



**ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ**

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ  
ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

ΜΙΧΟΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ,

Δρ. ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ Τ.Ε.*

ΙΟΥΝΙΟΣ 2017

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ Τ.Ε.  
Π. ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 12244 ΑΙΓΑΛΕΙΩ , ΑΘΗΝΑ – ΕΛΛΑΔΑ  
Τηλ. 210-5381488

# Περίληψη

Σε αυτή την πτυχιακή θα ερευνηθεί η ιδέα σχεδιασμού ελέγχου της λειτουργίας των πτερυγίων καμπυλότητας σε λεπίδες ανεμογεννητριών. Μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση τέτοιων πτερυγίων είναι δυνατόν να επιφέρει μεγάλη μείωση στα αναπτυσσόμενα φορτία που επιδρούν στις λεπίδες και στον ρότορα μιας ανεμογεννήτριας από την χαοτική συμπεριφορά του ανέμου. Επιπλέον με την συνεχή αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών, η λύση των πτερυγίων γίνεται ολοένα και πιο ελκυστική σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές ενεργού ελέγχου ροής ανέμου, που απαιτούν την κίνηση ολόκληρων των φτερών ή του ρότορα. Το μεγαλύτερο εμπόδιο στην μετάβαση τους από το ερευνητικό στάδιο στην βιομηχανία είναι η υψηλή απαιτητικότητα για ακρίβεια, αφού μια αλλαγή στην γωνία κλίσης των πτερυγίων αποφέρει σχετικά μεγάλη αλλαγή στην γωνία προσβολής των λεπίδων. Μια λανθασμένη αύξηση κατά μόνο δύο μοίρες μπορεί να προκαλέσει απώλεια στήριξης της ανεμογεννήτριας κάτι που αν διαρκέσει αρκετά υπό συγκεκριμένες συνθήκες επιφέρει την καταστροφή της (stall effect). Για την απόκτηση της επιθυμητής απόκρισης, η ανάπτυξη του ελέγχου θα εστιάσει σε ελεγκτές τριών όρων PID, καθώς τέτοιες τεχνικές έχουν δείξει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε πρώιμες μελέτες. Η ερευνητική προσέγγιση θα πραγματοποιηθεί στο πολυτεχνείο του Βερολίνου με σκοπό την εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ερευνητικής ανεμογεννήτριας για την ανάπτυξη και την δοκιμή του ελεγκτή. Αφού προσεγγιστεί η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος διαφορετικοί PID ελεγκτές θα δοκιμαστούν για την αποτελεσματικότητά τους σε διαφορετικά περιβάλλοντα διαταραχής. Στην συνέχεια θα γίνει μια προσπάθεια για την γενίκευση των αποτελεσμάτων σε συνθήκες ρεαλιστικού περιβάλλοντος.

# Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και μέντορα Νικολάου Γρηγόρη για την διαρκή υποστήριξη, καθοδήγηση και πίστη που δείχνει σε μένα τα τελευταία χρόνια. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ομάδας 'Αιολικής Ενέργειας' του πολυτεχνείου του Βερολίνου και ιδιαίτερα τον Πεχλιβανόγλου Γιώργο για τις ευκαιρίες που μου έδωσε, τον *Sirko Bartholomay* για τον εξαιρετικά εκτελεσμένο ρόλο του ως επόπτη της κινητικότητας μου στην Γερμανία και τον *Jörg Alber* για την υποστήριξη εντός και εκτός του Πανεπιστημίου. Θα είμαι πάντα ευγνώμων για την πολύτιμη συμβολή σας.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>9</b>
1.1	Ανεμογενήτριες . . . . .	9
1.2	Υπάρχοντα Προβλήματα . . . . .	9
1.3	Σκοπός της Πτυχιακής . . . . .	10
1.4	Μεθοδολογία . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Βιβιογραφική Επισκόπηση</b>	<b>11</b>
2.1	Αεροτομική Επιφάνεια . . . . .	11
2.2	Ενεργός Έλεγχος Ροής . . . . .	13
2.2.1	Μεθόδοι Ενεργού Ροής . . . . .	13
2.2.2	Συσκευές Ενεργού Ελέγχου . . . . .	14
2.2.3	Παραδοσιακά Πτερύγια Καμπυλότητας . . . . .	16
2.3	Ψηφιακή Επεξεργασία Σημάτων . . . . .	17
2.3.1	Μετασχηματισμός Fourier . . . . .	17
2.3.2	Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier ( <i>DFT</i> ) . . . . .	17
2.3.3	Φασματική Ανάλυση . . . . .	18
2.4	Δυναμικά Συστήματα . . . . .	19
2.4.1	Κατασκευή Μοντέλου . . . . .	19
2.4.2	Αναγνώριση Συστήματος . . . . .	20
2.4.3	Χρονοσειρές . . . . .	21
2.4.4	Ανάλυση Χρονοσειράς . . . . .	21
2.4.5	Γραμμικά Χρονικά αμετάβλητα Μοντέλα ( <i>LTI</i> ) . . . . .	21
2.4.6	Μοντέλα Χώρου Κατάστασης . . . . .	22
2.5	Έλεγχος . . . . .	24
2.5.1	Τεχνικές ελέγχου . . . . .	25
2.5.2	Στόχοι Ρύθμισης Κερδών . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Εξοπλισμός</b>	<b>29</b>
3.1	Αεροδυναμική Σήραγγα . . . . .	29
3.2	Ερευνητική Ανεμογεννήτρια του Βερολίνου . . . . .	31
3.3	Ευφυής Λεπίδα . . . . .	32
3.3.1	Πτερύγια Καμπυλότητας . . . . .	32
3.3.2	Ενεργοποιητές . . . . .	32
3.3.3	Μετρητές Μηχανικής Τάσης . . . . .	33
3.4	Φίλτρα . . . . .	34

---

<b>4</b>	<b>Μεθοδολογία</b>	<b>35</b>
4.1	Συλλογή Δεδομένων . . . . .	36
4.2	Επεξεργασία του Σήματος . . . . .	36
4.3	Αναγνώριση Συστήματος . . . . .	39
4.4	Σχεδιασμός του Ελεγκτή . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα</b>	<b>44</b>
5.1	Καθολική Αλλαγή Ταχύτητας Εισροής . . . . .	45
5.2	Τοπική Ριπή . . . . .	49
5.3	Λάθη στην γωνία εκτροπής . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα - Μελλοντική Έρευνα</b>	<b>58</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Αιολικό πάρκο . . . . .	9
2.1	Βασική κατασκευή Αεροτομής και χαρακτηριστικοί παράγοντες . . . . .	11
2.2	Γραφική παράσταση του συντελεστή άντωσης (μπλε) και του συντελεστή οπισθέλκουσας (κόκκινο) σε σύγκριση με την γωνία προσβολής AoA. . . . .	13
2.3	Ρυθμίσεις στην καμπύλη άντωσης μέσω τεχνικών ελέγχου ροής, α) Συσκευές ΔΣ, β) Συσκευές $I/D$ . . . . .	15
2.4	Φάσμα φάσης και φάσμα πλάτους ενός σήματος . . . . .	19
2.5	Μπλοκ διάγραμμα Συστήματος με είσοδο $u$ έξοδο $y$ και διαταραχή $d$ . . . . .	19
2.6	Μπλοκ διάγραμμα που αντιπροσωπεύει τον στόχο της μεθόδου αναγνώρισης συστημάτων . . . . .	20
2.7	Μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου . . . . .	24
2.8	Απόκριση Συστήματος με περιγραφή των χαρακτηριστικών στοιχείων . . . . .	26
3.1	3-D Cad σχέδιο του Τούνελ που βρίσκεται στο Πολυτεχνείο του Βερολίνου . . . . .	29
3.2	Η ανακαινισμένη σήραγγα για την φιλοξενία της πειραματικής ανεμογεννήτριας . . . . .	30
3.3	3-D Cad σχέδιο της ερευνητικής ανεμογεννήτριας μέσα στην αεροδυναμική σύραγγα . . . . .	31
3.4	Εσωτερικό κύκλωμα του κινητήρα-σέρβο . . . . .	32
3.5	Φύλλο λειτουργίας των σέρβο-κινητήρων . . . . .	32
3.6	Wheatstone Bridge . . . . .	33
3.7	Ευφυής Λεπίδα . . . . .	33
3.8	Διάταξη Φίλτρων . . . . .	34
4.1	Μπλοκ διάγραμμα συστήματος κλειστού βρόχου . . . . .	35
4.2	Πείραμα με τυχαία βηματική ακολουθία στην είσοδο του συστήματος . . . . .	36
4.3	Ανάλυση συχνοτήτων σήματος μηχανικής τάσης . . . . .	37
4.4	Γραφικές παραστάσεις των φίλτρων στο πεδίο συχνοτήτων . . . . .	38
4.5	Αποτέλεσμα επεξεργασίας του σήματος . . . . .	38
4.6	Σύγκριση πειραματικής και προσομοιωμένης απόκρισης . . . . .	41
4.7	Γραφικό εργαλείο υπολογισμού των κερδών του ελεγκτή . . . . .	43
5.1	Προσομοιωμένη διαταραχή . . . . .	45
5.2	Αποτελέσματα επιθετικής απόρριψης διαταραχής . . . . .	46
5.3	Αποτελέσματα επιθετικής ακολούθησης τιμής αναφοράς . . . . .	46
5.4	Αποτελέσματα ομαλής ακολούθησης τιμής αναφοράς . . . . .	46
5.5	Αποτελέσματα επιθετικής μέσης προσέγγισης . . . . .	47
5.6	Αποτελέσματα ομαλής μέσης προσέγγισης . . . . .	47
5.7	Ιδανικά Κέρδη $PID$ . . . . .	48
5.8	Τοπική ριπή στο επίπεδο περιστροφής της έλικας . . . . .	49

---

5.9	Μη ελεγχόμενη διεργασία . . . . .	50
5.10	Ομαλή ακολουθία τιμής αναφοράς . . . . .	51
5.11	Επιθετική ακολουθία τιμής αναφοράς . . . . .	52
5.12	Επιθετική μέση προσέγγιση . . . . .	53
5.13	Ιδανικά Κέρδη <i>PID</i> . . . . .	54
5.14	Η ανεμογεννήτρια τοποθετημένη σε γωνία εκτροπής $\gamma = 30^\circ$ . . . . .	55
5.15	Πεδίο εισροής για την περίπτωση της διαταραχής λαθών στην γωνία εκτροπής . . . . .	56
5.16	Σύγκριση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση λαθών στην γωνία εκτροπής . . . . .	57

# Κατάλογος Πινάκων

4.1	Κέρδη PID	43
5.1	Ιδανικά Κέρδη PID	44



# Λίστα Συμβόλων

$\beta$	Γωνία πτερυγίωνκαμπυλότητας [ <i>deg</i> ]
$\rho$	πυκνότητα [ <i>kg/m<sup>3</sup></i> ]
$A\alpha A$	Γωνία προσβολής [ <i>deg</i> ]
$C_D$	Συντελεστής οπισθέλκουσας
$C_L$	Συντελεστής άντωσης
$D$	Οπισθέλκουσα δύναμη [ <i>N</i> ]
$F$	Συχνότητα [ <i>Hz</i> ]
$L$	Άντωση [ <i>N</i> ]
$M$	Μηχανική τάση [ <i>Nm</i> ]
$T$	Περίοδος [ <i>s</i> ]
$U$	Ταχύτητα [ <i>m/s</i> ]
$u_i$	Ταχύτητα εισροής ανέμου [ <i>m/s</i> ]
$V$	Ηλεκτρική Τάση [ <i>V</i> ]
$\gamma$	Γωνία εκτροπής [ <i>deg</i> ]
$A$	Εμβαδόν επιφάνειας [ <i>m<sup>2</sup></i> ]

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Ανεμογεννήτριες

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια εκθετική αύξηση της ανάγκης αιολικών πάρκων. Πιο συγκεκριμένα οι χρονιές 2014 και 2015 ξεπέρασαν διαδοχικά τον ετήσιο αριθμό εγκατάστασης αιολικών πάρκων κατά 20% παραπάνω από τις προηγούμενες χρονιές, με την Κίνα να παίζει ηγετικό ρόλο και Ευρώπη και Η.Π.Α. να παρουσιάζουν και οι δύο επιτυχημένες χρονιές. Σήμερα, στις αρχές του 2017 η παγκόσμια παραγωγή ενέργειας από αιολικές πηγές αγγίζει τα 487 GW, με σχεδόν το 50% αυτού του αριθμού να έχει προστεθεί τα τελευταία πέντε χρόνια[1]. Ως επακόλουθο αυτής της ραγδαίας αύξησης, πολλές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη μιας στρατηγικής ελέγχου με σκοπό της μείωση των διάφορων φορτίων που αναπτύσσονται στις ανεμογεννήτριες και συνεπώς την αύξηση της διάρκειας ζωής τους.



Σχήμα 1.1: Αιολικό πάρκο

### 1.2 Υπάρχοντα Προβλήματα

Όλες οι ανεμογεννήτριες υπόκεινται σε σοβαρά και ταχύ διακυμαινόμενα φορτία. Αυτά τα φορτία προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως μια διάτμηση, ριπές ή αναταράξεις στην ταχύτητα του ανέμου, ή λάθη στην γωνία εκτροπής φαινόμενα τα οποία έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην διάρκεια ζωής των φτερών αλλά και του κινητήρα της ανεμογεννήτριας. Συνεπώς, πολλά ερευνητικά προγράμματα επικεντρώνονται στην αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων με σκοπό την όσο δυνατόν μεγαλύτερη ελαχιστοποίηση αυτών των φορτίων,

αυξάνοντας συνεπώς την αποδοτικότητα και διάρκεια ζωής των επί μέρους εξαρτημάτων. Τεχνικές όπως αλλαγές στην γωνία πρόνευσης ατομικά ανά φτερό ( ατομική πρόνευση), ή ταυτόχρονα με την χρήση χρονικής καθυστέρησης ( κυκλική πρόνευση) έχουν επιφέρει σημαντικά αποτελέσματα στην πιθανότητα μείωσης των φορτίων σε ποσοστά 21% και 25% αντίστοιχα, σε βάθος χρόνου ως και 20 χρόνια λειτουργίας. Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές αδυνατούν να αντιδράσουν αποτελεσματικά σε περισσότερο χαοτικά φαινόμενα όπως ριπές ανέμου και τυρβώδης ροές. Επιπλέον, με την αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών - με μοντέλα που αγγίζουν τα 120 μέτρα σε διάμετρο - αυξάνεται και η ανάγκη για τεχνικές ελέγχου μεγαλύτερης ευελιξίας και καλύτερης τοπικής διανομής της πίεσης. Πρόσφατες έρευνες απέδειξαν ότι με την χρήση πιο σύνθετων τεχνικών ελέγχου, κάνοντας χρήση πτερυγίων καμπυλότητας στο χείλος εκβολής, ακόμα μεγαλύτερα ποσοστά ελαχιστοποίησης φορτίων είναι δυνατόν να επιτευχθούν ξεπερνώντας τα προβλήματα αλλαγών της γωνίας πρόνευσης των φτερών, λόγω του ότι μικρότερες μάζες χρειάζεται να κινηθούν. Αυτή η πτυχιακή εργασία θα αναλύσει την ιδέα του ενεργού ελέγχου ροής ανέμου με την χρήση πτερυγίων καμπυλότητας στο χείλος εκβολής των φτερών μιας ανεμογεννήτριας, για την "ανακούφιση" τους από τα συνεχώς αναπτυσσόμενα φορτία κατά την διάρκεια κανονικής λειτουργίας.

### 1.3 Σκοπός της Πτυχιακής

Αυτή η πτυχιακή θα αναλύσει την ιδέα εφαρμογής πτερυγίων καμπυλότητας στις λεπίδες των ανεμογεννητριών με στόχο την μείωση των αναπτυσσόμενων φορτίων κατά την διάρκεια ομαλής λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, θα εξεταστεί η ιδέα ανάπτυξης στρατηγικής ελέγχου με την χρήση πειραματικών τιμών και στην συνέχεια θα εξεταστεί πόσο αποτελεσματικός είναι ο συγκεκριμένος ελεγκτής σε διάφορες συνθήκες διαταραχών.

### 1.4 Μεθοδολογία

Για το αρχικό κομμάτι αυτής της πτυχιακής, θα γίνει μια βιβλιογραφική επισκόπηση για την κατανόηση της αρχής λειτουργίας των ανεμογεννητριών και των αεροδυναμικών φαινομένων που αναπτύσσονται κατά της διάρκεια λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας. Στην συνέχεια θα δοθεί ιδιαίτερη σημασία στις διαφορετικές τεχνικές ενεργού ελέγχου ροής όπως περιγράφεται στην βιβλιογραφία αλλά ταυτόχρονα και μέσω της εμπειρίας που αποκτήθηκε κατά την διάρκεια διεξαγωγής πειραμάτων σε αεροδυναμική σήραγγα. Ακολουθώντας την ίδια πορεία, μια αναφορά στην λειτουργία των ασητηριών που αφορούν την ερευνώμενη διεργασία θα πραγματοποιηθεί για να αναλυθεί η χρησιμότητα το καθενός και ταυτόχρονα για την καλύτερη κατανόηση της πειραματικής διάταξης. Ιδιαίτερη σημασία θα δοθεί στην μελέτη των κινητήρων που δρουν ως ενεργοποιητές των πτερυγίων καμπυλότητας και των οποίων η συμπεριφορά έχει ιδιαίτερη επίδραση στην αεροδυναμική επίδοση των λεπίδων.

Ως ένα δεύτερο βήμα, μια σειρά διαφορετικών πειραμάτων θα πραγματοποιηθούν βασισμένα στην βηματική απόκριση των πτερυγίων, για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας του περιστρεφόμενου συστήματος. Βάση αυτού, μια προσέγγιση για την αναγνώριση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος θα γίνει με τον προσδιορισμό μαθηματικού μοντέλου βάση των τεχνικών αναγνώρισης συστημάτων όπως περιγράφονται από τον *Ljung* [3].

Μετά τον καθορισμό του μαθηματικού μοντέλου διάφοροι ελεγκτές κλειστού βρόχου θα υπολογιστούν με σκοπό την μείωση του σφάλματος που ανιχνεύεται στην είσοδο. Η αποτελεσματικότητα αυτών θα εξεταστεί σε δύο διαφορετικές συνθήκες διαταραχών: καθολικής αλλαγής της ταχύτητας του ανέμου, τοπικής ριπής στο επίπεδο περιστροφής της έλικας και λάθη στην γωνία εκτροπής.

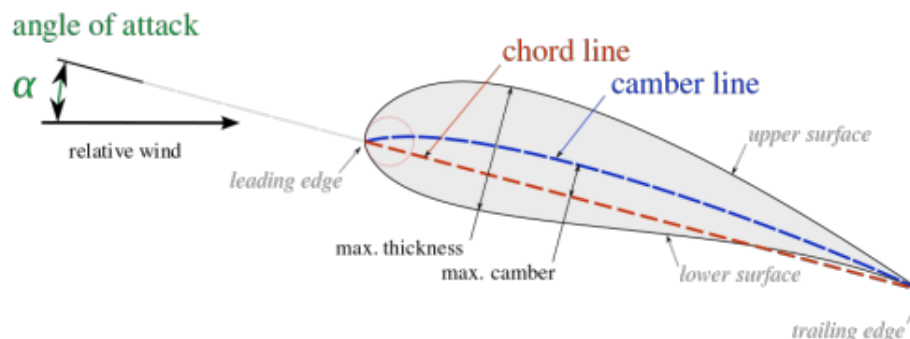
## Κεφάλαιο 2

# Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια βιβλιογραφική επισκόπηση των εννοιών που αναλύονται σε αυτή την πτυχιακή εργασία. Ο στόχος της εργασίας είναι η ανάλυση της πειραματικής διεργασίας και η παρουσίαση αποτελεσμάτων παρά η ανάλυση θεωριών που είναι ήδη γνωστές στην επιστημονική κοινότητα. Ωστόσο, μια σύντομη αναφορά στις βασικές έννοιες θεωρείται αναγκαία για την ευκολότερη κατανόηση και ανάγνωση των παρακάτω κεφαλαίων. Αρχικά, θα γίνει μια σύντομη αναφορά στα αεροδυναμικά στοιχεία και στην ιδέα του ενεργού ελέγχου ροής για την κατανόηση της λειτουργίας των πτερυγίων καμπυλότητας και της χρήσης τους στις ανεμογεννήτριες. Στην συνέχεια, θα δοθεί παραπάνω έμφαση στις τεχνικές αναγνώρισης συστημάτων και εν τέλη θα δοθεί μια σύντομη περιγραφή της θεωρίας του Ελέγχου.

### 2.1 Αεροτομική Επιφάνεια

Οι αεροτομές (Airfoils) αποτελούν το βασικό σχέδιο για τον σχεδιασμό λεπίδων ανεμογεννητριών, φτερά αεροπλάνων και σε οποιαδήποτε εφαρμογή της οποίας η αρχή λειτουργία βασίζεται στην αρχή της ροής ρευστών. Το σχήμα της παρουσιάζει ένα στοιχείο καμπυλότητας, σχεδιασμένο ώστε να αλληλεπιδρά με τις αναπτυσσόμενες αεροδυναμικές δυνάμεις με τρόπο που να επιτυγχάνεται η καλύτερη αναλογία άντωσης/οπισθέλκουσας κατά την διάρκεια μιας πτήσης. Σε γενικές γραμμές και στην πιο σύνηθες μορφή τους, αποτελούνται από μια στρογγυλεμένη εμπρόσθια άκρη και μία σχετικά εξαιρετικά λεπτή οπίσθια άκρη. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας αεροτομής είναι ιδιαίτερης σημασίας για την απόδοσή τους, συνεπώς η κατασκευή τους απαιτεί υψηλή ακρίβεια και προσοχή.



Σχήμα 2.1: Βασική κατασκευή Αεροτομής και χαρακτηριστικοί παράγοντες

Τα δυο πιο βασικά αεροδυναμικά μεγέθη που καθορίζουν την λειτουργία τους είναι η δύναμη της δυναμικής

άντωσης ή άντωσης ( $L$ ) και η οπισθέλκουσα δύναμη ή αντίσταση ( $D$ ). Η άντωση είναι η συνιστώσα δύναμη που ασκείται στο σώμα από τον ρευστό εντός του οποίου αυτό λειτουργεί, σε κάθετη διεύθυνση κατά την κίνηση του σώματος. Για την ανάπτυξη αυτής της δύναμης είναι πολύ σημαντικό το σώμα να παρουσιάζει ασυμμετρία κατά της κατεύθυνση στην οποία αυτό κινείται. Η μαθηματική έκφραση της άντωσης φαίνεται στην εξίσωση 2.1.

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A U^2 \quad (2.1)$$

όπου,

- $C_L$ : Ο συντελεστής της άντωσης
- $\rho$ : Η πυκνότητα του ρευστού
- $A$ : Η μετωπική επιφάνεια του σώματος
- $U$ : Η σχετική ταχύτητα του σώματος και του ρευστού

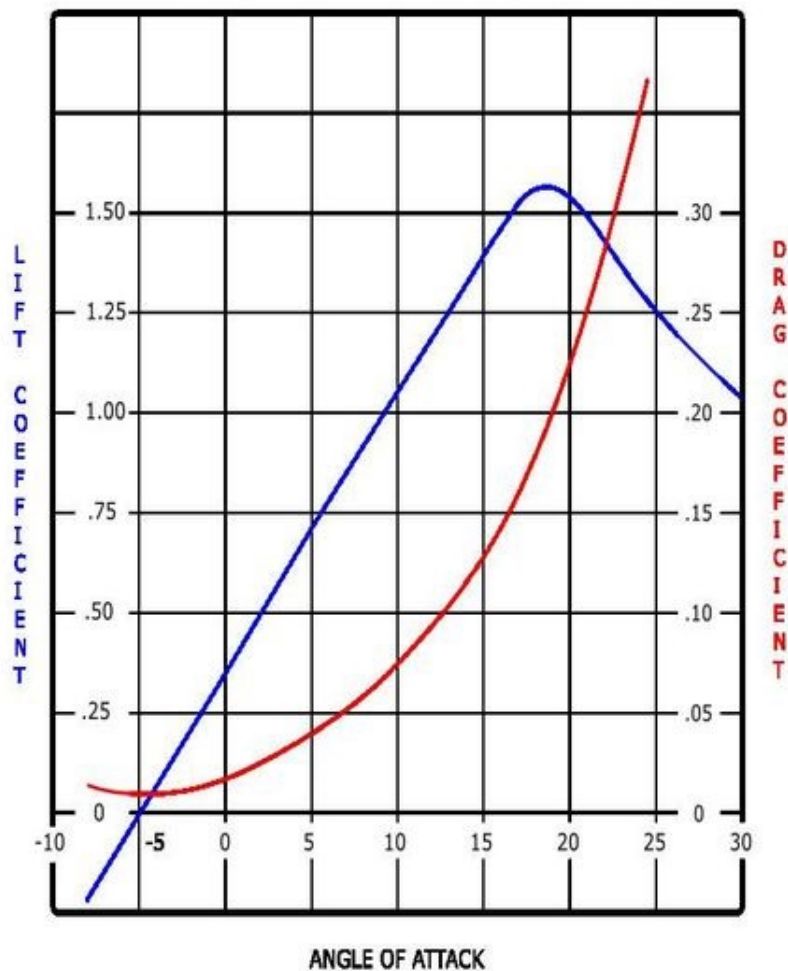
Η οπισθέλκουσα δύναμη ( $D$ ) είναι η δύναμη που ενεργεί κάθετα στην κίνηση του σώματος και σε αντίθετη κατεύθυνση από την δύναμη της άντωσης. Η παρουσία της σχετίζεται άμεσα με την διαφορά πίεσης που δημιουργείται στις δύο πλευρές του σώματος. Η διαφορά πίεσης δημιουργείται λόγω της ασυμμετρίας του σώματος σε σχέση με την ταχύτητα εισροής του ανέμου, αφού από την μία πλευρά ο άνεμος πρέπει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση από ότι στην άλλη. Αυτή η διαφορά απόστασης έχει ως αποτέλεσμα την διαφορά ταχύτητας του ανέμου στις δυο πλευρές του σώματος, κάτι που εν τέλη προκαλεί την διαφορά πίεσης από την σύγκρουση των σωματιδίων του αέρα με το σώμα. Η δύναμη της οπισθέλκουσας δίνεται από την εξίσωση 2.2.

