



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ελέγχου Βάθους Ρομποτικού Ψαριού,
με Χρήση Αντλίας**

Ιωάννης Αλιπράντης

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2014

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον στα βιομημητικά υποβρύχια σκάφη. Σπουδαίο ρόλο ώστε να υπάρξει όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση αυτών των οχημάτων είναι ο έλεγχος βάθους τους. Αν και ο έλεγχος βάθους σε μεγάλα υποβρύχια οχήματα έχει μελετηθεί και πραγματοποιηθεί εδώ και πολλά χρόνια, το ίδιο θέμα για μικρότερης κλίμακας και χαμηλότερου κόστους οχήματα δεν έχει λάβει την αρμόζουσα προσοχή. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται διεξοδικά ο έλεγχος βάθους ενός ρομποτικού ψαριού, χρησιμοποιώντας μια μικρή αντλία που λειτουργεί με τη βοήθεια ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Αναπτύσσεται η δυναμική του συστήματος και οι περιορισμοί που προκύπτουν λόγω της χρήσης επενεργητών και αισθητήρων μικρού μεγέθους και χαμηλού κόστους. Σχεδιάζεται ένας ελεγκτής ανάδρασης όλων των μεταβλητών κατάστασης, ο οποίος υλοποιείται και επιβεβαιώνεται από προσομοιώσεις και από πειράματα. Προσβλέπεται ότι ο ελεγκτής αυτός θα συνδράμει σημαντικά στον έλεγχο βάθους μικρών υποβρύχιων οχημάτων χαμηλού κόστους και καλής ενεργειακής απόδοσης.

Abstract

Recently, there has been growing interest in biomimetic underwater vehicles. To exploit the full workspace of this kind of vehicles, depth control is needed which plays a critical role. Although depth control for large vehicles, such as submarines, has been addressed, this issue for low-cost, small-scale underwater vehicles has not received attention. In this thesis, the depth control of a small robotic fish is studied, with the use of a small dc pump. The depth control system dynamics are developed and limitations arising from the low-cost, small-scale actuators and sensors are described. A controller with limited feedback is designed, implemented and validated both by simulations and experiments. It is expected that this controller will add an important dimension in depth control of low-cost, energy-efficient small underwater vehicles.

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ευάγγελο Παπαδόπουλο, καθώς η συμβολή του στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας ήταν μεγάλη. Με αξιοσημείωτη συστηματικότητα με καθοδήγησε σωστά ώστε να βρεθεί κατάλληλη διέξοδος σε περιπτώσεις δυσκολιών φαινομενικά αζεπέραστων. Θέλω να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, καθώς το να εργαστούμε στην ίδια ομάδα ήταν μία πολύ εποικοδομητική εμπειρία για μένα. Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω το Μιχάλη Μακροδημήτρη, ο οποίος με ενθουσιασμό με μύησε σε έναν τομέα που είχα σχεδόν μηδενική προηγούμενη επαφή. Θέλω να τον ευχαριστήσω για τις ώρες που περάσαμε μαζί και που ακούραστος μέχρι αργά με βοηθούσε ώστε να προχωρήσει η εργασία μου.

*Αφιερώνεται στην οικογένειά μου, στους φίλους μου και στη Σοφία,
οι οποίοι με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης της εργασίας.*

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
Περιεχόμενα.....	6
Κατάλογος Σχημάτων	9
Κατάλογος Πινάκων.....	12
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	13
1.1 Σκοπός Εργασίας.....	15
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	15
1.3 Δομή Εργασίας.....	16
Κεφάλαιο 2: Βασικές έννοιες και τρόποι έλεγχου βάθους	18
2.1 Λόγοι ανάπτυξης ρομποτικών ψαριών	18
2.2 Πλευστότητα.....	19
2.3 Στατικός και δυναμικός έλεγχος βάθους.....	20
2.4 Έλεγχος βάθους στα ψάρια.....	21
2.5 Έλεγχος βάθους σε αυτόνομα υποβρύχια σκάφη	23
2.6 Έλεγχος βάθους σε τηλεχειριζόμενα σκάφη.....	24
2.7 Έλεγχος βάθους στα βιομιμητικά ρομποτικά ψάρια	26
Κεφάλαιο 3: Μοντελοποίηση και ανάπτυξη δυναμικής του συστήματος	31
3.1 Ανάπτυξη της δυναμικής της αντλίας	31
3.2 Αλλαγή μεταβλητής κατάστασης	37
3.3 Ομαδοποίηση παραμέτρων.....	37
3.4 Δυναμική της κάθετης κίνησης μέσα στο νερό	38
3.5 Συνολική δυναμική του συστήματος	40
3.6 Προσδιορισμός παραμέτρων της δυναμικής της αντλίας	41
3.7 Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή ταχύτητας της αντίστασης του νερού.....	43
3.8 Δομικό διάγραμμα και πόλοι ανοιχτού βρόχου.....	43
Κεφάλαιο 4: Έλεγχος.....	46
4.1 Ελεγκτής ανάδρασης όλων των μεταβλητών κατάστασης.....	46
4.2 Κριτήριο ευστάθειας Routh Hurwitz.....	47

4.3	Προσδιορισμός κερδών	48
4.4	Απόκριση με διαταραχή.....	48
4.5	Ελεγκτής ανάδρασης όλων των μεταβλητών κατάστασης με ολοκληρωτή σφάλματος	50
4.6	Κριτήριο ευστάθειας Routh Hurwitz για το νέο ελεγκτή.....	51
4.7	Μεθοδολογία ρύθμισης κερδών.....	52
4.8	Απόκριση συστήματος χωρίς και με διαταραχή.....	60
Κεφάλαιο 5: Υλοποίηση		62
5.1	Αισθητήρας πίεσης.....	62
5.2	Αντλία	65
5.3	Μικροεπεξεργαστής.....	73
5.4	Γέφυρα H (H-Bridge)	74
5.5	Κύστη	74
5.6	Δεξαμενή	74
5.7	Συνδεσμολογία	75
5.8	Κόστος.....	76
5.9	Λογισμικό	77
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα.....		79
6.1	Μοντέλο για σκοπούς υλοποίησης	79
6.2	Αποτελέσματα	81
6.3	Σφάλματα μεταξύ των αποκρίσεων	87
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία		91
7.1	Συμπεράσματα	91
7.2	Μελλοντική εργασία.....	92
Βιβλιογραφία		94
Παράρτημα Α: Συνδεσμολογία μηχανοτρονικής διάταξης.....		97
Παράρτημα Β: Μοντέλο για σκοπούς υλοποίησης, όπως δημιουργήθηκε στο Simulink.....		98
Παράρτημα Γ: Κώδικας σε γλώσσα C		99
Παράρτημα Δ: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα πίεσης		106
Παράρτημα Ε: Τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα της αντλίας		114
Παράρτημα ΣΤ: Τεχνικά χαρακτηριστικά αυξητικής παλμογεννήτριας		115

Παράρτημα Ζ:	Τεχνικά χαρακτηριστικά του H-Bridge.....	119
Παράρτημα Η:	Τεχνικά χαρακτηριστικά του PIC.....	123
Παράρτημα Θ:	Κατασκευαστικά σχέδια στηριγμάτων αντλίας και παλμογεννήτριας.....	131

Κατάλογος Σχημάτων

Κεφάλαιο 1:	Εισαγωγή	13
Σχήμα 1-1.	«Ιπτάμενη μηχανή» του Leonardo Da Vinci.....	13
Σχήμα 1-2.	Το ρομποτικό ψάρι του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου στο ΕΜΠ.....	14
Κεφάλαιο 2:	Βασικές έννοιες και τρόποι έλεγχου βάθους.....	18
Σχήμα 2-1.	Καθοδήγηση κοπαδιού ψαριών από βιομιμητικά ρομποτικά ψάρια.....	19
Σχήμα 2-2.	Αρνητική, ουδέτερη και θετική πλευστότητα.....	20
Σχήμα 2-3.	Ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων πάνω στο ψάρι.....	21
Σχήμα 2-4.	Νηκτική κύστη στους οστεϊχθύες.....	22
Σχήμα 2-5.	Το συκώτι (liver) και τα πλευρικά πτερύγια στους χονδροιχθύες.....	23
Σχήμα 2-6.	Κάθετη τομή υποβρυχίου.....	23
Σχήμα 2-7.	Πλευρικά πτερύγια υποβρυχίου.....	24
Σχήμα 2-8.	Τυπικό ROV.....	25
Σχήμα 2-9.	Πρωθητήρες (thrusters).....	25
Σχήμα 2-10.	Έμβολο αποθήκευσης νερού.....	26
Σχήμα 2-11.	Ρομποτικό ψάρι με πλευρικά πτερύγια.....	27
Σχήμα 2-12.	Προσανατολισμός και κίνηση του ψαριού ανάλογα με τη θέση του κέντρου μάζας.....	28
Σχήμα 2-13.	Γραμμικός οδηγός με γραμμικό οδηγό τύπου κοχλία-περικόχλιου.....	28
Κεφάλαιο 3:	Μοντελοποίηση και ανάπτυξη δυναμικής του συστήματος	31
Σχήμα 3-1.	Φυσικό μοντέλο της αντλίας, τοποθετημένη μέσα στο ψάρι.....	32
Σχήμα 3-2.	Γραμμικός γράφος της αντλίας.....	33
Σχήμα 3-3.	Κανονικό δένδρο.....	33
Σχήμα 3-4.	Δεσμοί.....	33
Σχήμα 3-5.	Δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο ψάρι.....	39
Σχήμα 3-6.	Προσδιορισμός της χρονικής σταθεράς και της σταθεράς ελέγχου.....	42
Σχήμα 3-7.	Προσδιορισμός του γραμμικού συντελεστή της ταχύτητας.....	43
Σχήμα 3-8.	Δομικό διάγραμμα ανοιχτού βρόχου.....	44
Σχήμα 3-9.	Πόλοι ανοιχτού βρόχου.....	45

Κεφάλαιο 4:	Έλεγχος.....	46
Σχήμα 4-1.	Δομικό διάγραμμα κλειστού βρόχου.	46
Σχήμα 4-2.	Απόκριση συστήματος.	49
Σχήμα 4-3.	Δομικό διάγραμμα με διαταραχή στη μάζα.	49
Σχήμα 4-4.	Απόκριση συστήματος με διαταραχή στη μάζα.....	50
Σχήμα 4-5.	Δομικό διάγραμμα κλειστού βρόχου με ολοκληρωτή σφάλματος.....	51
Σχήμα 4-6.	Γεωμετρικός τόπος ριζών σε συνάρτηση με το κέρδος K_I ...	54
Σχήμα 4-7.	Γεωμετρικός τόπος ριζών σε συνάρτηση με το κέρδος K_h ..	56
Σχήμα 4-8.	Γεωμετρικός τόπος ριζών σε συνάρτηση με το κέρδος K_v ..	57
Σχήμα 4-9.	Γεωμετρικός τόπος ριζών σε συνάρτηση με το κέρδος K_μ ..	58
Σχήμα 4-10.	Γεωμετρικός τόπος ριζών σε συνάρτηση με το κέρδος K_{q_μ} .	60
Σχήμα 4-11.	Απόκριση συστήματος χωρίς διαταραχή.	60
Σχήμα 4-12.	Απόκριση συστήματος με διαταραχή.	61
Κεφάλαιο 5:	Υλοποίηση	62
Σχήμα 5-1.	Εσωτερικό ενός διαφορικού αισθητήρα πίεσης.	62
Σχήμα 5-2.	Gauge αισθητήρας πίεσης MPX5010GP της Freescale.	63
Σχήμα 5-3.	Κατασκευαστικό σχέδιο του αισθητήρα (διαστάσεις σε [mm]).	64
Σχήμα 5-4.	Αντλία θετικής μετατόπισης RS-360SH.	66
Σχήμα 5-5.	Κατασκευαστικά σχέδια κινητήρα RS-360SH-2885 της Mabuchi Motor.....	66
Σχήμα 5-6.	Αρχή λειτουργίας μαγνητικής (α) και οπτικής (β) αυξητικής παλμογεννήτριας.	67
Σχήμα 5-7.	Κινητήρας 1524E006S123 της Faulhaber.	68
Σχήμα 5-8.	Η αντλία μετά την ενσωμάτωση της παλμογεννήτριας.	69
Σχήμα 5-9.	Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της μετατόπισης στην αντλία (D).....	71
Σχήμα 5-10.	Ο μικροεπεξεργαστής PIC18F4431 της Microchip.....	73
Σχήμα 5-11.	Χαρτογράφηση των 40 pins του μικροεπεξεργαστή.	73
Σχήμα 5-12.	H-Bridge MC33926 της Pololu.....	74
Σχήμα 5-13.	Η δεξαμενή του εργαστηρίου.	75
Σχήμα 5-14.	Σχηματική απεικόνιση της μηχανοτρονικής διάταξης.....	75
Κεφάλαιο 6:	Αποτελέσματα.....	79
Σχήμα 6-1.	Μοντέλο για σκοπούς ελέγχου.....	79

Σχήμα 6-2.	Μοντέλο για σκοπούς ελέγχου όπως δημιουργήθηκε στο Simulink.	80
Σχήμα 6-3.	Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πρώτων δοκιμών.	82
Σχήμα 6-4.	Αποτελέσματα προσομοίωσης με το ιδανικό μοντέλο (ideal model).....	83
Σχήμα 6-5.	Προσθήκη προσομοίωσης με το πραγματικό μοντέλο (real model).....	83
Σχήμα 6-6.	Προσθήκη πειραματικού αποτελέσματος (experiment).....	84
Σχήμα 6-7.	Αποτελέσματα προσομοίωσης με το ιδανικό μοντέλο (ideal model).....	85
Σχήμα 6-8.	Προσθήκη προσομοίωσης με το πραγματικό μοντέλο (real model).....	86
Σχήμα 6-9.	Προσθήκη πειραματικού αποτελέσματος (experiment).....	86
Σχήμα 6-10.	Σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του πραγματικού μοντέλου και της προσομοίωσης του ιδανικού μοντέλου.	88
Σχήμα 6-11.	Σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων του πειράματος και της προσομοίωσης του ιδανικού μοντέλου	89
Σχήμα 6-12.	Προσθήκη πειραματικού αποτελέσματος (experiment).....	90

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Τιμές των παραμέτρων.....	44
Πίνακας 5-1. Αποτελέσματα πειράματος για ροή από ακτινικά προς αξονικά.	72
Πίνακας 5-2. Αποτελέσματα πειράματος για ροή από αξονικά προς ακτινικά.	72
Πίνακας 5-3. Κόστος διάταξης.....	76

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Σήμερα παρατηρείται μία έκρηξη ερευνητικού ενδιαφέροντος και ανάπτυξης στον τομέα της βιομιμητικής. Βιομημητική (βίος + μιμητική) (Biomimetics) ονομάζεται η μελέτη της δομής και λειτουργίας βιολογικών συστημάτων για να χρησιμοποιηθούν ως πρότυπα για το σχεδιασμό και την κατασκευή υλικών και μηχανισμών/μηχανών. Στη φύση, με την πάροδο του χρόνου, οι οργανισμοί μέσα από τη διαδικασία της φυσικής επιλογής και την εξέλιξη των ειδών, έχουν αποκτήσει τις βέλτιστες μορφές και τρόπους λειτουργίας ώστε να είναι σε θέση να επιβιώνουν. Η αυτοϊαση, η έκθεση στο περιβάλλον με την ελάχιστη δυνατή φθορά, η υδροφοβία και η απορρόφηση και εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας είναι μερικές μόνο από τις αξιοζήλευτες λειτουργίες της φύσης που παρουσιάζουν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Με την ανάπτυξη του κλάδου της βιομιμητικής, νέες τεχνολογίες δημιουργήθηκαν ώστε να λυθούν σύνθετα προβλήματα στον μακρόκοσμο αλλά και τον μικρόκοσμο. Αν και ο άνθρωπος από τότε που εμφανίστηκε στη γη, ζώντας πάνω στη γη, αναγκαστικά επηρεαζόταν και έπαιρνε ιδέες από το φυσικό περιβάλλον ώστε να κατασκευάσει τα εργαλεία του, η πρώτη ιδέα που μπορεί κανείς να πει ότι ανήκει στη βιομιμητική, όπως χρησιμοποιείται σήμερα ο όρος, είναι μία από τις ιπτάμενες μηχανές του Leonardo Da Vinci (1452–1519) μ.Χ., όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-1.



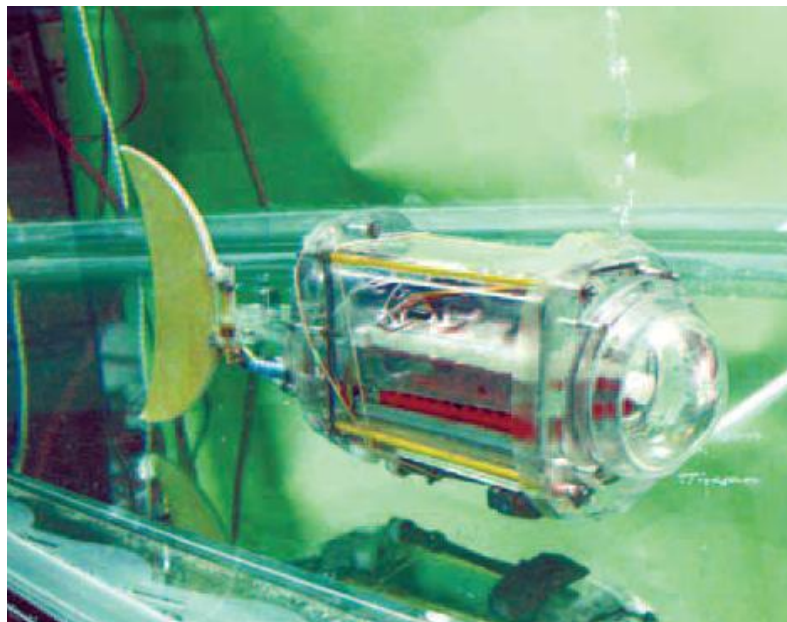
Σχήμα 1-1. «Ιπτάμενη μηχανή» του Leonardo Da Vinci.

Αν και η μηχανή αυτή δεν κατασκευάστηκε ποτέ, τα σχέδια δείχνουν μια μηχανή σχεδιασμένη να ίπταται με τη βοήθεια τεχνητών φτερών, τα οποία είναι εμπνευσμένα καθαρά από τη δομή και τη λειτουργία των φτερών που έχουν τα πουλιά. Η λέξη

βιομημητική άρχισε να χρησιμοποιείται ως όρος αρκετά αργότερα, γύρω στο 1930. Ιδιαίτερη άνθιση παρατηρείται στον κλάδο αυτόν την τελευταία δεκαετία, με πολλές μελέτες να προσπαθούν να μιμηθούν λειτουργίες της φύσης. Όσο αφορά τη ρομποτική, τετράποδα ρομπότ, ρομποτικά ψάρια, έντομα και αμφίβια κατασκευάζονται και αναπτύσσονται συνεχώς.

Ο λόγος για τον οποίο έχει δοθεί μεγάλη βαρύτητα στην ανάπτυξη βιομημητικών συστημάτων, είναι κυρίως γιατί τα βιομημητικά συστήματα, είναι πολύ πιο αποδοτικά από άποψη κατανάλωσης ενέργειας και έχουν καλύτερες ικανότητες λειτουργίας σε σχέση με τα συμβατικά. Ειδικότερα, όσον αφορά τα βιομημητικά ρομπότ, αυτά ανοίγουν νέους ερευνητικούς ορίζοντες, καθώς επιτρέπουν λιγότερο επεμβατικές αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον, την πανίδα και τη χλωρίδα. Πηγαίνοντας ένα βήμα πιο πέρα, ένας από τους στόχους των βιομημητικών ρομπότ είναι να μπορέσουν να αλληλεπιδράσουν αποδοτικά επικοινωνώντας με ζώα, χωρίς να τα τρομάξουν, μιας και θα μοιάζουν πολύ με αυτά.

Χαρακτηριστικό των ρομποτικών ψαριών, αποτελεί το γεγονός ότι κινούνται με τεχνητές ουρές, οι οποίες κινούνται και έχουν δομή παρόμοια με αυτή των ψαριών που συναντά κανείς στο φυσικό περιβάλλον. Στόχος τους είναι να μοιάζουν μορφολογικά και λειτουργικά με τα ψάρια, ώστε να υιοθετήσουν τα πλεονεκτήματά τους στην ενεργειακή κατανάλωση, την ευελιξία και την φιλικότητα στο περιβάλλον (Σχήμα 1-2).



Σχήμα 1-2. Το ρομποτικό ψάρι του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου στο ΕΜΠ.

1.1 Σκοπός Εργασίας

Για να αξιοποιηθεί πλήρως ένα ρομποτικό ψάρι, είναι απαραίτητο να έχει την ικανότητα να διατηρεί κάποιο συγκεκριμένο βάθος, καθώς και να το αλλάζει κατά βούληση. Επομένως καίρια λειτουργία για την σωστή αξιοποίησή του είναι ο έλεγχος βάθους του. Χωρίς αυτόν, το ψάρι θα ήταν καταδικασμένο να κολυμπά στην επιφάνεια του νερού, ή στον πυθμένα, καθώς πρακτικά είναι αδύνατο να επιτευχθεί με ακρίβεια ουδέτερη πλευστότητα, ώστε να είναι σε θέση να παραμείνει το ψάρι σε συγκεκριμένο βάθος. Αλλά και να ήταν δυνατόν να επιτευχθεί ουδέτερη πλευστότητα με μεγάλη ακρίβεια, πάλι θα υπήρχε η ανάγκη ενός μηχανισμού ώστε να είναι δυνατή η αλλαγή του βάθους κατά βούληση.

Στόχος της εργασίας αυτής είναι η υλοποίηση ελέγχου βάθους για το ρομποτικό ψάρι του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, καθώς πριν την περάτωση της παρούσας εργασίας το ψάρι στερούταν της ικανότητας ελέγχου βάθους. Η μελέτη και η πραγματοποίηση του ελέγχου βάθους θα πρέπει να πληροί τα εξής κριτήρια: α) ο έλεγχος βάθους να είναι στατικός, ώστε το ψάρι να είναι σε θέση να αλλάξει το βάθος του χωρίς να χρειάζεται να κινηθεί αναγκαστικά στο οριζόντιο επίπεδο, β) μικρού μεγέθους, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ρομποτικά ψάρια, γ) χαμηλού κόστους, ώστε να είναι εύκολα υλοποιήσιμος από τον καθένα, δ) να υπάρξει συστηματική ανάπτυξη και δικαιολόγηση των δυναμικών εξισώσεων του συστήματος, ε) να σχεδιαστεί ένας αξιόπιστος ελεγκτής σύμφωνα με τις αρχές του αυτομάτου ελέγχου, στ) να επαληθευτεί η λειτουργικότητα του ελεγκτή όχι μόνο με προσομοιώσεις, αλλά και με πειράματα, ζ) να αναπτυχθεί μεθοδολογία ρύθμισης του ελεγκτή, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόκρισης του συστήματος και η) κατασκευή μιας μηχανοτρονικής διάταξης, η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση ελέγχου βάθους σε οποιοδήποτε βιομιμητικό ρομποτικό ψάρι, ή παρόμοια υποθαλάσσια μηχανή, απλά αλλάζοντας τις τιμές σε μερικές παραμέτρους.

Φιλοδοξία του έργου ήταν να πραγματοποιηθεί έλεγχος βάθους ο οποίος θα πλεονεκτεί σε ανάλυση, συμπεριφορά και κόστος από οποιαδήποτε παρόμοια διάταξη έχει πραγματοποιηθεί στον κόσμο μέχρι τώρα. Η επιλογή φθηνού εξοπλισμού εισάγει ακόμα περισσότερη δυσκολία στο εγχείρημα, καθώς πρέπει να αντιμετωπισθούν προβλήματα που θα προκύψουν από την μειωμένη αξιοπιστία του εξοπλισμού, μιας και το χαμηλό κόστος μεταφράζεται πάντα και σε χαμηλότερη ποιότητα.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Για την πραγματοποίηση της έρευνας και της υλοποίησης του ελέγχου βάθους, πολύτιμη βοήθεια προσέφερε η βιβλιογραφία που παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω.

Για την κατανόηση των κινήσεων και της λειτουργίας ελέγχου βάθους στα έμβια ψάρια, βοήθησαν τα [15] και [22]. Για τη μελέτη των υπαρχουσών ερευνών στα AUV, χρησιμοποιήθηκε η εργασία [16], στην οποία παρουσιάζεται έλεγχος ολίσθησης (sliding mode control) στην παροχή νερού που εισέρχεται και εξέρχεται στις δεξαμενές του σκάφους, και η εργασία [9], στην οποία έχει υλοποιηθεί αναλογικός-διαφορικός-ολοκληρωτικός (PID) και LQR έλεγχος στη γωνία των πλευρικών πτερυγίων ενός σκάφους. Για τη μελέτη των υπαρχουσών ερευνών στα ROV χρησιμοποιήθηκε η εργασία [8], στην οποία πραγματοποιήθηκε αναλογικός-διαφορικός (PD) και προσαρμοστικός μη γραμμικός έλεγχος με ανάδραση μεταβλητών κατάστασης (adaptive nonlinear state feedback) στη ταχύτητα της έλικας των προωθητήρων, και η εργασία [2], στην οποία για τον έλεγχο βάθους, εκτός από PD έλεγχο στους προωθητήρες, χρησιμοποιείται βοηθητικά ένα σύστημα εμβόλου, με τη δυνατότητα αποθήκευσης νερού. Επίσης, η εργασία [18] συνδυάζει δεξαμενές εντός του σκάφους οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να γεμίζουν με νερό και έλεγχο στην κλίση των πλευρικών πτερυγίων του σκάφους.

Για τη μελέτη του ελέγχου βάθους στα βιομιμητικά ψάρια χρησιμοποιήθηκαν οι επόμενες εργασίες. Οι εργασίες [26] και [27] παρουσιάζουν ασαφή έλεγχο (fuzzy control) και PID έλεγχο αντίστοιχα στη γωνία των πλευρικών πτερυγίων του ψαριού. Στις εργασίες [21], [7], [20], και [25] επιχειρείται έλεγχος βάθους χρησιμοποιώντας ασαφή έλεγχο μεταβάλλοντας το κέντρο μάζας του ψαριού. Η εργασία [11] παρουσιάζει ασαφή έλεγχο στη γωνία που σχηματίζει η ουρά ενός ρομποτικού σαλαχιού με την επιφάνεια του νερού. Η εργασία [5] παρουσιάζει έλεγχο βάθους θερμαίνοντας και ψύχοντας ποσότητες παραφίνης, αλλάζοντας έτσι τη μέση πυκνότητα του ψαριού. Στην εργασία [19] γίνεται σχεδιασμός ενός εμβόλου αποθήκευσης νερού, με απώτερο σκοπό να χρησιμοποιηθεί για έλεγχο βάθους.

Οι διπλωματικές εργασίες [23] και [24] πραγματεύονται έλεγχο βάθους ενός μικρού υποβρύχιου σκάφους και ενός ρομποτικού ψαριού αντίστοιχα. Για τις αρχές της μηχανικής των ρευστών, χρησιμοποιήθηκε το [4]. Για τη μοντελοποίηση και την ανάπτυξη της δυναμικής του συστήματος, τα [13] [14] και [17]. Για τον σχεδιασμό του ελεγκτή τα [3], [10] και [12]. Για εξοικείωση με το περιβάλλον του Simulink της Matlab, το [6]. Τέλος για την εκμάθηση της γλώσσας προγραμματισμού C για μικροεπεξεργαστές, το [1].

1.3 Δομή Εργασίας

Το κύριο μέρος της εργασίας αποτελείται από επτά κεφάλαια τα οποία αναλύονται περιληπτικά στη συνέχεια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι λόγοι ύπαρξης βιομιμητικών ρομποτικών ψαριών, βασικές έννοιες όπως η πλευστότητα, ο στατικός και δυναμικός έλεγχος βάθους,

καθώς και ο τρόπος με τον οποίο ελέγχουν το βάθος τους τα ψάρια στη φύση. Επίσης, παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέθοδοι ελέγχου βάθους που ακολουθούν τα μεγάλα υποβρύχια και AUV, τα ROV και τέλος η υπάρχουσα έρευνα που έχει γίνει γύρω από αυτό το θέμα στα ρομποτικά ψάρια.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του συστήματος, η ανάπτυξη των δυναμικών εξισώσεων και ο προσδιορισμός των άγνωστων παραμέτρων. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται στην τελική τους μορφή οι δυναμικές εξισώσεις που αποτελούν τον ανοιχτό βρόχο του συστήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του ελεγκτή που οδηγεί το σύστημα στο επιθυμητό βάθος, οι δυσκολίες που παρουσιάστηκαν, καθώς και η μεθοδολογία ρύθμισης του ελεγκτή για βελτιστοποίηση της απόκρισης του συστήματος κλειστού βρόχου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται τα εξαρτήματα που χρειάστηκαν ώστε να γίνει η υλοποίηση της μηχανοτρονικής διάταξης η οποία θα πραγματοποιεί τον έλεγχο βάθους, τα κατασκευαστικά και λειτουργικά τους χαρακτηριστικά και οι μετατροπές που χρειάστηκαν να γίνουν. Επίσης παρουσιάζονται τα κύρια σημεία του λογισμικού που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες του ελέγχου.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και επεξηγούνται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μέσω του λογισμικού της Matlab, καθώς και τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πραγματοποίηση της εργασίας, καθώς και προτάσεις για μελλοντικές εργασίες πάνω στο αντικείμενο.

Κεφάλαιο 2: Βασικές έννοιες και τρόποι έλεγχου βάθους

Ο έλεγχος βάθους υποβρύχιων οχημάτων μεγάλου μεγέθους έχει πραγματοποιηθεί επιτυχώς εδώ και πάνω από 100 χρόνια. Η ικανότητα ελέγχου βάθους όμως σε μικρά υποβρύχια βιομημητικά ρομπότ αποτελεί πρόκληση, λόγω του περιορισμένου μεγέθους τους, μιας και τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα είναι πολλές φορές δύσκολο να πραγματοποιηθούν σε μικρότερη, λόγω δυσκολίας εύρεσης παρόμοιου εξοπλισμού σε τέτοια κλίμακα. Επίσης, πολλές φορές αυτές οι μέθοδοι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ρομποτικά ψάρια, διότι δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις της βιομημητικής, δηλαδή της ικανότητας να πλησιάσει ένα ρομποτικό ψάρι κάποια αληθινά ψάρια, χωρίς να τα τρομάξει και να τα διώξει από κοντά του (επεμβατικότητα στη φύση).

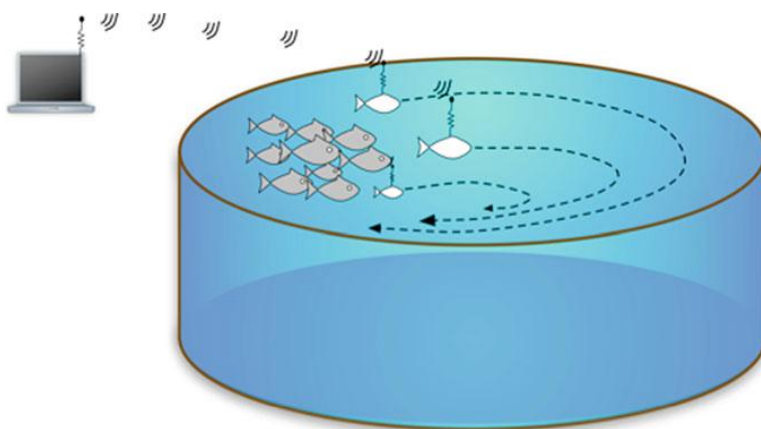
Παρακάτω, θα παρουσιασθούν οι ανάγκες που οδήγησαν στην κατασκευή των πρώτων ρομποτικών ψαριών, κάποιες απαραίτητες έννοιες για την κατανόηση της παρούσας εργασίας, καθώς και τα βασικά σημεία κάθε μεθόδου ελέγχου βάθους που απαντώνται στη φύση αλλά και στα υποβρύχια οχήματα.

2.1 Λόγοι ανάπτυξης ρομποτικών ψαριών

Συγκρίνοντας ένα σύγχρονο πλοίο ή υποβρύχιο με ένα ψάρι, παρατηρείται ότι μια από τις κύριες διαφορές είναι ότι το πλοίο και το υποβρύχιο κινούνται με έλικα, ενώ το ψάρι κινείται με τη βοήθεια της ουράς του. Τα ψάρια λόγω της ουράς τους, έχουν μερικά πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα υποβρύχια. Είναι αθόρυβα, έχουν πολύ πιο ενεργειακά αποδοτικό τρόπο κίνησης και πολύ μεγαλύτερη ευελιξία όσο αφορά τις κινήσεις τους μέσα στο νερό. Για παράδειγμα, για να κάνει ένα πλοίο αναστροφή 180 μοιρών, χρειάζεται να διαγράψει μια τροχιά μήκους περίπου 7-8 φορές όσο το μήκος σώματός τους, τη στιγμή που ένα ψάρι μπορεί να κάνει αναστροφή διαγράφοντας μια τροχιά 0.7 φορές το μήκος του σώματός του. Από αυτές τις παρατηρήσεις, δίνοντας μεγάλη σημασία στον παράγοντα του θορύβου, γεννήθηκε η ιδέα να μελετηθεί αν θα ήταν δυνατή η επιτυχής κατασκευή υποβρυχίων τα οποία θα κινούνται με τη βοήθεια τεχνητών ουρών, έτσι ώστε να μη δημιουργούν θόρυβο και συνεπώς να μην είναι ανιχνεύσιμα από αντίπαλες δυνάμεις. Ακόμη, με τον ίδιο τρόπο θα μπορούσαν να κατασκευαστούν πλοία νέας γενιάς, αθόρυβα, με πολύ μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και αισθητά καλύτερη ευελιξία κινήσεων. Για την πραγματοποίηση αυτού του εγχειρήματος, πρώτα θα έπρεπε να γίνει έρευνα σε κατασκευές πολύ μικρότερης κλίμακας από την κλίμακα ενός πλοίου. Αυτή η ανάγκη οδήγησε στην κατασκευή των πρώτων ρομποτικών ψαριών.

Όμως παράλληλα με την ανάπτυξή τους, φάνηκαν και άλλες χρησιμότητες. Καθώς ένα ρομποτικό ψάρι χρησιμοποιεί την ουρά του για να κινηθεί, μπορεί να προσεγγίσει ψάρια στο φυσικό τους περιβάλλον χωρίς να τα τρομάξει. Αυτό μέχρι τώρα δεν ήταν εφικτό από άλλες μηχανές, καθώς τα μόνα υποβρύχια οχήματα αυτού του μεγέθους χρησιμοποιούσαν μικρές έλικες, τους προωθητήρες (thrusters), που προκαλούσαν θόρυβο και δίνες διώχνοντας μακριά τα ψάρια. Αυτή η ικανότητα έδωσε νέες δυνατότητες αναφορικά με την παρακολούθηση των συνηθειών των ψαριών. Πλέον είναι δυνατή η παρακολούθηση κοπαδιών ψαριών από κοντινή απόσταση, το οποίο είναι σημαντικό ειδικά σε είδη υπό εξαφάνιση και η συλλογή πολύτιμων πληροφοριών από το περιβάλλον, όπως θερμοκρασία βάθος, ρεύματα νερού κ.τ.λ..

Τέλος, άλλη μία εφαρμογή είναι ο έλεγχος των κίνησης ενός κοπαδιού ψαριών σε μία επιθυμητή τροχιά [15]. Για παράδειγμα για να παραμείνει υγιές ένα κοπάδι ψαριών σε ένα ιχθυοτροφείο θα πρέπει να ασκείται. Ένας τρόπος άσκησης θα ήταν να κολυμπούν ενάντια σε τεχνητά ρεύματα. Κάτι τέτοιο απαιτεί όμως μεγάλες και ακριβές υδροδυναμικές μηχανές. Αντί για αυτό, θα μπορούσαν κάποια ρομποτικά ψάρια να προσεγγίσουν το κοπάδι, να πάρουν ηγετική θέση σε αυτό και να το οδηγήσουν σε μια επιθυμητή τροχιά, κάνοντας το κοπάδι να κολυμπήσει και να ασκηθεί (Σχήμα 2-1).



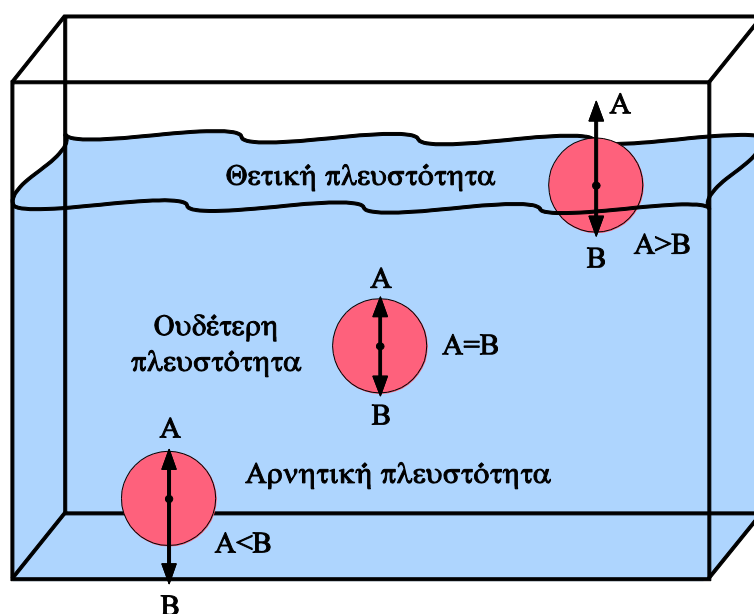
Σχήμα 2-1. Καθοδήγηση κοπαδιού ψαριών από βιομιμητικά ρομποτικά ψάρια.

2.2 Πλευστότητα

Πριν συζητηθεί η λειτουργία του ελέγχου βάθους, ας γίνει μια αναφορά στην πλευστότητα. Η πλευστότητα (buoyancy) ενός σώματος, δείχνει την τάση που έχει ένα σώμα να βυθιστεί, να επιπλεύσει ή να μείνει ακίνητο σε ένα βάθος και βασίζεται στην αρχή του Αρχιμήδη. Σύμφωνα με αυτήν, σε ένα σώμα το οποίο βρίσκεται μέσα σε ένα υγρό, εκτός από το βάρος του, του ασκείται και μία επιπλέον δύναμη, η άνωση A :

$$A = \rho_v \cdot g \cdot V \quad (2-1)$$

Όπου ρ_v είναι η πυκνότητα του υγρού στο οποίο είναι βυθισμένο το σώμα, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και V ο όγκος του βυθισμένου σώματος. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-2, όταν η άνωση είναι μεγαλύτερη από το βάρος του σώματος, τότε το σώμα έχει θετική πλευστότητα, κινείται προς την επιφάνεια του υγρού και παραμένει εκεί. Όταν η άνωση είναι ίση με το βάρος, τότε, το σώμα έχει ουδέτερη πλευστότητα και παραμένει ακίνητο μέσα στο υγρό. Πρακτικά είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί ουδέτερη πλευστότητα, καθώς οι δύο αντίθετες δυνάμεις πρέπει να έχουν την ίδια τιμή με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Τέλος, όταν η άνωση είναι μικρότερη από το βάρος του σώματος, το σώμα έχει αρνητική πλευστότητα, κινείται προς τον πυθμένα και παραμένει εκεί.

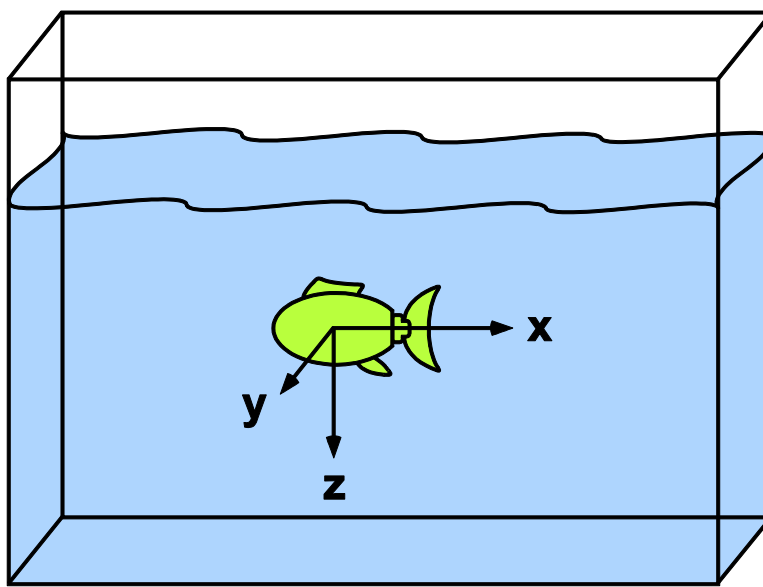


Σχήμα 2-2. Αρνητική, ουδέτερη και θετική πλευστότητα.

2.3 Στατικός και δυναμικός έλεγχος βάθους

Παρακάτω θα ορισθούν ο στατικός και δυναμικός έλεγχος βάθους. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται και ως έμμεσος ή άμεσος έλεγχος αντίστοιχα. Αν και ίσως δεν είναι και οι πιο εύστοχες ονομασίες για αυτό που ορίζουν, ανάλογα από ποια σκοπιά θα το δει κανείς, έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία και θα επεξηγηθούν καθώς βοηθούν στο διαχωρισμό του ελέγχου βάθους σε 2 κατηγορίες [23], [24]. Θεωρώντας το ορθοκανονικό σύστημα αξόνων xyz τοποθετημένο πάνω στο ρομποτικό ψάρι όπως φαίνεται στο σχήμα 2-3, δυναμικός έλεγχος βάθους ονομάζεται η δυνατότητα του ψαριού να αλλάζει το βάθος του (δηλαδή τη θέση του στον άξονα του z) με απαραίτητη προϋπόθεση την κίνησή του

στο οριζόντιο επίπεδο (δηλ. το επίπεδο xy). Στατικός έλεγχος βάθους ονομάζεται η δυνατότητα να αλλάζει το βάθος του, χωρίς την προϋπόθεση κίνησης στο οριζόντιο επίπεδο. Από τους παραπάνω ορισμούς φαίνεται ότι ο στατικός έλεγχος βάθους πλεονεκτεί σημαντικά έναντι του δυναμικού, λόγω της λειτουργικότητάς του ακόμη και σε πολύ περιορισμένους χώρους, όπου ένα ρομποτικό ψάρι θα ήταν αδύνατο να κάνει κινήσεις στο οριζόντιο επίπεδο.



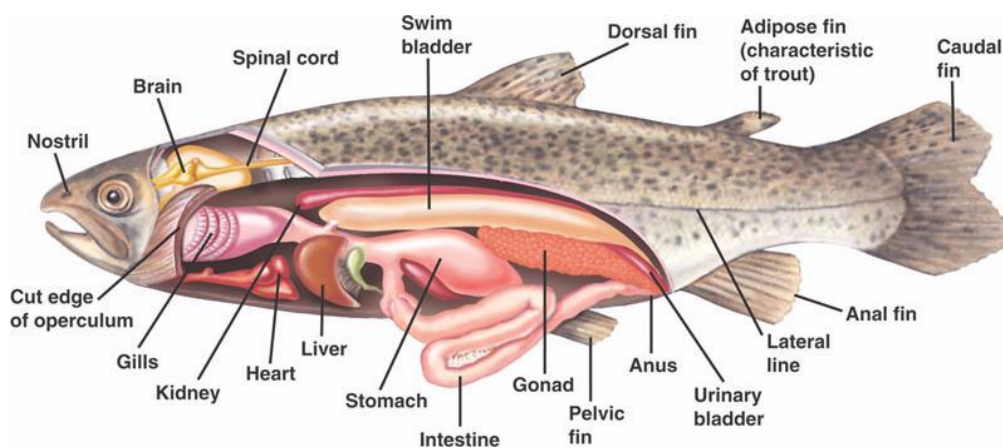
Σχήμα 2-3. Ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων πάνω στο ψάρι.

2.4 Έλεγχος βάθους στα ψάρια

Μιας και η παρούσα μελέτη ασχολείται με βιομιμητικό ρομποτικό ψάρι, είναι απαραίτητη η γνώση της βασικής λειτουργίας ελέγχου βάθους των ψαριών στη φύση. Με αυτό τον τρόπο, θα αποσαφηνιστούν καλύτερα και οι δύο κατηγορίες ελέγχου που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, αφού για τις δύο διαφορετικές κατηγορίες ψαριών, εφαρμόζεται και διαφορετικός έλεγχος. Ένας γενικός διαχωρισμός που μπορεί να γίνει στα ψάρια, αφορά τη σκελετική κατασκευή τους. Έτσι, υπάρχουν οι οστέιχθες (osteichthyes) που αποτελούν την πλειοψηφία των ψαριών και οι χονδριχθές (chondrichthyes).

