



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.

Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΤΙΤΛΟΣ

Ασύρματος Βιομηχανοτρονικός Έλεγχος Προσθετικού Άνω Άκρου

Νικόλαος Κουκουλάς

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2017

Περίληψη

Οι τοπολογίες ελέγχου άνω προσθετικών άκρων αποσκοπούν στην βελτίωση της ζωής των ασθενών μέσω της υποκατάστασης της λειτουργίας των φυσικών άκρων με αισθητικά αποδεκτές και ασφαλείς για την υγεία των ασθενών λύσεις. Με γνώμονα τα κριτήρια αυτά ο έλεγχος Εκτεταμένης Φυσιολογικής Ιδιοδεκτικότητας (Extended Physiological Proprioception, EPP), που παρουσιάζει τον υψηλότερο βαθμό ελέγχου και αποκατάστασης της φυσικής λειτουργίας σε σχέση με τις ανταγωνιστικές τοπολογίες, τείνει να εγκαταλειφθεί καθώς υστερεί σε θέματα υγιεινής και είναι αισθητικά μη αποδεκτός. Η τοπολογία ελέγχου EPP δίνει στον ασθενή την ικανότητα της αίσθησης μέσω των νευρικών υποδοχέων του. Αυτό επιτυγχάνεται με την διασύνδεση καλωδίων μεταξύ των εναπομεινάντων μυών ή τενόντων του ασθενή και του προσθετικού άκρου. Με τον τρόπο αυτό δεν απαιτείται οπτική ανάδραση για τον έλεγχο του προσθετικού άκρου. Η μηχανική διασύνδεση αποτελεί το μεγαλύτερο πλεονέκτημα και ταυτόχρονα μειονέκτημα του ελέγχου EPP.

Η ραγδαία ανάπτυξη των ασύρματων τεχνολογιών μας δίνει τη δυνατότητα του επανασχεδιασμού της τοπολογίας Ελέγχου EPP ώστε να διατηρήσουμε το υψηλό επίπεδο ελέγχου απαλείφοντας παράλληλα τα μειονεκτήματα. Η τοπολογία ελέγχου που προτείνεται στη μεταπτυχιακή αυτή εργασία βασίζεται στην προσέγγιση του Βιομηχανοτρονικού Ελέγχου EPP [1],[16],[17] και φιλοδοξεί να επαναφέρει στο προσκήνιο την τοπολογία ελέγχου EPP αντικαθιστώντας τη μηχανική διασύνδεση με ασύρματη. Η τοπολογία Ασύρματου Βιομηχανοτρονικού Ελέγχου EPP αποτελείται από δύο Microchips, που επικοινωνούν μεταξύ τους σε μοντέλο Master – Slave κάνοντας χρήση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας Bluetooth Low Energy (BLE). Τα δύο Microchips ελέγχουν την Εργαστηριακή πειραματική διάταξη που έχει σχεδιαστεί ειδικά, από πλευράς υλικού (hardware), ώστε να προσομοιάζει το ζεύγος ακρωτηριασμένου-προσθετικού άκρου της τοπολογίας EPP. Η διάταξη αποτελείται από την πλευρά του Master από δύο αισθητήρες δύναμης που προσομοιώνουν τους μύες του ασθενή και δύο Master κινητήρες που προσομοιώνουν την ανάδραση της μηχανικής διασύνδεσης της κλασσικής EPP τοπολογίας. Η δύναμη που ασκείται στους Master αισθητήρες δύναμης μεταφέρεται μέσω BLE από το Master Microchip στο Slave Microchip ως τάση και ενεργοποιεί τον Slave κινητήρα που προσομοιώνει προσθετικό άκρο ενός βαθμού ελευθερίας. Η μετατόπιση του Slave κινητήρα μεταφέρεται μέσω BLE από το Slave Microchip στο Master Microchip. Το Master Microchip ελέγχει τους Master κινητήρες ώστε να ακολουθήσουν την μετατόπιση του Slave κινητήρα, δίνοντας έτσι την αίσθηση φυσικού ελέγχου στον ασθενή.

Στα πλαίσια της εργασίας έγινε επιλογή του ασύρματου πρωτοκόλλου και της πλατφόρμας ανάπτυξης λογισμικού με γνώμονα την επίτευξη της προαναφερθείσας λειτουργικότητας και αναπτύχθηκε λογισμικό που υλοποιεί επικοινωνία Master-Slave και προσφέρει την επιθυμητή λειτουργικότητα. Τα πειράματα που διεξήχθησαν σε δοκιμαστική διάταξη για τον έλεγχο της λειτουργικότητας κρίθηκαν επιτυχή. Για την εφαρμογή της τοπολογίας στην Εργαστηριακή διάταξη έγινε αναγνώριση παραμέτρων και μοντελοποίηση, και σχεδιάστηκε PD ελεγκτής. Πειράματα διεξήχθησαν στην Εργαστηριακή διάταξη κατέδειξαν ότι Ασύρματης Βιομηχανοτρονική τοπολογία είναι ικανή να επιτύχει αποτελέσματα αντίστοιχα με της Βιομηχανοτρονικής [16], [17] EPP τοπολογίας.

Abstract

Control topologies of upper limb prosthesis are focused in improving the life of patients through substitute the functionality of the natural limbs with solutions aesthetically acceptable and risk free for the health of the patients. It is due to these standards that Extended Prosthesis Proprioception (EPP), a control topology for upper limb prosthesis superior to its rivals in terms of control, has become deprecated. EPP offers control close to the functionality of the natural limb by allowing the patient to 'feel' the prosthesis. This is achieved by mechanically linking with cables the leftover tendons or muscles of the amputated limb with the prosthesis. This way the patient can control the prosthesis without the optical feedback he needs for other control topologies. Unfortunately, the mechanical linkage is also the greatest disadvantage of this topology. It can be achieved only through surgery and the result is both aesthetically unacceptable and a risk for the patients' health.

The rapid growth of wireless technologies gives as the opportunity to redesign the EPP control topology in a way that will maintain the superior control and will eliminate the disadvantages. The control topology we are proposing is based on the Biomechatronic EPP control [1], [16], [17] and aspires to revive the EPP control topology by replacing the mechanical linkage with a wireless one. The Wireless Biomechatronic EPP control topology consists of two Microchips that interact in a Master-Slave communication model by using the Bluetooth Low Energy (BLE) protocol. The two Microchips control the Laboratory Experimental Setup, designed explicitly in terms of hardware to simulate the amputated-prosthesis pair of the EPP approach. The experimental setup from Masters' side, consists of two force sensors that simulate the muscles of the patient and two Master DC motors that simulate the feedback from the mechanical linkage. The force received from the sensors is transmitted from the Master Microchip through BLE to the Slave Microchip as a voltage that drives the Slave DC motor which simulates a 1-DOF prosthesis. The displacement of the Slave motor is measured and transmitted by the Slave Microchip to the Master Microchip through BLE. In turn the Master Microchip control the Master Motors to follow the displacement of the Slave motor thus giving the sense of natural control to the patient.

Inside the scope of this master thesis, the development platforms and wireless technology were selected in order to perform the described functionality. A software was developed to achieve Master-Slave communication through the selected protocol and the described functionality. The first tests of the Wireless EPP control topology in a test setup where conducted with success. In order for tests to take place in the Laboratory Experimental setup, system identification and system modeling where conducted and a PD controller was designed to achieve the desired functionality. The tests in the Laboratory Setup concluded that the Wireless Biomechatronic EPP control topology can achieve results similar to the Biomechatronic EPP [16], [17] control topology.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Σχημάτων.....	9
Κατάλογος Πινάκων	11
Κατάλογος Συντμήσεων.....	13
1 Εισαγωγή.....	17
1.1 Σκοπός εργασίας	17
1.2 Πρόταση εργασίας.....	18
1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	19
1.4 Δομή εργασίας.....	24
2 Ασύρματη Επικοινωνία Χαμηλής Κατανάλωσης	25
2.1 Τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας χαμηλής κατανάλωσης [13]	25
2.2 Πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth Low Energy	32
2.3 Επιλογή BLE chipset	40
3 Βιομηχανοτρονική Διάταξη Ασύρματου EPP	45
3.1 Έλεγχος κινητήρα συνεχούς ρεύματος	47
3.2 Υπολογισμός θέσης κινητήρα συνεχούς ρεύματος	53
3.3 Αισθητήρας δύναμης	55
4 Προγραμματιστική Ανάλυση Διάταξης Ελέγχου	57
4.1 Διεπαφή επικοινωνίας BLE.....	58
4.2 Διεπαφή ελέγχου ηλεκτρομηχανικών στοιχείων.....	64
4.3 Δομικό διάγραμμα εφαρμογής	65
4.4 Διαχείριση και επεξεργασία ασύγχρονων συμβάντων	67
5 Αξιολόγηση Δυνατότητας Εφαρμογής Ασύρματου EPP	71
5.1 Υλικό και συνδεσμολογία δοκιμαστικής διάταξης.....	71
5.2 Αναγνώριση παραμέτρων συστήματος.....	77
5.3 Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμαστικής διάταξης	79

6	Εφαρμογή Ασύρματου ΕΡΡ.....	83
6.1	Αναγνώριση παραμέτρων συστήματος.....	83
6.2	Οδήγηση Master κινητήρων	88
6.3	Στοιχεία και συνδεσμολογία εργαστηριακής πειραματικής διάταξης	89
6.4	Μοντελοποίηση συστήματος	92
6.5	Υλοποίηση ελεγκτή	93
6.6	Πειραματικά αποτελέσματα εργαστηριακής πειραματικής διάταξης.....	97
7	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	101
7.1	Συμπεράσματα	101
7.2	Μελλοντική εργασία	101
8	Βιβλιογραφία	103
9	Παράρτημα Α.....	105

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1.	Αντιπαραβολή κλασσικής τοπολογίας ντίζας με προτεινόμενη τοπολογία ελέγχου BLE.	17
Σχήμα 1-2.	Προτεινόμενη wireless biomechatronic-EPP τοπολογία ελέγχου.	18
Σχήμα 1-3.	Δομικό διάγραμμα διάταξης.	19
Σχήμα 1-4.	Παράδειγμα μοντελοποίησης συστήματος μιοηλεκτρικού ελέγχου [10].	22
Σχήμα 2-1.	Τοπολογίες Δικτύων.	27
Σχήμα 2-2.	Κόστη κατασκευής ανά τεχνολογία.	29
Σχήμα 2-3.	BLE stack for Nordic Soft Device 130. [14].	33
Σχήμα 2-4.	Παράδειγμα παραμέτρων GAP προφίλ.	36
Σχήμα 2-5.	Διαδικασία επίτευξης σύνδεσης μεταξύ δύο συσκευών BLE.	37
Σχήμα 2-6.	Παράδειγμα πρόσβασης ενός Client στην πληροφορία που προσφέρει ο Server μέσω ATT/GATT.	38
Σχήμα 2-7.	Characteristic format example.	39
Σχήμα 2-8.	RedBearLab BLE Nano Schematic.	43
Σχήμα 3-1.	Slave κινητήρας εργαστηριακής διάταξης.	45
Σχήμα 3-2.	Master κινητήρες εργαστηριακής διάταξης.	46
Σχήμα 3-3.	Δομικό διάγραμμα τοπολογίας ασύρματου ελέγχου EPP.	47
Σχήμα 3-4.	Μοντελοποίηση συστήματος DC κινητήρα.	48
Σχήμα 3-5.	Τεταρτημόρια λειτουργίας Ροπής/Ταχύτητας.	49
Σχήμα 3-6.	Κυκλωματική απεικόνιση του H-Bridge.	50
Σχήμα 3-7.	Παράδειγμα λειτουργίας H-Bridge.	51
Σχήμα 3-8.	Παραδείγματα duty cycle.	52
Σχήμα 3-9.	Δομικό διάγραμμα συστήματος για έλεγχο ρεύματος μέσω H-bridge.	53
Σχήμα 3-10.	Παλμοί εξόδου quadrature Encoder για ωρολογιακή περιστροφή.	55
Σχήμα 3-11.	Σχέση αντίστασης-δύναμης.	56
Σχήμα 4-1.	Μπλοκ διάγραμμα λογισμικού.	58
Σχήμα 4-2.	Διαμόρφωση πακέτων πληροφορίας.	61
Σχήμα 4-3.	Ροή πληροφορίας BLE Communication Interface.	66
Σχήμα 4-4.	Δομικό Διάγραμμα Electromechanical Interface.	67
Σχήμα 4-5.	Multithreading control.	68

Σχήμα 5-1.	Κινητήρας με Encoder και gearhead.....	71
Σχήμα 5-2.	L293D pinout.....	72
Σχήμα 5-3.	Κύκλωμα H-Bridge και SoC (Master & Slave).....	73
Σχήμα 5-4.	Συνδεσμολογία υποδοχής ακροδεκτών.....	74
Σχήμα 5-5.	Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα.....	75
Σχήμα 5-6.	Ολοκληρωμένη συνδεσμολογία για διάταξη unidirectional EPP του Master SoC.....	76
Σχήμα 5-7.	Ολοκληρωμένη συνδεσμολογία για διάταξη unidirectional EPP του Slave SoC.....	76
Σχήμα 5-8.	Βρόχος ελέγχου με χρήση SoC.....	77
Σχήμα 5-9.	Βρόχος ελέγχου συνεχούς συστήματος.....	77
Σχήμα 5-10.	Απόκριση συστήματος σε βηματική είσοδο.....	78
Σχήμα 5-11.	Master κινητήρας ακολουθεί Slave κινητήρα.....	80
Σχήμα 5-12.	Σφάλμα του Master στην παρακολούθηση της τροχιάς του Slave.....	81
Σχήμα 5-13.	Σήμα διέγερσης FSR σε σχέση με έξοδο PWM ενεργοποίησης Slave κινητήρα.....	82
Σχήμα 6-1.	Ρεύμα αριστερού Master κινητήρα σε σχέση με την ταχύτητα κατά την εκκίνηση.....	84
Σχήμα 6-2.	Ρεύμα δεξιού Master κινητήρα σε σχέση με την ταχύτητα κατά την εκκίνηση.....	85
Σχήμα 6-3.	Απόκριση ανοιχτού βρόχου για αριστερό Master κινητήρα.....	86
Σχήμα 6-4.	Απόκριση ανοιχτού βρόχου για δεξί Master κινητήρα.....	87
Σχήμα 6-5.	Διασύνδεση DRV8833 με Master SoC και κινητήρες.....	88
Σχήμα 6-6.	Ρεύμα εξόδου του H-Bridge σε σχέση με την είσοδο DC.....	89
Σχήμα 6-7.	Master Microcontroller LPC1768.....	90
Σχήμα 6-8.	Μπλοκ διάγραμμα λογισμικού για την Εργαστηριακή πειραματική διάταξη.....	91
Σχήμα 6-9.	Συνδεσμολογία διάταξης bidirectional wireless master.....	92
Σχήμα 6-10.	Μοντέλο συστήματος ασύρματης τοπολογίας ελέγχου.....	93
Σχήμα 6-11.	Γεωμετρικός τόπος ριζών για τοποθέτηση πόλων με την χρήση του PD ελεγκτή.....	95
Σχήμα 6-12.	Γεωμετρικός τόπος ριζών πριν και μετά τη διαμόρφωση για τον αριστερό κινητήρα.....	96
Σχήμα 6-13.	Γεωμετρικός τόπος ριζών πριν και μετά τη διαμόρφωση για τον δεξί κινητήρα.....	96
Σχήμα 6-14.	Απόκριση Ασύρματης τοπολογίας Βιομηχανοτρονικού EPP.....	97
Σχήμα 6-15.	Σφάλμα τοπολογίας ασύρματου ελέγχου EPP.....	98
Σχήμα 6-16.	Απόκριση τοπολογίας Βιομηχανοτρονικού ελέγχου.....	99
Σχήμα 6-17.	Σφάλμα τοπολογίας Βιομηχανοτρονικού ελέγχου.....	100

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1. Σωματοτροφοδοτούμενων προσθετικών συστημάτων.....	21
Πίνακας 2-1. Ασύρματες τεχνολογίες και τοπολογίες που υποστηρίζουν [13].....	27
Πίνακας 2-2. Κατανάλωση chipset σε εκπομπή/λήψη.	40
Πίνακας 2-3. RF performance.	40
Πίνακας 2-4. Processing Capabilities.....	41
Πίνακας 2-5. Flash/RAM.	41
Πίνακας 2-6. Multiprotocol Support.	42
Πίνακας 3-1. Λειτουργία H-Bridge για οδήγηση κινητήρα.	51
Πίνακας 4-1. Παράμετροι για τον καθορισμό του GAP peripheral role του Master SoC.	59
Πίνακας 4-2. Διαμόρφωση υπηρεσίας GATT πρωτοκόλλου για το Master SoC.	60
Πίνακας 4-3. Παράμετροι για τον καθορισμό του GAP central role του Slave SoC.....	62
Πίνακας 4-4. Connection Parameters του Slave SoC.....	62
Πίνακας 4-5. Διαμόρφωση υπηρεσίας GATT πρωτοκόλλου.	63
Πίνακας 6-1. Λογική DRV8833 για έλεγχο με SoC	88
Πίνακας 6-2. Σύγκριση τοπολογιών ελέγχου.....	100

Κατάλογος Συντμήσεων

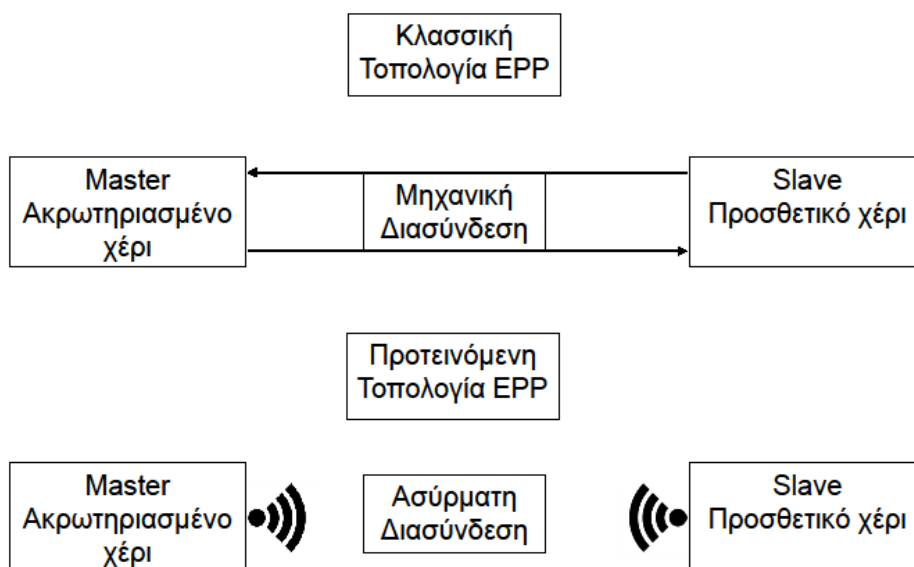
EPP	Extended Psychological Proprioception
BLE	Bluetooth Low Energy
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
RF4CE	Radio Frequency for Consumer Electronics
IRDA	Infrared Data Association
PCB	Printed Circuit Board
UDP	User Datagram Protocol
DoF	Degrees of Freedom
FSR	Force Sensitive Resistor
LL	Link Layer
HCI	Host Controller Interface
PHY	Physical Layer
L2CAP	Logical Link Control and Adaptation Protocol
ATT	Attribute Protocol
SM	Security Manager
GATT	Generic Attribute Profile
GAP	Generic Access Profile
SDK	Standard Development Kit
SoC	System on Chip
GUI	Graphic User Interface
UUID	Universally Unique Identifier
PTF	Polymer Thick Film
PWM	Pulse Width Modulation
IOT	Internet of Things
PPR	Pulses per Revolution
PPI	Pulses per Inch
RPM	Revolutions per Minute
IDE	Integrated Development Environment

API Application Programmable Interface

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός εργασίας

Οι σύγχρονες τοπολογίες ελέγχου άνω προσθετικών άκρων έχουν ως στόχο την υποκατάσταση της λειτουργικότητας των ακρωτηριασμένων άκρων με όσο το δυνατόν φυσικό και αισθητικά αποδεκτό τρόπο. Η κλασική τοπολογία ελέγχου ιδιοδεκτικής αισθητικότητας EPP (Extended Physiological Proprioception) παρουσιάζει τον υψηλότερο βαθμό αποκατάστασης της λειτουργικότητας του ακρωτηριασμένου άκρου καθώς δίνει στον ασθενή την ιδιοδεκτική αισθητικότητα, την ικανότητα δηλαδή της αίσθησης του προσθετικού, μέσω των νευρικών υποδοχέων του. Η τοπολογία περιλαμβάνει μηχανική διασύνδεση του εσωτερικού (τένοντες, μύες) του ακρωτηριασμένου άνω άκρου και του προσθετικού με χρήση ντίζας (Bowden Cable EPP). Η διασύνδεση αυτή δίνει στον ασθενή την δυνατότητα ελέγχου του προσθετικού άκρου σαν φυσική προέκταση του σώματος του, παρουσιάζει όμως σημαντικά μειονεκτήματα ως προς την αισθητική και την υγιεινή. Η πρόταση εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μίας πρωτότυπης τοπολογίας σωματοτροφοδοτούμενου ελέγχου για προσθετικά άνω άκρα, η οποία θα αντικαταστήσει την κλασική τοπολογία ελέγχου EPP (Extended Physiological Proprioception) όπως φαίνεται στο Σχ. 1-1.



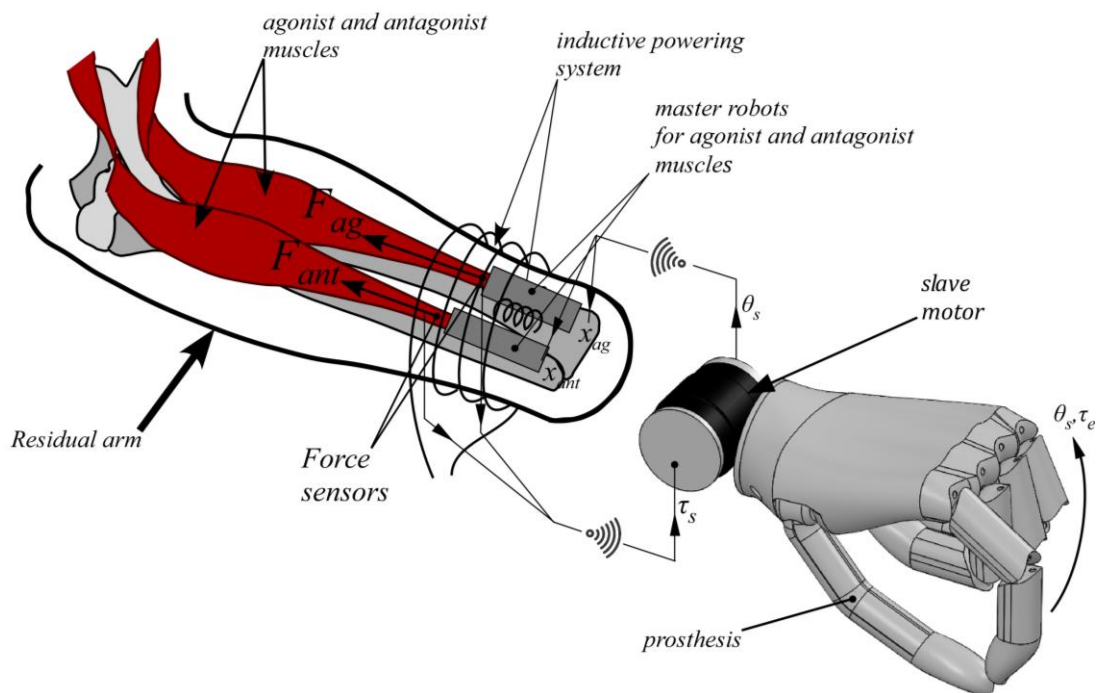
Σχήμα 1-1. Αντιπαραβολή κλασικής τοπολογίας ντίζας με προτεινόμενη τοπολογία ελέγχου BLE.

Η προτεινόμενη τοπολογία που βασίζεται στον Βιομηχανοτρονικό έλεγχο EPP [1],[2] θα επιτυγχάνει ασύρματη διασύνδεση μεταξύ ακρωτηριασμένου άνω άκρου και προσθετικού με χρήση της τεχνολογίας BLE (Bluetooth Low Energy). Το μοντέλο επικοινωνίας και η αρχιτεκτονική ελέγχου είναι τύπου Master-Slave. Στόχος της προτεινόμενης τοπολογίας είναι να παράγει τα ίδια αποτελέσματα

φυσικού ελέγχου και αποκατάστασης της λειτουργίας του προσθετικού με την τοπολογία EPP ντίζας. Να διατηρήσει δηλαδή την ιδιοδεκτική αισθητικότητα των ακρωτηριασμένων άνω άκρων εξαλείφοντας παράλληλα τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από την μηχανική διασύνδεση μεταξύ του ακρωτηριασμένου άκρου και του προσθετικού.

1.2 Πρόταση εργασίας

Η διάταξη αποτελείται από δυο microchips τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους σε τοπολογία Master Slave έτσι ώστε να εγκαθιδρυθεί ένα σύστημα τηλεχειρισμού μεταξύ ακρωτηριασμένου και προσθετικού άκρου. Η γραφική απεικόνιση ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο Σχ. 1-2, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση δύο μύες ενός ανταγωνιστικού ζεύγους, συνδέονται ο καθένας με ένα Master κινητήρα και οδηγούν μέσω ασύρματης επικοινωνίας ένα Slave κινητήρα που αντιστοιχεί σε προσθετικό άκρο ενός βαθμού ελευθερίας.

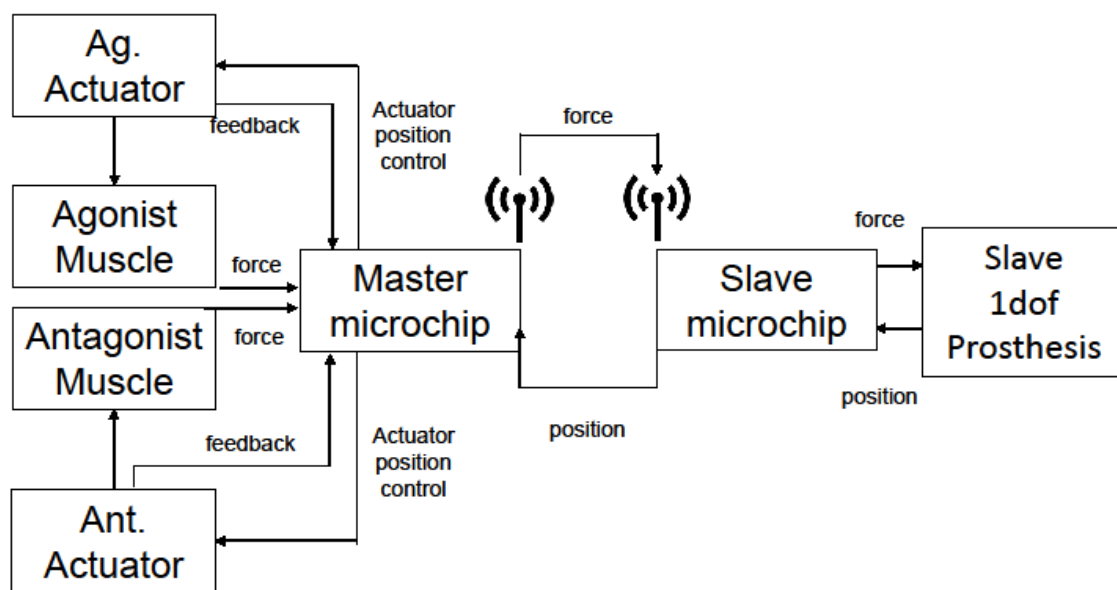


Σχήμα 1-2. Προτεινόμενη wireless biomechatronic-EPP τοπολογία ελέγχου.

Στο σύστημα τηλεχειρισμού που προτείνεται στην εργασία [2] ένας ή περισσότεροι εναπομείναντες μύες του ακρωτηριασμένου άκρου συνδέονται ο καθένας στον ακροδέκτη ενός αισθητήρα δύναμης, ασκώντας απευθείας δυνάμεις κατά τη σύσπασή τους. Στην διάταξη της συγκεκριμένης εργασίας στον αισθητήρα δύναμης ασκείται δύναμη από τον δοκιμαστή (tester) της διάταξης. Το σήμα του αισθητήρα έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία παραλαμβάνεται από το Master microchip και στέλνεται μέσω BLE στο Slave microchip που βρίσκεται στο προσθετικό άκρο ώστε να ενεργοποιηθεί ο Slave επενεργητής του προσθετικού. Η απόκριση κίνησης του Slave επενεργητή εξαρτάται πλήρως από τις εντολές δύναμης από την πλευρά του Master microchip καθώς και από εμπόδια ή αντιστάσεις του περιβάλλοντος χώρου. Η ακριβής θέση του κινητήρα υπολογίζεται από το Slave microchip με βάση τα σήματα της παλμογεννήτριας (Encoder) που είναι ενσωματωμένη στον κινητήρα και στέλνεται πίσω

στο Master microchip μέσω BLE. Το Master microchip ενεργοποιεί και ελέγχει τους Master επενεργητές ώστε να ακολουθήσουν την τροχιά του προσθετικού Slave επενεργητή, ελέγχοντας έτσι δυνητικά το μήκος και την ταχύτητα της σύσπασης των αντίστοιχων μυών. Με τον τρόπο αυτό φτάνει στον μυ και κατ' επέκταση στον ασθενή η πληροφορία που θα έδινε η μηχανική διασύνδεση για εμπόδια ή για αντιστάσεις από το περιβάλλον χωρίς την οπτική ανάδραση.

Το σύστημα τηλεχειρισμού της διάταξης που θα υλοποιηθεί θα ακολουθεί την προσέγγιση της αρχιτεκτονικής ελέγχου θέσης-δύναμης (position force architecture, P-F). Τα σήματα ελέγχου της προτεινόμενης τοπολογίας φαίνονται στο δομικό διάγραμμα του Σχ.1-3



Σχήμα 1-3. Δομικό διάγραμμα διάταξης.

Στο δομικό διάγραμμα της διάταξης του Σχ. 1-3 βλέπουμε ότι υπάρχει ένας δευτερεύον βρόχος ελέγχου μεταξύ του master microchip και του master actuator. Η απόδοση του συστήματος θα αξιολογηθεί από την ικανότητα των Master επενεργητών να ακολουθήσουν την τροχιά του Slave επενεργητή ώστε σε πραγματική εφαρμογή της διάταξης η ιδιοδεκτική αισθητικότητα της ντίζας να αντικατασταθεί από αυτή των επενεργητών.

1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η προτεινόμενη πρωτότυπη τοπολογία ελέγχου άνω προσθετικού άκρου είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να πληροί τις προδιαγραφές που καθορίστηκαν από τον Childress D.S το 1992 [5], [11] και διέπουν όλες τις γνωστές αρχιτεκτονικές ελέγχου προσθετικών άκρων. Οι προδιαγραφές αυτές είναι:

1. Υποσυνειδήτος έλεγχος. Ο χειρισμός του προσθετικού άκρου από τον ασθενή πρέπει να επιτυγχάνεται είτε υποσυνειδήτητα είτε, εάν αυτό δεν είναι εφικτό, με τον ελάχιστο δυνατό νοητικό φόρτο. Έτσι εξασφαλίζεται ότι ο έλεγχος του προσθετικού θα προσομοιάζει όσο το δυνατόν σε αυτόν του φυσιολογικού άκρου.
2. Ευκολία χρήσης και εκμάθησης. Η διαδικασία εκμάθησης, λόγω ευκολίας του χειρισμού καθίσταται ελκυστική προς τον ασθενή.
3. Απόζευξη λειτουργιών στον πολύ-λειτουργικό έλεγχο. Σε προσθετικά μέλη που εκτελούν πολλές διαφορετικές λειτουργίες, ο έλεγχος καθμίας από αυτές είναι ανεξάρτητος από τον έλεγχο της άλλης.
4. Παράλληλος έλεγχος. Έτσι δίνεται η δυνατότητα ταυτόχρονου και συγχρονισμένου ελέγχου των διαφορετικών λειτουργιών του προσθετικού άκρου.
5. Φυσική εμφάνιση. Εξασφαλίζει ότι το προσθετικό σύστημα είναι αισθητικά ελκυστικό σε όλες τις φάσεις της λειτουργίας του.
6. Καμία απώλεια της λειτουργικότητας του φυσικού άκρου από την αντικατάστασή του από το προσθετικό.
7. Άμεση πρόσβαση του ασθενή στο προσθετικό άκρο και άμεση ανταπόκριση αυτού στις ανάγκες του χρήστη.

Στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου πρέπει να ληφθεί υπόψη, όχι μόνο η άμεση ικανοποίηση των αναγκών του ασθενή και η προσομοίωση της λειτουργικότητας του φυσικού άκρου αλλά και η δυνατότητα συντήρησης, παραμετροποίησης, αναβάθμισης και παραγωγής αυτού. Για το λόγο αυτό οι παρακάτω προδιαγραφές πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη στον σχεδιασμό.

1. Ευκολία εγκατάστασης, εκμάθησης και παραμετροποίησης του Microcontroller.
2. Αξιοπιστία του λογισμικού του microchip και συμβατότητα με άλλες πλατφόρμες ανάπτυξης λογισμικού.
3. Δυνατότητα λειτουργίας του συστήματος σε περιβάλλον εκτός εργαστηρίου.
4. Χειρισμός συστήματος και εξοπλισμού χωρίς υψηλή τεχνογνωσία και εξοπλισμό υψηλών τεχνολογικών προδιαγραφών.

Από τα παραπάνω και αν ληφθεί παράλληλα υπόψη η λειτουργική πολυπλοκότητα του φυσιολογικού άνω άκρου που μόνο για το χέρι αναπαρίσταται συστημικά από 27 και άνω βαθμούς ελευθερίας (27+ dof), αντιλαμβανόμαστε ότι ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος ελέγχου είναι αρκετά απαιτητικός και ακόμα και σήμερα αποτελεί πρόκληση για τους ερευνητές. Οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές ελέγχου μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Τα σωματοτροφοδοτούμενα προσθετικά συστήματα (body-powered prostheses) και τα εξωτερικά τροφοδοτούμενα συστήματα (externally powered systems).

1.3.1 Σωματοτροφοδοτούμενα προσθετικά συστήματα

Τα σωματοτροφοδοτούμενα προσθετικά συστήματα ελέγχου έκαναν την πρώτη τους εμφάνιση το 1950. Αυτό που επιτυγχάνεται με την προσέγγιση αυτή είναι ότι ο ασθενής μπορεί να αισθανθεί την μυϊκή προσπάθεια που καταβάλει για να χειριστεί το προσθετικό άκρο. Παρέχεται δηλαδή μια μορφή ανάδρασης στον ανάπηρο μέσω μηχανικής διασύνδεσης ακρωτηριασμένου και προσθετικού άκρου. Η διασύνδεση αυτή γίνεται κατά κύριο λόγο με ντίζες (Bowden cables). Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των σωματοτροφοδοτούμενων προσθετικών συστημάτων φαίνονται στον Πίνακα 1-1.

Πίνακας 1-1. Σωματοτροφοδοτούμενων προσθετικών συστημάτων.

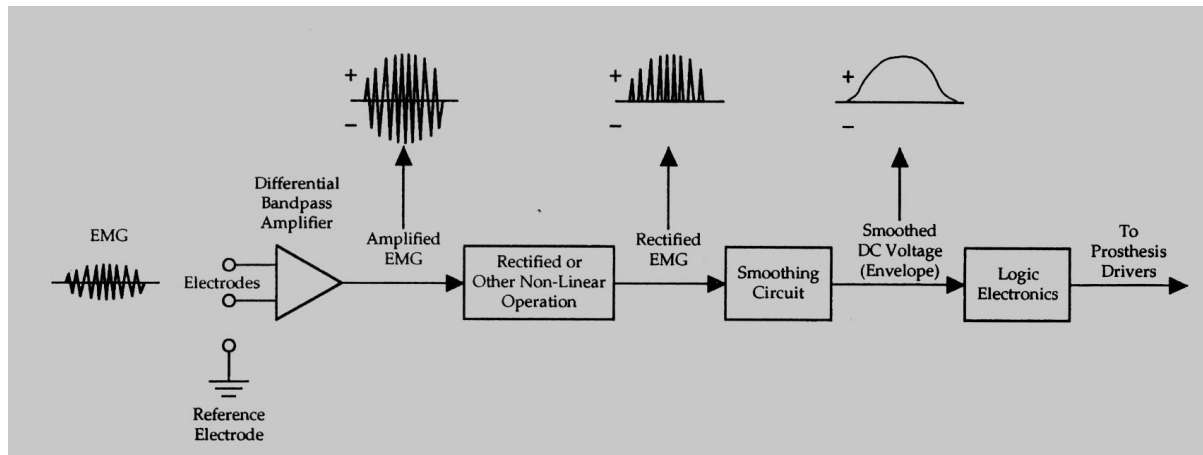
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα (μη επεμβατική μέθοδος)	Μειονεκτήματα (επεμβατική μέθοδος)
Αίσθηση ελέγχου του προσθετικού άκρου	Άβολο στην εφαρμογή	Πρόσθετες χειρουργικές επεμβάσεις για την τοποθέτηση του μηχανισμού ελέγχου
Χαμηλό κόστος	Περιορισμένο εύρος κίνησης	Κίνδυνος μόλυνσης
Αντοχή	Δεν υπάρχει μηχανική υποβοήθηση	Δυσκολία συντήρησης
Ελαφριά κατασκευή	Η δύναμη παρέχεται αποκλειστικά από τον ανάπηρο	
Καθιστά το προσθετικό μέλος επέκταση του σώματος		

1.3.2 Εξωτερικά τροφοδοτούμενα συστήματα

Τα εξωτερικά τροφοδοτούμενα συστήματα δεν χρησιμοποιούν την δύναμη του σώματος ως επενεργητή. Στα συστήματα αυτά γίνεται χρήση πνευματικών ή ηλεκτρομαγνητικών επενεργητών όπως οι ηλεκτροκινητήρες για την υποβοήθηση του προσθετικού. Από τα εξωτερικά τροφοδοτούμενα συστήματα ιδιαίτερα διαδεδομένος είναι ο μυοηλεκτρικός έλεγχος. Σε αυτήν την στρατηγική ελέγχου χρησιμοποιείται το ηλεκτρομυογραφικό σήμα από τους μύες για την οδήγηση του προσθετικού [10]. Ηλεκτρόδια τοποθετούνται επιφανειακά στο δέρμα κοντά στους μύες και ανιχνεύουν ηλεκτρικά σήματα που παράγονται λόγω της σύσπασής τους. Η ένταση του ηλεκτρικού σήματος που παράγεται είναι ανάλογη της έντασης της μυϊκής προσπάθειας. Το σήμα που λαμβάνεται ενισχύεται, επεξεργάζεται και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του προσθετικού. Η μοντελοποίηση ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο Σχ.1-4. Σήμερα ο μυοηλεκτρικός έλεγχος έχει επικρατήσει έναντι όλων των άλλων στρατηγικών. Ωστόσο, δίνει την δυνατότητα στον χρήστη μόνο για έλεγχο της ταχύτητας του προσθετικού, που έχει

αποδειχθεί ότι υστερεί έναντι του ελέγχου θέσης που επιτυγχάνεται στις περιπτώσεις των ελεγκτών EPP [8].

Συγκεκριμένα, στον μυοηλεκτρικό έλεγχο, η ταχύτητα του προσθετικού είναι ανάλογη του σήματος που παράγεται από τους μύες. Όμως, η ανάδραση που πληροφορεί τον χρήστη για την κατάσταση του προσθετικού είναι μόνο οπτική και δεν ενεργοποιεί την ιδιοδεκτική αισθητικότητα του. Από την άλλη πλευρά, το βασικό πλεονέκτημα είναι πως ο μυοηλεκτρικός έλεγχος είναι μια τελείως μη-επεμβατική μέθοδος, κάτι που τελικά έχει οδηγήσει στην επικράτησή του.



Σχήμα 1-4. Παράδειγμα μοντελοποίησης συστήματος μυοηλεκτρικού ελέγχου [10].

1.3.3 Έλεγχος θέσης κλειστού βρόγχου EPP

Με βάση την παραπάνω ανάλυση αντιλαμβανόμαστε ότι η υπάρχουσα προσέγγιση του μυοηλεκτρικού ελέγχου μειονεκτεί ως προς το επίπεδο ελέγχου του προσθετικού. Δεν προσφέρει στον ασθενή την ανάδραση εκείνη που θα του επιτρέψει να λειτουργήσει το προσθετικό σαν φυσική προέκταση του σώματος του. Για να επιτευχθεί ο υποσυνείδητος έλεγχος, ο D.C Simpson εισήγαγε το 1974 την έννοια “Εκτεταμένη Φυσιολογική Ιδιοδεκτικότητα” (Extended Physiological Proprioception-EPP) [10]. Στην τοπολογία αυτή γίνεται χρήση ντίζας και πνευματικών επενεργητών. Οι πνευματικοί επενεργητές χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν τον ανάπηρο στην κίνηση του προσθετικού ενώ η μηχανική διασύνδεση μεταξύ ακρωτηριασμένου και προσθετικού άκρου εξασφαλίζει την ανάδραση. Ο ανάπηρος πλέον αντιλαμβάνεται με τα φυσικά αισθητήρια του σώματος που ευθύνονται για το έλεγχο του άνω άκρου τη θέση του προσθετικού μέλους και η οπτική ανάδραση και άρα η συνειδητή παρακολούθηση της λειτουργίας δεν είναι πλέον απαραίτητη.

