



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΟΣ ΜΗΧΑΝΟΤΡΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ
ΤΟΥ ΕΞΩΣΚΕΛΕΤΟΥ**

ΜΑΝΙΑΤΗΣ Κ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

1059808

**Επιβλέπων
Καθηγητής Μούρτζης Δημήτρης**

Η διπλωματική εργασία υποβλήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών
Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, Οκτώβριος 2023

ΟΡΟΛΟΓΙΑ

Artificial Intelligence	Τεχνητή Νοημοσύνη
Berkeley Lower Extremity Exoskeleton	Εξωσκελετός Κατώτερων Άκρων Berkeley
Battery Management System	Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών
Computer Aided Design	Σχεδιασμός με Υποστήριξη Υπολογιστή
Degrees of Freedom	Βαθμοί Ελευθερίας
Direct Current	Συνεχές ρεύμα
Electroencephalogram	Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα
Electromyography	Ηλεκτρομυογράφημα
European Agency for Safety and Health at Work	Ευρωπαϊκή Υπηρεσία για την Ασφάλεια και την Υγεία στην Εργασία
General Purpose Input/Output	Είσοδος/Εξοδος Γενικού Σκοπού
Hybrid Assistive Limb	Υβριδικό Βοηθητικό Άκρο
Human Machine Interface	Διεπαφή Ανθρώπου-Μηχανής
Integrated Development Environment	Ολοκληρωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης
Inertial Measurement Unit	Αδρανειακή Μονάδα Μέτρησης
Internet of Things	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
Lithium Ion	Λιθίου Ιόντων
Level of Assistance	Επίπεδο Υποστήριξης
Nickel-Metal Hydride	Υδρίδιο νικελίου-μετάλλου
Node MicroController Unit	Μονάδα Μικροελεγκτή Κόμβου
Polylactic Acid	Πολυγαλακτικό οξύ
Pulse Width Modulation	Διαμόρφωση πλάτους παλμού
Radio Control	Ραδιοέλεγχος
Service Set Identifier	Αναγνωριστικό συνόλου υπηρεσιών
Series Elastic Actuators	Σειριακοί ελαστικοί ενεργοποιητές
System on a Chip	Σύστημα επί ψηφίδας
Torque Generator Box	Κιβώτιο δημιουργίας ροπής
Universal Asynchronous Receiver/Transmitter	Προσαρμοστικό Κύκλωμα Ασύγχρονης Σειριακής Επικοινωνίας
Work-Related Musculoskeletal Disorder	Μυοσκελετική διαταραχή που σχετίζεται με την εργασία

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, έχει διεξαχθεί εκτενής έρευνα για την ανάπτυξη και την εφαρμογή καινοτόμων συσκευών εξωσκελετού. Οι εξωσκελετοί είναι μηχανικές δομές που φοριούνται από ανθρώπους για να βελτιώσουν τη δύναμη και την αντοχή τους. Μπορούν να σχεδιαστούν για συγκεκριμένα μέρη του σώματος ή για ολόκληρο το σώμα. Οι εξωσκελετοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε διάφορες κατηγορίες με βάση τα μέρη του σώματος που υποστηρίζουν. Οι εξωσκελετοί ολόκληρου του σώματος σχεδιάζονται για να υποστηρίξουν όλα τα άκρα ή την πλειοψηφία του σώματος, ενώ οι εξωσκελετοί του ανώτερου μέρους καλύπτουν το στήθος, το κεφάλι, την πλάτη και τους ώμους. Οι εξωσκελετοί του κατώτερου μέρους επικεντρώνονται στους μηρούς, τα κάτω πόδια και τους γοφούς.

Οι εξωσκελετοί κατηγοριοποιούνται σε βιομηχανικές, ιατρικές και στρατιωτικές εφαρμογές, ανάλογα με την προοριζόμενη χρήση τους. Οι βιομηχανικοί εξωσκελετοί χρησιμοποιούνται στον χώρο εργασίας για να βελτιώσουν την παραγωγικότητα, να μειώσουν την κόπωση των μυών και να προλάβουν τραυματισμούς που σχετίζονται με την εργασία στον αυχένα, τους ώμους και την πλάτη. Οι ιατρικοί εξωσκελετοί χρησιμοποιούνται κυρίως σε κέντρα αποκατάστασης για να βοηθήσουν τους ασθενείς να ανακτήσουν την κινητικότητα. Από την άλλη πλευρά, οι στρατιωτικοί εξωσκελετοί χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές επιχειρήσεις για να ενισχύσουν τη δύναμη, την αντοχή και τη συνολική απόδοση των στρατιωτών ενώ ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας.

Όσον αφορά την ενεργοποίηση, οι εξωσκελετοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως παθητικοί ή ενεργοί. Οι παθητικοί εξωσκελετοί αναδιανέμουν μηχανικά το βάρος του σώματος, μειώνοντας τον κίνδυνο επιβάρυνσης και τραυματισμούς μέσω ομοιόμορφης κατανομής του βάρους και ελαχιστοποίησης της κόπωσης στα χέρια. Αντίθετα, οι ενεργοί εξωσκελετοί ενισχύουν τη δύναμη και τη λειτουργικότητα του χρήστη. Αυτοί οι εξωσκελετοί απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια και συνήθως είναι πιο βαριοί και μεγαλύτεροι για να φιλοξενήσουν τον απαραίτητο εξοπλισμό και τις μπαταρίες. Ωστόσο, η ανάγκη για φόρτιση και η περιορισμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας μπορεί να αποτελέσει μεγάλη πρόκληση.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΛΥΣΗ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι εξωσκελετοί είναι μια ξεχωριστή κατηγορία επαγγελματικών ρομπότ που χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς. Σχεδιάζονται ειδικά για να μιμούνται, να συμπληρώνουν ή να ενισχύουν τις ανθρώπινες κινήσεις. Όταν οι άνθρωποι φορούν τους εξωσκελετούς, αισθάνονται μια δύναμη να καθοδηγεί το χέρι τους στην επιθυμητή θέση. Ορισμένες εργασίες, όπως η ανύψωση βαριών φορτίων ή η εκτέλεση επαναλαμβανόμενων ενεργειών, μπορεί να απαιτούν σημαντική βοήθεια από τον εξωσκελετό. Αντίθετα, αν η εργασία δεν απαιτεί πολύ μεγάλη προσπάθεια, ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει το επίπεδο βοήθειας του εξωσκελετού σε χαμηλότερο επίπεδο. Ωστόσο, η διαδικασία χειροκίνητης ρύθμισης του επιπέδου υποστήριξης του εξωσκελετού μπορεί να είναι χρονοβόρα και αναποτελεσματική. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 για τη ρύθμιση του επιπέδου υποστήριξης του εξωσκελετού MATE-XT της εταιρείας Comau χρησιμοποιείται ένα κλειδί Allen 6mm. Η διαφορά ανάμεσα σε αυτόν τον εξωσκελετό και τους άλλους της ίδιας κατηγορίας είναι ότι επιτρέπει στους χρήστες να ελέγχουν το επίπεδο υποστήριξης ανάλογα με τις ανάγκες τους. Ο εξωσκελετός προσφέρει 8 διαφορετικές επιλογές υποστήριξης. Όταν

