



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ηλεκτρονικού
Συστήματος Τετράποδου Ρομπότ**

Μπολανάκης Γεώργιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

*Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου*

Αθήνα, Μάρτιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ηλεκτρονικού
Συστήματος Τετράποδου Ρομπότ**

Μπολανάκης Γεώργιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

*Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου*

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28η Μαρτίου 2018

.....
Ε. Παπαδόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Σούντρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Σωτηριάδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018

.....

Γεώργιος Γ. Μπολανάκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Γ. Μπολανάκης, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφεται η διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης του νέου ηλεκτρονικού συστήματος του τετράποδου ρομπότ «Λαίλαψ». Το ρομπότ αναπτύσσεται υπό την επίβλεψη του καθηγητή Ευάγγελου Παπαδόπουλου, στο εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Καταρχάς, πραγματοποιήθηκαν πειράματα στο αρχικό ηλεκτρονικό σύστημα για να διερευνηθούν τα αίτια της αστάθειας του, καθώς και οι σχεδιαστικές του ατέλειες. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των αρχικών πειραμάτων, έγιναν κατάλληλες παρεμβάσεις και στη συνέχεια δοκιμές, από τις οποίες επιβεβαιώθηκαν οι υποθέσεις μας που αποτέλεσαν τη βάση για τον σχεδιασμό του νέου ηλεκτρονικού συστήματος. Η νέα αρχιτεκτονική του συστήματος και των επιμέρους υποσυστημάτων του, έγινε με γνώμονα την επίτευξη ηλεκτρικής σταθερότητας και της γενικότερης αξιοπιστίας του συστήματος, χαρακτηριστικά που απουσίαζαν από την αρχική υλοποίηση. Έγινε προσπάθεια η υλοποίηση του νέου συστήματος να συμβαδίζει με τις συνεχώς εξελισσόμενες τεχνολογικές τάσεις του τομέα της ηλεκτρονικής και των ενσωματωμένων συστημάτων. Παράλληλα, διατηρήθηκε σημαντικά η απλότητα του συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα αποσφαλμάτωσης τόσο του υλικού, όσο και του λογισμικού που το απαρτίζουν.

Ένα μέρος αυτής της διπλωματικής εργασίας αφιερώθηκε στην αναπτυξιακή πλακέτα «LAUNCHXL-F28379D» της εταιρείας Texas Instruments. Συγκεκριμένα, έχοντας την πλακέτα αυτή ως κεντρικό πυρήνα στη νέα αρχιτεκτονική του συστήματος ελέγχου, δημιουργήθηκε το απαραίτητο υλικό και λογισμικό για τον έλεγχο των αρθρώσεων του ρομπότ.

Λέξεις κλειδιά

Ηλεκτρονικό Σύστημα, Σχεδιασμός Συστήματος, Ενσωματωμένα Συστήματα, Τετράποδα Ρομπότ, Μικροελεγκτής, Ελεγκτής PD, Έλεγχος Θέσης, Οπτοζεύκτης, Παλμοτροφοδοτικό, LAUNCHXL-F28379D, TMS320F28379D, ePWM, eQEP, GPIO, DCL

Abstract

The aim of this diploma thesis is to describe the process of designing and implementing the new electronic system of the multi-joint, quadruped robot «Laelaps». The robot is developed by the research team of Prof. Evangelos Papadopoulos at the school of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.

To begin with, experiments were carried out with the first version of the electronic system in order to investigate the causes of its instability and to determine the flaws of the original implementation. Taking into account the results from these experiments, we made temporary changes in order to retest the entire system before proceeding with the design of the new electronics architecture. The main goal of the new architecture was to achieve electrical stability, as well as to increase the reliability of the entire robotic system. Decisions were made to keep up with the new technological trends, and also to ensure simplicity in its implementation.

An important part of this diploma thesis was the employment of the development board LAUNCHXL-F28379D made by Texas Instruments. This board is the main core of the new control system. We developed the required hardware and software to control the joints of the robot as part of the new embedded system architecture.

Keywords

Electronic System, System Design, Embedded System, Quadruped Robot, Microcontroller, PD Control, Position Control, Optocoupler, DC/DC Converter, LAUNCHXL-F28379D, TMS320F28379D, ePWM, eQEP, GPIO, DCL

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν κατά το χρονικό διάστημα της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Πρώτα από όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ευάγγελο Παπαδόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την πρώτη κιόλας στιγμή, δίνοντάς μου την ευκαιρία να πραγματοποιήσω τη διπλωματική μου στο εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου. Τον ευχαριστώ, επίσης, για τις συμβουλές και την καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλο αυτό το διάστημα, αλλά και για τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε κατά την περίοδο συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους υποψήφιους διδάκτορες Κώστα Κουτσούκη, Θανάση Μαστρογεωργίου και ιδιαίτερα στον Κωνσταντίνο Μαχαιρά για την άριστη συνεργασία που είχαμε, καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν. Είμαι ειλικρινά ευγνώμων για την υποστήριξη που μου προσέφεραν πολλά μέλη του εργαστηρίου, όπως ο Γιάννης Βάλβης, ο Μάνος Σωτηρόπουλος και ο Ηλίας Ζουρνατζής. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τη Γεωργία Πανάγου για την μεγάλη κατανόηση και τη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου και κυρίως στη μητέρα μου, για την καθημερινή, υλική και ηθική, στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αφιερώνεται στη γιαγιά μου Μαρία

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	6
Ευχαριστίες	7
Περιεχόμενα	9
Κατάλογος Εικόνων.....	11
Κατάλογος Πινάκων	14
1 Εισαγωγή.....	15
1.1 Σκοπός Εργασίας	15
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	16
1.3 Δομή Εργασίας	19
2 Εισαγωγικές Έννοιες.....	20
2.1 Ηλεκτρικός Θόρυβος και τεχνικές απόσβεσής του	20
2.2 Ενίσχυση ψηφιακών σημάτων	23
2.3 Οπτοζεύκτης (Optocoupler)	24
2.4 Τροφοδοτικά συνεχούς τάσης	25
2.5 Ενσωματωμένα Συστήματα	27
3 Πειράματα στο Αρχικό Ηλεκτρονικό Σύστημα	29
3.1 Εισαγωγή	29
3.2 Το ηλεκτρονικό σύστημα του ρομπότ «Λαίλαψ Ι»	29
3.2.1 Εισαγωγή.....	29
3.2.2 Η αρχιτεκτονική του αρχικού συστήματος	29
3.2.3 Γνωστά προβλήματα	33
3.3 Α΄ Φάση πειραμάτων	33
3.3.1 Ασταθής λειτουργία του κινητήρα	33
3.3.2 Περαιτέρω έλεγχος των σημάτων οδήγησης PWM και DIR.....	35
3.3.3 Έλεγχος ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ψηφιακών ακροδεκτών της πλακέτας DM35820-HR.....	36
3.3.4 Αποτελέσματα και σχολιασμός Α΄ Φάσης Πειραμάτων	38
3.4 Β΄ Φάση πειραμάτων	38
3.4.1 Ενίσχυση των σημάτων ελέγχου PWM και DIR	39
3.4.2 Προσάρτηση επιδιορθωτικής πλακέτας	42
3.4.3 Κυμάτωση στο σήμα PWM.....	44
3.4.4 Σφάλμα στο Duty Cycle του σήματος PWM.....	45
3.4.5 Μετατροπείας Τάσης DC/DC	48
3.4.6 Πρόσθετες βελτιωτικές ενέργειες στο αρχικό σύστημα	50
3.4.7 Κατασκευή και λειτουργία πλακέτας ελέγχου οπτοζευκτών	52
3.4.8 Δοκιμή του συνολικού αρχικού συστήματος μετά τις βελτιώσεις	54
4 Το Ηλεκτρονικό Σύστημα του Τετράποδου Ρομπότ «Λαίλαψ ΙΙ».....	55
4.1 Εισαγωγή	55
4.2 Η αρχιτεκτονική του νέου ηλεκτρονικού συστήματος	56
4.3 Σύστημα Ενεργειακής Τροφοδοσίας.....	58

4.3.1	Γενικά.....	58
4.3.2	Υποσύστημα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος	58
4.3.3	Υποσύστημα τροφοδοσίας χαμηλής ισχύος.....	61
4.4	Σύστημα Ελέγχου	62
4.4.1	Γενικά.....	62
4.4.2	Περιφερειακή Μονάδα Ελέγχου.....	62
4.4.3	Υποσύστημα Οδήγησης	68
4.4.4	Υποσύστημα ανατροφοδότησης	75
5	Προγραμματισμός Περιφερειακής Μονάδας Ελέγχου	76
5.1	Εισαγωγή.....	76
5.2	Ο μικροελεγκτής TMS320F28379D.....	77
5.3	Παραμετροποίηση του περιφερειακού ePWM.....	80
5.4	Παραμετροποίηση του περιφερειακού eQEP.....	82
5.5	Πολυπλεξία των ακροδεκτών GPIO	85
5.6	Έλεγχος θέσης με χρήση της βιβλιοθήκης «Digital Control Library V2.1»	87
5.7	Δοκιμή του συνολικού τελικού συστήματος «Λαίλαψ II»	90
6	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	93
6.1	Συμπεράσματα	93
6.2	Μελλοντική Εργασία	93
7	Βιβλιογραφία.....	95
8	Datasheets.....	96
9	Παράρτημα A: Main.c.....	97
10	Παράρτημα B: TMS320F28379D Functional Block Diagram	104
11	Παράρτημα Γ: Bill Of Materials	105

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1.	Οπτική σύγκριση μεταξύ του αρχικού (αριστερά) και του νέου (δεξιά) ηλεκτρονικού συστήματος του τετράποδου ρομπότ «Λαίλαψ».	15
Εικόνα 1-2.	Το τετράποδο ρομπότ «Phony Pony» του Frank McGhee (1966).	17
Εικόνα 1-3.	Το τετράποδο ρομπότ του Daniel J. DiLorenzo (1987).	17
Εικόνα 1-4.	Η εξέλιξη του ρομπότ BigDog της εταιρείας Boston Dynamics (2005-2008).	18
Εικόνα 1-5.	Η δεύτερη έκδοση του τετράποδου ρομπότ Cheetah του πανεπιστημίου MIT (2017)..	18
Εικόνα 2-1.	Τμήμα πλακέτας πριν και μετά την τοποθέτηση νησίδων του σημείου αναφοράς (GND).	21
Εικόνα 2-2.	Το πιο απλό πραγματοποιησιμο βαθυτερατό RC φίλτρο.	22
Εικόνα 2-3.	Απόρριψη κοινού σήματος κατά τη μεταφορά σήματος σε διαφορεική μορφή.	22
Εικόνα 2-4.	Καλώδιο Ethernet με θωράκιση φύλλου αλουμινίου και μεταλλικού πλέγματος.	23
Εικόνα 2-5.	Το στοιχειώδες κύκλωμα ενισχυτή κοινού εκπομπού (Common Emitter).	24
Εικόνα 2-6.	Η βασική δομή του ενισχυτή κοινής πηγής (Common Source).	24
Εικόνα 2-7.	Δομή του οπτοζεύκτη 6N137 τεχνολογίας TTL της εταιρείας VISHAY.	25
Εικόνα 2-8.	Το γραμμικό τροφοδοτικό LM1117 της εταιρείας Texas Instruments.	26
Εικόνα 2-9.	Το παλμοτροφοδοτικό D24V60F5 της εταιρείας Pololu.	27
Εικόνα 3-1.	Η αρχιτεκτονική του ηλεκτρονικού συστήματος του ρομπότ «Λαίλαψ I».	30
Εικόνα 3-2.	Η πλακέτα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος (αριστερά) και η πρώτη έκδοση της πλακέτας επέκτασης των οδηγών των κινητήρων (δεξιά).	31
Εικόνα 3-3.	Σχηματικό διάγραμμα του υλοποιημένου κυκλώματος οπτικής σύζευξης στην πλακέτα επέκτασης των οδηγών του αρχικού συστήματος.	32
Εικόνα 3-4.	Ο πύργος PCIe/104 που αποτελούσε την κεντρική μονάδα ελέγχου του αρχικού συστήματος. Στο πρώτο επίπεδο η επεξεργαστική μονάδα, στο δεύτερο επίπεδο η πλακέτα τροφοδοσίας της μονάδας και στα υπόλοιπα επίπεδα οι πλακέτες ακροδεκτών Εισόδου/Εξόδου υψηλής ταχύτητας.	32
Εικόνα 3-5.	Διάταξη 1ου πειράματος. Έλεγχος ενός κινητήρα χωρίς ανατροφοδότηση.	34
Εικόνα 3-6.	Είσοδος (αριστερά) και έξοδος (δεξιά) του σήματος PWM στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης με αποσυνδεδεμένη την τροφοδοσίας υψηλής ισχύος.	34
Εικόνα 3-7.	Έξοδος σήματος PWM από το κύκλωμα οπτικής σύζευξης μετά την τροφοδοσία υψηλής ισχύος.	35
Εικόνα 3-8.	Το σήμα PWM κατά την είσοδο (κίτρινο) και έξοδο (πράσινο) από το κύκλωμα οπτικής σύζευξης.	36
Εικόνα 3-9.	Συνδεσμολογία για την μέτρηση του εξερχόμενου ρεύματος (Source Current).	37
Εικόνα 3-10.	Συνδεσμολογία για την μέτρηση του εισερχόμενου ρεύματος (Sink Current).	37
Εικόνα 3-11.	Σχηματικό διάγραμμα δοκιμαστικής πλακέτας για την ενίσχυση των σημάτων ελέγχου.	39
Εικόνα 3-12.	Δοκιμαστική πλακέτα για την ενίσχυση των σημάτων ελέγχου.	40
Εικόνα 3-13.	Σήμα PWM. Είσοδος (πράσινο) και έξοδος (κίτρινο) στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.	40
Εικόνα 3-14.	Σήμα DIR στην κατάσταση 1. Είσοδος (πράσινο) και έξοδος (κίτρινο) στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.	41
Εικόνα 3-15.	Σήμα DIR στην κατάσταση 0. Είσοδος (πράσινο) και έξοδος (κίτρινο) στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.	41
Εικόνα 3-16.	Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας Extension Board V1.0.	42
Εικόνα 3-17.	Τελικό σχέδιο της πλακέτας Extension Board V1.0.	43

Εικόνα 3-18.	Η πλακέτα επέκτασης των οδηγών με προσαρτημένη την επιδιορθωτική πλακέτα Extension V1.0.	44
Εικόνα 3-19.	Ανεπιθύμητη κυμάτωση στο σήμα PWM που παράγεται στην έξοδο του κυκλώματος οπτικής σύζευξης.	44
Εικόνα 3-20.	Το σήμα PWM που παράγεται στην έξοδο του κυκλώματος οπτικής σύζευξης μετά την τοποθέτηση πυκνωτή χωρητικότητας 10μF στον ακροδέκτη τροφοδοσίας του οπτοζεύκτη 6N137.	45
Εικόνα 3-21.	Η σχέση μεταξύ της αντίστασης πρόσδεσης (Pull-Up) και της παραμόρφωσης του παλμού στην έξοδο του οπτοζεύκτη 6N137 όπως δίνεται από τον κατασκευαστή.	46
Εικόνα 3-22.	Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος προσομοίωσης.	46
Εικόνα 3-23.	Προσομοίωση για Pull-Up αντίσταση $R_p=10k\Omega$ και Duty Cycle της εισερχόμενης παλμοσειράς 10%. Η είσοδος (πράσινο) και η έξοδος (πορτοκαλί) του παλμού στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.	47
Εικόνα 3-24.	Προσομοίωση για Pull-Up αντίσταση $R_p=1k\Omega$ και Duty Cycle της εισερχόμενης παλμοσειράς 10%. Η είσοδος (πράσινο) και η έξοδος (πορτοκαλί) του παλμού στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.	47
Εικόνα 3-25.	Προσομοίωση στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης για αντίσταση $R_p=10k\Omega$ και Duty Cycle σήματος PWM 0,5%. Η είσοδος (πράσινο) και η έξοδος (πορτοκαλί) του παλμού.	48
Εικόνα 3-26.	Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας πρόσδεσης του μετατροπέα τάσης.	49
Εικόνα 3-27.	Ανω επίπεδο της πλακέτας πρόσδεσης του μετατροπέα τάσης.	49
Εικόνα 3-28.	Ο μετατροπέας τάσης UEI25-050-D48 κολλημένος στην ειδική πλακέτα.	49
Εικόνα 3-29.	Προσάρτηση του μετατροπέα τάσης στο αρχικό ηλεκτρονικό σύστημα παροχής υψηλής ισχύος.	50
Εικόνα 3-30.	Πλακέτα τροφοδοσίας χαμηλής ισχύος. Ήταν περιττή η χρήση της και αφαιρέθηκε από το αρχικό σύστημα.	52
Εικόνα 3-31.	Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας ελέγχου οπτοζευκτών OptoTester V1.0.	53
Εικόνα 3-32.	Ανω επίπεδο της πλακέτας ελέγχου οπτοζευκτών OptoTester V1.0.	53
Εικόνα 3-33.	Το αρχικό ρομπωτικό σύστημα Λαίλαψ I μετά τις βελτιώσεις που έγιναν σε αυτό. Στιγμιότυπο πειράματος που πραγματοποιήθηκε από τους υπεύθυνους υποψήφιους διδάκτορες.	54
Εικόνα 4-1.	Το τετράποδο ρομπότ «Λαίλαψ II» και το νέο ηλεκτρονικό σύστημα.	55
Εικόνα 4-2.	Η αρχιτεκτονική του νέου Ηλεκτρονικού Συστήματος του ρομπότ «Λαίλαψ II».	57
Εικόνα 4-3.	Τροφοδοτικό εργαστηρίου υψηλής ισχύος N8737A της εταιρείας Agilent.	58
Εικόνα 4-4.	Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας τροφοδοσίας υψηλής ισχύος Power Distribution Board V2.0.	59
Εικόνα 4-5.	Ανω και κάτω επίπεδο της πλακέτας τροφοδοσίας υψηλής ισχύος Power Distribution Board V2.0.	59
Εικόνα 4-6.	Η πλακέτα υψηλής ισχύος Power Distribution Board V2.0 προσαρτημένη στο ρομπότ «Λαίλαψ II».	60
Εικόνα 4-7.	Εργαστηριακό τροφοδοτικό Agilent U8002a.	61
Εικόνα 4-8.	Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board V1.0.	63
Εικόνα 4-9.	Ανω και κάτω επίπεδο της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board V1.0.	64
Εικόνα 4-10.	Κάτω επίπεδο της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board V1.0.	64
Εικόνα 4-11.	Ανω επίπεδο της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board V1.0.	64
Εικόνα 4-12.	Οι τελικές πλακέτες TMS320F28379D Extension Board V1.0 που κατασκευάστηκαν.	65
Εικόνα 4-13.	Σήματα κωδικοποιητή QEPA, QEPB σε απλή μορφή και φαινόμενο συνακρόασης.	66
Εικόνα 4-14.	Μέτρηση αναλογικού σήματος πληροφορίας από τον κωδικοποιητή θέσης RMB28.	67

Εικόνα 4-15.	Αρχική υλοποίηση της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board με χρήση της εργαλειομηχανής LPKF. Πάνω φαίνεται το στάδιο δημιουργίας των πολλαπλών VIA πριν την επικόλληση των στοιχείων της πλακέτας.....	68
Εικόνα 4-16.	Σχηματικό διάγραμμα του νέου κυκλώματος οπτικής σύζευξης που προσομοιώθηκε..	69
Εικόνα 4-17.	Προσομοίωση για Duty Cycle 10% της εισερχόμενης παλμοσειράς. Η είσοδος (πράσινο) και η έξοδος (πορτοκαλί) του παλμού στο νέο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.	69
Εικόνα 4-18.	Προσομοίωση για Duty Cycle 0,5% της εισερχόμενης παλμοσειράς. Η είσοδος (πράσινο) και η έξοδος (πορτοκαλί) του παλμού στο νέο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.	70
Εικόνα 4-19.	Διάταξη πειραμάτων με χρήση της πλακέτας δοκιμών του κυκλώματος οπτικής σύζευξης.	70
Εικόνα 4-20.	Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας δοκιμών του κυκλώματος οπτικής σύζευξης.	71
Εικόνα 4-21.	Σχέδιο της πλακέτας δοκιμών του κυκλώματος οπτικής σύζευξης.	71
Εικόνα 4-22.	Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας επέκτασης των οδηγών Driver Ext. Board V2.0.	73
Εικόνα 4-23.	Άνω και κάτω επίπεδο πλακέτας επέκτασης των οδηγών Driver Ext. Board V2.0.	74
Εικόνα 4-24.	Ξεχωριστή απεικόνιση των δύο επιπέδων της πλακέτας επέκτασης των οδηγών Driver Ext. Board V2.0. Διακρίνονται οι τρεις νησίδες των σημείων αναφοράς.	74
Εικόνα 4-25.	Η πλακέτα Driver Ext. Board V2.0.	74
Εικόνα 4-26.	Ο αυξητικός κωδικοποιητής θέσης της εταιρείας BROADCOM®.	75
Εικόνα 5-1.	Η αναπτυσσόμενη πλακέτα LAUNCHXL-F28379D της εταιρείας Texas Instruments.	76
Εικόνα 5-2.	Η Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας και ο συν-επεξεργαστής CLA (Control Law Accelerator) της οικογένειας C2000™.	77
Εικόνα 5-3.	Χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή TMS320F28379D.	79
Εικόνα 5-4.	Σήματα και καταχωρητές τμήματος του υποσυστήματος Time-Base Submodule.....	80
Εικόνα 5-5.	Τα παραγόμενα σήματα QEPA, QEPB και QEPI από έναν αυξητικό κωδικοποιητή.	83
Εικόνα 5-6.	Οι τέσσερις διακριτές καταστάσεις του υποσυστήματος DQU.....	83
Εικόνα 5-7.	Ονοματολογία υποστηριζόμενων βασικών συναρτήσεων.	87
Εικόνα 5-8.	Αρχιτεκτονική του ελεγκτή με αναλογική συνιστώσα και διαφοριστή DCL_runPID_C4.88	
Εικόνα 5-9.	Μετρήσεις γωνιακών θέσεων στην πρώτη δοκιμή της περιφερειακής μονάδας ελέγχου.....	91
Εικόνα 5-10.	Μετρήσεις γωνιακής θέσης της άρθρωσης του γοφού (hip) στο τελικό πείραμα.....	91
Εικόνα 5-11.	Μετρήσεις γωνιακής θέσης της άρθρωσης του γονάτου (knee) στο τελικό πείραμα.....	92
Εικόνα 5-12.	Στιγμιότυπα του ρομπότ «Λαίλαψ II» από το τελικό πείραμα που πραγματοποιήθηκε.92	

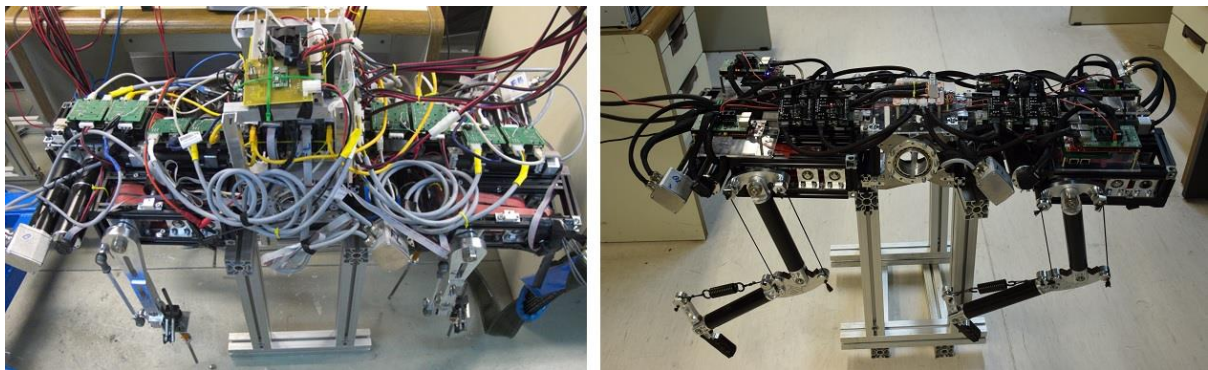
Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Αναμενόμενες και μετρηθείσες τιμές του εξερχόμενου ρεύματος (Source Current).	37
Πίνακας 3-2. Αναμενόμενες και μετρηθείσες τιμές του εισερχόμενου ρεύματος (Sink Current).	37
Πίνακας 4-1. Αποτελέσματα σύγκρισης αρχικού και νέου κυκλώματος οπτικής σύζευξης.....	72
Πίνακας 5-1. Μέρος του πίνακα πολυπλεξίας ακροδεκτών GPIO.	85
Πίνακας 5-2. Benchmarks διαφόρων υλοποιήσεων του ελεγκτή PID.	89
Πίνακας 11-1. Λίστα υλικών για την κατασκευή της πλακέτας Power Distribution Board V2.0.	105
Πίνακας 11-2. Λίστα υλικών για την κατασκευή της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board V1.0.....	105
Πίνακας 11-3. Λίστα υλικών για την κατασκευή της πλακέτας Driver Ext. Board V2.0.....	106

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του νέου ηλεκτρονικού συστήματος του τετράποδου ρομπότ πολλαπλών αρθρώσεων και μεταβλητής υποχωρητικότητας «Λαίλαψ» (Εικόνα 1-1). Έγινε προσπάθεια να μην επεκταθούμε σε περιττές πληροφορίες και να εστιάσουμε στις μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν, ώστε η εργασία που εκπονήθηκε να αποτελεί βοήθημα για τη συστηματική μελέτη, τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των ηλεκτρονικών συστημάτων σύγχρονων ρομποτικών εφαρμογών.



Εικόνα 1-1. Οπτική σύγκριση μεταξύ του αρχικού (αριστερά) και του νέου (δεξιά) ηλεκτρονικού συστήματος του τετράποδου ρομπότ «Λαίλαψ».

Σε ένα εκτεταμένο και πολύπλοκο ρομποτικό σύστημα το οποίο παρουσιάζει αρκετές και ασυσχέτιστες ηλεκτρικές αστάθειες είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ορισθεί ένας ντετερμινιστικός τρόπος προσδιορισμού και αντιμετώπισης των προβλημάτων που παρουσιάζει. Η εξαρχής ανάλυση και η εις βάθος γνώση του ρομποτικού συστήματος δεν αποτελούσε ρεαλιστική αντιμετώπιση για την επίλυση των ασταθειών, λόγω της μεγάλης έκτασης του συστήματος. Για τον λόγο αυτόν, χρησιμοποιήθηκε αντίστροφη μηχανική προσέγγιση (Reverse Engineering) για τον αρχικό προσδιορισμό των αιτιών που προκαλούσαν τις αστάθειες. Ανάλογα με την κατεύθυνση αυτής της προσέγγισης, γινόταν συστηματική μελέτη των σχετιζόμενων υποσυστημάτων.

Η πρώτη επαφή με το ρομποτικό σύστημα «Λαίλαψ» ήταν πραγματική πρόκληση. Για την αναγνώριση των ιδιοτήτων του, τον ορθό σχεδιασμό και την υλοποίηση του νέου ηλεκτρονικού συστήματος πραγματοποιήθηκαν αρκετά πειράματα στο αρχικό σύστημα, ώστε να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι ηλεκτρικές του αστάθειες και οι αδυναμίες στην αρχιτεκτονική του. Μεγάλο μέρος της εργασίας αφιερώθηκε στη βελτίωση του αρχικού συστήματος και στην πραγματοποίηση δοκιμών με ολόκληρο το ρομποτικό σύστημα σε λειτουργία, ώστε να ληφθούν υπόψη όλες οι πιθανές παράμετροι που συμβάλλουν στην ηλεκτρική του σταθερότητα.

Κατά τη συνολική εξέλιξη του ρομπότ από τους επιστημονικούς υπεύθυνους, πραγματοποιήθηκαν σημαντικές αλλαγές στην αρχιτεκτονική του συστήματος ελέγχου, αφού απελευθερώθηκε μεγάλο μέρος των υπολογιστικών πόρων της προηγούμενης κεντρικής μονάδας ελέγχου και διαμοιράστηκε σε τέσσερις περιφερειακές μονάδες ελέγχου. Το γεγονός αυτό, δημιούργησε την ανάγκη για την υλοποίηση

κατάλληλου υλικού και λογισμικού για την πραγμάτωση της νέας αρχιτεκτονικής. Οι ανάγκες αυτές καλύφθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας αυτής.

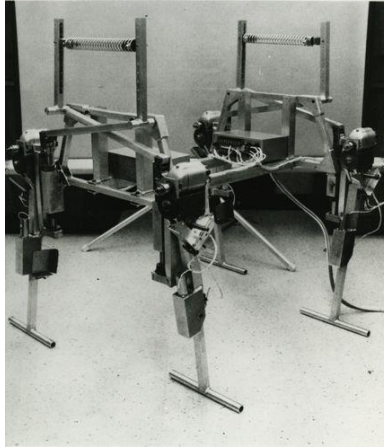
Τέλος, σημαντικός στόχος ήταν η παροχή της δυνατότητας εύκολης αποσφαλμάτωσης (Debug) των διαφόρων ηλεκτρονικών υποσυστημάτων χωρίς την ανάγκη αφαίρεσής τους από το σύστημα ή τη δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για τη καταγραφή σημαντικών ηλεκτρικών σημάτων. Η απαίτηση αυτή έγινε ιδιαίτερα αισθητή κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων στο αρχικό σύστημα και λήφθηκε σοβαρά υπόψη για την κάλυψη μελλοντικών αναγκών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υλοποίηση του νέου ηλεκτρονικού συστήματος παρέχει και τη δυνατότητα ηλεκτρικά απομονωμένης αποσφαλμάτωσης του λογισμικού που εκτελείται στις περιφερειακές μονάδες ελέγχου μέσω της διεπαφής JTAG, η οποία παρέχεται από την εταιρεία Texas Instruments.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό το ερευνητικό ενδιαφέρον του ευρύτερου τομέα της ρομποτικής και των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, στην κατασκευή ρομποτικών συστημάτων που εμπνέονται από τη δομή και τις κινητικές ικανότητες των τετράποδων ζώων [14]. Βασικό πλεονέκτημα των ρομπότ με πόδια, συγκριτικά με άλλες υλοποιήσεις κινούμενων ρομπότ, είναι η δυνατότητα κίνησης σε τραχύ έδαφος, εκεί όπου άλλες αρχιτεκτονικές θα αποτύγχαναν ή θα καθυστερούσαν ιδιαίτερα. Τα ρομπότ με πόδια παρέχουν την προοπτική μετακίνησης και προσφοράς πολύτιμων υπηρεσιών σε δυνητικά επικίνδυνα για τον άνθρωπο περιβάλλοντα [7]. Η μετάβαση του ανθρώπου σε ένα τέτοιο περιβάλλον, θα έθετε σε κίνδυνο τη ζωή του λόγω αντίξωων συνθηκών και ανεξέλεγκτα ευμετάβλητων παραγόντων.

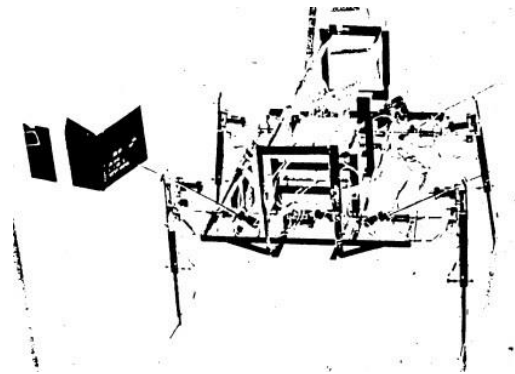
Από την άλλη πλευρά, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός τετράποδου ρομπότ είναι δυσεπίτευκτη διαδικασία και απαιτεί τον εξαρχής προσδιορισμό πολλών παραμέτρων που αφορούν όχι μόνο το ίδιο το ρομπότ, αλλά και το περιβάλλον λειτουργίας για το οποίο προορίζεται. Επίσης, τα τετράποδα ρομπότ που έχουν υλοποιηθεί έως τώρα είναι πολύ ενεργοβόρα σε σύγκριση με τα ρομπότ με ρόδες, με αποτέλεσμα μερίδιο της έρευνας να έχει επικεντρωθεί σε τεχνικές μείωσης του ενεργειακού κόστους για τη λειτουργία τους [9] [4].

Γενικότερα, τα ρομπότ με πόδια μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την τεχνική επενέργησης που χρησιμοποιείται. Στην πρώτη και πιο διαδεδομένη κατηγορία ανήκουν αυτά που χρησιμοποιούν ηλεκτρική επενέργηση, ενώ ακολουθούν αυτά στα οποία χρησιμοποιείται υδραυλική και πνευματική επενέργηση παρόλο που ο έλεγχος των αρθρώσεων είναι πιο δύσκολος, η απόδοση αυξάνεται σε μεγάλα φορτία. Τα πρώτα ρομπότ με πόδια που υλοποιήθηκαν ήταν ιδιαίτερα ογκώδη και χρησιμοποιούσαν ως επί το πλείστον υδραυλικά συστήματα επενέργησης. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, και ειδικότερα του τομέα της ηλεκτρονικής και των υπολογιστικών συστημάτων, ξεκίνησε η χρήση των ηλεκτρικών επενεργητών. Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τη δυναμική των τετράποδων ρομπότ και τον μηχανολογικό τους σχεδιασμό με αναφορές να ξεκινούν από το 1966. Ωστόσο, πολύ λίγες από αυτές περιλαμβάνουν εκτενή αναφορά στα ηλεκτρονικά συστήματα από τα οποία αποτελούνται. Ένα από τα πρώτα τετράποδα ρομπότ που υλοποιήθηκαν με ηλεκτρική επενέργηση ήταν το «Phony Pony» (Εικόνα 1-2). Το ρομπότ αυτό χρησιμοποιούσε για την επενέργηση στις αρθρώσεις τροποποιημένους ηλεκτρικούς κινητήρες από δράπανα χειρός.



Εικόνα 1-2. Το τετράποδο ρομπότ «Phony Pony» του Frank McGhee (1966).

Μία από τις πρώτες αναφορές στην αρχιτεκτονική του ηλεκτρονικού συστήματος που υλοποιήθηκε για τετράποδο ρομπότ έγινε στη διπλωματική εργασία του Daniel J. DiLorenzo, που εκπονήθηκε το 1987 στο MIT [6]. Ο DiLorenzo περιέγραψε αναλυτικά τις προδιαγραφές απαιτήσεων του ηλεκτρονικού συστήματος και πραγματοποίησε δοκιμές ελέγχου των κινητήρων με κυκλώματα που παρήγαγαν αναλογική τάση, επιτυγχάνοντας έτσι τον έλεγχο της ροπής. Ωστόσο, όπως αποδείχτηκε στη συνέχεια της μελέτης του, ο έλεγχος των κινητήρων με αναλογική τάση είχε πολλές ενεργειακές απώλειες. Στο τελικό του σχέδιο, με στόχο την παραγωγή παλμοσειρών PWM για τον έλεγχο της ροπής, πρωταγωνιστικό ρόλο στο υποσύστημα οδήγησης έπαιξαν τα ολοκληρωμένα κυκλώματα 74LS174. Ο έλεγχος σε υψηλό επίπεδο πραγματοποιήθηκε από κεντρικό υπολογιστή και το λογισμικό είχε δημιουργηθεί με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού C.



Εικόνα 1-3. Το τετράποδο ρομπότ του Daniel J. DiLorenzo (1987).

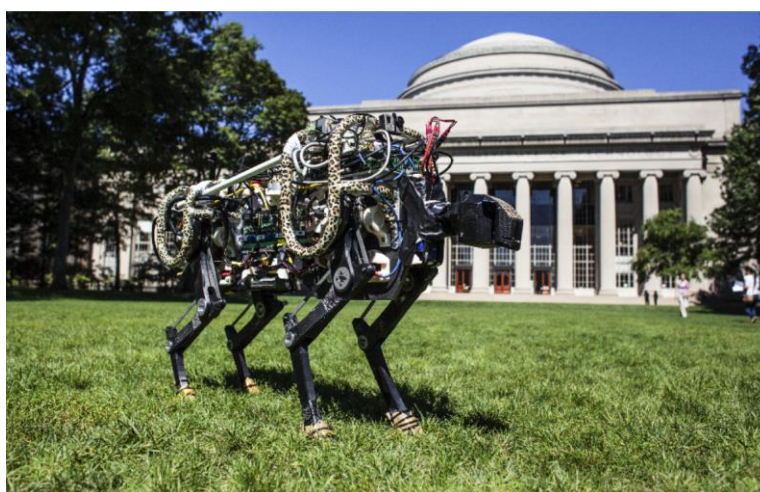
Η εξέλιξη των τετράποδων ρομπότ από τα τέλη της δεκαετίας του '80 έως σήμερα είναι ραγδαία. Η έρευνα του Marc Raibert και των ερευνητικών ομάδων που διέυθνε άνοιξε νέους ορίζοντες στον τομέα αυτό [10][11][12][13]. Το 1992 ίδρυσε την εταιρεία Boston Dynamics, η οποία διαδραματίζει μέχρι και σήμερα σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των ρομποτικών συστημάτων με πόδια. Το φθινόπωρο του 2005, παρουσιάστηκε από την εταιρεία αυτή η πρώτη έκδοση του τετράποδου ρομπότ BigDog [5]. Η κεντρική μονάδα ελέγχου του BigDog υλοποιήθηκε με το πρότυπο ενσωματωμένου υπολογιστικού συστήματος PC/104, ενώ το λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν πραγματικού χρόνου (QNX). Το ρομπότ διαθέτει κάμερα με δυνατότητα καταγραφής στερεοσκοπικής εικόνας ανάλυσης 320x240 εικονοστοιχείων (pixels) και συχνότητα ανανέωσης 29 καρέ ανά δευτερόλεπτο (fps).

Επιπλέον, διέθετε αισθητήρες απόστασης (IR) στα γόνατα, ηλεκτρονική πυξίδα και γυροσκόπιο για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού. Τα χρόνια που ακολούθησαν η εξέλιξη του ρομπότ ήταν τρομακτική. Στο ηλεκτρονικό σύστημα του BigDog προστέθηκαν αισθητήρες LiDAR και GPS. Δυστυχώς, λίγα μπορούμε να γνωρίζουμε για την τρέχουσα κατάσταση του ρομπότ, αφού η εταιρεία δεν προβαίνει σε δημοσίευση των χαρακτηριστικών του, με τις μόνες πληροφορίες να προέρχονται από βίντεο και στιγμιότυπα της λειτουργίας του. Παράλληλα με την ανάπτυξη του BigDog αναπτύσσονται από την ίδια εταιρεία και άλλα παρεμφερή ρομποτικά συστήματα με πόδια, όπως το LittleDog, το LS3, το SpotMini και το Atlas [1][2][3].



Εικόνα 1-4. Η εξέλιξη του ρομπότ BigDog της εταιρείας Boston Dynamics (2005-2008).

Το 2014 το πανεπιστήμιο MIT δημοσίευσε στοιχεία για το τετράποδο ρομπότ Cheetah [8]. Αν και δεν έγινε εκτενής αναφορά στα επιμέρους ηλεκτρονικά συστήματα, αναφέρθηκε μεταξύ άλλων η χρήση των σερβοκινητήρων DYNAMIXEL EX-106+ για την επενέργηση στις αρθρώσεις των ποδιών. Επίσης, στο αρχικό σύστημα χρησιμοποίησαν τον ελεγκτή πραγματικού χρόνου cRIO-9082 με ενσωματωμένο υποσύστημα FPGA για τον συνολικό έλεγχο του ρομπότ, ενώ η παραμετροποίηση του συστήματος γινόταν ασύρματα (πρότυπο IEEE 802.11), μέσω του λογισμικού LabVIEW. Να σημειωθεί, επίσης, ότι πέτυχαν συχνότητα του βρόχου ελέγχου 4kHz. Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη του ρομπότ Cheetah είναι σημαντική (Εικόνα 1-5).



Εικόνα 1-5. Η δεύτερη έκδοση του τετράποδου ρομπότ Cheetah του πανεπιστημίου MIT (2017).

1.3 Δομή Εργασίας

Στα κεφάλαια που ακολουθούν, αρχικά γίνεται αναφορά σε ιδιαίτερα χρήσιμες για τον αναγνώστη θεωρητικές αρχές και έννοιες, οι οποίες χρειάστηκαν κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της υλοποίησης του νέου ηλεκτρονικού συστήματος. Επίσης, αναφέρονται εν συντομία τα σύγχρονα ενσωματωμένα συστήματα και οι νέες τεχνολογικές τάσεις στον τομέα αυτό.

Το κύριο μέρος της εργασίας αποτελείται από τα Κεφάλαια 3, 4 και 5. Το Κεφάλαιο 3 εστιάζει στο αρχικό ηλεκτρονικό σύστημα. Για τον σκοπό αυτό, αρχικά αναφέρονται τα πειράματα που διενεργήθηκαν, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται σταδιακά η μελέτη του συστήματος, η αναγνώριση των ασταθειών, αλλά και των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών προβλημάτων που τις προκαλούν. Το υπόλοιπο μέρος του κεφαλαίου ασχολείται με τις βελτιωτικές αλλαγές και προσθήσεις που έγιναν στο αρχικό σύστημα, πριν τη διενέργεια των τελικών πειραμάτων με το ρομπότ σε λειτουργία συνολικά.

Το Κεφάλαιο 4 αποτελεί τον καρπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας, στο οποίο παρουσιάζεται αναλυτικά ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του νέου ηλεκτρονικού συστήματος. Αρχικά, γίνεται αναφορά στη νέα αρχιτεκτονική του συστήματος και στη συνέχεια γίνεται ενδελεχής περιγραφή όλων των επιμέρους υποσυστημάτων που τη διέτουν.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή TMS320F28379D της εταιρείας Texas Instruments. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται η αρχιτεκτονική του μικροελεγκτή και ο τρόπος προγραμματισμού και παραμετροποίησής των επιμέρους περιφερειακών υποσυστημάτων του, με απώτερο στόχο τον έλεγχο των αρθρώσεων του ρομπότ.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και γίνεται αναφορά σε πιθανές μελλοντικές βελτιώσεις και αλλαγές για την περαιτέρω εξέλιξη του παρόντος ηλεκτρονικού συστήματος.

2 Εισαγωγικές Έννοιες

2.1 Ηλεκτρικός Θόρυβος και τεχνικές απόσβεσής του

Με την ευρύτερη έννοια, ως ηλεκτρικό θόρυβο ορίζουμε οποιαδήποτε ανεπιθύμητη διαταραχή που εισάγεται σε ένα ηλεκτρικό σήμα και έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση των χαρακτηριστικών του. Οι διαταραχές αυτές προέρχονται συχνά από παράγοντες εκτός του υπό ενδιαφέροντος ηλεκτρικού συστήματος, οι οποίοι μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής το διαταράσσουν (θόρυβος παρεμβολής ή Interference Noise). Για παράδειγμα, στους παράγοντες αυτούς περιλαμβάνονται το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος στις εγκαταστάσεις ενός κτηρίου, οι λάμπες φθορισμού, τα ανεξάρτητα ηλεκτρικά συστήματα που βρίσκονται κοντά και συσκευές ασυρμάτων δικτύων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, δημιουργούνται ηλεκτρομαγνητικά πεδία από τους εξωτερικούς παράγοντες, τα οποία καθίστανται ικανά να προκαλέσουν απότομες διακυμάνσεις στην τάση ευαίσθητων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Η μορφή του θορύβου αυτού μπορεί να παρουσιάζει τυχαιότητα στα χαρακτηριστικά του, γεγονός που εξαρτάται από τον παράγοντα που τον προκαλεί. Επίσης, συχνό φαινόμενο θορύβου παρεμβολής είναι ο θόρυβος συνακρόασης (Crosstalk) που προκαλείται λόγω χωρητικής και επαγωγικής σύζευξης μεταξύ δύο γειτονικών χαλκοδιαδρόμων ή αγωγών που μεταφέρουν ηλεκτρικά σήματα. Στην περίπτωση που ο θόρυβος προέρχεται από τα ίδια τα στοιχεία του κυκλώματος και είναι αποτέλεσμα των μηχανισμών που διέπουν τη λειτουργία τους, αναφερόμαστε στον εγγενή θόρυβο (Inherent Noise). Ο θόρυβος αυτός χαρακτηρίζεται έντονα από τυχαιότητα και είναι δύσκολη η πλήρης αποκοπή του από το κύκλωμα που μας ενδιαφέρει. Σημαντικές κατηγορίες εγγενούς θορύβου είναι ο θερμικός θόρυβος (Thermal Noise), ο θόρυβος βολής (Shot Noise) και ο θόρυβος ριπής (Popcorn Noise).

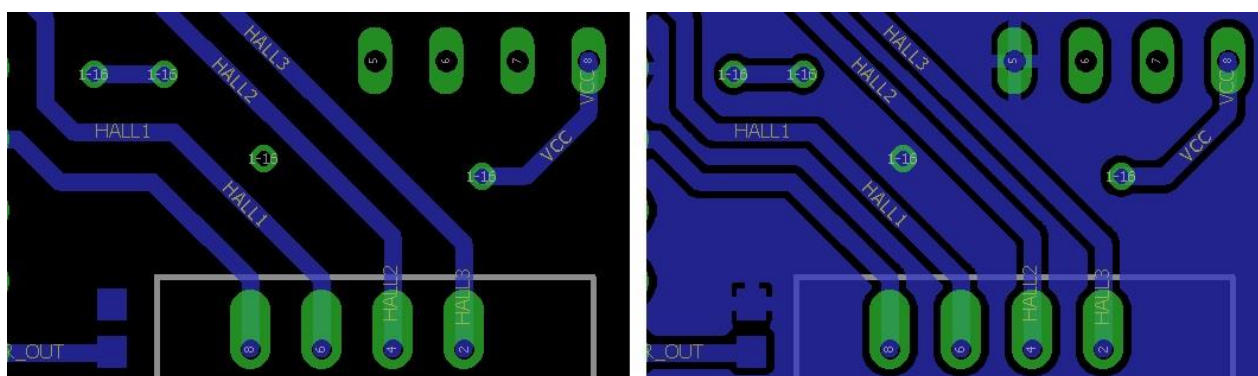
Σε ένα εκτενές ηλεκτρονικό σύστημα είναι πιθανόν να παρουσιάζεται ηλεκτρικός θόρυβος σε σημαντικά σήματα ελέγχου, ο οποίος μπορεί να προέρχεται από πληθώρα εξωτερικών ή εγγενών παραγόντων, ο προσδιορισμός των οποίων μπορεί να μην είναι εύκολος. Σε αυτή την περίπτωση, ενδείκνυται η χρήση της λειτουργίας γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform ή FFT) ενός παλμογράφου, για τον ακριβή προσδιορισμό του φάσματος του θορύβου που εμφανίζεται. Στη συνέχεια, με την εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών μπορούμε με σχετική ευκολία να αποκόψουμε τον ανεπιθύμητο θόρυβο.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την αποκοπή του ηλεκτρικού θορύβου, οι οποίες αν εφαρμοστούν είτε ανεξάρτητα είτε συνδυαστικά μπορούν να βοηθήσουν σε σημαντική μείωση του θορύβου. Παρακάτω αναφέρονται μερικές από τις τεχνικές αυτές, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

- **Πυκνωτές Απόζευξης** (Decoupling ή Bypass Capacitors): Η τοποθέτηση πυκνωτών απόζευξης σε ένα κύκλωμα έχει ως βασικό στόχο την αποκοπή του ηλεκτρικού θορύβου σε μία γραμμή τροφοδοσίας που παρέχει την απαραίτητη ηλεκτρική ισχύ για τη λειτουργία ενός ή περισσότερων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ICs) ή άλλων διακριτών στοιχείων του κυκλώματος. Συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότεροι του ενός πυκνωτές σε παράλληλη σύνδεση για την αύξηση του φάσματος αποκοπής. Ανάλογα με τις ανάγκες μπορεί να χρησιμοποιηθούν και πυκνωτές διαφορετικής τεχνολογίας (ηλεκτρολυτικοί ή κεραμικοί). Οι πυκνωτές αυτοί προτείνεται γενικά από τους κατασκευαστές των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων να τοποθετούνται κοντά στους ακροδέκτες τροφοδοσίας. Για αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιούνται συνήθως κεραμικοί πυκνωτές τεχνολογίας SMD, οι οποίοι είναι μικροί σε

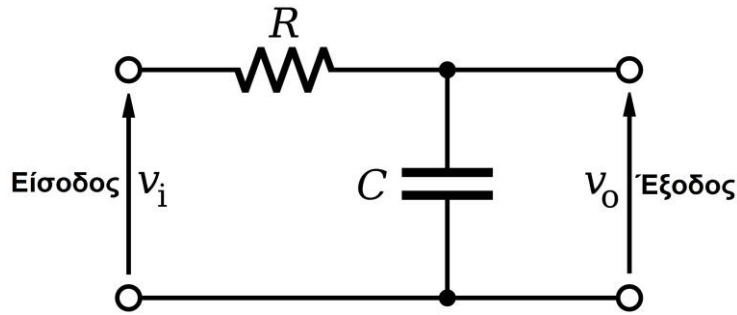
μέγεθος και έχουν παράλληλα εξαιρετικά χαρακτηριστικά, όπως χαμηλή ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR).

- **Νησίδες Σημείων Αναφοράς:** Μία σημαντική τεχνική για τη μείωση του ηλεκτρικού θορύβου αλλά και για την ορθή λειτουργία γενικότερα του κυκλώματος είναι η χρήση ισχυρής σύνδεσης των επιμέρους στοιχείων με το εκάστοτε σημείο αναφοράς. Στόχος, δηλαδή, είναι η μείωση της σύνθετης αντίστασης της γραμμής σύνδεσης του στοιχείου με το σημείο αναφοράς. Για τον σκοπό αυτό, είναι ευρέως διαδεδομένη η χρήση νησίδων αναφοράς, δηλαδή η εισαγωγή επιφανειών χαλκού (Εικόνα 2-1) περιμετρικά των στοιχείων (Ground Pour), ή η τοποθέτηση ενός ολόκληρου επιπέδου χαλκού (Ground Plane) στην υπό σχεδιασμό πλακέτα. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η σύνθετη αντίσταση της γραμμής και η πιθανότητα εμφάνισης διαφοράς δυναμικού μεταξύ σημείων που θα έπρεπε να είναι μηδενικό. Σημαντική μείωση, επίσης, συμβαίνει και στο φαινόμενο της συνακρόασης με την παρεμβολή νησίδων μεταξύ χαλκοδιαδρόμων που μεταφέρουν ευαίσθητα σήματα.



Εικόνα 2-1. Τμήμα πλακέτας πριν και μετά την τοποθέτηση νησίδων του σημείου αναφοράς (GND).

- **Γαλβανική Απομόνωση (Galvanic Isolation):** Η τεχνική της γαλβανικής απομόνωσης χρησιμοποιείται ευρέως για την ηλεκτρική αποσύζευξη μεταξύ δύο ηλεκτρικών υποσυστημάτων που συνυπάρχουν σε ένα ευρύτερο σύστημα. Με τη χρήση αυτής της τεχνικής απομονώνεται ηλεκτρικά το ένα υποσύστημα από το άλλο, έχοντας ανεξάρτητα μεταξύ τους σημεία αναφοράς των δυναμικών που αναπτύσσονται στα κυκλώματά τους. Έτσι, επιτυγχάνεται αποκοπή του ηλεκτρικού θορύβου που θα μπορούσε να εισαχθεί από το πιο θορυβώδες σύστημα προς το πιο ευαίσθητο μέσω της κοινής γείωσης. Αν και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σαν τεχνική, δημιουργείται συνήθως η ανάγκη εύρεσης τρόπου μεταφοράς σημάτων πληροφορίας από το ένα σύστημα προς το άλλο. Ένας τρόπος που χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την εργασία ήταν η χρήση ειδικών συσκευών που ονομάζονται οπτοζεύκτες.
- **Ενσωμάτωση Πραγματοποιήσιμων Φίλτρων:** Ένας απλός και συνήθης τρόπος να αποκόψουμε περιττό υψίσυχο θόρυβο είναι η υλοποίηση εντός του κυκλώματος ενός πραγματοποιήσιμου φίλτρου. Το πιο απλό πραγματοποιήσιμο φίλτρο είναι το βαθυπερατό RC φίλτρο (Εικόνα 2-2). Σε πολλά σημεία του κυκλώματος μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την τοπολογία του και με την προσθήκη ενός κατάλληλου πυκνωτή να σχηματιστεί ένα βαθυπερατό φίλτρο. Από τη συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου (2-1) προσδιορίζεται η τιμή της συχνότητας αποκοπής (ή συχνότητα μισής ισχύος). Σε αυτή τη συχνότητα, η συνάρτηση μεταφοράς έχει μέτρο ίσο προς $1/\sqrt{2}$ της μέγιστης τιμής της. Στη σχέση (2-2) φαίνεται η απόκριση συχνότητας του φίλτρου.

