

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών



Σχεδίαση συστήματος ανάκτησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά την πέδηση ηλεκτρικών οχημάτων

Γιάννης Τζώρτζης

Τριμελής επιτροπή: Ευτύχης Κουτρούλης (Επικ. Καθηγητής), Κωνσταντίνος
Καλαϊτζάκης (Καθηγητής), Νικόλαος Τσουρβελούδης (Καθηγητής)

Απρίλιος 2016

Πρόλογος

Η ομάδα *TUCER* (*TUC ECO RACER*) του Πολυτεχνείου Κρήτης σχεδιάζει και κατασκευάζει πρωτότυπα ηλεκτρικά οχήματα πόλης, χαμηλής κατανάλωσης. Τα οχήματα αυτά χρησιμοποιούν ως κύρια πηγή ενέργειας μία κυψέλη υδρογόνου, από την οποία παράγεται η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Το πιο πρόσφατο όχημα που έχει κατασκευαστεί είναι το *TUCer-14* και αποτελεί πλατφόρμα πειραματισμού για προβλήματα που σχετίζονται με την επίτευξη χαμηλής κατανάλωσης, την οδηγική ασφάλεια και την αυτόνομη πλοήγηση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται ένα σύστημα ανάκτησης ενέργειας, το οποίο σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για το παραπάνω όχημα και εφαρμόστηκε σε αυτό με στόχο την επίτευξη χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας.

Η παρούσα εργασία δεν θα είχε πραγματοποιηθεί χωρίς την υποστήριξη, την βοήθεια, την καθοδήγηση και γενικά την συμμετοχή κάποιων ατόμων, για τα οποία θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου.

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Μαρία και Νίκο, για την στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια της πορείας μου ως φοιτητή, για την ψυχολογική και υλική βοήθεια καθώς και για την συνολική καθοδήγηση στη ζωή. Δεν θα μπορούσα να μην συμπεριλάβω τα αδέρφια μου, Γιώργο, Αθηνά, Μάνο και τις οικογένειες τους, για όλα όσα μου έχουν προσφέρει. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον επιβλέποντα μου κ. Ευτύχιο Κουτρούλη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής ΗΜΜΥ, για την καθοδήγηση του στα πλαίσια της εργασίας, την συνεχή μας επικοινωνία και γενικά για την εξαιρετική συνεργασία μας.

Τον κ. Νικόλαο Τσουρβελούδη, Καθηγητή της Σχολής ΜΠΔ, για την συμμετοχή μου στην ομάδα και την άψογη συνεργασία μας.

Τον κ. Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη, Καθηγητή της Σχολής ΗΜΜΥ, για την συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή για την αξιολόγηση της παρούσας εργασίας.

Τον κ. Πιπερίδη Σάββα, μέλος της κατηγορίας του Ε.ΔΙ.Π της Σχολής ΜΠΔ, για τον χρόνο που αφιέρωσε και την καθοδήγηση του σε πρακτικά μέρη της εργασίας καθώς επίσης για την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη την διάρκεια της πορείας μου στην ομάδα.

Τον κ. Σπανουδάκη Πολυχρόνη, μέλος της κατηγορίας του Ε.ΔΙ.Π της Σχολής ΜΠΔ και επικεφαλής της ερευνητικής ομάδας *TUCER*, για την συμμετοχή μου στην ομάδα, την καθοδήγηση και την τέλεια συνεργασία μας.

Τον Αλέξανδρο Αμαργιανό, μεταπτυχιακό φοιτητή της σχολής ΜΠΔ, για την άψογη συνεργασία μας, για την πολύτιμη βοήθεια του στην παρούσα εργασία και γενικά για την συναδελφική μας πορεία στην ομάδα.

Όλα τα μέλη της ομάδας, καθένα από τα οποία βοήθησε με τον τρόπο του για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Και φυσικά όλους τους φίλους μου.

Αφιερώνεται στην Ιωάννα...

Περίληψη

Για την επιβράδυνση ενός οχήματος, είτε ηλεκτρικού είτε όχι, χρησιμοποιούνται μηχανικά φρένα ώστε το όχημα τελικά να ακινητοποιηθεί ή να αποκτήσει μικρότερη ταχύτητα από την αρχική. Κατά την διαδικασία αυτή (πέδηση) η κινητική ενέργεια του οχήματος μετατρέπεται μέσω της τριβής σε θερμότητα που απελευθερώνεται στο περιβάλλον. Επομένως αυτή η ενέργεια ουσιαστικά δεν χρησιμοποιείται και επιπλέον επιβαρύνει το περιβάλλον.

Την τελευταία δεκαετία όμως έχει αναπτυχθεί η ιδέα μιας διαφορετικής, ωφέλιμης μετατροπής της κινητικής ενέργειας που διαθέτει το όχημα κατά την πέδηση, ώστε να επιτυγχάνεται επαναχρησιμοποίηση της. Η αρχή αυτή ονομάζεται Αναγεννητική Πέδηση (*Regenerative braking*) και σκοπός της είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του οχήματος σε ηλεκτρική, χρησιμοποιώντας κάποιο μέσο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (όπως μπαταρίες, υπερπυκνωτές κτλ). Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα από το όχημα για ένα μέρος της κίνησης του.

Το *TUCer-14* είναι το πιο πρόσφατο πρωτότυπο όχημα που έχει κατασκευάσει η ομάδα *TUCer* και αποτελεί μία ιδανική πλατφόρμα πειραματισμού για τεχνολογίες όπως αυτή που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία. Το όχημα κινείται με την βοήθεια ενός τριφασικού ηλεκτροκινητήρα που τροφοδοτείται από την κυψέλη υδρογόνου μέσω ενός ελεγκτή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της κυψέλης σε εναλλασσόμενο. Κατά την διαδικασία της πέδησης ο ηλεκτροκινητήρας δεν απαιτεί αλλά αντίθετα προσφέρει ενέργεια η οποία είναι ηλεκτρική και προέρχεται από την κινητική ενέργεια του οχήματος. Σε αυτή τη φάση ο ελεγκτής λειτουργεί ως ανορθωτής και μετατρέπει το τριφασικό ρεύμα του ηλεκτροκινητήρα σε συνεχές.

Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία παρεμβάλλεται ανάμεσα στην κυψέλη υδρογόνου και στον ελεγκτή του ηλεκτροκινητήρα. Όταν ο τελευταίος λειτουργεί ως γεννήτρια τότε η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται, αποθηκεύεται σε υπερπυκνωτές. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το σύστημα αποφασίζει αν ο ηλεκτροκινητήρας θα τροφοδοτηθεί από την κυψέλη του υδρογόνου, είτε από τους υπερπυκνωτές στους οποίους έχει αποθηκευτεί η ανακτημένη ενέργεια.

Σύμφωνα με τα στοιχεία από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, η προσθήκη του συστήματος ανάκτησης ενέργειας μείωσε την κατανάλωση ενέργειας του οχήματος κατά περίπου 16 %.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε τη βάση δημοσίευσης που παρουσιάστηκε στο διεθνές συνέδριο **23rd Mediterranean Conference on Control and Automation**.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	5
1 Εισαγωγή	7
2 Τοπολογίες Συστημάτων Ανάκτησης Ενέργειας	11
2.1 Υβριδικό σύστημα με κυψέλη υδρογόνου και μπαταρία	11
2.2 Διάταξη ανάκτησης ενέργειας με χρήση σφονδύλου	12
2.3 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση υπεραγωγίων πηνίων	12
2.4 Διάταξη ανάκτησης ενέργειας με χρήση υπερπυκνωτών	13
2.5 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση υπερπυκνωτών και μπαταριών	13
2.6 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση μπαταριών, σφονδύλου και επιπλέον ηλεκτροκινητήρα	14
3 Η Προτεινόμενη Τοπολογία Ανάκτησης Ενέργειας	16
3.1 Παρουσίαση της τοπολογίας του συστήματος	16
3.2 Κυψέλη Υδρογόνου	18
3.3 Ηλεκτροκινητήρας	18
3.4 Ελεγκτής του ηλεκτροκινητήρα	19
3.5 Υπερπυκνωτές	19
3.5.1 Σύνθεση της συστοιχίας των υπερπυκνωτών	21
3.6 Σύστημα Φόρτισης Υπερπυκνωτών	22
3.7 Ηλεκτρονικοί Διακόπτες	23
3.8 Μονάδα ελέγχου του συστήματος	24
4 Σχεδίαση και Κατασκευή του Συστήματος	26
4.1 Το κύκλωμα φόρτισης	26
4.2 Το κύκλωμα ελέγχου	26
4.2.1 Τροφοδοσία του συστήματος	28
4.2.2 Οδήγηση των διακοπών ελέγχου	28
4.2.3 Συγκριτική τάσης	28
5 Έλεγχος του Συστήματος	31
5.1 Η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων	32
5.2 Παραγωγή του πηγαίου κώδικα.	34
5.2.1 Επικοινωνία του λογισμικού με το υλικό	34
5.2.2 Βιβλιοθήκη για το χειρισμό των θυρών εισόδου/εξόδου γενικής χρήσης GPIOs	38

5.2.3	Υλοποίηση του αλγορίθμου	41
5.2.4	Βοηθητική βιβλιοθήκη του συστήματος	43
5.2.5	Η κύρια συνάρτηση του προγράμματος	44
5.2.6	Διαχειριστής σήματος τερματισμού	46
5.2.7	Διαδικασία αρχικοποίησης των θυρών εισόδου εξόδου γενικής χρήσης	47
5.2.8	Διαδικασία αποδέσμευσης των ψηφιακών θυρών	48
5.2.9	Ελεγχόμενη αλλαγή κατάστασης ψηφιακής θύρας	48
5.2.10	Διαδικασία αρχικοποίησης του συστήματος	49
5.2.11	Διαδικασία φόρτισης υπερπυκνωτών	51
5.2.12	Εκφόρτιση υπερπυκνωτών	53
5.2.13	Κίνηση με χρήση της κυψέλης υδρογόνου	55
6	Πειραματικά Αποτελέσματα	58
6.0.1	Τελική Δοκιμή	59
7	Συμπεράσματα	65
	Βιβλιογραφία	66
8	Παράρτημα	69
	Κατάλογος Εικόνων	69
	Κατάλογος Εικόνων 2	70
	Κατάλογος Πινάκων	71

Εισαγωγή

Στις μέρες μας, περισσότερο από ποτέ, αποδεικνύεται ότι η χρήση του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και γενικά των ορυκτών καυσίμων σε οχήματα που κινούνται με μηχανές εσωτερικής καύσης επιφέρει πολλά αρνητικά σε αντίθεση με τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας για την κίνηση των ηλεκτρικών οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα:

1. παγκοσμίως, τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων εξαντλούνται με γρήγορους ρυθμούς. Από την άλλη μεριά η ηλεκτρική ενέργεια, που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [1], [2] και αποθηκεύεται σε διάφορα μέσα όπως το υδρογόνο και οι μπαταρίες, αποτελεί μία πολύ καλή λύση για το μέλλον στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Το τελευταίο προκύπτει από το γεγονός ότι αυτό το είδος της ενέργειας προσφέρεται για πολύ περισσότερα χρόνια στο μέλλον και τείνει να γίνει πιο προσιτή από οικονομική άποψη. Επίσης η χρήση της ενέργειας αυτής δεν προσφέρει εκπομπές ρύπων και επομένως είναι φιλική προς το περιβάλλον.
2. υπάρχουν γεωπολιτικοί και οικονομικοί παράγοντες που θέτουν το ορυκτά καύσιμα απρόσιτα από πολλές πλευρές, κυρίως λόγω της ύπαρξης τους σε συγκεκριμένες χώρες στον κόσμο. Αντιθέτως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι διαθέσιμες στα περισσότερα σημεία του κόσμου.
3. οι μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK) προκαλούν ηχορύπανση ενώ οι ηλεκτροκινητήρες είναι αθόρυβοι. Επίσης οι MEK μολύνουν την ατμόσφαιρα με καυσαέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα συνεισφέροντας στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Επιπλέον οι τελευταίες χρειάζονται συχνή συντήρηση με την χρήση λιπαντικών, τα οποία πρέπει να ανακυκλωθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα. Από την άλλη πλευρά οι ηλεκτροκινητήρες δεν παράγουν κάποιο είδος επιβλαβών αερίων. Επίσης η απόδοση των ηλεκτροκινητήρων είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των MEK και πιο συγκεκριμένα η πρώτη κινείται γύρω στο 95% ενώ η δεύτερη γύρω στο 30% [3].

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω τα οχήματα που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια για την κίνηση τους, έχουν σημαντικό προβάδισμα σε σχέση με εκείνα που διαθέτουν μηχανές εσωτερικής καύσης. Παρόλα αυτά τα πρώτα έχουν τη δυνατότητα να γίνουν ακόμα πιο αποδοτικά και φιλικά προς το περιβάλλον, με την χρήση διάφορων τεχνικών υβριδοποίησης.

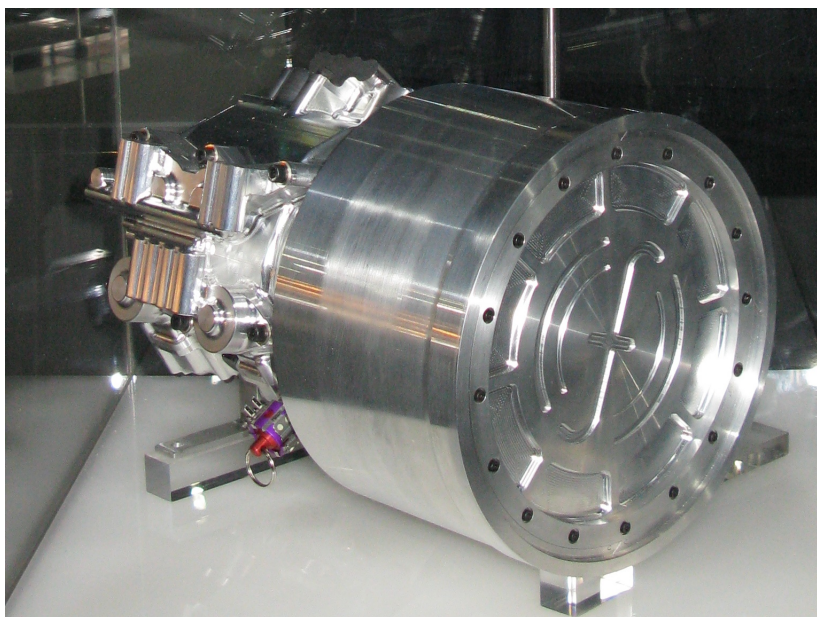
Τα υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν δύο ή περισσότερες πηγές ενέργειας για την κίνηση τους. Ιδιαίτερα στα ηλεκτρικά υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούνται συνήθως δύο πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, από τις οποίες η μία είναι η κύρια και η άλλη είναι η δευτερεύουσα για υποβοήθηση. Πλέον είναι αρκετά διαδεδομένη η τεχνική της ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση έτσι ώστε η ενέργεια αυτή να αποθηκεύεται στην δευτερεύουσα πηγή, η οποία με την λειτουργία της θα βοηθήσει στην μεγιστοποίηση της απόδοσης και την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης του οχήματος. Το αρνητικό της κατασκευής ενός υβριδικού αυτοκινήτου είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα, το οποίο βέβαια επικαλύπτεται από τα αρκετά θετικά αποτελέσματα που προσφέρει, μερικά από τα οποία αναδεικνύονται και στην παρούσα εργασία.

Σημαντικό μέρος στην διαδικασία ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση, αποτελούν τα μέσα αποθήκευσης της ενέργειας. Τέτοια είναι οι μπαταρίες [4] ή οι υπερπυκνωτές[5] που αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια, είναι τα μηχανικά που αποθηκεύουν κινητική ενέργεια, όπως ο σφόνδυλος (flywheel) [6, 7], και άλλα που αποθηκεύουν την ανακτούμενη ενέργεια υπό μορφή μαγνητικού πεδίου[7].

Τα οχήματα που κινούνται με μπαταρίες συνιστούν μία μεγάλη ομάδα ηλεκτρικών οχημάτων και μάλιστα την πιο διαδεδομένη. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στην μεγάλη αυτονομία που προσφέρουν οι μπαταρίες, καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, σε ένα σύστημα ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση η μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας, από τον ηλεκτροκινητήρα στο μέσο αποθήκευσης, είναι εκρηκτική και επαναλαμβανόμενη. Το γεγονός αυτό προκαλεί καταπόνηση των μπαταριών όταν λειτουργούν ως αποθηκευτικό μέσο κατά την διάρκεια της ηλεκτρικής πέδησης. Στην δημοσίευση [5] υποστηρίζεται ότι η επαναλαμβανόμενη φόρτιση ή αποφόρτιση των μπαταριών, και ιδιαίτερα υπό συνθήκες υψηλού φορτίου, προκαλεί την μείωση του κύκλου ζωής τους. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος (lead-acid) καταστρέφονται γρηγορότερα όταν λειτουργούν σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης [5, 8]. Επίσης στις εργασίες [5, 9] φαίνεται ότι ο κύκλος ζωής των μπαταριών νικελίου-μετάλλου (NiMH) μειώνεται κατά 200-300 κύκλους όταν αποφορτίζονται σε μεγάλα φορτία. Στις μπαταρίες ιόντων λιθίου (lithium-ion) παρατηρείται ένα φαινόμενο γήρανσης ιδιαίτερα σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και φορτίου με χαμηλό επίπεδο φόρτισης[10].

Σε συστήματα ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση χρησιμοποιείται επίσης ο σφόνδυλος (ή flywheel) (Εικόνα 1.1), ο οποίος επιταχύνεται από ένα βοηθητικό ηλεκτροκινητήρα του οχήματος κατά την διαδικασία της πέδησης και αποκτά γωνιακή ταχύτητα. Όταν ο σφόνδυλος αποκτήσει αρκετά μεγάλο αριθμό στροφών και το σύστημα χρειάζεται την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον σφόνδυλο, τότε ο παραπάνω ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί σαν γεννήτρια και παρέχει την επιθυμητή ηλεκτρική ενέργεια στον πρωτεύοντα ηλεκτροκινητήρα. Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας με τη χρήση σφονδύλου χαρακτηρίζεται από υψηλή πυκνότητα ενέργειας (100–130 W h/kg), μεγάλη πυκνότητα ισχύος και υψηλή απόδοση που φτάνει το 90% [7]. Παρόλα αυτά η τεχνική αυτή παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα [12, 13, 14]:

1. σημαντική απώλεια ενέργειας κυρίως λόγω τριβών και μεγάλης αναμονής, κατά την οποία δεν χρησιμοποιείται ο σφόνδυλος και η ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα.
2. παρουσιάζει προβλήματα αξιοπιστίας, γεγονός που οφείλεται σε τριβές και γενικά σε ισχυρές δυνάμεις που ασκούνται στα μηχανικά μέρη.



Εικόνα 1.1: Σφόνδυλος που χρησιμοποιείται σε συστήματα ανάκτησης ενέργειας [11].

3. η ενέργεια που αποθηκεύεται στον σφόνδυλο εξαρτάται από το βάρος του και επομένως για να αναχτάται σημαντικό ποσό ενέργειας, ο σφόνδυλος πρέπει να έχει σχετικά μεγάλο βάρος.

Η τεχνική της υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης αποθηκεύει την ηλεκτρική ενέργεια, που παράγεται από τον ηλεκτροκινητήρα κατά την διαδικασία της επιβράδυνσης, υπό μορφή μαγνητικού πεδίου με την χρήση υπεραγώγιμων πηνίων. Κατά την διαδικασία της αποφόρτισης τα πηνία αυτά φορτίζουν πυκνωτές, οι οποίοι με την σειρά τους παρέχουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια στο σύστημα. Θεωρητικά η τεχνική αυτή μπορεί να έχει απόδοση μεγαλύτερη από 95% και τα υπεραγώγιμα πηνία θεωρητικά μπορούν να φορτιστούν και να αποφορτίσουν άπειρες φορές [15, 16]. Τα αρνητικά της μεθόδου αυτής είναι κυρίως το μεγάλο κόστος και η μεγάλη πολυπλοκότητα για εφαρμογές μικρής διάρκειας.

Οι υπερπυκνωτές (supercapacitors ή ultracapacitors) (Εικόνα 1.2) είναι πυκνωτές με πολύ μεγάλη χωρητικότητα και η χρήση τους είναι πολύ συχνή σε συστήματα ανάκτησης ενέργειας. Χρησιμοποιούνται κυρίως είτε σαν αποθηκευτικό μέσο για την ηλεκτρική ενέργεια που αναχτάται, είτε σαν δευτερεύουσα πηγή ενέργειας όταν είναι φορτισμένοι. Οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν πολλά θετικά στοιχεία σε εφαρμογές όπως η ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση, όπου η ισχύς είναι εκρηκτική:

1. έχουν πολύ μικρό βάρος καθώς δεν περιέχουν χημικά στοιχεία όπως οι μπαταρίες,
2. έχουν πολύ μικρή εσωτερική αντίσταση και έτσι λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, γεγονός που αυξάνει τον κύκλο ζωής τους,
3. έχουν υψηλή αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής,
4. παρόλο που χαρακτηρίζονται από μικρή πυκνότητα ενέργειας, προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ισχύος και γι' αυτό είναι ιδανικοί ως δευτερεύουσα πηγή ενέργειας.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω σχετικά με τα μέσα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, επιλέχθηκαν τελικά οι υπερπυκνωτές για την υλοποίηση του συστήματος. Οι μπαταρίες



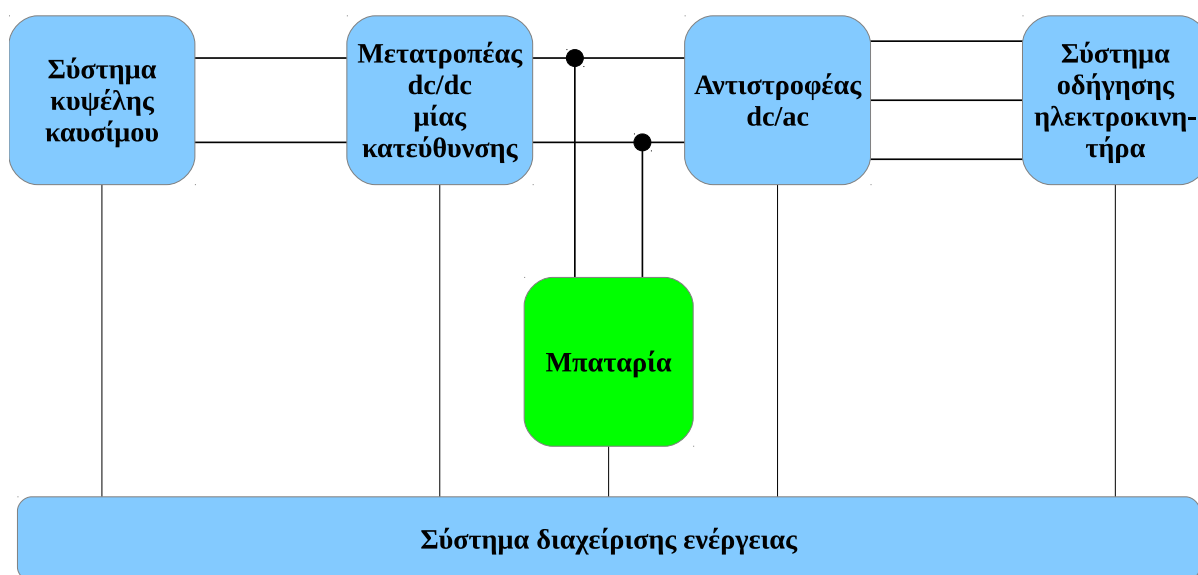
Εικόνα 1.2: Υπερπυκνωτές

απορρίφθηκαν κυρίως λόγω του βάρους τους και του αργού ρυθμού φόρτισης. Η ιδέα του σφονδύλου δεν θεωρήθηκε εφικτή για την τρέχουσα κατασκευή του οχήματος λόγω των ισχυρών δυνάμεων που ασκούνται στα διάφορα μηχανικά μέρη. Η υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση αποτελεί μία καλή λύση αλλά δυστυχώς έχει υψηλό κόστος και μεγάλη πολυπλοκότητα. Αντιθέτως οι υπερπυκνωτές έχουν αρκετά μικρό βάρος, είναι ιδανικοί για εφαρμογές μικρής διάρκειας και υψηλής ισχύος και επίσης δεν είναι απρόσιτοι σε κόστος.

Τοπολογίες Συστημάτων Ανάκτησης Ενέργειας

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τοπολογίες συστημάτων ανάκτησης ενέργειας που έχουν υλοποιηθεί και χρησιμοποιούνται σε διάφορους τύπους οχημάτων.