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A U^2 \quad (2.2)$$

όπου,

- $C_D$ : Ο συντελεστής της οπισθέλκουσας δύναμης
- $\rho$ : Η πυκνότητα του ρευστού
- $A$ : Η μετωπική επιφάνεια του σώματος
- $U$ : Η σχετική ταχύτητα του σώματος και του ρευστού

Όπως φαίνεται από το σχήμα 2.2 ένα μέγεθος που μπορεί να περιγράψει τον βαθμό ασυμμετρίας του σώματος είναι η γωνία προσβολής  $\alpha$  ή  $AoA$ . Αναλογικά με την γωνία προσβολής αυξάνεται η άντωση που επικρατεί στο σώμα ενώ η δύναμη της οπισθέλκουσας διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο, μετά από μια συγκεκριμένη τιμή της γωνίας προσβολής - συνήθως κοντά στις  $16^\circ$  - η δύναμη της άντωσης πέφτει δραματικά, ενώ η οπισθέλκουσα αυξάνεται με εκθετικό ρυθμό. Συνεπώς είναι πολύ σημαντικό η γωνία προσβολής της αεροτομής να μην ξεπερνά τις  $16^\circ$  και να λειτουργεί μεταξύ των ορίων  $0^\circ$  ως  $16^\circ$ . Συνήθως, αποφασίζεται μια συγκεκριμένη τιμή της γωνίας προσβολής όπου η αναλογία  $\frac{L}{D}$  - ή  $\frac{C_L}{C_D}$  - να παραμένει κοντά σε μια τιμή που ικανοποιεί της απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.



Σχήμα 2.2: Γραφική παράσταση του συντελεστή άντωσης (μπλε) και του συντελεστή οπισθέλκουσας (κόκκινο) σε σύγκριση με την γωνία προσβολής AoA.

## 2.2 Ενεργός Έλεγχος Ροής

Με την έννοια του Ενεργού Ελέγχου Εισροής (Active flow control) εννοείται ο έλεγχος του τοπικού πεδίου εισροής ανέμου που περιτριγυρίζει κάθε λεπίδα. Ο κύριος στόχος είναι η μείωση των ακραίων φορτίων που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια υψηλής δραστηριότητας του ανέμου, και η αντιμετώπιση της μηχανικής κόπωσης που δημιουργείται από τυχαία εμφανιζόμενα φαινόμενα. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, συσκευές ενεργού ελέγχου, γνωστές και ως ευφυείς συσκευές, τοποθετούνται στις λεπίδες των ανεμογεννητριών. Μια έυφυής' συσκευή συνήθως περιλαμβάνει τρία μέρη: αισθητήρες, μικροεπεξεργαστές και ενεργοποιητές. Οι αισθητήρες παράγουν ένα σήμα το οποίο αναλύεται από τους μικροεπεξεργαστές και κάνοντας χρήση της θεωρίας του ελέγχου παράγεται ένα σήμα ελέγχου για την αντίδραση των ενεργοποιητών.

### 2.2.1 Μέθοδοι Ενεργού Ροής

Οι μέθοδοι ελέγχου ροής κατηγοριοποιούνται ομοιόμορφα με τις τεχνικές ελέγχου φορτίου που εξηγήθηκαν νωρίτερα: είτε παθητικοί είτε ενεργοί. Ορισμένες παθητικές τεχνικές περιλαμβάνουν γεωμετρική διαμόρφωση για τον χειρισμό της κλίσης πίεσης, τη χρήση μηχανικών γεννητριών στροβίλων για έλεγχο διαχωρισμού,

την προσθήκη ενός πτερυγίου τύπου Gurney στην οπίσθια ακμή και την τοποθέτηση διαμηκών αυλακώσεων ή λοξών σε μια επιφάνεια για τη μείωση της οπισθέλκουσας.

Οι ενεργές μέθοδοι ελέγχου μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: προκαθορισμένες και διαδραστικές (ανοικτές ή κλειστές). Ο προκαθορισμένος έλεγχος εισάγει σταθερές ή μη σταθερές εισροές ενέργειας χωρίς να ανησυχεί για την κατάσταση ροής. Επομένως, δεν απαιτούνται αισθητήρες για αυτήν τη μέθοδο και ο βρόχος ελέγχου είναι ανοιχτός. Σε αυτή την περίπτωση, η σταθερή συσκευή εμφύσησης θα λειτουργεί συνεχώς χωρίς να λαμβάνει υπόψη την ταχύτητα του ανέμου ή τη γωνία πρόνευσης.

Σε αντίθεση, ένα διαδραστικό σύστημα ελέγχου περιέχει έναν ενεργοποιητή, έναν ελεγκτή και έναν αισθητήρα. Το σύστημα μπορεί είτε να λειτουργεί σε μορφή ανοιχτού βρόχου είτε κλειστού βρόχου. Ο έλεγχος ανοιχτού βρόχου δεν παρατηρεί την έξοδο της διεργασίας που ελέγχει. Επομένως, δεν μπορεί να προσδιορίσει εάν η είσοδος του έχει επιτύχει τον επιθυμητό στόχο. Στο παράδειγμα, η σταθερή συσκευή εμφύσησης θα προγραμματίζεται να ενεργοποιείται μόλις ξεπεραστεί μια καθορισμένη γωνία προσβολής. Ο έλεγχος κλειστού βρόχου χρησιμοποιεί ανατροφοδότηση για να συγκρίνει την πραγματική έξοδο με την επιθυμητή έξοδο. Για την οδήγηση του ενεργοποιητή ή της συσκευής χρησιμοποιείται ένας νόμος ελέγχου ανατροφοδότησης προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα μεταξύ της τιμής αναφοράς και του σήματος ανάδρασης. Στο παράδειγμα, η συσκευή εμφύσησης θα είχε έναν πρόσθετο αισθητήρα για την ανίχνευση της έναρξης του διαχωρισμού ροής. Θα προγραμματιστεί να ενεργοποιηθεί μόλις ανιχνευθεί ο διαχωρισμός ροής.

Τα συστήματα κλειστού βρόχου θα είναι τα πλέον επωφελής για τον έλεγχο των ανεμογεννητριών. Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι η κατανάλωση ενέργειας και η ασφάλεια. Τα προκαθορισμένα συστήματα λειτουργούν συνεχώς ακόμη και όταν η συσκευή δεν είναι απαραίτητη, χρησιμοποιώντας έτσι υπερβολική ενέργεια. Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου θα ήταν πιο αποτελεσματικά, αλλά κατά καιρούς θα λειτουργούσαν άσκοπα. Επιπλέον, με τη χρήση υπερβολικής ενέργειας, και τα δύο αυτά συστήματα θα μπορούσαν να είναι επιζήμια για το σύστημα, καθώς δεν παρατηρούν την έξοδο. Ο ακατάλληλος έλεγχος των ενεργών συσκευών έχει αποδειχθεί ότι έχει σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία του στρόβιλου και στη συνολική ασφάλεια. Με τη χρήση ανατροφοδότησης, το σύστημα ελέγχου μπορεί να διαμορφωθεί έτσι ώστε να ενεργοποιεί και να κλείνει το σύστημα ενεργού ελέγχου ροής όπως απαιτείται.

### 2.2.2 Συσκευές Ενεργού Ελέγχου

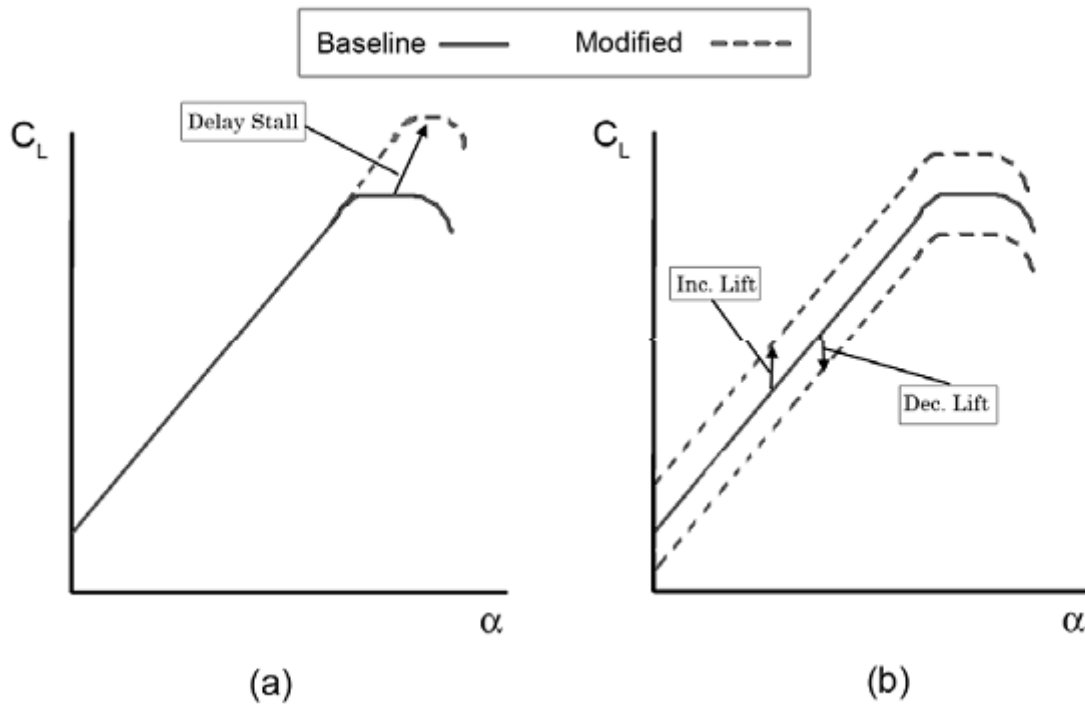
Αυτές οι συσκευές έχουν δείξει δυναμικό για τον έλεγχο των ανεμογεννητριών και αξίζουν τη μελλοντική έρευνα, από τις οποίες όμως καμία δεν έχει ωριμάσει σε σημείο δοκιμής σε ανεμογεννήτριες πλήρους κλίμακας. Επίσης, αρκετές από τις τεχνικές δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί για τον έλεγχο των ανεμογεννητριών. Αντ' αυτού, πολλές από τις τεχνικές έχουν επικεντρωθεί σε άλλους τομείς, όπως ρότορα ή μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα. Δεδομένου ότι όλες οι συσκευές λειτουργούν διαφορετικά, τόσο μηχανικά όσο και αεροδυναμικά, και βρίσκονται σε διαφορετικά στάδια ωρίμανσης, είναι δύσκολο να γίνουν άμεσες συγκρίσεις. Το πρώτο βήμα στη συζήτηση των πολυάριθμων συσκευών ενεργού ελέγχου (*AFC*) είναι να ορίσουμε ένα σχήμα σήμανσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση κάθε έννοιας. Στην παρούσα έκθεση χρησιμοποιείται ένα προτεινόμενο σχήμα τεσσάρων επιπέδων.

Το πρώτο στρώμα προσδιορίζει την τεχνική ως γεωμετρική συσκευή (*G*) ή ρευστοποιητική συσκευή (*F*). Οι γεωμετρικές συσκευές (*G*) μετακινούν ένα τμήμα της εξωτερικής επιφάνειας, αλλάζοντας έτσι το σχήμα του τμήματος και συνδέοντας τη ροή αέρα γύρω από την αεροτομή. Οι υδραυλικές συσκευές (*F*) αλλάζουν ενεργά τη ροή γύρω από το τμήμα της λεπίδας είτε προσθέτοντας αέρα είτε αφαιρώντας αέρα από την εξωτερική ροή.

Η δεύτερη στρώση περιγράφει τη θέση της συσκευής, όπως κοντά στην πρόσθια άκρη (*LE*), κοντά στην οπίσθια άκρη (*TE*) ή στη μεσαία χορδή (*MC*).

Το τρίτο επίπεδο περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο η συσκευή ρυθμίζει την καμπύλη άντωσης. Οι έρευνες

των συσκευών *AFC* δείχνουν ότι η καμπύλη ανύψωσης μιας αεροτομής επηρεάζεται με έναν από τους δύο τρόπους. Πρώτον, η συσκευή μετατοπίζει ολόκληρη την καμπύλη άντωσης προς τα πάνω ή προς τα κάτω, η οποία γίνεται με την αποτελεσματική αλλαγή της καμπύλης της αεροτομής. Αυτό χαρακτηρίζεται ως αύξηση της άντωσης (*L*) ή μείωση της οπισθέλκουσας (*D*). Πολλές συσκευές μπορούν να μετατοπίσουν την καμπύλη άντωσης τόσο προς τα επάνω όσο και προς τα κάτω. Αυτά χαρακτηρίζονται ως (*I/D*). Δεύτερον, η συσκευή επεκτείνει την καμπύλη ανύψωσης της αεροτομής για να σταματήσει σε υψηλότερη γωνία προσβολής, αυτό είναι χαρακτηρισμένο ως καθυστέρηση του φαινομένου απώλειας στήριξης (*DS*). Το σχήμα 2.3 εμφανίζει τους δύο διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να ρυθμιστεί η καμπύλη άντωσης.



Σχήμα 2.3: Ρυθμίσεις στην καμπύλη άντωσης μέσω τεχνικών ελέγχου ροής, α) Συσκευές  $\Delta\Sigma$ , β) Συσκευές  $I/D$

Για να μειωθούν επιτυχώς τα φορτία, η συσκευή πρέπει να μπορεί να μειώσει την παραγόμενη άντωση. Κατά την πρώτη παρατήρηση, η καθυστέρηση της απώλειας στήριξης (*DS*) αυξάνει μόνο την άντωση σε υψηλές γωνίες προσβολής όπως φαίνεται στο Σχ. 2.1α. Αυτό δεν μειώνει την άντωση. Επομένως, οι συσκευές *DS* δεν μπορούν να θεωρούνται ως επιλογή για την ελάφρυνση του φορτίου.

Τα ταλαντευόμενα φορτία σε έναν στρόβιλο προκαλούνται από ξαφνικές αλλαγές στην άντωση που βλέπει η λεπίδα. Αυτές οι αλλαγές στην άντωση μπορούν να προκληθούν από μια σειρά συμβάντων, μία από τις οποίες είναι το φαινόμενο του στροβιλισμού. Ο στροβιλισμός μπορεί να αυξήσει / μειώσει την ταχύτητα του ανέμου να αυξήσει / μειώσει τη γωνία προσβολής  $\alpha$  που παρατηρείται από μια περιστρεφόμενη λεπίδα ή μπορεί να κάνει και τα δύο. Επομένως, για να μειωθούν αυτά τα ταλαντευόμενα φορτία, οι ξαφνικές αλλαγές στην άντωση πρέπει να μετριάζονται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας την κλίση της καμπύλης άντωσης Σχ. 2.3. Η μειωμένη κλίση κάνει τρία πράγματα που βοηθούν στη μείωση των φορτίων. Ένα, η διακύμανση άντωσης ( $\Delta$ ) για ένα δεδομένο  $\Delta\alpha$  μειώνεται. Δύο, η μέγιστη ανύψωση για ένα δεδομένο  $\Delta\alpha$  μειώνεται. Τρία, το μέγεθος της μέγιστης αρνητικής άντωσης μειώνεται. Αυτή η μείωση είναι σημαντική κατά τη διάρκεια έκτακτης διακοπής λειτουργίας για μηχανές που κάνουν χρήση της τεχνικής αλλαγής γωνίας πρόνευσης των λεπίδων. Καθώς μειώνεται γρήγορα η γωνία πρόνευσης, οι λεπίδες περνούν σε αρνητικές γωνίες προσβολής



κατά τις οποίες ο ρότορας μπορεί να βιώσει υψηλά φορτία. Το κύριο πλεονέκτημα της τροποποίησης των λεπίδων με συσκευές  $DS$  είναι η μείωση των ταλαντώσεων. Τα δευτερεύοντα οφέλη συνδέονται με την μειωμένη χορδή, επιτρέποντας μικρότερες λεπίδες και, συνεπώς, απαιτούν λιγότερα υλικά.

Το τέταρτο και τελικό στρώμα διαφοροποιεί μεταξύ μίας σταθερής ( $S$ ) και ασταθούς ( $U$ ) διάταξης (δηλ. Μιας συσκευής η θέση της οποίας μεταβάλλεται με το χρόνο σε μία ονομαστική ρύθμιση). Για παράδειγμα, ένα σύστημα πτερυγωτού άκρου, αν και θα μπορούσε να είναι σε συνεχή κίνηση, απλώς αλλάζει θέση για να δημιουργήσει μια σειρά σταθερών συνθηκών και ως εκ τούτου θεωρείται σταθερή συσκευή. Οι περισσότερες από τις συσκευές που λειτουργούν ασταθώς είναι επίσης ικανές για σταθερή λειτουργία. Επομένως, αυτές οι συσκευές είναι επισημασμένες ( $S/U$ ).

### 2.2.3 Παραδοσιακά Πτερύγια Καμπυλότητας

Τα παραδοσιακά πτερύγια έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε πτερύγια ανεμογεννητριών για αεροδυναμική πέδηση και έλεγχο φορτίου. Υπάρχουν δύο διαφορετικές διαμορφώσεις (ανάλογα με τη στρεπτική ακαμψία της λεπίδας) στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα πτερύγια για έλεγχο φορτίου. Σε μια στρεπτικώς άκαμπτη λεπίδα, η εκτροπή του πτερυγίου στην επιφάνεια πίεσης παράγει μια αύξηση στο αεροδυναμικό φορτίο και μια παραμόρφωση προς την πλευρά αναρρόφησης μειώνει το αεροδυναμικό φορτίο. Σε μια στρεπτικά μαλακή λεπίδα, η κάμψη του πτερυγίου προς την επιφάνεια πίεσης θα δημιουργήσει μια ροπή κλίσης που θα συστρέψει τη μύτη της λεπίδας προς την επιφάνεια πίεσης, μειώνοντας έτσι τη γωνία προσβολής και, κατά συνέπεια, το φορτίο. Ομοίως, η κάμψη του πτερυγίου κατά την αντίθετη κατεύθυνση αναστρέφει τη λεπίδα προς την επιφάνεια αναρρόφησης, αυξάνοντας έτσι τη γωνία προσβολής και συνεπώς το φορτίο επί της λεπίδας. Αυτά τα πτερύγια ταξινομούνται ως γεωμετρικής κατασκευής  $G$ , τοποθέτησης  $TE$ , αλλαγή στην καμπύλη άντωσης  $I/D$  και λειτουργίας  $S$ .

## 2.3 Ψηφιακή Επεξεργασία Σημάτων

### 2.3.1 Μετασχηματισμός Fourier

Όπως θα φανεί αργότερα στην ανάλυση του πειραματικού συστήματος, τα σήματα των φυσικών μεγεθών που ενδιαφέρουν τους σκοπούς αυτής της ερευνητικής προσέγγισης, παρουσιάζουν ένα στοιχείο περιοδικότητας. Συνεπώς για την ανάλυση και κατανόηση της συμπεριφοράς τους, υπόκειται σε ένα μετασχηματισμό Fourier. Γενικά όλα τα σήματα που παρουσιάζουν περιοδικό χαρακτήρα με περίοδο  $T$  (και συχνότητα  $\Omega = 2\pi/T$ ) μπορούν να αναλυθούν ως ένα άθροισμα ημιτονοειδών συναρτήσεων με την χρήση του μετασχηματισμού Fourier 2.3. Κάνοντας χρήση αυτού του μετασχηματισμού, όλη η χρονική συμπεριφορά του σήματος μπορεί να μεταφερθεί στο πεδίο συχνοτήτων όπου είναι πιο εύκολος ο καθορισμός της επαναλαμβανόμενης συμπεριφοράς των στοιχείων του σε κάθε ενδιαφερόμενη συχνότητα. Για παράδειγμα όταν το σήμα αποτελεί ένα άθροισμα πολλών περιοδικών σημάτων στο πεδίο του χρόνου παρατηρείται μια χρονοσειρά από την οποία είναι πολύ δύσκολο, και πολλές φορές αδύνατο, να καθοριστούν τα πλάτη των επί μέρους περιοδικών σημάτων. Ωστόσο, όταν γίνεται η μεταφορά του σήματος στο πεδίο των συχνοτήτων, και με την χρήση ενός διαγράμματος φασματικής ανάλυσης, το πλάτος που παρουσιάζεται σε κάθε συχνότητα τώρα είναι ορατό. Αν η φασματική ανάλυση ενός σήματος έδειχνε τρεις κορυφές στις συχνότητες  $3Hz, 5Hz, 8Hz$ , τότε το συμπέρασμα θα ήταν πως το σήμα αποτελείται από το άθροισμα τριών ημιτονοειδών σημάτων με περιόδους  $1/3s, 1/5s, 1/8s$  και τα αντίστοιχα πλάτη.

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (2.3)$$

με

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-j\omega n} \quad (2.4)$$

Το ζευγάρι των εξισώσεων 2.3 και 2.4 αποτελούν την αναπαράσταση της ακολουθίας Fourier. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier παριστάνει την  $x[n]$  ως υπέρθεση άπειρων μικρών μιγαδικών αριθμών μορφής

$$\frac{1}{2\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega$$

όπου η συχνότητα μεταβάλλεται εντός του διαστήματος  $2\pi$  και ο όρος  $X(e^{j\omega})$  καθορίζει το σχετικό μέγεθος κάθε μιγαδικής συνιστώσας. Λόγω της μιγαδικής φύσεως του μετασχηματισμού Fourier, αυτός μπορεί να εκφραστεί με μια φάση και ένα μέτρο του αριθμού σε μορφή

$$X(e^{j\omega}) = |X(e^{j\omega})| e^{j\angle X(e^{j\omega})}$$

όπου  $|X(e^{j\omega})|$  το μέτρο του μιγαδικού αριθμού και  $\angle X(e^{j\omega})$  η φάση του.

### 2.3.2 Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT)

Ίδανικά για την μέτρηση ενός σήματος στον χρόνο, παράγεται μια ακολουθία δειγματοληψίας όπου τα δείγματα παίρνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα  $nT$  και απέχουν μεταξύ τους μηδαιμικό χρόνο. Έτσι και το σήμα εξόδου μπορεί να θεωρηθεί ένα αναλογικό σήμα που αποτελείται από μια σειρά αθροίσματος χροστικών συναρτήσεων με πλάτος το πλάτος του κάθε δείγματος στην αντίστοιχη χρονική στιγμή.

$$x_s = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT)\delta(t - nT) \quad (2.5)$$

Με αντικατάσταση της 2.5 στην 2.4 έχουμε την εξίσωση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier 2.7

$$X_s(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT)e^{-j2\pi f nT} \quad (2.6)$$

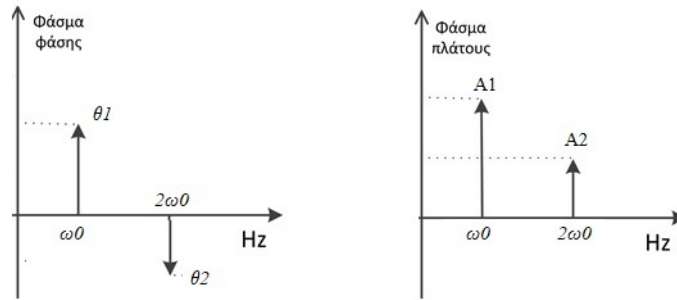
Ο *DFT* (Discrete Fourier Transform) είναι μια ακολουθία μιας συνεχούς μεταβλητής, και αντιστοιχεί σε ομοιόμορφα κατανεμημένα δείγματα στο πεδίο της συχνότητας. Σε πρακτικές εφαρμογές ωστόσο, δεν είναι δυνατή η συλλογή άπειρων δειγμάτων και ο αριθμός τους περιορίζεται σε ένα πεπερασμένο αριθμό  $N$ . Τα τώρα διακριτά δείγματα ισαπέχουν χρονικά μεταξύ τους με απόσταση  $\Delta f$  και συνεπώς η εξίσωση 2.7 παίρνει την παρακάτω μορφή

$$X_s(k\Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT)e^{-j2\pi(k\Delta f)nT} \quad (2.7)$$

Για την υλοποίηση του *DFT* απαιτούνται  $N$  μιγαδικοί υπολογισμοί και  $N - 1$  προσθέσεις για το κάθε ένα δείγμα. Συνεπώς για τον ολικό υπολογισμό χρειάζονται  $N * N = N^2$  μιγαδικοί υπολογισμοί και  $N(N - 1)$  μιγαδικές προσθέσεις. Κάτι τέτοιο απαιτεί έναν πολύ μεγάλο χρόνο εκτέλεσης που πολλές φορές είναι ακόμα μεγαλύτερος λόγω έλλειψης του απαραίτητου τεχνολογικού εξοπλισμού. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος που ονομάστηκε *FFT* (Fast Fourier Transform). Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην διάσπαση του αρχικού αλγορίθμου *DFT* σε επιμέρους μικρότερα κομμάτια τα οποία υπολογίζονται μεμονωμένα και στην συνέχει βάση της αρχής της υπέρθεσης επανασυνδέονται για τον υπολογισμό του τελικού *DFT*. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση του αριθμού των μιγαδικών πολλαπλασιασμών από  $N^2$  σε  $\frac{N}{2} \log_2 N$ . Αν για παράδειγμα το μήκος του δείγματος είναι  $N = 1024 = 2^{10}$  τότε ο υπολογισμός του *DFT* θα χρειαζόταν  $1024^2 = 1,048,576$  μιγαδικούς πολλαπλασιασμούς ενώ τώρα ο *FFT* απαιτεί  $\frac{1024}{2} \log_2 1024 = 5120$ . Είναι φανερό λοιπόν ότι επιτυγχάνεται μεγάλη μείωση του χρόνου εκτέλεσης της τάξης του 200 προς 1, για το δοσμένο παράδειγμα.

