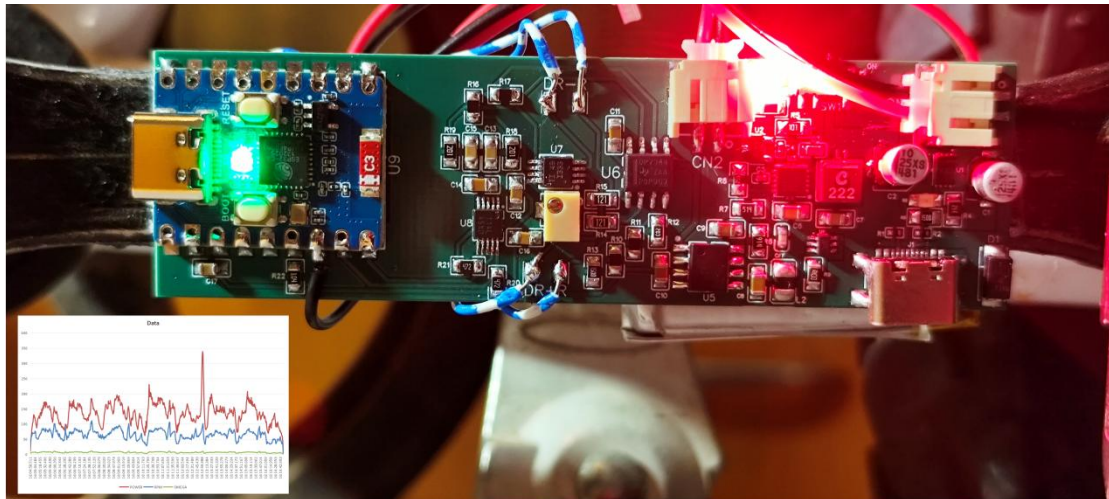


ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΡΟΦΩΝ, ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΠΟΔΗΛΑΤΟ



Του φοιτητή
Βασιλείου Σύγκου
Αρ. Μητρώου: 518144

Επιβλέπων
Ιορδάνης Κιοσκερίδης
Καθηγητής

Ιούνιος 2026

Τίτλος Π.Ε.: Μέτρηση στροφών, ταχύτητας και της μηχανικής ισχύος σε ποδήλατο

Κωδικός Π.Ε.: 25303

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Βασίλειος Σύγκος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Ιορδάνης Κιοσκερίδης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 29/9/2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 22/5/2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Βασίλειου Σύγκου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στην οικογένεια μου»

Πρόλογος

Επέλεξα αυτό το θέμα καθώς μου αρέσει η ποδηλασία και η υλοποίηση ηλεκτρονικών διατάξεων. Στο κομμάτι της ποδηλασίας ένας από τους καλύτερους τρόπους καταγραφής της απόδοσης ενός ποδηλάτη κατά την διάρκεια της προπόνησης είναι η μέτρηση της ισχύος που παράγεται, με τις γνώσεις που έχω αποκομίσει όλα αυτά τα χρόνια της ακαδημαϊκής μου πορείας, μου έχει δοθεί η δυνατότητα να υλοποιήσω μια κατασκευή η οποία θα μπορεί να πραγματοποιήσει αυτές τις μετρήσεις, χρησιμοποιώντας έναν πολύ ενδιαφέρον αισθητήρα, το strain gauge. Μέσω της αξιοποίησης του συγκεκριμένου αισθητήρα δίνεται η δυνατότητα να μετρηθεί η δύναμη που ασκείται στο πετάλι και σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες διατάξεις που θα υλοποιηθούν να μετρηθεί τελικά η μηχανική ισχύς. Πρόκειται για μια κατασκευή στην οποία χρειάστηκε ο σχεδιασμός του ηλεκτρονικού κυκλώματος, η ανάπτυξη των απαραίτητων τυπωμένων πλακετών, η αξιοποίηση ενός ESP32 για την επεξεργασία και ασύρματη μετάδοση των δεδομένων με τελικό αποτέλεσμα την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου συστήματος.

Περίληψη

Αντικείμενο της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μιας συσκευής η οποία έχει τη δυνατότητα να μετρά τις στροφές, την ταχύτητα και τη μηχανική ισχύ σε ποδήλατο. Συσκευή η οποία χρησιμοποιείται για τη συλλογή δεδομένων προκειμένου να βελτιωθεί η διαδικασία της προπόνησης.

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι αισθητήρων. Για τη μέτρηση των στροφών και της γωνιακής ταχύτητας αξιοποιείται ένας αισθητήρας Hall, ενώ για την μέτρηση της δύναμης η οποία ασκείται στο πετάλι του ποδηλάτου γίνεται χρήση δύο αισθητήρων strain gauge, με τη δύναμη μπορεί να υπολογιστεί η ροπή και τελικά η μηχανική ισχύ. Τα δεδομένα επεξεργάζονται από έναν μικροελεγκτή ESP32 C3 Zero και στη συνέχεια αποστέλλονται σε έναν τερματικό μέσω του πρωτοκόλλου BLE.

Μετά τη βαθμονόμηση της συσκευής με τη χρήση βαρών, έγιναν δοκιμές σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο και παρατέθηκαν γραφήματα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, επιπλέον εφαρμόστηκε ψηφιακό φίλτρο EMA για την εξομάλυνση των μετρήσεων και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Εν κατακλείδι, το σύστημα ανταποκρίνεται κατά την ποδηλασία, οι στροφές και συνεπώς η ταχύτητα υπολογίζονται με σταθερότητα, ενώ για τη μηχανική ισχύ διαπιστώθηκε αρχικά ένα σχετικό σφάλμα της τάξης 1.19%, το οποίο διαμορφώθηκε στο 4.02% μετά το πέρας των μετρήσεων λόγω της καταπόνησης των αισθητήρων. Το σφάλμα αυτό παραμένει σε μικρές τιμές με την τακτική βαθμονόμηση του συστήματος.

«Measurement of RPM, Velocity and Mechanical Power on a Bicycle»

«Sygkos Vasileios»

Abstract

The subject matter of this thesis is the design and implementation of a device that is capable of measuring RPM, angular velocity and mechanical power on a bicycle. A device that can be used to collect data in order to enhance training sessions.

Two types of sensors were used to carry out measurements. RPM and angular velocity are measured by using a hall effect sensor, whilst the magnitude of the force applied to the pedal of the bicycle is measured with two strain gauges, by measuring the force, torque and subsequently, the mechanical power can be calculated. The data are processed with an ESP32 C3 Zero microcontroller and they are sent to a terminal via BLE.

After the calibration of the device with weights, it is tested indoors and outdoors, the results are presented with graphs. In addition, a digital EMA filter was used to smooth the measurements and a comparison is held between the results.

In conclusion, the device is really responsive during cycling sessions, RPM and therefore angular velocity are stable, whereas for the measurement of mechanical power an initial error of 1.19% is observed, a number that increased to 4.02% upon measuring the error after all the tests are done, the increase is caused due to the mechanical stress of the sensors. A low error percentage can be established by calibrating the device regularly.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ την οικογένεια μου για την υποστήριξη και τη βοήθεια, όχι μόνο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου αλλά σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επιπλέον, ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας, Ιορδάνη Κιοσκερίδη.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Εικόνων	xi
Κατάλογος Πινάκων	xiii
Συνοτομογραφίες	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός της εργασίας	1
1.2 Ιστορία και τύποι βατόμετρων	1
1.3 Εισαγωγή στη μέτρηση ισχύος	2
1.3.1 Στροφές και ταχύτητα	2
1.3.2 Ροπή και δύναμη	2
1.4 Επεξεργασία και μεταφορά των δεδομένων	2
Κεφάλαιο 2ο: Βασικές έννοιες και φυσικά μεγέθη	3
2.1 Εισαγωγή	3
2.2 Στροφές βραχίονα (RPM)	3
2.3 Γωνιακή ταχύτητα	3
2.4 Ροπή	4
2.4.1 Δύναμη	5
2.5 Μηχανική ισχύς	6
2.6 Επίλογος	6
Κεφάλαιο 3ο: Αισθητήρες	7
3.1 Εισαγωγή	7
3.2 Strain gauge	7
3.3 Αισθητήρας Hall	9
3.4 Επίλογος	10
Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση του κυκλώματος	11
4.1 Εισαγωγή	11
4.2 Βαθμίδα φόρτισης	12

4.2.1 USB type-C connector	12
4.2.2 Επαναφορτιζόμενη μπαταρία LiPo	13
4.2.3 Διάταξη φόρτισης με το MCP73831	13
4.2.4 Θερμοκρασία	15
4.2.5 Διακόπτης λειτουργίας	15
4.3 Boost Converter	16
4.3.1 Τάση εξόδου	16
4.3.2 Undervoltage lockout	17
4.3.3 Πηνίο	17
4.3.4 Πυκνωτές	17
4.3.5 Ιδανική δίοδος	17
4.3.6 RLC Filter	18
4.3.7 AGND και GND	18
4.4 Γραμμικός ρυθμιστής τάσης	19
4.5 Μορφομετατροπέας	20
4.6 ADC	22
4.6.1 Programmable Gain Amplifier	23
4.6.2 Φίλτρο RC	23
4.6.3 I2C	24
4.7 ESP32-C3 Zero	24
4.7.1 Χαρακτηριστικά του ESP32-C3 Zero	24
4.7.2 Σχηματικό κυκλώματος	25
4.7.3 Bluetooth Low Energy (BLE)	26
4.8 Αισθητήρας Hall	27
4.9 Επίλογος	28
Κεφάλαιο 5ο: Υλοποίηση του κυκλώματος	29
5.1 Εισαγωγή	29
5.2 Συναρμολόγηση κύριας πλακέτας και μετρήσεις	29
5.3 Πλακέτα αισθητήρα Hall	33
5.4 Κόλληση των αισθητήρων strain gauge	34
5.5 Τοποθέτηση της κατασκευής στο βραχίονα	35
5.6 Επίλογος	39
Κεφάλαιο 6ο: Βαθμονόμηση και μετρήσεις	40
6.1 Εισαγωγή	40

6.2 Πρόγραμμα	40
6.2.1 Υπολογισμός RPM και ταχύτητας	40
6.2.2 Υπολογισμός μηχανικής ισχύος	41
6.3 Μεταβλητή βαθμονόμησης k	42
6.4 Δοκιμή στροφών	46
6.5 Δοκιμή συσκευής	47
6.5.1 Ήπια καθήμενη ποδηλασία	47
6.5.2 Ορθοπεταλιά	49
6.6 Φίλτρο EMA	51
6.6.1 Ήπια καθήμενη ποδηλασία (EMA)	52
6.6.2 Ορθοπεταλιά (EMA)	53
6.7 Σύγκριση σημάτων	54
6.7.1 Ήπια καθήμενη ποδηλασία	54
6.7.2 Ποδηλασία σε εξωτερικό χώρο	56
6.7.3 Σύγκριση τιμών μεταβλητής α	57
6.8 Τελική καταμέτρηση σφάλματος	60
Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις	61
7.1 Συμπεράσματα	61
7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις	61
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	62
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ	63

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 : Favero Assioma PRO RL-1	1
Εικόνα 1.2 : 4iiii Precision 3+	1
Εικόνα 1.3 : Shimano Ultegra FC-R8100-P	2
Εικόνα 2.1 : Απεικόνιση γωνιακής ταχύτητας στο βραχίονα	4
Εικόνα 2.2 : Απεικόνιση δύναμης F και απόστασης r	5
Εικόνα 3.1 : Strain gauge	8
Εικόνα 3.2 : Διάταξη γέφυρας Wheatstone	8
Εικόνα 3.3 : Μαγνητική απόκριση DRV5032DU [6]	9
Εικόνα 3.4 : Μαγνητική απόκριση DRV5032FA [6]	10
Εικόνα 3.5 : Μαγνητική απόκριση DRV5015A3 [7]	10
Εικόνα 4.1 : Διάγραμμα ροής του κυκλώματος	11
Εικόνα 4.2 : Σχηματικό κυκλώματος φόρτισης	12
Εικόνα 4.3 : USB pinout [8]	12
Εικόνα 4.4 : Σχηματικό boost converter	16
Εικόνα 4.5 : Σχηματικό LDO	19
Εικόνα 4.6 : Σχηματικό μορφομετατροπέα	20
Εικόνα 4.7 : Σχηματικό ADC	22
Εικόνα 4.8 : ESP32-C3 Zero [14]	24
Εικόνα 4.9 : ESP32-C3 Zero Pinout [14]	25
Εικόνα 4.10 : Σχηματικό ESP32	25
Εικόνα 4.11 : Σχηματικό αισθητήρα Hall	27
Εικόνα 5.1 : PCB Layout	29
Εικόνα 5.2 : Κύκλωμα φόρτισης	30
Εικόνα 5.3 : Μέτρηση κατά την φόρτιση της συσκευής	30
Εικόνα 5.4 : Κύκλωμα boost converter	31
Εικόνα 5.5 : Κύκλωμα LDO	31
Εικόνα 5.6 : Κύκλωμα μορφομετατροπέα	32
Εικόνα 5.7 : Κύκλωμα ADC	32
Εικόνα 5.8 : ESP32-C3 Zero	33
Εικόνα 5.9 : Hall effect sensor PCB layout	33
Εικόνα 5.10 : Πλακέτα αισθητήρα Hall	33
Εικόνα 5.11 : Έξοδος αισθητήρα Hall	34
Εικόνα 5.12 : Strain gauge τοποθετημένο στο βραχίονα	34
Εικόνα 5.13 : Strain gauge επικαλυμμένο με σιλικόνη	35
Εικόνα 5.14 : Πλακέτα τοποθετημένη στο βραχίονα	36
Εικόνα 5.15 : Ακροδέκτες των αισθητήρων strain gauge	36
Εικόνα 5.16 : Strain gauge συμπίεσης	37
Εικόνα 5.17 : Strain gauge επιμήκυνσης	37
Εικόνα 5.18 : Πλακέτα αισθητήρα Hall	38
Εικόνα 5.19 : Αισθητήρας Hall απέναντι από τον μαγνήτη	38
Εικόνα 5.20 : Ενεργοποιημένη συσκευή	39
Εικόνα 6.1 : Σταθεροποίηση βραχίονα	42
Εικόνα 6.2 : Μέτρηση offset	43

Εικόνα 6.3 : Διαδικασία βαθμονόμησης	43
Εικόνα 6.4 : Μετρήσεις 10 κιλών	44
Εικόνα 6.5 : Γράφημα μέτρησης k.....	45
Εικόνα 6.6 : Μέτρηση δύναμης F	45
Εικόνα 6.7 : Μέτρηση στροφών, ταχύτητας και μηχανικής ισχύος	47
Εικόνα 6.8 : Γράφημα διακύμανσης Στροφών-Ισχύος (χαμηλού ρυθμού)	48
Εικόνα 6.9 : Γράφημα διακύμανσης γωνιακής ταχύτητας (χαμηλού ρυθμού)	48
Εικόνα 6.10 : Δεδομένα στο BLE terminal	49
Εικόνα 6.11 : Γράφημα διακύμανσης Στροφών-Ισχύος (υψηλού ρυθμού)	50
Εικόνα 6.12 : Γράφημα διακύμανσης γωνιακής ταχύτητας (υψηλού ρυθμού)	50
Εικόνα 6.13 : Γράφημα διακύμανσης Στροφών-Ισχύος (χαμηλού ρυθμού)	52
Εικόνα 6.14 : Γράφημα διακύμανσης γωνιακής ταχύτητας (χαμηλού ρυθμού)	52
Εικόνα 6.15 : Γράφημα διακύμανσης Στροφών-Ισχύος (υψηλού ρυθμού)	53
Εικόνα 6.16 : Γράφημα διακύμανσης γωνιακής ταχύτητας (υψηλού ρυθμού)	53
Εικόνα 6.17 : Γράφημα σύγκρισης μετρήσεων	54
Εικόνα 6.18 : Γράφημα γωνιακής ταχύτητας	55
Εικόνα 6.19 : Γράφημα διακύμανσης ισχύος σε εξωτερικό χώρο	56
Εικόνα 6.20 : Γράφημα διακύμανσης γωνιακής ταχύτητας σε εξωτερικό χώρο	56
Εικόνα 6.21 : Γράφημα για $\alpha = 0.1$	57
Εικόνα 6.22 : Γράφημα για $\alpha = 0.3$	58
Εικόνα 6.23 : Γράφημα για $\alpha = 0.5$	58
Εικόνα 6.24 : Γράφημα για $\alpha = 0.8$	59
Εικόνα 6.25 : Terminal κατά τη μέτρηση	60

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 : Τύποι	6
Πίνακας 4.1 : Λειτουργία διόδου	18
Πίνακας 4.2 : FSR-LSB [13]	23
Πίνακας 4.3 : Επιλογή λειτουργίας [15]	26
Πίνακας 5.1 : Μετρήσεις κυκλώματος φόρτισης	30
Πίνακας 5.2 : Μετρήσεις boost converter	31
Πίνακας 5.3 : Μετρήσεις LDO	31
Πίνακας 5.4 : Μετρήσεις μορφομετατροπέα	32
Πίνακας 6.1 : Αποτελέσματα μετρήσεων βαθμονόμησης	44
Πίνακας 6.2 : Αποτελέσματα επαναληπτικής μέτρησης 4kg	46
Πίνακας 6.3 : Αποτελέσματα μέτρησης στροφών	46
Πίνακας 6.4 : Αποτελέσματα μετρήσεων	49
Πίνακας 6.5 : Αποτελέσματα μετρήσεων	51
Πίνακας 6.6 : Αποτελέσματα μετρήσεων	53
Πίνακας 6.7 : Αποτελέσματα μετρήσεων	54
Πίνακας 6.8 : Αποτελέσματα μετρήσεων	55
Πίνακας 6.9 : Αποτελέσματα μετρήσεων	56
Πίνακας 6.10 : Αποτελέσματα μετρήσεων για διάφορες τιμές του α	59
Πίνακας 6.11 : Αποτελέσματα μέτρησης 4kg	60

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
LDO	Low Dropout
ΔΣ	Δέλτα-Σίγμα
EMA	Exponential Moving Average

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Η μέτρηση της ισχύος που παράγει ένας ποδηλάτης κατά τη διάρκεια της άσκησης αποτελεί τον πιο αξιόπιστο και ακριβή τρόπο μετατροπής της επίδοσης σε μετρήσιμα δεδομένα.

Αυτή η μέθοδος καταγραφής υπερέρχει έναντι των καθιερωμένων τρόπων όπως για παράδειγμα η μέτρηση των παλμών διότι είναι ανεξάρτητη των εξωτερικών παραγόντων και συνθηκών που μπορεί να επικρατούν κατά την διάρκεια της ποδηλασίας. Μεταβλητές που αφορούν τον ποδηλάτη όπως για παράδειγμα η κόπωση ή παράγοντες που αφορούν το περιβάλλον όπως η θερμοκρασία ή ο αέρας, αν αφορά την ποδηλασία σε εξωτερικό χώρο, επηρεάζουν τις μετρήσεις αλλά δεν είναι αποτέλεσμα της άσκησης.

Επομένως, ο σκοπός της πτυχιακής είναι η σχεδίαση και υλοποίηση μιας κατασκευής μέτρησης της ισχύος η οποία είναι καθαρά και μόνο αποτέλεσμα του παραγόμενου έργου του ποδηλάτη.

1.2 Ιστορία και τύποι βατόμετρων

Η δυνατότητα μέτρησης της απόδοσης των προπονήσεων με την μέτρηση της ισχύος έγινε δυνατή το 1986 όταν ο Ulrich Schoberer ανέπτυξε και πατένταρε το πρώτο σύστημα το οποίο είχε τη δυνατότητα να πραγματοποιεί αυτές τις μετρήσεις κατά την διάρκεια της ποδηλασίας [1]. Υπάρχουν πολλά είδη βατόμετρων στο εμπόριο, τα πιο διαδεδομένα είναι τα εξής:

- Πεταλιού

Μετρά άμεσα τη δύναμη που ασκεί ο ποδηλάτης στο πετάλι.



Εικόνα 1.1: Favero Assioma PRO RL-1

- Βραχίονα (ο τύπος που υλοποιήθηκε στην πτυχιακή εργασία)

Μετρά έμμεσα τη δύναμη που ασκεί το ένα πόδι του ποδηλάτη, μέσω της παραμόρφωσης του μετάλλου.



Εικόνα 1.2: 4iiii Precision 3+

- Δισκοβραχίονα

Μετρά έμμεσα τη δύναμη που ασκούν και τα δύο πόδια του ποδηλάτη, μέσω της παραμόρφωσης του μετάλλου.



Εικόνα 1.3: Shimano Ultegra FC-R8100-P

1.3 Εισαγωγή στη μέτρηση ισχύος

Για τον υπολογισμό και την μέτρηση της ισχύος είναι απαραίτητη η αξιοποίηση κάποιων βασικών μεγεθών της μηχανικής τα οποία αναλύονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 της πτυχιακής.

1.3.1 Στροφές και ταχύτητα

Η καταμέτρηση του αριθμού των στροφών που πραγματοποιεί ο βραχίονας είναι αναγκαία για τον υπολογισμό της ταχύτητας. Πρέπει σε αυτό το σημείο να γίνει η επισήμανση ότι η αναφορά στην ταχύτητα δεν σχετίζεται με την ταχύτητα με την οποία μπορεί να κινείται το ποδήλατο, αλλά την ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται το πετάλι και πιο συγκεκριμένα ο βραχίονας, δηλαδή στους υπολογισμούς γίνεται η χρήση της γωνιακής ταχύτητας του βραχίονα.

1.3.2 Ροπή και δύναμη

Το άλλο μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισχύος είναι η ροπή. Για τον υπολογισμό της ροπής και με δεδομένο το μήκος του βραχίονα, πρέπει να μετρηθεί η δύναμη η οποία ασκείται στον βραχίονα του ποδηλάτου κατά την περιστροφή. Η μέτρηση της δύναμης γίνεται με τη χρήση των αισθητήρων strain gauge.

1.4 Επεξεργασία και μεταφορά των δεδομένων

Μόλις ολοκληρωθούν οι απαραίτητες διαδικασίες για τις μετρήσεις των φυσικών μεγεθών, οι οποίες θα αναλυθούν διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας, τα δεδομένα αποστέλλονται σε ένα μικροελεγκτή ESP32 στον οποίο πραγματοποιούνται οι απαραίτητοι υπολογισμοί.

Τέλος, αφού περατωθούν όλες οι διεργασίες, οι τιμές των στροφών, της ταχύτητας και της μηχανικής ισχύος που παράγονται στο ποδήλατο αποστέλλονται ασύρματα, με τη χρήση bluetooth σε ένα τερματικό κινητού για την εύκολη και άμεση ανάγνωση των αποτελεσμάτων κατά τη διάρκεια της ποδηλασίας.

Κεφάλαιο 2ο: Βασικές έννοιες και φυσικά μεγέθη

2.1 Εισαγωγή

Οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης πτυχιακής βασίζονται στις αρχές και τα φυσικά μεγέθη της μηχανικής, επομένως κρίνεται απαραίτητη η αναλυτική αναφορά στις έννοιες και στους τύπους που χρησιμοποιούνται για να πραγματοποιηθούν όλοι οι υπολογισμοί.

Η κατανόηση αυτών των ορισμών είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα ως προς την ολοκλήρωση της πτυχιακής, καθώς βοηθούν στη μετατροπή των δεδομένων που παρέχουν οι αισθητήρες σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα περιφερειακά σε μεγέθη και αριθμούς κατανοητούς προς τον χρήστη.

Στο κεφάλαιο αυτό θα προσδιοριστούν οι μαθηματικές σχέσεις που συνδέουν όλα τα φυσικά μεγέθη. Αρχικά, το πως ο αριθμός των στροφών που πραγματοποιεί ο βραχίονας του ποδηλάτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η γωνιακή ταχύτητα, καθώς επίσης και το πως η δύναμη που ασκείται στο πετάλι από τον ποδηλάτη μετατρέπεται σε ροπή. Τέλος, πως όλα αυτά τα μεγέθη συσχετίζονται για να αποδώσουν τη μηχανική ισχύ.

2.2 Στροφές βραχίονα (RPM)

Το πρώτο μέγεθος το οποίο αναλύεται είναι οι στροφές που πραγματοποιεί ο βραχίονας του ποδηλάτου. Για να προκύψει ο υπολογισμός του αριθμού των στροφών χρησιμοποιείται ένα βασικό μέγεθος το οποίο είναι η συχνότητα. Ο τύπος της συχνότητας ορίζεται ως εξής:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

Όπου

- f = συχνότητα
- T = περίοδος, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μια περιστροφή

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η συχνότητα εκφράζει το πόσο συχνά πραγματοποιείται μια περιστροφή σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ενώ η μονάδα μέτρησης είναι το Hertz (Hz).

Στην περίπτωση καταμέτρησης των στροφών του βραχίονα η χρονική βάση που χρησιμοποιείται είναι τα 60 δευτερόλεπτα, επομένως οι στροφές ανά λεπτό μπορούν να υπολογιστούν με την παρακάτω σχέση:

$$RPM = f \cdot 60 \quad (2.2)$$

2.3 Γωνιακή ταχύτητα

Το επόμενο μέγεθος το οποίο απαιτείται για τους υπολογισμούς είναι η γωνιακή ταχύτητα (angular velocity). Ως γωνιακή ταχύτητα σε ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο ορίζεται η

γωνιακή μετατόπιση ως προς ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ο τύπος της γωνιακής ταχύτητας ορίζεται ως εξής:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (2.3)$$

Όπου

- $\Delta\theta$ = γωνιακή μετατόπιση
- Δt = χρονικό διάστημα

Με βάση τον τύπο 2.3 η γωνιακή ταχύτητα για μια περιστροφή μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.4)$$

Ο παραπάνω τύπος 2.4 ορίζει τη γωνιακή ταχύτητα ως τη γωνιακή απόσταση μιας περιστροφής 2π διαιρούμενη με το χρόνο T που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί. Είναι μέγεθος διανυσματικό με την κατεύθυνση να ορίζεται χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού, η μονάδα μέτρησης είναι το rad/s. [2]



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση γωνιακής ταχύτητας στο βραχίονα

2.4 Ροπή

Η ροπή ορίζεται ως η δράση περιστροφής ενός αντικειμένου γύρω από έναν άξονα, η οποία οφείλεται στην εφαρμογή μιας δύναμης. Αν η δύναμη ασκείται σε ένα σημείο που ορίζεται από ένα διάνυσμα θέσης [2], ο τύπος υπολογισμού της ροπής είναι:

$$\tau = F \cdot r \quad (2.5)$$

Όπου

- F = εφαρμοζόμενη δύναμη

- r = η απόσταση από το κέντρο του άξονα

Μονάδα μέτρησης της ροπής είναι το $N \cdot m$.

