

Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών



Διπλωματική Εργασία

# Ανάπτυξη ηλεκτρονικού συστήματος μετρήσεων για έλεγχο ηλεκτρικών οχημάτων

Ιωάννης Σταματιάδης

Εξεταστική Επιτροπή :

Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος

Καθηγητής Τσουρβελούδης Νικόλαος

Φεβρουάριος 2022



## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εκπονήθηκε στο πλαίσιο κατασκευής του νέου ηλεκτρικού οχήματος της φοιτητικής ομάδας TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός πρωτότυπου ηλεκτρονικού συστήματος μετρήσεων για τον αξιόπιστο και αποδοτικό έλεγχο του συνόλου των συστημάτων που απαιτεί για την λειτουργία του ένα όχημα κυψέλης υδρογόνου.

Η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την υποστήριξη και συμμετοχή ορισμένων ανθρώπων, για τους οποίους θέλω να πάρω την ευκαιρία να ευχαριστήσω. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω :

Πρώτα από όλα, τα μέλη της ομάδας TUCer και ειδικά τα μέλη της ομάδας ηλεκτρονικών Κουτσούμπα Λουκά και Χριστοδουλάκη Γιώργο, για την συμβολή τους σε αυτή την διπλωματική εργασία και γενικότερα για τις ευχάριστες και δημιουργικές στιγμές που μοιραστήκαμε.

Τον κ. Πιπερίδη Σάββα, που ανήκει στο εργαστηριακό και διδακτικό προσωπικό της Σχολής Μ.Π.Δ και υπεύθυνο της ομάδας, για την καθοδήγηση και υποστήριξη του όλο τον καιρό της συμμετοχής μου στην ομάδα.

Τον κ. Κουτρούλη Ευτύχιο, Καθηγητή της Σχολής Η.Μ.Μ.Υ, για την προθυμία του να αναλάβει την επίβλεψη της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και για την άριστη μεταξύ μας συνεργασία και επικοινωνία.

Τον κ. Τσουρβελούδη Νικόλαο, Καθηγητή της Σχολής Μ.Π.Δ, για την συμμετοχή του στην επιτροπή αξιολόγησης αυτής της εργασίας και την επίβλεψη της ομάδας.

Τον κ. Σταυραράκη Γεώργιο, Καθηγητή της Σχολής Μ.Π.Δ, για την συμμετοχή του στην επιτροπή αξιολόγησης αυτής της εργασίας.

Τους φίλους μου Γιάννη Γ. , Γιάννη Κ. , Κώστα, Μιχάλη Α. , Μιχάλη Γ. και Παντελή για τις αμέτρητες όμορφες στιγμές που μοιραστήκαμε τα τελευταία πέντε χρόνια.

Και περισσότερο από όλους, για όλα αυτά που μου έχουν προσφέρει, τα οποία δύσκολα καταγράφονται σε μία σελίδα χαρτί, την οικογένεια μου Στέλιο, Λίζα και Σπύρο, στους οποίους αφιερώνω και αυτή την εργασία.

## Περίληψη

Τα οχήματα κυψέλης υδρογόνου αποτελούν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση απέναντι στα οχήματα με ρυπογόνους κινητήρες εσωτερικής καύσης, ή με μεγάλες βραδυφόρτιστες συστοιχίες μπαταριών. Ωστόσο, η δυσκολία παραγωγής καθαρού υδρογόνου ως καύσιμο για κυψέλες υδρογόνου, αλλά και η υψηλή πολυπλοκότητα των συστημάτων μετρήσεων και ελέγχου τους, στέκονται εμπόδια στην ευρεία χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας από το κοινό.

Με γνώμονα τα παραπάνω, αντικείμενο αυτής της εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη ενός απλού, ασφαλούς και αξιόπιστου συστήματος μετρήσεων για τον έλεγχο ενός πρωτότυπου ηλεκτρικού οχήματος κυψέλης υδρογόνου. Το πρωτότυπο όχημα στο οποίο στηρίζεται το σύστημα που αναπτύχθηκε, αποτελεί το νέο όχημα E.R 2021 της ομάδας TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το όχημα αυτό χρησιμοποιεί μία κυψέλη υδρογόνου ανταλλαγής πρωτονίων, η οποία σε συνεργασία με μια συστοιχία υπερπυκνωτών, τροφοδοτούν έναν κινητήρα τριών φάσεων χωρίς ψήκτρες. Για τον έλεγχο της λειτουργίας των παραπάνω μονάδων και των υποστηρικτικών μερών που παρεμβάλλονται στο σύστημα, αλλά και με στόχο την διασφάλιση της οικονομίας υδρογόνου και της ασφάλειας του οδηγού, στο όχημα χρησιμοποιείται ένα σύνολο δέκα διαφορετικών αισθητήρων. Τον ρόλο της διασύνδεσης των παραπάνω αισθητήρων, της συλλογής των μετρήσεων τους, αλλά και του ελέγχου των μερών του συστήματος με βάση τις παραπάνω μετρήσεις, θα αναλάβει το πρωτότυπο ηλεκτρονικό κύκλωμα που αναπτύσσεται σε αυτή την εργασία. Το ίδιο αποτελείται από οκτώ διαφορετικά υποκυκλώματα, τα οποία θα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός κεντρικού μικροεπεξεργαστή.

Στο πλαίσιο της ομάδας TUCer και της εκπόνησης αυτής της εργασίας, για τον έλεγχο της λειτουργίας του προτεινόμενου συστήματος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα σύνολο πρωτότυπων τυπωμένων κυκλωμάτων τα οποία υλοποιούν τα κυκλώματα που σχεδιάστηκαν. Τέλος, μέσα από μια σειρά δοκιμών στο εργαστήριο ελέγχθηκε η λειτουργία του συστήματος και λήφθηκαν σημαντικά συμπεράσματα με στόχο την περαιτέρω βελτίωση του.

# Περιεχόμενα

---

<b>Περιεχόμενα</b>	<b>5</b>
<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>7</b>
<b>2. Περιγραφή Συστήματος</b>	<b>10</b>
2.1 Προϋποθέσεις Σχεδιασμού	10
2.2 Τοπολογία συστήματος	11
2.2.1 Κύκλωμα Παροχής Υδρογόνου	11
2.2.2 Ηλεκτρικό Κύκλωμα	12
2.3 Κυψέλη Υδρογόνου	14
2.4 Μετατροπέας DC-DC	16
2.5 Υπερπυκνωτές	17
2.6 Βαλβίδες Υδρογόνου	19
2.7 Κινητήρας και Ελεγκτής Κινητήρα	20
2.8 Κεντρική Μονάδα Ελέγχου	21
2.9 Κομβία Έκτακτης Ανάγκης.	22
<b>3. Ανάπτυξη Κυκλωμάτων Συστήματος</b>	<b>24</b>
3.1 Γειώσεις και Ασφάλεια	24
3.2 Σύνολο Αισθητήρων	24
3.2.1 Αισθητήρες Τάσης	25
3.2.2 Αισθητήρες Ρεύματος	25
3.2.3 Αισθητήρας Θερμοκρασίας ΚΥ	27
3.2.4 Αισθητήρας Θερμοκρασίας Περιβάλλοντος	28
3.2.5 Αισθητήρας Πίεσης Υδρογόνου	28
3.2.6 Αισθητήρας Διαρροής Υδρογόνου.	29
3.2.7 Αισθητήρας Μέτρησης Ταχύτητας	29
3.2.8 Αισθητήρας Θέσης Γκαζιού	30
3.3 Διάταξη Ηλεκτρονικού Συστήματος	31
3.4 Κύκλωμα Διασύνδεσης Κεντρικού Μικροεπεξεργαστή	31
3.5 Κύκλωμα Ελέγχου Μετατροπέα DC-DC	39
3.6 Κύκλωμα Ελέγχου Ανεμιστήρα και Αισθητήρων Θερμοκρασίας	41
3.7 Κύκλωμα Ελέγχου Κινητήρα και Αισθητήρα Γκαζιού	42
3.8 Κύκλωμα Ελέγχου Βαλβίδων και Αισθητήρα Πίεσης	43
3.9 Κύκλωμα Τροφοδοτικών	49
3.10 Κύκλωμα Ταχυμέτρου	52
3.11 Πρόσθετα Κυκλώματα	53
<b>4. Σχεδίαση και Κατασκευή Κυκλωμάτων</b>	<b>54</b>
4.1 Τοπολογία κυκλωμάτων	54
4.2 Το Λογισμικό Σχεδίασης	54

4.3	Σχεδίαση Σχηματικού Διαγράμματος	55
4.4	Σχεδίαση Διάταξης Τυπωμένου Κυκλώματος	57
4.5	Κατασκευή Πρωτότυπων Τυπωμένων Κυκλωμάτων	59
<b>5.</b>	<b>Πειραματικά Αποτελέσματα</b>	<b>63</b>
5.1	Εισαγωγή	63
5.2	Δοκιμή Αισθητήρων Τάσης	63
5.3	Δοκιμή Αισθητήρων Ρεύματος	67
5.4	Δοκιμή Αισθητήρων Θερμοκρασίας	69
5.5	Δοκιμή Κυκλώματος Ταχυμέτρου	71
<b>6.</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>73</b>
<b>7.</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>74</b>

---

# 1. Εισαγωγή

---

Το αυτοκίνητο αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής του σύγχρονου ανθρώπου. Παρ' όλα αυτά, η χρήση συμβατικών οχημάτων, αλλά και ο μεγάλος αριθμός οχημάτων σε χρήση ανά τον κόσμο έχουν οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα τόσο στο περιβάλλον όσο και στην κοινωνία. Η ραγδαία κλιματική αλλαγή, το αυξανόμενο κόστος των ορυκτών καυσίμων, αλλά και οι πιέσεις από παγκόσμιους φορείς, ωθούν την σημερινή αυτοκινητοβιομηχανία στην σταδιακή εγκατάλειψη του κινητήρα εσωτερικής καύσης και στην ολοένα και πιο ουσιαστική επικέντρωση της στην ανάπτυξη υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων [1].

Οι πιο βασικές τεχνολογίες που εφαρμόζονται σε οχήματα σήμερα είναι τα υβριδικά - βενζινοκίνητα οχήματα, τα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας και τα οχήματα κυψέλης υδρογόνου. Τα υβριδικά - βενζινοκίνητα οχήματα χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό κινητήρα εσωτερικής καύσης (ΚΕΚ) μαζί με ένα συνήθως ηλεκτροκινητήρα ο οποίος συνήθως δίνει κίνηση στους μπροστινούς τροχούς. Σε συνθήκες πόλης και σε χαμηλές ταχύτητες την κίνηση του οχήματος αναλαμβάνει ο ηλεκτροκινητήρας ο οποίος τροφοδοτείται από μία μικρού μεγέθους συστοιχία συσσωρευτών. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες, είτε σε περιπτώσεις που απαιτείται περισσότερη ισχύς ο ΚΕΚ ενεργοποιείται και δίνει κίνηση στους τροχούς αυτόνομα ή σε συνεργασία με τον ηλεκτροκινητήρα. Η φόρτιση των συσσωρευτών γίνεται από εξωτερική πηγή είτε από ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση του οχήματος.

Με την σειρά τους τα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα κάνουν χρήση όλων των συστημάτων που συναντάμε σε ένα υβριδικό όχημα αλλά δεν διαθέτουν ΚΕΚ. Αντίθετα κάνουν χρήση ενός ή περισσότερων ηλεκτροκινητήρων μεγαλύτερης ισχύος για την κίνηση του οχήματος. Για να τροφοδοτήσουν τους ισχυρότερους ηλεκτροκινητήρες διαθέτουν μεγαλύτερες συστοιχίες μπαταριών, οι οποίες μπορούν να φορτιστούν με τους ίδιους τρόπους που συναντάμε και στα υβριδικά οχήματα.

Παρ' όλα αυτά οι δυο παραπάνω τεχνολογίες εμφανίζουν κάποια σημαντικά προβλήματα. Τα υβριδικά οχήματα συνεχίζουν να εξαρτώνται από τα ορυκτά καύσιμα ενώ τα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν συστοιχίες συσσωρευτών που απαιτούν αυξημένο χρόνο φόρτισης και παρουσιάζουν μείωση της απόδοσης τους με τον χρόνο χρήσης. Μια απάντηση στις παραπάνω τεχνολογίες αποτελεί η κυψέλη υδρογόνου (ΚΥ), τεχνολογία για την οποία προορίζεται και το σύστημα μετρήσεων που αναπτύσσεται σε αυτήν την εργασία. Τα οχήματα με ΚΥ δεν χρησιμοποιούν ρυπογόνο ΚΕΚ, μπορούν να ανεφοδιαστούν από ένα πρατήριο υδρογόνου, ενώ παρουσιάζουν αυξημένη αυτονομία χωρίς την χρήση μεγάλων συστοιχιών μπαταριών [1]. Επίσης το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας ενέργεια που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπου με την χρήση κατάλληλων τεχνικών βελτιστοποίησης της παραγωγής του μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη εναλλακτική στα ορυκτά καύσιμα [3]. Ωστόσο το υψηλό κόστος παραγωγής, ο μειωμένος αριθμός υποδομών παροχής και παραγωγής υδρογόνου και τα ακόμα πρώιμα

συστήματα διαχείρισης ενέργειας δυσκολεύουν την υιοθέτηση των ΚΥ από την βιομηχανία και τους καταναλωτές [4]. Εστιάζοντας στο θέμα της διαχείρισης ενέργειας είναι φανερό ότι τεχνολογίες σαν αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω απαιτούν έναν μεγάλο αριθμό περίπλοκων συστημάτων μετρήσεων και ελέγχου. Σκοπός αυτών των συστημάτων είναι η βελτίωση της κατανάλωσης ενέργειας και η δημιουργία εύχρηστων, οικονομικών και αξιόπιστων οχημάτων.

Έτσι, αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου, ασφαλούς και αποδοτικού συστήματος μετρήσεων για τον έλεγχο ενός πρωτότυπου οχήματος κυψέλης υδρογόνου. Το όχημα στο οποίο θα στηριχτεί το παρόν ηλεκτρονικό σύστημα μετρήσεων και ελέγχου είναι το νέο όχημα ER 2021 της ομάδας TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η ομάδα TUCer αποτελεί μια εθελοντική ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης, η οποία απαρτίζεται από φοιτητές, αλλά και διδακτικό και ερευνητικό προσωπικό του ιδρύματος. Αντικείμενο της ομάδας αποτελεί η έρευνα, ανάπτυξη και κατασκευή πρωτότυπων και φιλικών προς το περιβάλλον οχημάτων, εστιάζοντας στην ασφάλεια και τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το νέο όχημα κατασκευασμένο εξ' ολοκλήρου από φοιτητές θα συμμετάσχει στον διαγωνισμό Shell Eco-Marathon 2022 στην κατηγορία Urban Concept με καύσιμο το υδρογόνο [5]. Ειδικότερα, ο διαγωνισμός Shell Eco-Marathon αποτελεί ένας παγκόσμιος διαγωνισμός μηχανικής ο οποίος τα τελευταία 35 χρόνια δίνει την δυνατότητα σε φοιτητές από όλο τον κόσμο να συνεργαστούν και να καινοτομήσουν με στόχο την ανάπτυξη της οικολογικής μετακίνησης [6]. Με στόχο την συμμετοχή της ομάδας στην κατηγορία του διαγωνισμού με χρήση κυψέλης υδρογόνου, την τροφοδοσία του οχήματος αναλαμβάνει μια κυψέλη καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων. Καθώς οι κανονισμοί του διαγωνισμού που διέπουν την κατασκευή και λειτουργία του οχήματος είναι αυστηροί με γνώμονα την ασφάλεια των συμμετεχόντων, η επιλογή μιας έτοιμης εμπορικής λύσης συστήματος μετρήσεων για τον έλεγχο του οχήματος είναι πρακτικά αδύνατη. Η κατασκευάστρια εταιρία της ΚΥ που χρησιμοποιείται στο όχημα προσφέρει κάποιες έτοιμες λύσεις σε μορφή αυτόνομης γεννήτριας, όμως το περιττό βάρος, το υψηλό κόστος και η δυσκολία παρέμβασης και τροποποίησης του παραπάνω πακέτου για χρήση σε ένα όχημα, κάνει επιτακτική την ανάγκη δημιουργίας ενός πρωτότυπου συστήματος μετρήσεων και ελέγχου [7].

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία, αναπτύσσεται ένα πρωτότυπο ηλεκτρονικό σύστημα μετρήσεων μέσω του οποίου ο κεντρικός μικροελεγκτής του οχήματος διασυνδέεται με το σύνολο των αισθητήρων στο όχημα. Το σύνολο αυτό αποτελείται από δέκα διαφορετικούς αισθητήρες οι οποίοι λαμβάνουν μετρήσεις για ένα πλήθος παραμέτρων του οχήματος. Στην συνέχεια ο παραπάνω μικροελεγκτής είναι υπεύθυνος για τον ολοκληρωμένο έλεγχο της ΚΥ αλλά και των υποστηρικτικών μονάδων της με γνώμονα την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, το προτεινόμενο σύστημα περιλαμβάνει τον έλεγχο πέντε διαφορετικών μονάδων. Πρώτη μονάδα αποτελεί ένας DC-DC μετατροπέας. Σκοπός αυτού του μετατροπέα θα είναι η αξιόπιστη φόρτιση της συστοιχίας υπερπυκνωτών που βρίσκονται στο όχημα μέσω της ΚΥ αλλά και μέσω ανάκτησης ενέργειας από την πέδηση του κινητήρα. τις υπόλοιπες μονάδες αποτελούν ο



ελεγκτής του κινητήρα του οχήματος, δυο βαλβίδες υψηλής πίεσης υδρογόνου και ο ανεμιστήρας της ΚΥ. Επίσης το σύστημα αυτό περιλαμβάνει σε ξεχωριστά κυκλώματα την μέτρηση της ταχύτητας του οχήματος και τον έλεγχο των βοηθητικών συστημάτων του (φώτα, φλας, κόρνα, υαλοκαθαριστήρας).

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής :

- Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αρχικά θα αναλυθούν πλήρως οι απαιτούμενες προδιαγραφές και απαιτήσεις του συστήματος μετρήσεων το οποίο αναπτύχθηκε. Προχωρώντας θα παρουσιαστούν οι προτεινόμενες τοπολογίες του κυκλώματος παροχής υδρογόνου αλλά και του ηλεκτρικού κυκλώματος του οχήματος, ενώ στην συνέχεια θα παρουσιαστούν όλα τα βασικά εξαρτήματα που απαρτίζουν τα δύο παραπάνω κυκλώματα και είναι απαραίτητα για την λειτουργία του συστήματος με βάση τις προδιαγραφές.
- Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αρχικά θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά και η λειτουργία όλων των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στο όχημα. Στην συνέχεια, θα παρουσιαστεί η διάταξη του ηλεκτρονικού συστήματος μετρήσεων και ελέγχου, το οποίο χωρίζεται σε επτά διαφορετικά υποκυκλώματα. Προχωρώντας, για κάθε υποκύκλωμα θα αναλυθούν οι απαιτήσεις λειτουργίας του και στην συνέχεια θα αναλυθεί η σχεδίαση του εκάστοτε ηλεκτρονικού κυκλώματος που υλοποιεί αυτές τις λειτουργίες. Πρόσθετα, θα γίνει αναφορά σε τεχνικές ασφαλούς σχεδίασης οι οποίες εφαρμόζονται στα κυκλώματα του συστήματος.
- Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο θα παρουσιαστεί όλη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής των πρωτότυπων τυπωμένων κυκλωμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του συστήματος. Πρόσθετα θα παρουσιαστεί εν συντομία το λογισμικό σχεδίασης αλλά και η τελική μορφή της πλακέτας του συστήματος η οποία κατασκευάζεται βιομηχανικά.
- Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο μέσα από μία σειρά δοκιμών στον χώρο του εργαστηρίου παρουσιάζεται ο έλεγχος της λειτουργίας των κυκλωμάτων που αναπτύχθηκαν σε συνεργασία με τους αισθητήρες. Στην συνέχεια, μέσω της σύγκρισης των τιμών που πάρθηκαν με αυτές των αισθητήρων αναφοράς των πειραμάτων, εξάγονται συμπεράσματα για την λειτουργία του συστήματος.
- Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την υλοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας και θα γίνει αναφορά σε πιθανές μελλοντικές αλλαγές και βελτιώσεις.

## 2. Περιγραφή Συστήματος

---

### 2.1 Προϋποθέσεις Σχεδιασμού

Όπως αναφέρθηκε εν συντομία στην εισαγωγή, το ηλεκτρονικό σύστημα μετρήσεων που αναπτύσσεται σε αυτή την διπλωματική εργασία προορίζεται για τον έλεγχο του νέου οχήματος ER.2021 της ομάδας TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το νέο όχημα της ομάδας θα συμμετάσχει στον πανευρωπαϊκό διαγωνισμό Shell Eco Marathon 2022 στην κατηγορία Urban Concept με καύσιμο το υδρογόνο. Η συγκεκριμένη κατηγορία αποτελείται από οχήματα τα οποία προσομοιάζουν σύγχρονα επιβατικά οχήματα. Κατά τον αγώνα, τα οχήματα αυτής της κατηγορίας δοκιμάζονται σε σενάρια κίνησης σε δρόμους μιας πόλης όπου απαιτείται συχνά να σταματήσουν και να ξανά-ξεκινήσουν λόγω ύπαρξης φαναριών και εμποδίων. Με σκοπό την συμμετοχή του παραπάνω οχήματος στον παραπάνω διαγωνισμό το όχημα θα πρέπει να ακολουθεί μια σειρά κανονισμών και προϋποθέσεων που διασφαλίζουν την ασφάλεια όλων των συμμετεχόντων αλλά και την αξιοπιστία του οχήματος. Ιδιαίτερα σημαντικό κεφάλαιο των κανόνων ασφαλείας αφορά η λειτουργία του συστήματος ελέγχου και μετρήσεων του οχήματος κατά την διάρκεια οποιασδήποτε βλάβης ή έκτακτης ανάγκης. Για τον παραπάνω λόγο, στην σχεδίαση του συστήματος μετρήσεων του οχήματος είναι αναγκαίο να τοποθετηθούν τα παρακάτω μέρη και συστήματα:

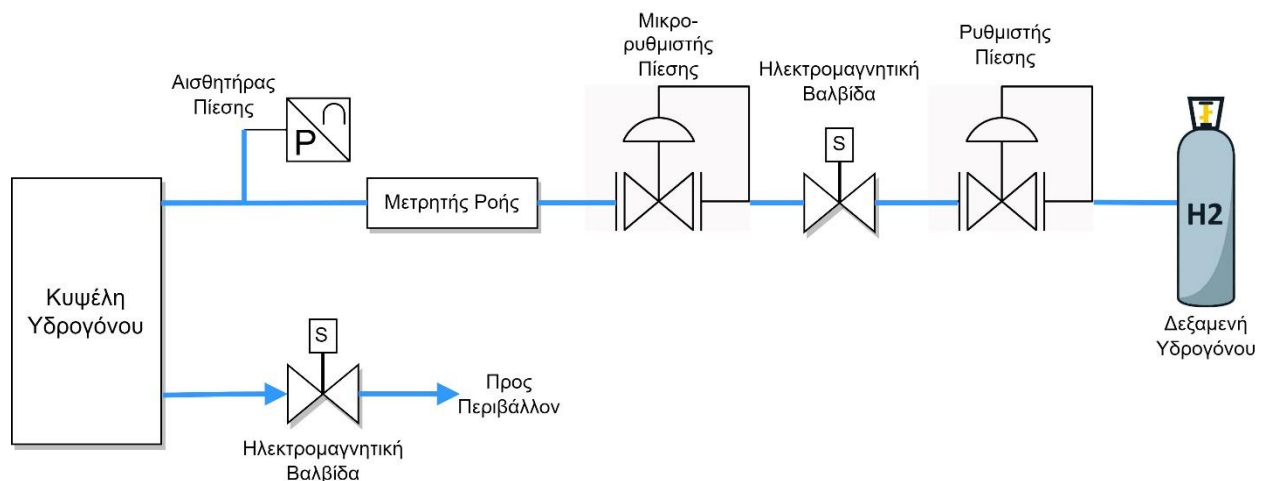
- Αισθητήρας διαρροής υδρογόνου.
- Κομβία έκτακτης ανάγκης.
- Αυτόνομο σύστημα ελέγχου της βαλβίδας τροφοδοσίας υδρογόνου.
- Υπερπυκνωτές για αποθήκευση ενέργειας.
- Αυτοεπιστρεφόμενος αισθητήρας θέσης γκαζιού.
- Αυτόματη αποκοπή του κινητήρα σε περίπτωση ανάγκης.
- Μπαταρία τροφοδοσίας συστημάτων ασφαλείας.
- Μετρητής κατανάλωσης υδρογόνου.

## 2.2 Τοπολογία συστήματος

Με βάση τις προϋποθέσεις σχεδιασμού που αναφέρθηκαν προηγουμένως και με βασικό στόχο την δημιουργία ενός απλού και αξιόπιστου συστήματος μετρήσεων και ελέγχου, επιλέχθηκε και παρουσιάζεται η παρακάτω τοπολογία η οποία χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αποτελεί το κύκλωμα παροχής υδρογόνου στην ΚΥ, ενώ το δεύτερο αποτελεί το ηλεκτρικό κύκλωμα του οχήματος.

### 2.2.1 Κύκλωμα Παροχής Υδρογόνου

Το κύκλωμα παροχής υδρογόνου έχει ως βασικό στόχο την τροφοδοσία της ΚΥ με τον απαιτούμενο όγκο υδρογόνου στην κατάλληλη πίεση. Δευτερεύων ρόλος αυτού του συστήματος, αλλά εξίσου σημαντικός, αποτελεί η μέτρηση της πίεσης και του όγκου του τροφοδοτούμενου υδρογόνου αλλά και η διασφάλιση της απομόνωσης του συστήματος τροφοδοσίας σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, κινδύνου ή βλάβης.



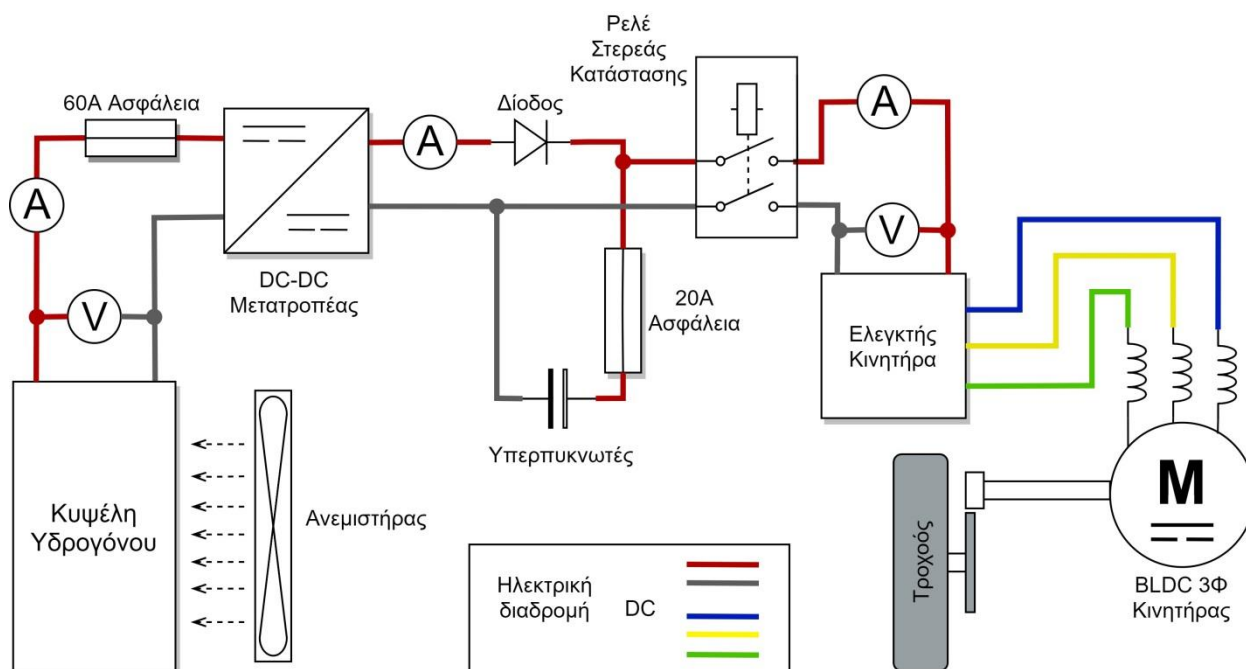
Εικόνα 2.1 : Το κύκλωμα παροχής υδρογόνου.

Το κύκλωμα υδρογόνου όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2 ξεκινάει από την εγκεκριμένου τύπου δεξαμενή παροχής υδρογόνου, η οποία τοποθετείται στο πίσω μέρος του οχήματος, σε σταθερό σημείο και έχει χωρητικότητα ενός λίτρου. Στην συνέχεια, μέσω ανοξείδωτων σωληνώσεων, συνδέεται χειροκίνητος ρυθμιστής πίεσης, με σκοπό την ρύθμιση της πίεσης παροχής υδρογόνου στα επιθυμητά επίπεδα. Επόμενο μέρος της διαδρομής υδρογόνου αποτελεί μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα (solenoid valve), η οποία επίσης συνδέεται μέσω ανοξείδωτων σωληνώσεων. Σε αυτήν την διπλωματική εργασία, η συγκεκριμένη βαλβίδα από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως βαλβίδα παροχής υδρογόνου (supply valve). Η ίδια ελέγχεται από το σύστημα μετρήσεων και ελέγχου και σκοπός της είναι η αξιόπιστη αποκοπή της παροχής υδρογόνου κατά οποιαδήποτε βλάβη ή έκτακτη ανάγκη. Έπειτα μέσω πλαστικών σωληνώσεων ακολουθεί ένας δεύτερος παθητικός μικρο-ρυθμιστής πίεσης. Ο ρυθμιστής αυτός έχει σκοπό την ρύθμιση της πίεσης του υδρογόνου σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια. Στην συνέχεια του κυκλώματος βρίσκεται ο μετρητής ροής υδρογόνου, ο οποίος τοποθετείται με σκοπό την μέτρηση της κατανάλωσης υδρογόνου κατά την λειτουργία του οχήματος. Τελευταίο μέρος της διαδρομής του

κυκλώματος υδρογόνου αποτελεί ο αισθητήρας πίεσης, ο οποίος πληροφορεί τον κεντρικό μικροελεγκτή του οχήματος για την πίεση του υδρογόνου αμέσως πριν την ΚΥ. Ένα ξεχωριστό τμήμα του κυκλώματος υδρογόνου αποτελεί επίσης και μια δεύτερη ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα. Η βαλβίδα αυτή έχει σκοπό ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα να απελευθερώνει στο περιβάλλον την περίσσεια υδρογόνου, υδρατμών και θερμότητας που έχουν δημιουργηθεί στο εσωτερικό της ΚΥ. Στην συνέχεια αυτής της διπλωματικής εργασίας η παραπάνω βαλβίδα θα αναφέρεται ως βαλβίδα απαλλαγής (purge valve).

## 2.2.2 Ηλεκτρικό Κύκλωμα

Το ηλεκτρικό κύκλωμα του οχήματος αναλαμβάνει την αποτελεσματική διασύνδεση όλων των επιμέρους συστημάτων του οχήματος με την ΚΥ. Βασικός στόχος της σχεδίασης αυτής αποτελεί η δημιουργία ενός απλού και αξιόπιστου συστήματος διαχείρισης ενέργειας το οποίο θα προσφέρει αξιοπιστία και αποδοτικότητα κατά την λειτουργία του οχήματος.



Εικόνα 2.2 : Το ηλεκτρικό κύκλωμα του οχήματος.

Η τοπολογία του ηλεκτρικού κυκλώματος του οχήματος όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3 ξεκινάει από την ΚΥ, η οποία αποτελεί την κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα. Στην συνέχεια συνδέεται άμεσα με έναν μετατροπέα DC-DC σκοπός του οποίου αποτελεί η ανύψωση της τάσης εξόδου της κυψέλης. Για την προστασία των δύο παραπάνω μονάδων σε περίπτωση βλάβης, παρεμβάλλεται μεταξύ τους μια τηχόμενη ασφάλεια με ονομαστικό ρεύμα τήξης στα 60A. Στην συνέχεια, παράλληλα με τον μετατροπέα DC-DC τοποθετείται μια συστοιχία υπερπυκνωτών, η οποία αποτελεί την αποθήκη ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος. Επίσης παράλληλα με τον μετατροπέα και την συστοιχία των υπερπυκνωτών

συνδέεται και ο ελεγκτής του κινητήρα. Ο ίδιος είναι υπεύθυνος για την τροφοδοσία και οδήγηση του τριφασικού κινητήρα που δίνει κίνηση στο όχημα αλλά και για την ανάκτηση ενέργειας μέσω της πέδησης. Πρόσθετα, μεταξύ του ελεγκτή του κινητήρα και των παράλληλα συνδεδεμένων υπερπυκνωτών και μετατροπέα DC-DC παρεμβάλλεται ένα ρελέ στερεάς κατάστασης (solid state) όπως επίσης και μια διόδος. Σκοπός του ρελέ είναι η ηλεκτρική αποκοπή του κινητήρα από την τροφοδοσία σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης ή βλάβης. Ενώ σκοπός της διόδου αποτελεί η αποτροπή των ανάστροφων ρευμάτων που δημιουργούνται από την ανάκτηση ενέργειας να περάσουν στην ΚΥ και τον μετατροπέα DC-DC προκαλώντας βλάβες. Επίσης μεταξύ της παράλληλης σύνδεσης των υπερπυκνωτών και του ελεγκτή του κινητήρα παρεμβάλλεται μια τηχόμενη ασφάλεια, με ονομαστικό ρεύμα τήξης 20A. Αυτή η ασφάλεια, διασφαλίζει την αποφυγή διαρροής επικίνδυνων τιμών ρευμάτων μέσα από τους υπερπυκνωτές. Τέλος ένα ξεχωριστό κομμάτι του ηλεκτρικού συστήματος αποτελεί ο ανεμιστήρας της ΚΥ που σκοπό έχει την τροφοδοσία της κυψέλης με τον απαιτούμενο όγκο ατμοσφαιρικού αέρα. Σε συνεργασία όλες οι παραπάνω μονάδες αποτελούν το σύστημα παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του οχήματος με σκοπό την αξιόπιστη και αποδοτική κίνηση του [8]. Η λειτουργία αυτού του συστήματος με την παραπάνω τοπολογία διακρίνεται στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Η αποθηκευμένη ενέργεια που βρίσκεται στην συστοιχία των υπερπυκνωτών δεν είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες του κινητήρα, έτσι η ΚΥ δουλεύει σε αυξημένο ρυθμό και τροφοδοτεί τον κινητήρα ενώ παράλληλα φορτίζει τους υπερπυκνωτές. Ο μετατροπέας DC-DC επίσης ανυψώνει σε κατάλληλα επίπεδα τη τάση της κυψέλης έτσι ώστε να μπορέσει να υποστηρίξει τις απαιτήσεις του κινητήρα.
- Η αποθηκευμένη ενέργεια που βρίσκεται στην συστοιχία των υπερπυκνωτών είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες του κινητήρα την δεδομένη στιγμή και έτσι η κυψέλη μεταβαίνει σε μια κατάσταση συντήρησης και λειτουργεί σε χαμηλό ρυθμό καταναλώνοντας πολύ μικρή ποσότητα καυσίμου.
- Το όχημα κινείται χωρίς να χρειάζεται υποβοήθηση από τον κινητήρα είτε γιατί επιβραδύνει είτε γιατί κινείται σε κεκλιμένο επίπεδο. Ο ελεγκτής του κινητήρα μεταβαίνει σε κατάσταση ανάκτησης ενέργειας και τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια τους υπερπυκνωτές, αν οι ίδιοι δεν είναι πλήρως φορτισμένοι. Η κυψέλη παραμένει σε κατάσταση συντήρησης και λειτουργεί σε χαμηλό ρυθμό.