### 2.3.3 Φασματική Ανάλυση

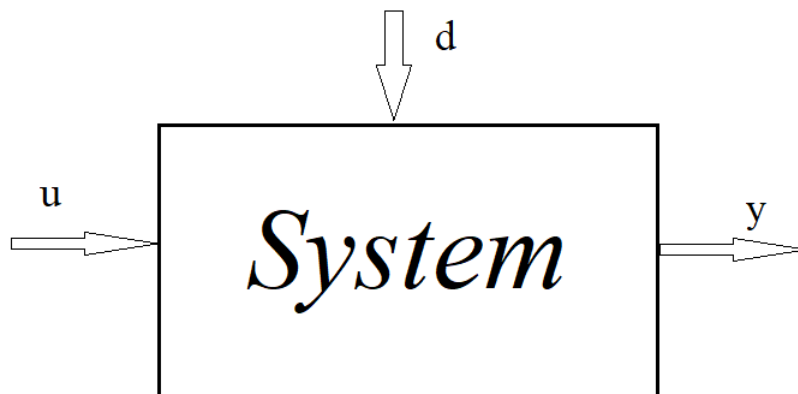
Μέσω της χρήσης του μετασχηματισμού Fourier ένα σήμα είναι δυνατό να αναπαρασταθεί στον χώρο της συχνότητας με ένα διάγραμμα φασματικής ανάλυσης. Ένα φάσμα πλάτους ενός σήματος  $X(s)$  μπορεί να δώσει μια αίσθηση του αρμονικού του περιεχομένου και ταυτόχρονα απεικονίζει την ισχύ του σήματος σε κάθε φασματική συχνότητα. Οι γραμμές των φασματικών διαγραμμάτων φανερώνουν την ένταση της κάθε φασματικής συχνότητας και απέχουν μεταξύ τους απόσταση, ίση με την θεμελιώδη συχνότητα  $\omega_0$ . Η πρώτη γραμμή του διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τον πρώτο όρο που εμπεριέχει συχνότητα σε μια σειρά Fourier, ονομάζεται **θεμελιώδης συχνότητα** και όλα τα πολλαπλάσια αυτής ονομάζονται αρμονικές. Οι γραμμές του φάσματος πλάτους είναι πάντα θετικές επειδή οι συντελεστές της σειράς είναι και αυτοί θετικοί. Αντίθετα σε ένα φάσμα φάσης οι γραμμές μπορεί να είναι είτε θετικές ( προς τα πάνω) είτε αρνητικές (προς τα κάτω) ανάλογα με το πρόσημο της γωνίας. Για ένα περιοδικό σήμα το φασματικό του περιεχόμενο βρίσκεται στις συχνότητες  $0, \omega_0, 2\omega_0, 3\omega_0, \dots, k\omega_0, \dots$  ενώ στις ενδιάμεσες συχνότητες δεν υπάρχει ισχύ. Αυτό υποδεικνύει ότι το φάσμα ενός περιοδικού σήματος είναι γραμμικό. Μια θεμελιώδης ιδιότητα των περιοδικών σημάτων είναι ότι το πλάτος κάθε αρμονικής τείνει στο μηδέν όσο ο αριθμός τους  $k$  τείνει στο άπειρο. Ως συνέπεια υπάρχει κάποιος αριθμός  $k$  για τον οποίο οι συχνότητες ίσες ή μεγαλύτερες του αριθμού  $k\omega_0$  έχουν αμελητέο φασματικό περιεχόμενο.



Σχήμα 2.4: Φάσμα φάσης και φάσμα πλάτους ενός σήματος

## 2.4 Δυναμικά Συστήματα

Ως σύστημα νοείται ένα αντικείμενο το οποίο αποτελείται από κάποια φυσικά στοιχεία που συνδέονται μεταξύ τους. Η αλληλεπίδραση αυτών των στοιχείων και η αντίδραση τους στις διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος εντός του οποίου το σύστημα λειτουργεί, παράγει αυτό που ονομάζεται απόκριση του συστήματος ή έξοδος. Η απόκριση του συστήματος μπορεί να προκαλείται από ενέργειες ενός παρατηρητή οι οποίες ονομάζονται είσοδοι του συστήματος. Το βασικό χαρακτηριστικό των εισόδων είναι ότι είναι γνωστά σήματα και μπορούν να επεξεργαστούν με οποιονδήποτε τρόπο είναι επιθυμητός από τον παρατηρητή. Σήματα εισόδων τα οποία δεν προκαλούνται από κάποιον παρατηρητή ονομάζονται διαταραχές και μπορούν να χωριστούν σε αυτές που μπορούν να μετρηθούν απευθείας και σε αυτές που καταγράφονται βάση της απόκρισης του συστήματος. Μια απλή αναπαράσταση του συστήματος μπορεί να φανεί στο σχήμα 2.5.

Σχήμα 2.5: Μπλοκ διάγραμμα Συστήματος με είσοδο  $u$  έξοδο  $y$  και διαταραχή  $d$ 

### 2.4.1 Κατασκευή Μοντέλου

Η κατασκευή ενός μοντέλου για την περιγραφή της διεργασίας βασίζεται στην παρατήρηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να αναπτυχθούν με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι ο διαχωρισμός του συστήματος σε υπό μέρους συστήματα των οποίων οι ιδιότητες είναι ήδη γνωστές. Η διαδικασία αυτή βασίζεται σε γνώση των φυσικών μεγεθών και νόμων και την σχέση που τους συνδέει με βάση την εμπειρία του μηχανικού συστημάτων. Στην συνέχεια δημιουργείται μια σύνδεση των υποσυστημάτων και ένα περιγραφικό μοντέλο ολόκληρου του συστήματος δημιουργείται. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή και

ως μοντελοποίηση. Δεν απαιτείται η συλλογή πειραματικών δεδομένων και είναι αρκετή μόνο η γνώση των φυσικών νόμων και στοιχείων. Συνήθως το σύστημα αναπαριστάται με ένα μπλοκ διάγραμμα, με κάθε μπλοκ να περιέχει απλά στοιχεία.

Η άλλη τεχνική είναι βασισμένη στην συλλογή και χρήση πειραματικών δεδομένων της εισόδου και της εξόδου του συστήματος. Μετά την καταγραφή αυτών των σημάτων, γίνεται μια ανάλυση δεδομένων ώστε να εκτιμηθεί ένα μοντέλο. Αυτή η τεχνική ονομάζεται 'Αναγνώριση Συστήματος'.

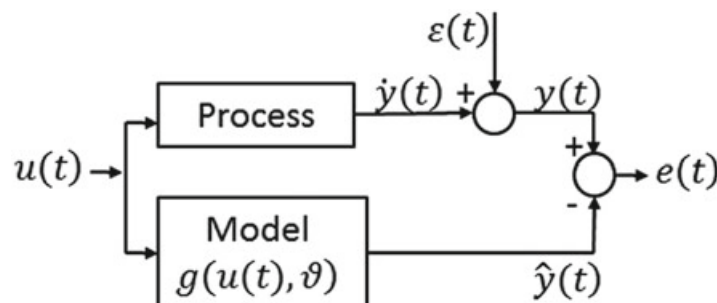
### 2.4.2 Αναγνώριση Συστήματος

Η αναγνώριση συστήματος, ή αλλιώς η διαδικασία μοντελοποίησης του συστήματος, είναι η διαδικασία καθορισμού της συμπεριφοράς μια πραγματικής διεργασίας. Η επιστημονική μοντελοποίηση επιδιώκει την καλύτερη εξέταση φαινομένων με σκοπό να βελτιωθεί η κατανόηση αυτών και της σχέσεως των μεγεθών που τα αποτελούν. Ένας ορισμός του μοντέλου που δόθηκε από τον Eykhoff[4], εισήγαγε για πρώτη φορά την έννοια των 'απαραίτητων στοιχείων': 'το μοντέλο είναι μια απλοποιημένη αναπαράσταση των απαραίτητων στοιχείων ενός ήδη υπάρχοντος συστήματος, το οποίο παρουσιάζει την γνώση για το σύστημα με έναν εύχρηστο τρόπο'.

Ως σύστημα καθορίζεται το σύνολο των διεργασιών που ενεργούν σε αυτό. Κάθε διεργασία χαρακτηρίζεται από μια σειρά, όχι απαραίτητα γνωστών, φυσικών ιδιοτήτων. Ο σκοπός της μοντελοποίησης είναι η προσομοίωση των απαραίτητων στοιχείων της απλοποιημένης συμπεριφοράς κάποιου συστήματος. Συνεπώς οι τεχνικές μοντελοποίησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες:

- Αναγνώριση 'άσπρου-κουτιού', διαδικασία η οποία στοχεύει στην μοντελοποίηση πραγματοποιώντας πειράματα πάνω στην διεργασία για την επεξήγηση των ήδη γνωστών φυσικών μεγεθών.
- Αναγνώριση 'μαύρου-κουτιού', όπου η μοντελοποίηση πραγματοποιείται με βάση μόνο τα πειραματικά δεδομένα και χωρίς προηγούμενη γνώση για τα δυναμικά στοιχεία του συστήματος. Αυτή η τεχνική βασίζεται σε μια δημιουργία σχέσης μεταξύ του σήματος εισόδου και εξόδου μιας διεργασίας και την αλληλεξάρτηση αυτών των δύο.
- Αναγνώριση 'γκρί-κουτιού', όπου οι ιδιαιτερότητες του κάθε φυσικού νόμου δεν είναι γνωστές και γίνεται μια προσπάθεια μοντελοποίησης με χρήση της ήδη υπάρχουσας γνώσης και διεξαγωγή πειραμάτων για την καλύτερη κατανόηση του συστήματος.

Η αναγνώριση συστήματος προσπαθεί να εκτιμήσει ένα μαύρο ή γκρί μοντέλο των δυναμικών στοιχείων ενός συστήματος, κάνοντας παρατήρηση των πειραμάτων εισόδου-εξόδου. Ο Ζαδεθ το 1962 όρισε την διαδικασία αναγνώρισης συστήματος ως '... η αντιστοίχιση βασισμένη στην είσοδο-έξοδο, ενός συστήματος με άλλα προκαθορισμένα συστήματα, η οποία επιβεβαιώνεται με την χρήση δοκιμών'.



Σχήμα 2.6: Μπλοκ διάγραμμα που αντιπροσωπεύει τον στόχο της μεθόδου αναγνώρισης συστημάτων

### 2.4.3 Χρονοσειρές

Για την συλλογή κρίσιμων πληροφοριών σχετικά με τις διεργασίες που πρέπει να διερευνηθούν, πειραματικά δεδομένα επιτυγχάνονται μέσω της διάταξης κυκλώματος αισθητήριων. Οι μεταβλητές διεργασίας πρέπει να λαμβάνονται με διάρκεια και συχνότητα δειγματοληψίας αρκετή, ώστε η ποιότητα της συλλεγμένης χρονοσειράς να είναι του επιπέδου που η αναλυτική μέθοδος απαιτεί. Η ακολουθία των παρατηρήσεων σε μια μεταβλητή  $y(t)$ ,  $t \in T$  ( $T$  είναι ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ κάθε δείγματος), ονομάζεται χρονοσειρά. Τα δείγματα συνήθως ισαπέχουν χρονικά μεταξύ τους και συμβολίζονται με ακέραιους αριθμούς ( $t = 1, \dots, n$ ) όπου το  $n$  υποδεικνύει τον αριθμό των δειγμάτων. Ο κύριος στόχος της ανάλυσης χρονοσειρών είναι να ληφθούν μαθηματικά συμπεράσματα από τα δεδομένα δείγματος, που λαμβάνονται από τους αισθητήρες της πειραματικής διάταξης.

### 2.4.4 Ανάλυση Χρονοσειράς

Η χρονοσειρά  $y(t)$  είναι ένα διακριτό σήμα που εκφράζεται ως  $[y(kT)]$  και  $[x(kT)]$ , το οποίο αποτελεί μία ακολουθία λαμβανόμενη από την έξοδο (για  $x(t)$  την είσοδο) ενός συστήματος στα δείγματα ( $t_k = kT; k = 0, 1, 2, \dots, N$ ), όπου  $T$  είναι η περίοδος δειγματοληψίας και  $N$  ο αριθμός των δειγμάτων.

Η αυτοσυσχέτιση, αναφέρεται στη συσχέτιση μιας χρονοσειράς με το δικό της παρελθόν και τις μελλοντικές της τιμές. Προκειμένου να προσδιοριστεί η έκφραση της αυτοσυσχέτισης, οι ακόλουθες συναρτήσεις ορίζονται για μια διακριτή χρονοσειρά  $y(kT) = [y_1, y_2, \dots, y_N]$ .

1. Απόκλιση:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N (y(kT) - \mu)^2 \quad (2.8)$$

όπου  $\mu$  ο μέσος όρος των  $N$  στοιχείων της χρονοσειράς  $y(kT)$ .

2. Αυτοκατανομής με καθυστέρηση  $= \tau$ :

$$C_y^\tau = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-\tau} [(y(kT) - \mu)(y(k + \tau)T - \mu)] \quad (2.9)$$

3. Αυτοσυσχέτιση ως η αναλογία μεταξύ απόκλισης και αυτοκατανόμησης:

$$R_y^N = \frac{C_y^\tau}{\sigma_y^2}; \quad \text{για κάθε } \tau : R_y^N(\tau) = \frac{C_y(\tau)}{\sigma_y^2} \quad (2.10)$$

Ο συντελεστής  $R_y^N$  σε καθυστέρηση  $\tau$  (εξίσωση 2.10) ορίζει την αυτοκατανόμηση (εξίσωση 2.9) κανονικοποιημένη από την απόκλιση (εξίσωση 2.8)[5]. Θετική αυτοσυσχέτιση μπορεί να είναι συνέπεια μιας περιοδικότητας στοιχείων, κάτι που κάνει την πρόβλεψη της χρονοσειράς πιο ακριβή, αφού οι μελλοντικές τιμές εξαρτώνται από τις παροντικές και τις παρελθοντικές.

### 2.4.5 Γραμμικά Χρονικά αμετάβλητα Μοντέλα (*LTI*)

Οι περισσότερες από τις ιδιότητες των γραμμικών χρονικά αμετάβλητα συστημάτων (*LTI*) οφείλονται στο γεγονός ότι το σύστημα μπορεί να αναπαρασταθεί με γραμμικές διαφορικές εξισώσεις. Τέτοιες ιδιότητες περιλαμβάνουν την κρουστική απόκριση, συνέλιξη, δυαδικότητα, σταθερότητα, κλιμάκωση, κ.λπ. Οι ιδιότητες του γραμμικού, χρονικά αμετάβλητου συστήματος δεν θα πρέπει γενικά να εφαρμόζονται σε μη γραμμικά συστήματα. Παρόλα αυτά, τα *LTI* θα μπορούσε να αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση για τον προσδιορισμό του μη γραμμικού συστήματος.

Η επίδραση οποιουδήποτε αμετάβλητου γραμμικού συστήματος (*LTI*) σε ένα αυθαίρετο σήμα εισόδου είναι λαμβάνεται με τη συνέλιξη του σήματος εισόδου με την συνάρτηση κρουστικής απόκρισης του συστήματος. Σε ένα σύστημα *LTI*, η έξοδος του συστήματος  $y(t)$  για μια είσοδο  $x(t)$  μπορεί να ληφθεί από την ολοκλήρωση της συνέλιξης:

$$y(t) = g(t) * x(t) = \int_0^t g(t - \tau)x(\tau)d\tau \quad (2.11)$$

όπου  $g(t)$  είναι η συνάρτηση κρουστικής απόκρισης του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα,  $g(t)$  είναι η έξοδος του συστήματος για είσοδο  $x(t) = \delta(t)$  όπου  $\delta(t)$  η κρουστική συνάρτηση. Η κρουστική απόκριση περιέχει όλα τα δυναμικά στοιχεία του συστήματος. Κάνοντας χρήση του μετασχηματισμού *Laplace* στο ολοκλήρωμα της συνέλιξης 2.11,

$$Y(s) = G(s)X(s) \quad (2.12)$$

όπου  $Y(s), G(s), X(s)$  είναι οι μετασχηματισμοί κατά *Laplace* των  $y(t), g(t)$  και  $x(t)$  αντίστοιχα.

Ως Συνάρτηση Μεταφοράς ορίζεται η μαθηματική έκφραση ενός *LTI* που συσχετίζει την είσοδο και την έξοδο του συστήματος. Σε ένα *LTI*, η Σ.Μ. μπορεί να εκφραστεί ως η αναλογία του μετασχηματισμού *Laplace* της συνάρτησης εισόδου και εξόδου του συστήματος, που ισούται με τον μετασχηματισμό της συνάρτησης απόκρισης του συστήματος,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2.13)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος αποτελεί την αναλογία ονομαστή-παρανομαστή οι οποίοι είναι πολυωνυμικοί όροι της μεταβλητής 's',

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_0}{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_0} \quad (2.14)$$

Οι ρίζες των  $N(s)$  ονομάζονται μηδενικά του συστήματος και οι ρίζες  $D(s)$  λέγονται πόλοι του συστήματος. Οι πόλοι και τα μηδενικά είναι περίπλοκοι αριθμοί που καθορίζουν τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Το πραγματικό μέρος των πόλων καθορίζει τη χρονική σταθερά του συστήματος και το φανταστικό μέρος την ταλαντευτική συμπεριφορά του. Η Σ.Μ. χαρακτηρίζει επίσης τη συχνοτική συμπεριφορά του συστήματος, την απόκριση, δηλαδή, του συστήματος σε σήματα διαφορετικών συχνοτήτων.

## 2.4.6 Μοντέλα Χώρου Κατάστασης

Στον χώρο κατάστασης η σχέση μεταξύ της εισόδου, του θορύβου και της εξόδου του συστήματος γράφεται ως ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης. Στα περισσότερα συστήματα, για τα οποία υπάρχει μια προηγούμενη γνώση της θεμελιώδης λειτουργίας τους, η αναπαράσταση τους στον χώρο κατάστασης επιτυγχάνεται πιο εύκολα σε συνεχή χρόνο, για τον απλό λόγο ότι οι περισσότεροι φυσικοί νόμοι γράφονται σε συνεχή χρόνο. Ως συνέπεια η αναπαράσταση του συστήματος γίνεται ως

$$\dot{x}(t) = A(\theta)x(t) + B(\theta)u(t) \quad (2.15)$$

όπου  $A, B$  είναι πίνακες συγκεκριμένων διαστάσεων ( $n \times n$  και  $n \times m$ , αντίστοιχα, για  $n$ -διαστάσεων καταστάσεις και  $m$ -διαστάσεων εισόδους. Το διάνυσμα  $\theta$  είναι ένα διάνυσμα παραμέτρων φυσικών παραμέτρων, σταθερές υλικών κ.λπ. Η μοντελοποίηση δημιουργείται ως σταθερές καταστάσεων  $x$  με την έξοδο να είναι ένας συνδυασμός των γνωστών καταστάσεων. Έστω  $m(t)$  ιδανική μέτρηση χωρίς θόρυβο που λαμβάνουμε

από του αισθητήρες της διεργασίας,

$$m(t) = Hx(t) \quad (2.16)$$

Έστω  $p$  ο διαφορικός τελεστής η εξίσωση 2.16 γράφεται ως

$$[pI - F(\theta)]x(t) = G(\theta)u(t)$$

και εν τέλη η πράξη μεταφοράς από την είσοδο στην έξοδο είναι

$$\begin{aligned} m(t) &= G_c(p, \theta)U(t) \\ G_c(p, \theta) &= H[pI - F(\theta)]^{-1}G(\theta) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Με αυτόν τον τρόπο ένα μοντέλο συνεχούς χρόνου του συστήματος αποκτάται, παραμετροποιημένο με πραγματικούς συντελεστές.

Ωστόσο στην πραγματικότητα θα υπάρχει κάποια επίδραση του θορύβου στο σήμα  $m(t)$ . Για την αντιμετώπιση του παραμετροποιείται μια ακόμη κατάσταση που περιλαμβάνει τον μοντέλου του θορύβου. Ένας τρόπος παρουσίαση του θορύβου είναι

$$v(t) = H(q, \theta)e(t)$$

όπου  $v(t)$  το μοντέλο του θορύβου και  $e(t)$  το σήμα του `άσπρου θορύβου`. Ως `άσπρος θόρυβος` νοείται ο θόρυβος του οποίου η πηγή είναι γνωστή και προβλεπόμενη. Για την απεικόνιση στον χώρο κατάστασης είναι πιο σύνηθες ο διαχωρισμός του θορύβου σε μετρούμενο θόρυβο  $v(t)$  και θόρυβο της διεργασίας  $w(t)$  ώστε η μορφή του χώρου κατάσταση είναι η εξής:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= A(\theta)x(t) + B(\theta)u(t) + w(t) \\ y(t) &= C(\theta)x(t) + v(t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Έστω ότι η προσοχή στρέφεται στην πρόβλεψη της εξόδου  $y$  της εξίσωσης 2.18. Η περιγραφή του συστήματος ευνοεί την χρήση του φίλτρου *Kalman*. Έστω ότι  $v(t)$ ,  $w(t)$  γκαουσιανές τυχαίες συνάρτησης του θορύβου, η προβλεπόμενη έξοδος  $y$  δίνεται από

$$\begin{aligned} \hat{x}(t+1, \theta) &= A(\theta)\hat{x}(t, \theta) + B(\theta)u(t) + K(\theta)[y(t) - C(\theta)\hat{x}(t, \theta)] \\ \hat{y}(t|\theta) &= C(\theta)\hat{x}(t, \theta) \end{aligned} \quad (2.19)$$

όπου  $K(\theta)$

$$K(\theta) = [A(\theta)\bar{P}(\theta)C^T(\theta) + R_1\mathbf{2}(\theta)][C(\theta)\bar{P}C^T(\theta) + R_2(\theta)]^{-1} \quad (2.20)$$

και  $\bar{P}$  υπολογίζεται με χρήση της εξίσωσης Riccati

$$\begin{aligned} \bar{P}(\theta) &= A(\theta)\bar{P}(\theta)A^T(\theta) + R_1(\theta) - [A(\theta)\bar{P}(\theta)C^T(\theta) + R_1\mathbf{2}(\theta)] \\ &\quad [C(\theta)\bar{P}C^T(\theta) + R_2(\theta)]^{-1}[A(\theta)\bar{P}(\theta)C^T(\theta) + R_1\mathbf{2}(\theta)]^T \end{aligned} \quad (2.21)$$

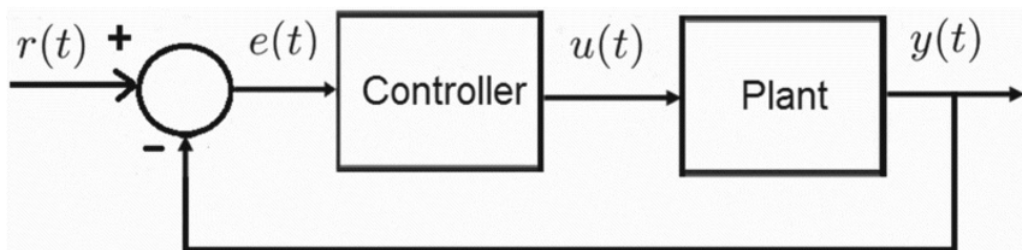
Συνοψίζοντας φαίνεται πως στην αναπαράσταση του χώρου κατάστασης μπορεί να συμπεριληφθεί ένα μοντέλο θορύβου αυξάνοντας έτσι τις δυνατότητες τις μοντελοποίησης. Η προβλεπόμενη έξοδος  $\hat{y}(t)$  προ-



βλέπεται με μεγαλύτερη ακρίβεια κάνοντας χρήση του φίλτρου *Kalman* απομονώνοντας τον θόρυβο και αυξάνοντας την ακρίβεια των μετρήσεων.

## 2.5 Έλεγχος

Το πρόβλημα του ελέγχου είναι να μορφοποιήσει την έξοδο ενός συστήματος με έναν επιθυμητό τρόπο επιλέγοντας την είσοδο του. Τα συστήματα ελέγχου είναι αυτά που κάνουν τις μηχανές, στην ευρύτερο έννοια του όρου, να λειτουργούν όπως προβλέπεται. Τα συστήματα ελέγχου βασίζονται συνήθως στην αρχή της ανατροφοδότησης, όπου το σήμα που πρόκειται να ελεγχθεί συγκρίνεται με ένα επιθυμητό σήμα αναφοράς με την διαφορά τους να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διορθωτικής δράσης ελέγχου. Ένας ορισμός της έννοιας του ελέγχου είναι: Έλεγχος ενός δεδομένου συστήματος είναι η διαδικασία καθορισμού, παραγωγής, πρόκλησης του κατάλληλου σήματος εισόδου του συστήματος, έτσι ώστε η έξοδος να ακολουθεί μια επιθυμητή τιμή. Ο μηχανισμός που εκτελεί τον έλεγχο ενός ελεγχόμενου συστήματος, ονομάζεται ελεγκτής [7]. Ένα σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει την ελεγχόμενη διεργασία και τον ελεγκτή που επιδιώκει τον έλεγχο της απόκρισης, δηλαδή της εξόδου της ελεγχόμενης διεργασίας.