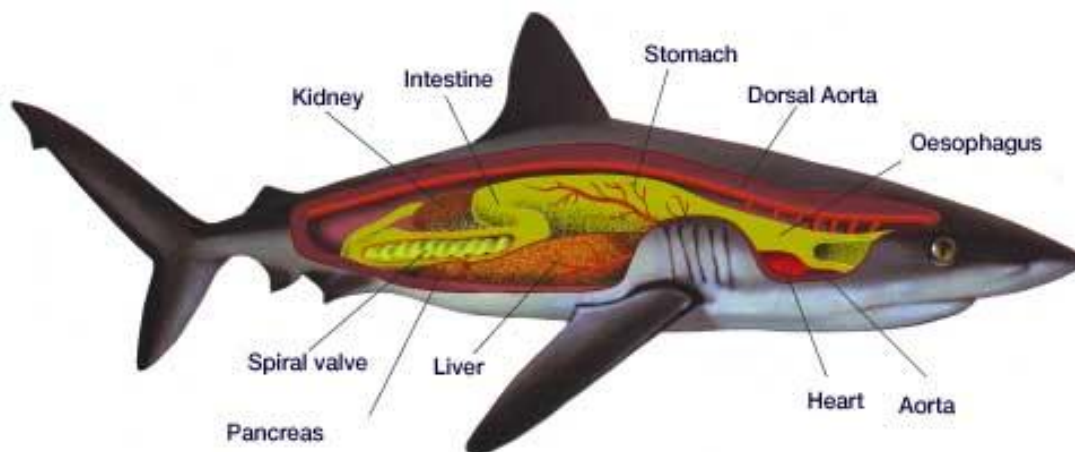
Στην κατηγορία των οστέιχθων, ανήκουν τα ψάρια που έχουν σκελετό αποτελούμενο από κόκκαλα. Τα περισσότερα ψάρια που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία έχουν στο σώμα τους ένα όργανο, τη νηκτική κύστη (swim bladder), όπως φαίνεται στο σχήμα 2-4. Η νηκτική κύστη, η οποία είναι συνδεδεμένη με το πεπτικό σύστημα, μοιάζει με σάκο ο οποίος αδειάζει ή γεμίζει με αέρα, μεταβάλλοντας τον όγκο του ψαριού χωρίς

να μεταβάλλει πρακτικά το βάρος του, ανάλογα με το αν το ψάρι θέλει να κινηθεί προς την επιφάνεια του νερού ή προς τον πυθμένα [22]. Δηλαδή, το ψάρι με αυτό τον τρόπο μεταβάλλει τη μέση πυκνότητά του. Όταν το ψάρι φτάσει στο επιθυμητό βάθος, τότε η νηκτική κύστη ρυθμίζει την ποσότητα αέρα που περιέχει, ώστε να επιτύχει ουδέτερη πλευστότητα και να διατηρήσει το βάθος του. Με αυτό το μηχανισμό, επιτυγχάνεται στατικός έλεγχος βάθους. Στην πράξη βέβαια, τα ψάρια συνήθως όταν αλλάζουν το βάθος τους κάνουν και κινήσεις στο οριζόντιο επίπεδο και κινούν πολλές φορές και τα πτερύγιά τους.



Σχήμα 2-4. Νηκτική κύστη στους οστεϊχθύες.

Τα ψάρια που ανήκουν στην κατηγορία των χονδριχθύων, έχουν σκελετό αποτελούμενο από χόνδρους, όπως για παράδειγμα ο καρχαρίας. Τα περισσότερα από αυτά τα ψάρια δεν έχουν νηκτική κύστη στο σώμα τους. Για να ρυθμίζουν την πλευστότητά τους και κατά συνέπεια το βάθος τους, το σώμα τους είναι εφοδιασμένο με ένα μεγάλο ελαιώδες συκώτι, που σε ορισμένες περιπτώσεις αποτελεί περίπου το 30% του σώματός τους (σχήμα 2-5). Το συκώτι αυτό παράγει ποσότητες ελαίων με πυκνότητα μικρότερη από την πυκνότητα του θαλασσινού νερού. Έτσι ρυθμίζοντας τις ποσότητες των ελαίων τα ψάρια μπορούν να ρυθμίσουν την πλευστότητά τους. Όμως αυτή η ρύθμιση δεν έχει σε καμία περίπτωση την ακρίβεια που καταφέρνει η νηκτική κύστη. Για το λόγο αυτό, τα ψάρια αυτά είναι αναγκασμένα να κινούνται συνεχώς στο οριζόντιο επίπεδο, ώστε να δημιουργείται ροή νερού γύρω από τα πτερύγιά τους και αλλάζοντας την κλίση των πλευρικών τους πτερυγίων, να δημιουργούνται οι κατάλληλες δυνάμεις ώστε να διατηρείται το επιθυμητό βάθος. Δηλαδή οι χονδριχθύες εκτελούν δυναμικό έλεγχο βάθους.

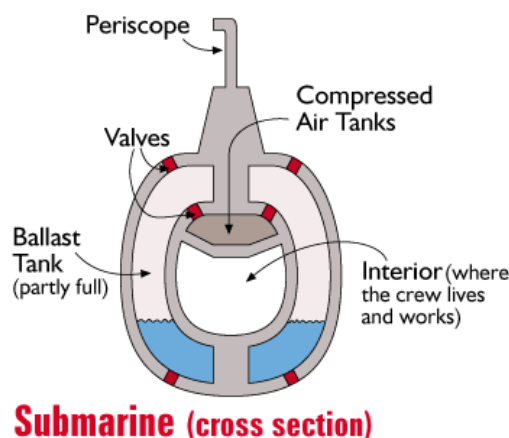


Σχήμα 2-5. Το συκώτι (liver) και τα πλευρικά πτερύγια στους χονδριχθύες.

2.5 Έλεγχος βάθους σε αυτόνομα υποβρύχια σκάφη

Ο έλεγχος βάθους στα αυτόνομα υποβρύχια σκάφη (autonomous underwater vehicles ή AUV) πραγματοποιείται συνήθως με τη βοήθεια δεξαμενών εντός του σκάφους οι οποίες γεμίζουν με νερό και αδειάζουν με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα, σε συνδυασμό με την κατάλληλη κλίση των πλευρικών πτερυγίων του σκάφους [18].

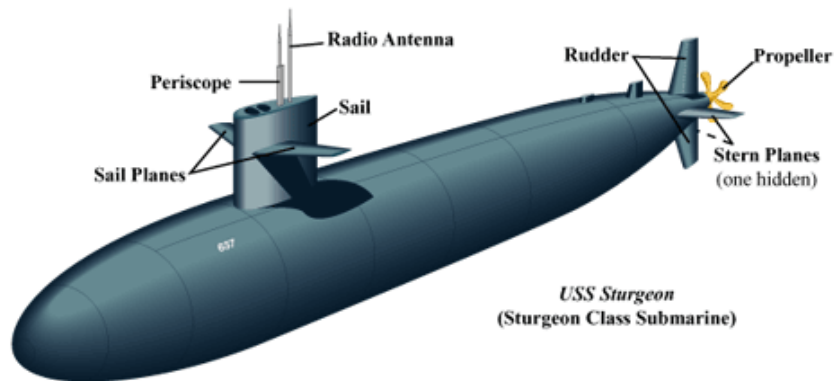
Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2-6 φαίνεται μία τομή ενός υποβρυχίου. Το εσωτερικό τμήμα του υποβρυχίου (interior) αποτελεί το χώρο στον οποίο βρίσκεται ο εξοπλισμός του σκάφους. Στον χώρο αυτόν κινείται και το πλήρωμα. Εξωτερικά του χώρου αυτού και σε δακτυλιοειδή μορφή, βρίσκονται οι δεξαμενές του υποβρυχίου (ballast tank).



Σχήμα 2-6. Κάθετη τομή υποβρυχίου.

Όταν το υποβρύχιο πρέπει να καταδυθεί, οι δεξαμενές γεμίζουν με νερό, ενώ όταν πρέπει να αναδυθεί, πεπιεσμένος αέρας εισέρχεται μέσα στις δεξαμενές και διώχνουν το νερό πίσω στη θάλασσα. Όταν το υποβρύχιο φτάσει στο επιθυμητό βάθος, ρυθμίζεται

κατάλληλα η ποσότητα του νερού μέσα στις δεξαμενές ώστε να επιτευχθεί ουδέτερη πλευστότητα. Παράλληλα, επειδή αυτή η διαδικασία δεν έχει μεγάλη ακρίβεια, για τη διατήρηση του επιθυμητού βάθους συνδράμουν και τα πλευρικά πτερύγια του υποβρυχίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-7, εκτελώντας την ίδια λειτουργία που κάνουν και τα πλευρικά πτερύγια του καρχαρία.

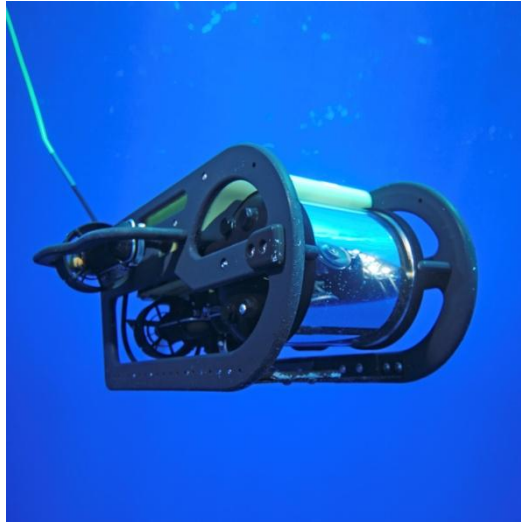


Σχήμα 2-7. Πλευρικά πτερύγια υποβρυχίου.

Όσο αφορά τους τρόπους ελέγχου τέτοιου είδους σκαφών, έχει υλοποιηθεί έλεγχος ολίσθησης (sliding mode control) στην παροχή νερού που εισέρχεται και εξέρχεται στις δεξαμενές του σκάφους, βασισμένος σε μοντέλα αποτελούμενα από μη γραμμικές εξισώσεις [16]. Άλλοι ερευνητές, έχουν υλοποιήσει έλεγχο PID και LQR στη γωνία των πλευρικών πτερυγίων ενός σκάφους, παρουσιάζοντας όμως μόνο αποτελέσματα σε προσομοιώσεις, χωρίς να έχουν επαληθεύσει τη λειτουργικότητά τους με πραγματικό πείραμα [9]. Οι προαναφερόμενες μέθοδοι έδειξαν κάποια θετικά αποτελέσματα, για τη λειτουργία τους όμως απαιτείται αρκετά μεγάλη υπολογιστική ισχύς.

2.6 Έλεγχος βάθους σε τηλεχειριζόμενα σκάφη

Ο έλεγχος βάθους σε τηλεχειριζόμενα σκάφη (remotely operated vehicles ή ROV) (Σχήμα 2-8) και ορισμένα μικρά AUV στη συντριπτική πλειοψηφία γίνεται με τη βοήθεια προωθητήρων (thrusters) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-9. Εκτός από τους προωθητήρες που κινούν οριζόντια το σκάφος, υπάρχουν και προωθητήρες που λειτουργούν κατακόρυφα, δημιουργώντας τις απαραίτητες δυνάμεις για την αλλαγή του βάθους και τη σταθεροποίηση σε κάποιο συγκεκριμένο βάθος. Στη βιομηχανική όμως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν προωθητήρες, καθώς ο θόρυβος και οι δίνες που δημιουργούν τρομάζουν και απομακρύνουν τα ψάρια.



Σχήμα 2-8. Τυπικό ROV.



Σχήμα 2-9. Πρωθητήρες (thrusters)

Σε ένα μικρό αυτόνομο υποβρύχιο σκάφος, με την κίνηση του να βασίζεται σε πρωθητήρες πραγματοποιήθηκε αναλογικός-διαφορικός (PD) και προσαρμοστικός μη γραμμικός έλεγχος με ανάδραση μεταβλητών κατάστασης (adaptive nonlinear state feedback) στην ταχύτητα της έλικας των πρωθητήρων, με τον δεύτερο ελεγκτή να έχει καλύτερα αποτελέσματα [8]. Άλλη μια εργασία παρουσιάζει αποτελέσματα για έλεγχο βάθους όταν εκτός από PD έλεγχο στους πρωθητήρες, χρησιμοποιείται βοηθητικά για καλύτερη πλευστότητα και μείωση κατανάλωσης ενέργειας, ένα σύστημα εμβόλου, με τη δυνατότητα αποθήκευσης νερού μέσα του [2]. Δυστυχώς όμως, οι πρωθητήρες είναι απαγορευτικοί σε εφαρμογές βιομιμητικών ψαριών.

Το σύστημα εμβόλου στο οποίο έγινε αναφορά παραπάνω παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-10. Αποτελείται από ένα κύλινδρο, στο εσωτερικό του οποίου μπορεί να κινείται ένα έμβολο. Το έμβολο είναι συνδεδεμένο με έναν άξονα που φέρει σπείρωμα και με αυτόν τον τρόπο μπορεί να μετατοπίζεται με τη βοήθεια ενός μικρού κινητήρα. Ανάλογα με την κίνηση του εμβόλου, μπαίνει ή βγαίνει νερό από τον κύλινδρο (Σχήμα 2-10). Συνήθως τέτοια συστήματα είναι εφοδιασμένα με κινητήρες χαμηλής ισχύος με συνέπεια την αργή απόκριση κατά το γέμισμα και το άδειασμα του κυλίνδρου.



Σχήμα 2-10. Έμβολο αποθήκευσης νερού.

2.7 Έλεγχος βάθους στα βιομηχανικά ρομποτικά ψάρια

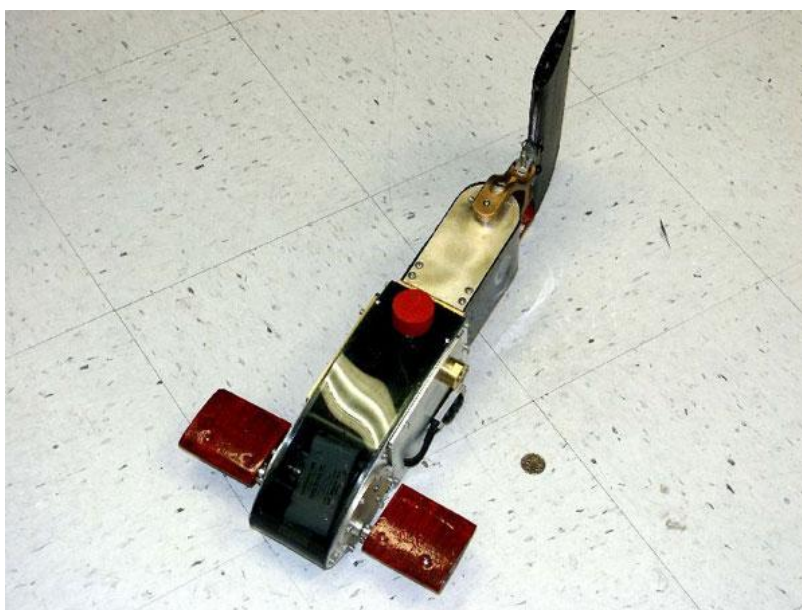
Στη βιομηχανική, έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς διάφορες μέθοδοι ελέγχου βάθους. Πλευρικά πτερύγια, έμβολα αποθήκευσης νερού, συστήματα αλλαγής του κέντρου μάζας, όπως γραμμικοί φορείς, συστήματα θέρμανσης παραφίνης ώστε να αλλάξει η πυκνότητά τους και άλλες μέθοδοι έχουν παρουσιαστεί, είτε μόνες τους, είτε σε συνδυασμό μεταξύ τους.

Στην κατηγορία *δυναμικού ελέγχου βάθους*, έχουν χρησιμοποιηθεί τρεις μέθοδοι υλοποίησης, η πρώτη με έλεγχο της κλίσης των πλευρικών πτερυγίων, η δεύτερη με μετατόπιση του κέντρου μάζας είτε προς το κεφάλι είτε προς την ουρά του ψαριού και η τρίτη, η οποία εφαρμόζεται σε ένα ρομποτικό σαλάχι, χρησιμοποιεί τη γωνία που μπορεί να σχηματίσει η ουρά του σαλαχιού προς την επιφάνεια ή τον πυθμένα, ώστε να αλλάξει ο προσανατολισμός του και να αναδυθεί ή να καταδυθεί.

Παρουσίαση ασαφούς ελέγχου (fuzzy control) στη γωνία των πλευρικών πτερυγίων του ψαριού παρουσιάζεται στο [26], χωρίς όμως να παρουσιάζονται οι δυναμικές εξισώσεις του συστήματος. Γεγονός το οποίο δικαιολογεί και την ύπαρξη του συγκεκριμένου ελεγκτή, καθώς για να σχεδιαστεί ένα ελεγκτής σύμφωνα με τις αρχές του αυτομάτου ελέγχου, χρειάζεται οπωσδήποτε να αναπτυχθούν πρώτα οι δυναμικές

εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα. Μία ακόμα σοβαρή έλλειψη στη συγκεκριμένη έρευνα, είναι ότι δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα απόκρισης του συστήματος για κάποιο σταθερό επιθυμητό βάθος, πράγμα το οποίο δεν επιτρέπει να σχηματισθεί κάποιο ξεκάθαρο συμπέρασμα σχετικά με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά αυτής της μεθόδου ελέγχου βάθους. Η μορφή τυπικών πλευρικών πτερυγίων σε ένα ρομποτικό ψάρι φαίνονται στο Σχήμα 2-10.

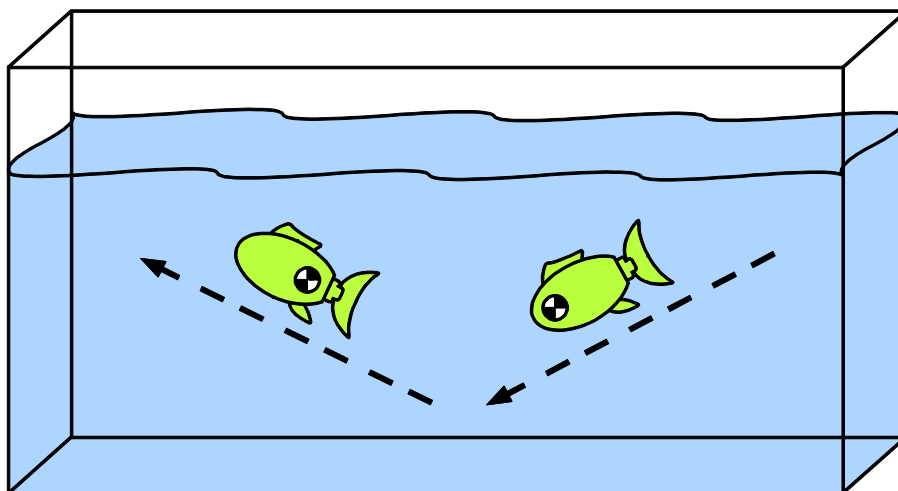
Επίσης έχει προταθεί έλεγχος βάθους τύπου PID, μεταβάλλοντας κατάλληλα τη γωνία των πλευρικών πτερυγίων γίνεται στο [27]. Η έρευνα είναι αξιόλογη, αναπτύσσεται αναλυτικά η δυναμική του συστήματος και σχεδιάζεται ένας αξιόπιστος ελεγκτής. Η έρευνα συνοδεύεται από πειράματα με καλά αποτελέσματα



Σχήμα 2-11. Ρομποτικό ψάρι με πλευρικά πτερύγια.

Δημοφιλής φαίνεται να είναι η μέθοδος μεταβολής του κέντρου μάζας ενός ρομποτικού ψαριού, όσο αφορά τον έλεγχο βάθους. Σε αυτή τη μέθοδο, με κάποιον τρόπο, το κέντρο βάρους του ψαριού αλλάζει, με αποτέλεσμα ο προσανατολισμός του ψαριού μέσα στο νερό να αλλάζει (Σχήμα 2-11). Συνήθως η μεταφορά του κέντρου μάζας επιτυγχάνεται με γραμμικό οδηγό που μεταφέρει κάποια μάζα προς το κεφάλι ή προς την ουρά του ψαριού (Σχήμα 2-12) ή με έμβολο αποθήκευσης νερού, τοποθετημένο και αυτό είτε κοντά στο κεφάλι είτε κοντά στην ουρά του ψαριού. Μεταφέροντας το κέντρο μάζας προς το κεφάλι του ψαριού, για παράδειγμα μεταφέροντας ένα γραμμικό οδηγό τύπου κοχλία-πτερικόχλιου (ball screw) προς το κεφάλι ή γεμίζοντας ένα έμβολο αποθήκευσης νερού, το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο προς το κεφάλι του ψαριού, το ψάρι αλλάζει προσανατολισμό μέσα στο νερό, με το κεφάλι να προσανατολίζεται προς τον πυθμένα

και την ουρά προς την επιφάνεια. Το ψάρι, κουνώντας την ουρά του ενώ βρίσκεται σε αυτή τη στάση, δημιουργεί δυνάμεις που το σπρώχνουν ώστε να καταδυθεί. Για την ανάδυση, συμβαίνει το αντίθετο. Το ball screw κινείται προς την ουρά ή ο κύλινδρος με το έμβολο αδειάζει, το ψάρι «κοιτάζει» προς τα πάνω και κουνώντας την ουρά του, αναδύεται.



Σχήμα 2-12. Προσανατολισμός και κίνηση του ψαριού ανάλογα με τη θέση του κέντρου μάζας



Σχήμα 2-13. Γραμμικός οδηγός με γραμμικό οδηγό τύπου κοχλία- περικόχλιου.

Αρκετές έρευνες αναφέρουν ότι χρησιμοποιούν την παραπάνω μέθοδο [21], [7], [20], [25]. Δυστυχώς όλες είναι ελλιπείς ως προς την τεκμηρίωση και τα αποτελέσματα της μεθόδου. Σε αυτές που επιχειρείται κάποιου είδους έλεγχος, πραγματοποιείται ασαφής έλεγχος ως προς τη μετατόπιση του κέντρου μάζας σε σχέση με το βάθος στο οποίο βρίσκεται το ψάρι. Λίγες από αυτές παρουσιάζουν τη δυναμική του συστήματος, και χαρακτηριστική είναι η απουσία αποτελεσμάτων της μεθόδου για κάποιο σταθερό

επιθυμητό βάθος, γεγονός το οποίο και πάλι δεν μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τη μέθοδο.

Τέλος, υπάρχει μία άλλη έρευνα στην οποία χρησιμοποιείται ασαφής έλεγχος για να ελεγχθεί το βάθος ενός ρομποτικού σαλαχιού. Η ουρά του σαλαχιού έχει την ικανότητα να σχηματίζει γωνία προς τον πυθμένα ή την επιφάνεια του νερού, αλλάζοντας τον προσανατολισμό του σαλαχιού. Έτσι, κουνώντας τα πλευρικά πτερύγιά του όπως ένα πραγματικό σαλάχι, δημιουργεί προωθητική δύναμη και ανάλογα με τον προσανατολισμό του, αναδύεται ή καταδύεται [11].

Στην κατηγορία *στατικού ελέγχου βάθους*, έχει χρησιμοποιηθεί μέθοδος θέρμανσης και ψύξης παραφίνης. Άλλη μία μελέτη προτείνει το σχεδιασμό ενός εμβόλου αποθήκευσης νερού, αλλά δεν έχει προχωρήσει σε περαιτέρω μελέτη για τον έλεγχο.

Έλεγχος βάθους με θέρμανση ή ψύξη ποσότητας παραφίνης, αλλάζοντας έτσι τη μέση πυκνότητα του ψαριού παρουσιάζεται στο [5]. Η ίδια διαδικασία, με έλαια όμως και όχι με παραφίνη, συμβαίνει στην πραγματικότητα στο κεφάλι της φάλαινας φυσητήρα, ώστε να αποκτήσει ουδέτερη πλευστότητα. Αν και δεν παρουσιάζεται η δυναμική του συστήματος, ούτε ο έλεγχος που πραγματοποιήθηκε, υπάρχουν αποτελέσματα για σταθερό επιθυμητό βάθος, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ικανοποιητικά στη μόνιμη κατάσταση. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η πολύ αργή απόκριση του συστήματος, μιας και χρειάζονται μεγάλα χρονικά διαστήματα για την ψύξη και τη θέρμανση της παραφίνης.

Τέλος στην έρευνα όπου γίνεται σχεδιασμός ενός εμβόλου αποθήκευσης νερού, παρουσιάζονται τα σχέδια της κατασκευής και αναπτύσσεται και αναλύεται διεξοδικά και με μεγάλη λεπτομέρεια η δυναμική του συστήματος [19]. Όμως η έρευνα είναι ημιτελής, καθώς δεν γίνεται κανένας έλεγχος στο βάθος, καθώς ούτε και αποτελέσματα σε προσομοιώσεις ή πειράματα.

Από την προαναφερόμενη εργασία που έχει πραγματοποιηθεί από άλλους ερευνητές ανά τον κόσμο γύρω από τον έλεγχο βάθους σε βιομιμητικά ψάρια, φαίνεται ότι δεν έχει επιτευχθεί πουθενά στατικός έλεγχος βάθους εκτός από την περίπτωση με τη θέρμανση και ψύξη παραφίνης, με μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου να αποτελεί η πολύ αργή απόκριση του συστήματος. Σε όλες τις άλλες εργασίες, γίνεται απόπειρα δυναμικού ελέγχου βάθους, κύριο μειονέκτημα του οποίου είναι η απαραίτητη προϋπόθεση κίνησης του ψαριού στο οριζόντιο επίπεδο, και μάλιστα με κάποια ελάχιστη ταχύτητα. Η γενική εικόνα της ήδη υπάρχουσας έρευνας γύρω από το θέμα, δεν είναι καλή. Πολλές φορές οι έρευνες δεν συνοδεύονται από πειραματικά αποτελέσματα. Στις έρευνες όπου πραγματοποιήθηκαν πειράματα στις περισσότερες περιπτώσεις πραγματοποιείται ασαφής έλεγχος, μέθοδος που δεν είναι δόκιμη στα πλαίσια του αυτομάτου ελέγχου,

χωρίς να αναπτύσσεται η δυναμική του συστήματος, χωρίς να σχεδιάζεται ένας αξιόπιστος ελεγκτής, με αποτελέσματα που άλλοτε είναι ικανοποιητικά και άλλοτε όχι και χωρίς κάποια στοιχειώδη μεθοδολογία ρύθμισης του συστήματος για βελτίωση της απόκρισής του.

Κεφάλαιο 3: Μοντελοποίηση και ανάπτυξη δυναμικής του συστήματος

Για την πραγματοποίηση του στατικού ελέγχου βάθους, αποφασίστηκε στην παρούσα εργασία να σχεδιασθεί μία μηχανοτρονική διάταξη η οποία να λειτουργεί με τρόπο παρόμοιο με αυτόν με τον οποίο λειτουργεί και η νηκτική κύστη στους οστεϊχθύες. Το ψάρι γεμίζει ή αδειάζει τη νηκτική του κύστη με οξυγόνο, με αποτέλεσμα τη μεταβολή του όγκου του ψαριού, άρα και τη μεταβολή της πλευστότητας. Σε αυτή την εργασία, θα εισέρχεται και θα εξέρχεται νερό μέσα σε μία τεχνητή κύστη. Με αυτό τον τρόπο θα μεταβάλλεται η μάζα του ψαριού χωρίς να μεταβάλλεται ο όγκος του ψαριού, καθώς μπορεί να μεταβάλλεται ο όγκος της τεχνητής κύστης, τα τοιχώματα του ψαριού όμως είναι ασυμπίεστα. Οπότε σε αυτή την περίπτωση η πλευστότητα μεταβάλλεται μέσω μεταβολής της μάζας.

Για τη διακίνηση του νερού, θα χρησιμοποιηθεί μια μικρή γραναζωτή αντλία νερού, η οποία κινείται με τη βοήθεια ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Ο τρόπος αυτός αποτελεί καινοτομία, η οποία θα εφαρμοστεί για πρώτη φορά για τον έλεγχο βάθους σε βιομημητικά ψάρια και επιτρέπει στατικό έλεγχο βάθους με γρήγορη απόκριση του συστήματος. Το ψάρι αρχικά θα έχει θετική πλευστότητα και θα βρίσκεται στην επιφάνεια του νερού. Για να κινηθεί σε κάποιο βάθος, η αντλία θα διακινεί νερό στην κύστη, η οποία θα βρίσκεται τοποθετημένη μέσα στο ψάρι. Έτσι η συνολική μάζα του ψαριού θα αυξάνεται, ενώ ο όγκος του θα παραμένει σταθερός. Με αυτό τον τρόπο, το ψάρι θα ξεκινά να βυθίζεται. Για να σταματήσει το ψάρι, η αντλία θα αφαιρεί κάποια ποσότητα νερού από την κύστη ώστε να επιβραδυνθεί και μετά θα αποκατασταθεί ουδέτερη πλευστότητα ώστε να παραμείνει το ψάρι στο επιθυμητό βάθος.

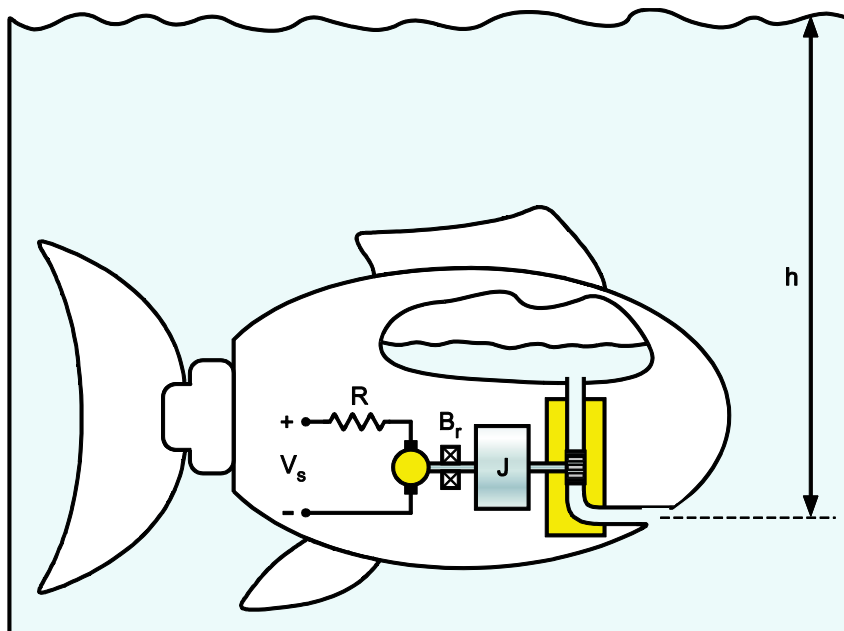
Παρακάτω θα μοντελοποιηθεί το σύστημα και θα αναπτυχθούν οι δυναμικές εξισώσεις που το περιγράφουν. Για τη μοντελοποίηση της αντλίας, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των γραμμικών γράφων (linear graphs) [17].

3.1 Ανάπτυξη της δυναμικής της αντλίας

Η αντλία αποτελείται από 3 υποσυστήματα (σχήμα 3-1). Το ηλεκτρικό, το οποίο αποτελείται από το ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) (direct current ή DC), το στροφικό μηχανικό, που αποτελείται από το δρομέα του κινητήρα και τα γρανάζια και το υδραυλικό, καθώς η αντλία διακινεί ποσότητες νερού. Τέλος, υπάρχει και το γραμμικό μηχανικό σύστημα της κίνησης του ψαριού στον κατακόρυφο άξονα, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω. Στο ηλεκτρικό υποσύστημα, αμελήθηκε η επαγωγή L του κυκλώματος, όπως συνηθίζεται στους κινητήρες ΣΡ. Στο υδραυλικό υποσύστημα

αμελήθηκαν οι υδραυλικές αντιστάσεις R_f , η αδράνεια του νερού I_f και η υδραυλική χωρητικότητα της κύστης C_f , καθώς το μήκος των σωλήνων που θα χρησιμοποιηθούν είναι πολύ μικρό και αντίστοιχα η ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στην κύστη είναι και αυτή μικρή. Άλλωστε, ακόμη και αν τα υδραυλικά μεγέθη R_f και I_f που αμελήθηκαν διαδραμάτιζαν πιο σημαντικό ρόλο, με τον τρόπο που έγινε ο προσδιορισμός των παραμέτρων, όπως θα παρουσιαστεί αργότερα, αυτά τα μεγέθη θα συμπεριλαμβάνονταν ως μέρος της συνολικής ροπής αδράνειας J και της συνολικής αντίστασης B_r .

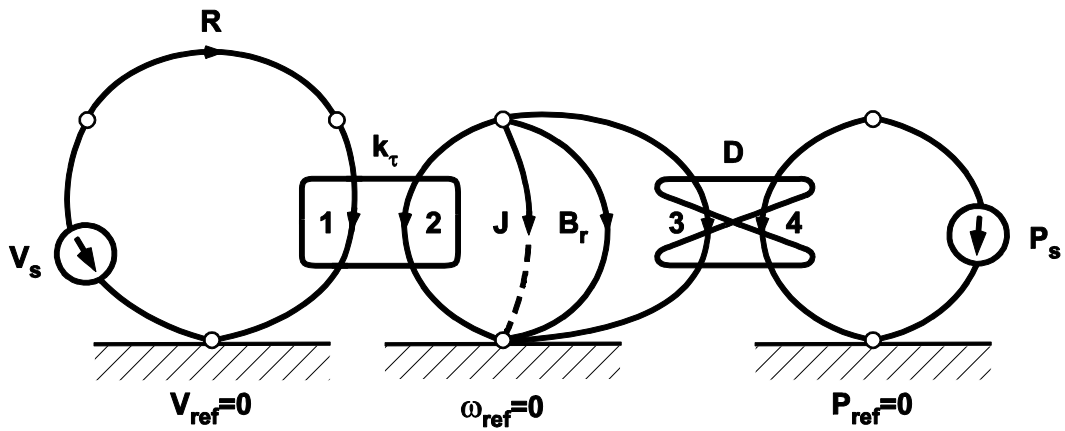
Επάνω στην αντλία, επειδή όπως θα φανεί παρακάτω, υπήρχε η ανάγκη να μετρούνται οι στροφές το δρομέα της αντλίας, προσαρτήθηκε μια αυξητική παλμογεννήτρια (incremental encoder). Συνεπώς, στο σχήμα 3-1, το J [$Kg \cdot m^2$] συμβολίζει τη συνολική ροπή αδράνειας του δρομέα της αντλίας, των γραναζιών της αντλίας, του δρομέα της αυξητικής παλμογεννήτριας και του νερού που διακινείται. Ουσιαστικά είναι η αδράνεια οτιδήποτε κινείται με την γωνιακή ταχύτητα του ρότορα. Το B_r [$N \cdot s$] συμβολίζει τη συνολική αντίσταση των εδράσεων του ρότορα της αντλίας, των εδράσεων του δρομέα της αυξητικής παλμογεννήτριας και των υδραυλικών αντιστάσεων των σωληνώσεων και της διαδρομής του νερού μέσα στην αντλία. Το R [Ω] συμβολίζει την ηλεκτρική αντίσταση του τυλίγματος του δρομέα, V_s [V] είναι η τάση που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες του κινητήρα της αντλίας και h [m] είναι το βάθος στο οποίο βρίσκεται το ψάρι (η απόσταση του ψαριού από την επιφάνεια του νερού).



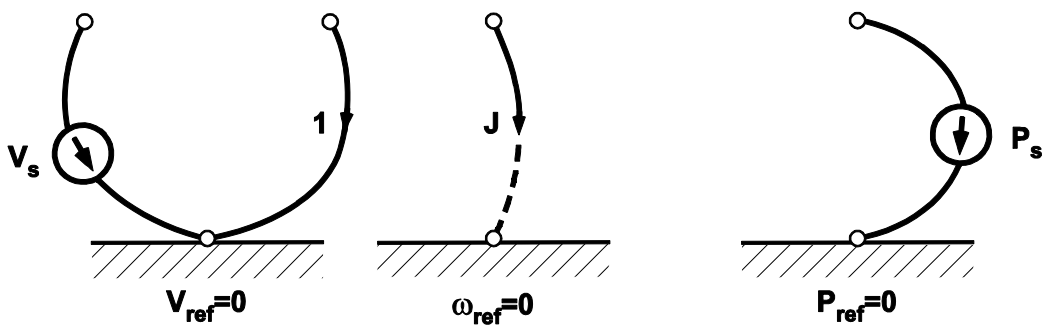
Σχήμα 3-1. Φυσικό μοντέλο της αντλίας, τοποθετημένη μέσα στο ψάρι.

Από το φυσικό μοντέλο, όπως παρουσιάζεται παραπάνω (σχήμα 3-1), σχεδιάζεται ο γραμμικός γράφος του συστήματος (σχήμα 3-2). Το κανονικό δένδρο (normal tree) και

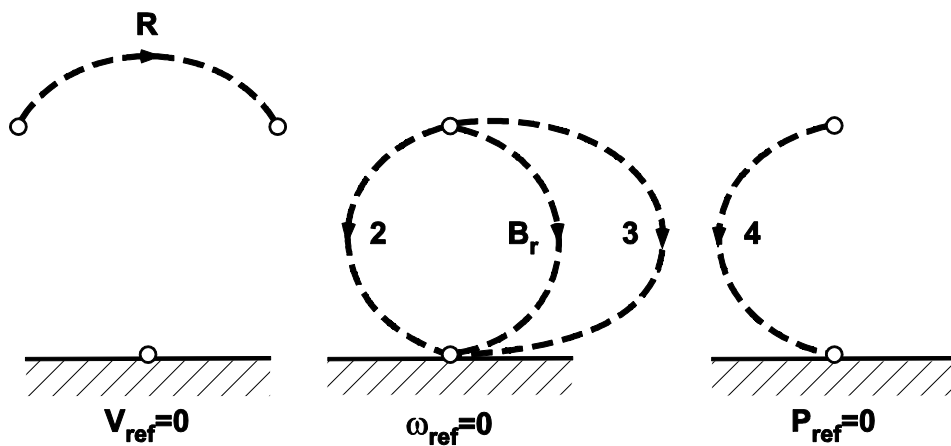
οι δεσμοί (bonds) θα μας χρησιμεύσουν για την κατάστρωση των εξισώσεων και παρουσιάζονται στα σχήματα 3-3 και 3-4 αντίστοιχα.



Σχήμα 3-2. Γραμμικός γράφος της αντλίας.



Σχήμα 3-3. Κανονικό δένδρο.



Σχήμα 3-4. Δεσμοί.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3-2, το ηλεκτρικό υποσύστημα συνδέεται με το μηχανικό στροφικό μέσω ενός μετασχηματιστή (transformer) που έχει παράμετρο μετασχηματισμού το $k_r [N \cdot m / A]$, τη σταθερά της ροπής. Το μηχανικό στροφικό υποσύστημα συνδέεται με το υδραυλικό μέσω ενός αναστροφέα (gyrator) με παράμετρο αναστροφής το $D [m^3 / rad]$, τη μετατόπιση της αντλίας. Η πίεση λόγω του βάθους του φαριού μοντελοποιείται ως μια πηγή πίεσης $P_s [N / m^2]$.

Παρακάτω θα ακολουθηθεί η μεθοδολογία των γραμμικών γράφων για την κατάστρωση των εξισώσεων δυναμικής της αντλίας. Με $\omega [rad / s]$ συμβολίζονται οι γωνιακές ταχύτητες κάθε κλάδου του γραμμικού γράφου, με $i [A]$ τα ρεύματα, με $v [V]$ οι τάσεις, με $T [N \cdot m]$ οι ροπές, με $q [m^3 / s]$ οι παροχές και με $P [N / m^2]$ οι πιέσεις. Οι πρωτεύουσες μεταβλητές αποτελούνται από τις μεταβλητές τύπου «Α» (across) (όπως αυτές ορίζονται από τη μεθοδολογία των γραμμικών γράφων) των στοιχείων που ανήκουν στο κανονικό δένδρο του γράφου και από τις μεταβλητές τύπου «Τ» (through) των στοιχείων που ανήκουν στους δεσμούς του γράφου.

Πρωτεύουσες μεταβλητές: $V_s, i_R, v_1, T_2, \omega_J, T_{B_r}, T_3, q_4, P_s$

Οι δευτερεύουσες μεταβλητές αποτελούνται από τις μεταβλητές «Α» των στοιχείων που ανήκουν στους δεσμούς του γράφου και τις μεταβλητές «Τ» των στοιχείων που ανήκουν στο κανονικό δένδρο.

Δευτερεύουσες μεταβλητές: $i_s, v_R, i_1, \omega_2, T_J, \omega_{B_r}, \omega_3, P_4, q_s$

Το άθροισμα των στοιχείων συσσώρευσης «Α» που βρίσκονται στο κανονικό δένδρο και των στοιχείων συσσώρευσης «Τ» που βρίσκονται στους δεσμούς αποτελεί την τάξη του συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μόνο η συνολική ροπή αδράνειας J η οποία είναι στοιχείο συσσώρευσης «Α» και ανήκει στο κανονικό δένδρο του γράφου.

Τάξη συστήματος: $n = 1$

Οι μεταβλητές κατάστασης αποτελούνται από τις μεταβλητές «Α» στοιχείων συσσώρευσης «Α» που ανήκουν στο κανονικό δένδρο και οι μεταβλητές «Τ» στοιχείων συσσώρευσης «Τ» που ανήκουν στους δεσμούς. Εδώ υπάρχει μόνο η γωνιακή ταχύτητα ω_J .

Μεταβλητές κατάστασης: ω_J

Θα γραφούν $B-S$ εξισώσεις στοιχείων για τα παθητικά στοιχεία του συστήματος (όχι για τις πηγές) έτσι ώστε η πρωτεύουσα μεταβλητή να βρίσκεται στο αριστερό μέρος της εξίσωσης. B είναι ο αριθμός των κλάδων του γραμμικού γράφου και S ο αριθμός των ανεξάρτητων πηγών του γραμμικού γράφου.

Εξισώσεις στοιχείων: $B - S = 9 - 2 = 7$

$$v_R = i_R \cdot R \Rightarrow i_R = \frac{v_R}{R} \quad (3-1)$$

$$v_1 = -k_\tau \cdot \omega_2 \quad (3-2)$$

$$i_1 = \frac{1}{k_\tau} \cdot T_2 \Rightarrow T_2 = k_\tau \cdot i_1 \quad (3-3)$$

$$T_{B_r} = B_r \cdot \omega_{B_r} \quad (3-4)$$

$$\frac{d\omega_J}{dt} = \frac{1}{J} \cdot T_J \quad (3-5)$$

$$\omega_3 = -\frac{1}{D} \cdot q_4 \Rightarrow q_4 = -D \cdot \omega_3 \quad (3-6)$$

$$T_3 = D \cdot P_4 \quad (3-7)$$

Για τις εξισώσεις 3-2 και 3-3, στη βιβλιογραφία προτείνεται η μορφή:

$$v_1 = k_\tau \cdot \omega_2 \quad (3-8)$$

$$i_1 = -\frac{1}{k_\tau} \cdot T_2 \Rightarrow T_2 = -k_\tau \cdot i_1 \quad (3-9)$$

Όμως το πρόσημο των σχέσεων αυτών εξαρτάται από το πώς ορίζει κανείς το ποια θα είναι η φορά των στροφών ω_2 εάν εφαρμοστεί κάποια θετική τάση v_1 . Έτσι όπως ορίστηκαν για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις 3-2 και 3-3 με τη μορφή που έχουν γραφτεί.

Σειρά έχουν να γραφούν οι $N - N_d - S_A$ ανεξάρτητες εξισώσεις συνέχειας, κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει μία μόνο δευτερεύουσα μεταβλητή που εμφανίζεται στο αριστερό μέρος της εξίσωσης. Αυτό επιτυγχάνεται αν οι εξισώσεις γραφούν για $N - N_d - S_A$ κόμβους ή υπερκόμβους των οποίων η περιβάλλουσα κλειστή γραμμή συναντά τους κλάδους του κανονικού δένδρου που αντιστοιχούν σε παθητικά στοιχεία μόνο μία φορά. N είναι ο αριθμός των κλάδων του γραμμικού γράφου, N_d ο αριθμός των ενεργειακών περιοχών στο σύστημα (ηλεκτρική, μηχανική στροφική, υδραυλική) και S_A οι πηγές μεταβλητής «Α» του γραμμικού γράφου.

Εξισώσεις συνέχειας: $N - N_d - S_A = 7 - 3 - 2 = 2$

$$i_R - i_1 = 0 \Rightarrow i_1 = i_R \quad (3-10)$$

$$T_J = -T_2 - T_{B_r} - T_3 \quad (3-11)$$

Επόμενο βήμα είναι να γραφούν $B - N + N_d - S_T$ ανεξάρτητες εξισώσεις συμβατότητας, κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει μία μόνο δευτερεύουσα μεταβλητή που εμφανίζεται στο αριστερό μέρος της εξίσωσης. Αυτό επιτυγχάνεται γράφοντας εξισώσεις συμβατότητας για $B - N + N_d - S_T$ βρόχους, που σχηματίζονται εάν κάθε ένας από τους $B - N + N_d - S_T$ κλάδους των δεσμών μετακινηθεί στο κανονικό δένδρο. S_T είναι οι πηγές μεταβλητής «T» του γραμμικού γράφου.

$$\text{Εξισώσεις συμβατότητας: } B - N + N_d - S_T = 9 - 7 + 3 - 0 = 5$$

$$-V_s + v_R + v_1 = 0 \Rightarrow v_R = V_s - v_1 \quad (3-12)$$

$$-\omega_2 + \omega_J = 0 \Rightarrow \omega_2 = \omega_J \quad (3-13)$$

$$-\omega_J + \omega_{B_r} = 0 \Rightarrow \omega_{B_r} = \omega_J \quad (3-14)$$

$$-\omega_J + \omega_3 = 0 \Rightarrow \omega_3 = \omega_J \quad (3-15)$$

$$-P_4 + P_s = 0 \Rightarrow P_4 = P_s \quad (3-16)$$

Τέλος, χρησιμοποιούνται οι $N - N_d - S_A$ και οι $B - N + N_d - S_T$ ανεξάρτητες εξισώσεις για να απαλειφθούν οι δευτερεύουσες μεταβλητές από τις $B - S$ εξισώσεις στοιχείων. Αλγεβρικά μειώνονται οι εξισώσεις που προκύπτουν εφαρμόζοντας τα παραπάνω στο τέλος παραμένει ένα σύνολο εξισώσεων ως προς τις μεταβλητές κατάστασης και τις εισόδους (πηγές).

$$\begin{aligned} (2-5) \Rightarrow \frac{d\omega_J}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot T_J \stackrel{(2-9)}{=} -\frac{1}{J} \cdot (T_2 + T_{B_r} + T_3) \stackrel{(2-3),(2-4)}{=} -\frac{1}{J} \cdot (k_\tau \cdot i_1 + B_r \cdot \omega_{B_r} + D \cdot P_4) \stackrel{(2-8),(2-12)}{=} \\ &\stackrel{(2-14)}{=} -\frac{1}{J} \cdot (k_\tau \cdot i_1 + B_r \cdot \omega_J + D \cdot P_s) \stackrel{(2-1)}{=} -\frac{1}{J} \cdot \left(k_\tau \cdot \frac{v_R}{R} + B_r \cdot \omega_J + D \cdot P_s \right) \stackrel{(2-10)}{=} \\ &= -\frac{1}{J} \cdot \left(k_\tau \cdot \frac{V_s - v_1}{R} + B_r \cdot \omega_J + D \cdot P_s \right) \stackrel{(2-2)}{=} -\frac{1}{J} \cdot \left(k_\tau \cdot \frac{V_s + k_\tau \cdot \omega_2}{R} + B_r \cdot \omega_J + D \cdot P_s \right) \stackrel{(2-11)}{=} \\ &= -\frac{1}{J} \cdot \left(k_\tau \cdot \frac{V_s + k_\tau \cdot \omega_J}{R} + B_r \cdot \omega_J + D \cdot P_s \right) \Rightarrow \frac{d\omega_J}{dt} = -\frac{1}{J} \cdot \left(\frac{k_\tau^2 + B_r \cdot R}{R} \cdot \omega_J + \frac{k_\tau}{R} \cdot V_s + D \cdot P_s \right) \Rightarrow \end{aligned}$$

$$J \cdot \dot{\omega}_J + \frac{k_\tau^2 + B_r \cdot R}{R} \cdot \omega_J = -\frac{k_\tau}{R} \cdot V_s - D \cdot P_s \quad (3-17)$$

3.2 Αλλαγή μεταβλητής κατάστασης

Από τη διαδικασία προέκυψε ότι η δυναμική της αντλίας περιγράφεται από την εξίσωση 3-17. Σε αυτή την εξίσωση, προέκυψε ως μεταβλητή κατάστασης η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα της αντλίας, ω_J . Παρόλα αυτά, στην εφαρμογή που εξετάζεται πρέπει να υπάρχει γνώση της μάζας του νερού που διακινείται μέσω της αντλίας. Για αυτό το λόγο η εξίσωση 3-17 που έχει ως μεταβλητή κατάστασης το ω_J θα μετασχηματιστεί ώστε η μεταβλητή κατάστασης να είναι η *παροχή μάζας* του νερού που διακινεί η αντλία q_μ [kg / s].