Η παραπάνω διασύνδεση των επιμέρους μονάδων, τόσο στο κύκλωμα τροφοδοσίας υδρογόνου όσο και στο ηλεκτρικό κύκλωμα του οχήματος, προσφέρει έναν ιδιαίτερα απλοποιημένο τρόπο διαχείρισης. Επίσης, προσφέρει την δυνατότητα προσαρμογής του παραπάνω συστήματος σε διαφορετικά οχήματα χωρίς την ανάγκη υλοποίησης σημαντικών αλλαγών τόσο σε υλικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο λογισμικού.

## 2.3 Κυψέλη Υδρογόνου

Η κυψέλη καυσίμου ή υδρογόνου αποτελεί μια συσκευή μετατροπής της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το βασικό πλεονέκτημα των κυψελών καυσίμου σε αντίθεση με τις μπαταρίες, οι οποίες ταξινομούνται στην ίδια κατηγορία, είναι ότι οι πρώτες δεν χάνουν την απόδοση τους κατά την χρήση τους. Τα κύρια μέρη μιας ΚΥ είναι δύο ηλεκτρόδια (άνοδος και κάθοδος) τα οποία χωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Η βασική αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου βασίζεται στις δύο παρακάτω αντιδράσεις.



Η αντίδραση (2.1) λαμβάνει χώρα στην άνοδο, κατά την οποία το υδρογόνο χωρίζεται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Τα πρωτόνια μπορούν να διέλθουν μέσα από τον ηλεκτρολύτη ενώ τα ηλεκτρόνια όχι. Αντίθετα τα ηλεκτρόνια περνούν από έναν αγωγό που συνδέει την άνοδο με την κάθοδο. Στην αντίδραση (2.2) όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάσουν στην κάθοδο τότε συνδυάζονται με το οξυγόνο και τα πρωτόνια που βρίσκονται στον ηλεκτρολύτη και έτσι προκύπτει τελικά καθαρό νερό. Η προσανατολισμένη αυτή κίνηση των ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο σε μία απλή κυψέλη καυσίμου παράγει περίπου 0.7V στα άκρα των ηλεκτροδίων [9].

Στην παραπάνω διαδικασία στηρίζεται και η κυψέλη καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων FCgen® – 1020ACS της εταιρίας Ballard η οποία επιλέχθηκε ως βασική μονάδα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για το ηλεκτρικό σύστημα του οχήματος και φαίνεται στην Εικόνα 2.3 [10]. Η αξιοπιστία, η απλότητα, το μικρό βάρος αλλά και το κόστος υπήρξαν οι βασικότεροι λόγοι επιλογής της παραπάνω ΚΥ. Επίσης η ίδια συνδυάζει νέες σημαντικές τεχνολογίες, όπως η εξάλειψη της ανάγκης ύγρανσης των μεμβρανών από εξωτερικό σύστημα μέσω της υιοθέτησης μεμβρανών με αυτόνομη ύγρανση. Πιο συγκεκριμένα τα βασικά χαρακτηριστικά της παραπάνω ΚΥ παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 και προέρχονται από την επίσημη ιστοσελίδα του κατασκευαστή.



Εικόνα 2.3 : Η κυψέλη υδρογόνου Ballard FCgen® – 1020ACS.

Πίνακας 2.1 : Χαρακτηριστικά κυψέλης υδρογόνου Ballard FCgen® – 1020ACS

Χαρακτηριστικά	Τιμή
Αριθμός κυψελών	28
Ονομαστική ισχύς	41.1 W/cell
Ονομαστικό ρεύμα	65.3 A
Μέγιστο ρεύμα	75 A
Ονομαστική τάση	660 mV/cell
Εύρος τάσης	0.5 – 1 V/cell
Απαιτούμενη ροή αέρα	3 m <sup>3</sup> /cell
Βάρος	11 kg

Από τον Πίνακα 2.1 προκύπτει ότι συνολικά η ΚΥ αποδίδει κατά μέγιστο ισχύ της τάξης των 1150 Watt. Επίσης προκύπτει ότι συνολικά η ΚΥ απαιτεί κατά ελάχιστο 84m<sup>3</sup> ροή ατμοσφαιρικού αέρα για την ορθή λειτουργία της. Παρ' όλα αυτά οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται και η μειωμένη ροή φρέσκου ατμοσφαιρικού αέρα κάτω από το περίβλημα του οχήματος, δημιουργούν ισχυρές απώλειες στην απαραίτητη περιεκτικότητα του αέρα σε οξυγόνο. Επίσης για λόγους οικονομίας ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και αξιοπιστίας ο ανεμιστήρας πρέπει να έχει την δυνατότητα να καλύψει τις μέγιστες απαιτήσεις σε ροή αέρα χωρίς να χρειάζεται να λειτουργεί στο μέγιστο. Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω λόγους καθίσταται σαφές ότι πρέπει να επιλεγθεί ένας ανεμιστήρας υψηλής απόδοσης αλλά και μικρού βάρους. Έτσι για την παροχή της κυψέλης με τον απαιτούμενο όγκο ατμοσφαιρικού αέρα επιλέχθηκε ο ανεμιστήρας 6314 της εταιρίας Ebmpapst, τα βασικά χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.2 : Χαρακτηριστικά ανεμιστήρα Ebmpapst 6314.

Χαρακτηριστικά	Τιμή
Ροή Αέρα	710 m <sup>3</sup>
Ονομαστική τάση	24 V
Εύρος τάσης τροφοδοσίας	16-32 V
Ισχύς	67 W
Βάρος	910g

## 2.4 Μετατροπéας DC-DC

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο η κυψέλη υδρογόνου που επιλέχθηκε διαθέτει 28 διαφορετικές κυψέλες οι οποίες παραγάγουν έως 1V η κάθε μια. Συνολικά λοιπόν η ΚΥ είναι ικανή να παρέχει μέγιστη διαφορά δυναμικού της τάξης των 28V. Παράλληλα, όταν το φορτίο αυξάνεται, τότε και η τιμή του ρεύματος στην έξοδο αυξάνεται, και σύμφωνα με την χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης που παρέχεται από τον κατασκευαστή, παρατηρείται πτώση της τάσης των κυψελών. Το παραπάνω γεγονός δημιουργεί την ανάγκη ύπαρξης μιας μονάδας η οποία θα έχει την δυνατότητα να σταθεροποιεί την τάση σε ένα ορισμένο επίπεδο ανεξάρτητα από τις ανάγκες του φορτίου που είναι συνδεδεμένο στην κυψέλη. Την συγκεκριμένη διαδικασία αναλαμβάνει ένας ρυθμιζόμενος DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης της εταιρίας Elecdan-Converters όπως φαίνεται και στη Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4 : DC-DC Μετατροπέας της εταιρίας Elecdan-Converters.

Ο συγκεκριμένος μετατροπέας παρουσιάζει τα παρακάτω σημαντικά χαρακτηριστικά :

- Είναι εφοδιασμένος με βιδωτούς ακροδέκτες συμβατούς με ρεύματα εισόδου μέχρι 50 A καθιστώντας τον ιδανικό για χρήση μαζί με την ΚΥ.
- Στην είσοδο του μπορεί να δεχθεί τάσεις από 8V μέχρι 60V ενώ η τάση εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί αυτόματα και να φτάσει έως τα 60V.
- Η ισχύς εξόδου του μπορεί να φτάσει μέχρι τα 2.8kW με απόδοση 96%.
- Διαθέτει λειτουργία σταθερής τάσης ή σταθερού ρεύματος στην έξοδο.

Στην εφαρμογή του παραπάνω μετατροπέα στο πρωτότυπο όχημα ο ίδιος δέχεται στην είσοδο του τάσεις μέχρι 28V και σκοπό έχει την διατήρηση της σταθερής τάσης των 48V στην έξοδο του για την φόρτιση των υπερπυκνωτών και την τροφοδοσία του κινητήρα. Υπεύθυνος για τον έλεγχο της λειτουργίας του είναι ο κεντρικός μικροελεγκτής του οχήματος που θα παρουσιαστεί σε επόμενη παράγραφο.



## 2.5 Υπερπυκνωτές

Όπως προέκυψε από τον Πίνακα 2.1, η ΚΥ που χρησιμοποιείται στο πρωτότυπο όχημα εμφανίζει μέγιστη ισχύ εξόδου της τάξης των 1.15kW στην βέλτιστη λειτουργία της. Την ίδια στιγμή ο κινητήρας που χρησιμοποιείται για να δώσει κίνηση στο όχημα απαιτεί ισχύ 1kW σε λειτουργία μέγιστου φορτίου. Σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα συστήματα που βρίσκονται στο όχημα, τα οποία επίσης πρέπει να τροφοδοτηθούν από την ΚΥ, είναι φανερό ότι η ίδια δεν θα μπορούσε να υποστηρίξει τις ενεργειακές απαιτήσεις όλου του οχήματος και ταυτόχρονα να διατηρήσει παράλληλα μια χαμηλή κατανάλωση υδρογόνου. Το παραπάνω συμπέρασμα προκύπτει από το γεγονός ότι σε περιπτώσεις κατά τις οποίες ο κινητήρας απαιτείται να αποδώσει στο μέγιστο, όπως επίσης και τα υπόλοιπα συστήματα του οχήματος, τότε η ΚΥ πρέπει να λειτουργεί στο βέλτιστο σημείο της συνεχόμενα, καταναλώνοντας υψηλά επίπεδα καυσίμου (υδρογόνου). Επίσης το παραπάνω γεγονός θα δημιουργεί έντονες αυξομειώσεις στην λειτουργία της ΚΥ καθώς οι ενεργειακές απαιτήσεις του οχήματος σε πραγματικά σενάρια εμφανίζουν επίσης έντονες αυξομειώσεις. Για τους παραπάνω λόγους απαιτείται ένα ενσωματωμένο σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε η ενέργεια που παράγεται από τη ΚΥ να μπορεί να διαχειριστεί με έναν πιο αποδοτικό τρόπο. Τον ρόλο αυτό αναλαμβάνει μια συστοιχία δώδεκα υπερπυκνωτών BMOD0058 της εταιρίας Maxwell (Εικόνα 2.5), πετυχαίνοντας μια τάση της τάξης των 48V.



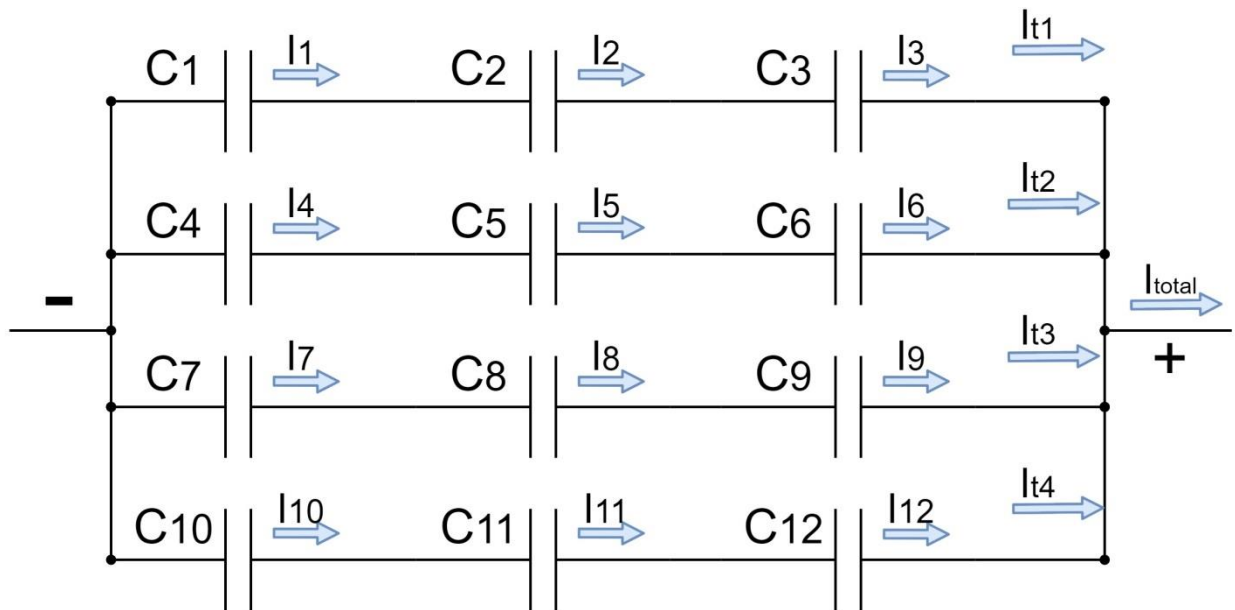
Εικόνα 2.5 : Υπερπυκνωτής Maxwell BMOD0058.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε υπερπυκνωτή της συστοιχίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3 και προέρχονται από την κατασκευάστρια εταιρία.

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά του υπερπυκνωτή Maxwell BMOD0058.

Χαρακτηριστικό λειτουργίας	Τιμή
Χωρητικότητα	58F
Ονομαστική τάση	16V
Εσωτερική αντίσταση	22mΩ
Μέγιστο συνεχόμενο ρεύμα	170A
Μέγιστη ενέργεια ανά cell(6)	0.35Wh

Στην Εικόνα 2.6 που ακολουθεί παρουσιάζεται η υβριδική συνδεσμολογία των δώδεκα πυκνωτών. Η συνδεσμολογία που επιλέχθηκε είναι η σύνδεση τριών πυκνωτών σε σειρά και στην συνέχεια η παράλληλη σύνδεση τεσσάρων τέτοιων τριάδων σε παράλληλη σύνδεση.



Εικόνα 2.6 : Συνδεσμολογία Υπερπυκνωτών.

Για το ρεύμα κάθε τριάδας πυκνωτών συνδεδεμένων σε σειρά ισχύει ότι:

$$I_{total1} = I1 = I2 = I3 \quad (2.3)$$

Όπου στο συγκεκριμένο παράδειγμα τα ρεύματα I1-I3 αντιστοιχούν στους πυκνωτές C1-C3. Για την τάση σε κάθε τριάδα πυκνωτών συνδεδεμένων σε σειρά σύμφωνα με τον νόμο τάσεων του Kirchhoff ισχύει η παρακάτω σχέση (2.4) :

$$V_{total1} = V_{c1} + V_{c2} + V_{c3} \quad (2.4)$$

Για τον υπολογισμό της συνολικής χωρητικότητας  $C_{total1}$  και της συνολικής εσωτερικής αντίστασης  $R_{total1}$  των τριών υπερπυκνωτών συνδεδεμένων σε σειρά χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (2.5) και (2.6) που ακολουθούν:

$$\frac{1}{C_{total1}} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3} \quad (2.5)$$

$$R_{total1} = R1 + R2 + R3 \quad (2.6)$$

Οι σχέσεις (2.3 - 2.6) ισχύουν αντίστοιχα για κάθε τριάδα υπερπυκνωτών η οποία είναι συνδεδεμένη σε σειρά από την συνδεσμολογία που φαίνεται στην Εικόνα 2.6. Με βάση τις παραπάνω σχέσεις υπολογίζονται οι απαραίτητες τιμές για κάθε τριάδα υπερπυκνωτών.

Στην συνέχεια οι ίδιες τριάδες μπορούν να αντιμετωπιστούν σαν τέσσερις παράλληλοι κλάδοι και έτσι να υπολογιστούν οι συνολικές παράμετροι της συστοιχίας. Για τους παράλληλους κλάδους σύμφωνα με τον νόμο τάσεων και ρευμάτων του Kirchhoff ισχύουν οι δύο παρακάτω σχέσεις (2.7) και (2.8) :

$$I_{total} = I_{t1} + I_{t2} + I_{t3} + I_{t4} \quad (2.7)$$

$$V_{total} = V_{total1} = V_{total2} = V_{total3} = V_{total4} \quad (2.8)$$

Ο κάθε κλάδος στην ουσία περιέχει ένα πυκνωτή συνδεδεμένο σε σειρά με μια αντίσταση, οι χαρακτηριστικές τιμές των οποίων είναι ίδιες. Έτσι, για να υπολογιστεί η συνολική χωρητικότητα και αντίσταση της συστοιχίας των υπερπυκνωτών χρησιμοποιείται το απλοποιημένο ανάλογο αυτής της συνδεσμολογίας. Το απλοποιημένο ανάλογο της παράλληλης συνδεσμολογίας των κλάδων αποτελεί ένας πυκνωτής συνδεδεμένος σε σειρά με μια αντίσταση για τις χαρακτηριστικές τιμές των οποίων ισχύουν οι δύο παρακάτω σχέσεις (2.9),(2.10), όπου  $n=4$  ο συνολικός αριθμός των κλάδων.

$$C_{total} = C_{total1} * n \quad (2.9)$$

$$R_{total} = \frac{R_{total}}{n} \quad (2.10)$$

Πίνακας 2.4 : Χαρακτηριστικά συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Χαρακτηριστικά	Τιμή
Χωρητικότητα	77,3 F
Ονομαστική τάση	48V
Εσωτερική Αντίσταση	16,5 mΩ
Μέγιστο συνεχόμενο ρεύμα	680A

## 2.6 Βαλβίδες Υδρογόνου

Το σύστημα τροφοδοσίας υδρογόνου πρέπει να διαθέτει μια βαλβίδα υψηλής πίεσης η οποία υπό την συνθήκη ότι δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα θα είναι κλειστή. Κατά την διάρκεια κανονικής λειτουργίας του οχήματος η βαλβίδα θα παραμένει ανοικτή, έτσι ώστε να παρέχει με την κατάλληλη πίεση, την ποσότητα υδρογόνου που χρειάζεται για να λειτουργήσει η ΚΥ. Η βαλβίδα θα απενεργοποιείται και δηλαδή θα κλείνει, σταματώντας στιγμιαία την παροχή υδρογόνου στο σύστημα τροφοδοσίας της ΚΥ σε οποιαδήποτε από τις δύο παρακάτω περιπτώσεις:

1. Ο αισθητήρας διαρροής υδρογόνου έχει ανιχνεύσει επικίνδυνη ποσότητα υδρογόνου και έχει ενεργοποιήσει το σήμα εξόδου έκτακτης ανάγκης.
2. Οποιοδήποτε από τα δύο κομβία έκτακτης ανάγκης που βρίσκονται στον χώρο του οδηγού και στο εξωτερικό του οχήματος έχουν πατηθεί.

Είναι φανερό ότι η παραπάνω βαλβίδα αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι του συστήματος ασφαλείας του οχήματος καθώς αυτή ελέγχει την ροή του υδρογόνου από την δεξαμενή προς την ΚΥ. Για αυτό τον λόγο η ίδια πρέπει να τροφοδοτείται από μια ξεχωριστή μπαταρία, διασφαλίζοντας έτσι την αδιάκοπη λειτουργία της, ανεξαρτήτως της λειτουργίας του συστήματος παροχής ενέργειας του οχήματος. Σύμφωνα με τις παραπάνω απαιτήσεις η βαλβίδα που επιλέχθηκε είναι ένα προϊόν της εταιρίας Burkert και συγκεκριμένα το μοντέλο 6281-EV-A10. Αυτή η ηλεκτρομαγνητική διαφραγματική βαλβίδα παρουσιάζει ικανοποιητικούς χρόνους απόκρισης που ξεκινούν από τα 0.1 δευτερόλεπτα, ενώ απαιτεί συνεχή τροφοδοσία της τάξης των 24V η οποία παρέχεται από την μπαταρία. Επίσης η ίδια διαθέτει προστασία ενάντια των κραδασμών, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα σημαντικό για χρήση σε ένα όχημα δρόμου.



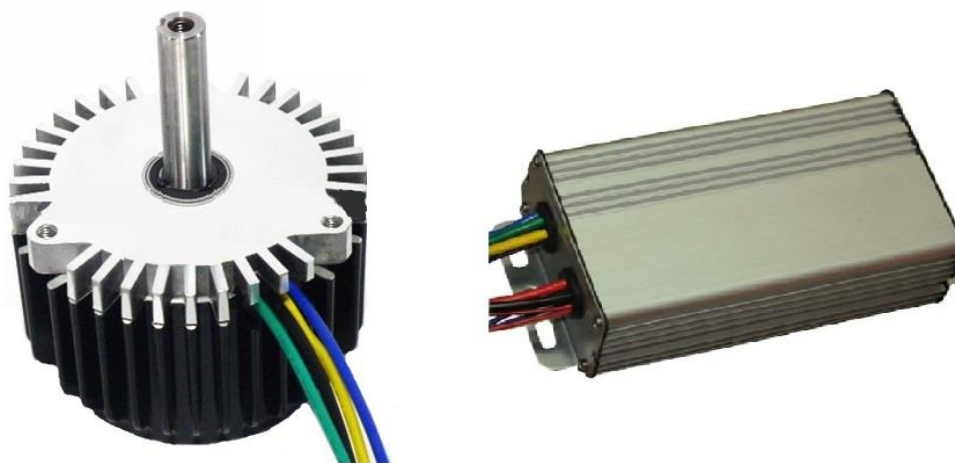
Εικόνα 2.7 : Η ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα Burkert.

Η ίδια βαλβίδα για λόγους ομοιομορφίας του συστήματος ελέγχου χρησιμοποιείται και ως βαλβίδα απαλλαγής. Συγκεκριμένα, τοποθετείται στο κύκλωμα απομάκρυνσης καταλοίπων από την ΚΥ. Ο έλεγχος αυτής της βαλβίδας προέρχεται από ένα ξεχωριστό μικροελεγκτή, ο οποίος διασφαλίζει την ενεργοποίηση της βαλβίδας ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, τα οποία καθορίζονται από τον κατασκευαστή της ΚΥ.

## 2.7 Κινητήρας και Ελεγκτής Κινητήρα

Ο κινητήρας αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι του οχήματος καθώς ο ίδιος είναι υπεύθυνος τόσο για την κίνηση του οχήματος, όσο και για την ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση. Για τον παραπάνω λόγο, η επιλογή της ισχύος και του τύπου του κινητήρα και του ελεγκτή του, γίνεται με βάση τις λειτουργικές και τις αγωνιστικές απαιτήσεις του οχήματος. Αρχικά, με βάση τον σχεδιασμό του οχήματος, η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει ο κινητήρας προέρχεται κατά κύριο κανόνα από την ΚΥ. Έτσι, για να διασφαλιστεί η αποδοτική λειτουργία του συστήματος ενέργειας, η ισχύς του κινητήρα δεν πρέπει να ξεπερνάει την μέγιστη ισχύ εξόδου της ΚΥ. Επιπλέον, το χαμηλό βάρος του οχήματος, το χαμηλό μη-αναρτώμενο βάρος στο σύστημα μετάδοσης κίνησης και το μικρό πλάτος των ελαστικών είναι μερικοί λόγοι οι οποίοι μειώνουν την απαιτούμενη ισχύ του κινητήρα. Στο αγωνιστικό κομμάτι, το όχημα δεν χρειάζεται να επιταχύνει ραγδαία, ούτε οι

τελικές ταχύτητες χρειάζεται να είναι υψηλές. Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε η ισχύς του κινητήρα να είναι της τάξης του 1kW. Όσον αφορά τον τύπο του κινητήρα, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρικός κινητήρας χωρίς ψήκτρες (BLDC). Τέτοιοι κινητήρες απαιτούν ελάχιστη συντήρηση ενώ εμφανίζουν πολύ καλύτερο βαθμό απόδοσης από τους κινητήρες DC. Οι ίδιοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε μικρά οχήματα όπως ηλεκτρικά σκούτερ και αμαξίδια. Παρόλα' αυτά, οι κινητήρες BLDC παρουσιάζουν υψηλό κόστος αγοράς ενώ απαιτούν ειδικό ψηφιακό κύκλωμα για την οδήγηση τους. Τελικά επιλέχθηκε πακέτο κινητήρα και ελεγκτής ισχύος 1kW και τάσης 48V από την εταιρία MAC Motor Tech (Εικόνα 2.3). Λόγοι επιλογής του παραπάνω πακέτου αποτέλεσαν το χαμηλό κόστος αγοράς και η ευκολία διασύνδεσης κινητήρα και ελεγκτή. Πρόσθετα, ο εφοδιαζόμενος ελεγκτής περιλαμβάνει και ενσωματωμένη λειτουργία ανάκτησης ενέργειας, βοηθώντας έτσι στην απλοποίηση του συστήματος μετρήσεων και ελέγχου του οχήματος.



Εικόνα 2.8 : Ο κινητήρας BLDC του οχήματος και ο ελεγκτής του.

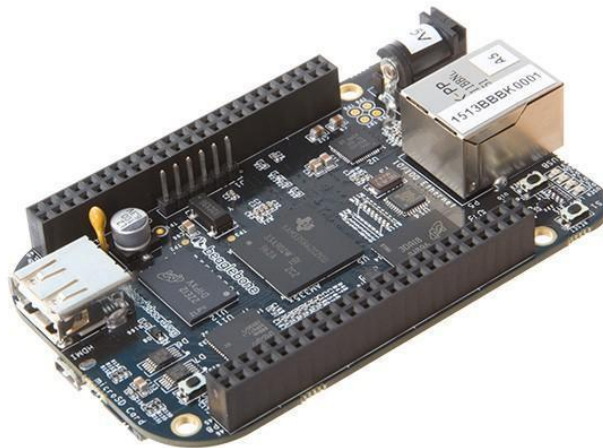
## 2.8 Κεντρική Μονάδα Ελέγχου

Η ύπαρξη μιας πληθώρας αισθητήρων και συστημάτων στο όχημα, δημιουργεί την ανάγκη ύπαρξης μιας κεντρικής μονάδας ελέγχου και εποπτείας. Η μονάδα αυτή θα συλλέγει δεδομένα από το σύνολο των αισθητήρων του οχήματος, θα μετατρέπει αυτές τις μετρήσεις σε ψηφιακές και στην συνέχεια θα τις αποθηκεύει για περαιτέρω επεξεργασία. Στην συνέχεια η ίδια μονάδα έχοντας αποθηκευμένα τα δεδομένα των αισθητήρων, μέσα από μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων (FSM) θα αποφασίζει για τον έλεγχο και την λειτουργία των επιμέρους μονάδων του οχήματος σε πραγματικό χρόνο. Τον ρόλο της κεντρικής μονάδας ελέγχου θα διαδραματίσει ένας μικροελεγκτής BeagleBone Black (Εικόνα 2.9) . Ο μικροελεγκτής αυτός αποτελεί ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό σύστημα σε μέγεθος πιστωτικής κάρτας ο οποίος διαθέτει τις παρακάτω σημαντικές δυνατότητες και χαρακτηριστικά :

- Επεξεργαστής AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8,
- Μνήμη RAM 512Mb DDR3,

- Αποθηκευτικό χώρο 4GB 8-bit eMMC,
- 2x PRU 32-bit microcontrollers,
- Ευρεία διασυνδεσιμότητα (USB Client-Host, Ethernet, HDMI),
- 2 σειρές 46 θυρών εισόδου-εξόδου τύπου Pin,
- Μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό 12 Bit έως 1.8V,
- Λειτουργικό σύστημα βασισμένο σε Linux.

Ο ισχυρός επεξεργαστής για τα δεδομένα του μεγέθους του συστήματος αλλά και ο μεγάλος αποθηκευτικός χώρος και μνήμη RAM, προσδίδουν μεγαλύτερη ελευθερία στον τρόπο διαχείρισης των δεδομένων και στην εκτέλεση του κώδικα διαχείρισης. Πρόσθετα, η ύπαρξη δύο programmable real-time unit (PRU) ταχύτητας 200MHz και ο μεγάλος αριθμός θυρών εισόδου-εξόδου, καθιστούν τον συγκεκριμένο μικροελεγκτή ιδανικό για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Επίσης, η υψηλή ανάλυση του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter, ADC) προσφέρει υψηλή ακρίβεια στην ανάγνωση αναλογικών σημάτων. Τέλος, το λειτουργικό σύστημα βασισμένο σε Linux προσφέρει ευρεία παραμετροποίηση και δυνατότητα εκτέλεσης σύνθετων εργαλείων διασύνδεσης όπως η σουίτα Robot Operating System (ROS).



Εικόνα 2.9 : Ο μικροελεγκτής BeagleBone Black.

## 2.9 Κομβία Έκτακτης Ανάγκης.

Τόσο στον εσωτερικό χώρο που βρίσκεται ο οδηγός όσο και στον εξωτερικό χώρο του οχήματος απαιτείται η ύπαρξη κομβίων έκτακτης ανάγκης για την έγκαιρη και εύκολη απενεργοποίηση όλων των κρίσιμων συστημάτων του οχήματος. Στον εσωτερικό χώρο, το

κομβίο πρέπει να βρίσκεται σε θέση την οποία ο οδηγός θα μπορεί να έχει πρόσβαση εύκολα και γρήγορα σε οποιαδήποτε έκτακτη ανάγκη, ενώ στον εξωτερικό χώρο το κομβίο πρέπει να βρίσκεται στο πίσω μέρος του οχήματος σε σταθερό σημείο, έτσι ώστε το προσωπικό ασφαλείας του αγώνα να έχει εύκολη πρόσβαση σε αυτό. Για την παραπάνω χρήση επιλέχθηκαν κομβία τύπου "μανιτάρι" της εταιρίας Omron και της σειράς A165E-02, τα οποία αφού έχουν πιεστεί επανέρχονται στη αρχική τους θέση περιστρέφοντας τα.

## 3. Ανάπτυξη Κυκλωμάτων Συστήματος

---

### 3.1 Γειώσεις και Ασφάλεια

Η συνήθης πρακτική εφαρμογής γειώσεων στον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας αποτελεί η ύπαρξη μιας ενιαίας γείωσης η οποία μεταδίδεται σε όλο το όχημα μέσω του μεταλλικού πλαισίου του. Παρόλα αυτά, η μικρή επιφάνεια του πλαισίου του οχήματος αυτής της εργασίας, αλλά και η χρήση διαφορετικών υλικών στην κατασκευή του, το καθιστούν μία μη ιδανική επιλογή ως πλατφόρμα γείωσης. Πρόσθετα, η διαφορά των τάσεων λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του οχήματος (48V) με το σύστημα μετρήσεων και ελέγχου (3.3-5V), καθιστούν την ύπαρξη διαφορετικών γειώσεων αναγκαία για την αποφυγή σφαλμάτων και δημιουργίας θορύβου. Έτσι, για την πλήρη απομόνωση των συστημάτων ελέγχου από το κύκλωμα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, το όχημα διαθέτει δύο διαφορετικές γειώσεις. Η πρώτη γείωση είναι αυτή του μικροελεγκτή και αφορά όλα τα ηλεκτρονικά μέρη τα οποία συνδέονται άμεσα με αυτόν. Μέσα σε αυτό το διευρυμένο κύκλωμα πραγματοποιείται η διασύνδεση όλων των διεπαφών του μικροελεγκτή με τον εξωτερικό κόσμο, τους αισθητήρες, αλλά και διάφορες κομβικές διεργασίες που εξασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία του οχήματος. Στην συνέχεια αυτής της εργασίας η παραπάνω γείωση θα αναφέρεται ως «BBB\_GND», γνωστοποιώντας έτσι την άμεση συσχέτιση της με την γείωση του κεντρικού μικροελεγκτή. Η δεύτερη ενιαία γείωση αφορά το κύκλωμα αποθήκευσης, μεταφοράς και κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας του οχήματος. Το ενιαίο αυτό κύκλωμα χρησιμοποιεί αγωγούς μεγαλύτερης διατομής και συνδέει την ΚΥ με τον μετατροπέα DC-DC, τους υπερπυκνωτές και τον ελεγκτή του κινητήρα. Η άμεση συσχέτιση του παραπάνω ενιαίου κυκλώματος με την ΚΥ συντελεί στην ονομασία της γείωσης αυτής ως «FC\_GND». Με αυτόν διαχωρισμό επιτυγχάνεται η πλήρης απομόνωση των δύο παραπάνω συστημάτων. Έτσι, το σύστημα μετρήσεων και ελέγχου προστατεύεται από την διαρροή υψηλών τάσεων και ρευμάτων και γίνεται ένα σημαντικό βήμα στην εξουδετέρωση των βρόχων στις γειώσεις. Επίσης, το κύκλωμα της ΚΥ προστατεύεται από διαταραχές που προκαλούνται από τα υψηλής συχνότητας διακοπτικά στοιχεία του συστήματος μετρήσεων και ελέγχου.

### 3.2 Σύνολο Αισθητήρων

Το σύνολο των αισθητήρων που βρίσκονται πάνω στο όχημα αποτελείται από δέκα διαφορετικούς αισθητήρες, οι οποίοι μέσω της κατάλληλης διασύνδεσής τους, επικοινωνούν με τον κεντρικό μικροελεγκτή. Οι αισθητήρες που βρίσκονται επάνω στο όχημα είναι οι εξής :

- Αισθητήρας τάσης εξόδου ΚΥ,



- Αισθητήρας ρεύματος στην έξοδο της ΚΥ,
- Αισθητήρας ρεύματος στην έξοδο του μετατροπέα DC-DC,
- Αισθητήρας τάσης υπερπυκνωτών,
- Αισθητήρας ρεύματος στην είσοδο του ελεγκτή του κινητήρα,
- Αισθητήρας θερμοκρασίας ΚΥ (θερμίστορ),
- Αισθητήρας θερμοκρασίας περιβάλλοντος,
- Αισθητήρας πίεσης υδρογόνου,
- Αισθητήρας διαρροής υδρογόνου,
- Αισθητήρας τύπου reed για μέτρηση ταχύτητας,
- Αισθητήρας θέσης γκαζιού (ποτενσιόμετρο).

### 3.2.1 Αισθητήρες Τάσης

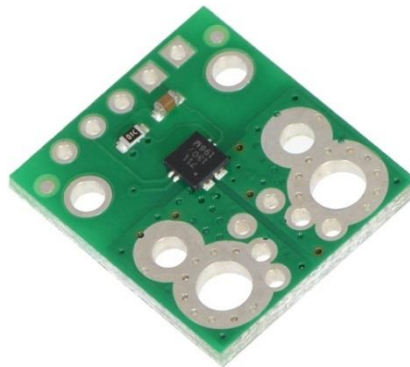
Οι δύο αισθητήρες τάσης που βρίσκονται όχημα είναι υπεύθυνοι για την μέτρηση της τάσης στα άκρα της κυψέλης και στα άκρα των υπερπυκνωτών. Οι τιμές των δύο παραπάνω τάσεων αποτελούν αναγκαίες μετρήσεις για την αποτελεσματική ρύθμιση του μετατροπέα DC-DC με στόχο την οικονομική λειτουργία του συστήματος. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε και για τις δύο εφαρμογές είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα ACPL-C87A, ενσωματωμένο σε package τύπου SMD (Surface Mounted Device). Αυτός ο αισθητήρας περιλαμβάνει έναν οπτικά απομονωμένο ενισχυτή ο οποίος είναι σχεδιασμένος ειδικά για μέτρηση τάσης. Διαθέτει εύρος εισόδου 2V και απαιτεί τάση τροφοδοσίας από 3.3V έως 5V. Το μικρό εύρος εισόδου του παραπάνω αισθητήρα καθιστά αναγκαία την χρήση διαιρέτη τάσης στα άκρα του, για τον υποβιβασμό της τάσης εισόδου στα επιθυμητά επίπεδα, καθώς οι τάσεις που μετράει ο παραπάνω αισθητήρας μπορούν να φτάσουν έως και τα 48V. Επίσης, οι αντιστάσεις στην είσοδο του αισθητήρα πρέπει να είναι χαμηλής ανοχής για την αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων. Τέλος, εφόσον αυτός ο αισθητήρας είναι και οπτικά απομονωμένος, από την μεριά της μέτρησης είναι γειωμένος με την ΚΥ ενώ από την μεριά επικοινωνίας με τον μικροελεγκτή πρέπει να είναι γειωμένος με αυτόν.

