

Περίληψη

Αρχικά γίνεται προσπάθεια για την περιγραφή ενός συστήματος ηλεκτρονικά ελεγχόμενης διεύθυνσης με έμφαση στις προδιαγραφές που πρέπει να πληροί. Αναλύεται το θεωρητικό κομμάτι της μελέτης και του σχεδιασμού του συστήματος προκειμένου να γίνει η κατασκευή. Παράλληλα περιγράφεται η λειτουργία τόσο των επιμέρους εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται όσο και των ηλεκτρονικών μονάδων ελέγχου αυτών. Με βάση αυτή τη μελέτη προκύπτει η σχεδίαση και η κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος που βρίσκεται εφαρμογή σε τρίκυκλο όχημα. Περιγράφονται οι διαδικασίες μελέτης και σχεδίασης του συστήματος καθώς και κατασκευαστικές λεπτομέρειες των εξαρτημάτων που τοποθετήθηκαν. Ακόμα αναλύονται και κάποια λάθη που προέκυψαν από αυτή την προσπάθεια προκειμένου να φτάσουμε σε ένα αποδεκτό αποτέλεσμα. Τέλος βλέπουμε τη δυσκολία κατασκευής τέτοιων συστημάτων, καθώς η λειτουργία τους απαιτεί περίπλοκες δομές ελέγχου.

Abstract

Firstly, an attempt is made to describe an electronically-controlled steering system, with an emphasis on the specifications it should fulfill. The theoretical part of the system study and design is analyzed in order to proceed with the construction. At the same time, the function of the spare parts that are used, as well as their electronic control units, are described. Based on that study, the design and construction of such a system results, and is applied to a tad-pole tricycle. The system study and design procedures are described, along with the manufacturing details of the mounted parts. Furthermore, some errors that occurred in this attempt are analyzed, before an acceptable result was obtained. Finally, we realize the difficulty in developing such systems, as their function requires complicated control structures.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
1 Εισαγωγή.....	4
2 Το σύστημα Steer by Wire	5
2.1 Συνοπτικά εξαρτήματα συστήματος Steer by wire	6
2.2 Εφαρμογή του συστήματος Steer by Wire στα οχήματα και περιγραφή επιμέρους συστημ	6
2.2.1 Έλεγχος κατεύθυνσης και συγχρονισμός των τροχών.	7
2.2.2 Προσαρμοζόμενη, μεταβαλλόμενη αίσθηση οδήγησης.	7
2.2.3 Ρυθμιζόμενη δυνατότητα επιστροφής τιμονιού στη θέση 0 (κέντρο).	7
2.2.4 Μεταβλητός λόγος διεύθυνσης.	8
2.2.4.1 Ο μηχανισμός στους τροχούς.	9
2.2.4.2 Ο μηχανισμός τιμονιού.....	10
2.3 Ασφάλεια συστήματος Steer by Wire και εφεδρεία.....	10
2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του συστήματος Steer by Wire.	11
2.5 Πρωτόκολλο επικοινωνίας σε ένα σύστημα steer by wire.	12
2.6 Μελέτη του συστήματος Steer by Wire κατά την οδήγηση με σκοπό την ανάπτυξη «λογισμικού αλληλεπίδρασης».	13
2.6.1 Αίσθηση ροπής του τιμονιού και οδήγησης.....	13
2.6.2 Παρακολούθηση της γωνίας των τροχών.....	17
2.6.3 Ενεργή επιστροφή τιμονιού.....	19
2.6.4 Ροπή ανάδρασης του συστήματος τροχών	21
2.6.5 Μεταβλητός λόγος διεύθυνσης	24
2.6.6 Δομή ελέγχου του συστήματος Steer by Wire	25
3 Μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή του συστήματος steer by wire σε τρίκυκλο ποδήλατο.	27
3.1 Μελέτη και σχεδίαση συστήματος steer by wire στο τρίκυκλο	28
3.1.1 Μελέτη για την μετατροπή του υπάρχοντος συστήματος διεύθυνσης.....	28
3.1.2 Μελέτη του συστήματος για την επιλογή ηλεκτροκινητήρα	29
3.1.3 Μελέτη τοποθέτησης ηλεκτροκινητήρα και σχεδιασμός επιμέρους εξαρτημάτων	33
3.1.4 Μελέτη για το υποσύστημα ελέγχου (υλικολογισμικό)	34
3.1.5 Μελέτη τροφοδοσίας του συστήματος.....	40
3.1.6 Προδιαγραφές λειτουργίας του συστήματος και προγραμματισμός	42
3.2 Κατασκευή συστήματος steer by wire.	42
3.2.1 Κατασκευή γραναζιών και βάση ηλεκτροκινητήρα.....	43
3.2.2 Τοποθέτηση γραναζιών και βάσης του ηλεκτροκινητήρα στο τρίκυκλο	44

3.2.3	Κατασκευή βάσεων για την τοποθέτηση των αισθητήρων	47
3.2.4	Συνδεσμολογία των ηλεκτρικών εξαρτημάτων του συστήματος Steer by Wire.....	48
3.2.5	Κατασκευή πλαισίου για την τοποθέτηση των ηλεκτρικών εξαρτημάτων στο τρίκυκλο	49
3.2.6	Κατασκευή μηχανισμού ελατηρίων για την επιστροφή του τιμονιού στο κέντρο	50
3.2.7	Ανάπτυξη προγραμματισμού για την λειτουργία του συστήματος Steer by Wire	52
3.3	Υπολογισμός κόστους κατασκευής του συστήματος Steer by Wire.....	56
	Συμπεράσματα.....	57
	Βιβλιογραφία.....	58

1 Εισαγωγή

Η επιλογή του αντικειμένου της παρούσας πτυχιακής εργασίας, προέκυψε έπειτα από σχετική παρότρυνση του καθηγητή Δρ Κοσμάνη, με τον οποίο βρέθηκα στην ευχάριστη θέση να συνεργαστώ κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Το αντικείμενο μελέτης που εξετάζουμε και αναλύουμε κινείται γύρω από ένα ηλεκτρονικό σύστημα διεύθυνσης, τόσο στο θεωρητικό σκέλος όσο και στο πρακτικό. Από τα πρώτα κίολας στάδια της μελέτης της κατασκευής συναντήσαμε ποικίλης φύσεως προβλήματα. Μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης των προβλημάτων μπορεί να γίνει ως εξής: οι πιθανοί τρόποι διάταξης του συστήματος, η πολυπλοκότητα σχεδιασμού ελέγχου του συστήματος, και προβλήματα σχετικά με ακρίβεια κατασκευής και ανοχές. Υπήρξαν αρκετές ανεπιτυχείς προσπάθειες για την επίτευξη ενός αποδεκτού αποτελέσματος όσον αφορά το σχεδιασμό και την κατευθυντικότητα του συστήματος, αλλά με τη βοήθεια του καθηγητή και αρκετή μελέτη παρόμοιων συστημάτων, οδηγηθήκαμε εν τέλει στα επιθυμητά αποτελέσματα.

Σε γνωσιακό επίπεδο, η εργασία απαιτούσε τόσο ικανότητα προγραμματισμού όσο και δυνατότητα κατασκευής εξαρτημάτων που θα ήταν απαραίτητα για την επίτευξη της ηλεκτρονικά ελεγχόμενης διεύθυνσης. Η υλοποίηση της ιδέας αποδείχτηκε στην πράξη δυσκολότερη από το αρχικώς αναμενόμενο, καθώς δεν υπήρχε η κατάλληλη τεχνογνωσία για την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων. Αυτή η έλλειψη τεχνογνωσίας εξηγείται σε απόλυτο βαθμό από το γεγονός ότι το εν λόγω σύστημα δεν έχει ακόμα υιοθετηθεί από τις αυτοκινητοβιομηχανίες, πράγμα το οποίο επηρέασε αναπόφευκτα και τη μεγάλη δυσκολία εύρεσης υλικού.

2 Το σύστημα Steer by Wire

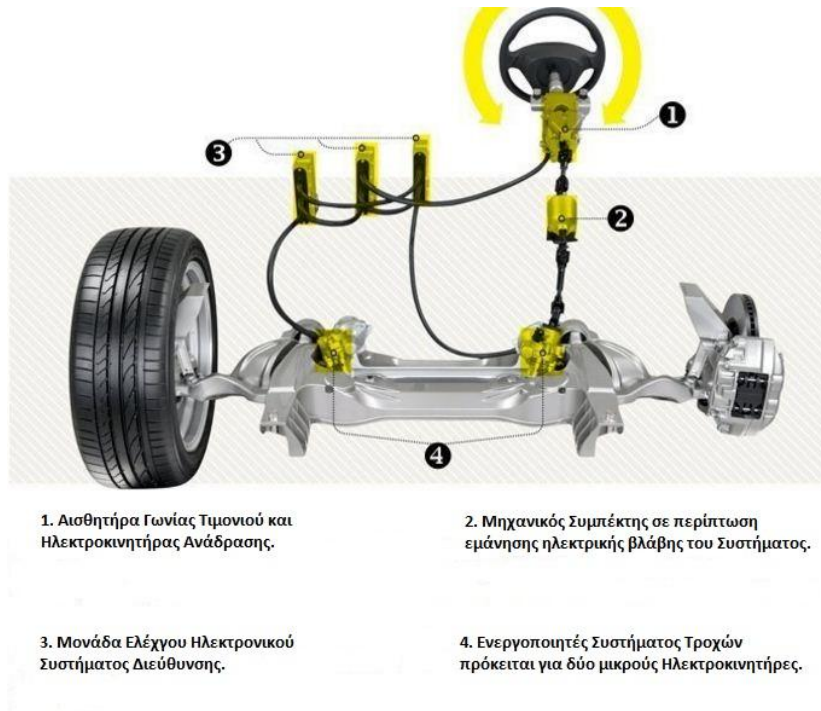
Τα ενσωματωμένα συστήματα ηλεκτρονικών και ειδικότερα τα ενσωματωμένα κυκλώματα υλικολογισμικού, αυξάνονται πολύ γρήγορα και κατακτούν την αγορά ολοένα και περισσότερο όπου και αντικαθιστούν πλέον τα μηχανικά και υδραυλικά εξαρτήματα των διάφορων εφαρμογών. Ο λόγος για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας είναι τόσο τεχνικός όσο και οικονομικός. Από την μία το κόστος των εξαρτημάτων μειώνεται καθώς αυξάνεται η ασφάλεια και η αξιοπιστία τους. Από την άλλη, η τεχνολογία αυτή διευκολύνει την εισαγωγή νέων λειτουργιών των οποίων η ανάπτυξη θα ήταν δαπανηρή ή ακόμη και αδύνατη αν χρησιμοποιείτο ξεχωριστά μηχανικά ή υδραυλικά συστήματα. Γενικά τα “x by wire” συστήματα εφαρμόζονται πάνω στα νέα οχήματα όλο και περισσότερο όπως για παράδειγμα: η ηλεκτρική πεταλούδα γκαζιού, το ηλεκτρικό χειρόφρενο κ.α. Τέλος αυτή η τάση “x by wire” έχει ως αποτέλεσμα, την αντικατάσταση των μηχανικών και υδραυλικών εξαρτημάτων, κυρίως στην βιομηχανία του οχήματος, από πλήρως ηλεκτρονικά συστήματα.

Αρχικά για να μπορέσουμε να μιλήσουμε για το steer by wire πρέπει να περιγράψουμε την λειτουργία του συστήματος διεύθυνσης στην γενική του μορφή. Το συμβατικό σύστημα διεύθυνσης είναι απλό στην μορφή του και η χρήση του είναι να δίνει στον οδηγό την δυνατότητα να αλλάζει την κατεύθυνση του οχήματος μέσω του τιμονιού με επαυξημένη ροπή στους τροχούς λόγω κάποιας σχέσης μετάδοσης πινιόν – κορώνας και όλο αυτό με μηχανική σύμπλεξη του συστήματος. Έτσι με αυτόν τον τρόπο ο οδηγός ελέγχει την κατεύθυνση του οχήματος σύμφωνα με την βούλησή του.

Να τονίσουμε παράλληλα πως σε ένα όχημα στο σύστημα steer by wire θα έχουμε εμπλοκή και μηχανικού εξοπλισμού παράλληλα με το ηλεκτρικό, και αυτό για την αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος σε περίπτωση βλάβης των ηλεκτρικών μερών, παραδείγματος χάριν σε ένα αεροπλάνο η κίνηση των πτερυγίων των φτερών γίνεται με υδραυλικό σύστημα, αλλά παρόλα αυτά έχουμε και μηχανικό εξοπλισμό σε περίπτωση αστοχίας του πρώτου. Σχετικά με το σύστημα, το πρώτο βασικό πλεονέκτημα έγκειται στον μειωμένο κίνδυνο να εισέλθει η κολώνα τιμονιού στο θάλαμο οδήγησης σε περίπτωση μετωπικής σύγκρουσης. Επιπλέον, ο μεταβλητός λόγος διεύθυνσης της κολώνας τιμονιού προσφέρει αυξημένη άνεση στον οδηγό, δηλαδή αυτή η λειτουργία ενεργοποιεί ανάλογα με τις συνθήκες οδήγησης κάθε φορά την διαφορετική γωνία περιστροφής του τιμονιού, με τους τροχούς του συστήματος διεύθυνσης, για παράδειγμα κατά το παρκάρισμα ή την οδήγηση μέσα στη πόλη, αυτός ο λόγος θα είναι μικρότερος έτσι ώστε να μικραίνει και η περιστροφή στο τιμόνι που απαιτείται από τον οδηγό. Τέλος, τα εξαρτήματα του συστήματος διεύθυνσης είναι από τα πιο βαριά εξαρτήματα πάνω στο όχημα. Έτσι αφαιρώντας τα και αν στην θέση τους τοποθετήσουμε ένα ηλεκτρονικό σύστημα μειώνουμε το συνολικό βάρος του οχήματος που αποσκοπεί σε μειωμένη κατανάλωση καυσίμου αλλά και λιγότερες εκπομπές ρύπων στο περιβάλλον.

2.1 Συνοπτικά εξαρτήματα συστήματος Steer by wire

Τα κυριότερα εξαρτήματα του συστήματος steer by wire αναλύονται παρακάτω:



Σχήμα 1 Απεικόνιση των σημαντικότερων εξαρτημάτων του συστήματος steer by wire σε όχημα της Nissan (Infiniti). [7]

- 1) Τιμόνι
- 2) Αισθητήρας γωνίας και ηλεκτροκινητήρας ανάδρασης
- 3) Μηχανικός συμπλέκτης σε περίπτωση βλάβης του συστήματος
- 4) Μονάδες ελέγχου και επεξεργασίας δεδομένων
- 5) Ηλεκτροκινητήρες ενσωματωμένοι στο σύστημα διεύθυνσης

Συνοπτικά ο αισθητήρας γωνίας καταγράφει την πρόθεση του οδηγού για συγκεκριμένη στροφή και μέσω της μονάδας ελέγχου επενεργεί στους ηλεκτροκινητήρες οι οποίοι αναλαμβάνουν την κατεύθυνση των τροχών. Επίσης στο τιμόνι υπάρχει ένας ηλεκτροκινητήρας ανάδρασης ο οποίος αναλαμβάνει την αίσθηση ενός σκληρού τιμονιού στην πορεία ευθείας. Τέλος υπάρχει και ο μηχανικός συμπλέκτης που μπαίνει σε λειτουργία όταν το σύστημα παρουσιάσει δυσλειτουργία ή χαλάσει κάποιο ηλεκτρικό εξάρτημα.

2.2 Εφαρμογή του συστήματος Steer by Wire στα οχήματα και περιγραφή επιμέρους συστημάτων

Σε ένα σύστημα steer by wire όπως αναφέραμε δεν υπάρχουν μηχανικές συνδέσεις μεταξύ του τιμονιού και του συστήματος διεύθυνσης, δηλαδή κατά την διάρκεια λειτουργίας του οχήματος το τιμόνι είναι αποσυνδεδεμένο από τον μηχανισμό διεύθυνσης. Παρά το γεγονός

αυτό που δεν υπάρχει μηχανική σύνδεση, αναμένεται από το σύστημα steer by wire όχι μόνο να λειτουργήσει σαν το συμβατικό σύστημα αλλά και να παρέχει στον οδηγό μια πιο προηγμένη λειτουργία διεύθυνσης.

Επομένως υπάρχουν πολλές βασικές απαιτήσεις, στο πώς θα λειτουργήσει το σύστημα διεύθυνσης, σε ένα σύστημα steer by wire. Παρακάτω θα αναλύσουμε λεπτομερώς αυτές τις απαιτήσεις και τις λειτουργίες σε ένα τέτοιο σύστημα.

2.2.1 Έλεγχος κατεύθυνσης και συγχρονισμός των τροχών.

Αρχικά σε ένα σύστημα steer by wire ο κατευθυντικός έλεγχος του οχήματος είναι η βασικότερη απαίτηση. Δηλαδή, η απαίτηση αυτή αφορά τους τροχούς οι οποίοι θα πρέπει να ακολουθούν την εντολή που έχει δώσει ο οδηγός σαν είσοδο από το τιμόνι (κατά πόσο να στρίψει ή να παραμείνει σε ευθεία το όχημα), μέσω του συστήματος διεύθυνσης αλλά και την εποπτεία από το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου και την δυναμική συμπεριφορά του εκάστοτε οχήματος. Οι τροχοί θα πρέπει να διατηρούν συγχρονισμό με το τιμόνι σε πραγματικό χρόνο, χωρίς κλίση, αντιστάθμιση και χρονοκαθυστέρηση.

2.2.2 Προσαρμοζόμενη, μεταβαλλόμενη αίσθηση οδήγησης.

Η αίσθηση του τιμονιού παρέχει πληροφορίες για την δύναμη ή την ροπή που αναπτύσσεται από τις ρόδες στο τιμόνι καθώς είναι σε επαφή με το οδόστρωμα και αυτές μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την κατάσταση του οδοστρώματος. Αυτή η πληροφορία πρέπει να επιστραφεί πίσω στο τιμόνι στον οδηγό και να την αναπαράγει ώστε να γίνει αισθητή από αυτόν για να διατηρήσει τον έλεγχο του οχήματος. Επομένως η αίσθηση οδήγησης είναι από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του οχήματος, για την διατήρηση του κατευθυντικού ελέγχου και της σταθερότητας του οχήματος. Τέλος σε ένα σύστημα steer by wire δεν είναι μόνο απαραίτητο να αναπαράγεται αυτή η αίσθηση οδήγησης όπως σε ένα σύστημα διεύθυνσης με μηχανική σύνδεση αλλά και την προσαρμοζόμενη ή μεταβαλλόμενη αίσθηση του τιμονιού από τις ρόδες.

2.2.3 Ρυθμιζόμενη δυνατότητα επιστροφής τιμονιού στη θέση 0 (κέντρο).

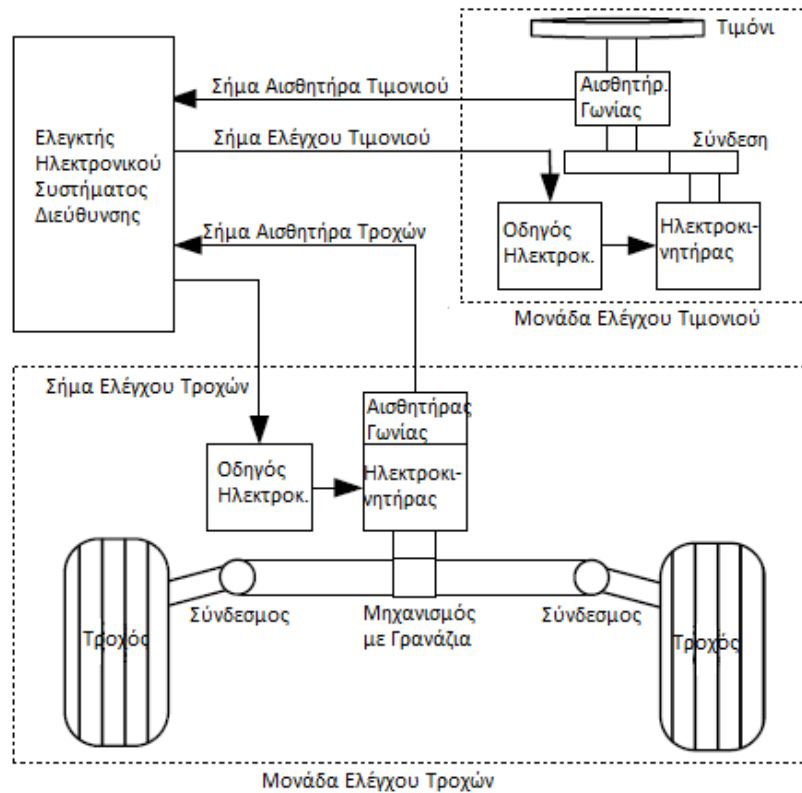
Το τιμόνι σε αυτήν περίπτωση θα πρέπει να επιστρέψει αυτόματα στο κέντρο όπως και οι ρόδες όταν ο οδηγός αφήσει το τιμόνι μετά από μία στροφή. Το τιμόνι θα ρυθμιστεί με βάση την ταχύτητα του οχήματος. Δηλαδή αλλιώς μετά από μία μεγάλη στροφή και πολύ μικρή ταχύτητα και διαφορετικά μία μικρή στροφή με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Στα συμβατικά συστήματα διεύθυνσης γίνετε αισθητή αυτή η αυτόματη επαναφορά του τιμονιού μετά από τη έξοδο της στροφής.