2.4.1 Δύναμη

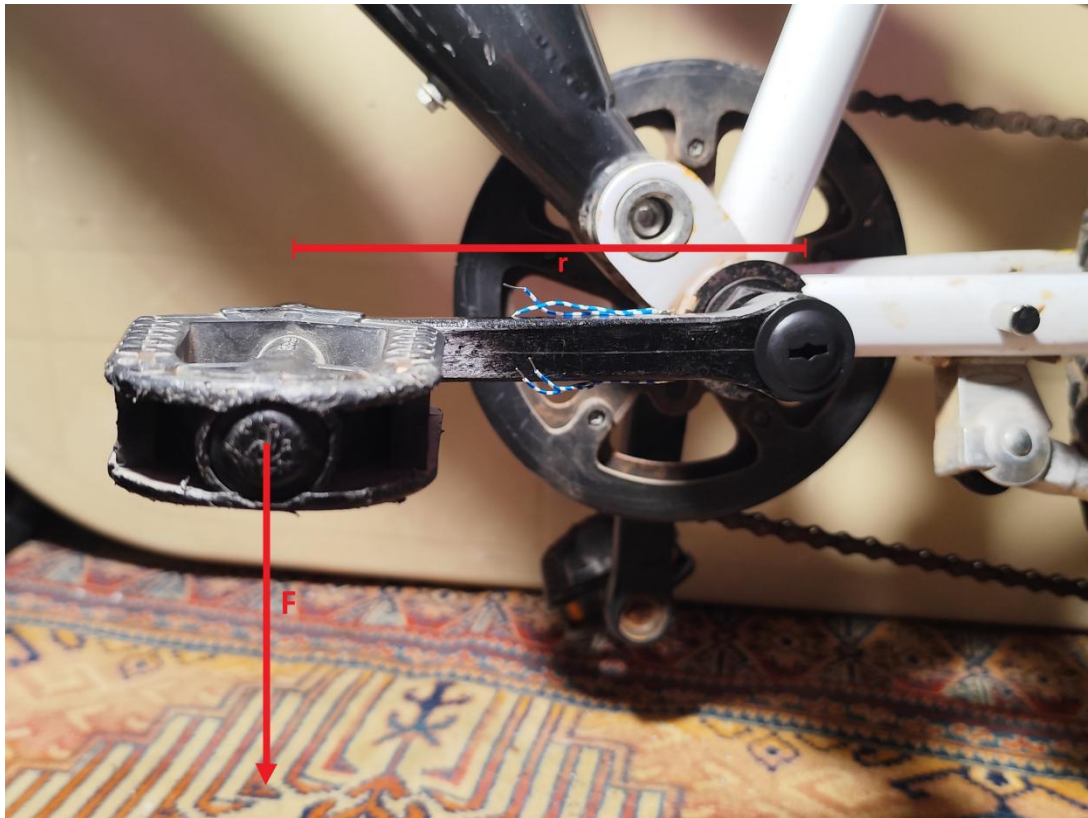
Η δύναμη η οποία ασκείται στον βραχίονα μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$F = m \cdot g \quad (2.6)$$

Όπου

- m = μάζα
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, επιτάχυνση της βαρύτητας

Η μεταβλητή της μάζας (m) είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση της κατασκευής.



Εικόνα 2.2: Απεικόνιση δύναμης F και απόστασης r

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα 2.2, η δύναμη (F) είναι το αποτέλεσμα της πίεσης του πεταλιού από τον ποδηλάτη και η μεταβλητή r είναι το μήκος του βραχίονα, από το σημείο που είναι τοποθετημένο το πετάλι και εφαρμόζεται η δύναμη (F) μέχρι το σταθερό άξονα γύρω από τον οποίο περιστρέφεται ο βραχίονας.

2.5 Μηχανική ισχύς

Το τελικό φυσικό μέγεθος το οποίο υπολογίζεται με τη χρήση των μεγεθών που αναλύθηκαν στο συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι η μηχανική ισχύς, η οποία παράγεται λόγω της περιστροφικής κίνησης, ο τύπος είναι ο εξής:

$$P = \tau \cdot \omega \quad (2.7)$$

Μονάδα μέτρησης της ισχύος είναι τα Watt.

2.6 Επίλογος

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο έγινε η ανάλυση της θεωρίας η οποία χρησιμοποιείται στα επόμενα κεφάλαια για τον υπολογισμό των μεγεθών από τον μικροελεγκτή. Οι τύποι παραθέτονται περιληπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.1: Τύποι

Μέγεθος	Τύπος
Στροφές (<i>RPM</i>)	$f \cdot 60$
Γωνιακή ταχύτητα (ω)	$\frac{2\pi}{T}$
Ροπή (τ)	$F \cdot r$
Δύναμη (F)	$m \cdot g$
Μηχανική ισχύς (P)	$\tau \cdot \omega$

Κεφάλαιο 3ο: Αισθητήρες

3.1 Εισαγωγή

Για τη μέτρηση των δεδομένων που απαιτούνται για την υλοποίηση της συσκευής επιλέχθηκαν δυο τύποι αισθητήρων. Η χρήση των οποίων δίνει τη δυνατότητα στον μικροελεγκτή να λάβει την πληροφορία και με την υλοποίηση των απαραίτητων μαθηματικών υπολογισμών να τη μετατρέψει σε ευανάγνωστα δεδομένα για τον ποδηλάτη.

Συγκεκριμένα για τη καταγραφή της δύναμης που ασκείται στο πετάλι από τον ποδηλάτη, χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες strain gauge.

Ενώ, ο αισθητήρας Hall χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ρυθμού με τον οποίο περιστρέφεται ο βραχίονας (cadence) κατά τη διάρκεια της ποδηλασίας.

3.2 Strain gauge

Οι αισθητήρες strain gauge είναι στοιχεία τα οποία έχουν τη δυνατότητα να μετρούν την παραμόρφωση σε ένα αντικείμενο. Οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορα υλικά όπως το μέταλλο, το τσιμέντο, ή το ξύλο.

Με τον όρο παραμόρφωση περιγράφεται το πόσο μεταβάλλεται ένα αντικείμενο ανάλογα με το μέγεθος της δύναμης που ασκείται σε αυτό. Η παραμόρφωση αυτή ορίζεται ως η μεταβολή του μήκους του αντικειμένου ως προς το αρχικό, προ παραμόρφωσης, μήκος. Ο τύπος αυτός αναφέρεται ως Poisson's ratio και είναι ο εξής [3]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.1)$$

Όπου

- ΔL = η τιμή της μεταβολής του μήκους
- L = το αρχικό μήκος

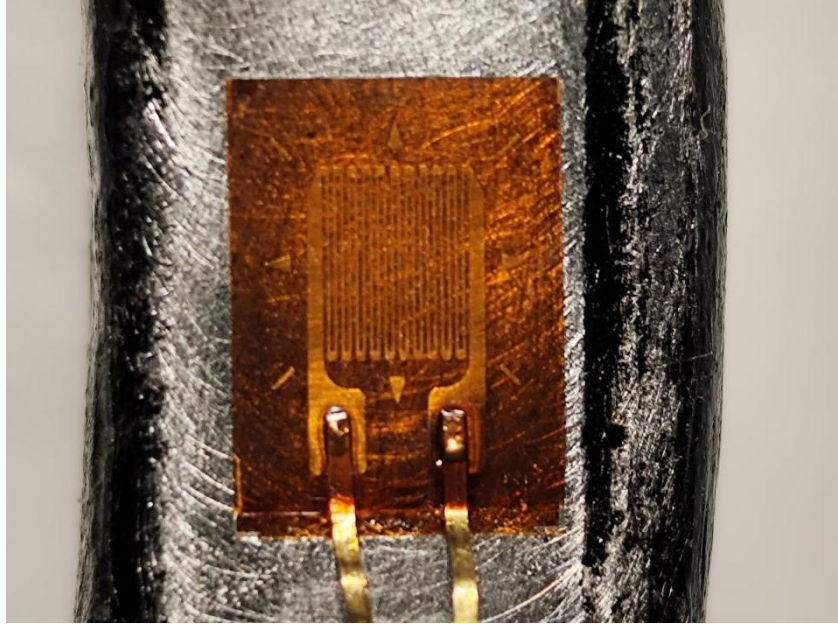
Μια άλλη μεταβλητή που αφορά τον αισθητήρα είναι ο συντελεστής του strain gauge GF (gauge factor) και εκφράζει την ευαισθησία που παρουσιάζει κατά την παραμόρφωση. Ο τύπος είναι ο εξής:

$$GF = \frac{\Delta L/L}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

Η τυπική τιμή της μεταβλητής GF είναι 2.

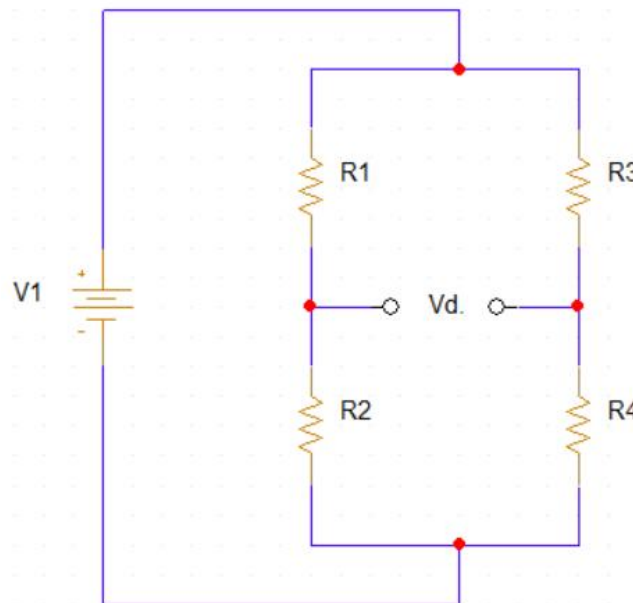
Κατασκευαστικά, το strain gauge αποτελείται από ένα υπόστρωμα στο οποίο τοποθετείται ένα λεπτό μεταλλικό πλέγμα το οποίο εμφανίζει μια αντίσταση η οποία αυξάνεται κατά την επιμήκυνση και μειώνεται κατά τη συμπίεση [3]. Το μέταλλο που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το constantan, το οποίο είναι ένα κράμα χαλκού και νικελίου.

Για τη σωστή μέτρηση της παραμόρφωσης του βραχίονα τα strain gauges τοποθετούνται έτσι ώστε το πλέγμα να είναι παράλληλα με την φορά της επιμήκυνσης και της συμπίεσης [3]. Για την κόλληση μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικευμένες κόλλες όπως είναι η σειρά M-bond της Vishay είτε κυανοακρυλικές κόλλες.



Εικόνα 3.1: Strain gauge

Στην πράξη η μεταβολή της αντίστασης του αισθητήρα είναι πολύ μικρή, της τάξης των mOhm. Για την μέτρηση της μεταβολής και την μετατροπή σε τάση χρησιμοποιείται η συνδεσμολογία της γέφυρας Wheatstone.



Εικόνα 3.2: Διάταξη γέφυρας Wheatstone

Στην εικόνα 3.2 φαίνονται οι δύο κλάδοι της γέφυρας στους οποίους σχηματίζονται δύο διαιρέτες τάσεις. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο κόμβων αποτελεί το σήμα εξόδου και υπολογίζεται ως εξής:

$$Vd = V1 \cdot \frac{R4 \cdot R1 - R3 \cdot R2}{(R3 + R4) \cdot (R1 + R2)} \quad (3.3)$$

Αν η τάση Vd είναι ίση με μηδέν, τότε η γέφυρα βρίσκεται σε ισορροπία.

Υπάρχουν τρία είδη γεφυρών:

- Γέφυρα 1/4, μεταβάλλεται μια αντίσταση
- Γέφυρα 2/4, μεταβάλλονται δύο αντιστάσεις
- Γέφυρα 4/4, μεταβάλλονται τέσσερις αντιστάσεις [4]

Η τροφοδοσία του κυκλώματος μπορεί να γίνει είτε από μια πηγή τάσης είτε από μια πηγή ρεύματος.

Στο κύκλωμα της συσκευής χρησιμοποιείται μια γέφυρα 2/4, με τις μεταβολές των αντιστάσεων να είναι διαφορικής πολικότητας, ενώ τροφοδοτείται από μια πηγή ρεύματος.

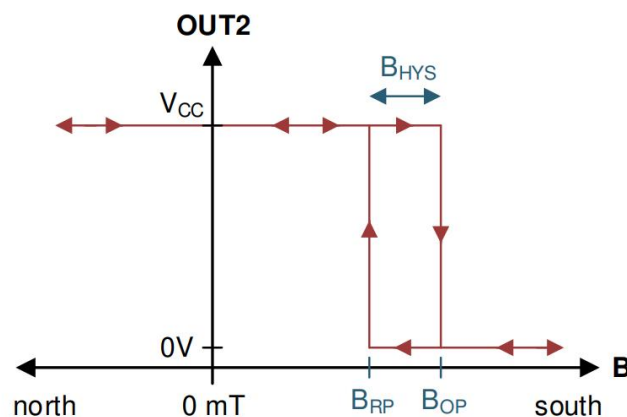
3.3 Αισθητήρας Hall

Ο αισθητήρας Hall (Hall effect sensor) είναι ένα είδος μορφομετατροπέα, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει μαγνητικά πεδία. Η βασική αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο φαινόμενο Hall, σύμφωνα με το οποίο, όταν ένας αγωγός που μεταφέρει ρεύμα εκτεθεί σε ένα κάθετο προς το ρεύμα μαγνητικό πεδίο, παράγει στην έξοδο μια τάση [5]. Μεγάλο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου αισθητήρα είναι ότι έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί μετρήσεις χωρίς να χρειάζεται επαφή.

Η τάση στην έξοδο των αισθητήρων Hall μπορεί να είναι αναλογική (linear) ή ψηφιακή (digital). Η διαφορά τους έγκειται στο ότι η τιμή της τάσης στην έξοδο του αναλογικού αισθητήρα εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου, ενώ η έξοδος του ψηφιακού αισθητήρα ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται αν η ένταση του μαγνητικού πεδίου ξεπεράσει ή υποχωρήσει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο [5].

Οι ψηφιακοί αισθητήρες Hall χωρίζονται στις παρακάτω υποκατηγορίες:

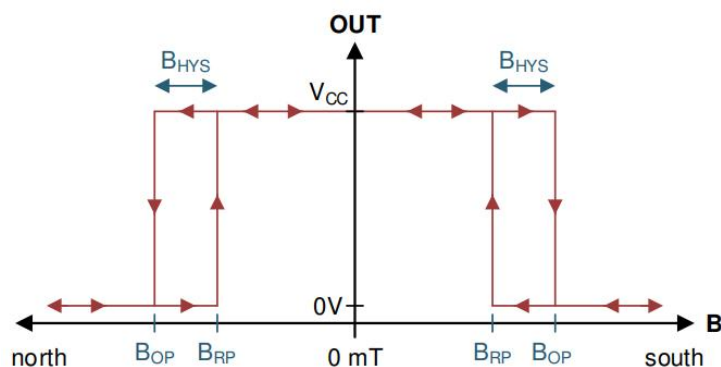
- Unipolar: Λειτουργεί μόνο με έναν από τους δύο πόλους, ενεργοποιείται όταν ο πόλος πλησιάζει τον αισθητήρα και απενεργοποιείται όταν απομακρύνεται.



Εικόνα 3.3: Μαγνητική απόκριση DRV5032DU [6]

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η απόκριση του αισθητήρα που χρησιμοποιείται για την μέτρηση των στροφών. Όταν η μαγνητική επαγωγή του νότιου πόλου ξεπεράσει το όριο B_{OP} η έξοδος από HIGH αλλάζει κατάσταση σε LOW.

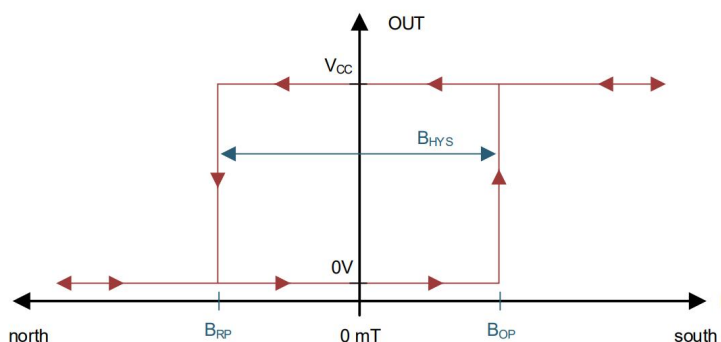
- Omnipolar: Ενεργοποιείται με την παρουσία οποιουδήποτε πόλου (βόρειος ή νότιος), απενεργοποιείται όταν απομακρυνθεί.



Εικόνα 3.4: Μαγνητική απόκριση DRV5032FA [6]

Παραπάνω φαίνεται η απόκριση της omnipolar έκδοσης του DRV5032.

- Latching: Ένας τύπος αισθητήρα ο οποίος διατηρεί την κατάσταση στην έξοδο. Ενεργοποιείται αν είναι κοντά στον νότιο πόλο και για να αλλάξει κατάσταση πρέπει να βρεθεί η παρουσία του βόρειου πόλου.



Εικόνα 3.5: Μαγνητική απόκριση DRV5015A3 [7]

Τα όρια λειτουργίας ενός αισθητήρα Hall λέγονται σημείο λειτουργίας (operating point, B_{op}) και σημείο απελευθέρωσης (release point, B_{rp}). Η διαφορά των δύο αυτών τιμών λέγεται υστέρηση (hysteresis) και είναι το στοιχείο του αισθητήρα το οποίο εξασφαλίζει ότι δεν θα υπάρξουν λανθασμένες ενεργοποιήσεις της εξόδου αν η μαγνητική επαγωγή (magnetic flux density) είναι κοντά στα όρια λειτουργίας B_{op} και B_{rp} .

Μονάδα μέτρησης των B_{op} και B_{rp} είναι το milliTesla (mT).

3.4 Επίλογος

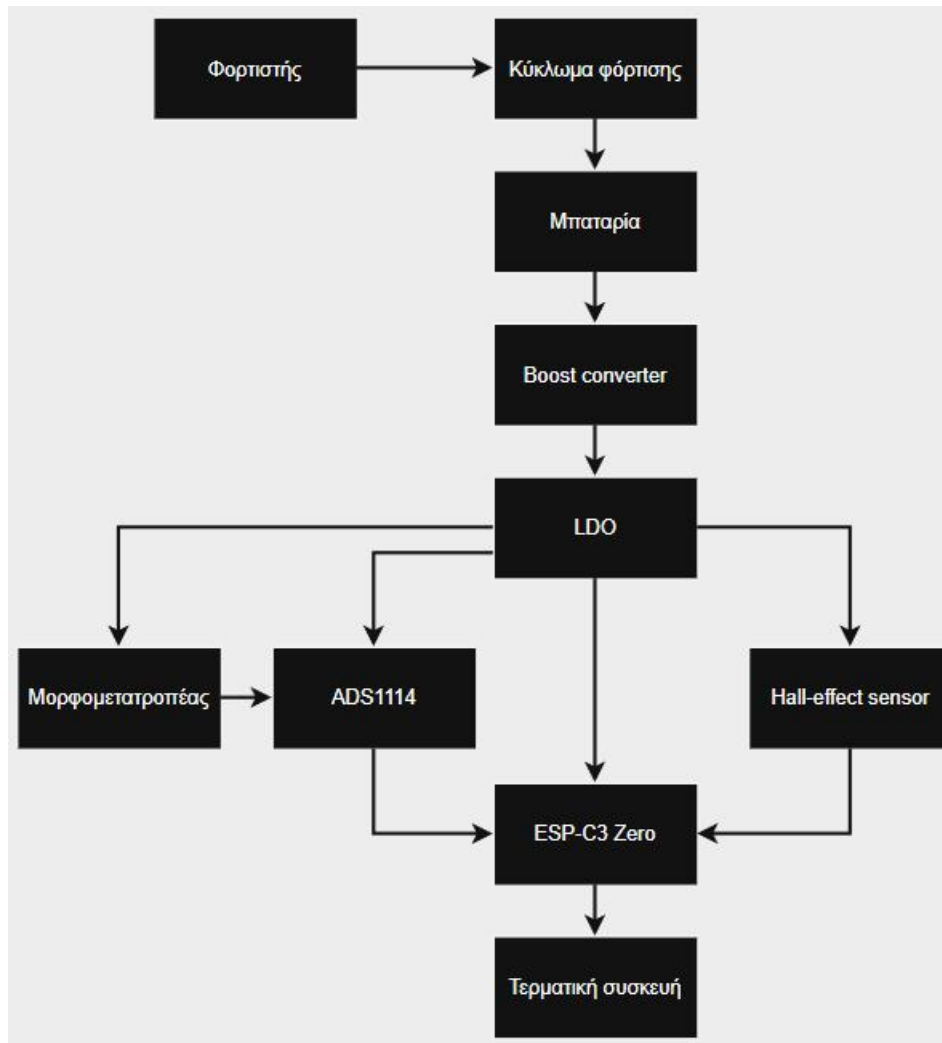
Στο 3ο Κεφάλαιο έγινε η ανάλυση των αισθητήρων οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην κατασκευή.

Έγινε αναφορά στον αισθητήρα μέτρησης παραμόρφωσης strain gauge, τις ιδιότητες του όπως είναι το Poisson's ratio και ο συντελεστής GF. Επιπλέον, το πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τη διάταξη της γέφυρας Wheatstone για να μετρηθεί το μέγεθος της παραμόρφωσης του βραχίονα λόγω της δύναμης που δέχεται από τον ποδηλάτη.

Επιπροσθέτως, έγινε αναφορά στον αισθητήρα Hall, τη βασική αρχή λειτουργίας του καθώς επίσης και τα διάφορα διαθέσιμα είδη. Τέλος, αναλύθηκαν τα όρια λειτουργίας του αισθητήρα B_{op} και B_{rp} , καθώς επίσης και η υστέρηση (hysteresis).

Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση του κυκλώματος

4.1 Εισαγωγή



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής του κυκλώματος

Στο 4ο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της διάταξης της συσκευής που φαίνεται στην εικόνα 4.1. Η επιλογή των στοιχείων που αποτελούν το κύκλωμα έγιναν με βάση κάποια κριτήρια.

Το βασικό κριτήριο είναι ότι λόγω της μικρής μεταβολής της αντίστασης των αισθητήρων strain gauge, το κύκλωμα του μορφομετατροπέα μετρά μια πολύ μικρή τάση της τάξης των μV - mV , επομένως είναι απαραίτητη η χρήση ολοκληρωμένων χαμηλού θορύβου, τα οποία δεν επηρεάζουν τις μετρήσεις.

Επιπλέον, λόγω της φύσης της κατασκευής, δηλαδή ότι περιστρέφεται συνεχώς, κρίνεται απαραίτητη η χρησιμοποίηση μιας επαναφορτιζόμενης μπαταρίας LiPo για την τροφοδοσία του κυκλώματος, όπως επίσης και η χρήση του πρωτοκόλλου BLE για την ασύρματη μετάδοση των δεδομένων.

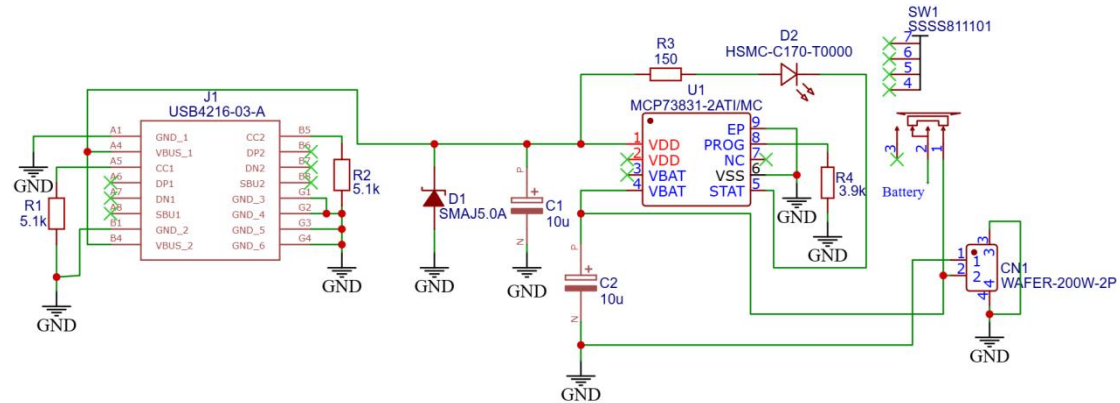
Τέλος, για την αξιοποίηση όλου του διαθέσιμου εύρους τάσης της μπαταρίας τοποθετείται ένα ολοκληρωμένο boost converter για την τροφοδοσία ενός LDO regulator. Αυτός με τη

Κεφάλαιο 4ο

σειρά του τροφοδοτεί το κύκλωμα με μια σταθερή τάση 3.3V, ελαχιστοποιώντας την κυμάτωση της τάσης (ripple voltage) που εισάγει η χρήση ενός converter.

4.2 Βαθμίδα φόρτισης

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της βαθμίδας φόρτισης της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας LiPo που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του κυκλώματος. Το σχηματικό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Σχηματικό κυκλώματος φόρτισης

4.2.1 USB type-C connector

Για την παροχή τάσης στο κύκλωμα φόρτισης χρησιμοποιείται μια θύρα USB type-C, εξασφαλίζοντας την συμβατότητα με τους κοινούς φορτιστές του εμπορίου.

Pin	Signal	Mating Sequence	Pin	Signal	Mating Sequence
A1	GND	First	B12	GND	First
A4	V _{aus}	First	B9	V _{aus}	First
A5	CC1	Second	B8	SBU2	Second
A6	Dp1	Second	B7	Dn2	Second
A7	Dn1	Second	B6	Dp2	Second
A8	SBU1	Second	B5	CC2	Second
A9	V _{aus}	First	B4	V _{aus}	First
A12	GND	First	B1	GND	First
SHELL	GND		SHELL	GND	

Εικόνα 4.3: USB pinout [8]

Σύμφωνα με το pinout του επιλεγμένου USB (USB4216-03-A) που φαίνεται στην εικόνα 4.3 η σχεδίαση έχει ως εξής:

- Οι ακροδέκτες A4, A9, B4 και B9 χρησιμοποιούνται για την παροχή τροφοδοσίας σταθερής τάσης 5V, ενώ στο σχηματικό της εικόνας 4.1 οι ακροδέκτες A9 και B9 παραλείπονται καθώς είναι κατασκευαστικά βραχυκυκλωμένοι με τους A4 και B4.
- Οι ακροδέκτες A1, A12, B1 και B12 καθώς επίσης και το περίβλημα της θύρας USB αποτελούν τη γείωση του κυκλώματος.

- Από τη στιγμή που η θύρα USB αξιοποιείται αποκλειστικά και μόνο για την τροφοδοσία του κυκλώματος, είναι απαραίτητη η τοποθέτηση pull-down αντιστάσεων στους ακροδέκτες A5 και B5, CC1 και CC2 αντίστοιχα για την αναγνώριση της συσκευής (Sink) από τον φορτιστή (Source) και την ενεργοποίηση της παροχής τάσης στη γραμμή V_{bus} . Η τυπική τιμή των αντιστάσεων που χρησιμοποιούνται είναι 5.1k.
- Οι υπόλοιποι ακροδέκτες της θύρας USB παραμένουν ασύνδετοι καθώς δεν υπάρχει η ανάγκη για μεταφορά δεδομένων μεταξύ των συσκευών.