### 3.2.2 Αισθητήρες Ρεύματος

Οι τρεις αισθητήρες ρεύματος που βρίσκονται στο όχημα είναι υπεύθυνοι για την μέτρηση του ρεύματος στην έξοδο της ΚΥ, στην έξοδο του μετατροπέα DC-DC και στην

είσοδο του ελεγκτή του κινητήρα. Όπως και οι τιμές της τάσης στην είσοδο και στην έξοδο του μετατροπέα DC-DC έτσι και οι τιμές που λαμβάνονται για τα ρεύματα είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την αποτελεσματική ρύθμιση του μετατροπέα με στόχο την αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία του συστήματος. Ο αισθητήρας που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τις τρεις παραπάνω εφαρμογές είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα ACS711EX της εταιρίας Allegro. Ο ίδιος, ενσωματώνεται σε ένα πακέτο τύπου SMD το οποίο εφαρμόζεται πάνω σε μία μικρή πλακέτα - φορέα έδρασης κατασκευασμένη από την εταιρία Pololu (Εικόνα 3.1). Αποτελείται από έναν γραμμικό αισθητήρα ρεύματος βασισμένο στο φαινόμενο Hall και εμφανίζει τα παρακάτω σημαντικά χαρακτηριστικά :

- Σχεδιασμός για αμφίδρομα ρεύματα εισόδου από -31 A έως 31 A,
- Χαμηλή εσωτερική αντίσταση 0.6 mΩ,
- Απομόνωση εισόδου – εξόδου λόγω χρήσης φαινομένου Hall [11],
- Τυπικό συνολικό σφάλμα εξόδου  $\pm 4\%$ ,
- Τροφοδοσία από 3V έως 5.5V.



Εικόνα 3.1 : Ο αισθητήρας ρεύματος.

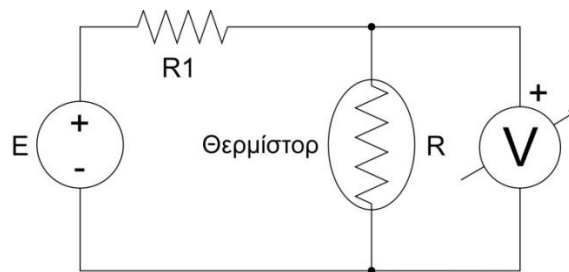
Ο παραπάνω αισθητήρας παράγει στην έξοδο του μια αναλογική τάση γραμμικά ανάλογη με το ρεύμα εισόδου. Πιο συγκεκριμένα η τάση εξόδου σε κατάσταση ηρεμίας είναι  $V_{cc}/2$  , όπου  $V_{cc}$  η τάση τροφοδοσίας, και αυξάνεται κατά 45 mV ανά Ampere ρεύματος στην είσοδο. Το θετικό ρεύμα αυξάνει την τάση εξόδου και το αρνητικό ρεύμα την μειώνει. Η σχέση μεταξύ του στιγμιαίου ρεύματος εισόδου,  $I_{in}$ , και της τάσης εξόδου του αισθητήρα,  $V_{out}$ , αναπαρίσταται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$V_{out} = \frac{V_{cc}}{2} + I_{in} * \frac{V_{cc}}{73.3 A} \quad (3.1)$$

$$I_{in} = 73.3 A * \frac{V_{out}}{V_{cc}} - 36.65 A \quad (3.2)$$

### 3.2.3 Αισθητήρας Θερμοκρασίας ΚΥ

Τα θερμίστορ αποτελούν αισθητήρες στους οποίους η ειδική τους αντίσταση μεταβάλλεται με την θερμοκρασία. Η πιο συνηθισμένη κατηγορία τους για χρήση σε εφαρμογές μέτρησης θερμοκρασίας, είναι τα θερμίστορ με αρνητικό θερμοκρασιακό συντελεστή (Negative Temperature Coefficient, NTC). Γενικότερα, χαρακτηρίζονται από την μεγάλη τους ευαισθησία στις μεταβολές θερμοκρασίας, την απλότητα της διασύνδεσης τους με τα υπόλοιπα κυκλώματα, αλλά και από την έντονη μη-γραμμικότητά τους [11]. Για την μέτρηση της θερμοκρασίας της ΚΥ χρησιμοποιείται ως αισθητήρας θερμοκρασίας ένα θερμίστορ τύπου NTC 100kΩ, καθώς απαιτείται η γρήγορη ανίχνευση μεταβολής της θερμοκρασίας της. Επίσης, ο συγκεκριμένος αισθητήρας περιέχεται στο πακέτο της ΚΥ και η χρήση του συνίσταται από τον κατασκευαστή της. Το θερμίστορ αυτό τοποθετείται στην πιο απλή διάταξη για μέτρηση θερμοκρασίας μέσω της μέτρησης της τάσης εξόδου (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2 : Απλό κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας με θερμίστορ.

Στην ουσία το θερμίστορ τοποθετείται σε ένα διαιρέτη τάσης, όπου η αντίσταση  $R1$  επιλέγεται με βάση τα όρια του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter, ADC) του μικροεπεξεργαστή. Γνωρίζοντας την δεύτερη αντίσταση, την τάση τροφοδοσίας  $V_{cc}$ , αλλά και μετρώντας την τάση εξόδου  $V_{out}$ , μπορεί να προσδιοριστεί η αντίσταση του θερμίστορ  $R_{thermistor}$  εκείνη την στιγμή μέσω της εξίσωσης (3.3).

$$R_{thermistor} = \frac{V_{out} * R1}{V_{cc} - V_{out}} \quad (3.3)$$

Για τον προσδιορισμό της πραγματικής θερμοκρασίας με μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιείται η εξίσωση των Steinhart και Hart (3.4).

$$T_{(R)} = \left( A_1 + B_1 * \ln \frac{R}{R_{ref}} + C_1 * \ln^2 \frac{R}{R_{ref}} + D_1 * \ln^3 \frac{R}{R_{ref}} \right)^{-1} \quad (3.4)$$

Όπου οι συντελεστές  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ ,  $D_1$  της εξίσωσης Steinhart και Hart παρέχονται από τον κατασκευαστή των θερμίστορ και αφορούν το υλικό του θερμίστορ. Το ίδιο ισχύει και για τον συντελεστή  $R_{ref}$  ο οποίος αφορά την τιμή της αντίστασης του θερμίστορ σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως 25°C). Η εξίσωση αυτή παρέχει μια πιο

κοντινή προσέγγιση στην πραγματική θερμοκρασία από άλλες απλούστερες εξισώσεις και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλο το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας του αισθητήρα.

### 3.2.4 Αισθητήρας Θερμοκρασίας Περιβάλλοντος

Πέρα από την μέτρηση της θερμοκρασίας της ΚΥ, ιδιαίτερα σημαντική για την αξιοπιστία και αποδοτικότητα του συστήματος μετρήσεων και ελέγχου, είναι και η μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Συγκρίνοντας αυτές τις δύο μετρήσεις θερμοκρασίας ο μικροελεγκτής μπορεί να αποφασίζει για τα επίπεδα ψύξης που απαιτούνται για την ορθή λειτουργία της ΚΥ. Για την μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος χρησιμοποιείται ο αισθητήρας LM35 από την εταιρία Texas Instruments. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας αποτελεί ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα μέτρησης της θερμοκρασίας με γραμμική και αναλογική ως προς τους βαθμούς Κελσίου έξοδο της τάξης των  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ . Ο ίδιος δεν απαιτεί κάποια εξωτερική ολοκλήρωση ή βαθμονόμηση, ενώ δέχεται τάσεις τροφοδοσίας από 4V μέχρι 30V. Έτσι, ο παραπάνω αισθητήρας μπορεί να συνδεθεί άμεσα με τον κεντρικό μικροελεγκτή χωρίς κάποιου είδους απομόνωση ή συμπληρωματικό κύκλωμα.

### 3.2.5 Αισθητήρας Πίεσης Υδρογόνου

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η τροφοδοσία του υδρογόνου στην ΚΥ με την κατάλληλη πίεση αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό θέμα ασφαλείας αλλά και ενίσχυσης της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας της ΚΥ. Η πίεση παροχής υδρογόνου στην ΚΥ ρυθμίζεται από δύο διαφορετικά όργανα. Το ένα αποτελεί μια περιστροφική στρόφιγγα με μανόμετρο η οποία ρυθμίζεται χειροκίνητα και τοποθετείται ακριβώς μετά την δεξαμενή υδρογόνου. Το δεύτερο στοιχείο ρύθμισης της πίεσης αποτελεί ένας παθητικός ρυθμιστής πίεσης ο οποίος εξασφαλίζει τον ακριβή περιορισμό της πίεσης στα επιθυμητά επίπεδα (0.36 bar). Καθώς στο κύκλωμα παροχής υδρογόνου παρεμβάλλονται και άλλα στοιχεία εκτός των ρυθμιστών πίεσης, όπως βαλβίδες και ροόμετρα, αλλά και διαφορετικού τύπου σωληνώσεις και διακλαδώσεις, καθίσταται αναγκαία η εποπτεία της πίεσης του υδρογόνου ακριβώς πριν την ΚΥ. Τοποθετώντας έναν αισθητήρα πίεσης σε αυτή την θέση εξασφαλίζεται η αξιόπιστη μέτρηση της πίεσης του υδρογόνου που εισέρχεται στην ΚΥ, ενώ δημιουργείται και η δυνατότητα ανίχνευσης διαρροών του κυκλώματος που ακολουθεί μετά τους δύο ρυθμιστές πίεσης. Για την παραπάνω λειτουργία επιλέχθηκε αισθητήρας πίεσης της εταιρίας Kobold και συγκεκριμένα το μοντέλο SEN-3276-B035Y, με πεδίο μέτρησης πίεσης από 0 έως 1.6bar και τάση τροφοδοσίας από 0 μέχρι 20V (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3 : Ο αισθητήρας πίεσης υδρογόνου.

Ο παραπάνω αισθητήρας επιλέχθηκε καθώς παρουσιάζει υψηλή αντοχή και ακρίβεια, ενώ διαθέτει ικανοποιητικούς χρόνους απόκρισης. Τέλος το μεγάλο εύρος τροφοδοσίας του, που κυμαίνεται από τα 10 V έως τα 30 V, προσφέρει ευελιξία στον τρόπο διασύνδεσης του με το κύκλωμα μετρήσεων και ελέγχου του οχήματος.

### 3.2.6 Αισθητήρας Διαρροής Υδρογόνου

Καθώς το υδρογόνο σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος αποτελεί ένα άοσμο, άχρωμο, άγευστο και ιδιαίτερα εύφλεκτο αέριο, η ανάγκη έγκαιρης και αξιόπιστης ανίχνευσης του αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό θέμα ασφαλείας. Για τον παραπάνω λόγο καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη αισθητήρα διαρροής υδρογόνου. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας για λόγους ασφαλείας θα πρέπει να τοποθετηθεί στο υψηλότερο σημείο του χώρου που βρίσκεται η ΚΥ και το σύστημα τροφοδοσίας υδρογόνου και πλησίον του κεντρικού αγωγού εξαερισμού. Ο αισθητήρας τοποθετείται σε αυτό το σημείο καθώς σε συνθήκες περιβάλλοντος το υδρογόνο βρίσκεται σε αέρια μορφή. Έτσι αφού εμφανίζει μικρότερο βάρος από τον ατμοσφαιρικό αέρα ωθείται προς τα πάνω λόγω της ατμοσφαιρικής πίεσης και στην συνέχεια κινείται προς τον αγωγού εξαερισμού [12]. Επίσης, ο αισθητήρας αυτός πρέπει να τροφοδοτείται από μια δευτερεύουσα μπαταρία απομονωμένη από τα υπόλοιπα κυκλώματα του οχήματος για να διασφαλιστεί η αδιάκοπη λειτουργία του σε όλα τα σενάρια κίνησης. Με βάση όλες τις παραπάνω απαιτήσεις χρησιμοποιείται ο αισθητήρας της σειράς μοντέλων Powerknowz™ ο οποίος κατασκευάζεται από την εταιρία Neodym Gas Detection Systems (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4 : Ο αισθητήρας υδρογόνου της Neodym.

Ο παραπάνω αισθητήρας επιλέχθηκε με βάση την γραμμική και υψηλής ανάλυσης μέτρηση υδρογόνου του, για την "έξυπνη" προσαρμογή του με βάση την θερμοκρασία περιβάλλοντος και την μεγάλο εύρος της τάσης τροφοδοσίας του.

### 3.2.7 Αισθητήρας Μέτρησης Ταχύτητας

Η ταχύτητα κίνησης ενός οχήματος είναι άμεσα συσχετιζόμενη με την περιστροφική ταχύτητα των τροχών του. Γνωρίζοντας την ακτίνα  $R$  του τροχού και την ταχύτητα περιστροφής του, μπορεί εύκολα κανείς να υπολογίσει την διαμήκη ταχύτητα του οχήματος. Πρώτα μέσω της εξίσωσης (3.5) υπολογίζεται η εξωτερική περίμετρος του τροχού  $C$ , στην συνέχεια πολλαπλασιάζοντας την περιστροφική ταχύτητα  $RPM$  με την

περίμετρο του τροχού όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.6), υπολογίζεται η διαμήκης ταχύτητα  $u(m/s)$  και η μετατροπή της σε χιλιόμετρα ανά ώρα  $u(km/h)$  :

$$C = 2 * \pi * R \quad (3.5)$$

$$u(m/s) = \frac{RPM * C}{60}, \quad u(km/h) = 3,6 * u(m/s) \quad (3.6)$$

Για τον προσδιορισμό της περιστροφικής ταχύτητας του τροχού του οχήματος, χρησιμοποιείται ένας μαγνητικός διακόπτης τύπου Reed, σε συνεργασία με δύο μικρούς μαγνήτες οι οποίοι τοποθετούνται στις ακτίνες του τροχού του οχήματος. Ο μαγνητικός διακόπτης Reed αποτελείται από έναν αισθητήρα ανίχνευσης μαγνητικού πεδίου, ο οποίος χρησιμοποιείται για να αποκόπτει ή να αποκαθιστά την ροή του ρεύματος σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα [11]. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ο αισθητήρας τροφοδοτείται από πηγή σταθερής τάσης και τοποθετείται σε σταθερό σημείο πλησίον των ακτινών του τροχού. Κατά την κίνηση του οχήματος και συνεπώς την περιστροφή των τροχών, κάθε φορά που οι μαγνήτες περνάνε μπροστά από τον αισθητήρα ο ίδιος αποκαθιστά την ροή του ρεύματος. Έτσι, στην έξοδο του αισθητήρα δημιουργείται ένα σήμα με στιγμιαίους παλμούς της τάσης που σηματοδοτούν την διέλευση των μαγνητών. Στην συνέχεια, το σήμα αυτό εισέρχεται σε κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα μετατροπής της συχνότητας των παλμών σε αναλογική τάση, για την ανάγνωση και επεξεργασία του από τον μικροελεγκτή. Το κύκλωμα αυτό, αλλά και η διαδικασία υπολογισμού της ταχύτητας από τον μικροελεγκτή αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο. Τέλος, γνωρίζοντας τον λόγο της σχέσης του συστήματος μετάδοσης κίνησης μαζί με την περιστροφική ταχύτητα που μετράται από την παραπάνω διαδικασία, ο μικροελεγκτής έχει την δυνατότητα να υπολογίσει και τις στροφές του κινητήρα [13].

### 3.2.8 Αισθητήρας Θέσης Γκαζιού

Τον ρόλο του αισθητήρα θέσης γκαζιού διαδραματίζει ένας αισθητήρας της εταιρίας Magneti Marelli και συγκεκριμένα το μοντέλο PF2C (Εικόνα 3.5). Ο συγκεκριμένος αισθητήρας χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία και αποτελεί μια δοκιμασμένη λύση για εφαρμογές σε επιταχυντές οχημάτων δρόμου καθώς διαθέτει υψηλή προστασία ενάντια των κραδασμών και των θερμικών καταπονήσεων.



Εικόνα 3.5 : Ο αισθητήρας θέσης γκαζιού.

Στην ουσία, ο παραπάνω αισθητήρας αποτελεί ένα περιστροφικό ποτενσιόμετρο εγκλεισμένο σε ένα προστατευτικό περίβλημα, το οποίο παρουσιάζει μέγιστη αντίσταση 1.2 kOhm. Οι αισθητήρες αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα οικονομικοί, παρόλα αυτά εμφανίζουν μειωμένη ανάλυση και είναι ευπαθείς σε φθορές σε σύγκριση με άλλους τύπους αισθητήρων θέσης γκαζιού [14]. Σε σύνδεση με το ποτενσιόμετρο τοποθετείται άξονας, ο οποίος συνδέεται με το πετάλι του επιταχυντή με τέτοιο τρόπο, κατά τον οποίο όταν ο οδηγός πιέζει το πετάλι, το ποτενσιόμετρο περιστρέφεται.

### 3.3 Διάταξη Ηλεκτρονικού Συστήματος

Έχοντας αναλύσει τις απαιτήσεις του συστήματος μετρήσεων και ελέγχου, αλλά και τους επιμέρους αισθητήρες και ηλεκτρικά μέρη τα οποία συνδέονται με αυτό, το επόμενο βήμα αποτελεί η σχεδίαση του ηλεκτρονικού κυκλώματος διαχείρισης τους. Για την πιο αποτελεσματική περιγραφή και ανάλυση, το ηλεκτρονικό κύκλωμα μετρήσεων και ελέγχου χωρίζεται σε έξι υποκυκλώματα συγκεντρωμένα σε μία κεντρική πλακέτα και σε άλλα δύο ξεχωριστά κυκλώματα σε ξεχωριστές πλακέτες. Στόχος του διαμοιρασμού του ενιαίου κυκλώματος είναι η απλούστευση της διαδικασίας σχεδιασμού και στην συνέχεια η διευκόλυνση της διαδικασίας αναζήτησης σχεδιαστικών ή κατασκευαστικών σφαλμάτων. Έτσι το ηλεκτρονικό κύκλωμα μετρήσεων και ελέγχου διαμοιράζεται σε συνολικά επτά διαφορετικά υποκυκλώματα καθένα από τα οποία είναι υπεύθυνο για μία από τις παρακάτω εργασίες:

- Διασύνδεση κεντρικού μικροελεγκτή,
- Έλεγχος μετατροπέα DC-DC,
- Έλεγχος ανεμιστήρα ΚΥ και αισθητήρων θερμοκρασίας,
- Επικοινωνία με ελεγκτή κινητήρα και έλεγχος αισθητήρα γκαζιού,
- Έλεγχος βαλβίδων και αισθητήρα πίεσης υδρογόνου,
- Τροφοδοσία υποκυκλωμάτων,
- Έλεγχος αισθητήρα ταχύτητας.

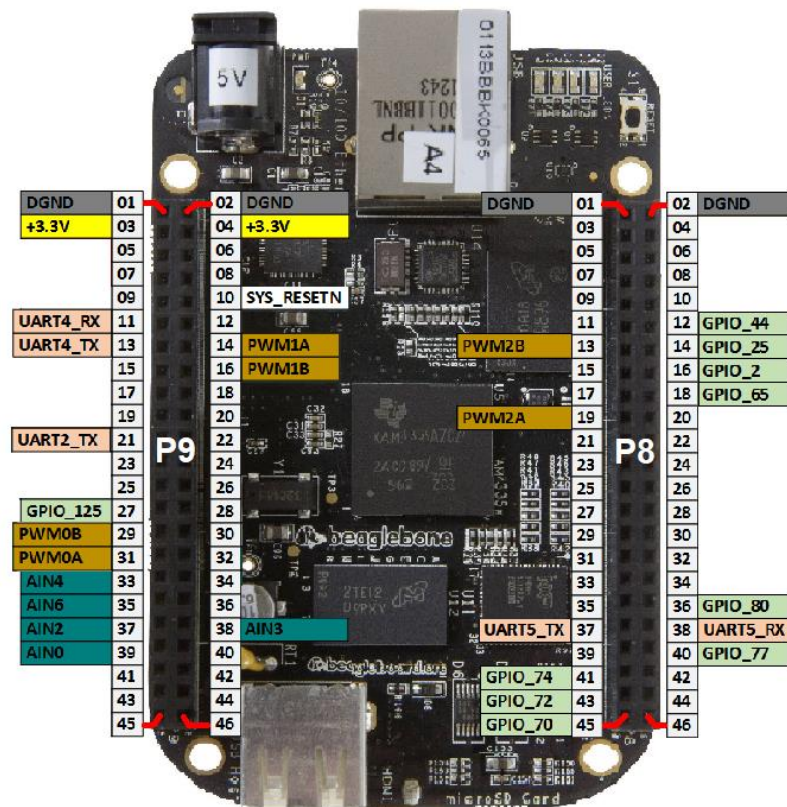
Στην συνέχεια της εργασίας θα αναλυθεί πλήρως η κυκλωματική σχεδίαση των υποκυκλωμάτων που πραγματοποιούν τις παραπάνω εργασίες.

### 3.4 Κύκλωμα Διασύνδεσης Κεντρικού Μικροεπεξεργαστή

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, τον ρόλο της κεντρικής μονάδας ελέγχου διαδραματίζει ο μικροεπεξεργαστής BeagleBone Black(BBB). Στόχος του κυκλώματος που θα περιγραφεί σε αυτήν τη παράγραφο, αποτελεί η αξιόπιστη διασύνδεση του μικροελεγκτή με τα επιμέρους υποκυκλώματα του συστήματος μετρήσεων και ελέγχου.



Συνολικά, ο μικροεπεξεργαστής BBB διαθέτει 92 ξεχωριστές θύρες με διαφορετικές λειτουργίες. Όμως, στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν μόνο οι 33. Στην εικόνα που ακολουθεί, παρατίθεται το σχεδιάγραμμα κάτοψης των θυρών του μικροεπεξεργαστή BBB και φαίνονται όλες οι ονομασίες και οι αριθμοί των θυρών που χρησιμοποιούνται (Εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6 : Οι χρησιμοποιούμενες θύρες του μικροεπεξεργαστή.

Πιο συγκεκριμένα, οι θύρες που χρησιμοποιούνται ανήκουν σε επτά διαφορετικές κατηγορίες, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρατίθενται παρακάτω.

- **Θύρες DGND** : Οι συγκεκριμένες θύρες αποτελούν την γείωση του μικροεπεξεργαστή. Οι ίδιες, συνδέονται στο τυπωμένο κύκλωμα με ένα ενιαίο επίπεδο γείωσης από την μία πλευρά του τυπωμένου κυκλώματος. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται ότι η γείωση όλων των εξαρτημάτων βρίσκεται στο ίδιο δυναμικό αναφοράς, αλλά και η προστασία του κυκλώματος από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές υψηλών συχνοτήτων [15].
- **Θύρες +3.3V** : Αυτές οι θύρες, αποτελούν θύρες σταθερής τάσης εξόδου της τάξης των 3.3V. Παρόλα αυτά, η χρήση τους προορίζεται για θύρες αναφοράς τάσης και όχι τροφοδοσίας κάποιου εξωτερικού εξαρτήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ενσωματωμένοι



στην πλακέτα του μικροεπεξεργαστή ρυθμιστές τάσης, που τροφοδοτούν αυτές τις θύρες, είναι χαμηλής ισχύος [16].

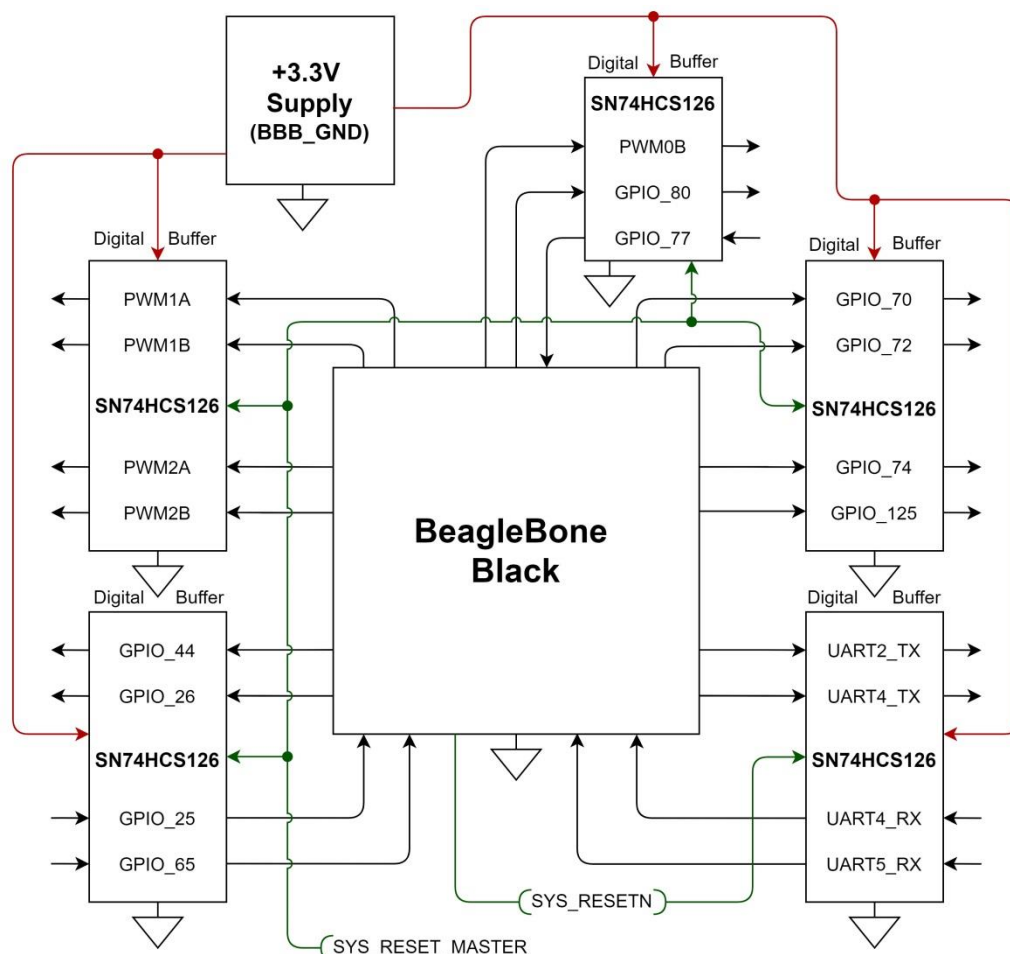
- **Θύρες UART** : Οι θύρες UART επιτρέπουν την ασύγχρονη σειριακή επικοινωνία (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) μεταξύ του μικροεπεξεργαστή και εξωτερικών συσκευών. Μέσω της ασύγχρονης επικοινωνίας, γίνεται εφικτή η διαμόρφωση της ταχύτητας μεταφοράς και της μορφής των δεδομένων, χαρακτηριστικά τα οποία επιτρέπουν την σειριακή επικοινωνία με άλλους μικροεπεξεργαστές και περιφερειακά όπως οθόνες κ.α.
- **Θύρες PWM** : Αυτές οι θύρες, αποτελούν θύρες εξόδου σημάτων με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM - Pulse Width Modulation). Η μέθοδος PWM λειτουργεί δημιουργώντας παλμούς και μεταβάλλοντας το χρόνο που κάθε παλμός παραμένει «ενεργός» (duty cycle) ελέγχει την μέση τιμή του σήματος. Ανάλογα με την συχνότητα που συμβαίνει αυτή η διαδικασία, σήματα τέτοιου τύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς, όπως έλεγχος κινητήρων, LED και άλλων διατάξεων. Ανάλογα με το ποσοστό του Duty Cycle η μέση τάση εξόδου αυτής της κατηγορίας θυρών μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως 3.3V.
- **Θύρες AIN** : Οι θύρες αυτού του τύπου αποτελούν θύρες αναλογικής εισόδου. Οι ίδιες συνδέονται άμεσα με τον μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC – Analog to Digital Converter) που βρίσκεται στον μικροελεγκτή. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας έχει την δυνατότητα ταυτόχρονης ανάγνωσης μέχρι έξι αναλογικών σημάτων με πλάτος μέχρι τα 1.8V, ενώ η μετατροπή γίνεται σε ψηφιακό σήμα 12-bit. Εφόσον το ψηφιακό σήμα είναι ανάλυσης 12-bit τότε οι τιμές εξόδου του ADC κυμαίνονται από το 0 έως το 4096, ενώ διαιρώντας το μέγιστο πλάτος της τάσης εισόδου με την μέγιστη τιμή εξόδου του μετατροπέα ADC, προκύπτει ότι η ανάλυση του μετατροπέα είναι της τάξης των 0.4mV ανά τιμή.
- **Θύρες GPIO** : Αυτές οι θύρες αποτελούν θύρες γενικής χρήσης εισόδου – εξόδου (GPIO – General Purpose Input-Output). Στην ουσία πρόκειται για θύρες ψηφιακής επικοινωνίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως είσοδοι και ως έξοδοι. Ως είσοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επικοινωνία του μικροεπεξεργαστή με διακόπτες ή ψηφιακούς αισθητήρες, ενώ ως έξοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την οδήγηση εξωτερικών ψηφιακών κυκλωμάτων όπως οθόνες, σέρβο-κινητήρες ή LED. Η σταθερή τάση εξόδου των θυρών αυτής της κατηγορίας ορίζεται στα +3.3V.
- **Θύρα SYS\_RESETN** : Η θύρα αυτή αποτελεί την θύρα εξόδου του σήματος επαναφοράς. Το σήμα εξόδου επαναφοράς αυτής της θύρας είναι ενεργό στο μηδέν και έτσι κατά την κανονική λειτουργία του κυκλώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σήμα έναρξης λειτουργίας για τα συνδεδεμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα, και όποτε χρειαστεί η επαναφορά τους να ενεργοποιείται διακόπτοντας έτσι την λειτουργία τους.

Ο Πίνακας 3.1 περιγράφει συνοπτικά τον λόγο χρήσης και τον αριθμό της κάθε θύρας που χρησιμοποιείται σε αυτήν την εφαρμογή.

Πίνακας 3.1 : Λίστα χρησιμοποιούμενων θυρών μικροελεγκτή.

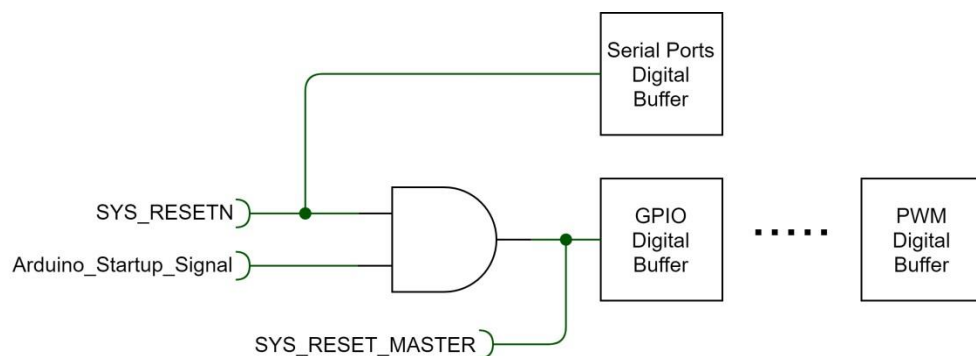
Ονομασία	Αριθμός	Λειτουργία
DGND	P9_1	Σύνδεση γείωσης μικροεπεξεργαστή
DGND	P9_2	Σύνδεση γείωσης μικροεπεξεργαστή
+3.3V	P9_3	Τάση αναφοράς +3.3V
+3.3V	P9_4	Τάση αναφοράς +3.3V
SYS_RESETN	P9_10	Σήμα επαναφοράς συστήματος (Ενεργό στο 0)
UART4_RX	P9_11	Σειριακή επικοινωνία με Arduino Pro Mini (Read)
UART4_TX	P9_13	Σειριακή επικοινωνία με Arduino Pro Mini (Transmit)
PWM1A	P9_14	Σήμα ελέγχου ρεύματος εξόδου μετατροπέα DC_DC
PWM1B	P9_16	Σήμα ελέγχου ταχύτητας κινητήρα
UART2_TX	P9_21	Σήμα σειριακής επικοινωνίας με οθόνη οδηγού
GPIO_125	P9_27	Σήμα ελέγχου βαλβίδας υδρογόνου
PWM0B	P9_29	Σήμα ελέγχου βαλβίδας απομάκρυνσης καταλοίπων
AIN4	P9_33	Βοηθητική εξωτερική θύρα αναλογικής εισόδου
AIN6	P9_35	Βοηθητική εξωτερική θύρα αναλογικής εισόδου
AIN2	P9_37	Σήμα μέτρησης αισθητήρα ρεύματος μετατροπέα DC-DC
GND_ADC	P9_38	Γείωση μετατροπέα ADC
AIN0	P9_39	Σήμα μέτρησης αισθητήρα ρεύματος κινητήρα
AIN5	P9_40	Σήμα πολλαπλής σειριακής θύρας με χρήση πολυπλέκτη
DGND	P8_1	Σύνδεση γείωσης μικροεπεξεργαστή
DGND	P8_2	Σύνδεση γείωσης μικροεπεξεργαστή
GPIO_44	P8_12	Βοηθητική εξωτερική θύρα ψηφιακής εξόδου
PWM2B	P8_13	Σήμα ελέγχου ταχύτητας ανεμιστήρα ψύξης ΚΥ
GPIO_26	P8_14	Βοηθητική εξωτερική θύρα ψηφιακής εξόδου
GPIO_25	P8_16	Βοηθητική εξωτερική θύρα ψηφιακής εισόδου
GPIO_65	P8_18	Βοηθητική εξωτερική θύρα ψηφιακής εισόδου
PWM2A	P8_19	Βοηθητική εξωτερική θύρα σήματος εξόδου PWM
GPIO_80	P8_36	Σήμα ενεργοποίησης μετατροπέα DC-DC
UART5_TX	P8_37	Βοηθητική θύρα σειριακής επικοινωνίας (Transmit)
UART5_RX	P8_38	Βοηθητική θύρα σειριακής επικοινωνίας (Read)
GPIO_77	P8_40	Εξωτερικό σήμα έκτακτης ανάγκης
GPIO_74	P8_41	Σήμα ελέγχου S2 πολυπλέκτη αναλογικών εισόδων
GPIO_72	P8_43	Σήμα ελέγχου S1 πολυπλέκτη αναλογικών εισόδων
GPIO_70	P8_45	Σήμα ελέγχου S0 πολυπλέκτη αναλογικών εισόδων

Οι θύρες που χρησιμοποιήθηκαν και φαίνονται στον Πίνακα 3.1, επιλέχθηκαν με βάση τις ανάγκες διασύνδεσης των επιμέρους ηλεκτρονικών υποσυστημάτων και αισθητήρων, και με στόχο την απλούστευση των συνδέσεων πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα που εδράζεται ο μικροελεγκτής. Ωστόσο, ο μεγάλος αριθμός συνδέσεων, δημιουργεί την ανάγκη ενός μηχανισμού επαναφοράς ή αποκοπής όλων των ψηφιακών σημάτων κατά την εκκίνηση ή παύση λειτουργίας του συστήματος ή σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης ή βλάβης. Για την ικανοποίηση των παραπάνω λειτουργιών χρησιμοποιείται ένα σύνολο πέντε ψηφιακών απομονωτών (Digital Buffers). Οι ψηφιακοί απομονωτές είναι ηλεκτρονικά στοιχεία τα οποία απομονώνουν την είσοδο από την έξοδο παρέχοντας είτε μηδενική τάση, είτε την ίδια τάση με αυτή της εισόδου. Έτσι όλα τα σήματα ελέγχου, επικοινωνίας και μετρήσεων αμέσως μετά αφού εξέλθουν από τον μικροελεγκτή, ή αμέσως πριν εισέλθουν σε αυτόν διέρχονται μέσα από έναν digital buffer. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας του το ολοκληρωμένο κύκλωμα SN74HCS126, το οποίο περιλαμβάνει τέσσερις ξεχωριστούς ψηφιακούς απομονωτές σε ένα πακέτο τύπου SMD. Όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα της Εικόνας 3.7 συνολικά χρησιμοποιούνται πέντε πακέτα SN74HCS126 για τον έλεγχο όλων των απαραίτητων σημάτων. Την τροφοδοσία τους αναλαμβάνει ένα τροφοδοτικό σταθερής τάσης εξόδου +3.3V DC το οποίο βρίσκεται στην κύκλωμα.