ο διακόπτης είναι ρυθμισμένος στο επίπεδο "1" σημαίνει ότι ο εξωσκελετός παρέχει ελάχιστη ώθηση στον χρήστη. Αντίθετα, όταν ο διακόπτης είναι ρυθμισμένος στο επίπεδο "8" ο εξωσκελετός παρέχει σημαντική ενίσχυση στον χρήστη. Είναι προφανές ότι είναι δύσκολο για τους εργαζομένους να χρησιμοποιούν συνεχώς το κλειδί ενώ παράλληλα να εκτελούν απαιτητικές εργασίες. Επομένως, είναι ζωτικής σημασίας να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία αλλαγής του επιπέδου υποστήριξης του εξωσκελετού.



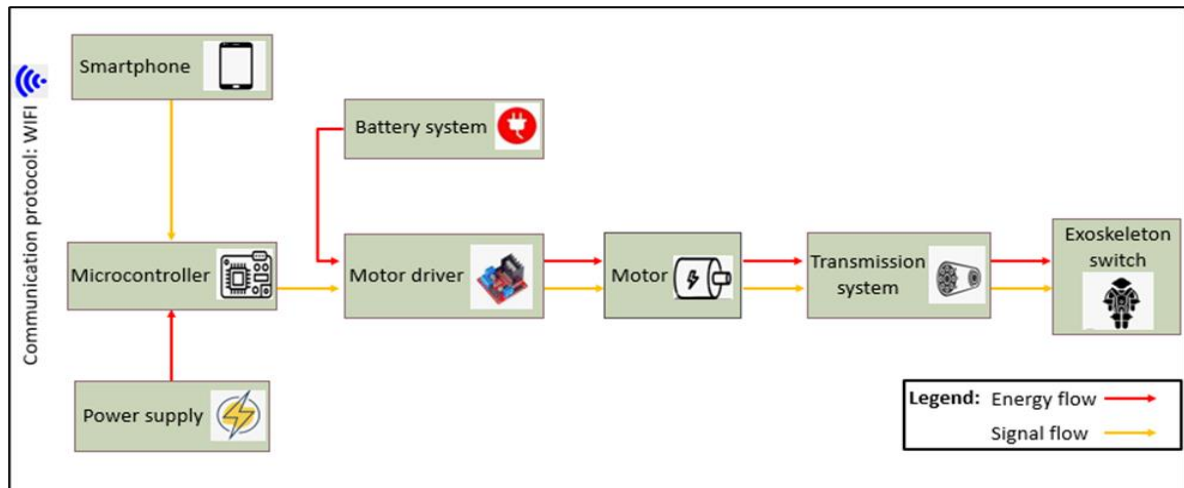
Σχήμα 1: Χειροκίνητη ρύθμιση του επιπέδου υποστήριξης του εξωσκελετού MATE-XT της COMAU.

Η προτεινόμενη λύση για να αντιμετωπιστούν οι περιορισμοί που συνεπάγεται η χρήση ενός κλειδιού Allen είναι η εφαρμογή ενός μηχανοτρονικού συστήματος για την αυτόματη ρύθμιση του επιπέδου υποστήριξης. Αυτό το σύστημα επιτρέπει στον χειριστή να αλλάξει τη ρύθμιση του διακόπτη του εξωσκελετού χωρίς την ανάγκη για ένα κλειδί Allen. Αποκαθιστώντας το χρόνο αδράνειας που συνοδεύει τις χειροκίνητες ρυθμίσεις, αυξάνεται η παραγωγικότητα του χρήστη.

Ο στόχος είναι να δημιουργηθεί επικοινωνία από απόσταση ανάμεσα στον χειριστή και το σύστημα, χρησιμοποιώντας Wi-Fi ή Bluetooth σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Βιομηχανίας 4.0. Αυτό επιτρέπει τη ρύθμιση του επιπέδου υποστήριξης με χρήση smartphone ή φορητού υπολογιστή, εξασφαλίζοντας μια ασφαλή και γρήγορη διαδικασία.

Το αυτοματοποιημένο σύστημα έχει σχεδιαστεί ειδικά για το μοντέλο εξωσκελετού MATE-XT της Comau και περιλαμβάνει έναν κινητήρα, ένα σύστημα μετάδοσης, ένα μικροελεγκτή και ένα σύστημα μπαταριών. Αρχικά, υπολογίζεται η απαιτούμενη ροπή για την περιστροφή του κλειδιού σε διάφορα επίπεδα υποστήριξης. Βάσει αυτού, επιλέγεται ένας κατάλληλος κινητήρας που μπορεί να παράξει την απαιτούμενη ροπή. Επιπλέον, αν θεωρηθεί απαραίτητο, μπορεί να σχεδιαστεί ένα πρόσθετο σύστημα μετάδοσης για επιπλέον παραγωγή ροπής. Όσον αφορά το ηλεκτρονικό μέρος, επιλέγεται ένας κατάλληλος μικροελεγκτής που πρέπει να εκπληρώνει δύο βασικές λειτουργίες. Καταρχάς, θα πρέπει να οδηγεί και να ελέγχει τον κινητήρα και, κατά δεύτερον, να διευκολύνει την επικοινωνία με τον χειριστή. Το Wi-Fi προτείνεται ως το καταλληλότερο πρωτόκολλο επικοινωνίας IoT λόγω της ασύρματης φύσης του. Τέλος ένα σύστημα μπαταριών κατασκευάζεται για να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία των διάφορων συστημάτων παρέχοντας την απαιτούμενη ισχύ.

