



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Σχεδίαση και ανάπτυξη συστήματος διαχείρισης  
συσσωρευτών ενέργειας οχήματος formula student car

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΚΡΕΜΜΥΔΑ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

Επιβλέπων: Πυρομάλης Δημήτριος  
Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α

Αθήνα, Ιούλιος 2022





University of West Attica  
School of Engineering  
Department of Industrial Design & Production Engineering

# Design and development of battery management system for a formula student car

Diploma Thesis

**Kremmydas Nikolaos**

**Supervisor:** Piromalis Dimitrios  
Assistant Professor Uni.W.A

Athens , July 2022



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής  
Σχολή Μηχανικών  
Τμήμα Βιομηχανικής Σχεδίασης & Παραγωγής  
Τομέας Συστημάτων Βιομηχανικής Παραγωγής

## Σχεδίαση και ανάπτυξη συστήματος διαχείρισης συσσωρευτών ενέργειας οχήματος formula student car

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΚΡΕΜΜΥΔΑ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

Επιβλέπων: Πυρομάλης Δημήτριος  
Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

.....  
Πυρομάλης Δημήτριος  
Επ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α

.....  
Λάσκαρης Νικόλαος  
Επ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α

.....  
Δρόσος Χρήστος  
Ε.ΔΙ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022

.....  
**ΚΡΕΜΜΥΔΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**  
© 2022 - All rights reserved



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής  
Σχολή Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης & Παραγωγής  
Τομέας Ψηφιακών Συστημάτων

Copyright © - All rights reserved Κρεμμύδας Νικόλαος, 2022  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

### **Δήλωση συγγραφέα πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας**

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η Κρεμμύδας Νικόλαος του Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου 71447203 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Κρεμμύδας Νικόλαος

## Περίληψη

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις των επόμενων δεκαετιών είναι η μείωση των ρύπων , η οποία επιτυγχάνεται με τον περιορισμό της κατανάλωσης των ορυκτών πόρων και την μετάβαση σε φιλικότερες μορφές ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αλλά και τα ηλεκτρικά οχήματα είναι δύο από τα βασικότερα μέσα για αυτή την μετάβαση. Σημαντικός παράγοντας για την επίτευξη των παραπάνω είναι η αποθήκευση ενέργειας. Με στόχο την εξασφάλιση της προστασίας των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας αλλά και την ασφαλή λειτουργία τους είναι απαραίτητη και η ανάπτυξη ενός συστήματος διαχείρισης αποθήκευσης ενέργειας. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η σχεδίαση και η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος.

Αρχικά η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματεύεται τις διάφορες τεχνολογίες μπαταριών προς αξιοποίηση καθώς και τους παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε πιθανές αστοχίες. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία αλλά και οι διάφορες αρχιτεκτονικές ενός συστήματος διαχείρισης μπαταριών. Μετέπειτα ακολουθεί η παρουσίαση όλων των απαραίτητων κυκλωμάτων που αναπτύχθηκαν και τέλος αναφέρονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λάβαμε κατά την περίοδο των δοκιμών ,τα οποία υποδεικνύουν και την ορθή λειτουργία του τελικού συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί πως κριτήριο για όλα τα παραπάνω αποτέλεσε η απλότητα και η αξιοπιστία κατά την σχεδίαση, με μελλοντικό στόχο την αξιοποίηση του συστήματος στα πλαίσια της φοιτητικής ομάδας formula student.

## **Abstract**

One of the greatest challenges of the next decades is the reduction of pollutants, which can be achieved by limiting consumption of fossil fuels and the transitioning to sustainable forms of energy. Sources of renewable energy and electric cars are two of the most important fields for this transition. Important factor to achieve that is energy storage. To ensure the protection of the energy storage systems and the safe operation, the development of a battery management system is critical. The subject of the current diploma thesis is the design and implementation of a battery management system.

This thesis deals with the various battery technologies as well as the factors that can lead to potential failures. Also the basic structural elements and the architectures of a battery management system are presented. Then the developed circuits are presented and finally the results that we received during the testing period which validate the correct operation of the final system. During design phase, main criterion was reliability and simplicity. The main goal is the exploitation of the system in a formula student car.



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Πυρομάλη Δημήτριο για την ευκαιρία που πρόσφερε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα και για την καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω την φοιτητική ομάδα Prom Racing. Η διετής συμμετοχή μου σε αυτήν ήταν μία αξέχαστη εμπειρία, καθώς μέσα από αυτή όχι μόνο εξάσκησα πρακτικά και θεωρητικά το αντικείμενο σπουδών μου, αλλά επίσης μου δόθηκε η ευκαιρία να γνωρίσω την διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής ενός ηλεκτρικού μονοθέσιου αλλά και να εργαστώ με άτομα για την επίτευξη ενός κοινού στόχου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους φίλους μου για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Διαγωνισμός Formula Student</b>	<b>14</b>
1.1	Ιστορική αναδρομή στον διαγωνισμό Formula Student	14
1.2	Αγωνίσματα διαγωνισμού	15
1.2.1	Στατικά Αγωνίσματα	15
1.2.2	Δυναμικά αγωνίσματα	16
1.3	Αρχιτεκτονική ηλεκτροκίνητων οχημάτων Formula student	17
1.3.1	Κεντρική μονάδα ελέγχου οχήματος(VCU – Vehicle Control Unit)	17
1.3.2	Κύκλωμα απενεργοποίησης (Shutdown Circuit)	18
1.3.3	Ηλεκτροκίνητήριο σύστημα	19
1.3.4	Συσσωρευτές και σύστημα διαχείρισής συσσωρευτών	22
1.3.5	Κανονισμοί του διαγωνισμού που επηρέασαν τον σχεδιασμό του συστήματος διαχείρισης μπαταριών	23
<b>2</b>	<b>Μπαταρίες</b>	<b>24</b>
2.1	Τεχνολογία των Μπαταριών	24
2.2	Ταξινόμηση κελιών και μπαταριών	25
2.2.1	Πρωτεύοντα κελιά – μπαταρίες	26
2.2.2	Δευτερεύοντα κελιά – μπαταρίες	26
2.3	Λειτουργίες κελιών - μπαταριών	26
2.4	Ηλεκτρικές ιδιότητες μπαταριών	28
2.5	Ορολογία μπαταριών	29
2.6	Τεχνικές προδιαγραφές μπαταριών	30
2.7	Χημικές τεχνολογίες μπαταριών και κελιών	31
2.8	Τρόποι κατασκευής κελιών	36
2.8.1	Πρισματική μεταλλική θήκη	36
2.8.2	Κυλινδρική χαλύβδινη θήκη	37
2.8.3	Rouch	38
2.9	Επιλογή μπαταριών για χρήση σε ηλεκτρικό όχημα	38
2.10	Σχεδιασμός συστήματος μπαταριών για ηλεκτρικά οχήματα	39
<b>3</b>	<b>Σύστημα Διαχείρισης μπαταριών</b>	<b>42</b>
3.1	Λειτουργίες του συστήματος διαχείρισης μπαταριών	43
3.2	Αρχιτεκτονικές συστημάτων διαχείρισης μπαταριών	44
3.3	Σχεδιασμός του συστήματος διαχείρισης μπαταριών	47
3.3.1	Μέτρηση Τάσης	47
3.3.2	Μέτρηση Θερμοκρασίας	47
3.4	Εξισορρόπηση τάσης μπαταριών	51
3.4.1	Μέθοδος εξισορρόπησης με αντίσταση	51

3.4.2	Μέθοδος εξισορρόπησης με χρήση πυκνωτών . . . . .	52
3.4.3	Εξισορρόπηση με χρήση πηνίου/μετασχηματιστή . . . . .	55
3.4.4	Μέθοδοι εξισορρόπησης με χρήση μετατροπών ενέργειας . . . . .	58
3.5	Μέτρηση Ρεύματος . . . . .	61
3.6	Δεδομένα και πρωτόκολλα επικοινωνίας . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Προσομοίωση κυκλώματος εξισορρόπησης σε περιβάλλον Matlab/Simulink</b>	<b>65</b>
4.1	Περιγραφή του Μοντέλου . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Σχεδιασμός του Συστήματος διαχείρισης μπαταριών</b>	<b>73</b>
5.1	Περιγραφή του HARDWARE . . . . .	73
5.2	Περιγραφή Firmware . . . . .	83
5.3	Περιγραφή Software . . . . .	88
<b>6</b>	<b>Αποτελέσματα και μετρήσεις</b>	<b>91</b>
6.1	Επαλήθευση μετρήσεων τάσης . . . . .	93
6.2	Επαλήθευση μέτρησης ρεύματος . . . . .	95
6.3	Επαλήθευση εξισορρόπησης τάσης . . . . .	97
6.4	Σφάλματα . . . . .	98
<b>7</b>	<b>Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη</b>	<b>100</b>
7.1	Συμπεράσματα . . . . .	100
7.2	Προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη . . . . .	100
<b>A'</b>	<b>Ακρωνυμία και συντομογραφίες</b>	<b>104</b>
<b>B'</b>	<b>Σχέδια Κυκλωμάτων και το τυπωμένο κύκλωμα</b>	<b>105</b>
<b>Γ'</b>	<b>Κώδικας του Software</b>	<b>112</b>
<b>Δ'</b>	<b>Κώδικας του Firmware</b>	<b>122</b>

# Κατάλογος σχημάτων

1.1	Φωτογραφία από τον διαγωνισμό Formula Student στην Ουγγαρία για το έτος 2021(Formula student East)	14
1.2	Αγωνίσματα και κατανομή πόντων ανά αγώνισμα	15
1.3	Πίστα του skipdad	16
1.4	Διάγραμμα κυκλώματος απενεργοποίησης	18
1.5	Μονοκινητήριο σύστημα	20
1.6	Μονοκινητήριο σύστημα μονοθεσίου της ομάδας Prom Racing	20
1.7	Δικινητήριο σύστημα στους πίσω τροχούς	21
1.8	Τετρακινητήριο σύστημα	21
1.9	Accumulator Container	22
1.10	Open Accumulator	22
2.1	Αρχιτεκτονική δομή μπαταρίας	25
2.2	Διαδικασία εκφόρτισης κελιού	27
2.3	Διαδικασία φόρτισης κελιού	28
2.4	Ισοδύναμο κύκλωμα μπαταρίας	29
2.5	Δομή μπαταρίας Ιόντων Λιθίου	33
2.6	Σύγκριση ενεργειακής πυκνότητας μπαταριών	34
2.7	Σύγκριση μπαταριών	35
2.8	Πρισματική θήκη μπαταριών	37
2.9	Κυλινδρική θήκη μπαταριών	37
2.10	Rouch μπαταρία	38
2.11	Σύνδεση μπαταριών σε σειρά	39
2.12	Σύνδεση μπαταριών παράλληλα	40
2.13	Σύνδεση μπαταριών παράλληλα/σειρά	40
3.1	Αρχιτεκτονική Master Slave	44
3.2	Δομή μονάδας ελέγχου μπαταρίας	45
3.3	Δομή μονάδας μέτρησης μπαταρίας	46
3.4	Δομή μονάδας μέτρησης υψηλής τάσης	46
3.5	Κυκλωματική τοπολογία NTC Thermistor	49
3.6	Κατηγορίες μεθόδων εξισορρόπησης	51
3.7	Εξισορρόπηση με Αντιστάσεις	52
3.8	Εξισορρόπηση με πυκνωτή μεταγωγής	53
3.9	Εξισορρόπηση με πυκνωτές μονής μεταγωγής	54
3.10	Εξισορρόπηση με πυκνωτές διπλής βαθμίδας	55
3.11	Εξισορρόπηση με χρήση μονού ή πολλαπλών πηνίων	56
3.12	Εξισορρόπηση με χρήση μετασχηματιστή μονής περιέλιξης.	56
3.13	Εξισορρόπηση με χρήση μετασχηματιστή πολλαπλών περιελίξεων.	57

3.14	Εξισορρόπηση με χρήση μετασχηματιστή πολλαπλών περιελίξεων. . . . .	58
3.15	Εξισορρόπηση με χρήση μετατροπέα Cuk. . . . .	58
3.16	Εξισορρόπηση με χρήση μετατροπέα Buck-Boost. . . . .	59
3.17	Εξισορρόπηση με χρήση μετατροπέα Flyback. . . . .	60
3.18	Εξισορρόπηση με χρήση μετατροπέα ράμπας. . . . .	60
3.19	Εξισορρόπηση με χρήση μετατροπέα Full Bridge. . . . .	61
3.20	Αισθητήριο Hall Effect ανοιχτού βρόχου . . . . .	62
3.21	Αισθητήριο Hall Effect κλειστού βρόχου . . . . .	62
3.22	Αισθητήριο Shunt Resistor . . . . .	63
3.23	Δομή διαύλου CAN . . . . .	64
4.1	Προσομοίωση κυκλώματος εξισορρόπησης μπαταριών . . . . .	65
4.2	Datasheet του κελιού . . . . .	66
4.3	Χαρακτηριστικά κελιού στο Matlab . . . . .	66
4.4	Function στο Matlab . . . . .	67
4.5	Αλγόριθμος εξισορρόπησης με είσοδο τις τάσεις . . . . .	67
4.6	Αλγόριθμος εξισορρόπησης με είσοδο τις τάσεις . . . . .	68
4.7	Φόρτιση συστοιχίας χωρίς εξισορρόπηση . . . . .	69
4.8	Γραφική παράσταση τάσεων μετά από φόρτιση χωρίς εξισορρόπηση . . . . .	70
4.9	Φόρτιση συστοιχίας με εξισορρόπηση . . . . .	71
4.10	Γραφική παράσταση τάσεων μετά από φόρτιση με εξισορρόπηση . . . . .	72
5.1	System Design του συστήματος διαχείρισης μπαταριών . . . . .	73
5.2	Ολοκληρωμένο BQ76920 . . . . .	74
5.3	Καταχωρητής υπεύθυνος για την ενεργοποίηση του ADC . . . . .	75
5.4	Ανάγνωση μηνύματος από το ολοκληρωμένο . . . . .	76
5.5	Απόστολή μηνύματος από τον μικροελεγκτή . . . . .	76
5.6	Κύκλωμα παθητικής εξωτερικής εξισορρόπησης κελιών . . . . .	77
5.7	Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος . . . . .	78
5.8	Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος με Shunt Resistor . . . . .	78
5.9	Πίνακας χαρακτηριστικών Arduino MKR Zero . . . . .	79
5.10	Σχηματικό κύκλωμα Regulator 5V . . . . .	80
5.11	Σχηματικό κύκλωμα Regulator 3.3V . . . . .	81
5.12	Σχηματικό κύκλωμα CAN-BUS . . . . .	81
5.13	Σχηματικό κύκλωμα NTC Thermistor . . . . .	82
5.14	Χαρακτηριστικά NTC Thermistor από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή . . . . .	82
5.15	Απόσπασμα του κώδικα για την δήλωση ολοκληρωμένου. . . . .	83
5.16	Απόσπασμα του κώδικα από το χάρτη των καταχωρητών. . . . .	84
5.17	Απόσπασμα του κώδικα με την δήλωση βιβλιοθηκών. . . . .	84
5.18	Απόσπασμα κώδικα εύρεσης ολοκληρωμένου. . . . .	85
5.19	Απόσπασμα κώδικα δήλωσης Shunt Resistor. . . . .	85
5.20	Απόσπασμα κώδικα για την διαδικασία ανάγνωσης τάσης. . . . .	85
5.21	Απόσπασμα κώδικα για την ενεργοποίηση εξισορρόπησης. . . . .	86
5.22	Απόσπασμα κώδικα δήλωσης βιβλιοθήκης και μεταβλητών. . . . .	86
5.23	Απόσπασμα κώδικα δήλωσης ορίων. . . . .	87
5.24	Απόσπασμα κώδικα περίπτωσης ερώτησης τάσης. . . . .	87
5.25	Απόσπασμα κώδικα περίπτωσης ερώτησης θερμοκρασίας. . . . .	87
5.26	Συνάρτηση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας. . . . .	88
5.27	Γραφική περιβάλλον χρήστη. . . . .	88

---

5.28	Διεργασία εύρεσης σειριακής. . . . .	89
5.29	Επιστροφή τάσης στο περιβάλλον χρήστη. . . . .	90
6.1	Τυπωμένο κύκλωμα συστήματος. . . . .	91
6.2	Διάταξη συστήματος. . . . .	92
6.3	Μέτρηση τάσεων και θερμοκρασιών από το σύστημα. . . . .	93
6.4	Μέτρηση τάσης πρώτου κελιού. . . . .	93
6.5	Μέτρηση τάσης δεύτερου κελιού. . . . .	93
6.6	Μέτρηση συνολικής τάσης από το σύστημα. . . . .	94
6.7	Επαλήθευση της συνολικής τάσης με πολύμετρο. . . . .	95
6.8	Παρακολούθηση ρεύματος. . . . .	95
6.9	Επαλήθευση μέτρησης ρεύματος. . . . .	96
6.10	Τάσεις πακέτου μπαταριών . . . . .	97
6.11	Εξισορρόπηση κελιών 2 και 4. . . . .	98
6.12	Εξακρίβωση λειτουργίας προστασίας από υπέρταση. . . . .	99

# Κεφάλαιο 1

## Διαγωνισμός Formula Student

### 1.1 Ιστορική αναδρομή στον διαγωνισμό Formula Student

Ο θεσμός του Formula Student θεμελιώθηκε πριν από τρεις δεκαετίες από την SAE (Society of Automotive Engineers) στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Σήμερα, 10 βασικοί διαγωνισμοί που λαμβάνουν χώρα κάθε χρόνο σε ολόκληρο τον κόσμο, μαρτυρούν την επιτυχία αυτής της ανεκτίμητης εμπειρίας. Ομάδες φοιτητών από τα καλύτερα πανεπιστήμια του κόσμου, αναλαμβάνουν να μελετήσουν, να σχεδιάσουν και να κατασκευάσουν ένα πρωτότυπο αγωνιστικό μονοθέσιο όχημα κατά τη διάρκεια ενός ή δύο ακαδημαϊκών ετών. Στόχος του διαγωνισμού είναι οι φοιτητές να αποκτήσουν εμπειρία, να κατασκευάσουν και να μάθουν μέσα από τον διαγωνισμό. Επίσης είναι ένας τρόπος οι φοιτητές να δοκιμάσουν τις θεωρητικές γνώσεις που αποκτούν από την σχολή σε πρακτικά πλαίσια. [1]



Σχήμα 1.1: Φωτογραφία από τον διαγωνισμό Formula Student στην Ουγγαρία για το έτος 2021 (Formula student East)



Στον διαγωνισμό υπάρχουν τρεις κατηγορίες αγωνιστικών μονοθέσιων . Η ηλεκτροκίνητη κατηγορία(Electric Vehicle), η κατηγορία με κινητήρες εσωτερικής καύσης (Combustion Vehicle) και η κατηγορία με τα αυτόνομα οχήματα (Driverless Vehicle ) η οποία υπάρχει τα τελευταία 5 χρόνια και αγωνίζονται χωρίς οδηγό. Το 2022 ορισμένοι διαγωνισμοί ανακοίνωσαν και μία ακόμα κατηγορία η οποία θα αφορά οχήματα τα οποία έχουν υβριδικό σύστημα (CV Hybrid), το συγκεκριμένο σύστημα κατά κύριο λόγο χρησιμοποιεί κινητήρα εσωτερικής καύσης με ηλεκτρική υποβοήθηση. [1]

## 1.2 Αγωνίσματα διαγωνισμού

Οι ομάδες καλούνται να αγωνιστούν τόσο σε στατικά αγωνίσματα όσο και σε δυναμικά αγωνίσματα τα οποία βαθμολογούνται. Παρακάτω στο σχήμα 1.2 φαίνεται ο πίνακας με τα αγωνίσματα.