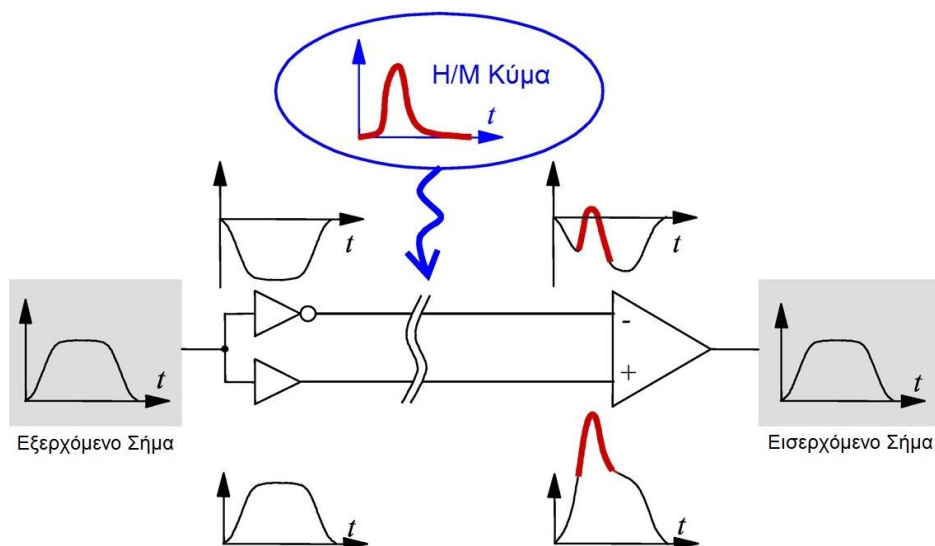


Εικόνα 2-2. Το πιο απλό πραγματοποιήσιμο βαθυπερατό RC φίλτρο.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{RCs+1} \quad (2-1)$$

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi fRC)^2}} e^{-j\theta(f)} \quad (2-2)$$

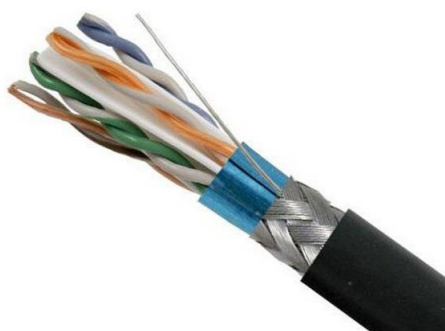
- Μεταφορά σήματος σε διαφορική μορφή.** Η μετατροπή ενός σήματος από απλή σε διαφορική μορφή (Differential Signaling) για τη μεταφορά του σε μεγάλη απόσταση, συνηθίζεται όταν απαιτείται αξιοπιστία και μείωση της επιρροής των ηλεκτρικών παρεμβολών σε αυτό. Ένα διαφορικό σήμα αποτελείται ουσιαστικά από δύο συμπληρωματικά σήματα και κατά την μετατροπή του σε απλή μορφή (single-ended) συγκρίνονται τα δύο σήματα μεταξύ τους (Εικόνα 2-3) και όχι ένα απλό σήμα με το σημείο αναφοράς (GND). Με αυτή την τεχνική αυξάνονται σημαντικά οι ανοχές στον ηλεκτρικό θόρυβο λόγω της κοινής απόρριψης σήματος. Ωστόσο, απαιτείται η χρήση δύο αγωγών για τη μεταφορά κάθε σήματος, ενώ επίσης χρειάζεται η υλοποίηση κατάλληλου κυκλώματος για τη μετατροπή των σημάτων μεταξύ των δύο μορφών. Η τεχνική μεταφοράς των σημάτων σε διαφορική μορφή είναι πολλές φορές μονόδρομος σε αναλογικά σήματα, αλλά χρησιμοποιείται συχνά και σε ψηφιακά σήματα.



Εικόνα 2-3. Απόρριψη κοινού σήματος κατά τη μεταφορά σήματος σε διαφορική μορφή.

- Θωρακισμένο καλώδιο (Shielded Cable):** Όταν η μεταφορά σημάτων σε διαφορική μορφή δεν είναι εφικτή λόγω περιορισμένου χώρου για την τοποθέτηση του κατάλληλου υλικού μετατροπής ή λόγω

επιλογής να μην αυξηθεί η πολυπλοκότητα του κυκλώματος, τότε απαιτείται η μεταφορά ευαίσθητων σημάτων να γίνεται με κατάλληλες θωρακισμένες ηλεκτρικά καλωδιώσεις (Εικόνα 2-4). Η θωράκιση που επιλέγουν οι κατασκευαστές γίνεται με διάφορες τεχνικές, με πιο ευρέως διαδεδομένες τη χρήση φύλλου αλουμινίου και ειδικού μεταλλικού πλέγματος για την απορρόφηση των εισερχόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Να σημειώσουμε ότι η χρήση τέτοιων καλωδιώσεων απαιτεί παράλληλα τον τερματισμό της θωράκισης με το αντίστοιχο σημείο αναφοράς, αφού σε αντίθετη περίπτωση οι εισερχόμενες παρεμβολές δεν αποσβαίνονται και χάνεται το πλεονέκτημα της θωράκισης.



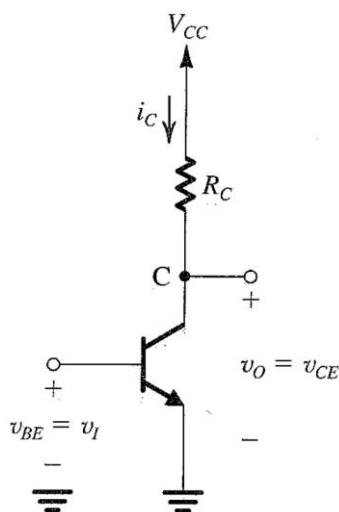
Εικόνα 2-4. Καλώδιο Ethernet με θωράκιση φύλλου αλουμινίου και μεταλλικού πλέγματος.

2.2 Ενίσχυση ψηφιακών σημάτων

Κατά τον σχεδιασμό ενός ηλεκτρονικού συστήματος εμφανίζεται συχνά η ανάγκη ενίσχυσης ενός ψηφιακού σήματος. Οι περιπτώσεις που απαιτείται ενίσχυση ψηφιακών σημάτων είναι πολλές, οι συνηθέστερες των οποίων είναι κατά την μεταφορά τους σε μεγάλη απόσταση και όταν προέρχονται από ένα κύκλωμα με υψηλή αντίσταση εξόδου, όπως οι ακροδέκτες ενός μικροελεγκτή. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε έτοιμες υλοποιήσεις σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος, είτε κατάλληλες διατάξεις ενίσχυσης με τρανζίστορ. Στην παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιήθηκαν ενισχύσεις των σημάτων ελέγχου, χρησιμοποιώντας διπολικά τρανζίστορ ένωσης (BJT) και τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (MOSFET). Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση τρανζίστορ BJT υλοποιήθηκε η βασική δομή του ενισχυτή κοινού εκπομπού (Common Emitter ή CE) και με τη χρήση τρανζίστορ MOSFET υλοποιήθηκε η βασική δομή του ενισχυτή κοινής πηγής (Common Source ή CS). Ο χαρακτηρισμός «κοινής» πηγής και «κοινού» εκπομπού προκύπτει από το γεγονός ότι όταν το κύκλωμα αντιμετωπίζεται σαν ένα δίθυρο δίκτυο, ο γειωμένος ακροδέκτης της πηγής και του εκπομπού αντίστοιχα είναι κοινός μεταξύ των θυρών εισόδου και εξόδου. Τα κυκλώματα αυτά αποτελούν τη βάση για την υλοποίηση πιο σύνθετων ενισχυτών και στη δική μας περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη λειτουργίας διακόπτη.

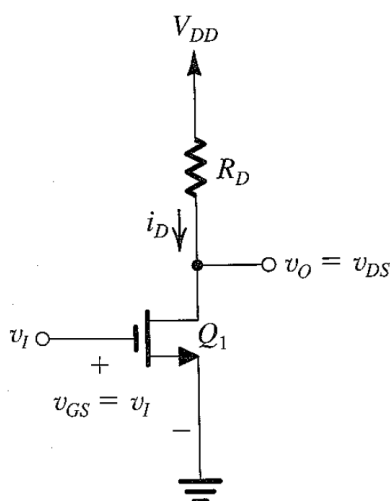
Στον ενισχυτή κοινού εκπομπού (Εικόνα 2-5) η τάση εισόδου u_i εφαρμόζεται μεταξύ βάσης και εκπομπού ($u_i = u_{BE}$), ενώ η τάση εξόδου u_o λαμβάνεται μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού ($u_o = u_{CE}$). Κατά τη χρήση του τρανζίστορ ως διακόπτη η λειτουργία του εναλλάσσεται μεταξύ της περιοχής αποκοπής και της περιοχής κορεσμού. Όταν η τάση u_i είναι αρκετά μικρή το τρανζίστορ δεν άγει, καθώς βρίσκεται στην περιοχή αποκοπής (λειτουργία ανοιχτού διακόπτη). Αυξάνοντας την τάση στην είσοδο πάνω από κάποιο κατώφλι (περίπου 0,5V), το τρανζίστορ αρχίζει να άγει και τη στιγμή που η τιμή της γίνει αρκετά μεγάλη ώστε να ισχύει $u_{CE} + 0,4 < u_{BE}$ το τρανζίστορ εισέρχεται στην περιοχή κορεσμού. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας παρέχεται μία διαδρομή χαμηλής αντίστασης μεταξύ του συλλέκτη και της γείωσης (λειτουργία κλειστού διακόπτη). Να

σημειωθεί ότι ο ενισχυτής κοινού εκπομπού είναι αναστρέφων, δηλαδή το σήμα εξόδου είναι εκτός φάσης 180° σε σχέση με το σήμα εισόδου.



Εικόνα 2-5. Το στοιχειώδες κύκλωμα ενισχυτή κοινού εκπομπού (Common Emitter).

Από την άλλη πλευρά, στον ενισχυτή κοινής πηγής (Εικόνα 2-6) η τάση εισόδου v_i εφαρμόζεται μεταξύ πύλης και πηγής ($v_i = v_{GS}$), ενώ η τάση εξόδου v_o λαμβάνεται μεταξύ υποδοχής και πηγής ($v_o = v_{DS}$). Για τιμές της τάσης εισόδου μικρότερες από την τάση κατωφλίου (V_t), το τρανζίστορ είναι σε αποκοπή, με αποτέλεσμα το ρεύμα i_D να είναι μηδενικό και η τάση εξόδου να είναι ίση με τη τιμή της V_{DD} (λειτουργία ανοιχτού διακόπτη). Αυξάνοντας την τάση εισόδου ($v_i > V_t$), το τρανζίστορ διεγείρεται, το ρεύμα i_D αυξάνεται και η τάση εξόδου μειώνεται. Για μεγαλύτερες τιμές της τάσης εισόδου, το τρανζίστορ μεταβαίνει στην περιοχή λειτουργίας τριόδου (λειτουργία κλειστού διακόπτη). Ο ενισχυτής κοινής πηγής, όπως και ο ενισχυτής κοινού εκπομπού, είναι αναστρέφων.



Εικόνα 2-6. Η βασική δομή του ενισχυτή κοινής πηγής (Common Source).

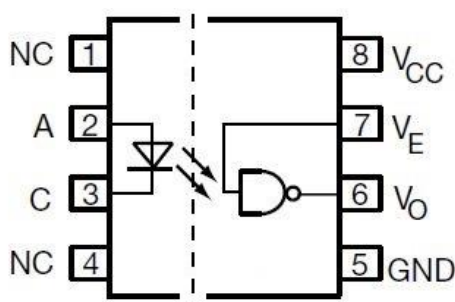
2.3 Οπτοζεύκτης (Optocoupler)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι συχνά επιθυμητό σε ένα εκτεταμένο ηλεκτρονικό σύστημα να απομονώνονται ηλεκτρικά επιμέρους υποσυστήματα για την αποφυγή μεταφοράς ηλεκτρικού θορύβου από

το ένα στο άλλο. Βέβαια, διατηρείται η ανάγκη για μεταφορά σημάτων πληροφορίας μεταξύ των απομονωμένων ηλεκτρικά υποσυστημάτων και χρειάζεται αυτό να συμβαίνει με αξιοπιστία, διατηρώντας ανεξάρτητα τα σημεία αναφοράς τους.

Μία συσκευή που χρησιμοποιείται ευρέως για τη μεταφορά σημάτων μεταξύ δυο γαλβανικά απομονωμένων κυκλωμάτων είναι ο οπτοζεύκτης. Η συσκευή αυτή είναι διαθέσιμη σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος, ενώ υπάρχουν αρκετές διαφοροποιήσεις ανάλογα με την εταιρεία κατασκευής τους και τα χαρακτηριστικά τους. Η υλοποίηση των οπτοζευκτών γίνεται συνήθως με τεχνολογία TTL (Transistor-transistor Logic) όπου χρησιμοποιούνται αυστηρώς διατάξεις με διπολικά τρανζίστορ. Αν και συνήθως το γεγονός αυτό μειώνει την ενεργειακή απόδοση των ολοκληρωμένων, η διαφορά με τις τεχνολογίες CMOS μειώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας, ενώ επίσης τα καθιστά και πιο ανθεκτικά σε φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκκένωσης (ESD).

Στην είσοδο ενός οπτοζεύκτη (Εικόνα 2-7) βρίσκεται μία δίοδος εκπομπής φωτός (LED) η οποία όταν διαρρέεται από ρεύμα εκπέμπει φωτόνια προς την απέναντι πλευρά. Η έξοδος του οπτοζεύκτη έχει συνήθως τη συνδεσμολογία ανοικτού συλλέκτη (Open Collector) και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αντιστροφή του σήματος που εισέρχεται σε αυτόν. Για την επιλογή του κατάλληλου οπτοζεύκτη, είναι καταρχάς απαραίτητος ο προσδιορισμός του εύρους ζώνης του επιθυμητού προς μεταφορά σήματος. Ακόμη, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πτώση τάσης του LED, η απαιτούμενη ένταση ρεύματος που θα πρέπει να το διαρρέει ώστε να ενεργοποιηθεί η έξοδος του οπτοζεύκτη και η μέγιστη δυνατή παροχή ρεύματος της εξόδου.



Εικόνα 2-7. Δομή του οπτοζεύκτη 6N137 τεχνολογίας TTL της εταιρείας VISHAY.

2.4 Τροφοδοτικά συνεχούς τάσης

Για να τεθεί ένα ρομποτικό σύστημα σε λειτουργία χρειάζεται η παροχή σε αυτό της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος μέσω κατάλληλων τροφοδοτικών συνεχούς τάσης. Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για τη λειτουργία των επιμέρους ηλεκτρονικών υποσυστημάτων, ήταν απαραίτητη η δημιουργία συνεχών τάσεων τροφοδοσίας με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα τροφοδοτικά συνεχούς τάσης, κεντρική λειτουργία των οποίων είναι η παροχή ελεγχόμενης συνεχούς τάσης από μία εξωτερική πηγή συνεχούς τάσης και περιορισμένου εύρους. Γενικά τα τροφοδοτικά συνεχούς τάσης διαχωρίζονται στις εξής ευρύτερες κατηγορίες:

- **Γραμμικά τροφοδοτικά (Linear Regulators):** Πρόκειται για τροφοδοτικά που μπορούν να υποβιβάσουν την τάση τροφοδοσίας στην είσοδό τους, αλλάζοντας δυναμικά την αντίστασή τους. Σημαντική υποκατηγορία γραμμικών τροφοδοτικών είναι τα LDO (Low Dropout Regulators), τα οποία έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν ακόμη και αν η εισερχόμενη σε αυτά τάση τροφοδοσίας δε διαφέρει

αισθητά από την τάση στην έξοδό τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα γραμμικού τροφοδοτικού LDO είναι το LM1117-3.3 (Εικόνα 2-8), που χρησιμοποιείται για να υποβιβάσει την εισερχόμενη σε αυτό τροφοδοσία σε τροφοδοσία συνεχούς τάσης 3,3V. Τα γραμμικά τροφοδοτικά έχουν δεκαετίες παρουσίας στα ηλεκτρονικά κυκλώματα και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα λόγω της αξιοπιστίας τους, της παρουσίας χαμηλού θορύβου στην παραγόμενη τάση και του μικρού τους μεγέθους, που τα κάνει ιδιαίτερα δημοφιλή στους σχεδιαστές πλακετών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Ωστόσο, βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι κατά τη λειτουργία τους χάνεται σημαντικό ποσοστό της εισερχόμενης ενέργειας με τη μορφή θερμότητας. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από τον σχεδιαστή, ώστε η τοποθέτηση του γραμμικού τροφοδοτικού να διευκολύνει την απαγωγή της θερμότητας, έχοντας ως επακόλουθο την αύξηση της διάρκειας ζωής του τροφοδοτικού.



Εικόνα 2-8. Το γραμμικό τροφοδοτικό LM1117 της εταιρείας Texas Instruments.

- **Διακοπτικά τροφοδοτικά ή παλμοτροφοδοτικά (DC/DC Converters):** Τα παλμοτροφοδοτικά βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές σύγχρονες ηλεκτρονικές συσκευές, όπως τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Τα τροφοδοτικά αυτά παρέχουν τη δυνατότητα είτε να υποβιβαστεί, είτε να ανυψωθεί η εισερχόμενη σε αυτά τροφοδοσία. Μάλιστα, σε μερικές τοπολογίες πραγματοποιείται αμφίδρομη ροή ισχύος. Μεγάλο πλεονέκτημα των παλμοτροφοδοτικών είναι η υψηλή απόδοσή της λειτουργίας τους συγκριτικά με τα γραμμικά τροφοδοτικά. Ένα ιδανικό παλμοτροφοδοτικό παρουσιάζει βαθμό απόδοσης (efficiency) 100%, αποδίδοντας μηδενική ενέργεια στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Στην πραγματικότητα, όμως, τα παλμοτροφοδοτικά παρουσιάζουν μικρές απώλειες, οι οποίες ακόμη και υπό τις χειρότερες συνθήκες λειτουργίας είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές των γραμμικών τροφοδοτικών. Η λειτουργία τους βασίζεται στη χρήση ενός ή περισσοτέρων διακοπών για τον μετασχηματισμό της συνεχούς τάσης από ένα επίπεδο (είσοδος) σε κάποιο άλλο (έξοδος). Η επικρατέστερη μέθοδος ελέγχου των διακοπών βασίζεται στη Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation ή PWM). Με τη μέθοδο αυτή διατηρείται σταθερή η συχνότητα μετάβασης και ρυθμίζεται κατάλληλα το Duty Cycle της παλμοσειράς. Έτσι, το φάσμα του ηλεκτρικού θορύβου στην έξοδο του παλμοτροφοδοτικού περιορίζεται, με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η αποκοπή του. Τέλος, τα παλμοτροφοδοτικά διαχωρίζονται και από τον βαθμό της ηλεκτρικής απομόνωσης μεταξύ της εισερχόμενης τροφοδοσίας και της παραγόμενης εξόδου. Όταν ένα παλμοτροφοδοτικό παρουσιάζει πλήρη αποσύζευξη (γαλβανική απομόνωση) αναφέρεται από τον κατασκευαστή ως βασική ιδιότητα (Isolated DC/DC Converter). Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερης σημασίας σε εκτενή ρομπωτικά συστήματα, όπως το ρομπότ «Λαίλαψ», καθώς υπάρχει συνήθως η ανάγκη τροφοδοσίας με μία μοναδική πηγή (εργαστηριακό τροφοδοτικό ή συστοιχία συσσωρευτών), διατηρώντας ηλεκτρικά απομονωμένα τα επιμέρους συστήματα. Η υλοποίηση του νέου ηλεκτρονικού συστήματος του ρομπότ «Λαίλαψ II» περιλαμβάνει τη χρήση του παλμοτροφοδοτικού D24V60F5 (Εικόνα 2-9).



Εικόνα 2-9. Το παλμοτροφοδοτικό D24V60F5 της εταιρείας Pololu.

2.5 Ενσωματωμένα Συστήματα

Με τον όρο Ενσωματωμένο Σύστημα (Embedded System) αναφερόμαστε σε ένα υπολογιστικό σύστημα που συνίσταται από υλικό (hardware) και λογισμικό (software) σχεδιασμένα να επιτελούν μία συγκεκριμένη λειτουργία. Συχνά, ένα ενσωματωμένο σύστημα αποτελεί δομική μονάδα ενός μεγαλύτερου συστήματος, όπως τα κινητά τηλέφωνα, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές γενικού σκοπού και τα αεροπλάνα. Τα ενσωματωμένα συστήματα είναι αναπόσπαστο μέρος της καθημερινότητας και πολλές φορές οι άνθρωποι τα χρησιμοποιούν εν αγνοία τους. Για παράδειγμα, σε ένα σύγχρονο αυτοκίνητο υφίστανται πολυάριθμα αυτόνομα ενσωματωμένα συστήματα που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και καθένα από αυτά επιτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες για την πραγμάτωση του κεντρικού στόχου, την ασφαλή μετακίνηση. Σημαντική υποκατηγορία των ενσωματωμένων συστημάτων είναι τα ενσωματωμένα συστήματα πραγματικού χρόνου (Real-Time Embedded System), τα οποία φέρουν εις πέρας μία συγκεκριμένη λειτουργία υπό χρονικούς περιορισμούς. Μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η υλοποίηση ενός συστήματος πραγματικού χρόνου ως περιφερειακή μονάδα ελέγχου των αρθρώσεων του ρομπότ.

Ο σχεδιασμός ενός ενσωματωμένου συστήματος περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα μικροϋπολογιστικά υποσυστήματα. Η ανάπτυξη τέτοιων υποσυστημάτων αποτελεί αντικείμενο σημαντικής έρευνας σε παγκόσμιο επίπεδο. Καθημερινά νέες αρχιτεκτονικές παρουσιάζονται στο προσκήνιο, ενώ δημιουργούνται νέοι όροι για την καλύτερη περιγραφή τους. Σημαντική προσοχή πρέπει να δίνεται πάντα στα χαρακτηριστικά κάθε συστήματος, στις υπολογιστικές του επιδόσεις, στην ισχύ που καταναλώνει, στο κόστος αλλά και στον χρόνο ανάπτυξης του λογισμικού που απαιτείται σε περίπτωση που επιλεχθεί. Ανάλογα με τις προδιαγραφές του υπό σχεδιασμό ενσωματωμένου συστήματος, για την επίτευξη της κεντρικής λειτουργίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ASIC (Application-Specific Integrated Circuit), FPGA (Field Programmable Gate Array), μικροεπεξεργαστής (μP), μικροελεγκτής (μCU), SoC (System on Chip), ή και συνδυασμός αυτών. Τα βασικά χαρακτηριστικά και οι συνήθεις εφαρμογές τους αναγράφονται παρακάτω:

- **ASIC (Application-Specific Integrated Circuit):** Το ASIC είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (Integrated Circuit ή IC), το οποίο έχει υλοποιηθεί με στόχο να επιτελεί αδιάλειπτα μία συγκεκριμένη λειτουργία. Ο σχεδιασμός ενός ASIC γίνεται σε χαμηλό επίπεδο, γεγονός που πλεονεκτεί σε σχέση με άλλες τεχνολογίες, καθώς επιτυγχάνεται η βέλτιστη ενεργειακή απόδοση. Ωστόσο, ο σχεδιασμός απαιτεί την αφιέρωση αρκετού χρόνου από εξειδικευμένους ηλεκτρολόγους μηχανικούς, ενώ η υλοποίησή του θέτει ένα υψηλό κατώφλι κόστους. Όταν η ενεργειακή απόδοση είναι μέγιστης σημασίας και ταυτόχρονα στοχεύεται μαζική παραγωγή, αξίζει ένα ενσωματωμένο σύστημα να υλοποιηθεί με ASIC. Η ιστορία των ASICs ξεκίνησε από τη δεκαετία του '80, αλλά κατέστη γνωστή στο ευρύ κοινό τα τελευταία χρόνια,

κυρίως λόγω της αλματώδους ανάπτυξης των κρυπτονομισμάτων. Η «ανασκαφή» (mining) των κρυπτονομισμάτων είναι μία ιδιαίτερα απαιτητική υπολογιστικά διαδικασία, με στόχο την όσο το δυνατόν λιγότερη κατανάλωση ενέργειας για την εύρεση ενός κρυπτονομίσματος. Αυτές οι απαιτήσεις ταιριάζουν απόλυτα στα πλεονεκτήματα ενός ASIC, με αποτέλεσμα τη ραγδαία ανάπτυξη της κατασκευής ASIC για την ανασκαφή κρυπτονομισμάτων.

- **FPGA (Field Programmable Gate Array):** Με τον όρο FPGA αναφερόμαστε σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα γενικού σκοπού, η ακριβής λειτουργία του οποίου μπορεί να ορισθεί και να προγραμματιστεί με τη χρήση γλωσσών περιγραφής υλικού (Hardware Description Language ή HDL). Πρόκειται ουσιαστικά για ένα σύστημα αποτελούμενο από μεγάλο αριθμό λογικών τμημάτων (logic blocks), τα οποία μπορούν να προγραμματιστούν για να εκτελέσουν λειτουργίες βασικών πυλών (AND, OR, XOR κ.ο.κ.), αλλά και πιο σύνθετων δομών, όπως αυτές των αποκωδικοποιητών (decoders). Η χρήση FPGA είναι λιγότερο κοστοβόρα από την υλοποίηση ενός ASIC, ενώ η λειτουργία του μπορεί άμεσα και με σχετική ευκολία να προγραμματίζεται και να δοκιμάζεται εκ νέου, χωρίς επιπλέον κόστος. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τη χρήση των FPGA ανεκτίμητη, καθώς ένας κακός σχεδιασμός μπορεί να βελτιωθεί και να δοκιμαστεί σε λίγες ώρες, σε αντίθεση με έναν κακό σχεδιασμό ενός ASIC που θα καθυστερούσε αρκετές εβδομάδες, ίσως και μήνες, τη διαδικασία. Επίσης, αν και η ενεργειακή απόδοση ενός FPGA είναι υποδεέστερη συγκριτικά με ένα ASIC σχεδιασμένο να επιτελεί την ίδια λειτουργία, είναι κατά πολύ υψηλότερη από τις υπόλοιπες τεχνολογίες.
- **Μικροεπεξεργαστής (Microprocessor ή μP):** Ο μικροεπεξεργαστής είναι ένας επεξεργαστής υλοποιημένος σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Βασική του λειτουργία είναι η πραγματοποίηση αριθμητικών πράξεων και η μεταφορά των αποτελεσμάτων σε κάποια άλλη συσκευή του συστήματος. Να σημειωθεί ότι οι μικροεπεξεργαστές δε μπορούν να φέρουν εις πέρας καμία λειτουργία χωρίς τη συνεισφορά άλλων περιφερειακών, όπως τις συσκευές εισόδου/εξόδου και τις μνήμες.
- **Μικροελεγκτής (Microcontroller Unit ή MCU):** Με τον όρο μικροελεγκτής αναφερόμαστε σε ένα μικρό υπολογιστικό σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει εκτός από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας και άλλα απαραίτητα και ευρείας χρήσης περιφερειακά υποσυστήματα (Peripherals), συμπεριλαμβανομένων και μονάδων μνήμης. Η λειτουργία της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας, όπως και όλων των περιφερειακών, μπορεί να προγραμματιστεί για να εξυπηρετεί τις ανάγκες του υπό σχεδιασμό ενσωματωμένου συστήματος. Όλες οι διακριτές μονάδες ενός μικροελεγκτή μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και να αλληλεπιδρούν. Οι σύγχρονοι μικροελεγκτές, αν και μοιάζουν πολύ με τα ολοκληρωμένα συστήματα (System on Chip ή SoC) καθώς όλα τα υποσυστήματα είναι κατασκευασμένα σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα (Integrated Circuit ή IC), διαφέρουν από αυτά κυρίως λόγω της απλούστερης αρχιτεκτονικής τους και των περιορισμένων σε αριθμό και πολυπλοκότητα περιφερειακών υποσυστημάτων που διαθέτουν.
- **System on Chip (SoC):** Τα SoCs είναι υλοποιήσεις ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με στόχο να αποδώσουν το εύρος των δυνατοτήτων που παρέχει ένα ηλεκτρονικός υπολογιστής γενικού σκοπού. Είναι αρκετά πιο σύνθετα συστήματα συγκριτικά με τους μικροελεγκτές, καθώς πρέπει να παρέχουν εξεζητημένες υπηρεσίες, όπως η επεξεργασία γραφικών και η επικοινωνία με ασύρματα δίκτυα. Σε αντίθεση με τους μικροελεγκτές τα SoCs, δεν περιλαμβάνουν μνήμη και απαιτούν εξωτερική υλοποίηση για να τεθούν σε λειτουργία.

3 Πειράματα στο Αρχικό Ηλεκτρονικό Σύστημα

3.1 Εισαγωγή

Για τη βελτίωση οποιουδήποτε ηλεκτρονικού συστήματος ο Ηλεκτρολόγος Μηχανικός πρέπει να έρθει σε άμεση επαφή μαζί του, να λάβει γνώση όλων των χαρακτηριστικών του, όπως την αρχιτεκτονική του, τις παραμέτρους κανονικής λειτουργίας και τις προδιαγραφές του, καθώς και των προβλημάτων που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του. Γενικότερα χρειάζεται να γνωρίζει σε βάθος το υπάρχον σύστημα σαν να το έχει σχεδιάσει ο ίδιος. Για τον λόγο αυτό, το πρώτο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφιερώθηκε στην μελέτη του αρχικού ρομπωτικού συστήματος «Λαίλαψ Ι» [15].

Αρχικά πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων (Α' Φάση), από τα οποία λήφθηκαν πληροφορίες για τις δυνατότητες του συστήματος, όπως επίσης και για τις ηλεκτρικές αστάθειες που παρουσιάζει κατά τη λειτουργία του. Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων βοήθησαν στον ακριβή προσδιορισμό των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών προβλημάτων του συστήματος. Στη συνέχεια, στο αρχικό σύστημα έγιναν επισκευές προσωρινού χαρακτήρα, ενώ με τη διενέργεια νέων πειραμάτων (Β' Φάση), διατηρώντας το σύστημα ιδιαίτερα σταθερό ηλεκτρικά, επιβεβαιώθηκε η αποτελεσματικότητα των βελτιώσεων που έγιναν και οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση για τον σχεδιασμό του νέου ηλεκτρονικού συστήματος του ρομπότ «Λαίλαψ ΙΙ».

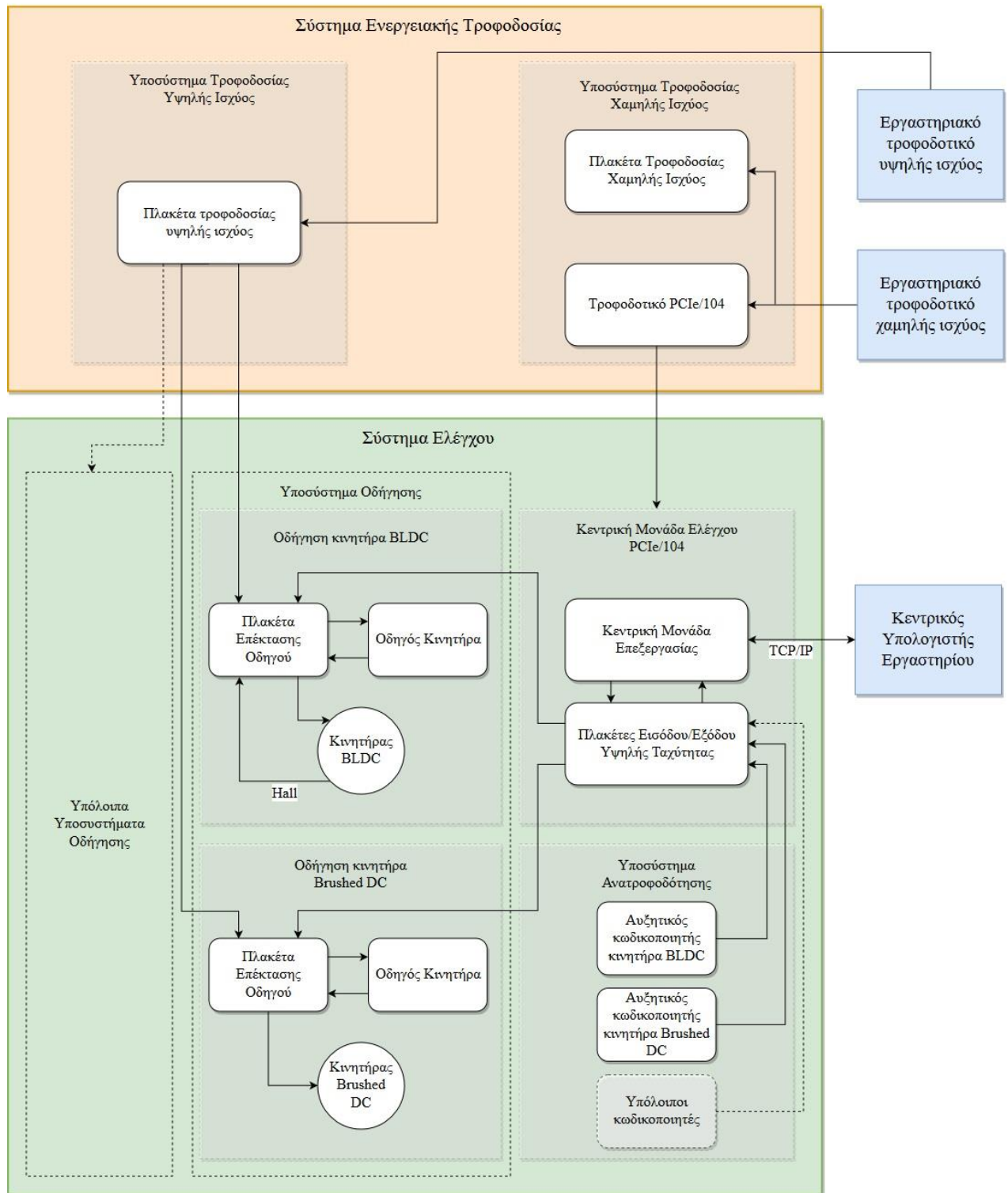
3.2 Το ηλεκτρονικό σύστημα του ρομπότ «Λαίλαψ Ι»

3.2.1 Εισαγωγή

Για την πλήρη κατανόηση των πειραμάτων και των αλλαγών που πραγματοποιήθηκαν στο αρχικό ηλεκτρονικό σύστημα χρειάζεται να γίνει σύντομη αναφορά στην αρχιτεκτονική του, ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει μία συνολική εικόνα του συστήματος. Θα γίνει προσπάθεια η παρουσίαση να μην εκτείνεται σε περιττές λεπτομέρειες παρά μόνο σε ορισμένα υποσυστήματά τα οποία αποτέλεσαν επίκεντρο μελέτης κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

3.2.2 Η αρχιτεκτονική του αρχικού συστήματος

Στην Εικόνα 3-1 φαίνεται εποπτικά η αρχιτεκτονική του ηλεκτρονικού συστήματος, καθώς και των επιμέρους υποσυστημάτων. Το ηλεκτρονικό σύστημα του ρομπότ «Λαίλαψ Ι» συνίσταται από δύο κεντρικά συστήματα, το σύστημα ενεργειακής τροφοδοσίας και το σύστημα ελέγχου.



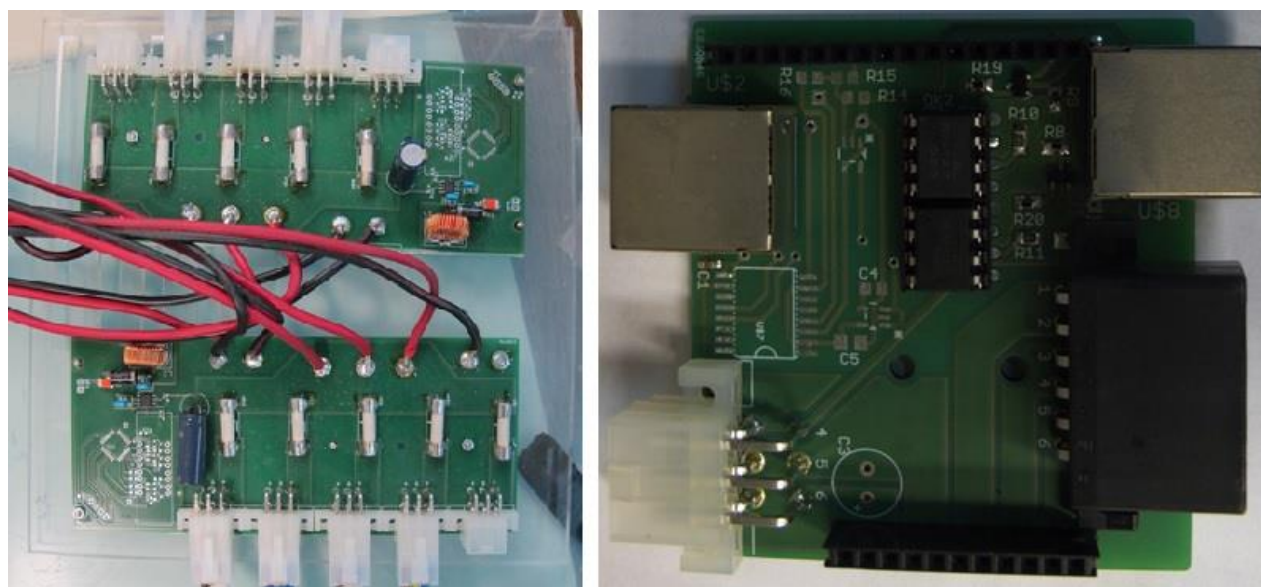
Εικόνα 3-1. Η αρχιτεκτονική του ηλεκτρονικού συστήματος του ρομπότ «Λαίλαψ I».

Κεντρικός στόχος του συστήματος ενεργειακής τροφοδοσίας είναι η εξασφάλιση των ενεργειακών απαιτήσεων του ρομποτικού συστήματος συνολικά. Το υποσύστημα αυτό διακρίνεται με τη σειρά του στο υποσύστημα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος και στο υποσύστημα τροφοδοσίας χαμηλής ισχύος. Η διάκριση μεταξύ των δύο υποσυστημάτων δεν είναι προφανής, καθώς ο διαχωρισμός δεν έγκειται μόνο στην μεγάλη διαφορά απαιτήσεων σε ηλεκτρική ισχύ κάθε υποσυστήματος. Βασική διαφορά, επίσης, είναι πως τα σημεία

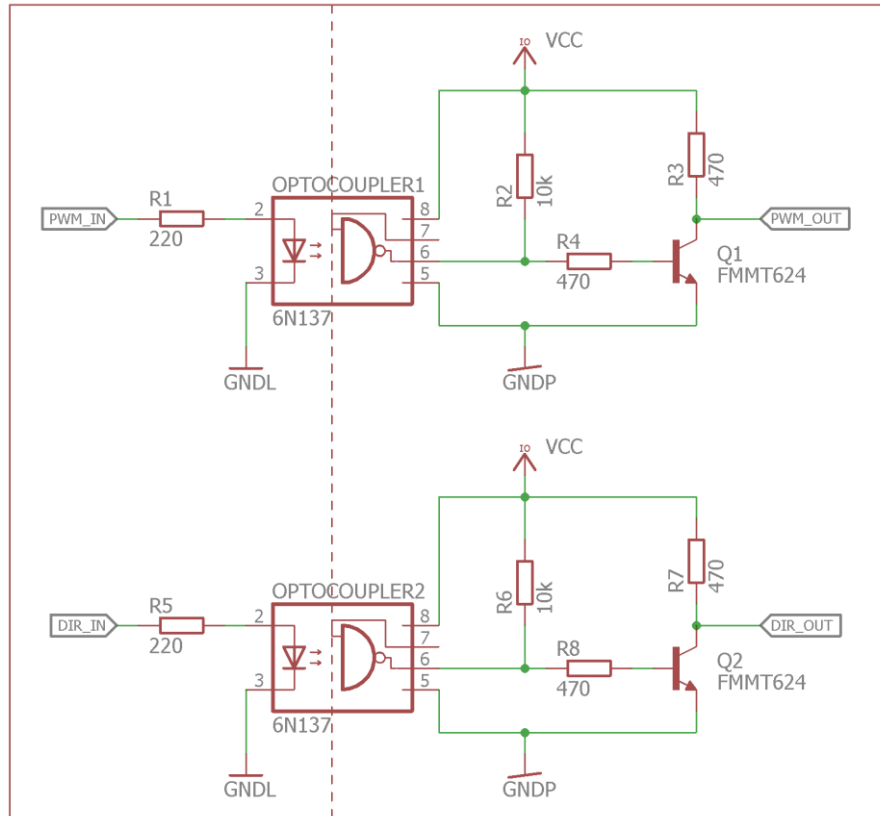
αναφοράς των παρεχόμενων ηλεκτρικών τάσεων είναι ανεξάρτητα μεταξύ των δύο υποσυστημάτων ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη ηλεκτρική απομόνωση (Electrical Isolation). Η ηλεκτρική απομόνωση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην προστασία του ευαίσθητου ηλεκτρικά υποσυστήματος ελέγχου, αλλά διασφαλίζει παράλληλα και την ύπαρξη λιγότερου ηλεκτρικού θορύβου στα επιμέρους ηλεκτρονικά υποσυστήματα από τα οποία αποτελείται.

Το *υποσύστημα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος* διαμοιράζει την απαραίτητη ηλεκτρική ισχύ στους *οδηγούς των κινητήρων* και παράλληλα με ειδικό κύκλωμα παλμικού μετατροπέα τάσης DC/DC (MAX5035) παρέχει τροφοδοσία τάσης 5V για τη λειτουργία του κυκλώματος οπτικής σύζευξης [26]. Η παρεχόμενη ισχύς, προερχόμενη από το τροφοδοτικό υψηλής ισχύος του εργαστηρίου, μέσω της *πλακέτας υψηλής ισχύος* (Εικόνα 3-2) διαμοιράζεται (συνδεσμολογία αστέρα) στις πλακέτες επέκτασης των οδηγών των κινητήρων. Οι πλακέτες αυτές (Εικόνα 3-2) συνδέουν τους οδηγούς τόσο με το υποσύστημα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος όσο και με το υποσύστημα ελέγχου.

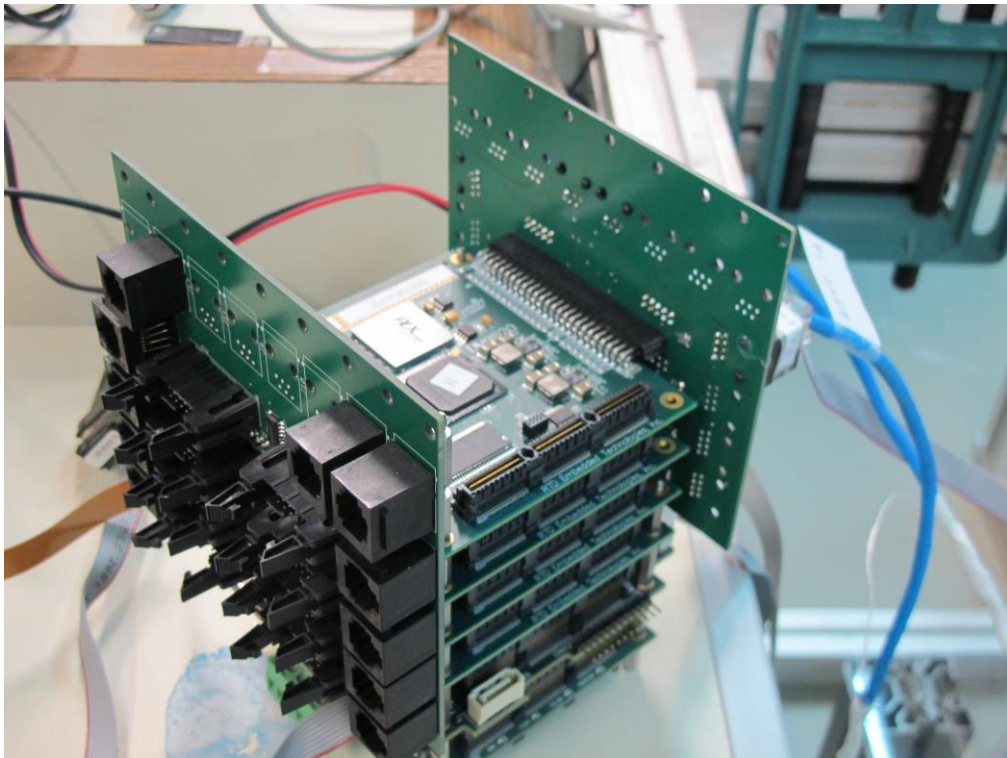
Το *υποσύστημα ελέγχου* αποτελείται από την *κεντρική μονάδα ελέγχου* (Εικόνα 3-4) και υλοποιήθηκε με το πρότυπο ενσωματωμένου υπολογιστικού συστήματος PCIe/104 και η οποία παράγει τα απαραίτητα σήματα για τον έλεγχο της γωνιακής θέσης των κινητήρων μέσω των επιμέρους υποσυστημάτων οδήγησης των κινητήρων [21]. Στόχος των υποσυστημάτων οδήγησης είναι η μετάφραση των εντολών από το κεντρική μονάδα ελέγχου σε μηχανική κίνηση. Συγκεκριμένα, ο οδηγός των κινητήρων δέχεται δύο σήματα πληροφορίας, το σήμα PWM και το σήμα DIR. Το σήμα PWM είναι μία παλμοσειρά, το Duty Cycle (κύκλος εργασίας) της οποίας προσδιορίζει την επιθυμητή ένταση ρεύματος (κλίμακα από 0A έως 12A) προς τους κινητήρες. Το σήμα DIR εναλλάσσεται μεταξύ των λογικών καταστάσεων 0 (τάση 0V) και 1 (τάση 3,3V) και προσδιορίζει την επιθυμητή φορά κίνησης του κινητήρα. Σημαντικό ρόλο στην ηλεκτρική απομόνωση των δύο υποσυστημάτων ενεργειακής τροφοδοσίας διαδραματίζει το κύκλωμα οπτικής σύζευξης που υλοποιείται στην *πλακέτα επέκτασης των οδηγών* με χρήση των οπτοζευκτών 6N137 [17]. Η προβληματική υλοποίηση αυτού του κυκλώματος (Εικόνα 3-3) συνεισέφερε σημαντικά στην αστάθεια του συστήματος, όπως παρατηρήθηκε στα πειράματα που αναφέρονται στη συνέχεια.



Εικόνα 3-2. Η πλακέτα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος (αριστερά) και η πρώτη έκδοση της πλακέτας επέκτασης των οδηγών των κινητήρων (δεξιά).



Εικόνα 3-3. Σχηματικό διάγραμμα του υλοποιημένου κυκλώματος οπτικής σύζευξης στην πλακέτα επέκτασης των οδηγών του αρχικού συστήματος.



Εικόνα 3-4. Ο πύργος PCIe/104 που αποτελούσε την κεντρική μονάδα ελέγχου του αρχικού συστήματος. Στο πρώτο επίπεδο η επεξεργαστική μονάδα, στο δεύτερο επίπεδο η πλακέτα τροφοδοσίας της μονάδας και στα υπόλοιπα επίπεδα οι πλακέτες ακροδεκτών Εισόδου/Εξόδου υψηλής ταχύτητας.

3.2.3 Γνωστά προβλήματα

Πριν τη διεξαγωγή της Α' φάσης πειραμάτων στο αρχικό σύστημα, ήταν ήδη γνωστά από προηγούμενα πειράματα μερικά από τα προβλήματα που εμφανιζόταν κατά τη λειτουργία του. Το σύστημα κατά τη λειτουργία του ρομπότ παρουσίαζε αστάθειες οι οποίες εμπόδιζαν την εκτεταμένη χρονικά και αξιόπιστη λειτουργία του. Μερικές από αυτές ήταν:

- Ασταθής κίνηση των κινητήρων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.
- Παραγωγή ηχητικών παρασίτων τύπου «ραδιοφώνου».
- Ασταθής λειτουργία μετά από επανεκκίνηση του συστήματος.
- Διακοπή λειτουργίας λόγω σφάλματος υπέρτασης στο τροφοδοτικό υψηλής ισχύος (Over Voltage Protection).
- Τυχαία και συχνή καταστροφή των οπτοζευκτών 6N137 και του ολοκληρωμένου κυκλώματος MAX5035.

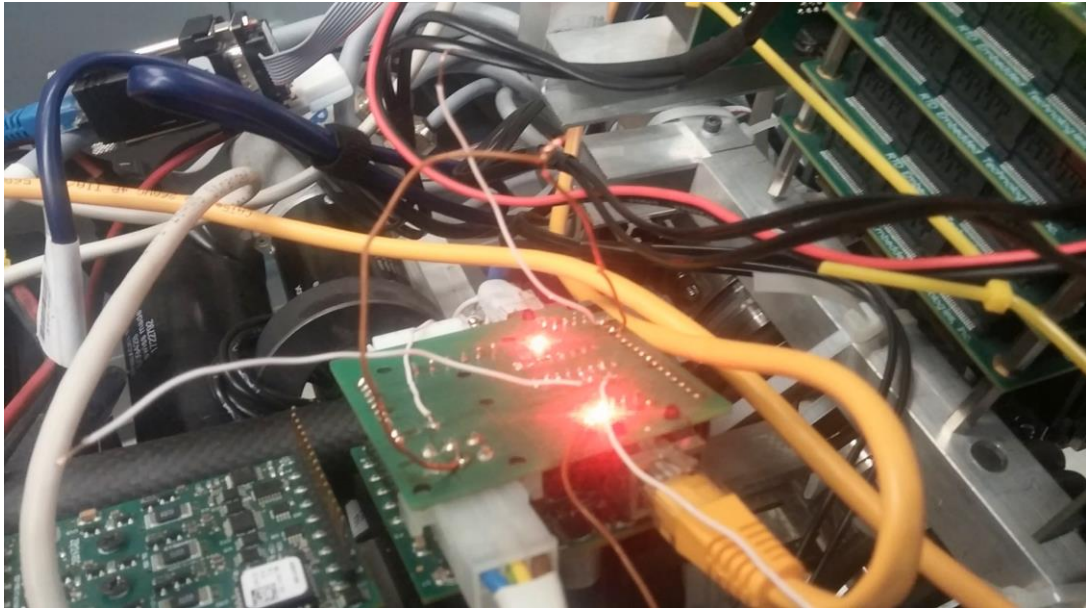
Επίσης, το σύστημα χαρακτηριζόταν από κακή οργάνωση των καλωδιώσεων, γεγονός που δυσχέραινε πρακτικά την λειτουργία του ρομποτικού συστήματος, καθώς και την πραγματοποίηση αλλαγών σε αυτό. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι μερικά τμήματα του αρχικού σχεδιασμού δεν υλοποιήθηκαν και παρέμειναν σε αρχικό στάδιο. Για παράδειγμα, δεν υλοποιήθηκε ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) για τη μεταφορά της πληροφορίας κατανάλωσης ρεύματος από έναν οδηγό κινητήρα, καθώς και το κύκλωμα της ιδανικής διόδου που ήταν τμήμα του υποσυστήματος τροφοδοσίας υψηλής ισχύος. Για αυτό τον λόγο δεν παρουσιάζονται στην αρχιτεκτονική του αρχικού συστήματος.