Εικόνα 3.7 : Διασύνδεση ψηφιακών απομονωτών με μικροελεγκτή.

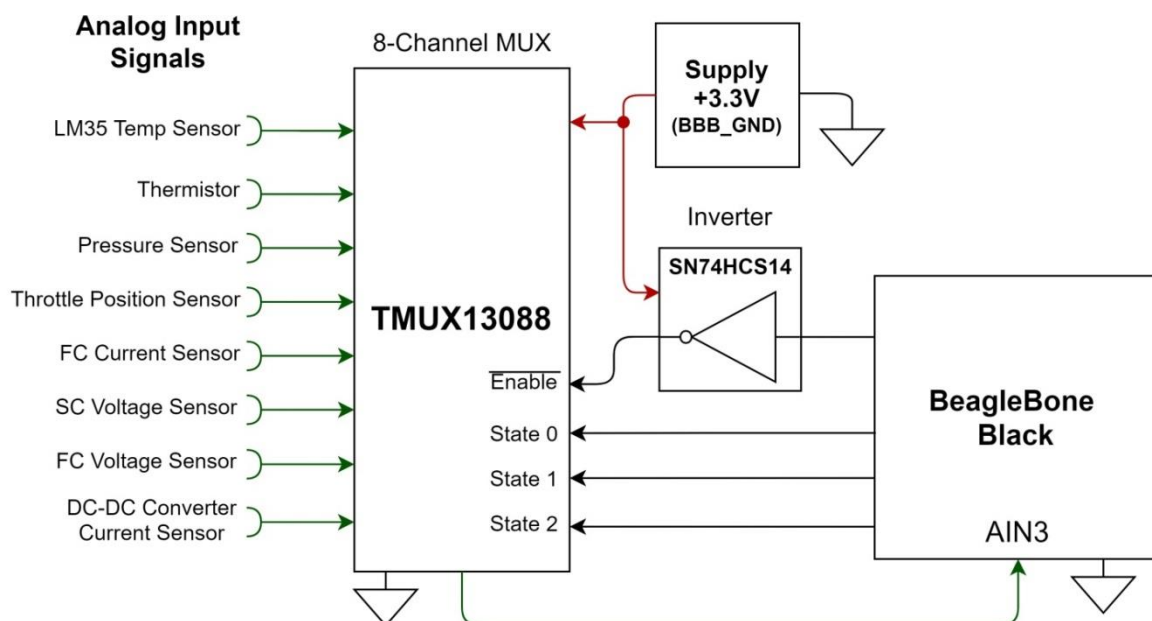
Ωστόσο η λειτουργία των πέντε παραπάνω ψηφιακών απομονωτών ελέγχεται από διαφορετικά σήματα ελέγχου. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα που αναλαμβάνει την απομόνωση των σημάτων σειριακής επικοινωνίας, και φαίνεται στην κάτω δεξιά πλευρά της Εικόνας 3.7, ελέγχεται μόνο από το σήμα επαναφοράς συστήματος (SYS\_RESET\_N) και όχι από το σήμα εκκίνησης του μικροελεγκτή Arduino (Arduino Startup Signal), η λειτουργία του οποίου θα αναλυθεί στην παράγραφο του κυκλώματος ελέγχου των βαλβίδων υδρογόνου. Η παραπάνω σύνδεση διασφαλίζει ότι τα σήματα σειριακής επικοινωνίας δεν θα αποκοπούν σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης ή βλάβης, αλλά μόνο όταν το επιλέξει ο ίδιος ο μικροελεγκτής, και δηλαδή μηδενίσει την έξοδο της θύρας SYS\_RESET\_N. Η αντίθετη λογική ισχύει για τα τέσσερα υπόλοιπα ολοκληρωμένα κυκλώματα που αναλαμβάνουν την αποκοπή των υπολοίπων σημάτων. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8 μέσω μιας πύλης AND, η οποία δέχεται στην μια είσοδο της το σήμα επαναφοράς συστήματος του μικροελεγκτή Beaglebone Black και στην άλλη το σήμα εκκίνησης του μικροελεγκτή Arduino, προκύπτει το σήμα ελέγχου των τεσσάρων υπολοίπων ψηφιακών απομονωτών. Έτσι οι τέσσερις ψηφιακοί απομονωτές έχουν ανενεργό σήμα ελέγχου και έτσι δεν επιτρέπουν την διέλευση των σημάτων από και προς τον μικροελεγκτή, όταν το επιλέξει ο μικροελεγκτής Beaglebone Black ή ο μικροελεγκτής Arduino δεν έχει εκκινήσει ορθά.



Εικόνα 3.8 : Σχεδιάγραμμα σημάτων ελέγχου ψηφιακών απομονωτών.

Εξαίρεση από την παραπάνω συνδεσμολογία αποτελούν τα σήματα αναλογικής εισόδου. Τα οποία καθώς πρόκειται για αναλογικά σήματα δεν μπορούν να μεταφραστούν από την είσοδο στην έξοδο ενός ψηφιακού απομονωτή. Παρόλα αυτά, η παραπάνω εξαίρεση για τον έλεγχο εισόδου των αναλογικών σημάτων, καλύπτεται τμηματικά ως συνέπεια υλοποίησης της λειτουργικότητας που θα αναλυθεί στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας πολυπλέκτες. Ο μικροεπεξεργαστής Beaglebone Black διαθέτει συνολικά έξι θύρες αναλογικής εισόδου. Παρόλα αυτά, ο μεγάλος αριθμός αισθητήρων με αναλογική έξοδο που υπάρχουν στο σύστημα μετρήσεων, οι οποίοι πρέπει να επικοινωνήσουν με τον μικροελεγκτή, δημιουργεί την ανάγκη διεύρυνσης του αριθμού αναλογικών εισόδων. Για να ικανοποιηθεί αυτή η ανάγκη γίνεται χρήση ενός πολυπλέκτη (Multiplexer – MUX) οκτώ εισόδων. Η έξοδος του πολυπλέκτη συνδέεται απευθείας με μια από τις αναλογικές εισόδους του μικροελεγκτή, και στην συνέχεια σε κάθε κανάλι εισόδου του πολυπλέκτη συνδέονται όλα τα απαραίτητα αναλογικά σήματα εισόδου. Με την σειρά του ο μικροελεγκτής, ελέγχοντας τις καταστάσεις λειτουργίας του πολυπλέκτη, έχει την δυνατότητα να διαβάζει σε μία αναλογική θύρα οκτώ διαφορετικά σήματα αναλογικής εισόδου. Καθώς οι είσοδοι του

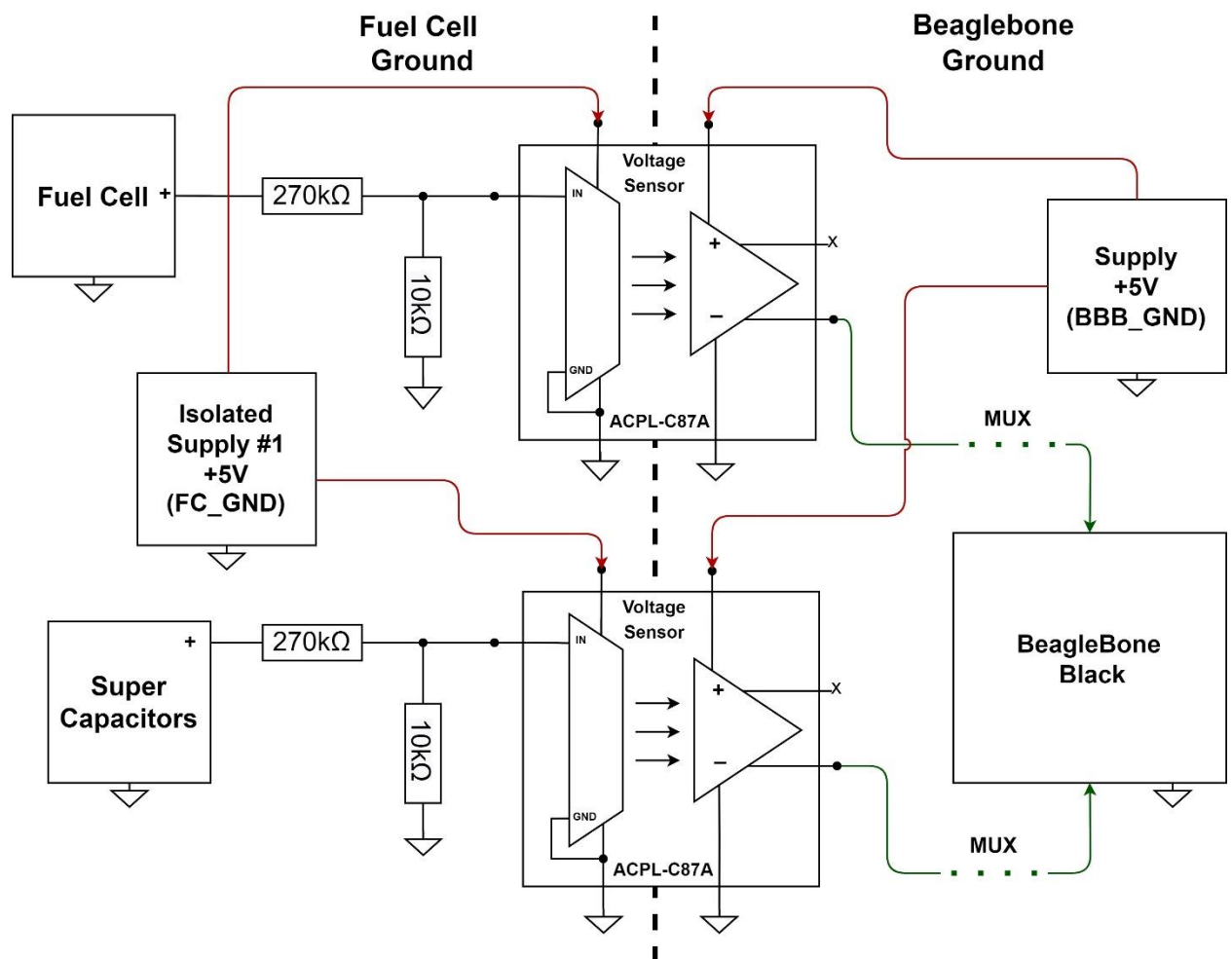
πολυπλέκτη είναι οκτώ, αριθμός που χρειάζεται τρία ψηφία-bit για να αναπαρασταθεί ως δυαδικός αριθμός, τα ψηφιακής λογικής σήματα ελέγχου καταστάσεων του πολυπλέκτη είναι τρία στο πλήθος. Αφού ο μικροεπεξεργαστής διαθέτει δύο μονάδες PRU υψηλής ταχύτητας, οι οποίες διαχειρίζονται τις ψηφιακές εισόδους-εξόδους, η ταχύτητα μετάβασης των καταστάσεων του πολυπλέκτη μπορεί να γίνει ιδιαίτερα υψηλή. Με αυτό τον τρόπο, η δειγματοληψία των οκτώ διαφορετικών αναλογικών εισόδων, σε μια αναλογική θύρα του μικροεπεξεργαστή, μέσω του πολυπλέκτη, γίνεται με ιδιαίτερα υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας. Έτσι η απόκριση ανάγνωσης των αναλογικών σημάτων είναι ιδιαίτερα υψηλή, ενώ χάνεται λιγοστή ουσιαστική πληροφορία. Πρόσθετα, επιλέγεται πολυπλέκτης ο οποίος διαθέτει σήμα ελέγχου ενεργοποίησης (Enable), το οποίο επίσης ελέγχεται από τον μικροελεγκτή, και δίνει την δυνατότητα αποκοπής ή επαναφοράς της θύρας αναλογικής εισόδου από τα σήματα εισόδου του πολυπλέκτη. Ο πολυπλέκτης που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί σε αυτή την εφαρμογή είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα TMUX13088, που περιλαμβάνει συμβατότητα με λογικά σήματα 1.8V τα οποία χρησιμοποιεί ο μικροεπεξεργαστής Beaglebone Black και ενδείκνυται από τον κατασκευαστή του για χρήση με αναλογικά και ψηφιακά σήματα. Ο ίδιος δέχεται τροφοδοσία από 1.6V μέχρι 5.5V, και σε αυτή την περίπτωση τροφοδοτείται από τροφοδοτικό σταθερής τάσης εξόδου +3.3V DC. Στην Εικόνα 3.9 που ακολουθεί φαίνεται το σχεδιάγραμμα του κυκλώματος διασύνδεσης και επικοινωνίας του πολυπλέκτη με την μικροελεγκτή, μαζί με τα αναλογικά σήματα τα οποία χρησιμοποιούν αυτή την συνδεσμολογία.



Εικόνα 3.9 : Σχεδιάγραμμα συνδεσμολογίας πολυπλέκτη αναλογικών εισόδων.

Καθώς το σήμα ενεργοποίησης του πολυπλέκτη (Enable) είναι αντίστροφης λογικής, τότε καθίσταται αναγκαία η χρήση ενός αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα SN74HCS14, το οποίο περιλαμβάνει έξι κανάλια αντίστροφης και τροφοδοτείται επίσης από το τροφοδοτικό σταθερής τάσης εξόδου +3.3V DC.

Δύο από τα αναλογικά σήματα τα οποία εισέρχονται στον μικροελεγκτή μέσω του πολυπλέκτη, είναι και αυτά των εξόδων των δύο αισθητήρων τάσης που βρίσκονται στο σύστημα. Όπως έχει αναφερθεί και στην αρχή της ενότητας, οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της τάσης στα άκρα της ΚΥ και των υπερπυκνωτών, είναι τα ολοκληρωμένα κυκλώματα ACPL-C87A. Οι δύο αυτοί αισθητήρες αποτελούν στην ουσία οπτικά απομονωμένοι ενισχυτές με λόγο ενίσχυσης 1 προς 1. Όμως, καθώς το εύρος της τάσης που δέχονται στην είσοδο τους είναι από 0V έως 2V, καθίσταται αναγκαίος ο υποβιβασμός της μετρούμενης τάσης η οποία μπορεί να φτάσει τα 48V. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.10, οι δύο αισθητήρες συνδέονται παράλληλα με την ΚΥ και τους υπερπυκνωτές, αφού πρώτα υποβιβαστεί η μετρούμενη τάση με την χρήση ενός απλού διαιρέτη τάσης.



Εικόνα 3.10 : Το σχεδιάγραμμα διασύνδεσης των αισθητήρων τάσης.

Από την κάθε πλευρά γείωσης οι δύο αισθητήρες τροφοδοτούνται με απομονωμένα μεταξύ τους τροφοδοτικά σταθερής τάσης εξόδου +5V DC. Οι αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται είναι 270kΩ και 10kΩ και μέσω αυτών επιτυγχάνεται υποβιβασμός της τάσης με λόγο 28 προς 1. Στην συνέχεια οι δύο αισθητήρες απομονώνουν την υποβιβασμένη μετρούμενη τάση από το κύκλωμα της κυψέλης και την μεταφέρουν στο κύκλωμα του μικροελεγκτή. Στην ουσία ο μικροελεγκτής διαβάζει στην αναλογική είσοδο

του την υποβιβασμένη τάση από τον διαιρέτη τάσης. Στην συνέχεια γνωρίζοντας τον λόγο υποβιβασμού πολλαπλασιάζει με αυτόν την μέτρηση και έτσι γνωρίζει την πραγματική τάση στα άκρα των δύο αισθητήρων. Καθώς ο λόγος υποβιβασμού είναι 28 προς 1 και ο μικροελεγκτής μπορεί να δεχθεί στην αναλογική του είσοδο μέχρι 1.8V, η παραπάνω συνδεσμολογία μπορεί να δεχθεί με ασφάλεια και να μετρήσει τάσεις μέχρι και 50.4V.

Τελευταίο τμήμα του κυκλώματος διασύνδεσης του κεντρικού μικροελεγκτή αποτελεί ένας μετατροπέας λογικής (Logic Converter). Καθώς ο μικροελεγκτής Beaglebone Black χρησιμοποιεί σταθερή τάση 3.3V σε όλες του τις εισόδους και εξόδους, η επικοινωνία με εξωτερικές συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικές τάσεις λειτουργίας είναι αδύνατη. Συγκεκριμένα η οθόνη που βρίσκεται στον χώρο του οδηγού και τον πληροφορεί σε πραγματικό χρόνο για τις μετρήσεις των αισθητήρων, όπως τάσεις, ρεύματα και θερμοκρασίες στο σύστημα, λειτουργεί και επικοινωνεί με άλλες συσκευές με τάση +5V. Η οθόνη χρησιμοποιεί πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας, και συγκεκριμένα χρησιμοποιεί την θύρα UART2\_TX του μικροελεγκτή Beaglebone Black για να διαβάσει τις πληροφορίες προς απεικόνιση από τον ίδιο. Ο μετατροπέας λογικής που επιλέχθηκε είναι το μοντέλο με κωδικό BOB-100090 από την εταιρία Sparkfun και συνδυάζει τέσσερα κανάλια μετατροπής λογικής με χρήση τρανζίστορ τύπου MOSFET. Ο ίδιος παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο συσκευών και διασφαλίζει την μετατροπή του σειριακού σήματος επικοινωνίας του μικροελεγκτή από τα 3.3V στα 5V που απαιτεί η οθόνη.

### 3.5 Κύκλωμα Ελέγχου Μετατροπέα DC-DC

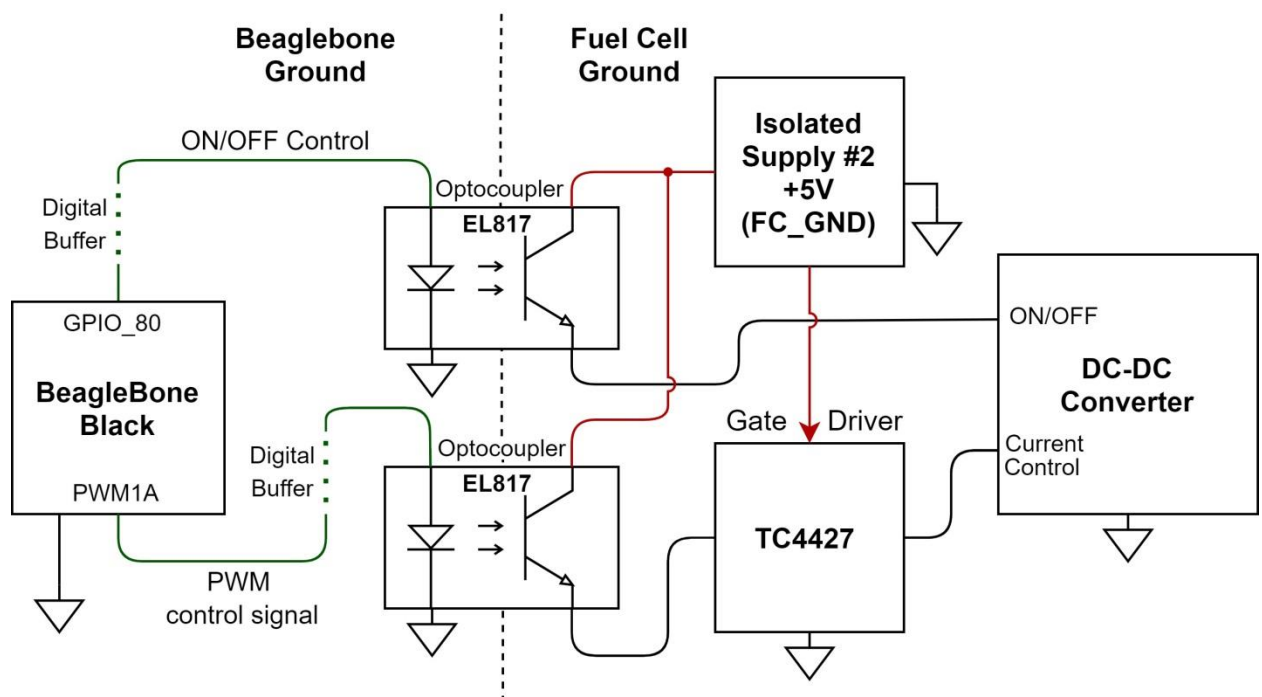
Ο μετατροπέας DC-DC που χρησιμοποιείται στο όχημα απαιτεί δύο ξεχωριστά σήματα από τον κεντρικό μικροελεγκτή για τον έλεγχο του. Το πρώτο σήμα ελέγχου είναι τύπου ON/OFF και είναι υπεύθυνο για την εκκίνηση ή την παύση της λειτουργίας του μετατροπέα. Το δεύτερο σήμα ελέγχου είναι τύπου PWM (Pulse Width Modulation) και είναι αυτό που ελέγχει και ρυθμίζει την τιμή του ρεύματος εξόδου, με σκοπό την προστασία της ΚΥ από υψηλές απαιτούμενες τιμές ρεύματος. Καθώς ο μετατροπέας DC-DC είναι άμεσα συνδεδεμένος με την ΚΥ και τους υπερπυκνωτές, για τους λόγους που έχουν αναλυθεί στην παράγραφο 3.1, η γείωση λειτουργίας του είναι διαφορετική από αυτή του μικροελεγκτή. Έτσι, τα δύο σήματα ελέγχου που προέρχονται από τον μικροελεγκτή, πρώτα πρέπει απομονωθούν έτσι ώστε να αποκτήσουν την γείωση της ΚΥ. Για την παραπάνω λειτουργικότητα επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν οπτικοί απομονωτές, και συγκεκριμένα το μοντέλο EL317. Τέτοια ολοκληρωμένα κυκλώματα, βασίζουν την λειτουργία τους σε μια διόδο που εκπέμπει υπέρυθρο φως και σε ένα φωτοτρανζίστορ ευαίσθητο σε αυτή την ακτινοβολία [17]. Καθώς δεν υπάρχει αγωγή σύνδεση μεταξύ της διόδου και του τρανζίστορ, τα κυκλώματα από τις δύο μεριές του οπτικού απομονωτή είναι πλήρως ηλεκτρικά απομονωμένα. Έτσι, στην συνέχεια, τα απομονωμένα σήματα ελέγχου μπορούν να μεταφερθούν με ασφάλεια προς τον μετατροπέα DC-DC.

Παρόλα αυτά το σήμα ελέγχου του ρεύματος εξόδου πρέπει να ενισχυθεί προτού εφαρμοστεί στον μετατροπέα. Τα σήματα που προέρχονται από τον μικροελεγκτή, είναι χαμηλής τάσης 1.8 - 3.3V ενώ το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να τροφοδοτήσει ο μικροελεγκτής από μια θύρα είναι επίσης χαμηλό της τάξης των 50mA. Το σήμα



εξερχόμενο από τον οπτικό απομονωτή είναι επίσης αδύναμο για να μπορέσει να οδηγήσει το εσωτερικό σύστημα ελέγχου του μετατροπέα DC-DC που περιλαμβάνει τρανζίστορ τύπου MOSFET. Για αυτόν τον λόγο οι υψηλές χωρητικότητες που εμφανίζουν οι ακροδέκτες των τρανζίστορ τύπου MOSFET κατά την χρονική περίοδο αλλαγής της κατάστασης τους μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στο κύκλωμα. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκε η χρήση ενός οδηγού πύλης (Gate Driver) και συγκεκριμένα του ολοκληρωμένου κυκλώματος με κωδικό TC4427. Τέτοια ολοκληρωμένα κυκλώματα χρησιμοποιούνται για να μεταφράζουν σήματα υψηλής συχνότητας όπως το σήμα ελέγχου PWM, σε υψηλότερες τάσεις και ρεύματα, με σκοπό τον γρήγορο και αξιόπιστο έλεγχο μιας πύλης ενός MOSFET, αλλά και την προστασία των κυκλωμάτων ελέγχου.

Στο σχεδιάγραμμα του ηλεκτρονικού κυκλώματος που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.11 οι δύο οπτικοί απομονωτές συνδέονται απευθείας με τον μικροελεγκτή.



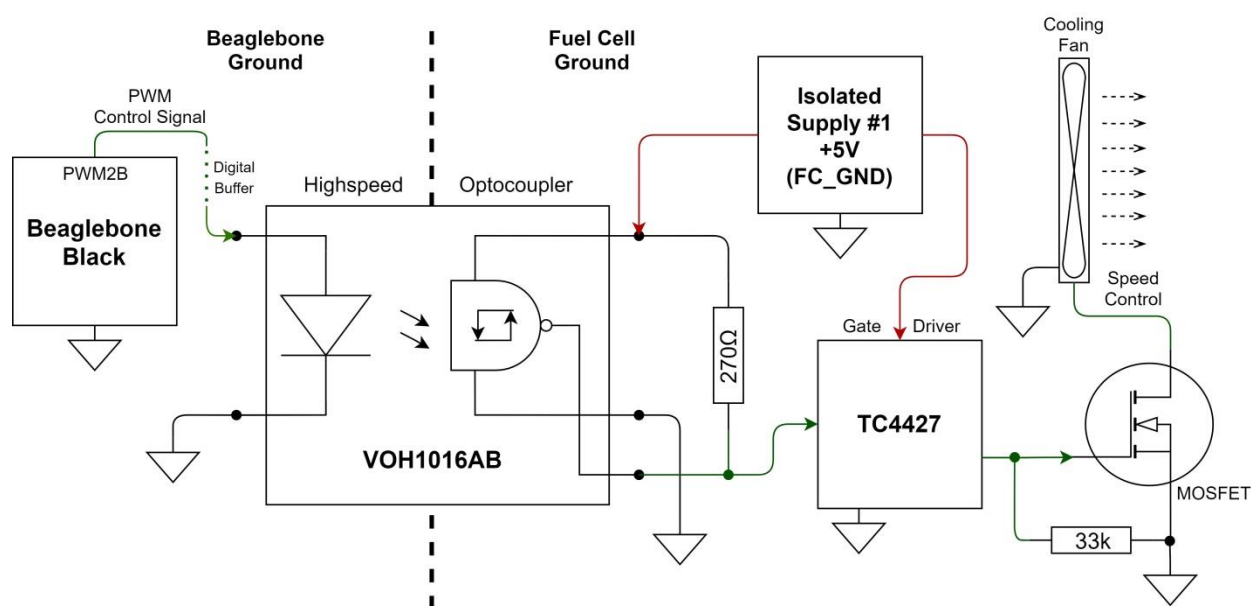
Εικόνα 3.11 : Σχεδιάγραμμα κυκλώματος ελέγχου μετατροπέα DC-DC.

Ο πρώτος οπτικός απομονωτής συνδέεται με μια θύρα ψηφιακής εξόδου για το σήμα ελέγχου ON/OFF, ενώ ο δεύτερος με μία θύρα τύπου PWM για το σήμα ελέγχου του ρεύματος του μετατροπέα. Στην άλλη πλευρά των οπτικών απομονωτών και συγκεκριμένα στον συλλέκτη του φωτοτρανζίστορ συνδέεται ένα τροφοδοτικό σταθερής τάσης εξόδου +5V DC το οποίο είναι γειωμένο με την κυψέλη. Ο εκπομπός του πρώτου φωτοτρανζίστορ συνδέεται απευθείας με τον μετατροπέα μεταφέροντας του το απομονωμένο σήμα ελέγχου ON/OFF, ενώ του δεύτερου συνδέεται με τον οδηγό πύλης TC4427 για την περαιτέρω ενίσχυση του σήματος ελέγχου του ρεύματος πριν αυτό φτάσει στον μετατροπέα.



### 3.6 Κύκλωμα Ελέγχου Ανεμιστήρα και Αισθητήρων Θερμοκρασίας

Η αποτελεσματική ψύξη της ΚΥ αλλά και η αξιόπιστη μέτρηση της θερμοκρασίας της αποτελούν δύο πολύ σημαντικούς παράγοντες για την αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία του οχήματος. Το κύκλωμα που θα περιγραφεί σε αυτή την παράγραφο είναι υπεύθυνο για τον γρήγορο και αξιόπιστο έλεγχο του ανεμιστήρα που είναι υπεύθυνος για την ψύξη της ΚΥ, αλλά και για την διασύνδεση των δύο αισθητήρων θερμοκρασίας που βρίσκονται στο όχημα με τον κεντρικό μικροελεγκτή. Ξεκινώντας από το κύκλωμα ελέγχου του ανεμιστήρα (Εικόνα 3.12), ο κατασκευαστής αυτού προτείνει τον έλεγχο της ταχύτητας του με χρήση σήματος ελέγχου PWM πλάτους +5V σε συνδεσμολογία ανοικτού συλλέκτη.



Εικόνα 3.12 : Το κύκλωμα ελέγχου της ταχύτητας του ανεμιστήρα.

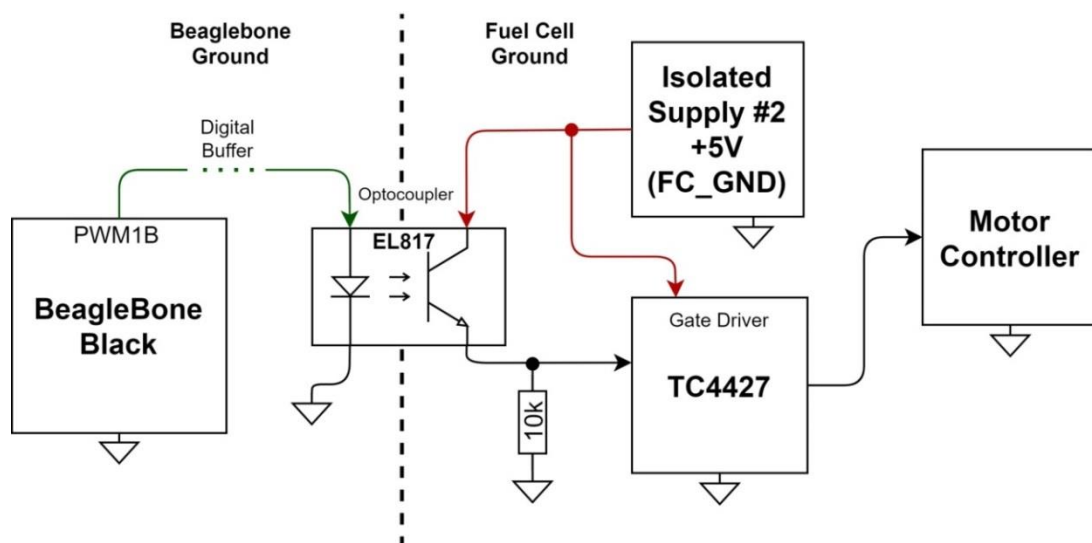
Αρχικά το σήμα ελέγχου PWM αφού προέρχεται από τον μικροελεγκτή πρέπει πρώτα να αλλάξει γείωση καθώς η τροφοδοσία του ανεμιστήρα γίνεται με γείωση αυτής της κυψέλης υδρογόνου. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του ανεμιστήρα για τον γρήγορο και αξιόπιστο έλεγχο της ταχύτητας του, το σήμα ελέγχου PWM πρέπει να είναι υψηλής συχνότητας της τάξης των 2kHz. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται ο οπτικός απομονωτής υψηλής ταχύτητας VOH1016AB ο οποίος ενδείκνυται από τον κατασκευαστή του για μεταφορά δεδομένων με συχνότητα 2kHz ενώ διαθέτει μεγάλο εύρος τάσης τροφοδοσίας από 3V έως 15V. Στην συνέχεια, το σήμα ελέγχου το οποίο εξέρχεται από τον οπτικό απομονωτή έχει ως αναφορά την γείωση της ΚΥ και διέρχεται από τον οδηγό πύλης TC4427 με σκοπό τον γρήγορο και αξιόπιστο έλεγχο της πύλης του τρανζίστορ τύπου MOSFET που ακολουθεί. Τόσο ο οπτικός απομονωτής, όσο και ο οδηγός πύλης τροφοδοτούνται από το ίδιο απομονωμένο τροφοδοτικό σταθερής τάσης εξόδου +5V DC, ενώ σύμφωνα με την προτεινόμενη συνδεσμολογία του κατασκευαστή του οπτικού απομονωτή συνδέεται μια αντίσταση 270Ω στα άκρα των εξόδων του. Το σήμα PWM

εξερχόμενο από τον οδηγό πύλης έχει ενισχυθεί κατάλληλα έτσι ώστε να μπορέσει να οδηγήσει την πύλη του MOSFET με ταχύτητα και αξιοπιστία, ενώ η προσθήκη μιας αντίστασης  $33k\Omega$  συνδεδεμένη με την γείωση (pull-down) προστατεύει το κύκλωμα στην περίπτωση της αποφόρτισης της πύλης σε κάποια απροσδιόριστη κατάσταση. Εσωτερικά του ανεμιστήρα ο απαγωγός (Drain) του τρανζίστορ MOSFET συνδέεται με μία τάση αναφοράς  $+5V$  και με την κατάλληλη συνδεσμολογία ελέγχεται αποτελεσματικά η ταχύτητα του ανεμιστήρα.

Συνεχίζοντας με την διασύνδεση των αισθητήρων θερμοκρασίας του συστήματος, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, οι δύο αισθητήρες που χρησιμοποιούνται, είναι ένα θερμίστορ για την μέτρηση της θερμοκρασίας της ΚΥ και ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα LM35 για την μέτρηση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας. Η συνδεσμολογία του θερμίστορ είναι ίδια όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2.3, δηλαδή σε συνδεσμολογία διαιρέτη τάσης με μοναδική προσθήκη ένα πυκνωτή  $0.1\mu F$  παράλληλα συνδεδεμένο στο θερμίστορ. Ο αισθητήρας LM35 δεν χρειάζεται κάποια εξωτερική συνδεσμολογία και συνδέεται μόνο με την τροφοδοσία. Τέλος και οι δύο αισθητήρες συνδέονται απευθείας με τον μικροελεγκτή και τροφοδοτούνται από τροφοδοτικό σταθερής τάσης εξόδου  $+5V$  DC, το οποίο είναι γειωμένο με τον μικροελεγκτή.