Ισχύει ότι:

$$\rho = \frac{\mu}{V} \Rightarrow \mu = \rho \cdot V \Rightarrow \dot{\mu} = \rho \cdot \dot{V} \Rightarrow q_\mu = \rho \cdot q \quad (3-18)$$

Όπου ρ [kg / m³] είναι η πυκνότητα του νερού, μ [Kg] είναι η μάζα του νερού που διακινεί η αντλία, V [m³] είναι ο όγκος του νερού και q [m³ / s] είναι η *παροχή όγκου* (όπως έχει προαναφερθεί). Η σχέση που συνδέει την παροχή όγκου με την γωνιακή ταχύτητα της αντλίας είναι:

$$q = -D \cdot \omega_J \quad (3-19)$$

Επομένως, η εξίσωση 3-18, με τη βοήθεια της 3-19 μετασχηματίζεται ως εξής:

$$q_\mu = -\rho \cdot D \cdot \omega_J \Rightarrow \omega_J = -\frac{q_\mu}{\rho \cdot D} \quad (3-20)$$

Τέλος, η εξίσωση 3-17 με τη βοήθεια της 3-20 μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\frac{J}{\rho \cdot D} \cdot \dot{q}_\mu + \frac{k_\tau^2 + B_r \cdot R}{R \cdot \rho \cdot D} \cdot q_\mu = \frac{k_\tau}{R} \cdot V_s + D \cdot P_s \quad (3-21)$$

Πλέον η μεταβλητή κατάστασης στην Εξίσωση 3-21 είναι η παροχή μάζας του νερού που διακινεί η αντλία.

3.3 Ομαδοποίηση παραμέτρων

Τώρα που έγινε ανάπτυξη της εξίσωσης της αντλίας, αρχίζουν ήδη να διαφαίνονται τα προβλήματα λόγω επιλογής φθηνού εξοπλισμού. Δυστυχώς, ο κατασκευαστής της αντλίας που επιλέχθηκε δεν παρέχει χαρακτηριστικά της αντλίας, όπως την αντίσταση λόγω τριβών στις εδράσεις του δρομέα (B_r) ή τη σταθερά ροπής (k_τ). Αλλά ακόμη και αν υπήρχαν οι τιμές αυτών των παραμέτρων, έτσι όπως μοντελοποιήθηκε η αντλία, κάποια

μεγέθη είναι σύνολα κάποιων επιμέρους συνιστωσών, όπως για παράδειγμα η συνολική ροπή αδράνειας (J). Αν και ορισμένες τιμές των παραμέτρων είναι εύκολο να προσδιοριστούν, όπως για παράδειγμα η ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος του κινητήρα, που προσδιορίζεται εύκολα με ένα πολύμετρο, για κάποιες άλλες παραμέτρους θα χρειαζόταν σχεδίαση πολλών πειραμάτων και κατασκευή πειραματικών διατάξεων. Για να αποφευχθεί αυτό, βρέθηκε μια απλή μέθοδος ώστε να ομαδοποιηθούν πολλές παράμετροι μαζί και τέλος με ένα πείραμα να γίνει εκτίμηση αυτών των ομαδοποιημένων παραμέτρων.

Διαιρώντας όλους τους όρους της Εξίσωσης (3-21) με το συντελεστή του q_μ , η μορφή της εξίσωσης παίρνει την εξής μορφή:

$$\frac{J \cdot R}{k_\tau^2 + B_r \cdot R} \cdot \dot{q}_\mu + q_\mu = \frac{k_\tau \cdot \rho \cdot D}{k_\tau^2 + B_r \cdot R} \cdot V_s + \frac{\rho \cdot R \cdot D^2}{k_\tau^2 + B_r \cdot R} \cdot P_s \quad (3-22)$$

Η πίεση P_s είναι αμελητέα για μικρά βάθη, και επειδή τα πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο έλαβαν χώρα σε μια δεξαμενή μέγιστου βάρους 0.8m, μπορεί να αμεληθεί στη συγκεκριμένη περίπτωση. Επομένως, η εξίσωση 3-22 παίρνει τη μορφή:

$$\left(\underbrace{\frac{J \cdot R}{k_\tau^2 + B_r \cdot R}}_\tau \right) \cdot \dot{q}_\mu + q_\mu = \left(\underbrace{\frac{k_\tau \cdot \rho \cdot D}{k_\tau^2 + B_r \cdot R}}_k \right) \cdot V_s \quad (3-23)$$

Οι παράμετροι ομαδοποιούνται στις συνολικές σταθερές τ και k όπου

$$\tau = \frac{J \cdot R}{k_\tau^2 + B_r \cdot R} \quad (3-24)$$

$$k = \frac{k_\tau \cdot \rho \cdot D}{k_\tau^2 + B_r \cdot R} \quad (3-25)$$

Η εξίσωση 2-21 τελικά παίρνει τη μορφή:

$$\tau \cdot \dot{q}_\mu + q_\mu = k \cdot V_s \quad (3-26)$$

Δηλαδή η δυναμική της αντλίας έχει τη μορφή μιας διαφορικής εξίσωσης πρώτου βαθμού, με τ μία χρονική σταθερά και k μία σταθερά.

Τελικά το πρόβλημα προσδιορισμού του μεγάλου αριθμού παραμέτρων που υπήρχαν στην αρχή ανάγεται στον προσδιορισμό μόνο των παραμέτρων τ και k .

3.4 Δυναμική της κάθετης κίνησης μέσα στο νερό

Επόμενο βήμα είναι να αναπτυχθεί η δυναμική της κίνησης του ρομποτικού ψαριού μέσα στο νερό. Για λόγους μοντελοποίησης θεωρούμε το ψάρι ως ένα σώμα στο οποίο

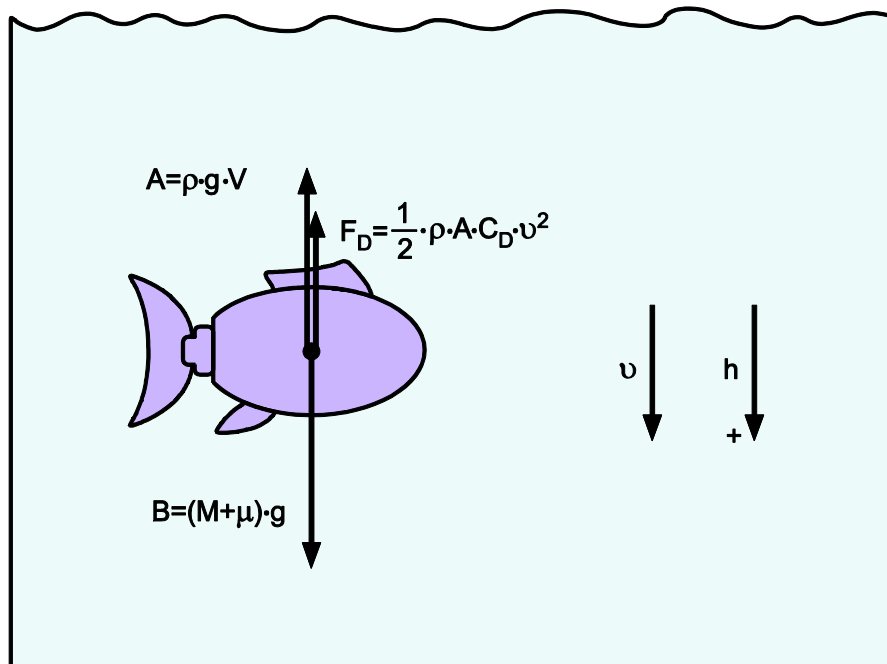
ασκούνται συγκεντρωμένα οι εξής δυνάμεις όταν αυτό βρίσκεται σε κίνηση μέσα στο νερό: η άνωση A , το βάρος B και η αντίσταση του νερού F_D . Η αντίσταση του νερού έχει φορά πάντα αντίθετη από τη φορά της κίνησης του ψαριού μέσα στο νερό. Όπως φαίνεται στο σχήμα (2-6).

Εφαρμόζοντας το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα προκύπτει η δυναμική της κάθετης κίνησης:

$$\Sigma F = \Sigma M \cdot a \Rightarrow B - A - F_D = \Sigma M \cdot a \Rightarrow$$

$$\Rightarrow M \cdot g + \mu \cdot g - \rho \cdot g \cdot V - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot |v| \cdot v = (M + \mu) \cdot \dot{v} \quad (3-27)$$

όπου M [Kg] είναι η μάζα του ψαριού, μ [Kg] είναι η διακινούμενη μάζα νερού μέσω της αντλίας, η οποία έχει θετικό πρόσημο όταν το νερό μπαίνει μέσα στο ψάρι και αρνητικό όταν το νερό βγαίνει από το ψάρι. Ακόμα, g [m/s^2] είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, V [m^3] είναι ο όγκος του ψαριού, A [m^2] είναι η κάθετη επιφάνεια στην κατακόρυφη κίνηση του ψαριού, και C_D είναι ο συντελεστής αντίστασης, μία αδιάστατη σταθερά.



Σχήμα 3-5. Δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο ψάρι.

Θεωρώντας ότι το ψάρι έχει ουδέτερη πλευστότητα, ισχύει ότι:

$$M \cdot g - \rho \cdot g \cdot V = 0 \quad (3-28)$$

Επομένως η Εξίσωση (3-27) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\mu \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot |v| \cdot v = (M + \mu) \cdot \dot{v} \quad (3-29)$$

Παρατηρώντας την Εξίσωση (3-29) φαίνεται ότι υπάρχουν δύο μη γραμμικότητες. Η μία είναι στο δεύτερο μέλος, στο οποίο πολλαπλασιάζονται οι δύο μεταβλητές της εξίσωσης, μ και \dot{v} . Η ποσότητα της μάζας μ που θα εισέρχεται και θα εξέρχεται στο ψάρι είναι πολύ μικρότερη από τη μάζα M του ίδιου του ψαριού, οπότε στο δεύτερο μέλος, το μ μπορεί να αμεληθεί. Η δεύτερη μη γραμμικότητα είναι η ταχύτητα που είναι υψωμένη στο τετράγωνο στο πρώτο μέλος. Επομένως ο όρος αυτός (αντίσταση του υγρού) θα πρέπει σε πρώτη προσέγγιση να γραμμικοποιηθεί ως εξής:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot |v| \cdot v \cong B_D \cdot v \quad (3-30)$$

Δηλαδή η μη γραμμική εξίσωση θα αντικατασταθεί από μια άλλη, γραμμική, όπου B_D είναι ο γραμμικός συντελεστής της ταχύτητας.

Έτσι, η Εξίσωση 3-29 μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\mu \cdot g - B_D \cdot v = M \cdot \dot{v} \quad (3-32)$$

3.5 Συνολική δυναμική του συστήματος

Η συνολική δυναμική του συστήματος, εκτός από τις Εξισώσεις (3-26) και (3-32) συμπληρώνεται με τις εξής εξισώσεις:

$$\dot{\mu} = q_\mu \quad (3-33)$$

$$\dot{h} = v \quad (3-34)$$

Οπότε η συνολική σύστημα περιγράφεται από το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau \cdot \dot{q}_\mu + q_\mu = k \cdot V_s \\ \dot{\mu} = q_\mu \\ \mu \cdot g - B_D \cdot v = M \cdot \dot{v} \\ \dot{h} = v \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{q}_\mu = -\frac{q_\mu}{\tau} + \frac{k}{\tau} \cdot V_s \\ \dot{\mu} = q_\mu \\ \dot{v} = -\frac{B_D}{M} \cdot v + \frac{g}{M} \cdot \mu \\ \dot{h} = v \end{array} \right\} \quad (3-35)$$

Παρακάτω παρουσιάζεται το σύστημα εξισώσεων (εξισώσεις κατάστασης) στη μητρική μορφή $\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u$ και $y = C \cdot x + D \cdot u$:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_\mu \\ \dot{\mu} \\ \dot{v} \\ \dot{h} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{g}{M} & -\frac{B_D}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_A \cdot \begin{bmatrix} q_\mu \\ \mu \\ v \\ h \\ x \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{k}{\tau} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_B \cdot V_s \quad (3-36)$$

$$h_y = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_C \cdot \begin{bmatrix} q_\mu \\ \mu \\ v \\ h \\ x \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_D \cdot V_s \quad (3-37)$$

Οι μεταβλητές κατάστασης είναι τα στοιχεία που αποτελούν τον πίνακα x , δηλαδή οι μεταβλητές q_μ , μ , v , και h .

3.6 Προσδιορισμός παραμέτρων της δυναμικής της αντλίας

Για να γίνει ο προσδιορισμός των παραμέτρων τ και k , εφαρμόστηκε μία σταθερή τάση $V_s = 2V$ στην αντλία, με ενσωματωμένη την αυξητική παλμογεννήτρια. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η αντλία διακινούσε νερό από ένα δοχείο προς ένα άλλο με τη βοήθεια σωλήνων μικρού μήκους. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, μέσω της αυξητικής παλμογεννήτριας καταγράφονταν οι μετρήσεις των στροφών της αντλίας και μέσω της Εξίσωσης 3-20 (βλ. Παράγραφο 5.2 για την ακριβή περιγραφή της διαδικασίας) γινόταν ο υπολογισμός της παροχής μάζας του νερού. Αργότερα, η παροχή μάζας σε σχέση με το χρόνο σχεδιάστηκε σε γράφημα, και μετά γραφικά προσδιορίστηκαν οι παράμετροι τ και k .

Στο Σχήμα 3-5, με μπλε χρώμα φαίνεται η παροχή μάζας του νερού, όπως προέκυψε από την αριθμητική παραγωγή των πειραματικών δεδομένων. Η μορφή της καμπύλης μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω σφαλμάτων που προκύπτουν από την αριθμητική παραγωγή αλλά και δεδομένου ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πείραμα δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια. Γνωρίζοντας τη μορφή που έχει μια διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης όπως της Εξίσωσης 2-24, σχεδιάστηκε μια καμπύλη τέτοιας μορφής που προσεγγίζει την πειραματική καμπύλη, όπως φαίνεται με πράσινο χρώμα στο Σχήμα 2-5, ως βοήθεια για τον προσδιορισμό των παραμέτρων.

Εδώ θα πρέπει να γίνει μία ακόμα αναφορά, όσο αφορά τη λειτουργία της αντλίας. Για να υπερνικήσει τις τριβές και να αρχίσει να στρέφεται ο δρομέας της αντλίας απαιτείται

μία ελάχιστη τιμή στην τάση που θα εφαρμοστεί στους ακροδέκτες της. Με πειραματικές δοκιμές βρέθηκε ότι η αντλία αρχίζει να λειτουργεί για $V_s > 0.8 V$. Επομένως, μπορεί να εφαρμοσθούν $2 V$ στους ακροδέκτες, αλλά λόγω του παραπάνω φαινομένου, για την εύρεση των σταθερών, θα χρησιμοποιηθεί η τιμή:

$$V_s = 2 - 0.8 = 1.2 V \quad (3-38)$$

Στη μόνιμη κατάσταση, η παροχή έχει αποκτήσει κάποια σταθερή τιμή, οπότε στη σχέση 3-26 ο όρος \dot{q}_μ είναι μηδέν, άρα μένει:

$$q_\mu = k \cdot V_s \quad (3-39)$$

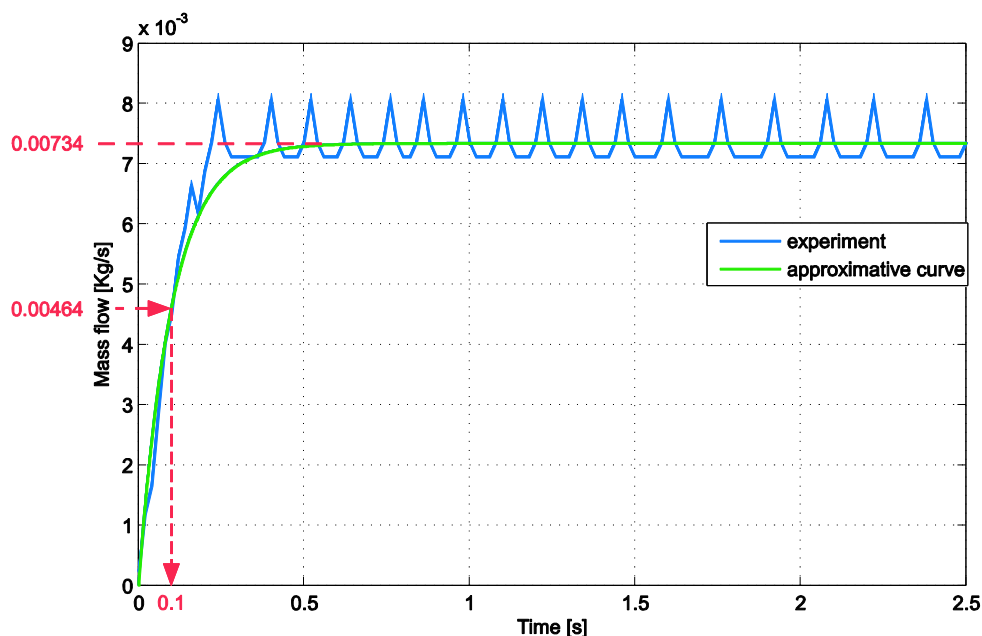
Η σταθερή τιμή στη μόνιμη κατάσταση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-5 είναι: $q_\mu = 0.00734 \text{ Kg} / \text{s}$, οπότε η σταθερά κέρδους είναι:

$$k = q_\mu / V_s = 0.00734 / 1.2 \Rightarrow k = 0.0061 \text{ kg} / \text{s} \cdot V \quad (3-40)$$

Για τον προσδιορισμό της χρονικής σταθεράς, ακολουθείται ο εξής κανόνας. Υπολογίζεται το 63.21% της τιμής που έχει η παροχή μάζας στη μόνιμη κατάσταση:

$$0.6321 \cdot 0.00734 = 0.00464 \quad (3-41)$$

Στο διάγραμμα, για $q_\mu = 0.00464 \text{ Kg} / \text{s}$, ο χρόνος που αντιστοιχεί είναι 0.1 s . Άρα είναι $\tau = 0.1 \text{ s}$.

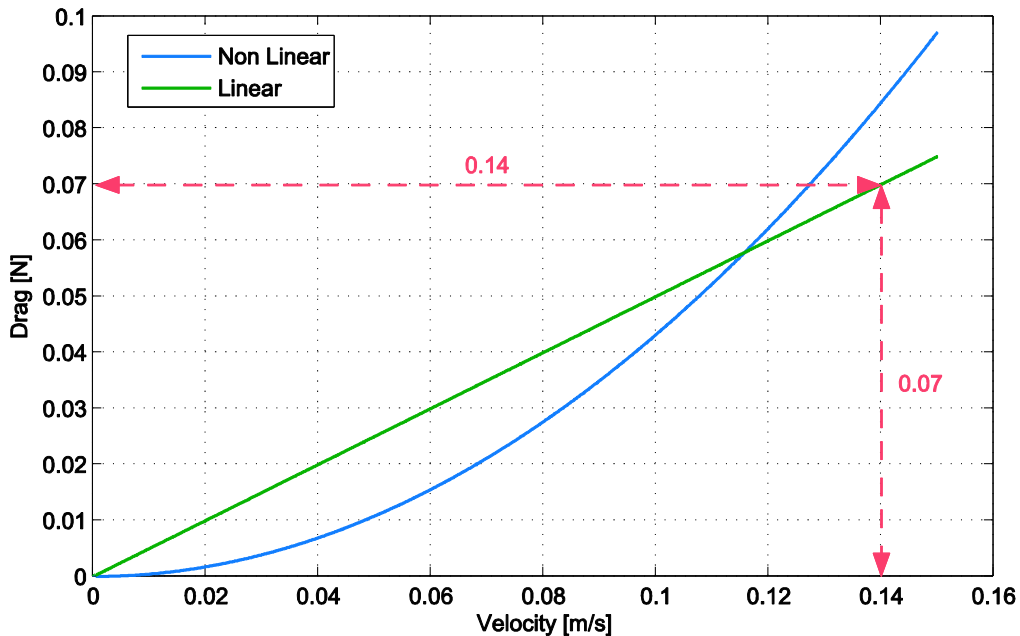


Σχήμα 3-6. Προσδιορισμός της χρονικής σταθεράς και της σταθεράς ελέγχου.

3.7 Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή ταχύτητας της αντίστασης του νερού

Για τον προσδιορισμό του γραμμικού συντελεστή B_D , σχεδιάζεται η αντίσταση του υγρού F_D για συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων, όπως φαίνεται με μπλε χρώμα στο σχήμα 3-7. Το εύρος ταχυτήτων που επιλέχθηκε ήταν από 0 έως 0.15 m/s , καθώς αυτή ήταν η εκτίμηση για τις ταχύτητες στις οποίες θα κινείται το ψάρι κατακόρυφα. Με πράσινο χρώμα φαίνεται η ευθεία που προσεγγίζει την μπλε καμπύλη. Ο γραμμικός συντελεστής B_D είναι η κλίση της ευθείας. Άρα:

$$B_D = \frac{\delta y}{\delta x} = \frac{0.07}{0.14} \Rightarrow B_D = 0.5 \text{ [kg / s]} \quad (3-31)$$



Σχήμα 3-7. Προσδιορισμός του γραμμικού συντελεστή της ταχύτητας.

3.8 Δομικό διάγραμμα και πόλοι ανοιχτού βρόχου

Συγκεντρωτικά, όλες οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1. Τιμές των παραμέτρων.

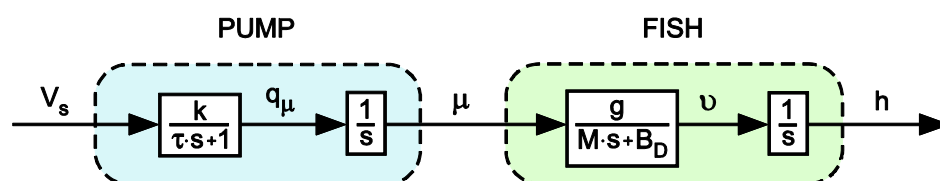
Σύμβολο	Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
M	Μάζα του ρομποτικού ψαριού	0.8515	kg
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας	9.81	m / s^2
k	σταθερά	0.0061	$kg / s \cdot V$
τ	Χρονική σταθερά	0.1	s
B_D	Γραμμικός συντελεστής της ταχύτητας	0.5	kg / s

Με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Laplace, μετασχηματίζονται οι Εξισώσεις (3-35) από το πεδίο του χρόνου, στο πεδίο της συχνότητας:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau \cdot \dot{q}_\mu + q_\mu = k \cdot V_s \\ \dot{\mu} = q_\mu \\ \mu \cdot g - B_D \cdot v = M \cdot \dot{v} \\ \dot{h} = v \end{array} \right\} \xRightarrow{M/L} \left\{ \begin{array}{l} \tau \cdot s \cdot q_\mu(s) + q_\mu(s) = k \cdot V_s(s) \\ s \cdot \mu(s) = q_\mu(s) \\ \mu(s) \cdot g - B_D \cdot v(s) = M \cdot s \cdot v(s) \\ s \cdot h(s) = v(s) \end{array} \right\} \Rightarrow$$

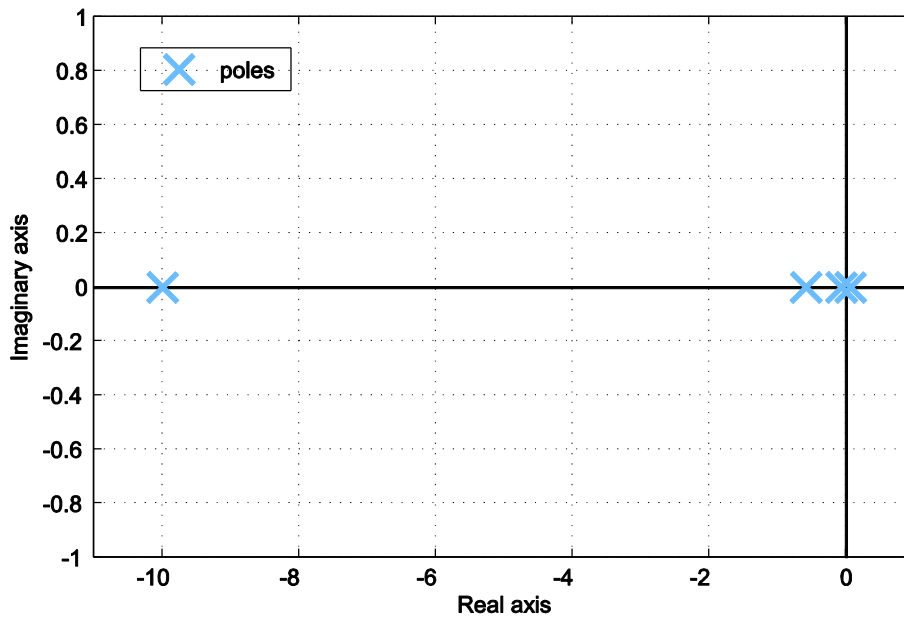
$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{q_\mu(s)}{V_s(s)} = \frac{k}{\tau \cdot s + 1} \\ \frac{\mu(s)}{q_\mu(s)} = \frac{1}{s} \\ \frac{v(s)}{\mu(s)} = \frac{g}{M \cdot s + B_D} \\ \frac{h(s)}{v(s)} = \frac{1}{s} \end{array} \right\} \quad (3-38)$$

Έτσι, σχηματίζεται το δομικό διάγραμμα ανοιχτού βρόχου, όπως φαίνεται στο σχήμα (3-8). Στο διάγραμμα ανοιχτού βρόχου, είσοδος του συστήματος είναι η τάση V_s που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες της αντλίας και έξοδος είναι το βάθος του ψαριού.



Σχήμα 3-8. Δομικό διάγραμμα ανοιχτού βρόχου.

Οι ιδιοτιμές του πίνακα A της εξίσωσης 3-36 είναι οι πόλοι του ανοιχτού βρόχου, όπως φαίνονται στο Σχήμα (3-9).



Σχήμα 3-9. Πόλοι ανοιχτού βρόχου.

Στο σημείο 0 υπάρχουν δύο πόλοι, οι οποίοι προέρχονται από τους δύο ολοκληρωτές που φαίνονται στο Σχήμα 3-8.

Κεφάλαιο 4: Έλεγχος

Για τον έλεγχο του συστήματος επιλέχθηκε ανάδραση όλων των μεταβλητών κατάστασης. Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατόν να μετακινηθούν όλοι οι πόλοι σε νέες επιθυμητές θέσεις, πράγμα που αποτελεί πλεονέκτημα που δεν έχουν άλλοι ελεγκτές, όπως οι PD και PID. Παρακάτω θα αναπτυχθεί ο ελεγκτής και θα αναλυθεί μέσω του κριτηρίου ευστάθειας Routh Hurwitz. Θα επεξηγηθούν οι δυσκολίες που προέκυψαν και οι τρόποι επίλυσης που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος, θα αναπτυχθεί μεθοδολογία ρύθμισης του ελεγκτή για βέλτιστη απόκριση του συστήματος.

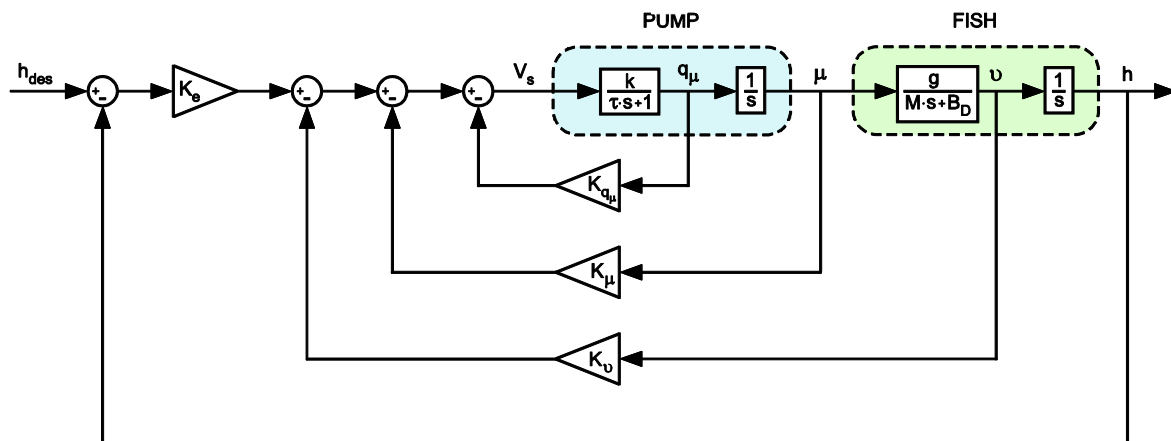
4.1 Ελεγκτής ανάδρασης όλων των μεταβλητών κατάστασης

Ο ελεγκτής ανάδρασης όλων των μεταβλητών κατάστασης (full state feedback control) λαμβάνει υπόψη του το επιθυμητό βάθος του ψαριού και ανάλογα με την τιμή των μεταβλητών κατάστασης, υπολογίζει την τιμή της τάσης που πρέπει να εφαρμοστεί στους ακροδέκτες της αντλίας, κάθε χρονική στιγμή. Ο ελεγκτής περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_s = K_e \cdot (h_{des} - h) - K_v \cdot v - K_\mu \cdot \mu - K_{q_\mu} \cdot q_\mu \tag{3-1}$$

Όπου K_e είναι το κέρδος του σφάλματος ($h_{des} - h$), K_v είναι το κέρδος της ταχύτητας, K_μ είναι το κέρδος της μάζας και K_{q_μ} είναι το κέρδος της παροχής μάζας.

Το δομικό διάγραμμα του κλειστού βρόχου, έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα (4-1). Η είσοδος σε αυτό το σύστημα είναι το επιθυμητό βάθος h_{des} και η έξοδος είναι το πραγματικό βάθος του ψαριού h .



Σχήμα 4-1. Δομικό διάγραμμα κλειστού βρόχου.

4.2 Κριτήριο ευστάθειας Routh Hurwitz

Για να είναι ευσταθές το σύστημα με τον ελεγκτή που δημιουργήθηκε, θα πρέπει να ικανοποιείται το κριτήριο ευστάθειας Routh Hurwitz. Για την ανάπτυξη του κριτηρίου, θα πρέπει να είναι γνωστή η συνάρτηση μεταφοράς του συνολικού συστήματος. Ο αριθμητής της συνάρτησης μεταφοράς του συνολικού συστήματος αποτελείται από το συνδυασμό των συναρτήσεων της πρόσω τροφοδότησης, ενώ ο παρονομαστής αποτελείται από τη μονάδα μείον το άθροισμα των συναρτήσεων μεταφοράς κάθε βρόχου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-1. Με κατάλληλες πράξεις αποκτά τη μορφή που φαίνεται στη Εξίσωση (4-2). Από τη μορφή της σχέσης φαίνεται ότι το σύστημα κλειστού βρόχου είναι 4ης τάξης.

$$\frac{h(s)}{h_{des}(s)} = \frac{1}{a_4 \cdot s^4 + \alpha_3 \cdot s^3 + \alpha_2 \cdot s^2 + \alpha_1 \cdot s + a_0} \quad (4-2)$$

Όπου:

$$a_0 = 1 \quad (4-3)$$

$$a_1 = \frac{K_\mu \cdot B_D + K_v \cdot g}{K_e \cdot g} \quad (4-4)$$

$$a_2 = \frac{B_D + (K_{q_\mu} \cdot B_D \cdot k) + (K_\mu \cdot M \cdot k)}{K_e \cdot k \cdot g} \quad (4-5)$$

$$a_3 = \frac{\tau \cdot B_D + M + K_{q_\mu} \cdot M \cdot k}{K_e \cdot k \cdot g} \quad (4-6)$$

$$a_4 = \frac{\tau \cdot M}{K_e \cdot k \cdot g} \quad (4-7)$$

Οι συνθήκες ευστάθειας Routh Hurwitz για σύστημα 4ης τάξης όπως παρουσιάζονται στο [Bishop] είναι οι παρακάτω:

$$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 > 0 \quad (4-8)$$

$$a_3 \cdot a_2 > a_4 \cdot a_1 \quad (4-9)$$

$$a_3 \cdot a_2 \cdot a_1 > a_4 \cdot a_1^2 + a_3 \cdot a_0^2 \quad (4-10)$$

Οι συνθήκες αυτές οδηγούν στο πεδίο τιμών που μπορεί να έχει κάθε κέρδος, ώστε να προκύπτει ευσταθές σύστημα.

4.3 Προσδιορισμός κερδών

Για τον προσδιορισμό κάποιων αρχικών κερδών, αρχικά έγινε μία απλή αντιστοίχιση μεγεθών για τα κέρδη K_v , K_μ , K_{q_μ} . Δηλαδή κάνοντας κάποια εκτίμηση για το εύρος τιμών κάθε μεγέθους, και βλέποντας από το δομικό διάγραμμα τη σύνδεση των μεγεθών, έγινε ένας πρώτος προσδιορισμός. Για παράδειγμα, γνωρίζοντας ότι η τάση θα κυμαίνεται από $-3 V$ έως $+3 V$ (δηλαδή θα έχει εύρος $6 V$) και η ταχύτητα από $-0.15 m/s$ έως $0.15 m/s$ (δηλαδή θα έχει εύρος $0.3 m/s$), το κέρδος K_v το οποίο συνδέει ταχύτητα με τάση θα είναι:

$$0.3 \cdot K_v = 6 \Rightarrow K_v = 20 \quad (4-11)$$

Ομοίως για τα κέρδη K_μ και K_{q_μ} :

$$0.04 \cdot K_\mu = 6 \Rightarrow K_\mu = 150 \quad (4-12)$$

$$0.02 \cdot K_{q_\mu} = 6 \Rightarrow K_{q_\mu} = 300 \quad (4-13)$$

Με βάση αυτά τα κέρδη και με τη βοήθεια των συνθηκών ευστάθειας Routh Hurwitz θα προσδιοριστεί μία τιμή για το κέρδος K_e . Λόγω της Εξίσωσης (4-8) προκύπτει ότι θα πρέπει $K_e > 0$ και λόγω της Εξίσωσης (4-10) $K_e < 37.58$. Επιλέχθηκε η τιμή $K_e = 5$. Παρατηρείται ότι για τα συγκεκριμένα κέρδη, επαληθεύεται και η συνθήκη (4-9).

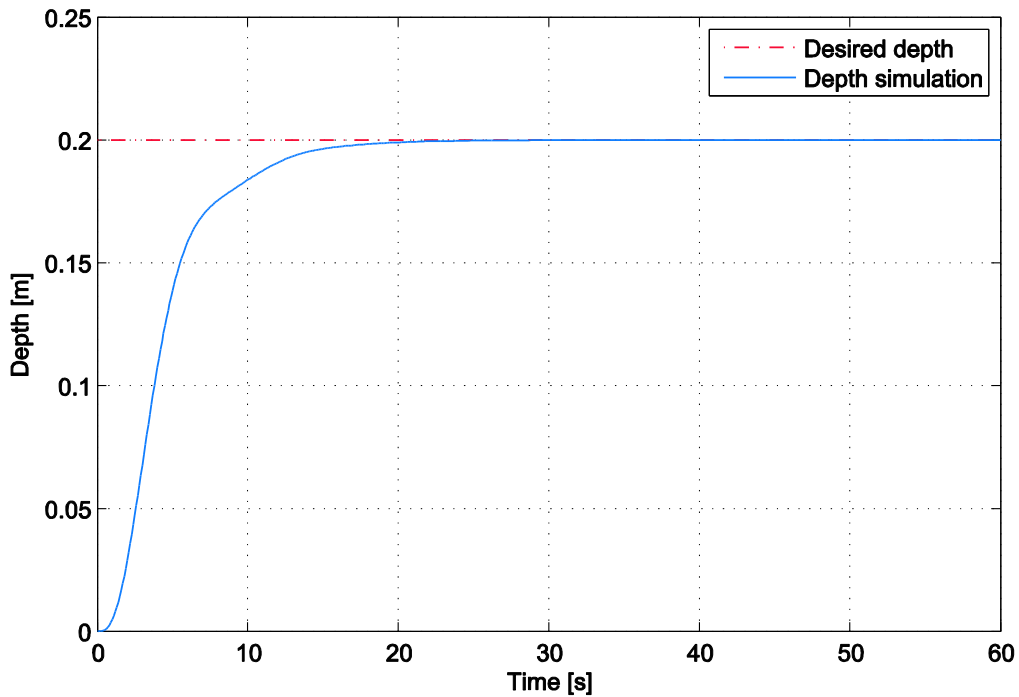
Με τον παραπάνω τρόπο γίνεται μία αρχική εκτίμηση ώστε να βρεθεί μία αρχική ομάδα κερδών. Σε επόμενη παράγραφο θα αναπτυχθεί μια μεθοδολογία για τη ρύθμιση κερδών ώστε να υπάρχει βέλτιστη απόκριση, σύμφωνα με τα επιθυμητά αποτελέσματα.

4.4 Απόκριση με διαταραχή

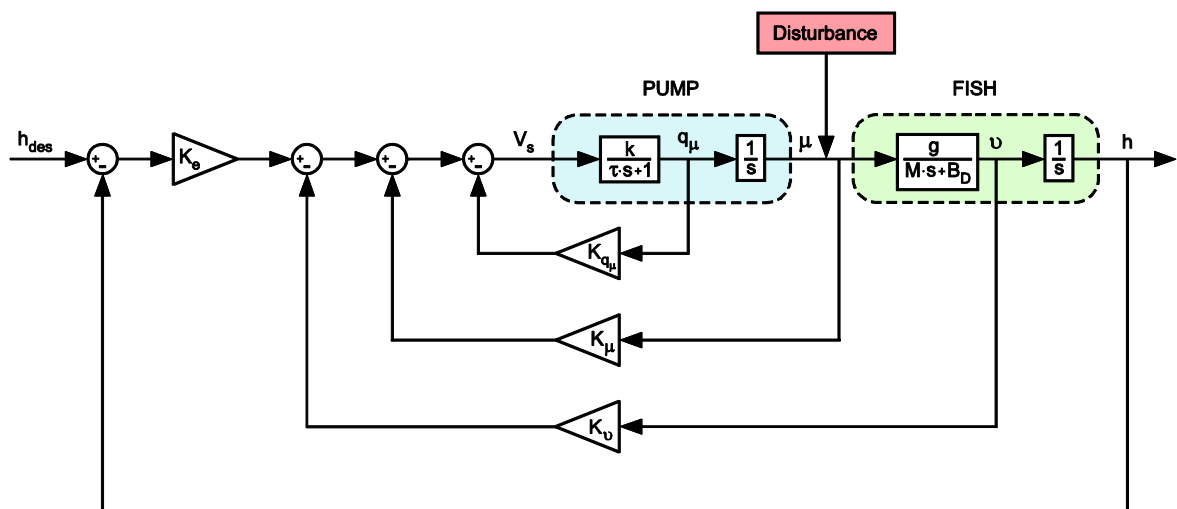
Κάνοντας προσομοίωση για το σύστημα κλειστού βρόχου με τον παραπάνω ελεγκτή και με κέρδη έπειτα από ρύθμιση: $K_e = 14$, $K_v = 50$, $K_\mu = 200$, $K_{q_\mu} = 600$ προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα για επιθυμητό βάθος (desired depth) $h_{des} = 0.2 m$ (Σχήμα 4-2). Το σχήμα δείχνει ότι η απόκριση του συστήματος είναι περίπου 10 s, δηλαδή έχει γρήγορη μετάβαση στη μόνιμη κατάσταση και δεν υπάρχουν ταλαντώσεις. Όταν όμως έγιναν τα πρώτα πειράματα, το ψάρι σταθεροποιούταν σε διαφορετικό βάθος από το επιθυμητό.

Αιτία αυτού του αποτελέσματος είναι διάφορα φαινόμενα που συμβαίνουν στο πραγματικό σύστημα, και έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση διαταραχής στη μάζα, κυρίως. Τα φαινόμενα αυτά είναι: 1) η υπόθεση ότι το ψάρι ως αρχική συνθήκη έχει ουδέτερη πλευστότητα. Στην πραγματικότητα στην αρχή του πειράματος το ψάρι έχει ελαφρώς θετική πλευστότητα και επιπλέει στην επιφάνεια του νερού. 2) Η αντλία έχει διαφορετική παροχή μάζας όταν εφαρμόζεται η ίδια τάση αλλά με διαφορετική φορά στο

δρομέα της, ειδικά σε χαμηλές τιμές τάσης. 3) Η αντλία έχει διαρροές επανακυκλοφορίας. 4) Η διάταξη ίσως δεν είναι απόλυτα στεγανή και υπάρχουν μικρές διαρροές προς το εσωτερικό ή το εξωτερικό της κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Επίσης είναι πιθανό να υπάρχουν και άλλοι λόγοι οι οποίοι ήταν αδύνατο να προσδιοριστούν. Επομένως, στο σύστημα κλειστού βρόχου εμφανίζεται μια διαταραχή όπως φαίνεται στο Σχήμα (4-3).

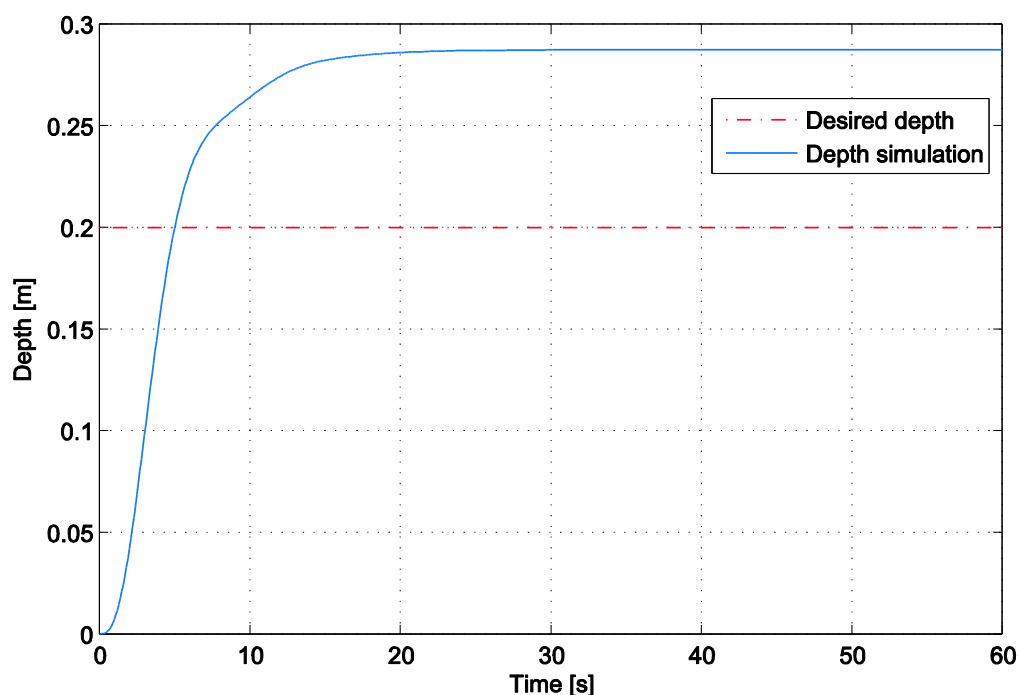


Σχήμα 4-2. Απόκριση συστήματος.



Σχήμα 4-3. Δομικό διάγραμμα με διαταραχή στη μάζα.

Προσομοιάζοντας στο Simulink της Matlab τη διαταραχή που παρατηρήθηκε πειραματικά, το αποτέλεσμα στην απόκριση του συστήματος όντως επαλήθευε αυτό που παρατηρήθηκε στο πείραμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-4. Στη μόνιμη κατάσταση, φαίνεται ότι το ψάρι έχει σταθεροποιηθεί σε διαφορετικό βάθος από το επιθυμητό, το οποίο είναι πάλι $h_{des} = 0.2 \text{ m}$.