Στα πλαίσια της εργασίας, δημιουργείται μια αρχική σχεδίαση και 3D μοντελοποίηση του αυτοματοποιημένου συστήματος χρησιμοποιώντας λογισμικό CAD. Στη συνέχεια, δημιουργείται ένα σχηματικό διάγραμμα χρησιμοποιώντας λογισμικό αυτοματοποίησης σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Η προγραμματισμός του μικροελεγκτή για τον αποτελεσματικό έλεγχο του κινητήρα, καθώς και η δημιουργία μιας εφαρμογής IoT για τον έλεγχο του συστήματος από το κινητό, αποτελούν σημαντικές προκλήσεις. Τέλος, το σύστημα συναρμολογείται και δοκιμάζεται στον εξωσκελετό για να επαληθευτεί η σωστή λειτουργία του. Στο σχήμα 2 φαίνεται η αρχιτεκτονική του συστήματος που επρόκειτο να κατασκευαστεί.



Σχήμα 2: Η αρχιτεκτονική του συστήματος.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Η πιο κρίσιμη σχεδιαστική απαίτηση του συστήματος είναι η ροπή που απαιτείται για την περιστροφή του διακόπτη του εξωσκελετού. Ο υπολογισμός της ροπής θα γίνει χρησιμοποιώντας μια ζυγαριά και ένα κλειδί Allen 6mm όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Διαδικασία υπολογισμού της απαιτούμενης ροπής για κάθε βήμα.

Στον Πίνακα 1, υπολογίζεται η ροπή που απαιτείται για την περιστροφή του διακόπτη του εξωσκελετού από το 1 έως το 8 ανά βήμα. Στον Πίνακα 2 υπολογίζεται η ροπή που απαιτείται για τη περιστροφή του διακόπτη του εξωσκελετού από το 8 έως το 1 ανά βήμα.

Πίνακας 1: Υπολογισμός της απαιτούμενης ροπής από το 1 έως στο 8 ανά βήμα.

ΒΗΜΑΤΑ	1→2	2→3	3→4	4→5	5→6	6→7	7→8
M (kg)	2.27	3.36	3.56	3.87	3.76	3.86	3.84
F (N)	22.27	32.91	34.87	37.92	36.84	37.87	37.67
T (N•m)	3.13	4.63	4.90	5.33	5.18	5.32	5.30
T (kg•cm)	31.92	47.17	49.98	54.34	52.80	54.27	53.99

Πίνακας 2: Υπολογισμός της απαιτούμενης ροπής από το 8 έως στο 1 ανά βήμα.

ΒΗΜΑΤΑ	2→1	3→2	4→3	5→4	6→5	7→6	8→7
M (kg)	1.63	2.20	3.46	3.54	3.41	4.85	5.08
F (N)	15.99	21.53	33.89	34.73	33.45	47.58	49.83
T (N•m)	2.25	3.03	4.77	4.88	4.70	6.69	7.01
T (kg•cm)	22.92	30.86	48.58	49.77	47.94	68.19	71.42

Όπως φαίνεται από τους δυο Πίνακες η κρίσιμη ροπή σχεδιασμού είναι η ροπή που απαιτείται για τη περιστροφή του διακόπτη από το 8 στο 7. Με βάση αυτή τη ροπή θα επιλεγεί ο κατάλληλος κινητήρας για το σύστημα.

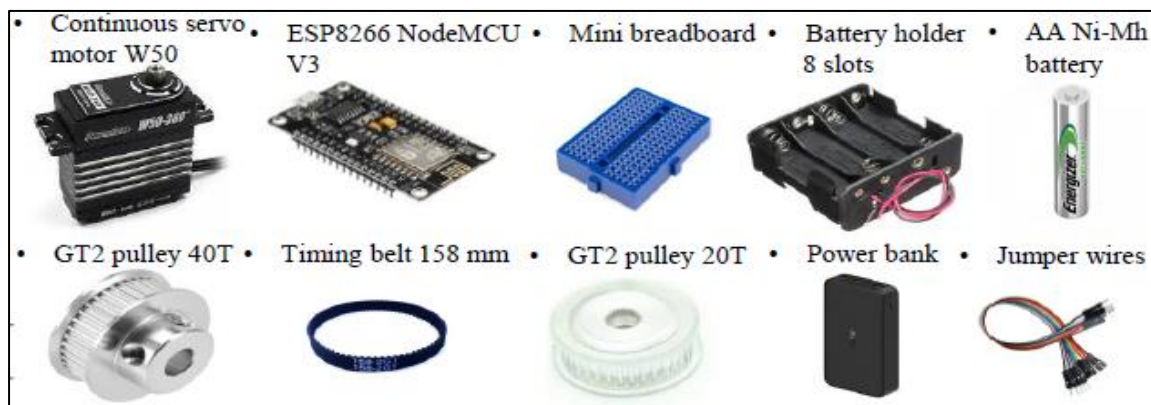
Το σύστημα που πρόκειται να αναπτυχθεί πρέπει να πληροί συγκεκριμένες απαιτήσεις σχεδίασης για να εξασφαλιστεί η λειτουργικότητα και η αξιοπιστία του. Όπως αναφέρθηκε

προηγουμένως, η κύρια απαίτηση είναι ότι το σύστημα να μπορεί να παράξει την απαιτούμενη ροπή για την περιστροφή του διακόπτη του εξωσκελετού, με ελάχιστη απαίτηση ροπής τα 71 kg*cm. Ωστόσο, μερικές φορές καθορίζεται ένας παράγοντας ασφαλείας για να εξασφαλιστεί ότι το σύστημα θα λειτουργεί κανονικά παρά τυχόν μηχανικές απώλειες. Εφόσον ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθούν οι μηχανικές απώλειες με την κατάλληλη επιλογή του συστήματος μετάδοσης, επιλέγεται ένας παράγοντας ασφαλείας 1,4.

Όσον αφορά τις μπαταρίες του συστήματος, πρέπει να διατηρούν τη χωρητικότητά τους για τουλάχιστον μία ημέρα μέχρι την επόμενη φόρτιση. Αυτό επιτρέπει στον χρήστη να φορτίζει τις μπαταρίες το βράδυ, εξασφαλίζοντας ότι το σύστημα είναι έτοιμο για χρήση την επόμενη ημέρα. Επιπλέον, το σύστημα πρέπει να επικοινωνεί με τον εξωτερικό κόσμο μέσω ενός δικτύου Wi-Fi, επιτρέποντας στους χρήστες να επιλέγουν το επίπεδο βοήθειας του εξωσκελετού χρησιμοποιώντας το κινητό τους τηλέφωνο. Τέλος, ο χρόνος ενεργοποίησης του συστήματος πρέπει να είναι γρήγορος, με μέγιστο χρόνο ενεργοποίησης 1 δευτερόλεπτο.