### 3.7 Κύκλωμα Ελέγχου Κινητήρα και Αισθητήρα Γκαζιού

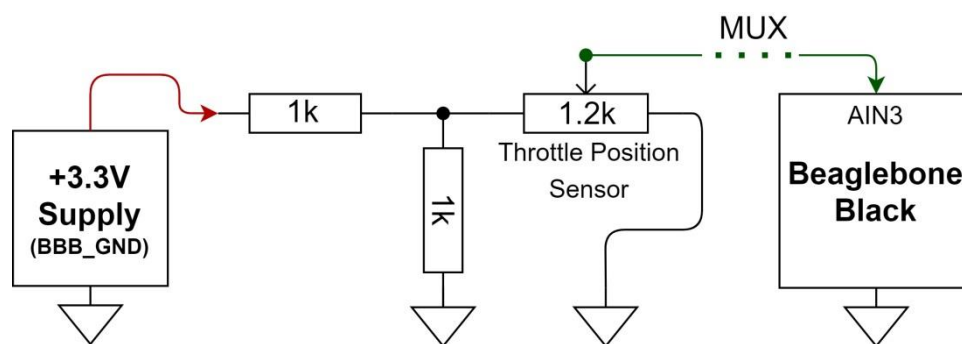
Ο έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα είναι ιδιαίτερα απλός καθώς ο ίδιος χρειάζεται μόνο ένα σήμα ελέγχου τύπου PWM για την ρύθμιση της ταχύτητας του. Το σήμα ελέγχου PWM προέρχεται από τον κεντρικό μικροελεγκτή και στην συνέχεια περνάει από έναν οπτικό απομονωτή για να αποκτήσει αναφορά στην γείωση του κινητήρα, η οποία είναι η ίδια με αυτή της ΚΥ. Στην συνέχεια, το απομονωμένο σήμα PWM προτού διέλθει στον ελεγκτή του κινητήρα χρειάζεται να ενισχυθεί. Η ενίσχυση αυτή γίνεται με σκοπό την προστασία του κυκλώματος, καθώς το σήμα ελέγχου PWM υψηλής συχνότητας είναι αδύναμο για να οδηγήσει συστήματα ελέγχου που εμφανίζουν μεγάλη χωρητικότητα μεταξύ των τρανζίστορ τους.



Εικόνα 3.13 : Το κύκλωμα επικοινωνίας του ελεγκτή κινητήρα – μικροελεγκτή.

Τόσο ο οπτικός απομονωτής στην πλευρά με αναφορά στην γείωση της ΚΥ, όσο και ο οδηγός πύλης, χρησιμοποιούν για την τροφοδοσία τους το ίδιο απομονωμένο τροφοδοτικό σταθερής τάσης εξόδου +5V DC. Στην Εικόνα 3.13 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα του κυκλώματος επικοινωνίας του κεντρικού μικροελεγκτή με τον ελεγκτή του κινητήρα, όπου ως οδηγός πύλης χρησιμοποιείται το ολοκληρωμένο κύκλωμα TC4427 ενώ ως οπτικός απομονωτής το ολοκληρωμένο κύκλωμα EL817, τα χαρακτηριστικά των οποίων έχουν αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο.

Όσον αφορά τον αισθητήρα θέσης γκαζιού του οχήματος, όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 3.2.8, πρόκειται στην ουσία για ένα ποτενσιόμετρο μεταβλητής αντίστασης που εμφανίζει μέγιστη αντίσταση 1.2kΩ. Το ποτενσιόμετρο αυτό τοποθετείται σε μία απλή διάταξη διαιρέτη τάσης, ενώ έχει κοινή γείωση με τον μικροελεγκτή Beaglebone Black και τροφοδοτείται με σταθερή DC τάση +3.3V από το ανάλογο τροφοδοτικό. Στην Εικόνα 3.14 φαίνεται η συνδεσμολογία του διαιρέτη τάσης μαζί με το ποτενσιόμετρο, ενώ παράλληλα σε αυτό έχει τοποθετηθεί μία δεύτερη αντίσταση 1kΩ με σκοπό την τήρηση του μέγιστου ορίου του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) του μικροελεγκτή Beaglebone το οποίο είναι στα 1.8V. Επίσης μέσω του μικροελεγκτή καθίσταται δυνατή η παραμετροποίηση της ενεργής διαδρομής του γκαζιού αλλά και το ελάχιστο και μέγιστο ποσοστό βυθίσματος του επιταχυντή που μεταφράζεται ως μεταβολή.

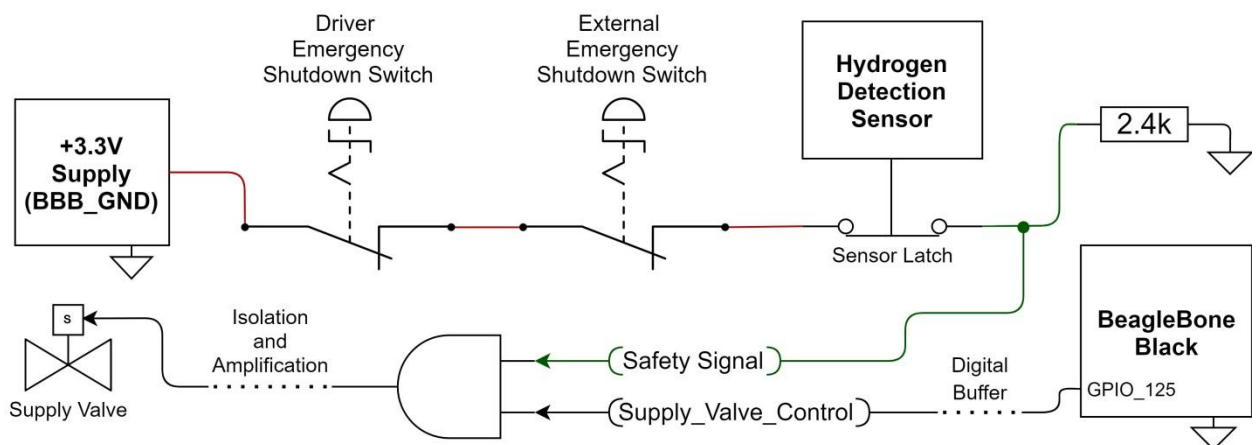


Εικόνα 3.14 : Η συνδεσμολογία του αισθητήρα θέσης γκαζιού.

### 3.8 Κύκλωμα Ελέγχου Βαλβίδων και Αισθητήρα Πίεσης

Ο αξιόπιστος και αποτελεσματικός έλεγχος των δύο βαλβίδων υδρογόνου που βρίσκονται στο όχημα αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα ασφαλείας. Πιο συγκεκριμένα, καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη ενός μηχανισμού που διασφαλίζει την ορθή λειτουργία των βαλβίδων και ιδιαίτερα της βαλβίδας παροχής υδρογόνου, κατά την κανονική λειτουργία του οχήματος, αλλά και την έγκαιρη απενεργοποίηση της σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης ή βλάβης. Για την επίτευξη αυτής της λειτουργικότητας χρησιμοποιείται ένα σήμα ασφαλείας το οποίο προκύπτει από τους αισθητήρες που σχετίζονται με τον τομέα της ασφαλούς λειτουργίας του οχήματος. Στην συνέχεια αυτό το σήμα ασφαλείας μαζί με το σήμα ελέγχου της βαλβίδας υδρογόνου από τον κεντρικό μικροελεγκτή, διέρχονται από μια πύλη AND, από την έξοδο της οποίας προκύπτει το τελικό σήμα ελέγχου που συνδέεται με την βαλβίδα παροχής υδρογόνου. Οι αισθητήρες

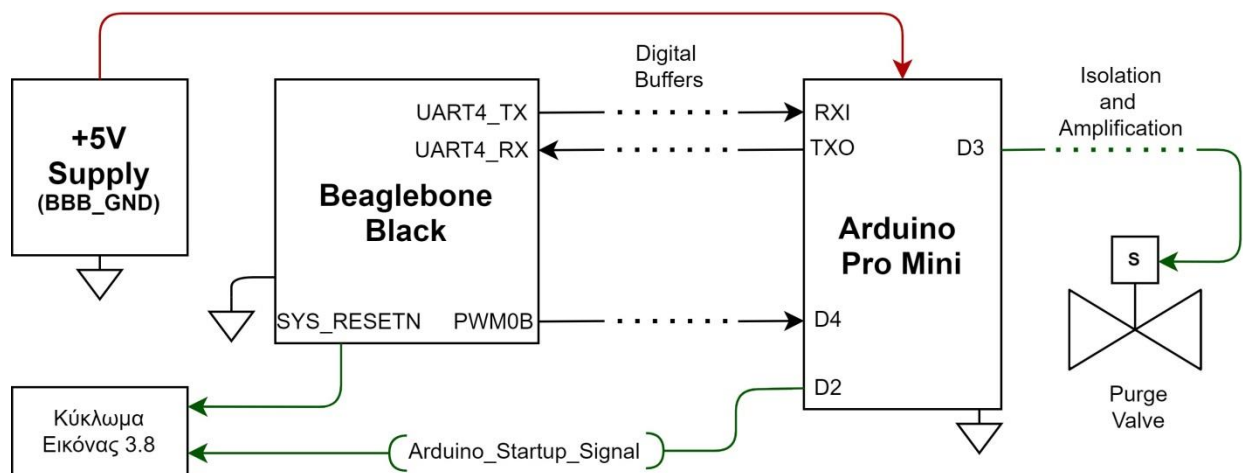
που σχετίζονται με την τήρηση της ασφαλούς λειτουργίας του οχήματος είναι ο αισθητήρας διαρροής υδρογόνου και τα δύο κομβία έκτακτης ανάγκης, το ένα από τα οποία βρίσκεται στον χώρο του οδηγού, ενώ το δεύτερο εξωτερικά του αμαξώματος. Οι τρεις αισθητήρες τροφοδοτούνται από ένα τροφοδοτικό σταθερής τάσης εξόδου +3.3V DC και συνδέονται σε σειρά. Με αυτό τον τρόπο αν οποιοδήποτε από τους τρεις αισθητήρες ενεργοποιηθεί, η σύνδεση το σήματος ασφαλείας με την τροφοδοσία διακόπτεται και έτσι μεταβαίνει σε κατάσταση μηδενικής τάσης και λογικού μηδέν. Έτσι σε εκείνη την περίπτωση το σήμα που καταλήγει στην πύλη AND είναι λογικό μηδέν και έτσι και το σήμα ελέγχου της βαλβίδας διακόπτεται. Το ίδιο ισχύει και για το σήμα ελέγχου που προέρχεται από τον μικροελεγκτή, το οποίο όταν επιλεγεί από τον κώδικα ελέγχου να απενεργοποιηθεί τότε βρίσκεται σε κατάσταση λογικού μηδέν και επιφέρει το ίδιο αποτέλεσμα στην έξοδο της πύλης AND. Στην Εικόνα 3.15 ακολουθεί σχεδιάγραμμα που περιγράφει την παραπάνω λειτουργικότητα.



Εικόνα 3.15 : Η διασύνδεση των αισθητήρων ασφαλείας.

Για τον έλεγχο της βαλβίδας απομάκρυνσης καταλοίπων από την ΚΥ χρησιμοποιείται διαφορετική συνδεσμολογία, καθώς η βαλβίδα αυτή δεν σχετίζεται άμεσα με την τήρηση της ασφαλούς λειτουργίας του οχήματος αλλά και για έναν δεύτερο λόγο. Πιο συγκεκριμένα, η βαλβίδα αυτή σύμφωνα με τον κατασκευαστή της κυψέλης πρέπει ενεργοποιείται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και να παραμένει ενεργή επίσης για συγκεκριμένο χρόνο. Για την επίτευξη της παραπάνω λειτουργίας επιλέχθηκε η χρήση ενός δεύτερου μικροελεγκτή και συγκεκριμένα του μικροελεγκτή Arduino Pro Mini. Ο ίδιος επικοινωνεί μέσα από τις σειριακές θύρες UART4\_RX και UART4\_TX με τον κεντρικό μικροελεγκτή. Κατά την εκκίνηση του συστήματος, μέσω των δύο παραπάνω θυρών και της επικοινωνίας των δύο μικροελεγκτών, διασφαλίζεται ότι και οι δύο έχουν εκκινήσει ορθά και είναι έτοιμοι για να προχωρήσουν στις διαδικασίες της κανονικής λειτουργίας του συστήματος. Στην συνέχεια μέσω της θύρας PWM0B ο μικροελεγκτής Beaglebone Black επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή Arduino και τον ενημερώνει για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο χρειάζεται να ενεργοποιήσει την βαλβίδα απομάκρυνσης καταλοίπων. Ο μικροεπεξεργαστής Arduino στην συνέχεια αναλαμβάνει στην ουσία την λειτουργία ενός χρονοδιακόπτη και είναι υπεύθυνος για την τήρηση των απαραίτητων χρόνων ενεργοποίησης της βαλβίδας. Η επικοινωνία με την βαλβίδα απομάκρυνσης καταλοίπων

επιτυγχάνεται μέσω του σήματος ελέγχου που προκύπτει από ψηφιακή θύρα εξόδου του μικροελεγκτή Arduino. Ως ένα πρόσθετο βήμα διασφάλισης της ορθής λειτουργίας του παραπάνω μικροελεγκτή χρησιμοποιείται και ένα δεύτερο ψηφιακό σήμα εξόδου (Arduino\_Startup\_Signal) που υπό την κανονική λειτουργία του συστήματος είναι απενεργοποιημένο. Μαζί με το σήμα επαναφοράς του κεντρικού μικροελεγκτή Beaglebone Black, το οποίο επίσης υπό την κανονική λειτουργία του συστήματος είναι απενεργοποιημένο, διέρχονται μέσω μιας πύλης AND. Στη συνέχεια μέσω της λειτουργικότητας που έχει αναλυθεί στην παράγραφο 3.4, διασφαλίζεται η ψηφιακή απομόνωση όλων των σημάτων επικοινωνίας και ελέγχου σε περίπτωση επαναφοράς του συστήματος ή μη-ορθής εκκίνησης του μικροελεγκτή Arduino, με σκοπό την προστασία του κυκλώματος. Στην Εικόνα 3.16 που ακολουθεί φαίνεται η παραπάνω συνδεσμολογία διασύνδεσης των δύο μικροελεγκτών, αλλά και οι υπόλοιπες δύο συνδέσεις του μικροελεγκτή Arduino με το κύκλωμα της Εικόνας 3.8 και την βαλβίδα απαλλαγής καταλοίπων.

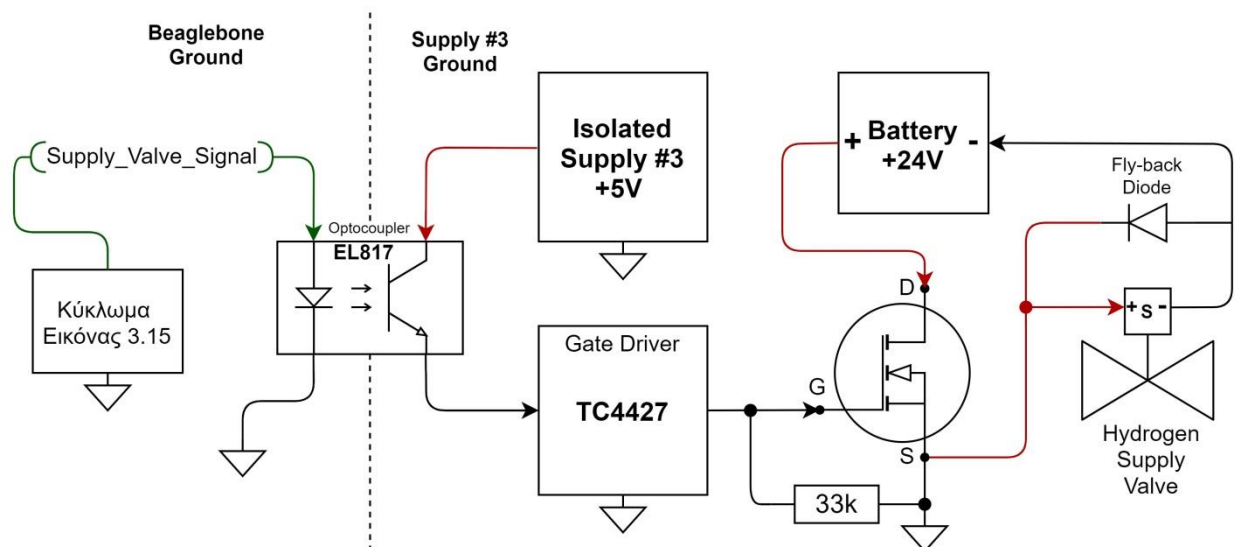


Εικόνα 3.16 : Η συνδεσμολογία του μικροελεγκτή Arduino.

Όμως, τα σήματα ελέγχου των δύο βαλβίδων προτού φθάσουν σε αυτές, χρειάζεται πρώτα να απομονωθούν και να ενισχυθούν. Αρχικά, για να ελέγξουν τις δύο βαλβίδες πρέπει να αποκτήσουν ίδια γείωση με αυτή της εκάστοτε βαλβίδας, ενώ στην συνέχεια πρέπει να ενισχυθούν έτσι ώστε να μπορέσουν να οδηγήσουν την πύλη των τρανζίστορ τύπου MOSFET, που είναι υπεύθυνα για το άνοιγμα και το κλείσιμο των βαλβίδων. Την αλλαγή της γείωσης αναφοράς των δύο σημάτων ελέγχου αναλαμβάνει ο οπτικός απομονωτής EL817, που έχει χρησιμοποιηθεί και σε κυκλώματα που έχουν παρουσιαστεί προηγουμένως σε αυτή την εργασία. Η βαλβίδα παροχής υδρογόνου, σύμφωνα με τους κανονισμούς που διέπουν την κατασκευή του οχήματος, απαιτείται να τροφοδοτείται από μια εξωτερική μπαταρία, για να διασφαλίζεται η αδιάκοπη λειτουργία της ανεξάρτητα από την λειτουργία των υπολοίπων συστημάτων του οχήματος. Για αυτό τον λόγο η βαλβίδα αυτή χρησιμοποιεί ως γείωση αναφοράς αυτή της εξωτερικής μπαταρίας. Η βαλβίδα απαλλαγής καταλοίπων, καθώς έχει δευτερεύοντα ρόλο στον τομέα της ασφαλούς λειτουργίας του οχήματος, δεν χρειάζεται να τροφοδοτείται από την εξωτερική μπαταρία και έτσι τροφοδοτείται απευθείας από το κύκλωμα της κυψέλης υδρογόνου. Έτσι, η

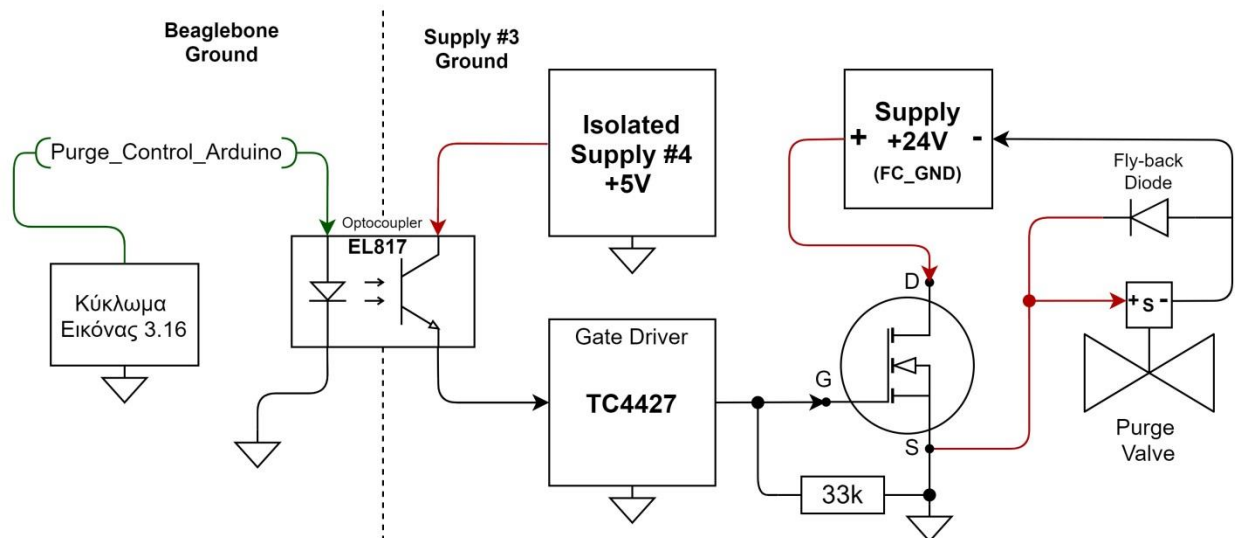


βαλβίδα απαλλαγής καταλοίπων έχει ως γείωση αναφοράς την γείωση της κυψέλης υδρογόνου. Στην συνέχεια, τα δύο απομονωμένα πλέον σήματα ελέγχου εξερχόμενα από τους δύο οπτικούς απομονωτές, ενισχύονται με την χρήση δύο οδηγών πύλης TC4427, με σκοπό τον αξιόπιστο, ασφαλή και γρήγορο έλεγχο των τρανζίστορ που ακολουθούν. Για το άνοιγμα και κλείσιμο των βαλβίδων επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν τρανζίστορ τύπου N-Channel MOSFET σε συνδεσμολογία High Side και συγκεκριμένα τα τρανζίστορ – διακόπτες υψηλής απόδοσης PSMNR90 σε ολοκληρωμένο πακέτο τύπου SMD. Στην συνδεσμολογία High Side, η πηγή τροφοδοσίας του φορτίου είναι συνδεδεμένη στον απαγωγό (Drain) του τρανζίστορ MOSFET. Παράλληλα, οι πύλες (Gate) και των δύο τρανζίστορ των δύο βαλβίδων οδηγούνται από το εκάστοτε ενισχυμένο σήμα ελέγχου που προέρχεται από τον οδηγό πύλης. Για να μπορέσει το σήμα ελέγχου στην πύλη, να ανοίξει και να κλείσει το τρανζίστορ, η πηγή (Source) συνδέεται με την γείωση του εκάστοτε οδηγού πύλης, ενώ μια αντίσταση 33k συνδέει την πύλη με την ίδια γείωση (Pull down) με σκοπό την αποφυγή απροσδιόριστων καταστάσεων. Στην συνέχεια, το φορτίο συνδέεται στην πηγή (Source) του τρανζίστορ και γειώνεται με την γείωση της τροφοδοσίας του. Όταν το τρανζίστορ ανοίξει, τότε ο θετικός ακροδέκτης της τροφοδοσίας της κάθε βαλβίδας που συνδέεται στον απαγωγό του τρανζίστορ συνδέεται με την πηγή και έτσι η βαλβίδα διαρρέεται από τάση και ανοίγει. Στην Εικόνα 3.17 που ακολουθεί, παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα της παραπάνω συνδεσμολογίας για την βαλβίδα παροχής υδρογόνου.



Εικόνα 3.17 : Η συνδεσμολογία ελέγχου βαλβίδας παροχής υδρογόνου.

Στον απαγωγό του τρανζίστορ που είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο της βαλβίδας παροχής υδρογόνου, συνδέεται ο θετικός ακροδέκτης της εξωτερικής μπαταρίας, τάσης +24V DC. Παράλληλα της βαλβίδας τοποθετείται μία ισχυρή δίοδος σε συνδεσμολογία Fly-back με σκοπό την προστασία της βαλβίδας από υψηλές τάσεις που δημιουργούνται κατά την διαδικασία κλεισίματος της εκάστοτε βαλβίδας. Στην συνδεσμολογία και των δύο βαλβίδων, το κάθε ζευγάρι οπτικού απομονωτή και οδηγού πύλης τροφοδοτείται από ένα ξεχωριστό απομονωμένο τροφοδοτικό σταθερής τάσης +5V DC. Στην Εικόνα 3.18 παρουσιάζεται το αντίστοιχο σχεδιάγραμμα διασύνδεσης της βαλβίδας απαλλαγής καταλοίπων.



Εικόνα 3.18 : Η συνδεσμολογία ελέγχου της βαλβίδας απαλλαγής καταλοίπων.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχεδιάγραμμα για τον έλεγχο της βαλβίδας απαλλαγής καταλοίπων, στον απαγωγό του τρανζίστορ συνδέεται τροφοδοτικό σταθερής τάσης +24V DC το οποίο είναι γειωμένο με την ΚΥ και όχι με την εξωτερική μπαταρία όπως στην περίπτωση της βαλβίδας παροχής υδρογόνου.

Πέρα από τον έλεγχο της ροής του υδρογόνου στο σύστημα της κυψέλης μέσω των ηλεκτρονικά ελεγχόμενων βαλβίδων, ένα επίσης πολύ σημαντικό θέμα ασφαλείας είναι η επιτήρηση και η μέτρηση της πίεσης του υδρογόνου στο ίδιο κύκλωμα. Καθώς η ΚΥ είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη ως προς την πίεση του υδρογόνου που της παρέχεται, η μέτρηση της πίεσης με ηλεκτρονικά μέσα είναι απαραίτητη. Όπως έχει παρουσιαστεί και στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, θα χρησιμοποιηθεί ένας αισθητήρας υψηλής ακρίβειας της εταιρίας Kobold. Ο ίδιος έχει δύο ακροδέκτες στην έξοδο του, ο ένας εκ των δύο είναι η γείωση του ενώ ο δεύτερος ακροδέκτης συνδέεται με τροφοδοσία σταθερής τάσης +12V DC. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας μεταφέρει την πληροφορία της μετρούμενης πίεσης με βάση το ρεύμα που δέχεται στην είσοδο του, το οποίο κυμαίνεται από 4 έως 20mA. Το ρεύμα εισόδου 4mA αναλογεί στην ελάχιστη μέτρηση πίεσης των 0 bar ενώ το ρεύμα εισόδου 20mA αναλογεί στην μέγιστη μέτρηση πίεσης η οποία είναι στα 1.6bar [18]. Η ίδια αναλογία ισχύει και για τις ενδιάμεσες τιμές μέτρησης σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$P = (I - 4) * 0.1 \quad (3.7)$$

όπου  $P$  είναι η μετρούμενη πίεση σε bar και  $I$  είναι το ρεύμα τροφοδοσίας του αισθητήρα πίεσης.

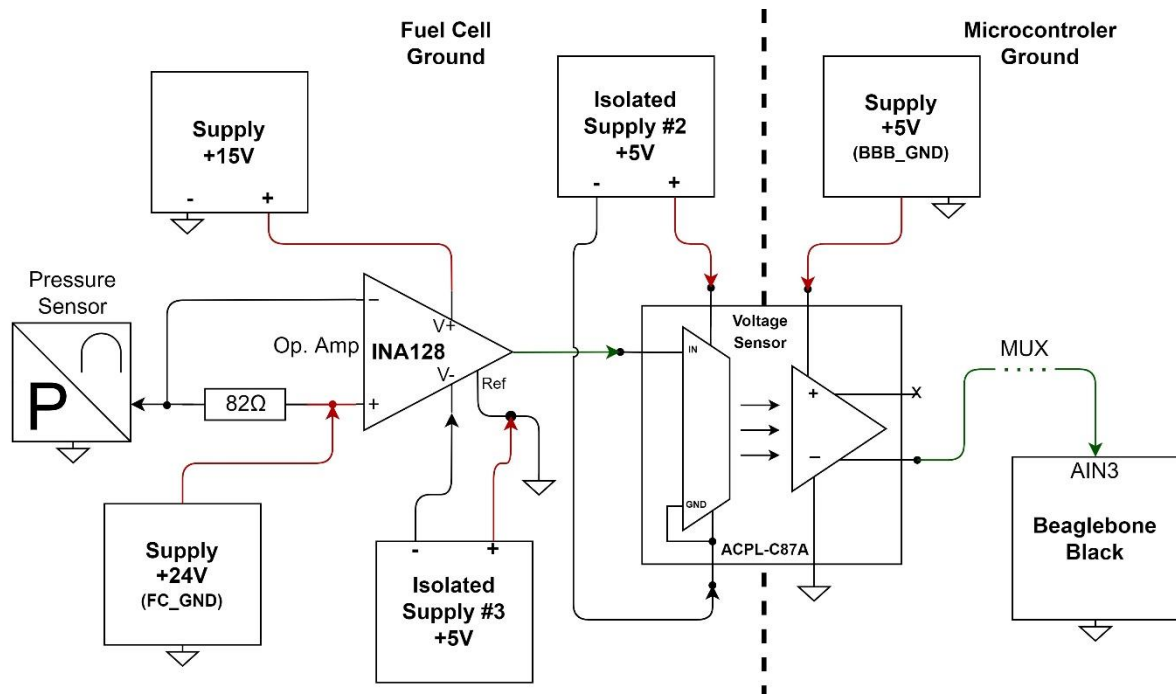
Για την μέτρηση του ρεύματος εισόδου χρησιμοποιείται μια αντίσταση  $82\Omega$  στην είσοδο του αισθητήρα και μετράται η πτώση τάσης στα άκρα της. Η τιμή της αντίστασης αυτής υπολογίστηκε σύμφωνα με το εύρος εισόδου του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) του μικροελεγκτή Beaglebone Black.

Στην συνέχεια, σύμφωνα με την απλή εξίσωση του νόμου του Ohm, καθώς οι τιμές της τάσης τροφοδοσίας και της αντίστασης είναι γνωστές, υπολογίζεται το ρεύμα στην είσοδο του αισθητήρα ως εξής:

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{82} \quad (3.8)$$

όπου  $V_R$  είναι η πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης και  $I_R$  είναι το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση και είναι ίσο με αυτό της τροφοδοσίας του αισθητήρα πίεσης.

Για την μέτρηση της πτώσης τάσης στα άκρα της αντίστασης αυτής χρησιμοποιείται ένας τελεστικός ενισχυτής υψηλής ακρίβειας και συγκεκριμένα ο ενισχυτής INA128, σε σύνδεση διαφορικού ενισχυτή. Ο ίδιος διαθέτει ρύθμιση της τάξης ενίσχυσης από 1 έως 10.000 μέσω της σύνδεσης μιας εξωτερικής αντίστασης. Παρόλα αυτά, καθώς το εύρος της μετρούμενης τάσης έχει ήδη προσαρμοστεί στα κατάλληλα όρια, το σήμα δεν χρειάζεται να ενισχυθεί και έτσι η εξωτερική αντίσταση δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί. Στην συνέχεια, η μετρούμενη τάση εξερχόμενη από τον τελεστικό ενισχυτή εισέρχεται στον αισθητήρα τάσης ACPL-C87A και σύμφωνα με την συνδεσμολογία που έχει αναλυθεί στην παράγραφο (3.4), η μέτρηση της πτώσης τάσης στα άκρα της αντίστασης μεταφέρεται στον μικροελεγκτή Beaglebone Black, ο οποίος χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.7) και (3.8) υπολογίζει την πίεση του υδρογόνου στον αισθητήρα. Στην Εικόνα 3.19 απεικονίζεται το σχεδιάγραμμα της παραπάνω συνδεσμολογίας.



Εικόνα 3.19 : Η διασύνδεση του αισθητήρα πίεσης υδρογόνου.

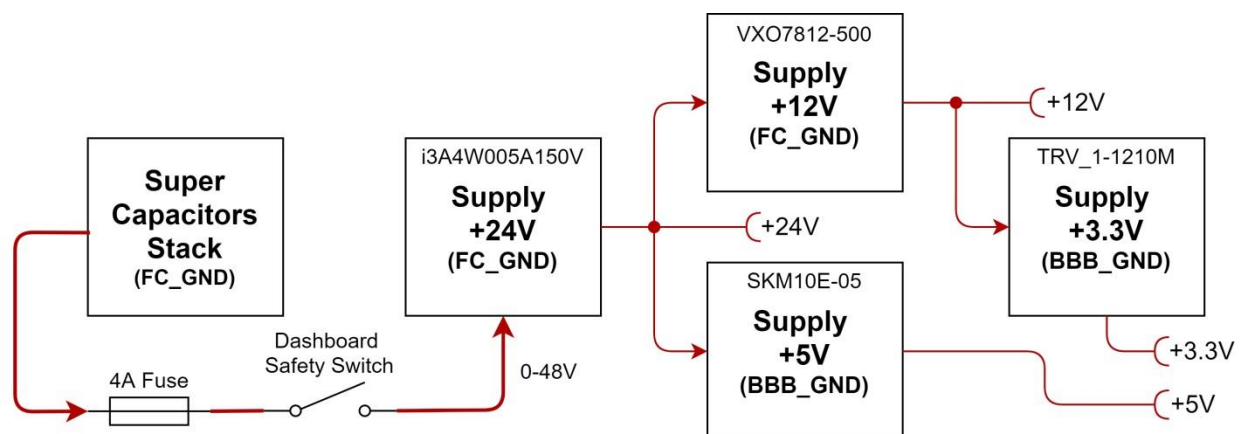
Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχεδιάγραμμα, για να επιτευχθεί η θετική τάση τροφοδοσίας +15V του τελεστικού ενισχυτή χρησιμοποιήθηκε ένα τροφοδοτικό σταθερής τάσης +15V DC. Για την παραγωγή της αρνητικής τάσης -5V του τελεστικού ενισχυτή,



συνδέθηκε ένα απομονωμένο τροφοδοτικό σε αντίστροφη σύνδεση με την γείωση του τελεστικού ενισχυτή, η οποία είναι αυτή της ΚΥ.

### 3.9 Κύκλωμα Τροφοδοτικών

Η παρουσία όλων των παραπάνω υποκυκλωμάτων αλλά και εξωτερικών εξαρτημάτων όπως ο ανεμιστήρας ψύξης της ΚΥ, δημιουργεί την ανάγκη ύπαρξης ενός υποκυκλώματος το οποίο αναλαμβάνει την τροφοδοσία όλων των παραπάνω μονάδων. Την ευθύνη αυτή δύναται να καλύψει το κύκλωμα τροφοδοτικών. Το συγκεκριμένο υποκύκλωμα περιλαμβάνει τέσσερα διαφορετικά τροφοδοτικά τα οποία προσφέρουν τροφοδοσίες σταθερής τάσης +3.3V, +5V, +12V και +24V DC. Τα δύο πρώτα τροφοδοτικά χαμηλότερης τάσης +3.3V και +5.5V είναι συνδεδεμένα με την γείωση του κεντρικού μικροελεγκτή (BBB\_GND), ενώ τα δύο τροφοδοτικά υψηλότερων τάσεων +12V και +24V είναι συνδεδεμένα με την γείωση της ΚΥ. Τα τρία από τα τέσσερα αυτά τροφοδοτικά τοποθετούνται συνδεδεμένα σε σειρά, από την υψηλότερη τάση εξόδου τους, προς την χαμηλότερη και κάθε ένα από αυτά τα τροφοδοτικά επιλέγεται σύμφωνα με τις συνολικές απαιτήσεις ισχύος των μονάδων που είναι υπεύθυνο να τροφοδοτήσει. Στην Εικόνα 3.20 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα της συνδεσμολογίας των τεσσάρων αυτών τροφοδοτικών που χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα.



Εικόνα 3.20 : Η συνδεσμολογία των τροφοδοτικών.

Η επιλογή αυτής της συνδεσμολογίας γίνεται με σκοπό την αποφυγή χρήσης τροφοδοτικών που πραγματοποιούν μεγάλες μετατροπές τάσης από την είσοδο στην έξοδο τους, καθώς συνήθως τέτοια τροφοδοτικά εμφανίζουν χαμηλό βαθμό απόδοσης. Λόγω της παραπάνω συνδεσμολογίας, η ανάλυση των εξαρτημάτων που τροφοδοτεί το κάθε τροφοδοτικό ξεκινάει από αυτό της χαμηλότερης τάσης και συγκεκριμένα αυτό που προσφέρει έξοδο 3.3V. Στον Πίνακα 3.2 καταγράφονται όλες οι μονάδες οι οποίες χρησιμοποιούν τροφοδοσία +3.3V και συνδέονται με αυτό το τροφοδοτικό.

Πίνακας 3.2 : Κατανάλωση ισχύος εξαρτημάτων τροφοδοσίας +3.3V DC.

