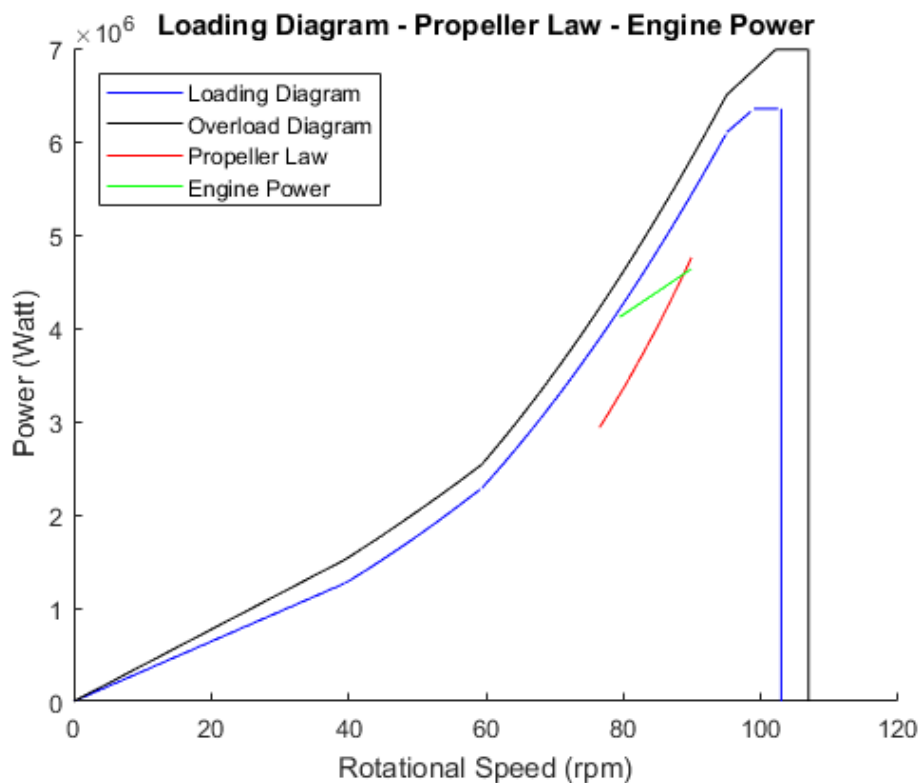


Διάγραμμα 23 : Ροπή λόγω Καύσης - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (1 κύλινδρος)

Στιγμαία μεταβολή της πίεσης εντός του θαλάμου καύσης ίση με τη τελική, που οδηγεί σε στιγμιαία μεταβολή της ροπής λόγω καύσης τη στιγμή $t=3$ sec.



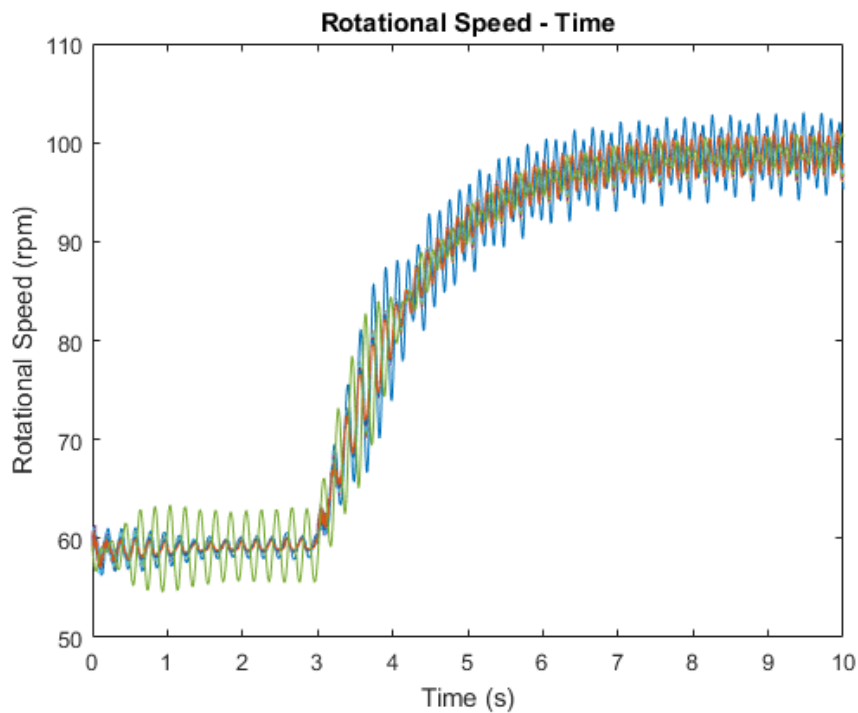
Ταλαντωτική συμπεριφορά της ροπής φορτίου της έλικας λόγω στρεπτικής ταλάντωσης της έλικας.



Διάγραμμα 24 : Διάγραμμα Φόρτισης (Loading Diagram)

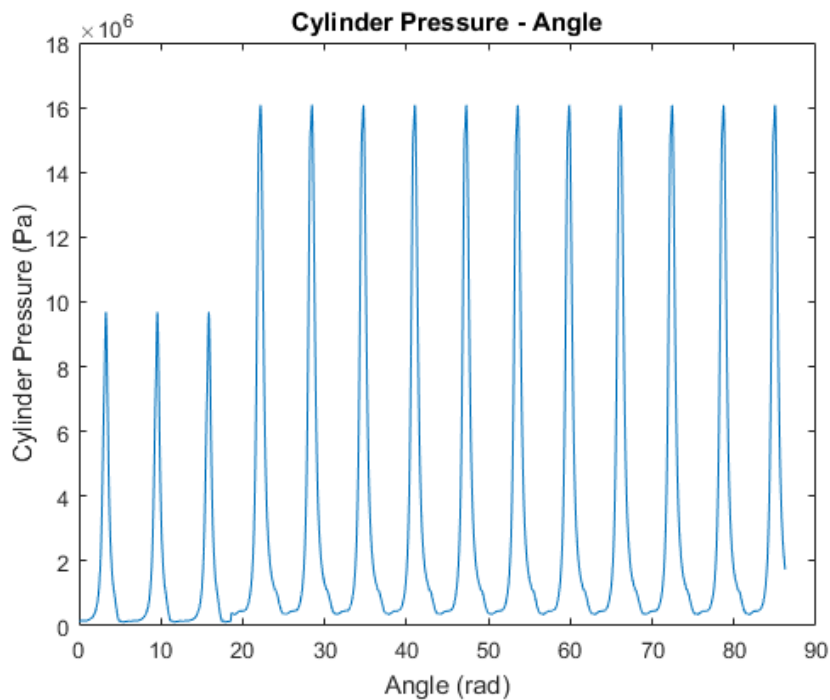
Παραγόμενη ισχύς από τον κινητήρα εντός των ορίων του Διαγράμματος Φόρτισης.

Περίπτωση 2: Επιτάχυνση από Φορτίο 25% σε Φορτίο 100%

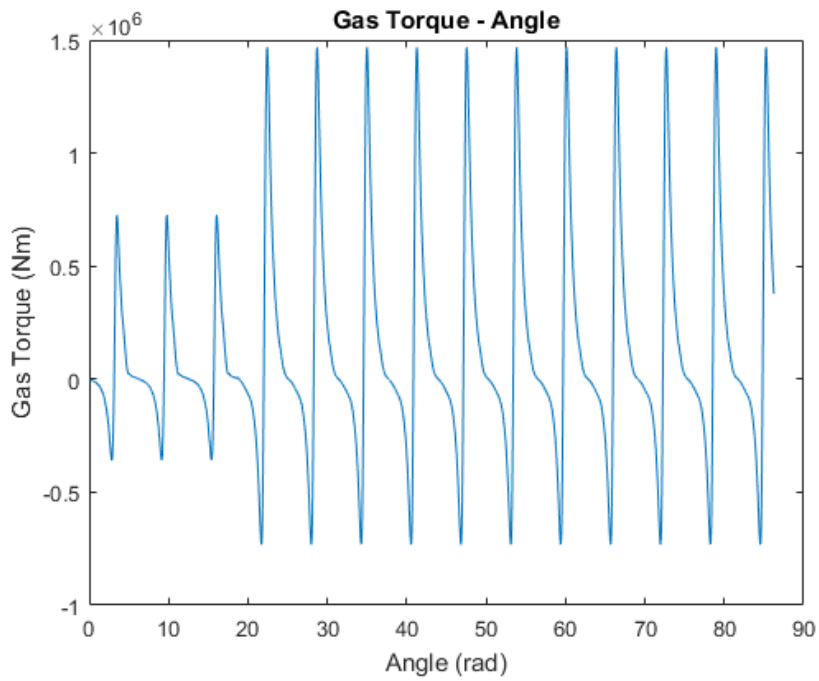


Διάγραμμα 26 : Ταχύτητα Περιστροφής – Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε ένα διάγραμμα)