2.1 Υβριδικό σύστημα με κυψέλη υδρογόνου και μπαταρία

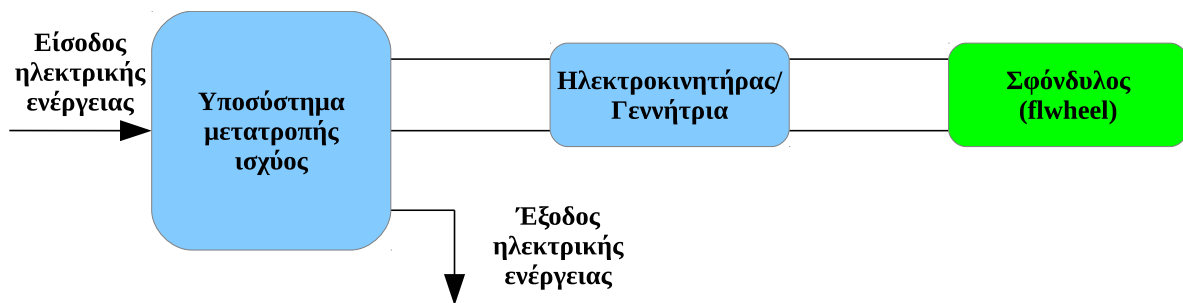


Εικόνα 2.1: Τοπολογία που περιλαμβάνει μία κυψέλη υδρογόνου και μπαταρίες.

Στην τοπολογία που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1, η βασική πηγή ενέργειας είναι η κυψέλη υδρογόνου ενώ η δευτερεύουσα πηγή είναι η μπαταρία. Η διάταξη αυτή είναι μία από τις πιο δεδομένες στην κατηγορία των ηλεκτρικών, υβριδικών οχημάτων. Όπως αναφέρεται στην εργασία [17], η κυψέλη υδρογόνου χρησιμοποιείται για την κίνηση του οχήματος, ενώ η μπαταρία παράλληλα

βοηθάει κυρίως για την εκκίνηση του συστήματος και γενικότερα για την καλύτερη αίσθηση επιτάχυνσης του οχήματος έτσι ώστε να επιτευχθεί η απόκριση που προσφέρει ένα όχημα με MEK. Επιπλέον η μπαταρία αποτελεί μέσο αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που ανακτάται κατά την πέδηση του οχήματος.

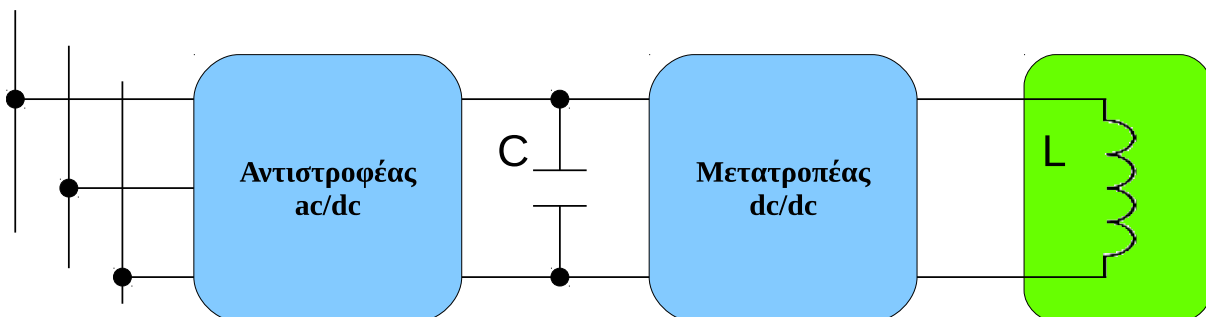
2.2 Διάταξη ανάκτησης ενέργειας με χρήση σφονδύλου



Εικόνα 2.2: Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με την χρήση σφονδύλου.

Στη δημοσίευση [7] περιγράφεται ένα σύστημα ανάκτησης ενέργειας με την χρήση σφονδύλου, χωρίς να αναφέρεται κάποια κύρια πηγή ενέργειας (Εικόνα 2.2). Ο ηλεκτροκινητήρας/γεννήτρια της Εικόνας 2.2 είναι βοηθητικός και χρησιμοποιείται είτε για να περιστρέψει τον σφόνδυλο, είτε για να μετατρέψει την κινητική ενέργεια του σφονδύλου σε ηλεκτρική. Στην διαδικασία της πέδησης ο βασικός ηλεκτροκινητήρας του οχήματος λειτουργεί σαν γεννήτρια και με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει τροφοδοτείται ο βοηθητικός ηλεκτροκινητήρας. Ο τελευταίος με τη σειρά του περιστρέφει τον σφόνδυλο, ο οποίος αποκτά μεγάλο αριθμό στροφών. Όταν το σύστημα ελέγχου του οχήματος αποφασίσει να εκμεταλλευτεί την αποθηκευμένη ενέργεια, τότε ο βοηθητικός ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί σαν γεννήτρια και μετατρέπει την κινητική ενέργεια του σφονδύλου σε ηλεκτρική προσφέροντας την στο υποσύστημα μετατροπής ισχύος.

2.3 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση υπεραγωγίων πηνίων

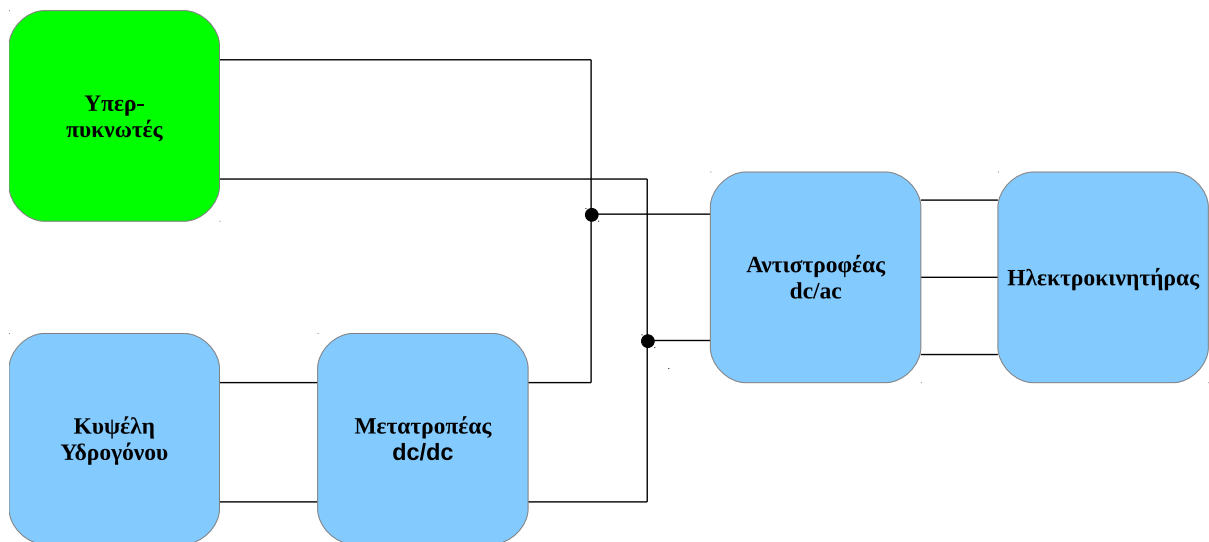


Εικόνα 2.3: Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με την χρήση υπεραγωγίσιμης μαγνητικής αποθήκευσης.

Η τοπολογία που παρουσιάζεται σε αυτή την ενότητα είναι αρκετά απλή και περιλαμβάνει ένα αντιστροφέα εναλλασσόμενου σε συνεχές ρεύμα, ένα μετατροπέα συνεχούς ρεύματος και ένα υπεραγώγιμο πηνίο[7]. Κατά την πέδηση, ο τριφασικός ηλεκτροκινητήρας του οχήματος λειτουργεί σαν

γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος καθώς μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική. Στη συνέχεια ο αντιστροφέας μετατρέπει αυτό το ρεύμα σε συνεχές, ενώ ο μετατροπέας dc/dc προσαρμόζει την διαφορά δυναμικού ώστε να είναι μέσα στα πλαίσια των προδιαγραφών του υπεραγωγίμου πηνίου (Εικόνα 2.3). Έτσι τελικά, το ηλεκτρικό ρεύμα που διαπερνάει το πηνίο μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια του πηνίου σε μαγνητική. Όταν λοιπόν το όχημα χρειαστεί αυτή την αποθηκευμένη ενέργεια, το υπεραγωγίμο πηνίο αποφορτίζεται φορτίζοντας ένα πυκνωτή, ο οποίος με την σειρά του παρέχει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια.

2.4 Διάταξη ανάκτησης ενέργειας με χρήση υπερπυκνωτών

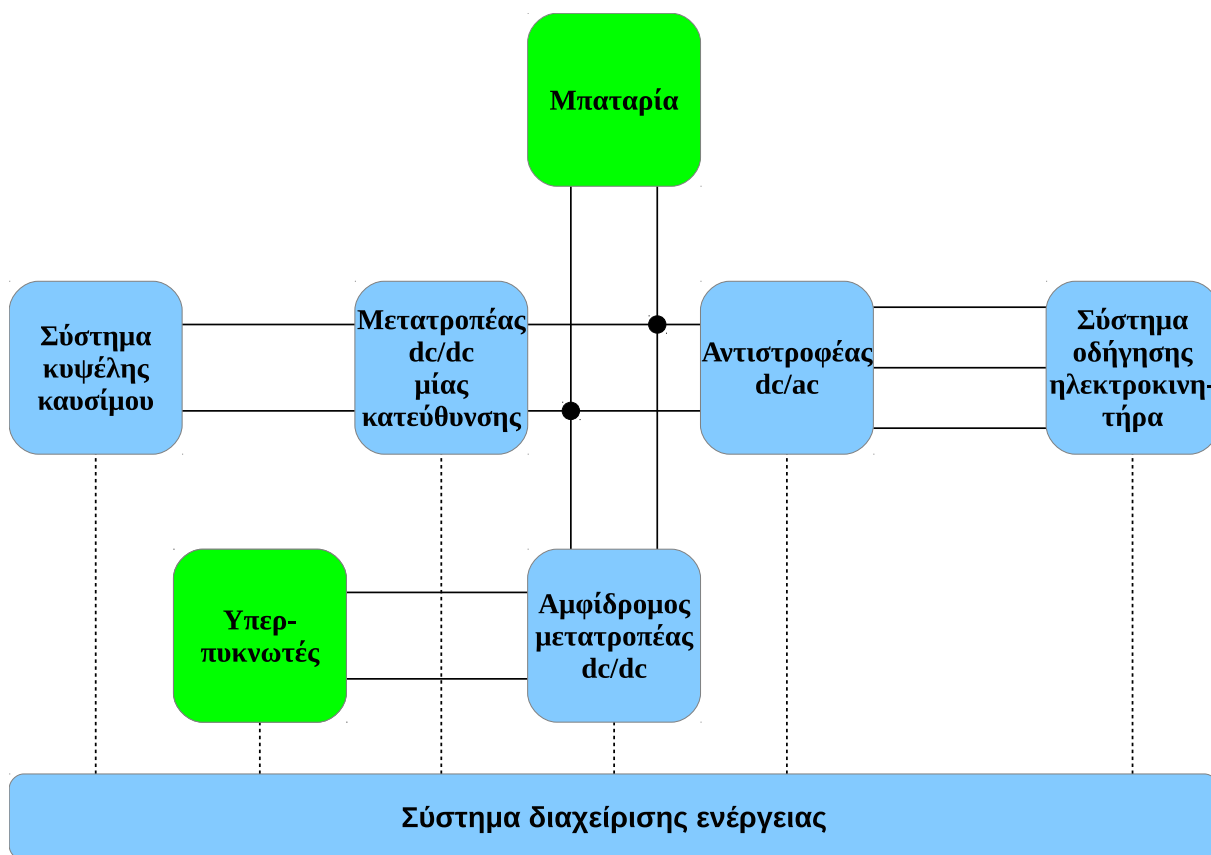


Εικόνα 2.4: Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με την χρήση υπερπυκνωτών.

Η τοπολογία που παρουσιάζεται στην εργασία [18] περιλαμβάνει δύο πηγές ενέργειας, μία κυψέλη υδρογόνου και υπερπυκνωτές. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4 το σύστημα υδρογόνου συνδέεται στον αντιστροφέα dc/ac μέσω ενός μετατροπέα dc/dc, ο οποίος προσαρμόζει την τάση εξόδου της κυψέλης υδρογόνου στην απαιτούμενη τάση εισόδου του αντιστροφέα. Αντίθετα, οι υπερπυκνωτές έχουν τέτοια συνδεσμολογία που τους επιτρέπει να συνδέονται άμεσα στον αντιστροφέα. Έτσι κατά την διαδικασία της πέδησης, οι υπερπυκνωτές φορτίζουν από το ρεύμα που προσφέρει ο αντιστροφέας dc/ac μετατρέποντας το εναλλασσόμενο ρεύμα του ηλεκτροκινητήρα σε συνεχές.

2.5 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση υπερπυκνωτών και μπαταριών

Αυτή η διάταξη (Εικόνα 2.5) αποτελεί ένα συνδυασμό των τοπολογιών 2.1 και 2.4 αφού περιλαμβάνει και υπερπυκνωτές και μπαταρίες. Αναφέρεται στην εργασία [7] και ουσιαστικά αποτελεί εξέλιξη της παραγράφου 2.1. Οι πυκνωτές δηλαδή έχουν προστεθεί για να υποβοηθήσουν το όλο σύστημα σε συνθήκες μεγάλου φορτίου, και ειδικά σε περιπτώσεις που η ζήτηση υψηλών ρευμάτων ή γενικά μεγάλης ισχύος είναι απότομη. Με αυτό τον τρόπο προστατεύονται και οι μπαταρίες και το σύστημα υδρογόνου κατά την διάρκεια της τροφοδότησης του αντιστροφέα και του ηλεκτροκινητήρα. Επιπλέον



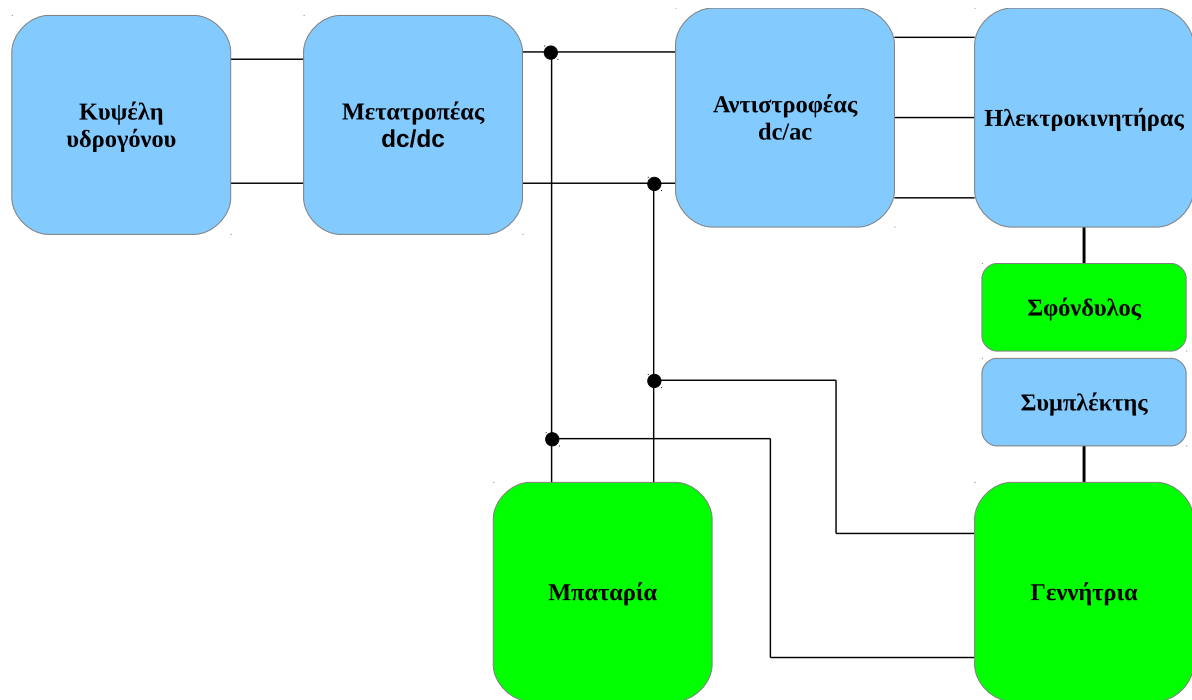
Εικόνα 2.5: Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με την χρήση υπερπυκνωτών και μπαταριών.

τα εκρηκτικά και υψηλά ρεύματα, κατά την διάρκεια της φόρτισης οδηγούνται κυρίως προς τους υπερπυκνωτές και έτσι αυξάνεται ο χρόνος ζωής των μπαταριών.

2.6 Ανάκτηση ενέργειας με χρήση μπαταριών, σφονδύλου και επιπλέον ηλεκτροκινητήρα

Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται μία τοπολογία που περιλαμβάνει ουσιαστικά τις διατάξεις των παραγράφων 2.1 και 2.2. Πρακτικά σε αυτή την τοπολογία, η βασική πηγή ενέργειας είναι μία κυψέλη καυσίμου, ενώ μπαταρίες χρησιμοποιούνται ως αποθηκευτικό μέσο ή ως δευτερεύουσα πηγή ενέργειας. Σε αντίθεση με την διάταξη της παραγράφου 2.1, εδώ η ανάκτηση ενέργειας γίνεται με την χρήση σφονδύλου και ενός δευτερεύοντα ηλεκτροκινητήρα που λειτουργεί ως γεννήτρια. Επιπλέον σε σύγκριση με την διάταξη της παραγράφου 2.2, εκτός από τον σφόνδυλο εδώ υπάρχουν δύο πηγές ενέργειας που μπορούν να τροφοδοτήσουν το σύστημα.

Σε γενικές γραμμές, οι παραπάνω τοπολογίες, περιγράφουν τα συστήματα που υπάρχουν και εφαρμόζονται σε οχήματα στην εποχή μας. Καθεμία από αυτές μπορεί να έχει διαφορετικές συμπεριφορές, αποδόσεις και αποτελεσματικότητα ανάλογα με τον τρόπο που θα χρησιμοποιηθούν τα διάφορα τμήματα της κάθε τοπολογίας. Σε αυτό το σημείο λοιπόν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο το αντικείμενο της μελέτης του αυτοματισμού, του συγχρονισμού και της λήψης αποφάσεων. Αυτό σημαίνει δηλαδή ότι ένα σύστημα ανάκτησης ενέργειας δεν επιβαρύνει τον οδηγό του οχήματος με επιπλέον απαιτήσεις αλλά λειτουργεί αυτόνομα. Επίσης, ο σωστός συγχρονισμός των επιμέρους



Εικόνα 2.6: Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με την χρήση μπαταριών, σφονδύλου και επιπλέον ηλεκτροκινητήρα.

συστημάτων εξασφαλίζει την σωστή λειτουργία τους καθώς και την ασφάλεια του οδηγού. Τέλος, η στοχευμένη λήψη αποφάσεων είναι καθοριστική στην απόδοση του τελικού συστήματος. Για παράδειγμα είναι σημαντική απόφαση το πότε θα χρησιμοποιηθεί η ανακτημένη ενέργεια, π.χ. σε υψηλή ταχύτητα ή σε χαμηλή. Κάτι τέτοιο μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην βελτίωση της κατανάλωσης ενέργειας. Όλα αυτά τα σημεία λοιπόν, απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή και μελέτη ώστε να συνδυαστούν άψογα για ένα λειτουργικό αποτέλεσμα.

Κεφάλαιο 3

Η Προτεινόμενη Τοπολογία Ανάκτησης Ενέργειας

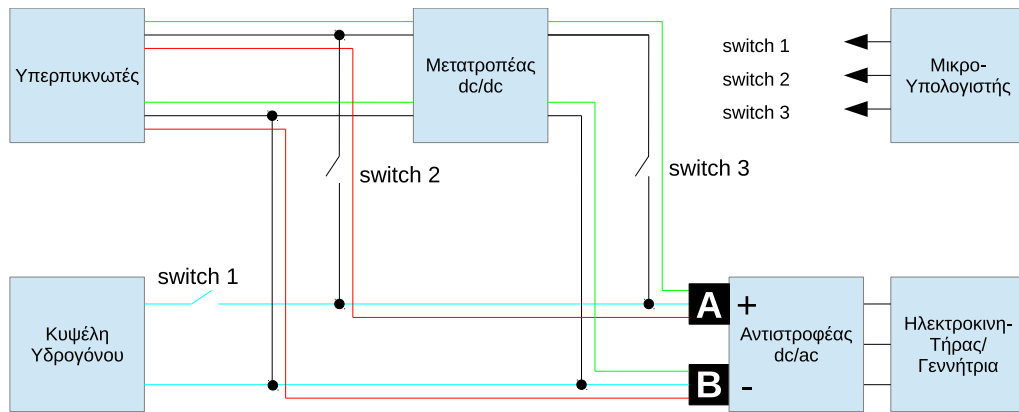
Στο σημείο αυτό, αναλύεται η προτεινόμενη τοπολογία του συστήματος ανάκτησης ενέργειας και παρουσιάζεται κάθε τμήμα της ξεχωριστά με μία αναλυτική περιγραφή να το ακολουθεί.



Εικόνα 3.1: Το όχημα του Πολυτεχνείου Κρήτης.

3.1 Παρουσίαση της τοπολογίας του συστήματος

Η τοπολογία που παρουσιάζεται σε αυτή τη διπλωματική εργασία φαίνεται στην Εικόνα 3.2. Η λειτουργία του συστήματος μπορεί να περιγραφεί από τρεις βασικές διαδικασίες:



Εικόνα 3.2: Η προτεινόμενη τοπολογία ανάκτησης ενέργειας.

1. τη κίνηση του οχήματος με την χρήση της κυψέλης υδρογόνου. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2, η διαδικασία αυτή είναι η γαλάζια γραμμή. Κατά την εφαρμογή της διαδικασίας αυτής, μόνο ο ηλεκτρονικός διακόπτης switch 1 άγει, επιτρέποντας στην κυψέλη υδρογόνου να τροφοδοτήσει τον ηλεκτροκινητήρα μέσω του ελεγκτή (αντιστροφέα dc/ac) .
2. την αποφόρτιση των υπερπυκνωτών, δηλαδή την κίνηση του οχήματος με την χρήση της ανακτημένης ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στους υπερπυκνωτές. Η διαδικασία αυτή αντιπροσωπεύεται από την κόκκινη γραμμή στην Εικόνα 3.2 και όπως μπορεί κανείς να δει, μόνο ο ηλεκτρονικός διακόπτης switch 2 άγει ώστε οι υπερπυκνωτές να τροφοδοτούν τον ηλεκτροκινητήρα μέσω του ελεγκτή.
3. την φόρτιση των υπερπυκνωτών μέσω του μετατροπέα dc/dc , η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2 με την πράσινη γραμμή. Σε αυτή την περίπτωση μόνο ο ηλεκτρονικός διακόπτης switch 3 άγει ώστε ο ηλεκτροκινητήρας να φορτίζει τους υπερπυκνωτές μέσω του ελεγκτή και του μετατροπέα.

Η τοπολογία που αναπτύχθηκε εμφανίζει αρκετές ιδιαιτερότητες σε σχέση με τις υπάρχουσες, που αξίζει να σημειωθούν. Πιο συγκεκριμένα:

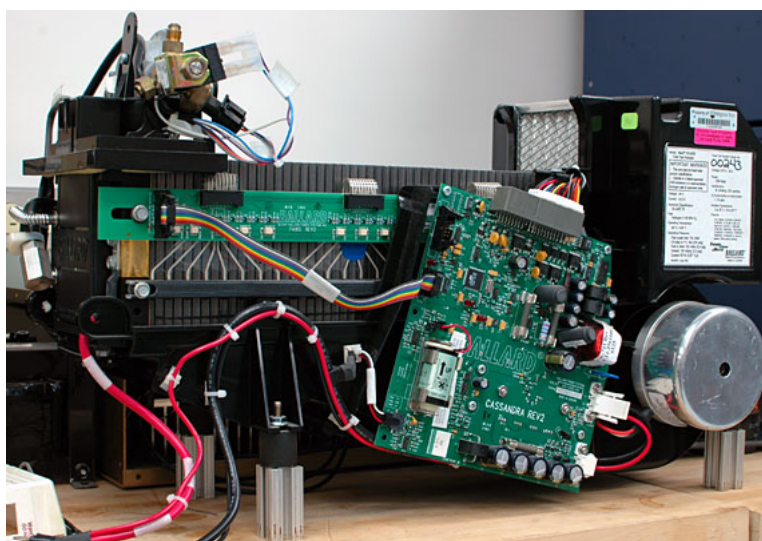
1. το σύστημα σχεδιάστηκε, υλοποιήθηκε και εφαρμόστηκε σε ένα πραγματικό πρωτότυπο όχημα, ενώ πολλές από τις παραπάνω τοπολογίες έχουν δοκιμαστεί μόνο στα πλαίσια προσομοιώσεων.
2. ο αλγόριθμος που εκτελείται από τον μικρο- υπολογιστή του συστήματος είναι απλός, παραμετροποιήσιμος και επεκτάσιμος. Προέκυψε από την σχεδίαση μία Μηχανής Πεπερασμένων Καταστάσεων (ΜΠΚ), γεγονός που συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση του, στην αποσφαλμάτωση, και στην επέκταση του.
3. το σύστημα αναπτύχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ανεξάρτητο τόσο σε επίπεδο υλικού, όσο και σε επίπεδο λογισμικού. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα οχήματα χωρίς να απαιτούνται αλλαγές σε αυτά.

