



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ασύρματος Βιομηχανοτρονικός Έλεγχος Προσθετικού Άνω Άκρου

Κωνσταντίνεας Πέτρος

Επιβλέπων Καθηγητής: κ. Ευάγγελος Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2022

Περίληψη

Η εκτεταμένη φυσιολογική ιδιοδεκτικότητα (Extended Physiological Proprioception, EPP) είναι μια τοπολογία ελέγχου προσθετικών άκρων η οποία βασίζεται στην εκμάθηση του χειρισμού του προσθετικού άκρου από τον οργανισμό του ακρωτηριασμένου ατόμου. Βασίζεται, δηλαδή, στην χρησιμοποίηση των φυσιολογικών αισθητήριων οργάνων του ανθρώπινου οργανισμού για τον έλεγχο του προσθετικού άκρου και για την απόδοση ανάδρασης της κίνησης του προσθετικού άκρου, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στο ακρωτηριασμένο άτομο να εξασκηθεί στον χειρισμό του προσθετικού άκρου και τελικά να μπορέσει να πετύχει μια ικανοποιητική αίσθηση χειρισμού και λειτουργίας του άκρου. Ο περιορισμός αυτός, της σύνδεσης του προσθετικού άκρου με τους ανθρώπινους αισθητήρες και επενεργητές που βρίσκονται στο εσωτερικό του ανθρώπινου οργανισμού δημιουργεί δύο σημαντικά μειονεκτήματα, τα οποία είναι το μειωμένο αισθητικό αποτέλεσμα της διάταξης και ο αυξημένος κίνδυνος μολύνσεων για τον ανθρώπινο οργανισμό.

Μια από τις λύσεις στα παραπάνω προβλήματα είναι η ανάπτυξη μιας διάταξης που βασίζεται στην ασύρματη μεταφορά της πληροφορίας μεταξύ της διάταξης που βρίσκεται στο εσωτερικό του ανθρώπινου οργανισμού και της διάταξης που βρίσκεται στο προσθετικό άκρο. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε η ιδέα της wireless biomechatronic EPP τοπολογίας ελέγχου. Η διάταξη που εξετάζεται στην παρούσα εργασία αφορά τον έλεγχο της κίνησης ενός προσθετικού χεριού με ένα βαθμό ελευθερίας, χρησιμοποιώντας την δύναμη δύο μυών του ανθρώπινου χεριού ως το σήμα αναφοράς της κίνησης του προσθετικού άκρου. Ταυτόχρονα, το σύστημα επενεργεί στους μυς προσπαθώντας να μεταφέρει στο ακρωτηριασμένο άτομο την αίσθηση της κίνησης του προσθετικού χεριού. Με αυτό τον τρόπο το ακρωτηριασμένο άτομο αφενός θα μπορεί να ελέγχει το προσθετικό άκρο και αφετέρου θα μπορεί να εξασκηθεί στον καλύτερο χειρισμό του μαθαίνοντας να διαχειρίζεται την αίσθηση ανάδρασης που λαμβάνει.

Η υλοποίηση της παραπάνω ιδέας βασίζεται στην χρήση του πρωτοκόλλου ασύρματης επικοινωνίας BLE το οποίο είναι κατάλληλο για εφαρμογές μικρής εμβέλειας και μικρής κατανάλωσης. Ταυτόχρονα, η ιδέα βασίζεται στη χρήση μικροελεγκτών οι οποίοι προσφέρουν την δυνατότητα χρήσης ποικίλων κυκλωμάτων για την λήψη και επεξεργασία σημάτων αλλά και την επενέργηση σε συστήματα και τον έλεγχο τους. Ταυτόχρονα, προσφέρουν την δυνατότητα προγραμματισμού τους για την εκτέλεση πολλών διαδικασιών που είναι απαραίτητες για την επίτευξη της ζητούμενης λειτουργίας με συγκεκριμένο, προσχεδιασμένο τρόπο. Στόχος της εργασίας ήταν επίσης να υλοποιηθεί μια διάταξη για την πραγματοποίηση δοκιμών η οποία θα προσομοιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο το πραγματικό σύστημα και ταυτόχρονα θα προσφέρει τη δυνατότητα επιτυχημένου ελέγχου μέσω λήψης μετρήσεων με υψηλή ακρίβεια και συχνότητα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών απέδειξαν ότι μια τέτοια διάταξη είναι υλοποιήσιμη και επιθυμητά χαρακτηριστικά μπορούν να επιτευχθούν, δημιουργώντας έτσι τις κατάλληλες συνθήκες για περαιτέρω έρευνα στο πεδίο αυτό.

Abstract

Extended Physiological Proprioception (EPP) is a control topology for the control of prosthetic limbs in a manner which aims to enable the amputee with the ability to become accustomed to the functional use of the prosthetic limb. It is based on the use of the natural sense mechanisms of the human body for the control of the prosthetic limb and also the generation of feedback for sensing the motion of the prosthetic limb. This provides the amputee with the capability to practice on the use and control of the prosthesis to finally become accustomed to it to the extent that will allow the amputee to achieve a practical and natural use of the prosthesis. The restriction of using the internal human body sensors and actuators leads to two major disadvantages of this concept. The first is the limited aesthetic effect of the topology and the second is the increased risk for infections of the amputee.

One solution to these limitations is the development of an alternative topology which is based on wireless communication for transferring information between the system which is part of the internal of the human body and the system which is part of the prosthetic limb. Based on this concept, the idea of wireless biomechatronic EPP control topology was developed for controlling a prosthesis. The topology which is reviewed in this thesis is based on the control of the prosthesis according to the control signal generated by the actuation forces of two human hand muscles. The system is using actuators to trigger the same muscles, trying to provide a sense of feedback for the motion and force applied of the prosthesis to the amputee. Therefore, the amputee is able to improve the prosthesis control skills by training using the feedback provided. This results in a better and more natural control of the prosthetic limb with respect to the other topologies and will provide a much more satisfactory result to the amputee after some time.

The implementation of this idea is based on the use of the BLE protocol for wireless communication. BLE is a wireless communication protocol which is suitable for low range and low consumption applications. Furthermore, the use of microcontrollers is utilized. Microcontrollers support a variety of electronic circuits for the measurement and analysis of multiple types of signals. They can also be used for actuating and controlling systems. At the same time, they can be configured in software in order to ensure that all the necessary procedures are executed in a specified and scheduled way. This thesis examines the development of a testing arrangement which is as close as possible to the actual topology of a human based application. The designed system should also be able to provide frequent and accurate measurements to be used in the control loop. The results of the tests conducted on the developed system showed that such a design is possible and the desired characteristics are achievable, thus establishing the necessary foundation for further research.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Ε. Παπαδόπουλο, διευθυντή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ευκαιρία που μου παρείχε να εκπονήσω την παρούσα εργασία καθώς και για την βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον υπεύθυνο μου, μεταδιδακτορικό ερευνητή Μπέρτο Γεώργιο για την άψογη συνεργασία μας καθώς και την υποστήριξη που μου παρείχε σε κάθε στάδιο αλλά και αντικείμενο της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Πασπαλίδη Παναγιώτη, προπτυχιακό φοιτητή του εργαστηρίου, με τον οποίο συνεργαστήκαμε επιτυχώς για την εκπόνηση των εργασιών μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους ανθρώπους που με υποστήριξαν όλο το διάστημα των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Κωνσταντίνος Πέτρος,
Αθήνα, 14^η Νοεμβρίου 2022

*Αφιερώνεται στους γονείς μου, Βασίλη και Χριστίνα,
τον αδερφό μου, Δημήτρη
και την Φωτεινή.*

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
Ευχαριστίες	4
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Σχημάτων	9
Κατάλογος Πινάκων	11
1 Εισαγωγή	12
1.1 Σκοπός Εργασίας	12
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	12
1.2.1 Σωματοτροφοδοτούμενα προσθετικά συστήματα	13
1.2.2 Εξωτερικά τροφοδοτούμενα συστήματα	13
1.2.3 Έλεγχος θέσης κλειστού βρόχου EPP	14
1.2.4 Τηλεχειρισμός	14
1.3 Δομή εργασίας	15
2 Στοιχεία Θεωρίας	16
2.1 Εκτεταμένη Φυσιολογική Ιδιοδεκτικότητα (EPP)	16
2.1.1 Κλασσική και Βιομηχανοτρονική EPP τοπολογίες ελέγχου	16
2.1.2 Ασύρματη βιομηχανοτρονική EPP	16
2.2 Πρωτόκολλο διεπαφής – BLE	19
2.2.1 Πρωτόκολλο Bluetooth Low Energy	19
2.2.2 Πρωτόκολλο GAP	20
2.2.3 Πρωτόκολλο GATT	23
2.3 Έλεγχος συστήματος με μικροελεγκτή - SoC	25
2.3.1 Προγραμματισμός μικροελεγκτών	27
2.3.2 Έλεγχος με την χρήση μικροελεγκτών	27
3 Ανάλυση - Σχεδιασμός	32
3.1 Εισαγωγή	32
3.2 Επιλογή μικροελεγκτών	32
3.2.1 Δυνατότητα BLE πρωτοκόλλου	32
3.2.2 Δυνατότητες SoC	33
3.2.3 Περιφερειακά	34
3.2.4 Τροφοδοσία	35
3.3 Σύστημα Master	36
3.3.1 Αισθητήρες δύναμης μυών	36

3.3.2	Κινητήρες	40
3.3.3	Σχεδιασμός/Επιλογή ελέγχου	44
3.3.4	Οδήγηση master κινητήρων	47
3.3.5	Σχεδιασμός υλοποίησης GAP και GATT protocol	49
3.4	Σύστημα Slave.....	52
3.4.1	Slave κινητήρας.....	52
3.4.2	Έλεγχος slave κινητήρα	54
3.4.3	Οδήγηση slave κινητήρα	56
3.4.4	Σχεδιασμός GAP protocol και GATT protocol υλοποίησης	58
4	Υλοποίηση	60
4.1	Εισαγωγή.....	60
4.2	Σύστημα Master.....	60
4.2.1	Ρουτίνα ρύθμισης παραμέτρων πρωτοκόλλου GAP	60
4.2.2	Ρουτίνα ρύθμισης παραμέτρων πρωτοκόλλου GATT	61
4.2.3	Ρουτίνα δειγματοληψίας-υπολογισμού δύναμης	64
4.2.4	Ρουτίνα υπολογισμού θέσης κινητήρων	66
4.2.5	Ρουτίνα ελέγχου κινητήρων	69
4.2.6	Ρουτίνα συντονισμού.....	74
4.3	Σύστημα Slave.....	75
4.3.1	Ρουτίνα ρύθμισης παραμέτρων πρωτοκόλλου GAP	75
4.3.2	Ρουτίνα ρύθμισης παραμέτρων πρωτοκόλλου GATT	76
4.3.3	Ρουτίνα υπολογισμού θέσης κινητήρα.....	78
4.3.4	Ρουτίνα ελέγχου κινητήρα	79
4.3.5	Ρουτίνα συντονισμού.....	80
5	Αποτελέσματα	82
5.1	Εισαγωγή.....	82
5.2	Δοκιμές υποσυστημάτων	82
5.2.1	Δοκιμή μέτρησης παλμών κωδικοποιητή	82
5.2.2	Δοκιμή μεταφοράς μέτρησης FSR μέσω BLE	85
5.3	Αποτελέσματα συστήματος	89
5.3.1	Δοκιμές FSR – Ελέγχου Slave κινητήρα	89
5.3.2	Δοκιμές θέσης slave κινητήρα – θέσης master κινητήρων	91
5.3.3	Συνολική δοκιμή συστήματος	94
6	Συμπεράσματα	96
6.1	Συμπεράσματα εργασίας	96
6.2	Μελλοντική εργασία	97
7	Βιβλιογραφία	99

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1.	Τοπολογία ασύρματης Biomechatronic EPP.	17
Σχήμα 2-2.	Συστήματα τοπολογίας master – slave.	18
Σχήμα 2-3.	Διαδικασίες διαφήμισης και ανίχνευσης GAP.	22
Σχήμα 2-4.	Δομή πληροφορίας στο πρωτόκολλο GATT.	24
Σχήμα 2-5.	Δομή τυπικού μικροελεγκτή.	25
Σχήμα 2-6.	Τυπική δομή System on Chip (SoC).	26
Σχήμα 2-7.	Σχέδιο Digital to Analog Converter 2bit.	28
Σχήμα 2-8.	Κύκλωμα 8bit digital to analog converter.	30
Σχήμα 2-9.	Σήματα PWM ίδιας συχνότητας – διαφορετικού duty cycle.	31
Σχήμα 3-1.	Αισθητήρας FSR 400 της Interlink Electronics.	37
Σχήμα 3-2.	Κύκλωμα σύνδεσης αισθητήρα FSR.	38
Σχήμα 3-3.	Απόκριση αισθητήρα FSR 1.	39
Σχήμα 3-4.	Απόκριση αισθητήρα FSR 2.	40
Σχήμα 3-5.	Connector pinout του master κινητήρα.	43
Σχήμα 3-6.	Συνδέσεις master κινητήρα.	44
Σχήμα 3-7.	Ισοδύναμο κύκλωμα dc κινητήρα.	45
Σχήμα 3-8.	Συνδέσεις driver master κινητήρων.	49
Σχήμα 3-9.	Συνδέσεις encoder slave κινητήρα.	54
Σχήμα 3-10.	Συνδέσεις driver slave κινητήρα.	58
Σχήμα 4-1.	Ρουτίνες GAP peripheral.	61
Σχήμα 4-2.	Ρουτίνες GATT server.	63
Σχήμα 4-3.	Ρουτίνα αποστολής ειδοποιήσεων FSR.	63
Σχήμα 4-4.	Ρουτίνα δειγματοληψίας μετρήσεων FSR.	65
Σχήμα 4-5.	Ρουτίνα ελέγχου ειδοποιήσεων χαρακτηριστικού FSR.	66
Σχήμα 4-6.	Λογικό διάγραμμα περιφερειακών GPIO, PPI, TIMER.	68
Σχήμα 4-7.	Ρουτίνα υπολογισμού περιστροφής κινητήρα.	69
Σχήμα 4-8.	Modes ελέγχου master κινητήρων.	72
Σχήμα 4-9.	Ρουτίνα υπολογισμού σήματος ελέγχου PD.	73
Σχήμα 4-10.	Ρουτίνα οδήγησης master κινητήρα.	73
Σχήμα 4-11.	Ρουτίνα συντονισμού master μικροελεγκτή.	74
Σχήμα 4-12.	Επαναληπτικές ρουτίνες συγκεκριμένης συχνότητας.	75
Σχήμα 4-13.	Ρουτίνες ρύθμισης GAP Central.	76
Σχήμα 4-14.	Ρουτίνα ανακάλυψης χαρακτηριστικών GATT server.	77
Σχήμα 4-15.	Ρουτίνες διαχείρισης FSR και ENCODER_POS χαρακτηριστικών.	78
Σχήμα 4-16.	Ρουτίνα συντονισμού slave μικροελεγκτή.	81

Σχήμα 4-17.	Επαναλαμβανόμενες ρουτίνες εγγραφής χαρακτηριστικού ENCODER_POS και υλοποίησης control loop.	81
Σχήμα 5-1.	Παλμοί καναλιών A των κωδικοποιητών των master κινητήρων, για τάση τροφοδοσίας 4V.	83
Σχήμα 5-2.	Μετρήσεις παλμών μικροελεγκτή για τάση τροφοδοσίας 4V	84
Σχήμα 5-3.	Παλμοί καναλιών A των κωδικοποιητών των master κινητήρων, για τάση τροφοδοσίας ίση με 4,2V.....	85
Σχήμα 5-4.	Μετρήσεις παλμών μικροελεγκτή για τάση τροφοδοσίας 4,2V.....	85
Σχήμα 5-5.	Δοκιμή 1 για ειδοποίηση FSR χαρακτηριστικού.....	86
Σχήμα 5-6.	Δοκιμή 2 για ειδοποίηση FSR χαρακτηριστικού, δεδομένα master.	87
Σχήμα 5-7.	Δοκιμή 2 για ειδοποίηση FSR χαρακτηριστικού, δεδομένα slave.....	87
Σχήμα 5-8.	Δοκιμή ειδοποίησης χαρακτηριστικού FSR.....	88
Σχήμα 5-9.	Πρώτη δοκιμή ελέγχου slave κινητήρα.	90
Σχήμα 5-10.	Δεύτερη δοκιμή ελέγχου slave κινητήρα.	90
Σχήμα 5-11.	Δεδομένα slave μικροελεγκτή, δοκιμή πρώτη.....	91
Σχήμα 5-12.	Δεδομένα master μικροελεγκτή, δοκιμή 1.	92
Σχήμα 5-13.	Δεδομένα slave μικροελεγκτή, δοκιμή 2.....	93
Σχήμα 5-14.	Δεδομένα master μικροελεγκτή, δοκιμή 2.	93
Σχήμα 5-15.	Απόκριση συστήματος slave.	94
Σχήμα 5-16.	Απόκριση master συστήματος.....	95

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Σύγκριση μικροελεγκτών ως προς ασύρματη επικοινωνία	33
Πίνακας 3-2. Σύγκριση μικροελεγκτών ως προς τα γενικά χαρακτηριστικά τους	34
Πίνακας 3-3. Συνδέσεις master κινητήρα.....	43
Πίνακας 3-4. Αντιστοίχιση θέσης προσθετικού άκρου – θέσεων περικοχλίων	46
Πίνακας 3-5. Λειτουργίες driver master κινητήρων.	48
Πίνακας 3-6. Συνδέσεις driver master κινητήρων	48
Πίνακας 3-7. Παράμετροι GAP peripheral	50
Πίνακας 3-8. Ρυθμίσεις GATT πρωτοκόλλου	52
Πίνακας 3-9. Συνδέσεις encoder slave κινητήρα	54
Πίνακας 3-10. Συνδέσεις driver slave κινητήρα.	57

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια προσπάθεια σχεδιασμού και υλοποίησης μιας διάταξης ελέγχου ενός προσθετικού άκρου βασισμένης στην ασύρματη βιομηχανοτρονική EPP τοπολογία ελέγχου προσθετικών άκρων. Η ιδέα που αναπτύσσεται βασίζεται στην χρησιμοποίηση του πρωτοκόλλου Bluetooth Low Energy για την επίτευξη ασύρματης επικοινωνίας καθώς επίσης και την χρήση μικροελεγκτών για την λήψη και επεξεργασία σημάτων, καθώς και την επενέργηση στην διάταξη. Πιο συγκεκριμένα γίνεται μια προσπάθεια επανασχεδιασμού τόσο της διάταξης όσο και του software που είχαν σχεδιαστεί και υλοποιηθεί σε προηγούμενη διπλωματική εργασία. Η βελτίωση έγκειται κυρίως στην επιλογή νέου εξοπλισμού, ο οποίος θα μπορεί να εξασφαλίσει την περαιτέρω σμίκρυνση της διάταξης, ούτως ώστε αυτή να έχει πλέον διαστάσεις κατάλληλες για την χρησιμοποίηση της διάταξης σε μια πραγματική εφαρμογή ελέγχου ενός προσθετικού άκρου. Ως αποτέλεσμα της αλλαγής του εξοπλισμού, προέκυψε η ανάγκη για σχεδιασμό νέου software το οποίο θα επέτρεπε στους μικροελεγκτές να χειριστούν τη νέα διάταξη και να πετύχουν την υλοποίηση της ασύρματης βιομηχανοτρονικής EPP τοπολογίας ελέγχου. Σκοπός της εργασίας ήταν να σχεδιαστεί η νέα διάταξη λαμβάνοντας υπόψιν συγκεκριμένες προδιαγραφές για τις διαστάσεις, αλλά και την απόδοση και επίδοση του συστήματος και στη συνέχεια, να υλοποιηθεί η αντίστοιχη διάταξη στο περιβάλλον του εργαστηρίου και να πραγματοποιηθούν δοκιμές που θα αποδεικνύουν την λειτουργικότητα του συστήματος αλλά και την επίτευξη των προδιαγραφών.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η τοπολογία ελέγχου ενός άνω προσθετικού άκρου που προτείνεται, βασίζεται στις προδιαγραφές που ορίστηκαν από τον Childress D.S το 1992. Στις ίδιες προδιαγραφές βασίζονται οι περισσότερες από τις διαδεδομένες τοπολογίες ελέγχου προσθετικών άκρων. Επιγραμματικά οι προδιαγραφές αυτές είναι:

- Οι διαδικασίες χρήσης και εκμάθησης της συμπεριφοράς του προσθετικού άκρου στον έλεγχο που εφαρμόζει το ακρωτηριασμένο άτομο πρέπει να είναι εύκολες.
- Ο έλεγχος του προσθετικού άκρου θα πρέπει να επιτυγχάνεται μηχανικά, χωρίς να απαιτείται το ακρωτηριασμένο άτομο να επικεντρώνεται σε αυτή την διαδικασία, ούτως ώστε η εμπειρία που προσφέρεται να μοιάζει με τον έλεγχο των φυσιολογικών ανθρώπινων άκρων
- Δυνατότητα παράλληλου ελέγχου όλων των διαφορετικών λειτουργιών που εκτελεί το προσθετικό άκρο, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται πλήρης λειτουργικότητα.
- Ελκυστική εμφάνιση, η οποία να πλησιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο την φυσική εμφάνιση των ανθρώπινων άκρων.
- Διάκριση των λειτουργιών του προσθετικού άκρου. Ένα προσθετικό άκρο που επιτελεί πολλές διαφορετικές λειτουργίες θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτελέσει κάθε μία από αυτές ανεξάρτητα.
- Επίτευξη πλήρους λειτουργικότητας συγκριτικά με το φυσικό άκρο. Ο ασθενής θα πρέπει να μπορεί να εκτελέσει τις ίδιες λειτουργίες που μπορούσε με το φυσικό άκρο.

Όμως, στις προδιαγραφές λειτουργίας του προσθετικού άκρου θα πρέπει πέρα από τις παραπάνω, που αφορούν την λειτουργία του, να προστεθούν και προδιαγραφές που αφορούν στην δυνατότητα συντήρησης του, αναβάθμισης του ή και αντικατάστασής του. Όσον αφορά λοιπόν την εφαρμογή βιομηχανοτρονικής EPP θα πρέπει να εξασφαλιστούν οι παρακάτω προδιαγραφές:

- Οι μικροελεγκτές της διάταξης θα πρέπει να μπορούν να εγκατασταθούν και να επαναπρογραμματιστούν εύκολα.
- Το λογισμικό του μικροελεγκτή θα πρέπει να είναι αξιόπιστο και να είναι συμβατό με ποικίλες πλατφόρμες ανάπτυξης λογισμικού.
- Ο χειρισμός του τελικού συστήματος δεν θα πρέπει να είναι πολύπλοκος και θα πρέπει να είναι εύκολος στην εκμάθηση για οποιοδήποτε ασθενή.

Οι αρχιτεκτονικές εφαρμογής ελέγχου προσθετικών άκρων μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κυρίως κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές είναι τα σωματοτροφοδοτούμενα προσθετικά συστήματα και τα εξωτερικά τροφοδοτούμενα συστήματα.

1.2.1 Σωματοτροφοδοτούμενα προσθετικά συστήματα

Σωματοτροφοδοτούμενα ονομάζονται τα συστήματα στα οποία ο έλεγχος του προσθετικού άκρου πραγματοποιείται μέσω του ανθρώπινου οργανισμού, με απευθείας επενέργηση. Δηλαδή, υπάρχει κάποια μηχανική διασύνδεση μεταξύ των μυών και του προσθετικού άκρου, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται τόσο η επενέργηση στο προσθετικό άκρο, αλλά και η ανάδραση της κίνησης του άκρου. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όσον αφορά την εκμάθηση της χρήσης του προσθετικού άκρου καθώς ο ασθενής μπορεί να αισθανθεί την προσπάθεια που καταβάλει για να κινήσει το προσθετικό άκρο. Πέρα από αυτό το πλεονέκτημα, μερικά ακόμη πλεονεκτήματα που εμφανίζουν αυτά τα συστήματα είναι το χαμηλό κόστος, η υψηλή αντοχή και η ελαφριά κατασκευή. Αντίστοιχα όμως, τα συστήματα αυτά εμφανίζουν και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως είναι η αυξημένη δυσκολία κίνησης του άκρου λόγω έλλειψης μηχανικής υποβοήθησης και το περιορισμένο εύρος κίνησης. Ταυτόχρονα, αν η διαδικασία σύνδεσης των μυών με τους επενεργητές του προσθετικού άκρου γίνεται με επεμβατική μέθοδο, τότε αυξάνεται η πιθανότητα μόλυνσης και υπάρχει δυσκολία συντήρησης.

1.2.2 Εξωτερικά τροφοδοτούμενα συστήματα

Τα συστήματα αυτά βασίζονται στην χρήση εξωτερικών επενεργητών για την κίνηση του προσθετικού άκρου. Οι επενεργητές που χρησιμοποιούνται είναι είτε πνευματικοί είτε ηλεκτρομαγνητικοί. Μια από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές εξωτερικά τροφοδοτούμενου ελέγχου προσθετικού άκρου είναι ο μυοηλεκτρικός έλεγχος. Σε αυτή την τοπολογία ελέγχου, τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα των μυών λαμβάνονται από κατάλληλους αισθητήρες (ηλεκτρόδια) και στη συνέχεια, αφού υποστούν επεξεργασία, χρησιμοποιούνται ως είσοδος για τον έλεγχο του προσθετικού άκρου. Πρόκειται για μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους ελέγχου προσθετικών άκρων σήμερα αλλά υστερεί ως προς την εκμάθηση της χρήσης του προσθετικού, καθώς δεν παρέχει ανατροφοδότηση της θέσης και των δυνάμεων του προσθετικού. Συνεπώς, ο χρήστης μέσω των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων που παράγουν οι μύς του μπορεί μόνο να ελέγξει την επιτάχυνση προσθετικού άκρου. Δεν μπορεί όμως να ελέγξει την θέση του προσθετικού άκρου χωρίς να διατηρεί οπτική επαφή με αυτό, διότι δεν

υπάρχει ανάδραση. Συνεπώς, η μέθοδος αυτή δεν προσφέρει τη δυνατότητα χειρισμού του προσθετικού άκρου με τον ίδιο τρόπο που ένα υγιές άτομο χειρίζεται το φυσιολογικό άκρο. Παρόλα αυτά, πρόκειται για μια μέθοδο που δεν απαιτεί κάποια επέμβαση και συνεπώς είναι πολύ πιο απλή στην εφαρμογή και την αντικατάσταση.

1.2.3 Έλεγχος θέσης κλειστού βρόχου EPP

Η κλασική μεθοδολογία ελέγχου EPP (Extended Physiological Proprioception) ανήκει στα σωματοτροφοδοτούμενα συστήματα. Εισήχθη αρχικά από τον D.C. Simpson το 1974 και σκοπό είχε να παρέχει στον ασθενή την δυνατότητα ανάδρασης της κίνησης του προσθετικού άκρου, ώστε τελικά να μπορέσει να εκπαιδευτεί στην χρήση του. Η σύνδεση των μυών με τους επενεργητές (πνευματικοί) γίνεται με την χρήση συρματόσκοινου Bowden. Οι επενεργητές χρησιμοποιούνται για να υποβοηθηθεί η κίνηση του προσθετικού άκρου. Η μηχανική σύνδεση του άκρου με τους μύες εξασφαλίζει την παροχή ανάδρασης στον ασθενή και έτσι τελικά επιτυγχάνεται η έμμεση αίσθηση της θέσης του χεριού χωρίς να απαιτείται οπτική επαφή και ο ασθενής μπορεί να εξοικειωθεί με την χρήση του προσθετικού άκρου. Όπως όμως αναφέρθηκε, τα συστήματα αυτά εμφανίζουν μειονεκτήματα που σχετίζονται με το μειωμένο αισθητικό αποτέλεσμα, τον κίνδυνο μόλυνσης και την δυσκολία αντικατάστασης ή συντήρησης. Τα μειονεκτήματα αυτά είχαν ως αποτέλεσμα την επικράτηση του μωσελεκτρικού ελέγχου στις εφαρμογές ελέγχου προσθετικών άκρων.

Η τοπολογία ελέγχου EPP διακρίνεται στην μονόδρομη και την αμφίδρομη EPP τοπολογία. Η αμφίδρομη τοπολογία επιτρέπει την πραγματοποίηση κινήσεων που καθορίζονται από παραπάνω από έναν μύες. Αντίθετα, η μονόδρομη τοπολογία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη τέτοιων κινήσεων λόγω μηχανικών περιορισμών που σχετίζονται με την ανατροφοδότηση της αίσθησης της κίνησης του προσθετικού άκρου. Για παράδειγμα, για να πραγματοποιηθεί μια κίνηση όπως η κάμψη και έκταση του καρπού απαιτείται η συνεργασία δύο μυών, του αγωνιστή και του ανταγωνιστή μυ. Χρησιμοποιώντας λοιπόν ένα ζεύγος επενεργητών και αισθητήρων μπορεί να υλοποιηθεί αμφίδρομη τοπολογία ελέγχου EPP η οποία προσφέρει πολύ καλύτερο αποτέλεσμα τόσο ως προς τον έλεγχο, όσο και ως προς την ανατροφοδότηση σε σχέση με την μονόδρομη EPP.

1.2.4 Τηλεχειρισμός

Η λύση για την αντιμετώπιση μερικών μειονεκτημάτων της κλασικής EPP τοπολογία που σχετίζονται με την μηχανική σύνδεση του προσθετικού άκρου με τους μύες του ακρωτηριασμένου ατόμου, είναι η χρήση μια βιομηχανοτρονικής EPP τοπολογίας ελέγχου που χρησιμοποιεί ασύρματη σύνδεση των μυών με το προσθετικό άκρο. Για μια διάταξη ελέγχου προσθετικού άκρου με βάση την EPP τοπολογία ελέγχου και τη χρήση ενός ασύρματου σχήματος επικοινωνίας, απαιτούνται δύο συστήματα, ένα σύστημα master και ένα σύστημα slave. Το σύστημα master διαχειρίζεται την λήψη και επεξεργασία των σημάτων των μυών και στη συνέχεια επενεργεί σε αυτούς για την παροχή ανατροφοδότησης. Ονομάζεται master γιατί διαχειρίζεται τους μύες του ακρωτηριασμένου ατόμου, δηλαδή την πηγή των σημάτων ελέγχου. Το σύστημα slave είναι υπεύθυνο για την επενέργεια στο προσθετικό άκρο, σύμφωνα με τα σήματα που δέχεται από το master σύστημα. Ονομάζεται έτσι γιατί ακολουθεί και εκτελεί τις οδηγίες που λαμβάνει από το σύστημα master.

Ο τηλεχειρισμός του προσθετικού άκρου επιτυγχάνεται ως εξής:

- Ο ασθενής ασκεί δύναμη στους μύες του, η οποία μετρείται από το master σύστημα με κάποιο αισθητήρα.
- Η πληροφορία αυτή μεταφέρεται ασύρματα στο slave σύστημα
- Το slave σύστημα χρησιμοποιεί την πληροφορία αυτή για να επενεργήσει στο προσθετικό άκρο.
- Ταυτόχρονα, μεταφέρει την πληροφορία της κίνησης του προσθετικού άκρου στο master σύστημα επίσης με ασύρματο τρόπο.
- Τέλος, το master σύστημα επενεργεί στους μύες του ασθενή χρησιμοποιώντας ως αναφορά την πληροφορία της κίνησης του προσθετικού άκρου.

1.3 Δομή εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται κάποια θεωρητικά στοιχεία για την τοπολογία ελέγχου προσθετικών άκρων EPP και πιο συγκεκριμένα για την κλασσική, τη βιομηχανοτρονική και την ασύρματη βιομηχανοτρονική EPP. Επίσης, δίνεται η γενική ιδέα της διάταξης που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε και παρατίθενται ορισμένες πληροφορίες για τον ασύρματο πρωτόκολλο BLE που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί. Τέλος, γίνεται μια παρουσίαση των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι μικροελεγκτές για τον έλεγχο συστημάτων. Στο Κεφάλαιο 3, αναλύεται διεξοδικά η διάταξη και παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα επιμέρους συστήματα, τα κριτήρια επιλογής εξοπλισμού, οι προδιαγραφές που τέθηκαν και οι περιορισμοί που προέκυψαν κατά τον σχεδιασμό. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η υλοποίηση του κώδικα για την πραγματοποίηση όλων των απαραίτητων λειτουργιών του συστήματος σύμφωνα με τον σχεδιασμό. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν και γίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2 Στοιχεία Θεωρίας

2.1 Εκτεταμένη Φυσιολογική Ιδιοδεκτικότητα (EPP)

Μια από τις μεγάλες προκλήσεις της αντικατάστασης ενός ακρωτηριασμένου άκρου με ένα προσθετικό είναι η επίτευξη του ελέγχου του προσθετικού άκρου από το ακρωτηριασμένο άτομο. Σε ένα μη ακρωτηριασμένο άτομο, ο έλεγχος των άνω άκρων επιτυγχάνεται από μηχανοϋποδοχείς, μια κατηγορία αισθητήριων υποδοχέων του ανθρώπινου σώματος, οι οποίοι μπορούν να αντιληφθούν οποιαδήποτε μεταβολή της κατάστασης των άνω άκρων και να ενημερώσουν αντίστοιχα το νευρικό σύστημα. Η απώλεια των υποδοχέων αυτών, οδηγεί στην απώλεια αίσθησης των άκρων και συνεπώς σε απώλεια ελέγχου των άκρων. Όπως γίνεται αντιληπτό, ο έλεγχος ενός προσθετικού χεριού απαιτεί, πέρα από την εφαρμογή κάποιας μεθόδου επενέργειας στο προσθετικό άκρο και κάποια μέθοδο ανάδρασης της θέσης του. Μια τοπολογία ελέγχου η οποία αποσκοπεί στην επίτευξη ανάδρασης της θέσης του προσθετικού άκρου μέσω χρησιμοποίησης των αισθητηρίων οργάνων του ανθρώπινου οργανισμού είναι η Εκτεταμένη Φυσιολογική Ιδιοδεκτικότητα ή αλλιώς EPP (Extended Physiological Proprioception). Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στην σύνδεση της κίνησης του προσθετικού χεριού με τους μύες του ανθρώπινου σώματος. Με τον τρόπο αυτό η μεταβολή της θέσης του προσθετικού χεριού γίνεται αντιληπτή από τους μηχανοϋποδοχείς του ανθρώπινου σώματος, παρέχοντας έτσι στο ακρωτηριασμένο άτομο ανάδραση της θέσης, της ταχύτητας αλλά και δυνάμεων που ασκούνται στο προσθετικό άκρο.

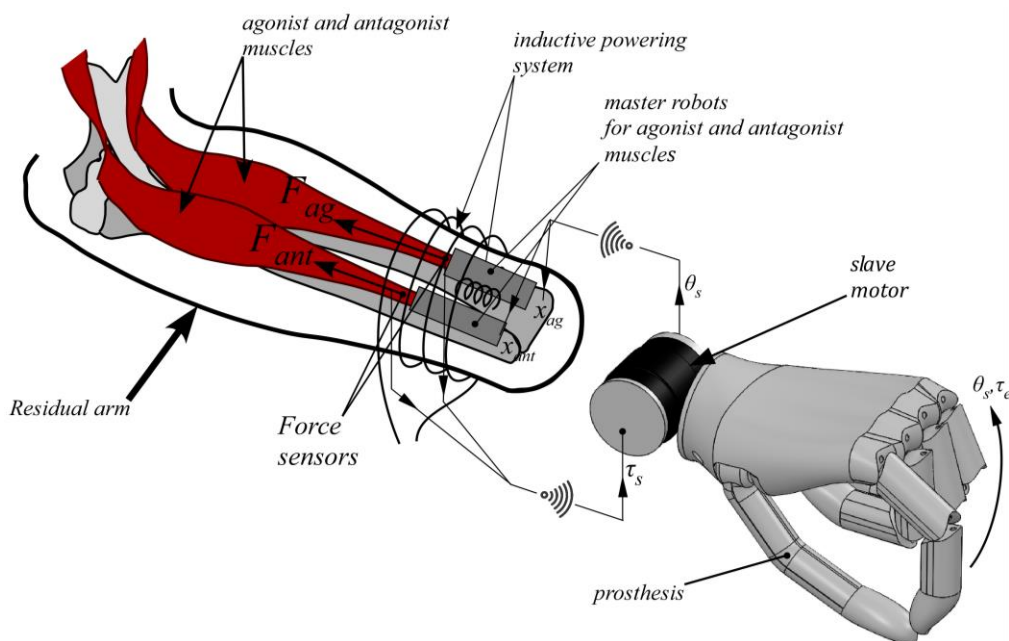
2.1.1 Κλασσική και Βιομηχανοτρονική EPP τοπολογίες ελέγχου

Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την διασύνδεση του προσθετικού άκρου με τους μύες του ανθρώπινου σώματος ήταν η κλασσική EPP, δηλαδή η μηχανική σύνδεση με την χρήση καλωδίων όπως π.χ. τα καλώδια Bowden. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου όμως είναι ότι αφενός το αποτέλεσμα δεν είναι αισθητικό λόγω των καλωδίων και των μηχανικών μερών που πρέπει να εγκατασταθούν με χειρουργική επέμβαση και αφετέρου, υπάρχει κίνδυνος μόλυνσεων λόγω του ότι τα καλώδια αυτά εξέρχουν από το ανθρώπινο σώμα και βρίσκονται σε απευθείας επαφή με το περιβάλλον. Η βιομηχανοτρονική EPP βασίζεται στην χρήση επενεργητών και αισθητήρων. Ένας υπολογιστής υπολογίζει την θέση του προσθετικού άκρου και στη συνέχεια επενεργεί στους μύες του ακρωτηριασμένου ατόμου αντίστοιχα, για να του αποδώσει την αίσθηση της θέσης του προσθετικού άκρου. Το πλεονέκτημα που εμφανίζει η μέθοδος αυτή είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη ελέγχου των επενεργητών με ασύρματο τρόπο, δηλαδή χωρίς την ύπαρξη καλωδίων που συνδέουν το προσθετικό άκρο με το εσωτερικό του ανθρώπινου οργανισμού. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι αφενός βελτιώνεται το αισθητικό αποτέλεσμα και αφετέρου μειώνεται ο κίνδυνος μόλυνσεων για το ακρωτηριασμένο άτομο καθώς πλέον δεν υπάρχει επαφή μεταξύ του εσωτερικού του οργανισμού και του περιβάλλοντος.

2.1.2 Ασύρματη βιομηχανοτρονική EPP

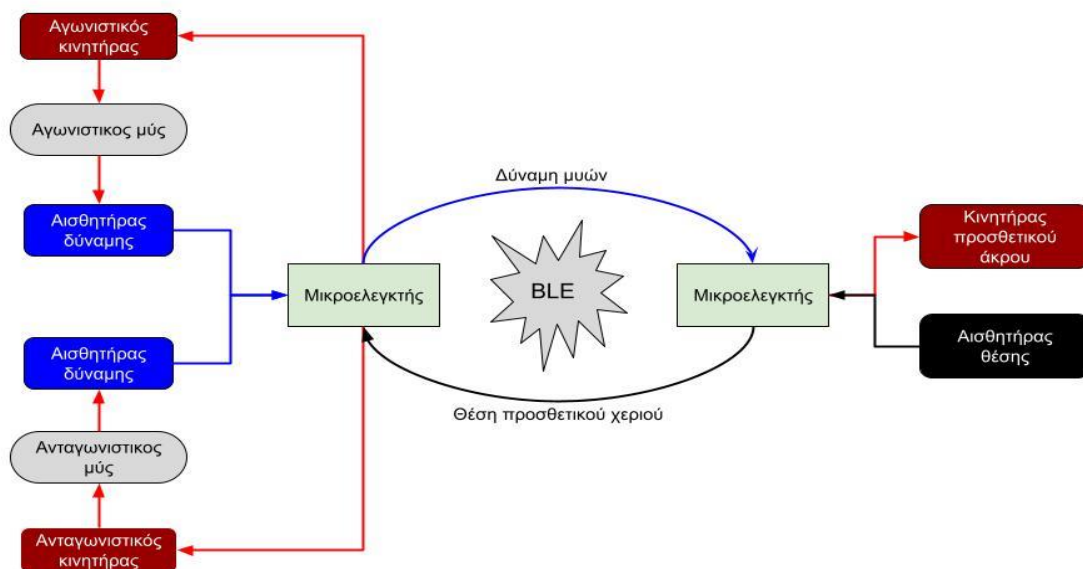
Η επίτευξη της κίνησης του ανθρώπινου καρπού σε ένα άξονα επιτυγχάνεται μέσω δύο μυών που βρίσκονται στο ανθρώπινο χέρι, του ωλένιου καμπτήρα και του ωλένιου

εκτείνοντα μυ. Οι δύο μύες έχουν μεταξύ τους σχέση αγωνιστή-ανταγωνιστή μυ, δηλαδή ο ένας μυς αντιστέκεται στη επίδραση του άλλου μυ. Ο ωλένιος καμπτήρας είναι υπεύθυνος για την κάμψη του καρπού, ενώ ο ωλένιος εκτείνοντας είναι υπεύθυνος για την έκταση του καρπού. Η εφαρμογή που μελετάται σε αυτή την εργασία προσπαθεί να πετύχει έλεγχο του προσθετικού άκρου ανάλογα με την δύναμη που ασκεί το ακρωτηριασμένο άτομο στους δύο αυτούς μύες. Η διάταξη αποτελείται από δύο επιμέρους συστήματα. Το ένα σύστημα (master) εγκαθίσταται με χειρουργική επέμβαση στο εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος, ενώ το άλλο σύστημα (slave) βρίσκεται πάνω στο προσθετικό άκρο. Το σύστημα master αποτελείται από δύο αισθητήρες δύναμης, οι οποίοι συνδέονται με τους μύες και παρέχουν μέτρηση της δύναμης που το ακρωτηριασμένο άτομο προσπαθεί να ασκήσει. Διαθέτει επίσης δύο dc κινητήρες οι οποίοι επενεργούν μέσω κατάλληλης διάταξης κοχλία περικοχλίου στους δύο αυτούς μύες. Τέλος, διαθέτει μικροελεγκτή ο οποίος είναι υπεύθυνος για την συλλογή των σημάτων από τους αισθητήρες δύναμης και τον έλεγχο των κινητήρων. Το σύστημα slave διαθέτει επίσης ένα κινητήρα dc για την κίνηση του προσθετικού άκρου, αισθητήρα θέσης του προσθετικού άκρου και ένα μικροελεγκτή για λήψη του σήματος θέσης του προσθετικού άκρου και έλεγχο του κινητήρα. Τα δύο συστήματα επικοινωνούν ασύρματα μέσω των μικροελεγκτών. Οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας BLE. Το Σχήμα 2-1 παρουσιάζει την διάταξη της ασύρματης Bio EPP τοπολογίας που μελετάται σε αυτή την εργασία.



Σχήμα 2-1. Τοπολογία ασύρματης Biomechatronic EPP.

Τα δύο συστήματα, master και slave αλληλοεπιδρούν για να πετύχουν την επιθυμητή λειτουργία του προσθετικού χεριού, δηλαδή τη λειτουργία που προσφέρει στο ακρωτηριασμένο άτομο έλεγχο του προσθετικού χεριού και ταυτόχρονα ανάδραση της κατάστασης του προσθετικού χεριού. Στο Σχήμα 2-2 παρουσιάζονται όλα τα συστήματα της διάταξης και η ροή πληροφορίας. Ο μικροελεγκτής master υπολογίζει την δύναμη που ασκεί το ακρωτηριασμένο άτομο με τους μύες του και στη συνέχεια επικοινωνεί αυτή την πληροφορία στον slave μικροελεγκτή. Ο slave μικροελεγκτής με την σειρά του επενεργεί στον κινητήρα του slave συστήματος ανάλογα με το σήμα δύναμης που έλαβε και στη συνέχεια υπολογίζει την θέση του προσθετικού χεριού. Την πληροφορία της θέσης του προσθετικού χεριού την μεταφέρει με την σειρά του στον master μικροελεγκτή. Ο master μικροελεγκτής τέλος, επενεργεί στους κινητήρες του master συστήματος ανάλογα με το σήμα θέσης του προσθετικού χεριού που έχει λάβει, ούτως ώστε να αποδώσει στο ακρωτηριασμένο άτομο την αίσθηση του προσθετικού χεριού μέσω των φυσιολογικών του αισθητηρίων.



Σχήμα 2-2. Συστήματα τοπολογίας master – slave.

Βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να πληροί η διάταξη για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ασύρματης bio EPP τοπολογίας για έλεγχο προσθετικού άκρου είναι:

- Μικρό μέγεθος
- Χαμηλή τάση και χαμηλό ρεύμα λειτουργίας
- Τροφοδοσία από μπαταρία και δυνατότητα ασύρματης φόρτισης
- Γρήγορη επικοινωνία μεταξύ των δύο συστημάτων (master και slave) για να επιτυγχάνεται μια ικανοποιητική αίσθηση ελέγχου του προσθετικού χεριού

- Γρήγορος έλεγχος των κινητήρων του master συστήματος. Η γρήγορη επίτευξη της ανάδρασης του προσθετικού άκρου είναι απαραίτητη για να μπορεί το ακρωτηριασμένο άτομο να κάνει χρήση του προσθετικού άκρου ομαλά και με ταχύτητες αντίστοιχες ενός κανονικού ανθρώπινου άκρου
- Δυνατότητα λειτουργίας για ένα εύρος δυνάμεων που αντιστοιχίζονται στην εκτέλεση καθημερινών διαδικασιών και εργασιών

2.2 Πρωτόκολλο διεπαφής – BLE

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την εφαρμογή της ασύρματης τοπολογίας Biomechatronic EPP επιλέχθηκε το πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας Bluetooth low energy (BLE). Οι λόγοι επιλογής του πρωτοκόλλου αυτού είναι αρκετοί και έχουν παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 2 της [3].