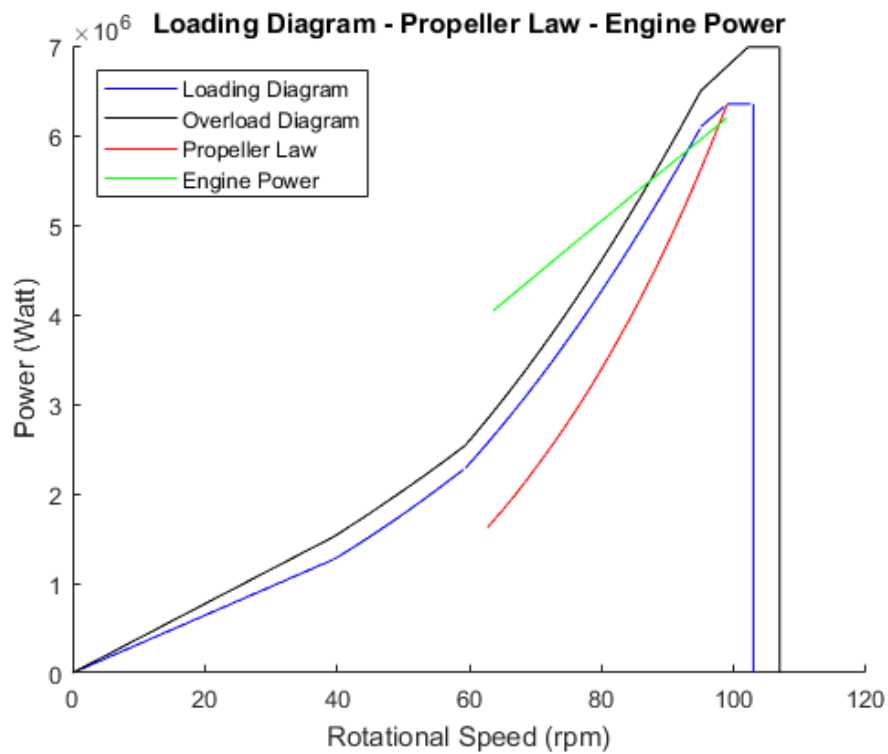
Στοιχεία με το μεγαλύτερο εύρος ταλάντωσης. Αρχικά: Αξονικό Σύστημα και Έλικα, Μετέπειτα: Αποσβεστήρας Στρεπτικών Ταλαντώσεων



Διάγραμμα 27 : Πίεση - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (1 κύλινδρος)



Διάγραμμα 28 : Ροπή λόγω Καύσης - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (1 κύλινδρος)



Διάγραμμα 29 : Διάγραμμα Φόρτισης (Loading Diagram)

Παραγόμενη ισχύς από τον κινητήρα εκτός των ορίων του Διαγράμματος Φόρτισης λόγω μεγάλης και ακαριαίας αύξησης της ροπής λόγω καύσης.

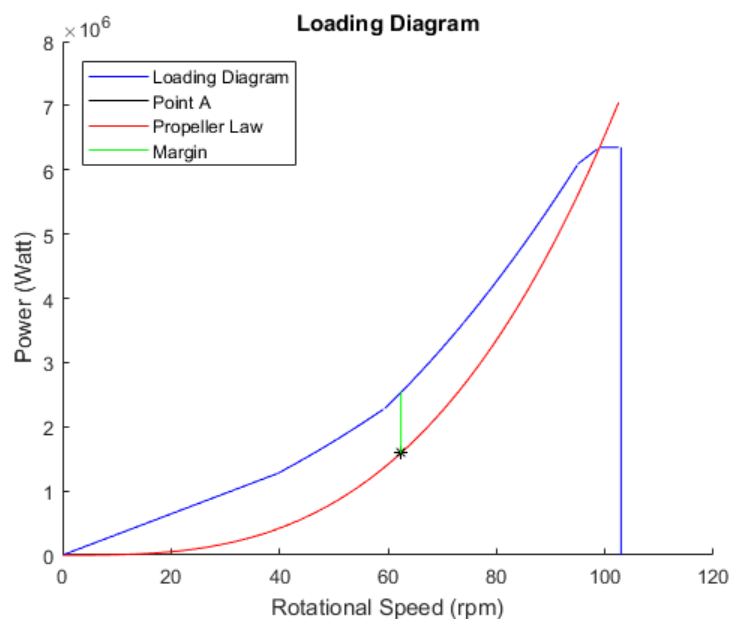
5.3 Προσομοιώσεις Επιτάχυνσης με Σταδιακή Αλλαγή Ροπής

Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μία προσομοίωση επιτάχυνσης με βάση τα υπάρχοντα στοιχεία για τα 4 φορτία του κινητήρα, καθώς και του Διαγράμματος Φόρτισης του κινητήρα. Η προσομοίωση θα αφορά την επιτάχυνση του κινητήρα από Φορτίο 25% σε Φορτίο 100%. Θεωρείται ότι η ροπή λόγω καύσης των κυλίνδρων αυξάνεται σταδιακά ανάλογα την αύξηση των στροφών περιστροφής του συστήματος με βάση το Διάγραμμα Φόρτισης του κινητήρα.

Αρχικά, θεωρείται ότι ο κινητήρας λειτουργεί σε σταθερό Φορτίο 25%. Σε αυτήν την κατάσταση το σημείο λειτουργίας του κινητήρα βρίσκεται πάνω σε ένα σημείο της καμπύλης του Νόμου της Έλικας. Θεωρείται ότι τη στιγμή που δέχεται την εντολή για επιτάχυνση ο κινητήρας παραλαμβάνει ακαριαία τη μέγιστη ισχύ που επιτρέπεται με βάση το Διάγραμμα Φόρτισής του, οπότε και την ανάλογη μέγιστη ροπή. Για τον προσδιορισμό της ροπής καύσης των κυλίνδρων για ενδιάμεσες ταχύτητες περιστροφής πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στα υπάρχοντα φορτία 25%, 50%, 75%, 100% με βάση τις στροφές περιστροφής του συστήματος. Η γραμμική παρεμβολή πραγματοποιείται στα Δυναμοδεικτικά Διαγράμματα Πίεσης – Γωνίας Στροφαλοφόρου Άξονα λόγω της αναλογικής σχέσης που έχει η ροπή καύσης των κυλίνδρων (T_{gas}) με την πίεση εντός του θαλάμου καύσης ($p(\theta)$). Υπενθυμίζεται ο τύπος υπολογισμού της ροπής καύσης των κυλίνδρων.

$$T_{gas} = \frac{\pi}{4} * B^2 * D_s(\theta) * p(\theta)$$

Επιπλέον, για τον υπολογισμό της μέγιστης ροπής καύσης που μπορεί να παρέχει ο κινητήρας το Δυναμοδεικτικό Διάγραμμα Πίεσης – Γωνίας Στροφαλοφόρου Άξονα πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή που υποδεικνύει το περιθώριο της επιπλέον ισχύος (άρα και ροπής) που είναι διαθέσιμη από τη διαφορά της καμπύλης του Νόμου της Έλικας και του Διαγράμματος Φόρτισης του κινητήρα. Το περιθώριο παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 30 : Περιθώριο Ισχύος

Έστω ένα τυχαίο σημείο A στην καμπύλη του Νόμου της Έλικας. Η ισχύς στο σημείο A είναι P_A . Η μέγιστη ισχύς για τις ίδιες στροφές λειτουργίας δίνεται από το Διάγραμμα Φόρτισης του κινητήρα. Το ποσοστό της ισχύος του σημείου A ως προς την μέγιστη ισχύ δίνεται από το λόγο των ανάλογων εξισώσεων του Νόμου της Έλικας ως προς το Διάγραμμα Φόρτισης του κινητήρα.