	CV & EV	DC
<b>Static Events:</b>		
Business Plan Presentation	75 points	-
Cost and Manufacturing	100 points	-
Engineering Design	150 points	150 points
<b>Dynamic Events:</b>		
Skid Pad	50 points	-
DV Skid Pad	75 points	75 points
Acceleration	50 points	-
DV Acceleration	75 points	75 points
Autocross	100 points	-
DV Autocross	-	100 points
Endurance	250 points	-
Efficiency	75 points	-
Trackdrive	-	200 points
Overall	1000 points	600 points

Table 3: Maximum points awarded

Σχήμα 1.2: Αγωνίσματα και κατανομή πόντων ανά αγώνισμα

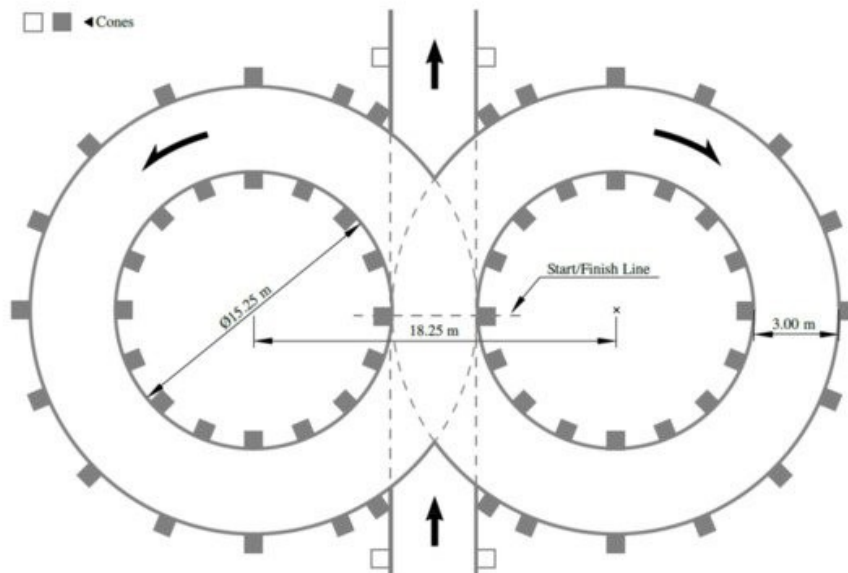
### 1.2.1 Στατικά Αγωνίσματα

- **Επιχειρηματικό πλάνο(Business Plan Presentation):** Οι ομάδες καλούνται να αναπτύξουν ένα επιχειρηματικό πλάνο μίας επιχείρησης που βασίζεται στην προώθηση του μονοθέσιου .
- **Κοστολόγηση και Κατασκευή οχήματος (Cost and Manufacturing):** Η ομάδα αξιολογείται στις γνώσεις της πάνω στις μεθόδους και διαδικασίες κατασκευής και κοστολόγησης ενός πρωτότυπου μονοθέσιου.

- **Σχεδιασμός οχήματος (Engineering Design):** Η ομάδα αξιολογείται στον τρόπο λήψης αποφάσεων και των επιστημονικών μεθόδων που έχει εφαρμόσει κατά την διάρκεια του σχεδιασμού. Για τον ηλεκτρικό σχεδιασμό του οχήματος συγκεκριμένα εξετάζονται τόσο τα συστήματα υψηλής τάσης όσο και τα συστήματα χαμηλής τάσης. Για τα συστήματα υψηλής τάσης εξετάζεται το σύστημα κίνησης, το κουτί των μπαταριών αλλά και όλο το HW και FW που το αφορά. Για τα συστήματα χαμηλής τάσης εξετάζονται το σύστημα ανάκτησης και απεικόνισης δεδομένων από το όχημα, το FW, την καλωδίωση και τα συστήματα ασφαλείας του οχήματος.

### 1.2.2 Δυναμικά αγωνίσματα

- **Επιτάχυνση (Acceleration):** Το μονοθέσιο καλείται στον μικρότερο δυνατό χρόνο να διανύσει μία απόσταση 75 μέτρων, από στατική θέση. Για λόγους ασφαλείας έχει θεσπιστεί όριο της ισχύος τα 80KW, όπου κάθε μονοθέσιο δεν πρέπει να τα υπερβεί τόσο σε αυτό, όσο και στα υπόλοιπα δυναμικά αγωνίσματα. Ο έλεγχος γίνεται μέσω μίας συσκευής μέτρησης ισχύος και ενέργειας(energy meter), που παρέχεται από τον εκάστοτε διαγωνισμό.
- **Skidpad:** Το όχημα καλείται να διανύσει μία πίστα σε σχήμα "8" όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3. Στόχος του συγκεκριμένου αγωνίσματος είναι η αξιολόγηση της πλευρικής επιτάχυνσης του οχήματος.



Σχήμα 1.3: Πίστα του skidpad

- **Autocross :**Το όχημα αγωνίζεται σε μία απαιτητική πίστα περίπου ενός χιλιομέτρου στο λιγότερο δυνατό χρόνο.

- **Endurance (Αγώνισμα αντοχής):** Το endurance αποτελεί το πιο απαιτητικό αγώνισμα του διαγωνισμού καθώς το όχημα καλείται να διανύσει μια απόσταση 22 χιλιομέτρων. Συμμετέχουν δύο οδηγοί από κάθε ομάδα και ο κάθε ένας από αυτούς διανύει απόσταση 11 χιλιομέτρων. Στο συγκεκριμένο αγώνισμα αξιολογείται η αξιοπιστία αλλά και η επίδοση του μονοθέσιου.
- **Efficiency (Αποδοτικότητα):** Ταυτόχρονα με το αγώνισμα της αντοχής διεξάγεται και το αγώνισμα της αποδοτικότητας. Στο συγκεκριμένο αγώνισμα καταγράφεται και αξιολογείται η κατανάλωση της ενέργειας του οχήματος συναρτήσει του χρόνου.

## 1.3 Αρχιτεκτονική ηλεκτροκίνητων οχημάτων Formula student

Για να κατανοηθεί η εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα διαχείρισης μπαταριών γίνεται μία σύντομη αναφορά στην αρχιτεκτονική των ηλεκτροκίνητων οχημάτων του διαγωνισμού.

### 1.3.1 Κεντρική μονάδα ελέγχου οχήματος (VCU – Vehicle Control Unit)

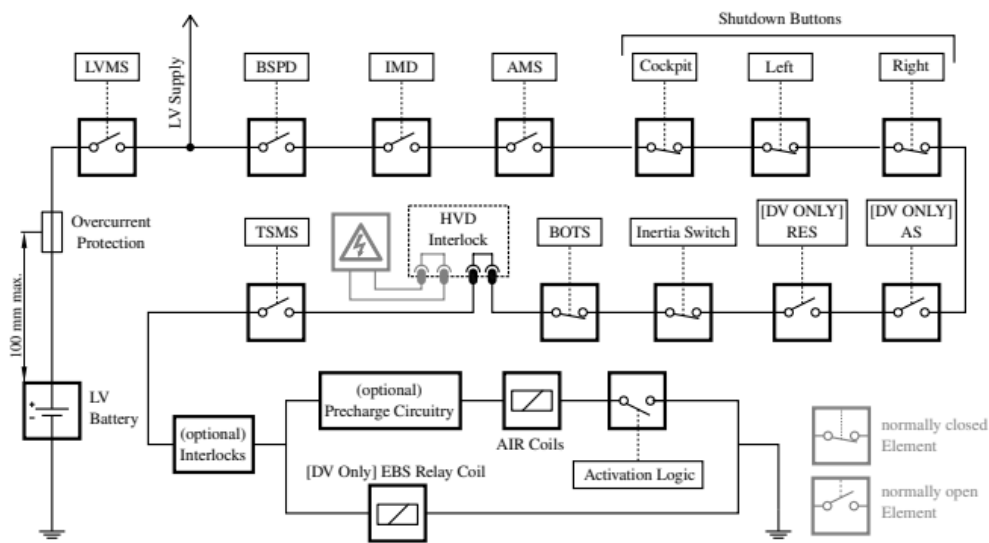
Η κυριότερη λειτουργία της κεντρικής μονάδας ελέγχου (VCU) είναι ο έλεγχος και ο υπολογισμός της ροπής που αποστέλλεται προς τον αναστροφέα. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση διαφόρων αισθητήρων οι οποίοι αποστέλλουν τα δεδομένα στην μονάδα επεξεργασίας που υπάρχει στην VCU η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ένας μικροελεγκτής. Για τον υπολογισμό της ροπής οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής :

- Μαγνητικό ποτενσιόμετρο στο οποίο γίνεται η καταγραφή και η μέτρηση θέσης του πεταλιού του γκαζιού.
- Αισθητήρες πίεσης φρένου.
- Αισθητήρες hall effect για την μέτρηση της ταχύτητας του τροχού.
- Αισθητήρας μέτρησης ρεύματος από και προς τον αναστροφέα.

Για την μέτρηση της θέσης πεταλιού του γκαζιού, χρησιμοποιούνται δύο αισθητήρες και η VCU ελέγχει την απόκλιση μεταξύ των δύο. Στην περίπτωση που η απόκλιση είναι μεγαλύτερη από 10% η ροπή που αποστέλλεται στον αναστροφέα είναι 0. Τα δεδομένα αυτά αποστέλλονται στην VCU μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας CAN-BUS. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται το μεγάλος πλήθος καλωδίων, αφού η πληροφορία στέλνεται μέσα από δύο καλώδια. Στην κεντρική μονάδα ελέγχου καταλήγουν και άλλες πληροφορίες οι οποίες αποθηκεύονται με σκοπό την ανάλυση του οχήματος δυναμικά και την βελτίωση του. Τέτοιοι αισθητήρες είναι :

- Αισθητήρας Υπερύθρων (Infrared sensor) για την μέτρηση θερμοκρασίας του ελαστικού.
- Αξελερόμετρο.
- Γραμμικό ποτενσιόμετρο για την μέτρηση θέσης της ανάρτησης.

### 1.3.2 Κύκλωμα απενεργοποίησης (Shutdown Circuit)



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα κυκλώματος απενεργοποίησης

Για την ασφάλεια του οδηγού και του οχήματος υπάρχει ένα σύστημα απενεργοποίησης του συστήματος υψηλής τάσης. Το κύκλωμα απενεργοποίησης αποτελείται από πολλά υποκυκλώματα τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους. Το κύκλωμα απενεργοποίησης τροφοδοτεί τις δύο επαφές ισχύος του συστήματος της μπαταρίας. Εάν σε κάποιο από τα υποκυκλώματα υπάρχει σφάλμα, διακόπτεται η τροφοδοσία των επαφών ισχύος του συσσωρευτή με συνέπεια την διακοπή της τροφοδοσίας υψηλής τάσης προς τον αναστροφέα. Παρακάτω περιγράφονται τα υποσυστήματα του κυκλώματος απενεργοποίησης. [2]

- **Διακόπτες έκτακτης ανάγκης (Kill Switch):** Στο μονοθέσιο υπάρχουν 3 τέτοιοι διακόπτες έκτακτης ανάγκης, εκ των οποίων ο ένας είναι τοποθετημένος μέσα στο μονοθέσιο κοντά στον οδηγό και οι άλλοι δύο στα πλάγια του μονοθέσιου, ένας σε κάθε μεριά.
- **Διακόπτης δυσλειτουργίας φρένων:** Ο διακόπτης αυτός βρίσκεται τοποθετημένος στο πετάλι του φρένου. Στην περίπτωση που υπάρχει κάποιο πρόβλημα ή δυσλειτουργία στο σύστημα των φρένων, είτε από απώλεια πίεσης υγρών, είτε από μεγάλη θερμοκρασία

ο διακόπτης θα πατηθεί, με συνέπεια την απενεργοποίηση του συστήματος υψηλής τάσης.

- **Σύστημα παρακολούθησης γαλβανικής απομόνωσης (IMD – Insulation Monitoring Device):** Η συσκευή αυτή είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση τόσο του συστήματος χαμηλής όσο και του συστήματος υψηλής τάσης. Στην περίπτωση που υπάρχει διαρροή, η συσκευή παρακολούθησης γαλβανικής απομόνωσης απενεργοποιεί με την χρήση ενός διακόπτη το κύκλωμα υψηλής τάσης.
- **Συσκευή ευπάθειας συστήματος πέδησης(BSPD):** Ένα αυτόνομο μη προγραμματιζόμενο σύστημα το οποίο δέχεται την μηχανική πίεση των φρένων και του ρεύματος που ρέει από τον συσσωρευτή προς τον αναστροφέα. Το σύστημα χρησιμεύει όταν η ροπή που αποστέλλεται προς τον αναστροφέα είναι λανθασμένη και για αυτόν τον λόγο ο οδηγός πατά δυνατά φρένο. Στην περίπτωση αυτή διακόπτεται η τροφοδοσία των επαφών ισχύος του συσσωρευτή.
- **Αισθητήρας επιτάχυνσης :** Η χρήση του συγκεκριμένου αισθητήρα λαμβάνει χώρα και στα συμβατικά οχήματα για την ενεργοποίηση των αερόσακων. Στον διαγωνισμό ο αισθητήρας απενεργοποιεί το σύστημα υψηλής τάσης σε περίπτωση πρόσκρουσης του οχήματος.
- **Interlocks:** Οι κονέκτορες υψηλής τάσης για λόγους ασφαλείας παρέχουν και ακόμα μία επαφή η οποία υποδηλώνει αν ο κονέκτορας είναι συνδεδεμένος. Όταν ο κονέκτορας δεν είναι συνδεδεμένος, οι επαφές ισχύος του συστήματος συσσωρευτών είναι ανοιχτές, γι' αυτό τον λόγο είναι αδύνατη η ροή ρεύματος έξω από το σύστημα συσσωρευτών. [2]

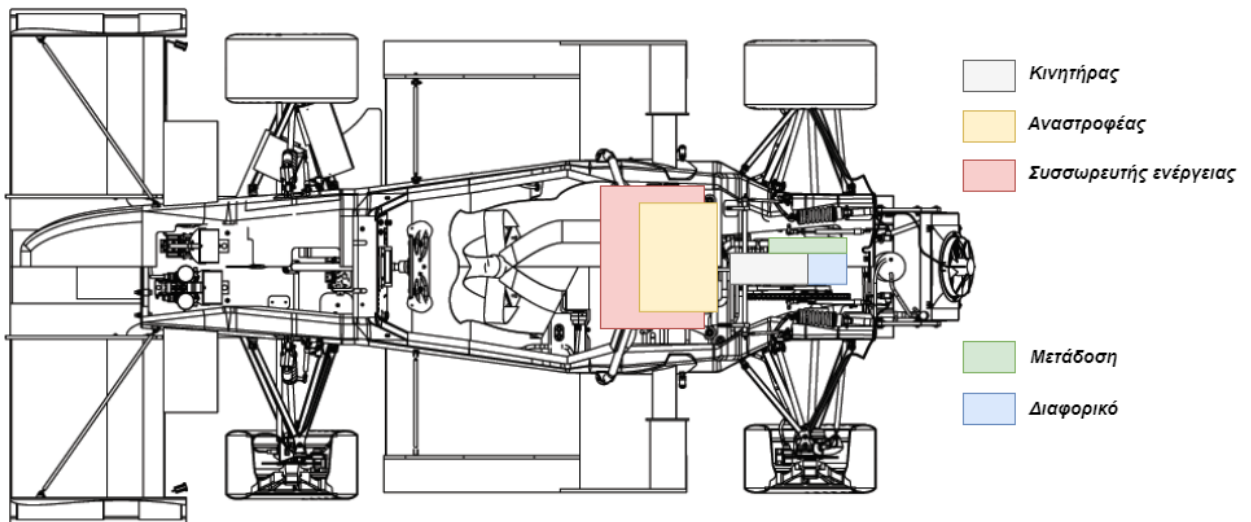
### 1.3.3 Ηλεκτροκινητήριο σύστημα

Ηλεκτροκινητήριο σύστημα (powertrain) αναφέρεται σε εκείνα τα υποσυστήματα τα οποία είναι υπεύθυνα για την μετατροπή της ενέργειας του συστήματος συσσωρευτών σε κινητική ενέργεια για την κίνηση των τροχών. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τους συσσωρευτές, τους αναστροφείς, τους ηλεκτροκινητήρες και το σύστημα μετάδοσης. Στα ηλεκτρικά αγωνιστικά μονοθέσια του διαγωνισμού ο φορτιστής των συσσωρευτών, βρίσκεται εκτός οχήματος για την εξοικονόμηση βάρους αλλά και λόγω των κανόνων ασφαλείας. Επίσης, από την συστοιχία συσσωρευτών ενέργειας τροφοδοτείται, μέσω υποβιβασμού τάσης από DC/DC μετατροπείς το σύστημα χαμηλής τάσης.