2.2.4 Μεταβλητός λόγος διεύθυνσης.

Ο λόγος διεύθυνσης είναι ο λόγος μεταξύ της γωνίας τιμονιού και των τροχών. Σε ένα μηχανικό σύστημα διεύθυνσης είναι σταθερό και περίπου 16 : 1. Σε περίπτωση μεταβλητού λόγου διεύθυνσης πετυχαίνουμε βελτίωση της απόδοσης στο κράτημα αλλά και την δυναμική συμπεριφορά του οχήματος.

Ο στόχος του συστήματος steer by wire είναι να εφαρμοστούν οι προαναφερόμενες λειτουργίες διεύθυνσης. Όλα αυτά τα μηχανικά “προβλήματα” για κανονική και προηγμένη λειτουργία του συστήματος διεύθυνσης πρέπει να μεταφραστούν σε ηλεκτρονικά προβλήματα ώστε να γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις για να αντιμετωπιστούν από μια μονάδα ελέγχου. Το τελικό σύστημα steer by wire πρέπει να ικανοποιεί την συνθήκη κλειστού βρόχου (feedback), ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του στους τομείς, όπως η σταθερότητα του συστήματος, η ικανοποιητική απόδοσή του και αντοχή του στο χρόνο.

Η αρχιτεκτονική δομή του συστήματος steer by wire φαίνεται στο παρακάτω σχήμα όπου και θα εξηγήσουμε την λειτουργία του κάθε ένα από αυτά. Το όλο σύστημα έχει εφαρμογή σε επιβατικά οχήματα καθώς είναι προφανές ότι διαφέρει λειτουργικά αλλά και σαν ανταλλακτικά από όχημα σε όχημα λόγω της διαφορετικότητας της εκάστοτε κατασκευαστικής εταιρίας. Η αρχή λειτουργίας παραμένει η ίδια σε όλα τα συστήματα steer by wire.



Σχήμα 2 Διάγραμμα λειτουργίας ενός steer by wire συστήματος. [5]

Στο σχήμα 2 βλέπουμε ένα σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος steer by wire. Αυτό περιλαμβάνει το τιμόνι με ένα υποσύστημα και τους τροχούς με ένα υποσύστημα για τον έλεγχο τους και μία ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου, ο ελεγκτής στην ουσία των υποσυστημάτων τιμονιού και τροχών. Ο ελεγκτής λειτουργεί έτσι ώστε να συντονίζει τα δύο υποσυστήματα για την λειτουργία τους με τον σωστό τρόπο. Αυτό το πετυχαίνει μέσω των καλωδιώσεων που υπάρχουν μεταξύ τους λαμβάνοντας ηλεκτρικά σήματα.

2.2.4.1 Ο μηχανισμός στους τροχούς.

Το συμβατικό υποβοηθούμενο σύστημα είτε υδραυλικό είτε ηλεκτρικό έχει αντικατασταθεί από έναν ηλεκτροκινητήρα έτσι ώστε να οδηγεί τους τροχούς μέσω της κρεμαγιέρας. Οι τροχοί είναι συνδεδεμένοι μέσω μιας άρθρωσης πάνω στην κρεμαγιέρα. Ένας αισθητήρας γωνίας βρίσκεται πάνω στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα ώστε να γνωρίζει την θέση των τροχών κάθε χρονική στιγμή. Ο εκλεκτης λαμβάνει σήμα για την γωνία κλίσης των τροχών και μέσω του οδηγού (motor driver) καθορίζει κατά πόσο θα στρίψουν οι τροχοί. Ο πρωταρχικός στόχος του συστήματος για τον έλεγχο των τροχών είναι η παρακολούθηση της γωνίας του τιμονιού, ανάλογα με την πρόθεση του οδηγού του οχήματος. Αυτό το σύστημα του μηχανισμού των τροχών και ο έλεγχος που ασκεί, αναφέρεται ως υποσύστημα ελέγχου των τροχών.

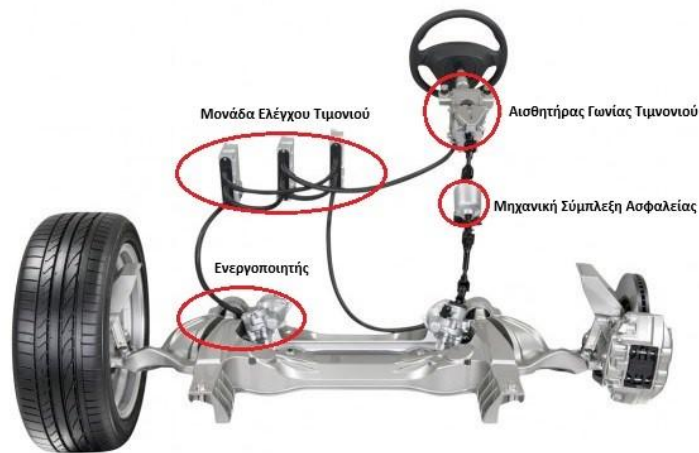
2.2.4.2 Ο μηχανισμός τιμονιού

Ο μηχανισμός του τιμονιού αποτελείται από το τιμόνι, τον αισθητήρα γωνίας του τιμονιού που τοποθετείται πάνω στο τιμόνι για την ανάγνωση της θέσης του, και τον ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος ενσωματώνεται και αυτός με το τιμόνι με οποιοδήποτε σύστημα εμπλοκής (γρανάζια, διάταξη ιμάντα) κτλ. Ο πρωταρχικός στόχος του ελέγχου του τιμονιού είναι για την αίσθηση της διεύθυνσης από τον οδηγό αλλά και για τον έλεγχο της γωνίας του τιμονιού ώστε να στρίψουν οι τροχοί με την κατάλληλη κλίση. Αυτό το σύστημα τιμονιού και ο έλεγχός του αναφέρονται ως υποσύστημα ελέγχου τιμονιού.

Φυσικά υπάρχουν και άλλες διαφορετικές αρχιτεκτονικές για ένα σύστημα steer by wire όπως ένας ηλεκτροκινητήρας στο σύστημα των τροχών με μηχανική υποστήριξη σε περίπτωση δυσλειτουργίας ή βλάβης των ηλεκτρονικών συστημάτων, επίσης στο τιμόνι μπορεί να υπάρχει μηχανισμός ανάδρασης, σε κάποια άλλα συστήματα και διαφορετικοί τύποι ανάγνωσης της γωνία τιμονιού. Γενικά όμως η αρχή λειτουργίας του steer by wire είναι ίδια για όλες τις εφαρμογές, απλώς αναλύσαμε μια συγκεκριμένη περίπτωση αυτής του σχήματος 2.

2.3 Ασφάλεια συστήματος Steer by Wire και εφεδρεία.

Για να εξασφαλίσουμε την αξιοπιστία ενός συστήματος steer by wire, χρησιμοποιούμε εφεδρικά συστήματα όπως την εμπλοκή ενός μηχανικού συστήματος ανάμεσα στο τιμόνι και την κρεμαγιέρα στο ήδη υπάρχον σύστημα έτσι ώστε αν κάπου παρουσιαστεί σφάλμα ή δυσλειτουργία, να λειτουργήσει το σύστημα με τον μηχανικό εξοπλισμό. Φυσικά με αυτόν τον τρόπο αυξάνουμε τον όγκο και το συνολικό βάρος του συστήματος αφού ένα ακόμη εξάρτημα βρίσκεται σε αναμονή εφεδρείας. Άλλος τρόπος είναι να βελτιωθεί το ηλεκτρονικό κομμάτι του συστήματος και σε περίπτωση βλάβης τα λάθη να περιορίζονται σε συγκεκριμένη θέση στο σύστημα, έτσι ώστε να μην βγαίνει το σύστημα όλο εκτός λειτουργίας, αλλά κάποιο κομμάτι του μόνο μέχρις ότου γίνει επιδιόρθωση. Επίσης σαν μία ακόμα εναλλακτική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η πέδη έκτακτης ανάγκης, που θα ενεργοποιηθεί από μόνη της σε περίπτωση δυσλειτουργίας του συστήματος. Ακραία μεν αλλά σημαντική λύση για την ασφάλεια των επιβατών.



Σχήμα 3 Εφεδρικό μηχανικό σύστημα ασφαλείας εμπλοκής συμπλέκτη (Fail-safe clutch) της εταιρίας Nissan(Infiniti). [8]

Στο παραπάνω σχήμα 3 φαίνεται το εφεδρικό σύστημα του οχήματος (Fail-safe clutch) που σε περίπτωση αστοχίας ή δυσλειτουργίας των λοιπών συστημάτων μπαίνει σε λειτουργία για ασφάλεια. Το σύστημα είναι μηχανικό και αποτελείται από έναν συμπλέκτη που ενεργοποιείται μόνο σε περίπτωση αστοχίας του συστήματος, (σε κανονική λειτουργία απλώς είναι στον αέρα όλο το μηχανικό σύστημα του συμπλέκτη) και εμπλέκει το τιμόνι απευθείας με το σύστημα διεύθυνσης των τροχών. Ναι μεν αυξάνεται η αξιοπιστία με την εφεδρεία αλλά χάνεται η έννοια του ηλεκτρονικού ελέγχου του συστήματος.

2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του συστήματος Steer by Wire.

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει ένα τέτοιο σύστημα steer by wire είναι πολλά, όπως η παθητική ασφάλεια, η ενεργητική ασφάλεια καθώς και το μειωμένο κόστος παραγωγής (μακροπρόθεσμα).

Αρχικά προσφέρει την δυνατότητα επικοινωνίας με άλλα συστήματα υποβοήθησης και πρόληψης, καθώς και τη δυνατότητα να λάβει τον έλεγχο του οχήματος σε περιπτώσεις που ο οδηγός αντιδρά λάθος ή δεν μπορεί να αντιδράσει σε περιπτώσεις αποφυγής ατυχήματος, οι οποίες απαιτούν στην πράξη, υπεράνθρωπη ακρίβεια και ταχύτητα χειρισμού.

Το σύστημα είναι προσαρμόσιμο στις ανάγκες του εκάστοτε οδηγού. Μπορεί δηλαδή να ρυθμιστεί η ταχύτητα επαναφοράς, αλλά και η σκληρότητα του τιμονιού.

Το σύστημα, αποτελείται από λιγότερα εξαρτήματα σε σχέση με τα μέχρι τώρα συστήματα (μηχανικά, υδραυλικά ή ηλεκτρικά υποβοηθούμενα), παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία χώρου στο όχημα και στη σχεδίαση. Επιπρόσθετα, μπορεί να τοποθετηθεί πιο εύκολα από όχημα σε όχημα καθώς οι αλλαγές που απαιτούνται θα είναι μηδαμινές (σε οχήματα ίδιας κατηγορίας).

Στον τομέα της παθητικής ασφάλειας προσφέρει επίσης στο ότι λόγω της έλλειψης της κολώνας τιμονιού δεν υπάρχει κίνδυνος εισχώρησης αυτής σε περίπτωση μετωπικής σύγκρουσης, στην καμπίνα του οδηγού, με τα ολέθρια αποτελέσματα που έχει, όταν συμβεί.

Προσφέρει επίσης επιπλέον άνεση, μειώνοντας το θόρυβο και τους κραδασμούς που εισχωρούν στην καμπίνα των επιβατών αλλά και την αίσθηση αυτών στον οδηγό, καθώς πλέον δεν υπάρχει απευθείας σύνδεση των τροχών με το τιμόνι.

Σαν σύστημα είναι πιο φιλικό ως προς το περιβάλλον καθώς δεν απαιτείται ο εφοδιασμός του με υδραυλικά υγρά, τα οποία αντικαθίστανται ή συμπληρώνονται στα συμβατικά συστήματα και είναι εξαιρετικά τοξικά.

Ένα τέτοιο σύστημα steer by wire είναι πολύ εύκολο να ελεγχθεί χωρίς την ανάγκη ύπαρξης οδηγού σε αυτόνομα οχήματα στο μέλλον, αλλά και να γίνει ευκολότερος ο συνδυασμός του με άλλα συστήματα όπως το αυτόματο παρκάρισμα κτλ.

Τέλος με την πάροδο του χρόνου, την εξέλιξη του συστήματος και τελικά την εφαρμογή του στα οχήματα παραγωγής, θα μειωθεί το κόστος, καθώς η αξία των ηλεκτρονικών παρουσιάζει σταθερά πτωτική τάση. Αυτό θα συμβάλλει, λόγω της εύκολης προσαρμογής του σε διάφορα οχήματα, στη ελαχιστοποίηση του χρόνου παραγωγής τους.

Τα μειονεκτήματα απ' την άλλη είναι ότι σήμερα ακόμα το σύστημα βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο και το κόστος για την τοποθέτησή του σε οχήματα παραγωγής είναι υψηλό και κρίνεται απαγορευτικό από τις κατασκευάστριες εταιρίες. Αν αναλογιστούμε και την ύπαρξη μηχανικής υποστήριξης στο σύστημα steer by wire έχουμε και το μειονέκτημα του βάρους αλλά και αυτό του χώρου τοποθέτησης και της περιπλοκότητας του όλου σχεδιασμού. Ακόμα η παθητική ασφάλεια σε περίπτωση μετωπικής σύγκρουσης επηρεάζεται, λόγω του ότι η κολώνα τιμονιού βρίσκεται μέσα στο αμάξωμα. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η δυσκολία του σχεδιασμού του συστήματος, έτσι ώστε να λειτουργεί τελείως αυτόνομα, χωρίς την ανάγκη κάποιου εφεδρικού μηχανικού συστήματος, καθώς και το γεγονός ότι η ιδέα της απουσίας φυσικής σύνδεσης τροχών-τιμονιού, όπως επίσης και της αυτόνομης οδήγησης, που μπορεί με μικρές προσθήκες να παρέχει το σύστημα, δεν έχει ωριμάσει στο αγοραστικό κοινό.

2.5 Πρωτόκολλο επικοινωνίας σε ένα σύστημα steer by wire.

Συνοπτικά το πρωτόκολλο επικοινωνίας Flexray χρησιμοποιείται ως λύση για το πρόβλημα της διαχείρισης της επικοινωνίας μεταξύ πολλών ηλεκτρονικών μονάδων ελέγχων ECUs σε ένα όχημα και κυρίως σε συστήματα x by wire. Οι ταχύτητες μετάδοσης της πληροφορίας σε ένα τέτοιο πρωτόκολλο ξεπερνούν τα 10Mbit/sec. Είναι το πρωτόκολλο της επόμενης γενιάς από το οποίο αναμένουμε ασφαλή και γρήγορη μεταφορά της πληροφορίας μεταξύ των μονάδων ελέγχου σε συστήματα x by wire, όπου συστήματα αποτελούμενα από μηχανικά εξαρτήματα αντικαθίστανται από ηλεκτρονικά συστήματα.

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας CAN, το οποίο υπάρχει και χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα στην βιομηχανία οχημάτων, είναι αργό στην μεταφορά πληροφορίας αφού μπορεί να φτάσει ταχύτητες μέχρι 1Mbit/sec υπό προϋποθέσεις. Όταν όμως τα μήκη των καλωδίων είναι μεγαλύτερα από 40 μέτρα τότε είναι αδύνατον να επιτευχθεί αυτή η ταχύτητα λόγω των απωλειών που υπάρχουν από την αντίσταση της καλωδίωσης αλλά και πιθανών σφαλμάτων στην μετάδοση της πληροφορίας. Έτσι το πρωτόκολλο Flexray σιγά σιγά αντικαθιστά το πρωτόκολλο CAN λόγω των μεγαλύτερων ταχυτήτων της τάξης των 10Mbit/sec και της ασφάλειας μετάδοσης της πληροφορίας.

2.6 Μελέτη του συστήματος Steer by Wire κατά την οδήγηση με σκοπό την ανάπτυξη «λογισμικού αλληλεπίδρασης».

2.6.1 Αίσθηση ροπής του τιμονιού και οδήγησης

Η αίσθηση διεύθυνσης παρέχει πληροφορίες σχετικά με την επαφή των ελαστικών των τροχών του οχήματος και το εκάστοτε έδαφος. Ως εκ τούτου, η αίσθηση οδήγησης είναι σημαντική για τον οδηγό, για τον κατευθυντικό έλεγχο και την ασφάλεια του οχήματος. Σε ένα συμβατικό σύστημα διεύθυνσης με μηχανικές συνδέσεις ο οδηγός ελέγχει την κατεύθυνση του οχήματος γυρνώντας το τιμόνι και έχοντας αίσθηση της διεύθυνσης για παράδειγμα την σκληρότητα που προκαλούν οι τροχοί στο τιμόνι σε ανώμαλο έδαφος. Στο σύστημα steer by wire όπου δεν υπάρχουν μηχανικές συνδέσεις η τεχνητή αίσθηση διεύθυνσης θα πρέπει να δημιουργείται από ένα υποσύστημα με μηχανισμό ανάδρασης.

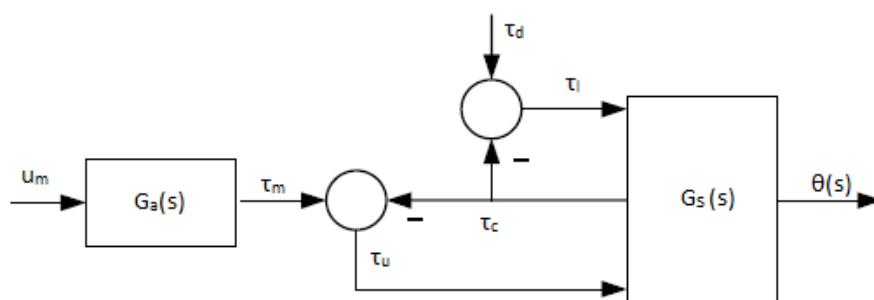
Η αίσθηση της οδήγησης καθορίζεται από την αντίδραση και τη ροπή που προκαλεί το τιμόνι, έτσι ο οδηγός μπορεί να αντιδράσει απευθείας από τον άξονα του τιμονιού στους τροχούς σε ένα συμβατικό σύστημα. Ενώ σε ένα σύστημα steer by wire την ροπή την δημιουργεί ένας κινητήρας ο οποίος βρίσκεται ενσωματωμένος στο τιμόνι έτσι ώστε να δώσει μία αίσθηση ρυθμιζόμενης διεύθυνσης.



Σχήμα 4 Σύστημα steer by wire τμήμα τιμονιού. [5]

Στο σύστημα *steer by wire* που εμφανίζεται στο σχήμα 4, ο άξονας του ηλεκτροκινητήρα πρέπει να είναι σε άμεση επαφή με κάποιο εξάρτημα και συγκεκριμένα με τον άξονα του τιμονιού. Ο ηλεκτροκινητήρας είναι τοποθετημένος στην κολώνα τιμονιού, και επομένως άμεσα συνδεδεμένος με το τιμόνι. Σαν αποτέλεσμα, αυτό το σύστημα που βασίζεται σε ηλεκτροκινητήρα, πάντα υφίσταται την επιρροή των εξωτερικών διαταραχών, όταν ο οδηγός του οχήματος στρίβει το τιμόνι. Ως εκ τούτου αυτή είναι μια ειδική εφαρμογή για τέτοια συστήματα ελέγχου που βασίζονται σε ηλεκτροκινητήρα.

Το σχήμα 5 δείχνει σε απλοποιημένη εκδοχή το διάγραμμα της ελεγχόμενης μονάδας τιμονιού. Τα σήματα εισαγωγής του προτύπου είναι η ροπή στρέψης του ηλεκτροκινητήρα τ_m και η εξωτερική ροπή τ_d και το σήμα εξόδου είναι η γωνία του τιμονιού. Η μεταβολή της εξωτερικής ροπής διαταραχής τ_d προκαλεί την απόκριση της ροπής αντίδρασης τ_c η οποία είναι η ροπή του τιμονιού. Από την άλλη πλευρά, το μέγεθος της ροπής αντίδρασης τ_c μεταβάλλεται με την ροπή του ηλεκτροκινητήρα τ_m . Έτσι, μια μεταβλητή ροπή στρέψης του τιμονιού, μπορεί να αποκτηθεί ελέγχοντας τη ροπή στρέψης του ηλεκτροκινητήρα τ_m .