Δηλαδή: $\frac{\text{Νόμος Έλικας}}{\text{Διάγραμμα Φόρτισης}}$

Οπότε το επιπλέον ποσοστό είναι : $1 - \frac{\text{Νόμος Έλικας}}{\text{Διάγραμμα Φόρτισης}}$

Τελικά η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει ο κινητήρας στο σημείο A είναι:

$$P_A + P_A * \left(1 - \frac{\text{Νόμος Έλικας}}{\text{Διάγραμμα Φόρτισης}} \right) =$$

$$P_A * \left(2 - \frac{\text{Νόμος Έλικας}}{\text{Διάγραμμα Φόρτισης}} \right)$$

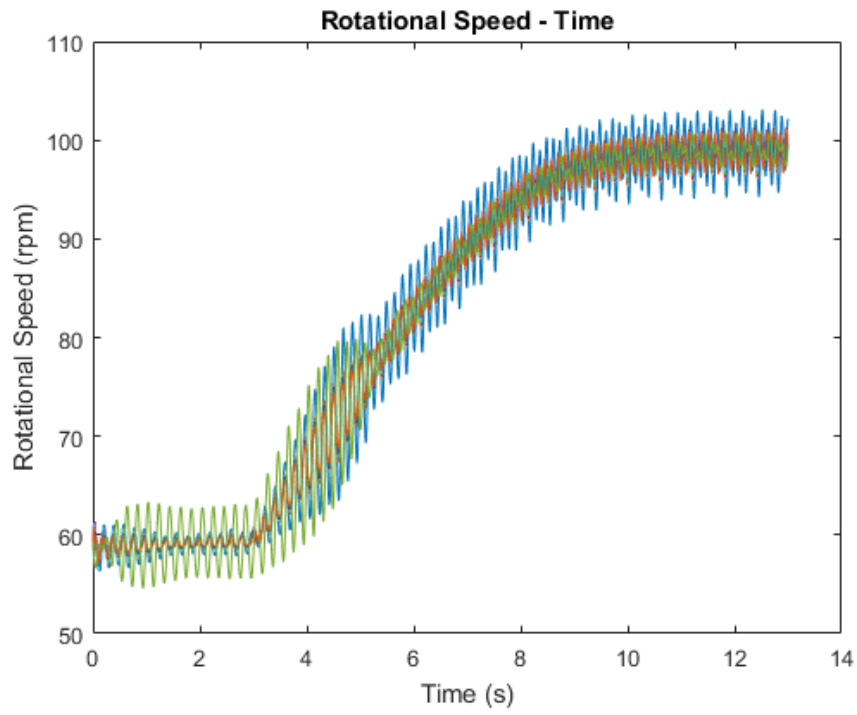
Δηλαδή το επιπλέον περιθώριο ισχύος (άρα και ροπής – πίεσης) είναι:

$$2 - \frac{\text{Νόμος Έλικας}}{\text{Διάγραμμα Φόρτισης}}$$

Στην προσομοίωση θεωρείται ότι η αλλαγή ροπής πραγματοποιείται τη στιγμή: 3 sec.

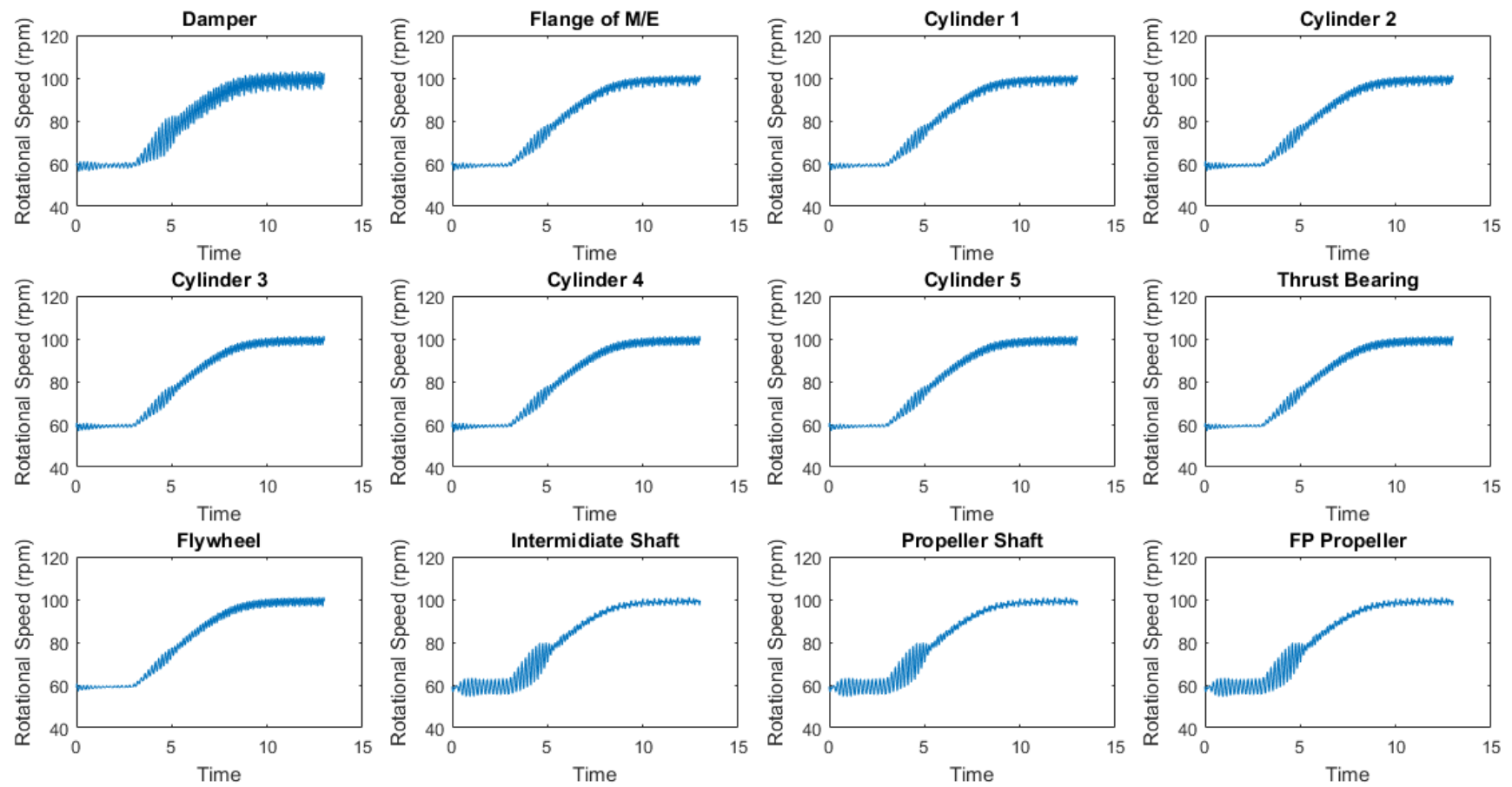
Τα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν σε αυτό το σενάριο της επιτάχυνσης είναι:

- Διάγραμμα Περιστροφικής Ταχύτητας – Χρόνου για όλα τα επιμέρους στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης στο ίδιο διάγραμμα
- Διάγραμμα Περιστροφικής Ταχύτητας – Χρόνου για όλα τα επιμέρους στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε ξεχωριστά διαγράμματα
- Διάγραμμα Πίεσης Κυλίνδρου – Γωνίας Περιστροφής Στροφαλοφόρου Άξονα για όλους τους κυλίνδρους
- Διάγραμμα Ροπής λόγω Καύσης - Γωνίας Περιστροφής Στροφαλοφόρου Άξονα για όλους τους κυλίνδρους
- Διάγραμμα Ροπής Έλικας – Χρόνου
- Διάγραμμα Ροπής Τριβών – Χρόνου
- Διάγραμμα Ροπής Αδράνειας Παλινδρομικών Μαζών – Χρόνου
- Διάγραμμα Ταχύτητας Εμβόλων – Χρόνου
- Διάγραμμα Φόρτισης Κινητήρα (Loading Diagram)