3.3 Α' Φάση πειραμάτων

Στόχος των αρχικών πειραμάτων στο ηλεκτρονικό σύστημα του ρομπότ «Λαίλαψ Ι» ήταν να έρθουμε για πρώτη φορά σε επαφή με το σύστημα εν λειτουργία, να εντοπίσουμε τυχόν προβλήματα και να τα περιορίσουμε σε συγκεκριμένα τμήματα του συστήματος με απώτερο σκοπό την εξέτασή τους αργότερα. Σε αυτά τα πειράματα ο έλεγχος γινόταν χωρίς ανατροφοδότηση (Open-loop Control), προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα που οφείλονται στην κεντρική μονάδα ελέγχου και στο υποσύστημα ανατροφοδότησης.

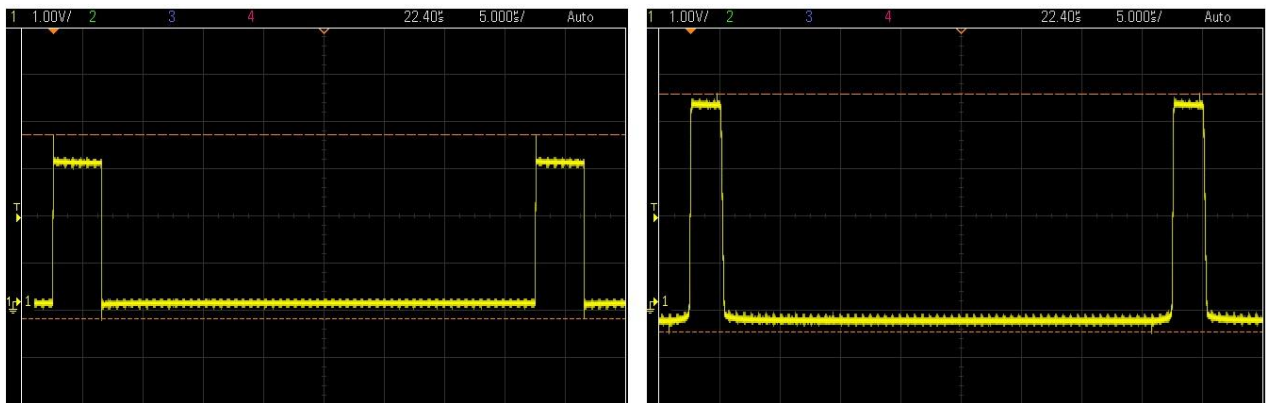
3.3.1 Ασταθής λειτουργία του κινητήρα

Αρχικά, ελέγχθηκε πειραματικά η λειτουργία ενός μόνο κινητήρα (Εικόνα 3-5). Λόγω της έλλειψης δοκιμαστικών επαφών (Test Points) στην πλακέτα επέκτασης του οδηγού του κινητήρα, προστέθηκαν με εξωτερική κόλληση μονόκλωνα καλώδια για εύκολη πρόσβαση σε καίρια σημεία. Καταρχάς, ελέγχθηκαν οι συνδέσεις τροφοδοσίας (τροφοδοσία υψηλής ισχύος 20-60V, τροφοδοσία κυκλώματος σύζευξης 5V, τροφοδοσία κεντρικής μονάδας ελέγχου 24V) και οι συνδέσεις των ελέγχου (PWM και DIR). Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι οι τάσεις τροφοδοσίας των κινητήρων και των οπτοζευκτών παρήχθησαν από διαφορετικά τροφοδοτικά με βραχυκυκλωμένους τους αρνητικούς τους πόλους, ενώ η τάση τροφοδοσίας της κεντρικής μονάδας ελέγχου ήταν ανεξάρτητη των άλλων τροφοδοσιών όπως απαιτείται από τις προδιαγραφές του συστήματος.

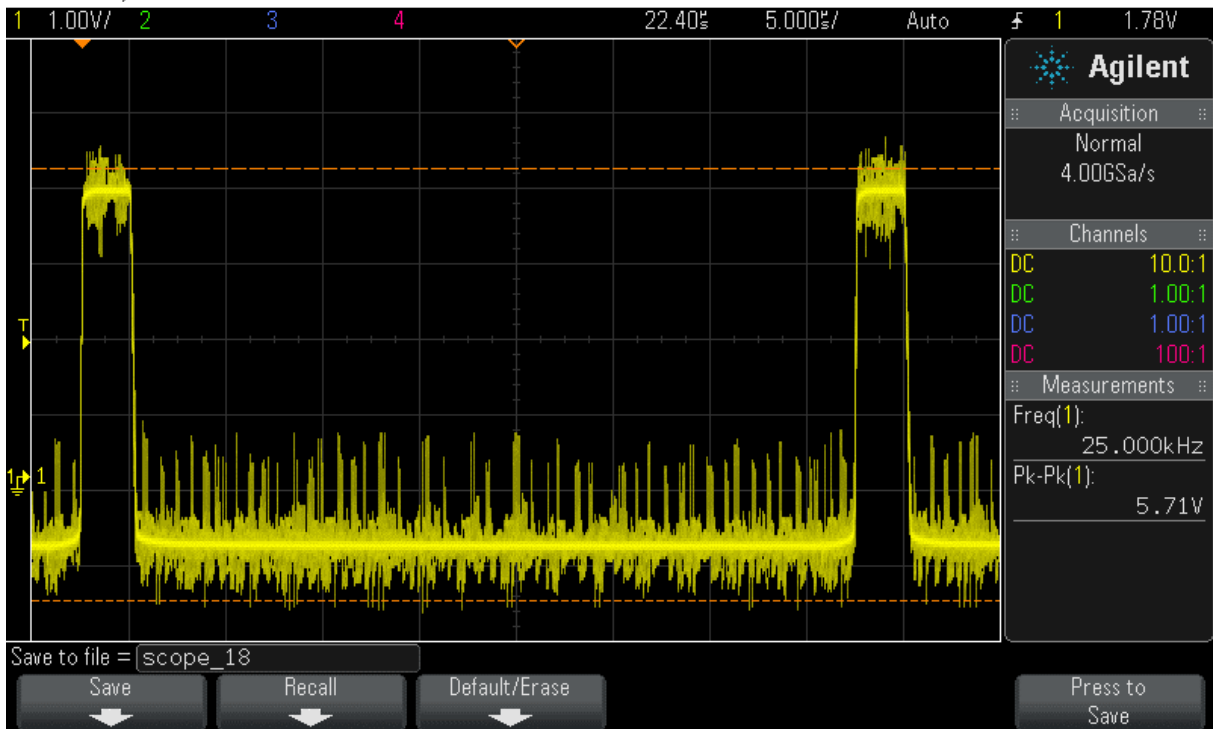


Εικόνα 3-5. Διάταξη 1ου πειράματος. Έλεγχος ενός κινητήρα χωρίς ανατροφοδότηση.

Σε πρώτο στάδιο, δε δόθηκε τροφοδοσία υψηλής ισχύος στους οδηγούς των κινητήρων για να ελεγχθεί μόνο η λειτουργία του κύκλωμα οπτικής σύζευξης. Η έξοδος του σήματος PWM από το κύκλωμα οπτικής σύζευξης ήταν εντός των ανεκτών ορίων (Εικόνα 3-6), ενώ μετά την τροφοδοσία υψηλής ισχύος για τη λειτουργία του κινητήρα ήταν αρκετά θορυβώδης και προβληματική (Εικόνα 3-7). Ταυτόχρονα παρατηρήθηκε ότι η λειτουργία του κινητήρα ήταν ασταθής και παρουσίαζε συχνά απότομες εναλλαγές τόσο στην ταχύτητα, όσο και στην κατεύθυνση της κίνησης. Επίσης, παρατηρήθηκαν απρόσμενες διακοπές στη λειτουργία του κινητήρα, οι οποίες επιλύθηκαν με την αποσύνδεση του οδηγού του κινητήρα από το σύστημα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος και την απευθείας σύνδεση του με το τροφοδοτικό του εργαστηρίου, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη προβληματικών καλωδιώσεων στο σύστημα.



Εικόνα 3-6. Είσοδος (αριστερά) και έξοδος (δεξιά) του σήματος PWM στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης, με αποσυνδεδεμένη την τροφοδοσίας υψηλής ισχύος.



Εικόνα 3-7. Έξοδος σήματος PWM από το κύκλωμα οπτικής σύζευξης μετά την τροφοδοσία υψηλής ισχύος.

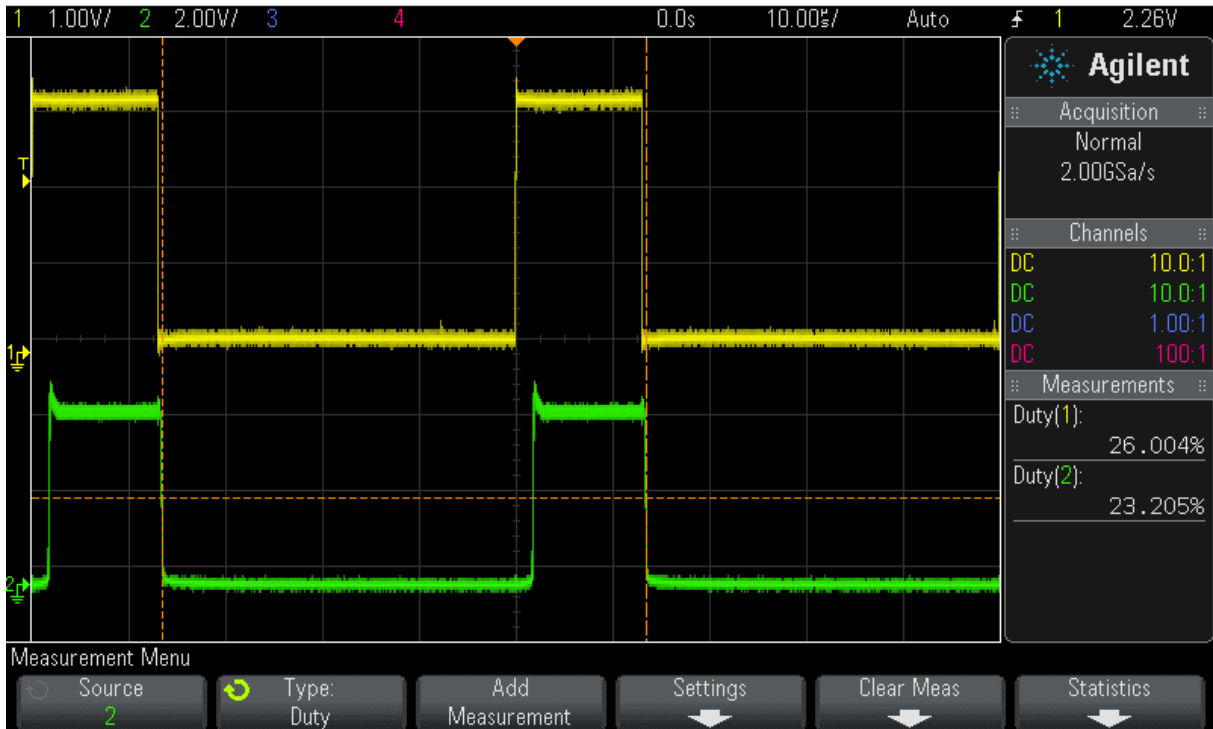
Στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια να περιοριστεί η πηγή της ασταθούς κίνησης του κινητήρα. Το πείραμα επαναλήφθηκε, δίνοντας έμφαση αυτή τη φορά στο σήμα ελέγχου της φοράς κίνησης του κινητήρα (DIR). Αρχικά, παρατηρήθηκε ότι το σήμα ήταν σταθερό, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιούσε απότομες εναλλαγές οι οποίες συνέχιζαν ακόμη και με την εκ νέου αποσύνδεση του οδηγού του κινητήρα από την τροφοδοσία υψηλής ισχύος, γεγονός το οποίο δε συνέβαινε στο σήμα PWM που επανερχόταν στην αρχική του κατάσταση. Αυτή η παρατήρηση μας οδήγησε στην υπόθεση ότι υπήρχε κάποιο πρόβλημα στο σήμα ελέγχου της φοράς κίνησης του κινητήρα DIR.

3.3.2 Περαιτέρω έλεγχος των σημάτων οδήγησης PWM και DIR

Σε νέα δοκιμή που διεξήχθη, επιβεβαιώθηκε πως η προβληματική λειτουργία του κινητήρα οφειλόταν στο κακής ποιότητας σήμα DIR που προέρχεται από την κεντρική μονάδα ελέγχου. Συγκεκριμένα, παρήχθησαν οι απαραίτητες τροφοδοσίες για τη λειτουργία ενός κινητήρα, αλλά αυτή τη φορά αποκόπηκε η είσοδος του σήματος DIR από το κύκλωμα οπτικής σύζευξης και αντ' αυτού πραγματοποιήθηκαν χειροκίνητες εναλλαγές μεταξύ των καταστάσεων 0 (0V) και 1 (5V). Ο κινητήρας λειτούργησε σταθερά και πραγματοποίησε εναλλαγές στην φορά κίνησης αντίστοιχες με αυτές του σήματος DIR.

Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερό το σήμα DIR στην κατάσταση 0 έγινε έλεγχος του σήματος PWM στην είσοδο και στην έξοδο από το κύκλωμα οπτικής σύζευξης. Παρατηρήθηκε μεγάλη μείωση του ηλεκτρικού θορύβου (Εικόνα 3-8) σε σύγκριση με το αρχικό πείραμα. Επίσης, παρατηρήθηκε αισθητή διαφορά στις τιμές Duty Cycle μεταξύ των δύο σημάτων, η οποία μελετήθηκε αναλυτικά σε πειράματα που ακολούθησαν.

M50-X 3014A, MY53160312: Tue Jan 17 00:27:59 2017

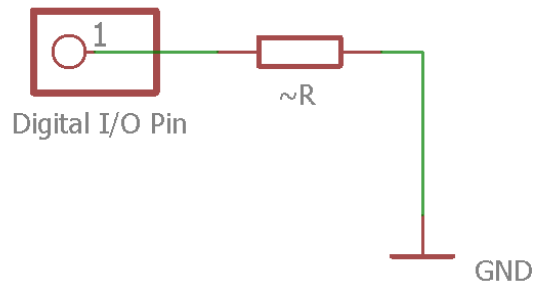


Εικόνα 3-8. Το σήμα PWM κατά την είσοδο (κίτρινο) και έξοδο (πράσινο) από το κύκλωμα οπτικής σύζευξης.

3.3.3 Έλεγχος ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ψηφιακών ακροδεκτών της πλακέτας DM35820-HR

Στο τεχνικό φύλλο δεδομένων των πλακετών με ακροδέκτες εισόδου/εξόδου υψηλής ταχύτητας (DM35820-HR) αναφέρεται δυνατότητα τροφοδοσίας στην έξοδο των ψηφιακών ακροδεκτών (Digital I/O Pins) ρεύματος έως 24mA και τάσης έως 3.3V [22]. Σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό του κυκλώματος οπτικής σύζευξης (Εικόνα 3-3), οι τιμές αυτές θα έπρεπε να επαρκούν για την ενεργοποίηση του οπτοζεύκτη 6N137, ο οποίος απαιτεί να περάσουν μεταξύ των ακροδεκτών 2 και 3 τουλάχιστον 5 mA για την μεταφορά του ηλεκτρικά απομονωμένου σήματος [17]. Οι προδιαγραφές αυτές αποτέλεσαν και τη βάση του σχεδιασμού των πλακετών επέκτασης των οδηγών των κινητήρων του ρομπότ «Λαίλαψ Ι». Επειδή, όμως, οι οδηγίες στο τεχνικό φύλλο δεδομένων ήταν ασαφείς σχετικά με το ρεύμα (sink και source current) και την τάση εξόδου, ήταν απαραίτητο η πλακέτα να ελεγχθεί πειραματικά, ώστε να προσδιοριστούν οι πραγματικές τιμές.

Αρχικά, ορίστηκε η έξοδος ενός ακροδέκτη ψηφιακού σήματος σε λογική τιμή 1 (3.3V) και τοποθετήθηκε εν σειρά ένα μεταβλητό ωμικό φορτίο (Εικόνα 3-9). Ο Πίνακας 3-1 περιλαμβάνει τόσο τις μετρήσεις που έγιναν για τις διάφορες τιμές της μεταβλητής αντίστασης, όσο και τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές.

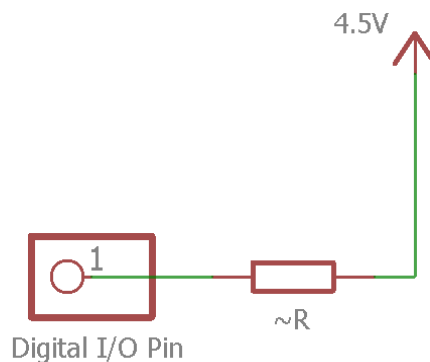


Εικόνα 3-9. Συνδεσμολογία για την μέτρηση του εξερχόμενου ρεύματος (Source Current).

Πίνακας 3-1. Αναμενόμενες και μετρηθείσες τιμές του εξερχόμενου ρεύματος (Source Current).

Φορτίο R~ (Ω)	Τάση εξόδου χωρίς φορτίο (V)	Αναμενόμενο εξερχόμενο ρεύμα (mA)	Τάση εξόδου με φορτίο (V)	Ρεύμα εξόδου με φορτίο (mA)
184	3,34	18,1	2,6	14,6
277	3,34	12	2,8	10,1
553	3,34	6	3,04	5,5

Ακολουθώντας, ορίστηκε η έξοδος του ίδιου ακροδέκτη σε κατάσταση 0 (0V) και τοποθετήθηκε εν σειρά ένα μεταβλητό ωμικό φορτίο και μία πηγή τάσης $V_{cc} = 4,5V$ (Εικόνα 3-10). Ο Πίνακας 3-2 περιλαμβάνει τις μετρήσεις που έγιναν για τις διάφορες τιμές της μεταβλητής αντίστασης καθώς και τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές.



Εικόνα 3-10. Συνδεσμολογία για την μέτρηση του εισερχόμενου ρεύματος (Sink Current).

Πίνακας 3-2. Αναμενόμενες και μετρηθείσες τιμές του εισερχόμενου ρεύματος (Sink Current).

Φορτίο R~ (Ω)	Τάση εξόδου χωρίς φορτίο (V)	Αναμενόμενο εισερχόμενο ρεύμα (mA)	Τάση εξόδου με φορτίο (V)	Ρεύμα εξόδου με φορτίο (mA)
184	0	-24,4	1,01	-18,9
277	0	-16,2	0,78	-13,4

Οι παραπάνω μετρήσεις απέδειξαν ότι η πλακέτα DM35820-HR είχε μεγάλη αντίσταση εξόδου και δε μπορούσε να παρέχει με ασφάλεια 24mA διατηρώντας την τάση στα 3.3V. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε αργότερα ως επίλυση του προβλήματος να προστεθεί ένα στάδιο ενίσχυσης των σημάτων ελέγχου PWM και DIR, προκειμένου να εξασφαλισθεί η σταθερή λειτουργία του κυκλώματος οπτικής σύζευξης.

3.3.4 Αποτελέσματα και σχολιασμός Α' Φάσης Πειραμάτων

Η πρώτη επαφή με το ρομπότ Λαίλαψ I μας έδειξε ότι είναι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο και απαιτητικό ρομποτικό σύστημα αποτελούμενο από πληθώρα υποσυστημάτων, τα οποία αλληλεπιδρούν. Για την ορθή λειτουργία του απαιτείται κάθε ηλεκτρονικό υποσύστημα να είναι ιδιαίτερα σταθερό και αξιόπιστο.

Εξαρχής παρατηρήθηκαν πολλά προβλήματα και έγινε μία προσπάθεια να διευκρινιστούν οι λόγοι για την αστάθειά του. Καταρχάς, διαπιστώθηκαν αρκετά κατασκευαστικά λάθη, όπως ατεχνίες στις καλωδιώσεις για την παροχή υψηλής ισχύος και στα καλώδια Ethernet. Πιο συγκεκριμένα, οι συνδέσεις των ακροδεκτών δεν ήταν αρκετά σταθερές, τα μήκη των καλωδίων ήταν πολύ μεγαλύτερα από τα απαιτούμενα με αποτέλεσμα την αύξηση του ηλεκτρικού θορύβου στο σύστημα και τη δυσκολία πραγματοποίησης αλλαγών στην συνδεσμολογία των διαφόρων υποσυστημάτων. Τέλος, παρατηρήθηκαν «ψυχρές» κολλήσεις στις πλακέτες επέκτασης των οδηγών, οι οποίες πιθανόν να προκαλούσαν διάφορα προβλήματα στο ρομπότ κατά τη λειτουργία του.

Με βάση το αποτέλεσμα του πρώτου πειράματος ξεκίνησε η αναζήτηση της πηγής του προβλήματος. Αρχικά, μελετήθηκε το κύκλωμα οπτικής σύζευξης και στη συνέχεια δόθηκε έμφαση στα σήματα ελέγχου του κινητήρα (PWM και DIR). Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη μελέτη των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της πλακέτας DM35820-HR. Συνοπτικά θα μπορούσαμε να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των πρώτων πειραμάτων ως εξής:

- Διαπιστώθηκε προβληματική λειτουργία του κινητήρα Brushless DC, η οποία χαρακτηριζόταν από επαναλαμβανόμενες και άτακτες αλλαγές φοράς στην κίνησή του, ενώ ταυτόχρονα παρατηρήθηκαν απρόσμενες διακοπές και επανεκκινήσεις στη λειτουργία του.
- Προσδιορίστηκαν οι βασικοί παράγοντες στους οποίους οφειλόταν αυτή η αστάθεια. Καταρχάς οι κακές καλωδιώσεις της τροφοδοσίας υψηλής ισχύος προκαλούσαν τις απρόσμενες διακοπές λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε με την αντικατάσταση των καλωδιώσεων. Επίσης, η αστάθεια του σήματος ελέγχου DIR είχε ως αποτέλεσμα τις άτακτες εναλλαγές στη φορά κίνησης αφού πρακτικά ο οδηγός τον κινητήρων δεχόταν επαναλαμβανόμενες εντολές για εναλλαγή της φοράς κίνησης. Αυτός ο παράγοντας προκαλούσε επιπλέον αισθητό ηλεκτρικό θόρυβο στο σήμα ελέγχου PWM (Εικόνα 3-7).
- Ελέγχθηκαν πειραματικά τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ψηφιακών ακροδεκτών της πλακέτας DM35820-HR και παρατηρήθηκε αδυναμία παροχής της απαραίτητης ισχύος για την ορθή λειτουργία του οπτοζεύκτη 6N137.

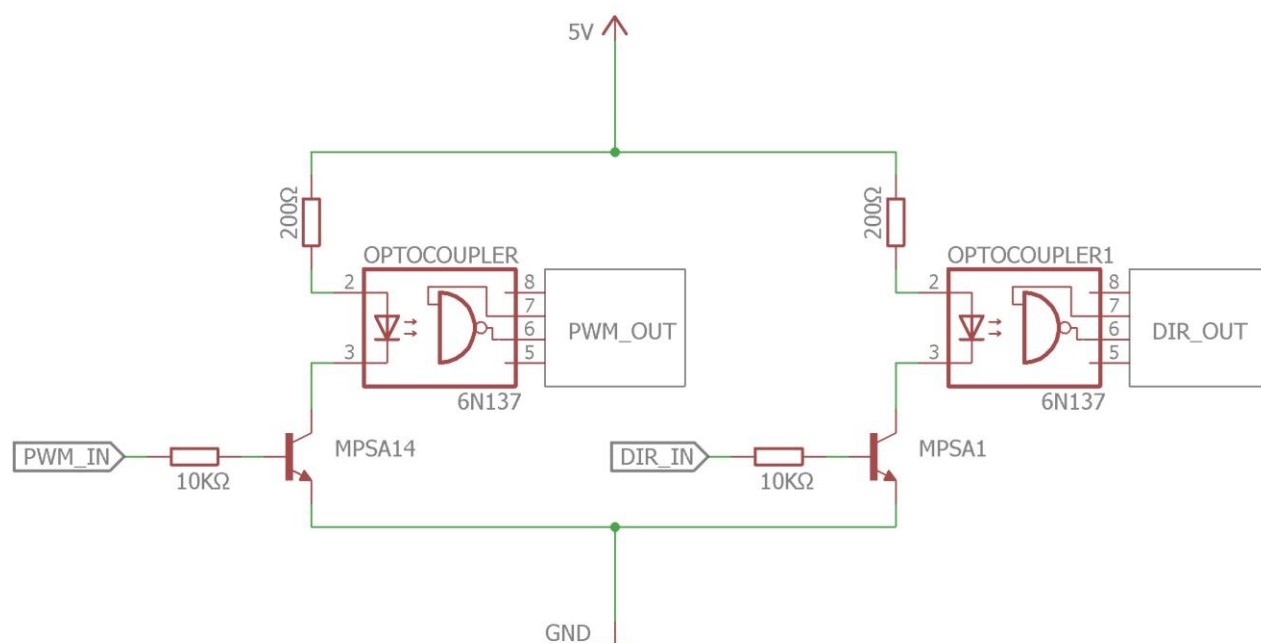
3.4 Β' Φάση πειραμάτων

Έχοντας έρθει σε επαφή με το ρομπότ και γνωρίζοντας μερικούς από τους βασικούς λόγους αστάθειας, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν επιδιορθώσεις στο υπάρχον σύστημα πριν τον σχεδιασμό της δεύτερης έκδοσης του ηλεκτρονικού συστήματος. Στόχος της Β' φάσης των πειραμάτων στο αρχικό σύστημα ήταν η

περαιτέρω δοκιμή, αυτή τη φορά ολόκληρου του συστήματος σε λειτουργία, ώστε να έχουν ληφθεί υπόψη όλοι οι παράγοντες που συμβάλλουν στην ηλεκτρική του αστάθεια.

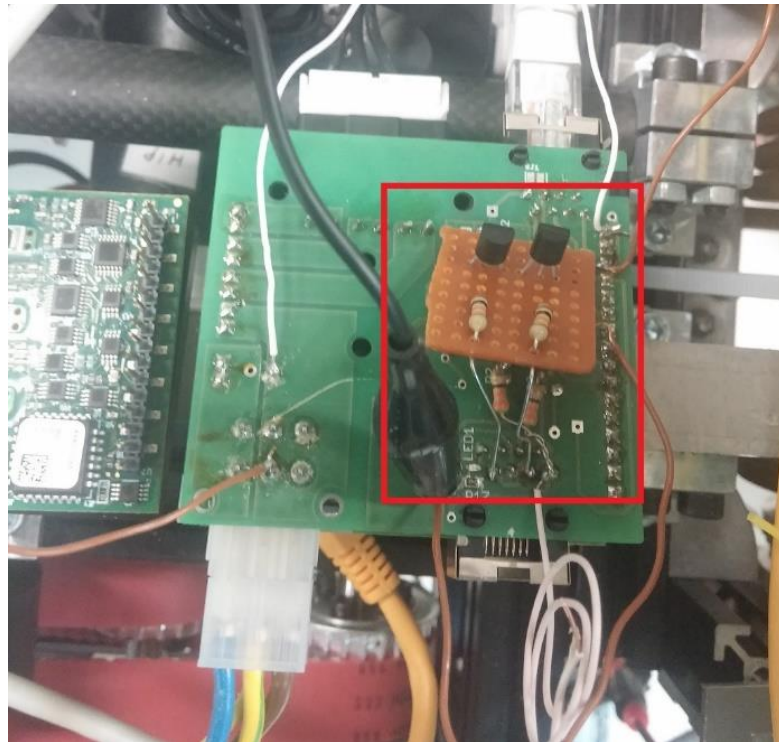
3.4.1 Ενίσχυση των σημάτων ελέγχου PWM και DIR

Όπως προαναφέρθηκε, ένα βασικό πρόβλημα που εμπόδιζε την ομαλή κίνηση του κινητήρα ήταν η αδυναμία των σημάτων ελέγχου, τα οποία προέρχονται από το υποσύστημα ελέγχου και συγκεκριμένα από τις ψηφιακές εξόδους I/O της πλακέτας DM35820-HR. Για την ενίσχυση των σημάτων κατασκευάστηκε το κύκλωμα ενός ενισχυτή κοινού εκπομπού ενός σταδίου (Εικόνα 3-11). Επιλέχθηκε το τρανζίστορ Darlington MPSA14, το οποίο ήταν ήδη διαθέσιμο στο εργαστήριο και έχει μέγιστο DC ρεύμα συλλέκτη $I_C=500\text{mA}$, κέρδος ρεύματος $h_{fe}>5000$, διαφορά δυναμικού συλλέκτη-εκπομπού στον κορεσμό $V_{CE(sat)} = 1.5\text{V max}$ και διαφορά δυναμικού βάσης-εκπομπού στον κορεσμό $V_{BE(sat)}=2.0\text{V}$. Η επιλογή των αντιστάσεων έγινε μετά από DC ανάλυση του κυκλώματος.

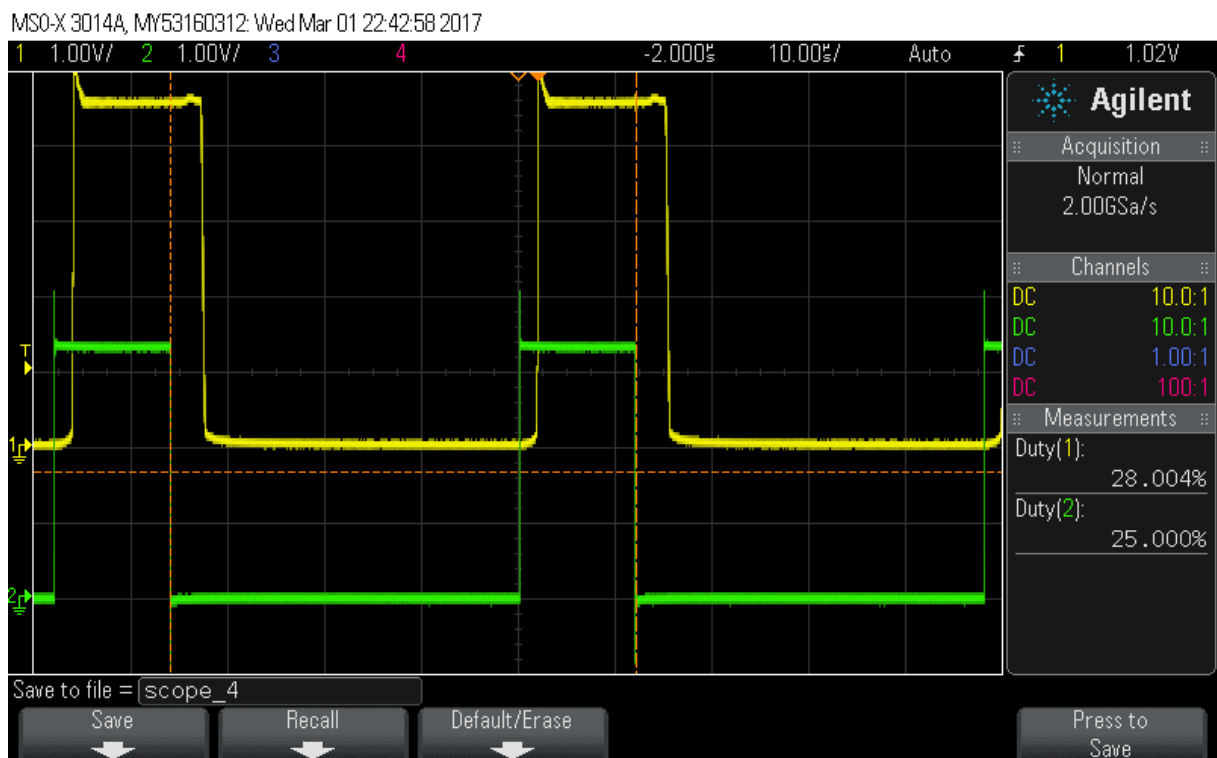


Εικόνα 3-11. Σχηματικό διάγραμμα δοκιμαστικής πλακέτας για την ενίσχυση των σημάτων ελέγχου.

Η υλοποίηση του κυκλώματος έγινε σε διάτρητη δοκιμαστική πλακέτα, η οποία προσαρτήθηκε στην υπάρχουσα πλακέτα επέκτασης των οδηγών (Εικόνα 3-12). Ελέγχθηκε η λειτουργία του κυκλώματος οπτικής σύζευξης, όπου διαπιστώθηκε ότι τα σήματα PWM και DIR ήταν εντός των αποδεκτών ορίων (Εικόνα 3-13, Εικόνα 3-14 και Εικόνα 3-15). Παρ' όλα αυτά, στο σήμα DIR που εξάγεται από το κύκλωμα παρατηρήθηκε υψίσυχνος θόρυβος, το πλάτος του οποίου δεν επηρέαζε την ομαλή λειτουργία του οδηγού και εμφανιζόταν μόνο στην κατάσταση 1 (5V). Επιπλέον, παρατηρήθηκε αύξηση του Duty Cycle του σήματος PWM στην έξοδο του κυκλώματος οπτικής σύζευξης, η οποία οφειλόταν στο στάδιο ενίσχυσης που προστέθηκε.

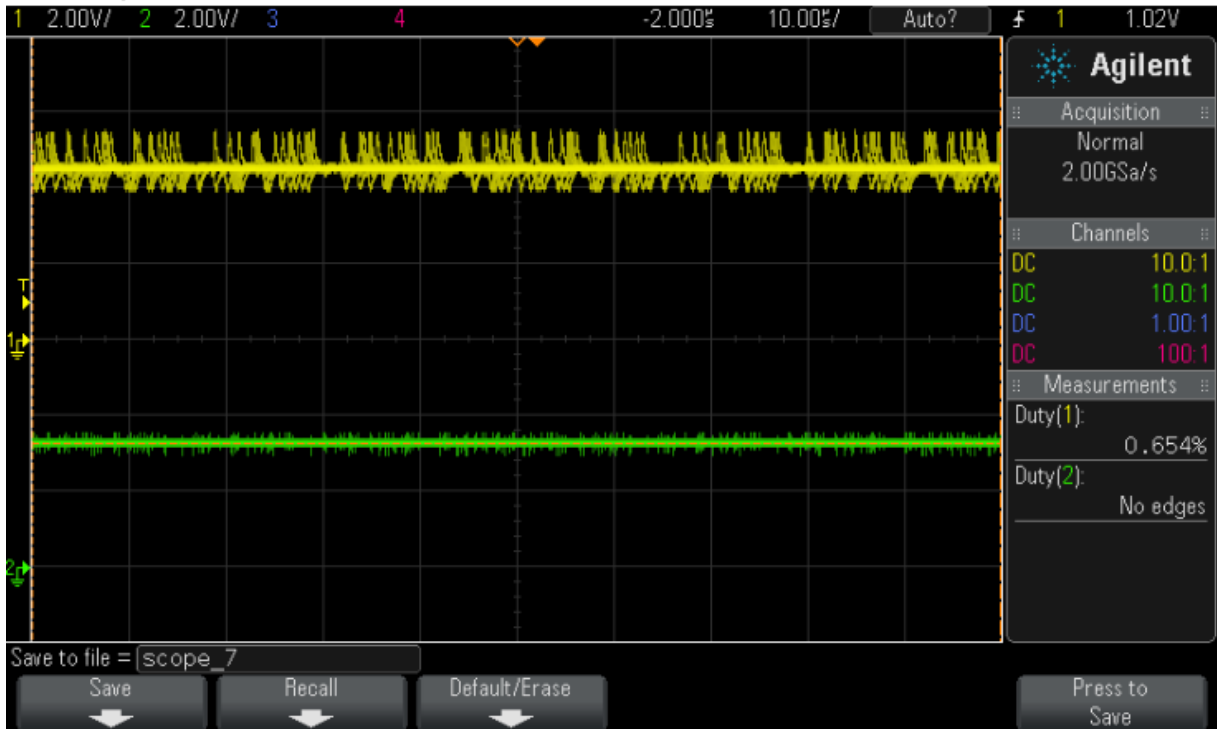


Εικόνα 3-12. Δοκιμαστική πλακέτα για την ενίσχυση των σημάτων ελέγχου.



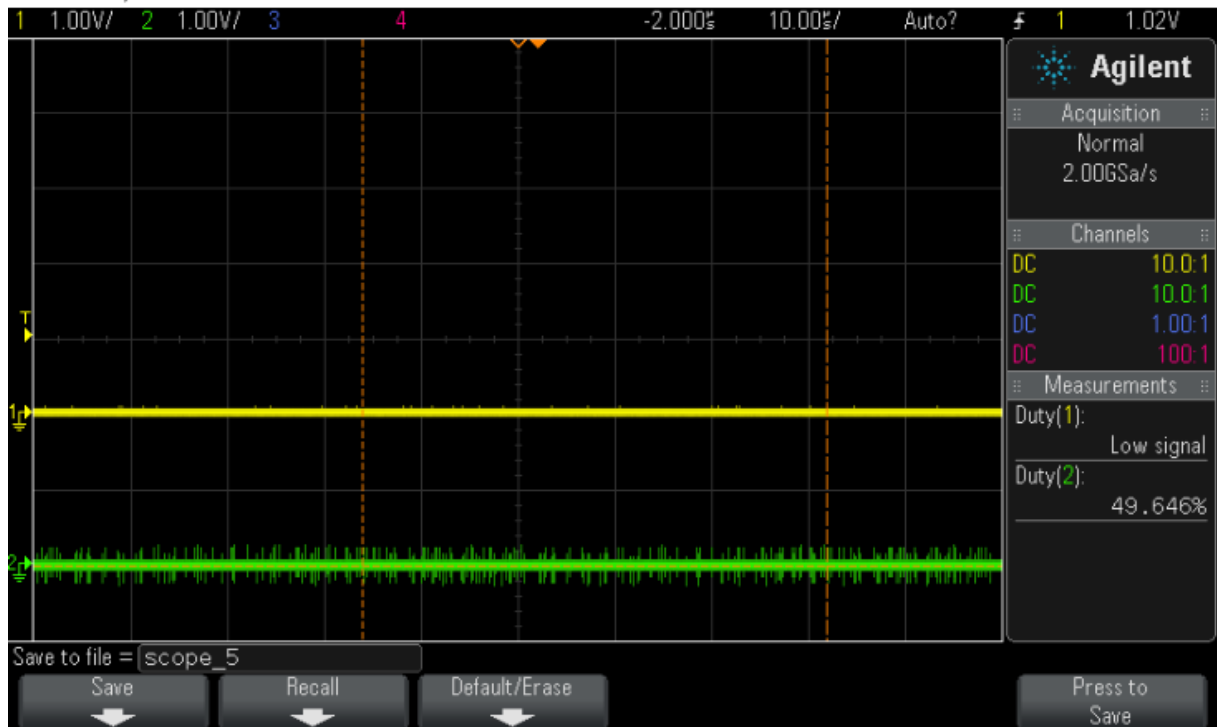
Εικόνα 3-13. Σήμα PWM. Είσοδος (πράσινο) και έξοδος (κίτρινο) στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.

MSO-X 3014A, MY53160312: Wed Mar 01 23:15:25 2017



Εικόνα 3-14. Σήμα DIR στην κατάσταση 1. Είσοδος (πράσινο) και έξοδος (κίτρινο) στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.

MSO-X 3014A, MY53160312: Wed Mar 01 22:44:19 2017

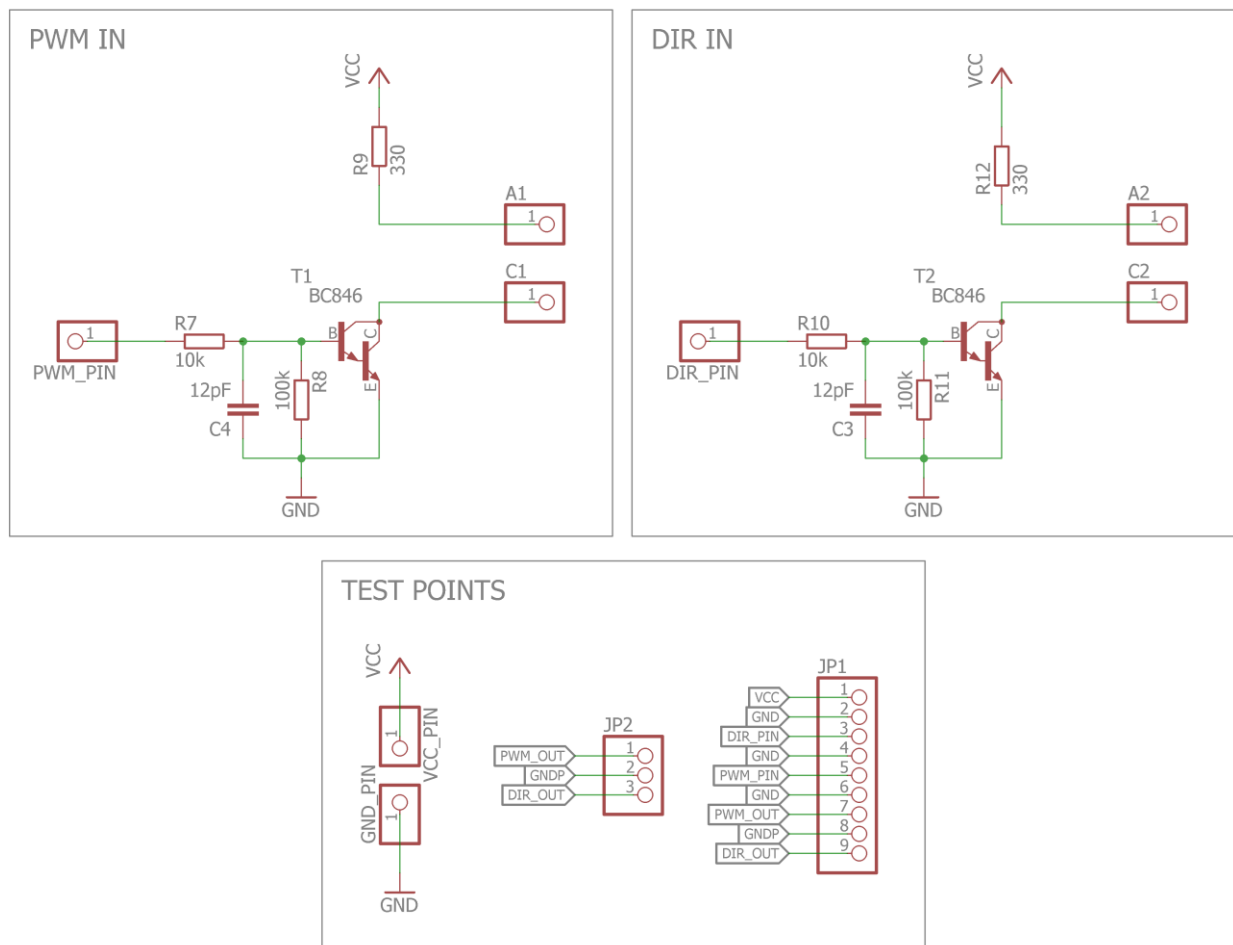


Εικόνα 3-15. Σήμα DIR στην κατάσταση 0. Είσοδος (πράσινο) και έξοδος (κίτρινο) στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.

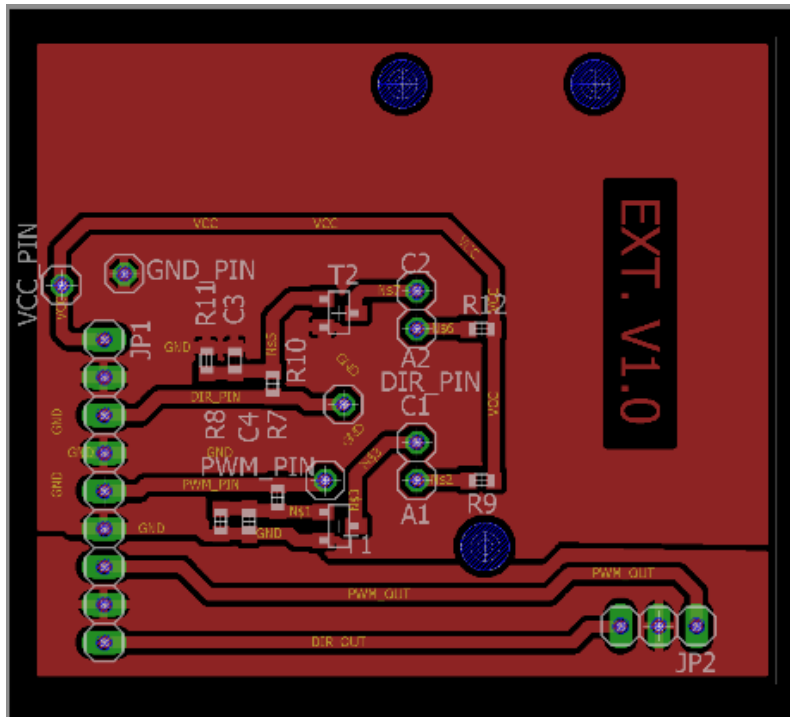
3.4.2 Προσάρτηση επιδιορθωτικής πλακέτας

Η χρήση της δοκιμαστικής πλακέτας που κατασκευάστηκε με στόχο την ενίσχυση των σημάτων ελέγχου ήταν επιτυχής. Στα πλαίσια αυτού του σχεδιασμού, με μικρές αλλαγές και βελτιώσεις, υλοποιήθηκαν οκτώ πλακέτες, οι οποίες και προσδέθηκαν στις υπάρχουσες πλακέτες επέκτασης των οδηγών των κινητήρων.

Το ηλεκτρικό κύκλωμα που υλοποιήθηκε δε διέφερε πολύ από αυτό της προηγούμενης δοκιμαστικής πλακέτας. Η πλακέτα «Extension V1.0» υλοποιεί το κύκλωμα ενός ενισχυτή κοινού εκπομπού ενός σταδίου με χρήση του διπολικού τρανζίστορ ένωσης BJT (BC846), το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για λειτουργία ως διακόπτης σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος [20]. Ο ενισχυτής ελέγχει το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο εκπομπής φωτός στην είσοδο του οπτοζεύκτη 6N137 και ανάλογα με το ρεύμα που εισάγεται στη Βάση του λειτουργεί είτε στην περιοχή αποκοπής, είτε στην περιοχή κορεσμού. Εφόσον υπήρχε η δυνατότητα επιλογής πληθώρας τρανζίστορ που θα μπορούσαν να ικανοποιούν τις απαραίτητες προδιαγραφές, επιλέχθηκε το παραπάνω τρανζίστορ που ήταν σε άμεση διαθεσιμότητα και σε μεγάλη ποσότητα στο εργαστήριο. Για τον σχεδιασμό του κυκλώματος λήφθηκαν υπόψη όλες οι προδιαγραφές του οπτοζεύκτη 6N137. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στις τιμές ρεύματος που πρέπει να διαρρέουν τους ακροδέκτες στην είσοδο, ώστε το εισερχόμενο σήμα να μεταφράζεται ορθώς στην έξοδο του. Συγκεκριμένα, η ένταση του εισερχόμενου ρεύματος για κατάσταση 0 πρέπει είναι έως $I_{0max}=250\mu A$, ενώ για την κατάσταση 1 πρέπει να είναι τουλάχιστον $I_{1min}=5mA$. Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε το σχηματικό διάγραμμα (Εικόνα 3-16) και το σχέδιο της πλακέτας «Extension Board V1.0» (Εικόνα 3-17).



Εικόνα 3-16 Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας Extension Board V1.0.

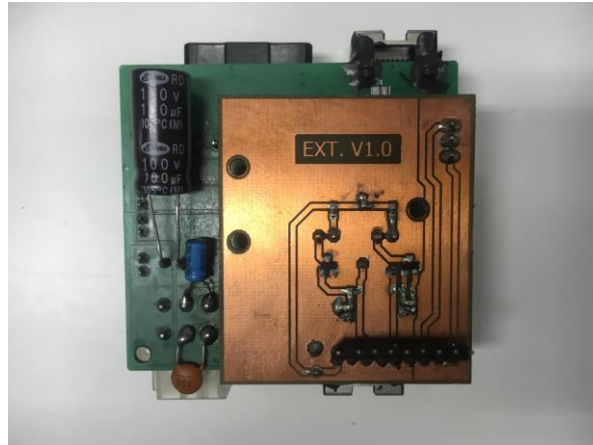


Εικόνα 3-17. Τελικό σχέδιο της πλακέτας Extension Board V1.0.

Ο πυκνωτής 12pF (C3 και C4) σε συνδυασμό με την αντίσταση (R7 και R10) που περιορίζει το ρεύμα στη βάση του τρανζίστορ υλοποιούν ένα βαθυτερατό φίλτρο με στόχο να αποκοπεί ο υψίσυχνος θόρυβος που πιθανώς να έχει το σήμα ελέγχου χωρίς να παραμορφώνεται η μορφή του (εύρος και Duty Cycle). Η συχνότητα μισής ισχύος του φίλτρου υπολογίστηκε $f_c=1,326\text{MHz}$ ύστερα από προσδιορισμό της συνάρτησης μεταφοράς του κυκλώματος που σχηματίζουν οι αντιστάσεις R7,R8 και ο πυκνωτής C4. Η τιμή του πυκνωτή επιλέχθηκε εμπειρικά χωρίς να προηγηθεί μελέτη για τα χαρακτηριστικά του θορύβου που παρουσιάζεται στο σύστημα ώστε να προσδιοριστεί επακριβώς η κατάλληλη συχνότητα αποκοπής. Η αντιστάσεις (R8 και R11) μεταξύ της Βάσης και του σημείου αναφοράς της κεντρικής μονάδας ελέγχου (GND_{PC}) προστέθηκαν ώστε να διατηρούνται τα τρανζίστορ στην περιοχή αποκοπής κατά τη διάρκεια έναρξης της λειτουργίας των πλακετών DM35820-HR, όταν η έξοδος των ακροδεκτών είναι απροσδιόριστη (Float). Έτσι αποφεύχθηκε η ανεπιθύμητη κίνηση των κινητήρων τη στιγμή της τροφοδοσίας και έναρξης των διαφόρων ηλεκτρονικών υποσυστημάτων.

Για την κατασκευή της πλακέτας χρησιμοποιήθηκε ειδική φωτοευαίσθητη πλακέτα και η διαδικασία της αποχάλκωσης πραγματοποιήθηκε με κατάλληλο χημικό (Τριχλωριούχος Σίδηρος - FeCl_3). Επίσης, πριν την διαδικασία προσάρτησης πραγματοποιήθηκαν παρεμβάσεις στις πλακέτες επέκτασης των οδηγών, όπως η αποκόλληση περιπτών στοιχείων, η τεχνητή καταστροφή συγκεκριμένων χαλκοδιαδρόμων και η προετοιμασία των απαραίτητων σημείων συγκόλλησης.

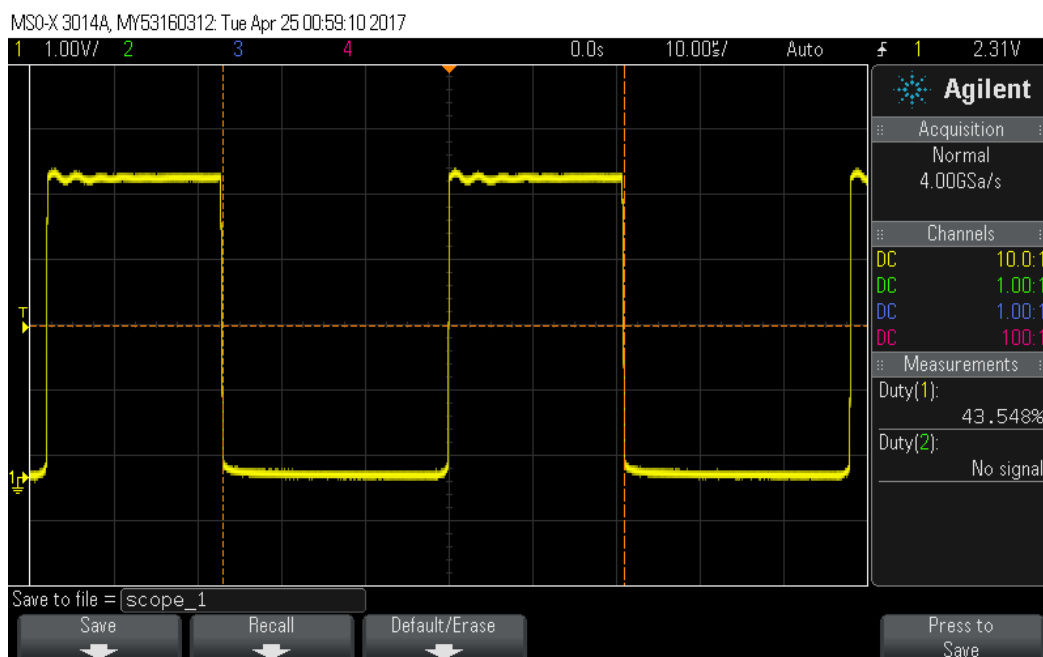
Θα πρέπει τέλος να υπογραμμίσουμε ότι στόχος της πλακέτας Extension Board V1.0 ήταν να προσθέσει ένα στάδιο ενίσχυσης για κάθε ένα από τα δύο σήματα ελέγχου (PWM και DIR) και όχι να αντικαταστήσει τις υπάρχουσες πλακέτες επέκτασης των οδηγών. Στην Εικόνα 3-18 φαίνεται η επιδιορθωτική πλακέτα προσαρτημένη στην πλακέτα επέκτασης των οδηγών.