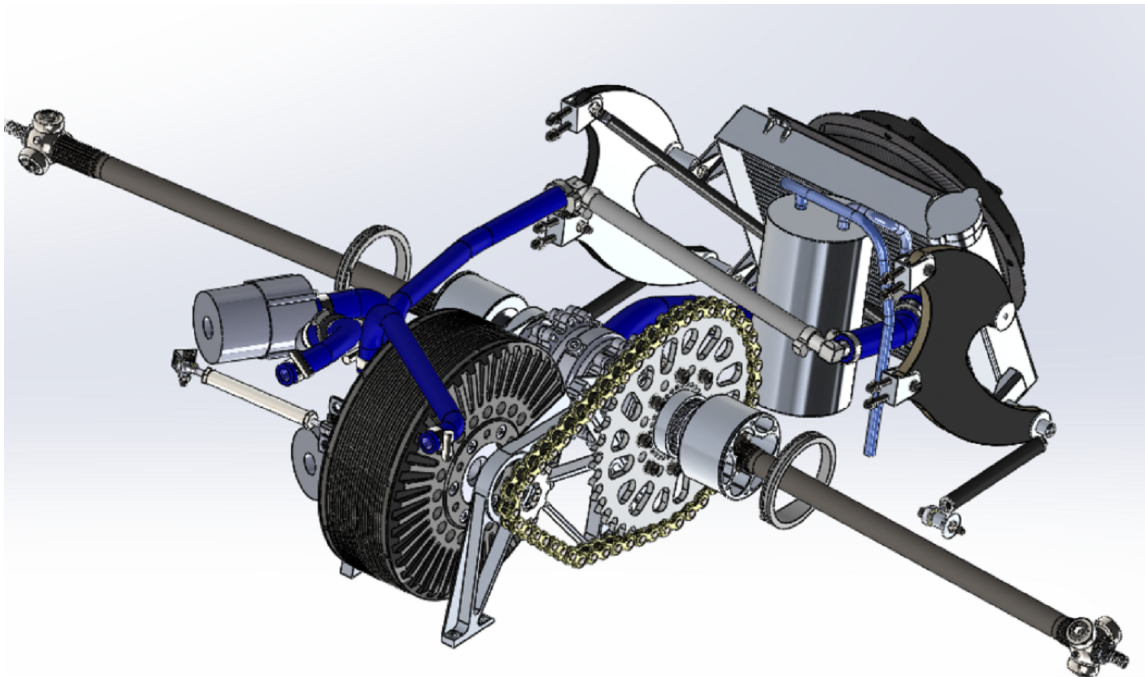
Υπάρχουν τρεις κατηγορίες ηλεκτροκινητήριων συστημάτων :

#### 1. Μονοκινητήριο σύστημα στον πίσω άξονα του οχήματος

Το σύστημα αυτό έχει υλοποιηθεί από την ομάδα τον τελευταίο χρόνο και αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο για την μετάδοση κίνησης του μονοθέσιου με την ύπαρξη μηχανικού διαφορικού συστήματος. Ο υπολογισμός της μείωσης των στροφών του κινητήρα γίνεται με βάση την ροπή εξόδου του ηλεκτρικού κινητήρα αλλά και τον μέγιστο αριθμό στροφών που μπορεί να παράγει. Στο σχήμα 1.5 φαίνεται το συγκεκριμένο ηλεκτροκινητήριο σύστημα.



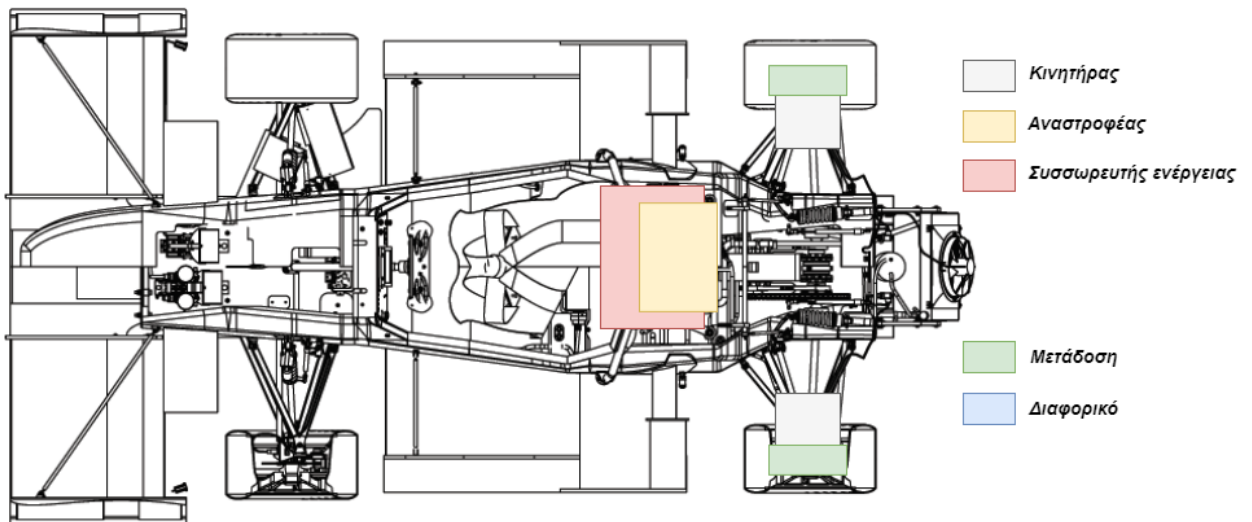
Σχήμα 1.5: Μονοκινητήριο σύστημα



Σχήμα 1.6: Μονοκινητήριο σύστημα μονοθεσίου της ομάδας Prom Racing

## 2. Δικινητήριο σύστημα στους πίσω τροχούς

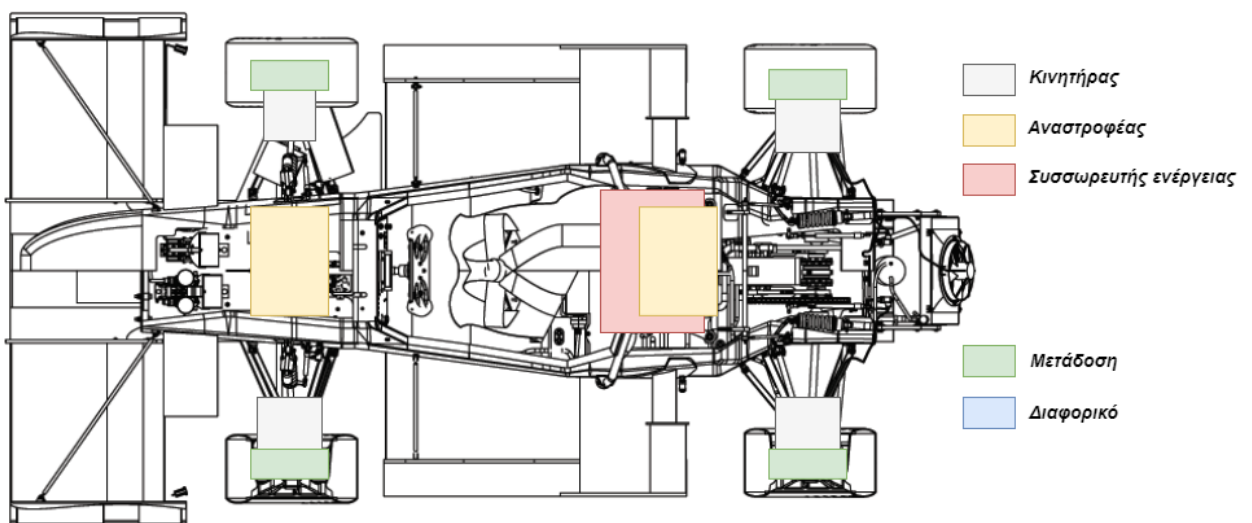
Δύο κινητήρες παρέχουν μέσω διαφορικών συστημάτων μετάδοσης, ανεξάρτητη κίνηση στους πίσω τροχούς (σχήμα 1.7). Είναι αρκετά διαφορετικό σύστημα από αυτό του μονοκινητήριου, από μηχανολογικής άποψης, καθώς απαιτείται συνήθως πλανητικός μειωτήρας για την μείωση των στροφών του ηλεκτροκινητήρα. Για την σωστή δυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου απαιτείται διαφορισμός των ταχυτήτων των δύο τροχών, ο οποίος επιτυγχάνεται ηλεκτρονικά με αλγόριθμο διανυσματικού ελέγχου ροπής (torque vectoring).



Σχήμα 1.7: Δικινητήριο σύστημα στους πίσω τροχούς

### 3. Τετρακινητήριο σύστημα

Τέσσερις κινητήρες παρέχουν μέσω διαφορετικών συστημάτων μετάδοσης, ανεξάρτητη κίνηση σε όλους του τροχούς(Σχήμα 1.8). Το συγκεκριμένο σύστημα είναι αρκετά απαιτητικό, διότι απαιτεί μηχανολογικό σχεδιασμό της μετάδοσης αλλά και τοποθέτησής της μαζί με τον κινητήρα στο άκρο του οχήματος. Όπως και στο σύστημα με τους δύο κινητήρες είναι απαραίτητη και η ανάπτυξη αλγορίθμου torque vectoring, δίνοντας το πλεονέκτημα του ελέγχου της ροπής του κάθε τροχού ξεχωριστά. Ακόμα ένα θετικό του συγκεκριμένου συστήματος είναι η βέλτιστη αξιοποίηση του συστήματος ανάκτησης ενέργειας μέσω της αναγεννητικής πέδησης. Επιπλέον, μέσω της αναγεννητικής πέδησης η χωρητικότητα των συσσωρευτών μειώνεται με αποτέλεσμα την μείωση του βάρους του συστήματος.



Σχήμα 1.8: Τετρακινητήριο σύστημα

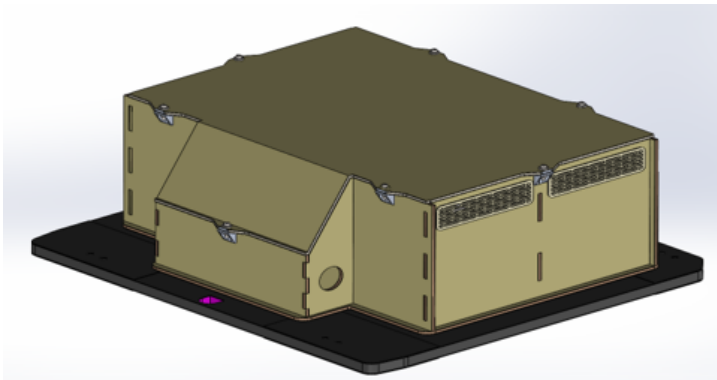
### 1.3.4 Συσσωρευτές και σύστημα διαχείρισής συσσωρευτών

Για την τροφοδοσία του αναστροφέα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα σύστημα συσσωρευτών ενέργειας, που περιέχει συστοιχία μπαταριών λιθίου κοβαλτίου (LiCoO<sub>2</sub>). Η χωρητικότητα των παραπάνω κελιών είναι 8000mAh και η συνδεσμολογία που εφαρμόστηκε είναι μια τοπολογία 140 κελιών συνδεδεμένων σε σειρά, ανά δύο παράλληλα (140s2p). Η τοπολογία αυτή επιλέχθηκε έτσι ώστε το μονοθέσιο να είναι ικανό να διανύσει τα 22 χιλιόμετρα που απαιτούνται για τον τερματισμό του αγωνίσματος της αντοχής. Η συνολική ενέργεια του συσσωρευτή υπολογίζεται από τον τύπο:

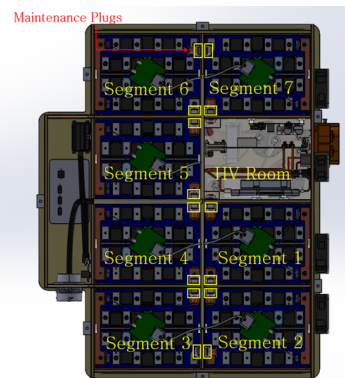
$$E = Capacity_{Bat} \times V_{nombat} = 2 \times 8 \times 3.7 \times 140 = 8.29kWh \quad (1.1)$$

Η μέγιστη τάση των συσσωρευτών είναι :

$$Total_{maxVoltage} = 4.2 \times 140 = 588V \quad (1.2)$$



Σχήμα 1.9: Accumulator Container



Σχήμα 1.10: Open Accumulator

Λόγω κάποιων χαρακτηριστικών που κάνουν επικίνδυνη την χρήση του συγκεκριμένου τύπου μπαταρίας σε συνθήκες που αφορούν την θερμοκρασία, το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης αλλά και την τάσης διακοπής, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση κάθε κελιού του συσσωρευτή ενέργειας. Για τον λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί ένα σύστημα διαχείρισης και παρακολούθησης των κελιών, το οποίο παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο τόσο την τάση κάθε παράλληλου συνδυασμού κελιών ξεχωριστά, όσο και την θερμοκρασία τους. Στην περίπτωση που κάποια μέτρηση διαφέρει σε σχέση με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή αλλά και τους κανονισμούς του διαγωνισμού, το σύστημα σταματά την τροφοδοσία των δύο επαφών ισχύος, με συνέπεια τον περιορισμό της υψηλής τάσης μόνο στο εσωτερικό του συστήματος συσσωρευτών.



### 1.3.5 Κανονισμοί του διαγωνισμού που επηρέασαν τον σχεδιασμό του συστήματος διαχείρισης μπαταριών

Η ομάδες για να συμμετάσχουν πρέπει να σχεδιάζουν όλα τα συστήματα του μονοθέσιου με βάση προδιαγραφών που ορίζονται από τους κανονισμούς που ανακοινώνουν οι διαγωνισμοί κάθε χρόνο. Παρακάτω αναφέρονται οι κανονισμοί οι οποίοι επηρέασαν τον σχεδιασμό του συστήματος διαχείρισης μπαταριών. [2]

1. Κάθε συσσωρευτής υψηλής τάσης θα πρέπει να παρακολουθείται από ένα σύστημα διαχείρισης μπαταριών, κάθε φορά που ο διακόπτης ενεργοποίησης χαμηλής τάσης του μονοθέσιου είναι ανοιχτός ή ο συσσωρευτής είναι συνδεδεμένος στον φορτιστή.
2. Το σύστημα διαχείρισης μπαταριών θα πρέπει συνέχεια να μετρά:
  - Όλες τις τάσεις των κελιών.
  - Το ρεύμα που διαρρέεται από το σύστημα υψηλής τάσης.
  - Την θερμοκρασία των κελιών.
3. Η μέγιστη θερμοκρασία των κελιών είναι 60°C.
4. Το σύστημα υψηλής τάσης θα πρέπει να κλείσει εάν η τάση ή η θερμοκρασία διαφέρει από αυτή που αναγράφεται από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή για:
  - 500ms για τάση και ρεύμα κελιού.
  - 1s για θερμοκρασία.

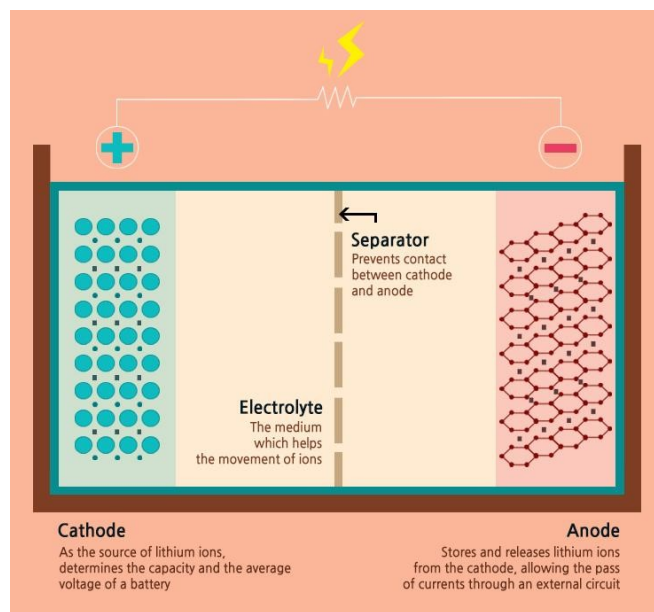
# Κεφάλαιο 2

## Μπαταρίες

### 2.1 Τεχνολογία των Μπαταριών

Η μπαταρία είναι μια συσκευή που αποθηκεύει τη χημική ενέργεια που περιέχεται στα ενεργά υλικά της, και την οποία αποδεσμεύει απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικής οξειδοαναγωγικής αντίδρασης. Στην περίπτωση ενός επαναφορτιζόμενου συστήματος, η μπαταρία φορτίζεται με την αντίστροφη διαδικασία. Αυτός ο τύπος αντίδρασης περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος. Σε μη ηλεκτροχημικές αντιδράσεις όπως η σκουριά και η καύση, γίνεται άμεσα η μεταφορά ηλεκτρονίων και εμπλέκεται μόνο θερμότητα. Ο όρος μπαταρία χρησιμοποιείται συχνά, όμως για μία ηλεκτροχημική μονάδα βασικός όρος είναι το κελί. Μία μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα κελιά συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα, ή και τα δύο, ανάλογα με την επιθυμητή τάση και χωρητικότητα εξόδου. Ένα κελί αποτελείται από τρία δομικά στοιχεία:

- **Άνοδος:** Η άνοδος ή αλλιώς το αρνητικό ηλεκτρόδιο που δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση.
- **Κάθοδος:** Η κάθοδος ή αλλιώς το θετικό ηλεκτρόδιο που δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και ελαττώνεται κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση.
- **Ηλεκτρολύτης:** Ο ηλεκτρολύτης που παρέχει το μέσο για τη μεταφορά φορτίου, ως ιόντα, μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.



Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονική δομή μπαταρίας

Η τάση και η χωρητικότητα του κελιού εξαρτάται από τον συνδυασμό της ανόδου και της καθόδου. Η άνοδος επιλέγεται με βάση την αποτελεσματικότητα σε αναγωγή καθώς και στην ευκολία κατασκευής και το κόστος. Για την άνοδο συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται μέταλλα με τον ψευδάργυρο και το λίθιο να είναι τα πιο δημοφιλή παραδείγματα. Από την άλλη πλευρά η κάθοδος θα πρέπει να είναι υλικό με υψηλή απόδοση στην οξείδωση. Τόσο η άνοδος όσο και η κάθοδος θα πρέπει να έχουν κατάλληλη τάση και σταθερότητα όταν έρχονται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη. Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται για την κάθοδο είναι μεταλλικά οξείδια. Όσον αφορά τον ηλεκτρολύτη θα πρέπει να έχει καλές ιοντικές ιδιότητες αλλά να είναι και μη ηλεκτρικά αγωγός, ούτε να αντιδρά με τα υλικά του ηλεκτροδίου. Μικρές αλλαγές στις ιδιότητες του με την έκθεση σε μεγάλη θερμοκρασία αλλά και το χαμηλό κόστος είναι επίσης σημαντικά για την επιλογή του ηλεκτρολύτη. Οι περισσότεροι ηλεκτρολύτες είναι υδατικοί με κάποιες εξαιρέσεις όπως στην θερμική άνοδο και στην άνοδο λιθίου.

Τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου είναι ηλεκτρικά απομονωμένα στο κελί για την αποτροπή βραχυκυκλώματος, όμως περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη. Πρακτικά ένα υλικό διαχωρισμού χρησιμοποιείται για την απομόνωση της ανόδου και της καθόδου, επιτρέποντας όμως στον ηλεκτρολύτη να διατηρεί την επιθυμητή ιοντική αγωγιμότητα. Τα κελιά μπορούν να κατασκευαστούν σε πολλά σχήματα και διαμορφώσεις όπως κυλινδρικά, πρισματικά και σε σχήμα θήκης (Pouch). [3]

## 2.2 Ταξινόμηση κελιών και μπαταριών

Τα κελιά και οι μπαταρίες χαρακτηρίζονται πρωτεύοντα (μη επαναφορτιζόμενα) και δευτερεύοντα (επαναφορτιζόμενα) ανάλογα με την ικανότητα τους να επαναφορτίζονται ηλεκτρικά. Μέσα σε αυτές τις κατηγορίες κελιών υπάρχουν και άλλες κατηγορίες που αφορούν την κατασκευή και τον σχεδιασμό τους. [3]

### 2.2.1 Πρωτεύοντα κελιά – μπαταρίες

Αυτά τα κελιά δεν μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά εύκολα και αποτελεσματικά, έτσι μετά την αποφόρτιση τους κελιά αυτά αποσύρονται. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των κελιών είναι η φθηνή, ελαφριά πηγή ενέργειας, με καλή διάρκεια ζωής σε χαμηλούς ρυθμούς εκφόρτισης . [3]

### 2.2.2 Δευτερεύοντα κελιά – μπαταρίες

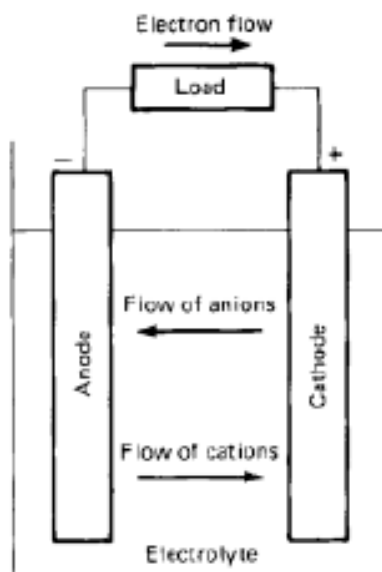
Αυτά τα κελιά μετά την αποφόρτιση τους μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά στην αρχική τους κατάσταση δίνοντας τους ρεύμα με την αντίθετη κατεύθυνσεως όμως από αυτή του ρεύματος εκφόρτισης. Η διαδικασία της επαναφόρτισης μπορεί να επαναληφθεί εκατοντάδες ή χιλιάδες φορές ανάλογα με τον τύπο και την ποιότητα της μπαταρίας. Είναι συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και είναι γνωστές ως «μπαταρίες αποθήκευσης» ή «συσσωρευτές». Οι εφαρμογές των δευτερευόντων μπαταριών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- Οι εφαρμογές στις οποίες, η δευτερεύουσα μπαταρία χρησιμοποιείται ως συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, όντας ηλεκτρικά συνδεδεμένη με μία κύρια πηγή ενέργειας η οποία την φορτίζει και η μπαταρία παρέχει την ενέργεια της στο φορτίο κατ' απαίτηση. Τέτοιες μπαταρίες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως, συστήματα αυτοκινήτου, αεροδιαστημικής, UPS(πηγές ενέργειας αναμονής) και υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα.
- Υπάρχουν περιπτώσεις όμως που οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται ως κύριες πηγές ενέργειας και ουσιαστικά αποφορτίζονται τελείως και επαναφορτίζονται μετά την χρήση τους. Τέτοιες περιπτώσεις είναι συσκευές ευρείας κατανάλωσης, ηλεκτρικά εργαλεία και ηλεκτρικά οχήματα. Αυτό που χαρακτηρίζει τις δευτερεύουσες μπαταρίες είναι η υψηλή πυκνότητα ισχύος, ο υψηλός ρυθμός εκφόρτισης και επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης, ενώ οι ενεργειακές τους πυκνότητες είναι γενικότερα χαμηλότερες από αυτές των πρωτεύουσών μπαταριών . [3]

## 2.3 Λειτουργίες κελιών - μπαταριών

### • Εκφόρτιση

Όταν ένα εξωτερικό φορτίο είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένο με ένα κελί, τα ηλεκτρόνια κινούνται από την άνοδο, η οποία οξειδώνεται προς το φορτίο και έπειτα στην κάθοδο, όπου γίνονται δεκτά και το υλικό της καθόδου μειώνεται. Το ηλεκτρικό κύκλωμα ολοκληρώνεται στον ηλεκτρολύτη, με την ροή των ανιόντων και των κατιόντων προς την άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα. Παρακάτω φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας εκφόρτισης ενός κελιού.



Σχήμα 2.2: Διαδικασία εκφόρτισης κελιού

Η αντίδραση εκφόρτισης μπορεί να γραφτεί θεωρώντας ένα μέταλλο ως άνοδο και ως κάθοδο το χλώριο ( $\text{Cl}_2$ ).

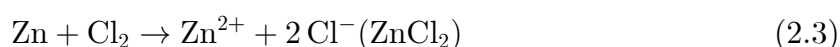
Αρνητικό ηλεκτρόδιο : Αντίδραση Οξείδωσης



Θετικό ηλεκτρόδιο : Αντίδραση Αναγωγής

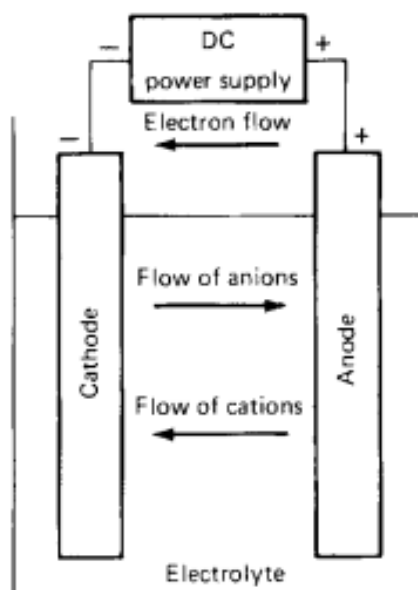


Αντίδραση Εκφόρτισης :



### • Φόρτιση

Κατά την διάρκεια της φόρτισης ενός επαναφορτιζόμενου κελιού, το ρεύμα έχει φορά αντίθετη με αυτή της εκφόρτισης. Αυτή τη φορά η οξείδωση γίνεται στο θετικό ηλεκτρόδιο και η αναγωγή στο αρνητικό όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Εξ ορισμού η άνοδος είναι το ηλεκτρόδιο στο οποίο πραγματοποιείται οξείδωση και η κάθοδος αυτό στο οποίο πραγματοποιείται αναγωγή. Στην φόρτιση το θετικό ηλεκτρόδιο είναι η άνοδος και το αρνητικό η κάθοδος. Αντίστοιχα με το παράδειγμα του μετάλλου και του χλωρίου η διαδικασία φόρτισης φαίνεται παρακάτω. [3]



Σχήμα 2.3: Διαδικασία φόρτισης κελιού

Αρνητικό ηλεκτρόδιο : Αντίδραση Αναγωγής



Θετικό ηλεκτρόδιο : Αντίδραση Οξειδωσης



Αντίδραση φόρτισης :



## 2.4 Ηλεκτρικές ιδιότητες μπαταριών

- **Τάση:** Το τυπικό δυναμικό του κελιού καθορίζεται από τον τύπο των ενεργών υλικών που περιέχονται στο κελί. Μπορεί να υπολογιστεί από δεδομένα ελεύθερης ενέργειας ή να ληφθεί πειραματικά. Το τυπικό δυναμικό ενός στοιχείου μπορεί να υπολογιστεί από τα τυπικά δυναμικά ηλεκτροδίων ως εξής:

Άνοδος(δυναμικό οξειδωσης) + Κάθοδος( δυναμικό αναγωγής) = Τυπικό δυναμικό κελιού

- **Χωρητικότητα:** Η χωρητικότητα ενός κελιού καθορίζεται από την ποσότητα των ενεργών υλικών στο κελί και εκφράζεται ως η συνολική ποσότητα ενέργειας που εμπλέκεται στην ηλεκτροχημική αντίδραση και ορίζεται ως Coulombs ή Αμπέρ- ώρα(Ah) . Η αμπέρ -

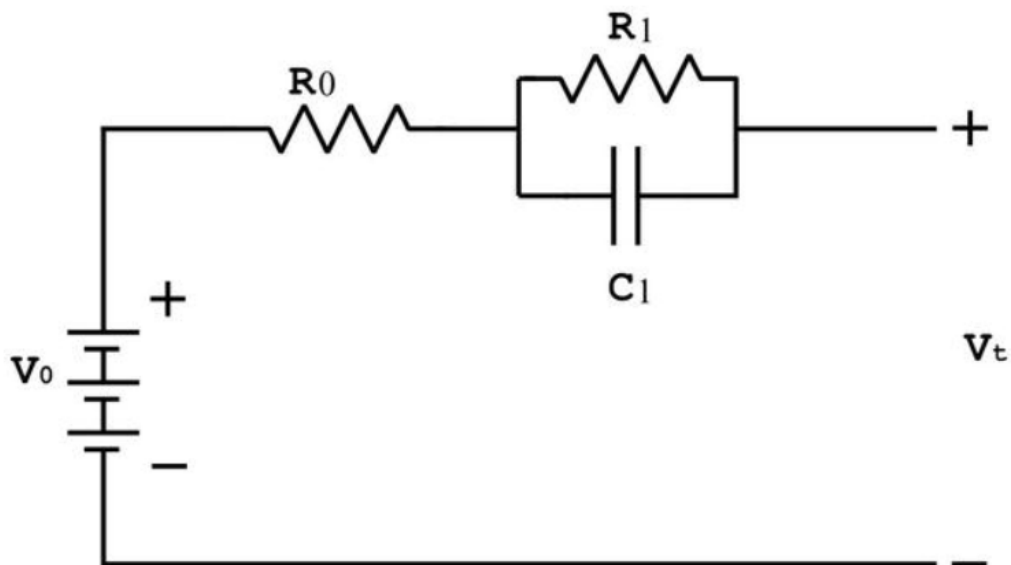
ώρα σε μία μπαταρία συνδέεται άμεσα με την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που λαμβάνεται από το ενεργό υλικό.

- **Ενέργεια:** Η χωρητικότητα ενός κελιού μπορεί να θεωρηθεί και ενεργειακή βάση (watt-hours) λαμβάνοντας υπόψη την τάση και την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η θεωρητική τιμή αντιπροσωπεύει την μέγιστη ενέργεια που μπορεί να μεταφερθεί από ένα ηλεκτροχημικό σύστημα. [3]

$$\text{Watt-hour}(Wh) = \text{Voltage}(V) \times \text{ampere - hour}(Ah) \quad (2.7)$$

## 2.5 Ορολογία μπαταριών

Ορισμένοι όροι είναι σημαντικοί για την κατανόηση της απόδοσης και των χαρακτηριστικών των μπαταριών. Σε αυτήν την ενότητα θα αναλύσουμε τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της παρούσας κατάστασης μίας μπαταρίας. Παρακάτω φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα μιας μπαταρίας, το οποίο χρησιμοποιείται για να μοντελοποιηθεί η δυναμική συμπεριφορά της μπαταρίας.[4]



Σχήμα 2.4: Ισοδύναμο κύκλωμα μπαταρίας

1. **Τάση ανοιχτού κυκλώματος (Open-Circuit Voltage):** Αναφέρεται στην τάση μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου όταν δεν υπάρχει φορτίο στην μπαταρία. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και αυξάνεται με την φόρτιση .
2. **Τάση λειτουργίας (Working Voltage):** Ονομάζεται τάση τερματικού ή κλειστού κυκλώματος και αναφέρεται στην τάση μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου όταν υπάρχει φορτίο στην μπαταρία. Η τάση λειτουργίας εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης και το ρεύμα φόρτισης / εκφόρτισης.

3. **Ρυθμός εκφόρτισης (Discharge Rate):** Στην περιγραφή των μπαταριών, το ρεύμα εκφόρτισης εκφράζεται ως C-rate για κανονικοποίηση έναντι της χωρητικότητας της μπαταρίας, η οποία διαφέρει ανάλογα με την μπαταρία. Ο ρυθμός «C» είναι ένα μέτρο του ρυθμού με τον οποίο αποφορτίζεται μια μπαταρία σε σχέση με την χωρητικότητά της. Ο ρυθμός 1C σημαίνει ότι το ρεύμα εκφόρτισης θα αποφορτίσει ολόκληρη την μπαταρία σε 1 ώρα. Ο ρυθμός εκφόρτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει την ικανότητα εξόδου ισχύος.
4. **Κατάσταση φόρτισης (State of Charge - SoC):** Έκφραση της τρέχουσας χωρητικότητας της μπαταρίας ως ποσοστό της μέγιστης χωρητικότητας. Η κατάσταση φόρτισης υπολογίζεται με την ολοκλήρωση της αλλαγής της χωρητικότητας της μπαταρίας με την πάροδο του χρόνου.
5. **Κατάσταση Υγείας (State of Health - SoH):** Αναφέρεται στην τρέχουσα κατάσταση υγείας της μπαταρίας σε σύγκριση με την μέτρηση στην αρχή της ζωής της. Η συγκεκριμένη μεταβλητή υποδεικνύει σε πόσο χρόνο θα χρειαστεί η μπαταρία για να φτάσει στο τέλος της ζωής της. Ουσιαστικά είναι μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης, της χωρητικότητας, της τάσης, αυτοεκφόρτισης, της ικανότητας της μπαταρίας να φορτιστεί και συνολικό αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης που έχει ολοκληρώσει η μπαταρία σε εκείνο το χρονικό σημείο.
6. **Εσωτερική αντίσταση (Internal Resistance):** Είναι η συνολική αντίσταση μίας μπαταρίας μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων της, συμπεριλαμβανομένης της αντίστασης από τους συλλέκτες ρεύματος, τα ηλεκτρόδια, τα ενεργά υλικά, τα υλικά διαχωρισμού και τους ηλεκτρολύτες. Οι μπαταρίες με μικρή εσωτερική αντίσταση έχουν καλύτερη απόδοση, ανάλογα και με την κατάσταση φόρτισης / εκφόρτισης. Όταν η εσωτερική αντίσταση μιας μπαταρίας αυξάνεται η απόδοση της μπαταρίας μειώνεται, καθώς και η θερμική σταθερότητα της. Η θερμική σταθερότητα μειώνεται, καθώς περισσότερη ενέργεια φόρτισης μετατρέπεται σε θερμότητα.
7. **Αυτοεκφόρτιση (Self-Discharge):** Αυτό είναι ένα φαινόμενο που χαρακτηρίζει τις μπαταρίες και στο οποίο στην εσωτερική χημική πλευρά, πραγματοποιούνται αντιδράσεις οι οποίες μειώνουν την αποθηκευμένη χωρητικότητα της μπαταρίας, χωρίς αυτή να είναι συνδεδεμένη με κάποιο φορτίο. Η αυτοεκφόρτιση μειώνει την διάρκεια ζωής της μπαταρίας, καθώς και την πλήρη φόρτιση.[4]

## 2.6 Τεχνικές προδιαγραφές μπαταριών

Σε αυτήν την ενότητα περιγράφονται οι προδιαγραφές που μπορεί να δούμε στα φύλλα τεχνικών προδιαγραφών των μπαταριών.

1. **Ονομαστική τάση (Nominal Voltage):** Ονομαστική τάση ονομάζουμε την μέση τάση κατά τη διάρκεια της συνολικής διαδικασίας εκφόρτισης της μπαταρίας με ρυθμό εκφόρτισης 0,2C. Επίσης αναφέρεται και ως «κανονική τάση» της μπαταρίας.



