

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Προσομοίωση αυτόματου πιλότου πλοίων σε Matlab – Simulink

Διπλωματική εργασία

Θεόδωρος Π. Δρίβας



Χανιά
Σεπτέμβριος, 2012

©Copyright υπό Δρίβα Θεόδωρο
2012

Η διπλωματική εργασία του Δρίβα Θεόδωρου εγκρίνεται

Πουλιέζος Αναστάσιος, Καθηγητής

Παπαευθυμίου Σπύρος, Επίκουρος Καθηγητής

Κανέλλος Φώτης, Λέκτορας

Περιεχόμενα

Βιογραφικό σημείωμα.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract.....	7
Κεφάλαιο 1.Μαθηματική μοντελοποίηση.....	8
1.1.Μη γραμμικές δυναμικές εξισώσεις.....	8
1.1.2.Είσωση ταχύτητας.....	10
1.1.2.1.Μη γραμμική προσέγγιση.....	10
1.1.2.2.Γραμμική προσέγγιση.....	11
1.1.3.Εξισώσεις πλοήγησης.....	11
1.1.3.1.Μοντέλο Davidson και Schiff.....	11
1.1.4.Μέθοδος επιπρόσθετων μαζών και αδράνειας.....	12
1.1.5.Πειραματικά μοντέλα.....	14
1.1.5.1.Μοντέλο Nomoto.....	14
1.1.5.2.Μοντέλο Abkowitz.....	16
1.2.Περιβαλλοντικές διαταραχές.....	17
1.2.1.Κόματα.....	18
1.2.2.Άνεμοι.....	19
1.3.Τύπος πλοίου.....	23
1.4.Η πορεία του πλοίου.....	26
1.5.Σύνοψη.....	30
Κεφάλαιο 2.Περί αυτοματισμού.....	31
2.1.Εξισώσεις κατάστασης.....	31
2.1.1.Αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου.....	31
2.1.2.Αναπαράσταση στο πεδίο της συχνότητας.....	33
2.1.3.Ελεγχιμότητα, παρατηρησιμότητα και ευστάθεια.....	35
2.2.Ελεγκτής PID.....	
2.2.1.Παράμετροι μεταβατικής απόκρισης.....	36
2.3.PID ελεγκτής ως αυτόματος πιλότος πλοίου.....	40
2.4.Μέθοδοι σχεδιασμού ελεγκτή.....	41
2.4.1.Μέθοδος κυρίαρχων πόλων.....	42
2.5.Σύνοψη.....	46
Κεφάλαιο 3.Σχεδίαση αυτόματου πιλότου διατήρησης πορείας πλοίου.....	47
3.1.Προδιαγραφές.....	47
3.1.1.Προδιαγραφές μεταβατικής απόκρισης για πλοίο.....	48
3.2.Σχεδιασμός ελεγκτή.....	49
3.2.1.Η μέθοδος MIGO.....	50
3.2.2.Ο αλγόριθμος MIGO.....	53
3.2.3.Επίλυση με την μεθοδολογία MIGO.....	54
3.3.Προσομοίωση.....	55
3.3.1.Συναρτήσεις σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB.....	58
3.3.2.Παράμετροι προσομοίωσης.....	61

3.3.3.Αποτελέσματα.....	63
3.4.Σύνοψη.....	67
Κεφάλαιο 4. Πρακτική υλοποίηση αυτόματου πιλότου πλοίου.....	68
4.1.Υλοποίηση του αυτόματου πιλότου.....	68
4.2.Πηδάλιο πορείας.....	68
4.3.Δορυφορική πυξίδα.....	72
4.4.Ανεμόμετρο.....	73
4.5.Σύνοψη.....	75
Κεφάλαιο 5. Αυτόματος πιλότος και βέλτιστο αποτέλεσμα.....	76
5.1. Σύγχρονες οικονομικές και περιβαλλοντικές απαιτήσεις.....	76
5.2.Αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων.....	78
5.2.1. Μέθοδοι μείωσης εκπομπής ρύπων.....	78
5.2.2.Πλεονεκτήματα της μείωσης ταχύτητας πλεύσης.....	80
5.3.Προγράμματα Βέλτιστης Δρομολόγησης και η συμβολή του αυτόματου πιλότου.....	81
5.4.Σύνοψη.....	83
Βιβλιογραφία – Αναφορές.....	84
Λογισμικό – Γλώσσα προγραμματισμού: MATLAB.....	85

Βιογραφικό Σημείωμα

Γεννηθείς στις 2 Σεπτεμβρίου 1987 και μόνιμος κάτοικος Σαλαμίνας. Μετά τις πανελλήνιες εξετάσεις της σχολικής χρονιάς 2004 – 2005 εισήχθη στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Κατά τη διάρκεια των σπουδών μου έλαβα τρεις υποτροφίες επίδοσης και την πρακτική μου άσκηση έκανα στην Διαδικασία Α.Ε. – Σύμβουλοι Επιχειρήσεων. Είμαι κάτοχος τριών πτυχίων ξένων γλωσσών, για αγγλικά, ισπανικά και γαλλικά.

Τέλος, κατά τη στρατιωτική θητεία μου στο Πολεμικό Ναυτικό, υπηρέτησα στο γραφείο του Τεχνικού Ασφαλείας του Ναυστάθμου Κρήτης, όπου εργάστηκα σε θέματα εργασιακής ασφάλειας και μετρήσεων εύφλεκτων αερίων στα πολεμικά πλοία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός ελεγκτή PID ο οποίος θα χρησιμεύσει ως αυτόματος πιλότος για την πλοήγηση εμπορικού πλοίου. Ξεκινούμε από την μελέτη μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν το δυναμικό σύστημα κίνησης του πλοίου. Περνάμε στη σχεδίαση του ελεγκτή, σύμφωνα με τις αρχές που διέπουν τις μεθόδους της επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων (αναλογική, διαφορική και παραγωγική). Έπειτα, χρησιμοποιούμε τέτοια μαθηματικά μοντέλα για προσομοίωση του συστήματος ελεγκτή-πλοίου. Τέλος, αναφέρουμε πώς συμβάλει ο αυτόματος πιλότος στη βέλτιστη πλοήγηση, από οικονομικής και περιβαλλοντικής άποψης.

Ο λόγος της ενασχόλησής μας είναι οι προκλήσεις που δημιουργεί το ανταγωνιστικό περιβάλλον των ναυτιλιακών επιχειρήσεων και φυσικά οι απαιτήσεις για σεβασμό προς το περιβάλλον. Οι προκλήσεις αυτές αφορούν την αποτελεσματικότερη, πιο κερδοφόρα και ασφαλέστερη διαχείριση των πλοίων για την μεταφορά εμπορευμάτων. Οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις, που επικεντρώνονται στους ρύπους που παράγονται από τη λειτουργία των πλοίων, περιγράφονται αναλυτικά από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (www.imo.org) με τις συνθήκες Tier I, II και III και επιβάλεται η καθολική εφαρμογή τους.

Ένας τέτοιος αυτόματος πιλότος σε συνεργασία με λογισμικό προτεινόμενης βέλτιστης πορείας πλοίου δίνουν λύση σε αυτό το πρόβλημα. Τέτοια λογισμικά χρησιμοποιούν δεδομένα όπως μετεωρολογικές προβλέψεις, προσέγγιση της πορείας σε τόξο μέγιστου κύκλου με κέντρο το κέντρο της Γης (που δίνει την μικρότερη απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία στην επιφάνειά της), την κατανάλωση καυσίμου κ.α. Ο αυτόματος πιλότος θα εξασφαλίζει την διατήρηση της βέλτιστης αυτής πορείας για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αυτόματος πιλότος πλοήγησης πλοίου, MIGO, PID, βέλτιστη δρομολόγηση πλοίου, μείωση κατανάλωσης καυσίμου

ABSTRACT

The subject of this thesis is the design of a PID controller, which will serve as a ship autopilot for the navigation of a commercial ship. First step is the study of mathematical modeling of the dynamic system of ship motion. Secondly, the design of a PID controller, according to the principles given by methods of selecting appropriate parameters (proportional, differential and productive) and the use of mathematical models for simulation. Finally, we refer to how an autopilot can contribute to an optimum ship route, considering financial and environmental demands.

Our purpose is to show how an autopilot help to cope with the challenges of the competitive environment of maritime operations and the environmental demands. These challenges aim to a more efficient, more profitable and safer management for shipping transportations. The environmental demands focus on the greenhouse gas emissions by ships, described in detail by the International Maritime Organization (www.imo.org) with regulations presented in Tier I, II and III. Their global imposition is vital.

The use of an autopilot in collaboration with a sea route optimization software, provides a solution to this problem. Data of meteorological forecasts, rhumb lines (which gives the shortest distance between two points on Earth surface), fuel consumption etc is used to provide suggestions of optimum sea routes for a journey. Autopilot will apply the selected one.

KEYWORDS

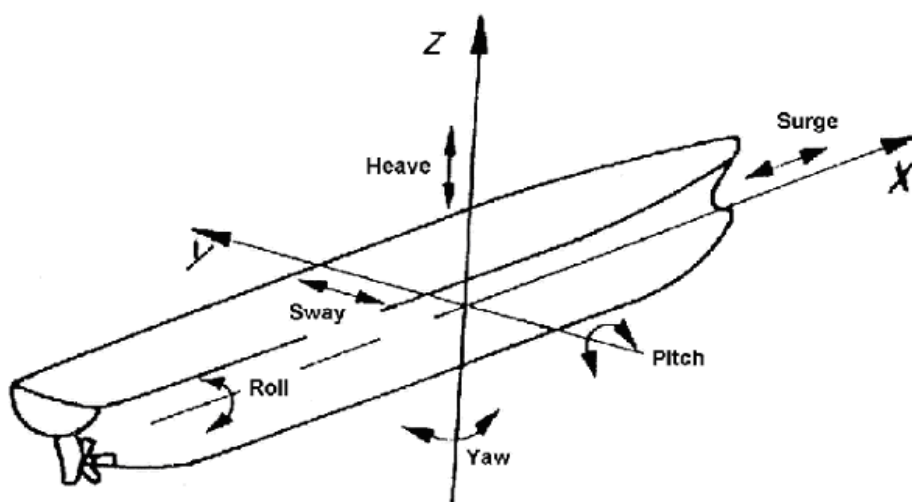
Course keeping ship autopilot, MIGO, PID, ship route optimization, fuel optimum consumption

Κεφάλαιο 1

Μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος του πλοίου

1.1 Μη γραμμικές δυναμικές εξισώσεις

Απαραίτητη προϋπόθεση για την κατανόηση του προβλήματος, τη σχεδίαση του ελεγκτή και τον προσδιορισμό των απαιτήσεών μας από αυτόν είναι η κατανόηση του μαθηματικού μοντέλου που διέπει το σύστημα. Παρακάτω παρουσιάζεται η τρισδιάστατη αναπαράσταση του:



Σχήμα 1.1

Όπως βλέπουμε, το σύστημα συντεταγμένων για την μαθηματική περιγραφή της κίνησης του πλοίου παίρνει ως σύστημα αναφοράς το ίδιο το πλοίο. Για τη δική μας ευκολία ορίζουμε ως σημείο $0(0,0,0)$ το κέντρο βάρους του πλοίου. Ο άξονας κίνησης του πλοίου είναι ο X. Οι μη γραμμικές δυναμικές εξισώσεις που περιγράφουν τις συνισταμένες δυνάμεις (X, Y, Z) και τις ροπές στους τρεις άξονες (K, M, N) είναι οι εξής^[1]:

$$X = m [u - v \cdot r + w \cdot q - x_g(q^2 + r^2) + y_g(p \cdot q - \dot{r}) + z_g(p \cdot r + \dot{q})] \quad (1.1)$$

$$Y = m [\dot{v} - w \cdot p + u \cdot r - y_g(r^2 + p^2) + z_g(q \cdot r - \dot{p}) + x_g(q \cdot p + \dot{r})] \quad (1.2)$$

$$Z = m [\dot{w} - u \cdot q + v \cdot p - z_g(p^2 + q^2) + x_g(r \cdot p - \dot{q}) + y_g(r \cdot q + \dot{p})] \quad (1.3)$$

$$K = I_x \cdot p + (I_z - I_y)q \cdot r - (r + p \cdot q)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (p \cdot r - q)I_{xy} + m [y_g(\dot{w} - u \cdot q + v \cdot p) - z_g(\dot{v} - w \cdot p + u \cdot r)] \quad (1.4)$$

$$M = I_y q + (I_x - I_z)r \cdot p - (p + q \cdot r)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (q \cdot p - \dot{r})I_{yz} + m [z_g(\dot{u} - v \cdot r + w \cdot q) - x_g(\dot{w} - u \cdot q + v \cdot p)] \quad (1.5)$$

$$N = I_z \cdot r + (I_y - I_x)p \cdot q - (q + r \cdot p)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (r \cdot q - \dot{p})I_{zx} + m [x_g(\dot{v} - w \cdot p + u \cdot r) - y_g(\dot{u} - v \cdot r + w \cdot q)] \quad (1.6)$$

Προκύπτουν από την εφαρμογή των νόμων του Euler για την κίνηση, το πρώτο και δεύτερο αξίωμα. Όσο για τα μεγέθη:

m : η μάζα του πλοίου

u : η ταχύτητα στον άξονα X

v : η ταχύτητα στον άξονα Y

w : η ταχύτητα στον άξονα Z

r : η γωνιακή ταχύτητα στον άξονα Z

p : γωνιακή ταχύτητα στον άξονα X

q : γωνιακή ταχύτητα στον άξονα Y

I_x, I_y, I_z : ροπές αδράνειας στους άξονες X, Y, Z

x_g, y_g, z_g : συντεταγμένες του κέντρου βάρους του πλοίου

Για την απλοποίηση των εξισώσεων αυτών παίρνουμε τις εξής παραδοχές:

- Ομογενή διανομή της μάζας του πλοίου και συμμετρία στο επίπεδο $x-y$ ($I_{xy}=0, I_{yz}=0$)
- Η ταχύτητα στον άξονα Z και οι γωνιακές ταχύτητες στους άξονες X και Y μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.
- Ταύτιση του κέντρου βάρους του πλοίου και του συστήματος συντεταγμένων, όπως αναφέραμε παραπάνω.
- Μικρές τιμές για την ταχύτητα r , την γωνιακή ταχύτητα v και τη γωνία δ του πηδαλίου

Με αυτές έχουμε το εξής μοντέλο εξισώσεων για την περιγραφή κίνησης του πλοίου:

$$X = m(\dot{u} - u \cdot r - x_g \cdot r^2) \quad (1.7)$$

$$Y = m(\dot{v} + u \cdot r + x_g \cdot \dot{r}) \quad (1.8)$$

$$Z = I_z \cdot \dot{r} + m \cdot x_g (\dot{v} + u \cdot r) \quad (1.9)$$

Συνεχίζουμε με την κανονικοποίηση των εξισώσεων. Παίρνουμε σαν παραδοχή ότι η ταχύτητα v στον άξονα Y και η γωνιακή ταχύτητα r στον Z είναι μικρά μεγέθη σε σχέση με τα υπόλοιπα. Αυτό μας επιτρέπει στο να ανεξαρτητοποιήσουμε την εξίσωση των συνισταμένων του X από τις εξισώσεις των συνισταμένων σε Y και Z , με την προϋπόθεση ότι η ταχύτητα u_0 (αρχική συνθήκη για την ταχύτητα στον X) παραμένει σταθερή, δηλαδή έχουμε σταθερή πρόωση. Επίσης θεωρούμε ότι $v_0 = w_0 = 0$ στους άλλους άξονες. Επομένως:

$$\begin{array}{lll} u = u_0 + \Delta u & v = \Delta v & r = \Delta r \\ X = X_0 + \Delta X & Y = \Delta Y & N = \Delta N \end{array}$$

Αυτή η διαδικασία μας δίνει μια εξίσωση για την ταχύτητα και την κυρίως κίνηση του πλοίου και ένα σύστημα 2 εξισώσεων για την πλοήγηση. Έτσι έχουμε:

$$\text{Εξίσωση ταχύτητας:} \quad X = m \cdot \dot{u} \quad (1.10)$$

$$\text{Εξισώσεις πλοήγησης:} \quad Y = m(\dot{u} + u_0 \cdot r + x_g \cdot \dot{r}) \quad (1.11)$$

$$Z = I_z \cdot \dot{r} + m \cdot x_g(\dot{u} + u_0 \cdot r) \quad (1.12)$$

1.1.2 Εξίσωση ταχύτητας

Η εξίσωση της ταχύτητας συνδέει τη ροπή T που δίνει ο κινητήρας στις προπέλες με την ταχύτητα του πλοίου u :

$$X(u, v, r, \dot{u}, \delta, T) = m(\dot{u} - u \cdot r - x_g \cdot r^2) \quad [1] \quad (1.13)$$

1.1.2.1 Μη γραμμική προσέγγιση

Ο M.Blanke^[1] πρότεινε μια άλλη μη γραμμική προσέγγιση για τη συνισταμένη δύναμη στον X :

$$X = X_u \cdot \dot{u} + X_{vr} v \cdot r + X_{|u|u} |u| u + X_{rr} r^2 + (1-t)T + X_{cc\delta\delta} c^2 \cdot \delta^2 + X_{ext} \quad (1.14)$$

Αντικαθιστώντας την (1.14) στην (1.13) έχουμε:

$$(m - X_u) \cdot \dot{u} = X_{|u|u} |u| u + (1-t)T + T_{loss} \quad (1.15)$$

Όπου:

$$T_{loss} = (m + X_{vr}) v \cdot r + (X_{rr} + m x_g) r^2 + X_{cc\delta\delta} c^2 \cdot \delta^2 + X_{ext} \quad (1.16)$$

X_u : Αδράνεια ανάλογη της μάζας στον X

$X_{|u|u}$: Συνισταμένη αντίστασης

t : Ποσοστό μείωσης ροπής

$X_{cc\delta\delta}$: Αντίσταση από τη ροή γύρω απ' το πτερύγιο πηδαλίου

T : Ροπή προπέλλας

c : Ροή γύρω απ' το πτερύγιο πηδαλίου

T_{loss} : Όρος απωλειών από την αντίσταση

$(m + X_{vr})$: Αντίσταση από τη σχετική κίνηση στον άξονα Y και την γωνιακή ταχύτητα στον Z

$(X_{rr} + m x_g)$: Αντίσταση από την γωνιακή ταχύτητα στον Z

X_{ext} : Εξωτερικές δυνάμεις από περιβαλλοντικές διαταραχές (άνεμο, κύματα)

Ισχύει $T_{loss}=0$ για σταθερή κατάσταση, καθώς η ροπή T εξουδετερώνει τις απώλειες. Όσο για τη ροή στο πτερύγιο της προπέλας, η ταχύτητα δίνεται:

$$c_T^2 = V_a^2 + (0.8 \cdot a \cdot \frac{8}{\pi \rho D^2})^2 \cdot T \quad (1.17)$$

V_a : ταχύτητα εισερχόμενης στην έλικα ροής

a : βήμα έλικας

D : διάμετρος προπέλλας

1.1.2.2 Γραμμική προσέγγιση

Έχουμε μια γραμμική προσέγγιση της (1.15) αντικαθιστώντας σε αυτήν τα εξής:

$$u = u_0 + \Delta u$$

$$T = T_0 + \Delta T$$

$$T_{\text{loss}} = T_{\text{loss } 0} + \Delta T_{\text{loss}}$$

Έτσι έχουμε:

$$(m - X_u) \dot{u} = X_u \Delta u + (1-t) \Delta T + \Delta T_{\text{loss}} \quad (1.18)$$

1.1.3 Εξισώσεις πλοήγησης

Οι εξισώσεις πλοήγησης περιλαμβάνουν τις μεταβλητές v , r , ψ (γωνία στον Z) και δ (γωνία πηδαλίου).

1.1.3.1 Μοντέλο Davidson and Schiff(1946)

Οι Davidson and Schiff^[1] το 1946 πρότειναν την αντικατάσταση των εξισώσεων (1.11) και (1.12) με τις παρακάτω εξισώσεις, οι οποίες έχουν σαν συντελεστές υδροδυναμικά μεγέθη, χαρακτηριστικά για κάθε πλοίο, που θα εξηγήσουμε παρακάτω:

$$Y = Y_v \cdot \dot{v} + Y_r \cdot \dot{r} + Y_v \cdot v + Y_r \cdot r + Y_\delta \cdot \delta_R \quad (1.19)$$

$$Z = Z_v \cdot \dot{v} + Z_r \cdot \dot{r} + Z_v \cdot v + Z_r \cdot r + Z_\delta \cdot \delta_R \quad (1.20)$$

Μπορούμε να γράψουμε τις εξισώσεις στην μορφή:

$$M \cdot \dot{v} + N(u_0)v = b \cdot \delta_R \quad (1.21)$$

Όπου $v = [u \ r]^T$. Η αντίστοιχη απεικόνιση σε εξισώσεις κατάστασης, με μεταβλητές κατάστασης την ταχύτητα u και την γωνιακή ταχύτητα r και μεταβλητή ελέγχου την γωνία πηδαλίου δ . Πρώτα βρίσκουμε τους όρους από τις παρακάτω εξισώσεις το σύστημά μας:

$$\dot{x} = Ax + b\delta = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \delta \quad (1.22)$$

$$a_{11} = \frac{(I_Z - N\dot{r})Y_V - (m \cdot x_G - Y\dot{r})N_V}{\det(M)} \quad (1.23)$$

$$a_{12} = \frac{(I_Z - N\dot{r})(Y_R - m \cdot U_0) - (m \cdot x_G - Y\dot{r})(N_R - m \cdot x_G \cdot U_0)}{\det(M)} \quad (1.24)$$

$$a_{21} = \frac{(I_Z - Y\dot{V})N_V - (m \cdot x_G - N\dot{V})Y_V}{\det(M)} \quad (1.25)$$

$$a_{22} = \frac{(m - Y\dot{V})(N_R - m \cdot x_G \cdot U_0) - (m \cdot x_G - N\dot{V})(Y_R - m \cdot U_0)}{\det(M)} \quad (1.26)$$

$$b_1 = \frac{(I_Z - N\dot{r})Y_\delta - (m \cdot x_G - Y\dot{r})N_\delta}{\det(M)} \quad (1.27)$$

$$b_1 = \frac{(m - Y\dot{r})N_\delta - (m \cdot x_G - N\dot{V})Y_\delta}{\det(M)} \quad (1.28)$$

Οι πίνακες είναι:

$$M = \begin{bmatrix} m - Y\dot{V} & m \cdot x_G - Y\dot{r} \\ m \cdot x_G - N\dot{V} & I_Z - N\dot{r} \end{bmatrix} \quad N(U_0) = \begin{bmatrix} -Y_V & m \cdot x_G - Y_R \\ -N_V & m \cdot x_G \cdot U_0 - N_R \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

1.1.4 Επιπρόσθετη μάζα και αδράνεια

Σε αυτό το σημείο, πριν προχωρήσουμε, καλό είναι να αναφερθούμε στην επιπρόσθετη (ή εικονική μάζα)^[1] και τη σημασία της στη Ρευστομηχανική.

Ένα σώμα όταν κινείται εντός ρευστού αλληλεπιδρά με αυτό. Καθώς το σώμα επιταχύνεται ή επιβραδύνεται ασκεί και δέχεται δυνάμεις (κυρίως με την μορφή πίεσης) από το ρευστό. Αυτή η αλληλεπίδραση ως σύστημα περιλαμβάνει ένα στοιχειώδη χώρο που περικλείει το σώμα και το περιβάλλον υγρό. Καθώς όμως, η αρμονική κίνηση του πλοίου προκαλεί ταλάντωση στο υγρό, με διαφορετικό πλάτος και φάση σε διαφορετικά μέρη του όγκου του ρευστού, και καθώς αυτή η ταλάντωση απομακρύνεται από το κυρίως σώμα, δεν το επηρεάζει. Έτσι το σύστημα σώματος-υγρού έχει να κάνει με τις επιδράσεις στη μάζα του σώματος μόνο. Το σύστημα δεν περιλαμβάνει την μάζα του υγρού, μόνο την αντίδρασή του. Η αντίδραση αυτή αντιστοιχίζεται στην κίνηση του πλοίου εν προκειμένω, με συντελεστές για κάθε επιτάχυνση, γραμμική και γωνιακή στους 3 άξονες. Άρα οι δυνάμεις που δέχεται το πλοίο είναι ανάλογες αυτών. Οι συνισταμένες των αντιδράσεων αυτών παρουσιάζονται παρακάτω:

$$X_A = X\dot{u}\cdot\dot{u} + X\dot{w}\cdot(\dot{w} + uq) + X\dot{q}\cdot\dot{q} + Z\dot{w}\cdot wq + Z\dot{q}\cdot q^2 + X\dot{v}\cdot\dot{v} + X\dot{p}\cdot\dot{p} + X\dot{r}\cdot\dot{r} - Y\dot{v}\cdot vr - Y\dot{p}\cdot rp - Y\dot{r}\cdot r^2 - X\dot{v}\cdot ur - Y\dot{w}\cdot wr + Y\dot{w}\cdot vq + Z\dot{p}\cdot pq - (Y\dot{q} - Z\dot{r})qr \quad (1.30)$$

$$Y_A = X\dot{u}\cdot\dot{u} + Y\dot{w}\cdot\dot{w} + Y\dot{q}\cdot\dot{q} + Y\dot{v}\cdot\dot{v} + Y\dot{p}\cdot\dot{p} + Y\dot{r}\cdot\dot{r} + X\dot{v}\cdot X\dot{v}\cdot vr + Y\dot{w}\cdot vp + X\dot{r}\cdot r^2 + (X\dot{p} - Z\dot{r})rp + Z\dot{p}\cdot p^2 - X\dot{w}(up - wr) + X\dot{u}\cdot ur - Z\dot{w}\cdot wp - Z\dot{q}\cdot pq + X\dot{q}\cdot qr \quad (1.31)$$

$$Z_A = X\dot{w}(\dot{u} - qw) + Z\dot{w}\cdot\dot{w} + Z\dot{q}\cdot\dot{q} - X\dot{u}\cdot uq - X\dot{q}\cdot q^2 + Y\dot{w}\cdot\dot{v} + Z\dot{p}\cdot\dot{p} + Z\dot{r}\cdot\dot{r} + Y\dot{v}\cdot vp + Y\dot{r}\cdot rp + Y\dot{p}\cdot p^2 + X\dot{v}\cdot up + Y\dot{w}\cdot wp - X\dot{v}\cdot vq - (X\dot{p} - X\dot{q})pq - X\dot{r}\cdot qr \quad (1.32)$$

Οι παραπάνω συντελεστές μετατοπίσεων, ταχυτήτων, επιταχύνσεων και γωνιών προκύπτουν από πειράματα και έρευνα με μοντέλα πλοίων υπό κλίμακα και ονομάζονται υδροδυναμικοί συντελεστές. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος μετρήσεων τέτοιων συντελεστών είναι ο μηχανισμός κίνησης επιπέδου (planar motion mechanism – PMM):



Εικόνα 1.1

Κατασκευάζεται ένα υπό κλίμακα μοντέλο πλοίου του τύπου που μας ενδιαφέρει. Αυτό προσαρτίζεται σε έναν μηχανισμό που έχει τέσσερις εργασίες να επιτελέσει. Πρώτον κινεί με σταθερή ταχύτητα το μοντέλο κατά μήκος ενός αγωγού στον οποίον ρέει νερό με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (π.χ.ταχύτητα ροής).Δεύτερον, μετράει τις πλευρικές επιταχύνσεις από τις αντιδράσεις και τρίτον τυχόν γωνιακές μεταβολές. Τέταρτον, καθ'όλη τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, με τη βοήθεια αισθητήρων μετρά τις δυνάμεις που δέχεται και καταγράφει τις διαφορές μεταξύ των επιθυμητών ταχυτήτων, επιταχύνσεων, γωνιών και αυτών που παρατηρήθηκαν. Συλλέγονται όλα αυτά τα δεδομένα και καθορίζονται οι υδροδυναμικοί συντελεστές για το πλοίο.

1.1.5 Πειραματικά μοντέλα περιγραφής κίνησης ενός πλοίου

Η περιγραφή της κίνησης του πλοίου δεν περιορίζεται μόνο στην απλή μαθηματική διατύπωση που αναπτύξαμε παραπάνω. Μια άλλη προσέγγιση είναι να συνδεθούν χαρακτηριστικά του πλοίου (π.χ. μήκος) με τις εξισώσεις αυτές. Έτσι, με βασικές πληροφορίες μπορούμε να έχουμε ένα σύνολο εξισώσεων, χωρίς να χρειάζονται πολυδάπανες και χρονοβόρες μετρήσεις. Δύο τέτοια μοντέλα παρουσιάζονται παρακάτω.

1.1.5.1 Το μοντέλο Nomoto

Το 1957 οι Ιάπωνες επιστήμονες Nomoto, Taguchi, Honda και Hirano παρουσίασαν δύο εκδοχές^[1] του μοντέλου των Davidson και Schiff, απαλοίφοντας τον όρο της ταχύτητας v του άξονα Y . Έτσι μας δίνουν την δεύτερης τάξης συνάρτηση μεταφοράς με έξοδο την γωνιακή ταχύτητα r στον άξονα Y και είσοδο την εντολή γωνίας του πηδαλίου δ_R :

$$\frac{r}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1+T_3s)}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (1.33)$$

Οι παράμετροι συνδέονται με τους προηγούμενους πίνακες και δίνονται:

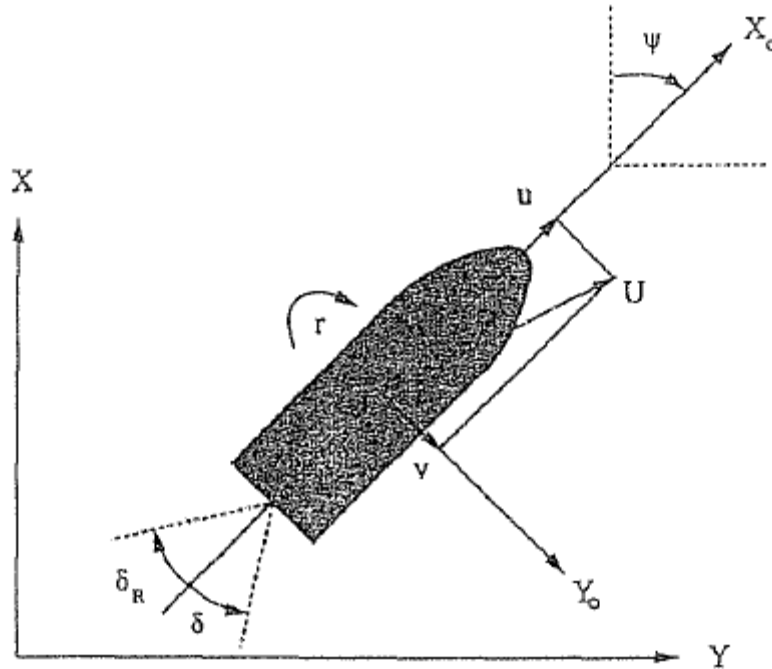
$$T_1 \cdot T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)} \quad (1.34)$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11} \cdot m_{22} + n_{22} \cdot m_{11} - n_{12} \cdot m_{21} - n_{21} \cdot m_{12}}{\det(N)} \quad (1.35)$$

$$K_R = \frac{n_{21} \cdot b_1 - n_{11} \cdot b_2}{\det(N)} \quad (1.36)$$

$$K_R \cdot T_3 = \frac{m_{21} \cdot b_1 - m_{11} \cdot b_2}{\det(N)} \quad (1.37)$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι μεταβλητές που χρησιμοποιούμε και πως συνδέονται με την κατεύθυνση του πλοίου:



Σχήμα 1.2

Για δικιά μας διευκόλυνση, για πιο εύκολη κατανόηση της αντιστροφής των αξόνων X και Y στο παραπάνω σχήμα απεικόνισης της κατεύθυνσης του πλοίου ορίζουμε για την γωνία του πηδαλίου $\delta_R = -\delta$, δηλαδή η πραγματική γωνία του πηδαλίου θα έχει αντίθετη φορά από αυτή του μοντέλου μας. Έτσι όταν έχουμε $\delta > 0$ να μας δίνει γωνιακή ταχύτητα $r > 0$. Ο άξονας X_0 είναι ως προς το πλοίο και ταυτίζεται με την κατεύθυνσή του. Η γωνία ψ ανάμεσα στον X και τον X_0 είναι η κατεύθυνση του πλοίου. Και αφού είναι στον άξονα Z τότε εννοείται ότι $\psi = r$. Άρα η προηγούμενη συνάρτηση μεταφοράς για την γωνία κατεύθυνσης είναι τρίτης τάξης αφού $\psi(s) = r(s) \cdot s$. Για να έχουμε μια δευτέρας τάξεως προσέγγιση αντικαθιστούμε τις παραμέτρους T_1, T_2, T_3 με την παράμετρο T , όπου $T = T_1 + T_2 - T_3$. Έτσι έχουμε:

$$\frac{\psi}{\delta}(s) = \frac{K}{s(1+Ts)} \quad (1.38)$$

Η αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου είναι:

$$T \cdot \ddot{\psi} + \dot{\psi} = K \cdot \delta \quad (1.39)$$

Για το πλοίο που χρησιμοποιήσαμε για τη σχεδίαση του αυτόματου πιλότου και την προσομοίωση, οι παράμετροι της συνάρτησης μεταφοράς έχουν ως εξής:

Πίνακας 1.1

	Cargo Ship-Mariner Class(Chislett and Strom-Tejsen)
L(m)	170m
u ₀ (m/s)	7.7m/s
DWT	16622tng
K	0.185
T ₁	118
T ₂	7.8
T ₃	18.5

Οπότε:

$$G_P(s) = \frac{\psi}{\delta}(s) = \frac{1.7 \cdot 10^{-3}}{s^2 + 9.3 \cdot 10^{-3}s} \quad (1.40)$$

1.1.5.2 Μοντέλο Abkowitz

Στην αρχή του κεφαλαίου παρουσιάσαμε μια παραδοχή, τα μοντέλα τα οποία αναπτύξαμε να ανταποκρίνονται σε μικρές τιμές των r , v και δ . Όμως κάτι τέτοιο για τη σχεδίαση και την προσομοίωση δεν είναι πρακτικό. Ο Abkowitz^[1] το 1964 παρουσίασε πώς μπορούμε να περιγράψουμε την κίνηση ενός πλοίου, χωρίς αυτές τις παραδοχές, τροποποιώντας τις εξισώσεις 1.7-1.9 με αναπτύγματα Taylor, γύρω από την τιμή U_0 , δηλαδή την ονομαστική ταχύτητα του πλοίου.

Να θυμηθούμε ότι το ανάπτυγμα Taylor έχει τον εξής τύπο:

$$\sum_0^\infty \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n = f(a) + \frac{f'(a)}{1!} (x-a) + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n \quad (1.41)$$

Όπου a ένας αριθμός στον οποίο είναι παραγωγίσιμη η συνάρτηση f (εν προκειμένω η ονομαστική ταχύτητα U_0). Τα αναπτύγματα του Abkowitz θα είναι για τις ταχύτητες u , v και την γωνιακή ταχύτητα r και μέχρι 3^{ov} βαθμού.