Από την άλλη πλευρά, η υλοποίηση του EPP εμφανίζει τα μειονεκτήματα των body-powered συστημάτων. Για να πραγματοποιηθεί η καλωδιακή σύνδεση, απαιτείται πλαστική χειρουργική επέμβαση μετά τον ακρωτηριασμό [19-22]. Υπάρχει δυσκολία στη συντήρηση, κίνδυνος μόλυνσης και μη-αποδεκτό αισθητικό αποτέλεσμα τόσο της πλαστικής, όσο και των καλωδιακών συνδέσεων. Για τους παραπάνω λόγους το EPP εγκαταλείφθηκε και επικράτησε ο μυοηλεκτρικός έλεγχος ως τρόπος χειρισμού προσθετικών συστημάτων [9]. Το πρόβλημα ωστόσο, είναι πως ταυτόχρονα με τα

μειονεκτήματα του EPP, χάθηκε η ανάδραση θέσης στα φυσικά αισθητήρια από τον έλεγχο των προσθετικών άκρων.

Η διάταξη ελέγχου EPP εξαρτάται από τον αριθμό και τον τύπο των διαθέσιμων πηγών ελέγχου. Στην περίπτωση της τοπολογίας ελέγχου που προτείνουμε, πηγή ελέγχου είναι ο μυς που δίνει με τη σύσπασή του το σήμα για να ενεργοποιηθεί το προσθετικό. Στη κλασσική προσέγγιση EPP με την χρήση μηχανικής διασύνδεση ξεχωρίζουμε δύο ειδών διατάξεις, την μονόδρομη (unidirectional) και την αμφίδρομη (bidirectional).

Αν έχουμε μία πηγή ελέγχου μπορούμε να υλοποιήσουμε μια μονόδρομη διάταξη ελέγχου. Στην διάταξη αυτή, η σχέση μεταξύ δύναμης ταχύτητας και θέσης προσθετικού και ακρωτηριασμένου άκρου είναι 1-1 μόνο στην μια κατεύθυνση. Στο παράδειγμα ελέγχου της κάμψης και της έκτασης ενός βραχίονα συνδεδεμένου στην άρθρωση του αγκώνα, με την υλοποίηση μιας μονόδρομης διάταξης, η κίνηση του προσθετικού είναι ανάλογη της μετατόπισης του καλωδίου διασύνδεσης (ντίτζα) στην κάμψη. Αντιθέτως στην έκταση η αναλογία αυτή μπορεί να χαθεί εάν η πηγή ελέγχου κινηθεί ταχύτερα από το προσθετικό, διότι τότε το καλώδιο χαλαρώνει .

Στην περίπτωση που οι πηγές για τον έλεγχο μίας άρθρωσης σχηματίζουν ένα ζεύγος αγωνιστή / ανταγωνιστή τότε μπορούμε να υλοποιήσουμε αμφίδρομη διάταξη ή πλήρη EPP. Αυτή η διάταξη ελέγχου μοιάζει περισσότερο στην φυσική και παρέχει μακράν καλύτερη αίσθηση ελέγχου από την μονόδρομη διάταξη. Η μηχανική διασύνδεση παρέχει μία 1-1 σχέση μεταξύ δύναμης ταχύτητας (και θέσης) προσθετικού και ακρωτηριασμένου άκρου και στις δύο κατευθύνσεις της κίνησης.

Η προτεινόμενη διάταξη αφορά την προσέγγιση του πλήρους EPP με την αντικατάσταση της μηχανικής διασύνδεσης από ασύρματα.

1.3.4 Τηλεχειρισμός-Τηλερομποτική

Ο τηλεχειρισμός μας δίνει την δυνατότητα της καταπολέμησης των μειονεκτημάτων του EPP ελέγχου. Το μοντέλο επικοινωνίας που θα χρησιμοποιήσουμε στην προτεινόμενη διάταξη για την υλοποίηση του τηλεχειρισμού είναι το μοντέλο Master-Slave. Τα συστήματα τηλεχειρισμού αποτελούνται από τρία μέρη:

1. Συσκευή τύπου Master που ελέγχει ο ασθενής-χρήστης
2. Συσκευή τύπου Slave η οποία λειτουργεί με βάση τις εντολές που δέχεται από την συσκευή Master
3. Ελεγκτής που είναι υπεύθυνος για τη δυναμική σύζευξη των συσκευών Master και Slave μεταφέροντας κατάλληλα τις μεταξύ τους κινήσεις και δυνάμεις.

Ο χειριστής της διάταξης, στην περίπτωση μας ο ασθενής ελέγχει μία συσκευή που με την χρήση ενός πρωτοκόλλου ασύρματης ή ενσύρματης επικοινωνίας, στην περίπτωση μας BLE μεταφέρει τις εντολές του στην απομακρυσμένη Slave συσκευή ενώ παράλληλα πληροφορείται από αυτήν για την κατάστασή της (ανάδραση). Ο ελεγκτής ενός τέτοιου συστήματος καθορίζει μια από τις δυο μεταβλητές ισχύος κάθε συσκευής με βάση την απόκριση της αντίστοιχης μεταβλητής στην άλλη συσκευή. Στο

σύστημα μας η μεταβλητή ισχύος που καθορίζει ο Master είναι αυτή της δύναμης ενώ ο Slave καθορίζει την ροπή. Ένα ιδανικό σύστημα τηλεχειρισμού εγγυάται ότι αυτός ο έλεγχος είναι τέλειος και έτσι η μηχανική εμπέδηση του περιβάλλοντος μεταφέρεται αυτούσια στον χειριστή, σαν αυτός να χειρίζεται απευθείας το τηλε-ρομπότ, χωρίς να υπάρχει απόσταση μεταξύ τους. Τότε, το σύστημα τηλεχειρισμού χαρακτηρίζεται ως διαφανές (transparent). Γενικά, η διαφάνεια (transparency) του συστήματος τηλεχειρισμού μπορεί να αξιολογηθεί με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις:

1. την προσέγγιση εμπέδησης, που εστιάζει στην ακρίβεια με την οποία μεταφέρεται η μηχανική εμπέδηση του περιβάλλοντος της Slave συσκευής στον χειριστή [12].
2. την προσέγγιση θέσης-δύναμης, η οποία καθορίζει τη διαφάνεια ανάλογα με το σφάλμα στην παρακολούθηση της θέσης και της δύναμης ανάμεσα στις συσκευές κάθε χρονική στιγμή [7].

1.4 Δομή εργασίας

Στο πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σκοπός της εργασίας, μια σύντομη ανασκόπηση στη βιβλιογραφία, η πρόταση της έρευνας και η δομή της συγγραφής της. Στο δεύτερο κεφάλαιο ακολουθεί η παρουσίαση ασύρματων τεχνολογιών χαμηλής κατανάλωσης και η αιτιολόγηση της επιλογής μίας εξ αυτών καθώς και αντίστοιχου υλικού που θα επιτρέψει την υλοποίηση του ασύρματου EPP για την ανάπτυξη της διάταξης ελέγχου άνω προσθετικού άκρου. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται θεωρητικά η λειτουργία της διάταξης ασύρματου ελέγχου με την χρήση microcontroller και η περιγράφεται η θεωρητική λειτουργία των ηλεκτρομηχανολογικών στοιχείων που αποτελούν την διάταξη. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η δομή και ο σχεδιασμός του λογισμικού της εφαρμογής. Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται η δυνατότητα υλοποίησης του ασύρματου EPP με βάση την αρχιτεκτονική τύπου θέσης-δύναμης για χρήση ελεγκτή και χωρίς την χρήση αυτού. Στο έκτο κεφάλαιο εφαρμόζεται η ασύρματη τοπολογία σε πειραματική διάταξη και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα. Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο ακολουθούν τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.

2 Ασύρματη Επικοινωνία Χαμηλής Κατανάλωσης

2.1 Τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας χαμηλής κατανάλωσης [13]

Η ραγδαία ανάπτυξη του τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και η τεχνολογική επανάσταση του IOT μας προσφέρουν πληθώρα τεχνολογιών για την υλοποίηση του μοντέλου επικοινωνίας τύπου master slave.

Bluetooth Low Energy

Η τεχνολογία αυτή ξεκίνησε από το Nokia Research Centre και υιοθετήθηκε από το Bluetooth Special Interest Group (SIG) το 2007. Στόχος της τεχνολογίας αυτής ήταν να επιτρέψει σε συσκευές που τροφοδοτούνται από πεπερασμένες πηγές (μπαταρίες) να είναι συνδεδεμένες μόνιμως στο internet. Τυπικές συσκευές BLE απαιτείται να μπορούν να λειτουργήσουν για χρόνια χωρίς αλλαγή μπαταρίας. Η τροφοδοσία γίνεται συνήθως από coin cell batteries όπως πχ η CR2032. Η τεχνολογία φιλοδοξεί να δώσει τη δυνατότητα σε συσκευές κινητών τηλεφώνων να δημιουργήσουν ένα δίκτυο (τοπολογία αστέρα αντίστοιχη με αυτή του κλασσικού πρωτοκόλλου Bluetooth) με άλλες συσκευές του περιβάλλοντος τους. Το LE πλεονεκτεί καθότι είναι κομμάτι του κλασσικού πρωτοκόλλου και άρα συμφωνημένο και αποδεκτό από όλη την βιομηχανία των συσκευών ασύρματης επικοινωνίας (standard), με αποτέλεσμα να έχει δοκιμαστεί (tested) εκτεταμένα ως προς τη συμβατότητα (conformance) και την διαλειτουργικότητα (interoperability).

ANT

Η τεχνολογία αυτή λειτουργεί στο φάσμα των 2.4GHz αλλά είναι ιδιόκτητη (proprietary) δηλαδή αποδεκτή από συγκεκριμένους κατασκευαστές συσκευών ασύρματης επικοινωνίας (κλειστό πρωτόκολλο). Η τεχνολογία αυτή αποσκοπούσε αρχικά στη διασύνδεση αισθητήρων φυσικής κατάστασης (fitness) με συσκευές απεικόνισης πληροφορίας όπως έξυπνα ρολόγια ή οθόνες ποδηλάτων. Λόγω της ιδιόκτητης φύσης του πρωτοκόλλου δεν έχει γίνει αντικείμενο εκτεταμένων δοκιμών συμβατότητας (conformance) και διαλειτουργικότητας (interoperability). Ένα θετικό στοιχείο είναι η ευκολία στην υλοποίηση δικτύου. Η τροφοδοσία των συσκευών γίνεται με μπαταρίες τύπου κέρματος (coin cell batteries) και απαιτείται διάρκεια λειτουργίας χρόνων. Πλέον έχει αντικατασταθεί από το ANT+.

ZigBee

Η τεχνολογία αυτή αποτελεί μια εξειδίκευση (specification) χαμηλής κατανάλωσης ασύρματης επικοινωνίας, του standard 802.15.4.2003 του IEEE. Εισάγει ένα πλέγμα δικτύωσης στον ασύρματο χώρο χαμηλής ισχύος και στοχεύει σε εφαρμογές τηλεχειρισμού, αυτοματισμών σπιτιού και έξυπνων μετρητών. Μειονεκτεί στη δυσκολία ανάπτυξης (deployment) λόγω πολυπλοκότητας και στην κατανάλωση που δεν επιτρέπει σε συσκευές τέτοιας τεχνολογίας να λειτουργούν για μεγάλα διαστήματα με πηγές όπως οι μπαταρίες τύπου νομίσματος (coin cell batteries). Τα κανάλια επικοινωνίας μοιάζουν με αυτά του BLE στο εύρος (2MHz) αλλά έχουν μεταξύ τους απόσταση (5MHz) ξεοδεύοντας έτσι το

διαθέσιμο φάσμα. Τέλος απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό κατά την ανάπτυξη καθότι δεν μπορεί να αποφύγει παρεμβολές (frequency hopping technology).

RF4CE

Η τεχνολογία RF4CE (Radio Frequency for Consumer Electronics) είναι βασισμένη στο ZigBee με πρόθεση να ξεπεράσει τα συνήθη προβλήματα με την τεχνολογία υπέρυθρων: Interoperability, Line of Sight και περιορισμένες δυνατότητες ενίσχυσης. Έχει γίνει standardized από το 2009 και υποστηρίζεται από την Texas Instruments και την Freescale. Προοριζόταν αρχικά για έλεγχο συσκευών από απόσταση.

Wi-Fi

Η τεχνολογία αυτή που καθορίζεται από το IEEE 802.11 wireless networking standard χαρακτηρίζεται από την αποτελεσματικότητα της. Η χρήση της είναι βέλτιστη για μεταφορά μεγάλου αριθμού δεδομένων σε μεγάλες ταχύτητες (throughput) αλλά δεν είναι κατάλληλη για τροφοδοσία από κερματοειδείς μπαταρίες (coin cell batteries).

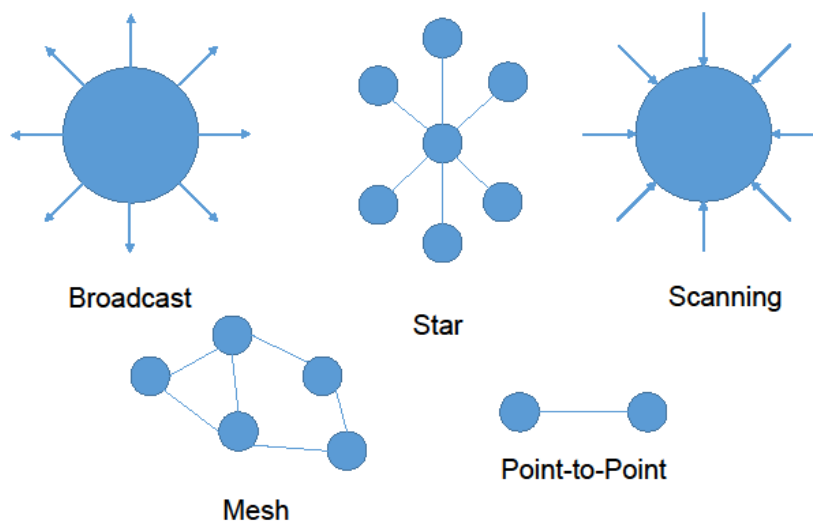
IRDA

Η Infrared Data Association είναι ένα SIG που αποτελείται από 36 μέλη και ασχολείται με τεχνολογία υπέρυθρων. Η τεχνολογία αυτή αν και έχει να παρουσιάσει πολλή μεγάλη ταχύτητα throughput (1Gbps) υποστηρίζεται για πολύ μικρές αποστάσεις (line of sight <10cm). Συγκρινόμενη με τις υπόλοιπες τεχνολογίες εμφανίζει αυξημένη κατανάλωση.

2.1.1 Τοπολογίες διαμόρφωσης δικτύου

Ένας τρόπος να επιλέξουμε τεχνολογία είναι οι τοπολογίες δικτύου που μπορεί να υποστηρίξει. Οι κύριες τοπολογίες δικτύου στην ασύρματη επικοινωνία χαμηλής κατανάλωσης είναι πέντε:

- **Broadcast:** Το μήνυμα στέλνεται και είναι διαθέσιμο να παραληφθεί από όλες τις συσκευές που βρίσκονται εντός ακτίνας αποστολής. Δεν υπάρχει επικύρωση παραλαβής. Η συσκευή που στέλνει μηνύματα δεν δέχεται.
- **Mesh:** Το μήνυμα μπορεί να πάει από ένα οποιοδήποτε σημείο του δικτύου σε ένα άλλο πηδώντας (Hopping) από τους κόμβους του συστήματος.
- **Star:** Η κεντρική συσκευή μπορεί να επικοινωνεί με περισσότερες διασυνδεδεμένες σε αυτή συσκευές.
- **Scanning:** Η συσκευή είναι διαρκώς σε φάση λήψης μηνυμάτων σε αναμονή μετάδοσης εντός εμβέλειας.
- **Point-to-Point:** Διασύνδεση μόνο δύο συσκευών.



Σχήμα 2-1. Τοπολογίες Δικτύων

Πίνακας 2-1 Ασύρματες τεχνολογίες και τοπολογίες που υποστηρίζουν [13].

	BLE	A	A+	Zi	RF	Wi	Ir
Broadcast	+	+1	+1	x	X	X	X
Mesh	+2	+	+	+	+	X	X
Star	+	+	+	+	+	+	X
Scanning	+	+3	+	+	+	X	X
Point to Point	+	+	+	+	+	+	+

LE (Bluetooth low energy), A (ANT), A+ (ANT+), Zi (ZigBee), RF (RF4CE), Wi (Wi-Fi), Ir (IrDA)

1: Η συσκευή υποστηρίζει ταυτόχρονα και listening mode

2: Το LE υποστηρίζει Mesh με πρόσθετη εφαρμογή

3: Δεν επιτρέπεται η σύνδεση και υπάρχει μεγάλη κατανάλωση

2.1.2 Ευκολία υλοποίησης εφαρμογής

Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις τεχνολογίες με βάση το μέγεθος του κώδικα (software) και το υλικό (hardware) που απαιτείται για την υλοποίηση μιας απλής εφαρμογής.

BLE

Οι συσκευές αυτές χωρίζονται σε single mode (only LE) και Bluetooth+LE. Οι πρώτες περιλαμβάνουν τον μικροεπεξεργαστή και το σύστημα ραδιοεπικοινωνίας στο ίδιο chip. Η στοίβα πρωτοκόλλου είναι υλοποιημένη (integrated) εντός του πυριτίου και το API που δίνεται στον προγραμματιστή είναι σχετικά απλό με αποτέλεσμα να μην απαιτείται ιδιαίτερη προσπάθεια στην υλοποίηση καινούργιων εφαρμογών. Η ίδια ευκολία διέπει και τις συσκευές Bluetooth+LE.

RF4CE

Τεχνολογία αντίστοιχης ευκολίας με αυτή του BLE. Απαιτείται εισαγωγή της στοίβας πρωτοκόλλου στον host processor.

ANT

Συνήθως χρειάζονται 2 chip και ο προγραμματιστής πρέπει να επιλέξει το σύστημα ραδιοεπικοινωνίας και τον μικροεπεξεργαστή που θα χρησιμοποιήσει. Για το Ant+ απαιτείται certification το οποίο και κοστίζει. Η στοίβα πρωτοκόλλου θεωρείται μαύρο κουτί και τα προφίλ σχεδιάζονται σε συνεργασία της ομάδας που υποστηρίζει την τεχνολογία και των προγραμματιστών κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την ευκολία στην ανάπτυξη εφαρμογών.

IrDA

Απλό πρωτόκολλο που υποστηρίζεται από ολοκληρωμένο κύκλωμα επεξεργαστή και λυχνία υπέρυθρων. Η πολυπλοκότητα αυξάνει για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Απαιτείται certification από την IrDA.

Wi-Fi

Η πολυπλοκότερη τεχνολογία από άποψη υλοποίησης. Απαιτεί οδηγούς και πλήρη στοίβα πρωτοκόλλου. Το hardware πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να πληροί τις προδιαγραφές που τίθενται από το πρωτόκολλο. Απαιτείται certification υψηλού κόστους για την δημιουργία νέων προϊόντων.

2.1.3 Κόστος κατασκευής συσκευής

Το κόστος αυτών των συσκευών εξαρτάται κυρίως από τον επεξεργαστή, το σύστημα ραδιοεπικοινωνίας, την κεραία, την μπαταρία και τον υποδοχέα της, τον ρυθμιστή τάσης (regulator) και το PCB. Σημαντικό επίσης κόστος είναι και αυτό του κρυστάλλου που στις ασύρματες τεχνολογίες απαιτείται να είναι υψηλής ποιότητας.

	Processor	Radio	Antenna	Regulator	PCB Size
LE	N/A	\$2.95/1k ¹ [30]	Printed 8mm ²	N/A	20mm ² ³
A	Slow	\$3.95/10k [31]	Printed 'F' 15mm	N/A	125mm ² [32]
A+	N/A	\$3.33/1k [33]	Printed 'F' 15mm	N/A	306mm ² [34]
Zi	N/A	\$3.20/1k [35]	Printed 'F' 15mm	N/A	305mm ² [29]
RF	N/A	\$2.75/1k [36]	Printed 'F' 15mm	N/A	305mm ² [29]
Wi	High	\$3	Printed 8mm ²	\$1.50 ⁴	60mm ²
Ni	Slow	\$1.60/10k [37]	Metal 2cm	N/A	300mm ² [38]
Ir	N/A	\$1.97/10k [39]	8mm	N/A	21 mm ² + CPU [40]
NF	High	\$1	50mmx 30mm	\$0.33 ⁵	100mm ² [41]

Key: LE (Bluetooth low energy), A (ANT), A+ (ANT+), Zi (ZigBee), RF (RF4CE), Wi (Wi-Fi), Ni (Nike+), Ir (IrDA), NF (NFC)

Notes: ¹ if used as part of a Bluetooth design, the cost would be less than a 20% adder.

² Cambridge Silicon Radio (CSR) patented printed antenna design may be used with CSR chips.

³ Bluetooth and LE [42]. LE only is aimed at medium cost PCB technologies, therefore modules are approximately 96mm² including antenna [43].

⁴ Wi-Fi requires 1v8 @200mA and 3v3 @400mA = £0.86. At an exchange rate of £1.75 to \$1 => \$1.50 [44] [45].

⁵ NFC requires 50mA @ 3v3 = £0.194. At an exchange rate of £1.75 to \$1 => \$0.33 [46].

Σχήμα 2-2. Κόστη κατασκευής ανά τεχνολογία.

2.1.4 Αποδοτικότητα μετάδοσης δεδομένων

Μια ασύρματη μετάδοση αποτελείται από δύο βασικά συστατικά, το payload και το overhead. Το overhead χρησιμοποιείται για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία της μετάδοσης. Η αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου μπορεί να μετρηθεί ως ο λόγος του μεγέθους των πραγματικών δεδομένων που θέλουμε να στείλουμε (payload) ως προς το συνολικό μέγεθος του πακέτου. Ένα μη αποδοτικό πρωτόκολλο ξοδεύει χρόνο στην αποστολή πακέτων με μικρό ποσοστό πραγματικής πληροφορίας εξαντλώντας έτσι την μπαταρία χωρίς την επίτευξη αποτελέσματος. Ένα αποδοτικό πρωτόκολλο θα μεταδώσει πολύ περισσότερη πληροφορία με την χρήση της ίδια ενέργειας. Στις ακραίες τιμές της αποδοτικότητας υπάρχει μια σχέση αντιστρόφως ανάλογης εξάρτησης με την αξιοπιστία. Ένα πρωτόκολλο που δεν περιλαμβάνει αρκετά bit για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της μετάδοσης μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια όλων των πακέτων. Το BLE υπερτερεί των άλλων τεχνολογιών με 67% αποδοτικότητα (efficiency) χωρίς έτσι να χάνει σε αξιοπιστία (reliability).

2.1.5 Αποδοτικότητα κατανάλωσης ενέργειας

ANT

- 32 bytes/second = 256bits/second
- 61μA κατανάλωση, για τροφοδοσία 3v coin cell battery
- Power = VI = 3V x 61μA = 0.183mW
- Power per bit = 0.71μW/bit

BLE

Ένα πακέτο εκπέμπεται κατά μέσο όρο κάθε 500ms. Το πακέτο εμπεριέχει 20 byte χρήσιμης πληροφορίας και η κατανάλωση είναι 49μA στα 3V. Έχουμε μετάδοση και στα 3 κανάλια για αύξηση της σθεναρότητας του πρωτοκόλλου.

- Power: 49μA x 3V = 0.147mW
- Bytes per second = 20 x (1/500ms) x 3 channels =120 bytes/second
- Bits per second = 960 bits/sec
- Power per bit =0.153μW/bit

Η παραπάνω τιμή μπορεί να μειωθεί με αύξηση του φορτίου (payload) και non-connectable advertisements.

IrDA

Για μία εκπομπή με 14 bit payload και sleep mode επεξεργαστή με κατανάλωση 0.1μA (αμελητέα) έχω κατά μέσο όρο 55 μA κατανάλωση.

- Power: 55μA x 3V = 0,165mW
- Bits 14
- Power per bit 11.7μW/bit

Wi-Fi

Η κατανάλωση της τεχνολογίας αυτής είναι περίπου 116mA στα 1.8V για ταχύτητες μετάδοσης 40Mbps σε πακέτα UDP. Το πρόβλημα είναι ότι η κατανάλωση δεν μειώνεται για χαμηλότερες ταχύτητες.

- Power = 116mA x 1.8V = 0.210W
- Power per bit = 0.00525μW/bit

ZigBee

Μια συσκευή της τεχνολογίας αυτής καταναλώνει 0.035606W για 24 Bytes

- Bits per second = 192bits

- Power per bit = 185.9 μ W/bit

2.1.6 Εμβέλεια

Η εμβέλεια στις ασύρματες τεχνολογίες εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ευαισθησία RF του δέκτη και την ισχύ εκπομπής του εκπομπού. Σε πραγματικές συνθήκες όμως επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, τη συχνότητα του φορέως, το ντιζάιν της συσκευής και το λογισμικό που τρέχει πάνω σε αυτή. Οι ονομαστικές τιμές που δίνονται για την εμβέλεια, συνήθως μετρούνται σε ιδανικά περιβάλλοντα και τείνουν να ξεπερνούν κατά πολύ τις τιμές που μπορούν να επιτευχθούν σε πραγματικές εφαρμογές. Βασικός λόγος είναι ότι η συχνότητα 2.4GHz εξασθενεί από την αλληλεπίδραση της με το ανθρώπινο σώμα. Η λίστα που ακολουθεί δίνει τυπικές τιμές για τις προαναφερθείσες τεχνολογίες σε πραγματικά περιβάλλοντα (όχι αποστειρωμένα εργαστηριακά δεδομένα) όπου υπάρχει θόρυβος και παρεμβολές :

- IrDA ~ 5cm
- Ant(+) ~ 30m
- ZigBee ~ 100m
- RF4CE based on ZigBee ~ 100m
- Wi-Fi ~ 150m
- BLE ~ 280m

2.1.7 Throughput

Μια σημαντική παράμετρος επιλογής ασύρματης τεχνολογίας είναι ο ρυθμός αποστολής δεδομένων. Η λίστα που ακολουθεί περιλαμβάνει τυπικές τιμές για τις τεχνολογίες που παρουσιάσαμε:

- IrDA ~ 1Gbps
- Ant(+) ~ 29Kbps
- ZigBee ~ 100Kbps
- RF4CE based on ZigBee ~ 100Kbps
- Wi-Fi (lowest power 802.11b mode) ~ 6Mbps
- BLE ~ 305Kbps

2.1.8 Latency

Η παράμετρος αυτή καθορίζει το χρόνο από την στιγμή αποστολής του πακέτου μέχρι την στιγμή αντίδρασης του δέκτη σε αυτό. Τυπικές τιμές αποτυπώνονται στην λίστα που ακολουθεί:

- IrDA ~ 25ms

- Ant (+) ~ “zero”
- ZigBee ~ 20ms
- Wi-Fi (lowest power 802.11b mode) ~ 1.5ms
- BLE ~ 2.5ms

Χαμηλές τιμές τις παραμέτρου αυτής επιτυγχάνονται με αύξηση της κατανάλωσης ισχύος. Τεχνολογίες όπως Ant και Wi-Fi απαιτούν από τον δέκτη να ‘ακούει’ συνεχώς καταναλώνοντας έτσι αισθητά περισσότερο από τις άλλες τεχνολογίες. Η τεχνολογία BLE από την άλλη πλευρά μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση χωρίς την αύξηση της κατανάλωσης μετά την επίτευξη σύνδεσης.

2.1.9 Επιλογή τεχνολογίας

Η εφαρμογή που αναπτύσσουμε απαιτεί μετάδοση πληροφορίας σε πολύ γρήγορο ρυθμό με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας καθώς το κομμάτι του master μηχανισμού (microcontroller + dc motor circuit) θα βρίσκεται εντός του ακρωτηριασμένου άκρου και θα τροφοδοτείται από μπαταρία. Η πληροφορία που ανταλλάσσουμε δεν είναι μεγάλη σε μέγεθος (3 bytes data payload αρκούν) αλλά απαιτείται να είναι διαθέσιμη στα master slave microchips σε ταχύτητες τέτοιες ώστε η διάταξη να μπορεί να ανταποκρίνεται στην συχνότητα που λειτουργεί το φυσικό σύστημα. Με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε η τεχνολογία BLE είναι αυτή που καλύπτει τις παραπάνω προδιαγραφές.

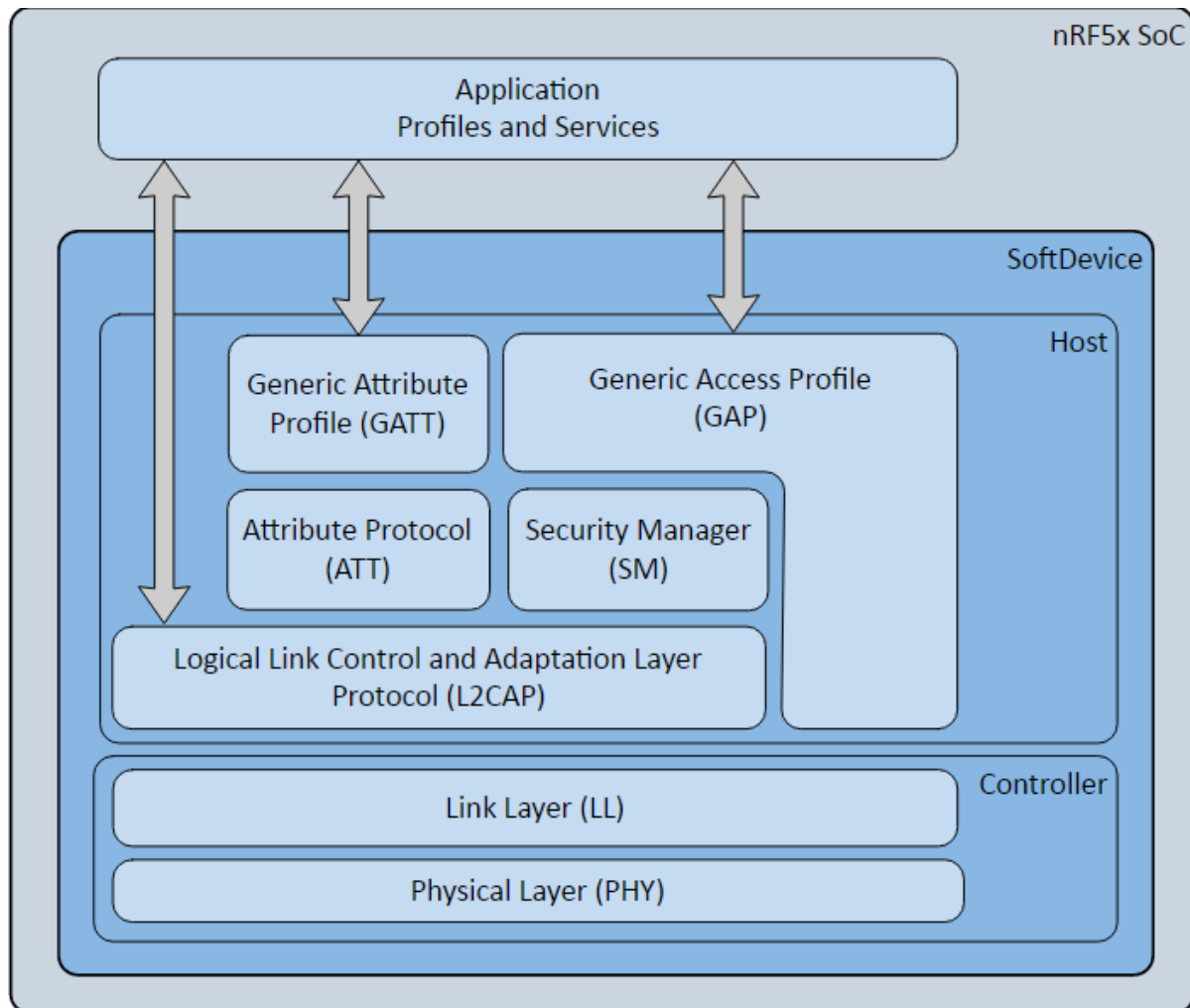
2.2 Πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth Low Energy

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας BLE που υποστηρίζεται από συσκευές Bluetooth 4.0+ και καθορίζεται από το Bluetooth SIG [3], είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης. Υποστηρίζει επικοινωνία σε μέση απόσταση (<280m) . Το BLE διαθέτει πολυεπίπεδη στοίβα πρωτοκόλλου (layered protocol stack) ειδικά σχεδιασμένη για την αποτελεσματική μεταφορά μικρής ποσότητας δεδομένων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, πράγμα που το καθιστά προτιμητέο σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα για συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία. Ο μέγιστος ρυθμός αποστολής δεδομένων (connection interval) που μπορεί να επιτευχθεί για πακέτα μέχρι 20 bytes είναι τα 7.5ms. Η στοίβα πρωτοκόλλου BLE αποτελείται από τα παρακάτω:

- 2.4-GHz RF physical layer (PHY) με ρυθμό μετάδοσης 1 Mbps
- Link Layer (LL) που καθορίζει τον χρονοισμό και την δομή (format) των πακέτων για το PHY
- Host Control Interface (HCI) για την διασύνδεση του επιπέδου ελεγκτή υλικού (hardware controller layer PHY+LL) με το firmware host επίπεδο της στοίβας.
- Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP) που δομεί την πληροφορία σε πακέτα για αποστολή και αποδομεί τα πακέτα που λαμβάνονται σε πληροφορία.
- Attribute Protocol (ATT) που καθορίζει την οργάνωση και πρόσβαση στην πληροφορία εφαρμογής (application data)

- Security Manager (SM) που παρέχει μηχανισμούς για την ασφαλή ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών.
- Generic Attribute Profile (GATT) που καθορίζει μεθόδους για την πρόσβαση στα application data που διαμορφώνονται στο ATT layer.
- Generic Access Profile (GAP) που καθορίζει τον τρόπο που δύο συσκευές BLE αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους.

Πάνω από τη στοίβα πρωτοκόλλου στέκονται τα προφίλ και οι υπηρεσίες που είτε παρέχονται από το εκάστοτε SDK (standard development kit) της εφαρμογής είτε δημιουργούνται από τον χρήστη.



Σχήμα 2-3. BLE stack for Nordic Soft Device 130. [14]

Η ανάπτυξη εφαρμογών πάνω σε SoC's (System on Chip) που υποστηρίζουν επικοινωνία BLE είναι ιδιαίτερα απαιτητική λόγω της πολυπλοκότητας του πρωτοκόλλου ειδικότερα όταν ο προγραμματιστής πρέπει να καθορίσει μόνος του διάφορα επίπεδα του πρωτοκόλλου. Για το λόγο αυτό συσκευές που προορίζονται για εμπορική χρήση περιλαμβάνουν SDK που απλοποιούν το στήσιμο εφαρμογών με την χρήση easy-to-configure GUI. Για την ανάπτυξη εφαρμογών στα BLE SoC's είναι απαραίτητο να γίνουν κατανοητά τα παρακάτω:

- Δημιουργία σύνδεσης μεταξύ δύο BLE συσκευών (GAP)
- Κατανόηση της διαμόρφωσης των πακέτων που μεταφέρουν την πληροφορία, της ανταλλαγής των πακέτων αυτών μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και της διαχείρισης της πληροφορίας που αυτά περιλαμβάνουν (GATT)
- Διαμόρφωση των προδιαγραφών της εφαρμογής ώστε αυτές να αντιστοιχηθούν με τη λειτουργία που καθορίζεται από τα GAP και GATT

2.2.1 Generic Access Profile (GAP)

Η διαδικασία σύνδεσης και επικοινωνίας δύο συσκευών BLE διαμορφώνεται πρωταρχικά από το GAP. Το προφίλ αυτό καθορίζει 4 βασικούς ρόλους και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών.

- **Broadcaster:** Ο ρόλος αυτός προορίζεται για εκπομπή πληροφορίας (broadcasting). Δεν προβλέπεται σύνδεση με οποιοδήποτε άλλο ρόλο και για αυτό δεν υποστηρίζεται και οποιαδήποτε μορφή ανταλλαγής πληροφορίας (request, response operations) με άλλες συσκευές με χρήση παρεχόμενων υπηρεσιών (services). Η μόνη πληροφορία που διακινείται είναι αυτή που περιλαμβάνεται στο πακέτο εκπομπής (advertisement payload). Η επικοινωνία είναι μονόδρομη και δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει συγκεκριμένος παραλήπτης. Ένα παράδειγμα λειτουργίας συσκευής BLE στο ρόλο αυτό είναι τα beacons (φάροι). Τα beacons εκπέμπουν συνεχώς μηνύματα τα οποία μπορεί να εξυπηρετούν διαφημιστικούς σκοπούς χωρίς να περιμένουν κάποια απάντηση.
- **Observer:** Ο ρόλος αυτός προορίζεται για την ανίχνευση μηνυμάτων εκπομπής (advertisement packets) αλλά αποτρέπει τη σύνδεση με οποιαδήποτε άλλη συσκευή. Είναι το δυικό του broadcaster. Λειτουργεί σαν ραδιοφωνικός δέκτης που μονίμως δέχεται πληροφορία αλλά δεν μπορεί να επικοινωνήσει πίσω με την πηγή της πληροφορίας. Παράδειγμα συσκευής σε τέτοιο ρόλο αποτελούν εφαρμογές smartphones που μας επιτρέπουν να βλέπουμε μηνύματα από broadcasters σε εμπορικά κέντρα.
- **GAP Peripheral:** Στη λειτουργία αυτή η συσκευή εκτός από την εκπομπή πακέτων πληροφορίας (advertisement packets) επιτρέπει σε άλλες συσκευές να συνδεθούν πάνω της. Μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες (services) και να εξυπηρετεί ή να εκτελεί αιτήματα ανάλογα με τον GATT profile ρόλο (master-slave). Δεν μπορεί να ξεκινήσει διαδικασία σύνδεσης αλλά μπορεί να φιλτράρει τις συσκευές που συνδέονται πάνω της.
- **GAP Central:** Στην λειτουργία αυτή η συσκευή σαρώνει (scans) συνεχώς για άλλες συσκευές οι οποίες βρίσκονται σε ρόλο Peripheral. Μπορεί να εκκινήσει την διαδικασία σύνδεσης. Το central διαμορφώνει τους χρόνους στους οποίους θα ανταλλάσσονται τα δεδομένα (Connection Interval).

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι για να υπάρξει διασύνδεση μεταξύ δύο συσκευών σε αυτό το πρωτόκολλο πρέπει να υπάρχει το ζεύγος central-peripheral. Στην αρχική έκδοση του πρωτοκόλλου επιτρεπόταν μόνο ένα ζεύγος αλλά από το Bluetooth 4.1 και μετά ένα central device μπορεί να συνδεθεί

ταυτόχρονα με παραπάνω από ένα peripheral. Μπορούμε να ομαδοποιήσουμε τους παραπάνω ρόλους σε δύο κατηγορίες, advertiser και scanner) που χαρακτηρίζονται από τα εξής μεγέθη:

- Advertiser (broadcaster, peripheral) / Advertising Interval: Είναι ρυθμός εκπομπής advertising πακέτων. Μπορεί να κυμαίνεται από μερικά ms μέχρι 7.5 s και καθορίζει την κατανάλωση της συσκευής. Ο χρόνος αυτός δεν σχετίζεται με το connection interval, δεν καθορίζει δηλαδή το ρυθμό που ανταλλάσσουμε πληροφορία μεταξύ δυο συσκευών όταν αυτές είναι συνδεδεμένες. Πρακτικά το μέγεθος αυτό καθορίζει το πόσο εύκολα μπορούμε να ανιχνεύουμε (scan) μια συσκευή BLE. Αν μειώσουμε το advertising interval αυξάνουμε την κατανάλωση, αλλά αυξάνουμε και τα πακέτα που εκπέμπουμε στην μονάδα του χρόνου. Η διάρκεια αποστολής του πακέτου είναι αρκετά μικρότερη (της τάξης μερικών ms).
- Scanner (obServer, central)- Scan window / Scan Interval: Το παράθυρο ανίχνευσης είναι ο χρόνος εκείνος για τον οποίο η συσκευή central ψάχνει για συσκευές peripheral. Σε αυτή την κατάσταση έχουμε υψηλή κατανάλωση ενέργειας και για αυτό θέλουμε να έχουμε scanning window όσο το δυνατόν μικρότερο. Στην γενική περίπτωση παραμετροποιούμε το διάστημα αυτό ανάλογα με το advertising interval των συσκευών που ψάχνουμε. Αν πχ έχουμε μια συσκευή central να σκανάρει για 100 ms κάθε 1 s (100ms scan window, 1s scan interval, 10% scanning time 90% idle) τότε αν το advertising interval των peripheral συσκευών με τις οποίες προσπαθούμε να έρθουμε σε επαφή είναι 1 s υπάρχει περίπτωση να μην τις ανιχνεύσουμε ποτέ.