4.2.2 Επαναφορτιζόμενη μπαταρία LiPo

Για την τροφοδοσία επιλέχθηκε η AKYGA LP103040 η οποία είναι μια μπαταρία λιθίου πολυμερούς (LiPo), με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ονομαστική τάση: 3.7V
- Τάση πλήρους φόρτισης: 4.2V
- Τάση εκφόρτισης: 2.75V
- Ονομαστική χωρητικότητα: 1200mAh
- Ρεύμα φόρτισης: 0.2C, standard CC
- Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης: 1C
- Διαστάσεις: 42.5 x 31.0 x 10.5 mm
- Βάρος: ~14g

Η μπαταρία διαθέτει επίσης ένα ενσωματωμένο PCM (protective circuit module), το οποίο προστατεύει την μπαταρία από υπερφόρτιση (overcharge), υπερεκφόρτιση (over-discharge) και από βραχυκύκλωμα (short circuit) [9].

Ενώ, για τη σύνδεση της μπαταρίας στην τυπωμένη πλακέτα αντικαταστάθηκε το αρχικό βύσμα JST SYP-02T-1 με το JST PH 2.0 για λόγους συμβατότητας.

4.2.3 Διάταξη φόρτισης με το MCP73831

Η βαθμίδα φόρτισης έχει ως κύριο στοιχείο το ολοκληρωμένο MCP73831, το οποίο είναι ένας γραμμικός ελεγκτής διαχείρισης φόρτισης. Το ολοκληρωμένο διατίθεται σε πακέτο DFN το οποίο είναι μια εξαιρετική επιλογή για τη διαχείριση του περιορισμένου χώρου της πλακέτας λόγω των μικρών διαστάσεων του 2 mm x 3 mm [10].

4.2.3.1 Δίοδος TVS

Αρχικά, για την τροφοδοσία του κυκλώματος χρησιμοποιείται ένα καλώδιο USB το οποίο είναι hot-pluggable. Τα καλώδια αυτών των τροφοδοτικών δρουν ως πηνία. Το οποίο σημαίνει ότι κατά την σύνδεση ή την αποσύνδεση μπορεί να δημιουργηθούν υπερτάσεις οι οποίες μπορούν να καταστρέψουν το ολοκληρωμένο. Μια δίοδος TVS τοποθετημένη στη γραμμή τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου έχει τη δυνατότητα να αναστείλει αυτές τις υπερτάσεις και να προστατέψει το κύκλωμα [10].

Για την προστασία του κυκλώματος επιλέχθηκε η SMAJ5.0A (D1), η οποία έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Reverse Stand off voltage (V_R): 5.0V
- Minimum Breakdown Voltage (V_{BR}): 6.4V
- Maximum Breakdown Voltage (V_{BR}): 7V
- Maximum Clamping Voltage (V_C): 9.2V

Σύμφωνα με την τιμή του V_R η δίοδος δεν άγει και επομένως δεν επηρεάζει την τροφοδοσία του κυκλώματος όταν η τάση είναι σταθερή 5V, ενώ αρχίζει να άγει αν η τάση ξεπεράσει τα 6.4V.

4.2.3.2 Πυκνωτές

Για την εξασφάλιση της σταθερότητας του κυκλώματος φόρτισης, χρησιμοποιήθηκαν οι πυκνωτές C1 και C2 με τιμή 10uF στους ακροδέκτες V_{DD} και V_{BAT} . Ο πυκνωτής C2 εξασφαλίζει τη σταθερότητα κατά το Constant-Voltage mode και παρέχει την απαραίτητη αντιστάθμιση που απαιτείται λόγω της επαγωγικής φύσης της μπαταρίας. Επίσης παρέχει σταθερότητα σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει φορτίο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά είδη πυκνωτών όπως κεραμικός, τανταλίου ή ηλεκτρολυτικοί [10].

4.2.3.3 Ακροδέκτης Status

Ο ακροδέκτης Status προσφέρει οπτική ένδειξη για την κατάσταση της φόρτισης. Στις περιπτώσεις που το κύκλωμα είναι απενεργοποιημένο, δεν είναι συνδεδεμένη η μπαταρία ή αν η φόρτιση έχει ολοκληρωθεί το LED (D2) παραμένει απενεργοποιημένο. Ενώ κατά την φόρτιση της μπαταρίας το LED ενεργοποιείται. Για τον υπολογισμό της αντίστασης R_3 χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$R_3 = \frac{V_{bus} - V_f}{I_f} \quad (4.1)$$

Όπου

- V_{bus} : πηγή τροφοδοσίας από τη θύρα USB
- V_f : πτώση τάσης στο LED (forward voltage)
- I_f : ρεύμα (forward current)

Επομένως,

$$R_3 = \frac{V_{bus} - V_f}{I_f} = \frac{5V - 2V}{0.02A} = 150 \text{ Ohm}$$

4.2.3.4 Ρεύμα φόρτισης και λειτουργία

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας το ρεύμα για την απλή φόρτιση της μπαταρίας είναι $0.2C = 0.2 \cdot 1200\text{mAh} = 240\text{mA}$. Για τη ρύθμιση του ρεύματος φόρτισης αρκεί η τοποθέτηση μιας αντίστασης στον ακροδέκτη PROG με τη γείωση. Η τιμή της αντίστασης μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$I_{REG} = \frac{1000V}{R_{PROG}} \quad (4.2)$$

Επομένως η αντίσταση ρύθμισης του ρεύματος R_4 (R_{PROG}) που προκύπτει από τον τύπο 4.2 είναι:

$$R_4 = \frac{1000V}{I_{REG}} = \frac{1000V}{240 mA} = 4.16k$$

Η άμεσα διαθέσιμη τιμή αντίστασης είναι 3.9k, επομένως το τελικό ρεύμα φόρτισης είναι 256mA.

Για τη λειτουργία, το ολοκληρωμένο παρέχει ένα μικρό ρεύμα 6 μA στον ακροδέκτη V_{BAT} για να επιβεβαιωθεί η παρουσία μπαταρίας. Αν η τάση στην έξοδο είναι κάτω από $V_{REG} + 100 mV$, όπου $V_{REG} = 4.2 V$, σημαίνει ότι ανιχνεύτηκε η μπαταρία. Η διαδικασία φόρτισης ξεκινά αν η τάση στην είσοδο είναι μεγαλύτερη κατά 150 mV από την τάση της μπαταρίας.

Αν η τάση της μπαταρίας είναι κάτω από το 71.5% (V_{PTH}) της V_{REG} ξεκινά η λειτουργία Preconditioning κατά την οποία παρέχεται το 10% του προγραμματισμένου ρεύματος, μόλις η τάση στο V_{BAT} ξεπεράσει αυτό το όριο εισέρχεται στο Constant-Current mode όπου το ολοκληρωμένο παρέχει το προγραμματισμένο ρεύμα μέχρι η τάση να φτάσει την τιμή της V_{REG} . Στο σημείο αυτό, ξεκινά το Constant-Voltage Mode, κατά το οποίο το ρεύμα μειώνεται μέχρι τελικά να φτάσει στο 20% (I_{TERM}) του αρχικού ρεύματος και να τερματιστεί ο κύκλος φόρτισης.

Μετά την ολοκλήρωση φόρτισης, για την αυτόματη επανεκκίνηση ενός νέου κύκλου πρέπει η τάση της μπαταρίας να πέσει κάτω από το 94% (V_{RTH}) της V_{REG} [10].

Να σημειωθεί ότι οι τιμές των V_{REG} , V_{PTH} , V_{RTH} και I_{TERM} είναι εργοστασιακά προκαθορισμένες και εξαρτώνται από την έκδοση του ολοκληρωμένου.

4.2.4 Θερμοκρασία

Η ακραία περίπτωση κατά την οποία η απαγωγή θερμότητας είναι η μέγιστη συμβαίνει όταν γίνεται η μετάβαση από το Preconditioning στο Constant-Current mode, η ισχύς που καταναλώνεται μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$P_D = (V_{DDMAX} - V_{PTHMIN}) \cdot I_{REGMAX} \quad (4.3)$$

Όπου

- V_{DDMAX} : Μέγιστη τάση εισόδου
- V_{PTHMIN} : Ελάχιστη τάση μετάβασης κατάστασης
- I_{REGMAX} : Μέγιστο ρεύμα φόρτισης

Επομένως εφαρμόζοντας τον τύπο 4.3, η θερμοκρασία της επαφής είναι:

$$P_D = (5 V - 3 V) \cdot 254 mA = 0.508W$$

$$T_J = (P_D \cdot \theta_{JA}) + T_A = (0.508W \cdot 76 \text{ }^\circ C/W) + 25 \text{ }^\circ C = 63.6 \text{ }^\circ C$$

Όπου

- θ_{JA} : θερμική αντίσταση επαφής του ολοκληρωμένου προς το περιβάλλον
- T_A : θερμοκρασία περιβάλλοντος

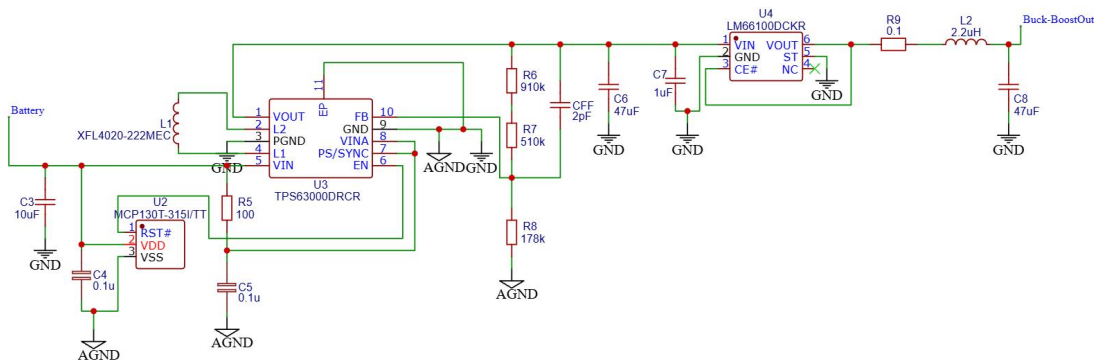
4.2.5 Διακόπτης λειτουργίας

Για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση του κυκλώματος τοποθετείται ο διακόπτης SSSS811101 (SW1) της ALPSALPINE μεταξύ του κυκλώματος φόρτισης της μπαταρίας και

του φορτίου, καθώς το ολοκληρωμένο δεν διαθέτει λειτουργία Power Path Management και αν το φορτίο είναι συνδεδεμένο ενώ φορτίζει η μπαταρία υπάρχει περίπτωση να μην ανιχνευτεί η συνθήκη για τον τερματισμό του κύκλου φόρτισης (20% του αρχικού ρεύματος).

4.3 Boost Converter

Το εύρος τάσης της μπαταρίας LiPo είναι 3.15V - 4.2V, ενώ το σύστημα απαιτεί σταθερή τροφοδοσία 3.3V. Επομένως, χρειάζεται ένα κύκλωμα με ένα μετατροπέα ο οποίος έχει τη δυνατότητα να αυξάνει (boost) την τάση σε ένα ασφαλές επίπεδο. Η επιλογή ενός ολοκληρωμένου το οποίο μπορεί να διαχειρίζεται αυτή τη λειτουργία, προσφέρει μεγάλη απόδοση αξιοποιώντας όλο το διαθέσιμο εύρος τάσης της μπαταρίας.



Εικόνα 4.4: Σχηματικό boost converter

4.3.1 Τάση εξόδου

Ο μετατροπέας λειτουργεί ως ένας προ-ρυθμιστής (pre-regulator) τάσης για τον γραμμικό ρυθμιστή τάσης (LDO) που ακολουθεί, επομένως η τάση εξόδου πρέπει να ρυθμιστεί έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του LDO για να μπορεί να υποβιβάζει την τάση στο επίπεδο των 3.3V, με σταθερότητα και όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες.

Ο ακροδέκτης PS/SYNC τοποθετείται με ένα χαμηλοπερατό φίλτρο στη τροφοδοσία για την επιλογή του mode σε PWM, ρυθμίζοντας έτσι τη συχνότητα του ολοκληρωμένου στα 1.5MHz.

Η τάση εξόδου του TPS63000 ρυθμίζεται τοποθετώντας έναν διαιρέτη τάσης στους ακροδέκτες FB και VOUT του ολοκληρωμένου. Η τυπική τιμή της τάσης στον ακροδέκτη FB είναι 500 mV. Ο κατασκευαστής του ολοκληρωμένου (Texas Instruments) προτείνει η τιμή της αντίστασης R_8 να είναι μικρότερη από 200k, έτσι ώστε το ρεύμα του διαιρέτη τάσης να είναι μεγαλύτερο ή ίσο με 1 μ A [11]. Τέλος, για να εξασφαλισθεί ότι η τελική τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος ρυθμίζεται σωστά από τον γραμμικό ρυθμιστή τάσης, η τιμή της τάσης εξόδου του μετατροπέα επιλέγεται στα 4.5 V.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή τοποθετούνται δυο αντιστάσεις σε σειρά για να επιτευχθεί η τιμή της αντίστασης που υπολογίζεται.

Με αυτές τις παραμέτρους η έξοδος μπορεί να ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$R_6 + R_7 = R_8 \cdot \left(\frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1 \right) \quad (4.4)$$

Η τιμή της αντίστασης R_8 ορίζεται ως 178k και με την αντικατάσταση των δεδομένων στον τύπο 4.4 υπολογίζεται η τιμή των $R_6 + R_7$.

$$R_6 + R_7 = R_8 \cdot \left(\frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1 \right) = 178 \text{ k} \cdot \left(\frac{4.5 \text{ V}}{0.5 \text{ V}} - 1 \right) = 1.42 \text{ M}$$

Για τη βελτίωση της απόδοσης στον έλεγχο της εξόδου τοποθετείται ένας πυκνωτής (feedforward capacitor) παράλληλα με τις αντιστάσεις R_6 και R_7 . Η τιμή του οποίου υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$C_{FF} = \frac{2.2 \mu\text{s}}{R_6 + R_7} \quad (4.5)$$

Επομένως,

$$C_{FF} = \frac{2.2 \mu\text{s}}{1.42 \text{ M}} = 1.5 \text{ pF}$$

Κοντινή τιμή εμπορίου $C_{FF} = 2 \text{ pF}$.

4.3.2 Undervoltage lockout

Για την προστασία και διατήρηση της μπαταρίας τοποθετείται το MCP130 το οποίο είναι ένα ολοκληρωμένο παρακολούθησης τάσης. Αν η τάση της μπαταρίας στην είσοδο πέσει κάτω από 3.15V, η έξοδος του ολοκληρωμένου η οποία είναι συνδεδεμένη στον ακροδέκτη EN του μετατροπέα γίνεται LOW και επομένως το TPS63000 απενεργοποιείται.

4.3.3 Πηνίο

Το πηνίο που επιλέχθηκε είναι το XFL4020-222MEC και έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Αυτεπαγωγή: 2.2 μH ($\pm 20\%$)
- DCR (mOhms): 21.35 (τυπική τιμή)
- I_{SAT} : 3.7A

Η πολύ μικρή εσωτερική αντίσταση του πηνίου (DCR) εξασφαλίζει ότι οι απώλειες είναι πολύ μικρές, επιπλέον το ρεύμα κορεσμού I_{SAT} είναι υπεραρκετό για να καλύψει τις ανάγκες της συσκευής.

4.3.4 Πυκνωτές

Στον ακροδέκτη της εισόδου του ολοκληρωμένου τοποθετείται ο πυκνωτής C_3 με τιμή 10 μF για την βελτίωση της ανταπόκρισης του μετατροπέα σε καταστάσεις μετάβασης (transient), καθώς επίσης και στη γενική ηλεκτρομαγνητική (EMI) συμπεριφορά του τροφοδοτικού [11].

Στον ακροδέκτη της εξόδου του μετατροπέα χρησιμοποιείται ο πυκνωτής C_6 με τιμή 47 μF , ο οποίος μειώνει την κυμάτωση της τάσης (ripple) εξόδου και βελτιώνει την ανταπόκριση στη σύνδεση φορτίου.

4.3.5 Ιδανική δίοδος

Για την προστασία του μετατροπέα από ανάστροφη τάση εξόδου τοποθετήθηκε το ολοκληρωμένο LM66100 το οποίο είναι μια ιδανική δίοδος.

Για τη λειτουργία ο ακροδέκτης VIN της διόδου συνδέεται με την έξοδο του TPS63000, ενώ ο ακροδέκτης CE συνδέεται στην έξοδο της διόδου VOUT. Έτσι, ο εσωτερικός συγκριτής του ολοκληρωμένου μπορεί να ελέγξει τη λειτουργία της διόδου βάση των τιμών των τάσεων στους ακροδέκτες.

Πίνακας 4.1: Λειτουργία διόδου

Συνθήκη	Λειτουργία
$V_{IN} - 250\text{mV} > V_{OUT}$	ON
$V_{IN} + 80\text{mV} < V_{OUT}$	OFF

Η συγκεκριμένη διάδος αποτελεί την ιδανική λύση για την προστασία του μετατροπέα καθώς η πτώση τάσης κατά την λειτουργία ON είναι αμελητέα λόγω της μικρής αντίστασης R_{ON} του εσωτερικού P-MOSFET, με τυπική τιμή 79mOhm.

4.3.6 RLC Filter

Το PSRR (Power Supply Rejection Ratio) του γραμμικού ρυθμιστή τάσης δεν είναι ιδανικό στις υψηλές συχνότητες, επομένως τοποθετείται ένα χαμηλοπερατό φίλτρο RLC στην έξοδο του μετατροπέα για την μείωση των κυματώσεων της τάσης. Η συχνότητα αποκοπής είναι:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.6)$$

Όπου

- $L = 2.2\mu\text{H}$
- $C = 47\mu\text{F}$

Επομένως,

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2.2\mu\text{H} \cdot 47\mu\text{F}}} = 15.6\text{kHz}$$

Η αντίσταση $R_9 = 0.1\text{Ohm}$ τοποθετείται για την εξομάλυνση των υπερτάσεων (overshooting).

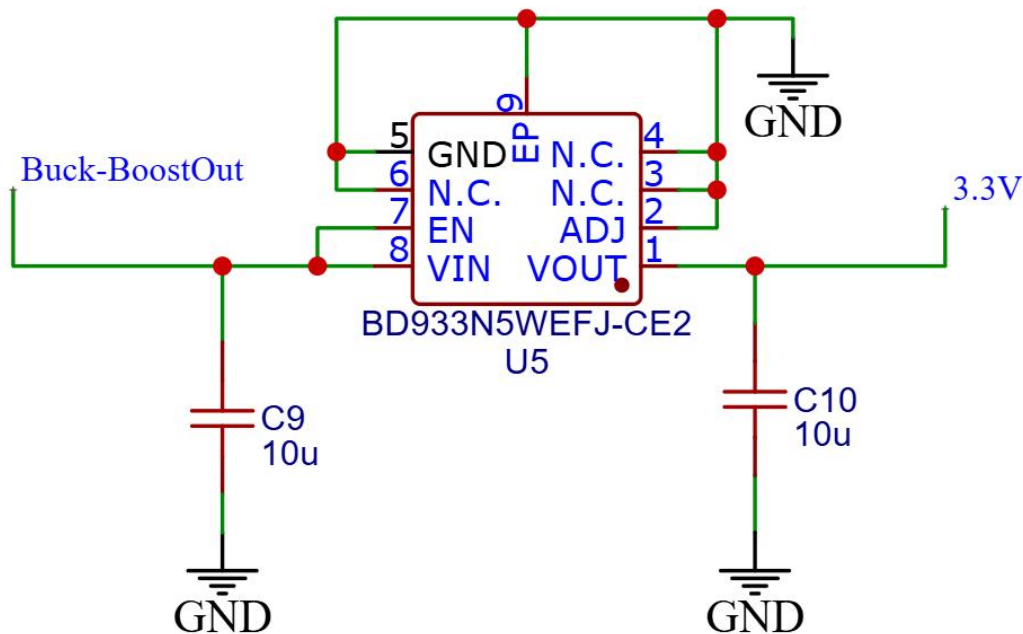
4.3.7 AGND και GND

Για τα αναλογικά σήματα του κυκλώματος χρησιμοποιείται η γείωση AGND έτσι ώστε να είναι απομονωμένα από τον θόρυβο που έχει η γείωση GND.

4.4 Γραμμικός ρυθμιστής τάσης

Για την παροχή της τάσης του κυκλώματος χρησιμοποιείται ένας γραμμικός ρυθμιστής τάσης.

Η χρήση του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου κρίνεται απαραίτητη για την εξάλειψη των κυματώσεων (ripple) που απομένουν μετά το φίλτρο, καθώς οι μετρήσεις που γίνονται στις βαθμίδες που ακολουθούν χρειάζονται μεγάλη ακρίβεια και ο θόρυβος στη γραμμή της τροφοδοσίας μπορεί να εισάγει σημαντικά σφάλματα στα τελικά αποτελέσματα.



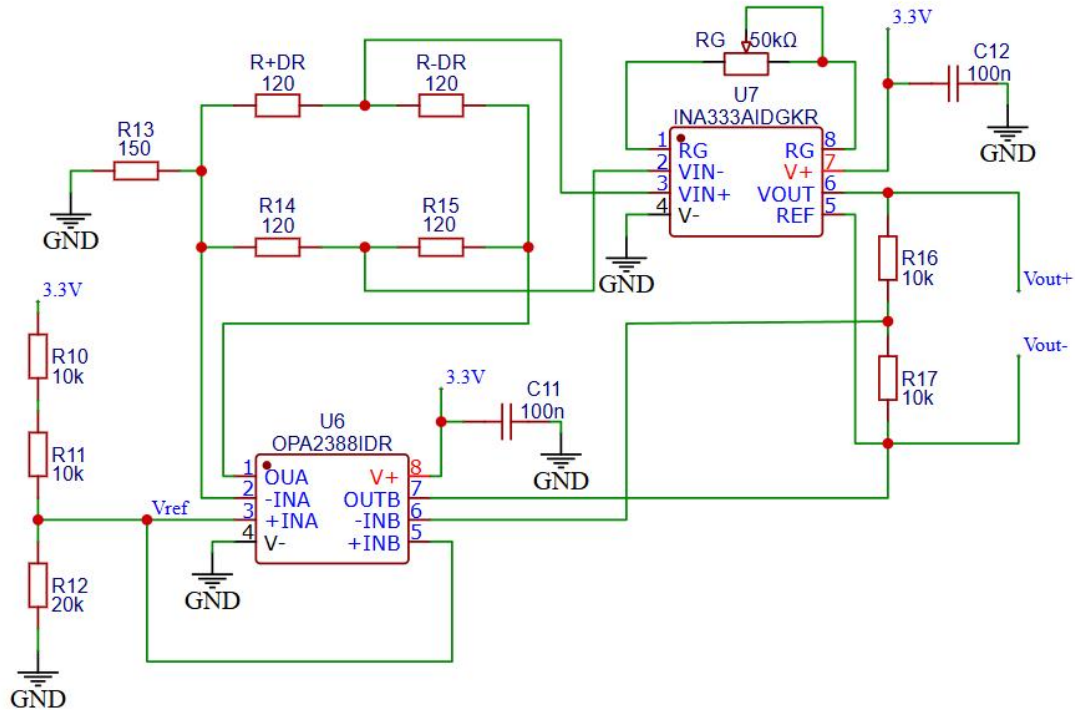
Εικόνα 4.5: Σχηματικό LDO

Το ολοκληρωμένο που χρησιμοποιείται είναι το BD933N5WEFJ-CE2 το οποίο έχει σταθερή τάση εξόδου 3.3V και μέγιστο ρεύμα 500mA. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή για να λειτουργεί ομαλά το ολοκληρωμένο και να γίνεται σωστά η ρύθμιση της τάσης η ελάχιστη τιμή στην είσοδο πρέπει να είναι 4.5V [12].

Επιπλέον, η ιδανική διόδος LM66100 που είναι τοποθετημένη στην προηγούμενη διάταξη μπορεί να λειτουργήσει ως προστασία από ανάστροφη τροφοδοσία και για τον γραμμικό ρυθμιστή τάσης καθώς αν η είσοδος του LDO VIN είναι ανοιχτή ή παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση, το ρεύμα που διαπερνά τον ρυθμιστή είναι πολύ μικρό και δεν μπορεί να καταστρέψει το ολοκληρωμένο.

4.5 Μορφομετατροπές

Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης του βραχίονα χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα με μια γέφυρα Wheatstone 2/4 τροφοδοτούμενη από μια πηγή ρεύματος, ενώ για την ενίσχυση του διαφορικού σήματος στην έξοδο της γέφυρας τοποθετείται ένας ενισχυτής οργανολογίας με τροποποιημένη την έξοδο του έτσι ώστε να είναι διαφορική.



Εικόνα 4.6: Σχηματικό μορφομετατροπέα

Για την παροχή του ρεύματος και της τάσης αναφοράς χρησιμοποιείται ο ένας από τους δύο τελεστικούς ενισχυτές που διαθέτει το ολοκληρωμένο OPA2388. Η τάση αναφοράς υπολογίζεται με τον τύπο:

$$V_{\text{ref}} = V_{\text{CC}} \cdot \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{11} + R_{10}} \quad (4.7)$$

Επομένως,

$$V_{\text{ref}} = V_{\text{CC}} \cdot \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{11} + R_{10}} = 3.3\text{V} \cdot \frac{20\text{k}}{20\text{k}} = 1.65\text{V}$$

Η τάση στον ακροδέκτη +INA του U6 είναι ίδια με την τάση στον ακροδέκτη -INA, επομένως το ρεύμα που διαρρέει τη γέφυρα υπολογίζεται εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm:

$$I_{R13} = \frac{V_{+INA}}{R_{13}} \quad (4.8)$$

Επομένως,

$$I_{R13} = \frac{V_{+INA}}{R_{13}} = \frac{1.65\text{V}}{150\text{Ohm}} = 11\text{mA}$$

Οι τιμές των αντιστάσεων της γέφυρας είναι 120Ohm, με τις R+DR και R-DR να αποτελούν τις αντιστάσεις των αισθητήρων. Η R+DR είναι τοποθετημένη στο πάνω μέρος του βραχίονα

και επομένως η αντίσταση της αυξάνεται λόγω της επιμήκυνσης του μετάλλου, ενώ η R-DR είναι τοποθετημένη στο κάτω μέρος και η αντίσταση της μειώνεται λόγω της συμπίεσης. Οι τάσεις στις εισόδους του ενισχυτή οργανολογίας INA333 σε κατάσταση ισορροπίας της γέφυρας υπολογίζονται με τον τύπο:

$$V_{IN} = V_{R13} + V_R \quad (4.9)$$

Συνεπώς οι υπολογισμοί έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} V_{IN+} &= V_{R13} + V_{R+DR} = R_{13} \cdot I_{R13} + R_{R+DR} \cdot \frac{I_{R13}}{2} \\ &= 150 \cdot 11\text{mA} + 120 \cdot \frac{11\text{mA}}{2} = 2.31\text{V} \end{aligned}$$

Ομοίως,

$$\begin{aligned} V_{IN-} &= V_{R13} + V_{R-DR} = R_{13} \cdot I_{R13} + R \cdot \frac{I_{R13}}{2} \\ &= 150 \cdot 11\text{mA} + 120 \cdot \frac{11\text{mA}}{2} = 2.31\text{V} \end{aligned}$$

Ο κλάδος της εξόδου V_{IN-} αποτελείται από τις δύο σταθερές αντιστάσεις επομένως η τάση εξόδου δεν αλλάζει.