Με βάση αυτό οι συνισταμένες δυνάμεις στους 3 άξονες δίνονται

$$X = X^* + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_u \Delta u + X_{uu} \Delta u^2 + X_{uuu} \Delta u^3 + X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 + X_{\delta\delta} \delta^2 + X_{rv} r v \delta + X_{r\delta} r \delta + X_{v\delta} v \delta + X_{vvv} v^2 \Delta u + X_{ruu} r^2 \Delta u + X_{\delta\delta u} \delta^2 \Delta u + X_{rvu} r v u + X_{r\delta u} r \delta \Delta u + X_{v\delta u} v \delta \Delta u \quad (1.42)$$

$$Y = Y^* + Y_u \Delta u + Y_{uu} \Delta u^2 + Y_r r + Y_v v + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\delta} \delta + Y_{rr} r^3 + Y_{vvv} v^3 + Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 + Y_{r\delta} r^2 \delta + Y_{\delta\delta r} \delta^2 r + Y_{rv} r^2 v + Y_{\delta\delta v} \delta^2 v + Y_{vv\delta} v^2 \delta + Y_{\delta vr} \delta v r + Y_{vu} v \Delta u + Y_{vu} v \Delta u^2 + Y_{ru} r \Delta u + Y_{ruu} r \Delta u^2 + Y_{\delta u} \delta \Delta u + Y_{\delta uu} \delta \Delta u^2 \quad (1.43)$$

$$N = N^* + N_u \Delta u + N_{uu} \Delta u^2 + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_v v + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\delta} \delta + N_{rr} r^3 + N_{vvv} v^3 + N_{\delta\delta\delta} \delta^3 + N_{r\delta} r^2 \delta + N_{\delta\delta r} \delta^2 r + N_{rv} r^2 v + N_{vvv} v^2 r + N_{\delta\delta v} \delta^2 v + N_{vv\delta} v^2 \delta + N_{\delta vr} \delta v r + N_{vu} v \Delta u + N_{vu} v \Delta u^2 + N_{ru} r \Delta u + N_{ruu} r \Delta u^2 + N_{\delta u} \delta \Delta u + N_{\delta uu} \delta \Delta u^2 \quad (1.44)$$

Για κάθε συντελεστή παραπάνω ισχύει $A_n = \frac{1}{n!} \cdot \frac{\partial A}{\partial v}$. Οι τιμές για αυτούς τους συντελεστές, για το πλοίο που θα μελετήσουμε, δίνονται στη συνέχεια, στον πίνακα 2.2.

1.2 Περιβαλλοντικές διαταραχές

Σειρά έχει να εξετάσουμε την μαθηματική μοντελοποίηση των περιβαλλοντικών διαταραχών^[1] που επηρεάζουν την κίνηση ενός πλοίου. Αυτές είναι:

- Κύματα: αυτά που δημιουργούνται από τις καιρικές συνθήκες, δηλαδή τον άνεμο
- Άνεμοι
- Θαλάσσια ρεύματα: κυρίως αφορά κυματισμό που έχει προκληθεί σε περιοχή με διαφορετικές καιρικές συνθήκες (διαφέρει από τα κύματα που προαναφέραμε στο ότι έχουν πολύ μεγαλύτερο μήκος κύματος και πολύ μικρότερη συχνότητα) και θαλάσσια ρεύματα (όπως το Ρεύμα του Κόλπου του Μεξικού)

Κύρια επίδραση έχουν τα κύματα και οι άνεμοι. Τα θαλάσσια ρεύματα μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα. Για αυτό, λοιπόν, στη συνέχεια επικεντρωνόμαστε στις δύο πρώτες κατηγορίες.

Αυτό που χρειαζόμαστε είναι εξισώσεις που να μας δίνουν τις δυνάμεις που ασκούν στο πλοίο αυτές οι διαταραχές. Συγκεκριμένα θέλουμε τις συνισταμένες στους άξονες X και Y, αφού αυτές επηρεάζουν την γωνία κατεύθυνσης ψ με τις ροπές που ασκούν.

1.2.1 Κύματα



BEAUFORT FORCE 6
WIND SPEED: 22-27 KNOTS

Εικόνα 1.2

Θα ξεκινήσουμε από τα βασικά χαρακτηριστικά των κυμάτων. Θα αναφερθούμε πρώτα στην συχνότητα, το μήκος κύματος, το πλάτος, την φυσική συχνότητα, το ύψος, τη συχνότητα που δέχεται το πλοίο λόγω του φαινομένου Doppler (σχετική κίνηση πλοίου-κυματισμού) και τη φασματική πυκνότητα.

Οι Pierson και Moskowitz^[1] μελέτησαν τον θαλάσσιο κυματισμό και μας δίνουν εξισώσεις που τον περιγράφουν. Ξεκινάμε από την φασματική πυκνότητα:

$$S(\omega) = A \cdot \omega^{-5} \cdot e^{(-B\omega^{-4})} \quad (1.45)$$

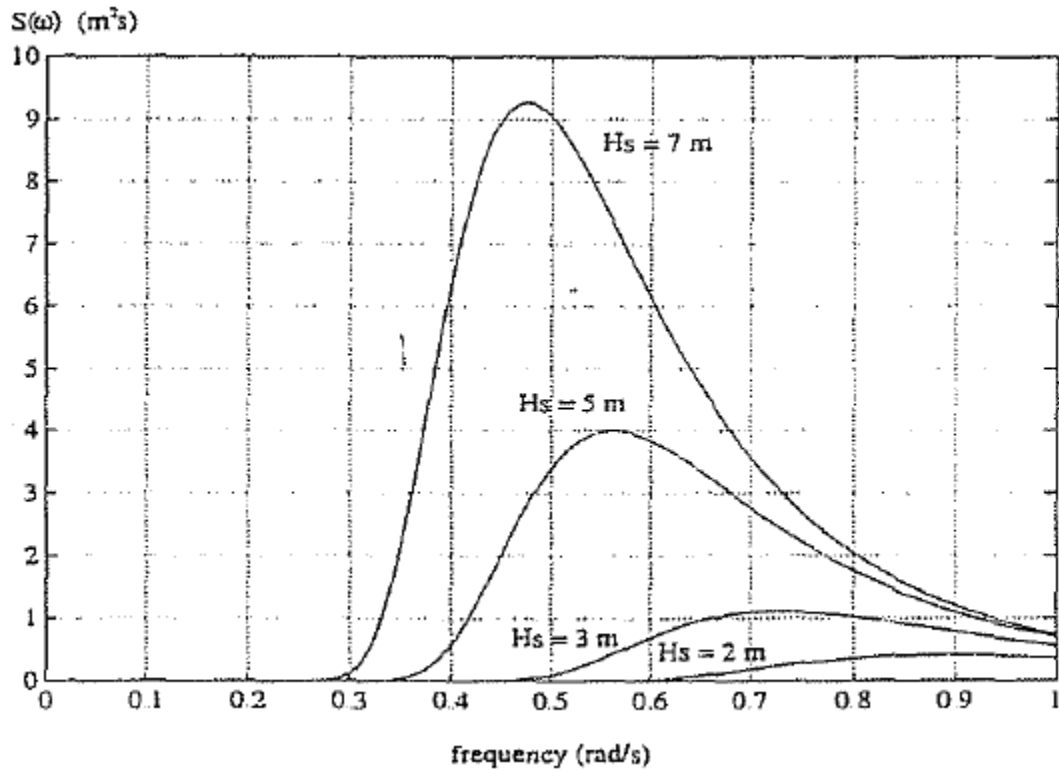
Όπου ω είναι η κυκλική συχνότητα του κυματισμού και οι σταθερές A και B δίνονται ως:

$$A = 8.1 \cdot e^{-3g^2} \quad (1.46) \quad B = 0.74 \cdot \left(\frac{g}{V}\right)^4 \quad (1.47)$$

Όπου V η ταχύτητα του ανέμου σε m/s, 30m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Η ταχύτητα του ανέμου μας δίνει και το ύψος του κύματος $H_s(m)$ και την κυκλική συχνότητα του κύματος $\omega(\text{rad/s})$ με τους εξής τύπους:

$$H_s = 0.21 \cdot \frac{V^2}{g} \quad (1.48) \quad \omega = 0.88 \cdot \frac{g}{V} \quad (1.49)$$

Παρακάτω φαίνεται το γράφημα που μας δίνει την φασματική πυκνότητα συναρτήση της συχνότητας για $0 \leq \omega \leq 1$:



Σχήμα 1.3

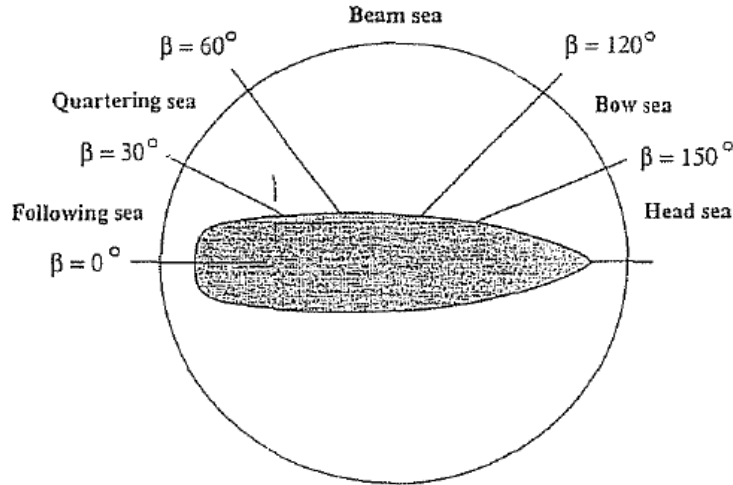
Όσο για την περίοδο:

$$T = 2\pi\sqrt{5/4B} \quad (1.50)$$

Η κυκλική συχνότητα όμως, όπως προαναφέραμε, του κυματισμού που δέχεται το πλοίο είναι διαφορετική. Αυτό οφείλεται στη σχετική κίνηση και επεξηγείται από το φαινόμενο Doppler. Κύριοι παράγοντες είναι η ταχύτητα του πλοίου $u(\text{m/s})$ και η γωνία $\beta(\text{rad})$ ανάμεσα στην κατεύθυνσή του και την κατεύθυνση του κυματισμού. Ο τύπος που μας δίνει την σχετική κυκλική συχνότητα ω_e είναι:

$$\omega_e = \omega_0 - \left(\frac{\omega_0^2}{g}\right)u \cdot \cos\beta \quad (1.51)$$

Για να γίνει κατανοητό πώς προκύπτει η γωνία β μας βοηθά το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.4

Από αυτό φαίνεται ότι για αντίθετες κατευθύνσεις $\beta=180^\circ$ ενώ για ούριο άνεμο $\beta=0^\circ$. Άλλο ένα μέγεθος που μας χρειάζεται είναι η κλίση του κύματος συναρτήσει της σχετικής κυκλικής συχνότητας και δίνεται:

$$s(t) = A \cdot k \cdot \sin \omega t \quad (1.52) \quad k = \frac{\omega^2}{g} \quad (1.53)$$

Όλα αυτά τα χρησιμοποιούμε σε έναν αλγόριθμο για να υπολογίσουμε τις δυνάμεις. Τα βήματά του είναι τα παρακάτω:

- 1) Χωρίζουμε το φάσμα κυκλικής συχνότητας από 0 έως 1 σε N ίσα μέρη με $\Delta\omega$ σταθερή διαφορά το ένα από το άλλο.
- 2) Υπολογίζουμε για ένα ω εντός του $\Delta\omega$ την τιμή της φασματικής πυκνότητας. Με την τιμή που βρίσκουμε υπολογίζουμε το πλάτος κύματος που του αντιστοιχεί με τον τύπο:

$$A(\omega) = \sqrt{2S(\omega) \cdot \Delta\omega} \quad (1.54)$$

- 3) Υπολογίζουμε την αντίστοιχη κλίση του κύματος $s(\omega, t)$
- 4) Επαναλαμβάνουμε τα προηγούμενα βήματα για $0 \leq \omega \leq 1$.

Τις τιμές της κλίσης τις χρησιμοποιούμε στους παρακάτω τύπους, που μας δίνουν τις συνισταμένες στους άξονες X και Y:

$$X_{\text{wave}}(t) = \sum_{i=1}^N \rho \cdot g \cdot B \cdot L \cdot T \cdot \cos \beta \cdot s_i(t) \quad (1.55)$$

$$Y_{\text{wave}}(t) = \sum_{i=1}^N \rho \cdot g \cdot B \cdot L \cdot T \cdot \sin \beta \cdot s_i(t) \quad (1.56)$$

Το i αντιστοιχεί στο πλήθος των τιμών που έχουμε από την διακριτοποίηση του φάσματος για $\Delta\omega$, της φασματικής πυκνότητας.

1.2.2 Άνεμοι

Για τις δυνάμεις που δέχεται ένα πλοίο από τους άνεμους που επικρατούν στην περιοχή όπου πλέει, αποτελέσαν το αντικείμενο πολλών επιστημονικών ομάδων και ο Iswerwood^[1] το 1972 κατέληξε στο συγκεκριμένο σύστημα εξισώσεων για τις συνισταμένες στους άξονες X, Y και τη συνισταμένη των ροπών N στον άξονα Z:

$$X_{wind}(t) = \frac{1}{2}C_X(\gamma_R) \cdot \rho_W \cdot V_R^2 \cdot A_T \quad (1.57)$$

$$Y_{wind}(t) = \frac{1}{2}C_Y(\gamma_R) \cdot \rho_W \cdot V_R^2 \cdot A_L \quad (1.58)$$

$$N_{wind}(t) = \frac{1}{2}C_N(\gamma_R) \cdot \rho_W \cdot V_R^2 \cdot A_L \cdot L \quad (1.59)$$

Όπου:

ρ_W : πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα (kg/m^3)

V_R : ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 30m από το επίπεδο της θάλασσας (knots)

A_T : πλευρική επιφάνεια πλοίου εκτεθειμένη στους ανέμους (m^2)

A_L : εγκάρσια επιφάνεια πλοίου εκτεθειμένη στους ανέμους (m^2)

L : μήκος πλοίου (m)

$C_X(\gamma_R)$, $C_Y(\gamma_R)$, $C_N(\gamma_R)$: παράμετροι που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του πλοίου και τη σχετική γωνία πλεύσης-ανέμου γ_R (ψ -φ_{ανέμου}). Αυτές δίνονται ως εξής:

$$C_X = A_0 + A_1 \cdot \frac{2A_L}{L^2} + A_2 \cdot \frac{2A_T}{B^2} + A_3 \cdot \frac{L}{B} + A_4 \cdot \frac{S}{L} + A_5 \cdot \frac{C}{L} + A_6 M \quad (1.60)$$

$$C_Y = B_0 + B_1 \cdot \frac{2A_L}{L^2} + B_2 \cdot \frac{2A_T}{B^2} + B_3 \cdot \frac{L}{B} + B_4 \cdot \frac{S}{L} + B_5 \cdot \frac{C}{L} + B_6 \cdot \frac{A_{ss}}{A_L} \quad (1.61)$$

$$C_N = C_0 + C_1 \cdot \frac{2A_L}{L^2} + C_2 \cdot \frac{2A_T}{B^2} + C_3 \cdot \frac{L}{B} + C_4 \cdot \frac{S}{L} + C_5 \cdot \frac{C}{L} \quad (1.62)$$

S : περίμετρος πλευρικής επιφάνειας πλοίου εκτεθειμένη στους ανέμους (m)

M : αριθμός τμημάτων που συνθέτουν την πλευρική επιφάνεια

C : απόσταση του κέντρου κάθε τμήματος από το κέντρο βάρους του πλοίου (m)

A_{ss} : εκτεθειμένη επιφάνεια υπερκατασκευής πλοίου (m^2)

Παρακάτω δίνονται οι παράμετροι A, B και C συναρτήσει της γωνίας γ_R

Πίνακας 1.2

γ_R (deg)	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	S.E.
0	2.152	-5.00	0.243	-0.164	—	—	—	0.086
10	1.714	-3.33	0.145	-0.121	—	—	—	0.104
20	1.818	-3.97	0.211	-0.143	—	—	0.033	0.096
30	1.965	-4.81	0.243	-0.154	—	—	0.041	0.117
40	2.333	-5.99	0.247	-0.190	—	—	0.042	0.115
50	1.726	-6.54	0.189	-0.173	0.348	—	0.048	0.109
60	0.913	-4.68	—	-0.104	0.482	—	0.052	0.082
70	0.457	-2.88	—	-0.068	0.346	—	0.043	0.077
80	0.341	-0.91	—	-0.031	—	—	0.032	0.090
90	0.355	—	—	—	-0.247	—	0.018	0.094
100	0.601	—	—	—	-0.372	—	-0.020	0.096
110	0.651	1.29	—	—	-0.582	—	-0.031	0.090
120	0.564	2.54	—	—	-0.748	—	-0.024	0.100
130	-0.142	3.58	—	0.047	-0.700	—	-0.028	0.105
140	-0.677	3.64	—	0.069	-0.529	—	-0.032	0.123
150	-0.723	3.14	—	0.064	-0.475	—	-0.032	0.128
160	-2.148	2.56	—	0.081	—	1.27	-0.027	0.123
170	-2.707	3.97	-0.175	0.126	—	1.81	—	0.115
180	-2.529	3.76	-0.174	0.128	—	1.55	—	0.112
Mean S.E.								0.103

γ_R (deg)	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	S.E.
10	0.096	0.22	—	—	—	—	—	0.015
20	0.176	0.71	—	—	—	—	—	0.023
30	0.225	1.38	—	0.023	—	-0.29	—	0.030
40	0.329	1.82	—	0.043	—	-0.59	—	0.054
50	1.164	1.26	0.121	—	-0.242	-0.95	—	0.055
60	1.163	0.96	0.101	—	-0.177	-0.88	—	0.049
70	0.916	0.53	0.069	—	—	-0.65	—	0.047
80	0.844	0.55	0.082	—	—	-0.54	—	0.046
90	0.889	—	0.138	—	—	-0.66	—	0.051
100	0.799	—	0.155	—	—	-0.55	—	0.050
110	0.797	—	0.151	—	—	-0.55	—	0.049
120	0.996	—	0.184	—	-0.212	-0.66	0.34	0.047
130	1.014	—	0.191	—	-0.280	-0.69	0.44	0.051
140	0.784	—	0.166	—	-0.209	-0.53	0.38	0.060
150	0.536	—	0.176	-0.029	-0.163	—	0.27	0.055
160	0.251	—	0.106	-0.022	—	—	—	0.036
170	0.125	—	0.046	-0.012	—	—	—	0.022
Mean S.E.								0.044

γ_R (deg)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	S.E.
10	0.0596	0.061	—	—	—	-0.074	0.0048
20	0.1106	0.204	—	—	—	-0.170	0.0074
30	0.2258	0.245	—	—	—	-0.380	0.0105
40	0.2017	0.457	—	0.0067	—	-0.472	0.0137
50	0.1759	0.573	—	0.0118	—	-0.523	0.0149
60	0.1925	0.480	—	0.0115	—	-0.546	0.0133
70	0.2133	0.315	—	0.0081	—	-0.526	0.0125
80	0.1827	0.254	—	0.0053	—	-0.443	0.0123
90	0.2627	—	—	—	—	-0.508	0.0141
100	0.2102	—	-0.0195	—	0.0335	-0.492	0.0146
110	0.1567	—	-0.0258	—	0.0497	-0.457	0.0163
120	0.0801	—	-0.0311	—	0.0740	-0.396	0.0179
130	-0.0189	—	-0.0488	0.0101	0.1128	-0.420	0.0166
140	0.0256	—	-0.0422	0.0100	0.0889	-0.463	0.0162
150	0.0552	—	-0.0381	0.0109	0.0689	-0.476	0.0141
160	0.0881	—	-0.0306	0.0091	0.0366	-0.415	0.0105
170	0.0851	—	-0.0122	0.0025	—	-0.220	0.0057
Mean S.E.							0.0127

Λόγω της συμμετρίας των πλοίων μπορούμε να παρουσιάσουμε τις παραμέτρους C_X , C_Y και C_N συναρτήσει της σχετικής γωνίας πλεύσης-ανέμου γ_R ($\gamma_R = \psi_{\text{wind}} - \psi$) ως εξής:

$$C_X = C_X \cdot \cos(\gamma_R) \quad (1.63)$$

$$C_Y = C_Y \cdot \sin(\gamma_R) \quad (1.64)$$

$$C_N = C_Z \cdot \sin(2\gamma_R) \quad (1.65)$$

1.3 Ο τύπος του πλοίου

Πριν προχωρήσουμε στα βήματα που ακολουθήσαμε για να σχεδιάσουμε τον ελεγκτή, είναι καλό να παρουσιάσουμε αναλυτικά το μοντέλο του πλοίου, του οποίου τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν. Ο ελεγκτής μας αναφέρεται στον έλεγχο πλεύσης ενός φορτηγού πλοίου, της κατηγορίας bulk carrier^[2], όπως είναι η διεθνής ονομασία. Αποτελεί ένα νεώτερο τύπο φορτηγού πλοίου που είναι ναυπηγημένο για μεταφορά ομοειδών φορτίων "χύδην", χύμα, (in bulk). Κύριο χαρακτηριστικό του τύπου αυτού είναι ότι έχει μόνο ένα κατάστρωμα. Από μακριά μοιάζει με δεξαμενόπλοιο με υπερκατασκευή στο επίστεγο, πλην όμως φέρει στο κατάστρωμα 3-5 γερανούς σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις.

Η μεγάλη αύξηση των μεταφορών ομοειδών φορτίων, όπως είναι οι βωξίτες, οι γαιάνθρακες, τα δημητριακά, τα σιδηρομεταλλεύματα, τα φωσφάτα κλπ,

συνετέλεσε στη μεγάλη αύξηση της ναυπήγησης και χρησιμοποίησης φορτηγών bulk carriers, τα οποία και αποδείχθηκαν πολύ αποδοτικά.



Εικόνα 1.3

Παραλλαγές του τύπου αυτού είναι τα μεταλλευματοφόρα, τα διπλής μεταφοράς φορτηγά πλοία (μετάλλευμα/πετρέλαιο), όπως και τα τριπλής μεταφοράς, τα γνωστά πλοία O.B.O. (Ore/Bulk/Oil-προφέρεται όμπο).

Κάποια βασικά χαρακτηριστικά για το πλοίο δίνονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 2.1

Χαρακτηριστικά	Μέγεθος
Ολικό μήκος-L	170m
Μήκος μεταξύ καθέτων(perpendiculars)-L _{pp}	160m
Μέγιστο πλάτος(beam)-B	23.17m
Βύθισμα(draft)-D	8.23m
Μάζα-m	17·10 ⁶ kg
Ροπή αδρανείας-I _z	21·10 ⁹ kg·m ²
Κέντρο βάρους(x _G ,y _G)	(-3.68m,0m)

Για δική μας διευκόλυνση κατά τον σχεδιασμό του ελεγκτή θα κανονικοποιήσουμε τις εξισώσεις ταχύτητας και πλοήγησης έτσι ώστε τα μεγέθη του πλοίου να αντιμετωπίζονται σαν σταθερές ως προς τη στιγμιαία ταχύτητά του U^[1]. Οι συνισταμένες της ταχύτητας στους άξονες X και Y έχουν οριστεί ήδη ως u=u₀+Δu και v=Δv. Έτσι έχουμε

$$U = \sqrt{(u + \Delta u)^2 + \Delta v^2} \quad (1.66)$$

Για πλοίο που κινείται με σταθερή ταχύτητα και σταθερή πορεία φυσικά θα ισχύει U=u₀. Κατά την αλλαγή πορείας όμως η ταχύτητα θα ελαττώνεται λόγω των τριβών και της αντίδρασης του ρευστού στο οποίο κινείται, δηλαδή την θάλασσα.

Για την κανονικοποίηση αυτή υπάρχουν καθορισμένες μέθοδοι. Αυτή που θα χρησιμοποιήσουμε εμείς είναι το Prime System of SNAME (1950)^[1]. Χρησιμοποιεί ως μονάδες αναφοράς την ταχύτητα U του πλοίου, το μήκος μεταξύ καθέτων(perpendiculars) L_{pp} , χρονική μονάδα $\frac{L}{U}$ και μονάδα μάζας $\frac{1}{2}\rho L^3$. Αναλυτικότερα

Πίνακας 2.2

Unit	Prime-system
Length	L
Mass	$\frac{\rho}{2} L^3$
Inertia moment	$\frac{\rho}{2} L^5$
Time	$\frac{L}{U}$
Reference area	L^2
Position	L
Angle	1
Linear velocity	U
Angular velocity	$\frac{U}{L}$
Linear acceleration	$\frac{U^2}{L}$
Angular acceleration	$\frac{U^2}{L^2}$
Force	$\frac{\rho}{2} U^2 L^2$
Moment	$\frac{\rho}{2} U^2 L^3$

Σημειώνοντας τα κανονικοποιημένα μεγέθη με ένα τόνο ()' έχουμε για μάζα, ροπή αδρανείας και κέντρο βάρους

$$m' = 798 \cdot 10^{-5} \quad I_z' = 39.2 \cdot 10^{-5} \quad x_G' = -0.023 \quad (1.67)$$

Την ίδια επεξεργασία περνούν και οι συντελεστές του μοντέλου Abkowitz (1.1.4.3) και έχουμε συγκεκριμένα για αυτό το πλοίο^[1]

Πίνακας 2.3

X-equation	Y-equation	N-equation
$-X'_u + m' = -840 \cdot 10^{-5}$	$-Y'_y + m' = -1546 \cdot 10^{-5}$	$-N'_y + m' x'_c = 23 \cdot 10^{-5}$
	$-Y'_r + m' x'_c = 9 \cdot 10^{-5}$	$-N'_r + I'_z = -83 \cdot 10^{-5}$
$X'_u = -184 \cdot 10^{-5}$	$Y'_v = -1160 \cdot 10^{-5}$	$N'_u = -264 \cdot 10^{-5}$
$X'_{uu} = -110 \cdot 10^{-5}$	$Y'_r = -499 \cdot 10^{-5}$	$N'_r = -166 \cdot 10^{-5}$
$X'_{uuu} = -215 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{vvv} = -8078 \cdot 10^{-5}$	$N'_{vvv} = 1636 \cdot 10^{-5}$
$X'_{uv} = -899 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{vvr} = 15356 \cdot 10^{-5}$	$N'_{vvr} = -5483 \cdot 10^{-5}$
$X'_{rr} = 18 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{vu} = -1160 \cdot 10^{-5}$	$N'_{vu} = -264 \cdot 10^{-5}$
$X'_{\delta\delta} = -95 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{ru} = -499 \cdot 10^{-5}$	$N'_{ru} = -166 \cdot 10^{-5}$
$X'_{u\delta\delta} = -190 \cdot 10^{-5}$	$Y'_\delta = 278 \cdot 10^{-5}$	$N'_\delta = -139 \cdot 10^{-5}$
$X'_{rv} = 798 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{\delta\delta\delta} = -90 \cdot 10^{-5}$	$N'_{\delta\delta\delta} = 45 \cdot 10^{-5}$
$X'_{v\delta} = 93 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{u\delta} = 556 \cdot 10^{-5}$	$N'_{u\delta} = -278 \cdot 10^{-5}$
$X'_{uv\delta} = 93 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{uu\delta} = 278 \cdot 10^{-5}$	$N'_{uu\delta} = -139 \cdot 10^{-5}$
	$Y'_{v\delta\delta} = -4 \cdot 10^{-5}$	$N'_{v\delta\delta} = 13 \cdot 10^{-5}$
	$Y'_{vvd} = 1190 \cdot 10^{-5}$	$N'_{vvd} = -489 \cdot 10^{-5}$
	$Y'_{0'} = -4 \cdot 10^{-5}$	$N'_{0'} = 3 \cdot 10^{-5}$
	$Y'_{0'_u} = -8 \cdot 10^{-5}$	$N'_{0'_u} = 6 \cdot 10^{-5}$
	$Y'_{0'_{uu}} = -4 \cdot 10^{-5}$	$N'_{0'_{uu}} = 3 \cdot 10^{-5}$

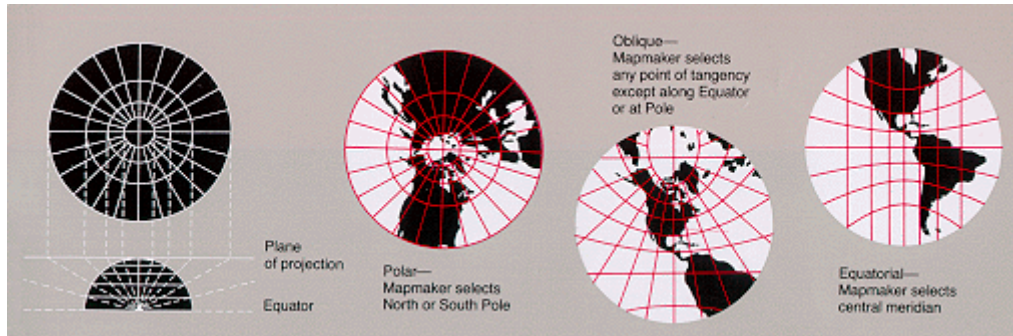
1.4 Η πορεία του πλοίου

Σε αυτή την παράγραφο θα αναφερθούμε στην διαδικασία με την οποία επιλέγεται η πορεία που θα ακολουθήσει ένα πλοίο^[12]. Πώς αυτή η διαδικασία βελτιστοποιείται θα αναφερθούμε παρακάτω.

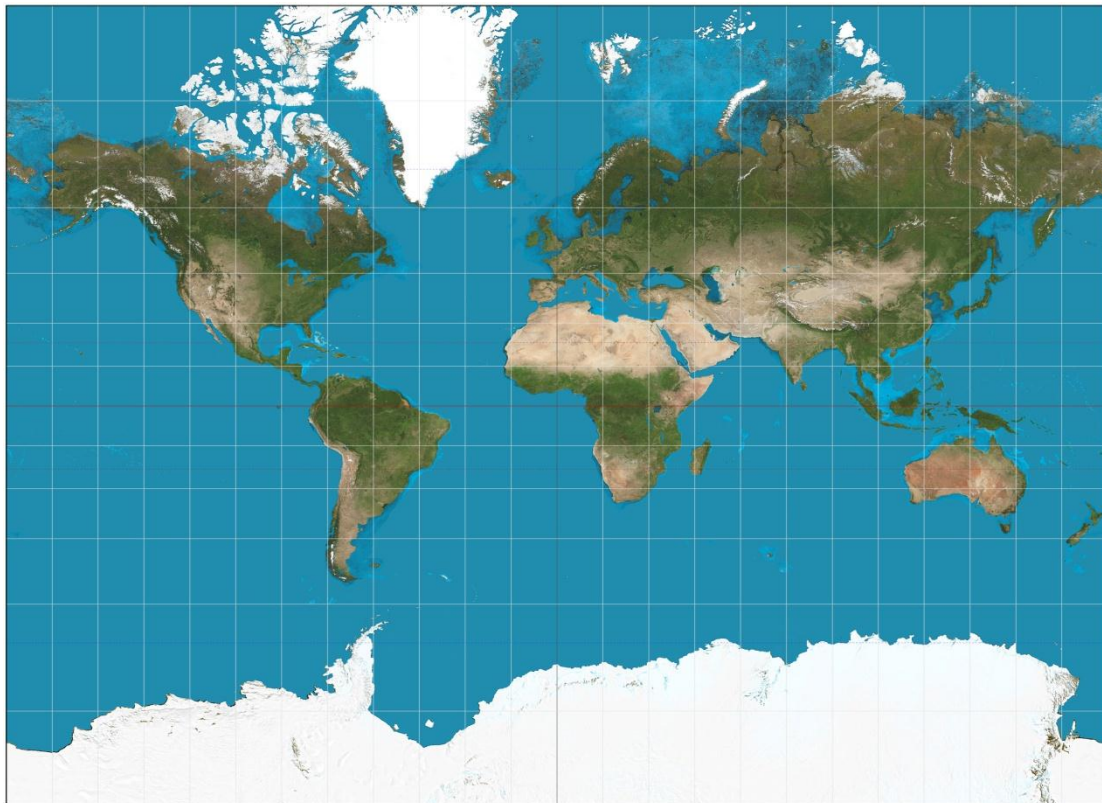
Όποτε ζητείται ο σχεδιασμός πορείας για ένα πλοίο λαμβάνονται υπ' όψιν από το πλήρωμα παρόμοια προηγούμενα ταξίδια, απαιτήσεις για τον χρόνο πραγματοποίησής του κλπ. Υπάρχουν διεθνείς κανονισμοί ανάλογα το μέγεθος του πλοίου και το εμπόρευμα που μεταφέρει από πού μπορεί να περάσει, υπάρχουν καθορισμένοι ναυτικές οδοί και υπάρχουν και απαγορεύσεις διέλευσης που αφορούν το μέγεθος. Πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν και οι καιρικές συνθήκες που θα αντιμετωπίσει το πλήρωμα. Αυτές έχουν αντίκτυπο και στην ασφάλεια αλλά και στο κόστος του ταξιδιού. Κάθε ταξίδι επίσης μπορεί να περιλαμβάνει παραπάνω από δύο σταθμούς. Άρα πρέπει να επιλεγεί και η ενδιάμεση πορεία.

Έχοντας επιλέξει δύο σημεία για την πορεία μας θέλουμε να καλύψουμε την ελάχιστη απόσταση. Αυτή είναι η ορθοδρομική καμπύλη^[5]. Στην ουσία είναι τόξο ενός κύκλου με κέντρο το κέντρο της Γης. Τους κύκλους αυτούς τους ονομάζουμε Μέγιστους Κύκλους. Πρακτικά χωρίζουμε την πορεία σε ευθύγραμμα τμήματα προσεγγίζοντας την ορθοδρομική καμπύλη. Αυτό συμβαίνει γιατί η κατεύθυνση που δίνουμε στο πλοίο είναι γωνία κάθε φορά μετρημένη ως προς τον εκάστοτε μεσημβρινό. Πλησιάζοντας όμως στον προορισμό η γωνία αυτή αλλάζει. Για να μην έχουμε λοιπόν συνεχή διόρθωση της πορείας, αποφασίζουμε ότι ανά τακτά χρονικά διαστήματα θα διορθώνουμε την πορεία. Όσο συχνότερη η διόρθωση αυτή τόσο καλύτερη η προσέγγιση στην ορθοδρομική καμπύλη.

Σε αυτή τη διαδικασία μας βοηθούν οι γνωμονικοί χάρτες οι οποίοι παρουσιάζουν τους μέγιστους κύκλους σαν ευθείες. Επίσης, χρησιμοποιούμε και τους μερκατορικούς, στους οποίους μια ευθεία πορεία είναι μια διαδρομή με μόνιμη κατεύθυνση, δηλαδή μόνιμη γωνία ως προς τον εκάστοτε μεσημβρινό. Για να γίνουν πιο αντιληπτοί παρουσιάζονται παρακάτω



Εικόνα 1.4-Γνωμονικοί χάρτες



Εικόνα 1.5-Μερκατορικός χάρτης

Το ζητούμενο είναι ένα σύνολο συντεταγμένων σημείων που θα μας δώσουν μια πορεία που θα καλύπτει τις ανάγκες μας. Για παράδειγμα ένα ταξίδι από το Ομάν στη Σιγκαπούρη με ενδιάμεσους σταθμούς θα έχει την εξής μορφή.