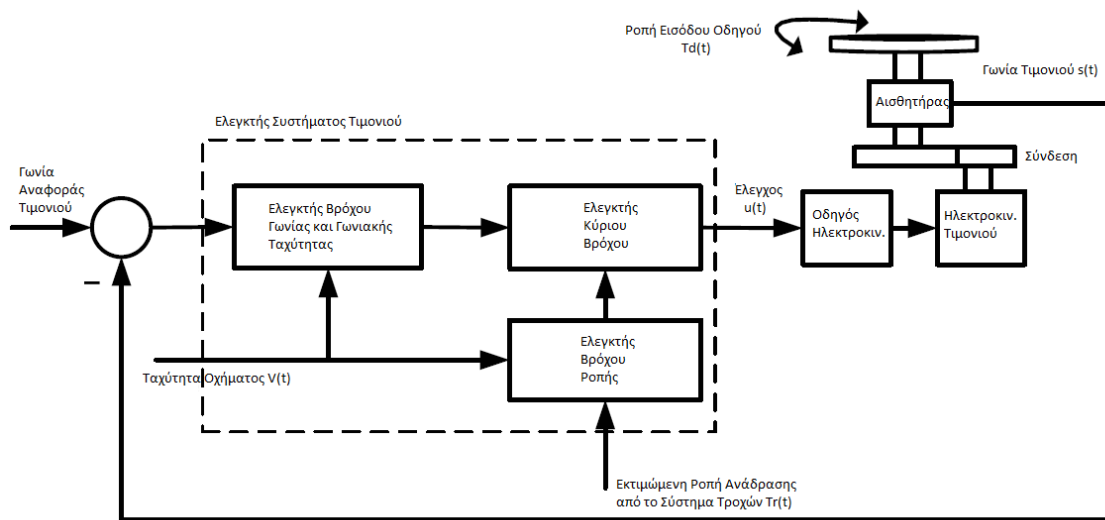


Σχήμα 5 Απλοποιημένο μοντέλο ελεγχόμενης μονάδας τιμονιού. [5]

Επιπροσθέτως, η ροπή του ηλεκτροκινητήρα τ_m μπορεί να ελεγχθεί μέσω του σήματος ελέγχου του ηλεκτροκινητήρα u_m έτσι ώστε να μεταβάλλεται με τις τροφοδοτούμενες μεταβλητές του συστήματος *steer by wire* και του οχήματος. Ως αποτέλεσμα, η ροπή τιμονιού τ_c ποικίλει με τις μεταβλητές αυτές, και μπορεί να γίνει αισθητή από τον οδηγό. Σε αυτή την εργασία περιγράφουμε ένα σύστημα ελέγχου τιμονιού, που χρησιμοποιεί την ιδέα για απόρριψη της διαταραχής ώστε να αναπαραχθεί η επιθυμητή αίσθηση χρήσης του τιμονιού.

Το σχηματικό διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 6, αναπαριστά το σύστημα ελέγχου της ανάδρασης του τιμονιού. Σε αυτό το σύστημα η ενέργεια του οδηγού του οχήματος, δηλαδή το στρίψιμο του τιμονιού, λαμβάνεται ως μια ροπή διαταραχής τ_d , που εφαρμόζεται στον κλειστό βρόχο ανάδρασης του υποσυστήματος του τιμονιού. Το υποσύστημα του τιμονιού παράγει μια ροπή αντίδρασης τ_c , με σκοπό να απορρίψει τη ροπή

διαταραχής τ_d . Έτσι ο οδηγός του οχήματος, που κρατάει το τιμόνι, δύναται να αισθανθεί την αλλαγή στη ροπή αντίδρασης τ_c . Ρυθμίζοντας αυτόματα τις παραμέτρους του ελεγκτή του συστήματος ανάδρασης κλειστού βρόχου του τιμονιού, ώστε να αλλάζουν οι παράμετροι για την ροπή του ηλεκτροκινητήρα τ_m , θα αλλάξει και η ροπή αντίδρασης τ_c . Οι τροφοδοτούμενες μεταβλητές του συστήματος ελέγχου περιλαμβάνουν την γωνία του τιμονιού, την ροπή ανάδρασης του συστήματος ελέγχου των τροχών, και την ταχύτητα του οχήματος. Επομένως, το παρόν σύστημα παράγει μια ρυθμιζόμενη αίσθηση του τιμονιού μέσω της παραγωγής της απαιτούμενης ροπής αντίδρασης τ_c , ως ανάδραση στην κίνηση του οδηγού ή ροπή διαταραχής τ_d .



Σχήμα 6 Σύστημα ελέγχου τιμονιού με ηλεκτροκινητήρα ανάδρασης. [5]

Επομένως, η απαίτηση για αίσθηση του τιμονιού, επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τον έλεγχο ανάδρασης για το υποσύστημα τιμονιού από μια πληθώρα βρόχων όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Η απαίτηση να αποκτηθεί η αίσθηση τιμονιού μεταφράζεται στην πράξη σε απαίτηση για σχεδιασμό ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου με ειδική δομή ελέγχου. Προκειμένου να σχεδιάσουμε το σύστημα ελέγχου steer by wire με την απαιτούμενη αίσθηση τιμονιού, είναι σημαντικό να προσδιορίσουμε την έννοια της αίσθησης τιμονιού σαν μέρος εντός του συστήματος ελέγχου τιμονιού.

Η ροπή τιμονιού τ_c είναι μια στρέψη που παράγεται στον άξονα τιμονιού. Δύναται να περιγραφεί ως εξής:

$$T_d - \tau_c = \tau_l$$

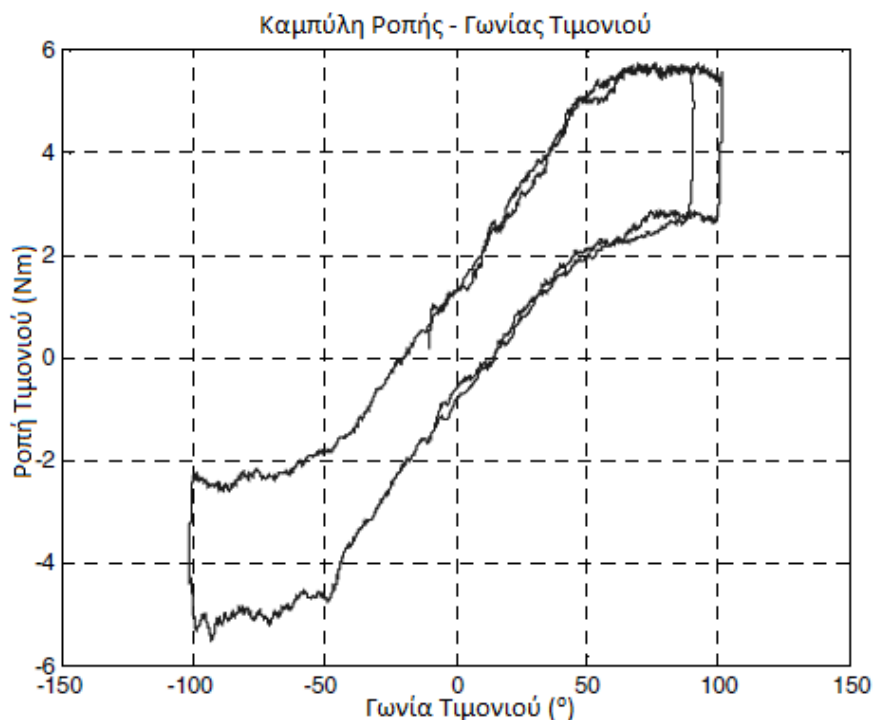
όπου το τ_d αντιπροσωπεύει μια ισάξια ροπή διαταραχής που ασκείται στον οδηγό, το τ_c αντιπροσωπεύει μια ροπή αντίδρασης του τιμονιού και το τ_l αντιπροσωπεύει την πραγματική ροπή που μεταφέρεται στο τιμόνι ως φορτίο. Επιπλέον, η ροπή τ_c μπορεί επίσης να περιγραφεί ως εξής:

$$\tau_m - \tau_c = \tau_u$$

όπου τ_m εκφράζει τη ροπή του ηλεκτροκινητήρα και τ_u , την ουσιαστική ροπή που εφαρμόζεται στο φορτίο του ηλεκτροκινητήρα. Η ροπή του ηλεκτροκινητήρα τ_m ελέγχεται από το σήμα ελέγχου $u(t)$ στα σχήματα 5 και 6. Έτσι η τιμή ελέγχου εξόδου μπορεί να καθορίσει την απαιτούμενη ροπή τ_c σύμφωνα με το σχήμα 5. Εφαρμόζοντας μια σειρά εξισώσεων μεταξύ της τ_c και του $u(t)$, δύναται να αναπτυχθεί η ποσοτική περιγραφή σχετικά με την αίσθηση τιμονιού. Ως αποτέλεσμα, η απαίτηση για αίσθηση τιμονιού στο σύστημα steer by wire μεταφράζεται σε απαίτηση για τον έλεγχο εξόδου του μεταβαλλόμενου με την αύξηση και μη γραμμικού ελεγκτή, όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Σύμφωνα με την απαίτηση σχεδιασμού ελέγχου για τον ελεγκτή τιμονιού, διατηρείται η σταθερότητα του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου, οι απαιτούμενες επιδόσεις και η αξιοπιστία εντός του πλαισίου μέσα στο οποίο κυμαίνονται οι παράμετροι.

Γενικά, η αίσθηση τιμονιού καθορίζεται από την αντίδραση ροπής του τροχού λαμβάνοντας υπόψη την γωνία του τιμονιού. Περιγράφεται από την καμπύλη της ροπής του τιμονιού σε συνάρτηση με αυτή της γωνίας τιμονιού, οι οποίες καμπύλες τυπικά είναι μια λειτουργία της ταχύτητας του οχήματος. Στο σχήμα 7 βλέπουμε ένα παράδειγμα της ροπής του τιμονιού που μετρήθηκε σε ένα δοκιμαστικό όχημα με σύστημα steer by wire.

Στο σχήμα που ακολουθεί, βλέπουμε τη γωνία τιμονιού σε μοίρες, όπου 0 εκφράζει το κέντρο, προς τα θετικά θεωρούμε τη στροφή δεξιά και προς τα αρνητικά τη στροφή αριστερά. Η ροπή που αναπτύσσεται σε συνάρτηση με την γωνία τιμονιού, εξαρτάται και από τον παράγοντα της ταχύτητας, δηλαδή αν γίνει απόπειρα στροφής προς τα δεξιά και η ταχύτητα του οχήματος είναι αρκετά υψηλή τότε η ροπή αυξάνεται για να έχουμε και την κατάλληλη αίσθηση σκληρότερου τιμονιού σε αντίθεση με την περίπτωση όπου η ταχύτητα του οχήματος είναι χαμηλή, οπότε η αίσθηση τιμονιού πρέπει να είναι πιο απαλή και γι' αυτό η ροπή του τιμονιού είναι πιο μικρή. Αυτό συμβαίνει και με την στροφή στα αριστερά, απλώς οι τιμές εκφράζονται με αρνητικό πρόσημο.

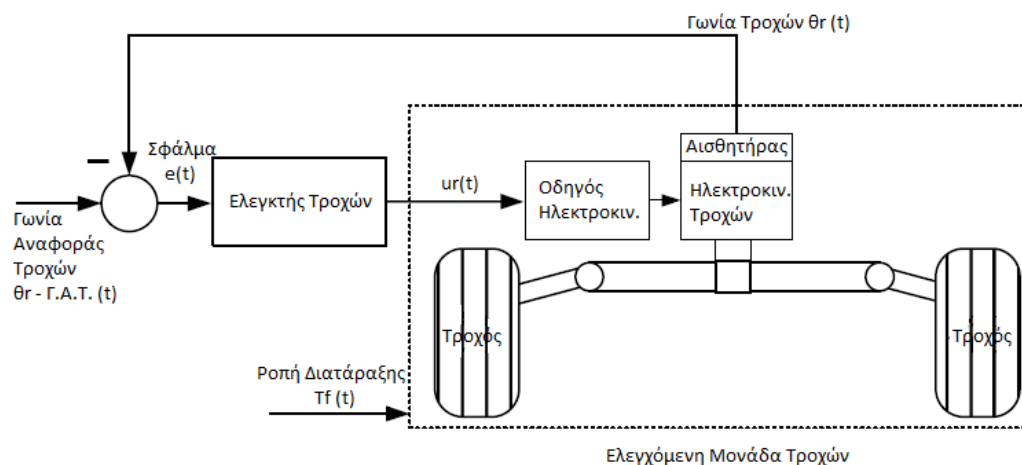


Σχήμα 7 Γραφική παράσταση Ροπής – Γωνίας τιμονιού. [5]

2.6.2 Παρακολούθηση της γωνίας των τροχών

Οι τροχοί του συστήματος steer by wire πρέπει να ακολουθούν τις εντολές εισαγωγής του οδηγού και να διατηρούν το συγχρονισμό με το τιμόνι. Αυτό σημαίνει ότι η γωνία των τροχών πρέπει να ανιχνεύει τη γωνία τιμονιού. Επομένως, απαιτείται από το σύστημα των τροχών να έχει μια γρήγορη απόκριση, την κατάλληλη απόσβεση και αμελητέο σφάλμα ανίχνευσης. Βασισμένη σε αυτές τις απαιτήσεις, μια δομή ελέγχου υποβοηθούμενης ανάδρασης εφαρμόζεται για το υποσύστημα ελέγχου των τροχών. Ως αποτέλεσμα, η απαίτηση για ανίχνευση από το υποσύστημα ελέγχου τροχών steer by wire, γίνεται πρόβλημα σχεδιασμού για το υποβοηθούμενο σύστημα ελέγχου των τροχών (κίνησης).

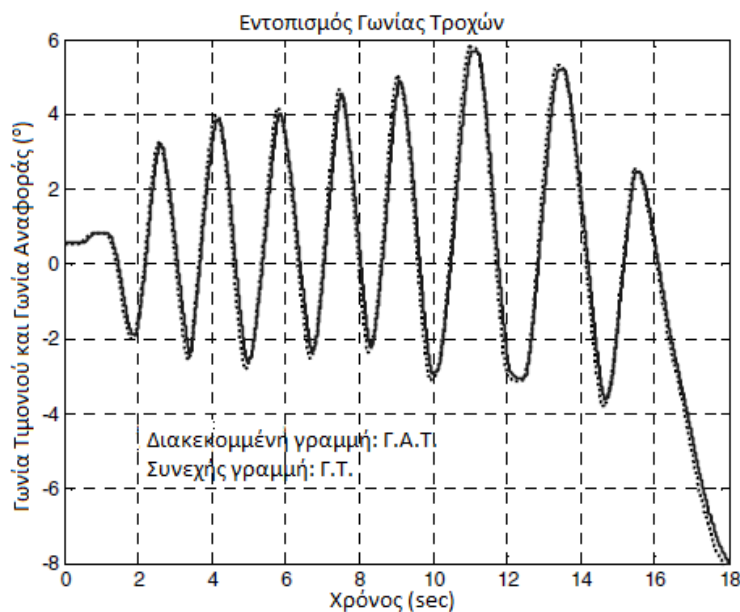
Το σχήμα 8 δείχνει μια σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος ελέγχου τροχών που βασίζεται σε έναν ηλεκτροκινητήρα. Αναπτύσσεται ένας έλεγχος ανάδρασης των τροχών ώστε να εφαρμόσει την ανίχνευση της πραγματικής γωνίας τιμονιού στις επιθυμητές γωνίες αναφοράς. Μια βασική ιδιότητα ενός συστήματος ελέγχου τροχών είναι το γεγονός ότι το ελεγχόμενο σήμα εξόδου ανιχνεύει ένα σήμα αναφοράς εισόδου, μέσω της απόρριψης εξωτερικών διαταραχών. Το σύστημα ελέγχου ανάδρασης των τροχών μπορεί να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρέχει αρκετή στρεπτική ακαμψία, και έτσι να αποβάλει την επιρροή των διαταραχών και να ικανοποιήσει τις απαιτούμενες ακρίβειες ανίχνευσης της γωνίας των τροχών με αμελητέα σφάλματα ανίχνευσης. Σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα η γωνία τροχών θ_r τροφοδοτείται με τον ελεγκτή υποβοήθησης ώστε να ανιχνεύει την γωνία αναφοράς των τροχών θ_{r-ref} . Ο αλγόριθμος ελέγχου της υποβοήθησης παρέχει μια γρήγορη απόκριση για τη γωνία τροχών θ_r με την κατάλληλη απόσβεση και το αμελητέο σφάλμα ανίχνευσης e_r . Η γωνία αναφοράς τροχών θ_{r-ref} αποκτάται από τη γωνία τιμονιού θ_s στο υποσύστημα ελέγχου τιμονιού. Η μεταβολή γωνίας τιμονιού θ_s ελέγχεται από τον οδηγό του οχήματος καθώς στρίβει το τιμόνι.



Σχήμα 8 Σύστημα ελέγχου ανάδρασης τροχών. [5]

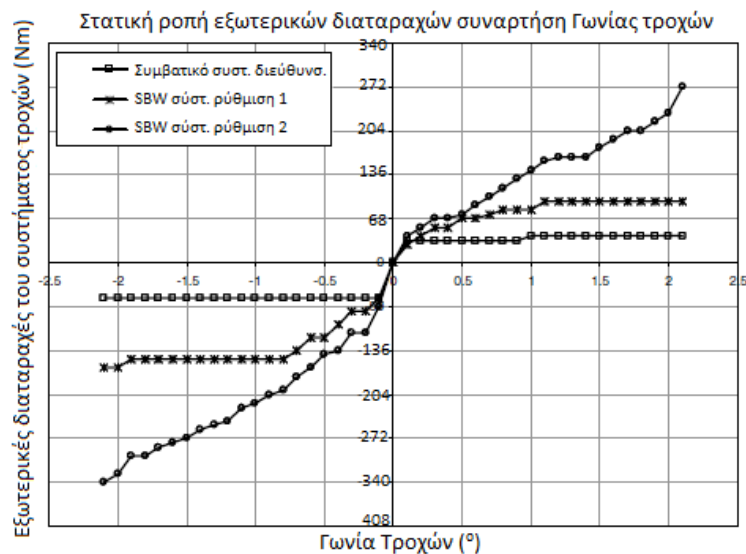
Οι συνηθισμένες εξωτερικές διαταραχές στο σύστημα ελέγχου των τροχών που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα περιλαμβάνουν: την αδράνεια ευθυγράμμισης, διαταραχές που οφείλονται στην επιφάνεια του δρόμου και ριπές ανέμου (πλαγιοδρόμηση). Οι εξωτερικές παρεμβολές – διαταραχές μπορούν να προκαλέσουν τα σφάλματα ανίχνευσης. Το σύστημα ελέγχου των τροχών εξασφαλίζει μια ακαμψία ώστε να ξεπεραστούν οι επιδράσεις της διαταραχής, δηλαδή της αδράνειας ευθυγράμμισης των τροχών καθώς και άλλων διαταραχών, ώστε τα στατικά αλλά και δυναμικά σφάλματα να ικανοποιούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Οι προδιαγραφές σχεδιασμού της στιβαρότητας της υποβοήθησης απαιτεί το σφάλμα ανίχνευσης να είναι μικρότερο από την απαιτούμενη γωνία σφάλματος βασισμένη σε μια μέγιστη ροπή διαταραχής του συστήματος ελέγχου των τροχών.

Η δυναμική του συστήματος των τροχών μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες του δρόμου, τα φορτία του οχήματος και διάφορες άλλες εξωτερικούς παράγοντες. Συγκεκριμένα, η αύξηση της δυναμικής του ελεγχόμενου συστήματος αλλάζει σημαντικά εξαιτίας κάποιων παραγόντων, όπως η ταχύτητα του οχήματος. Αυτές οι αστάθειες είναι δυνατό να υποβαθμίσουν την απόδοση του συστήματος ελέγχου των τροχών. Η απόδοση ανίχνευσης μπορεί να διατηρηθεί εφαρμόζοντας τη μεταβλητή ακαμψία του συστήματος ελέγχου των τροχών, ώστε να αντισταθμίσει την επίδραση της δυναμικής του οχήματος. Στο σύστημα ελέγχου των τροχών χρησιμοποιείται μια στρατηγική προγραμματισμού ελέγχου ώστε να εξασφαλίζει τη μεταβλητή ακαμψία του συστήματος. Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης της δομής ελέγχου του συστήματος είναι το γεγονός ότι το υποσύστημα των τροχών μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα. Το σήμα αναφοράς των δεδομένων εισαγωγής για τη γωνία θ_{r-ref} μπορεί να εισάγεται με ένα χειριστήριο ή οποιαδήποτε εναλλακτική συσκευή, που να λειτουργεί ως είσοδος δεδομένων για την γωνία. Επομένως, η γωνία τροχών μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας το χειριστήριο ή παρόμοιες συσκευές εισαγωγής δεδομένων κατεύθυνσης.



Σχήμα 9 Διάγραμμα εντοπισμού της γωνίας των τροχών. [5]

Το σχήμα 9 δίνει τα αποτελέσματα μιας δοκιμής ελέγχου σχετικά με την ανίχνευση των τροχών σε ένα δοκιμαστικό όχημα steer by wire. Ο χρόνος απόκρισης και το σφάλμα ανίχνευσης ικανοποιούν τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Το σχήμα 10 παρακάτω παρουσιάζει τα αποτελέσματα του ελέγχου της ικανότητας απόρριψης διαταραχών των τροχών σε ένα όχημα με σύστημα steer by wire. Οι καμπύλες του ελέγχου δείχνουν ένα όφελος του συστήματος των τροχών στο να απορρίπτουν τις εξωτερικές ροπές διαταραχής σε αυτή της σχεδιασμό ελέγχου. Για παράδειγμα χρειάζονται 142 Nm ροπής διαταραχής για να κινηθεί η γωνία των τροχών κατά μία (1) μοίρα. Για να παρατηρηθεί η ίδια αλλαγή γωνίας σε ένα συμβατικό σύστημα διεύθυνσης χρειάζονται μόλις 41 Nm εξωτερικής ροπής.