3.2 Κυψέλη Υδρογόνου

Η κυψέλη υδρογόνου, που φαίνεται στην Εικόνα 3.3, αποτελεί προϊόν της εταιρείας Ballard και είναι ένα πλήρως αυτόνομο σύστημα υδρογόνου. Έχει κατασκευαστεί για εφαρμογές που απαιτούν φορητότητα και για περιπτώσεις που η χρήση μιας βοηθητικής πηγής ενέργειας είναι απαραίτητη. Διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- παρέχει έως και 1200 watts στην έξοδο,
- η τάση εξόδου είναι συνεχούς ρεύματος και δεν ρυθμίζεται, ωστόσο αυτή η τάση κυμαίνεται από 22 έως και 50 Volts ανάλογα με το φορτίο.

Η κυψέλη υδρογόνου είναι η βασική πηγή ενέργειας του οχήματος και τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα και τον ελεγκτή του που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

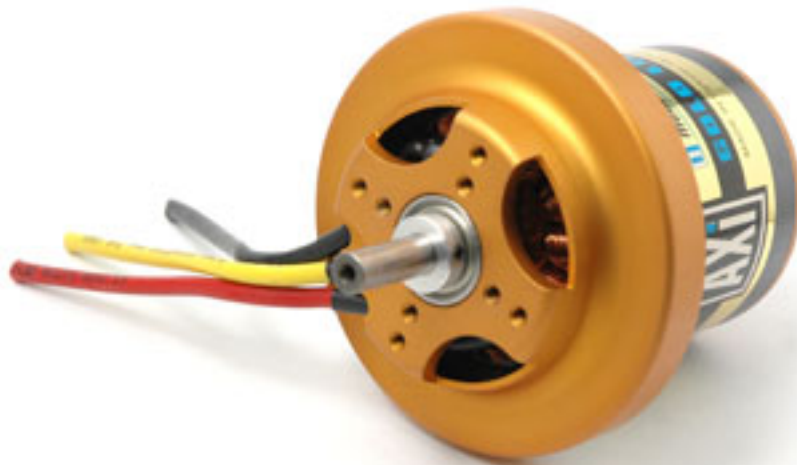


Εικόνα 3.3: Κυψέλη υδρογόνου.

3.3 Ηλεκτροκινητήρας

Ο ηλεκτροκινητήρας του οχήματος φαίνεται στην Εικόνα 3.4 είναι ο Axi 5360, είναι τριφασικός και χρησιμοποιείται κυρίως σε αεροπλάνα και ελικόπτερα μοντελισμού. Για το λόγο αυτό έχει πολύ μικρό βάρος και παράλληλα έχει όλη την απαιτούμενη ροπή που χρειάζεται το όχημα για να κινηθεί. Επιπλέον διαθέτει τα εξής σημαντικά χαρακτηριστικά:

- 120 RPM(περιστροφές το λεπτό) ανά Volt,
- μέγιστη απόδοση 94%,
- το βάρος του ανέρχεται σε μόλις 1350g,
- είναι μικρός σε μέγεθος 89x94 mm,
- διαθέτει μεγάλη χωρητικότητα ρεύματος 65 A/20 s.



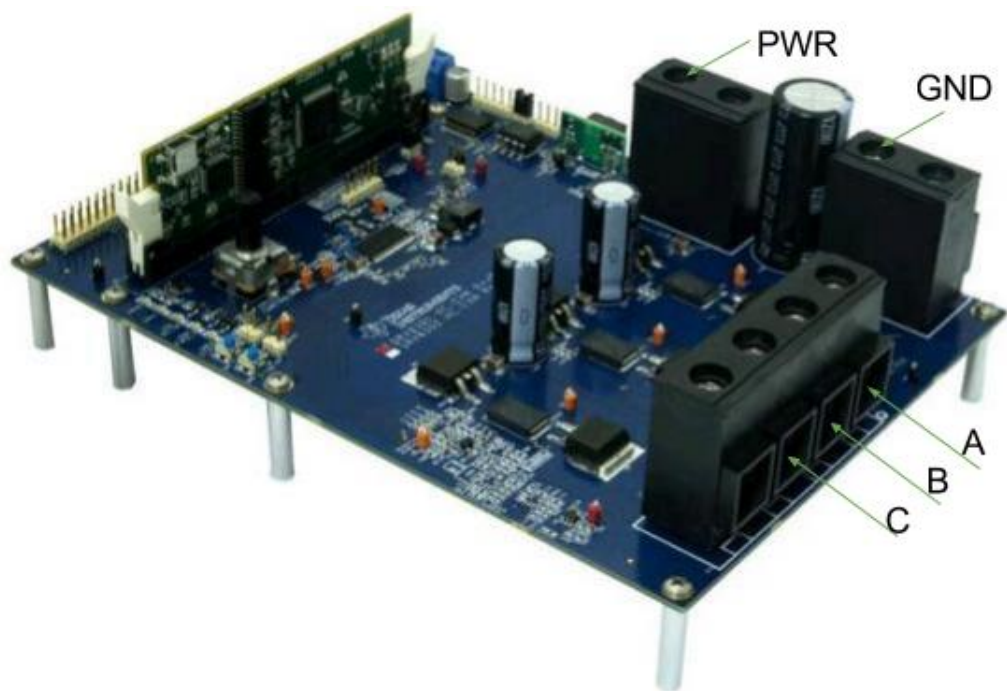
Εικόνα 3.4: Ο ηλεκτροκινητήρας του οχήματος.

3.4 Ελεγκτής του ηλεκτροκινητήρα

Το όχημα είναι εφοδιασμένο με τον μικρο- ελεγκτή drv8301 της Texas Instruments ο οποίος είναι ενσωματωμένος σε μία ολοκληρωμένη πλακέτα (Εικόνα 3.5) για την τροφοδοσία και την οδήγηση του ηλεκτροκινητήρα. Με εργαστηριακές δοκιμές παρατηρήθηκε ότι όταν ο ηλεκτροκινητήρας περιστρεφόταν από ένα δεύτερο μοτέρ, τότε τα MOSFET της πλακέτας του ελεγκτή πραγματοποιούν ανόρθωση της τάσης των τριών φάσεων του κινητήρα. Έτσι όταν ο ηλεκτροκινητήρας περιστρέφεται από τους τροχούς του οχήματος, τότε στα σημεία τροφοδοσίας του ελεγκτή PWR, GND (Εικόνα 3.5) παράγεται συνεχής τάση. Η μέγιστη τιμή αυτής της τάσης μετρήθηκε και είναι περίπου 30-33 Volts όταν το όχημα κινείται με 30-35 kmph , που αποτελεί την μέγιστη ταχύτητα του με τις τρέχουσες ρυθμίσεις. Η ανόρθωση της τάσης από την πλακέτα του ελεγκτή του ηλεκτροκινητήρα, ήταν σημαντική παρατήρηση για την εξέλιξη του συστήματος γιατί μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα αφού δεν χρειάζεται ένας επιπλέον ανορθωτής που θα έπρεπε να εφαρμόζεται στις φάσεις του ηλεκτροκινητήρα μόνο κατά την διάρκεια της φόρτισης, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση θα έπρεπε να απομονώνεται.

3.5 Υπερπυκνωτές

Όπως έχει ήδη αναφερθεί χρησιμοποιήθηκαν υπερπυκνωτές ως μέσο αποθήκευσης της ανακτώμενης ενέργειας αλλά και ως δευτερεύουσα πηγή ενέργειας. Οι κυριότεροι λόγοι από αυτούς που περιγράφηκαν στην Ενότητα 1, είναι το πολύ μικρό τους βάρος, η ανθεκτικότητά τους σε απότομες αλλαγές ρευμάτων και η άμεση παροχή ενέργειας. Σημαντικός στόχος της ομάδας TUCer είναι η μείωση του βάρους του οχήματος όσο το δυνατό περισσότερο. Επομένως η χρήση μίας μπαταρίας



Εικόνα 3.5: Ο ελεγκτής κινητήρων της Texas instruments.

ή ενός σφονδύλου δεν θα ήταν επιθυμητή. Επιπλέον για την φόρτιση κάποιας μπαταρίας θα απαιτούνταν ένα σύστημα που θα τη φορτίζει με συγκεκριμένο τρόπο, πράγμα που σημαίνει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα.



Εικόνα 3.6: Ο υπερπυκνωτής Maxwell BPAK0052 P015 b01.

Για τη σύνθεση της τελικής συστοιχίας των υπερπυκνωτών, χρησιμοποιήθηκαν έξι υπερπυκνωτές (Εικόνα 3.6) της εταιρείας Maxwell [19], οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι παράλληλα. Τα βασικά

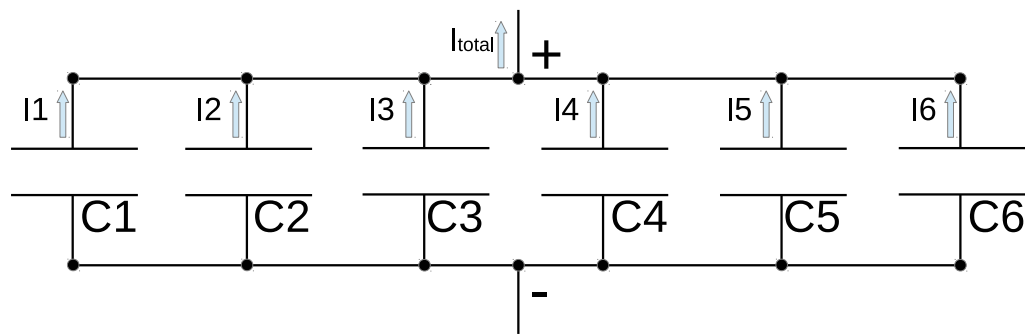
χαρακτηριστικά του κάθε υπερπυκνωτή παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 και προέρχονται από επίσημο υλικό της εταιρείας.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά του υπερπυκνωτή Maxwell BPAK0052 P015 b01.

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Χωρητικότητα	52F
Ονομαστική τάση	15Vdc
Εσωτερική αντίσταση	14.5mΩhm
Μέγιστο συνεχόμενο ρεύμα	20A
Μέγιστο στιγμιαίο ρεύμα (1s)	80A

3.5.1 Σύνθεση της συστοιχίας των υπερπυκνωτών

Στην Εικόνα 3.7 παρουσιάζεται η παράλληλη συνδεσμολογία των επιμέρους υπερπυκνωτών που συνιστούν την τελική συστοιχία. Στις εξισώσεις που ακολουθούν, οι υπερπυκνωτές της συστοιχίας αριθμούνται από τον αριθμό ένα (1) μέχρι τον αριθμό έξι (6) όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7.



Εικόνα 3.7: Υπερπυκνωτές σε παράλληλη σύνδεση.

Από το νόμο των ρευμάτων του Kirchhoff ισχύει ότι:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (3.2)$$

όπου I_1 - I_6 είναι τα ρεύματα που προέρχονται από τους υπερπυκνωτές με χωρητικότητες C_1 - C_6 αντίστοιχα και I_{total} το ρεύμα που προέρχεται από τη συνολική συστοιχία. Από την εργασία [20] χρησιμοποιούμε τις παρακάτω σχέσεις [(3.3), (3.4)] για να υπολογίσουμε τη συνολική χωρητικότητα και τη συνολική εσωτερική αντίσταση της συστοιχίας των υπερπυκνωτών:

$$C_{total} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \quad (3.3)$$

όπου C_1 - C_6 οι χωρητικότητες των έξι υπερπυκνωτών και C_{total} η χωρητικότητα της συνολικής συστοιχίας των υπερπυκνωτών..

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} \quad (3.4)$$

όπου R είναι η εσωτερική αντίσταση για κάθε υπερπυκνωτή και R_{total} η εσωτερική αντίσταση της τελικής συστοιχίας των υπερπυκνωτών.

Τέλος, από το νόμο των τάσεων του Kirchhoff

$$V_{total} = V1 = V2 = V3 = V4 = V5 = V6 \quad (3.5)$$

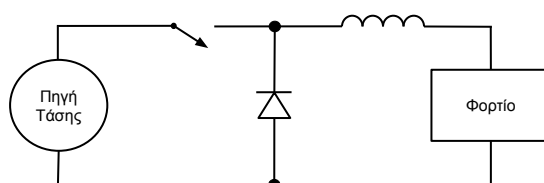
όπου V1-V6 οι τάσεις στα άκρα των υπερπυκνωτών με χωρητικότητες C1-C6 αντίστοιχα και Vtotal η τάση στα άκρα της τελικής συστοιχίας των υπερπυκνωτών. Σύμφωνα με τις σχέσεις 3.2 - 3.5, το συνολικό μέσο αποθήκευσης- δευτερεύουσα πηγή ενέργειας έχει τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά συστοιχίας υπερπυκνωτών.

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Χωρητικότητα	312F
Ονομαστική τάση	15Vdc
Εσωτερική αντίσταση	2.41mΩhm
Μέγιστο συνεχόμενο ρεύμα	120A
Μέγιστο στιγμιαίο ρεύμα(1s)	480A

3.6 Σύστημα Φόρτισης Υπερπυκνωτών

Σημαντικό μέρος στο σύστημα ανάκτησης ενέργειας ήταν η δημιουργία ενός κατάλληλου συστήματος φόρτισης. Σύμφωνα με στοιχεία της Maxwell [21] η φόρτιση χρειάζεται ιδιαίτερη διαχείριση γιατί οι υπερπυκνωτές όταν αποφορτίσουν είναι βραχυκυκλωμένοι, γεγονός που μπορεί να καταστρέψει ένα κοινό φορτιστή που δεν διαθέτει κάποια προστασία. Ένας γραμμικός ρυθμιστής τάσης(linear voltage regulator)είναι μία λύση η οποία όμως δεν είναι ενεργειακά αποδοτική με αποτέλεσμα ένα μεγάλο μέρος της ανακτώμενης ενέργειας να χάνεται στο περιβάλλον σαν θερμότητα. Έτσι προτείνεται η χρήση ενός διακοπτικού(switching) ρυθμιστή τάσης του οποίου η απόδοση εξαρτάται από την ποιότητα κατασκευής και σχεδίασης. Ένα απλό σχηματικό διάγραμμα ενός διακοπτικού ρυθμιστή ανύψωσης τάσης (buck converter) φαίνεται στην Εικόνα 3.8.

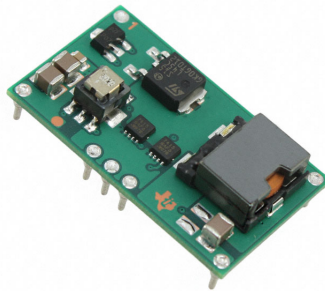


Εικόνα 3.8: Το σχηματικό διάγραμμα ενός διακοπτικού ρυθμιστή ανύψωσης τάσης.

Μετά από αναζήτηση επιλέχθηκε ο διακοπτικός ρυθμιστής τάσης PTN78020H της εταιρείας Texas Instruments, που φαίνεται στην Εικόνα 3.9. Ο ρυθμιστής αυτός έχει τα εξής χρήσιμα χαρακτηριστικά:

- μεγάλο εύρος τάσης εισόδου με άνω όριο τα 36V. Κατά την διαδικασία δοκιμών επιβράδυνσης του οχήματος, παρατηρήθηκε ότι η ανορθωμένη τάση που παράγει ο ηλεκτροκινητήρας δε ξεπερνούσε τα 30-33V,

- ρυθμιζόμενη έξοδος σε ένα εύρος που εξυπηρετεί της ανάγκες του συστήματος. Η έξοδος ρυθμίστηκε στα 15V που είναι η ονομαστική τάση των υπερπυκνωτών,
- προστασία από υψηλή θερμοκρασία. Αν ανέβει αρκετά η θερμοκρασία του εξαρτήματος, μετά από λίγο αυτό παύει να λειτουργεί έτσι ώστε να μην καταστραφεί,
- σύμφωνα με στοιχεία της εταιρείας έχει απόδοση κοντά στο 96%.



Εικόνα 3.9: Ο διακοπτικός ρυθμιστής ανύψωσης τάσης PTN78020H.

Το βασικό πρόβλημα του συγκεκριμένου ρυθμιστή τάσης ήταν ότι η έξοδος του μπορούσε να διαχειριστεί μέχρι 6A ρεύμα. Επίσης δεν υπήρχε κάποιο άλλο έτοιμο εμπορικό προϊόν τόσο αξιόπιστο και με τέτοια απόδοση σε υψηλότερη τιμή έντασης ρεύματος στην έξοδο. Έτσι η τελική ιδέα ήταν να κατασκευαστεί ένας φορτιστής με την χρήση πολλών τέτοιων εξαρτημάτων σε συνδεσμολογία που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.7 Ηλεκτρονικοί Διακόπτες

Ένα μεγάλο μέρος του συστήματος που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή εμπεριέχει το κομμάτι του ελέγχου. Όπως περιγράφεται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο, το σύστημα ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τρεις βασικές λειτουργίες του οχήματος (κίνηση με χρήση της κυψέλης υδρογόνου, κίνηση με τη χρήση υπερπυκνωτών, φόρτιση υπερπυκνωτών). Για τον έλεγχο λοιπόν αυτόν έπρεπε να χρησιμοποιηθούν κατάλληλοι διακόπτες που θα επιτρέψουν τις μεταβάσεις μεταξύ των εναλλακτικών καταστάσεων λειτουργίας.

Οι πιο απλοί και εύκολοι στον έλεγχο ηλεκτρονικοί διακόπτες είναι οι ηλεκτρονόμοι (relays) (Εικόνα 3.10), οι οποίοι όμως έχουν αρκετά μειονεκτήματα κυρίως λόγω της μηχανικής τους λειτουργίας. Τα μειονεκτήματα αυτά είναι συνοπτικά τα παρακάτω:

- η μηχανική τους λειτουργία (ένα έλασμα μετακινείται από ένα πηνίο και ενώνει δύο επαφές) προκαλεί την γρήγορη δυσλειτουργία τους,
- η αλλοίωση των επαφών επιφέρει την μη σωστή λειτουργία,
- απαιτεί πολύ περισσότερη ενέργεια από ένα transistor,
- η αντίσταση επαφής είναι ιδιαίτερα μεγαλύτερη από αυτή των transistors,
- η ταχύτητα εναλλαγής κατάστασης είναι πολύ μικρότερη από εκείνη των transistor.



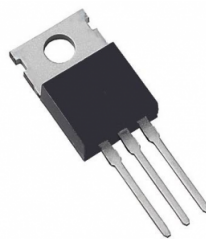
Εικόνα 3.10: Ο ηλεκτρονόμος (Relay) G2R-1 [22]

Λόγω των μειονεκτημάτων των ηλεκτρονόμων επιλέχτηκαν τρανζίστορ τύπου MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors) για την επίτευξη του ελέγχου που απαιτεί το σύστημα. Η επιλογή αυτή έγινε κυρίως λόγω των παρακάτω χαρακτηριστικών λειτουργίας τους:

- χρειάζονται ελάχιστη ενέργεια για να λειτουργήσουν,
- δεν επιβαρύνονται από μηχανικά προβλήματα,
- οι εναλλαγές στις καταστάσεις τους γίνεται πολύ γρηγορότερα από ότι στα relays,
- έχουν μικρή εσωτερική αντίσταση που μειώνεται όταν διαχειρίζονται μεγάλα ρεύματα,
- είναι αρκετά ελαφρύτερα από τα relays,

Τα MOSFET που επιλέχτηκαν είναι τα STP75NF75 της εταιρείας ST [23] και έχουν τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά:

1. τάση: $V_{DS} = 75V$,
2. αντίσταση: $R_{DS(on)} < 0.011\Omega$,
3. ρεύμα: $I_d = 80A$.

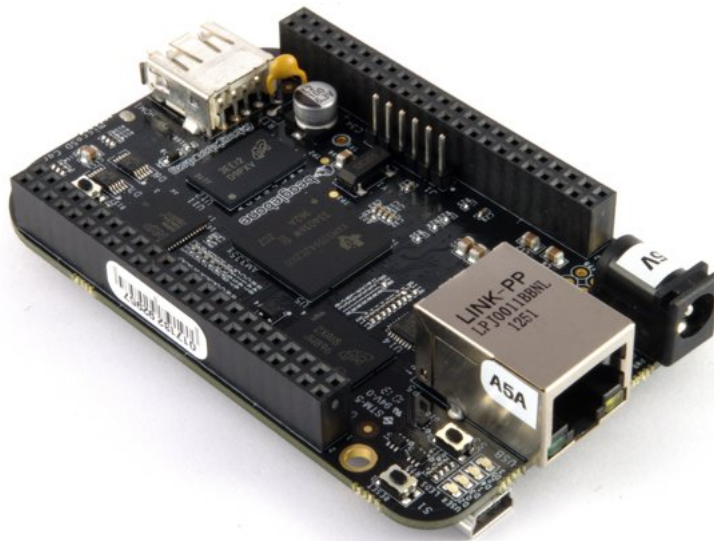


Εικόνα 3.11: Το *MOSFET* τύπου STP75NF75 [23]

3.8 Μονάδα ελέγχου του συστήματος

Για την υλοποίηση της μονάδας ελέγχου των ηλεκτρονικών διακοπών χρησιμοποιήθηκε το Beagle-Bone Black. Είναι ένα υπολογιστικό σύστημα σε μέγεθος πιστωτικής κάρτας με πολλές δυνατότητες. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι:

- διαθέτει τον επεξεργαστή AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8 [24],
- έχει μνήμη 512MB DDR3 RAM,
- ο αποθηκευτικός χώρος αποτελείται κυρίως από 4GB 8-bit eMMC on-board flash storage,
- περιλαμβάνει δύο μικρο-ελεγκτές PRU 32-bit,
- χρησιμοποιεί θύρες επικοινωνίας USB client και USB host,
- επιτρέπει σύνδεση μέσω διαδικτύου είτε με τη χρήση Ethernet, είτε με wifi dongle,
- διαθέτει 2x46 θύρες, οι περισσότερες από τις οποίες είναι θύρες εισόδου/εξόδου γενικής χρήσης.
- Διαθέτει το λειτουργικό σύστημα το Debian [25] και είναι εφοδιασμένο με όλους τους χρήσιμους οδηγούς για την σωστή λειτουργία των USB, του ήχου, της εικόνας, για την σωστή επικοινωνία του λειτουργικού με τους αχροδέκτες εισόδου- εξόδου γενικής χρήσης(GPIOs) κτλ. Χρησιμοποιώντας λοιπόν ένα ολοκληρωμένο λειτουργικό σύστημα όπως το Debian προσφέρεται η δυνατότητα επιλογής της γλώσσας προγραμματισμού στην οποία θα γραφεί το πρόγραμμα για το σύστημα.



Εικόνα 3.12: Το υπολογιστικό σύστημα Beaglebone Black.