2. **Τάση διακοπής ( Cut-off Voltage )**: Αυτή είναι η τελική τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων της μπαταρίας, στην διαδικασία της φόρτισης η εκφόρτισης . Αυτή είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση, και ορίζει την κατάσταση «άδειας» μπαταρίας.
3. **Καμπύλη εκφόρτισης (Discharge Curve)**: Παρουσιάζεται η αλλαγή τάσης σε σχέση με τον χρόνο κατά την διάρκεια μιας διαδικασίας εκφόρτισης.
4. **Ονομαστική χωρητικότητα(Nominal capacity) :** Η συνολική διαθέσιμη χωρητικότητα όταν η μπαταρία αποφορτίζεται με ένα συγκεκριμένο ρεύμα (C-rate) . Η χωρητικότητα υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το ρεύμα εκφόρτισης επί το χρόνο εκφόρτισης και μειώνεται με την αύξηση του C- rate .
5. **Ονομαστική ενέργεια (Nominal Energy) :** Η συνολική διαθέσιμη ενέργεια όταν η μπαταρία αποφορτίζεται με συγκεκριμένο ρεύμα (C Rate). Η ενέργεια υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την εκφόρτιση ισχύς(σε Watt) επί το χρόνο εκφόρτισης. Όπως η χωρητικότητα έτσι και η ενέργεια μειώνεται με την αύξηση του C- Rate.
6. **Κύκλοι ζωής (Cycle life)**:Αντιπροσωπεύει το πόσες φορές μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία μπορεί να φορτιστεί και να εκφορτιστεί. Η διάρκεια ζωής εκτιμάται για ειδικές συνθήκες φόρτισης – εκφόρτισης και εξαρτάται επίσης από τον τύπο της μπαταρίας, χημική σύνθεση, βάθος εκκένωσης και τον σχεδιασμό της. Επηρεάζεται συνήθως από θερμοκρασία και υγρασία.
7. **Μέγιστο ρεύμα συνεχούς εκφόρτισης( Max continuous discharge current)**: Το μέγιστο ρεύμα στο οποίο μπορεί μία μπαταρία να αποφορτίζεται. Το όριο αυτό το ορίζει ο κατασκευαστής της μπαταρίας προκειμένου να αποφευχθούν υπερβολικοί ρυθμοί αποφόρτισης που θα μπορούσαν να καταστρέψουν την μπαταρία ή να μειώσουν την χωρητικότητά της. [4]

## 2.7 Χημικές τεχνολογίες μπαταριών και κελιών

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών χημικών κελιών που προσφέρουν διαφορετικές τάσεις, ισχύ και ενεργειακές επιδόσεις. Τα κελιά ιόντων λιθίου έχουν σημαντικά μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα από τα προηγούμενα χημικά, τα οποία τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία . Επίσης θεωρούνται ασφαλέστερα, λιγότερο τοξικά και είναι αποδοτικότερα ενεργειακά, με σημαντικά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Μερικές από τις πιο δημοφιλείς χημικές ουσίες παρουσιάζονται στην παρακάτω ενότητα . [5]

### • Οξέως Μόλυβδου

Οι μπαταρίες οξέως μολύβδου αποτελούνται από μια κάθοδο διοξειδίου μολύβδου, η άνοδος από μεταλλικό σφουγγάρι μολύβδου και από έναν ηλεκτρολύτη διαλύματος θειικού οξέως. Αυτά τα βαρέα μέταλλα είναι τοξικά, η απόρριψή τους είναι επικίνδυνη για το περιβάλλον. Η τάση των κελιών είναι στα 2 Volt. Οι μπαταρίες μολύβδου θεωρούνται δευτερεύουσες μπαταρίες, χαμηλού κόστους, διαθέσιμη σε μεγάλες ποσότητες και ποικιλία μεγεθών. Έχει μεγάλη απόδοση σε υψηλές τόσο και χαμηλές θερμοκρασίες, εύκολη ένδειξη κατάστασης

φόρτισης και μπορεί να διατηρήσει την φόρτιση της σε εφαρμογές με διακοπτόμενες φορτίσεις. Τα στοιχεία των κελιών είναι ανακυκλώσιμα. Λόγω των μη αναστρέψιμων φυσικών αλλαγών στα ηλεκτρόδια, η αστοχία εμφανίζεται ύστερα από μερικές εκατοντάδες έως και 2000 κύκλους φόρτισης. Τα μειονεκτήματα αυτών των μπαταριών είναι η χαμηλή ενεργειακή τους πυκνότητα, ο μεγάλος χρόνος φόρτισης και η ανάγκη τους για προσεκτική συντήρηση. Χρησιμοποιείται κυρίως για αποθήκευση ενέργειας, τροφοδοσία έκτακτης ανάγκης, εκκίνηση κινητήρα, φωτισμό οχημάτων, ανάφλεξη κινητήρων και σε προηγούμενες γενιές ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων. [5]

- **Νικελίου Καδμίου**

Αυτά τα κελιά χρησιμοποιούν υδροξείδιο του Νικελίου για την άνοδο  $\text{Ni(OH)}_2$  και για την κάθοδο, κάδμιο  $\text{Cd}$  και ένα αλκαλικό υδροξείδιο του καλίου για τον ηλεκτρολύτη. Τα τυπικά κελιά Νικελίου Καδμίου χρησιμοποιούν μια υδατική χημική διαδικασία εμποτισμού για την κατασκευή των ηλεκτροδίων. Τα κελιά αυτά χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε διαστημόπλοια από την αρχή της εξερεύνησης του διαστήματος. Έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες και μεγάλη διάρκεια ζωής σε οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης και δυνατότητα γρήγορης επαναφόρτισης. Το φαινόμενο της μνήμης είναι ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα του, όπως και ο υψηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης σε υψηλή θερμοκρασία. Το κάδμιο είναι εξαιρετικά τοξικό, για αυτόν τον λόγο η χρήση του στις μπαταρίες έχει απαγορευτεί με εξαίρεση τις ιατρικές και ορισμένες στρατιωτικές εφαρμογές. [5]

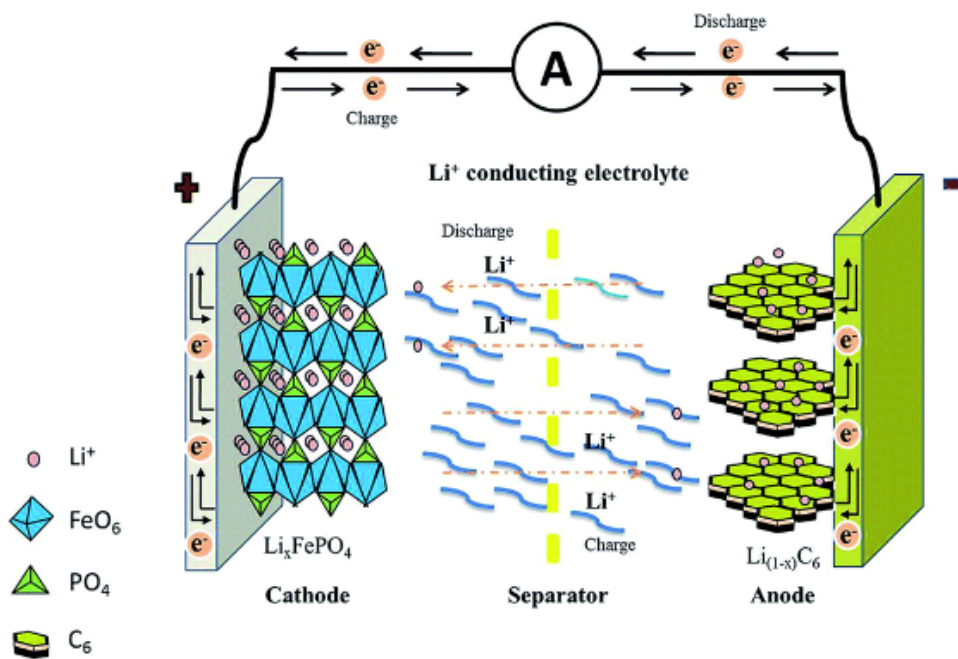
- **Νικελίου Υδριδίου μετάλλου**

Για την κάθοδο τα κελιά χρησιμοποιούν υδροξείδιο του νικελίου  $\text{Ni(OH)}_2$ . Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως ενεργό στοιχείο σε μία άνοδο που μπορεί και το απορροφά. Αυτό το ηλεκτρόδιο είναι κατασκευασμένο από υδρίδιο μετάλλου, συνήθως κράματα λανθανίου και σπάνιων γαιών που οξειδώνονται με το υδρογόνο. Ο ηλεκτρολύτης είναι αλκαλικός, συνήθως υδροξείδιο του καλίου. Τα κελιά αυτά έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από αυτά του Νικελίου – Καδμίου, δυνατότητα γρήγορης επαναφόρτισης, μεγάλη διάρκεια ζωής, σε οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης. Η απόσυρση τους δεν προκαλεί προβλήματα στο περιβάλλον. Η ακριβή κατασκευή των ανόδων, το φαινόμενο της μνήμης αλλά και η κακή διατήρηση της φόρτισης είναι τα μειονεκτήματα τους. Χρησιμοποιούνται σε υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και άλλες ηλεκτρονικές εφαρμογές. Ήταν η κύρια επιλογή για τα ηλεκτρικά οχήματα. Ωστόσο, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου καταλαμβάνουν σταδιακά την αγορά. [5]

- **Ιόντων Λιθίου**

Το λίθιο είναι ελκυστικό λόγω του χαμηλού ισοδύναμου βάρους και των υψηλών προοπτικών και έχει χρησιμοποιηθεί σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και παρέχει πάνω από την τριπλάσια ενεργειακή πυκνότητα από παραδοσιακές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, ενώ έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος σε μία προσπάθεια περαιτέρω βελτίωσης της απόδοσης. Αυτό περιλαμβάνει μία κίνηση για αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα, ικανότητα παροχής υψηλής ισχύος καθώς και μεγάλη διάρκεια ζωής και θερμική σταθερότητα για αυξημένη ασφάλεια. Η προσοχή εστιάστηκε στην δυνατότητα γρήγορης φόρτισης καθώς και στην μείωση του κόστους, μέσω της χρήσης φθηνών πρώτων υλών και χαμηλής τοξικότητας προς το περιβάλλον. Η έρευνα και η ανάπτυξη έχει επικεντρωθεί σε πολλές πτυχές της

τεχνολογίας των κελιών για να βελτιωθεί συνολικά η απόδοση. Μεγάλη έμφαση έχει δοθεί στα θετικά υλικά της καθόδου καθώς παίζει μεγάλο ρόλο στην συνολική ενεργειακή πυκνότητα. Ανάλογα με την επιλογή του ηλεκτρολύτη, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τα υγρά κελιά ιόντων λιθίου που χρησιμοποιούν υγρούς ηλεκτρολύτες και τα κελιά ιόντων λιθίου στερεάς κατάστασης τα οποία χρησιμοποιούν ανόργανους ή πολυμερείς ηλεκτρολύτες. [5]



Σχήμα 2.5: Δομή μπαταρίας Ιόντων Λιθίου

- **Οξειδίου του κοβαλτίου – λιθίου**

Ήταν το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό καθόδου για την κατασκευή ηλεκτροδίων σε μπαταρίες λιθίου για πολλά χρόνια, που χρησιμοποιείται σε φορητούς υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και τάμπλετ. Τα κελιά αυτά έχουν μέτρια διάρκεια ζωής (μικρότερη από 500 κύκλους φόρτισης) και ενεργειακή πυκνότητα. Ωστόσο η χημεία τους είναι λιγότερο θερμικά σταθερή από άλλες χημικές ουσίες οξειδίων ή φωσφορικών μετάλλων κάτω από ακραίες συνθήκες, όπως βραχυκύκλωμα καθιστώντας τα περισσότερο ευαίσθητα σε θερμικές συνθήκες. Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων τους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης είτε σε υβριδικά είτε σε ηλεκτρικά οχήματα. [5]

- **Φωσφορικού σιδήρου – Λιθίου**

Τεχνολογία με βάση τα φωσφορικά άλατα. Έχει βελτιωμένη θερμική και χημική σταθερότητα από τα οξείδια και γενικά θεωρείται ότι είναι χημικά πιο ασφαλές κελί από άλλες τεχνολογίες κελιών ιόντων λιθίου και λιγότερο επιρρεπής σε θερμικές απώλειες σε συνθήκες κατάχρησης. Τα κελιά ιόντων λιθίου είναι εξίσου ανθεκτικά και σταθερά ακόμα και μετά από πολλούς κύκλους φόρτισης. Αν και οι μπαταρίες φωσφορικού σιδήρου – λιθίου έχουν χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τα οξείδια, είναι ικανές να υποστηρίξουν υψηλότερα ρεύματα και επομένως είναι κατάλληλες για υψηλή ισχύ και για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αποτελούν σημαντική βελτίωση σε σχέση με τα κελιά

οξειδίου του κοβαλτίου – λιθίου όσον αφορά το κόστος, την ασφάλεια και την τοξικότητα ως προς το περιβάλλον. [5]

- **Οξείδιο του μαγγανίου – λιθίου**

Τα κελιά αυτά έχουν μεγαλύτερη τάση από χημικές ενώσεις που βασίζονται στο κοβάλτιο και είναι ωστόσο θερμικά πιο σταθερά. Η ενεργειακή τους πυκνότητα είναι 20 % μικρότερη. Το μαγγάνιο σε αντίθεση με το κοβάλτιο, είναι πιο ένα ασφαλές και φιλικό προς το περιβάλλον υλικό για την κατασκευή καθόδων. Τα πλεονεκτήματα του είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή απόδοση. Τα αρνητικά αυτών των κελιών είναι η χαμηλή χωρητικότητα και η θερμική αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες. [5]

- **Οξείδιο κοβαλτίου μαγνησίου νικελίου λιθίου**

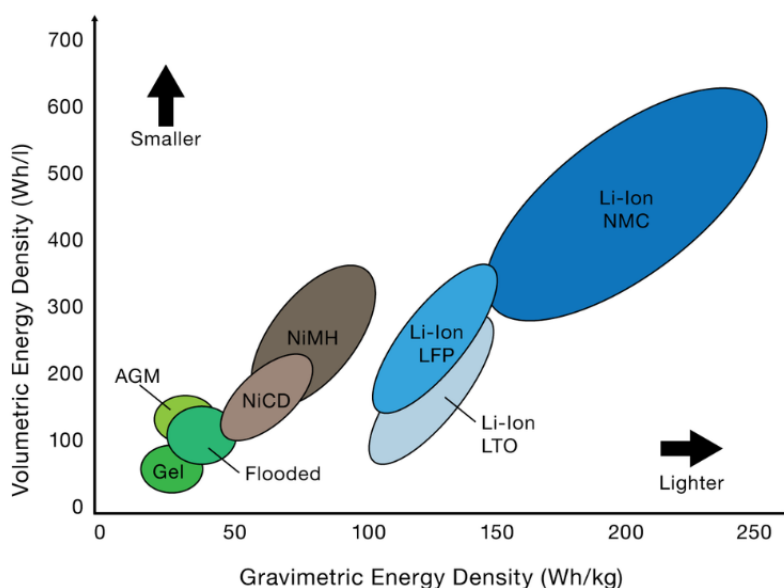
Τα κελιά αυτά προσφέρουν μια οικονομική επιλογή με περιορισμένη ωστόσο ηλεκτροχημική απόδοση. [5]

- **Οξείδιο του Τιτανικού λιθίου**

Αυτά τα κελιά αντικαθιστούν το αρνητικό ηλεκτρόδιο από γραφίτη με τιτανικό λίθιο. Αυτό το υλικό είναι συμβατό με οποιοδήποτε από τα παραπάνω θετικά ηλεκτρόδια αλλά χρησιμοποιείται συνήθως σε συνδυασμό με υλικά με βάση το μαγγάνιο. Προσφέρουν μεγάλη σε ισχύ ικανότητα και με μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. [5]

Σε σύγκριση με την αρχική κατάσταση των μπαταριών ιόντων λιθίου στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η απόδοσή τους έχει βελτιωθεί σημαντικά. Επί του παρόντος έχουν τα ακόλουθα κυρίαρχα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες παραδοσιακές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες.

BATTERY DENSITY COMPARISON



Σχήμα 2.6: Σύγκριση ενεργειακής πυκνότητας μπαταριών

Σε σύγκριση με την αρχική κατάσταση των μπαταριών ιόντων λιθίου στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η απόδοσή τους έχει βελτιωθεί σημαντικά. Επί του παρόντος έχουν τα ακόλουθα κυρίαρχα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες παραδοσιακές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες.

Application	Units	Lead-Acid	NiCd	NiMH	Li-Ion
Cell Voltage	Volts	2	1.2	1.2	2.4 – 3.8
Specific Energy	Wh/kg	30 – 40	35 – 80	55 – 110	100 – 300
Energy Density	Wh/l	50 – 90	50 – 70	160 – 420	125 – 600+
Power Density	W/kg	100 – 200	100 – 150	100 – 500	500 – 5000
Maximum Discharge	Rate	6 – 10C	20C	15C	80C
Useful Capacity	DOD %	50	50	50 – 80	>80
Charge Efficiency	%	60 – 80	60 – 80	70 – 90	>95
Self – Discharge	%/Month	3 – 4	15 – 20	15 – 30	2 – 3
Temperature Range	°C	-40 to 60	-20 to 70	-20 to 65	-30 to 70
Cycle Life	No. of Cycles	200 – 400	300 – 1000	500 – 1000	>2000
Memory Effect		No	Yes	Yes(<NiCd)	No
Robustness (Over/Under Voltage)		Yes	Yes	Yes	Needs BMS

Σχήμα 2.7: Σύγκριση μπαταριών

- Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα: Ενεργειακή πυκνότητα ανά όγκο και μάζα για μπαταρία ιόντων λιθίου μπορεί να είναι έως 500Wh/l και 230Wh/kg, αντίστοιχα, τα οποία αυξάνονται συνεχώς με περισσότερη έρευνα και ανάπτυξη. [4]
- Υψηλή μέση τάση εξόδου (3,6V): Είναι τριπλάσια από αυτήν για το Ni-Cd ή το Ni-MH.
- Υψηλή ισχύς εξόδου: Μπορεί να φτάσει τα 2000 W/kg για σύντομο χρονικό διάστημα.
- Χαμηλή αυτοεκφόρτιση: Είναι λιγότερο από 3% ανά μήνα, που είναι λιγότερο από το ήμισυ του ποσοστού των μπαταριών Ni-Cd και Ni-MH.
- Φαινόμενα μνήμης: Διαφέρει από αυτό των μπαταριών Ni-Cd και Ni-MH και οδηγεί σε καλή απόδοση διάρκειας ζωής για μπαταρίες ιόντων λιθίου.
- Γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση: Η χωρητικότητα μπορεί να φτάσει το 80% της ονομαστικής χωρητικότητας της στο ρυθμό 1C.
- Ευρύ φάσμα θερμοκρασιών λειτουργίας (από -25°C έως +50°C): Η τρέχουσα έρευνα στοχεύει στην διεύρυνση αυτού του εύρους σε -40°C έως +70°C με βελτιώσεις των υλικών που χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρολύτες και τα ηλεκτρόδια.
- Εύκολη δοκιμή για την υπολειπόμενη χωρητικότητα αφού η καμπύλη εκφόρτισης δεν είναι πλήρως οριζόντιο οροπέδιο
- Χωρίς συντήρηση αφού οι παρενέργειες είναι ελάχιστες σε σύγκριση με τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που χρησιμοποιούν υδατικούς ηλεκτρολύτες.