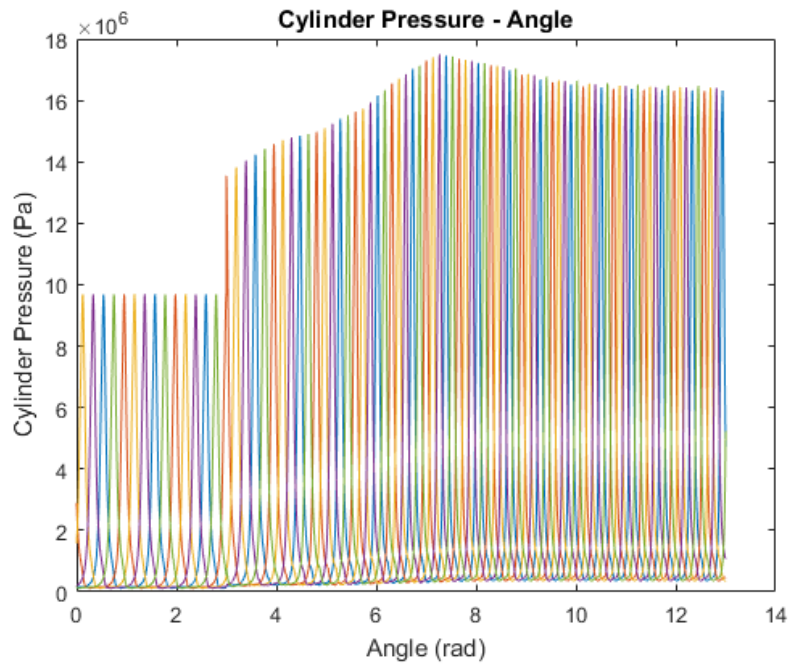


Διάγραμμα 31 : Ταχύτητα Περιστροφής – Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε ένα διάγραμμα)

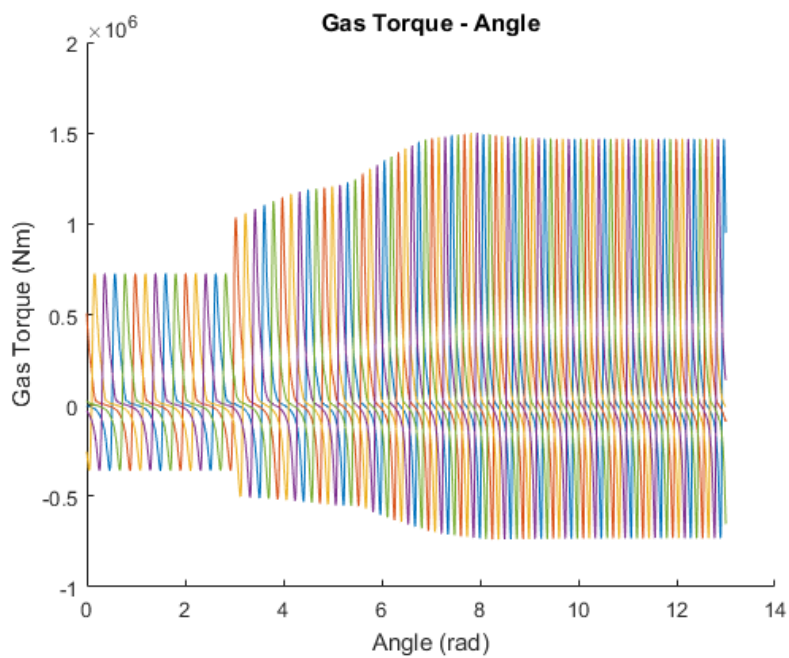
Στοιχεία με το μεγαλύτερο εύρος ταλάντωσης. Αρχικά: Αξονικό Σύστημα και Έλικα,
Μετέπειτα: Αποσβεστήρας Στρεπτικών Ταλαντώσεων



Διάγραμμα 32 : Ταχύτητα Περιστροφής - Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε διαφορετικά διαγράμματα)

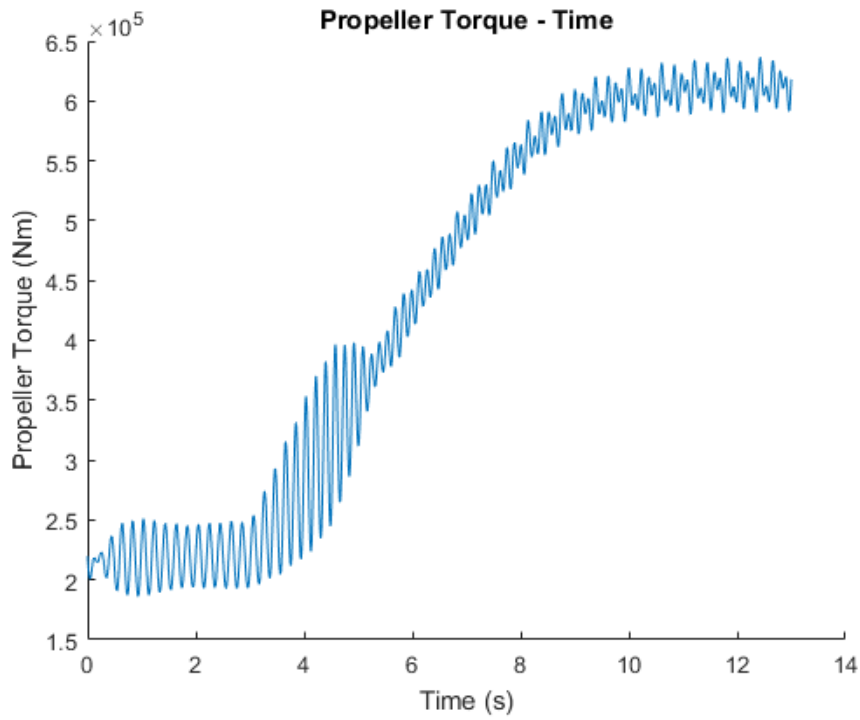


Διάγραμμα 33 : Πίεση - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (για όλους τους κυλίνδρους)

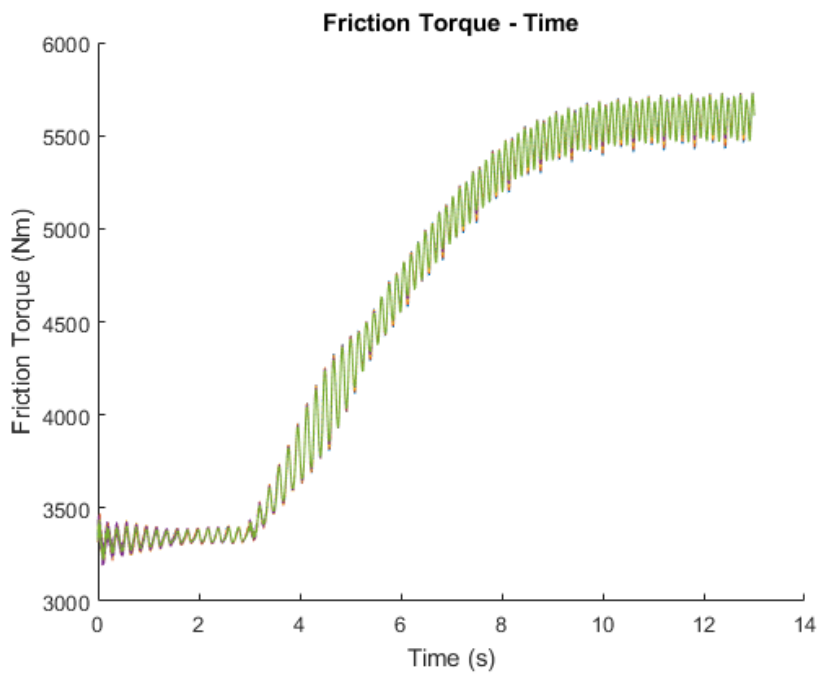


Διάγραμμα 34 : Ροπή Καύσης - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (για όλους τους κυλίνδρους)

Στιγμαία αύξηση ροπής (και πίεσης) ίση με τη μέγιστη επιτρεπόμενη από το Διάγραμμα Φόρτισης. Διατήρηση της ανάλογης μέγιστης ροπής από το Διάγραμμα Φόρτισης για όλο το εύρος των ταχυτήτων περιστροφής.