Σχήμα 10 Διάγραμμα ροπή διαταραχών σε συνάρτηση της γωνίας των τροχών. [5]

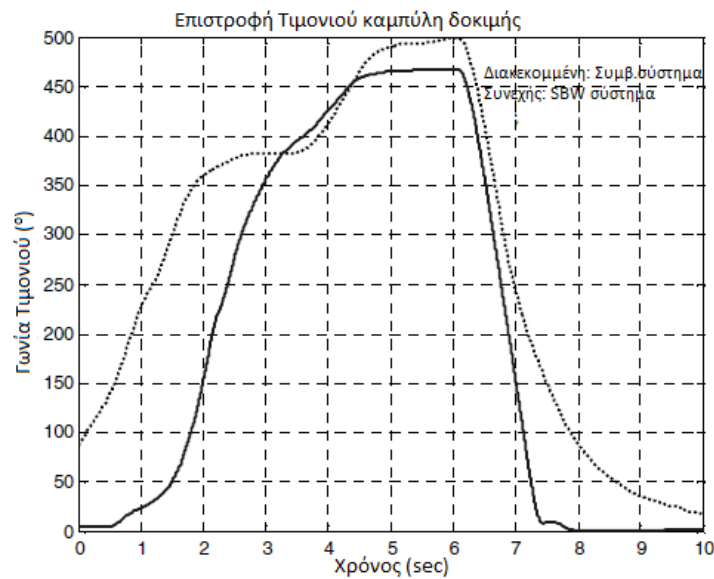
2.6.3 Ενεργή επιστροφή τιμονιού

Το τιμόνι επιστρέφει αυτόματα στο κέντρο πορείας σε ένα συμβατικό σύστημα διεύθυνσης εξαιτίας της ροπής αδράνειας λόγω της αλληλεπίδρασης ελαστικού – δρόμου που δίνει μία τάση ευθυγράμμισης, η οποία τάση όμως οφείλεται και στο σύστημα σχεδιασμού της ανάρτησης του εκάστοτε οχήματος. Αντιμετωπίζεται δε ως εξωτερική διαταραχή στο σύστημα ελέγχου των τροχών. Το σύστημα των τροχών που βασίζεται στον έλεγχο της υποβοήθησης, δηλαδή σε ένα σύστημα steer by wire, απορρίπτει την διαταραχή της δύναμης αδράνειας σε τέτοιο βαθμό, ώστε οι τροχοί να μην έχουν τάση να επιστρέψουν στην κεντρική θέση. Ως αποτέλεσμα το αυτο – κεντράρισμα του τιμονιού δε μπορεί να βασίζεται άμεσα στη δύναμη αδράνειας σε συστήματα steer by wire.

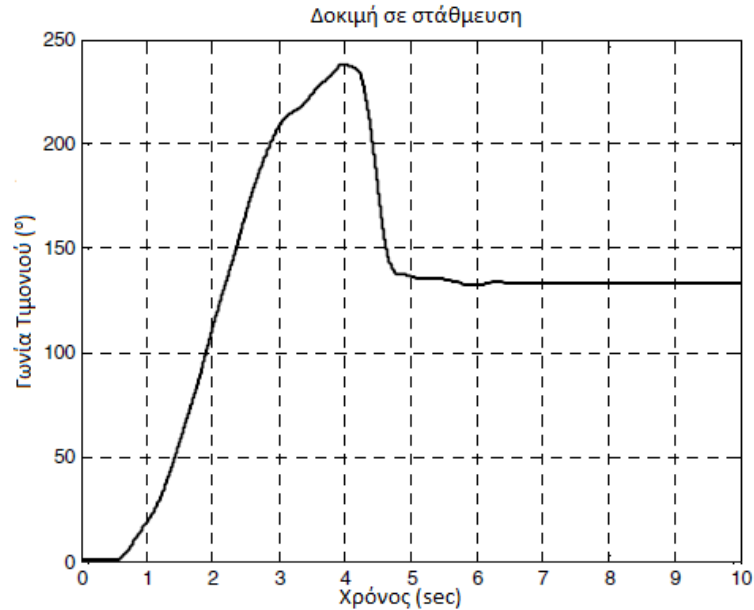
Είναι αναγκαίο το σύστημα steer by wire να διατηρεί μια τάση αυτο – κεντραρίσματος. Αυτή η απαίτηση ικανοποιείται από τον έλεγχο αυτο – κεντραρίσματος του υποσυστήματος τιμονιού, με την υποστήριξη της ροπής του συστήματος τροχών και των σημάτων γωνίας των τροχών. Το τιμόνι επιστρέφει στο κέντρο με ρυθμιζόμενο ρυθμό, ο οποίος καθορίζεται από το σύστημα ελέγχου τιμονιού. Ο ρυθμός επιστροφής αντίστοιχα είναι

ανάλογος με την ταχύτητα του οχήματος. Η γωνία και η ροπή των τροχών τροφοδοτείται στο σύστημα ελέγχου τιμονιού όπως φαίνεται στο σχήμα 11. Όταν το τιμόνι επιστρέφει στο κέντρο, οι τροχοί ακολουθούν το τιμόνι για να επιστρέψουν στο κέντρο. Επειδή το αυτο – κεντράρισμα του τιμονιού μπορεί να ελεγχθεί ενεργά, αναφέρεται ως μια ενεργή επιστροφή τιμονιού ή ιδιότητα ενεργού αυτο – κεντραρίσματος του συστήματος steer by wire.

Τα σχήματα 11 και 12 δίνουν τα αποτελέσματα της δοκιμής, της ενεργής επιστροφής του τιμονιού σε ένα όχημα steer by wire. Ο ρυθμός επιστροφής τιμονιού αυξάνεται σε συμφωνία με τη μεταβολή της ταχύτητας του οχήματος. Το τιμόνι θα διατηρηθεί σε μια καθορισμένη γωνία όταν το όχημα είναι σε κατάσταση στάθμευσης όπως φαίνεται στο σχήμα 12.



Σχήμα 11 Δοκιμαστική αναπαράσταση επιστροφής τιμονιού στο κέντρο. [5]



Σχήμα 12 Επιστροφή τιμονιού σε κατάσταση παρκκαρίσματος. [5]

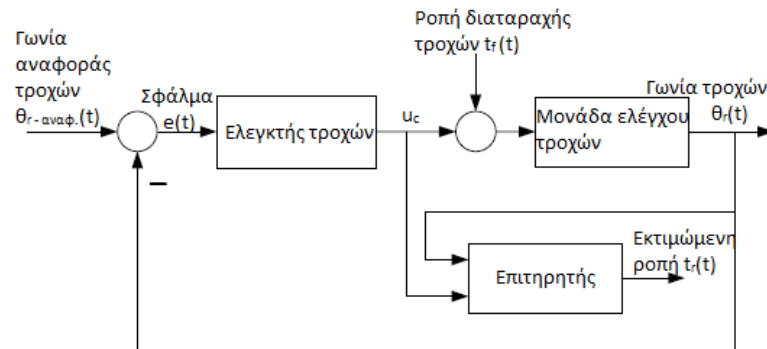
2.6.4 Ροπή ανάδρασης του συστήματος τροχών

Έχει επισημανθεί ότι η πληροφορία της δύναμης κατά την επαφή των τροχών με την επιφάνεια του δρόμου είναι σημαντική για το σύστημα steer by wire. Είναι απαραίτητη προκειμένου να εξασφαλίζει την αίσθηση τιμονιού και να καθορίζει ρεαλιστική ανάδραση της πορείας στον οδηγό του οχήματος. Επίσης χρειάζεται, για να βοηθά το σύστημα τιμονιού να εφαρμόζει ενεργό αυτο – κεντράρισμα τιμονιού.

Ως ένα σύστημα ελέγχου υποβοήθησης, το σύστημα τροχών κατευθύνει τους τροχούς αποβάλλοντας τις εξωτερικές διαταραχές, συμπεριλαμβανομένης της αδράνειας ευθυγράμμισης. Αυτές οι εξωτερικές διαταραχές περιλαμβάνουν την πληροφορία σχετικά με τη δύναμη και τη ροπή της επαφής ελαστικού – επιφάνεια δρόμου. Επομένως, όλες οι απορριφθείσες εξωτερικές διαταραχές λαμβάνονται υπόψη στο σύστημα ελέγχου steer by wire. Χρησιμοποιώντας την τεχνική εκτίμησης σήματος, μπορούν να αποκτηθούν οι πληροφορίες σχετικά με τη δύναμη και τη ροπή της επαφής. Αυτή η εκτιμώμενη μεταβλητή ελαστικού – δρόμου είναι κατά προσέγγιση ίση με τις δυνάμεις τιμονιού που προκαλούν την διεύθυνση του οχήματος. Αναφέρονται και ως ροπή ανάδρασης του συστήματος των τροχών ή ως ροπή στρέψης του συστήματος των τροχών.

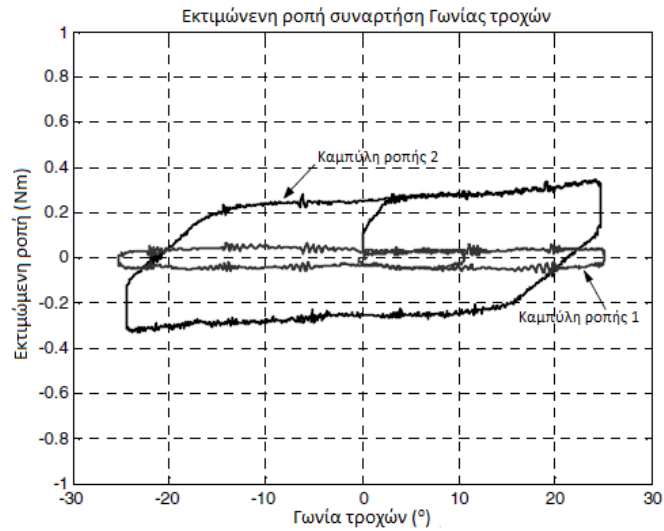
Τα πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης του εκτιμώμενου σήματος της ροπής, περιλαμβάνουν: χαμηλότερο κοστολόγιο επειδή δεν συντρέχει ανάγκη προσθήκης υλικού, χαμηλό θόρυβο σήματος, υψηλή ποιότητα σήματος, καθώς και ευκολία εφαρμογής. Οι δοκιμές οχημάτων έχουν δείξει ότι ο χρόνος απόκρισης του εκτιμώμενου σήματος είναι γρηγορότερος από ότι θα ήταν στην άμεση μέτρηση, η οποία θα χρησιμοποιούσε έναν αισθητήρα ροπής, προσαρμοσμένο στο σύστημα διεύθυνσης του συστήματος τροχών.

Το σχήμα 13 δείχνει ένα σχηματικό διάγραμμα του εκτιμητή σήματος της ανάδρασης των τροχών. Τα δεδομένα εισαγωγής του εκτιμητή περιλαμβάνουν: την γωνία τροχών, το σήμα ελέγχου εξόδου του ελεγκτή των τροχών και τα σχετικά σήματα του οχήματος. Ένας αλγόριθμος αξιόπιστης εκτίμησης εφαρμόζεται, για να αποκτήσουμε το εκτιμώμενο σήμα της ροπής τ_r , δίχως επιπλέον εξοπλισμό. Το σήμα τ_r βρίσκεται σε αναλογία με την πραγματική ροπή ελαστικού τροχού – δρόμου και μεταβάλλεται σύμφωνα με τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος των τροχών, τις εξωτερικές διαταραχές και τις εκάστοτε συνθήκες δρόμου.



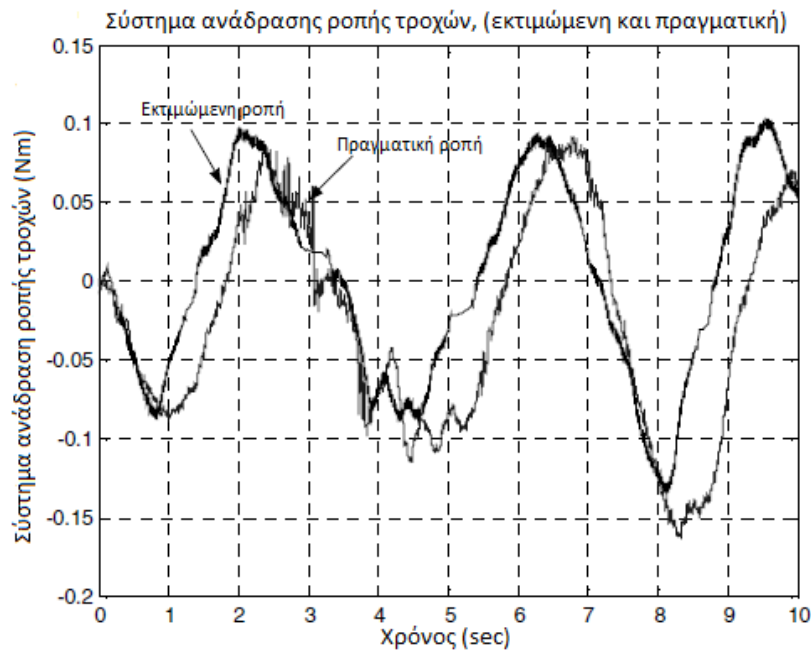
Σχήμα 13 Σχηματικό διάγραμμα του εκτιμητή ροπής συστήματος τροχών. [5]

Το σχήμα 14 δείχνει τα αποτελέσματα της δοκιμής της εκτιμώμενης ροπής σε συνάρτηση με τη γωνία τιμονιού σε ένα δοκιμαστικό όχημα με σύστημα steer by wire. Οι εκτιμώμενες ροπές αποκτούνται στις δύο ακόλουθες περιπτώσεις: στην μία, οι εμπρόσθιοι τροχοί του οχήματος δοκιμής ανυψώνονται από το έδαφος σε τέτοιο βαθμό, ώστε να απομονώνεται η επιρροή της τριβής ελαστικού – εδάφους (καμπύλη ροπής 1), και στην άλλη οι εμπρόσθιοι τροχοί του οχήματος δοκιμάζονται στην κατάσταση στάθμευσης (καμπύλη ροπής 2). Γίνεται αντιληπτό ότι οι εκτιμώμενες ροπές είναι εμφανώς διαφορετικές σε αυτές τις δύο περιπτώσεις. Η εκτιμώμενη ροπή θα μεταβληθεί σύμφωνα με τις διαφορετικές τιμές ροπής ευθυγράμμισης που παρατηρούνται στους διαφορετικούς τύπους επιφανειών δρόμου, όπως ο στεγνός δρόμος, δρόμος με χιόνι ή παγωμένοι δρόμοι.



Σχήμα 14 Διάγραμμα εκτιμώμενης ροπής σε συνάρτηση της γωνίας τιμονιού. [5]

Το σχήμα 15 δείχνει ένα ακόμα αποτέλεσμα για την εκτιμώμενη ροπή σε ένα σύστημα τροχών ενός δοκιμαστικού οχήματος. Το σήμα u_c λαμβάνεται από το σύστημα ελέγχου τροχών, έπειτα τροφοδοτείται στο υποσύστημα ελέγχου του τιμονιού και τροποποιείται με βάση την ταχύτητα του οχήματος v_s ώστε να παρέχει μια ρεαλιστική αίσθηση ανάδρασης του δρόμου, στον οδηγό του οχήματος. Σε αυτή τη δοκιμή δίνεται επίσης ένα σήμα δύναμης το οποίο προέρχεται από άμεση μέτρηση, χρησιμοποιώντας ένα μετρητή τάσης προσαρμοσμένο σε κάποιο σημείο του συστήματος διεύθυνσης. Το μετρημένο σήμα χαρακτηρίζεται από μια εμφανή χρονική καθυστέρηση.



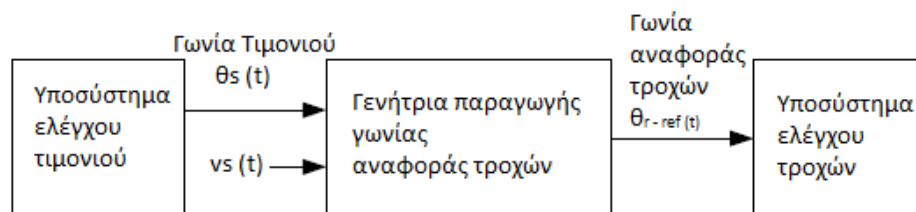
Σχήμα 15 Διάγραμμα εκτιμώμενης και πραγματικής ροπής μετρημένη πάνω στο σύστημα διεύθυνσης. [5]

2.6.5 Μεταβλητός λόγος διεύθυνσης

Η σχέση διεύθυνσης είναι μια σχέση μεταξύ της γωνίας του τιμονιού θ_s και της γωνίας των τροχών θ_r , δηλαδή $\gamma_{sr} = \theta_s/\theta_r$. Έχει καθιερωθεί ως μια σταθερά στα συμβατικά συστήματα διεύθυνσης με υδραυλική υποβοήθηση. Σε μερικά συστήματα διεύθυνσης με μεταβλητή σχέση μετάδοσης, είναι μια λειτουργία της γωνίας τιμονιού.

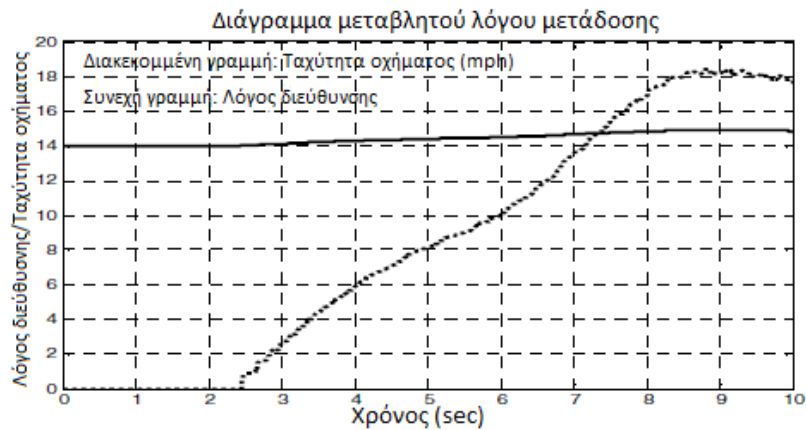
Στα συστήματα *steer by wire*, η σχέση διεύθυνσης μπορεί να είναι ρυθμιζόμενη σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας λογισμικό στον ελεγκτή του *steer by wire*, και αυτό επειδή δεν έχουμε μηχανικές συνδέσεις οι οποίες θα καθόριζαν εξ αρχής το λόγο μετάδοσης. Στην προκειμένη περίπτωση ο λόγος διεύθυνσης είναι μια λειτουργία της γωνίας του τιμονιού θ_s και της ταχύτητας του οχήματος v_s . Η μεταβλητή σχέση διεύθυνσης βελτιώνει την ποιότητα χειρισμού του οχήματος καθώς και τη δυναμική του.

Παρακάτω βλέπουμε σε ένα σχηματικό διάγραμμα τη λειτουργία της μεταβλητής σχέσης διεύθυνσης που συνδέει το υποσύστημα τιμονιού και το υποσύστημα τροχών. Τα δεδομένα εισαγωγής περιλαμβάνουν: τη γωνία τιμονιού θ_s και την ταχύτητα του οχήματος v_s και ως δεδομένα εξόδου τη γωνία αναφοράς του δρόμου θ_{r-ref} . Με άλλα λόγια, η γωνία αναφοράς δρόμου προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της γωνίας τιμονιού θ_s από μια λειτουργία μεταβλητής σχέσης διεύθυνσης. Επειδή το υποσύστημα τροχών μπορεί να ανιχνεύει τη γωνία αναφοράς δρόμου θ_{r-ref} (πορείας), μέσα στον απαιτούμενο χρόνο απόκρισης και τα αμελητέα σφάλματα γωνίας, ο οδηγός του οχήματος μπορεί να ελέγξει άμεσα τη γωνία τροχών θ_r με τη μεταβλητή σχέση διεύθυνσης.

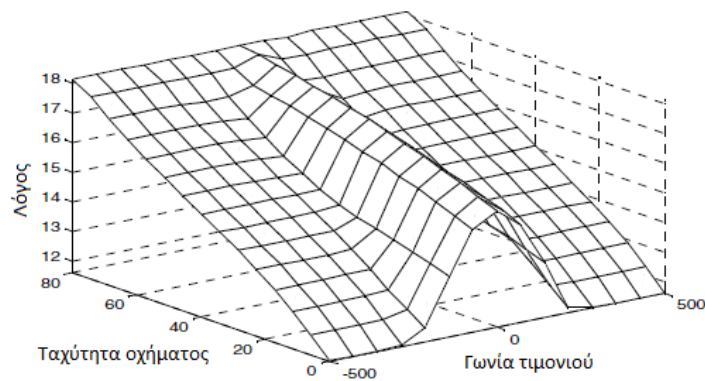


Σχήμα 16 Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας μεταβλητού λόγου διεύθυνσης. [5]

Το σχήμα 17 είναι το αποτέλεσμα μια δοκιμής της σχέσης διεύθυνσης που μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την ταχύτητα του οχήματος, σε ένα δοκιμαστικό όχημα *steer by wire*. Διαφορετικές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εφαρμοστεί η μεταβλητή σχέση διεύθυνσης. Το σχήμα 18 δείχνει μία τρισδιάστατη καμπύλη μεταβλητής σχέσης διεύθυνσης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ασαφούς λογικής, (*fuzzy logic*).