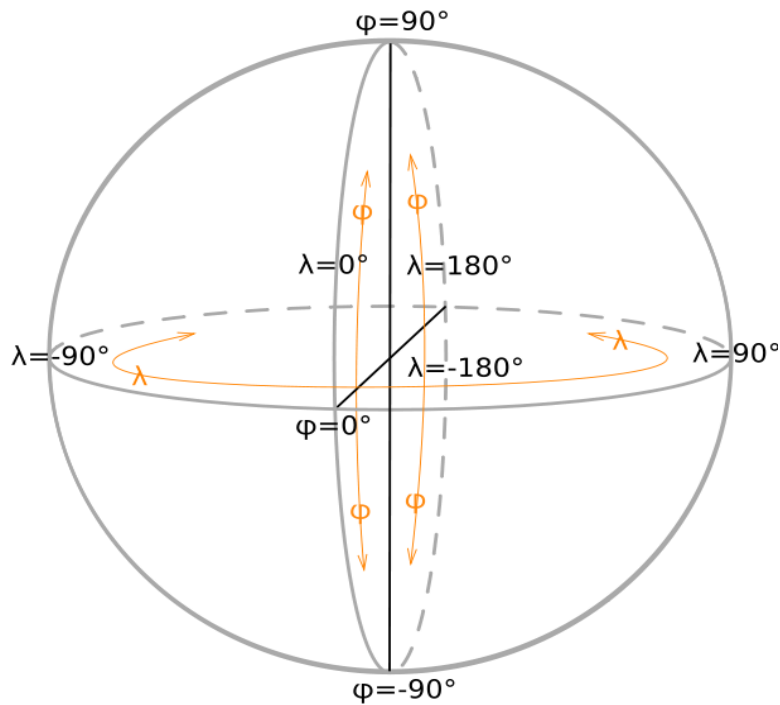
Εικόνα 1.6

Επαναλαμβάνουμε ότι είναι σημαντικό να προσεγγίζουμε όσο μπορούμε την ορθοδρομική καμπύλη.

Οι συντεταγμένες χωρίζονται σε γεωγραφικό μήκος (μεσημβρινοί) και γεωγραφικό πλάτος (ισημερινοί). Η διεθνής ορολογία είναι Longitude και Latitude.

Όταν αναφερόμαστε στο γεωγραφικό μήκος ενός σημείου, στην επιφάνεια της Γης, αναφερόμαστε στην γωνία που σχηματίζεται με κορυφή το κέντρο της Γης ανάμεσα σε έναν μεσημβρινό που περνά από το σημείο και έναν μεσημβρινό αναφοράς. Αυτός ο μεσημβρινός αναφοράς είναι ο μεσημβρινός του Greenwich, που χωρίζει την Γη νοητά σε ανατολικό και δυτικό ημισφαίριο. Εξ'ορισμού, ένα σημείο στο δυτικό ημισφαίριο θα έχει αρνητικό γεωγραφικό μήκος, ενώ θετικό στο ανατολικό. Οι μεσημβρινοί είναι ελλείψεις που τέμνονται μόνο στους δύο πόλους της Γης και είναι κάθετοι στον Ισημερινό. Αντιστοιχούν σε μέγιστους κύκλους. Οι κατευθύνσεις των πλοίων ορίζονται πάντα ως γωνίες ως προς τον εκάστοτε μεσημβρινό.

Το γεωγραφικό πλάτος αναφέρεται στους ισημερινούς, με σημείο αναφοράς τον Ισημερινό που χωρίζει τη Γη σε βόρειο και νότιο ημισφαίριο. Είναι κύκλοι και παράλληλοι μεταξύ τους. Το γεωγραφικό πλάτος ενός σημείου είναι η γωνία ανάμεσα σε αυτό και τον Ισημερινό, με κορυφή το κέντρο της Γης και τόξο τμήμα ενός μεσημβρινού. Σχηματικά, για να γίνει πιο αντιληπτός ο ρόλος των γωνιών



Σχήμα 1.5

Για παράδειγμα οι συντεταγμένες του κέντρου της Αθήνας είναι 37°58'N 23°43'E. Το N σημαίνει North (βόρειο ημισφαίριο) και το E για East (ανατολικό ημισφαίριο). Αυτή η αναπαράσταση των συντεταγμένων σε μοίρες, λεπτά και δευτερόλεπτα (degrees, minutes, seconds) μετατρέπεται σε δεκαδικής μορφής μοίρες (decimal degrees) ως εξής^[5]

$$\varphi = \text{degrees} + \frac{\text{minutes}}{60} + \frac{\text{seconds}}{3600} \quad (1.68)$$

για παράδειγμα

$$117^{\circ}29'50.5'' = 117 + \frac{29}{60} + \frac{50.5}{3600}$$

$$\varphi = 117.5^{\circ}$$

Κι όσο για τον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης d ανάμεσα σε δύο σημεία A(latA, longA) και B(latB, longB), με τις συντεταγμένες lat και long σε δεκαδική μορφή, δίνεται από τον Σφαιρικό νόμο των συνημιτόνων ως εξής^[6]

$$d = \arccos(\sin(\text{lat1}) \cdot \sin(\text{lat2}) + \cos(\text{lat1}) \cdot \cos(\text{lat2}) \cdot \cos(\text{long2} - \text{long1})) \cdot R \quad (1.69)$$

Όπου R=6371km η ακτίνα της Γης.

1.5 Σύνοψη

Μέχρι στιγμής έχουμε περιγράψει το μαθηματικό μοντέλο του πλοίου που θα αποτελέσει τη βάση της μελέτης μας. Για την συνέχεια είναι απαραίτητη η αναπαράσταση του προβλήματος σε εξισώσεις κατάστασης, οι οποίες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της σχεδίασης ενός ελεγκτή. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δοθεί το θεωρητικό υπόβαθρο για το πώς θα χρησιμοποιηθεί το μαθηματικό μοντέλο στη σχεδιάσή του.

Κεφάλαιο 2

Περί αυτοματισμού

2.1 Εξισώσεις κατάστασης

Οι εξισώσεις κατάστασης^[7] είναι μια περιγραφή στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια μεγάλη γκάμα συστημάτων όπως γραμμικά, μη γραμμικά, χρονικά αναλλοίωτα ή μη, με ή χωρίς αρχικές συνθήκες. Κατάσταση ονομάζουμε ένα σύνολο μεταβλητών του συστήματος η παρακολούθηση των οποίων μας περιγράφει πλήρως το σύστημα κάθε στιγμή.

2.1.1 Αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου

Όπως είδαμε το σύστημά μας περιγράφεται από γραμμικές δυναμικές εξισώσεις με σταθερούς συντελεστές. Συστήματα σαν αυτό καλούνται γραμμικά, χρονικά αμετάβλητα συστήματα. Αν το σύστημα είναι μίας εισόδου-μίας εξόδου τότε αναπαρίσταται από τη γνωστή μη ομογενή συνήθη διαφορική εξίσωση n-οστής τάξης με σταθερούς συντελεστές:

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = b_0 \cdot r(t) \quad (2.1)$$

Με τις αντίστοιχες n αρχικές συνθήκες της y και των παραγώγων της,

$$y(0) = y_0, \dot{y}(0) = y_1, \dots, y^{(n-1)}(0) = y_{n-1} \quad (2.2)$$

Στην μορφή αυτή η y(t) καλείται έξοδος του συστήματος, ενώ η r(t) είσοδος. Αν το σύστημα είναι πολλών εισόδων-πολλών εξόδων το σύστημα αναπαρίσταται από μία διανυσματική διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης και μία αλγεβρική εξίσωση της μορφής,

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad x(0) = x_0 \quad (2.3)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t) \quad (2.4)$$

όπου λόγω του χρονικά αμετάβλητου έχει θεωρηθεί χωρίς βλάβη γενικότητας ότι $t_0=0$. Στη μορφή αυτή η διανυσματική συνάρτηση,

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_m(t) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

καλείται κατάσταση του συστήματος, η

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \dots \\ u_r(t) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

είναι η (διανυσματική) είσοδος στο σύστημα και η

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \dots \\ y_m(t) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

η (διανυσματική) έξοδος. Οι πίνακες A ($n \times n$), B ($n \times r$), C ($m \times n$), D ($m \times r$) καλούνται πίνακες του χώρου κατάστασης, ενώ η διάσταση n καλείται (δυναμική) τάξη του συστήματος.

Ένα σύστημα μίας εισόδου-μίας εξόδου στη μορφή αυτή εύκολα μετασχηματίζεται σε αναπαράσταση χώρου κατάστασης αν θέσουμε,

$$x_1(t) = y(t) \quad x_2(t) = \dot{y}(t) \quad \dots \quad x_n(t) = y^{(n-1)}(t) \quad (2.8)$$

οπότε εύκολα προκύπτει,

$$\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= x_2(t) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= x_3(t) \\ &\dots \\ \frac{dx_n(t)}{dt} &= -a_{n-1} \cdot x_n(t) - \dots - a_0 \cdot x_1(t) + b_0 \cdot r(t) \end{aligned}$$

ή τελικά,

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_0 & \dots & a_{n-1} \end{bmatrix} \cdot x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ b_0 \end{bmatrix} \cdot r(t) \quad (2.9)$$

Όπου $r(t)$ η είσοδος αναφοράς. Η επιλογή των μεταβλητών κατάστασης είναι σημαντική για την σωστή αναπαράσταση του συστήματος, καθώς θα πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε το σύστημα να προσδιορίζεται εντελώς κάθε χρονική στιγμή t όταν ξέρουμε την ιστορία των εισόδων ($u(\tau)$, $0 \leq \tau \leq t$) και την τωρινή και αρχική τιμή των μεταβλητών καταστάσεων $x(0)$ και $x(t)$. Η ενδιαμέση μετεξέλιξη του συστήματος την περίοδο $0 < \tau < t$ έχει καταγραφεί στις μεταβλητές κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα οι μεταβλητές κατάστασης $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$ ενός συστήματος ορίζονται ως ένας (ελάχιστος) αριθμός μεταβλητών τέτοιων ώστε αν γνωρίζουμε τις τιμές τους για οποιαδήποτε χρονική στιγμή t_0 , την συνάρτηση εισόδου που εφαρμόζεται στο σύστημα για $t > t_0$, και τον μαθηματικό νόμο που συνδέει την είσοδο, τις μεταβλητές

κατάστασης και το σύστημα, τότε καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός της κατάστασης του συστήματος για οποιαδήποτε χρονική στιγμή $t > t_0$.

Η κατάστροψη των εξισώσεων απαιτεί γνώση των φυσικών νόμων που διέπουν τις διαδικασίες του συστήματος, γνώση που δεν είναι πάντα διαθέσιμη στον μηχανικό Αυτομάτου Ελέγχου. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η διεπιστημονική προσέγγιση στο στάδιο της κατάστροφης του μαθηματικού υποδείγματος.

2.1.2 Αναπαράσταση στο πεδίο της συχνότητας

Οι εξισώσεις (2.1), (2.3) και (2.4) εκφράζουν το μαθηματικό υπόδειγμα των συστημάτων στο πεδίο του χρόνου. Στα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου είναι εξίσου σημαντική και η αναπαράστασή τους στο πεδίο της συχνότητας καθώς τα σήματα που τα διατρέχουν εμφανίζονται σε διαφορετικές συχνότητες. Η μετάβαση από την μία μορφή στην άλλη είναι σχετικά απλή μέσω του γνωστού μετασχηματισμού Laplace. Μετασχηματίζοντας κατά Laplace και τα δύο μέλη της (1.1) παίρνουμε,

$$Y(s) = \frac{b(s)}{a(s)} \cdot R(s) + \frac{c(s)}{a(s)} = G(s) \cdot R(s) + \frac{c(s)}{a(s)} \quad (2.10)$$

όπου η

$$G(s) = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{b_0}{s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_1 \cdot s^1 + a_0} \quad (2.11)$$

καλείται συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος. Αν οι αρχικές συνθήκες του συστήματος είναι μηδενικές, ο όρος $c(s)$ είναι μηδενικός, οπότε

$$Y(s) = G(s) \cdot R(s) \quad (2.12)$$

Το πολυμεταβλητό σύστημα,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot u(t) & x(t_0) &= x_0 \\ y(t) &= C(t) \cdot x(t) + D(t) \cdot u(t) \end{aligned}$$

μπορεί να μετασχηματιστεί κατά Laplace παρόμοια. Η μόνη διαφορά είναι ότι στη θέση της βαθμωτής συνάρτησης μεταφοράς προκύπτει ένας πίνακας συναρτήσεων μεταφοράς.

Θεωρώντας λοιπόν μηδενικές αρχικές συνθήκες, ο μετασχηματισμός Laplace δίνει

$$(sI - A) \cdot X(s) = B \cdot U(s) \Rightarrow X(s) = (sI - A)^{-1} \cdot B \cdot U(s) \quad (2.13)$$

$$Y(s) = C \cdot X(s) + D \cdot U(s) \quad (2.14)$$

υποθέτοντας ότι ο $(sI - A)$ είναι αντιστρέψιμος. Επομένως, αντικαθιστώντας την $X(s)$ παίρνουμε,

$$Y(s) = [C \cdot (sI - A)^{-1} B + D] \cdot U(s) \quad (2.15)$$

όπου ο πίνακας μεταφοράς (transfer matrix) είναι,

$$G(s) = [C \cdot (sI - A)^{-1} B + D] \quad (2.16)$$

Η διάσταση του $G(s)$ είναι $m \times r$ και η μορφή του

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & \cdots & g_{1r}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1}(s) & \cdots & g_{mr}(s) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

όπου τα $g_{ij}(s)$ είναι βαθμωτές συναρτήσεις της μορφής,

$$g_{ij}(s) = \frac{b_{mij}s^{m_{ij}-1} + \cdots + b_1s + b_0}{s^{n_{ij}} + a_{n_{ij}-1}s^{n_{ij}-1} + \cdots + a_0} \quad a_k, b_k \in \mathbf{R} \quad (2.18)$$

Κάθε βαθμωτή συνάρτηση μεταφοράς $g_{ij}(s)$ καλείται ρητή πραγματική συνάρτηση. Περαιτέρω αν $n_{ij} \geq m_{ij}$ η συνάρτηση καλείται πρόπωση ενώ αν $n_{ij} > m_{ij}$ καλείται αυστηρά πρόπωση. Παρόμοια ο πίνακας μεταφοράς $G(s)$ καλείται ρητός πραγματικός αν όλες οι $g_{ij}(s)$ είναι ρητές πραγματικές, και πρόπων ή αυστηρά πρόπων αν όλες οι $g_{ij}(s)$ είναι πρόπωση ή αυστηρά πρόπωση. Από τον ορισμό προκύπτει ευθέως ότι αν μία βαθμωτή συνάρτηση είναι πρόπωση, τότε το $\lim_{s \rightarrow \infty} g(s)$ υπάρχει στο $\mathbf{C}$ ενώ αν είναι αυστηρά πρόπωση $\lim_{s \rightarrow \infty} g(s) = 0$. Κάθε πίνακας συνάρτησης μεταφοράς είναι ρητός πραγματικός και πρόπων αφού

$$(sI - A)^{-1} = \frac{1}{\det(sI - A)} \cdot \text{adj}(sI - A) \quad (2.19)$$

και ο πίνακας $\text{adj}(sI - A)$ αποτελείται από πραγματικές συναρτήσεις βαθμού $< n$, ενώ βαθμός $[\det(sI - A)] = n$. Τέλος, η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος δίνεται ως

$$G_p(s) = \frac{C' \cdot \text{adj}(sI - A) \cdot B}{\det(sI - A)} \quad (2.20)$$

Πριν την χρησιμοποιήσουμε θα πρέπει να δούμε αν το σύστημα εξισώσεων κατάστασης πληρεί κάποιες προϋποθέσεις. Αυτές είναι η ελεγχσιμότητα, η παρατηρησιμότητα και η ευστάθεια ενός συστήματος.

2.1.3 Ελεγχιμότητα, Παρατηρησιμότητα και Ευστάθεια ενός συστήματος

Θεωρούμε το προαναφερθέν σύστημα καλείται πλήρως ελέγξιμο^[7] (completely controllable) αν δεδομένων των αρχικών συνθηκών κατάστασης x_0 και μιας επιθυμητής τιμής καταστάσεων $x^*(t)$, μπορούμε πάντα να βρούμε κατάλληλες και πεπερασμένες τιμές ελέγχου $u(t)$ ώστε το σύστημα να φθάσει στην επιθυμητή τιμή σε πεπερασμένο χρόνο $t < \infty$. Πρακτικά, το σύστημα είναι πλήρως ελέγξιμο αν και μόνον αν ο $n \times n$ πίνακας ελεγχιμότητας

$$\Gamma = [B \mid AB \mid \dots \mid A^{n-1}B] \quad (2.21)$$

είναι πλήρους βαθμού, δηλαδή $\text{βαθμός}(\Gamma) = n$, όπου n το πλήθος των μεταβλητών κατάστασης, όπως προαναφέραμε.

Το σύστημα καλείται πλήρως παρατηρήσιμο^[7] (completely observable) αν γνωρίζοντας τις τιμές των εξόδων $y(t)$ και εισόδων $u(t)$ για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα t , $0 < t < \infty$ τότε μπορούμε να ανακτήσουμε τις τιμές των μεταβλητών κατάστασης $x(t)$ για οποιαδήποτε χρονική στιγμή του διαστήματος $[0, t]$. Αυτό σημαίνει ότι παρατηρώντας τις σχέσεις του συστήματος με το περιβάλλον (είσοδοι-έξοδοι) μπορούμε να υπολογίσουμε την εσωτερική συμπεριφορά του συστήματος. Πρακτικά ένα σύστημα είναι πλήρως παρατηρήσιμο αν και μόνον αν ο $n \times n$ πίνακας παρατηρησιμότητας,

$$\Theta = \begin{bmatrix} A \\ C \cdot A \\ C^2 \cdot A \\ \vdots \\ C^{n-1} \cdot A \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

είναι πλήρους βαθμού, δηλαδή $\text{βαθμός}[\Theta] = n$.

Τέλος, για την ευστάθεια^[7] πρέπει πρώτα να αναφερθούμε στους όρους μηδενικά και πόλοι. Οι ρίζες του αριθμητή και του παρονομαστή λέγονται μηδενικά και πόλοι, αντίστοιχα. Είναι σημαντικά χαρακτηριστικά του συστήματος και από αυτά εξαρτάται η μορφή απόκρισης του συστήματος.

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για την ευστάθεια, αυτό όμως που ενδιαφέρει πρακτικά είναι η κατάσταση $x(t)$ του συστήματος να μην «εκρήγνυται». Έχουμε τους εξής:

(α) Ευσταθές κατά Lyapunov αν και μόνον αν $\text{Re}\{\lambda_i\} \leq 0$ και τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις μηδενικές ιδιοτιμές είναι διακεκριμένα.

(β) Ασυμπτωτικά ευσταθές αν και μόνον αν $\text{Re}\{\lambda_i\} < 0$.

Όπου λ_i είναι οι ρίζες του παρονομαστή, δηλαδή οι πόλοι. Είναι αναγκαίο λοιπόν να έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος (μην ξεχνάμε ότι οι ρίζες μπορεί να είναι και μιγαδικές, κάτι που συνηθίζεται).

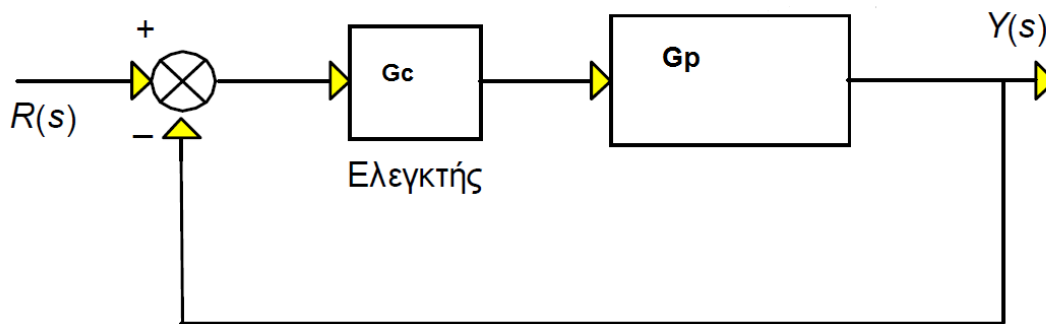
Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε τη συνάρτηση μεταφοράς σύμφωνα με τους τύπους Nomoto και τα χαρακτηριστικά του πλοίου που προαναφέραμε.

2.2 Ο ελεγκτής PID (Proportional-Integral-Derivative)

Ο ελεγκτής PID^[7] έχει την εξής συνάρτηση μεταφοράς:

$$G_C(s) = K_P + K_D \cdot s + K_I \cdot \frac{1}{s} \quad (2.23)$$

Όπου K_P ο αναλογικός όρος, K_D ο διαφορικός και K_I ο ολοκληρωτικός. Μαζί με τη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος, που μας δίνεται όπως είπαμε στο 2.1, έχουμε το εξής ανατροφοδοτούμενο (κλειστό) σύστημα



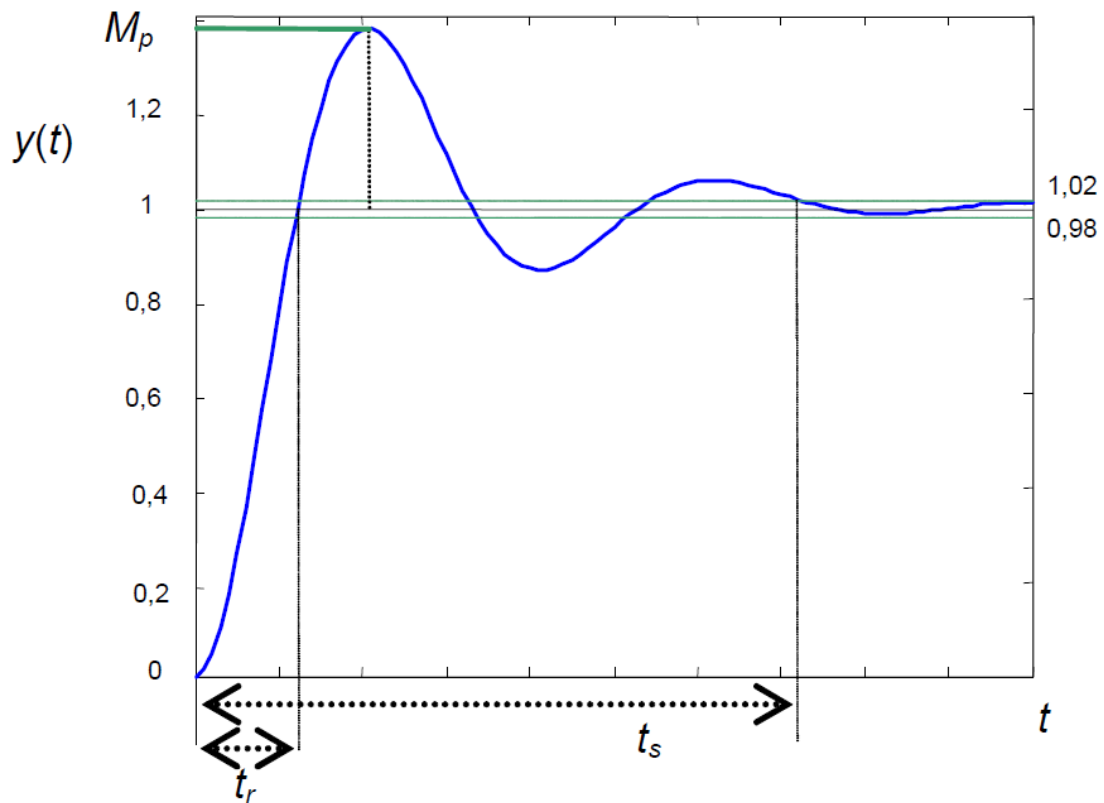
Σχήμα 2.1

Όπου $R(s)$ η είσοδος αναφοράς και $Y(s)$ η έξοδος. Η νέα συνάρτηση μεταφοράς

$$G(s) = \frac{G_c(s) \cdot G_p(s)}{1 + G_c(s) \cdot G_p(s)} \quad (2.24)$$

2.2.1 Παράμετροι μεταβατικής απόκρισης

Για την εύρεση των τιμών K_D , K_P , K_I χρησιμοποιούνται κάποιες προδιαγραφές. Αυτές είναι οι παράμετροι μεταβατικής απόκρισης. Για την κατανόηση των παραμέτρων αυτών θα αναφερόμαστε στο παρακάτω σχήμα, που δείχνει μία τυπική απόκριση ενός συστήματος αυθαίρετης τάξης με υποαπόσβεση.



Σχήμα 2.2

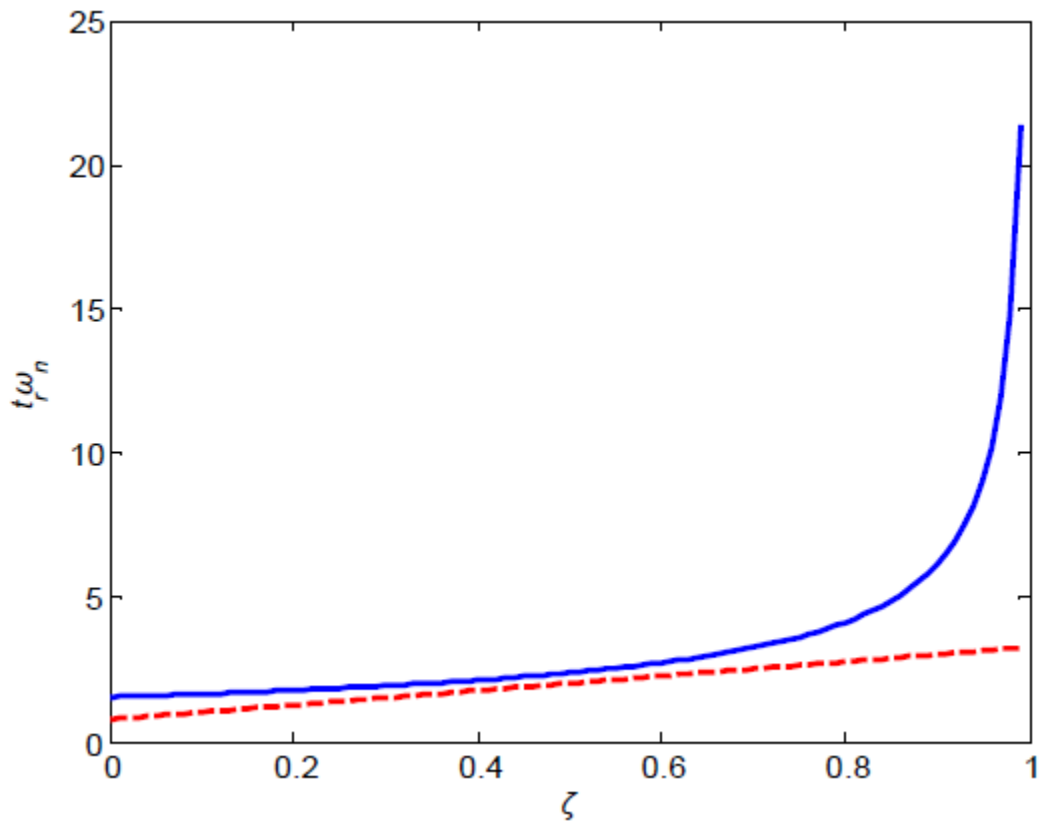
1.Χρόνος ανύψωσης (t_r): Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να ανέλθει η απόκριση από το 10% στο 90% της τελικής της τιμής (άλλα συνήθη όρια είναι από 5% σε 95% ή από 0% σε 100%). Είναι φανερό ότι είναι επιθυμητό να είναι όσο πιο μικρός γίνεται. Για την διαδικασία δευτέρας τάξης, ο χρόνος ανύψωσης είναι:

$$t_r = \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \arctan\left(-\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) \quad (2.25)$$

και η γραμμική προσέγγιση

$$t_r = \frac{0.8+2.5\zeta}{\omega_n} \quad (2.26)$$

και οι γραφικές τους παραστάσεις



Σχήμα 2.3

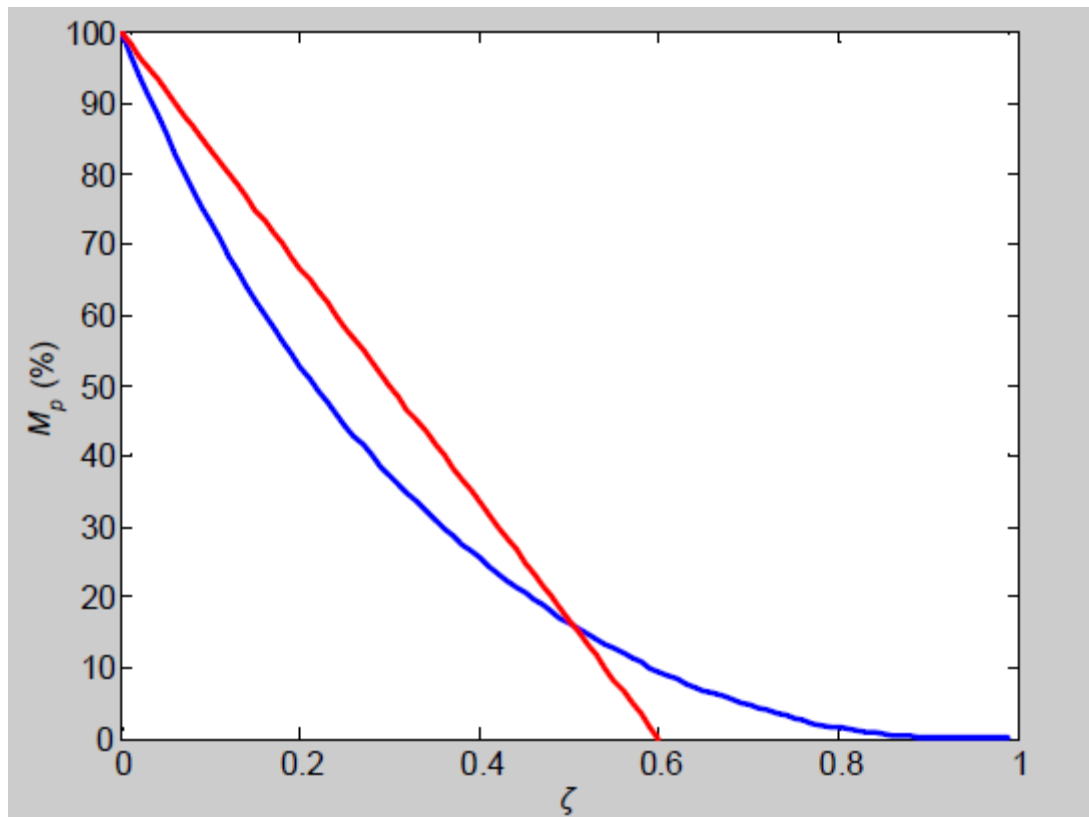
2.Μεγίστη (ποσοστιαία) υπερύψωση (M_p): Είναι η τιμή της μέγιστης κορυφής της καμπύλης απόκρισης, μετρούμενη από τη μονάδα. Όταν η τελική τιμή της μόνιμης κατάστασης της απόκρισης διαφέρει από την μονάδα και δίνεται:

$$M_p = e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \text{ όπου } 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (2.27)$$

και η γραμμική προσέγγιση

$$M_p = 1 - \frac{\zeta}{0.6} \text{ όπου } 0 \leq \zeta \leq 0.6 \quad (2.28)$$

Η συνάρτηση $M_p(\zeta)$ και η γραμμική της προσέγγιση φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Προφανώς αυξανομένου του ζ μειώνεται η υπερύψωση.

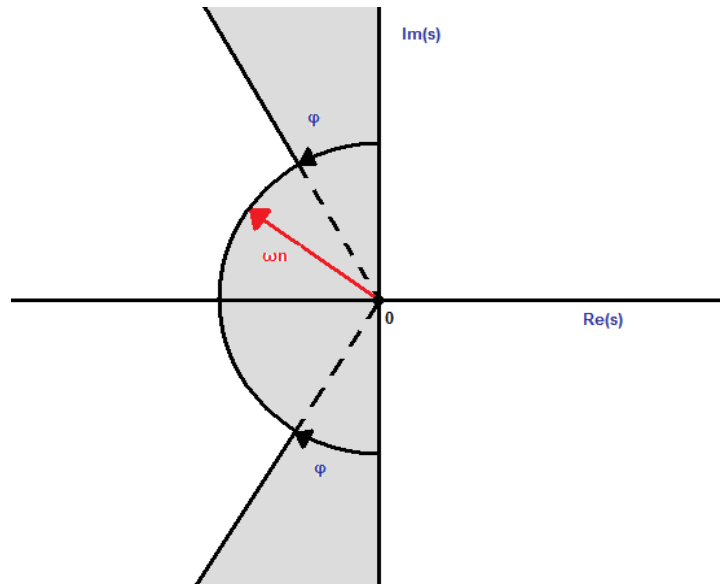


Σχήμα 2.4

3. Χρόνος αποκατάστασης (t_s): Είναι ο χρόνος που απαιτείται μέχρι να φθάσει και να παραμείνει η καμπύλη απόκρισης μέσα σε ορισμένα όρια γύρω από την τελική τιμή. Το μέγεθος των ορίων εκφράζεται ως απόλυτο ποσοστό της τελικής τιμής (συνήθως $\pm 2\%$). Το ποσοστιαίο κριτήριο σφάλματος υιοθετείται με βάση τους αντικειμενικούς σκοπούς σχεδίασης του συστήματος. Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος αυτός τόσο το καλύτερο. Για την διαδικασία δευτέρας τάξης δίνεται:

$$e^{-\zeta\omega_n t_s} = 0.02 \quad \text{ή} \quad t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (2.29)$$

Οι προδιαγραφές μας βοηθούν να ορίσουμε μια περιοχή των επιθυμητών πόλων για το σύστημα μας. Το να έχει κάποιους από αυτούς τους πόλους ως ρίζες το σύστημά μας, το πετυχαίνουμε αντισταθμίζοντάς το με τον ελεγκτή. Συγκεκριμένα, η περιοχή με άξονα X το πραγματικό μέρος των ριζών και άξονα Y το φανταστικό (για μιγαδικές ρίζες) είναι



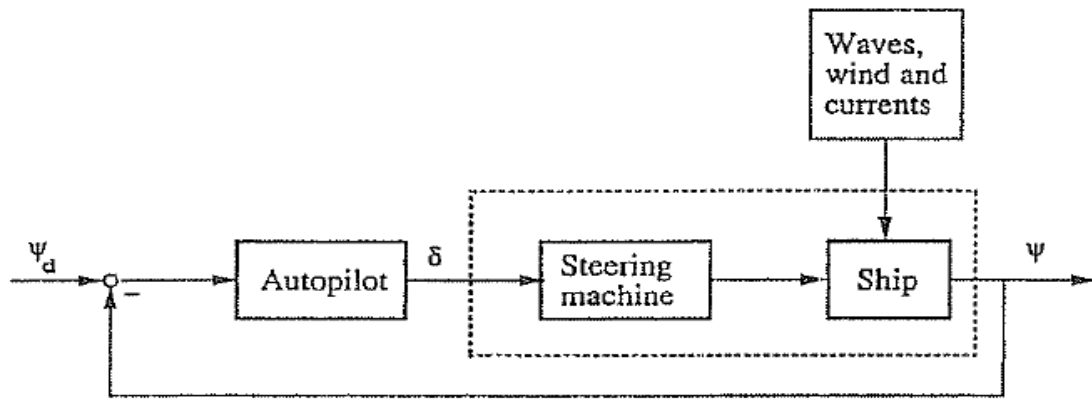
Σχήμα 2.5

Όπου το ω_n (κυκλική συχνότητα του συστήματος) μας δίνεται από τις προδιαγραφές όπως και το ζ (φυσική συχνότητα). Και η γωνία $\varphi = \sin^{-1}(\zeta)$.