Η μείωση του βάρους είναι ένας κρίσιμος παράγοντας σχεδίασης, καθώς το εξωσκελετό φοριέται στο ανθρώπινο σώμα. Ένα βαρύ σύστημα μπορεί να περιορίσει τις κινήσεις του χρήστη και να προκαλέσει κόπωση. Επομένως, το σύστημα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ελαφρύτερο. Επίσης, η βέλτιστη αξιοποίηση του χώρου είναι σημαντική. Το σύστημα πρέπει να καταλαμβάνει ελάχιστο χώρο στο εξωσκελετό. Τέλος, το συνολικό κόστος του συστήματος πρέπει να είναι χαμηλό και τα περισσότερα μέρη του συστήματος πρέπει να είναι διαθέσιμα για αγορά μέσω διαδικτύου. Αυτό μειώνει την ανάγκη για πρόσθετες μηχανουργικές εργασίες σε ένα μηχανουργείο.

Ακολουθεί η επιλογή των εξαρτημάτων που αποτελούν το μηχανοτρονικό σύστημα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Ειδικότερα το σύστημα αποτελείται από:



Σχήμα 4: Επιλογή των εξαρτημάτων που αποτελούν το σύστημα.

- Τον σερβοκινητήρα W50-360°. Οι συνεχείς περιστροφικοί σερβοκινητήρες έχουν τροποποιηθεί για να παρέχουν ανοιχτού βρόχου έλεγχο ταχύτητας. Αυτή η τροποποίηση τους μετατρέπει αποτελεσματικά σε κινητήρες με ενσωματωμένους οδηγούς κινητήρα, συσκευασμένους σε μια μικρή και οικονομική μορφή. Βασικά, οι συνεχείς σερβοκινητήρες λειτουργούν παρόμοια με τους κινητήρες DC, επιτρέποντας απεριόριστη περιστροφή πάνω από τους 360 μοίρες. Δεν διαθέτουν ανατροφοδότηση θέσης και τα μόνα ελέγχσιμα στοιχεία είναι η ταχύτητα και η κατεύθυνση του άξονα του κινητήρα. Ο συνεχής σερβοκινητήρας είναι η βέλτιστη

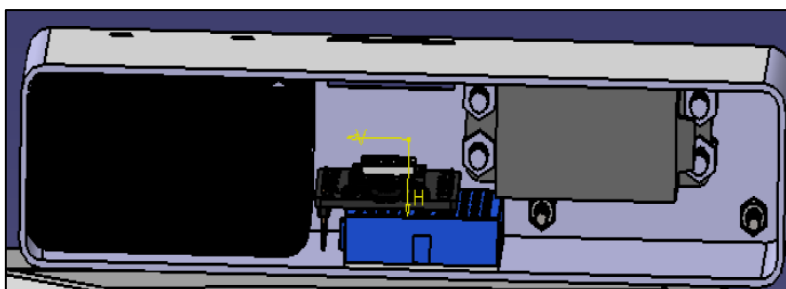
επιλογή για το σύστημα λόγω της ικανότητάς του για απεριόριστη περιστροφή και της υψηλής παραγωγής ροπής. Επιπλέον, διαθέτει ενσωματωμένο οδηγό κινητήρα και σύστημα μετάδοσης (γρανάζια), όπως ένας τυπικός σερβοκινητήρας. Για το υλοποιημένο μηχανολογικό σύστημα σε αυτήν την εργασία, χρησιμοποιήθηκε ο σερβοκινητήρας W50-360° winch από την Power HD. Παρέχει μέγιστη ροπή εξόδου 50 kg•cm και λειτουργεί σε ένα εύρος τάσης από 6,0V έως 8,4V. Επιπλέον, αυτός ο σερβοκινητήρας είναι εξαιρετικά ελαφρύς, ζυγίζοντας μόλις 80 γραμμάρια. Όσον αφορά τον έλεγχο του σερβοκινητήρα, μπορεί να επιτευχθεί με την αποστολή ενός σήματος Pulse Width Modulation (PWM) στον συνεχή σερβοκινητήρα. Το PWM αποτελείται από μια ακολουθία παλμών που επαναλαμβάνονται περιοδικά με μεταβαλλόμενες διάρκειες. Η διάρκεια κάθε παλμού καθορίζει την ταχύτητα και την κατεύθυνση του άξονα του κινητήρα.

- Τον μικροελεγκτή ESP8266 Lolin NodeMCU. Οι ακροδέκτες GPIO (General Purpose Input/Output) αντιστοιχούν στους 16 ψηφιακούς ακροδέκτες εισόδου/εξόδου, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την έξοδο PWM. Ο μικροελεγκτής Lolin NodeMCU προγραμματίζεται χρησιμοποιώντας το περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE (Integrated Development Environment), το οποίο παρέχει ένα περιβάλλον προγραμματισμού για τη συγγραφή και ανέβασμα κώδικα στην πλακέτα. Ο κώδικας μεταφέρεται στον μικροελεγκτή μέσω ενός καλωδίου USB, ειδικότερα ενός καλωδίου USB τύπου B. Τα sketches του Arduino, που γράφονται σε γλώσσες C ή C++, χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό της πλακέτας NodeMCU.
- Ένα mini breadboard.
- Ένα battery holder 8 θέσεων. Επίσης η μπαταρία που επιλέχθηκε για το σύστημα ήταν η μπαταρία της εταιρείας Energizer τύπου AA NiMH και χωρητικότητας 2000mAh.
- Για το σύστημα μετάδοσης, απαιτούνται δύο τροχαλίες και ένας ιμάντας. Η πρώτη τροχαλία θα τοποθετηθεί στον σερβοκινητήρα, ενώ η δεύτερη θα περιστραφεί με ένα Allen κλειδί στον διακόπτη του εξωσκελετού. Πρώτα πρέπει να γίνει η επιλογή της τροχαλίας που θα τοποθετηθεί στον σερβοκινητήρα. Μετά από μια εκτενή έρευνα, επιλέχθηκε μια τροχαλία από αλουμίνιο που έχει 20 δόντια και μπορεί να συνδεθεί με έναν RC σερβοκινητήρα 25T. Επιπλέον, χρησιμοποιεί ένα προφίλ δοντιών GT2. Επίσης, σχεδιάστηκε για χρήση με έναν ιμάντα πλάτους 6mm. Η δεύτερη επιλεγμένη τροχαλία έχει διπλάσια διάμετρο από τη πρώτη ώστε το μηχανικό πλεονέκτημα να ισούται με 2. Επιπλέον αυτή η τροχαλία σχεδιάστηκε ειδικά για χρήση με ιμάντες GT2 πλάτους 6mm. Διαθέτει 40 δόντια και μια εσωτερική οπή 6mm. Η τροχαλία μπορεί να στερεωθεί με ασφάλεια σε οποιοδήποτε άξονα διαμέτρου 6mm χρησιμοποιώντας δύο βίδες. Όσον αφορά το ιμάντα χρονισμού που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να επιλεγεί το κατάλληλο μέγεθος. Ο ιμάντας χρονισμού πρέπει να έχει προφίλ δοντιών GT2 και πλάτος 6mm. Τελικά επιλέγεται ιμάντας μήκους 158mm.
- Τέλος για την ολοκλήρωση του συστήματος απαιτούνται ένα power bank το οποίο θα είναι η πηγή ενέργειας του microcontroller και καλώδια τύπου jumper ώστε να γίνουν οι κατάλληλες ηλεκτρικές συνδέσεις των υλικών μεταξύ τους.