Σχήμα 17 Διάγραμμα Λόγου διεύθυνσης / Ταχύτητα οχήματος συγκριτικά. [5]



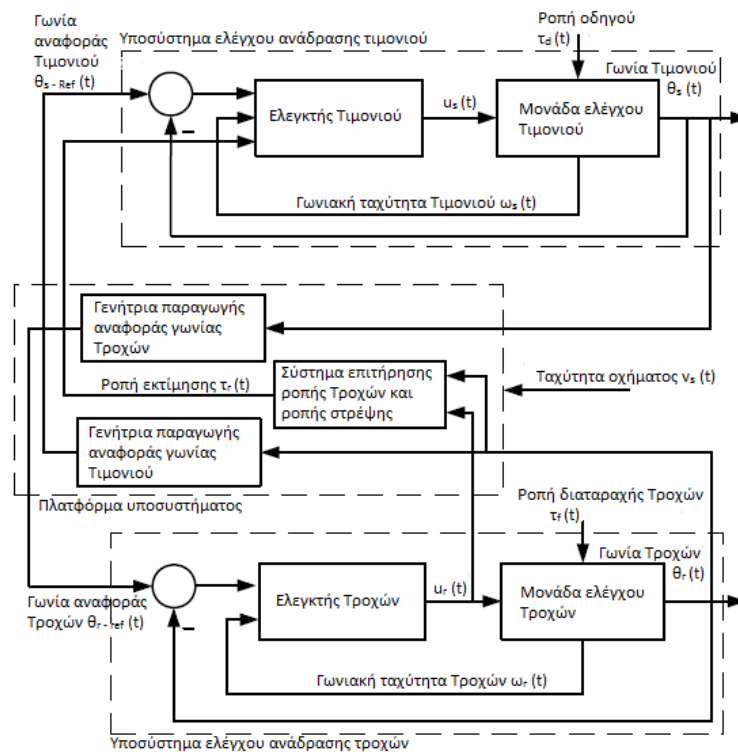
Σχήμα 18 Τριδιάστατο γράφημα του λόγου διεύθυνσης χρησιμοποιώντας την τακτική Ασαφούς λογικής. [5]

2.6.6 Δομή ελέγχου του συστήματος Steer by Wire

Στο σχήμα 19 παρατηρείται ένα διάγραμμα της δομής ελέγχου του συστήματος steer by wire. Περιλαμβάνει ένα υποσύστημα ελέγχου τιμονιού και ένα υποσύστημα ελέγχου τροχών. Τα δύο υποσυστήματα ενσωματώνονται ως ένα σύστημα ελέγχου steer by wire μέσω μιας πλατφόρμας υποσυστήματος. Η πλατφόρμα του υποσυστήματος περιλαμβάνει μια λειτουργία μεταβλητής σχέσης διεύθυνσης, μια λειτουργία μεταβλητής ροπής στρέψης του συστήματος των τροχών και μια λειτουργία μεταβλητής αναφοράς του τιμονιού. Το σύστημα steer by wire που προκύπτει δύναται να εφαρμόσει τις απαιτούμενες λειτουργίες διεύθυνσης σχεδιάζοντας τα υποσυστήματα και το ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου steer by wire έτσι ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις για σταθερότητα, επιδόσεις και αξιοπιστία.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 16 το υποσύστημα ελέγχου τιμονιού αποτελείται από έναν εσωτερικό βρόχο ροπής ανάδρασης, ένα βρόχο ανάδρασης γωνιακού ρυθμού του τιμονιού και ένα βρόχο ανάδρασης θέσης γωνίας τιμονιού. Η απαιτούμενη ροπή αντίδρασης της διεύθυνσης παράγεται εφαρμόζοντας ρυθμιζόμενες παραμέτρους και καμπύλες παραμέτρων για αυτούς τους τρεις βρόχους στον ελεγκτή τιμονιού.

Το εκτιμώμενο σήμα της ροπής στρέψης του συστήματος των τροχών τ_r , χρησιμοποιείται για να σχηματίσει έναν εσωτερικό βρόχο της ροπής ανάδρασης. Η γωνία τιμονιού θ_s και ο ρυθμός μεταβολής διεύθυνσης ω_s χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν το βρόχο ανάδρασης θέσης και το βρόχο ανάδρασης του ρυθμού μεταβολής διεύθυνσης. Το υποσύστημα ελέγχου τιμονιού με τρεις βρόχους ανάδρασης βασιζόμενους σε αυτά τα σήματα, παρέχει τη μεταβλητή ροπή τιμονιού, ενεργή επιστροφή τιμονιού και απόσβεση.



Σχήμα 19 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου steer by wire. [5]

Όσον αφορά το σχήμα 16, το υποσύστημα ελέγχου τιμονιού συνδέεται με το υποσύστημα ελέγχου τροχών μέσω μιας διάταξης λειτουργίας μεταβλητού λόγου διεύθυνσης, έτσι ώστε να παραχθεί η γωνία αναφοράς τροχών $\theta_r - ref$.

Το υποσύστημα ελέγχου τροχών επίσης συνδέεται με το υποσύστημα ελέγχου τιμονιού, μέσω μιας διάταξης επιτήρησης της μεταβλητής ροπής στρέψης του συστήματος των τροχών, και μιας διάταξης επιτήρησης της μεταβλητής γωνίας αναφοράς τιμονιού. Η εκτιμώμενη ροπή στρέψης του συστήματος των τροχών παράγεται από το υποσύστημα ελέγχου των τροχών και τροφοδοτείται στο υποσύστημα τιμονιού μέσω μιας διάταξης επιτήρησης της ροπής στρέψης των τροχών. Η γωνία αναφοράς των τροχών παράγεται μέσω μιας διάταξης επιτήρησης της γωνίας αναφοράς τιμονιού.

Παραμένοντας στο ίδιο σχηματικό διάγραμμα, διαπιστώνουμε ότι το υποσύστημα ελέγχου ανάδρασης των τροχών αποτελείται από έναν εσωτερικό βρόχο ανάδρασης τιμών και έναν εξωτερικό βρόχο ανάδρασης θέσης. Ως δεδομένα εξόδου του συστήματος ελέγχου της ανάδρασης των τροχών περιγράφονται η γωνία τροχών θ_r και ως δεδομένα εισόδου η γωνία αναφοράς τιμονιού $\theta_s - ref$. Σχεδιάζεται ως ένα σύστημα ελέγχου τροχών με τέτοιο τρόπο, ώστε η γωνία τροχών θ_r να ανιχνεύει τη γωνία αναφοράς τιμονιού $\theta_s - ref$ ως δεδομένο εισαγωγής,

με το ελάχιστο δυνατό σφάλμα ανίχνευσης και με γρήγορη απόκριση. Προκειμένου να διατηρηθεί το σφάλμα ανίχνευσης στο ελάχιστο επιθυμητό εύρος, μια στρατηγική ελέγχου μέσω προγραμματισμού χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει τη μεταβολή της δυναμικής του οχήματος που παρατηρείται με τη μεταβολή της ταχύτητας του οχήματος.

Σύμφωνα με τη δομή ελέγχου ενός συστήματος steer by wire και σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, όταν ο οδηγός κρατά ή στρίβει το τιμόνι, μια κατάλληλη αίσθηση τιμονιού παράγεται από το υποσύστημα ελέγχου του τιμονιού που δύναται να ρυθμιστεί από τον οδηγό. Ταυτόχρονα, από τη γωνία τιμονιού δίνεται στο υποσύστημα ελέγχου ανάδρασης των τροχών η γωνία αναφοράς τροχών βασισμένη στη μεταβλητή σχέση διεύθυνσης. Η γωνία τροχών θα εντοπίσει αυτόματα τη γωνία τιμονιού με αμελητέο σφάλμα. Όταν ο οδηγός ελευθερώσει το τιμόνι, η γωνία τροχών και η ροπή τους, θα δοθεί ως σήμα αναφοράς στα δεδομένα εισόδου του υποσυστήματος του τιμονιού για να μεταβάλει το ρυθμό επιστροφής και να καθοριστεί η θέση τιμονιού. Σε αυτήν την περίπτωση το τιμόνι θα επιστρέψει στο κέντρο ή την επιθυμητή γωνία με το ρυθμιζόμενο ρυθμό επιστροφής.

3 Μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή του συστήματος steer by wire σε τρίκυκλο ποδήλατο.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος στην πράξη, σε ένα τρίκυκλο όχημα, στο οποίο θα εφαρμόσουμε το συγκεκριμένο σύστημα steer by wire. Θα ασχοληθούμε συγκεκριμένα με την μελέτη, την σχεδίαση και την κατασκευή του συστήματος πάνω στο όχημα.

Η μελέτη αφορά ένα πρωτότυπο σχέδιο καθώς εφαρμόζεται σε τρίκυκλο όχημα και μέσα σε εργαστηριακά πλαίσια για την επίδειξη του συστήματος πειραματικά και μόνο και όχι μία μόνιμη κατασκευή τουλάχιστον προς το παρόν, έτσι ώστε να μελετήσουμε την λειτουργία του συστήματος καθαυτού. Στο παρακάτω σχήμα 20, απεικονίζεται το τρίκυκλο, στο οποίο θα γίνει η μετατροπή στο σύστημα διεύθυνσης από μηχανικό σε πλήρως ηλεκτρονικά ελεγχόμενο.



Σχήμα 20 Τρίκυκλο ποδήλατο στα πλαίσια πτυχιακής εργασίας εφαρμογής του συστήματος steer by wire.

3.1 Μελέτη και σχεδίαση συστήματος steer by wire στο τρίκυκλο

Αρχικά για να μπορέσουμε να προχωρήσουμε στη σχεδίαση και μετέπειτα στην κατασκευή πρέπει να μελετήσουμε το τρίκυκλο ποδήλατο και γενικά το σύστημα που θα εφαρμόσουμε σε αυτό. Αναλυτικά τι θα πρέπει να μελετήσουμε:

- 1) Υπάρχον σύστημα διεύθυνσης και μετατροπή αυτού.
- 2) Επιλογή ηλεκτροκινητήρα με βάση την δύναμη που απαιτείται για τη στροφή.
- 3) Την κατασκευή τμημάτων για την τοποθέτηση του ηλεκτροκινητήρα κτλ.
- 4) Την επιλογή των υποσυστημάτων ελέγχου (υλικολογισμικό).
- 5) Την τροφοδοσία του υποσυστήματος για την λειτουργία του.
- 6) Προγραμματισμός με βάση κάποιων προδιαγραφών λειτουργίας του συστήματος steer by wire.

3.1.1 Μελέτη για την μετατροπή του υπάρχοντος συστήματος διεύθυνσης

Το σύστημα διεύθυνσης του τρίκυκλου είναι μηχανικό και θα πρέπει να γίνει μετατροπή έτσι ώστε να μπορεί να γίνει εφαρμογή του συστήματος steer by wire. Το

σύστημα τιμονιού είναι τοποθετημένο πάνω στο πλαίσιο με έναν κεντρικό άξονα ο οποίος του επιτρέπει μια ελευθερία κίνησης. Επίσης, το τιμόνι έχει δύο αναμονές στο κάτω μέρος που του επιτρέπουν σύνδεση στα δύο άκρα μια για αριστερά και μια για δεξιά μέσω των δύο ράβδους ζεύξης στα ακραζόνια του συστήματος διεύθυνσης των τροχών. Έτσι, αφαιρώντας τις δύο ράβδους ζεύξης τιμονιού – τροχών το τιμόνι πλέον είναι ανεξάρτητο των τροχών. Επιπλέον, μεταξύ τους οι τροχοί είναι συνδεδεμένοι και με μία ακόμα ράβδο έτσι ώστε να τηρούν την γωνία Ackermann. Δεν προβλέπεται να καταργηθεί αυτή η ράβδος, διότι εμείς θα εγκαταστήσουμε μόνο έναν ηλεκτροκινητήρα οπότε μέσω αυτής πάλι θα καθορίζεται η συγκεκριμένη γωνία. Παρακάτω στο σχήμα 21, φαίνεται το μηχανικό σύστημα διεύθυνσης του τρίκυκλου ποδηλάτου.



Σχήμα 21 Μηχανικό σύστημα διεύθυνσης τρίκυκλου ποδηλάτου.

Το τιμόνι θα παραμείνει ως έχει για την μετέπειτα χρήση του ως τιμόνι αλλά με διαφορετικό τρόπο λειτουργίας χωρίς μηχανικές συνδέσεις. Αναλυτικά θα επεκταθούμε σε άλλη παράγραφο. Επομένως, θεωρητικά, αφαιρώντας τις ράβδους ελευθερώνουμε το τιμόνι από μηχανικές συνδέσεις, αφού σε ένα τέτοιο σύστημα το αναμενόμενο είναι να μην υπάρχουν μηχανικές συνδέσεις μεταξύ τιμονιού – τροχών. Εξάλλου αυτό είναι και το νόημα του όρου *steer by wire*, δηλαδή ηλεκτρονικός έλεγχος διεύθυνσης.

3.1.2 Μελέτη του συστήματος για την επιλογή ηλεκτροκινητήρα

Αρχικά για να μπορέσουμε να στρίψουμε το όχημα αφού δεν έχουμε πλέον μηχανικές συνδέσεις θα πρέπει να έχουμε ένα εξάρτημα που θα το κάνει για εμάς αλλά χωρίς απευθείας σύνδεση μεταξύ τιμονιού – τροχών. Έτσι το πρώτο πράγμα που κάναμε ήταν να μετρήσουμε την ροπή που χρειάζεται για την στρόφιξη του τρίκυκλου, σε στατική τριβή και με ένα άτομο περίπου 80 κιλών πάνω σε αυτό. Πήραμε ένα ροπόμετρο το οποίο το τοποθετήσαμε ακριβώς πάνω στον οριζόντιο άξονα του ακραζονίου και είδαμε ότι στα 9,5 Nm άρχισε ο τροχός να στρέφεται, οπότε θέλαμε έναν ηλεκτροκινητήρα ο οποίος να αποδίδει αυτή την ροπή κατά την διάρκεια λειτουργίας του. Παρακάτω στο σχήμα βλέπουμε το τρίκυκλο κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων και την απαίτηση για ροπή σε στατική τριβή.



Σχήμα 22 Διεξαγωγή μετρήσεων για την ροπή σε στατική τριβή.

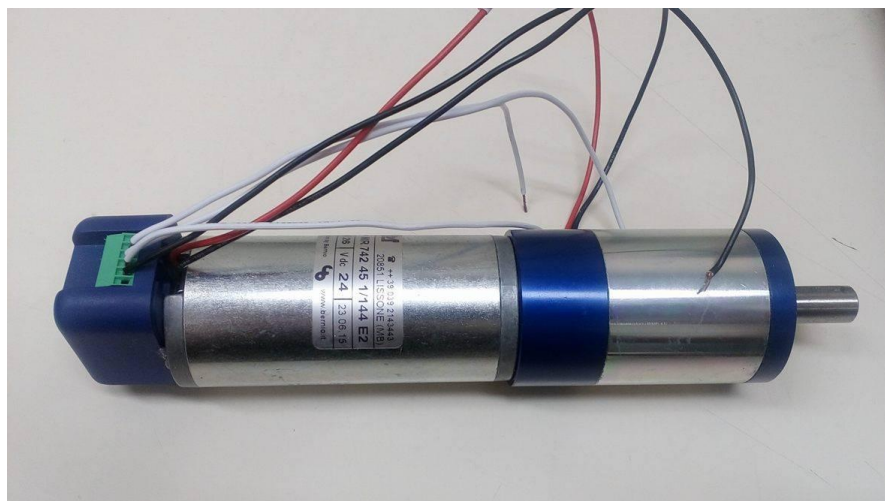
Παράλληλα βλέπουμε και τον πίνακα 1 από διαφορετικό είδος επιφανειών που μελετήσαμε και τη ροπή σε στατική τριβή να αλλάζει ανάλογα με την επιφάνεια.

➤ Πίνακας 1 Μετρήσεις στατικής τριβής διαφορετικού τύπου επιφανειών.

Είδος επιφάνειας	Μέγιστη ροπή που αναπτύχτηκε
Ολισθηρό έδαφος μακέτα	7Nm
Άσφαλτος (Παλαιωμένη)	9,5Nm
Γυαλόχαρτο p80	20Nm

Το όχημα υποθετικά θα κινείται στην άσφαλτο και σε στατική τριβή θα χρειάζεται 9,5Nm ροπής για τα στρίβει επιτόπου, αλλά κατά την κίνηση οι δυνάμεις που θα ασκούνται θα είναι λιγότερες λόγω της αδράνειας. Οπότε ένας ηλεκτροκινητήρας με ισχύ λειτουργίας σε αυτή τη ροπή μας καλύπτει.

Παρακάτω βλέπουμε στο σχήμα 23 τον ηλεκτροκινητήρα που θα χρησιμοποιήσουμε στην κατασκευή για την κίνηση του συστήματος διεύθυνσης.



Σχήμα 23 Ηλεκτροκινητήρας με τον μειωτήρα σαν ενιαίο εξάρτημα.

Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα, για τα οποία άλλωστε επιλέχτηκε, ήταν η ικανότητα του να αποδίδει κατά την λειτουργία του 9,5Nm ροπής και μέγιστη ονομαστική 32Nm, μέγιστο ρεύμα λειτουργίας στα 5,5A και τάση λειτουργίας στα 24volt. Επίσης ο ηλεκτροκινητήρας αποτελείται και από ένα πλανητικό μειωτήρα με σχέση μετάδοσης 1:144 δηλαδή κάθε πλήρη περιστροφή της ατράκτου του μειωτήρα ο ηλεκτροκινητήρας περιστρέφεται 144 φορές. Έτσι μπορούμε να καθορίσουμε και την γωνία στροφής έχοντας αυτό ως δεδομένο. Παρακάτω φαίνονται δύο σχήματα 24 και 25, στο ένα τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτροκινητήρα σε μαύρο περίγραμμα και στο άλλο οι γεωμετρικές διαστάσεις του.

TYPE	RATIO	L mm	*R.P.M. no load min-1	*R.P.M. S 1 min-1	S1 torque Nm	*R.P.M. S2 min-1	S2 torque Nm	Max torque Nm	I max 24 Vdc
MR 742 45 1/4	4	130	900	785	0,17	685	0,29	1,35	5,5
MR 742 45 1/6	6	130	600	554	0,25	490	0,41	1,9	5,5
MR 742 45 1/16	16	146	230	206	0,6	164	1,12	4,2	5,5
MR 742 45 1/24	24	146	150	135	0,91	117	1,65	6,3	5,5
MR 742 45 1/36	36	146	98	82	1,4	73	2,25	8,8	5,5
MR 742 45 1/64	64	162	55	49	1,9	43	3,3	14	5,5
MR 742 45 1/96	96	162	37,5	33	3,1	28	6,2	22	5,5
MR 742 45 1/144	144	162	26	22	5,8	19,5	9,5	32	5,5
MR 742 45 1/216	216	162	16,5	14	7,7	12,5	13,5	32	3
MR 742 45 1/576	576	176	6,7	5,5	18	4,8	32	32	1,6
MR 742 45 1/1296	1296	176	2,9	2,4	32	2,4	32	32	0,65

Σχήμα 24 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτροκινητήρα. [9]

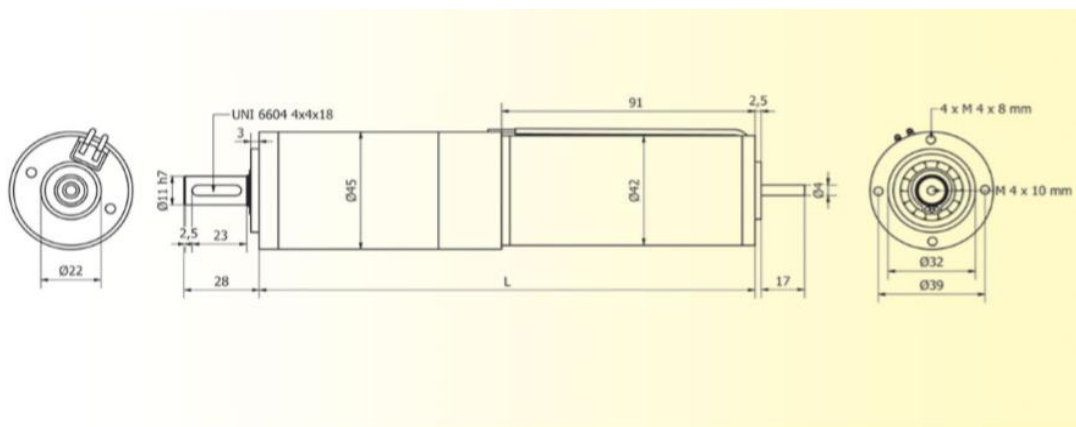
Πίνακας 2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ηλεκτροκινητήρα.

Τύπος	Λόγος Μετάδοσης	Ολικό Μήκος (mm)	Στροφές χωρίς Φορτίο (min^{-1})	Στροφές με Φορτίο1 (min^{-1})	Ροπή με Φορτίο1 (Nm)	Στροφές με Φορτίο2 (min^{-1})	Ροπή με Φορτίο2 (Nm)	Μέγιστη Ροπή (Nm)	Μέγιστο Ρεύμα στα 24V (A)
742 45 1/144	144	162	26	22	5,8	19,5	9,5	32	5,5

*Όπου Φορτίο 1: Δοκιμή με φορτίο (1,2A) και θερμοκρασία 70°C.

*Όπου Φορτίο 2: Δοκιμή με φορτίο (1,6A) και θερμοκρασία 80°C.

*Το μέγιστο ρεύμα αναφέρεται για 2 δευτερόλεπτα κατά την εκκίνηση του ηλεκτροκινητήρα.