Εδώ εμφανίζεται το πρόβλημα ότι έχουμε μια περιοχή εφικτών πόλων. Δεν έχουμε τη βέλτιστη λύση. Με την βοήθεια διάφορων μεθόδων όπως αυτή των κυρίαρχων πόλων και της αναλυτικής μεθόδου βρίσκουμε κάποιες λύσεις που πλησιάζουν τις προσδοκίες μας. Χρειάζεται όμως περαιτέρω μελέτη και δοκιμές για να καταλήξουμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

2.3 Ελεγκτές PID ως αυτόματοι πιλότοι πλοίων

Οι ελεγκτές PID ως αυτόματοι πιλότοι πλοίων^[1] έχουν ευρεία εφαρμογή στη σημερινή εποχή. Χρησιμοποιώντας συστήματα όπως το γυροσκόπιο αλλά και το GPS (global positioning system) ελέγχουν την γωνία πλεύσης του πλοίου με άξονα αναφοράς τον εκάστοτε μεσημβρινό της Γης. Σκοπός τους φυσικά είναι να κρατούν σταθερή πορεία ($\psi = \text{σταθερά}$) και να θέτουν σε νέα κατεύθυνση το πλοίο προκειμένου να διατηρήσει μια προκαθορισμένη πορεία. Το κλειστό σύστημα για αυτή την εφαρμογή παρουσιάζεται επιγραμματικά



Σχήμα 2.6

Όπου ψ_d η είσοδος αναφοράς, δηλαδή η επιθυμητή κατεύθυνση, και φαίνεται και η εφαρμογή των περιβαλλοντικών διαταραχών στο σύστημα του πλοίου. Η μαθηματική μορφή του ελεγκτή που συνδέει την εντολή για την γωνία του πηδαλίου με την γωνία αναφοράς και την κατεύθυνση του πλοίου είναι

$$\delta = K_P \cdot (\psi_d - \psi(t)) + K_D \cdot \dot{\psi}(t) - K_I \cdot \int_0^t (\psi_d - \psi(\tau)) d\tau \quad (2.30)$$

ή

$$\delta = K_P \cdot (1 + T_d \cdot s + T_I/s) \cdot (\psi_d - \psi) \quad (2.31)$$

Όπου T_d η διαφορική χρονική σταθερά ($K_D = T_D/K_P$) και T_I η ολοκληρωτική χρονική σταθερά ($K_I = T_I/K_P$). Μια εμπειρική σχέση για την σχεδίαση των ελεγκτών μας δίνει μια πρώτη τιμή για K_I , σε σχέση με την χρονική σταθερά T_I

$$\frac{1}{T_I} = \frac{\omega_n}{10} \quad (2.31)$$

2.4 Μέθοδοι σχεδιασμού ελεγκτών PID

Τα τόσα χρόνια ανάπτυξης, μελετών και πειραμάτων γύρω από τη θεωρία αυτόματου ελέγχου έχουν δώσει ένα ευρύ σύνολο μεθόδων σχεδιασμού ελεγκτών. Οι μέθοδοι που αναφέρονται σε ελεγκτές PID είναι πολλές, αν σκεφτούμε ότι οι συγκεκριμένου τύπου ελεγκτές αποτελούν το 90% των εφαρμογών στην σύγχρονη βιομηχανία. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου γίνεται με βάση τις απαιτήσεις και τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζεται ο ελεγκτής. Εμείς θα αναπτύξουμε παρακάτω και θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο βελτιστοποίησης διαφορικού όρου με περιορισμό της ευαισθησίας του συστήματος στις διαταραχές (M_s constrained integral gain optimization method – MIGO)^{[15][16]}, που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο. Θα χρειαστεί όμως και η κατανόηση της μεθόδου κυρίων πόλων^[7] που περιγράφεται στη συνέχεια.

2.4.1 Μέθοδος κυρίαρχων πόλων

Έχουμε την γενική μορφή της συνάρτησης μεταφοράς,

$$G(s) = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2.33)$$

Γράφοντας την σε μορφή μηδενικών-πόλων,

$$G(s) = K \cdot \frac{\prod_{j=1}^m (s - z_j)}{\prod_{i=1}^n (s - p_i)} \quad (2.34)$$

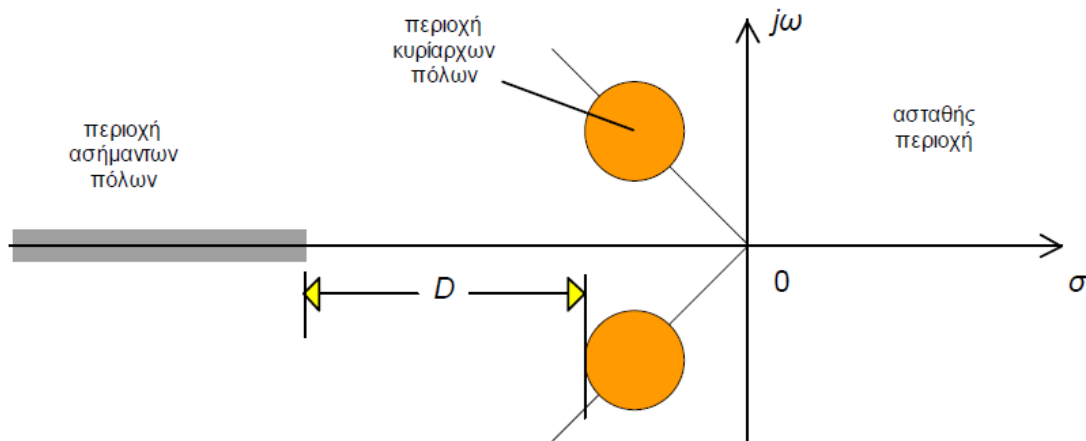
Αν η είσοδος $R(s)=1/s$, τότε

$$G(s) = \frac{K}{s} \cdot \frac{\prod_{j=1}^m (s - z_j)}{\prod_{i=1}^n (s - p_i)} = \frac{c_1}{s} + \frac{c_2}{(s - p_1)} + \dots + \frac{c_n}{(s - p_n)} \quad (2.35)$$

και αντιστρέφοντας,

$$y(t) = c_1 + \sum_{i=1}^n c_{i+1} \cdot e^{p_i t} \quad (2.36)$$

όπου οι συντελεστές c_i βρίσκονται με τη μέθοδο των μερικών κλασμάτων. Επομένως η χρονική απόκριση αποτελείται από ένα άθροισμα εκθετικών όρων που η μορφή τους αντιστοιχεί στη φύση των πόλων (πραγματικοί, μιγαδικοί, πολλαπλοί). Η ανάλυση τέτοιων συστημάτων για μεγάλα n (>3) είναι δύσκολη. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που μπορούμε να προσεγγίσουμε τέτοια συστήματα με συστήματα δευτέρας τάξης. Αυτό γίνεται όταν ένα ζευγάρι μιγαδικών πόλων είναι κυρίαρχο, δηλαδή η θέση του είναι τέτοια σε σχέση με τους υπόλοιπους πόλους, ώστε η χρονική απόκριση να προσεγγίζεται από την χρονική απόκριση ενός συστήματος δευτέρας τάξης με πόλους το κυρίαρχο ζευγάρι πόλων. Στο Σχ. 2.7 φαίνονται σχετικές περιοχές κυρίαρχων και ασήμαντων πόλων.

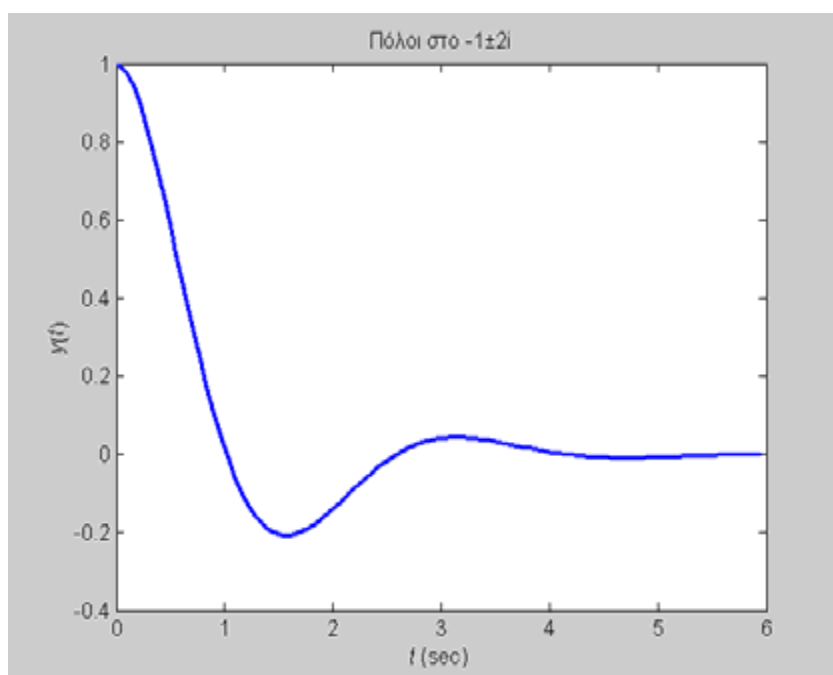


Σχήμα 2.7

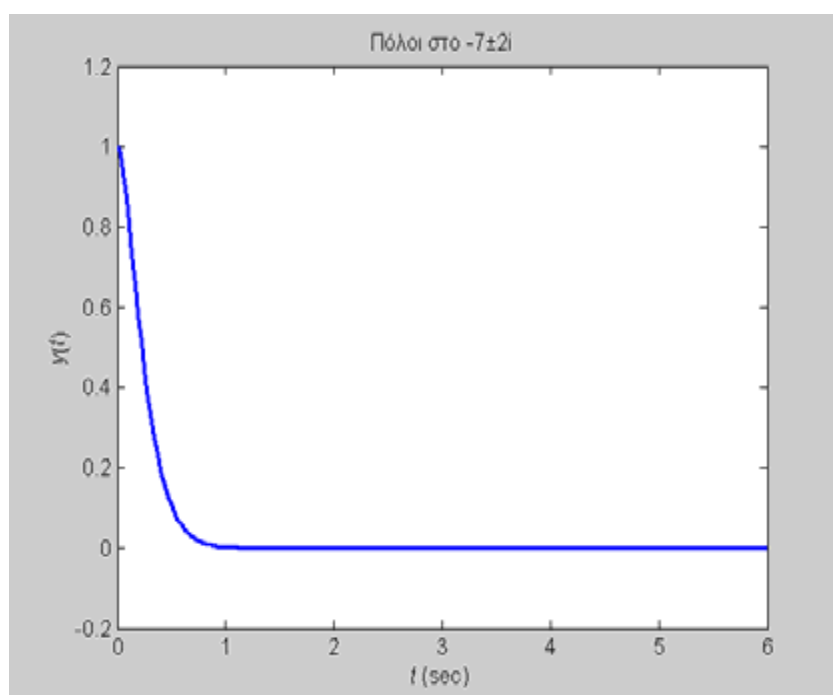
Η ακριβής απόσταση D ποικίλλει ανάλογα με το σύστημα, αλλά μπορούμε να πούμε ότι αν το πραγματικό μέρος ενός πόλου είναι 7-10 φορές του κυρίαρχου, τότε ο πόλος μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντος όσον αφορά την μεταβατική απόκριση. Αυτό προκύπτει εύκολα αν σκεφθούμε ότι ο χρόνος αποκατάστασης είναι συνάρτηση του $\zeta \cdot \omega_n$, δηλαδή του πραγματικού μέρους των πόλων. Στα σχήματα 2.8-2.11 βλέπουμε τις χρονικές αποκρίσεις των επιμέρους πόλων και την συνολική απόκριση του συστήματος με συνάρτηση μεταφοράς,

$$G(s) = \frac{30.74 \cdot 10^3}{(s^2 + 2s + 5)(s^2 + 14s + 53)(s^2 + 20s + 116)} \quad (2.37)$$

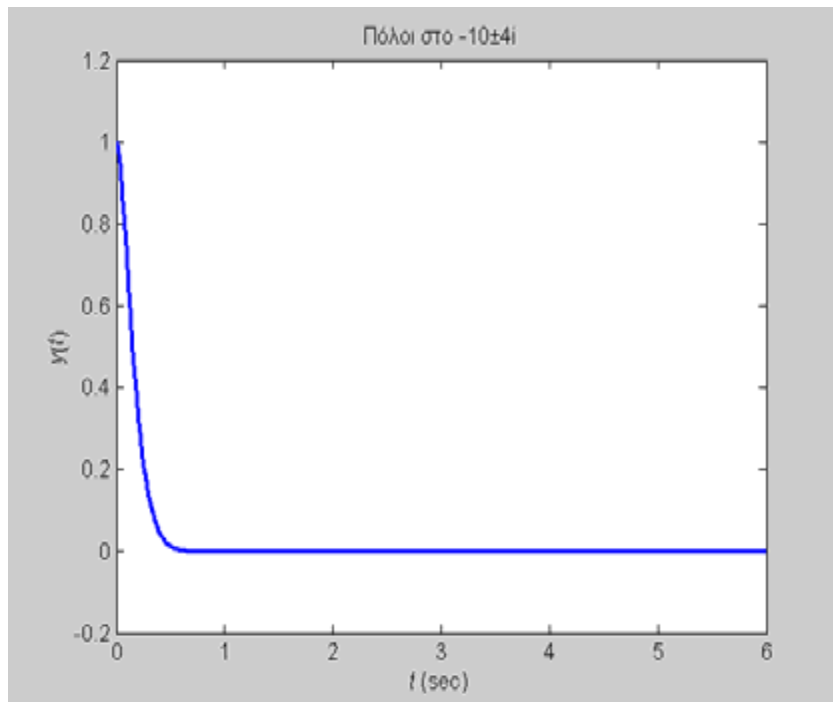
και πόλους στο $\{-1 \pm 2i\}$, $\{-7 \pm 2i\}$, $\{-10 \pm 4i\}$. Όπως φαίνεται από τα επιμέρους γραφήματα, η απόκριση των ασήμαντων πόλων $\{-7 \pm 2i\}$, $\{-10 \pm 4i\}$ εξασθενεί αισθητά πιο γρήγορα (0,5 sec.) από αυτή του κυρίαρχου ζεύγους $\{-1 \pm 2i\}$ (5 sec.) η δε συνολική απόκριση (4ο γράφημα) προσεγγίζεται αρκετά καλά από αυτή του κυρίαρχου ζεύγους.



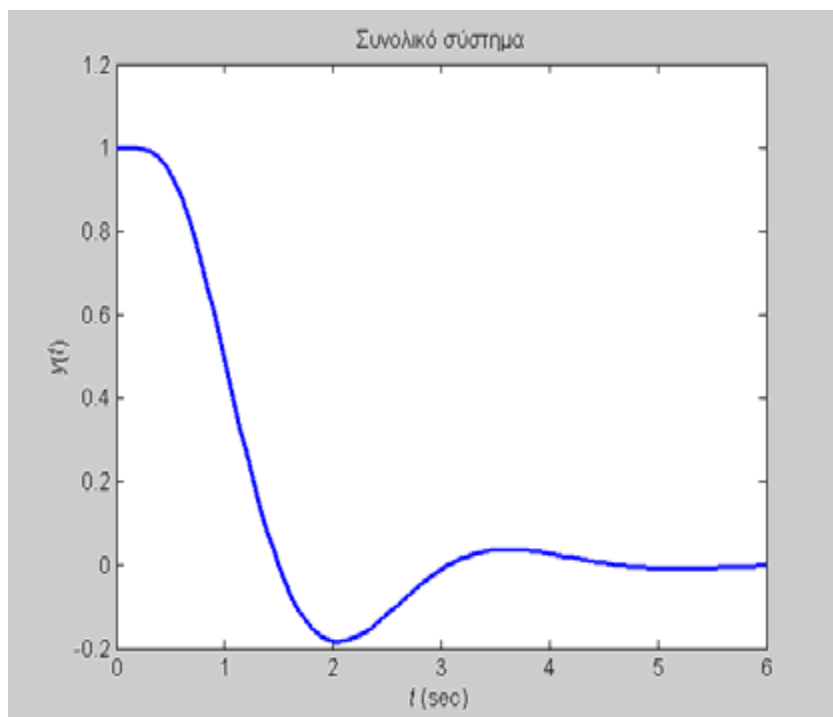
Σχήμα 2.8



Σχήμα 2.9



Σχήμα 2.10



Σχήμα 2.11

2.5 Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάσαμε κάποια απαραίτητα θεωρητικά στοιχεία που θα μας χρειαστούν στη συνέχεια. Φυσικά και αποτελούν ένα ελάχιστο κομμάτι από τη σύγχρονη θεωρία αυτομάτου ελέγχου, η οποία περιλαμβάνει εφαρμογές σε κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα στη σημερινή εποχή.

Κεφάλαιο 3

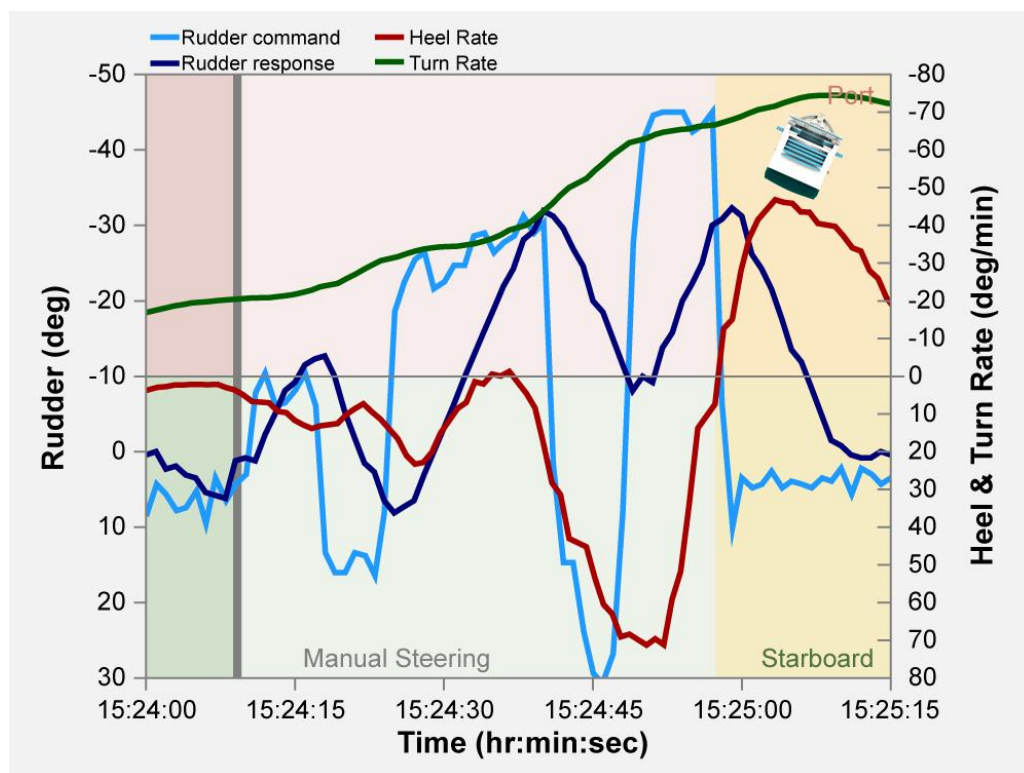
Σχεδίαση αυτόματου πιλότου διατήρησης πορείας πλοίου

3.1 Προδιαγραφές

Το πρώτο βήμα που χρειάζεται να κάνουμε στη σχεδίαση ενός ελεγκτή είναι να καθορίσουμε τις απαιτήσεις μας. Αφού, δηλαδή, έχουμε ορίσει το πρόβλημα, το έχουμε μοντελοποιήσει, ποια θα είναι η χρησιμότητα του ελεγκτή; Τι εργασίες θα επιτελέσει; Σε όλα αυτά απαντάνε οι προδιαγραφές που ορίζουμε.

Σε πρώτο στάδιο έχουμε προδιαγραφές που απευθύνονται γενικά στους ελεγκτές PID. Αναφέρομαι σε χαρακτηριστικά όπως η μέγιστη υπερύψωση (M_p) και ο χρόνος αποκατάστασης (t_s). Όπως είπαμε, από αυτά, μπορούμε να ορίσουμε τον χώρο των επιθυμητών πόλων για το σύστημά μας.

Περαιτέρω, δημιουργούνται απαιτήσεις που επηρεάζουν αυτές τις προδιαγραφές. Πρώτα από όλα είναι αναγκαίο οι αποκρίσεις, οι αντιδράσεις του ελεγκτή, να μην είναι απότομες. Για να καταλάβουμε τι εννοούμε απότομο θα αναφερθούμε στη λειτουργία του πηδαλίου. Όσο μεγαλύτερες οι γωνίες που παίρνει και όσο πιο γρήγορα ανταποκρίνεται, τόσο μεγαλύτερη η κλίση του πλοίου κατά τη διάρκεια αλλαγής πορείας. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί από ενοχλητικό για το πλήρωμα, όσο και επικίνδυνο, αλλά και επιζήμιο ανάλογα το φορτίο. Παραστατικά η σχέση μεταξύ αυτής της κλίσης και της λειτουργίας του πηδαλίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 3.1

Άρα θα έχουμε κάποιους περιορισμούς όσον αφορά τις γωνίες αλλαγής κατεύθυνσης και της γωνιακής ταχύτητας του πηδαλίου..

Άλλοι περιορισμοί απορρέουν από τα μηχανικά μέρη του συστήματος. Για παράδειγμα, η συντριπτική πλειοψηφία των εμπορικών πλοίων στις μέρες έχουν πηδάλια με γωνίες που παίρνουν τιμές 35° με -35° . Αυτό συνηθίζεται για να αποφεύγονται μεγάλες μηχανικές καταπονήσεις στο πηδάλιο.

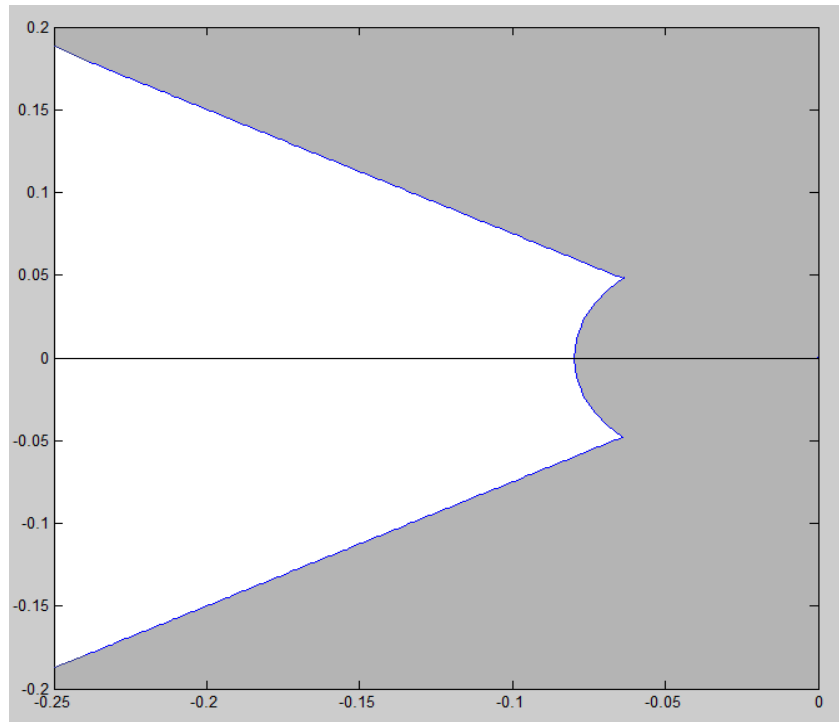
Ο συμψηφισμός αυτών και άλλων περιορισμών είναι που θα μας δώσει τις προδιαγραφές με τις οποίες θα προχωρήσουμε στην σχεδίαση. Έχουμε να αποφασίσουμε ποιοι θα είναι οι χρόνοι αποκατάστασης και μέχρι ποια υπερύψωση θα επιτρέψουμε στο σύστημα.

3.1.1 Μέγιστη υπερύψωση, χρόνοι αποκατάστασης και περιοχή επιθυμητών πόλων.

Για πλοία όπως αυτό του οποίου το μοντέλο χρησιμοποιούμε χρειάζεται περίπου ένα λεπτό για να αλλάξει την κατεύθυνσή του και να σταθεροποιηθεί. Ανάλογα τις καιρικές συνθήκες και το φορτίο που μεταφέρεται προκύπτει ο επιθυμητός χρόνος αποκατάστασης. Λαμβάνοντας αυτό υπ'όψιν θέλουμε έναν ελεγκτή ο οποίος θα αντιμετωπίζει και τις διαταραχές που προκύπτουν από αλλαγές σε παραμέτρους του συστήματος (φορτίο, καιρικές συνθήκες κτλ). Χρειαζόμαστε δηλαδή το στοιχείο της ευρωστίας από τον ελεγκτή. Αυτό επιτυγχάνεται με την μέθοδο σχεδίασης MIGO για PID ελεγκτές.

Συνεχίζουμε με τον ορισμό των προδιαγραφών. Θα ορίσουμε χρόνο αποκατάστασης $t_s = 60s$ και μέγιστη υπερύψωση $M_p \leq 5\%$. Με τους τύπους 2.27 και 2.28 υπολογίζουμε τη φυσική συχνότητα ζ και την κυκλική ω_n που μας δίνουν ότι η επιθυμητή φυσική συχνότητα του συστήματος κυμαίνεται $0.7 \leq \zeta < 1$. Θα επιλέξω την τιμή $\zeta = 0.8$. Θέλουμε η τιμή ζ να πλησιάζει την τιμή 1 που αντιστοιχεί στην κρίσιμη απόσβεση αλλά θέλω και όσο περισσότερες επιλογές στο θέμα των πόλων. Από την 2.28 προκύπτει ότι $\omega_n = \frac{1}{15\zeta}$. Άρα για μεγαλύτερο ω_n θέλουμε μικρότερο ζ . Έτσι $\omega_n = 0.08 \text{ rad/s}$. Οι προδιαγραφές μας δίνουν περιοχές επιθυμητών πόλων που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα

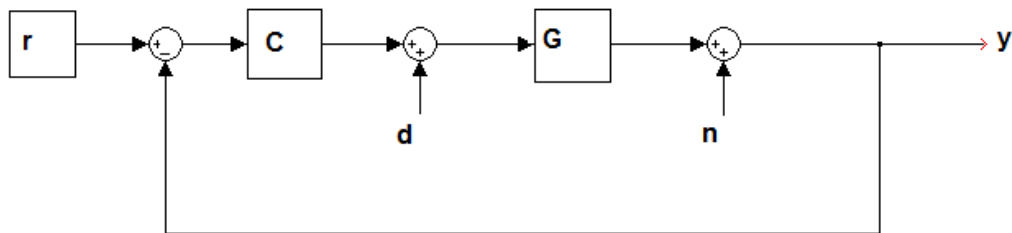
Για $M_p \leq 5\%$ και $t_s = 60s$



Σχήμα 3.2

3.2 Σχεδιασμός ελεγκτή

Το κλειστό ανατροφοδοτούμενο σύστημα στο οποίο θέλουμε να εφαρμόσουμε τον ελεγκτή μας είναι το εξής



Σχήμα 3.3

Όπου C η συνάρτηση μεταφοράς 2.23, G η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος σύμφωνα με το μοντέλο Nomoto 1.44 και r η είσοδος αναφοράς. Επίσης, d οι διαταραχές που προκύπτουν από αλλαγές στις παραμέτρους του συστήματος και n ο θόρυβος σήματος από τα όργανα μετρήσεων και τους επενεργητές. Με τους σωστούς υπολογισμούς, η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του κλειστού συστήματος $H(s) = \frac{C(s) \cdot G(s)}{1 + C(s) \cdot G(s)}$ δίνεται:

$$H(s) = \frac{s^3 + 9.3 \cdot 10^{-3} \cdot s^2}{s^3 + (9.3 + 1.7 \cdot K_D) \cdot 10^{-3} \cdot s^2 + 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot K_P \cdot s + 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot K_I} \quad (3.1)$$

3.2.1 Η μέθοδος MIGO

Η συγκεκριμένη θεωρία αναπτύχθηκε από τους J.K.Astrom και Ελένη Παναγοπούλου. Βάση αποτέλεσε η μεθοδολογία Ziegler – Nichols προσπαθώντας να καταλήξουν σε μια απλή όσο αυτή, που κυρίως θα κάλυπτε την απαίτηση για βελτιστοποίηση ως προς την ελαχιστοποίηση της ευαισθησίας του συστήματος στις διάφορες διαταραχές που δημιουργούνται όταν έχουμε αλλαγές στις παραμέτρους του συστήματος (load disturbance). Στην περίπτωση του συστήματος του πλοίου ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αλλαγή της συμπεριφοράς του ελεγκτή όταν το πλοίο είναι πλήρως φορτωμένο και όταν δεν φέρει φορτίο. Άλλη γνωστή μέθοδος που χρησιμοποιείται για αυτόν τον λόγο είναι ο εύρωστος έλεγχος (robust control).

Απαιτήσεις αυτής της μεθόδου είναι το σύστημα να είναι γραμμικό και η συνάρτηση μεταφοράς να μην είναι ορισμένη στο άπειρο. Απαιτήσεις που καλύπτονται από το σύστημά μας.

Στόχος της μεθόδου αυτής, όπως είπαμε, είναι η απόρριψη διαταραχών που δημιουργείται από αλλαγές παραμέτρων του συστήματος. Συνήθως είναι χαμηλών συχνοτήτων. Μειώνονται με την παρουσία και την αύξηση, κατά το δυνατόν, του διαφορικού όρου του ελεγκτή PID, του K_I . Οι διαταραχές αυτές ορίζονται από τη διαφορά της απόλυτης τιμής του σφάλματος σταθερής κατάστασης (integrated absolute error), δηλαδή:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (3.2)$$

και

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (3.3)$$

Έχει αποδειχθεί ότι

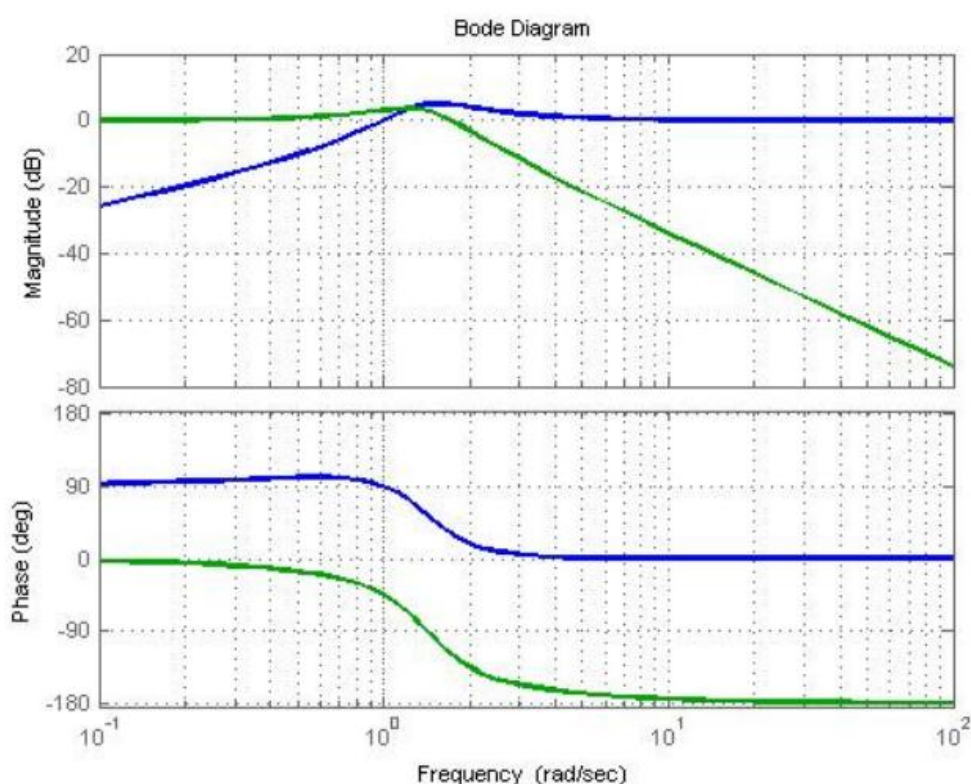
$$IE = \frac{1}{K_I} \quad (3.4)$$

Βλέπουμε ότι όσο αυξάνουμε τον διαφορικό όρο μειώνεται το σφάλμα. Σημαντικό ρόλο στην επιλογή της κατάλληλης τιμής K_I έχουν οι συναρτήσεις ευαισθησίας. Για συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή την $G_C(s)$ (2.23) και συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος την $G_P(s)$ (2.20) έχουμε:

$$S(s) = \frac{1}{1 + G_C \cdot G_P} \quad (3.5)$$

$$T(s) = \frac{G_C \cdot G_P}{1 + G_C \cdot G_P} \quad (3.6)$$

Όπου $S(s)$ η συνάρτηση ευαισθησίας και $T(s)$ η συμπληρωματική συνάρτηση ευαισθησίας. Η πρώτη δείχνει το κατά πόσον μειώνεται η ευαισθησία σε διαταραχές και η δεύτερη το πόσο ανταπεξέρχεται σε αστοχίες των μετρήσεων (measurement noise) και μη μετρήσιμες παραμέτρους του δυναμικού μας συστήματος. Έυκολα φαίνεται ότι ισχύει πάντα $S(s) + T(s) = 1$. Έχει παρατηρηθεί ότι στις χαμηλές συχνότητες ενδείκνυται να έχουμε $S(s) \approx 0$, άρα και $T(s) \approx 1$, ενώ στις υψηλές αντίστροφα $S(s) \approx 1$ και $T(s) \approx 0$. Εμείς πρέπει λοιπόν να συμβιβάσουμε αυτές τις δύο καταστάσεις ανάλογα των αναγκών μας. Παρακάτω έχουμε ένα παράδειγμα σε διαγράμματα Bode που δείχνουν την αντιστοιχία αυτή ($S(s)$:μπλε, $T(s)$:πράσινο)



Σχήμα 3.4

Οι μέγιστες τιμές για τις συναρτήσεις, συναρτήσει τιμών για την κυκλική συχνότητα ω , ορίζονται

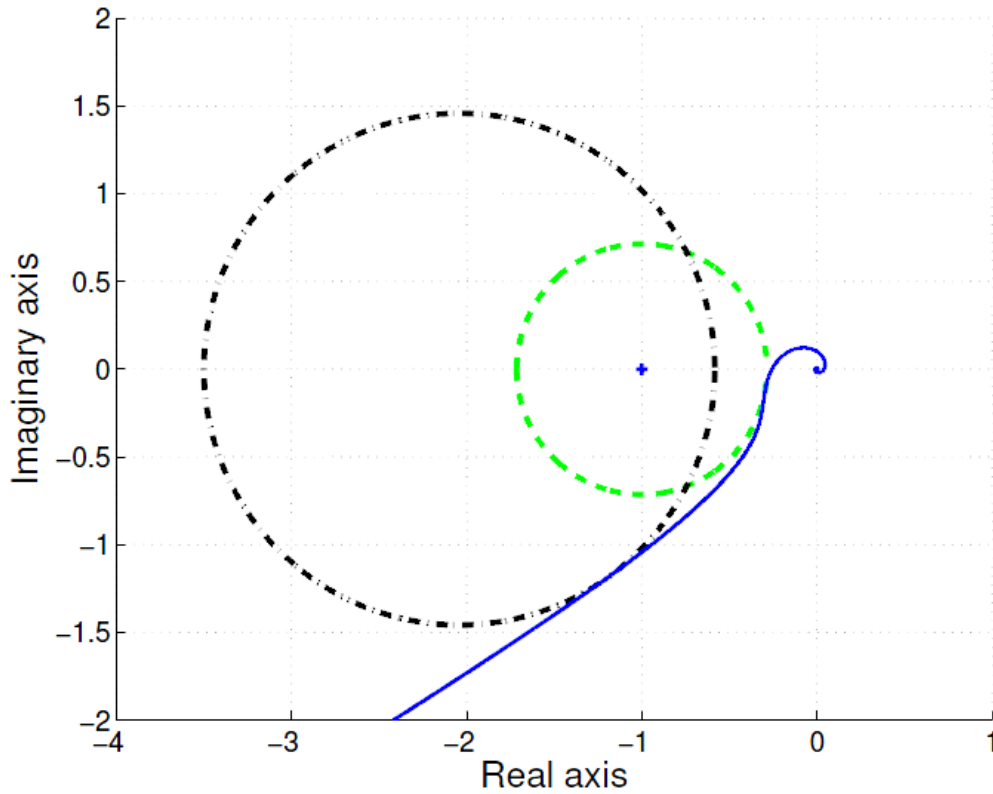
$$M_S = \max_{0 \leq \omega \leq \infty} |S(i\omega)| \quad (3.7)$$

$$M_T = \max_{0 \leq \omega \leq \infty} |T(i\omega)| \quad (3.8)$$

Οι τιμές για M_S και κυμαίνονται από 1.3 έως 2 και για M_T από 1 έως 1.5. Αυτό που κάνουμε είναι να χρησιμοποιήσουμε την τιμή M_S ως παράμετρο της σχεδίασης του ελεγκτή PID, μιας και η αυξομειώσή της προκαλεί σημαντικές αλλαγές στην απόκριση του συστήματος.