Εικόνα 3-18. Η πλακέτα επέκτασης των οδηγών με προσαρτημένη την επιδιορθωτική πλακέτα Extension V1.0.

3.4.3 Κυμάτωση στο σήμα PWM

Στα προηγούμενα πειράματα παρατηρήθηκε, σε ορισμένες περιπτώσεις, κυμάτωση στο σήμα PWM (Εικόνα 3-19) που παράγεται στην έξοδο από το κύκλωμα οπτικής σύζευξης, η οποία έπρεπε να διερευνηθεί περαιτέρω. Το φαινόμενο αυτό εμφανιζόταν σε κάποιες από τις πλακέτες επέκτασης των οδηγών και ύστερα από δοκιμές διαπιστώθηκε ότι δεν οφειλόταν σε κάποια δυσλειτουργία των οδηγών. Παρόλο που η κυμάτωση αυτή δεν είχε επιπτώσεις στη λειτουργία του κινητήρα, ήταν πιθανό κατά τη λειτουργία ολόκληρου του συστήματος να δημιουργούσε κάποιου είδους αστάθεια.

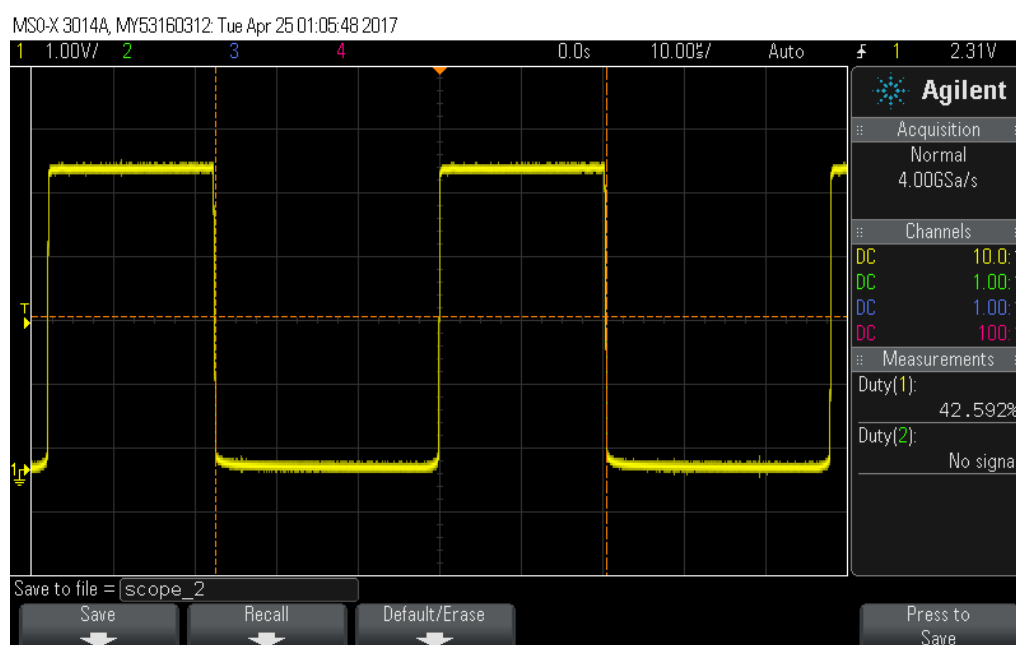


Εικόνα 3-19. Ανεπιθύμητη κυμάτωση στο σήμα PWM που παράγεται στην έξοδο του κυκλώματος οπτικής σύζευξης.

Υποθέσαμε ότι η κυμάτωση οφειλόταν σε κάποια σχεδιαστική ή κατασκευαστική ατέλεια στο κύκλωμα ενίσχυσης της εξόδου του οπποζεύκτη 6N137. Ύστερα από οπτικό και ηλεκτρικό έλεγχο στο κύκλωμα δεν

βρέθηκαν κατασκευαστικά προβλήματα και επομένως η αναζήτηση του προβλήματος επικεντρώθηκε στον σχεδιασμό του κυκλώματος ενίσχυσης.

Για την ορθή λειτουργία ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC) χρειάζεται, καταρχάς, να εξασφαλιστεί σε αυτό σταθερή τάση τροφοδοσίας. Ο οπποζεύκτης 6N137 απαιτεί για τη λειτουργία του τάση τροφοδοσίας 5V στον ακροδέκτη 8 (VCC), η οποία στο αρχικό σύστημα παραγόταν εξωτερικά του ρομπότ σε τροφοδοτικό του εργαστηρίου. Η μεγάλη σύνθετη αντίσταση της γραμμής τροφοδοσίας των 5V λόγω μεγάλου μήκους καλωδίου (10μ) σε συνδυασμό με την απουσία πυκνωτή κοντά στον ακροδέκτη τροφοδοσίας του οπποζεύκτη ήταν πιθανόν να δημιουργούσε αυτό το πρόβλημα. Για την επίλυση του προβλήματος τοποθετήθηκε ηλεκτρολυτικός πυκνωτής χωρητικότητας 10μF και ονομαστικής τάσης 16V κοντά στον ακροδέκτη 8. Η έξοδος του σήματος PWM (Εικόνα 3-20) από το κύκλωμα οπτικής σύζευξης δεν παρουσίαζε πλέον την ανεπιθύμητη κυμάτωση.



Εικόνα 3-20. Το σήμα PWM που παράγεται στην έξοδο του κυκλώματος οπτικής σύζευξης μετά την τοποθέτηση πυκνωτή χωρητικότητας 10μF στον ακροδέκτη τροφοδοσίας του οπποζεύκτη 6N137.

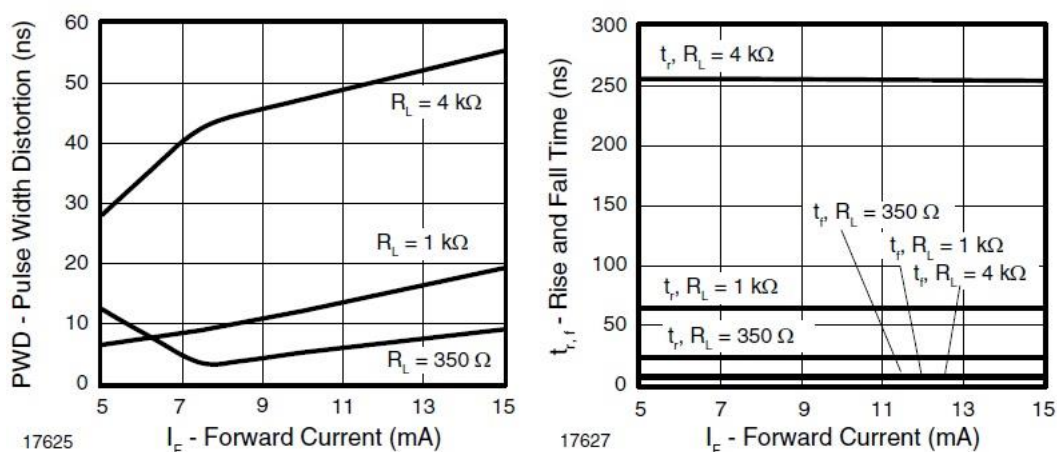
3.4.4 Σφάλμα στο Duty Cycle του σήματος PWM

Στα προηγούμενα πειράματα παρατηρήθηκε, επίσης, μία αισθητή διαφορά στο Duty Cycle του σήματος PWM που εισέρχεται στο κύκλωμα της οπτικής σύζευξης σε σύγκριση με αυτό που εξάγεται από αυτό. Συγκεκριμένα, στα πειράματα που διενεργήθηκαν πριν τη πρόσθεση της βαθμίδας ενίσχυσης παρατηρήθηκε μειωμένη τιμή του Duty Cycle σε σύγκριση με αυτό της εισερχόμενης στον οπποζεύκτη παλμοσειράς, ενώ μετά την πρόσθεση παρατηρήθηκε αύξηση αυτής της τιμής. Η πλακέτα Extension V1.0 επιδιόρθωσε το πρόβλημα της αστάθειας, αλλά δεν τελειοποίησε το κύκλωμα, καθώς υπήρχαν και άλλοι παράγοντες που επηρέαζαν τη λειτουργία του κυκλώματος. Για αυτόν τον λόγο, έγινε συστηματική ανάλυση και του κυκλώματος ενίσχυσης στην έξοδο του οπποζεύκτη και διαπιστώθηκε πως δεν είχαν ληφθεί υπόψη δύο πολύ σημαντικοί παράγοντες που συνεισφέρουν στην παραμόρφωση του εύρους του παλμού.

Καταρχάς, η τιμή της αντίστασης πρόσδεσης (Pull-Up) στην έξοδο του οπποζεύκτη 6N137 ξεπερνούσε κατά πολύ την τιμή που προτείνει ο κατασκευαστής. Συγκεκριμένα, στο τεχνικό φύλλο δεδομένων δηλώνεται

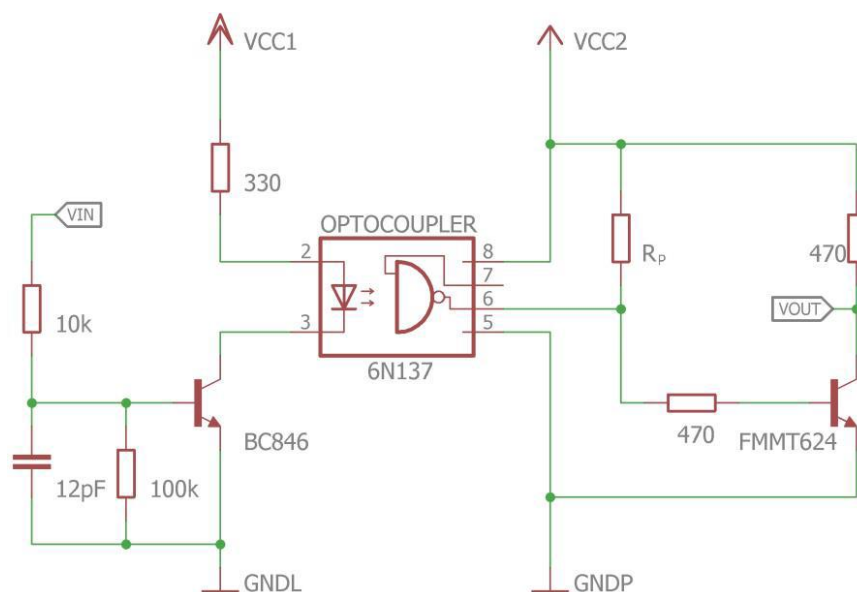
ρητά ότι η μέγιστη τιμή για την ομαλή λειτουργία θα πρέπει να είναι μικρότερη των 4kΩ ενώ είχε επιλεγθεί αντίσταση 10kΩ [17]. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να αυξάνεται πολύ ο χρόνος απόκρισης της εξόδου του οπτοζεύκτη και κατ' επέκταση και η παραμόρφωση του εύρους του παλμού (Εικόνα 3-21).

Ο δεύτερος παράγοντας που επηρεάζει το εύρος του παλμού είναι το ρεύμα που διαρρέει τη βάση του τρανζίστορ FMMT624 [23]. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα που διαρρέει τη Βάση, τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος που χρειάζεται το τρανζίστορ για να μεταβεί από την περιοχή κορεσμού στην περιοχή αποκοπής, το οποίο συνεπάγεται μικρότερο εύρος του παλμού. Ωστόσο, λόγω της μεγάλης τιμής της αντίστασης πρόσδεσης (Pull-Up) που είχε επιλεγθεί (10kΩ), ο παράγοντας αυτός δεν επιδρούσε σημαντικά στο εύρος του παλμού, αφήνοντας έτσι μόνο τον πρώτο παράγοντα να ενεργήσει.

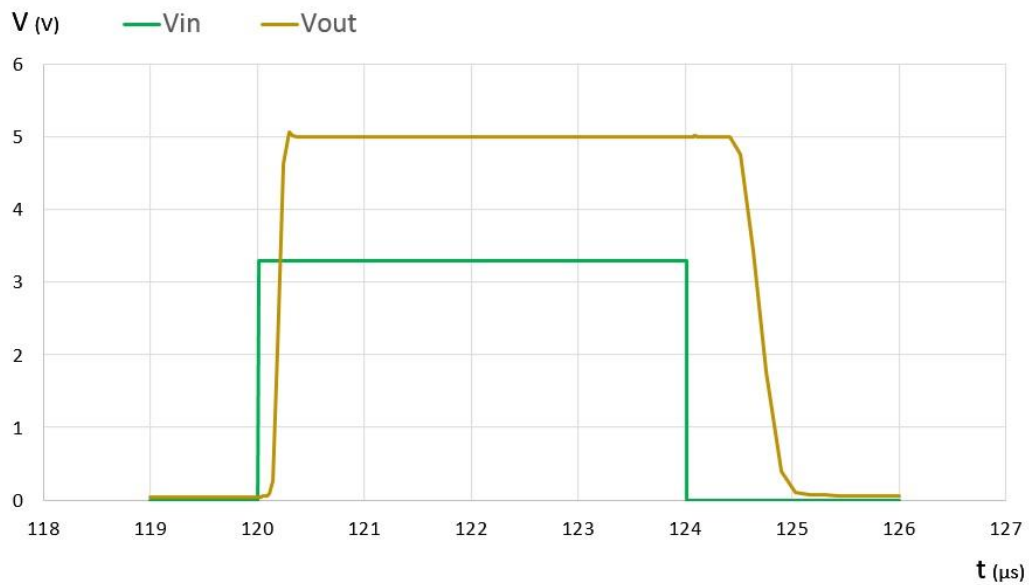


Εικόνα 3-21. Η σχέση μεταξύ της αντίστασης πρόσδεσης (Pull-Up) και της παραμόρφωσης του παλμού στην έξοδο του οπτοζεύκτη 6N137 όπως δίνεται από τον κατασκευαστή.

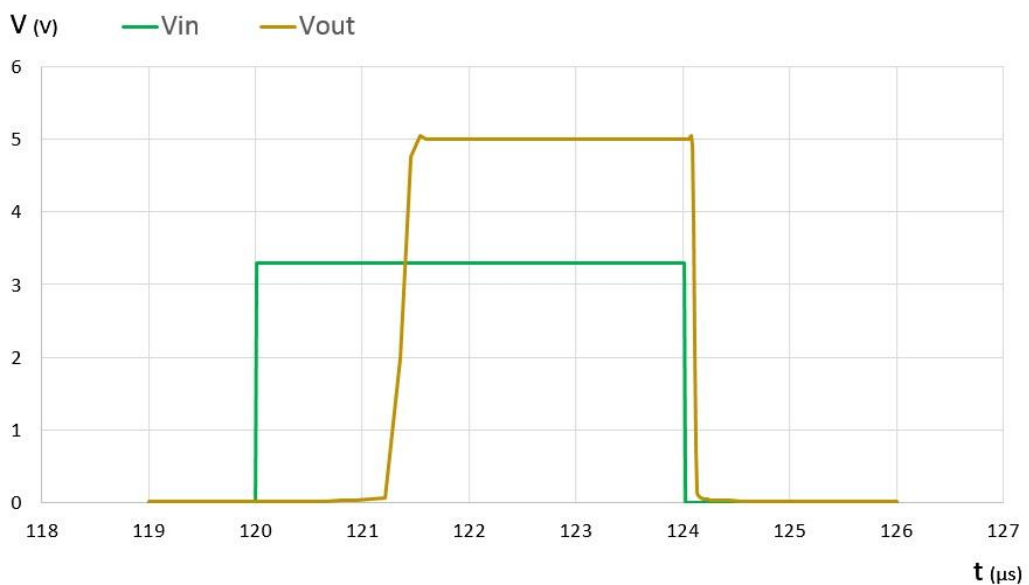
Για να επιβεβαιωθεί η θεωρία αυτή πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με το πρόγραμμα SPICE (Εικόνα 3-22). Η προσομοίωση έγινε με είσοδο παλμοσειρά συχνότητας 25kHz και Duty Cycle 10% (εύρος παλμού 4μs) για δύο διαφορετικές τιμές της Pull-Up αντίστασης R_p (10kΩ και 1kΩ) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες Εικόνα 3-23 και Εικόνα 3-24.



Εικόνα 3-22. Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος προσομοίωσης.



Εικόνα 3-23. Προσομοίωση για Pull-Up αντίσταση $R_p=10\text{k}\Omega$ και Duty Cycle της εισερχόμενης παλμοσειράς 10%. Η είσοδος (πράσινο) και η έξοδος (πορτοκαλί) του παλμού στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.

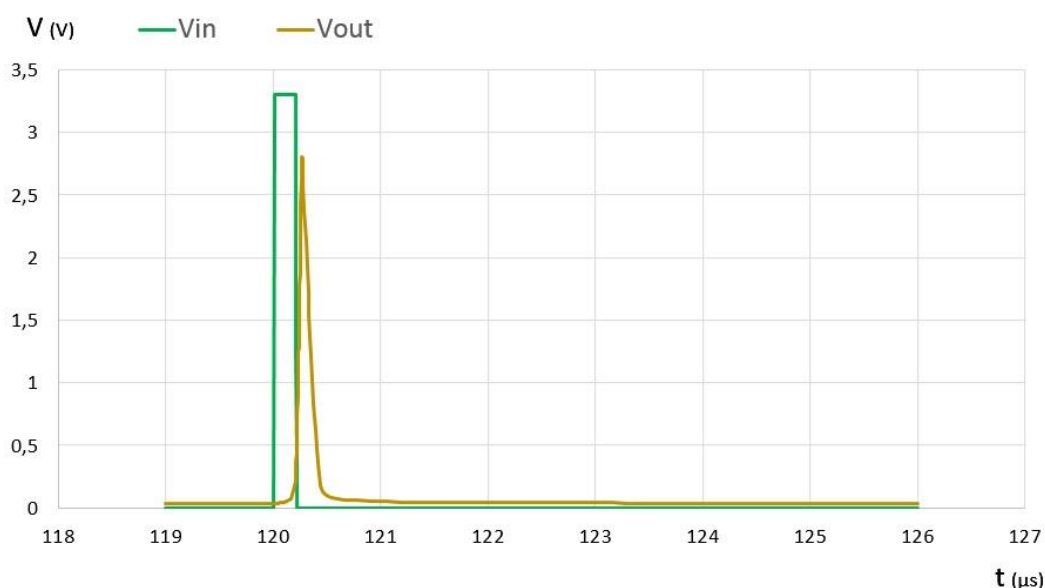


Εικόνα 3-24. Προσομοίωση για Pull-Up αντίσταση $R_p=1\text{k}\Omega$ και Duty Cycle της εισερχόμενης παλμοσειράς 10%. Η είσοδος (πράσινο) και η έξοδος (πορτοκαλί) του παλμού στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.

Στην πρώτη περίπτωση ($R_p=10\text{k}\Omega$) το εύρος του παλμού στην έξοδο ήταν $4,76\mu\text{s}$ (Duty Cycle 11,9%) που σημαίνει αύξηση του Duty Cycle κατά 1,9%. Στη δεύτερη περίπτωση ($R_p=1\text{k}\Omega$) το εύρος του παλμού ήταν $2,68\mu\text{s}$ (Duty Cycle 6,7%), που αντιστοιχεί σε μείωση σε σχέση με το επιθυμητό κατά 3,3%. Το γεγονός αυτό αποδόθηκε στον δεύτερο παράγοντα που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Κατά την πραγματοποίηση δοκιμών σε έναν κινητήρα και για πολύ μικρή τιμή Duty Cycle ($<1\%$) στο σήμα ελέγχου PWM, παρατηρήθηκε πλήρης ακινησία. Αρχική υπόθεση ήταν πως αυτό οφειλόταν στην αδυναμία του κυκλώματος οπτικής σύζευξης να μεταφράσει σωστά το σήμα αυτό. Για αυτόν τον λόγο, έγινε

και τρίτη προσομοίωση του υφιστάμενου κυκλώματος για πολύ μικρή τιμή Duty Cycle (0.5%). Διαπιστώθηκε ότι το τρανζίστορ FMMT624 δεν προλαβαίνει να μεταβεί από την περιοχή κορεσμού στην περιοχή αποκοπής (Εικόνα 3-25).



Εικόνα 3-25. Προσομοίωση στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης για αντίσταση $R_p=10k\Omega$ και Duty Cycle σήματος PWM 0,5%. Η είσοδος (πράσινο) και η έξοδος (πορτοκαλί) του παλμού.

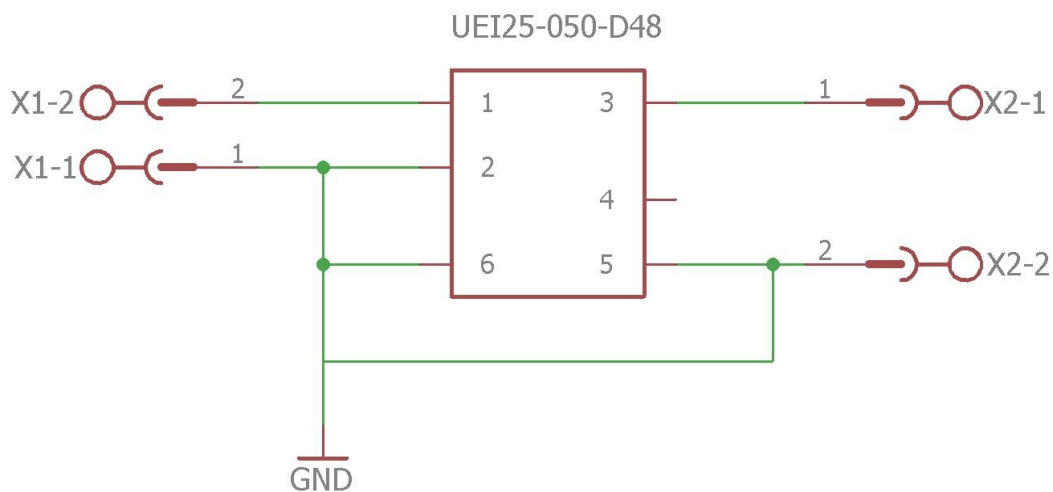
Από τις παραπάνω προσομοιώσεις, παρατηρήθηκε αδυναμία του κυκλώματος οπτικής σύζευξης να λειτουργήσει σωστά και να μεταφέρει τα σήματα ελέγχου αυτούσια στον οδηγό του κινητήρα ακόμη και μετά τη προσθήκη της ενισχυτικής βαθμίδας στην είσοδο. Αυτό είχε σημαντικές επιπτώσεις στον έλεγχο του κινητήρα αφού η επιθυμητή τιμή ρεύματος, η οποία υπολογιζόταν στη κεντρική μονάδα ελέγχου και μεταφραζόταν ως Duty Cycle της παλμοσειράς PWM, δεν έφθανε ποτέ με ακρίβεια στον οδηγό του κινητήρα.

3.4.5 Μετατροπείας Τάσης DC/DC

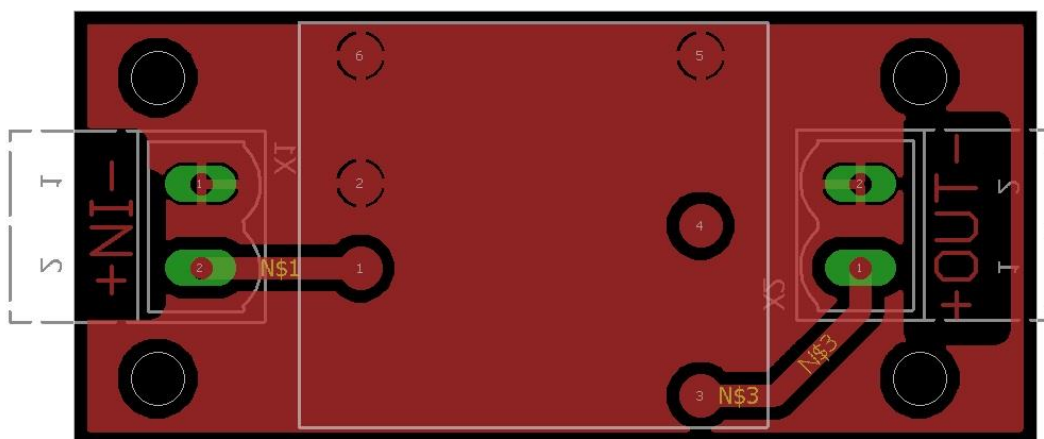
Για την λειτουργία του οπτοζεύκτη 6N137 απαιτείται τροφοδοσία τάσης 5V, η οποία στην προηγούμενη έκδοση του ηλεκτρονικού συστήματος ενεργειακής τροφοδοσίας παραγόταν στην πλακέτα υψηλής ισχύος με υλοποίηση παλμοτροφοδοτικού βασισμένης στο ολοκληρωμένο κύκλωμα MAX5035BUSA+ της εταιρείας Maxim Integrated. Η λειτουργία αυτού του κυκλώματος ήταν προβληματική με αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια πειραμάτων να καταστρέφεται το ολοκληρωμένο MAX5035. Από τους υποψήφιους διδάκτορες είχε σταματήσει η χρήση του κυκλώματος αυτού και η απαραίτητη τάση για τη λειτουργία του κυκλώματος οπτικής σύζευξης γινόταν με τη χρήση τρίτου εργαστηριακού τροφοδοτικού. Ο αρνητικός πόλος του τροφοδοτικού αυτού είχε βραχυκυκλωθεί με τον αρνητικό πόλο του τροφοδοτικού υψηλής ισχύος, αφού η παραγόμενη τάση έπρεπε να έχει κοινό σημείο αναφοράς με τον οδηγό του κινητήρα.

Η χρήση του παλμοτροφοδοτικού διακόπηκε και αντικαταστάθηκε με έναν μετατροπέα τάσης (DC-DC Converter) της εταιρείας MURATA POWER SOLUTIONS. Το μοντέλο που επιλέχθηκε (UE125-050-D48) χαρακτηρίζεται από δυνατότητα τροφοδοσίας με μεγάλο εύρος της τάσης εισόδου (36V έως 60V), δυνατότητα παροχής ρεύματος με ένταση έως 5A (25W), και υψηλή απόδοση έως και 91% [31]. Επίσης, προσφέρει πλήρη ηλεκτρική αποσύζευξη μεταξύ της εισόδου και της εξόδου (True Isolation). Για την

πρόσδεση του στο υπάρχον σύστημα σχεδιάστηκε κατάλληλη πλακέτα (Εικόνα 3-26, Εικόνα 3-27 και Εικόνα 3-28), η οποία προσαρτήθηκε στο υπάρχον σύστημα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος (Εικόνα 3-29).



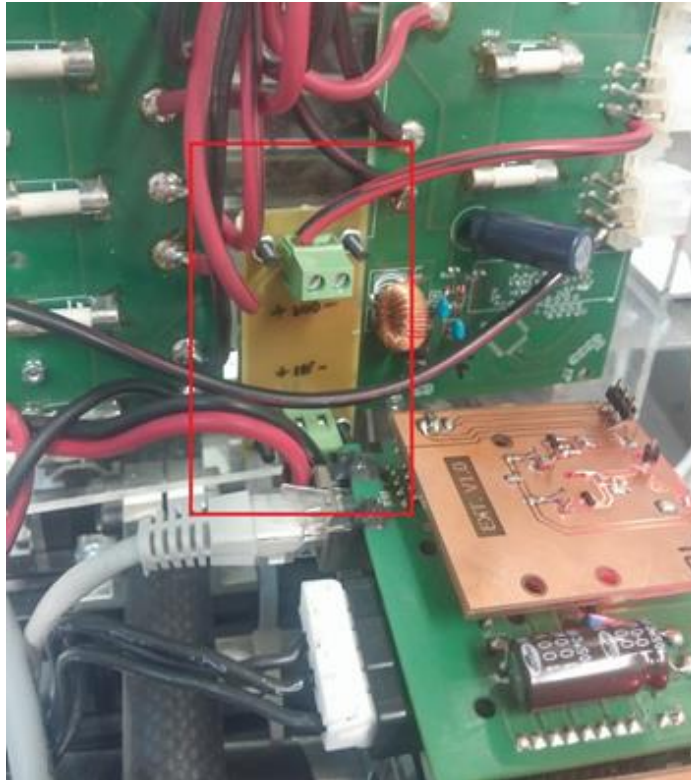
Εικόνα 3-26. Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας πρόσδεσης του μετατροπέα τάσης.



Εικόνα 3-27. Άνω επίπεδο της πλακέτας πρόσδεσης του μετατροπέα τάσης.



Εικόνα 3-28. Ο μετατροπέας τάσης UEI25-050-D48 κολλημένος στην ειδική πλακέτα



Εικόνα 3-29. Προσάρτηση του μετατροπέα τάσης στο αρχικό ηλεκτρονικό σύστημα παροχής υψηλής ισχύος.

Η λειτουργία του ρομπότ ήταν ομαλή και μετά την πρόσδεση του μετατροπέα τάσης UEI25-050-D48. Ύστερα από αυτή τη βελτίωση στο σύστημα, για την τροφοδοσία του ρομπότ χρησιμοποιούνταν πλέον δύο τροφοδοτικά (αντί για τρία), και συγκεκριμένα, ένα για την τροφοδοσία του υπολογιστή (24V) και ένα για την τροφοδοσία υψηλής ισχύος (45V~60V) από την οποία παράγεται και η απαιτούμενη τάση 5V για τη λειτουργία του κυκλώματος οπτικής σύζευξης.

3.4.6 Πρόσθετες βελτιωτικές ενέργειες στο αρχικό σύστημα

Κατά τη διάρκεια των προαναφερθέντων πειραμάτων και παράλληλα με την συστηματική μελέτη του αρχικού ηλεκτρονικού συστήματος παρατηρήθηκαν επιπλέον αδυναμίες και σχεδιαστικά λάθη. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες από τις αδυναμίες που εντοπίστηκαν, καθώς οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις και ήταν απαραίτητες πριν τη διενέργεια πειραμάτων με ολόκληρο το ρομποτικό σύστημα σε λειτουργία.

Σχεδιαστικά λάθη και βελτιώσεις στην πλακέτα επέκτασης των οδηγών:

- Δε δημιουργήθηκαν οι απαραίτητες νησίδες (Ground Planes) των σημείων αναφοράς (GND POWER, GND-LOGIC και GND-PC) για τη μείωση του ηλεκτρικού θορύβου που οφείλεται στο φαινόμενο συνακρόασης (Crosstalk), καθώς και για τη μείωση της σύνθετης αντίστασης προς αυτά.
- Δεν προστέθηκαν οι κατάλληλοι πυκνωτές απόζευξης κοντά στην τροφοδοσία των 5V (V_{CC}) του οπτοζεύκτη. Μία προσωρινή λύση την οποία εφαρμόσαμε σε όλες τις πλακέτες ήταν η πρόσθεση πυκνωτών χωρητικότητας 10 μ F. Όμως, ορθότερη λύση θα ήταν η πρόσθεση ενός ζευγαριού πυκνωτών απόζευξης (10 μ F και 100nF) για την αποκοπή και του υψίσυχνου θορύβου στη γραμμή των 5V.

- Έγινε πρόβλεψη στο σχέδιο της πλακέτας επέκτασης των οδηγών, αλλά δεν κολλήθηκε ηλεκτρολυτικός πυκνωτής χωρητικότητας 100μF και ονομαστικής τάσης 100V κοντά στην τροφοδοσία υψηλής ισχύος του οδηγού, όπως προτείνεται από τον κατασκευαστή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την πιθανώς ασταθή λειτουργία του κινητήρα, ενώ ταυτόχρονα αποτελούσε κίνδυνο μερικής ή και ολικής καταστροφής των οδηγών. Επίσης, στην κατάσταση κατά την οποία ένας κινητήρας λειτουργούσε ως γεννήτρια, η παραγόμενη ενέργεια είχε ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση της τροφοδοσίας υψηλής ισχύος και η λειτουργία ολόκληρου του συστήματος να διακόπτεται λόγω σφάλματος υπέρτασης (Over Voltage Protection) στην έξοδο του τροφοδοτικού υψηλής ισχύος. Για την επίλυση πιθανών προβλημάτων στο μέλλον κολλήθηκε κατάλληλος ηλεκτρολυτικός πυκνωτής σε κάθε πλακέτα επέκτασης των οδηγών.

- Στο αρχικό υποσύστημα ελέγχου είχαν προστεθεί, ως προσπάθεια για να βελτιωθεί η ηλεκτρική ευστάθεια του συστήματος, συσκευές φερρίτη γύρω από τα καλώδια τροφοδοσίας των κινητήρων. Οι συσκευές αυτές συγκάλυπταν σε κάποιο βαθμό τα προβλήματα που εμφάνιζε το υποσύστημα ελέγχου, αλλά προσέθεταν περιττό βάρος στο ρομπότ (>1kg) και ταυτόχρονα ασκούσαν πίεση στα βύσματα τροφοδοσίας των φάσεων των κινητήρων. Στα πειράματα που ακολούθησαν με το ρομποτικό σύστημα σε λειτουργία καθ' ολότητα, αφαιρέθηκαν οι συσκευές αυτές και δεν παρατηρήθηκε επιπλέον θόρυβος ούτε στα σήματα ελέγχου, ούτε στις γραμμές παροχής υψηλής ισχύος.

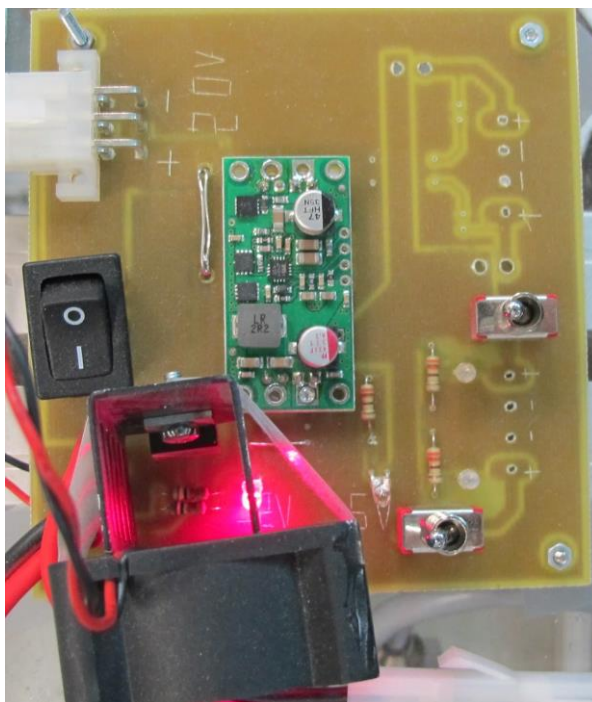
Σχεδιαστικά λάθη στο σύστημα ενεργειακής τροφοδοσίας:

- Οι ασφάλειες ρεύματος που επιλέχθηκαν ήταν ακατάλληλες για την προστασία των κινητήρων και των οδηγών τους. Συγκεκριμένα, οι ασφάλειες που είχαν τοποθετηθεί ήταν βραδείας τήξης και μπορούσαν να προσφέρουν για μεγάλο χρονικό διάστημα (5 δευτερόλεπτα) το τετραπλάσιο της ονομαστικής τους τιμής ($4 \times 12,5 = 50A$), γεγονός καταστροφικό τόσο για τους οδηγούς των κινητήρων, όσο και για τους ίδιους τους κινητήρες σε περίπτωση μη λειτουργίας των συστημάτων προστασίας των οδηγών (over-voltage, over-current, over-heating, short-circuit).

- Ένα πολύ συχνό φαινόμενο κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων, ήταν η απρόσμενη και τυχαία καταστροφή των οπτοζευκτών 6N137. Πολλοί παράγοντες ήταν υπεύθυνοι για το φαινόμενο αυτό, συμπεριλαμβανομένων της κακής τροφοδοσίας των οπτοζευκτών και των σχεδιαστικών επιλογών που απείχαν από τις υποδείξεις του κατασκευαστή. Όμως, παρόλο που πραγματοποιήθηκαν αρκετές βελτιώσεις στο αρχικό σύστημα, δεν εξαλείφθηκε εντελώς το φαινόμενο αυτό. Ο οπτοζεύκτης είναι εκ κατασκευής στοιχείο αρκετά ευαίσθητο σε φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκκένωσης (ESD). Εικάστηκε ότι η απουσία σύνδεσης του σκελετού του ρομπότ με τη γείωση του κτιρίου μπορεί να ευθύνεται για την καταστροφή των οπτοζευκτών. Συγκεκριμένα, κατά τη λειτουργία του ρομπότ παράγονταν λόγω μηχανικών τριβών ηλεκτρικά φορτία, τα οποία μη έχοντας τρόπο διαφυγής προς τη γη, παρέμεναν πάνω σε αυτό. Στη συνέχεια, η επαφή κάποιου ατόμου με την πλακέτα επέκτασης των οδηγών είχε ως αποτέλεσμα τη βίαιη μεταφορά φορτίων από το ρομπότ προς αυτόν. Για την αποφυγή του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκκένωσης συνδέθηκε ο σκελετός του ρομπότ σε σειρά με μία αντίσταση 1MΩ στη γείωση του κτιρίου. Η αλλαγή αυτή εξάλειψε εντελώς το φαινόμενο της τυχαίας καταστροφής των οπτοζευκτών.

- Στο αρχικό σύστημα είχε κατασκευαστεί πλακέτα τροφοδοσίας χαμηλής ισχύος (Εικόνα 3-30), με στόχο να τροφοδοτήσει τον δρομολογητή δικτύου, καθώς επίσης και άλλα υποσυστήματα που πιθανώς θα τοποθετούνταν κατά την εξέλιξη του συστήματος. Ωστόσο, η χρήση της συγκεκριμένης πλακέτας ήταν περιττή, καθώς στο ρομπότ ήταν διαθέσιμη η πλακέτα ATX3510HR-190W (μέρος του πύργου PCIe/104)

που είχε τη δυνατότητα να τροφοδοτήσει τις συσκευές αυτές [18]. Συγκεκριμένα, έδινε τη δυνατότητα τροφοδοσίας στη γραμμή των 5V έντασης ρεύματος έως 16,8A και στη γραμμή των 12V έως και 8,4A. Τα χαρακτηριστικά αυτά ικανοποιούσαν τις απαιτούμενες σε ενέργεια ανάγκες του συστήματος και μάλιστα με πολύ υψηλή απόδοση 91,04%. Για τον λόγο αυτό, αφαιρέθηκε η πλακέτα τροφοδοσίας χαμηλής ισχύος από το αρχικό σύστημα και πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλες συνδέσεις με την πλακέτα ATX3510HR-190W.

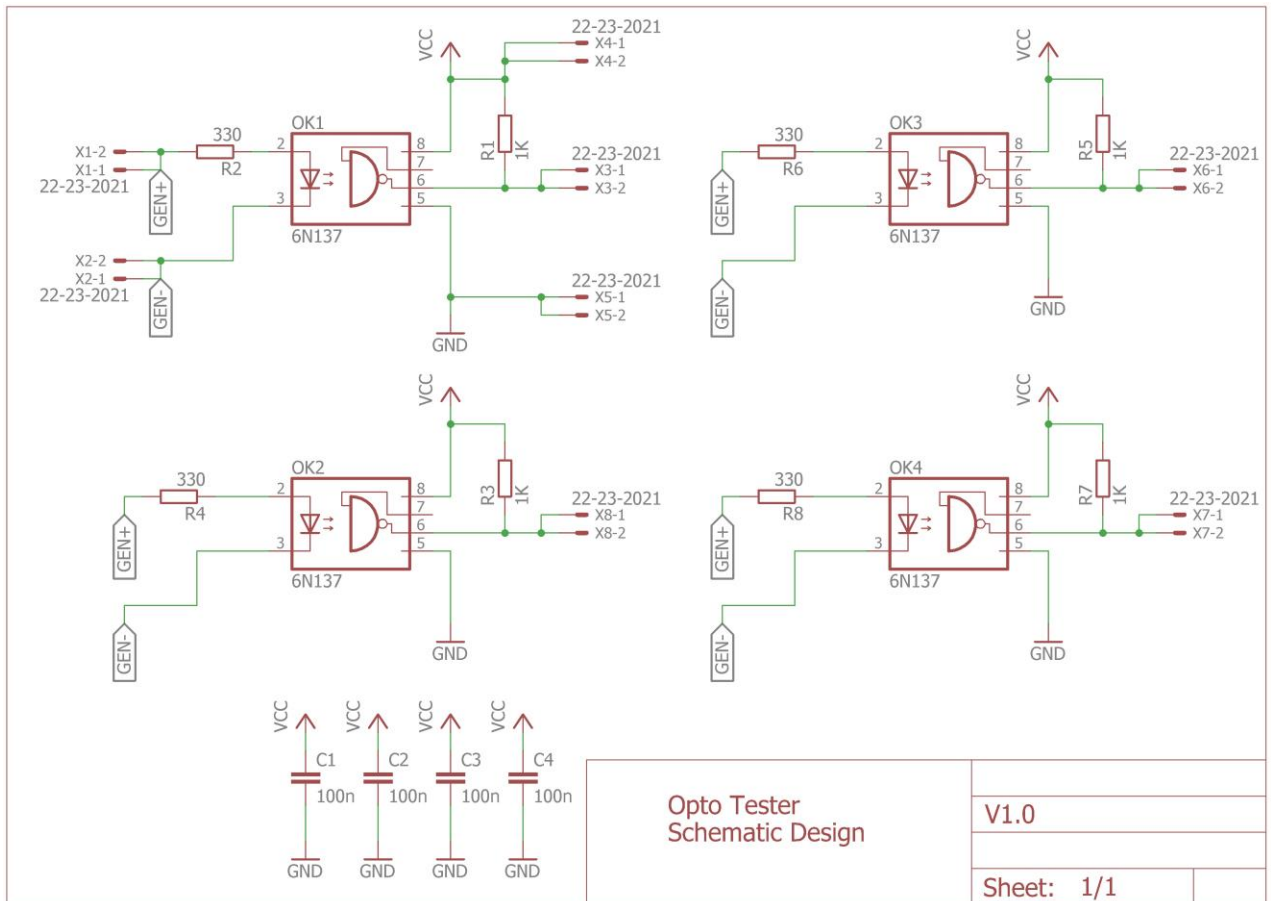


Εικόνα 3-30. Πλακέτα τροφοδοσίας χαμηλής ισχύος. Ήταν περιττή η χρήση της και αφαιρέθηκε από το αρχικό σύστημα.

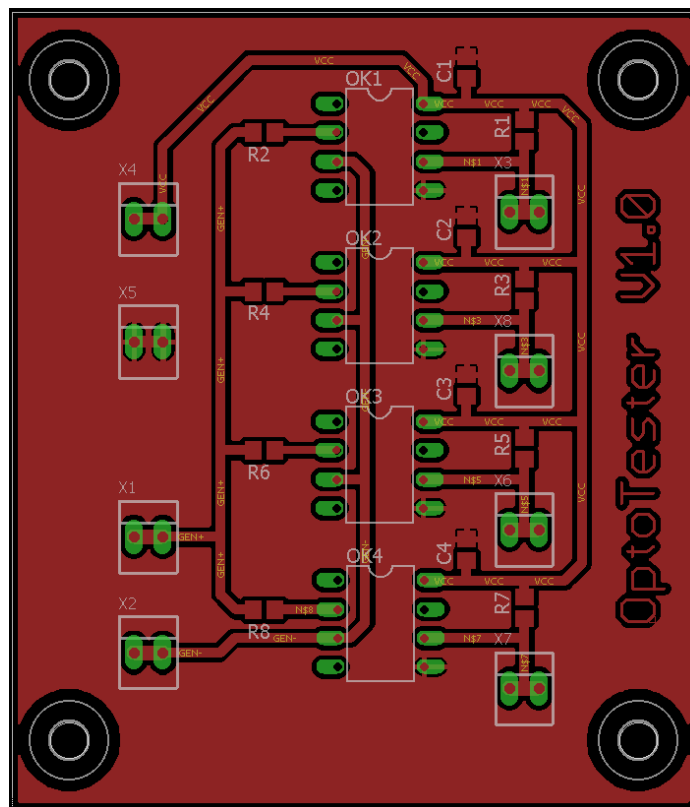
3.4.7 Κατασκευή και λειτουργία πλακέτας ελέγχου οπτοζευκτών

Κατά τη διάρκεια παλαιότερων πειραμάτων είχαν καταστραφεί αρκετοί οπτοζεύκτες με αποτέλεσμα να μη γνωρίζουμε την λειτουργική κατάσταση των υφιστάμενων στο ρομπωτικό σύστημα αλλά και όλων όσων είχαν αφαιρεθεί για αποθήκευση. Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε και κατά τη διάρκεια των δικών μας πειραμάτων. Για τον λόγο αυτόν, ήταν απαραίτητη η εύρεση ενός εύκολου τρόπου προσδιορισμού της λειτουργικής κατάστασης ενός οπτοζεύκτη χωρίς την ανάγκη να τίθεται όλο το ρομπωτικό σύστημα σε λειτουργία. Έτσι, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε εντός του εργαστηρίου με χρήση της εργαλειομηχανής LPKF, ειδική πλακέτα για τις δοκιμές τεσσάρων οπτοζευκτών ταυτόχρονα.

Το κύκλωμα που υλοποιήθηκε (Εικόνα 3-31 και Εικόνα 3-32), το οποίο αποτελείται από τον ελάχιστο δυνατό αριθμό στοιχείων που χρειάζονται για τον ταυτόχρονο έλεγχο τεσσάρων οπτοζευκτών, απαιτεί για τη λειτουργία του τροφοδοσία τάσης 5V, καθώς και σήμα εισόδου παλμοσειρά με πλάτος 5V και συχνότητα 25kHz. Η δοκιμή της πλακέτας ήταν επιτυχής και η χρήση της ήταν απολύτως απαραίτητη έως ότου προσδιορίστηκαν όλοι οι παράγοντες οι οποίοι συνέβαλαν στην καταστροφή των οπτοζευκτών.



Εικόνα 3-31. Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας ελέγχου οπτοζευκτών OptoTester V1.0.



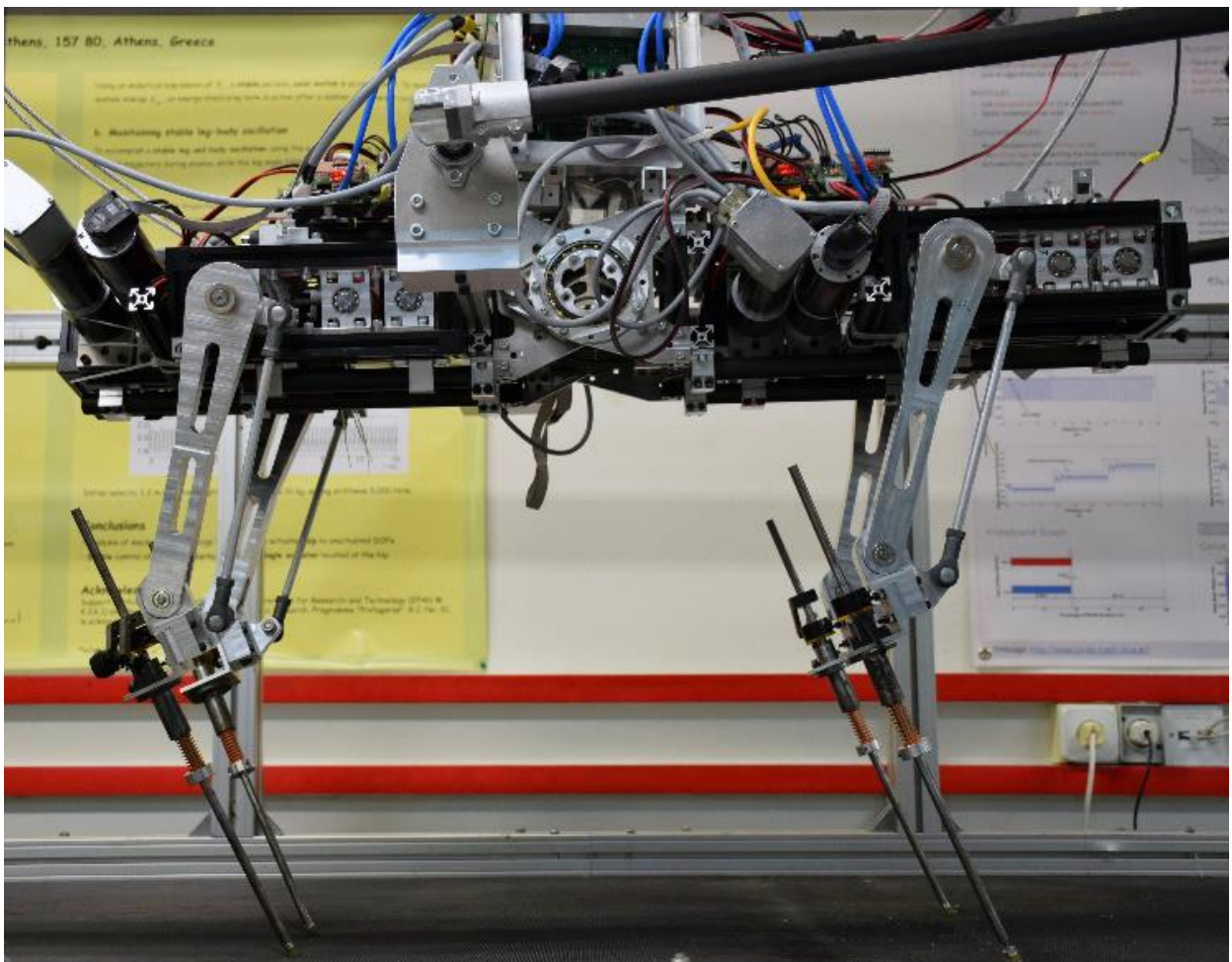
Εικόνα 3-32. Άνω επίπεδο της πλακέτας ελέγχου οπτοζευκτών OptoTester V1.0.

3.4.8 Δοκιμή του συνολικού αρχικού συστήματος μετά τις βελτιώσεις

Μετά την πραγματοποίηση όλων των προαναφερθεισών βελτιώσεων και αλλαγών, έγιναν οι πρώτες δοκιμές του συνολικού συστήματος. Αρχικά, ελέγχθηκαν μία προς μία όλες οι βελτιωμένες πλακέτες επέκτασης των οδηγών σε επαναλαμβανόμενο πείραμα λειτουργίας ενός μόνο κινητήρα. Στη συνέχεια, μετά από αφαίρεση των αρθρώσεων (hip και knee) για την αποφυγή σύγκρουσης με τους κινητήρες, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με όλο το σύστημα σε λειτουργία.

Στο πρώτο πείραμα που πραγματοποιήθηκε, δόθηκε η εντολή στους κινητήρες για κίνηση με μία σταθερή φορά. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, παρατηρήθηκε αδυναμία ενός κινητήρα να κινηθεί με σταθερή ταχύτητα, ενώ παράλληλα από το σύστημα προερχόταν έντονος ηχητικός θόρυβος (τύπου ραδιοφώνου). Ακολούθησε ενδελεχής έλεγχος όλων των σημάτων ελέγχου και εντοπίστηκε θόρυβος σε πολλά από αυτά, χωρίς να μπορεί να προσδιοριστεί η αιτία. Για την επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε να δοκιμασθεί κάθε οδηγός κινητήρα ξεχωριστά, καθώς ήταν τα μόνα στοιχεία του συστήματος στα οποία δεν είχε προηγηθεί έλεγχος. Παρατηρήθηκε προβληματική λειτουργία σε δύο από αυτούς, οι οποίοι αντικαταστάθηκαν με νέους για τη διεξαγωγή των επόμενων πειραμάτων.

Η εξέλιξη των τελευταίων πειραμάτων του βελτιωμένου αρχικού συστήματος ήταν εξαιρετική και όλα τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα λειτούργησαν σταθερά και αξιόπιστα. Παρακάτω παρουσιάζεται το αρχικό σύστημα μετά τις βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό.