Σχεδίαση και Κατασκευή του Συστήματος

4.1 Το κύκλωμα φόρτισης

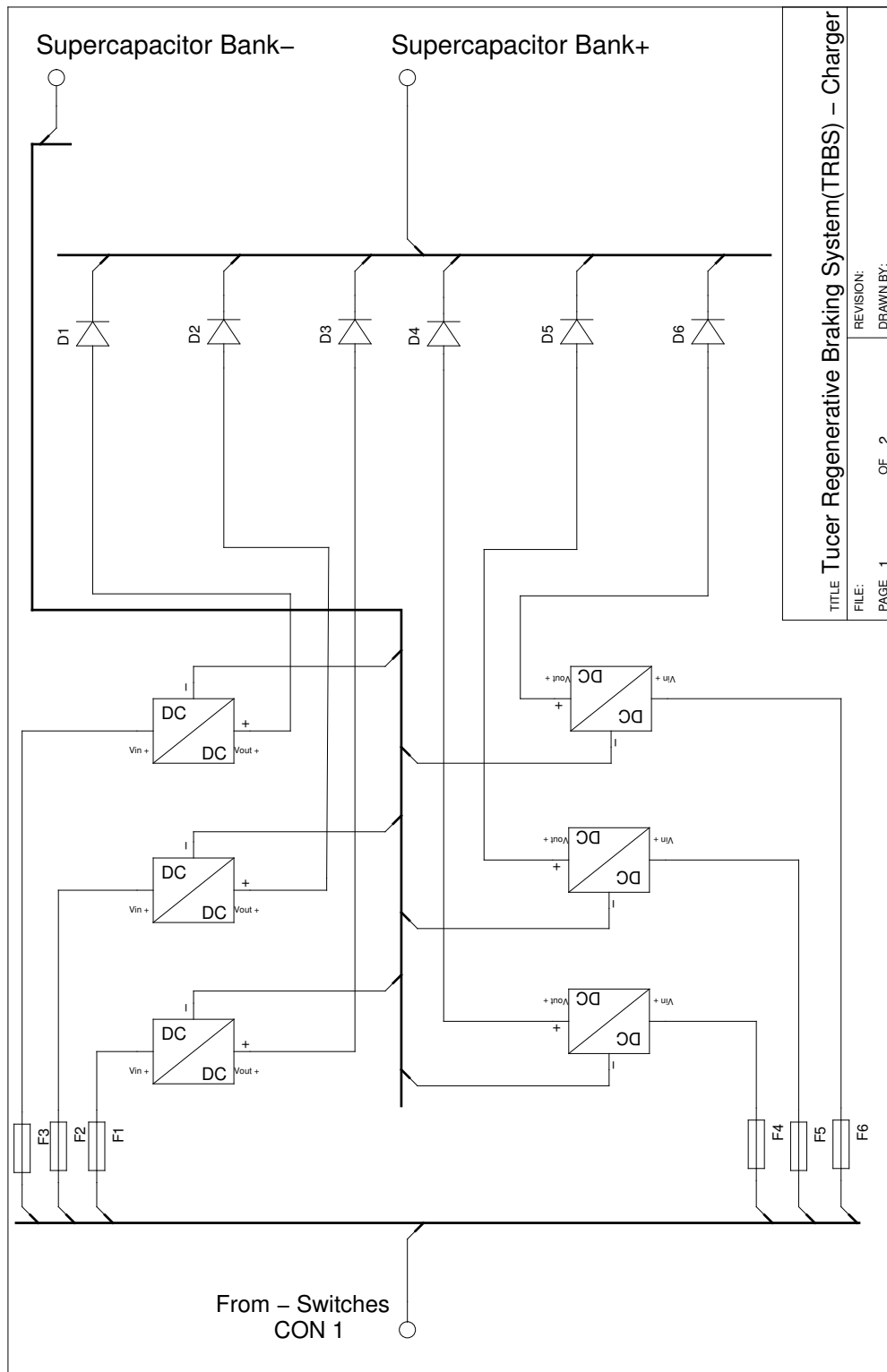
Το κύκλωμα φόρτισης (Εικόνα 4.1) αποτελείται από έξι DC/DC μετατροπείς, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι παράλληλα. Οι τρεις από αυτούς είναι οι PTN78020W [26] και έχουν ρυθμιστεί στη μέγιστη τάση εξόδου των 12 Volts. Οι υπόλοιποι τρεις μετατροπείς είναι οι PTN78020H [26] και έχουν ρυθμιστεί σε τάση εξόδου 15 Volts. Αυτός ο διαχωρισμός έγινε επειδή παρατηρήθηκε ότι οι πρώτοι μετατροπείς παράγουν τάση εξόδου ακόμα και αν η τάση εισόδου είναι χαμηλότερη από την επιθυμητή τάση εξόδου. Αντιθέτως οι μετατροπείς PTN78020H παράγουν τάση εξόδου μόνο όταν η τάση εισόδου περάσει κατά 2 Volts την επιθυμητή τάση εξόδου. Έτσι αν δεν υπήρχαν οι μετατροπείς PTN78020W και η τάση των υπερπυκνωτών ήταν, για παράδειγμα, 10 Volts τότε κάποιο μέρος ενέργειας θα χανόταν χωρίς να αποθηκεύεται στους υπερπυκνωτές. Ενώ με αυτή την συνδεσμολογία λειτουργούν αρχικά οι PTN78020W μέχρι η τάση των υπερπυκνωτών να φτάσει τα 12 Volts. Στη συνέχεια, αρχίζουν σταδιακά να λειτουργούν οι μετατροπείς PTN78020H επειδή έχουν μεγαλύτερη τάση εξόδου.

Με αυτή την τοπολογία δημιουργήθηκε ένα πλήρες κύκλωμα φόρτισης που θεωρητικά αντέχει μέχρι και 18 Ampere στην έξοδο του. Τελικά βέβαια, στα πειράματα που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή, χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι τρεις μετατροπείς με την υψηλή τάση εξόδου. Αυτό έγινε επειδή το εύρος λειτουργίας των υπερπυκνωτών που επιλέχθηκε ήταν 12-15 Volts.

4.2 Το κύκλωμα ελέγχου

Το κύκλωμα ελέγχου (Εικόνα 4.2) περιλαμβάνει:

- τους ηλεκτρονικούς διακόπτες - MOSFET (switch 2, switch 3 της Εικόνας 4.2) που ελέγχουν την φόρτιση και την εκφόρτιση των υπερπυκνωτών,



Εικόνα 4.1: Το κύκλωμα φόρτισης που υλοποιήθηκε.

- τον ηλεκτρονικό διακόπτη (switch 1 της Εικόνας 4.2) που ελέγχει τον διακόπτη της εξόδου της κυψέλης υδρογόνου,
- τον συγκριτή τάσης (sensor 2 της Εικόνας 4.2) που θέτει το κατώφλι στην τάση των υπερπυκνωτών,
- το διακόπτη (sensor 1 της Εικόνας 4.2) που αναγνωρίζει την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του επιταχυντή του οχήματος,
- τροφοδοτικά και optocoupler για την οδήγηση των MOSFETS,
- τροφοδοτικό που παρέχει ενέργεια σε όλο το σύστημα.

4.2.1 Τροφοδοσία του συστήματος

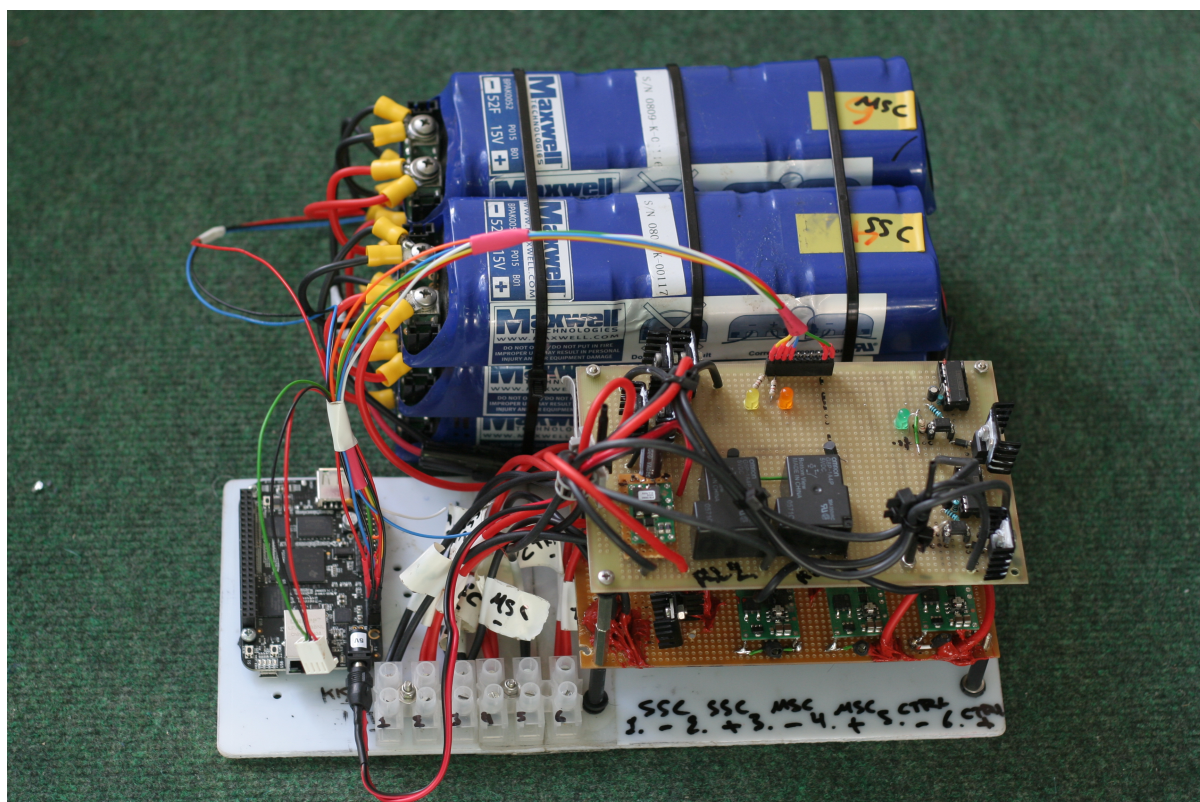
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σύστημα είναι αυτοτροφοδοτούμενο. Αυτό σημαίνει ότι όσα εξαρτήματα χρειάζονται τροφοδοσία, αυτή προέρχεται από τους υπερπυκνωτές. Επειδή όμως η τάση των τελευταίων δεν είναι σταθερή και επίσης είναι αρκετά υψηλή, χρησιμοποιείται ένας DC/DC μετατροπέας [27], ο οποίος παράγει τάση 5 Volts στην έξοδο του. Έτσι τροφοδοτούνται αποτελεσματικά ο μικροϋπολογιστής του συστήματος, τα τροφοδοτικά για την οδήγηση των MOSFET και ο συγκριτής τάσης.

4.2.2 Οδήγηση των διακοπών ελέγχου

Τα MOSFETS που χρησιμοποιήθηκαν ως διακόπτες, τοποθετήθηκαν στον θετικό πόλο της εκάστοτε πηγής και για το λόγο αυτό χρειάζονται ιδιαίτερη οδήγηση. Μετά από προβλήματα που παρουσιάστηκαν με την χρήση high-side οδηγών, εφαρμόστηκε μια διαφορετική λύση. Χρησιμοποιήθηκε ο DC/DC μετατροπέας DCP010512BP [28] με απομονωμένη έξοδο, ο οποίος δέχεται είσοδο τάσης 5 Volts από το βασικό τροφοδοτικό του συστήματος, και παράγει έξοδο τάσης 12 Volts που είναι αρκετή ώστε να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο κανάλι αγωγής ρεύματος στο MOSFET. Ο αρνητικός πόλος της εξόδου συνδέεται στην πηγή (source) του MOSFET, ενώ ο θετικός πόλος συνδέεται στην πύλη (gate) του MOSFET μέσω ενός optocoupler. Ο optocoupler ελέγχεται από μία ψηφιακή θύρα του υπολογιστή, έτσι όταν διεγείρεται η τάση του μετατροπέα φτάνει στην πύλη (gate) του MOSFET και αυτό άγει, διαφορετικά λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης.

4.2.3 Συγκριτής τάσης

Μία είσοδος του συστήματος αποτελεί το κατώφλι τάσης των υπερπυκνωτών. Όταν είναι φορτισμένοι (τάση υψηλότερη του ορισμένου κατωφλίου) τότε το όχημα κινείται με την ενέργεια που οι ίδιοι προσφέρουν. Η πηγή ενέργειας αλλάζει, είτε εν κινήσει είτε όχι, (χρησιμοποιείται η κυψέλη υδρογόνου ως πηγή ενέργειας) όταν η τάση των υπερπυκνωτών πέσει κάτω από το προκαθορισμένο κατώφλι. Το κατώφλι αυτό υλοποιείται, σε επίπεδο υλικού, με τον συγκριτή τάσης LM393N[29]. Ο συγκριτής δέχεται δύο εισόδους και όταν αυτές έχουν ίδια τάση παράγει έξοδο με τάση περίπου ίση με την τάση τροφοδοσίας του, διαφορετικά μηδενική. Έτσι η μία είσοδος του είναι συνδεδεμένη σε μία τάση αναφοράς, ενώ η άλλη αντιστοιχεί στην τάση των υπερπυκνωτών.



Εικόνα 4.3: Το τελικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας.

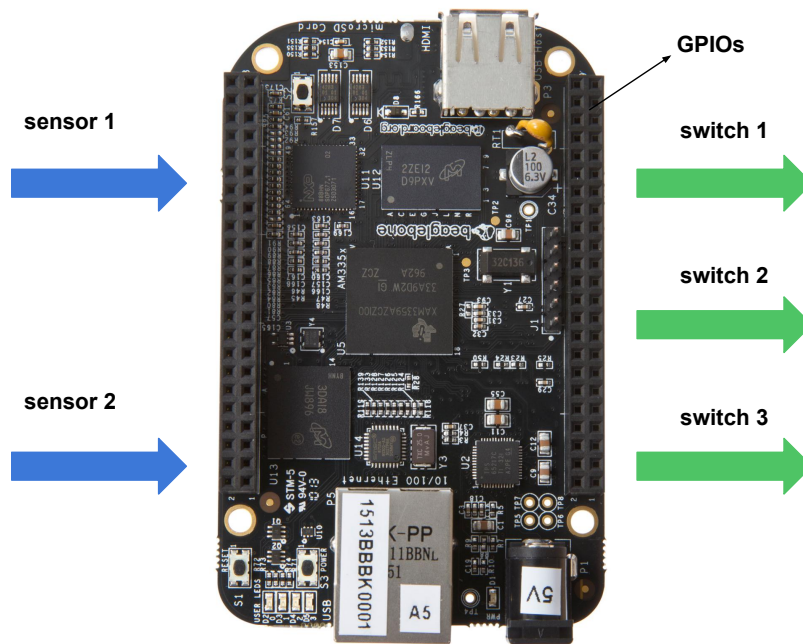
Έλεγχος του Συστήματος

Σημαντικό τμήμα ενός συστήματος ανάκτησης ενέργειας είναι αυτό του ελέγχου. Το τμήμα ελέγχου συγκεντρώνει δεδομένα από αισθητήρες, τα επεξεργάζεται και παράγει κάποιες εξόδους. Το τμήμα ελέγχου του συστήματος ανάκτησης ενέργειας της παρούσας διπλωματικής εργασίας (Εικόνα 5.1):

- διαθέτει δύο αισθητήρες που παράγουν τα δεδομένα εισόδου. Ο αισθητήρας **sensor 2** χρησιμοποιείται για να παρατηρηθεί αν η τάση των υπερπυκνωτών είναι υψηλότερη ή όχι από ένα προκαθορισμένο όριο. Ο αισθητήρας **sensor 1** χρησιμοποιείται για να παρατηρηθεί αν ο επιταχυντής του οχήματος είναι ενεργοποιημένος ή όχι,
- χρησιμοποιεί ως μονάδα επεξεργασίας των δεδομένων τον μικροϋπολογιστή **Beaglebone Black**,
- παράγει ως εξόδους, σήματα που ελέγχουν τους διακόπτες **switch 1**, **switch 2**, **switch 3** και οι οποίοι ελέγχουν την έξοδο της κυψέλης υδρογόνου, την εκφόρτιση των υπερπυκνωτών και την φόρτιση των υπερπυκνωτών αντίστοιχα.

Ο συγχρονισμός των εξόδων του συστήματος με βάση τις εισόδους κάθε χρονική στιγμή, είναι μία περίπλοκη διαδικασία. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε μία μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων που επιτυγχάνει την οργάνωση του ελέγχου του συστήματος, όπως περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο. Η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων αποτελεί ένα πολύ δυνατό και δυναμικό εργαλείο σε συστήματα που απαιτούν πολύπλοκους ελέγχους. Αυτό το μοντέλο ελέγχου λοιπόν χρησιμοποιήθηκε για του λόγους που ακολουθούν:

- δημιουργεί μία πολύ κατανοητή αλληλουχία καταστάσεων και μεταβάσεων,
- είναι εύκολα κατανοητή από ανθρώπους, οι οποίοι δεν χρειάζεται να διαθέτουν ιδιαίτερες γνώσεις προγραμματισμού,
- δεν επιτρέπει μεγάλα περιθώρια σφαλμάτων γιατί οι μεταβάσεις ακολουθούν πολύ συγκεκριμένους κανόνες και κάθε κατάσταση αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο των διαφόρων μεταβλητών του συστήματος. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό σε περιπτώσεις συνεργασίας λογισμικού και υλικού,



Εικόνα 5.1: Οι είσοδοι και οι έξοδοι του μικροϋπολογιστή Beaglebone Black.

- διαθέτει μεγάλη δυνατότητα επεκτασιμότητας, γεγονός που αποτελούσε βασικό σκοπό της παρούσας εργασίας,
- Η μεταφορά του σε πηγαίο κώδικα διαφόρων γλωσσών προγραμματισμού είναι μία αρκετά απλή διαδικασία.

5.1 Η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων

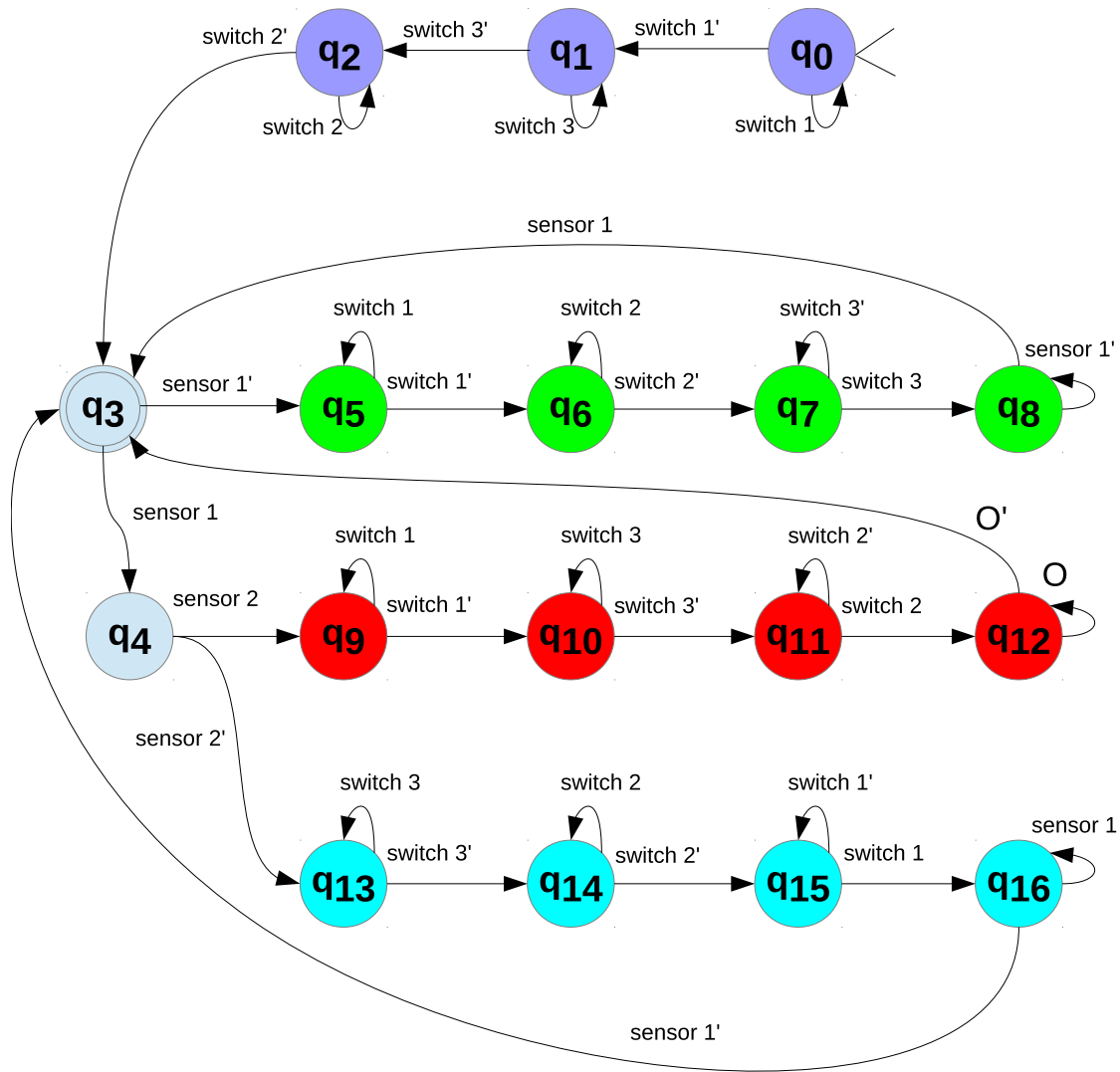
Η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων που δημιουργήθηκε για τους σκοπούς του συστήματος ανάλυσης ενέργειας της παρούσας εργασίας, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2. Οι καταστάσεις μπορούν να χωριστούν σε πέντε βασικές λειτουργίες:

- την λειτουργία της αρχικοποίησης του συστήματος που απεικονίζεται στις καταστάσεις q0 - q2 με χρώμα βιολετί. Σε αυτή τη λειτουργία ο μικροϋπολογιστής επιχειρεί να απενεργοποιήσει όλους τους διακόπτες του συστήματος. Αν τα καταφέρει (αν δηλαδή δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα στο λειτουργικό σύστημα ή στο πρόγραμμα) τότε η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων μεταβαίνει στην κατάσταση q3, διαφορετικά θα παραμείνει σε κάποια από τις καταστάσεις q0 - q2,
- την λειτουργία της απόφασης που υλοποιείται από τις καταστάσεις q3, q4 με γαλάζιο χρώμα. Στην κατάσταση q3 ελέγχεται αν είναι ενεργοποιημένος ο επιταχυντής του οχήματος. Αν όχι, τότε το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση q5 και ξεκινάει η λειτουργία της φόρτισης. Διαφορετικά, αν ο επιταχυντής του οχήματος είναι ενεργοποιημένος, τότε η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων μεταβαίνει στην κατάσταση q4. Σε αυτή, συγκρίνεται η τάση των υπερπυκνωτών σε σχέση με ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Αν η τάση αυτή είναι υψηλότερη του κατωφλίου,

τότε γίνεται μετάβαση στην κατάσταση q9 και ξεκινάει η διαδικασία εκφόρτισης των υπερπυκνωτών. Διαφορετικά, αν η τάση των υπερπυκνωτών είναι χαμηλότερη του κατωφλίου, τότε γίνεται μετάβαση στην κατάσταση q13 και ξεκινάει η λειτουργία κίνησης με τη χρήση της κυψέλης υδρογόνου,

- τη λειτουργία της φόρτισης των υπερπυκνωτών που συμβολίζεται με τις καταστάσεις q5 - q8 με πράσινο χρώμα. Κατά τη λειτουργία αυτή απενεργοποιείται ο **switch 1** που ελέγχει την έξοδο της κυψέλης υδρογόνου και ο **switch 2** που ελέγχει την εκφόρτιση των υπερπυκνωτών. Αν η απενεργοποίηση των δύο διακοπών είναι επιτυχής, τότε ενεργοποιείται ο **switch 3** που επιτρέπει την φόρτιση. Η φόρτιση σταματάει αν ενεργοποιηθεί ο επιταχυντής του οχήματος. Η λειτουργία της φόρτισης απεικονίζεται με την πράσινη γραμμή στην Εικόνα 3.2,
- τη λειτουργία της εκφόρτισης των υπερπυκνωτών που συμβολίζεται με τις καταστάσεις q9 - q12 με κόκκινο χρώμα. Κατά τη λειτουργία αυτή απενεργοποιείται ο **switch 1** που ελέγχει την έξοδο της κυψέλης υδρογόνου και ο **switch 3** που ελέγχει την φόρτιση των υπερπυκνωτών. Αν η απενεργοποίηση των δύο διακοπών είναι επιτυχής, τότε ενεργοποιείται ο διακόπτης που επιτρέπει την εκφόρτιση. Η εκφόρτιση σταματάει είτε αν απενεργοποιηθεί ο επιταχυντής του οχήματος, είτε αν η τάση των υπερπυκνωτών πέσει κάτω από το προκαθορισμένο κατώφλι. Η λειτουργία της εκφόρτισης απεικονίζεται με την κόκκινη γραμμή στην Εικόνα 3.2,
- τη λειτουργία της κίνησης του οχήματος με τη χρήση της κυψέλης υδρογόνου που υλοποιείται με τις καταστάσεις q13 - q16 με γαλάζιο χρώμα. Κατά τη λειτουργία αυτή απενεργοποιείται ο **switch 3** που ελέγχει την φόρτιση των υπερπυκνωτών και ο **switch 2** που ελέγχει την εκφόρτιση των υπερπυκνωτών. Αν η απενεργοποίηση των δύο διακοπών είναι επιτυχής, τότε ενεργοποιείται ο **switch 1** που επιτρέπει τη χρήση της κυψέλης υδρογόνου. Η λειτουργία ολοκληρώνεται αν ενεργοποιηθεί ο επιταχυντής του οχήματος. Η λειτουργία της κίνησης του οχήματος με τη χρήση της κυψέλης υδρογόνου απεικονίζεται με την γαλάζια γραμμή στην Εικόνα 3.2,

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται όλες οι καταστάσεις της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων καθεμία από τις οποίες συνοδεύεται από μία σύντομη περιγραφή. Στον Πίνακα 5.2 εμφανίζονται οι εισοδοί και οι εξοδοί του συστήματος, δηλαδή οι δύο αισθητήρες και οι τρεις διακόπτες αντίστοιχα. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι έχουν γίνει κάποιες συμβάσεις σχετικά με την κατάσταση των εισόδων και των εξόδων. Για παράδειγμα, όταν εμφανίζεται το σύμβολο '**switch 1**' εννοείται ότι ο ηλεκτρονικός διακόπτης switch 1 είναι ενεργοποιημένος, ενώ αντιθέτως όταν εμφανίζεται το σύμβολο '**switch 1**' ' εννοείται ότι ο ηλεκτρονικός διακόπτης switch 1 είναι απενεργοποιημένος. Η ίδια σύμβαση ισχύει και για τους υπόλοιπους διακόπτες. Επιπλέον ο συμβολισμός '**sensor 2**' ' σημαίνει πως η τάση των υπερπυκνωτών είναι υψηλότερη από το προκαθορισμένο κατώφλι, ενώ ο συμβολισμός '**sensor 2**' ' σημαίνει πως η τάση των υπερπυκνωτών είναι μικρότερη ή ίση του κατωφλίου. Τέλος, ο συμβολισμός '**sensor 1**' ' σημαίνει ότι ο επιταχυντής του οχήματος είναι ενεργοποιημένος και ο συμβολισμός '**sensor 1**' ' σημαίνει πως ο επιταχυντής είναι απενεργοποιημένος.