2.2.1 Πρωτόκολλο Bluetooth Low Energy

Το πρωτόκολλο BLE είναι μια παραλλαγή του κλασσικού πρωτοκόλλου Bluetooth, που έχει ως σκοπό τη διατήρηση των τεχνικών προδιαγραφών του βασικού πρωτοκόλλου (δηλαδή εμβέλεια, ταχύτητα επικοινωνίας, κόστος εξοπλισμού) αλλά με σημαντικά μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Αφορμή για την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας ήταν η ανάγκη για χρησιμοποίηση του πρωτοκόλλου από μικρές ασύρματες συσκευές που τροφοδοτούνται από μικρής ισχύος μπαταρίες, όπως π.χ. κινητά τηλέφωνα, περιφερειακά υπολογιστών, μικρόφωνα, ακουστικά, κ.λπ. Η ανάπτυξη του πρωτοκόλλου ξεκίνησε από την Nokia η οποία προσπάθησε να δημιουργήσει ένα πρωτόκολλο με τα χαρακτηριστικά του Bluetooth που θα ήταν όμως κατάλληλο για εφαρμογές ασύρματης τεχνολογίας. Το πρωτόκολλο κυκλοφόρησε επίσημα σαν BLE το 2010 ενώ το 2011 κυκλοφόρησαν τα πρώτα κινητά τηλέφωνα που υποστήριζαν το πρωτόκολλο αυτό. Έκτοτε, έχουν γίνει αρκετές βελτιώσεις του πρωτοκόλλου με την ανάπτυξη βελτιωμένων εκδόσεων οι οποίες είχαν ως σκοπό την επέκταση της εμβέλειας του, την περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την αύξηση της ταχύτητας επικοινωνίας και της ποσότητας δεδομένων που μπορούν να ανταλλάσσονται ανά πακέτο. Γενικά οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται η τεχνολογία BLE είναι πολλές, μερικές από τις οποίες είναι:

- Ασύρματες συσκευές επικοινωνίας,
- Τηλεοράσεις,
- Περιφερειακά υπολογιστών,
- Αισθητήρες κάθε είδους,
- Συστήματα οδήγησης,
- Μεταφορικά οχήματα,
- Έξυπνα ρολόγια

Το εύρος εφαρμογών είναι πλέον τόσο μεγάλο που έχουν οριστεί ακόμα και προφίλ τα οποία χρησιμοποιούν οι σχεδιαστές συσκευών που χρησιμοποιούν το BLE πρωτόκολλο για να υπάρχει μεγαλύτερη συμβατότητα μεταξύ συσκευών διαφορετικών κατασκευαστών αλλά και για να επιτυγχάνεται η ικανοποίηση συγκεκριμένων ιδιοτήτων από υλοποιήσεις που απευθύνονται σε παρόμοιες εφαρμογές. Μερικά από αυτά τα προφίλ είναι τα παρακάτω:

- Προφίλ HID (human interface device) που αφορά εφαρμογές περιφερειακών υπολογιστών όπως πληκτρολόγια, ποντίκια κλπ,
- Προφίλ αθλητισμού που αφορά συσκευές που καταγράφουν τις επιδόσεις κατά την άθληση
- Προφίλ υγείας που αφορά διάφορους αισθητήρες όπως θερμομέτρα, μετρητές γλυκόζης κ.λπ.,
- Προφίλ ειδοποιήσεων που αφορά την μεταβίβαση διάφορων μηνυμάτων ή ειδοποιήσεων μεταξύ συσκευών
- Προφίλ παρακολούθησης μπαταρίας που αφορά εφαρμογές παρακολούθησης του επιπέδου φόρτισης ή της κατάστασης μπαταριών

Γενικά το BLE είναι συμβατό με τα περισσότερα λειτουργικά συστήματα που χρησιμοποιούνται από τις έξυπνες συσκευές σήμερα, όπως είναι τα:

- IOS
- Windows
- Android
- Linux
- Blackberry
- MacOS
- Zephyr OS

Τέλος, μερικά από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου είναι:

- Εύρος μετάδοσης έως 100 μέτρα
- Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων έως 2Mbit/s
- Κατανάλωση ρεύματος μικρότερη των 15mA
- Δικτυακή τοπολογία Scatternet

Τα δύο βασικά πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το BLE και είναι υπεύθυνα για την διαχείριση των συνδέσεων και την ανταλλαγή δεδομένων είναι τα πρωτόκολλα *GAP (Generic Access Profile)* και *GATT (Generic Attribute)* τα οποία αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

2.2.2 Πρωτόκολλο GAP

Το πρωτόκολλο GAP είναι το πρωτόκολλο εκείνο το οποίο διαχειρίζεται τις διαδικασίες της σύνδεσης και της διαφήμισης στην επικοινωνία μέσω Bluetooth. Αρχικά μια συσκευή που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο GAP πρέπει να αναλάβει ένα ρόλο. Οι ρόλοι που υποστηρίζονται από το πρωτόκολλο GAP είναι οι παρακάτω:

- **Broadcaster.** Η λειτουργία ενός broadcaster δεν μπορεί να περιγραφεί ως ανταλλαγή πληροφορίας, αλλά περισσότερο ως εκπομπή πληροφορίας ή διαφήμιση. Δεν απαιτείται σύνδεση με κάποια άλλη συσκευή. Ένας broadcaster μπορεί να μεταδίδει πληροφορίες οι οποίες εντάσσονται στο πακέτο διαφήμισης. Η πληροφορία αυτή εκπέμπεται γενικά, χωρίς κάποιον συγκεκριμένο παραλήπτη. Οποιαδήποτε συσκευή μπορεί να λάβει αυτή την πληροφορία και να την διαβάσει

- **Observer.** Κατά αντιστοιχία με τον ρόλο του broadcaster, ο observer μπορεί να ανιχνεύει οποιαδήποτε πληροφορία μεταδίδεται διαμέσου ενός πακέτου διαφήμισης. Δεν μπορεί να στείλει κάποια πληροφορία, ούτε μπορεί να συνδεθεί με κάποια συσκευή για να διαβάσει υπηρεσίες και χαρακτηριστικά που μπορεί να υποστηρίξει αυτή. Μπορεί όμως να διαβάσει οποιαδήποτε πληροφορία διαφημίζεται από κάποια συσκευή
- **Peripheral.** Μια συσκευή peripheral υποστηρίζει την μετάδοση πληροφορίας μέσω διαφήμισης, όπως μια συσκευή broadcaster, αλλά επίσης υποστηρίζει την σύνδεση με μια άλλη συσκευή. Μπορεί επίσης να παρέχει πληροφορίες οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στο πακέτο διαφήμισης, αλλά προορίζονται μόνο για μια συσκευή με την οποία έχει συνδεθεί. Η διαδικασία της διαφήμισης είναι παθητική, δηλαδή η ίδια η συσκευή δεν μπορεί να εκκινήσει την σύνδεση με μία άλλη συσκευή, αλλά μπορεί να φιλτράρει τις συσκευές που θα προσπαθήσουν να συνδεθούν με αυτήν εφαρμόζοντας κατάλληλα φίλτρα. Σημειώνεται ότι μια συσκευή GAP peripheral μπορεί να συνδεθεί με πολλαπλές συσκευές.
- **Central.** Μια συσκευή central μπορεί να αναζητά συσκευές peripheral μπορεί επίσης να συνδεθεί μαζί τους. Μπορεί να διαβάζει την πληροφορία που διαφημίζει μια συσκευή, αλλά μπορεί επίσης να ανταλλάσσει παραπάνω πληροφορίες με μια συσκευή peripheral με την οποία θα συνδεθεί. Μια συσκευή central ελέγχει την διαδικασία της σύνδεσης και επίσης ελέγχει τις παραμέτρους της σύνδεσης, δηλαδή τον ρυθμό ανταλλαγής δεδομένων. Σημειώνεται ότι μια συσκευή GAP central μπορεί να συνδεθεί με πολλαπλές συσκευές GAP peripheral.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, μια εφαρμογή στην οποία πρέπει να υπάρχει ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ δύο συσκευών και όχι μια μονόδρομη σχέση επικοινωνίας απαιτεί την ύπαρξη ενός ζεύγους GAP peripheral – GAP central.

Μια συσκευή GAP peripheral προσπαθεί να προσελκύσει μια συσκευή GAP central να συνδεθεί μαζί της μέσω της διαδικασίας της διαφήμισης. Πρακτικά η διαδικασία της διαφήμισης είναι μια διαδικασία με την οποία μια συσκευή GAP peripheral διαφημίζει την πληροφορία που διαθέτει, την εφαρμογή την οποία αφορά, το όνομά της και άλλα χαρακτηριστικά, τα οποία καλείται να αναγνωρίσει μία GAP central συσκευή για να συνδεθεί με αυτήν. Για την διαδικασία της διαφήμισης ορίζονται οι εξής παράμετροι:

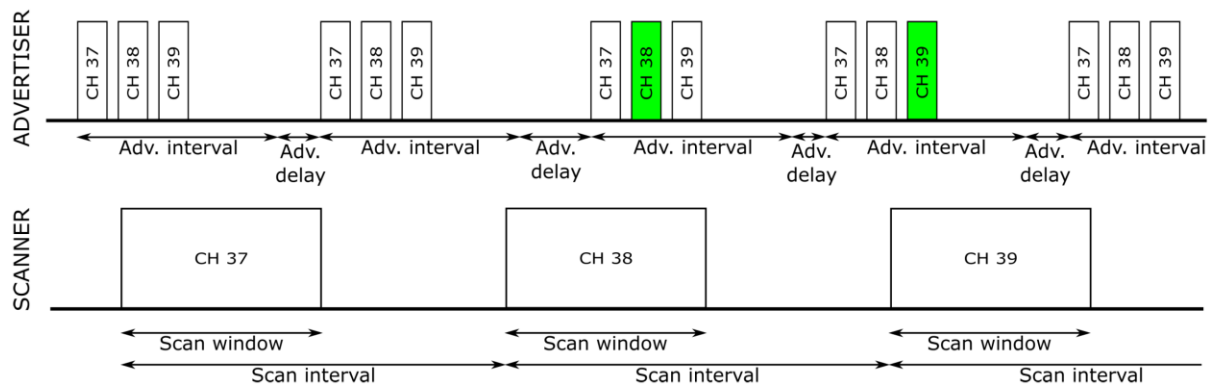
- **Διάστημα διαφήμισης,** δηλαδή ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών εκπομπών των δεδομένων διαφήμισης. Όσο μικρότερο είναι αυτό το διάστημα, τόσο συχνότερη είναι η εκπομπή πακέτων διαφήμισης και άρα τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να ανακαλυφθεί το GAP peripheral. Παρόλα αυτά, η συχνή διαφήμιση αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας. Είναι μεταβλητή παράμετρος και ορίζεται από τον σχεδιαστή της εφαρμογής.
- **Διάρκεια διαφήμισης,** δηλαδή η διάρκεια κατά την οποία εκπέμπονται τα πακέτα διαφήμισης. Είναι σταθερή παράμετρος και είναι της τάξης των μικροδευτερολέπτων.
- **Χρόνος διαφήμισης,** δηλαδή η χρονική διάρκεια μετά από την οποία η GAP peripheral συσκευή θα σταματήσει να εκπέμπει δεδομένα διαφήμισης αν δεν έχει συνδεθεί μαζί της κάποια συσκευή. Είναι μεταβλητή παράμετρος.
- **Δεδομένα διαφήμισης,** δηλαδή τα δεδομένα τα οποία διαφημίζει η συσκευή και τα οποία ανιχνεύει μια GAP central συσκευή. Συνήθως περιλαμβάνουν το όνομα της

συσκευής και ίσως κάποια πληροφορία για τις υπηρεσίες και τα χαρακτηριστικά που διαθέτει.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μια συσκευή GAP peripheral δεν μπορεί να εκκινήσει μια σύνδεση, αλλά μπορεί να αποκλείσει τις συνδέσεις, είτε αποκλείοντας κάθε σύνδεση, είτε εφαρμόζοντας κάποιο φίλτρο στις συσκευές στις οποίες θα επιτρέψει να συνδεθούν μαζί της. Κατά αντιστοιχία, μια συσκευή GAP central μπορεί να ανιχνεύει συσκευές που διαφημίζονται. Η διαδικασία της ανίχνευσης διαθέτει και αυτή αντίστοιχες παραμέτρους, οι οποίες είναι:

- Διάρκεια ανίχνευσης, είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η συσκευή εκπέμπει πακέτα ανίχνευσης και αναζητά συσκευές που διαφημίζονται. Είναι μεταβλητή παράμετρος. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια ανίχνευσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να ανιχνευθούν συσκευές, αλλά αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας αντίστοιχα.
- Διάστημα ανίχνευσης, είναι ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών ανιχνεύσεων. Είναι μεταβλητή παράμετρος. Όσο μεγαλύτερο το διάστημα ανίχνευσης, τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα να ανιχνευθεί μια συσκευή αλλά αντίστοιχα είναι μικρότερη και η κατανάλωση ενέργειας.

Οι παράμετροι ανίχνευσης και διαφήμισης πρέπει να ορίζονται κατάλληλα διότι μη σωστός ορισμός των παραμέτρων αυτών μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μια GAP central συσκευή να μην καταφέρει ποτέ να ανιχνεύσει μια συγκεκριμένη GAP peripheral συσκευή. Το Σχήμα 2-3 παρουσιάζει τις διαδικασίες διαφήμισης και ανίχνευσης του GAP πρωτοκόλλου και τις αντίστοιχες παραμέτρους που τις ορίζουν.



Σχήμα 2-3. Διαδικασίες διαφήμισης και ανίχνευσης GAP.

Μια GAP central συσκευή, όμως είναι υπεύθυνη και για τον ορισμό των παραμέτρων σύνδεσης, δηλαδή των παραμέτρων που ορίζουν την σύνδεση δύο συσκευών. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- Ελάχιστο και μέγιστο διάστημα σύνδεσης. Οι τιμές αυτές είναι ακέραια πολλαπλάσια της τιμής 7,5ms. Οι παράμετροι αυτοί ορίζουν την συχνότητα με την οποία αποστέλλονται πληροφορίες από την μία συσκευή στην άλλη. Η συχνότητα μπορεί να είναι οποιαδήποτε ορίζεται από την ελάχιστη και την μέγιστη τιμή αυτής της παραμέτρου. Γενικά όσο μικρότερη τιμή έχει αυτή η παράμετρος, τόσο μεγαλύτερη

είναι η κατανάλωση ενέργειας αλλά αντίστοιχα τόσο γρηγορότερα μπορεί να μεταφερθεί πληροφορία.

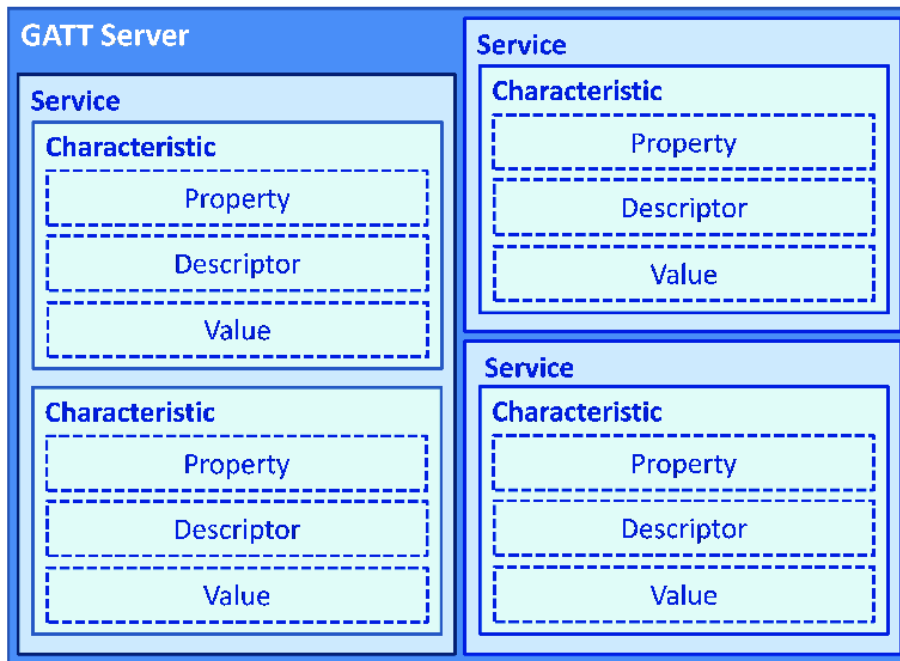
- Αδράνεια slave. Όταν μια σύνδεση είναι εγκατεστημένη, η συσκευή GAP central αποστέλλει συχνά στην συσκευή GAP peripheral πακέτα που δεν περιλαμβάνουν πληροφορία, αλλά που έχουν σκοπό έχουν την διαπίστωση της κατάστασης της επικοινωνίας. Η παράμετρος της αδράνειας slave ορίζει τον αριθμό των πακέτων αυτών (ονομάζονται συμβάντα διασύνδεσης) που μπορεί να αγνοήσει η GAP peripheral συσκευή, έως ότου αποφασίσει ότι η επικοινωνία έχει χαθεί και τερματίσει την σύνδεση. Σκοπός αυτής της λειτουργίας είναι η μείωση της κατανάλωσης των συσκευών. Παρόλα αυτά, μεγάλη τιμή αυτής της παραμέτρου μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την καθυστέρηση της διάγνωσης της απώλειας επικοινωνίας.
- Διάστημα ελέγχου διασύνδεσης. Η παράμετρος αυτή καθορίζει την συχνότητα με την οποία η GAP central συσκευή αποστέλλει πακέτα χωρίς πληροφορία για την εξακρίβωση της κατάστασης της σύνδεσης.

Παρόλο που όπως αναφέρθηκε, η ρύθμιση των παραμέτρων της σύνδεσης καθορίζεται από την συσκευή GAP central, η GAP peripheral μπορεί να στείλει αίτημα ανανέωσης των παραμέτρων αυτών. Το αίτημα αυτό περιλαμβάνει τις προτιμώμενες τιμές των παραμέτρων για την GAP peripheral συσκευή και η GAP central συσκευή μπορεί είτε να το αποδεχθεί, είτε να το απορρίψει.

2.2.3 Πρωτόκολλο GATT

Το πρωτόκολλο GATT είναι το πρωτόκολλο εκείνο το οποίο διαχειρίζεται την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ δύο συσκευών που επικοινωνούν μέσω BLE. Όπως και το πρωτόκολλο GAP, το GATT ορίζει ρόλους για τις συσκευές. Οι ρόλοι αυτοί οι είναι GATT server και GATT client. Ένας GATT client μπορεί να είναι συνδεδεμένος με πολλούς GATT servers, αλλά ένας GATT server μπορεί να είναι συνδεδεμένος μόνο με έναν GATT client. Μια GATT server συσκευή περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες που μπορούν να επικοινωνηθούν μεταξύ των δύο συσκευών. Ένας GATT client, μπορεί να ανακαλύψει αυτή την πληροφορία και στη συνέχεια να την χειριστεί κατάλληλα, πάντα όμως σύμφωνα με τους περιορισμούς που έχει ορίσει ο GATT server. Η επικοινωνία μπορεί να είναι αμφίδρομη, δηλαδή μπορεί να μεταφέρεται από τον server στον client ή το αντίθετο. Οι ρόλοι του GATT client και GATT server είναι ανεξάρτητοι των ρόλων που έχουν οι συσκευές ως προς το GAP πρωτόκολλο.

Στο πρωτόκολλο GATT η πληροφορία είναι οργανωμένη σε υπηρεσίες και χαρακτηριστικά. Οι υπηρεσίες δεν περιλαμβάνουν άμεσα πληροφορία εξυπηρετούν την λογική οργάνωση των χαρακτηριστικών. Κάθε υπηρεσία χαρακτηρίζεται από ένα UUID, δηλαδή ένα μοναδικό δεκαεξαδικό αριθμό. Ο αριθμός αυτός μπορεί να είναι 16bit αν πρόκειται για κάποια επίσημα καταχωρημένη υπηρεσία, ή 128bit αν πρόκειται για κάποια μη επίσημα καταχωρημένη υπηρεσία. Το αντικείμενο το οποίο περιέχει την πληροφορία και ορίζει επίσης τον τρόπο με τον οποίο εκείνη διακινείται είναι το *Characteristic*. Ένα χαρακτηριστικό πρέπει οπωσδήποτε να ανήκει σε κάποια υπηρεσία, ενώ μια υπηρεσία μπορεί να περιλαμβάνει πολλά χαρακτηριστικά. Αντίστοιχα με τις υπηρεσίες, τα χαρακτηριστικά χαρακτηρίζονται από ένα μοναδικό UUID. Το Σχήμα 2-4 παρουσιάζει την δομή της πληροφορίας σε υπηρεσίες και χαρακτηριστικά σύμφωνα με το πρωτόκολλο GATT.



Σχήμα 2-4. Δομή πληροφορίας στο πρωτόκολλο GATT.

Ένα χαρακτηριστικό μπορεί να υποστηρίξει μια εκ των παρακάτω λειτουργιών:

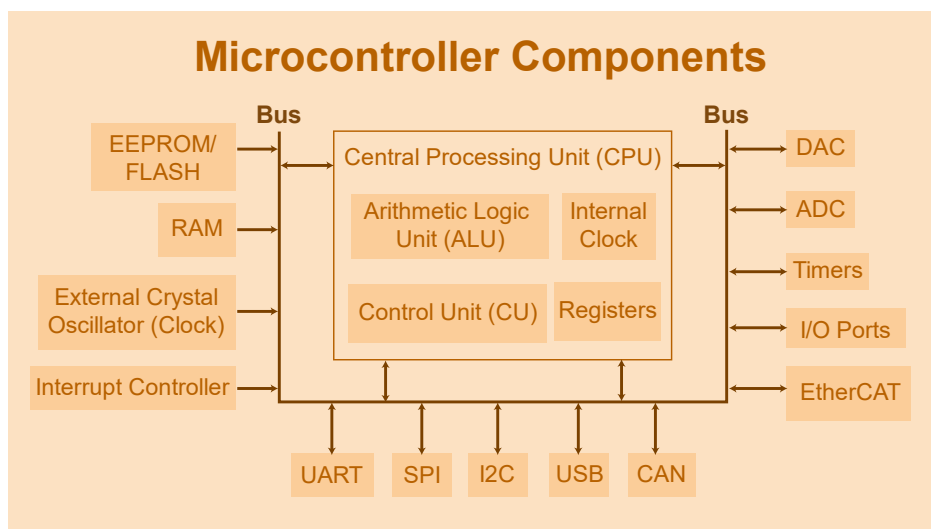
- **Read.** Ένα χαρακτηριστικό read μπορεί να διαβαστεί από τον GATT client, δηλαδή ο GATT client μπορεί να στείλει ένα αίτημα ανάγνωσης της τιμής του
- **Write/Write without response.** Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν την εγγραφή της τιμής τους από τον GATT client. Στην πρώτη περίπτωση η εγγραφή πρέπει να συνοδεύεται από την κατάλληλη απόκριση από τον GATT server ενώ στην δεύτερη όχι.
- **Notify/Indicate.** Τα χαρακτηριστικά που υποστηρίζουν αυτές τις λειτουργίες μπορούν να ενημερώνουν αυτόματα τον GATT client για οποιαδήποτε αλλαγή στην τιμή τους. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο GATT client να έχει υλοποιήσει συνδρομή στο χαρακτηριστικό αυτό. Η διαφορά των δύο λειτουργιών είναι ότι ένα notification στέλνεται χωρίς να απαιτείται επιβεβαίωση από τον GATT client, ενώ ένα indication απαιτεί επιβεβαίωση από τον GATT client για να αποσταλεί. Επίσης, ένας GATT client πρέπει να ενεργοποιήσει τις ειδοποιήσεις ενός χαρακτηριστικού (notifications) για να επιτρέψει στον GATT server να τον ενημερώνει για αλλαγές της τιμής του χαρακτηριστικού.

Οι υπηρεσίες και τα χαρακτηριστικά είναι οργανωμένα σε μια βάση δεδομένων εντός του GATT server. Ο GATT client μπορεί να τα ανακαλύψει εκτελώντας την διαδικασία της ανακάλυψης. Με την διαδικασία αυτή αποκτά την πληροφορία των χαρακτηριστικών που παρέχει ο GATT server και μπορεί στη συνέχεια να τα χειριστεί κατάλληλα. Η βάση δεδομένων ονομάζεται πίνακας ATT (ATT table, Attribute table) και έχει καταχωρημένες όλες τις υπηρεσίες και τα χαρακτηριστικά του GATT server. Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους ενός χαρακτηριστικού είναι ο *χειριστής του χαρακτηριστικού* (attribute handler), η πληροφορία εκείνη δηλαδή με την οποία ο GATT client μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση σε ένα χαρακτηριστικό της βάσης. Για παράδειγμα, ένας GATT client πρέπει να

γνωρίζει τον χειριστή ενός χαρακτηριστικού write για να γράψει μια τιμή σε αυτό, ή ενός χαρακτηριστικού notify για να κάνει συνδρομή σε αυτό. Η παράμετρος αυτή, που θα μπορούσε να παρομοιαστεί με την διεύθυνση του χαρακτηριστικού στην βάση, είναι σταθερή και διαφορετική για κάθε χαρακτηριστικό. Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι οι άδειες ενός χαρακτηριστικού. Ανεξάρτητα από την λειτουργία του χαρακτηριστικού, για να επιτρέπεται η χρησιμοποίηση της αντίστοιχης λειτουργίας πρέπει να έχουν οριστεί κατάλληλες άδειες. Για παράδειγμα, ένας GATT server μπορεί να περιλαμβάνει στην βάση του ένα χαρακτηριστικό τύπου write αλλά να επιτρέπει συγκεκριμένα μόνο κωδικοποιημένη εγγραφή (encrypted write) ή πιστοποιημένη εγγραφή (authenticated write). Με αυτό τον τρόπο, ένας GATT server μπορεί να εισάγει περισσότερους περιορισμούς στην διαχείριση-χρησιμοποίηση των χαρακτηριστικών του. Ειδικά για χαρακτηριστικά τύπου *ειδοποίησης* (notification) και *υπόδειξης* (indication), ορίζεται υποχρεωτικά ένα ακόμη πεδίο, ο *περιγραφέας* (descriptor). Ο περιγραφέας των χαρακτηριστικών ειδοποίησης και υπόδειξης ονομάζεται *Διαμόρφωση Χαρακτηριστικού Χρήστη* (Client characteristic configuration) και καθορίζει την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των ειδοποιήσεων. Επιτρέπει την εγγραφή και την ανάγνωση της τιμής του. *Περιγραφέας* μπορεί να οριστεί και για άλλου τύπου χαρακτηριστικά, αλλά χωρίς να είναι υποχρεωτικό. Σε αυτή την περίπτωση, ο *περιγραφέας* εξυπηρετεί την παροχή περισσότερης πληροφορίας για το αντίστοιχο *χαρακτηριστικό*.

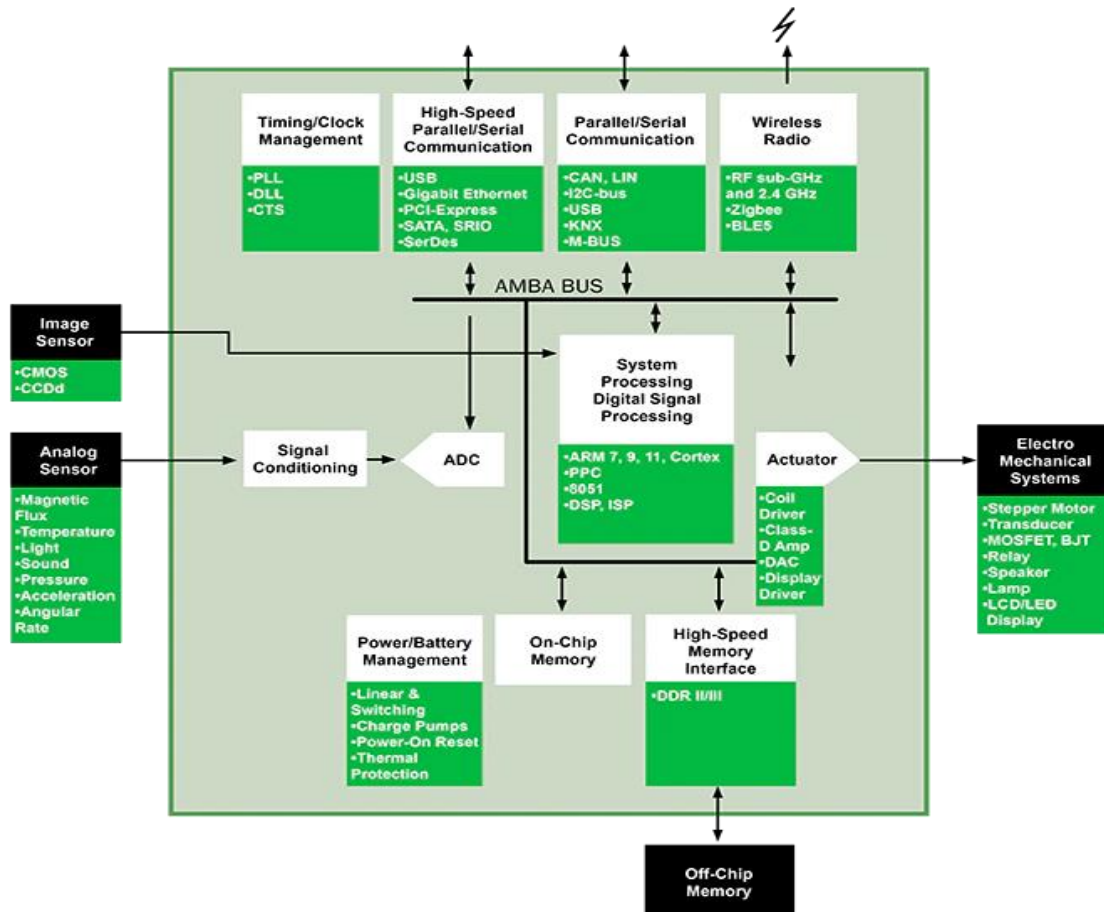
2.3 Έλεγχος συστήματος με μικροελεγκτή - SoC

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η εφαρμογή της ασύρματης biomechatronic EPP που εξετάζεται σε αυτή την Μεταπτυχιακή Εργασία βασίζεται στη χρήση μικροελεγκτών. Οι μικροελεγκτές είναι πρακτικά μικροί υπολογιστές, δηλαδή ολοκληρωμένα κυκλώματα πολύ μικρού μεγέθους που αποτελούνται από επεξεργαστή, μνήμη και περιφερειακά εισόδου/εξόδου για επικοινωνία με το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα για την εφαρμογή που εξετάζεται στην εργασία αυτή, καταλληλότερος θα ήταν ο όρος System on Chip. Ένα system on chip περιλαμβάνει ένα μικροελεγκτή καθώς επίσης και άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα που προσφέρουν συγκεκριμένες δυνατότητες όπως ασύρματη επικοινωνία μέσω WiFi ή ρύθμιση της τροφοδοσίας. Το Σχήμα 2-5 παρουσιάζει την δομή ενός μικροελεγκτή.



Σχήμα 2-5. Δομή τυπικού μικροελεγκτή.

Αντίστοιχα, το Σχήμα 2-6 παρουσιάζει την τυπική δομή ενός SoC. Ένα system on chip έχει ως βασικό στοιχείο ένα μικροελεγκτή, αλλά διαθέτει και επιπλέον κυκλώματα που παρέχουν στον μικροελεγκτή περισσότερες δυνατότητες, τόσο όσον αφορά την επικοινωνία με το περιβάλλον, αλλά και όσον αφορά την απόδοση του και την λειτουργία του.



Σχήμα 2-6. Τυπική δομή System on Chip (SoC).

Τα επιπλέον κυκλώματα που διαθέτει ένα system on chip σε σχέση με ένα απλό μικροελεγκτή συνήθως είναι:

- Κύκλωμα ρύθμισης της τάσης τροφοδοσίας. Τέτοια κυκλώματα επιτρέπουν στον προγραμματιστή να καθορίσει το επίπεδο τάσης λειτουργίας του chip και άρα να ορίσει και την τάση που θα μπορεί να σηκώσει ο μικροελεγκτής στις εξόδους του, κάνοντας τον έτσι συμβατό με πολλά διαφορετικά chip και κυκλώματα.
- Κύκλωμα ασύρματης επικοινωνίας. Πολλά system on chip διαθέτουν κυκλώματα ασύρματης επικοινωνίας όπως Wi-Fi και Bluetooth. Η ασύρματη επικοινωνία είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα που επιτρέπει τη χρήση μικροελεγκτών σε ασύρματες εφαρμογές μικρού μεγέθους.
- Κύκλωμα σειριακής επικοινωνίας MSB. Το κύκλωμα αυτό παρέχει την δυνατότητα της σύνδεσης του μικροελεγκτή με συσκευές όπως ηλεκτρονικούς υπολογιστές και επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών. Η δυνατότητα αυτή είναι πολύ σημαντική

διότι αφενός καθιστά εύκολο τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή και αφετέρου επιτρέπει στον μικροελεγκτή να επικοινωνεί με τον υπολογιστή στέλνοντας ή λαμβάνοντας πληροφορίες.

2.3.1 Προγραμματισμός μικροελεγκτών

Οι μικροελεγκτές μπορούν να εκτελούν ποικίλες λειτουργίες. Οι λειτουργίες αυτές καθορίζονται από τα εκτελέσιμα αρχεία τα οποία είναι φορτωμένα στην μνήμη τους. Ένα εκτελέσιμο αρχείο περιλαμβάνει εντολές στη μορφή κώδικα μηχανής. Παρόλα αυτά ένας προγραμματιστής δεν γράφει το εκτελέσιμο αρχείο σε κώδικα μηχανής. Παλαιότερα ο προγραμματισμός των μικροελεγκτών γινόταν με χρήση γλωσσών τύπου Assembly που επιτρέπουν την απευθείας διαχείριση των καταχωρητών ενός μικροελεγκτή. Ένα πρόγραμμα τύπου assembler στη συνέχεια μετέτρεπε τον κώδικα assembly σε κώδικα μηχανής. Σήμερα, ο προγραμματισμός των μικροελεγκτών γίνεται με την χρήση προγραμματιστικών γλωσσών υψηλότερου επιπέδου, όπως είναι η C, C++, Java και Python. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται προγράμματα τύπου Compiler και Assembler για την μετατροπή του κώδικα αρχικά σε Assembly και στη συνέχεια σε κώδικα μηχανής. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι κάθε οικογένεια μικροελεγκτών είναι συμβατή με διαφορετική γλώσσα Assembly και συνεπώς ένας προγραμματιστής πρέπει να ορίσει το είδος του μικροελεγκτή κατά την διαδικασία μεταγλώττισης του κώδικα του. Παρότι οι γλώσσες προγραμματισμού υψηλού επιπέδου είναι αρκετά πιο κατανοητές και εύκολες στην χρήση σε σχέση με γλώσσες τύπου assembly, πολλοί προγραμματιστές εξακολουθούν να χρησιμοποιούν την Assembly σε πολλές εφαρμογές. Ο βασικός λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι τα προγράμματα μεταγλωττιστές (compilers) που μετατρέπουν μια γλώσσα υψηλού επιπέδου σε γλώσσα assembly δεν πετυχαίνουν πάντα την βελτιστοποίηση όσον αφορά την διάρκεια εκτέλεσης όλων των εντολών, με αποτέλεσμα πολλές φορές ένας έμπειρος προγραμματιστής να μπορεί να πετύχει την ίδια λειτουργία με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα γράφοντας κατευθείαν σε assembly παρά σε μία υψηλού επιπέδου γλώσσα. Παρόλα αυτά, η χρήση γλωσσών assembly απαιτεί μεγάλο βαθμό εξοικείωσης τόσο με την ίδια την γλώσσα όσο και με τον ίδιο τον μικροελεγκτή που χρησιμοποιείται σε μια εφαρμογή. Επιπλέον για τις διάφορες υψηλού επιπέδου γλώσσες προγραμματισμού έχουν δημιουργηθεί βιβλιοθήκες συναρτήσεων που πραγματοποιούν συγκεκριμένες λειτουργίες. Οι βιβλιοθήκες αυτές είναι γραμμένες με τέτοιο τρόπο που εξασφαλίζει ότι κατά την εκτέλεση του κώδικα ο μικροελεγκτής έχει μικρή πιθανότητα να οδηγηθεί σε μια προβληματική κατάσταση. Συνεπώς είναι πολύ πιο ασφαλής η χρήση τέτοιων γλωσσών για τον προγραμματισμό μικροελεγκτών.

2.3.2 Έλεγχος με την χρήση μικροελεγκτών

Οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται πλέον σε όλες σχεδόν τις τεχνολογικές εφαρμογές. Μια από τις βασικότερες λειτουργίες των μικροελεγκτών είναι ο έλεγχος συστημάτων. Ένα σύστημα ελέγχου συνήθως αποτελείται από αισθητήρες, επενεργητές και συσκευές λήψης αποφάσεων. Ο λόγος που οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ελέγχου είναι ότι μπορούν να λάβουν και να επεξεργαστούν τα σήματα αισθητήρων, μπορούν να εκτελέσουν υπολογισμούς και να λάβουν αποφάσεις εκτιμώντας συγκεκριμένες προϋποθέσεις και συνθήκες και τέλος μπορούν να επενεργήσουν οι ίδιοι σε συστήματα ή να οδηγήσουν συστήματα άλλων επενεργητών. Μάλιστα, είναι πολύ αποτελεσματικοί γιατί

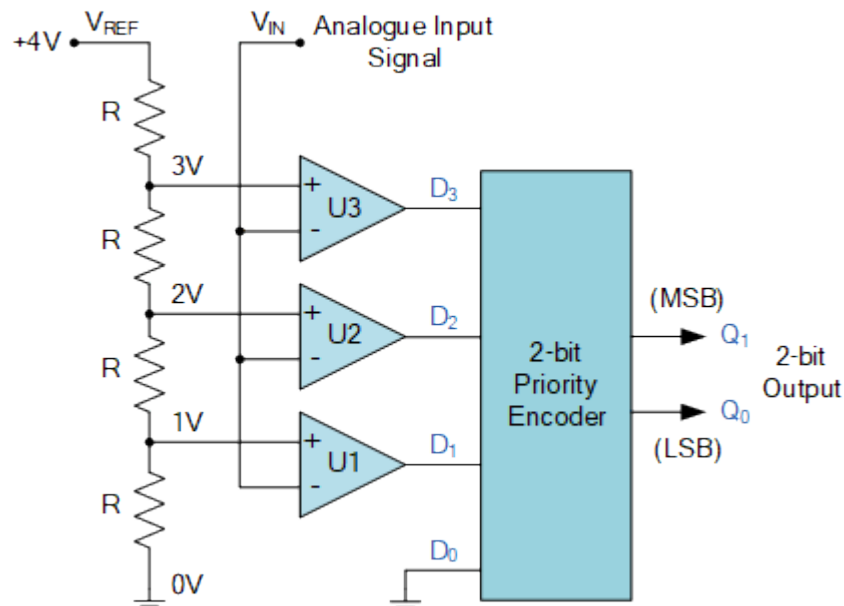
προσφέρουν πληθώρα δυνατοτήτων για κάθε μία από τις λειτουργίες αυτές. Οι κυριότερες δυνατότητες που διαθέτουν οι μικροελεγκτές για την εκτέλεση των παραπάνω λειτουργιών παρουσιάζονται παρακάτω:

Λήψη και επεξεργασία σημάτων από αισθητήρες

Οι βασικές μέθοδοι με τις οποίες ένας αισθητήρας μεταφέρει πληροφορία για την μέτρηση του είναι:

- Αναλογικό σήμα τάσης ή ρεύματος. Πολλοί αισθητήρες είτε παθητικοί είτε ενεργητικοί, εκπέμπουν σήματα τάσης ή ρεύματος η τιμή των οποίων είναι ανάλογη του μετρούμενου μεγέθους. Ένας μικροελεγκτής μπορεί να μετρήσει την τάση ή το ρεύμα εξόδου ενός αισθητήρα με την χρήση ενός κυκλώματος ADC (Analog to digital converter). Ένα κύκλωμα ADC μπορεί να δειγματοληπτεί την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του και να την μετατρέψει σε ψηφιακό σήμα το οποίο στη συνέχεια μπορεί να επεξεργαστεί ο μικροελεγκτής. Τα κυκλώματα ADC είναι σχεδιασμένα να μετράνε σήματα συγκεκριμένου εύρους τάσης και με συγκεκριμένη ακρίβεια. Η ακρίβεια ορίζεται από τον αριθμό των bits που χρησιμοποιεί το κύκλωμα ADC και ορίζει την ανάλυση με την οποία μπορεί να μετρηθεί ένα σήμα. Το Σχήμα 2-7 παρουσιάζει το κύκλωμα ενός 2bit ADC. Για παράδειγμα, ένα κύκλωμα ADC που μπορεί να μετρήσει τάσεις 0-5V με ακρίβεια 10bit, μπορεί να πετύχει ανάλυση ίση με

$$\text{Ανάλυση ADC(V)} = \frac{\text{Εύρος τάσης ADC(V)}}{2^{\text{Bits ADC}}} = \frac{5}{1024} = 0,00488V \quad (0-1)$$



Σχήμα 2-7. Σχέδιο Digital to Analog Converter 2bit.

- Ψηφιακό σήμα, δύο καταστάσεων (Logic high – Logic low). Ένας αισθητήρας μπορεί να παράγει στην έξοδο του ένα σήμα τάσης το οποίο δεν παίρνει ένα εύρος τιμών αλλά μπορεί να πάρει δύο διακριτές τιμές. Οι διακριτές αυτές τιμές μεταφράζονται στις καταστάσεις Logic low και Logic high. Με τον τρόπο αυτό ένας αισθητήρας μπορεί να μεταφέρει δυαδική πληροφορία, όπως π.χ. την κατάσταση ενός διακόπτη ή την κατάσταση ενός κουμπιού. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται και οι οπτικοί κωδικοποιητές, δηλαδή οι αισθητήρες γωνιακής θέσης των κινητήρων. Ένας οπτικός κωδικοποιητής εκπέμπει τετραγωνικούς παλμούς, δηλαδή σήματα δύο καταστάσεων με συχνότητα που αντιστοιχίζεται στην ταχύτητα του κινητήρα. Επίσης, κάθε παλμός αντιστοιχίζεται σε στροφή συγκεκριμένων μοιρών, ανάλογα με την ακρίβεια του κωδικοποιητή. Ένας μικροελεγκτής μπορεί να αντιληφθεί την κατάσταση ενός ψηφιακού σήματος μέσω των εισόδων του. Ιδιαίτερα σημαντικό σε αυτή την περίπτωση είναι τα επίπεδα τάσης των σημάτων του αισθητήρα να είναι συμβατά με τα επίπεδα τάσης του μικροελεγκτή. Υπάρχουν διάφορα πρότυπα για την μετάφραση επιπέδων τάσης σε καταστάσεις Logic high και Logic low. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα είναι τα πρότυπα CMOS και TTL. Το πρότυπο TTL ορίζει ως κατάσταση Logic low την κατάσταση στην οποία η τάση κυμαίνεται από 0 έως 0,8V και ως κατάσταση Logic high την κατάσταση στην οποία η τάση κυμαίνεται από 2 έως 5V. Αντίστοιχα, το πρότυπο CMOS ορίζει ως κατάσταση Logic low την κατάσταση στην οποία η τάση κυμαίνεται από 0 έως το 1/3 της τάσης τροφοδοσίας ενώ ως κατάσταση Logic high ορίζεται η κατάσταση στην οποία η τάση κυμαίνεται μεταξύ 2/3 και 3/3 της τάσης τροφοδοσίας.
- Τέλος, πολλοί αισθητήρες χρησιμοποιούν κάποιο πρωτόκολλο επικοινωνίας για την μεταφορά της πληροφορίας. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας βασίζονται στην ανταλλαγή σημάτων τάσης που μπορούν να πάρουν δύο καταστάσεις (Logic low και Logic high), με την διαφορά όμως ότι σε αυτή την περίπτωση το κάθε πρωτόκολλο ορίζει κανόνες σύμφωνα με τους οποίους τα σήματα δύο καταστάσεων μεταφράζονται σε πληροφορία. Τέτοια πρωτόκολλα είναι το UART, το I2C και το SPI. Οι αισθητήρες αυτοί διαθέτουν μια λίστα από πληροφορίες τις οποίες ο μικροελεγκτής μπορεί να αποκτήσει χρησιμοποιώντας κατάλληλες συναρτήσεις που ορίζονται σε κάθε πρωτόκολλο.

Εκτέλεση υπολογισμών και λήψη αποφάσεων

Οι μικροελεγκτές μπορούν να εκτελούν σύνθετους υπολογισμούς σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για την χρήση τους στον υπολογισμό σημάτων ελέγχου. Επίσης διαθέτουν χρονιστές ακριβείας με τους οποίους μπορούν να συντονίζουν την εκτέλεση διαφορετικών υπολογισμών ή να υπολογίζουν τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ διαφορετικών επαναλήψεων με ακρίβεια.

Επενέργηση ή οδήγηση επενεργητών

Οι μικροελεγκτές μπορούν να επενεργούν οι ίδιοι σε συστήματα ή να οδηγούν άλλους επενεργητές, όπως dc κινητήρες. Οι μέθοδοι με τις οποίες το επιτυγχάνουν αυτό είναι πολλές μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

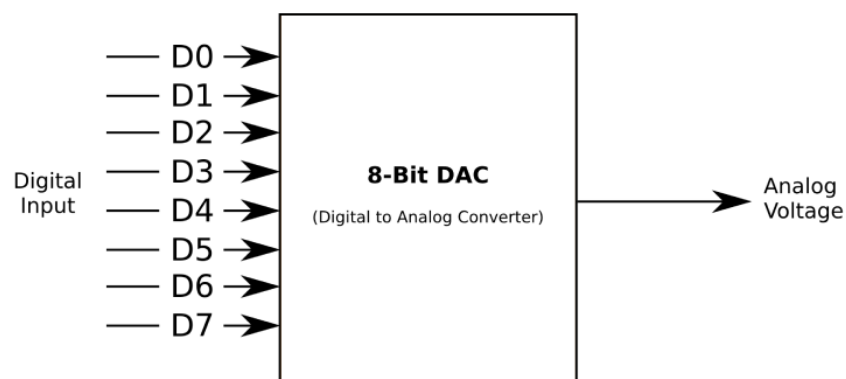
- Ψηφιακά σήματα εξόδου – σήματα δύο καταστάσεων. Εφαρμόζοντας κατάλληλα ένα σήμα δύο καταστάσεων (Logic high – Logic low), ένας μικροελεγκτής μπορεί να αλληλοεπιδράσει με διάφορες συσκευές, όπως ρελέ ή driver κινητήρων και άλλους αυτοματισμούς.
- Αναλογικά σήματα εξόδου. Οι μικροελεγκτές διαθέτουν Digital to Analog converters, δηλαδή κυκλώματα που μπορούν να μετατρέψουν ένα ψηφιακό σήμα σε αναλογικό. Κατά αντιστοιχία με την λειτουργία των ADC, τα DAC κυκλώματα λαμβάνουν ως είσοδο μια ψηφιακή τιμή και την μετατρέπουν σε αναλογικό σήμα συγκεκριμένης τάσης. Η μετατροπή αλλά και η ανάλυση του αναλογικού σήματος εξόδου εξαρτάται από τον αριθμό των bits που χρησιμοποιεί το DAC κύκλωμα για μετατροπή του ψηφιακού σήματος σε αναλογικό. Η σχέση που συνδέει την τάση εξόδου ενός DAC με το ψηφιακό σήμα εισόδου και την ακρίβεια (αριθμό bits) του DAC είναι η παρακάτω:

$$\text{Τάση εξόδου (V)} = \text{Min}\left(\frac{\text{Ψηφιακό σήμα εισόδου} \times \text{Τάση DAC(V)}}{2^{\text{Bits DAC}}}, \text{Τάση DAC}\right) \quad (0-2)$$

Δηλαδή για έναν DAC με μέγιστη τάση εξόδου ίση με 5V και ακρίβεια 10bit, το αναλογικό σήμα εξόδου είναι:

$$\text{Τάση εξόδου(V)} = \text{Min}\left(\frac{\text{Ψηφιακό σήμα εισόδου} \times 5}{1024}, 5\right) \quad (0-3)$$

Με την χρήση ενός DAC ο μικροελεγκτής μπορεί να εφαρμόσει ένα σήμα συγκεκριμένης τάσης σε ένα εξωτερικό σύστημα και συνεπώς να επενεργήσει σε αυτό. Τα αναλογικά σήματα εξόδου χρησιμοποιούνται συχνά από drivers κινητήρων για να οριστεί ένα άνω όριο στο ρεύμα που μπορεί να τραβήξει ο κινητήρας ή χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της τροφοδοσίας κυκλωμάτων. Το Σχήμα 2-8 παρουσιάζει το κύκλωμα ενός 8bit DAC.



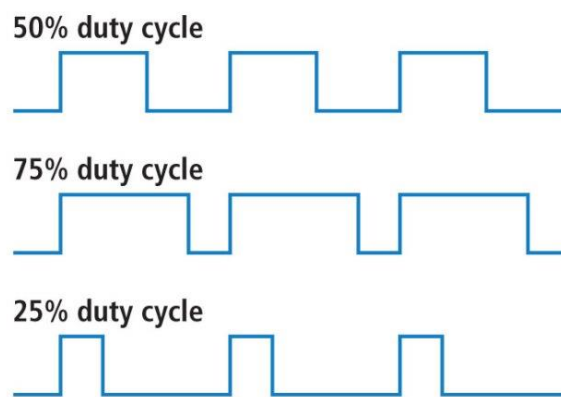
Σχήμα 2-8. Κύκλωμα 8bit digital to analog converter.

- Σήματα τετραγωνικών παλμών μεταβλητού πλάτους (PWM). Τα σήματα PWM είναι σήματα τετραγωνικών παλμών μεταβλητού πλάτους. Τα σήματα αυτά εφαρμόζονται επαναληπτικά με μια επιθυμητή συχνότητα – περίοδο. Ένα βασικό χαρακτηριστικό

των τετραγωνικών παλμών είναι το Duty cycle, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου που ο τετραγωνικός παλμός μένει ενεργός ως προς την περίοδο των παλμών (χρονική διαφορά δύο διαδοχικών παλμών). Τα σήματα PWM χρησιμοποιούνται ευρέως στον έλεγχο κινητήρων, τόσο για έλεγχο τάσης, όσο και για έλεγχο ρεύματος.

$$\text{Duty Cycle (\%)} = \frac{\text{Διάρκεια Παλμού (s)}}{\text{Περίοδος PWM (s)}} \quad (0-4)$$

Οι drivers των κινητήρων διαθέτουν κυκλώματα που μπορούν να μετατρέψουν το duty cycle ενός PWM σήματος εισόδου σε σήμα τάσης ή σήμα ρεύματος και αντίστοιχα να πετύχουν την επιθυμητή τάση ή το επιθυμητό ρεύμα στον κινητήρα. Το Σχήμα 2-9 παρουσιάζει τρία διαφορετικά σήματα PWM με κοινή συχνότητα και διαφορετικό duty cycle.