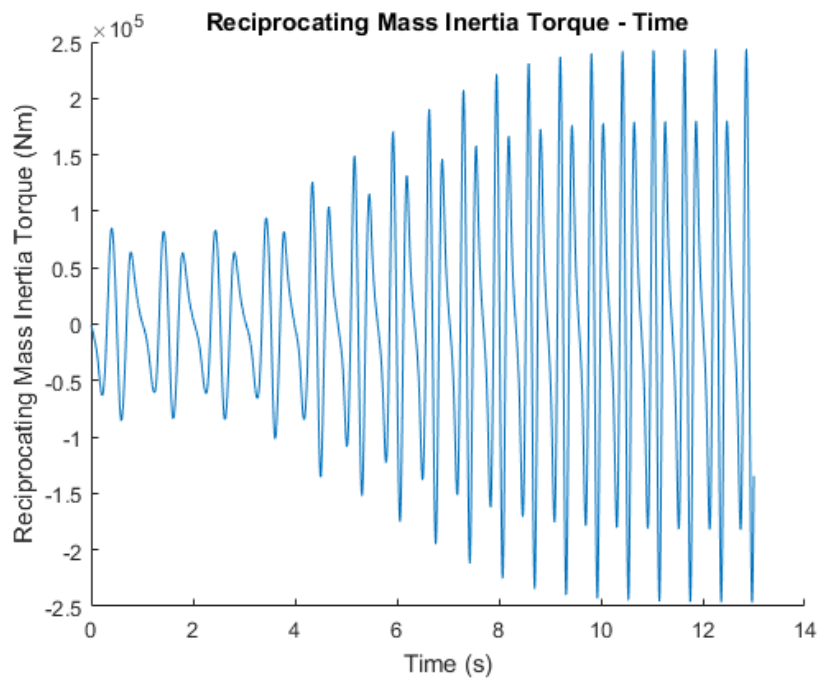


Διάγραμμα 35 : Ροπή Έλικας - Χρόνος

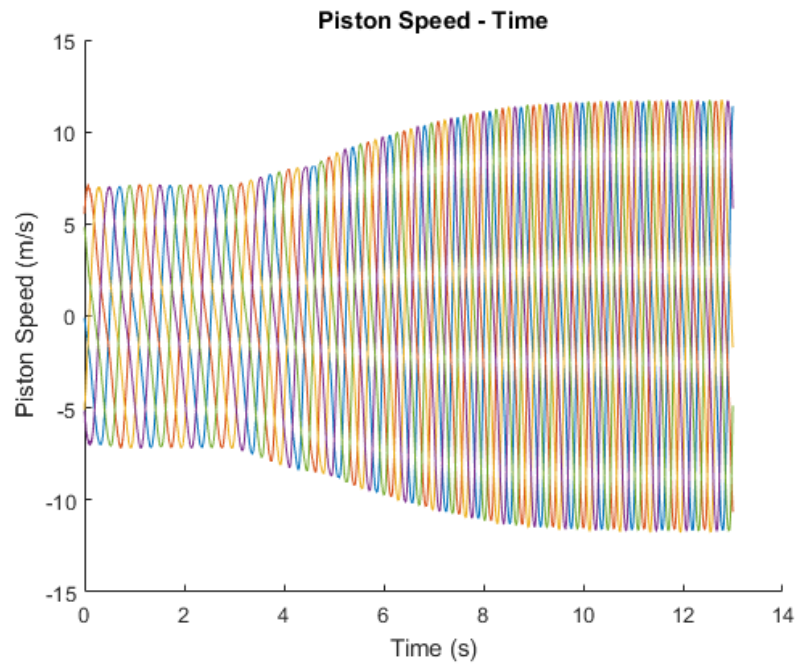


Διάγραμμα 36 : Ροπή Τριβών – Χρόνος (για όλους τους κυλίνδρους ξεχωριστά)

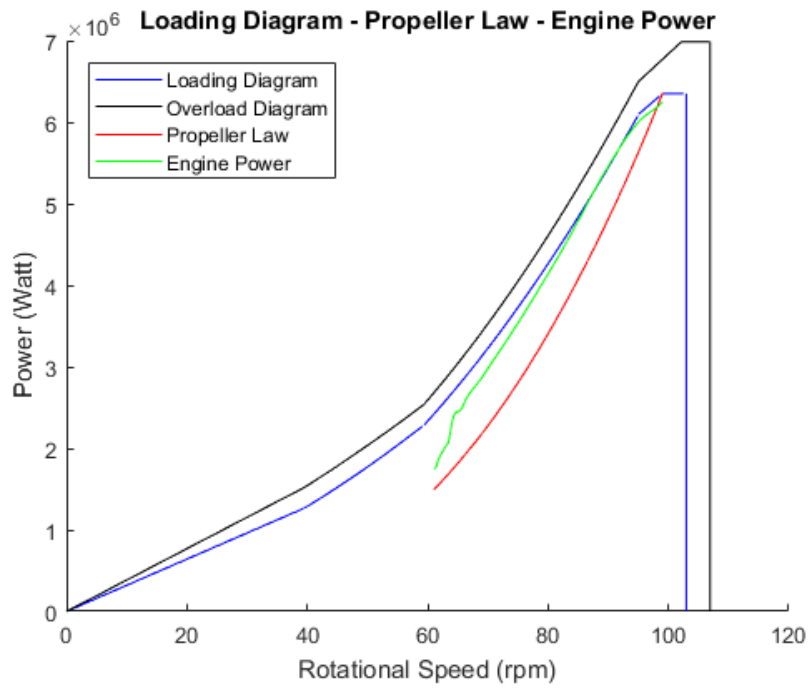
Ταλαντωτική συμπεριφορά της ροπής τριβών λόγω της γραμμικής σχέσης με τη γωνιακή ταχύτητα.



Διάγραμμα 37 : Ροπή λόγω Αδράνειας Παλινδρομικών Μαζών (1 κύλινδρος)



Διάγραμμα 38 : Ταχύτητα Εμβόλων - Χρόνος



Διάγραμμα 39 : Διάγραμμα Φόρτισης Κινητήρα

Παραγόμενη ισχύς από τον κινητήρα ίση με τη μέγιστη επιτρεπόμενη από το Διάγραμμα Φόρτισης.

6. Συμπεράσματα

6.1 Καταγραφή Συμπερασμάτων

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά στη διερεύνηση των στρεπτικών ταλαντώσεων και των δυναμικών φαινομένων που αναπτύσσονται σε μία τυπική εγκατάσταση πρόωσης ενός εμπορικού πλοίου κατά τη λειτουργία δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel. Μελετήθηκαν περιπτώσεις τόσο για σταθερή, όσο και για μεταβατική λειτουργία του κινητήρα. Για την πραγματοποίηση της μελέτης αναπτύχθηκε μοντέλο με τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και της εγκατάστασης πρόωσης, όπως και για τις αναπτυσσόμενες ροπές κατά τη λειτουργία του. Τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από τις προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας συνοψίζονται παρακάτω.

Αρχικά, τα πρώτα συμπεράσματα αφορούν στις στρεπτικές ταλαντώσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα κατά τη λειτουργία υπό σταθερό φορτίο. Παρατηρείται ότι το φορτίο κατά το οποίο αναπτύσσεται μεγαλύτερο πλάτος στις στρεπτικές ταλαντώσεις είναι το φορτίο 25% της Μεγίστης Συνεχούς Ισχύος του κινητήρα. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο καθώς το φορτίο 25% βρίσκεται πολύ κοντά στο άνω όριο του εύρους στροφών συντονισμού (Barred Speed Range) του κινητήρα. Τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης όπου παρατηρείται το μέγιστο πλάτος στρεπτικών ταλαντώσεων στο συγκεκριμένο φορτίο είναι το αξονικό σύστημα (ενδιάμεσος και ελικοφόρος άξονας) και η έλικα του πλοίου. Λόγω αυτού, σε μελέτες αντοχής του συστήματος λόγω αναπτυσσόμενων στρεπτικών τάσεων δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην αντοχή του αξονικού συστήματος. Στα φορτία 50%, 75% και 100%, μεγαλύτερο εύρος στρεπτικών ταλαντώσεων παρατηρείται στον αποσβεστήρα. Αυτό το αποτέλεσμα είναι επιθυμητό καθώς ο σκοπός λειτουργίας του αποσβεστήρα είναι να παραλαμβάνει και να αποσβένει τις στρεπτικές ταλαντώσεις του συστήματος.