Επίσης, συνδέονται και με το καρτεσιανό γράφημα Nyquist της συνάρτησης μεταφοράς για τον ανοιχτό βρόχο. Η καμπύλη της συνάρτησης στο γράφημα θα είναι

εφαπτόμενη σε ένα ή δύο κύκλους, χωρίς να τέμνει κανέναν. Ο ένας κύκλος θα έχει κέντρο C_{Ms} το σημείο $(-1,0i)$ και ακτίνα $R_{Ms} = \frac{1}{M_S}$. Ο άλλος θα έχει το κέντρο του στον άξονα X (πραγματικοί αριθμοί), στο σημείο $C_{Mp} = -\frac{M_P^2}{M_P^2-1}$ με ακτίνα $R_{Mp} = \frac{M_P}{M_P^2-1}$. Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η σχέση με την καμπύλη μιας συνάρτησης μεταφοράς στο καρτεσιανό Nyquist γράφημα



Σχήμα 3.5

Η μέθοδος MIGO χρησιμοποιεί έναν κύκλο με κέντρο

$$C = \frac{M_S - M_S M_P - 2M_S M_P^2 + M_P^2 - 1}{2M_S(M_P^2 - 1)} \quad (3.9)$$

και ακτίνα

$$R = \frac{M_S + M_P - 1}{2M_S(M_P^2 - 1)} \quad (3.10)$$

τα οποία χρησιμοποιούνται στην βελτιστοποίηση – επίλυση όπως περιγράφεται παρακάτω.

3.2.2 Ο αλγόριθμος MIGO

Η επίλυση αφορά στο να βρούμε τη βέλτιστη τιμή M_s . Η αντικειμενική συνάρτηση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η εξής:

$$f(K_p, K_I, K_D, \omega) = |1 + C(i\omega) \cdot G(i\omega)|^2 \quad (3.11)$$

Υπό περιορισμούς

$$f(K_p, K_I, K_D, \omega) \geq R^2 \quad (3.12)$$

$$|G_0(i\omega_s) - C_{Ms}|^2 = R_{Ms}^2 \quad \text{ή} \quad |G_0(i\omega_p) - C_{Mp}|^2 = R_{Mp}^2 \quad (3.13)$$

Όπου G_0 η τιμή στο γράφημα Nyquist της συνάρτησης μεταφοράς στον ανοιχτό σύστημα και ω_s, ω_p οι τιμές των συχνοτήτων που εφάπτεται σε έναν από τους δύο κύκλους.

Αντικαθιστούμε παρακάτω προτού προχωρήσουμε. Κατ'αρχήν η συνάρτηση του ελεγκτή είναι

$$G_C(i\omega) = K_p + K_D \cdot (i\omega) + \frac{K_I}{i\omega} \quad (3.14)$$

και η συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να παρασταθεί ως μιγαδικός αριθμός

$$G_p(i\omega) = a(\omega) + i \cdot b(\omega) = r(\omega) \cdot e^{i\varphi(\omega)} \quad (3.15)$$

όπου

$$r(\omega) = a(\omega) \cos \varphi(\omega) \quad (3.16)$$

$$r(\omega) = b(\omega) \sin \varphi(\omega) \quad (3.17)$$

$$r(\omega)^2 = a(\omega)^2 + b(\omega)^2 \quad (3.18)$$

Η αριθμητική επίλυση του προβλήματος περιγράφεται ως εξής:

$$f(K_p, K_I, K_D, \omega) = R^2 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \omega}(K_p, K_I, K_D, \omega) = 0 \quad (3.21)$$

Όπως προαναφέραμε, η αρχή αυτής της μεθόδου είναι η μεγιστοποίηση όσο ενδείκνυται του όρου K_I . Επίσης στη βέλτιστη τιμή της f θα ισχύει:

$$df = \frac{\partial f}{\partial K_p} \cdot dK_p + \frac{\partial f}{\partial K_D} \cdot dK_D + \frac{\partial f}{\partial K_I} \cdot dK_I + \frac{\partial f}{\partial \omega} \cdot d\omega = 0 \quad (3.22)$$

K_I επειδή, όπως είπαμε, έχουμε την μέγιστη τιμή K_I σε αυτή τη θέση, $dK_I = 0$. Επίσης $\frac{\theta f}{\theta K_D} = \frac{\theta f}{\theta K_D} = 0$ για διάφορες αλλαγές dK_P και dK_D . Εν κατακλείδι η αριθμητική επίλυση έχει ως εξής:

$$f(K_P, K_I, K_D, \omega) = R^2 \quad (3.23)$$

$$\frac{\theta f}{\theta \omega}(K_P, K_I, K_D, \omega) = 0 \quad (3.24)$$

$$\frac{\theta f}{\theta K_P}(K_P, K_I, K_D, \omega) = 0 \quad (3.25)$$

$$\frac{\theta f}{\theta K_D}(K_P, K_I, K_D, \omega) = 0 \quad (3.26)$$

Τέλος, η μέθοδος συνοψίζεται στον εξής αλγόριθμο:

1. Δημιουργείται ένα φάσμα τιμών για την κυκλική συχνότητα ω (rad/s) του συστήματος.
2. Επιλέγουμε τιμές για M_S και M_P , στα διαστήματα που προαναφέραμε.
3. Υπολογίζουμε την $\frac{\theta f}{\theta \omega}$.
4. Ελέγχουμε αν ισχύει $\frac{\theta^2 f}{\theta \omega^2} > 0$, αλλιώς επιστρέφουμε στο 2.
5. Αν το βήμα 4 ισχύει, υπολογίζουμε τιμές για K_P , K_D , K_I .
6. Επιλέγουμε νέες τιμές για M_S και M_P και ελέγχουμε αν καλύπτονται οι περιορισμοί.
7. Επαναλαμβάνουμε μέχρι να βρούμε την βέλτιστη τιμή.

Την επίλυση όλης αυτής της διαδικασίας αναλαμβάνουν πακέτα λογισμικού όπως το sisotool του αριθμητικού προγραμματιστικού περιβάλλοντος MATLAB.

3.2.3 Επίλυση με την μεθοδολογία MIGO

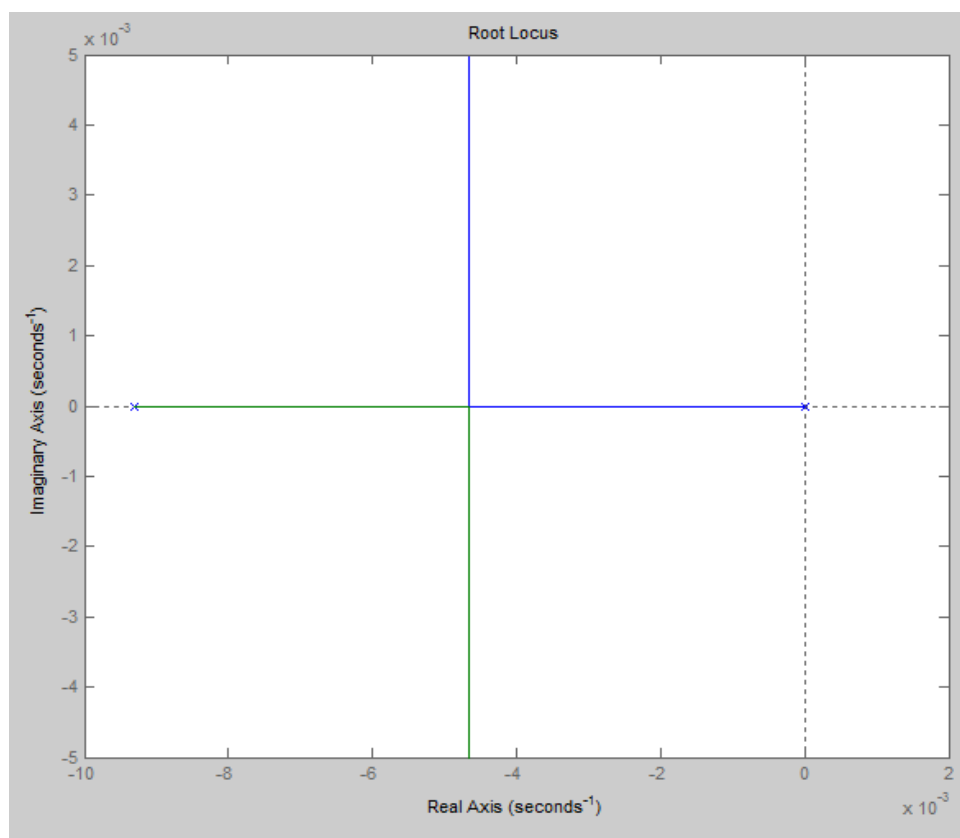
Το κλειστό ανατροφοδοτούμενο σύστημα που ρυθμίζει η MIGO παρουσιάστηκε στο σχήμα 3.1. Πρώτα δημιουργούμε την συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB με την εντολή

$$\text{sys} = \text{tf}(1.7\text{e-}3, [1 \ 9.3\text{e-}3 \ 0]) \quad (3.27)$$

Στη συνέχεια την εισάγουμε στο πρόγραμμα επίλυσης sisotool. Το συγκεκριμένο εργαλείο δίνει πολλές δυνατότητες και πληροφορίες στον σχεδιάστή. Του επιτρέπει να χρησιμοποιήσει μεθόδους ρύθμισης όπως η MIGO, η Ziegler-Nichols, η εσωτερικού μοντέλου ελέγχου ρύθμιση, LQG κ.α. Δίνει γραφήματα Bode, Nyquist, το γράφημα βηματικής απόκρισης, κρουστικής απόκρισης, γράφημα γεωμετρικού τόπου ριζών κ.α.

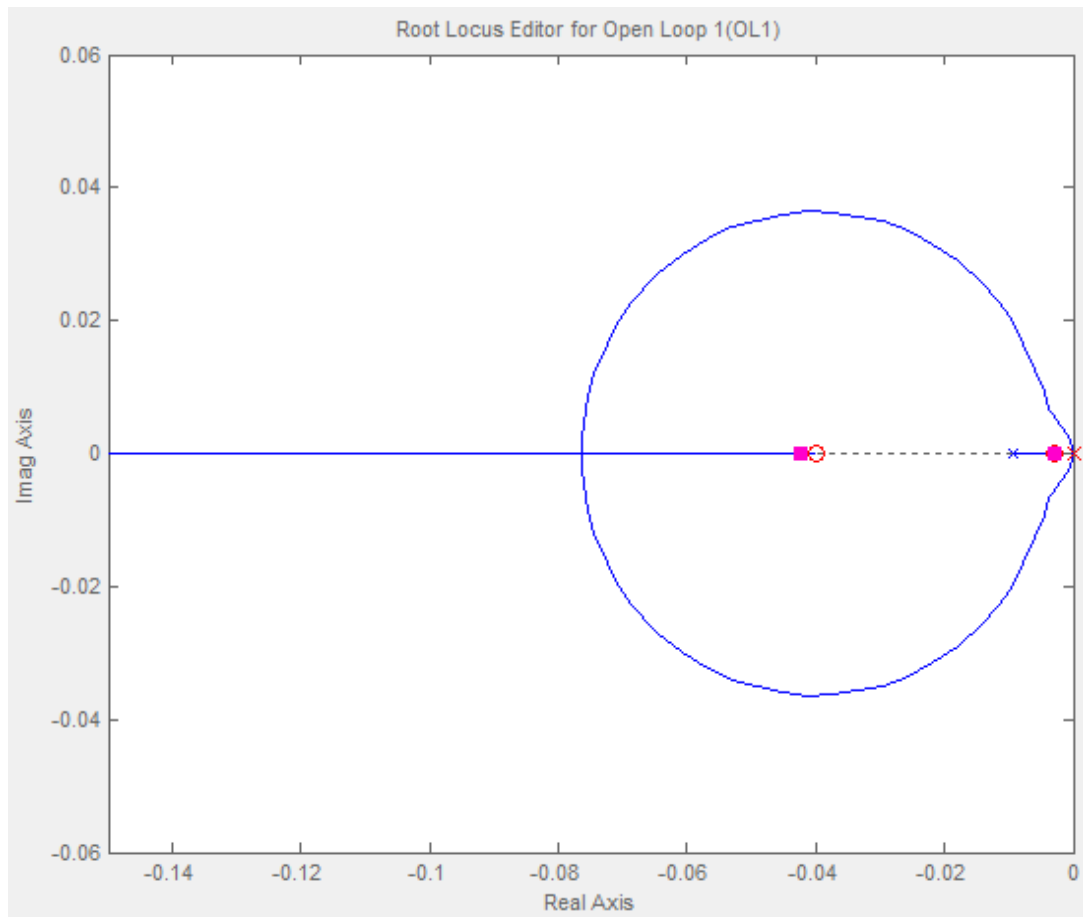
Με τις προδιαγραφές μέγιστης υπερύψωσης M_p και χρόνο αποκατάστασης t_s ξέρουμε σε ποια περιοχή θέλουμε να είναι οι πόλοι του αντισταθμισμένου συστήματος και τι μορφή θα έχει η βηματική απόκριση. Το sisotool μας επιτρέπει χάρη στην άμεση σχεδίαση της βηματικής απόκρισης να επιλέξουμε τους πόλους διαδραστικά για ελεγκτή PID.

Πριν την προσθήκη του ελεγκτή ας δούμε κάποια χαρακτηριστικά του ανοιχτού συστήματος. Ο γεωμετρικός τόπος ριζών (ως προς κέρδος K στην ανατροφοδότηση)



Σχήμα 3.6

Βλέπουμε ότι το σύστημα παρουσιάζει σταθερότητα μιας και όλοι οι πόλοι είναι στην αρνητική πλευρά του άξονα X . Να αναφέρουμε ότι και οι πόλοι της συνάρτησης μεταφοράς 2.23 είναι 0 και -0.009, άρα από μόνο του το σύστημα παρουσιάζει ευστάθεια. Με την προσθήκη του ελεγκτή θα τοποθετήσουμε τους πόλους για να έχουμε την επιθυμητή απόκριση σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Επειδή το κλειστό σύστημα είναι 3^{ης} τάξης θα έχουμε 3 πόλους. Ένας από αυτούς θα είναι αδύναμος, δηλαδή δεν θα επηρεάζει την απόκριση του συστήματος, και οι άλλοι δύο κυρίαρχοι. Η έννοια αδύναμων και κυρίαρχων πόλων περιγράφηκε στο 2.4.1. Συγκεκριμένα έχουμε τον εξής γεωμετρικό τόπο ριζών με την προσθήκη του ελεγκτή PID (συνάρτηση 3.1)



Σχήμα 3.7

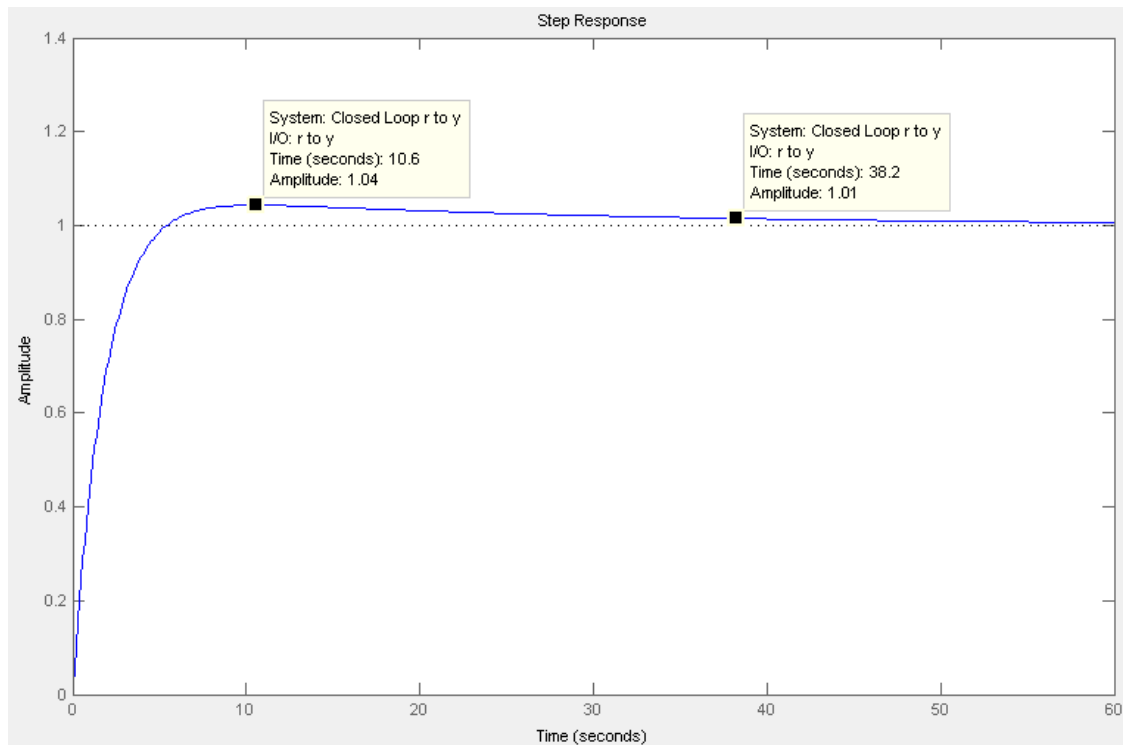
Επιλέξαμε τους εξής πόλους

$$s_1 = -0.0426 \quad (3.28)$$

$$s_2 = -0.00288 \quad (3.29)$$

$$s_3 = -0.549 \text{ (*αδύναμος πόλος)} \quad (3.30)$$

Με βηματική απόκριση



Σχήμα 3.9

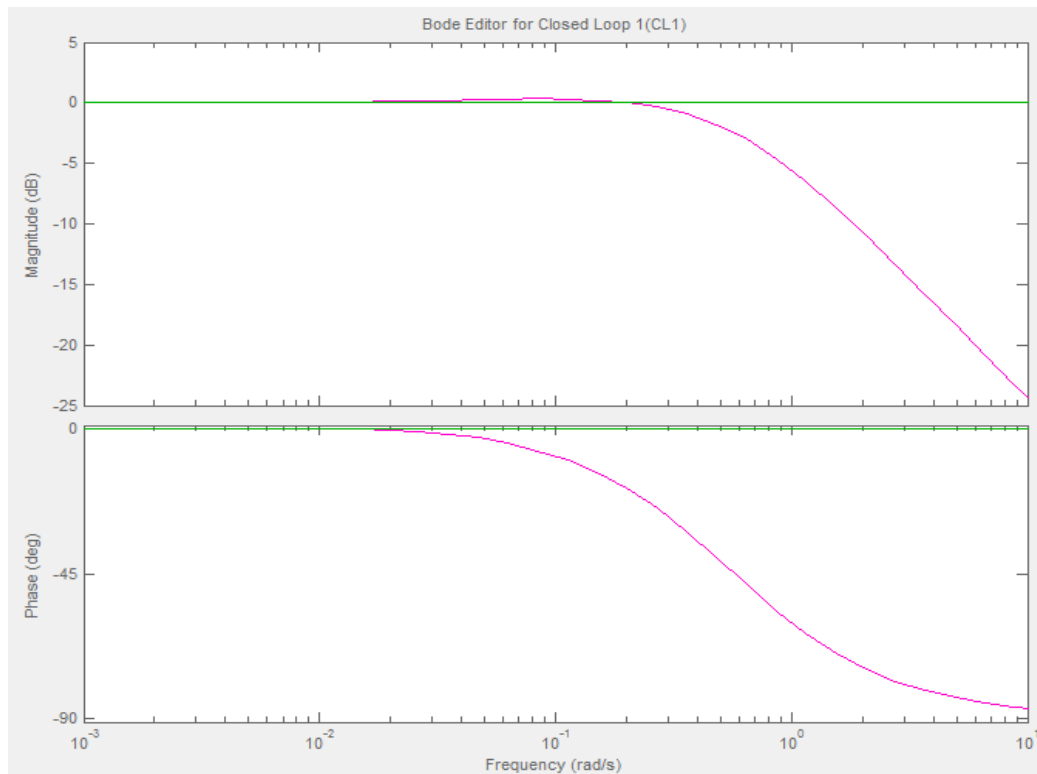
Βλεπουμε ότι η μέγιστη υπερύψωση είναι μικρότερη του 5% και ο χρόνος αποκατάστασης είναι περίπου 38s. Ο ελεγκτής μας θα έχει τους εξής όρους

$$K_P = 14.9 \quad (3.31)$$

$$K_I = 0.0396 \quad (3.32)$$

$$K_D = 346.5 \quad (3.33)$$

Και το διάγραμμα Bode του κλειστού συστήματος, που μας δείχνει πώς το σήμα εισόδου επηρεάζεται και αλλάζει πλάτος (dB) και φάση (deg) στην έξοδο, συναρτήσει της κυκλικής συχνότητας του συστήματος.



Σχήμα 3.8

Εμείς έχουμε επιλέξει $\omega = 0.08 \text{ rad/s}$. Για τη συγκεκριμένη τιμή βλέπουμε στο διάγραμμα ότι έχουμε μηδενικές μεταβολές στο πλάτος του σήματος και της φάσης.

3.3 Προσομοίωση

Με ένα σύνολο από προγράμματα (συναρτήσεις της MATLAB-mfiles) πραγματοποιούμε προσομοίωση για να δούμε αν ο ελεγκτής ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των ταξιδιών στη θάλασσα. Το σύνολο των συναρτήσεων αυτών προέρχεται από την ερευνητική δουλειά του καθηγητή Thor I. Fossen του ιδρύματος NTNU-Norwegian University of Science and Technology. Λεπτομέρειες για τις μελέτες από τις οποίες προέκυψαν τα προγράμματα βρίσκονται στο βιβλίο του ίδιου καθηγητή με τίτλο *Guidance and Control of Ocean Vehicles*(1994). Οι κώδικες είναι διαθέσιμοι στην ιστοσελίδα www.marinecontrol.org

3.3.1 Συναρτήσεις σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB

Οι συναρτήσεις αυτές αφορούν την κίνηση του πλοίου, τις περιβαλλοντικές διαταραχές (καιρικές συνθήκες) και κάποιες βοηθητικές, κυρίως για μαθηματική επίλυση. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούμε:

➤ **sim.m:**

Καλεί όλες τις υπόλοιπες αναγκαίες για την προσομοίωση συναρτήσεις. Σε αυτήν ορίζουμε χαρακτηριστικά του συστήματος όπως οι

συντεταγμένες των σημείων που ορίζουν την διαδρομή του πλοίου (x_c, y_c), η ταχύτητά του (U_0), η ταχύτητα ανέμου (V_{wind}), γωνία ανέμου (b), τον συνολικό χρόνο της προσομοίωσης (t_f), το χρονικό δείγμα (h) και άλλα που θα αναλύσουμε στη συνέχεια. Συγκεντρώνει τα αποτελέσματα και τα αποθηκεύει, καθώς και παρουσιάζει την εξέλιξή τους σε γραφήματα.

➤ **bulk.m:**

Δέχεται σαν όρισμα τα εξής:

- α. Το διάνυσμα x που περιέχει τις ταχύτητες u και v , τις γωνίες ψ , δ , την γωνιακή ταχύτητα r και τις συντεταγμένες x και y .
- β. Την εντολή πηδαλίου, γωνία u_i (rad)
- γ. Την γωνιακή ταχύτητα του πηδαλίου $deltad$ (rad/s)
- δ. Την προεπιλεγμένη ταχύτητα πλεύσης του πλοίου U_0 (m/s)
- ε. Την σχετική ως προς τον εκάστοτε μεσημβρινό γωνία ανέμου b (rad)
- στ. Την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 30m από την θάλασσα V_{wind} (knots)
- ζ. Τον χρόνο προσομοίωσης $time$ (s).

Επιστρέφει τα παρακάτω:

- α. Την χρονική παράγωγο των μεγεθών του διανύσματος x
- β. Τη διανυσματική ταχύτητα του πλοίου U (m/s)
- γ. Τις δυνάμεις που δέχεται το πλοίο χωρίς την επίδραση των περιβαλλοντικών διαταραχών (X_{nd} , Y_{nd} , N_{nd})
- δ. Τις δυνάμεις που δέχεται από τις περιβαλλοντικές διαταραχές (X_d , Y_d , N_d)
- ε. Τις γωνιακές ταχύτητα και επιτάχυνση του πηδαλίου $deltad$ (rad/s) και $deltadd$ (rad/s²).

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιεί τις εξισώσεις 1.44-1.46 του μοντέλου Abkowitz, όπως αυτό περιγράφηκε στην 1.1.4.3.

➤ **windforce.m**

Δέχεται σαν όρισμα τα:

- α. Τη σχετική γωνία ανέμου-πλεύσης $gamma_r$ (rad)
- β. Τη σχετική ταχύτητα ανέμου-πλεύσης V_r (m/s)
- γ. Το ολικό μήκος του πλοίου L (m)
- δ. Το μέγιστο πλάτος του πλοίου B (m)
- ε. Τις διαμήκεις, εγκάρσιες επιφάνειες του πλοίου A_L και A_T (m²)
- στ. Την επιφάνεια υπερκατασκευής A_{SS} (m²) και την περίμετρό της S (m)
- ζ. Την απόσταση C (m) από την πλώρη του κέντρου βάρους της διαμήκου επιφάνειας A_L .
- η. Τον αριθμό των μερών M που ξεχωρίζουν στην διαμήκη επιφάνεια.

Επιστρέφει τις τρεις συνισταμένες δυνάμεις που ασκεί ο άνεμος στο πλοίο, μία για κάθε άξονα. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση όσα περιγράψαμε στο 1.2.2.

➤ **waveforces.m**

Δέχεται σαν ορίσματα:

- α. Την ταχύτητα του ανέμου $V_{wind}(m/s)$
- β. Την πυκνότητα του ρευστού (εν προκειμένω για θαλασσινό νερό $\rho=1023kg/m^3$)
- γ. Το μέγιστο πλάτος του πλοίου $B(m)$
- δ. Το βύθισμα του πλοίου $T(m)$
- ε. Το ολικό μήκος $L(m)$
- στ. Τις γωνίες πλεύσης και ανέμου ως προς τον εκάστοτε μεσημβρινό b και ψ αντίστοιχα (rad)
- ζ. Τον χρόνο $time(s)$
- η. Την ταχύτητα U του πλοίου (m/s)

Επιστρέφει τις συνισταμένες στους τρεις άξονες των δυνάμεων που ασκεί ο κυματισμός στο πλοίο. Οι υπολογισμοί γίνονται με βάση όσα περιγράψαμε στην 1.2.1.

➤ **wavespectrum.m**

Η συγκεκριμένη συνάρτηση καλείται από την `windforce.m` και παίρνει μέρος στους υπολογισμούς δίνοντας το φάσμα του κύματος συναρτήσει διάφορων κυκλικών συχνοτήτων στο διάστημα $[0,1]$. Δέχεται σαν ορίσματα:

- α. Την ταχύτητα ανέμου $V_{wind} (m/s)$ σε ύψος 30m από την επιφάνεια της θάλασσας
 - β. Ένα σύνολο τιμών για την κυκλική συχνότητα ω στο διάστημα $[0,1]$.
- Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιεί τους τύπους 1.44-1.48.

➤ **euler2.m**

Αυτή η συνάρτηση είναι βοηθητική και καλείται από τις άλλες συναρτήσεις για διαφορίση κατά Euler (μέθοδος 2ας τάξης).

Στη συνάρτηση `bulk.m` κάναμε κάποιες απαραίτητες αλλαγές. Οι συντελεστές για το μοντέλο του Abkowitz που μας δίνονται είναι ήδη με βάση την κανονικοποίηση που περιγράψαμε στο κεφ.1.3. Είναι αναγκαίο να κανονικοποιήσουμε και τις δυνάμεις των περιβαλλοντικών διαταραχών. Επειδή δεν έχουμε αντίστοιχα στοιχεία, θα χρειαστεί να κάνουμε κάποιους υπολογισμούς.

Στον άξονα X η σχέση 1.18 για $\Delta T=0$ (επιλέγουμε μόνιμη ταχύτητα, άρα και μόνιμη πρόωση) και $\Delta T_{loss} \approx 0$, σύμφωνα με την κανονικοποίηση γίνεται

$$\dot{u} = \frac{x(\frac{u^2}{L})}{m' - Xu} \quad (3.34)$$

όπως ξέρουμε όμως για κάθε επιτάχυνση a , $a = \frac{F}{m}$, έτσι εξισώνοντας καταλήγουμε:

$$X = \frac{7.9}{U^2} \cdot 10^{-8} \cdot F \quad (3.35)$$

όπου X η κανονικοποιημένη δύναμη στον άξονα X από την ασκούμενη δύναμη F στον ίδιο άξονα. Αντίστοιχα εργαζόμαστε και για τον άξονα Y . Η επιτάχυνση στον άξονα Y δίνεται από την κανονικοποιημένη εξίσωση

$$\dot{v} = \frac{-[(Iz - Nr)Y + (m \cdot xg - Yr)N] \cdot \frac{U^2}{L}}{1.3 \cdot 10^{-5}} \quad (3.36)$$

Εξισώνοντας όπως πριν έχουμε

$$Y = \frac{Fy - 2.26 \cdot 10^6 \cdot U^2 \cdot N}{6.8 \cdot 10^6 \cdot U^2} \quad (3.37)$$

Για την δύναμη N στον άξονα Z έχουμε την κανονικοποιημένη σχέση για την γωνιακή επιτάχυνση

$$\dot{r} = \frac{[-(Iz - Nr)Y + (m - Yv)N] \cdot \frac{U^2}{L}}{1.3 \cdot 10^{-5}} \quad (3.38)$$

Η γωνιακή επιτάχυνση στον άξονα Z όπως ξέρουμε δίνεται επίσης

$$\tau = I_Z \cdot \alpha \quad (3.39)$$

Όπου τ η ροπή και I η ροπή αδρανείας στον Z . Εξισώνοντας τις 3.10, 3.11 και λαμβάνοντας υπ' όψιν την 3.9 καταλήγουμε

$$Y = \frac{(115.8 - \cos y)F_y + \sin y \cdot F_x}{783.55 \cdot 10^6 \cdot U^2} \quad (3.40)$$

Η συμμετοχή της ασκούμενης στον άξονα X δύναμης F_x οφείλεται στην κίνηση του πλοίου εντός του ρευστού. Η εξίσωση για τη συνισταμένη στον άξονα Z δεν μας χρειάζεται, μιας και μελετάμε τη δισδιάστατη κίνηση στο επίπεδο XY .

3.3.2 Παράμετροι προσομοίωσης

Σε αυτή την ενότητα θα δούμε τι αποτελέσματα μας δίνουν οι ελεγκτές που σχεδιάσαμε. Θα δούμε πως επηρεάζουν τη συμπεριφορά του πλοίου παράμετροι όπως οι καιρικές συνθήκες, η ταχύτητα πλεύσης που επιλέγουμε κ.α.

Για την πορεία του πλοίου αναφερθήκαμε στο κεφ.1.4. Σε αυτή την προσομοίωση τα σημεία της πορείας δεν θα δίνονται σε συντεταγμένες, αλλά σε χιλιόμετρα, για να δούμε πως ανταποκρίνεται το σύστημά μας σε μικρότερες

διαδρομές, που είναι πιο απαιτητικές λόγω του περιορισμένου χώρου. Θα ορίσουμε ένα σύνολο έστω επτά σημείων με αρχή στο 0. Οι κατευθύνσεις θα μετρώνται πάντα ως προς την κάθετο, που αντιστοιχεί σε μεσημβρινό. Όταν πλησιάσει αρκετά σε ένα από αυτά τα σημεία η είσοδος αναφοράς, δηλαδή η κατεύθυνση, θα αλλάζει προκειμένου να κατευθυνθεί στο αμέσως επόμενο σημείο της πορείας. Το πόσο κοντά στο επιθυμητό σημείο θα γίνεται η αλλαγή θα το ορίσουμε εμείς με μια ακτίνα ελέγχου. Όταν το πλοίο εισέρχεται στην περιοχή που ορίζει η ακτίνα θα αλλάζει πορεία. Η ακτίνα αυτή έχει επικρατήσει να είναι το πολύ διπλάσια σε μήκος από το ολικό μήκος του πλοίου. Εμείς θα ορίσουμε $\rho=340\text{m}$ μιας και το ολικό μήκος του πλοίου $L=170\text{m}$. Άρα όταν αλλάζει η πορεία θα ισχύει

$$\rho \leq \sqrt{(y(t) - y_c)^2 + (x(t) - x_c)^2} \quad (3.41)$$

Όπου $x(t)$, $y(t)$ η θέση του πλοίου την χρονική στιγμή t και x_c, y_c το σημείο όπου θέλουμε να θέσουμε νέα πορεία.

Από τις καιρικές συνθήκες εξαρτάται και η ταχύτητα πλεύσης που θα επιλέξουμε. Όπως έχουμε αναφέρει η ταχύτητα αυτή είναι ονομαστική λόγω της ύπαρξης των περιβαλλοντικών διαταραχών. Αυτή όμως είναι αντίστοιχη της πρόωσης που δίνουν οι μηχανές. Όσο πιο δυσμενείς οι καιρικές συνθήκες, τόσο μεγαλύτερη πρόωση χρειαζόμαστε, τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα που επιλέγουμε. Τα εμπορικά πλοία κινούνται με ταχύτητες 10 έως και 23 κόμβους (5m/s-12m/s ή 18km/h-43.2km/h). Εμείς θα ξεκινήσουμε από καιρικές συνθήκες των 5 beaufort με ταχύτητα 10 κόμβων (5.1m/s ή 18km/h) και θα ανεβάζουμε beaufort και ταχύτητα. Να ληφθεί υπ' όψιν ότι στα 9 beaufort εκδίδεται απαγορευτικό απόπλου για επιβατικά πλοία. Για καλύτερη κατανόηση, οι παρακάτω πίνακες έχουν μετατροπές μονάδων και χαρακτηρισμό του καιρού ανάλογα τα beaufort.