Κωδικός Εξαρτήματος	Περιγραφή Εξαρτήματος	Ισχύς τροφοδοσίας (25°C)	Μέγιστη Ισχύς τροφοδοσίας
SML-P11	LED SMD	5mW	50mW
TMUX13088	Multiplexer(MUX)	1mW	500mW
SN74HCS126	Digital Buffer (x5)	0,1mW (0,5W)	230mW (1,15W)
TC7WH08FK	Dual AND Gate	1mW	200mW
SN74HCS14	Quad NOT gate	0,1mW	230mW
PF2C/00	Throttle Position Sensor	10mW	10mW
Σύνολο:		17.6mW	2,140 W

Καθώς δεν χρειάζονται όλα τα εξαρτήματα ταυτόχρονα την μέγιστη ισχύ τροφοδοσίας τους, επιλέχθηκε η χρήση ενός τροφοδοτικού με ισχύ εξόδου 1W και συγκεκριμένα το απομονωμένο τροφοδοτικό TRV 1-1510M. Το συγκεκριμένο τροφοδοτικό με τάση εισόδου +12V και τάξη εξόδου +3.3V παρουσιάζει βαθμό απόδοσης της τάξης του 79%, καθιστώντας το ικανό να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις παροχής ισχύος σε όλα τα εξαρτήματα κατά την κανονική τους λειτουργία, αλλά και στις περιπτώσεις που ένα ή περισσότερα εξαρτήματα απαιτήσουν την μέγιστη ισχύ τροφοδοσίας τους.

Στον Πίνακα 3.3 καταγράφονται όλες οι μονάδες και εξαρτήματα τα οποία χρησιμοποιούν τροφοδοσία +5V και συνδέονται με το επόμενο τροφοδοτικό που προσφέρει στην έξοδο του αυτή την τάση. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο τμήμα της ισχύος από το τροφοδοτικό με έξοδο +5V το απαιτεί για την λειτουργία του ο κεντρικός μικροελεγκτής Beaglebone Black. Ακολουθούν σε απαιτήσεις ισχύος τροφοδοσίας τα τέσσερα μικρότερα ξεχωριστά τροφοδοτικά με κωδικό LME0505SC, ισχύος 250mW. Αυτά τα απομονωμένα τροφοδοτικά επιλέχθηκαν βάση την μικρής ισχύος έξοδο τους και τον υψηλό βαθμό απόδοσης τους με σκοπό την τροφοδοσία διάφορων εξαρτημάτων τα οποία απαιτείται να είναι απομονωμένα από το υπόλοιπο κύκλωμα. Συνολικά τα εξαρτήματα που στηρίζονται στο τροφοδοτικό τάσης εξόδου +5V παρουσιάζουν μία μέση ζήτηση ισχύος περίπου 7.25W, ενώ κατά το μέγιστο μπορεί να χρειαστούν έως και περίπου 11.5W. Σύμφωνα λοιπόν με αυτές τις απαιτήσεις παροχής ισχύος και λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν θα απαιτούν όλα τα εξαρτήματα την μέγιστη ισχύ τροφοδοσίας τους ταυτόχρονα, επιλέχθηκε το απομονωμένο τροφοδοτικό SKM10E-05. Το τροφοδοτικό αυτό παρουσιάζει υψηλό βαθμό απόδοσης (90%), ισχυρή απομόνωση εισόδου-εξόδου και διάφορες χρήσιμες λειτουργίες προστασίας. Κατά την λειτουργία του δέχεται τάση +24V στην είσοδο του από το μεγαλύτερο τροφοδοτικό που είναι συνδεδεμένο με την συστοιχία των υπερπυκνωτών και στην συνέχεια παρέχει απομονωμένη τροφοδοσία ισχύος 10W και τάσης +5V DC με γείωση αναφοράς αυτή του κεντρικού μικροελεγκτή.

Πίνακας 3.3 : Κατανάλωση ισχύος εξαρτημάτων τροφοδοσίας +5V DC.

Κωδικός Εξαρτήματος	Περιγραφή Εξαρτήματος	Μέση Ισχύς τροφοδοσίας	Μέγιστη Ισχύς τροφοδοσίας
LME0505SC	Isolated DC-DC Converter (x4)	250mW (1W)	250mW (1W)
LM35	Temperature Sensor	25mW	50mW
Thermistor 10k	Temperature Sensor	0,05mW	0.5mW
ACPL-C87A	Voltage Sensor (x3)	48mW (144mW)	100mW(300m W)
ACS711EX	Current Sensor (x3)	20mW (60mW)	27.5mw(82.5m W)
Arduino Pro Mini	Microcontroller	20mW	40mW
Beaglebone Black	Main Microcontroller	6W	10W
Σύνολο:		7,249 W	11,473 W

Το επόμενο τροφοδοτικό που προσφέρει στην έξοδο του αμέσως μεγαλύτερη τάση, είναι αυτό με τάση εξόδου +12V DC. Αυτό τροφοδοτεί το μικρότερο τροφοδοτικό τάσης εξόδου +3.3V και ισχύος 1kW που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη σελίδα, αλλά και τον αισθητήρα πίεσης υδρογόνου του οχήματος, η κατανάλωση ισχύος του οποίου είναι ανεπαίσθητη σε σύγκριση με αυτή του τροφοδοτικού. Για την επαρκή κάλυψη των αναγκών τροφοδοσίας των δύο αυτών εξαρτημάτων, αλλά και με γνώμονα μελλοντικές εξωτερικές επεκτάσεις του κυκλώματος, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το τροφοδοτικό VXO7812-500 ισχύος 2W και βαθμού απόδοσης 94%. Αυτό δέχεται στην είσοδο του τάση +24V από το μεγαλύτερο τροφοδοτικό και στην έξοδο του παρέχει τάση τροφοδοσίας +12V με γείωση κοινή με αυτή της ΚΥ.

Το τελευταίο τροφοδοτικό είναι αυτό που προσφέρει στην έξοδο του τάση +24V, το οποίο τροφοδοτεί όλα τα εξαρτήματα του συστήματος μετρήσεων και ελέγχου, συμπεριλαμβανομένου και του ανεμιστήρα ψύξης της ΚΥ. Αναλύοντας τα εξαρτήματα που συνδέονται με αυτό το τροφοδοτικό, ο ανεμιστήρας αποτελεί το εξάρτημα το οποίο απαιτεί για την λειτουργία του το μεγαλύτερο τμήμα της ισχύος (67W). Στην συνέχεια ακολουθούν τα δύο μικρότερα τροφοδοτικά των 5V και 12V, τα οποία απαιτούν 2W και 10W, αντίστοιχα. Την μικρότερη απαίτηση ισχύος έχει η βαλβίδα απαλλαγής καταλοίπων που τροφοδοτείται απευθείας από το συγκεκριμένο τροφοδοτικό και απαιτεί από 8W μέχρι 9.5W. Συνολικά λοιπόν αυτό το τροφοδοτικό χρειάζεται να παρέχει ισχύ στην έξοδο του κατά ελάχιστο 88.5W σε τάση +24V DC. Για την ικανοποίηση των παραπάνω απαιτήσεων επιλέχθηκε το τροφοδοτικό i3A4W005A150V ισχύος 100W, το οποίο προσφέρει ένα περιθώριο παροχής ισχύος 11.5W που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λόγους ασφαλείας ή

για μελλοντικές επεκτάσεις. Το τροφοδοτικό αυτό μπορεί να δεχθεί από 9V έως 53V στην είσοδο του και με χρήση μιας αντίστασης μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε να παρέχει σταθερή τάση εξόδου από 3.3V έως 30V ανεξάρτητα της τάσης εισόδου του. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν αυτό τροφοδοτικό ιδανικό για σύνδεση με την συστοιχία των υπερπυκνωτών. Τέλος το μικρό μέγεθος του και οι μειωμένες ανάγκες ψύξης του, επιτρέπουν την έδραση του στην κεντρική πλακέτα του συστήματος μετρήσεων και ελέγχου μαζί με τα υπόλοιπα τροφοδοτικά.

### 3.10 Κύκλωμα Ταχυμέτρου

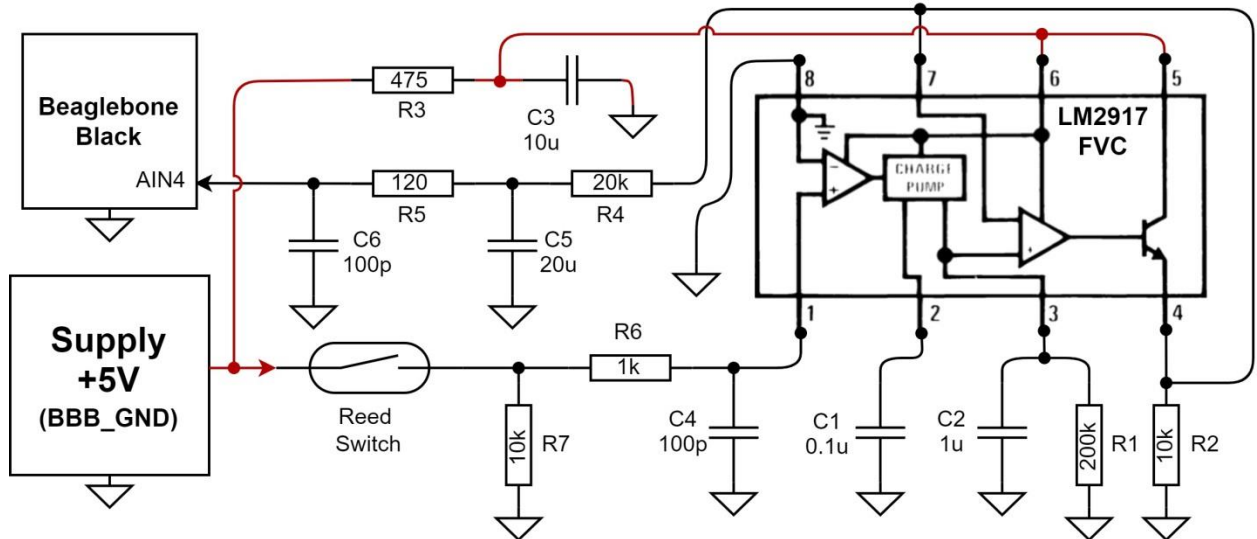
Η ακριβής μέτρηση της ταχύτητας του οχήματος ανά πάσα στιγμή αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική πληροφορία που ο οδηγός μπορεί να αξιοποιήσει ούτως ώστε να οδηγήσει το όχημα με ασφάλεια αλλά και με οικονομία καυσίμου. Πρόσθετα, η ψηφιοποίηση και αποθήκευση των μετρήσεων της ταχύτητας του οχήματος αποτελεί μια ιδιαίτερα χρήσιμη δυνατότητα. Μέσω αυτής, ο υπεύθυνος μηχανικός μπορεί να κατευθύνει τον οδηγό προς τις κατάλληλες ενέργειες για να εξασφαλίζει την μέγιστη απόδοση του οχήματος κάτω από τις απρόβλεπτες συνθήκες ενός αγώνα. Καθώς μια έτοιμη εμπορική λύση ταχυμέτρου το οποίο έχει την δυνατότητα να επικοινωνεί με μικροελεγκτή είναι ιδιαίτερα δυσεύρετη, επιλέχθηκε η ανάπτυξη ενός ξεχωριστού κυκλώματος, το οποίο με την βοήθεια διακοπών τύπου Reed μετράει την ταχύτητα του οχήματος. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.2.7, δύο μαγνήτες τοποθετούνται στις ακτίνες ενός εκ των τροχών του οχήματος, ενώ ο αισθητήρας Reed τοποθετείται σε σταθερό σημείο πλησίον των ακτινών. Παράλληλα, ο διακόπτης Reed τροφοδοτείται από το τροφοδοτικό σταθερής τάσης +5V DC που βρίσκεται στην κεντρικό κύκλωμα. Κάθε φορά που οι μαγνήτες διέρχονται μπροστά από τον αισθητήρα Reed κατά την περιστροφή του τροχού, ο διακόπτης κλείνει για ένα μικρό χρονικό διάστημα μέχρι να παρέλθει ο μαγνήτης. Έτσι, στα άκρα του δημιουργείται ένας σχεδόν τετραγωνικός παλμός με πλάτος +5V. Την μέτρηση της συχνότητας του παραπάνω τετραγωνικού σήματος, για τον προσδιορισμό της περιστροφικής ταχύτητας του τροχού και συνεπώς και την ταχύτητα του οχήματος, αναλαμβάνει ο μετατροπέας συχνότητας σε τάση LM2917. Για την διασύνδεση αυτού του μετατροπέα χρησιμοποιείται το προτεινόμενο από τον κατασκευαστή κύκλωμα διασύνδεσης για χρήση σε εφαρμογή ταχυμέτρου. Με βάση αυτό, συνδέονται στα άκρα του μετατροπέα μία σειρά από αντιστάσεις και πυκνωτές όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.21. Στην συνέχεια, οι τιμές των αντιστάσεων R1 και C1 ρυθμίζονται ως εξής:

$$V_{out} = f_{IN} * V_{CC} * R1 * C1 \quad (3.9)$$

Όπου  $V_{out}$  η τάση εξόδου του μετατροπέα και  $f_{in}$  η συχνότητα του τετραγωνικού παλμού.

Σκοπός της παραπάνω ρύθμισης είναι η τήρηση των ορίων του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό του κεντρικού μικροελεγκτή (+1.8V), ο οποίος επικοινωνεί με τον μετατροπέα. Πρόσθετα, στην έξοδο του αναλογικού σήματος της μέτρησης που συνδέεται με τον μικροελεγκτή παρεμβάλλονται μια σειρά από φίλτρα RC με σκοπό την εξομάλυνση του αναλογικού σήματος εξόδου. Επίσης, για τον ίδιο σκοπό συνδέεται και ένα φίλτρο RC στην είσοδο του σήματος από το ταχύμετρο αλλά και μια αντίσταση σε σύνδεση pull-down

για την αποφυγή απροσδιόριστων καταστάσεων. Οι τιμές των αντιστάσεων και πυκνωτών των RC φίλτρων υπολογίστηκαν με βάση την αποκοπή συγκεκριμένων συχνοτήτων από το αναλογικό σήμα μέτρησης και δοκιμάστηκαν τόσο στον προσομοιωτή κυκλωμάτων LtSpice, αλλά και πειραματικά.



Εικόνα 3.21 : Η διασύνδεση του ταχυμέτρου του οχήματος.

Το σήμα αναλογικής τάσης εξερχόμενο από το παραπάνω κύκλωμα και έχοντας εξομαλυνθεί από τα δύο φίλτρα RC, εισέρχεται στην ψηφιακή θύρα AIN4 του μικροελεγκτή Beaglebone Black. Με την σειρά του, ο μικροελεγκτής χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (3.9) υπολογίζει την συχνότητα διέλευσης των μαγνητών μπροστά από τον διακόπτη Reed. Τέλος γνωρίζοντας την συχνότητα αυτή ο ίδιος χρησιμοποιεί τις εξισώσεις (3.5) και (3.6) που έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο 3.2.7 για να υπολογίσει τελικά την ταχύτητα του οχήματος. Η μέτρηση της ταχύτητας στην συνέχεια μπορεί να αποθηκευτεί ή να επεξεργαστεί με σκοπό την απεικόνιση της στην οθόνη που παρέχει πληροφορίες στον οδηγό.

### 3.11 Πρόσθετα Κυκλώματα

Τα δύο τελευταία κυκλώματα που εμφανίζονται στο σύστημα μετρήσεων και ελέγχου αυτού του οχήματος είναι τα κυκλώματα που φέρουν τους αισθητήρες ρεύματος, και το κύκλωμα που φέρει την διόδο V30DL50C η οποία αποτρέπει την επιστροφή επικίνδυνων ρευμάτων από την συστοιχία των υπερπυκνωτών προς τον μετατροπέα DC-DC. Και τα δύο αυτά κυκλώματα στην ουσία αποτελούν πλακέτες-φορείς που διευκολύνουν την διασύνδεση αυτών των στοιχείων πάνω στο σύστημα και για αυτό τον λόγο δεν χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης.

## 4. Σχεδίαση και Κατασκευή Κυκλωμάτων

---

### 4.1 Τοπολογία κυκλωμάτων

Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η πλειονότητα των ξεχωριστών κυκλωμάτων του συστήματος μετρήσεων και ελέγχου του οχήματος τοποθετούνται σε ένα ενιαίο τυπωμένο κύκλωμα. Αυτή η ενοποίηση του συστήματος μετρήσεων και ελέγχου του οχήματος σε ένα ενιαίο κύκλωμα γίνεται με σκοπό την ελαχιστοποίηση των εξωτερικών συνδέσεων, την απλοποίηση διασύνδεσης του συστήματος και την μείωση του περιττού βάρους. Πιο συγκεκριμένα, τα κυκλώματα τα οποία αναπτύσσονται στο ίδιο τυπωμένο κύκλωμα όπως αυτά έχουν παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο αυτής της εργασίας, ακολουθούν παρακάτω.

- Κύκλωμα διασύνδεσης κεντρικού μικροελεγκτή,
- Κύκλωμα ελέγχου μετατροπέα DC-DC,
- Κύκλωμα ελέγχου ανεμιστήρα και αισθητήρων θερμοκρασίας,
- Κύκλωμα ελέγχου κινητήρα και αισθητήρα γκαζιού,
- Κύκλωμα ελέγχου βαλβίδων και αισθητήρα πίεσης,
- Κύκλωμα τροφοδοτικών.

Αντίθετα, τα κυκλώματα του ταχυμέτρου, των αισθητήρων ρεύματος και της διόδου αποτροπής επιστροφής ρευμάτων τοποθετούνται σε ξεχωριστά τυπωμένα κυκλώματα. Η παραπάνω διαφοροποίηση γίνεται με σκοπό την διευκόλυνση των συνδέσεων και την αποφυγή χρήσης μεγάλου μήκους αγωγών κατά μήκος του οχήματος.

### 4.2 Το Λογισμικό Σχεδίασης

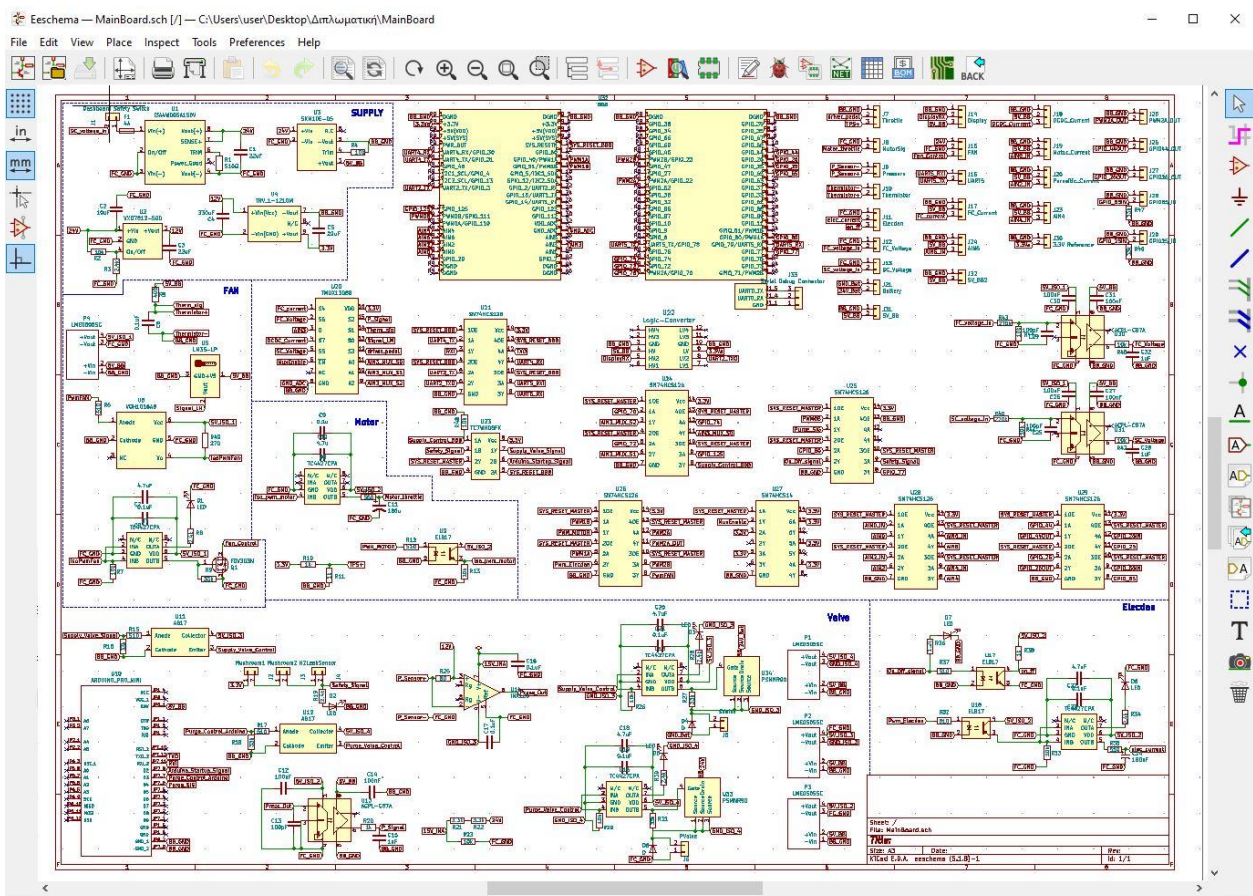
Για την σχεδίαση όλων των κυκλωμάτων επιλέχθηκε η χρήση του λογισμικού KiCAD [19]. Το λογισμικό KiCAD αποτελεί μια ολοκληρωμένη σουίτα λογισμικού για σχεδιασμό ηλεκτρικών κυκλωμάτων με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (electronic computer-aided design - ECAD). Η συγκεκριμένη σουίτα διατίθεται δωρεάν και μπορεί να εγκατασταθεί σε λειτουργικά συστήματα που βασίζονται σε Linux, αλλά και στα Windows. Η ίδια επιτρέπει τον σχεδιασμό αλλά και την προσομοίωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, διαθέτει ένα ενσωματωμένο περιβάλλον για σχηματική αποτύπωση, σχεδιασμό διάταξης τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Board – PCB), προβολή



αρχείων κατασκευής, προσομοίωση SPICE και μηχανικούς υπολογισμούς. Πρόσθετα, μέσα στο ίδιο πακέτο προσφέρονται εργαλεία για τη δημιουργία κοστολογίου υλικών, αρχείων Gerber και τρισδιάστατων μοντέλων των PCB και των εξαρτημάτων που τοποθετούνται σε αυτά. Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά, αλλά και το μηδενικό κόστος απόκτησης και χρήσης της παραπάνω σουίτας, την καθιστούν μια ιδιαίτερα ελκυστική πρόταση για σχεδίαση τυπωμένων κυκλωμάτων.

### 4.3 Σχεδίαση Σχηματικού Διαγράμματος

Για την σχεδίαση του σχηματικού διαγράμματος του ηλεκτρονικού κυκλώματος της ενιαίας πλακέτας χρησιμοποιείται το εργαλείο για σχηματική αποτύπωση της σουίτας KiCAD. Χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο εργαλείο, σχεδιάζεται όλο το λειτουργικό σχεδιάγραμμα των κυκλωμάτων που έχουν παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο και προσθέτονται οι κατάλληλες υποδοχές για τους συνδέσμους των εξωτερικών αγωγών που συνδέονται στο κύκλωμα. Η σχεδίαση των πρωτότυπων πλακετών πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας [20]. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκε η διαδικασία μετατροπής των σχηματικών διαγραμμάτων των πρωτότυπων πλακετών σε σχέδια PCB έτοιμα προς εκτύπωση σε ηλεκτρονικές πλακέτες. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται το περιβάλλον σχηματικής αποτύπωσης μαζί με το σχηματικό του ενιαίου κυκλώματος μετρήσεων και ελέγχου.



Εικόνα 4.1 : Το σχηματικό του κυκλώματος στο περιβάλλον KiCAD.

Παρατηρώντας το περιβάλλον σχεδίασης στην Εικόνα 4.1 της προηγούμενης σελίδας διακρίνουμε την γραμμή εργαλείων στο πάνω μέρος της εικόνας, την γραμμή εξαρτημάτων στην δεξιά κάθετη πλευρά της εικόνας και την γραμμή ρυθμίσεων διάταξης στην αριστερή κάθετη πλευρά. Χρησιμοποιώντας αυτές τις γραμμές εργαλείων, ο χρήστης μπορεί να πλοηγηθεί στο σχέδιο του και να το παραμετροποιήσει με βάση τις δικές του ανάγκες. Στην συνέχεια, έχει την δυνατότητα να εισάγει σχηματικά εξαρτημάτων και να δημιουργήσει κυκλώματα χρησιμοποιώντας αγωγούς. Το συγκεκριμένο εργαλείο, διαθέτει μια μεγάλη βιβλιοθήκη σχηματικών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Παρόλα αυτά αρκετά από τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται στο παρόν σύστημα δεν περιλαμβάνονται στην ενσωματωμένη βιβλιοθήκη και πρέπει να δημιουργηθούν από την αρχή. Τα νέα σχηματικά δημιουργούνται στο ενσωματωμένο περιβάλλον σχεδίασης σχηματικών, ενώ οι σωστές επαφές και ονομασίες εφαρμόζονται σύμφωνα με το φυλλάδιο των κατασκευαστή του κάθε εξαρτήματος. Στην συνέχεια, όλα τα νέα σχηματικά διαγράμματα αποθηκεύονται εντός του γενικού αρχείου του σχεδίου σε ξεχωριστή βιβλιοθήκη, ούτως ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιονδήποτε υπολογιστή. Προχωρώντας στην σχεδίαση του σχηματικού διαγράμματος που φαίνεται στο κέντρο της Εικόνας 4.1 το ίδιο έχει χωριστεί με διακεκομμένες γραμμές σε έξι κομμάτια. Το κάθε κομμάτι αντιστοιχεί στο κάθε κύκλωμα ελέγχου και μετρήσεων όπως αυτά έχουν περιγραφεί και προηγουμένως σε αυτή την εργασία. Στο πάνω δεξιό μέρος του σχεδίου μπορεί να διακρίνει κανείς το σύνολο των εξωτερικών συνδέσμων. Όλοι αυτοί οι σύνδεσμοι, μέσω των θυρών τους, αποτελούν τον δίαυλο επικοινωνίας του τυπωμένου κυκλώματος με το σύνολο των αισθητήρων, την τροφοδοσία αλλά και τα εξωτερικά περιφερειακά. Οι σύνδεσμοι που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν ανήκουν στην σειρά L1NK της εταιρίας Molex. Οι ίδιοι εμφανίζονται σε αυτό το σχέδιο σε παραλλαγές δύο και τριών επαφών, εφαρμόζουν με κλείδωμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ρεύματα μέχρι 11A.

Αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση του σχηματικού σχεδιαγράμματος ολόκληρου του κυκλώματος μετρήσεων και ελέγχου, ακολουθεί η ανάθεση των φυσικών αποτυπωμάτων του κάθε εξαρτήματος. Το αποτύπωμα (footprint) αποτελεί το σχέδιο του κάθε εξαρτήματος στον πραγματικό κόσμο. Το ίδιο, ορίζει τις πραγματικές διαστάσεις του και πως αυτό εν συνεχεία μπορεί να τοποθετηθεί και να συνδεθεί σε ένα τυπωμένο κύκλωμα. Για αυτό τον λόγο, η σωστή επιλογή του αποτυπώματος του κάθε εξαρτήματος είναι μια ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία και πρέπει πάντα να γίνεται σύμφωνα με τον τύπο και τις διαστάσεις που παρέχονται από το φυλλάδιο πληροφοριών του εκάστοτε κατασκευαστή. Το περιβάλλον σχεδίασης KiCAD διαθέτει μία ιδιαίτερα μεγάλη βιβλιοθήκη τυποποιημένων αποτυπωμάτων που χρησιμοποιούν οι κατασκευαστές ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Παρόλα αυτά τα αποτυπώματα κάποιων εξαρτημάτων, όπως του μικροελεγκτή Beaglebone Black, δεν περιλαμβάνονται στην παραπάνω βιβλιοθήκη. Έτσι για την δημιουργία τους χρησιμοποιήθηκε το ενσωματωμένο πρόγραμμα σχεδίασης αποτυπωμάτων και ακολουθήθηκαν πιστά οι διαστάσεις που παρέχονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Τέλος, αφού έχει ολοκληρωθεί η ανάθεση των αποτυπωμάτων όλων των εξαρτημάτων, ακολουθεί η δημιουργία του αρχείου netlist το οποίο περιέχει όλες της πληροφορίες



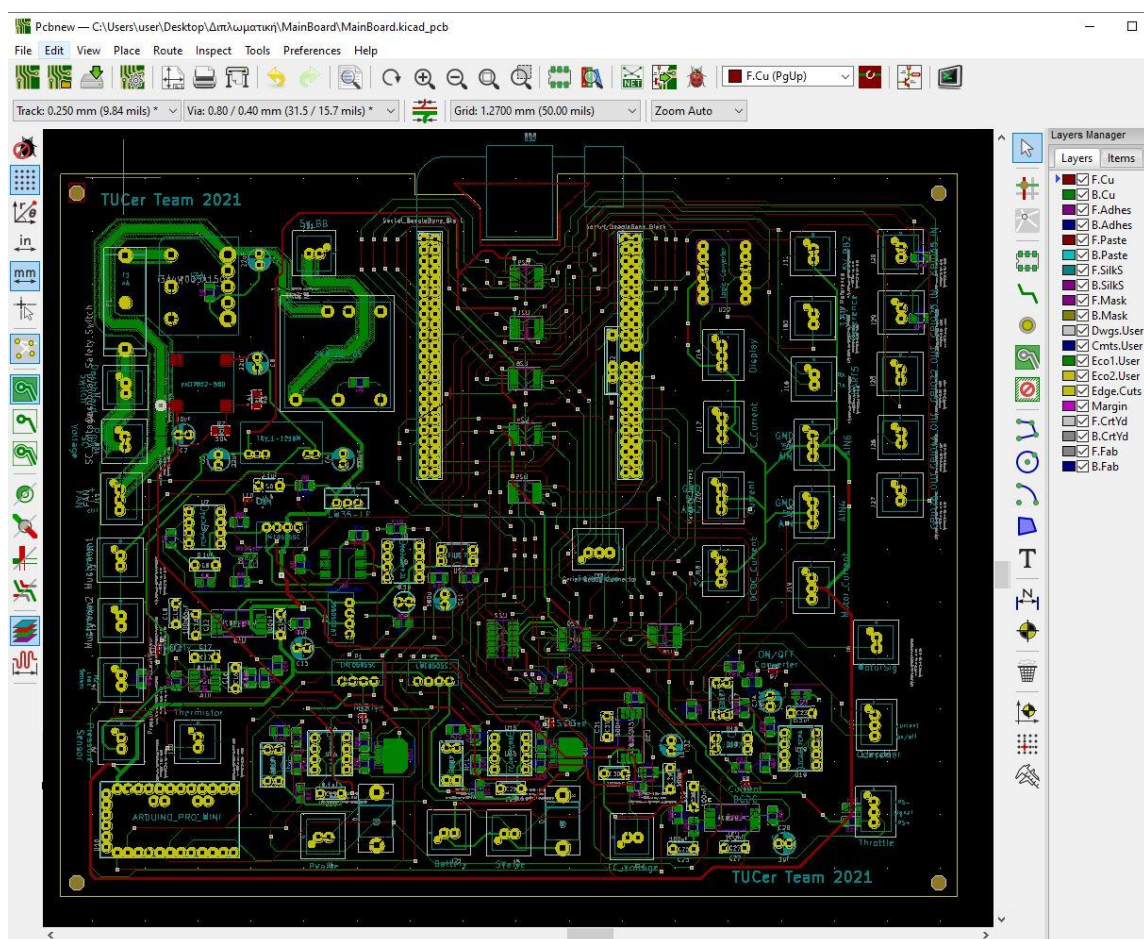
διασύνδεσης των εξαρτημάτων του σχηματικού διαγράμματος και το οποίο χρησιμοποιείται στο επόμενο στάδιο της σχεδίασης.

## 4.4 Σχεδίαση Διάταξης Τυπωμένου Κυκλώματος

Η σχεδίαση της διάταξης του τελικού τυπωμένου κυκλώματος πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το ανάλογο εργαλείο σχεδίασης (PCBnew) της σουίτας KiCAD. Χρησιμοποιώντας το αρχείο netlist που δημιουργήθηκε προηγουμένως, εισάγονται στο σχεδιαστικό περιβάλλον όλα τα απαραίτητα αποτυπώματα των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται και εμφανίζονται οι απαιτούμενες μεταξύ τους συνδέσεις. Στην συνέχεια, σχεδιάζεται η επιθυμητή περίμετρος του τυπωμένου κυκλώματος, η οποία παρόλα αυτά μπορεί να χρειαστεί να μεγαλώσει ή να μικρύνει ανάλογα με τις ανάγκες που προκύπτουν στην συνέχεια της σχεδίασης. Το επόμενο βήμα που ακολουθεί είναι η τοποθέτηση των αποτυπωμάτων όλων των εξαρτημάτων στο πλαίσιο του τυπωμένου κυκλώματος. Η τοποθέτηση τους γίνεται με βάση την ελαχιστοποίηση των περιττών γραμμών διασύνδεσης και των κενών περιοχών. Πρόσθετα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το ύψος που προεξέχουν προς τα επάνω κάποια εξαρτήματα, καθώς μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα στην τοποθέτηση των εξαρτημάτων κατά την κατασκευή του τυπωμένου κυκλώματος.

Στην συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία σχεδιασμού των γραμμών διασύνδεσης όλων των εξαρτημάτων. Αρχικά, χρησιμοποιώντας τον ενσωματωμένο στην σουίτα υπολογιστή πάχους γραμμών, υπολογίζεται το πάχος για όλες τις γραμμές που διαρρέονται από μεγαλύτερα ρεύματα. Οι παράμετροι που εισάγονται στον παραπάνω υπολογιστή είναι το μήκος της εκάστοτε γραμμής, το ύψος της σε χαλκό, το οποίο καθορίζεται από την διαδικασία κατασκευής της πλακέτας, και το ρεύμα το οποίο έχει υπολογιστεί ότι διαρρέει την συγκεκριμένη γραμμή. Στην συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τις μη-ιδανικές συνθήκες λειτουργίας και κατασκευής του κυκλώματος, το ελάχιστο πάχος που προκύπτει από τον υπολογιστή για την εκάστοτε γραμμή αυξάνεται κατά 20%. Έχοντας υπολογίσει τα απαραίτητα πάχη για όλες τις κρίσιμες γραμμές, πραγματοποιείται η διασύνδεση όλων των εξαρτημάτων χρησιμοποιώντας και τις δύο πλευρές της πλακέτας με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Οι γραμμές τοποθετούνται σε επαρκή απόσταση μεταξύ τους έτσι ώστε στην συνέχεια να μπορεί να διέρχεται ανάμεσα τους επίπεδο γείωσης. Επίσης, κατά την διαρρύθμιση τους αποφεύγονται οι γωνίες μεγαλύτερες των 45 μοιρών και η χρήση πολλαπλών αλλαγών επιπέδου σε μία γραμμή. Ολοκληρώνοντας την διασύνδεση όλων των εξαρτημάτων, ακολουθεί η δημιουργία του επιπέδου γείωσης. Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο το σύστημα μετρήσεων και ελέγχου αυτής της εργασίας χρησιμοποιεί δύο βασικές γειώσεις, αυτή του κεντρικού μικροελεγκτή Beaglebone Black και αυτή της ΚΥ. Για τον λόγο αυτόν, το τυπωμένο κύκλωμα θα σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να έχει δύο επίπεδα γείωσης. Από την κάτω πλευρά του τυπωμένου κυκλώματος δημιουργείται επίπεδο γείωσης του κεντρικού μικροελεγκτή, ενώ από την πάνω πλευρά δημιουργείται επίπεδο γείωσης της ΚΥ. Έτσι τα εξαρτήματα τοποθετούνται σε μία πλευρά με βάση την γείωση που χρησιμοποιούν. Για την επικοινωνία εξαρτημάτων μεταξύ των δύο επιπέδων χρησιμοποιούνται αγωγοί αλλαγής επιπέδου οι οποίοι συνδέουν

μέσω μίας επιχάλωμένης τρύπας τις δύο πλευρές του τυπωμένου κυκλώματος. Με την σειρά τους, τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται συνδέονται και συγκολλούνται στην πλακέτα είτε μέσω οπών (THT), είτε επιφανειακά (SMD). Τα μεγέθη των οπών αλλά και των επαφών καθορίζονται ανάλογα με το μέγεθος των ακροδεκτών του κάθε εξαρτήματος. Πιο συγκεκριμένα, η διάμετρος της οπής είναι κατά ένα χιλιοστό μεγαλύτερη από το πάχος του ακροδέκτη του εκάστοτε εξαρτήματος, ενώ το μέγεθος της επαφής έχει διάμετρο διπλάσια της οπ. Τέλος, πλησίον του κάθε εξαρτήματος τοποθετείται η ονομασία του ή η χαρακτηριστική τιμή του σε χαλκό ή μελάνι, πληροφορίες οι οποίες είναι ιδιαίτερα βοηθητικές κατά την συγκόλληση των εξαρτημάτων και την συναρμολόγηση της πλακέτας. Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται το περιβάλλον σχεδιασμού τυπωμένου κυκλώματος της σουίτας KiCAD, ενώ φαίνεται και η διαρρύθμιση και διασύνδεσή των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων στα δύο επίπεδα της πλακέτας. Για την πιο καθαρή εμφάνιση των γραμμών τα δύο επίπεδα γείωσης έχουν αποκρυφτεί.