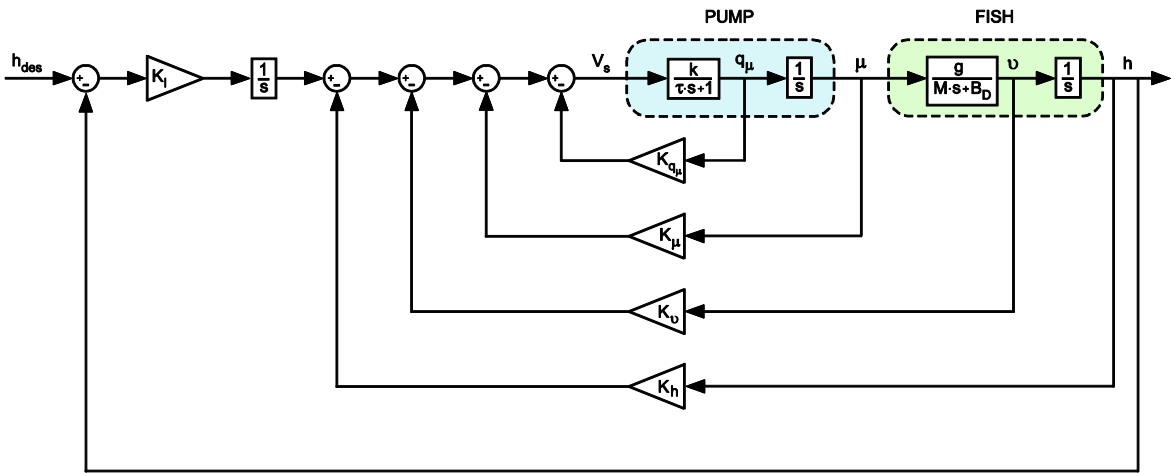
Σχήμα 4-4. Απόκριση συστήματος με διαταραχή στη μάζα.

4.5 Ελεγκτής ανάδρασης όλων των μεταβλητών κατάστασης με ολοκληρωτή σφάλματος

Ο έλεγχος ανάδρασης όλων των μεταβλητών κατάστασης, δεν είναι ικανός να εξάγει αποτέλεσμα με μηδενικό μόνιμο σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση, όταν υπάρχει διαταραχή σε κάποια από της μεταβλητές κατάστασης. Για να επιτευχθεί μηδενικό μόνιμο σφάλμα σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να εισαχθεί ένας ολοκληρωτής σφάλματος. Το μη μηδενικό σφάλμα που τείνει να δημιουργηθεί, καθώς περνά ο χρόνος και ο ολοκληρωτής το μεγεθύνει, εντοπίζεται και διορθώνεται η απόκριση ώστε να φτάσει στην επιθυμητή τιμή. Ο νέος ελεγκτής ανάδρασης όλων των μεταβλητών κατάστασης με ολοκληρωτή σφάλματος, περιγράφεται από τη σχέση

$$V_s = K_I \cdot \int (h_{des} - h) dt - K_h \cdot h - K_v \cdot v - K_\mu \cdot \mu - K_{q_\mu} \cdot q_\mu \quad (3-14)$$

Όπου K_I είναι το κέρδος του ολοκληρωτή του σφάλματος. Το δομικό διάγραμμα του κλειστού βρόχου με το νέο ελεγκτή φαίνεται στο Σχήμα 4-5.



Σχήμα 4-5. Δομικό διάγραμμα κλειστού βρόχου με ολοκληρωτή σφάλματος.

4.6 Κριτήριο ευστάθειας Routh Hurwitz για το νέο ελεγκτή

Απαραίτητη διαδικασία είναι να βρεθεί η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου με το νέο ελεγκτή και να διατυπωθούν οι συνθήκες ευστάθειας για το νέο σύστημα. Με τον ίδιο τρόπο όπως και στην προηγούμενη περίπτωση προσδιορίζεται η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου, η οποία περιγράφεται από την Εξίσωση 4-15.

$$\frac{h(s)}{h_{des}(s)} = \frac{1}{a_5 \cdot s^5 + a_4 \cdot s^4 + a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \quad (4-15)$$

Όπου:

$$a_0 = 1 \quad (4-16)$$

$$a_1 = \frac{K_h}{K_I} \quad (4-17)$$

$$a_2 = \frac{K_\mu \cdot B_D + K_v \cdot g}{K_I \cdot g} \quad (4-18)$$

$$a_3 = \frac{B_D + (K_{q_\mu} \cdot B_D \cdot k) + (K_\mu \cdot M \cdot k)}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-19)$$

$$a_4 = \frac{\tau \cdot B_D + M + K_{q_\mu} \cdot M \cdot k}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-20)$$

$$a_5 = \frac{\tau \cdot M}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-21)$$

Από τη συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου, φαίνεται ότι προσθέτοντας τον ολοκληρωτή σφάλματος, το σύστημα από 4ης τάξης που ήταν έγινε 5ης τάξης.

Οι συνθήκες ευστάθειας Routh Hurwitz για σύστημα 5ης τάξης φαίνονται παρακάτω:

$$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 > 0 \quad (4-22)$$

$$a_3 \cdot a_4 > a_2 \cdot a_5 \quad (4-23)$$

$$a_0 \cdot a_4 \cdot a_5 > a_1 \cdot a_4^2 + a_2 \cdot (a_2 \cdot a_5 - a_3 \cdot a_4) \quad (4-24)$$

$$(a_0 \cdot a_5 - a_1 \cdot a_4) \cdot (a_1 \cdot a_4^2 + a_2 \cdot (a_2 \cdot a_5 - a_3 \cdot a_4) - a_0 \cdot a_4 \cdot a_5) > a_0 \cdot (a_2 \cdot a_5 - a_3 \cdot a_4)^2 \quad (4-25)$$

Οι συνθήκες αυτές οδηγούν στο πεδίο τιμών που μπορεί να έχει κάθε κέρδος, ώστε να προκύπτει ευσταθές σύστημα.

4.7 Μεθοδολογία ρύθμισης κερδών

Για τον προσδιορισμό των κερδών, αρχικά έγινε απλή αντιστοίχιση μεγεθών για τα κέρδη K_h , K_v , K_μ , K_{q_μ} , όπως και προηγουμένως:

$$1 \cdot K_h = 6 \Rightarrow K_h = 6 \quad (4-26)$$

$$0.3 \cdot K_v = 6 \Rightarrow K_v = 20 \quad (4-27)$$

$$0.04 \cdot K_\mu = 6 \Rightarrow K_\mu = 150 \quad (4-28)$$

$$0.02 \cdot K_{q_\mu} = 6 \Rightarrow K_{q_\mu} = 300 \quad (4-29)$$

Τώρα μένει να επιλεγεί ένα κέρδος K_I τέτοιο ώστε το σύστημα να είναι ευσταθές. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με τη βοήθεια των συνθηκών ευστάθειας Routh Hurwitz, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση.

Ένας άλλος τρόπος είναι να σχεδιαστεί ο γεωμετρικός τόπος ριζών για το κέρδος K_I και να επιλεγεί μία τιμή για την οποία προκύπτει ευσταθές σύστημα, όπως θα γίνει

παρακάτω. Ο παρονομαστής της Εξίσωσης (4-15) αν εξισωθεί με το μηδέν, αποτελεί τη χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος κλειστού βρόχου (Εξίσωση (4-30)).

$$a_5 \cdot s^5 + a_4 \cdot s^4 + a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0 = 0 \quad (4-30)$$

Η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος είναι συνάρτηση των κερδών K_I , K_h , K_v , K_μ , K_{q_μ} . Για να σχεδιαστεί ο γεωμετρικός τόπος των ριζών ως προς το κέρδος K_I θα πρέπει η Εξίσωση (4-30) να μετασχηματισθεί στη μορφή:

$$1 + K_I \cdot H_I = 0 \quad (4-31)$$

Μετά από κατάλληλες πράξεις προκύπτει η Εξίσωση (4-32) η οποία έχει τη ζητούμενη μορφή.

$$1 + K_I \cdot \left(\frac{1}{\underbrace{c_{I5} \cdot s^5 + c_{I4} \cdot s^4 + c_{I3} \cdot s^3 + c_{I2} \cdot s^2 + c_{I1} \cdot s}_{H_I}} \right) = 0 \quad (4-32)$$

Όπου:

$$c_{I1} = K_h \quad (4-33)$$

$$c_{I2} = \frac{K_\mu \cdot B_D + K_v \cdot g}{g} \quad (4-34)$$

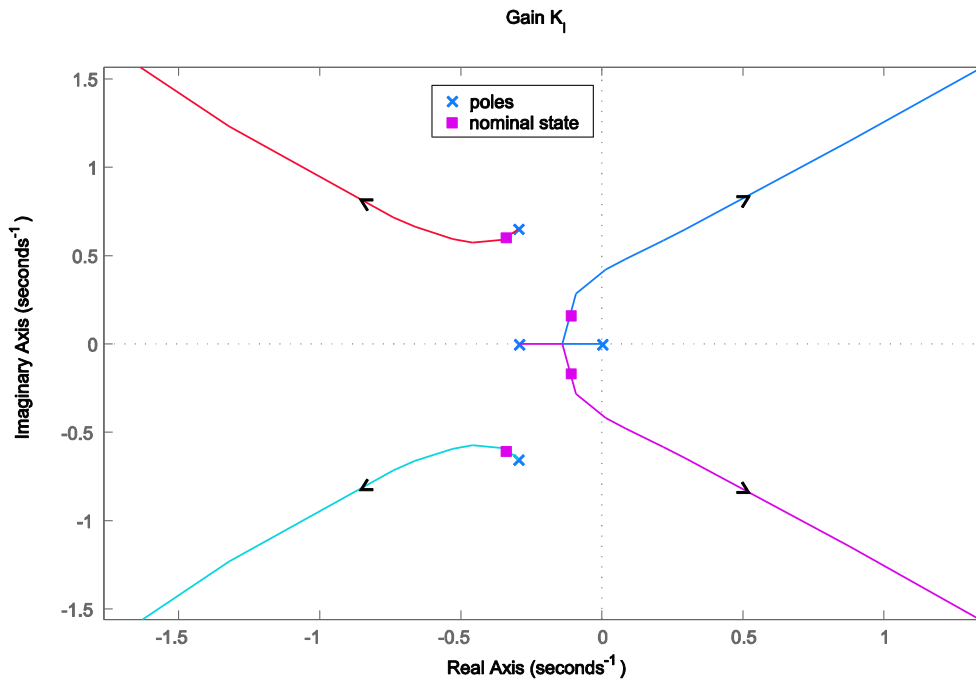
$$c_{I3} = \frac{B_D + K_{q_\mu} \cdot B_D \cdot k + K_\mu \cdot M \cdot k}{k \cdot g} \quad (4-35)$$

$$c_{I4} = \frac{\tau \cdot B_D + M + K_{q_\mu} \cdot M \cdot k}{k \cdot g} \quad (4-36)$$

$$c_{I5} = \frac{\tau \cdot M}{k \cdot g} \quad (4-37)$$

Αν αντικατασταθούν οι τιμές των κερδών K_h , K_v , K_μ , K_{q_μ} που προσδιορίστηκαν παραπάνω και όλες οι τιμές των παραμέτρων, τότε η συνάρτηση μεταφοράς θα είναι συνάρτηση μόνο του κέρδους K_I . Πλέον μπορεί να σχεδιαστεί ο γεωμετρικός τόπος των ριζών. Οι κυρίαρχοι πόλοι δηλαδή αυτοί που βρίσκονται πιο κοντά στο 0 και επηρεάζουν περισσότερο τη συμπεριφορά της απόκρισης, φαίνονται στο Σχήμα (4-6). Τα μαύρα βέλη στο διάγραμμα δείχνουν τη φορά μετακίνησης των πόλων, όσο αυξάνεται το κέρδος K_I . Η τιμή που επιλέχθηκε για το κέρδος ήταν $K_I = 0.9$. Για αυτή την τιμή του κέρδους οι

πόλοι έχουν μετακινηθεί και φαίνονται με τετράγωνα μωβ χρώματος πάνω στο διάγραμμα. Για τη συγκεκριμένη τιμή που επιλέχθηκε, το σύστημα είναι ευσταθές, αφού οι πόλοι βρίσκονται στο αριστερό ημιεπίπεδο. Αν όμως το κέρδος K_I αυξηθεί πολύ, οι δύο δεξιοί πόλοι θα μετακινηθούν και άλλο δεξιά και θα περάσουν στο δεξί ημιεπίπεδο, καθιστώντας το σύστημα ασταθές.



Σχήμα 4-6. Γεωμετρικός τόπος ριζών σε συνάρτηση με το κέρδος K_I .

Επομένως, μέχρι εδώ έχει επιλεγεί μία αρχική ομάδα κερδών, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ευσταθή απόκριση στο σύστημα. Όμως αυτή η απόκριση αν και είναι ευσταθής, το πιο πιθανό είναι να μην είναι ακριβώς η επιθυμητή, για παράδειγμα μπορεί να έχει ανεπιθύμητες ταλαντώσεις. Οπότε υπάρχει η ανάγκη να υπάρχει γνώση για το πώς συμπεριφέρεται το σύστημα, όταν αλλάζει κάθε κέρδος ξεχωριστά. Αυτό έχει γίνει ήδη για το κέρδος K_I με το Σχήμα (4-6). Υπάρχει γνώση των θέσεων των πόλων στην ονομαστική κατάσταση (τετράγωνα μωβ χρώματος) και φαίνεται πως κινούνται οι πόλοι ανάλογα με την αύξηση ή τη μείωση του συγκεκριμένου κέρδους. Το ίδιο πρέπει να γίνει και για τα υπόλοιπα κέρδη K_h , K_v , K_μ , K_{q_μ} . Δηλαδή θα πρέπει η χαρακτηριστική Εξίσωση (4-30) να έρθει στη μορφή:

$$1 + K_l \cdot H_l = 0 \quad (4-38)$$

για κάθε ένα από τα εναπομείναντα κέρδη και μετά να σχεδιαστεί ο γεωμετρικός τόπος των ριζών μαθώς και η θέση των πόλων στην ονομαστική κατάσταση, ώστε να υπάρχει

γνώση του πως μεταβάλλεται η απόκριση του συστήματος σε σχέση με τη μεταβολή κάθε κέρδους.

Για το κέρδος K_h η χαρακτηριστική εξίσωση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$1 + K_h \cdot \left(\frac{b_{h1} \cdot s}{\underbrace{c_{h5} \cdot s^5 + c_{h4} \cdot s^4 + c_{h3} \cdot s^3 + c_{h2} \cdot s^2 + 1}_{H_h}} \right) = 0 \quad (4-39)$$

Όπου:

$$b_{h1} = \frac{1}{K_I} \quad (4-40)$$

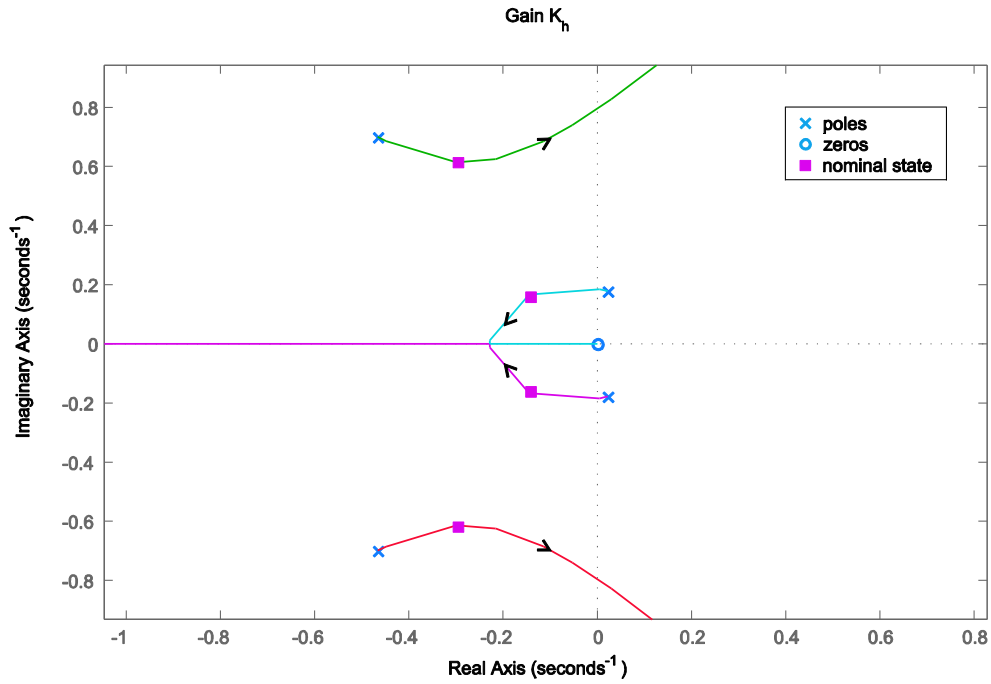
$$c_{h2} = \frac{K_\mu \cdot B_D + K_v \cdot g}{K_I \cdot g} \quad (4-41)$$

$$c_{h3} = \frac{B_D + K_{q_\mu} \cdot B_D \cdot k + K_\mu \cdot M \cdot k}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-42)$$

$$c_{h4} = \frac{\tau \cdot B_D + M + K_{q_\mu} \cdot M \cdot k}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-43)$$

$$c_{h5} = \frac{\tau \cdot M}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-44)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των κερδών K_I , K_v , K_μ , K_{q_μ} , η συνάρτηση μεταφοράς θα είναι συνάρτηση μόνο του κέρδους K_h . Ο γεωμετρικός τόπος των ριζών φαίνεται στο Σχήμα 4-7. Από το σχήμα φαίνεται ότι αυξανόμενου του κέρδους K_h , οι πόλοι που βρίσκονται δεξιά έρχονται προς τα αριστερά, αλλά από την άλλη, αν το κέρδος αυξηθεί πολύ, οι πόλοι που βρίσκονται αριστερά, θα περάσουν στο δεξί ημιεπίπεδο, καθιστώντας το σύστημα ασταθές. Επομένως, το κέρδος δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ μικρό, καθώς οι δύο πόλοι που βρίσκονται δεξιά πρέπει να έρθουν αριστερά, αλλά ούτε και πολύ μεγάλο, καθώς και οι άλλοι δύο πόλοι πρέπει να παραμείνουν στο αριστερό ημιεπίπεδο. Η καλύτερη λύση για το κέρδος K_h θα ήταν μία τιμή τέτοια ώστε οι δύο πόλοι που βρίσκονταν αρχικά στο δεξί ημιεπίπεδο να έρθουν αριστερά και το φανταστικό τους μέρος να έρθει όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μηδέν, ώστε να μειωθούν οι ταλαντώσεις. Ταυτόχρονα, οι άλλοι δύο πόλοι να έρθουν στο σημείο όπου έχουν το μικρότερο δυνατό φανταστικό μέρος και σε καμία περίπτωση να μην περάσουν στο δεξί ημιεπίπεδο.



Σχήμα 4-7. Γεωμετρικός τόπος ριζών σε συνάρτηση με το κέρδος K_h .

Για το κέρδος K_v η χαρακτηριστική εξίσωση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$1 + K_v \cdot \left(\frac{b_{v2} \cdot s^2}{c_{v5} \cdot s^5 + c_{v4} \cdot s^4 + c_{v3} \cdot s^3 + c_{v2} \cdot s^2 + c_{v1} \cdot s + 1} \right) = 0 \quad (4-45)$$

H_v

Όπου:

$$b_{v2} = \frac{1}{K_I} \quad (4-46)$$

$$c_{v1} = \frac{K_h}{K_I} \quad (4-47)$$

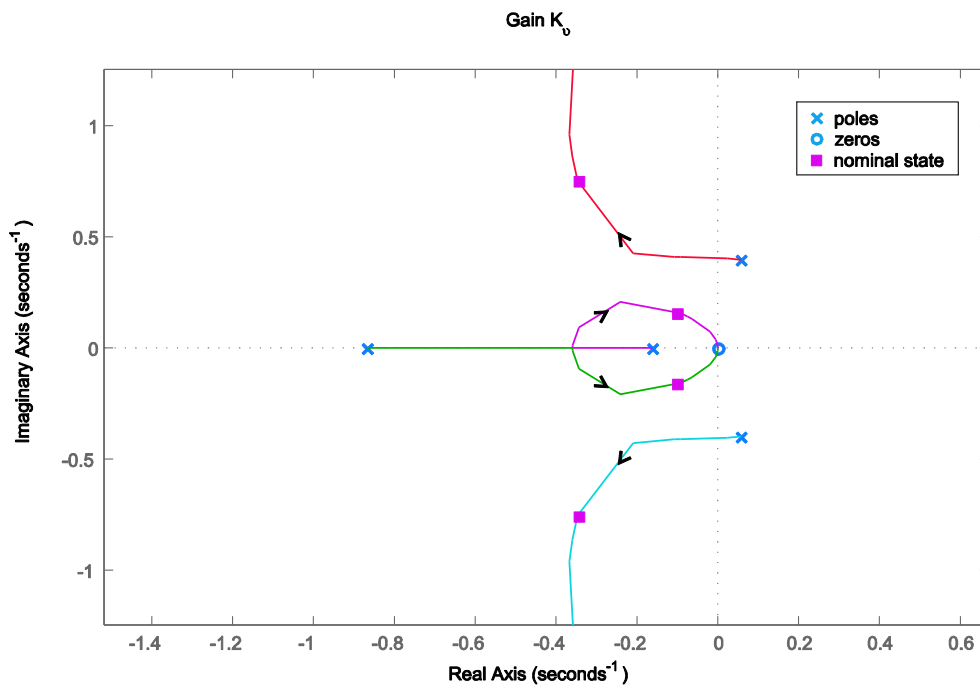
$$c_{v2} = \frac{K_\mu \cdot B_D}{K_I \cdot g} \quad (4-48)$$

$$c_{v3} = \frac{B_D + K_{q_\mu} \cdot B_D \cdot k + K_\mu \cdot M \cdot k}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-49)$$

$$c_{v4} = \frac{\tau \cdot B_D + M + K_{q_\mu} \cdot M \cdot k}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-50)$$

$$c_{v5} = \frac{\tau \cdot M}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-51)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των κερδών K_I , K_h , K_μ , K_{q_μ} , η συνάρτηση μεταφοράς θα είναι συνάρτηση μόνο του κέρδους K_v . Ο γεωμετρικός τόπος των ριζών φαίνεται στο Σχήμα 4-8.



Σχήμα 4-8. Γεωμετρικός τόπος ριζών σε συνάρτηση με το κέρδος K_v .

Από το σχήμα φαίνεται ότι αυξανόμενου του κέρδους K_v , δύο από τους πόλους κινούνται προς το μηδέν, ενώ άλλοι αυξάνουν το φανταστικό τους μέρος συνεχώς.

Για το κέρδος K_μ η χαρακτηριστική εξίσωση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$1 + K_\mu \cdot \underbrace{\left(\frac{b_{\mu3} \cdot s^3 + b_{\mu2} \cdot s^2}{c_{\mu5} \cdot s^5 + c_{\mu4} \cdot s^4 + c_{\mu3} \cdot s^3 + c_{\mu2} \cdot s^2 + c_{\mu1} \cdot s + 1} \right)}_{H_\mu} = 0 \quad (4-52)$$

Όπου:

$$b_{\mu2} = \frac{B_D}{K_I \cdot g} \quad (4-53)$$

$$b_{\mu3} = \frac{M}{K_I \cdot g} \quad (4-54)$$

$$c_{\mu 1} = \frac{K_h}{K_I} \quad (4-55)$$

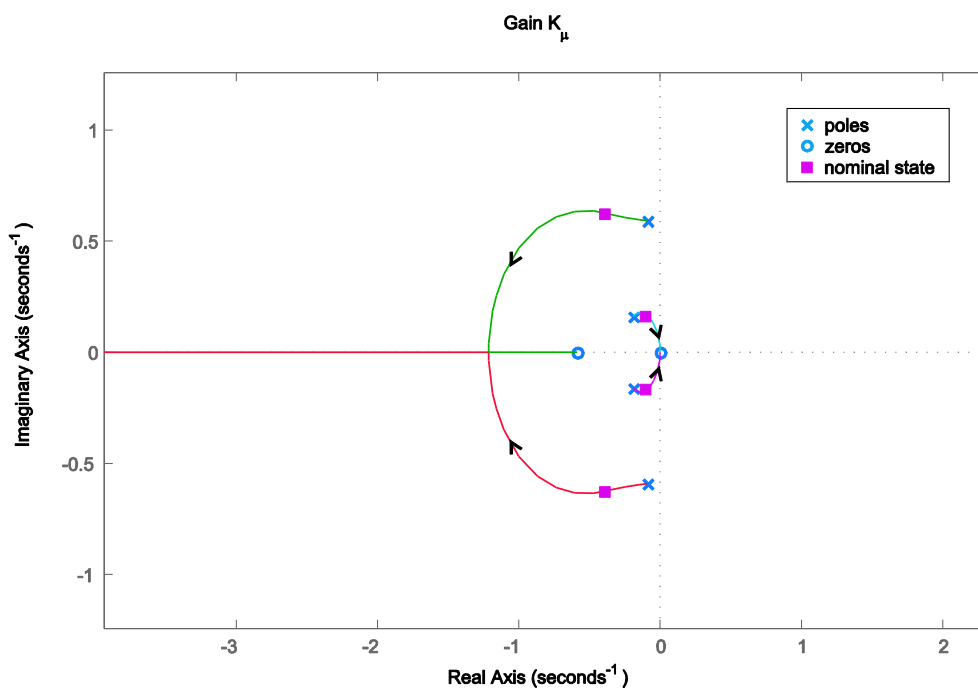
$$c_{\mu 2} = \frac{K_v}{K_I} \quad (4-56)$$

$$c_{\mu 3} = \frac{B_D + K_{q\mu} \cdot B_D \cdot k}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-57)$$

$$c_{\mu 4} = \frac{\tau \cdot B_D + M + K_{q\mu} \cdot M \cdot k}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-58)$$

$$c_{\mu 5} = \frac{\tau \cdot M}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-59)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των κερδών K_I , K_h , K_v , $K_{q\mu}$, η συνάρτηση μεταφοράς θα είναι συνάρτηση μόνο του κέρδους K_μ . Ο γεωμετρικός τόπος των ριζών φαίνεται στο Σχήμα 4-9.



Σχήμα 4-9. Γεωμετρικός τόπος ριζών σε συνάρτηση με το κέρδος K_μ .

Από το Σχήμα 4-9 φαίνεται ότι αυξανόμενου του κέρδους K_μ , δύο από τους κυρίαρχους πόλους κινούνται προς το μηδέν, ενώ άλλοι αυξάνουν μειώνουν το

φανταστικό τους μέρος και κινούνται προς τα αριστερά, μέχρι να μηδενιστεί εντελώς το φανταστικό τους μέρος. Επομένως αύξηση του κέρδους θα παράγει απόκριση με μειωμένες ταλαντώσεις.

Για το κέρδος $K_{q\mu}$ η χαρακτηριστική εξίσωση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$1 + K_{q\mu} \cdot \underbrace{\left(\frac{b_{q4} \cdot s^4 + b_{q3} \cdot s^3}{c_{q5} \cdot s^5 + c_{q4} \cdot s^4 + c_{q3} \cdot s^3 + c_{q2} \cdot s^2 + c_{q1} \cdot s + 1} \right)}_{H_q} = 0 \quad (4-60)$$

Όπου:

$$b_{q3} = \frac{B_D \cdot k}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-61)$$

$$b_{q4} = \frac{M \cdot k}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-62)$$

$$c_{q1} = \frac{K_h}{K_I} \quad (4-63)$$

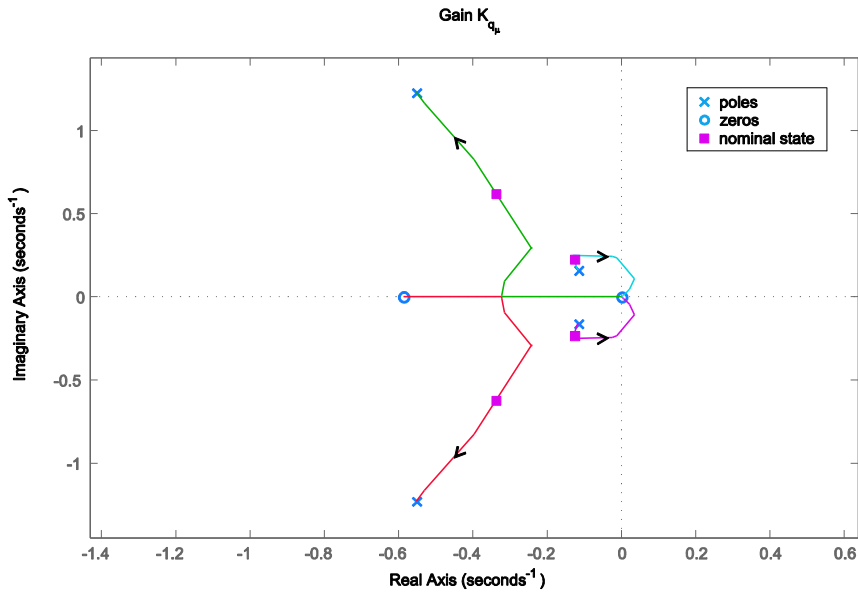
$$c_{q2} = \frac{K_\mu \cdot B_D + K_\nu \cdot g}{K_I \cdot g} \quad (4-64)$$

$$c_{q3} = \frac{B_D + K_\mu \cdot M \cdot k}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-65)$$

$$c_{q4} = \frac{\tau \cdot B_D + M}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-66)$$

$$c_{q5} = \frac{\tau \cdot M}{K_I \cdot k \cdot g} \quad (4-67)$$

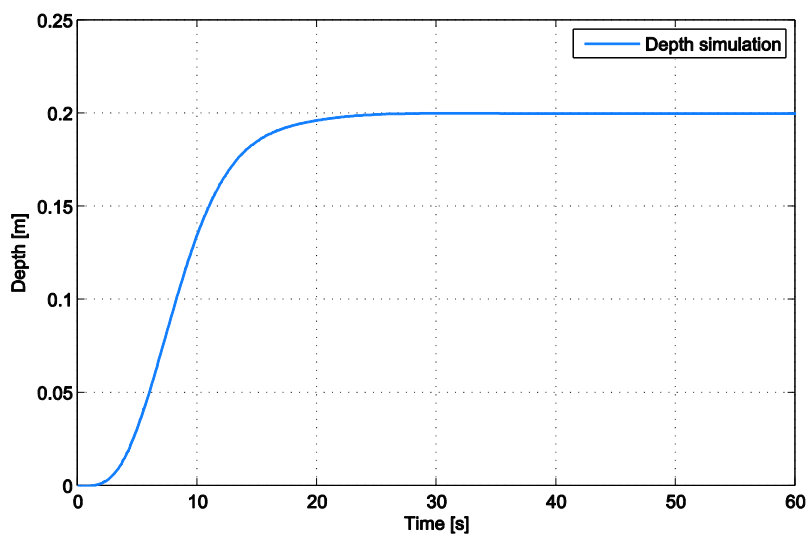
Αντικαθιστώντας τις τιμές των κερδών K_I , K_h , K_ν , K_μ , η συνάρτηση μεταφοράς θα είναι συνάρτηση μόνο του κέρδους $K_{q\mu}$. Ο γεωμετρικός τόπος των ριζών φαίνεται στο Σχήμα 4-10. Το σχήμα δείχνει ότι όσο αυξάνεται το κέρδος $K_{q\mu}$, δύο από τους κυρίαρχους πόλους κινούνται προς τα δεξιά και κάποια στιγμή περνούν στο δεξί ημιεπίπεδο, ενώ οι άλλοι αυξάνουν το φανταστικό τους μέρος και κινούνται προς τα αριστερά. Επομένως μεγάλη αύξηση του κέρδους θα παράγει απόκριση με μεγαλύτερες ταλαντώσεις και κάποια στιγμή θα προκύψει αστάθεια.



Σχήμα 4-10. Γεωμετρικός τόπος ριζών σε συνάρτηση με το κέρδος $K_{q_{\mu}}$.

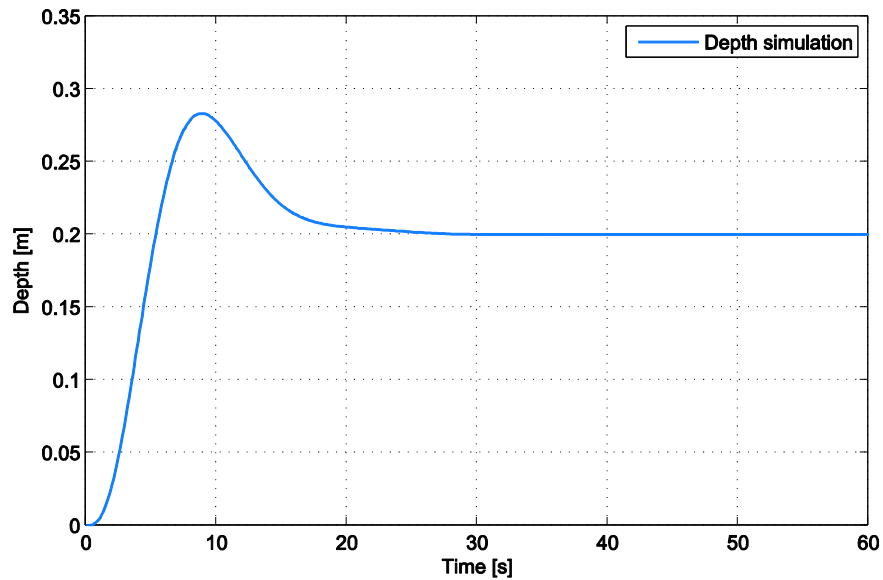
4.8 Απόκριση συστήματος χωρίς και με διαταραχή

Επομένως σχεδιάστηκε ένας ελεγκτής ο οποίος είναι ικανός να οδηγήσει την απόκριση σε μηδενικό σφάλμα ακόμα και όταν υπάρχουν διαταραχές στο σύστημα. Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε προηγουμένως βοήθησε ώστε να ρυθμιστούν κατάλληλα τα κέρδη. Έτσι, το σύστημα για κέρδη $K_I = 1$, $K_h = 8.8$, $K_v = 20$, $K_{\mu} = 150$, $K_{q_{\mu}} = 300$ και χωρίς τη διαταραχή παρουσιάζει την απόκριση που φαίνεται στο Σχήμα 4-11. Επιθυμητή τιμή βάθους είναι τα 0.2 m.



Σχήμα 4-11. Απόκριση συστήματος χωρίς διαταραχή.

Με τα ίδια κέρδη, αν προστεθεί και η διαταραχή, το σύστημα μπορεί να επαναφέρει το ψάρι στο σωστό επιθυμητό βάθος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-12, κάτι που δεν μπορούσε να καταφέρει ο ελεγκτής ανάδρασης όλων των μεταβλητών κατάστασης χωρίς ολοκληρωτή στο σφάλμα.



Σχήμα 4-12. Απόκριση συστήματος με διαταραχή.

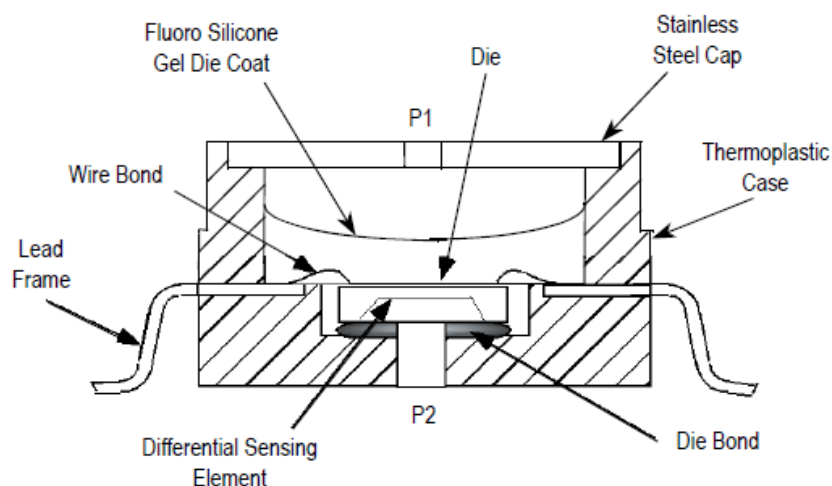
Κεφάλαιο 5: Υλοποίηση

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιασθούν τα εξαρτήματα που επιλέχθηκαν ώστε να κατασκευαστεί η μηχανοτρονική διάταξη του ελέγχου βάθους. Θα δικαιολογηθεί η επιλογή τους και θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά τους. Επίσης θα γίνει και υπολογισμός του κόστους της διάταξης, μιας και ένα από τα κριτήρια για την κατασκευή της ήταν το χαμηλό κόστος.

5.1 Αισθητήρας πίεσης

Για τον έλεγχο βάθους του ψαριού χρειάζεται γνώση του πραγματικού βάθους του ψαρού κάθε χρονική στιγμή. Ο πιο απλός τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι έμμεσα, μέσω μέτρησης της υδροστατικής πίεσης του νερού λόγω βάθους. Οπότε για την υλοποίηση χρειάζεται ένας αισθητήρας πίεσης.

Γενικά οι αισθητήρες πίεσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις ομάδες. Υπάρχουν οι απόλυτοι αισθητήρες πίεσης (absolute pressure sensors) οι οποίοι έχουν μία είσοδο για νερό (ή αέρα) και μετρούν πίεση με αναφορά το απόλυτο μηδέν. Υπάρχουν οι διαφορικοί αισθητήρες πίεσης (differential pressure sensors) οι οποίοι έχουν δύο εισόδους και μετρούν τη διαφορά πίεσης μεταξύ των υγρών ή των αερίων που οδηγούνται στις δύο εισόδους. Τέλος, η τρίτη κατηγορία είναι οι (gauge pressure sensors) οι οποίοι έχουν μία είσοδο για το εργαζόμενο μέσο και άλλη μία σπή προς το περιβάλλον. Αυτοί οι αισθητήρες μετρούν την πίεση με πίεση αναφοράς την πίεση του περιβάλλοντος, η οποία θεωρείται σταθερή. Όλοι οι αισθητήρες για τη μέτρηση της πίεσης χρησιμοποιούν ένα διάφραγμα τύπου strain gauge (die), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-1, έτσι ανάλογα την παραμόρφωση, μετράται η πίεση που ασκείται.

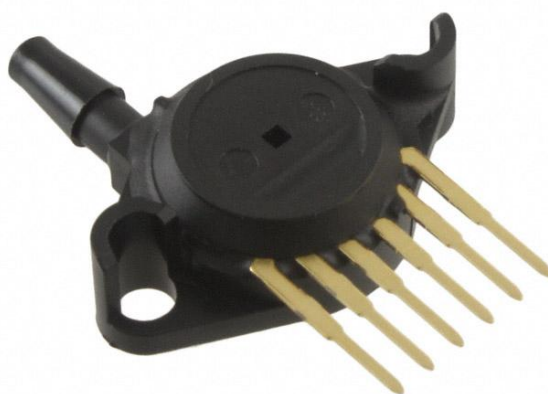


Σχήμα 5-1. Εσωτερικό ενός διαφορικού αισθητήρα πίεσης.

Μέσα στο ψάρι η πίεση δεν είναι σταθερή γιατί υπάρχει η κύστη όπου αποθηκεύεται μέσα το νερό που διακινείται από την αντλία. Καθώς η μάζα του νερού που βρίσκεται μέσα στην κύστη μεταβάλλεται με το χρόνο, έτσι μεταβάλλεται και ο όγκος της κύστης. Οπότε όταν φουσκώνει η κύστη με νερό, ο αέρας που υπάρχει μέσα στο ψάρι συμπιέζεται, άρα η πίεση του αέρα αυξάνεται, ενώ όταν η κύστη αδειάζει, ο αέρας εκτονώνεται και η πίεση μειώνεται. Επομένως ο καλύτερος τύπος αισθητήρα στην περίπτωση αυτή είναι ο απόλυτος αισθητήρας πίεσης, ο οποίος μετράει με πίεση αναφοράς το απόλυτο μηδέν.

Για την επιλογή αισθητήρα, οι προϋποθέσεις που έπρεπε να πληρούνται είναι το σήμα εξόδου του αισθητήρα να κυμαίνεται από 0 έως 5 V το μέγιστο ώστε να μπορεί να το επεξεργαστεί ο μικροεπεξεργαστής και να έχει εύρος μέτρησης πίεσης που να αντιστοιχεί όσο γίνεται περισσότερο στα 0.8 m, το οποίο είναι το ύψος της δεξαμενής στην οποία θα γίνουν τα πειράματα. Με αυτόν τον τρόπο ο αισθητήρας θα έχει καλύτερη διακριτική ικανότητα από κάποιον που για παράδειγμα έχει έξοδο σήματος από 0 έως 5 V αλλά μετράει πιέσεις που αντιστοιχούν από 0 έως 100 m.

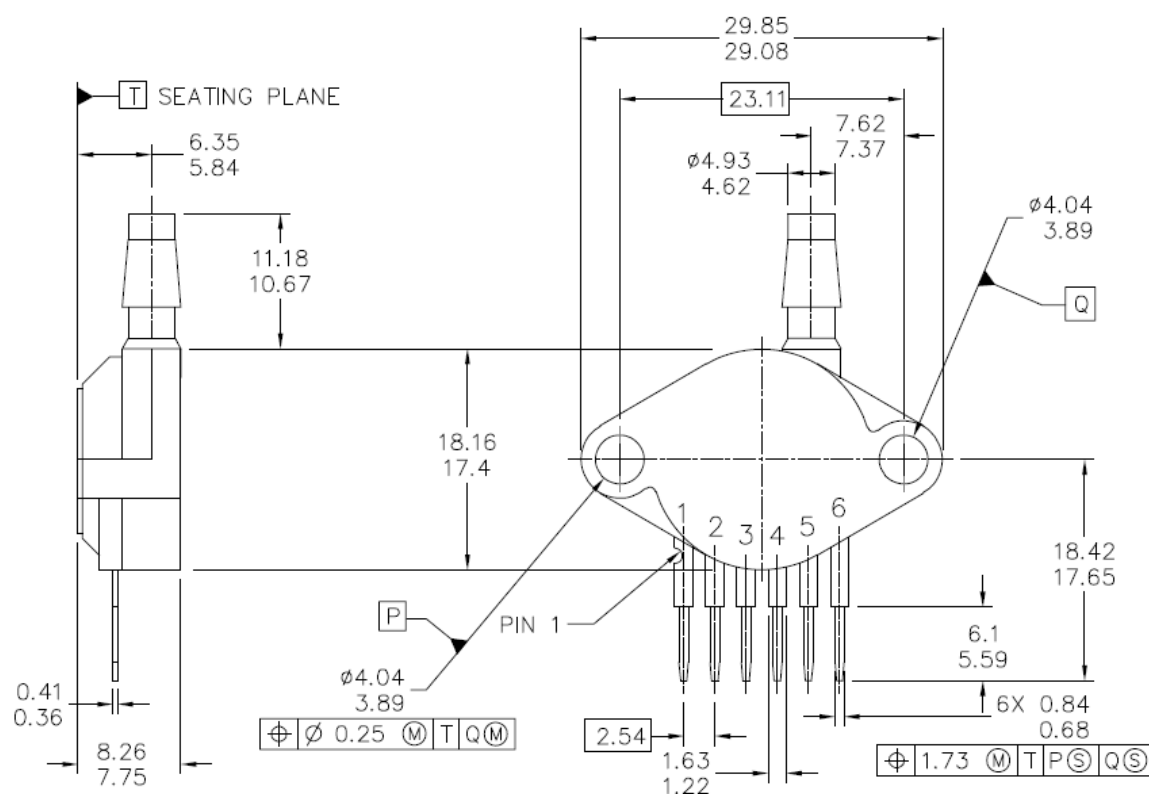
Μετά από έρευνα ανάμεσα στους διαθέσιμους αισθητήρες πίεσης που υπάρχουν στο εμπόριο, δεν βρέθηκε απόλυτος αισθητήρας πίεση ο οποίος να καλύπτει και τις δύο παραπάνω προϋποθέσεις. Όμως βρέθηκε ένας gauge αισθητήρας πίεσης που να πληροί τα παραπάνω χαρακτηριστικά και αυτός επιλέχθηκε. Το μοντέλο του είναι MPX5010GP της εταιρίας Freescale και φαίνεται στο σχήμα 5-2. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα παρουσιάζονται στο Παράρτημα Δ.



Σχήμα 5-2. Gauge αισθητήρας πίεσης MPX5010GP της Freescale.

Για να μετρά σωστά την πίεση ο αισθητήρας, μιας και είναι gauge, θα πρέπει η πίεση του περιβάλλοντος να είναι σταθερή. Επειδή αυτό δε συμβαίνει στο εσωτερικό του ψαριού, έπρεπε να βρεθεί μια λύση. Αυτό που έγινε τελικά, ήταν να εγκιβωτισθεί ο αισθητήρας μέσα σε ένα πλαστικό κουτί φτιαγμένο από plexiglass. Από το κουτί βγαίνει μόνο το στόμιο εισόδου του αισθητήρα, και τα καλώδια που τον συνδέουν στην ηλεκτρονική πλακέτα. Το κουτί στεγανοποιήθηκε εντελώς με τη βοήθεια σιλικόνης, ώστε να μην μπορεί να βγει ή να μπει και άλλος αέρας στο κουτί. Με τον τρόπο αυτό, η πίεση στο περιβάλλον του αισθητήρα δε μεταβάλλεται.

Ο αισθητήρας τροφοδοτείται με τάση 5 V στο ακροδέκτη 3 (οι ακροδέκτες φαίνονται στο Σχήμα 5-3), ο ακροδέκτης 2 συνδέεται με τη γείωση και ο ακροδέκτης 1 εξάγει το αναλογικό σήμα του αισθητήρα, το οποίο κυμαίνεται από 0 V για ατμοσφαιρική πίεση (100 Kpa) έως 4.7 V για πίεση 110 Kpa (δηλαδή για στήλη νερού 1 μέτρου).



Σχήμα 5-3. Κατασκευαστικό σχέδιο του αισθητήρα (διαστάσεις σε [mm]).