- Μεγάλη διάρκεια ζωής(κύκλοι φόρτισης) : Μπορούν να επιτευχθούν περισσότερες από 1000 φορτίσεις. Περισσότερες από 5000 φορές μπορούν να επιτευχθούν με μικρό βάθος φόρτισης και εκφόρτισης. [4]

Πρέπει να παραδεχτούμε ότι οι τρέχουσες μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν επίσης κάποιες ελλείψεις, όπως τα ακόλουθα:

- Υψηλό κόστος: Κυρίως λόγω του υψηλού κόστους του υλικού θετικού ηλεκτροδίου  $\text{LiCoO}_2$ . Κατά μήκος με τη συνεχώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία υλικού θετικών ηλεκτροδίων,  $\text{Li}[\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}]\text{O}_2$ , το  $\text{LiFePO}_4$  και το  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλη μείωση του κόστους τους.
- Πρέπει να υπάρχει ειδικό κύκλωμα προστασίας για την αποφυγή υπερφόρτισης.

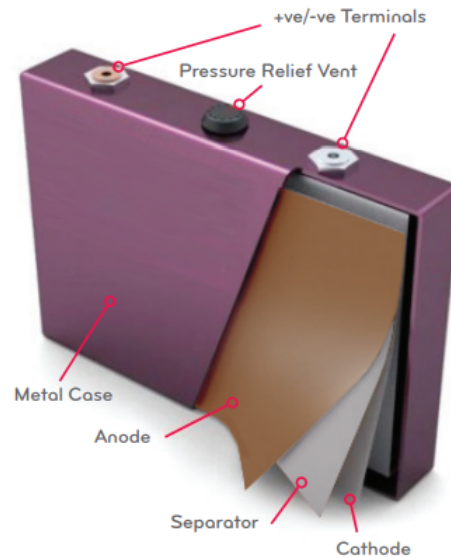
Ως εκ τούτου, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου θεωρούνται κυρίαρχη τεχνολογία και θα συνεχίσουν να έχουν ένα πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογών στο άμεσο μέλλον. [4]

## 2.8 Τρόποι κατασκευής κελιών

Τα υλικά αποθήκευσης ενέργειας και οι χημικές ενώσεις παίζουν μεγάλο ρόλο στην συνολική απόδοση των κελιών. Ωστόσο, τα κελιά ιόντων λιθίου είναι διαθέσιμα σε μια σειρά μορφών των οποίων η μηχανική επηρεάζει το κελί και επομένως την απόδοση της μπαταρίας. Τα κελιά αποθήκευσης ενέργειας χρειάζονται μηχανικά στηρίγματα και συστήματα συγκράτησης για τη σύνδεση και τη συγκράτηση τους στη δομή της μπαταρίας. [5]

### 2.8.1 Πρισματική μεταλλική θήκη

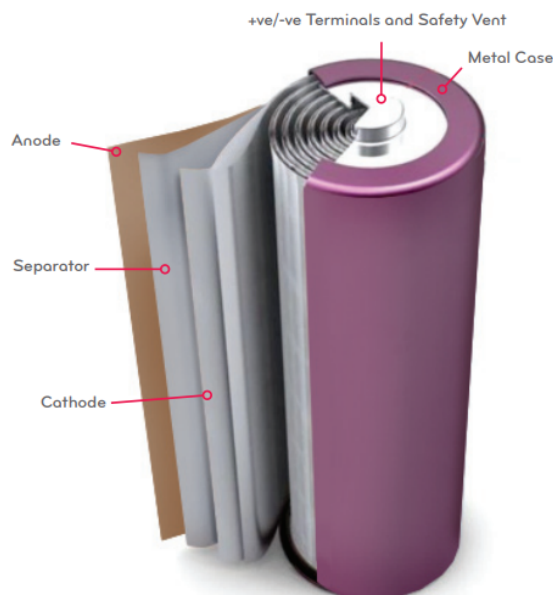
Τα δοχεία αλουμινίου ή χάλυβα χρησιμοποιούνται παραδοσιακά με στοιχεία ιόντων λιθίου. Τα πρισματικά κελιά ιόντων λιθίου έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Τα μεταλλικά κουτιά είναι ισχυρά και επιτρέπουν την καλή απαγωγή θερμότητας. Τα πρισματικά κελιά μπορούν να συσκευαστούν πιο αποτελεσματικά από τα κυλινδρικά κελιά. [5]



Σχήμα 2.8: Πρισματική θήκη μπαταριών

### 2.8.2 Κυλινδρική χαλύβδινη θήκη

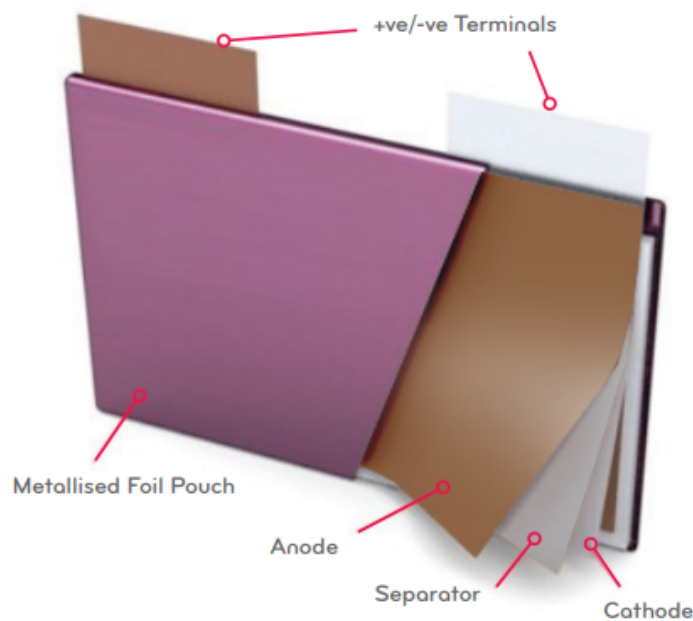
Τα μικρά κυλινδρικά κελιά κατασκευάζονται σε πολύ μεγάλους όγκους και η τιμή είναι χαμηλή για τυπικά σχήματα. Το πρότυπο 18650 (διάμετρος 18 mm, μήκος 650 mm) χρησιμοποιείται σε μπαταρίες φορητών υπολογιστών. Τα κελιά έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, αλλά το μειονέκτημα είναι το ογκώδες μέγεθος και η αναποτελεσματική χρήση του χώρου. Οι κοιλότητες αέρα που δημιουργούνται μεταξύ των κελιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ψύξη. Τα κελιά συνήθως έχουν ένα κύκλωμα προστασίας από υπερφόρτιση. [5]



Σχήμα 2.9: Κυλινδρική θήκη μπαταριών

### 2.8.3 Pouch

Τα Pouch κελιά είναι κελιά όπου η εσωτερική στοίβα ηλεκτροδίων περιέχεται σε μια μαλακή συσκευασία πλαστικού-αλουμινίου. Τα κελιά αυτά λόγω του σχήματός τους κάνουν πιο αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου χώρου, έχοντας έτσι 90 με 95% απόδοση όσον αφορά την αξιοποίηση χώρου. Λόγω της απουσίας του μεταλλικού περιβλήματος το βάρος των συγκεκριμένων κελιών είναι μικρότερο και έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα. Μπορούν να κατασκευαστούν σε διάφορες μορφές και μεγέθη ανάλογα με την εφαρμογή χωρίς να περιορίζονται σε τυποποιημένα πρότυπα. Λόγω μεγάλης επιφάνειας και αναλογίας διαστάσεων έχουν καλή θερμική απαγωγή. [5]



Σχήμα 2.10: Pouch μπαταρία

## 2.9 Επιλογή μπαταριών για χρήση σε ηλεκτρικό όχημα

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ικανές να αποθηκεύσουν έως και τρεις φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα βάρους και όγκου από τις συμβατικές μπαταρίες οξέως-μολύβδου και NiMH. Αυτό είναι περίπου τρεις φορές το επίπεδο τάσης των 3,5Volts. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι διαδεδομένες και σε εφαρμογές αεροδιαστημικής, ηλεκτροκίνητων οχημάτων και υβριδικών λόγω της υψηλής ενέργειας. Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας της μπαταρίας, είναι σημαντικό να κατανοηθούν τα χαρακτηριστικά της, συμπεριλαμβανομένης της σχέσης ενέργειας – ισχύος, της εσωτερικής αντίστασης του κελιού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία και τα χαρακτηριστικά φόρτισης και εκφόρτισης. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι αρκετά χαμηλός, περίπου 5% σε σχέση με το μεγάλο ποσοστό των κελιών οξέως μολύβδου και NiMH είναι 15% και 25% αντίστοιχα. Επίσης ακόμα ένα χαρακτηριστικό είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Στην περίπτωση κελιών NiMH η διάρκεια ζωής τους πέφτει στο 80% μετά από 500 κύκλους φόρτισης με ρυθμό 1C, σε αντίθεση με τα κελιά ιόντων λιθίου που για να φτάσουν σε αυτό το ποσοστό ζωής πρέπει να περάσουν 1200 κύκλοι φόρτισης. Είναι μεγάλος αριθμός χαρακτηριστικών της μπαταρίας Li-ion που την καθιστούν να είναι ευνοϊκή για εφαρμογές ηλεκτρικών και



υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων και αυτές παρουσιάζονται παρακάτω: [6] [7]

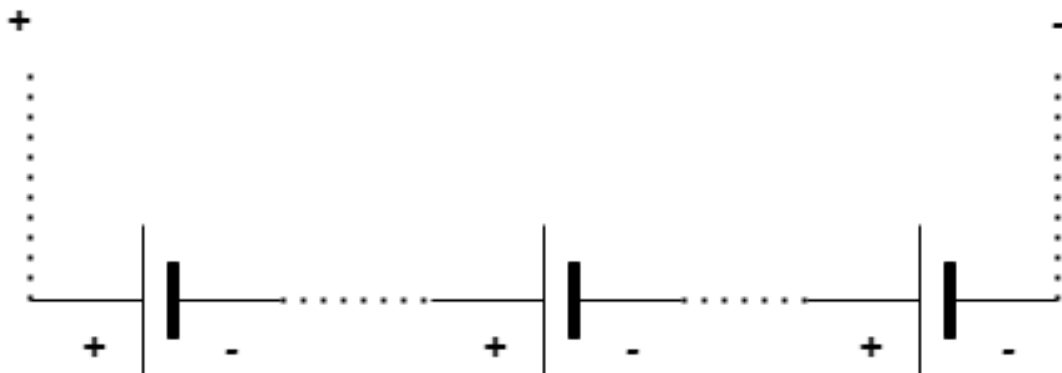
- Υψηλές βαρυμετρικές και ογκομετρικές ενεργειακές πυκνότητες
- Λειτουργία σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος
- Μεγάλος κύκλος ζωής
- Καλή πυκνότητα ισχύος παλμού

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικά υβριδικά-ηλεκτρικά οχήματα και εφαρμογές πλήρως ηλεκτρικών οχημάτων, λόγω των πολλών εγγενών πλεονεκτημάτων τους. Αυτά τα πλεονεκτήματα κάνουν τις μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ο πιο κυρίαρχος υποψήφιος για να εκπληρώσουν τις απαιτήσεις σε ενέργεια, ισχύ και απόδοση του κλάδου της αυτοκινητοβιομηχανίας. [8] [6]

## 2.10 Σχεδιασμός συστήματος μπαταριών για ηλεκτρικά οχήματα

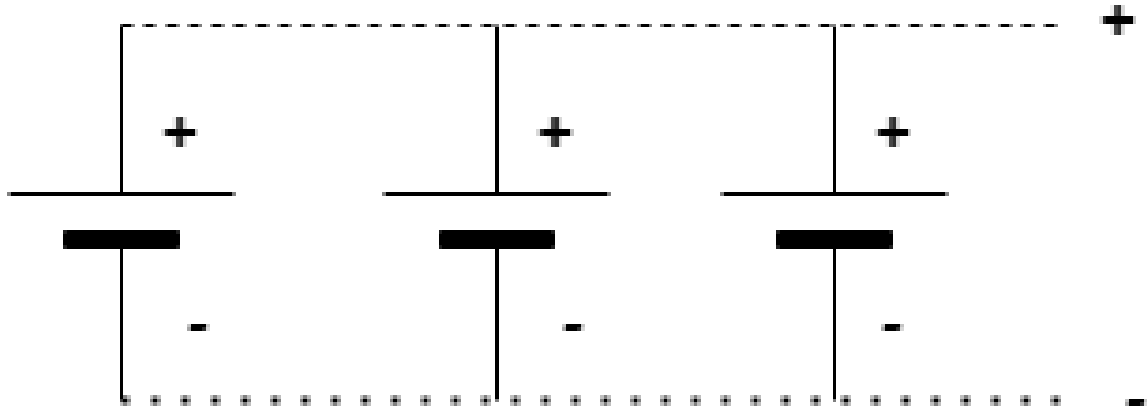
Το σύστημα μπαταρίας των αυτοκινήτων αποτελείται από πολλά μεμονωμένα στοιχεία με τα κελιά να είναι το στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας. Για την δημιουργία του συστήματος μπαταρίας πρέπει πρώτα να δημιουργηθούν και τα υποσυστήματα του. Και αυτό απαιτεί αρχικά την επιλογή σύνδεσης των κελιών με τρόπο τέτοιο ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή συνολική τάση και η χωρητικότητα. Για τις συνδέσεις των κελιών υπάρχουν τρεις τρόποι που έχουν κυριαρχήσει :

- **Σύνδεση των κελιών σε σειρά:** Με την σύνδεση των κελιών σε σειρά προστίθενται οι τάσεις των κελιών αλλά η χωρητικότητα μένει σταθερή .



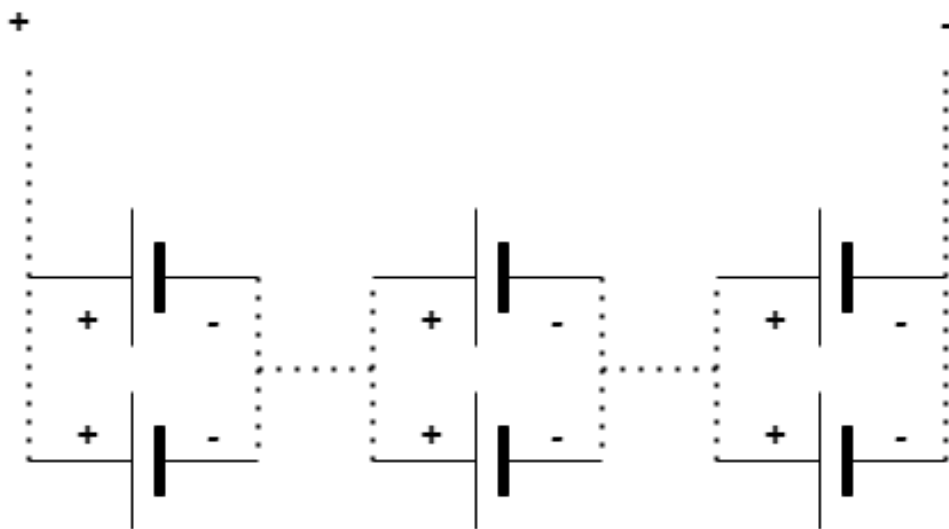
Σχήμα 2.11: Σύνδεση μπαταριών σε σειρά

- **Σύνδεση των κελιών παράλληλα:** Με την σύνδεση των κελιών παράλληλα η συνολική τάση μένει σταθερή αλλά η χωρητικότητα αυξάνεται με την τιμή του κάθε κελιών που συνδέεται παράλληλα.



Σχήμα 2.12: Σύνδεση μπαταριών παράλληλα

- **Σύνδεση των κελιών σε σειρά/ παράλληλα:** Με τον συγκεκριμένο τρόπο σύνδεσης είναι δυνατό να επιτευχθεί οποιαδήποτε επιθυμητή τάση και χωρητικότητα θέλουμε.



Σχήμα 2.13: Σύνδεση μπαταριών παράλληλα/σειρά

Εκτός από τα κελιά και την συνδεσιμότητα τους υπάρχουν και αρκετά συστήματα που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της αρχιτεκτονικής του συστήματος της μπαταρίας. Μερικά από τα πιο σημαντικά παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Busbars :** Μεταλλικές ράβδοι υψηλής αγωγιμότητας που χρησιμοποιούνται για την σύνδεση των κελιών μεταξύ τους .
- **Καλωδίωση:** Η καλωδίωση χρησιμοποιείται για την σύνδεση των αισθητήρων θερμοκρασίας από τα κελιά στο σύστημα διαχείρισης μπαταριών .
- **Σύστημα διαχείρισης μπαταριών:** Είναι το σύστημα το οποίο είναι υπεύθυνο για την επίβλεψη των κελιών αλλά και συνολικά όλο το σύστημα της μπαταρίας .