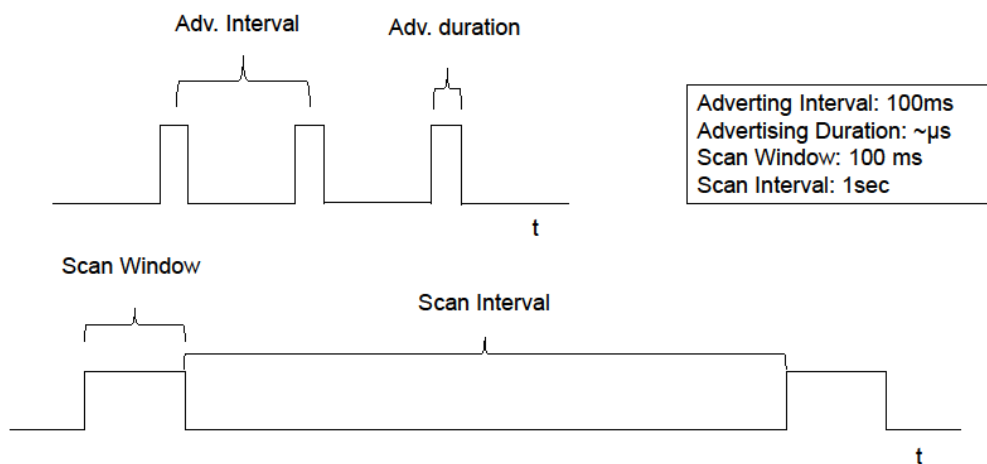
Όπως βλέπουμε από το Σχ. 2-4 η διάρκεια του advertisement είναι πολύ μικρή και εξαρτάται από το payload που έχει ορίσει ο προγραμματιστής. Γενικά οι παράμετροι αυτοί είναι σημαντικές κατά την προσπάθεια επίτευξης σύνδεσης μεταξύ δύο συσκευών BLE είτε κατά την προσπάθεια επανασύνδεσης όταν για κάποιο λόγο η σύνδεση διακοπεί.

Οι τελευταίες αλλά σημαντικότερες για την εφαρμογή μας παράμετροι που καθορίζονται από το GAP προφίλ είναι οι παράμετροι σύνδεσης (Connection Parameters). Connection Interval και αφορά το ρυθμό που ανταλλάσσεται πληροφορία σε μία σύνδεση. Γενικά κάθε ρόλος (central, peripheral) έχει τις δικές του προκαθορισμένες προτιμήσεις (preferences) αλλά είναι οι παράμετροι του central που επιβάλλονται στον peripheral.

Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- Minimum & Maximum Connection Interval: Καθορίζει τον μέγιστο και τον ελάχιστο ρυθμό αποστολής δεδομένων. Η ελάχιστη τιμή στα περισσότερα SDK's είναι τα 7.5 ms και η μέγιστη τα 4 sec. Η τιμή αυτή στην πράξη επηρεάζεται και από το μέγεθος της πληροφορίας (Buffer) που θέλουμε να στείλουμε. Μπορούμε να στέλνουμε πακέτα πληροφορίας μεταξύ των δύο συσκευών όχι συχνότερα από το min connection interval. Αν πχ η παράμετρος έχει οριστεί στα 200 ms και εμείς θέλουμε να μεταδίδουμε τις τιμές μιας παραμέτρου που μεταβάλλεται κάθε 100 ms τότε η πληροφορία ενοποιείται και αποστέλλεται όταν παρέλθει το χρονικό διάστημα των 200 ms.

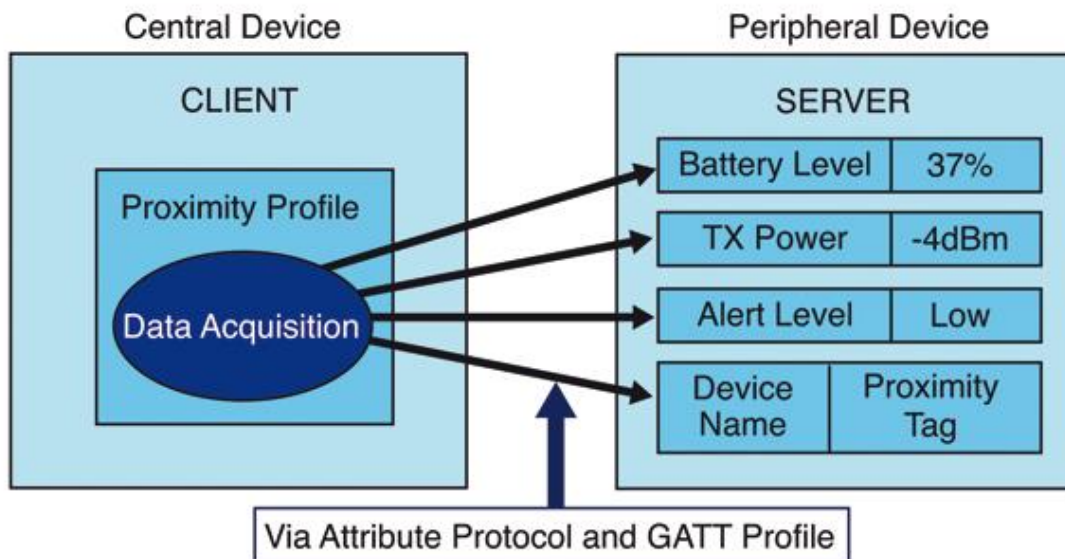
- **Slave Latency:** Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο επικεντρώνεται στην χαμηλή κατανάλωση. Είναι επιθυμητό λοιπόν όταν ο επεξεργαστής δεν έχει δεδομένα να διαχειριστεί να βρίσκεται σε sleep mode. Η παράμετρος αυτή καθορίζει τον αριθμό των connection events που μπορεί να αγνοήσει ένα peripheral αν αυτά δεν περιέχουν πληροφορία.
- **Connection Supervision Timeout:** Η παράμετρος αυτή καθορίζει το χρόνο που γίνεται έλεγχος ώστε να διαπιστωθεί αν πράγματι διατηρείται η σύνδεση.



Σχήμα 2-4. Παράδειγμα παραμέτρων GAP προφίλ.

Η διαδικασία επίτευξης σύνδεσης μεταξύ δύο συσκευών με βάση το GAP προφίλ που παρουσιάζεται στο Σχ. 2-5 ξεκινάει με την συσκευή σε ρόλο peripheral να ξεκινάει την εκπομπή πακέτων advertisements. Τα πακέτα αυτά εκπέμπονται σε συχνότητα που καθορίζεται από το advertising interval. Όταν η central συσκευή ανιχνεύσει τα πακέτα αυτά ξεκινά την διαδικασία της σύνδεσης επιβάλλοντας τις παραμέτρους σύνδεσης που έχουν προκαθοριστεί. Η περιφερειακή συσκευή μπορεί να προτείνει τις δικές της παραμέτρους αλλά αυτές θα γίνουν δεκτές από την κεντρική συσκευή μόνο αν είναι εντός των ορίων των δικών της παραμέτρων. Έπειτα από τον συγχρονισμό η επικοινωνία συνεχίζεται με κοινές πλέον με την κεντρική και την περιφερειακή συσκευή να έχουν τις ίδιες παραμέτρους σύνδεσης.

τις υπηρεσίες που προσφέρει ο sever πρέπει να αποκτήσει αυτή την γνώση μέσω της ανίχνευση υπηρεσιών (service discovery).



Σχήμα 2-6. Παράδειγμα πρόσβασης ενός Client στην πληροφορία που προσφέρει ο Server μέσω ATT/GATT.

Πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο που το σύνηθες είναι να υπάρχει η αντιστοιχία Peripheral/Server, Central/Client, οι ρόλοι μπορούν να εναλλάσσονται. Αυτό σημαίνει ότι ένα central device μπορεί να είναι ταυτόχρονα και Server εκτός από Client και να απαντά με τη σειρά του σε request που γίνονται από τη συσκευή peripheral που τώρα παίζει το ρόλο του Client.

2.2.3 GATT data format

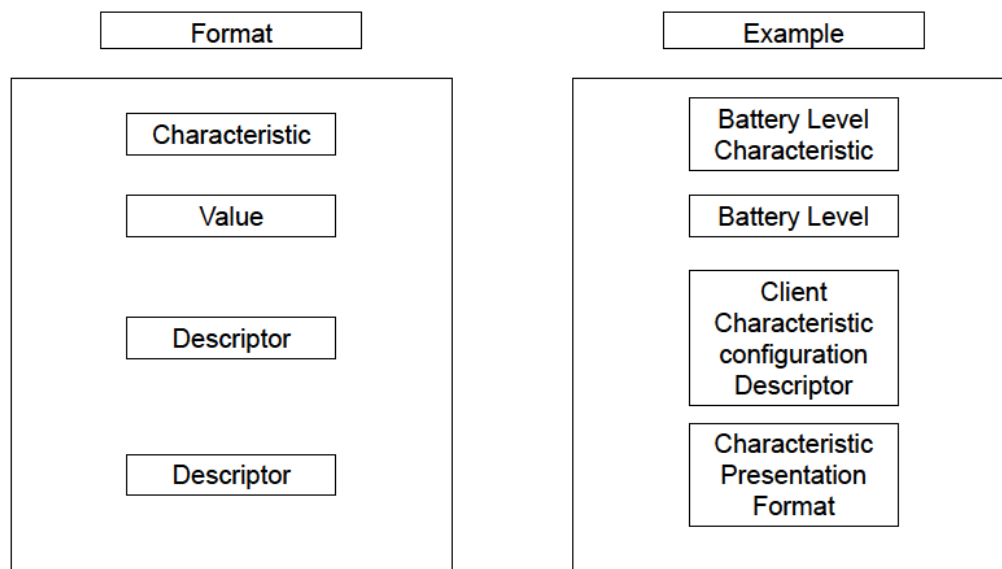
Ο GATT Server όπως προαναφέραμε δομεί την πληροφορία με βάση τα Attributes, Characteristics και Services. Κάθε Service περιέχει ένα ή περισσότερα Characteristics και κάθε characteristic συντίθεται από Attributes τα οποία περιέχουν και την πληροφορία που θέλουμε να διακινήσουμε μέσα από την σύνδεση δύο συσκευών BLE. Το attribute αποτελεί το θεμελιώδες δοχείο (container) μια διακριτής πληροφορίας. Η δομή κάθε attribute είναι η εξής και φαίνεται στο σχήμα.

- Attribute Handle: Χρησιμοποιείται ώστε να έχουμε πρόσβαση στο συγκεκριμένο attribute.
- Attribute Type: 16-bit UUID προσδιορισμένο από το Bluetooth SIG που καθορίζει τον τύπο πληροφορίας που βρίσκεται μέσα στο attribute
- Attribute Value: Το κομμάτι της πληροφορίας που περιέχεται στο Attribute
- Attribute Permission: Καθορίζει τα δικαιώματα που δίνονται πάνω στην συγκεκριμένη πληροφορία (read/write permissions) και την ασφάλεια που χαρακτηρίζει το attribute (security requirements).

Ο GATT Server αποτελείται από πολλά attributes τα οποία βρίσκονται αποθηκευμένα στη βάση δεδομένων γνωστή ως “attribute database”. Ο GATT Client κάνοντας χρήση του Attribute Handle μπορεί να έχει πρόσβαση στην πληροφορία που εμπεριέχεται στο συγκεκριμένο attribute της βάσης δεδομένων και να εκτελέσει λειτουργίες εγγραφής και διαβάσματος (read write operations) αν αυτό επιτρέπεται από το Attribute Permission. Η γνώση του Attribute Handle παρέχεται στον Client μέσω του Service Discovery. Το Characteristic με την σειρά του αποτελεί μία σύνθεση των παρακάτω attributes:

- Characteristic Declaration Attribute: Σηματοδοτεί το attribute έναρξης του συγκεκριμένου characteristic. Από εκεί και πέρα τα byte που θα διαβάσουμε αφορούν τα παρακάτω Attributes
- Characteristic Value Attribute: Τιμή της πληροφορίας του συγκεκριμένου characteristic
- Characteristic Descriptor Attribute: Προαιρετικά Attributes που περιέχουν πληροφορία για την τιμή του Characteristic

Στο Σχ. 2-7 φαίνεται το παράδειγμα ενός χαρακτηριστικού του GATT προφίλ. Η υπηρεσία (Service) του GATT Server αποτελεί σύνθεση ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών συνδεδεμένων λογικά μεταξύ τους ώστε να προσδίδεται στην συσκευή BLE συγκεκριμένη λειτουργικότητα.



Σχήμα 2-7. Characteristic format example.

Το Bluetooth SIG προσφέρει ένα σύνολο προκαθορισμένων υπηρεσιών που ζητούνται συχνά από τέτοιου τύπου συσκευές. Επιπροσθέτως η στοίβα (stack) επιτρέπει στον χρήστη τον προσδιορισμό και την υλοποίηση υπηρεσιών πέραν των καθορισμένων που μπορούν να περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά είτε προκαθορισμένα είτε ορισμένα από τον χρήστη.

Εκτός από τον ορισμό της δομής της πληροφορίας το GATT, επίπεδο της BLE στοίβας καθορίζει και ένα σύνολο διαδικασιών και μεθόδων ώστε ο Client να μπορέσει να ανακαλύψει (discover) και να αποκτήσει πρόσβαση στην πληροφορία που περιέχει ο Server. Στην διαδικασία του service discovery που ξεκινά αμέσως μετά την ζεύξη των δύο συσκευών ο Client χρησιμοποιεί της μεθόδους αυτές ώστε να ανακαλύψει (discover) τμήμα ή και ολόκληρη την βάση δεδομένων που περιέχει ο Server.

2.3 Επιλογή BLE chipset

Η λειτουργία της προτεινόμενης διάταξης προς υλοποίηση απαιτεί την λήψη και την επεξεργασία σημάτων από αισθητήρες. Ένας προγραμματιζόμενος μικροελεγκτής αποτελεί την βέλτιστη λύση. Οι περισσότεροι πωλητές (vendors) BLE chip ελέγχου ραδιοεπικοινωνίας περιλαμβάνουν στο chip και τον μικροελεγκτή που είναι απαραίτητος για τον έλεγχο της ηλεκτρομηχανολογικής διάταξης. Για τα Chipsets αυτά η κατανάλωση καθορίζεται κυρίως από το ράδιο και ειδικότερα από την κατανάλωση εκπομπής, λήψης (TX/RX). Οι τιμές κυμαίνονται από 5mA μέχρι 8mA. Από τον Πίνακα 2-2 βλέπουμε ότι τα chipset της Nordic υπερέρχουν έναντι των υπολοίπων.

Πίνακας 2-2. Κατανάλωση chipset σε εκπομπή/λήψη.

PART	Current RX/TX(0dbm)
Texas Instruments CC2640	5.9mA/6.1mA
Nordic Semiconductor nRF52832/nRF51822	5.0mA/4.6mA
Freescale KW40Z	6.5mA/8.4mA
Silicon Labs Blue Gecko	7.5mA/8.3mA
Cypress PSoC 4 BLE	15.6mA/16.4mA

Μία ακόμα σημαντική παράμετρος ειδικά σε εφαρμογές που απαιτούν επικοινωνία από απόσταση μεγαλύτερη του 1 μέτρου είναι η ισχύς εκπομπής (TX power) και η ευαισθησία λήψης.

Πίνακας 2-3. RF performance.

Part	TX Power	Receive Sensitivity
Texas Instruments CC2640	+5dBm	-97dBm
Nordic Semiconductor nRF52832	+4dBm	-96dBm
Freescale KW40Z	+5dBm	-91dBm
Silicon Labs Blue Gecko	+10dBm	-95dBm
Cypress PSoC 4 BLE	+3dBm	-92dBm

TI CC2540/CC2541	+4dBm	-89dBm/-94dBm
Nordic Semiconductor nRF51822	+4dBm	-93dBm
CSR CSR101x	7.5dBm	-92.5dBm

Το όριο στην ισχύ εκπομπής είναι τα 10 dBm. Η ισχύς μπορεί να αυξηθεί με την χρήση πρόσθετων εξαρτημάτων αλλά ταυτόχρονα θα αυξηθεί και η κατανάλωση. Η εφαρμογή μας δεν απαιτεί ιδιαίτερα μεγάλη ισχύ εκπομπής ούτε ευαισθησία λήψης καθότι η απόσταση master slave θα είναι μικρή.

Η επεξεργαστική ισχύς καθορίζει την ικανότητα του chip να υλοποιεί το BLE protocol stack και ταυτόχρονα να συλλέγει και να επεξεργάζεται τα σήματα των αισθητήρων. Γενικά οι επεξεργαστές Cortex-M έχουν επικρατήσει στον τομέα αυτό.

Πίνακας 2-4. Processing Capabilities.

Part	CPU Core
Texas Instruments CC2640	Cortex-M3
Nordic Semiconductor nRF52832	Cortex-M4F
Freescale KW40Z	Cortex-M0+
Silicon Labs Blue Gecko	Cortex-M3/M4F
Cypress PSoC 4 BLE	Cortex-M0
TI CC2540/CC2541	8051
Nordic Semiconductor nRF51822	Cortex-M0
CSR CSR101x	Proprietary 16-bit

Η δυνατότητα υλοποίησης σύνθετων εφαρμογών από τον χρήστη καθορίζεται από τις μνήμες flash και RAM του chipset.

Πίνακας 2-5. Flash/RAM.

Part	Flash	RAM
Texas Instruments CC2640	128kB	20kB
Nordic Semiconductor nRF52832	512kB	64kB
Freescale KW40Z	160kB	20kB

Silicon Labs Blue Gecko	256kB	32kB
Cypress PSoC 4 BLE	128kB,256kB	32kB
TI CC2540/CC2541	128kB,256kB	8kB
Nordic Semiconductor nRF51822	128kB,256kB	16kB,32kB

Ένα τελευταίο χαρακτηριστικό που διαχωρίζει τα chipsets είναι η ικανότητα τους να υποστηρίξουν πολλαπλά πρωτόκολλα. Στον Πίνακα 2-6 φαίνεται η υποστήριξη που προσφέρουν τα πιο γνωστά chip BLE ραδιοεπικοινωνίας.

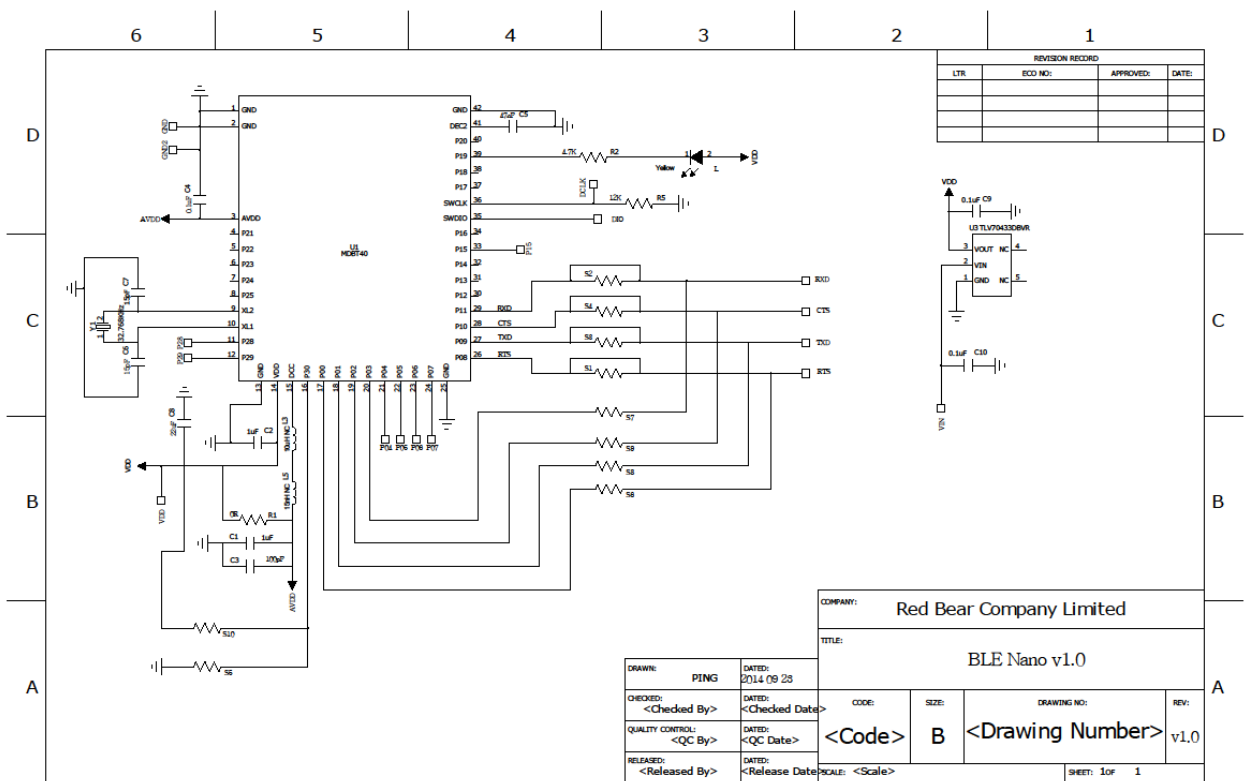
Πίνακας 2-6. Multiprotocol Support.

Part	Protocol Support
Texas Instruments CC2640	BLE,Zigbee,RF4CE
Nordic Semiconductor nRF52832	BLE,ANT,2.4GHz proprietary
Freescale KW40Z	BLE
Silicon Labs Blue Gecko	BLE
Cypress PSoC 4 BLE	BLE
TI CC2540/CC2541	BLE
Nordic Semiconductor nRF51822	BLE,ANT,2.4GHz proprietary
CSR CSR101x	BLE

Η επιλογή για την εφαρμογή μας έγινε με βάση τα παραπάνω κριτήρια. Το chip Nordic Semiconductors nRF51822 αποτέλεσε την λύση για το microchip της εφαρμογής καθώς διακρίνεται από χαμηλή κατανάλωση και παρέχει βιβλιοθήκη στοίβας (stack) ασύρματου πρωτοκόλλου (soft device S130) για την ανάπτυξη εφαρμογών. Η συσκευή αυτή αποτελεί μια από τις μικρότερες πλατφόρμες ανάπτυξης λογισμικού τύπου BLE 4.1 στην αγορά (2015). Ενδείκνυται για ανάπτυξη εφαρμογών τύπου IOT (Internet of Things) καθώς είναι ένα σύστημα πάνω σε τσιπ (SoC), δηλαδή εκτός από τον μικροελεγκτή περιλαμβάνει πάνω στο ίδιο τσιπ την στοίβα ασύρματου πρωτοκόλλου την κεραία και το τσιπ ελέγχου της ραδιοεπικοινωνίας, ρολόι πραγματικού χρόνου (RTC) και τα περιφερειακά (peripherals) δηλαδή διεπαφές σειριακής επικοινωνίας (UART,SPI, I2C) και μετατροπείς σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (A/D converter). Το σχηματικό της πλατφόρμας και πληροφορίες σχετικά με την διασύνδεση της με άλλες συσκευές βρίσκονται στο Παράρτημα Α.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά:

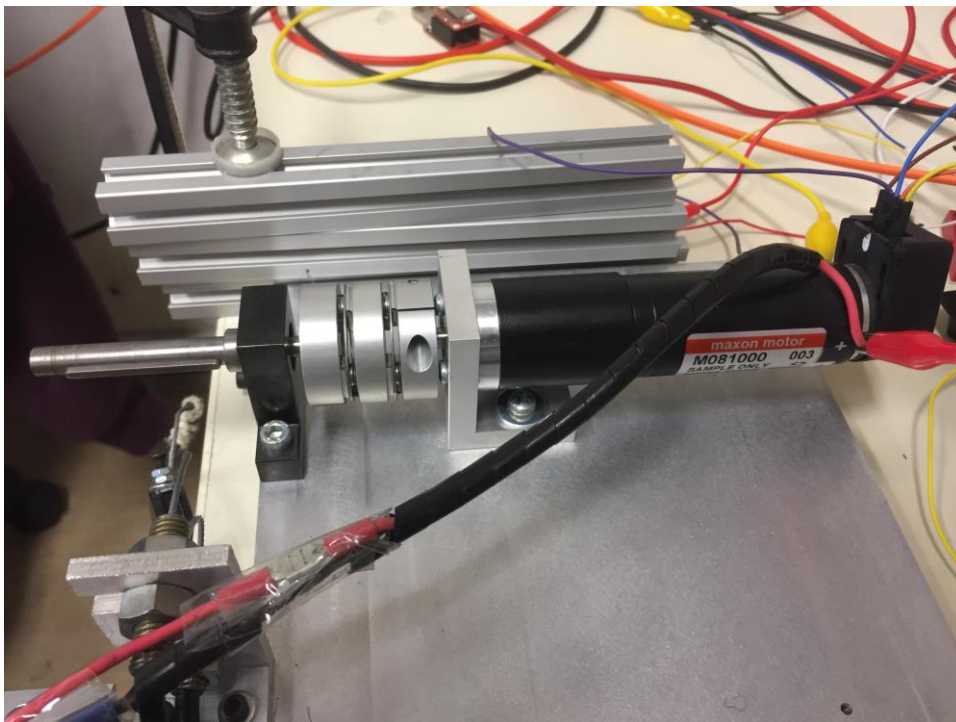
- Πλατφόρμα ανάπτυξης λογισμικού διαστάσεων 18.5mm x 21.0mm.
- Nordic nrf51822 SoC που υποστηρίζει τόσο central όσο και peripheral role.
- Ultra-low power Arm Cortex M0 Core.
- Υποστηρίζει τάση τροφοδοσίας από 1.8 στα 3.3 V. Με χρήση εσωτερικού ρυθμιστή τάσης μπορεί να δεχθεί είσοδο μέχρι 13V την οποία μετασχηματίζει στα 3.3V.
- 16MHz συχνότητα επεξεργαστή, 256KB Flash, 16KB RAM.
- Εξωτερικό κρύσταλλο 32.768KHz απαραίτητο για το ρολόι πραγματικού χρόνου (RTC).
- Υποστηρίζει σειριακή επικοινωνία τύπου UART, I2C, SPI.
- Receive Sensitivity -93dBm για TX Power +4dBm.



Σχήμα 2-8. RedBearLab BLE Nano Schematic.

3 Βιομηχανοτρονική Διάταξη Ασύρματου EPP

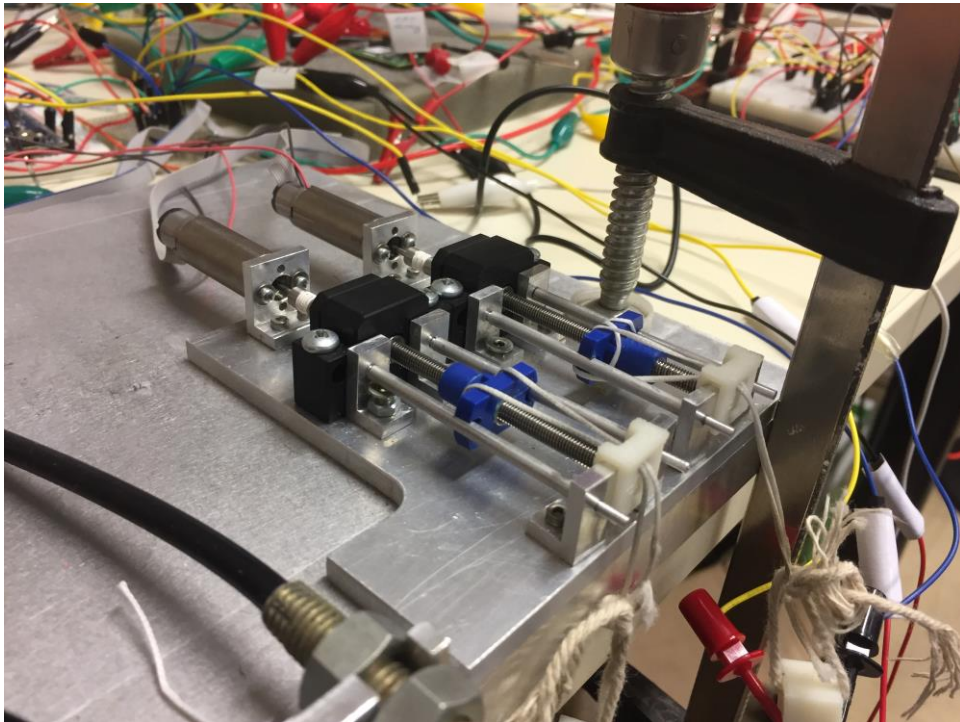
Βασικός στόχος της εργασίας είναι η δημιουργία μιας ασύρματης τοπολογίας ελέγχου που να προσομοιώνει αυτή του Σχ. 1-2 και η τελική της εφαρμογή στην εργαστηριακή δοκιμαστική (testing) διάταξη, ώστε να συγκριθεί με την βιομηχανοτρονική EPP τοπολογία ελέγχου [16], [17]. Για να επιτευχθεί απόκριση συστήματος αντίστοιχη της κλασσικής και της βιομηχανοτρονικής EPP τοπολογίας πρέπει η ασύρματη τοπολογία να προσφέρει στον ασθενή την ιδιοδεκτική αισθητικότητα χωρίς την μηχανική διασύνδεση της κλασσικής προσέγγισης. Η υλοποίηση της τοπολογίας ασύρματου ελέγχου έγινε με βάση το δομικό διάγραμμα του Σχ. 1-3 και την ήδη υπάρχουσα εργαστηριακή διάταξη. Η εργαστηριακή διάταξη, που βασίζεται στο Σχ. 1-2, αποτελείται από έναν Slave κινητήρα συνεχούς ρεύματος στην πλευρά του προσθετικού όπως φαίνεται στο Σχ. 3-1 και δύο Master κινητήρες συνεχούς ρεύματος Maxon DCX 12L brushed όπως φαίνεται στο Σχ. 3-2. Οι Master κινητήρες είναι συνδεδεμένοι με κοχλίες (leadscrew) που μετατρέπουν την περιστροφική τους κίνηση σε γραμμική. Στις άκρες των κοχλιών είναι συνδεδεμένοι οι αισθητήρες δύναμης μέσω σχοινιών. Όταν ο χειριστής ασκεί μια δύναμη στους αισθητήρες δύναμης τραβώντας τα σχοινιά, ενεργοποιεί τον Slave κινητήρα. Οι master κινητήρες προσπαθούν να παρακολουθήσουν την κίνηση του Slave κινητήρα, τραβώντας τα σχοινιά με τα οποία είναι συνδεδεμένοι προς την αντίστοιχη κατεύθυνση, δίνοντας έτσι στον χειριστή την αίσθηση της μετατόπισης του Slave κινητήρα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κινητήρων περιγράφονται στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 3-1. Slave κινητήρας εργαστηριακής διάταξης

Το δομικό διάγραμμα της ασύρματης τοπολογίας ελέγχου παρουσιάζεται στο Σχ. 3-3 και συνδυάζει μία σειρά από τεχνολογίες που αντιπροσωπεύουν τα στοιχεία του φυσικού συστήματος όπως αυτά φαίνονται στο Σχ. 1-3. Η δύναμη που έρχεται από τον μ και συνιστά το σήμα ενεργοποίησης του Slave

επενεργητή από την πλευρά του προσθετικού, πρέπει να παραληφθεί από το Master SoC με την χρήση αισθητήρων δύναμης. Η ιδιοδεκτική αισθητικότητα επιτυγχάνεται με επενεργητές που επιδρούν πάνω στους μύες όπως φαίνεται στο Σχ.1-3 και αντικαθιστούν την επίδραση της ντίζας. Ο βρόχος ελέγχου των Master επενεργητών που παρουσιάζεται στο Σχ. 3-3 απαιτεί κατάλληλη συσκευή για την οδήγηση τους και κατάλληλα αισθητήρια όργανα για τον υπολογισμό της θέσης των επενεργητών. Η τελική λειτουργία της τοπολογίας ελέγχου και η αλληλεπίδραση των στοιχείων καθορίζεται από τα δύο SoC's, ένα Master και ένα Slave.

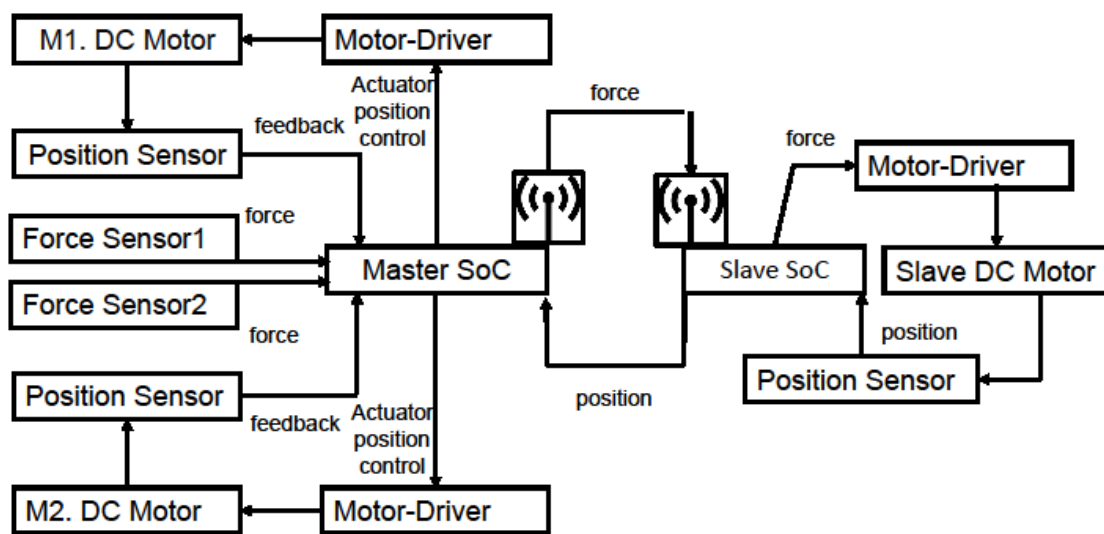


Σχήμα 3-2. Master κινητήρες εργαστηριακής διάταξης

Η σχεδίαση πρέπει επίσης να λάβει υπόψη τους περιορισμούς που προκύπτουν από την τελική χρήση της προτεινόμενης τοπολογίας ελέγχου, η οποία προβλέπει την εγκατάσταση του Master τμήματος στο εσωτερικό του ακρωτηριασμένου άνω άκρου. Το περιβάλλον αυτό διαφοροποιεί τον σχεδιασμό της τοπολογίας ασύρματου ελέγχου από αντίστοιχες τοπολογίες ρομποτικού ελέγχου και εισάγει τους εξής περιορισμούς:

- Τροφοδοσία: Η τροφοδοσία της διάταξης του Master SoC και των Master επενεργητών θα γίνεται από αυτοσυντηρούμενη πηγή (μπαταρία). Το 95% αυτής θα παρέχεται στους επενεργητές άρα πρέπει το Master SoC να έχει μικρή κατανάλωση. Η κατανάλωση του SoC εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ασύρματη τεχνολογία που χρησιμοποιεί. Το περιβάλλον της διάταξης μας περιορίζει επίσης στο μέγεθος της τροφοδοσίας. Κατά συνέπεια πρέπει το ρεύμα που καταναλώνει ο επενεργητής να είναι χαμηλό της τάξης των mA.
- Μέγεθος: Το Master SoC όπως και οι επενεργητές πρέπει να είναι μικρού μεγέθους αλλά και μικρού βάρους ώστε να μην επιβαρύνουν τον ασθενή.

- Εύρος τάσης τροφοδοσίας για το Master SoC που να προσφέρεται από μικρές μπαταρίες καθώς αυτές θα βρίσκονται εντός του σώματος του ασθενή. Συνήθεις τιμές τάσης σε μικρά μεγέθη κυμαίνονται από 3.3V μέχρι 14 V.
- Μετατροπείας δύναμης σε τάση: Ο αισθητήρας που θα λαμβάνει ως είσοδο την δύναμη και θα έχει ως έξοδο ηλεκτρική τάση πρέπει να είναι μικρός σε μέγεθος, ελαφρύς και ανθεκτικός. Η απόκρισή του πρέπει να είναι κατά το δυνατόν γραμμική, να παρουσιάζει μικρή υστέρηση και να χαρακτηρίζεται από υψηλή επαναληψιμότητα (repeatability).



Σχήμα 3-3. Δομικό διάγραμμα τοπολογίας ασύρματου ελέγχου EPP.

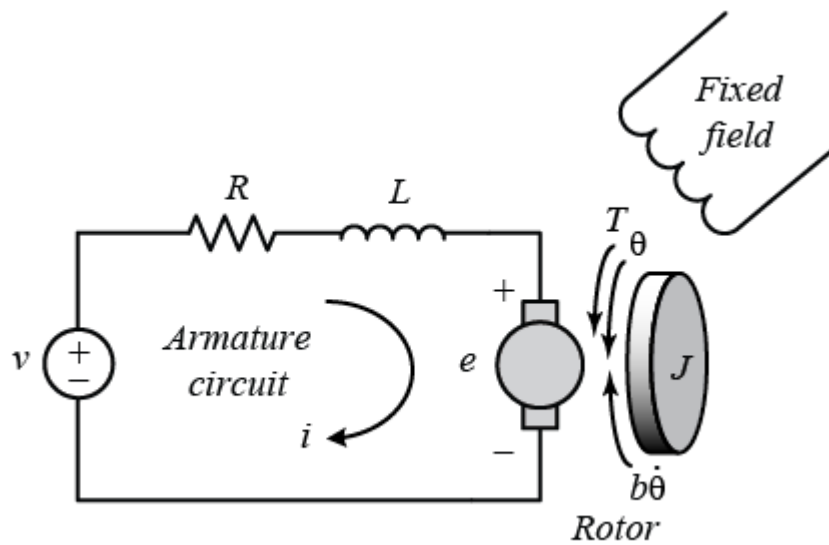
3.1 Έλεγχος κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Οι επενεργητές της εργαστηριακής πειραματικής διάταξης είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Επιλέχθηκαν καθότι προσφέρουν υψηλή ροπή εκκίνησης και είναι ικανοί να ανταποκριθούν σε απότομες μεταβολές του φορτίου. Υπερέχουν στην σχέση αποτελεσματικότητας-μεγέθους έναντι άλλων κινητήρες ενώ μπορούν να λειτουργήσουν για τάσεις εντός των προδιαγραφών.

3.1.1 Μοντελοποίηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Για να υλοποιηθεί ο βρόγχος ελέγχου που φαίνεται στο Σχ. 3-3 απαιτείται η μοντελοποίηση του κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Το σύστημα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς φορτίο μπορεί να

μοντελοποιηθεί με βάση το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα και το διάγραμμα ελεύθερου σώματος του δρομέα όπως φαίνεται στο Σχ. 3-4.



Σχήμα 3-4. Μοντελοποίηση συστήματος DC κινητήρα.

- J: Ροπή αδράνειας του κινητήρα
- b: Σταθερά ιξώδους τριβής
- K_b: Σταθερά ηλεκτρεγερτικής δύναμης
- K_t: Σταθερά ροπής του κινητήρα
- R: Ηλεκτρική αντίσταση
- L: Ηλεκτρική επαγωγή

Σε γενικές γραμμές, η ροπή που παράγεται από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι ανάλογη προς το ρεύμα σπλισμού και την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Στην εφαρμογή μας, το μαγνητικό πεδίο είναι σταθερό και, κατά συνέπεια, ότι η ροπή του κινητήρα είναι ανάλογη μόνο με το ρεύμα σπλισμού i κατά ένα σταθερό παράγοντα K_t , όπως φαίνεται στην Εξ. 3-1. Αυτό αναφέρεται ως *armature-controlled motor*.

$$T = K_t i \quad (3-1)$$

Η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη e , είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας $\dot{\theta}$ του άξονα κατά έναν σταθερό παράγοντα K_b .

$$e = K_b \dot{\theta} \quad (3-2)$$

Οι σταθερές της ροπής του κινητήρα και της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε μονάδες SI είναι ίσες και έτσι θα αναπαρασταθούν με την σταθερά K

$$K_b = K_t = K \quad (3-3)$$

Με χρήση του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα και του νόμου τάσεων του Kirchhoff από το Σχ. 3-4 εξάγουμε τις παρακάτω κυρίαρχες εξισώσεις του συστήματος:

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = Ki \quad (3-4)$$

$$L\frac{di}{dt} + Ri = V - K\dot{\theta} \quad (3-5)$$

Με εφαρμογή μετασχηματισμού Laplace καταλήγουμε στις εξισώσεις μοντελοποίησης:

$$s(Js + b)\Theta(s) = KI(s) \quad (3-6)$$

$$(Ls + R)I(s) = V(s) - Ks\Theta(s) \quad (3-7)$$

3.1.2 Έλεγχος με χρήση H-Bridge

Ο έλεγχος DC κινητήρων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με τα τεταρτημόρια του διαγράμματος ροπής-ταχύτητας στα οποία μπορεί να λειτουργήσει όπως φαίνεται στο Σχ. 3-5. Έλεγχος 1 τεταρτημόριου αφορά κυκλώματα οδήγησης (motor drivers) που μπορούν να λειτουργήσουν τον κινητήρα μόνο με θετική ταχύτητα και θετική ροπή δηλαδή να ελέγχουν την κίνηση του κινητήρα μόνο σε μία κατεύθυνση. Μια οδήγηση τέτοιου τύπου δεν είναι ικανοποιητική για την διάταξή μας.