Με την αξιοποίηση του δεύτερου τελεστικού ενισχυτή του ολοκληρωμένου OPA2388 η έξοδος του ενισχυτή οργανολογίας μετατρέπεται από μονοπολική (single-ended) σε διαφορική (differential). Για την επίτευξη αυτού υλοποιείται μια διάταξη αναστρέφων ενισχυτή με κέρδος:

$$A_V = -\frac{R_{17}}{R_{16}} \quad (4.10)$$

Άρα,

$$A_V = -\frac{R_{17}}{R_{16}} = -\frac{10k}{10k} = -1$$

Επομένως, ο τελεστικός ενισχυτής αντιστρέφει το σήμα εξόδου V_{out+} του ενισχυτή οργανολογίας και έτσι παρέχεται η τάση εξόδου V_{out-} του κυκλώματος. Η τροφοδοσία του τελεστικού είναι μονοπολική επομένως χρειάζεται μια τάση αναφοράς γύρω από την οποία κινούνται οι δύο εξόδοι. Η κοινή τάση είναι ίση με:

$$V_{CM} = V_{ref} = 1.65\text{V}$$

Το κέρδος του ενισχυτή οργανολογίας INA333 μπορεί να ρυθμιστεί με μια εξωτερική αντίσταση στους ακροδέκτες 1 και 8 του ολοκληρωμένου, ο τύπος για τον υπολογισμό του κέρδους είναι:

$$G = 1 + \left(\frac{100k\Omega}{R_G} \right) \quad (4.11)$$

Για την καλύτερη δυνατή βαθμονόμηση του κυκλώματος τοποθετείται ένα τρίμερ με αντίσταση 50kΩ.

Με αυτά τα δεδομένα αν οι αντιστάσεις των αισθητήρων R+DR και R-DR έχουν μια μεταβολή DR=100mΩ και με την αντίσταση του τρίμερ ρυθμισμένη ως $R_G = 500\Omega$, χρησιμοποιώντας τον τύπο 4.9, η διαφορική τάση εξόδου του ενισχυτή οργανολογίας είναι:

Κεφάλαιο 4ο

$$V_{IN+} = V_{R13} + V_{R+DR} = R_{13} \cdot I_{R13} + R_{R+DR} \cdot \frac{I_{R13}}{2}$$

$$= 150 \cdot 11\text{mA} + 120.1 \cdot \frac{11\text{mA}}{2} = 2.31055\text{V}$$

$$V_{IN-} = 2.31\text{V}$$

Ο τύπος για τον υπολογισμό της εξόδου είναι:

$$V_{OUT+} = V_{REF} + \frac{IN_+ - IN_-}{2} \cdot G \quad (4.12)$$

Και

$$V_{OUT-} = V_{REF} + \left(A_V \cdot \frac{IN_+ - IN_-}{2} \right) \cdot G \quad (4.13)$$

Επομένως,

$$V_{OUT+} = V_{REF} + \frac{IN_+ - IN_-}{2} \cdot G = 1.65\text{V} + \frac{2.31055\text{V} - 2.31\text{V}}{2} \cdot \left(1 + \frac{100\text{k}}{500} \right)$$

$$= 1.65\text{V} + 0.000275 \cdot 201 = 1.705275\text{V}$$

$$V_{OUT-} = V_{REF} + \left(A_V \cdot \frac{IN_+ - IN_-}{2} \right) \cdot G = 1.65\text{V} + \left(-\frac{2.31055\text{V} - 2.31\text{V}}{2} \right) \cdot \left(1 + \frac{100\text{k}}{500} \right)$$

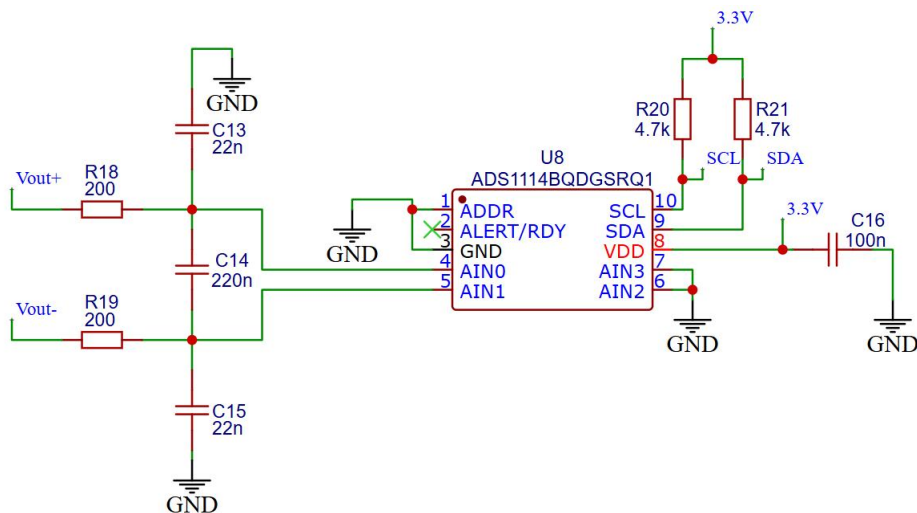
$$= 1.65\text{V} - 0.000275 \cdot 201 = 1.594725\text{V}$$

Τέλος, αφαιρώντας τα δύο σήματα η τελική τάση εξόδου είναι:

$$V_{OUTDIF} = V_{OUT+} - V_{OUT-} = 1.705275\text{V} - 1.594725\text{V} = 0.11055\text{V}$$

4.6 ADC

Για την μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό χρησιμοποιείται το ολοκληρωμένο ADS1114, ένας μετατροπέας τύπου ΔΣ (delta-sigma) με 16-bit ο οποίος υποστηρίζει το πρωτόκολλο I2C για τη μετάδοση των δεδομένων στον μικροελεγκτή.



Εικόνα 4.7: Σχηματικό ADC

Ο ADC του ADS1114 μετρά το διαφορικό σήμα, V_{in} , το οποίο είναι η διαφορά της τάσης μεταξύ των ακροδεκτών AIN0 και AIN1.

Ο πυρήνας του ολοκληρωμένου αποτελείται από έναν διαφορικό $\Delta\Sigma$ διαμορφωτή με switched-capacitor το οποίο ακολουθείται από ένα ψηφιακό φίλτρο. Η διάταξη είναι ιδανική για την καταστολή κοινών σημάτων (common-mode signals) [13].

4.6.1 Programmable Gain Amplifier

Πριν τον $\Delta\Sigma$ ADC υπάρχει ένας προγραμματιζόμενος ενισχυτής κέρδους με τον οποίο γίνεται η ρύθμιση του Full-scale Range (FSR). Η επιλογή του FSR καθορίζει την διακριτική ικανότητα του ADC, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$LSB = \frac{FSR}{2^{16}} \quad (4.14)$$

Οι διαθέσιμες επιλογές FSR με την αντίστοιχη τιμή του LSB φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.2: FSR-LSB [13]

FSR	LSB
$\pm 6.144V$	$187.5\mu V$
$\pm 4.096V$	$125\mu V$
$\pm 2.048V$	$62.5\mu V$
$\pm 1.024V$	$31.25\mu V$
$\pm 0.512V$	$15.625\mu V$
$\pm 0.256V$	$7.8125\mu V$

Οι χαμηλές κλίμακες που διαθέτει το ADS1114 είναι ιδανικές για τη μέτρηση των μικρών μεταβολών της γέφυρας Wheatstone.

4.6.2 Φίλτρο RC

Ένα διαφορικό χαμηλοπερατό φίλτρο τοποθετείται με τη χρήση των αντιστάσεων R_{18} και R_{19} με τον κοινό πυκνωτή C_{14} να καθορίζει την κάτω συχνότητα -3dB για την περαιτέρω μείωση του θορύβου. Η συχνότητα αποκοπής υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot (R_{18} + R_{19}) \cdot C_{14}} \quad (4.15)$$

Με την αντικατάσταση των τιμών στον τύπο 4.15 ισχύει ότι:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot (R_{18} + R_{19}) \cdot C_{14}} = \frac{1}{2\pi \cdot (200 + 200) \cdot 220nF} = 1.808kHz$$

Επιπλέον για την περαιτέρω μείωση του θορύβου υψηλών συχνοτήτων προσθέτονται δύο πυκνωτές κοινού σήματος, η τάση αποκοπής υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_{18}) \cdot C_{13}} \quad (4.16)$$

Επομένως,

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \cdot (200) \cdot 22nF} = 36.1\text{kHz}$$

4.6.3 I2C

Για την μεταφορά των δεδομένων απο τον ADC στον μικροελεγκτή χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο I2C. Για την επίτευξη του διάυλου επικοινωνίας των συσκευών με τη χρήση του I2C απαιτούνται δυο γραμμές.

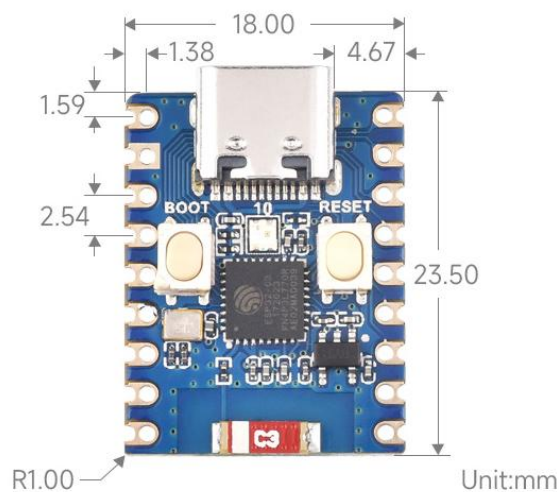
- Μια γραμμή σειριακών δεδομένων (SDA)
- Μια γραμμή σειριακού ρολογιού (SCL)

Οι δύο γραμμές είναι τύπου ανοικτού συλλέκτη (open drain), επομένως τοποθετούνται pull-up αντιστάσεις με τιμή 4.7k.

Μέσω της σύνδεσης του ακροδέκτη ADDR στην γείωση ορίζεται η διεύθυνση επικοινωνίας ως η 0x48.

4.7 ESP32-C3 Zero

Για την επεξεργασία και τη μετάδοση των δεδομένων επιλέχθηκε ο ESP32-C3 Zero, ο οποίος ξεχωρίζει για το εξαιρετικά μικρό μέγεθος του με ημικυκλικές επαφές κάνοντας το ιδανικό για πλακέτες SMD.



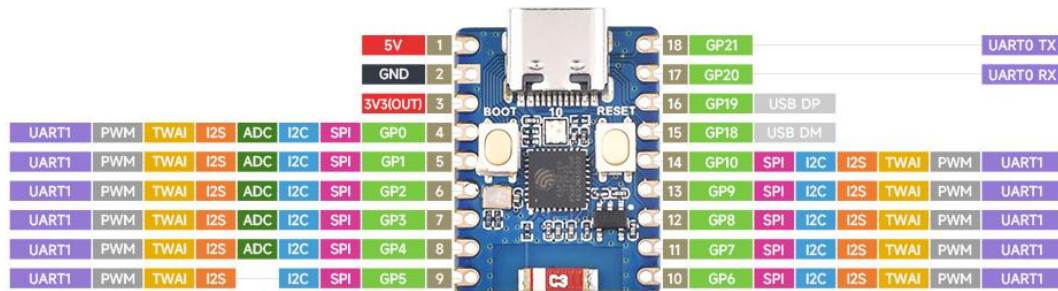
Εικόνα 4.8: ESP32-C3 Zero [14]

4.7.1 Χαρακτηριστικά του ESP32-C3 Zero

Προδιαγραφές ESP-C3 Zero:

- SoC χαμηλής κατανάλωσης με RISC-V 32-bit μονοπύρηνο επεξεργαστή, με μέγιστη συχνότητα λειτουργίας τα 160MHz.
- 2.4GHz Wi-Fi (802.11 b/g/n) and Bluetooth® 5 (LE).
- Διαθέτει 400KB SRAM, 384KB ROM και ενσωματωμένη μνήμη flash 4MB.

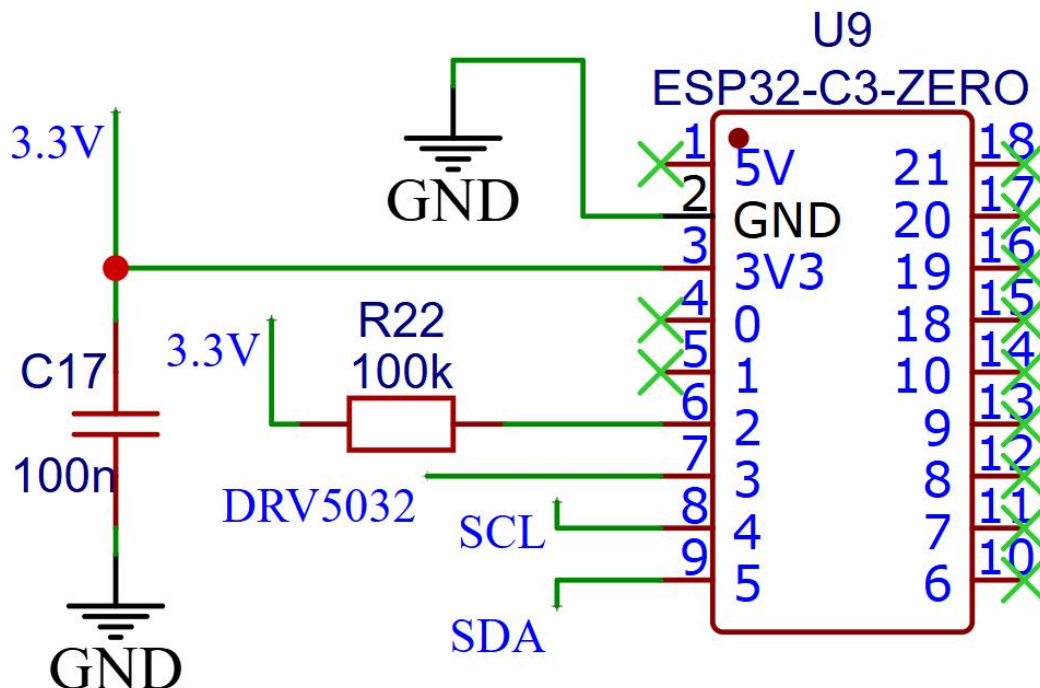
- Μονάδα με ημικυκλικές επαφές και κεραμική κεραία.
- Υποστηρίζει έλεγχο του ρολογιού συστήματος (clock) και ανεξάρτητη ρύθμιση της τροφοδοσίας της μονάδας, επιτρέποντας καλύτερη διαχείριση της κατανάλωσης σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας.
- Ενσωματωμένο USB serial port με 15 ακροδέκτες GPIO.
- Διαθέτει μεγάλο εύρος θυρών επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων 3 × SPI, 1 × I2C, 2 × UART, 1 × I2S, καθώς και 2 × ADC τα οποία φαίνονται αναλυτικά στην εικόνα 4.9 [14].



Εικόνα 4.9: ESP32-C3 Zero Pinout [14]

4.7.2 Σχηματικό κυκλώματος

Το κύκλωμα χαρακτηρίζεται από τις λιγιστές διασυνδέσεις που απαιτούνται για την υλοποίηση του συστήματος.



Εικόνα 4.10: Σχηματικό ESP32

Οι ακροδέκτες GPIO4 και GPIO5 χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των γραμμών SCL και SDA του ADC.

Για την μετατροπή των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά επιλέχθηκε ο εξωτερικός ADC λόγω της μεγαλύτερης ανάλυσης που προσφέρει, έναντι των 12-bit του ADC του ESP32, επιπλέον, ο ADS1114 διαθέτει PGA ο οποίος είναι χρήσιμος για την μέτρηση πολύ μικρών σημάτων.

Για τον ορισμό της λειτουργίας του ESP32 σε SPI boot mode, δηλαδή στην λειτουργία κατά την οποία ο επεξεργαστής φορτώνει και εκτελεί το πρόγραμμα που βρίσκεται στην flash memory χρησιμοποιούνται ορισμένοι ακροδέκτες ως strapping pins.

Τα strapping pins στον συγκεκριμένο ESP32 είναι τα GPIO2, GPIO8 και GPIO9.

Πίνακας 4.3: Επιλογή λειτουργίας [15]

Boot Mode	GPIO2	GPIO8	GPIO9
SPI boot mode	1	0/1	1

Για την επιλογή του SPI mode οι ακροδέκτες πρέπει να λάβουν αυτές τις τιμές κατά την εκκίνηση.

Το GPIO9 έχει μια εσωτερική pull-up αντίσταση η οποία θέτει τον ακροδέκτη σε λογικό 1, ενώ το GPIO8 μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή.

Ο ακροδέκτης GPIO2 στην πραγματικότητα δεν έχει ρόλο στην επιλογή της λειτουργίας αλλά ο κατασκευαστής προτείνει την προσθήκη μιας pull-up αντίστασης για την αποφυγή δυσλειτουργιών [15].

4.7.3 Bluetooth Low Energy (BLE)

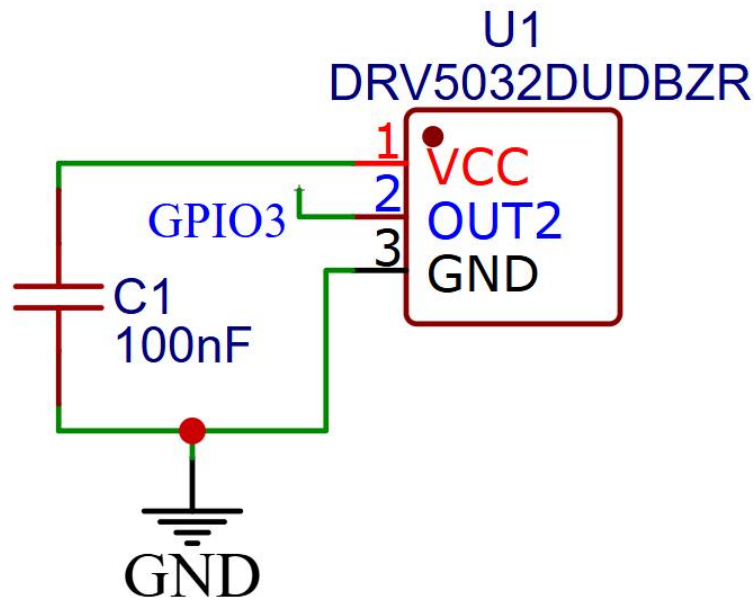
Για τη ζωντανή μεταφορά των δεδομένων από τον μικροελεγκτή στο κινητό του χρήστη αξιοποιείται το Bluetooth Low Energy που προσφέρει ο ESP32-C3 Zero προσφέροντας εύκολη και άμεση ανάγνωση των μετρήσεων.

Το BLE χαρακτηρίζεται από την σχεδίαση του για πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας κάνοντας το ιδανικό για συσκευές τροφοδοτούμενες με μπαταρία. Για την μετάδοση των δεδομένων χρησιμοποιείται η ενσωματωμένη κεραμική κεραία η οποία λειτουργεί στα 2.4GHz.

Επιπλέον, επιλέχθηκε η μέθοδος UART μέσω BLE χρησιμοποιώντας το πρότυπο Nordic UART Service το οποίο επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων σε μορφή κειμένου. Η αποστολή των δεδομένων γίνεται μέσω της λειτουργίας notify, η οποία επιτρέπει στον ESP-32 να αποστέλλει δεδομένα μόλις είναι διαθέσιμα. Τα δεδομένα αυτά και οι μετρήσεις μπορούν να διαβαστούν χρησιμοποιώντας εφαρμογές όπως το Serial Bluetooth Terminal ή το nRF Connect.

4.8 Αισθητήρας Hall

Για την μέτρηση των στροφών χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας Hall.



Εικόνα 4.11: Σχηματικό αισθητήρα Hall

Το ολοκληρωμένο το οποίο χρησιμοποιείται είναι το DRV5032 το οποίο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ψηφιακή έξοδος
- Unipolar
- Συχνότητα δειγματοληψίας 20Hz
- Τυπική τιμή B_{op} : 2.5mT
- Τυπική τιμή B_{tp} : 1.8mT
- Υστέρηση: 0.7mT [6]

Όταν η μαγνητική επαγωγή ξεπεράσει το όριο B_{op} ο αισθητήρας Hall θέτει την έξοδο σε λογικό low και παραμένει σε αυτή την κατάσταση μέχρι η μαγνητική επαγωγή να είναι μικρότερη του B_{tp} , όπου η έξοδος οδηγείται σε λογικό high.

Για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση του αισθητήρα Hall χρησιμοποιείται ένας κυλινδρικός 10x20mm μαγνήτης νεοδυμίου N35.

4.9 Επίλογος

Στο 4ο κεφάλαιο έγινε αναλυτική ανάλυση των βαθμίδων της κατασκευής οι οποίες είναι οι εξής:

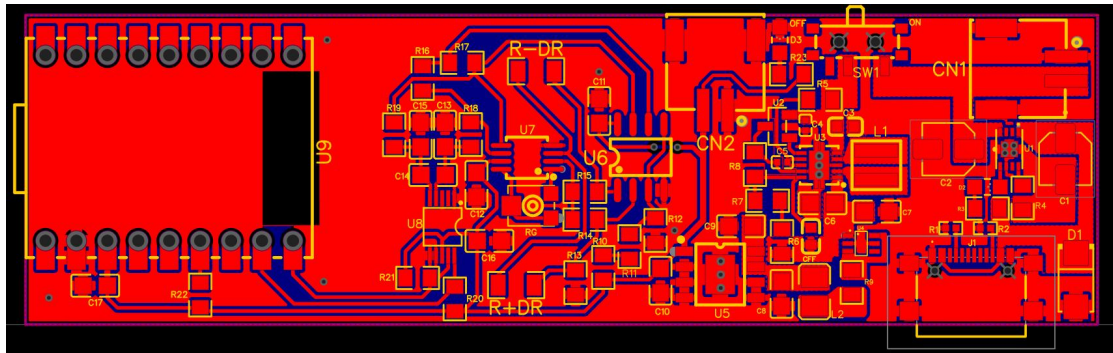
- Μια διάταξη για την φόρτιση της μπαταρίας LiPo με βασικό ολοκληρωμένο το MCP73831 με ορισμένο ρεύμα φόρτισης 256mA.
- Ένας boost-converter (TPS63000) ο οποίος αυξάνει την τάση της μπαταρίας με σκοπό την αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους τάσης της μπαταρίας, δίνοντας αρκετό περιθώριο έτσι ώστε η επόμενη βαθμίδα να λειτουργεί σταθερά και αξιόπιστα. Η τάση εξόδου ορίστηκε στα 4.5V.
- Για την παροχή της τάσης των 3.3V του κυκλώματος τοποθετήθηκε ένας LDO και συγκεκριμένα το ολοκληρωμένο BD933N5WEFJ-CE2.
- Ένας μορφομετατροπέας με μια γέφυρα 2/4, η οποία χρησιμοποιεί strain gauges ως μεταβαλλόμενες αντιστάσεις, τροφοδοτούμενη από μια πηγή ρεύματος. Ενώ, η διαφορική τάση εξόδου της γέφυρας ενισχύεται από τον ενισχυτή οργανολογίας INA333 ο οποίος έχει τροποποιηθεί έτσι ώστε να έχει διαφορική έξοδο χρησιμοποιώντας τον OPA2388 ως αναστρέφων ενισχυτή.
- Η διαφορική έξοδος του ενισχυτή οργανολογίας αφού φιλτραριστεί τοποθετείται στην είσοδο του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ADS1114.
- Για τη μέτρηση των στροφών του βραχίονα γίνεται χρήση του αισθητήρα Hall DRV5032.
- Τέλος, για την επεξεργασία και μετάδοση των δεδομένων αξιοποιείται ο ESP32-C3 Zero, ολοκληρώνοντας έτσι το κύκλωμα της κατασκευής.

Κεφάλαιο 5ο: Υλοποίηση του κυκλώματος

5.1 Εισαγωγή

Για την υλοποίηση του κυκλώματος είναι απαραίτητη η σχεδίαση μιας τυπωμένης πλακέτας με την οποία μπορεί να γίνει καλύτερη διαχείριση και επεξεργασία των μικρών και ευαίσθητων σε θόρυβο σημάτων που παράγει το κύκλωμα.

Για την σχεδίαση του κυκλώματος επιλέχθηκε το πρόγραμμα EasyEDA, στην παρακάτω εικόνα 5.1 φαίνεται το layout της τυπωμένης πλακέτας στο περιβάλλον του προγράμματος.



Εικόνα 5.1: PCB Layout

Στο δεξιό κομμάτι της πλακέτας τοποθετήθηκαν όλες οι διατάξεις που αφορούν την τροφοδοσία του κυκλώματος και τη φόρτιση της μπαταρίας. Για τη διασύνδεση των εξαρτημάτων χρησιμοποιήθηκαν πολύγωνα χαλκού (copper pour) τα οποία προσφέρουν χαμηλή αντίσταση των διαδρομών και καλύτερη απαγωγή της θερμότητας που παράγεται κατά την λειτουργία ή την φόρτιση της μπαταρίας.

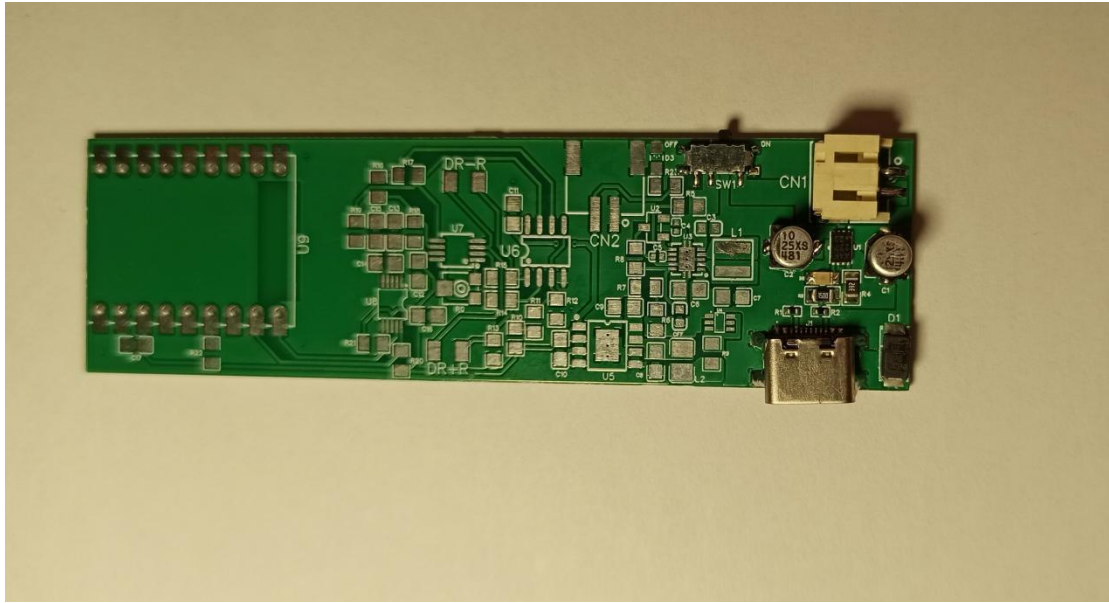
Στο κεντρικό μέρος της πλακέτας είναι το κύκλωμα του μορφομετατροπέα και ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.