Πίνακας 3.1

Μποφόρ	Ταχύτητα ανέμου				Ύψος κυμάτων (m)	
	m/s	km/h	mph	kn	Ανοιχτή θάλασσα (Ατλαντικός)	Αβαθή, όρμοι και λίμνες
0	0,0 - <0,3	0	0 - <1,2	0 - <1	-	-
1	0,3 - <1,6	1 - 5	1,2 - <4,6	1 - <4	0,0 - 0,2	0,05
2	1,6 - <3,4	6 - 11	4,6 - <8,1	4 - <7	0,5 - 0,75	0,6
3	3,4 - <5,5	12 - 19	8,1 - <12,7	7 - <11		
4	5,5 - <8,0	20 - 28	12,7 - <18,4	11 - <16	0,8 - 1,2	1,0
5	8,0 - <10,8	29 - 38	18,4 - <25,3	16 - <22	1,2 - 2,0	1,5
6	10,8 - <13,9	39 - 49	25,3 - <32,2	22 - <28	2,0 - 3,5	2,3
7	13,9 - <17,2	50 - 61	32,2 - <39,1	28 - <34	3,5 - 6,0	3,0
8	17,2 - <20,8	62 - 74	39,1 - <47,2	34 - <41	πάνω από 6,0	4,0
9	20,8 - <24,5	75 - 88	47,2 - <55,2	41 - <48		
10	24,5 - <28,5	89 - 102	55,2 - <64,4	48 - <56	έως 20,0	5,5
11	28,5 - <32,7	103 - 117	64,4 - <73,6	56 - <64	πάνω από 20,0	-
12	>32,7	>118	>73,6	>64		

Πίνακας 3.2

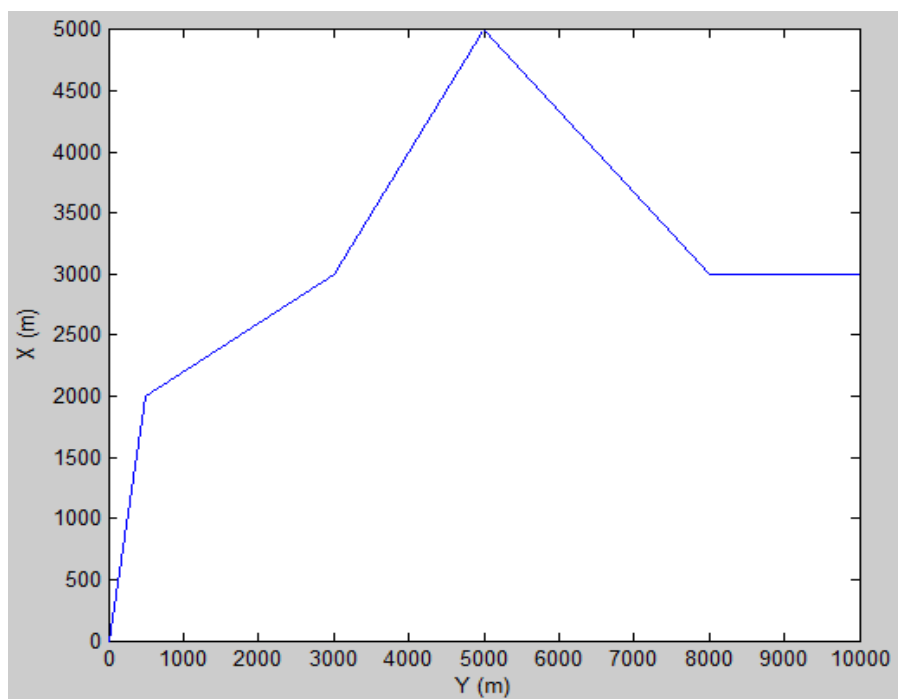
Μποφόρ	Χαρακτηρισμός ανέμου	Χαρακτηρισμός θάλασσας	Φαινόμενα	
			στην ξηρά	στην θάλασσα
0	Απνοία (νηνεμία)	Γαλήνια	Δεν φυσά άνεμος, ο καπνός υψώνεται κατακόρυφα.	Επίπεδη, κατοπτρική επιφάνεια (κοινώς «θάλασσα λάδι»).
1	Σχεδόν άπνοια / Υποπνέων (ελαφρύ αεράκι)	Ρυτιδούμενη	Ο άνεμος μετακινεί τον καπνό, όχι όμως τον ανεμοδείκτη.	Το νερό κάνει μικρές «ρυτίδες».
2	Πολύ ασθενής (ελαφριά αύρα)	Ήρεμη	Ο άνεμος γίνεται αισθητός στο δέρμα, τα φύλλα κινούνται.	Μικρά κυματάκια που δεν «σπάνε». Οι κορυφές τους έχουν υαλώδη μορφή και ποτέ αφρό.
3	Ασθενής (γλυκιά αύρα)	Λίγο ταραγμένη	Φύλλα και μικρά κλαριά κινούνται διαρκώς.	Τα μικρά κύματα αρχίζουν να σπάνε και εμφανίζεται λίγος αφρός («προβατάκια»).
4	Σχεδόν μέτριος (μέτρια αύρα)	Λίγο ταραγμένη ως ταραγμένη (μέτρια)	Ο άνεμος σηκώνει σκόνη και πεσμένα χαρτιά. Τα κλαδιά αρχίζουν να κινούνται.	Μέτρια κύματα, εμφανίζεται αφρός και σταγονίδια νερού (πίπλος).
5	Μέτριος	Ταραγμένη	Μικρά δέντρα αρχίζουν να κινούνται.	Μεγαλύτερα κύματα (ύψους 1,2 - 2,5 μ.), εμφανίζονται αφρώδεις κορυφές παντού.
6	Ισχυρός	Κυματώδης	Μεγάλα κλαδιά κινούνται και ο αέρας σφυρίζει. Η χρήση της ομπρέλας γίνεται δύσκολη.	Μεγάλα κύματα (ύψους 2 - 4 μ.) με επιμήκεις αφρώδεις κορυφές και έντονο πίπλο.
7	Σφοδρός / Σχεδόν Θυελλώδης (Near Gale)	Κυματώδης έως πολύ κυματώδης	Τα δέντρα κινούνται ολόκληρα και το περπάτημα ενάντια στον άνεμο γίνεται δύσκολο.	Η θάλασσα ογκούται (φουσκώνει) και λευκός αφρός από κύματα (ύψους 3 - 5 μ.) που σπάζουν αρχίζει να παρασύρεται και να σχηματίζονται ραβδώσεις κατά την διεύθυνση του ανέμου.

8	Θυελλώδης (Gale)	Πολύ κυματώδης έως τρικυμιώδης	Μεγάλα δέντρα κινούνται ολόκληρα και μικρά κλαδιά σπάνε. Η οδήγηση γίνεται δύσκολη και το περπάτημα ενάντια στον άνεμο εξαιρετικά δύσκολο.	Η θάλασσα αρχίζει να φουρτουιάζει. Σχετικά υψηλά κύματα (4 - 6 μ.) με προεξέχουσες κορυφές που αρχίζουν να σπάνε. Σχηματίζονται έντονες λωρίδες αφρού κατά την διεύθυνση του ανέμου. Μεγάλες ποσότητες αιωρούμενου αφρού.
9	Πολύ Θυελλώδης (Strong Gale)	Τρικυμιώδης	Μεγάλα κλαδιά σπάνε, μικρές ζημιές σε καμινάδες και σκεπές. Προσωρινή σήμανση και οδοφράγματα παρασύρονται. Δύσκολη η όρθια στάση.	Υψηλά κύματα (6 - 9 μ.) με πυκνές ραβδώσεις αφρού κατά την διεύθυνση του ανέμου. Οι κορυφές των κυμάτων αρχίζουν να γέρνουν, να πέφτουν και να κυλινθάνε. Ο αφρός είναι δυνατόν να επηρεάζει την ορατότητα.
10	Θύελλα (Storm)	Πολύ τρικυμιώδης	Σπάνια παρατηρείται στο εσωτερικό της ξηράς. Δέντρα σπάζουν ή ξεριζώνονται. Πολλά κεραμίδια αποσπώνται από τις σκεπές, αρκετές ζημιές στο εξωτερικό των κτιρίων.	Πολύ υψηλά (8 - 12,5 μ.) κύματα με μακριές λοφώδεις ράχες. Το σπάσιμο και κύλισμα των κορυφών των κυμάτων γίνεται έντονο και βίαιο. Η θάλασσα εμφανίζει μεγάλα λευκά μπαλώματα και η συνολική της εμφάνιση αρχίζει να ασπρίζει. Η ορατότητα μειώνεται.
11	Βίαιη / Σφοδρή θύελλα (Violent Storm)	Εξαιρετικά τρικυμιώδης (ή Άγρια)	Πολύ σπάνια παρατηρείται στο εσωτερικό της ξηράς. Πολλές στέγες υψίστανται μεγάλη ζημιά. Αρκετές ζημιές σε κτίρια, αυτοκίνητα, πάρκα. Έπιπλα και βαριά αντικείμενα εκτός κτιρίων παρασύρονται. Αδύνατη η όρθια στάση. Εκτεταμένες ζημιές στην βλάστηση.	Εξαιρετικά υψηλά (9 - 14 μ.) ογκώδη κύματα, μεγάλες ποσότητες αιωρούμενου αφρού, μικρή ορατότητα. Δύσκολη η θέα πλοίων μικρής και μεσαίας χωρητικότητας, ίσως για λίγη ώρα να χάνονται πίσω από τα κύματα.
12	Τυφώνας (Hurricane-force)*	Μανώμενη (ή Πολύ άγρια)	Εξαιρετικά σπάνιο συμβάν στο εσωτερικό της ξηράς. Σοβαρές καταστροφές σε μεγάλη έκταση. Μερικά παράθυρα μπορεί να σπάσουν. Κινητά στίπια (mobile homes), καθώς και κακής κατασκευής υπόστεγα και αχυρώνες υψίστανται μεγάλες ζημιές ή και καταστρέφονται. Συντρίμμια εκσφενδονίζονται και παρασύρονται. Πολύ εκτεταμένες ζημιές στην	Τεράστια κύματα (14 μ. και άνω). Ο αέρας γεμίζει με αφρό και πίπλο, η θάλασσα ασπρίζει εντελώς. Ελάχιστη έως μηδενική ορατότητα.

3.3.3 Αποτελέσματα

Επιλέγουμε μια διαδρομή με διάφορες γωνίες αλλαγής κατεύθυνσης για να δούμε πώς ανταποκρίνεται ο αυτόματος πιλότος. Συνήθως οι αλλαγές πορείας δεν είναι μεγαλύτερες από 35°, δηλαδή την μέγιστη γωνία του πεδαλίου. Ούτως ή άλλως μεγάλες αλλαγές στη γωνία πλεύσης μπορούν να είναι από ενοχλητικές μέχρι και επικίνδυνες. Αυτό είναι άλλο ένα στοιχείο που λαμβάνεται υπ'όψιν στην επιλογή πορείας. Για πρακτικούς λόγους θέτουμε ως όριο αλλαγής κατεύθυνσης τις 90°.

Η διαδρομή που επιλέξαμε φαίνεται στο σχήμα



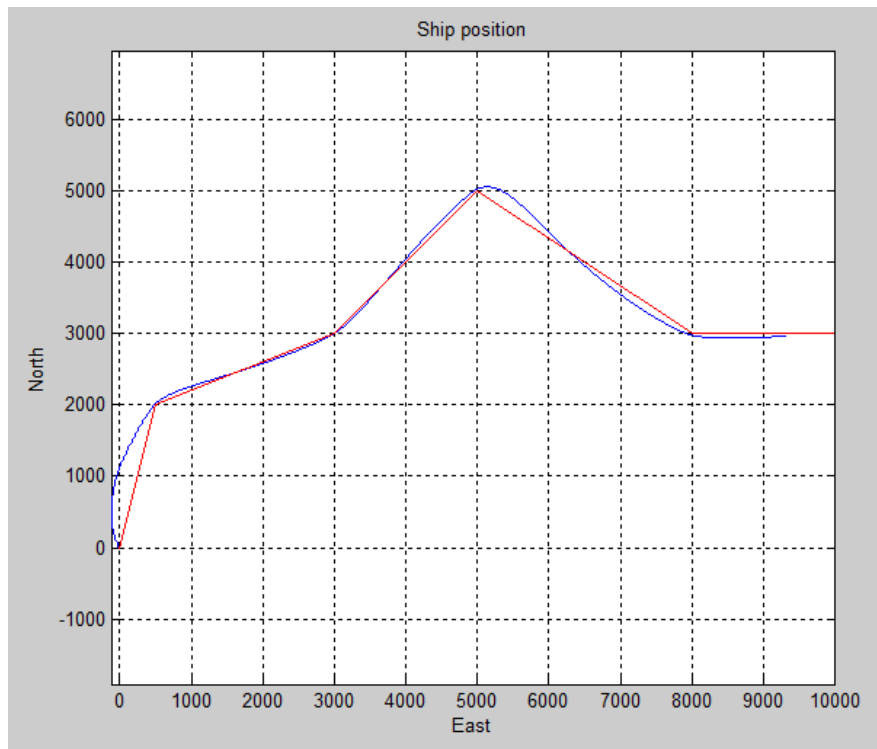
Σχήμα 3.8

Αποτελείται από έξι σημεία και έχουμε έξι γωνίες αλλαγής κατεύθυνσης. Συγκεντρωτικά

Πίνακας 3.3

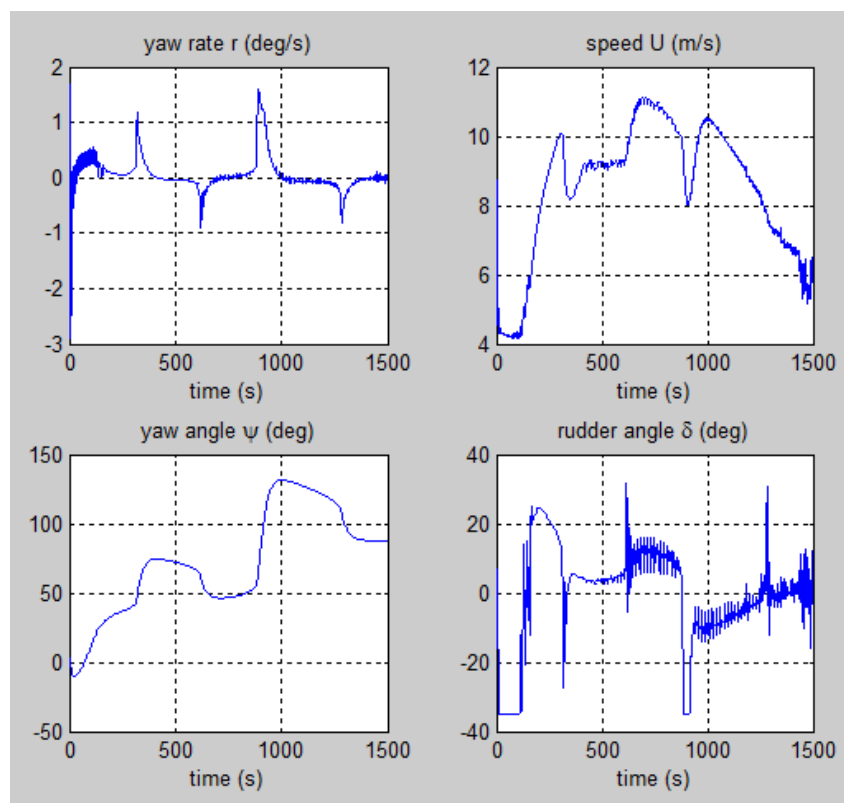
Y(m)	0	500	3000	5000	8000	10000
X(m)	0	2000	3000	5000	3000	3000
Γωνία αλλαγής πλεύσης		16°	60°	-30°	82.4°	-37.4°
Γωνία ως προς τον μεσημβρινό (κάθετο)		16°	75.7°	45°	127.4°	90°

Θα δοκιμάσουμε τον ελεγκτή στα 5 και 8 beaufort με ονομαστικές ταχύτητες 5.5m/s(19.8km/h ή 10.7κόμβοι) και 11.5m/s(41.4km/h ή 22.5κόμβοι) αντίστοιχα.Πρώτα για 5 beaufort η πορεία του πλοίου φαίνεται στο παρακάτω γράφημα



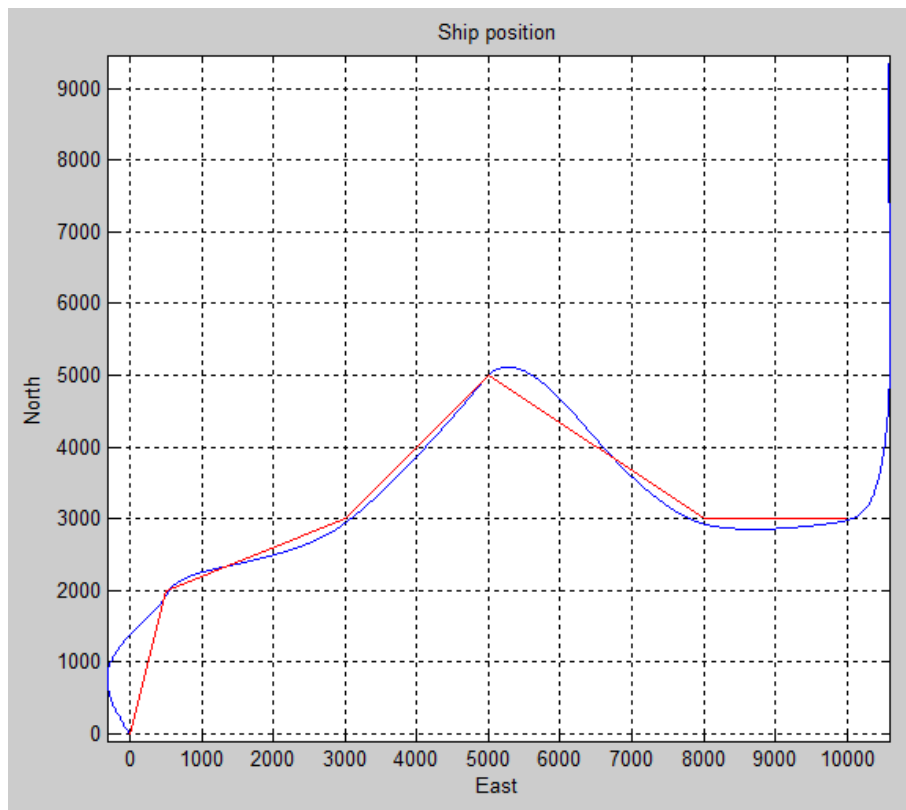
Σχήμα 3.9

Βλέπουμε ότι το πλοίο, με τη βοήθεια του ελεγκτή, ακολουθά πιστά την πορεία. Επίσης, παρακάτω βλέπουμε τα διαγράμματα της ταχύτητας του πλοίου U , της γωνιακής ταχύτητας r , της γωνίας πλεύσης ψ και των γωνιών δ που παίρνει το πηδάλιο.

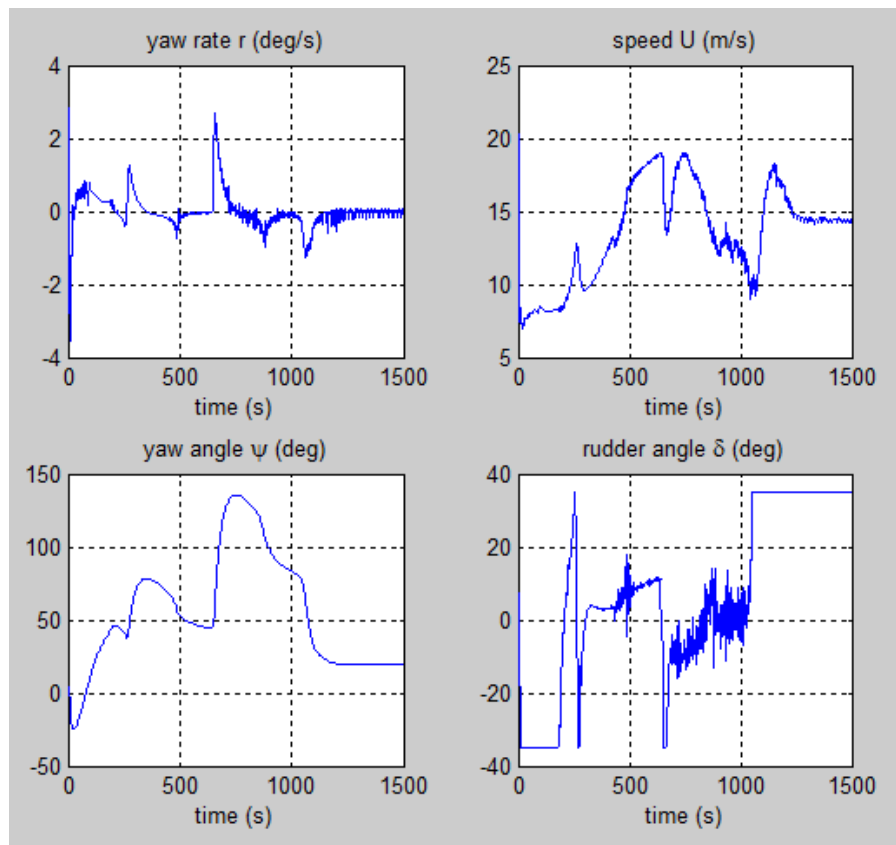


Σχήμα 3.10

Αντίστοιχα για ταχύτητα πλεύσης 11.5m/s (22knots) και 8 beaufort



Σχήμα 3.11



Σχήμα 3.12

Ο αυτόματος πιλότος παραμένει αξιόπιστος, ασφαλής και αποτελεσματικός και στις καιρικές συνθήκες των 8 beaufort, που θεωρούνται θυελλώδεις.

3.4 Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύξαμε βήμα-βήμα τη σχεδίαση ενός ελεγκτή PID, που προορίζεται για χρήση ως αυτόματου πιλότου πλοίου. Στην ουσία δημιουργήσαμε έναν κανόνα για τη σχέση της επιθυμητής κατεύθυνσης με την γωνία του πηδαλίου. Αυτός ο κανόνας είναι ο τύπος 2.29 εφαρμόζοντας τις τιμές

$$\delta = 14.9(\psi_d - \psi(t)) + 346.5 \cdot \dot{\psi} - 0.0396 \cdot \int_0^t (\psi_d - \psi(\tau)) d\tau \quad (3.42)$$

Με τη βοήθεια λογισμικού κάναμε τις απαραίτητες δοκιμές και καταλήξαμε σε αυτόν που θα ανταπεξέρχεται σε αλλαγές παραμέτρων του συστήματος, δηλαδή θα παρουσιάζει ευρωστία. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε την πρακτική υλοποίηση ενός τέτοιου αυτόματου συστήματος ελέγχου και ποια η συνεισφορά του στις σύγχρονες ανταγωνιστικές και περιβαλλοντικές απαιτήσεις.

Κεφάλαιο 4

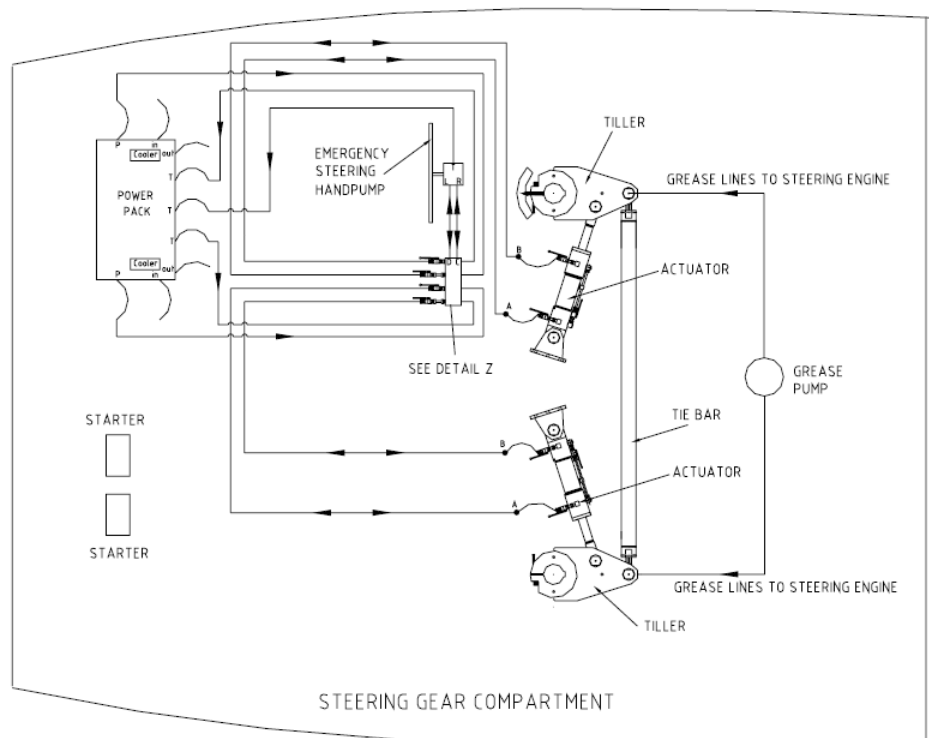
Πρακτική υλοποίηση αυτόματου πιλότου πλοίου

4.1 Υλοποίηση του αυτόματου πιλότου

Για την υλοποίηση αυτού του συστήματος ελέγχου χρειάζεται ένα σύνολο από αισθητήρες, επενεργητές, μηχανικά μέρη, καλωδιώσεις για μετάδοση πληροφοριών και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Όλα αυτά χρειάζεται να δουλεύουν αρμονικά μεταξύ τους και ο αυτόματος πιλότος αναλαμβάνει το ρόλο του διαχειριστή. Πιο συγκεκριμένα έχουμε το σύστημα του πηδαλίου, τους αισθητήρες για τις καιρικές συνθήκες και την κατεύθυνση που ακολουθά το πλοίο, το σύνολο των καλωδιώσεων που επιτρέπει στο σύστημα να επικοινωνεί και τέλος τον ίδιο τον ελεγκτή.

4.2 Πηδάλιο πορείας

Στα συμβατικά πλοία η πηδαλιουχία γίνεται από κινούμενα κάθετα πτερύγια εγκατεστημένα στο πρυμναίο τμήμα του σκάφους. Η κίνηση των πτερυγίων επιτυγχάνεται με χρήση υδραυλικών συστημάτων. Συνεπώς για τον έλεγχο και την τηλεμετρία απαιτούνται αισθητήρες για την μηχανική θέση των πτερυγίων καθώς και για την λειτουργική κατάσταση του συστήματος όπως επίσης ηλεκτρικά ελεγχόμενες βαλβίδες για την εκτέλεση των επιθυμητών κινήσεων από το υδραυλικό σύστημα. Ένα τέτοιο σύστημα είναι το Type - 900 Series Steering System^[3] της εταιρίας Vosper Thornycroft Marine Products Ltd . Αποτελείται από τα πτερύγια , το σύστημα αντλιών ελαίου υψηλής πίεσης, τα υδραυλικά έμβολα, το κιβώτιο ηλεκτρικά ελεγχόμενων υδραυλικών βαλβίδων, το οιακοστρόφιο ανάγκης και τον πίνακα ενδείξεων και χειρισμού στην γέφυρα του πλοίου.



Σχήμα 4.1 : Διάγραμμα βασικών τμημάτων του μηχανισμού πηδαλίου

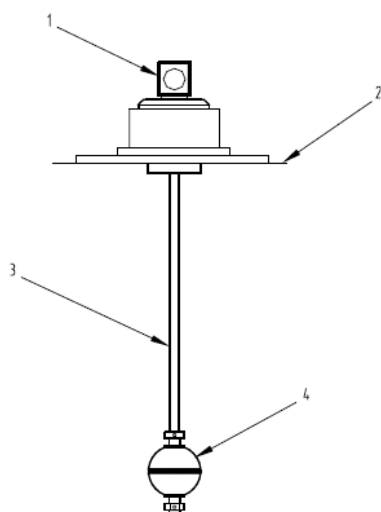
Το σύστημα υδραυλικών αντλιών υψηλής πίεσης αποτελείται από τις δυο αντλίες υψηλής πίεσης, τα δύο ψυγεία απαγωγής θερμότητας από το υδραυλικό έλαιο και το δοχείο ελαίου. Οι ασφαλιστικές διατάξεις υλοποιούνται από ηλεκτρονόμους εντός των εκκινητών των ηλεκτροκίνητων αντλιών και σε αυτές εκτός από τις προστασίες για τον κινητήρα (απώλεια φάσης, υπερένταση, θερμοκρασία κινητήρα) ελέγχονται και οι θερμοκρασία και στάθμη υδραυλικού ελαίου. Τέλος σε αυτή την μονάδα με χρήση μηχανικών ανακουφιστικών βαλβίδων επιτυγχάνεται η προστασία του συστήματος από υψηλές πιέσεις. Τη θερμοκρασία και τη στάθμη του ελαίου τις ελέγχουμε με τους κάτωθι αισθητήρες :

α) Με θερμοστάτη model 471 εταιρίας TRAFAG ρυθμισμένος στους 65°C. Αυτός είναι μηχανικός θερμοστάτης που αποτελείται από ένα μεταλλικό στοιχείο που μεταβάλλει την διάσταση του μήκους του και σε αυτό είναι συνδεδεμένος μηχανικά ένας μικροδιακόπτης.



Εικόνα 4.1 : Θερμοστάτης 471 εταιρίας TRAFAG

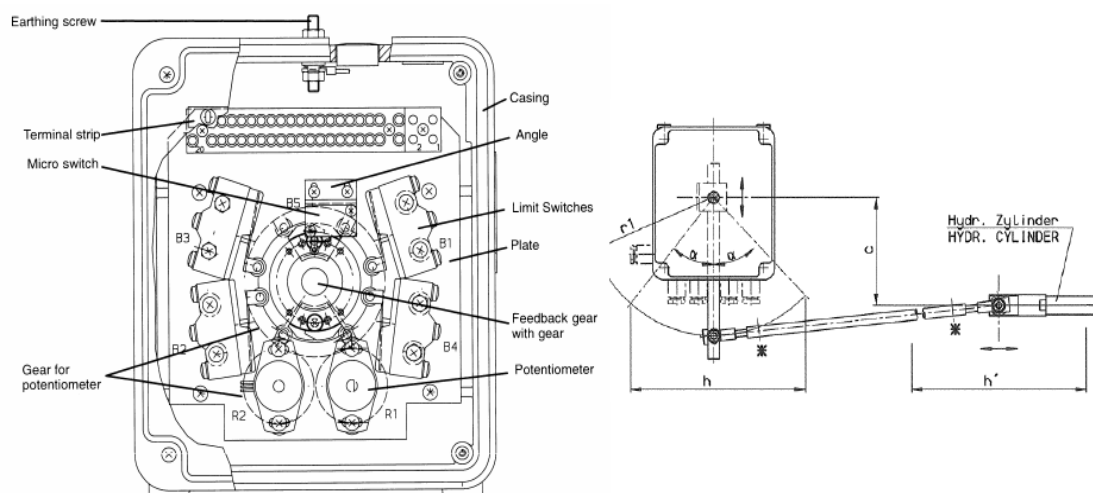
β) Μαγνητικούς πλωτήρες model ls-800E εταιρίας GEM . Είναι τοποθετημένοι εντός της ελαιο-δεξαμενής και ελέγχουν την κατώτερη στάθμη δημιουργώντας σήμα βλάβης σε περίπτωση ενεργοποίησης.



Float Material	316 Stainless Steel		
Compatible Mounting Types	1, 3, 4, 5 (Units $\geq 72^\circ$)	3, 4, 5 (Units $> 72^\circ$)	1, 3, 4
Float Dimensions			
Part Number	14569	15666	138935
Operating Temperature	-40°F to +300°F (-40°C to +148.9°C)		
Min. Media Specific Gravity	.75	.75	.60

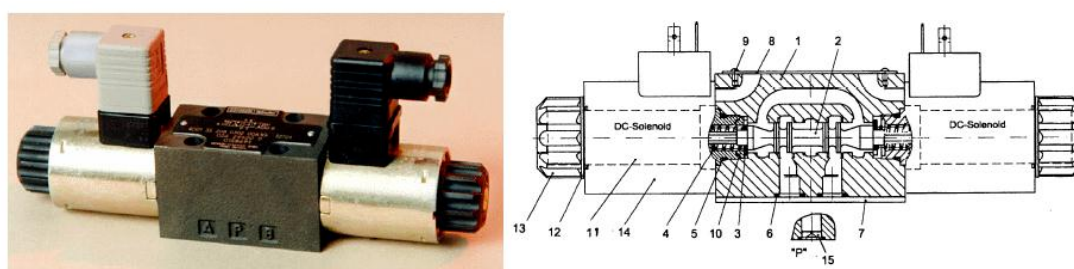
Σχήμα 4.2 : Μαγνητικός πλωτήρας και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά

Για τον έλεγχο των πηδαλίων απαιτείται ένα σήμα εντολής προς την ηλεκτρική βαλβίδα κίνησης και σήματα τηλεμετρίας της θέσης των πτερυγίων. Για την μέτρηση των γωνιών χρησιμοποιούνται αισθητήρες της εταιρίας Raytheon Anschütz τυπου 101D528 που είναι συνδεδεμένοι με χρήση μοχλοβραχίονα με τα πτερύγια. Αυτοί αποτελούνται από ένα ποτενσιόμετρο που στρέφεται από διάταξη γραναζιών για την υποτύπωση της γωνίας και όριο-διακόπτες για τον έλεγχο των μέγιστων ορίων επιτρεπόμενης λειτουργίας των πτερυγίων.



Σχήμα 4.3 : Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα μέτρησης γωνίας

Για τον έλεγχο των πτερυγίων υπάρχει το κιβώτιο βαλβίδων που διαθέτει τους μηχανισμούς προστασίας από υπερπίεση και τις ηλεκτρικά ελεγχόμενες βαλβίδες ελέγχου της ροής ελαίου προς τα έμβολα. Οι ηλεκτρικές βαλβίδες αποτελούνται από το υδραυλικό τμήμα, όπου ένας διαμορφωμένος κύλινδρος ανάλογως της θέσης του απελευθερώνει διαδρόμους και το ηλεκτρικό τμήμα που αποτελείται από δυο αντιδιαμετρικά πηνία. Ανάλογα σε ποιο πηνίο τροφοδοτούμε την τάση, αυτό μετακινεί τον μεταλλικό πυρήνα του, που με την σειρά του μετατοπίζει τον κυλίνδρου του υδραυλικού τμήματος.