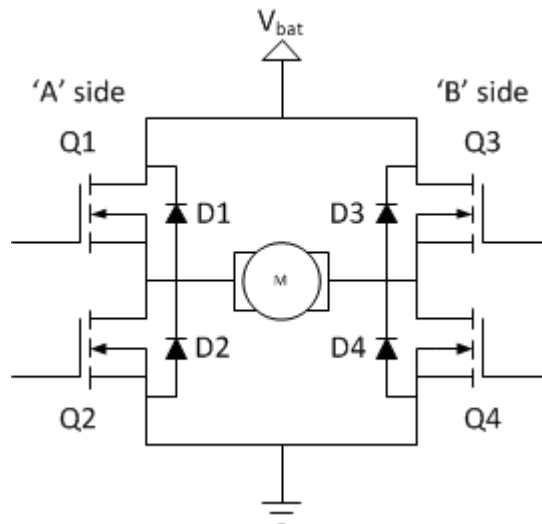


Σχήμα 3-5. Τεταρτημόρια λειτουργίας Ροπής/Ταχύτητας.

Ο Slave κινητήρας της διάταξης μας είναι επιθυμητό να μπορεί να κινηθεί προς τις δύο κατευθύνσεις (άνοιγμα-κλείσιμο προσθετικού χεριού) ανάλογα με την διέγερση που δέχεται από το ζεύγος των αισθητήρων δύναμης. Οι Master κινητήρες πρέπει να μπορούν επίσης να κινηθούν και στις δύο κατευθύνσεις λόγω των διορθωτικών κινήσεων που καλούνται να κάνουν κατά την προσπάθεια

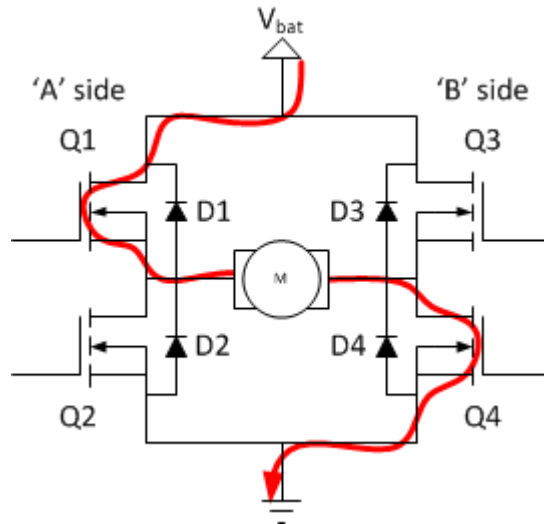
τους να ακολουθήσουν τον Slave κινητήρα. Πρέπει λοιπόν να πάμε σε οδήγηση που λειτουργεί τους κινητήρες (Master και Slave)σε δύο τεταρτημόρια (two-quadrant) το I και το III.

Το κύκλωμα οδήγησης που επιλέχθηκε για την επίτευξη ελέγχου 2 τεταρτημόριων είναι αυτό του H-Bridge. Γενικά η χρήση του ενδείκνυται στις εφαρμογές ελέγχου DC κινητήρων. Το όνομα του προέρχεται από το σχήμα της διάταξης, η οποία αποτελείται από τέσσερα στοιχεία-διακόπτες, συνήθως διπολικά (bi-polar) ή FET τρανζίστορ όπως φαίνεται στο Σχ. 3-6 (Q1..Q4) και διόδους (D1..D4) γνωστές και ως freewheeling diodes.



Σχήμα 3-6. Κυκλωματική απεικόνιση του H-Bridge.

Η αρχή λειτουργίας είναι απλή. Μπορούμε να ελέγξουμε την φορά περιστροφής του κινητήρα ανάλογα με τα ζεύγη των αντίθετων πλευρών που είναι 'κλειστά'. Στο Σχ. 3-7 φαίνεται το παράδειγμα όπου το ζεύγος Q1 Q4 είναι κλειστό κάνοντας το κύκλωμα να διαρρέεται από ρεύμα της συγκεκριμένης διαδρομής αναγκάζοντας τον κινητήρα σε συγκεκριμένη φορά περιστροφής. Το αντίθετο ζεύγος θα οδηγούσε σε διαφορετική διαδρομή ρεύματος (διαμέσου των Q2 Q3) και άρα διαφορετική φορά περιστροφής. Απαγορεύεται να έχουμε δύο διακοπτικά στοιχεία της ίδιας πλευράς 'κλειστά' ταυτόχρονα.



Σχήμα 3-7. Παράδειγμα λειτουργίας H-Bridge.

Ο Πίνακας 3-1 παρουσιάζει την λειτουργία του κινητήρα σε σχέση με το λογικό επίπεδο (High-Low) των διακοπτικών στοιχείων:

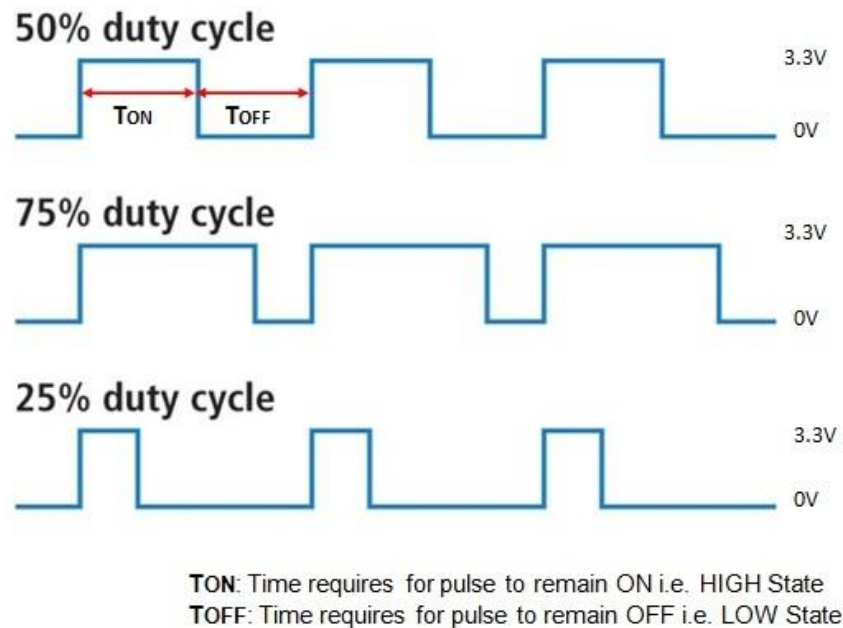
Πίνακας 3-1. Λειτουργία H-Bridge για οδήγηση κινητήρα.

Q1	Q2	Q3	Q4	Αποτέλεσμα
1	0	0	1	Δεξιά περιστροφή
0	1	1	0	Αριστερή περιστροφή
0	0	0	0	Ελεύθερη κίνηση
0	1	0	1	Φρένο
1	0	1	0	Φρένο
1	1	0	0	Βραχυκύκλωμα
0	0	1	1	Βραχυκύκλωμα
1	1	1	1	Βραχυκύκλωμα

3.1.3 Έλεγχος PWM

Η στρατηγική που επιλέχθηκε για την οδήγηση και τον έλεγχο του κινητήρα είναι αυτή της διαμόρφωσης πλάτους παλμού PWM. Το PWM είναι πολύ διαδεδομένο στον έλεγχο DC κινητήρων καθώς με την χρήση του μπορεί να ελεγχθεί η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Για κάθε

συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή της ψηφιακής εξόδου μπορεί να είναι μία εκ των High Low. Με τη διαμόρφωση PWM μπορούμε να πάρουμε από μια ψηφιακή έξοδο τιμές διαφορετικές των High και Low αλλάζοντας την αναλογία του χρόνου όπου το σήμα είναι High σε σχέση με Low για μια συγκεκριμένη μονάδα χρόνου όπως φαίνεται στο Σχ. 3-8. Η αναλογία αυτή εκφράζεται από το duty cycle. Για ένα σήμα που στο 50% του χρόνου είναι High σε σχέση με το προκαθορισμένο διάστημα χρόνου έχουμε 50% duty cycle και τετραγωνικό παλμό. Ένα ποσοστό duty cycle 100% σημαίνει ουσιαστικά τιμή High στην έξοδο.



Σχήμα 3-8. Παραδείγματα duty cycle.

Μια πολύ σημαντική παράμετρος στον έλεγχο με PWM είναι η συχνότητα του PWM. Πρέπει η συχνότητα να είναι αρκετά μεγάλη ώστε ο κινητήρας να 'βλέπει' μόνο την συνεχή συνιστώσα του PWM δηλαδή την μέση τιμή και να μην αντιλαμβάνεται μετάβαση από high σε low του τετραγωνικού παλμού. Αν θεωρήσουμε τον κινητήρα ως ένα χαμηλοπερατό φίλτρο και με γνώση ότι η σχέση μεταξύ γωνιακής ταχύτητας και τάσης είναι της μορφής:

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3-8)$$

Τότε η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου αυτού είναι:

$$\omega_c = \frac{1}{\tau} = 2\pi f_c \Rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (3-9)$$

Οπού τ είναι η σταθερά χρόνου του κινητήρα. Θεωρητικά ο χρόνος που κάνει ο κινητήρας να φτάσει το 100% της γωνιακής ταχύτητας σταθερής κατάστασης είναι περίπου:

$$t_{final} \cong 4\tau \quad (3-10)$$

Για να έχουμε την επιθυμητή απόκριση πρέπει να επιλέξουμε συχνότητα:

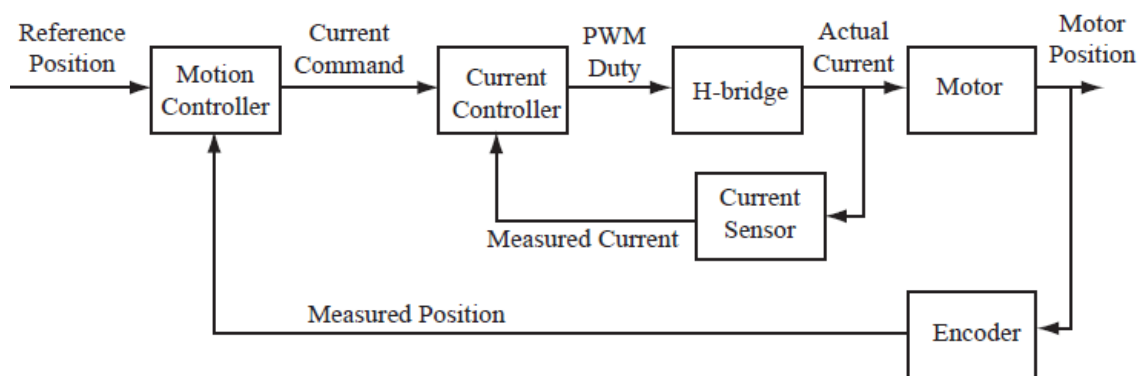
$$f_{pwm} \geq \frac{4}{2\pi\tau} \quad (3-11)$$

3.1.4 Τελικό σύστημα ελέγχου

Υπάρχουν δύο τύποι ελέγχου που εφαρμόζονται για κινητήρες συνεχούς. Ο έλεγχος τάσης και ο έλεγχος ροπής ή έλεγχος ρεύματος. Στην δική μας εφαρμογή επιθυμούμε έλεγχο ροπής. Κατά συνέπεια για έλεγχο θέσης χρειαζόμαστε την Εξ. 3-6. Με βάση αυτήν έχω:

$$s(Js+b)\Theta(s) = KI(s) \Rightarrow \frac{\Theta(s)}{I(s)} = G(s) = \frac{K_\theta}{s(Js+b)} = \frac{K}{s(\tau s+1)} \quad (3-12)$$

Το σύστημα για έλεγχο ρεύματος με χρήση H-Bridge περιγράφεται στο Σχ. 3-9.



Σχήμα 3-9. Δομικό διάγραμμα συστήματος για έλεγχο ρεύματος μέσω H-bridge.

Στο σύστημα της εργασίας, η εντολή που δίνεται από το SoC είναι αυτή του PWM Duty cycle. Ο εσωτερικός βρόχος ελέγχου για το ρεύμα υλοποιείται από το H-bridge. Στην περίπτωση αυτή στο μοντέλο του Σχ. 3-9 ο βρόγχος ελέγχου αντικαθίσταται από το H-Bridge που μοντελοποιείται ως ένα κέρδος που περιγράφει την σχέση μεταξύ ρεύματος και Duty Cycle του PWM όπως φαίνεται στην Εξ. 3-13.

$$I = K * DutyCycle \quad (3-13)$$

3.2 Υπολογισμός θέσης κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θέσης και της φοράς περιστροφής του DC κινητήρα είναι η παλμογεννήτρια (Encoders). Υπάρχουν τρεις τεχνολογίες για τον αισθητήρα αυτό:

- Οπτικοί Encoders: Χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες και χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές βιομηχανικών αυτοματισμών. Για την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής απαιτείται έξτρα προστασία από σκόνη, δονήσεις και άλλες συνθήκες που παρουσιάζονται σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.

- Μαγνητικοί Encoders: Είναι ανθεκτικότεροι από τους οπτικούς αλλά έχουν χαμηλότερη ανάλυση και ακρίβεια. Χρησιμοποιούνται εκεί που οι περιβαλλοντικοί παράγοντες (χρώμα, ατμός, δονήσεις) αποτρέπουν την χρήση οπτικών μειώνοντας την απόδοση τους.
- Χωρητικοί Encoders: Καινούρια τεχνολογία με αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μαγνητικών.

Το δεύτερο στοιχείο που διαχωρίζει τους Encoders είναι η αντοχή τους σε δυνάμεις που ασκούνται στον άξονα τους. Έχουμε Encoders χαμηλού (~10N), μεσαίου και υψηλού φόρτου (~100N). Οι Encoders διακρίνονται σε δύο βασικές γεωμετρίες:

- Περιστροφικοί (Rotary): Χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση περιστροφικής κίνησης. Η ανάλυση τους μετριέται σε παλμούς ανά περιστροφή (Pulses per Rotation). Συνήθως περιέχουν έναν εσωτερικό κωδικοποιημένο δίσκο και μία αισθητήρια κεφαλή για τον καθορισμό της θέσης. Ένας Encoder με 100ppr έχει 100 χαραγμένα στον δίσκο του.
- Γραμμικοί (Linear): Αποτελούνται από μια κλιμακωτή λωρίδα και μια αισθητήρια κεφαλή που διαβάζει το κενό ανάμεσα στις κλίμακες για να προσδιορίσει την θέση. Η ανάλυση του μετριέται σε παλμούς ανά μονάδα μήκους (inch, cm, etc). Για ανάλυση 100 ppi (Points per Inch) μια κίνηση μιας ίντσας προσδιορίζεται από 100 αναγνώσεις στην κλίμακα.

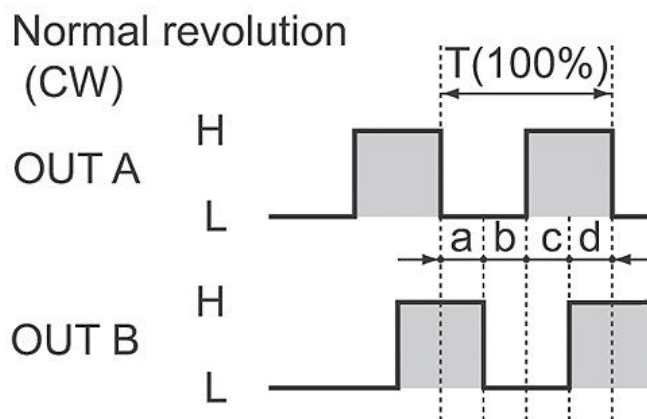
Τέλος οι Encoders διαχωρίζονται από τον τύπο της μέτρησης που λαμβάνουν σε απόλυτους (absolute) και αυξητικούς (incremental). Οι δύο τύποι διαφοροποιούνται τόσο στην συνδεσμολογία τους όσο και στον τρόπο αναγνώρισης της κίνησης. Οι incremental Encoders μπορούν να παρέχουν μόνο την σχετική θέση του άξονα. Δεν περιέχουν πληροφορία για την θέση του άξονα πριν την ενεργοποίηση τους. Το μόνο που μπορούμε να πούμε είναι πόσο μακριά έχουμε 'ταξιδέψει' από την στιγμή της ενεργοποίησης. Η πληροφορία της θέσης επιστρέφεται μέσω ηλεκτρικών παλμών, από ένα ή δύο κανάλια αντίστοιχα. Οι απόλυτοι Encoders επιστρέφουν την θέση ακόμα και όταν ο άξονας έχει αρχική θέση διάφορη του μηδενός πριν την ενεργοποίησή τους. Η ανάλυση τους είναι αντίστοιχη με των incremental αλλά η πληροφορία θέσης δίνεται με την μορφή δυαδικού (binary) format και όχι υψίσυχνων παλμών.

Για τους Encoder τύπου incremental rotary με δύο κανάλια, μπορούμε να αυξήσουμε την ακρίβεια της μέτρησης. Οι αισθητήρες αυτοί γνωστοί και ως quadrature έχουν δύο κανάλια A και B με παλμούς σε φάση 90 μοιρών. Κάθε έξοδος μπορεί να είναι είτε ON είτε OFF με αποτέλεσμα να ξεχωρίζουμε τέσσερις καταστάσεις.

- 1) A=OFF B=ON
- 2) A=OFF B=OFF
- 3) A=ON B=OFF
- 4) A=ON B=ON

Έτσι για μια ανάλυση 100ppr μπορούμε να έχουμε 400 διαφορετικές καταστάσεις για κάθε περιστροφή αυξάνοντας έτσι την ανάλυση επί τέσσερα. Το μοτίβο επίσης με το οποίο τα A και B πάνε

από ON σε OFF μπορεί να μας δώσει και την φορά περιστροφής όπως φαίνεται στο Σχ. 3-10. Αν το A προηγείται του B έχουμε ωρολογιακή περιστροφή ενώ αν έπεται έχουμε ανθρωρολογιακή.



Σχήμα 3-10. Παλμοί εξόδου quadrature Encoder για ωρολογιακή περιστροφή.

Οι rotary Encoders εμφανίζουν περιορισμούς στην ταχύτητα τόσο μηχανολογικής όσο και ηλεκτρολογικής φύσης. Το μηχανολογικό όριο μέγιστης ταχύτητας του άξονα του Encoder είναι οι περιστροφές ανά λεπτό (rpm). Το ηλεκτρολογικό όριο επιβάλλεται από την συχνότητα των ηλεκτρονικών maximum frequency που είναι χαρακτηριστικό μέγεθος για κάθε τύπο Encoder μέσα στο κύκλωμα του Encoder και καθορίζει πόσο γρήγορα τα κυκλώματα πάνε από ON σε OFF. Ο τύπος είναι $Maximum\ Electrical\ Speed = (maximum\ frequency\ response / pulses\ per\ revolution) * 60s / min$.

$$Max. Electrical Speed = (max. frequency response / pulses per revolution) * 60s / min \quad (3-14)$$

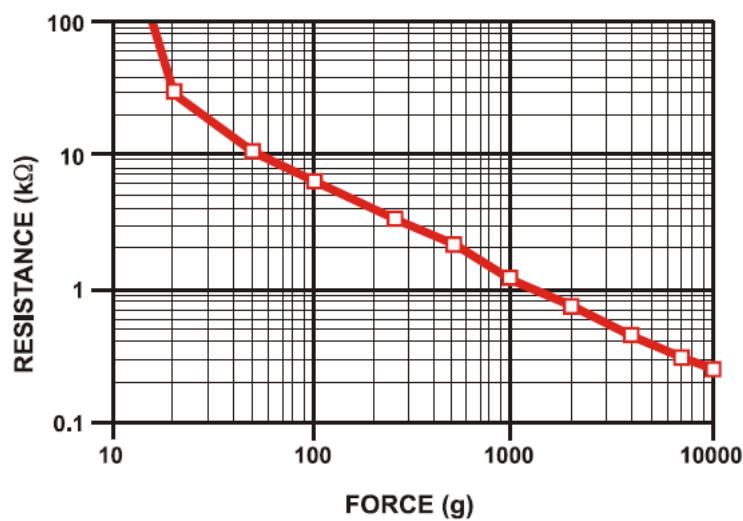
3.3 Αισθητήρας δύναμης

Για την υλοποίηση της διάταξης ελέγχου επιλέχθηκε ως μετατροπέας δύναμης σε τάση ο αισθητήρας FSR. Ο FSR είναι μια συσκευή PTF (polymer thic film) που εμφανίζει μείωση αντίστασης όσο αυξάνεται η δύναμη που του ασκείται. Ο αισθητήρας αυτός είναι ιδανικός για έλεγχο αφής. Χαρακτηρίζεται από μικρό μέγεθος (<0.15mm), είναι φθηνός, ανθεκτικός σε επαναλαμβανόμενη χρήση και περιβαλλοντικούς παράγοντες και έχει μικρή στατική κατανάλωση. Η απόκριση (rise time) των FSR είναι πιο αργή από αυτή των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων αλλά ικανοποιητική για την εφαρμογή που περιγράφουμε στην πρόταση εργασίας (1-2 ms rise time). Οι FSR παρουσιάζουν επίσης μικρότερη ευαισθησία σε δονήσεις και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές πλεονεκτώντας έτσι των πιεζοηλεκτρικών που λόγω υψηλής ταχύτητας απόκρισης και ευαισθησίας είναι ευαίσθητοι σε θόρυβο.

Γενικά ο FSR πλεονεκτεί έναντι άλλων μετατροπέων όπως τα πιεζοηλεκτρικά και οι αισθητήρες τύπου Strain Gauge. Βασικό του μειονέκτημα αποτελεί η υστέρηση που εμφανίζει και κυρίως η μη γραμμική του απόκριση. Η υστέρηση, δηλαδή η διαφορά στην απόκριση ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του FSR δεν επηρεάζει την λειτουργία του ελεγκτή όπως την αντιλαμβάνεται ο χειριστής του προσθετικού. Η μη γραμμική απόκριση μπορεί να διορθωθεί με κατάλληλο κύκλωμα επεξεργασίας σήματος της εξόδου του FSR πριν αυτή εισέλθει στο Master SoC αλλά και μετέπειτα με

προγραμματιστικές μεθόδους. Τέλος να σημειωθεί ότι ο FSR δεν είναι κατάλληλος για μέτρηση μεγάλης ακρίβειας.

Η απόκριση δύναμης-αντίστασης ενός αισθητήρα FSR φαίνεται στο Σχ. 3-11. Η απόκριση είναι αντιστρόφως ανάλογη κατά προσέγγιση της δύναμης. Μπορούμε να παρατηρήσουμε από την απόκριση ότι για χαμηλές δυνάμεις έχουμε μια συμπεριφορά τύπου διακόπτη που εκτινάσσει την αντίσταση από τα 10 KΩ στα 100KΩ. Το κατώφλι αυτό ενεργοποίησης πέρα από το οποίο, για μεγαλύτερες δυνάμεις έχουμε αυτή την κατά προσέγγιση αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ δύναμης αντίστασης είναι γνωστό και ως "break force" και εξαρτάται από το υλικό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα αλλά και του επενεργητή δηλαδή του μέσου που ασκεί την δύναμη στον αισθητήρα.



Σχήμα 3-11. Σχέση αντίστασης-δύναμης.

Για μεγάλες δυνάμεις η απόκριση όπως προαναφέραμε αποκλίνει από την γραμμική συμπεριφορά και οδηγείται σε κορεσμό. Για το παράδειγμα το Σχ. 3-11 το σημείο κορεσμού βρίσκεται πολύ πέρα από τα 10 Kg. Το σημείο κορεσμού του FSR είναι περισσότερο συνάρτηση της πίεσης παρά της δύναμης άρα εξαρτάται και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του επενεργητή. Είναι δυνατόν λοιπόν να μετρήσουμε μεγαλύτερες δυνάμεις διατηρώντας την δυναμική συμπεριφορά του FSR και αποφεύγοντας τον κορεσμό αν τις ασκήσουμε σε μεγαλύτερη επιφάνεια.

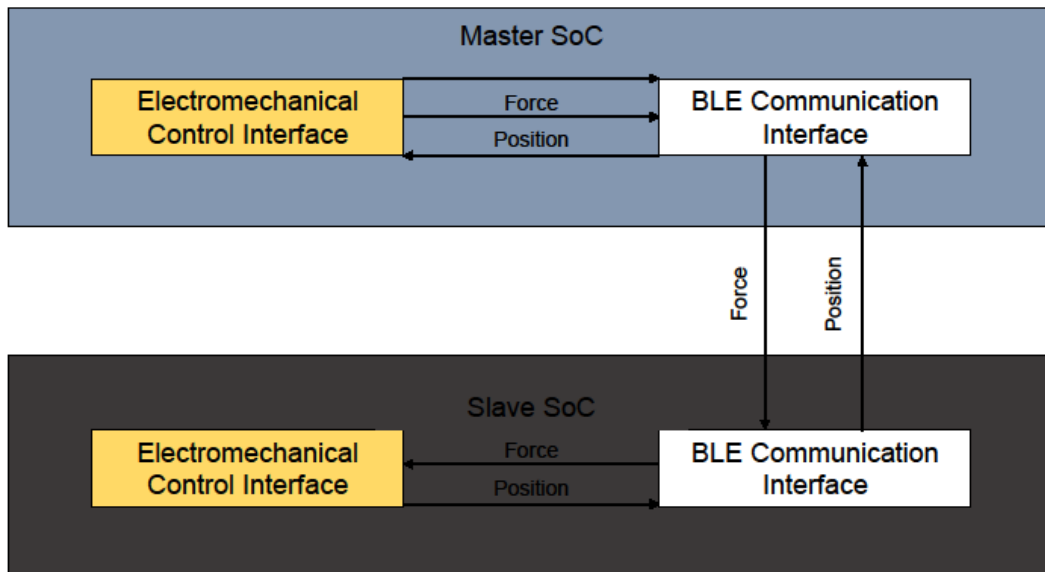
4 Προγραμματιστική Ανάλυση Διάταξης Ελέγχου

Στο κεφάλαιο αυτό ακολουθεί η ανάλυση του λογισμικού (software) που υλοποιήθηκε ώστε η προτεινόμενη διάταξη να έχει την επιθυμητή λειτουργία. Το λογισμικό αποτέλεσε τον ακρογωνιαίο λίθο της εφαρμογής που αναπτύχθηκε καθώς έγινε η προσπάθεια όλες οι λειτουργίες, όπως η επεξεργασία και μετατροπή των σημάτων από τους αισθητήρες, να γίνουν από το SoC (Master & Slave). Για την ανάπτυξη χρησιμοποιήθηκε το SDK που προσφέρεται από το περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού mbed και καθιστά τον κώδικα συμβατό με όλες τις πλατφόρμες ανάπτυξης λογισμικού (development platforms) που υποστηρίζονται από το περιβάλλον της mbed. Το συγκεκριμένο SDK προσφέρει API κατάλληλο για συνεργασία με αισθητήρες και λοιπά ηλεκτρονικά και μηχανολογικά στοιχεία.

Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε χωρίζεται αρχιτεκτονικά σε δύο επίπεδα αφάιρεσης (abstraction layers) με βάση την αρχή διαχωρισμού των προβλημάτων (separation of concerns). Η σχεδίαση του λογισμικού με βάση την αρχή αυτή εξασφαλίζει την απλοποίηση σύνθετων προβλημάτων, την διαλειτουργικότητα (interoperability), τον ευκολότερο και καλύτερο προγραμματισμό της διαχείρισης ασύγχρονων γεγονότων και τον ευκολότερο εντοπισμό προβλημάτων λογισμικού (debugging). Τα επίπεδα αυτά αντιμετωπίζονται ως μαύρα κουτιά που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους με σήματα εισόδου και εξόδου όπως φαίνεται στο Σχ. 4-1.

- Διεπαφή επικοινωνίας BLE (Communication Interface): Διαμόρφωση επικοινωνίας BLE και ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ Master SoC και Slave SoC σύμφωνα με το πρωτόκολλο.
- Διεπαφή ελέγχου ηλεκτρομηχανικών στοιχείων (Electromechanical Control Interface): Έλεγχος υλικού (motors, Encoders, FSR) για την επίτευξη της επιθυμητής λειτουργίας.

Οι δύο διεπαφές εμφανίζονται τόσο στο λογισμικό του Master SoC όσο και του Slave SoC όπως φαίνεται στο Σχ. 4-1 αλλά έχουν πολλές διαφορές. Αρχικά το BLE Interface διαφοροποιείται καθότι όπως επεξηγήσαμε στο Κεφάλαιο 2.2 για να γίνει η σύνδεση μεταξύ δύο συσκευών θα πρέπει να υπάρχει το ζεύγος Central-Peripheral. Εν συνεχεία η διεπαφή διαχείρισης και ελέγχου των αισθητήρων και των κινητήρων διαφοροποιείται καθότι το Master SoC καλείται να διαβάσει τα σήματα των αισθητήρων FSR και να κάνει έλεγχο θέσης στους master κινητήρες. Από την άλλη πλευρά το Slave SoC καλείται να ενεργοποιήσει τον Slave κινητήρα με βάση την εντολή δύναμης που έρχεται από την διεπαφή BLE επικοινωνίας όπως φαίνεται στο Σχ. 4-1, και να ενημερώσει το Master SoC μέσω της διεπαφής επικοινωνίας για την θέση του Slave κινητήρα.



Σχήμα 4-1. Μπλοκ διάγραμμα λογισμικού.

4.1 Διεπαφή επικοινωνίας BLE

Πρωταρχικό μέλημα της εργασίας αποτέλεσε ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του λογισμικού ώστε να επιτευχθεί επικοινωνία μεταξύ των δύο SoC's (Master & Slave) με την χρήση του πρωτοκόλλου BLE. Το τμήμα του λογισμικού αυτού εκτός, από την διαμόρφωση και την αποστολή της πληροφορίας, καθορίζει την λειτουργία της διάταξης εντός των προδιαγραφών που τέθηκαν και την επιτυχία αυτής. Αυτό συμβαίνει καθότι για να είναι δυνατή η χρήση της διάταξης σε πραγματικές εφαρμογές προσθετικών πρέπει:

- Το νευρικό σύστημα του ασθενή να μην αντιλαμβάνεται καθυστέρηση από την στιγμή που ασκείται η δύναμη στον αισθητήρα δύναμης μέχρι την στιγμή που κινείται το προσθετικό
- Να μην υπάρχει καθυστέρηση από την στιγμή που το προσθετικό δέχεται κάποια επίδραση από το περιβάλλον μέχρι την στιγμή που ο επενεργητής εντός του χεριού προσαρμόζει το μήκος του τένοντα για να δώσει την αίσθηση της αφής.

Η πρώτη συνθήκη εξαρτάται αποκλειστικά από την επικοινωνία BLE. Η δεύτερη συνθήκη εξαρτάται εν μέρει από την επικοινωνία καθώς σημαντικό ρόλο έχει η ποιότητα του ελέγχου, δηλαδή ο τύπος του ελεγκτή (PID, LQR) και ο σωστός υπολογισμός των παραμέτρων του, η διαχείριση των οποίων γίνεται από την διεπαφή ελέγχου ηλεκτρομηχανικών στοιχείων (Electromechanical Control Interface).

4.1.1 Διεπαφή επικοινωνίας BLE για το Master SoC

GAP Peripheral

Για την επίτευξη σύνδεσης BLE μεταξύ των δύο SoC's (Master & Slave) όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2.2 είναι απαραίτητο να καθοριστούν ρόλοι GAP σε μορφή ζεύγους Central-Peripheral. Το Master SoC επιλέχθηκε να λειτουργήσει σε ρόλο Peripheral. Οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν για τον ρόλο αυτό είναι:

Πίνακας 4-1. Παράμετροι για τον καθορισμό του GAP peripheral role του Master SoC.

Advertising Interval:100ms	Συχνότητα εκπομπής των πακέτων
Advertising Timeout:0 s	Η διαδικασία advertisement δεν σταματά. Δεν είναι απαραίτητος ο ορισμός ρουτίνας callback για την περίπτωση timeout (timeout event)
Device Name	Το όνομα της συσκευής όπως φαίνεται σε συσκευές που ανιχνεύουν BLE
TX power: -4dbm	Δεν χρειαζόμαστε μεγάλη ισχύ εκπομπής καθώς η απόσταση των συσκευών στην πραγματική εφαρμογή θα είναι κοντά. Σε περίπτωση που δεν μπορεί να επιτευχθεί σύνδεση η παράμετρος μπορεί να αυξηθεί μέχρι και τα +4dbm
Advertising Type: Connectable Undirected	Επιτρέπεται η σύνδεση στην συσκευή μας και μάλιστα από οποιαδήποτε άλλη συσκευή τύπου Central. Σε πραγματική εφαρμογή της διάταξης με αλλαγή του πεδίου αυτού σε Connectable Directed θα επιτρέπεται σύνδεση μόνο με την συσκευή Slave SoC.
Advertisement Payload:	Ο καθορισμός του πακέτου 31 Byte που αποστέλλεται σε κάθε advertising event.
Complete Local Name	Το όνομα αυτό χρησιμοποιείται από το software του slave SoC's για να επιτρέψει την σύνδεση μόνο με το συγκεκριμένο Peripheral.

Complete List 128-bit Service Ids	Πλήρης λίστα των Service IDs απαραίτητη για να μπορέσει ο Central-Slave να προβεί σε Service Discovery
Bio Service	Η υπηρεσία που προσφέρεται
LE_General_Discoverable	Η συσκευή είναι ανιχνεύσιμη

GATT Server

Στην διάταξη μας το Master SoC θα εκτελέσει αποκλειστικά και τον ρόλο του GATT Server. Θα είναι αυτό δηλαδή που θα προσφέρει της υπηρεσίες στο Slave SoC. Για τον καθορισμό του ρόλου αυτού επιλέχθηκε ένα τυχαίο base UUID των 128 bit και πάνω σε αυτό διαμορφώθηκαν δύο custom made χαρακτηριστικά (characteristic) ώστε να υπάρχει η ροή της πληροφορίας θέσης-δύναμης όπως αυτή φαίνεται στο Σχ. 4-1.

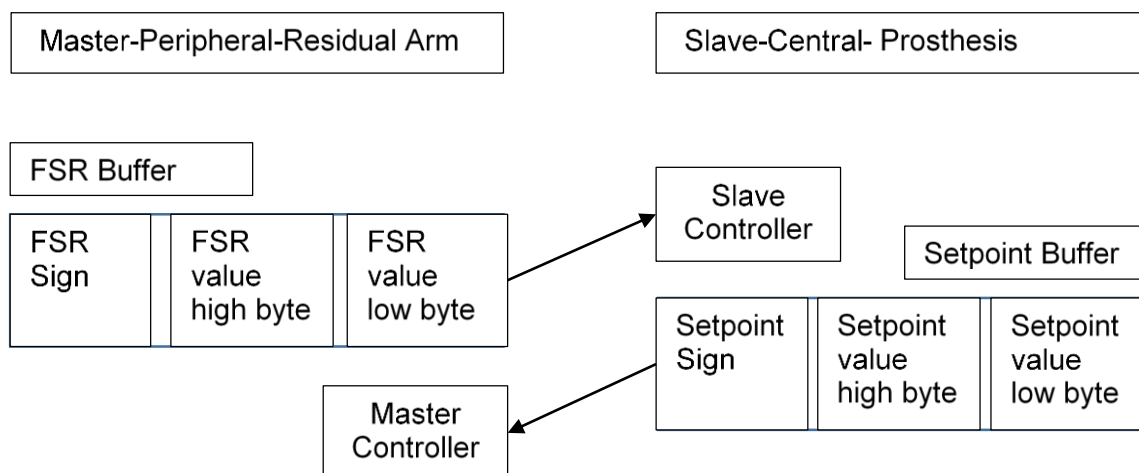
Πίνακας 4-2. Διαμόρφωση υπηρεσίας GATT πρωτοκόλλου για το Master SoC.

Service UUID:	71D30000-503E-4C75-BA94-3148-F18D941E
Characteristic1 UUID :	71D30003-503E-4C75-BA94-3148-F18D941E
Char1. Properties:	Write without response
Characteristic2 UUID :	71D30002-503E-4C75-BA94-3148-F18D941E
Char2. Properties:	Notify
Buffer Length	3 bytes

Για την υπηρεσία που προσφέρουμε δημιουργήθηκαν δύο χαρακτηριστικά:

- Write without response: Δίνει την δυνατότητα στον Client να 'γράψει' μια τιμή προκαθορισμένου μεγέθους (3 bytes) στην database του Server. Είναι εξίσου γρήγορο με τα notifications καθώς δεν αναμένεται απάντηση από το Server για την επιβεβαίωση λήψης του πακέτου. Στην εφαρμογή μας με τη χρήση αυτής της υπηρεσίας ο Client-Slave μεταφέρει τη θέση του Slave κινητήρα στο Master SoC. Ο ρυθμός αποστολής δεδομένων εξαρτάται από το λογισμικό του Slave και το connection interval. Η πληροφορία διακινείται μέσω του Setpoint Buffer.
- Notify: Είναι η ταχύτερη δυνατή μορφή αποστολής δεδομένων που υποστηρίζει το πρωτόκολλο και επιτρέπει στον Server να ενημερώνει τον Client για αλλαγές σε συγκεκριμένες παραμέτρους. Το

μέγεθος της πληροφορίας είναι στα 3 bytes. Με χρήση αυτού του Buffer το Master SoC ενημερώνει τον Client για την τιμή που διαβάζει από τον αισθητήρα δύναμης FSR και που θα χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση του Slave κινητήρα στο προσθετικό άκρο. Ο ρυθμός αποστολής δεδομένων εξαρτάται από το Master SoC και το connection interval. Η πληροφορία διακινείται μέσω του FSR Buffer.



Σχήμα 4-2. Διαμόρφωση πακέτων πληροφορίας.

Το πρωτόκολλο BLE μας δίνει την δυνατότητα ταχείας ανταλλαγής δεδομένων. Ο ρυθμός ανταλλαγής καθορίζεται από τα Connection Parameters αλλά και από το μέγεθος της πληροφορίας που διακινούμε. Ειδικότερα αν και το μέγιστο data payload είναι 20 bytes όσο χαμηλότερα κινούμαστε τόσο μεγαλύτερο ρυθμό μπορούμε να επιτύχουμε με ελάχιστο αυτόν του Minimum Connection Interval.

Διαχείριση συμβάντων (events) BLE πρωτοκόλλου για το Master SoC

Το Master SoC ξεκινά την λειτουργία του σε Advertising mode. Στο αρχικό setup υλοποιούνται οι εξής συναρτήσεις διαχείρισης ασύγχρονων συμβάντων:

- **Connection Callback:** Διαχειρίζεται το συμβάν σύνδεσης με άλλη συσκευή. Σε κάθε σύνδεση ενεργοποιείται το μπλοκ ελέγχου rid και καθορίζεται η περίοδος ελέγχου στο 1ms.
- **Disconnection Callback:** Διαχειρίζεται το συμβάν αποσύνδεσης από άλλη συσκευή. Σε κάθε αποσύνδεση απενεργοποιείται το μπλοκ του rid ελέγχου και η συσκευή εισέρχεται ξανά σε Advertising mode.
- **GATT Server Write Callback:** Διαχειρίζεται το συμβάν εγγραφής δεδομένων από το Client microchip στην βάση του master-Server. Στην περίπτωση μας υπάρχει επεξεργασία του Set point Buffer ώστε να επαναδομηθεί η πληροφορία της θέσης του Slave κινητήρα. Το συμβάν αυτό αφορά μόνο την περίπτωση που υπάρχει ενεργή σύνδεση.

- Task Handle: Η συνάρτηση αυτή καθορίζει το ρυθμό και την διαμόρφωση των δεδομένων που περιέχονται στα notifications του Server προς τον Client. Ο ρυθμός των ειδοποιήσεων είναι στα 7.5ms και δεν μπορεί να αυξηθεί (με βάση το πρωτόκολλο BLE). Ανά 7.5 ms γίνεται δειγματοληψία της εξόδου του κυκλώματος FSR και αποστέλλεται με την μορφή ειδοποίησης στον Client. Συχνότερη δειγματοληψία δεν έχει νόημα λόγω του περιορισμού στην συχνότητα των ειδοποιήσεων. Η τιμή που είναι ένας δεκαδικός (float) με εύρος τιμών από 0-1.0 μετατρέπεται σε ακέραιο πριν αποσταλεί. Στην περίπτωση του Bidirectional EPP η τιμή αυτή είναι η διαφορά μεταξύ των δύο μιών οπότε μπορεί να έχει θετικό πρόσημο για το κλείσιμο του βραχίονα και αρνητικό για το άνοιγμα. Το πρόσημο αποθηκεύεται στο πρώτο byte του FSR Buffer και η απόλυτη ακέραια τιμή σπάει στα επόμενα δυο bytes.

4.1.2 Διεπαφή επικοινωνίας BLE για το Slave SoC

GAP Central

Η συμπλήρωση του ζεύγους Central-Peripheral για την επίτευξη σύνδεσης απαιτεί την λειτουργία του Slave SoC σε ρόλο Central. Οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν για τον ρόλο αυτό είναι:

Πίνακας 4-3. Παράμετροι για τον καθορισμό του GAP central role του Slave SoC.

Scan Interval:1000ms	Συχνότητα διαδικασίας ανίχνευσης.
Scan Window:1000ms	Συνολικός χρόνος ανίχνευσης.
Scan Timeout:0s	Χρόνος που η συσκευή μπαίνει σε timeout. Για το χρόνο αυτό δεν ορίζεται timeout οπότε δεν χρειάζεται να οριστεί συνάρτηση επεξεργασίας συμβάντος Timeout.