Σχήμα 2-9. Σήματα PWM ίδιας συχνότητας – διαφορετικού duty cycle.

- Σειριακά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι μικροελεγκτές μπορούν να αλληλοεπιδρούν με άλλες συσκευές χρησιμοποιώντας κατάλληλα πρωτόκολλα σειριακής επικοινωνίας. Τα πρωτόκολλα αυτά επιτρέπουν την ανταλλαγή ψηφιακής πληροφορίας. Πολλοί drivers κινητήρων, ειδικά όσοι είναι σχεδιασμένοι για οδήγηση κινητήρων υψηλών απαιτήσεων, υποστηρίζουν τέτοια πρωτόκολλα επικοινωνίας. Μέσω της υλοποίησης ενός τέτοιου πρωτοκόλλου, ένας driver μπορεί να παρέχει την δυνατότητα σύνθετων επιλογών ελέγχου, όπως την επιλογή του είδους ελέγχου (τάσης ή ρεύματος), τον ορισμό ενός εύρους τιμών για την επιθυμητή τάση ή το ρεύμα, τον ορισμό της φοράς περιστροφής

3 Ανάλυση - Σχεδιασμός

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία ανάλυσης των απαιτήσεων και των προδιαγραφών κάθε επιμέρους στοιχείου της συνολικής διάταξης. Επίσης, παρουσιάζονται οι επιλογές που έγιναν για τον σχεδιασμό των συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην τελική διάταξη.

3.2 Επιλογή μικροελεγκτών

Το πρώτο και κύριο στοιχείο της διάταξης το οποίο έπρεπε να επιλεγεί ήταν οι μικροελεγκτές που θα χρησιμοποιούνταν στα συστήματα Master και Slave. Οι μικροελεγκτές που θα χρησιμοποιούνταν στην διάταξη έπρεπε να πληρούν ορισμένες προδιαγραφές ούτως ώστε να εξασφαλίζεται ότι μπορούν να εκτελέσουν όλες τις απαιτούμενες λειτουργίες με ακρίβεια και σε συγκεκριμένο χρόνο, για να επιτυγχάνονται οι χρονικές προδιαγραφές της εργασίας. Σε προηγούμενη διπλωματική εργασία έγινε επιλογή μικροελεγκτών της Nordic και συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα SoC (system on chip) nrf51822. Απαιτήθηκε, όμως, να γίνει αντικατάσταση των μικροελεγκτών διότι, όπως είχε αναλυθεί στο Κεφάλαιο 6.3 της [3], η επεξεργαστική ισχύς τους δεν ήταν αρκετή για να επιτυγχάνεται ακριβής παρακολούθηση της θέσης των κινητήρων μέσω της διεπαφής με τους οπτικούς κωδικοποιητές. Δεδομένου, όμως, ότι για την προηγούμενη διπλωματική εργασία [3] είχαν χρησιμοποιηθεί μικροελεγκτές της Nordic, δόθηκε και τώρα προτεραιότητα σε μικροελεγκτές της ίδιας εταιρείας, ούτως ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα λογισμικά για compile και testing που χρησιμοποιήθηκαν και στο παρελθόν και ήταν συμβατά με του μικροελεγκτές της Nordic.

3.2.1 Δυνατότητα BLE πρωτοκόλλου

Το βασικό χαρακτηριστικό που θα έπρεπε να υποστηρίζουν οι μικροελεγκτές είναι η δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας μέσω του πρωτοκόλλου BLE. Το τελευταίο BLE SoC της Nordic είναι το nrf5340 το οποίο διαθέτει τα παρακάτω πλεονεκτήματα συγκριτικά με το προηγούμενο (nrf51822) σχετικά με την δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας με BLE πρωτόκολλο:

- Μειωμένη κατανάλωση για την μέγιστη **ισχύ μετάδοσης ασύρματης πληροφορίας**. Η μειωμένη κατανάλωση λόγω ασύρματης επικοινωνίας είναι σημαντικό πλεονέκτημα διότι η κύρια διαδικασία για την οποία ο μικροελεγκτής καταναλώνει ισχύ είναι η ασύρματη επικοινωνία. Συνεπώς, μειωμένη κατανάλωση για ασύρματη επικοινωνία μεταφράζεται σε αυξημένη αυτονομία του συστήματος.
- Ξεχωριστό πυρήνα CPU στα 64MHz για network εφαρμογές (οι διαδικασίες που αφορούν την ασύρματη επικοινωνία μέσω BLE ελέγχονται και εκτελούνται από την network CPU, μειώνοντας σημαντικά την επιβάρυνση της κύριας (application) CPU, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλες διαδικασίες. Το nrf51822 αντιθέτως, δεν διέθετε ξεχωριστές CPUs, ενώ και η ταχύτητα της CPU ήταν στα 16MHz, δηλαδή ήταν σημαντικά μικρότερη από αυτήν του nrf5340.

Παρόλα αυτά, το nrf51822 υπερσιχύει στην μέγιστη ισχύ μετάδοσης ασύρματης πληροφορίας, η οποία είναι +4Db σε σύγκριση με το nrf5340 το οποίο έχει μέγιστη ισχύ μετάδοσης +3Db. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό επηρεάζει την μέγιστη απόσταση μετάδοσης, η οποία για την συγκεκριμένη εφαρμογή δεν θα είναι μεγάλη, αλλά θα είναι της τάξης των μερικών εκατοστών. Συνεπώς, το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό στο οποίο υστερεί το nrf5340 δεν θεωρήθηκε σημαντικό. Ο Πίνακας 3-1 παρουσιάζει συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας των SoC και τις αντίστοιχες τιμές τους.

Πίνακας 3-1. Σύγκριση μικροελεγκτών ως προς ασύρματη επικοινωνία

Μοντέλο	nrf51822 (αρχικό SoC)	nrf5340 (νέο SoC)
Κατανάλωση ρεύματος	10.5mA @4dB TX power 8.06mA @0dB TX power	5.1mA @3dB TX power 3.4mA @4dB TX power
Ισχύς μετάδοσης	+4dB	+3dB
Ευαισθησία λήψης	-93dB	-95dB
Network CPU	n/a	64Mhz, Cortex M33

3.2.2 Δυνατότητες SoC

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το SoC nrf5340 υπερτερεί σημαντικά του nrf51822 ως προς την επεξεργαστική ισχύ. Πιο συγκεκριμένα, το nrf5340 διαθέτει 2 πυρήνες που αναλαμβάνουν διακριτές λειτουργίες. Ο network πυρήνας αποτελείται από έναν επεξεργαστή Cortex M33 με ταχύτητα στα 64MHz που αναλαμβάνει να ελέγχει και να εκτελεί τις διαδικασίες που σχετίζονται με ασύρματες επικοινωνίες (όπως το BLE). Επίσης, διαθέτει 265KB flash μνήμη και 64KB μνήμη RAM. Ο application πυρήνας, οποίος είναι υπεύθυνος για όλες τις διεργασίες πλην αυτών που σχετίζονται με ασύρματες επικοινωνίες, αποτελείται επίσης από έναν Cortex M33 επεξεργαστή με ταχύτητα στα 64MHz, η οποία όμως μπορεί να αυξηθεί και στα 128MHz για καλύτερη επίδοση, αν αυτό απαιτείται από την εφαρμογή, με μειωμένη όμως απόδοση (δηλαδή αυξημένη κατανάλωση ρεύματος για τις ίδιες διαδικασίες σε σχέση με την λειτουργία στα 64MHz). Επίσης, διαθέτει 1MB flash μνήμη και 512KB μνήμη RAM. Το SoC nrf51822, αντιθέτως, διαθέτει ένα πυρήνα μόνο, ο οποίος αναλαμβάνει να εκτελέσει όλες τις διαδικασίες και αποτελείται από μία Cortex M0 CPU με ταχύτητα στα 16MHz. Επίσης διαθέτει 256KB μνήμη flash και 32KB μνήμη RAM.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου οι αυξημένες δυνατότητες του επεξεργαστή είναι πολύ σημαντικός παράγοντας επιλογής microcontroller καθώς επηρεάζει την επίδοση του μικροελεγκτή, η οποία είναι απαραίτητο να πετυχαίνει τις προδιαγραφές της εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, οι χαμηλές δυνατότητες του επεξεργαστή του nrf51822 SoC είχαν ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να υποστηριχθεί η ακριβής παρακολούθηση της θέσης των κινητήρων μέσω διεπαφής με τους οπτικούς κωδικοποιητές, διότι η συχνότητα των παλμών που παράγονταν κατά την κίνηση των κινητήρων ήταν τέτοια που δεν επέτρεπε στην CPU να καταγράψει όλους τους παλμούς ενώ ταυτόχρονα εκτελούνταν όλες οι υπόλοιπες διαδικασίες. Συνεπώς, τα δύο πλεονεκτήματα που εμφανίζει το nrf5340 SoC ως προς το nrf51822 SoC , δηλαδή:

- η ύπαρξη δύο πυρήνων με διακριτές λειτουργίες
- η αυξημένη ταχύτητα των δύο πυρήνων

κρίνονται πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα για την εφαρμογή αυτή. Ο Πίνακας 3-2 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των επεξεργαστών των δύο μικροελεγκτών.

Πίνακας 3-2. Σύγκριση μικροελεγκτών ως προς τα γενικά χαρακτηριστικά τους.

Μοντέλο		nrf51822	nrf5340
Πυρήνας εφαρμογών	CPU	Cortex M0, 16MHz	Cortex M33, 64/128MHz
	Flash Memory	256KB	1MB
	RAM	32KB	512KB
Πυρήνας δικτύου	CPU	N/A	Cortex M33, 64MHz
	Flash Memory	N/A	256KB
	RAM	N/A	64KB

3.2.3 Περιφερειακά

Τα περιφερειακά είναι συστήματα που αποτελούνται από hardware και software και επιτρέπουν στον μικροελεγκτή να επικοινωνήσει με το περιβάλλον του, δηλαδή με άλλες συσκευές, μέσω κατάλληλων σημάτων και να εκτελέσει συγκεκριμένες λειτουργίες. Τα βασικά περιφερειακά τα οποία απαιτούνται για την εφαρμογή αυτή είναι τα παρακάτω:

- Αναλογικοψηφιακός μετατροπέας (Analog to digital converter, ADC), για μέτρηση του σήματος τάσης των αισθητήρων δύναμης
- Διαμόρφωση εύρους παλμού (Pulse width modulation, PWM), για έλεγχο των κινητήρων
- Εισόδους/Εξόδους γενικής χρήσης (Generic purpose inputs/outputs, GPIO), για αποστολή/λήψη διακριτών (ψηφιακών) σημάτων, όπως παραδείγματος χάριν για διάβασμα των οπτικών κωδικοποιητών, ή για έλεγχο της κατεύθυνσης στροφής των κινητήρων
- Χρονιστής (Timer), για την εκτέλεση διεργασιών ύστερα από συγκεκριμένη χρονική περίοδο

Ένα βασικό πλεονέκτημα του nrf5340 SoC είναι ότι διαθέτει 4 περιφερειακά PWM. Συνεπώς υποστηρίζει τη χρήση συγκεκριμένων επαφών για την παραγωγή σημάτων PWM ρυθμιζόμενης συχνότητας και πλάτους παλμού. Αντίθετα, το SoC nrf51822 δεν διαθέτει έτοιμο περιφερειακό PWM, αλλά πρέπει κανείς να χρησιμοποιήσει παραπάνω από ένα άλλα περιφερειακά για να υλοποιήσει τετραγωνικούς παλμούς μεταβλητής συχνότητας και πλάτους. Συνεπώς, η πολυπλοκότητα της υλοποίησης αυξάνεται και καταναλώνεται μεγαλύτερο μέρος της CPU για να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα. Η τεχνική PWM είναι η βασική τεχνική που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο DC κινητήρων μέσω κατάλληλων dc motor drives. Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται ο έλεγχος της τάσης ή του ρεύματος του κινητήρα. Στην εφαρμογή μας απαιτείται η χρήση PWM για τον έλεγχο τόσο των Master όσο και των Slave κινητήρων.

Επίσης, το nrf5340 SoC πλεονεκτεί και ως προς το ADC (Analog to digital converter) περιφερειακό που διαθέτει. Πιο συγκεκριμένα, το ADC του nrf5340 μπορεί να ρυθμιστεί για να προσφέρει ανάλυση 12bit (ακόμα και 14bit αν χρειαστεί), σε αντίθεση με το nrf51822 το οποίο μπορεί να προσφέρει έως 10bit ανάλυση. Η ανάλυση σχετίζεται με την διακριτική

ικανότητα που έχει ο ADC για να αντιληφθεί ένα αναλογικό σήμα και να το μετατρέψει σε ψηφιακό. Αν και εν γένει η αυξημένη διακριτική ικανότητα ενός ADC είναι σημαντικό πλεονέκτημα, στην εφαρμογή μας δεν γίνεται να αξιοποιηθεί σημαντικά, λόγω του ότι ο αναλογικός αισθητήρας δύναμης που χρησιμοποιείται δεν είναι ιδιαίτερα ακριβής και υπόκειται σε θόρυβο.

Επιπλέον, το περιφερειακό ADC του nrf5340 παρέχει ένα ακόμη πλεονέκτημα το οποίο είναι αρκετά χρήσιμο στην εφαρμογή αυτή. Ένας ADC έχει συγκεκριμένες προδιαγραφές για την αντίσταση του κυκλώματος που του οποίου την τάση πρέπει να μετρήσει. Ο ADC του nrf51822 μπορεί να πετύχει την προδιαγεγραμμένη απόδοση όταν το κύκλωμα του αισθητήρα που συνδέεται στον ADC έχει αντίσταση μικρότερη από 1kOhm. Το κύκλωμα μέτρησης των αισθητήρων δύναμης (FSR), έχει αρκετά υψηλή αντίσταση και συνεπώς το περιφερειακό ADC του nrf51822 δεν είναι κατάλληλο για την λήψη μετρήσεων από τους αισθητήρες δύναμης. Αντίθετα, το περιφερειακό ADC του nrf5340 επιτρέπει την ρύθμιση μιας παραμέτρου του, για την προσαρμογή του περιφερειακού ADC στην αντίσταση του κυκλώματος του αισθητήρα που συνδέεται σε αυτόν. Η παράμετρος αυτή είναι ο χρόνος φόρτισης του πυκνωτή ο οποίος χρησιμοποιείται από τον ADC για δειγματοληψία της τάσης του αισθητήρα που είναι συνδεδεμένος σε αυτόν. Ο χρόνος φόρτισης του πυκνωτή δειγματοληψίας του ADC εξαρτάται από την αντίσταση του αισθητήρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του αισθητήρα, τόσο μεγαλύτερος πρέπει να είναι και ο χρόνος φόρτισης του πυκνωτή δειγματοληψίας. Ο ADC του nrf5340 επιτρέπει την ρύθμιση της παραμέτρου αυτής μέχρι και την τιμή (ανώτατο όριο) των 40μs, η οποία είναι κατάλληλη για μέτρηση κυκλωμάτων με αντίσταση της τάξης των 800kOhm.

3.2.4 Τροφοδοσία

Όσον αφορά την τροφοδοσία, το nrf5340 SoC μπορεί να τροφοδοτηθεί από συνεχή τάση στο εύρος 1,7-5,5V. Το nrf51822 μπορεί να τροφοδοτηθεί από ένα μικρότερο εύρος συνεχούς τάσης, ίσο με 1,8-3,6V. Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα του nrf5340 για την εφαρμογή μας διότι μπορεί να τροφοδοτηθεί από την ίδια πηγή συνεχούς τάσης 5V που θα χρησιμοποιηθεί και για την τροφοδοσία των:

- master κινητήρων και master driver και
- οπτικού κωδικοποιητή του slave encoder

Συνεπώς δεν χρειάζεται η μία πηγή συνεχούς τάσης της τάξης των 3V, που θα αύξανε τις διαστάσεις του εξοπλισμού. Επιπλέον, το nrf5340 διαθέτει regulators που του επιτρέπουν να μετατρέπει την εξωτερική τάση τροφοδοσίας σε 3.3V συνεχή τάση και με αυτήν να τροφοδοτεί τα εσωτερικά του συστήματα αλλά και να τροφοδοτεί εξωτερικές συσκευές με:

- τάση ίση με την τάση τροφοδοσίας του και
- 5V.

Συνεπώς, προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Μπορεί να τροφοδοτήσει με 3V συνεχούς τάσης τους οπτικούς κωδικοποιητές των master κινητήρων και έτσι να μην χρειαστεί επιπλέον τροφοδοσία συνεχούς τάσης στα 3V και
- Μπορεί να τροφοδοτήσει με 5V συνεχούς τάσης τον οπτικό κωδικοποιητή του slave κινητήρα. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα γιατί ενώ όπως αναφέρθηκε παραπάνω θα υπάρχει πηγή τάσης στα 5V, αυτή ίσως χρειάζεται να ρυθμίζεται σε ελαφρώς υψηλότερο επίπεδο (π.χ. 5.5V) για να αντισταθμιστεί πιθανή πτώση τάσης κατά την λειτουργία των κινητήρων. Με αυτό τον τρόπο, το ευαίσθητο κύκλωμα του οπτικού

κωδικοποιητή θα τροφοδοτείται από μια σταθερή πηγή τάσης 5V από τον μικροελεγκτή (nrf5340) ενώ ο ίδιος ο μικροελεγκτής και τα κυκλώματα των master κινητήρων θα μπορούν να τροφοδοτούνται από συνεχή τάση στο εύρος 5-5,5V.

Αντίθετα, το nrf51822 SoC δεν έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτηθεί από τροφοδοσία 5V συνεχούς τάσης και συνεπώς θα έπρεπε να εγκατασταθεί άλλη μία πηγή τάσης 3,3-3,6V στην διάταξη για την τροφοδοσία του. Αντίστοιχα, το SoC nrf5340 πλεονεκτεί και σε κατανάλωση ρεύματος, καθώς όπως αναφέρθηκε στην πρώτη παράγραφο του κεφαλαίου αυτού, απαιτεί σημαντικά χαμηλότερο ρεύμα για την ασύρματη επικοινωνία με σχετικά παρόμοια ισχύ μετάδοσης. 3.

3.3 Σύστημα Master

Το σύστημα Master είναι αυτό που θα βρίσκεται εντός του χεριού του ακρωτηριασμένου ατόμου και σκοπό θα έχει:

- Να μετράει την δύναμη που ασκείται από το άτομο στους αισθητήρες δύναμης μέσω του αγωνιστικού μμ και του ανταγωνιστικού μμ και να επικοινωνεί την διαφορά των δύο δυνάμεων στον μικροελεγκτή του Slave συστήματος μέσω του πρωτοκόλλου BLE
- Να ελέγχει τους master κινητήρες με αναφορά την θέση του slave κινητήρα, ούτως ώστε να μεταφέρει στο άτομο την αίσθηση της θέσης του προσθετικού καρπού, ασκώντας δύναμη στους μύες του.

Το παραπάνω σύστημα αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Αισθητήρες δύναμης μυών
- Αισθητήρες θέσης master κινητήρων
- Έλεγχος master κινητήρων
- Οδήγηση master κινητήρων
- Πρωτόκολλα GAP και GATT
- Κύκλωμα τροφοδοσίας

3.3.1 Αισθητήρες δύναμης μυών

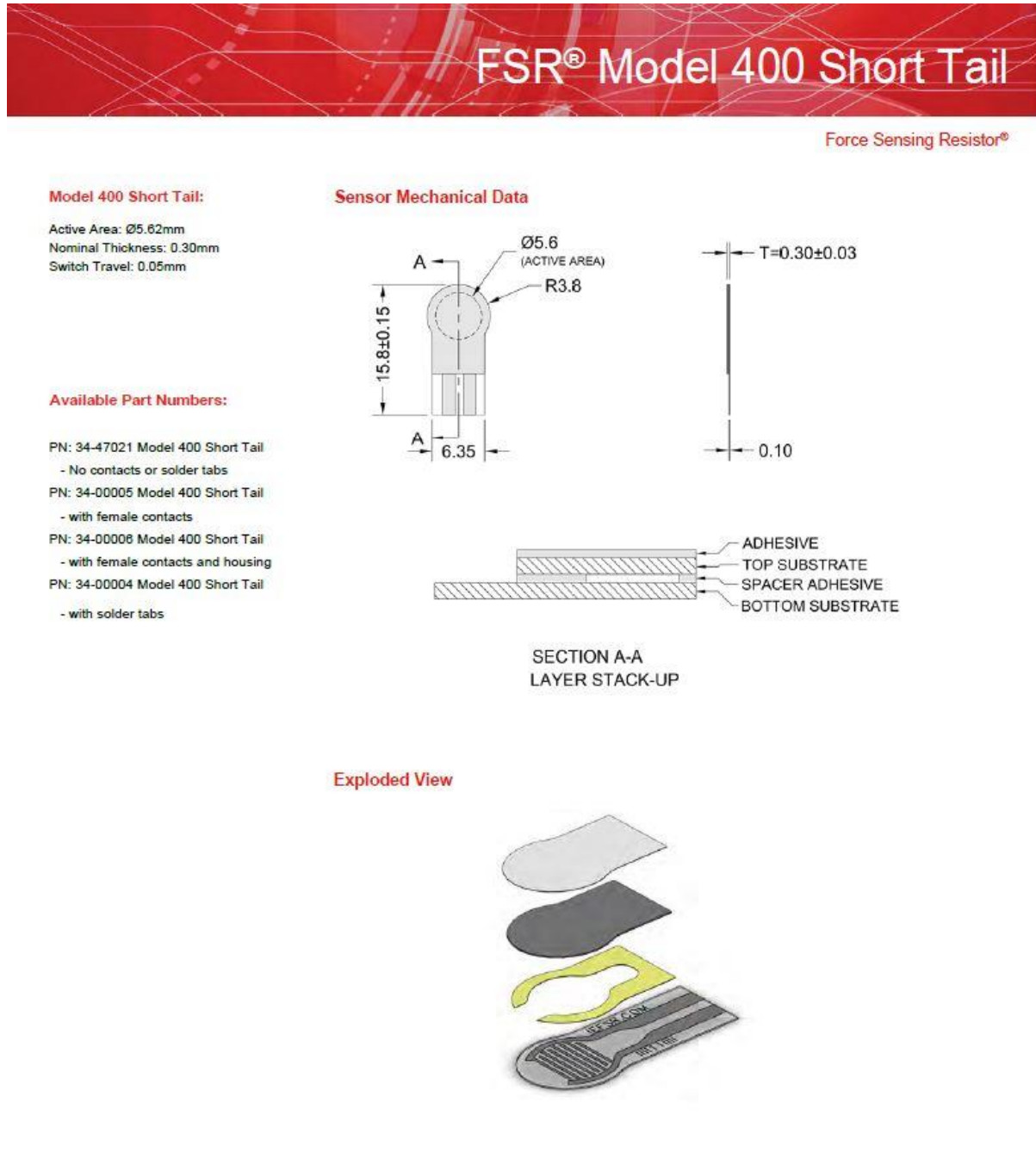
Όπως είχε ήδη επιλεγεί στην προηγούμενη διπλωματική εργασία, ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της δύναμης που ασκεί το άτομο με τους μύες του είναι ένας force sensitive resistor. Η λειτουργία του έγκειται στο ότι όταν ασκείται δύναμη στην επιφάνεια του, η αντίσταση του μειώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται η πτώση τάσης που προκαλεί όταν στα άκρα του εφαρμοστεί μια τάση. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι δεν είναι κατάλληλος αισθητήρας για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, παρόλα αυτά, είναι μια αρκετά οικονομική επιλογή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δοκιμές. Επίσης, στην εφαρμογή αυτή το ζητούμενο είναι να ποσοτικοποιηθεί η διαφορά μεταξύ των δυνάμεων που ασκεί ο χρήστης στον αγωνιστικό και ανταγωνιστικό μμ του, συνεπώς, η μεγάλη ακρίβεια της μέτρησης δεν είναι βασικό ζητούμενο.

Σε σχέση με την διάταξη που υλοποιήθηκε στην διπλωματική εργασία [3], έγιναν οι παρακάτω τροποποιήσεις:

- Αντί για δύο στάδια τελεστικών ενισχυτών, χρησιμοποιήθηκε ένα,
- Χρησιμοποιήθηκε μικρότερος σε διαστάσεις αισθητήρας,

- Σχεδιάστηκε διαφορετικό housing

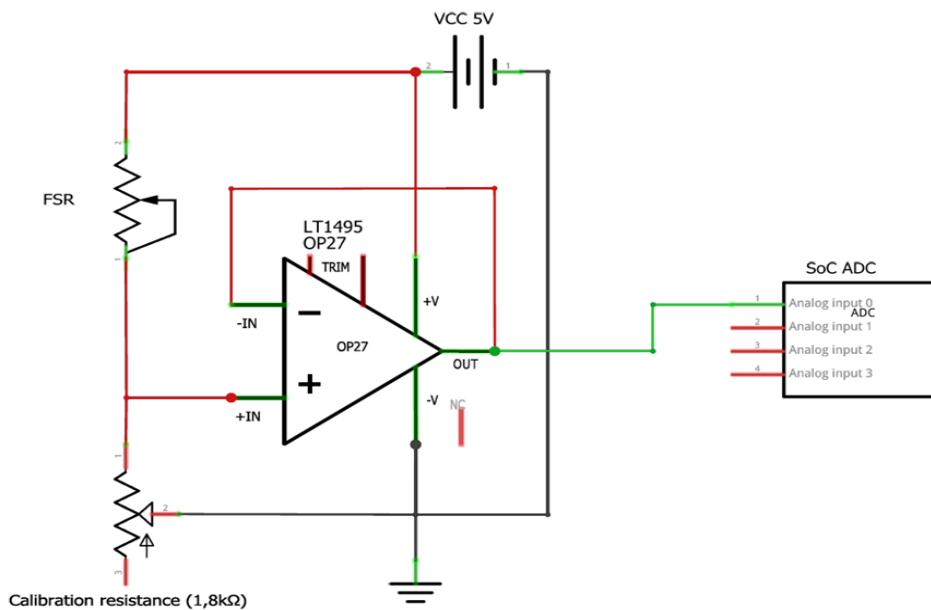
Η δύναμη που μπορεί να ασκήσει ένα άτομο στους μύες που ελέγχουν την κίνηση του καρπού κυμαίνεται από 0,6kg έως 2,5kg, δηλαδή 6-25N. Παρόλα αυτά, το χρήσιμο εύρος για εφαρμογές προσθετικών χεριών είναι πολύ χαμηλότερο. Συνεπώς θεωρήθηκε μέγιστη δύναμη ίση με 20N. Έτσι επιλέχθηκε ως αισθητήρας δύναμης ο FSR 400 της Interlink Electronics με διάμετρο 5mm και εύρος μετρήσεων από 0,2N έως και 20N. Στο Σχήμα 3-1 παρουσιάζεται ο αισθητήρας.



Σχήμα 3-1. Αισθητήρας FSR 400 της Interlink Electronics.

Όσον αφορά την χρήση ενός αντί για δύο τελεστικών ενισχυτών, αυτό έγινε διότι δοκιμάζοντας την προηγούμενη διάταξη, διαπιστώθηκε ότι ενώ αυτή αποσκοπούσε στο να πετύχει την γραμμικοποίηση της απόκρισης του αισθητήρα, αφενός παρατηρήθηκε ένα

διάστημα δυνάμεων-βαρών (έως 200 γραμμάρια) η τάση εξόδου του αισθητήρα μειωνόταν, και στη συνέχεια, αφού ξεπερνούσαν αυτό το όριο δύναμης-βάρους, η απόκριση ξεκινούσε να αυξάνεται. Αφετέρου, έγινε μικρή τροποποίηση στις αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση των κερδών των τελεστικών ενισχυτών, ούτως ώστε η απόκριση του αισθητήρα να είναι ρυθμισμένη στο εύρος 0-3V, το οποίο είναι το εύρος που μπορεί να μετρήσει ο ADC του μικροελεγκτή αντί για το εύρος 0-5V που είχε τεθεί ως εύρος προηγουμένως. Όπως διαπιστώθηκε με δοκιμές, η απόκριση του αισθητήρα περιοριζόταν στο εύρος τάσεων 2,5-3,0V για δυνάμεις-βάρη άνω των 400 γραμμαρίων, γεγονός που περιόριζε πάρα πολύ το εύρος μετρήσεων του ADC. Η τελική διάταξη είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 3-2.

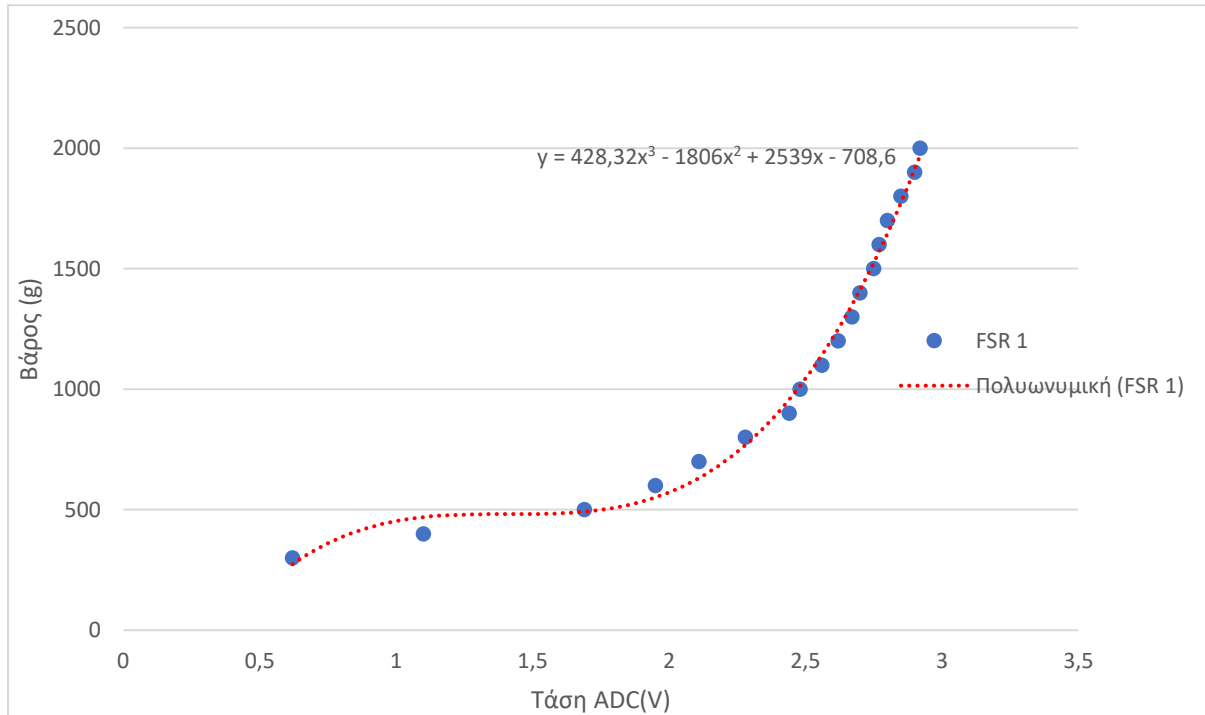


Σχήμα 3-2. Κύκλωμα σύνδεσης αισθητήρα FSR.

Χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος τελεστικός ενισχυτής, δηλαδή ο LT1495, με την διαφορά ότι δεν χρησιμοποιήθηκε αντίσταση στη σύνδεση της εξόδου με την αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή και η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή συνδέθηκε κατευθείαν με το αναλογικό κανάλι του μικροελεγκτή, χωρίς την μεσολάβηση του δεύτερου σταδίου ενίσχυσης. Η διάταξη τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς τάσης 5V, η οποία τροφοδοτεί τόσο τον τελεστικό ενισχυτή, όσο και τον αισθητήρα δύναμης. Χρησιμοποιήθηκε μεταβλητή αντίσταση για την σύνδεση σε σειρά με τον αισθητήρα δύναμης. Η αντίσταση αυτή ρυθμίστηκε ούτως ώστε όταν ασκείται η μέγιστη δύναμη στον αισθητήρα δύναμης, η έξοδος της διάταξης να ισούται με 3V, όση δηλαδή και η μέγιστη τάση που μπορεί να μετρηθεί από τον ADC του μικροελεγκτή. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω η μέγιστη δύναμη που θέλουμε να μπορούμε να μετρήσουμε στην εφαρμογή μας είναι 20N. Επιλέχθηκε η χρήση μεταβλητής αντίστασης ούτως ώστε αφενός να είναι εύκολο να ρυθμιστεί εκ νέου η τιμή, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι η απόκριση των FSR (force sensitive resistors) φθίνει με την χρήση και δεν παραμένει σταθερή. Η τιμή της αντίστασης, ύστερα από δοκιμές προσδιορίστηκε ίση με 2,6kOhm για μέγιστη δύναμη ίση με 20N.

Η διάταξη περιλαμβάνει δύο αισθητήρες δύναμης FSR, έναν για τον αγωνιστικό μύ και έναν για τον ανταγωνιστικό μύ. Αφού υλοποιήθηκε η διάταξη, σύμφωνα με το παραπάνω

σχέδιο, στη συνέχεια έπρεπε να γίνει calibration των δύο αισθητήρων. Για την διαδικασία, χρησιμοποιήθηκαν βάρη ακριβείας που ήταν διαθέσιμα στο εργαστήριο. Η διάταξη του κάθε αισθητήρα συνδέθηκε στο αντίστοιχο ADC κανάλι του μικροελεγκτή. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν μεταβλητές δυνάμεις στους αισθητήρες δύναμης με βήμα 100 γραμμάρια, ξεκινώντας από τα 0 γραμμάρια έως και τα δύο κιλά, που αντιστοιχούν στην μέγιστη δύναμη. Για κάθε είσοδο (τιμή βάρους) καταγράφηκε η τιμή της μετρούμενης τάσης από τον μικροελεγκτή. Το Σχήμα 3-3 απεικονίζει τις μετρήσεις τάσης που καταγράφηκαν για τον πρώτο αισθητήρα FSR. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η πολυωνυμική συνάρτηση 3ου βαθμού που χρησιμοποιήθηκε για την προσέγγιση της απόκρισης του αισθητήρα.

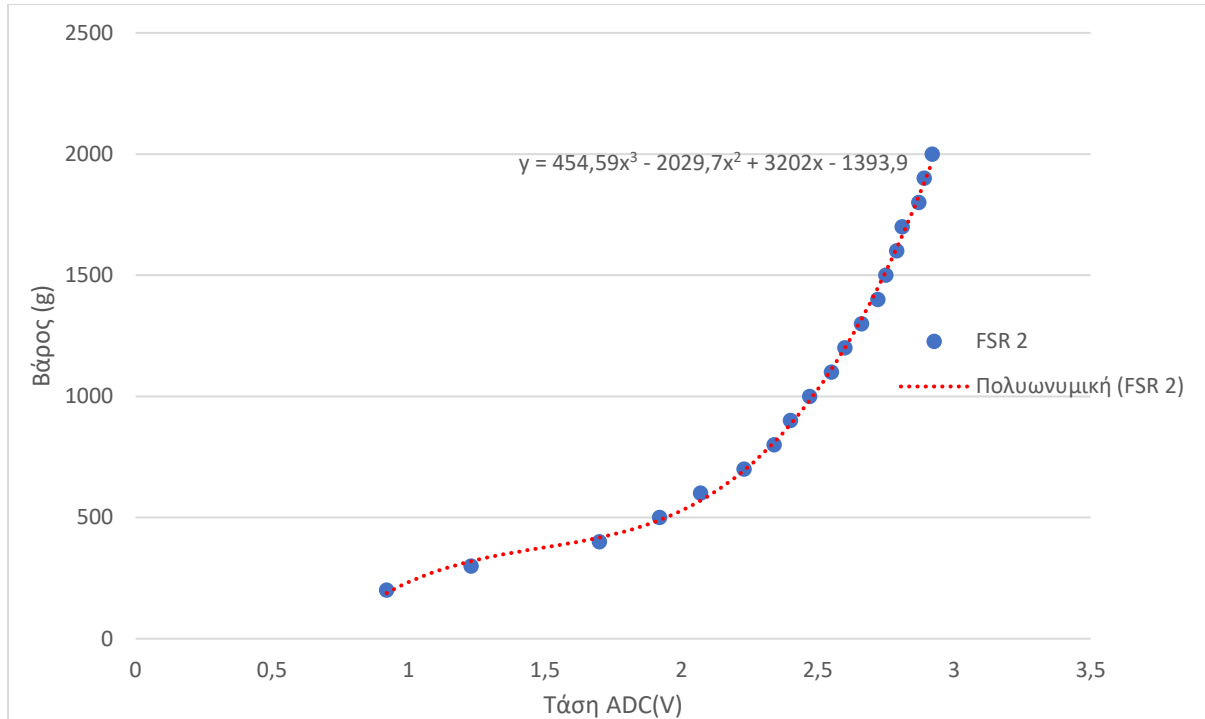


Σχήμα 3-3. Απόκριση αισθητήρα FSR 1.

Το Σχήμα 3-4 απεικονίζει τις μετρήσεις τάσης που καταγράφηκαν για τον δεύτερο αισθητήρα FSR και την αντίστοιχη πολυωνυμική συνάρτηση τρίτου βαθμού. Σημειώνεται ότι οι δοκιμές έγιναν με τις παρακάτω ρυθμίσεις στον μικροελεγκτή:

- Ανάλυση ADC: 10 bits
- Χρόνος φόρτισης πυκνωτή δειγματοληψίας: 40μs

Παρατηρείται σημαντική διαφορά ανάμεσα στους δύο αισθητήρες για μετρήσεις με χαμηλά βάρη, αλλά σε μεγαλύτερα βάρη, οι μετρήσεις είναι πολύ κοντινές. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην επαφή που γίνεται μεταξύ της επιφάνειας του αισθητήρα και του hooping, η οποία ίσως να μην εξασφαλίζεται ομοιόμορφα για μικρές δυνάμεις.



Σχήμα 3-4. Απόκριση αισθητήρα FSR 2.

Το ζητούμενο όμως, είναι ο υπολογισμός της δύναμης και όχι της τάσης. Συνεπώς, έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος αντιστοίχισης των τιμών τάσης που μετρήθηκαν από το μικροελεγκτή με τις τιμές των βαρών που χρησιμοποιήθηκαν. Η κανονική διαδικασία θα ήταν να υπολογιστεί η τιμή της αντίστασης του αισθητήρα (R_{fsr}) χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση μεταφοράς του τελεστικού ενισχυτή και στη συνέχεια να υπολογιστεί η δύναμη, από την χαρακτηριστική δύναμης – αντίστασης του αισθητήρα. Η διαδικασία αυτή όμως θα απαιτούσε περισσότερες πράξεις υπολογιστικά. Αντί αυτού, χρησιμοποιήθηκε πολυωνυμική συνάρτηση τρίτου βαθμού για να προσεγγιστεί η απόκριση του αισθητήρα. Για τον πρώτο αισθητήρα, η συνάρτηση που δίνει ως έξοδο την μάζα σε γραμμάρια χρησιμοποιώντας ως είσοδο την τάση σε millivolts είναι:

$$y = -708,602 + 2539,024x - 1806x^2 + 428,324x^3 \quad (1-1)$$

Ενώ για τον δεύτερο αισθητήρα, η συνάρτηση είναι:

$$y = -1393,889 + 3202,032x - 2029,667x^2 + 454,591x^3 \quad (1-2)$$

3.3.2 Κινητήρες

Για το master σύστημα επιλέχθηκαν οι dc κινητήρες DCX 8 M της Maxon με ονομαστική τάση 4,2V. Οι κινητήρες αυτοί επιλέχθηκαν με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- Έχουν μικρό μέγεθος, γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους για το master σύστημα το οποίο πρέπει να στο χέρι του ατόμου,
- Έχουν μικρή τάση λειτουργίας και καταναλώνουν χαμηλό ρεύμα, το οποίο επίσης είναι πλεονέκτημα για την τοποθέτηση εντός του ανθρώπινου σώματος

- Έχουν ονομαστική ροπή ίση με 0,649mNm και ονομαστική ταχύτητα 5000rpm που όπως θα αναλυθεί παρακάτω καλύπτουν τις απαιτήσεις της εφαρμογής.
- Είναι συμβατοί με κωδικοποιητή ακρίβειας 256 παλμών ανά περιστροφή που όπως επίσης θα αναλυθεί παρακάτω καλύπτει τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Ο οπτικός κωδικοποιητής που επιλέχθηκε είναι ο ENX8 MAG της Maxon ο οποίος δίνει ακρίβεια 256 παλμών ανά περιστροφή. Συνολικά το σύστημα κινητήρα-κωδικοποιητή διαθέτει επαφή τύπου FPC δώδεκα συνδέσεων για σύνδεση κινητήρα και κωδικοποιητή με λοιπά συστήματα. Βάσει απαιτήσεων της εφαρμογής, οι master κινητήρες θα πρέπει να στρέφονται ούτως ώστε να μετακινούν το περικόχλιο κατά μήκος σπειρώματος συνολικού μήκους 25, από τα οποία το χρήσιμο μήκος είναι 20mm. Αυτό το μήκος αντιστοιχίζεται στην πλήρη κίνηση του slave κινητήρα, δηλαδή στην πλήρη κίνηση του προσθετικού χεριού πάνω σε έναν άξονα. Η μέγιστη γωνιακή μετατόπιση είναι 95 μοίρες. Ο κωδικοποιητής των master κινητήρων παράγει 256 παλμούς ανά περιστροφή, το οποίο μπορεί να μεταφραστεί σε ακρίβεια τουλάχιστον ίση με:

$$\text{Ανάλυση θέσης(μοίρες)} = \frac{\text{Μοίρες πλήρους περιστροφής}}{\text{Αριθμός παλμών ανά περιστροφή}} = \frac{360}{256} = 1,40 \text{ μοίρες} \quad (1-3)$$

Η ανάλυση αυτή μεταφράζεται σε ακρίβεια θέσης του περικοχλίου ίση με:

$$\begin{aligned} \text{Ανάλυση θέσης(mm)} &= \text{Ανάλυση θέσης(μοίρες)} \times \text{Βήμα περικοχλίου} \left(\frac{\text{mm}}{\text{μοίρα}} \right) = \\ 1,4 \times \frac{0,4}{360} &= 1,56 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (1-4)$$

Το οποίο με τη σειρά του μεταφράζεται σε ακρίβεια θέσης του προσθετικού χεριού ίση με:

$$\begin{aligned} \text{Ανάλυση θέσης προσθετικού(μοίρες)} &= \frac{\text{Ανάλυση θέσης(mm)} \times \text{Μέγιστη περιστροφή προσθετικού(μοίρες)}}{\text{Χρήσιμο μήκος σπειρώματος(mm)}} \rightarrow \\ \text{Ανάλυση θέσης προσθετικού(μοίρες)} &= \frac{0,00156 \times 95}{20} = 0,00741^\circ \end{aligned} \quad (1-5)$$

Η ανάλυση αυτή είναι πολύ καλή, στην πραγματικότητα, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω είναι πολύ καλύτερη της ανάλυσης της θέσης του προσθετικού χεριού μέσω του κωδικοποιητή του slave κινητήρα, η οποία είναι 0,014 μοίρες.

Μια άλλη παράμετρος που έπρεπε να ληφθεί υπόψιν κατά την επιλογή του κινητήρα και του κωδικοποιητή του ήταν οι στροφές του κινητήρα και το πως αυτές καθορίζουν την συχνότητα των παλμών που παράγει ο κωδικοποιητής. Όπως αναδείχθηκε και στην προηγούμενη διπλωματική εργασία, το διάβασμα των παλμών ενός κωδικοποιητή μπορεί να είναι μια δύσκολη διαδικασία για έναν μικροελεγκτή, αν η συχνότητα των παλμών είναι μεγάλη και τελικά, μπορεί να καταλήξει να χρησιμοποιείται ο επεξεργαστής του μικροελεγκτή κυρίως για αυτή την διαδικασία, καθυστερώντας ή διακόπτοντας συχνά λοιπές διαδικασίες

που είναι επίσης σημαντικές για την εκτέλεση του συνολικού προγράμματος. Ακόμη χειρότερα, αν η συχνότητα των παλμών είναι πολύ μεγάλη, αυτό μπορεί να οδηγήσει στο να μην καταγράφονται όλοι οι παλμοί, δηλαδή να υπάρχει σφάλμα μέτρησης της θέσης.

Στην εφαρμογή αυτή, θεωρήθηκε ότι η μέγιστη ταχύτητα των master κινητήρων είναι ίση με 3000rpm η οποία υπολογίστηκε θεωρώντας ότι χρονικά θα πρέπει οι master κινητήρες να είναι σε θέση να ακολουθήσουν την κίνηση του slave κινητήρα εντός 1s. Όπως αναλύθηκε παραπάνω, η μέγιστη μετατόπιση των περικοχλίων των master κινητήρων είναι 20mm. Η οποία αντιστοιχίζεται σε 50 περιστροφές. Συνεπώς για να ολοκληρωθεί αυτή η κίνηση σε 1s, απαιτείται η ταχύτητα των master κινητήρων να μπορεί να φτάσει τις 3000rpm όπως προκύπτει από την εξίσωση (3-6).

$$\begin{aligned} \text{Ταχύτητα}(rpm) &= \frac{\text{Χρήσιμο μήκος σπειρώματος}(mm)}{\text{Βήμα περικοχλίου}(mm)} \times 360^\circ / \text{στροφή} \times \frac{1}{60s} \Rightarrow \\ \text{Ταχύτητα}(rpm) &= \frac{20}{0,4} \times 60 = 3000rpm \end{aligned} \quad (1-6)$$

Ο κωδικοποιητής παράγει 256 παλμούς ανά στροφή για το κανάλι A και άλλους τόσους για το κανάλι B. Συνεπώς, για την μέγιστη ταχύτητα προκύπτει από την εξίσωση ότι παράγονται παλμοί με συχνότητα 12,8kHz.

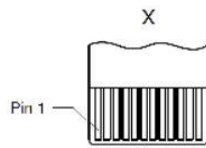
$$\begin{aligned} \text{Συχνότητα παλμών encoder}(kHz) &= \frac{\text{Μέγιστη ταχύτητα}(rpm) \times \text{Αριθμός παλμών ανά περιστροφή}}{60} \Rightarrow \\ \text{Συχνότητα παλμών encoder}(kHz) &= \frac{3000 \times 256}{60} = 12,8kHz \end{aligned} \quad (1-7)$$

Άρα τελικά, θεωρώντας και τα δύο κανάλια του κωδικοποιητή, A και B, ο μικροελεγκτής θα πρέπει να διαχειριστεί μέγιστη συχνότητα παλμών ίση με 25,6kHz. Δεδομένου ότι οι κινητήρες-κωδικοποιητές είναι δύο για να μπορέσει ο μικροελεγκτής να παρακολουθήσει τους παλμούς, θα πρέπει να τους δειγματοληπτεί τουλάχιστον με την διπλάσια συχνότητα, δηλαδή 50kHz. Αν και μεγάλη, αυτή η συχνότητα είναι σημαντικά μικρότερη από την συχνότητα στην οποία λειτουργούν τα περιφερειακά του μικροελεγκτή, η οποία είναι ίση με 16MHz.

Όσον αφορά την τροφοδοσία, ο κωδικοποιητής τροφοδοτείται με συνεχή τάση από 3V έως και 3,6V. Αντίστοιχα και η έξοδος του κωδικοποιητή, δηλαδή οι τετραγωνικοί παλμοί των καναλιών A,B,I είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας. Με αυτό τον τρόπο, ο κωδικοποιητής είναι συμβατός με τον μικροελεγκτή, ο οποίος, όπως αναλύθηκε παραπάνω μπορεί να τροφοδοτήσει συσκευές με συνεχή τάση 3V έως 3,6V και επίσης μπορεί να δεχθεί σήματα εισόδου συνεχούς τάσης 3V έως 3,6V.