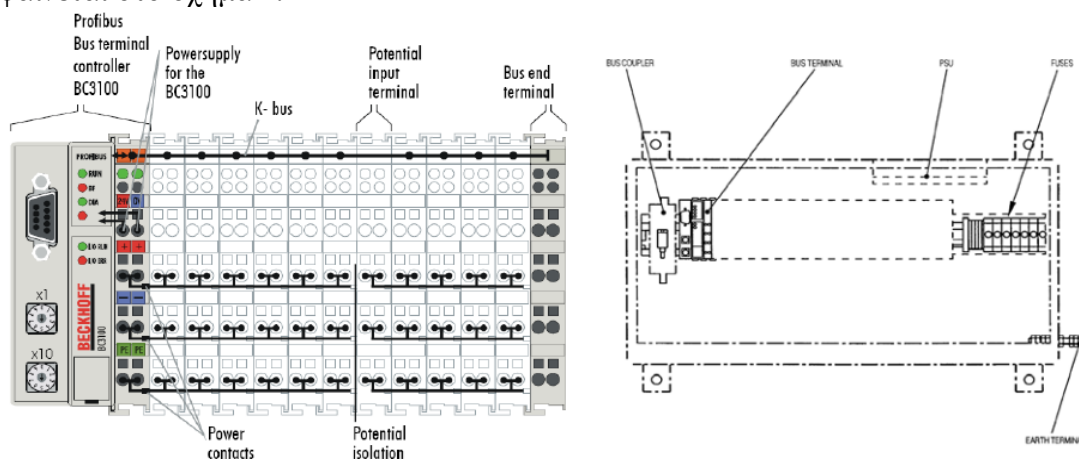
Εικόνα 4.2: Ηλεκτροβαλβίδα ελέγχου εμβόλων πηδαλίου

Η τηλεμετρία του συστήματος πηδαλίου από το κεντρικό σύστημα αφορά την ενημέρωση για της βλάβες που εντοπίζονται από τον αυτοματισμό των εκκινήτων μέσω των ψηφιακών διασυνδέσεων με το τοπικό I/O BOX (In-Out Box). Επίσης ο έλεγχος γίνεται επενεργώντας στους ηλεκτρονόμους του εκκινήτη με σήμα on/off τάσης. Οι ενδείξεις των γωνιών των πηδαλίων στην γέφυρα και τοπικά στο χώρο του πηδαλίου γίνονται από αναλογικούς αυτόνομους ενδείκτες ± 10 Volt DC που ανήκουν σε ξεχωριστό κύκλωμα με ανεξάρτητη τροφοδότηση 24Volt DC από το σύστημα του

πηδαλίου. Αυτό γίνεται καθώς είναι απαίτηση των κανονισμών IMO SOLAS και υλοποιείται με έναν επιπλέον αισθητήρα μέτρησης γωνίας.

Όπως το σύστημα του πηδαλίου, έτσι και τα υπόλοιπα συστήματα του πλοίου έχουν ένα σύνολο αισθητήρων και επενεργητών. Λόγω αυτού έχουμε να διαχειριστούμε ένα σύνολο σημάτων εισόδου από τους αισθητήρες (αναλογικά και ψηφιακά) και ένα σύνολο σημάτων εξόδου στους επενεργητές (αναλογικά και ψηφιακά). Σε αυτό μας βοηθάνε τα I/O Boxes(Input-Output).

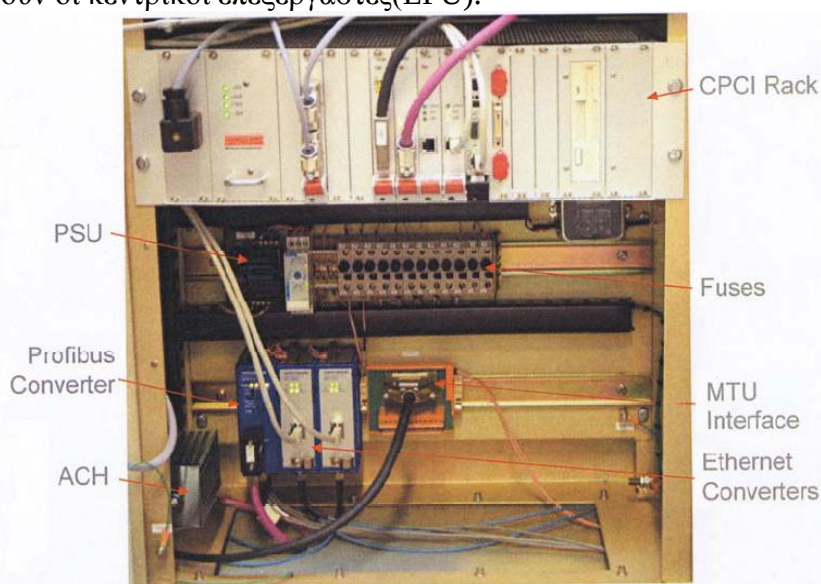
Ένα I/O Box έχει έναν τελικό προσαρμογέα δικτύου (bus terminal controller) και συνδεδεμένες κάρτες διασύνδεσης (input-output bus terminals). Η δομή του φαίνεται στο σχήμα 4.4



Σχήμα 4.4

Ο τελικός προσαρμογέας του συγκεκριμένου παραδείγματος (Bus terminal controller BC3100) χρησιμοποιεί τον τύπο διαύλου επικοινωνίας Profibus-DP. Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε έναν μετατροπέα σε οπτικό σήμα για να χρησιμοποιήσουμε οπτικές ίνες για την μεταφορά των δεδομένων. Αυτό βοηθά τη σύνδεσή μας να είναι ανθεκτική σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Τέτοιοι μετατροπείς κυκλοφορούν στο εμπόριο.

Τα I/O Boxes είναι διάσπαρτα σε όλο το πλοίο. Ενώνονται και οργανώνονται σε δίκτυα, μορφής π.χ.αστέρα ή βρόγχου. Την διαχείριση ενός τέτοιου δικτύου αναλαμβάνουν οι κεντρικοί επεξεργαστές(LPU).



Εικόνα 4.3-LPU κεντρικός επεξεργαστής

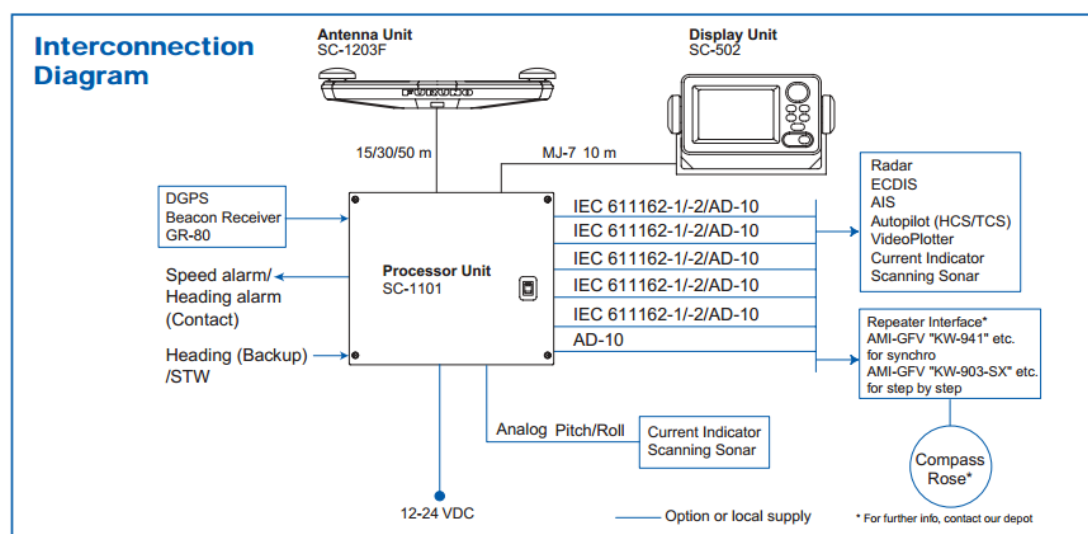
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα της εικόνας 4.3 βλέπουμε έναν υπολογιστή κατασκευάστριας εταιρίας PEP σε διάσταση κιβωτίου 19inch rack και απαρτίζεται από τις κάτωθι μονάδες:

- α. Μονάδα μικροϋπολογιστή CP302
- β. Θύρα εισόδου εξόδου CP380
- γ. Κάρτα δικτύου Ethernet CP340
- δ. Κάρτα διασύνδεσης (RS422) με ελεγκτή κυριών μηχανών CP345
- ε. Κάρτα διασύνδεσης με το Profibus CP351

Στη συνέχεια οι επεξεργαστές LPU επικοινωνούν με σταθμούς εργασίας του πλοίου (π.χ.γέφυρα του πλοίου) όπου και συνδέονται με κάποιον υπολογιστή. Από εκεί το σύστημα επιβλέπεται από το πλήρωμα το οποίο το διαχειρίζεται.

4.3 Δορυφορική πυξίδα

Από τα αρχαία χρόνια που οι άνθρωποι παρατηρούσαν την θέση των αστερισμών περάσαμε στην ανακάλυψη τα πυξίδας,στη χρήση γυροσκοπίου για την πλοήγηση και φτάνουμε στην εποχή μας και τις δορυφορικές πυξίδες που κάνουν χρήση του συστήματος GPS(global positioning system). Οι δορυφορικές πυξίδες δίνουν πλέον λεπτομερείς πληροφορίες για τις ακριβείς συντεταγμένες του πλοίου, για την κατεύθυνσή του,την ταχύτητά του κ.α. Εμείς θα δούμε την δορυφορική πυξίδα Furuno SC-110^[13] και πώς αυτή μπορεί να συνεργαστεί με τον αυτόματο πιλότο. Αποτελείται από την κεραία,τον επεξεργαστή της και μια οθόνη. Τα βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα που παρουσιάζεται και η συνδεσμολογία τους.

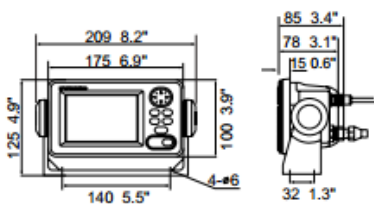
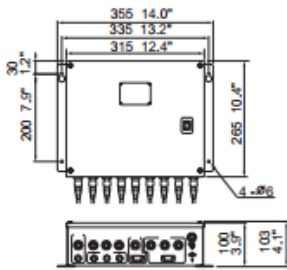
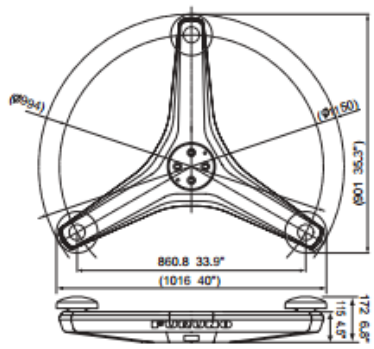


Σχήμα 4.5

Η κεραία λαμβάνει σήματα από τους διάφορους δορυφόρους που αποτελούν το σύστημα GPS τα οποία μεταδίδει στον επεξεργαστή. Αυτός υπολογίζει την ακριβή θέση σε συντεταγμένες και την κατεύθυνση, συνδυάζοντας τα δεδομένα που λαμβάνει. Επίσης υπάρχει και η δυνατότητα υπολογισμού και της κλίσης του καραβιού. Αυτές τις πληροφορίες τις μεταδίδει στην μονάδα της οθόνης. Επίσης, χάρη σε 10 θύρες IEC 61162-1/-2 μπορεί να επικοινωνεί και με άλλα πληροφοριακά συστήματα. Εν προκειμένω μπορεί να δίνει σε έναν υπολογιστή τις συντεταγμένες θέσεως και την κατεύθυνση του πλοίου και να αποτελούν είσοδο για τον αυτόματο

πιλότο μας. Οι συντεταγμένες θα μετατρέπονται σε χιλιομετρικές αποστάσεις με τον τύπο 1.68 και με αρχική συνθήκη την αφετηρία του πλοίου. Εκτός από αυτές έχει ξεχωριστές αναλογικές και ψηφιακές θύρες που δίνουν πληροφορίες για τις γωνίες κατεύθυνσης και κλίσης. Τέλος, διαθέτει εξόδους για έκτακτη ειδοποίηση σε ότι αφορά την ταχύτητα και την κατεύθυνση. Πιο αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 4.1

1. Accuracy Heading: $\pm 0.6^\circ$ (95 % static accuracy) (IMO THD MSC.116(73) static accuracy: $\pm 1.0^\circ \times \sec \text{Lat.}$) GPS: 10 m (95 %) DGPS: 5 m (95 %) 2. Follow-up 25°/s rate-of-turn 3. Settling time 4 min 4. Interface Number of ports 10 ports* 5 ports in AD-10 or 10 ports in IEC 61162-1/-2 * Number of ports is changed by system configuration. 1 port AD-10 only Serial data sentence 25/100/200 ms, 1s data rate: HDT, HDM(Heading), Patt(Pitch, Roll and Yaw), ROT(Rate of turn) 1/2 s data rate: VHW(Heading), VTG, VBW(SOG), GGA, GLL, GNS(L/L), ZDA(UTC), GSA, GSV Log Output 1 port: 200/400 p/nm (closure) Alarm Output 1 port: Alarm signal (closure signal) Heading Input 1 port: Backup Heading (AD-10/IEC 61162-1/-2) HDT, HDG, HDM, VBW, VHW, VLW DGPS Input 1 port: RTCM SC-104 format 5. Receiver Type Twelve discrete channels. C/A code, all-in-view 6. Receive Freq L1 (1575.42 MHz) 7. Display Unit 4.5" diagonal 95 (W) x 60 (H)mm, 120 x 64 pixels 8. Display Mode Steering, Nav Data, Set and Drift, Compass Rose, ROT, Heading POWER SUPPLY 12-24 VDC, 15 W ENVIRONMENTAL IEC 60945 for EMC, Vibration, Temperature EQUIPMENT LIST Standard 1. Display Unit SC-502 1 unit 2. Antenna Unit with 15 m cable SC-1203F 1 unit 3. Processor Unit SC-1101 1 unit 4. Standard Spare Parts, Installation Materials 1 set Optional 1. Antenna Cable, 15 m 20S0336-1, 30 m CP20-01700, 50 m CP20-01710 2. Flush Mount Kit S type CP20-17, F type CP20-29 3. Repeater Interface for synchro or step by step		Display Unit 0.6 kg 1.3 lb 	
		Processor Unit 3.6 kg 7.9 lb 	
		Antenna Unit 6.8 kg 15.0 lb 	

4.4 Ανεμόμετρο

Το ανεμόμετρο είναι απαραίτητο όχι μόνο για ενημέρωση του πληρώματος για τις καιρικές συνθήκες, αλλά φυσικά για να πληροφορεί το σύστημα μας για τα beaufort που πνέουν και ανάλογα να αναλαμβάνει λειτουργία ένας από τους 2 ελεγκτές που έχουμε περιγράψει. Για την εφαρμογή που θέλουμε, δηλαδή για τη λειτουργία του σε πλοίο, και για να καλύψουμε ακραίες καιρικές συνθήκες επιλέγουμε ανεμόμετρο όπως το Intrinsically Safe WindObserver^[14] της Gill Instruments που φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 4.4

Είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ατσάλι, ιδανικό για πλοία και οποιαδήποτε παράκτια κατασκευή (π.χ. πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου). Μετράει ανέμους ταχύτητας 0-75m/s (μέχρι και άνω των 12 beaufort...) και κατευθύνσεων 0°-359°. Χρησιμοποιεί ψηφιακές θύρες RS422 και RS232. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.2

Wind Speed

Range	0 - 75 m/s
Starting Threshold	0.01 m/s
Accuracy	2% @ 12 m/s
Resolution	0.01 m/s
Offset	±0.01 m/s

Direction

Range	0 - 359°
Dead band direction	None
Accuracy	±2° @ 12 m/s
Resolution	1°

Measurement

Ultrasonic Output Range	1Hz
Parameters	Wind Speed and Direction
Units	m/s, knots, MPH, KPH, ft/min
Averaging	3 sec, 5 sec, 10 sec, 15 sec

Digital Output

Communication	RS422 & RS232 from power supply and interface RS422 from Anemometer
Baud Rates	2400, 4800, 9600, 19200, 38400
Formats	8 data, odd, even or no parity
Anemometer status	Supplied as part of standard message

Power Requirement

Power Requirement for PCI	1) 100VAC - 120VAC, 10VA 2) 200VAC - 250VAC, 10VA
---------------------------	--

Mechanical

External Construction	Stainless Steel 316
Size	380mm x 210mm
Weight	1.6kg

Environmental (Anemometer)

Protection Class	IP66
Humidity	0% to 100% RH
Operational Temperature	-30°C to +70°C
Precipitation	300mm/hr
EMC	EN 61000-6-4:2007 Emissions EN 61000-6-1:2007 Immunity

Environmental (Power Supply)

Protection Class	IP65
Humidity	5% to 90% RH
Operational Temperature	-30°C to +40°C
EMC	EN 61000-6-4:2007 Emissions EN 61000-6-1:2007 Immunity

General

Suitable for exposure to a marine environment

Approvals

Power Supply II (1) GD	[Ex ia Ga] IIC [Ex iaD Da] IIIC (Ta = -30°C to +40°C)
Anemometer II 1 GD	Ex ia IIC T4 Ga Ex iaD IIIC T135°C Da IP66 (Ta = -30°C to +70°C)

4.4 Σύνοψη

Το κεφάλαιο αυτό ήταν μια αναλυτική παρουσίαση αναγκαίων εξαρτημάτων και της συνδεσμολογίας τους για τη σωστή λειτουργία ενός συστήματος αυτόματου πιλότου. Όλα τα πλοία διαθέτουν το σύνολο αυτό ούτως ή άλλως, οπότε η εφαρμογή ενός ελεγκτή για αυτόματο πιλότο είναι εύκολη και δυνατή σε κάθε τύπο εμπορικού πλοίου.

Κεφάλαιο 5

Αυτόματος πιλότος και βέλτιστο αποτέλεσμα

5.1 Σύγχρονες οικονομικές και περιβαλλοντικές απαιτήσεις

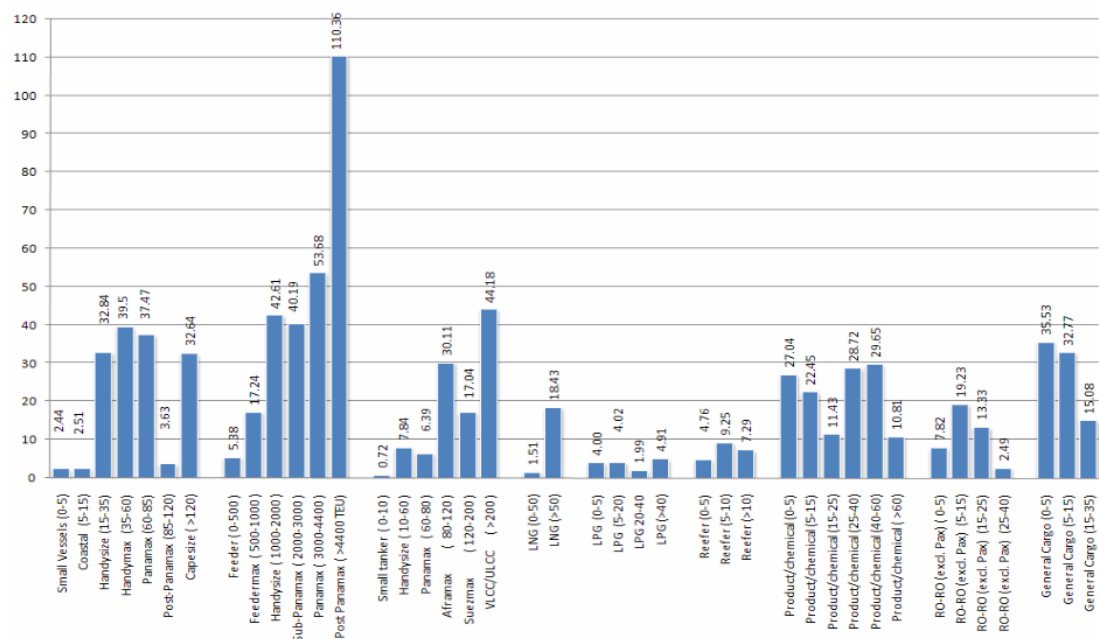
Οι εξελίξεις των τελευταίων ετών στο θέμα της ενεργειακής επάρκειας, η οικονομική κρίση, η εμφάνιση νέων ανταγωνιστών από τις χώρες της Ασίας και της Λατινικής Αμερικής δεν άφησαν ανεπηρέαστο ούτε τον χώρο της ναυτιλίας. Σε ένα ήδη έντονα ανταγωνιστικό επιχειρηματικό κλάδο αναζητούνται λύσεις που θα κάνουν τα ταξίδια οικονομικά αποδοτικότερα. Παράλληλα θα εξασφαλίζουν και τη συμμόρφωση με τους νέους αυστηρούς διεθνείς περιβαλλοντικούς κανονισμούς.

Την μερίδα του λέοντος στην προσπάθεια για μείωση του κόστους ενός ταξιδιού παίρνουν οι προσπάθειες για μείωση της κατανάλωσης καυσίμων. Είναι ένα μέτρο άμεσα εφαρμόσιμο σε κάθε τύπο και κάθε ηλικίας πλοίο στο στόλο της κάθε επιχείρησης, χωρίς κάποιο αρχικό κόστος. Η κύρια μέθοδος είναι απλή. Μείωση της ταχύτητας πλεύσης^[8]. Φυσικά και υπάρχουν κάποιες προϋποθέσεις, όπως το να μην υπάρχουν καθυστερήσεις στην παράδοση των εμπορευμάτων. Για αυτό γίνεται επιτακτική η επιλογή μιας βέλτιστης διαδρομής που να συμβιβάζει αυτές τις απαιτήσεις. Για αυτόν τον σκοπό έχουν αναπτυχθεί προγράμματα που να προτείνουν μια τέτοια διαδρομή.

Όσο για τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (www.imo.org), που τελεί υπό την αιγίδα του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών, έχει εκδόσει αυστηρούς διεθνείς κανονισμούς. Αυτοί είναι οι IMO Tier I, IMO Tier II και IMO Tier III που θα είναι σε πλήρη ισχύ μέχρι το 2016. Αφορούν τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου NO_x ^{[9][10]}, και κατ'επέκταση και των υπολοίπων αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου^[11]. Πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί, δοκιμάζονται και εξετάζονται, οι οποίες θα πετύχουν μείωση των εκπομπών αυτών από τα πλοία. Άλλες αφορούν εγκατάσταση ειδικών μηχανισμών (π.χ. επιλεκτική καταλυτική μείωση-selective catalytic reuction ή SCR), άλλες τροποποιήσεις στους υπάρχοντες κινητήρες (π.χ. έγχυση θαλασσινού νερού στην έξοδο του αεροσυμπιεστή) και άλλες πιο πρακτικές (π.χ. μειωμένη ταχύτητα πλεύσης).

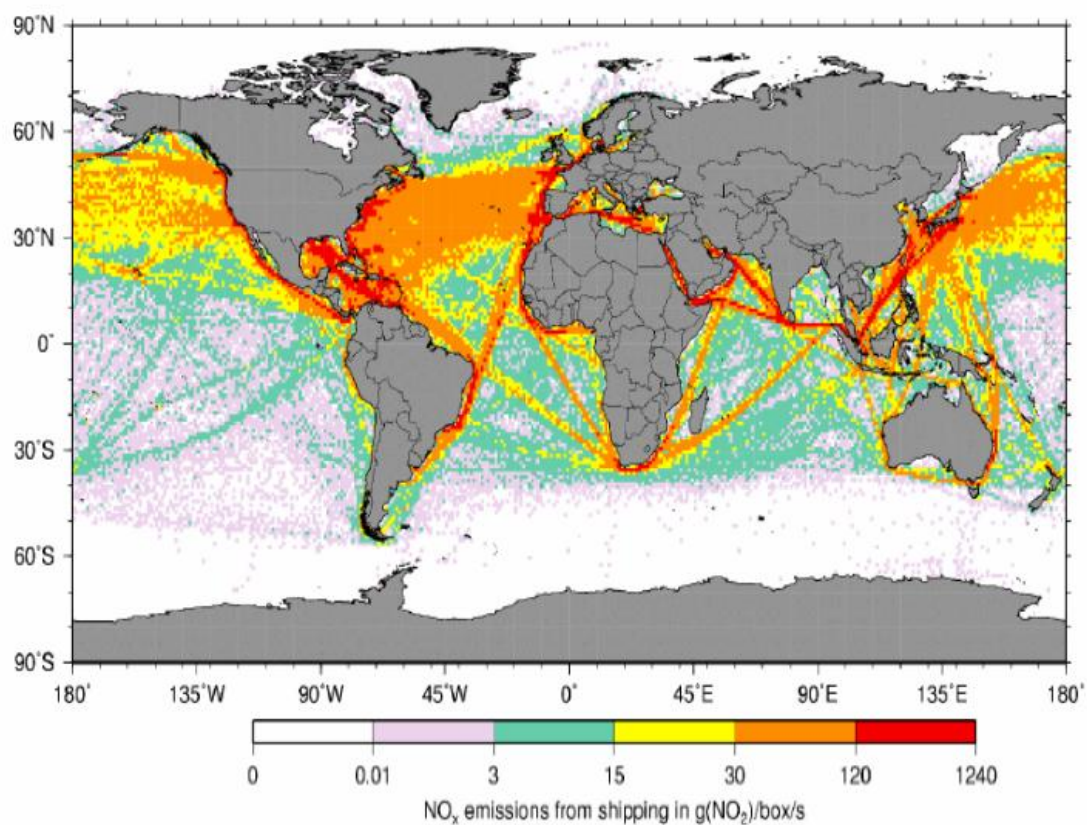
5.2 Αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων

Αναφέραμε τους διεθνείς κανονισμούς IMO Tier I, IMO Tier II και III που επιβάλουν σημαντικές μειώσεις στην εκπομπή ρύπων, κυρίως οξειδίων του αζώτου NO_x και κατ'επέκταση και των υπολοίπων. Το πόσο σημαντικό είναι το πρόβλημα της εκπομπής ρύπων από τα πλοία μας δείχνει το παρακάτω σχήμα, που μας δίνει σε εκατομύρια τόνους τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα CO_2 , από τους διάφορους τύπους πλοίων



Σχήμα 5.1

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται που είναι πιο έντονη η εκπομπή των ρύπων

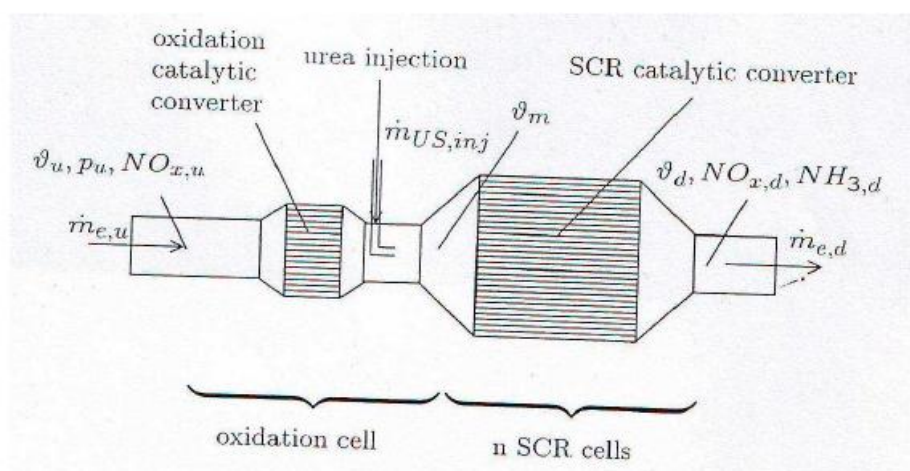


Εικόνα 5.1

5.2.1 Μέθοδοι μείωσης εκπομπής ρύπων

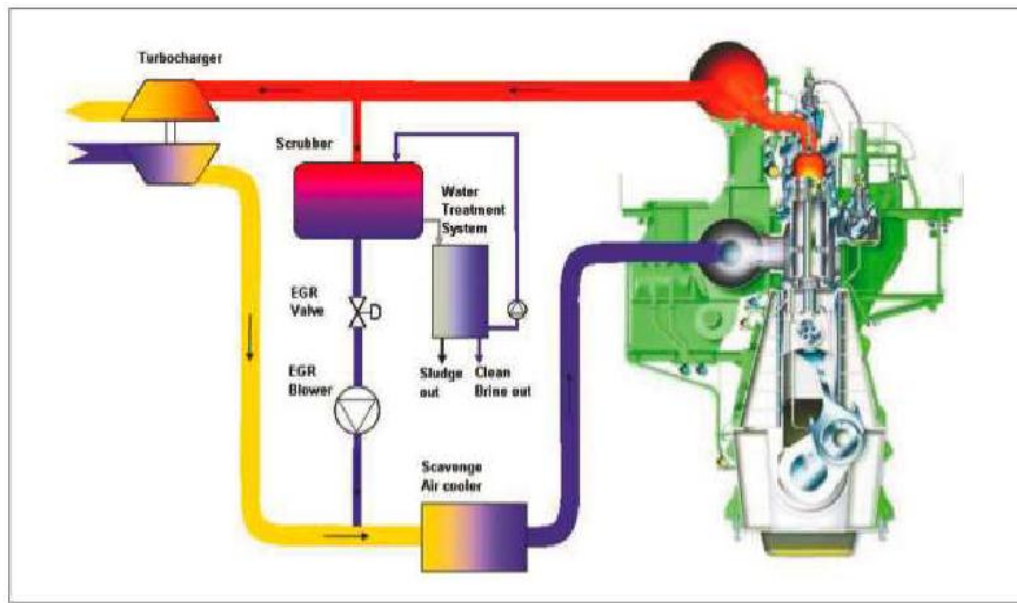
Θα αναφερθούμε επιγραμματικά σε μεθόδους μείωσης των ρύπων. Πρώτα θα μιλήσουμε για εγκατάσταση μηχανισμών^{[10][11]} που βοηθάνε στην κατεύθυνση αυτή. Συγκεκριμένα έχουμε:

- Άμεσος ψεκασμός νερού στον κύλινδρο της μηχανής: μείωση της θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης, μεγαλύτερη πίεση κατά τη διαδικασία της συμπίεσης, γρηγορότερη αύξηση της πίεσης και μεγαλύτερη έκκλιση θερμότητας κατά την ανάφλεξη, περίπου 30% μείωση ρύπων NO_x
- Επιλεκτική καταλυτική μείωση (SCR) με χρήση καταλύτη (ή ψεκασμό ουρίας) που μετατρέπουν τα οξείδια του αζώτου NO_x σε αμμωνία NH_3 : μείωση μέχρι και 95% των ρύπων NO_x



Σχήμα 5.2- Πλήρες σύστημα SCR με δύο καταλυτικούς μετατροπείς και έγχυση ουρίας

- Ανακύκλωση καυσαερίων (EGR) στην εισαγωγή αέρα μειώνει τα επίπεδα οξυγόνου στο μίγμα και αυξάνει την ειδική θερμοχωρητικότητα: επιτυγχάνονται μικρότερες θερμοκρασίες ανάφλεξης μειώνοντας 80% τις εκπομπές ρύπων NO_x αλλά αυξάνεται η κατανάλωση καυσίμου



Σχήμα 5.3-Σύστημα EGR για μηχανή Diesel

Έπειτα έχουμε τροποποιήσεις^{[10][11]} που μπορούν να γίνουν σε έναν κινητήρα για να ρίξουμε τα επίπεδα των οξειδίων του αζώτου.

- Βελτιστοποίηση ψεκασμού καυσίμου: έρευνες πραγματοποιούνται για το πώς η πίεση ψεκασμού, η γεωμετρία των χοάνων ψεκασμού, ο συντονισμός και η συχνότητα ψεκασμού, καθώς και ο συνδυασμός των προηγούμενων, μειώνουν τους ρύπους αυξάνοντας την αποδοτικότητα της καύσης
- Καλύτερη ψύξη του συμπιεσμένου αέρα πριν την είσοδο στον θάλαμο καύσης με ταυτόχρονη αύξηση του λόγου αέρας/καύσιμο: μειώνει τη θερμοκρασία και αυξάνει την πίεση κατά την ανάφλεξη
- Ο κύκλος Miller, μια παραλλαγή του κύκλου Otto: συνδυάζει μικρότερο λόγο συμπίεσης, αυξημένης πίεσης υπερτροφοδότηση, μεταβλητό χρονισμό ψεκασμού και καλύτερη ψύξη του υπερτροφοδοτούμενου αέρα
- Καλύτερη λίπανση με εξειδικευμένα υλικά

Οι εταιρείες παραγωγής κινητήρων, που προορίζονται για πλοία, χρησιμοποιούν συνδυασμούς αυτών των τεχνικών στα νέα τους μοντέλα. Υπάρχουν και κάποιες πρακτικές τεχνικές^[9]. Αναλυτικά

- Καλή συντήρηση της προπέλλας του πλοίου. Από πολυετή χρήση και φθορές μπορεί να αυξήσει μέχρι και 6% την κατανάλωση καυσίμου, λόγω επιπλέον αντιστάσεων που δημιουργούνται.
- Αποφυγή άσχημων καιρικών συνθηκών. Η ανάγκη για μεγαλύτερη ισχύ από τις μηχανές για την πλεύση αυξάνει σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου.
- Συχνός καθαρισμός των υφάλων του πλοίου. Με την οξείδωση και τους θαλάσσιους οργανισμούς που επικάθονται στα ύφαλα του πλοίου η κατανάλωση μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 10%.
- Ειδική επικάλυψη-βαφή για τα ύφαλα του πλοίου. Μειώνει τη συνεκτικότητα, τις τριβές στην επιφάνεια των υφάλων και βοηθά στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμου μέχρι και 5%.
- Χρήση της θερμότητας των καυσαερίων σε λέβητα αεριοστροβίλων που θα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για το πλοίο. Συνολική μείωση κατανάλωσης καυσίμου μέχρι και 8%.

- Μείωση της ταχύτητας πλεύσης. Η πιο διαδεδομένη, αποτελεσματική και απλή μέθοδος μείωσης κατανάλωσης. Με μείωση 10% της ταχύτητας πετυχαίνουμε έως και 20% μείωση στο καύσιμο, με 20% έως και 40% κ.ο.κ. Σημαντικός περιορισμός να μην διαταράσσεται η εφοδιαστική αλυσίδα. Δηλαδή να είμαστε εντός χρονοδιαγραμμάτων. Αυτή την μέθοδο αναπτύσσουμε στη συνέχεια.