Σχήμα 2.7: Μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου

Σε γενικές γραμμές, ο στόχος σε ένα σύστημα ελέγχου είναι να κάνει κάποια έξοδο, έστω  $y$  να συμπεριφέρεστε κατά έναν επιθυμητό τρόπο με το χειρισμό ορισμένων εισόδων, έστω  $u$ . Ο απλούστερος στόχος μπορεί να είναι να κρατηθεί η έξοδος του συστήματος  $y$  σε χαμηλές τιμές (ή κοντά σε κάποιο σημείο ισορροπίας) - πρόβλημα ρυθμιστή -. Η διαδικασία της μοντελοποίησης που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα αφού ο σχεδιασμός ενός ελεγκτή βασίζεται στην παρουσία κάποιου μοντέλου της διεργασίας. Ο σχεδιασμός του ελέγχου γίνεται προσεκτικά ώστε η απόκριση του συστήματος να έχει κάποια συγκεκριμένη μορφή. Για τον καθορισμό αυτής της μορφής ένα σύστημα ορολογίας έχει καθιερωθεί, επιτρέποντας την περιγραφή της επιθυμητής απόκρισης.

- Κέρδος σταθερής κατάστασης (Steady state gain): είναι το κέρδος της διαδικασίας, όπως ορίζεται από τον Selborg [9] "ο λόγος της μεταβλητής μεταβολής της εξόδου με την μεταβλητή μεταβολή της εισόδου, όταν η είσοδος έχει ρυθμιστεί σε μια νέα σταθερή τιμή, επιτρέποντας έτσι στη διεργασία να φτάσει σε μια νέα τιμή σταθερής κατάστασης".

$$K = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \quad (2.22)$$

όπου

- $t_2 = 0$  χρόνος παραμονής μεταξύ του διαστήματος  $\pm 2\%$  της σταθερής κατάστασης
- $t_1$  = αρχικός χρόνος απόκρισης
- $y_2$  = τιμή τελικής σταθερής κατάστασης
- $t_2$  = αρχικής τιμή βηματικής απόκρισης

- Σφάλμα τελικής κατάστασης  $e$ : Η διαφορά της επιθυμητής τιμής και της τιμής της απόκρισης του συστήματος στην τελική σταθερή κατάσταση.
- Απόσβεση  $\zeta$  (Damping): Είναι μια μονάδα χωρίς διαστάσεις που υποδηλώνει το βαθμό φθίνουσας συμπεριφοράς όταν το σύστημα υπόκειται σε μια διαταραχή.
- Νεκρός χρόνος  $t_d$  (Dead Time): Είναι ο χρόνος που χρειάζεται το σύστημα να αρχίσει την αλλαγή της εξόδου του από τη στιγμή που παρουσιάστηκε μια αλλαγή στην είσοδο του.
- Χρονική σταθερά  $\tau$  (Time constant): Είναι η σταθερά που καθορίζει την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος
- Χρόνος ανύψωσης  $t_r$  (Rise Time): Είναι ο χρόνος που χρειάζεται το σύστημα να φτάσει την τιμή της τελικής σταθερής κατάστασης. Όταν η διεργασία δεν υπόκειται σε υπερύψωση, ο χρόνος ανύψωσης υπολογίζεται ως τον χρόνο που η απόκριση χρειάζεται να φτάσει από το 10% στο 90% της τελικής σταθερής κατάστασης.
- (Peak Time)  $t_p$ : Ο χρόνος που χρειάζεται η απόκριση να φτάσει για πρώτη φορά την μέγιστη τιμή της.

$$t_p = \frac{\pi * \tau}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.23)$$

- Υπερύψωση (Overshoot): Ορίζεται ως το ποσοστό απόκρισης που ξεπερνά την τιμή της τελικής σταθερής κατάστασης. Αυτή η συμπεριφορά συναντάται κυρίως σε συστήματα με χαμηλή απόσβεση και συνήθως ακολουθείται από ένα `κουδούνισμα`.

$$\%OS = e^{\frac{-\tau * \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}} \quad (2.24)$$

- Κουδούνισμα (Ringing): Είναι μια δυναμική συμπεριφορά όπου το σήμα τείνει να ταλαντεύεται γύρω από την τιμή τελικής σταθερής κατάστασης έπειτα από μια υπερύψωση.
- Φυσική συχνότητα (Natural frequency): είναι η φθίνουσα συχνότητα με την οποία το σήμα ταλαντεύεται γύρω από την τιμή σταθερής κατάστασης.
- Περίοδος  $P$ : Η περίοδος  $P$  είναι ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών της βηματικής απόκρισης

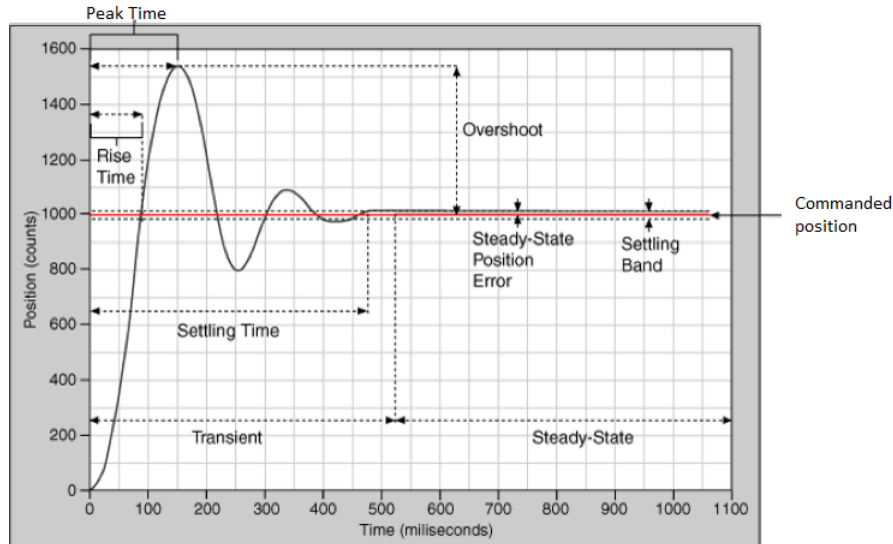
$$P = \frac{2 * \pi * \tau}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.25)$$

### 2.5.1 Τεχνικές ελέγχου

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνικές ελέγχου με διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας η κάθε μία. Από τους ελεγκτές απλούστερης μορφής που απλά ενισχύουν το σήμα εισόδου - ελεγκτές  $P$  - σε συστήματα τεχνικής νοημοσύνης που προσπαθούν μέσα από πολύπλοκους αλγόριθμους να περιγράψουν την ανθρώπινη συμπεριφορά. Ο στόχος κάθε μηχανικού ελέγχου είναι να εφαρμόσει την καταλληλότερη από αυτές τις μεθόδους στην διεργασία που προσπαθεί να ελέγξει.

#### Lead-Lag

Οι κλασικές τεχνικές ελέγχου αναπτύχθηκαν μεταξύ άλλων από τους Bode, Nichols και Nyquist κοντά στα μέσα του 20ού αιώνα βάσει κάποια αναπαράστασης της συνάρτησης συχνότητας  $G(e^{j\omega})$ . Για το σκοπό αυτό συνήθως γίνεται χρήση του νόμου της ανατροφοδότησης,



Σχήμα 2.8: Απόκριση Συστήματος με περιγραφή των χαρακτηριστικών στοιχείων

$$u(t) = F(q)[r(t) - y(t)] \quad (2.26)$$

όπου  $r(t)$  είναι η επιθυμητή τιμή της εξόδου γνωστή και ως τιμή αναφοράς. Χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τις διαταραχές, το κλειστό σύστημα παίρνει την μορφή

$$y(t) = \frac{F(q)G(q)}{1 + F(q)G(q)}r(t) \quad (2.27)$$

και η επιλογή της  $F(q)$  γίνεται έτσι ώστε η ελεγχόμενη συνάρτηση

$$F(e^{j\omega})G(e^{j\omega})$$

να έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Για την επίτευξη ευστάθειας, οι συχνότητες που βρίσκονται γύρω από την συχνότητα  $\omega_c$  (crossover) όπου

$$|F(e^{j\omega})G(e^{j\omega})| = 1$$

είναι ιδιαίτερης σημασίας. Γενικά μια καλή γνώση του  $G(e^{j\omega})$  στις συγκεκριμένες συχνότητες συντελεί στην επιτυχία της εφαρμογής.

## PID

Με την αποτελεσματικότητα που παρουσιάζει ο ελεγκτής τριών όρων - *PID* 2.28 τόσο στην μεταβατική αλλά και στην σταθερή κατάσταση, είναι μία από τις πιο διάσημες επιλογές ελέγχου, συνδυάζοντας απλότητα και αποδοτικότητα. Από τις τεχνικές ρύθμισης του ελεγκτή Ziegler-Nichols το 1942 μέχρι σήμερα εξακολουθεί να αποτελεί το 90% του ελέγχου της βιομηχανίας, με τις περισσότερες φορές να προτιμάται από τις πιο σύγχρονες ψηφιακές μεθόδους. Ο *PID* κάνει χρήση της μεθόδου ανατροφοδότησης και μπορεί να θεωρηθεί ελεγκτής Lead-Lag έχοντας έναν πόλο στην αρχή των αξόνων και τον άλλο στο άπειρο. Στην πιο σύνηθες περίπτωση ο ελεγκτής δίνεται από την εξίσωση 2.28

$$c(t) = K_p(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.28)$$

όπου το σήμα ελέγχου παράγεται από την εξίσωση 2.28, στην οποία το σήμα σφάλματος  $e(t)$  υπόκειται σε

απλές μαθηματικές πράξεις. Ως  $K_p$  δηλώνεται το αναλογικό κέρδος του όρου  $P$ ,  $K_i$  είναι το ολοκληρωτικό κέρδος του όρου  $I$  και  $K_d$  το διαφορικό κέρδος του όρου  $D$ . Οι λειτουργίες των τριών όρων είναι οι εξής.

- Ο αναλογικός όρος  $P$  δίνει μια γενική λύση στο πρόβλημα του ελέγχου παράγοντας ένα σήμα αναλογικό του σφάλματος εισόδου
- Ο ολοκληρωτικός όρος  $I$  μειώνει το σφάλμα σταθερής κατάστασης άλλα ταυτόχρονα δημιουργεί υπερύψωση στην απόκριση του συστήματος
- Ο διαφορικός όρος  $D$  βελτιώνει την απόκριση στην μεταβατική περίοδο και συνήθως αυξάνει την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος κάνοντας όμως το σύστημα πιο ευάλωτο σε θορύβους.

Σε γενικές γραμμές ο διαφορικός όρος έχει θετικό αποτέλεσμα και προκαλεί μια φασική προήγηση της απόκρισης η οποία εξουδετερώνει την φασική καθυστέρηση που εισάγει ο ολοκληρωτικός όρος. Επίσης, αυξάνει την ταχύτητα απόσβεσης των ταλαντώσεων κάνοντας έτσι το σύστημα πιο αποδοτικό ενάντια διαταραχών. Ακόμα και αν στην θεωρία η αύξηση του διαφορικού κέρδους οδηγεί σε αύξηση της ευστάθειας, στην πράξη κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα αληθές. Πολλές φορές λόγω της αδράνειας του συστήματος η ρύθμιση του όρου  $D$  έχει αποδειχθεί πολύ δύσκολη και λειτουργεί αντίθετα με τις προσδοκίες του ρυθμιστή. Αυτή η δυσκολία έχει οδηγήσει στην αποφυγή της χρήσης διαφορικού όρου και επιλογές όπως ελεγκτής  $PI$  χρησιμοποιείται αντί του  $PID$ .

### 2.5.2 Στόχοι Ρύθμισης Κερδών

Η επιλογή των κερδών μπορεί να αποδειχθεί μια δύσκολη διαδικασία στην εφαρμογή ενός ελέγχου  $PID$ . Ο γενικός στόχος είναι η ρύθμιση έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ευστάθεια στο σύστημα κλειστού βρόχου και θα ικανοποιεί τα εξής κριτήρια:

- Σταθερή Ευστάθεια
- Σταθερότητα ενάντια σε αβεβαιότητες της μοντελοποίησης
- Αντιμετώπιση του θορύβου και σταθερότητα ενάντια σε αβεβαιότητες του περιβάλλοντος
- Ακολούθηση επιθυμητής τιμής με ικανοποιητική συμπεριφορά στην μεταβατική κατάσταση, συμπεριλαμβανομένου της υπερύψωσης, τον χρόνο ανύψωσης και τον χρόνο τελικής κατάστασης.
- Απόρριψη εξωτερικών διαταραχών

Οι παραπάνω στόχοι μπορούν να κατηγοροποιηθούν βάση της χρήσης τους ως:

- Αναλυτικοί μέθοδοι: Οι παράμετροι του  $PID$  υπολογίζονται κάνοντας χρήση αλγεβρικών ή αναλυτικών μεθόδων για την επίτευξη των παραπάνω στόχων. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τον στόχο να είναι σε αναλυτική μορφή και να υπάρχει ένα ακριβές μοντέλο διεργασίας.
- Μέθοδοι απόκρισης συχνότητας: Τα χαρακτηριστικά της συχνотικής απόκρισης της ελεγχόμενης διεργασίας χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση του  $PID$ . Η μέθοδος αυτή εστιάζει σε σταθερή ευστάθεια.
- Εμπειρικοί μέθοδοι: Οι παράμετροι του  $PID$  ρυθμίζονται με βάση την εμπειρία του ρυθμιστή κατά την διάρκεια λειτουργίας της διεργασίας. Η πιο διάσημη μέθοδος είναι αυτή των Ziegler-Nichols
- Μέθοδοι βελτιστοποίησης: Τα κέρδη βρίσκονται με χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης όπου δημιουργείται μια συνάρτηση κόστους και στην συνέχεια μέσα από επαναληπτικές διαδικασίες μειώνεται αριθμητικά μέχρι να βρεθεί τοπικό ακρότατο.

- Προσαρμοστικοί μέθοδοι: Με αυτή την μέθοδο τα κέρδη του ελεγκτή ρυθμίζονται συνέχεια κατά την διάρκεια λειτουργίας της διεργασίας ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη λειτουργία ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

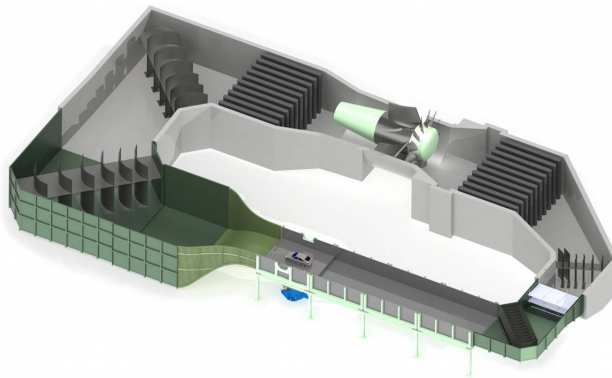
Δεν υπάρχει πρακτικό όριο μεταξύ των συνόρων αυτών των μεθόδων, συνεπώς σε κάθε εφαρμογή μπορεί να γίνει ταυτόχρονη χρήση περισσότερων από μια μεθόδους. Στην πραγματικότητα οι εμπειρικοί μέθοδοι προτιμώνται κατά 90% των περιπτώσεων, λόγω της απλότητας τους και της εξοικείωσης των ρυθμιστών με αυτές μέσα από όλα αυτά τα χρόνια. Ωστόσο, για ορισμένες εφαρμογές όπου η βέλτιστη πιθανή συμπεριφορά είναι αναγκαία, οι υπόλοιπες μέθοδοι μπορούν να δώσουν σαφές αποτέλεσμα σε σχέση με τις εμπειρικές. Εν τέλη η ρύθμιση των κερδών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και διαφέρει κάθε φορά ανάλογα τις απαιτήσεις της εφαρμογής και της κρίσης του ρυθμιστή-μηχανικού.

## Κεφάλαιο 3

# Εξοπλισμός

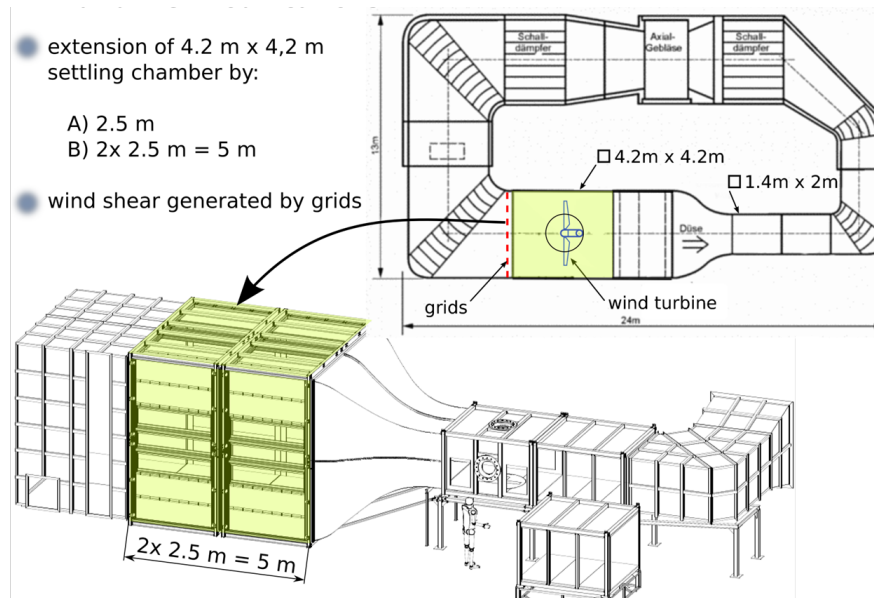
### 3.1 Αεροδυναμική Σήραγγα

Το Growika, παίρνει την ονομασία του από τον γερμανικό όρο "Großer Windkannal" που σημαίνει μεγάλη αεροδυναμική σήραγγα, κάτι είναι πλήρως αντιπροσωπευτικό αφού είναι η μεγαλύτερη σήραγγα μικρών ταχυτήτων στην περιοχή του Βερολίνου. Από το 1977, που σηματοδοτεί την ημερομηνία που χτίστηκε, ο ειδικός σχεδιασμός της σε μορφή δακτυλίου έχει προσεγγίσει διάφορους ερευνητές από όλο τον κόσμο και έχει φιλοξενήσει πολλά ερευνητικά προγράμματα από τον τομέα της αεροδυναμικής μηχανικής. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1 ο τομέας δοκιμών αποτελείται από ένα σύνολο τεσσάρων κουτιών, γνωστά και ως WOX, που έχουν την δυνατότητα να αφαιρεθούν και να προστεθούν ανάλογα, για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες της κάθε μελέτης. Η ροή αέρα παράγεται από ένα μοτέρ 450kW εφοπλισμένο με μια φτερωτή, με ταχύτητες που φτάνουν τα 60m/s στον τομέα δοκιμών.



Σχήμα 3.1: 3-D Cad σχέδιο του Τούνελ που βρίσκεται στο Πολυτεχνείο του Βερολίνου

Πρόσφατα η σήραγγα ανακαινίστηκε για να φιλοξενήσει την ερευνητική ανεμογεννήτρια του Βερολίνου "B.e.R.T. (Berlin Research Turbine)" όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2. Τα κουτιά WOX1 ένα και WOX αντικαταστάθηκαν με ένα μεγαλύτερο θάλαμο διαστάσεων 4.20 m ύψους 4.20 m πλάτους. Επιπλέον τρία συρμάτινα πλέγματα διαμέτρου 2 mm και πάχους 0.3 mm τοποθετήθηκαν ακριβώς μετά την γωνία της σύραγγας, με σκοπό την εξομάλιση του πεδίου ανέμου που εξέρχεται αυτής. Ως συνέπεια του μεγέθους του νέου θαλάμου, οι ταχύτητες ανέμου περιορίζονται στο μέγιστο των 7m/s.



Σχήμα 3.2: Η ανακαινισμένη σήραγγα για την φιλοξενία της πειραματικής ανεμογεννήτριας

### 3.2 Ερευνητική Ανεμογεννήτρια του Βερολίνου

Η ανεμογεννήτρια είναι μεσαίου μεγέθους τύπου οριζόντιου άξονα "(HAWT)" και αποτελεί μέρος ενός μεγάλου ερευνητικού προγράμματος χρηματοδοτούμενο από την Γερμανική Ένωση Έρευνας (DFG). Σε αυτό το πρόγραμμα εμπλέκονται πέντε διαφορετικά μεγάλα Γερμανικά πανεπιστήμια, με το κάθε ένα να έχει αναλάβει διαφορετικές αρμοδιότητες. Η ανεμογεννήτρια σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και τοποθετήθηκε από την εταιρία SMARTBLADE GmbH. Ο ρότορας είναι ρότορας τριών λεπίδων και διαμέτρου 3m, με ταχύτητα κανονικής λειτουργίας στα 180rpm και γενικό εύρος ταχυτήτων που αρχίζουν από τα 100 και φτάνουν τα 250rpm. Περισσότερες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της δομής της ανεμογεννήτριας μπορούν να βρεθούν στο φύλλο αναφοράς BeRT της SMARTBLADE GmbH[10].



Σχήμα 3.3: 3-D Cad σχέδιο της ερευνητικής ανεμογεννήτριας μέσα στην αεροδυναμική σύραγγα



### 3.3 Ευφυής Λεπίδα

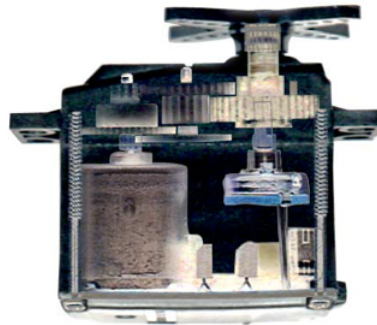
Μία από τις λεπίδες της ανεμογεννήτριας, γνωστή και ως 'Ευφυής Λεπίδα', είναι πλήρως εξοπλισμένη με αισθητήρια πίεσης και γραμμικούς μετρητές μηχανικής τάσης, καθώς και ανιχνευτές τριών οπών για τον καθορισμό της γωνίας προσβολής του ανέμου στην περιοχή των πτερυγίων καμπυλότητας.

#### 3.3.1 Πτερύγια Καμπυλότητας

Τρία πτερύγια καμπυλότητας έχουν τοποθετηθεί σε απόσταση από 60% έως το 90% της ακτίνας του ρότορα, με το καθένα να αποτελεί ένα 10% αυτής την απόσταση. Αποτελούν επίσης το 30% της τοπικής χορδής της λεπίδας και έχουν μία συνολική γωνία παραμόρφωσης της τάξεως των  $\pm 10^\circ$ .

#### 3.3.2 Ενεργοποιητές

Η ενεργοποίηση της κίνησης των πτερυγίων πραγματοποιείται από τρεις σέρβο κινητήρες DA-14-05-60-B σχεδιασμένους από την γερμανική εταιρία Volz [12], με έναν μεταλλικό άξονα να συνδέει κάθε πτερύγιο με τον αντίστοιχο κινητήρα.