Σχήμα 25 Μηχανολογικό σχέδιο ηλεκτροκινητήρα (οι διαστάσεις σε mm). [9]

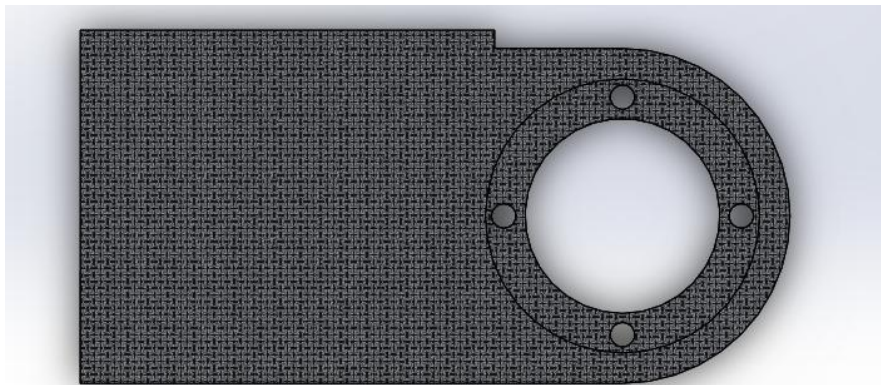
3.1.3 Μελέτη τοποθέτησης ηλεκτροκινητήρα και σχεδιασμός επιμέρους εξαρτημάτων

Για την τοποθέτηση του ηλεκτροκινητήρα το καλύτερο σημείο θεωρητικά, θα ήταν αυτό όπου θα μπορούσε να εγκατασταθεί ευκολότερα στο υφιστάμενο πλαίσιο του τρίκυκλου με τη χαμηλότερη τιμή από κατασκευαστική άποψη και την ευκολία τοποθέτησης των ανταλλακτικών πάνω σε αυτό χωρίς να γίνει μόνιμη η κατασκευή. Η κίνηση των τροχών καθώς και ο τρόπος με τον οποίο θα δινόταν η μετάδοση της κίνησης ήταν και αυτά αντικείμενο μελέτης. Μελετήσαμε αρκετές εκδοχές και η καταλληλότερη περιελάμβανε εμπλοκή του ακραξιονίου με μόνιμο γρανάζι από την μία και από την άλλη βάση στο πλαίσιο, παράλληλα του ακραξιονίου, με τον ηλεκτροκινητήρα να φέρει γρανάζι και αυτός. Έτσι η κίνηση θα γίνει με οδοντωτούς τροχούς και με σχέση μετάδοσης 1:1. Ο λόγος που επιλέξαμε αυτόν το τρόπο λειτουργίας είναι ξεκάθαρα για την ευκολία κατασκευής των εξαρτημάτων αλλά και για την αποφυγή μόνιμης σύνδεσης όπως για παράδειγμα συγκολλήσεις και επεξεργασία με αφαίρεση υλικού από τον άξονα του ακραξιονίου και το ίδιο το πλαίσιο.

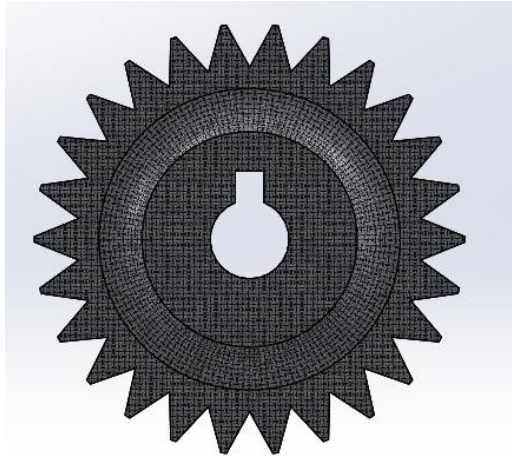
Τα επιμέρους εξαρτήματα είναι η βάση του ηλεκτροκινητήρα που θα δώσει την δυνατότητα στήριξης πάνω στο πλαίσιο και τα γρανάζια, ένα του ηλεκτροκινητήρα και ένα του ακραξιονίου.

Η βάση του ηλεκτροκινητήρα καθώς και τα γρανάζια σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα solidworks. Το solidworks είναι πρόγραμμα τρισδιάστατου σχεδιασμού. Οι διαστάσεις των γραναζιών προέκυψαν ύστερα από κάποιες μετρήσεις που έγιναν πάνω στο τρίκυκλο στα σημεία που θα τοποθετηθούν καθώς και με δεδομένο ότι η μετάδοση κίνησης θα πρέπει να είναι 1:1. Η βάση του ηλεκτροκινητήρα σχεδιάστηκε σύμφωνα με τις διαστάσεις του ίδιου του ηλεκτροκινητήρα αλλά και τους περιορισμούς που θέτει το ίδιο το τρίκυκλο στην ευρύτερη περιοχή τοποθέτησης.

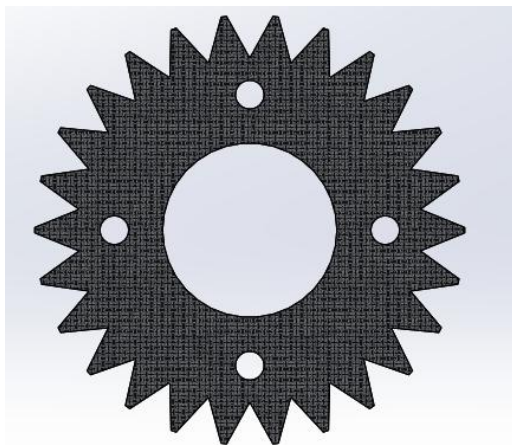
Παρακάτω στα σχήματα φαίνονται τα εξαρτήματα όπως αυτά σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα solidworks, χωρίς τις διαστάσεις τους. Στο πρώτο σχήμα 26, φαίνεται η βάση του ηλεκτροκινητήρα, στο δεύτερο σχήμα 27, το γρανάζι του ηλεκτροκινητήρα και στο τελευταίο σχήμα 28, το γρανάζι του ακραξιονίου.



Σχήμα 26 Βάση ηλεκτροκινητήρα για το αριστερό σημείο στήριξης του στο πλαίσιο (λογισμικό solidworks).



Σχήμα 27 Οδοντωτός τροχός ηλεκτροκινητήρα (λογισμικό solidworks).



Σχήμα 28 Οδοντωτός τροχός ακραζονίου (λογισμικό solidworks).

3.1.4 Μελέτη για το υποσύστημα ελέγχου (υλικολογισμικό)

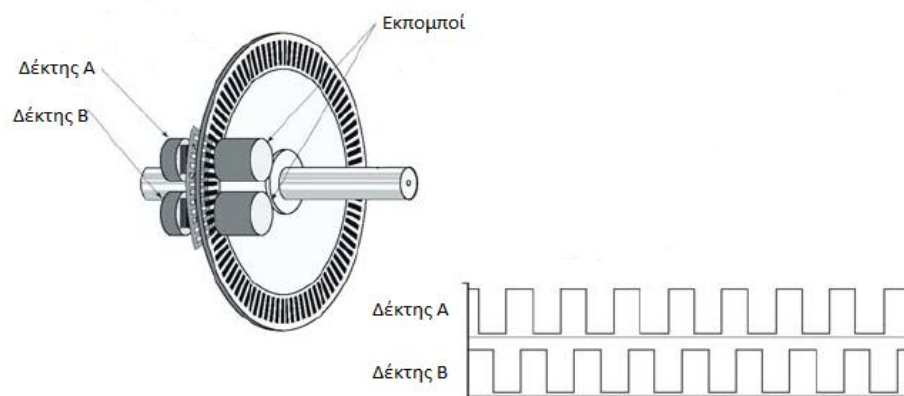
Αρχικά για να προχωρήσουμε στον σχεδιασμό και έπειτα στην κατασκευή θα πρέπει να ξεκαθαρίσουμε τον τρόπο με τον οποίο θα λειτουργεί το σύστημα steer by wire. Αν γίνει μια αναδρομή πίσω στην θεωρία θα πρέπει θεωρητικά να πληρούμε τις εξής προδιαγραφές:

- 1) Αίσθηση της ροπής στο τιμόνι και γενικά της οδήγησης.
- 2) Παρακολούθηση της γωνίας των τροχών.
- 3) Ενεργή επιστροφή του τιμονιού.
- 4) Σύστημα ανάδρασης των τροχών.
- 5) Μεταβλητός λόγος διεύθυνσης.

Επειδή όμως είναι πρακτικά αδύνατο να υλοποιηθούν οι παραπάνω προϋποθέσεις λόγω του κόστους των ανταλλακτικών και έλλειψης τεχνογνωσίας, τουλάχιστον αρκεί να επιτύχουμε ενεργή επιστροφή του τιμονιού ανάλογα με την πρόθεση του οδηγού, δηλαδή τον

έλεγχο κατευθυντικότητας. Προτού περιγράψουμε τα υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε θα αναφέρω μια αποτυχημένη προσπάθεια ελέγχου την κατευθυντικότητας του συστήματος, που προκύπτει ύστερα από μια σειρά προσπαθειών.

Επειδή πρόκειται να χρησιμοποιηθεί encoder στην πρώτη προσπάθεια, θα εξηγηθεί στην επόμενη παράγραφο τί είναι και πως λειτουργεί αυτό το εξάρτημα, σχήμα 29.



Σχήμα 29 Οπτικός αισθητήρας, διάτρητος δίσκος, σήμα από δύο παράγωγα ζεύγη για τον έλεγχο κατεύθυνσης. [10]

Οι οπτικοί αισθητήρες αποτελούνται από δύο τύπους ειδικών διόδων, μία δίοδο εκπομπής και μια φωτο-ευαίσθητη δίοδο. Κατά την λειτουργία του συστήματος η μία δίοδος led τροφοδοτείται με τάση ανάλογα την πηγή της εφαρμογής και τα χαρακτηριστικά κατασκευής της, περίπου 5 – 12Volt. Ο δίσκος που περιστρέφεται στο σύστημα είναι σε κάποια σημεία του διάτρητος έτσι ώστε να περνά το φως που εκπέμπει η δίοδος led όταν χρειάζεται. Όταν σε τμήμα που είναι διάτρητο περάσει το φως της led τότε η αντίστοιχη φωτοδίοδος (δέκτης), που είναι απέναντί της άγει, ενώ στην αντίθετη περίπτωση που θα παρεμβάλλεται μεταξύ τους το έλασμα τότε σταματά να άγει. Το σήμα που παράγεται εκτός από περιοδικό, είναι ψηφιακό με τάση αυτή της τροφοδοσίας. Ανάμεσα στην τάση τροφοδοσίας υπάρχει και μία αντίσταση pull – up, έτσι ώστε η λήψη του σήματος να είναι αξιόπιστη (απορροφά τις παρασιτικές τάσεις). Στα οχήματα συνήθως βρίσκει εφαρμογή στο σύστημα ανάφλεξης, έτσι ώστε να πληροφορεί την μονάδα ελέγχου για την θέση του εκκεντροφόρου και να δίνεται ο σπινθήρας την κατάλληλη χρονική στιγμή. Χρησιμοποιείται ευρέως και για την κατασκευή κωδικοποιητών για την ανάγνωση του αριθμού στροφών της κατασκευής, αλλά μπορεί να γίνεται και ανάγνωση για την θέση που βρίσκεται ο άξονας και την φορά κατεύθυνσής του κάθε χρονική στιγμή, με τον συνδυασμό δύο οπτικών ζευγών με κατάλληλη γωνία. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάγνωση του σήματος που λαμβάνεται από τον αισθητήρα, δηλαδή ποιο σήμα προηγείται και ποιο ακολουθεί.

Η προσπάθεια που έγινε ήταν να ελεγχθεί το σήμα που παράγει έτσι ώστε να γνωρίζουμε και να καθορίζουμε την στροφή αλλά και να θέσουμε ένα όριο της γωνίας της. Τελικά ως κάποιο βαθμό επετεύχθη, δηλαδή υπήρχαν φορές που λειτουργούσε κανονικά και άλλες που έβγαινε εκτός ορίων των προδιαγραφών και αυτό γιατί τέτοιου είδους αισθητήρες χάνουν τη διακριτότητα τους λόγω της κατασκευής τους. Έτσι ήταν αδύνατον να συνεχίσουμε να τον χρησιμοποιούμε με τόσο μεγάλο σφάλμα, καθώς δεν θα είχαμε καμία

ασφάλεια στο σύστημα που μελετάμε. Προέκυψαν και άλλες δυσκολίες αργότερα, όπως σχετικά με τη γωνία αναφοράς του τιμονιού στην κεντρική θέση, κάθε φορά που εκκινούσαμε το όχημα μετά τον τερματισμό του. Τελικά και το στάδιο προγραμματισμού τέτοιου είδους αισθητήρων ήταν μια απελπιστικά δύσκολη διαδικασία.

Στο παρακάτω σχήμα 30, φαίνεται ο encoder που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη προσπάθεια δοκιμής για την λειτουργία του συστήματος διεύθυνσης.



Σχήμα 30 Ο encoder τοποθετημένος στην διάταξη του ηλεκτροκινητήρα με δύο παράγωγα ζεύγη.

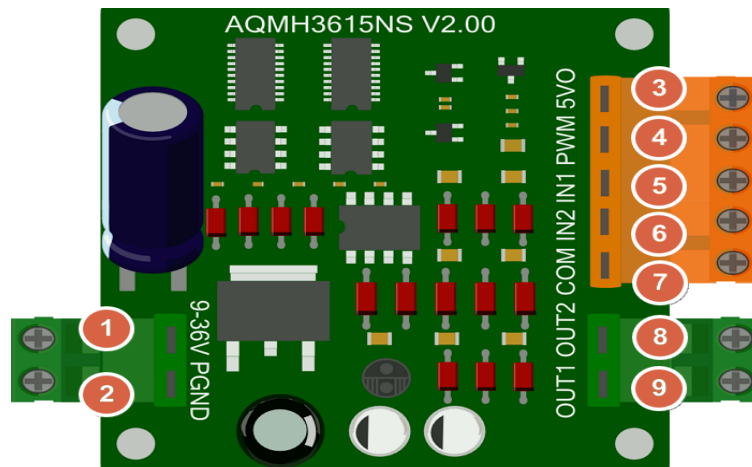
Μια πιο ασφαλής μέθοδος είναι να μετατρέψουμε τον ηλεκτροκινητήρα σε σερβοκινητήρα χρησιμοποιώντας δύο ποτενσιόμετρα που τοποθετούνται, το ένα στον άξονα περιστροφής του τιμονιού, και το άλλο στην άτρακτο του ηλεκτροκινητήρα. Έτσι πετυχαίνουμε τον έλεγχο κατευθυντικότητας και την ενεργή επιστροφή των τροχών κατά την κίνηση του τιμονιού στην κεντρική θέση. Έπειτα θα πρέπει να ελέγξουμε τον ηλεκτροκινητήρα με έναν οδηγό ο οποίος να πληροί τις προδιαγραφές μέγιστης τάσης και έντασης που αναπτύσσει ο ηλεκτροκινητήρας. Έπειτα θα χρειαστεί και ένας μικροελεγκτής ανοιχτού κώδικα έτσι ώστε με κάποιο τρόπο να ελέγξουμε και την λειτουργία του συστήματος με τον κατάλληλο προγραμματισμό καθώς και καλωδιώσεις για σύνδεση των επιμέρους εξαρτημάτων μεταξύ τους.

Έτσι τα εξαρτήματα που επιλέχτηκαν μετά από μελέτη ήταν αρχικά ο οδηγός του ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτροκινητήρα πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί τάση μέχρι 24volt και μέγιστο ρεύμα 5,5A. Παρακάτω φαίνεται στο σχήμα 31, ένα τέτοιο εξάρτημα.



Σχήμα 31 Οδηγός ηλεκτροκινητήρα. [11]

Στην συνέχεια θα δούμε πάλι σε ένα σχήμα την συνδεσμολογία ενός τέτοιου εξαρτήματος, καθώς φέρει ακροδέκτες τόσο για την τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα όσο και για την διαχείρισή του. Η μεθοδολογία ελέγχου του ηλεκτροκινητήρα μέσω του οδηγού του, γίνεται σε συγκεκριμένους ακροδέκτες και αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός μικροελεγκτή ανοιχτού κώδικα. Θα το δούμε αναλυτικά στο σχήμα και στον πίνακα που ακολουθούν, καθώς παρουσιάζει ενδιαφέρον η όλη διαδικασία ελέγχου.



Σχήμα 32 Σχηματική αναπαράσταση οδηγού ηλεκτροκινητήρα. [11]

➤ Πίνακας 3 Τεχνικά χαρακτηριστικά των ακροδεκτών του οδηγού.

Ακροδέκτης 1	Παροχή τροφοδοσίας από πηγή 9 – 36 V (+)
Ακροδέκτης 2	Παροχή τροφοδοσία από πηγή γείωση (-)
Ακροδέκτης 3	Τάση εξόδου 5V
Ακροδέκτης 4	PWM σήμα εισόδου για τον έλεγχο ταχύτητας
Ακροδέκτης 5	Σήμα εισόδου ελέγχου του ηλεκτροκινητήρα 1
Ακροδέκτης 6	Σήμα εισόδου ελέγχου του

	ηλεκτροκινητήρα 2
Ακροδέκτης 7	Γείωση
Ακροδέκτης 8	Τροφοδοσία ηλεκτροκινητήρα (+)
Ακροδέκτης 9	Τροφοδοσία ηλεκτροκινητήρα (-)

Όσον αφορά τους ακροδέκτες 4,5,6 παρακάτω βλέπουμε στον πίνακα τη μεθοδολογία ελέγχου του οδηγού του ηλεκτροκινητήρα.

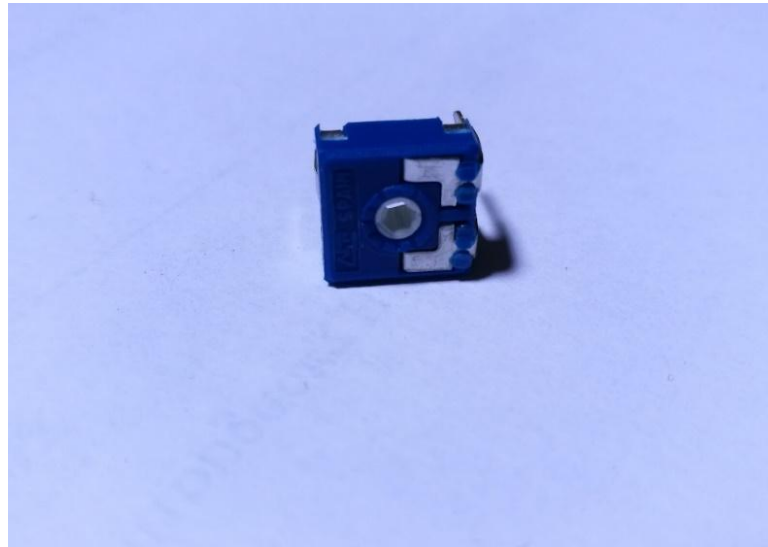
➤ Πίνακας 4 Μεθοδολογία ελέγχου του οδηγού μέσω μικροελεγκτή.

Ακροδέκτης 5	Ακροδέκτης 6	Ακροδέκτης 4	Ακροδέκτης 8,9 συμπεριφορά του ηλεκτροκινητήρα
0	0	x	Σταματά
1	1	x	Ουδέτερος
1	0	1	Δεξιόστροφα 100%
0	1	1	Αριστ/στροφα 100%
1	0	PWM	Δεξιόστροφα PWM
0	1	PWM	Αριστ/στροφα PWM

- Όπου «0» αναφέρεται σε σήμα με τάση (0 – 0,8V)
- Όπου «1» αναφέρεται σε σήμα με τάση (2 – 5V)
- Όπου «PWM» αναφέρεται σε σήμα (0 – 5V) για την ρύθμιση της ταχύτητας
- Όπου «x» δεν έχουμε καθόλου σήμα (PWM)
- Όπου 100% αντιστοιχεί στην λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα στις μέγιστες στροφές.

Στον παραπάνω πίνακα είδαμε την μεθοδολογία ελέγχου του οδηγού του ηλεκτροκινητήρα. Αυτός φυσικά ελέγχεται από έναν μικροελεγκτή που εμείς προγραμματίζουμε. Ο μικροελεγκτής λειτουργεί με τάση ίση με 5V, οπότε το 0 σημαίνει ότι δεν υπάρχει τάση δηλαδή 0V, και το 1 ότι υπάρχει τάση 5V. Το σήμα PWM (pulse width modulation), το οποίο στα ελληνικά σημαίνει διαμόρφωση πλάτους παλμού, καθορίζεται επίσης από μικροελεγκτή μέσω προγραμματισμού και προσδιορίζει κατά περίπτωση την γωνία αναφοράς αλλά και την ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα. Με λίγα λόγια το PWM είναι σήμα τετραγωνικής μορφής, και καθορίζοντας εμείς το πλάτος του επεμβαίνουμε στην εκάστοτε λειτουργία του εξαρτήματος.