5.2.2 Πλεονεκτήματα της μείωσης ταχύτητας πλεύσης

Για να καταλάβουμε το πώς επηρεάζει η μείωση της ταχύτητας^[8] ενός πλοίου την κατανάλωση καυσίμου και τους ρύπους θα πάρουμε κάποιες παραδοχές. Έστω, λοιπόν, ότι έχουμε ένα πλοίο που θα ταξιδέψει από ένα λιμάνι Α σε ένα λιμάνι Β με απόσταση L (nm-nautical miles), μεταφέροντας ένα φορτίο W με σταθερή ταχύτητα U_0 (knots). Οι χρόνοι έχουν ως εξής:

$$\text{Χρόνος ταξιδιού στη θάλασσα: } T_0 = \frac{L}{24 \cdot V_0} \quad (5.1)$$

Χρόνος παραμονής στο λιμάνι: t_0

Με F_0 και f_0 τις καταναλώσεις καυσίμου αντίστοιχα, μετρημένες σε τόνους την ημέρα (tns/day). Η συνολική κατανάλωση καυσίμου FC_0 (tns/day) θα είναι:

$$FC_0 = F_0 \cdot T_0 + f_0 \cdot t_0 \quad (5.2)$$

Τώρα επιλέγουμε μια νέα μειωμένη σταθερή ταχύτητα πλεύσης V . Αυτή θα είναι συναρτήσει της V_0 , δηλαδή $V = a \cdot V_0$, όπου a συντελεστής που ανήκει $0 < a < 1$. Έτσι θα έχουμε αυξημένο χρόνο πλεύσης T , αφού

$$T = \frac{L}{24V} = \frac{T_0}{a} \quad (5.3)$$

Ρεαλιστικές τιμές για το a είναι από 0.95 έως 0.8, δηλαδή μείωση στην ταχύτητα από 5% έως 20%. Η αναλογία κατανάλωσης καυσίμου με την αναλογία ταχυτήτων είναι κυβικής τάξης. Αυτό προκύπτει από τη σχέση κατανάλωσης-ταχύτητας, $F = k \cdot V^3$, έτσι

$$\frac{F}{F_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^3 \quad (5.4)$$

Όπου k γνωστή σταθερά. Η κατανάλωση καυσίμου κατά την παραμονή στο λιμάνι ανά μέρα παραμένει ίδια. Η κατανάλωση αυτή δικαιολογείται από τις ανάγκες για ηλεκτρισμό του πλοίου κ.α. Επιθυμούμε να μειώσουμε την παραμονή αυτή προκειμένου να μην υπερβούμε τον συνολικό χρόνο. Έτσι η συνολική κατανάλωση υπολογίζεται:

$$\Delta(\text{Κατανάλωση καυσίμου}) =$$

$$= \Delta(\text{Κατανάλωση στη θάλασσα}) + \Delta(\text{Κατανάλωση στο λιμάνι})$$

$$=F \cdot T - F_0 \cdot T_0 = f \cdot t - f_0 \cdot t_0 = F \cdot \frac{L}{24 \cdot V} - F_0 \cdot \frac{L}{24 \cdot V_0} + f(t-t_0)$$

$$\text{αφού } V = a \cdot V_0$$

$$= F \cdot \frac{L}{24a \cdot V_0} - F_0 \cdot \frac{L}{24 \cdot V_0} + f(t-t_0) = \left(\frac{F}{a} - F_0 \right) \frac{L}{24V_0} + f(t-t_0)$$

$$\text{επειδή } \frac{F}{F_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^3$$

$$= \frac{L}{24V_0} \cdot \left(\left(\frac{V}{V_0} \right)^3 \frac{F_0}{a} - F_0 \right) + f(t-t_0) = \frac{L}{24V_0} \cdot \left(\left(\frac{a \cdot V_0}{V_0} \right)^3 \frac{F_0}{a} - F_0 \right) + f(t-t_0)$$

και καταλήγουμε στον τύπο

$$\Delta(\text{Κατανάλωση καυσίμου}) = \frac{L}{24V_0} \cdot F_0 \cdot (a^2 - 1) + f(t-t_0) \quad (5.5)$$

Το μόνο πρόβλημα στην παραπάνω μελέτη είναι αν θα μπορεί να μειωθεί ο χρόνος παραμονής στο λιμάνι, καθώς εξαρτάται από πολλούς εξωγενείς παράγοντες. Για παράδειγμα οι υποδομές που διαθέτει ο κάθε λιμένας για το ξεφόρτωμα των φορτίων του πλοίου. Αυτό βέβαια μπορεί να αναπληρωθεί με κάποιες υποχωρήσεις στον συνολικό χρόνο που απαιτείται για το ταξίδι.

Για να βρούμε την αντίστοιχη μείωση για εκπομπές CO₂ θα χρησιμοποιήσουμε τον εμπειρικό συντελεστή F_{CO2}=3.17. Σύμφωνα με μελέτες του IMO (IMO GHG Study,2000) οι τιμές για αυτό το συντελεστή κυμαίνονται από 3.16 έως 3.175. Έτσι, πολλαπλασιάζοντας την 5.5 με τον συντελεστή F_{CO2} έχουμε τη διαφορά σε εκπομπές CO₂

$$\Delta(\text{CO}_2 \text{ Emissions}) = F_{\text{CO}_2} \cdot \frac{L}{24V_0} \cdot F_0 \cdot (a^2 - 1) + f(t-t_0) \quad (5.6)$$

Μπορούμε να διαιρέσουμε τις 5.5 και 5.6 με το παραγόμενο έργο για να δούμε και την αποδοτικότητα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το έργο είναι το γινόμενο του φορτίου W επί την απόσταση L(nm ή km). Οι μονάδες μέτρησης του φορτίου ποικίλουν ανάλογα τον τύπο του πλοίου. Γενικά χρησιμοποιούνται οι τόννοι (ή kg), εκτός από περιπτώσεις όπως τα πλοία μεταφοράς container που χρησιμοποιούν τις μονάδες TEU (twenty feet equivalent feet), τα πλοία μεταφοράς οχημάτων Ro-Ro όπου υπολογίζουμε τα οχήματα κ.ο.κ.

5.3 Προγράμματα Βέλτιστης Δρομολόγησης και η συμβολή του αυτόματου πιλότου

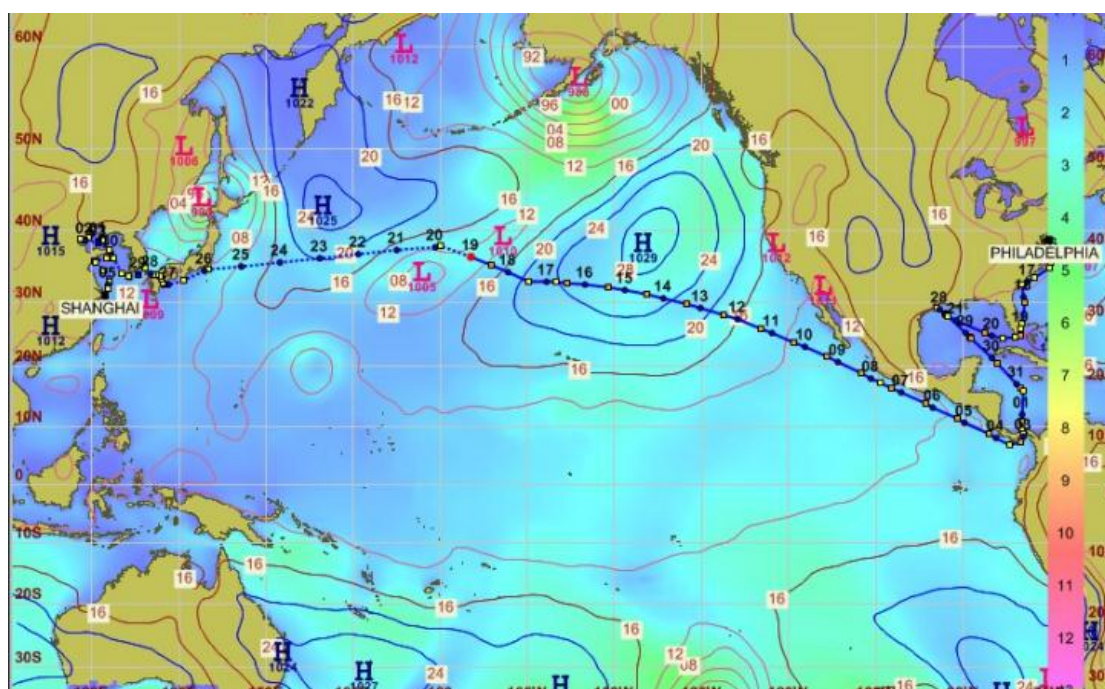
Στο κεφάλαιο 1.4 περιγράψαμε πώς επιλέγεται η πορεία ενός πλοίου για κάποιο ταξίδι. Στην εποχή μας έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται ευρέως, πακέτα λογισμικού που δίνουν αν όχι τη βέλτιστη διαδρομή, ένα σύνολο προτεινόμενων που να καλύπτει κάποιες απαιτήσεις. Παράμετροι που λαμβάνουν υπ'όψιν είναι προκαθορισμένες διεθνείς ναυτικές οδοί, οι καιρικές συνθήκες, η κατανάλωση καυσίμου, η επιθυμητή ταχύτητα πλεύσης, χρονικοί περιορισμοί, λοξοδρομικές καμπύλες κ.α. Η προτεινόμενη πορεία δίνεται ως σημεία με τις συντεταγμένες τους.

Ένα τέτοιο πακέτο λογισμικού είναι το SeaRoutes FOC^[12] (Fuel Optimum Consumption). Και αυτό ξεκινά με βάση όσα προαναφέραμε. Δηλαδή ποια είναι η ελάχιστη απόσταση με βάση τις ορθοδρομικές καμπύλες, η διάρκεια του ταξιδιού υπολογισμένη με μια σταθερή ταχύτητα πλεύσης, οι καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια αυτή και η κατανάλωση καυσίμου.

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου, εκτός από τα δεδομένα της αγοράς, χρησιμοποιεί και μαθηματικά μοντέλα. Με βάση τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής (κατανάλωση, ισχύς) και υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του πλοίου (βύθισμα, αποδοτικότητα προπέλας κ.α.) υπολογίζει κάποιες μέσες τιμές για την αντίσταση από τη θάλασσα και τον αέρα, την συνολική κατανάλωση για τις ανάγκες κίνησης, ηλεκτροδότησης του πλοίου κ.ο.κ. Επίσης, υπολογισμοί γίνονται και για διάφορες ταχύτητες πλεύσης.

Στη συνέχεια, δημιουργεί ένα σύνολο εναλλακτικών διαδρομών. Κάθε διαδρομή αποτελείται από σημεία που παίρνουν τιμές με βάση τα παραπάνω. Έτσι δημιουργούνται γραφήματα. Με αλγόριθμους, όπως ο Dijkstra, επιλέγουμε τις καλύτερες λύσεις. Η βελτιστοποίηση όμως δεν τελειώνει εδώ. Μπορούμε να προσθέσουμε στην εξίσωση και κάποιο κέρδος για εξοικονόμηση χρόνου. Έτσι δημιουργούνται πολλά εναλλακτικά σενάρια. Δεν αναφέρουμε άλλες παραμέτρους όπως περιορισμοί από ζώνες πολέμου, απαγορευμένες περιοχές, μη προσπελάσιμες περιοχές λόγω μικρού βάθους(υφάλους) κ.α., που δεν μπορεί να λάβει υπόψη κάποιο μαθηματικό μοντέλο.

Σε κάθε περίπτωση, ένα τέτοιο πακέτο λογισμικού καταλήγει σε μια καθορισμένη πορεία με συγκεκριμένες συντεταγμένες, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 5.2

Η πορεία έχει διαιρεθεί σε επιμέρους τμήματα με άκρα με συγκεκριμένες συντεταγμένες. Αυτά τα σημεία αναφέρονται και ως waypoints. Αυτά θα αποτελούν και την είσοδο αναφοράς για τον αυτόματο πιλότο.

Ο ελεγκτής μας θα αναλαμβάνει την διατήρηση της βέλτιστης πορείας που επιλέχθηκε. Χάρη σε υψηλής τεχνολογίας συστήματα (όπως το GPS) μπορεί με

ακρίβεια και ασφάλεια να μειώσει δραστικά την απόκλιση από την ορθοδρομική καμπύλη από σημείο σε σημείο, με συνεχείς διορθώσεις, χωρίς να χρειάζεται ανθρώπινη παρέμβαση.

Τέλος, συνεισφέρει και στη διατήρηση μιας σταθερής ταχύτητας. Έτσι με την βοήθεια λογισμικού για την επιλογή διαδρομής και την επιλογή ταχύτητας με βάση όσα είπαμε στο κεφ.5.2.2, ο αυτόματος πιλότος μας βοηθά στους στόχους μας, είτε αυτοί είναι οικονομικοί ή περιβαλλοντικοί.

5.4 Σύνοψη

Η σύγχρονη τεχνολογία και οι καινοτομίες στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές μας επιτρέπουν μέσα από τη συνεργασία συστημάτων να επιτυγχάνουμε τους στόχους μας. Με απλές ιδέες αντιμετωπίζουμε τις προκλήσεις και τις απαιτήσεις που απορρέουν από ένα ανταγωνιστικό παγκοσμιοποιημένο περιβάλλον αλλά και από την υποχρέωση μας για προστασία του φυσικού περιβάλλοντος.

Βιβλιογραφία – Αναφορές

- [1] Guidance and Control of Ocean Vehicles – Thor I.Fossen
- [2] IMO and the safety of bulk carriers (1999) – International Maritime Organization
- [3] Συστήματα τηλεμετρίας πλοίων – Χρήστος Σ.Λύκος
- [4] Vessel Dynamics – United States National Transportation Safety Board
- [5] "Virtues of the Haversine" Sky and Telescope – R.W. Sinnott
- [6] The VNR Concise Encyclopedia of Mathematics – W. Gellert, S. Gottwald, M. Hellwich, H. Kästner, and H. Küstner
- [7] Περί αυτοματισμού – Αναστάσιος Πουλιέζος
- [8] Speed reduction as an emissions' reduction measure for fast ships – Harilaos N. Psaraftis, Christos A. Kontovas, Nikolaos M.P. Kakalis
- [9] Reducing Greenhouse Gas Emissions from Ships – ICCT
- [10] Ship emissions and technical emission reduction potential in the Northern Baltic Sea – Johanna Wahlström, Niko Karvosenoja and Petri Porvari
- [11] Reducing Air Pollution from Ships – Danish Ministry of Environment
- [12] Searoutes FOC : Fuel Optimum Consumption – Takis Varelas, Sofia Archontaki
- [13] Τεχνικό εγχειρίδιο: Furuno Satellite Compass Model SC-110
- [14] Τεχνικό εγχειρίδιο: Intrinsically Safe WindObserver Anemometer, User Manual Doc No. 1360-PS-000, Issue 03 – Gill Instruments
- [15] A Software Tool for Robust PID Design – Olof Garpinger, Tore Hagglund
- [16] Practical tuning of fractional order proportional and integral controller: Tuning rule development – Tripti Bhaskaran, Yang Quan Chen, Dingy Xue

Λογισμικό – Γλώσσα προγραμματισμού: MATLAB

A. sim.m

```
t_f = 1500;           % χρόνος προσομοίωσης (sec)
h   = 0.1;            % χρονικό βήμα (sec)

Kp = 40;              % αναλογικός όρος
Td = 220/Kp;          % διαφορικός όρος
Ti = 0.16/Kp;         % ολοκληρωτικός όρος

x = zeros(7,1);       % αρχικές συνθήκες: x = [ u v r x y psi delta ]'

% --- MAIN LOOP ---
N = round(t_f/h);      % αριθμός μετρήσεων
xout = zeros(N+1,length(x)+8); % τιμές μετρούμενων μεγεθών
U0=5.5;                % ταχύτητα πλοίου (m/s)
Vwind=10.7;            % ταχύτητα ανέμου (m/s)
b=pi/2;                % γωνία ανέμου (rad)
Wwave=0.4*sqrt(9.81/(0.21*((Vwind)^2/9.81))); % κυκλική συχνότητα
% κυματισμού (rad/s)
xc=[0 2000 3000 5000 3000 3000]; % συντεταγμένες X (m)
yc=[0 500 3000 5000 8000 10000]; % συντεταγμένες Y (m)
g=length(xc);          % πλήθος συντεταγμένων
p=160;                 % ακτίνα ελέγχου (m)
j=2;
psi_ref = atan2(yc(2),xc(2)); % αρχική κατεύθυνση
% πορεία (rad)
H=0;
for i=1:N+1,
    time = (i-1)*h;
    r = x(3);           % γωνιακή ταχύτητα
    % στρέψης (rad/s)
    psi = x(6);          % κατεύθυνση (rad)
    H=H+(psi_ref-psi)*h;
    delta = -Kp*((psi-psi_ref)+Td*r-Ti*H); % ελεγκτής PID

    [xdot,U,X,Y,Z,Xnd,Ynd,Znd] = bulk(x,delta,U0,b,Vwind,time);
    % μοντέλο πλοίου
    xout(i,:) = [time,x',U,X,Y,Z,Xnd,Ynd,Znd];
    % τιμές προς παρουσίαση

    x = euler2(xdot,x,h);
    % διαφόριση κατά Euler

    psi_ref=atan2((yc(j)-xout(i,6)),((xc(j)-xout(i,5))));
    % έλεγχος κατεύθυνσης

    if ((xout(i,5)-xc(j))^2+(xout(i,6)-yc(j))^2)<=(p^2)
        % αλλαγή κατεύθυνσης
        if j<g
            psi_ref=atan2((yc(j+1)-yc(j)),(xc(j+1)-xc(j)));
            j=j+1;
        end
    end
end
end
```

```

% time-series
t      = xout(:,1);           %χρόνος(s)
u      = xout(:,2);           %ταχύτητα στον X ως προς U0 (m/s)
v      = xout(:,3);           %ταχύτητα στον Y(m/s)
r      = xout(:,4)*180/pi;    %γωνιακή ταχύτητα(rad/s)
x      = xout(:,5);           %θέση στον X(γεωγραφικό μήκος) (m)
y      = xout(:,6);           %θέση στον X(γεωγραφικό πλάτος) (m)
psi    = xout(:,7)*180/pi;    %κατεύθυνση ως προς τον X(rad)
delta  = xout(:,8)*180/pi;    %γωνία πηδαλίου(rad)
U      = xout(:,9);           %διανυσματική ταχύτητα πλοίου
X      = xout(:,10);          %συνισταμένη δυνάμεων στον X
Y      = xout(:,11);          %συνισταμένη δυνάμεων στον Y
Z      = xout(:,12);          %συνισταμένη δυνάμεων στον Z
Xnd    = xout(:,13);          %συνισταμένη δυνάμεων περιβαλοντικών
διαταραχών στον X
Ynd    = xout(:,14);          %συνισταμένη δυνάμεων περιβαλοντικών
διαταραχών στον Y
Znd    = xout(:,15);          %συνισταμένη δυνάμεων περιβαλοντικών
διαταραχών στον Z

% Γραφήματα

figure(1)
plot(y,x),grid,axis('equal'),xlabel('East'),ylabel('North'),title('Ship position')
hold on
plot(yc,xc,'r')
hold off
figure(2)
subplot(221),plot(t,r),xlabel('time (s)'),title('yaw rate r (deg/s)'),grid
subplot(222),plot(t,U),xlabel('time (s)'),title('speed U (m/s)'),grid
subplot(223),plot(t,psi),xlabel('time (s)'),title('yaw angle \psi (deg)'),grid
subplot(224),plot(t,delta),xlabel('time (s)'),title('rudder angle \delta (deg)'),grid
figure(3)
subplot(231),plot(t,X),xlabel('time (s)'),title('Xd'),grid
subplot(232),plot(t,Y),xlabel('time (s)'),title('Yd'),grid
subplot(233),plot(t,Z),xlabel('time (s)'),title('Zd'),grid
subplot(234),plot(t,Xnd),xlabel('time (s)'),title('Xnd'),grid
subplot(235),plot(t,Ynd),xlabel('time (s)'),title('Ynd'),grid
subplot(236),plot(t,Znd),xlabel('time (s)'),title('Znd'),grid

```

B. bulk.m

```
function [xdot,U,Xd,Yd,Nd,Xnd,Ynd,Nnd] = bulk(x,ui,U0,b,Vwind,time)
% [xdot,U] = bulk(x,ui) επιστρέφει την ταχύτητα U σε m/s και την
παράγωγο
% του διανύσματος x = [ u v r x y psi delta n ]' για φορτηγό πλοίο
μήκους L=160.93 m,
% όπου:
%
% u      = ταχύτητα στον X ως προς U0 (m/s)
% v      = ταχύτητα στον Y (m/s)
% r      = γωνιακή ταχύτητα (rad/s)
% x      = συντεταγμένη στον X (m)
% y      = συντεταγμένη στον Y (m)
% psi    = γωνία κατεύθυνσης ως προς τον X (rad)
% delta  = γωνία πηδαλίου (rad)
%
% Τα ορίσματα είναι :
%
% ui      = εντολή γωνίας πηδαλίου (rad)
% U0      = επιθυμητή ταχύτητα
% b       = γωνία ανέμου(rad)
% Vwind   = ταχύτητα ανέμου(m/s)
% time    = χρόνος

% Έλεγχος διαστάσεων ορισμάτων
if (length(x) ~= 7),error('x-vector must have dimension 7 !'); end
if (length(ui) ~= 1),error('ui must be a scalar input!'); end

% Μεταβλητές κανονικοποίησης
L = 170;
U = sqrt((U0 + x(1))^2 + x(2)^2);

% Αδιάστατες παράμετροι και ορίσματα
delta_c = -ui; % delta_c = -ui ώστε r>0
u      = x(1)/U;
v      = x(2)/U;
r      = x(3)*L/U;
psi    = x(6);
delta  = x(7);

% Παράμετροι,υδροδυναμικοί συντελεστές και κύριες διαστάσεις
delta_max = 35; % μέγιστη γωνία πηδαλίου (deg)
Ddelta_max = 5; % μέγιστη γωνιακή ταχύτητα πηδαλίου (deg/s)

m = 798e-5;
Iz = 39.2e-5;
xG = -0.023;

%Μοντέλο Abkowitz

Xudot = -42e-5; Yvdot = -748e-5; Nvdot = 4.646e-5;
Xu      = -184e-5; Yrdot = -9.354e-5; Nrdot = -43.8e-5;
Xuu     = -110e-5; Yv      = -1160e-5; Nv      = -264e-5;
Xuuu    = -215e-5; Yr      = -499e-5; Nr      = -166e-5;
Xvv     = -899e-5; Yvvv    = -8078e-5; Nvvv    = 1636e-5;
Xrr     = 18e-5; Yvvr     = 15356e-5; Nvvr     = -5483e-5;
```



```

Xdd = -95e-5; Yvu = -1160e-5; Nvu = -264e-5;
Xudd = -190e-5; Yru = -499e-5; Nru = -166e-5;
Xrv = 798e-5; Yd = 278e-5; Nd = -139e-5;
Xvd = 93e-5; Yddd = -90e-5; Nddd = 45e-5;
Xuvd = 93e-5; Yud = 556e-5; Nud = -278e-5;
      Yuud = 278e-5; Nuud = -139e-5;
      Yvdd = -4e-5; Nvdd = 13e-5;
      Yvvd = 1190e-5; Nvvd = -489e-5;
      Y0 = -4e-5; N0 = 3e-5;
      Y0u = -8e-5; N0u = 6e-5;
      Y0uu = -4e-5; N0uu = 3e-5;

m11 = m-Xudot;
m22 = m-Yvdot;
m23 = m*xG-Yrdot;
m32 = m*xG-Nvdot;
m33 = Iz-Nrdot;

if abs(delta_c) >= delta_max*pi/180,
    delta_c = sign(delta_c)*delta_max*pi/180;
end
delta_dot = delta_c - delta;
if abs(delta_dot) >= Ddelta_max*pi/180,
    delta_dot = sign(delta_dot)*Ddelta_max*pi/180;
end

% Συνισταμένες δυνάμεων χωρίς περιβαλλοντικές διαταραχές
X = Xu*u + Xuu*u^2 + Xuuu*u^3 + Xvv*v^2 + Xrr*r^2 + Xrv*r*v +
Xdd*delta^2 + ...
    Xudd*u*delta^2 + Xvd*v*delta + Xuvd*u*v*delta;
Xnd=X;
Y = Yv*v + Yr*r + Yvvv*v^3 + Yvvr*v^2*r + Yvu*v*u + Yru*r*u +
Yd*delta + ...
    Yddd*delta^3 + Yud*u*delta + Yuud*u^2*delta + Yvdd*v*delta^2 +
...
    Yvvd*v^2*delta + (Y0 + Y0u*u + Y0uu*u^2);
Ynd=Y;
N = Nv*v + Nr*r + Nvvv*v^3 + Nvvr*v^2*r + Nvu*v*u + Nru*r*u +
Nd*delta + ...
    Nddd*delta^3 + Nud*u*delta + Nuud*u^2*delta + Nvdd*v*delta^2 +
...
    Nvvd*v^2*delta + (N0 + N0u*u + N0uu*u^2);
Nnd=N;

%Συνισταμένες δυνάμεις περιβαλλοντικών διαταραχών

Vr=sqrt((Vwind*cos(b)-U*cos(psi))^2+(Vwind*sin(b)-U*sin(psi))^2);
%σχετική ταχύτητα πλοίου ανέμου
[Xwind,Ywind,Nwind]=windforce(b-psi,Vr,171,23,1200,500,180,180,80,2);
[Xwave,Ywave,Nwave]=waveforces(Vwind,1014,22,160,8,U,b,time,psi);

Fx=Xwind+Xwave;
Fy=Ywind+Ywave;
Fn=Nwind+Nwave;

%Κανονικοποίηση περιβαλλοντικών διαταραχών

Xd=((0.079*Fx)/(U^2))*(1e-6);
Yd=(108*Fy-Fx*sin(psi))/(730e6*(U^2));
Nd=((0.009*cos(psi)-0.04)*Fy-0.009*sin(psi)*Fx)/(2.26e6*(U^2));

```

```

%Συνολικές συνισταμένες

X=X+Xd;
Y=Y+Yd;
N=N+Nd;

%Αποτελέσματα

detM22 = m22*m33-m23*m32;

xdot = [
            X*(U^2/L)/m11
        - (-m33*Y+m23*N)*(U^2/L)/detM22
        (-m32*Y+m22*N)*(U^2/L^2)/detM22
        (cos(psi)*(U0/U+u)-sin(psi)*v)*U
        (sin(psi)*(U0/U+u)+cos(psi)*v)*U
            r*(U/L)
        delta_dot
];
end

```

Γ. waveforces.m

```

function [Xw,Yw,Nw]=waveforces(V,P,B,L,T,U,b,t,psi)
%H συνάρτηση αυτή επιστρέφει τις δυνάμεις που ασκούν οι άνεμοι στους
3
%άξονες.Τα ορίσματα είναι:
%
%V:ταχύτητα ανέμου(m/s)
%P:πυκνότητα θαλάσσιου νερού(kg/m3)
%B:μέγιστο πλάτος πλοίου(m)
%L:ολικό μήκος(m)
%T:βύθισμα(m)
%U:ταχύτητα πλοίου(m/s)
%b:κατεύθυνση ανέμου(m/s)
%t:χρόνος προσομοίωσης(s)
%psi:γωνία κατεύθυνσης(rad)
w=(0:0.01:1);
S=wavespec(2,V,w',0);
Xw=0;
Yw=0;
Nw=0;
for i=1:100
    A(i)=sqrt(2*S(i)*0.01);
    k(i)=w(i)^2/9.81;
    we(i)=w(i)-(w(i)^2/9.81)*U*cos(b-psi);
    z(i)=A(i)*cos(we(i)*t);
    s(i)=A(i)*k(i)*sin(we(i)*t);
end
for i=1:100
    x(i)=P*9.81*B*L*T*cos(b-psi)*s(i);
    y(i)=-P*9.81*B*L*T*sin(b-psi)*s(i);
    n(i)=(1/24)*P*9.81*B*L*(L^2-B^2)*sin(2*(b-psi))*(z(i)^2);
end
for i=2:100
    Xw=Xw+x(i);
    Yw=Yw+y(i);
    Nw=Nw+n(i);
end
end

```

Δ. windforce.m

```
function [tauX,tauY,tauN] =
windforce(gamma_r,V_r,L,B,A_L,A_T,A_SS,S,C,M)
% [w_wind,cx,cy,cn] = windforce(gamma_r,V_r,L,B,A_L,A_T,A_SS,S,C,M)
% επιστρέφει τις συνισταμένες δυνάμεις [tauX,tauY,tauN] που ασκούν οι
άνεμοι στο πλοίο
% σύμφωνα με τους τύπους του Isherwood (1972).
%
% Ορίσματα:
%
% gamma_r = σχετική γωνία πλεύσης ανέμου (rad)
% V_r      = σχετική ταχύτητα ανέμου-πλοίου (m/s)
% L        = ολικό μήκος (m)
% B        = μέγιστο πλάτος (m)
% A_L      = πλευρική εκτεθειμένη επιφάνεια (m^2)
% A_T      = διαμήκης εκτεθειμένη επιφάνεια (m^2)
% A_SS     = εκτεθειμένη επιφάνεια υπερκατασκευής (m^2)
% S        = περίμετρος εκτεθειμένης επιφάνειας (m)
% C        = απόσταση κέντρου πλευρικής εκτεθειμένης επιφάνειας από
την πλώρη (m)
% M        = αριθμός διακριτών τμημάτων

if nargin~=10, error('the number of inputs must be 10');end

% μετατροπές και σταθερές
rho_a = 1.224;           % πυκνότητα αέρα στους 20C
gamma_r = gamma_r*(180/pi); % rad2deg

if (gamma_r<0)&&(gamma_r>=-180)
    gamma_r=-gamma_r;
end
if gamma_r>=180
    gamma_r=-(-360+gamma_r);
end
if gamma_r<-180
    gamma_r=360+gamma_r;
end

% CX_data = [gamma_r    A0  A1  A2  A3  A4  A5  A6  ]
CX_data= [...
0    2.152    -5.00    0.243    -0.164    0        0        0
10   1.714    -3.33    0.145    -0.121    0        0        0
20   1.818    -3.97    0.211    -0.143    0        0        0.033
30   1.965    -4.81    0.243    -0.154    0        0        0.041
40   2.333    -5.99    0.247    -0.190    0        0        0.042
50   1.726    -6.54    0.189    -0.173    0.348    0        0.048
60   0.913    -4.68    0        -0.104    0.482    0        0.052
70   0.457    -2.88    0        -0.068    0.346    0        0.043
80   0.341    -0.91    0        -0.031    0        0        0.032
90   0.355    0        0        0        -0.247    0        0.018
100  0.601    0        0        0        -0.372    0        -0.020
110  0.651    1.29    0        0        -0.582    0        -0.031
120  0.564    2.54    0        0        -0.748    0        -0.024
130  -0.142    3.58    0        0.047    -0.700    0        -0.028
140  -0.677    3.64    0        0.069    -0.529    0        -0.032
150  -0.723    3.14    0        0.064    -0.475    0        -0.032
160  -2.148    2.56    0        0.081    0        1.27    -0.027
170  -2.707    3.97    -0.175    0.126    0        1.81    0
180  -2.529    3.76    -0.174    0.128    0        1.55    0    ];
```

```

% CY_data = [gamma_r B0 B1 B2 B3 B4 B5 B6]
CY_data = [...
0 0 0 0 0 0 0
10 0.096 0.22 0 0 0 0
20 0.176 0.71 0 0 0 0
30 0.225 1.38 0 0.023 0 -0.29 0
40 0.329 1.82 0 0.043 0 -0.59 0
50 1.164 1.26 0.121 0 -0.242 -0.95 0
60 1.163 0.96 0.101 0 -0.177 -0.88 0
70 0.916 0.53 0.069 0 0 -0.65 0
80 0.844 0.55 0.082 0 0 -0.54 0
90 0.889 0 0.138 0 0 -0.66 0
100 0.799 0 0.155 0 0 -0.55 0
110 0.797 0 0.151 0 0 -0.55 0
120 0.996 0 0.184 0 -0.212 -0.66 0.34
130 1.014 0 0.191 0 -0.280 -0.69 0.44
140 0.784 0 0.166 0 -0.209 -0.53 0.38
150 0.536 0 0.176 -0.029 -0.163 0 0.27
160 0.251 0 0.106 -0.022 0 0 0
170 0.125 0 0.046 -0.012 0 0 0
180 0 0 0 0 0 0 0];

```

```

% CN_data = [gamma_r C0 C1 C2 C3 C4 C5]
CN_data = [...
0 0 0 0 0 0
10 0.0596 0.061 0 0 0 -0.074
20 0.1106 0.204 0 0 0 -0.170
30 0.2258 0.245 0 0 0 -0.380
40 0.2017 0.457 0 0.0067 0 -0.472
50 0.1759 0.573 0 0.0118 0 -0.523
60 0.1925 0.480 0 0.0115 0 -0.546
70 0.2133 0.315 0 0.0081 0 -0.526
80 0.1827 0.254 0 0.0053 0 -0.443
90 0.2627 0 0 0 0 -0.508
100 0.2102 0 -0.0195 0 0.0335 -0.492
110 0.1567 0 -0.0258 0 0.0497 -0.457
120 0.0801 0 -0.0311 0 0.0740 -0.396
130 -0.0189 0 -0.0488 0.0101 0.1128 -0.420
140 0.0256 0 -0.0422 0.0100 0.0889 -0.463
150 0.0552 0 -0.0381 0.0109 0.0689 -0.476
160 0.0881 0 -0.0306 0.0091 0.0366 -0.415
170 0.0851 0 -0.0122 0.0025 0 -0.220
180 0 0 0 0 0 0];

```

```

% interpolate in the tables
A0 = interp1(CX_data(:,1),CX_data(:,2),gamma_r);
A1 = interp1(CX_data(:,1),CX_data(:,3),gamma_r);
A2 = interp1(CX_data(:,1),CX_data(:,4),gamma_r);
A3 = interp1(CX_data(:,1),CX_data(:,5),gamma_r);
A4 = interp1(CX_data(:,1),CX_data(:,6),gamma_r);
A5 = interp1(CX_data(:,1),CX_data(:,7),gamma_r);
A6 = interp1(CX_data(:,1),CX_data(:,8),gamma_r);

B0 = interp1(CY_data(:,1),CY_data(:,2),gamma_r);
B1 = interp1(CY_data(:,1),CY_data(:,3),gamma_r);
B2 = interp1(CY_data(:,1),CY_data(:,4),gamma_r);
B3 = interp1(CY_data(:,1),CY_data(:,5),gamma_r);
B4 = interp1(CY_data(:,1),CY_data(:,6),gamma_r);
B5 = interp1(CY_data(:,1),CY_data(:,7),gamma_r);

```

```

B6 = interp1(CY_data(:,1),CY_data(:,8),gamma_r);

C0 = interp1(CN_data(:,1),CN_data(:,2),gamma_r);
C1 = interp1(CN_data(:,1),CN_data(:,3),gamma_r);
C2 = interp1(CN_data(:,1),CN_data(:,4),gamma_r);
C3 = interp1(CN_data(:,1),CN_data(:,5),gamma_r);
C4 = interp1(CN_data(:,1),CN_data(:,6),gamma_r);
C5 = interp1(CN_data(:,1),CN_data(:,7),gamma_r);

% wind coeffisients
cx = A0 + A1*2*A_L/L^2 + A2*2*A_T/B^2 + A3*(L/B) + A4*(S/L) +
A5*(C/L) + A6*M;
cy = -(B0 + B1*2*A_L/L^2 + B2*2*A_T/B^2 + B3*(L/B) + B4*(S/L) +
B5*(C/L) + B6*A_SS/A_L);
cn = -(C0 + C1*2*A_L/L^2 + C2*2*A_T/B^2 + C3*(L/B) + C4*(S/L) +
C5*(C/L));

if (gamma_r<0)&&(gamma_r>=-180)
    cy=-cy;
end
if gamma_r>=180
    cy=-cy;
end

% wind forces and moment
tauX = 0.5*cx*rho_a*V_r^2*A_T;
tauY = 0.5*cy*rho_a*V_r^2*A_L;
tauN = 0.5*cn*rho_a*V_r^2*A_L*L;
end

```

E. wavespectrum.m

```

function S = wavespectrum(P,W)
%Υπολογίζει για συγκεκριμένο φάσμα κυκλικής συχνότητας τις
%αντίστοιχες τιμές της φασματικής πυκνότητας σύμφωνα με το μοντέλο
%Pierson-Maskowitz
%
%Ορίσματα:
%
% P          - Ταχύτητα ανέμου
% W          - Τιμές κυκλικής συχνότητας [rad/s]
%Επιστρέφει:
% S          - Τιμές φασματικής πυκνότητας [m^2 s]

S=[];
[m,n] = size(W);
if n>m
    disp('Error: W must be a column vector')
    return
end

Vwind20 = P;
A=8.1e-3*9.81^2;
B=0.74*(9.81/Vwind20)^4;
for k=1:length(W),
    Sa=A*W(k)^(-5)*exp(-B/(W(k)^4));
    S=[S;Sa];
end
end

```

ΣΤ. euler2.m

```
function xnext = euler2(xdot,x,h)
% Ολοκληρώνει συστήμα συνήθων διαφορικών εξισώσεων
% σύμφωνα με την μέθοδο του Euler 2ας τάξης
%
% xnext = euler2(xdot,x,h)
%
% xdot - dx/dt(k) = f(x(k))
% x      - x(k)
% xnext - x(k+1)
% h      - μέγεθος βήματος
%
% Author:   Thor I. Fossen

xnext = x + h*xdot;
```