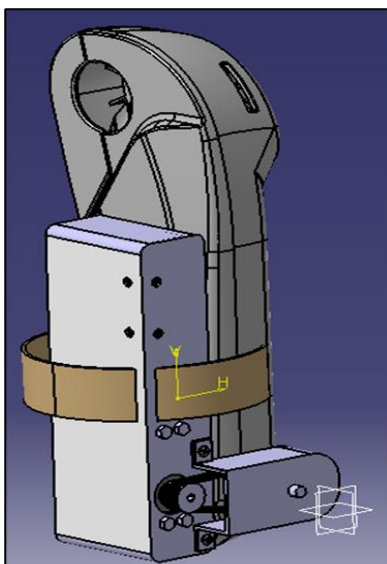
Μετά την επιλογή των κατάλληλων εξαρτημάτων, το επόμενο βήμα στη διαδικασία σχεδίασης περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός μοντέλου 3D του συστήματος χρησιμοποιώντας λογισμικό CAD. Το εξωτερικό κέλυφος λειτουργεί ως προστατευτικό περίβλημα για το σύστημα, περικλείοντας όλα τα εξαρτήματα όπως ο ηλεκτροκινητήρας, ο μικροελεγκτής και οι μπαταρίες. Το εξωτερικό κέλυφος έχει ορθογώνιο σχήμα και διαθέτει πολλές οπές και υποδοχές για τη συναρμολόγηση των διάφορων εξαρτημάτων του συστήματος. Για να αντέξει τις σημαντικές δυνάμεις που ασκούνται από τον ηλεκτροκινητήρα, το εξωτερικό περίβλημα έχει πάχος 1,5mm. Επίσης υπάρχει μια επέκταση του εξωτερικού περιβλήματος, η οποία ονομάζεται επιπρόσθετο κέλυφος. Το επιπρόσθετο κέλυφος χρησιμοποιείται για να παρέχει υποστήριξη στον άξονα που είναι υπεύθυνος για τον περιστροφή του διακόπτη του εξωσκελετού, και έχει πάχος 2mm. Και τα δύο μέρη θα παραχθούν χρησιμοποιώντας έναν 3D εκτυπωτή.

Ο ηλεκτροκινητήρας στερεώνεται στο εξωτερικό κέλυφος χρησιμοποιώντας τέσσερα μπουλόνια M4 και δώδεκα παξιμάδια M4. Οι επιφάνειες στήριξης του ηλεκτροκινητήρα έχουν τρύπες μέσα από τις οποίες περνούν οι μπουλόνια. Δύο παξιμάδια χρησιμοποιούνται σε κάθε επιφάνεια στήριξης για να στερεωθούν τα μπουλόνια στο εξωτερικό κέλυφος, ενώ ένα άλλο παξιμάδι χρησιμοποιείται για να κρατήσει τον ηλεκτροκινητήρα στη θέση του. Επιπλέον, ο ηλεκτροκινητήρας συνδέεται με τη μικρή τροχαλία μέσω ενός βιδώματος που βρίσκεται στην κορυφή του ηλεκτροκινητήρα. Το θηλυκό μέρος της τροχαλίας έχει σχεδιαστεί για να ταιριάζει στο αρσενικό μέρος του ηλεκτροκινητήρα.

Το επιπρόσθετο κέλυφος συνδέεται με το εξωτερικό κέλυφος χρησιμοποιώντας δύο βίδες M3 Philips και τέσσερα παξιμάδια M3, με δύο παξιμάδια τοποθετημένα σε κάθε βίδα. Εκτός από τον ηλεκτροκινητήρα, ο μικροελεγκτής και η μπαταρία τοποθετούνται μέσα στο εξωτερικό κέλυφος. Η πλακέτα NodeMCU τοποθετείται στο κέντρο του εξωτερικού περιβλήματος και εισέρχεται σε ένα mini breadboard, επιτρέποντας τη δημιουργία ημιμόνιμων πρωτότυπων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Η μπαταρία τοποθετείται επίσης στην αριστερή πλευρά του εξωτερικού περιβλήματος και κοντά στον μικροελεγκτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Τα τελικά σχέδια απεικονίζονται στο Σχήμα 6.

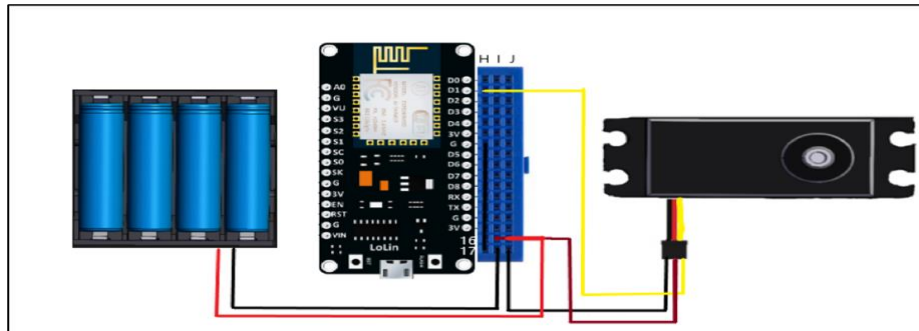


Σχήμα 5: Εσωτερική άποψη του συστήματος.



Σχήμα 6: Τα τελικά σχέδια του συστήματος πάνω στον εξωσκελετό.