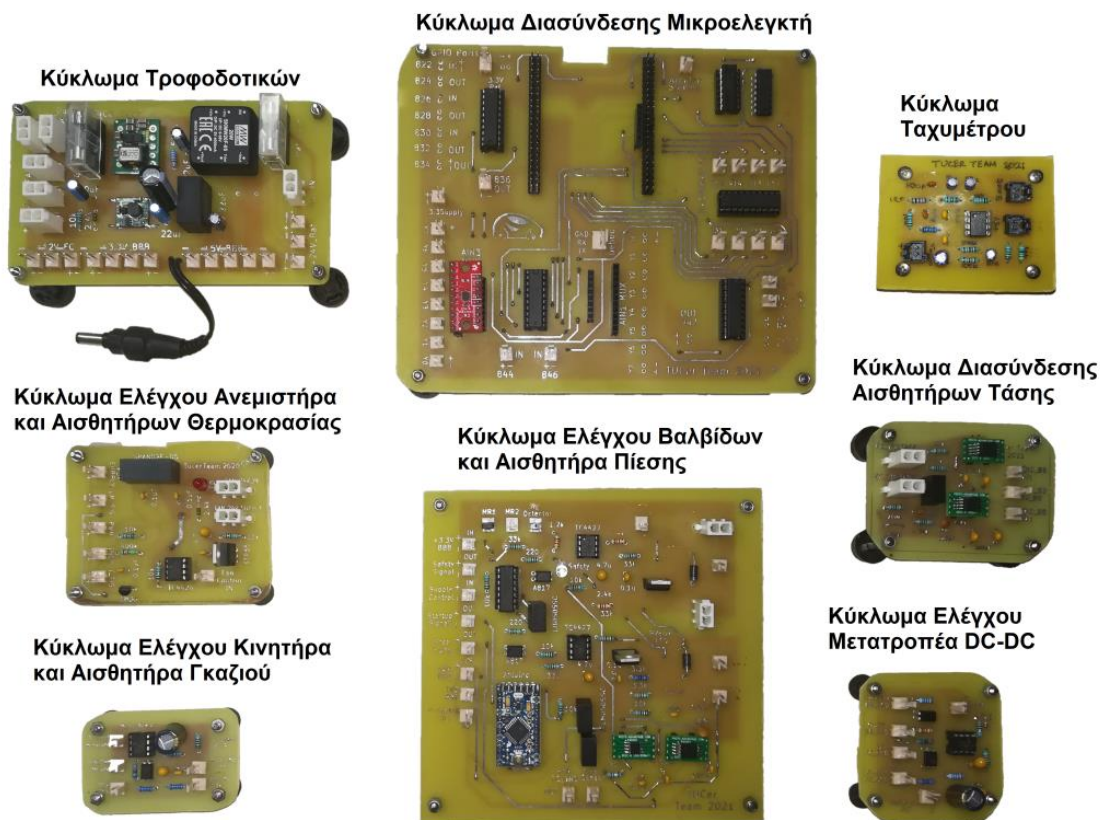


Εικόνα 4.2 : Το περιβάλλον σχεδίασης τυπωμένων κυκλωμάτων.

Έπειτα από την ολοκλήρωση του τελικού σχεδίου διάταξης του τυπωμένου κυκλώματος, το τελευταίο βήμα της σχεδίασης είναι η εξαγωγή των αρχείων gerber. Αυτά τα αρχεία περιέχουν όλες τις αναγκαίες πληροφορίες για την κατασκευή τυπωμένων κυκλωμάτων και αποτελούν το πρότυπο αρχείου που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία κατασκευής τους. Στην συνέχεια, το πακέτο αρχείων gerber αποστέλλεται στον κατασκευαστή που έχει επιλεγεί, για να ελεγχθεί και να ξεκινήσει η παραγωγή του.

## 4.5 Κατασκευή Πρωτότυπων Τυπωμένων Κυκλωμάτων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το τελικό σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος το οποίο παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία αποστέλλεται και κατασκευάζεται εξωτερικά. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο σχέδιο αποτελεί το τελικό αποτέλεσμα μιας σειράς δοκιμών και κατασκευών εργαστηριακών πρωτότυπων τυπωμένων κυκλωμάτων. Έτσι, όλα τα κυκλώματα που παρουσιάζονται στο τρίτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας, προτού οριστικοποιηθούν και εφαρμοστούν όλα μαζί σε ένα ενιαίο τυπωμένο κύκλωμα, έχουν προηγουμένως κατασκευαστεί ως εργαστηριακά πρωτότυπα, με σκοπό τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας τους σε πραγματικές συνθήκες. Πρόσθετα, τα μικρότερα συμπληρωματικά τυπωμένα κυκλώματα του παρόντος συστήματος όπως αυτό του ταχυμέτρου ή των φορέων των αισθητήρων ρεύματος, επίσης κατασκευάζονται στον χώρο του εργαστηρίου. Η διαδικασία κατασκευής των πρωτότυπων τυπωμένων κυκλωμάτων γίνεται στον χώρο του εργαστηρίου της ομάδας TUCer με χειροποίητο τρόπο, χρησιμοποιώντας την τεχνική της χημικής χάραξης. Παρόλα αυτά, λόγω της χρήσης της παραπάνω διαδικασίας προκύπτουν ορισμένοι περιορισμοί. Αυτοί οι περιορισμοί αφορούν κυρίως το επίπεδο που μπορεί να ελαχιστοποιηθεί το μέγεθος των γραμμών, αλλά και οι μεταξύ τους αποστάσεις χωρίς να υπάρξει κάποιο σφάλμα ή βραχυκύκλωμα. Έτσι, το σχέδιο της διάταξης των πρωτότυπων τυπωμένων κυκλωμάτων είναι διαφορετικό και στην ουσία αποτελεί μια απλούστερη εκδοχή του τελικού σχεδίου διάταξης. Στην Εικόνα 4.3 φαίνεται το σύνολο των πρωτότυπων τυπωμένων κυκλωμάτων των συστημάτων που έχουν αναλυθεί στο τρίτο κεφάλαιο.



Εικόνα 4.3 : Τα πρωτότυπα τυπωμένα κυκλώματα του συστήματος.

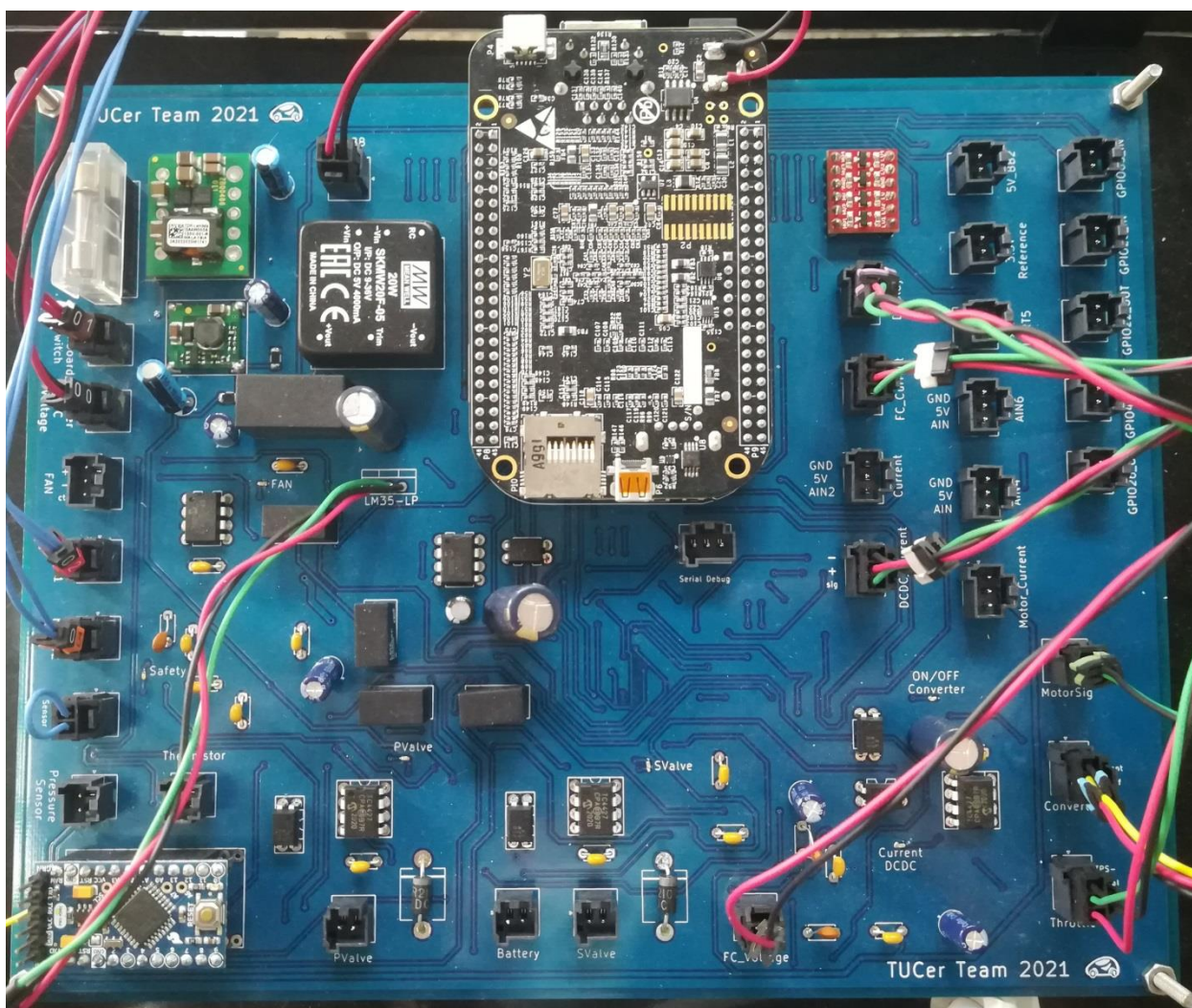
Η κατασκευή των πρωτότυπων κυκλωμάτων ξεκινάει από το τελειοποιημένο σχέδιο διάταξης της εκάστοτε πλακέτας. Το πρώτο βήμα αποτελεί η εξαγωγή των δύο αρχείων που περιέχουν τα ίχνη χαλκού, τα οποία αποτελούν την διάταξη του κυκλώματος για τις δύο όψεις (πάνω και κάτω) της πλακέτας. Στην συνέχεια, οι δύο αυτές διατάξεις εκτυπώνονται σε διαφάνειες χρησιμοποιώντας ένα εκτυπωτή τύπου laser. Έτσι, ως αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας δημιουργείται μια διαφανής μεμβράνη η οποία έχει σκιασμένο το σχέδιο του κυκλώματος για κάθε πλευρά της πλακέτας. Προχωρώντας, οι δύο αυτές μεμβράνες τοποθετούνται η μια πάνω στην άλλη, ευθυγραμμίζονται και συγκολλούνται στις γωνίες τους, δημιουργώντας έτσι ένα πακέτο σε μορφή φακέλου. Στην συνέχεια, μέσα στον φάκελο των διαφανειών που έχει δημιουργηθεί, τοποθετείται μια κενή πολυεστερική πλακέτα με φωτοευαίσθητες επιστρώσεις χαλκού και στις δύο πλευρές. Για να αποτυπωθεί το σχέδιο που βρίσκεται στις διαφάνειες πάνω στις δύο όψεις της φωτοευαίσθητης πλακέτας, η ίδια πρέπει να εκτεθεί σε υπεριώδη ακτινοβολία. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται μια συσκευή η οποία φέρει λαμπτήρα που εκπέμπει υπεριώδη ακτινοβολία. Το πακέτο του φακέλου το οποίο περιέχει την φωτοευαίσθητη πλακέτα τοποθετείται μέσα στην συσκευή και παραμένει μέσα σε αυτήν για έξι με οκτώ λεπτά, ανάλογα με το μέγεθος του σχεδίου αλλά και την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τις δύο όψεις της πλακέτας και έχει ως αποτέλεσμα την αποσύνθεση της φωτοευαίσθητης μεμβράνης στα σημεία που έμειναν εκτεθειμένα στην υπεριώδη ακτινοβολία. Από την άλλη μεριά τα σκιασμένα σημεία των διαφανειών που αποτελούν τα ίχνη του κυκλώματος, προστατεύουν την φωτοευαίσθητη μεμβράνη αφήνοντας αποτυπωμένο πάνω σε αυτήν το σχέδιο της διάταξης του κυκλώματος. Στην συνέχεια, η πλακέτα τοποθετείται σε μια σφραγισμένη από το φως συσκευασία ούτως ώστε να σταματήσει η διαδικασία αποτύπωσης στις φωτοευαίσθητες πλευρές της πλακέτας. Ακολουθεί η διαδικασία της χημικής χάραξης, η οποία αποτελείται από βυθίσεις της πλακέτας σε δύο διαφορετικά διαλύματα. Καθώς τα δύο επόμενα διαλύματα αποτελούνται από τοξικές και καυστικές ουσίες, η χρήση προστατευτικού εξοπλισμού όπως γάντια, μάσκα με εγκεκριμένα φίλτρα, γυαλιά πλήρους κάλυψης και ρόμπα είναι απολύτως αναγκαία. Το πρώτο διάλυμα που χρησιμοποιείται αποτελεί ένα διάλυμα νερού και χρυστάλλων υδροξειδίου του νατρίου. Η αναλογία που χρησιμοποιείται είναι 10 γραμμάρια υδροξειδίου του νατρίου ανά ένα λίτρο νερού. Η πλακέτα αφαιρείται από το σφραγισμένο δοχείο και τοποθετείται στο πρώτο διάλυμα για περίπου 3 με 10 λεπτά έως ότου να εμφανιστεί ευδιάκριτα το σχέδιο των ιχνών του χαλκού. Στην συνέχεια η πλακέτα αφαιρείται από το διάλυμα και ξεπλένεται με άφθονο νερό. Το αποτέλεσμα της βύθισης της πλακέτας στο παραπάνω διάλυμα είναι η δημιουργία μιας προστατευτικής μεμβράνης πάνω από τα ίχνη του κυκλώματος που αποτυπώθηκαν από την έκθεση της πλακέτας σε υπεριώδη ακτινοβολία. Το επόμενο διάλυμα που χρησιμοποιείται, αποτελείται από ένα διάλυμα υδροχλωρικού οξέος περιεκτικότητας 16% με ένα διάλυμα υπεροξειδίου του υδρογόνου περιεκτικότητας 36%. Η αναλογία που χρησιμοποιείται στο παραπάνω διάλυμα είναι 100mL διαλύματος υδροχλωρικού οξέος ανά 6mL διαλύματος υπεροξειδίου του υδρογόνου. Η πλακέτα τοποθετείται στο παραπάνω διάλυμα μέχρι να απομακρυνθεί όλος ο περιττός χαλκός από την επιφάνεια της πλακέτας και να παραμείνουν μόνο τα ίχνη χαλκού του κυκλώματος. Για αυτό τον λόγο ο χρόνος έκθεσης της πλακέτας στο διάλυμα δεν είναι σταθερός και εξαρτάται έντονα από το μέγεθος της πλακέτας. Αφού ολοκληρωθεί



και η έκθεση στο δεύτερο διάλλειμα, η πλακέτα ξεπλένεται με άφθονο νερό και στην συνέχεια καθαρίζεται ενδελεχώς με αιθυλική αλκοόλη.

Το επόμενο στάδιο κατασκευής της πρωτότυπης πλακέτας αποτελεί η διάτρηση των απαραίτητων τρυπών όλων των εξαρτημάτων. Για την παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιούνται ειδικά τρυπάνια με μέγεθος ανάλογο με αυτό που προδιαγράφεται από το σχέδιο για κάθε τρύπα. Αφού ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία η πλακέτα καθαρίζεται με πεπιεσμένο αέρα και αιθυλική αλκοόλη. Το τελευταίο στάδιο είναι η επίστρωση όλων των ιχνών χαλκού με μία στρώση χρώματος κασσίτερου για την ενίσχυση της αγωγιμότητας και της αξιοπιστίας των γραμμών. Τέλος, ακολουθεί ένας τελευταίος καθαρισμός με αιθυλική αλκοόλη. Έτσι, ολοκληρώνοντας όλες τις παραπάνω διαδικασίες η πλακέτα είναι έτοιμη για χρήση ώστε να συγκολληθούν όλα τα εξαρτήματα και ολοκληρωμένα κυκλώματα στις δύο πλευρές της.

Στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζεται το τελικό ενοποιημένο τυπωμένο κύκλωμα του συστήματος μετρήσεων και ελέγχου του οχήματος το οποίο κατασκευάστηκε από εξωτερικό συνεργάτη παραγωγής τυπωμένων κυκλωμάτων.



Εικόνα 4.4 : Το τελικό τυπωμένο κύκλωμα του συστήματος.

Οι βιομηχανίες παραγωγής τυπωμένων κυκλωμάτων χρησιμοποιούν παρόμοιες τεχνικές χημικής χάραξης όπως και αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο για την παραγωγή των πρωτότυπων πλακετών. Παρόλα αυτά, τα εξειδικευμένα εργαλεία και μηχανήματα, αλλά και οι προηγμένες διαδικασίες παραγωγής που συναντώνται στις παραγωγές τυπωμένων κυκλωμάτων μεγάλης κλίμακας, επιτρέπουν την περεταίρω σμίκρυνση των γραμμών μεταφοράς και των μεταξύ τους επαφών. Ως αποτέλεσμα, τα τυπωμένα κυκλώματα που έχουν παραχθεί βιομηχανικά παρουσιάζουν μικρότερο μέγεθος και μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σύγκριση με τα πρωτότυπα που παράγονται στο περιβάλλον του εργαστηρίου. Παρατηρώντας τις Εικόνες 4.3 και 4.4 επιβεβαιώνεται το παραπάνω γεγονός. Το σύνολο των επτά ξεχωριστών πρωτότυπων πλακετών (εκτός της πλακέτας του ταχυμέτρου), αφού επιβεβαιώθηκε η ορθή λειτουργία του, επανασχεδιάστηκε έτσι ώστε να εφαρμόζεται σε μία μικρότερη ενιαία πλακέτα που κατασκευάζεται βιομηχανικά. Η βιομηχανική παραγωγή της πλακέτας, πέρα από το ότι επιτρέπει την μείωση του μεγέθους των κυκλωμάτων, προσφέρει ορισμένα σημαντικά προτερήματα. Η εφαρμογή μονωτικού στρώματος και στις δύο πλευρές της πλακέτας, η εσωτερική επιχάλκοποίηση όλων των τρυπών και το φινίρισμα της επιφάνειας των επαφών με μη-τοξικά υλικά αποτελούν μερικά από αυτά τα σημαντικά προτερήματα. Τέλος η ενοποίηση του συστήματος σε μια πλακέτα εξουδετερώνει την ανάγκη χρήσης εξωτερικών αγωγών για την διασύνδεση των κυκλωμάτων ελέγχου.

## 5. Πειραματικά Αποτελέσματα

---

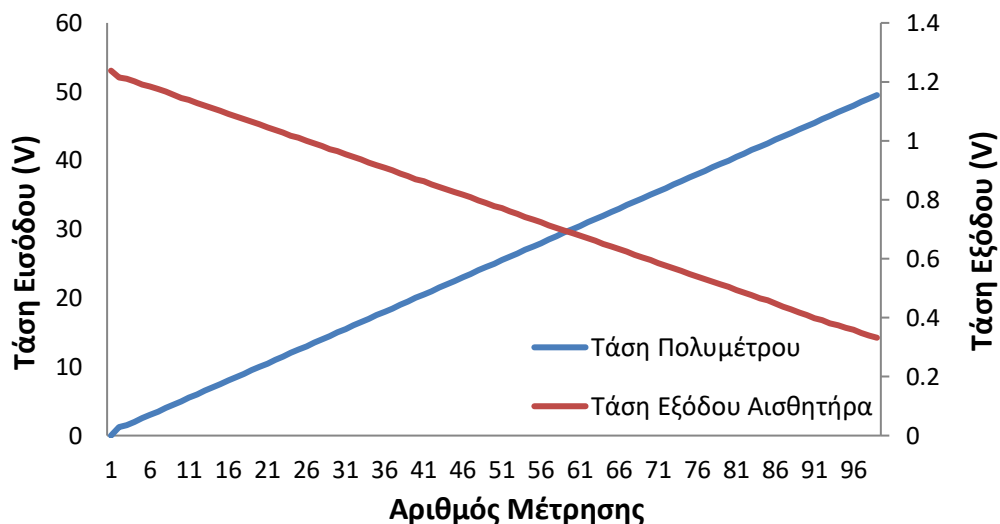
### 5.1 Εισαγωγή

Έπειτα από την ολοκλήρωση της θεωρητικής ανάλυσης και σχεδίασης όλων των απαραίτητων υποσυστημάτων για την ασφαλή λειτουργία του οχήματος, ακολουθεί μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών που επιβεβαιώνουν την ορθή τους λειτουργία. Για την διενέργεια αυτών των δοκιμών θα χρησιμοποιηθούν τα πρωτότυπα κυκλώματα των επιμέρους συστημάτων, που έχουν κατασκευαστεί στον χώρο του εργαστηρίου με τις μεθόδους που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι, πραγματοποιώντας αυτές τις δοκιμές χρησιμοποιώντας πραγματικά κυκλώματα εξάγονται σημαντικές πληροφορίες και συμπεράσματα, τα οποία αφορούν την ρύθμιση των παραμέτρων επικοινωνίας του συστήματος με το σύνολο των αισθητήρων στο όχημα. Κατά την διάρκεια αυτών των δοκιμών, τα δεδομένα που προκύπτουν από τον εκάστοτε αισθητήρα θα εισέρχονται και θα αποθηκεύονται στον κεντρικό μικροελεγκτή. Για την σύγκριση και την επιβεβαίωση των δεδομένων που προκύπτουν από το σύστημα ελέγχου και μετρήσεων σε κάθε πείραμα, θα χρησιμοποιείται και ένας ολοκληρωμένος εξωτερικός αισθητήρας ο οποίος θα αποτελεί την μέτρηση αναφοράς.

### 5.2 Δοκιμή Αισθητήρων Τάσης

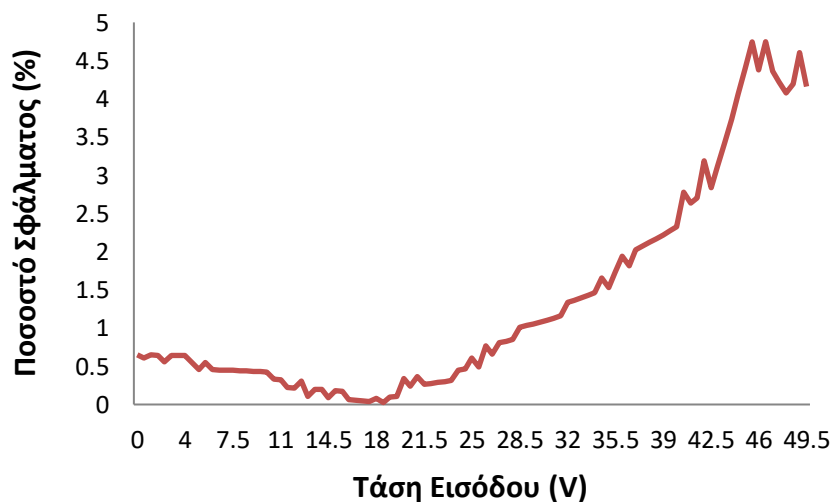
Για την πειραματική δοκιμή των αισθητήρων τάσης θα χρησιμοποιηθεί το κύκλωμα διασύνδεσης αυτών των αισθητήρων όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 3.10 και παρουσιάζεται ως πρωτότυπο τυπωμένο κύκλωμα στην Εικόνα 4.3.

Η πρώτη δοκιμή περιλαμβάνει την μέτρηση μιας γραμμικά αυξανόμενης τάσης που ξεκινάει από τα 0V και καταλήγει έως τα 50V χρησιμοποιώντας το κύκλωμα των αισθητήρων τάσης. Τον αισθητήρα αναφοράς αποτελεί ένα συμβατικό πολύμετρο υψηλής ακρίβειας, το οποίο θα συνδέεται παράλληλα με το κύκλωμα των αισθητήρων τάσης και μετράει την ίδια τάση. Για την δημιουργία της γραμμικά αυξανόμενης τάσης χρησιμοποιήθηκε μια συστοιχία μπαταριών τάσης 12.5V και ένας διαιρέτης τάσης με ποτενσιόμετρο. Οι μπαταρίες συνδέθηκαν σε σειρά έτσι ώστε να παρέχουν μέγιστη τάση 50V και με την αυξομείωση της μιας αντίστασης (ποτενσιόμετρο) του διαιρέτη τάσης επιτυγχάνεται η αυξομείωση της τάσης. Ξεκινώντας από τα 0V πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από το κύκλωμα διασύνδεσης των αισθητήρων τάσης για κάθε 0.5V έως τα 50V. Στο σχεδιάγραμμα που ακολουθεί στην Εικόνα 5.1 της επόμενης σελίδας παρουσιάζονται οι τιμές που προέκυψαν από την παραπάνω πειραματική μέτρηση.



Εικόνα 5.1 : Πειραματικό διάγραμμα μέτρησης μιας γραμμικά αυξανόμενης τάσης χρησιμοποιώντας το πρωτότυπο κύκλωμα διασύνδεσης των αισθητήρων τάσης και πολύμετρο. Ο αριστερός κατακόρυφος άξονας και η μπλε καμπύλη αντιστοιχούν στην τάση που μετράται από το πολύμετρο, ενώ ο αριστερός κατακόρυφος άξονας και η κόκκινη γραμμή αντιστοιχούν στην τάση εξόδου του κυκλώματος διασύνδεσης των αισθητήρων τάσης.

Παρατηρώντας το σχεδιάγραμμα της Εικόνας 5.1, το κύκλωμα διασύνδεσης των αισθητήρων τάσης παρουσιάζει γραμμική απόκριση στην μετρούμενη γραμμική τάση. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται σε αυτό το κύκλωμα είναι αντίστροφης λογικής. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του, τάση εισόδου 0V αντιστοιχεί σε τάση εξόδου του αισθητήρα 1.23V ενώ τάση εισόδου 50V αντιστοιχεί σε τάση εξόδου 0,337V. Στην Εικόνα 5.1 παρατηρείται ότι η τάση εξόδου του κυκλώματος ξεκινά από τα 1.238V για τάση μέτρησης 0V ενώ καταλήγει στα 0.328V για τάση μέτρησης 50V. Στην συνέχεια στην Εικόνα 5.2 ακολουθεί το σχεδιάγραμμα της καμπύλης του σφάλματος της μέτρησης τάσης από τον κεντρικό μικροελεγκτή.

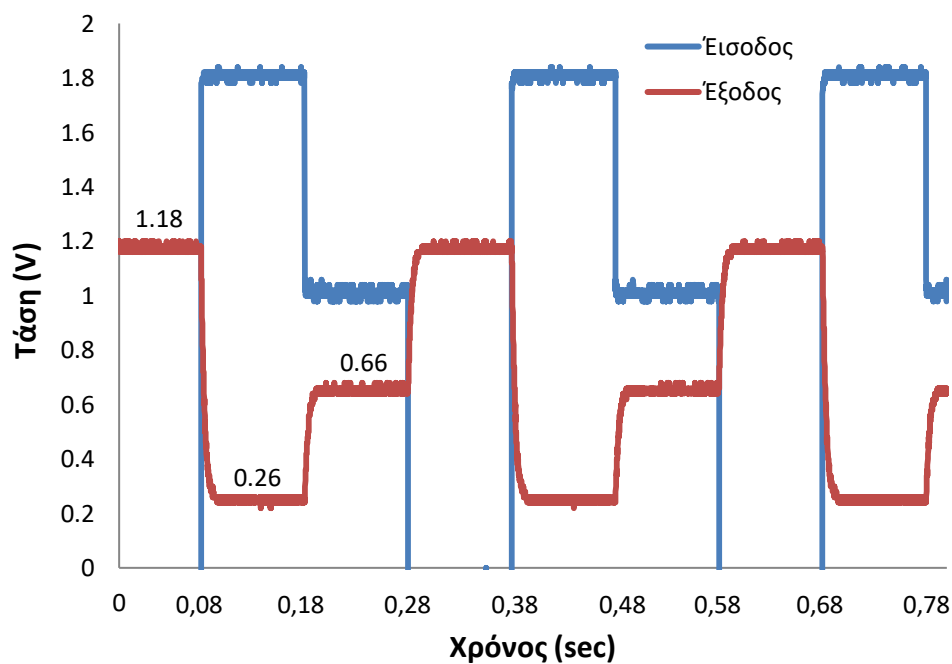


Εικόνα 5.2 : Σχεδιάγραμμα καμπύλης σφάλματος μέτρησης τάσης από τον κεντρικό μικροελεγκτή.

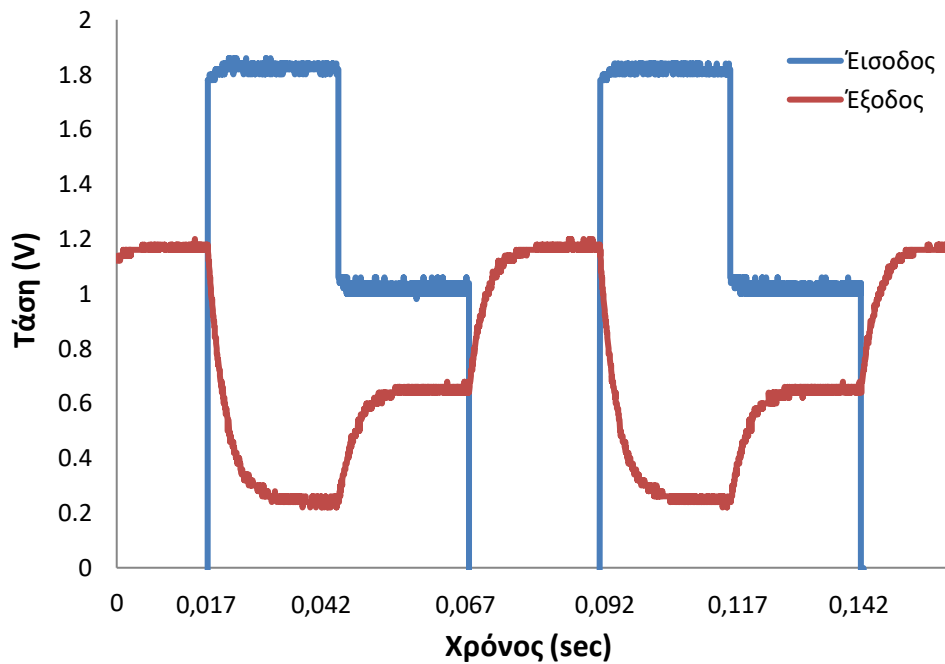


Παρατηρώντας το σχεδιάγραμμα σφάλματος μέτρησης τάσης της Εικόνας 5.1 της προηγούμενης σελίδας παρατηρείται η αύξηση του ποσοστού σφάλματος στις υψηλότερες τάσεις.

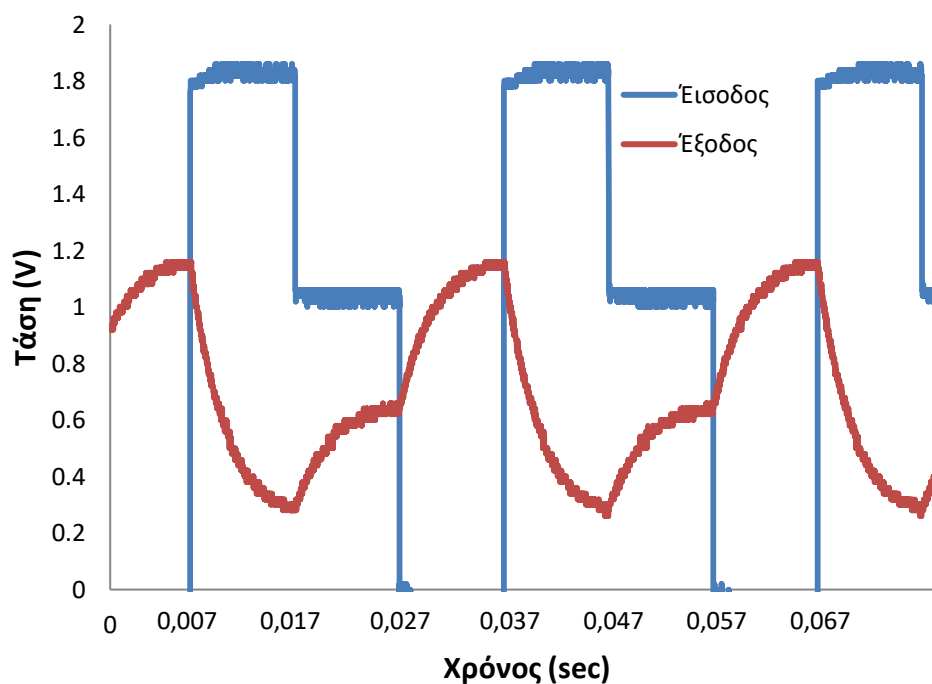
Στην συνέχεια ακολουθούν πειράματα που ελέγχουν την απόκριση του κυκλώματος διασύνδεσης των αισθητήρων τάσης. Για τους σκοπούς αυτών των δοκιμών, ο διαιρέτης τάσης που βρίσκεται στο κύκλωμα διασύνδεσης των αισθητήρων και υποβιβάζει την τάση εισόδου στα επιθυμητά επίπεδα, θα παρακαμφθεί. Στο πειραματικό κύκλωμα θα χρησιμοποιηθεί το ψηφιακά ελεγχόμενο ποτενσιόμετρο MCP4151 σε συνδεσμολογία διαιρέτη τάσης. Το ίδιο θα ελέγχεται από ένα εξωτερικό μικροελεγκτή Arduino Uno και ο διαιρέτης τάσης θα τροφοδοτείται από μια μπαταρία 12V. Με την κατάλληλη επιλογή της δεύτερης αντίστασης του διαιρέτη τάσης και τον προγραμματισμού του μικροελεγκτή επιτυγχάνεται στην έξοδο του πειραματικού κυκλώματος μια ψηφιακά ελεγχόμενη τάση από 0 μέχρι 2V. Αυτή η ψηφιακά ελεγχόμενη τάση είναι εκείνη που θα συνδεθεί στα άκρα του κυκλώματος διασύνδεσης των αισθητήρων παρακάμπτοντας όμως τις αντιστάσεις υποβιβασμού. Τόσο η είσοδος όσο και η έξοδος του κυκλώματος αυτού θα συνδεθούν με ψηφιακό παλμογράφο. Στις δοκιμές που ακολουθούν θα ελεγχθεί η απόκριση του συνολικού κυκλώματος σε ένα σενάριο μετάβασης από 90% στο 50% και έπειτα στο 0% της επιτρεπόμενης περιοχής μέτρησης του αισθητήρα τάσης.