Με τις παραπάνω παραμέτρους εξασφαλίζουμε ότι η συσκευή σκανάρει συνεχώς για να συνδεθεί με το ζευγάρι της (peripheral) το συντομότερο δυνατό. Σε πραγματικό περιβάλλον αυτό είναι απαραίτητο για την άμεση αποκατάσταση της σύνδεσης σε περίπτωση που διακοπεί λόγω σφάλματος είτε λόγω απομάκρυνσης του προσθετικού από τον ανάπηρο.

Τέλος καθορίζονται οι παράμετροι σύνδεσης ώστε να επιτυγχάνεται ο μέγιστος ρυθμός αποστολής δεδομένων που επιτρέπεται από το SDK και το hardware που διαθέτουμε

Πίνακας 4-4. Connection Parameters του Slave SoC.

Minimum Conn Interval: 7.5ms	Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης
Maximum Conn Interval: 7.5ms	Ο ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης
Slave latency: 0	Κανένα connection event δεν αγνοείται
Connection Supervision Timeout: 600ms	Χρόνος για επανέλεγχο σύνδεσης

GATT Client

Στην διάταξη μας το Slave SoC έχει προγραμματιστεί αποκλειστικά ως Client. Για να μπορέσει ο Client να χρησιμοποιήσει τις υπηρεσίες του Server πρέπει τις 'ανακαλύψει' πρώτα με την μέθοδο του service discovery. Για να γίνει αυτό πρέπει να δηλωθεί εκ των προτέρων το UUID τόσο του Service όσο και του characteristic που θα χρησιμοποιήσει ο Client. Με τον τρόπο αυτό ο Client θα φάξει το advertisement payload του Server για να βρει το αντίστοιχο Service ώστε να αποκτήσει το handle του. Το στοιχείο αυτό είναι απαραίτητο για την πρόσβαση στην attribute database και στην πληροφορία που αυτή περιέχει.

Πίνακας 4-5. Διαμόρφωση υπηρεσίας GATT πρωτοκόλλου.

Discovered Service UUID :	71D30000-503E-4C75-BA94-3148-F18D941E
Discovered Characteristic1 UUID :	71D30003-503E-4C75-BA94-3148-F18D941E
Discovered Characteristic2 UUID :	71D30002-503E-4C75-BA94-3148-F18D941E

Διαχείριση συμβάντων BLE πρωτοκόλλου για το Slave SoC

Το Slave SoC ξεκινά εξαρχής σε scanning mode. Η λειτουργία σε αυτό το mode απαιτεί τη δημιουργία των παρακάτω συναρτήσεων για την διαχείριση συμβάντων BLE πρωτοκόλλου:

- **Scanning Callback:** Διαχειρίζεται το συμβάν ανίχνευσης μίας BLE συσκευής σε ρόλο peripheral. Για κάθε εκπομπή που ανιχνεύεται γίνεται χρήση της συνάρτησης ανάλυσης advertisement payload. Από το πακέτο αυτό μεγέθους 31 bytes μας ενδιαφέρει το πεδίο του Complete Local Name. Αν υπάρχει αντιστοίχιση με το αντίστοιχο πεδίο στο payload του master microchip επιχειρείται σύναψη σύνδεσης.
- **Connection Callback:** Διαχειρίζεται το συμβάν διασύνδεσης με άλλη συσκευή. Για κάθε σύνδεση (στην περίπτωση μας μπορεί να υπάρξει σύνδεση μόνο με το Master SoC) ξεκινάει η λειτουργία ανίχνευσης υπηρεσίας (launch service discovery). Η λειτουργία αυτή μπορεί να ανακαλύψει όλες τις υπηρεσίες και τα χαρακτηριστικά αυτών. Στην περίπτωση μας δίνετε ως παράμετρος το uuid της υπηρεσίας και του χαρακτηριστικού που ψάχνουμε ώστε να επιταχύνουμε την διαδικασία εύρεσης των handles και να μπορέσουμε να κάνουμε άμεσα χρήση αυτών.
- **Discovered Service Callback:** Διαχειρίζεται το συμβάν ανίχνευσης υπηρεσίας.
- **Discovered Characteristic Callback:** Διαχειρίζεται το συμβάν ανίχνευσης χαρακτηριστικού. Όταν υπάρξει η ανίχνευση γίνεται χρήση του CCCD handle (Client Characteristic Configuration Descriptor). Το handle αυτό είναι απαραίτητο για την διαχείριση των ειδοποιήσεων (notifications) που λαμβάνονται από τον Server. Η επιλογή για εμάς είναι 1 δηλαδή να επιτρέπονται οι ειδοποιήσεις.
- **Discovery Termination Callback:** Διαχειρίζεται το συμβάν λήξης της υπηρεσίας ανίχνευσης.

- **Disconnection Callback:** Διαχειρίζεται το συμβάν τερματισμού της σύνδεσης. Η συσκευή επανέρχεται σε Scanning mode ώστε να μπορέσει να αποκαταστήσει άμεσα την σύνδεση.
- **HVX Callback:** Διαχειρίζεται το συμβάν λήψης ειδοποίησης από τον Server. Στην περίπτωση μας υπάρχει επεξεργασία του FSR Buffer ώστε να επαναδομηθεί η πληροφορία της δύναμης από τα bytes του FSR Buffer στην δεκαδική τιμή (float) που στάλθηκε από τον Server. Το συμβάν αυτό αφορά μόνο την περίπτωση που υπάρχει ενεργή σύνδεση.
- **Task Handle:** Η συνάρτηση αυτή καθορίζει το ρυθμό και την διαμόρφωση των δεδομένων που περιέχονται στις εγγραφές του Client προς τον Server. Ο ρυθμός των εγγραφών είναι στα 7.5ms. Ανά 7.5 ms γίνεται υπολογισμός της θέσης του slave κινητήρα από τους παλμούς που έχει μετρήσει ο Encoder. Η τιμή που είναι μια μεταβλητή τύπου float μετατρέπεται σε ακέραιο με εύρος τιμών από -32.768 μέχρι 32.767. Για να βελτιώσουμε την ακρίβεια μπορούμε να στείλουμε την τιμή σε μορφή float ή double αλλά αυτό θα αυξήσει το μέγεθος του Setpoint Buffer. Το πρόσημο αποθηκεύεται στο πρώτο byte του Setpoint Buffer και η απόλυτη ακέραια τιμή σπάει στα επόμενα δυο bytes.

4.2 Διεπαφή ελέγχου ηλεκτρομηχανικών στοιχείων

Το δεύτερο τμήμα της εφαρμογής αποτέλεσε η δημιουργία μιας διεπαφής (interface) για την απόκτηση της πληροφορίας από τα αισθητήρια όργανα (FSR, Encoder) και η οδήγηση των κινητήρων Master και Slave αντίστοιχα. Το μπλοκ αυτό του λογισμικού αποτελείται από 2 διαφορετικά υπό-μπλοκ στην περίπτωση του Slave SoC και 4 στην περίπτωση του Master SoC. Η διαφορά αυτή προκύπτει από τον έλεγχο θέσης του κινητήρα Master από τον οποίο θα εξαρτηθεί και η επιτυχία της εφαρμογής και από το διάβασμα του αναλογικού σήματος FSR.

4.2.1 Διεπαφή ελέγχου ηλεκτρομηχανικών στοιχείων Master SoC

Το λογισμικό του Master SoC αποτελείται από 4 υπό-μπλοκ.

- **FSR signal output processing:** Το μπλοκ αυτό είναι υπεύθυνο για την ανάγνωση των pin που είναι συνδεδεμένα με την έξοδο του FSR για την λήψη του σήματος δύναμης από τους μύες. Το σήμα εξόδου του FSR είναι αναλογικό και λαμβάνεται κάθε 7.5 ms. Το σήμα λαμβάνεται από A/D μετατροπέα σήματος και μετατρέπεται από την αναλογική τάση [Vmin Vmax] σε [0 1].
- **Motor Drive Block:** Το μπλοκ αυτό είναι υπεύθυνο για την οδήγηση του κινητήρα στα δύο τεταρτημόρια λειτουργίας με χρήση του H-Bridge. Η διεύθυνση περιστροφής του κινητήρα καθώς και η ταχύτητα περιστροφής καθορίζονται από το μπλοκ ελέγχου.
- **Motor Direction and Position Calibration Block:** Το μπλοκ αυτό είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό της θέσης και της φοράς περιστροφής του κινητήρα. Για να γίνει αυτό διαβάζονται τα δύο κανάλια εξόδου του Master Encoder. Για την μέτρηση των παλμών χρησιμοποιήθηκαν δύο τεχνικές. Η πρώτη τεχνική είναι αυτή του interrupts και διασφαλίζει ότι δεν θα χαθεί παλμός

καθώς για κάθε άνοδο (Rising) ή πτώση (Falling) ή αλλαγή (Change) γίνεται κλήση ενός counter. Στην περίπτωση όμως πολλών και συχνών interrupt υπάρχει καθυστέρηση στην εκτέλεση του κώδικα έως και ολική αποτυχία της εφαρμογής. Η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή του rolling όπου περιοδικά ελέγχονται τα κανάλια του Encoder. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει την απρόσκοπτη εκτέλεση του κώδικα αλλά εγκυμονεί τον κίνδυνο να χαθεί παλμός αν ο κινητήρας γυρίζει πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα τον λανθασμένο υπολογισμό θέσης και φοράς περιστροφής. Για τις δύο παραπάνω μεθόδους οι παλμοί μετρούνται μόνο στην άνοδο (rising) του παλμού του πρώτου καναλιού. Η μέθοδος αυτή δίνει ακρίβεια 25% της μεθόδου quadrature decoding. Η επιλογή αυτή έγινε για να αντισταθμίσει την υψηλή συχνότητα interrupt από πολύ ταχείς κινητήρες (>5000rpm). Στην περίπτωση αυτή παρατηρήθηκε ότι το Master SoC δεν μπορούσε να εξυπηρετήσει τα interrupts, και να διατηρήσει την εκτέλεση του προγράμματος και το BLE stack ενώ με την μέθοδο του rolling υπήρχε σφάλμα φοράς περιστροφής και θέσης του άξονα.

- **Motor Control Block:** Το μπλοκ αυτό είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του κινητήρα ώστε να ακολουθήσει την τροχιά του προσθετικού και να δώσει στην διάταξη μας αποτελέσματα αντίστοιχα του κλασσικού EPP ελέγχου με χρήση μηχανικής διασύνδεσης.

4.2.2 Slave electromechanical control interface

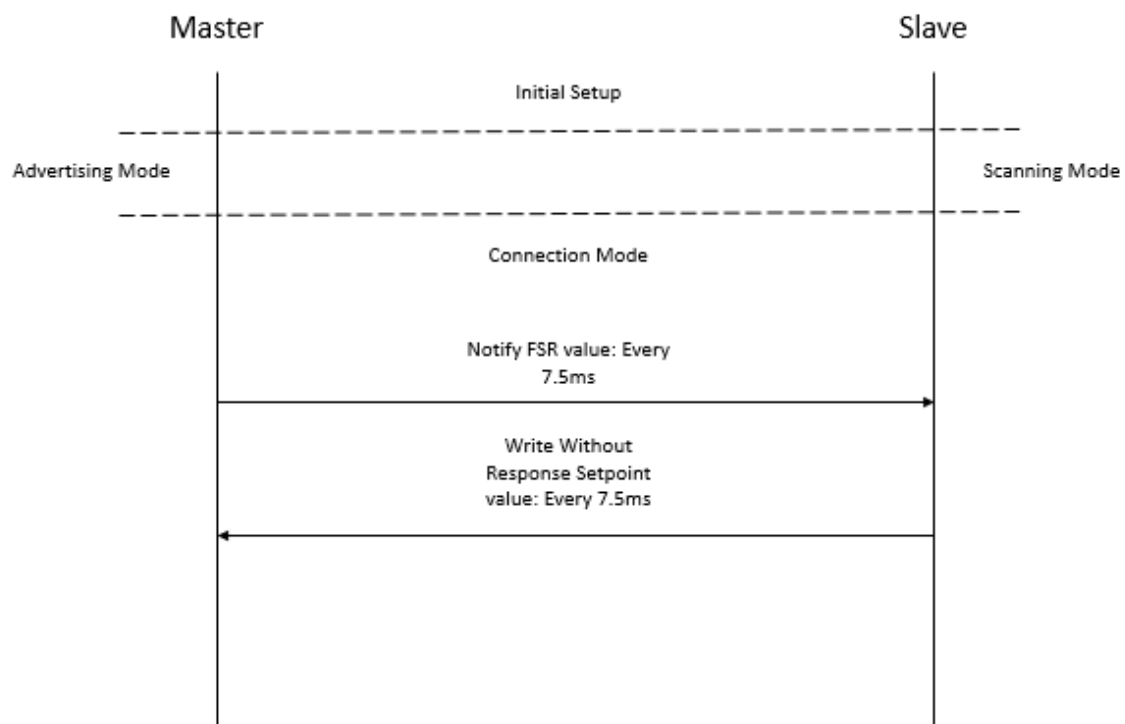
Το λογισμικό του slave microchip αποτελείται από 2 υπό-μπλοκ:

- **Motor Drive Block:** Το μπλοκ αυτό είναι υπεύθυνο για την οδήγηση του κινητήρα στα δύο τεταρτημόρια λειτουργίας με χρήση του H-Bridge. Η διεύθυνση περιστροφής του κινητήρα καθώς και η ταχύτητα περιστροφής καθορίζονται από την τιμή που βρίσκεται εντός του FSR Buffer. Σε διάταξη τύπου bidirectional EPP έχουμε για θετικές τιμές άνοιγμα του προσθετικού και για αρνητικές κλείσιμο ενώ το μέγεθος της δύναμης καθορίζει την ταχύτητα κίνησης του κινητήρα και άρα του προσθετικού.
- **Motor Direction and Position Calibration Block:** Το μπλοκ αυτό είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό της θέσης και της φοράς περιστροφής του κινητήρα. Για να γίνει αυτό διαβάζονται τα δύο κανάλια του Slave Encoder. Οι παλμοί μετρούνται στην άνοδο (rising) του παλμού του πρώτου καναλιού. Το μπλοκ αυτό είναι αντίστοιχο του master.

4.3 Δομικό διάγραμμα εφαρμογής

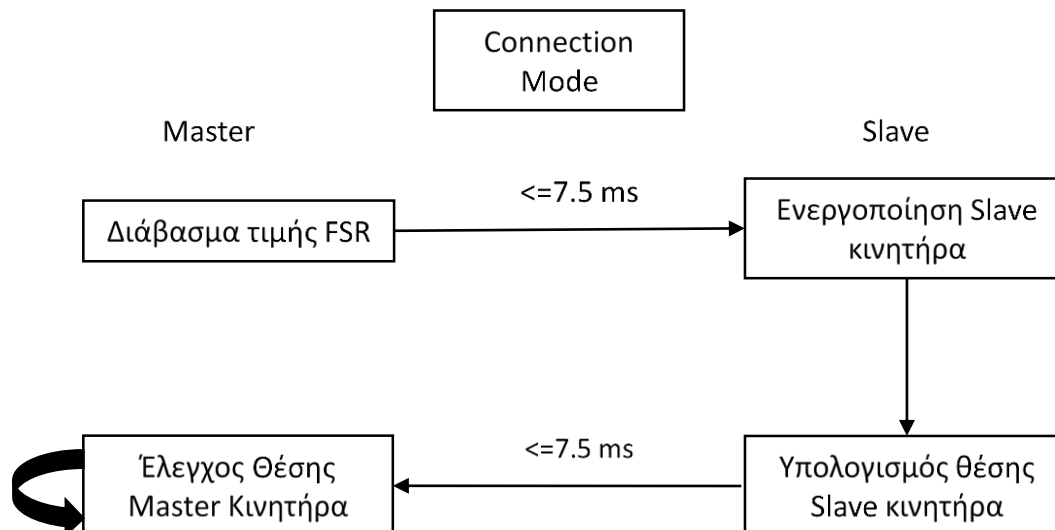
Με την υλοποίηση των δύο διεπαφών για το κάθε SoC (Master και Slave) ολοκληρώνεται η διάταξη ασύρματου του Βιομηχανοτρονικού ελέγχου. Η διάταξη ξεκινά την λειτουργία της όταν και τα δύο SoC τροφοδοτηθούν. Η αρχική φάση αποτελείται από το βασικό setup που τρέχει στα δύο SoC και όταν αυτό ολοκληρωθεί ακολουθεί η διαδικασία σύνδεσης με βάση όσα προαναφέρθηκαν στο BLE πρωτόκολλο και στην διαμόρφωση της διεπαφής επικοινωνίας. Η διαδικασία setup εκτελείται μόνο μια φορά κατά την πρώτη ενεργοποίηση των SoC και εισάγει μια καθυστέρηση 2 ~ 3 sec. Η διαδικασία σύνδεσης και η αναγνώριση των υπηρεσιών έχει αμελητέα διάρκεια της τάξης των microseconds.

Το τέλος της ανίχνευσης υπηρεσιών σηματοδοτεί την έναρξη της δεύτερης φάσης. Στη φάση αυτή κάθε δύναμη που ασκείται στον FSR μεταφέρεται με καθυστέρηση με εύρος από μερικά μs μέχρι 7.5 ms το αργότερο στο Slave SoC και ενεργοποιείται ο κινητήρας του προσθετικού. Ο κινητήρας παραμένει ενεργοποιημένος μέχρις ότου η δύναμη γίνει μηδέν δηλαδή του αποσταλεί τιμή ίση με το 0. Στην περίπτωση του Bidirectional EPP μπορεί το άθροισμα των δυνάμεων να είναι 0. Κατά την διάρκεια της σύνδεσης, η θέση του Slave κινητήρα μετράτε και στέλνεται ανά 7.5 ms στο Master SoC ως σημείο αναφοράς (Setpoint). Το Master SoC ελέγχει κάθε περίπου 1ms την θέση του κινητήρα του και την προσαρμόζει ανάλογα με το Setpoint που έχει λάβει και τον έλεγχο που περιγράφεται στο Control Block ώστε να παρακολουθεί τη θέση του Slave κινητήρα.



Σχήμα 4-3. Ροή πληροφορίας BLE Communication Interface.

Ο ρυθμός με τον οποίο μπορούμε να στέλνουμε ειδοποιήσεις από τον Master Server ή να γράφουμε πληροφορία σε αυτόν εξαρτάται από το Minimum Connection Interval που για την συσκευή μας είναι τα 7.5 ms. Επειδή οι δύο αυτές λειτουργίες τρέχουν αδιάλειπτα κάθε 7.5 ms γίνεται ανταλλαγή πληροφορίας θέσης- δύναμης. Από το Σχήμα 4-4 βλέπουμε ότι η μέγιστη καθυστέρηση που εισάγει το Electromechanical Interface σε συνδυασμό με το Communication Interface είναι τα 16ms από τη στιγμή που η δύναμη θα ασκηθεί μέχρι τη στιγμή που ο κινητήρας του master θα ξεκινήσει να κινείται και 7.5 ms μέχρι να ξεκινήσει ο slave. Στην περίπτωση που η δύναμη ασκηθεί τη στιγμή ανταλλαγής της πληροφορίας αυτό μειώνεται στα 8.5 ms και ο slave ξεκινά να κινείται άμεσα (ελάχιστη καθυστέρηση εισάγεται από την εκτέλεση του κώδικα). Στις παραπάνω τιμές δεν έχει υπολογιστεί η καθυστέρηση που εισάγεται από την εκτέλεση του κώδικα κάθε μπλοκ.



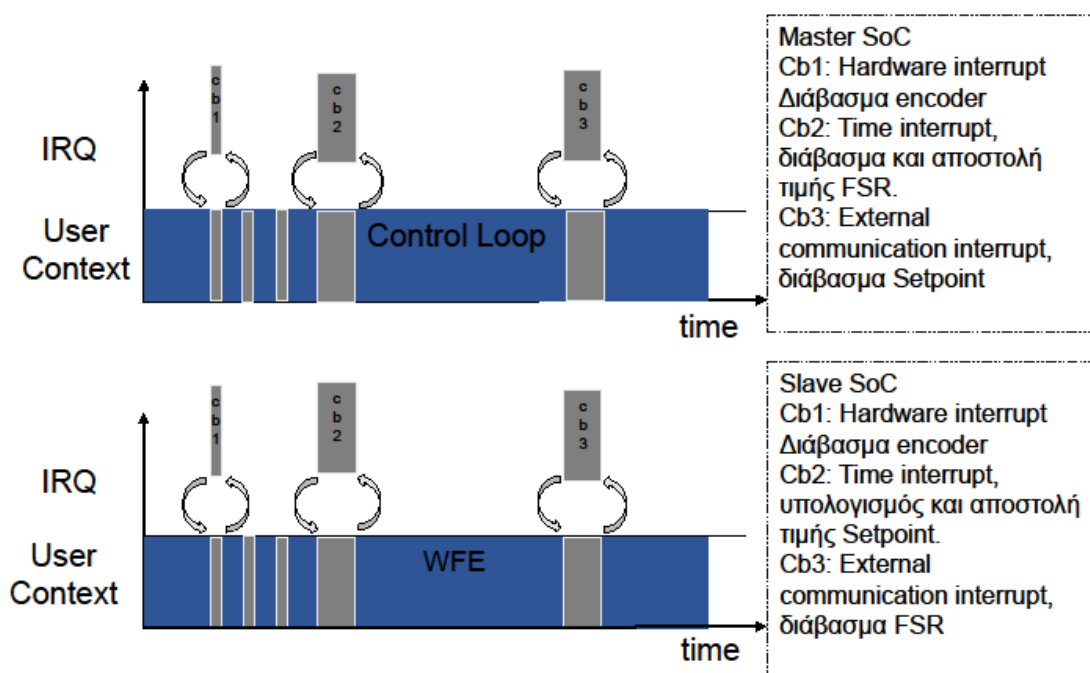
Σχήμα 4-4. Δομικό Διάγραμμα Electromechanical Interface.

4.4 Διαχείριση και επεξεργασία ασύγχρονων συμβάντων

Η χρήση του BLE πρωτοκόλλου για την επικοινωνία απαιτεί την προσέγγιση της διαχείρισης των ασύγχρονων συμβάντων (asynchronous event handling). Η προσέγγιση αυτή μας επιτρέπει να διαχειριστούμε συμβάντα τα οποία δεν γνωρίζουμε πότε θα προκύψουν. Για κάθε συμβάν πρωτοκόλλου δημιουργείτε ένα callback το οποίο μας δίνει την δυνατότητα όταν αυτό συμβεί να το διαχειριστούμε. Τα callbacks ενεργοποιούνται (triggered) από γεγονότα και αντιμετωπίζονται από το λογισμικό ως διακοπές (interrupts) της βασικής ροής (main/user context) εκτέλεσης του προγράμματος. Υπάρχουν τριών τύπων interrupts, τα χρονικά (timers), οι διακοπές υλικού (hardware interrupts) και οι διακοπές συμβάντων επικοινωνίας (BLE interrupts). Η προσέγγιση του asynchronous event εξυπηρετεί τις διακοπές όταν αυτές δημιουργούνται. Όταν μια διακοπή συμβεί τη στιγμή που μια άλλη εξυπηρετείται τότε μπαίνει στην ουρά (queue) και περιμένει την σειρά της για να εξυπηρετηθεί. Η εξυπηρέτηση είναι τύπου FIFO (first in first out). Όταν ολοκληρωθεί η εξυπηρέτηση των διακοπών συνεχίζεται η βασική ροή του προγράμματος που και αυτή αντιμετωπίζεται ουσιαστικά ως interrupt. Η προσέγγιση αυτή πλεονεκτεί στην διαχείριση πολλών διακοπών αν ο χρόνος εκτέλεσης των αντίστοιχων μπλοκ κώδικα είναι μικρός. Σε περίπτωση που κάποια διακοπή απαιτεί την εκτέλεση ενός μπλοκ κώδικα με μεγάλο χρόνο εκτέλεσης τότε δημιουργούνται προβλήματα τα οποία δεν φαίνονται στην διαδικασία του debugging αλλά στο run time είναι καταστροφικά. Αυτό απαιτεί τον καλό προγραμματισμό (scheduling) των γεγονότων. Ενέργειες όπως η αναμονή (blocking code) απαγορεύονται, ενώ άλλες χρονοβόρες διαδικασίες όπως το διάβασμα αναλογικών ακροδεκτών και η χρήση σειριακής επικοινωνίας (UART,SPI) πρέπει να προγραμματίζονται κατάλληλα. Ταυτόχρονα πρέπει να γίνει σωστή διαχείριση της δυναμική μνήμης (dynamic memory allocation) ώστε να μην υπάρξει σύγκρουση (race condition)

μεταξύ δύο interrupt μπλόκ λογισμικού που προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν την ίδια μεταβλητή ή χρήση χώρου μνήμης από έναν μπλόκ που ανήκει και σε άλλο μπλόκ.

Τα callbacks της εφαρμογής φαίνονται στο Σχ. 4-5. Στην πλευρά του Master SoC έχουμε τρία callbacks Το πρώτο ενεργοποιείται από τα hardware interrupts των παλμών εξόδου του Encoder και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θέσης των κινητήρων. Το callback αυτό ενεργοποιείται πολύ συχνά (ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα) και πρέπει ο χρόνος εξυπηρέτησης του να είναι ελάχιστος. Το δεύτερο είναι το διάβασμα του FSR και η αποστολή του μέσω BLE. Είναι timer interrupt προγραμματισμένο κάθε 7.5 ms (minimum connection interval). Το τρίτο ενεργοποιείται από BLE interrupt ώστε να λάβει το Master SoC την θέση του Slave κινητήρα από το Slave Soc Ο βρόγχος ελέγχου εκτελείται στην βασική ροή (main/user context). Τα callbacks από την πλευρά του Slave SoC είναι επίσης τρία. Το πρώτο είναι το ίδιο με του Master SoC. Το δεύτερο ενεργοποιείται από χρονικό interrupt για την αποστολή της θέσης του Slave κινητήρα στο Master SoC κάθε 7.5ms. Το τρίτο είναι το ίδιο με αυτό του Master SoC για την παραλαβή της τιμής του FSR.



Σχήμα 4-5. Multithreading control.

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.5 τα hardware interrupts που προέρχονται από τον Encoder είναι πολύ συχνά και εμφανίζονται με συχνότητα ανάλογη της ταχύτητας του κινητήρα. Ο χρόνος εξυπηρέτησης τους είναι μικρός (4~5 μsecs) αλλά αθροιστικά εισάγουν καθυστέρηση στην ουρά των interrupts και κατά συνέπεια στον βρόχο ελέγχου που εκτελείται στην βασική ροή. Αυτό είναι κομβικής σημασίας καθώς η αύξηση του χρόνου T, της περιόδου που εκτελείται ο έλεγχος μειώνει την απόδοση του ελεγκτή. Τα συμβάντα (events) που σχετίζονται με την επικοινωνία εισάγουν και αυτά την δική τους

καθυστέρηση η οποία είναι χρονικά δεδομένη και σε μικρότερη συχνότητα από αυτή των άλλων callbacks. Αν δεν έχει προλάβει να εξυπηρετηθεί ένα συμβάν επικοινωνίας BLE μέχρι να έρθει το επόμενο τότε η λαβή (handle) για το συμβάν αυτό δείχνει πλέον στο επόμενο συμβάν με αποτέλεσμα το προηγούμενο να μην εκτελεστεί ποτέ. Το ίδιο ισχύει και για τα συμβάντα ενεργοποιούμενα από χρονιστές (timer interrupts). Για το λόγο αυτό τα ευαίσθητα κομμάτια του λογισμικού όπως ο έλεγχος των master κινητήρων πρέπει να μην τοποθετούνται σε αυτά τα μπλόκ αλλά στην βασική ροή.

5 Αξιολόγηση Δυνατότητας Εφαρμογής Ασύρματου ERP

Η διαμόρφωση της ασύρματης τοπολογίας ελέγχου δεν έγινε απευθείας επάνω στην εργαστηριακή διάταξη αλλά σε μια δοκιμαστική ώστε να αξιολογηθεί η δυνατότητα της εφαρμογής της στην εργαστηριακή διάταξη. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το υλικό της δοκιμαστικής διάταξης και οι πειραματικές δοκιμές που έγιναν με σκοπό την αξιολόγηση της διαφάνειας (transparency) της τοπολογίας του ασύρματου ελέγχου με την προσέγγιση θέσης-δύναμης [7]. Η επιτυχία της διάταξης καθορίζεται από την ικανότητα των Master κινητήρων να παρακολουθούν τον Slave κινητήρα κάθε χρονική στιγμή καθώς και από την καθυστέρηση μεταξύ της άσκησης δύναμης στα FSR και της ενεργοποίησης του Slave κινητήρα. Η διάταξη των πειραμάτων αυτών περιλαμβάνει μόνο έναν Master κινητήρα και ένα FSR από την πλευρά του Master SoC είναι δηλαδή μια unidirectional διάταξη ελέγχου (Κεφ. 1.3.3).

5.1 Υλικό και συνδεσμολογία δοκιμαστικής διάταξης

Η δοκιμαστική διάταξη για την οποία εκτελέστηκαν δοκιμές αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία τα οποία είναι τα ίδια από πλευράς Master και Slave:

Faulhaber 1524E006S123 dc motor

Ο κινητήρας που επιλέχθηκε και ως Master και ως Slave περιλαμβάνει Encoder και gearhead και φαίνεται στο Σχ. 5-1. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

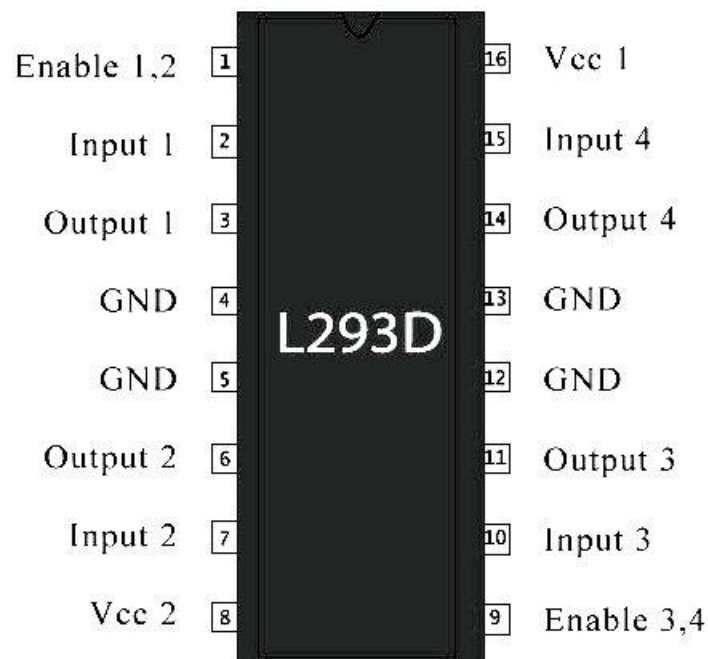
- Διάμετρος 15 mm, Μήκος 24 mm χωρίς τον Encoder και το gearhead.
- Ονομαστική τάση εισόδου 6 V. Μπορεί να υποστηρίξει από 3-9 V.
- Αντίσταση τυλιγμάτων στα 11 ohm
- Stall Current 550 mA στα 6 V
- Ταχύτητα περιστροφής χωρίς φορτίο και gearhead 13.400 rpm στα 6 V
- Gearhead με λόγο 141:1. Για κάθε 141 περιστροφές του κινητήρα έχω 1 περιστροφή του gearhead shaft.
- Συνολικό μήκος μαζί με Encoder και gearhead 61.65 mm συμπεριλαμβανομένου και του gearhead shaft 4 mm. Διάμετρος 6 mm.



Σχήμα 5-1. Κινητήρας με Encoder και gearhead.

L293D H-Bridge

Το H-Bridge που επιλέχθηκε για την οδήγηση του κινητήρα (Master & Slave) είναι το L293D. Η διασύνδεση του με τα SoC φαίνεται στο Σχ. 5-3 Το chip αυτό είναι κατάλληλο για οδήγηση κινητήρα στα δύο τεταρτημόρια λειτουργίας του και μας επιτρέπει επίσης τον έλεγχο της ταχύτητας με χρήση παλμού PWM. Έχει το πλεονέκτημα ότι είναι φθινό, ανθεκτικό ενώ μπορεί να οδηγήσει ταυτόχρονα δύο κινητήρες οπότε αποτελεί ιδανική λύση για διάταξη bidirectional EPP. Μπορεί να οδηγήσει μέχρι 1.2 Amps και έχει τάση λειτουργίας από 4.5 έως 36 V. Μια ακόμα πολύ σημαντική παράμετρος για το συγκεκριμένο h-bridge είναι ότι λειτουργεί ως current controller.

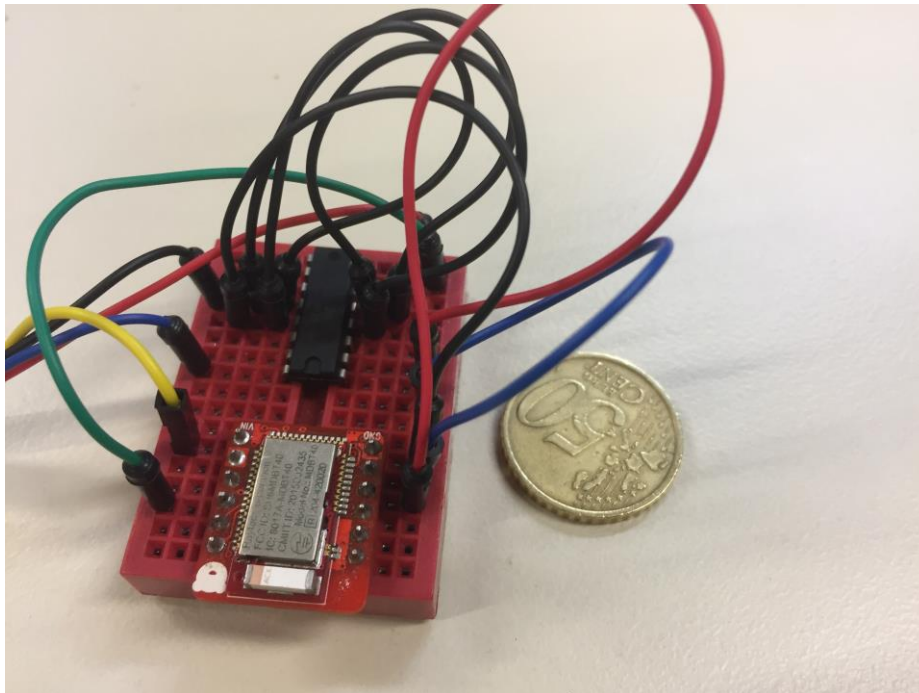


Σχήμα 5-2. L293D pinout.

Τα pins του Σχ. 5.2 έχουν τις εξής λειτουργίες:

- Pin 1 (1,2EN): Ο ακροδέκτης που ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τον κινητήρα ανάλογα με το αν είναι HIGH ή LOW. Στο pin αυτό συνδέεται ο παλμός PWM για έλεγχο ταχύτητας.
- Pin 2 (1A): Ο ακροδέκτης που συνδέεται με το SoC και ρυθμίζει τη φορά περιστροφής σε συνδυασμό με το Pin7. Η τιμή μπορεί να είναι HIGH ή LOW.
- Pin 3 (1Y): Συνδέεται σε έναν από τους δύο ακροδέκτες του κινητήρα.
- Pin 4-5: Ground
- Pin 6 (2Y): Συνδέεται σε έναν από τους δύο ακροδέκτες του κινητήρα.
- Pin 7 (2A): Ο ακροδέκτης που συνδέεται με το SoC και ρυθμίζει τη φορά περιστροφής σε συνδυασμό με το Pin2. Η τιμή μπορεί να είναι HIGH ή LOW.
- Pin 8 (VCC2/V+): Η τροφοδοσία των κινητήρων. Η τάση πρέπει να είναι αντίστοιχη της μέγιστης τάσης λειτουργίας των κινητήρων.

- Pin 9 (3,4EN) Ο ακροδέκτης που ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τον δεύτερο κινητήρα ανάλογα αν είναι HIGH ή LOW. Στο pin αυτό συνδέεται ο παλμός PWM για έλεγχο ταχύτητας.
- Pin 10 (3A): Ο ακροδέκτης που συνδέεται με το SoC και ρυθμίζει τη φορά περιστροφής σε συνδυασμό με το Pin15. Η τιμή μπορεί να είναι HIGH ή LOW.
- Pin 11 (3Y) Συνδέεται σε έναν από τους δύο ακροδέκτες του δεύτερου κινητήρα.
- Pin 12-13: Ground
- Pin 14 (4Y) Συνδέεται σε έναν από τους δύο ακροδέκτες του δεύτερου κινητήρα.
- Pin 15 (5A) Ο ακροδέκτης που συνδέεται με το SoC και ρυθμίζει τη φορά περιστροφής σε συνδυασμό με το Pin10. Η τιμή μπορεί να είναι HIGH ή LOW.
- Pin 16 (VCC1): Χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του H-Bridge για την εκτέλεση λογικών πράξεων. Συνδέεται στα 5 V.



Σχήμα 5-3. Κύκλωμα H-Bridge και SoC (Master & Slave).

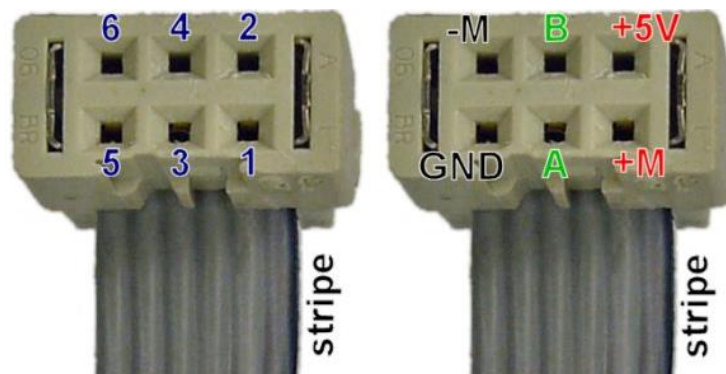
Encoder HES164A

Ο Encoder είναι magnetic rotary incremental quadrature, τεχνολογίας Hall Effect με δύο κανάλια. Η τροφοδοσία του Encoder θεωρητικά μπορεί να πάρει τιμές από 4.5 V μέχρι 15 V. Για κάθε περιστροφή του gearshaft έχουμε 141 παλμούς (ppr) σε κάθε κανάλι. Άρα έχουμε ακρίβεια στις 2.55 μοίρες. Για μικρότερη γωνία κίνησης δεν παίρνουμε παλμό. Για τη μέτρηση των δύο καναλιών δεν χρειάζεται pull up resistor καθώς περιλαμβάνεται στο κύκλωμα του Encoder. Μπορούμε παρόλα αυτά να εισάγουμε τέτοιες αντιστάσεις στο εξωτερικό κύκλωμα αν χρειαζόμαστε ταχύτερο rise time του παλμού εξόδου των καναλιών. Με βάση τα παραπάνω η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του gearshaft είναι $13.400/141=95$

rpm. Με Encoder 141ppr έχουμε $95 \cdot 141 / 60 = 223$ παλμούς ανά δευτερόλεπτο δηλαδή 1 παλμό ανά 4.5ms για τροφοδοσία 6 V. Η τροφοδοσία καθορίζει την μέγιστη ταχύτητα με βάση την χαρακτηριστική τάσης ταχύτητας για κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Η σύνδεση του κινητήρα και του Encoder με το SoC (Master & Slave) γίνονται μέσω υποδοχής 6 ακροδεκτών που καταλήγει μέσω καλωδιοταινίας στον κινητήρα. Οι υποδοχές που φαίνονται στο Σχήμα 3-6 αντιστοιχούν σε:

1. Θετικός ακροδέκτης τροφοδοσίας του κινητήρα. Μπορεί να συνδεθεί είτε σε γείωση είτε σε τροφοδοσία από 3-9V
2. Θετικός ακροδέκτης τροφοδοσίας VCC Encoder. Μπορεί να συνδεθεί σε 4.5 έως 15 V
3. Έξοδος καναλιού A. Περιέχει εσωτερική pull-up αντίσταση στα 10 KΩ. Η τιμή εναλλάσσεται μεταξύ ground και VCC
4. Έξοδος καναλιού B. Περιέχει εσωτερική pull-up αντίσταση στα 10 KΩ. Η τιμή εναλλάσσεται μεταξύ ground και VCC
5. Ground για τον Encoder. Μπορεί να είναι είτε το ίδιο είτε διαφορετικό με αυτό του κινητήρα.
6. Αρνητικός ακροδέκτης τροφοδοσίας του κινητήρα. Μπορεί να συνδεθεί είτε σε γείωση είτε σε τροφοδοσία από 3 έως 9 V



Σχήμα 5-4. Συνδεσμολογία υποδοχής ακροδεκτών.

Η διασύνδεση των κινητήρων Master και Slave και των Encoder τους με τα αντίστοιχα SoC's φαίνεται στα Σχ.5-6, 5-7. Ο Encoder αντιπροσωπεύεται από διαφορετικό μπλοκ. Η συνδεσμολογία είναι ίδια τόσο για το Master όσο και για το Slave SoC σε διάταξη unidirectional EPP ελέγχου.

FSR SEN-0937

Ο αισθητήρας δύναμης που χρησιμοποιήθηκε για την διάταξή μας είναι το μοντέλο SEN-0937 της Sparkfun και φαίνεται στο Σχ. 5-5 Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- Διαστάσεις : Μήκος 6.0325 cm. Μέγιστο πλάτος 1.905 cm.
- Επιφάνεια για την μέτρηση ασκούμενης δύναμης: διάμετρος 1.27 cm.
- Σχήμα επιφάνειας αισθητήρα: Κυκλικό.