Ακολουθούν τα ποτενσιόμετρα. Ένα χρησιμοποιείται για τον ηλεκτροκινητήρα και μπαίνει στην άτρακτο μετά την μείωση, και ένα κάτω από το τιμόνι. Χρησιμοποιούνται δύο από αυτά, το ένα για να δίνει εντολή από το τιμόνι στον ηλεκτροκινητήρα για την γωνία στροφής, και το άλλο για την παρακολούθηση της κατάστασης γωνίας του ηλεκτροκινητήρα σε πραγματικό χρόνο. Αναλόγως την επιθυμητή γωνία αυτός θα σταματά την λειτουργία του. Ο λόγος που χρησιμοποιούμε τα ποτενσιόμετρα είναι προφανώς η εύκολη διαχείρισή τους και ο προγραμματισμός τους, σε αντίθεση με τον encoder. Παρακάτω στο σχήμα 33, βλέπουμε πως μοιάζει εξωτερικά ένα ποτενσιόμετρο που χρησιμοποιήσαμε για την εργασία μας.



Σχήμα 33 Περιστροφικό γραμμικό ποτενσιόμετρο.

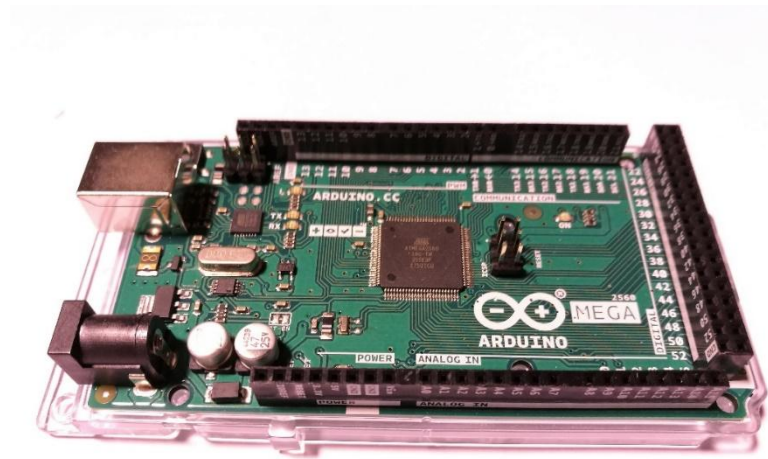
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ποτενσιόμετρων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 5. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η γωνία λειτουργίας του ποτενσιόμετρου είναι 300 μοίρες. Μέσα σε αυτό το φάσμα περιστροφής αλλάζει η αντίστασή του από 0Ω αντίσταση μέχρι 10kΩ.

➤ Πίνακας 5 Τεχνικά χαρακτηριστικά ποτενσιόμετρων.

Αντίσταση	10kΩ
Εύρος αντίστασης	0-10kΩ
Ισχύς	125mW
Ανοχές	± 20%
Μηχανική περιστροφή γωνίας	300°
Μέγιστη τάση λειτουργίας	200V
Τύπος Ποτενσιόμετρου	Γραμμικός

Για την διαχείριση όλων αυτών των εξαρτημάτων επιλέξαμε το μικροελεγκτή της εταιρίας Arduino, το μοντέλο Mega 2560, με λογισμικό ανοιχτού κώδικα. Όλες οι εντολές για

τον έλεγχο του συστήματος steer by wire καθώς και οι προδιαγραφές ελέγχου, αποτυπώνονται μέσα από έναν κώδικα που θα δημιουργήσουμε εμείς και θα περιγράψουμε σε επόμενη παράγραφο. Παρακάτω στο σχήμα 34 βλέπουμε πως μοιάζει εξωτερικά ένας τέτοιος μικροελεγκτής.



Σχήμα 34 Μικροελεγκτής Arduino Mega 2560, ανοιχτού κώδικα.

Ο μικροελεγκτής διαθέτει μία θύρα για την σύνδεση του με τον υπολογιστή, από όπου γίνεται η μεταφορά της πληροφορίας μέσω λογισμικού, και μία θύρα για την τροφοδοσία του με τάση 7 – 12V. Έχει αναλογικές εισόδους για σήματα όπως αυτά που παράγουν τα ποτενσιόμετρα. Επίσης υπάρχουν ψηφιακές εισοδοι και έξοδοι σημάτων καθώς και ψηφιακές έξοδοι σημάτων PWM με τάσεις λειτουργίας των 0 και 5 (V).

3.1.5 Μελέτη τροφοδοσίας του συστήματος

Για την τροφοδοσία των εξαρτημάτων του ηλεκτροκινητήρα, του οδηγού του, του μικροελεγκτή και των ποτενσιομέτρων, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μπαταρίες που να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις τάσης των παραπάνω εξαρτημάτων, έτσι ώστε να λειτουργούν απροβλημάτιστα. Θα πρέπει εξ αρχής να προβλέψουμε και να ελέγξουμε για τυχόν ασυμβατότητες που θα προκύψουν, μεταξύ των εξαρτημάτων. Για παράδειγμα ασυμβατότητα θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε την επιλογή του οδηγού του ηλεκτροκινητήρα σε τάση και ένταση διαφορετικές από αυτές του ηλεκτροκινητήρα, με αποτέλεσμα την καταστροφή του οδηγού σε περίπτωση λειτουργίας εκτός ορίων των προδιαγραφών του.

Αποφασίσαμε λοιπόν σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ηλεκτροκινητήρα, να χρησιμοποιήσουμε για την τροφοδοσία του μέσω του οδηγού του, δύο μπαταρίες οξέος – μολύβδου των 12 V σε σύνδεση με σειρά, έτσι ώστε να έχουμε την επιθυμητή τάση λειτουργίας, δηλαδή αυτή των 24 V. Το μικροελεγκτή (arduino) τον τροφοδοτήσαμε με μία ξεχωριστή αλκαλική μπαταρία με τάση 9 V. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνουμε την

ηλεκτρική απομόνωση των κυκλωμάτων ισχύος και ελέγχου. Τέλος τα ποτενσιόμετρα λειτουργούν με τάση 5 V και τροφοδοτούνται από τον μικροελεγκτή μέσω μίας θύρας που παράγει αυτήν την τάση. Παρακάτω στα σχήματα 35 και 36, βλέπουμε τις μπαταρίες που θα χρησιμοποιήσουμε.



Σχήμα 35 Μπαταρίες τροφοδοσίας ηλεκτροκινητήρα οξέος – μολύβδου.



Σχήμα 36 Αλκαλική μπαταρία τροφοδοσίας μικροελεγκτή.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών μολύβδου – οξέος είναι:

- **Τάση μπαταρίας: 12(V)**
- **Χωρητικότητα: 1,3(Ah/20HR)**
- **Διαστάσεις μπαταρίας: 97.00 x 43.00 x 52.00 (mm)**

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αλκαλικής μπαταρίας είναι:

- **Τάση μπαταρίας: 9(V)**
- **Τύπος μπαταρίας: 6LR61**

3.1.6 Προδιαγραφές λειτουργίας του συστήματος και προγραμματισμός

Με βάση τις προδιαγραφές λειτουργίας που θέτουμε, αλλάζει και ο προγραμματισμός, αλλά και γενικότερα τα εξαρτήματα που θα χρησιμοποιήσουμε. Οι προδιαγραφές που θα θέσουμε εξ αρχής θα απαιτούν τον έλεγχο κατεύθυνσης των τροχών με βάση την γωνία αναφοράς του τιμονιού, καθώς και την ανίχνευση των τροχών με βάση την θέση αναφοράς του τιμονιού. Σύμφωνα με αυτές τις προδιαγραφές επιλέχτηκαν και τα εξαρτήματα που θα διαχειρίζονται την λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα.

Ουσιαστικά, με την κίνηση του τιμονιού από τον οδηγό, ανάλογα την γωνία στροφής, οι τροχοί θα ανιχνεύουν την γωνία αυτή. Αυτό γίνεται εφικτό με τη χρήση αισθητήρων εκ των οποίων ένας θα είναι τοποθετημένος στον άξονα του τιμονιού, και ο άλλος στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα. Φυσικά και ο ηλεκτροκινητήρας συμβάλλει στην πραγματοποίηση της μετάδοσης κίνησης.

Για να συντονιστεί αυτή η λειτουργία θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μικροελεγκτής, ο οποίος μέσω του κατάλληλου προγραμματισμού θα είναι ικανός να διαχειριστεί αυτές τις απαιτήσεις.

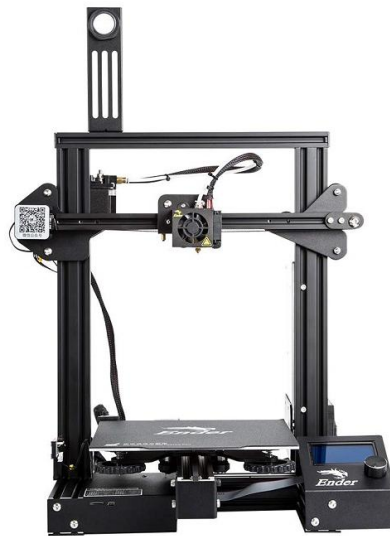
3.2 Κατασκευή συστήματος steer by wire.

Η κατασκευή περιλαμβάνει:

- 1) Τα γρανάζια (ακραξονίου, ηλεκτροκινητήρα) και τη βάση του ηλεκτροκινητήρα.
- 2) Την τοποθέτηση των γραναζιών και της βάσης στήριξης του ηλεκτροκινητήρα στο πλαίσιο του τρικύκλου.
- 3) Τις βάσεις για την τοποθέτηση των αισθητήρων θέσης (ποτενσιόμετρα).
- 4) Την ηλεκτρική σύνδεση των εξαρτημάτων, περιλαμβανομένου και του μικροελεγκτή.
- 5) Την τοποθέτηση των εξαρτημάτων σε συγκεκριμένο σημείο στο τρίκυκλο, μέσα σε ένα πλαίσιο για την προστασία τους.
- 6) Το μηχανισμό ελατηρίων στο τιμόνι για αυτόματη επιστροφή του στο κέντρο.
- 7) Την ανάπτυξη προγραμματισμού για την λειτουργία του συστήματος steer by wire.

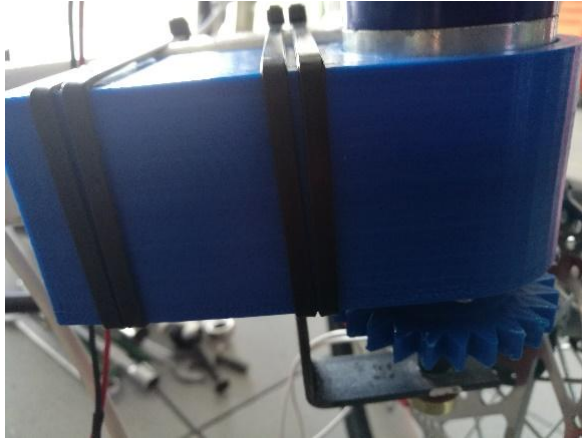
3.2.1 Κατασκευή γραναζιών και βάση ηλεκτροκινητήρα

Για την κατασκευή των γραναζιών και τη βάση χρησιμοποιήσαμε 3D εκτυπωτή και υλικό κατασκευής πλαστικό τύπου (p.l.a), για την επίδειξη και μόνο, και όχι για μόνιμη κατασκευή, επειδή το πλαστικό δεν παρουσιάζει ικανοποιητική αντοχή και διάρκεια στο χρόνο. Τα κομμάτια είναι συμπαγή ώστε να αυξήσουμε όσο το δυνατό την αντοχή τους, έστω και για την επίδειξη. Η διαδικασία για την εκτύπωση περιελάμβανε πρώτα το σχεδιασμό και έπειτα την εξαγωγή του σχεδίου και καταχώρισή του στο λογισμικό του εκτυπωτή. Η διάρκεια εκτύπωσης για τη βάση ήταν περίπου 17 ώρες, για το γρανάκι του ακραξονίου περίπου 2 ώρες, και για το γρανάκι του ηλεκτροκινητήρα περίπου 2,5 ώρες. Έπρεπε να καταχωρηθούν και οι κατάλληλες ανοχές από πριν, έτσι ώστε τα τελικά κομμάτια να εξυπηρετούν το σκοπό χρήσης τους. Παρακάτω στο σχήμα 37 βλέπουμε τον εκτυπωτή που χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή των γραναζιών.



Σχήμα 37 3D εκτυπωτής της εταιρία Creality Enter μοντέλο 3 Pro. [12]

Τα τελικά κομμάτια που προέκυψαν φαίνονται και αυτά στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 38 Βάση ηλεκτροκινητήρα.



Σχήμα 39 Γρανάζι ηλεκτροκινητήρα.



Σχήμα 40 Γρανάζι ακραζονίου.

3.2.2 Τοποθέτηση γραναζιών και βάσης του ηλεκτροκινητήρα στο τρίκυκλο

Για το γρανάζι του ακραζονίου, το οποίο φέρει πάνω του, εσωτερικά της περιμέτρου του, οπές, χρειάστηκε να τρυπήσουμε το ακραζόνιο και να ανοίξουμε σπειρώματα, έτσι ώστε να στηρίξουμε το γρανάζι. Τα σπειρώματα έγιναν στη βάση του ακραζονίου και είναι τυποποιημένα. Οι κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι και αυτοί τυποποιημένοι. Αναλυτικά στον πίνακα που ακολουθεί βλέπουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνδεση. Όλα κατασκευάστηκαν με το χέρι. Οι οπές ανοίχτηκαν με τρυπάνι τυποποιημένο και μετέπειτα έγιναν και τα σπειρώματα με εργαλείο σπειροτόμησης.

➤ Πίνακας 6 Τεχνικών χαρακτηριστικών εξαρτημάτων.

Εξάρτημα	Ποσότητα	Διαστάσεις
Οπές γραναζιού	3	Φ 4
Σπειρώματα βάσης	3	M4 x 8
Φρεζάτος κοχλίας DIN 7991	3	M4 x 12

Το παρακάτω σχήμα 41, δείχνει την τοποθέτηση του γραναζιού στο ακραζόνιο.



Σχήμα 41 Τοποθέτηση γραναζιού στο ακραζόνιο.

Το γρανάζι του ηλεκτροκινητήρα ήταν έτοιμο για τοποθέτηση μετά την ολοκλήρωση της τρισδιάστατης εκτύπωσής του. Το μόνο που χρειάστηκε για την εμπλοκή του με τον κινητήρα ήταν μια σφήνα χάλυβα, η οποία κατασκευάστηκε επίσης με το χέρι. Η σφήνα έχει διαστάσεις 4 x 4 x 18 (mm) και με βάση αυτές τις προδιαγραφές συμμορφώθηκε και το γρανάζι. Το γρανάζι τοποθετήθηκε πάνω στην άτρακτο του ηλεκτροκινητήρα και βιδώθηκε στο κέντρο με έναν κοχλία M4 x 10.

Η βάση του ηλεκτροκινητήρα έχει 4 οπές με διάμετρο 4 (mm), έτσι ο ηλεκτροκινητήρας τοποθετείται χωνευτά και βιδώνεται με 4 κοχλίες M4 x 10 μέσα σε αυτήν. Και τα δύο αυτά εξαρτήματα παράλληλα τοποθετούνται με βάσεις πάνω στο πλαίσιο του τρικύκλου κοντά στο ακραζόνιο, έτσι ώστε τα δύο γρανάζια να έρχονται σε συνεργασία αλλά και να είναι ευθυγραμμισμένα στον κάθετο άξονα μεταξύ ακραζονίου και πλαισίου. Οι βάσεις κατασκευάστηκαν με το χέρι και ανοίχτηκαν οι κατάλληλες οπές για τη συναρμολόγησή τους με τη βάση του ηλεκτροκινητήρα, αλλά και του πλαισίου του τρικύκλου. Οι βάσεις που κατασκευάστηκαν είναι χαλύβδινες και φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 42.



Σχήμα 42 Βάσεις στήριξης ηλεκτροκινητήρα στο πλαίσιο του τρικύκλου.

Η τελική μορφή της σύνδεσης των παραπάνω εξαρτημάτων πάνω στο τρίκυκλο, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 43. Έτσι φάνηκε και το αποτέλεσμα των ανοχών που παρατηρούνται μεταξύ των γραναζιών αλλά και αυτών στο μειωτήρα του ηλεκτροκινητήρα. Μπορούμε να δούμε στην πράξη, ότι λόγω των ανοχών, οι ρόδες παρουσιάζουν νεκρή ζώνη στη μεταξύ τους συνεργασία μέχρι και 3 μοίρες. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την χρήση μεταλλικών γραναζιών και την χρήση μηδενικών ανοχών, όπως στα συμβατικά συστήματα διεύθυνσης. Ο ηλεκτροκινητήρας και αυτός παρουσιάζει ανοχές λόγω του πλανητικού του μειωτήρα όπου και δεν μπορούμε να επεμβούμε.



Σχήμα 43 Τελική μορφή μετά την συναρμογή των εξαρτημάτων στο τρίκυκλο.

3.2.3 Κατασκευή βάσεων για την τοποθέτηση των αισθητήρων

Ο αισθητήρας, βάσει της γωνίας του τιμονιού, στέλνει ένα σήμα στο μικροελεγκτή μεταφέροντας την πρόθεση του οδηγού για στροφή, και μάλιστα το μέγεθος της στροφής σε μοίρες. Από την άλλη ο δεύτερος αισθητήρας στέλνει και αυτός ένα σήμα στο μικροελεγκτή για να τον πληροφορήσει αν έγινε η στροφή και κατά ποια γωνία. Ο μικροελεγκτής σταματά την λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα όταν τα δύο σήματα συμβαδίζουν και έτσι επιτυγχάνουμε και την ενεργή επιστροφή στη θέση 0 (κέντρο), αλλά και τη γωνία στροφής, όταν αυτό απαιτείται.

Επομένως, χρειαζόμαστε δύο αισθητήρες, έναν στο τιμόνι του τρικύκλου και έναν στην άτρακτο του ηλεκτροκινητήρα, μετά την μείωση.

Ο πρώτος εδράζει κάτω από το τιμόνι, σε μία βάση που κατασκευάστηκε κοντά στον άξονα περιστροφής του, και ο δεύτερος κάτω από τη βάση του ηλεκτροκινητήρα, κοντά στο γρανάζι του. Η κάθε σύνδεση είναι μηχανική.

Παρακάτω βλέπουμε στα σχήματα την τοποθεσία που εδράζουν οι αισθητήρες θέσης, ένας για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 44 Βάση αισθητήρα θέσης τιμονιού.

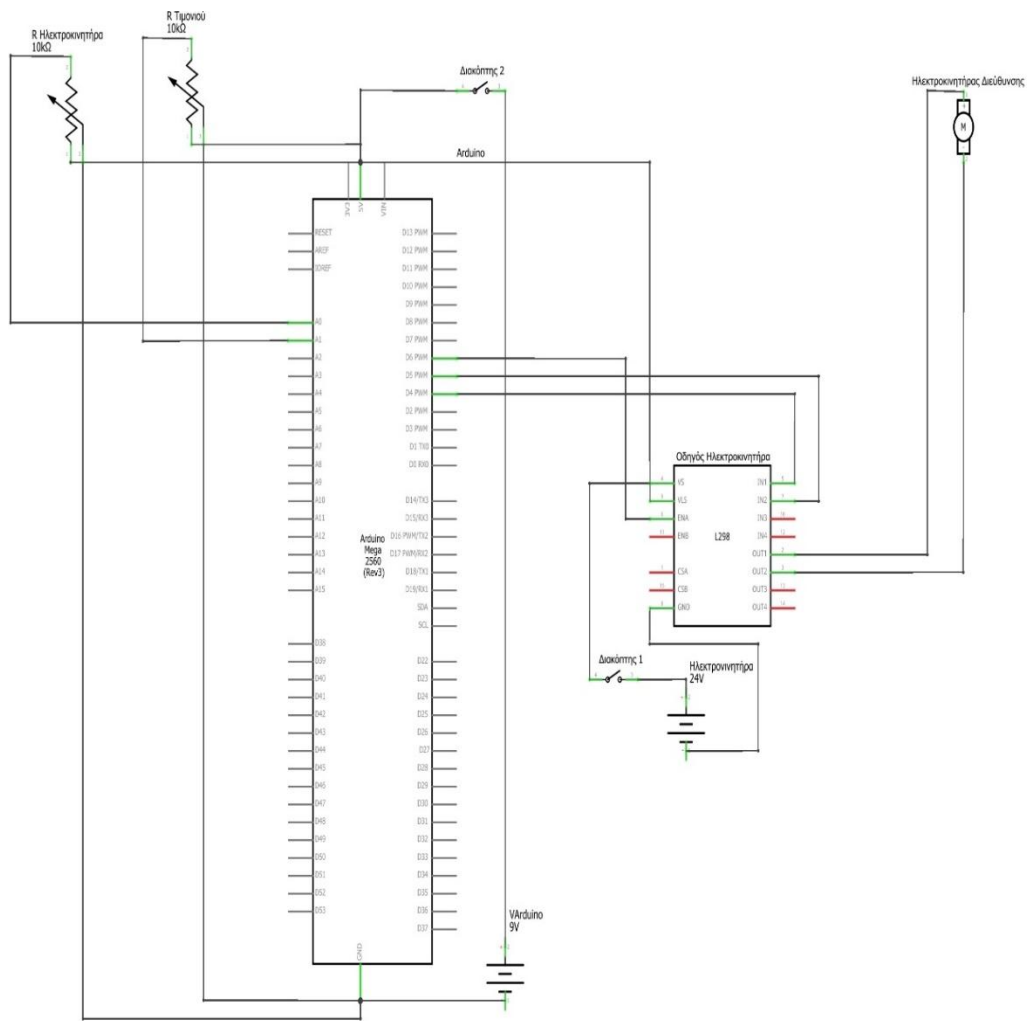


Σχήμα 45 Βάση αισθητήρα θέσης ηλεκτροκινητήρα.