Εικόνα 5.2: Η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων.

5.2 Παραγωγή του πηγαίου κώδικα.

Σε αυτό το μέρος περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε ώστε να παραχθεί ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος που εκτελείται στον υπολογιστή του συστήματος ανάκτησης ενέργειας. Στην Εικόνα 5.3 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής που περιγράφει τον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε. Όπως φαίνεται, το διάγραμμα ροής χρησιμοποιεί τα ίδια χρώματα με τη μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων στις αντίστοιχες ενέργειες. Η αρχικοποίηση του συστήματος υλοποιείται από τα βιολετί βήματα, η φόρτιση των υπερπυκνωτών από τα πράσινα βήματα, η αποφόρτιση τους από τα κόκκινα βήματα, και η χρήση της κυψέλης υδρογόνου από τα γαλάζια. Έτσι, μπορείς κανείς να κάνει εύκολα την αντιστοίχιση ανάμεσα στα δύο διαγράμματα. Αποφασίστηκε, για λόγους ευκολίας και συμβατότητας με άλλα συστήματα του οχήματος, ο αλγόριθμος να υλοποιηθεί στην γλώσσα προγραμματισμού C++.

5.2.1 Επικοινωνία του λογισμικού με το υλικό

Πριν όμως από την συγγραφή του προγράμματος, ήταν αναγκαίο να μελετηθεί ο τρόπος που ο υπολογιστής του συστήματος επικοινωνεί με τις θύρες εισόδου-εξόδου γενικής χρήσης που διαθέτει.

Πίνακας 5.1: Περιγραφή των καταστάσεων.

Κατάσταση	Περιγραφή Κατάστασης
q_0	Αρχικοποίηση συστήματος - Απενεργοποίηση switch 1
q_1	Αρχικοποίηση συστήματος - Απενεργοποίηση switch 2
q_2	Αρχικοποίηση συστήματος - Απενεργοποίηση switch 3
q_3	Κατάσταση αναμονής
q_4	Επιλογή πηγής ενέργειας
q_5	Διαδικασία Φόρτισης-Απενεργοποίηση switch 1
q_6	Διαδικασία Φόρτισης-Απενεργοποίηση switch 2
q_7	Διαδικασία Φόρτισης-Ενεργοποίηση switch 3
q_8	Διαδικασία Φόρτισης-Φόρτιση Υπερπυκνωτών
q_9	Διαδικασία Εκφόρτισης-Απενεργοποίηση switch 1
q_{10}	Διαδικασία Εκφόρτισης-Απενεργοποίηση switch 3
q_{11}	Διαδικασία Εκφόρτισης-Ενεργοποίηση switch 2
q_{12}	Διαδικασία Εκφόρτισης-Υπερπυκνωτές ως βοηθητική πηγή ενέργειας
q_{13}	Χρήση κυψέλης υδρογόνου-Απενεργοποίηση switch 3
q_{14}	Χρήση κυψέλης υδρογόνου-Απενεργοποίηση switch 2
q_{15}	Χρήση κυψέλης υδρογόνου-Ενεργοποίηση switch 2
q_{16}	Χρήση κυψέλης υδρογόνου-Κυψέλη υδρογόνου ως κύρια πηγή ενέργειας

Πίνακας 5.2: Περιγραφή του αλφάβητου της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων.

Σύμβολο	Περιγραφή Συμβόλου
switch 1	switch 1 (κυψέλη υδρογόνου) ενεργοποιημένος
switch 1'	switch 1 (κυψέλη υδρογόνου) απενεργοποιημένος
switch 2	switch 2 (εκφόρτιση υπερπυκνωτών) ενεργοποιημένος
switch 2'	switch 2 (εκφόρτιση υπερπυκνωτών) απενεργοποιημένος
switch 3	switch 3 (φόρτιση υπερπυκνωτών) ενεργοποιημένος
switch 3'	switch 3 (φόρτιση υπερπυκνωτών) απενεργοποιημένος
sensor 2	Τάση υπερπυκνωτών υψηλότερη από το κατώφλι
sensor 2'	Τάση υπερπυκνωτών χαμηλότερη από το κατώφλι
sensor 1	Επιταχυντής ενεργοποιημένος
sensor 1'	Επιταχυντής απενεργοποιημένος
O	sensor 2 AND sensor 1
O'	sensor 2' OR sensor 1'

Η γενική διαδικασία που ακολουθείται για να ελέγξει ο χρήστης ή ένα πρόγραμμα τις θύρες εξόδου είναι η εξής:

- ο χρήστης ή το πρόγραμμα γράφει την τιμή που επιθυμεί, ένα (1) ή μηδέν(0) ανάλογα σε ποια κατάσταση θέλει τη θύρα (που έχει επιλέξει), σε ένα ειδικό αρχείο που το λειτουργικό σύστημα έχει αντιστοιχίσει στη θύρα αυτή.
- το λειτουργικό σύστημα αναγνωρίζει την αλλαγή στο αρχείο που αναφέρεται στη συγκεκριμένη θύρα.

Πίνακας 5.3: Πίνακας Μεταβάσεων.

Τρ. κατάσταση	Επ. κατάσταση, Είσοδος	Επ. κατάσταση, Είσοδος
q_0	q_0 , switch 1	q_1 , switch 1'
q_1	q_1 , switch 3	q_2 , switch 3'
q_2	q_2 , switch 2	q_3 , switch 2'
q_3	q_4 , sensor 1	q_5 , sensor 1'
q_4	q_9 , sensor 2	q_{13} , sensor 2'
q_5	q_5 , switch 1	q_6 , switch 1'
q_6	q_6 , switch 2	q_7 , switch 2'
q_7	q_7 , switch 3'	q_8 , switch 3
q_8	q_8 , sensor 1'	q_3 , sensor 1
q_9	q_9 , switch 1	q_{10} , switch 1'
q_{10}	q_{10} , switch 3	q_{11} , switch 3'
q_{11}	q_{11} , switch 2'	q_{12} , switch 2
q_{12}	q_{12} , O	q_3 , O'
q_{13}	q_{13} , switch 3	q_{14} , switch 3'
q_{14}	q_{14} , switch 2	q_{15} , switch 2'
q_{15}	q_{15} , switch 1'	q_{16} , switch 1
q_{16}	q_{16} , sensor 1	q_3 , sensor 1'

- το λειτουργικό σύστημα αλλάζει την κατάσταση της θύρας ανάλογα με το περιεχόμενο του αρχείου.
- σε επίπεδο υλικού, η συγκεκριμένη θύρα θα έχει θετική ή μηδενική τάση σε σχέση με τη γείωση και ανάλογα με την τιμή του αρχείου.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται για το χειρισμό των θυρών εισόδου, με τη διαφορά ότι αντί για εγγραφές στο αντίστοιχο αρχείο της θύρας γίνονται αναγνώσεις.

Ο υπολογιστής του συστήματος χρησιμοποιεί ένα λειτουργικό σύστημα, που όπως παρατηρήθηκε παραπάνω, είναι βασισμένο στην διανομή Linux debian. Είναι πολύ εύκολο κάποιος χρήστης να αλλάξει την κατάσταση των θυρών με χειροκίνητο τρόπο μέσω ενός τερματικού. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η παρακάτω, θεωρώντας ότι θα χρησιμοποιηθεί η θύρα με αριθμό 4:

1. γνωστοποιείται στο λειτουργικό σύστημα η πρόθεση χειρισμού της θύρας χρησιμοποιώντας την εντολή: `sudo echo "4" > /sys/class/gpio/export` , ώστε να δημιουργηθούν τα κατάλληλα αρχεία,
2. ορίζεται ο τύπος της θύρας, θα χρησιμοποιηθεί δηλαδή ως είσοδος ή ως έξοδος. Αυτό γίνεται με την εντολή: `sudo echo "out" /sys/class/gpio/gpio4/direction` ή αντίστοιχα `sudo echo "in" /sys/class/gpio/gpio4/direction`,
3.
 - αν η θύρα οριστεί ως έξοδος, τότε ο χρήστης μπορεί να την ενεργοποιήσει ή να την απενεργοποιήσει θέτοντας την τιμή 1 ή 0 αντίστοιχα στο αρχείο value , χρησιμοποιώντας την εντολή: `sudo echo "1" > /sys/class/gpio/gpio4/value` ή την εντολή: `sudo echo "0" > /sys/class/gpio/gpio4/value`. Αντίστοιχα,

- αν η θύρα οριστεί σαν είσοδος, τότε ο χρήστης μπορεί να διαβάσει την τιμή που αντιστοιχεί στην κατάσταση της μέσω της εντολής `cat /sys/class/gpio/gpio4/value`.

5.2.2 Βιβλιοθήκη για το χειρισμό των θυρών εισόδου/εξόδου γενικής χρήσης **GPIOs**

Για τον χειρισμό των θυρών μέσω ενός προγράμματος, αυτό που πρέπει να γίνει είναι ουσιαστικά αυτό που παραπάνω έκανε ο χρήστης, δηλαδή να γράφει και να διαβάζει συγκεκριμένα αρχεία. Επειδή η χρήση τέτοιων υπολογιστών είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, έχουν γραφεί ήδη βιβλιοθήκες σε διάφορες γλώσσες προγραμματισμού για την εύκολη διαχείριση της συμπεριφοράς των θυρών. Έτσι για την παρούσα εργασία δεν χρειάστηκε να δημιουργηθεί εκ νέου μία τέτοια βιβλιοθήκη αλλά αντίθετα χρησιμοποιήθηκε μία ελεύθερα διαθέσιμη υλοποίηση από το διαδίκτυο [30]. Η βιβλιοθήκη αυτή είναι γραμμένη στη γλώσσα προγραμματισμού C++ και αποτελείται από δύο αρχεία. Το ένα είναι ένα αρχείο κεφαλίδας (header file), που περιλαμβάνει την αφηρημένη δημιουργία μιας κλάσης μαζί με τις μεταβλητές και τις μεθόδους της, κάθε αντικείμενο της οποίας αντιπροσωπεύει μία θύρα. Το άλλο αρχείο εμπεριέχει τον πηγαίο κώδικα που υλοποιεί τις μεθόδους της αφηρημένης κλάσης που προαναφέρθηκε. Τα δύο αρχεία φαίνονται στις Εικόνες 5.4 και 5.5.

```

1 #ifndef gpio_class_h
2 #define gpio_class_h
3
4 #include <string>
5 using namespace std;
6 /* GPIO Class
7  * Purpose: Each object instantiated from this class will
8  * control a GPIO pin The GPIO pin number must be passed
9  * to the overloaded class constructor
10 */
11 class gpio_class
12 {
13 public:
14     gpio_class(); // create a GPIO object that controls GPIO4 (default
15     gpio_class(string x); // create a GPIO object that controls GPIOx,
16                         //where x is passed to this constructor
17     int export_gpio(); // exports GPIO
18     int unexport_gpio(); // unexport GPIO
19     int setdir_gpio(string dir); // Set GPIO Direction
20     int setval_gpio(string val); // Set GPIO Value (putput pins)
21     int getval_gpio(string& val); // Get GPIO Value (input/ output pins)
22     string get_gpionum(); // return the GPIO number associated
23                         // with the instance of an object
24 private:
25     string gpionum; // GPIO number associated with the instance of an object
26 };
27
28 #endif

```

Εικόνα 5.4: Αρχείο κεφαλίδας για την βιβλιοθήκη ελέγχου των θυρών εισόδου-εξόδου γενικής χρήσης.

```

1 #include <fstream>
2 #include <string>
3 #include <iostream>
4 #include <sstream>
5 #include "gpio_class.h"
6
7 using namespace std;
8
9 gpio_class::gpio_class()
10 {
11     this->gpionum = "4"; //GPIO4 is default
12 }
13
14 gpio_class::gpio_class(string gnum)
15 {
16     this->gpionum = gnum; //Instantiate gpio_class object for GPIO pin number "
    gnum"
17 }
18
19 int gpio_class::export_gpio()
20 {
21     string export_str = "/sys/class/gpio/export";
22     ofstream exportgpio(export_str.c_str()); // Open "export" file. Convert C++
23                                             // string to C string. Required for
24                                             // all Linux pathnames
25     if (exportgpio < 0){
26         cout << " FAILURE: Unable to export GPIO"<< this->gpionum << " ."<< endl;
27         return -1;
28     }
29
30     exportgpio << this->gpionum ; //write GPIO number to export
31     exportgpio.close(); //close export file
32     return 0;
33 }
34
35 int gpio_class::unexport_gpio()
36 {
37     string unexport_str = "/sys/class/gpio/unexport";
38     ofstream unexportgpio(unexport_str.c_str()); //Open unexport file
39     if (unexportgpio < 0){
40         cout << " FAILURE: Unable to unexport GPIO"<< this->gpionum << " ."<< endl;
41         return -1;
42     }
43
44     unexportgpio << this->gpionum ; //write GPIO number to unexport
45     unexportgpio.close(); //close unexport file
46     return 0;
47 }
48
49 int gpio_class::setdir_gpio(string dir)
50 {
51

```

```

52     string setdir_str = "/sys/class/gpio/gpio" + this->gpionum + "/direction";
53     ofstream setdirgpio(setdir_str.c_str()); // open direction file for gpio
54     if (setdirgpio < 0){
55         cout << " FAILURE: Unable to set direction of GPIO"<< this->gpionum <<
56         " ."<< endl;
57         return -1;
58     }
59     setdirgpio << dir; //write direction to direction file
60     setdirgpio.close(); // close direction file
61     return 0;
62 }
63
64 int gpio_class::setval_gpio(string val)
65 {
66
67     string setval_str = "/sys/class/gpio/gpio" + this->gpionum + "/value";
68     ofstream setvalgpio(setval_str.c_str()); // open value file for gpio
69     if (setvalgpio < 0){
70         cout << " FAILURE: Unable to set the value of GPIO"<< this->gpionum <<
71         " ."<< endl;
72         return -1;
73     }
74     setvalgpio << val ; //write value to value file
75     setvalgpio.close(); // close value file
76     return 0;
77 }
78
79 int gpio_class::getval_gpio(string& val){
80
81     string getval_str = "/sys/class/gpio/gpio" + this->gpionum + "/value";
82     ifstream getvalgpio(getval_str.c_str()); // open value file for gpio
83     if (getvalgpio < 0){
84         cout << " FAILURE: Unable to get value of GPIO"<< this->gpionum << " ."<<
85         endl;
86         return -1;
87     }
88     getvalgpio >> val ; //read gpio value
89
90     if(val != "0")
91         val = "1";
92     else
93         val = "0";
94
95     getvalgpio.close(); //close the value file
96     return 0;
97 }
98
99 string GPIOClass::get_gpionum(){
100

```

```

101 return this->gpionum;
102
103 }

```

Εικόνα 5.5: Πηγαίος κώδικας για την υλοποίηση της βιβλιοθήκης ελέγχου των θυρών εισόδου-εξόδου γενικής χρήσης.

Με βάση λοιπόν την βιβλιοθήκη αυτή μπορούν να γραφούν προγράμματα σε C++ που να χρησιμοποιούν τις συναρτήσεις που προσφέρονται:

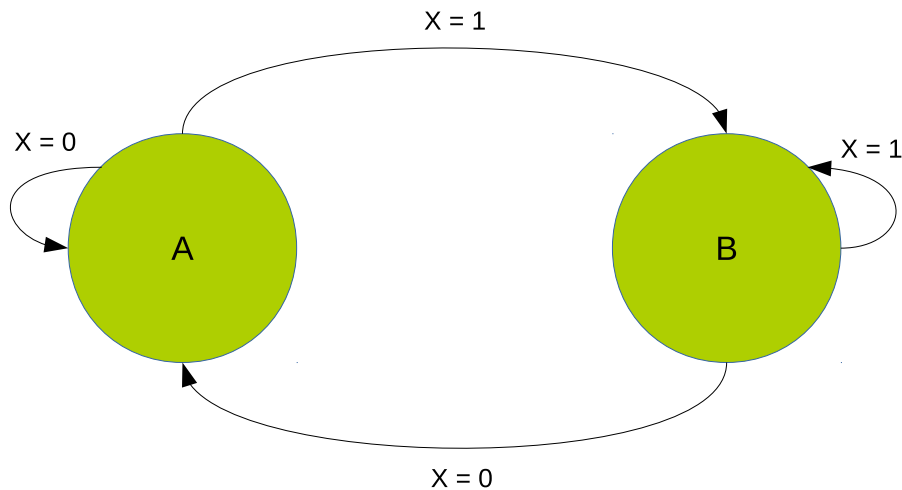
- τη συνάρτηση `exportgpio()` που χρησιμοποιείται για να αρχικοποιήσει τη θύρα,
- τη συνάρτηση `unexportgpio()` που καλείται για να απελευθερώσει τους πόρους που έχει δεσμεύσει το λειτουργικό σύστημα για τη θύρα που χρησιμοποιήθηκε,
- τη συνάρτηση `setdirgpio(string dir)` που ορίζει τον τύπο της θύρας,
- τη συνάρτηση `setvalgpio()` που θέτει την κατάσταση της θύρας και
- τη συνάρτηση `exportgpio()` που διαβάζει την κατάσταση της θύρας.

5.2.3 Υλοποίηση του αλγορίθμου

Η επιλογή της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων για τον έλεγχο του συστήματος, εκτός των άλλων, επιλέχτηκε επιπλέον για την εύκολη τεχνική που υπάρχει και επιτυγχάνει να μεταφράσει τις καταστάσεις και τις μεταβάσεις της μηχανής σε πηγαίο κώδικα. Όπως αναφέρεται στη δημοσίευση [31] για την μετάφραση της μηχανής πεπερασμένων σε πηγαίο κώδικα ακολουθούνται κάποιοι απλοί κανόνες:

- το σύνολο των καταστάσεων της FSM δηλώνονται σαν στοιχεία μίας μεταβλητής τύπου `enum`,
- ορίζεται μία καθολική μεταβλητή (πχ `state`) που αντιπροσωπεύει τον δείκτη που καθορίζει σε ποια κατάσταση βρίσκεται κάθε στιγμή η μηχανή,
- πραγματοποιούνται έλεγχοι συνθήκης, συνήθως με την χρήση του `switch`, για να αποφασιστεί η ανάλογη μετάβαση.

Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος που γίνεται η μετάφραση ακολουθεί ένα παράδειγμα με μία απλή μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων που φαίνεται στην Εικόνα 5.6. Η μηχανή αυτή περιγράφει ένα σύστημα που αναγνωρίζει πότε μία πόρτα αυτοκινήτου είναι ανοιχτή και πότε κλειστή χρησιμοποιώντας ένα διακόπτη. Η μεταβλητή `X` αντιπροσωπεύει την κατάσταση του διακόπτη, συνεπώς γίνεται η εξής σύμβαση: όταν $X = 0$, τότε η πόρτα θεωρείται κλειστή ενώ όταν $X = 1$, τότε η πόρτα θεωρείται ανοιχτή. Έτσι όταν η πόρτα είναι κλειστή, δηλαδή $X = 0$, τότε η μηχανή βρίσκεται στην κατάσταση A. Αν όμως η πόρτα ανοίξει, δηλαδή $X = 1$ (αλλάζει η κατάσταση του διακόπτη), τότε η μηχανή μεταβαίνει στην κατάσταση B. Η μηχανή επιστρέφει στην A, μόνο αν ο διακόπτης αλλάξει ξανά κατάσταση. Ο αντίστοιχος κώδικας που παράγεται από αυτή τη μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων, βρίσκεται στην Εικόνα 5.7.



Εικόνα 5.6: Απλή μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων που αναγνωρίζει πότε μία πόρτα αυτοκινήτου είναι ανοικτή ή κλειστή.

```

1 ...
2 enum states {
3     A, B
4 } state;
5
6 state = A;
7
8 while(true) {
9     switch(state) {
10
11         case A:
12             if (x == 0)
13                 state = A;
14             if (x == 1)
15                 state = B;
16             break;
17
18         case B:
19             if (x == 1)
20                 state = B;
21             if (x == 0)
22                 state = A;
23             break;
24     }
25 }
26 ...

```

Εικόνα 5.7: Κώδικας που παράγεται από τη μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων της Εικόνας 5.6.

Με την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω δημιουργήθηκε και το πρόγραμμα που αντιπροσωπεύει τις καταστάσεις και τις μεταβάσεις την μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων που σχεδιάστηκε για το σύστημα. Για την καλύτερη οργάνωση και την ευκολότερη κατανόηση του πηγαίου κώδικα, δημιουργήθηκαν κάποιες βασικές συναρτήσεις. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.2

- οι βιολετί καταστάσεις ομαδοποιήθηκαν στην συνάρτηση fsm_init_op() που περιγράφεται στην υποενότητα 5.15,
- οι πράσινες καταστάσεις αναφέρονται στην διαδικασία φόρτισης των υπερπυκνωτών και συμπεριλαμβάνονται στην συνάρτηση fsm_charging_op() η οποία αναλύεται στην υποενότητα 5.2.11,
- στις κόκκινες καταστάσεις οι υπερπυκνωτές αποφορτίζονται και η διαδικασία ελέγχεται από την συνάρτηση fsm_discharging_op() που παρουσιάζεται στην υποενότητα 5.2.12,
- οι γαλάζιες καταστάσεις L-O δηλώνουν την λειτουργία του συστήματος υδρογόνου και ομαδοποιούνται στην συνάρτηση fsm_fc_op() που περιγράφεται στην υποενότητα 5.2.13.

5.2.4 Βοηθητική βιβλιοθήκη του συστήματος

Ακολουθεί μία βοηθητική βιβλιοθήκη που δημιουργήθηκε για την δήλωση μεταβλητών, τη δήλωση των πρωτοτύπων των συναρτήσεων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς επίσης και τη δήλωση σταθερών (Εικόνα 5.8).

```

1 #define OFF "0"           // gpio status off
2 #define ON "1"           // gpio status on
3 #define SEC_TIME 90000   // time of a second
4 #define INIT_STATES_NUM 3 // number of initialization states
5 #define SW_FC_GPIO "2"   // gpio for the fuel cell switch
6 #define SW_SC_C_GPIO "4" // gpio that controls supercaps charging operation
7 #define SW_SC_D_GPIO "27" // gpio that controls supercaps discharging operation
8 #define T_GPIO "22"      // gpio that senses throttle of the car
9 #define CH_GPIO "25"     // gpio that senses a charging threshold
10 #define T_PRESSED "0"    // pressed status of throttle
11 #define T_UNPRESSED "1"  // unpressed status of throttle
12 #define CH_TRUE "0"      // over charging threshold
13 #define CH_FALSE "1"
14 #define CHARGING 1
15 #define DISCHARGING 2
16 #define FC 3
17 #define Y_SMALL 89 //ASCII for letter 'y'
18 #define Y_BIG 121 //ASCII for letter 'Y'
19
20
21
22 // P state: system init - Waiting for switch_1 to open
23 // Q state: system init - Waiting for switch_3 to open
24 // R state: system init - Waiting for switch_2 to open
25
26
27 enum states { q0, q1, q2, q3, q4, q5, q6, q7, q8, q9, q10, q11, q12, q13, q14, q15
    , q16 };
28 states op_states; //
29 int throttle_counter; // Variable that counts how many times the throttle is
30 // is pressed.

```

```

31
32 void quit_signal_handler (int);
33
34 void gpio_init_process ();
35
36 void gpio_unexport_process ();
37
38 int turn_on_off_gpio (string, string, void*);
39
40 void fsm_init_op ();
41
42 void fsm_charging_op ();
43
44 void fsm_discharging_op ();
45
46 void fsm_fc_op ();
47
48 void print_logo ();

```

Εικόνα 5.8: Βοηθητική βιβλιοθήκη που περιλαμβάνει δηλώσεις μεταβλητών δηλώσεις πρωτοτύπων των συναρτήσεων και δηλώσεις σταθερών.