Επιπλέον συμπεράσματα προκύπτουν για τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις λόγω καύσης και λόγω της αδράνειας των μαζών κατά τη λειτουργία του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η συνολική δύναμη που αναπτύσσεται είναι σύνθεση των δύο προηγούμενων δυνάμεων. Η δύναμη των αερίων είναι αρκετά μεγαλύτερη της δύναμης λόγω αδράνειας των μαζών. Ωστόσο η επίδραση της δεύτερης δεν είναι αμελητέα (ως ποσοστό της συνολικής δύναμης), ενώ σε μεγάλο εύρος του κύκλου λειτουργίας είναι αντίθετη της δύναμης των αερίων τείνοντας να αποφορτίσει το σύστημα. Οι δυνάμεις στο έμβολο, στη διεύθυνση του διωστήρα, οι ακτινικές και οι στρεπτικές δυνάμεις του στροφάλου είναι ίδιας τάξης μεγέθους, ενώ οι δυνάμεις που είναι κάθετες στα τοιχώματα είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερες από τις προηγούμενες.

Το τελευταίο συμπέρασμα που προκύπτει από τη λειτουργία του κινητήρα σε σταθερό φορτίο είναι η χρησιμότητα του σφονδύλου. Ο σφόνδυλος μέσω της μεγάλης αδράνειας που έχει βοηθάει το σύστημα να καλύψει του νεκρούς χρόνους στην παραγωγή ροπής από την καύση των κυλίνδρων, παρέχοντας τη ροπή στο σύστημα εξωτερικά του κινητήρα με πιο ομαλό τρόπο. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα φαίνεται στο Διάγραμμα 14 του Κεφαλαίου 5.1, όπου παρουσιάζεται η ροπή πριν και μετά το Σφόνδυλο.

Τα συμπεράσματα από τη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα αφορούν κυρίως την αναπτυσσόμενη ροπή και ισχύ του κινητήρα και τα όριά του μέσω του Διαγράμματος Φόρτισης. Για τη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα και συγκεκριμένα για την επιτάχυνση μελετήθηκαν δύο τρόποι για τη πραγματοποίησή της.

Αρχικά ο πρώτος τρόπος που εξετάστηκε είναι από τη στιγμιαία ανάπτυξη της ροπής λόγω καύσης, μέσω του αντίστοιχου Δυναμοδεικτικού Διαγράμματος Πίεσης-Γωνίας Στροφαλοφόρου Άξονα, για το τελικό φορτίο λειτουργίας του κινητήρα. Αυτή η διαδικασία ωστόσο παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες. Πιο συγκεκριμένα η επιτάχυνση σε κοντινά φορτία (π.χ. από Φορτίο 50% σε Φορτίο 75%, όπως μελετήθηκε) είναι δυνατόν να συμβεί καθώς η ισχύς που παράγει ο κινητήρας κατά την επιτάχυνση είναι εντός του Διαγράμματος Φόρτισης, ωστόσο ο κινητήρας μπορεί να διαθέσει μεγαλύτερη ισχύ μέχρι το όριο του Διαγράμματος Φόρτισης που με αυτόν τον τρόπο αγνοείται. Όσον αφορά στην επιτάχυνση σε φορτία που απέχουν μεταξύ τους (π.χ. από Φορτίο 25% σε Φορτίο 100%, όπως μελετήθηκε), δεν είναι δυνατόν να συμβεί καθώς η ροπή που παράγει ο κινητήρας άμεσα είναι πολύ μεγάλη, οδηγώντας έτσι σε πολύ μεγάλη ισχύ ξεπερνώντας τα όρια του Διαγράμματος Φόρτισης του κινητήρα.

Με το δεύτερο τρόπο που μελετάται η επιτάχυνση μπορούμε να εξάγουμε πιο ασφαλή αποτελέσματα για το μεταβατικό φαινόμενο. Η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας, όπως και η πίεση εντός του θαλάμου καύσης συναρτηθεί της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα, αυξάνονται σταδιακά ανάλογα την αύξηση των στροφών από την επιπλέον ροπή που διατίθεται. Η ισχύς που παρέχει ο κινητήρας είναι η μέγιστη δυνατή από το Διάγραμμα Φόρτισης, χωρίς ωστόσο να ξεπερνά τα όριά του, αντιμετωπίζοντας και τα δύο προβλήματα που πρόκυπταν από τον πρώτο τρόπο. Η μεταβολή της ροπής καύσης μέσω της μεταβολής της πίεσης θεωρείται στιγμιαία τη στιγμή που ο κινητήρας αρχίζει να επιταχύνει και από Φορτίο 25% μεταβαίνει στο μέγιστο φορτίο του Διαγράμματος Φόρτισης στις ίδιες στροφές λειτουργίας. Όσον αφορά τις στρεπτικές ταλαντώσεις παρατηρούνται φαινόμενα ανάλογα με εκείνα της λειτουργίας σε σταθερό φορτίο. Δηλαδή, αρχικά η στρεπτική ταλάντωση του ενδιάμεσου άξονα, του ελικοφόρου άξονα και της προπέλας είναι μεγάλη και έπειτα φθίνει, ενώ του αποσβεστήρα το αντίθετο. Ακόμα παρατηρείται ότι κατά την επιτάχυνση του συστήματος και πριν ο κινητήρας βρεθεί στο τελικό σημείο λειτουργίας η μέγιστη ροπή του συστήματος (και η μέγιστη πίεση) παρουσιάζουν ένα μέγιστο ώστε να καταφέρει ο κινητήρας να υπερνικήσει τις αντιστάσεις. Μόλις ο κινητήρας βρεθεί στο τελικό σημείο λειτουργίας του (φορτίο 100%) η ροπή καύσης και η πίεση στους κυλίνδρους παίρνουν ως τιμή την ανάλογη τιμή τους στο φορτίο 100%.

Μία αδυναμία της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο τρόπος υπολογισμού των Δυναμοδεικτικών Διαγραμμάτων Πίεσης – Γωνίας Στροφαλοφόρου Άξονα για ενδιάμεσα φορτία μέσω γραμμικής παρεμβολής από τα υπάρχοντα γνωστά φορτία. Ωστόσο, η συγκεκριμένη προσέγγιση μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα στα πλαίσια της παρούσας μελέτης για το μεταβατικό φαινόμενο ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα.

6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται μοντελοποίηση του κινητήρα με σκοπό τη μελέτη των δυναμικών φαινομένων που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία του.

Σημαντικό κομμάτι της εργασίας είναι ο προσδιορισμός των δυνάμεων που ασκούνται στον κινητήρα και υπεισέρχονται στο πρόγραμμα ως επιμέρους μοντέλα. Ωστόσο έχουν θεωρηθεί κάποιες απλοποιήσεις με στόχο να είναι εφικτή η προσομοίωση των σύνθετων φαινομένων που πραγματοποιούνται κατά τη λειτουργία μίας εγκατάστασης πρόωσης ενός πλοίου. Συνεπώς, οι προτάσεις για μελλοντικές εργασίες, οι οποίες θα μπορούσαν να εκπονηθούν βασιζόμενες στην παρούσα εργασία, σχετίζονται με την βελτίωση αυτών των προσεγγίσεων ως προς την καλύτερη δυνατή συμφωνία του μοντέλου με τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα πραγματικό σύστημα.

Πιο συγκεκριμένα θα μπορούσαν να δημιουργηθούν 2 μοντέλα. Το πρώτο θα αφορά ένα θερμοδυναμικό μοντέλο που θα παράγει με μεγαλύτερη ακρίβεια την καμπύλη πίεσης-γωνίας (δυναμοδεικτικό διάγραμμα), για μεταβαλλόμενη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα. Το δεύτερο μοντέλο θα αφορά τον υπολογισμό των τριβών στον κινητήρα. Το μοντέλο της παρούσας εργασίας υπολογίζει τις δυνάμεις στα έδρανα του κινητήρα καθώς και στα έδρανα του διωστήρα. Μέσω των δυνάμεων είναι δυνατόν να εξαχθούν δεδομένα για το αντίστοιχο μοντέλο τριβών.

Τέλος ένα επιπλέον θέμα το οποίο μπορεί να αποτελέσει επέκταση της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη αντοχής του συστήματος λόγω των στρεπτικών ταλαντώσεων που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία του κινητήρα σε κανονική λειτουργία, καθώς και σε καταστάσεις όπου παρουσιάζεται το φαινόμενο της απώλειας έναυσης (misfire).