Για τον προσδιορισμό της γραμμικής σχέσης του βάθους σε σχέση με την τάση εξόδου του αισθητήρα, μετρήθηκε η τάση εξόδου για δύο διαφορετικά βάθη, για παράδειγμα στο βάθος $h_1 = 0 \text{ m}$ (επιφάνεια του νερού) και σε βάθος $h_2 = 0.6 \text{ m}$ και μέσω γραμμικής παρεμβολής προέκυψε η Εξίσωση (5-1).

$$\frac{h_2 - h_1}{V_2 - V_1} = \frac{h - h_1}{V - V_1} \Rightarrow h = (V - V_1) / 4.5 \quad [m] \quad (5-1)$$

Μετά από δοκιμές που έγιναν παρατηρήθηκε ότι όταν ο αισθητήρας βρισκόταν στην επιφάνεια του νερού, καθώς περνούσε η ώρα η ένδειξη δεν παρέμενε η ίδια αλλά μεταβαλλόταν με αργό ρυθμό. Αυτό οφείλεται πιθανόν στο ότι το νερό της δεξαμενής είχε διαφορετική θερμοκρασία από τον αέρα του εργαστηρίου (λόγω θέρμανσης από τα καλοριφέρ την ημέρα). Όταν τελείωναν τα πειράματα, το ψάρι έβγαине από τη δεξαμενή για να στεγνώσει. Την επόμενη ημέρα, καθώς το ψάρι έμπαινε πάλι μέσα στη δεξαμενή για τα πειράματα, το ψάρι, άρα και ο αέρας μέσα στο ψάρι και κατ' επέκταση μέσα στο κιβώτιο του αισθητήρα έκανε κάποιο χρονικό διάστημα ώστε να έρθει στην ίδια θερμοκρασία με το νερό της δεξαμενής. Κατά τη διάρκεια αυτού του φαινομένου η πίεση μέσα στο κουτί του αισθητήρα μεταβαλλόταν αργά αργά, με αποτέλεσμα για το ίδιο βάθος, η ένδειξη του αισθητήρα να διαφέρει καθώς περνούσαν οι ώρες. Επομένως έπρεπε να βρεθεί κάποια λύση για αυτό το πρόβλημα. Η λύση που εφαρμόστηκε, ήταν στην αρχή κάθε πειράματος, πριν ξεκινήσει ο έλεγχος βάθους, πάντα να γίνεται αρχικοποίηση του αισθητήρα. Δηλαδή όταν το ψάρι βρισκόταν στην επιφάνεια, ο αισθητήρας έβγαζε μία ορισμένη τάση εξόδου V_1 . Η τάση αυτή αντιστοιχιζόταν με τη βοήθεια του μικροεπεξεργαστή στο βάθος 0 m και παράλληλα αποθηκευόταν στη μνήμη, ώστε να χρησιμοποιηθεί στην Εξίσωση (5-1). Έτσι μπορούσε κάθε φορά να εκτελεσθεί το πείραμα που κατά μέσο όρο δεν ξεπερνούσε τα 3 λεπτά με αξιόπιστες μετρήσεις πίεσης και κατ' επέκταση βάθους.

Με τον αισθητήρα πίεσης, λύθηκε το πρόβλημα μέτρησης του βάθους h . Για την λειτουργία του ελεγκτή θα πρέπει να υπάρχουν μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο όλων των μεταβλητών κατάστασης. Επομένως υπάρχει ακόμα το πρόβλημα μέτρησης των υπόλοιπων τριών μεταβλητών ν , μ και q_μ . Αφού υπάρχουν πλέον μετρήσεις του βάθους, με αριθμητική παραγωγή, προκύπτουν οι μετρήσεις της κατακόρυφης ταχύτητας του ψαριού ν .

5.2 Αντλία

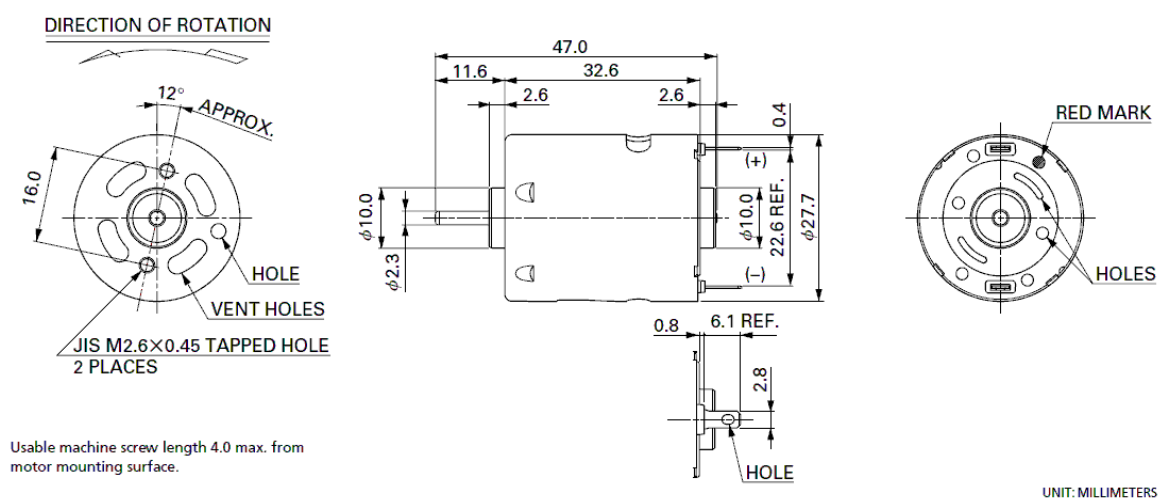
Ο στατικός έλεγχος βάθους που σχεδιάστηκε χρησιμοποιεί μια αντλία ώστε να διακινούνται οι απαραίτητες ποσότητες νερού. Έτσι, έπρεπε να βρεθεί μία κατάλληλη αντλία για την υλοποίηση του ελέγχου βάθους. Η αντλία θα έπρεπε να είναι μικρή σε μέγεθος, να κινείται μέσω κινητήρα συνεχούς ρεύματος, να μπορεί να αντιστρέφει τη φορά της ροής του νερού, και να λειτουργεί σε ένα εύρος από 0 έως 6 V περίπου.

Μετά από ενδελεχή έρευνα στις αντλίες που ήταν διαθέσιμες στο εμπόριο, επιλέχθηκε η αντλία θετικής μετατόπισης RS-360SH (Σχήμα 5-4). Η αντλία είναι

γρاناζωτή, και κινείται από τον κινητήρα RS-360SH-2885 της εταιρίας Mabuchi motor. Ο κινητήρας έχει ισχύ έως και 40 W, ενώ μπορεί να τροφοδοτηθεί με τάση έως 9 V. Τα κατασκευαστικά σχέδια του κινητήρα φαίνονται στο Σχήμα 5-5. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ε.



Σχήμα 5-4. Αντλία θετικής μετατόπισης RS-360SH.



Σχήμα 5-5. Κατασκευαστικά σχέδια κινητήρα RS-360SH-2885 της Mabuchi Motor.

Βασικό πρόβλημα στην υλοποίηση του ελέγχου βάθους, ήταν τρόπος με τον οποίο θα πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις της μάζας του νερού που διακινεί η αντλία και της παροχής μάζας. Ο τρόπος που επιλέχθηκε να γίνουν οι μετρήσεις στη μάζα και την παροχή μάζας, είναι μέσω μετρήσεων των στροφών του κινητήρα. Αν μπορέσει να υπάρξει τρόπος μέτρησης των στροφών του κινητήρα, τότε η μάζα του νερού που

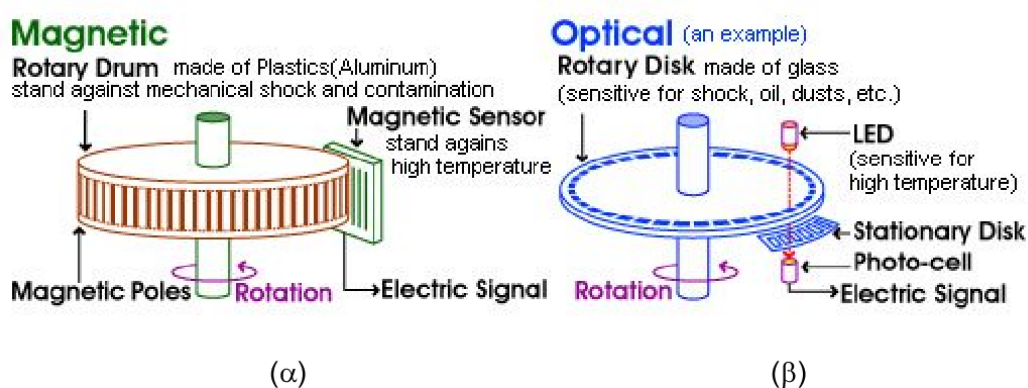
διακινείται, σε σχέση με τις στροφές περιγράφεται από τη Εξίσωση 3-20, όπως παρουσιάστηκε στο 2ο κεφάλαιο:

$$q_{\mu} = -\rho \cdot D \cdot \omega_j \quad (5-2)$$

Από την παραπάνω σχέση, είναι άγνωστη η μετατόπιση της αντλίας D . Οπότε, για τον προσδιορισμό της παραμέτρου, πρέπει να σχεδιαστεί ένα επιπλέον πείραμα.

Αρχικά, το πρόβλημα μέτρησης στροφών στους κινητήρες λύνεται με ενσωμάτωση μιας αυξητικής παλμογεννήτριας (incremental encoder) στον κινητήρα. Υπάρχουν δύο κατηγορίες αυξητικής παλμογεννήτριας. Η οπτική (optical) και η μαγνητική (magnetic) αυξητική παλμογεννήτρια. Οι οπτικές αυξητικές παλμογεννήτριες χρησιμοποιούν ένα κυκλικό δίσκο τοποθετημένο πάνω στην άτρακτο του κινητήρα (Σχήμα 5-6 (β)). Ο δίσκος έχει οπές πάνω του σε κυκλική διάταξη. Από τη μια μεριά υπάρχει μία πηγή φωτός (ένα μικρό led) και από την άλλη ένας ανιχνευτής φωτός. Έτσι, καθώς κινείται ο δίσκος στις στροφές του κινητήρα, τη μια περνάει φως από την οπή του δίσκου και την άλλη δεν περνά. Ο ανιχνευτής φωτός έτσι μετράει τους παλμούς φωτός που δέχεται και μετά γίνεται αντιστοίχιση των παλμών με τις στροφές του κινητήρα.

Στην μαγνητική αυξητική παλμογεννήτρια ο κυκλικός δίσκος δεν έχει οπές, αλλά περιφερειακά του έχει μαγνήτες (Σχήμα 5-6 (α)). Κοντά στον δίσκο είναι τοποθετημένος ένας μαγνητικός αισθητήρας. Έτσι, καθώς ο δίσκος κινείται στις στροφές του κινητήρα, ο μαγνητικός αισθητήρας, μετρά τους παλμούς που προέρχονται από τους μαγνήτες του δίσκου και αργότερα αυτοί οι παλμοί αντιστοιχίζονται σε στροφές.



Σχήμα 5-6. Αρχή λειτουργίας μαγνητικής (α) και οπτικής (β) αυξητικής παλμογεννήτριας.

Στο εμπόριο υπάρχουν πολλοί κινητήρες οι οποίοι έχουν ενσωματωμένη αυξητική παλμογεννήτρια. Ο κινητήρας όμως της αντλίας δεν είχε. Οπότε μία επιλογή ήταν να αντικατασταθεί ο υπάρχων κινητήρας της αντλίας από κάποιον άλλο αντίστοιχων χαρακτηριστικών, ο οποίος να έχει ενσωματωμένη παλμογεννήτρια, ή στον ήδη υπάρχων κινητήρα να ενσωματωθεί μία. Η πρώτη επιλογή απορρίφθηκε γιατί το πλαστικό κέλυφος

της αντλίας το οποίο περιέχει τα γρανάζια και το κανάλι ροής του νερού είναι ειδικά σχεδιασμένα για τις διαστάσεις του υπάρχοντος κινητήρα ενώ δεν μπορούσε να βρεθεί κινητήρας με ενσωματωμένη παλμογεννήτρια σε αυτές τις διαστάσεις. Οπότε απέμεινε η δεύτερη επιλογή. Για να ενσωματωθεί όμως μία παλμογεννήτρια στον κινητήρα, θα πρέπει στο πίσω μέρος να περισσεύει ένα ελάχιστο μήκος της ατράκτου του δρομέα του κινητήρα. Αυτό όμως δε συμβαίνει σε αυτή την περίπτωση καθώς στο πίσω μέρος του κινητήρα δεν εξέχει καθόλου η άτρακτος, όπως φαίνεται και στο κατασκευαστικό σχέδιο (Σχήμα 5-5), με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ενσωματωθεί πάνω του ο δίσκος της παλμογεννήτριας. Αυτό ήταν ένα πρόβλημα πολύ επίπονο να λυθεί. Μία ιδέα ήταν να γίνει μία οπή στο πίσω μέρος της ατράκτου και κατά μήκος της, ώστε αν ήταν δυνατόν να ενσωματωθεί εκεί ένας λεπτότερος άξονας, ο οποίος θα είχε πάνω του τον δίσκο της παλμογεννήτριας. Αυτό το εγχείρημα ήταν πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί καθώς η διάμετρος της ατράκτου είναι πολύ μικρή, μόλις 2.3 mm όπως φαίνεται και στο κατασκευαστικό σχέδιο.

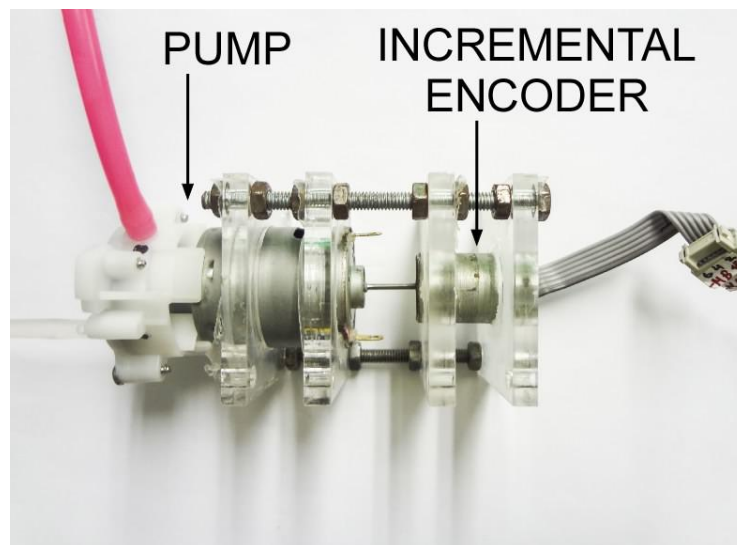
Όσο αφορά την αυξητική παλμογεννήτρια, γενικά υπάρχουν πολλοί τύποι στην αγορά. Όμως, υπήρχαν στο εργαστήριο από προηγούμενο έργο μερικοί κινητήρες 1524E006S123 της εταιρίας Faulhaber, με ενσωματωμένο μειωτήρα στροφών 15/5S141:1K832, μαγνητική αυξητική παλμογεννήτρια HES164A, και ειδικό μηχανισμό ώστε η έξοδος να είναι κάθετη στον άξονα του κινητήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-7. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αυξητικής παλμογεννήτριας παρουσιάζονται στο Παράρτημα ΣΤ.



Σχήμα 5-7. Κινητήρας 1524E006S123 της Faulhaber.

Αποσυναρμολογώντας έναν τέτοιο κινητήρα επιτεύχθηκε να απομονωθεί η αυξητική παλμογεννήτρια, και να διατηρήσει ταυτόχρονα τη λειτουργικότητά της. Ο δίσκος της παλμογεννήτριας ήταν σχεδιασμένος για την άτρακτο του συγκεκριμένου κινητήρα, η οποία είχε διάμετρο 1.5 mm. Στη συνέχεια, απομονώθηκε και η άτρακτος του δρομέα από τον οπλισμό και τα τυλίγματα και κόπηκε σε μικρότερο μήκος. Το πιο δύσκολο σημείο ήταν το άνοιγμα τρύπας 1.5 mm στην άτρακτο της αντλίας που είχε διάμετρο 2.3 mm. Η τρύπα θα έπρεπε να γίνει με αρκετά μεγάλη ακρίβεια στο κέντρο της άτρακτου ώστε να αποφευχθούν έκκεντρες κινήσεις του άξονα της παλμογεννήτριας. Η κατεργασία έγινε σε μηχανή CNC, αφού πρώτα βγήκε ο δρομέας μέσα από τον κινητήρα και τοποθετήθηκε εντελώς κατακόρυφος σε ένα τσοκ με τη βοήθεια ρολογιού. Αφού χρησιμοποιήθηκε αρχικά κεντραδόρος, επιτεύχθηκε η πραγματοποίηση της τρύπας με ικανοποιητική ακρίβεια. Αφού ο δρομέας επανατοποθετήθηκε μέσα στην αντλία, στο πίσω μέρος του ενσωματώθηκε με σφιχτή συναρμογή το αξονάκι της παλμογεννήτριας και μετά ενσωματώθηκε και η ίδια η παλμογεννήτρια.

Για να συγκρατείται η αντλία με την αυξητική παλμογεννήτρια ως ένα σώμα δημιουργήθηκε ένας σκελετός συγκράτησης. Ο σκελετός αποτελείται από στηρίγματα φτιαγμένα από plexiglas, ντίζες με σπείρωμα και τα αντίστοιχα περικόχλια. Τα στηρίγματα, δύο για την αντλία και δύο για την παλμογεννήτρια, εφαρμόζονται με σφιχτή συναρμογή στην αντλία και στην παλμογεννήτρια αντίστοιχα. Δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια μηχανήματος κοπής laser και τα κατασκευαστικά σχέδιά τους φαίνονται στο Παράρτημα Θ. Αφού τοποθετηθούν τα στηρίγματα, ενώνονται με τη βοήθεια ντιζών με σπείρωμα M4 και με τα αντίστοιχα περικόχλια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-8.



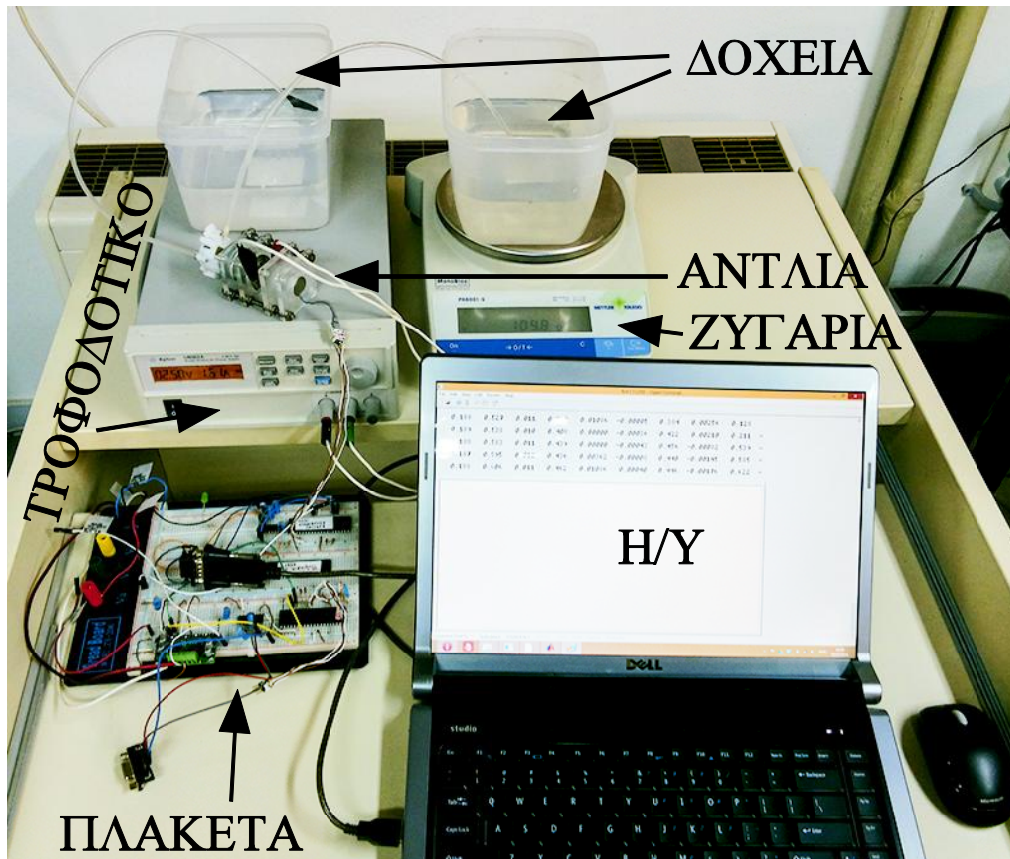
Σχήμα 5-8. Η αντλία μετά την ενσωμάτωση της παλμογεννήτριας.

Οπότε με τον παραπάνω τρόπο επιτεύχθηκε η μέτρηση των στροφών του κινητήρα. Αυτό που απομένει, είναι να σχεδιαστεί ένα πείραμα για τον προσδιορισμό της μετατόπισης της αντλίας D . Η Εξίσωση (5-2) μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$q_{\mu} = \rho \cdot D \cdot \omega_j \Rightarrow \frac{\delta\mu}{\delta t} = \rho \cdot D \cdot \frac{\delta\theta}{\delta t} \Rightarrow \delta\mu = \rho \cdot D \cdot \delta\theta \quad (5-3)$$

όπου θ είναι η γωνία του δρομέα της αντλίας. Το πείραμα που σχεδιάστηκε ήταν το εξής: Στους ακροδέκτες της αντλίας εφαρμόστηκε γνωστή τάση. Καθώς λειτουργεί η αντλία, διακινεί νερό από ένα δοχείο σε ένα άλλο. Το δοχείο στο οποίο μεταφέρεται το νερό είναι τοποθετημένο πάνω σε μια ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας. Αφού πέρασαν ορισμένα δευτερόλεπτα ώστε οι στροφές να σταθεροποιηθούν στη μόνιμη κατάσταση, ένα led τοποθετημένο πάνω στην πλακέτα αναβοσβήνει 3 φορές με χρονική καθυστέρηση 1 δευτερολέπτου ανάμεσα σε κάθε άναμμα. Όταν ανάβει για τρίτη φορά το led σημειώνεται η ένδειξη της ζυγαριάς, ενώ ταυτόχρονα, με τη βοήθεια ενός μικροεπεξεργαστή αρχίζει η μέτρηση των περιστροφών του δρομέα μέσω της αυξητικής παλμογεννήτριας. Η αντλία δουλεύει συνεχόμενα για ένα λεπτό. Τρία δευτερόλεπτα πριν ολοκληρωθεί το χρονικό διάστημα του ενός λεπτού, αναβοσβήνει και πάλι το led. Την τρίτη φορά που θα ανάψει το led, συμπληρώνεται ακριβώς ένα λεπτό. Εκείνη τη στιγμή σημειώνεται και πάλι η ένδειξη της ζυγαριάς και ταυτόχρονα σταματά η μέτρηση των περιστροφών της αντλίας. Στο Σχήμα 5-9 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.

Πραγματοποιήθηκαν αρκετά πειράματα με την αντλία να διακινεί νερό και με τις δύο δυνατές φορές περιστροφής του δρομέα. Στο Σχήμα 5-8 φαίνεται ένας ροζ σωλήνας, ο οποίος είναι συνδεδεμένος στο στόμιο που βρίσκεται *ακτινικά* της αντλίας. Στο ίδιο σχήμα αριστερά φαίνεται και ο δεύτερος σωλήνας, ο οποίος είναι διαφανής και είναι συνδεδεμένος στο στόμιο που βρίσκεται *αξονικά* στην αντλία. Έτσι υπάρχουν δύο δυνατές φορές ροής του νερού. Ακτινικά προς αξονικά και αντίστροφα, δηλαδή αξονικά προς ακτινικά. Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όταν η φορά ροής του νερού είναι ακτινικά προς αξονικά και στον Πίνακα 5-2 όταν η ροή είναι αντίστροφη. Σε όλες τις περιπτώσεις των πειραμάτων η τάση που εφαρμόστηκε ήταν 2.5 V. Λόγω του φαινομένου όμως που έχει ήδη αναφερθεί, δηλαδή ότι η αντλία αρχίζει να κινείται όταν στους ακροδέκτες εφαρμόζεται τάση από 0.8 V και πάνω, στην αντλία είναι ουσιαστικά σαν να εφαρμόζονται 1.7 V.



Σχήμα 5-9. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της μετατόπισης στις αντλίες (D).

Στο τέλος του πειράματος έχουν καταγραφεί οι παλμοί που μετρήθηκαν από την αυξητική παλμογεννήτρια (πρώτη στήλη των Πινάκων 5.1 και 5.2) και η μάζα του νερού που διακινήθηκε $\delta\mu$ μέσω της αντλίας (τέταρτη στήλη των Πινάκων 5.1 και 5.2). Κάθε περιστροφή της αντλίας αντιστοιχεί σε 2 παλμούς. Επομένως αν οι παλμοί που μετρήθηκαν διαιρεθούν δια δύο προκύπτουν οι συνολικές περιστροφές που πραγματοποίησε η αντλία στη διάρκεια του ενός λεπτού (δεύτερη στήλη στους Πίνακες). Γνωρίζοντας ότι κάθε περιστροφή αντιστοιχεί σε γωνία $2\pi \text{ rad}$, πολλαπλασιάζοντας τις συνολικές περιστροφές με 2π προκύπτει η συνολική γωνία που πραγματοποίησε ο δρομέας της αντλίας $\delta\theta$ (τρίτη στήλη των Πινάκων). Η πυκνότητα του νερού είναι γνωστή $\rho = 1000 [\text{kg} / \text{m}^3]$, επομένως μπορεί πλέον να προσδιοριστεί η μετατόπιση $D [\text{m}^3 / \text{rad}]$ (τέταρτη στήλη των Πινάκων).

$$\delta\mu = \rho \cdot D \cdot \delta\theta \Rightarrow D = \frac{\delta\mu}{\rho \cdot \delta\theta} \quad (5-4)$$

Πίνακας 5-1. Αποτελέσματα πειράματος για ροή από ακτινικά προς αξονικά.

Πείραμα για τάση 2.5 V και ροή ακτινικά προς αξονικά.				
Παλμοί	Περιστροφές N	Γωνία δθ [rad]	Διακινούμενη μάζα δμ [kg]	Μετατόπιση αντλίας D [m³/rad]
15816	7908	49687.39	0.425	8.55348E-09
15820	7910	49699.95	0.470	9.45675E-09
15958	7979	50133.49	0.470	9.37497E-09
16000	8000	50265.44	0.482	9.58909E-09
15870	7935	49857.03	0.474	9.50718E-09
Μέσος Όρος				9.2963E-09

Πίνακας 5-2. Αποτελέσματα πειράματος για ροή από αξονικά προς ακτινικά.

Πείραμα για τάση 2.5 V και ροή αξονικά προς ακτινικά.				
Παλμοί	Περιστροφές N	Γωνία δθ [rad]	Διακινούμενη μάζα δμ [kg]	Μετατόπιση αντλίας D [m³/rad]
15866	7933	49844.47	0.444	8.90771E-09
15714	7857	49366.95	0.441	8.9331E-09
15698	7849	49316.68	0.439	8.90165E-09
15564	7782	48895.71	0.432	8.83513E-09
15166	7583	47645.35	0.435	9.12996E-09
Μέσος Όρος				8.94151E-09

Στην τελευταία σειρά των Πινάκων 5.1 και 5.2 έχει υπολογιστεί ο μέσος όρος για την τιμή του D για κάθε μία από τις δύο φορές. Υπολογίζοντας εκ νέου το μέσο όρο αυτών των δύο τιμών, προκύπτει ότι $D = 91.19 \cdot 10^{-10} [m^3 / rad]$.

$$\delta\mu = \rho \cdot D \cdot \delta\theta \Rightarrow \mu = \rho \cdot D \cdot \theta \Rightarrow \mu = 91.19 \cdot 10^{-7} \cdot \theta \quad (5-5)$$

και επειδή μία περιστροφή της αντλίας αντιστοιχεί σε γωνία $2\pi \text{ rad}$, μπορεί η παραπάνω σχέση να μετασχηματισθεί ώστε να υπολογίζεται η μάζα σε σχέση με τις περιστροφές της αντλίας, κάτι που είναι πιο απλό να χρησιμοποιηθεί στον μικροεπεξεργαστή. Έτσι, επειδή:

$$\theta = 2 \cdot \pi \cdot N \quad (5-6)$$

Η Εξίσωση (5-6) γίνεται:

$$\mu = 0.000057 \cdot N \quad (5-7)$$

όπου N είναι οι περιστροφές της αντλίας.

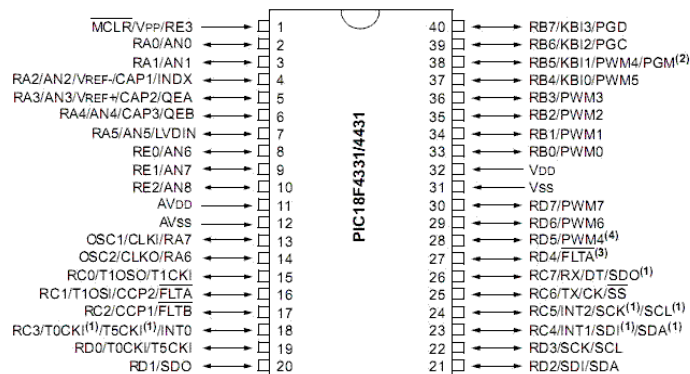
Τέλος, απομένει η μέτρηση σε πραγματικό χρόνο της παροχής μάζας του νερού q_μ . Αυτό μπορεί να γίνει με αριθμητική παραγωγή της διακινούμενης μάζας μ . Επομένως επιτεύχθηκε η ύπαρξη μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο για όλες τις μεταβλητές κατάστασης.

5.3 Μικροεπεξεργαστής

Για τη διαδικασία του ελέγχου, ένας απλός και φθηνός μικροεπεξεργαστής αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθεί. Επιλέχθηκε ο 8-bit PIC18F4431 μικροεπεξεργαστής της εταιρίας Microchip (σχήμα 5-10). Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο γιατί είχε ενσωματωμένη λειτουργία αποκωδικοποίησης quadrature σήματος, πράγμα το οποίο ήταν απαραίτητο ώστε να μετρούνται οι παλμοί της αυξητικής παλμογεννήτριας, άρα και οι στροφές του κινητήρα. Προγραμματίζεται σε γλώσσα προγραμματισμού C. Ο επεξεργαστής αποτελείται από 40 pins, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-11.



Σχήμα 5-10. Ο μικροεπεξεργαστής PIC18F4431 της Microchip.



Σχήμα 5-11. Χαρτογράφηση των 40 pins του μικροεπεξεργαστή.

5.4 Γέφυρα H (H-Bridge)

Για να τροφοδοτηθεί ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος με τα κατάλληλα ποσά ρεύματος που χρειάζεται, χρειάζεται οπωσδήποτε ένα h-bridge. Το h-bridge που θα χρησιμοποιούταν, θα έπρεπε να μπορεί να τροφοδοτήσει με τουλάχιστον 6.5 V και 2 A. Μία φθηνή λύση ήταν το MC33926 της εταιρείας Pololu (Σχήμα 5-12), το οποίο είναι συμβατό με είσοδο TTL/CMOS λογικής, πράγμα που κάνει εύκολη τη συνεργασία με τον μικροεπεξεργαστή.



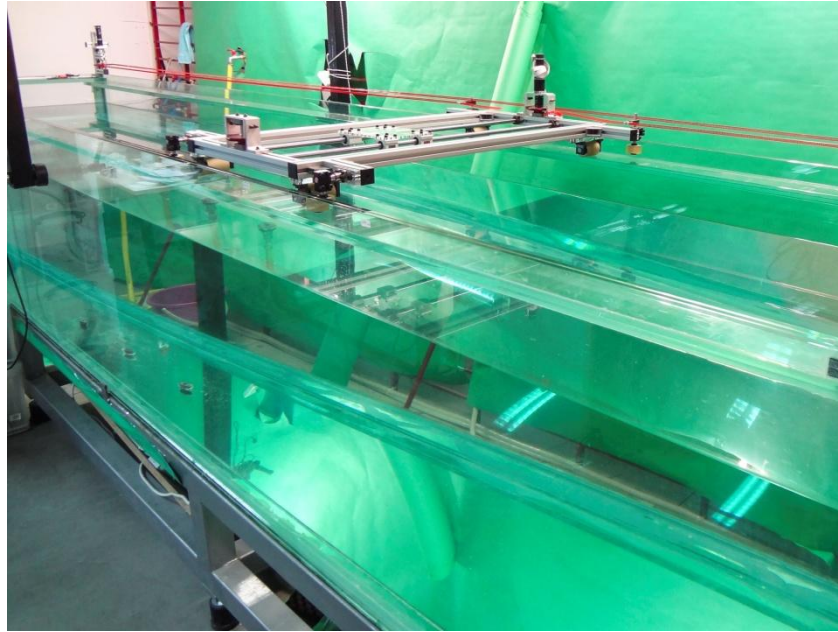
Σχήμα 5-12. H-Bridge MC33926 της Pololu.

5.5 Κύστη

Για τεχνητή κύστη, υπάρχουν στην αγορά μερικές φτιαγμένες από ελαστικά υλικά. Στο μέγεθος που χρειαζόταν όμως η πιο απλή και φθηνή λύση ήταν να χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο, κοινό μπαλόνι.

5.6 Δεξαμενή

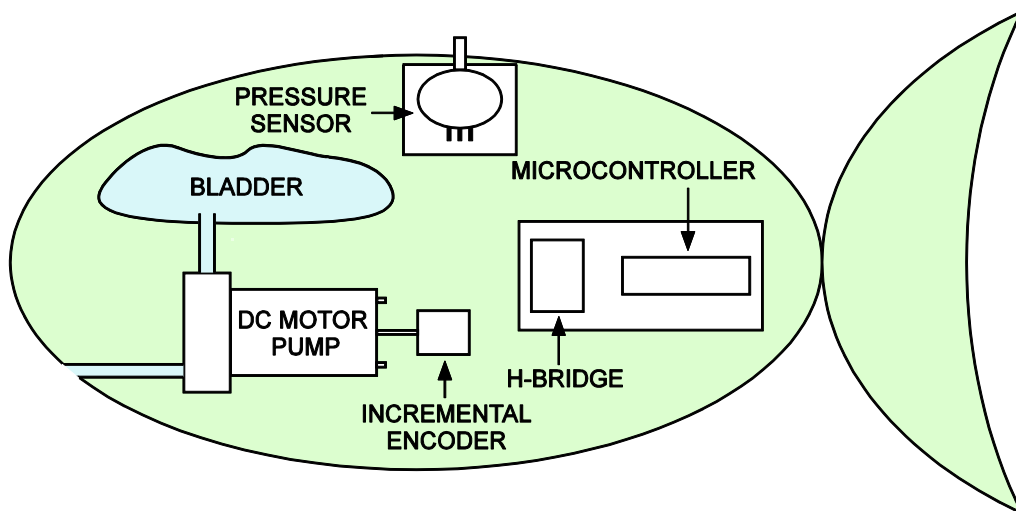
Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο ειδικά διαμορφωμένη δεξαμενή του εργαστηρίου αυτομάτου ελέγχου (σχήμα 5-13). Η δεξαμενή έχει διαστάσεις 5 m (μήκος) x 1 m (πλάτος) x 0.8 m (ύψος). Για να μπορέσει να γίνει κάποια σύγκριση, αξίζει να αναφερθεί ότι οι διαστάσεις του ρομποτικού ψαριού είναι 0.3 m (μήκος) x 0.08 m (πλάτος) x 0.07 m (ύψος). Η δεξαμενή είναι εξοπλισμένο με ειδικό φορείο μετατόπισης στους άξονες x και y κατασκευασμένο από μέλη του εργαστηρίου αυτομάτου ελέγχου. Το φορείο αυτό χρησιμοποιείται σε άλλου είδους πειράματα, όταν είναι απαραίτητες μετρήσεις δυνάμεων που ασκούνται πάνω το ψάρι κατά τη διάρκεια κίνησής του.



Σχήμα 5-13. Η δεξαμενή του εργαστηρίου.

5.7 Συνδεσμολογία

Μία απλή σχηματική απεικόνιση της μηχανοτρονικής διάταξης, φαίνεται στο Σχήμα 5-14.



Σχήμα 5-14. Σχηματική απεικόνιση της μηχανοτρονικής διάταξης.

Ο αισθητήρας πίεσης (pressure sensor) έχει το στόμιό του εκτεθειμένο στο νερό ώστε να λαμβάνει τις απαιτούμενες μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές διαβάζονται από τον μικροεπεξεργαστή (microcontroller). Στον μικροεπεξεργαστή λαμβάνονται επίσης οι μετρήσεις από την αυξητική παλμογεννήτρια (incremental encoder). Μετά τη λήψη των μετρήσεων από τον αισθητήρα πίεσης και την παλμογεννήτρια, ο μικροεπεξεργαστής

προβαίνει στους απαραίτητους υπολογισμούς των μεταβλητών κατάστασης και μετά στον υπολογισμό της τάσης που πρέπει να εφαρμοσθεί στους ακροδέκτες της αντλίας. Τότε ο μικροεπεξεργαστής στέλνει την απαιτούμενη τιμή στο H-Bridge, και με τη σειρά του το H-bridge εφαρμόζει την απαιτούμενη τάση στους ακροδέκτες της αντλίας. Έτσι, η αντλία διακινεί νερό είτε από το εξωτερικό περιβάλλον προς την κύστη, είτε το αντίστροφο, ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται.

5.8 Κόστος

Ένα από κριτήρια που έπρεπε να ικανοποιείται κατά την κατασκευή της διάταξης ήταν το χαμηλό κόστος. Για την υλοποίηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν πολύ φθηνά εξαρτήματα, ώστε να είναι δυνατή η υλοποίηση τέτοιου συστήματος από τον καθένα. Πιο συγκεκριμένα, το κόστος κάθε επιμέρους εξαρτήματος καθώς και το συνολικό κόστος της διάταξης παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-1.

Πίνακας 5-3. Κόστος διάταξης.

Εξάρτημα	Κόστος
Αισθητήρας πίεσης	13 €
Αντλία	2.5 €
Αυξητική παλμογεννήτρια	7 €
Μικροεπεξεργαστής	7€
H-bridge	13 €
Λοιπά εξαρτήματα	17.5 €
Συνολικό κόστος	60 €

Όσο αφορά το κόστος της αυξητικής παλμογεννήτριας, αυτό αναφέρεται στο κόστος του κινητήρα ο οποίος έχει ενσωματωμένη την παλμογεννήτρια. Οι κινητήρες είχαν αγοραστεί σε μεγάλες ποσότητες σε πολύ καλή τιμή για προηγούμενο έργο του εργαστηρίου. Στα λοιπά εξαρτήματα συγκαταλέγονται όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα για την υλοποίηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές και καλώδια. Επίσης εκεί συμπεριλαμβάνονται οι ντίζες με τα περικόχλια και τα πλαστικά στηρίγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του σκελετού που κρατάει σταθερά την αντλία με την παλμογεννήτρια.

Το συνολικό κόστος της διάταξης ανέρχεται στα 60 € και κρίνεται ως πολύ καλό με δεδομένη την πολυπλοκότητα μιας τέτοιας διάταξης. Ως μέτρο σύγκρισης αξίζει να

σημειωθεί ότι ορισμένα ρομποτικά ψάρια, για τη μέτρηση του βάθους τους, χρησιμοποιούν sonar κόστους εκατοντάδων €.

5.9 Λογισμικό

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον προγραμματισμό του μικροεπεξεργαστή ήταν το MPLAB v.8, το C18 Microchip compiler και το MPLAB ICD2. Ο κώδικας συντάχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C, λόγω συμβατότητας με πολλούς compilers και με βιβλιοθήκες λογισμικού. Στην αρχή κάθε πειράματος, γίνεται μία αυτόματη ρύθμιση του αισθητήρα πίεσης ώστε να αντιστοιχηθεί η επιφάνεια του νερού με το 0 στο βάθος όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 5.1. Για τη λήψη των μετρήσεων του αισθητήρα γίνεται αναλογο-ψηφιακή μετατροπή 10 bits. Επειδή τα σήματα του αισθητήρα είχαν πολύ θόρυβο, χρησιμοποιήθηκε μέσος όρος 10 τιμών ανά 50 μs ώστε να προκύψουν καλύτερες τιμές για τη χρησιμοποίηση των απαιτούμενων υπολογισμών.

Παράλληλα, ο μικροεπεξεργαστής δέχεται τις μετρήσεις από την παλμογεννήτρια. Αφού γίνουν οι απαραίτητες μετατροπές των σημάτων πίεσης σε βάθος και στροφών σε μάζα διακινούμενου νερού, σειρά έχει ο υπολογισμός των παραγώγων αυτών των μεγεθών ώστε να υπάρχει γνώση της ταχύτητας και της παροχής μάζας. Αυτή ήταν μια επίπονη διαδικασία, καθώς οι αριθμητικές παραγωγίσεις δημιουργούσαν επιπλέον θόρυβο, στον ήδη υπάρχοντα από το σήμα του βάθους. Αφού δοκιμάστηκαν διάφορες μέθοδοι αριθμητικής παραγωγίσης, η μέθοδος με τα καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιεί τιμές 4 χρονικών στιγμών, ώστε να υπολογισθεί η παράγωγος και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\dot{x}(t) = \frac{x(t) + 3 \cdot x(t - dt) - 3 \cdot x(t - 2 \cdot dt) - x(t - 3 \cdot dt)}{6 \cdot dt} \quad (5-8)$$

Επομένως, ο μικροεπεξεργαστής χρησιμοποιεί δύο φορές την παραπάνω σχέση για να υπολογισθεί η ταχύτητα και η παροχή μάζας ως εξής:

$$v(t) = \frac{h(t) + 3 \cdot h(t - dt) - 3 \cdot h(t - 2 \cdot dt) - h(t - 3 \cdot dt)}{6 \cdot dt} \quad (5-9)$$

$$q_{\mu}(t) = \frac{\mu(t) + 3 \cdot \mu(t - dt) - 3 \cdot \mu(t - 2 \cdot dt) - \mu(t - 3 \cdot dt)}{6 \cdot dt} \quad (5-10)$$

Για τον υπολογισμό της τάσης που θα εφαρμοστεί στους ακροδέκτες της αντλίας, στο ελεγκτή που σχεδιάστηκε, έχει προστεθεί και ολοκληρωτής σφάλματος. Επομένως, πρέπει να γίνει επιλογή κάποιας αριθμητικής μεθόδου για υπολογισμό ολοκληρώματος. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε η απλή μέθοδος του τραπεζίου με πολύ ικανοποιητικά

αποτελέσματα. Η μέθοδος τραπεζίου υπολογίζει το εμβαδό της συνάρτησης ανάμεσα σε δύο χρονικές στιγμές με τη σχέση:

$$I_{new} = \frac{x(t) + x(t-dt)}{2} \cdot dt \quad (5-11)$$

Συγκεκριμένα, για το σφάλμα θα είναι:

$$I_{new} = \frac{[h_{des}(t) - h(t)] + [h_{des}(t-dt) - h(t-dt)]}{2} \cdot dt \quad (5-11)$$

Τέλος, το ολοκλήρωμα υπολογίζεται προσθέτοντας σε κάθε χρονική στιγμή το νέο εμβαδό στο ήδη υπολογισμένο συνολικό εμβαδό μέχρι την προηγούμενη χρονική στιγμή, κάτι το οποίο σε κώδικα γράφεται ως εξής:

$$I = I + I_{new} \quad (5-12)$$

Έτσι, μπορεί να γίνει ο τελικός υπολογισμός της τάσης που θα εφαρμοσθεί στους ακροδέκτες της αντλίας. Ο έλεγχος κλειστού βρόχου εκτελείται κάθε 50 ms.