- Ελάχιστη μετρούμενη δύναμη 100g.
- Μέγιστη μετρούμενη δύναμη 10kg.
- Διάρκεια ζωής >10 εκατομμυρίων ενεργοποιήσεων.

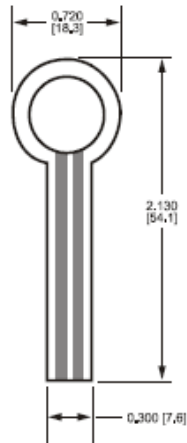


Figure 8:
Part No. 402 (0.5" Circle)

Active Area: 0.5" [12.7] diameter

Nominal thickness: 0.018" [0.46 mm]

Material Build:

Semiconductive Layer

0.005" [0.13] Ultem

Spacer Adhesive

0.006" [0.15] Acrylic

Conductive Layer

0.005" [0.13] Ultem

Rear Adhesive

0.002" [0.05] Acrylic

Connector

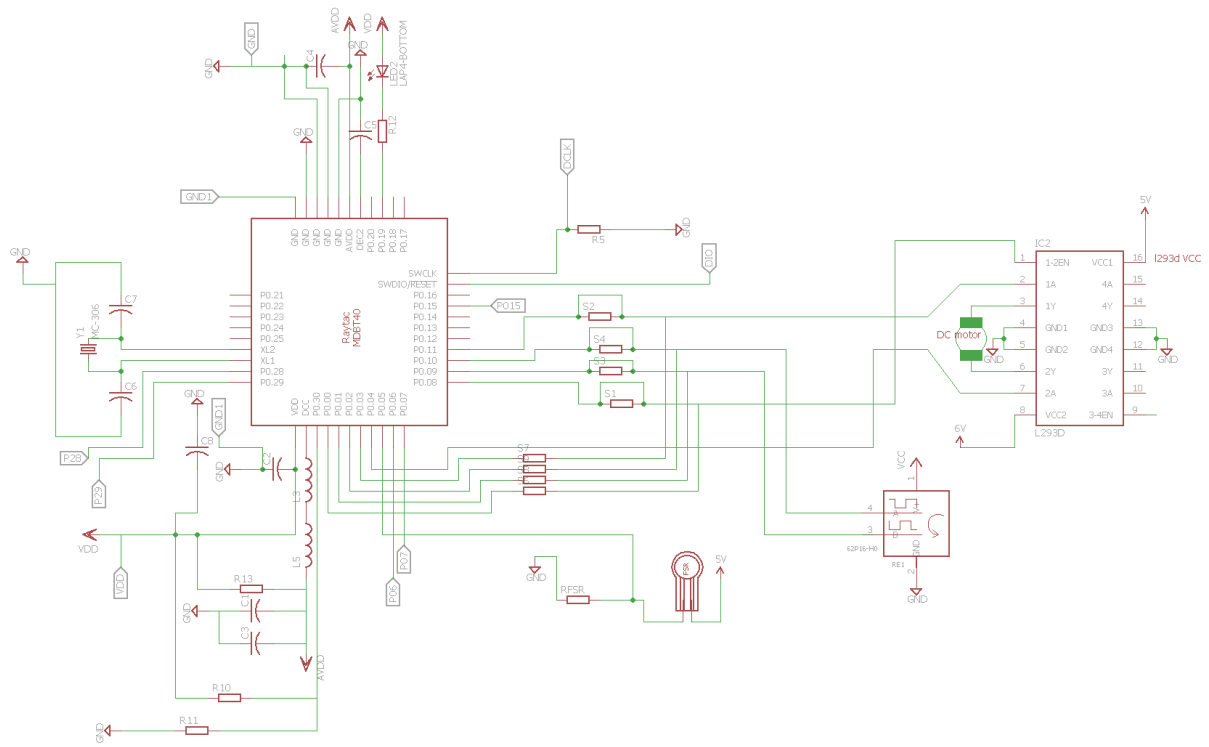
a. No connector

b. Solder Tabs (not shown)

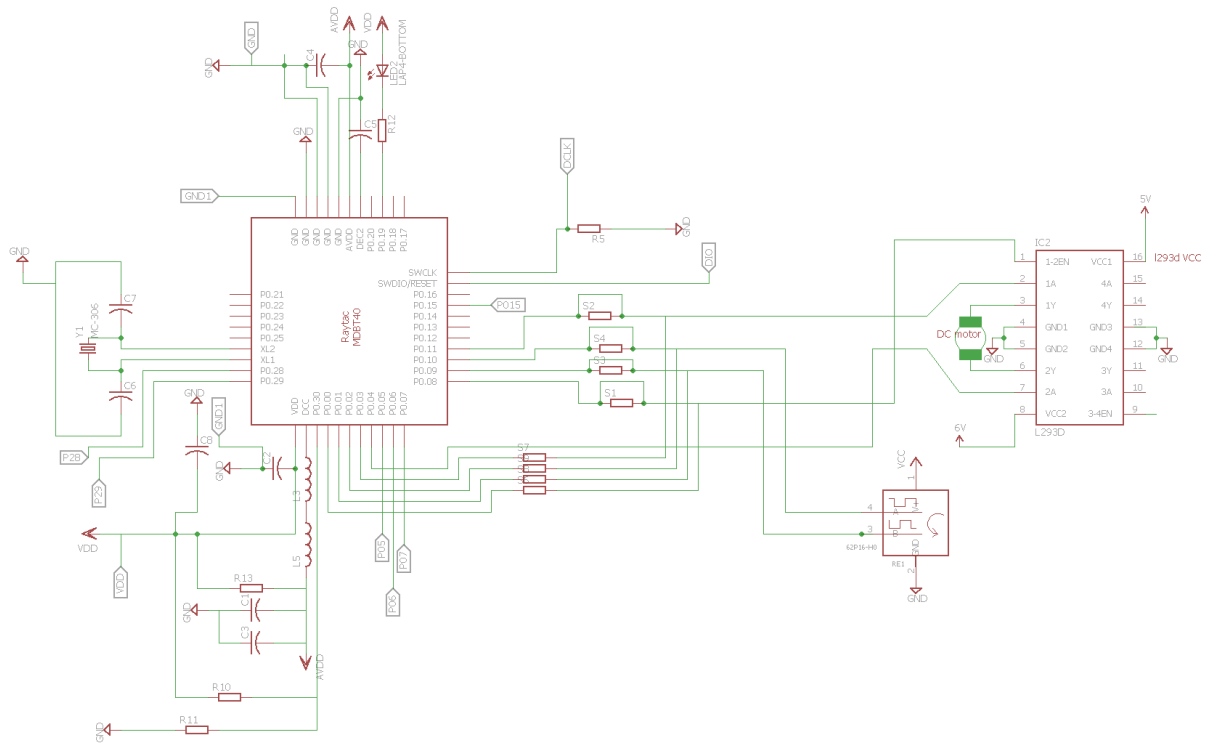
c. AMP Female connector

Σχήμα 5-5. Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα.

Το πλήρες σχηματικό για την συνδεσμολογία των Master και Slave SoC με τα υπόλοιπα στοιχεία της διάταξης φαίνεται στο Σχ. 5-6 και 5-7 αντίστοιχα.



Σχήμα 5-6. Ολοκληρωμένη συνδεσμολογία για διάταξη unidirectional EPP του Master SoC.



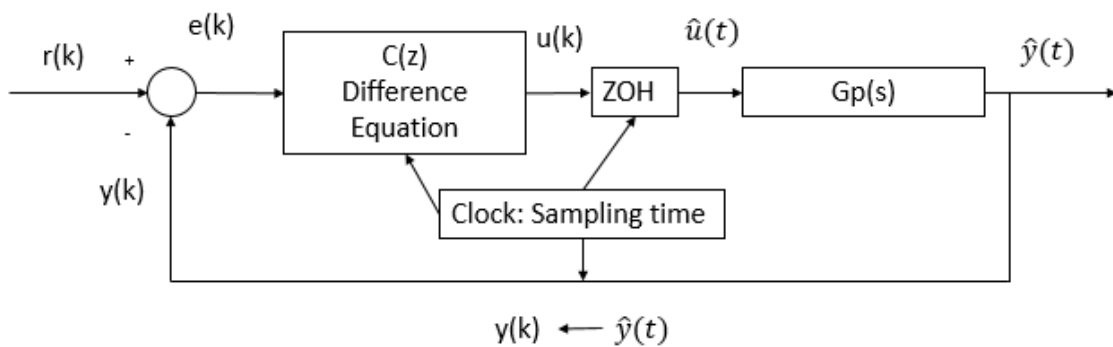
Σχήμα 5-7. Ολοκληρωμένη συνδεσμολογία για διάταξη unidirectional EPP του Slave SoC.

5.2 Αναγνώριση παραμέτρων συστήματος

Η αναγνώριση των παραμέτρων του συστήματος για την εξαγωγή της συνάρτησης μεταφοράς έγινε με χρήση της απόκρισης θέσης του κινητήρα σε βηματική είσοδο για κλειστό βρόχο ελέγχου. Το σύστημα που καλούμαστε να ελέγξουμε καθότι πρόκειται για dc κινητήρα με βάση την Εξ. 3-12 θα έχει την μορφή:

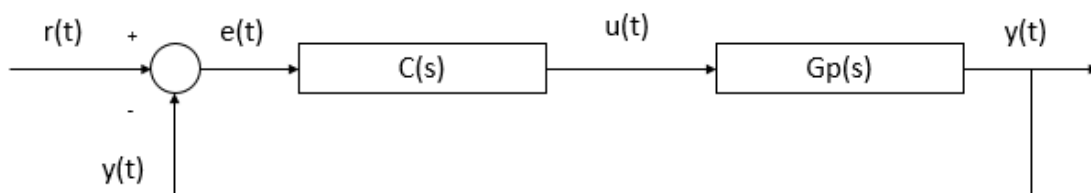
$$G_p(s) = \frac{K}{s(s+a)} \quad (5-1)$$

Για ψηφιακό έλεγχο μέσω SoC ο βρόχος ελέγχου έχει την μορφή του Σχ. 5-8 όπου η συνάρτηση μεταφοράς αντιπροσωπεύει τον κινητήρα μαζί με το H-Bridge.



Σχήμα 5-8. Βρόχος ελέγχου με χρήση SoC.

Το ισοδύναμο για το συνεχές σύστημα έχει την μορφή που φαίνεται στο Σχ. 5-9



Σχήμα 5-9. Βρόχος ελέγχου συνεχούς συστήματος.

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου για μοναδιαία ανατροφοδότηση θα είναι της μορφής:

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{Y}{R} \quad (5-2)$$

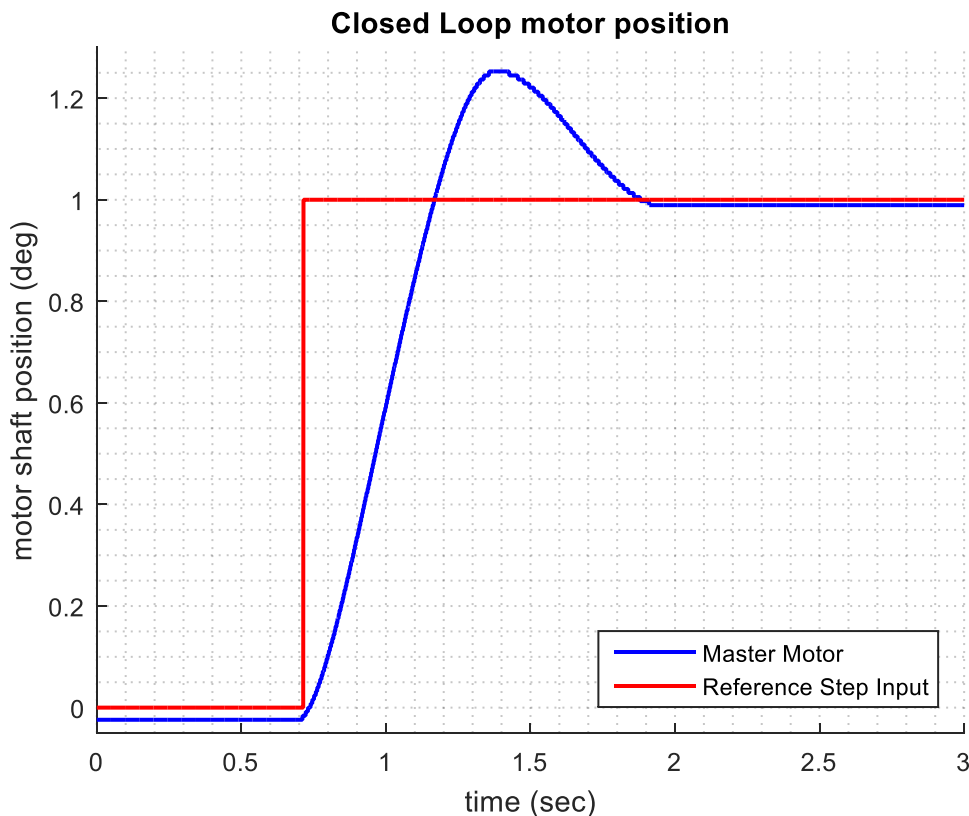
Για να προσεγγίσουμε τις παραμέτρους ω_n , ζ δώσαμε βηματική είσοδο σε μοίρες.

$$Y(s) = T(s)R(s) \quad R(s) = \frac{1}{s} \quad (5-3)$$

Ο ελεγκτής επιλέχθηκε τυχαία ως ένας P ελεγκτής της μορφής:

$$C(s) = K_p = 0.5 \quad (5-4)$$

Η απόκριση του συστήματος για την βηματική διέγερση είναι της μορφής που παρουσιάζεται στο Σχ. 5-10:



Σχήμα 5-10. Απόκριση συστήματος σε βηματική είσοδο.

Από την παραπάνω απόκριση παρατηρήσαμε τα εξής:

- Ο άξονας του κινητήρα κατά την εκκίνηση δεν βρίσκεται στην θέση 0 αλλά στις -0.024 μοίρες. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την τροφοδοσία του SoC αυτό εισέρχεται σε μια φάση αρχικοποίησης (initialization) που διαρκεί μερικά milliseconds. Στην φάση αυτή, όπου το πρόγραμμα δεν έχει ξεκινήσει ακόμα εμφανίζεται μια μικρή τάση σε όλους τους ακροδέκτες του SoC οπότε μετακινείται ελάχιστα ο κινητήρα χωρίς να μετρείται η θέση του.
- Έχουμε σφάλμα τελικής θέσης 0.01 μοίρες το οποίο οφείλεται στην προηγούμενη αρχική συνθήκη και στην ακρίβεια του Encoder που είναι 2.55 μοίρες. Θεωρητικά επειδή το σύστημα μας είναι τύπου 1 θα έπρεπε να έχουμε μηδενικό σφάλμα θέσης.

Υπολογισμός παραμέτρων ω_n και ζ :

Από την απόκριση του συστήματος στο Σχ. 5-10 βλέπουμε για βηματική είσοδο που δίνεται την χρονική στιγμή $t=0.711$ s ότι:

$$\text{Peak time } t_p = 0.6473 \text{ s} \quad (5-5)$$

$$\text{Maximum Overshoot } M_p = 1.253 - 0.9894 = 0.2636 \quad (5-6)$$

$$\text{Maximum Percentage Overshoot } PO = \frac{0.2636}{0.9894} * 100\% = 26.6\% \quad (5-7)$$

$$\text{damping ratio } \zeta = \sqrt{\frac{(\ln \frac{PO}{100})^2}{\pi^2 + (\ln \frac{PO}{100})^2}} = 0.388 \quad (5-8)$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \Rightarrow \omega_n = 5.27 \quad (5-9)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του κλειστού συστήματος που προκύπτει με εφαρμογή των παραμέτρων αυτών είναι:

$$T(s) = \frac{27.73}{s^2 + 4.09s + 27.73} \quad (5-10)$$

$$T(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \Rightarrow \frac{27.73}{s^2 + 4.09s + 27.73} = \frac{\frac{K_p K}{s(s-p)}}{1 + \frac{K_p K}{s(s-p)}} \Rightarrow \frac{27.73}{s^2 + 4.09s + 27.73} = \frac{K_p K}{s^2 - sp + K_p K}$$

$$G(s) = \frac{55.46}{s(s + 4.09)} \quad (5-11)$$

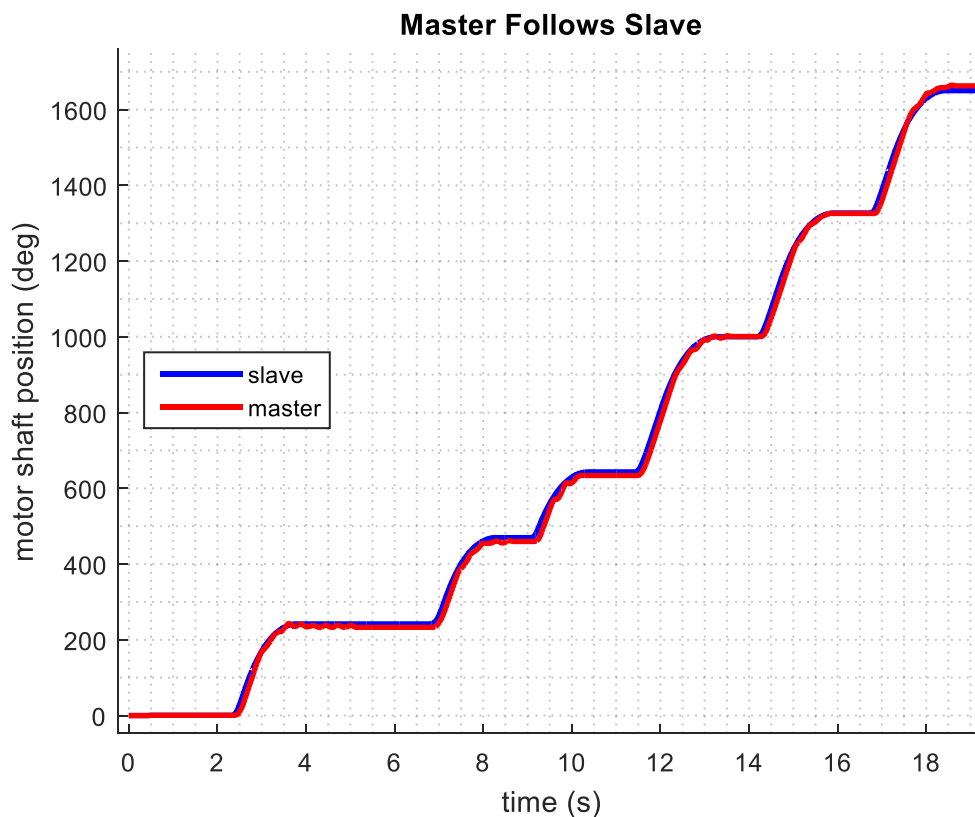
5.3 Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμαστικής διάταξης

Σκοπός των μετρήσεων στην δοκιμαστική διάταξη είναι:

1. Έλεγχος ανταπόκρισης Slave κινητήρα σε εντολή δύναμης που δέχεται το Master FSR. Εξετάζεται η καθυστέρηση της ενεργοποίησης του Slave κινητήρα για είσοδο δύναμης στο Master FSR.
2. Έλεγχος ανταπόκρισης Master κινητήρα σε εντολή θέσης από το Slave SoC: Εξετάζεται η ικανότητα του Master κινητήρα να παρακολουθεί τις κινήσεις του Slave κινητήρα.

Το σύστημα διεγείρεται από είσοδο δύναμης τυχαίου πλάτους, διάρκειας και συχνότητας στον Master αισθητήρα δύναμης (FSR). Ο υπολογισμός της θέσης γίνεται με την μέθοδο της δειγματοληψίας (polling) των καναλιών των Encoders (Master & Slave). Στο Σχ. 5-11 φαίνεται η ικανότητα του Master κινητήρα να παρακολουθεί την κίνηση του Slave κινητήρα για διαδοχικές τυχαίες διεγέρσεις του FSR. Οι κινητήρες κινούνται προς μία διεύθυνση καθότι η τοπολογία ελέγχου είναι αυτή του unidirectional EPP. Το σήμα διεγέρσης δίνεται σε ένα FSR. Σε περίπτωση bidirectional θα είχαμε δύο FSR, και η

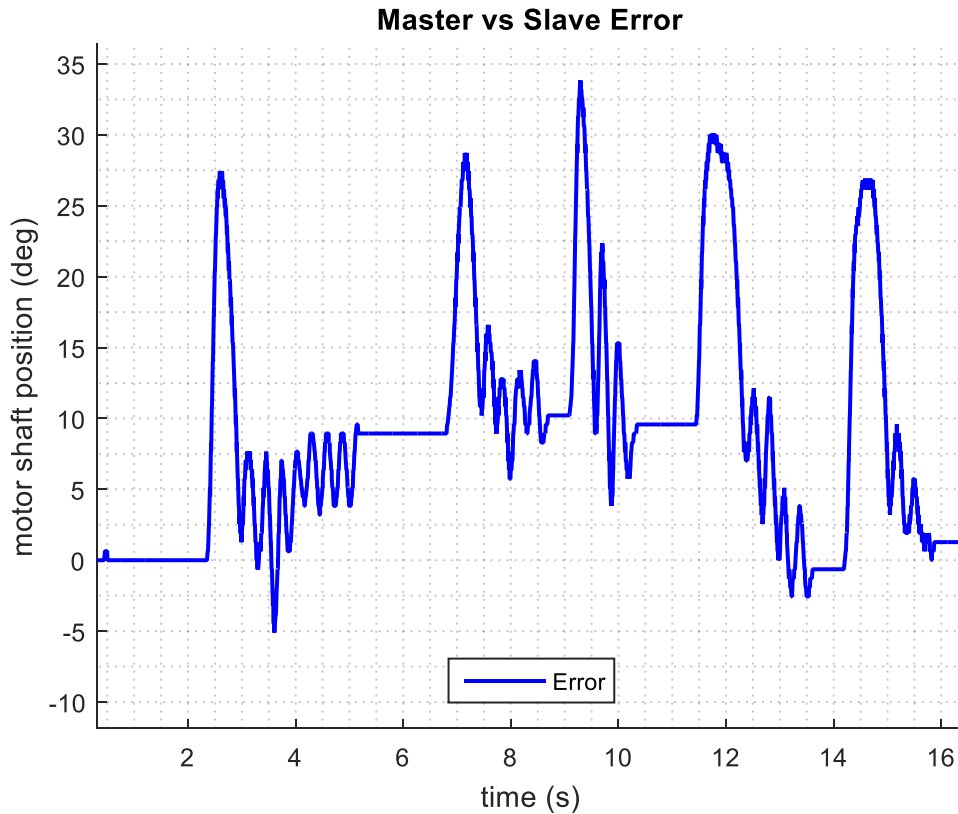
διαφορά των σημάτων θα ήταν η είσοδος του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή θα είχαμε και αντίθετη περιστροφή. Ο έλεγχος που έχει επιλεγεί για το σύστημα είναι τύπου P με $K_p=5$.



Σχήμα 5-11. Master κινητήρας ακολουθεί Slave κινητήρα.

Στο Σχ. 5.12. βλέπουμε το σφάλμα για τον P έλεγχο που ανέρχεται κατά μέση τιμή (mean) στις 3.64 μοίρες. Στην διάταξη αυτή επειδή οι κινητήρες είναι αργοί έχουμε ακρίβεια υπολογισμών με την μέθοδο της δειγματοληψίας χωρίς να κινδυνεύουμε να χάσουμε παλμούς.

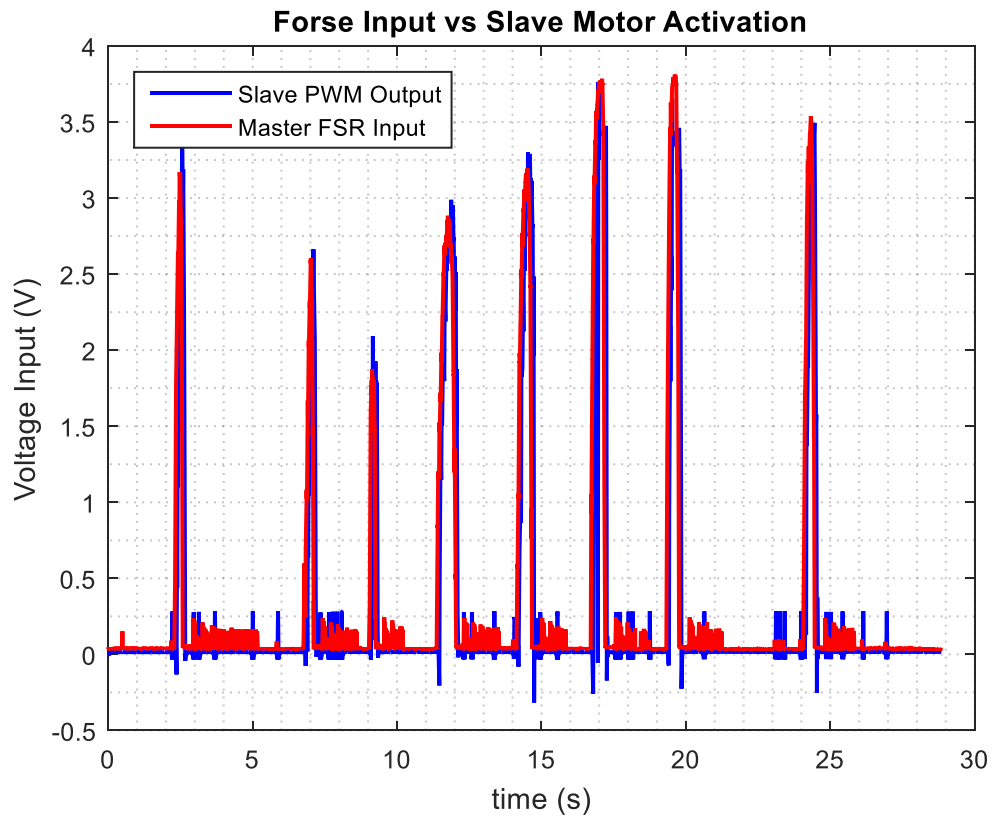
Η καθυστέρηση του Master κινητήρα στην προσπάθειά του να ακολουθήσει τον Slave κινητήρα είναι 44 ms για την εκκίνηση και αντίστοιχη για το Settling time. Όπως προαναφέραμε χρειάζεται 7.5 ms κατ' ελάχιστο για να στείλει το Slave SoC την θέση του στο Master SoC χωρίς να υπολογίζουμε το latency (2.5ms) και τον χρόνο εκτέλεσης του συγκεκριμένου callback. Η περαιτέρω καθυστέρηση οφείλεται στον χρόνο εκτέλεσης των υπόλοιπων callbacks. Η βασική ροή (main loop) όπου εκτελείται ο έλεγχος του κινητήρα έχει χρόνο εκτέλεσης run time 4 ms. Αντίστοιχο χρόνο εκτέλεσης έχουν και τα callbacks των συμβάντων BLE πρωτοκόλλου.



Σχήμα 5-12. Σφάλμα του Master στην παρακολούθηση της τροχιάς του Slave.

Στα Σχ. 5-13 φαίνεται η διέγερση του συστήματος με είσοδο στον Master FSR σε σχέση με το σήμα ενεργοποίησης του Slave κινητήρα. Ένα κατωδιαβατό φίλτρο έχει εφαρμοστεί στο σήμα PWM ώστε να μετατραπεί στην αντίστοιχη αναλογική τιμή τάσης.

Η καθυστέρηση μεταξύ της διέγερσης του FSR και της ενεργοποίησης του Slave κινητήρα ανέρχεται στα 45ms. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα η τοπολογία ελέγχου είναι διαφανής [7]. Επίσης η καθυστέρηση μεταξύ διέγερσης FSR ενεργοποίησης Slave κινητήρα και μεταξύ Slave κινητήρα και Master κινητήρα είναι μικρότερη των 50 ms με αποτέλεσμα να μην γίνεται αντιληπτή από τον ανθρώπινο εγκέφαλο.



Σχήμα 5-13. Σήμα διέγερσης FSR σε σχέση με έξοδο PWM ενεργοποίησης Slave κινητήρα

6 Εφαρμογή Ασύρματου EPP

Με βάση τα αποτελέσματα του Κεφ. 5 η τοπολογία ασυρμάτου ελέγχου EPP μπορεί να εφαρμοστεί στην εργαστηριακή πειραματική διάταξη. Σκοπός των πειραμάτων που διεξήχθησαν είναι η αξιολόγηση της ασύρματης τοπολογίας ελέγχου EPP σε σχέση με την τοπολογία Βιομηχανοτρονικού EPP που παρουσιάζεται στην εργασία [16],[17].

6.1 Αναγνώριση παραμέτρων συστήματος

Ο έλεγχος των Master κινητήρων της εργαστηριακής πειραματικής διάταξης που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 απαιτεί την αναγνώριση των παραμέτρων του συστήματος. Η διαδικασία έγινε με χρήση της βηματικής απόκρισης ταχύτητας ανοιχτού βρόχου για κάθε Master κινητήρα (αριστερό και δεξί), με βάση τις εξισώσεις μοντελοποίησης για DC κινητήρα που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 3.1. Τα πειράματα για την ταυτοποίηση του συστήματος έγιναν με τους Master κινητήρες διασυνδεδεμένους στους κοχλίες ώστε να έχουμε ένα πιο ακριβές μοντέλο της συμπεριφοράς τους μέσα στη διάταξη. Για έλεγχο ροπής με βάση την Εξ. 3-4 έχουμε στο σύστημα μας είσοδο το ρεύμα που τραβάει ο κινητήρας. Για να μετρηθεί το ρεύμα αυτό συνδέθηκε σε σειρά με τον κινητήρα μία αντίσταση $R=1.64 \Omega$ στα άκρα της οποίας μετρήθηκε η τάση και εν συνεχεία το ρεύμα του κινητήρα. Για την αναγνώριση των παραμέτρων του συστήματος ελήφθη υπόψη και η τριβή Coulomb που φαίνεται στην Εξ. 6-2 με την Εξ. 3-4 να μετατρέπεται στην Εξ. 6-1.

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = K_t i - c \operatorname{sgn} \dot{\theta} \quad (6-1)$$

$$c = K_t i_f \quad (6-2)$$

Η έξοδος του συστήματος μας είναι η γραμμική μετατόπιση του σχοινιού που είναι συνδεδεμένο σε κάθε κινητήρα και δίνει στον χειριστή την αίσθηση της μετατόπισης όπως περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 3. Η Εξ. 6.3 συνδέει την γωνιακή μετατόπιση του κινητήρα με την γραμμική μετατόπιση [15] του σχοινιού για χρήση leadscrew.

$$\theta(t) = x(t) \frac{2\pi}{h} \quad (6-3)$$

Όπου h είναι το βήμα του κοχλίου που μετατρέπει την γραμμική σε περιστροφική κίνηση και δίνεται από τον κατασκευαστή:

$$h = 1.22 \text{ mm} / r \quad (6-4)$$

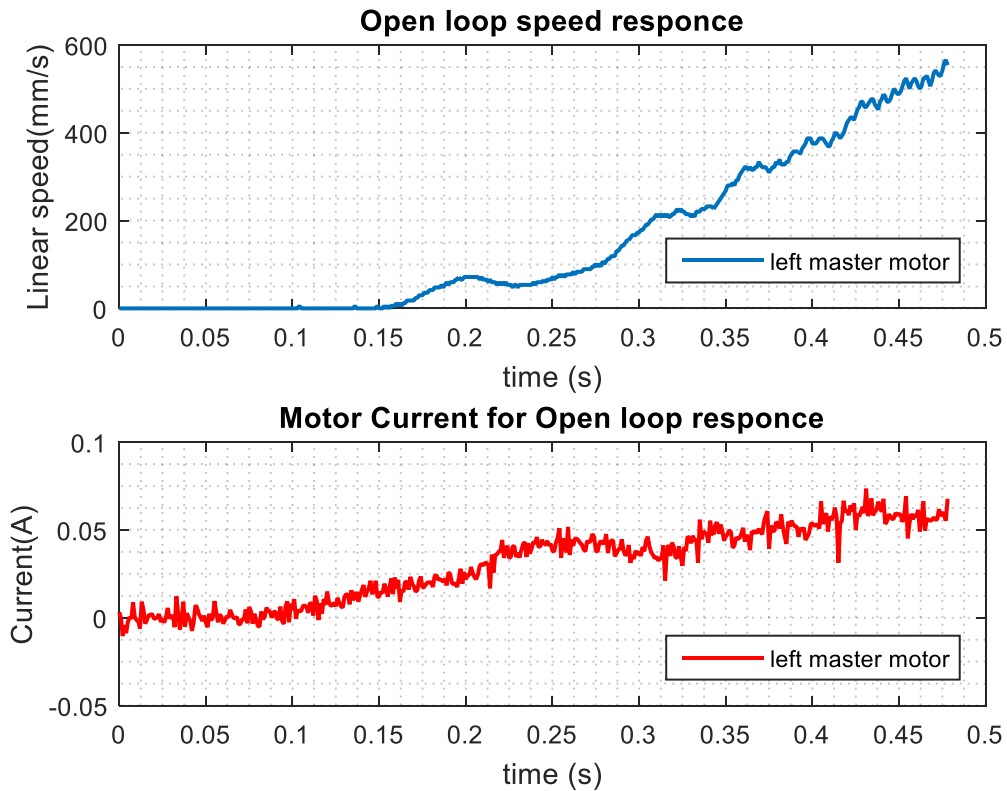
Με χρήση της Εξ. 6-3 η Εξ 6-1 μετατρέπεται στην Εξ 6-4.

$$\frac{2\pi}{h} J\ddot{x} + \frac{2\pi}{h} b\dot{x} = K_t i - c \operatorname{sgn} \dot{x} \quad (6-5)$$

Το ρεύμα i_f της Εξ. 6-2 είναι το ρεύμα που χρειάζεται ο κινητήρας για να ξεπεράσει την τριβή Coulomb και το μετράμε ακριβώς μόλις ξεκινήσει ο κινητήρας πάνω στην βοηθητική αντίσταση που είναι συνδεδεμένη σε σειρά με τον κινητήρα. Για τον υπολογισμό του i_f εφαρμόσαμε μία τάση στους

κινητήρες και μετρήσαμε την ταχύτητα τους σε σχέση με το ρεύμα που τους διαρρέει όπως φαίνεται στα Σχ. 6-1 και 6-2. Για τον αριστερό Master κινητήρα με βάση το Σχ. 6-1 κατά την στιγμή της εκκίνησης ισχύει:

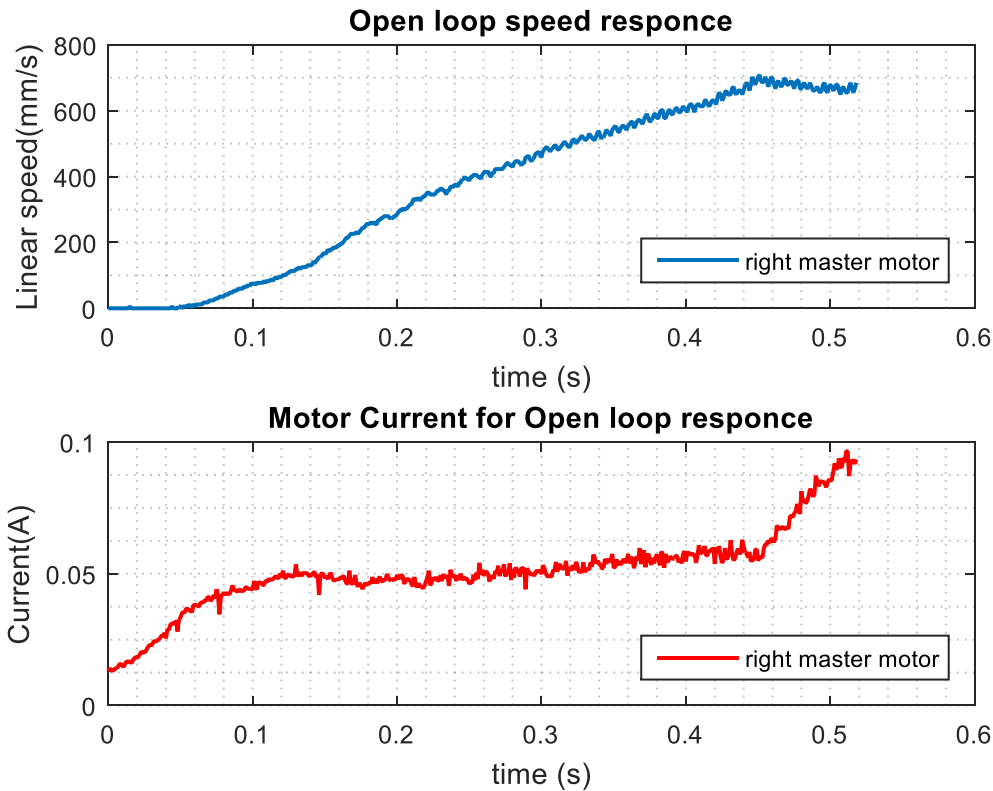
$$i_f = 22.3mA \quad (6-6)$$



Σχήμα 6-1. Ρεύμα αριστερού Master κινητήρα σε σχέση με την ταχύτητα κατά την εκκίνηση.

Με βάση το Σχ. 6-2 για το ρεύμα κατά την εκκίνηση του δεξιού Master κινητήρα ισχύει:

$$i_f = 35.4mA \quad (6-7)$$



Σχήμα 6-2. Ρεύμα δεξιού Master κινητήρα σε σχέση με την ταχύτητα κατά την εκκίνηση.

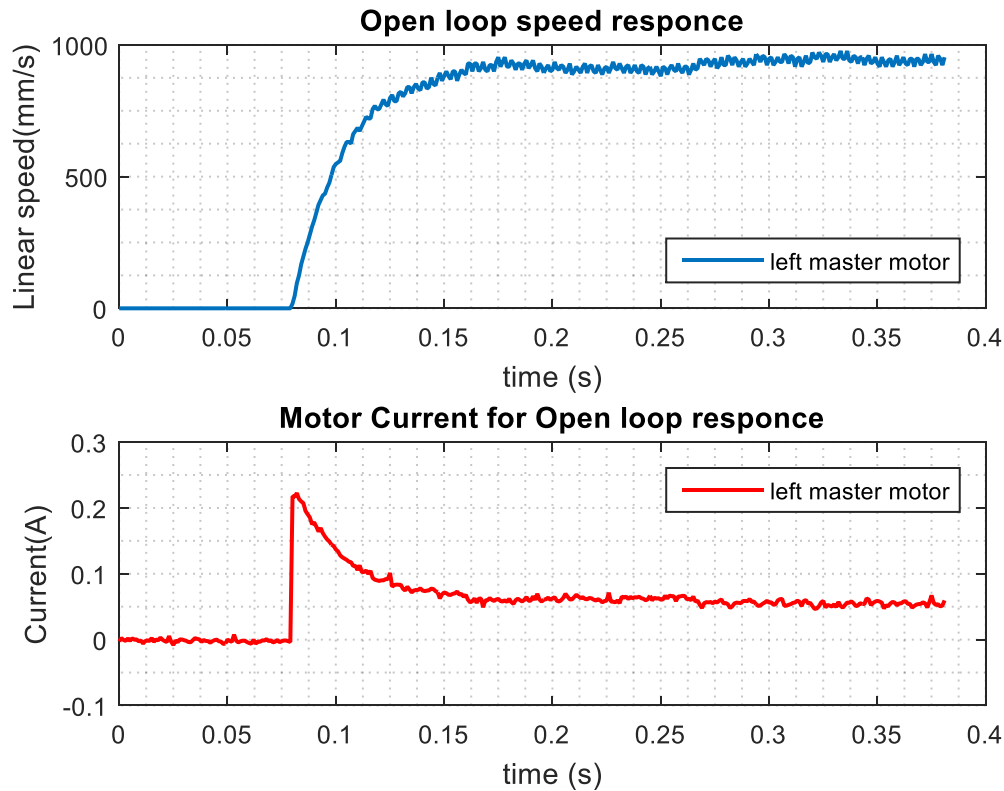
Στην μόνιμη κατάσταση, όταν $\ddot{x} = 0$ η απόκριση ταχύτητας ανοιχτού βρόχου του συστήματος φαίνεται στο Σχ. 6-3 για τον αριστερό Master κινητήρα και στο Σχ. 6-4 για τον δεξί. Από την Εξ.6-5 αν θεωρήσουμε ότι $\ddot{x} = 0$ στην μόνιμη κατάσταση, υπολογίζεται η σταθερά της ιξώδους τριβής b με βάση την Εξ. 6-8:

$$b = \frac{hK_t}{2\pi\dot{x}_{ss}}(i_{ss} - i_f) \quad (6-8)$$

Η ροπή αδράνειας είναι τότε:

$$J = b \cdot \tau_{mech} \quad (6-9)$$

Όπου τ_{mech} είναι η μηχανική χρονική σταθερά του κινητήρα και μετρείται ως ο χρόνος που κάνει ο κινητήρας να φτάσει στο 60% της ταχύτητας μόνιμης κατάστασης.



Σχήμα 6-3. Απόκριση ανοιχτού βρόχου για αριστερό Master κινητήρα.