Τέλος, στο αριστερό κομμάτι της πλακέτας τοποθετήθηκε ο ESP32-C3 Zero για την εύκολη προσβασιμότητα και τον προγραμματισμό αφού κολληθεί στην πλακέτα.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται η διαδικασία συναρμολόγησης της πλακέτας και η λήψη μετρήσεων για την επαλήθευση των θεωρητικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ενώ, για την διασφάλιση της λειτουργικότητας του κυκλώματος, η κόλληση των διατάξεων που παρουσιάστηκαν έγινε σταδιακά, επιβεβαιώνοντας πρώτα την σωστή και άρτια λειτουργία μιας διάταξης, πριν κολληθεί η επόμενη.

5.2 Συναρμολόγηση κύριας πλακέτας και μετρήσεις

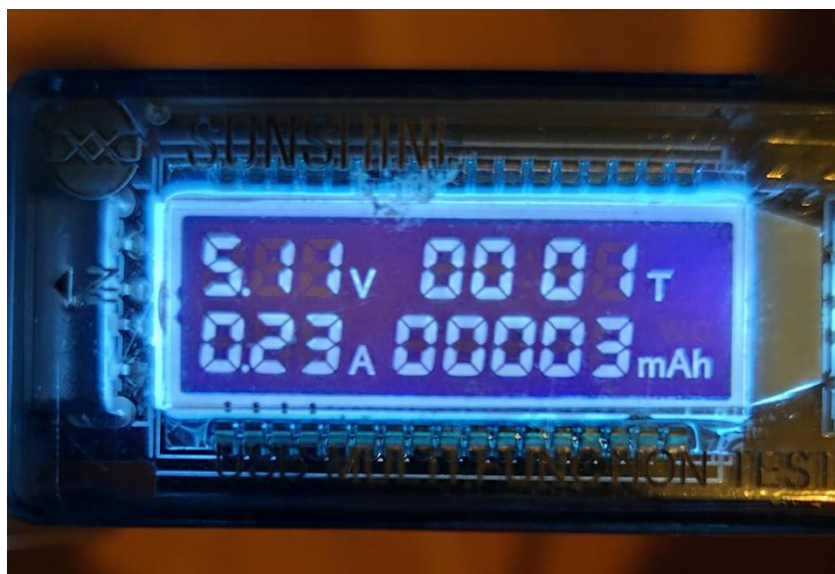
Η πρώτη διάταξη η οποία τοποθετείται στην πλακέτα είναι το κύκλωμα φόρτισης της LiPo μπαταρίας. Για τη μέτρηση των τιμών που φαίνονται στον πίνακα 5.1 χρησιμοποιήθηκε το USB Tester SS-302A της SUNSHINE.



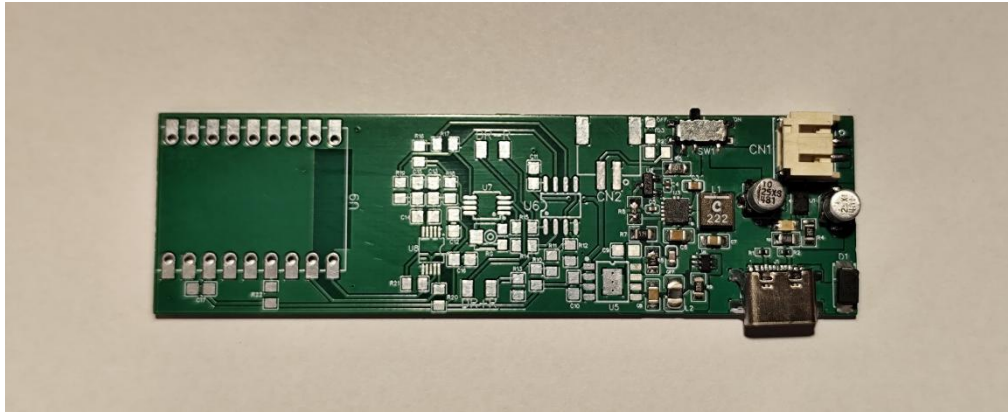
Εικόνα 5.2: Κύκλωμα φόρτισης

Πίνακας 5.1: Μετρήσεις κυκλώματος φόρτισης

	Θεωρητική τιμή	Πειραματική τιμή
Τάση εισόδου	5V	5.11V
Τάση φόρτισης	4.2V	4.151V
Ρεύμα φόρτισης	256mA	~230mA
Διάρκεια φόρτισης	-	4h 54m



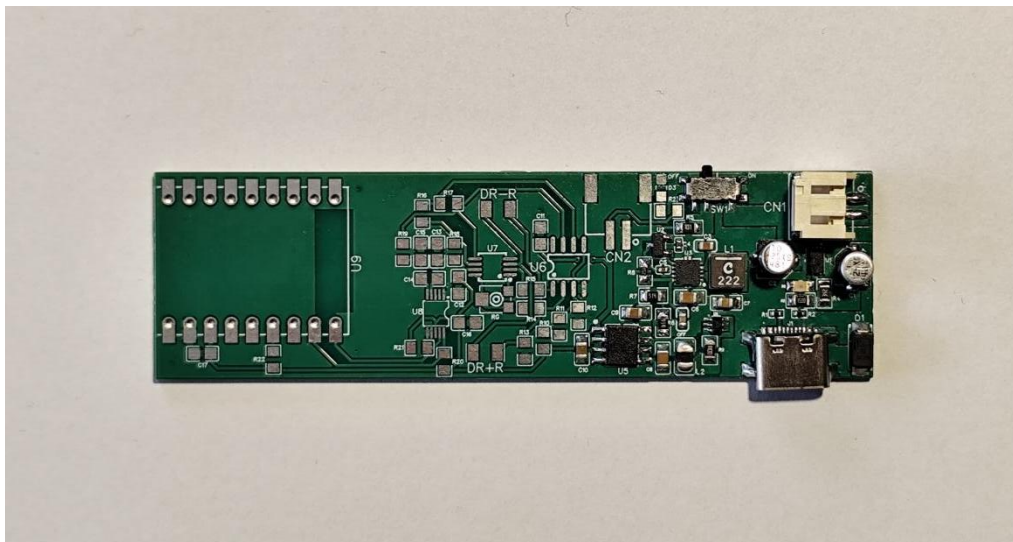
Εικόνα 5.3: Μέτρηση κατά την φόρτιση της συσκευής



Εικόνα 5.4: Κύκλωμα boost converter

Πίνακας 5.2: Μετρήσεις boost converter

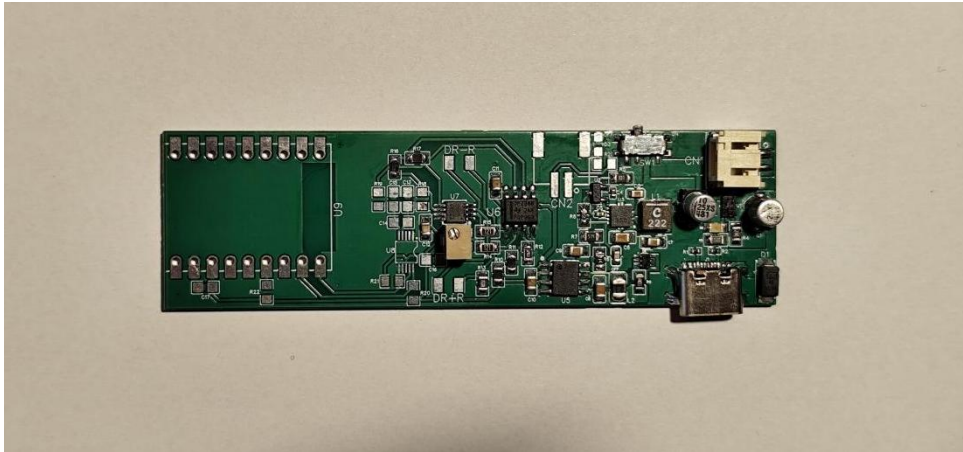
	Θεωρητική τιμή	Πειραματική τιμή
Τάση εξόδου	4.5V	4.448V



Εικόνα 5.5: Κύκλωμα LDO

Πίνακας 5.3: Μετρήσεις LDO

	Θεωρητική τιμή	Πειραματική τιμή
Τάση εξόδου	3.3V	3.329V

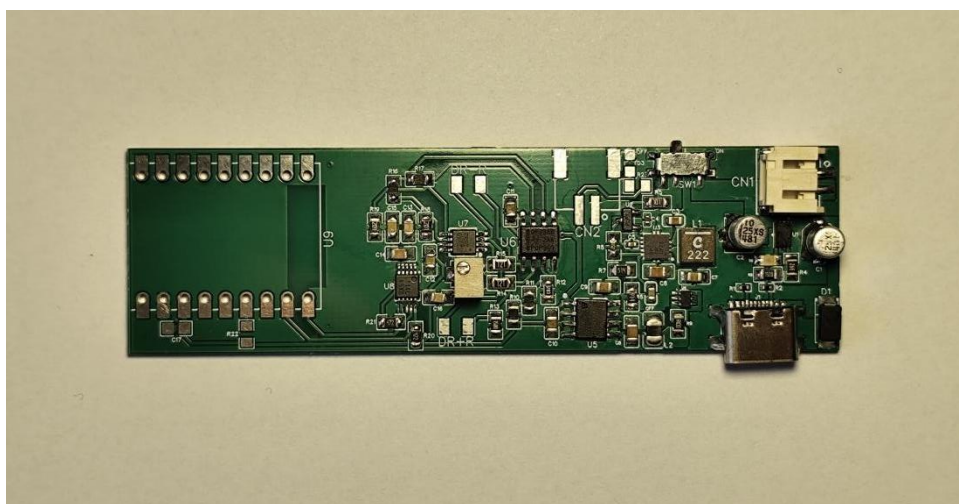


Εικόνα 5.6: Κύκλωμα μορφομετατροπέα

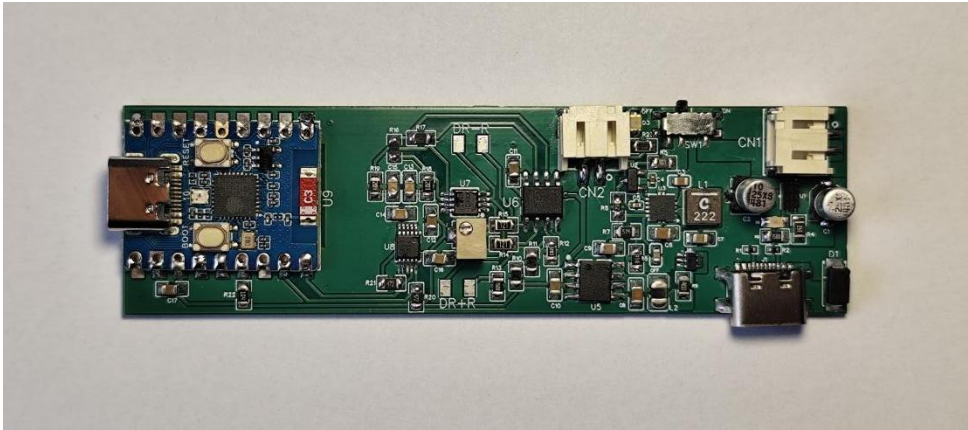
Πίνακας 5.4: Μετρήσεις μορφομετατροπέα

	Θεωρητική τιμή	Πειραματική τιμή
V_{ref}	1.65V	1.6631V
I_{13}	11mA	11.094mA
V_{in+}	2.31V	2.332V
V_{in-}	2.31V	2.332V

$$I_{13} = \frac{V_{R13}}{R_{13}} = \frac{1.6642V}{150\Omega} = 11.094mA$$

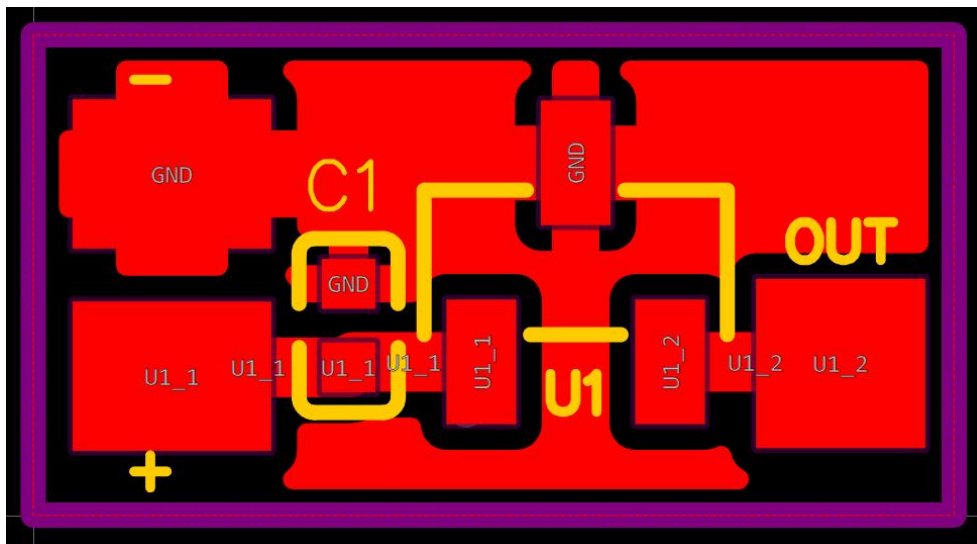


Εικόνα 5.7: Κύκλωμα ADC

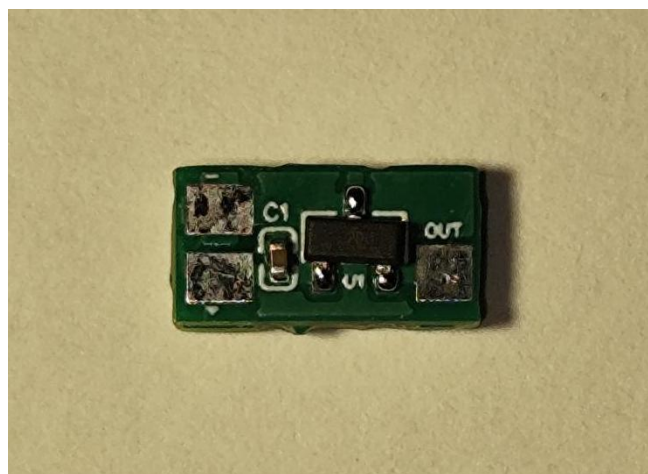


Εικόνα 5.8: ESP32-C3 Zero

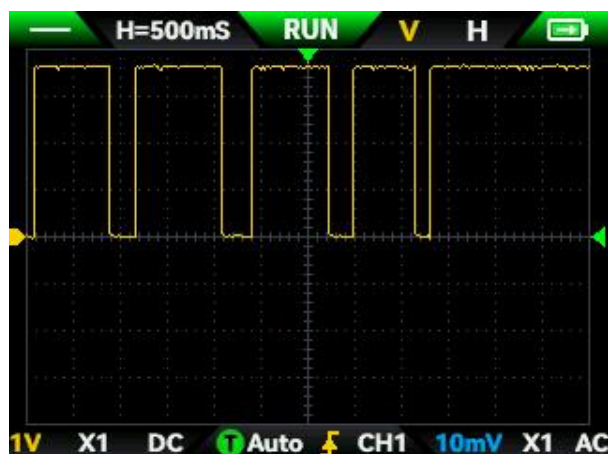
5.3 Πλακέτα αισθητήρα Hall



Εικόνα 5.9: Hall effect sensor PCB layout



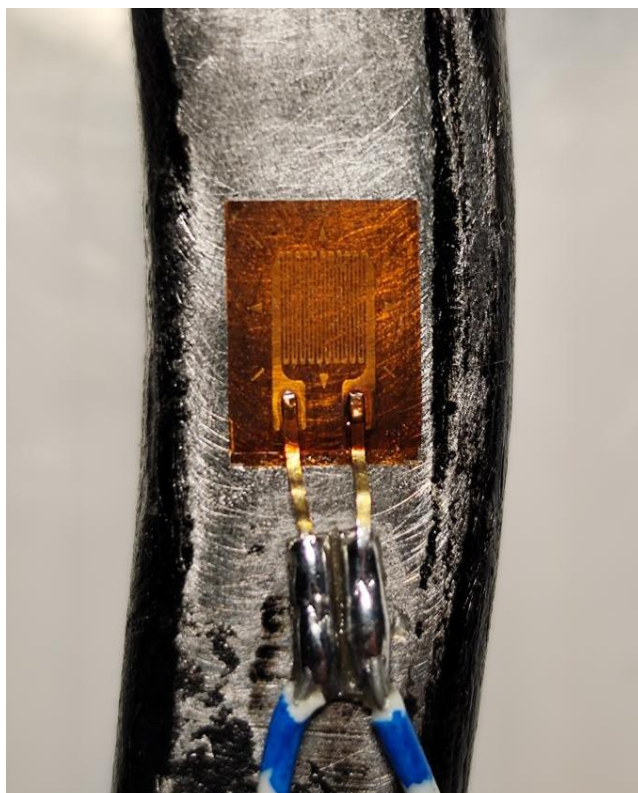
Εικόνα 5.10: Πλακέτα αισθητήρα Hall



Εικόνα 5.11: Έξοδος αισθητήρα Hall

5.4 Κόλληση των αισθητήρων strain gauge

Η κόλληση των αισθητήρων στο βραχίονα έγινε με τη χρήση κυανοακρυλικής κόλλας. Στη βάση του αισθητήρα τοποθετήθηκε ένα κομμάτι χαλκού το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία τυπωμένων πλακετών και διαμορφώθηκε έτσι ώστε να έχει από ένα κομμάτι χαλκού στο οποίο μπορούν να κολληθούν οι δύο ακροδέκτες του αισθητήρα. Στο ίδιο κομμάτι τοποθετούνται και τα καλώδια τα οποία καταλήγουν στην πλακέτα με το κύκλωμα του μορφομετατροπέα, προσφέροντας έτσι την απαραίτητη μηχανική υποστήριξη που χρειάζεται για την προστασία των αισθητήρων.



Εικόνα 5.12: Strain gauge τοποθετημένο στο βραχίονα

Η ολοκλήρωση της τοποθέτησης των αισθητήρων έγινε με την επικάλυψη αυτών χρησιμοποιώντας σιλικόνη τύπου RTV, πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η SUPRA BLACK της PERMATEX, για την προστασία από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως είναι η υγρασία, η σκόνη κλπ.



Εικόνα 5.13: Strain gauge επικαλυμμένο με σιλικόνη

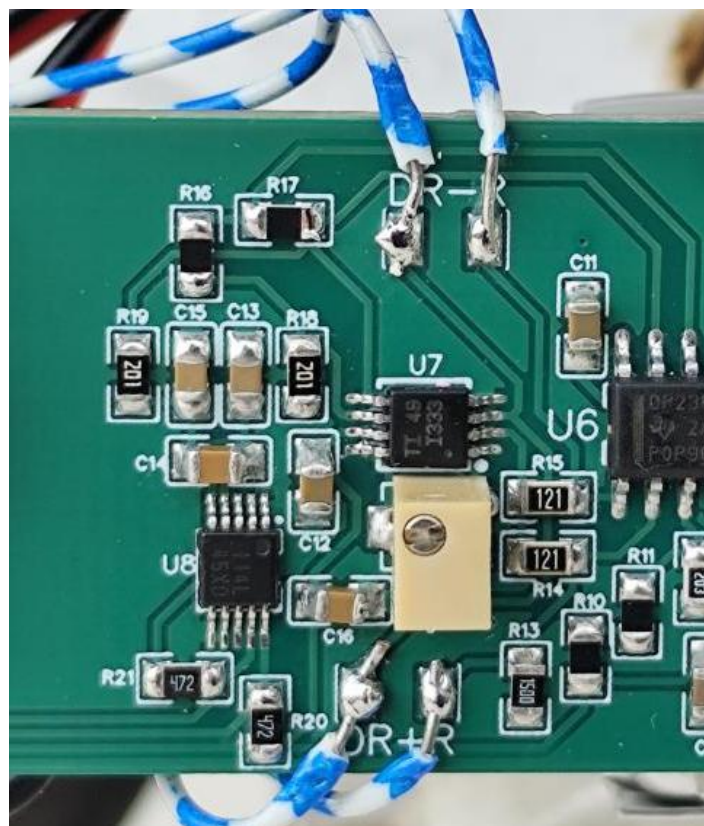
5.5 Τοποθέτηση της κατασκευής στο βραχίονα

Οι πλακέτες με τις οποίες γίνονται οι μετρήσεις τοποθετήθηκαν στο βραχίονα με τη χρήση ταινίας διπλής όψης και τα αποτελέσματα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.

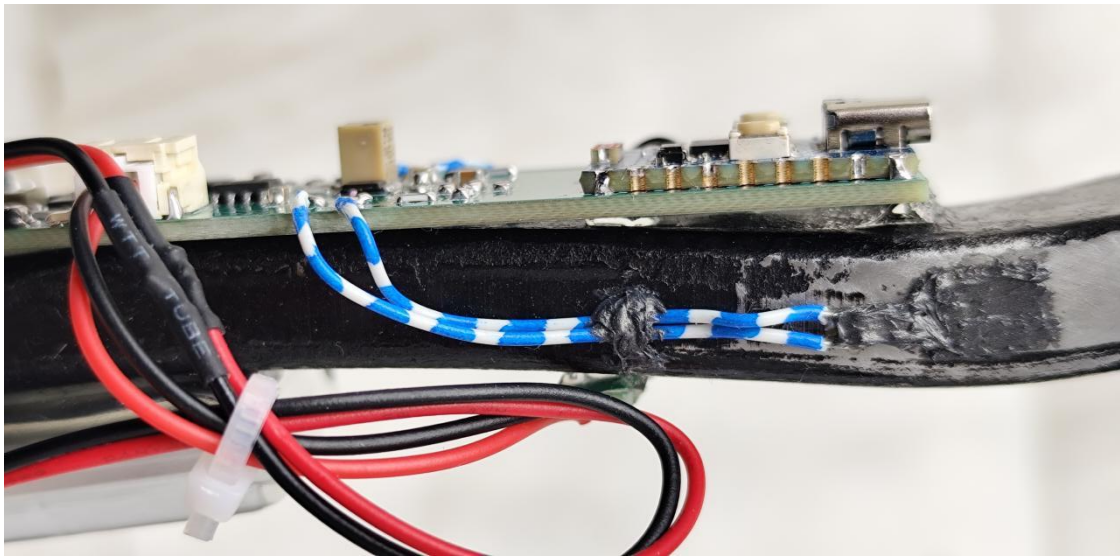
Η πλακέτα με τον αισθητήρα Hall εγκαθίσταται στο εσωτερικό μέρος του βραχίονα έτσι ώστε να είναι απέναντι από τον μαγνήτη με τον οποίο ενεργοποιείται η έξοδος του αισθητήρα.



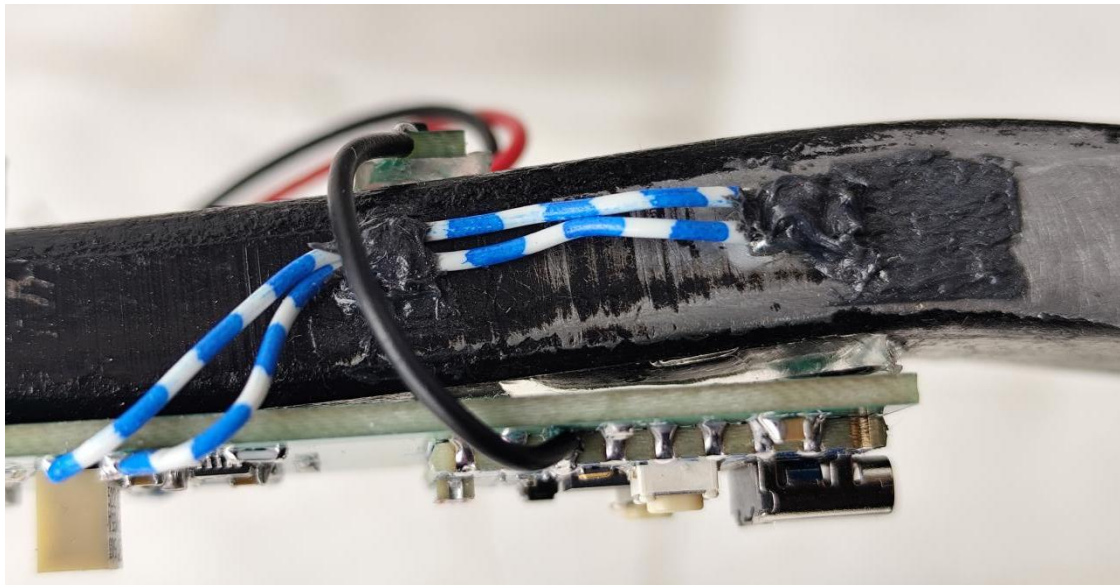
Εικόνα 5.14: Πλακέτα τοποθετημένη στο βραχίονα



Εικόνα 5.15: Ακροδέκτες των αισθητήρων strain gauge

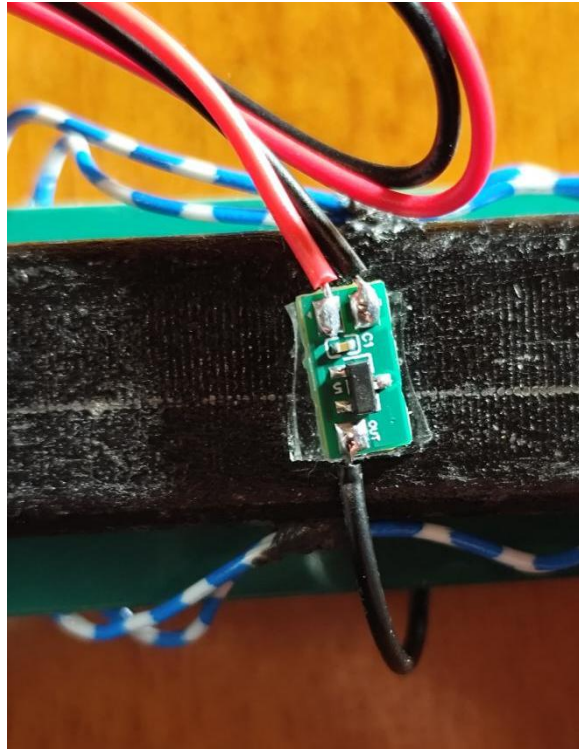


Εικόνα 5.16: Strain gauge συμπίεσης



Εικόνα 5.17: Strain gauge επιμήκυνσης

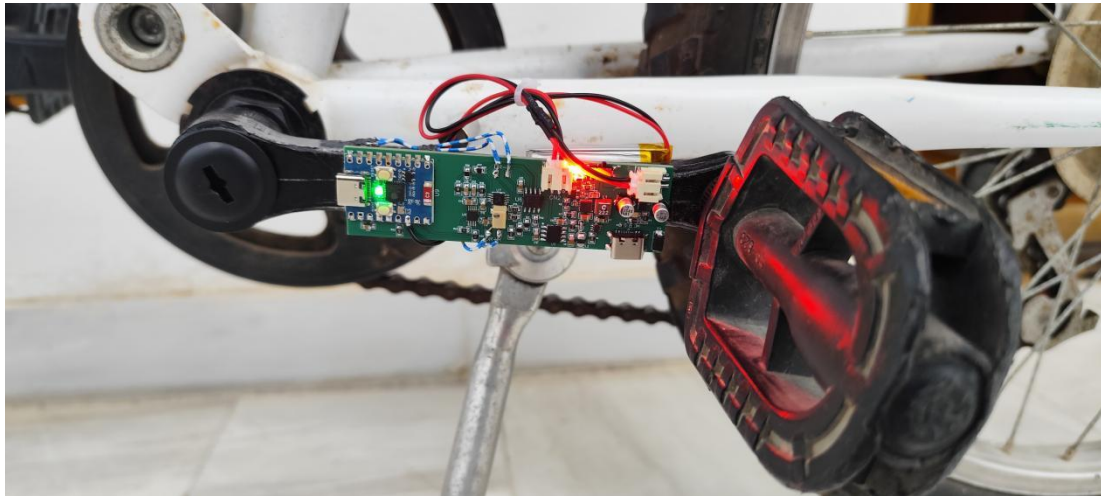
Όπως φαίνεται στις εικόνες 5.16 και 5.17, για την βελτίωση της μηχανικής υποστήριξης των αισθητήρων και την προστασία τους, με τη χρήση της σιλικόνης κολλήθηκαν τα καλώδια στο μέσο, προσφέροντας περαιτέρω προστασία από την καταπόνηση που μπορεί να δεχτούν κατά την κίνηση.