Τέλος, για την σύνδεση του κινητήρα και του κωδικοποιητή με τα διάφορα υποσυστήματα, όπως η τροφοδοσία, ο motor driver και ο μικροελεγκτής, κατασκευάστηκε κατάλληλος adapter. Στο Σχήμα 3-2 φαίνονται οι συνδέσεις του κινητήρα και του κωδικοποιητή, καθώς και ο αντάπτορας που κατασκευάστηκε.

maxon



Motor	
Pin 1	Motor +
Pin 2	Motor -
Encoder	
Pin 3	NC
Pin 4	GND
Pin 5	Vcc
Pin 6	A
Pin 7	B
Pin 8	I
Pin 9	NC
Pin 10	NC
Pin 11	NC
Pin 12	NC

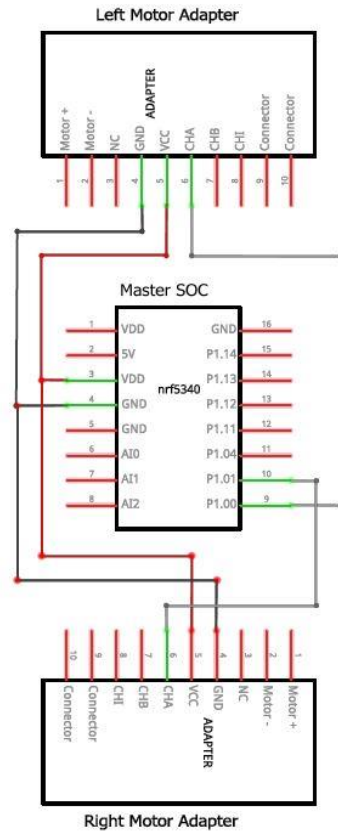
Σχήμα 3-5. Connector pinout του master κινητήρα.

Στον Πίνακα 3-3 φαίνονται οι συνδέσεις μεταξύ των adapters και του μικροελεγκτή για την σύνδεση το διάβασμα των κωδικοποιητών.

Πίνακας 3-3. Συνδέσεις master κινητήρα.

Συσκευή	Pin	Συσκευή	Pin	Λειτουργία
Adapter 1	Pin 4	Μικροελεγκτής	GND	3V- και αναφορά σημάτων
Adapter 1	Pin 5	Μικροελεγκτής	Vdd	3V+
Adapter 1	Pin 6	Μικροελεγκτής	P1.0	Παλμοί καναλιού A
Adapter 2	Pin 4	Μικροελεγκτής	GND	3V- και αναφορά σημάτων
Adapter 2	Pin 5	Μικροελεγκτής	Vdd	3V+
Adapter 2	Pin 6	Μικροελεγκτής	P1.1	Παλμοί καναλιού A

Στο Σχήμα 3-6 παρουσιάζονται οι συνδέσεις του Πίνακα 3-4 με την μορφή μονογραμμικού σχεδίου.



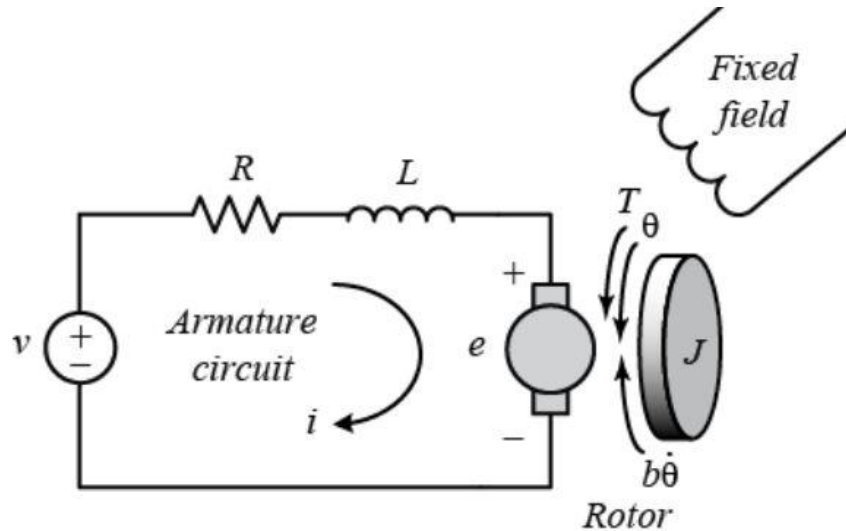
Σχήμα 3-6. Συνδέσεις master κινητήρα.

3.3.3 Σχεδιασμός/Επιλογή ελέγχου

Το επόμενο στάδιο για τον σχεδιασμό της διάταξης, ήταν η επιλογή του είδους ελέγχου για το master σύστημα. Στόχος του ελέγχου είναι να επιτευχθεί η επιθυμητή θέση του περικοχλίου το οποίο εξασφαλίζει την εφαρμογή συγκεκριμένης δύναμης στους μύες του ακρωτηριασμένου ατόμου, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η αίσθηση που αντιστοιχεί στην θέση του προσθετικού χεριού. Ο έλεγχος είναι με ανατροφοδότηση θέσης (closed loop) και ο ελεγκτής που θα εφαρμοστεί είναι PD. Ένα στοιχείο που σχεδιάστηκε από την αρχή ήταν ο έλεγχος των master κινητήρων οι οποίοι αποτελούν τον επενεργητή του master συστήματος. Γενικά στους κινητήρες εφαρμόζονται δύο είδη ελέγχου:

- Έλεγχος τάσης
- Έλεγχος ρεύματος

Ο έλεγχος τάσης καθορίζει την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα ενώ ο έλεγχος ρεύματος καθορίζει την ροπή του κινητήρα. Το Σχήμα 3-7 παρουσιάζει το ισοδύναμο κύκλωμα ενός dc κινητήρα



Σχήμα 3-7. Ισοδύναμο κύκλωμα dc κινητήρα.

Γενικά για ένα dc κινητήρα, η ροπή που ασκεί στον άξονα του είναι ίση με:

$$T = K_T I \quad (1-8)$$

όπου I το ρεύμα του κινητήρα και K_T η σταθερά ροπής του. Η ΗΕΔ του κινητήρα δίνεται από την σχέση:

$$V = K_T \dot{\theta} \quad (1-9)$$

Όπου θ η γωνιακή θέση του κινητήρα. Συνεπώς, η χαρακτηριστική εξίσωση για το ρεύμα του κινητήρα είναι:

$$J \ddot{\theta} + b \dot{\theta} = K_T I \quad (1-10)$$

όπου J είναι η ισοδύναμη ροπή αδράνειας που βλέπει ο κινητήρας και b είναι η ισοδύναμη απόσβεση του κινητήρα. Η χαρακτηριστική εξίσωση για την τάση του κινητήρα είναι:

$$L \frac{dI}{dt} + RI = V - K_T \dot{\theta} \quad (1-11)$$

όπου L είναι η αυτεπαγωγή του κινητήρα και R η ωμική αντίσταση του κινητήρα. Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace προκύπτουν οι αντίστοιχες σχέσεις στο πεδίο της συχνότητας:

$$s(Js + b)\Theta(s) = K_T I(s) \quad (1-12)$$

$$(Ls + R)I(s) = V(s) - K_T s\Theta(s) \quad (1-13)$$

Στόχος μας είναι να ελέγξουμε την θέση των κινητήρων, ελέγχοντας είτε την τάση (ταχύτητα), είτε το ρεύμα (ροπή) του κινητήρα. Αντίστοιχα, επιλύουμε τις παραπάνω εξισώσεις εξαλείφοντας το ρεύμα ή την τάση αντίστοιχα και θεωρώντας έξοδο την θέση και είσοδο την τάση ή το ρεύμα του κινητήρα προκύπτουν οι αντίστοιχες εξισώσεις (3-14) για έλεγχο ρεύματος και (3-15) για έλεγχο τάσης.

$$\frac{\Theta(s)}{I(s)} = \frac{K_T}{s(Js + b)} \quad (1-14)$$

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{K_T}{s[(Ls + R)(Js + b) + K^2]} \quad (1-15)$$

Για την εφαρμογή μας, ο έλεγχος ρεύματος εμφανίζει περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τον έλεγχο τάσης. Ελέγχοντας την ροπή, πρακτικά ελέγχεται η επιτάχυνση του κινητήρα και συνεπώς επιτυγχάνεται πιο γρήγορη απόκριση σε σχέση με τον έλεγχο τάσης-ταχύτητας. Η ταχύτητα της απόκρισης είναι σημαντική παράμετρος για τον σχεδιασμό του ελεγκτή και συνεπώς το παραπάνω συνιστά ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Παρόλα αυτά, το εύρος της κίνησης είναι τόσο μικρό που η επίδραση αυτού του πλεονεκτήματος πρακτικά εξαλείφεται. Επιπλέον, ο έλεγχος ρεύματος απαιτεί την χρήση συγκεκριμένου εξοπλισμού (current-torque controlling drivers). Πραγματοποιώντας έρευνα για τέτοιου είδους εξοπλισμό, διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχουν drivers που να εφαρμόζουν αναλογικό έλεγχο ρεύματος για κινητήρες με τα χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν για αυτή την εφαρμογή, δηλαδή τάση λειτουργίας κοντά στα 5V και μέγιστο ρεύμα 1,2A.

Αντίθετα, οι περισσότερες συσκευές οι οποίες αναφερόταν ότι έκαναν έλεγχο ρεύματος και ήταν κατάλληλες για τα χαρακτηριστικά των master κινητήρων, στην πραγματικότητα εφάρμοζαν ένα είδος περιορισμού του ρεύματος κάτω από ένα μεταβλητό όριο. Η πρακτική αυτή δεν μπορεί να χαρακτηριστεί έλεγχος ρεύματος και σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσε να εξασφαλίσει ότι η απόκριση του πραγματικού συστήματος θα ήταν παρόμοια με την προσομοιωμένη.

Συνεπώς, λόγω αυτού του περιορισμού επιλέχθηκε να εφαρμοστεί έλεγχος τάσης. Έχοντας επιλέξει το είδος του ελέγχου, το επόμενο στάδιο ήταν η προσομοίωση του συστήματος με βάσει τα στοιχεία για τους κινητήρες από το datasheet. Το σήμα αναφοράς των master κινητήρων προκύπτει από τη θέση του προσθετικού χεριού σε μοίρες και όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το σήμα αυτό μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 95 μοίρες. Η θέση 0 αντιστοιχεί στην κάτω ακραία θέση, δηλαδή την πλήρη κάμψη του προσθετικού χεριού, ενώ η θέση 95 αντιστοιχεί στην άνω ακραία θέση, δηλαδή την πλήρη έκταση του προσθετικού χεριού. Άρα για την θέση 0, ο αγωνιστικός μυς θα πρέπει να είναι σε πλήρη έκταση και ο ανταγωνιστικός σε πλήρη κάμψη, ενώ για την θέση 95, ο αγωνιστικός μυς θα πρέπει να είναι σε πλήρη κάμψη και ο ανταγωνιστικός μυς σε πλήρη έκταση. Κατ' επέκταση προκύπτει ο Πίνακας 3-4 που παρουσιάζει την αντιστοίχιση θέσης προσθετικού άκρου και θέσης των περικοχλίων.

Πίνακας 3-4. Αντιστοίχιση θέσης προσθετικού άκρου – θέσεων περικοχλίων

Κίνηση	Πλήρης κάμψη καρπού	Πλήρης έκταση καρπού
Θέση προσθετικού άκρου (μοίρες)	0	95
Θέση Αγωνιστικού περικοχλίου (mm)	0	20
Θέση Αγωνιστικού κινητήρα (μοίρες)	0	18000
Θέση Ανταγωνιστικού περικοχλίου (mm)	20	0
Θέση ανταγωνιστικού κινητήρα (μοίρες)	18000	0

Κατ' επέκταση προκύπτουν η συνάρτηση (3-16) που δίνει την ζητούμενη γωνιακή θέση του αγωνιστικού συστήματος σε μοίρες σε σχέση με την θέση του προσθετικού χεριού και η συνάρτηση (3-17) που δίνει την ζητούμενη γωνιακή θέση του ανταγωνιστικού συστήματος σε σχέση με την θέση του προσθετικού χεριού.

$$\text{Ζητούμενη θέση(μοίρες)} = \frac{1}{\text{Βήμα περικογλίου}} \times \text{Θέση προσθετικού χεριού(μοίρες)} \times \frac{20\text{mm}}{95\text{μοίρες}} \Rightarrow \quad (1-16)$$

$$\text{Ζητούμενη θέση(μοίρες)} = 189,47 \times \text{Θέση προσθετικού χεριού(μοίρες)}$$

$$\text{Ζητούμενη θέση(μοίρες)} = \frac{1}{\text{Βήμα περικογλίου}} [20(\text{mm}) - \text{Θέση προσθετικού χεριού(μοίρες)}] \times \frac{20(\text{mm})}{95(\text{μοίρες})} \Rightarrow \quad (1-17)$$

$$\text{Ζητούμενη θέση(μοίρες)} = 18000 - 189,47 \times \text{Θέση προσθετικού χεριού(μοίρες)}$$

3.3.4 Οδήγηση master κινητήρων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο έλεγχος του κινητήρα είναι έλεγχος τάσης και συνεπώς χρειάζεται ένας αντίστοιχος motor driver. Ο motor driver θα πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω συνθήκες:

- Να είναι κατάλληλος για dc κινητήρες με ονομαστική τάση λειτουργίας σε ένα εύρος τάσεων από 3V έως 10V
- Να είναι κατάλληλος για ρεύμα κινητήρα τουλάχιστον 200-300mA
- Να πραγματοποιεί έλεγχο της τάσης στα άκρα του κινητήρα με γραμμικό-αναλογικό τρόπο
- Να επιτρέπει τον έλεγχο της φοράς στροφής του κινητήρα
- Να είναι συμβατός με τα σήματα ελέγχου του μικροελεγκτή, δηλαδή σήματα τάσης με τιμή από 0V έως και 3,6V
- Να δέχεται ως σήμα ελέγχου τετραγωνικούς παλμούς (PWM) με συχνότητα έως και 200kHz για να είναι συμβατός με τις δυνατότητες σε PWM του μικροελεγκτή.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά ικανοποιούνται πλήρως από τον DRV8833 της Texas Instruments ο οποίος είχε χρησιμοποιηθεί και στην προηγούμενη διπλωματική εργασία. Πιο συγκεκριμένα, ο DRV8833 έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Έχει τάση τροφοδοσίας 2,7-10,8V
- Μπορεί να οδηγήσει κινητήρες με 1,5A ρεύμα συνεχούς λειτουργίας και έως και 2A μέγιστο ρεύμα
- Πραγματοποιεί έλεγχο της τάσης του κινητήρα κατά αναλογία με το duty cycle του PWM σήματος εισόδου
- Επιτρέπει έλεγχο της φοράς κίνησης του κινητήρα
- Είναι συμβατός με τα σήματα ελέγχου του μικροελεγκτή, διότι αντιλαμβάνεται Logic High για σήματα τάσης άνω των 2V και Logic Low για σήματα τάσης κάτω των 0,7V.
- Δέχεται PWM σήμα ελέγχου με συχνότητα χαμηλότερη από 50kHz.

Επιπλέον, ο drv8833 προσφέρει τις παρακάτω δυνατότητες που είναι χρήσιμες για την εφαρμογή μας:

- Μπορεί να οδηγήσει δυο dc κινητήρες, συνεπώς δεν χρειάζονται δύο drivers για την οδήγηση των master κινητήρων. Διαθέτει 2 pins για τον έλεγχο κάθε κινητήρα, τα pins AIN1 και AIN2 για έλεγχο του πρώτου κινητήρα και τα pins BIN1 και BIN2 για τον έλεγχο του δεύτερου κινητήρα.
- Μπορεί να περιορίσει το ρεύμα των κινητήρων με εσωτερικό closed loop έλεγχο για προστασία του κινητήρα.

- Διαθέτει λειτουργία Sleep mode, για περιορισμό της κατανάλωσης του driver σε περιόδους που δεν εκτελείται έλεγχος των master κινητήρων.

Όσον αφορά την οδήγηση των κινητήρων, αυτή γίνεται με δύο modes, το slow decay mode και το fast decay mode. Το mode λειτουργίας ελέγχεται ρυθμίζοντας το κατάλληλο pin του driver σε Logic low ή Logic high. Για την εφαρμογή αυτή επιλέχθηκε το slow decay mode. Επίσης, η φορά κάθε κινητήρα ελέγχεται, ρυθμίζοντας το pin του driver στο οποίο εφαρμόζεται το σήμα PWM. Τα παραπάνω φαίνονται και στον Πίνακα 3-5 και από το datasheet του driver.

Πίνακας 3-5. Λειτουργίες driver master κινητήρων.

xIN1	xIN2	FUNCTION
PWM	0	Forward PWM, fast decay
1	PWM	Forward PWM, slow decay
0	PWM	Reverse PWM, fast decay
PWM	1	Reverse PWM, slow decay

Για να αντισταθμιστεί η πτώση τάσης που προκαλείται από την λειτουργία των κινητήρων αλλά και για να επιτευχθεί μεγαλύτερο εύρος τάσης στο οποίο λειτουργούν οι κινητήρες, επιλέχθηκε η τροφοδοσία των master drivers να είναι 5V. Επίσης, για προστασία των κινητήρων από μεγάλα ρεύματα, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η λειτουργία current chopping που παρέχει ο driver. Σύμφωνα με το datasheet, η λειτουργία αυτή ενεργοποιείται συνδέοντας αντίσταση μεταξύ των pins AISEN και GND για τον πρώτο κινητήρα και μεταξύ των pins BISEN και GND για τον δεύτερο κινητήρα. Η σχέση που συνδέει την τιμή της αντίστασης με την μέγιστη τιμή του ρεύματος που θα επιτρέπει ο driver είναι αυτή που περιγράφεται στην εξίσωση (3-18).

$$I_{trip} (mA) = \frac{200 (mV)}{R_{sense} (Ohm)} \quad (1-18)$$

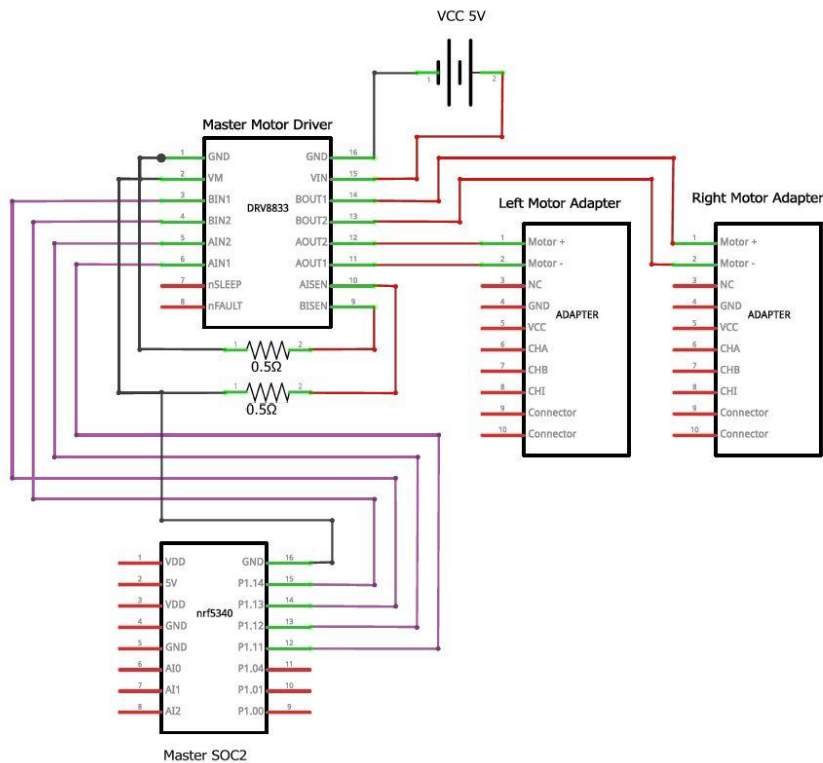
Επιλέχθηκε να περιοριστεί το ρεύμα του κινητήρα στα 400mA και ως εκ τούτου επιλέξαμε αντίσταση ίση με 0,5Ohm. Ο Πίνακας 3-6 παρουσιάζει τις συνδέσεις μεταξύ του driver, του κινητήρα, του μικροελεγκτή και της τροφοδοσίας.

Πίνακας 3-6. Συνδέσεις driver master κινητήρων

Συσκευή	Pin	Συσκευή	Pin	Λειτουργία
drv8833	AIN1	Μικροελεγκτής	P1.11	PWM
drv8833	AIN2	Μικροελεγκτής	P1.12	PWM
drv8833	BIN1	Μικροελεγκτής	P1.13	PWM
drv8833	BIN2	Μικροελεγκτής	P1.14	PWM
drv8833	GND	Μικροελεγκτής	GND	Αναφορά σημάτων
drv8833	GND	Τροφοδοσία	5V +	Τροφοδοσία drv8833
drv8833	VIN	Τροφοδοσία	5V -	Τροφοδοσία drv8833
drv8833	AISEN	drv8833	GND μέσω αντίστασης 0,5Ohm	Περιορισμός ρεύματος πρώτου κινητήρα
drv8833	BISEN	drv8833	GND μέσω αντίστασης 0,5Ohm	Περιορισμός ρεύματος δεύτερου κινητήρα

drv8833	AOUT1	Adapter 1	Pin 1	Τροφοδοσία κινητήρα
drv8833	AOUT2	Adapter 1	Pin 2	Τροφοδοσία κινητήρα
drv8833	BOUT1	Adapter 2	Pin 1	Τροφοδοσία κινητήρα
drv8833	BOUT2	Adapter 2	Pin 2	Τροφοδοσία κινητήρα

Το Σχήμα 3-8 παρουσιάζει τις συνδέσεις αυτές με την μορφή μονογραμμικού σχεδίου.



Σχήμα 3-8. Συνδέσεις driver master κινητήρων.

3.3.5 Σχεδιασμός υλοποίησης GAP και GATT protocol

Όπως αναφέρθηκε και στην θεωρία, το GAP (Generic Access Profile) είναι το πρωτόκολλο που ελέγχει τη σύνδεση και τη διαφήμιση υπηρεσιών στο πρωτόκολλο Bluetooth. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη σχεδιαστική παράμετρος για να οριστεί αν ο master μικροελεγκτής θα έχει τον ρόλο του GAP central ή του GAP peripheral, είναι ευκολότερο να οριστεί ο ρόλος του GAP peripheral σε συνέχεια της υλοποίησης που είχε γίνει στην προηγούμενη διπλωματική εργασία.

Η πρώτη διαδικασία που πρέπει να οριστεί είναι αυτή της διαφήμισης του GAP peripheral. Όπως αναφέρθηκε και στη θεωρία με την διαδικασία αυτή ένα GAP peripheral «διαφημίζει» την ύπαρξη του ούτως ώστε να αναγνωριστεί από συσκευές GAP central. Η βασικότερη παράμετρος για τη διαδικασία αυτή είναι το advertising interval. Για την παράμετρο αυτή αποφασίστηκε να οριστεί μια τιμή της τάξης των 100-150ms. Ο χρόνος αυτός είναι σχετικά μικρός και μεταφράζεται σε αυξημένη κατανάλωση αλλά έτσι εξασφαλίζεται ότι ο master μικροελεγκτής διαφημίζεται συχνά και άρα είναι πολύ πιθανό να τον αναγνωρίζει γρήγορα ο slave μικροελεγκτής, μειώνοντας την καθυστέρηση κατά την εκκίνηση της εφαρμογής, ή σε περιπτώσεις αποσύνδεσης. Επίσης, η διαδικασία της

διαφήμισης και σύνδεσης με ένα GAP central θα πραγματοποιείται σπάνια και συνεπώς η επίπτωση της ως προς την κατανάλωση της συσκευής δεν θα είναι μεγάλη.

Επιπλέον, ορίστηκε στο πακέτο δεδομένων διαφήμισης που αποστέλλει ο master μικροελεγκτής να περιλαμβάνεται το όνομα του και το UUID της BioEPP service. Αυτό έγινε, ούτως ώστε να δίνεται στις συσκευές GAP central ένα στοιχείο για το ποια είναι αυτή η συσκευή και να μπορεί έτσι ο slave μικροελεγκτής να την αναγνωρίσει και να επιχειρήσει να συνδεθεί σε αυτήν.

Τέλος, το advertising timeout ορίστηκε άπειρο. Αυτό έγινε για να διευκολυνθεί η διαδικασία κατά το πειραματικό στάδιο, ούτως ώστε να εξασφαλιστεί ότι ο master μικροελεγκτής διαφημίζεται συνεχώς και έτσι ο slave μικροελεγκτής να μπορεί να συνδεθεί ανά πάσα στιγμή. Σε κανονική λειτουργία όμως, θα ήταν χρήσιμο να τεθεί ένα χρονικό όριο ύστερα από το οποίο ο master μικροελεγκτής θα σταματάει να διαφημίζεται. Έτσι θα εξασφαλιστεί ότι σε περίπτωση προβλήματος του slave μικροελεγκτή, ο master θα σταματήσει την διαφήμιση του και θα περιορίσει την κατανάλωση του.

Όσον αφορά την διαδικασία της σύνδεσης, εκεί όπως αναφέρθηκε και στην θεωρία, οι παράμετροι καθορίζονται από το GAP central. Παρόλα αυτά, δηλώθηκαν οι προτιμώμενες παράμετροι και ο master μικροελεγκτής αφού συνδεθεί με τον slave μικροελεγκτή στέλνει ένα αίτημα για ανανέωση των παραμέτρων σύνδεσης σύμφωνα με τις προτιμώμενες. Αυτό γίνεται για να εξασφαλιστεί ότι οι επιθυμητές παράμετροι θα επιβληθούν στην σύνδεση. Οι παράμετροι επιλέχθηκαν ως εξής:

- Connection interval = 7,5ms. Η ρύθμιση αυτή είναι η χαμηλότερη δυνατή αλλά εξασφαλίζει την ταχύτερη δυνατή επικοινωνία. Η γρήγορη μεταφορά δεδομένων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη μιας αρμονικής – συνεχούς κίνησης του προσθετικού άκρου που θα παρέχει στον χρήστη μια ικανοποιητική εμπειρία. Παρόλα αυτά, είναι μια ρύθμιση που αυξάνει την κατανάλωση.
- Slave latency = 10. Επιλέχθηκε αυτός αριθμός ούτως ώστε να περιοριστεί η κατανάλωση του master μικροελεγκτή η οποία έχει αυξηθεί από τις τιμές των προηγούμενων παραμέτρων. Έτσι, σε περίπτωση που δεν υπάρχει πληροφορία να αποσταλεί στον slave μικροελεγκτή, ο master μπορεί να αγνοήσει έως 10 connection events για να περιορίσει την κατανάλωση του.
- Timeout = 1000ms. Σε περίπτωση που ο slave μικροελεγκτής δεν λάβει ανταπόκριση από τον master στα connection events για πάνω από 1000ms, η σύνδεση θα τερματιστεί.

Στον Πίνακα 3-7 παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις του GAP peripheral για advertising και connection. Σημειώνεται ότι οι παραπάνω παράμετροι σύνδεσης θα ισχύσουν μόνο εάν ο GAP central αποδεχθεί το αίτημα για ανανέωση των παραμέτρων που θα του στείλει ο GAP peripheral.

Πίνακας 3-7. Παράμετροι GAP peripheral

<i>Διαδικασία</i>	<i>Παράμετρος</i>	<i>Τιμή</i>
Advertising	Advertising interval minimum	100ms
	Advertising interval maximum	150ms
	Advertising timeout	άπειρο
	Advertising data	Όνομα συσκευής: BioEPP

		Master SOC Service UUID: BioEPP service UUID
Connection	Connection interval	7,5ms
	Slave latency	10
	Timeout	1000ms

Όσον αφορά το πρωτόκολλο GATT (Generic ATtribute profile), όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, αυτό ρυθμίζει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ δύο συσκευών χρησιμοποιώντας ρυθμίσεις που ονομάζονται υπηρεσίες και χαρακτηριστικά. Για την επικοινωνία μέσω GATT πρωτοκόλλου ορίζονται 2 ρόλοι για τις συσκευές που επικοινωνούν. Ο ρόλος του GATT client και ο ρόλος του GATT server. Όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως για το πρωτόκολλο GAP δεν υπάρχει κάποια σχεδιαστική παράμετρος για να επιλέξουμε ποιος από τους δύο μικροελεγκτές θα αναλάβει κάθε ρόλο, αλλά μπορούμε να συνεχίσουμε με την προηγούμενη παραδοχή και να αποδώσουμε τον ρόλο του GATT server στον master μικροελεγκτή, όπως ακριβώς έγινε και στην διπλωματική εργασία [3]. Τα δεδομένα που πρέπει να ανταλλάσσονται μεταξύ των δύο μικροελεγκτών είναι τα εξής:

- Η διαφορά της μέτρησης των δύο αισθητήρων δύναμης στην master διάταξη, η οποία πρέπει να μεταφέρεται από τον master προς τον slave ούτως ώστε ο slave να ελέγξει το προσθετικό άκρο
- Η θέση του slave κινητήρα, η οποία πρέπει να μεταφέρεται από τον slave στον master ούτως ώστε ο master μικροελεγκτής να ελέγχει τους master κινητήρες για να μεταφέρει στον χρήστη ανάδραση της θέσης του προσθετικού άκρου.

Δεδομένου ότι στο GATT πρωτόκολλο ο GATT server είναι αυτός που ορίζει τις υπηρεσίες και τα χαρακτηριστικά, η υλοποίηση που προσφέρει την ταχύτερη μεταφορά δεδομένων είναι η ακόλουθη:

- Η διαφορά της μέτρησης των δύο αισθητήρων δύναμης θα μεταφέρεται από τον master στον slave με την μορφή *ειδοποίησης* (notification). Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι ο slave θα ενημερώνεται για αλλαγές στην μέτρηση των αισθητήρων δύναμης άμεσα χωρίς να χρειάζεται να υλοποιήσει αυτός κάποια διαδικασία διαβάσματος.
- Η θέση του slave κινητήρα θα μεταφέρεται στον master με την μορφή γραψίματος. Ο slave (GATT client) μόλις διαπιστώσει κάποια αλλαγή της θέσης του κινητήρα, θα γράφει την τιμή της νέας θέσης στο αντίστοιχο χαρακτηριστικό του master. Μάλιστα, για να επιτυγχάνεται μέγιστη ταχύτητα αυτής της διαδικασίας, θα χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση WRITE_WITHOUT_RESPONSE κατά την οποία ο GATT client δεν περιμένει να λάβει επιβεβαίωση από τον GATT server ότι η διαδικασία γραψίματος ολοκληρώθηκε επιτυχώς, ούτε ο GATT server πρέπει να στείλει επιβεβαίωση, με αποτέλεσμα και οι δύο μικροελεγκτές να εκτελούν λιγότερες ενέργειες και άρα να μπορούν να μεταφέρουν πληροφορία γρηγορότερα και με μικρότερη κατανάλωση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, χρειάζεται να οριστούν δύο GATT χαρακτηριστικά στον master, ένα χαρακτηριστικό με ιδιότητες ειδοποίησης (notification) για την μεταφορά της μέτρησης των αισθητήρων δύναμης και ένα χαρακτηριστικό με ιδιότητες εγγραφής χωρίς απάντηση (write without response) για την μεταφορά της πληροφορίας της θέσης του slave

κινητήρα. Για λόγους ευκολίας και τα δύο χαρακτηριστικά παρέχονται κάτω από την ίδια υπηρεσία. Στον Πίνακα 3-8 που ακολουθεί παρουσιάζονται η υπηρεσία και τα χαρακτηριστικά που θα παρέχει ο master μικροελεγκτής μέσω της λειτουργίας τους ως GATT server.

Πίνακας 3-8. Ρυθμίσεις GATT πρωτοκόλλου

Τύπος	Όνομα	Ιδιότητες	UUID (hex)
Υπηρεσία	BIOEPP	-	1111
Χαρακτηριστικό	FSR	Notify	111A
Χαρακτηριστικό	ENCODER_POS	Write without response	111B

3.4 Σύστημα Slave

Το σύστημα slave είναι αυτό που θα βρίσκεται στο προσθετικό άκρο και σκοπό έχει:

- να ελέγχει τον slave κινητήρα ούτως ώστε να πετυχαίνει την κίνηση του προσθετικού άκρου σύμφωνα με την πληροφορία της δύναμης που το άτομο ασκεί στους τένοντες του και
- να μεταφέρει την πληροφορία της θέσης του slave κινητήρα στον master μικροελεγκτή, ούτως ώστε εκείνος με την σειρά του να ελέγξει τους master κινητήρες και να μεταφέρει στο άτομο ανάδραση της θέσης του προσθετικού άκρου

Το σύστημα αυτό αποτελείται από τα παρακάτω υποσυστήματα:

- Slave κινητήρας
- Έλεγχος slave κινητήρα
- Οδήγηση slave κινητήρα
- Πρωτόκολλα GAP και GATT
- Κύκλωμα τροφοδοσίας

3.4.1 Slave κινητήρας

Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση του προσθετικού άκρου είναι ο RE30, 60W της Maxon. Ο κινητήρας είναι εξοπλισμένος με μειωτήρα στροφών ο οποίος μειώνει τις στροφές του άξονα με ένα λόγο μείωσης ίσο με 343/17567. Επιπλέον, ο κινητήρας διαθέτει οπτικό κωδικοποιητή 500 παλμών ανά περιστροφή. Ο κωδικοποιητής που είναι ενσωματωμένος στον κινητήρα είναι ο HEDS 5540 της Maxon.

Ο κινητήρας έχει ονομαστική τάση ίση με 12V και ονομαστικό ρεύμα ίσο με 4A, ενώ κατά την εκκίνηση μπορεί να τραβήξει έως και 60A. Ο οπτικός κωδικοποιητής τροφοδοτείται από 5V συνεχούς τάσης και παράγει τετραγωνικούς παλμούς ίδιας τάσης.

Η ανάλυση της θέσης του slave κινητήρα (δηλαδή η ανάλυση του οπτικού του κωδικοποιητή) είναι ίση με $360/500 = 0,72$ μοίρες. Επειδή μεσολαβεί και μειωτήρας μεταξύ του άξονα του κινητήρα και του άξονα του προσθετικού χεριού, η ανάλυση θέσης του προσθετικού χεριού είναι τελικά ίση με 0,0141 μοίρες, όπως προκύπτει από την εξίσωση (3-19).

$$\begin{aligned} \text{Ανάλυση θέσης προσθετικού(μοίρες)} &= \text{Ανάλυση κωδικοποιητή(μοίρες)} \times \text{Λόγος μειωτήρα} \Rightarrow \\ \text{Ανάλυση θέσης προσθετικού(μοίρες)} &= 0,72 \times \frac{343}{17567} = 0,0141^\circ \end{aligned} \quad (1-19)$$

Η ανάλυση αυτή είναι παραπάνω από ικανοποιητική για την εφαρμογή μας καθώς είναι μικρότερη από την διακριτική ικανότητα του ανθρώπινου χεριού. Θεωρώντας ξανά ότι το σύστημα θα πρέπει να πετυχαίνει την μέγιστη κίνηση εντός 1 δευτερολέπτου και ότι η μέγιστη κίνηση αντιστοιχεί σε στροφή 95 μοιρών, προκύπτει ότι η μέγιστη ταχύτητα του κινητήρα θα πρέπει να είναι 811 rpm, όπως προκύπτει από την εξίσωση (3-20).

$$\begin{aligned} \text{Ταχύτητα (rpm)} &= \text{Μέγιστη στροφή προσθετικού (μοίρες)} \times \frac{1}{\text{Λόγος μειωτήρα}} \times \frac{60(\text{δευτερόλεπτα / λεπτό})}{360(\text{μοίρες ανά στροφή})} \Rightarrow \\ \text{Ταχύτητα (rpm)} &= \frac{95(\text{μοίρες}) \times 17576 \times 60}{343 \times 360} = 811 \text{ rpm} \end{aligned} \quad (1-20)$$

Αφενός, η ταχύτητα αυτή μπορεί εύκολα να επιτευχθεί από τον κινητήρα, καθώς είναι κατά πολύ μικρότερη από την ονομαστική του, η οποία είναι 7630 rpm. Αφετέρου, γνωρίζοντας την μέγιστη ταχύτητα μπορούμε να υπολογίσουμε την μέγιστη συχνότητα των παλμών του κωδικοποιητή:

$$\begin{aligned} \text{Συχνότητα παλμών(Hz)} &= \frac{\text{Μέγιστη ταχύτητα(rpm)} \times \text{Παλμοί ανά περιστροφή}}{60} \Rightarrow \\ \text{Συχνότητα παλμών(Hz)} &= \frac{811 \times 500}{60} = 6758 \end{aligned} \quad (1-21)$$

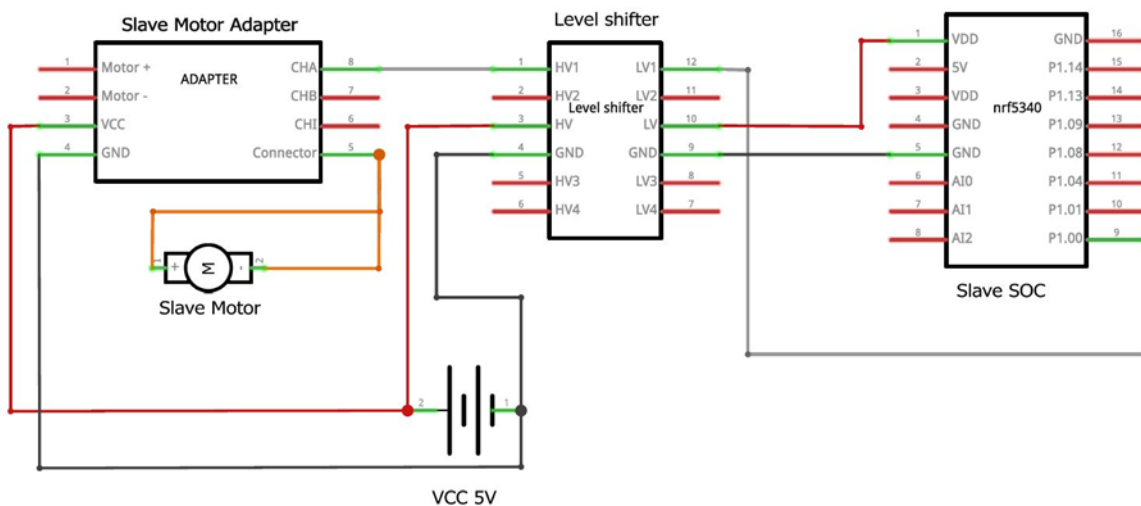
Άρα η συνολική συχνότητα των παλμών και για τα δύο κανάλια, Α και Β, θα είναι η διπλάσια, δηλαδή 13,516kHz. Για να μπορέσει ο μικροελεγκτής να διαβάσει επιτυχώς τον κωδικοποιητή, θα πρέπει να μπορεί να δειγματοληπτήσει τουλάχιστον με την διπλάσια συχνότητα, δηλαδή 27kHz. Αν και η συχνότητα αυτή είναι υψηλή, είναι αρκετά μικρότερη από τη συχνότητα των περιφερειακών του μικροελεγκτή, η οποία είναι 16MHz.

Ο κωδικοποιητής που χρησιμοποιείται για τον slave κινητήρα τροφοδοτείται με 5V συνεχούς τάσης και αντίστοιχα εκπέμπει τετραγωνικούς παλμούς πλάτους 5V. Αυτό δεν είναι συμβατό με τον μικροελεγκτή ο οποίος μπορεί να διαβάσει σήματα τάσης έως και 3,6V. Αν και λειτουργικά ο μικροελεγκτής θα αντιλαμβανόταν την διαφορά μεταξύ High και Low καταστάσεων των σημάτων του κωδικοποιητή, η συνεχής εφαρμογή τάσης 5V στα κανάλια του μικροελεγκτή δεν ενδείκνυται. Για να επιτευχθεί η προσαρμογή της τάσης, χρησιμοποιήθηκε ο level shifter της Sparkfun ο οποίος είναι κατάλληλος για μετατροπή σημάτων επικοινωνίας 3,3V σε σήματα επικοινωνίας 5V και το αντίθετο. Ο μετατροπέας απαιτεί δύο τροφοδοσίες για την επίτευξη της μετατροπής, μια τροφοδοσία στα 3,3V και μία τροφοδοσία στα 5V. Αυτό δεν ήταν πρόβλημα καθώς η τροφοδοσία 5V είναι διαθέσιμη και η τροφοδοσία 3,3V μπορεί να δοθεί από τον ίδιο τον μικροελεγκτή. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας 3-9 που περιέχει τις συνδέσεις μεταξύ κωδικοποιητή, level shifter και μικροελεγκτή.

Πίνακας 3-9. Συνδέσεις encoder slave κινητήρα

Συσκευή	Pin	Συσκευή	Pin	Λειτουργία
Κωδικοποιητής	Channel A	Sparkfun Level shifter	HV1	5V σήμα κωδικοποιητή
Κωδικοποιητής	VCC	Τροφοδοσία	5V+	Τροφοδοσία κωδικοποιητή
Κωδικοποιητής	GND	Τροφοδοσία	5V-	Τροφοδοσία κωδικοποιητή
Sparkfun Level shifter	HV	Τροφοδοσία	5V+	Τροφοδοσία level shifter
Sparkfun Level shifter	GND	Τροφοδοσία	5V-	Τροφοδοσία level shifter
Sparkfun Level shifter	LV	Μικροελεγκτής	VDD	Τροφοδοσία level shifter
Sparkfun Level shifter	GND	Μικροελεγκτής	GND	Τροφοδοσία level shifter
Sparkfun Level shifter	LV1	Μικροελεγκτής	P1.00	3V σήμα κωδικοποιητή

Στο Σχήμα 3-9 φαίνεται η ίδια διάταξη με την μορφή μονογραμμικού σχεδίου:



Σχήμα 3-9. Συνδέσεις encoder slave κινητήρα

3.4.2 Έλεγχος slave κινητήρα

Για το slave σύστημα, το ζητούμενο είναι εφαρμογή συγκεκριμένης ροπής στο προσθετικό άκρο, η οποία είναι ανάλογη της διαφοράς των μετρήσεων των δύο αισθητήρων δύναμης του master συστήματος, δηλαδή πρακτικά ανάλογη της διαφοράς δύναμης του αγωνιστικού και ανταγωνιστικού μυ. Ο έλεγχος αυτός εξασφαλίζει το ζητούμενο, δηλαδή ότι αφενός η δύναμη που ασκεί το άτομο μέσω των μυών του αντιστοιχίζεται σε δύναμη-ροπή του προσθετικού χεριού (όπως συμβαίνει και για ένα κανονικό άκρο, όχι προσθετικό) και αφετέρου ότι όταν το προσθετικό χέρι συναντήσει κάποιο εμπόδιο, που δεν θα του επιτρέψει να στραφεί περισσότερο, αυτό, μέσω της ανάδρασης του master συστήματος θα γίνει

αντιληπτό και ο χρήστης θα αντιληφθεί ότι πρέπει να ασκήσει περισσότερη δύναμη για να μετακινήσει το προσθετικό άκρο περισσότερο.

Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως για το master σύστημα, αφού το ζητούμενο είναι έλεγχος ροπής, τελικά για τον slave κινητήρα αυτό μεταφράζεται σε έλεγχο ρεύματος. Για τον κινητήρα του slave συστήματος ήταν εύκολο να βρεθεί driver που να προσφέρει αναλογικό έλεγχο ρεύματος. Ο έλεγχος που εφαρμόστηκε είναι open loop (χωρίς ανάδραση).

Όπως έχει αναλυθεί και στο Κεφάλαιο 3.5 της διπλωματικής εργασίας [4], η σχέση που δίνει την ροπή που πρέπει να ασκεί το προσθετικό χέρι σε σχέση με την δύναμη που ασκείται από το ακρωτηριασμένο άτομο στους μύες του είναι της μορφής:

$$\tau = \begin{cases} 0, F_{act} \in [F_{flex,t}, F_{ext,t}] \\ \max(aF_{act} + b, T_{max}), F_{act} > F_{ext,t}, a = \frac{T_{max}}{(F_{ext,mc} - F_{flex,t})}, b = aF_{ext,t} \\ \max(T_{min} + \lambda F_{act} + c, T_{min}), F_{act} < F_{flex,t}, a = -\frac{T_{min}}{(F_{flex,t} - F_{flex,mc})}, c = -\lambda F_{flex,t} \end{cases} \quad (1-22)$$

Στην παραπάνω σχέση, οι τιμές T_{max} και T_{min} είναι οι ακραίες τιμές της ροπής για κάμψη και έκταση του προσθετικού άκρου αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές μπορούν να οριστούν με βάση απαιτήσεις για την ροπή που θα μπορεί να ασκεί το προσθετικό χέρι. Βασικότερη όμως απαίτηση για τη εφαρμογή μας ήταν να μεταφέρεται στον χρήστη μια αίσθηση ομαλής κίνησης του προσθετικού άκρου, η οποία θα μπορεί να πετύχει την μέγιστη κίνηση του προσθετικού χεριού σε συγκεκριμένο χρόνο, ο οποίος ορίστηκε στο 1s. Σύμφωνα με αυτή την θεώρηση, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές οδήγησης του κινητήρα από την μία ακραία θέση στην άλλη ακραία θέση (0 μοίρες, 95 μοίρες) με διαφορετικές εντολές duty cycle (όπως θα εξηγηθεί παρακάτω) και διαπιστώθηκε ότι τιμές duty cycle μεγαλύτερες από 1,0% πετυχαίνουν την κίνηση του άξονα του κινητήρα (χωρίς κάποιο φορτίο) από την μία ακραία θέση στην άλλη, εντός ενός δευτερολέπτου.

Ταυτόχρονα, έπρεπε να γίνει και κάποιος συμβιβασμός ούτως ώστε να δίνεται στο άτομο η δυνατότητα να ελέγξει έμμεσα και την θέση του προσθετικού άκρου με κάποια ακρίβεια. Διαπιστώθηκε με δοκιμές ότι για τιμές duty cycle μεγαλύτερες του 1,3% δεν ήταν δυνατό να επιτευχθεί αυτό. Η επιτάχυνση του κινητήρα ήταν τέτοια που δεν υπήρχε ακρίβεια στην θέση του προσθετικού άκρου. Ταυτόχρονα, διαπιστώθηκε ότι για τιμές duty cycle χαμηλότερες του 0,65% ο κινητήρας δεν μπορούσε να υπερνικήσει τις τριβές και να ξεκινήσει. Συνεπώς αποφασίστηκε να αντιστοιχηθούν οι ακραίες τιμές ροπής με την ακραία τιμή duty cycle η οποία αφενός επιτυγχάνει πλήρη κίνηση του προσθετικού εντός ενός δευτερολέπτου και αφετέρου επιτρέπει την αντιστοίχιση των ενδιάμεσων τιμών δύναμης σε τιμές duty cycle που επιτρέπουν στο ακρωτηριασμένο άτομο να ορίσει την θέση του προσθετικού άκρου με αρκετή ακρίβεια. Τέλος, αποφασίστηκε, η ελάχιστη εντολή duty cycle να είναι 0,65% ούτως ώστε να επιτυγχάνεται κίνηση του προσθετικού χεριού για κάθε εντολή δύναμης που είναι εκτός των ορίων ακινησίας (parking band). Σύμφωνα με τα παραπάνω, η σχέση με την οποία η εντολή δύναμης μετασχηματίζεται σε εντολή duty cycle είναι η εξής:

$$D.C. = \begin{cases} 0, F_{act} \in [F_{flex,t}, F_{ext,t}] \\ \min(aF_{act} + b, \max D.C.), F_{act} > F_{ext,t}, a = \frac{(\max D.C. - \min D.C.)}{(F_{flex,mc} - F_{flex,t})}, b = aF_{ext,t} \\ \min(aF_{act} + b, \max D.C.), F_{act} < F_{flex,t}, a = -\frac{(\max D.C. - \min D.C.)}{(F_{flex,t} - F_{flex,mc})}, b = -aF_{flex,t} \end{cases} \quad (1-23)$$

Οι τιμές για Max D.C. και Min D.C. επιλέχθηκαν όπως εξηγήθηκε παραπάνω και είναι ίσες με 1,3% και 0,65%. Οι τιμές των παραμέτρων Fflex_t, Fflex_{mc}, Fext_t, Fext_{mc} επιλέχθηκαν ύστερα από δοκιμές με την τελική διάταξη ούτως ώστε να εξασφαλίζεται μια αρμονική κίνηση του προσθετικού χεριού. Αρχικά θεωρήθηκαν ίσες με:

- Fflex,mc = -20 N
- Fflex,t = -2N
- Fext,t = 2N
- Fext,mc = 20N

3.4.3 Οδήγηση slave κινητήρα

Για την οδήγηση του slave κινητήρα χρησιμοποιήθηκε ο AZBDC10A4 της Advanced Motion Controls. Ο driver αυτός είναι κατάλληλος για εφαρμογές ελέγχου ροπής καθώς παρέχει την δυνατότητα ελέγχου του ρεύματος του κινητήρα μέσω ελέγχου του duty cycle σήματος PWM το οποίο λαμβάνει σαν είσοδο. Είναι κατάλληλος για την οδήγηση του slave κινητήρα διότι πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Μπορεί να οδηγήσει κινητήρες με ρεύμα έως και 5A για συνεχή λειτουργία και έως και 10A ως μέγιστη στιγμιαία τιμή,
- Είναι κατάλληλος για τάσεις από 10V έως και 36V,
- Μπορεί να ελέγξει το ρεύμα του κινητήρα μέσω σήματος PWM συχνότητας από 10kHz έως και 25kHz,
- Μπορεί να ελέγξει την φορά στροφής του κινητήρα με ψηφιακό σήμα (0-1, Logic low-Logic high)

Ο έλεγχος ρεύματος γίνεται ελέγχοντας το duty cycle του σήματος PWM. Το duty cycle μπορεί να πάρει τιμές 0 έως και 100%. Για κάθε τιμή duty cycle, ο driver προσπαθεί να πετύχει το αντίστοιχο ρεύμα εξόδου. Αυτό το πετυχαίνει υλοποιώντας έναν εσωτερικό ελεγκτή ο οποίος κάνει closed loop έλεγχο στην τιμή του ρεύματος μέχρις ότου να πετύχει την τιμή αναφοράς (duty cycle PWM). Η διόρθωση της τιμής του ρεύματος γίνεται τροποποιώντας την τάση εξόδου του driver.