5.2.5 Η κύρια συνάρτηση του προγράμματος

Στον πηγαίο κώδικα της Εικόνας 5.9 φαίνεται η κύρια συνάρτηση του προγράμματος [main()] καθώς επίσης και οι δηλώσεις των GPIOs που είναι καθολικές. Έτσι κάθε διακόπτης που θέλουμε να ελέγξουμε καθώς επίσης και κάθε αισθητήρας που διαθέτουμε αποτελεί ξεχωριστό αντικείμενο της κλάσης gpio_class που δημιουργήθηκε στην βιβλιοθήκη:

- το αντικείμενο switch_1 αντιπροσωπεύει τον ηλεκτρονικό διακόπτη switch 1 που ελέγχει την έξοδο της κυψέλης υδρογόνου,
- το αντικείμενο switch_3 αναλαμβάνει τον έλεγχο του ηλεκτρονικού διακόπτη switch 3 που είναι υπεύθυνος για την φόρτιση των υπερπυκνωτών,
- το αντικείμενο switch_2 ελέγχει τον ηλεκτρονικό διακόπτη switch 2 για την αποφόρτιση των υπερπυκνωτών,
- η μεταβλητή sensor_1 αντιπροσωπεύει τον αισθητήρα του επιταχυντή του οχήματος (sensor 1), και ουσιαστικά είναι ένας διακόπτης για να γνωρίζει το πρόγραμμα αν ο οδηγός του οχήματος ωθεί το πετάλι του επιταχυντή και
- τέλος το αντικείμενο sensor_2 δημιουργήθηκε για τον αισθητήρα της τάσης των υπερπυκνωτών (sensor 2). Ο αισθητήρας αυτός ελέγχει αν η τάση των υπερπυκνωτών είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη από ένα ορισμένο όριο.

```

1 #include "gpio_class.h"
2 #include "aux_library.h"
3
4 using namespace std;

```



```

5
6 gpio_class* switch_1; // Gpio object to control fuel cell switch
7 gpio_class* switch_3; // Gpio object to control supercapacitors charging switch
8 gpio_class* switch_2; // Gpio object to control supercapacitors
9                                     //discharging switch
10 gpio_class* sensor_1; // Gpio object for the throttle switch
11 gpio_class* sensor_2; // Gpio object for the boolean status ch - charged, not
    charged
12
13
14 int main (void)
15 {
16
17     signal(SIGINT, quit_signal_handler);
18     string sensor_1_data; // Data from sensor 1 (throttle switch status)
19     string sensor_2_data; // Data from sensor 2 (sc voltage status)
20     print_logo();
21
22     gpio_init_process(); // GPIOs initialization
23     op_states = q0;      // FSM pointer initialization
24     throttle_counter = 0;
25
26     while (true) {
27
28         if ((op_states == q0) || (op_states == q1) || (op_states == q2))
29             fsm_init_op(); // Purple states of the fsm
30
31         else if ((op_states == q5) || (op_states == q6) ||
32                 (op_states == q7) || (op_states == q8))
33             fsm_charging_op(); // Green states of the fsm
34
35         else if ((op_states == q9) || (op_states == q10) ||
36                 (op_states == q11) || (op_states == q12))
37             fsm_discharging_op(); // Red states of the fsm
38
39         else if ((op_states == q13) || (op_states == q14) ||
40                 (op_states == q15) || (op_states == q16))
41             fsm_fc_op(); // Light blue states of the fsm
42
43         else if (op_states == q3) {
44             cout << "\nSTATE_q3\n" << endl;
45             usleep(SEC_TIME);
46             sensor_1 -> getval_gpio(sensor_1_data);
47
48             if (sensor_1_data == T_PRESSED)
49                 op_states = q4; // Throttle switch pressed
50             else
51                 op_states = q5; // Throttle switch not pressed -> charging
52
53             //if (throttle_counter == 2)
54             //    op_states = q5;
55     }

```

```

56     else if (op_states == q4) {
57         sensor_2 -> getval_gpio(sensor_2_data);
58
59         if (sensor_2_data == CH_TRUE)
60             op_states = q9;    // Discharging supercapacitors
61         else
62             op_states = q13;    // Fuel cell operation
63     }
64     else {
65         cout << "Not good" << endl;
66     }
67
68 }
69
70 gpio_unexport_process();
71 return 0;
72 }

```

Εικόνα 5.9: Η κύρια συνάρτηση του προγράμματος ελέγχου.

5.2.6 Διαχειριστής σήματος τερματισμού

Η συνάρτηση `quit_signal_handler` καλείται από το χρήστη (μέσω ενός τερματικού) όταν αυτός επιθυμεί να τερματίσει το πρόγραμμα ελέγχου του συστήματος ανάκτησης ενέργειας. Η συνάρτηση αυτή λειτουργεί ως διαχειριστής του σήματος τερματισμού, που προέρχεται από των συνδυασμό των πλήκτρων Control-C, και προκαλεί τον τερματισμό ενός προγράμματος σε λειτουργικά συστήματα linux. Η συνάρτηση αυτή ρωτάει τον χρήστη αν είναι σίγουρος για τον τερματισμό του προγράμματος, θέτει όλους τους ηλεκτρονικούς διακόπτες σε ανοικτή κατάσταση για θέματα ασφάλειας και τέλος απελευθερώνει τα αντίστοιχα αρχεία που έχουν δεσμευτεί από το λειτουργικό σύστημα για τις GPIOs.

```

1  /*
2  quit_signal_handler:
3  -----
4
5      This function terminates the program normally when
6      Control-c is pressed (SIGINT unix signal)
7  */
8  void quit_signal_handler(int signum)
9  {
10     printf("\nControl-c pressed (SIGINT), do you really");
11     printf(" want to exit? [Y/n]");
12     char chose;
13     scanf("%c",&chose);
14     printf("\n");
15     if ((chose == Y_SMALL) || (chose == Y_BIG)){
16
17         turn_on_off_gpio("Exiting", OFF, switch_1);
18         turn_on_off_gpio("Exiting", OFF, switch_3);
19         turn_on_off_gpio("Exiting", OFF, switch_2);
20         gpio_unexport_process();
21         printf("TRBS fsm finished !!! Signum: %d\n",signum);

```

```

22     exit (signum);
23 }
24 return;
25 }

```

Εικόνα 5.10: Η συνάρτηση τερματισμού.

5.2.7 Διαδικασία αρχικοποίησης των θυρών εισόδου εξόδου γενικής χρήσης

Η συνάρτηση `gpio_init_process` (Εικόνα 5.11) καλείται στην αρχή της κύριας συνάρτησης του προγράμματος και αναλαμβάνει την αρχικοποίηση των αντικειμένων της κλάσης `gpio_class`. Πιο συγκεκριμένα ορίζει τους αριθμούς που αντιστοιχούν στις επιλεγμένες θύρες (GPIOs), δεσμεύει (export) τις τελευταίες στο λειτουργικό σύστημα και για καθεμία από αυτές ορίζει τον τύπο τους, αν είναι δηλαδή είσοδος ή έξοδος.

```

1  /*
2  gpio_init_process:
3  -----
4
5  This function initializes gpios. Exporting, setting
6  direction etc.
7  */
8  void gpio_init_process ()
9  {
10     // Creating new instances of the gpio_class for gpios
11
12     switch_1 = new gpio_class (SW_FC_GPIO);
13     switch_3 = new gpio_class (SW_SC_C_GPIO);
14     switch_2 = new gpio_class (SW_SC_D_GPIO);
15     sensor_1 = new gpio_class (T_GPIO);
16     sensor_2 = new gpio_class (CH_GPIO);
17
18
19     // Exporting gpios
20
21     switch_1 -> export_gpio();
22     switch_3 -> export_gpio();
23     switch_2 -> export_gpio();
24     sensor_1 -> export_gpio();
25     sensor_2 -> export_gpio();
26
27
28     // Setting the gpios direction
29
30     switch_1 -> setdir_gpio("out");
31     switch_3 -> setdir_gpio("out");
32     switch_2 -> setdir_gpio("out");
33     sensor_1 -> setdir_gpio("in");
34     sensor_2 -> setdir_gpio("in");
35 }

```

Εικόνα 5.11: Συνάρτηση αρχικοποίησης των θυρών εισόδου-εξόδου γενικής χρήσης.

5.2.8 Διαδικασία αποδέσμευσης των ψηφιακών θυρών

Η συνάρτηση `gpio_unexport_process` (Εικόνα 5.12) απελευθερώνει τους πόρους που έχει διαθέσει το λειτουργικό σύστημα για την επικοινωνία με τις ψηφιακές θύρες. Ουσιαστικά δηλαδή, καταργεί τα αρχεία `gpio#`, `direction`, `value` που αναφέρονται στον αριθμό της θύρας, στον τύπο της και στην τιμή της αντίστοιχα. Η συνάρτηση αυτή καλείται κατά τον τερματισμό του προγράμματος και πιο συγκεκριμένα μέσα στην συνάρτηση `quit_signal_handler`.

```
1  /*
2  gpio_unexport_process:
3  -----
4
5  This function is unexporting gpios when it is needed.
6  */
7  void gpio_unexport_process()
8  {
9      // Unexporting gpios
10
11     switch_1 -> unexport_gpio();
12     switch_3 -> unexport_gpio();
13     switch_2 -> unexport_gpio();
14     sensor_1 -> unexport_gpio();
15     sensor_2 -> unexport_gpio();
16 }
```

Εικόνα 5.12: Η συνάρτηση αποδέσμευσης των θυρών εισόδου-εξόδου γενικής χρήσης.

5.2.9 Ελεγχόμενη αλλαγή κατάστασης ψηφιακής θύρας

Η συνάρτηση `turn_on_off_gpio` (Εικόνα 5.13) δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για λόγους μεγαλύτερης ασφάλειας. Καλείται σε όλα τα μέρη του προγράμματος στα οποία απαιτείται η αλλαγή της κατάστασης μίας ψηφιακής θύρας εξόδου. Επιχειρεί να αλλάξει την κατάσταση μίας ψηφιακής θύρας γράφοντας 1 ή 0 (για να την ενεργοποίηση ή την απενεργοποίηση της θύρας αντίστοιχα) στο αρχείο `value` που αντιστοιχεί στη θύρα αυτή. Τότε, εισέρχεται σε κατάσταση αναμονής για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα `SEC_TIME` και μετά διαβάζει το αρχείο που προσπάθησε να αλλάξει. Αν το αρχείο έχει αλλάξει τότε επιστρέφει την τιμή `true` στο πρόγραμμα που την κάλεσε. Διαφορετικά επιστρέφει `false`. Παρόλο που η συνάρτηση αυτή δεν μπορεί να ανιχνεύσει σφάλματα στο υλικό μέρος του συστήματος, είναι πολύ χρήσιμη γιατί με την χρήση της αποφεύγονται πιθανά σφάλματα λογισμικού.

```
1  /*
2  turn_on_off_gpio:
3  -----
4
5  This function changes the status of a gpio when it is
6  called. It also checks if the status has really changed,
7  and in this case returns true. Otherwise it returns
8  false.
9  */
10 int turn_on_off_gpio(string state, string status, void* gpio)
```

```

11 {
12     cout << "\t" << state << endl;
13     int return_status;
14     string gpio_value;
15     gpio_class* gpio_aux = (gpio_class*)gpio;
16     gpio_aux -> setval_gpio(status);
17     usleep(SEC_TIME); // waiting for a while
18     gpio_aux -> getval_gpio(gpio_value);
19
20     if (gpio_value == status) // checking gpio value
21         return_status = true;
22
23     else
24         return_status = false;
25
26     return return_status;
27 }

```

Εικόνα 5.13: Η συνάρτηση που αναλαμβάνει να αλλάξει την κατάσταση μίας ψηφιακής θύρας εξόδου.

5.2.10 Διαδικασία αρχικοποίησης του συστήματος

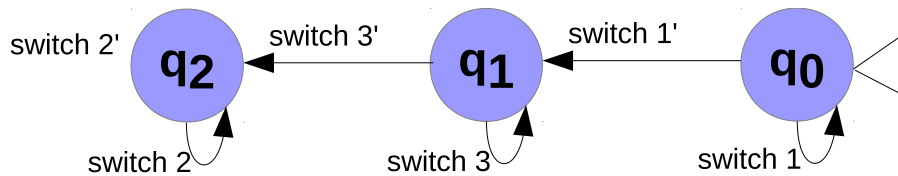
Η συνάρτηση `fsm_init_op` Εικόνα (5.15) καλείται στην αρχή της κύριας συνάρτησης του προγράμματος και αναλαμβάνει τη διαδικασία αρχικοποίησης του συστήματος, κατά την οποία θέτονται όλοι οι ηλεκτρονικοί διακόπτες σε ανοικτή κατάσταση έτσι ώστε να μην άγουν. Ουσιαστικά αυτό γίνεται για να γνωρίζει το σύστημα την αρχική του κατάσταση ώστε να μην υπάρχουν απρόσμενες καταστάσεις. Η λειτουργία της συνάρτησης `fsm_init_op` περιγράφεται στην Εικόνα 5.14, το οποίο αποτελεί μέρος της Εικόνας 5.2. Η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία κατά την κλήση της συνάρτησης αυτής.

1. Ξεκινάει με την κατάσταση `q0` στην οποία απενεργοποιείται ο ηλεκτρονικός διακόπτης που ελέγχει την κυψέλη υδρογόνου. Αν η κατάσταση της αντίστοιχης θύρας αλλάξει επιτυχώς, τότε η μηχανή περνάει στην επόμενη κατάσταση `q1`, διαφορετικά παραμένει στην ίδια.
2. Στην κατάσταση `q1` απενεργοποιείται ο ηλεκτρονικός διακόπτης που είναι υπεύθυνος για την φόρτιση των υπερπυκνωτών. Η μηχανή περνάει στην επόμενη κατάσταση `q2` αν η κατάσταση της αντίστοιχης ψηφιακής θύρας αλλάξει επιτυχώς.
3. Στην κατάσταση `q2` απενεργοποιείται ο ηλεκτρονικός διακόπτης που είναι υπεύθυνος για την εκφόρτιση των υπερπυκνωτών. Αν η κατάσταση της αντίστοιχης θύρας αλλάξει επιτυχώς, τότε η μηχανή περνάει στην επόμενη κατάσταση `q3`, διαφορετικά παραμένει στην ίδια.

```

1  /*
2  fsm_init_op:
3  -----
4
5  This function is called to initialize the automaton.
6  It tries to turn off all the gpios with direction "out".
7  */

```



Εικόνα 5.14: Διαδικασία αρχικοποίησης των ηλεκτρονικών διακοπών.

```

8 void automaton_init_op()
9 {
10  string gpio_value; // auxiliary var to load gpio's value
11  int status;
12  cout << "Initializing operation" << endl;
13
14  switch (op_states) {
15      case q0:
16          // trying to turn off switch_1 gpio
17          status = turn_on_off_gpio("q0", OFF, switch_1);
18
19          if (status == true) // checking gpio value
20              op_states = q1; // change state
21
22          else
23              op_states = q0; // stay in the same state
24
25          break;
26
27      case q1:
28          // trying to turn off switch_3 gpio
29          status = turn_on_off_gpio("q1", OFF, switch_3);
30
31          if (status == true) // checking gpio value
32              op_states = q2; // change state
33
34          else
35              op_states = q1; // stay in the same state
36
37          break;
38
39      case q2:
40          // trying to turn off switch_2 gpio
41          status = turn_on_off_gpio("q2", OFF, switch_2);
42
43          if (status == true) // checking gpio value
44              op_states = q3; // change state
45
46          else
47              op_states = q2; // stay in the same state
48          break;
49  }

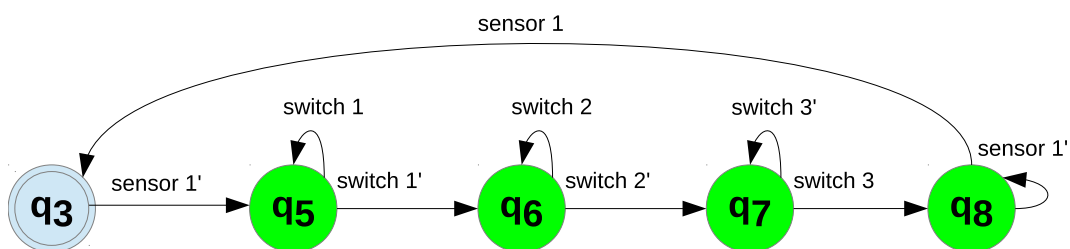
```

Εικόνα 5.15: Συνάρτηση αρχικοποίησης των ηλεκτρονικών διακοπών.

5.2.11 Διαδικασία φόρτισης υπερπυκνωτών

Η συνάρτηση `fsm_chargin_op` Εικόνα 5.17 καλείται από την κύρια συνάρτηση του προγράμματος κάθε φορά που μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων βρίσκεται σε μία από τις καταστάσεις `q5`, `q6`, `q7`, `q8`. Η συνάρτηση αυτή υλοποιεί τη διαδικασία φόρτισης των υπερπυκνωτών που απεικονίζεται στην Εικόνα 5.16, το οποίο αποτελεί μέρος της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων της Εικόνας 5.2. Οι καταστάσεις της διαδικασίας αυτής (φόρτισης) είναι οι `q5`, `q6`, `q7`, `q8` και η ακολουθία ξεκινάει με την πρώτη και προχωράει διαδοχικά στις επόμενες. Το σύστημα για να εισέλθει στις καταστάσεις της φόρτισης, πρώτα πρέπει να περάσει από την κατάσταση `q3`. Σε αυτή τη φάση ελέγχει αν ο επιταχυντής είναι απενεργοποιημένος και μόνο τότε ξεκινάει την φόρτιση μεταβαίνοντας στην κατάσταση `q8`.

- Στην κατάσταση `q5`, το σύστημα επιχειρεί να απενεργοποιήσει τον ηλεκτρονικό διακόπτη που ελέγχει την κυψέλη υδρογόνου (switch 1). Μεταβαίνει στην επόμενη κατάσταση μόνο αν ο διακόπτης απενεργοποιηθεί επιτυχώς,
- αντίστοιχα στην κατάσταση `q6`, το σύστημα επιχειρεί να απενεργοποιήσει τον ηλεκτρονικό διακόπτη της εκφόρτισης των πυκνωτών (switch 2),
- ενώ στην επόμενη κατάσταση (`q7`) πραγματοποιείται ενεργοποίηση του διακόπτη φόρτισης (switch 3). Έτσι, αν το σύστημα μεταβεί επιτυχώς στην κατάσταση `q8`, τότε το σύστημα είναι σε διαδικασία φόρτισης.
- από την κατάσταση φόρτισης το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση `q3`, μόνο αν ενεργοποιηθεί ο επιταχυντής από τον οδηγό του οχήματος.



Εικόνα 5.16: Διαδικασία Φόρτισης.

```

1  /*
2  fsm_charging_op:
3  -----
4
5  This function is called when the system is going to
6  charge supercapacitors.
7  */
8  void automaton_charging_op()

```

```

9 {
10     string sensor_1_data;
11     string sensor_2_data;
12     int status;
13
14     cout << "Charging operation" << endl;
15
16
17     switch (op_states) {
18         case q5:
19             // trying to turn off switch_1 gpio
20             status = turn_on_off_gpio("q5", OFF, switch_1);
21
22             if (status == true) // checking gpio value
23                 op_states = q6; // change state
24             else
25                 op_states = q5; // stay in the same state
26             break;
27
28         case q6:
29             // trying to turn off switch_2 gpio
30             status = turn_on_off_gpio("q6", OFF, switch_2);
31
32             if (status == true) // checking gpio value
33                 op_states = q7; // change state
34             else
35                 op_states = q6; // stay in the same state
36             break;
37
38         case q7:
39             // trying to turn on switch_3 gpio
40             status = turn_on_off_gpio("q7", ON, switch_3);
41
42             if (status == true) // checking gpio value
43                 op_states = q8; // change state
44             else
45                 op_states = q7; // stay in the same state
46             break;
47
48         case q8:
49
50             cout << "\tF" << endl;
51             usleep(SEC_TIME);
52             sensor_1 -> getval_gpio(sensor_1_data);
53             sensor_2 -> getval_gpio(sensor_2_data);
54
55             if ((sensor_1_data == T_PRESSED) || (sensor_2_data == CH_TRUE))
56                 op_states = q3; // change state
57             else
58                 op_states = q8; // stay in the same state
59             break;
60     }

```

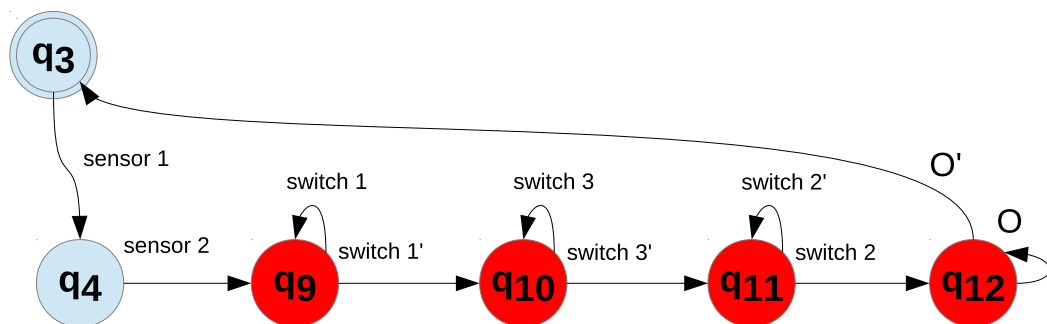

Εικόνα 5.17: Η συνάρτηση που υλοποιεί τη διαδικασία φόρτισης των υπερπυκνωτών.

5.2.12 Εκφόρτιση υπερπυκνωτών

Η συνάρτηση `fsm_dischargin_op` Εικόνα 5.19 καλείται από την κύρια συνάρτηση του προγράμματος κάθε φορά που μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων βρίσκεται σε μία από τις καταστάσεις `q9`, `q10`, `q11`, `q12`. Η συνάρτηση αυτή υλοποιεί τη διαδικασία εκφόρτισης των υπερπυκνωτών που απεικονίζεται στην Εικόνα 5.18, το οποίο αποτελεί μέρος της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων της Εικόνας 5.2. Οι καταστάσεις της διαδικασίας αυτής (εκφόρτισης) είναι οι `q9`, `q10`, `q11`, `q12` και η ακολουθία ξεκινάει με πρώτη την κατάσταση `q9`. Η όλη διαδικασία όμως ξεκινάει από την κατάσταση `q3`, από την οποία το πρόγραμμα μεταβαίνει στην κατάσταση `q4`, μόνο αν ο οδηγός του οχήματος ενεργοποιήσει τον επιταχυντή.

- Στην κατάσταση `q4` αποφασίζεται ότι το όχημα θα κινηθεί με την χρήση υπερπυκνωτών, μόνο αν η τάση των τελευταίων είναι υψηλότερη από το προκαθορισμένο κατώφλι,
- στην κατάσταση `q9`, το σύστημα επιχειρεί να απενεργοποιήσει τον ηλεκτρονικό διακόπτη που ελέγχει την διαδικασία φόρτισης των υπερπυκνωτών (switch 1). Μεταβαίνει στην επόμενη κατάσταση μόνο αν ο διακόπτης απενεργοποιηθεί επιτυχώς,
- αντίστοιχα στην κατάσταση `q10`, το σύστημα επιχειρεί να απενεργοποιήσει τον ηλεκτρονικό διακόπτη που ελέγχει την έξοδο της κυψέλης υδρογόνου (switch 3),
- στην επόμενη κατάσταση (`q11`) πραγματοποιείται ενεργοποίηση του διακόπτη που ελέγχει την εκφόρτιση των υπερπυκνωτών (switch 2). Έτσι, αν το σύστημα μεταβεί επιτυχώς στην κατάσταση `q12`, τότε το σύστημα είναι σε διαδικασία κίνηση με τη χρήση των υπερπυκνωτών.

Το σύστημα εγκαταλείπει την εκφόρτιση των υπερπυκνωτών αν είτε η τάση των υπερπυκνωτών πέσει κάτω από το ορισμένο κατώφλι, είτε ο οδηγός του οχήματος απενεργοποιήσει τον επιταχυντή.



Εικόνα 5.18: Διαδικασία Εκφόρτισης.

```

1 /*
2 fsm_discharging_op:
3 -----
4
5 This function is called when the system "decides" to

```

```

6   move the car by using supercapacitors.
7   */
8   void fsm_discharging_op()
9   {
10      string sensor_1_data;
11      string sensor_2_data;
12      int status;
13
14      cout << "Discharging operation" << endl;
15
16
17      switch (op_states) {
18          case q9:
19              // trying to turn off switch_1 gpio
20              status = turn_on_off_gpio("q9", OFF, switch_1);
21
22              if (status == true)    // checking gpio value
23                  op_states = q10;  // change state
24              else
25                  op_states = q9;    // stay in the same state
26              break;
27
28          case q10:
29              // trying to turn off switch_3 gpio
30              status = turn_on_off_gpio("q10", OFF, switch_3);
31
32              if (status == true)    // checking gpio value
33                  op_states = q11;  // change state
34              else
35                  op_states = q10;    // stay in the same state
36              break;
37
38          case q11:
39              // trying to turn on switch_2 gpio
40              status = turn_on_off_gpio("q11", ON, switch_2);
41
42              if (status == true)    // checking gpio value
43                  op_states = q12;  // change state
44              else
45                  op_states = q11;    // stay in the same state
46              break;
47
48          case q12:
49
50              usleep(SEC_TIME);
51              sensor_1 -> getval_gpio(sensor_1_data);
52              sensor_2 -> getval_gpio(sensor_2_data);
53
54              if ((sensor_1_data == T_UNPRESSED) || (sensor_2_data == CH_FALSE))
55                  op_states = q3;    // change state
56              else
57                  op_states = q12;    // stay in the same state

```

```

58     break;
59 }
60 }

```

Εικόνα 5.19: Η συνάρτηση που υλοποιεί τη διαδικασία εκφόρτισης των υπερπυκνωτών.