Λόγω του φαινομένου που παρατηρήθηκε για την αντλία και αναφέρθηκε ήδη κατά τον προσδιορισμό των παραμέτρων της αντλίας, η αντλία ξεκινά να κινείται όταν εφαρμοσθεί στους ακροδέκτες της από 0.8 V και πάνω. Για το λόγο αυτό, έπρεπε να αντισταθμιστεί αυτό το φαινόμενο για το σωστό έλεγχο της διάταξης. Έτσι, όταν η τάση που προκύπτει από τον ελεγκτή είναι θετική, προστίθενται και 0.8 V, ενώ όταν η τάση προκύπτει αρνητική, αφαιρούνται και 0.8 V με τη βοήθεια του παρακάτω τμήματος κώδικα:

```

if(controller output >= 0){
controller output = controller output + 0.8;
}
if(controller output < 0){
controller output = controller output - 0.8;
}

```

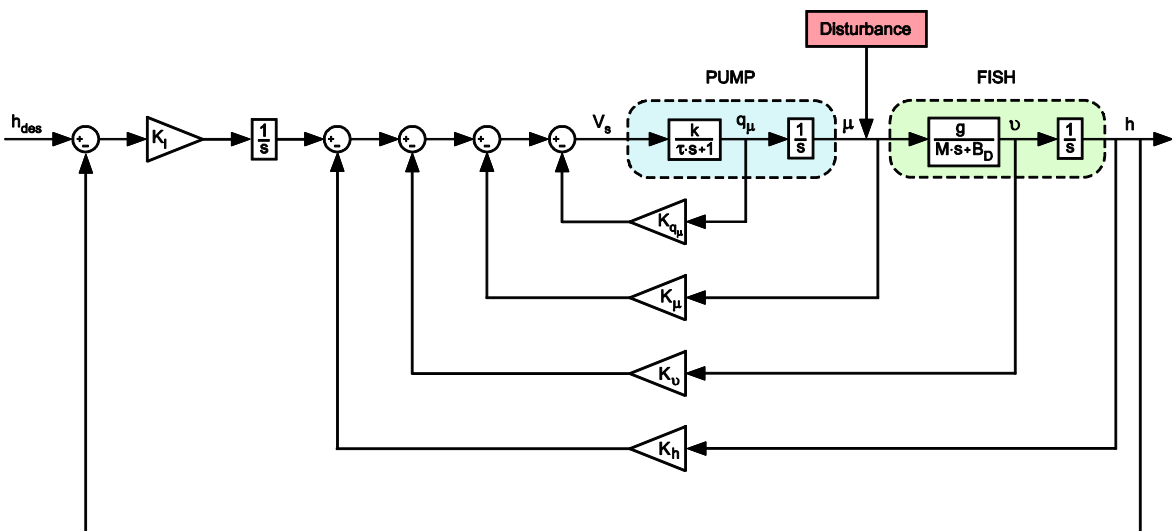
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της έρευνας. Η έρευνα συνοδεύτηκε από αποτελέσματα προσομοίωσης αλλά και πειραματικά. Οι προσομοιώσεις έγιναν με τη βοήθεια του Simulink της Matlab, ενώ τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τη μηχανοτρονική διάταξη που κατασκευάστηκε στην ειδικά διαμορφωμένη δεξαμενή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

6.1 Μοντέλο για σκοπούς υλοποίησης

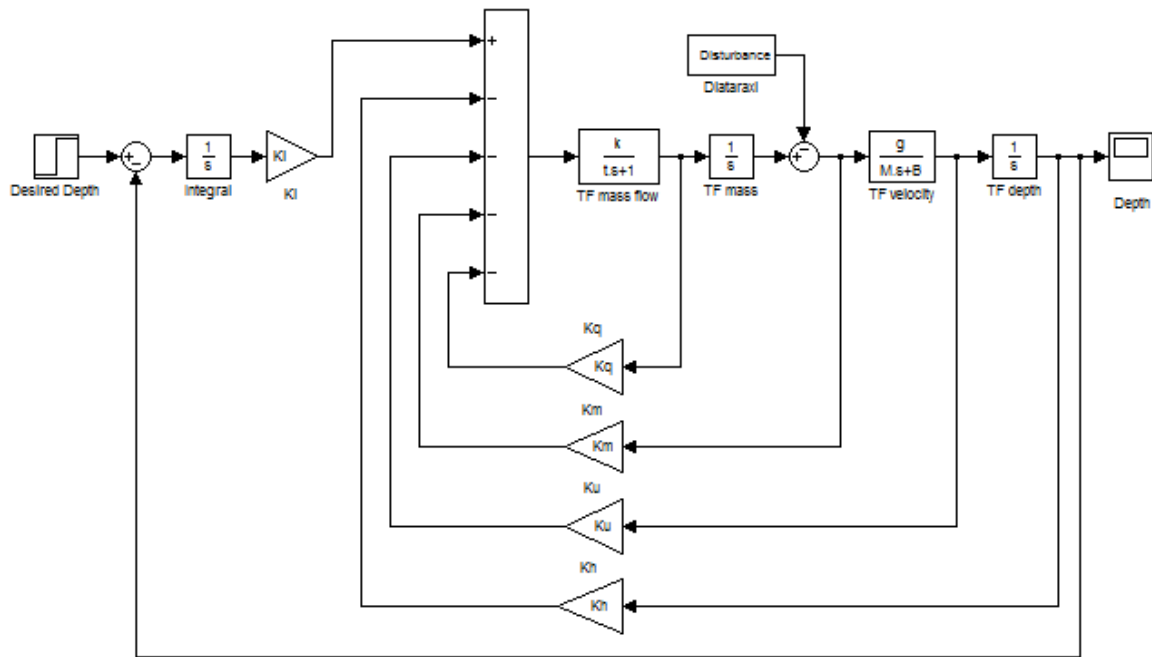
Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 4, ήταν προορισμένο για σκοπούς ελέγχου, και δεν συμπεριλάμβανε μη γραμμικότητες. Από εδώ και στο εξής αυτό το μοντέλο θα ονομάζεται ιδανικό μοντέλο. Στην πραγματικότητα όμως, υπάρχουν πολλά επιπρόσθετα μη γραμμικά φαινόμενα τα οποία έχουν σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά του συστήματος. Επομένως, για να αξιολογηθεί ο ελεγκτής που σχεδιάστηκε, πρέπει να κατασκευαστεί ένα επιπλέον μοντέλο που να περιλαμβάνει τις μη γραμμικότητες. Αυτό το μοντέλο αποτελεί το πραγματικό μοντέλο

Το ιδανικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για σκοπούς ελέγχου, με ενσωματωμένη τη διαταραχή φαίνεται στο Σχήμα 6-1.



Σχήμα 6-1. Μοντέλο για σκοπούς ελέγχου.

Το ίδιο μοντέλο όταν χρησιμοποιήθηκε ώστε να γίνουν προσομοιώσεις, παραστάθηκε στο Simulink της Matlab όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-2.



Σχήμα 6-2. Μοντέλο για σκοπούς ελέγχου όπως δημιουργήθηκε στο Simulink.

Το πραγματικό μοντέλο, το οποίο κατασκευάστηκε για σκοπούς αξιολόγησης και υλοποίησης, φαίνεται στο Παράρτημα Β. Οι αριθμοί 1 έως 11 πάνω στο σχεδιάγραμμα του Παραρτήματος Β αντιστοιχούν σε φαινόμενα που ενσωματώθηκαν στο αρχικό μοντέλο και θα επεξηγηθούν παρακάτω:

- 1) Σε αυτό το τμήμα του δομικού διαγράμματος γίνεται αριθμητικός υπολογισμός του ολοκληρώματος του σφάλματος, με τη μέθοδο του τραπεζίου, ακριβώς όπως πραγματοποιείται και στον μικροεπεξεργαστή.
- 2) Εδώ προσομοιώνεται το τμήμα του κώδικα που τρέχει μέσα στον μικροεπεξεργαστή και προσθέτει 0.8 V αν η τελική τάση προκύπτει θετική και αφαιρεί 0.8 V αν η τελική τάση που προκύπτει είναι θετική (offset). Αυτό γίνεται ώστε να αντισταθμιστεί η απαίτηση τουλάχιστον 0.8 V ώστε να κινηθεί η αντλία (deadzone).
- 3) Σε αυτό το τμήμα θέτονται τα όρια της τάσης που θα δέχεται ο κινητήρας της αντλίας (saturation). Για λόγους εύρυθμης λειτουργίας της αντλίας και για να αποφευχθούν ακραίες καταπονήσεις στον άξονα που συνδέει την παλμογεννήτρια, αποφασίστηκε η τάση να κυμαίνεται από -3 V έως 3 V.
- 4) Αυτό είναι ένα κέρδος που αντισταθμίζει το κέρδος του H-bridge. Το H-bridge, με δεδομένη την τάση που τροφοδοτείται, πολλαπλασιάζει τη εντολή της τάσης που του δίνει ο μικροεπεξεργαστής κατά 1.3. Για το λόγο αυτό, εισάγεται αυτό το κέρδος, το οποίο πριν διαιρεί με 1.3 την εντολή που θα δοθεί στο H-bridge, ώστε τελικά να προκύπτει η σωστή τιμή τάσης στην έξοδο του H-bridge.

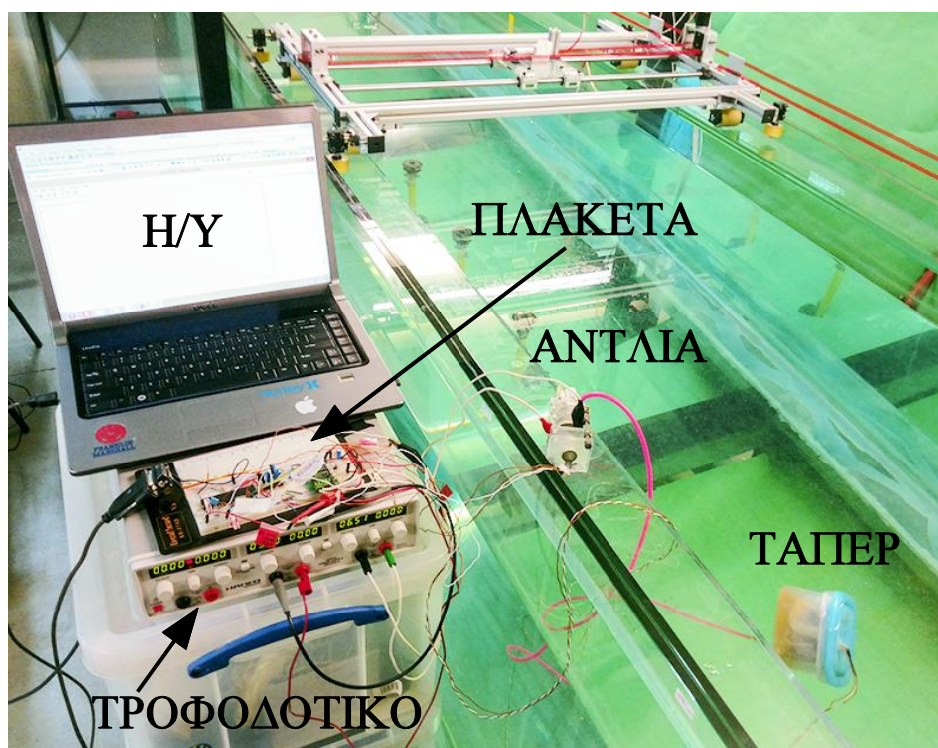
- 5) Εδώ βρίσκεται το κέρδος του H-bridge, όπως επεξηγήθηκε στο 4)
- 6) Σε αυτό το τμήμα προσομοιώνεται το φαινόμενο της αντλίας να κινείται από τα 0.8 V και πάνω (deadzone).
- 7) Εδώ προσομοιώνεται ένα άλλο φαινόμενο το οποίο παρατηρείται στην αντλία κατά το οποίο η παροχή που προκύπτει για συγκεκριμένη τάση κατά τη μία φορά περιστροφής του ρότορα της αντλίας, διαφέρει από την παροχή που προκύπτει για την ίδια τάση αλλά με αντίθετη φορά περιστροφής του ρότορα.
- 8) Το block αυτό εισάγει στο σύστημα το θόρυβο που προέρχεται από τον αισθητήρα πίεσης
- 9) Όπως τέθηκαν όρια στην τάση, πρέπει να τεθούν και στο βάθος, καθώς να μην μπορεί το ψάρι να κινηθεί μέχρι όποιο βάθος θέλει, αλλά από την άλλη το βάθος δεν μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές, μιας και δεν μπορεί να κινηθεί πιο πάνω από την επιφάνεια του νερού.
- 10) Σε αυτό το σημείο εκτελείται αριθμητική παραγωγή τεσσάρων σημείων για τον υπολογισμό της παροχής μάζας.
- 11) Η ίδια διαδικασία γίνεται και για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ψαριού.

6.2 Αποτελέσματα

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος που έγιναν τα πειράματα. Το ψάρι στην αρχή του πειράματος έχει ελαφρώς θετική πλευστότητα ώστε να επιπλέει στην επιφάνεια του νερού. Όταν δοθεί η εντολή του επιθυμητού βάθους και ξεκινήσει το πείραμα, αρχικά γίνεται αυτόματα ρύθμιση του αισθητήρα πίεσης ώστε τα 0m να αντιστοιχούν στην επιφάνεια του νερού. Αυτή η διαδικασία διαρκεί περίπου μισό δευτερόλεπτο. Μετά αρχίζει ο έλεγχος βάθους. Κάθε χρονική στιγμή, οι μετρήσεις πίεσης και περιστροφών της αντλίας φθάνουν στον επεξεργαστή μέσω του αισθητήρα πίεσης και της αυξητικής παλμογεννήτριας. Στη συνέχεια στον επεξεργαστή γίνονται οι κατάλληλες μετατροπές μεγεθών και οι απαιτούμενοι υπολογισμοί ώστε πλέον να είναι γνωστές όλες οι μεταβλητές κατάστασης. Γνωρίζοντας αυτές τις τιμές, ο επεξεργαστής προχωράει στον υπολογισμό της απαιτούμενης τάσης που πρέπει να εφαρμοσθεί στους ακροδέκτες της αντλίας, όπως ορίζει η εξίσωση του ελεγκτή που σχεδιάστηκε. Αφού υπολογισθεί αυτή η τάση, ο επεξεργαστής στέλνει την απαιτούμενη τιμή στο H-bridge, ώστε αυτό με τη σειρά του να εφαρμόσει την κατάλληλη τάση στους ακροδέκτες της αντλίας. Από εκεί και πέρα η αντλία θα διακινήσει κάποια ποσότητα νερού, μεταβάλλοντας την πλευστότητα του ψαριού και κάνοντάς το να κινηθεί κατακόρυφα. Την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή θα επαναληφθεί η ίδια διαδικασία, ώστε να φτάσει νέα τιμή τάσης στην αντλία, μιας και οι τιμές των μεταβλητών κατάστασης έχουν αλλάξει και κάποια διαφορετική τάση θα πρέπει

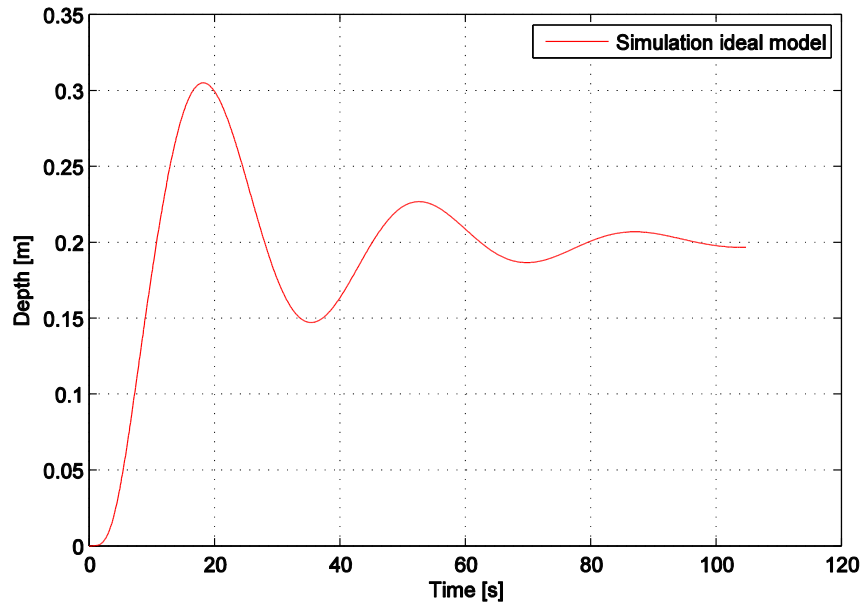
να εφαρμοστεί στην αντλία. Επαναλαμβάνοντας συνεχώς αυτή τη διαδικασία, κάποια στιγμή το ψάρι φτάνει στο επιθυμητό βάθος και να παραμείνει εκεί, εκτός και εάν η εντολή βάθους αλλάξει εκ νέου.

Στο Σχήμα 6-3 φαίνεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αρχικά για να γίνουν οι πρώτες δοκιμές. Αντί για το ψάρι χρησιμοποιήθηκε ένα κοινό φαγητοδοχείο (τάπερ). Η αντλία βρισκόταν έξω από το νερό και διακινούσε μέσω σωλήνων νερό στο τάπερ, ώστε αυτό να φτάσει στο επιθυμητό βάθος. Στην εικόνα φαίνεται επίσης το τροφοδοτικό, ο υπολογιστής, στον οποίο έφταναν οι μετρήσεις του βάθους και η ηλεκτρονική πλακέτα.



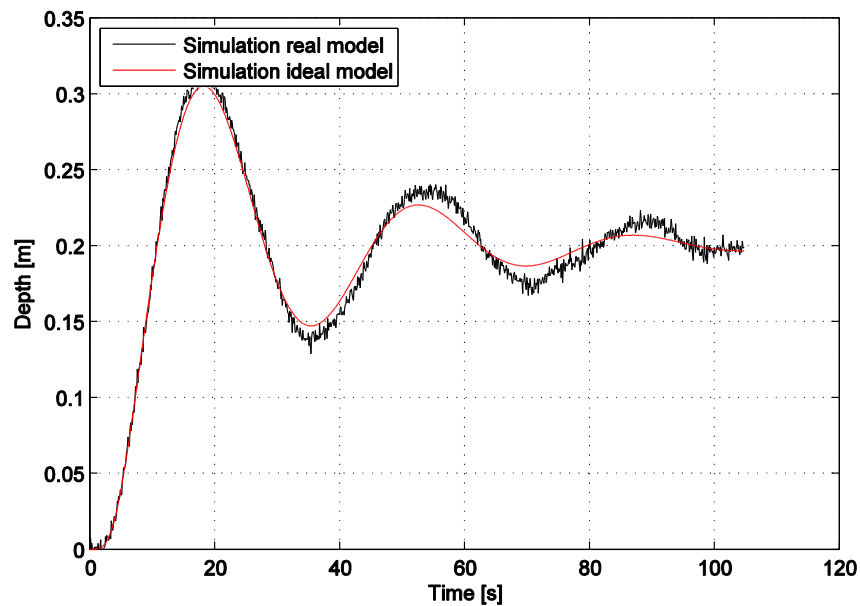
Σχήμα 6-3. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πρώτων δοκιμών.

Στη συνέχεια θα παρουσιασθούν αποτελέσματα για δύο διαφορετικές ομάδες κερδών. Η πρώτη ομάδα κερδών είναι $K_l = 1.4$, $K_h = 4.5$, $K_v = 40$, $K_\mu = 100$ και $K_{q_\mu} = 500$. Τα κέρδη αυτά προέκυψαν από μία πρώτη ρύθμιση της αρχικής ομάδας κερδών που ορίστηκε στην Παράγραφο 4.7. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται προοδευτικά, ξεκινώντας από το ιδανικό μοντέλο. Μετά, στο ίδιο γράφημα, παρουσιάζεται και η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του πραγματικού μοντέλου. Τέλος, στο ίδιο γράφημα προστίθεται και το πραγματικό πείραμα. Το επιθυμητό βάθος για το πείραμα είναι $h_{des} = 0.2 \text{ m}$. Ο έλεγχος κλειστού βρόχου πραγματοποιείται κάθε 0.1 s. Δηλαδή η τιμή της τάσης στους ακροδέκτες της αντλίας ανανεώνεται κάθε 0.1 s. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 6-4, 6-5 και 6-6.

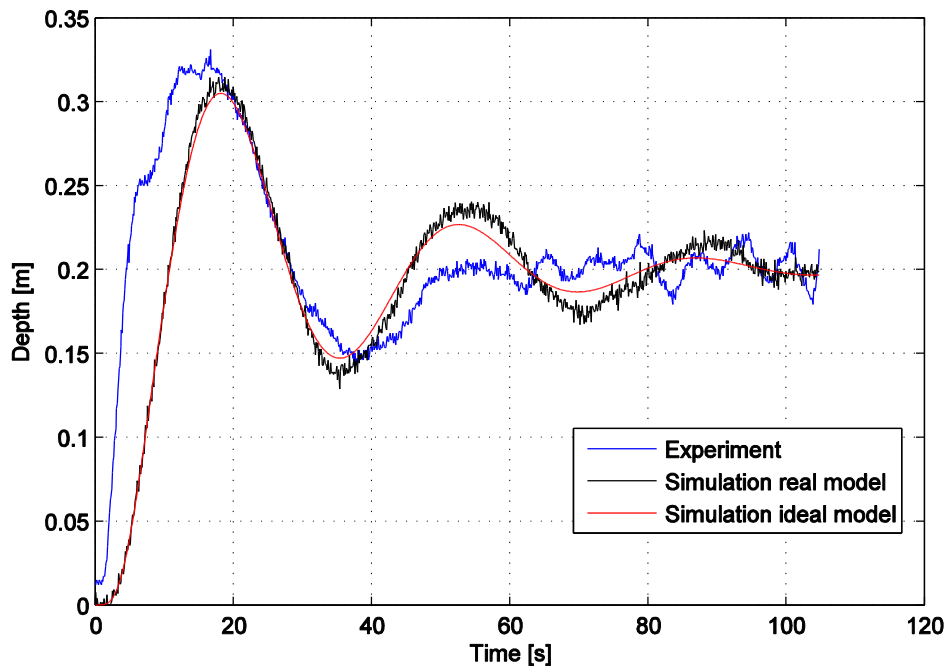


Σχήμα 6-4. Αποτελέσματα προσομοίωσης με το ιδανικό μοντέλο (ideal model).

Στο Σχήμα 6-4 φαίνεται με κόκκινο χρώμα η απόκριση του συστήματος με τα προαναφερόμενα κέρδη σύμφωνα με το ιδανικό μοντέλο (Simulation ideal model). Υπάρχει υπερακόντιση και αποσβενύμενη ταλάντωση έως το σύστημα να φτάσει στη μόνιμη κατάσταση και να σταθεροποιηθεί στο επιθυμητό βάθος, το οποίο είναι τα 0.2 m. Χρειάζεται περεταίρω ρύθμιση των κερδών, καθώς με αυτή την πρώτη ρύθμιση το σύστημα κάνει σχεδόν 90 s μέχρι να φτάσει στη μόνιμη κατάσταση.



Σχήμα 6-5. Προσθήκη προσομοίωσης με το πραγματικό μοντέλο (real model).



Σχήμα 6-6. Προσθήκη πειραματικού αποτελέσματος (experiment).

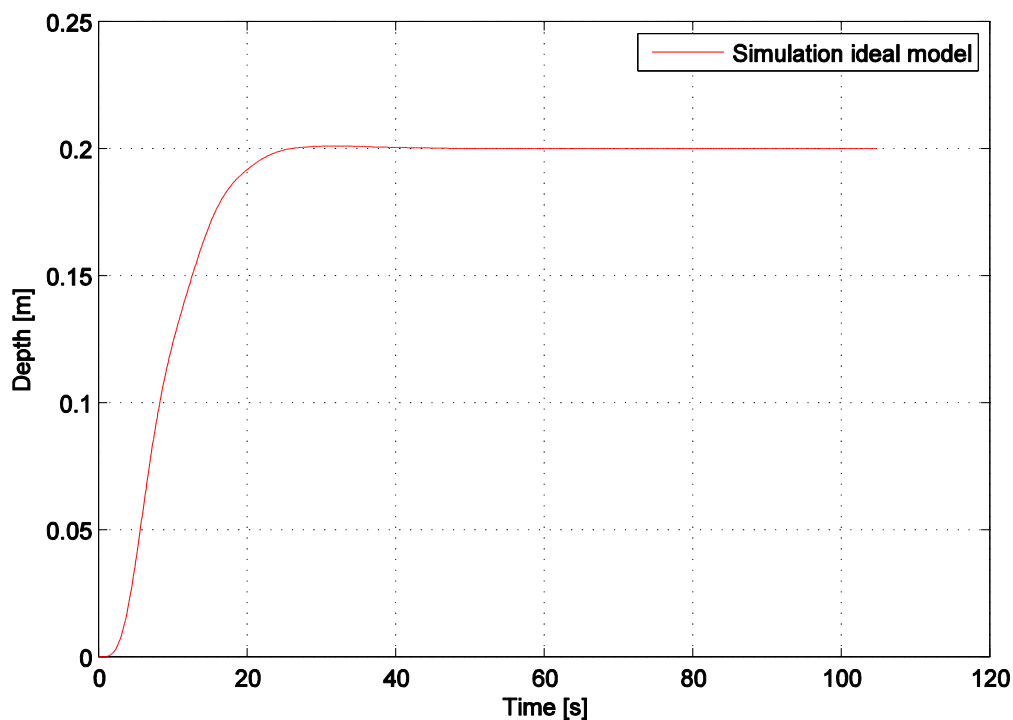
Στο Σχήμα 6-5, εκτός από την απόκριση του συστήματος σύμφωνα με το ιδανικό μοντέλο, έχει προστεθεί με μαύρο χρώμα και η απόκριση σύμφωνα με το πραγματικό μοντέλο (Simulation real model). Φαίνεται η απόκριση του συστήματος σύμφωνα με το πραγματικό μοντέλο μοιάζει αρκετά στη μορφή με την απόκριση του ιδανικού μοντέλου. Η απόκριση του πραγματικού μοντέλου όμως εμφανίζει θόρυβο λόγω της μοντελοποίησης του αισθητήρα πίεσης και των αριθμητικών παραγωγίσεων και ολοκληρώσεων. Επίσης παρατηρείται ελαφρώς μεγαλύτερο εύρος στην ταλάντωση.

Στο Σχήμα 6-6, υπάρχει επιπλέον με μπλε χρώμα και η απόκριση που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος (Experiment). Η πειραματική απόκριση φαίνεται ότι ακολουθεί τη μορφή που έχουν προβλέψει οι προσομοιώσεις. Δε συμπίπτει με μεγάλη ακρίβεια με αυτές, καθώς στην πραγματικότητα είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν και άλλα φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν την απόκριση και τα οποία δεν μοντελοποιήθηκαν. Στο σχήμα φαίνεται ότι στο πείραμα το ψάρι αρχικά καταδύεται γρηγορότερα απ ό,τι δείχνουν οι αποκρίσεις των προσομοιώσεων, μετά όμως φθάνει ελαφρώς ταχύτερα στη μόνιμη κατάσταση. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι η πειραματική απόκριση στη μόνιμη κατάσταση εμφανίζει μια μικρή ταλάντωση γύρω από το επιθυμητό βάθος. Γενικά όμως επαληθεύτηκε και με πείραμα ότι με τα συγκεκριμένα κέρδη, το ψάρι κάνει μία αποσβενύμενη ταλάντωση μέχρι να φτάσει στο επιθυμητό βάθος.

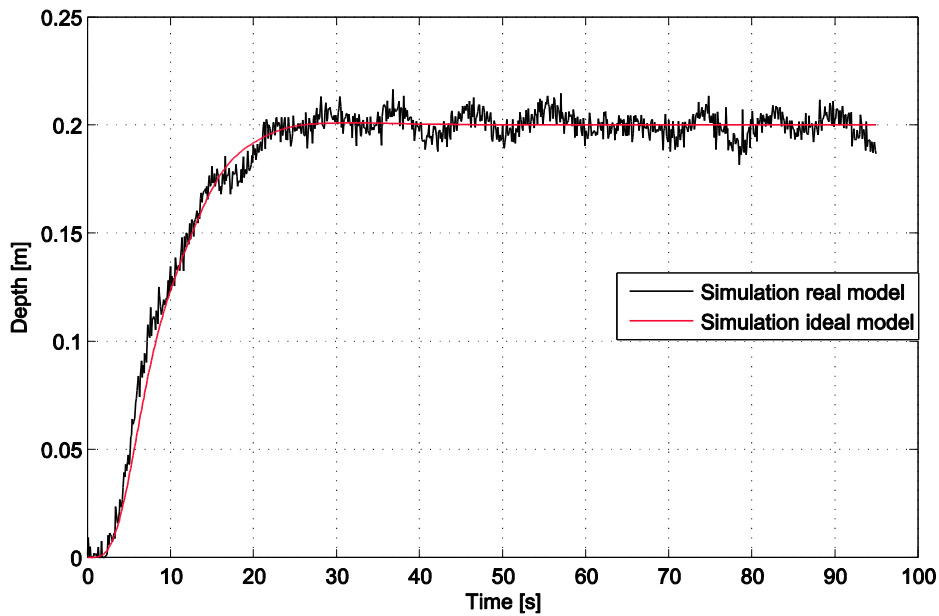
Μετά από αυτά τα αποτελέσματα φαίνεται ότι προσομοίωση σύμφωνα με το ιδανικό μοντέλο, η προσομοίωση σύμφωνα με το πραγματικό μοντέλο και το πείραμα

συμφωνούν μεταξύ τους. Θα πρέπει όμως να βελτιωθεί η απόκριση του συστήματος. Αν είναι δυνατόν θα πρέπει να μην υπάρχει υπερακόντιση και το σύστημα να φτάνει στη μόνιμη κατάσταση πιο γρήγορα. Για τον λόγο αυτό έγινε μία δεύτερη ρύθμιση κερδών. Αποφασίστηκε να αλλάξει το κέρδος K_h . Πιο συγκεκριμένα, όπως παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 4.7 και φαίνεται και στο Σχήμα 4-7, αν αυξηθεί λίγο το κέρδος K_h , φαίνεται ότι το φανταστικό μέρος των πόλων που βρίσκονται δεξιά θα μειωθεί ενώ παράλληλα οι άλλοι πόλοι δεν θα μετακινηθούν πολύ προς τα αριστερά. Για το λόγο αυτόν το κέρδος K_h αυξήθηκε και από 4.5 που ήταν πριν, έγινε 13.

Επομένως η δεύτερη ομάδα κερδών μετά την επιπλέον ρύθμιση είναι $K_I = 1.4$, $K_h = 13$, $K_v = 40$, $K_\mu = 100$ και $K_{q_\mu} = 500$. Το επιθυμητό βάθος για το πείραμα είναι και πάλι $h_{des} = 0.2 \text{ m}$ και ο έλεγχος κλειστού βρόχου πραγματοποιείται κάθε 0.1 s, όπως και στο προηγούμενο πείραμα. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με τις ίδιες αρχικές συνθήκες όπως και πριν, δηλαδή στην αρχή του πειράματος είχε ελαφρώς θετική πλευστότητα και επέπλεε στην επιφάνεια του νερού. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 6-7, 6-8 και 6-9.

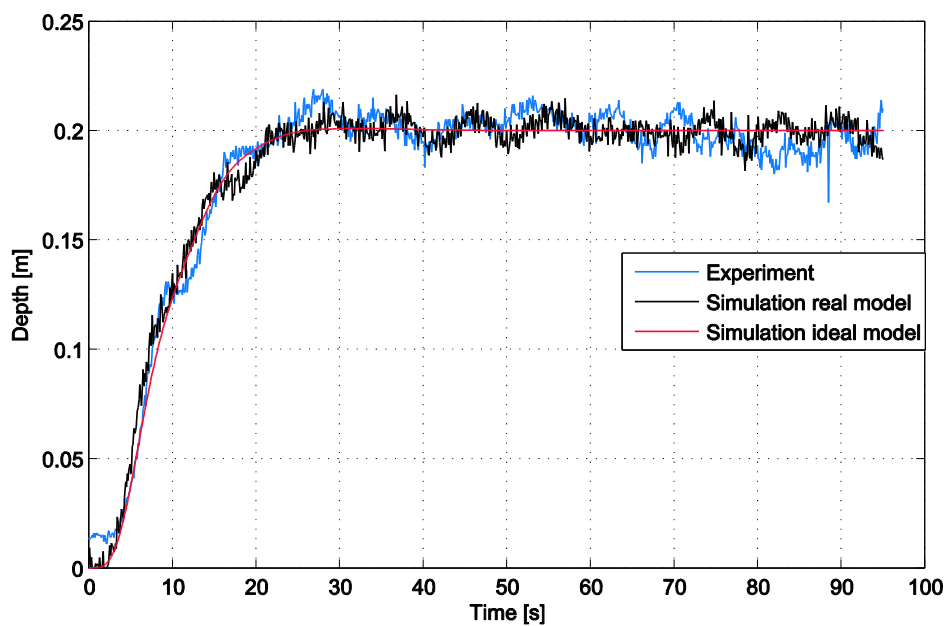


Σχήμα 6-7. Αποτελέσματα προσομοίωσης με το ιδανικό μοντέλο (ideal model).



Σχήμα 6-8. Προσθήκη προσομοίωσης με το πραγματικό μοντέλο (real model).

Στο Σχήμα 6-7 φαίνεται με κόκκινο χρώμα η απόκριση του συστήματος με τα προαναφερόμενα κέρδη σύμφωνα με το ιδανικό μοντέλο (Simulation ideal model). Η επιπλέον ρύθμιση των κερδών που έγινε ήταν πολύ αποτελεσματική, καθώς τώρα η υπερακόντιση είναι πρακτικά μηδενική. Η απόκριση φτάνει στη μόνιμη κατάσταση μετά από περίπου 20 s και παραμένει στο επιθυμητό βάθος.



Σχήμα 6-9. Προσθήκη πειραματικού αποτελέσματος (experiment).

Στο Σχήμα 6-8, έχει προστεθεί με μαύρο χρώμα και η απόκριση σύμφωνα με το πραγματικό μοντέλο (Simulation real model). Η απόκριση του συστήματος σύμφωνα με το πραγματικό μοντέλο μοιάζει πολύ στη μορφή με την απόκριση του ιδανικού μοντέλου. Η κύρια διαφορά εκτός από την ύπαρξη θορύβου είναι ότι η απόκριση σύμφωνα με το πραγματικό μοντέλο στη μόνιμη κατάσταση δεν είναι σταθερή στα 0.2 m, αλλά κάνει μία μικρή ταλάντωση γύρω από το επιθυμητό βάθος. Αυτό συμβαίνει στο πραγματικό μοντέλο, στο οποίο έχουν προστεθεί τα μη γραμμικά φαινόμενα που λείπουν από το ιδανικό μοντέλο. Επομένως, από αυτό βγαίνει το συμπέρασμα ότι με τα εξαρτήματα και τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του ελέγχου βάθους, το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα που μπορεί να προκύψει στην πραγματικότητα, είναι στη μόνιμη κατάσταση το βάθος να ταλαντώνεται ελάχιστα γύρω από την επιθυμητή τιμή του βάθους, και να μην είναι τελείως σταθερό στην επιθυμητή τιμή. Μεγάλο ενδιαφέρον επομένως έχει να φανεί κατά πόσο το σύστημα στην πραγματικότητα έχει φτάσει αυτά τα όρια βέλτιστης λειτουργίας.

Στο Σχήμα 6-9, υπάρχει επιπλέον με μπλε χρώμα και η απόκριση που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος (Experiment). Η απόκριση αυτού του πειράματος ακολουθεί πολύ πιστά τις 2 προσομοιώσεις, σε σχέση με την πειραματική απόκριση του Σχήματος 6-6 στην οποία υπήρχε κάποια απόκλιση με τις προσομοιώσεις. Στη μόνιμη κατάσταση όντως εμφανίζεται κάποια μικρή ταλάντωση, όπως προέβλεψε η προσομοίωση με το πραγματικό μοντέλο. Επίσης, σε πρώτη προσέγγιση φαίνεται ότι το πραγματικό σύστημα έχει φτάσει πολύ κοντά στα όρια βέλτιστης λειτουργίας, καθώς μόνο σε κάποιες περιπτώσεις το εύρος της ταλάντωσης της πειραματικής απόκρισης ξεπερνά το εύρος ταλάντωσης της προσομοίωσης του πραγματικού μοντέλου. Το γεγονός ότι δεν συμπίπτουν απόλυτα η προσομοίωση του πραγματικού μοντέλου και η πειραματική απόκριση, οφείλεται στο ότι αφενός κάποια πράγματα είναι αδύνατον να προσομοιωθούν ακριβώς όπως συμβαίνουν στην πραγματικότητα (όπως για παράδειγμα ο θόρυβος του αισθητήρα) και αφετέρου ότι όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, πιθανόν υπάρχουν και άλλα φαινόμενα που δεν παρατηρήθηκαν, ή ακόμη και αυτά που παρατηρήθηκαν, δεν ήταν δυνατόν να προσομοιωθούν τέλεια.

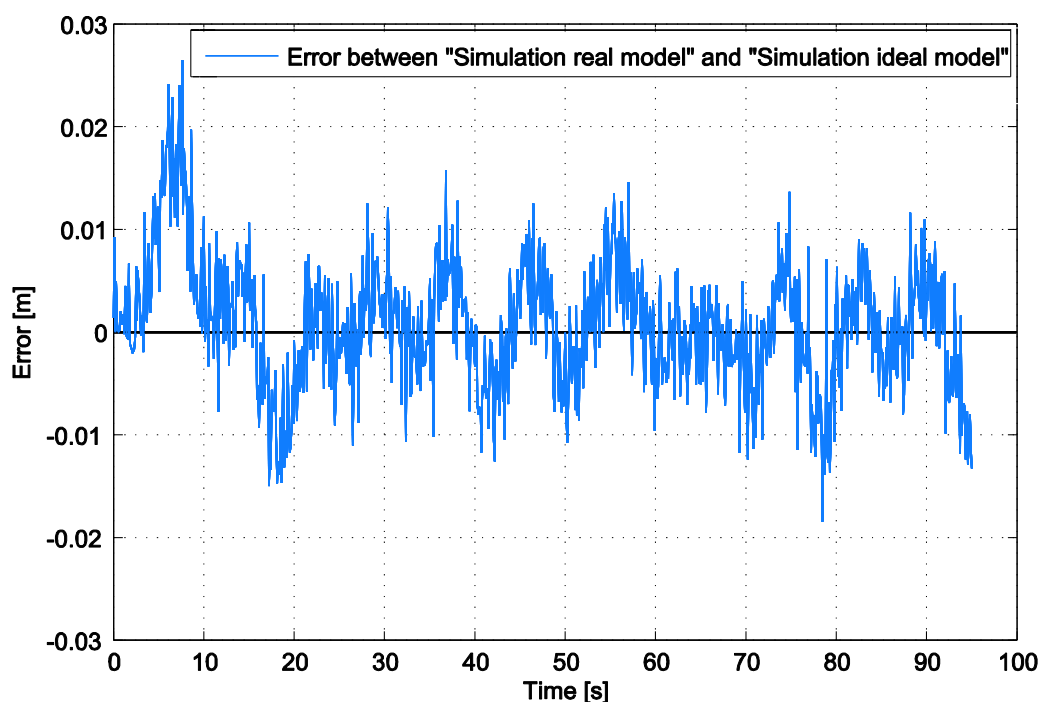
6.3 Σφάλματα μεταξύ των αποκρίσεων

Για να γίνει καλύτερη ανάλυση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 6.2, θα πρέπει να εξετασθεί το εύρος απόκλισης που έχουν μεταξύ τους οι αποκρίσεις των αποτελεσμάτων με την τελευταία ομάδα κερδών.

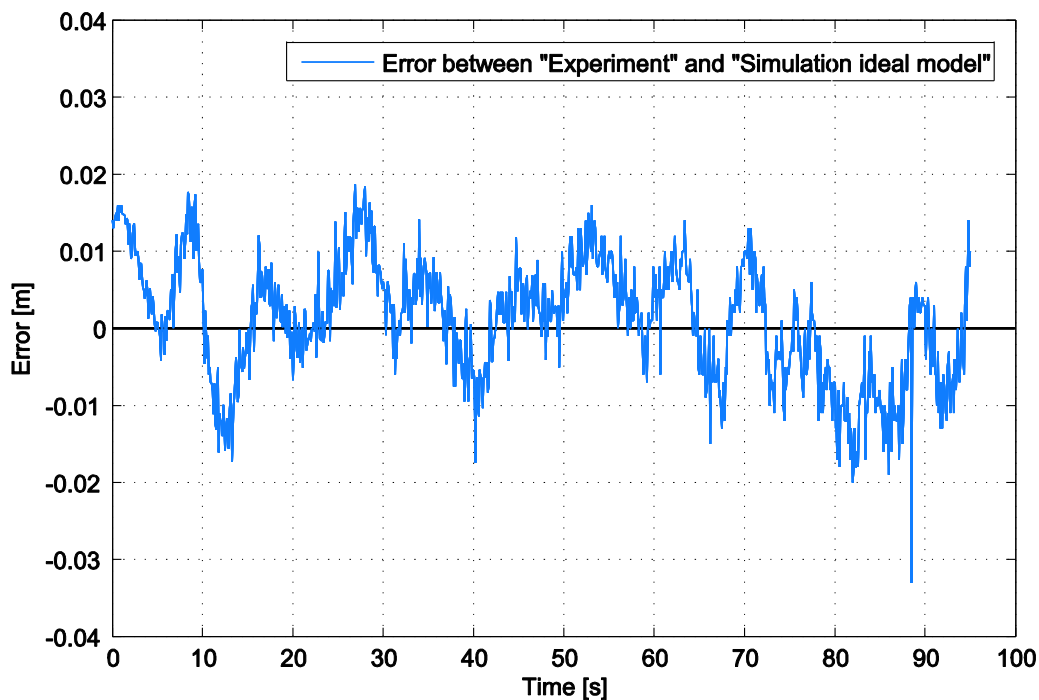
Έτσι, στο Σχήμα 6-10 παρουσιάζεται το σφάλμα (απόκλιση) μεταξύ του αποτελέσματος της προσομοίωσης του πραγματικού μοντέλου (Simulation real model)

και του αποτελέσματος της προσομοίωσης του ιδανικού μοντέλου (Simulation ideal model) που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 6-8. Από το Σχήμα 6-10 φαίνεται ότι σφάλμα μεταξύ των δύο αποκρίσεων στη μόνιμη κατάσταση (μετά τα 20 s) κυμαίνεται σε ένα εύρος $\pm 0.015 m$, ενώ μέσα στα πρώτα 10 s το σφάλμα φτάνει για λίγο περίπου μέχρι τα $+ 0.025 m$

Στο Σχήμα 6-11 παρουσιάζεται το σφάλμα μεταξύ του αποτελέσματος του πειράματος (Experiment) και του αποτελέσματος της προσομοίωσης του ιδανικού μοντέλου (Simulation ideal model) που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 6-9. Το σφάλμα μεταξύ των δύο αποκρίσεων σε όλη τη διάρκεια του πειράματος κυμαίνεται και εδώ ως επί το πλείστον σε ένα εύρος $\pm 0.015 m$. Μόνο κοντά στα 90 s το σφάλμα ακαριαία ξεπερνά τα $- 0.03 m$. Πιθανόν αυτή η μέτρηση να αποτελεί σφάλμα του αισθητήρα πίεσης, λόγω της ακαριαίας αλλαγής βάθους που φαίνεται να πραγματοποιείται.



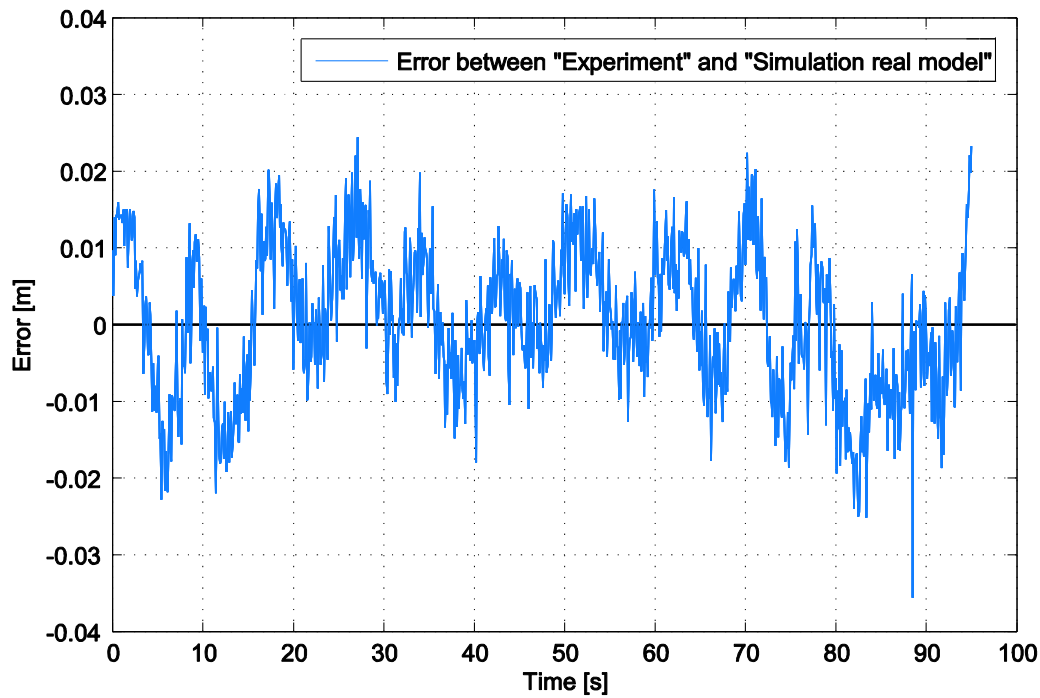
Σχήμα 6-10. Σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του πραγματικού μοντέλου και της προσομοίωσης του ιδανικού μοντέλου.



Σχήμα 6-11. Σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων του πειράματος και της προσομοίωσης του ιδανικού μοντέλου

Επομένως από το γεγονός ότι και στις δύο περιπτώσεις το σφάλμα κυμαίνεται στο εύρος $\pm 0.015 \text{ m}$ προκύπτει το συμπέρασμα ότι το πραγματικό σύστημα που κατασκευάστηκε έχει φτάσει και λειτουργεί με τη βέλτιστη δυνατή απόκριση. Το εύρος σφάλματος $\pm 0.015 \text{ m}$ από το επιθυμητό βάθος είναι πολύ καλό, δεδομένου ότι η μηχανοτρονική διάταξη αποτελείται από εξαρτήματα πολύ χαμηλού κόστους, άρα και σχετικά χαμηλής ποιότητας. Άλλωστε, μπορεί τα πειράματα να έγιναν με επιθυμητό βάθος τα 0.2 m , όμως αυτό έγινε λόγω του περιορισμένου βάθους της δεξαμενής στην οποία έγιναν τα πειράματα. Το ψάρι θα μπορούσε να καταδυθεί σε μεγαλύτερα βάθη και πάλι το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση θα κυμαίνεται στο ίδιο εύρος. Επομένως σε μεγαλύτερα βάθη ένα σφάλμα αυτής της τάξης είναι αμελητέο.

Τέλος, στο Σχήμα 6-12 παρουσιάζεται το σφάλμα μεταξύ του αποτελέσματος του πειράματος (Experiment) και του αποτελέσματος της προσομοίωσης του πραγματικού μοντέλου (Simulation real model) που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 6-9. Το σφάλμα μεταξύ των δύο αποκρίσεων σε αυτή την περίπτωση έχει εύρος $\pm 0.02 \text{ m}$.



Σχήμα 6-12. Προσθήκη πειραματικού αποτελέσματος (experiment).

Δηλαδή είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Αυτό όμως είναι λογικό, γιατί μπορεί το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του πραγματικού μοντέλου και το αποτέλεσμα του πειράματος να έχουν σφάλμα $\pm 0.015 \text{ m}$ σε σχέση με το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του ιδανικού μοντέλου, αλλά για τους λόγους που αναφέρθηκαν στο τέλος της Παραγράφου 6.2, αυτές οι δύο αποκρίσεις σε δε συμπίπτουν απόλυτα. Επομένως υπάρχουν σημεία μου για παράδειγμα η μία απόκριση μπορεί να έχει σφάλμα $+ 0.01 \text{ m}$ και η άλλη $- 0.01 \text{ m}$. Έτσι συνολικά η διαφορά τους να είναι $- 0.02 \text{ m}$.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

7.1 Συμπεράσματα

Ένα ρομποτικό ψάρι, για να μπορέσει να λειτουργήσει όπως ένα αληθινό, και να έχει ελευθερία κινήσεων ως προς το βάθος, θα πρέπει οπωσδήποτε να έχει ένα υποσύστημα υπεύθυνο για τον αποτελεσματικό έλεγχο βάθους του.