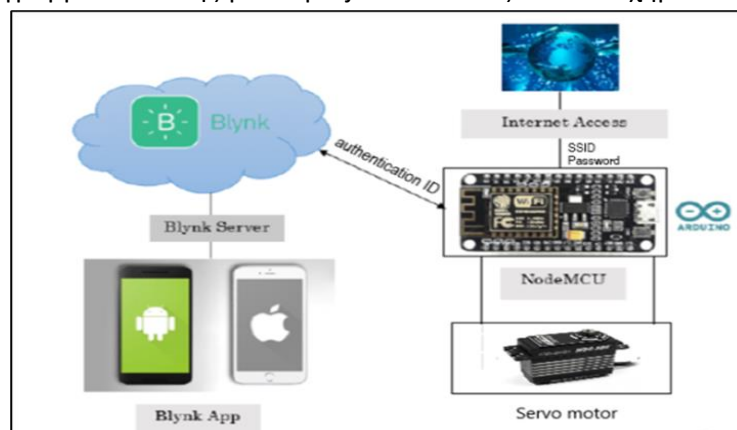
Ένα σχηματικό διάγραμμα είναι μια οπτική αναπαράσταση σε δύο διαστάσεις που απεικονίζει τη λειτουργικότητα και την αλληλεπίδραση των ηλεκτρικών συστατικών ενός κυκλώματος. Σε αυτήν την περίπτωση, τα στοιχεία που πρέπει να συνδεθούν ηλεκτρικά είναι ο ηλεκτροκινητήρας, ο μικροελεγκτής και η μπαταρία. Η μπαταρία διαθέτει δύο ακάλυπτα καλώδια: ένα κόκκινο καλώδιο που υποδεικνύει τη θετική (+) τάση ή την Vcc και ένα μαύρο καλώδιο που υποδεικνύει την αρνητική (-) τάση ή τη γείωση. Το κόκκινο καλώδιο της μπαταρίας συνδέεται με το καλώδιο τροφοδοσίας (PWR) του ηλεκτροκινητήρα, ενώ το μαύρο καλώδιο της μπαταρίας συνδέεται με το καλώδιο γείωσης (GND) του ηλεκτροκινητήρα. Επιπλέον, ο ακροδέκτης γείωσης του μικροελεγκτή πρέπει να συνδεθεί με το μαύρο καλώδιο γείωσης του ηλεκτροκινητήρα. Τέλος, το καλώδιο σήματος (SGL) πρέπει να συνδεθεί με ένα ακροδέκτη PWM στον μικροελεγκτή. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όλοι οι ακροδέκτες ψηφιακής εισόδου/εξόδου του NodeMCU μπορούν να λειτουργήσουν ως έξοδοι σήματος PWM. Σε αυτήν τη συγκεκριμένη περίπτωση, ο ακροδέκτης D1 του NodeMCU συνδέεται με το καλώδιο σήματος του ηλεκτροκινητήρα. Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Οπτική αναπαράσταση του σχηματικού διαγράμματος.

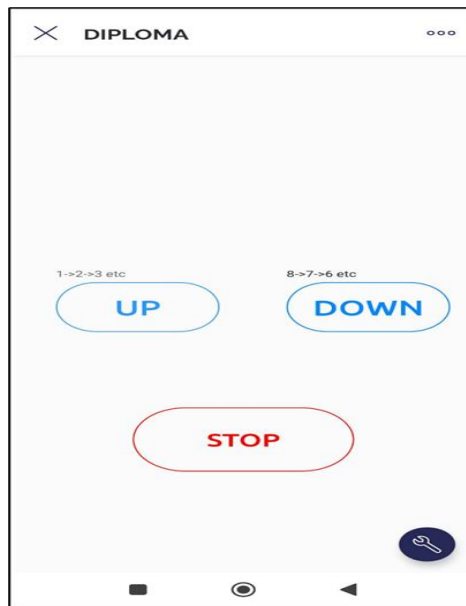
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το Blynk είναι μια πλατφόρμα Internet of Things (IoT) σχεδιασμένη για iOS ή Android smartphones. Επιτρέπει στους χρήστες να ελέγχουν απομακρυσμένα συσκευές όπως Arduino, Raspberry Pi και NodeMCU. Με τη συγγραφή και τη ρύθμιση των κατάλληλων ρυθμίσεων στα διαθέσιμα widgets, αυτή η εφαρμογή επιτρέπει τη δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος ή διεπαφής ανθρώπου-μηχανής (HMI). Η πλατφόρμα αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: 1) τον διακομιστή Blynk, υπεύθυνο για τη διευκόλυνση της επικοινωνίας μεταξύ του smartphone και του υλικού, 2) τις βιβλιοθήκες Blynk, οι οποίες επιτρέπουν την επικοινωνία με το διακομιστή και προσφέρουν μια σειρά από widgets για τον έλεγχο, την εμφάνιση και τη διαχείριση λειτουργιών που σχετίζονται με τον χρόνο και 3) την εφαρμογή Blynk, η οποία επιτρέπει στους χρήστες να σχεδιάζουν εντυπωσιακές διεπαφές χρησιμοποιώντας διάφορα widgets. Το NodeMCU θα προγραμματιστεί χρησιμοποιώντας το Arduino IDE με την περιλαμβανόμενη ταυτότητα του SSID (Service Set Identifier) και τον κωδικό πρόσβασης του ασύρματου δικτύου Wi-Fi. Στη συνέχεια, η εφαρμογή Blynk θα εγκαθιστά μια σύνδεση με το NodeMCU χρησιμοποιώντας το αναγνωριστικό ελέγχου του project. Το διάγραμμα σύνδεσης για το project απεικονίζεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 8: Το διάγραμμα σύνδεσης του project.

Το Σχήμα 10 απεικονίζει τη διεπαφή που δημιουργήθηκε στην εφαρμογή Blynk IoT για τον έλεγχο του συστήματος από τον χρήστη.



Σχήμα 9: Διεπαφή ελέγχου του συστήματος από το χρήστη μέσω του κινητού του τηλεφώνου.