5.2.13 Κίνηση με χρήση της κυψέλης υδρογόνου

Η συνάρτηση `fsm_fc_op` Εικόνα 5.21 καλείται από την κύρια συνάρτηση του προγράμματος κάθε φορά που η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων βρίσκεται σε μία από τις καταστάσεις `q13`, `q14`, `q15`, `q16`. Η συνάρτηση αυτή υλοποιεί τη διαδικασία κατά την οποία γίνεται η χρήση της κυψέλης υδρογόνου ως βασική πηγή ενέργειας για την κίνηση του οχήματος. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην Εικόνα 5.20, το οποίο αποτελεί μέρος της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων της Εικόνας 5.2, και όπως φαίνεται ξεκινάει με πρώτη την κατάσταση `q13`. Πριν όμως τη μετάβαση σε αυτή τη λειτουργία, η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων ξεκινάει από την κατάσταση `q3`, από την οποία το πρόγραμμα μεταβαίνει στην κατάσταση `q4`, μόνο αν ο οδηγός του οχήματος ενεργοποιήσει τον επιταχυντή. Στη συνέχεια:

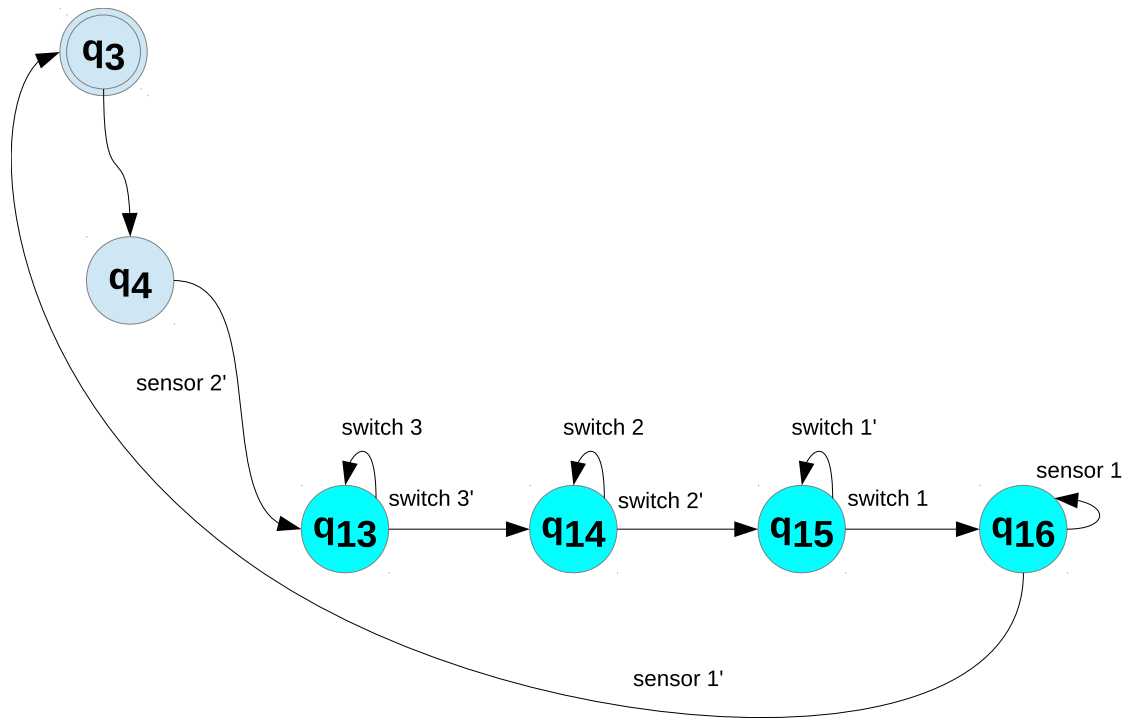
- στην κατάσταση `q4` αποφασίζεται ότι το όχημα θα κινηθεί με την χρήση της κυψέλης υδρογόνου, μόνο αν η τάση των υπερπυκνωτών είναι χαμηλότερη από το προκαθορισμένο κατώφλι,
- στην κατάσταση `q13`, το σύστημα επιχειρεί να απενεργοποιήσει τον ηλεκτρονικό διακόπτη που ελέγχει την διαδικασία φόρτισης των υπερπυκνωτών (switch 3). Μεταβαίνει στην επόμενη κατάσταση μόνο αν ο διακόπτης απενεργοποιηθεί επιτυχώς,
- αντίστοιχα στην κατάσταση `q14`, το σύστημα επιχειρεί να απενεργοποιήσει τον ηλεκτρονικό διακόπτη που ελέγχει την εκφόρτιση των υπερπυκνωτών (switch 2),
- στην επόμενη κατάσταση (`q15`) πραγματοποιείται ενεργοποίηση του διακόπτη που ελέγχει την έξοδο της κυψέλης υδρογόνου (switch 1). Έτσι, αν το σύστημα μεταβεί επιτυχώς στην κατάσταση `q16`, τότε το σύστημα είναι σε διαδικασία κίνησης με τη χρήση της κυψέλης υδρογόνου.

Το σύστημα εγκαταλείπει την χρήση της κυψέλης υδρογόνου αν ο οδηγός του οχήματος απενεργοποιήσει τον επιταχυντή.

```

1
2 fsm_fc_op :
3 -----
4
5     This function is called when the system "decides" to
6     move the car by using fuel cell.
7     */
8
9     void fsm_fc_op()
10    {
11        string sensor_1_data;
12        string sensor_2_data;
13        int status;
14

```



Εικόνα 5.20: Κίνηση με χρήση της κυψέλης υδρογόνου.

```

15  cout << "FC operation" << endl;
16
17
18  switch (op_states) {
19      case q13:
20          status = turn_on_off_gpio("q13", OFF, switch_3);
21
22          if (status == true) // checking gpio value
23              op_states = q14;
24          else
25              op_states = q13;
26          break;
27
28      case q14:
29          status = turn_on_off_gpio("q14", OFF, switch_2);
30
31          if (status == true) // checking gpio value
32              op_states = q15;
33          else
34              op_states = q14;
35          break;
36
37      case q15:
38          status = turn_on_off_gpio("q15", ON, switch_1);
39
40          if (status == true) // checking gpio value
41              op_states = q16;
42          else
43              op_states = q15;

```

```

44     break;
45
46     case q16:
47
48         usleep(SEC_TIME);
49         sensor_1 -> getval_gpio(sensor_1_data);
50         sensor_2 -> getval_gpio(sensor_2_data);
51
52         if ((sensor_1_data == T_UNPRESSED))
53             op_states = q3;
54         else
55             op_states = q16;
56         break;
57     }
58 }

```

Εικόνα 5.21: Η συνάρτηση που υλοποιεί τη διαδικασία κατά την οποία γίνεται η χρήση της κυψέλης υδρογόνου ως βασική πηγή ενέργειας για την κίνηση του οχήματος.

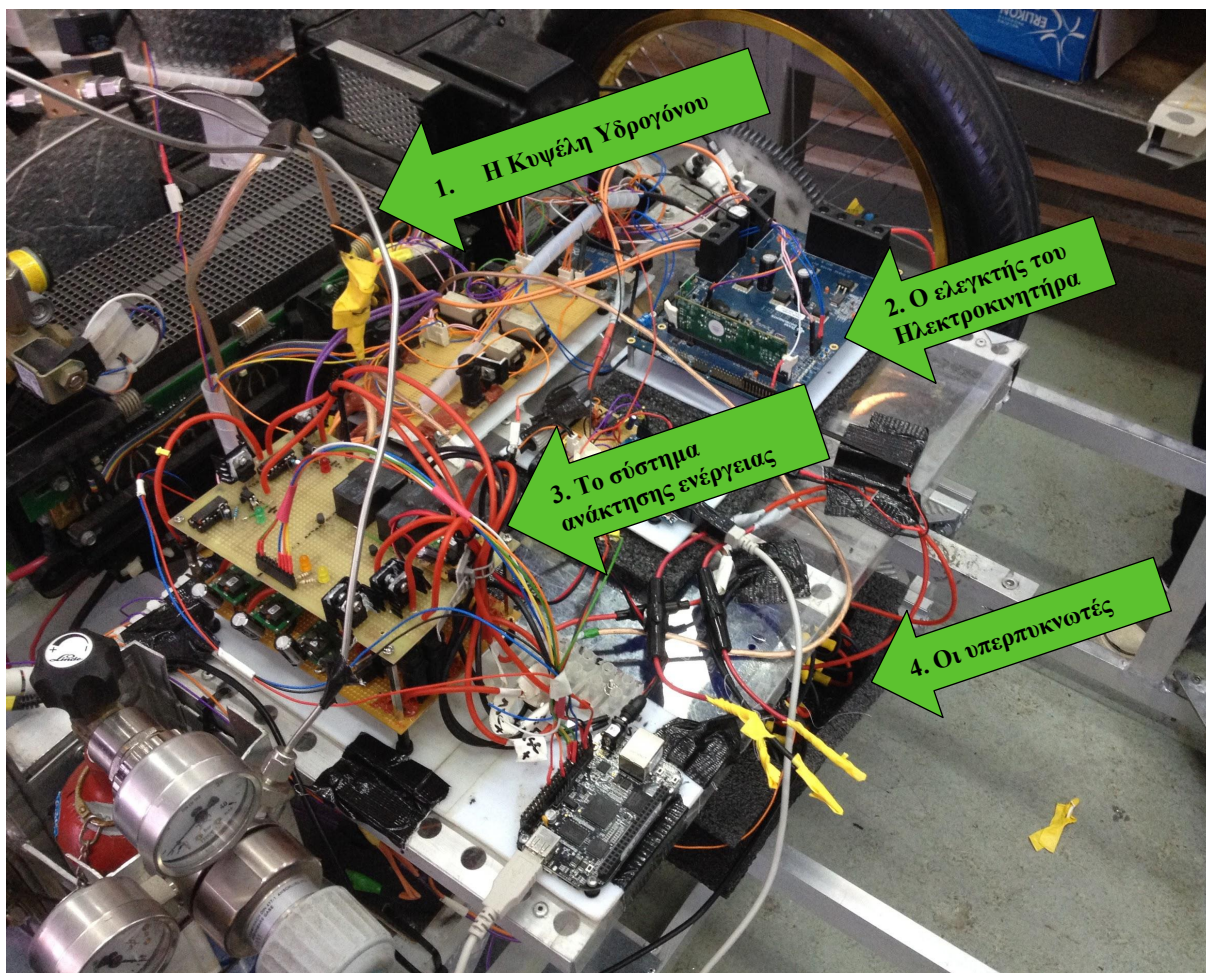
Πειραματικά Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής και του προγραμματισμού του συστήματος, ακολούθησε ένας μεγάλος αριθμός δοκιμών στο εργαστήριο. Από τα πειράματα αυτά προέκυψαν κάποια σημαντικά συμπεράσματα που επηρέασαν την τελική δοκιμή σε πραγματικές οδικές συνθήκες:

- όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 3.5, η συστοιχία των υπερπυκνωτών έχει μέγιστη τιμή τάσης τα 15 Volts. Επίσης ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να αυξήσει 120 περιστροφές το λεπτό (RPM) για κάθε 1 Voltτάσης που του προσφέρεται. Έτσι, θεωρητικά, τα 15 Volts των υπερπυκνωτών μπορούν να περιστρέψουν τον ηλεκτροκινητήρα με 1800 στροφές το λεπτό, δηλαδή θα μπορούσαν να κινήσουν το όχημα με ταχύτητα περίπου 18 kmph με δεδομένο ότι η ακτίνα του τροχού είναι 27cm. Όμως οι υπερπυκνωτές αποφορτίζονται γρήγορα και επιπλέον από τα πειράματα που έγιναν, παρατηρήθηκε ότι είναι δύσκολο να φορτιστούν πλήρως. Αυτό σημαίνει ότι το όχημα δεν θα μπορούσε να διατηρήσει μια σταθερή υψηλή ταχύτητα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έτσι αποφασίστηκε η κίνηση με τους υπερπυκνωτές να είναι σταθερή στα 10 kmph ώστε να προκύψουν αποτελέσματα που μπορούν να δείξουν την προσφορά των υπερπυκνωτών. Λεπτομέρειες θα δοθούν παρακάτω.
- Ο ελεγκτής του ηλεκτροκινητήρα και όλη η περιφερειακή πλακέτα του δουλεύει στο πεδίο τιμών τάσης 8-60 Volts . Έτσι για να διατηρηθεί η ταχύτητα του οχήματος στα 10 kmph πρέπει να προσφερθούν πάνω από 10 Volts . Μάλιστα επιλέχθηκε η τάση των υπερπυκνωτών να μην πέφτει κάτω από τα 12 Volts γιατί όταν είναι συνδεδεμένοι σε φορτίο, θα έχουν ακόμα χαμηλότερη τάση.
- Η φόρτιση των υπερπυκνωτών ξεκινάει όταν οι στροφές του ηλεκτροκινητήρα ξεπερνούν τις 1400-1500 rpm, επειδή σε αυτό το σημείο η ανορθωμένη τάση στην είσοδο της πλακέτας του ελεγκτή του ηλεκτροκινητήρα, είναι περίπου 13-14 Volts και ξεπερνάει την αρχική τάση των υπερπυκνωτών που είναι 12 Volts. Επιπλέον, στο όχημα υπάρχει μία σχέση μετάδοσης της κίνησης περίπου ένα προς δέκα (1:10), ανάμεσα στον ηλεκτροκινητήρα και στον τροχό. Αυτό σημαίνει ότι η κίνηση του τροχού παράγει αρκετή ενέργεια ώστε να φορτίζονται οι υπερπυκνωτές, όταν το όχημα κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη των 15 kmph.

6.0.1 Τελική Δοκιμή

Αφότου ολοκληρώθηκαν τα πειράματα στο εργαστήριο, το σύστημα ανάκτησης ενέργειας εγκαταστάθηκε στο όχημα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1, και ξεκίνησαν οι δοκιμές σε πραγματικές οδικές συνθήκες. Η διαδρομή της τελικής δοκιμής στις εγκαταστάσεις της Πολυτεχνειούπολης του Πολυ-



Εικόνα 6.1: Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας εγκατεστημένο στο όχημα.

τεχνείου Κρήτης απεικονίζεται γραφικά στην Εικόνα 6.2. Επιλέχθηκε έτσι ώστε να αποδειχθεί ότι η ανακτώμενη ενέργεια μπορεί να προσφέρει σημαντική βελτίωση στην κατανάλωση και συνεπώς στην αυτονομία του ηλεκτρικού οχήματος. Κατά την αρχή της δοκιμής οι υπερπυκνωτές είχαν τάση 12 Volts όσο δηλαδή και το αντίστοιχο κατώφλι του συγκριτή. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίστηκε ότι θα χρησιμοποιηθεί μόνο ανακτημένη ενέργεια και όχι ενέργεια που προϋπήρχε στους υπερπυκνωτές από την αρχική φόρτιση. Κατά τη διάρκεια της διαδρομής οι υπερπυκνωτές θα φορτιστούν και στο τελευταίο τμήμα της το όχημα κινείται μόνο με την ανακτημένη ενέργεια.

Πιο συγκεκριμένα έγινε μία προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα πραγματικό σενάριο οδήγησης ώστε να δειχθούν αποτελέσματα που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα:

- στο κόκκινο μέρος της διαδρομής το όχημα πραγματοποιεί επιτάχυνση μέχρι τα 20 kmph (που είναι εντός του επιτρεπτού ορίου ταχύτητας στους βασικούς δρόμους της Πολυτεχνειούπο-

λης) και τότε ο οδηγός απενεργοποιεί τον επιταχυντή έως ότου το όχημα επιβραδύνει στο κατηγορικό οδόστρωμα μέχρι να σταματήσει στην αρχή της πράσινης γραμμής.

- Στην πράσινη γραμμή το όχημα ξεκινάει από την ηρεμία και επιταχύνει μέχρι να αποκτήσει ταχύτητα ίση με 10 kmph που είναι και το μέγιστο επιτρεπτό όριο ταχύτητας στους χώρους στάθμευσης. Το όχημα πραγματοποιεί τον γύρο του χώρου στάθμευσης και επειδή δεν υπάρχει ελεύθερη θέση, κινείται προς την έξοδο και σταματά στην αρχή της κίτρινης γραμμής.
- Στην κίτρινη γραμμή το όχημα επιταχύνει ξανά μέχρι τα 20 kmph και τότε ο οδηγός απενεργοποιεί τον επιταχυντή ώστε το όχημα να εισέλθει στον επόμενο χώρο στάθμευσης και να σταματήσει στην αρχή της μπλε γραμμής.
- Στην μπλε διαδρομή το όχημα ξεκινάει και κινείται με 10 kmph, κάνοντας τον γύρο του χώρου στάθμευσης όπου τελικά ο οδηγός παρατηρεί μία ελεύθερη θέση, όπου και σταθμεύει.

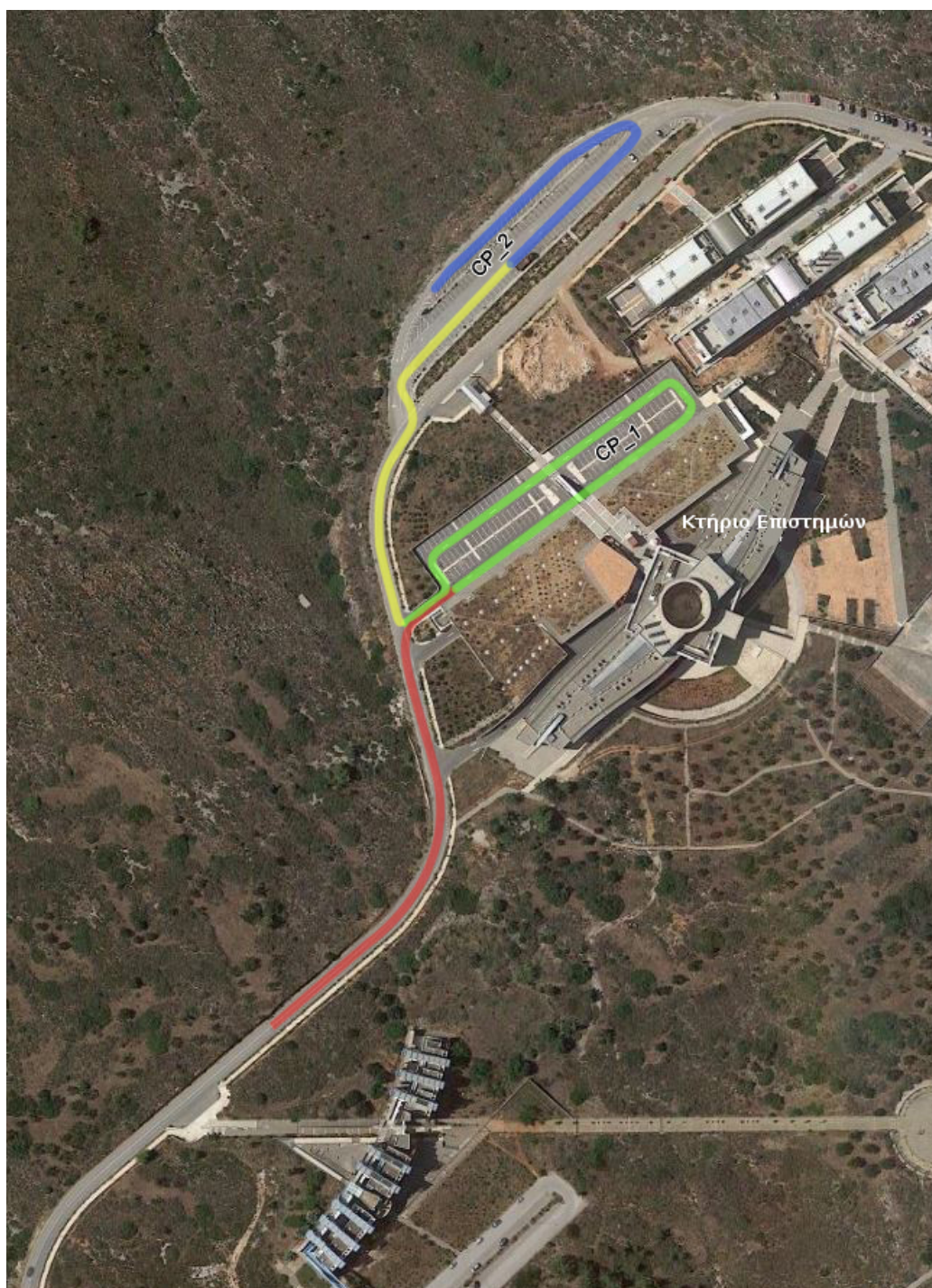
Αυτή η διαδρομή πραγματοποιήθηκε δύο φορές. Την πρώτη φορά έγινε με το όχημα να κινείται μόνο με την κυψέλη υδρογόνου, ενώ την δεύτερη έγινε με το σύστημα ανάκτησης ενέργειας εγκατεστημένο. Έτσι μετρήθηκε η προσφορά του συστήματος σε ενέργεια.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 6.3, φόρτιση των υπερπυκνωτών πραγματοποιείται στα χρονικά διαστήματα 10'-46' και 185'-212', στα οποία το όχημα επιβραδύνει από τα 20 kmph μέχρι την ηρεμία. Μπορεί να παρατηρήσει κανείς στο διάγραμμα της Εικόνας 6.3, ότι στα σημεία φόρτισης (πράσινη γραμμή) η ταχύτητα διατηρείται σταθερή. Αντιθέτως στην περίπτωση που το σύστημα δεν είναι εγκατεστημένο, η ταχύτητα σε αυτά τα διαστήματα αυξάνεται γιατί ο ηλεκτροκινητήρας περιστρέφεται ελεύθερος. Από το ίδιο διάγραμμα φαίνεται ότι η καμπύλες της ταχύτητας των δύο δοκιμών είναι σχεδόν πανομοιότυπες, γεγονός που σημαίνει ότι τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα.

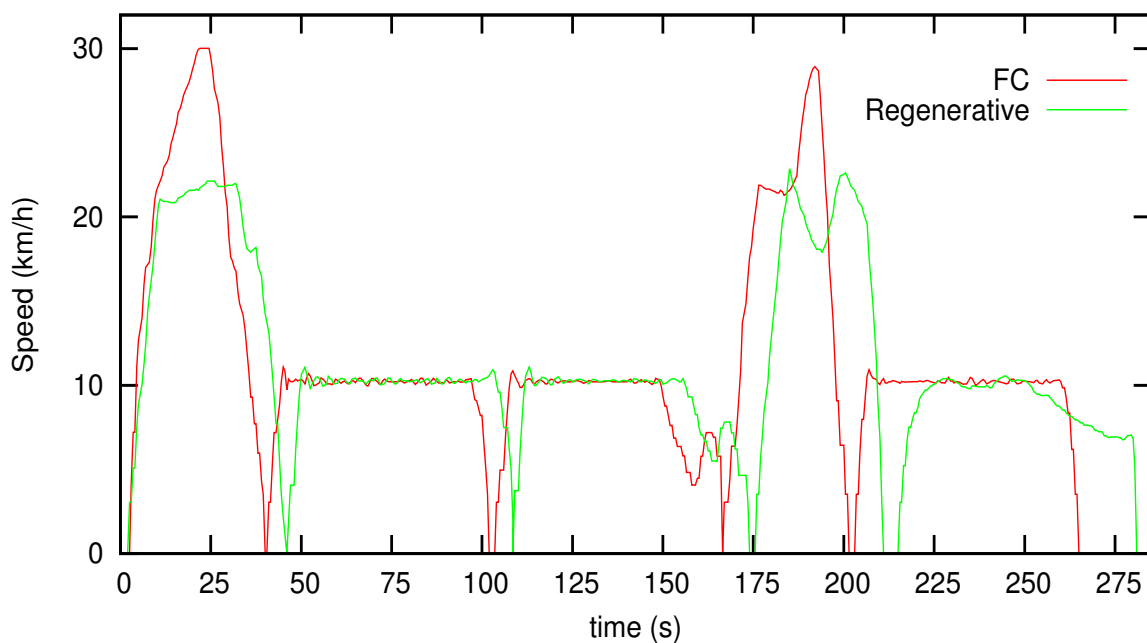
Στο πρώτο διάγραμμα (πάνω) της Εικόνας 6.4 φαίνονται οι τάσεις και τα ρεύματα κατά τη διάρκεια της πρώτης δοκιμής που πραγματοποιήθηκε χωρίς την προσθήκη του συστήματος ανάκτησης ενέργειας. Στο δεύτερο διάγραμμα (κάτω) της Εικόνας 6.4 παρουσιάζονται οι τάσεις και τα ρεύματα από την δεύτερη δοκιμή που επιτεύχθηκε με τη χρήση του συστήματος ανάκτησης ενέργειας. Από το δεύτερο διάγραμμα (Εικόνα 6.4) μπορεί κανείς να καταλάβει τότε το όχημα κινείται με τους υπερπυκνωτές και τότε με την κυψέλη υδρογόνου, παρατηρώντας τις τάσεις. Στο τελευταίο μέρος του διαγράμματος αυτού (κάτω, Εικόνα 6.4) φαίνεται ότι η τάση είναι πολύ μικρή και το ρεύμα υψηλό γιατί το όχημα κινείται με την ενέργεια των υπερπυκνωτών. Ενώ στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα του πρώτου διαγράμματος (πάνω, Εικόνα 6.4), στο οποίο το όχημα κινείται μόνο με την κυψέλη υδρογόνου, η τάση είναι υψηλή και το ρεύμα χαμηλό.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 6.5 φαίνεται η ισχύς που καταναλώνεται από τον κινητήρα και τον ελεγκτή του στις δύο περιπτώσεις της δοκιμής. Η πρώτη περίπτωση, κατά την οποία το όχημα κινείται μόνο με ενέργεια που προέρχεται από την κυψέλη υδρογόνου, απεικονίζεται με την κόκκινη γραμμή. Η δεύτερη περίπτωση, κατά την οποία το όχημα διαθέτει το σύστημα ανάκτησης, απεικονίζεται από την πράσινη και την μπλε γραμμή. Πιο συγκεκριμένα η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει την ανακτημένη ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση του οχήματος στο τελευταίο τμήμα της διαδρομής.