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Κινηματικός Μηχανισμός Εμφολοφόρου ΜΕΚ.....	15
Εικόνα 2 : Αρχή Λειτουργίας Δίχρονου Κινητήρα.....	16
Εικόνα 3 : Αρχή Λειτουργίας Τετράχρονου Κινητήρα.....	17
Εικόνα 4 : Στροβιλουπερπληρωτής σε Τομή	19
Εικόνα 5 : Σύστημα Εκκίνησης Πεπιεσμένου Αέρα	20
Εικόνα 6 : Στροφαλοφόρος Άξονας Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα.....	21
Εικόνα 7 : Σύστημα Εμβόλου-Βάκτρου-Διωστήρα.	22
Εικόνα 8 : Τομή Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα.....	23
Εικόνα 9 : Βασική Αρχή Λειτουργίας Ρυθμιστή Στροφών	24
Εικόνα 10 : Διάγραμμα Περιοχής Λειτουργίας Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα	25
Εικόνα 11 : Διάγραμμα Φόρτισης Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα	26
Εικόνα 12 : Τυπικό Σύστημα Εγκατάστασης Πρόωσης Πλοίου	32
Εικόνα 13 : Ανάλυση Κινητήρα	33
Εικόνα 14 : Αποσβεστήρας Ναυτικού Κινητήρα (Geislinger Damper)	34
Εικόνα 15 : Σφόνδυλος Ναυτικού Κινητήρα	35
Εικόνα 16 : Μειωτήρας Στροφών σε Τομή	35
Εικόνα 17 : Ελικοφόρος Άξονας	36
Εικόνα 18 : Ενδιάμεσος Άξονας	37
Εικόνα 19 : Περιοχές Λίπανσης Ενδιάμεσου Εδράνου	38
Εικόνα 20 : Ωστικό Έδρανο, Ωστικό Έδρανο σε Τομή.....	39
Εικόνα 21 : Χοάνη Πλοίου (Stern Tube).....	39
Εικόνα 22 : Έλικας Σταθερού Βήματος	40
Εικόνα 23 : Έλικα Μεταβλητού Βήματος.....	40
Εικόνα 24 : Απλός Ταλαντωτής	41
Εικόνα 25 : Εσωτερικές Ταλαντώσεις Δίχρονου Κινητήρα Πλοίου	44
Εικόνα 26 : Στρεπτική Ταλάντωση Συστήματος 2 Μαζών	45
Εικόνα 27 : Προσέγγιση BSR (MAN B&W)	46
Εικόνα 28 : Διάγραμμα Στρεπτικών Τάσεων - Στροφών.....	47
Εικόνα 29 : Κινηματικός Μηχανισμός Κινητήρα.....	48
Εικόνα 30 : Δυναμοδεικτικό Διάγραμμα Δίχρονου Κινητήρα	50
Εικόνα 31 : Δυνάμεις Αερίων.....	52
Εικόνα 32 : Παλινδρομικές Αδρανειακές Δυνάμεις.....	54
Εικόνα 33 : Επαλληλία Δυνάμεων	55
Εικόνα 34 : Εγκατάσταση Πρόωσης Παρούσας Μελέτης.....	58
Εικόνα 35 : Εγκατάσταση Πρόωσης – Σύστημα Διακριτών Μαζών.....	59
Εικόνα 36 : Επεξήγηση Στοιχείων Συστήματος Εγκατάστασης Πρόωσης	59
Εικόνα 37 : Κινηματικός Μηχανισμός Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα	62
Εικόνα 38 : Δυναμοδεικτικό Διάγραμμα Πίεσης-Γωνίας Στροφαλοφόρου Άξονα Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα	63

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Σταθεροί Συντελεστές Εξίσωσης Διαγράμματος Φόρτισης	29
Πίνακας 2 : Σταθεροί Συντελεστές Εξίσωσης Διαγράμματος Υπερφόρτισης.....	29
Πίνακας 3 : Φορτία Κινητήρα	31
Πίνακας 4 : Τρόποι Υπολογισμού Τριβών.....	69
Πίνακας 5 : Διαφορές Ισχύος Πραγματικού Συστήματος – Μοντέλου	70
Πίνακας 6 : Διαφορές Στροφών Πραγματικού Συστήματος - Μοντέλου	70

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 : Ταχύτητα Περιστροφής – Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε ένα διάγραμμα) για τα 4 Φορτία	72
Διάγραμμα 2 : Ταχύτητα Περιστροφής - Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε διαφορετικά διαγράμματα) για Φορτίο 25%.....	73
Διάγραμμα 3 : Ταχύτητα Περιστροφής - Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε διαφορετικά διαγράμματα) για Φορτίο 50%.....	74
Διάγραμμα 4 : Ταχύτητα Περιστροφής – Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε διαφορετικά διαγράμματα) για Φορτίο 75%.....	75
Διάγραμμα 5 : Ταχύτητα Περιστροφής - Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε διαφορετικά διαγράμματα) για Φορτίο 100%.....	76
Διάγραμμα 6 : Δυναμοδεικτικά Διαγράμματα Πίεσης - Γωνίας Στροφαλοφόρου Άξονα για τα 4 Φορτία	77
Διάγραμμα 7 : Ροπή Καύσης - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (για τα 4 Φορτία).....	78
Διάγραμμα 8 : Πίεση - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (για όλους τους κυλίνδρους), Φορτίο 100%	79
Διάγραμμα 9 : Ροπή Καύσης - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (για όλους τους κυλίνδρους), Φορτίο 100%	79
Διάγραμμα 10 : Ροπή Έλικας - Χρόνος, Φορτίο 100%.....	80
Διάγραμμα 11 : Ροπή Τριβών – Χρόνος (για όλους τους κυλίνδρους ξεχωριστά) , Φορτίο 100%	80
Διάγραμμα 12 : Ροπή λόγω Αδράνειας Παλινδρομικών Μαζών (1 κύλινδρος), Φορτίο 100%	81
Διάγραμμα 13 : Ταχύτητα Εμβόλων - Χρόνος, Φορτίο 100%.....	81
Διάγραμμα 14 : Ροπή πριν και μετά το Σφόνδυλο - Χρόνος	82
Διάγραμμα 15 : Δυνάμεις στο Έμβολο	82
Διάγραμμα 16 : Δυνάμεις κάθετες στα τοιχώματα.....	83
Διάγραμμα 17 : Στρεπτική Δύναμη Στροφάλου	83
Διάγραμμα 18 : Ακτινική Δύναμη Στροφάλου	84
Διάγραμμα 19 : Δύναμη κατά τη Διεύθυνση του Διωστήρα.....	84
Διάγραμμα 20 : Ταχύτητα Περιστροφής – Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε ένα διάγραμμα)	86

Διάγραμμα 21 : Ταχύτητα Περιστροφής - Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε διαφορετικά διαγράμματα)	87
Διάγραμμα 22 : Πίεση - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (1 κύλινδρος)	88
Διάγραμμα 23 : Ροπή λόγω Καύσης - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (1 κύλινδρος)	88
Διάγραμμα 24 : Ροπή Έλικας - Χρόνος	89
Διάγραμμα 25 : Διάγραμμα Φόρτισης (Loading Diagram).....	89
Διάγραμμα 26 : Ταχύτητα Περιστροφής – Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε ένα διάγραμμα)	90
Διάγραμμα 27 : Πίεση - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (1 κύλινδρος)	90
Διάγραμμα 28 : Ροπή λόγω Καύσης - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (1 κύλινδρος).....	91
Διάγραμμα 29 : Διάγραμμα Φόρτισης (Loading Diagram).....	91
Διάγραμμα 30 : Περιθώριο Ισχύος	92
Διάγραμμα 31 : Ταχύτητα Περιστροφής – Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε ένα διάγραμμα)	94
Διάγραμμα 32 : Ταχύτητα Περιστροφής - Χρόνος (όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης πρόωσης σε διαφορετικά διαγράμματα)	95
Διάγραμμα 33 : Πίεση - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (για όλους τους κυλίνδρους).....	96
Διάγραμμα 34 : Ροπή Καύσης - Γωνία Στροφαλοφόρου Άξονα (για όλους τους κυλίνδρους)	96
Διάγραμμα 35 : Ροπή Έλικας - Χρόνος	97
Διάγραμμα 36 : Ροπή Τριβών – Χρόνος (για όλους τους κυλίνδρους ξεχωριστά).....	97
Διάγραμμα 37 : Ροπή λόγω Αδράνειας Παλινδρομικών Μαζών (1 κύλινδρος)	98
Διάγραμμα 38 : Ταχύτητα Εμβόλων - Χρόνος	98
Διάγραμμα 39 : Διάγραμμα Φόρτισης Κινητήρα	99