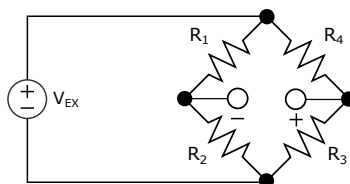
Σχήμα 3.4: Εσωτερικό κύκλωμα του κινητήρα-σέρβο

Supply Voltage	
Operating voltage	4,8-5 V
Signal voltage	TTL level
Input Pulse	
Valid pulse lengths	0.9 – 2.1 ms
Left / Center / Right	0.9 ms / 1.5 ms / 2.1 ms
Resolution	< 0.5 $\mu$ s
Operating Data at 5 Volts	
Peak stall torque	32 Ncm 41 oz-in
No load speed	610°/s
Max. travel angle	+/- 65° = 130° total travel
Material / Shielding / Protection	
Case	Carbon fiber reinforced POM
Splash water resistance	IP 67 , waterproof to 1m water depth
EMI / RFI shielding	Case shielded
Gear set	Hardened steel

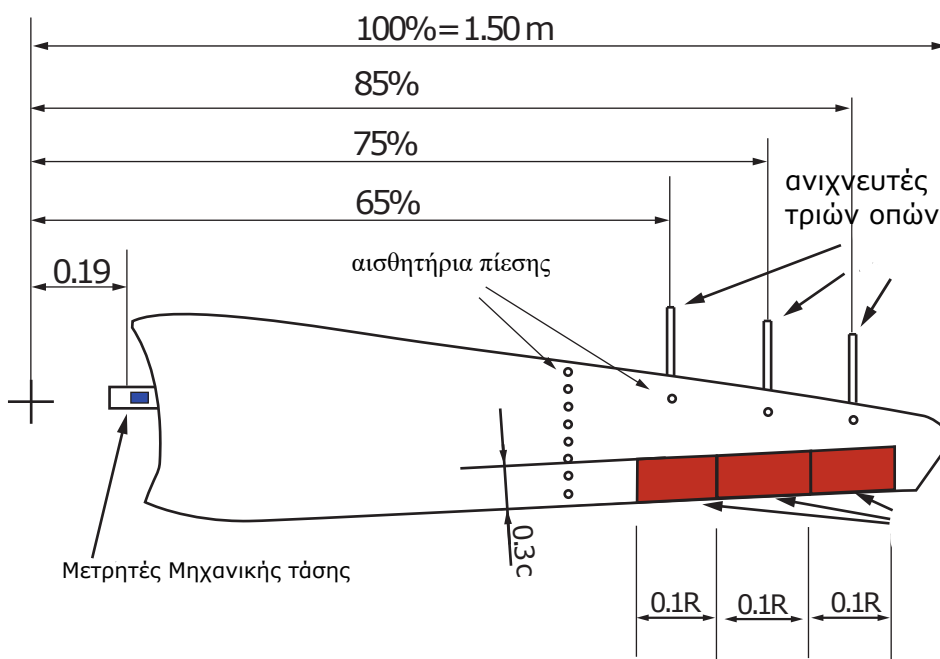
Σχήμα 3.5: Φύλλο λειτουργίας των σέρβο-κινητήρων

### 3.3.3 Μετρητές Μηχανικής Τάσης

Σε απόσταση  $0.19\text{cm}$  από το κέντρο του θαλάμου του κινητήρα και ακριβώς στην βάση της λεπίδας, δύο γραμμικοί μετρητές μηχανικής τάσης έχουν τοποθετηθεί. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται σε ένα κύκλωμα πλήρους γέφυρας Wheatstone της οποίας οι μεταλλικοί αγωγοί μεταβάλλουν την αντίστασή τους και συνεπώς την τάση εξόδου της γέφυρας όταν τους ασκηθεί κάποια δύναμη. Οι γραμμικοί μετρητές μηχανικής τάσης είναι ευαίσθητοι σε αλλαγές μετατόπισης κατά μήκος του κυρίου άξονα αλλά σχετικά αναισθητοί κατά μήκος του εγκάρσιου άξονα. Γι' αυτόν τον λόγο, έχουν τοποθετηθεί δύο αντί ενός αισθητήρια που διαφέρουν κατά  $90^\circ$  μεταξύ τους, για την μέτρηση ταυτόχρονα της εγκάρσιας και κύριας τάσης. Οι μετρητές είναι τύπου **FAET-A6194N-35-S6/EL** κατασκευασμένοι από την Micro-Measurements of Vishay Precision Group[13]. Έχουν αντίσταση πλέγματος  $350.0 \pm 2\% \text{ Ohm}$  και συντελεστή τάσης  $2.10 \pm \text{Nohm}$  σύμφωνα με το εγχειρίδιο κατασκευαστή. Η καλωδίωση της γέφυρας έγινε σύμφωνα με το σχήμα 3.6.



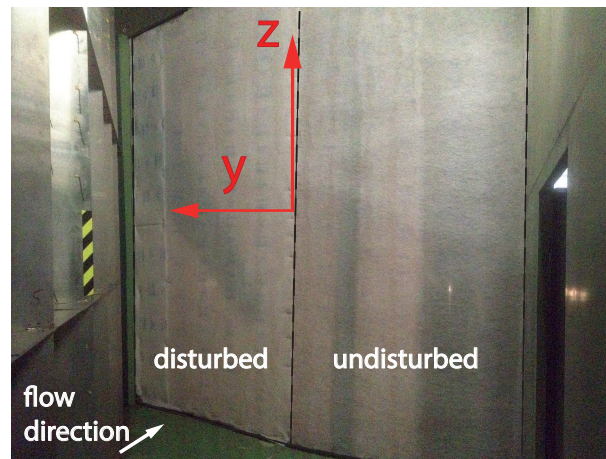
Σχήμα 3.6: Wheatstone Bridge



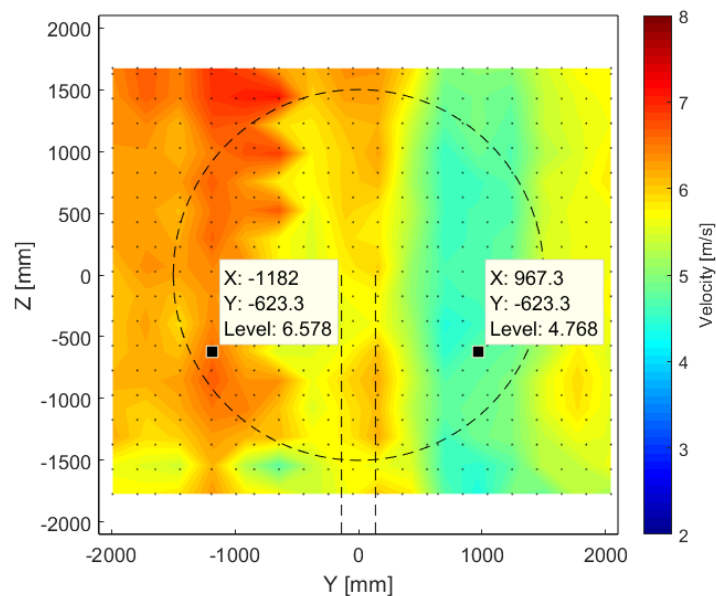
Σχήμα 3.7: Ευφυής Λεπίδα

### 3.4 Φίλτρα

Με σκοπό την δημιουργία διαταραχής στο πεδίο εισροής ανέμου της ανεμογεννήτριας, διαφορετικά στρώματα συνθετικών φίλτρων έχουν τοποθετηθεί στο πρώτο μεταλλικό πλέγμα ακριβώς μετά της γωνία της σήραγγας. Στο δεξί κάθετο μισό της περιοχής τοποθετείται ένα φίλτρο, ενώ στο άλλο μισό τρεις διαφορετικοί τύποι διαταραχών ερευνώνται: μηδενική διαταραχή (ένα στρώμα), μικρή διαταραχή (δύο στρώματα) και υψηλή διαταραχή (τρία στρώματα). Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι να υπάρχει μια σχετική αλλαγή 2 μοιρών  $AoA$  σε ταχύτητες που χιμούνται από  $6.5m/s$  ως  $8.5m/s$ . Με αυτόν τον σκοπό, μετά απο αναζήτηση του καταλληλότερου υλικού ένα φίλτρο τύπου **Viledon P15/150s** επιλέχθηκε. Στο σχήμα 3.8 φαίνεται η μείωση της ταχύτητας της κάθετης εισροής του ανέμου στην ανεμογεννήτρια, σε κατάσταση μικρής διαταραχής. Ός αποτέλεσμα, ένα φαινόμενο τοπικής ριπής ανέμου επιτυγχάνεται, η οποία αργότερα θα χρησιμοποιηθεί για την μελέτη της αποτελεσματικότητας των πτερυγίων καμπυλότητας όταν δρουν υπό έλεγχο.



(α') Τα φίλτρα τοποθετημένα πάνω στο μεταλλικό πλέγμα



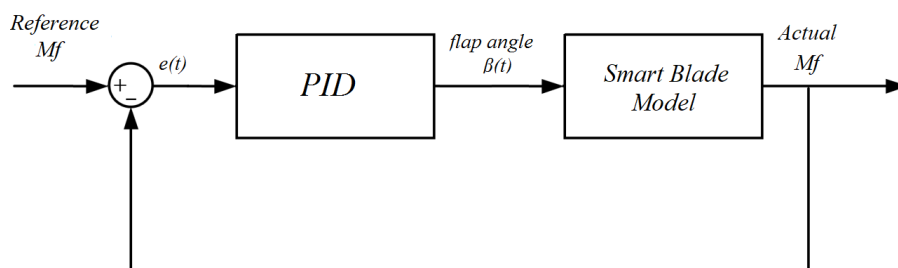
(β') Μέτρηση ταχύτητας ανέμου που εξέρχεται από το επίπεδο περιστροφής της έλικας

Σχήμα 3.8: Διάταξη Φίλτρων

## Κεφάλαιο 4

# Μεθοδολογία

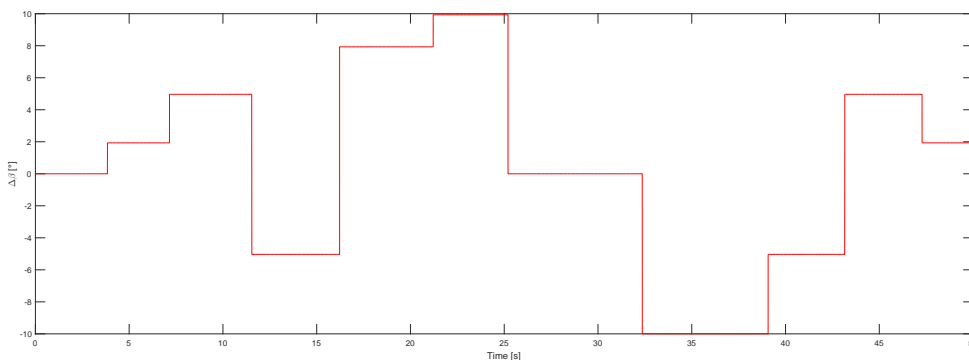
Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια περιγραφή των ενεργειών που οδήγησαν στον σχεδιασμό του κλειστού συστήματος ελέγχου (σχ. 4.1). Ο βασικός στόχος είναι η μείωση των αναταράξεων που εντοπίζονται στον μετρητή της μηχανικής τάσης κατά μήκος του εγκάρσιου άξονα -  $M_f$  -, κατά την διάρκεια λειτουργίας σε μια από τις εξομοιωμένες διαταραχές. Συνεπώς, είναι αναγκαίος ο καθορισμός ενός μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει την δυναμική σχέση μεταξύ των διαφορετικών γωνιών πτερυγίων  $-\beta-$  και της  $M_f$ . Για αυτόν τον λόγο, μια σειρά πειραμάτων εκτελέστηκαν στο περιστρεφόμενο σύστημα για την συλλογή πληροφοριών που μπορούν να εξηγήσουν την παραπάνω σχέση. Συνεχείς, τυχαίες, βηματικοί είσοδοι δόθηκαν στα πτερύγια και ταυτόχρονα παρατηρήθηκαν οι αλλαγές στη  $M_f$ . Για τον σχεδιασμό του ελεγκτή, όλα τα πτερύγια αντιμετωπίζονται ως μία μονάδα. Οι συνθήκες λειτουργίας κατά την διεξαγωγή πειραμάτων είναι ταχύτητα εισροής ανέμου  $6.2m/s$  και ταχύτητα περιστροφής ανεμογεννήτριας  $3Hz$ . Αυτές οι συνθήκες καθορίστηκαν έτσι ώστε να επιτευχθεί η πρότυπη αναλογία  $\lambda$  μεταξύ της γωνιακής ταχύτητας στην κορυφή της λεπίδας και της πραγματικής ταχύτητας εισροής του ανέμου, σύμφωνα με το κριτήριο Betz[14]. Για τον καθορισμό μοντέλου, τεχνικές αναγνώρισης συστήματος 'μαύρου κουτιού' θα εφαρμοστούν στα δεδομένα που συλλέχθηκαν. Ωστόσο, η αναγνώριση του περιστρεφόμενου συστήματος είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία ειδικά όταν κυριαρχούν στοιχεία θορύβου και διαταραχών στα πειραματικά δεδομένα. Συνεπώς, είναι αναγκαία η ανάλυση και προεργασία της πληροφορίας έτσι ώστε η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος να γίνει ορατή. Αφού επιτευχθεί αυτό και καθοριστεί το μοντέλο που αντιπροσωπεύει το σύστημα, γίνεται δυνατός ο υπολογισμός των κερδών ενός ελεγκτή  $PID$ . Η επεξεργασία του σήματος, η αναγνώριση του συστήματος καθώς και ο υπολογισμός των κερδών του ελεγκτή θα γίνει με την βοήθεια του προγράμματος MATLAB[15].



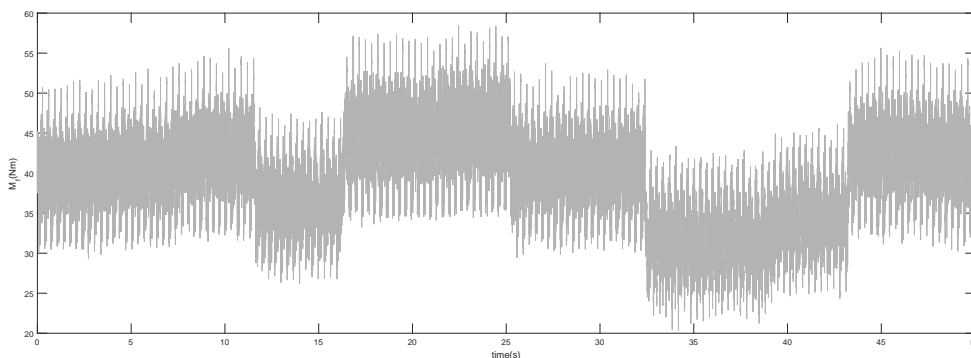
Σχήμα 4.1: Μπλόκ διάγραμμα συστήματος κλειστού βρόχου

## 4.1 Συλλογή Δεδομένων

Για να καθοριστεί η δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου διεργασίας, βηματικές εισόδοι τυχαίων γωνιών  $\beta$  δόθηκαν στα πτερύγια κατά την διάρκεια ομαλής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Στο σχήμα 4.2 φαίνονται οι αλλαγές στο σήμα  $M_f$  (κάτω), καθώς αλλάζει βηματικά η επιθυμητή γωνία των πτερυγίων(πάνω). Είναι φανερό πως η πληροφορία που λαμβάνουμε επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες μεταξύ αυτών και ο ηλεκτρονικός θόρυβος. Για την συλλογή επαρκής πληροφορίας τέσσερα παρόμοια πειράματα πραγματοποιούνται, με κάθε φορά διαφορετική ακολουθία της επιθυμητής γωνίας των πτερυγίων (σήμα εισόδου). Τα επιπλέον δεδομένα θα χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση της ακρίβειας του μοντέλου που έχει εκτιμηθεί παρακάτω, συγκρίνοντας την πραγματική τιμή εξόδου  $M_f$  με αυτή του μοντέλου προσομοίωσης.



(α) Επιθυμητή γωνία των πτερυγίων



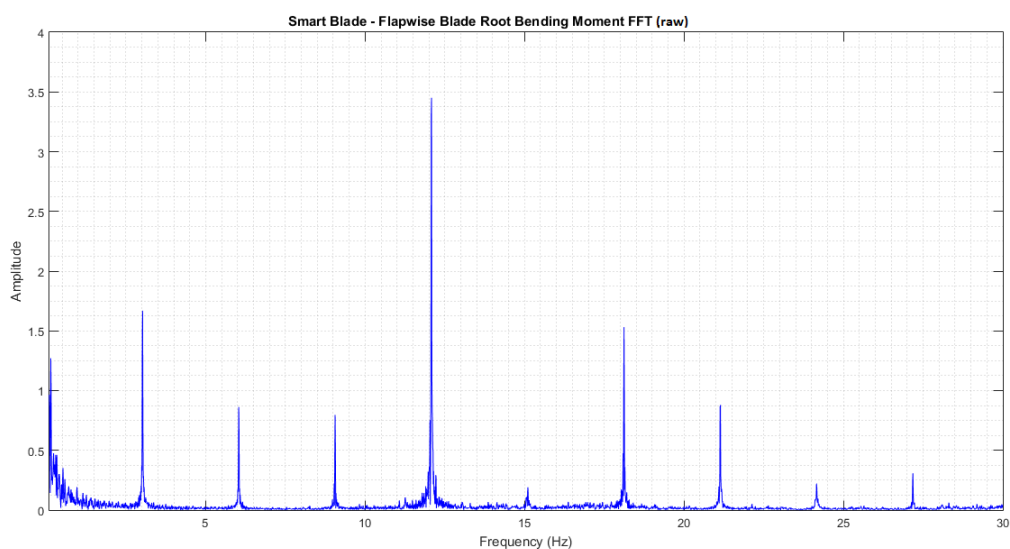
(β) Σήμα του μετρητή μηχανικής τάσης κατά τον εγκάρσιο άξονα

Σχήμα 4.2: Πείραμα με τυχαία βηματική ακολουθία στην είσοδο του συστήματος

## 4.2 Επεξεργασία του Σήματος

Είναι αναγκαίο να καθοριστούν οι πηγές των διαφορετικών διαταραχών που επηρεάζουν το σήμα του αισθητήριου μηχανικής τάσης. Πραγματοποιώντας μια ανάλυση συχνοτήτων στο σήμα, παρατηρείται πως ένα μεγάλο ποσοστό των αναπτυσσόμενων φορτίων έχει σταθερό περιοδικό χαρακτήρα. Οι βασικές μεταβολές στο σήμα συμβαίνουν στην συχνότητα περιστροφής  $3Hz$  και στις αρμονικές αυτής. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός πως η ανεμογεννήτρια αποτελείται από τρεις λεπίδες και περιστρέφεται με  $3Hz$ . Κάθε φορά που μια λεπίδα περνάει μπροστά από το κύριο σώμα της ανεμογεννήτριας, η διαφορά στο πεδίο απορροής (wake) προκαλεί μια αναταραχή στο σύστημα που γίνεται αισθητή από τον μετρητή μηχανικής τάσης. Έχοντας υπ' όψη ότι το σημείο αναφοράς είναι η ευφυής λεπίδα, είναι λογικό ότι η μεγαλύτερη αναταραχή θα καταγράφεται την στιγμή που αυτή περνάει μπροστά από τον πύργο ενώ μικρότερη θα εντοπίζεται

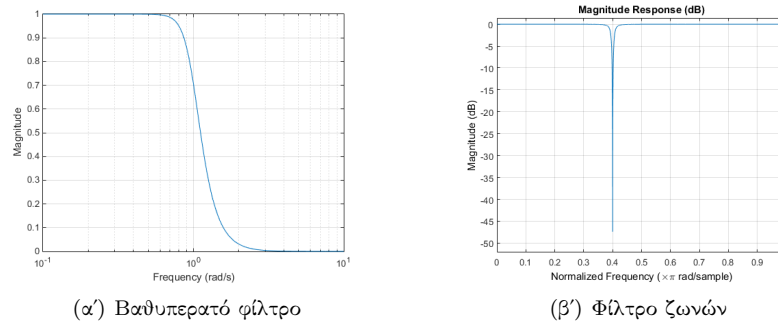
στην περίπτωση των υπόλοιπων δυο λεπίδων. Αυτό το φαινόμενο που είναι γνωστό ως και 'σκιά του πύργου' (tower shadow) εξηγεί τα φορτία που εντοπίζονται στα 3, 6 Hz. Για μεγαλύτερη ευκολία θα γίνεται αναφορά στην συχνότητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας ως  $1P$  (once per revolution) και στις αρμονικές ως  $nP$  όπου  $n$  ο αριθμός της εκάστοτε αρμονικής. Τα φορτία που συγκεντρώνονται στην συχνότητα  $3P$  οφείλονται εν μέρη στο γεγονός ότι η ανεμογεννήτρια λειτουργεί μέσα σε αεροδυναμική σήραγγα, κάτι που σημαίνει πως οι τοίχοι αυτής παίζουν ρόλο στην μορφολογία του πεδίου εισροής. Αυτό που θα ήταν αναμενόμενο είναι να υπάρχει μια τάση μείωσης των φορτίων όσο αυξάνονται οι αρμονικές. Αντίθετα, παρατηρείται μια έντονη αύξηση στην συχνότητα  $4P$ . Μετά από ανάλυση της μηχανικής δομής του συστήματος, λεπτομέρειες της οποίας είναι πέρα από τους σκοπούς αυτής της έρευνας (πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στο φύλλο αναφοράς B.e.R.T. [10]), παρατηρήθηκε πως η τέταρτη τάξη της συχνότητας περιστροφής τέμνεται με την θεμελιώδη συχνότητα του πύργου της ανεμογεννήτριας κάτι που προκαλεί έντονους κραδασμούς στο σύστημα.



Σχήμα 4.3: Ανάλυση συχνότητων σήματος μηχανικής τάσης

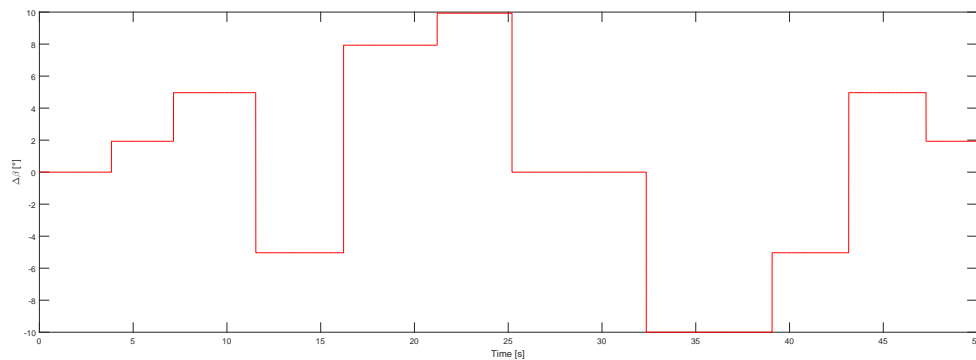
Τα δυναμικά στοιχεία του συστήματος ως ένα ποσοστό της τάξεως του 99% 'κρύβονται' σε χαμηλές συχνότητες. Ήδη από συχνότητες άνω των  $10\text{Hz}$  ένα πολύ μικρό ποσοστό πληροφορίας είναι δυνατό να εντοπιστεί. Ταυτόχρονα, εφόσον το σήμα προέρχεται από πειραματική διάταξη, το στοιχείου του θορύβου γίνεται όλο και πιο κυρίαρχο με την αύξηση των συχνοτήτων. Ως 'θόρυβος' επισημαίνεται οποιαδήποτε μη επιθυμητή παραλλαγή στο σήμα πληροφορίας, η οποία μπορεί να προέρχεται από μετατροπές του ηλεκτρικού σήματος, μεταφορά καθώς και επεξεργασία του από τις μονάδες μέτρησης.

Το γεγονός ότι η ανάπτυξη των φορτίων έχει επαναλαμβανόμενο χαρακτήρα χρησιμοποιήθηκε στην διαδικασία φιλτραρίσματος του σήματος. Αρχικά, με την υπόθεση ότι οποιοδήποτε στοιχείο άνω των  $10\text{Hz}$  δεν περιέχει σημαντική πληροφορία, το σήμα 'πέρασε' από ένα βαθυπερατό 6-ης τάξεως φίλτρο τύπου butterworth με συχνότητα αποκοπής στα  $10\text{Hz}$ . Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του φίλτρου, μπορεί να ειπωθεί πως έχει την μορφή γκαουσιανής συνάρτησης τοποθετημένη στο σύστημα αξόνων των συχνοτήτων. Όταν χρησιμοποιείται ως βαθυπερατό φίλτρο, δηλαδή όταν το διαπερνάνε μόνο οι χαμηλές συχνότητες, το κέντρο της συνάρτησης τοποθετείται στην συχνότητα μηδέν και η τάξη του φίλτρου καθορίζει την διακύμανση της. Όσο χαμηλότερη η τάξη τόσο μικρότερη είναι η διακύμανση της συνάρτησης, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση της πραγματικής συχνότητας αποκοπής από την επιθυμητή. Αντίστροφα, η ακρίβεια του φίλτρου αυξάνεται με την αύξηση της τάξεως άλλα ταυτόχρονα αυξάνεται και η πολυπλοκότητα των υπολογισμών.

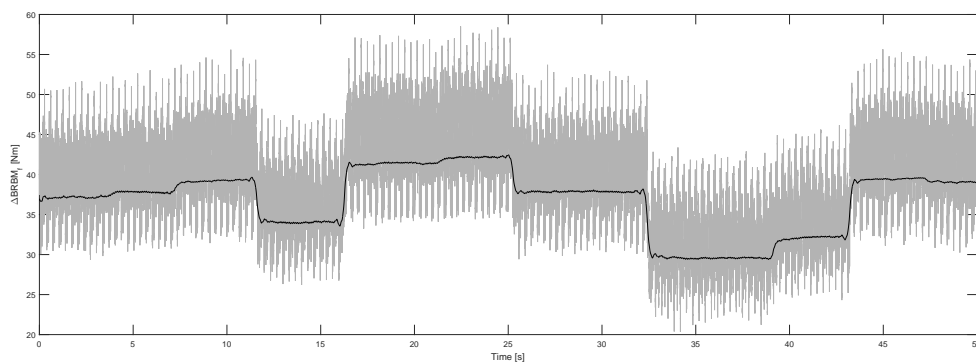


Σχήμα 4.4: Γραφικές παραστάσεις των φίλτων στο πεδίο συχνοτήτων

Στην συνέχεια το βαθυπερασμένο σήμα διαπερνάει ένα φίλτρο ζωνών (notch filter) που το απομονώνει από της συχνότητες  $1P, 2P, 3P$  και εν τέλη το σήμα αποτελείται μόνο από χαρακτηριστικά που περιγράφουν την δυναμική του συμπεριφορά. Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η γραφική παράσταση του βαθυπερατού φίλτρου και του φίλτρου ζωνών που χρησιμοποιήθηκαν ενώ στο σχήμα 4.5 φαίνεται το αποτέλεσμα της επεξεργασίας με την σύγκριση του επεξεργασμένου με το αρχικό σήμα.



(α) Επιθυμητή γωνία των πτερυγίων



(β) Σήμα του μετρητή μηχανικής τάσης κατά τον εγκάρσιο άξονα

Σχήμα 4.5: Αποτέλεσμα επεξεργασίας του σήματος

### 4.3 Αναγνώριση Συστήματος

Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός μιας συνάρτησης ή μοντέλου που να ικανή να περιγράψει την συμπεριφορά του συστήματος για κάθε δεδομένη είσοδο. Εφόσον μετά την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε μια ορατή απόκριση του συστήματος, αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση ενός μοντέλου κάνοντας χρήση των συναρτήσεων ελαχιστοποίησης σφάλματος. Αρχικά, τρία διαφορετικά σετ δεδομένων θα επεξεργαστούν, με τον ίδιο τρόπο που προαναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, για την εκπαίδευση και αργότερα την επαλήθευση του μοντέλου σε διαφορετικές εισόδους. Το εργαλείο System Identification[16] του MATLAB χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των μοντέλων.

Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί είναι αρχικά η εκτίμηση διαφορετικών μοντέλων με βάση το σετ δεδομένων εκπαίδευσης, και στην συνέχεια η σύγκριση των αποτελεσμάτων στο σετ δεδομένων επαλήθευσης. Κάνοντας χρήση του κριτηρίου μέσου τετραγωνικού σφάλματος, θα κριθεί ο βαθμός της ταύτισης του κάθε μοντέλου με το πραγματικό σύστημα και εν τέλη το μοντέλο με το μεγαλύτερο ποσοστό ταύτισης θα χρησιμοποιηθεί στον σχεδιασμό του ελεγκτή. Μόνο γραμμικά μοντέλα θα εκτιμηθούν. Η εκτίμηση μοντέλων γίνεται με την επαναλαμβανόμενη μείωση της συνάρτησης κόστους  $J$  (4.1) κάθε μοντέλου μέχρι να επιτευχθεί - ιδανικά - ολικό ελάχιστο ή μέχρι το σφάλμα να διατηρηθεί στην ίδια τιμή για τρεις συνεχόμενες επαναλήψεις. Ως  $N$  δηλώνεται ο αριθμός των δειγμάτων και  $e(t, \theta)$  είναι ένα διάνυσμα σε χρόνο  $t$  παραμετροποιημένο από το διάνυσμα  $\theta$ .

$$\text{minimize } J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^T(t, \theta) \quad e(t, \theta) \quad (4.1)$$

Τρεις βασικοί τύποι μοντέλων καθορίστηκαν για την εκτίμηση του μοντέλου διεργασίας. Ο πρώτος είναι η κλασική συνάρτηση μεταφοράς (4.2) με μετασχηματισμό στο πεδίο του *La place*,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_0}{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_0} \quad (4.2)$$

ο δεύτερος είναι εξισώσεις χώρου κατάστασης (4.3) με την χρήση της μεθόδου *subspace*, όπου  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  οι μεταβλητές κατάστασης και  $K$  ο συντελεστής *Kalman*

$$\begin{aligned} dx/dt &= Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \\ M_f(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t) \end{aligned} \quad (4.3)$$

και ο τρίτος είναι μοντέλα τύπου *ARM* (4.4) και *ARMAX* (4.5) που αντί για σταθερούς συντελεστές μεταβλητών έχουν πολυώνυμους όρους.

$$\text{ARM: } X_t = \mu + \epsilon_t + \sum_{i=1}^q \theta_i \epsilon_{t-i} \quad (4.4)$$

$$\text{ARMAX: } X_t = \epsilon_t + \sum_{i=1}^p \phi_i (X_{t-i} - m_{t-i}) + \sum_{i=1}^q \theta_i \epsilon_{t-i} \quad (4.5)$$



Το πρόβλημα που αντιμετωπίζει η μεθοδολογία μείωσης του σφάλματος είναι ότι υπάρχει ο κίνδυνος να καταλήξει η διαδικασία σε τοπικό ελάχιστο. Κάτι τέτοιο θα σήμαινε πως ενώ υπάρχει περιθώριο βελτίωσης της ακρίβειας του μοντέλου αυτό δεν επιτυγχάνεται λόγω κακής αρχικοποίησης των ελεύθερων παραμέτρων. Για την αντιμετώπιση ενός τέτοιου φαινομένου, διαφορετικοί μέθοδοι αρχικοποίησης δοκιμάστηκαν μέχρι να βρεθεί ένα μοντέλο που περιγράφει τα σημαντικά δυναμικά στοιχεία του συστήματος με υψηλή ακρίβεια. Επιπλέον το βασικό πρόβλημα ήταν να βρεθεί ο σωστός ορισμός του σφάλματος για την μείωση της συνάρτησης κόστους  $J$ . Από την βιβλιογραφία του εργαλείου System Identification βρέθηκε πως υπάρχουν δύο μέθοδοι ορισμού του σφάλματος  $e(t)$ .

όταν η διαδικασία εκτίμησης έχει ως βάση την **πρόβλεψη** (prediction) η συνάρτηση σφάλματος είναι η ακόλουθη

$$e(t) = y_{\text{measured}}(t) - y_{\text{predicted}}(t)$$

ενώ όταν η διαδικασία εκτίμησης έχει ως βάση την **προσομοίωση** (simulation) η συνάρτηση σφάλματος ορίζεται ως

$$e(t) = y_{\text{measured}}(t) - y_{\text{simulated}}(t)$$

Στην πρώτη μέθοδο γίνεται προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα μοντέλο του θορύβου και βάση αυτού να εκτιμήσει το τελικό μοντέλο του συστήματος. Αντίθετα, η δεύτερη διαδικασία προβλέπει το τελικό μοντέλο του συστήματος και μετά προχωράει στην πρόβλεψη του μοντέλου του θορύβου έχοντας ως γνώμονα τα σφάλματα πρόβλεψης. Η βασική διαφορά υπόκειται στο γεγονός ότι με την μέθοδο της προσομοίωσης πραγματοποιείται εκτίμηση του μοντέλου χωρίς αυτή να επηρεάζεται από ένα μοντέλο θορύβου, κάτι που στην περίπτωση αυτής της μελέτης είναι αχρείαστο αφού το σήμα έχει ήδη υποστεί προεργασία για την ευκολότερη αναγνώριση του συστήματος. Συνεπώς, η μέθοδος της προσομοίωσης προτιμήθηκε από αυτή της πρόβλεψης.

Τελικά δύο μοντέλα βρέθηκαν που να μπορούν να περιγράψουν τα κύρια δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος με ακρίβεια και ταυτοχρονα να έχουν χαμηλή πολυπλοκότητα. Το πρώτο είναι ένα μοντέλο 4-ης τάξης χώρου κατάστασης τύπου *subspace* και κάνοντας χρήση του αλγόριθμου *CVA* του *Larimore*[18]. Οι εξισώσεις του χώρου κατάστασης είναι,

$$\begin{aligned} dx/dt &= Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \\ M_f(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t) \end{aligned} \quad (4.6)$$

με μεταβλητές κατάστασης,

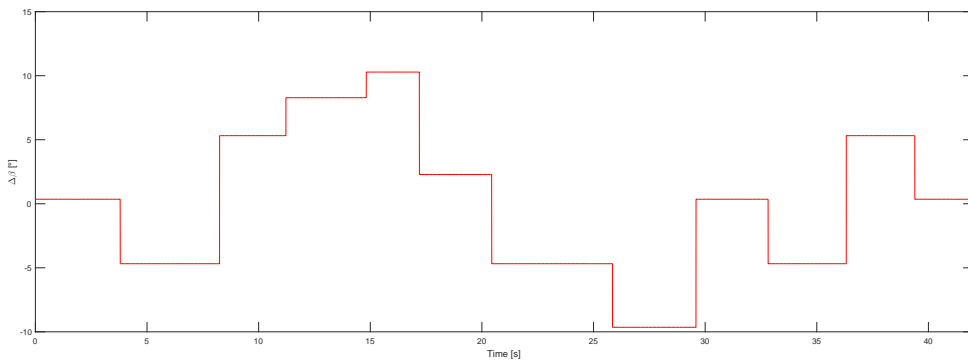
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -9470 & -3.127e + 04 & -4019 & -18.58 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 4.732 \\ 173 \\ -5483 \\ -7.356e + 05 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0], D = [0], K = \begin{bmatrix} 2.412e + 04 \\ 1.321e + 06 \\ 3.419e + 06 \\ -8.473e + 08 \end{bmatrix}$$

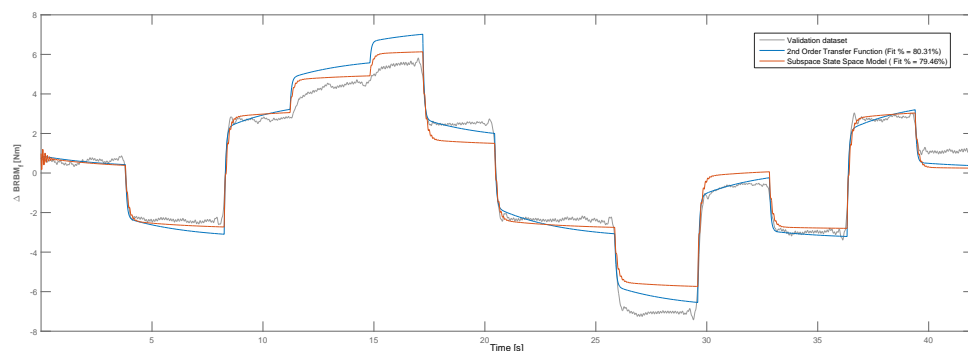
Το δεύτερο μοντέλο είναι μια συνάρτηση μεταφοράς δεύτερης τάξεως της μορφής,

$$H(s) = \frac{M_f(s)}{U(s)} = \frac{8.538s + 3.792}{s^2 + 16.19s + 5.325} \quad (4.7)$$

Η ταύτιση των δύο αυτών μοντέλων με το σετ δεδομένων εκτίμησης ήταν της τάξεως του 79.34% για το μοντέλο του χώρου κατάστασης και 81.56% αντίστοιχα για την συνάρτηση μεταφοράς. Το πρόβλημα που δημιουργείται είναι ότι στην απλή σύγκριση με το σετ δεδομένων εκτίμησης, ανεξάρτητα από την υψηλή ακρίβεια που παρουσιάζουν, υπάρχει ο κίνδυνος να μην γενικεύουν της συμπεριφορά τους σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Για την επαλήθευση των δύο μοντέλων έγινε η σύγκριση του με το σετ δεδομένων επαλήθευσης - το οποίο είναι ανεξάρτητο από αυτό της εκτίμησης - και εξετάστηκε το ποσοστό ταύτισης με την πραγματική απόκριση του συστήματος. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 4.6. Στο σχήμα 4.6(α) φαίνεται η είσοδος του συστήματος και στο σχήμα 4.6(β) διακρίνονται οι τρεις αποκρίσεις. Με χρώμα γκρι είναι η πραγματική απόκριση του συστήματος που μετρήθηκε κατά της διεξαγωγή πειραμάτων, με χρώμα κόκκινο είναι η απόκριση του μοντέλου χώρου κατάστασης και με χρώμα μπλε είναι η απόκριση της συνάρτησης μεταφοράς.



(α') Επιθυμητή γωνία των πτερυγίων



(β') Μεταβολή της εγκάρσιας μηχανικής τάσης

Σχήμα 4.6: Σύγκριση πειραματικής και προσομοιωμένης απόκρισης

Παρατηρείται πως και τα δύο μοντέλα έχουν ποσοστό ταύτισης κοντά στο 80% με τη πραγματική απόκριση και επομένως εκφράζουν ικανοποιητικά το σύστημα. Το μοντέλο χώρου κατάστασης παρουσιάζει ελαφρά καλύτερη περιγραφή της μεταβατικής περιόδου από την συνάρτηση μεταφοράς και ως αποτέλεσμα προτιμήθηκε έναντι του δεύτερου για τον σχεδιασμό του ελεγκτή.

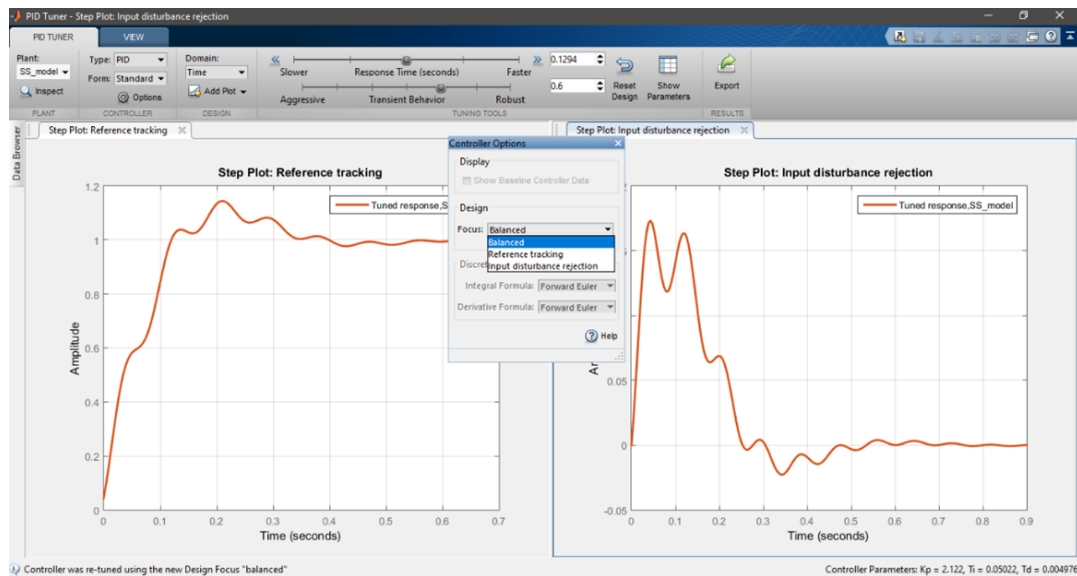
## 4.4 Σχεδιασμός του Ελεγκτή

Τα πλεονεκτήματα ενός ελεγκτή τριών όρων *proportional-integral-derivative (PID)* (4.8) είναι η υψηλή του επιτυχία και ταυτόχρονα η απλότητα εφαρμογής του. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν υπάρχει η απαίτηση για ένα πολύπλοκο και πολύ υψηλής ακρίβειας μοντέλο διεργασίας αυτός ο τύπος ελεγκτής επιλέχθηκε να δοκιμασθεί έναντι άλλων τεχνικών ελέγχου. Ο ελεγκτής παίρνει ως είσοδο την συνάρτηση σφάλματος  $e(t)$ , η οποία υπολογίζεται αφαιρώντας το πραγματικό μέγεθος  $M_f$  από την τιμή αναφοράς, και παράγει μια ακολουθία γωνιών  $\beta(t)$  με στόχο τον μηδενισμό του σφάλματος. Ο καθορισμός της τιμής αναφοράς γίνεται βάση του υπολογισμού του μέσου όρου της πραγματικής τιμής  $M_f$  σε καταστάσεις ομαλής λειτουργίας χωρίς διαταραχές. Την στιγμή που ο ελεγκτής τίθεται σε λειτουργία αυτή η τιμή είναι αμετάβλητη.

$$\beta(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.8)$$

Για τον σχεδιασμό του ελεγκτή το γραφικό εργαλείο Control System[17] του MATLAB χρησιμοποιήθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7. Το Control System Toolbox παρέχει αλγόριθμους και εφαρμογές για συστηματική ανάλυση, σχεδιασμό και ρύθμιση γραμμικών συστημάτων ελέγχου. Ένα σύστημα μπορεί να οριστεί ως συνάρτηση μεταφοράς, σύστημα εξισώσεων χώρου κατάστασης, κέρδος μηδενικού πόλου ή μοντέλο απόκρισης συχνότητας. Οι εφαρμογές και οι λειτουργίες, όπως η γραφική αναπαράσταση βηματικής απόκρισης και τα διαγράμματα Bode, επιτρέπουν την ανάλυση και την απεικόνιση της συμπεριφοράς του συστήματος στις διαστάσεις χρόνου και συχνότητας. Ο συντονισμός των κερδών του ελεγκτή μπορεί να επιτευχθεί κάνοντας χρήση διαδραστικών τεχνικών όπως η διαμόρφωση του βρόχου Bode και η μέθοδος του τόπου ριζών. Η εργαλειοθήκη συντονίζει αυτόματα ελεγκτές SISO, (single-input single-output) και MIMO (multiple-input multiple-output), συμπεριλαμβανομένων των ελεγκτών PID. Οι ελεγκτές μπορούν να περιλαμβάνουν πολλαπλά συντονισμένα μπλοκ που εκτείνονται σε διάφορους βρόχους ανατροφοδότησης. Επίσης είναι δυνατή η ρύθμιση ελεγκτών βάση του κέρδους και ο ορισμός πολλαπλών στόχων συντονισμού, όπως ακολουθία τιμής αναφοράς, απόρριψη διαταραχών και περιθώρια σταθερότητας. Το τελικό σχέδιο μπορεί να επαληθευτεί παρακολουθώντας τον χρόνο ανύψωσης, την υπερύψωση, τον χρόνο διεύθεσης, τα περιθώρια κέρδους και φάσης καθώς και άλλες απαιτήσεις.

Μετά την εισαγωγή του προηγούμενου μοντέλου που εκτιμήθηκε τα κέρδη του ελεγκτή υπολογίστηκαν με τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις: απόρριψη διαταραχής, ακολουθία τιμής αναφοράς και μια μέση προσέγγιση. Επιπρόσθετα, δύο υποκατηγορίες δημιουργήθηκαν για κάθε προσέγγιση, μια επιθετικής(γρήγορης) συμπεριφοράς και μια πιο ομαλής(αργής). Ο πίνακας με τον υπολογισμό των κερδών του PID φαίνεται στον πίνακα 4.1.



Σχήμα 4.7: Γραφικό εργαλείο υπολογισμού των κερδών του ελεγκτή

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των κερδών, είναι ιδιόκτητοι αλγόριθμοι της MathWorks. Ο υπολογισμός γίνεται βάση των στόχων ρύθμισης του κλειστού βρόχου, μερικούς από τους οποίους είναι οι εξής:

- Σταθερότητα κλειστού βρόχου - Η έξοδος του συστήματος κλειστού βρόχου παραμένει οριοθετημένη για περιορισμένη είσοδο.
- Επαρκής απόδοση - Το σύστημα κλειστού βρόχου παρακολουθεί τις αλλαγές της τιμής αναφοράς και καταστέλλει τις διαταραχές όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης του βρόχου (η πρώτη συχνότητα στην οποία το κέρδος ανοιχτού βρόχου είναι μονάδα), τόσο πιο γρήγορα ο ελεγκτής ανταποκρίνεται σε αλλαγές της τιμής αναφοράς ή διαταραχές στον βρόχο.
- Επαρκής ευρωστία - Ο σχεδιασμός του βρόχου έχει επαρκές περιθώριο φάσης και κέρδους για την ανοχή σε λάθη μοντελοποίησης ή παραλλαγές στη δυναμική του συστήματος.

Ο αλγόριθμος MathWorks για τον συντονισμό των ελεγκτών PID βοηθάει να ικανοποιηθούν αυτοί οι στόχοι αυτούς τους στόχους ρυθμίζοντας αυτόματα τα κέρδη PID για να ισορροπήσετε την απόδοση (χρόνος απόκρισης) και την ευρωστία (περιθώρια σταθερότητας).

Από προεπιλογή, ο αλγόριθμος επιλέγει μια συχνότητα διασταύρωσης (εύρος ζώνης του βρόχου) που βασίζεται στα δυναμικά χαρακτηριστικά του βρόχου και σχεδιάζει ένα περιθώριο φάσης με στόχο τις  $60^\circ$ . Αν επιλεγεί μια συγκεκριμένη συχνότητα διασταύρωσης ή ένα περιθώριο κέρδους κάνοντας χρήση της επιλογής `pidtuneOptions` τότε ο αλγόριθμος εστιάζει την ρύθμιση ώστε να ικανοποιούνται καλύτερα αυτοί οι στόχοι.

Πίνακας 4.1: Κέρδη PID

Προσέγγιση	Αναλογικό κέρδος	Σταθερά χρόνου ολοκλήρωσης	Σταθερά χρόνου διαφόρισης
Επιθετική απόρριψη διαταραχής	$6.406e - 04$	$1.141e - 05$	$2.852e - 06$
Ομαλή απόρριψη διαταραχής	2.173	0.04646	$2.852e - 06$
Επιθετική ακολουθία τιμής αναφοράς	2.105	0.04972	$2.852e - 06$
Ομαλή ακολουθία τιμής αναφοράς	2.173	0.05267	$2.852e - 06$
Επιθετική μέση προσέγγιση	1.243	0.02401	$2.852e - 06$
Ομαλή μέση προσέγγιση	2.173	0.05010	$5.703e - 06$

## Κεφάλαιο 5

# Αποτελέσματα

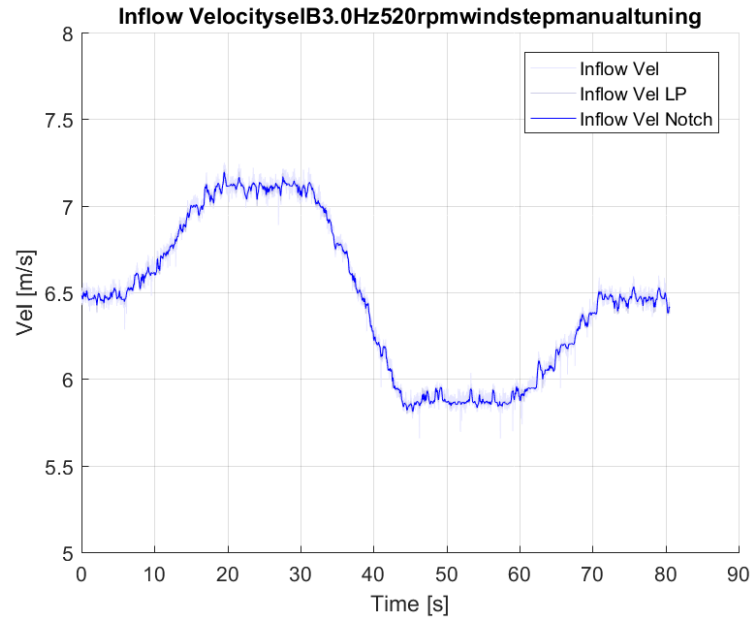
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Αρχικά, η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι μια γενική ή καθολική αλλαγή του ανέμου εισροής που εισέρχεται στο πεδίο του ρότορα, και πραγματοποιούνται πειράματα κάνοντας χρήση όλων των κερδών του πίνακα 4.1. Για την επίτευξη ευστάθειας του συστήματος ένα βαθυπερατό φίλτρο τοποθετείται στην είσοδο του ελεγκτή για την απομόνωση της συνάρτησεως του σφάλματος από τον θόρυβο. Αυτό το φίλτρο ρυθμίζεται με βάση της απαιτήσεις του εκάστοτε πειράματος έτσι ώστε να ερευνηθεί η καλύτερη πιθανή συμπεριφορά του συστήματος κλειστού βρόχου. Ωστόσο, όπως είναι γνωστό κάθε φίλτρο εισάγει μια καθυστέρηση φάσης στο σήμα που το διαπερνά και ως αποτέλεσμα η συνάρτηση σφάλματος  $e(t)$  τώρα είναι καθυστερημένη κατά μια φασική τιμή. Ως συνέπεια τα κέρδη του ελεγκτή που υπολογίστηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι λιγότερο αποτελεσματικά αφού υπολογίστηκαν βάση διαφορετικών συνθηκών. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, έγινε μια προσπάθεια εμπειρικής βελτίωσης του σετ κερδών που έδινε τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα, κατά την διάρκεια των υποθέσεων προς εξέταση. Το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου μπορεί να φανεί στον πίνακα 5.1, όπου παρουσιάζονται τα κέρδη που ευρέθηκαν.

Αναλογικό κέρδος	Σταθερά χρόνου ολοκλήρωσης	Σταθερά χρόνου διαφόρισης
2.173	0.010	$2.003e - 06$

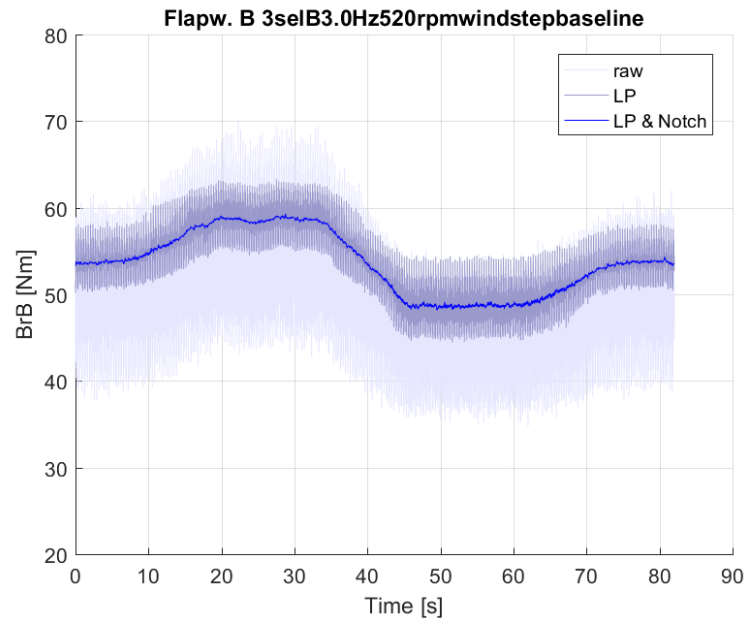
Πίνακας 5.1: Ιδανικά Κέρδη PID

## 5.1 Καθολική Αλλαγή Ταχύτητας Εισροής

Αυτή η πειραματική υπόθεση ξεκινά με μη διαταραγμένο πεδίο εισροής ανέμου, ταχύτητας  $6\text{ m/s}$ , την ανεμογεννήτρια τοποθετημένη σε γωνία εκτροπής  $\gamma = 0^\circ$  και ταχύτητα περιστροφής  $3\text{ Hz}$ . Στην συνέχεια η ανεμογεννήτρια εκτίθεται σε αλλαγή ταχύτητας εισροής που έχει επίπτωση στην μεταβολή της εγκάρσιας μηχανικής τάσης όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.1. Σε αυτή την περίπτωση το φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα φίλτρο με συχνότητα αποκοπής  $F_c = 2\text{ Hz}$ . Παρόλο την επιθετική συμπεριφορά αυτού του φίλτρου, ικανοποιούσε τις ανάγκες αυτής την περίπτωσης αφού η διαταραχή εντοπίζεται σε πολύ χαμηλές συχνότητες της τάξεως των  $0.2\text{ Hz}$ .