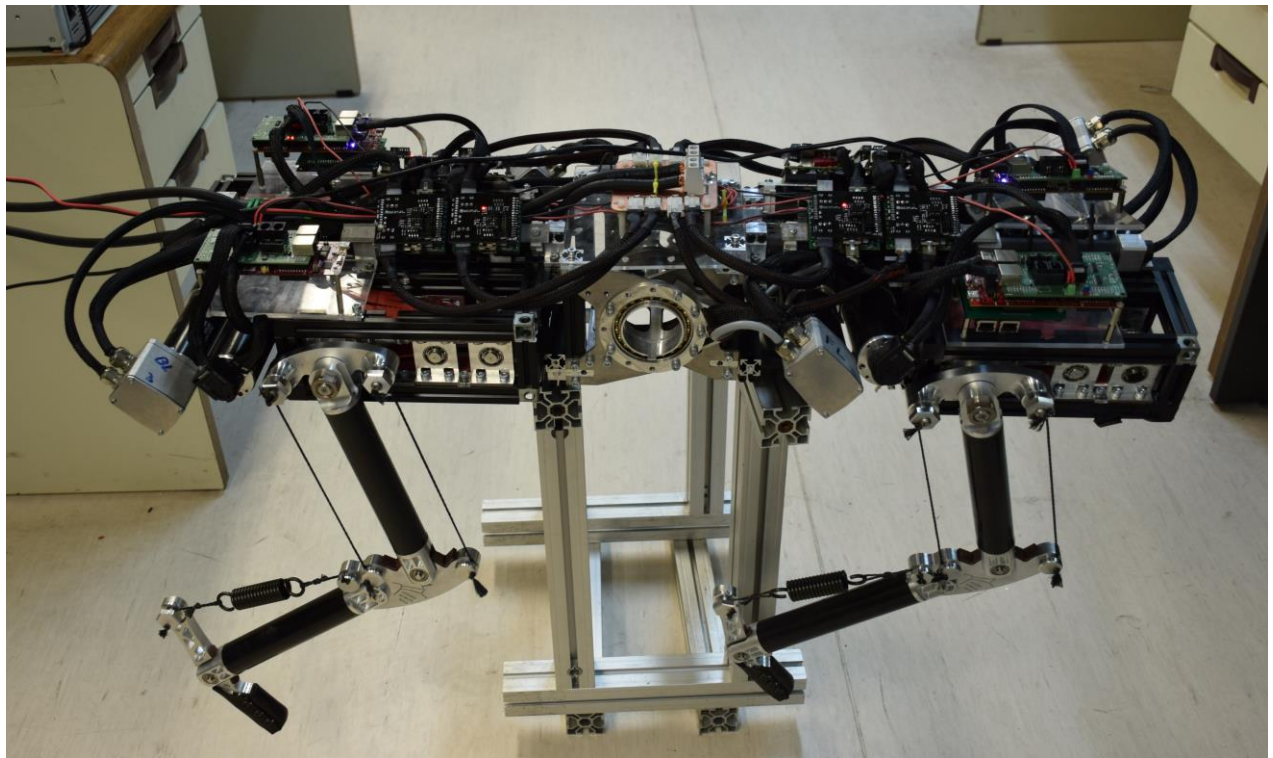


Εικόνα 3-33. Το αρχικό ρομποτικό σύστημα Λαίλαψ I μετά τις βελτιώσεις που έγιναν σε αυτό. Στιγμιότυπο πειράματος που πραγματοποιήθηκε από τους υπεύθυνους υποψήφιους διδάκτορες.

4 Το Ηλεκτρονικό Σύστημα του Τετράποδου Ρομπότ «Λαίλαψ II»

4.1 Εισαγωγή

Με τα πειράματα που διεξήχθησαν στο αρχικό ηλεκτρονικό σύστημα, αποκτήθηκαν τα εφόδια για τον σχεδιασμό του νέου ηλεκτρονικού συστήματος (Εικόνα 4-1). Η αρχιτεκτονική του νέου συστήματος σχεδιάστηκε με απώτερο στόχο την ηλεκτρική αξιοπιστία του ρομπότ και παράλληλα τη διατήρηση σε μεγάλο βαθμό της απλότητας των επιμέρους υποσυστημάτων. Έγινε προσπάθεια να αξιολογηθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του αρχικού συστήματος, προκειμένου να επιλεγθούν προσεκτικά τα χαρακτηριστικά που θα διατηρούνταν στο νέο σύστημα.



Εικόνα 4-1. Το τετράποδο ρομπότ «Λαίλαψ II» και το νέο ηλεκτρονικό σύστημα.

Παράλληλα με την ανάπτυξη του νέου ηλεκτρονικού συστήματος, πραγματοποιήθηκαν από τους υπεύθυνους υποψήφιους διδάκτορες σημαντικές αλλαγές στο ρομπότ τόσο σε επίπεδο μηχανολογικού σχεδιασμού, όσο και σε επίπεδο αρχιτεκτονικής του υποσυστήματος ελέγχου. Όσον αφορά τις μηχανολογικές τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν νέα πόδια από σωλήνες ανθρακονήματος και ντουραλουμίνιο.

Από την άλλη μεριά, υπήρξε ριζική αλλαγή στην αρχιτεκτονική του υποσυστήματος ελέγχου, καθώς αφαιρέθηκε η κεντρική μονάδα ελέγχου (ενσωματωμένο σύστημα PCIe/104) και επιλέχθηκε να διαμοιραστεί μέρος του ελέγχου σε τέσσερις περιφερειακές μονάδες, με χρήση της αναπτυξιακής πλακέτας LAUNCHXL-F28379D της εταιρείας Texas Instruments. Κεντρική λειτουργία της κάθε περιφερειακής μονάδας είναι ο έλεγχος της γωνιακής θέσης των αρθρώσεων ενός ποδιού. Επίσης, σημαντικές αλλαγές πραγματοποιήθηκαν στα υποσυστήματα οδήγησης με σημαντικότερη αυτή του επανασχεδιασμού της

πλακέτας επέκτασης των οδηγών των κινητήρων. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η αρχιτεκτονική του νέου ηλεκτρονικού συστήματος που υλοποιήθηκε, ενώ στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5) αναλύεται η αρχιτεκτονική του μικροελεγκτή TMS320F28379D και περιγράφονται τα βήματα προγραμματισμού και παραμετροποίησής του.

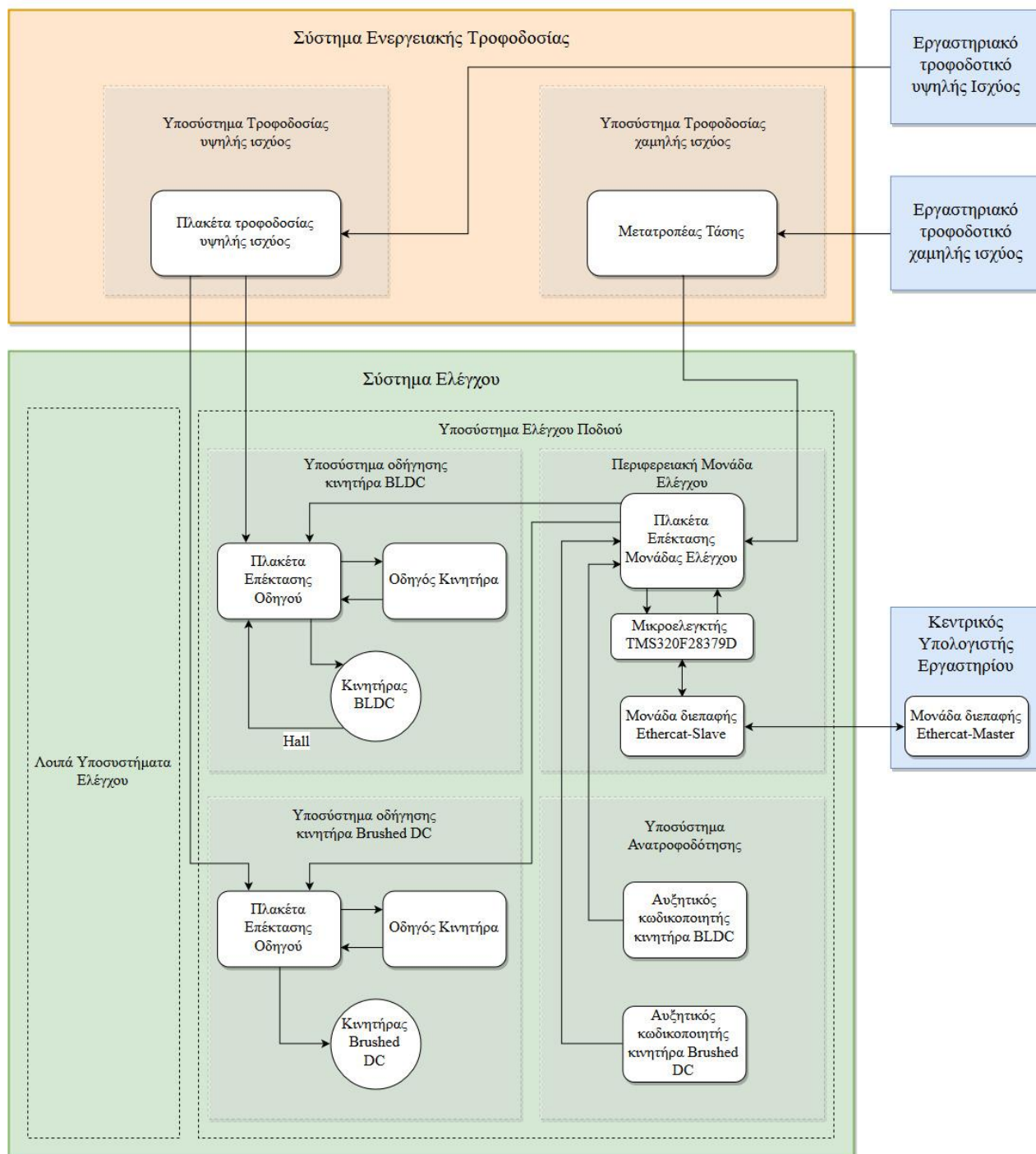
4.2 Η αρχιτεκτονική του νέου ηλεκτρονικού συστήματος

Στην αρχιτεκτονική του νέου ηλεκτρονικού συστήματος διατηρήθηκαν όσα χαρακτηριστικά της αρχικής αρχιτεκτονικής αξιολογήθηκαν ως θεμιτά. Πραγματοποιήθηκαν, ωστόσο, αρκετές βελτιωτικές αλλαγές και προσθήκες, έτσι ώστε να ενισχυθεί η αξιοπιστία του συστήματος και η προσαρμοστικότητά του στις συνεχείς αλλαγές που πραγματοποιούνται κατά τη συνολική εξέλιξη του ρομπότ. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στον σχεδιασμό των επιμέρους υποσυστημάτων, ώστε αυτά να είναι ευσταθή ηλεκτρικά και να δίνεται η δυνατότητα στους ερευνητές να πραγματοποιούν με ευχέρεια κάθε είδους αλλαγή σε αυτά. Επίσης, έγινε προσπάθεια να προβλεφθούν μελλοντικά προβλήματα, οι πιθανές λύσεις των οποίων ενσωματώθηκαν στον παρών σχεδιασμό. Παράλληλα, δόθηκε δυνατότητα εύκολης αποσφαλμάτωσης (debugging) των επιμέρους υποσυστημάτων. Το χαρακτηριστικό αυτό, απουσίαζε από τον αρχικό σχεδιασμό και δυσχέραινε τόσο την καταγραφή με παλμογράφο των σημάτων ελέγχου, όσο και την εξεύρεση της πηγής των διαφόρων προβλημάτων που παρουσιάζονταν.

Ένα τόσο πολύπλοκο και εκτεταμένο ηλεκτρονικό σύστημα απαιτεί, εκτός από έναν προσεκτικό σχεδιασμό που να αξιοποιεί τις νέες τεχνολογίες, και μία ποιοτική υλοποίηση ώστε να διατηρείται η αξιοπιστία σε βάθος χρόνου. Οι διάφορες πλακέτες που κατασκευάστηκαν δοκιμάστηκαν σε παρατεταμένα πειράματα πριν την οριστική προσαρμογή τους στο τελικό σύστημα. Επίσης, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη κατασκευή ποιοτικών και εύκαμπτων καλωδιώσεων. Έγινε προσεκτική επιλογή των χαρακτηριστικών και του μήκους των καλωδίων, η οργάνωση των οποίων έγινε με βάση τη γεωμετρική τοπολογία των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων που συνδέουν. Σημαντικός παράγοντας, επίσης, στην αξιοπιστία των καλωδιώσεων ήταν η επιλογή των κατάλληλων ακροδεκτών και η σταθερή προσάρτησή τους στα άκρα των καλωδιώσεων.

Στην Εικόνα 4-2 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του νέου ηλεκτρονικού συστήματος. Συγκριτικά με την αρχιτεκτονική του αρχικού συστήματος (Εικόνα 3-1), έμφαση δόθηκε στις εξής απαιτήσεις:

- Απλοποίηση του συστήματος ενεργειακής τροφοδοσίας.
- Διατήρηση της χρήσης ανεξάρτητων εργαστηριακών τροφοδοτικών για τη λειτουργία του ρομπότ.
- Αφαίρεση της ογκώδους και απαρχαιωμένης κεντρικής μονάδας ελέγχου που ακολουθούσε το πρότυπο PCIe/104 και αντικατάσταση αυτής με περιφερειακές μονάδες ελέγχου.
- Σύνδεση των επιμέρους υποσυστημάτων ελέγχου και του κεντρικού υπολογιστή του εργαστηρίου με δίκτυο EtherCAT.
- Αναβάθμιση του ρόλου του κεντρικού υπολογιστή από απλό παρατηρητή σε κεντρικό εφαρμοστή των νόμων ελέγχου.



Εικόνα 4-2. Η αρχιτεκτονική του νέου Ηλεκτρονικού Συστήματος του ρομπότ «Λαίλαψ II».

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται αναλυτικά ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των συστημάτων ενεργειακής τροφοδοσίας και ελέγχου, καθώς και των επιμέρους υποσυστημάτων που τα συνιστούν. Επίσης, στο Παράρτημα Γ παρατίθενται πίνακες (Bill of materials ή BOM) με τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των πλακετών που αναφέρονται στη συνέχεια.

4.3 Σύστημα Ενεργειακής Τροφοδοσίας

4.3.1 Γενικά

Σκοπός του *συστήματος ενεργειακής τροφοδοσίας* είναι η παροχή της ηλεκτρικής ισχύος που απαιτείται για τη λειτουργία όλων των επιμέρους υποσυστημάτων του ρομπότ. Η αρχιτεκτονική του συστήματος διατηρήθηκε στα βασικά της χαρακτηριστικά, ίδια με αυτή του αρχικού συστήματος. Όμως, πραγματοποιήθηκαν σημαντικές αλλαγές, μερικές εκ των οποίων είχαν ήδη γίνει στο αρχικό σύστημα, ως βελτιώσεις.

Επιδιώχθηκε κατά τον σχεδιασμό να απλουστευθεί η αρχιτεκτονική του συστήματος, καθώς και να αφαιρεθούν οι ιδιοκατασκευές που μείωναν την αξιοπιστία του συστήματος και συγχρόνως καθιστούσαν δύσκολη την επισκευή του, όπως η υλοποίηση του παλμοτροφοδοτικού. Χρησιμοποιήθηκαν εμπορικές λύσεις για τη δημιουργία των απαραίτητων τάσεων τροφοδοσίας και διατηρήθηκε η χρήση δύο ανεξάρτητων εργαστηριακών τροφοδοτικών. Η ανάγκη για παραμονή του συστήματος ελέγχου σε λειτουργία μετά από κάποιο ανεξέλεγκτο συμβάν συνέβαλλε στην επιλογή να διατηρηθεί η χρήση δύο ανεξάρτητων τροφοδοτικών. Πραγματοποιήθηκαν, επίσης, σημαντικές αλλαγές στις καλωδιώσεις και στους ακροδέκτες που επιλέχθηκαν.

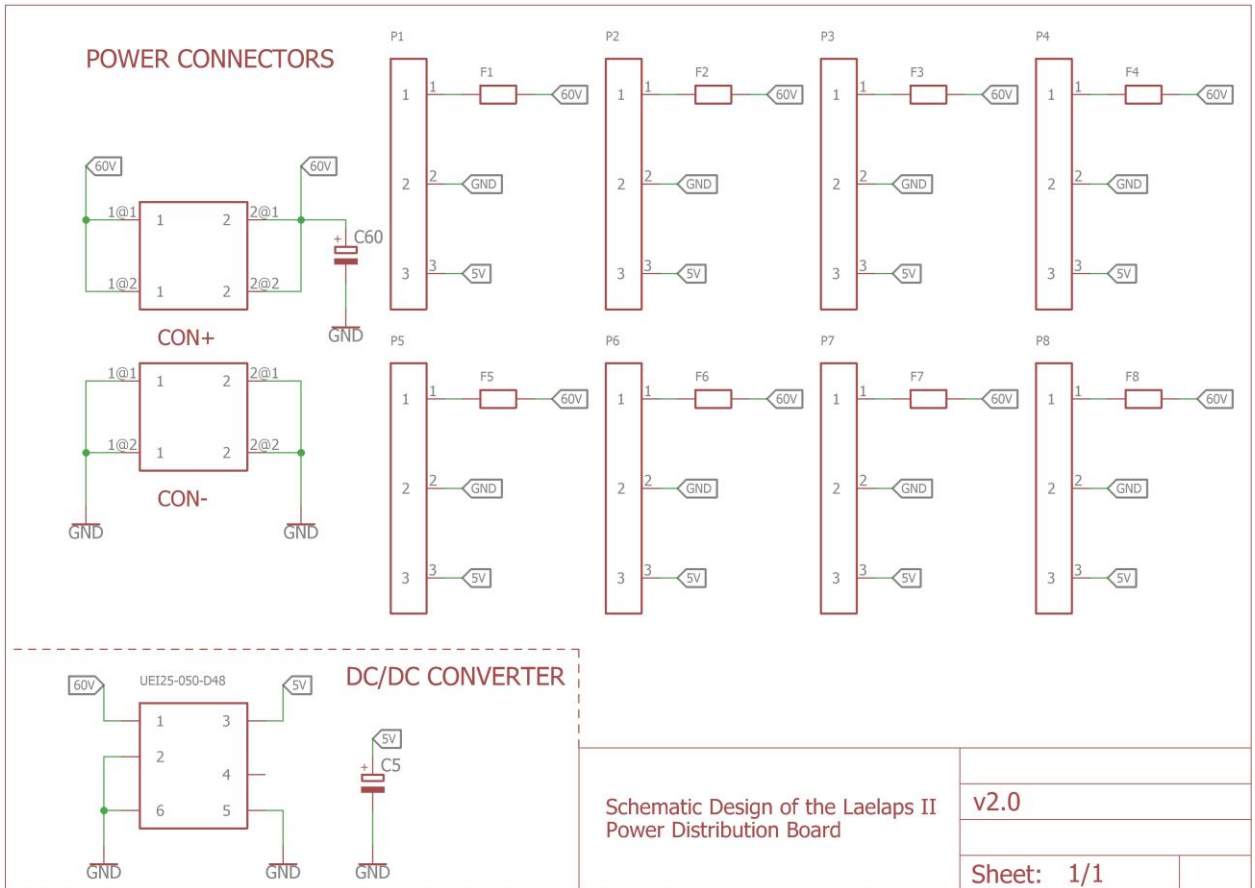
4.3.2 Υποσύστημα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος

Για την τροφοδοσία της ηλεκτρικής ισχύος στους *οδηγούς των κινητήρων*, καθώς επίσης και για τη λειτουργία του κυκλώματος οπτικής σύζευξης στις πλακέτες επέκτασης των οδηγών παράγονται δύο τάσεις τροφοδοσίας με κοινό σημείο αναφοράς το GNDP (Power Ground). Η πρώτη τροφοδοσία είναι υψηλής τάσης (45V έως 60V), παράγεται στο τροφοδοτικό υψηλής ισχύος N8737A της εταιρείας Agilent (Εικόνα 4-3) και διαμοιράζεται μέσω της *πλακέτας τροφοδοσίας υψηλής ισχύος* στους οδηγούς των κινητήρων. Το τροφοδοτικό N8737A μπορεί να παράσχει ηλεκτρική ισχύ έως και 3.3KW, με μέγιστη τάση 60V και μέγιστη ένταση ρεύματος 55A. Η δεύτερη τροφοδοσία είναι χαμηλής τάσης (5V) και παράγεται μέσω της πρώτης τροφοδοσίας στην πλακέτα υψηλής ισχύος, με χρήση ενός *μετατροπέα τάσης DC/DC*. Επιλέχθηκε το ίδιο μοντέλο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτίωση του αρχικού συστήματος (UEI25-050-D48 της εταιρείας MURATA POWER SOLUTIONS), καθώς ήταν ιδιαίτερα σταθερό και μικρό σε μέγεθος.

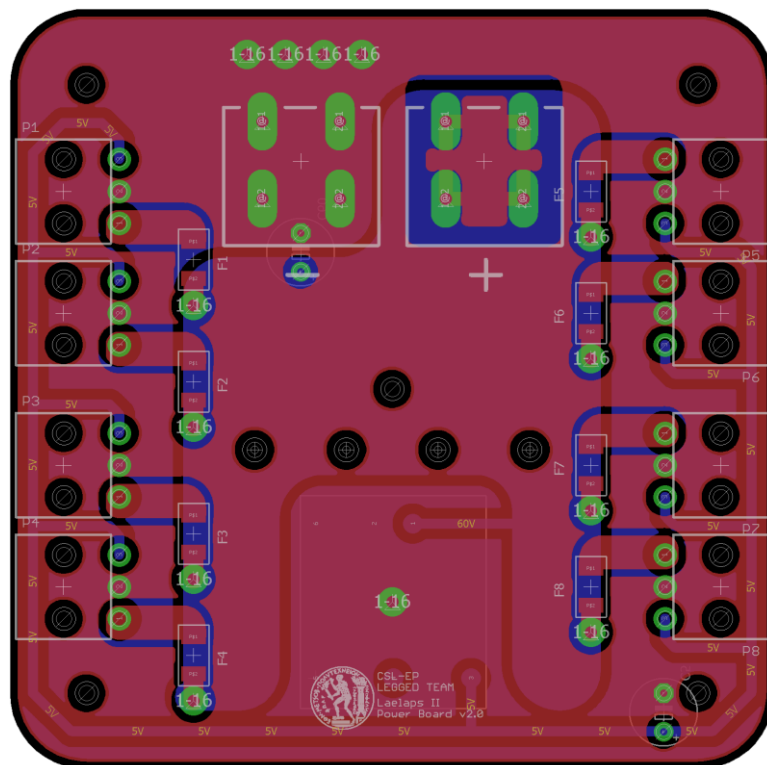


Εικόνα 4-3. Τροφοδοτικό εργαστηρίου υψηλής ισχύος N8737A της εταιρείας Agilent.

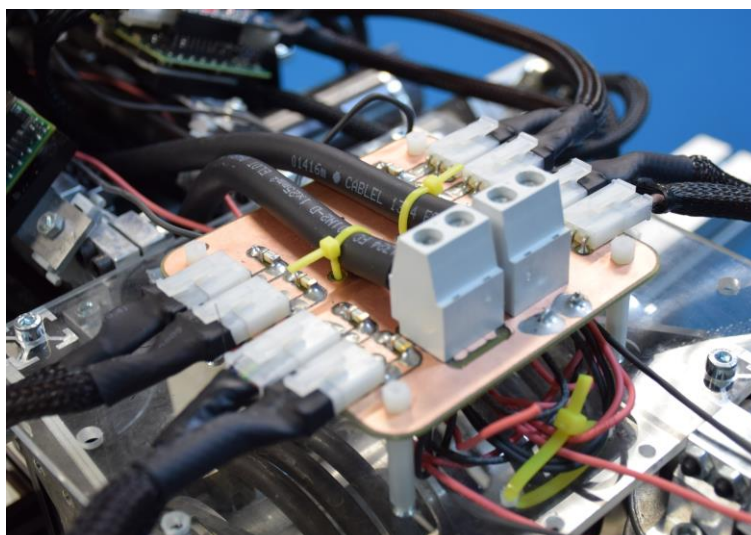
Για την υλοποίηση του υποσυστήματος υψηλής ισχύος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε εντός του εργαστηρίου, με χρήση της εργαλειομηχανής LPKF, η *πλακέτα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος Power Distribution Board v2.0* (Εικόνα 4-4, Εικόνα 4-5 και Εικόνα 4-6).



Εικόνα 4-4. Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας τροφοδοσίας υψηλής ισχύος Power Distribution Board V2.0.



Εικόνα 4-5. Άνω και κάτω επίπεδο της πλακέτας τροφοδοσίας υψηλής ισχύος Power Distribution Board V2.0.



Εικόνα 4-6. Η πλακέτα υψηλής ισχύος Power Distribution Board V2.0 προσαρτημένη στο ρομπότ «Λαίλαψ II».

Ο σχεδιασμός της πλακέτας έγινε έχοντας υπόψη να μειωθεί το μέγεθος και να αυξηθεί η προσαρμοστικότητα της σε σύγκριση με την προηγούμενη πλακέτα (Εικόνα 3-2), όπως επίσης και να διορθωθούν αστοχίες του προηγούμενου σχεδιασμού. Αναλυτικότερα, οι τελικές διαστάσεις της πλακέτας είναι 10cmx10cm με στρογγυλεμένες τις άκρες για την αποφυγή τραυματισμών κατά τη σύνδεση/αποσύνδεση των καλωδιώσεων. Λήφθηκε υπόψη ο κίνδυνος βραχυκυκλώματος και για αυτόν τον λόγο επιλέχθηκε να μη βρίσκεται εκτεθειμένη νησίδα υψηλής τάσης στο άνω επίπεδο της πλακέτας.

Για τη σύνδεση της πλακέτας με το *εργαστηριακό τροφοδοτικό υψηλής ισχύος* χρησιμοποιήθηκε εύκαμπτο πολύκλωνο καλώδιο ηλεκτροσυγκόλλησης διατομής 25mm², ονομαστικής τάσης 100V και με δυνατότητα παροχής σταθερού ρεύματος έντασης 85A. Σημαντικό μειονέκτημα της προηγούμενης υλοποίησης ήταν η έλλειψη της δυνατότητας αποσύνδεσης της τροφοδοσίας υψηλής ισχύος από το ρομπότ. Τα καλώδια είχαν κολληθεί στην προηγούμενη πλακέτα και θα έπρεπε να αφαιρεθεί ολόκληρη και κατ' επέκταση όλες οι συνδέσεις με τα επιμέρους υποσυστήματα. Στον νέο σχεδιασμό τοποθετήθηκαν κλέμες (Fixed Terminal Block) για την εύκολη σύνδεση/αποσύνδεση των καλωδίων παροχής υψηλής ισχύος με το ρομπότ. Τα χαρακτηριστικά τους υπερέβαιναν τις απαιτούμενες ηλεκτρικές ανάγκες, αλλά επιλέχθηκαν για την επίτευξη σταθερότητας στη σύνδεση με τα καλώδια ηλεκτροσυγκόλλησης. Επίσης, έγιναν κατάλληλες οπές για την σταθεροποίηση των καλωδίων με δεματικά σύσφιξης (tire ups).

Η σύνδεση κάθε *υποσυστήματος οδήγησης* με την πλακέτα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος γίνεται σε συνδεσμολογία αστέρα. Σε κάθε σύνδεση τοποθετήθηκαν για την προστασία των κινητήρων ασφάλειες ταχείας τήξης 0451010.MRL της εταιρείας Littelfuse ονομαστικού ρεύματος 10A. Για τη σύνδεση των *υποσυστημάτων οδήγησης* με την πλακέτα υψηλής ισχύος χρησιμοποιήθηκε καλώδιο, με μόνωση σιλικόνης για μέγιστη ευκαμπτότητα, με ονομαστική τάση 500V (DC) και δυνατότητα σταθερής παροχής ρεύματος έντασης 10A. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η επιλογή των καλωδίων έγινε υπολογίζοντας την επιθυμητή σταθερή τιμή έντασης ρεύματος (Constant Current) και όχι τη μέγιστη τιμή (Surge Current), όπως είχε γίνει στο αρχικό σύστημα. Το γεγονός αυτό συνέβαλε και στη μείωση του συνολικού βάρους των καλωδιώσεων.

Στο αρχικό σύστημα για τη σύνδεση του συστήματος υψηλής ισχύος είχε χρησιμοποιηθεί ακροδέκτης 6 επαφών, εκ των οποίων πρακτικά μόνο οι τρεις ήταν συνδεδεμένες με καλώδια. Επίσης, για τη σύνδεση των φάσεων των κινητήρων με την *πλακέτα επέκτασης των οδηγών* είχε χρησιμοποιηθεί ο ευμεγέθης ακροδέκτης

6 επαφών 175783-2 της εταιρείας TE Connectivity. Ο ακροδέκτης αυτός είχε τη δυνατότητα παροχής ανά επαφή σταθερού ρεύματος με ένταση 19A, δηλαδή συνολικά 38A ανά φάση, τιμή που υπερέβαινε αισθητά την απαιτούμενη. Για την επίτευξη ομοιομορφίας στις συνδέσεις υψηλής ισχύος και τη μείωση του χώρου που απαιτούσαν οι προηγούμενοι ακροδέκτες επιλέχθηκε κατάλληλος ακροδέκτης τριών επαφών της εταιρείας MOLEX (39-30-3035). Ο ακροδέκτης χρησιμοποιείται τόσο στις συνδέσεις των πλακετών επέκτασης των οδηγών με το *σύστημα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος* όσο και στις συνδέσεις των φάσεων των κινητήρων με τις πλακέτες επέκτασης των οδηγών. Κάθε επαφή έχει ονομαστική τάση 600V και μέγιστη δυνατότητα παροχής σταθερού ρεύματος έντασης 13A. Η σύνδεση των επαφών με τα επιμέρους καλώδια ενισχύθηκε με τη χρήση θερμοσυστελλόμενου μακαρονιού, ενώ περιμετρικά των καλωδιώσεων τοποθετήθηκε πολυεστερικό περίβλημα για την οργάνωση και την προστασία τους από εκδορές. Επιπλέον, διατηρήθηκε η σύνδεση του μεταλλικού σκελετού του ρομπότ με τη γείωση του κτιρίου μέσω εν σειρά τοποθετημένης αντίστασης 1MΩ, αλλαγή που είχε πραγματοποιηθεί ως βελτίωση στο αρχικό σύστημα. Σκοπός της σύνδεσης αυτής ήταν η προστασία των ευαίσθητων υποσυστημάτων ελέγχου από φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκκένωσης (ESD). Τέλος, προστέθηκε ο πυκνωτής C60 (1000μF, 100V) για την εξάλειψη του φαινομένου υπέρτασης στη γραμμή τροφοδοσίας υψηλής ισχύος.

4.3.3 Υποσύστημα τροφοδοσίας χαμηλής ισχύος

Το *υποσύστημα τροφοδοσίας χαμηλής ισχύος* φέρει ως βασική λειτουργία την παροχή ηλεκτρικής ισχύος στις περιφερειακές μονάδες ελέγχου και στα υποσυστήματα ανατροφοδότησης. Αρχικός στόχος ήταν η απευθείας σύνδεση με εξωτερικό τροφοδοτικό του εργαστηρίου. Όμως, για τη σύνδεση θα χρειαζόταν καλώδιο μεγάλου μήκους. Η μεγάλη αντίσταση της γραμμής σε συνδυασμό με τις υψηλές ανάγκες σε ρεύμα (>4A) μας ώθησε στη χρήση του παλμοτροφοδοτικού D24V60F5 της εταιρείας Pololu. Το παλμοτροφοδοτικό δέχεται ως είσοδο τάση μεγάλου εύρους που κυμαίνεται από 5V έως 38V και στην έξοδό του παράγει τάση 5V με δυνατότητα σταθερής παροχής ρεύματος έντασης 6A. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, επιλέχθηκε για λόγους προστασίας και μείωσης του ηλεκτρικού θορύβου να διατηρηθεί η ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ των υποσυστημάτων οδήγησης και των *περιφερειακών μονάδων ελέγχου συμπεριλαμβανομένων και των υποσυστημάτων ανατροφοδότησης*. Για τον λόγο αυτόν, χρησιμοποιήθηκαν τροφοδοσίες με ανεξάρτητα σημεία αναφοράς (GNDL και GNDP). Για την τροφοδοσία του σταθεροποιητή τάσης D24V60F5 χρησιμοποιήθηκε το εργαστηριακό τροφοδοτικό Agilent U8002a (Εικόνα 4-7). Η σύνδεση της εξόδου του σταθεροποιητή με περιφερειακές μονάδες ελέγχου έγινε με εύκαμπτο πολύκλωνο καλώδιο διατομής 0,5mm². Για τη λειτουργία των αναπτυσσικών πλακετών απαιτείται, επίσης, και τροφοδοσία τάσης 3.3V, η οποία παράγεται ξεχωριστά σε κάθε πλακέτα μέσω του γραμμικού σταθεροποιητή τάσης LM1117 [25]. Ο γραμμικός σταθεροποιητής έχει τη δυνατότητα σταθερής παροχής ηλεκτρικού ρεύματος έντασης 800mA.



Εικόνα 4-7. Εργαστηριακό τροφοδοτικό Agilent U8002a.

4.4 Σύστημα Ελέγχου

4.4.1 Γενικά

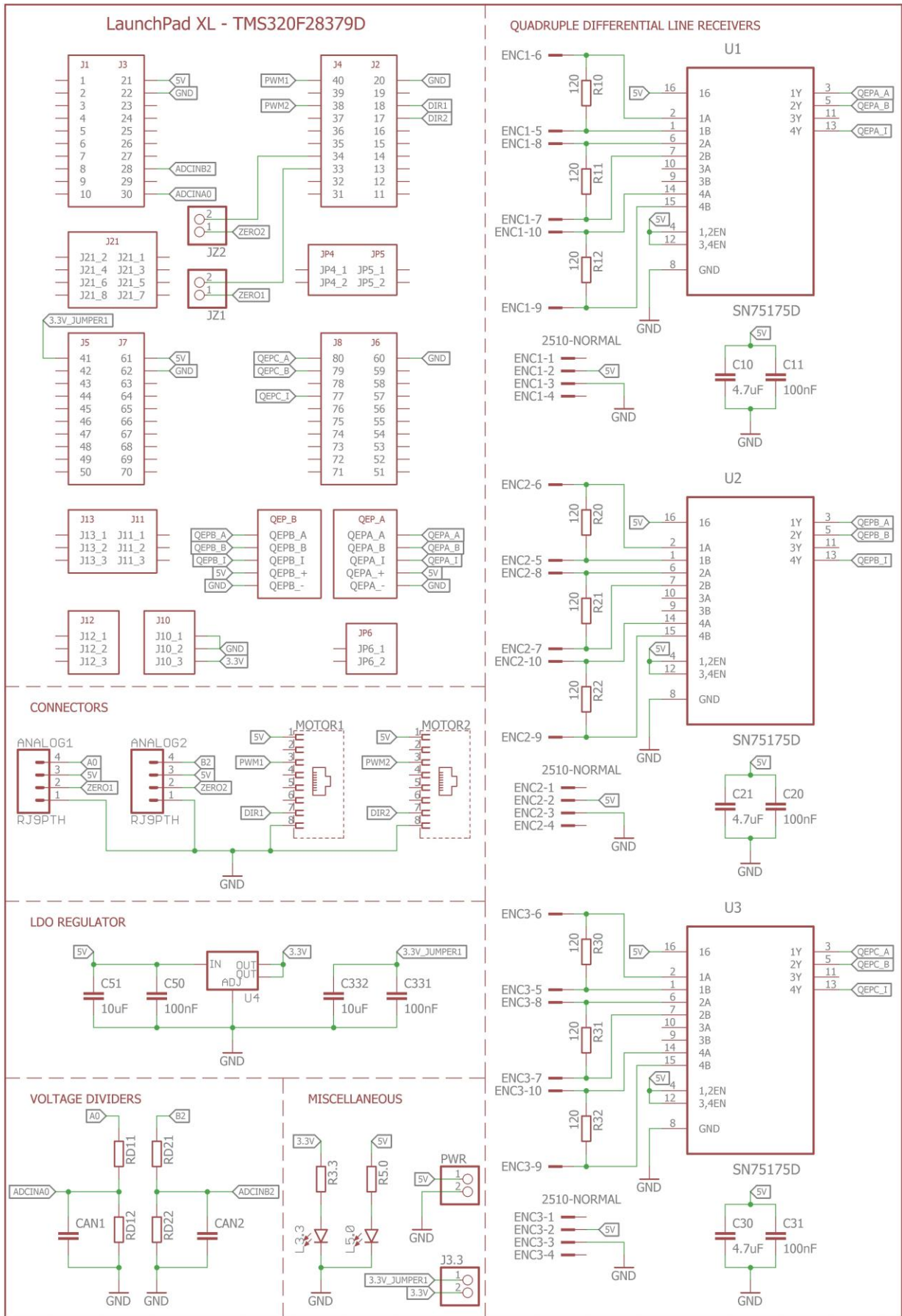
Το σύστημα ελέγχου έχει διαφοροποιηθεί σημαντικά από αυτό του ρομπότ «Λαίλαψ Ι». Μεγάλες αλλαγές πραγματοποιήθηκαν γενικότερα στην αρχιτεκτονική του ελέγχου, με κυριότερη την επιλογή να απομακρυνθεί το ενσωματωμένο σύστημα σχεδιασμένο με το πρότυπο PCIe/104 και να αντικατασταθεί με περιφερειακές μονάδες ελέγχου αποτελούμενες από την αναπτυξιακή πλακέτα LAUNCHXL-F28379D της εταιρείας Texas Instruments. Για τον σκοπό αυτό, διαμοιράσθηκε μεγάλο μέρος του ελέγχου, αφήνοντας ελεύθερους πόρους στον *κεντρικό υπολογιστή* για την υλοποίηση προγραμματισμού υψηλού επιπέδου. Η επικοινωνία του κεντρικού υπολογιστή με τις περιφερειακές μονάδες ελέγχου γίνεται μέσω δικτύου EtherCAT, το οποίο είναι υπό ανάπτυξη από τους υποψήφιους διδάκτορες του εργαστηρίου.

Από την άλλη πλευρά, η κεντρική ιδέα της αρχιτεκτονικής των υποσυστημάτων οδήγησης και ανατροφοδότησης παρέμεινε η ίδια. Ωστόσο, πραγματοποιήθηκαν σημαντικές βελτιώσεις στον σχεδιασμό και στην υλοποίησή τους. Διατηρήθηκε η χρήση των οδηγών των κινητήρων AZBDC12A8 της εταιρείας AMC και στα υποσυστήματα ανατροφοδότησης η χρήση των αυξητικών κωδικοποιητών θέσης HEDL-5640 της εταιρείας AVAGO TECHNOLOGIES [19][24]. Έγιναν σημαντικές αλλαγές στις πλακέτες επέκτασης των οδηγών, οι οποίες, εκτός των άλλων, φέρουν και σαν κύρια λειτουργία τη μεταφορά της πληροφορίας ελέγχου μεταξύ των δύο ανεξάρτητων ηλεκτρικά υποσυστημάτων μέσω του κυκλώματος οπτικής σύζευξης.

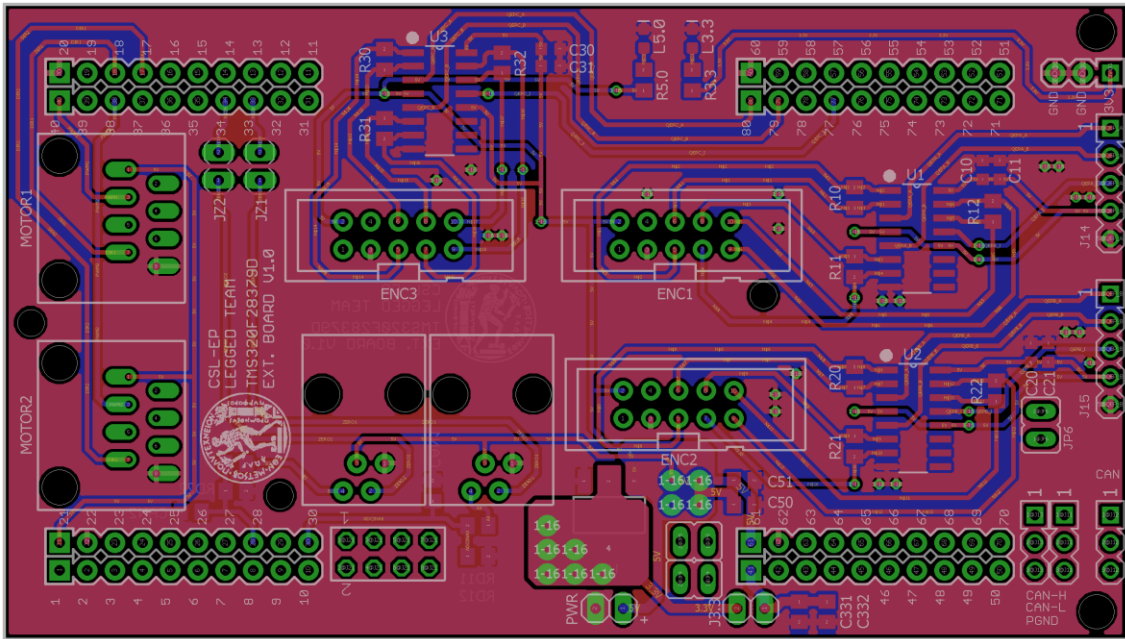
4.4.2 Περιφερειακή Μονάδα Ελέγχου

Σκοπός κάθε περιφερειακής μονάδας ελέγχου είναι ο έλεγχος της γωνιακής θέσης των δύο κινητήρων που επενεργούν σε κάθε πόδι του ρομπότ. Μέσω του δικτύου EtherCAT θα μεταφέρονται από τον κεντρικό υπολογιστή οι κατάλληλες παράμετροι λειτουργίας και οι τρέχουσες επιθυμητές γωνιακές θέσεις των κινητήρων. Μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη του απαραίτητου λογισμικού και υλικού για την υλοποίηση της βασικής λειτουργίας κάθε περιφερειακής μονάδας ελέγχου. Η υλοποίηση έγινε παράλληλα τόσο για το λογισμικό όσο και για το υλικό, ώστε να συνάδει ο σχεδιασμός της πλακέτας επέκτασης της αναπτυξιακής πλακέτας LAUNCHXL-F28379D με τις απαιτήσεις που προσδιορίστηκαν κατά τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή.

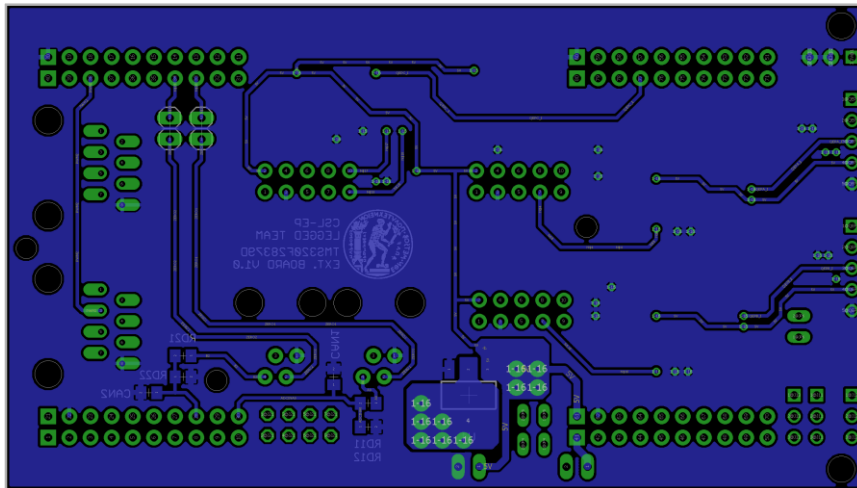
Πυρήνας της αρχιτεκτονικής κάθε περιφερειακού υποσυστήματος ελέγχου είναι η πλακέτα LAUNCHXL-F28379D, η οποία ενσωματώνει τον ισχυρό *μικροελεγκτή TMS320F28379D* της εταιρείας Texas Instruments. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις δυνατότητες του μικροελεγκτή αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5. Στο πλαίσιο της υλοποίησης του απαραίτητου υλικού, για την λειτουργία της περιφερειακής μονάδας ελέγχου σχεδιάστηκε ειδική πλακέτα TMS320F28379D Extension Board V1.0 (Εικόνα 4-8, Εικόνα 4-9, Εικόνα 4-10, Εικόνα 4-11 και Εικόνα 4-12) που επεκτείνει τις δυνατότητες της αναπτυξιακής πλακέτας. Η πλακέτα προσφέρει τις απαραίτητες κυκλωματικές λειτουργίες και διεπαφές που απαιτούνται για τη σύνδεση της πλακέτας LAUNCHXL-F28379D με το υποσύστημα ανατροφοδότησης, το υποσύστημα οδήγησης και το υποσύστημα τροφοδοσίας χαμηλής ισχύος.



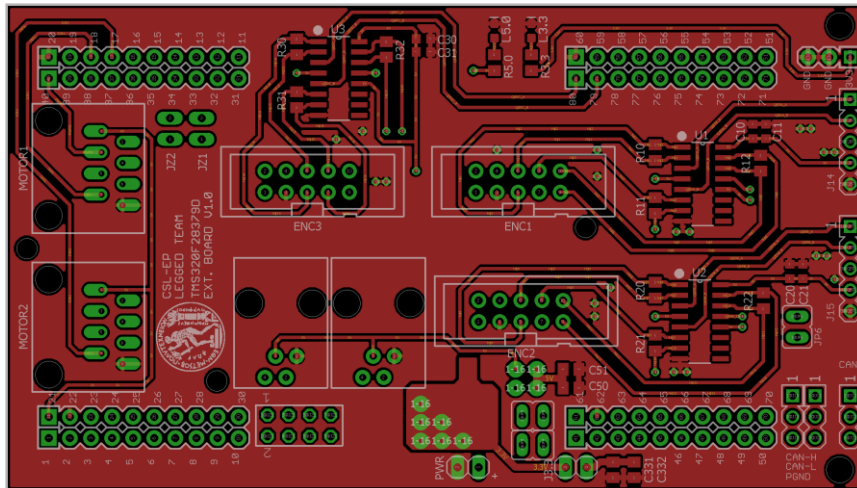
Εικόνα 4-8. Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board V1.0.



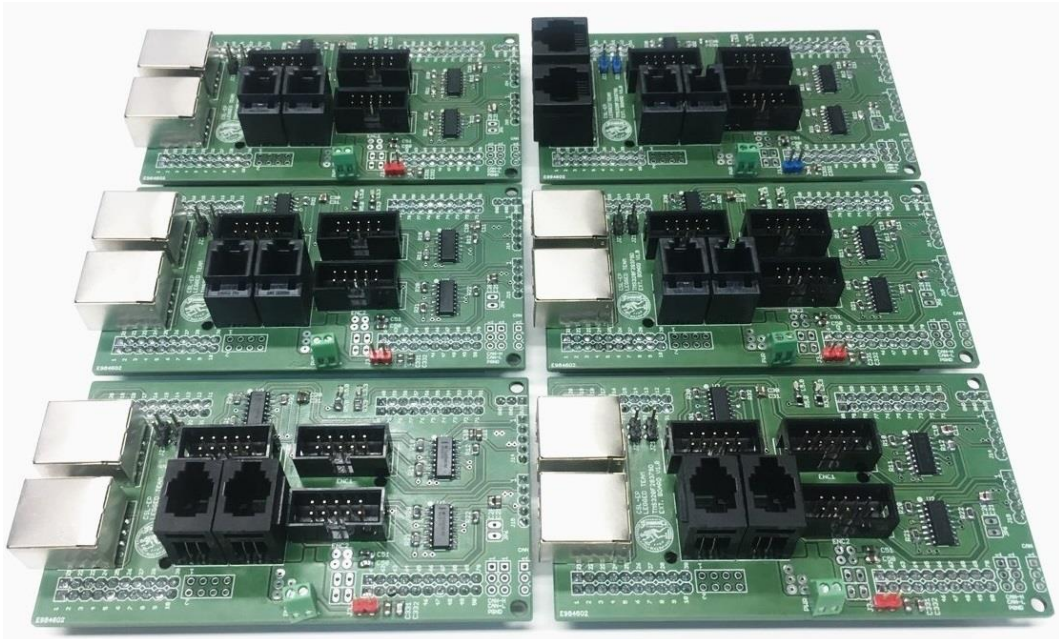
Εικόνα 4-9. Άνω και κάτω επίπεδο της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board V1.0.



Εικόνα 4-10. Κάτω επίπεδο της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board V1.0.



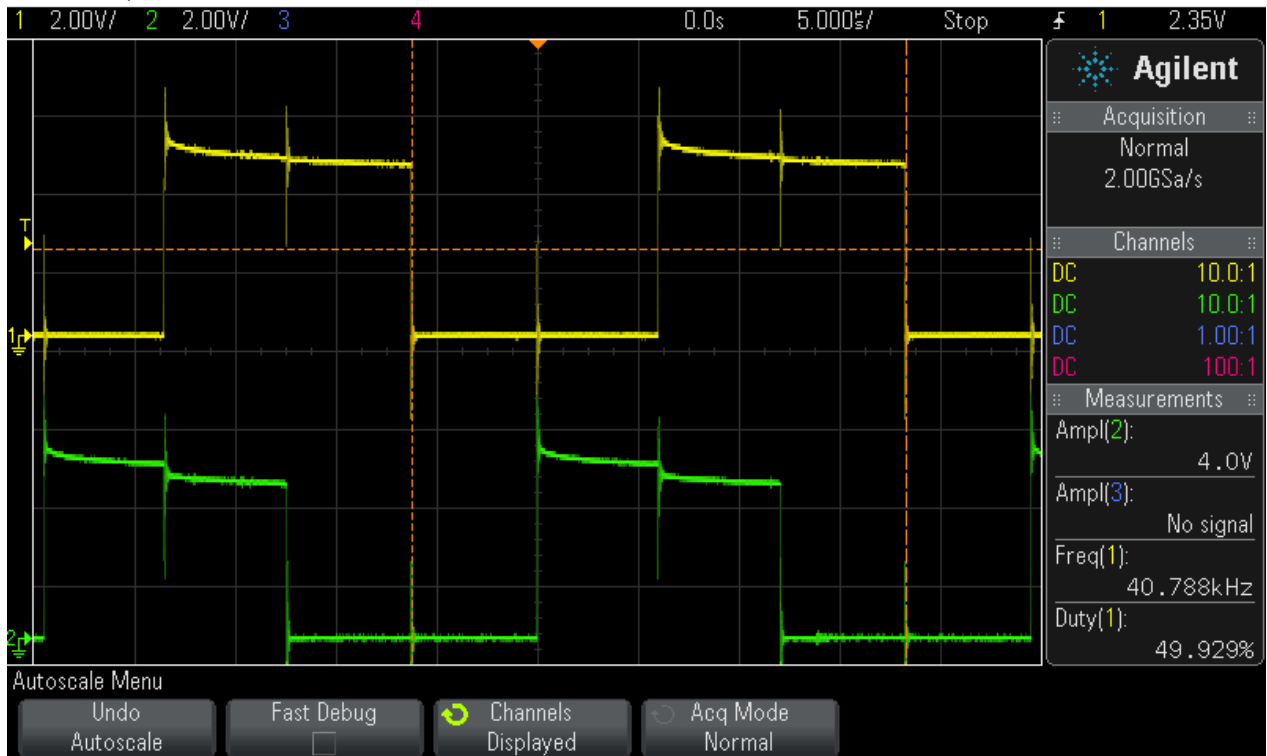
Εικόνα 4-11. Άνω επίπεδο της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board V1.0.



Εικόνα 4-12. Οι τελικές πλακέτες TMS320F28379D Extension Board V1.0 που κατασκευάστηκαν.