Ο driver αυτός είναι ο ίδιος που χρησιμοποιήθηκε και στις προηγούμενες διπλωματικές εργασίες. Διαπιστώθηκε όμως ότι υπήρχε ασυμβατότητα μεταξύ των επιπέδων τάσης των σημάτων εισόδου που απαιτούσε ο driver και του επιπέδου τάσης των σημάτων που μπορεί να δώσει ο μικροελεγκτής μέσω των εξόδων του. Πιο συγκεκριμένα ο driver απαιτεί σήματα 5V (Logic high, PWM) ενώ ο μικροελεγκτής μπορεί να δώσει σήματα έως και 3,6V (Logic high, PWM). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε level shifter, δηλαδή κύκλωμα κατάλληλο

για την μεταβολή σημάτων επικοινωνίας μιας τάσης σε σήματα επικοινωνίας μιας άλλης τάσης.

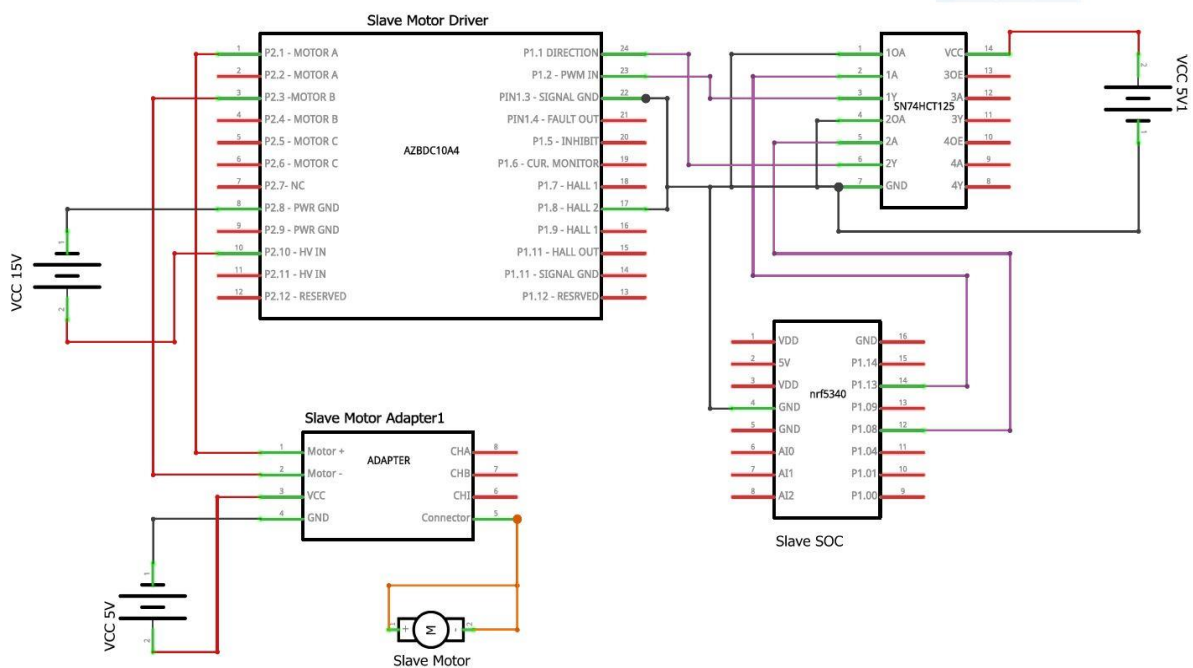
Ο level shifter που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ίδιος που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.4.1. Παρόλα αυτά, κατά τις δοκιμές διαπιστώθηκε ότι η έξοδος του level shifter για είσοδο σήμα PWM χαμηλού Duty Cycle και συχνότητας 15kHz (όπως απαιτείται από τον driver και τις τιμές duty cycle που επιλέχθηκαν στο προηγούμενο μέρος) δεν ήταν τετραγωνικός παλμός, αλλά εμφάνιζε μια συνάρτηση αναρρίχησης μικρής διάρκειας που όμως επηρέαζε το σήμα σημαντικά, με αποτέλεσμα να εισάγει σφάλμα στο πραγματικό duty cycle που θα αντιλαμβάνονταν ο driver. Έτσι, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το chip SN74AHCT125 που εμφάνιζε σημαντικά μικρότερο rise time. Το chip αυτό διαθέτει 4 κανάλια κάθε ένα από τα οποία διαθέτει μία είσοδο και μία έξοδο και μια είσοδο ενεργοποίησης (σήμα ελέγχου) του κάθε καναλιού. Το σήμα ελέγχου ενεργοποιεί και απενεργοποιεί την λειτουργία κάθε καναλιού. Όταν το κανάλι είναι ενεργοποιημένο (το pin ελέγχου είναι γειωμένο) τότε η έξοδος είναι στην ίδια λογική κατάσταση με την είσοδο. Η σημαντική παράμετρος που καθιστά το κύκλωμα κατάλληλο για την εφαρμογή είναι ότι για την είσοδο, ως Logic high γίνονται αντιληπτά σήματα τάσης μεγαλύτερης από 2V, ενώ στην έξοδο, η κατάσταση Logic high μεταφράζεται σε σήματα τάσης ίσης με την τάση τροφοδοσίας. Συνεπώς τροφοδοτώντας το κύκλωμα με 5V συνεχούς τάσης (η οποία είναι ήδη διαθέσιμη στην διάταξη) πετύχαμε να ανορθώσουμε πρακτικά το σήμα PWM του μικροελεγκτή από τα 3,6V στα 5V και να το κάνουμε συμβατό με τον driver. Η απόκριση του κυκλώματος αυτού είναι πολύ καλύτερη από του logic shifter και αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί και για το σήμα ελέγχου της φοράς του κινητήρα, αν και εκεί ο χρόνος ανύψωσης δεν ήταν πρόβλημα. Συνοψίζοντας, ο Πίνακας 3-10 παρουσιάζει τις συνδέσεις μεταξύ driver, κινητήρα και μικροελεγκτή.

Πίνακας 3-10. Συνδέσεις driver slave κινητήρα.

<i>Συσκευή</i>	<i>Pin</i>	<i>Συσκευή</i>	<i>Pin</i>	<i>Λειτουργία</i>
AZBDC10A	P1.1	SN74AHCT125	1Y	5V PWM
AZBDC10A	P1.2	SN74AHCT125	2Y	5V Έλεγχος φοράς
AZBDC10A	P1.3	SN74AHCT125	GND	Αναφορά
AZBDC10A	P1.8	AZBDC10A	P1.3	Λειτουργία DC motor
AZBDC10A	P2.1	Κινητήρας	+	Τροφοδοσία κινητήρα
AZBDC10A	P2.3	Κινητήρας	-	Τροφοδοσία κινητήρα
AZBDC10A	P2.8	Τροφοδοσία	15V-	Τροφοδοσία AZBDC10A4
AZBDC10A	P2.11	Τροφοδοσία	15V+	Τροφοδοσία AZBDC10A4
SN74AHCT125	VCC	Τροφοδοσία	5V+	Τροφοδοσία SN74AHCT125
SN74AHCT125	GND	Τροφοδοσία	5V-	Τροφοδοσία SN74AHCT125
SN74AHCT125	1A	Μικροελεγκτής	P1.13	3V PWM
SN74AHCT125	1OE	SN74AHCT125	GND	Ενεργοποίηση καναλιού 1

SN74AHCT125	2A	Μικροελεγκτής	P1.08	3V Έλεγχος φοράς
SN74AHCT125	2OE	SN74AHCT125	GND	Ενεργοποίηση καναλιού 2

Το Σχήμα 3-10 παρουσιάζει τις συνδέσεις αυτές με την μορφή μονογραμμικού σχεδίου.



Σχήμα 3-10. Συνδέσεις driver slave κινητήρα.

3.4.4 Σχεδιασμός GAP protocol και GATT protocol υλοποίησης

Όπως ήδη αναφέρθηκε κατά την παρουσίαση του master συστήματος, ο slave μικροελεγκτής θα αναλάβει τους ρόλους του GAP central και GATT client. Όσον αφορά την υλοποίηση του GAP πρωτοκόλλου, μια συσκευή που έχει αναλάβει τον ρόλο του GAP central πρέπει να εκκινήσει τη διαδικασία ανίχνευσης για να εντοπίσει GAP peripherals. Οι παράμετροι ανίχνευσης είναι αντίστοιχες των παραμέτρων διαφήμισης που εφαρμόστηκαν στην περίπτωση του GAP peripheral. Αρχικά η παράμετρος του παραθύρου ανίχνευσης (scan window), δηλαδή η διάρκεια της διαδικασίας ανίχνευσης ορίστηκε στα 60ms. Η διάρκεια είναι μικρή σχετικά αλλά αυτό έγινε διότι η συσκευή GAP peripheral, δηλαδή ο master μικροελεγκτής είναι πολύ κοντά. Η παράμετρος διάστημα σάρωσης (scan interval), δηλαδή η περίοδος επανάληψης της διαδικασίας ανίχνευσης, ορίστηκε στα 20ms. Αυτό έγινε διότι αφενός η διάρκεια της διαφήμισης του slave μικροελεγκτή έχει τεθεί στα 100-150ms και αφετέρου γιατί επιδιώκουμε να πετύχουμε γρήγορη ανίχνευση και σύνδεση για να μειώσουμε τον χρόνο αναμονής του χρήστη κατά την εκκίνηση και κατά την διαχείριση συμβάντων αποσύνδεσης. Για το είδος ανίχνευσης ορίστηκε ενεργή ανίχνευση (active scan) κατά την οποία το GAP central ζητάει επιπλέον πληροφορίες από το GAP peripheral. Αυτό έγινε ούτως ώστε να ελεγχθεί αν τα GAP peripheral που θα ανιχνευθούν διαθέτουν την BioEPP υπηρεσία. Αν αυτή δεν είναι διαθέσιμη, ο μικροελεγκτής αντιλαμβάνεται ότι το GAP peripheral που ανίχνευσε δεν είναι ο master μικροελεγκτής και συνεχίζει την διαδικασία της ανίχνευσης. Για εξοικονόμηση χρόνου, ο μικροελεγκτής στέλνει αίτημα για περισσότερες πληροφορίες μόνο αν κατά την αρχική ανίχνευση του GAP peripheral, αυτό επιτρέπει την

σύνδεση από το GAP central. Αν ο μικροελεγκτής ανιχνεύσει GAP peripheral που επιτρέπει την σύνδεση, τότε θα του αποστείλει αίτημα για επιπλέον δεδομένα. Αν στα επιπλέον δεδομένα διαπιστώσει ότι υπάρχει το UUID της BioEPP υπηρεσίας, τότε θα σταματήσει την διαδικασία ανίχνευσης και θα αποστείλει αίτημα σύνδεσης.

Στη συνέχεια, αφού επιτευχθεί η διαδικασία της σύνδεσης, ο μικροελεγκτής θα ξεκινήσει την διαδικασία της ανακάλυψης υπηρεσιών και χαρακτηριστικών. Προτού όμως περιγραφεί αυτή η διαδικασία, πρέπει να αναφερθούν οι παράμετροι σύνδεσης που χρησιμοποιεί ο slave μικροελεγκτής, δηλαδή ο GAP central. Αυτές κατά αντιστοιχία με τον master μικροελεγκτή είναι οι ακόλουθες:

- Connection interval = 7,5ms
- Slave latency = 10
- Timeout = 1000ms

Η διαδικασία της ανακάλυψης υπηρεσιών είναι απαραίτητη για να μπορέσει η GATT client συσκευή να εντοπίσει τις υπηρεσίες και τα χαρακτηριστικά που παρέχονται από ένα GATT server. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο master μικροελεγκτής διαθέτει μία υπηρεσία, την BioEPP, οποία με την σειρά της παρέχει δύο χαρακτηριστικά, το FSR και το ENCODER_POS. Στην διαδικασία ανακάλυψης, ο slave μικροελεγκτής αναζητά τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, χρησιμοποιώντας ως παράμετρο αναζήτησης το UUID τους. Το FSR χαρακτηριστικό θα χρησιμοποιηθεί για να λαμβάνονται ειδοποιήσεις για την διαφορά της μέτρησης των αισθητήρων δύναμης. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι τύπου ειδοποίησης (notification), συνεπώς, όταν ανακαλυφθεί αυτό το χαρακτηριστικό, πρέπει να γίνει συνδρομή (subscription) σε αυτό. Με την διαδικασία της συνδρομής, ο GATT client ενεργοποιεί την συνάρτηση διαχείρισης ειδοποιήσεων, δηλαδή την διαδικασία με την οποία τα δεδομένα που αποστέλλονται από τον GATT server για ένα notification χαρακτηριστικό διαχειρίζονται εσωτερικά. Παρόλα αυτά, ακόμα δεν είναι δυνατόν να ληφθούν ειδοποιήσεις. Για να γίνει αυτό, πρέπει πρώτα να ενεργοποιηθούν οι ειδοποιήσεις στον GATT server. Αυτό γίνεται γράφοντας τιμή ένα στον περιγραφέα (descriptor) ενός χαρακτηριστικού τύπου ειδοποίησης. Μόλις το κάνει και αυτό ο GATT client, οι ειδοποιήσεις είναι ενεργοποιημένες και θα τις διαχειριστεί ο ίδιος σύμφωνα με την συνάρτηση που ορίστηκε κατά την διαδικασία της συνδρομής. Το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας ανακάλυψης είναι η αναγνώριση του ENCODER_POS χαρακτηριστικού. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι τύπου εγγραφής (write) και συνεπώς κατά την αναγνώρισή του, ο GATT client καταγράφει τον χειριστή (handler) του χαρακτηριστικού, την τιμή του οποίου θα πρέπει να χρησιμοποιήσει ως παράμετρο κατά την διαδικασία γραψίματος μιας τιμής στο χαρακτηριστικό αυτό. Αφού γίνει και το παραπάνω, η διαδικασία ανακάλυψης έχει ολοκληρωθεί.

Τέλος, ορίστηκαν και κατάλληλες συναρτήσεις διαχείρισης ασύγχρονων συμβάντων, όπως η αποσύνδεση από το GAP peripheral ή η παύση της συνδρομής στο χαρακτηριστικό τύπου ειδοποίησης. Κατά την αποσύνδεση από ένα GAP peripheral αυτόματα παύει και η συνδρομή στο χαρακτηριστικό τύπου ειδοποίησης και ταυτόχρονα παύονται οι υπόλοιπες διεργασίες που εκτελεί ο μικροελεγκτής. Στη συνέχεια ξεκινάει η διαδικασία ανίχνευσης από την αρχή, όπως αυτή παρουσιάστηκε. Αν ακυρωθεί η συνδρομή σε ένα notification χαρακτηριστικό, τότε αρχικά παύονται όλες οι υπόλοιπες διεργασίες και γίνεται προσπάθεια να ενεργοποιηθεί ξανά η συνδρομή. Αν αυτό δεν πετύχει, προκαλείται αποσύνδεση και ξεκινάει ξανά η διαδικασία ανίχνευσης.

4 Υλοποίηση

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η προγραμματιστική υλοποίηση όλων των διαδικασιών που εκτελούν οι μικροελεγκτές για να επιτύχουν τις απαιτούμενες λειτουργίες βάσει σχεδιασμού. Επίσης, παρουσιάζονται οι δοκιμές που έγιναν χρησιμοποιώντας το πραγματικό σύστημα για να διαπιστωθεί η ακρίβεια των παραμέτρων που θεωρήθηκαν κατά τον σχεδιασμό.

4.2 Σύστημα Master

Το σύστημα master περιλαμβάνει 3 βασικές λειτουργίες:

- Λήψη μέτρησης των αισθητήρων δύναμης
- Επικοινωνία με τον slave μικροελεγκτή μέσω BLE
- Έλεγχος κλειστού βρόχου της θέσης των περικοχλίων με ανάδραση θέσης των κινητήρων

Οι διαδικασίες αυτές μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ρύθμιση πρωτοκόλλου GAP
- Ρύθμιση πρωτοκόλλου GATT
- Δειγματοληψία καναλιών ADC για λήψη μέτρησης από τους αισθητήρες δύναμης
- Δειγματοληψία οπτικών κωδικοποιητών για υπολογισμό θέσης των κινητήρων
- Έλεγχος και οδήγηση των master κινητήρων

Η δομή του προγράμματος μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως εξής:

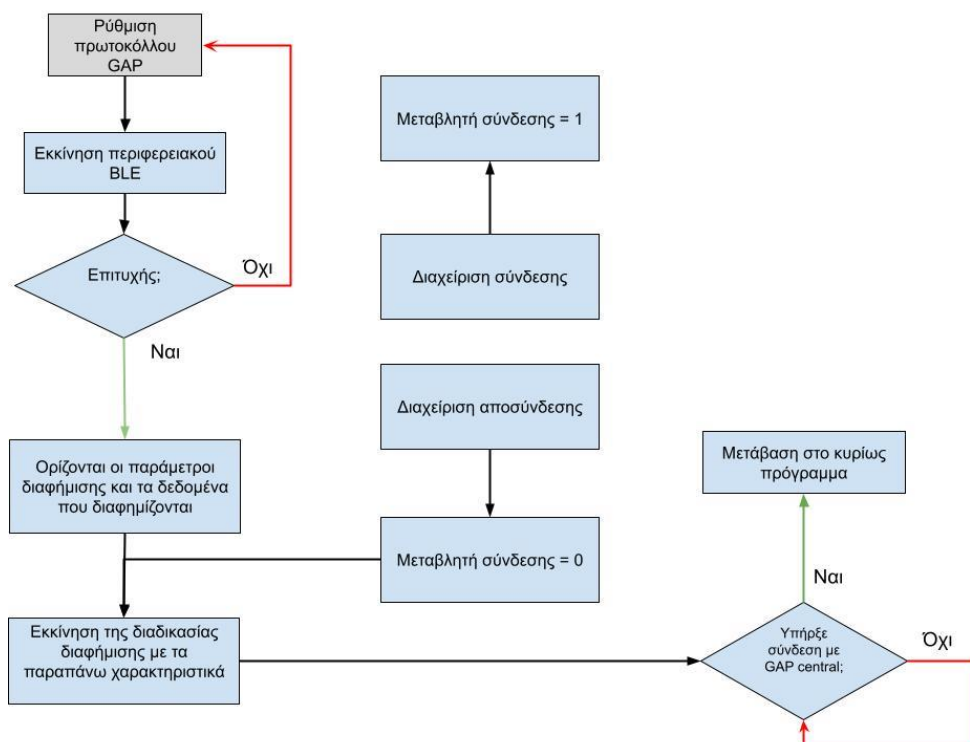
- Εκκίνηση όλων των υποσυστημάτων με αρχικοποίηση όλων των παραμέτρων σύμφωνα με τον σχεδιασμό
- Αναμονή για σύνδεση από τον μικροελεγκτή του slave συστήματος
- Εκκίνηση χρονομέτρων για εκτέλεση των διαδικασιών δειγματοληψίας ADC και ελέγχου κινητήρων
- Διαχείριση ασύγχρονων συμβάντων

4.2.1 Ρουτίνα ρύθμισης παραμέτρων πρωτοκόλλου GAP

Κατά την εκκίνηση του προγράμματος MASTER_SOC, καλείται η ρουτίνα ρύθμισης των παραμέτρων που αφορούν το GAP πρωτόκολλο και είναι υπεύθυνη για την ρύθμιση της διαδικασίας διαφήμισης του GAP peripheral και για την σύνδεση του με ένα GAP central. Σημειώνεται ότι πριν ξεκινήσει το BLE περιφερειακό του μικροελεγκτή, έχει ολοκληρωθεί και η ρουτίνα ρύθμισης των παραμέτρων του GATT πρωτοκόλλου που παρουσιάζεται παρακάτω.

Αρχικά, εκκινείται το περιφερειακό του μικροελεγκτή που είναι υπεύθυνο για την υλοποίηση του BLE πρωτοκόλλου. Στη συνέχεια ορίζονται οι παράμετροι της διαφήμισης όπως αυτές αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο καθώς και τα δεδομένα τα οποία ο μικροελεγκτής διαφημίζει, δηλαδή το UUID της BioEPP υπηρεσίας. Ορίζονται επίσης οι συναρτήσεις διαχείρισης των συμβάντων σύνδεσης και αποσύνδεσης. Στη συνέχεια εκκινείται η διαδικασία διαφήμισης η οποία τρέχει συνεχώς έως ότου να υπάρξει σύνδεση με

GAP central. Σε περίπτωση αποσύνδεσης, εκκινείται από την αρχή η διαδικασία διαφήμισης. Στο σχέδιο που ακολουθεί φαίνεται το λογικό διάγραμμα που περιγράφει την παραπάνω διαδικασία. Η ρουτίνα αποσύνδεσης εκτελείται ασύγχρονα όταν υπάρξει αποσύνδεση του GAP central από το GAP peripheral. Το Σχήμα 4-1 παρουσιάζει το λογικό διάγραμμα των ρουτίνων που ρυθμίζουν το GAP πρωτόκολλο για τον master μικροελεγκτή.



Σχήμα 4-1. Ρουτίνες GAP peripheral.

Οι ρουτίνες σύνδεσης και αποσύνδεσης ελέγχουν την τιμή της μεταβλητής σύνδεσης, η οποία χρησιμοποιείται από το κυρίως πρόγραμμα για την επιτήρηση των διαδικασιών. Η ρουτίνα αποσύνδεσης, όμως, πέρα από την αλλαγή της τιμής της μεταβλητή σύνδεσης, επανεκκινεί και την διαδικασία διαφήμισης, ούτως ώστε να αναζητηθεί νέα σύνδεση.

4.2.2 Ρουτίνα ρύθμισης παραμέτρων πρωτοκόλλου GATT

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ρουτίνα ρύθμισης των παραμέτρων του GATT πρωτοκόλλου δεν είναι επαναληπτική και εκτελείται πριν την εκκίνηση του προγράμματος, πριν καν εκκινηθεί το BLE περιφερειακό του μικροελεγκτή. Στόχος αυτής της ρουτίνας είναι να ορίσει την υπηρεσία BioEPP με τα χαρακτηριστικά:

- FSR με ιδιότητες notification και DESCRIPTOR τύπου notification
- ENCODER_POS με ιδιότητες εγγραφής χωρίς απόκριση και άδειες για εγγραφή

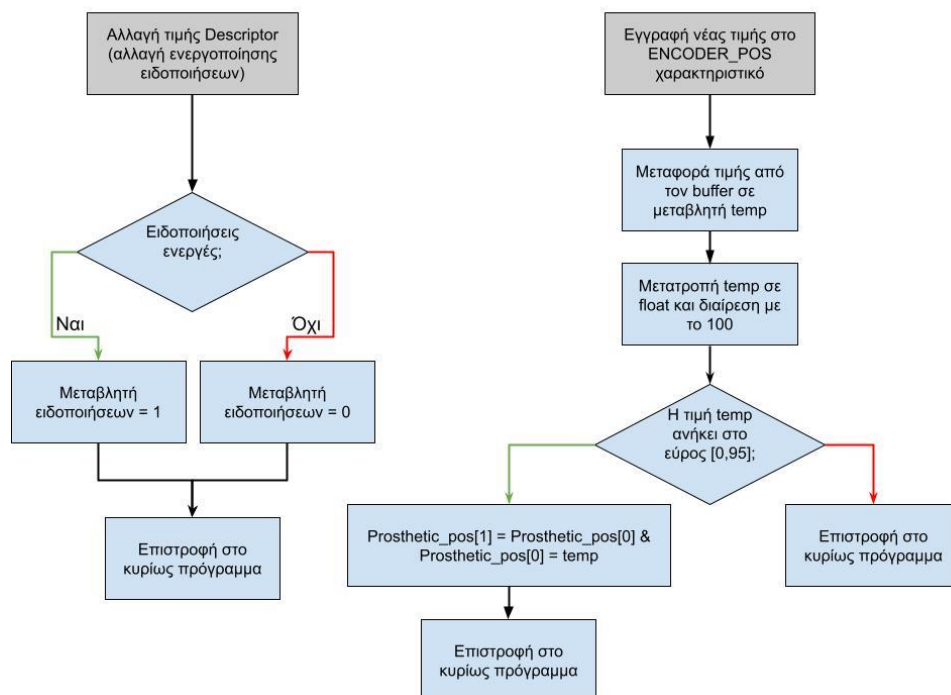
Επίσης η ρουτίνα ορίζει δύο συναρτήσεις οι οποίες εκτελούνται ασύγχρονα:

- Συνάρτηση διαχείρισης ειδοποιήσεων στο FSR χαρακτηριστικό. Όπως εξηγήθηκε και στο Κεφάλαιο 3.4.4, απαραίτητη προϋπόθεση για την αποστολή ειδοποιήσεων από τον GATT server στον GATT client είναι ο GATT client να έχει ενεργοποιήσει τις ειδοποιήσεις. Αυτό γίνεται γράφοντας τιμή ένα στον περιγραφέα του FSR

χαρακτηριστικού. Η συνάρτηση αυτή καλείται ασύγχρονα όταν ενεργοποιηθούν ή απενεργοποιηθούν οι ειδοποιήσεις και αντίστοιχα ορίζει την τιμή μεταβλητής ελέγχου των ειδοποιήσεων, την οποία στη συνέχεια χειρίζεται το κυρίως πρόγραμμα για λόγους επιτήρησης.

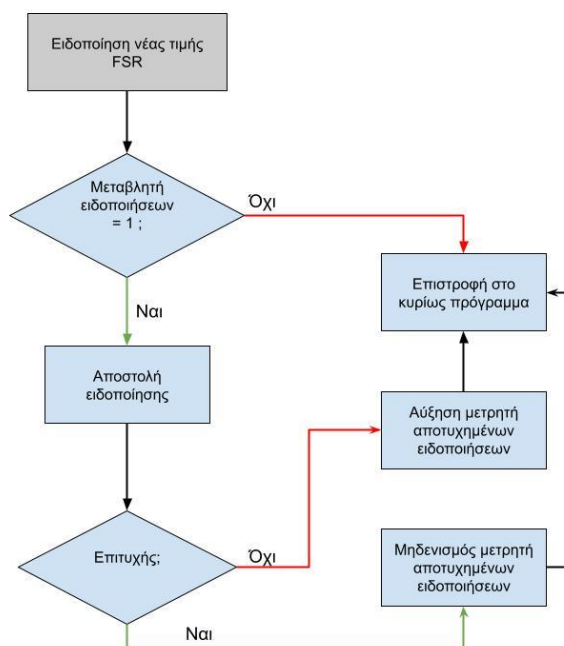
- Συνάρτηση διαχείρισης γραψίματος τιμής στο χαρακτηριστικό ENCODER_POS. Η ρουτίνα αυτή καλείται ασύγχρονα όταν γράφεται μια τιμή στο χαρακτηριστικό και στόχο έχει να μεταφέρει την τιμή αυτή από τον προσωρινό buffer του χαρακτηριστικού σε μια μεταβλητή του κυρίως προγράμματος. Η τιμή που γράφεται στο χαρακτηριστικό ENCODER_POS από τον slave μικροελεγκτή είναι η τιμή της θέσης του slave κινητήρα. Η παράμετρος αυτή μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως και 95 μοίρες. Οι τιμές δεν είναι ακέραιες αλλά έχουν και δεκαδικά ψηφία. Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, η ανάλυση της θέσης του προσθετικού χεριού είναι 0,014 μοίρες. Δηλαδή υπάρχει ακρίβεια στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο. Για λόγους ευκολίας, αντί να χρησιμοποιηθούν δεδομένα τύπου float (32bit single precision floating point number), χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα τύπου ακέραιας μη αρνητικής μεταβλητής ακρίβειας 16bit. Για να προστεθεί η ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων, ο slave μικροελεγκτής έχει προηγουμένως πολλαπλασιάσει την float τιμή της θέσης με το εκατό και την έχει μετατρέψει σε ακέραια τιμή ακρίβειας 16bit. Συνεπώς, στην ρουτίνα διαχείρισης γραψίματος, ο μικροελεγκτής πρέπει να πάρει την τιμή από τον buffer, να την μετατρέψει σε float και να την διαιρέσει με το εκατό. Τέλος πρέπει να ελέγξει αν η τιμή αυτή είναι στο εύρος 0-95 μοιρών και αν όχι να την απορρίψει. Αν η τιμή είναι αποδεκτή, τότε αυτή μεταβιβάζεται σε μια μεταβλητή (πίνακας 1x2) η οποία διατηρεί τις δύο τελευταίες έγκυρες τιμές θέσης του προσθετικού χεριού που έχουν ληφθεί. Ο λόγος που διατηρούνται οι δύο τελευταίες τιμές της παραμέτρου αυτής, είναι ότι η παράμετρος αυτή αποτελεί το είσοδο αναφοράς του control loop. Ο ελεγκτής που εφαρμόστηκε είναι PD και συνεπώς χρειάζεται να υπολογιστεί ο ρυθμός μεταβολής του σφάλματος. Τέλος, σημειώνεται ότι μια ακέραια θετική μεταβλητή ακρίβειας 16bit μπορεί να πάρει τιμές έως και 65535, δηλαδή είναι κατάλληλη για τιμές θέσης του προσθετικού έως και 654 μοίρες, συνεπώς υπερκαλύπτει τις ανάγκες της εφαρμογής μας.

Στο Σχήμα 4-2 που παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα των δύο αυτών συναρτήσεων. Τέλος ορίζεται και η συνάρτηση ειδοποίησης του GATT server για το FSR χαρακτηριστικό. Όπως θα αναλυθεί παρακάτω, η συνάρτηση ειδοποίησης καλείται ύστερα από την δειγματοληψία των αισθητήρων δύναμης. Ως παράμετρο έχει την τιμή της διαφοράς των μετρήσεων των δύο αισθητήρων. Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, η μέτρηση των αισθητήρων δύναμης κυμαίνεται μεταξύ 0 και 20N. Συνεπώς, η μέγιστη διαφορά των μετρήσεων μπορεί να είναι 20N. Η ακρίβεια του αισθητήρα δύναμης δεν είναι μεγάλη, αλλά αποφασίστηκε και εδώ να διατηρηθούν δύο δεκαδικά ψηφία. Δηλαδή ο αριθμός της ειδοποίησης ισούται με την διαφορά της μέτρησης των αισθητήρων σε Newton πολλαπλασιασμένη με το εκατό.



Σχήμα 4-2. Ρουτίνες GATT server.

Συνεπώς, η τιμή της ειδοποίησης βρίσκεται στο εύρος [-2000, 2000]. Για το εύρος αυτό είναι κατάλληλη η χρησιμοποίηση δεδομένων τύπου ακέραιου ακρίβειας 16bit. Στο Σχήμα 4-3 απεικονίζεται το λογικό διάγραμμα της συνάρτησης που διαχειρίζεται την αποστολή ειδοποιήσεων για το FSR χαρακτηριστικό.



Σχήμα 4-3. Ρουτίνα αποστολής ειδοποιήσεων FSR.

Η συνάρτηση αυτή, λοιπόν, λαμβάνει ως είσοδο έναν ακέραιο αριθμό ακρίβειας 16bit, ελέγχει αρχικά αν οι ειδοποιήσεις έχουν ενεργοποιηθεί και εν συνεχεία ειδοποιεί τον GATT client για την νέα τιμή. Αν η ειδοποίηση δεν μεταφερθεί επιτυχώς, δηλαδή προκύψει σφάλμα, αυξάνει ένας μετρητής αποτυχημένων ειδοποιήσεων. Αν η ειδοποίηση μεταφερθεί επιτυχώς, μηδενίζεται ο αθροιστής αποτυχημένων ειδοποιήσεων.

4.2.3 Ρουτίνα δειγματοληψίας-υπολογισμού δύναμης

Η δειγματοληψία των αισθητήρων δύναμης γίνεται μέσω των ADC καναλιών του μικροελεγκτή. Για να γίνει η δειγματοληψία σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 3 πρέπει να εκκινηθεί το περιφερειακό που ελέγχει τους ADC του μικροελεγκτή με τις κατάλληλες ρυθμίσεις. Οι ρυθμίσεις αυτές είναι οι εξής:

- Ρύθμιση δύο καναλιών A0 και A1 ως κανάλια ADC
- Ρύθμιση ακρίβειας 10bit για τις μετρήσεις
- Ρύθμιση χρόνου φόρτισης πυκνωτή δειγματοληψίας στα 40μs
- Ρύθμιση λειτουργίας των καναλιών ως single ended και όχι differential. Στη single ended ρύθμιση η τιμή του καναλιού υπολογίζεται μετρώντας την τάση μεταξύ του καναλιού και του GND pin. Στην differential ρύθμιση, υπολογίζεται η διαφορά τάσης μεταξύ δύο καναλιών.
- Ρύθμιση ενός πίνακα buffer 1x2 για την αποθήκευση των τιμών των δύο καναλιών ADC (A0 και A1).

Αφού έχουν οριστεί όλες αυτές οι παράμετροι, μπορεί να εκκινηθεί το ADC περιφερειακό του μικροελεγκτή. Η διαδικασία δειγματοληψίας και υπολογισμού δύναμης μπορεί να χωριστεί στις εξής επιμέρους συναρτήσεις:

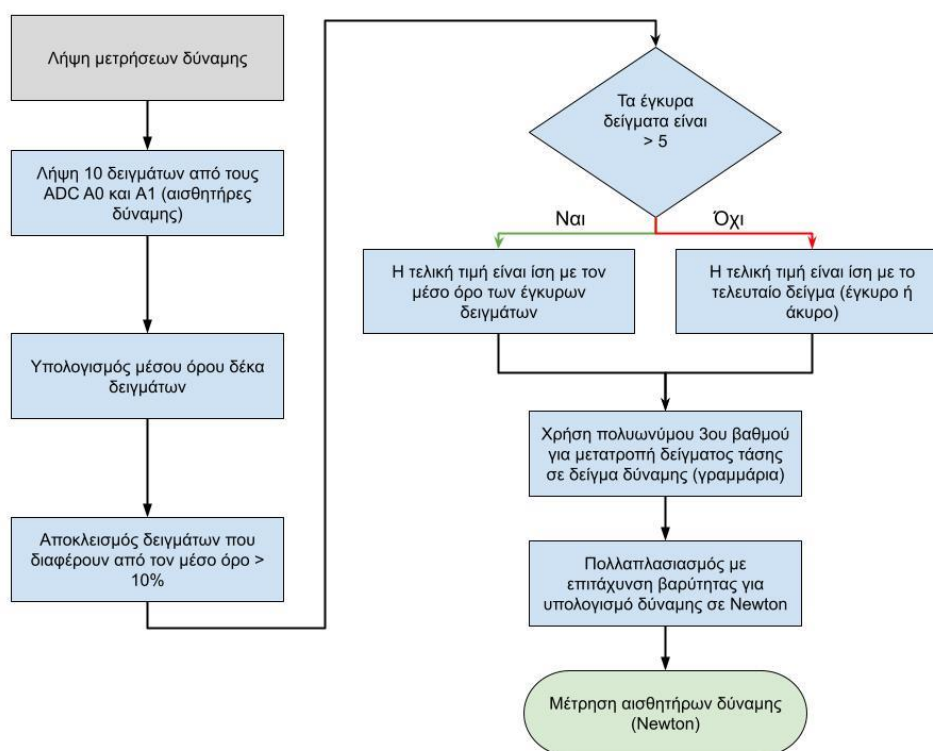
- Δειγματοληψία μέτρησης ADC καναλιών και υπολογισμός τάσης
- Φιλτράρισμα τιμής τάσης μέσω εφαρμογής μέσου όρου
- Υπολογισμός τιμής δύναμης μέσω εφαρμογής line fitting
- Έλεγχος για αποστολή ειδοποίησης μέσω GATT πρωτοκόλλου

Αξίζει εδώ να τονιστεί ότι η επεξεργασία της μέτρησης τάσης του ADC γίνεται διότι η έξοδος των αισθητήρων δύναμης επηρεάζεται αρκετά από τον τρόπο εφαρμογής της δύναμης αλλά και την ισορροπία του αισθητήρα εσωτερικά του housing. Για τον λόγο αυτό, η συνάρτηση δειγματοληψίας λαμβάνει 10 συνεχόμενα δείγματα από κάθε ADC και υπολογίζει τον μέσο όρο. Στη συνέχεια ελέγχει ποια από τα δείγματα διαφέρουν από τον μέσο όρο περισσότερο από 5%. Όσα δείγματα απέχουν από τον μέσο όρο περισσότερο από 5% απορρίπτονται. Αν τα δείγματα που απορρίπτονται είναι περισσότερα από πέντε (στα δέκα), τότε η μέτρηση δεν έχει καθόλου επαναληψιμότητα και η συνάρτηση επιστρέφει ως έξοδο το δέκατο (τελευταίο) δείγμα. Αν τα δείγματα που απορρίπτονται είναι λιγότερα από πέντε, τότε η συνάρτηση επιστρέφει ως έξοδο το νέο μέσο όρο των έγκυρων δειγμάτων. Από δοκιμές που έγιναν παρατηρήθηκε ότι για δυνάμεις χαμηλότερες από 3N η επαναληψιμότητα ήταν πολύ χαμηλή (απόρριψη περισσότερων από επτά δειγμάτων). Αντίθετα, για δυνάμεις μεγαλύτερες των 5N η επαναληψιμότητα ήταν πολύ μεγάλη (απόρριψη ενός ή δύο δειγμάτων).

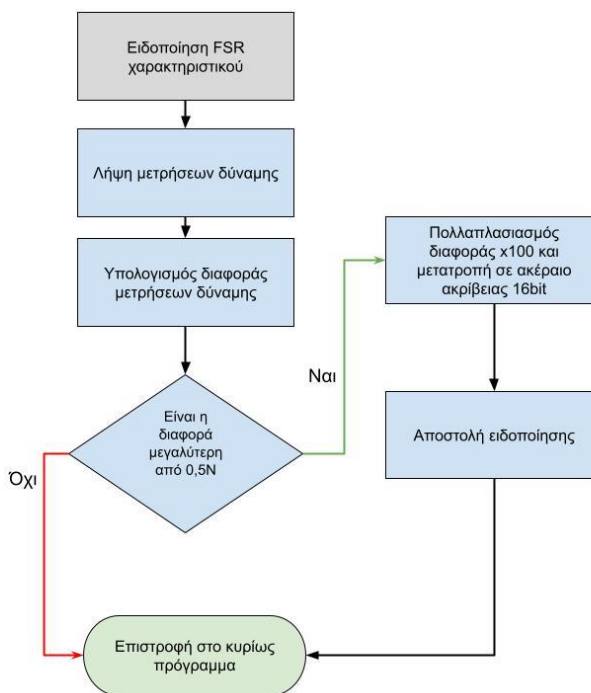
Όσον αφορά τον υπολογισμό της δύναμης, όπως αναλύθηκε και στον σχεδιασμό, έχουν υπολογιστεί πολυωνυμικές συναρτήσεις που προσεγγίζουν την δύναμη που ασκείται στον αισθητήρα θεωρώντας ως είσοδο την τάση που μετράει το αντίστοιχο ADC κανάλι. Οι πολυωνυμικές συναρτήσεις προέκυψαν από 20 δείγματα που λήφθηκαν για κάθε αισθητήρα

και είναι διαφορετικές μεταξύ τους. Αφού λοιπόν η συνάρτηση καθαρισμού της μετρούμενης τάσης από τους ADC δώσει αποτέλεσμα, η τιμή αυτή εισάγεται στην συνάρτηση υπολογισμού δύναμης (δηλαδή το πολυώνυμο τρίτου βαθμού που προσδιορίστηκε). Η έξοδος του είναι υπολογισμένη σε γραμμάρια, συνεπώς για να μετατραπεί σε Newton πολλαπλασιάζεται με τον παράγοντα επιτάχυνσης της βαρύτητας 0.0098. Τέλος, υπολογίζεται η διαφορά των τιμών δύναμης που υπολογίστηκαν από τους δύο αισθητήρες.

Αν η διαφορά των μετρήσεων είναι μεγαλύτερη από 0,3N τότε η τιμή πολλαπλασιάζεται με το εκατό και μετατρέπεται από float σε ακέραιο ακρίβειας 16bit και δίνεται ως είσοδος στην συνάρτηση ειδοποίησης του FSR χαρακτηριστικού. Αυτό έγινε για να δοθεί ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων στην παράμετρο που λαμβάνει ο slave μικροελεγκτής χωρίς να χρησιμοποιηθούν δεδομένα τύπου float. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι επειδή η τιμή που μας ενδιαφέρει να υπολογιστεί και τελικά να σταλεί είναι η διαφορά των μετρήσεων των δύο αισθητήρων, οι παραπάνω συναρτήσεις εκτελούνται παράλληλα για τους δύο αισθητήρες. Διαφορετικά, δηλαδή αν εκτελούνταν σειριακά, η χρονική καθυστέρηση μεταξύ των μετρήσεων θα εισήγαγε σφάλμα στην αναφορά του τελικού σήματος που θα αποσπελλόταν στον slave μικροελεγκτή. Το Σχήμα 4-4 παρουσιάζει το λογικό διάγραμμα της εκτέλεσης των παραπάνω συναρτήσεων. Το Σχήμα 4-5 παρουσιάζει το λογικό διάγραμμα της ρουτίνας που ελέγχει αν πρέπει να αποσταλεί ειδοποίηση του χαρακτηριστικού FSR.



Σχήμα 4-4. Ρουτίνα δειγματοληψίας μετρήσεων FSR.



Σχήμα 4-5. Ρουτίνα ελέγχου ειδοποιήσεων χαρακτηριστικού FSR.

4.2.4 Ρουτίνα υπολογισμού θέσης κινητήρων

Όπως σημειώθηκε και στο Κεφάλαιο του σχεδιασμού, η παρακολούθηση των παλμών ενός οπτικού κωδικοποιητή ο οποίος παράγει παλμούς με συχνότητα δεκάδες kHz μπορεί να είναι αρκετά δύσκολη διαδικασία. Γενικότερα οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των παλμών ενός οπτικού κωδικοποιητή είναι δύο:

- Hardware interrupts
- Χρήση κατάλληλου περιφερειακού του μικροελεγκτή

Το hardware interrupt είναι πρακτικά μια συνάρτηση η οποία καλείται όταν σε μια είσοδο του μικροελεγκτή ικανοποιηθεί μια συνθήκη. Για την παρακολούθηση παλμών, η συνθήκη αυτή μπορεί να είναι η μεταβολή του λογικού επιπέδου της εισόδου από Logic low (τάση κοντά στο μηδέν) σε Logic high (τάση μεγαλύτερη του μηδέν, η ακριβής τιμή εξαρτάται από τον μικροελεγκτή, εδώ περίπου 2V). Κάθε φορά που ικανοποιείται η συνθήκη, η συνάρτηση του hardware interrupt καλείται. Πάλι για την παρακολούθηση ενός οπτικού κωδικοποιητή, η συνάρτηση αυτή περιλαμβάνει την αύξηση ή μείωση ενός μετρητή βημάτων ανάλογα με το αν οι παλμοί του καναλιού A προηγούνται των παλμών του καναλιού B. Στην περίπτωση μας αυτό δοκιμάστηκε, αλλά παρόλα αυτά για παρακολούθηση δύο κωδικοποιητών και την καταγραφή της φοράς του κινητήρα, διαπιστώθηκε ότι υπήρχε σφάλμα. Το σφάλμα προέκυψε διότι η διάρκεια εκτέλεσης της συνάρτησης του hardware interrupt ήταν μεγαλύτερη από την χρονική διάρκεια μεταξύ δύο hardware interrupts, με αποτέλεσμα να μην καταμετρώνται όλοι οι παλμοί. Συνεπώς, διαπιστώθηκε ότι αυτή η διαδικασία δεν ήταν κατάλληλη για το σύστημα του master, το οποίο διαθέτει ζεύγη κινητήρων-κωδικοποιητών.

Ο μικροελεγκτής διαθέτει κατάλληλο περιφερειακό για παρακολούθηση κωδικοποιητή, παρόλα αυτά, είναι σχεδιασμένο για συχνότητες πολύ χαμηλότερες και δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Τελικά η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο συνδυασμός των περιφερειακών GPIO, PPI και TIMER του μικροελεγκτή. Το περιφερειακό GPIO (Generic purpose Input/Output Tasks and Events) είναι ένα περιφερειακό το οποίο διαχειρίζεται μεταβολές κατάστασης (συμβάντα) των εισόδων του μικροελεγκτή. Πρακτικά μοιάζει με το hardware interrupt, με την διαφορά ότι δεν υλοποιείται στη CPU αλλά εκτελείται στο περιφερειακό. Είναι στο χέρι του προγραμματιστή να ορίσει αν η διαχείριση συμβάντων μιας εισόδου του μικροελεγκτή, θα συνδεθεί με μια συνάρτηση που εκτελείται στην CPU ή θα συνδεθεί με μια αποστολή (task) σε άλλη είσοδο/έξοδο του μικροελεγκτή μέσω του ίδιου του GPIO περιφερειακού.

Το περιφερειακό TIMER προσφέρει δύο δυνατότητες:

- Δυνατότητα μετρητή. Το περιφερειακό διατηρεί ένα μετρητή τον οποίο αυξάνει υπό συνθήκες που ορίζει ο προγραμματιστής και στη συνέχεια επιτρέπει στον προγραμματιστή να ορίσει μια συνάρτηση που θα εκτελεστεί όταν ο μετρητής ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή.
- Δυνατότητα χρονομέτρου. Το περιφερειακό διατηρεί ένα χρονόμετρο διάρκειας που έχει οριστεί από τον προγραμματιστή. Όταν το χρονόμετρο εξαντληθεί, εκτελείται μια συνάρτηση που έχει οριστεί από τον προγραμματιστή και ταυτόχρονα το χρονόμετρο επανεκκινεί.