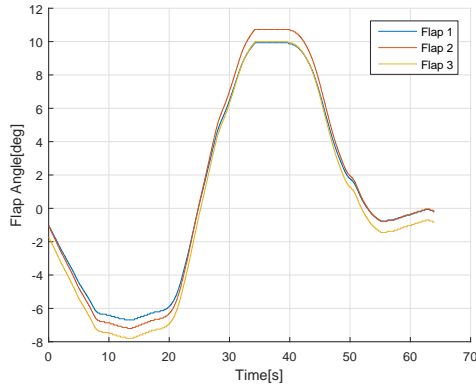
(α') Μεταβολή ταχύτητας ανέμου της σήραγγας



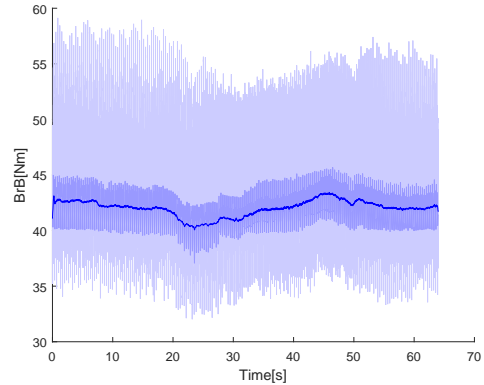
(β') Μεταβολή εγκάρσιας μηχανικής τάσης

Σχήμα 5.1: Προσομοιωμένη διαταραχή

Ο στόχος του ελεγκτή είναι να μειώσει την μεταβολή  $M_f$  όσο το δυνατόν περισσότερο και ιδανικά στο μηδέν, δηλαδή η λεπίδα να μην ταλαντεύεται παρόλο την διαφορά ταχύτητας στο πεδίο εισροής. Οι ελεγκτές δοκιμάστηκαν με την σειρά που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1. Κάθε φορά ένας ελεγκτής  $PID$  τιθόταν σε λειτουργία και παρατηρούνταν η μεταβολή  $M_f$  κάνοντας αναπαράσταση της ίδιας διαταραχής.

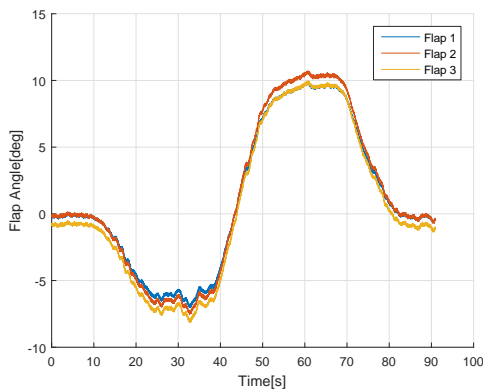


(α') Μεταβολή την γωνίας των πτερυγίων

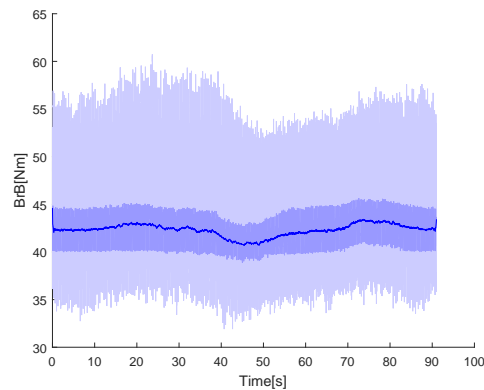


(β') Μεταβολή εγκάρσιας μηχανικής τάσης

Σχήμα 5.2: Αποτελέσματα επιθετικής απόρριψης διαταραχής

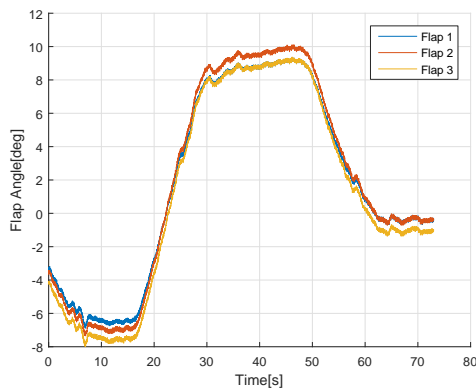


(α') Μεταβολή την γωνίας των πτερυγίων

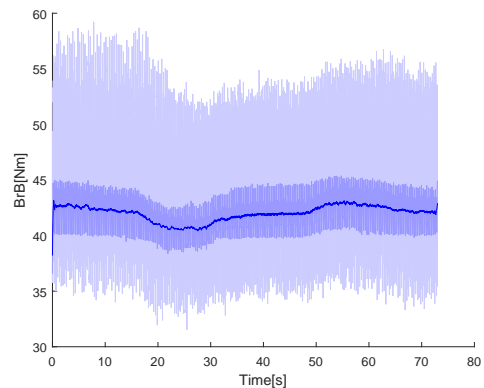


(β') Μεταβολή εγκάρσιας μηχανικής τάσης

Σχήμα 5.3: Αποτελέσματα επιθετικής ακολουθίας τιμής αναφοράς

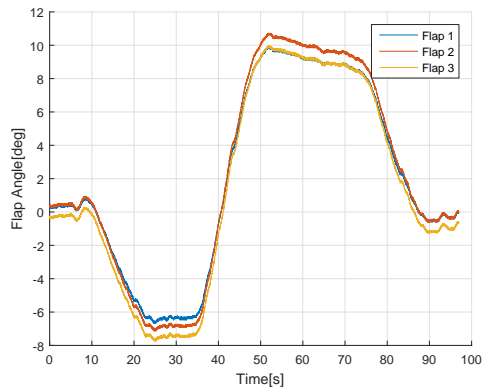


(α') Μεταβολή την γωνίας των πτερυγίων

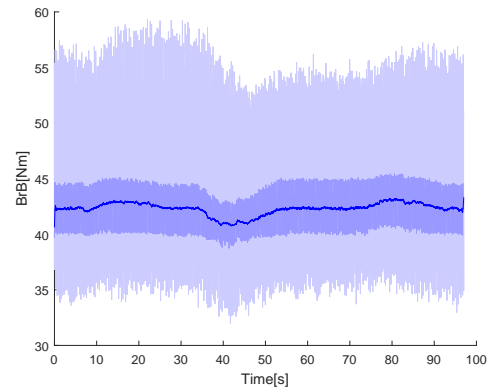


(β') Μεταβολή εγκάρσιας μηχανικής τάσης

Σχήμα 5.4: Αποτελέσματα ομαλής ακολουθίας τιμής αναφοράς

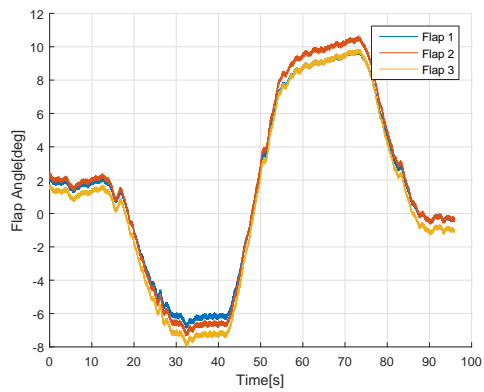


(α') Μεταβολή την γωνίας των πτερυγίων

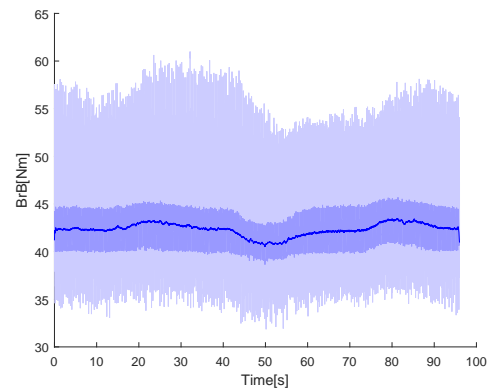


(β') Μεταβολή εγχάρσιας μηχανικής τάσης

Σχήμα 5.5: Αποτελέσματα επιθετικής μέσης προσέγγισης



(α') Μεταβολή την γωνίας των πτερυγίων

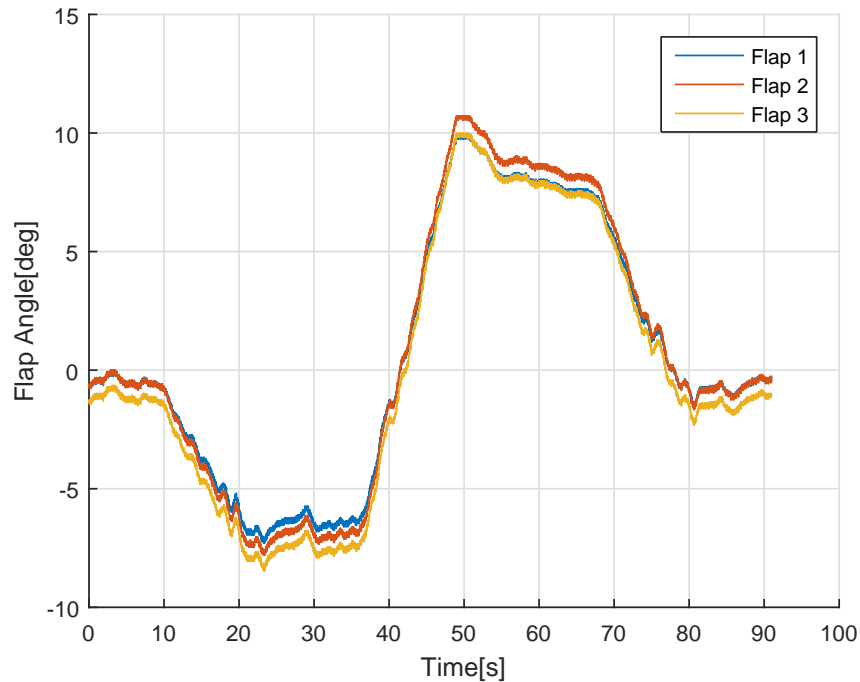


(β') Μεταβολή εγχάρσιας μηχανικής τάσης

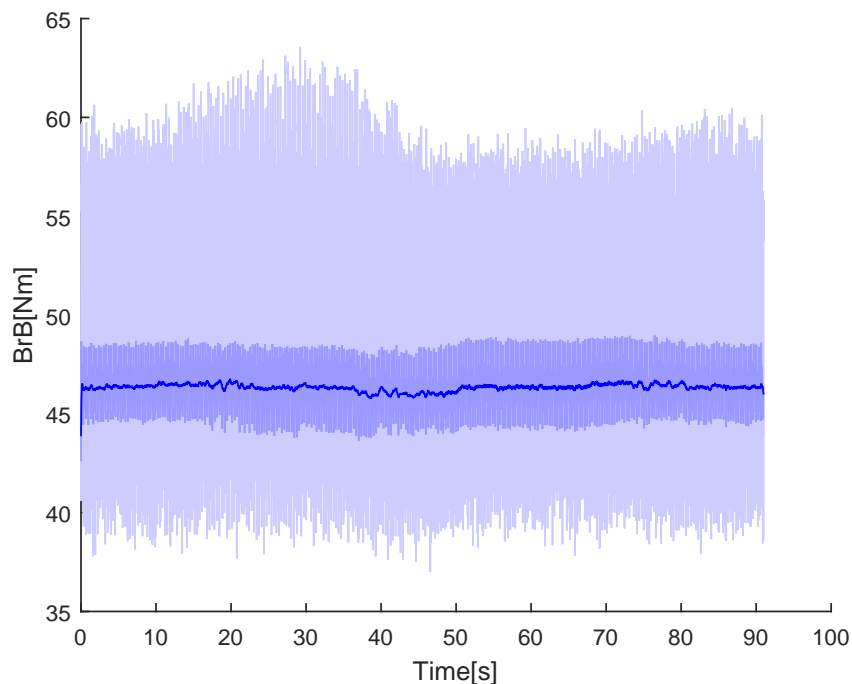
Σχήμα 5.6: Αποτελέσματα ομαλής μέσης προσέγγισης



Η ρύθμιση για ομαλή απόρριψη διαταραχής οδήγησε το σύστημα κλειστού βρόχου σε αστάθεια και δεν ήταν δυνατή η καταγραφή δεδομένων χωρίς τον κίνδυνο να προκληθεί βλάβη στην διεργασία. Όλες οι υπόλοιπες ρυθμίσεις του ελεγκτή έδειξαν σχετικά καλά αποτελέσματα σε αυτή την αργή διαταραχή. Ωστόσο, επιβεβαιώνεται το γεγονός πως η καθυστέρηση που εισάγει το φίλτρο δεν είναι αμελητέα και έχει επιπτώσεις στην αποδοτικότητα των ελεγκτών. Συνεπώς προκύπτουν τα κέρδη του πίνακα 5.1 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.



(α) Μεταβολή την γωνίας των πτερυγίων και την γωνία προσβολής

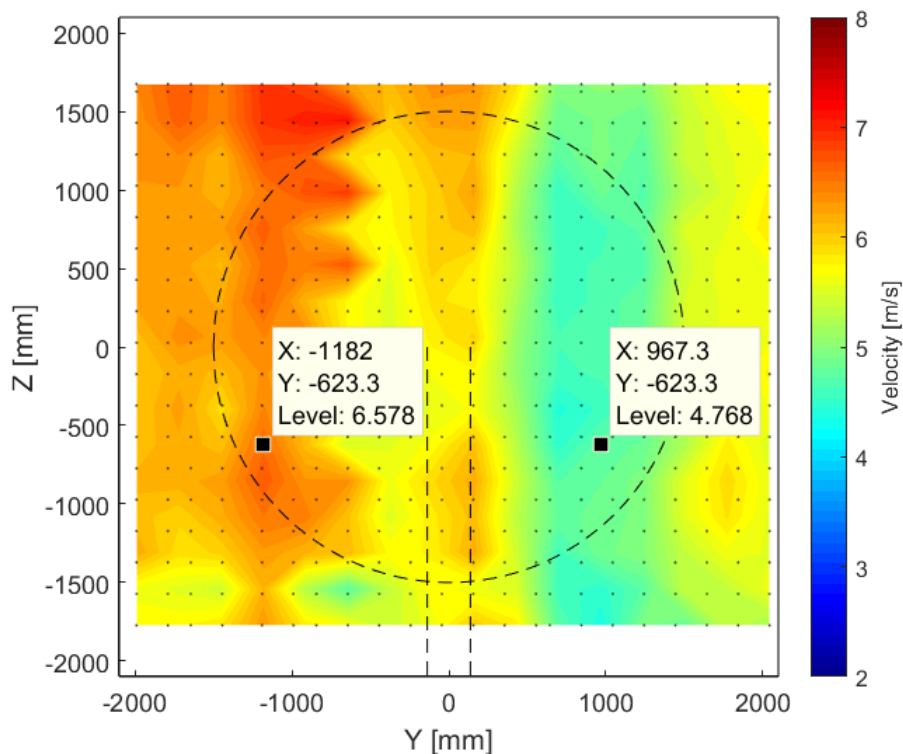


(β') Μεταβολή εγκάρσιας μηχανικής τάσης

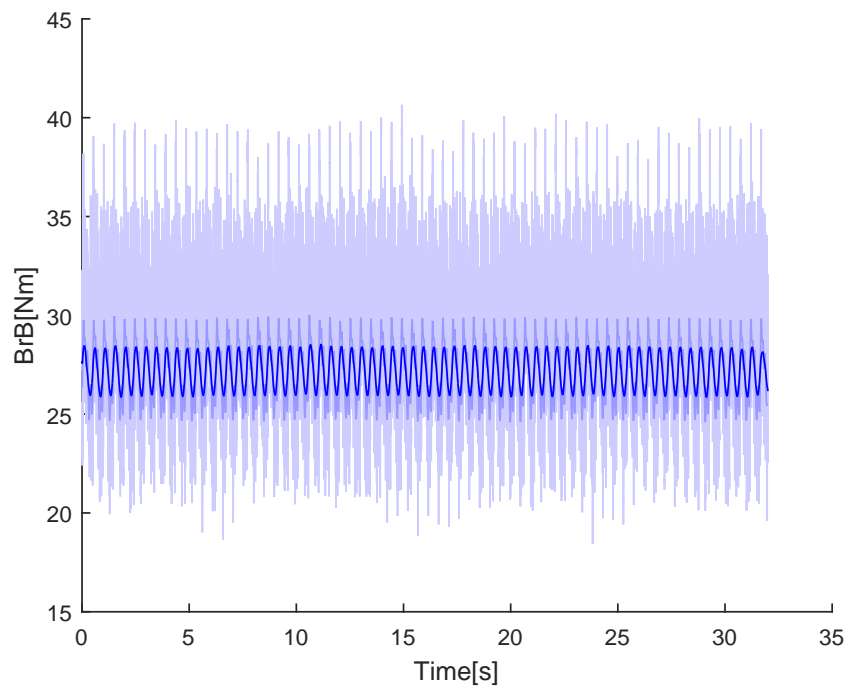
Σχήμα 5.7: Ιδανικά Κέρδη PID

## 5.2 Τοπική Ριπή

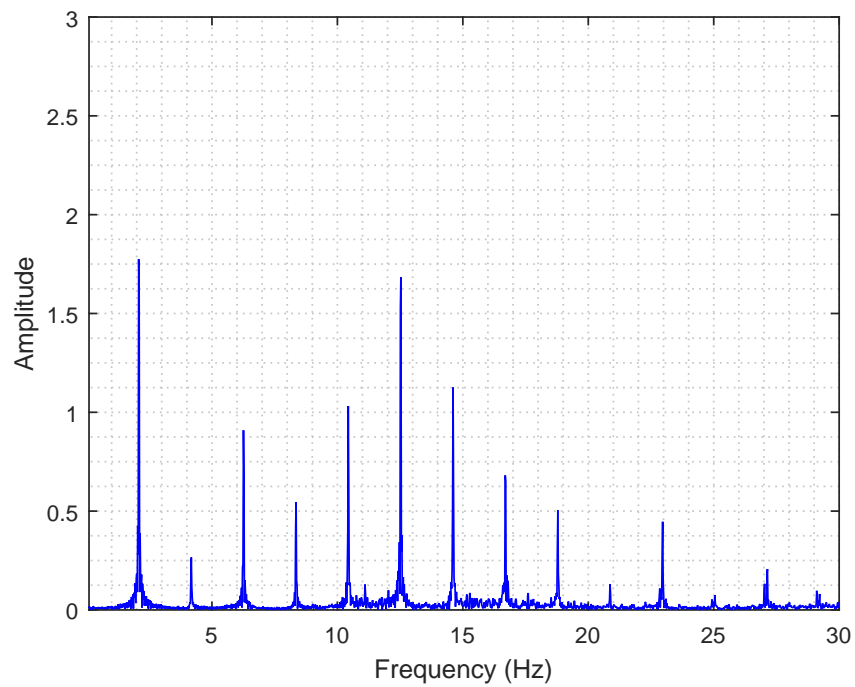
Σε αυτή την περίπτωση διαταραχής δημιουργείται ένα πεδίο εισροής όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8. Ο ελεγκτής σε αυτήν την περίπτωση καλείται να αντιμετωπίσει διαταραχές που εμφανίζονται με συχνότητα  $6Hz$ . Λόγω της υψηλής ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας, σε συνδυασμό με τα όρια ταχύτητας των ενεργοποιητών των πτερυγίων, η ταχύτητα περιστροφής μειώθηκε στα  $2.1Hz$  και η ταχύτητα ανέμου της σήραγγας στα  $5m/s$  αντίστοιχα, ώστε να διατηρηθεί η πρότυπη αναλογία  $\lambda$  όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4 και ταυτόχρονα να είναι δυνατή η ταχεία απόκριση των πτερυγίων. Το αποτέλεσμα είναι η ανεμογεννήτρια να λειτουργεί σε δύο διαφορετικά πεδία εισροής με ταχύτητες  $5m/s$  και  $3.5m/s$  αντίστοιχα. Συνεπώς ο στόχος για αυτήν την περίπτωση είναι η μείωση των φορτίων που εμφανίζονται σε χαμηλές συχνότητες και συγκεκριμένα στην  $1P$ . Το φίλτρο του ελεγκτή σε αυτήν την περίπτωση ρυθμίζεται σε συχνότητα αποκοπής  $F_c = 10Hz$  για να είναι δυνατός ο έλεγχος των συχνοτήτων  $1P, 2P, 3P$ . Τα αποτελέσματα γίνονται ορατά στην σύγκριση διαγραμμάτων συχνοτικών αναλύσεων μεταξύ της ελεγχόμενης και μη ελεγχόμενης διεργασίας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.13 ο ελεγκτής είναι ικανός να μειώνει το πλάτος των φορτίων  $1P$  από την μη ελεγχόμενη τιμή  $M_f = 1.6341Nm$  σε ελεγχόμενη τιμή  $M_f = 1.22Nm$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι η συχνότητα  $1P$  στην μην διαταραγμένη περίπτωση είναι σε πλάτος  $M_f = 1.24Nm$  το οποίο είναι περισσότερο από την ελεγχόμενη διαταραγμένη τιμή. Επιπλέον, λόγω του βαθμού δυσκολίας αυτής της περίπτωσης, οι περισσότεροι ελεγκτές προκαλούσαν αστάθεια στο σύστημα κλειστού βρόχου. Ως αποτέλεσμα δεν ήταν δυνατή η καταγραφή αυτών των περιπτώσεων χωρίς τον κίνδυνο πρόκλησης βλάβης του συστήματος και παρουσιάζονται μόνο οι ελεγκτές που έδωσαν αποτελέσματα.