Αρχικά, στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν πρώτα οι ήδη υπάρχουσες εργασίες γύρω από το θέμα. Από την μελέτη αυτή όμως, τα συμπεράσματα δεν ήταν ιδιαίτερα υποβοηθητικά. Αποφασίσθηκε να υλοποιηθεί στατικός έλεγχος βάθους, λόγω του μεγάλου πλεονεκτήματός του, το οποίο είναι η ικανότητα αλλαγής του βάθους και διατήρησής του χωρίς την απαραίτητη κίνηση στο οριζόντιο επίπεδο. Καθώς δεν υπήρχε κάποια μέθοδος που να αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα, αποφασίσθηκε να σχεδιαστεί ένα καινοτομικό σύστημα, το οποίο δεν είχε χρησιμοποιηθεί ποτέ ξανά. Η μέθοδος χρησιμοποιεί μια αντλία συνεχούς ρεύματος ώστε να διακινήσει με σωστό τρόπο ποσότητες νερού προς το εσωτερικό ή το εξωτερικό του ψαριού και να επιτύχει στατικό έλεγχο βάθους.

Ξεκινώντας την εργασία, αναπτύχθηκαν συστηματικά οι δυναμικές εξισώσεις, και λήφθηκαν τα κατάλληλα μέτρα ώστε να λυθούν τα προβλήματα και οι δυσκολίες που προέκυψαν. Μετά από τις απαραίτητες διαδικασίες, προέκυψε ένα γραμμικό σύστημα, με τη βοήθεια του οποίου σχεδιάστηκε ο ελεγκτής. Αργότερα, με λίγα απαραίτητα πειράματα, έγινε δυνατός ο προσδιορισμός των παραμέτρων που χρειαζόνταν ώστε το μοντέλο να είναι πλήρες. Για τον έλεγχο του βάθους, σχεδιάστηκε έλεγχος ανάδρασης όλων των μεταβλητών κατάστασης. Αυτό όμως δεν ήταν αρκετό όπως φάνηκε, καθώς δεν μπορούσε να απορρίψει τις διαταραχές. Έτσι, ενσωματώθηκε ένας ολοκληρωτής σφάλματος, φέρνοντας τα επιθυμητά αποτελέσματα, όπως φάνηκε αρχικά στις προσομοιώσεις.

Για την πραγματοποίηση ακριβέστερων προσομοιώσεων, ήταν απαραίτητη η ενσωμάτωση όλων των φαινομένων που συνέβαιναν στην πραγματικότητα αλλά ήταν πολύ δύσκολο να μοντελοποιηθούν. Έτσι, ήταν δυνατή μια πιο ρεαλιστική εικόνα της απόκρισης που θα είχε το σύστημα. Τα φαινόμενα αυτά οφείλονται κατά κύριο λόγο στην επιλογή εξαρτημάτων χαμηλού κόστους, άρα και σχετικά χαμηλής ποιότητας, γεγονός το οποίο έφερε πολλές δυσκολίες και μετέτρεψε το εγχείρημα σε αληθινή πρόκληση, μιας και το να υλοποιηθεί έλεγχος βάθους, ο οποίος συνήθως είναι αρκετά ακριβός στην υλοποίηση, επιχειρήθηκε να πραγματοποιηθεί με πολύ χαμηλό κόστος.

Αρκετά σύνθετη αποδείχτηκε η υλοποίηση της μηχανοτρονικής διάταξης, καθώς για να λειτουργήσει ο ελεγκτής υπήρχε η απαίτηση μέτρησης σε πραγματικό χρόνο όλων των μεταβλητών κατάστασης. Για να γίνει αυτό, έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος ώστε να μετρούνται οι στροφές της αντλίας, πράγμα που αποδείχτηκε πολύ δύσκολο, λόγω της κατασκευής της αντλίας. Όταν τελικά κατέστη δυνατό αυτό και η μηχανοτρονική διάταξη ήταν έτοιμη, έμενε ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή. Σε αυτό το στάδιο επιλέχθηκαν οι κατάλληλες αριθμητικές μέθοδοι για τον υπολογισμό των παραγώγων και των ολοκληρωμάτων και συντάχθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού C που πραγματοποιούσε τις πράξεις του ελεγκτή. Σημαντικό κομμάτι της σύνταξης του κώδικα αποτέλεσε η δημιουργία ρουτινών που αντισταθμίζουν μη γραμμικότητες του συστήματος που παρατηρούνται στην πραγματικότητα, καθώς και η δημιουργία ρουτίνας για την ρύθμιση του αισθητήρα στην αρχή του κάθε πειράματος.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα με επιτυχία, με τη συμπεριφορά που είχαν προβλέψει οι προσομοιώσεις, κάτι που επαλήθευσε την ορθότητα της εργασίας και σφράγισε με επιτυχία το εγχείρημα του ελέγχου βάθους με αυτή την καινοτομική μέθοδο στατικού ελέγχου.

Συμπερασματικά, ο απαιτούμενος έλεγχος βάθους υλοποιήθηκε με επιτυχία καθώς ικανοποιήθηκαν όλα τα κριτήρια που είχαν τεθεί ως στόχος, αρχικά. Αποδείχθηκε ότι είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί έλεγχος βάθους με πολύ χαμηλό κόστος και μέσω σωστής ανάλυσης και σχεδιασμού ελεγκτή να έχει μία αξιοζήλευτη απόκριση, παρά την ποιότητα των εξαρτημάτων που συνθέτουν τη μηχανοτρονική διάταξη.

7.2 Μελλοντική εργασία

Καθώς περνά ο καιρός, η τεχνολογία αναπτύσσεται συνεχώς και προϊόντα υψηλής τεχνολογίας γίνονται διαθέσιμα στην αγορά σε όλο και χαμηλότερο κόστος. Οπότε, μελλοντικά θα είναι πιθανόν δυνατό να βρεθούν εξαρτήματα καλύτερης ποιότητας και ακρίβειας χωρίς να μεγαλώσει αισθητά το κόστος. Ειδικά για τον αισθητήρα πίεσης ίσως θα μπορούσε να βρεθεί κάποιος φθηνός απόλυτος αισθητήρας πίεσης με το συγκεκριμένο εύρος μετρήσεων βάθους, κάτι που την στιγμή που συντάχθηκε η παρούσα εργασία, δεν υπήρχε στο εμπόριο. Ακόμα καλύτερα, ίσως να ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ένας τέτοιος αισθητήρας και επιπλέον να είναι ψηφιακός και όχι αναλογικός, ώστε να μειωθεί ο θόρυβος στις μετρήσεις.

Όσο αφορά την αντλία, θα μπορούσε να βρεθεί κάποια καλύτερη αντλία, με καλύτερη και πιο ομαλή λειτουργία, καθώς και με ενσωματωμένη αυξητική παλμογεννήτριας, σε χαμηλή τιμή, κάτι που δεν βρέθηκε στην αγορά τη δεδομένη στιγμή.

Μία άλλη σκέψη είναι να κατασκευαστεί μία ακόμη μικρότερη αντλία, με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, ώστε να εξοικονομηθεί χώρος μέσα στο ρομποτικό ψάρι, καθώς είναι πολύτιμος και πολύ περιορισμένος.

Από άποψη ελέγχου, θα μπορούσε να γίνει μη γραμμικός adaptive έλεγχος, ώστε ο ελεγκτής να προσαρμόζεται ανάλογα όταν κάποιες παράμετροι αλλάζουν έστω και λίγο και με αυτό τον τρόπο ο ελεγκτής να είναι σε θέση να ανταποκριθεί καλύτερα στο πραγματικό σύστημα, που αποτελείται από αρκετές μη γραμμικότητες, βελτιώνοντας ακόμη περισσότερο την απόκριση στη μόνιμη κατάσταση.

Βιβλιογραφία

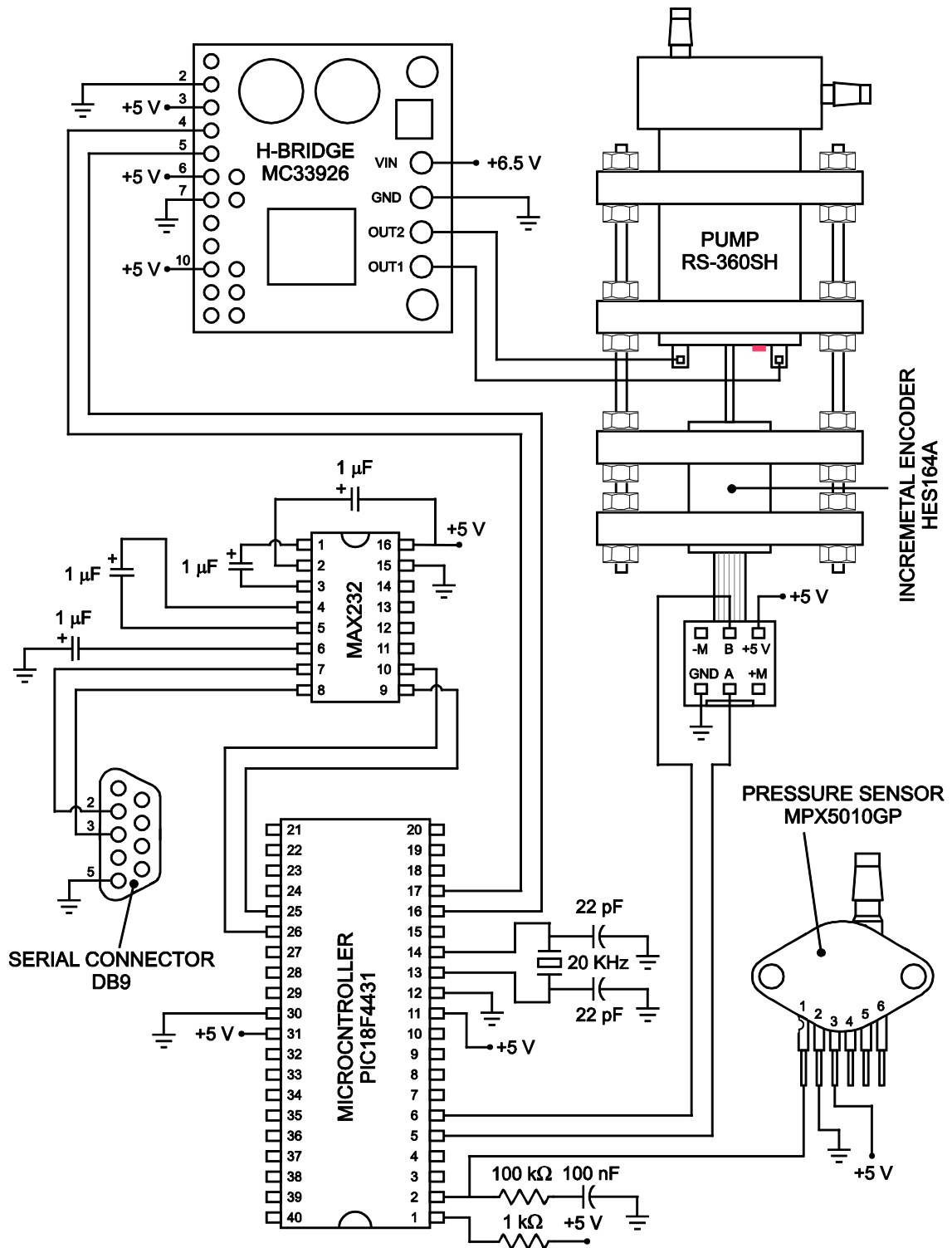
- [1] Barnett Richard H., O’Cull Larry and Cox Sarah, “Embedded C Programming and the AVR”, 2nd Edition, Delmar, Cengage Learning, 2007.
- [2] Detweiler Carrick, Sosnowski Stefan, Vasilescu Iuliu, and Rus Daniela, “Saving Energy with Buoyancy and Balance Control for Underwater Robots with Dynamic Payloads,” *Experimental Robotics, Springer Tracts in Advanced Robotics*, Volume 54, 2009, pp. 429-438.
- [3] Dorf Richard C. and Bishop Robert H., “Modern Control Systems”, 12th Edition, Pearson Prentice Hall, 2011.
- [4] Douglas John F., Gasiorek Janusz M., Swaffield John A. and Jack Lynne B., “Fluid Mechanics”, 5th Edition, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [5] Inoue Tomotaka, Shibuya Koji and Nagano Akinori, “Underwater Robot with a Buoyancy Control System Based on the Spermaceti Oil Hypothesis - Development of the Depth Control System,” *IEEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2010, Taipei, Oct. 2010, pp. 1102-1107.
- [6] Karris Steven T., “Introduction to Simulink with Engineering Applications”, 1st Edition, Orchard, 2006.
- [7] Lee Pei-Jun, Lee Meng-Shiue, and Wang Ruei-Chan, “A Fuzzy Control Based Robotic Fish with Multiple Actuators,” *International Journal of Fuzzy Systems*, Vol. 14, No. 1, March 2012, pp. 45-53.
- [8] Maalouf D., Tamanaja I., Campos E., Chemori A., Creuze V., Torres J. and Lozano R., “From PD to Nonlinear Adaptive Depth-Control of a Tethered Autonomous Underwater Vehicle,” *IFAC Joint Conference 2013, 5th Symposium on System Structure and Control*, Grenoble, France, 2013.
- [9] Noh Maziyah Mat, Arshad Mohd Rizal and Mokhtar Rosmiwati Mohd, “Depth and pitch control of USM underwater glider: performance comparison PID vs. LQR,”

Indian Journal of Geo-Marine Sciences (IJMS) NISCAIR-CSIR, India, Apr. 2011, volume 40, pp. 200-206.

- [10] Nise Norman S., "Control Systems Engineering", 6th Edition, Wiley, 2011.
- [11] Niu Chuanmeng, Zhang Lige, Bi Shusheng and Cai Yueri, "Development and Depth Control of a Robotic Fish Mimicking Cownose Ray," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, December 2012, Guangzhou, China, pp. 814-818.
- [12] Ogata Katsuhiko, "Modern Control Engineering", 4th Edition, Prentice Hall, 2002.
- [13] Ogata Katsuhiko, "System Dynamics", 4th Edition, Pearson Prentice Hall, 2004.
- [14] Palm William J. III, "System Dynamics", 2nd Edition, McGraw-Hill, 2010.
- [15] Palstra Arjan P. and Planas Josef V., "Swimming Physiology of Fish", Springer, 2013.
- [16] Riedel Jeffery S., Healey Anthony J., Marco David B. and Beyazay Bahadir, "Design and Development of Low Cost Variable Buoyancy System for the Soft Grounding of Autonomous Underwater Vehicles," *International Symposium on Unmanned untethered submersible technology*, 1999, p. 427-438.
- [17] Rowell Derek and Wormley David N., "Introduction to System Dynamics", 1st Edition, Prentice Hall, 1996.
- [18] Shawn Y., Woods A., Bauer Robert J. and Seto Mae L., "Automated Ballast Tank Control System for Autonomous Underwater Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Volume 37, Issue 4, August 2012, pp 727-739.
- [19] Sumantri Bambang, Karsiti Mohd. Noh, "Development of variable ballast mechanism for depth positioning of spherical URV," *International Symposium on ITS Information Technology*, Aug. 2008 Kuala Lumpur, Malaysia, Volume 4, pp.1-6.
- [20] Thuan Le Minh, Thinh Nguyen Truong, Phuong Nguyen Ngoc, "Study of Artificial Fish Bladder System for Robot Fish," *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, December 2011, Phuket, Thailand, pp. 2126-2130.

- [21] Truong Nguyen Thinh, Phuong Nguyen Ngoc, Minh-Nhat Dang “Swimming of Robotic Fish based Biologically-Inspired approach”, *Proceedings of the 2011 International Conference on Control, Automation and Systems*, October 2011, Gyeonggi-do, Korea, pp. 625-630.
- [22] Videler John. J., “Fish Swimming”, 1st Edition, Chapman & Hall, 1993.
- [23] Van de Weyer Matthias, “Depth Control of an underwater Robot”, *Bachelor Thesis*, Institute of Parallel and Distributed Systems, University of Stuttgart, Germany.
- [24] Wuhrmann Thomas, “Design of a Diving System for a Robotic Fish”, *Bachelor Thesis*, Autonomous Systems Lab, ETH, Spring Term 2009, Zurich, Switzerland.
- [25] Zhang Feitian, Thon John, Thon Cody and Tan Xiaobo, “Miniature Underwater Glider: Design, Modeling, and Experimental Results,” *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, (ICRA 2012), River Centre, Saint Paul, Minnesota, USA, May 2012, pp. 4904-4910.
- [26] Zhang Le, Zhao Wei, Hu Yonghui, Zhang Dandan, and Wang Long, “Development and Depth Control of Biomimetic Robotic Fish,” *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA, Oct 29 - Nov 2, 2007, pp. 3560-3565.
- [27] Zhao Whei, Yu Junzhi, Fang Yiming, and Wang Long, “Development of Multi-mode Biomimetic Robotic Fish Based on Central Pattern Generator,” *Proc. IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 9-15, 2006, Beijing, China, p.3891-3896.

Παράρτημα Α: Συνδεσμολογία μηχανοτρονικής διάταξης



Παράρτημα Γ: Κώδικας σε γλώσσα C

```
#include <18F4431.h>
#device adc=10
#include <math.h>

#FUSES NOWDT //No Watch Dog Timer
#FUSES WDT128 //Watch Dog Timer uses 1:128 Postscale
#FUSES HS //High speed Osc (> 4mhz for PCM/PCH) (>10mhz for PCD)
#FUSES NOPROTECT //Code not protected from reading
#FUSES IESO //Internal External Switch Over mode enabled
#FUSES NOBROWNOUT //No brownout reset
#FUSES BORV27 //Brownout reset at 2.7V
#FUSES NOPUT //No Power Up Timer
#FUSES NOCPD //No EE protection
#FUSES STVREN //Stack full/underflow will cause reset
#FUSES NODEBUG //No Debug mode for ICD
#FUSES NOLVP //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18) used for I/O
#FUSES NOWRT //Program memory not write protected
#FUSES NOWRTD //Data EEPROM not write protected
#FUSES FCMEN //Fail-safe clock monitor enabled
#FUSES NOWINEN //WDT Timer Window Disabled
#FUSES T1LOWPOWER //Timer1 low power operation when in sleep
#FUSES HPOL_HIGH //High-Side Transistors Polarity is Active-High (PWM 1,3,5 and 7)
//PWM module high side output pins have active high output polarity
#FUSES NOWRTC //configuration not registers write protected
#FUSES NOWRTB //Boot block not write protected
#FUSES NOEBTR //Memory not protected from table reads
#FUSES NOEBTRB //Boot block not protected from table reads
#FUSES NOCPB //No Boot Block code protection
#FUSES LPOL_HIGH //Low-Side Transistors Polarity is Active-High (PWM 0,2,4 and 6)
//PWM module low side output pins have active high output polar
#FUSES NOPWMPIN //PWM outputs drive active state upon Reset
#FUSES MCLR //Master Clear pin enabled
#FUSES FLTAC1 //FLTA input is multiplexed with RC1
#FUSES SSP_RC //SCK/SCL=RC5, SDA/SDI=RC4, SDO=RC7
#FUSES PWM4B5 //PWM4 output is multiplexed on RB5
#FUSES EXCLKC3 //TMR0/T5CKI external clock input is muliplexed with RC3

#use delay(clock=2000000)
#use rs232(baud=115200,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8,STOP=1,ERRORS)
// Edw allazei kaneis to baud rate gia ti seiriaki an xreiastei
#byte TRISC=0x94
#byte QEICON = 0xFB6 // Quadrature Encoder Interface control REGISTER
```

```

#byte DFLTCON = 0xF60           // Digital filter control REGISTER
#byte POSCNTH = 0xF67          // Position REGISTER high byte
#byte POSCNTL = 0xF66         // Position REGISTER low byte
#bit QEICONDIR=0xFB6.5

// ----- ORISMOS METAVLITWN -----

int16 ADC_1_a=0;               // Orismos kai arxikopoiisi tw n 10 simeiw n
int16 ADC_1_b=0;               // kai tis metavlitis pou tha einai o mesos oros
int16 ADC_1_c=0;
int16 ADC_1_d=0;
int16 ADC_1_e=0;
int16 ADC_1_f=0;
int16 ADC_1_g=0;
int16 ADC_1_h=0;
int16 ADC_1_i=0;
int16 ADC_1_j=0;
int16 AD_Ch_2_1 = 0;

// Orismos kai arxikopoiisi metavlitwn

unsigned int8 pwm=0;
volatile float epith_vathos=0.2; // epithumito vathos psariou
volatile float error=0.0;
volatile float error0=0.0;
volatile float error1=0.0;
volatile float oloklirwma=0.0;
volatile float integ=0.0;
volatile float integral=0.0;
volatile float ioros=0.0;
volatile float u=0.0;           // Teliki Tasi pou feugei apo to H-bridge
volatile float uh=0.0;
volatile float paroxi=0.0;
volatile float taxitita=0.0;
volatile float maza=0.0;
volatile float maz1=0.0;
volatile float maz2=0.0;
volatile float maz3=0.0;
volatile float maz4=0.0;
volatile float tas=0.0;
volatile float D=0.000057;
volatile float diaf0=0.0;
volatile float diaf1=0.0;
volatile float diaf2=0.0;
volatile float volt1=0.0;

```

```

volatile float vathos1=0.0;
volatile float vathos2=0.0;
volatile float vathos3=0.0;
volatile float vathos4=0.0;
int8 flag=0;
volatile float volt_epith_integer=0.0;
volatile signed int16 sfalma=0;
volatile float arxikop=0.0;
volatile unsigned int16 ADC_arxikop=0;
volatile signed int16 counts1=0;
volatile signed int16 counts2=0;
volatile signed int16 counts3=0;
volatile signed int16 counts4=0;

volatile float KI=1.2;
volatile float Kh=13;
volatile float Ku=40.0;
volatile float Km=100.0;
volatile float Kq=500.0;

volatile float an_olok1=0.0;

// ----- ORISMOS 8BITA KAI 16BITA -----

union
{
    INT8 bytes[2];
    INT16 word;
} position_UNION;

// ----- SUNARTISI METRISEIS -----

// Edw ginontai oles oi apaitoumenes olisthiseis gia tous upologismous
// kathws kai o mesos oros twn metrisewn tou vathous gia tin aporipsi tou thoruvou

float metriseis1(){

    vathos4=vathos3;           // olisthiseis stis times tou vathous
    vathos3=vathos2;           // xreiazontai gia ton upologismo tis taxutitas
    vathos2=vathos1;

    counts4=counts3;           // olisthiseis stis times twn counts tou encoder
    counts3=counts2;           // xreiazontai gia ton upologismo tis paroxis

```

```

counts2=counts1;

error1=error0;
ioros=integral;

delay_us(50);           // Delay to allow stabilization
ADC_1_a= read_adc();    // Get the AtoD value
delay_us(50);           // Delay to allow stabilization
ADC_1_b= read_adc();    // Get the AtoD value
delay_us(50);           // Delay to allow stabilization
ADC_1_c= read_adc();    // Get the AtoD value
delay_us(50);           // Delay to allow stabilization
ADC_1_d= read_adc();    // Get the AtoD value
delay_us(50);           // Delay to allow stabilization
ADC_1_e= read_adc();    // Get the AtoD value
delay_us(50);           // Delay to allow stabilization
ADC_1_f= read_adc();    // Get the AtoD value
delay_us(50);           // Delay to allow stabilization
ADC_1_g= read_adc();    // Get the AtoD value
delay_us(50);           // Delay to allow stabilization
ADC_1_h= read_adc();    // Get the AtoD value
delay_us(50);           // Delay to allow stabilization
ADC_1_i= read_adc();    // Get the AtoD value
delay_us(50);           // Delay to allow stabilization
ADC_1_j= read_adc();    // Get the AtoD value

AD_Ch_2_1=(ADC_1_a+ADC_1_b+ADC_1_c+ADC_1_d+ADC_1_e+ADC_1_f+ADC_1_g+ADC_1_h+ADC_1_i+ADC_1
_j)/10;
volt1=AD_Ch_2_1*0.00488758553274;           //volt
vathos1=(volt1-arxikop)/4.5;                // Antistoxia twv Volt pou exei ws eksodo
                                           // o pressure sensor se vathos [m]

delay_ms(100);                             // Edw orizetai to sample rate, diladi sta posa
                                           // [ms] kleinei vroxo to sustima

position_UNION.bytes[0] = POSCNTL;
position_UNION.bytes[1] = POSCNTH;

if ((position_UNION.bytes[0] == 0) || (position_union.bytes[0] == 0xFF))
{
    position_UNION.bytes[0] = POSCNTL;
    position_UNION.bytes[1] = POSCNTH;
}

```

```

    counts1=position_UNION.word;
}

// ----- SUNARTISI DEADZONE -----

// Edw prosthetontai kai afairountai 0.8 volts sto nomo elegxou gt i antlia thelei
// toulaxiston 0.8 Volts gia na kinisei to rotora tis

float deadzone()
{
    if(u>=0){
        u=u+1.0;
        //! counts1=counts1-100;
    }
    if(u<0){
        u=-u;
        u=-(u+1.0);
    }
}

// ----- SUNARTISI MAIN -----

// H kuria sunartisi tou programmatos

void main()
{
    set_tris_c(191); // Edw thetw saturaton stin antlia ta 3V
    set_tris_a(255);
    QEICON = 0xA8;
    DFLTCON = 0x3B;
    POSCNTL = 0;
    POSCNTH = 0;

    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
    setup_adc_ports(0);
    set_adc_channel(0);
    delay_us(10);
    printf("hi!\r"); // Prin ksekinisei o elegxos grafei ena "hi" stin othoni
                    // gia na epivevaiwthei i leitourgikotita tis seiriakis

    delay_ms(1000);
    setup_ccp1(CCP_PWM);
    setup_ccp2(CCP_PWM);
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, 255, 1);
    enable_interrupts (INT_RDA) ;
}

```

```

enable_interrupts (GLOBAL) ;
set_pwm1_duty(0);
set_pwm2_duty(0);
delay_ms(200);
delay_us(50); // Delay to allow stabilization
ADC_arxikop= read_adc(); // Calibration tou aisthitira
arxikop=ADC_arxikop*0.00488758553274; // Midenismos vathous stin epifaneia tou nerou
arxikop=arxikop-0.05;

// ----- ATERMONO WHILE -----

while(1){

    metriseis1();

    taxitita=(vathos1+3*vathos2-3*vathos3-vathos4)*1.66667;
    // Arithmitikos upologismos taxutitas me 4 simeia
    maza=-counts1*D*0.5;
    // Ypologismos mazas (2 counts ana peristrofi)
    paroxi=(-counts1-3*counts2+3*counts3+counts4)*D*0.5*1.66667;
    // Arithmitikos upologismos paroxis me 4 simeia

    error=epith_vathos-vathos1;

    error0=error;
    oloklirwma=0.05*(error0+error1);
    integ=oloklirwma;
    integral=integral+integ;

    uh=KI*ioros-Kh*vathos1-Ku*taxitita-Km*maza-Kq*par;
    u=uh;

    deadzone();

    an_olokl=KI*ioros;
    diaf0=KI*ioros-Kh*vathos1;
    diaf1=KI*ioros-Kh*vathos1-Ku*tax;
    diaf2=KI*ioros-Kh*vathos1-Ku*tax-Km*maza;

    volt_epith_integer=u*39.230769;..... // 6.5 volt H-Bridge!!

    printf("%7.3f \r", vathos1);

    sfalma=(int16)volt_epith_integer;

```



```

if (sfalma>153)
{
    flag=1;
    set_pwm1_duty(153);
    set_pwm2_duty(0);
}
else if (sfalma<-153)
{
    flag=2;
    set_pwm1_duty(0);
    set_pwm2_duty(153);
}
else if (sfalma>0)
{
    pwm=(int8)sfalma;
    set_pwm1_duty(pwm);
    set_pwm2_duty(0);
    flag=3;
}
else if(sfalma<0)
{
    sfalma=-sfalma;
    pwm=(int8)sfalma;
    set_pwm1_duty(0);
    set_pwm2_duty(pwm);
    flag=4;
}
}

```

Παράρτημα Δ: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα πίεσης

Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated

The MPx5010 series piezoresistive transducers are state-of-the-art monolithic silicon pressure sensors designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This transducer combines advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure. The axial port has been modified to accommodate industrial grade tubing.

Features

- 5.0% Maximum Error over 0 to 85°C
- Ideally Suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Durable Epoxy Unibody and Thermoplastic (PPS) Surface Mount Package
- Temperature Compensated over -40 to +125°C
- Patented Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Available in Differential and Gauge Configurations
- Available in Surface Mount (SMT) or Through-hole (DIP) Configurations

**MPX5010
 MPXV5010
 MPVZ5010
 Series**

**0 to 10 kPa (0 to 1.45 psi)
 (0 to 1019.78 mm H₂O)
 0.2 to 4.7 V Output**

Application Examples

- Hospital Beds
- HVAC
- Respiratory Systems
- Process Control
- Washing Machine Water Level Measurement (Reference AN1950)
- Ideally Suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Appliance Liquid Level and Pressure Measurement

ORDERING INFORMATION								
Device Name	Case No.	# of Ports			Pressure Type			Device Marking
		None	Single	Dual	Gauge	Differential	Absolute	
Unibody Package (MPX5010 Series)								
MPX5010DP	867C			•		•		MPX5010DP
MPX5010GP	867B		•		•			MPX5010GP
MPX5010GS	867E		•		•			MPX5010D
MPX5010GSX	867F		•		•			MPX5010D
Small Outline Package (MPXV5010 Series)								
MPXV5010DP	1351			•		•		MPXV5010DP
MPXV5010G6U	482	•			•			MPXV5010G
MPXV5010GC6T1	482A		•		•			MPXV5010G
MPXV5010GC6U	482A		•		•			MPXV5010G
MPXV5010GC7U	482C		•		•			MPXV5010G
MPXV5010GP	1369		•		•			MPXV5010GP
Small Outline Package (Media Resistant Gel) (MPVZ5010 Series)								
MPVZ5010G6U	482	•			•			MPVZ5010G
MPVZ5010G7U	482B	•			•			MPVZ5010G
MPVZ5010GW6U	1735		•		•			MZ5010GW
MPVZ5010GW7U	1560		•		•			MZ5010GW



Operating Characteristics

Table 1. Operating Characteristics ($V_S = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, $P_1 > P_2$. Decoupling circuit shown in Figure 3 required to meet specification.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range	P_{OP}	0	—	10 1019.78	kPa mm H ₂ O
Supply Voltage ⁽¹⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current	I_o	—	5.0	10	mAdc
Minimum Pressure Offset ⁽²⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{off}	0	0.2	0.425	Vdc
Full Scale Output ⁽³⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{FSO}	4.475	4.7	4.925	Vdc
Full Scale Span ⁽⁴⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{FSS}	4.275	4.5	4.725	Vdc
Accuracy ⁽⁵⁾	—	—	—	±5.0	% V_{FSS}
Sensitivity	V/P	—	450 4.413	—	mV/mm mV/mm H ₂ O
Response Time ⁽⁶⁾	t_R	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output	I_{O+}	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time ⁽⁷⁾	—	—	20	—	ms
Offset Stability ⁽⁸⁾	—	—	±0.5	—	% V_{FSS}

1. Device is ratiometric within this specified excitation range.
2. Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
3. Full Scale Output (V_{FSO}) is defined as the output voltage at the maximum or full rated pressure.
4. Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
5. Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C .
 - TcSpan: Output deviation over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .
 - TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .
 - Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{FSS} , at 25°C .
6. Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
7. Warm-up Time is defined as the time required for the product to meet the specified output voltage after the Pressure has been stabilized.
8. Offset Stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

MPX5010

Pressure

Maximum Ratings

Table 2. Maximum Ratings⁽¹⁾

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Pressure ($P_1 > P_2$)	P_{max}	40	kPa
Storage Temperature	T_{stg}	-40 to +125	°C
Operating Temperature	T_A	-40 to +125	°C

1. Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

Figure 1 shows a block diagram of the internal circuitry integrated on a pressure sensor chip.

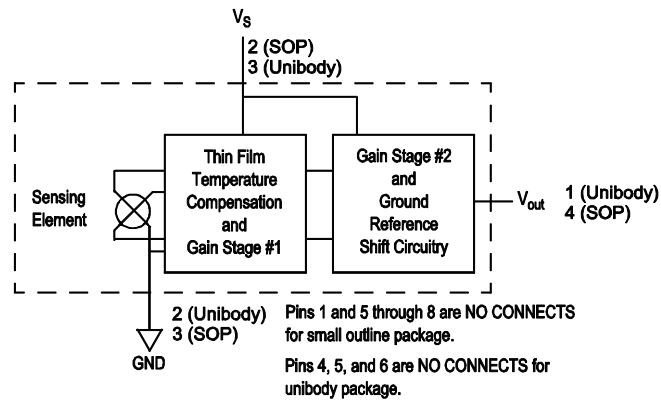


Figure 1. Fully Integrated Pressure Sensor Schematic

ON-CHIP TEMPERATURE COMPENSATION AND CALIBRATION

The performance over temperature is achieved by integrating the shear-stress strain gauge, temperature compensation, calibration and signal conditioning circuitry onto a single monolithic chip.

Figure 3 illustrates the Differential or Gauge configuration in the basic chip carrier (Case 482). A fluorosilicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the sensor diaphragm.

The MPx5010G series pressure sensor operating characteristics, and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media,

other than dry air, may have adverse effects on sensor performance and long-term reliability. Contact the factory for information regarding media compatibility in your application.

Figure 4 shows the recommended decoupling circuit for interfacing the integrated sensor to the A/D input of a microprocessor or microcontroller. Proper decoupling of the power supply is recommended.

Figure 5 shows the sensor output signal relative to pressure input. Typical, minimum, and maximum output curves are shown for operation over a temperature range of 0°C to 85°C using the decoupling circuit shown in Figure 4. The output will saturate outside of the specified pressure range.

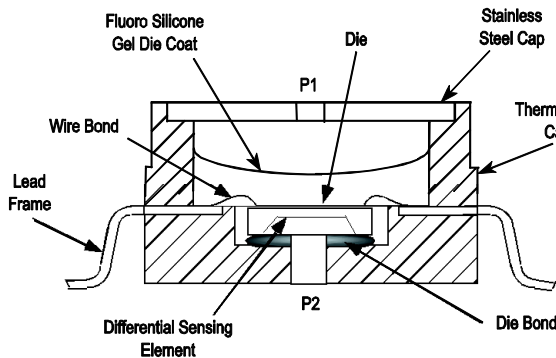


Figure 2. Cross-Sectional Diagram SOP (not to scale)

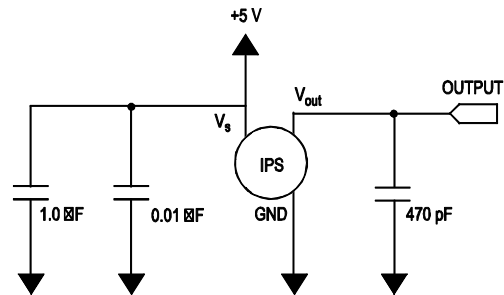


Figure 3. Recommended Power Supply Decoupling and Output Filtering (For additional output filtering, please refer to Application Note AN1646.)

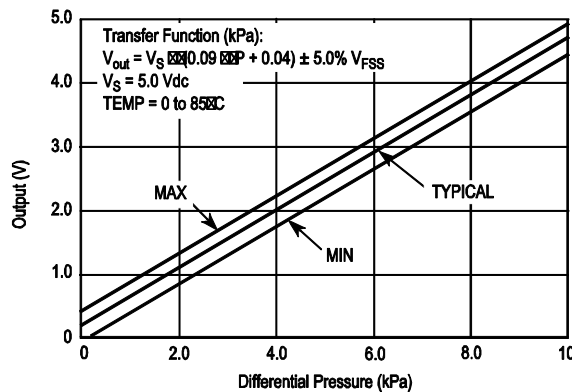


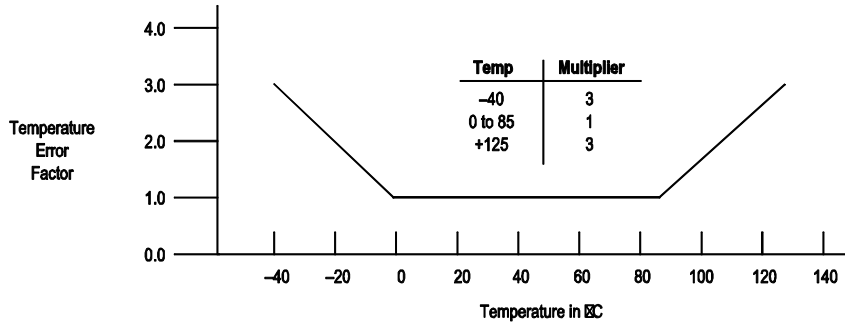
Figure 4. Output vs. Pressure Differential

Pressure

Transfer Function

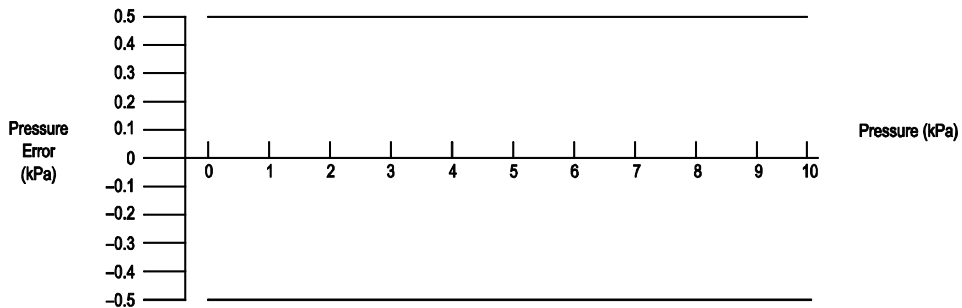
Nominal Transfer Value: $V_{out} = V_S \times (0.09 \times P + 0.04)$
 $\pm (\text{Pressure Error} \times \text{Temp. Factor} \times 0.09 \times V_S)$
 $V_S = 5.0 \text{ V} \approx 0.25 \text{ Vdc}$

Temperature Error Band



NOTE: The Temperature Multiplier is a linear response from 0 to -40°C and from 85 to 125°C.

Pressure Error Band



Pressure	Error (Max)
0 to 10 (kPa)	±0.5 (kPa)

MPX5010

6

Sensors
Freescale Semiconductor, Inc.

PRESSURE (P1)/VACUUM (P2) SIDE IDENTIFICATION TABLE

Freescale designates the two sides of the pressure sensor as the Pressure (P1) side and the Vacuum (P2) side. The Pressure (P1) side is the side containing fluorosilicone gel which protects the die from harsh media. The MPX pressure

sensor is designed to operate with positive differential pressure applied, P1 > P2.

The Pressure (P1) side may be identified by using the table below:

Part Number	Case Type	Pressure (P1) Side Identifier
MPX5010DP	867C	Side with Part Marking
MPX5010GP	867B	Side with Port Attached
MPX5010GS	867E	Side with Port Attached
MPX5010GSX	867F	Side with Port Attached
MPXV5010G6U	482	Stainless Steel Cap
MPXV5010GC6U/6T1	482A	Side with Port Attached
MPXV5010GC7U	482C	Side with Port Attached
MPXV5010GP	1369	Side with Port Attached
MPXV5010DP	1351	Side with Part Marking
MPVZ5010G6U	482	Stainless Steel Cap
MPVZ5010G7U	482B	Stainless Steel Cap
MPVZ5010GW6U	1735	Vertical Port Attached
MPVZ5010GW7U	1560	Vertical Port Attached

MINIMUM RECOMMENDED FOOTPRINT FOR SURFACE MOUNTED APPLICATIONS

Surface mount board layout is a critical portion of the total design. The footprint for the surface mount packages must be the correct size to ensure proper solder connection interface between the board and the package. With the correct

footprint, the packages will self align when subjected to a solder reflow process. It is always recommended to design boards with a solder mask layer to avoid bridging and shorting between solder pads.

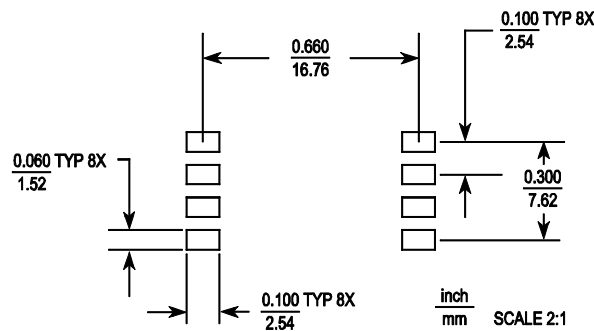
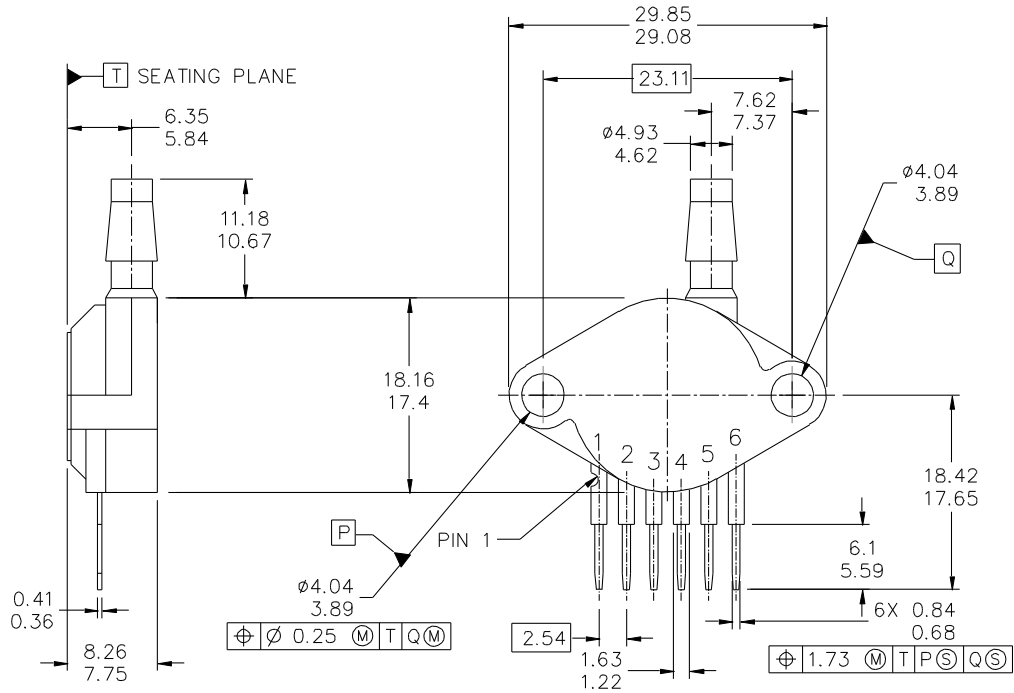


Figure 5. SOP Footprint (Case 482)

PACKAGE DIMENSIONS



© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	MECHANICAL OUTLINE	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE: SENSOR, 6 LEAD UNIBODY CELL, AP & GP 01ASB09087B	DOCUMENT NO: 98ASB42796B	REV: G	
	CASE NUMBER: 867B-04	28 JUL 2005	
	STANDARD: NON-JEDEC		

**CASE 867B-04
ISSUE G
UNIBODY PACKAGE**

PACKAGE DIMENSIONS

NOTES:

1. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
2. DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M-1994.
3. 867B-01 THRU -3 OBSOLETE, NEW STANDARD 867B-04.