Εικόνα 5.3 : Πειραματικό διάγραμμα μέτρησης της απόκρισης του κυκλώματος διασύνδεσης αισθητήρων τάσης σε σενάριο εισόδου 90%-50%-0% της περιοχής μέτρησης του αισθητήρα και για χρόνο βήματος  $T_{on} = 100ms$ . Η καμπύλη μπλε χρώματος αντιστοιχεί στην τάση στην είσοδο του αισθητήρα τάσης ενώ η καμπύλη κόκκινου χρώματος αντιστοιχεί στην τάση εξόδου του κυκλώματος διασύνδεσης των αισθητήρων.



Εικόνα 5.4 : Πειραματικό διάγραμμα μέτρησης της απόκρισης του κυκλώματος διασύνδεσης αισθητήρων τάσης σε σενάριο εισόδου 90%-50%-0% της περιοχής μέτρησης του αισθητήρα και για χρόνο βήματος **Ton = 25ms**.



Εικόνα 5.5 : Πειραματικό διάγραμμα μέτρησης της απόκρισης του κυκλώματος διασύνδεσης αισθητήρων τάσης σε σενάριο εισόδου 90%-50%-0% της περιοχής μέτρησης του αισθητήρα και για χρόνο βήματος **Ton = 10ms**.

Παρατηρώντας την Εικόνα 5.3 για χρόνο βήματος  $T_{on}=100ms$  η απόκριση του κυκλώματος στις αλλαγές της μετρούμενης τάσης είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική.

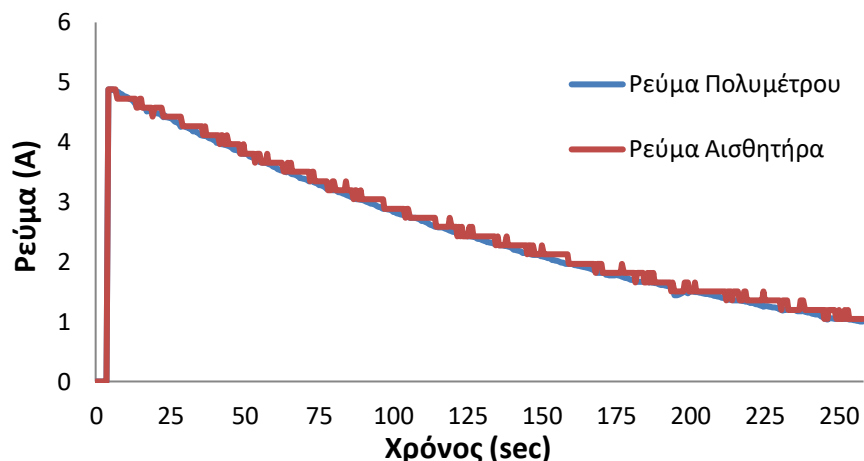
Συνεχίζοντας με την Εικόνα 5.4 για χρόνο βήματος  $T_{on}=25ms$  παρατηρείται η μείωση της απόκρισης του κυκλώματος στις αλλαγές της μετρούμενης τάσης, παρόλα αυτά ο χρόνος που η μέτρηση παραμένει σταθερή είναι ακόμα αρκετός έτσι ώστε να είναι δυνατό να αναγνωστεί από τον μικροελεγκτή. Τέλος, στην Εικόνα 5.5 για χρόνο βήματος  $T_{on}=10ms$  παρατηρείται μη-ικανοποιητική απόκριση του κυκλώματος στις αλλαγές της μετρούμενης τάσης. Συνεπώς, η τάση του εξόδου του κυκλώματος δεν παρουσιάζει καμία σταθερότητα έτσι ώστε ο μικροελεγκτής να μπορέσει να αναγνώσει και να μεταφράσει τις μετρήσεις.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με τις προδιαγραφές που παρέχει ο κατασκευαστής των αισθητήρων τάσης, παρατηρείται ουσιαστική διαφορά στην απόκριση της εξόδου σε σχέση με τις αλλαγές της τάσης στην είσοδο. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή οι χρόνοι απόκρισης σε αλλαγές 90%-50%-0% είναι της τάξης των  $\mu sec$ . Αντίθετα, μέσω των παραπάνω δοκιμών παρατηρείται ότι το κύκλωμα διασύνδεσης των αισθητήρων είναι ικανό να ανιχνεύσει αλλαγές 90%-50%-0% αξιόπιστα με ενεργούς χρόνους μέχρι τα 25  $\mu sec$ . Η διαφορά απόκρισης μεταξύ των προδιαγραφών του κατασκευαστή και των πειραματικών δεδομένων είναι ουσιαστική και οφείλεται σε απώλειες που έχουν σχέση με παρασιτικά ηλεκτρικά στοιχεία (αντιστάσεις, χωρητικότητες) στην πρωτότυπη πλακέτα. Παρόλα αυτά, η απόκριση σε σήματα με ενεργό χρόνο 25ms που προκύπτει ως ελάχιστη από τα πειραματικά δεδομένα είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική για τις απαιτήσεις του παρόντος συστήματος και για την χρήση για την οποία προορίζεται.

### 5.3 Δοκιμή Αισθητήρων Ρεύματος

Για την πειραματική δοκιμή των αισθητήρων ρεύματος χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας μαζί με τον φορέα του, σε συνδυασμό με το κύκλωμα διασύνδεσης του κεντρικού μικροελεγκτή, έτσι ώστε ο ίδιος να διαβάζει τις τιμές εξόδου του αισθητήρα. Τον ρόλο του αισθητήρα αναφοράς θα διαδραματίσει ένα πολύμετρο σε λειτουργία αμπερομέτρου, το οποίο τοποθετείται σε σειρά με τον αισθητήρα ρεύματος.

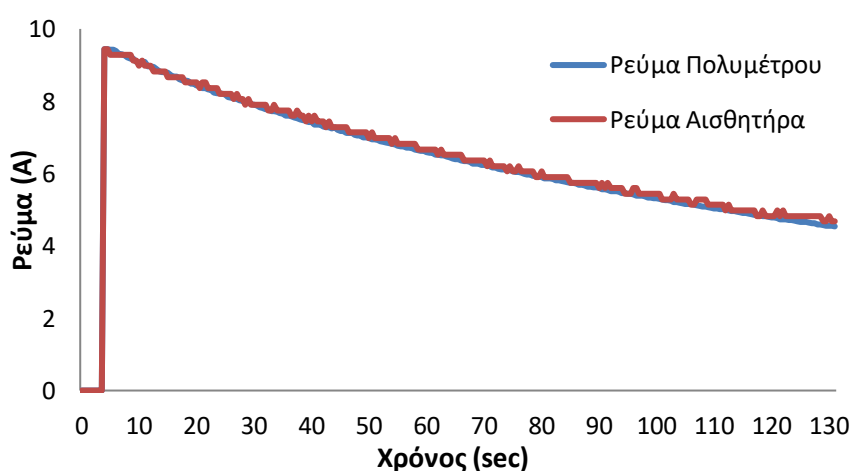
Το πρώτο πείραμα περιλαμβάνει την μέτρηση του ρεύματος εκφόρτισης μιας συστοιχίας υπερπυκνωτών στον πάγκο του εργαστηρίου. Ως φορτίο, στα άκρα της συστοιχίας τοποθετήθηκε μια παράλληλη συνδεσμολογία από αντιστάσεις ισχύος 4.7 $\Omega$ -50W. Αυτές οι αντιστάσεις τοποθετούνται πάνω σε μεταλλική ψύκτρα με σκοπό την αποτελεσματική απαγωγή της θερμότητας που παράγεται. Κατά την διενέργεια του πειράματος οι τιμές του ρεύματος εκφόρτισης καταγράφονται ανά 0.5sec τόσο από τον αισθητήρα ρεύματος όσο και από το πολύμετρο. Στο σχεδιάγραμμα της Εικόνας 5.6 παρουσιάζεται το μετρούμενο ρεύμα εκφόρτισης των υπερπυκνωτών από τα 5A έως το 1A, σε χρονικό διάστημα περίπου τεσσάρων λεπτών. Με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η μέτρηση του πολυμέτρου, ενώ με κόκκινο χρώμα η μέτρηση που προκύπτει από τον αισθητήρα ρεύματος.



Εικόνα 5.6 : Σχεδιάγραμμα καμπυλών πειραματικής μέτρησης ρεύματος εκφόρτισης υπερπυκνωτών με αισθητήρα ρεύματος και πολύμετρο.

Παρατηρώντας την καμπύλη της μέτρησης του ρεύματος από τον αισθητήρα στην Εικόνα 5.6 παρατηρείται ελαφριά απόκλιση της μετρούμενης τιμής γύρω από την πραγματική τιμή ρεύματος που μετράει το πολύμετρο. Για αυτό τον λόγο το σφάλμα μέτρησης που προκύπτει γίνεται όλο και πιο έντονο κατά την μείωση της μετρούμενης τιμής. Το παραπάνω φαινόμενο μπορεί να μετριασθεί χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικούς τρόπους. Πρώτος τρόπος είναι η διεύρυνση του εύρους κβάντισης της αναλογικής τάσης εξόδου του αισθητήρα στην είσοδο του μετατροπέα ADC του κεντρικού μικροελεγκτή. Ο δεύτερος τρόπος είναι η αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας της ίδιας εισόδου και στην συνέχεια ο υπολογισμός ενός μέσο όρου της εισαχθείσας τιμής ανά κάποιο μικρό χρονικό διάστημα.

Το δεύτερο πείραμα περιλαμβάνει την μέτρηση του ρεύματος φόρτισης μιας συστοιχίας υπερπυκνωτών στον πάγκο του εργαστηρίου χρησιμοποιώντας το ίδιο φορτίο και παραμέτρους με το προηγούμενο πείραμα.



Εικόνα 5.7 : Σχεδιάγραμμα καμπυλών πειραματικής μέτρησης ρεύματος φόρτισης υπερπυκνωτών με αισθητήρα ρεύματος και πολύμετρο.

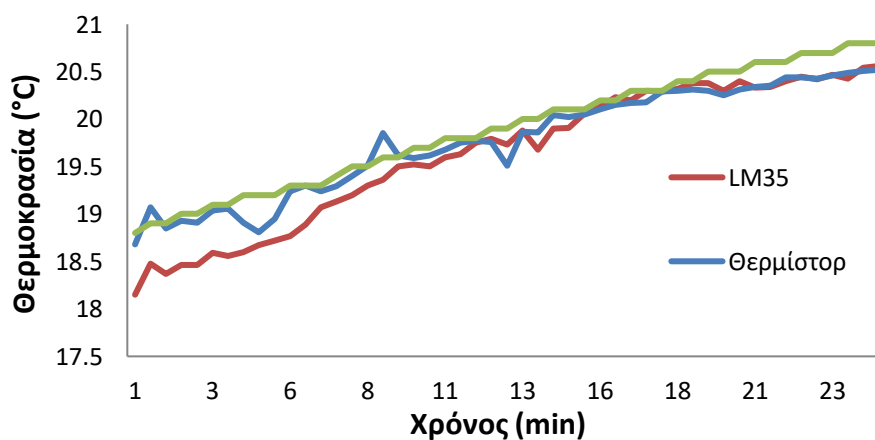
Παρατηρώντας την καμπύλη της μέτρησης του ρεύματος από τον αισθητήρα στην Εικόνα 5.7 η απόκλιση της μετρούμενης τιμής γύρω από την πραγματική τιμή ρεύματος που

μετράει το πολύμετρο, είναι μικρότερη σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα. Από το παραπάνω γεγονός παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τιμή του μετρούμενου ρεύματος από τον αισθητήρα τόσο αυξάνεται και η ακρίβεια του αισθητήρα. Συνεπώς, είναι σημαντική η επιλογή αισθητήρα της σειράς ACS7XX το εύρος τιμών μέτρησης του οποίου θα είναι κοντά στο εύρος τιμών των ρευμάτων προς μέτρηση κατά την λειτουργία του οχήματος. Πρόσθετα, όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 3.2.2 ο αισθητήρας ρεύματος ACS711EX που χρησιμοποιήθηκε κατά την διενέργεια των παραπάνω πειραμάτων, παράγει στην έξοδο του μια αναλογική τάση γραμμικά ανάλογη με το ρεύμα εισόδου που μετράει. Με την σειρά του, ο κεντρικός μικροελεγκτής για να προσδιορίσει την τιμή του ρεύματος χρησιμοποιεί μία μαθηματική σχέση που παρέχεται από τον κατασκευαστή του παραπάνω αισθητήρα. Κατά την χρήση διαφορετικών αισθητήρων ίδιου μοντέλου και εφαρμόζοντας την μαθηματική σχέση του κατασκευαστή, παρατηρήθηκε η ανάγκη της ρύθμισης των συντελεστών της για να προκύπτουν αξιόπιστες τιμές. Για αυτό τον λόγο, για την ενίσχυση της ακρίβειας των μετρήσεων ειδικά σε χαμηλότερες τιμές ρευμάτων καθίσταται απαραίτητη η βαθμονόμηση των συντελεστών του μαθηματικού τύπου υπολογισμού του ρεύματος.

## 5.4 Δοκιμή Αισθητήρων Θερμοκρασίας

Για την πειραματική δοκιμή των αισθητήρων θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε το κύκλωμα ελέγχου του ανεμιστήρα και των αισθητήρων θερμοκρασίας σε συνδυασμό με το κύκλωμα διασύνδεσης του κεντρικού μικροελεγκτή, έτσι ώστε ο ίδιος να διαβάζει τις τιμές εξόδου των αισθητήρων. Πιο συγκεκριμένα οι αισθητήρες των οποίων θα δοκιμαστεί η λειτουργία τους είναι ένα θερμίστορ και ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας LM35. Στα πειράματα που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, τον ρόλο του αισθητήρα αναφοράς θα διαδραματίσει ένας υπολογιστής διαδρομών τύπου Garmin με ενσωματωμένο αισθητήρα θερμοκρασίας.

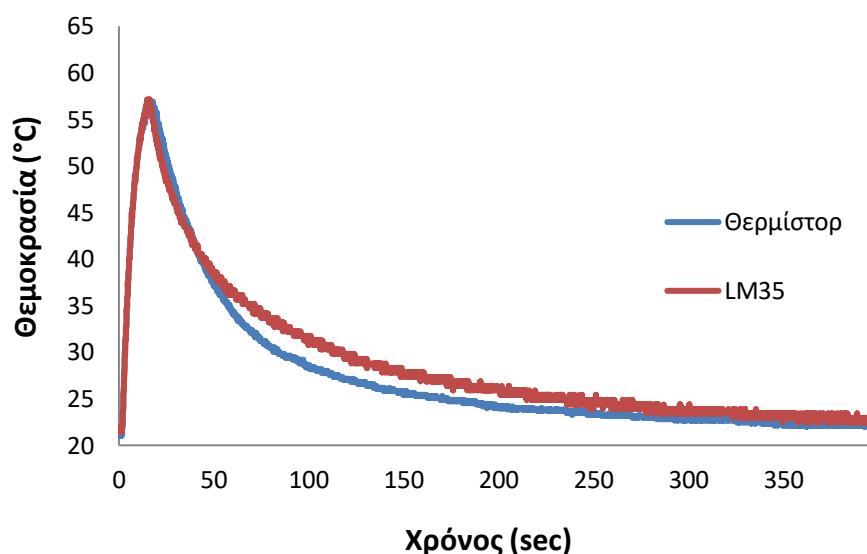
Στο πρώτο πείραμα οι αισθητήρες προς δοκιμή και ο αισθητήρας αναφοράς τοποθετούνται σε ήπια θερμαινόμενο χώρο και οι μετρήσεις τους καταγράφονται ανά 30 δευτερόλεπτα όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα που ακολουθεί στην Εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8 : Σχεδιάγραμμα καμπυλών μέτρησης θερμοκρασίας από τρεις διαφορετικούς αισθητήρες σε ήπια θερμαινόμενο χώρο.

Παρατηρώντας τις καμπύλες μετρήσεων θερμοκρασίας της Εικόνας 5.8 οι μετρήσεις που προκύπτουν από τους δύο αισθητήρες προς δοκιμή είναι ικανοποιητικά κοντά στις μετρήσεις του αισθητήρα αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα η μέγιστη απόκλιση από την τιμή αναφοράς για το θερμίστορ είναι στους  $0.77^{\circ}\text{C}$  ενώ για τον αισθητήρα LM35 στους  $0.37^{\circ}\text{C}$ . Εστιάζοντας στην συμπεριφορά του θερμίστορ παρατηρείται απόκλιση γύρω από την πραγματική τιμή. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στην υψηλή ευαισθησία του θερμίστορ στην αυξομείωση της θερμοκρασίας από ρεύματα αέρα. Ο αισθητήρας LM35 παρουσιάζει σταθερότερη συμπεριφορά και για αυτόν τον λόγο επιλέγεται και ως ο αισθητήρας που θα είναι υπεύθυνος για την μέτρηση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας. Ωστόσο ο ίδιος εμφανίζει λίγο μεγαλύτερη απόκλιση από την πραγματική θερμοκρασία, η οποία μπορεί να διορθωθεί έως ένα σημείο με βαθμονόμηση του αισθητήρα.

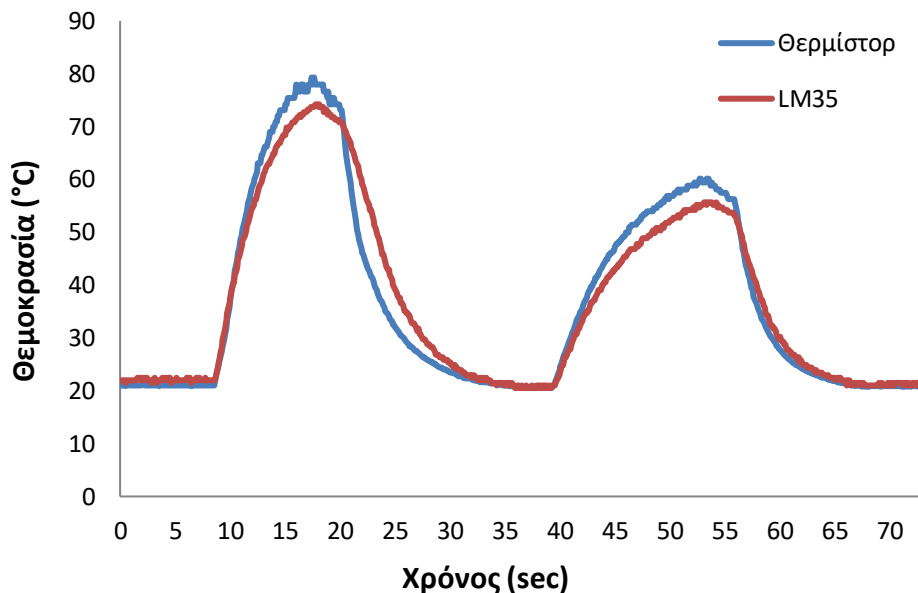
Στα δύο επόμενα πειράματα οι δύο αισθητήρες προς δοκιμή τοποθετούνται σε κλειστό περιβάλλον, η θερμοκρασία του οποίου μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας θερμό αέρα, είτε να εξισωθεί με την ατμοσφαιρική χρησιμοποιώντας ανεμιστήρα. Σκοπός αυτού του πειράματος είναι η προσομοίωση των θερμοκρασιών κατά την λειτουργία της κυψέλης υδρογόνου και την αξιολόγηση των αισθητήρων για την μέτρηση της θερμοκρασίας της ΚΥ. Στο πρώτο από τα δύο αυτά πειράματα οι δύο αισθητήρες θερμαίνονται και στην συνέχεια ψύχονται παθητικά από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η συμπεριφορά των δύο αισθητήρων αποτυπώνεται στις καμπύλες του σχεδιαγράμματος της Εικόνας 5.9 που ακολουθεί. Η περίοδος δειγματοληψίας και για τους δύο αισθητήρες είναι 0.1sec.



Εικόνα 5.9 : Σχεδιάγραμμα καμπυλών μέτρησης θερμοκρασίας θερμίστορ και αισθητήρα LM35 κατά την θέρμανση και παθητική ψύξη τους.

Παρατηρώντας τις καμπύλες μέτρησης της θερμοκρασίας των δύο αισθητήρων στην Εικόνα 5.9, η συμπεριφορά και των δύο αισθητήρων κατά την θέρμανση τους είναι παρόμοια. Παρόλα αυτά κατά την παθητική ψύξη τους από τον ατμοσφαιρικό αέρα το θερμίστορ εμφανίζει γρηγορότερη απόκριση και εξίσωση με την πραγματική ατμοσφαιρική θερμοκρασία.

Στο δεύτερο πείραμα οι δύο αισθητήρες ακολουθούν δύο κύκλους θέρμανσης και ενεργητικής ψύξης από τον ανεμιστήρα. Η συμπεριφορά των αισθητήρων αποτυπώνεται στις καμπύλες του σχεδιαγράμματος της Εικόνας 5.10 που ακολουθεί ενώ η συχνότητα δειγματοληψίας παραμένει ίδια με το προηγούμενο πείραμα.



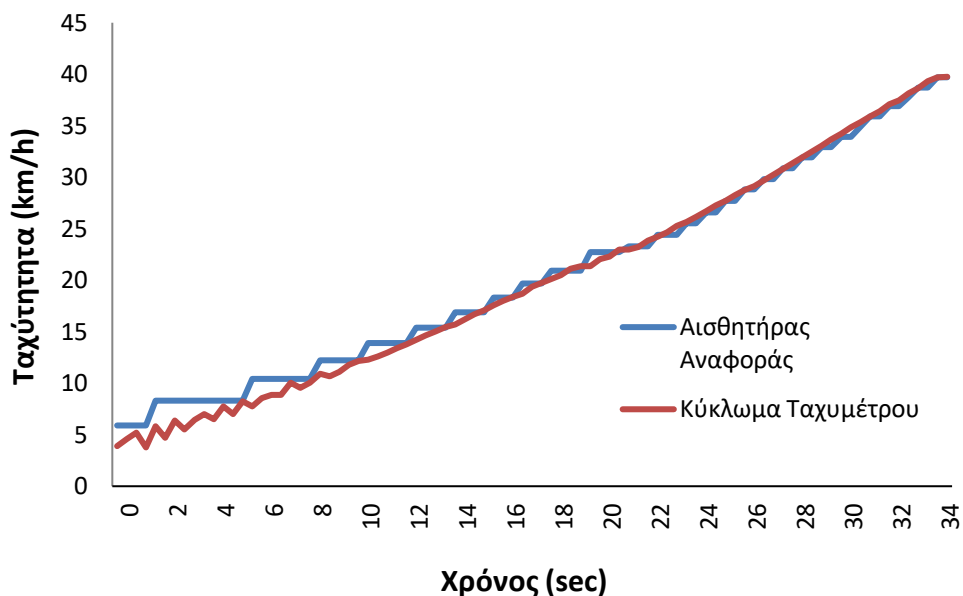
Εικόνα 5.10 : Σχεδιαγράμμα καμπυλών μέτρησης θερμοκρασίας θερμίστορ και αισθητήρα LM35 κατά την θέρμανση τους και ενεργητική ψύξη τους με χρήση ανεμιστήρα.

## 5.5 Δοκιμή Κυκλώματος Ταχυμέτρου

Για την δοκιμή του κυκλώματος του ταχυμέτρου, ο αισθητήρας-διακόπτης τύπου reed και οι συνοδευόμενοι μαγνήτες θα τοποθετηθούν πάνω σε μια σταθερή πειραματική διάταξη. Αυτή η διάταξη περιλαμβάνει έναν τροχό ακτίνας 10 ιντσών τοποθετημένο σε σταθερή μεταλλική διάταξη στήριξης τοποθετημένη πάνω στον πάγκο εργασίας. Οι δύο μαγνήτες τοποθετούνται στις ακτίνες του τροχού, ενώ ο αισθητήρας τοποθετείται στην διάταξη στήριξης του τροχού σε ανάλογη ακτίνα με τους μαγνήτες από το κέντρο του. Για την ανάγνωση και καταγραφή των μετρήσεων το κύκλωμα του ταχυμέτρου συνδέεται με έναν μικροελεγκτή. Ο ίδιος δέχεται σε μια αναλογική θύρα του την αναλογική τάση της μέτρησης που προκύπτει από το κύκλωμα του ταχυμέτρου. Στην συνέχεια πραγματοποιώντας τους κατάλληλους υπολογισμούς, όπως αυτοί έχουν αναλυθεί στις παραγράφους 3.2.7 και 3.10, υπολογίζει την διαμήκη ταχύτητα του τροχού όπως θα ήταν αυτή εάν ο ίδιος τροχός ήταν τοποθετημένος σε ένα κινούμενο όχημα. Πρόσθετα στην ίδια σταθερή διάταξη τοποθετείται και ο αισθητήρας αναφοράς αυτού το πειράματος ο οποίος είναι ένα ταχύμετρο ποδηλάτου της εταιρίας Cateye και θα υπολογίζει την ίδια ταχύτητα.

Στην δοκιμή που ακολουθεί πραγματοποιείται ένα σενάριο γραμμικής επιτάχυνσης από τα 0 έως τα 40 χιλιόμετρα ανά ώρα (ανώτατη ταχύτητα του οχήματος) σε συνολικό χρόνο 35 δευτερολέπτων με συχνότητα δειγματοληψίας των μετρήσεων και των δύο αισθητήρων ανά 0.4 δευτερόλεπτα. Σκοπός αυτής της δοκιμής είναι ο έλεγχος της ακρίβειας και της

αξιοπιστίας του κυκλώματος του ταχυμέτρου στην μέτρηση της ταχύτητας. Στην Εικόνα 5.11 που ακολουθεί, παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα των καμπυλών των μετρήσεων της ταχύτητας των δύο αισθητήρων.



Εικόνα 5.11 : Σχεδιάγραμμα καμπυλών μέτρησης ταχύτητας σε σταθερή επιτάχυνση από το κύκλωμα ταχυμέτρου και τον αισθητήρα αναφοράς.

Παρατηρώντας το σχεδιάγραμμα των καμπυλών των μετρήσεων ταχύτητας των δύο αισθητήρων, το κύκλωμα του ταχυμέτρου εμφανίζει ιδιαίτερα γραμμική συμπεριφορά. Σε σχέση με τον αισθητήρα αναφοράς (ταχύμετρο Cateye), το κύκλωμα του ταχυμέτρου εμφανίζει στις μετρήσεις του πολύ λιγότερες και μικρότερες διακυμάνσεις στις μικρές ταχύτητες, ενώ στις υψηλότερες ταχύτητες οι διακυμάνσεις είναι αμελητέες. Το φαινόμενο των διακυμάνσεων στις μικρές ταχύτητες είναι ιδιαίτερα έντονο καθώς η μικρή ταχύτητα περιστροφής του τροχού έχει ως αποτέλεσμα οι μαγνήτες να περνάνε ανά πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα μπροστά από τον αισθητήρα-διακόπτη reed. Τέτοια μεγάλα χρονικά διαστήματα είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ξεχωριστούν με ακρίβεια από το κύκλωμα το ταχυμέτρου χωρίς να θυσιάζεται έντονα η ακρίβεια στις υψηλότερες ταχύτητες. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου μπορούν να προστεθούν επιπλέον ζευγάρια μαγνητών, τα οποία σε συνδυασμό με τις κατάλληλες αλλαγές στο κύκλωμα μέτρησης θα βελτιώσουν αισθητά την ακρίβεια του κυκλώματος μέτρησης σε όλες τις ταχύτητες.



## 6. Συμπεράσματα

---

Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε ένας ολοκληρωμένος κύκλος έρευνας και ανάπτυξης ενός πρωτότυπου συστήματος μετρήσεων και ελέγχου, για χρήση σε ένα ηλεκτρικό όχημα κυψέλης υδρογόνου. Αρχικά, αναλύθηκε η δομή της προτεινόμενης διάταξης που χρησιμοποιείται στο όχημα, ενώ περιγράφηκαν τα χαρακτηριστικά και η λειτουργία των βασικών τμημάτων του συστήματος. Στην συνέχεια, αναλύθηκαν η δομή, τα χαρακτηριστικά και η λειτουργία του συνόλου των αισθητήρων το συστήματος. Παρουσιάστηκε η σχεδίαση όλων των απαραίτητων κυκλωμάτων για τον έλεγχο των αισθητήρων και του συνόλου των συστημάτων του οχήματος και αναλύθηκε η διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής των πρωτότυπων τυπωμένων κυκλωμάτων, που σε συνεργασία με τα υπόλοιπα τμήματα αποτελούν το σύστημα μετρήσεων και ελέγχου του οχήματος. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια σειρά από πειραματικές μετρήσεις στον χώρο του εργαστηρίου, οι οποίες ελέγχουν την ορθή λειτουργία των επιμέρους συστημάτων και αισθητήρων.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που προέκυψαν από τις παραπάνω δοκιμές, η λειτουργία του συστήματος μετρήσεων είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, ενώ οι μετρήσεις που προκύπτουν από τους αισθητήρες που δοκιμάστηκαν, εμφανίζουν υψηλή ευαισθησία και γρήγορη απόκριση στις αλλαγές. Παρόλα αυτά, για να επιτευχθούν τα παραπάνω θετικά χαρακτηριστικά, η βαθμονόμηση των μετρήσεων των αισθητήρων είναι απαραίτητη. Για αυτό τον λόγο η σύγκριση των μετρήσεων σε ελεγχόμενο περιβάλλον, με μετρήσεις που προέρχονται από αισθητήρες αναφοράς, είναι ιδιαίτερα σημαντική. Όμως, οι ιδανικές και ελεγχόμενες συνθήκες του εργαστηρίου διαφέρουν έντονα από αυτές που θα συναντήσει το όχημα, κινούμενο στο οδόστρωμα μιας πίστας. Οι δονήσεις και οι δυνάμεις που προκύπτουν κατά την κίνηση του οχήματος αλλά και η θερμοκρασία και η υγρασία, είναι παράγοντες οι οποίοι μπορούν να μεταβάλλουν την ορθή και ασφαλή λειτουργία του συστήματος μετρήσεων και ελέγχου. Για αυτό τον λόγο έπειτα από την ολοκλήρωση όλων των απαραίτητων εργασιών στο όχημα, ο πλήρης έλεγχος του οχήματος σε πραγματικές συνθήκες είναι αναγκαίος.

Αφού επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία του συστήματος και ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός των εξωτερικών συνδέσεων με το ενιαίο τυπωμένο κύκλωμα, το κύκλωμα μπορεί να τοποθετηθεί σε προστατευτικό περίβλημα ενώ οι εξωτερικές συνδέσεις να ομαδοποιηθούν σε μία φίσσα αυτοκινητιστικού τύπου. Πρόσθετα, καθώς παρατηρήθηκαν αστοχίες κατά την χρήση εξωτερικών μπαταριών, σημαντική για την προστασία του συστήματος είναι η προσθήκη μιας ασφάλειας στην σύνδεση του τυπωμένου κυκλώματος με την εξωτερική μπαταρία. Εν κατακλείδι, το σύστημα μετρήσεων και ελέγχου που αναπτύχθηκε κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί μια ευέλικτη πλατφόρμα διασύνδεσης και ελέγχου των απαραίτητων συστημάτων που απαιτούνται για την λειτουργία ενός πρωτότυπου οχήματος κυψέλης υδρογόνου. Ωστόσο, περισσότερες δοκιμές αλλά και αλλαγές που προστατεύουν το σύστημα από αστοχίες είναι απαραίτητες για να διασφαλίσουν την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες.

## 7. Βιβλιογραφία

---

- [1] Tabbi Wilberforce, Mohammad Ali Abdelkareem A.G.Olabi, "Fuel cell application in the automotive industry and future perspective," *Energy*, vol. 214, 2021, pp. 1-18.
- [2] Gianfranco Pistoia, *ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES*, Elsevier, 2010.
- [3] Dimitris Ipsakis, Panos Seferlis, Stella Bezergianni, Simira Papadopoulou, Spyros Voutetakis, Chrysovalantou Ziogou, "Optimal production of renewable hydrogen based on an efficient energy management strategy," *Energy*, vol. 55, 2013, pp. 58-67.
- [4] Yinghong Wu, Bo Li, Tiande Mo, Yu Li, Shien-Ping Feng, Jingkui Qu, Paul K. Chu Yang Luo, "Development and application of fuel cells in the automobile industry," *Journal of Energy Storage*, vol. 42, 2021, pp.1-32.
- [5] (2021) TUCer Team Website. [Online]. <https://www.tucer.tuc.gr/el/archiki>
- [6] Shell. (2021) Shell Eco Marathon Website. [Online]. <https://www.makethefuture.shell/en-gb>
- [7] FCgen®-H2PM 1.7 kW/48 V. [Online]. [https://www.ballard.com/docs/default-source/backup-power-documents/fcgen-h2pm-1\\_7-data-sheet.pdf?sfvrsn=4f37dd80\\_2](https://www.ballard.com/docs/default-source/backup-power-documents/fcgen-h2pm-1_7-data-sheet.pdf?sfvrsn=4f37dd80_2)
- [8] J. Van Mierlo, Y. Cheng, J. Timmermans and P. Van den Bossche, "Comparison of Fuel Cell Hybrid Propulsion Topologies with Super-Capacitor," 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, pp. 501-505.
- [9] Suk-Won Cha, Whitney G. Colella, Fritz B. Prinz Ryan O'Hayre, *Fuel Cell Fundamentals*, John Wiley & Sons Inc, 2016.
- [10] FCgen®-1020ACS. [Online]. [https://www.ballard.com/about-ballard/publication\\_library/product-specification-sheets/fcgen1020-spec-sheet](https://www.ballard.com/about-ballard/publication_library/product-specification-sheets/fcgen1020-spec-sheet)
- [11] Κώστας Καλαϊτζάκης, Ευτύχης Κουτρούλης, *ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ*. Χανιά: Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2010.
- [12] Swain, M., Filoso, P., Grilliot, E., & Swain, M. , "Hydrogen leakage into simple geometric enclosures," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, 2003, pp. 229-248.

- [13] V. Oliveira, "Using a reed switch to measure the angular speed of a fidget spinner," , Physics Education, vol. 55, 2020, pp. 1-5.
- [14] Kasab, Chopade, N. B., & Bhagat, S. . "Implementation of Throttle Position Sensor for Angular movement in Automobiles," 5th International Conference On Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBE), 2019, pp. 1-4.
- [15] R. S. Khandpur, Printed Circuit Boards : Design, Fabrication, Assembly and Testing, Tata McGraw-Hill Education, 2005.
- [16] Gerald Coley, BeagleBone Black System Reference Manual Revision A5.2, Beaglebone ed., 2013.
- [17] R. M. Marston, Optoelectronics Circuits Manual-Newnes, William Heinemann Ltd, 1988.
- [18] Kobold: Heavy Duty Industrial Piezoresistive Pressure Transducer <https://www.kobold.com/uploads/files/sen-3276-3277-gb-pressure.pdf>
- [19] KiCAD Org. [Online]. <https://www.kicad.org/>
- [20] Λουκάς Κουτσούμπας, "Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου κυψέλης καυσίμου για ηλεκτρικά οχήματα", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2021 <https://doi.org/10.26233/heallink.tuc.90531>