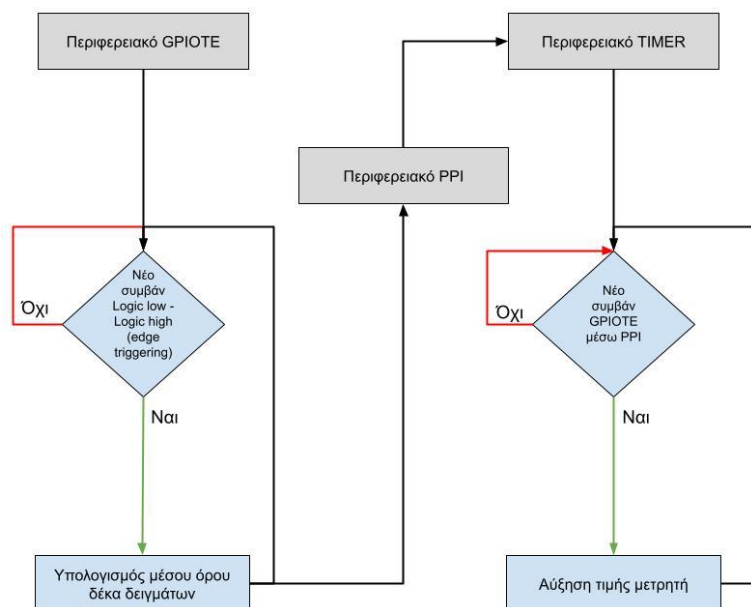
Το περιφερειακό PPI (Programmable peripheral interconnect) επιτρέπει την διασύνδεση διαφορετικών περιφερειακών χωρίς την μεσολάβηση της CPU. Πρακτικά, ορίζει μία σχέση αιτίου-αποτελέσματος, μεταξύ δύο διαφορετικών περιφερειακών. Στην περίπτωση μας, ρυθμίστηκαν δύο κανάλια στο GPIO περιφερειακό, ένα κανάλι για κάθε είσοδο του μικροελεγκτή που θα συνδεόταν με κανάλι A των κωδικοποιητών. Για τα κανάλια αυτά, ορίστηκε συμβάν για την μεταβολή του λογικού επιπέδου τους από την κατάσταση Logic low στην κατάσταση Logic high (δηλαδή κατά την ανύψωση του παλμού του κωδικοποιητή). Ταυτόχρονα, ρυθμίστηκαν δύο κανάλια στο περιφερειακό TIMER με την λειτουργία του μετρητή. Στη συνέχεια, μέσω του περιφερειακού PPI συνδέθηκαν τα συμβάντα των καναλιών του περιφερειακού GPIO με την αύξηση των μετρητών των αντίστοιχων καναλιών του περιφερειακού TIMER.

Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίστηκε ότι κάθε φορά που θα παράγεται ένας παλμός στο κανάλι A του κωδικοποιητή, θα προκαλείται ένα συμβάν στο κανάλι του GPIO, το οποίο μέσω του PPI περιφερειακού θα προκαλεί αύξηση κατά μία μονάδα του μετρητή του αντίστοιχου καναλιού του TIMER περιφερειακού. Το πλεονέκτημα αυτής της υλοποίησης είναι ότι οι μετρητές των καναλιών του TIMER περιφερειακού ανά πάσα στιγμή διατηρούν τον αριθμό των παλμών των καναλιών A των κωδικοποιητών, χωρίς την μεσολάβηση της CPU, δηλαδή χωρίς να διακόπτεται η ροή του προγράμματος της CPU από hardware interrupts κάθε 40μs (25kHz). Επιπλέον, το περιφερειακό GPIO έχει την δυνατότητα να παρακολουθήσει τους παλμούς των κωδικοποιητών (συνολική συχνότητα 25kHz) καθώς λειτουργεί με συχνότητα 16Mhz. Αντίθετα, για την καταγραφή της περιστροφής των κινητήρων, το μόνο που απαιτείται από την CPU είναι μια επαναληπτική διαδικασία πολύ μικρότερης συχνότητας (όσης ορίζουν οι απαιτήσεις της διαδικασίας ελέγχου, περίπου 10-20ms), η οποία θα καταγράφει την τιμή των μετρητών (δηλαδή τον αριθμό παλμών) και στη συνέχεια θα μηδενίζει τους μετρητές για να αποφευχθεί η υπερχειλίση τους.

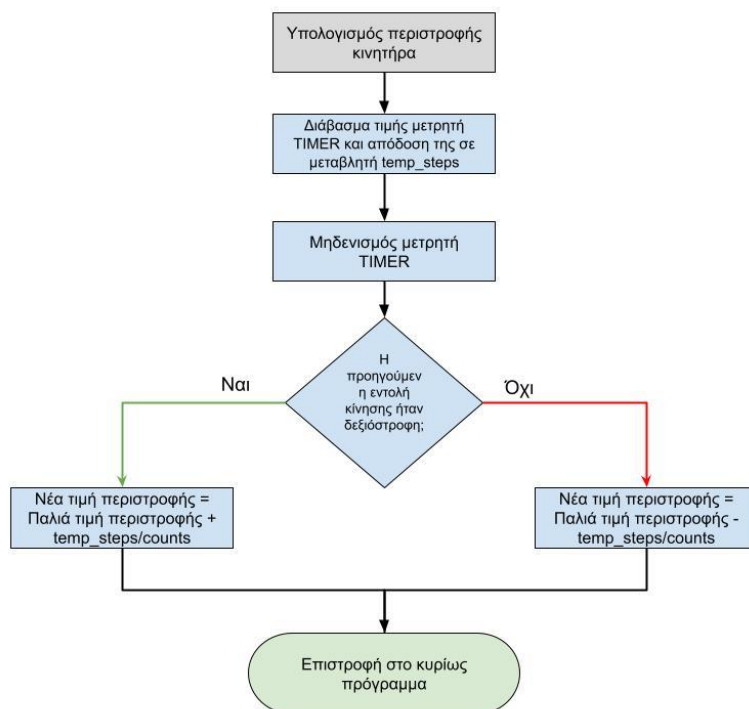
Το μειονέκτημα αυτής της εφαρμογής είναι ότι δεν υπάρχει ασφαλής τρόπος καταγραφής της φοράς περιστροφής. Για τον λόγο αυτό η ρουτίνα που τρέχει στην CPU για την καταγραφή της περιστροφής των κινητήρων εκτελεί τα ακόλουθα βήματα:

- Λήψη πληροφορίας της φοράς κίνησης από την ρουτίνα ελέγχου των κινητήρων
- Λήψη τιμής μετρητών και στη συνέχεια μηδενισμός τους
- Μετατροπή αριθμού παλμών σε στροφή (μοίρες)
- Υπολογισμός συνολικής θέσης κινητήρα προσθέτοντας ή αφαιρώντας την παραπάνω υπολογισμένη στροφή, ανάλογα με την πληροφορία της φοράς

Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι μεταξύ του διαβάσματος της τιμής του μετρητή και της επαναφοράς του στο μηδέν μεσολαβεί κάποιος χρόνος. Το διάστημα αυτό ενδέχεται να παραχθούν παλμοί οι οποίοι δεν θα διαβαστούν ποτέ, δηλαδή θα χαθούν. Αυτό γενικά θα εισήγαγε σφάλμα στην μέτρηση. Παρόλα αυτά, με δοκιμές που έγιναν, διαπιστώθηκε ότι δεν χάνονται παλμοί, ακόμα και κατά την λειτουργία των κινητήρων σε μέγιστη ταχύτητα. Μάλιστα για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα μέτρησης που προκαλείται από το γεγονός ότι η φορά κίνησης των κινητήρων δεν καταγράφεται μέσω σύγκρισης των παλμών των καναλιών A και B του κωδικοποιητή, αλλά θεωρείται ίδια με την εντολή φοράς κίνησης που δίνει ο μικροελεγκτής στον driver των κινητήρων ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία κατά την οποία, πριν κληθεί η ρουτίνα ελέγχου, καλείται η ρουτίνα καταγραφής των παλμών. Στη συνέχεια, κατά την κλήση της ρουτίνας ελέγχου, τίθεται η φορά κίνησης και κατά συνέπεια, οι παλμοί που θα υπολογιστούν στην επόμενη επανάληψη θα υπολογιστούν με την αντίστοιχη φορά που ορίστηκε στην προηγούμενη επανάληψη της ρουτίνας ελέγχου. Στο Σχήμα 4-6 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα της λειτουργίας των GPIOTE, PPI και TIMER περιφερειακών. Στο Σχήμα 4-7 παρουσιάζεται η ρουτίνα υπολογισμού της περιστροφής των κινητήρων.



Σχήμα 4-6. Λογικό διάγραμμα περιφερειακών GPIOTE,PPI,TIMER.



Σχήμα 4-7. Ρουτίνα υπολογισμού περιστροφής κινητήρα.

4.2.5 Ρουτίνα ελέγχου κινητήρων

Η ρουτίνα ελέγχου είναι υπεύθυνη για δύο διαδικασίες, τον υπολογισμό του σήματος ελέγχου με βάση τον PD ελεγκτή και την οδήγηση των κινητήρων με βάση το σήμα ελέγχου. Για τον υπολογισμό του σήματος ελέγχου αρχικά λαμβάνεται η τελευταία διαθέσιμη τιμή της θέσης του προσθετικού χεριού από την αντίστοιχη μεταβλητή η οποία ενημερώνεται από τον slave μικροελεγκτή μέσω BLE. Η τιμή αυτή μεταφράζεται στη γραμμική θέση του περικοχλίου την οποία πρέπει να πετύχει ο κάθε κινητήρας. Για το αγωνιστικό σύστημα η συνάρτηση (4-1) περιγράφει την σχέση μεταξύ της θέσης του προσθετικού χεριού ενώ για το ανταγωνιστικό σύστημα η σχέση αυτή περιγράφεται από την Συνάρτηση (4-2).

$$\text{Ζητούμενη γραμμική θέση(mm)} = \text{Θέση προσθετικού χεριού(μοίρες)} \times \frac{20(\text{mm})}{95(\text{μοίρες})} \quad (1-24)$$

$$\text{Ζητούμενη γραμμική θέση(mm)} = 20(\text{mm}) - \text{Θέση προσθετικού χεριού(μοίρες)} \times \frac{20\text{mm}}{95\text{μοίρες}} \quad (1-25)$$

Οι ζητούμενες γραμμικές θέσεις των περικοχλίων του αγωνιστικού και ανταγωνιστικού συστήματος αντίστοιχα μετατρέπονται σε ζητούμενες γωνιακές θέσεις των κινητήρων των δύο συστημάτων μέσω των σχέσεων που περιγράφουν η Συνάρτηση (4-3) και η Συνάρτηση (4-4) αντίστοιχα.

$$\text{Ζητούμενη γωνιακή θέση(μοίρες)} = \frac{\text{Θέση προσθετικού χεριού} \times \frac{20}{95}}{\text{Βήμα περικοχλίου}} \quad (1-26)$$

$$\text{Ζητούμενη γωνιακή θέση(μοίρες)} = \frac{20 - \text{Θέση προσθετικού χεριού} \times \frac{20}{95}}{\text{Βήμα περικοχλίου}} \quad (1-27)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το σφάλμα θέσης, σύμφωνα με την Συνάρτηση (4-5)

$$\text{Σφάλμα γωνιακής θέσης} = \text{Ζητούμενη γωνιακή θέση} - \text{Πραγματική γωνιακή θέση} \quad (1-28)$$

και στη συνέχεια ο ρυθμός μεταβολής του σφάλματος θέσης σύμφωνα με την Συνάρτηση (4-6).

$$\text{Ρυθμός μεταβολής σφάλματος θέσης} = \frac{(\text{Σφάλμα θέσης}_1 - \text{Σφάλμα θέσης}_0)}{T_1 - T_0} \quad (1-29)$$

όπου T_1 και T_0 είναι τα χρονικά στιγμιότυπα δύο επαναλήψεων της ρουτίνας ελέγχου. Παρότι η ρουτίνα ελέγχου, όπως και άλλες εκτελούνται ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα με χρήση χρονομέτρου, για μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό του διαστήματος χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων, χρησιμοποιείται κατάλληλη συνάρτηση που υπολογίζει τον χρόνο που παρήλθε από την προηγούμενη εκτέλεση της. Η τιμή αυτή εισάγεται ως το $\Delta T = T_0 - T_1$ στην παραπάνω σχέση. Στη συνέχεια, το σήμα ελέγχου υπολογίζεται με βάση τον PD ελεγκτή, όπως φαίνεται στην Συνάρτηση (4-7).

$$\text{Σήμα ελέγχου} = K_p \text{error} + K_D \frac{d\text{error}}{dt} \quad (1-30)$$

Όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3, το σήμα ελέγχου των κινητήρων είναι σήμα τάσης. Παρόλα αυτά, ο μικροελεγκτής ελέγχει τους κινητήρες μέσω driver ο οποίος ρυθμίζει την τάση των κινητήρων ανάλογα με το duty cycle σήματος PWM που δέχεται ως είσοδο από τον μικροελεγκτή. Αυτό σημαίνει ότι τελικά το σήμα ελέγχου πρέπει να μεταφραστεί σε εντολή duty cycle. Η μετατροπή αυτή γίνεται εντός της ρουτίνας οδήγησης του κινητήρα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο driver των κινητήρων δέχεται σήματα PWM συγκεκριμένου εύρους συχνότητας [15-25]kHz. Επιλέχθηκε η συχνότητα του PWM να οριστεί στα 20kHz. Ορίζοντας την συχνότητα του PWM στα 20kHz, η περίοδος του PWM προκύπτει:

$$T_{pwm} = \frac{1}{f_{pwm}} = 50000ns = 50\mu s \quad (1-31)$$

Συνεπώς για να οριστεί το duty cycle πρέπει να οριστεί η διάρκεια του τετραγωνικού παλμού, η οποία ορίζεται σύμφωνα με την Συνάρτηση (4-9).

$$Duty\ Cycle(\%) = \frac{\Delta\acute{\iota}\alpha\rho\kappa\epsilon\iota\alpha\ \text{παλμού}(s) \times 100}{\text{Περίοδος\ σήματος}(s)} \quad (1-32)$$

Το επιθυμητό duty cycle υπολογίζεται μέσω του σήματος τάσης που υπολογίστηκε από τον ελεγκτή. Η τάση στην έξοδο του driver του κινητήρα υπολογίζεται από την Συνάρτηση (4-10). Η τάση εξόδου του driver ταυτίζεται με το σήμα ελέγχου που υπολογίστηκε από τον ελεγκτή. Συνεπώς, το Duty Cycle του σήματος PWM που θα πρέπει να οριστεί από τον μικροελεγκτή για να αποδώσει ο driver την επιθυμητή τάση στην έξοδο του δίνεται από την Συνάρτηση (4-11).

$$\begin{aligned} \text{Τάση\ εξόδου\ driver}(V) &= \frac{\text{Τάση\ τροφοδοσίας}(V) \times Duty\ Cycle(\%)}{100} \Rightarrow \\ \text{Τάση\ εξόδου\ driver}(V) &= \frac{5Duty\ Cycle(\%)}{100} = 0,05Duty\ Cycle(\%) \end{aligned} \quad (1-33)$$

$$Duty\ Cycle(\%) = \frac{\text{Σήμα\ ελέγχου}(V)}{0,05} \quad (1-34)$$

Η βιβλιοθήκη χειρισμού του PWM περιφερειακού του μικροελεγκτή δεν επιτρέπει τον ορισμό του Duty Cycle του σήματος PWM, αλλά επιτρέπει τον ορισμό της περιόδου του σήματος και της διάρκειας του παλμού. Έτσι, ο μικροελεγκτής τελικά χρησιμοποιεί την σχέση που δίνεται από την Συνάρτηση (4-12) για να μετατρέψει το σήμα ελέγχου που υπολογίστηκε σε διάρκεια παλμού. Η περίοδος του PWM είναι σταθερή και επιλέχθηκε όπως αναλύθηκε παραπάνω μέσω της εξίσωσης (4-8).

$$\begin{aligned} \Delta\acute{\iota}\alpha\rho\kappa\epsilon\iota\alpha\ \text{παλμού}(ns) &= \frac{\text{Σήμα\ ελέγχου}(V) \times \text{Περίοδος\ σήματος}(ns)}{(100 \times 0,05)} \Rightarrow \\ \Delta\acute{\iota}\alpha\rho\kappa\epsilon\iota\alpha\ \text{παλμού}(ns) &= \text{Σήμα\ ελέγχου}(V) \times 10000 \end{aligned} \quad (1-35)$$

Συνεπώς, η ρουτίνα οδήγησης υπολογίζει την διάρκεια παλμού PWM που πρέπει να οριστεί για να επιτευχθεί στην έξοδο του driver η τάση που υπολογίστηκε από το σήμα ελέγχου. Επίσης, η ρουτίνα οδήγησης πρέπει να ορίσει την φορά κίνησης του κινητήρα. Αυτή προκύπτει από το πρόσημο του σφάλματος θέσης. Αν το σφάλμα θέσης είναι θετικό, δηλαδή η πραγματική θέση είναι μικρότερη της επιθυμητής, τότε ο κινητήρας πρέπει να στραφεί δεξιόστροφα. Διαφορετικά, ο κινητήρας πρέπει να στραφεί αριστερόστροφα. Το Σχήμα 4-8 είναι από το manual του driver και επεξηγεί πως μπορεί να ελεγχθεί η φορά κίνησης του κινητήρα.

Table 2. PWM Control of Motor Speed

xIN1	xIN2	FUNCTION
PWM	0	Forward PWM, fast decay
1	PWM	Forward PWM, slow decay
0	PWM	Reverse PWM, fast decay
PWM	1	Reverse PWM, slow decay

Σχήμα 4-8. Modes ελέγχου master κινητήρων.

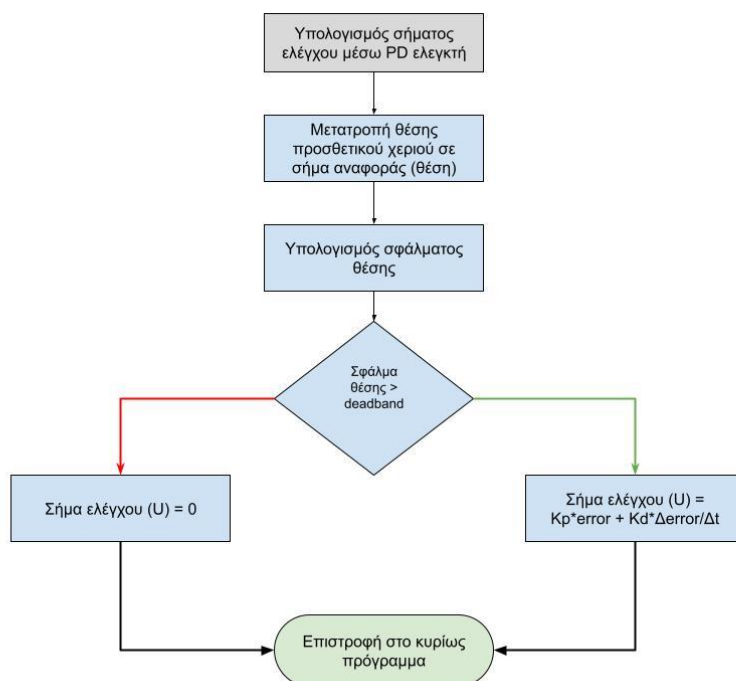
Δεδομένου ότι επιλέχθηκε η λειτουργία slow decay γίνεται φανερό ότι για να στραφεί ο κινητήρας δεξιόστροφα πρέπει να εφαρμοστεί PWM σήμα στην είσοδο IN2 (AIN2 για τον ένα κινητήρα και BIN2 για τον δεύτερο) και να εφαρμοστεί σήμα Logic high στην είσοδο IN1. Αντίστοιχα, για να στραφεί αριστερόστροφα, πρέπει να εφαρμοστεί σήμα PWM στην είσοδο IN1 και να εφαρμοστεί σήμα Logic high στην είσοδο IN2. Δηλαδή θα πρέπει οι έξοδοι του μικροελεγκτή που θα συνδεθούν με τις αντίστοιχες εισόδους του driver να μπορούν να δώσουν ταυτόχρονα και σήματα PWM και ψηφιακά σήματα. Τα σήματα PWM ελέγχονται από το PWM περιφερειακό του μικροελεγκτή, ενώ τα ψηφιακά σήματα ελέγχονται από το GPIO περιφερειακό του μικροελεγκτή. Μια έξοδος του μικροελεγκτή δεν μπορεί να ελέγχεται ταυτόχρονα από δύο περιφερειακά, οπότε αυτό θα απαιτούσε να αλλάζει η ρύθμιση του περιφερειακού που ελέγχει την εκάστοτε έξοδο κατά την αλλαγή κατεύθυνσης των κινητήρων. Η διαδικασία αυτή πέρα από το ότι είναι χρονοβόρα, εγκυμονεί και κινδύνους για σφάλματα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, προσομοιώθηκαν οι καταστάσεις Logic high και Logic low από το περιφερειακό PWM. Η κατάσταση logic high του GPIO περιφερειακού παράγει έξοδο 3V, συνεπώς για να προσομοιωθεί απαιτεί να τεθεί διάρκεια παλμού ίση με την περίοδο του PWM, δηλαδή duty cycle ίσο με 100%. Αντίστοιχα, η κατάσταση logic low του GPIO περιφερειακού παράγει έξοδο 0V, συνεπώς για να προσομοιωθεί πρέπει να τεθεί διάρκεια παλμού ίση με 0s, δηλαδή duty cycle 0%. Τέλος κατά την διάρκεια των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι για την λειτουργία σε slow decay mode, η έξοδος του driver δεν ήταν αντίστοιχη του duty cycle του σήματος PWM, αλλά αντίστοιχη του 100%-duty cycle(%). Συνεπώς οι Συναρτήσεις (4-10), (4-11) και (4-12) διορθώθηκαν αντίστοιχα και προέκυψαν οι Συναρτήσεις (4-13), (4-14) και (4-15).

$$\text{Τάση εξόδου driver(V)} = \frac{5(100 - \text{Duty Cycle}(\%))}{100} = 5 - \frac{5\text{Duty Cycle}(\%)}{100} \quad (1-36)$$

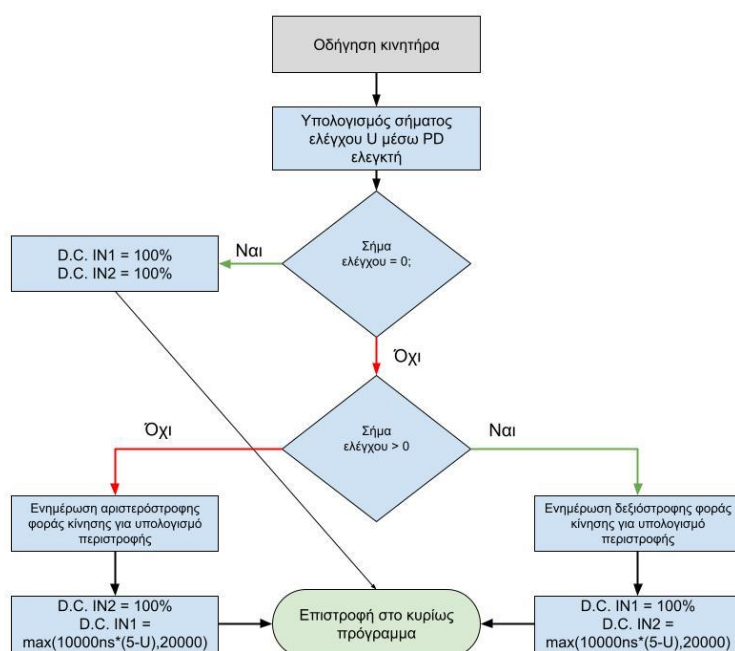
$$\text{Duty Cycle}(\%) = \frac{500 - 100\text{Σήμα ελέγχου(V)}}{5} \quad (1-37)$$

$$\text{Διάρκεια παλμού(ns)} = \frac{500 - 100\text{Σήμα ελέγχου(V)}}{5} \cdot 100 = 10000(5 - \text{Σήμα ελέγχου(V)}) \quad (1-38)$$

Τέλος, ύστερα από δοκιμές προέκυψε ότι η ελάχιστη τάση που χρειαζόταν ο κινητήρας για να κινηθεί (για να υπερνικήσει τις τριβές) ήταν 2,00V. Συνεπώς ορίστηκε ένα κάτω φράγμα στην τιμή της διάρκειας παλμού στα 30000ns, όπως προκύπτει επιλύοντας την Συνάρτηση (4-15). Το Σχήμα 4-9 παρουσιάζει το λογικό διάγραμμα της ρουτίνας υπολογισμού σήματος ελέγχου, ενώ το Σχήμα 4-10 παρουσιάζει το λογικό διάγραμμα της ρουτίνας οδήγησης του κινητήρα.



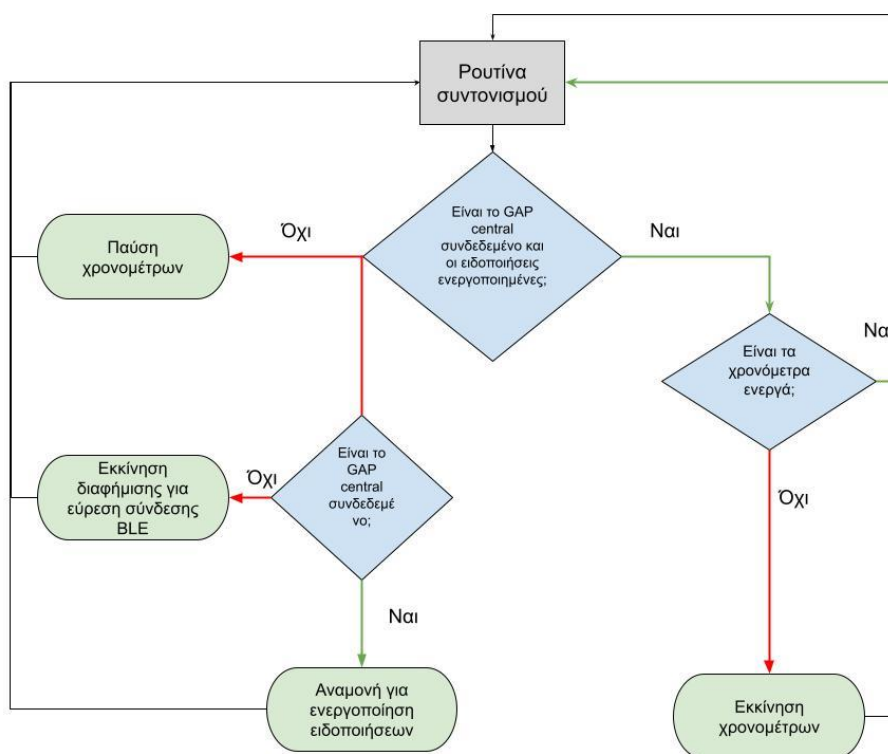
Σχήμα 4-9. Ρουτίνα υπολογισμού σήματος ελέγχου PD.



Σχήμα 4-10. Ρουτίνα οδήγησης master κινητήρα.

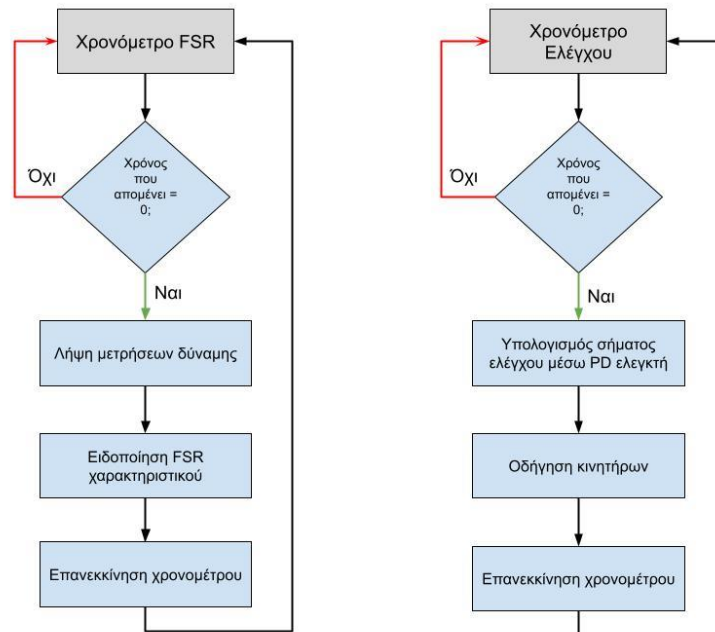
4.2.6 Ρουτίνα συντονισμού

Η ρουτίνα συντονισμού είναι η ρουτίνα η οποία είναι υπεύθυνη για τον συντονισμό όλων των λειτουργιών που πρέπει να επιτελέσει ο μικροελεγκτής. Αρχικά εκκινεί όλα τα περιφερειακά που απαιτούνται για αυτή την εφαρμογή και στη συνέχεια, αφού ρυθμίσει τον GATT server, εκκινεί την διαδικασία διαφήμισης του GAP peripheral. Περιμένει έως ότου κάποιο GAP central συνδεθεί και στη συνέχεια περιμένει έως ότου ενεργοποιηθούν οι ειδοποιήσεις για το FSR χαρακτηριστικό. Αφού γίνει και αυτό, τότε εκκινεί δύο χρονόμετρα. Τα χρονόμετρα έχουν μια συγκεκριμένη χρονική διάρκεια, σταθερή. Όταν μηδενίσουν, καλούνται οι ρουτίνες λήψης μέτρησης δύναμης και οδήγησης του κινητήρα και επανεκκινούνται τα χρονόμετρα. Παράλληλα, η ρουτίνα συντονισμού ελέγχει συνεχώς τη μεταβλητή ελέγχου σύνδεσης GAP central και τη μεταβλητή ελέγχου ειδοποιήσεων. Αν έστω και μία από αυτές τις μεταβλητές αυτές πάρει τιμή μηδέν, δηλαδή αν χαθεί η σύνδεση ή απενεργοποιηθούν οι ειδοποιήσεις, τότε σταματούν τα χρονόμετρα και η μόνη διαδικασία που τρέχει είναι ο έλεγχος των παραπάνω μεταβλητών. Αν οι μεταβλητές πάρουν ξανά τιμή 1, τότε επανεκκινούνται τα χρονόμετρα. Πρακτικά, δηλαδή, η ρουτίνα συντονισμού είναι υπεύθυνη για την εκκίνηση του συστήματος και στη συνέχεια επιτηρεί την επανάληψη των συναρτήσεων που απαιτούνται για την λειτουργία του συστήματος, ελέγχοντας αν υπάρχει επικοινωνία με τον slave μικροελεγκτή. Το Σχήμα 4-11 απεικονίζει το λογικό διάγραμμα της ρουτίνας συντονισμού του master μικροελεγκτή.



Σχήμα 4-11. Ρουτίνα συντονισμού master μικροελεγκτή.

Το Σχήμα 4-12 απεικονίζει το λογικό διάγραμμα των επαναληπτικών ρουτινών που ελέγχουν τις διαδικασίες ενημέρωσης του FSR χαρακτηριστικού με νέα μέτρηση από τους αισθητήρες δύναμης και ελέγχου των master κινητήρων.



Σχήμα 4-12. Επαναληπτικές ρουτίνες συγκεκριμένης συχνότητας.

4.3 Σύστημα Slave

Το σύστημα slave περιλαμβάνει 3 βασικές λειτουργίες:

- Λήψη μέτρησης θέσης προσθετικού χεριού
- Επικοινωνία με τον slave μικροελεγκτή μέσω BLE
- Open loop έλεγχος της ροπής του προσθετικού χεριού

Οι διαδικασίες αυτές μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ρύθμιση GAP πρωτοκόλλου
- Ρύθμιση GATT πρωτοκόλλου
- Δειγματοληψία οπτικού κωδικοποιητή για υπολογισμό θέσης κινητήρα
- Έλεγχος και οδήγηση των slave κινητήρα

Η δομή του προγράμματος μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως εξής:

- Εκκίνηση όλων των υποσυστημάτων με αρχικοποίηση όλων των παραμέτρων σύμφωνα με τον σχεδιασμό
- Αναζήτηση και σύνδεση σε master μικροελεγκτή
- Εκκίνηση χρονομέτρων για εκτέλεση της διαδικασίας ελέγχου
- Διαχείριση ασύγχρονων συμβάντων

4.3.1 Ρουτίνα ρύθμισης παραμέτρων πρωτοκόλλου GAP

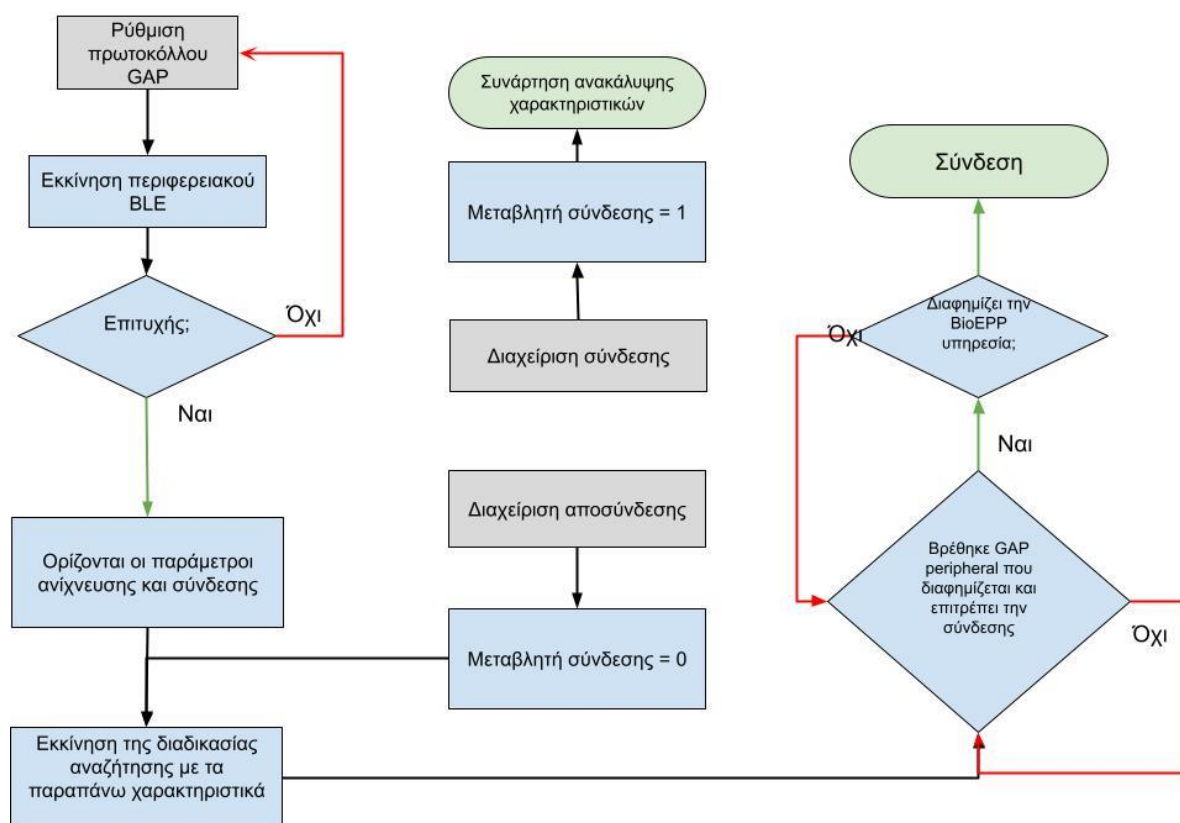
Όσον αφορά το πρωτόκολλο GAP, ο slave μικροελεγκτής πρέπει να ανιχνεύσει τα GAP περιφερειακά που βρίσκονται κοντά του, να ελέγξει αν κάποιο διαφημίζει την υπηρεσία BioEPP και αν ναι, να συνδεθεί σε αυτό. Επίσης, πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί ασύγχρονα συμβάντα όπως η αποσύνδεση από ένα GAP peripheral. Αρχικά, λοιπόν εκκινείται το περιφερειακό που είναι υπεύθυνο για την υλοποίηση του BLE πρωτοκόλλου. Στη συνέχεια ξεκινάει η διαδικασία ανίχνευσης βάσει των παραμέτρων ανίχνευσης που

έχουν επιλεγεί κατά τον σχεδιασμό. Η διαδικασία ανίχνευσης εκτελείται ασταμάτητα έως ότου βρεθεί κάποιο GAP peripheral το οποίο διαφημίζει την υπηρεσία BioEPP. Αν συμβεί αυτό, καλείται η συνάρτηση σύνδεσης και σταματάει η διαδικασία ανίχνευσης. Τέλος ορίζονται δύο συναρτήσεις οι οποίες καλούνται ασύγχρονα όταν συμβεί σύνδεση ή αποσύνδεση από ένα GAP peripheral. Η συνάρτηση αποσύνδεσης εκκινεί ξανά τη διαδικασία ανίχνευσης που αναφέρθηκε παραπάνω. Η συνάρτηση σύνδεσης ανήκει στην παρακάτω κατηγορία όπου και θα εξηγηθεί παραπάνω. Στο Σχήμα 4-13 απεικονίζεται το λογικό διάγραμμα αυτής της ρουτίνας.

4.3.2 Ρουτίνα ρύθμισης παραμέτρων πρωτοκόλλου GATT

Όσον αφορά το πρωτόκολλο GATT, ο μικροελεγκτής καλείται να υλοποιήσει τρεις ρουτίνες:

- Ρουτίνα ανακάλυψης χαρακτηριστικών GATT server αμέσως μετά την σύνδεση σε ένα GAP peripheral,
- Ρουτίνα διαχείρισης ειδοποίησης από του χαρακτηριστικού FSR και
- Ρουτίνα γραψίματος τιμής στο χαρακτηριστικό ENCODER_POS

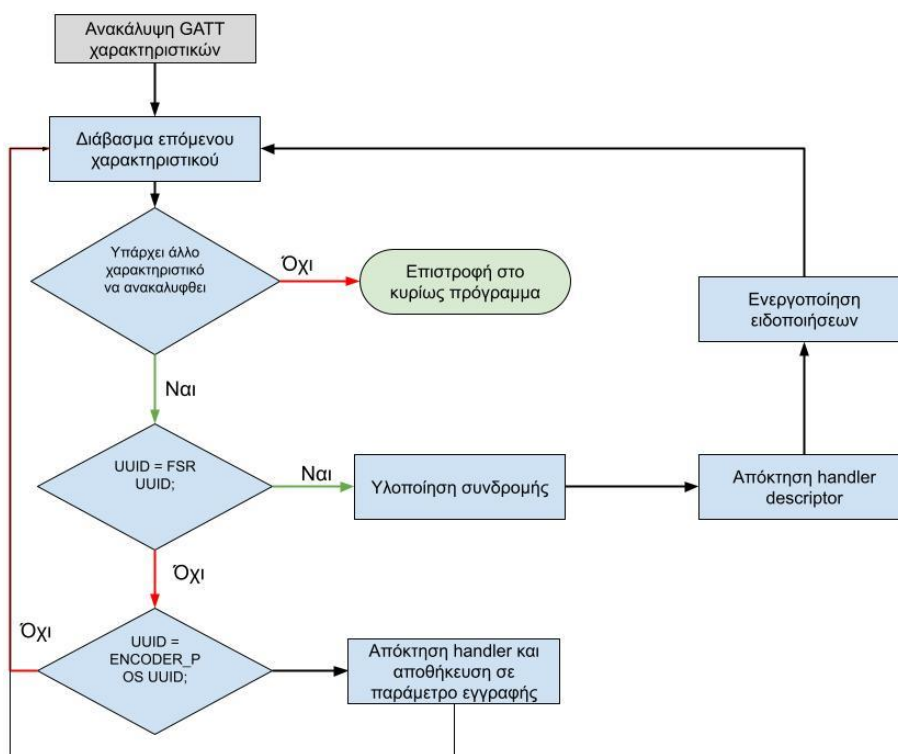


Σχήμα 4-13. Ρουτίνες ρύθμισης GAP Central.

Η ρουτίνα ανακάλυψης των χαρακτηριστικών του GATT server καλείται μία φορά, αμέσως μετά την σύνδεση του μικροελεγκτή σε ένα GAP peripheral, ούτως ώστε ο μικροελεγκτής (GATT client) να ανακαλύψει τους χειριστές (handlers) των χαρακτηριστικών FSR και ENCODER_POS του GATT server. Τον handler του χαρακτηριστικού FSR θα τον χρησιμοποιήσει για να ορίσει μια συνδρομή στο χαρακτηριστικό αυτό. Τον handler του χαρακτηριστικού ENCODER_POS θα τον χρησιμοποιήσει στην ρουτίνα γραψίματος του χαρακτηριστικού. Η ρουτίνα αναζητά τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας το UUID του. Αν

εντοπιστεί το FSR χαρακτηριστικό, τότε αμέσως ξεκινάει συνδρομή σε αυτό. Αν εντοπιστεί το ENCODER_POS χαρακτηριστικό, καταγράφει τον handler σε μεταβλητή για να χρησιμοποιείται κάθε φορά που θα καλείται η συνάρτηση εγγραφής. Η ρουτίνα αναζητά και τον περιγραφέα του χαρακτηριστικού FSR γιατί όπως έχει αναφερθεί πρέπει να γράψει την τιμή ένα σε αυτόν για να ενεργοποιήσει τις ειδοποιήσεις. Παράλληλα, διατηρεί μια μεταβλητή ελέγχου συνδρομής, η οποία χρησιμοποιείται από την ρουτίνα συντονισμού για να ελέγχει την εκτέλεση των διαδικασιών. Το λογικό διάγραμμα της ρουτίνας ανακάλυψης των χαρακτηριστικών ενός GATT server απεικονίζεται στο Σχήμα 4-14.

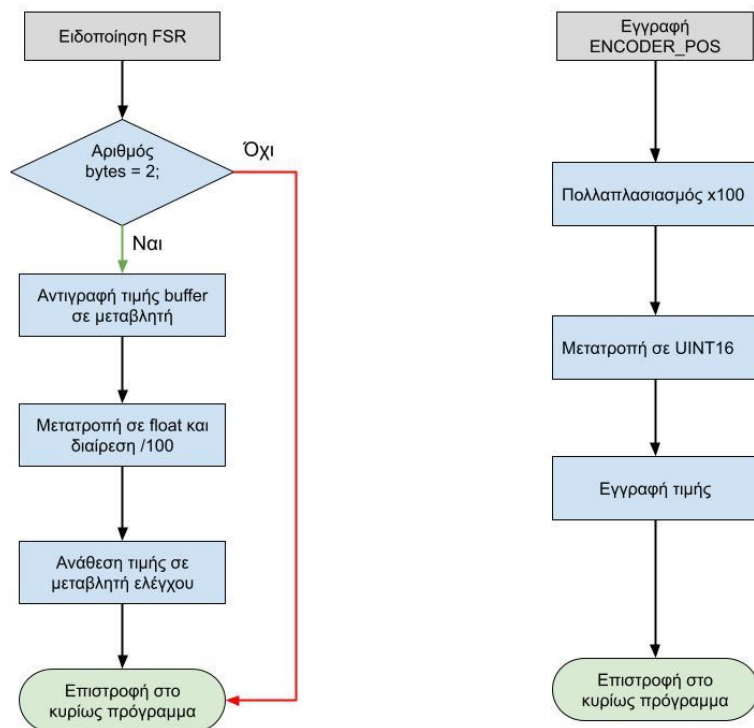
Η ρουτίνα διαχείρισης ειδοποίησης καλείται ασύγχρονα κάθε φορά που ο GATT client στέλνει μια ειδοποίηση για το χαρακτηριστικό FSR. Ο ρόλος της είναι να πάρει την τιμή από τον buffer και να την αποθηκεύσει σε μια μεταβλητή. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τιμή αυτή είναι σε μονάδες Nx100, συνεπώς πριν η νέα τιμή περαστεί ως είσοδος στην ρουτίνα ελέγχου, πρέπει να μετατραπεί σε float, να διαιρεθεί με το 100 και να ελεγχθεί αν είναι έγκυρη. Όπως αναφέρθηκε ήδη, η τιμή που στέλνει ο GATT server είναι ακέραια ακρίβειας 16bit. Η ρουτίνα ελέγχει τον αριθμό των bytes των δεδομένων που λήφθηκαν και αν είναι διάφορος του δύο (1 byte = 8 bit), τα απορρίπτει ως μη έγκυρα.



Σχήμα 4-14. Ρουτίνα ανακάλυψης χαρακτηριστικών GATT server.

Η ρουτίνα εγγραφής δεδομένων καλείται επαναληπτικά από την ρουτίνα συντονισμού για να γραφτεί στο ENCODER_POS χαρακτηριστικό του GATT server μια νέα τιμή θέσης του προσθετικού χεριού. Η τιμή της θέσης του προσθετικού χεριού είναι float και για να μεταφερθεί πρέπει πρώτα να πολλαπλασιαστεί με το εκατό και να μετατραπεί σε ακέραιο θετικό αριθμό ακρίβειας 16bit, όπως έχει ήδη εξηγηθεί. Αυτό γίνεται για να μεταφερθεί τιμή με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων. Λόγω αυτού και για να μειωθεί ο αριθμός δεδομένων

που μεταφέρονται μέσω BLE, η ρουτίνα εγγραφής καλείται από την ρουτίνα συντονισμού μόνο αν η θέση του προσθετικού χεριού έχει αλλάξει περισσότερο από ένα εκατοστό της μοίρας, σε σχέση με την τελευταία τιμή που έχει εγγραφεί. Οι ρουτίνες διαχείρισης νέας ειδοποίησης του χαρακτηριστικού FSR και εγγραφής του χαρακτηριστικού ENCODER_POS απεικονίζονται με την μορφή λογικού διαγράμματος στο Σχήμα 4-15.



Σχήμα 4-15. Ρουτίνες διαχείρισης FSR και ENCODER_POS χαρακτηριστικών.

4.3.3 Ρουτίνα υπολογισμού θέσης κινητήρα

Η ρουτίνα υπολογισμού της θέσης του κινητήρα είναι όμοια με την αντίστοιχη ρουτίνα που αναλύθηκε για το master σύστημα και βασίζεται στην αλληλεπίδραση των GPIO, PPI και TIMER περιφερειακών του μικροελεγκτή. Η διαφορά είναι ότι εδώ υπάρχει ένας μόνο κωδικοποιητής, συνεπώς χρειάζονται μόνο ένα κανάλι του GPIO περιφερειακού και ένα κανάλι του TIMER περιφερειακού. Η γωνιακή μετατόπιση του κινητήρα υπολογίζεται από τον αριθμό παλμών που έχουν καταγραφεί όπως φαίνεται στην Εξίσωση (4-16).

$$\Gamma\omega\nu\nu\alpha\kappa\eta\ \mu\epsilon\tau\alpha\tau\omicron\pi\iota\sigma\eta(\mu\omicron\iota\rho\epsilon\varsigma) = \text{Αριθμός παλμών} \times \frac{1}{\text{Ακρίβεια κωδικοποιητή(παλμοί/360^\circ)}} \Rightarrow \quad (1-39)$$

$$\Gamma\omega\nu\nu\alpha\kappa\eta\ \mu\epsilon\tau\alpha\tau\omicron\pi\iota\sigma\eta(\mu\omicron\iota\rho\epsilon\varsigma) = \text{Αριθμός παλμών} \times \frac{360}{256}$$

Όπως ακριβώς γίνεται και στην περίπτωση του master συστήματος, δεν καταγράφεται η φορά περιστροφής μέσω σύγκρισης των παλμών των καναλιών A και B των κωδικοποιητών, αλλά η φορά περιστροφής θεωρείται ίδια με την φορά περιστροφής που ορίζει η ρουτίνα οδήγησης του κινητήρα. Η φορά περιστροφής καταγράφεται σε μια ακέραια μεταβλητή η οποία παίρνει τιμές -1 για αριστερόστροφη περιστροφή ή 1 για δεξιόστροφη περιστροφή. Η γωνιακή θέση του κινητήρα υπολογίζεται όπως φαίνεται στην Εξίσωση (4-17).

$$\text{Νέα γωνιακή θέση κινητήρα(μοίρες)} = \text{Προηγούμενη γωνιακή θέση κινητήρα(μοίρες)} + \text{Φορά Περιστροφής} \times \text{Γωνιακή μετατόπιση(μοίρες)} \quad (1-40)$$

Αυτό που πρέπει να σημειωθεί εδώ είναι ότι η γωνιακή θέση του κινητήρα του slave συστήματος δεν ταυτίζεται με την γωνιακή θέση του προσθετικού χεριού, διότι χρησιμοποιείται μειωτήρας στροφών. Ο μειωτήρας που χρησιμοποιήθηκε έχει λόγο μείωσης ίσο με 343/17567, δηλαδή μία περιστροφή του κινητήρα αντιστοιχεί σε 0,01953 περιστροφές του προσθετικού χεριού. Συνεπώς, επειδή η πληροφορία που χρειάζεται να μεταφερθεί στο σύστημα master είναι η πληροφορία της γωνιακής θέσης του προσθετικού χεριού, μέσω της ρουτίνας υπολογισμού θέσης κινητήρα, γίνεται αντιστοίχιση της θέσης του κινητήρα στη θέση του προσθετικού χεριού, εφαρμόζοντας τον λόγο του μειωτήρα, όπως φαίνεται στην Εξίσωση (4-18).

$$\text{Γωνιακή θέση προσθετικού χεριού(μοίρες)} = \text{Γωνιακή θέση κινητήρα(μοίρες)} \times \text{Λόγος μειωτήρα} \Rightarrow$$

$$\text{Γωνιακή θέση προσθετικού χεριού(μοίρες)} = \text{Γωνιακή θέση κινητήρα(μοίρες)} \times \frac{343}{17567} \Rightarrow \quad (1-41)$$

$$\text{Γωνιακή θέση κινητήρα(μοίρες)} \times 0,001953$$

4.3.4 Ρουτίνα ελέγχου κινητήρα

Στο σύστημα του slave κινητήρα πραγματοποιείται έλεγχος ανοιχτού βρόχου της ροπής του προσθετικού χεριού. Όπως αναλύθηκε και κατά τον σχεδιασμό, ως αναφορά του ελέγχου λαμβάνεται η διαφορά των μετρήσεων των αισθητήρων δύναμης. Η τιμή αυτή παρέχεται στον slave μικροελεγκτή μέσω BLE ειδοποιήσεων του FSR χαρακτηριστικού. Η ρουτίνα ελέγχου, η οποία καλείται από την ρουτίνα συντονισμού, αναλαμβάνει να μετατρέψει το σήμα αναφοράς σε σήμα ελέγχου, χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις που υπολογίστηκαν στην στο αντίστοιχο κεφάλαιο της σχεδίασμού. Το σήμα ελέγχου σε αυτή την περίπτωση είναι duty cycle και έμμεσα αντιστοιχίζεται σε εντολή ρεύματος, δηλαδή εντολή ροπής, στον κινητήρα. Δύο περιορισμοί που τίθενται είναι ότι το σήμα ελέγχου πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 0,9% και μικρότερο του 1,3%. Το κάτω όριο προέκυψε με δοκιμές, διότι για τιμή duty cycle χαμηλότερη από 0,9% ο κινητήρας δεν μπορούσε να υπερνικήσει τις τριβές και συνεπώς δεν εκκινούσε. Το άνω όριο προέκυψε επίσης με δοκιμές, θέτοντας ως προδιαγραφή την επίτευξη πλήρους κίνησης, δηλαδή στροφής 95 μοιρών εντός ενός δευτερολέπτου.