Σχήμα 5.8: Τοπική ριπή στο επίπεδο περιστροφής της έλικας

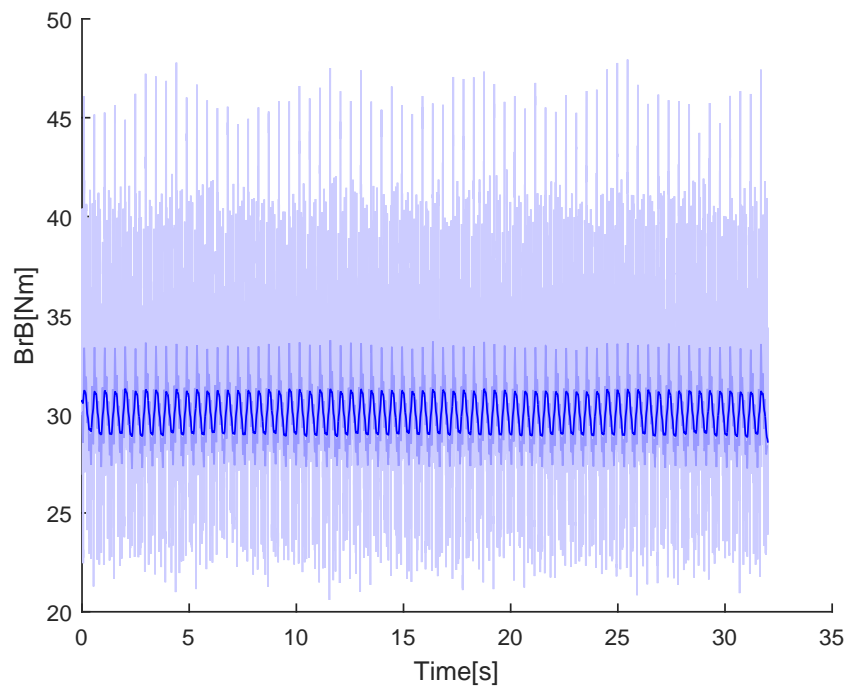


(α) Μεταβολή μηχανικής τάσης

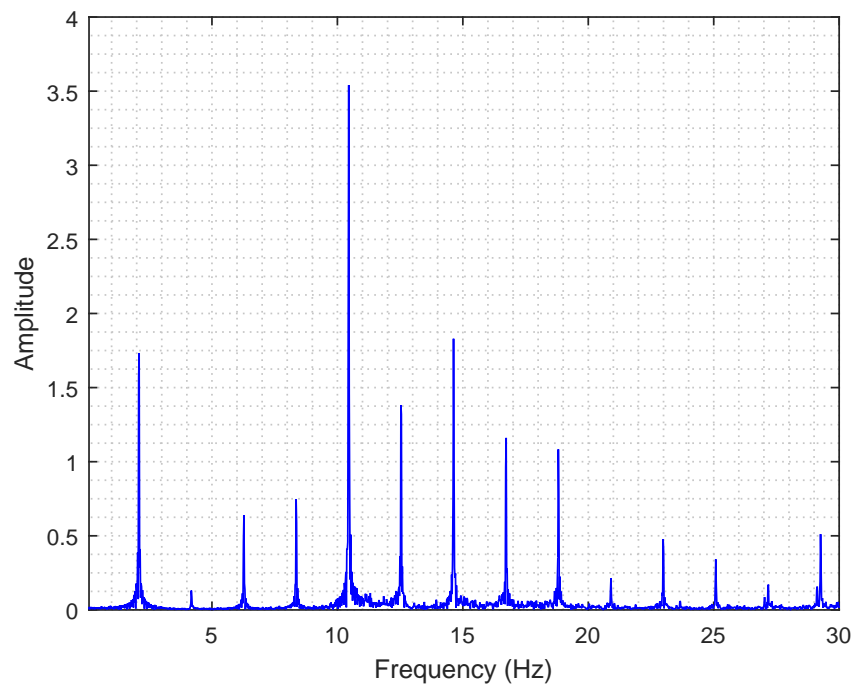


(β) Συχνοτική ανάλυση μηχανικής τάσης

Σχήμα 5.9: Μη ελεγχόμενη διεργασία

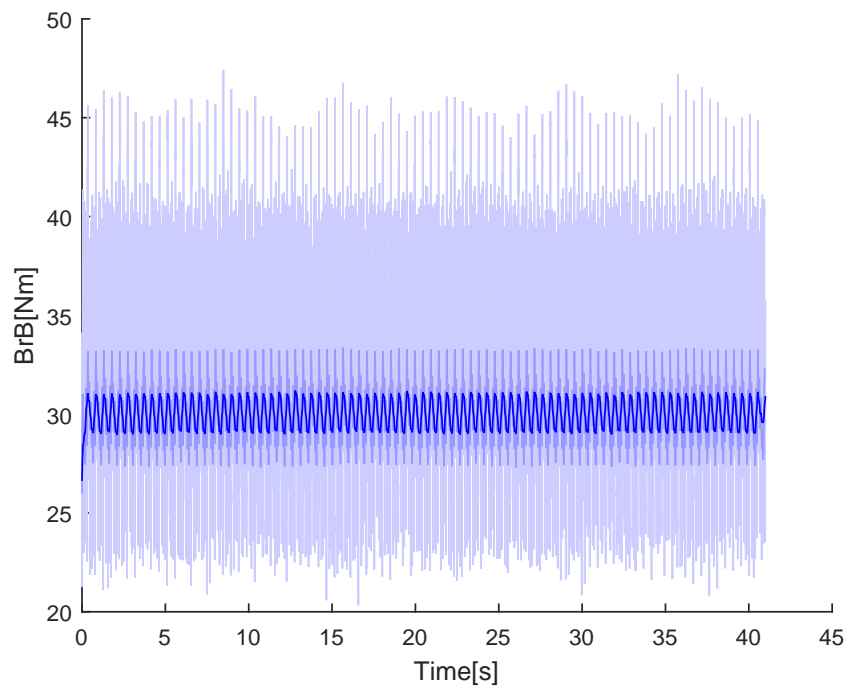


(α) Μεταβολή μηχανικής τάσης

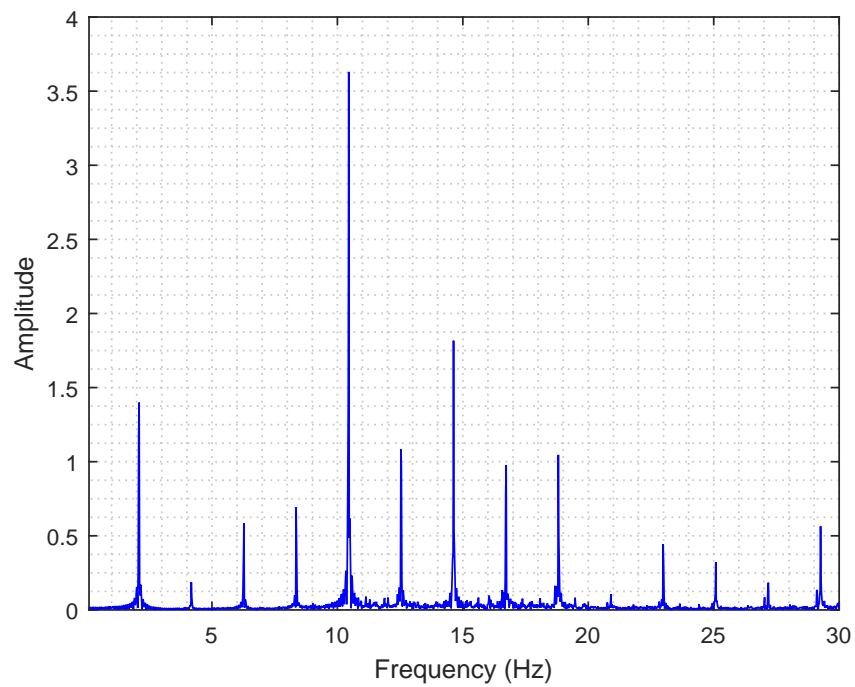


(β) Συχνοτική ανάλυση μηχανικής τάσης

Σχήμα 5.10: Ομαλή ακολουθία τιμής αναφοράς

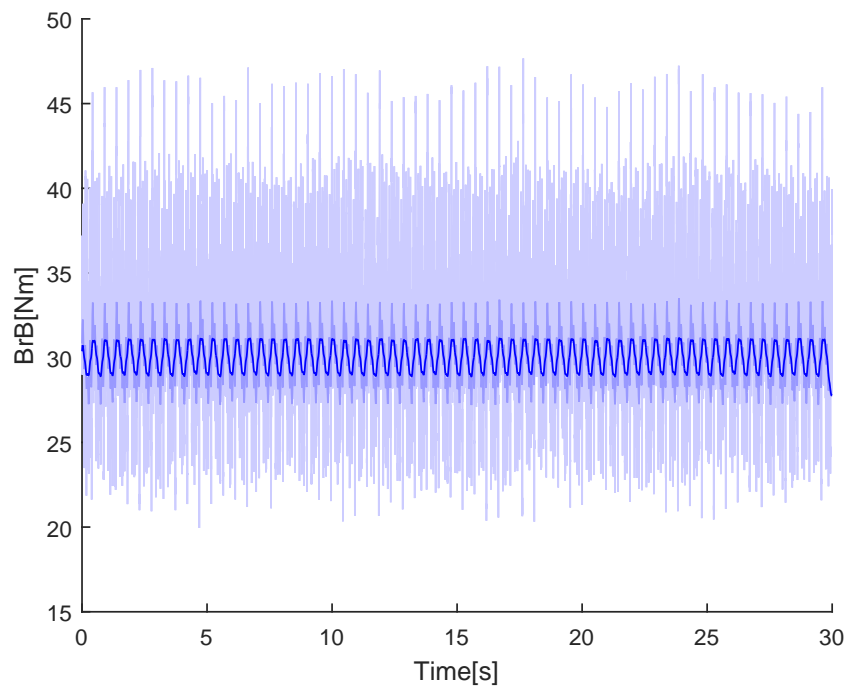


(α) Μεταβολή μηχανικής τάσης

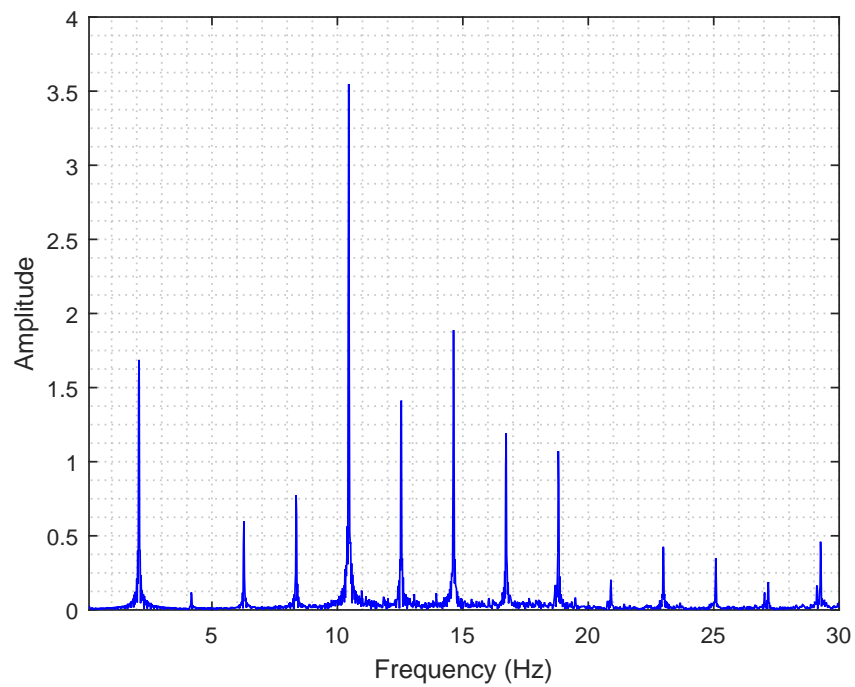


(β) Συχνοτική ανάλυση μηχανικής τάσης

Σχήμα 5.11: Επιθετική ακολουθία τιμής αναφοράς

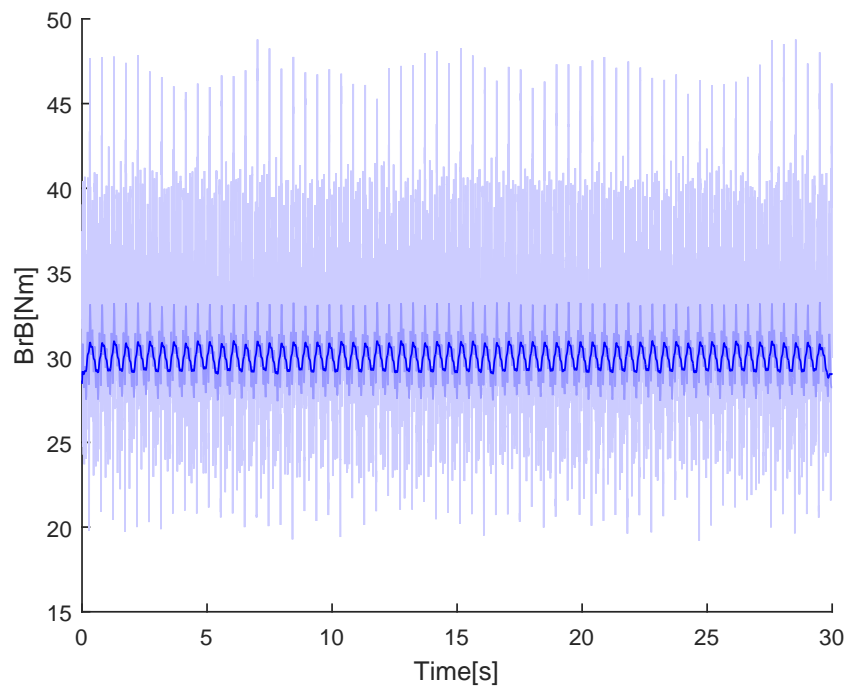


(α) Μεταβολή μηχανικής τάσης

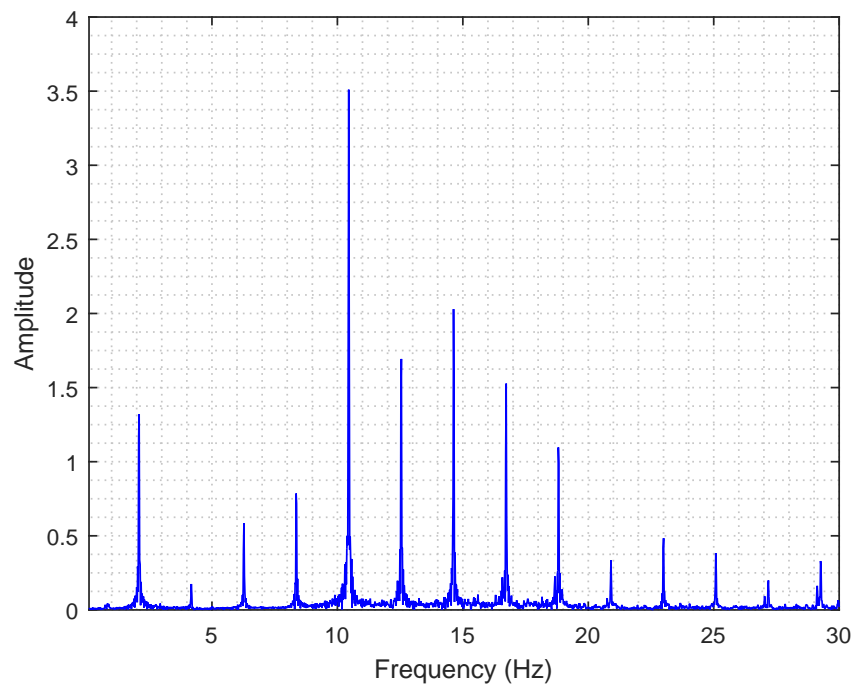


(β) Συχνοτική ανάλυση μηχανικής τάσης

Σχήμα 5.12: Επιθετική μέση προσέγγιση



(α) Μεταβολή μηχανικής τάσης



(β) Συχνοτική ανάλυση μηχανικής τάσης

Σχήμα 5.13: Ιδανικά Κέρδη  $PID$

### 5.3 Λάθη στην γωνία εκτροπής

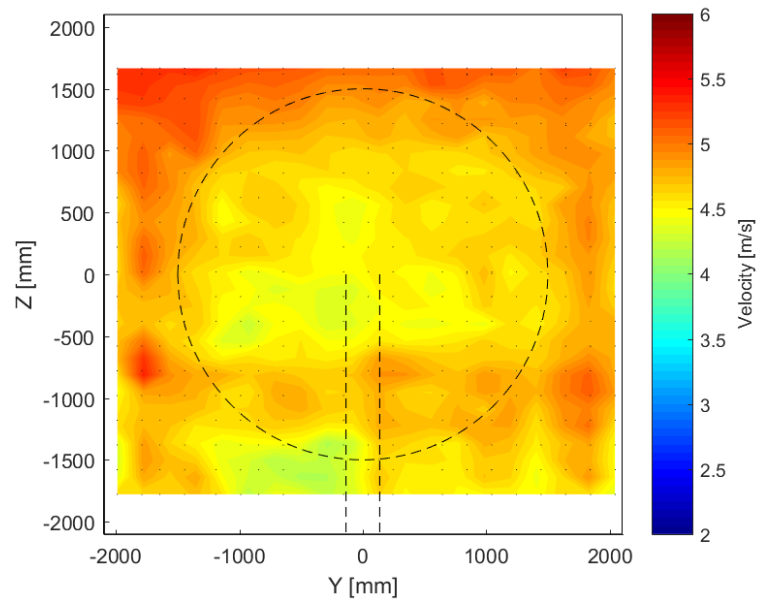
Σε αυτήν την περίπτωση διαταραχής δημιουργείται παρόμοια αλλαγή της ταχύτητας εισροής του αέρα, ωστόσο το πεδίο απορροής του αέρα και η κατεύθυνση εισροής είναι διαφορετικά. Λόγω της παρόμοιας μορφής των διαταραχών, η συνθήκες λειτουργίας αλλάζουν όπως στην προηγούμενη περίπτωση σε ταχύτητα περιστροφής  $2.1Hz$  και ταχύτητα ανέμου της σήραγγας στα  $5m/s$ . Επίσης το φίλτρο του ελεγκτή ρυθμίζεται σε συχνότητα αποκοπής  $F_c = 10Hz$ . Η ανεμογεννήτρια τοποθετείται σε γωνία εκτροπής  $\gamma = 30^\circ$  όπως φαίνεται στο σχήμα 5.10. Σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα του πιο αποτελεσματικού ελεγκτή.



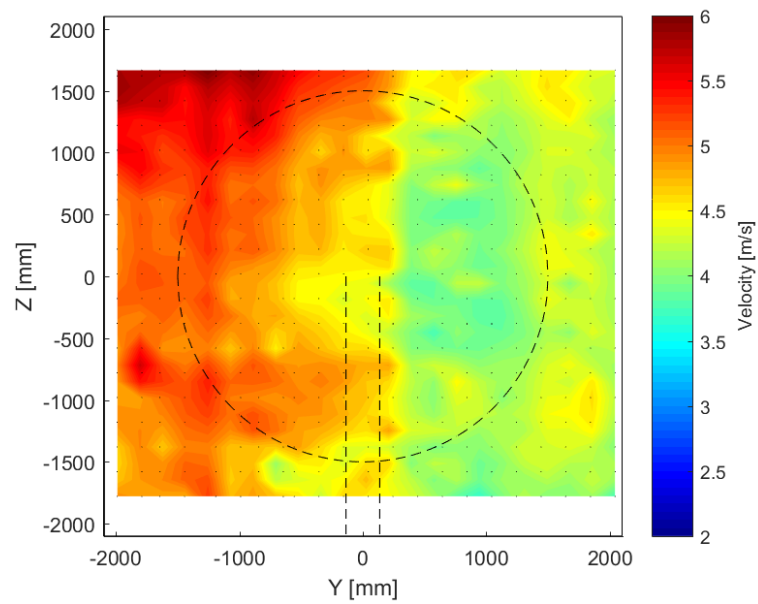
Σχήμα 5.14: Η ανεμογεννήτρια τοποθετημένη σε γωνία εκτροπής  $\gamma = 30^\circ$



Το διαταραγμένο πεδίο που δημιουργείται φαίνεται στο σχήμα 5.15.



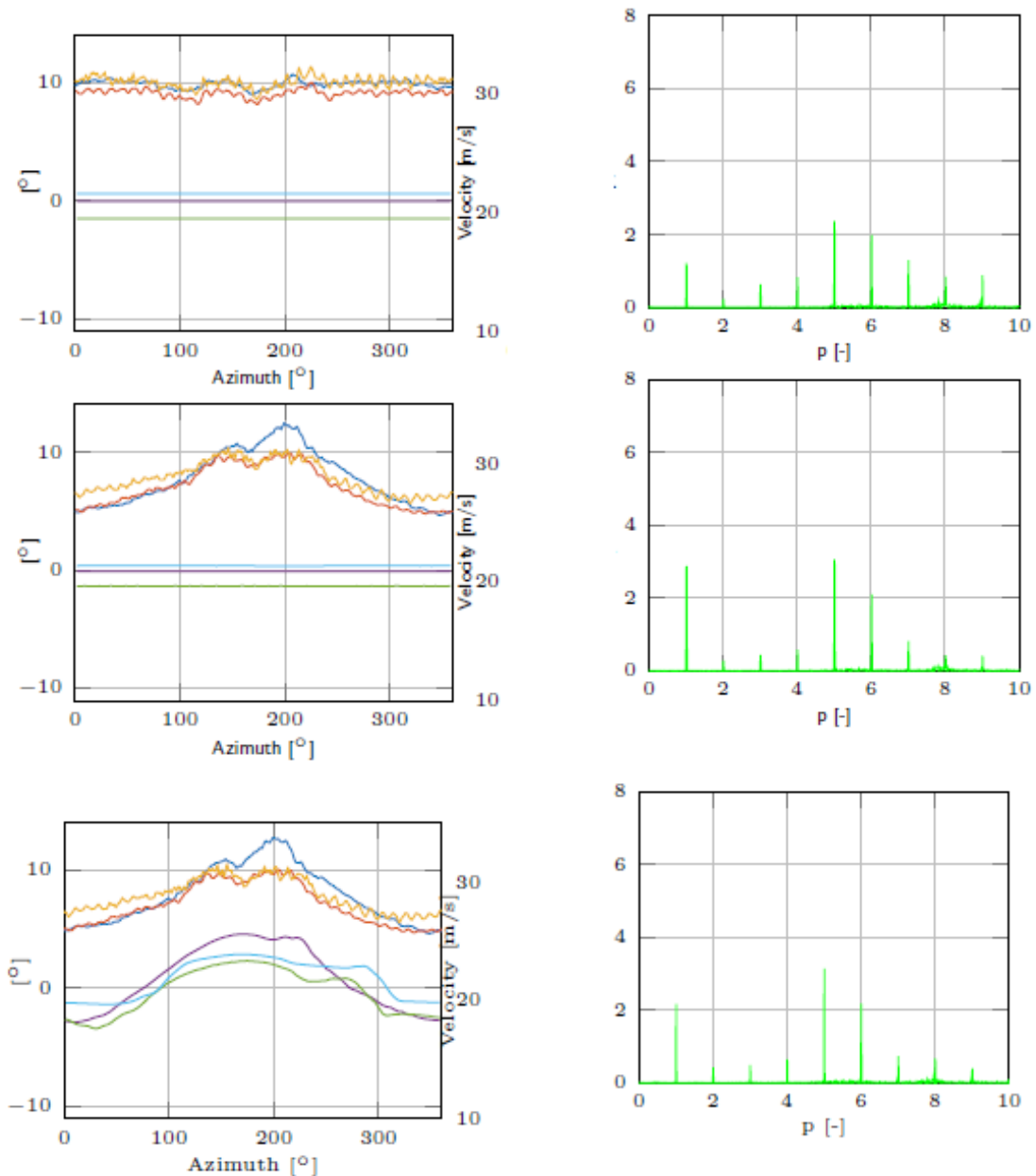
(α') Μη διαταραγμένο πεδίο



(β') Διαταραγμένο πεδίο

Σχήμα 5.15: Πεδίο εισροής για την περίπτωση της διαταραχής λαθών στην γωνία εκτροπής

Στα αποτελέσματα φαίνεται πως ο ελεγκτής είναι ικανός να μειώσει το πλάτος της συχνότητας  $1P$  σε ποσοστό και 24.74%. Το πλάτος  $1P$  αυξάνεται στην περίπτωση της διαταραχής από  $M_f = 1.22Nm$  σε  $M_f = 2.87Nm$  ενώ ο ελεγκτής έχει ως αποτέλεσμα την μείωση σε  $M_f = 2.16Nm$ . Στο παρακάτω διάγραμμα στην πρώτη σειρά είναι το μη διαταραγμένο πεδίο, στη δεύτερη σειρά φαίνεται το μη ελεγχόμενο διαταραγμένο πεδίο και η τρίτη σειρά είναι το αποτέλεσμα της χρήσης του ελεγκτή στην διαταραχή.



(α) Γωνία προσβολής της λεπίδας και γωνία πτερυγίων σε διάστημα μιας περιστροφής

(β) Συχνωτική ανάλυση μηχανικής τάσης

Σχήμα 5.16: Σύγκριση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση λαθών στην γωνία εκτροπής

## Κεφάλαιο 6

# Συμπεράσματα - Μελλοντική Έρευνα

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία παρουσιάστηκε η διαδικασία υπολογισμού των κερδών ενός ελεγκτή *PID* βάση πειραματικών δεδομένων. Ο ελεγκτής ήταν ικανός να μειώσει αποτελεσματικά τα φορτία  $1P$  που αναπτύσσονται στις λεπίδες της ανεμογεννήτριας κατά την διάρκεια των τριών προσομοιωμένων διαταραχών που παρουσιάστηκαν. Η ταχύτητα απόκρισης των πτερυγίων περιόρισε την αποτελεσματικότητα του ελεγκτή σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, σε πραγματικό περιβάλλον, οι ανεμογεννήτριες περιστρέφονται με πολύ χαμηλότερη ταχύτητα συνεπώς η εγκατάσταση ταχύτερων ενεργοποιητών θα ικανοποιούσε μόνο συγκριτικούς σκοπούς. Σαν μελλοντική δουλειά πιο περίπλοκες τεχνικές ελέγχου συνιστάται να δοκιμαστούν, όπως αλγόριθμοι τεχνικής νοημοσύνης, για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητά τους σε σύγκριση με τις πιο απλές τεχνικές.

# Βιβλιογραφία

- [1] Global Wind Energy Council, Market Forecasts  
<http://www.gwec.net/global-figures/market-forecast-2012-2016/~uno/abcde.html>
- [2] Andersen, PB, Henriksen, LC, Gaunaa, M, Bak, C and Buhl, 'Deformable trailing edge flaps for modern megawatt wind turbine controllers using strain gauge sensors'  
Wind Energy, vol 13, no. 2-3, pp. 193-206. DOI: 10.1002/we.371, 2010
- [3] Ljung, L. (1999). System identification. John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Eykhoff, P. (1974). System identification. Wiley, London
- [5] Box G., Jenkins G. (1976). Time series analysis: forecasting and control. Holden-Day, San Francisco
- [6] Chinarro, D. (2014). System Engineering Applied to Fuenmayor Karst Aquifer (San Julián de Banzo, Huesca) and Collins Glacier (King George Island, Antarctica). Springer.
- [7] Δ. Καλλιγερόπουλος, Σ. Βασιλειάδου (2005). Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου Ι. Αθήνα
- [8] Γ.Π. Σύρκος (2000). Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος. Αθήνα
- [9] Seborg, D. E., Mellichamp, D. A., Edgar, T. F., & Doyle III, F. J. (2010). Process dynamics and control. John Wiley & Sons.
- [10] SMART BLADE GmbH. BeRT Report 2015-06-08
- [11] SMART BLADE GmbH. Blades With Servo controlled Flaps Report 2015-06-08
- [12] Volz Servos GmbH & Co KG. DA14 Technical Specification. Technical Data Sheet. 2014.  
[http://www.volz-servos.com/resources/Downloads/DataSheets/DA-14\\_Datasheet\\_uni.pdf](http://www.volz-servos.com/resources/Downloads/DataSheets/DA-14_Datasheet_uni.pdf)
- [13] Vishay Precision Group. Stress Analysis Strain Gages. Catalogue. 2015.  
[www.vishaypg.com/micro-measurements/stress-analysis-strain-gages/](http://www.vishaypg.com/micro-measurements/stress-analysis-strain-gages/)
- [14] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). Wind energy handbook. John Wiley & Sons.
- [15] © 1994-2017 The MathWorks, Inc.  
<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [16] System Identification Toolbox, MATLAB, © 1994-2017 The MathWorks, Inc.  
<https://www.mathworks.com/products/sysid.html>
- [17] Control System Toolbox, MATLAB, © 1994-2017 The MathWorks, Inc.  
<https://www.mathworks.com/products/control.html>

- [18] Larimore, W. E. (1990, December). Canonical variate analysis in identification, filtering, and adaptive control. In Decision and Control, 1990., Proceedings of the 29th IEEE Conference on (pp. 596-604). IEEE.