Βιβλιογραφία

- [1] ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΕΩΣ, Τόμος Πρώτος, Β Έκδοση, Λαζάρου Χ. Κλιάνη, Ιωάννη Κ. Νικολού, Ιωάννη Κ. Σιδέρη, ΑΘΗΝΑ 2017
- [2] ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΕΩΣ, Τόμος Δεύτερος, Β Έκδοση, Λαζάρου Χ. Κλιάνη, Ιωάννη Κ. Νικολού, Ιωάννη Κ. Σιδέρη, ΑΘΗΝΑ 2018
- [3] ΝΑΥΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ DIESEL, Θέματα Σχεδίασης και Λειτουργίας, Ν.Π. Κυρτάτος, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ
- [4] ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ Ι, Εμφολοφόρες και Αεριοστρόβιλοι Θεωρία και Εφαρμογές, Κ.Δ. Ρακόπουλος, ΕΚΔΟΣΕΙΣ Fountas
- [5] ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΩΝ, 3^η Έκδοση, Χρήστος Α. Παπαδόπουλος, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ
- [6] ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΩΣΗ ΠΛΟΙΟΥ 5^η Έκδοση, Γερασίμου Κ. Πολίτη, Αθήνα 2018
- [7] MAN Energy Solutions, “Engine layout and load diagram”
- [8] MAN Energy Solutions, “Basic principles of ship propulsion”
- [9] MAN Energy Solutions, “Propulsion Trends in Bulk Carrier”
- [10] WinGD, “Marine Installation Manual, RT-flex50-D”
- [11] WinGD, “Maintenance Manual, RT-flex50-D”
- [12] “Procedure for torsional-vibration calculations in ice”, Erich-Schlesinger-Str. 19, 18059 Rostock, Lal Kevin, August 2021
- [13] “Crankshaft Modeling & Identification for Cylinder Pressure Estimation”, Aart - Jan van der Hoeven
- [14] “A Systematic Methodology Enabling Marine Engine Health Assessment by Employing First-Principles Digital Twins”, Konstantinos - Marios Tsitsilonis, University of Strathclyde Glasgow, March 2023
- [15] “Systematic Investigation of a Large Two-Stroke Engine Crankshaft Dynamics Model”, Konstantinos-Marios Tsitsilonis, Gerasimos Theotokatos, Nikolaos Xiros and Malcolm Habens, Published: 14 May 2020
- [16] “Engine Malfunctioning Conditions Identification through Instantaneous Crankshaft Torque Measurement Analysis”, Konstantinos-Marios Tsitsilonis and Gerasimos Theotokatos
- [17] “Torsional system dynamics of low-speed diesel engines based on instantaneous torque: Application to engine diagnosis”, Daniel Palomo Guerrero, Francisco J. Jiménez Espadafor

- [18] "Study of total instantaneous friction torque of a compression ignition (CI) engine: A numerical and experimental approach", Seddak Mohammed and Lakhdari A. Amina
- [19] "Single and double Wiebe function combustion model for a heavy-duty diesel engine retrofitted to natural-gas spark-ignition", Jinlong Liu, Cosmin E. Dumitrescu
- [20] "Vibration Characteristics of Two-stroke Low Speed Diesel Engines", NTUA
- [21] "Modeling and Simulation of Working Process of Marine Diesel Engine with a Comprehensive Method", Cao Hui, Wu Peili and Zhang Jundong
- [22] "Parametric Study of Torsional Damper on Crankshaft Life Assessment of an IC Engine" H. Karimaei, H. Chamani
- [23] "Mathematical Model of Marine Diesel Engine Simulator for a New Methodology of Self Propulsion Tests", Nur Izzuddin, Sunarsih and Agoes Priyanto
- [24] IACS Req. 2005/Rev.2 2015 M68 "Dimensions of propulsion shafts and their permissible torsional vibration stresses" (Feb 2005) (Corr.1 Mar 2012) (Corr.2 Nov 2012) (Rev.1 Aug 2014) (Rev.2 Apr 2015)
- [25] "Ανάλυση και συγκριτική αξιολόγηση δεδομένων από εργοστασιακές δοκιμές και δοκιμές θαλάσσης μεγάλων δίχρονων ναυτικών κινητήρων Diesel", ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Α. ΛΟΥΡΑΝΤΟΣ, ΑΘΗΝΑ ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2014
- [26] "Investigation of tribological properties of mechanical systems of conventional merchant vessels", CHARVALOS GEORGIOS, Athens July 2020
- [27] "MODELING AND SIMULATION OF THE STARTING PROCEDURE OF A LARGE TWO-STROKE MARINE DIESEL ENGINE", Mournianakis Konstantinos, Athens November 2015

Παράρτημα

Το παράρτημα αφορά την κατασκευή των πινάκων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο δυναμικής ανάλυσης της εργασίας.

- Ο πίνακας της ροπής αδράνειας διαστάσεων $N \times N$ είναι διαγώνιος πίνακας με στοιχεία μόνο στη διαγώνιό του. Κατασκευάζεται ως εξής:

$$J = \text{diag} (J_1, J_2, \dots, J_N)$$

Όπου J_1, J_2, \dots, J_N οι ροπές αδράνειας των στοιχείων του συστήματος της εγκατάστασης πρόωσης. Στο σύστημα που μελετάται $N=12$.

- Οι πίνακες των στρεπτικών σταθερών δυσκαμψίας K και των συντελεστών απόσβεσης C είναι τριδιαγώνιοι πίνακες διαστάσεων $N \times N$ και κατασκευάζονται και οι δύο με τον παρακάτω τρόπο:

V_1	$-V_1$			
$-V_1$...			
	$-V_i$	$V_i + V_{i+1}$	$-V_{i+1}$	
			...	$-V_M$
			$-V_M$	V_M

Όπου v_1, v_2, \dots, v_M οι στρεπτικές σταθερές δυσκαμψίας K και οι συντελεστές απόσβεσης C αντίστοιχα για τα στοιχεία του συστήματος της εγκατάστασης πρόωσης. Οι στρεπτικές σταθερές δυσκαμψίας K και οι συντελεστές απόσβεσης C αφορούν τις συνδέσεις μεταξύ των μαζών, άρα το πλήθος τους είναι ένα λιγότερο από το πλήθος των μαζών. Οπότε στο σύστημα που μελετάται ισχύει $M=N-1$, $M=11$.

- Οι πίνακες των ροπών καύσης (T_{gas}), τριβής ($T_{friction}$), αδρανειακών μαζών (T_j), πεπιεσμένου αέρα εκκίνησης (T_{start}) είναι διαστάσεων $N \times 1$ και έχουν τιμές μόνο στα στοιχεία των κυλίνδρων. Κατασκευάζονται ως εξής:

$$W = [0, 0, W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, 0, 0, 0, 0, 0]$$

Όπου W_1, W_2, W_3, W_4, W_5 οι τιμές των ροπών για τα στοιχεία των κυλίνδρων.

- Ο πίνακας της ροπής φορτίου λόγω έλικας είναι διαστάσεων $N \times 1$ και έχει τιμές μόνο στο τελευταίο στοιχείο του που αφορά την έλικα. Κατασκευάζεται ως εξής:

$$T_{prop} = [0, 0, \dots, T_{prop}]$$

Όπου T_{prop} η ροπή του φορτίου της έλικας.

- Ο πίνακας των συντελεστών τριβής της Προσέγγισης 4 είναι διαστάσεων $N \times N$ με στοιχεία μόνο στη διαγώνιο του και μόνο για τους κυλίνδρους. Κατασκευάζεται ως εξής:

$$C_f = \text{diag} (0, 0, C_{f_1}, C_{f_2}, C_{f_3}, C_{f_4}, C_{f_5}, 0, 0, 0, 0, 0)$$