Αφού υπολογιστεί και το σήμα ελέγχου, στη συνέχεια πρέπει να κληθεί η συνάρτηση οδήγησης του κινητήρα. Ο driver που χρησιμοποιείται για την οδήγηση του slave κινητήρα πραγματοποιεί έλεγχο ρεύματος μετατρέποντας το duty cycle του PWM σήματος που λαμβάνει ως είσοδο σε σταθερό ρεύμα στην έξοδο του. Όπως και ο driver των master κινητήρων δέχεται ως είσοδο σήματα PWM συχνότητας [15-25]kHz. Εδώ επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η χαμηλότερη συχνότητα του εύρους αυτού. Η συχνότητα αυτή αντιστοιχεί σε περίοδο PWM ίση με 66550ns. Δεδομένου ότι το σήμα ελέγχου που προκύπτει από την ρουτίνα ελέγχου είναι σήμα duty cycle, η διάρκεια του παλμού προκύπτει από την Συνάρτηση (4-19).

$$\begin{aligned} \Delta\acute{\iota}\alpha\rho\kappa\epsilon\iota\alpha \text{ παλμού(ns)} &= \frac{\text{Duty cycle(\%)} \times \text{Περίοδος παλμού(ns)}}{100} \Rightarrow \\ \Delta\acute{\iota}\alpha\rho\kappa\epsilon\iota\alpha \text{ παλμού(ns)} &= \frac{\text{Duty cycle(\%)} \times 66550}{100} = \text{Duty cycle(\%)} \times 665,5 \end{aligned} \quad (1-42)$$

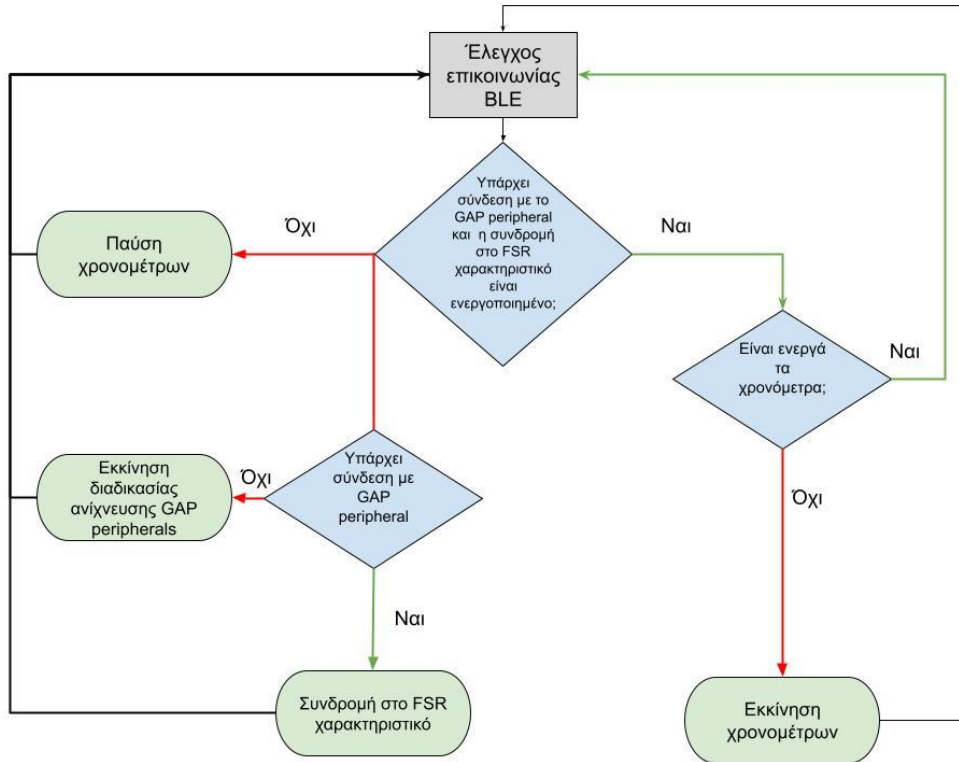
Επίσης, η ρουτίνα οδήγησης πρέπει να ορίσει και την φορά στροφής του κινητήρα. Η φορά στροφής προκύπτει από το πρόσημο του σήματος ελέγχου και επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας το λογικό επίπεδο της αντίστοιχης εισόδου του driver. Η κατάσταση logic high αντιστοιχίζεται σε δεξιόστροφη περιστροφή, ενώ η κατάσταση logic low αντιστοιχίζεται σε αριστερόστροφη περιστροφή.

4.3.5 Ρουτίνα συντονισμού

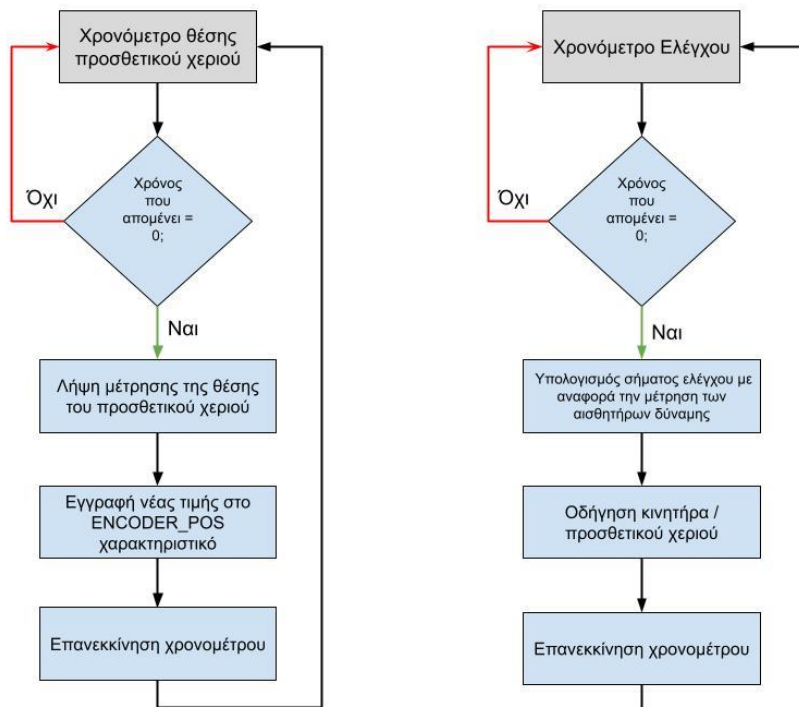
Η ρουτίνα συντονισμού, είναι υπεύθυνη για την εκκίνηση όλων των υποσυστημάτων ενώ στη συνέχεια επιτηρεί τις βασικές διαδικασίες του προγράμματος, δηλαδή:

- Λήψη μέτρησης θέσης του προσθετικού χεριού και αποστολή της στον master μικροελεγκτή
- Έλεγχος ανοιχτού βρόχου της ροπής του προσθετικού χεριού με αναφορά την μέτρηση των αισθητήρων δύναμης που λαμβάνεται από τον slave μικροελεγκτή,
- Επιτήρηση της επικοινωνίας μέσω BLE με τον slave μικροελεγκτή

Αρχικά, εκκινούνται τα περιφερειακά που χρησιμοποιούνται με τις απαραίτητες ρυθμίσεις και ξεκινάει η διαδικασία ανίχνευσης GAP peripheral, όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω. Το πρόγραμμα περιμένει έως ότου βρεθεί GAP peripheral, επιτευχθεί σύνδεση, γίνει συνδρομή στο FSR χαρακτηριστικό του master μικροελεγκτή και ενεργοποιηθούν οι ειδοποιήσεις. Στη συνέχεια εκκινεί δύο χρονόμετρα συγκεκριμένης διάρκειας. Όταν τα χρονόμετρα μηδενίσουν, καλούνται οι αντίστοιχες διαδικασίες (διάβασμα θέσης προσθετικού χεριού και έλεγχος ροπής προσθετικού χεριού) και γίνεται επανεκκίνηση τους. Παράλληλα, εκτελείται επαναληπτικά η ρουτίνα ελέγχου της επικοινωνίας BLE με τον master μικροελεγκτή. Η ρουτίνα αυτή ελέγχει ασταμάτητα την κατάσταση της σύνδεσης με το GAP peripheral και την κατάσταση της συνδρομής στο FSR χαρακτηριστικό του master μικροελεγκτή. Αν ένα από τα δύο δεν ισχύει, τότε σταματάει τα δύο χρονόμετρα. Η ρουτίνα τότε αναμένει έως ότου να ικανοποιούνται και οι δύο αυτές συνθήκες (σύνδεση με GAP peripheral, συνδρομή στο FSR χαρακτηριστικό) και τότε επανεκκινεί τα χρονόμετρα των βασικών διαδικασιών. Το Σχήμα 4-16 απεικονίζει το λογικό διάγραμμα της ρουτίνας συντονισμού του slave μικροελεγκτή, ενώ το Σχήμα 4-17 απεικονίζει τις επαναλαμβανόμενες εγγραφές του χαρακτηριστικού ENCODER_POS και υλοποίησης του control loop.



Σχήμα 4-16. Ρουτίνα συντονισμού slave μικροελεγκτή.



Σχήμα 4-17. Επαναλαμβανόμενες ρουτίνες εγγραφής χαρακτηριστικού ENCODER_POS και υλοποίησης control loop.

5 Αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

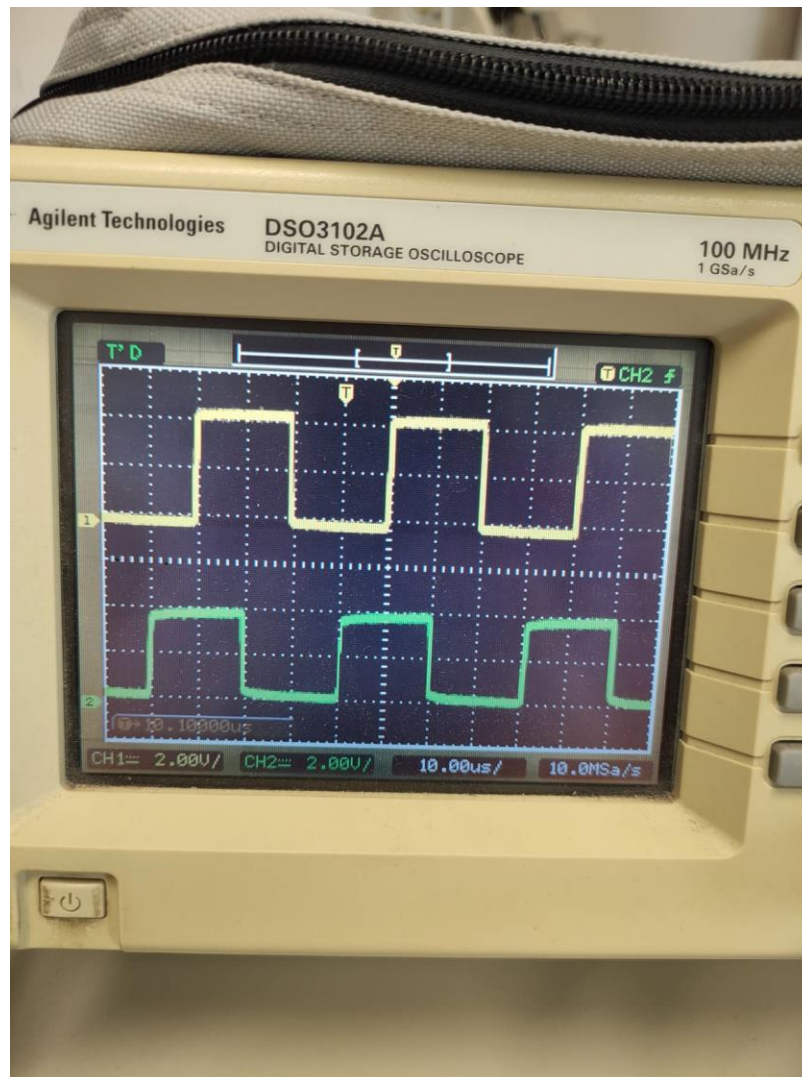
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από δοκιμές που έγιναν για να διαπιστωθεί η λειτουργία του συστήματος σύμφωνα με τον σχεδιασμό. Οι δοκιμές αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Τις δοκιμές που έγιναν για να διαπιστωθεί αν όλες οι επιμέρους ρουτίνες λειτουργούν σύμφωνα με τον σχεδιασμό και κυρίως αν οι μετρήσεις από τους κωδικοποιητές των κινητήρων, η λήψη μετρήσεων από τους αισθητήρες δύναμης, η μεταφορά της πληροφορίας μέσω BLE και η οδήγηση των κινητήρων πραγματοποιείται επιτυχώς.

5.2 Δοκιμές υποσυστημάτων

5.2.1 Δοκιμή μέτρησης παλμών κωδικοποιητή

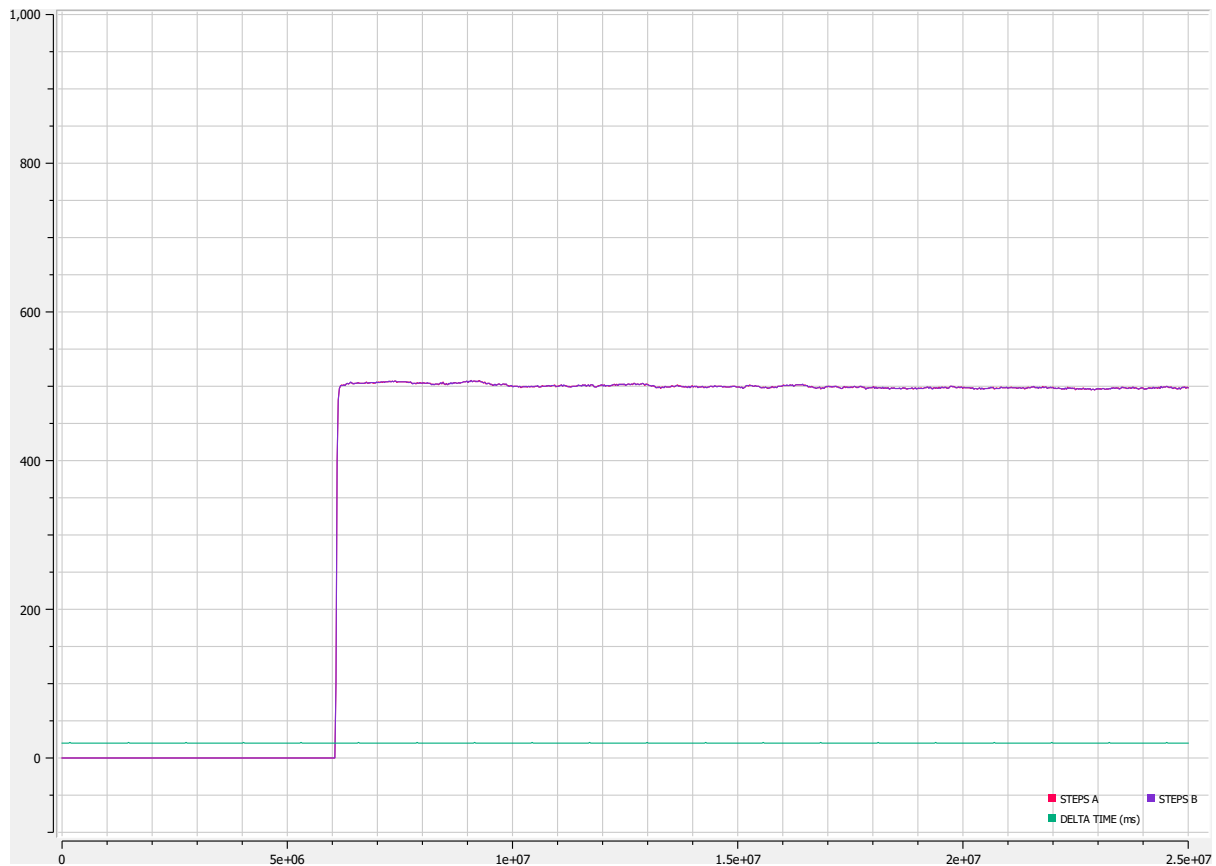
Όπως αναλύθηκε και στον σχεδιασμό, η μέγιστη αναμενόμενη συχνότητα παλμών προκύπτει κατά την περιστροφή των master κινητήρων με την μέγιστη ταχύτητα βάσει σχεδιασμού. Μάλιστα η χειρότερη περίπτωση αντιστοιχεί στην περίπτωση περιστροφής και των δύο master κινητήρων με την ίδια μέγιστη ταχύτητα, δηλαδή 3000rpm. Σε αυτή την περίπτωση, ο μικροελεγκτής έχει να διαχειριστεί παλμούς συχνότητας 25,6kHz. Για να εξακριβωθεί ότι η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για την μέτρηση και της φοράς περιστροφής των κινητήρων θα ήταν απαραίτητο να καταγραφούν και οι παλμοί των καναλιών B των κωδικοποιητών. Λόγω του ότι ο διαθέσιμος παλμογράφος είχε μόνο δύο κανάλια, θεωρήθηκε ισοδύναμο να καταγραφούν οι παλμοί των καναλιών A για διπλάσια συχνότητα, δηλαδή συχνότητα 51,2Hz. Αυτή η συχνότητα παλμών επιτυγχάνεται για ταχύτητα περιστροφής ίσης με 6000rpm. Επίσης, η δοκιμή αυτή εξασφαλίζει ότι το σύστημα θα είναι ικανό να καταγράψει τους παραγόμενους παλμούς με ακρίβεια ακόμα και για διπλάσια ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων, από αυτή που απαιτείται από την εφαρμογή.

Για τις ανάγκες της δοκιμής, οι δύο κινητήρες τροφοδοτήθηκαν με τάση 4V στην οποία σύμφωνα με την χαρακτηριστική εξίσωση τους, αναπτύσσουν ταχύτητα 6000rpm όταν στρέφονται χωρίς φορτίο. Στη συνέχεια, ο μικροελεγκτής ρυθμίστηκε ούτως ώστε να τυπώνει τον αριθμό των παλμών που παράγει το κανάλι A κάθε κωδικοποιητή ανά 20ms. Ταυτόχρονα, τα κανάλια A των κωδικοποιητών ήταν συνδεδεμένα με παλμογράφο. Χρησιμοποιώντας ρύθμιση υψηλής χρονικής ανάλυσης στον παλμογράφο, έγινε δυνατό να μετρηθεί ο αριθμός παλμών των κωδικοποιητών ανά 10μs. Στη συνέχεια συγκρίθηκαν οι δύο μετρήσεις. Το Σχήμα 5-1 απεικονίζει την οθόνη του παλμογράφου. Το κανάλι A είναι συνδεδεμένο στο κανάλι A του κωδικοποιητή του πρώτου master κινητήρα και το κανάλι B είναι συνδεδεμένο στο κανάλι A του κωδικοποιητή του δεύτερου master κινητήρα.



Σχήμα 5-1. Παλμοί καναλιών A των κωδικοποιητών των master κινητήρων, για τάση τροφοδοσίας 4V.

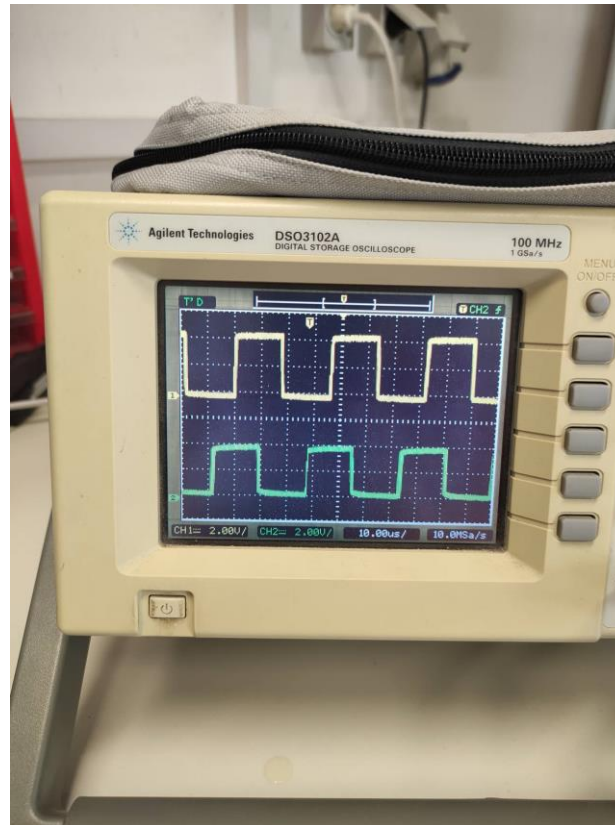
Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5-1, οι κωδικοποιητές παράγουν ένα παλμό κάθε 40μs. Αυτό μεταφράζεται σε 25 παλμούς ανά 1ms και τελικά σε 500 παλμούς ανά 20ms (sampling rate μικροελεγκτή). Αντίστοιχα, αυτό μεταφράζεται σε ταχύτητα ίση με 6000rpm. Στο Σχήμα 5-2, απεικονίζονται οι μετρήσεις του μικροελεγκτή για τον αριθμό παλμών των δύο καναλιών, καθώς και ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ των μετρήσεων (sampling rate). Όπως φαίνεται, οι μετρήσεις του μικροελεγκτή και για τα δύο κανάλια είναι περίπου 500 παλμοί (STEPS) κάθε 20ms, γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθότητα της μέτρησης. Η δοκιμή επαναλήφθηκε άλλη μια φορά, με λίγο μεγαλύτερη τάση τροφοδοσίας των κινητήρων (4,2V). Στο Σχήμα 5-3 απεικονίζονται οι παλμοί στα κανάλια A και B του παλμογράφου. Όπως φαίνεται, αυτή τη φορά παράγεται ένας παλμός κάθε 36 μs περίπου. Αυτό αντιστοιχίζεται σε 28 περίπου παλμούς ανά ms και συνεπώς σε 560 παλμούς ανά 20ms (sampling rate μικροελεγκτή).



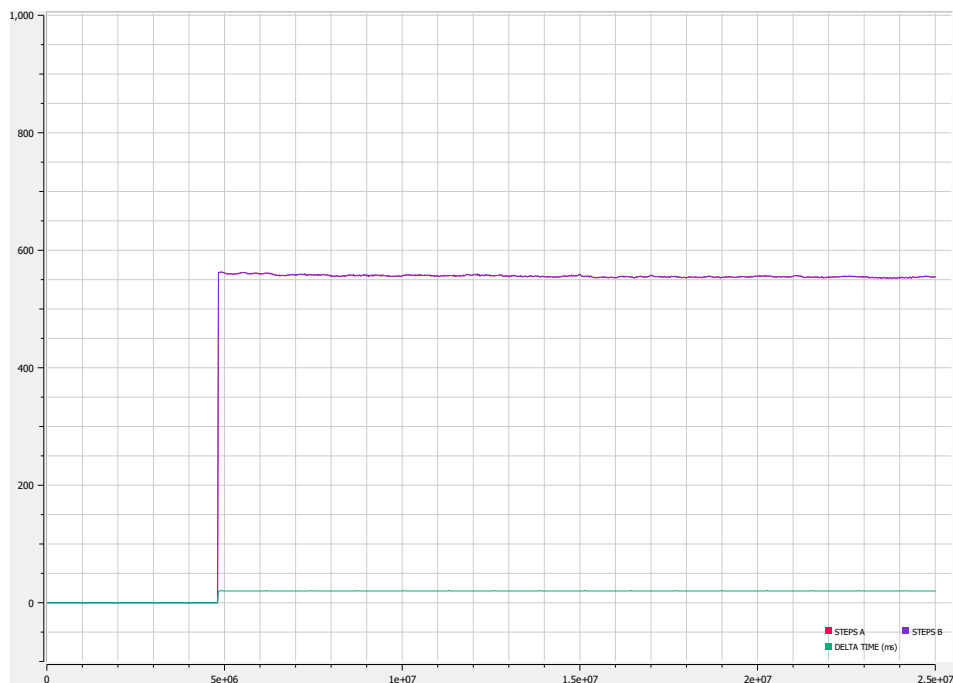
Σχήμα 5-2. Μετρήσεις παλμών μικροελεγκτή για τάση τροφοδοσίας 4V

Ταυτόχρονα η μέτρηση αυτή μεταφράζεται σε ταχύτητα περιστροφής 6562 rpm περίπου. Στο Σχήμα 5-4 απεικονίζονται οι μετρήσεις του μικροελεγκτή για τους παλμούς των δύο καναλιών καθώς και το διάστημα μεταξύ των μετρήσεων. Όπως φαίνεται, ο μικροελεγκτής μετράει περίπου 560 παλμούς κάθε 20ms, όντας έτσι σε συμφωνία με τις μετρήσεις του παλμογράφου.

Συνεπώς, με τις δύο παραπάνω δοκιμές εξακριβώθηκε ότι ο μικροελεγκτής θα είναι σε θέση να καταγράψει με ακρίβεια τους παλμούς των κωδικοποιητών του master συστήματος, προσδίδοντας έτσι ακρίβεια στην μέτρηση της θέσης τους. Ταυτόχρονα, προκύπτει ότι και ο slave μικροελεγκτής θα είναι σε θέση να καταγράψει με ακρίβεια τους παλμούς του κωδικοποιητή του slave συστήματος, ο οποίος κατά την εφαρμογή θα παράγει παλμούς με μικρότερη συχνότητα.



Σχήμα 5-3. Παλμοί καναλιών A των κωδικοποιητών των master κινητήρων, για τάση τροφοδοσίας ίση με 4,2V.

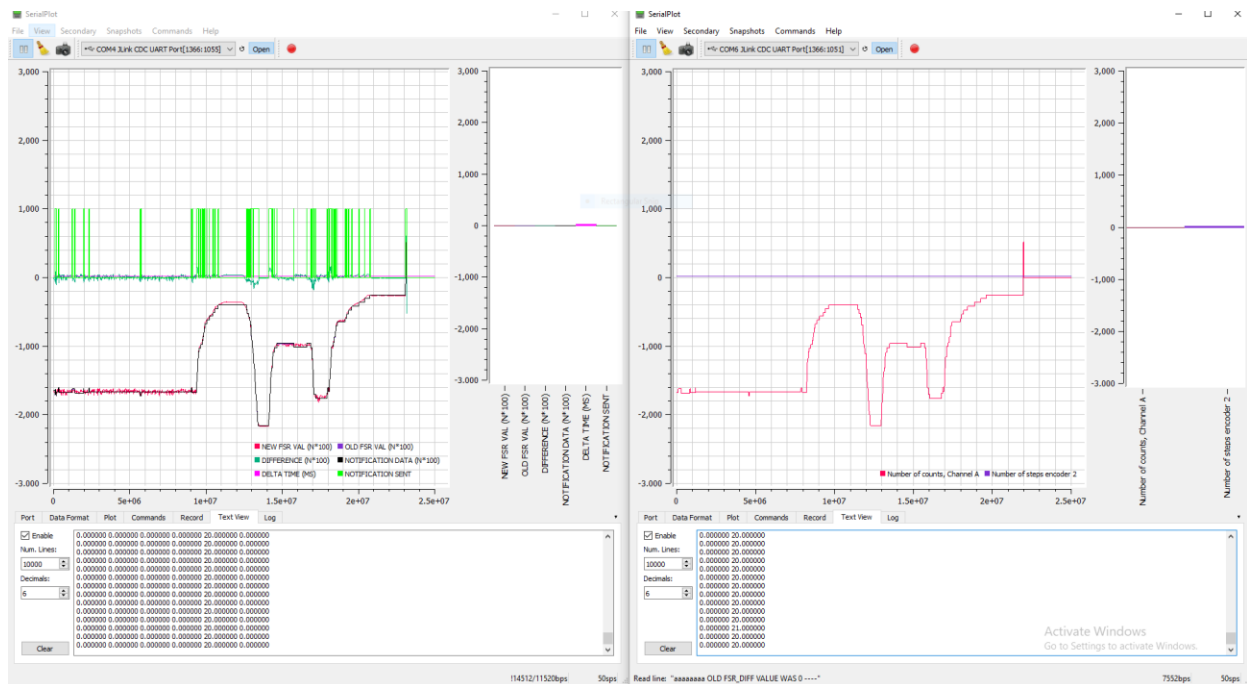


Σχήμα 5-4. Μετρήσεις παλμών μικροελεγκτή για τάση τροφοδοσίας 4,2V.

5.2.2 Δοκιμή μεταφοράς μέτρησης FSR μέσω BLE

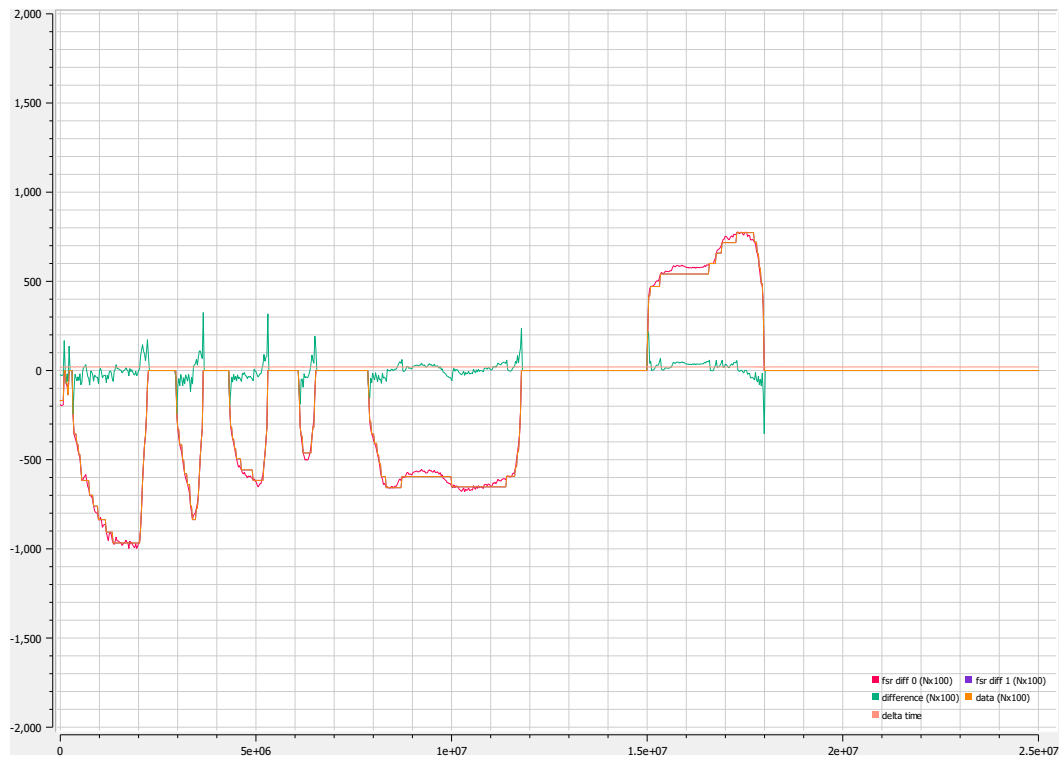
Η δοκιμή αυτή έγινε για να διαπιστωθεί η ταχύτητα μεταφοράς της μέτρησης των αισθητήρων δύναμης από τον Master μικροελεγκτή στον Slave μικροελεγκτή μέσω BLE. Για

τη δοκιμή, η έξοδος των δύο κυκλωμάτων μέτρησης της δύναμης συνδέθηκε στον master μικροελεγκτή. Ο master μικροελεγκτής ρυθμίστηκε να λαμβάνει μέτρηση από τους αισθητήρες ανά 20ms και να την στέλνει στον slave μικροελεγκτή. Ο slave μικροελεγκτής ρυθμίστηκε να τυπώνει την τιμή που παίρνει μέσω ειδοποιήσεων από το FSR χαρακτηριστικό του GATT server (master μικροελεγκτής). Στη συνέχεια ασκήθηκε δύναμη στους δύο αισθητήρες δύναμης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 5-5. Στο αριστερό μέρος της εικόνας φαίνονται οι μετρήσεις του master μικροελεγκτή. Συγκεκριμένα, με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η τελευταία μέτρηση της διαφοράς δύναμης των δύο αισθητήρων, και με μαύρο χρώμα η τιμή που στέλνεται μέσω BLE σαν ειδοποίηση του χαρακτηριστικού FSR. Οι τιμές είναι σε Newton και πολλαπλασιασμένες με το 100 για να επιτυγχάνεται ακρίβεια 2 δεκαδικών παρότι οι αριθμοί μεταφέρονται ως ακέραιοι. Στο δεξί μέρος της εικόνας παρουσιάζονται οι μετρήσεις του slave μικροελεγκτή. Αξίζει να τονιστεί εδώ, ότι η περίοδος της διαδικασίας ενημέρωσης του slave μικροελεγκτή για τη μέτρηση των αισθητήρων δύναμης έχει οριστεί στα 20ms. Αυτό σημαίνει ότι κάθε 20ms ο master μικροελεγκτής προσπαθεί να στείλει μια ειδοποίηση του χαρακτηριστικού FSR στον slave μικροελεγκτή. Επιλέχθηκε αυτό το διάστημα διότι σύμφωνα με το πρωτόκολλο BLE, η μικρότερη τιμή της παραμέτρου connection interval είναι 7,5ms. Ταυτόχρονα, η εντολή για αποστολή δεδομένων στο interface σειριακής επικοινωνίας, ούτως ώστε αυτά να μπορούν να απεικονιστούν στον υπολογιστή με την χρήση κατάλληλου λογισμικού διαρκεί περίπου 6ms. Συνεπώς, ένας πλήρης κύκλος αποστολής δεδομένων θα διαρκεί τουλάχιστον 14ms αν απαιτείται ο μικροελεγκτής να επιστρέφει μηνύματα για debugging.



Σχήμα 5-5. Δοκιμή 1 για ειδοποίηση FSR χαρακτηριστικού.

Πέρα από την παραπάνω δοκιμή, πραγματοποιήθηκε και δεύτερη δοκιμή. Το Σχήμα 5-6 απεικονίζει τα δεδομένα που κατέγραψε ο master μικροελεγκτής κατά την διάρκεια της δοκιμής.



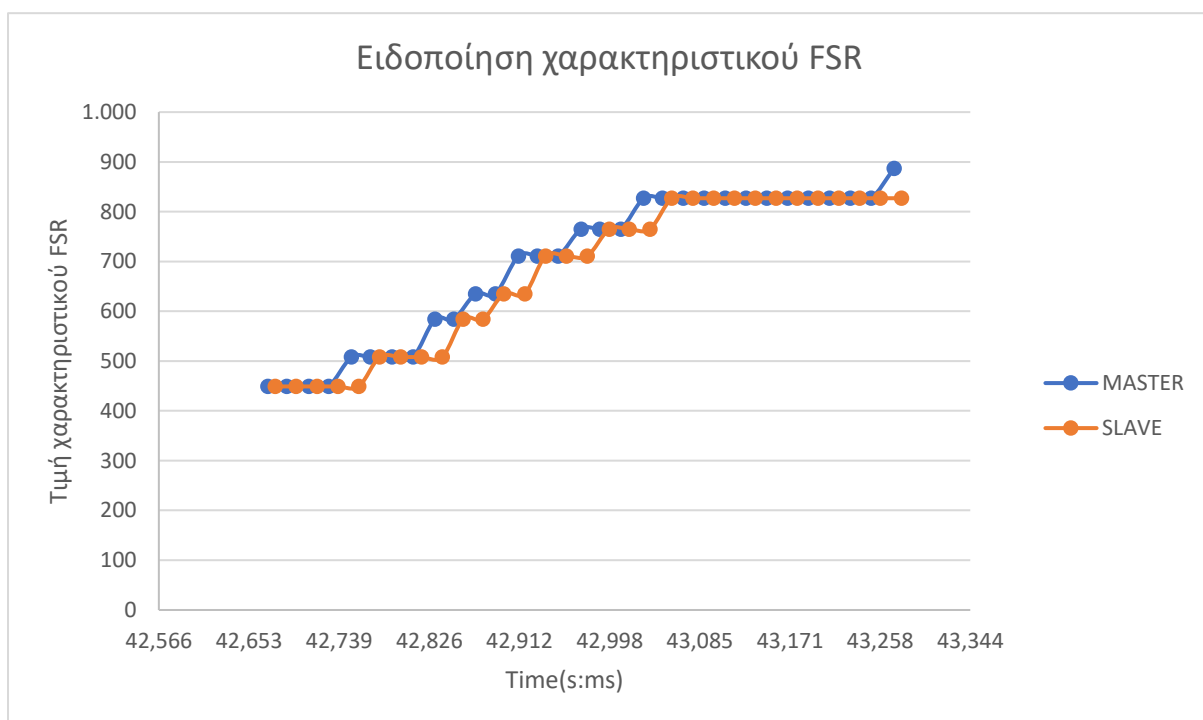
Σχήμα 5-6. Δοκιμή 2 για ειδοποίηση FSR χαρακτηριστικού, δεδομένα master.

Στο Σχήμα 5-7 απεικονίζονται τα δεδομένα που έλαβε ο slave μικροελεγκτής για το ίδιο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 5-7. Δοκιμή 2 για ειδοποίηση FSR χαρακτηριστικού, δεδομένα slave.

Στο Σχήμα 5-6, με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η τελευταία τιμή της διαφοράς δύναμης των δύο αισθητήρων FSR, ενώ με πορτοκαλί απεικονίζονται τα πραγματικά δεδομένα που αποστέλλονται. Όπως φαίνεται, τα δεδομένα παρουσιάζουν μια πιο διακριτή και όχι συνεχή καμπύλη, γεγονός που οφείλεται στη χρήση deadband 0,5N. Δηλαδή για να ειδοποιηθεί το χαρακτηριστικό FSR με νέα τιμή, πρέπει η διαφορά από την προηγούμενη τιμή να είναι μεγαλύτερη από 0,5N. Αυτό έγινε για να περιοριστεί ο αριθμός δεδομένων που μεταφέρονται μέσω του καναλιού BLE σε συνδυασμό με την μικρή ακρίβεια και αρκετό θόρυβο που εμφανίζουν οι μετρήσεις των αισθητήρων FSR. Στο Σχήμα 5-7, με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα δεδομένα που έλαβε ο slave μικροελεγκτής. Όπως φαίνεται, τα δεδομένα ταυτίζονται, τόσο αριθμητικά όσο και χρονικά. Μερικά από τα δεδομένα των Σχημάτων 5-6 και 5-7 παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-8 για ευκολότερη σύγκριση. Το Σχήμα 5-8 περιέχει ως πληροφορία τον χρόνο με ακρίβεια ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου.



Σχήμα 5-8. Δοκιμή ειδοποίησης χαρακτηριστικού FSR

Σε ορισμένες μετρήσεις παρατηρείται διαφορά ακριβώς 27ms μεταξύ της αποστολής της τιμής από τον master και της λήψης της τιμής από τον slave. Αυτό οφείλεται στην ρουτίνα που εκτελούσε το τύπωμα της τιμής του χαρακτηριστικού FSR στον slave μικροελεγκτή, η οποία εκτελείται εντός του βρόχου ελέγχου, το οποίο με την σειρά του εκτελείται κάθε 20m καθώς και στην τιμή 7,5ms της παραμέτρου connection interval.

Ένα πρόβλημα που παρατηρήθηκε κατά την εκτέλεση της δοκιμής ήταν η απώλεια της σύνδεσης μέσω BLE των δύο μικροελεγκτών, ύστερα από κάποια ώρα μεταφοράς πληροφορίας. Το πρόβλημα οφειλόταν στην διαχείριση της ενημέρωσης του FSR χαρακτηριστικού από τον master μικροελεγκτή και σχετίζεται με το throughput της επικοινωνίας μέσω BLE. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τον ορισμό κατάλληλων παραμέτρων των δύο μικροελεγκτών που αφορούν το BLE και το GATT πρωτόκολλο. Μάλιστα, η επιλογή των παραμέτρων αυτών για βελτιστοποίηση του

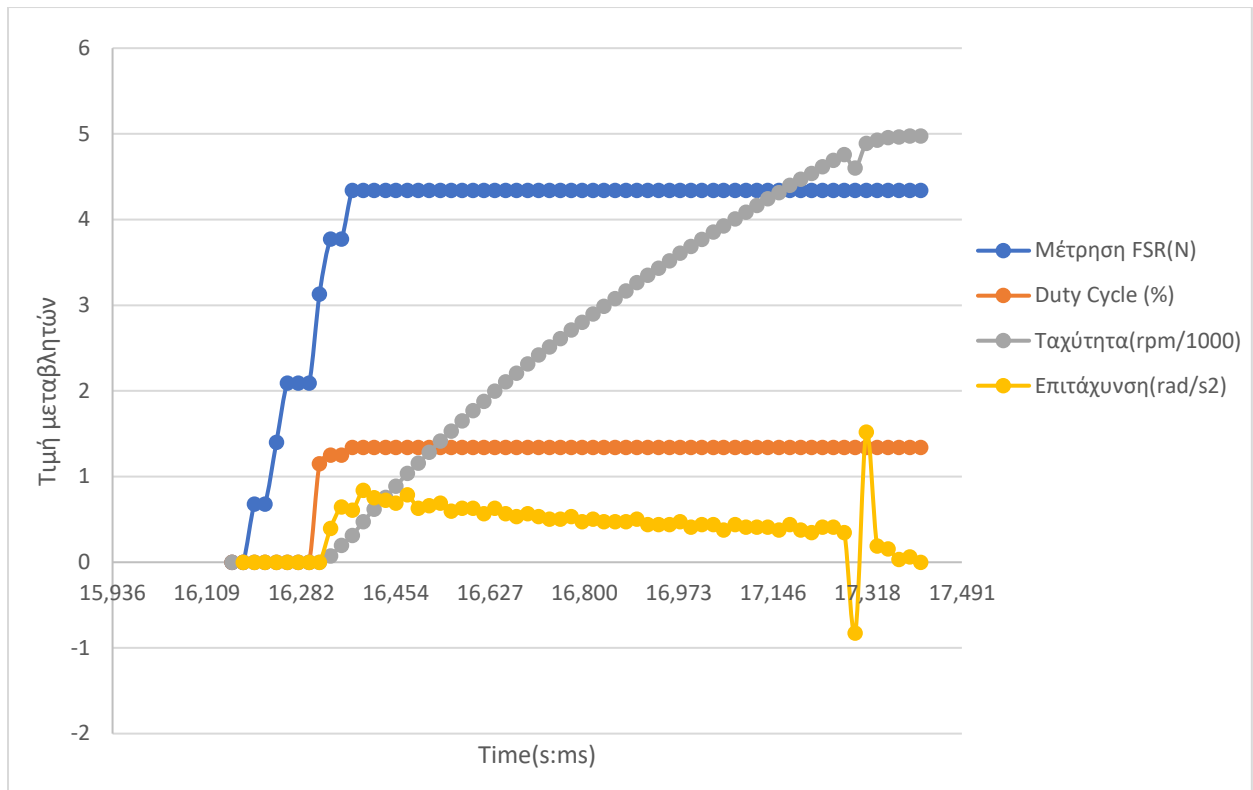
throughput της επικοινωνίας θα επέτρεπε την μεταφορά όλων των πακέτων πληροφορίας εντός των 7,5ms που ορίζονται από την παράμετρο του connection interval.

5.3 Αποτελέσματα συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν δοκιμάζοντας την λειτουργία της συνολικής διάταξης. Σημειώνεται ότι λόγω θορύβου στην μέτρηση της ταχύτητας των master κινητήρων, ο ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της θέσης τους ήταν απλός έλεγχος τύπου P (αναλογικός) με ανατροφοδότηση θέσης και όχι PD, όπως είχε σχεδιαστεί στις διπλωματικές εργασίες [2] και [3]. Σχεδιάζοντας το θεωρητικό σύστημα στο περιβάλλον Simulink και επιλύοντας το με χρονικό βήμα 20ms, όσο δηλαδή και το period του control loop υπολογίστηκαν τα κέρδη K_p για τους ελεγκτές των δύο κινητήρων. Τα κέρδη υπολογίστηκαν θεωρητικά ίσα με 10, αλλά όπως προέκυψε με δοκιμές, το σύστημα του antagonist δεν μπορούσε να υπερνικήσει τη στατική τριβή για μικρές μετακινήσεις και τελικά χρησιμοποιήθηκε κέρδος $K_p = 20$. Για το σύστημα master, οι μεταβλητές θέσης, οι μεταβλητές σφάλματος και οι μεταβλητές των σημάτων αναφοράς είναι όλες εκφρασμένες σε rad για να υπάρχει αντιστοιχία με το θεωρητικό σύστημα που σχεδιάστηκε στο Simulink. Η θεωρητική ανάλυση των συστημάτων master και slave, η επιλογή των κερδών των ελεγκτών και η προσομοίωση του συστήματος στο περιβάλλον του DPSACE είναι αντικείμενο άλλης διπλωματικής εργασίας.