Καταρχάς, η πλακέτα επέκτασης TMS320F28379D Extension Board V1.0 είναι υπεύθυνη για την μετατροπή των διαφορικών σημάτων που προέρχονται από τους *αυξητικούς κωδικοποιητές* σε απλή μορφή (single-ended), καθώς μόνο σε αυτή τη μορφή μπορούν να διαβαστούν από τα περιφερειακά eQEP του μικροελεγκτή. Για τη μετατροπή των διαφορικών σημάτων (QEPA+, QEPA-, QEPB+, QEPB-, QEPI+, QEPI-) σε απλή μορφή χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα SN75175 (quadruple differential line receiver), της εταιρείας Texas Instruments [29]. Κοντά στον ακροδέκτη τροφοδοσίας (V_{CC}) του ολοκληρωμένου τοποθετήθηκε ζευγάρι κατάλληλων πυκνωτών απόζευξης χωρητικότητας 4,7 μ F και 100nF και ονομαστικής τάσης 16V. Επίσης, τα διαφορικά σήματα τερματίστηκαν σε κάθε ζευγάρι ακροδεκτών με αντίσταση 120 Ω όπως προτείνεται από τον κατασκευαστή. Για τη σύνδεση των αυξητικών κωδικοποιητών με την πλακέτα επιλέχθηκε ο ακροδέκτης IDC (Insulation-Displacement Connector) δέκα επαφών. Ο ακροδέκτης διακρίνεται για την εύκολη σύνδεσή του με καλώδιο, ενώ επίσης η σχεδιάσή του φροντίζει να αποφευχθεί πιθανή σύνδεση με λανθασμένη πολικότητα, η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει την καταστροφή του αυξητικού κωδικοποιητή και των σχετιζόμενων κυκλωμάτων.

Κατά τον προγραμματισμό της αναπτυξιακής πλακέτας, έγινε αρχικά δοκιμή του ειδικού περιφερειακού eQEP με τον κωδικοποιητή S6 της εταιρείας US Digital® [28]. Ο κωδικοποιητής αυτός παράγει παλμοσειρές σε απλή και όχι σε διαφορική μορφή. Τα σήματα συνδέθηκαν απευθείας στην αναπτυξιακή πλακέτα και κατά την περιστροφή του κωδικοποιητή παρατηρήθηκε μεγάλο συσσωρευτικό σφάλμα. Στη συνέχεια, ελέγχθηκαν τα σήματα QEPA, QEPB και QEPI στον παλμογράφο του εργαστηρίου, όπου παρατηρήθηκε ηλεκτρικός θόρυβος οφειλόμενος στο φαινόμενο της συνακρόασης μεταξύ των αγωγών που μετέφεραν τα σήματα (Εικόνα 4-13). Ο θόρυβος αυτός πιθανώς να ήταν η αιτία του συσσωρευτικού σφάλματος που μετρήθηκε. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαίωσε την ανάγκη για μετατροπή των σημάτων σε διαφορική μορφή πριν τη μεταφορά τους σε εξωτερικό κύκλωμα.

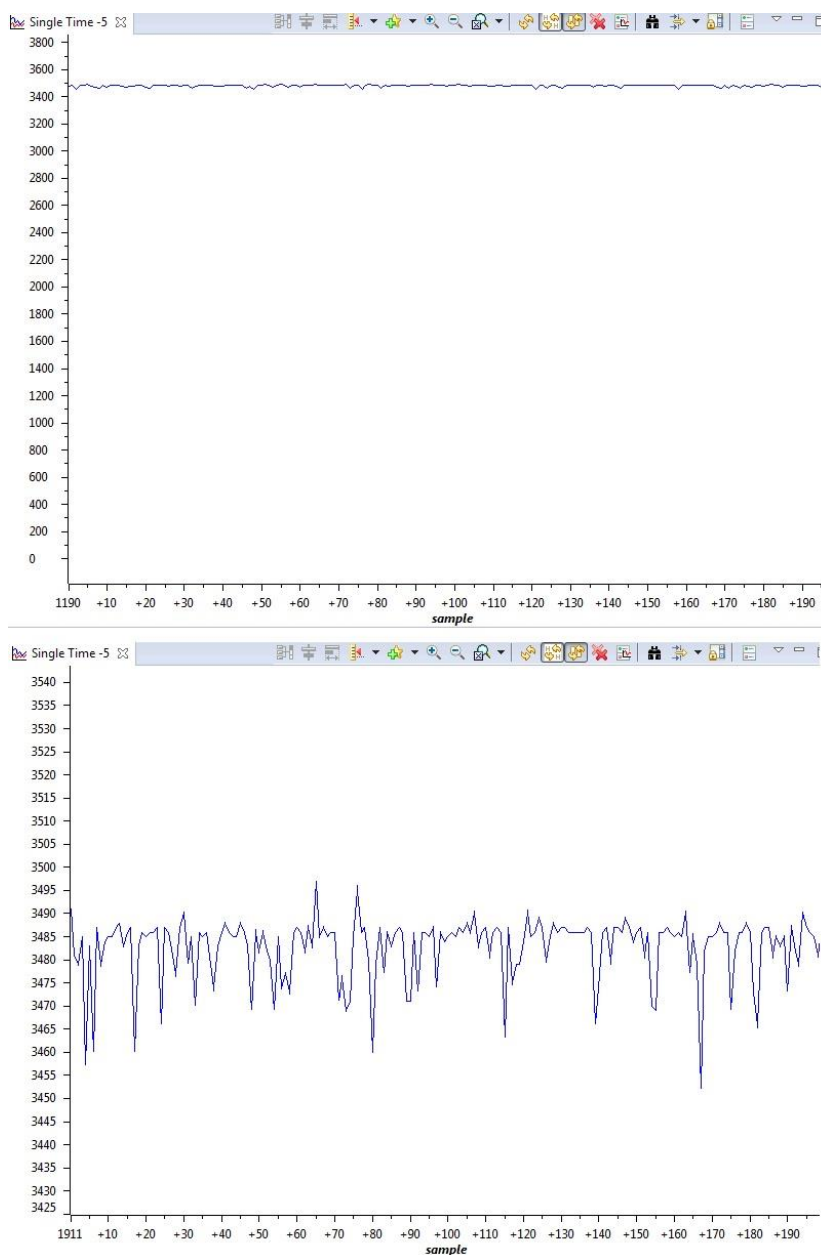


Εικόνα 4-13. Σήματα κωδικοποιητή QEPA,QEPB σε απλή μορφή και φαινόμενο συνακρόασης.

Η αναπτυξιακή πλακέτα παρέχει τη δυνατότητα απομονωμένης ηλεκτρικά αποσφαλμάτωσης (Isolated JTAG). Για τη λειτουργία της πλακέτας με ενεργοποιημένη τη δυνατότητα αυτή, χρειάζεται καταρχάς να επιβεβαιωθεί πως δεν είναι βραχυκυκλωμένοι οι ακροδέκτες (Jumpers) JP1, JP2 και JP3. Για τη λειτουργία της πλακέτας απαιτούνται εξωτερικές τροφοδοσίες τάσης 5V και 3,3V. Η πρώτη παρέχεται απευθείας από το υποσύστημα τροφοδοσίας χαμηλής ισχύος. Η δεύτερη παράγεται από την πρώτη στην πλακέτα TMS320F28379D Extension Board V1.0, με χρήση του ολοκληρωμένου κυκλώματος γραμμικού σταθεροποιητή LM1117 [25]. Στην είσοδο και στην έξοδο του ολοκληρωμένου τοποθετήθηκαν πλησίον των ακροδεκτών του πυκνωτές απόζευξης, χωρητικότητας 10μF και 100nF και ονομαστικής τάσης 16V. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν κατάλληλες νησίδες χαλκού στους ακροδέκτες για την απαγωγή της εκλυόμενης θερμότητας κατά τη λειτουργία του σταθεροποιητή. Τέλος, τοποθετήθηκαν οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LEDs) L5.0 και L3.3 για να επιβεβαιώνεται η ορθή παροχή των προαναφερθέντων τροφοδοσιών. Ο σχεδιασμός της πλακέτας προβλέπει την ανάγκη λειτουργίας χωρίς τη χρήση εξωτερικής τροφοδοσίας παρά μόνο με τη σύνδεση USB. Για τον λόγο αυτό, τοποθετήθηκε στο σχέδιο ο ακροδέκτης J3.3 (Jumper) που συνδέει την έξοδο του σταθεροποιητή με την είσοδο της τροφοδοσίας (3,3V) στην αναπτυξιακή πλακέτα. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή αυτή η λειτουργία θα πρέπει να αποσυνδέεται ο ακροδέκτης J3.3 και παράλληλα να επιβεβαιώνεται η βραχυκύκλωση των ακροδεκτών JP1, JP2 και JP3 που βρίσκονται στην αναπτυξιακή πλακέτα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη λειτουργία μέσω USB είναι μεν διαθέσιμη η αποσφαλμάτωση JTAG, αλλά δεν λειτουργεί ηλεκτρικά απομονωμένα.

Τέλος, ο σχεδιασμός της πλακέτας δίνει τη δυνατότητα ανάγνωσης δύο αναλογικών κωδικοποιητών απολύτου, με στόχο την αρχικοποίηση των γωνιακών θέσεων των αρθρώσεων. Πριν τον τελικό σχεδιασμό πραγματοποιήθηκε δοκιμή κατά την οποία χρησιμοποιήθηκε ο κωδικοποιητής RMB28 της εταιρείας RLS [27]. Ο συγκεκριμένος κωδικοποιητής παρέχει αναλογικό σήμα πληροφορίας πλάτους από 0V έως 5V. Για

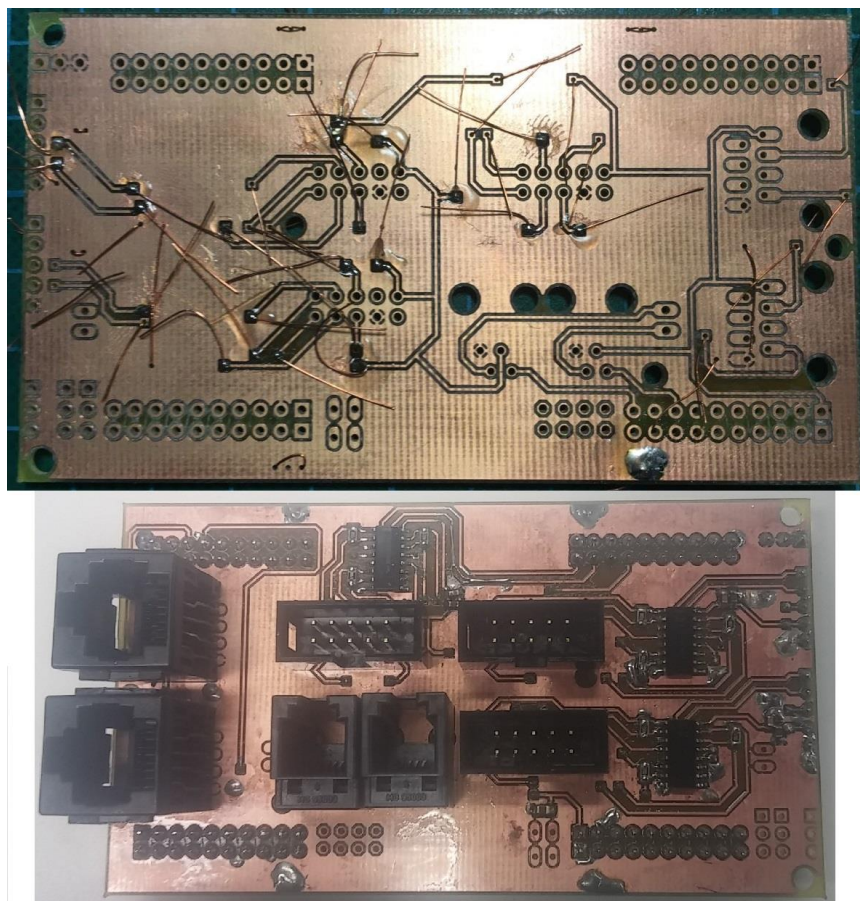
τη μετατροπή του σήματος σε κατάλληλη μορφή (πλάτος από 0V έως 3,3V) υλοποιήθηκε διαιρέτης τάσης. Η δοκιμή ήταν επιτυχής (Εικόνα 4-14), όμως παρατηρήθηκε θόρυβος μέγιστου πλάτους 28mV στο αναλογικό σήμα. Κατά τον σχεδιασμό προβλέφθηκε η μελλοντική ανάγκη για υλοποίηση βαθυπερατών φίλτρων (πυκνωτές CAN1, CAN2) για την αποκοπή του θορύβου, καθώς μία λανθασμένη αρχικοποίηση των αρθρώσεων θα μπορούσε να μεταβάλλει κατά πολύ την αναμενόμενη συμπεριφορά του ρομπότ. Οι πυκνωτές δεν είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία της πλακέτας και για αυτόν τον λόγο δεν κολλήθηκαν σε αυτήν και στο σχέδιο της πλακέτας τους δόθηκε η τιμή DNP (Do Not Place). Σε μελλοντική εργασία και μετά από προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του θορύβου μπορούν να επικολληθούν οι κατάλληλοι πυκνωτές. Για τη σύνδεση των αναλογικών κωδικοποιητών με την πλακέτα επιλέχθηκε ο ακροδέκτης RJ9.



Εικόνα 4-14. Μέτρηση αναλογικού σήματος πληροφορίας από τον κωδικοποιητή θέσης RMB28.

Επιπλέον, χρειάζεται να αναφερθεί ότι πριν τον προσδιορισμό του τελικού σχεδίου, κατασκευάστηκε πλακέτα (Εικόνα 4-15) εντός του εργαστηρίου, με χρήση της εργαλειομηχανής LPKF. Λόγω

κατασκευαστικών περιορισμών, όπως η αδυναμία κατασκευής επιμεταλλωμένων οπών (VIA), ο αρχικός σχεδιασμός ήταν αρκετά διαφορετικός. Τοποθετήθηκαν αρκετές οπές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την ιδόχειρη κατασκευή VIAs, με συγκόλληση γυμνών μονόκλωνων αγωγών μεταξύ των δύο επιπέδων. Η κατασκευή της πλακέτας ήταν ιδιαίτερα δύσκολη και απαιτητική, αλλά η δοκιμή της ήταν επιτυχής και από την εμπειρία που αποκτήθηκε προέκυψε το τελικό σχέδιο της πλακέτας.



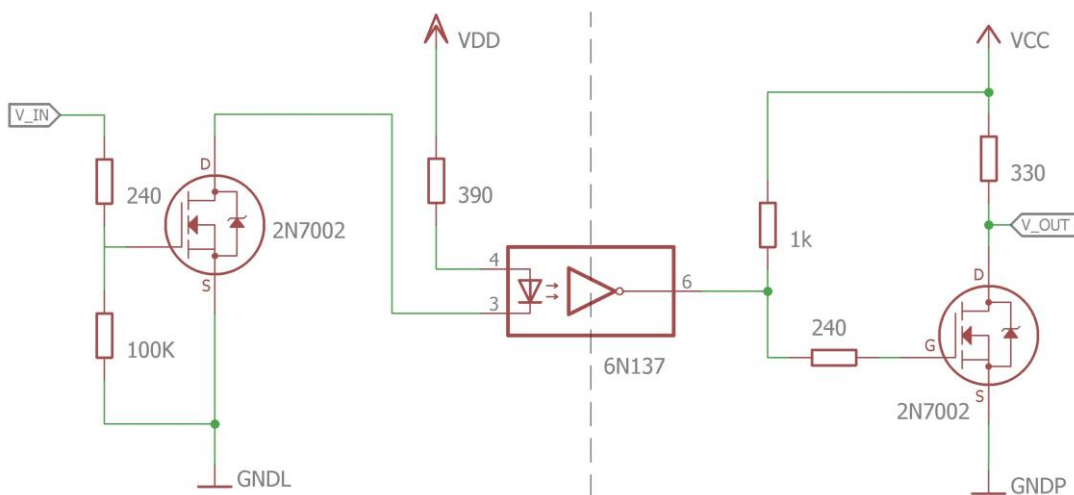
Εικόνα 4-15. Αρχική υλοποίηση της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board με χρήση της εργαλειομηχανής LPKF. Πάνω φαίνεται το στάδιο δημιουργίας των πολλαπλών VIA πριν την επικόλληση των στοιχείων της πλακέτας.

4.4.3 Υποσύστημα Οδήγησης

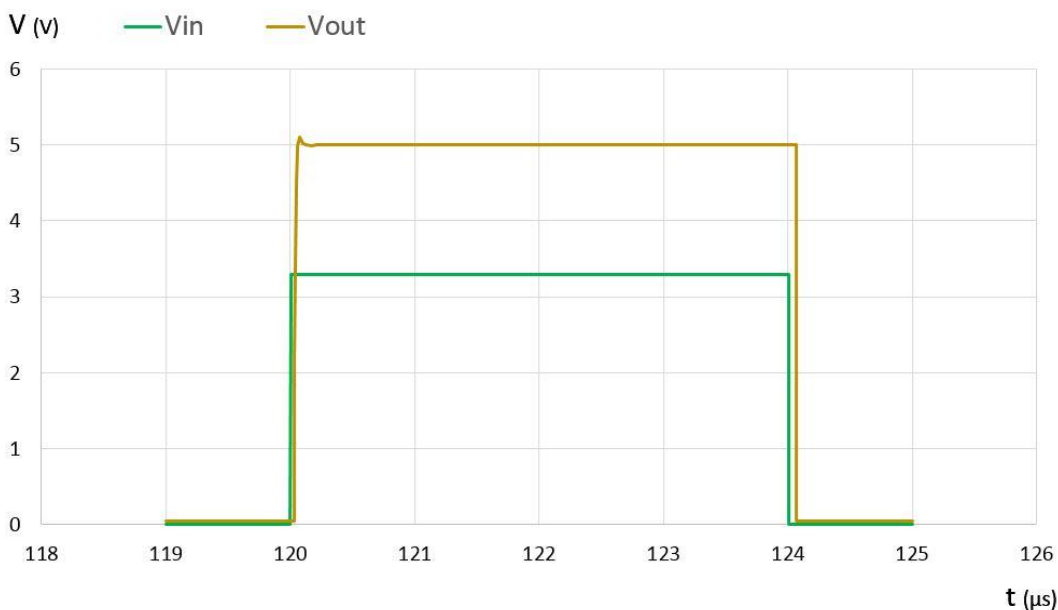
Κάθε υποσύστημα οδήγησης δέχεται τις εντολές ελέγχου από την αντίστοιχη περιφερειακή μονάδα ελέγχου, επενεργώντας αναλόγως στις αρθρώσεις του ποδιού. Για την επίτευξη αυτής της λειτουργίας διατηρήθηκε η χρήση των οδηγών ηλεκτρικών κινητήρων AZBDC12A8 και έγινε επανασχεδιασμός και υλοποίηση της νέας πλακέτας επέκτασης των οδηγών Driver Extension Board v2.0.

Ο οδηγός AZBDC12A8 παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος μόνιμων μαγνητών (Brushless και Brushed), με μέγιστη παροχή ρεύματος έντασης 12A και μέγιστη παροχή ισχύος 456W. Μέσω των δύο παρεχόμενων ακιδοσειρών του οδηγού επιτυγχάνονται όλες οι λειτουργίες. Τροφοδοτείται η απαραίτητη ηλεκτρική ισχύς για τη λειτουργία του, εισάγονται τα σήματα ελέγχου PWM και DIR και εισάγονται τα σήματα των αισθητήρων Hall Effect που απαιτούνται για την οδήγηση κινητήρων Brushless. Επίσης, σε συγκεκριμένους ακροδέκτες εξάγονται χρήσιμα σήματα πληροφορίας που ενημερώνουν για την κατάσταση της λειτουργίας του οδηγού.

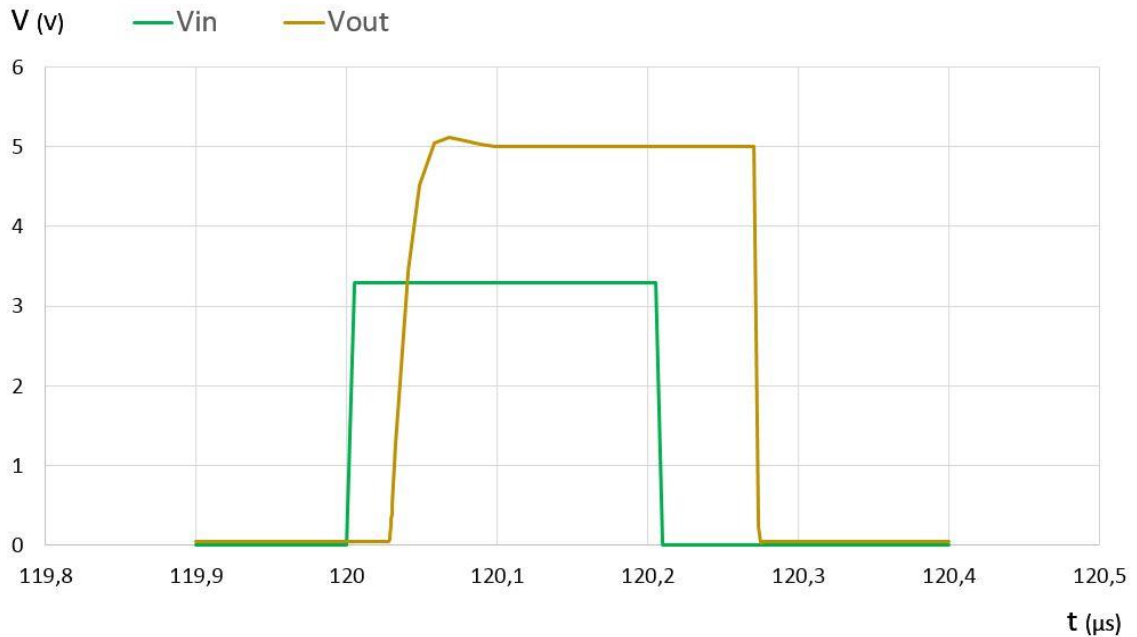
Πριν τον σχεδιασμό της τελικής έκδοσης της πλακέτας επέκτασης των οδηγών έπρεπε να προσδιοριστεί επακριβώς το κύκλωμα οπτικής σύζευξης. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, ήταν απαραίτητη η υλοποίηση βαθμίδων ενίσχυσης στην είσοδο και στην έξοδο του οπτοζεύκτη, τηρώντας παράλληλα τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Σχεδιάστηκε το νέο κύκλωμα οπτικής σύζευξης (Εικόνα 4-16) και πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με το πρόγραμμα SPICE για την επιβεβαίωση της αρχιτεκτονικής που επιλέχθηκε (ενισχυτής κοινής πηγής). Στην είσοδο του κυκλώματος δόθηκε παλμοσειρά συχνότητας 25kHz. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για διάφορες τιμές του Duty Cycle της εισερχόμενης (V_{in}) παλμοσειράς και έγινε σύγκριση με την παλμοσειρά που εξάγεται (V_{out}) από το τελικό στάδιο ενίσχυσης. Σε όλες τις δοκιμές παρατηρήθηκε αύξηση του Duty Cycle κατά 0,06%, που αντιστοιχεί σε αύξηση του εύρους του παλμού κατά 24ns. Το σφάλμα αυτό είναι πρακτικά μηδαμινό σε σύγκριση με αυτό του αρχικού κυκλώματος. Παραθέτουμε τα αποτελέσματα για Duty Cycle της εισερχόμενης παλμοσειράς ίσο με 10% (Εικόνα 4-17) και 0,5% (Εικόνα 4-18).



Εικόνα 4-16. Σχηματικό διάγραμμα του νέου κυκλώματος οπτικής σύζευξης που προσομοιώθηκε.

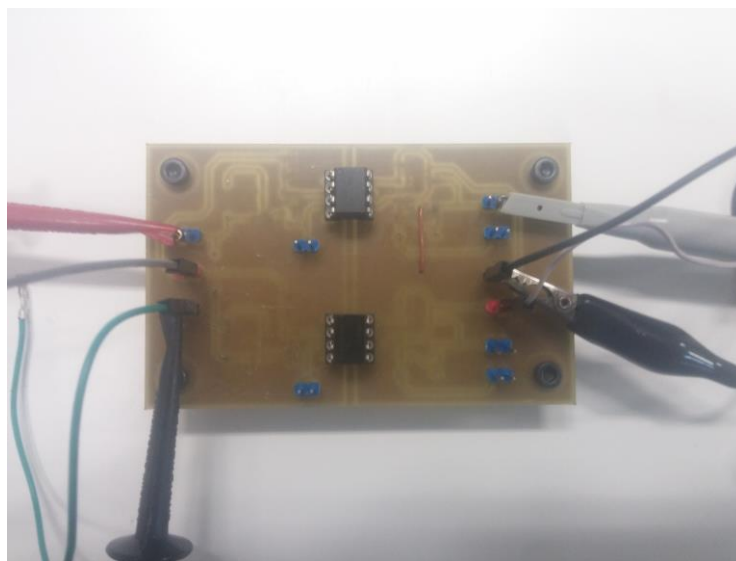


Εικόνα 4-17. Προσομοίωση για Duty Cycle 10% της εισερχόμενης παλμοσειράς. Η είσοδος (πράσινο) και η έξοδος (πορτοκαλί) του παλμού στο νέο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.

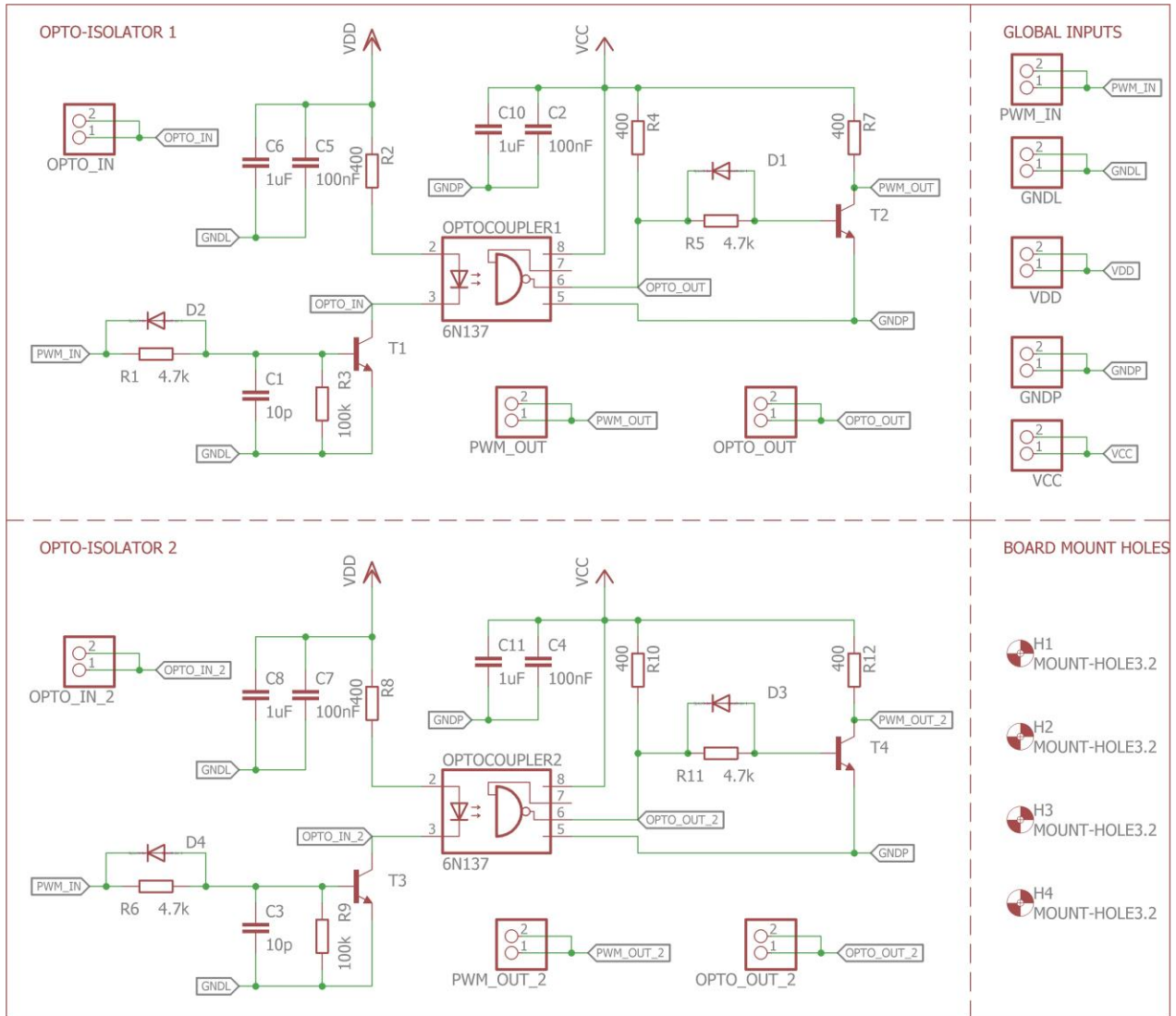


Εικόνα 4-18. Προσομοίωση για Duty Cycle 0,5% της εισερχόμενης παλμοσειράς. Η είσοδος (πράσινο) και η έξοδος (πορτοκαλί) του παλμού στο νέο κύκλωμα οπτικής σύζευξης.

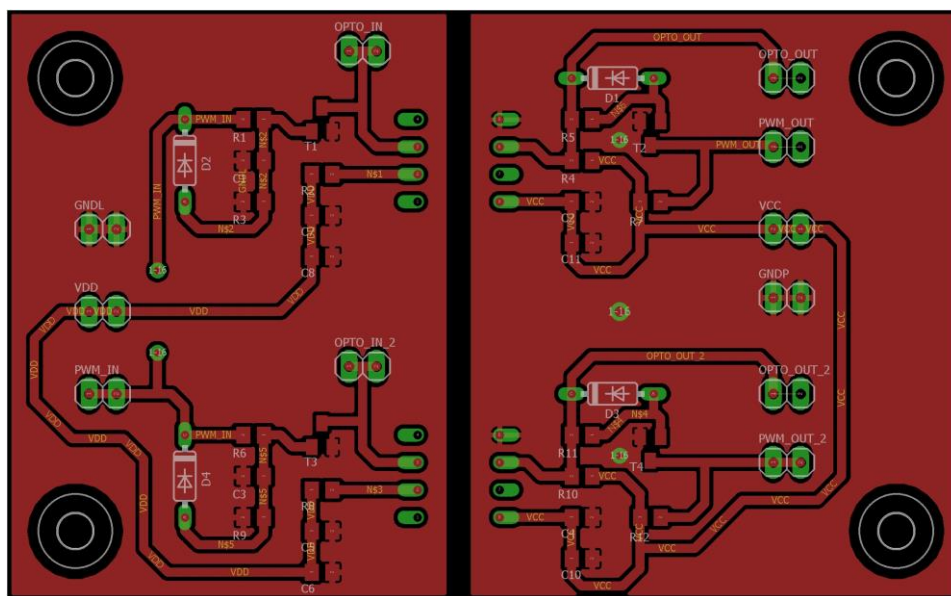
Παρόλο που τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ήταν ενθαρρυντικά, έπρεπε η υλοποίηση να δοκιμαστεί και σε πραγματικό κύκλωμα. Έτσι, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ειδική πλακέτα (Εικόνα 4-19, Εικόνα 4-20 και Εικόνα 4-21), στόχος της οποίας ήταν η επιβεβαίωση των προσομοιώσεων και παράλληλα η σύγκριση μεταξύ της αρχικής και της νέας αρχιτεκτονικής του κυκλώματος. Να σημειώσουμε ότι η πλακέτα σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορούν μετέπειτα να προστεθούν διόδοι και να δοκιμαστεί η πιθανή συμβολή τους στη βελτίωση του αρχικού κυκλώματος. Ωστόσο, επειδή τελικά χρησιμοποιήθηκαν τρανζίστορ MOSFET και δε μας ενδιέφερε η βελτίωση του κυκλώματος με διπολικά τρανζίστορ ένωσης BJT, ήταν περιττή η τοποθέτησή τους στην πλακέτα [16]. Επικολλήθηκαν τα κατάλληλα στοιχεία ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ του αρχικού κυκλώματος (Εικόνα 3-3) και του νέου κυκλώματος (Εικόνα 4-16) οπτικής σύζευξης.



Εικόνα 4-19. Διάταξη πειραμάτων με χρήση της πλακέτας δοκιμών του κυκλώματος οπτικής σύζευξης.



Εικόνα 4-20. Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας δοκιμών του κυκλώματος οπτικής σύζευξης.



Εικόνα 4-21. Σχέδιο της πλακέτας δοκιμών του κυκλώματος οπτικής σύζευξης.

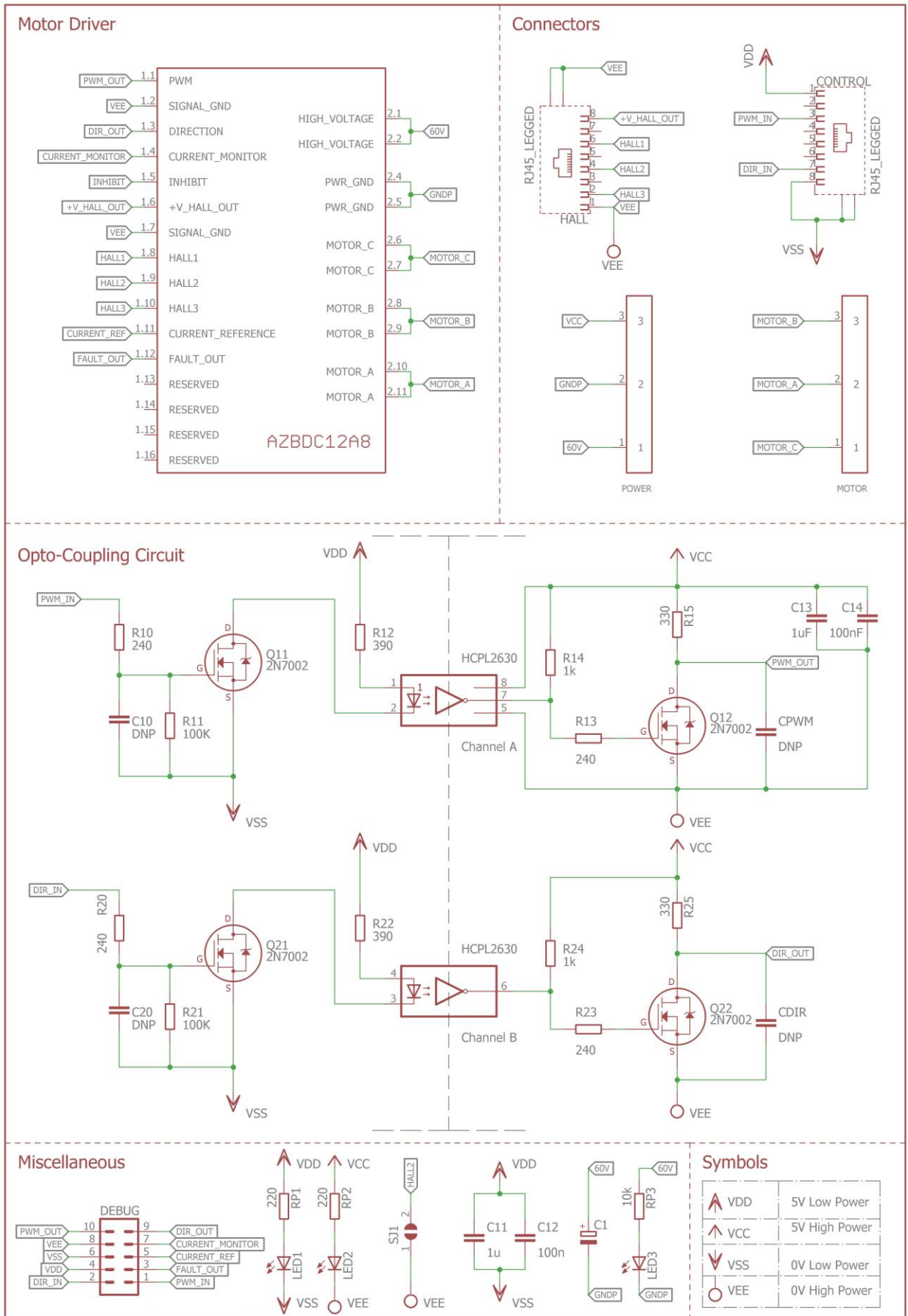
Πραγματοποιήθηκαν πειράματα για διάφορες τιμές Duty Cycle της εισερχόμενης παλμοσειράς και έγινε σύγκριση του σφάλματος μεταξύ των δύο κυκλωμάτων (Πίνακας 4-1). Τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας συχνοτήτων ταυτίστηκαν με αυτά της προσομοίωσης ($f = 25\text{kHz}$, $t_{\text{rise}}=5\text{ns}$, $t_{\text{fall}}=5\text{ns}$).

Πίνακας 4-1. Αποτελέσματα σύγκρισης αρχικού και νέου κυκλώματος οπτικής σύζευξης.

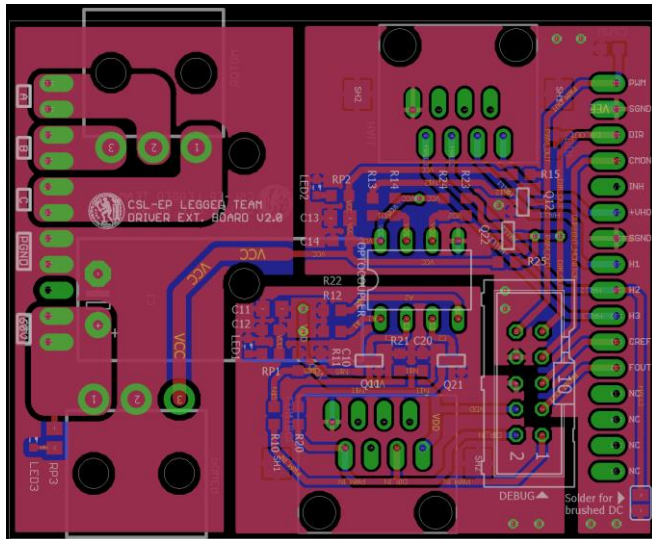
Duty Cycle εισερχόμενης παλμοσειράς (%)	Duty Cycle εξερχόμενης παλμοσειράς (%)		Ποσοστιαίο σφάλμα (%)	
	Αρχικό Κύκλωμα	Νέο Κύκλωμα	Αρχικό Κύκλωμα	Νέο Κύκλωμα
0,2	0	0,22	-100	10
1	0	1,02	-100	2
5	0,99	5,015	-80,2	0,3
50	46,47	50,02	-7,06	0,04
99	99,77	99,02	0,77	0,002
99,8	100	99,83	0,2	0,003

Έχοντας επιβεβαιώσει τη λειτουργία του νέου κυκλώματος οπτικής σύζευξης, επανασχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε η νέα πλακέτα επέκτασης των οδηγών. Στόχος της πλακέτας ήταν η διόρθωση των προηγούμενων αστοχιών και η παροχή δυνατότητας ευκολότερης αποσφαλμάτωσης κατά τη λειτουργία της. Οι ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν συνοψίζονται ως εξής:

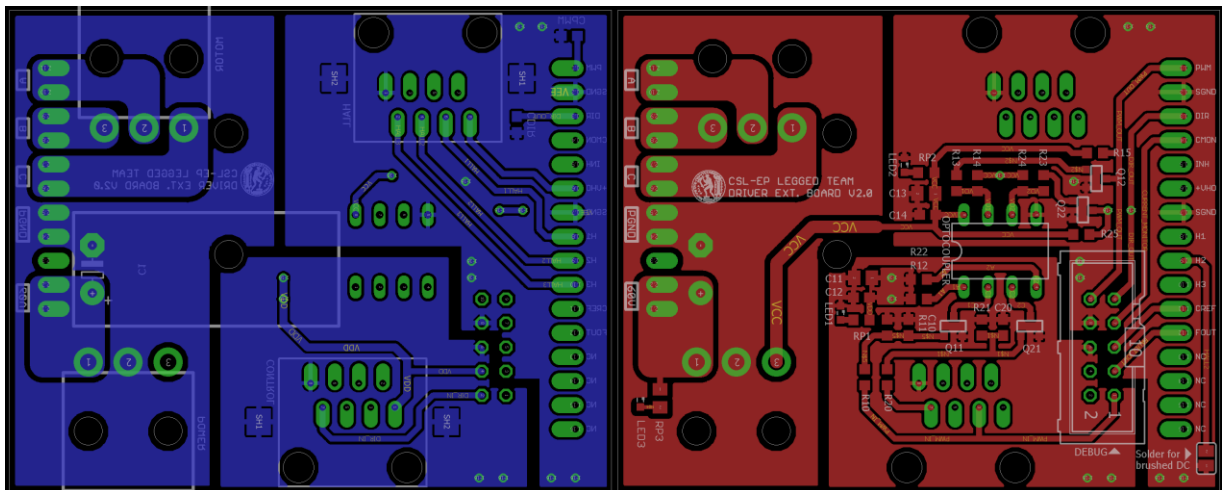
- Επανασχεδιάστηκε το κύκλωμα οπτικής σύζευξης.
- Προστέθηκαν ακροδέκτες RJ45 με ηλεκτρομαγνητική θωράκιση. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε καλώδιο κατηγορίας CAT5e για τη μεταφορά των σημάτων ελέγχου από την περιφερειακή μονάδα ελέγχου στην πλακέτα.
- Δόθηκε η δυνατότητα επιδιόρθωσης χωρίς την ανάγκη αφαίρεσης της πλακέτας από τον οδηγό που έχει προσαρτηθεί, αφού όλα τα κύρια στοιχεία τοποθετήθηκαν ηθελημένα στο άνω επίπεδο. Επίσης, μπορούν με ευκολία να εξαχθούν και να ελεγχθούν με παλμογράφο τα σημαντικά σήματα που αφορούν τη λειτουργία του οδηγού και του κυκλώματος οπτικής σύζευξης, μέσω του ακροδέκτη δέκα επαφών IDC (DEBUG).
- Τοποθετήθηκε ηλεκτρολυτικός πυκνωτής ονομαστικής τάσης 100V και χωρητικότητας 100 μF κοντά στους ακροδέκτες τροφοδοσίας υψηλής ισχύος, όπως προτείνει ο κατασκευαστής.
- Αντικαταστάθηκαν οι δύο οπτοζεύκτες 6N137 με τον αντίστοιχο οπτοζεύκτη δύο καναλιών VO2630 της ίδιας εταιρείας.
- Τοποθετήθηκαν πυκνωτές απόζευξης χωρητικότητας 10 μF και 100nF και ονομαστικής τάσης 16V κοντά στον ακροδέκτη τροφοδοσίας του οπτοζεύκτη (VCC), καθώς επίσης και στη γραμμή τάσης 5V που χρησιμοποιείται από τη βαθμίδα ενίσχυσης στην είσοδο του οπτοζεύκτη.
- Τοποθετήθηκαν αντιστάσεις Pull-Down 100K Ω για την αποφυγή ανεπιθύμητης λειτουργίας του οδηγού κατά την εκκίνηση της περιφερειακής μονάδας ελέγχου.
- Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος ακροδέκτης Molex τριών επαφών τόσο για την τροφοδοσία υψηλής ισχύος όσο και για τη σύνδεση με τις φάσεις του κινητήρα και τοποθετήθηκαν LEDs για να επιβεβαιώνεται η ορθή παροχή των απαραίτητων τροφοδοσιών.



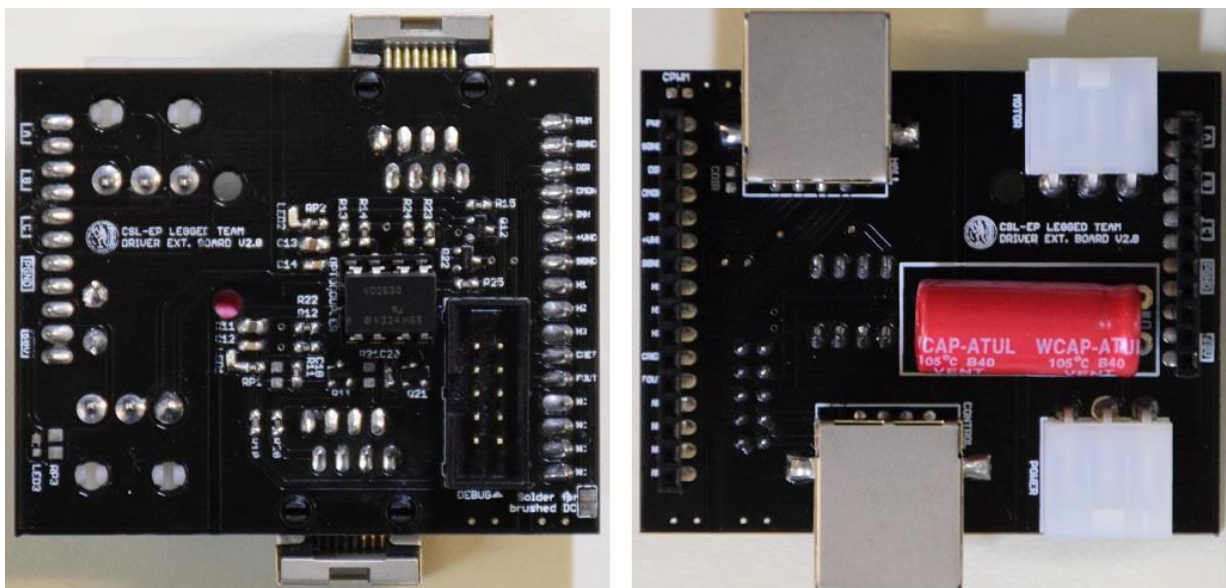
Εικόνα 4-22. Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας επέκτασης των οδηγών Driver Ext. Board V2.0.



Εικόνα 4-23. Άνω και κάτω επίπεδο πλακέτας επέκτασης των οδηγών Driver Ext. Board V2.0.



Εικόνα 4-24. Ξεχωριστή απεικόνιση των δύο επιπέδων της πλακέτας επέκτασης των οδηγών Driver Ext. Board V2.0. Διακρίνονται οι τρεις νησίδες των σημείων αναφοράς.



Εικόνα 4-25. Η πλακέτα Driver Ext. Board V2.0.

4.4.4 Υποσύστημα ανατροφοδότησης

Κάθε υποσύστημα ελέγχου αποτελείται από ένα υποσύστημα ανατροφοδότησης, στόχος του οποίου είναι η αναγνώριση της γωνιακής θέσης των κινητήρων και η επιστροφή αυτής της τιμής στην περιφερειακή μονάδα ελέγχου. Για την υλοποίηση του υποσυστήματος ανατροφοδότησης χρησιμοποιήθηκαν οι αυξητικοί κωδικοποιητές HEDL-5640 (Εικόνα 4-26) της εταιρείας BROADCOM®, οι οποίοι παράγουν 500 παλμούς ανά περιστροφή και προσφέρουν ανάλυση $360/(500*4) = 0,18$ μοιρών. Λόγω των συστημάτων μετάδοσης, η τελική ακρίβεια μπορεί να φτάσει έως και την τιμή των 0,01837 μοιρών (για το σύστημα μετάδοσης του κινητήρα Brushed), αφού απαιτούνται 98 περιστροφές του κινητήρα για την πραγματοποίηση μίας πλήρους περιστροφής της άρθρωσης. Τα σήματα πληροφορίας της γωνιακής θέσης εξάγονται σε διαφορεική μορφή και μεταφέρονται μέσω καλωδίου IDC στην περιφερειακή μονάδα ελέγχου για περαιτέρω επεξεργασία.



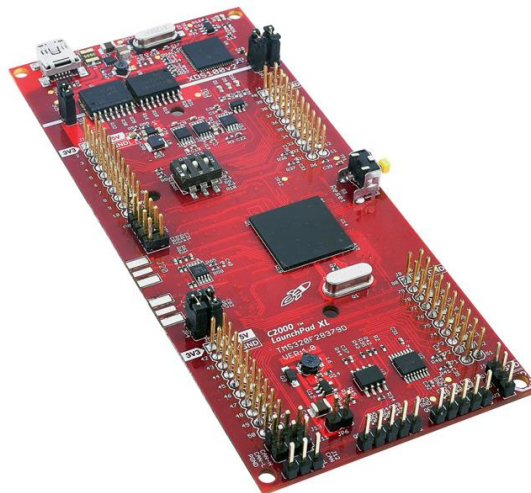
Εικόνα 4-26. Ο αυξητικός κωδικοποιητής θέσης της εταιρείας BROADCOM®.

5 Προγραμματισμός Περιφερειακής Μονάδας Ελέγχου

5.1 Εισαγωγή

Ένας από τους στόχους της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο προγραμματισμός τμήματος του περιφερειακού ενσωματωμένου συστήματος ελέγχου και συγκεκριμένα ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή TMS320F28379D της αναπτυξιακής πλακέτας LAUNCHXL-F28379D (Εικόνα 5-1) [30]. Κεντρική λειτουργία του προγράμματος που υλοποιήθηκε ήταν ο έλεγχος της θέσης (Position Control) των κινητήρων του ρομπότ. Με την προσάρτηση της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board V1.0 στην αναπτυξιακή πλακέτα, μπορεί να πραγματοποιηθεί έλεγχος της θέσης ενός ποδιού του ρομπότ, ενώ παράλληλα παρέχονται επιπλέον δυνατότητες για μελλοντική χρήση. Συνοπτικά οι δυνατότητες που παρέχονται από το πρόγραμμα είναι οι εξής:

- Διάβασμα αναλογικών σημάτων στους ακροδέκτες ADCINA0 and ADCINB2. Η λειτουργία αυτή υλοποιήθηκε με στόχο την προσάρτηση στο υποσύστημα ελέγχου του αναλογικού κωδικοποιητή απολύτου «RMB28» της εταιρείας RLS.
- Ταυτόχρονη μέτρηση των τιμών τριών αυξητικών κωδικοποιητών χρησιμοποιώντας τα περιφερειακά eQEP.
- Παραγωγή δύο ανεξάρτητων PWM σημάτων με χρήση των περιφερειακών ePWM1 και ePWM2.
- Προσδιορισμός της λειτουργίας των ψηφιακών ακροδεκτών I/O και έλεγχος της κατάστασής τους.
- Παράλληλος έλεγχος της γωνιακής θέσης δύο κινητήρων με συχνότητα του βρόχου ελέγχου ίση με 20kHz. Η υλοποίηση έγινε με στόχο την επενέργηση σε ένα πόδι του ρομπότ «Λαίλαψ II» και χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη Digital Control Library της Texas Instruments.



Εικόνα 5-1. Η αναπτυξιακή πλακέτα LAUNCHXL-F28379D της εταιρείας Texas Instruments.

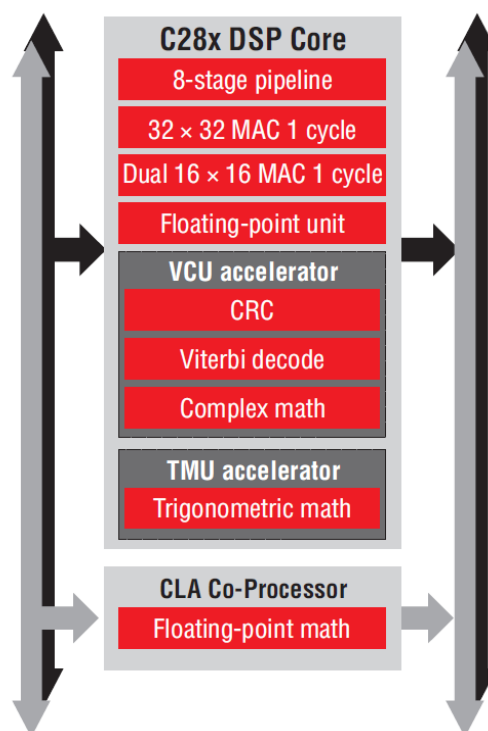
Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του μικροελεγκτή TMS320F28379D και των επιμέρους συστημάτων από τα οποία αποτελείται, καθώς επίσης και οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετροποίηση και τον προγραμματισμό των περιφερειακών υποσυστημάτων (Peripherals). Αξίζει

να σημειωθεί ότι η περιγραφή των διαφόρων λειτουργιών εστιάζεται σε βασικά χαρακτηριστικά, αφού μία εκτενής ανάλυση όλων των χαρακτηριστικών του μικροελεγκτή θα ξέφευγε από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Παρόλα αυτά, δίνεται προσοχή σε σημεία που μας απασχόλησαν ιδιαίτερα κατά την υλοποίηση του προγράμματος.