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός σκίτσου Blynk Arduino και τη μεταφόρτωσή του στο ESP8266 NodeMCU. Ένα σκίτσο Blynk Arduino είναι ένα πρόγραμμα που γράφεται στη γλώσσα προγραμματισμού Arduino και χρησιμοποιεί την πλατφόρμα Blynk IoT για τον απομακρυσμένο έλεγχο του σερβοκινητήρα μέσω της διεπαφής που δημιουργήθηκε προηγουμένως.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

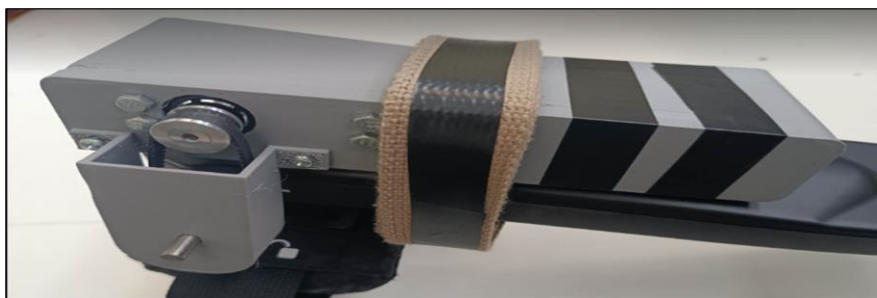
Το εξωτερικό και το επιπρόσθετο κέλυφος θα τυπωθούν χρησιμοποιώντας τον 3D εκτυπωτή Creality Ender 3 Pro. Γενικά, ο Creality Ender 3 Pro είναι γνωστός για το ότι είναι ένας προσιτός 3D εκτυπωτής. Επιπλέον, το υλικό που χρησιμοποιείται για τον 3D εκτυπωτή είναι το Novus PLA Grey. Το PLA (Polylactic Acid) είναι γνωστό για την ευκολία χρήσης του, την φιλικότητα προς το περιβάλλον, την ευελιξία του.

Το επόμενο βήμα στην κατασκευή του συστήματος περιλαμβάνει τη συναρμολόγηση των μεμονωμένων εξαρτημάτων στο εξωτερικό κέλυφος. Η συναρμολόγηση των εξαρτημάτων πρέπει να γίνει με συγκεκριμένη σειρά. Πρώτα, το επιπρόσθετο κέλυφος πρέπει να συναρμολογηθεί με το εξωτερικό κέλυφος, και στη συνέχεια ο κινητήρας πρέπει να τοποθετηθεί στη θέση του. Έπειτα, θα γίνει η εγκατάσταση του πακέτου μπαταριών και του μικροελεγκτή.

Το πακέτο μπαταριών του συστήματος θα εγκατασταθεί χρησιμοποιώντας μια κολλητική ταινία. Συγκεκριμένα, η κολλητική ταινία θα τυλιχθεί γύρω από το εξωτερικό κέλυφος, στερεώνοντας το πακέτο μπαταριών. Το τελικό βήμα είναι η συναρμολόγηση του μικροελεγκτή μέσα στο εξωτερικό κέλυφος, ολοκληρώνοντας τη διαδικασία συναρμολόγησης. Ο μικροελεγκτής πρέπει να συνδέεται ηλεκτρικά με τις μπαταρίες και το σερβοκινητήρα. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται καλώδια jumper μήκους 15 εκατοστών. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, τα κόκκινα καλώδια χρησιμοποιήθηκαν για την τροφοδοσία, τα μαύρα ή μπλε καλώδια για τη γείωση και το κίτρινο καλώδιο για το σήμα. Στη συνέχεια, ο μικροελεγκτής και το breadboard τοποθετούνται

στο εξωτερικό κέλυφος. Δεν απαιτείται πρόσθετη συναρμολόγηση, καθώς ο συμπαγής σχεδιασμός του εξωτερικού κελύφους και η παρουσία των καλωδίων εμποδίζουν τον μικροελεγκτή από το να αποχωρίζεται από τη θέση του. Αφού ολοκληρωθεί η συναρμολόγηση των διαφόρων εξαρτημάτων στο εξωτερικό κέλυφος, το σύστημα θα συναρμολογηθεί στον εξωσκελετό. Αυτό θα επιτευχθεί με τη βοήθεια της βίδας του εξωσκελετού και του ιμάντα πρόσδεσης. Αρχικά η βίδα του εξωσκελετού δημιουργείται χρησιμοποιώντας ένα κλειδί Allen 6mm. Το κλειδί Allen έχει τροποποιηθεί σε έναν τόρνο ώστε να μπορεί να εισαχθεί σε αυτό η μεγάλη τροχαλία. Ακολούθως, η βίδα του εξωσκελετού και η τροχαλία τοποθετούνται στον διακόπτη του εξωσκελετού. Στη συνέχεια, το σύστημα τοποθετείται στον βραχίονα του εξωσκελετού έτσι ώστε ο άξονας της βίδας του εξωσκελετού να περνά μέσα από την τρύπα του επιπρόσθετου κελύφους. Ο ιμάντας χρονισμού που χρησιμοποιείται έχει μήκος 158mm.

Επιπλέον, η ζώνη πρόσδεσης του συστήματος με τον εξωσκελετό πρέπει να τοποθετηθεί μέσα από τα καθορισμένα σημεία στερέωσης στο εξωσκελετό. Υπάρχουν δύο τρόποι για να γίνει αυτό. Μπορεί είτε να περάσει μέσω του σημείου στερέωσης που βρίσκεται στην επάνω πλευρά του κελύφους είτε μέσω του σημείου στερέωσης στην πλαϊνή πλευρά. Σε αυτήν την περίπτωση, η επιλογή γίνεται να χρησιμοποιηθεί το σημείο στερέωσης που βρίσκεται στο πάνω μέρος του εξωτερικού κελύφους. Τα Σχήματα 11 και 12 απεικονίζουν το τελικό συναρμολογημένο σύστημα στον εξωσκελετό από την μπροστινή και την πίσω πλευρά, αντίστοιχα.



Σχήμα 10: Μπροστά όψη του συναρμολογημένου συστήματος.

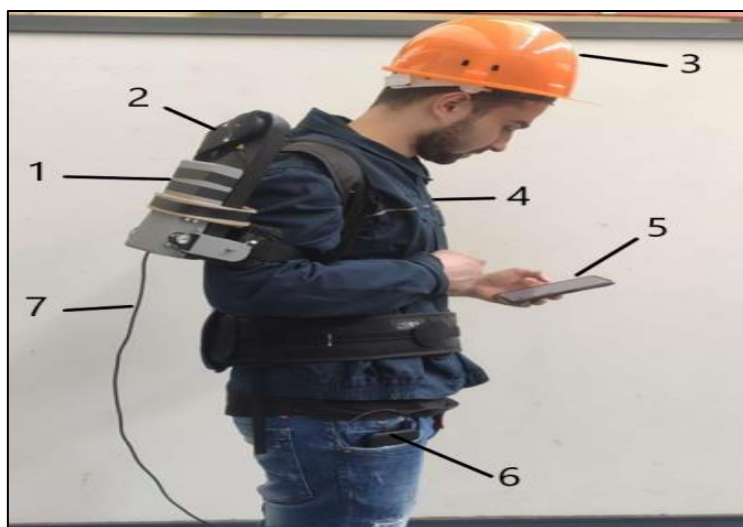


Σχήμα 11: Πίσω όψη του συναρμολογημένου συστήματος.