Εικόνα 5.18: Πλακέτα αισθητήρα Hall



Εικόνα 5.19: Αισθητήρας Hall απέναντι από τον μαγνήτη



Εικόνα 5.20: Ενεργοποιημένη συσκευή

5.6 Επίλογος

Στο 5ο κεφάλαιο έγινε η παρουσίαση των τυπωμένων πλακετών της κατασκευής, με τις πειραματικές μετρήσεις του κυκλώματος. Ενώ ακολουθεί η τοποθέτηση αυτών στο βραχίονα, με το τελικό αποτέλεσμα να φαίνεται στις εικόνες που παρατέθηκαν.

Κεφάλαιο 6ο: Βαθμονόμηση και μετρήσεις

6.1 Εισαγωγή

Το τελευταίο βήμα πριν την ολοκλήρωση και τη δοκιμή της συσκευής είναι η βαθμονόμηση αυτής. Για να γίνει η βαθμονόμηση χρειάζεται ο προσδιορισμός μιας μεταβλητής η οποία διαμορφώνει μια αναλογία μεταξύ της τάσης που παράγει το κύκλωμα του μορφομετατροπέα με τη δύναμη που ασκείται στο πετάλι από τον ποδηλάτη.

6.2 Πρόγραμμα

Για τη συγγραφή του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον του ARDUINO IDE. Η συγγραφή του BLE βασίστηκε στο παράδειγμα που υπάρχει στο αρχείο examples/BLE/UART του ARDUINO IDE. Παρακάτω γίνεται περιγραφή της βασικής λειτουργίας του προγράμματος.

6.2.1 Υπολογισμός RPM και ταχύτητας

Αρχικά, ξεκινά ένα εσωτερικό χρονόμετρο στον ESP32-C3 Zero με βάση το 1μs.

- `timerBegin(1000000);`

Επειδή το σήμα εξόδου του αισθητήρα Hall είναι ψηφιακό, για τον υπολογισμό του αριθμού των στροφών χρησιμοποιείται η παρακάτω εντολή:

- `attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(HALL_PIN), RPM_timer, FALLING);`

Με την εντολή FALLING το πρόγραμμα μπορεί να αντιληφθεί το σημείο στο οποίο ένα ψηφιακό σήμα μεταβαίνει από λογικό 1 σε λογικό 0 και καλεί την `interrupt RPM_timer`. Η `interrupt` αυτή, η οποία εκτελείται στην μνήμη RAM έτσι ώστε να γίνεται άμεσα, αρχικά τοποθετεί την χρονική στιγμή του χρονομέτρου στην μεταβλητή `now`.

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό της περιόδου του σήματος γίνεται αφαίρεση της τωρινής τιμής (`now`) με την προηγούμενη (`last_edge`) η οποία ενημερώνεται στο τέλος της `interrupt`. Η εντολή για τον υπολογισμό του RPM είναι:

- `RPM = 60000000.0 / (float)period; (RPM = 60s/T)`

Να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό των μεταβλητών λαμβάνονται αρκετές τιμές και χρησιμοποιείται ο μέσος όρος αυτών για πιο ομαλά αποτελέσματα. Επιπλέον, χρησιμοποιείται `debouncing` το οποίο απορρίπτει περιόδους με πολύ μικρή διάρκεια, εξασφαλίζοντας ότι δεν προσμετρούνται ψευδείς παλμοί.

Τέλος, για τον υπολογισμό της γωνιακής ταχύτητας πραγματοποιείται η πράξη:

- `omega = avgRPM * 2.0 * PI / 60.0;`

6.2.2 Υπολογισμός μηχανικής ισχύος

Για τη διαμόρφωση του ADC ADS1114, γίνεται χρήση της βιβλιοθήκης της Adafruit:

< Adafruit_ADS1X15.h > [16]

Το κέρδος του PGA ορίζεται με την εντολή:

- `ads.setGain(GAIN_FOUR);`

Με αυτή την επιλογή το FSR είναι ίσο με $\pm 1.024V$.

Σε συνθήκες πραγματικής εφαρμογής του κυκλώματος η γέφυρα Wheatstone δεν μπορεί να είναι απόλυτα ισορροπημένη, γιαντό το λόγο εμφανίζεται ένα offset στην έξοδο. Αυτό το offset πρέπει να μετρηθεί έτσι ώστε να αφαιρεθεί από τις τελικές μετρήσεις. Το offset μετράται κατά την εκκίνηση της συσκευής, με την ένδειξη του LED του ESP32-C3 Zero να είναι μπλε, ενώ κατά τη διαδικασία της μέτρησης δεν πρέπει να ασκείται κάποια δύναμη στο βραχίονα για να μην γίνει λανθασμένη μέτρηση. Το κομμάτι του κώδικα φαίνεται παρακάτω:

```
long offsetSum = 0;

for (int i = 0; i < 200; i++) {
    offsetSum += ads.readADC_Differential_0_1();
    delay(5);
}

offset = ((float)offsetSum / 200.0) * multiplier;
```

Για τον υπολογισμό συγκεντρώνονται 200 δείγματα και το τελικό offset είναι ο μέσος όρος αυτών των τιμών. Η τιμή της μεταβλητής multiplier είναι 0.03125 και αντιπροσωπεύει το πόσα millivolts αντιστοιχούν σε κάθε μονάδα LSB.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας ξεκινά η μέτρηση της τάσης για την πραγματοποίηση των υπόλοιπων υπολογισμών.

```
for (int i = 0; i < numSamples; i++) {
    sum += ads.readADC_Differential_0_1();
}

float results = (float)sum / numSamples;

voltage = results * multiplier;

force = abs((voltage - offset)) * k;
```

Ο παραπάνω κώδικας αρχικά πραγματοποιεί την ίδια διαδικασία με τον κώδικα για τον υπολογισμό του offset. Στη συνέχεια από την τάση που μετράται (voltage) αφαιρείται το offset και πολλαπλασιάζεται με την μεταβλητή βαθμονόμησης k, με την οποία μετατρέπεται η τάση στην αντίστοιχη δύναμη. Η διαδικασία υπολογισμού της μεταβλητής αυτής γίνεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 6.3.

6.3 Μεταβλητή βαθμονόμησης k

Ο μορφομετατροπέας παράγει στην έξοδο μια τάση η οποία εξαρτάται από την παραμόρφωση του βραχίονα. Στη συνέχεια αυτή η τάση μετατρέπεται από αναλογικό σήμα σε ψηφιακό από τον ADC. Αυτή η τιμή η οποία τελικά διαβάζεται από τον ESP32-C3 Zero, πρέπει να συσχετιστεί με την τιμή της δύναμης με την οποία παράχθηκε. Η μεταβλητή της βαθμονόμησης k καθορίζει τη σχέση μεταξύ της τάσης και της δύναμης που ασκείται στο πετάλι. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

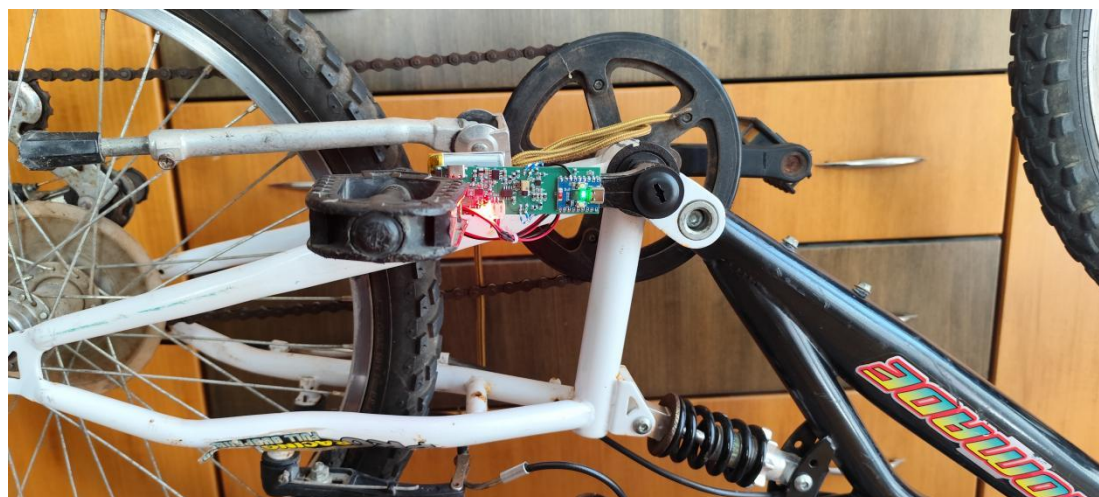
$$k = \frac{F}{V_{load-offset}} \quad (6.1)$$

Όπου

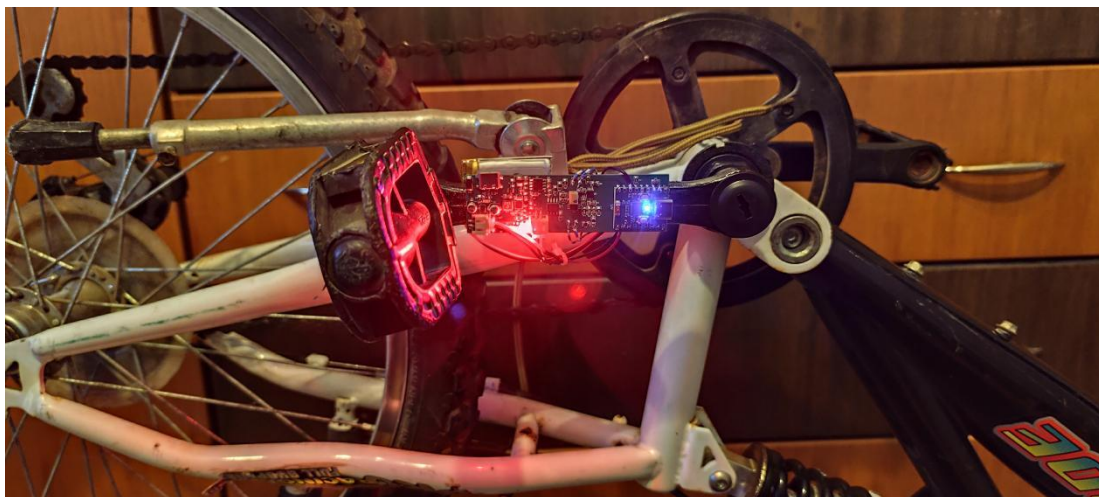
- F: η δύναμη που ασκείται και υπολογίζεται από τον τύπο $F = m \cdot g$
- V_{load} (mV): η τάση στην έξοδο του μορφομετατροπέα όταν ασκείται δύναμη
- Offset (mV): η τάση στην έξοδο του μορφομετατροπέα όταν ο βραχίονας είναι ελεύθερος

Η διαδικασία η οποία ακολουθείται είναι η καθιερωμένη στατική βαθμονόμηση, κατά την οποία πραγματοποιείται το κρέμασμα διάφορων γνωστών βαρών για να υπολογιστεί αρχικά η μεταβλητή F και στη συνέχεια με τη λήψη μετρήσεων της τάσης να υπολογιστεί η μεταβλητή k. Η μεταβλητή αυτή εκφράζει το πόσα Newton αντιστοιχούν σε κάθε 1 mV. Για τη μέτρηση του k χρησιμοποιούνται πολλές τιμές βαρών για την επιβεβαίωση της γραμμικότητας του συστήματος.

Για το βάρος χρησιμοποιήθηκαν μπουκάλια τα οποία κρεμάστηκαν με σκοινί απο το πετάλι ενώ είναι σε οριζόντια θέση. Πριν πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση τα βάρη ζυγίστηκαν μαζί με το σκοινί για την επιβεβαίωση του θεωρητικού βάρους και επομένως την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας.



Εικόνα 6.1: Σταθεροποίηση βραχίονα



Εικόνα 6.2: Μέτρηση offset



Εικόνα 6.3: Διαδικασία βαθμονόμησης

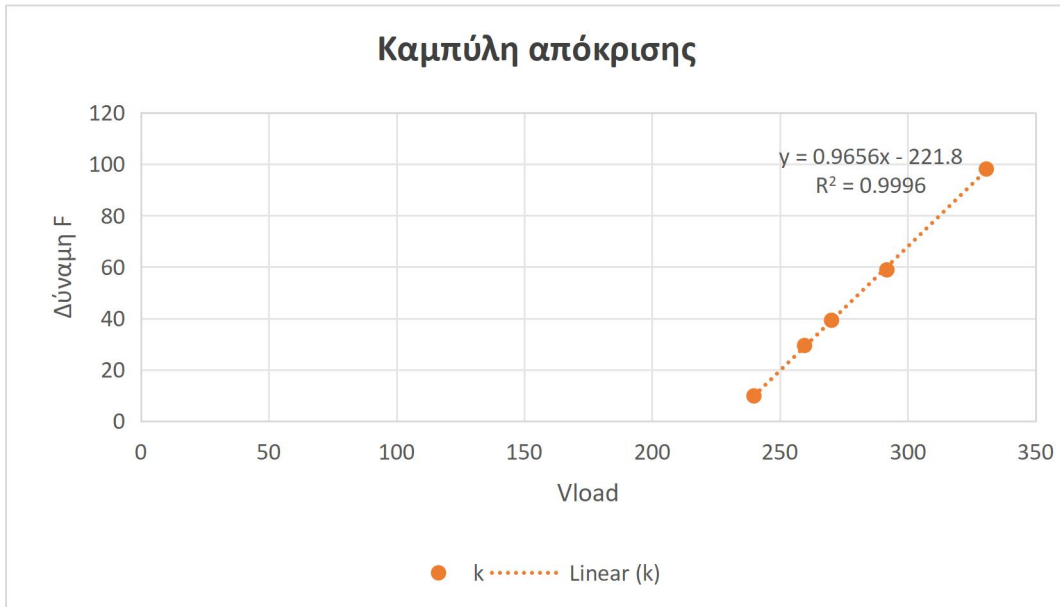


Εικόνα 6.4: Μετρήσεις 10 κιλών

Για την λήψη των μετρήσεων διαμορφώθηκε το πρόγραμμα έτσι ώστε να στέλνει στον τερματικό του κινητού την τάση που υπολογίζεται όταν κρέμεται το βάρος, καθώς επίσης και το offset το οποίο υπολογίζεται κατά την εκκίνηση. Μετά την λήψη 25 δειγμάτων τα αποτελέσματα και ο υπολογισμός της μεταβλητής k φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα μετρήσεων βαθμονόμησης

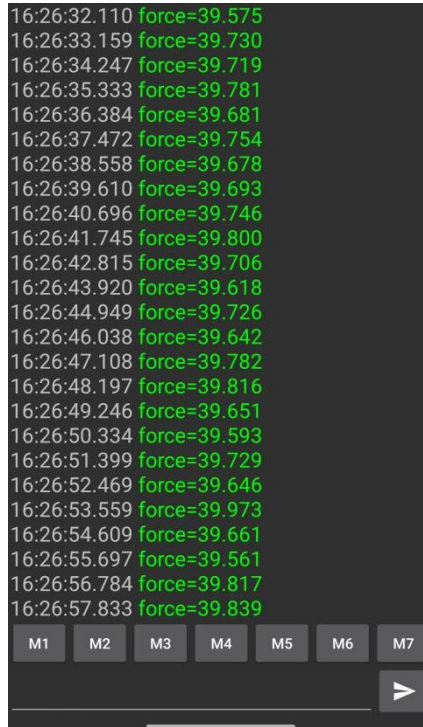
	Vload (Μέσος όρος)	Offset	F (Θεωρητικό)	k
1kg	239.85504	229.678	9.81	0.963934504
3kg	259.6472	229.678	29.43	0.982008195
4kg	270.21196	229.678	39.24	0.968077138
6kg	291.857	229.678	58.86	0.94662185
10kg	330.77256	229.678	98.1	0.970378624



Εικόνα 6.5: Γράφημα μέτρησης k

Επομένως, η τελική τιμή της μεταβλητής k είναι 0.9656, η οποία υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα excel το οποίο πραγματοποιεί τους υπολογισμούς με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης.

Για την επιβεβαίωση της τιμής επαναλαμβάνεται η μέτρηση με τη χρήση βάρους 4 κιλών.



Εικόνα 6.6: Μέτρηση δύναμης F

Με την λήψη 25 δειγμάτων για την δύναμη που ασκείται στο βραχίονα τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα επαναληπτικής μέτρησης 4kg

	Θεωρητική τιμή	Πειραματική τιμή
Δύναμη F (N)	39.24	39.71

$$\text{Σχετικό Σφάλμα} = \frac{39.71\text{N} - 39.24\text{N}}{39.24\text{N}} \cdot 100 = 1.19\%$$

Το σφάλμα οφείλεται στην τιμή του offset η οποία ενδέχεται να αποκλείει ελάχιστα από την αρχική μέτρηση η οποία πραγματοποιείται κατά την εκκίνηση.

6.4 Δοκιμή στροφών

Για την επαλήθευση του αριθμού των στροφών πραγματοποιήθηκε χειροκίνητη περιστροφή του βραχίονα για 60 δευτερόλεπτα με καταμέτρηση των στροφών. Στη συνέχεια συλλέχθηκαν οι μετρήσεις της συσκευής και υπολογίστηκε ο μέσος όρος, τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα μέτρησης στροφών

	Στροφές (RPM)
Χειροκίνητη	72
Συσκευή	70.8

Η μικρή απόκλιση οφείλεται στην διαφορά χρονισμού κατά την εκκίνηση της καταμέτρησης.

6.5 Δοκιμή συσκευής

Η δοκιμή της συσκευής έγινε αρχικά σε εσωτερικό χώρο με το ποδήλατο σταθεροποιημένο.

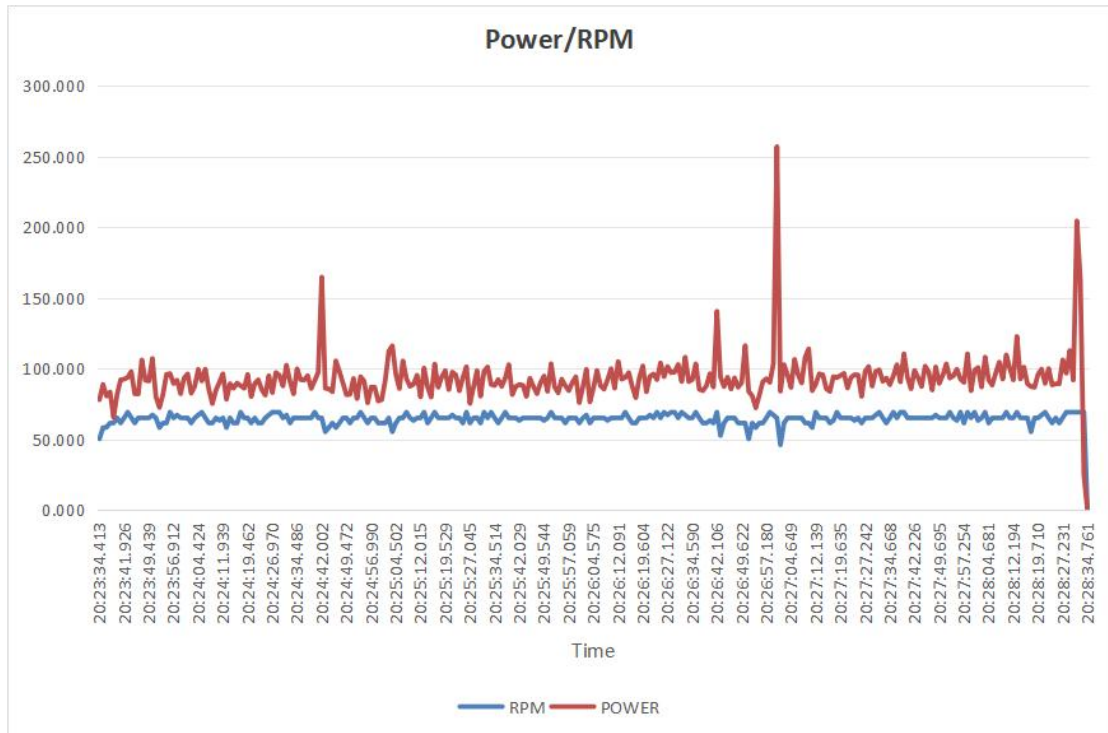
6.5.1 Ήπια καθημερινή ποδηλασία



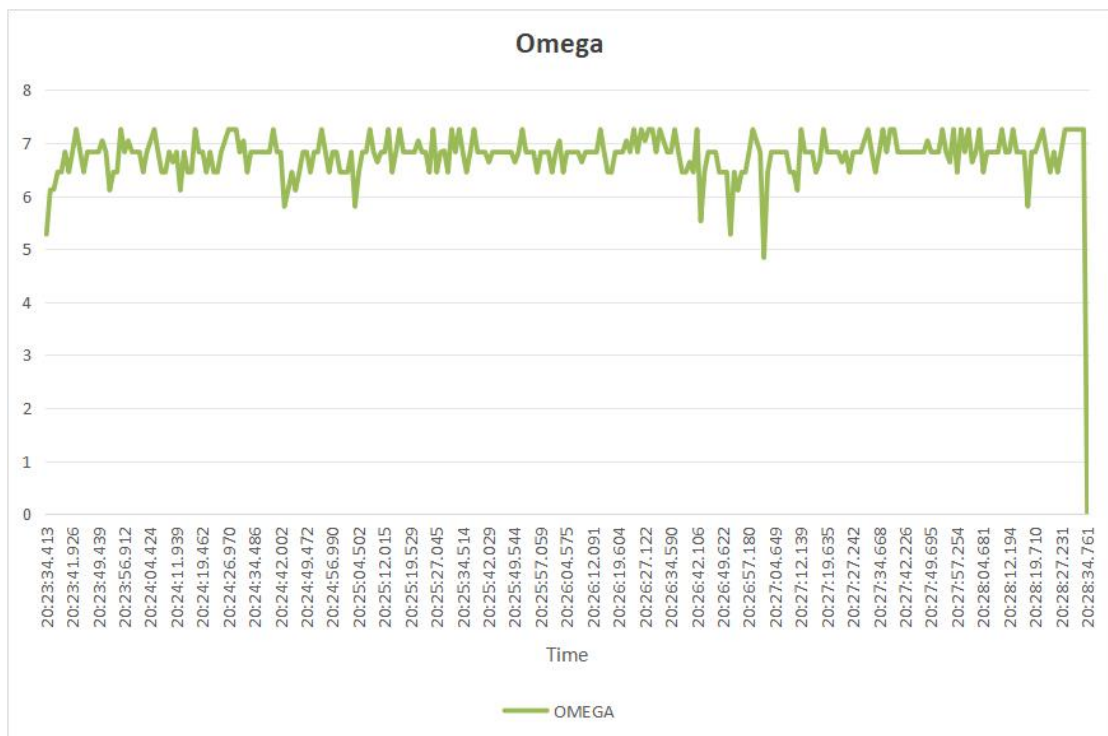
Εικόνα 6.7: Μέτρηση στροφών, ταχύτητας και μηχανικής ισχύος

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα 6.7 τα δεδομένα αποστέλλονται κάθε 1 δευτερόλεπτο, προκειμένου να είναι ευανάγνωστα από τον ποδηλάτη. Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων, τα δεδομένα συγκεντρώνονται και χρησιμοποιούνται για την δημιουργία γραφημάτων με το πρόγραμμα excel.

Κεφάλαιο 6ο



Εικόνα 6.8: Γράφημα διακύμανσης Στροφών-Ισχύος (χαμηλού ρυθμού)



Εικόνα 6.9: Γράφημα διακύμανσης γωνιακής ταχύτητας (χαμηλού ρυθμού)

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα μετρήσεων

Μέτρηση	Μέσος Όρος	Μονάδα Μέτρησης
Στροφές	64.72	RPM
Γωνιακή ταχύτητα	6.77	rad/s
Ισχύς	93.48	Watt

Διάρκεια άσκησης: 5 λεπτά

Παρατηρήσεις:

- Οι μετρήσεις των στροφών και φυσικά της γωνιακής ταχύτητας η οποία υπολογίζεται απο την τιμή του RPM, παρουσιάζουν ομαλές μεταπτώσεις, ενώ οι μικρές διακυμάνσεις που φαίνονται σε μερικά σημεία, είναι φυσιολογικές και ανταποκρίνονται στις πραγματικές αλλαγές της ταχύτητας των στροφών.
- Το γράφημα της ισχύος παρουσιάζει σταθερότητα γύρω απο κάποιες συγκεκριμένες τιμές κατά την διάρκεια της άσκησης. Επιπλέον, παρατηρούνται κάποιες υψηλές αιχμές σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία, οι οποίες οφείλονται σε στιγμιαία δυνατά πατήματα του πεταλιού, οι οποίες επιβεβαιώνουν την ανταπόκριση του συστήματος.