Για τον αριστερό Master κινητήρα υπολογίστηκαν ρεύμα, ταχύτητα μόνιμης κατάστασης, μηχανική σταθερά:

$$i_{ss} = 247.7 \text{ mA} \quad (6-10)$$

$$\dot{x}_{ss} = 977 \text{ mm} / \text{s} \quad (6-11)$$

$$\tau_{mech} = 25 \text{ ms} \quad (6-12)$$

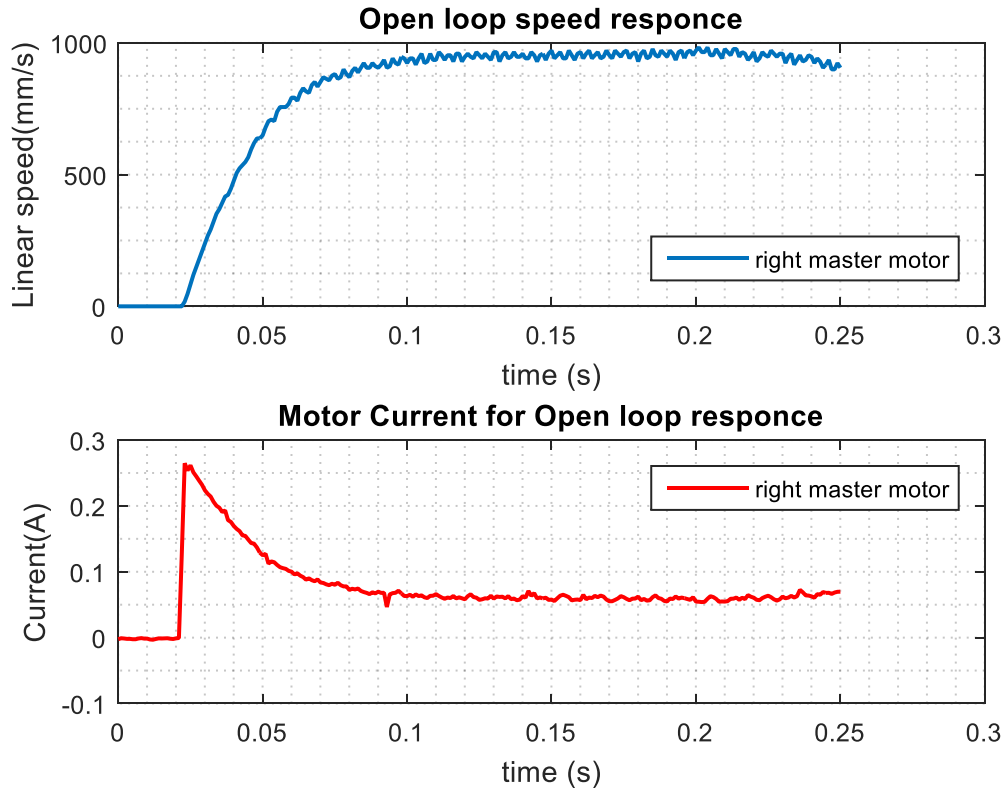
Η σταθερά ροπής του κινητήρα δίνεται από τον κατασκευαστή:

$$K_t = 6.44 \text{ N} \cdot \text{mm} / \text{A} \quad (6-13)$$

Με αντικατάσταση των Εξ. 6-6, 6-10, 6-11 6-12 και 6-13 στις Εξ. 6-8, 6-9 υπολογίζεται για τον αριστερό κινητήρα:

$$b = 242.68 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot \text{s} \quad (6-14)$$

$$J = 6.067 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^2 \quad (6-15)$$



Σχήμα 6-4. Απόκριση ανοιχτού βρόχου για δεξί Master κινητήρα.

Για τον δεξί Master κινητήρα υπολογίστηκαν ρεύμα και ταχύτητα μόνιμης κατάστασης:

$$i_{ss} = 286 \text{ mA} \quad (6-16)$$

$$\dot{x}_{ss} = 971 \text{ mm / s} \quad (6-17)$$

$$\tau_{mech} = 25 \text{ ms} \quad (6-18)$$

Η σταθερά ροπής του κινητήρα δίνεται από τον κατασκευαστή:

$$K_t = 6.44 \text{ N} \cdot \text{mm} / \text{A} \quad (6-19)$$

Με αντικατάσταση των Εξ. 6-7, 6-16, 6-17, 6-18 και 6-19 στις Εξ. 6-8, 6-9 υπολογίζεται για τον δεξί κινητήρα:

$$b = 242.44 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot \text{s} \quad (6-20)$$

$$J = 6.061 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^2 \quad (6-21)$$

Από την Εξ. 6-5 αγνοώντας τον μη γραμμικό όρο της τριβής Coulomb και εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace με μηδενικές αρχικές συνθήκες προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος για είσοδο ρεύμα και έξοδο μετατόπιση:

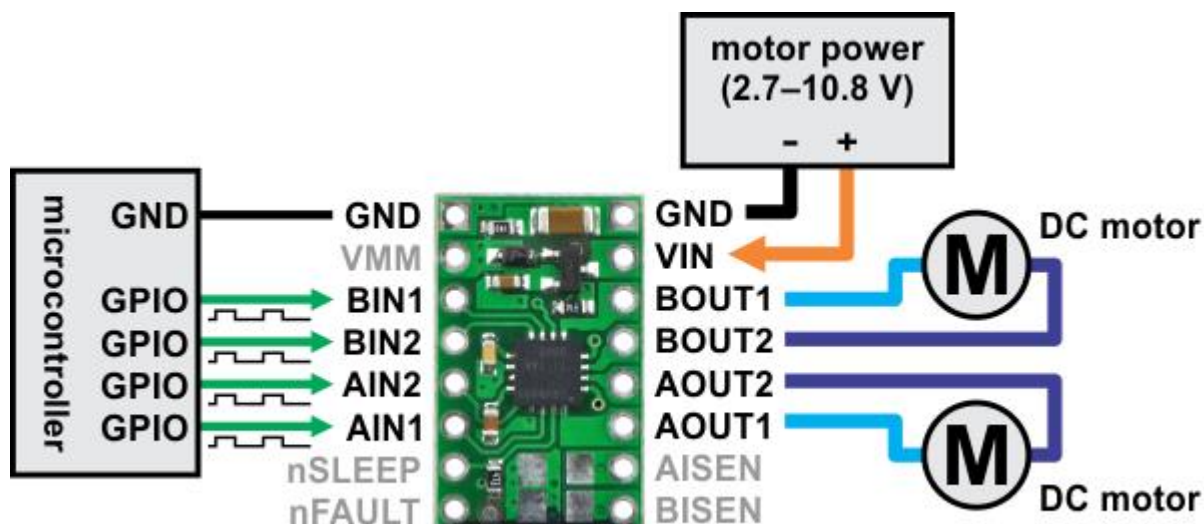
$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{h \cdot K_t}{2\pi \cdot s(Js + b)} \quad (6-22)$$

Με χρήση των παραμέτρων που υπολογίστηκαν προκύπτει ότι και για τους δύο Master κινητήρες αριστερό και δεξί ισχύει:

$$G(s) = \frac{X(s)}{I(s)} = \frac{3900}{s(0.025s + 1)} \quad (6-23)$$

6.2 Οδήγηση Master κινητήρων

Για την οδήγηση των Master κινητήρων επιλέχθηκε το H-Bridge DRV8833 της Texas Instruments. Τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στο Παράρτημα Α ενώ η διασύνδεση του με το Master SoC και τους Master κινητήρες φαίνεται στο Σχ. 6-6. Το DRV8833 μπορεί να οδηγήσει ρεύμα μέχρι 2 A ανά κανάλι και περιέχει πυκνωτή αποσύνδεσης (decoupling capacitor) μεταξύ των γειώσεων της τροφοδοσίας του SoC και της τροφοδοσίας των Master κινητήρων δίνοντας μας έτσι την δυνατότητα να διαχωρίσουμε το κύκλωμα ισχύος από τα ηλεκτρονικά, κάτι που με το I293d δεν ήταν δυνατόν και δημιούργησε σφάλματα στην μόνιμη κατάσταση λόγω θορύβου. Στο Πίνακα 6-1 παρουσιάζεται η λογική του H-Bridge για έλεγχο με SoC.

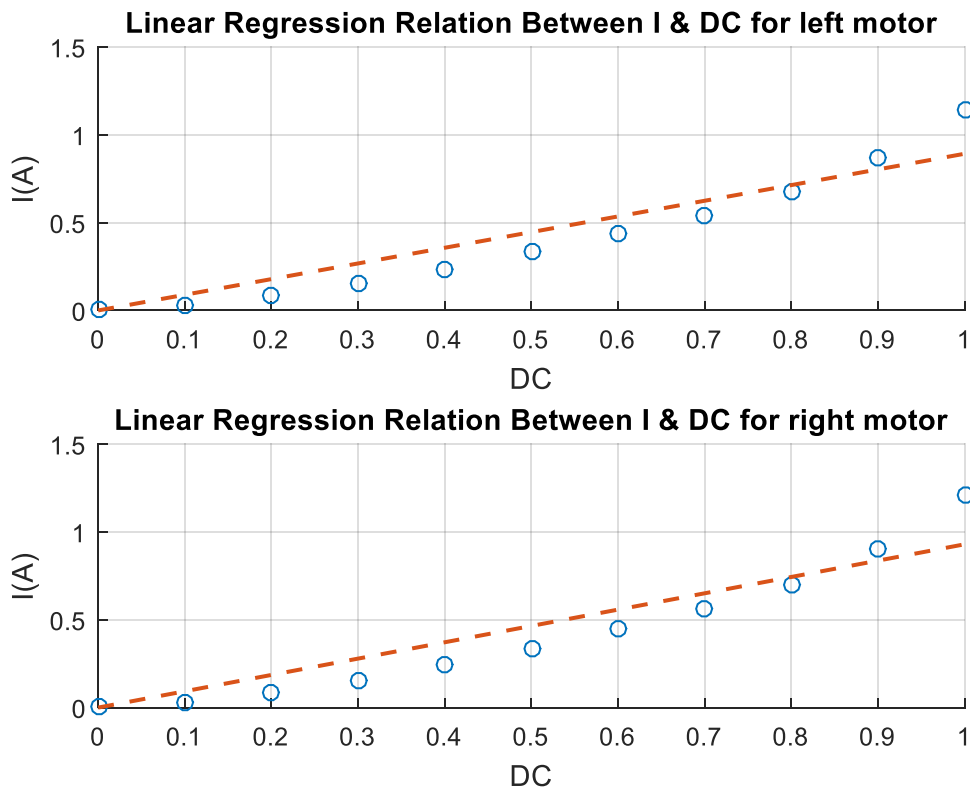


Σχήμα 6-5. Διασύνδεση DRV8833 με Master SoC και κινητήρες

Πίνακας 6-1. Λογική DRV8833 για έλεγχο με SoC

xIN1	xIN2	Λειτουργία
1	1-DC	Forward, Slow Decay
1-DC	1	Reverse, Slow Decay
DC	0	Forward, Fast Decay
0	DC	Revers, Fast Decay

Το DRV8833 μπορεί να κάνει έλεγχο ρεύματος και μοντελοποιείται με βάση την Εξ. 3-13. Για τον υπολογισμό του κέρδους $K_{DC \rightarrow A}$ που αντιστοιχεί την έξοδο PWM του Master SoC από Duty Cycle (DC) σε ρεύμα έγινε μέτρηση του ρεύματος εξόδου ανάλογα με το Duty Cycle (DC) της εντολής PWM και στην συνέχεια με χρήση γραμμικής παρεμβολής (linear regression) υπολογίστηκε η τιμή του κέρδους για κάθε κινητήρα. Τα ζεύγη ρεύματος-DC και η προσέγγιση της γραμμικής παρεμβολής απεικονίζονται στο Σχ. 6-6.



Σχήμα 6-6. Ρεύμα εξόδου του H-Bridge σε σχέση με την είσοδο DC

Με χρήση της γραμμικής παλινδρόμησης υπολογίζονται τα ακόλουθα κέρδη για μετατροπή της εξόδου PWM του SoC σε ρεύμα:

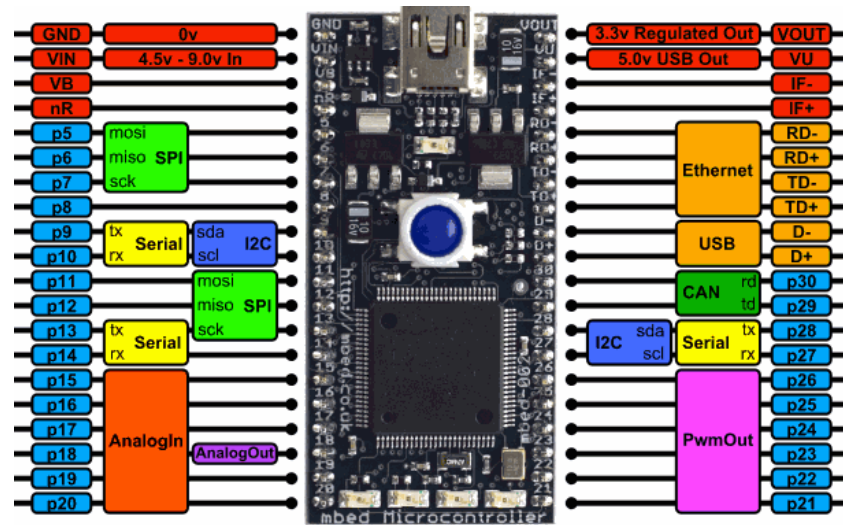
$$K_{left_{DC \rightarrow A}} = 0.8922 A / DC \quad (6-24)$$

$$K_{right_{DC \rightarrow A}} = 0.9289 A / DC \quad (6-25)$$

6.3 Στοιχεία και συνδεσμολογία εργαστηριακής πειραματικής διάταξης

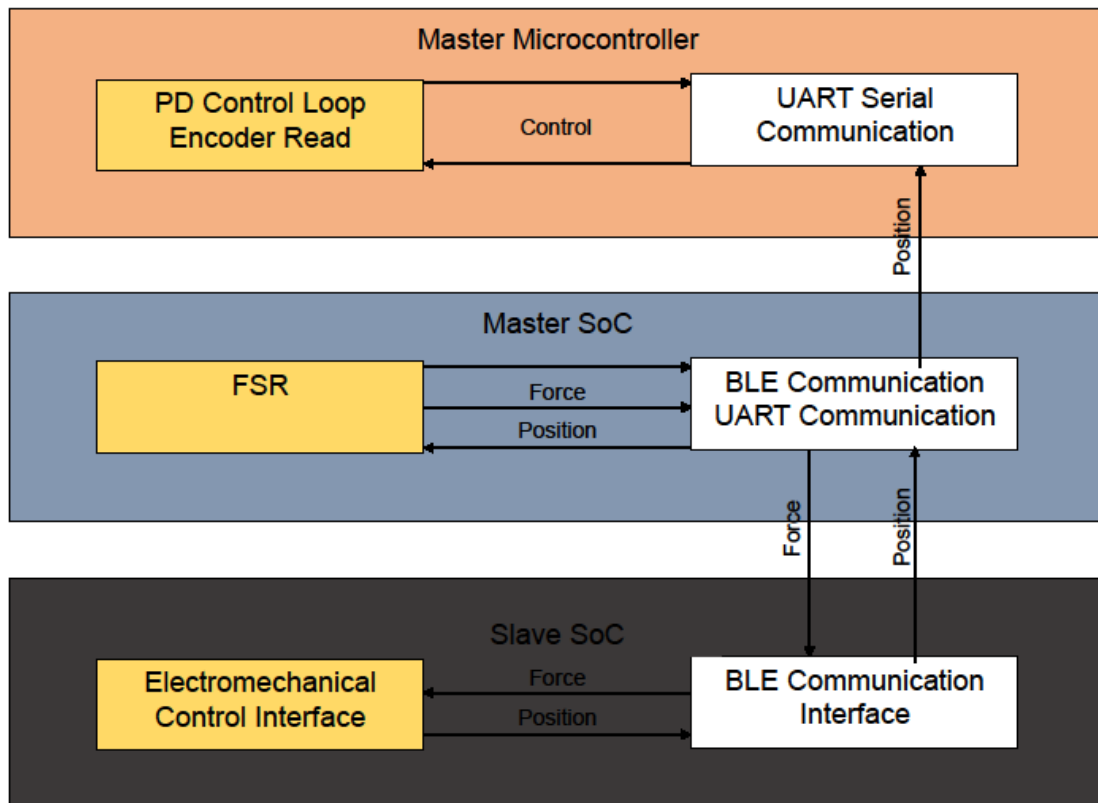
Για την υλοποίηση Bidirectional ελέγχου στην Εργαστηριακή πειραματική διάταξη επιλέχθηκε η μεταφορά του ελέγχου και του υπολογισμού θέσης των Master κινητήρων από το Master SoC σε dedicated Hardware. Η επιλογή αυτή κρίθηκε απαραίτητη καθώς η ταχύτητα των Master κινητήρων της εργαστηριακής διάταξης είναι υψηλή με αποτέλεσμα υψηλή συχνότητα παλμών από τους Encoders άρα πολλά Hardware Interrupts. Σε αρχικά πειράματα παρατηρήθηκε ότι το Master SoC με επεξεργαστή στα 16 MHz δεν είναι ικανός να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα την επικοινωνία και τα interrupts

από τους Encoders με βάση την ανάλυση του Κεφαλαίου 4.4. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε το LPC1768 development board της mbed που παρουσιάζεται στο Σχ. 6-7 για να υπολογίσει την θέση των Encoders και ταυτόχρονα να κάνει τον έλεγχο.



Σχήμα 6-7. Master Microcontroller LPC1768

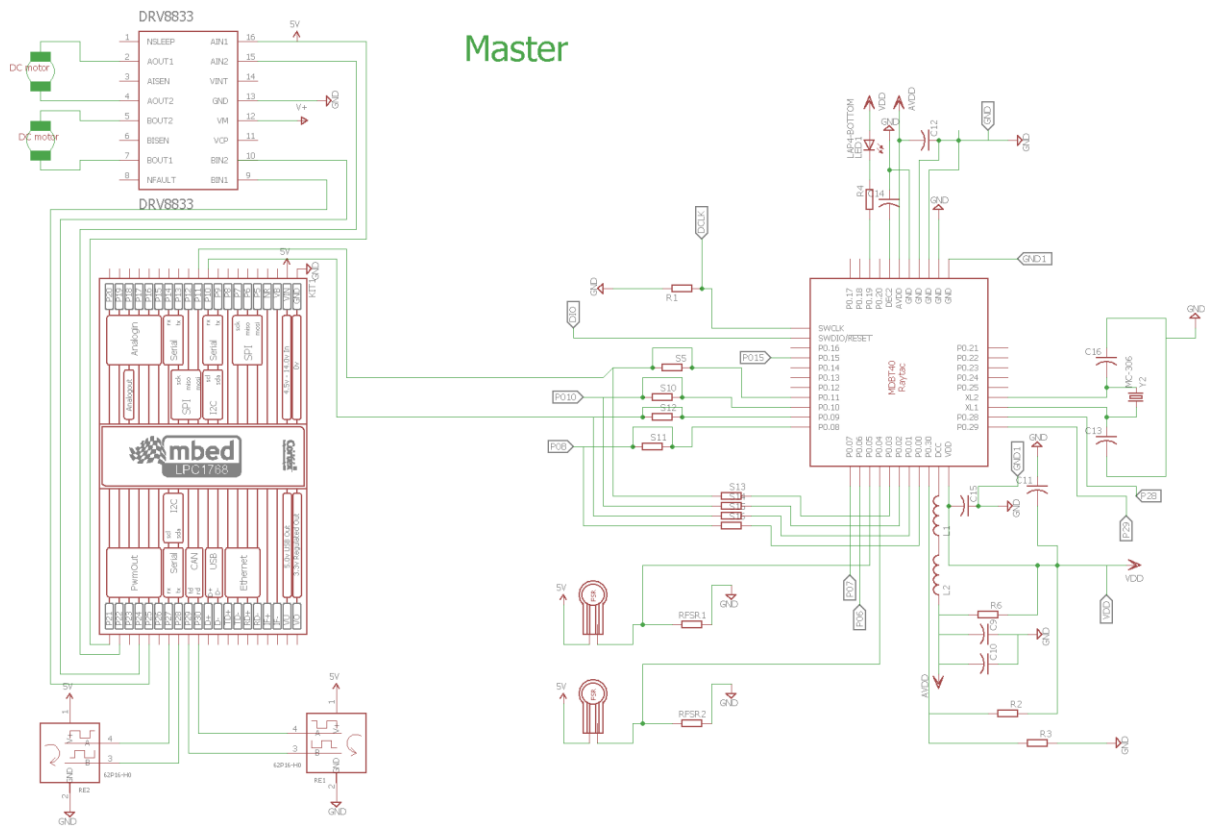
Ο LPC1768 είναι ένας ισχυρός Microcontroller με 32-bit Arm Cortex M3 με συχνότητα 96MHz που υποστηρίζεται από την πλατφόρμα MBED με αποτέλεσμα το λογισμικό που υλοποιήθηκε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αυτή την προσέγγιση. Η αλλαγή είναι ότι ορισμένα μπλοκ λογισμικού μεταφέρονται από το Master SoC στο Master Microcontroller και υλοποιείται ένα μπλοκ UART επικοινωνίας. Στην πράξη ο Master Microcontroller παίζει το ρόλο ενός εξειδικευμένου υλικού (dedicated hardware) τύπου αποκωδικοποιητής (quadrature decoder). Η λογική που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 παραμένει με το μπλοκ διάγραμμα λογισμικού να γίνεται αυτό του Σχ. 6-8.



Σχήμα 6-8. Μπλοκ διάγραμμα λογισμικού για την Εργαστηριακή πειραματική διάταξη.

Η διαφορά με το λογισμικό που εφαρμόστηκε στη δοκιμαστική διάταξη είναι ότι πλέον το μπλοκ του ελέγχου των Master κινητήρων και το μπλοκ εξυπηρέτησης των hardware interrupts από τους Encoders βρίσκεται στον LPC1768 Master Microcontroller. Το Master SoC συνεχίζει να διαχειρίζεται τα FSR και την επικοινωνία. Η επικοινωνία μεταξύ Master SoC και Master Microcontroller γίνεται σειριακά μέσω UART στα 9600 bps. Ο Buffer που διαχειρίζεται την πληροφορία της θέσης είναι ο ίδιος και αποστέλλεται σειριακά όταν ο Master Microcontroller ζητά είσοδο αναφοράς (Setpoint). Για Buffer μεγέθους 3 bytes και χρόνο μετάδοσης bit 104 μ s για 9600 bps χρειάζεται περίπου 3 ms για να ολοκληρωθεί αυτή η επικοινωνία. Μια ακόμα διαφορά είναι ότι για διαφορικούς Encoders (differential) τα κανάλια A και B είναι ανεστραμμένα. Για ωρολογιακή περιστροφή το B προηγείται του A ενώ το αντίθετο συμβαίνει με τα κανάλια \bar{A} , \bar{B} . Αν λοιπόν χρησιμοποιήσουμε τα A, B, για να διαβάσουμε τον Encoder ως single ended σωστά πρέπει να αλλάξουμε τον αλγόριθμο.

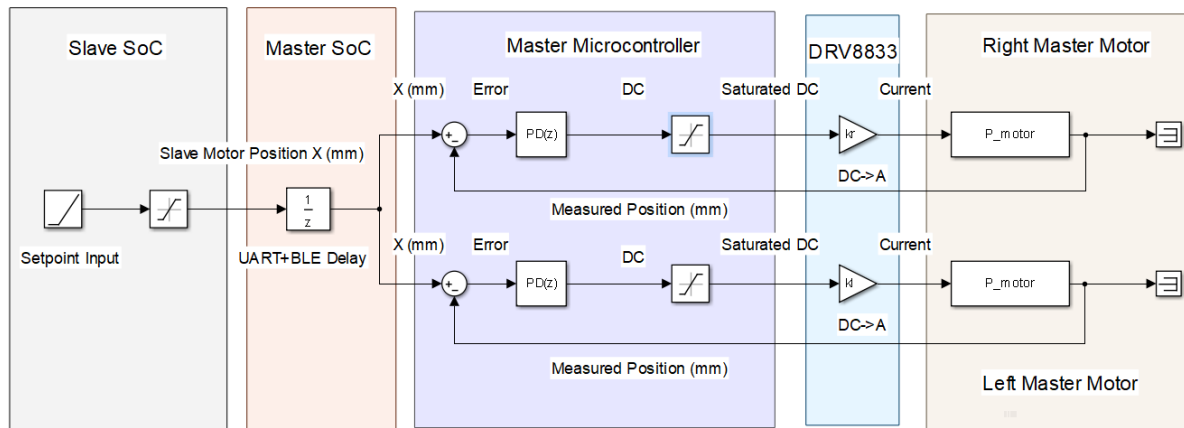
Η συνδεσμολογία για Bidirectional έλεγχο στην εργαστηριακή πειραματική διάταξη είναι αυτή του Σχ. 6-9. Η συνδεσμολογία για το Slave SoC είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην δοκιμαστική διάταξη και φαίνεται στο Σχ. 5-8.



Σχήμα 6-9. Συνδεσμολογία διάταξης bidirectional wireless master.

6.4 Μοντελοποίηση συστήματος

Για τον σχεδιασμό κατάλληλου ελεγκτή το δομικό διάγραμμα της ασύρματης τοπολογίας του Σχ. 3-3 μοντελοποιήθηκε σε μορφή LTI (linear time-invariant system) που παρουσιάζεται στο Σχ. 6-10. Η είσοδος αναφοράς είναι η θέση X (mm) του Slave κινητήρα. Η είσοδος μοντελοποιείται ως είσοδος ράμπας με ανώ όριο την τελική τιμή θέσης. Η τιμή αυτή στέλνεται κάθε 7.5 ms στο Master SoC. Μαζί με το Latency που είναι 2.5 ms έχουμε 10 ms συνολική καθυστέρηση που απεικονίζεται ως BLE delay στο μοντέλο του Σχ. 6-10. Η θέση εισέρχεται στον διακριτό PD ελεγκτή με περίοδο $T=1$ ms. Η έξοδος του ελεγκτή που είναι ρεύμα μετατρέπεται σε PWM Duty Cycle (DC) με βάση τις Εξ. 6-24, 6-25 για τον αριστερό και τον δεξί Master κινητήρα αντίστοιχα. Η τιμή του DC κυμαίνεται στο διάστημα $[0,1]$ και εισέρχεται στο DRV8833 που αντιπροσωπεύεται από το κέρδος DC/A με βάση τις Εξ. 6-24, 6-25 για τον αριστερό και τον δεξί Master κινητήρα αντίστοιχα. Η έξοδος του DRV8833 είναι το ρεύμα που ελέγχει την ροπή του κινητήρα με βάση την Εξ. 3-1.



Σχήμα 6-10. Μοντέλο συστήματος ασύρματης τοπολογίας ελέγχου.

6.5 Υλοποίηση ελεγκτή

Για το σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου των Master κινητήρων επιλέχθηκε έλεγχος PD. Ο κλασικός αλγόριθμος προβλέπει για συνεχή ελεγκτή:

$$u = k_p e + k_d \dot{e} \quad (6-26)$$

Ο έλεγχος αυτός είναι εύκολο να υλοποιηθεί στο Master Microcontroller προγραμματιστικά με βάση τον αλγόριθμο:

$$\text{Output} = k_p * \text{error}[KT] + k_d * \left(\frac{\text{error}[KT] - \text{error}[(K-1)T]}{T} \right) \quad (6-27)$$

Όπου K_p , K_d τα κέρδη του PD και T ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών ελέγχων. Ο έλεγχος του Master Microcontroller είναι ψηφιακός με περίοδο $T=1$ ms. Το σημείο αναφοράς μεταδίδεται από το Slave SoC στο Master SoC και στην συνέχεια μέσω UART στο Master Microcontroller περίπου κάθε 14 ms (7.5 ms + 2.5 ms latency + 4 ms UART delay). Με βάση τα πειράματα που διεξήχθησαν στην δοκιμαστική διάταξη περιμένουμε η συνολική καθυστέρηση μαζί με το run time να είναι πάλι γύρω στα 45 ms. Αν επιλέξουμε χρόνο καταστάλαξης (settling time) μικρότερο των 25 ms είμαστε σίγουροι ότι ο PD ελεγκτής κάθε φορά που λαμβάνει μία νέα θέση αναφοράς θα έχει ήδη ισορροπήσει στην προηγούμενη. Για τον υπολογισμό των κερδών του PD ελεγκτή τίθενται προδιαγραφές για settling time και pick time αντίστοιχα από τις Εξ. 6-28, 6-29.

$$t_s = 25ms \quad (6-28)$$

$$t_p = 20ms \quad (6-29)$$

Για συστήματα δευτέρου βαθμού η σχέση που συνδέει το settling time με την φυσική συχνότητα ω και τον συντελεστή απόσβεσης ζ περιγράφεται από την Εξ. 6-30:

$$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (6-30)$$

Η Εξ. 6-31 περιγράφει τη σχέση που συνδέει το pick time με την φυσική συχνότητα και τον συντελεστή απόσβεσης είναι.

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (6-31)$$

Για τους πόλους του συστήματος δευτέρου βαθμού ισχύει:

$$p_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm i\omega_d \quad (6-32)$$

Από την Εξ 6-32 με χρήση των Εξ. 6-28, 6-29, 6-30, 6-31 οι επιθυμητοί πόλοι του συστήματος για απόκριση εντός των προδιαγραφών δίνονται από την Εξ. 6-33:

$$p_{1,2} = -0.02297 \pm i \cdot 0.015708 \quad (6-33)$$

Ο PD ελεγκτής δίνεται από την Εξ. 6-34:

$$C(s) = K_p + K_D s = K_D (s + z_c) \quad (6-34)$$

Η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος με τον ελεγκτή είναι πλέον:

$$1 + C(p_{1,2})K_{hbridge}G(p_{1,2}) = 0 \quad (6-35)$$

Το $K_{hbridge}$ αντιστοιχεί στα κέρδη των Εξ. 6-24, 6-25 για Master αριστερό και δεξί κινητήρα αντίστοιχα. Με χρήση της Εξ. 6-35 ισχύει για τις γωνίες φάσης:

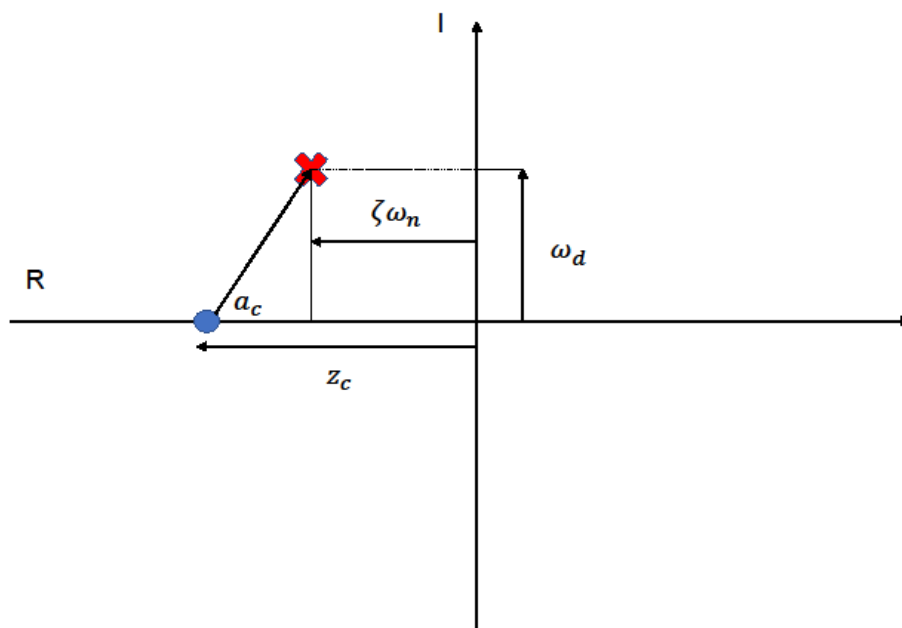
$$\angle C(p_{1,2}) + \angle(K_{hbridge}G(p_{1,2})) = \angle -1 = (2n+1)\pi \quad (6-36)$$

Για επιλογή του πόλου p_1 από την Εξ. 6-36 προκύπτει:

$$\angle(p_1 + z_c) = a_c = (2n+1)\pi - \varphi_g \quad (6-37)$$

Η φ_g είναι η γωνία φάσης της συνάρτησης μεταφοράς για $s=p_1$. Όπως φαίνεται στο Σχ. 6-11 για την επιλογή του πόλου p_1 (κόκκινο) η θέση του μηδενικού z_c (μπλε) μας δίνει την γωνία a_c και την Εξ. 6-38:

$$\tan(a_c) = \frac{\omega_d}{z_c - \zeta\omega_n} \quad (6-38)$$



Σχήμα 6-11. Γεωμετρικός τόπος ριζών για τοποθέτηση πόλων με την χρήση του PD ελεγκτή.

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση για τις επιλεγμένες προδιαγραφές pick time και settling time και για $n=0$ στην Εξ. 6-37 η τιμή του z_c προκύπτει με βάση την Εξ. 6-38:

$$z_c = 179.55 \quad (6-39)$$

Με βάση τις Εξ. 6-34,6-35 υπολογίζεται η τιμή του K_d από την Εξ 6-40:

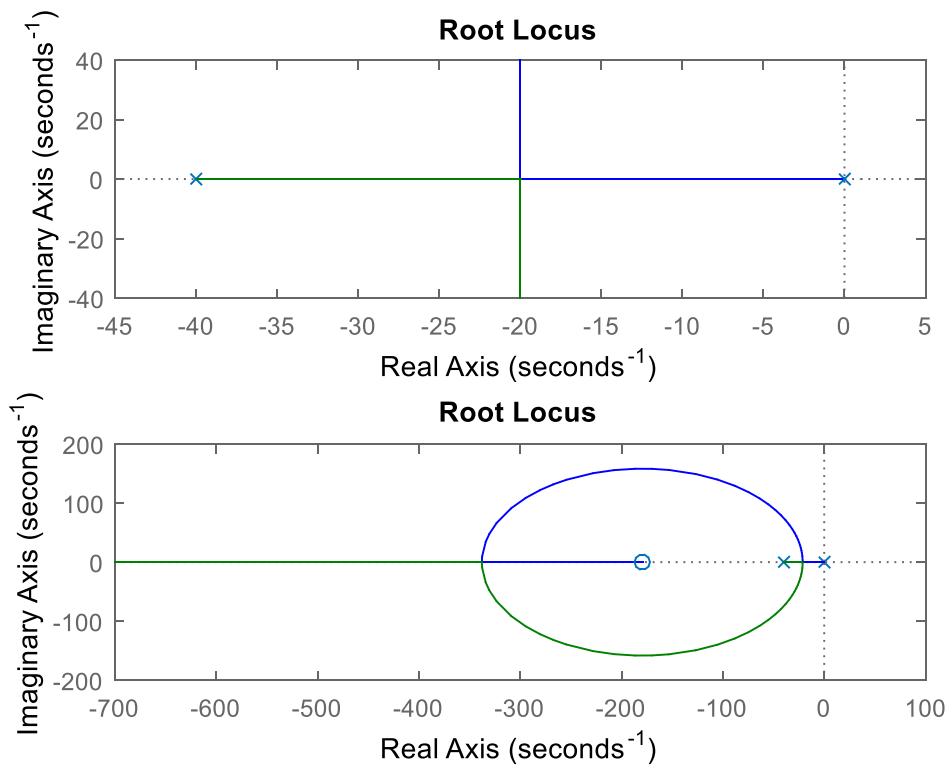
$$K_d = \frac{1}{\|(p_1 + z_c) \cdot K_{hbridge} G(p_1)\|} \quad (6-40)$$

Από την Εξ. 6-40 με βάση τις Εξ. 6-24, 6-25 για αριστερό και δεξί Master κινητήρα υπολογίζουμε τα αντίστοιχα K_d , και K_p - και σχεδιάζουμε τους αντίστοιχους ελεγκτές:

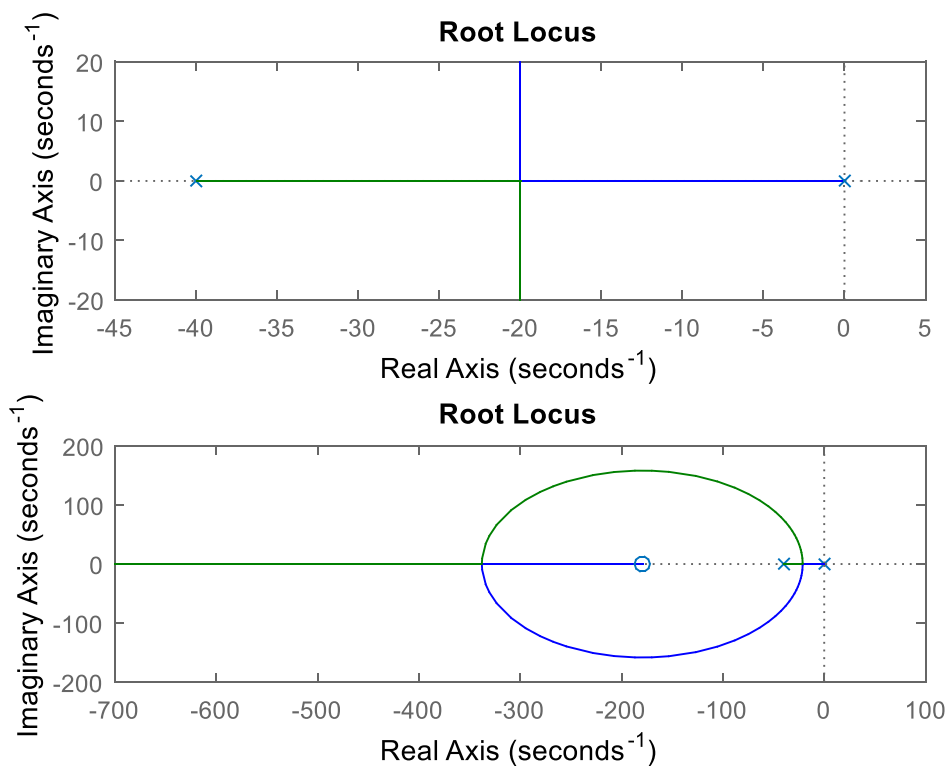
$$PD_{left} = 0.3612 + 0.002s \quad (6-41)$$

$$PD_{right} = 0.3469 + 0.0019s \quad (6-42)$$

Στα Σχ. 6-12, 6-13 φαίνεται ο γεωμετρικός τόπος ριζών του συστήματος πριν και μετά την διαδικασία του loop shaping για τον αριστερό και τον δεξί κινητήρα αντίστοιχα.



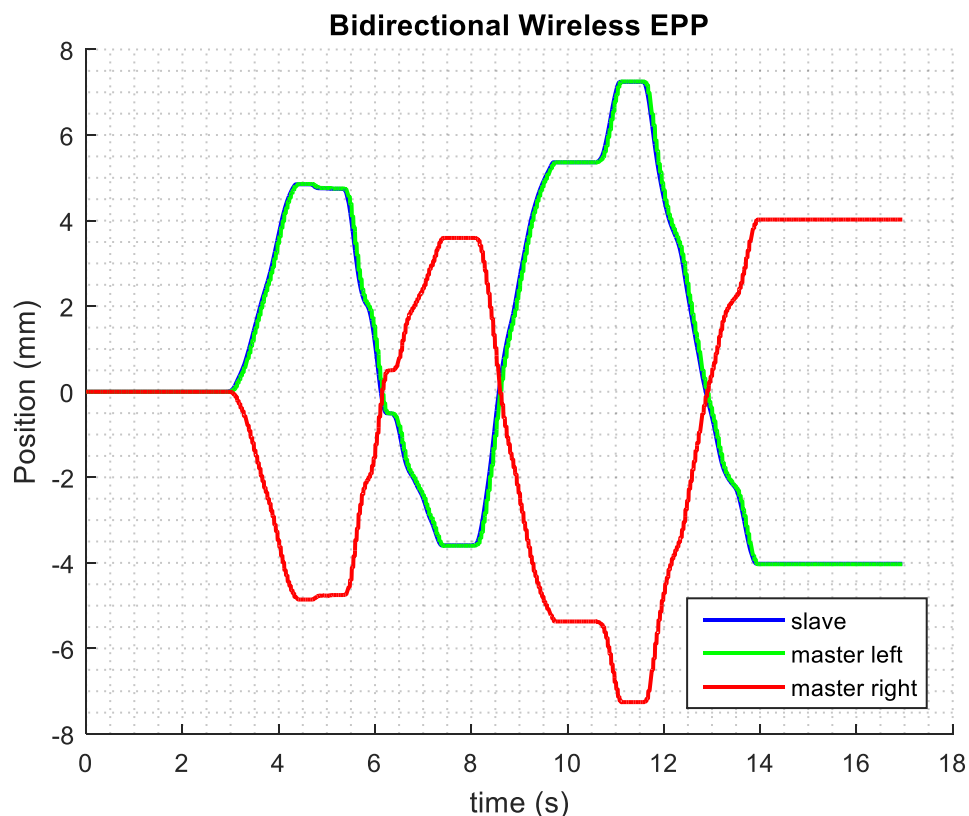
Σχήμα 6-12. Γεωμετρικός τόπος ριζών πριν και μετά τη διαμόρφωση για τον αριστερό κινητήρα.



Σχήμα 6-13. Γεωμετρικός τόπος ριζών πριν και μετά τη διαμόρφωση για τον δεξί κινητήρα.