- Καλώδια υψηλής τάσης/ρεύματος: Καλώδια μεταφοράς υψηλής τάσης και ρεύματος για την διασύνδεση των κελιών, το οποίο είναι ικανό να μεταφέρει όλη την ισχύ από και προς το σύστημα μπαταρίας.
- Διασύνδεση οχήματος: Η σύνδεση η οποία γίνεται μεταξύ του συστήματος μπαταρίας και το όχημα για την μεταφορά πληροφοριών. Συνήθως το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με το όχημα είναι το CAN-BUS το οποίο χρησιμοποιείται γενικά στην αυτοκίνηση. Οι πληροφορίες που μεταφέρονται προς το όχημα είναι η τάση του συνολικού συστήματος, θερμοκρασία και η κατάσταση φόρτισης
- Συσκευή μέτρησης ρεύματος: Είναι συσκευή η οποία τοποθετείται σε σειρά με την καλωδίωση της υψηλής τάσης για να παρακολουθεί το ρεύμα το οποίο διαρρέεται κατά την εκφόρτιση και φόρτιση.
- Αισθητήρες θερμοκρασίας: Τοποθετούνται στην αρνητική επαφή των κελιών για την μέτρηση της θερμοκρασίας τους.
- Συσκευή παρακολούθησης γαλβανικής απομόνωσης: Μια συσκευή για τον έλεγχο της μόνωσης υψηλής τάσης της μπαταρίας με το σύστημα έτσι ώστε να εντοπιστεί οποιοδήποτε πρόβλημα μόνωσης και να αποσυνδεθεί το σύστημα της μπαταρίας σε περίπτωση ανάγκης.
- Επαφές ισχύος: Οι δύο διακόπτες είναι υπεύθυνοι για την απομόνωση του συστήματος μπαταρίας από το όχημα, απενεργοποιούν και την θετική και αρνητική σύνδεση, καθιστώντας έτσι την μπαταρία ασφαλή.
- Σύστημα ψύξης: Είτε ενεργό είτε παθητικό σύστημα ψύξης το οποίο διατηρεί τα κελιά του συστήματος της μπαταρίας εντός θερμοκρασιακού παραθύρου λειτουργίας.

## Κεφάλαιο 3

# Σύστημα Διαχείρισης μπαταριών

Τα ηλεκτρικά οχήματα λειτουργούν πάντα σε ένα σύνθετο περιβάλλον λειτουργίας με ποικίλες μεταβλητές, όπως θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, ατμοσφαιρική διάβρωση, δονήσεις και ισχύς εισόδου και εξόδου. Επομένως οι μπαταρίες ιόντων λιθίου λειτουργούν επίσης στο ίδιο σύνθετο περιβάλλον και αυτοί οι παράγοντες θέτουν μεγάλες προκλήσεις για την ασφάλεια, τη διάρκεια ζωής και την αποτελεσματική χρήση τους. Τα κελιά ιόντων λιθίου είναι πολύ ευαίσθητα σε σχέση με τις παραμέτρους λειτουργίας τους. Είναι σημαντικό για αυτούς τους λόγους να υπάρχει έλεγχος και διαχείριση των μπαταριών για να μειωθεί το κόστος τους, αλλά και η κατάχρηση. Η λειτουργία των κελιών έξω από αυστηρά καθορισμένες περιοχές τάσης, ρεύματος και θερμοκρασίας μπορούν προκαλέσουν κρίσιμη ζημιά στα στοιχεία της μπαταρίας και να οδηγήσουν σε θερμική φυγή, μια κατάσταση στην οποία το κελί εισέρχεται σε μη αναστρέψιμη χημική αντίδραση με αποτέλεσμα πυρκαγιά και πιθανή έκρηξη. Για αυτόν τον λόγο, η παρακολούθηση και η διαχείριση της μπαταρίας είναι αναγκαία. [9]

Οι πρωταρχικοί στόχοι ενός συστήματος διαχείρισης μπαταριών είναι:

- Πρώτον, η προστασία της ασφάλειας του χειριστή του συστήματος που λειτουργεί με μπαταρία. Το σύστημα πρέπει να ανιχνεύει συνθήκες μη ασφαλούς λειτουργίας και να ανταποκρίνεται. Αυτό μπορεί να απαιτεί αποσύνδεση και απομόνωση της μπαταρίας από το φορτίο, προειδοποίηση του χειριστή από κάποια ένδειξη ή ειδοποίηση, και ούτω καθεξής.
- Δεύτερον, η προστασία των κελιών της μπαταρίας από ζημιές κατά την κατάχρηση ή περιπτώσεις αποτυχίας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει ενεργή παρέμβαση υπό έλεγχο λογισμικού που να μπορεί να ανιχνεύσει αστοχίες και να απομονώσει τα εξαρτήματα που παρουσιάζουν βλάβη από την υπόλοιπη μπαταρία και από το φορτίο που τροφοδοτεί.
- Τρίτον, να παρατείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας υπό κανονική λειτουργία. Το σύστημα διασφαλίζει ότι η μπαταρία δεν θα υπερφορτιστεί. Ελέγχει επίσης το σύστημα θερμικής διαχείρισης, διασφαλίζοντας ότι η μπαταρία διατηρείται εντός του εύρους της θερμοκρασίας λειτουργίας. [9]

### 3.1 Λειτουργίες του συστήματος διαχείρισης μπαταριών

Στα ηλεκτρικά οχήματα, το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας παίζει μεγάλο ρόλο στην ασφαλή λειτουργία, βελτιστοποίηση του τρόπου λειτουργίας και φόρτισης των οχημάτων αλλά και στην μείωση των εξόδων. Το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας είτε βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας είτε σε διαδικασία φόρτισης θα πρέπει να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο την κατάσταση της μπαταρίας, για διάγνωση βλαβών και να ενημερώνει τη μονάδα ελέγχου οχήματος ή φορτιστή μέσω κατάλληλου πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Στη συνέχεια, η μονάδα ελέγχου οχήματος ή ο φορτιστής μπορεί να υιοθετήσει την αντίστοιχη στρατηγική ελέγχου για την επίτευξη αποτελεσματικής και ασφαλούς χρήσης της μπαταρίας. Οι συνθήκες λειτουργίας της μπαταρίας ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του οχήματος και τις σχετικές λειτουργίες ενώ ακόμα διαφοροποιούνται και οι παράμετροι του συστήματος. Σε συστήματα χαμηλού κόστους, ενδέχεται να υπάρχουν κάποιες διαφορές στις απαιτήσεις ή τις λειτουργίες του συστήματος διαχείρισης μπαταριών. Ειδικά για μικρό αριθμό κελιών σε σειρά (π.χ. συστήματα 12V με τέσσερα κελιά σε σειρά), οι κατασκευαστές συστημάτων μπαταρίας προτείνουν ένα απλό εξωτερικό κύκλωμα διακοπής σε περιπτώσεις υψηλής αποφόρτισης και ένα κύκλωμα ελεγχόμενης τάσης κατά την φόρτιση.[10]

Για μεγαλύτερα και πιο σύνθετα συστήματα, το σύστημα εγγυάται την προστασία των πολύ ακριβών εξαρτημάτων που αποτελείται το σύστημα μπαταρίας. Αρχικά, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ξανά τη διαφορά μεταξύ των όρων «μπαταρία» και «κελί ». Μπαταρία είναι ένα σύνολο με ηλεκτρικές, μηχανικές και επικοινωνιακές διεπαφές σημάτων. Το σύνολο αυτό μπορεί να αποτελείται από πολλά κελιά που είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή και παράλληλα. Εάν οι μονάδες συνδέονται παράλληλα, τότε είναι δυνατό να ληφθούν υψηλότερα ρεύματα και μια σύνδεση σε σειρά οδηγεί σε υψηλότερη τάση. Σε μια μονάδα κάθε κελί πρέπει να παρακολουθείται για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας (τάση, ρεύμα και θερμοκρασία). Οι μετρήσεις αποθηκεύονται για τον υπολογισμό ιστορικών τιμών και την ενσωμάτωση τυχόν μετρήσεων για την προστασία της μπαταρίας και τη διατήρηση της απόδοσης.[10]

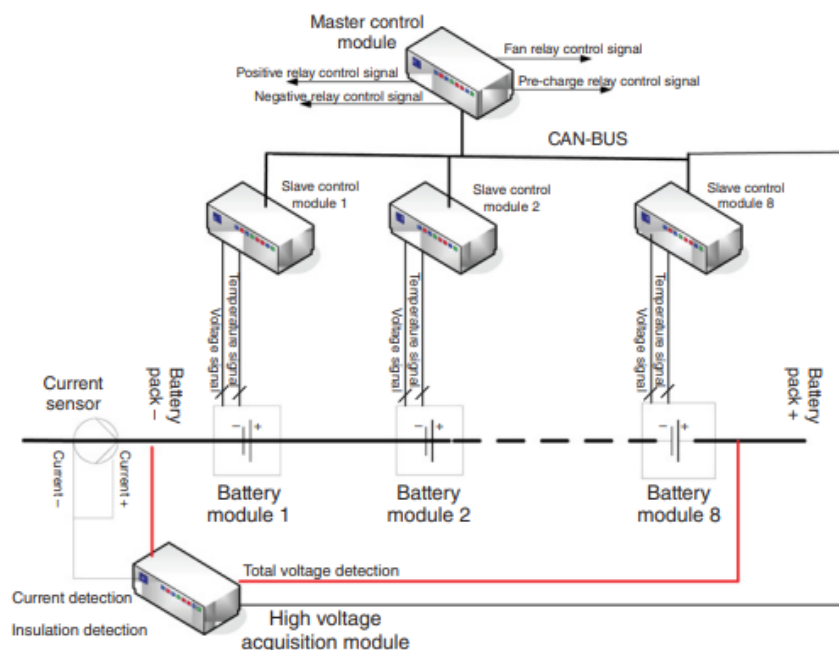
Οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές και τοπολογίες, σχετικά με το σχεδιασμό και την υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας, με βάση τους όρους κελί, μονάδα και μπαταρία που παρουσιάσαμε θα συζητηθεί ξεχωριστά παρακάτω. Συνοψίζοντας, προκειμένου να επιτευχθεί η αποτελεσματική λειτουργία και να παραταθεί η διάρκεια ζωής του συστήματος μπαταρίας, το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας θα πρέπει να περιλαμβάνει τις ακόλουθες λειτουργίες:[10]

1. Μέτρηση τάσης κάθε κελιού της μπαταρίας.
2. Μέτρηση θερμοκρασίας μπαταρίας.
3. Μέτρηση ρεύματος μπαταρίας.
4. Μέτρηση συνολικής τάσης μπαταρίας.
5. Μέτρηση αντίστασης απομόνωσης.
6. Θερμική διαχείριση.
7. Εκτίμηση κατάστασης υγείας της μπαταρίας (SoH).
8. Εκτίμηση κατάστασης φόρτισης (SoC) πακέτου μπαταριών.

9. Επικοινωνία με τα υπόλοιπα συστήματα του αυτοκινήτου.
10. Επικοινωνία με συσκευή παρακολούθησης .
11. Επικοινωνία με φορτιστή μπαταρίας που μπορεί να πραγματοποιήσει την ασφαλή φόρτιση.
12. Καταγραφή των χρόνων εκφόρτισης και φόρτισης.

### 3.2 Αρχιτεκτονικές συστημάτων διαχείρισης μπαταριών

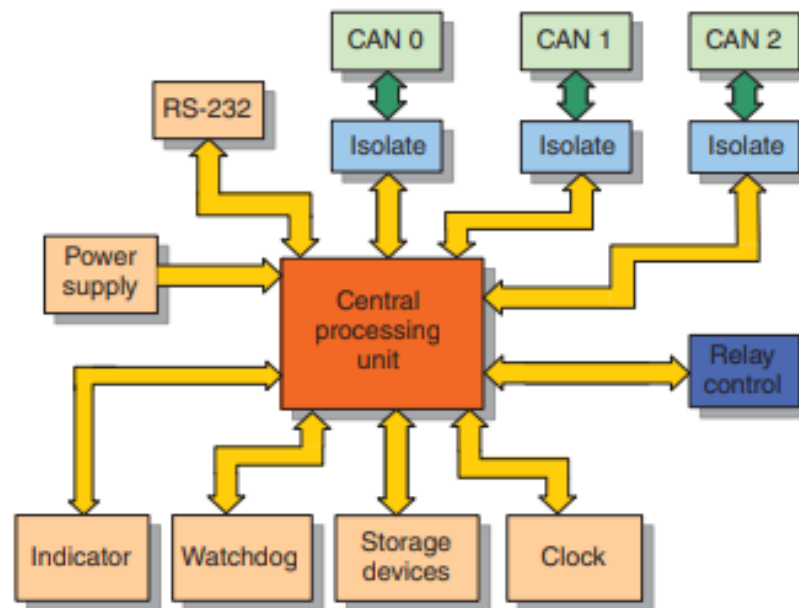
Το σύστημα διαχείρισης μπαταριών κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας δύο βασικές αρχιτεκτονικές: την κεντρική αρχιτεκτονική και την κατανεμημένη αρχιτεκτονική. Σε μια κεντρική αρχιτεκτονική, οι λειτουργίες του κεντρικού επεξεργαστή του συστήματος είναι η μέτρηση της τάσης, της θερμοκρασίας, του ρεύματος, της αντίστασης απομόνωσης, η εκτίμηση καταστάσεων και η επικοινωνία κ.λ.π. Απαιτεί σχετικά συγκεντρωμένα δείγματα και έχει πλεονεκτήματα όπως απλή σύνδεση, χαμηλό κόστος και εύκολη συντήρηση. Ωστόσο, ο μεγάλος των μπαταριών και ο περιορισμένος χώρος στα οχήματα, με τις μπαταρίες να κατανέμονται πάντα σε διαφορετικές περιοχές στα ηλεκτρικά οχήματα έχει οδηγήσει σε σταδιακή εξαφάνιση της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής. Η κατανεμημένη αρχιτεκτονική της μονάδας ελέγχου μπαταρίας (BCU) και η μονάδα μέτρησης της μπαταρίας (BMU) φαίνεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική Master Slave

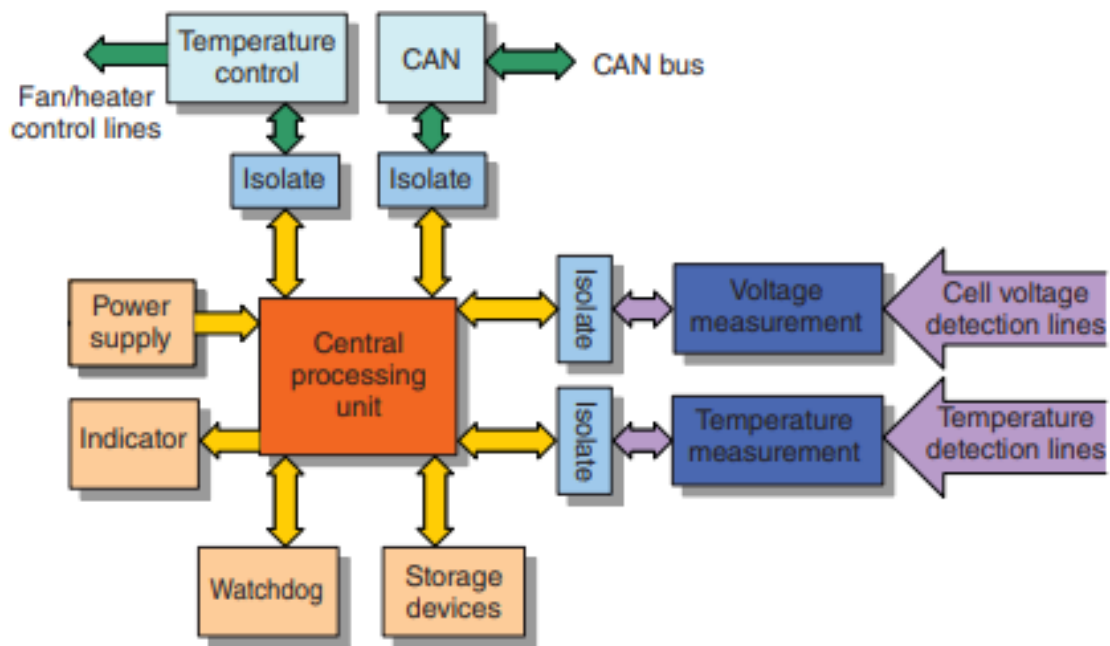
Η μονάδα ελέγχου μπαταρίας χρησιμοποιείται κυρίως για την επεξεργασία των δεδομένων και παραμέτρων της μπαταρίας. Επίσης, είναι υπεύθυνη για κάθε μονάδα μέτρησης και για την εκτίμηση της κατάστασης του πακέτου μπαταριών, συμπεριλαμβανομένων της κατάστασης φόρτισης (SoC), την κατάσταση ενέργειας (SoE), κατάσταση υγείας (SoH) και την κατάσταση λειτουργίας (SoF), που παρέχουν βασικά δεδομένα για τον έλεγχο του οχήματος και τον έλεγχο φόρτισης,

και επίσης στέλνει μια εντολή ελέγχου στις μονάδες μετρήσεων της μπαταρίας. Η δομή του κυκλώματος υλικού φαίνεται στο σχήμα 3.2. [10]