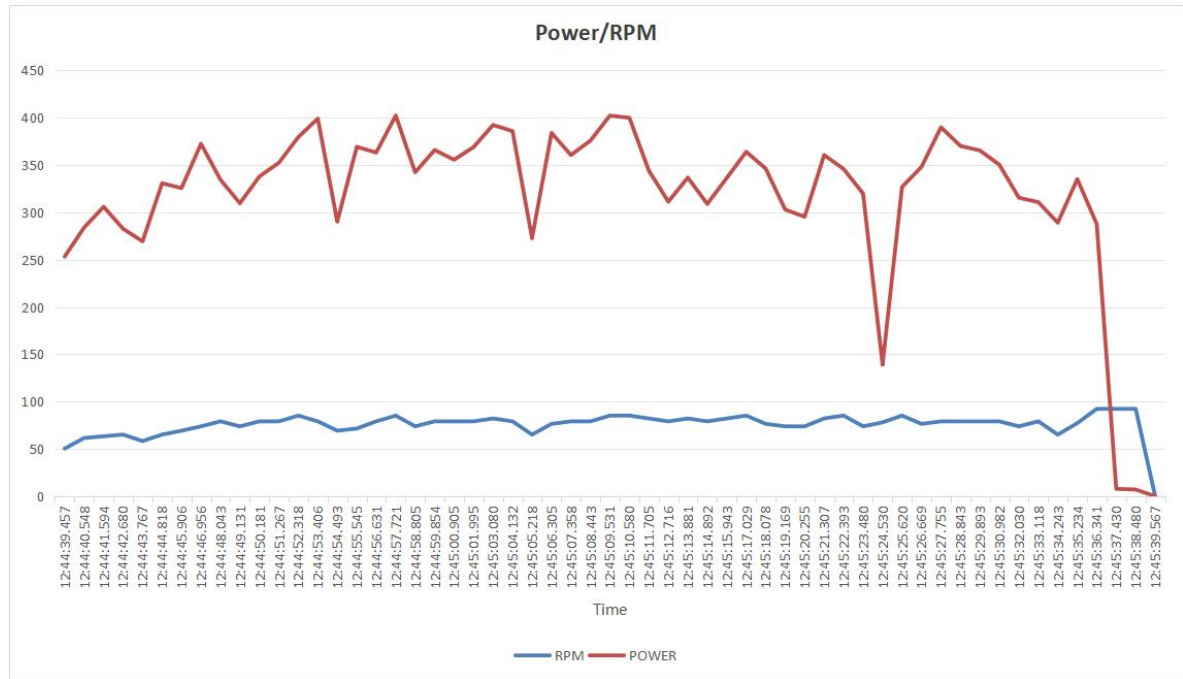
6.5.2 Ορθοπεταλιά

Με την μέθοδο της ορθοπεταλιάς, δίνεται η δυνατότητα μέτρησης μεγαλύτερων τιμών μηχανικής ισχύος. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα.

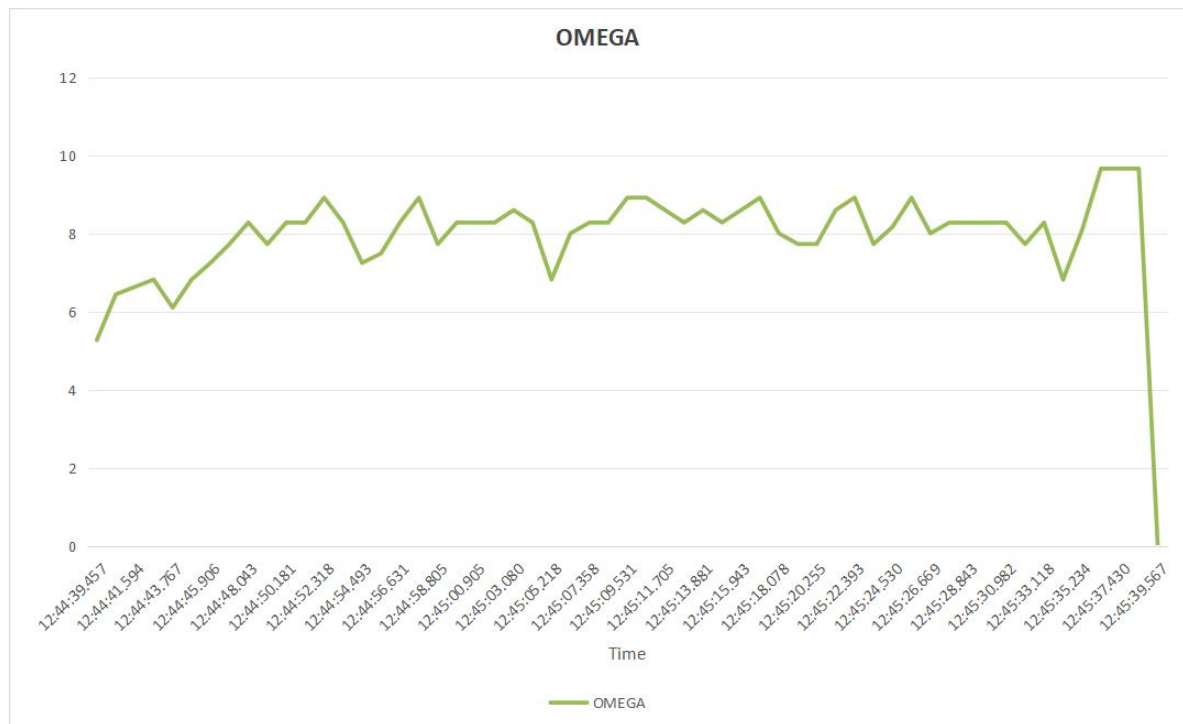


Εικόνα 6.10: Δεδομένα στο BLE terminal

Κεφάλαιο 6ο



Εικόνα 6.11: Γράφημα διακύμανσης Στροφών-Ισχύος (υψηλού ρυθμού)



Εικόνα 6.12: Γράφημα διακύμανσης γωνιακής ταχύτητας (υψηλού ρυθμού)

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα μετρήσεων

Μέτρηση	Μέσος Όρος	Μονάδα Μέτρησης
Στροφές	77.07	RPM
Γωνιακή ταχύτητα	8.07	rad/s
Ισχύς	324.72	Watt

Διάρκεια άσκησης: ~1 λεπτό

6.6 Φίλτρο EMA

Για την βελτίωση της ποιότητας του γραφήματος της μηχανικής ισχύος μπορεί να εφαρμοστεί ένα ψηφιακό φίλτρο εκθετικού κινητού μέσου όρου ή EMA (exponential moving average). Το EMA λειτουργεί ως ένα βαθυπερατό φίλτρο, το οποίο δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στα πιο πρόσφατα δεδομένα, μειώνοντας εκθετικά την επίδραση των προηγούμενων τιμών [17]. Με τη χρήση αυτού μπορούν να εξομαλυνθούν οι απότομες αιχμές του γραφήματος χωρίς να επηρεάζονται οι μετρήσεις. Ο τύπος υπολογισμού είναι ο εξής:

$$S_t = \alpha \cdot Y_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1}$$

Όπου

- S_t : η νέα φιλτραρισμένη τιμή.
- α : ο συντελεστής εξομάλυνσης.
- Y_t : η τρέχουσα μέτρηση.
- S_{t-1} : η προηγούμενη φιλτραρισμένη τιμή.

Η τιμή του συντελεστή εξομάλυνσης α μπορεί να πάρει τιμές από 0 μέχρι 1. Όσο πιο κοντά στο 0, τόσο πιο έντονο το φιλτράρισμα των τιμών με μεγαλύτερη όμως καθυστέρηση, ενώ αντίθετα όσο πιο κοντά στο 1, το φιλτράρισμα δεν είναι έντονο, όμως η μεταβολή του σήματος είναι πιο γρήγορη.

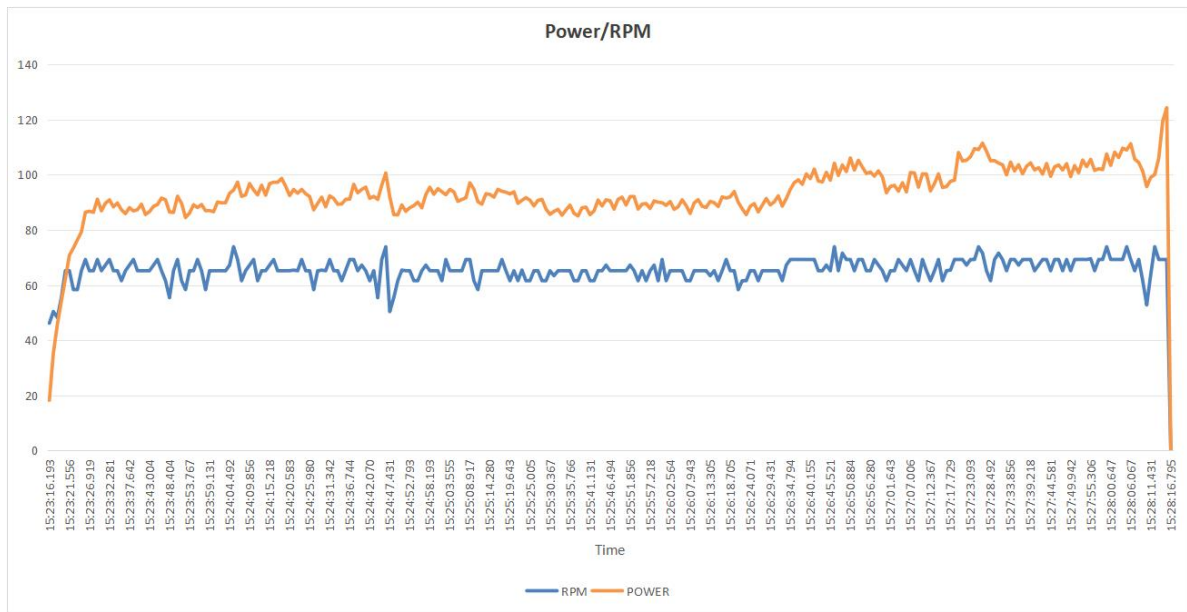
Επομένως, με την εφαρμογή του τύπου στο πρόγραμμα:

```
alpha = 0.3
```

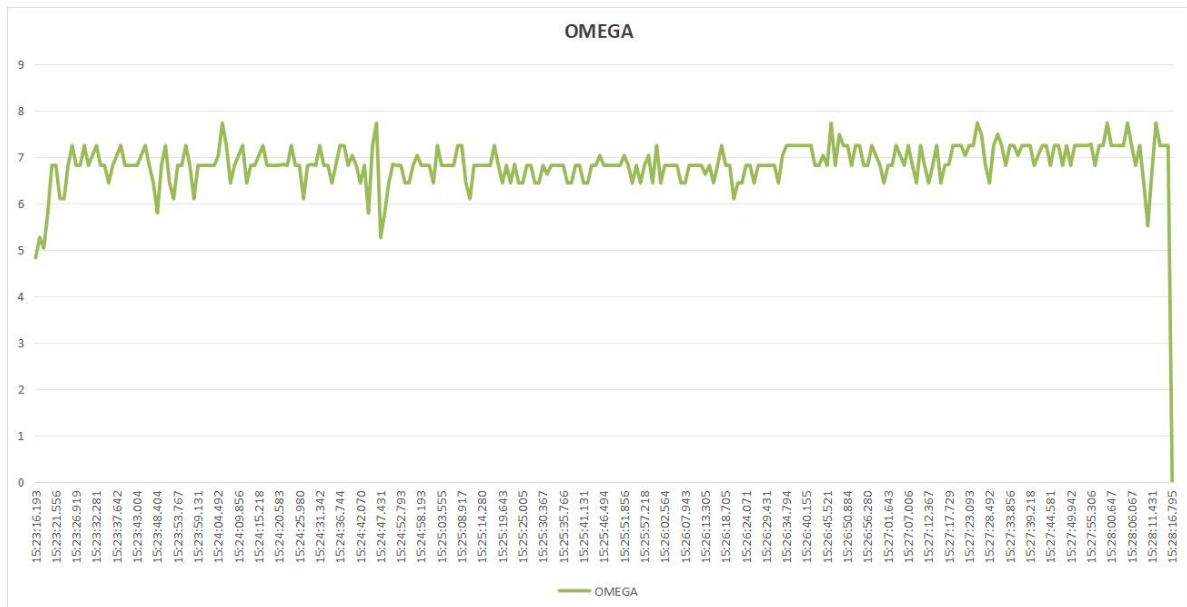
```
emapower = (alpha * power) + ((1.0 - alpha) * emapower);
```

Μετά την προσθήκη στο πρόγραμμα πραγματοποιούνται οι ίδιες μετρήσεις.

6.6.1 Ήπια καθημερινή ποδηλασία (EMA)



Εικόνα 6.13: Γράφημα διακύμανσης Στροφών-Ισχύος (χαμηλού ρυθμού)



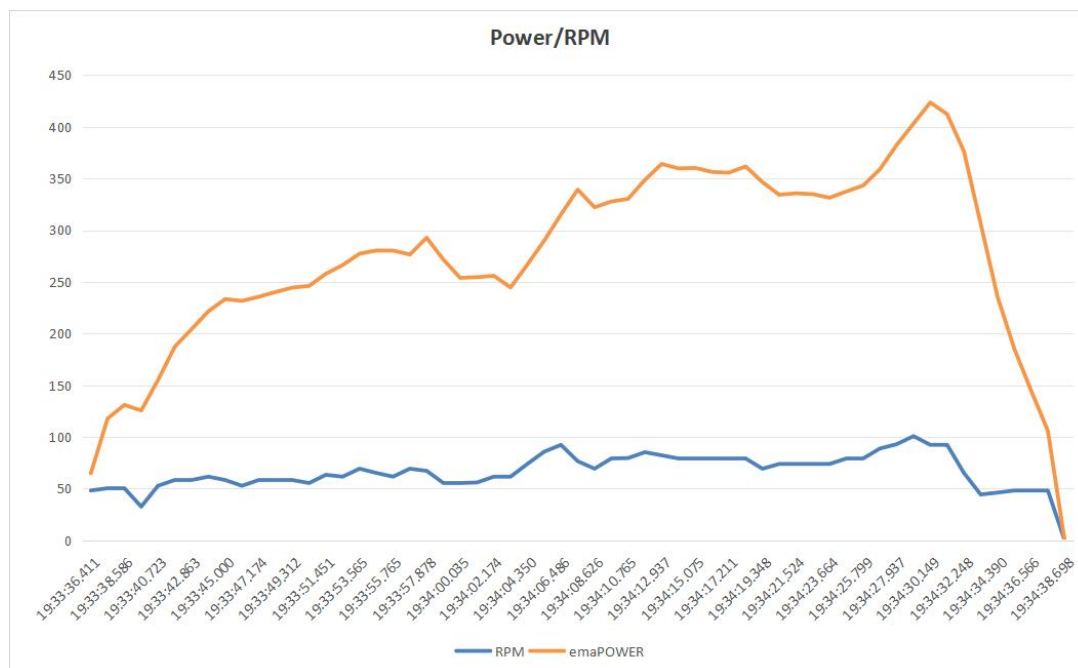
Εικόνα 6.14: Γράφημα διακύμανσης γωνιακής ταχύτητας (χαμηλού ρυθμού)

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα μετρήσεων

Μέτρηση	Μέσος Όρος	Μονάδα Μέτρησης
Στροφές	65.52	RPM
Γωνιακή ταχύτητα	6.86	rad/s
Ισχύς	93.39	Watt

Διάρκεια άσκησης: 5 λεπτά

6.6.2 Ορθοπεταλιά (EMA)



Εικόνα 6.15: Γράφημα διακύμανσης Στροφών-Ισχύος (υψηλού ρυθμού)



Εικόνα 6.16: Γράφημα διακύμανσης γωνιακής ταχύτητας (υψηλού ρυθμού)

Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα μετρήσεων

Μέτρηση	Μέσος Όρος	Μονάδα Μέτρησης
Στροφές	67.45	RPM
Γωνιακή ταχύτητα	7.06	rad/s
Ισχύς	280.07	Watt

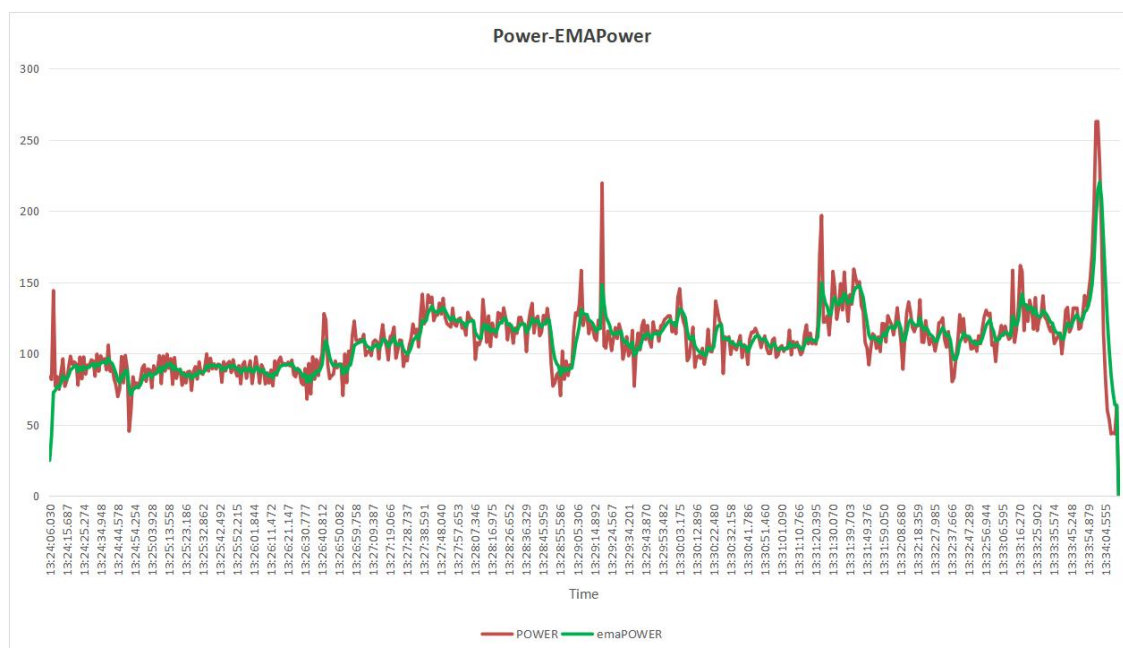
Διάρκεια άσκησης: ~1 λεπτό

6.7 Σύγκριση σημάτων

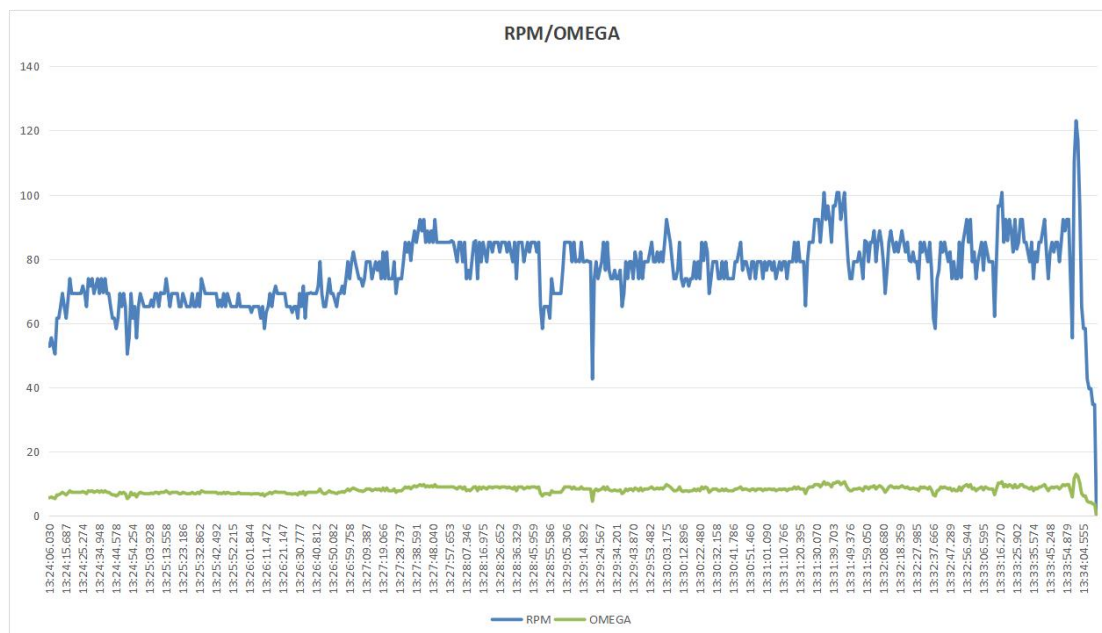
Το ακατέργαστο σήμα της μηχανικής ισχύος παρουσιάζει αρκετές διακυμάνσεις και αιχμές λόγω της ασταθούς κίνησης, επομένως για να καταστεί ευκολότερη η ανάγνωση της απόδοσης χρησιμοποιείται το φίλτρο τύπου EMA.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αρχικά γίνεται μια σύγκριση του ακατέργαστου σήματος με το φιλτραρισμένο και στη συνέχεια γίνεται δοκιμή διάφορων τιμών του συντελεστή εξομάλυνσης α .

6.7.1 Ήπια καθημερινή ποδηλασία



Εικόνα 6.17: Γράφημα σύγκρισης μετρήσεων



Εικόνα 6.18: Γράφημα γωνιακής ταχύτητας

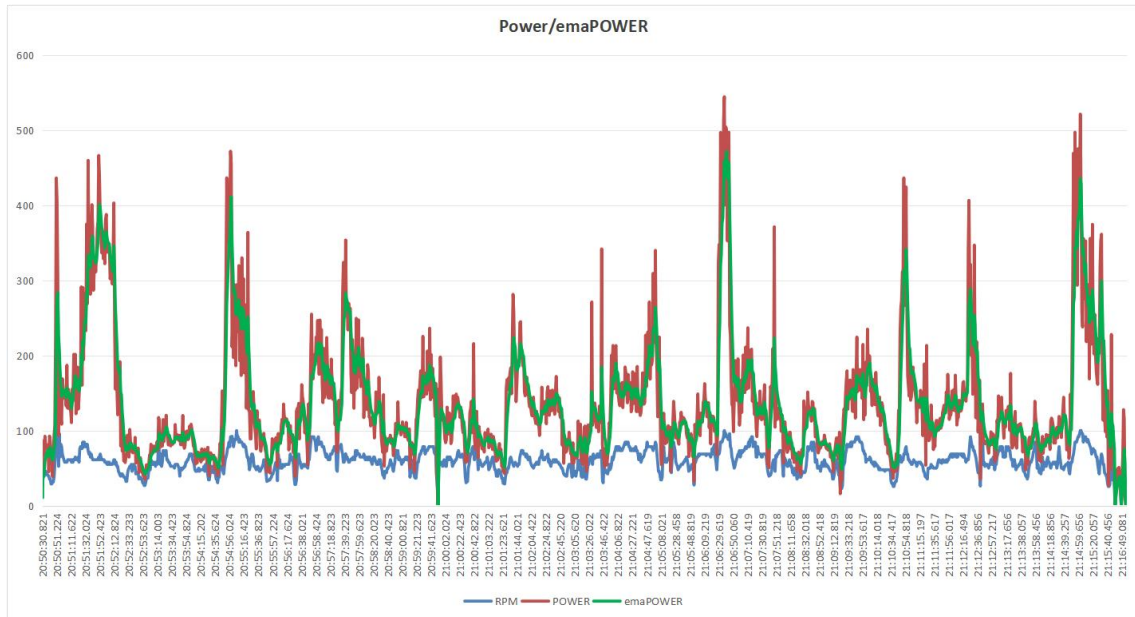
Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα μετρήσεων

Μέτρηση	Μέσος Όρος	Μονάδα Μέτρησης
Στροφές	76.50	RPM
Γωνιακή ταχύτητα	8.01	rad/s
Ισχύς	108.64	Watt
Ισχύς (EMA)	108.38	Watt

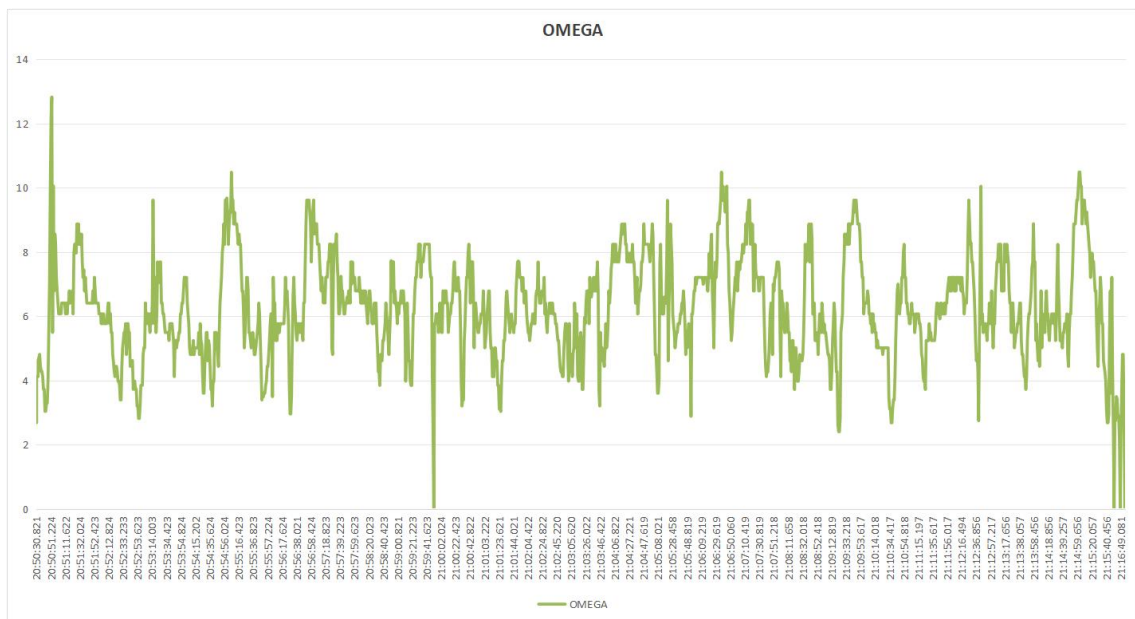
Διάρκεια άσκησης: 10 λεπτά

Παρατηρήσεις: Στην στατική ποδηλασία σε εσωτερικό χώρο όπου ο αθλητής μπορεί να διατηρεί σταθερό ρυθμό, η χρήση του φίλτρου EMA βοηθά στην περαιτέρω μείωση των διακυμάνσεων, με αποτέλεσμα την καθαρή οπτική ανάλυση των δεδομένων της άσκησης μου πραγματοποιήθηκε.