Υπολογίστηκε, χρησιμοποιώντας τον κανόνα του τραπεζίου [32] που εφαρμόστηκε στα διαγράμματα της Εικόνας 6.5, ότι η συγκεκριμένη διαδρομή και με τις συγκεκριμένες συνθήκες απαιτεί ενέργεια ίση με 15322J. Η ενέργεια που προσέφεραν οι υπερπυκνωτές, δηλαδή η ανακτημένη ενέργεια, είναι περίπου ίση με 2482J. Σύμφωνα με αυτά τα στοιχεία λοιπόν, η προσθήκη του συστήματος

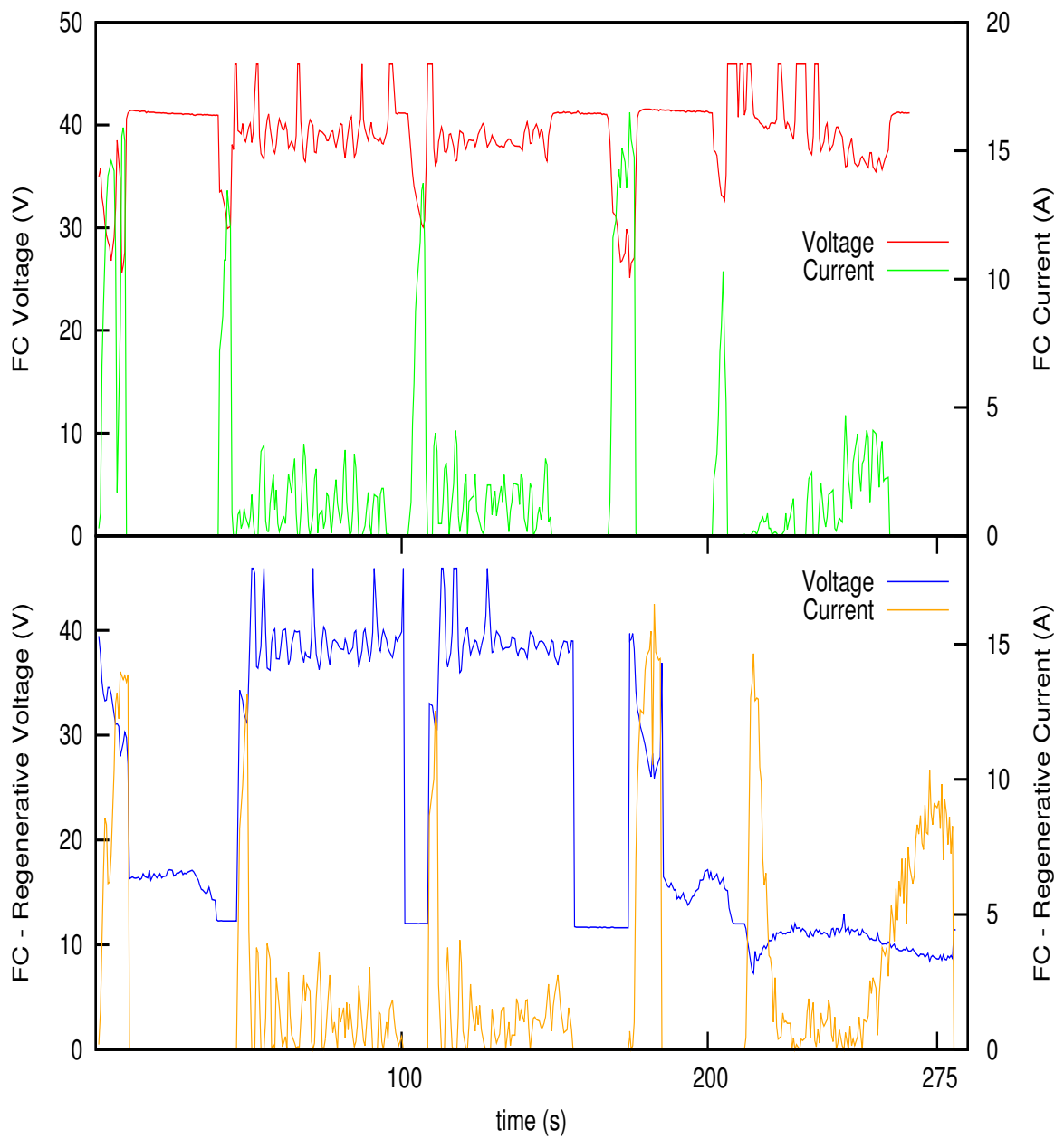


Εικόνα 6.2: Η διαδρομή της δοκιμής εντός της Πολυτεχνειούπολης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

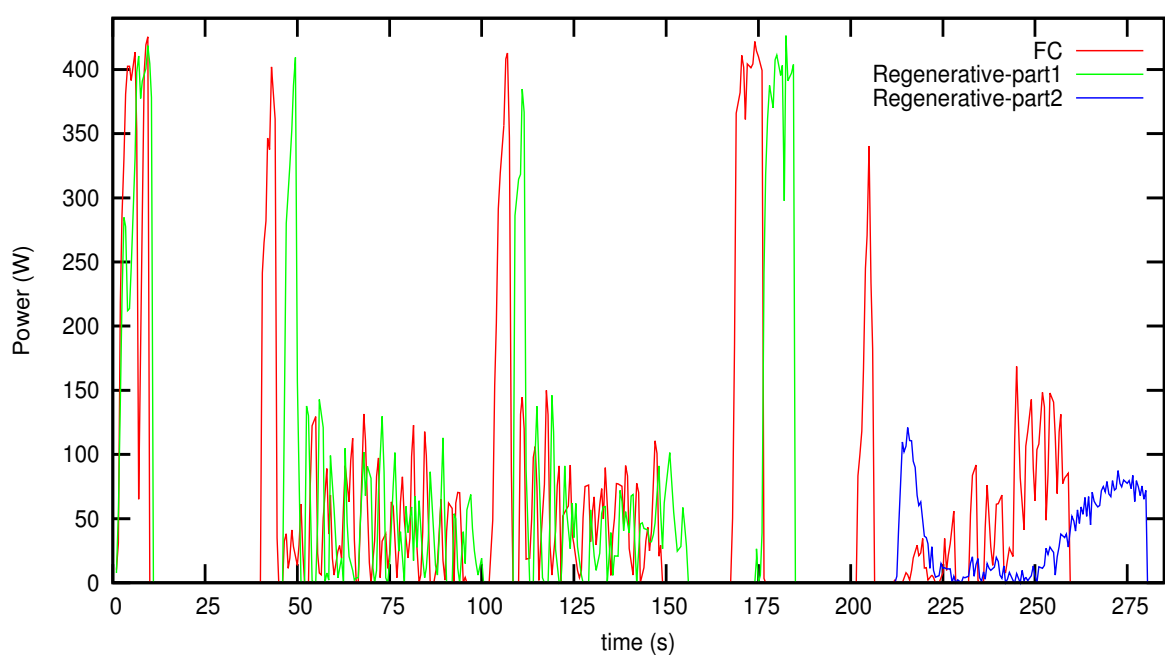


Εικόνα 6.3: Διαγράμματα ταχύτητας κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

μείωσε την κατανάλωση ενέργειας κατά περίπου 16 %. Σημειώνεται ότι οι φορτίσεις στην συγκεκριμένη διαδρομή πραγματοποιήθηκαν σε κεκλιμένο επίπεδο, πράγμα που σημαίνει ότι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε μη κεκλιμένο οδόστρωμα θα ήταν αρκετά μικρότερη γύρω στο 5%.



Εικόνα 6.4: Το πρώτο διάγραμμα (πάνω) δείχνει τις τάσεις και τα ρεύματα κατά τη διάρκεια της δοκιμής με χρήση μόνο της κυψέλης υδρογόνου. Το δεύτερο διάγραμμα (κάτω) δείχνει τις τάσεις και τα ρεύματα κατά τη διάρκεια της δοκιμής με εγκατεστημένο το σύστημα ανάκτησης ενέργειας.



Εικόνα 6.5: Η κόκκινη γραμμή δείχνει την ισχύ που καταναλώθηκε κατά τη διάρκεια της πρώτης δοκιμής με χρήση μόνο της κυψέλης υδρογόνου. Η πράσινη και η μπλε γραμμή απεικονίζουν την ισχύ που καταναλώθηκε κατά τη διάρκεια της δεύτερης δοκιμής με εγκατεστημένο το σύστημα ανάκτησης ενέργειας.

Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας υλοποιήθηκε ένα σύστημα ανάκτησης ενέργειας και εφαρμόστηκε στο πρωτότυπο όχημα TUCer 14 για την βελτίωση της κατανάλωσης του. Η υλοποίηση του συστήματος αυτού σχετίζεται τόσο με την κατασκευή του κυκλώματος όσο και με τον αλγόριθμο ελέγχου. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων και των δοκιμών παρατηρήθηκαν διάφορα προβλήματα και περιορισμοί αλλά και δυνατότητες που το σύστημα μπορεί να αποκτήσει.

Οι περισσότερες δοκιμές του κυκλώματος φόρτισης έγιναν στον πάγκο του εργαστηρίου με μια διάταξη που προσομοιώνει τον τροχό του οχήματος όταν βρίσκεται στον δρόμο. Σε όλες αυτές τις δοκιμές το σύστημα δεν δημιούργησε κανένα πρόβλημα και οι φορτίσεις ολοκληρώθηκαν επιτυχώς σε όλο το εύρος των στροφών.

Όμως, κατά την διάρκεια των δοκιμών στο οδόστρωμα, μέρη του συστήματος φόρτισης καταστράφηκαν και συγκεκριμένα κάποιοι από τους DC/DC μετατροπείς. Μετά από αρκετή έρευνα, παρατηρήθηκε ότι η μόνη διαφορά από το εργαστήριο στον δρόμο είναι ότι στο εργαστήριο οι στρόφες του ηλεκτροκινητήρα αυξάνονται σταδιακά και συνεπώς έτσι και το ρεύμα που προσφέρει ως γεννήτρια. Αντιθέτως, στον δρόμο, όταν το όχημα ήδη κινούνται με μεγάλη ταχύτητα, ο οδηγός απενεργοποιεί τον επιταχυντή ο ηλεκτρονικός διακόπτης της φόρτισης απότομα άγει και τότε δημιουργούνται κάποιες πολύ υψηλές κορυφές ρεύματος που επιτυγχάνουν να καταστρέψουν τον φορτιστή. Πιθανή λύση σε αυτό, που ήδη ερευνάται, είναι η προσθήκη ενός πηνίου στην είσοδο του φορτιστή ώστε να ξεκινήσει πιο ομαλά την φόρτιση.

Ο τρόπος με τον οποίο έχει χτιστεί ο έλεγχος του συστήματος, με τη χρήση της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων, προσφέρει τη δυνατότητα εύκολης επέκτασης και εξέλιξης του συστήματος. Για παράδειγμα στην εργασία [33], η οποία επίσης εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ομάδας TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης, παρουσιάζεται μια πληθώρα από διαφορετικές τεχνικές ελέγχου με μια εξέλιξη του συστήματος ανάκτησης ενέργειας (οι υπερπυκνωτές μπορούν και αλλάζουν συνδεσμολογία έτσι μπορούν να κινήσουν το όχημα με μεγαλύτερη ταχύτητα) και αλλαγές μόνο στο πρόγραμμα του υπολογιστή. Γενικά το σύστημα ανάκτησης ενέργειας που παρουσιάστηκε σε αυτή την εργασία μπορεί να αποτελέσει μία καλή και αξιόπιστη πλατφόρμα για περαιτέρω πειραματισμό και έρευνα.

Βιβλιογραφία

- [1] André Pina and Patrícia Baptista and Carlos Silva and Paulo Ferrão. Energy reduction potential from the shift to electric vehicles: The Flores island case study. *Energy Policy*, 67:37 – 47, 2014.
- [2] Chrysovalantou Ziogou, Dimitris Ipsakis, Panos Seferlis, Stella Bezergianni, Simira Papadopoulou, and Spyros Voutetakis. Optimal production of renewable hydrogen based on an efficient energy management strategy. *Energy*, 55:58 – 67, 2013.
- [3] Ali Emadi. *Energy - Efficient Electric Motors*. Marcel Dekker, New York, 2005.
- [4] Seon Hak Kim, Oh Jung Kwon, Deoksu Hyon, Seung Ho Cheon, Jin Su Kim, Byeong Heon Kim, Sung Tack Hwang, Jun Seok Song, Man Taeck Hwang, and Byeong Soo Oh. Regenerative braking for fuel cell hybrid system with additional generator. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(20):8415 – 8421, 2013.
- [5] Li Sun and Nong Zhang. Design, implementation and characterization of a novel bi-directional energy conversion system on {DC} motor drive using super-capacitors. *Applied Energy*, pages –, 2014.
- [6] R. Sebastián and R. Pena Alzola. Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9):6803 – 6813, 2012.
- [7] Guizhou Ren, Guoqing Ma, and Ning Cong. Review of electrical energy storage system for vehicular applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41:225 – 236, 2015.
- [8] D.B. Edwards and C. Kinney. Advanced lead acid battery designs for hybrid electric vehicles. In *Applications and Advances, 2001. The Sixteenth Annual Battery Conference on*, pages 207–212, 2001.
- [9] Eckhard Karden, Servé Ploumen, Birger Fricke, Ted Miller, and Kent Snyder. Energy storage devices for future hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 168(1):2 – 11, 2007.

- [10] Noshin Omar and Mohamed Abdel Monem and Yousef Firouz and Justin Salminen and Jelle Smekens and Omar Hegazy and Hamid Gaulous and Grietus Mulder and Peter Van den Bossche and Thierry Coosemans and Joeri Van Mierlo. Lithium iron phosphate based battery – assessment of the aging parameters and development of cycle life model. *Applied Energy*, 113:1575 – 1585, 2014.
- [11] Geni - Photo by user:geni. Licensed under GFDL via Commons. *Flybrid Systems Kinetic Energy Recovery System*.
- [12] Pawan Sharma and T.S. Bhatti. A review on electrochemical double-layer capacitors. *Energy Conversion and Management*, 51(12):2901 – 2912, 2010.
- [13] Rahul Walawalkar, Jay Apt, and Rick Mancini. Economics of electric energy storage for energy arbitrage and regulation in new york. *Energy Policy*, 35(4):2558 – 2568, 2007.
- [14] EPRI, Palo Alto, CA. *Handbook of Energy Storage for Transmission or Distribution Applications*, 2002. 1007189.
- [15] Peter J. Hall and Euan J. Bain. Energy-storage technologies and electricity generation. *Energy Policy*, 36(12):4352 – 4355, 2008.
- [16] A. Morandi, L. Trevisani, F. Negrini, P.L. Ribani, and M. Fabbri. Feasibility of superconducting magnetic energy storage on board of ground vehicles with present state-of-the-art superconductors. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, 22(2):5700106–5700106, April 2012.
- [17] Qi Li and Weirong Chen and Yankun Li and Shukui Liu and Jin Huang. Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1):514 – 525, 2012.
- [18] N. Benyahia, H. Denoun, A. Badji, M. Zaouia, T. Rekioua, N. Benamrouche, and D. Rekioua. {MPPT} controller for an interleaved boost dc–dc converter used in fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(27):15196 – 15205, 2014.
- [19] Maxwell Technologies. *BC BPAK Power Series 15v BOOSTCAP Ultracapacitors*, 2010.
- [20] L. Zhang and J. Y. Song and J. Y. Zou and N. Wang. High Voltage Super-Capacitors for Energy Storage Devices Applications. In *Electromagnetic Launch Technology, 2008 14th Symposium on*, pages 1–4, June 2008.
- [21] Maxwell Technologies. *Charging of Ultracapacitors*, 2005.
- [22] Omron. *The Best Seller G2R* - <http://www.omron.com/ecb/products/pdf/en-g2r.pdf>.
- [23] ST. *STP75NF75* - <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00002771.pdf>, 2007.
- [24] ARM. Arm, the architecture for the digital world - <http://www.arm.com/products/processors/cortex-a/cortex-a7.php>, September 2015.

- [25] Debian Project. Debian, the universal operating system - <https://www.debian.org>, February 2015.
- [26] Texas Instruments. *6-A, WIDE-INPUT ADJUSTABLE SWITCHING REGULATOR* - <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ptn78020w.pdf>, 2011.
- [27] Texas Instruments. *3-A, WIDE-INPUT ADJUSTABLE SWITCHING REGULATOR* - <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ptn78060w.pdf>, 2009.
- [28] Texas Instruments. *DCP01B Series 1-W, Isolated, Unregulated DC/DC Converter Modules* - <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dcp010512b.pdf>, 2015.
- [29] ST. *Low power dual voltage comparators* - <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000465.pdf>, 2016, 2013.
- [30] Hussam Al-Hertani . *The GPIOClass C++ class enables the Raspberry Pi its onboard GPIOs via the sysfs interface* - <https://github.com/halherta/RaspberryPi-GPIOClass-v1>, 2012.
- [31] A. Drumea and C. Popescu. Finite state machines and their applications in software for industrial control. In *Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress, 2004. 27th International Spring Seminar on*, volume 1, pages 25–29 vol.1, May 2004.
- [32] Milton Abramowitz. *Handbook of Mathematical Functions, With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover Publications, 1974.
- [33] Alexandros Amargianos. Regeneration and management of a prototype electric vehicle’s powertrain. Master’s thesis, Technical University of Crete, 2015.

Παράρτημα

Κατάλογος Εικόνων

1.1	Σφόνδυλος που χρησιμοποιείται σε συστήματα ανάκτησης ενέργειας [11].	9
1.2	Υπερπυκνωτές	10
2.1	Τοπολογία που περιλαμβάνει μία κυψέλη υδρογόνου και μπαταρίες.	11
2.2	Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με την χρήση σφονδύλου.	12
2.3	Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με την χρήση υπεραγωγίσιμης μαγνητικής αποθήκευσης. .	12
2.4	Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με την χρήση υπερπυκνωτών.	13
2.5	Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με την χρήση υπερπυκνωτών και μπαταριών.	14
2.6	Σύστημα ανάκτησης ενέργειας με την χρήση μπαταριών, σφονδύλου και επιπλέον ηλεκτροκινητήρα.	15
3.1	Το όχημα του Πολυτεχνείου Κρήτης.	16
3.2	Η προτεινόμενη τοπολογία ανάκτησης ενέργειας.	17
3.3	Κυψέλη υδρογόνου.	18
3.4	Ο ηλεκτροκινητήρας του οχήματος.	19
3.5	Ο ελεγκτής κινητήρων της Texas instruments.	20
3.6	Ο υπερπυκνωτής Maxwell BPAK0052 P015 b01.	20
3.7	Υπερπυκνωτές σε παράλληλη σύνδεση.	21
3.8	Το σχηματικό διάγραμμα ενός διακοπτικού ρυθμιστή ανύψωσης τάσης.	22
3.9	Ο διακοπτικός ρυθμιστής ανύψωσης τάσης PTN78020H.	23

3.10	Ο ηλεκτρονόμος (Relay) G2R-1 [22]	24
3.11	Το <i>MOSFET</i> τύπου STP75NF75 [23]	24
3.12	Το υπολογιστικό σύστημα Beaglebone Black.	25
4.1	Το κύκλωμα φόρτισης που υλοποιήθηκε.	27
4.2	Το κύκλωμα ελέγχου των ηλεκτρονικών διακοπών.	29
4.3	Το τελικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας.	30
5.1	Οι εισοδοί και οι εξοδοί του μικροϋπολογιστή Beaglebone Black.	32
5.2	Η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων.	34
5.3	Το διάγραμμα ροής που περιγράφει τον αλγόριθμο ελέγχου του συστήματος ανάκτησης ενέργειας.	35
5.6	Απλή μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων που αναγνωρίζει πότε μία πόρτα αυτοκινήτου είναι ανοικτή ή κλειστή.	42
5.14	Διαδικασία αρχικοποίησης των ηλεκτρονικών διακοπών.	50
5.16	Διαδικασία Φόρτισης.	51
5.18	Διαδικασία Εκφόρτισης.	53
5.20	Κίνηση με χρήση της κυψέλης υδρογόνου.	56
6.1	Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας εγκατεστημένο στο όχημα.	59
6.2	Η διαδρομή της δοκιμής εντός της Πολυτεχνειούπολης του Πολυτεχνείου Κρήτης. . . .	61
6.3	Διαγράμματα ταχύτητας κατά τη διάρκεια των δοκιμών.	62
6.4	Το πρώτο διάγραμμα (πάνω) δείχνει τις τάσεις και τα ρεύματα κατά τη διάρκεια της δοκιμής με χρήση μόνο της κυψέλης υδρογόνου. Το δεύτερο διάγραμμα (κάτω) δείχνει τις τάσεις και τα ρεύματα κατά τη διάρκεια της δοκιμής με εγκατεστημένο το σύστημα ανάκτησης ενέργειας.	63
6.5	Η κόκκινη γραμμή δείχνει την ισχύ που καταναλώθηκε κατά τη διάρκεια της πρώτης δοκιμής με χρήση μόνο της κυψέλης υδρογόνου. Η πράσινη και η μπλε γραμμή απεικονίζουν την ισχύ που καταναλώθηκε κατά τη διάρκεια της δεύτερης δοκιμής με εγκατεστημένο το σύστημα ανάκτησης ενέργειας.	64

Κατάλογος Εικόνων 2

5.4	Αρχείο κεφαλίδας για την βιβλιοθήκη ελέγχου των θυρών εισόδου-εξόδου γενικής χρήσης.	38
5.5	Πηγαίος κώδικας για την υλοποίηση της βιβλιοθήκης ελέγχου των θυρών εισόδου-εξόδου γενικής χρήσης.	39
5.7	Κώδικας που παράγεται από τη μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων της Εικόνας 5.6.	42

5.8	Βοηθητική βιβλιοθήκη που περιλαμβάνει δηλώσεις μεταβλητών δηλώσεις πρωτοτύπων των συναρτήσεων και δηλώσεις σταθερών.	43
5.9	Η κύρια συνάρτηση του προγράμματος ελέγχου.	44
5.10	Η συνάρτηση τερματισμού.	46
5.11	Συνάρτηση αρχικοποίησης των θυρών εισόδου-εξόδου γενικής χρήσης.	47
5.12	Η συνάρτηση αποδέσμευσης των θυρών εισόδου-εξόδου γενικής χρήσης.	48
5.13	Η συνάρτηση που αναλαμβάνει να αλλάξει την κατάσταση μίας ψηφιακής θύρας εξόδου.	48
5.15	Συνάρτηση αρχικοποίησης των ηλεκτρονικών διακοπών.	49
5.17	Η συνάρτηση που υλοποιεί τη διαδικασία φόρτισης των υπερπυκνωτών.	51
5.19	Η συνάρτηση που υλοποιεί τη διαδικασία εκφόρτισης των υπερπυκνωτών.	53
5.21	Η συνάρτηση που υλοποιεί τη διαδικασία κατά την οποία γίνεται η χρήση της κυψέλης υδρογόνου ως βασική πηγή ενέργειας για την κίνηση του οχήματος.	55

Κατάλογος Πινάκων

3.1	Χαρακτηριστικά του υπερπυκνωτή Maxwell BPAK0052 P015 b01.	21
3.2	Χαρακτηριστικά συστοιχίας υπερπυκνωτών.	22
5.1	Περιγραφή των καταστάσεων.	36
5.2	Περιγραφή του αλφάβητου της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων.	36
5.3	Πίνακας Μεταβάσεων.	37