6.6 Πειραματικά αποτελέσματα εργαστηριακής πειραματικής διάταξης

Σκοπός των μετρήσεων στην εργαστηριακή πειραματική διάταξη είναι η αξιολόγηση της ασύρματης τοπολογίας bidirectional EPP μέσω της προσέγγισης θέσης-δύναμης [7] και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της Βιομηχανοτρονικής τοπολογίας ελέγχου [16], [17]. Στο Σχ. 6-14 παρουσιάζεται η ικανότητα των δύο Master κινητήρων να παρακολουθήσουν την μετατόπιση του Slave κινητήρα: Το σύστημα διεγείρεται από την έξοδο των Master FSR με τετραγωνικό παλμό τάσης τυχαίου πλάτους, διάρκειας και συχνότητας. Η μέθοδος μέτρησης θέσης είναι αυτή των interrupts. Για bidirectional έλεγχο ο ένας Master κινητήρας κινείται αντίθετα από τον άλλο προσομοιάζοντας έτσι την κίνηση του ανταγωνιστή και αγωνιστή μμ αντίστοιχα όπως φαίνεται στο Σχ. 1-2.



Σχήμα 6-14. Απόκριση Ασύρματης τοπολογία Βιομηχανοτρονικού EPP

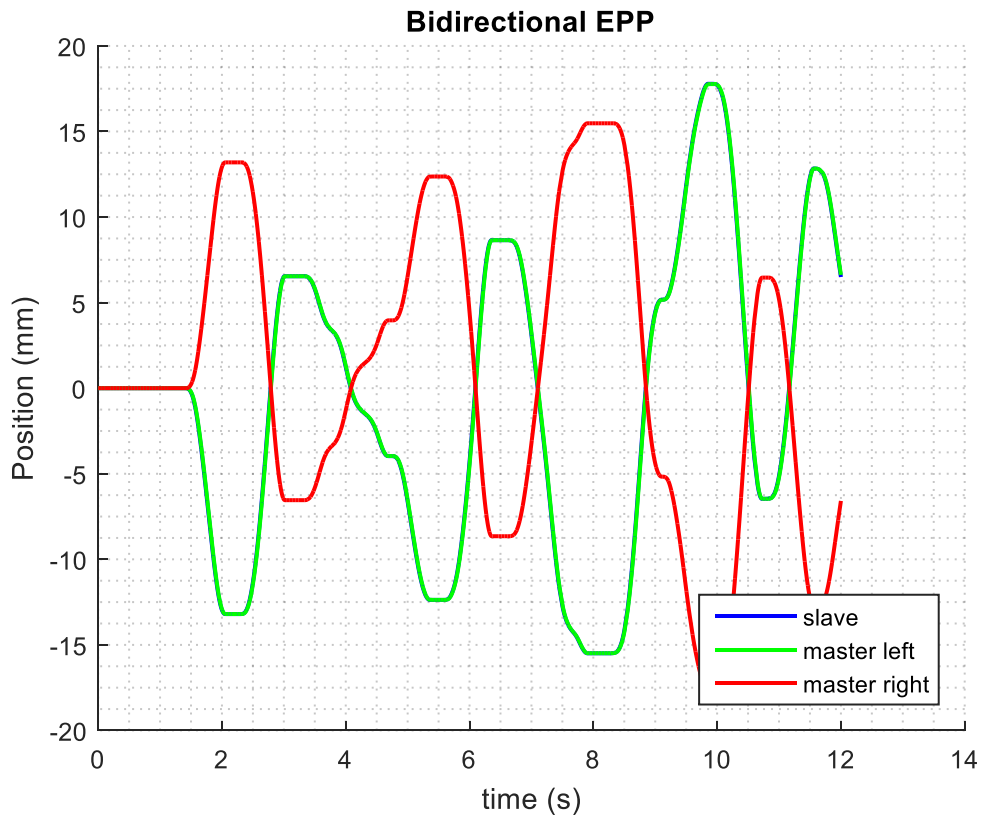
Η καθυστέρηση για τους δύο Master κινητήρες στην προσπάθειά τους να ακολουθήσουν τον Slave κινητήρα είναι 44 ms για την εκκίνηση και αντίστοιχη για το χρόνο αποκατάστασης. Όπως προαναφέραμε χρειάζεται 7.5 ms κατ' ελάχιστο για να στείλει το Slave SoC την θέση του στο Master SoC χωρίς να υπολογίζουμε το latency (2.5 ms) και τον χρόνο εξυπηρέτησης (run time) του συγκεκριμένου callback. Η καθυστέρηση για σειριακή επικοινωνία μέσω UART ανέρχεται στα 3 ms. Η περαιτέρω καθυστέρηση οφείλεται στον χρόνο εκτέλεσης των υπόλοιπων callbacks. Η βασική ροή (main loop) όπου εκτελείται ο έλεγχος του κινητήρα έχει χρόνο εκτέλεσης run time 4 ms. Αντίστοιχο χρόνο εκτέλεσης έχουν και τα callbacks των συμβάντων BLE πρωτοκόλλου.

Στο Σχ. 6-15 παρουσιάζεται το σφάλμα των Master κινητήρων στην προσπάθεια τους να ακολουθήσουν την μετατόπιση του Slave κινητήρα. Το σφάλμα τελική κατάσταση είναι μηδενικό ενώ ο διαφορικός όρος έχει βελτιώσει την μεταβατική απόκριση περιορίζοντας το Max Overshoot στο 0.14%



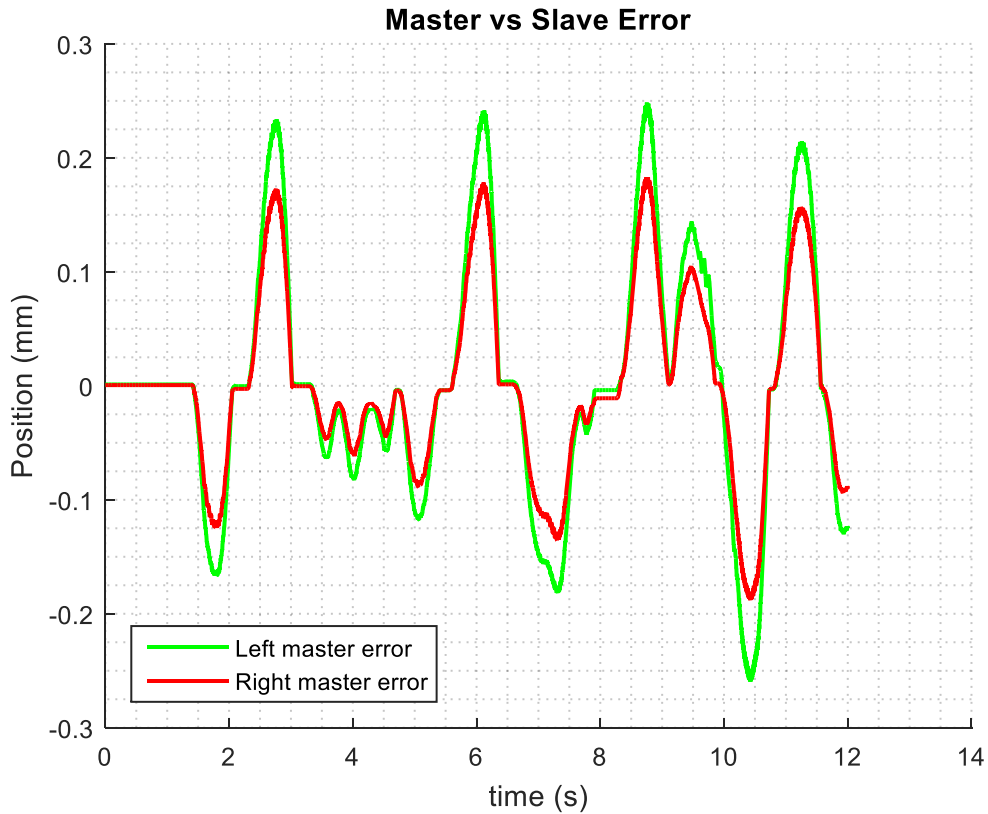
Σχήμα 6-15. Σφάλμα τοπολογίας ασύρματου ελέγχου EPP

Για την Βιομηχανοτρονική τοπολογία ελέγχου [16], [17] στο Σχ. 6-16 παρουσιάζεται η ικανότητα των δύο Master κινητήρων να παρακολουθήσουν την μετατόπιση του Slave κινητήρα. Η καθυστέρηση για τους δύο Master κινητήρες στην προσπάθεια τους να ακολουθήσουν τον Slave κινητήρα είναι 5ms για την εκκίνηση και αντίστοιχη για το χρόνο αποκατάστασης. Η απόκριση της τοπολογίας εδώ είναι πολύ καλύτερη από αυτή της ασύρματης τεχνολογίας όμως αυτό συμβαίνει γιατί κατά πρώτων έχουμε ενσύρματο έλεγχο και κατά δεύτερον τον έλεγχο κάνει ένας επεξεργαστής υπολογιστή με υπολογιστική ισχύ της τάξης των GHz ενώ η υπολογιστική ισχύς της για το Master Microcontroller είναι στα 96MHz.



Σχήμα 6-16. Απόκριση τοπολογίας Βιομηχανοτρονικού ελέγχου.

Στο Σχ. 6-17 παρουσιάζεται το σφάλμα των Master κινητήρων στην προσπάθεια τους να ακολουθήσουν την μετατόπιση του Slave κινητήρα. Η μεταβατική απόκριση είναι καλύτερη ενώ το σφάλμα τελικής κατάστασης είναι αντίστοιχο.



Σχήμα 6-17. Σφάλμα τοπολογίας Βιομηχανοτρονικού ελέγχου.

Ο Πίνακας 6-2 παρουσιάζει την σύγκριση των δύο τοπολογιών για τα χαρακτηριστικά μεγέθη. Με βάση τα αποτελέσματα θεωρούμε ότι η τοπολογία του ασυρμάτου ελέγχου είναι επιτυχημένη καθώς παρουσιάζει αποτελέσματα παρόμοια με αυτά της βιομηχανοτρονικής τοπολογίας.

Πίνακας 6-2. Σύγκριση τοπολογιών ελέγχου.

	Wireless Biomechatronic EPP	Biomechatronic EPP
Σφάλμα μόνιμης κατάστασης	0	0
Καθυστέρηση εκκίνησης	44ms	5ms
Καθυστέρηση στο χρόνο αποκατάστασης	49ms	5ms
Percentage Max Overshoot	0.14%	0

7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

7.1 Συμπεράσματα

Με βάση τα πειράματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5 η τοπολογία Ασύρματου Βιομηχανοτρονικού ελέγχου αξιολογείται ως διαφανής με βάση την προσέγγιση θέσης-δύναμης. Στο Κεφάλαιο 6 βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα του ελέγχου που επιτυγχάνει η Ασύρματη τοπολογία είναι εφάμιλλά της Βιομηχανοτρονικής τοπολογίας [16], [17]. Η περαιτέρω καθυστέρηση που οφείλεται στο πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας δεν ξεπερνάει τα 50 ms. Παρατηρήθηκε επίσης ότι τα SoC (Master + Slave) είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στον θόρυβο και πρέπει να υπάρξει ειδική μέριμνα ώστε το κύκλωμα ισχύος να αποζηυχθεί από τα ηλεκτρονικά, κάτι που δεν είναι πάντα εφικτό, όπως στην περίπτωση του H-Bridge L293D όπου η γείωση των κινητήρων και των SoC έπρεπε να είναι η ίδια. Το γεγονός αυτό δημιούργησε αρκετά προβλήματα στην διάγνωση προβλημάτων (debugging) αλλά και σε κακό έλεγχο.

Η υλοποίηση του λογισμικού ήταν επίσης ιδιαίτερα απαιτητική. Η προσέγγιση της διαχείρισης των ασύγχρονων γεγονότων που απαιτείται από το πρωτόκολλο BLE είναι ιδιαίτερα καλή για την εξυπηρέτηση γεγονότων με μικρό run time. Όταν όμως έχουμε υπολογισμούς που καθυστερούν την ροή του προγράμματος, είτε υψηλής συχνότητας hardware interrupts τότε είναι πιθανόν να δημιουργηθεί πρόβλημα. Κατά συνέπεια απαιτείται καλός συγχρονισμός από τον προγραμματιστή. Το πρόβλημα των hardware interrupts μπορεί να λυθεί με επιλογή κινητήρων με λιγότερους παλμούς ανά περιστροφή χάνοντας όμως σε ακρίβεια. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί εξειδικευμένο υλικό όπως αποκωδικοποιητές παλμογεννητριών (quadrature decoders) έτσι ώστε η διαχείριση των παλμών να μην γίνεται από το λογισμικό μέσω hardware interrupts αλλά να διαβάζεται σειριακά από το εξειδικευμένο υλικό. Το μειονέκτημα στην προσέγγιση αυτή είναι η αύξηση του όγκου όλης διάταξης.

Με βάση τις συνολικές απαιτήσεις της εφαρμογής πιστεύεται ότι χρειάζεται υψηλότερης συχνότητας επεξεργαστής (>16MHz). Γενικότερα οι επεξεργαστές τύπου cortex M0 προορίζονται για μεταφορά πληροφορίας και όχι επεξεργασία. Αν η πειραματική διάταξη από πλευράς υλικού είναι ιδιαίτερα απαιτητική πρέπει να πάμε σε επεξεργαστές τύπου cortex M3-M4 όπως και έγινε για την εργαστηριακή πειραματική διάταξη. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να αποφύγουμε τη χρήση εξειδικευμένου υλικού για τον υπολογισμό της θέσης των κινητήρων. Με υψηλότερης ταχύτητας επεξεργαστή θα μειωθεί επίσης και η καθυστέρηση που παρατηρήθηκε καθώς θα μειωθεί το run time.

7.2 Μελλοντική εργασία

Η Ασύρματη τοπολογία Βιομηχανοτρονικού Ελέγχου είναι μια βιώσιμη προσέγγιση ελέγχου EPP που μπορεί να εξαλείψει όλα τα μειονεκτήματα της κλασικής προσέγγισης δίνοντας έτσι στους ασθενείς υψηλότερης ποιότητας έλεγχο στα προσθετικά μέλη. Η Ασύρματη τοπολογία που σχεδιάστηκε και παρουσιάστηκε στην μεταπτυχιακή αυτή εργασία αποτελεί ένα proof of concept της ικανότητας αντικατάστασης της μηχανικής διασύνδεσης με ασύρματη.

Η Ασύρματη τοπολογία ελέγχου είναι σε επίπεδο όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διεξαγωγή πειραμάτων εντός του εργαστηρίου παρόλα αυτά χρήζει βελτιώσεων ώστε να τυποποιηθεί η λειτουργία της και να μετατραπεί σε πρωτότυπο για την διεξαγωγή τυποποιημένων πειραμάτων από χρήστες.

8 Βιβλιογραφία

- [1] Bertos, Y.A., Heckathorne C.W., Weir R.F., and Childress, D.S. (1997), "Microprocessor Based E.P.P. Position Controller for Electric Powered Upper-Limb Prostheses", *19th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Chicago, Illinois*, Oct. 30-Nov. 2, 1997.
- [2] Bertos, Y.A., Heckathorne C.W., Weir R.F., and Childress, D.S. (1998), "A microprocessor based e.p.p. controller for electric-powered prostheses", *International Society of Prosthetists and Orthotists ISPO Conference, Amsterdam*, June 1998.
- [3] Childress, D.S.(1980), "Closed-loop control in prosthetic systems: Historical perspective", *Annals of Biomedical Engineering*, 8, 210-215.
- [4] Childress, D.S. (1989), "Control Philosophies for Limb Prostheses", *Progress in Bioengineering (Paul, J.P., et al., eds.)*, Adam Hilger, New York, 210-215.
- [5] Childress, D.S. (1992), "Control of Limb Prostheses", Chapter 6D, *Atlas of Limb Prosthetics, Surgical, Prosthetic, and Rehabilitation Principles*, 2nd ed., Bowker, J.H. & Michael, J. W. (eds.), Mosby-Year Book, Inc., St. Louis MO, 175-199.
- [6] Childress, D.S., Grahn, E., Weir, R. F., Heckathorne, C., and Uellendahl, J. (1993), "Modification of a Bock Hand for E.P.P. Control by Exteriorized Tendons", *Proceedings of the 19th Annual Meeting of AAOP*, 13.
- [7] Cho, H. C., Park, J. H., Kim, K. and J. O. Park, "Sliding-model-based impedance controller for bilateral teleoperation under varying time-delay," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1025-1030, May 2001.
- [8] Doubler, J. A., and Childress, D. S., "Design and Evaluation of a Prosthesis Control System Based in the Concept of Extended Physiological Proprioception", *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 21, pt1 pp. 5-18, pt2 pp. 19-31 1984.
- [9] Mosher, R. C., Handyman to Hardiman, SAE paper 67008, *Society of Automotive Engineers (SAE)*, Warrendale, PA, 1967.
- [10] Scott, R. N., "Myoelectric Control of Prostheses a brief history", MEC 92, *Proceedings of the 1992 MyoElectric Controls/Powered Prosthetics Symposium*, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1992.
- [11] Vanghetti, G., "Plastica dei Monconi a Scopo di Protesi Cinematica", *Arch. d. Ortop.*, Vol. 16, no. 5, 1899a, pp. 305-324.
- [12] Yokokohji, Y. and Yoshikawa, T., "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 10, no. 5, pp. 605-620, 1994.
- [13] Phil Smith CSR/PLC , "Comparing Low-Power Wireless Technologies"
- [14] <https://devzone.nordicsemi.com>
- [15] Edrey D. Ruiz-Rojas, J.L. Vazquez-Gonzalez, Ruben Alejos-Palomares, "Mathematical Model of a Linear Electric Actuator with Prosthesis Applications"
- [16] Ζαχαρίας Βαγγελάτος, Αθήνα 2017 "Design of Upper limb prosthesis:Experimental Comparison of the Classic and Biomechatronic Extended Physiological Proprioception", Διπλωματική

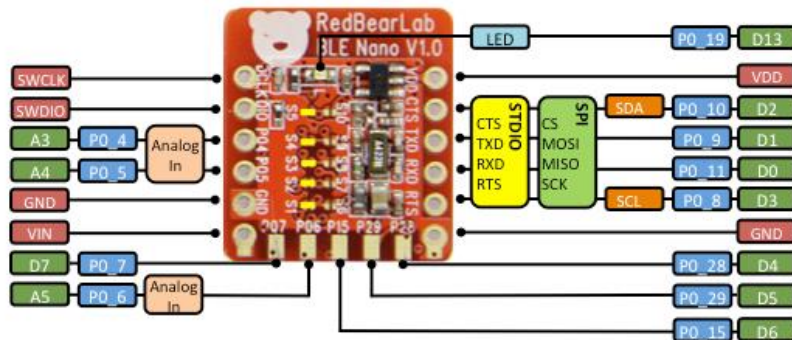
Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Μ.Μ. και Α.Ε., Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου.

- [17] Ανέστης Μαμπλέκος - Αλεξίου, Αθήνα 2016, "Σχεδιασμός και Προσομοίωση συστήματος τηλεχειρισμού προσθετικού άκρου με ιδιοδεκτική αίσθηση", Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Μ.Μ. και Α.Ε., Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου.

9 Παράρτημα A

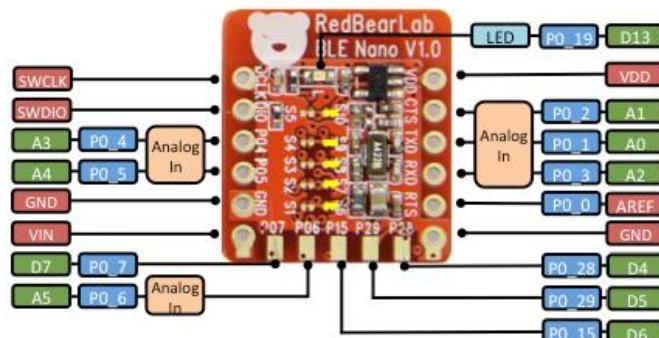
Στο παράρτημα A παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά από τα διάφορα ηλεκτρικά/μηχανολογικά εξαρτήματα που αγοράστηκαν από το εμπόριο για την υλοποίηση της πειραματικής διάταξης.

RedBearLab BLE nano (Nordic NRF51822)



default (ex-factory) settings

S1 Short and S6 Open	RTS > P0_8
S2 Short and S7 Open	RXD > P0_11
S3 Short and S8 Open	TXD > P0_9
S4 Short and S9 Open	CTS > P0_10
S5 Short and S10 Open	P0_30 > GND



user configurable settings

S1 Open and S6 Short	RTS > P0_0
S2 Open and S7 Short	RXD > P0_3
S3 Open and S8 Short	TXD > P0_1
S4 Open and S9 Short	CTS > P0_2
S5 Open and S10 Short	P0_30 > VDD

* Do not short S5 and S10 at the same time, this will damage the BLE Nano

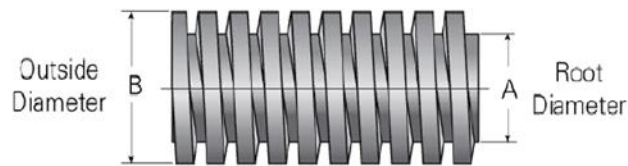
Κοχλίας μετατροπής περιστροφικής κίνησης σε γραμμική για Master κινητήρες



Product Specification Sheet

Metric Lead Screw 4 mm x 1.22 mm Stainless Steel

Call 855-HELIXLT or visit us online at www.helixlinear.com to configure and order your Metric Lead Screw 4 mm x 1.22 mm Stainless Steel today!

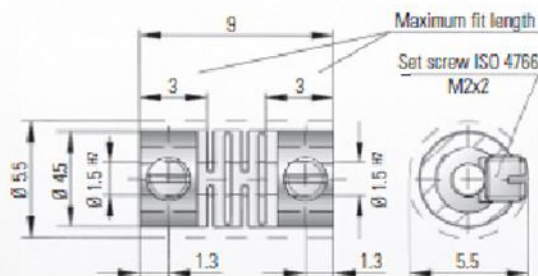


Product Info	
Part Number	016048S
Thread Direction	RH/LH
Screw Material	Stainless Steel
Details	
Lead [mm]	1.22
Starts	2
Pitch [mm]	0.6
Diameter [mm]	4
End Code for Types 1,2,3,5 [* Journals may show tracings of the thread]	2
End Code for Type 4 [* Journals may show tracings of the thread]	1
Diameter Code	016
Lead Code	048
Dimensions	
A [mm]	2.34
B [mm]	3.84
Performance Specifications	
Efficiency [%]	37-53
Lead Accuracy +/- [in/in]	0.0003

Παξιμάδι σύζευξης Master κινητήρων και κοχλιών.

MODEL FK1 001/9

MICROFLEX-COUPPLINGS



Material:

Coupling material: Polyamid
Hub material: stainless steel

Temperature range:

Bore diameter: 1.5 mm
Radial clamping is achieved by using a ISO 4766 M2 x 2 set screw.

-50 to +120° C

Backlash:

Absolutely backlash-free

Brief overloads:

Acceptable up to 1.5 times the value specified.

Service life:

These couplings are maintenance-free if the technical limits are not exceeded.

Speed range:

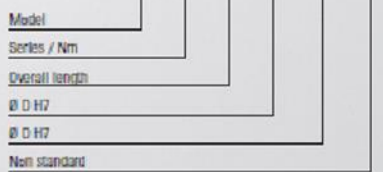
Up to 10.000 U/min

The extended diameter can be reduced by using a flattened shaft.

A further reduction of the \varnothing to 4.5 mm can be reached by using a M2x1.5 set screw (Additional Charge)

Order example

FK1 / 001 / 9 / 1.5 / 1.5 / XX



Technical information	
Nominal torque capacity:	1 Ncm
Maximum peak torque capacity:	2 Ncm
Weight:	0.47 g
Moment of inertia:	5.39 g/mm ²
Torsional stiffness:	23 Ncm/rad
Max. lateral misalignment:	0.1 mm
Max. angular misalignment:	1.5°
Max. axial misalignment:	0.2 mm

The information mentioned in this document is based on our present knowledge and experience and does not exclude the manufacturer's own substantial testing of the equipment. So there is no obligatory assurance even with regard to protective rights of Third Parties. The sale of our products is subject to our General Conditions of Sale and Delivery.

3891 1/04/2004



Experience and Know-how for your special requirements.

R+W Antriebselemente GmbH
Alexander-Wiegand-Straße 8 D-63911 Klingenberg/Germany
Tel. +49-(0)9372 - 9864-0 · Fax +49-(0)9372 - 9864-20
info@rw-kupplungen.de · www.rwcouplings.com

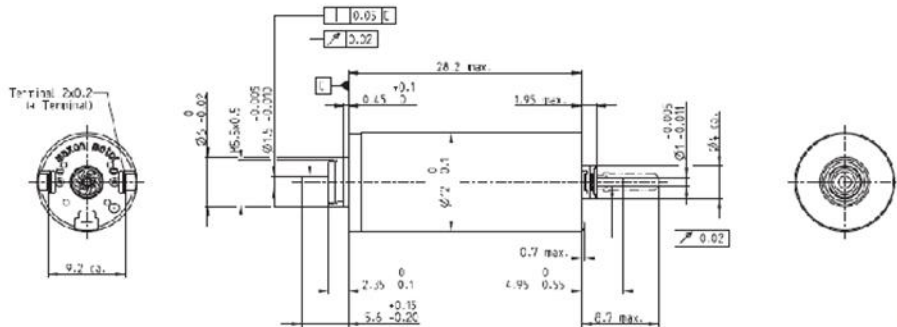
Master κινητήρες

DCX 12 L Precious Metal Brushes DC motor Ø12 mm

2.5/4.8 W 4.2 mNm 12000 rpm

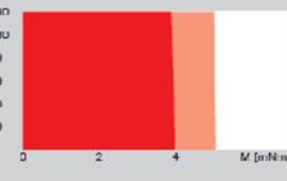


maxon X drives



M 3:2

Motor Data		Operating Range						
		3	4.5	6	9	12	18	
1. Nominal voltage	V							
2. No. load speed	rpm	8800	8810	8810	8820	8810	8800	
3. No. load current	mA	34.5	23	17.2	11.5	8.82	5.75	
4. Nominal speed	rpm	6380	5710	5600	5900	5600	5590	
5. Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	2.88	4.07	3.32	4.18	3.32	3.89	
6. Nominal current (max. continuous current)	A	0.924	0.661	0.622	0.441	0.311	0.206	
7. Stall torque	mNm	10.4	11.6	10.8	12.2	10.6	10.7	
8. Stall current	A	3.24	2.4	1.68	1.26	0.842	0.564	
9. Max. efficiency	%	81	82	81	82	81	81	
10. Internal resistance	Ω	0.927	1.87	3.58	7.12	14.3	32.5	
11. Internal inductance	mH	0.021	0.011	0.125	0.282	0.502	1.13	
12. Torque constant	mNm/A	3.22	4.89	5.44	9.66	12.0	19.3	
13. Speed constant	rpm/V	2970	1500	1400	309	741	494	
14. Speed/torque gradient	rpm/mNm	854	766	820	729	821	831	
15. Mechanical time constant	ms	4.22	4.27	4.20	4.27	4.20	4.3	
16. Motor inertia	cm ²	0.484	0.538	0.436	0.559	0.436	0.405	
Thermal data		Operating Range						
17. Thermal resistance housing-ambient	K/W	31	n [rpm]					Winding 4.5 V
18. Thermal resistance winding-housing	K/W	10.3						
19. Thermal time constant winding	s	10.1	14000					
20. Thermal time constant motor	s	194	12000					
21. Ambient temperature ball bearings	°C	-40	+85					
21. Ambient temperature sleeve bearings	°C	-30	+85					
22. Max. winding temperature	°C	100	20000					
Mechanical data ball bearings								
23. Max. speed	rpm	12000	0000					
24. Axial play	mm	0...0.1	4000					
Preload	N	0.5	2000					
25. Radial play	mm	0.015	0					
26. Max. axial load (dynamic)	N	0.5	0					
27. Max. force for press fits (static) (static, shaft supported)	N	8.8	0					
28. Max. radial load (mm from flange)	N	120	0					
28. Max. radial load (mm from flange)	N	1.5 [5]	0					
Mechanical data sleeve bearings		maxon Modular System						
23. Max. speed	rpm	12000	maxon gear	Stages	maxon sensor	maxon motor control		
24. Axial play	mm	0...0.15	116_GPX 12 A/C	1-4	-40_FNX 10 FASY	416_FSCON Module 24?		
Preload	N	0	117_GPX 12 I N17	1-4	-40_FNX 10 QIAD	416_FSCON 36? DC		
25. Radial play	mm	0.015	118_GPX 12 I IP	2-4		424_EP02 24/2 (DC/CC)		
26. Max. axial load (dynamic)	N	0.1	119_GPX 14 A/C	3-4		424_FPOS? Module 36?		
27. Max. force for press fits (static) (static, shaft supported)	N	30	120_GPX 14 I N17	3-4				
28. Max. radial load (mm from flange)	N	120	121_GPX 14 HP	4				
28. Max. radial load (mm from flange)	N	0.0 [5]						
Other specifications		Configuration						
29. Number of pole pairs		1	Bearing: Sleeve bearings/ball bearings preloaded					
30. Number of commutator segments		7	Commutation: Precious metal brushes with or without CLL					
31. Weight of motor	g	16	Range front/back: Standard flange/Flange with thread holes/no flange					
32. Typical noise level	dBA	44	Shaft front/back: Length					
			Electric connection: Terminals or cable/cable length/connector type					

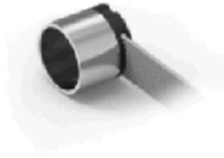


xdrives.maxonmotor.com

A1x12016 edition / previous data / subject to change

Master Encoders

Sensor - ENX10 EASY 512IMP



Type	
Counts per turn	512
Number of channels	3
Line Driver	RS422
Max. outer diameter	10 mm
Max. housing length	8.5 mm
Max. electrical speed	9000 rpm
Max. speed	3000 rpm
Technical data	
Supply voltage, typical	5 V
Supply voltage tolerance +/-	10 %
Output signal driver	Differential, EIA RS 422
Current per cable	-20...20 mA
Min. state length	45 °cl
Min. state length	135 °el
Signal rise time/Signal fall time	20/20 ns
Min. state duration	125 ns
Direction of rotation	A for B, CW
Index position	A low & B low
Index synchronously to AB	yes
Index pulse width	90 e°
Typical current draw at standstill	23 mA
Max. moment of inertia of code wheel	0.05 gcm ²
Weight (Standard cable length)	7.1 g
Operating temperature range	-40 100 °C
Number of autoclave cycles	0

Datasheet: http://www.maxonmotor.com/medias/CMS_Downloads/DIVERSES/ENXEASY_en.pdf

DRV8833 Dual H-Bridge Motor Driver

1 Features

- Dual-H-Bridge Current-Control Motor Driver
 - Can Drive Two DC Motors or One Stepper Motor
 - Low MOSFET ON-Resistance: HS + LS 360 mΩ
- Output Current (at $V_{M} = 5\text{ V}$, 25°C)
 - 1.5-A RMS, 2-A Peak per H-Bridge in RTY Package
- Outputs Can Be In Parallel for
 - 3-A RMS, 4-A Peak
- Wide Power Supply Voltage Range: 2.7 V to 10.8 V
- PWM Winding Current Regulation and Current Limiting
- Thermally Enhanced Surface-Mount Packages

2 Applications

- Battery-Powered Toys
- POS Printers
- Video Security Cameras
- Office Automation Machines
- Gaming Machines
- Robotics

3 Description

The DRV8833 device provides a dual bridge motor driver solution for toys, printers, and other mechatronic applications.

The device has two H-bridge drivers, and can drive two DC brush motors, a bipolar stepper motor, solenoids, or other inductive loads.

The output driver block of each H-bridge consists of N-channel power MOSFETs configured as an H-bridge to drive the motor windings. Each H-bridge includes circuitry to regulate or limit the winding current.

Internal shutdown functions with a fault output pin are provided for overcurrent protection, short-circuit protection, undervoltage lockout, and overtemperature. A low-power sleep mode is also provided.

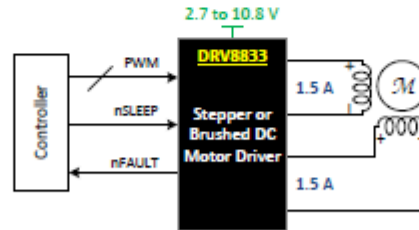
The DRV8833 is packaged in a 16-pin WQFN package with PowerPAD™ (Eco-friendly: RoHS & no Sb/Br).

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (MM)
DRV8833	TSSOP (16)	5.00 mm × 4.40 mm
	HTSSOP (18)	5.00 mm × 4.40 mm
	WQFN (18)	4.00 mm × 4.00 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

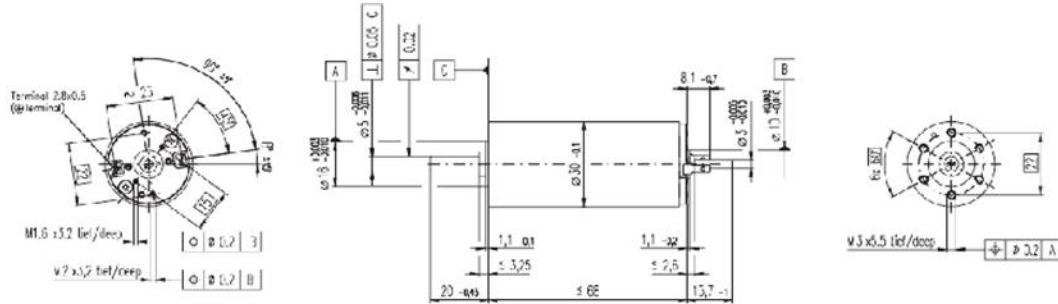
4 Simplified Schematic



⚠ An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Slave κινητήρας

RE 30 Ø30 mm, Graphite Brushes, 60 Watt



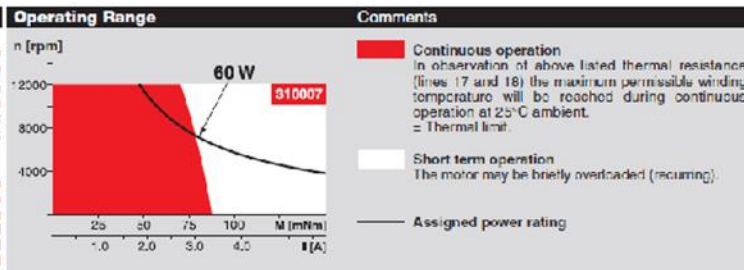
M 1:2

Block program	Order Number				
Standard program					
Special program (on request)					
according to dimensional drawing	310005	310006	310007	310008	310009
shaft length 16.7 / shortened to 8.7 mm	268195	268213	268214	268215	268216

Motor Data							
Values at nominal voltage							
1	Nominal voltage	V	12.0	18.0	24.0	36.0	48.0
2	No load speed	rpm	8170	8590	8810	8590	8490
3	No load current	mA	300	212	164	108	78.5
4	Nominal speed	rpm	7830	7900	8050	7810	7750
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	51.7	75.5	85.0	83.4	88.2
6	Nominal current (max. continuous current)	A	4.00	4.00	3.44	2.20	1.72
7	Stall torque	mNm	844	901	1020	936	1020
8	Starting current	A	60.5	49.8	39.3	23.5	19.0
9	Max. efficiency	%	86	87	87	87	88
Characteristics							
10	Terminal resistance	Ω	0.198	0.362	0.611	1.53	2.52
11	Terminal inductance	mH	0.0145	0.0103	0.119	0.281	0.513
12	Torque constant	mNm / A	13.9	19.9	25.9	39.8	53.8
13	Speed constant	rpm / V	685	479	569	240	178
14	Speed / torque gradient	rpm / mNm	9.74	0.71	0.89	9.22	0.33
15	Mechanical time constant	ms	3.12	3.25	3.03	3.17	3.01
16	Rotor inertia	gcm ²	33.5	35.7	33.3	32.9	34.5

Specifications		
Thermal data		
17	Thermal resistance housing-ambient	6.0 K / W
18	Thermal resistance winding-housing	1.7 K / W
19	Thermal time constant winding	16.2 s
20	Thermal time constant motor	714 s
21	Ambient temperature	-30 ... +100°C
22	Max. permissible winding temperature	+125°C
Mechanical data (ball bearings)		
23	Max. permissible speed	12000 rpm
24	Axial play	0.05 - 0.15 mm
25	Radial play	0.025 mm
26	Max. axial load (dynamic)	5.6 N
27	Max. force for press fits (static) (static, shaft supported)	110 N
28	Max. radial loading, 5 mm from flange	1200 N
Other specifications		
29	Number of pole pairs	1
30	Number of commutator segments	13
31	Weight of motor	238 g

Values listed in the table are nominal. Explanation of the figures on page 49.
 Δ Tolerances may vary from the standard specification.
 Option
 Preloaded ball bearings



maxon Modular System

1 Planetary Gearhead 232 mm 2.75 - 4.5 Nm Page 239

13 Planetary Gearhead 232 mm 1.0 - 6.0 Nm Page 240

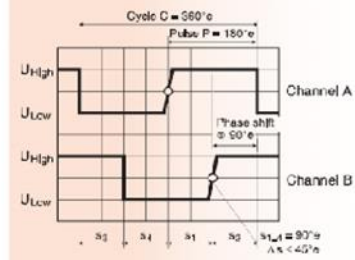
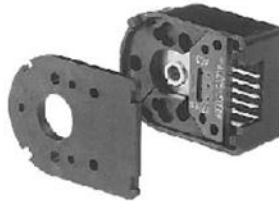
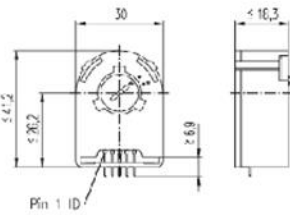
Encoder MR 250 - 1024 OPT 3 channels Page 259

Recommended Electronics:
 ADS 50/5 Page 276
 ADS_E 50/5 277
 EPOS 24/5 291
 EPOS2 50/5 295
 EPOS P 24/5 297
 Notes 18

maxon DC motor

Encoder HEDS 5540, 500 Counts per turn, 3 Channels

maxon tachometer



- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Order Number

110511	110513	110515
--------	--------	--------

Type	110511	110513	110515
Counts per turn	500	500	500
Number of channel	3	3	3
Max. operating frequency (kHz)	100	100	100
Shaft diameter (mm)	3	4	6

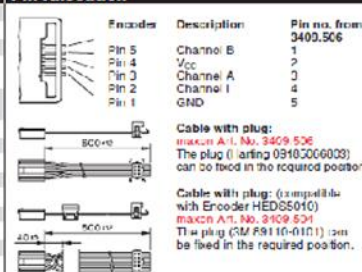


Combination	Page	+ Gearhead	Page	+ Brake	Page	Overall length [mm] / see: + Gearhead
+ Motor						
HF 25, 10 W	77					75.3
RE 25, 10 W	77	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	235			•
RE 25, 10 W	77	GP 32, 0.4 - 2.0 Nm	237			•
TE 25, 10 W	77	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	238/240			•
RE 25, 20 W	79					75.3
RE 25, 20 W	79	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	235			•
RE 25, 20 W	79	GP 32, 0.4 - 2.0 Nm	237			•
RE 25, 20 W	79	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	238/240			•
RE 25, 20 W	79			AB 23	306	105.7
RE 25, 20 W	79	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	235	AB 23	306	•
RE 25, 20 W	79	GP 32, 0.4 - 2.0 Nm	237	AB 23	306	•
RE 25, 20 W	79	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	238/240	AB 23	306	•
RE 26, 18 W	80					77.2
RE 26, 18 W	80	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	235			•
TE 26, 18 W	80	GP 32, 0.4 - 2.0 Nm	237			•
RE 26, 18 W	80	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	238/240			•
RE 35, 90 W	82					91.9
RE 35, 90 W	82	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	239/240			•
HF 35, 90 W	82	GP 32, 8 Nm	242			•
RE 35, 90 W	82	GP 42, 3.0 - 15 Nm	244			•
RE 35, 90 W	82			AB 23	306	124.1
RE 35, 90 W	82	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	239/240	AB 23	306	•
RE 35, 90 W	82	GP 42, 3.0 - 15 Nm	244	AB 23	306	•
RE 36, 70 W	83					90.2
RE 36, 70 W	83	GP 32, 0.4 - 2.0 Nm	237			•
RE 36, 70 W	83	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	239/240			•
RE 36, 70 W	83	GP 42, 3.0 - 15 Nm	244			•
RE 40, 150 W	84					91.7
RE 40, 150 W	84	GP 42, 3.0 - 15 Nm	244			•
RE 40, 150 W	84	GP 52, 4.0 - 30 Nm	247			•
TE 40, 150 W	84			AD 23	300	124.2
RE 40, 150 W	84	GP 42, 3.0 - 15 Nm	244	AB 23	306	•
TE 40, 150 W	84	GP 52, 4.0 - 30 Nm	247	AD 23	300	•

Technical Data

Supply voltage	± 5 V = 10 %
Output signal	TTL compatible
Phase shift (nominal)	90° ± 45°
Signal rise time (typical at C _L = 25 pF, R _L = 2.7 kΩ, 25°C)	180 ns
Signal fall time (typical at C _L = 25 pF, R _L = 2.7 kΩ, 25°C)	40 ns
Index pulse width (nominal)	50°
Operating temperature range	-40 ... +100°C
Moment of inertia of code wheel	≤ 0.6 gcm ²
Max. angular acceleration	250 000 rad/s ²
Output current per channel	min. -1 mA, max. 5 mA

Pin Allocation



Connection example