6.7.2 Ποδηλασία σε εξωτερικό χώρο



Εικόνα 6.19: Γράφημα διακύμανσης ισχύος σε εξωτερικό χώρο



Εικόνα 6.20: Γράφημα διακύμανσης γωνιακής ταχύτητας σε εξωτερικό χώρο

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα μετρήσεων

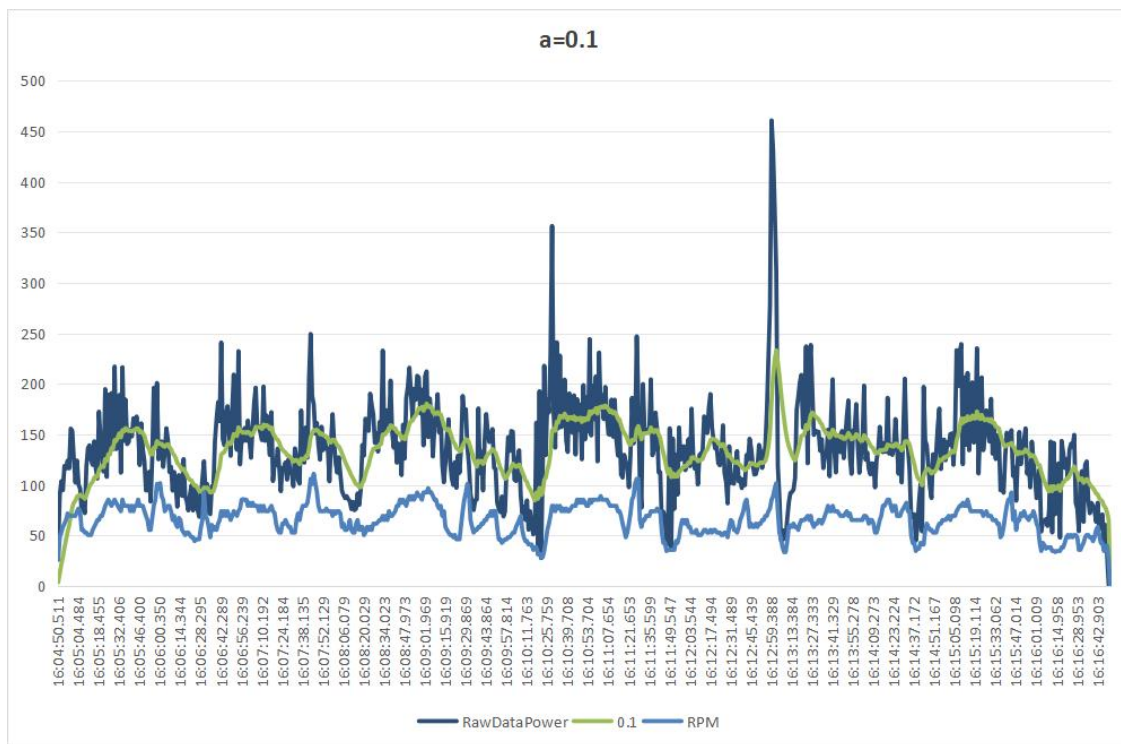
Μέτρηση	Μέσος Όρος	Μονάδα Μέτρησης
Στροφές	59.75	RPM
Γωνιακή ταχύτητα	6.25	rad/s
Ισχύς	137.99	Watt
Ισχύς (EMA)	137.57	Watt

Διάρκεια άσκησης: ~25 λεπτά

Παρατηρήσεις: Στη ποδηλασία εξωτερικού χώρου δεν είναι εύκολο για έναν αθλητή να διατηρεί σταθερή απόδοση για μεγάλα χρονικά διαστήματα λόγω της ανομοιομορφίας που παρουσιάζει ο δρόμος. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 6.19, υπάρχουν σημεία κατά τα οποία η ισχύς αυξάνεται απότομα, όπως φαίνεται για παράδειγμα στο χρονικό σημείο 20:54:35 και στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά, το οποίο αποτυπώνει την προσπάθεια που κατέβαλε ο ποδηλάτης κατά την ανάβαση μιας ανηφόρας ενώ στη συνέχεια η μείωση που ακολουθεί φανερώνει ότι ακολουθεί κατηφορικός δρόμος ο οποίος δεν απαιτεί την άσκηση δύναμης, για το λόγο αυτό υπάρχει και η μείωση της ισχύος ενώ οι στροφές παρουσιάζουν αύξηση η οποία οφείλεται στην κεκτημένη ταχύτητα. Η χρήση του φίλτρου EMA συνεισφέρει στην εξομάλυνση του γραφήματος, καθιστώντας το πιο ευανάγνωστο.

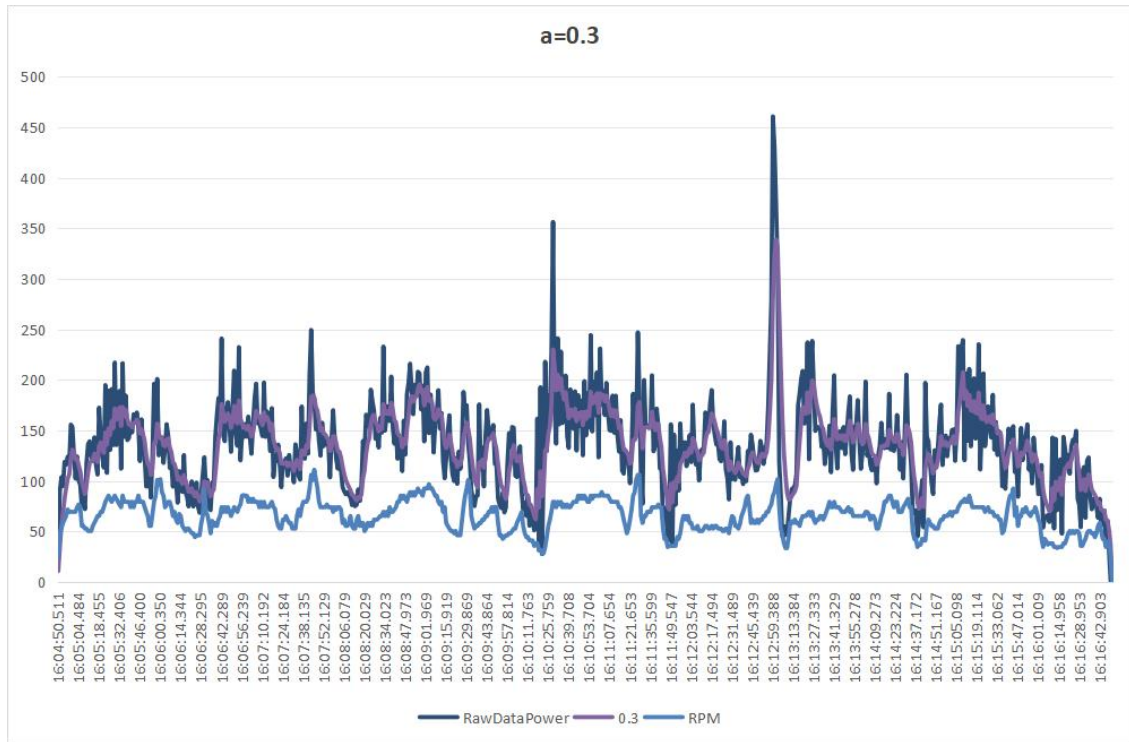
6.7.3 Σύγκριση τιμών μεταβλητής α

Στο παρακάτω κεφάλαιο δοκιμάζονται διάφορες τιμές του συντελεστή εξομάλυνσης α , για την πραγματοποίηση σύγκρισης μεταξύ των αποτελεσμάτων.

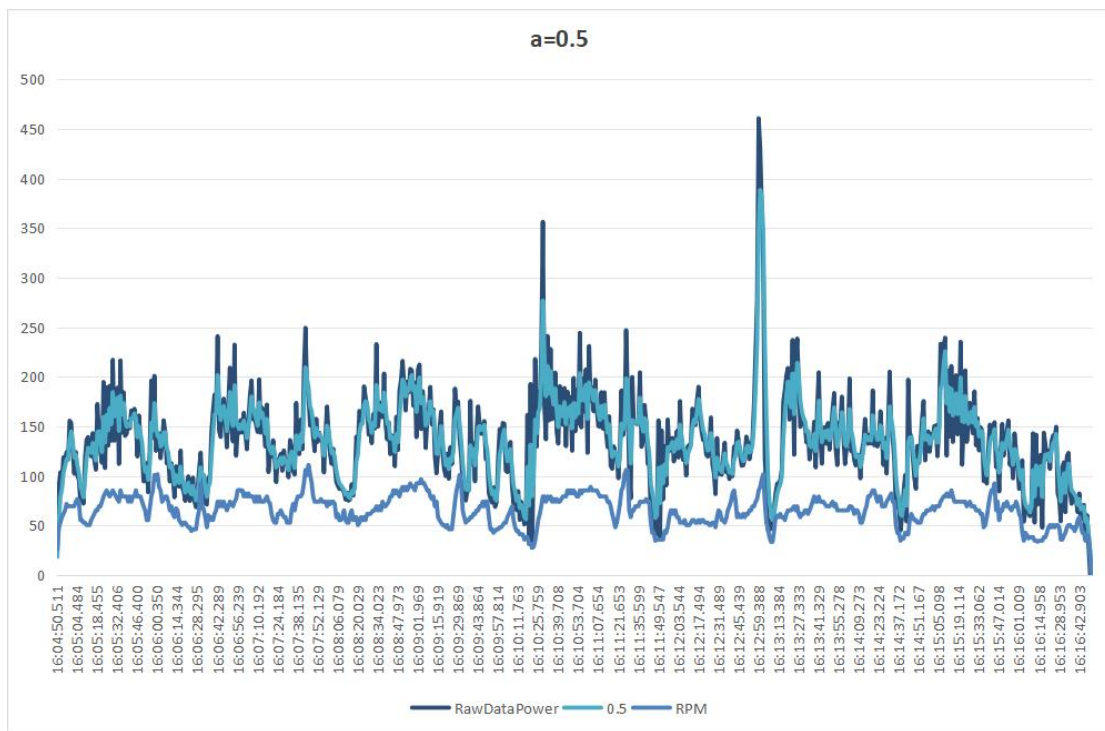


Εικόνα 6.21: Γράφημα για $\alpha = 0.1$

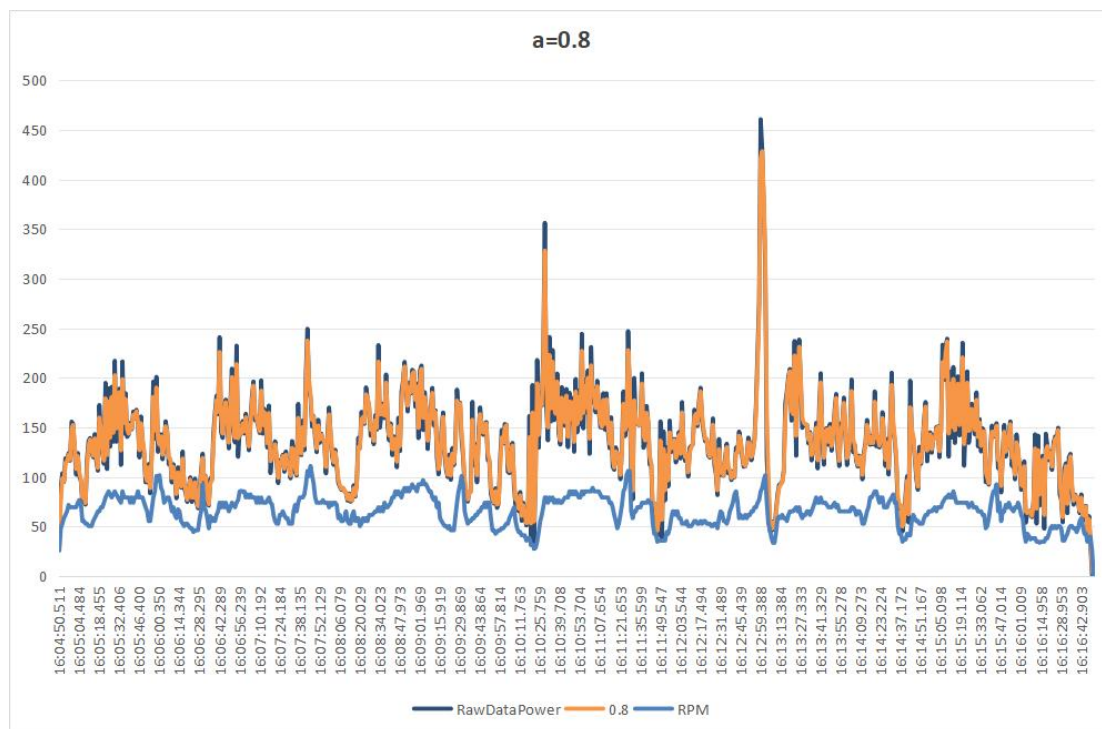
Κεφάλαιο 6ο



Εικόνα 6.22: Γράφημα για $\alpha = 0.3$



Εικόνα 6.23: Γράφημα για $\alpha = 0.5$



Εικόνα 6.24: Γράφημα για $\alpha = 0.8$

Πίνακας 6.10: Αποτελέσματα μετρήσεων για διάφορες τιμές του α

Μέτρηση	Μέσος Όρος	Μονάδα Μέτρησης
Στροφές	65.72	RPM
Γωνιακή ταχύτητα	6.88	rad/s
Ακατέργαστη Ισχύς	135.29	Watt
Ισχύς ($\alpha=0.1$)	134.42	Watt
Ισχύς ($\alpha=0.3$)	135.17	Watt
Ισχύς ($\alpha=0.5$)	135.26	Watt
Ισχύς ($\alpha=0.8$)	135.29	Watt

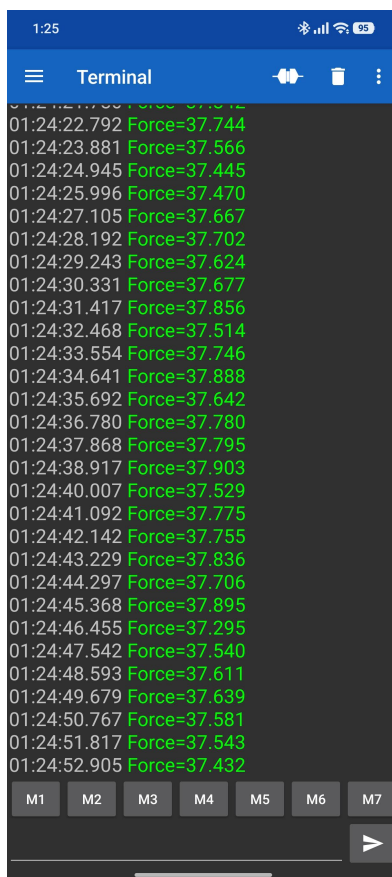
Διάρκεια άσκησης: ~12 λεπτά

Παρατηρήσεις:

- $\alpha = 0.1$: Εμφανίζει την πιο φιλτραρισμένη καμπύλη, όμως η υψηλή καθυστέρηση που εισάγει έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια δεδομένων, το οποίο αποτυπώνεται στην απόκλιση που παρουσιάζει η τιμή του μέσου όρου της ισχύος.
- $\alpha = 0.3$: Προσφέρει καλύτερο αποτέλεσμα όσον αφορά την γενική εικόνα της άσκησης χωρίς πολλές λεπτομέρειες.
- $\alpha = 0.5$: Η τιμή αυτή έχει ως αποτέλεσμα ένα σχετικά φιλτραρισμένο σήμα το οποίο μπορεί να αποδώσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις στιγμιαίες μεταβολές του σήματος.
- $\alpha = 0.8$: Ελάχιστες διαφορές μεταξύ του φιλτραρισμένου σήματος με το αρχικό σήμα.

6.8 Τελική καταμέτρηση σφάλματος

Μετά το πέρας όλων των μετρήσεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε ένα διάστημα αρκετών ημερών, γίνεται μια τελική μέτρηση με την διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την βαθμονόμηση χρησιμοποιώντας ένα βάρος 4 κιλών.



Εικόνα 6.25: Terminal κατά τη μέτρηση

Μετά την λήψη 25 δειγμάτων τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω, ενώ στον πίνακα συμπεριλαμβάνεται και η μέτρηση που είχε πραγματοποιηθεί αφού έγινε η βαθμονόμηση (πίνακας 6.2).

Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα μέτρησης 4kg

	Δύναμη F (N)	Σχετικό Σφάλμα
Θεωρητική τιμή	39.24	-
Πειραματική τιμή (αρχική)	39.71	1.19%
Πειραματική τιμή (τελική)	37.66	4.02%

Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη πτυχιακή πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του κυκλώματος, η ανάπτυξη των απαραίτητων τυπωμένων πλακετών, καθώς επίσης και η αξιοποίηση ενός ESP32-C3 Zero για την επεξεργασία και ασύρματη μετάδοση των δεδομένων με την χρήση BLE.

Μετά την πραγματοποίηση των απαραίτητων μετρήσεων οι στροφές και συνεπώς η ταχύτητα παρουσιάζουν σταθερότητα και ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες της ποδηλασίας.

Το κύκλωμα το οποίο είναι υπεύθυνο για την μέτρηση της μηχανικής ισχύος εμφανίζει ικανοποιητική ανταπόκριση με μεγάλη ακρίβεια στις αλλαγές κατά την ποδηλασία.

Μετά την βαθμονόμηση του συστήματος με την μέτρηση που πραγματοποιήθηκε υπολογίστηκε ένα σχετικό σφάλμα 1.19%, το οποίο οφείλεται στο offset και στις πολύ μικρές διακυμάνσεις της τάσης.

Μετά το πέρας όλων των μετρήσεων έγινε η ίδια μέτρηση και διαπιστώθηκε ένα σχετικό σφάλμα στις μετρήσεις 4.02%. Σφάλμα το οποίο είναι αναμενόμενο και οφείλεται στην καταπόνηση που δέχθηκαν οι αισθητήρες strain gauge κατά την ποδηλασία καθώς επίσης και από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος η οποία μπορεί να επηρέασε τους αισθητήρες.

Συμπερασματικά η πραγματοποίηση τακτικών βαθμονομήσεων είναι απαραίτητη έτσι ώστε το σύστημα να διατηρεί την ακρίβεια των μετρήσεων του.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Για την μέτρηση της μηχανικής ισχύος μπορεί να προστεθεί το κύκλωμα μέτρησης και στον άλλο βραχίονα του ποδηλάτου έτσι ώστε να μετρά ενεργά την ισχύ που παράγεται και στο τέλος να συνδυάζονται τα αποτελέσματα και η ισχύς να αποδίδεται με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια.

Επιπλέον, για τη διευκόλυνση του χρήστη, μπορεί να γίνει η ανάπτυξη μιας εφαρμογής για το κινητό η οποία θα λαμβάνει τα δεδομένα και μετά την ολοκλήρωση της άσκησης, η συλλογή των δεδομένων θα γίνεται αυτόματα με τελικό αποτέλεσμα την προβολή των γραφημάτων.

Τέλος, μια σημαντική μελλοντική επέκταση της παρούσας πτυχιακής είναι να πραγματοποιηθούν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων με μια πιστοποιημένη συσκευή του εμπορίου. Μια ταυτόχρονη μέτρηση θα βοηθούσε στον προσδιορισμό της ακρίβειας της συσκευής καθώς επίσης και στην βελτιστοποίηση της επιλογής του φίλτρου EMA.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] SRM, “THE HISTORY OF POWERMETERS,” srm.de, 2026. [Online]. Available: <https://www.srm.de/the-history-of-power-meters/>
- [2] D. Halliday, R. Resnick and J. Walker, *Fundamentals of Physics 10th edition*. Wiley, 2013.
- [3] NI, “Measuring Strain with Strain Gages,” ni.com, 2026. [Online]. Available: <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-strain-with-strain-gages.html>
- [4] Μ. Ν. Σπάσος, *Αναλογική επεξεργασία σημάτων αισθητηρίων*. Εκδόσεις ΑΪΒΑΖΗ, 2018.
- [5] Monolithic Power Systems, “Hall Effect Sensors: A Comprehensive Guide,” monolithicpower.com, 2026. [Online]. Available: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/hall-effect-sensors-a-comprehensive-guide>
- [6] Texas Instruments, “DRV5032 Ultra-Low-Power Digital-Switch Hall Effect Sensor,” DRV5032 datasheet, Dec. 2024.
- [7] Texas Instruments, “DRV5015 Low-Voltage, High-Sensitivity, Digital-Latch Hall Effect Sensor,” DRV5015 datasheet, Dec. 2019.
- [8] GTC, “USB Connectors,” USB4216-03-A datasheet, Feb. 2025.
- [9] Akyga, “LiPo Battery Specification Approval Sheet,” AKYGA LP103040 datasheet, Nov. 2019.
- [10] Microchip, “Li-Polymer Charge Management Controllers,” MCP73831 datasheet, Jun. 2020.
- [11] Texas Instruments, “TPS6300x High-Efficient Single Inductor Buck-Boost Converter,” TPS63000 datasheet, Oct. 2015.
- [12] ROHM Semiconductor, “Fixed/Adjustable Output Nano Cap™ LDO Regulators,” BD933N5WEFJ-CE2 datasheet, Mar. 2025
- [13] Texas Instruments, “ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860SPS, 16-Bit ADCs,” ADS1114 datasheet, Dec. 2024.
- [14] Waveshare, “ESP32-C3-Zero,” waveshare.com, 2026 [Online]. Available: <https://www.waveshare.com/wiki/ESP32-C3-Zero>
- [15] Espressif, “ESP32-C3 Series Datasheet Version 2.0,” ESP-32 C3 Zero datasheet, Nov. 2024.
- [16] Adafruit Industries, “Adafruit ADS1x15 Library,” GitHub repository, 2026. [Online]. Available: https://github.com/adafruit/adafruit_ads1x15
- [17] mbedded.ninja, “Exponential Moving Average (EMA) Filters,” blog.mbedded.ninja, 2024 [Online]. Available: <https://blog.mbedded.ninja/programming/signal-processing/digital-filters/exponential-moving-average-ema-filter/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ

```
#include <BLEDevice.h>
#include <BLEServer.h>
#include <BLEUtils.h>
#include <BLE2902.h>
#include <Adafruit_ADS1X15.h>

#define SERVICE_UUID "6E400001-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"
#define CHARACTERISTIC_UUID_RX "6E400002-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"
#define CHARACTERISTIC_UUID_TX "6E400003-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"

#define SDA 5
#define SCL 4
#define RGB_BUILTIN 10
#define RGB_BRIGHTNESS 64
#define HALL_PIN 3

//BLE
BLEServer *pServer = NULL;
BLECharacteristic *pTxCharacteristic;
bool deviceConnected = false;
bool oldDeviceConnected = false;
static unsigned long lastBleSend = 0;
const unsigned long BLE_UPDATE_INTERVAL = 1000; // 1 second

//ADC
Adafruit_ADS1115 ads;
float offset = 0.0;
const float multiplier = 0.03125F;
const float pedal = 0.14;
const float k = 0.9656;
int ForceSampleCount = 0;
```

```

float emapower = 0.0;
const float alpha = 0.1;
float ForceSum = 0;

//ω-RPM
hw_timer_t *timer = nullptr;
volatile uint64_t last_edge = 0;
const uint64_t debounce_timer = 100000; // <100ms
const uint32_t NO_SIGNAL_TIMEOUT_MS = 3000; // timeout
volatile unsigned long last_edge_millis = 0;
bool zeroSent = false;
volatile float rpm_sum = 0;
volatile uint32_t rpm_count = 0;
float avgRPM = 0.0;

class MyServerCallbacks : public BLEServerCallbacks {
    void onConnect(BLEServer *pServer) {
        deviceConnected = true;
    };
    void onDisconnect(BLEServer *pServer) {
        deviceConnected = false;
    }
};

void IRAM_ATTR RPM_timer() {
    uint64_t now = timerRead(timer);
    if (last_edge != 0) {
        uint64_t period = now - last_edge;
        if (period > debounce_timer) {
            float RPM = 60000000.0 / (float)period;
            rpm_sum += RPM;
            rpm_count++;
        }
    }
}

```

```

}
last_edge = now;
last_edge_millis = millis();
}

void setup() {
  Wire.begin(SDA, SCL);
  ads.setDataRate(RATE_ADS1115_475SPS);
  ads.setGain(GAIN_FOUR);
  ads.begin();

  rgbLedWrite(RGB_BUILTIN, 0, 0, RGB_BRIGHTNESS); // Blue

  long offsetSum = 0;
  for (int i = 0; i < 200; i++) {
    offsetSum += ads.readADC_Differential_0_1();
    delay(5);
  }
  offset = ((float)offsetSum / 200.0) * multiplier;

  pinMode(HALL_PIN, INPUT_PULLUP);
  timer = timerBegin(1000000);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(HALL_PIN), RPM_timer, FALLING);

  BLEDevice::init("Power Meter");
  pServer = BLEDevice::createServer();
  pServer->setCallbacks(new MyServerCallbacks());
  BLEService *pService = pServer->createService(SERVICE_UUID);
  pTxCharacteristic = pService->createCharacteristic(CHARACTERISTIC_UUID_TX,
BLECharacteristic::PROPERTY_NOTIFY);
  pTxCharacteristic->addDescriptor(new BLE2902());
  BLECharacteristic *pRxCharacteristic = pService-
>createCharacteristic(CHARACTERISTIC_UUID_RX,
BLECharacteristic::PROPERTY_WRITE);

```

```

pService->start();
pServer->getAdvertising()->start();
}

float voltage = 0.0;
float force = 0.0;
const int numSamples = 25;

void loop() {
  unsigned long currentMillis = millis();

  if (!deviceConnected) {
    rgbLedWrite(RGB_BUILTIN, 0, RGB_BRIGHTNESS, 0); // Green
  } else {
    rgbLedWrite(RGB_BUILTIN, RGB_BRIGHTNESS, 0, 0); // Red
  }

  long sum = 0;
  for (int i = 0; i < numSamples; i++) {
    sum += ads.readADC_Differential_0_1();
  }
  float results = (float)sum / numSamples;
  voltage = results * multiplier;
  force = abs((voltage - offset)) * k;
  ForceSum += force;
  ForceSampleCount++;

  if (deviceConnected && currentMillis - lastBleSend >= BLE_UPDATE_INTERVAL) {
    lastBleSend = currentMillis;

    float avgforce = 0;
    if (ForceSampleCount > 0) {
      avgforce = ForceSum / ForceSampleCount;
    }
  }
}

```

```

}
// Υπολογισμός RPM
if (rpm_count > 0) {
    noInterrupts();
    avgRPM = rpm_sum / (float)rpm_count;
    rpm_sum = 0;
    rpm_count = 0;
    interrupts();
} else {

    unsigned long timeSinceLast = currentMillis - last_edge_millis;
    if (timeSinceLast > NO_SIGNAL_TIMEOUT_MS) {
        avgRPM = 0.0;
    } else {
        float decayRPM = 60000.0 / (float)timeSinceLast;
        if (decayRPM < avgRPM){
            avgRPM = decayRPM;
        }
    }
}
if (avgRPM < 20.0){
    avgRPM = 0.0;
}
char buf[150];

if (avgRPM > 0) {
    float omega = avgRPM * 2.0 * PI / 60.0;
    float torque = avgforce * pedal;
    float power = (torque * omega) * 2 ;
    emapower = (alpha * power) + ((1.0 - alpha) * emapower);

    sprintf(buf, "RPM=%.2f, OMEGA=%.3f, POWER=%.3f, emaPOWER=%.3f\n",
avgRPM, omega, power, emapower);

```

```

    pTxCharacteristic->setValue((uint8_t*)buf, strlen(buf));
    pTxCharacteristic->notify();

    zeroSent = false;
}
else if (!zeroSent) {
    emapower = 0;
    char buf[150];
    sprintf(buf, "RPM=0.00, OMEGA=0.000, POWER=0.000, emaPOWER=0.000\n");

    pTxCharacteristic->setValue((uint8_t*)buf, strlen(buf));
    pTxCharacteristic->notify();

    zeroSent = true;
}
    ForceSum = 0;
    ForceSampleCount = 0;
}
// disconnecting
if (!deviceConnected && oldDeviceConnected) {
    delay(500); // give the bluetooth stack the chance to get things ready
    pServer->startAdvertising(); // restart advertising
    oldDeviceConnected = false;
}
// connecting
if (deviceConnected && !oldDeviceConnected) {
    // do stuff here on connecting
    oldDeviceConnected = true;
}
}
}

```