Η δοκιμή του μηχανοτρονικού συστήματος είναι ένα απαραίτητο βήμα για τη διασφάλιση της λειτουργικότητάς, της αξιοπιστίας και της απόδοσής του. Για να εξεταστεί η λειτουργικότητα του συστήματος, ο εξωσκελετός πρέπει να φορεθεί από έναν χειριστή.

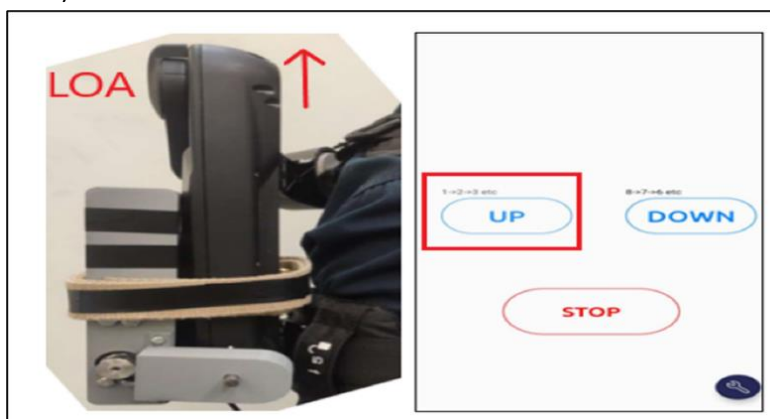
Συνήθως, άτομα που χρησιμοποιούν τέτοιες συσκευές είναι βιομηχανικοί εργάτες. Για αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιείται μια ειδική στολή μηχανουργείου και ένα προστατευτικό κράνος.

Ο χειριστής, κρατώντας το smartphone, ανοίγει την εφαρμογή Blynk και πλοηγείται στο project που έχει δημιουργήσει. Έπειτα, βεβαιώνεται ότι υπάρχει παροχή ισχύος για τον μικροελεγκτή. Συνήθως, χρησιμοποιείται ένας φορητός υπολογιστής για την παροχή ισχύος και τον προγραμματισμό του NodeMCU. Ωστόσο, σε αυτήν τη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι επιθυμητό το σύστημα να είναι φορητό. Επομένως, θα χρησιμοποιηθεί μια φορητή μπαταρία (power bank) ως πηγή τροφοδοσίας. Ο μικροελεγκτής συνδέεται με το power bank χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο τύπου B, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 12: 1) Μηχανοτρονικό σύστημα. 2) Εξωσκελετός. 3) Προστατευτικό κράνος. 4) Στολή μηχανουργείου. 5) Κινητό τηλέφωνο. 6) Φορητή μπαταρία. 7) Καλώδιο τύπου B.

Μετά τη σωστή σύνδεση όλων των εξαρτημάτων μεταξύ τους, είναι η στιγμή να θέσουμε το σύστημα σε λειτουργία. Έτσι, πατώντας το κουμπί UP/DOWN στο γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής Blynk, το επίπεδο υποστήριξης του εξωσκελετού αυξάνεται/μειώνεται κατά μία μονάδα (Σχήμα 14).



Σχήμα 13: Το σύστημα τίθεται σε λειτουργία.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ένα μηχανοτρονικό σύστημα για την αυτόματη προσαρμογή του επιπέδου υποστήριξης του εξωσκελετού MATE-XT σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με επιτυχία σε αυτή την εργασία. Επιπλέον, αναπτύχθηκε μια εφαρμογή με τη χρήση της εφαρμογής Blynk για τον

έλεγχου του σερβοκινητήρα και ο κώδικας για το σύστημα γράφτηκε στο περιβάλλον προγραμματισμού Arduino IDE. Μια άλλη κρίσιμη σχεδιαστική απαίτηση που ικανοποιήθηκε ήταν η δυνατότητα του συστήματος να αποσυναρμολογείται εύκολα από τον εξωσκελετό. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση ενός ιμάντα πρόσδεσης.

Υπάρχουν πολλές δυνατότητες για την επέκταση αυτής της εργασίας προκειμένου να βελτιωθεί ή να αναπτυχθεί περαιτέρω το μηχανοτρονικό σύστημα που κατασκευάστηκε. Αρχικά, μπορεί να γίνει η ενσωμάτωση ενός Συστήματος Διαχείρισης Μπαταρίας (BMS) στον σχεδιασμό. Το BMS είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα που παρακολουθεί και ελέγχει τη φόρτιση, την εκφόρτιση και τη συνολική λειτουργία ενός πακέτου μπαταριών. Βεβαιώνει την ασφάλεια και αποδοτική λειτουργία των μπαταριών, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής τους και αποτρέποντας οποιοδήποτε δυνητικό κίνδυνο ή ζημιά.

Επιπλέον, μπορούν να γίνουν διάφορες τροποποιήσεις στα κατασκευαστικά σχέδια των εξαρτημάτων του συστήματος. Ειδικότερα, μπορεί να γίνει ένας πιο ακριβής σχεδιασμός του εξωτερικού και του επιπρόσθετου κελύφους για να διευκολυνθεί ακόμα περισσότερο η συναρμολόγηση των εξαρτημάτων. Επιπλέον, ο σχεδιασμός θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί για να μειωθεί περαιτέρω ο χώρος και το βάρος του συστήματος μειώνοντας τις διαστάσεις του. Ιδανικά, θα πρέπει να ενσωματωθεί στον εξωσκελετό, αντικαθιστώντας τον βραχίονα του εξωσκελετού με ένα εξάρτημα που περιέχει το μηχανοτρονικό σύστημα. Επιπλέον, οι μπαταρίες μπορούν να αντικατασταθούν με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες μικρότερου μεγέθους.

Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα έξυπνο σύστημα τεχνητής νοημοσύνης (AI) για να παρατηρεί τον χρήστη είτε οπτικά μέσω μιας κάμερας είτε μέσω αισθητήρων στο σώμα τους και να καθορίζει το επίπεδο κόπωσης που αισθάνεται πραγματικά κατά τη διάρκεια κάθε εκτελούμενης εργασίας. Οι ρυθμίσεις του εξωσκελετού σε σχέση με την ρύθμιση του επιπέδου υποστήριξης θα μπορούσαν να προσαρμόζονται αυτόματα χωρίς να απαιτείται η παρέμβαση του ανθρώπου.