5.2 Ο μικροελεγκτής TMS320F28379D

Ο μικροελεγκτής TMS320F28379D ανήκει στην ευρύτερη οικογένεια των μικροελεγκτών C2000™ της εταιρείας Texas Instruments και ειδικότερα στην οικογένεια μικροελεγκτών Delfino™. Η οικογένεια αυτή έχει σχεδιαστεί με στόχο την παροχή μικροελεγκτών που θα φέρουν εις πέρας τις ανάγκες που υπάρχουν σε ένα ενσωματωμένο σύστημα πραγματικού χρόνου. Πρόκειται για μικροελεγκτές υψηλών επιδόσεων με περιφερειακά υποσυστήματα κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν έντονη ψηφιακή επεξεργασία σημάτων, όπως ο έλεγχος ηλεκτρικών κινητήρων, η λειτουργία αντιστροφών τάσης (Inverter), ο έλεγχος βιομηχανικών συστημάτων και η ανάπτυξη τεχνολογιών ραντάρ.

Ο μικροελεγκτής αποτελείται από δύο ανεξάρτητες κεντρικές μονάδες επεξεργασίας (Εικόνα 5-2) κάθε μία εκ των οποίων διαθέτει τον πυρήνα C28x των 32bit, σχεδιασμένο για ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP). Η αρχιτεκτονική του C28x βασίζεται σε ένα τροποποιημένο μοντέλο της αρχιτεκτονικής Harvard (modified Harvard architecture), το οποίο περιλαμβάνει έξι επιπλέον διαύλους (buses) για μεταφορά δεδομένων (data/address). Οι δυνατότητες του πυρήνα C28x επαυξάνονται με επιταχυντές υλικού (VCU accelerator, TMU accelerator) και τη μονάδα επεξεργασίας αριθμών κινητής υποδιαστολής απλής ακρίβειας (FPU). Επιπλέον, κάθε κεντρική μονάδα επεξεργασίας περιλαμβάνει μία ανεξάρτητη συν-επεξεργαστική μονάδα CLA (Control Law Accelerator).



Εικόνα 5-2. Η Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας και ο συν-επεξεργαστής CLA (Control Law Accelerator) της οικογένειας C2000™.

Ο μικροελεγκτής TMS320F28379D περιλαμβάνει πληθώρα δυνατοτήτων και περιφερειακών υποσυστημάτων που παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

- **Αρχιτεκτονική δύο πυρήνων.** Δύο ανεξάρτητα προγραμματιζόμενοι πυρήνες (32-bit C28x DSP core) με συχνότητα ρολογιού 200 μεγακύκλων. Κάθε πυρήνας περιλαμβάνει, επίσης, μία μονάδα επεξεργασίας αριθμών κινητής υποδιαστολής απλής ακρίβειας (Single-Precision Floating-Point Unit ή FPU), μία μονάδα επεξεργασίας τριγωνομετρικών συναρτήσεων, (Trigonometric Math Unit ή TMU) και μονάδα εκτέλεσης πολύπλοκων μαθηματικών πράξεων (Viterbi, Complex Math, CRC Unit ή VCU-II).
- **Επιταχυντές του νόμου ελέγχου.** Τμήμα της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας αλλά σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη από αυτή είναι η μονάδα επιτάχυνσης του νόμου ελέγχου (Control Law Accelerator ή CLA). Η ονομασία δόθηκε γιατί στόχος της είναι η πραγματοποίηση απαιτητικών μαθηματικών πράξεων χωρίς να διακόπτεται η ροή του προγράμματος που εκτελείται στον πυρήνα της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας. Κάθε μονάδα CLA μπορεί να προγραμματιστεί να λειτουργεί ανεξάρτητα και παράλληλα με τις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας. Το πέρας των υπολογισμών σε αυτές τις μονάδες μπορούν μέσω διακοπών να γνωστοποιηθούν στις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας. Οι CLA μπορούν να έχουν πρόσβαση στην μονάδα άμεσης προσπέλασης μνήμης (DMA) και στα διάφορα άλλα περιφερειακά υποσυστήματα (eQEP, ePWM, eCAP κ.ο.κ.), αλλά ο προγραμματισμός τους γίνεται αποκλειστικά μέσω των πυρήνων των κεντρικών μονάδων επεξεργασίας.
- **Μνήμες.** Περιλαμβάνεται μνήμη τεχνολογίας Flash (ECC-Protected) μεγέθους 1MB και μνήμη τυχαίας προσπέλασης RAM (ECC-Protected) μεγέθους 172KB. Με την εκκίνηση του συστήματος εκτελείται το πρόγραμμα που είναι αποθηκευμένο στη μνήμη Flash, ενώ οι συναρτήσεις που επιτελούν μεγάλο όγκο επεξεργασίας μπορούν να μεταφερθούν στη μνήμη RAM για την επίτευξη καλύτερων επιδόσεων.
- **Τάση λειτουργίας** ίση με 1,2V για τις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας και 3,3V για τους ακροδέκτες I/O. Η τάση λειτουργίας των ακροδεκτών αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον ορθή σχεδιασμό ηλεκτρονικών συστημάτων που επικοινωνούν με τον μικροελεγκτή.
- **DMA.** Μονάδα άμεσης προσπέλασης μνήμης με έξι διαύλους επικοινωνίας, καθένας εκ των οποίων υλοποιείται με εξειδικευμένους ελεγκτές, οι οποίοι κατευθύνουν τις αναγνώσεις και τις εγγραφές μεταξύ του διαύλου και της μνήμης.
- **GPIO.** Ο μικροελεγκτής διαθέτει 169 ακροδέκτες Εισόδου/Εξόδου γενικού σκοπού, οι οποίοι μπορούν να προγραμματιστούν να επιτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες με χρήση πολυπλεκτών και με τον προγραμματισμό των αντίστοιχων καταχωρητών. Κάθε ακροδέκτης έχει, συνήθως, δυνατότητα προγραμματισμού ποικίλων λειτουργιών.
- **Περιφερειακά υποσυστήματα επικοινωνίας.** Παρέχονται ελεγκτές για πολλές τεχνολογίες διεπαφής με εξωτερικές συσκευές όπως, USB 2.0, παράλληλη θύρα επικοινωνίας 12 επαφών (Universal Parallel Port ή uPP) , δύο περιφερειακά Controller Area Network (CAN), τρία περιφερειακά SPI (Serial Peripheral Interface) υψηλής ταχύτητας έως και 50-MHz, δύο πολυκάναλες σειριακές θύρες (McBSP) , τέσσερις σειριακές θύρες SCI/UART και δύο ελεγκτές για διεπαφή μέσω διαύλου I²C (Inter-Integrated Circuit).
- **Περιφερειακά υποσυστήματα εισόδου/εξόδου αναλογικών σημάτων.** Υποστηρίζονται τέσσερα περιφερειακά μετατροπής αναλογικής τάσης σε ψηφιακή (Analog-to-Digital Converters ή ADCs) και δυνατότητα καταγραφής με ακρίβεια έως 16-bit. Επίσης, παρέχονται οκτώ συγκριτές τάσης με μετατροπέα αναλογικής τάσης σε ψηφιακή ακρίβειας 12-bit και τρεις 12-Bit αναλογικοί έξοδοι με buffer.

- **Περιφερειακά υποσυστήματα με επαυξημένες δυνατότητες.** Ο μικροελεγκτής TMS320F28379D διαθέτει, επίσης, περιφερειακά με επαυξημένες δυνατότητες σε σύγκριση με τα αντίστοιχα άλλων οικογενειών μικροελεγκτών. Για αυτόν τον λόγο, τα περιφερειακά αυτά ξεκινούν με το γράμμα «e» που προέρχεται από τη λέξη «enhanced». Περιλαμβάνονται 12 περιφερειακά παραγωγής παλμοσειρών ePWM (Enhanced Pulse Width Modulator), τρία περιφερειακά που παρέχουν διεπαφή με αυξητικούς κωδικοποιητές eQEP (Enhanced Quadrature Encoder Pulse) και έξι περιφερειακά eCAP για την προεπεξεργασία ψηφιακών σημάτων (Enhanced Capture). Θα πρέπει να τονίσουμε ότι, ενώ οι δυνατότητες αυτών των περιφερειακών επεκτείνονται σε μεγάλο βαθμό, η παραμετροποίησή τους, ακόμη και για απλές εφαρμογές, είναι δύσκολη.
- **Αισθητήρας θερμοκρασίας.** Ο αισθητήρας μετρά την εσωτερική θερμοκρασία του μικροελεγκτή (case temperature) και εξάγει την τιμή της θερμοκρασίας σε μορφή αναλογικού σήματος το οποίο μπορεί να μετρηθεί μέσω του περιφερειακού ADCA.
- **Χρονοιστές.** Τρεις προγραμματιζόμενοι χρονοιστές γενικής χρήσης (Timer0, Timer1 και Timer2) μεγέθους 32-bit, οι οποίοι μπορούν να παραμετροποιηθούν και να προγραμματιστούν έτσι ώστε υπό συνθήκη να πυροδοτούν διακοπές υλικού.
- **Ρολόι μικροελεγκτή.** Η συχνότητα λειτουργίας του μικροελεγκτή μπορεί να προσδιοριστεί είτε με βάση τη συχνότητα λειτουργίας των ταλαντωτών (10MHz) που βρίσκονται εντός του ολοκληρωμένου κυκλώματος, είτε με κάποιον εξωτερικό ταλαντωτή για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας. Υποστηρίζονται τρία διαφορετικά είδη εξωτερικών ταλαντωτών (Single-ended Clock, Crystal, Resonator). Η αναπτυξιακή πλακέτα LAUNCHXL-F28379D περιλαμβάνει εξωτερικό ταλαντωτή (Crystal) συχνότητας 10Mhz.

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή TMS320F28379D παρουσιάζονται εποπτικά στην Εικόνα 5-3.

TMS320F2837xD		Temperatures		105°C	125°C	Q100
Sensing		Processing	Processing	Actuation		
ADC1: 16-bit, 1.1 MSPS 12-bit, 3.5 MSPS		C28x™ CPU 200 MHz	C28x™ CPU 200 MHz	12× ePWM Modules (Type 4) 24× Outputs (16× High-Res)		
ADC2: 16-bit, 1.1 MSPS 12-bit, 3.5 MSPS		FPU	FPU	Fault Trip Zones		
ADC3: 16-bit, 1.1 MSPS 12-bit, 3.5 MSPS		TMU	TMU	3× 12-Bit DAC		
ADC4: 16-bit, 1.1 MSPS 12-bit, 3.5 MSPS		VCU-II	VCU-II	Connectivity		
8× Windowed Comparators w/ Integrated 12-Bit DAC		CLA Co-Processor 200 MHz	CLA Co-Processor 200 MHz	4× UART		
8× Sigma-Delta Interface		Floating-Point Math	Floating-Point Math	2× I ² C		
Temperature Sensor		6-ch DMA	6-ch DMA	3× SPI		
3× eQEP		Memory	Memory	2× McBSP		
6× eCAP		Up to 512 KB Flash	Up to 512 KB Flash	2× CAN 2.0		
System Modules		Up to 102 KB SRAM	Up to 102 KB SRAM	USB 2.0 OTG FS MAC & PHY		
3× 32-Bit CPU Timers		2× 128-Bit Security Zones	2× 128-Bit Security Zones	uPP		
NMI Watchdog Timer		Boot ROM	Boot ROM	Power & Clocking		
2× 192 Interrupt PIE		2× EMIF		2× 10-MHz OSC		
				Ext OSC Input		
				Debug		
				Real-Time JTAG		

Εικόνα 5-3. Χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή TMS320F28379D.

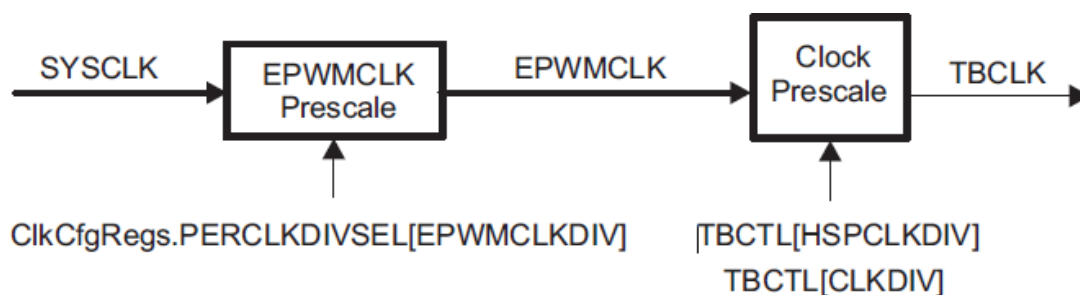
Κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού του μικροελεγκτή, χρειάστηκε αρκετές φορές να συμβουλευτούμε το διάγραμμα της αρχιτεκτονικής του (Functional Block Diagram) για τη συνολική κατανόηση του πολύπλοκου αυτού υπολογιστικού συστήματος (Παράρτημα Β 10). Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικά μερικά από τα σημαντικότερα περιφερειακά υποσυστήματα του μικροελεγκτή που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του προγράμματος.

5.3 Παραμετροποίηση του περιφερειακού ePWM

Το περιφερειακό ePWM (Enhanced Pulse Width Modulator) του μικροελεγκτή είναι ιδιαίτερης σημασίας για την υλοποίηση συστημάτων ελέγχου ηλεκτρονικών ισχύος, όπως για τον έλεγχο ηλεκτρικών κινητήρων, κατασκευή παλμοτροφοδοτικών (Switch Mode Power Supplies), υλοποίηση συστημάτων αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (Uninterruptible Power Supply ή UPS) και πολλών άλλων. Το περιφερειακό αυτό δίνει τη δυνατότητα να παραχθούν παλμοσειρές πολλών ειδών και χαρακτηριστικών σε κάποιες από τις ψηφιακές εξόδους του μικροελεγκτή. Στη δική μας εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν μόνο λίγες από τις πολυάριθμες δυνατότητες του περιφερειακού ePWM. Στόχος του σχεδιασμού της εταιρείας TI ήταν να παρέχει στους χρήστες ένα περιφερειακό για την παραγωγή πολύπλοκων παλμοσειρών με χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων υπολογιστικών πόρων από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας.

Ο μικροελεγκτής διαθέτει 12 ePWMx περιφερειακά, καθένα εκ των οποίων μπορεί να παράγει δύο εξόδους (ePWMxA και ePWMxB όπου «x» ο αύξων αριθμός του περιφερειακού). Επιλέχθηκε για οργανωτικούς λόγους που θα γίνουν κατανοητοί αργότερα να χρησιμοποιηθούν δύο ανεξάρτητα ePWM περιφερειακά για την υλοποίηση του προγράμματος. Οκτώ εκ των δώδεκα ePWM έχουν τη δυνατότητα παραγωγής παλμοσειρών με υψηλή ακρίβεια (ανάλυση 150 ps).

Η σημαντικότερη παράμετρος που έπρεπε να ρυθμιστεί ήταν η συχνότητα της παραγόμενης παλμοσειράς σε 20kHz. Το περιφερειακό ePWM περιλαμβάνει το υποσύστημα «Time-Base Submodule» για την παραγωγή των χρονισμών (κύκλων ρολογιού) που είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία του. Τμήμα αυτού (Εικόνα 5-4) ορίζει τη βασική συχνότητα λειτουργίας του περιφερειακού.



Εικόνα 5-4. Σήματα και καταχωρητές τμήματος του υποσυστήματος Time-Base Submodule.

Στο πρόγραμμα που υλοποιήσαμε επιλέξαμε να μη διαιρεθεί η συχνότητα λειτουργίας του περιφερειακού ePWM σε σχέση με τη συχνότητα λειτουργίας του μικροελεγκτή, ώστε να επιτύχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στο Duty Cycle του παραγόμενου σήματος. Για τον προσδιορισμό της περιόδου λειτουργίας του περιφερειακού (EPWMCLK) πρέπει να ορισθούν κατάλληλα τα bit 0-1 (EPWMCLK) του καταχωρητή PERCLKDIVSEL. Στη συνέχεια, για τον τελικό προσδιορισμό ορίζεται κατάλληλα και ο καταχωρητής TBCTL. Ακολούθως, αναλύονται οι σημαντικότεροι καταχωρητές που παραμετροποιήθηκαν για τη λειτουργία των περιφερειακών ePWM1 και ePWM2.

- **TBCTR** (Time Base counter) – Ο καταχωρητής αυτός περιέχει την τρέχουσα τιμή του χρονιστή του περιφερειακού. Ο κατασκευαστής ορίζει τον ρυθμό αύξησης της τιμής του απαριθμητή ως $TBCLK = EPWMCLK/(HSPCLKDIV*CLKDIV)$. Όπως προαναφέρθηκε, η περίοδος λειτουργίας του περιφερειακού (EPWMCLK) προσδιορίζεται μέσω του καταχωρητή PERCLKDIVSEL. Οι ρύθμιση των υπόλοιπων παραμέτρων παρουσιάζεται στη συνέχεια.
- **TBCTL** (Time Base Control Register). Στα bit 10-12 (CLKDIV) και 7-9 (HSPCLKDIV) αυτού του καταχωρητή ορίζονται οι τιμές των διαιρετών της συχνότητας αύξησης/μείωσης του καταχωρητή TBCTR. Οι προκαθορισμένες τιμές είναι $CLKDIV = 000_b$ (διαίρεση με τη μονάδα) και $HSPCLKDIV=001_b$ (διαίρεση με το 2). Επιλέχθηκε να μηδενιστούν και οι δύο μεταβλητές διατηρώντας τη συχνότητα αύξησης του TBCTR ίση με τη συχνότητα λειτουργίας του μικροελεγκτή (200MHz). Επίσης, στα bit 0-1 (CTRMODE) ορίζεται η λειτουργία του χρονιστή του περιφερειακού (Counter Mode). Για την παραγωγή συμμετρικού σήματος PWM, καθώς επίσης και για την καλύτερη δυνατή ακρίβεια στο Duty Cycle του σήματος επιλέχθηκε η λειτουργία «Up-Down Mode» θέτοντας $CTRMODE = 10_b$.
- **TBPRD** (Time Base Period - Καταχωρητής μεγέθους 16 bit). Η τιμή του καταχωρητή ορίζει ουσιαστικά την περίοδο του παραγόμενου σήματος PWM. Μόλις η τιμή του καταχωρητή TBCTR φτάσει αυτή την τιμή, τότε ξεκινά να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί και να ξεκινήσει η διαδικασία εκ νέου (λειτουργία «Up-Down Mode»). Συγκεκριμένα, η περίοδος του παραγόμενου σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$T_{PWM} = 2 \times T_{BPRD} \times T_{TBCLK} \quad (5-1)$$

- **CMPA** (Compare A Register). Σε κάθε νέο κύκλο ρολογιού ελέγχεται η τιμή του καταχωρητή CMPA με την τιμή του TBCTR. Όταν οι τιμές των καταχωρητών είναι ίσες πυροδοτείται ένα γεγονός (Event), το οποίο πραγματοποιεί αλλαγές στην έξοδο του καναλιού PWMxA. Συγκεκριμένα, έχοντας ορίσει τον καταχωρητή $CMPA = 0,1 \times TBPRD$ παράγεται παλμός με Duty Cycle 10%. Αντιστοίχως ορίζεται και ο καταχωρητής CMPB για την έξοδο PWMxB.
- **AQCTLA** (Action Qualifier Control Register For Output A). Κατά την πυροδότηση γεγονότων ισότητας του χρονιστή TBCTR με άλλους καταχωρητές το περιφερειακό μπορεί να προγραμματιστεί να εκτελεί συγκεκριμένες ενέργειες. Ο προγραμματισμός των ενεργειών αυτών γίνεται δίνοντας την κατάλληλη τιμή στον καταχωρητή AQCTLA. Για παράδειγμα, ορίζοντας τα bit 4-5 μπορούμε να προσδιορίσουμε την έξοδο του καναλιού PWMxA όταν έχουμε ισότητα του καταχωρητή TBCTR με τον καταχωρητή CMPA. Αντιστοίχως ορίζεται και ο καταχωρητής AQCTLB για την έξοδο PWMxB.
- **ETSEL** (Event Trigger Selection Register). Μπορούμε να ενεργοποιήσουμε την πυροδότηση διακοπών όταν ικανοποιείται κάποια συνθήκη. Η ενεργοποίηση γίνεται με καταχώρηση στο bit 3 (INTEN) της τιμής 1_b και με την καταχώρηση στα bit 0-2 της τιμής 001_b . Έτσι, ενεργοποιούμε την πυροδότηση στο πέρας μίας περιόδου, δηλαδή σε κάθε μηδενισμό του καταχωρητή TBCTR.

Στη συνέχεια παρατίθεται τμήμα κώδικα του προγράμματος στο οποίο πραγματοποιείται αρχικοποίηση των καταχωρητών του περιφερειακού ePWM1.

```

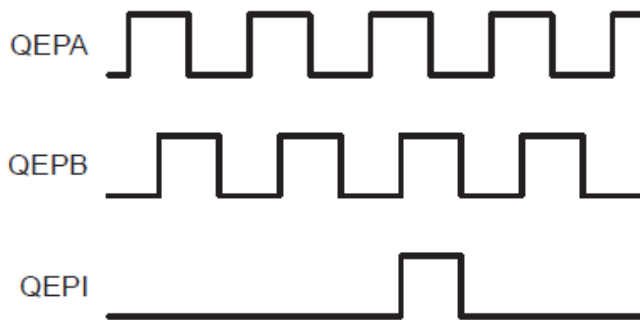
//Set ePWM peripherals prescaler to /1
EALLOW;
ClkCfgRegs.PERCLKDIVSEL.bit.EPWMCLKDIV = 0;
EDIS;
// Setup TBCLK
EPwm1Regs.TBPRD = 5000; // Set timer period to 5000 TBCLKs
EPwm1Regs.TBPHS.bit.TBPHS = 0x0000; // Phase is 0
EPwm1Regs.TBCTR = 0x0000; // Clear counter
// Set Compare values
EPwm1Regs.CMPA.bit.CMPA = SP; // Set compare A value
EPwm1Regs.CMPB.bit.CMPB = SP; // Set Compare B value
// Setup counter mode
EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; // Count up and down
EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // Disable phase loading
EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1; // Clock ratio to SYSCLKOUT
EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1;
// Set actions
EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = 2;
EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = 1;
// Interrupt once per period to change the compare values (Control Loop)
EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTSEL = 1; // Select INT on Zero event
EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTEN = 1; // Enable INT
EPwm1Regs.ETPS.all=1; //Generate an interrupt on every event

```

5.4 Παραμετροποίηση του περιφερειακού eQEP

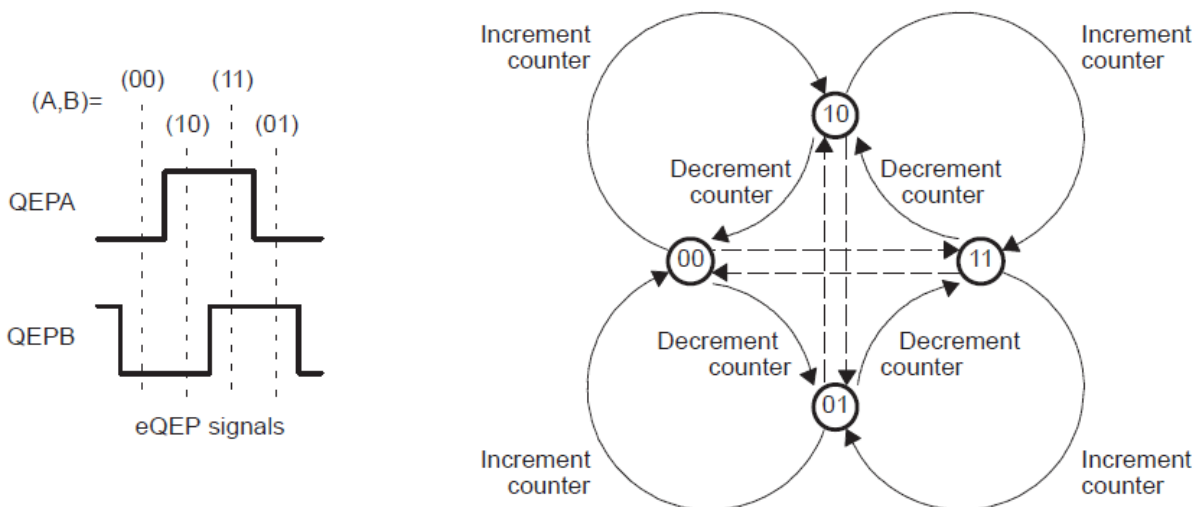
Στόχος του περιφερειακού eQEP (Enhanced Quadrature Encoder Pulse) είναι να διευκολύνει την προσαρμογή ενός αυξητικού κωδικοποιητή (Incremental Encoder) σε ένα ενσωματωμένο σύστημα χωρίς να αφιερωθεί πολύτιμος χρόνος για την ανάπτυξη συμβατού υλικού και λογισμικού. Το περιφερειακό eQEP μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για να διαβαστούν δεδομένα από έναν γραμμικό ή περιστροφικό αυξητικό κωδικοποιητή, ώστε να προσδιοριστεί η θέση, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του μηχανικού συστήματος στο οποίο έχει προσαρμοστεί. Η λειτουργία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εφαρμογές που επιθυμούμε να πραγματοποιήσουμε έλεγχο θέσης (Position Control), όπως στο ρομποτικό σύστημα «Λαίλαψ II».

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογίες για την κατασκευή αυξητικών κωδικοποιητών, όμως οι περισσότεροι κατασκευαστές επιλέγουν ως έξοδο των κωδικοποιητών, τουλάχιστον, τρία σήματα (Εικόνα 5-5), τα οποία αποτελούν τη χρήσιμη πληροφορία για τον προσδιορισμό της θέσης. Οι παλμοσειρές QEPA και QEPB έχουν διαφορά φάσης 90° και συνήθως σε μία περιστροφική κίνηση κατά τη φορά του ρολογιού η παλμοσειρά QEPA προηγείται της QEPB. Το σήμα QEPI είναι βοηθητικό και παράγει έναν παλμό ανά μία πλήρη περιστροφή του αυξητικού κωδικοποιητή. Η χρήση του QEPI είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς συνεισφέρει στην εκμηδένιση τυχόν σφάλματος που έχει συσσωρευτεί στις μετρήσεις ύστερα από πολλές περιστροφές. Σε πολλές περιπτώσεις χρειάζεται να γνωρίζουμε την ακριβή θέση κατά την εκκίνηση ενός συστήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ένας αυξητικός κωδικοποιητής απολύτου (absolute encoder), είτε να πραγματοποιηθεί αρχικοποίηση της θέσης με κάποιο ηλεκτρομηχανικό μέσο (endstop) και στη συνέχεια η τρέχουσα θέση να προσδιορίζεται μέσω του αυξητικού κωδικοποιητή.



Εικόνα 5-5. Τα παραγόμενα σήματα QEPA, QEPB και QEPI από έναν αυξητικό κωδικοποιητή.

Ο μικροελεγκτής TMS320F28379D διαθέτει τρία περιφερειακά eQEP, καθένα από τα οποία μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να αποκωδικοποιεί έως και τέσσερα είδη σημάτων πληροφορίας προερχόμενα από αυξητικούς κωδικοποιητές («Quadrature-count», «Direction-count», «UP-count» και «DOWN-count»). Στη δική μας περίπτωση, επιλέχθηκε η λειτουργία «Quadrature-count mode» κατά την οποία μπορούν απευθείας να διαβαστούν και να αποκωδικοποιηθούν τα προαναφερθέντα σήματα μέσω του υποσυστήματος DQU (Quadrature Decoder Unit) του περιφερειακού eQEP. Το DQU υλοποιεί πρακτικά μία μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων, η οποία ανά πάσα στιγμή μπορεί να βρεθεί σε τέσσερις καταστάσεις (Εικόνα 5-6), ανάλογα με την τιμή των εισαχθέντων σημάτων. Κάθε μετάβαση που συμβαίνει έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή τη μείωση του καταχωρητή QPOSCNT.



Εικόνα 5-6. Οι τέσσερις διακριτές καταστάσεις του υποσυστήματος DQU.

Για τη λειτουργία ενός περιφερειακού eQEP χρειάζεται κατά την εκκίνηση του προγράμματος να οριστούν κατάλληλα οι παρακάτω καταχωρητές:

- QPOSCNT (Position Counter Register). Πρόκειται για τον σημαντικότερο καταχωρητή, μεγέθους 32 bit. Η τιμή του καταχωρητή είτε αυξάνεται, είτε μειώνεται ανάλογα με τα εισερχόμενα σήματα QEPA και QEPB και από αυτήν την τιμή προκύπτει η τρέχουσα γωνιακή θέση του μηχανικού συστήματος και κατ'επέκταση η γωνιακή ταχύτητα και η φορά της κίνησης. Κατά τη διάρκεια ενημέρωσης της τιμής του από το DQU, βρίσκεται σε κατάσταση ανάγνωσης και δεν μπορεί να ενημερωθεί η τιμή του από τον χρήστη (Read Only).

- QPOSINIT (Position Counter Init Register). Περιλαμβάνει την τιμή στην οποία αρχικοποιείται ο καταχωρητής QPOSCNT τη στιγμή πυροδότησης κάποιου συμβάντος, το είδος του οποίου ορίζεται στον καταχωρητή QEPCTL. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει οποιαδήποτε τιμή επιθυμεί.
- QPOSMAX (Maximum Position Count Register). Ο χρήστης μπορεί να ορίσει τη μέγιστη δυνατή τιμή του καταχωρητή QPOSCNT. Ο καταχωρητής δε μπορεί να ξεπεράσει αυτή την τιμή και μηδενίζεται σε περίπτωση υπέρβασης.
- QPOSILAT (Index Position Latch Register). Κατά την εισαγωγή παλμού QEPI αποθηκεύεται η τρέχουσα τιμή του QPOSCNT στον καταχωρητή QPOSILAT, ώστε να μπορεί να γίνει επεξεργασία της τιμής αργότερα. Δεν είναι δυνατή η εγγραφή από τον χρήστη σε αυτόν τον καταχωρητή.
- QDECCTL (Quadrature Decoder Control Register). Η τιμή του καταχωρητή προσδιορίζεται πάντα από τον χρήστη και ρυθμίζει τις επιμέρους λειτουργίες του DQU. Για παράδειγμα, στα bit 14-15 (QSRC) μπορεί να ορισθεί η βασική λειτουργία του υποσυστήματος αποκωδικοποίησης. Στην προκειμένη περίπτωση, ορίσαμε σε αυτά τα bit την τιμή 00_b που αντιστοιχούν στη λειτουργία «Quadrature count mode».
- QEPCTL (QEP Control Register). Πρόκειται επίσης για καταχωρητή, η τιμή του οποίου πρέπει πάντα να προσδιορίζεται κατά την παραμετροποίηση ενός περιφερειακού eQEP. Περιλαμβάνει ρυθμίσεις που αφορούν τη συνολική λειτουργία του περιφερειακού. Συγκεκριμένα, στα bit 13-12 (PCRM) ορίζεται σε ποια περίπτωση θα πραγματοποιείται αρχικοποίηση του καταχωρητή QPOSCNT, ενώ στο bit 3 (QPEN) ορίζεται η συμπεριφορά του περιφερειακού σε περίπτωση επανεκκίνησης του συστήματος (SYSRSn).
- QCAPCTL (Quadrature Capture Control Register). Σε αυτόν τον καταχωρητή γίνεται παραμετροποίηση και ενεργοποίηση της δειγματοληψίας των εισερχόμενων σημάτων. Ο καθορισμός του bit 15 (CEN) σε 1_b ενεργοποιεί το υποσύστημα δειγματοληψίας και τα bit 4-6 προσδιορίζουν τη συχνότητα δειγματοληψίας σε σχέση με την κεντρική συχνότητα λειτουργίας του μικροελεγκτή (SYSCLKOUT). Η συχνότητα επιλέγεται κατάλληλα, έτσι ώστε να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αναμενόμενη συχνότητα των σημάτων QEPA και QEPB, η οποία μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας το πλήθος των παλμών που παράγει ο κωδικοποιητής με τη μέγιστη γωνιακή ταχύτητα σε στροφές ανά λεπτό του μηχανικού συστήματος στο οποίο έχει προσαρμοστεί.

Παρακάτω βλέπουμε τμήμα κώδικα του προγράμματος για την αρχικοποίηση των καταχωρητών του περιφερειακού eQEP1.

```
//Initialize eQEP1
EQep1Regs.QDECCTL.bit.QSRC = 00;           // QEP quadrature count mode
EQep1Regs.QEPCTL.bit.FREE_SOFT = 10;      // Position counter is unaffected by
                                           // emulation suspend.
// PCRM=01 mode: If the position counter is equal to QPOSMAX, then the position //
counter is reset to 0 on the next eQEP clock for forward movement and position //
counter overflow flag is set. If the position counter is equal to
// ZERO, then the position counter is reset to QPOSMAX on the next QEP clock.
EQep1Regs.QEPCTL.bit.PCRM = 01;
EQep1Regs.QEPCTL.bit.UTE = 0;             // Unit Timeout Disable
EQep1Regs.QPOSMAX = 0xffffffff;          // Set QPOSMAX
EQep1Regs.QPOSINIT = 0x7fffffff;         // Set QPOSINIT
```

```

EQep1Regs.QPOSCNT = 0x7fffffff; // Set QPOSCNT
EQep1Regs.QEPCTL.bit.QPEN = 1; // eQEP position counter is enabled
EQep1Regs.QCAPCTL.bit.CCPS = 6; // 1/64 eQEP capture timer clock prescaler
EQep1Regs.QCAPCTL.bit.CEN = 1; // QEP Capture Enable

```

5.5 Πολυπλεξία των ακροδεκτών GPIO

Ο μικροελεγκτής TMS320F28379D διαθέτει τη δυνατότητα προγραμματισμού της λειτουργίας έως και 169 ακροδεκτών GPIO, με χρήση των πολυπλεκτών που υφίστανται στην αρχιτεκτονική του. Ο προσδιορισμός της βασικής λειτουργίας ενός ακροδέκτη γίνεται με την κατάλληλη ρύθμιση των καταχωρητών που ορίζουν τη λειτουργία των ακροδεκτών (GPYMUXn και GPYGMUXn). Για παράδειγμα, στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-1), που προέρχεται από το τεχνικό φύλλο δεδομένων, φαίνονται οι δυνατές λειτουργίες που μπορούν να οριστούν για τους GPIO ακροδέκτες 0-15 [30]. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων y και n παίζει σημαντικό ρόλο για την ορθή ρύθμιση του εκάστοτε ακροδέκτη. Όταν κατά την παραμετροποίηση ενός ακροδέκτη η επιθυμητή τιμή του καταχωρητή GPYGMUXn είναι διάφορη του μηδενός (προκαθορισμένη τιμή κατά την εκκίνηση), τότε η αρχικοποίηση του καταχωρητή αυτού πρέπει να προηγείται της αρχικοποίησης του καταχωρητή GPYMUXn, έτσι ώστε να αποφευχθεί η παραγωγή παρασιτικών παλμών στην έξοδο του ακροδέκτη.

Πίνακας 5-1. Μέρος του πίνακα πολυπλεξίας ακροδεκτών GPIO.

GPIO Index	GPIO Mux Selection							
	0, 4, 8, 12	1	2	3	5	6	7	15
GPYGMUXn. GPIOz =	00b, 01b, 10b, 11b	00b			01b			11b
GPYMUXn. GPIOz =	00b	01b	10b	11b	01b	10b	11b	11b
GPIO0		EPWM1A (O)				SDAA (I/OD)		
GPIO1		EPWM1B (O)		MFSRB (I/O)		SCLA (I/OD)		
GPIO2		EPWM2A (O)			OUTPUTXBAR1 (O)	SDAB (I/OD)		
GPIO3		EPWM2B (O)	OUTPUTXBAR2 (O)	MCLKRB (I/O)	OUTPUTXBAR2 (O)	SCLB (I/OD)		
GPIO4		EPWM3A (O)			OUTPUTXBAR3 (O)	CANTXA (O)		
GPIO5		EPWM3B (O)	MFSRA (I/O)	OUTPUTXBAR3 (O)		CANRXA (I)		
GPIO6		EPWM4A (O)	OUTPUTXBAR4 (O)	EXTSYNCOUT (O)	EQEP3A (I)	CANTXB (O)		
GPIO7		EPWM4B (O)	MCLKRA (I/O)	OUTPUTXBAR5 (O)	EQEP3B (I)	CANRXB (I)		
GPIO8		EPWM5A (O)	CANTXB (O)	ADCSOAO (O)	EQEP3S (I/O)	SCITXDA (O)		
GPIO9		EPWM5B (O)	SCITXDB (O)	OUTPUTXBAR6 (O)	EQEP3I (I/O)	SCIRXDA (I)		
GPIO10		EPWM6A (O)	CANRXB (I)	ADCSOAO (O)	EQEP1A (I)	SCITXDB (O)		UPP-WAIT (I/O)
GPIO11		EPWM6B (O)	SCIRXDB (I)	OUTPUTXBAR7 (O)	EQEP1B (I)	SCIRXDB (I)		UPP-START (I/O)
GPIO12		EPWM7A (O)	CANTXB (O)	MDXB (O)	EQEP1S (I/O)	SCITXDC (O)		UPP-ENA (I/O)
GPIO13		EPWM7B (O)	CANRXB (I)	MDRB (I)	EQEP1I (I/O)	SCIRXDC (I)		UPP-D7 (I/O)
GPIO14		EPWM8A (O)	SCITXDB (O)	MCLKXB (I/O)		OUTPUTXBAR3 (O)		UPP-D6 (I/O)
GPIO15		EPWM8B (O)	SCIRXDB (I)	MFSXB (I/O)		OUTPUTXBAR4 (O)		UPP-D5 (I/O)

Εκτός από τη βασική λειτουργία ενός GPIO ακροδέκτη, μπορεί να ορισθούν και άλλες παράμετροι όπως η κατεύθυνση (Input / Output), η ενεργοποίηση των εσωτερικών Pull-up αντιστάσεων (καταχωρητές GPAPUD, GPBPUD, GPCPUD, GPDPUD, και GPFPU), η ενεργοποίηση πυροδότησης εξωτερικής διακοπής κ.α. Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτικά μέρος του προγράμματος που υλοποιήθηκε και είναι υπεύθυνο για την παραμετροποίηση της λειτουργίας των ακροδεκτών που επιλέχθηκαν για τη λειτουργία της περιφερειακής μονάδας ελέγχου.

ePWM1

```
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO0 = 1; // Disable pull-up on GPIO0 (EPWM1A)
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO1 = 1; // Disable pull-up on GPIO1 (EPWM1B)
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO0 = 1; // Configure GPIO0 as EPWM1A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO1 = 1; // Configure GPIO1 as EPWM1B
```

ePWM2

```
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO2 = 1; // Disable pull-up on GPIO2 (EPWM2A)
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO3 = 1; // Disable pull-up on GPIO3 (EPWM2B)
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO2 = 1; // Configure GPIO2 as EPWM2A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO3 = 1; // Configure GPIO3 as EPWM2B
```

eQEP1

```
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO20 = 1; // Disable pull-up on GPIO20 (EQEP1A)
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO21 = 1; // Disable pull-up on GPIO21 (EQEP1B)
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO22 = 1; // Disable pull-up on GPIO22 (EQEP1S)
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO23 = 1; // Disable pull-up on GPIO23 (EQEP1I)
GpioCtrlRegs.GPAQSEL2.bit.GPIO20 = 0; // Sync GPIO20 to SYSCLK (EQEP1A)
GpioCtrlRegs.GPAQSEL2.bit.GPIO21 = 0; // Sync GPIO21 to SYSCLK (EQEP1B)
GpioCtrlRegs.GPAQSEL2.bit.GPIO22 = 0; // Sync GPIO22 to SYSCLK (EQEP1S)
GpioCtrlRegs.GPAQSEL2.bit.GPIO23 = 0; // Sync GPIO23 to SYSCLK (EQEP1I)
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO20 = 1; // Configure GPIO20 as EQEP1A
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO21 = 1; // Configure GPIO21 as EQEP1B
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO22 = 1; // Configure GPIO22 as EQEP1S
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO23 = 1; // Configure GPIO23 as EQEP1I
```

eQEP2

```
GpioCtrlRegs.GPBPUD.bit.GPIO54 = 1; // Disable pull-up on GPIO54 (EQEP2A)
GpioCtrlRegs.GPBPUD.bit.GPIO55 = 1; // Disable pull-up on GPIO55 (EQEP2B)
GpioCtrlRegs.GPBPUD.bit.GPIO56 = 1; // Disable pull-up on GPIO56 (EQEP2S)
GpioCtrlRegs.GPBPUD.bit.GPIO57 = 1; // Disable pull-up on GPIO57 (EQEP2I)
GpioCtrlRegs.GPBQSEL2.bit.GPIO54 = 0; // Sync GPIO54 to SYSCLK (EQEP2A)
GpioCtrlRegs.GPBQSEL2.bit.GPIO55 = 0; // Sync GPIO55 to SYSCLK (EQEP2B)
GpioCtrlRegs.GPBQSEL2.bit.GPIO56 = 0; // Sync GPIO56 to SYSCLK (EQEP2S)
GpioCtrlRegs.GPBQSEL2.bit.GPIO57 = 0; // Sync GPIO57 to SYSCLK (EQEP2I)
GpioCtrlRegs.GPBMUX2.bit.GPIO54 = 1; // Configure GPIO54 as EQEP2A
GpioCtrlRegs.GPBMUX2.bit.GPIO55 = 1; // Configure GPIO55 as EQEP2B
GpioCtrlRegs.GPBMUX2.bit.GPIO55 = 1; // Configure GPIO55 as EQEP2B
GpioCtrlRegs.GPBMUX2.bit.GPIO56 = 1; // Configure GPIO56 as EQEP2S
GpioCtrlRegs.GPBMUX2.bit.GPIO56 = 1; // Configure GPIO56 as EQEP2S
GpioCtrlRegs.GPBMUX2.bit.GPIO57 = 1; // Configure GPIO57 as EQEP2I
GpioCtrlRegs.GPBMUX2.bit.GPIO57 = 1; // Configure GPIO57 as EQEP2I
```

eQEP3

```
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO6 = 1; // Disable pull-up on GPIO6 (EQEP3A)
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO7 = 1; // Disable pull-up on GPIO7 (EQEP3B)
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO8 = 1; // Disable pull-up on GPIO8 (EQEP3S)
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO9 = 1; // Disable pull-up on GPIO9 (EQEP3I)
GpioCtrlRegs.GPAQSEL1.bit.GPIO6 = 0; // Sync GPIO6 to SYSCLK (EQEP3A)
GpioCtrlRegs.GPAQSEL1.bit.GPIO7 = 0; // Sync GPIO7 to SYSCLK (EQEP3B)
```

```

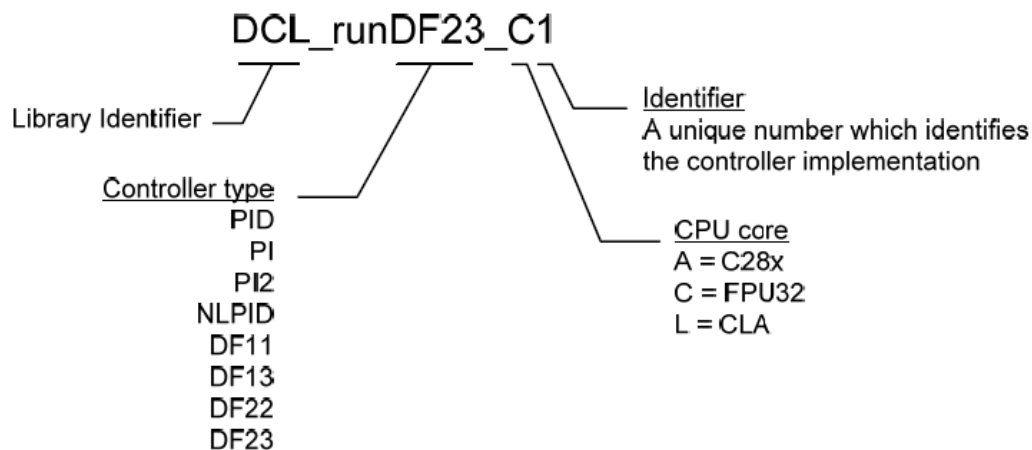
GpioCtrlRegs.GPAQSEL1.bit.GPIO8 = 0; // Sync GPIO8 to SYSCLK (EQEP3S)
GpioCtrlRegs.GPAQSEL1.bit.GPIO9 = 0; // Sync GPIO9 to SYSCLK (EQEP3I)
GpioCtrlRegs.GPAGMUX1.bit.GPIO6 = 1; // Configure GPIO6 as EQEP3A
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO6 = 1;
GpioCtrlRegs.GPAGMUX1.bit.GPIO7 = 1; // Configure GPIO7 as EQEP3B
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO7 = 1;
GpioCtrlRegs.GPAGMUX1.bit.GPIO8 = 1; // Configure GPIO8 as EQEP3S
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO8 = 1;
GpioCtrlRegs.GPAGMUX1.bit.GPIO9 = 1; // Configure GPIO9 as EQEP3I
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO9 = 1;

```

5.6 Έλεγχος θέσης με χρήση της βιβλιοθήκης «Digital Control Library V2.1»

Η βιβλιοθήκη Digital Control Library περιλαμβάνει έτοιμες υλοποιήσεις για ευρείας χρήσης αλγορίθμους ελέγχου και υποστηρίζεται μόνο από τους επεξεργαστές της οικογένειας C2000, που διαθέτουν μονάδα επεξεργασίας αριθμών κινητής υποδιαστολής «FPU» (32-bit Floating Point Unit). Επίσης, περιλαμβάνει έτοιμες υλοποιήσεις για την ανεξάρτητη επεξεργαστική μονάδα CLA με στόχο να αποφορτιστεί η κεντρική μονάδα επεξεργασίας, η οποία επιτελεί μεγάλο όγκο υπολογισμών. Όλες οι υλοποιήσεις είναι ανοικτού κώδικα. Συνολικά, υποστηρίζονται 52 βασικές συναρτήσεις (υλοποιήσεις οκτώ διαφορετικών ελεγκτών) και 38 βοηθητικές συναρτήσεις (καταγραφή δεδομένων, μέτρηση επίδοσης, καταγραφή μεταβατικών φαινομένων).

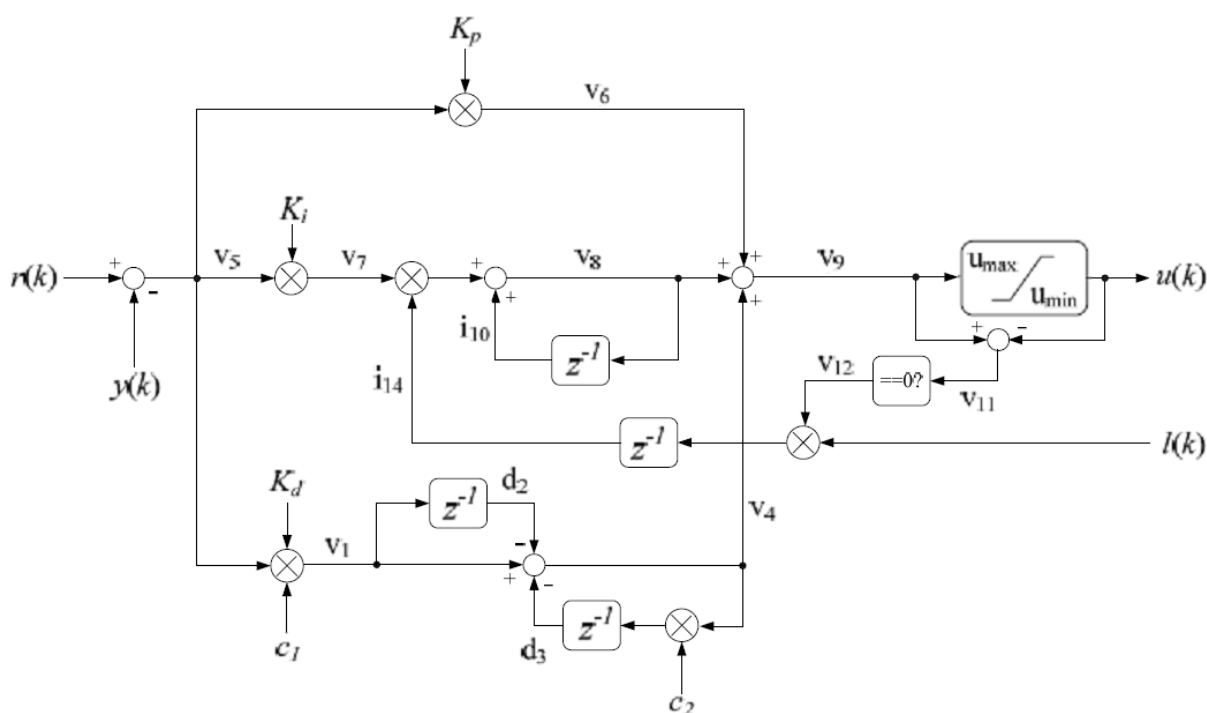
Στον φάκελο «source» της βιβλιοθήκης βρίσκονται τα αρχεία όλων των υποστηριζόμενων βασικών συναρτήσεων. Η ονομασία (Εικόνα 5-7) κάθε αρχείου προσδιορίζει το είδος του ελεγκτή που υλοποιεί, την έκδοση της υλοποίησης, καθώς και το υλικό για το οποίο προορίζεται να εκτελεστεί (Κεντρική μονάδα επεξεργασίας, επεξεργαστική μονάδα FPU, Επιταχυντής Νόμου ελέγχου CLA).



Εικόνα 5-7. Ονοματολογία υποστηριζόμενων βασικών συναρτήσεων.

Κύριος στόχος του προγράμματος που υλοποιήθηκε ήταν η δυνατότητα παράλληλου ελέγχου της γωνιακής μετατόπισης (θ) των δύο κινητήρων που επενεργούν στο πόδι του ρομπότ. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, επιλέχθηκε ο ελεγκτής με αναλογική συνιστώσα και διαφοριστή (proportional plus derivative controller). Η κατηγορία των ελεγκτών αυτών χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της υψηλής τους απόδοσης σε μεγάλο φάσμα συνθηκών λειτουργίας, αλλά και λόγω της απλότητας στην εφαρμογή τους επιτρέποντας στον μέσο μηχανικό να τους εφαρμόζει με σχετική ευκολία. Στην απλούστερή του μορφή ο ελεγκτής PD έχει τη

μορφή $G_c = K_p + K_D \cdot s$, όπου K_p είναι το κέρδος την αναλογικής συνιστώσας (open-loop gain) και K_D το κέρδος του διαφοριστή. Ο κλάδος του διαφοριστή στοχεύει στη μείωση της υπερακόντισης και του χρόνου αποκατάστασης. Από τη μεγάλη γκάμα επιλογών στη βιβλιοθήκη DCL, χρησιμοποιήθηκε η 4^η έκδοση του γραμμικού ελεγκτή PID (DCL_runPID_C4) λόγω της υψηλής απόδοσης (ελάχιστο αριθμό κύκλων ρολογιού για το αποτέλεσμα), αλλά και των επιπλέον δυνατοτήτων που προσφέρει. Η αρχιτεκτονική του ελεγκτή (Εικόνα 5-8) διαφέρει από αυτή του κλασικού ιδανικού PID ελεγκτή προσφέροντας επιπλέον τη δυνατότητα προσδιορισμού μέγιστης και ελάχιστης επιτρεπτής τιμής κορεσμού (Upper/Lower saturation limit), προστασία από το φαινόμενο wind-up στην ολοκληρωτική συνιστώσα, καθώς και προγραμματιζόμενο ψηφιακό βαθυπερατό φίλτρο στον διαφοριστή. Το ψηφιακό φίλτρο πρόκειται για απλό φίλτρο πρώτης τάξης με διαφοριστή. Η μετατροπή του σε μορφή διακριτού χρόνου προκύπτει με χρήση του μετασχηματισμού Tustin.



Εικόνα 5-8. Αρχιτεκτονική του ελεγκτή με αναλογική συνιστώσα και διαφοριστή DCL_runPID_C4.