STYLE 1:

- PIN 1: V OUT
 2: GROUND
 3: VCC
 4: V1
 5: V2
 6: V EX

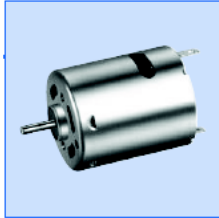
© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	MECHANICAL OUTLINE	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE: SENSOR, 6 LEAD UNIBODY CELL, AP & GP 01ASB09087B	DOCUMENT NO: 98ASB42796B	REV: G	
	CASE NUMBER: 867B-04	28 JUL 2005	
	STANDARD: NON-JEDEC		

PAGE 2 OF 2

**CASE 867B-04
 ISSUE G
 UNIBODY PACKAGE**

MPX5010

Παράρτημα Ε: Τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα της αντλίας



RS-360SH

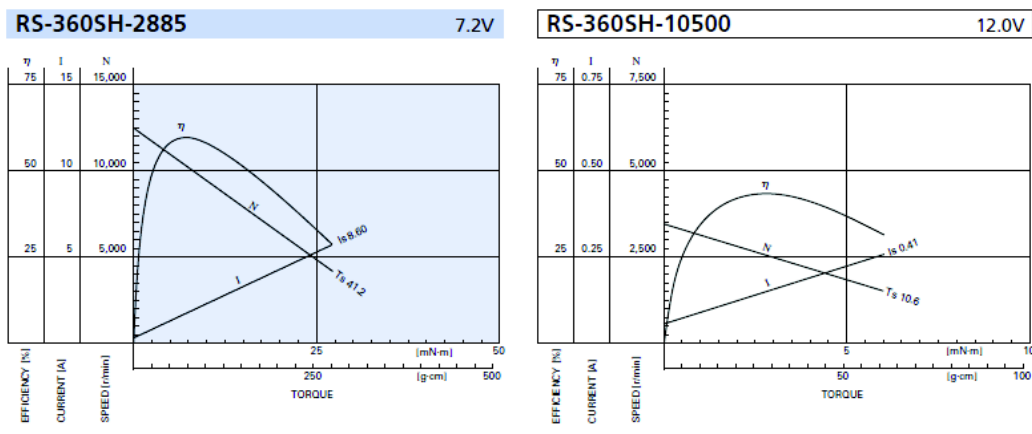
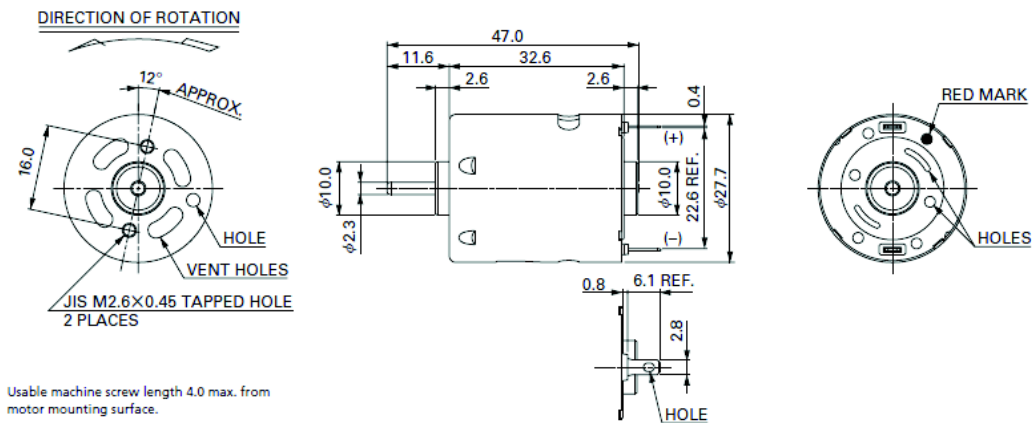
MABUCHI MOTOR
Carbon-brush motors

OUTPUT : 0.7W-40W (APPROX)

WEIGHT : 55g (APPROX)

Typical Applications Home Appliances : Massager / Vibrator
Office Automation Equipment : Copy Machine / Laser Printer
Precision Instruments : Vending Machine

MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY				STALL			
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED r/min	CURRENT A	SPEED r/min	CURRENT A	TORQUE mN·m	TORQUE g·cm	OUTPUT W	TORQUE mN·m	TORQUE g·cm	CURRENT A
RS-360SH-2885	3-9	7.2V CONSTANT	12500	0.36	10380	1.76	7.00	71.3	7.59	41.2	420	8.60
RS-360SH-10500	12-25	12V CONSTANT	3500	0.050	2590	0.14	2.74	28.0	0.74	10.6	108	0.41



MABUCHI MOTOR CO., LTD. Headquarters 430 Matsuhidai, Matsudo City, Chiba, 270-2280 Japan. Tel:81-47-710-1177 Fax:81-47-710-1132 (Sales Dept.)

Παράρτημα ΣΤ: Τεχνικά χαρακτηριστικά αυξητικής παλμογεννήτριας



Encoders

Magnetic Encoders

Features:
1 to 16 Lines per revolution
2 Channels
Digital output

Series HEM

		Encoder Ø 10 ... 12 mm	Encoder Ø 16 ... 17 mm	
Lines per resolution	N	10 ... 12	1 ... 16	
Signal output, square wave		2	2	channels
Supply voltage	V	3,0 ... 15,0	3,0 ... 15,0	V DC
Current consumption, typical (V _{cc} = 5 V DC)	I _{cc}	5	5 ¹⁾	mA
Pulse width	P	180 ± 45	180 ± 45	°e
Phase shift, channel A to B	Φ	90 ± 45	90 ± 45	°e
Logic state width	S	90 ± 45	90 ± 45	°e
Cycle	C	360 ± 30	360 ± 30	°e
Signal rise/fall time, typical	tr/tf	5 / 0,2	5 / 0,2	µs
Frequency range up to	f	7,2	7,2	kHz
Inertia of code disc	J	0,019	0,040	gcm ²
Operating temperature range		-20 ... +85	-20 ... +85	°C

¹⁾ current consumption for 1 ppr encoder = 11mA (typical at V_{cc} = 5 V DC) HEM-Q

Ordering Information

Encoder type	number of channels	lines per revolution Ø 10 ... 12 mm	lines per revolution Ø 16 ... 17 mm	
HEM-10	2	10		In combination with DC-Micromotors series 0816...S series 1016...G, 1024...S series 1219...G, 1224...S
HEM-12	2	12		
HEM-Q ²⁾	2		1 ¹⁾	In combination with DC-Micromotors series 1319...S, 1331...S, 1336...C series 1516...S, 1524...S series 1616...S, 1624...S series 1717...S, 1724...S, 1727...C series 2230...S, 2233...S series 3557...C, 3557...CR, 3557...CS
HEM-10 ²⁾	2		10	
HEM-12 ²⁾	2		12	
HEM-15 ²⁾	2		15	
HEM-16 ²⁾	2		16	

²⁾ channel B leads channel A

Features

These incremental shaft encoders in combination with the FAULHABER® DC-Micromotors are designed for indication and control of both shaft velocity and direction of rotation as well as for positioning.

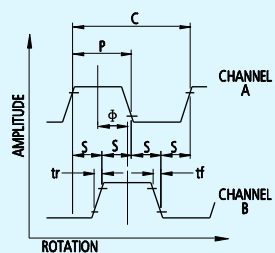
Solid state Hall sensors and a low inertia magnetic disc provide two channels with 90° phase shift.

The supply voltage for the encoder and the DC-Micromotor as well as the two channel output signals are interfaced with a ribbon cable to a 6-pin connector on motors ≤ 22mm in diameter for motors ≥ 23mm in diameter the motor voltage is supplied separately.

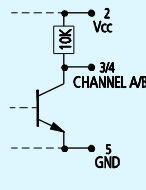
Details for the DC-Micromotors and suitable reduction gearheads are on separate catalog pages.

Please note: Velocity (rpm) = f (Hz) x 60/N

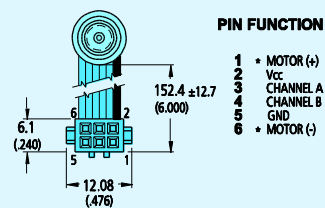
Output signals / Circuit diagram / Connector Information



OUTPUT SIGNALS
with clockwise rotation as seen from the shaft end exceptions indicated by note 3



OUTPUT CIRCUIT
* Motors 2342 and larger have separate motor connections



Shown with optional CONNECTOR (-6P)
(Berg / FCI 71601-106)
Polarized
.050" Ribbon cable - PVC
6 conductors - 28 AWG
Mating connector:
Header / FCI 75869-131

PIN FUNCTION

- 1 + MOTOR (+)
- 2 Vcc
- 3 CHANNEL A
- 4 CHANNEL B
- 5 GND
- 6 + MOTOR (-)

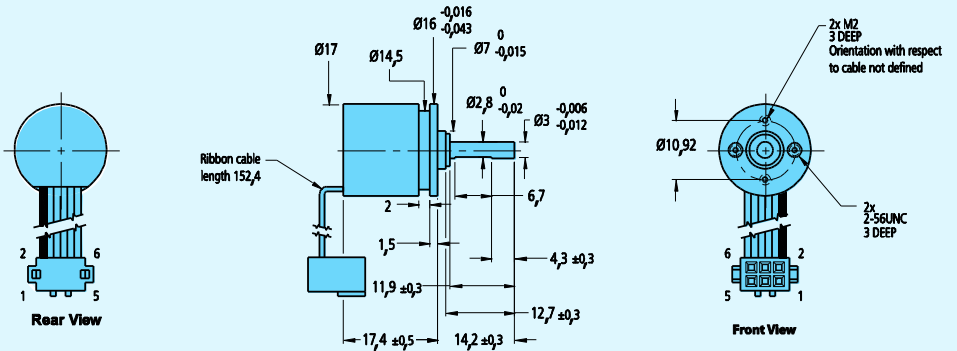
Specification subject to change without notice

11/10/2009

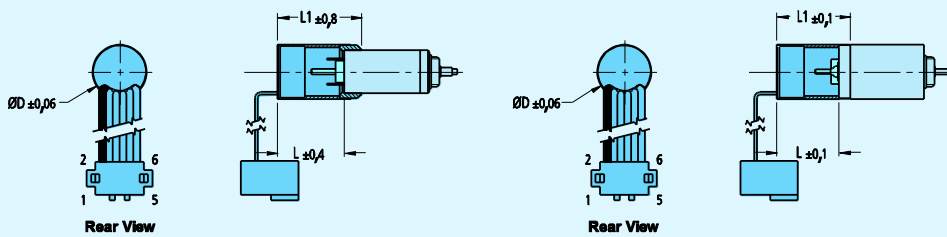
Micromo Electronics, Inc. · 14881 Evergreen Ave. · Clearwater FL, 33762-3008 · Phone: (800) 807-9166 Fax: (727) 572-7763 · Info@micromo.com · www.micromo.com

HEM

Encoder HEF Free standing



DC-Micromotor 0816 S, 1016 G, 12mm diameter series with HEM encoder



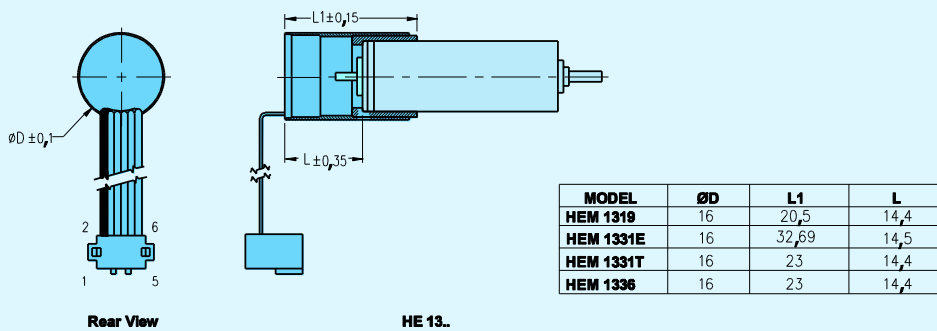
MODEL	ØD	L	L1
HEM 0816	10	12,3	15,5

HEM 0816

MODEL	ØD	L	L1
HEM 1016	10	11,5	13,5
HEM 12..	12	11,5	11,5

HEM 10../12..

DC-Micromotor 13mm diameter series with HEM encoder



MODEL	ØD	L1	L
HEM 1319	16	20,5	14,4
HEM 1331E	16	32,69	14,5
HEM 1331T	16	23	14,4
HEM 1336	16	23	14,4

HE 13..

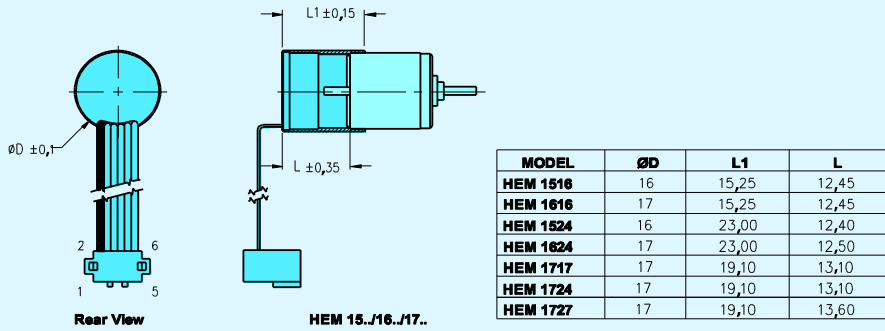
Specification subject to change without notice

11/10/2009

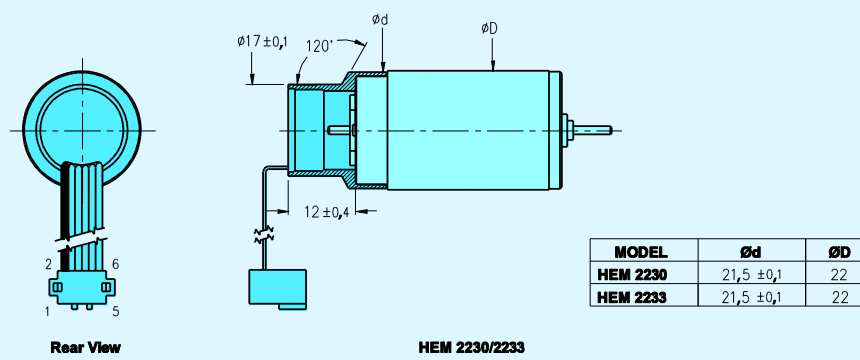
Micromo Electronics, Inc. · 14881 Evergreen Ave. · Clearwater FL, 33762-3008 · Phone: (800) 807-9166 Fax: (727) 572-7763 · Info@micromo.com · www.micromo.com

HEM

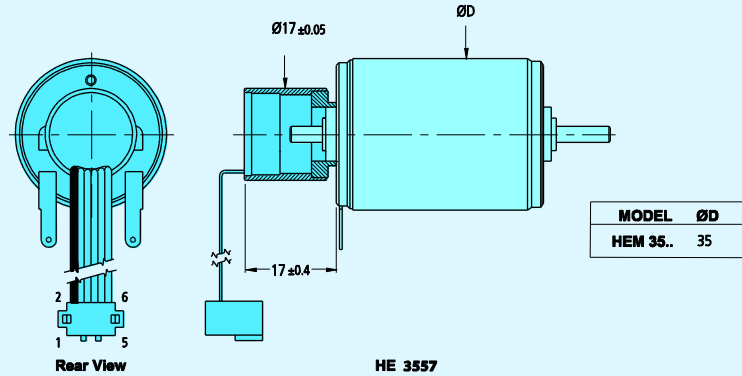
DC-Micromotor 15, 16, 17mm diameter series with HEM encoder



DC-Micromotor 22mm diameter series with Encoder HEM



DC-Micromotor 3557 series with Encoder HEM



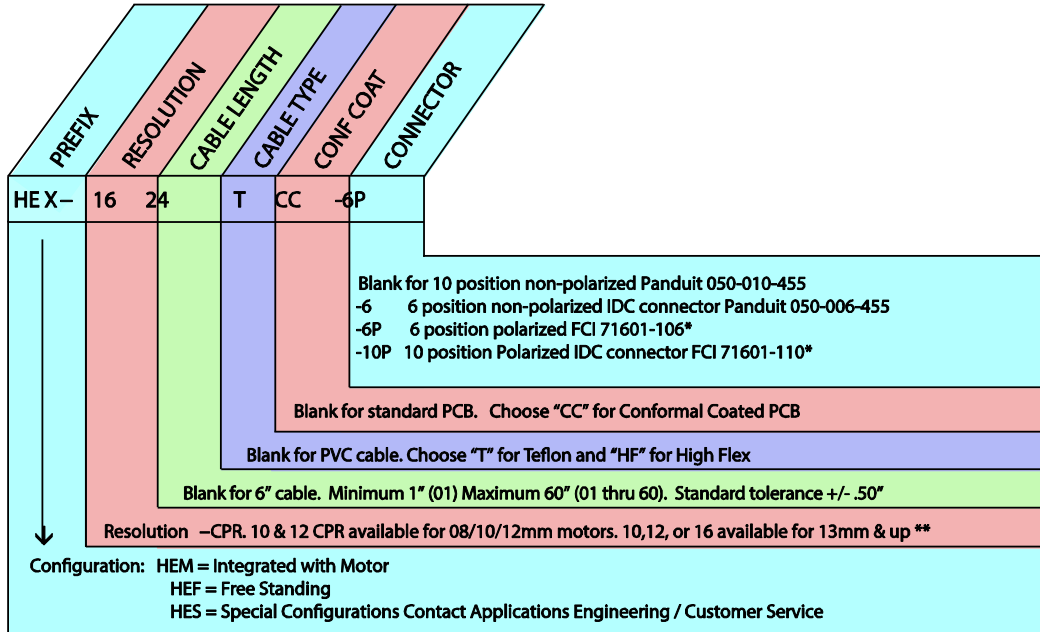
Specification subject to change without notice

Micromo Electronics, Inc. · 14881 Evergreen Ave. · Clearwater FL, 33762-3008 · Phone: (800) 807-9166 Fax: (727) 572-7763 · Info@micromo.com · www.micromo.com

11/10/2009

HEM ORDERING GUIDE

Encoder Magnetic
Ordering information



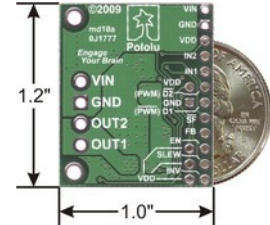
* Mating connectors available for Polarized Receptacles

** A "Q" in this position indicates 1 ppr quadrature technology

Παράρτημα Z: Τεχνικά χαρακτηριστικά του H-Bridge

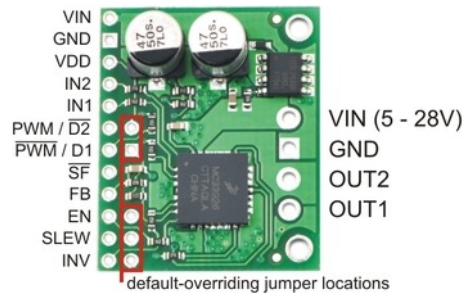
Overview

The MC33926 motor driver carrier can supply up to almost 3 A continuous current to a single brushed DC motor at 5 – 28 V, and it can tolerate peak currents up to 5 A for a few seconds, making this a great general-purpose motor driver for medium-sized DC motors. The MC33926 supports ultrasonic (up to 20 kHz) pulse width modulation (PWM) of the motor output voltage, which eliminates the audible switching sounds caused by PWM speed control, and a current feedback circuit outputs an analog voltage on the FB pin that is proportional to the output current. Since this board is a carrier for the Freescale Semiconductor MC33926 H-bridge, we recommend careful reading of the [MC33926 datasheet](#) (1MB pdf).



If you have two motors to control, please consider the [Dual MC33926 motor driver carrier](#).

Pinout



The default states of many of the MC33926 logic input pins requires that many external connections be made to use this motor driver. To reduce the number of necessary external connections, the board has five default-overriding jumpers. All of the default-overriding jumpers are tied to VDD, except the D1 jumper, which is tied to GND. All VDD jumper pads are circles; the ground jumper pad is square.

PIN	Default State	Description
VIN	HIGH	This is the main 5 – 28 V motor power supply connection, which should typically be made to the larger VIN pad. Operation from 5 – 8 V reduces maximum current output; the device is also protected for transients up to 40 V. The smaller VIN pad can be used to distribute the VIN node to the rest of the application circuit; for lower-current applications, the pin can also be used to power the motor driver and motor.
GND	LOW	Ground connection for logic and motor power supplies.
OUT2	HIGH	The motor output pin controlled by IN2.
OUT1	HIGH	The motor output pin controlled by IN1.
VDD	HIGH	3-5 V logic supply connection. This pin is used only for the \overline{SF} pull-up and default-overriding jumpers; in the rare case where none of those features is used, VDD can be left disconnected.
IN2	HIGH	The logic input control of OUT2. PWM can be applied to this pin (typically done with both disable lines inactive).
IN1	HIGH	The logic input control of OUT1. PWM can be applied to this pin (typically done with both disable lines inactive).

PWM / $\overline{D2}$	LOW	Inverted disable input: when $\overline{D2}$ is low, OUT1 and OUT2 are set to high impedance. A $\overline{D2}$ PWM duty cycle of 70% gives a motor duty cycle of 70%. Typically, only one of the two disable pins is used, but the default is for both disable pins to be active.
\overline{PWM} / D1	HIGH	Disable input: when D1 is high, OUT1 and OUT2 are set to high impedance. A D1 PWM duty cycle of 70% gives a motor duty cycle of 30%. Typically, only one of the two disable pins is used, but the default is for both disable pins to be active.
\overline{SF}	HIGH	Status flag output: an over-current (short circuit) or over-temperature event will cause \overline{SF} to be latched LOW. If either of the disable pins (D1 or $\overline{D2}$) are disabling the outputs, \overline{SF} will also be LOW. Otherwise, this pin is weakly pulled high. This allows the \overline{SF} pins of multiple units to be connected to a single input.
FB	LOW	The FB output provides analog current-sense feedback of approximately 525 mV per amp.
EN	LOW	Enable input: when EN is LOW, the chip is in a low-current sleep mode.
SLEW	LOW	Output slew rate selection input. A logical LOW results in a slow output rise time (1.5 μ s – 6 μ s). A logical HIGH selects a fast output rise time (0.2 μ s – 1.45 μ s). This pin should be set HIGH for high-frequency (over 10 kHz) PWM.
INV	LOW	A logical high value inverts the meaning of IN1 and IN2. This allows INV to function as a direction line if IN1 and IN2 are set to different values.

Basic Application Connections

In a typical application, five I/O lines are used to connect the motor driver to a microcontroller: the two input lines, IN1 and IN2, for direction control, one of the disable lines, D1 or $\overline{D2}$, for PWM speed control, the status flag, \overline{SF} , for monitoring motor driver errors, and the current sense output, FB, for monitoring motor current draw (connected to an analog-to-digital converter input). The control lines can be reduced to two pins if PWM signals are applied directly to the two input pins with both disable pins held inactive. A two-pin interface can also be achieved using one of the disable lines for PWM speed control and the INV input for direction control with IN1 and IN2 held at different values (i.e. one set HIGH and the other set LOW). In each of these cases, the other unused lines must be set to enable proper operation. For example, if $\overline{D2}$ is used for the PWM input (as is typically the case), D1 must be held low to prevent it from disabling the motor driver. The circuit board provides convenient jumper points for overriding the motor driver defaults without having to connect extra wires to the module.

The current sense and status flag connections are optional, though monitoring of the status flag can allow detection of latched fault conditions. The status flag is an open-drain output, so multiple units can have their status flag pins wired together for applications where I/O pins are scarce and determining which motor driver is experiencing a fault condition is not necessary.

Note that the default state of the enable pin, EN, is LOW, which holds the chip in a low-current sleep mode. You will need to hold this pin high (either with an external connection or via the default-overriding jumper next to the pin) to allow the chip to run.

Protection

The MC33926 has under-voltage, over-current, and over-temperature protection. Some protection events are indicated by the status flag pin (\overline{SF}), which is an active-low pin allowing the \overline{SF} pin from multiple boards to be connected to a single input. If the chip detects an over-current or over-temperature event, the \overline{SF} is latched LOW and OUT1 and OUT2 are set to high-impedance. To unlatch the status flag pin toggle the D1, $\overline{D2}$, EN or VIN lines. The carrier board has a reverse-protection MOSFET for added protection to the motor driver chip.

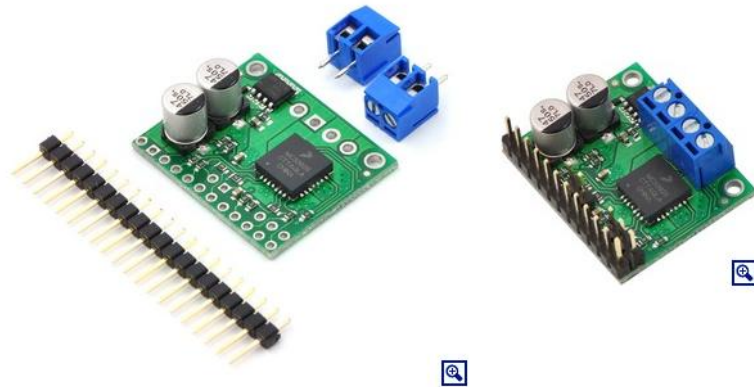
Real-World Power Dissipation Considerations

The MC33926 motor driver used on the carrier board has a maximum current rating of 5 A continuous. However, the chip by itself will overheat at lower currents. For example, in our tests at room temperature with no forced air flow, the chip was able to deliver 5 A for 5 s and 4 A for 18 s before the chip's thermal protection started reducing the current. A continuous current of 3 A was right at the over-temperature threshold; in some tests the thermal protection kicked in after a minute, and in other tests the chip delivered 3 A for over five minutes without triggering thermal protection. The actual current you can deliver will depend on how well you can keep the motor driver cool. The carrier's printed circuit board is designed to draw heat out of the motor driver chip, but performance can be improved by adding a heat sink. Our tests were conducted at 100% duty cycle; PWMing the motor will introduce additional heating proportional to the frequency.

This product can get **hot** enough to burn you long before the chip overheats. Take care when handling this product and other components connected to it.

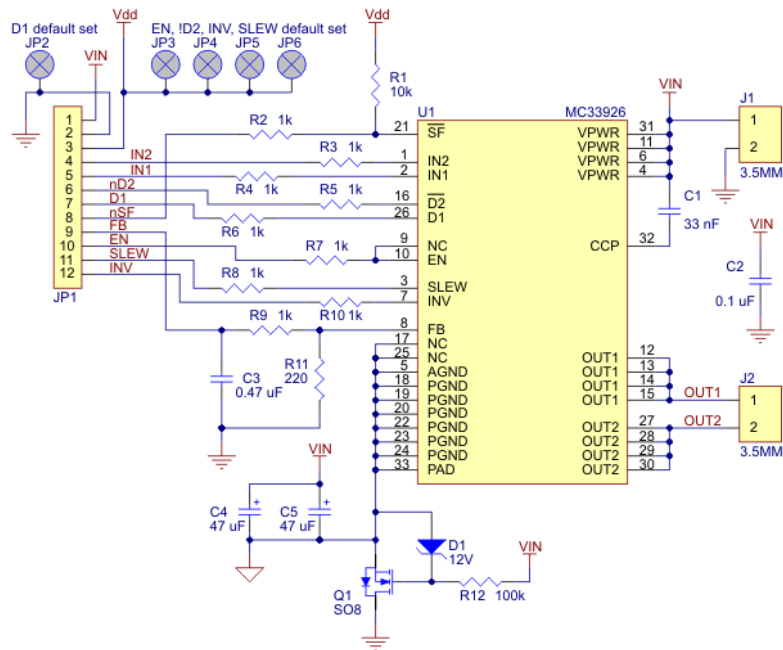
Unlike other H-Bridges, the 33926 has a feature that allows it to gracefully reduce current as the current exceeds 5 A or as the chip temperature approaches its limit. This means that if you push the chip close to its limit, you will see less power to the motor, but it might allow you to avoid a complete shutdown.

Included Hardware



A 20-pin [straight breakaway male header](#) is included with the MC33926 carrier board, which can be used to connect the PCB to perfboards or [breadboards](#). The board also includes two 2-pin 3.5mm terminal blocks for making simple motor connections.

Schematic Diagram



Dimensions

Size: 1.00" x 1.20"¹

Weight: 0.14 oz¹

General specifications

Motor driver:	MC33926
Motor channels:	1
Minimum operating voltage:	5 V ²
Maximum operating voltage:	28 V ³
Continuous output current per channel:	2.5 A ⁴
Peak output current per channel:	5 A
Current sense:	0.525 V/A
Maximum PWM frequency:	20 kHz ⁵
Minimum logic voltage:	2.5 V ⁶
Maximum logic voltage:	5.5 V
Reverse voltage protection?:	γ ⁷

Notes:

- Without included hardware.
- Operation from 5 - 8 V reduces maximum current output.
- The device is protected for transients up to 40 V.
- Can be improved by addition of heat sink or forced air flow.
- SLEW pin should be HIGH for frequencies above 10 kHz.
- Input HIGH threshold can be as high as 2.0 V.
- On motor voltage only; logic voltage does not have reverse protection.

Παράρτημα Η: Τεχνικά χαρακτηριστικά του PIC



MICROCHIP PIC18F2331/2431/4331/4431

28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with nanoWatt Technology, High Performance PWM and A/D

14-bit Power Control PWM Module:

- Up to 4 channels with complementary outputs
- Edge- or center-aligned operation
- Flexible dead-band generator
- Hardware fault protection inputs
- Simultaneous update of duty cycle and period:
 - Flexible special event trigger output

Motion Feedback Module:

- Three independent input capture channels:
 - Flexible operating modes for period and pulse width measurement
 - Special Hall Sensor interface module
 - Special event trigger output to other modules
- Quadrature Encoder Interface:
 - 2 phase inputs and one index input from encoder
 - High and low position tracking with direction status and change of direction interrupt
 - Velocity measurement

High-Speed, 200 Ksps 10-bit A/D Converter:

- Up to 9 channels
- Simultaneous two-channel sampling
- Sequential sampling: 1, 2 or 4 selected channels
- Auto-conversion capability
- 4-word FIFO with selectable interrupt frequency
- Selectable external conversion triggers
- Programmable acquisition time

Flexible Oscillator Structure:

- Four crystal modes up to 40 MHz
- Two external clock modes up to 40 MHz
- Internal oscillator block:
 - 8 user selectable frequencies: 31 kHz to 8 MHz
 - OSCTUNE can compensate for frequency drift
- Secondary oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Fail-Safe Clock Monitor:
 - Allows for safe shutdown of device if clock fails

Power-Managed Modes:

- Run CPU on, peripherals on
- Idle CPU off, peripherals on
- Sleep CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8 μ A typical
- Sleep current down to 0.1 μ A typical
- Timer1 oscillator, 1.8 μ A typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer (WDT), 2.1 μ A typical
- Two-Speed oscillator start-up

Peripheral Highlights:

- High current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupts
- Two Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
 - Capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns (TCY/16)
 - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns (TCY)
 - PWM output: PWM resolution is 1 to 10 bits
- Enhanced USART module:
 - Supports RS-485, RS-232 and LIN 1.2
 - Auto-Wake-up on Start bit
 - Auto-Baud detect
- RS-232 operation using internal oscillator block (no external crystal required)

Special Microcontroller Features:

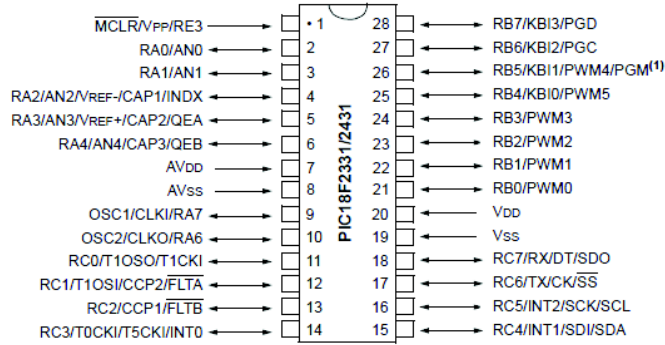
- 100,000 erase/write cycle enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle data EEPROM memory typical
- Flash/data EEPROM retention: 100 years
- Self-programmable under software control
- Priority levels for interrupts
- 8 X 8 Single-cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 41 ms to 131s
- Single-supply In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
 - Drives PWM outputs safely when debugging

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	CCP	SSP		EUSART	Quadrature Encoder	14-bit PWM (ch)	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)				SPI	Slave I ² C™				
PIC18F2331	8192	4096	768	256	24	5	2	Y	Y	Y	Y	6	1/3
PIC18F2431	16384	8192	768	256	24	5	2	Y	Y	Y	Y	6	1/3
PIC18F4331	8192	4096	768	256	36	9	2	Y	Y	Y	Y	8	1/3
PIC18F4431	16384	8192	768	256	36	9	2	Y	Y	Y	Y	8	1/3

PIC18F2331/2431/4331/4431

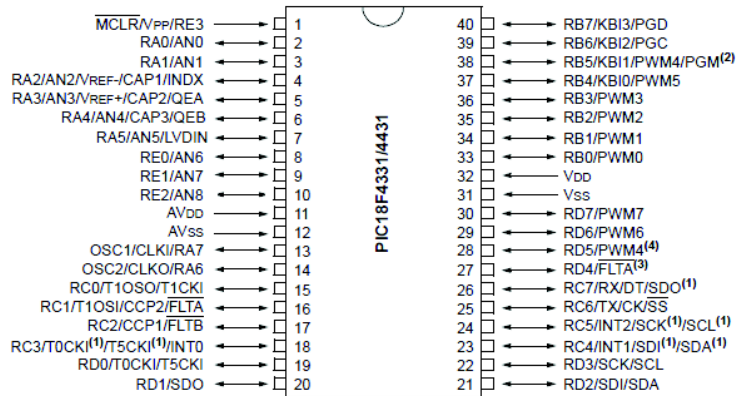
Pin Diagrams

28-Pin SDIP, SOIC



Note 1: Low-voltage programming must be enabled.

40-Pin PDIP



Note 1: RC3 is the alternate pin for T0CKI/T5CKI; RC4 is the alternate pin for SDI/SDA; RC5 is the alternate pin for SCK/SCL.

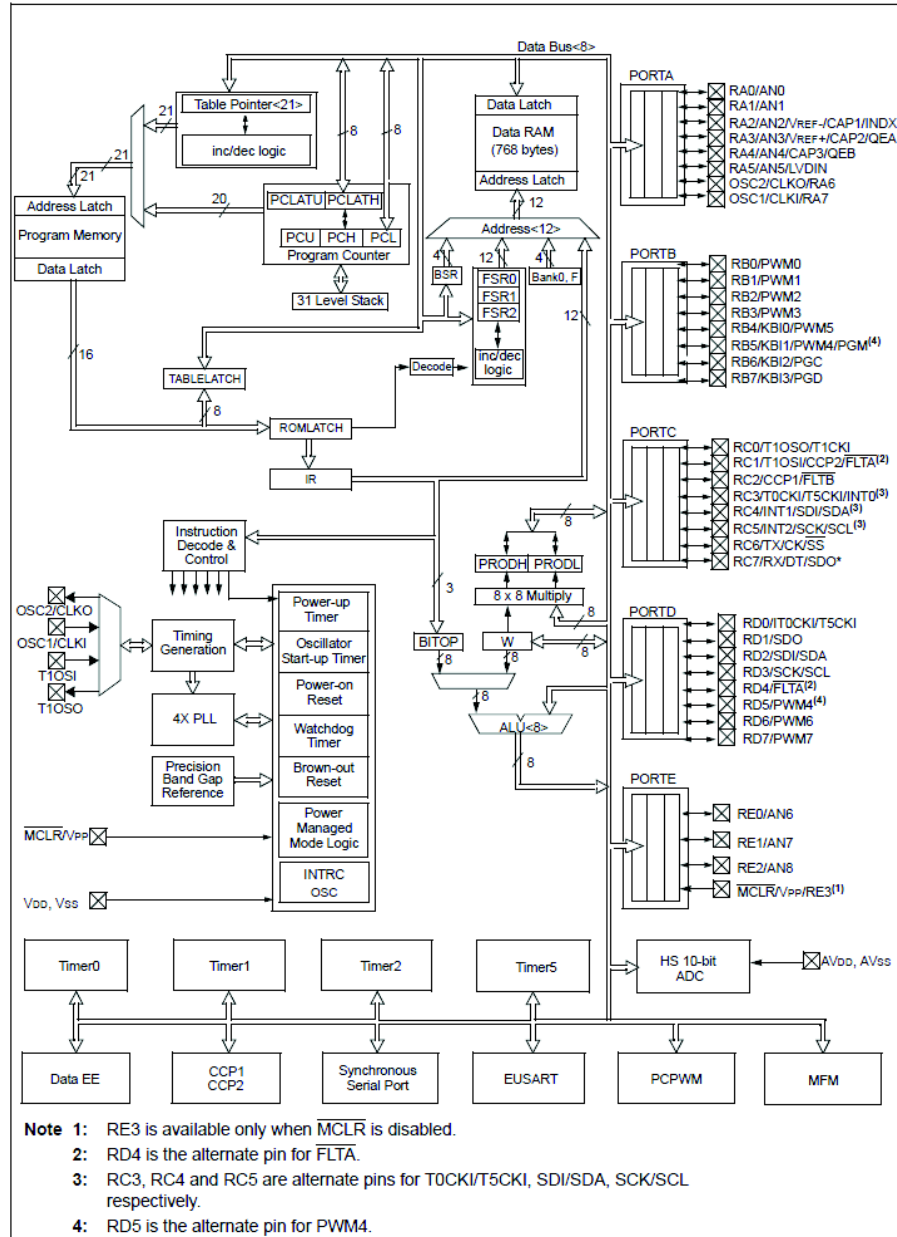
2: Low-voltage programming must be enabled.

3: RD4 is the alternate pin for FLTA.

4: RD5 is the alternate pin for PWM4.

PIC18F2331/2431/4331/4431

FIGURE 1-2: PIC18F4331/4431 BLOCK DIAGRAM



PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 1-3: PIC18F4331/4431 PINOUT I/O DESCRIPTIONS

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	DIP	TQFP	QFN			
MCLR/Vpp/RE3 MCLR Vpp RE3	1	18	18	I P I	ST ST	Master Clear (input) or programming voltage (input). Master Clear (Reset) input. This pin is an active-low. Reset to the device. Programming voltage input. Digital input. Available only when MCLR is disabled.
OSC1/CLKI/RA7 OSC1 CLKI RA7	13	30	32	I I I/O	ST CMOS TTL	Oscillator crystal or external clock input. Oscillator crystal input or external clock source input. ST buffer when configured in RC mode, CMOS otherwise. External clock source input. Always associated with pin function OSC1. (See related OSC1/CLKI, OSC2/CLKO pins.) General purpose I/O pin.
OSC2/CLKO/RA6 OSC2 CLKO RA6	14	31	33	O O I/O	— — TTL	Oscillator crystal or clock output. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKO, which has 1/4 the frequency of OSC1 and denotes the instruction cycle rate. General purpose I/O pin.
RA0/AN0 RA0 AN0	2	19	19	I/O I	TTL Analog	PORTA is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Analog input 0.
RA1/AN1 RA1 AN1	3	20	20	I/O I	TTL Analog	
RA2/AN2/VREF-/CAP1/ INDX RA2 AN2 VREF- CAP1 INDX	4	21	21	I/O I I I I	TTL Analog Analog ST ST	
RA3/AN3/VREF+/ CAP2/QEA RA3 AN3 VREF+ CAP2 QEA	5	22	22	I/O I I I I	TTL Analog Analog ST ST	
RA4/AN4/CAP3/QEB RA4 AN4 CAP3 QEB	6	23	23	I/O I I I	TTL Analog ST ST	
RA5/AN5/LVDIN RA5 AN5 LVDIN	7	24	24	I/O I I I	TTL Analog Analog	

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
O = Output P = Power
OD = Open-Drain (no diode to V_{DD})

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 1-3: PIC18F4331/4431 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	DIP	TQFP	QFN			
RB0/PWM0 RB0 PWM0	33	8	9	I/O O	TTL TTL	PORTB is a bidirectional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs. Digital I/O. PWM output 0.
RB1/PWM1 RB1 PWM1	34	9	10	I/O O	TTL TTL	Digital I/O. PWM output 1.
RB2/PWM2 RB2 PWM2	35	10	11	I/O O	TTL TTL	Digital I/O. PWM output 2.
RB3/PWM3 RB3 PWM3	36	11	12	I/O O	TTL TTL	Digital I/O. PWM output 3.
RB4/KBI0/PWM5 RB4 KBI0 PWM5	37	14	14	I/O I O	TTL TTL TTL	Digital I/O. Interrupt-on-change pin. PWM output 5.
RB5/KBI1/PWM4/ PGM RB5 KBI1 PWM4 PGM	38	15	15	I/O I O I/O	TTL TTL TTL ST	Digital I/O. Interrupt-on-change pin. PWM output 4. Low-voltage ICSP programming entry pin.
RB6/KBI2/PGC RB6 KBI2 PGC	39	16	16	I/O I I/O	TTL TTL ST	Digital I/O. Interrupt-on-change pin. In-Circuit Debugger and ICSP programming clock pin.
RB7/KBI3/PGD RB7 KBI3 PGD	40	17	17	I/O I I/O	TTL TTL ST	Digital I/O. Interrupt-on-change pin. In-Circuit Debugger and ICSP programming data pin.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power
 OD = Open-Drain (no diode to V_{DD})

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 1-3: PIC18F4331/4431 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	DIP	TQFP	QFN			
RC0/T1OSO/T1CKI RC0 T1OSO T1CKI	15	32	34	I/O O I	ST — ST	PORTC is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Timer1 oscillator output. Timer1 external clock input.
RC1/T1OSI/CCP2/ FLTA RC1 T1OSI CCP2 FLTA	16	35	35	I/O I I/O I	ST CMOS ST ST	Digital I/O. Timer1 oscillator input. Capture2 input, Compare2 output, PWM2 output. Fault interrupt input pin.
RC2/CCP1/FLT \overline{B} RC2 CCP1 FLT \overline{B}	17	36	36	I/O I/O I	ST ST ST	Digital I/O. Capture1 input/Compare1 output/PWM1 output. Fault interrupt input pin.
RC3/T0CKI/T5CKI/ INT0 RC3 T0CKI T5CKI INT0	18	37	37	I/O I I I	ST ST ST ST	Digital I/O. Timer0 alternate clock input. Timer5 alternate clock input. External interrupt 0.
RC4/INT1/SDI/SDA RC4 INT1 SDI SDA	23	42	42	I/O I I I/O	ST ST ST ST	Digital I/O. External interrupt 1. SPI Data in. I ² C Data I/O.
RC5/INT2/SCK/SCL RC5 INT2 SCK SCL	24	43	43	I/O I I/O I/O	ST ST ST ST	Digital I/O. External interrupt 2. Synchronous serial clock input/output for SPI mode. Synchronous serial clock input/output for I ² C mode.
RC6/TX/CK/ \overline{SS} RC6 TX CK \overline{SS}	25	44	44	I/O O I/O I	ST — ST ST	Digital I/O. USART Asynchronous Transmit. USART Synchronous Clock (see related RX/DT). SPI Slave Select input.
RC7/RX/DT/SDO RC7 RX DT SDO	26	1	1	I/O I I/O O	ST ST ST —	Digital I/O. USART Asynchronous Receive. USART Synchronous Data (see related TX/CK). SPI Data out.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
O = Output P = Power
OD = Open-Drain (no diode to V_{DD})

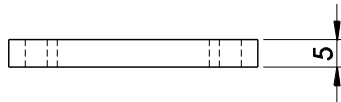
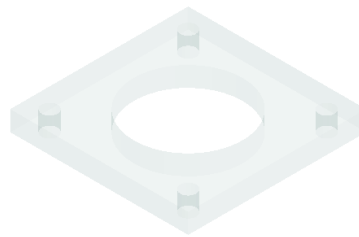
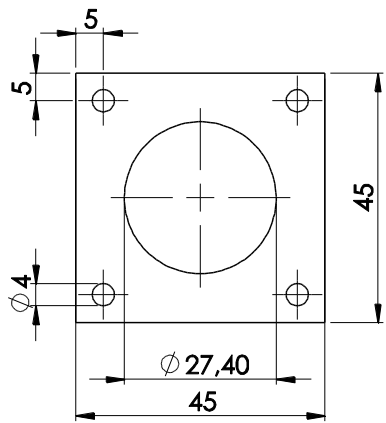
PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 1-3: PIC18F4331/4431 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

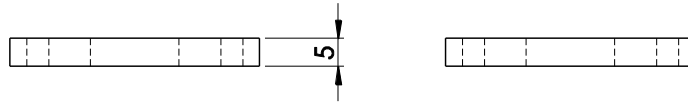
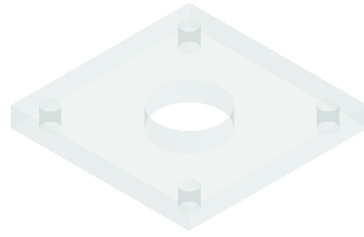
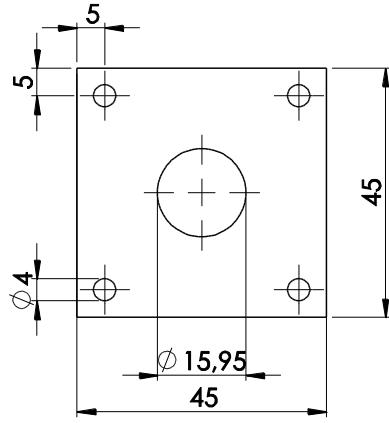
Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	DIP	TQFP	QFN			
RD0/T0CKI/T5CKI	19	38	38	I/O	ST	PORTD is a bidirectional I/O port, or a Parallel Slave Port (PSP) for interfacing to a microprocessor port. These pins have TTL input buffers when PSP module is enabled. Digital I/O. Timer0 external clock input. Timer5 input clock.
RD0				I	ST	
T0CKI				I	ST	
T5CKI						
RD1/SDO	20	39	39	I/O	ST	Digital I/O. SPI Data out.
RD1				O	—	
SDO						
RD2/SDI/SDA	21	40	40	I/O	ST	Digital I/O. SPI Data in. I ² C Data I/O.
RD2				I	ST	
SDI				I/O	ST	
SDA						
RD3/SCK/SCL	22	41	41	I/O	ST	Digital I/O. Synchronous serial clock input/output for SPI mode. Synchronous serial clock input/output for I ² C mode.
RD3				I/O	ST	
SCK				I/O	ST	
SCL				I/O	ST	
RD4/FLTA	27	2	2	I/O	ST	Digital I/O. Fault interrupt input pin.
RD4				I	ST	
FLTA						
RD5/PWM4	28	3	3	I/O	ST	Digital I/O. PWM output 4.
RD5				O	TTL	
PWM4						
RD6/PWM6	29	4	4	I/O	ST	Digital I/O. PWM output 6.
RD6				O	TTL	
PWM6						
RD7/PWM7	30	5	5	I/O	ST	Digital I/O. PWM output 7.
RD7				O	TTL	
PWM7						

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power
 OD = Open-Drain (no diode to V_{DD})

Παράρτημα Θ: Κατασκευαστικά σχέδια στηριγμάτων αντλίας και παλμογεννήτριας



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:						CSL NTUA			
TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:									
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE			ΣΤΗΡΙΓΜΑ ΑΝΤΛΙΑΣ			
CHKD									
APPYD									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE:1:1			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION																										
SURFACE FINISH:								CSL NTUA ΣΤΗΡΙΓΜΑ ΠΑΛΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ																												
TOLERANCES:																																				
LINEAR:								<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 10%;">DRAWN</td> <td style="width: 20%;">NAME</td> <td style="width: 20%;">SIGNATURE</td> <td style="width: 20%;">DATE</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td>CHK'D</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APP'VD</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MFG</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Q.A</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE		CHK'D					APP'VD					MFG					Q.A				
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE																																	
CHK'D																																				
APP'VD																																				
MFG																																				
Q.A																																				
ANGULAR:								MATERIAL:		DWG NO.																										
										A4																										
								WEIGHT:		SCALE:1:1																										
										SHEET 1 OF 1																										