3.2.4 Συνδεσμολογία των ηλεκτρικών εξαρτημάτων του συστήματος Steer by Wire

Ο αρχικός προορισμός των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ήταν ετερόκλητος, αλλά στην περίπτωση της κατασκευής μας θα πρέπει να συνεργάζονται. Έτσι η συνδεσμολογία παίζει σημαντικό ρόλο για την αξιοπιστία της επικοινωνίας μεταξύ τους. Όπως θα δούμε παρακάτω στο ηλεκτρικό σχέδιο των εξαρτημάτων, θα διαπιστώσουμε ότι οι αισθητήρες θέσης έχουν ένα καλώδιο τροφοδοσίας, ένα γείωσης και ένα για επιστροφή σήματος στο μικροελεγκτή, το οποίο είναι αναλογικό λόγω της κατασκευής του. Οι μπαταρίες, που βρίσκονται συνδεδεμένες σε σειρά, τροφοδοτούν τον ηλεκτροκινητήρα μέσω του οδηγού. Ο οδηγός έχει αναμονή για τροφοδοσία από τη μπαταρία, και αναμονή για την τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα, αλλά και ψηφιακές εισόδους για τη διαχείριση της λειτουργίας του κινητήρα, μέσω τριών ακροδεκτών που ελέγχονται από το μικροελεγκτή. Και τέλος υπάρχει μια ξεχωριστή μπαταρία για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή.

Στο παρακάτω σχήμα 46 φαίνεται το ηλεκτρικό σχέδιο του κυκλώματος, όπως αυτό εντάσσεται στο τρίκυκλο.



fritzing

Σχήμα 46 Ηλεκτρική συνδεσμολογία συστήματος *steer by wire* στο τρίκυκλο (λογισμικό fritzing).

3.2.5 Κατασκευή πλαισίου για την τοποθέτηση των ηλεκτρικών εξαρτημάτων στο τρίκυκλο

Για την τοποθέτηση των εξαρτημάτων κατασκευάσαμε ένα ξύλινο πλαίσιο μέσα στο οποίο βρίσκονται οι μπαταρίες, ο μικροελεγκτής, ο οδηγός του ηλεκτροκινητήρα και οι δύο διακόπτες για την ενεργοποίηση του συστήματος, ενσωματωμένοι στα πλάγια. Το πλαίσιο τοποθετήθηκε πίσω και κοντά στον τροχό του ποδηλάτου λόγω έλλειψης εναλλακτικής επιλογής χώρου.

Παρακάτω στο σχήμα 47 φαίνεται το ξύλινο πλαίσιο καθώς και τα εξαρτήματα που ενσωματώνονται μέσα σε αυτό.



Σχήμα 47 Εύλινο πλαίσιο για την τοποθέτηση των ηλεκτρικών εξαρτημάτων.

3.2.6 Κατασκευή μηχανισμού ελατηρίων για την επιστροφή του τιμονιού στο κέντρο

Αυτός ο μηχανισμός αποτελείται από δύο σπειροειδή ελατήρια. Το ένα τοποθετείται στην αριστερή πλευρά του μηχανισμού του τιμονιού και συνδέεται στο πλαίσιο του τρικύκλου, και το άλλο από τη δεξιά πλευρά, σε συμμετρία με το πρώτο. Έτσι δημιουργούνται δύο ίσες δυνάμεις, μια από αριστερά και μία από δεξιά, με αποτέλεσμα το τιμόνι να αποκτά την τάση για επιστροφή του στο κέντρο. Λόγω των ελατηρίων, υπάρχει και μια σχετική ανάδραση κατά το στρίψιμο, που οφείλεται και αυτή στη δύναμη επιστροφής του ελατηρίου στην αρχική του κατάσταση. Προσπαθούμε με αυτό τον τρόπο να επιτύχουμε μια σχετική αίσθηση οδήγησης και όχι μεταβλητή αίσθηση, διότι τα ελατήρια έχουν μια στιβαρότητα η οποία είναι σταθερή βάσει της κατασκευής τους. Επίσης αυτός ο μηχανισμός κατασκευάστηκε αφού αφαιρέσαμε τις ράβδους ζεύξης για να μετατρέψουμε το σύστημα διεύθυνσης του τρίκυκλου από μηχανικό σε ηλεκτρονικό.

Παρακάτω στο σχήμα 48, βλέπουμε το μηχανισμό τιμονιού με τα ελατήρια, όπως αυτός προέκυψε μετά την αφαίρεση των ράβδων ζεύξης.



Σχήμα 48 Μηχανισμός ελατηρίων τοποθετημένα στον μηχανισμό τιμονιού.

Στα αυτοκίνητα η ενεργή επιστροφή του τιμονιού στο κέντρο γίνεται με εντελώς διαφορετικό τρόπο από ότι σε μια κατασκευή με ελατήρια. Αυτό οφείλεται στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος ανάρτησης, και συγκεκριμένα στην γωνία caster.

Πρόκειται για τη γωνία που διαγράφουν οι τροχοί σε σχέση με τον νοητό κατακόρυφο άξονα περιστροφής τους. Η γωνία caster μπορεί να είναι αρνητική ή θετική: Εάν η προέκταση του νοητού άξονα περιστροφής του τροχού τέμνει το δρόμο εμπρός από το ίχνος της κατακόρυφου, τότε αυτή η γωνία που σχηματίζεται είναι θετική, δηλαδή έχουμε θετική caster, στην αντίθετη περίπτωση έχουμε αρνητική caster. Με τη γωνία caster εκμεταλλευόμαστε το βάρος του οχήματος, έτσι ώστε οι τροχοί να επιστρέφουν ενεργά στο κέντρο. Το βάρος εφαρμόζεται μπροστά ή πίσω από το σημείο επαφής του ελαστικού με την εκάστοτε επιφάνεια, δημιουργώντας έτσι μια ροπή που οφείλεται στην τριβή, και αναγκάζει τους τροχούς να ευθυγραμμιστούν. Για το λόγο αυτό παρατηρούμε ότι το τιμόνι έχει την τάση να επανέρχεται στο κέντρο μετά από μία στροφή. Για τον ίδιο λόγο, σε ευθεία πορεία, το αυτοκίνητο δε χρειάζεται παρά ελάχιστες διορθώσεις προκειμένου να παραμείνει σταθερά στην πορεία του. Αυτό επιτυγχάνεται μόνο με θετική γωνία caster.

Αντί των ελατηρίων, μπορούσαμε να έχουμε έναν ηλεκτροκινητήρα ανάδρασης για την ενεργή επιστροφή του τιμονιού στην κεντρική θέση. Αυτό θα απαιτούσε από κατασκευαστικής άποψης έναν ξεχωριστό ηλεκτροκινητήρα και έναν αισθητήρα θέσης, οι οποίοι θα έπρεπε να ενσωματωθούν στον άξονα περιστροφής του τιμονιού, και έναν αισθητήρα ροπής ο οποίος θα έπρεπε να τοποθετηθεί στον άξονα περιστροφής των τροχών. Έτσι ο αισθητήρας ροπής θα μπορούσε να αντιληφθεί το μέγεθος της ροπής που προκαλείται στον τροχό κατά την επαφή του με το δρόμο, κατά την έξοδό του από στροφή, ή και σε ευθεία πορεία, έτσι ώστε μέσω του μικροελεγκτή να παρέχει την απαραίτητη ανάδραση στο σύστημα τιμονιού και στον οδηγό. Αυτό παράλληλα θα απαιτούσε στην πράξη ακόμα πιο περίπλοκη ανάπτυξη προγραμματισμού, καθώς και πολυπλοκότητα τοποθέτησης των εξαρτημάτων τοποθέτησης στο σύστημα τιμονιού-τροχών.

3.2.7 Ανάπτυξη προγραμματισμού για την λειτουργία του συστήματος Steer by Wire

Πριν εξηγήσουμε το βασικό προγραμματισμό με τον οποίο ασχοληθήκαμε, θα αναπτύξουμε μία διαδικασία, η οποία αφορά τη ρύθμιση των αισθητήρων θέσης για την ομαλή λειτουργία και το σωστό προγραμματισμό μετέπειτα.

Όπως εξηγήσαμε και σε προηγούμενη παράγραφο, οι αισθητήρες θέσης είναι ουσιαστικά ποτενσιόμετρα και στο εσωτερικό τους υπάρχουν μεταβλητές αντιστάσεις. Όταν εμείς στρίβουμε το τιμόνι αριστερά ή δεξιά, μεταβάλλονται και οι τιμές της αντίστασης του αισθητήρα, οι οποίες βρίσκονται υπό τη μορφή σήματος εξόδου. Η αντίσταση που θα έχουμε όταν στρίψουμε τέρμα αριστερά θα είναι διαφορετική από αυτήν όταν στρίψουμε το τιμόνι τέρμα δεξιά. Αναφέρουμε επίσης ότι ο αισθητήρας θέσης παίρνει κίνηση από τον άξονα του τιμονιού, στον οποίο είναι τοποθετημένος. Ακόμα ο αισθητήρας περιλαμβάνει και τερματικές θέσεις, και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο κρίνεται αναγκαίο να ρυθμιστεί, έτσι ώστε να μη φτάσει ποτέ σε αυτό το σημείο, αλλά και να βρίσκεται στο κέντρο του με βάση το οποίο να λειτουργεί.

Αυτές οι ρυθμίσεις έγιναν με την βοήθεια του λογισμικού της εταιρίας Arduino και παρακάτω θα δούμε τον κώδικα που χρησιμοποιήσαμε για να επιτύχουμε τη μέτρηση και τη ρύθμιση των αισθητήρων θέσης. Η διαδικασία ρύθμισης ακολουθήθηκε και για τον αισθητήρα του τιμονιού αλλά και για τον αισθητήρα του ηλεκτροκινητήρα, καθώς στο βασικό προγραμματισμό, αυτό που επιδιώκουμε είναι τα δύο σήματα αυτά να συμπίπτουν, έτσι ώστε ο ηλεκτροκινητήρας να δίνει την κατάλληλη γωνία στροφής στους τροχούς, η οποία θα είναι ανάλογη με τη γωνία του τιμονιού που εισάγεται από τον οδηγό.

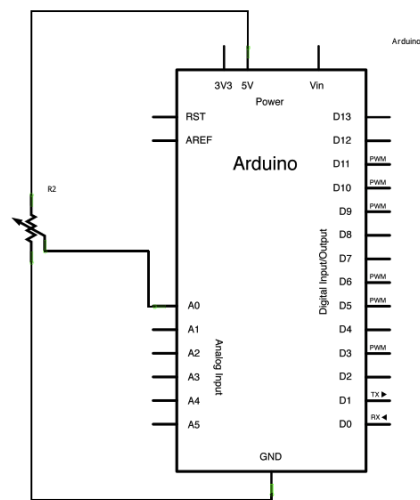
```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
}  
void loop() {  
  int PotValue = analogRead(A0);  
  Serial.println(PotValue);  
}
```

Ο προγραμματισμός αυτός μας δίνει κάποιες πληροφορίες, στη σειριακή οθόνη του λογισμικού, για την γωνία του αισθητήρα, υπό τη μορφή τάσης. Αυτή η γωνία προκύπτει ως εξής: Ο αισθητήρας τροφοδοτείται με τάση 5(V) από το μικροελεγκτή. Καθώς περιστρέφουμε τον αισθητήρα, αλλάζει η αντίσταση στον ακροδέκτη του σήματος, και κατά συνέπεια της τάσης που παράγεται.. Στο ένα άκρο η αντίσταση γίνεται η μέγιστη και στο άλλο η ελάχιστη, και σε αυτήν την περίπτωση η τάση του σήματος θα είναι 0(V) και 5(V) αντίστοιχα. Ο μικροελεγκτής είναι εφοδιασμένος στο εσωτερικό του με A/D Converter που

μετατρέπει το αναλογικό σήμα του αισθητήρα θέσης σε ψηφιακό. Έτσι μετατρέπει το αναλογικό σήμα που παράγεται, σε αριθμούς μεταξύ 0 και 1023. Επομένως, όταν περιστρέφεται μέχρι τέλους ο άξονας του αισθητήρα, από τη μια πλευρά παράγονται 0(V) πράγμα το οποίο αντιστοιχεί στον αριθμό 0, και από την άλλη πλευρά 5(V), που αντιστοιχούν στον αριθμό 1023. Ανάλογα με τη θέση παράγονται και οι ενδιάμεσοι αριθμοί.

Σύμφωνα με αυτό τον τρόπο λειτουργίας, πραγματοποιήσαμε και το κεντράρισμα του αισθητήρα θέσης. Το καταλληλότερο σημείο που μπορούμε να θεωρήσουμε ως κέντρο, από μαθηματικής άποψης, εκφράζεται με τον αριθμό 510. Καθώς το τιμόνι ήταν στο κέντρο και ταυτόχρονα περιστρέψαμε τον άξονα του αισθητήρα, παρακολουθούσαμε τη σειριακή οθόνη αναμένοντας την εμφάνιση του αριθμού 510 . Η στιγμή αυτής της εμφάνισης σηματοδοτεί και το επιτυχημένο κεντράρισμα του αισθητήρα.

Παρακάτω στο σχήμα 49, βλέπουμε την ηλεκτρική συνδεσμολογία του αισθητήρα θέσης, όπως ακολουθήθηκε για το καλιμπράρισμά του.



Σχήμα 49 Ηλεκτρική συνδεσμολογία αισθητήρα θέσης. [13]

Μετά από αυτή την διαδικασία που ακολουθήθηκε, θα δούμε παρακάτω και το βασικό κώδικα που κατασκευάσαμε για την λειτουργία του συστήματος steer by wire.

Αρχικά βλέπουμε τον κώδικα που συνθέσαμε και έπειτα θα περιγράψουμε τη λειτουργία που εκτελείται μέσω αυτού. Η σύνθεση του κώδικα έγινε με τη χρήση λογισμικού της εταιρίας Arduino.

```
byte motor_p1 = 4;
```

```
byte motor_p2 = 5;
```

```
byte pwmPin = 6;
```

```
int currentAngle;
```

```

int requiredAngle;
int errorAmount;
int remappedErrorAmount;
byte acceptableError = 10;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(motor_p1, OUTPUT);
  pinMode(motor_p2, OUTPUT);
  pinMode(pwmPin, OUTPUT);
}
void loop()
{
  readAndConditionAngle();
  readAndConditionRequiredAngle();
  if (currentAngle<requiredAngle){
    digitalWrite(motor_p1, HIGH);
    digitalWrite(motor_p2, LOW);
  } if (currentAngle>requiredAngle){
    digitalWrite(motor_p1, LOW);
    digitalWrite(motor_p2, HIGH);
  }
  calculateErrorAmount(currentAngle,requiredAngle);
  analogWrite(pwmPin,remappedErrorAmount);
  Serial.println(currentAngle);
}
void calculateErrorAmount(int currentAngle,int requiredAngle){
  errorAmount=abs(currentAngle-requiredAngle);
  remappedErrorAmount=map(errorAmount, 0, 300, 0, 200);
  if (remappedErrorAmount<acceptableError){

```

```

remappedErrorAmount=0;
}
}
void readAndConditionAngle() {
currentAngle = analogRead(0);
if (currentAngle<200){
currentAngle=200;
} if (currentAngle>760) {
currentAngle=760;
}
}
void readAndConditionRequiredAngle() {
requiredAngle = analogRead(1);
if (requiredAngle<200){
requiredAngle=200;
} if (requiredAngle>760) {
requiredAngle=760;
}
}
}

```

Ο συγκεκριμένος κώδικας εξυπηρετεί τη σωστή λειτουργία του συστήματος αλλά και συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές που έχουμε θέσει εξ αρχής. Δηλαδή ο ηλεκτροκινητήρας περιστρέφεται ανάλογα με τη γωνία που εισάγεται και στο τιμόνι.

Αντιστοιχίσαμε τη γωνία στροφής του τιμονιού σε τάση. Για να συνεχίσουμε να περιγράφουμε την λειτουργία του κώδικα, θα πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε πως στην πλευρά που τοποθετήσαμε τον ηλεκτροκινητήρα, διεξήγαμε κάποιες μετρήσεις της γωνίας περιστροφής του αριστερού τροχού. Η γωνία μετρήθηκε εξωτερικά (αριστερή στροφή), στις 30 μοίρες και εσωτερικά (δεξιά στροφή), στις 26 μοίρες. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ηλεκτρονικού μοιρογνωμονίου.

Καθώς γνωρίζουμε την εξωτερική και εσωτερική γωνία σε μοίρες, μέσω του πρώτου κώδικα που αναφέραμε σε προηγούμενη παράγραφο, μπορέσαμε να βρούμε την γωνία σε μορφή τάσης. Έτσι οι 30 μοίρες αριστερής στροφής μεταφράζονται μέσω του μικροελεγκτή, σε μια τιμή 300, και οι 26 μοίρες της δεξιάς στροφής, σε 760.

Παρακάτω στο σχήμα 50, βλέπουμε το ηλεκτρονικό μοιρογνωμόνιο που χρησιμοποιήσαμε για τη μέτρηση της γωνίας στροφής των τροχών.



Σχήμα 50 Ηλεκτρονικό μοιρογνωμόνιο της Εταιρίας Beta.

3.3 Υπολογισμός κόστους κατασκευής του συστήματος Steer by Wire

Παρακάτω θα δούμε το κοστολόγιο των εξαρτημάτων και των υλικών που προμηθευτήκαμε, και δε θα συμπεριλάβουμε στο κόστος την εργασία μας, όπως και τα ανταλλακτικά που κατασκευάσαμε μόνοι μας.

➤ Πίνακας 7 Κοστολόγιο κατασκευής.

Αριθμός	Εξάρτημα	Τιμή με Φ.Π.Α σε Ευρώ
1	Ηλεκτροκινητήρας	148 €
2	Μικροελεγκτής Arduino	42,6 €
3	Οδηγός Ηλεκτροκινητήρα	35,2 €
4	Μπαταρία μολύβδου-Οξέος	2 x 9,5 € = 19 €
5	Αλκαλική Μπαταρία	4,5 €
6	Καλωδίωση και προστασία	9 €
7	Ποτενσιόμετρα	2 x 1 € = 2 €
8	Διακόπτες	2 x 3 € = 6 €
9	Βίδες και ελατήρια	5 €
10	Βάση και γρανάζια	20 €

Το συνολικό κόστος κατασκευής ανέρχεται σε 291.3 €.

Συμπεράσματα

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία περιγράφουμε την υλοποίηση ενός απλού συστήματος steer by wire σύμφωνα με τις απαιτήσεις των λειτουργιών της διεύθυνσης του οχήματος και του συστήματος ελέγχου αυτού. Οι διαφορετικές απαιτήσεις της λειτουργίας διεύθυνσης μετατρέπονται σε προβλήματα σχεδιασμού του ελέγχου και λύνονται χρησιμοποιώντας ένα σύστημα ελέγχου με απλές δομές ελέγχου. Το σύστημα που προκύπτει παρέχει **ρυθμιζόμενη αίσθηση τιμονιού με ρεαλιστική ανάδραση ελαστικού – δρόμου, ενεργή επιστροφή τιμονιού με ρυθμιζόμενο ρυθμό επιστροφής, γρήγορο και ακριβή εντοπισμό της γωνίας τροχών με βάση τα δεδομένα εισόδου του οδηγού και μεταβλητή σχέση διεύθυνσης.**

Βιβλιογραφία

Άρθρο σε επιστημονικό περιοδικό

[1] Yixin Yao, “Vehicle Steer-by-Wire System Control,” SAE International, ISSN 0148-7191, April 3-6, 2006

Βιβλίο

[2] Δημήτριος Πράπας, “ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ Αρχές και Εφαρμογές,” Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλα, 2014.

[3] Κωνσταντίνος Καλοβρέκτης, “ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ Τεχνικές και Διατάξεις,” Εκδόσεις Τζιόλα, 2015.

[4] Dominique Paret, “Multiplexed Networks for Embedded Systems CAN, LIN, FlexRay, Safe-by-Wire,” Εκδόσεις Wiley, 2007.

Σχήματα από επιστημονικό περιοδικό

[5] Σχήματα 2,4-19, Yixin Yao, “Vehicle Steer-by-Wire System Control,” SAE International, ISSN 0148-7191

Κεφάλαιο σε πτυχιακή εργασία

[6] Βασίλειος Καρύδας και Γεώργιος Κοντοζήσης, “ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΡΙΚΥΚΛΟΥ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗ,” Θεσσαλονίκη, 2013, σελ. 51-52.

Ηλεκτρονικές πηγές

[7] <https://mymotorwheels.wordpress.com/2017/02/10/have-you-ever-wondered-what-is-drive-by-wire-or-x-by-wire/>.

[8] <https://www.invetr.com/chassis/steer-by-wire>.

[9] <http://www.bernio.it/en/mr-742-45-2c-12-24-vdc-30-w-o-46.html>.

[10] https://www.researchgate.net/figure/Incremental-optical-encoder-of-a-type-often-used-for-measuring-the-motor-shaft-position_fig10_228362381.

[11] https://wiki.dfrobot.com/15A_Single_DC_Motor_Driver_SKU_DRI0042.

[12] <https://grobotronics.com/3d-printer-creality-3d-ender-3-pro.html>.

[13] <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/AnalogReadSerial>.