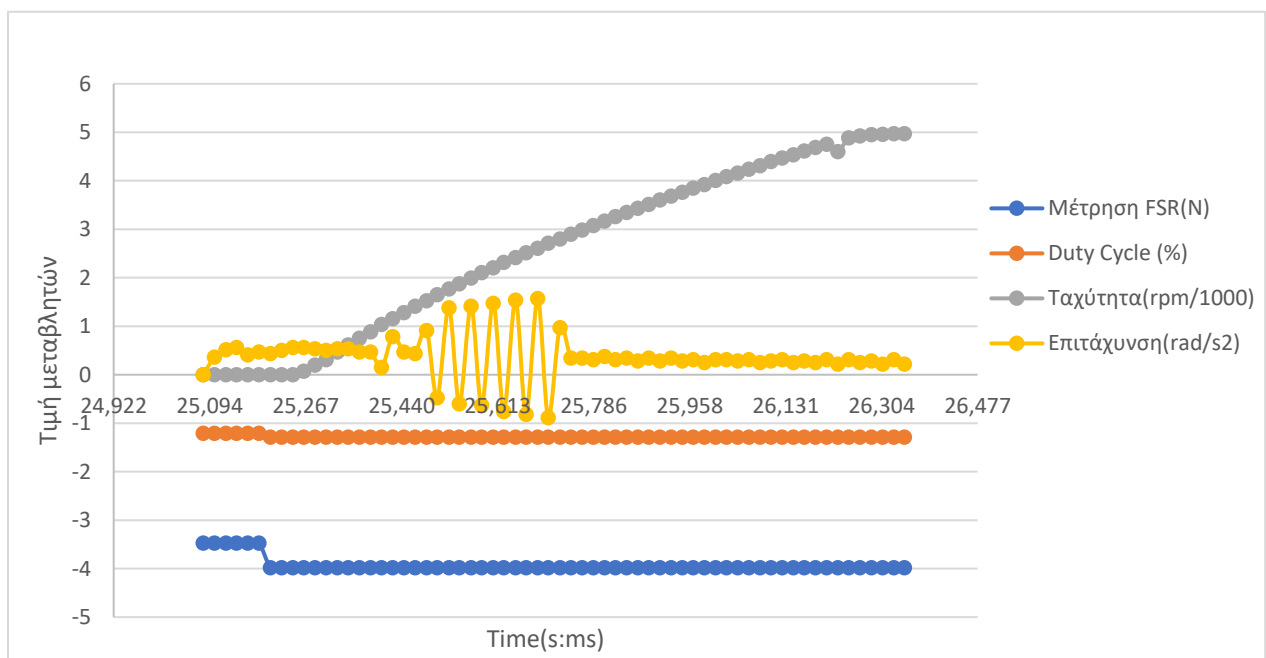
5.3.1 Δοκιμές FSR – Ελέγχου Slave κινητήρα

Στόχος της δοκιμής αυτής ήταν να διαπιστωθεί η επιτυχία ελέγχου της ροπής του slave κινητήρα αντίστοιχα με την μέτρηση δύναμης από τους αισθητήρες FSR. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε ασκώντας διάφορες δυνάμεις εναλλάξ στους δύο αισθητήρες δύναμης και παρατηρώντας την επιτάχυνση του προσθετικού χεριού. Ο master μικροελεγκτής κατέγραφε τις μετρήσεις των αισθητήρων δύναμης και την τιμή ενημέρωσης του χαρακτηριστικού FSR, ενώ ο slave μικροελεγκτής κατέγραφε της τιμή ενημέρωσης του χαρακτηριστικού FSR, το υπολογιζόμενο σήμα ελέγχου (duty cycle) και την ταχύτητα του κινητήρα. Χρησιμοποιήθηκε καταγραφή της ταχύτητας και όχι της επιτάχυνσης γιατί δύο παραγωγίσεις της μέτρησης θέσης θα εισήγαγαν σημαντικό θόρυβο. Έτσι έγινε μία παραγωγή για να υπολογιστεί η ταχύτητα και στη συνέχεια η επιτάχυνση υπολογίστηκε από την κλίση της καμπύλης της ταχύτητας. Στο Σχήμα 5-9 παρουσιάζονται τα δεδομένα της δοκιμής αυτής. Όπως παρατηρεί κανείς, όπως ορίστηκε από τον σχεδιασμό, ο μικροελεγκτής δεν ξεκινάει να επενεργεί στον κινητήρα για τιμές δύναμης χαμηλότερες των 3N. Αφού η τιμή της δύναμης ξεπεράσει το χαμηλό όριο που έχει τεθεί, ο μικροελεγκτής υπολογίζει το σήμα ελέγχου (duty cycle) και με βάση αυτό, επενεργεί στον κινητήρα μέσω του driver. Αντίστοιχα, ο κινητήρας ξεκινάει να αποκρίνεται στο σήμα ελέγχου και επιταχύνει. Λόγω του ότι ο κινητήρας πρακτικά λειτουργεί χωρίς φορτίο, παρατηρείται ότι η αλλαγή του σήματος ελέγχου μεταφράζεται σε αύξηση της επιτάχυνσης για μικρό χρονικό διάστημα, έως ότου δηλαδή ο κινητήρας επιταχύνει αρκετά.



Σχήμα 5-9. Πρώτη δοκιμή ελέγχου slave κινητήρα.

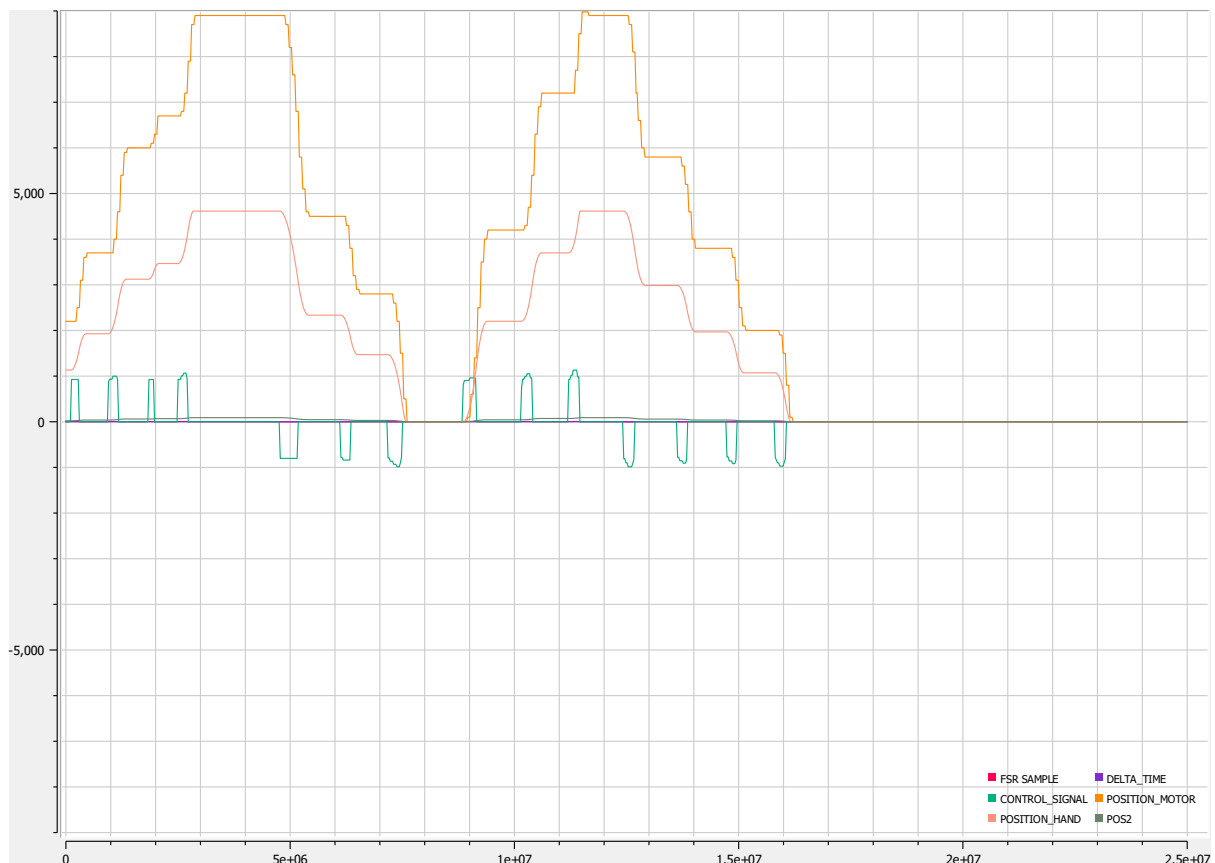
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε και δεύτερη δοκιμή, για αντίστροφη κίνηση του κινητήρα. Το σχήμα 5-10 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της δεύτερης δοκιμής.



Σχήμα 5-10. Δεύτερη δοκιμή ελέγχου slave κινητήρα.

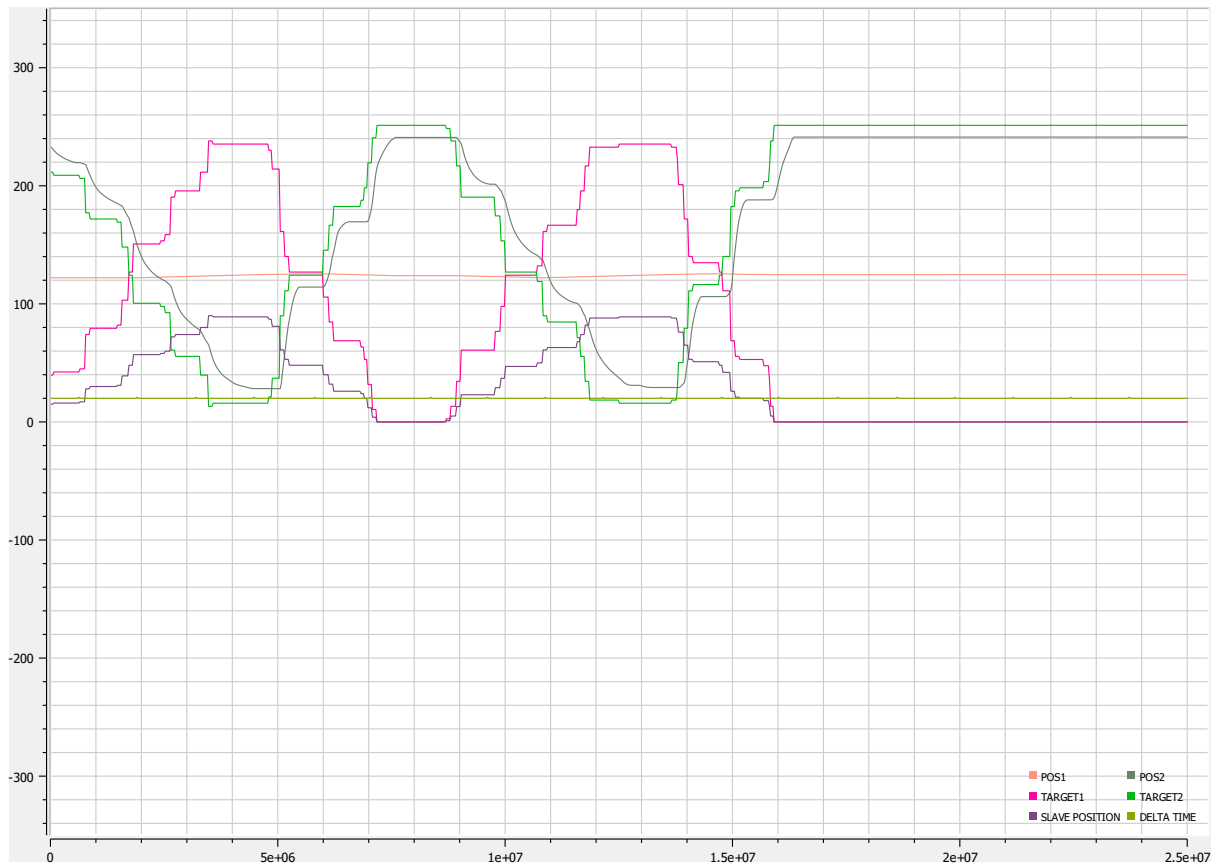
5.3.2 Δοκιμές θέσης slave κινητήρα – θέσης master κινητήρων

Στόχος της δοκιμής αυτής ήταν να διαπιστωθεί η ακρίβεια που επιτυγχάνεται στην θέση των master κινητήρων, πραγματοποιώντας P (proportional) έλεγχο θέσης, ρυθμίζοντας την τάση και χρησιμοποιώντας ως αναφορά την θέση του προσθετικού χεριού. Για τον σκοπό αυτό, διαφορετικές τιμές της θέσης του προσθετικού χεριού μεταφέρθηκαν από τον slave μικροελεγκτή στον master μικροελεγκτή μέσω εγγραφής του ENCODER_POS χαρακτηριστικού. Ο slave μικροελεγκτής ρυθμίστηκε να γράφει μια προκαθορισμένη ακολουθία τιμών θέσης του προσθετικού χεριού στο ENCODER_POS χαρακτηριστικό, ενώ ταυτόχρονα ρυθμίστηκε να τυπώνει την θέση του προσθετικού χεριού και την τιμή που γραφόταν στο ENCODER_POS χαρακτηριστικό. Ταυτόχρονα, ο master μικροελεγκτής ρυθμίστηκε να τυπώνει την τιμή που διάβαζε στο ENCODER_POS χαρακτηριστικό, το σφάλμα θέσης, το παραγόμενο σήμα ελέγχου, την χρονική μεταβολή μεταξύ διαδοχικών εκτελέσεων της ρουτίνας ελέγχου και την θέση των master κινητήρων (μετασχηματισμένη σε γραμμική θέση). Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές, μία για κάθε έναν από τους κινητήρες του master συστήματος. Το Σχήμα 5-8 απεικονίζει τα δεδομένα του slave μικροελεγκτή για την πρώτη δοκιμή.



Σχήμα 5-11. Δεδομένα slave μικροελεγκτή, δοκιμή πρώτη.

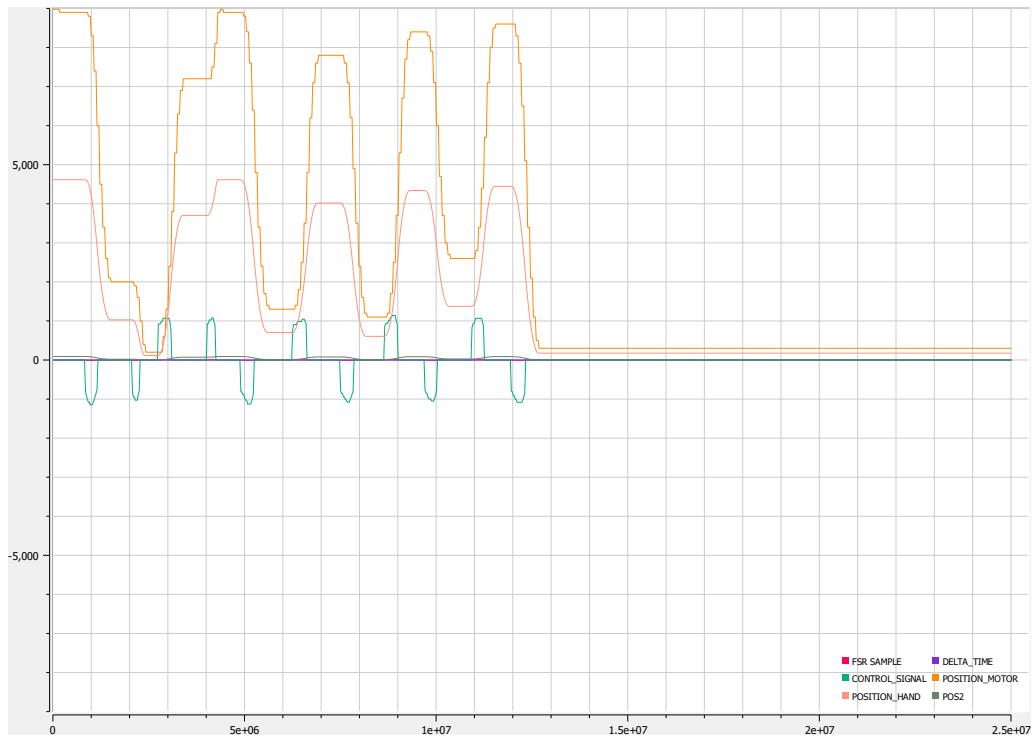
Όπως φαίνεται, το προσθετικό άκρο πραγματοποιεί δύο φορές την ίδια κίνηση, δηλαδή μετατόπιση από την μια ακραία θέση (θέση 0) στην άλλη ακραία θέση (θέση 90). Η μεταβλητή που αποτυπώνει την παραπάνω πληροφορία είναι η μεταβλητή POSITION_HAND η οποία είναι πολλαπλασιασμένη με το 100. Στο Σχήμα 5-12 απεικονίζεται η απόκριση του master συστήματος.



Σχήμα 5-12. Δεδομένα master μικροελεγκτή, δοκιμή 1.

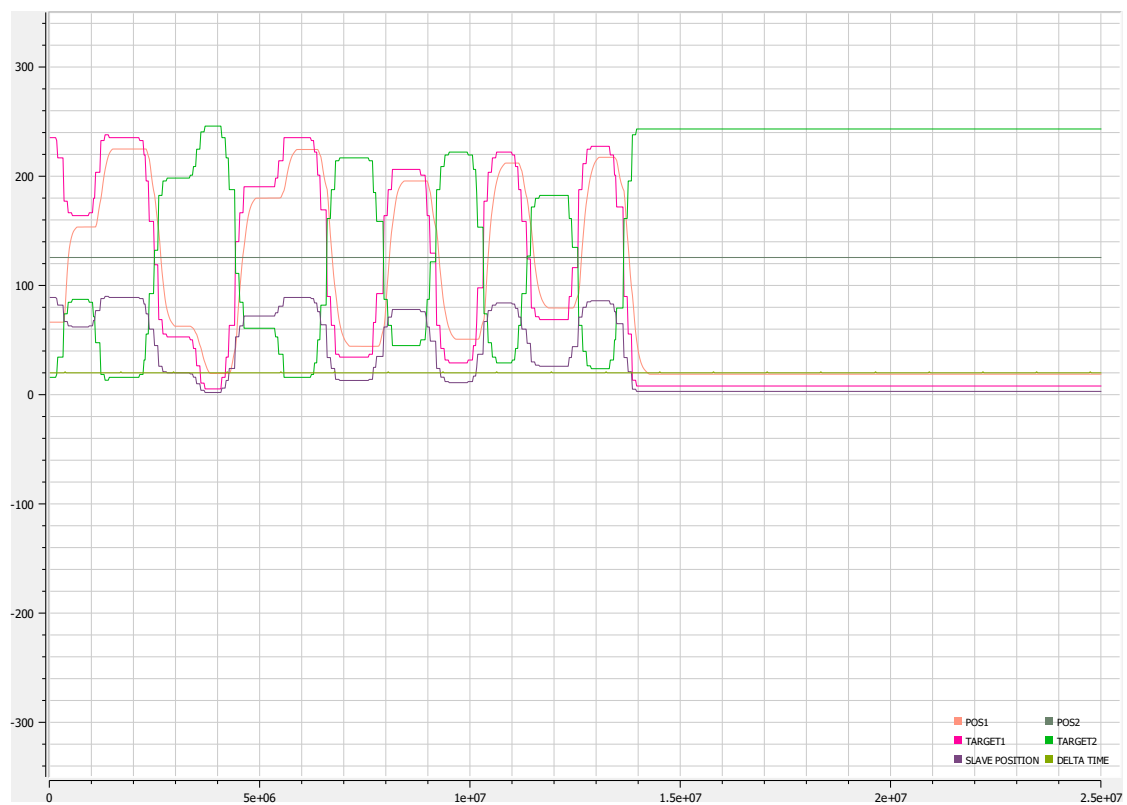
Όπως φαίνεται σε αυτό το σχήμα με μωβ χρώμα (μεταβλητή SLAVE_POSITION), η αλλαγή της θέσης του προσθετικού ενημερώνεται και ταυτόχρονα ορίζονται οι στόχοι για τους δύο κινητήρες του master συστήματος. Με magenda χρώμα απεικονίζεται ο στόχος του agonist κινητήρα και με ανοιχτό πράσινο χρώμα, ο στόχος του antagonist. Με σκούρο πράσινο χρώμα απεικονίζεται η θέση του antagonist κινητήρα, ενώ με πορτοκαλί χρώμα η θέση του agonist κινητήρα. Στη συγκεκριμένη δοκιμή ελέγχθηκε μόνο η κίνηση του antagonist. Αυτό εξηγεί γιατί η θέση του agonist κινητήρα παραμένει σταθερή. Από την άλλη, η θέση του antagonist κινητήρα, ακολουθεί τον στόχο με μια μικρή καθυστέρηση. Επίσης παρατηρείται μια μικρή απόκλιση στην θέση ισορροπίας η οποία οφείλεται στην χρήση $deadband=4rad$ για τον έλεγχο των κινητήρων του master συστήματος.

Στη δεύτερη δοκιμή που πραγματοποιήθηκε, ελέγχθηκε η κίνηση του agonist κινητήρα σε σχέση με την κίνηση του προσθετικού άκρου. Το Σχήμα 5-13 απεικονίζει την μεταβολή της θέσης του προσθετικού άκρου.



Σχήμα 5-13. Δεδομένα slave μικροελεγκτή, δοκιμή 2.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-13, μέσω εφαρμογής δύναμης στους αισθητήρες FSR το προσθετικό άκρο πραγματοποιεί διάφορες κινήσεις μεταξύ των δύο ακραίων θέσεων. Στο Σχήμα 5-11 απεικονίζεται η απόκριση του συστήματος master.

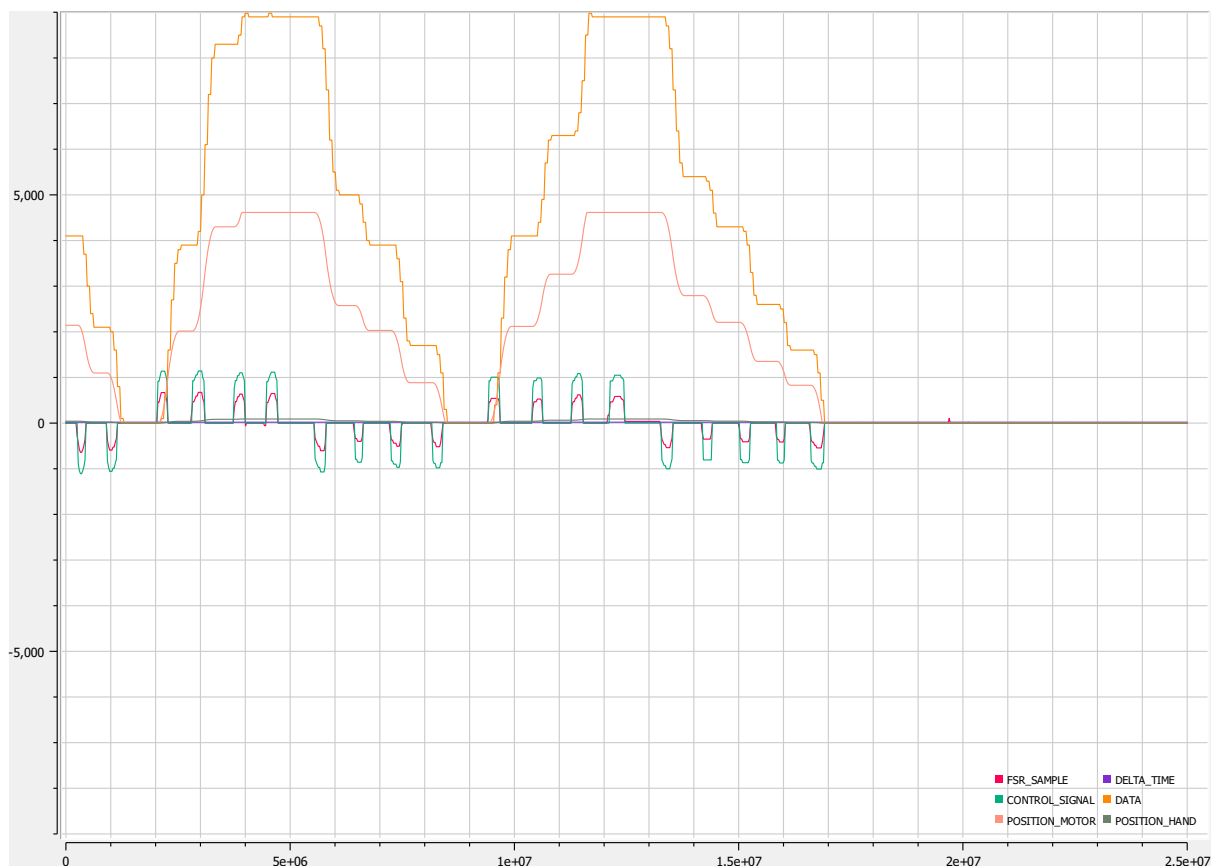


Σχήμα 5-14. Δεδομένα master μικροελεγκτή, δοκιμή 2.

Όπως παρατηρεί κανείς, σε αυτή τη δοκιμή, η θέση του agonist κινητήρα (πορτοκαλί χρώμα, μεταβλητή POS1) ακολουθεί την κίνηση του προσθετικού άκρου. Η κίνηση ορίζεται από την μετάφραση της θέσης του προσθετικού (μωβ χρώμα, μεταβλητή SLAVE_POSITION) σε στόχο (magenta χρώμα για τον agonist και ανοιχτό πράσινο για τον antagonist). Ο antagonist κινητήρας παραμένει ακίνητος αφού δεν ήταν συνδεδεμένος με το κύκλωμα οδήγησης. Πάλι όπως και στην προηγούμενη δοκιμή παρατηρείται μια καθυστέρηση μεταξύ της θέσης και του στόχου και μια απόκλιση στην θέση ισορροπίας, η οποία και εδώ οφείλεται στο deadband που έχει οριστεί στον control loop.

5.3.3 Συνολική δοκιμή συστήματος

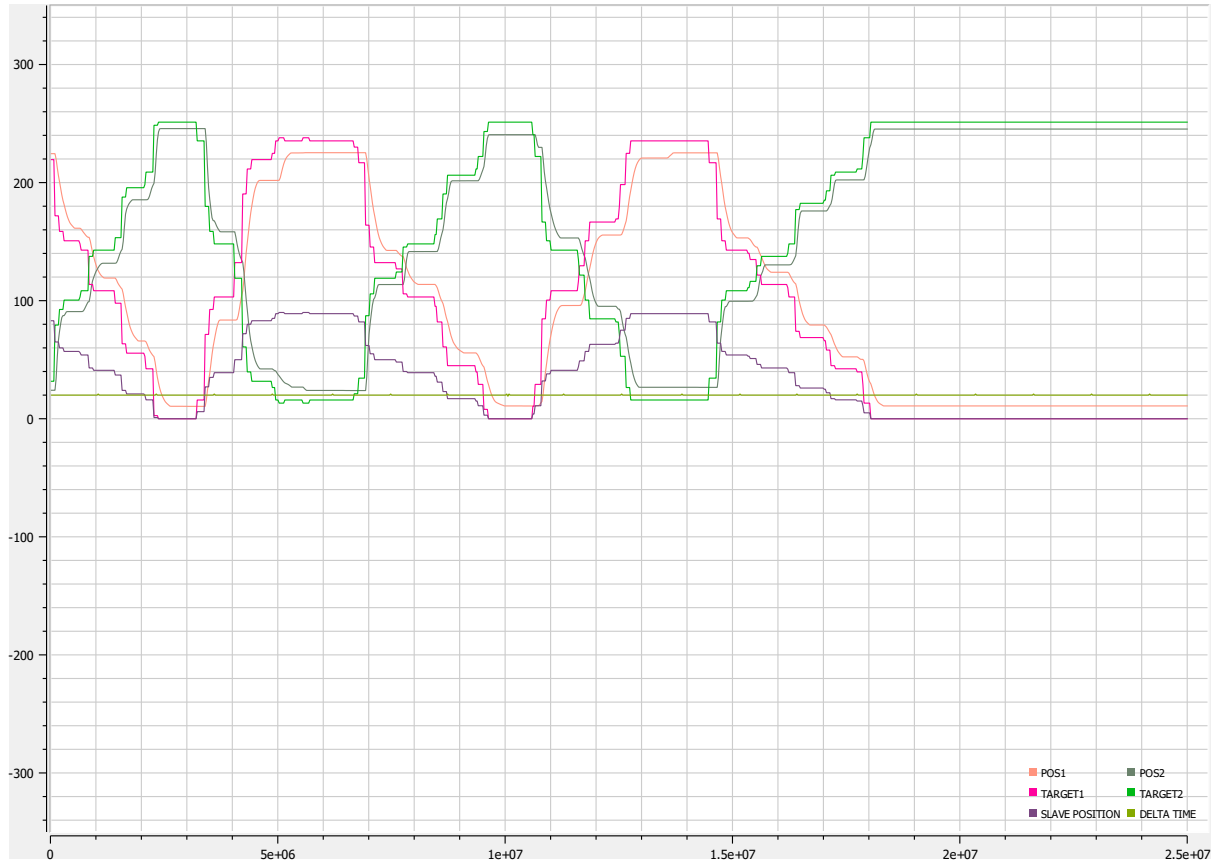
Κατά την συνολική δοκιμή του συστήματος, στόχος ήταν εξεταστεί η απόκριση του συνολικού συστήματος. Για τον σκοπό αυτό, ασκήθηκαν δυνάμεις στους αισθητήρες δύναμης και παρατηρήθηκε τόσο η μεταβολή της ταχύτητας του προσθετικού χεριού, όσο και η μεταβολή της θέσης των master κινητήρων. Για το πείραμα αυτό οι μεταβλητές που έπρεπε να καταγραφούν ήταν η μέτρηση δύναμης από τους αισθητήρες FSR και η θέση των κινητήρων για το master σύστημα και για το slave σύστημα ήταν η θέση του προσθετικού χεριού και η ταχύτητα του. Στο Σχήμα 5-12 παρουσιάζεται η κίνηση του slave συστήματος με αναφορά την δύναμη των αισθητήρων FSR.



Σχήμα 5-15. Απόκριση συστήματος slave.

Όπως παρατηρεί κανείς, με την άσκηση μικρών δυνάμεων έγινε σταδιακή μετατόπιση του προσθετικού άκρου μεταξύ των ακραίων θέσεων. Η μεταβλητή FSR_SAMPLE (κόκκινο χρώμα) απεικονίζει την τιμή του χαρακτηριστικού FSR που ενημερώνεται από τον master

μικροελεγκτή σύμφωνα με την μέτρηση της δύναμης από τους αντίστοιχους αισθητήρες. Η μεταβλητή POSITION_HAND (γκρι) δεν είναι ορατή γιατί κυμαίνεται στο εύρος 0-90 μοιρών, αλλά η μεταβλητή DATA (πορτοκαλί) είναι η ίδια πολλαπλασιασμένη με το 100 και αναπαριστά τα πραγματικά δεδομένα που αποστέλλονται στον master μικροελεγκτή μέσω εγγραφής του ENCODER_POS χαρακτηριστικού. Στο σχήμα 5-13 απεικονίζεται η απόκριση του master συστήματος.



Σχήμα 5-16. Απόκριση master συστήματος.

Όπως φαίνεται, σε αυτή την περίπτωση και οι δύο κινητήρες παρακολουθούν την κίνηση του προσθετικού χεριού. Η κίνηση του προσθετικού χεριού (μεταβλητή SLAVE_POSITION, μωβ χρώμα) αρχικά μετατρέπεται στις μεταβλητές στόχου των δύο κινητήρων (TARGET1-magenta χρώμα και TARGET2-ανοιχτό πράσινο χρώμα για agonist και antagonist κινητήρες αντίστοιχα). Στη συνέχεια, μέσω του βρόχου ελέγχου, οι θέσεις των δύο κινητήρων παρακολουθούν τον στόχο. Όπως παρατηρήθηκε και στο Σχήμα 5-12, το προσθετικό άκρο εκτελεί σταδιακές κινήσεις μεταξύ των δύο ακραίων θέσεων. Αυτό μεταφράζεται σε σταδιακή κίνηση των κινητήρων του master συστήματος μεταξύ των ακραίων θέσεων τους, οι οποίες είναι μεταξύ τους αντιδιαμετρικές. Τα παραπάνω γίνονται εμφανή και από το Σχήμα 5-13.

6 Συμπεράσματα

6.1 Συμπεράσματα εργασίας

Συνοψίζοντας, είναι χρήσιμο να παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή. Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η τοπολογία ασύρματης τοπολογίας ελέγχου biomechatronic EPP, χρησιμοποιώντας μικροελεγκτές και επιλέγοντας το BLE ως πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας είναι εφικτή και μάλιστα μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τόσο οι προδιαγραφές που αφορούν την ταχύτητα ελέγχου του προσθετικού χεριού αλλά και οι προδιαγραφές που αφορούν την ταχύτητα απόδοσης της αίσθησης της κίνησης του προσθετικού χεριού μέσω επενέργειας στον αγωνιστικό και ανταγωνιστικό μυ, ικανοποιήθηκαν. Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, είναι δυνατόν να επιτευχθεί πλήρης έκταση και πλήρης κάμψη του προσθετικού χεριού εντός ενός δευτερολέπτου. Επίσης, η ανατροφοδότηση της κίνησης του προσθετικού χεριού μέσω επενέργειας στους μύες του ανθρώπινου χεριού μπορεί να επιτευχθεί επίσης εντός ενός δευτερολέπτου για την μέγιστη κίνηση του προσθετικού. Σημειώνεται επίσης, ότι τα αποτελέσματα προέκυψαν εφαρμόζοντας απλό ελεγκτή P και όχι τον σχεδιασμένο PD ελεγκτή, λόγω του ότι η μέτρηση της ταχύτητας εμφάνιζε αρκετό θόρυβο και θεωρήθηκε ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Ταυτόχρονα, όπως διαπιστώθηκε, οι παραπάνω κινήσεις καθώς και γενικότερα η κίνηση του προσθετικού χεριού, μπορούν να επιτευχθούν με ομαλό τρόπο, δηλαδή χωρίς σημαντική καθυστέρηση μεταξύ της άσκησης δύναμης μέσω των μυών και της παρατήρησης της αντίστοιχης κίνησης του προσθετικού χεριού. Η μέγιστη καθυστέρηση που παρατηρήθηκε μεταξύ των χρονικών στιγμών άσκησης δύναμης στους αισθητήρες FSR και της κίνησης του προσθετικού χεριού ήταν περίπου 30ms. Η τιμή αυτή είναι μεν μεγαλύτερη από την τιμή χρονικής καθυστέρησης που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος (περίπου 15ms), αλλά δεν απέχει πολύ από αυτή. Αντίστοιχα, η μέγιστη καθυστέρηση ολοκλήρωσης της τοπολογίας bio EPP ήταν περίπου 100ms. Όπως αναλύθηκε, μέρος της καθυστέρησης οφείλεται στην παραμετροποίηση των ρυθμίσεων των μικροελεγκτών και αφορούν την διαχείριση της πληροφορίας μέσω των BLE και GATT πρωτοκόλλων. Οι παραπάνω τιμές καθυστέρησης δεν οφείλονται μόνο στους περιορισμούς που ορίζει το πρωτόκολλο BLE και το throughput της επικοινωνίας που επιτεύχθηκε με τον παρόντα σχεδιασμό, αλλά οφείλονται και στον σχεδιασμό άλλων ρουτινών που εκτελούνται περιοδικά και όχι ασύγχρονα. Για παράδειγμα, η ρύθμιση του master μικροελεγκτή να καλεί την τιμή εγγραφής του ENCODER_POS χαρακτηριστικού ασύγχρονα και όχι περιοδικά, θα εξασφάλιζε αμεσότερη μεταφορά της πληροφορίας αυτής στον βρόχο ελέγχου και άρα γρηγορότερο έλεγχο. Επίσης, η βελτιστοποίηση της επικοινωνίας μέσω BLE ως προς το throughput, θα εξασφάλιζε ότι εντός των 7,5ms που ορίζονται από το connection interval, ο slave προλαβαίνει να γράψει την τιμή του ENCODER_POS χαρακτηριστικού και ο master μικροελεγκτής προλαβαίνει να ενημερώσει το FSR χαρακτηριστικό. Εξασφαλίζοντας τα παραπάνω, θα ήταν εφικτό να μειωθεί η περίοδος εκτέλεσης του βρόχου ελέγχου από τα 20ms στα 10ms. Κατά αυτόν το τρόπο η απόκριση του συστήματος θα γινόταν ακόμα πιο ομαλή.

Όσον αφορά τον έλεγχο, λόγω μεγάλου θορύβου στην μέτρηση της ταχύτητας, δεν κατορθώθηκε να εφαρμοστεί PD ελεγκτής, αλλά αντίθετα εφαρμόστηκε απλός P ελεγκτής.

Επίσης, δεν εφαρμόστηκε η μεθοδολογία feed-forward compensation. Σύμφωνα με την μεθοδολογία αυτή, η ταχύτητα του προσθετικού άκρου λαμβάνεται υπόψιν στον βρόχο ελέγχου του master συστήματος. Τέλος, δεν λήφθηκε υπόψιν στον ελεγκτή η τιμή της τριβής που ασκείται στον κινητήρα. Όλα τα παραπάνω είχαν ως αποτέλεσμα την πιο αργή και λιγότερο ομαλή απόκριση του συστήματος σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα που δοκιμάστηκε να ελεγχθεί με το DSPACE. Σημειώνεται όμως εδώ, ότι πέρα από τον πιο σύνθετο έλεγχο που εφαρμόστηκε στο περιβάλλον DSPACE, το σύστημα αυτό υπερτερεί στο ότι δεν υλοποιεί ασύρματη επικοινωνία μέσω BLE και άρα δεν υπόκειται σε καθυστερήσεις λόγω ασύρματης επικοινωνίας, όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σε ένα σύστημα (hardware-software) και συνεπώς δεν εισάγονται καθυστερήσεις και δεν υπάρχει έλλειψη συγχρονισμού μεταξύ της εκτέλεσης διαφορετικών διαδικασιών και τέλος, η υπολογιστική ισχύς του συστήματος αυτού είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή των μικροελεγκτών, με αποτέλεσμα ο βρόχος ελέγχου να εκτελείται με περίοδο 1ms. Τα βήματα που δεν κατορθώθηκε να υλοποιηθούν στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας λόγω χρόνου, όπως η υλοποίηση PD ελεγκτή, η εισαγωγή feed forward compensation στο βρόχο ελέγχου και η ικανοποιητική μέτρηση της ταχύτητας των κινητήρων, είναι δυνατόν να υλοποιηθούν και να εξετασθούν σε επόμενη εργασία.

Επιπλέον, η λειτουργία του κυκλώματος μέτρησης της δύναμης των αισθητήρων FSR, καθώς και των ρουτίνων επεξεργασίας των μετρήσεων ήταν αποτελεσματικές καθώς αφενός ο χρήστης της διάταξης ήταν σε θέση να πετύχει μεγάλη ακρίβεια στον έλεγχο θέσης τους προσθετικού χεριού, αλλά επίσης μπορούσε να πετύχει έλεγχο του προσθετικού εφαρμόζοντας ένα εύρος δυνάμεων το οποίο είναι φυσιολογικό για τις κινήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τις δοκιμές. Δηλαδή, δεν απαιτήθηκε μεγάλη δύναμη για να μπορέσει να κινηθεί το προσθετικό άκρο με λογικές ταχύτητες, ούτε παρατηρήθηκε το αντίθετο φαινόμενο, δηλαδή η εφαρμογή δύναμης να προκαλεί μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας του προσθετικού.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης της εφαρμογής ασύρματης βιομηχανοτρονικής EPP τοπολογίας ελέγχου. Μερικά από τα σημεία αυτά θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα αλλά επιγραμματικά μπορούν να αναφερθούν μερικά από αυτά, όπως είναι η βελτιστοποίηση της επικοινωνίας BLE ως προς το throughput, η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ως προς την κατανάλωση ενέργειας των μικροελεγκτών και τέλος η βελτίωση της ρουτίνας μέτρησης θέσης μέσω των κωδικοποιητών, με τον υπολογισμό της κατεύθυνσης της κίνησης αλλά και της ταχύτητας.

6.2 Μελλοντική εργασία

Η υλοποίηση μιας βασικής διάταξης που πετυχαίνει την εφαρμογή ασύρματης βιομηχανοτρονικής EPP τοπολογίας ελέγχου μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη μιας βελτιωμένης διάταξης που θα έχει διορθώσει τα μειονεκτήματα της λύσης που υλοποιήθηκε και δοκιμάστηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

Αρχικά, όπως εξηγήθηκε και στα Κεφάλαια 3 και 4, έγινε ένας συμβιβασμός ως προς τον τρόπο υπολογισμού της κατεύθυνσης της κίνησης των κινητήρων λόγω της μεγάλης συχνότητας παλμών που παράγουν οι κωδικοποιητές για τις κινήσεις των κινητήρων που απαιτούνται στα πλαίσια αυτής της εφαρμογής. Ο συμβιβασμός αυτός, δηλαδή ο υπολογισμός της κατεύθυνσης κίνησης με βάση το σήμα ελέγχου που στέλνει ο μικροελεγκτής στον driver των κινητήρων και η αντίστοιχη διαχείριση που πρέπει να γίνει σε

επίπεδο software είχε ως αποτέλεσμα την εισαγωγή μικρού σφάλματος στην μέτρηση θέσης αλλά και την εισαγωγή θορύβου στην μέτρηση της ταχύτητας των κινητήρων. Δεδομένου ότι η ταχύτητα των κινητήρων είναι μια παράμετρος που πρέπει να υπολογίζεται σωστά για να μπορεί να ληφθεί υπόψιν στον ελεγκτή, είναι σημαντικό να βρεθεί μια ρουτίνα υπολογισμού της κατεύθυνσης και της ταχύτητας των κινητήρων που αφενός δεν θα έχει τα παραπάνω μειονεκτήματα και αφετέρου θα μπορεί να διαχειριστεί την συχνότητα παλμών των κωδικοποιητών.

Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι πολύ σημαντικό να γίνει ρύθμιση των παραμέτρων που αφορούν την επικοινωνίας των μικροελεγκτών μέσω BLE και σχετίζονται με το throughput της επικοινωνίας, δηλαδή την ποσότητα δεδομένων και την ταχύτητα μεταφοράς τους. Εξασφαλίζοντας μεγάλο throughput είναι δυνατόν να επιτευχθεί πολύ γρήγορη επικοινωνία, με περίοδο κοντά στα 7,5ms, δηλαδή την ελάχιστη τιμή του connection interval που ορίζεται από το πρωτόκολλο BLE. Αν γίνει αυτό, τότε θα είναι δυνατό να μειωθεί η περίοδος εκτέλεσης του βρόχου ελέγχου και να μειωθεί η καθυστέρηση μεταφοράς της πληροφορίας, οδηγώντας τελικά στην επίτευξη ενός πολύ γρηγορότερου συστήματος όσον αφορά την απόκριση.

Ακόμη, δεδομένου ότι το ζητούμενο είναι η επίτευξη του σχεδιασμού ενός συστήματος το οποίο θα έχει πολύ μικρές διαστάσεις και θα μπορεί να εγκατασταθεί με κατάλληλη χειρουργική επέμβαση εντός του ανθρώπινου οργανισμού, είναι σημαντικό να γίνει σχεδιασμός ενός κυκλώματος το οποίο θα περιλαμβάνει μόνο το SoC και τις απαραίτητες εισόδους και εξόδους για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το έτοιμο Development Kit που παρέχει η Nordic και να μεν βασίζεται στην χρήση του nrf5340 SoC, αλλά είναι ένα Kit με πολλές εισόδους και εξόδους και αρκετά κυκλώματα τα οποία είναι γενικά χρήσιμα σε κάποιον που θέλει να εξοικειωθεί με την χρήση του συγκεκριμένου SoC, αλλά δεν χρησιμεύουν σε μια εφαρμογή που στοχεύει σε συγκεκριμένες λειτουργίες. Συνεπώς, θα ήταν χρήσιμο να γίνει έρευνα για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός τέτοιου κυκλώματος το οποίο θα έχει τις διαστάσεις που απαιτείται για να εγκατασταθεί στο εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος και ταυτόχρονα να μπορεί να επιτελέσει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες για την εφαρμογή και μόνο αυτές.

Τέλος, είναι πολύ σημαντικό να γίνει σχεδιασμός μιας κατάλληλης διάταξης τροφοδοσίας και των δύο συστημάτων (master και slave) η οποία θα βασίζεται στην χρήση επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Αυτό θα ήταν χρήσιμο να ερευνηθεί σε συνδυασμό με την αναζήτηση ρυθμίσεων του nrf5340 SoC που θα πετυχαίνουν την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας της διάταξης. Η Nordic και πιο συγκεκριμένα το λογισμικό nrfConnect Software Development Kit που προτείνεται για χρήση με τα SoC της Nordic, υποστηρίζουν τόσο στατικές ρυθμίσεις χαμηλής κατανάλωσης, όσο και ρουτίνες (APIs) για διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας δυναμικά κατά την λειτουργία του SoC. Οι ρουτίνες αυτές επιτρέπουν τον χειρισμό της κατανάλωσης του SoC ανάλογα με τις λειτουργίες που πρέπει να επιτελέσει ο μικροελεγκτής σε κάθε χρονική στιγμή. Όσον αφορά την ασύρματη φόρτιση, αυτή είναι σημαντική, διότι με αυτό τον τρόπο θα μπορεί τελικά ο χρήστης της διάταξης να φορτίζει την πηγή ενέργειας που θα τροφοδοτεί το σύστημα master και θα βρίσκεται στο εσωτερικό του ανθρώπινου χεριού.

7 Βιβλιογραφία

- [1] Bertos, Y.A., "A MICROPROCESSOR-BASED E.P.P. POSITION CONTROLLER FOR ELECTRIC-POWERED UPPER-LIMB PROSTHESES," *Master of Science*, Electrical & Computer Engineering, Northwestern University, Evanston, IL, MSA, 1999.
- [2] Kontogiannopoulos, S., "Μια Βιομηχανοτρονική EPP Τοπολογία Ελέγχου Άνω Προσθετικού Άκρου και η Πειραματική Σύγκριση της Απόδοσης της με Άλλες Τοπολογίες Ελέγχου", *Diploma Thesis*, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Athens, 2018.
- [3] Koukoulas, N., "Ασύρματος Βιομηχανοτρονικός Έλεγχος Προσθετικού Άνω Άκρου," *Master Thesis*, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Athens, 2017.
- [4] Mablekos-Alexiou, A., "Design and Simulation of a Master Slave Architecture Biomechatronic EPP upper-limb prosthesis (ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΛΕΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΟΥ ΑΚΡΟΥ ΜΕ ΙΔΙΟΔΕΚΤΙΚΗ ΑΙΣΘΗΣΗ)," *Diploma Thesis*, Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece, 2016.
- [5] Moutopoulou, E., Bertos, G.A., Mablekos-Alexiou, A., and Papadopoulos, E.G., "Feasibility of a biomechatronic EPP Upper Limb Prosthesis Controller," in *2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2015, pp. 2454-2457.
- [6] Proctor, R.W. and Schneider, D.W., "Hick's law for choice reaction time: A review," *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 71, no. 6, pp. 1281-1299, 2018
- [7] Simpson, D.C., "The choice of control system for the multimovement prosthesis: extended physiological proprioception (EPP)," in *The Control of Upper-Extremity Prostheses and Orthoses*, e. a. Herberts, Ed.: Springfield, IL: Thomas, 1974, pp. 146-150.
- [8] Vangelatos, Z., "Design of Upper limb prosthesis: Experimental Comparison of the Classic and Biomechatronic Extended Physiological Proprioception," School of Mechanical Engineering, National technical University of Athens, Athens, 2017.
- [9] Bui, H., 2022, "Building a Bluetooth application on nRF Connect SDK - Part 3 Optimizing the connection", από <https://devzone.nordicsemi.com/guides/nrf-connect-sdk-guides/b/software/posts/building-a-bluetooth-application-on-nrf-connect-sdk-part-3-optimizing-the-connection>
- [10] Bui, H., 2020, "Building a Bluetooth application on nRF Connect SDK - Comparing and contrasting to SoftDevice Part 1", από <https://devzone.nordicsemi.com/guides/nrf-connect-sdk-guides/b/software/posts/building-a-ble-application-on-ncs-comparing-and-contrasting-to-softdevice-based-ble-applications>
- [11] Bui, H., 2021, "Building a Bluetooth application on nRF Connect SDK - Contrasting to SoftDevice - Part 2 Central role", από <https://devzone.nordicsemi.com/guides/nrf-connect-sdk-guides/b/software/posts/building-a-ble-application-on-ncs-sdk---contrasting-to-softdevice-based-ble-applications---part-2-central-role>
- [12] Ovrebek, 2022, "QDEC Peripheral with high speed encoder" από <https://devzone.nordicsemi.com/f/nordic-q-a/91398/qdec-peripheral-with-high-speed-encoder>
- [13] NRF5340 Product Specification, v1.3 από https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF5340_PS_v1.3.pdf

- [14] NRF5340 DK Hardware Description, από https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fps_nrf5340%2Fkeyfeatures_html5.html
- [15] NRF Connect SDK nrfx API Reference, από https://developer.nordicsemi.com/nRF_Connect_SDK/doc/latest/nrfx/api_reference.html
- [16] Zephyr RTOS API Reference, από <https://docs.zephyrproject.org/3.0.0/reference/index.html>