Για τη υλοποίηση του ελεγκτή PD η ολοκληρωτική συνιστώσα εξαλείφθηκε θέτοντας το κέρδος του ολοκληρωτή K_i ίσο με το μηδέν, ενώ επίσης αγνοήθηκαν οι τιμές των παραμέτρων που σχετίζονται με τη συνιστώσα αυτή. Για τη ρύθμιση του ελεγκτή χρειάζεται να προσδιοριστούν οι εξής παράμετροι:

- K_p : Κέρδος της αναλογικής συνιστώσας.
- K_d : Κέρδος διαφοριστή.
- K_r : Set point weight
- c_1, c_2 : Όπως φαίνεται στην αρχιτεκτονική του ελεγκτή (Εικόνα 5-8) για τον υπολογισμό της συνιστώσας του διαφοριστή χρειάζεται να προσδιοριστούν οι παράμετροι c_1 και c_2 (derivative filter coefficients) του ψηφιακού φίλτρου. Ο υπολογισμός των παραμέτρων γίνεται με χρήση των παρακάτω σχέσεων.

$$c_1 = \frac{2}{T + 2\tau} \quad c_2 = \frac{T - 2\tau}{T + 2\tau} \quad (5-2)$$

Η παράμετρος **T** ισούται με την περίοδο κλήσης της συνάρτησης, ενώ η παράμετρος **τ** (filter time constant) σχετίζεται με τη συχνότητα αποκοπής **f_c** του φίλτρου σύμφωνα με τη σχέση **f_c = 1/2πτ**.

- **d₂,d₃**: Μεταβλητές αποθήκευσης για τον υπολογισμό της συνιστώσας του διαφοριστή. Υπολογίζονται από την ίδια τη συνάρτηση σε κάθε κλήση της και δε χρειάζεται να προσδιοριστούν από τον χρήστη.
- **U_{max}**: Μέγιστη τιμή κορεσμού της συνάρτησης. Με τον προσδιορισμό της παραμέτρου U_{max} μπορεί να οριστεί το άνω όριο της εξόδου της συνάρτησης ώστε το Duty Cycle του παραγόμενου σήματος ελέγχου PWM να μην ξεπερνάει κάποια προκαθορισμένη τιμή.
- **U_{min}**: Ελάχιστη τιμή κορεσμού της συνάρτησης. Με τον προσδιορισμό της παραμέτρου U_{min}, μπορεί να οριστεί το κάτω όριο της εξόδου της συνάρτησης. Οι τιμές των παραμέτρων U_{min} και U_{max} επιλέχθηκαν να είναι ίδιου μέτρου και αντίθετου προσήμου.

Όταν το αποτέλεσμα της συνάρτησης είναι 0,5 το πρόγραμμα που υλοποιήθηκε μεταφράζει αυτή την τιμή σε παραγόμενη παλμοσειρά με Duty Cycle 50%. Όταν η επιστρεφόμενη τιμή είναι αρνητικού προσήμου, το Duty Cycle υπολογίζεται βάσει του μέτρου αυτής της τιμής και ταυτόχρονα αλλάζει η τιμή του αντίστοιχου ψηφιακού ακροδέκτη που είναι υπεύθυνος για τη παραγωγή του σήματος ελέγχου της φοράς κίνησης DIR. Για την ορθή λειτουργία της συνάρτησης και συγκεκριμένα για τον υπολογισμό της συνιστώσας του διαφοριστή, χρειάζεται η κλήση της να πραγματοποιείται με σταθερή συχνότητα. Εκμεταλλευτήκαμε τα ήδη παραμετροποιημένα περιφερειακά ePWM1 και ePWM2 και ενεργοποιήσαμε σε κάθε ένα από αυτά την πυροδότηση διακοπής υλικού ανά μία περίοδο του παραγόμενου σήματος. Στις ρουτίνες εξυπηρέτησης των διακοπών (epwm1_isr και epwm2_isr) προστέθηκε τμήμα κώδικα για τον έλεγχο των κινητήρων (control loop).

Ένας σημαντικός παράγοντας που λήφθηκε υπόψη πριν την επιλογή της συγκεκριμένης συνάρτησης για την υλοποίηση του ελεγκτή PD, ήταν η μικρή χρονική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου που χρησιμοποιεί. Η εξέλιξη γενικότερα των αλγορίθμων αυτών αποτελεί σημείο έρευνας και καθημερινά παρουσιάζονται νέες τεχνικές οι οποίες βελτιώνουν σημαντικά την επίδοσή τους. Η εταιρεία Texas Instruments στον οδηγό χρήσης της βιβλιοθήκης DCL περιλαμβάνει τον πίνακα επιδόσεων (Πίνακας 5-2) όλων των παρεχόμενων βασικών αλγορίθμων.

Πίνακας 5-2. Benchmarks διαφόρων υλοποιήσεων του ελεγκτή PID.

Συνάρτηση	Κύκλοι	Μέγεθος (words)
DCL_runPID_A1	99	80
DCL_runPID_C1	81	97
DCL_runPID_C2	197	207
DCL_runPID_C3	186	196
DCL_runPID_C4	84	90
DCL_runPID_L1	53	70
DCL_runPID_L1	45	58

Στην πρώτη στήλη βρίσκεται το όνομα της συνάρτησης που υλοποιεί τον ελεγκτή PID, στη δεύτερη στήλη ο αριθμός των κύκλων που χρειάζεται η συνάρτηση από την κλήση της μέχρι την επιστροφή της υπολογισμένης τιμής, ενώ στην τρίτη στήλη η συνολική μνήμη σε λέξεις (words) που απαιτεί. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι οι τιμές αυτές έχουν μετρηθεί από την εταιρεία στο «worst case scenario» δηλαδή όταν χρησιμοποιούνται όλες οι δυνατότητες κάθε συνάρτησης. Στο πρόγραμμα που υλοποιήθηκε δεν χρησιμοποιήθηκαν όλες οι δυνατότητες της συνάρτησης DCL_runPID_C4 και για αυτό το λόγο έγιναν μετρήσεις για να προσδιοριστεί επακριβώς ο αριθμός των κύκλων που χρειάζεται η συνάρτηση αυτή όπως επίσης και ο χρόνος εκτέλεσης του βρόχου ελέγχου συνολικά. Για τον υπολογισμό έγινε μέτρηση του καταχωρητή TBCTR πριν και μετά τα τμήματα κώδικα που μας ενδιέφεραν. Ο χρόνος εκτέλεσης της συνάρτησης DCL_runPID_C4 μετρήθηκε σε 67 κύκλους (335 ns) ενώ ο χρόνος εκτέλεσης του βρόχου ελέγχου συνολικά σε 244 κύκλους (1,22 μs). Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί έλεγχος PD της θέσης ενός κινητήρα με συχνότητα του βρόχου ελέγχου έως και 819 kHz. Βέβαια στο πρόγραμμα που υλοποιήθηκε η συχνότητα ελέγχου δε μπορεί να ξεπεράσει τα 20 kHz καθώς περιορίζεται από τη συχνότητα πυροδότησης διακοπών από τα ePWM περιφερειακά. Όμως, με διαφορετική υλοποίηση, η οποία θα χρησιμοποιούσε τους ανεξάρτητους χρονιστές (TIMER0, TIMER1 ή TIMER2), θα μπορούσε να επιτευχθεί η προαναφερθείσα επίδοση.

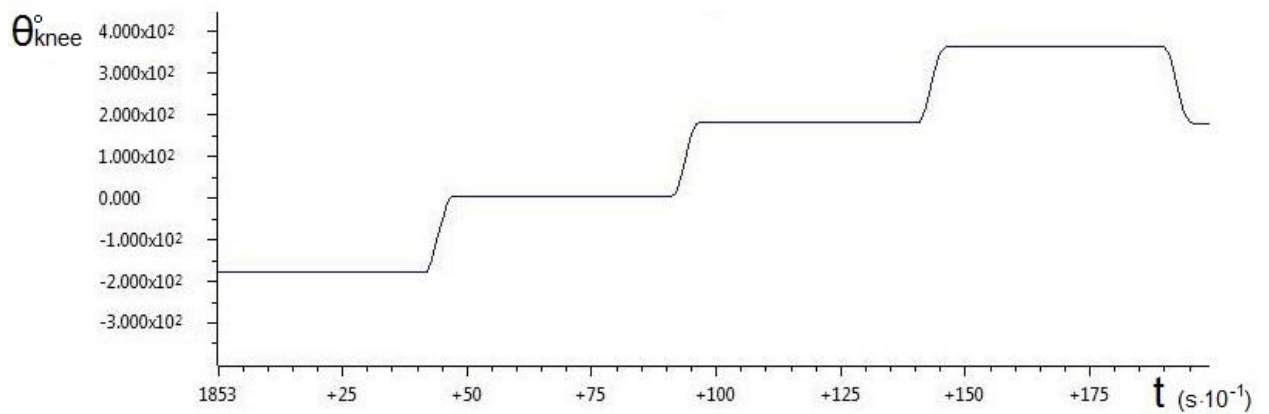
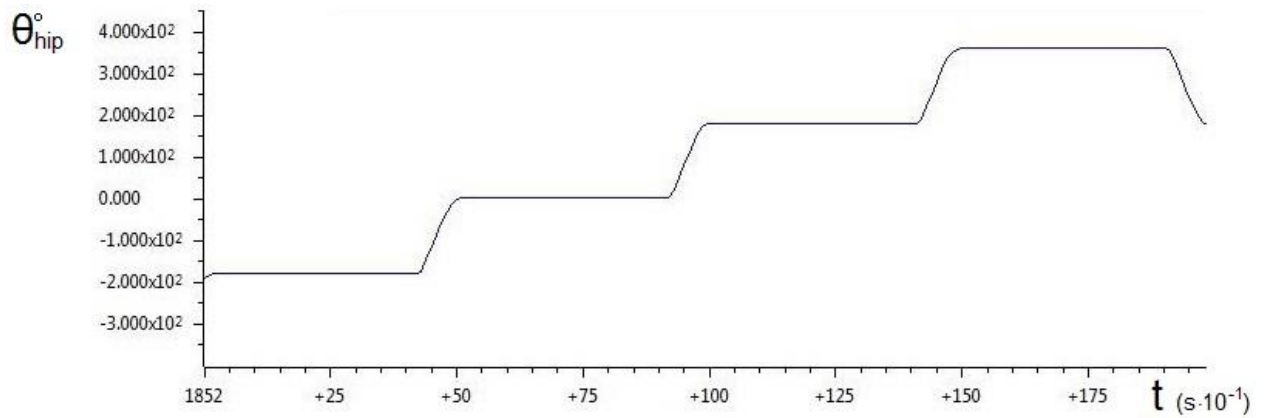
5.7 Δοκιμή του συνολικού τελικού συστήματος «Λαίλαψ II»

Έχοντας υλοποιήσει το κατάλληλο υλικό και λογισμικό για τον έλεγχο των αρθρώσεων του ρομπότ, πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων με στόχο να αξιολογηθεί η συνολική ευστάθεια του ηλεκτρονικού συστήματος. Αρχικά, έγινε απλή δοκιμή σε κάθε περιφερειακή μονάδα ελέγχου για να ελεγχθεί η ηλεκτρική τους σταθερότητα. Για τον σκοπό αυτό, δημιουργήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα (Παράρτημα Α), το οποίο ανανέωνε, με περίοδο 5s και εύρος από -360° έως και +360°, τις επιθυμητές γωνιακές θέσεις των αρθρώσεων. Καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, δεν παρατηρήθηκαν ηλεκτρικές αστάθειες και οι μετρήσεις των γωνιακών θέσεων των κινητήρων ήταν οι επιθυμητές (Εικόνα 5-9). Οι δοκιμές συνεχίστηκαν για μεγάλο χρονικό διάστημα προκειμένου να επιβεβαιωθεί η σταθερότητα του συστήματος σε βάθος χρόνου.

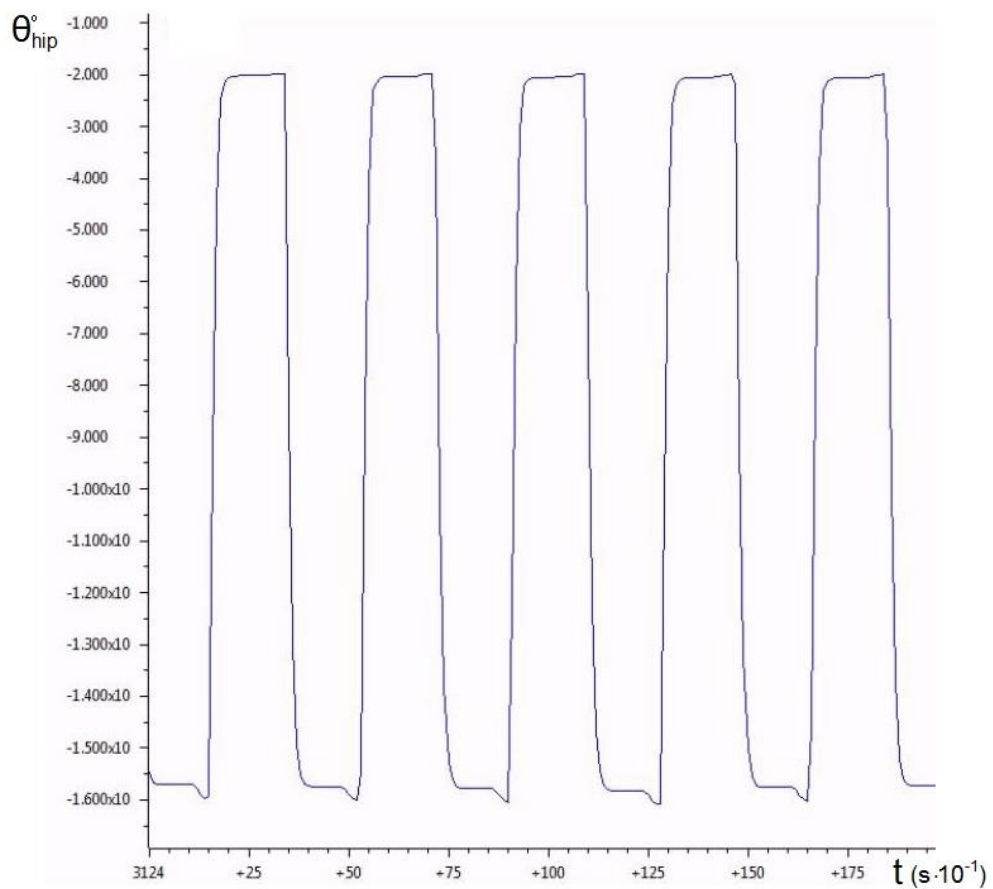
Οι περιφερειακές μονάδες ελέγχου αποδείχτηκαν αξιόπιστες και για αυτό ακολούθησε διεξαγωγή πειραμάτων με προσαρτημένα δύο από τα τέσσερα πόδια του ρομπότ. Πραγματοποιήθηκε αλλαγή στον βασικό βρόχο ελέγχου (main loop) του προγράμματος. Συγκεκριμένα, ορίστηκε ως αρχική γωνιακή θέση του κάθε κινητήρα αυτή που είχε κατά την εκκίνηση του προγράμματος και αντικαταστάθηκαν οι εντολές στο βασικό βρόχο με τις παρακάτω:

```
rk1 = 0.0f; //Set knee to 0 degrees
rk2 = 0.0f; //Set hip to 0 degrees
DELAY_US(2*1000000); //wait for 2 sec
rk1 = 0.1f; //Set knee to +36 degrees
rk2 = -0.05f; // Set hip to -18 degrees
DELAY_US(2*1000000); //wait for 2 sec
```

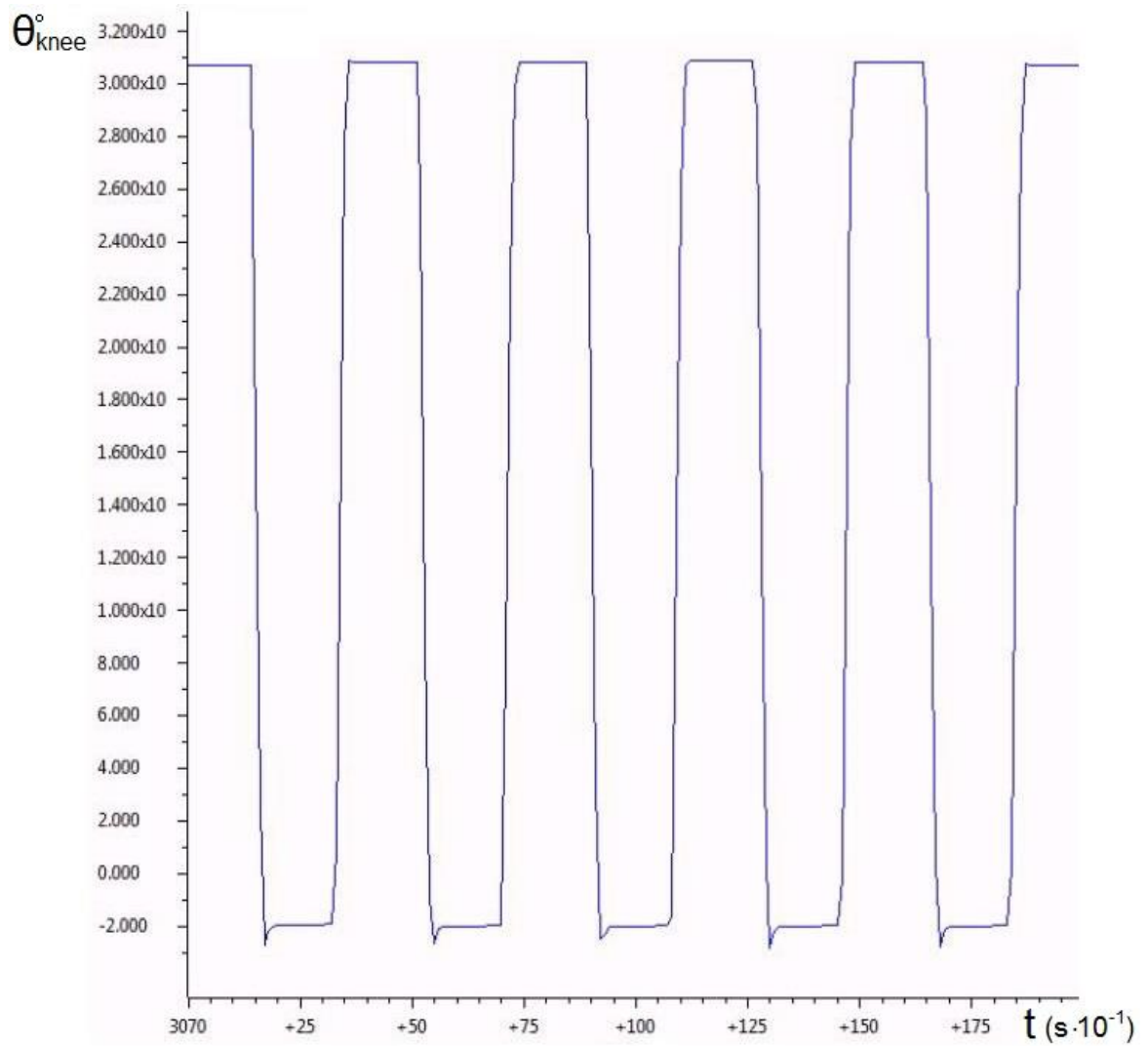
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων ήταν τα προσδοκώμενα (Εικόνα 5-10, Εικόνα 5-11 και Εικόνα 5-12). Το σύστημα ήταν ηλεκτρικά ευσταθές και δεν παρουσιάστηκαν προβλήματα κατά τη λειτουργία του. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ανεπιθύμητη κυμάτωση στις γωνιακές θέσεις των αρθρώσεων, οφειλόμενη στο γεγονός ότι δεν είχε προηγηθεί επαναπροσδιορισμός των κερδών του ελεγκτή μετά την προσάρτηση των ποδιών.



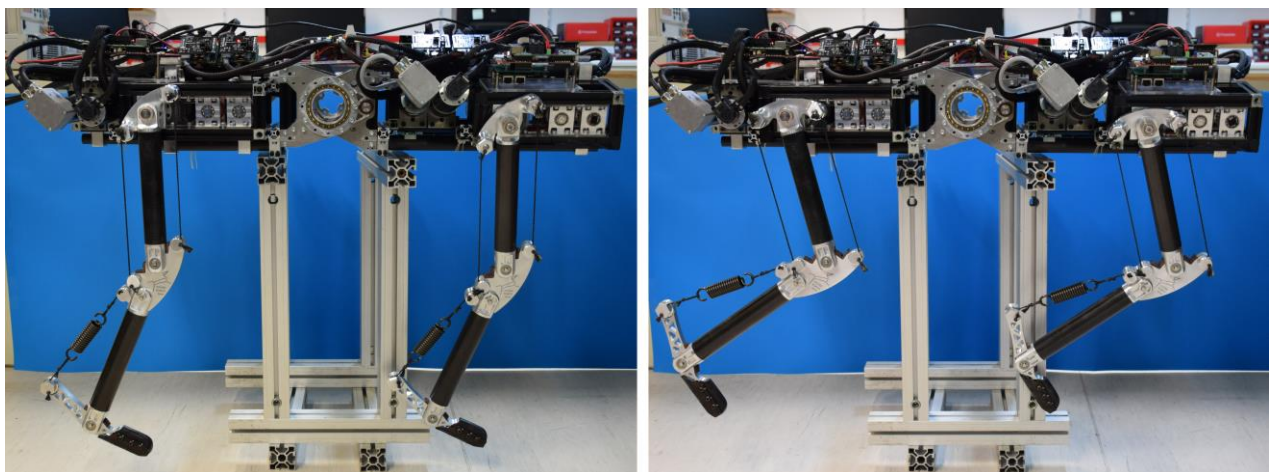
Εικόνα 5-9. Μετρήσεις γωνιακών θέσεων στην πρώτη δοκιμή της περιφερειακής μονάδας ελέγχου.



Εικόνα 5-10. Μετρήσεις γωνιακής θέσης της άρθρωσης του γοφού (hip) στο τελικό πείραμα.



Εικόνα 5-11. Μετρήσεις γωνιακής θέσης της άρθρωσης του γονάτου (knee) στο τελικό πείραμα.



Εικόνα 5-12. Στιγμιότυπα του ρομπότ «Λαίλαψ II» από το τελικό πείραμα που πραγματοποιήθηκε.

6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του νέου ηλεκτρονικού συστήματος του τετράποδου ρομπότ «Λαίλαψ». Καταρχάς, μελετήθηκε το αρχικό ηλεκτρονικό σύστημα, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν πειράματα προκειμένου να διευκρινιστούν οι αδυναμίες του αρχικού σχεδιασμού και να προσδιοριστούν οι ιδιαιτερότητες του ρομπότ. Στις πρώτες δοκιμές παρατηρήθηκαν αρκετά προβλήματα, όπως η ασταθής λειτουργία των κινητήρων και η συχνή ανεπιθύμητη επανεκκίνηση του συστήματος. Για την επίλυση των προβλημάτων αυτών πραγματοποιήθηκε ενίσχυση στα σήματα ελέγχου, η οποία έγινε με την προσάρτηση επισκευαστικών πλακετών που υλοποιούσαν το κύκλωμα ενός ενισχυτή κοινού εκπομπού. Με τη συστηματική ανάλυση του αρχικού συστήματος παρατηρήθηκαν και άλλες αδυναμίες, όπως η κακή τροφοδοσία του κυκλώματος οπτικής σύζευξης, η λανθασμένη επιλογή των ασφαλειών και οι προβληματικές καλωδιώσεις. Πραγματοποιήθηκαν αλλαγές και έγινε δοκιμή του συνολικού συστήματος στην οποία βρέθηκε αξιόπιστο. Με τις βελτιωτικές ενέργειες που έγιναν στο αρχικό σύστημα δεν επιλύθηκαν όλα τα προβλήματα, αλλά αυξήθηκε σημαντικά η ηλεκτρική ευστάθεια του ρομπότ.

Ακολούθησε ο σχεδιασμός του νέου ηλεκτρονικού συστήματος με απώτερο στόχο να επιτευχθεί ηλεκτρική ευστάθεια και να υλοποιηθεί το απαραίτητο υλικό για την πραγμάτωση της νέας αρχιτεκτονικής του συστήματος ελέγχου. Διατηρήθηκε η χρήση εξωτερικής τροφοδοσίας από δύο ανεξάρτητα εργαστηριακά τροφοδοτικά και κατασκευάστηκε η νέα πλακέτα παροχής υψηλής ισχύος. Για την επίλυση των προβλημάτων στο κύκλωμα οπτικής σύζευξης, αλλά και για την παροχή της δυνατότητας εύκολης αποσφαλμάτωσης του υλικού, έγινε επανασχεδιασμός της πλακέτας επέκτασης των οδηγών των κινητήρων. Η κεντρική μονάδα ελέγχου του αρχικού συστήματος αντικαταστάθηκε με περιφερειακές μονάδες ελέγχου που έχουν ως πυρήνα τις αναπτυξιακές πλακέτες LAUNCHXL-F28379D της εταιρείας Texas Instruments. Έγινε σχεδιασμός και υλοποίηση πλακετών, οι οποίες προσδέθηκαν στις αναπτυξιακές πλακέτες και επέκτειναν τις δυνατότητές τους, προσθέτοντας τις απαραίτητες διεπαφές για την επικοινωνία με τα υπόλοιπα υποσυστήματα.

Σημαντικό μέρος της εργασίας που εκπονήθηκε ήταν ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή TMS320F28379D με κυριότερο στόχο τον έλεγχο των αρθρώσεων του ρομπότ. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτός έγινε παραμετροποίηση των περιφερειακών υποσυστημάτων του μικροελεγκτή και υλοποιήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα με χρήση της βιβλιοθήκης Digital Control Library της εταιρείας Texas Instruments. Έχοντας υλοποιήσει το απαραίτητο υλικό και λογισμικό για τον έλεγχο των αρθρώσεων του ρομπότ έγιναν πειράματα στο τελικό σύστημα το οποίο βρέθηκε ιδιαίτερα αξιόπιστο.

Η ενασχόληση με ένα τόσο εκτεταμένο και σύνθετο ρομποτικό σύστημα ήταν πραγματική πρόκληση. Ωστόσο, θεωρούμε ότι με την παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν τα κατάλληλα βήματα, ώστε να χτιστεί μία γερή βάση για την περαιτέρω εξέλιξη του ρομπότ.

6.2 Μελλοντική Εργασία

Είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν βελτιώσεις και αρκετές επεκτάσεις στο υπάρχον ηλεκτρονικό σύστημα του ρομπότ «Λαίλαψ II», ανάλογα με τη γενικότερη κατεύθυνση της εξέλιξής του. Ύστερα από δοκιμές και επιβεβαίωση της ορθότητας της παρούσας αρχιτεκτονικής και υλοποίησης, θα ήταν ρεαλιστικός στόχος να

πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες αλλαγές στο σύστημα ενεργειακής τροφοδοσίας, ώστε η λειτουργία του ρομπότ να βασίζεται σε μία μόνο πηγή ηλεκτρικής ενέργειας όπως ένα εργαστηριακό τροφοδοτικό ή κατάλληλη συστοιχία συσσωρευτών ιόντων λιθίου πολυμερούς (Lithium-Ion Polymer ή LiPo). Βέβαια, πριν την εφαρμογή αυτής αλλαγής είναι απαραίτητο να έχει εξασφαλιστεί η προστασία των μηχανικών μερών σε περίπτωση αποτυχίας των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων, με την κατάλληλη τοποθέτηση Endstops στον σκελετό του ρομπότ, συνδεδεμένων ηλεκτρικά με τα υποσυστήματα οδήγησης. Σημαντική βελτίωση στο σύστημα ενεργειακής τροφοδοσίας θα ήταν και η προσθήκη κυκλώματος για την προστασία αυτής της μοναδικής πηγής από υπερτάσεις, με χρήση ειδικών διόδων γρήγορης απόκρισης σε απότομες διακυμάνσεις της γραμμής υψηλής ισχύος (Transient-Voltage-Suppression diode ή TVS).

Σε μία μελλοντική υλοποίηση του προγράμματος που δημιουργήθηκε, θα ήταν χρήσιμη η εκμετάλλευση και των δύο πυρήνων του μικροελεγκτή TMS320F28379D, διαχωρίζοντας κατάλληλα τη ροή του κώδικα, προκειμένου ο έλεγχος κάθε άρθρωσης να πραγματοποιείται από κάθε πυρήνα ξεχωριστά. Επίσης, η προοπτική χρήσης των μονάδων επιτάχυνσης του νόμου ελέγχου (CLAs) θα προσφέρει τη δυνατότητα να εφαρμοστούν πιο σύνθετοι αλγόριθμοι ελέγχου, διατηρώντας την επίδοση σε υψηλό επίπεδο. Επιπρόσθετα, με τη χρήση των διαθέσιμων χρονιστών (TIMER0, TIMER1 ή TIMER2), μπορεί να επιτευχθεί συχνότητα του βρόχου ελέγχου έως και 819 kHz.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ελέγχθηκε πειραματικά η χρήση ενός αυξητικού κωδικοποιητή απολύτου αναλογικού σήματος και παρατηρήθηκε ηλεκτρικός θόρυβος που θα μπορούσε δυνητικά να αποτρέψει την ορθή αρχικοποίηση των γωνιακών θέσεων των αρθρώσεων. Στο μέλλον, με τη μελέτη των χαρακτηριστικών του θορύβου, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι υπάρχουσες υλοποιήσεις RC φίλτρων στις πλακέτες TMS320F28379D Extension Board V1.0 και να επικολληθούν οι κατάλληλοι πυκνωτές για την αποκοπή του. Επίλυση αυτού του προβλήματος θα αποτελούσε και η υλοποίηση στο πρόγραμμα ενός ψηφιακού φίλτρου, όπως το μη γραμμικό φίλτρο μεσαίας τιμής (Median).

7 Βιβλιογραφία

- [1] BostonDynamics, "Atlas, The World's Most Dynamic Humanoid", [Online]. Available: <https://www.bostondynamics.com/atlas>.
- [2] BostonDynamics, "LS3 - Legged Squad Support Systems", [Online]. Available: <https://www.bostondynamics.com/ls3>.
- [3] BostonDynamics, "SpotMini, Good Things Come in Small Packages", [Online]. Available: <https://www.bostondynamics.com/spot-mini>.
- [4] C. Brown, V. Dana and B. Sarah, "Efficiency and effectiveness analysis of a new direct drive miniature quadruped robot", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, 2013.
- [5] M. Buehler, R. Playter και M. Raibert, "Robots Step Outside", *Int. Symp. Adaptive Motion of Animals and Machines*, Ilmenau, Germany, 2005.
- [6] D. DiLorenzo, "Design and implementation of a quadrupedal robot", *Diploma Thesis*, MIT, Boston, 1987.
- [7] Z. HongChao, G. HaiBo, D. ZongQuan, D. Liang and L. Zhen, "A review of heavy-duty legged robots", *Science China Technological Sciences*, 2013.
- [8] D. Hyun, S. Seok, J. Lee and S. Kim, "High speed trot-running: Implementation of a hierarchical controller using proprioceptive impedance control on the MIT Cheetah", *The International Journal of Robotics Research*, 2014, pp. 1417-1445.
- [9] H. Komatsu, G. Endo, R. Hodoshima, S. Hirose and E. F. Fukushima, "How to optimize the slope walking motion by the quadruped walking robot", *Advanced Robotics*, 2015, pp. 1497-1509.
- [10] M. Raibert, A. Morecki, G. Bianchi, K. Kedzior, "Dynamic stability and resonance in a one-legged hopping machine", *Conference on Theory and Practice of Robots and Anthropomorphic Systems*, Warsaw, 1983, pp. 352-367.
- [11] M. Raibert, H. Hanafusa, H. Inoue, "Four-legged running with one-legged algorithms", *Second International Symposium on Robotics Research*, Cambridge, 1985, pp. 311-315.
- [12] M. Raibert, J. Hodgins, "Animation of dynamic legged locomotion", *SIGGRAPH*, Las Vegas, 1991, pp. 349-358.
- [13] M. Raibert, M. Chepponis, H. Brown, "Running on four legs as though they were one", *IEEE J. Robotics and Automation*, 1986, pp. 70-82.
- [14] L. Yibin, L. Bin, R. Jiuhong and R. Xuewen, "Research of mammal bionic quadruped robots: A review", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Qingdao, 2011.
- [15] Κ. Δ. Ασημακόπουλος, «Σχεδιασμός και Κατασκευή Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Υποσυστημάτων Τετράποδου Ρομπότ», *Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΠ*, Αθήνα, 2017.

8 Datasheets

- [16] 2N7002, [N-Channel Enhancement Mode Mosfet.](#)
- [17] 6N137, VO2630, [High Speed Optocoupler, Single and Dual, 10 MBd.](#)
- [18] ATX3510HR-190W, [PCIe/104 DC/DC Power Supply](#)
- [19] AZBDC12A8, [Analog Servo Drive.](#)
- [20] BC846, [65V 100mA NPN general-purpose transistor.](#)
- [21] CMA34CR, [cpuModule.](#)
- [22] DM35820-HR, [Versatile High Speed Digital I/O.](#)
- [23] FMMT624, [125V NPN LOW SATURATION TRANSISTOR IN SOT23.](#)
- [24] HEDL-5640, [Encoder Line Drivers.](#)
- [25] LM1117, [800-mA Low-Dropout Linear Regulator.](#)
- [26] MAX5035, [1A 76V High-Efficiency MAXPower Step-Down DC-DC Converter.](#)
- [27] RMB28, [Angular magnetic encoder module.](#)
- [28] S6, [Optical Shaft Encoder.](#)
- [29] SN75175, [Quadruple Differential Line receiver.](#)
- [30] TMS320F2837xD Dual-Core Delfino Microcontrollers, [Technical Reference Manual.](#)
- [31] UEI25-050-D48, [Single Output Isolated 25-Watt DC/DC Converter.](#)

9 Παράρτημα A: Main.c

```
// Included Files
#include "F28x_Project.h"
#include "DCL.h"
#include "AdcSetup.h"
#include "Posspeed.h"

#define DIR1_GPIO    123
#define DIR2_GPIO    122
#define SP           2500

// Function Prototypes
__interrupt void epwm1_isr(void);
__interrupt void epwm2_isr(void);

// Global Variables
int AdcaResult0, AdcbResult0, AdcaResult1, AdcbResult1, dc;
float analog1 = 0.0f;

DCL_PID pid1 = PID_DEFAULTS;
float rk1;
float yk1;
float lk1;
float uk1;
float Duty1;

DCL_PID pid2 = PID_DEFAULTS;
float rk2;
float yk2;
float lk2;
float uk2;
float Duty2;

// eQEP variables
POSSPEED qep_posspeed=POSSPEED_DEFAULTS;
Uint16 int1cnt = 0;
Uint16 int2cnt = 0;

float desired_pos_high = 360.0;
float desired_pos_low = 0.0;
float desired_pos = 360.0;
long int raw_pos1, raw_pos2, raw_pos3;
unsigned long int pos_init = 2147483647; //0x7fffffff
float gwnia1, gwnia2, gwnia3;
float ngwnia1, ngwnia2, ngwnia3;
int dir = 0;

// Main
void main(void)
{
    // Initialise PID1 controller variables
```

```

pid1.Kp = 1.0f;
pid1.Ki = 0.0f;
pid1.Kd = 0.1f;
pid1.Kr = 1.0f;
pid1.c1 = 124.89f;
pid1.c2 = -0.987511f;
pid1.d2 = 0.0f;
pid1.d3 = 0.0f;
pid1.i10 = 0.0f;
pid1.i14 = 1.0f;
pid1.Umax = 0.3f;
pid1.Umin = -0.3f;
rk1 = 0.0f;
lk1 = 1.0f; // control loop not saturated

// Initialise PID2 controller variables
pid2.Kp = 1.0f;
pid2.Ki = 0.0f;
pid2.Kd = 0.2f;
pid2.Kr = 1.0f;
pid2.c1 = 124.89f;
pid2.c2 = -0.987511f;
pid2.d2 = 0.0f;
pid2.d3 = 0.0f;
pid2.i10 = 0.0f;
pid2.i14 = 1.0f;
pid2.Umax = 0.3f;
pid2.Umin = -0.3f;
rk2 = 0.0f;
lk2 = 1.0f; // control loop not saturated

// Initialize System Control:
// PLL, WatchDog, enable Peripheral Clocks
InitSysCtrl();

// enable PWM1 and PWM2
CpuSysRegs.PCLKCR2.bit.EPWM1 = 1;
CpuSysRegs.PCLKCR2.bit.EPWM2 = 1;

// Initialize GPIO
InitGpio();
GPIO_SetupPinMux(DIR1_GPIO, GPIO_MUX_CPU1, 0);
GPIO_SetupPinOptions(DIR1_GPIO, GPIO_OUTPUT, GPIO_PUSH_PULL);
GPIO_SetupPinMux(DIR2_GPIO, GPIO_MUX_CPU1, 0);
GPIO_SetupPinOptions(DIR2_GPIO, GPIO_OUTPUT, GPIO_PUSH_PULL);

// Initialize eQEP and ePWM peripherals
InitEQep1Gpio();
InitEQep2Gpio();
InitEQep3Gpio();
InitEPwm1Gpio();

```

```

InitEPwm2Gpio();

// Clear all __interrupts and initialize PIE vector table:
// Disable CPU __interrupts
DINT;

// Initialize the PIE control registers to their default state.
InitPieCtrl();

// Disable CPU __interrupts and clear all CPU __interrupt flags:
IER = 0x0000;
IFR = 0x0000;

//
// Initialize the PIE vector table with pointers to the shell Interrupt
// Service Routines (ISR).
InitPieVectTable();

// Interrupts that are used in this example are re-mapped to
// ISR functions found within this file.
EALLOW;
// This is needed to write to EALLOW protected registers
PieVectTable.EPWM1_INT = &epwm1_isr;
PieVectTable.EPWM2_INT = &epwm2_isr;
EDIS;
// This is needed to disable write to EALLOW protected registers

// Initialize eQEP peripherals
qep_osspeed.init(&qep_osspeed);

// Configure the ADC and power it up
CpuSysRegs.PCLKCR13.bit.ADC_A = 1;
ConfigureADC();

// Setup the ADCs for software conversions
SetupADCSoftware();

// Initialize ePWM peripherals
EALLOW;
CpuSysRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 0;
EDIS;
initEpwm();
EALLOW;
CpuSysRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1;
EDIS;

// Enable CPU INT3 which is connected to EPWM1-3 INT:
IER |= M_INT3;

// Enable TINT0 in the PIE: Group 3 __interrupt 1
PieCtrlRegs.PIEIER3.bit.INTx1 = 1;

```

```

PieCtrlRegs.PIEIER3.bit.INTx2 = 1;

// Enable global Interrupts and higher priority real-time debug events:
EINT; // Enable Global __interrupt INTM
ERTM; // Enable Global realtime __interrupt DBGGM

for (;;)
{
    //Main loop
    rk1 = 0.0f; //setpoint to 0 degrees
    rk2 = 0.0f;
    DELAY_US(5*1000000); //wait for 5 sec
    rk1 = -0.5f; //setpoint to -180 degrees
    rk2 = -0.5f;
    DELAY_US(5*1000000); //wait for 5 sec
    rk1 = -1.0f; //setpoint to -360 degrees
    rk2 = -1.0f;
    DELAY_US(5*1000000); //wait for 5 sec
    rk1 = -0.5f; //setpoint to -180 degrees
    rk2 = -0.5f;
    DELAY_US(5*1000000); //wait for 5 sec
    rk1 = 0.0f; //setpoint to 0 degrees
    rk2 = 0.0f;
    DELAY_US(5*1000000); //wait for 5 sec
    rk1 = 0.5f; //setpoint to 180 degrees
    rk2 = 0.5f;
    DELAY_US(5*1000000); //wait for 5 sec
    rk1 = 1.0f; //setpoint to 360 degrees
    rk2 = 1.0f;
    DELAY_US(5*1000000); //wait for 5 sec
    rk1 = 0.5f; //setpoint to 180 degrees
    rk2 = 0.5f;
    DELAY_US(5*1000000); //wait for 5 sec

    // Uncomment the following line to read analog inputs
    // Results are saved in variables
    // AdcaResult0,AdcaResult1,AdcbResult0,AdcbResult1
    // ReadAnalog();
}
}

// prdTicK - EPWM1 Interrupts once every 4 QCLK counts (one period)
__interrupt void epwm1_isr(void)
{
    if (int1cnt == 1) //20khz control loop frequency
    {
        EALLOW;
        //Uncomment the following lines to enable reading of the 3rd encoder
        //-----
        // Read raw values of eQEPs
        // qep_rosspeed.calc(&qep_rosspeed);
    }
}

```

```

        ///Read raw position eQEP3
        // if ((unsigned long int) qep_osspeed.raw_pos3 > pos_init)
        // raw_pos3 = (unsigned long int) qep_osspeed.raw_pos3 - pos_init;
        // else
        // raw_pos3 = -(pos_init - (unsigned long int)qep_osspeed.raw_pos3);
//-----

// Control Motor 1 Knee (BLDC)

// 1st Encoder Read
// Read raw values of eQEPs
qep_osspeed.calc(&qep_osspeed);

// Read raw position eQEP1
if ((unsigned long int) qep_osspeed.raw_pos1 > pos_init)
    raw_pos1 = (unsigned long int) qep_osspeed.raw_pos1 - pos_init;
else
    raw_pos1 = -(pos_init - (unsigned long int) qep_osspeed.raw_pos1);

// Translate raw value to degrees
gwnia1 = 360.0f * (raw_pos1 * 8.0f * 26.0f)
        / (2000.0f * 343.0f * 48.0f);

// Normalize the value of gwnia1
ngwnia1 = (gwnia1 * 1.0f) / 360.0f;

// Run PID controller
uk1 = DCL_runPID_C4(&pid1, rk1, ngwnia1, lk1);

// Set direction
if (uk1 >= 0.0f)
    GPIO_WritePin(DIR1_GPIO, 0);
else
{
    GPIO_WritePin(DIR1_GPIO, 1);
    uk1 = -uk1;
}

// Update PWM duty cycle
EPwm1Regs.CMPA.bit.CMPA = (1.0f - uk1) * SP;

    int1cnt = 0;
}
int1cnt++;

EDIS;
// Clear INT flag for this timer
EPwm1Regs.ETCLR.bit.INT = 1;
//
// Acknowledge this __interrupt to receive more __interrupts from group 3
//

```

```

PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP3;

}

__interrupt void epwm2_isr(void)
{
    if (int2cnt == 1)    //20khz control loop frequency
    {
        EALLOW;
        // Control Motor 2 Hip (Brushed DC)

        // Read raw values of eQEPs
        qep_osspeed.calc(&qep_osspeed);
        if ((unsigned long int) qep_osspeed.raw_pos2 > pos_init)
            raw_pos2 = (unsigned long int) qep_osspeed.raw_pos2 - pos_init;
        else
            raw_pos2 = -(pos_init - (unsigned long int) qep_osspeed.raw_pos2);

        // Translate raw value to degrees
        gwnia2 = 360.0f * (raw_pos2 * 12.0f * 26.0f)
                / (2000.0f * 637.0f * 48.0f);

        // Normalize the value of gwnia2
        ngwnia2 = (gwnia2 * 1.0f) / 360.0f;

        // Run PID controller
        uk2 = DCL_runPID_C4(&pid2, rk2, ngwnia2, lk2);

        // Set direction
        if (uk2 >= 0.0f)
            GPIO_WritePin(DIR2_GPIO, 0);
        else
        {
            GPIO_WritePin(DIR2_GPIO, 1);
            uk2 = -uk2;
        }

        // Update PWM duty cycle
        EPwm2Regs.CMPA.bit.CMPA = (1.0f - uk2) * SP;

        // Reset interrupt counter
        int2cnt = 0;
    }
    int2cnt++;
    EDIS;

    // Clear INT flag for this timer
    EPwm2Regs.ETCLR.bit.INT = 1;
    // Acknowledge this __interrupt to receive more __interrupts from group 3
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP3;
}

```

```
void ReadAnalog(void)
{
    //convert, wait for completion, and store results
    //start conversions immediately via software, ADCA
    AdcaRegs.ADCSOCFRC1.all = 0x0003; //SOC0 and SOC1

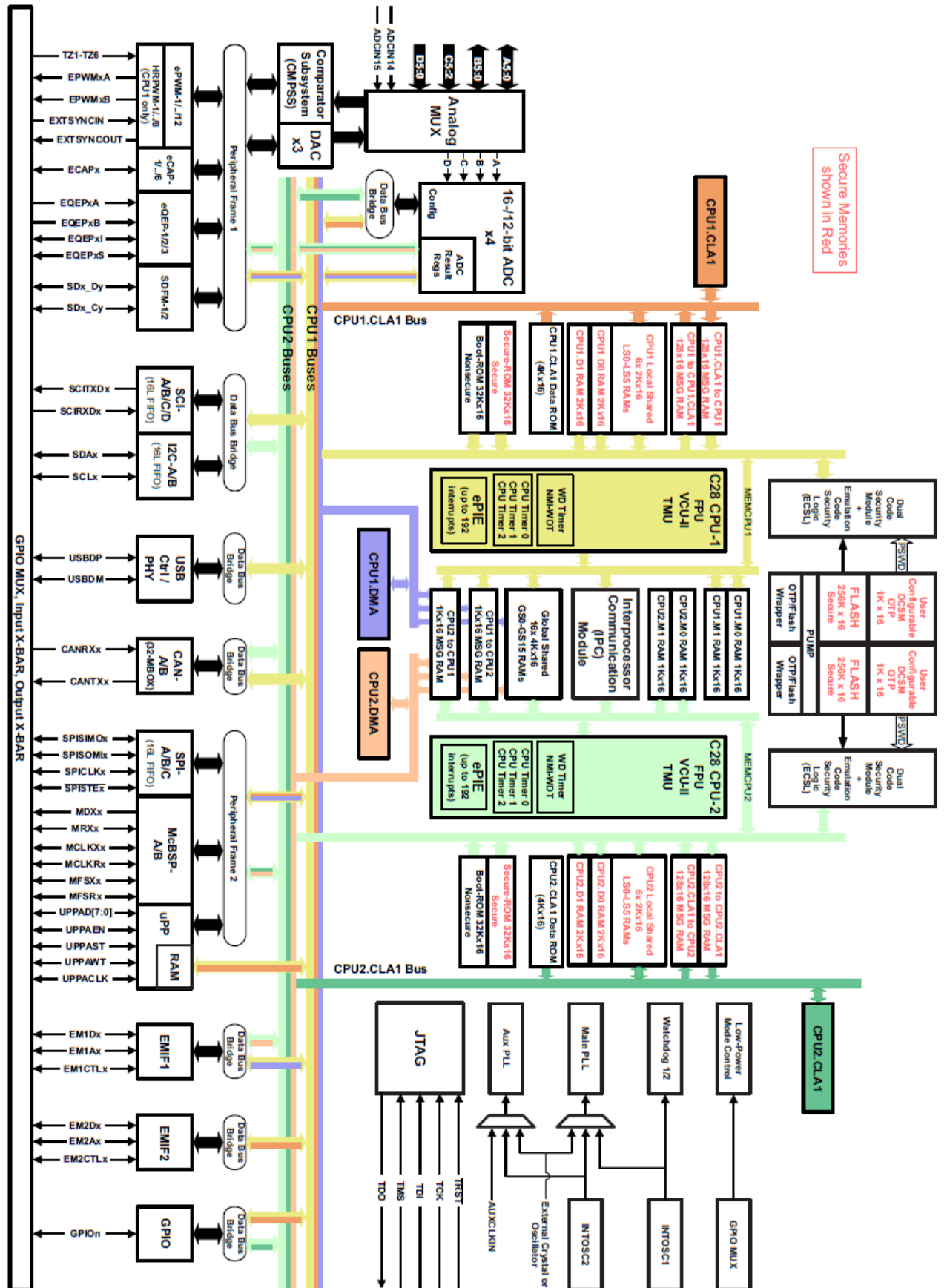
    //start conversions immediately via software, ADCB
    AdcbRegs.ADCSOCFRC1.all = 0x0003; //SOC0 and SOC1

    //wait for ADCA to complete, then acknowledge flag
    while (AdcaRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT1 == 0)
        ;
    AdcaRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1;

    //wait for ADCB to complete, then acknowledge flag
    while (AdcbRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT1 == 0)
        ;
    AdcbRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1;

    //store results
    AdcaResult0 = AdcaResultRegs.ADCRESULT0;
    AdcaResult1 = AdcaResultRegs.ADCRESULT1;
    AdcbResult0 = AdcbResultRegs.ADCRESULT0;
    AdcbResult1 = AdcbResultRegs.ADCRESULT1;
}
// End of file
```

10 Παράρτημα B: TMS320F28379D Functional Block Diagram



11 Παράρτημα Γ: Bill Of Materials

Πίνακας 11-1. Λίστα υλικών για την κατασκευή της πλακέτας Power Distribution Board V2.0.

Parts	Description/Value	Package	MPN	Quantity
C5	CAPACITOR 100uf 16V	-	-	1
C60	CAPACITOR 1000uf 100V	-	-	1
F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8	SMD FUSE FAST BLOW	610-269	0451010.MRL	8
P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8	MOLEX FEMALE 3-PIN CONNECTOR	-	39-30-3035	8
CON+, CON-	SCREW TERMINAL PITCH 10.16	1016	691256610002	2
UEI25-050-D48	UEI25-050-D48	-	UEI25-050-D48	1

Πίνακας 11-2. Λίστα υλικών για την κατασκευή της πλακέτας TMS320F28379D Extension Board V1.0.

Parts	Description/Value	Package	MPN	Quantity
CAN1, CAN2	DNP	0805	-	2
J3.3, JZ1, JZ2	PINHEADER 1X2 2.54 PITCH	-	-	3
PWR	SCREW TERMINAL 1X2 2.54 PITCH	-	-	1
U4	LDO	SOT223	LM1117MPX- 3.3/NOPB	1
RD11, RD21	RESISTOR 1.8kΩ	0805	-	2
C11, C20, C31	CAPACITOR 100nF 16V	0603	-	3
C50, C331	CAPACITOR 100nF 16V	0805	-	2
C51, C332	CAPACITOR 10uF 16V	0805	-	2
R10, R11, R12, R20, R21, R22, R30, R31, R32	RESISTOR 120Ω	0805	-	9
R3.3, R5.0	RESISTOR 1kΩ	0805	-	2
ENC1, ENC2, ENC3	IDC-CONNECTOR 2X5 2.54 PITCH	-	-	3
RD12, RD22	RESISTOR 3.3kΩ	0805	-	2
C10, C21, C30	CAPACITOR 4.7uF 16V	0603	-	3
LaunchPad XL	LAUNCHXL-F28379D		LAUNCHXL- F28379D	1
L3.3, L5.0	LED SMD Red Diffused	0603	HSMH-C190	2
MOTOR1, MOTOR2	RJ45 FEMALE CONNECTOR	RJ45	-	2
ANALOG1, ANALOG2	RJ9 FEMALE CONNECTOR	RJ9	-	2
U1, U2, U3	SN75175	SOIC-16	SN75175DR	3

Πίνακας 11-3. Λίστα υλικών για την κατασκευή της πλακέτας Driver Ext. Board V2.0.

Parts	Description/Value	Package	MPN	Quantity
C1	CAPACITOR 100uF 100V	-	860040875005	1
LED1, LED2, LED3	LED SMD Red Diffused	0603	HSMH-C190	3
DEBUG	IDC-CONNECTOR 2X5 2.54 PITCH	-	-	1
R11, R21	RESISTOR 100kΩ	0603	-	2
C12	CAPACITOR 100nF 16V	0603	-	1
C14	CAPACITOR 100nF 16V	0603	-	1
RP3	RESISTOR 10kΩ	0805	-	1
R14, R24	RESISTOR 1kΩ	0603	-	2
C11	CAPACITOR 4.7uf 16V	0805	-	1
C13	CAPACITOR 4.7uf 16V	0805	-	1
RP1, RP2	RESISTOR 1kΩ	0603	-	2
R10, R13, R20, R23	RESISTOR 240Ω	0603	-	4
Q11, Q12, Q21, Q22	MOSFET NPN 2N7002	SOT-23	2N7002P,215	4
R15, R25	RESISTOR 330Ω	0603	-	2
MOTOR, POWER	MOLEX FEMALE 3-PIN CONNECTOR	-	39-30-3035	2
R12, R22	RESISTOR 390Ω	0603	-	2
C10, C20, CDIR, CPWM	DNP	0603	-	4
OPTOCOUPLER	OPTOCOUPLER	DIL08	VO2630	1
CONTROL, HALL	RJ45 FEMALE CONNECTOR	RJ45	-	2