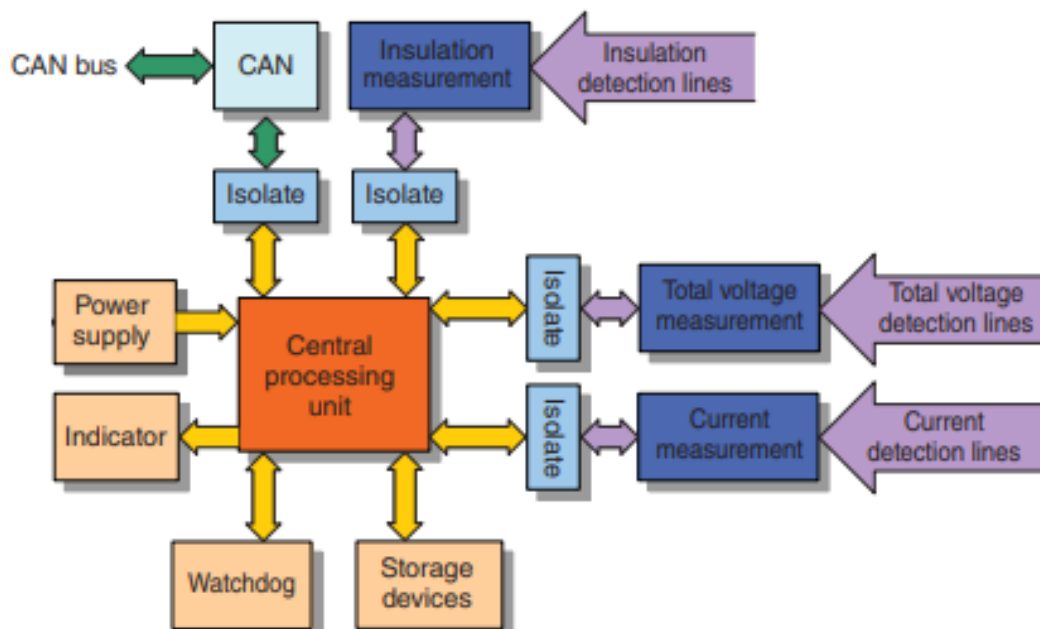
Σχήμα 3.2: Δομή μονάδας ελέγχου μπαταρίας

Η μονάδα μέτρησης μπαταρίας χρησιμοποιείται κυρίως για τη μέτρηση της τάσης κελιού, τη συνολική τάση, το ρεύμα, την αντίσταση απομόνωσης και θερμοκρασίας, καθώς και την εκπλήρωση εντολών ελέγχου της κεντρικής μονάδας. Οι μονάδες μέτρησης μπαταρίας ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες : σε υποτελείς μονάδες (Slave unit) και μονάδες μέτρησης υψηλής τάσης ανάλογα με τις λειτουργίες τους. Η υποτελής μονάδα μέτρησης μπαταρίας είναι γενικά εγκατεστημένη στο κουτί της μπαταρίας και εκτελεί τις εξής λειτουργίες: μέτρηση τάσης κελιού, μέτρηση θερμοκρασίας, έλεγχος ισορροπίας και θερμική διαχείριση (όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3). [10]



Σχήμα 3.3: Δομή μονάδας μέτρησης μπαταρίας

Η μονάδα μέτρησης υψηλής τάσης είναι πάντα εγκατεστημένη στο κεντρικό κουτί του οχήματος και εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες: μέτρηση της συνολικής τάσης, ρεύματος, μέτρηση αντίστασης απομόνωσης και έλεγχος των επαφών ισχύος υψηλής τάσης (όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Δομή μονάδας μέτρησης υψηλής τάσης

Αυτό το μοντέλο μπορεί να αποτρέψει την αμοιβαία παρεμβολή υψηλής και χαμηλής τάσης,



αυξάνει την ευελιξία του σχεδιασμού και της διάταξης και βελτιώνει την αξιοπιστία και την ασφάλεια του συστήματος. Η κεντρική μονάδα και η μονάδα μέτρησης μπαταρίας είναι και οι δύο υπεύθυνες για την επικοινωνία μέσω διαύλου CAN-BUS ή του διαύλου RS485 που επιλύει προβλήματα επικοινωνίας που έχουν εμφανιστεί στην κατανεμημένη αρχιτεκτονική.

### 3.3 Σχεδιασμός του συστήματος διαχείρισης μπαταριών

Η μονάδα μέτρησης της μπαταρίας ή η μονάδα διαχείρισης (Module Management Unit) αυτών, στην προσέγγιση της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής, είναι το βασικότερο μέρος του συστήματος διαχείρισης μπαταριών για την εκτίμηση της κατάστασης της μπαταρίας και είναι ο πυρήνας του υλικού σχεδιασμού. Το σύστημα διαχείρισης μπαταριών θα πρέπει να μετρά σε πραγματικό χρόνο παραμέτρους της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτοί περιλαμβάνουν την τάση της μπαταρίας ,τη θερμοκρασία ,το ρεύμα ,την τάση του πακέτου και την αντίσταση απομόνωσης. [10]

#### 3.3.1 Μέτρηση Τάσης

Σε μία μπαταρία που περιλαμβάνει κελιά ιόντων λιθίου, πρέπει η τάση των κελιών να μετριέται μεμονωμένα. Η μέτρηση τάσης των κελιών μεμονωμένα μας παρέχει πληροφορίες για την ισορροπία όλων των κελιών της μπαταρίας αλλά και πληροφορίες που είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της κατάστασης φόρτισης και υγείας της μπαταρίας. Η τάση κελιού εκτός των ορίων που μας έχει θέσει ο κατασκευαστής είναι μία ένδειξη προβλημάτων που αφορούν την διάρκεια ζωής αλλά και την ασφάλεια των κελιών. Για παράδειγμα, φόρτιση των κελιών ιόντων λιθίου μεγαλύτερη από αυτή των προδιαγραφών μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες εσωτερικές χημικές αντιδράσεις οι οποίες υποβαθμίζουν το κελί. Η υπερβολική εκφόρτιση μπορεί να προκαλέσει μια σειρά γεγονότων που οδηγούν σε βραχυκύκλωμα του κελιού.

Σε ακραίες περιπτώσεις, οποιοδήποτε από αυτά μπορεί να προκαλέσει θερμική διαφυγή, όπου η θερμότητα που παράγεται από παράλληλη αντίδραση ή βραχυκύκλωμα επιταχύνει τους μηχανισμούς αστοχίας μέσω φυσικής θετικής ανάδρασης, με αποτέλεσμα τελικά να πυροδοτήσει ή και να προκαλέσει έκρηξη της μπαταρίας. Για αυτούς τους λόγους δεν μπορούμε να υποθέσουμε ότι όλα τα στοιχεία έχουν αυτόματα την ίδια τάση και επομένως δεν μπορούμε να παραλείψουμε τη μέτρηση κάποιας τάσης σε μια μπαταρία ιόντων λιθίου. Αρκετοί κατασκευαστές ηλεκτρονικών έχουν βοηθήσει με την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, τα οποία είναι υπεύθυνα για την μέτρηση της τάσης. Τα ολοκληρωμένα είναι χαμηλού κόστους και με χαμηλές δυνατότητες επεξεργασίας. Σκοπός τους είναι η ακριβής μέτρηση αναλογικής τάσης, η γρήγορη απόκριση σε υψηλές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές(EMI) και η λειτουργία σε καταστάσεις με μεγάλες δονήσεις και μεγάλη θερμοκρασία τις οποίες βρίσκουμε σε περιβάλλον ηλεκτρικού οχήματος. [10] [11]

#### 3.3.2 Μέτρηση Θερμοκρασίας

Η μέτρηση θερμοκρασίας είναι η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της θερμοκρασίας λειτουργίας της μπαταρίας. Επί του παρόντος, οι μέθοδοι μέτρησης περιλαμβάνουν τη χρήση θερμοστοιχείου, θερμοικής αντίστασης, thermistor, αναλογικού αισθητήρα θερμοκρασίας και ψηφιακών αισθητήρων θερμοκρασίας .

- **Θερμοστοιχείο**

Το θερμοστοιχείο χρησιμοποιείται ευρέως στις μετρήσεις θερμοκρασίας. Τα κύρια χαρακτηριστικά του περιλαμβάνουν μεγάλο εύρος μέτρησης, σταθερή απόδοση, απλή δομή, καλή δυναμική απόκριση, μικρό σφάλμα μέτρησης, βολικό αυτόματο και ενσωματωμένο έλεγχο. Οι αρχές ενός θερμοστοιχείου βασίζονται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Εάν δύο διαφορετικοί αγωγοί ή ημιαγωγοί συνδέονται σε έναν βρόχο και τα δύο σημεία επαφής έχουν διαφορετική θερμοκρασία, τότε στον βρόχο παράγεται θερμοηλεκτρική ισχύς. Η τάση εξόδου του θερμοστοιχείου εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του θερμού και του ψυχρού άκρου. [10]

Στην πράξη, είναι απαραίτητη η αντιστάθμιση της θερμοκρασίας, με την χρήση φίλτρων για την ενίσχυση του κυκλώματος και η σχεδίαση κυκλώματος ανίχνευσης θερμοκρασίας στο ψυχρό άκρο. Όταν υπάρχουν πολλά σημεία θερμοκρασίας προς μέτρηση, η καλωδίωση σύνδεσης θα είναι πολύπλοκη. Η μεγάλη ποσότητα καλωδίωσης θα μειώσει την αξιοπιστία του συστήματος και θα περιπλέξει την τοποθέτηση του αισθητήρα.[10]

- **Θερμική αντίσταση**

Ένας ανιχνευτής θερμικής αντίστασης είναι ένας κοινός ανιχνευτής θερμοκρασίας στην περιοχή μέσης-χαμηλής θερμοκρασίας. Οι αρχές του βασίζονται στο γεγονός ότι η αντίσταση ενός αγωγού ή ημιαγωγού θα αλλάξει καθώς αλλάζει η θερμοκρασία. Οι περισσότεροι ανιχνευτές θερμικής αντίστασης είναι κατασκευασμένοι από καθαρά μέταλλα. Επί του παρόντος, τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι η πλατίνα, ο χαλκός, ενώ άλλα, όπως το νικέλιο, το μαγγάνιο και το ρόδιο κ.λ.π, αρχίζουν να χρησιμοποιούνται. Τα κύρια χαρακτηριστικά του ανιχνευτή θερμικής αντίστασης περιλαμβάνουν σήμα απομακρυσμένης μετάδοσης, υψηλή ευαισθησία, καλή σταθερότητα, καλή εναλλαξιμότητα και υψηλή ακρίβεια. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου μεγέθους του και της μεγάλης θερμικής αδράνειας, δεν μπορεί να μετρήσει γρήγορες αλλαγές στην θερμοκρασία. Χρειάζεται εξωτερική παροχή ενέργειας. Το κύκλωμα επεξεργασίας και η σύνδεσή του είναι τόσο περίπλοκα όσο και του θερμοστοιχείου.[10][9]

- **Αναλογικός αισθητήρας θερμοκρασίας**

Ένας αναλογικός ενσωματωμένος αισθητήρας θερμοκρασίας είναι ένας ενσωματωμένος αισθητήρας από ημιαγωγούς πυριτίου. Ονομάζεται επίσης αισθητήρας πυριτίου ή μονολιθικός ενσωματωμένος αισθητήρας θερμοκρασίας. Ένας αναλογικός ενσωματωμένος αισθητήρας θερμοκρασίας είναι ένα ειδικό ολοκληρωμένο που ενσωματώνει αισθητήρες θερμοκρασίας σε ένα τσιπ. Μπορεί να ολοκληρώσει τη μέτρηση της θερμοκρασίας και να εξάγει ένα αναλογικό σήμα. Τα σήματα εξόδου του αναλογικού ενσωματωμένου αισθητήρα θερμοκρασίας περιλαμβάνουν ρεύμα, τάση, συχνότητα και ούτω καθεξής. Τα κύρια χαρακτηριστικά είναι η χαμηλή τιμή, η γρήγορη ταχύτητα απόκρισης, η δυνατότητα αποστολής δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις, το μικρό μέγεθος και η χαμηλή ισχύς. Είναι κατάλληλο για μέτρηση θερμοκρασίας σε μεγάλη απόσταση. Η μη γραμμική βαθμονόμηση δεν είναι απαραίτητη αλλά χρειάζεται μια πολύπλοκη μονάδα επεξεργασίας.[10]

- **Ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας**

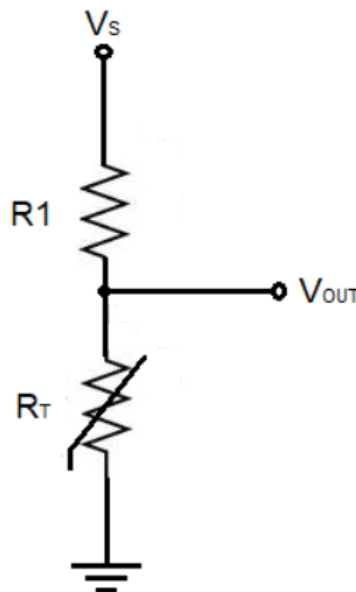
Ο έξυπνος αισθητήρας θερμοκρασίας, γνωστός και ως ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας, ενσωματώνει έναν αισθητήρα θερμοκρασίας με ένα περιφερειακό κύκλωμα, αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα(ADC), μικροελεγκτή και κύκλωμα διασύνδεσης σε ένα τσιπ, με δυνατότητα μέτρησης θερμοκρασίας και επικοινωνίας με μικροεπεξεργαστή. Μπορεί να εξάγει δεδομένα θερμοκρασίας και σχετικά δεδομένα ελέγχου θερμοκρασίας. Έχει καλά χαρακτηριστικά, όπως υψηλή ακρίβεια μέτρησης, γρήγορο χρόνο μετατροπής, προγραμματισμό, μέτρηση πολλαπλών σημείων ενώ παράλληλα τοποθετείται εύκολα.[10]

- **Thermistor**

Το thermistor είναι μια συσκευή μέτρησης θερμοκρασίας που περιλαμβάνει στερεούς ημιαγωγούς με υψηλό συντελεστή θερμοκρασίας- αντίστασης. Σύμφωνα με τον συντελεστή θερμοκρασίας, τα thermistor ταξινομούνται σε δύο τύπους :

Αντιστάσεις θετικού συντελεστή θερμοκρασίας(PTC-Positive Temperature Coefficient) και αντιστάσεις αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας (NTC- Negative Temperature Coefficient).

Τα κύρια χαρακτηριστικά του thermistor περιλαμβάνουν υψηλή ευαισθησία, μικρό μέγεθος, καλή σταθερότητα, ισχυρή ικανότητα υπερφόρτωσης, υψηλή ταχύτητα απόκρισης και μικρή καθυστέρηση. Ωστόσο, έχει χαμηλή ακρίβεια και έντονη μη γραμμικότητα. Χρησιμοποιείται ευρέως στον έλεγχο θερμοκρασίας με μικρότερη ακρίβεια. Παρακάτω φαίνεται η κυκλωματική τοπολογία NTC Thermistor(σχήμα3.5).[10][9]



Σχήμα 3.5: Κυκλωματική τοπολογία NTC Thermistor

Τύποι υπολογισμού θερμοκρασίας :

$$I = \frac{V}{R_1 + R_{thermistor}} \quad (3.1)$$

όπου :

$$V_{thermistor} = I \times R_{thermistor} \quad (3.2)$$

$$V_{thermistor} = \frac{R_{thermistor}}{R1 + R_{thermistor}} \times V \quad (3.3)$$

Η επιλογή της τιμής της αντίστασης R1 γίνεται για να μην υπάρχει απώλεια ισχύος στο κύκλωμα αλλά και για την επιστροφή του κατάλληλου εύρους τιμών στο σύστημα.

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας μειώνοντας το σφάλμα της μέτρησης χρησιμοποιείται η εξίσωση Stein Hart και Hart .

$$\frac{1}{T} = A + B \times (\ln R_{thermistor}) + C \times (\ln R_{thermistor})^3 \quad (3.4)$$

όπου:

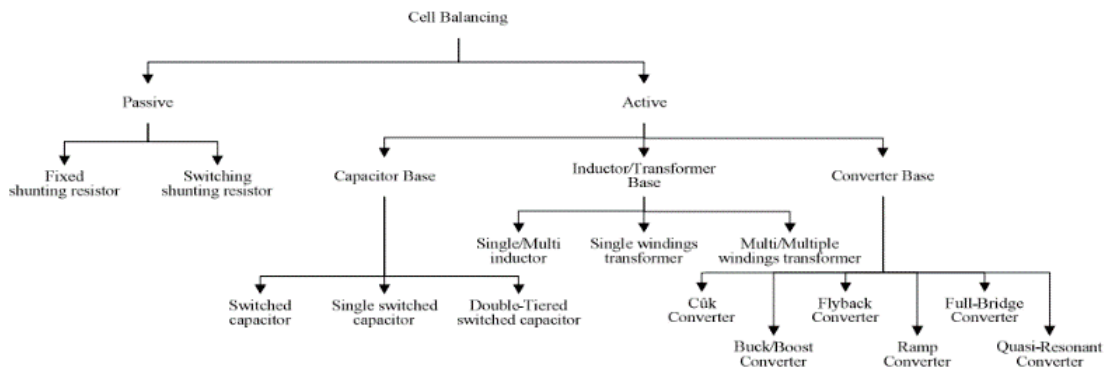
- $R_{thermistor}$  είναι η αντίσταση του thermistor σε  $\Omega$ .
- $T$  είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin.
- $A$  ,  $B$  ,  $C$  είναι μεταβλητές του thermistor οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με το thermistor.
- Για την μετατροπή της θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου ( $C$ ) :

$$T_c = T_k - 273.15 \quad (3.5)$$

Στις περισσότερες εφαρμογές, το thermistor είναι η προτιμώμενη επιλογή αισθητήρα θερμοκρασίας, λόγω της υψηλής ευαισθησίας και σταθερότητάς του, της υψηλής ταχύτητας απόκρισης καθώς και του μικρού μεγέθους και του χαμηλού κόστους. Το μικρό μέγεθος το καθιστά απαραίτητο για εφαρμογές μπαταρίας όπου οι αισθητήρες θερμοκρασίας πρέπει να τοποθετούνται όσο το δυνατόν πιο κοντά στους ακροδέκτες της μπαταρίας. Η χαμηλή ακρίβειά του δεν είναι κρίσιμη, καθώς η περιοχή θερμοκρασίας είναι πιο σημαντική από την πραγματική θερμοκρασία των κελιών.

### 3.4 Εξισορρόπηση τάσης μπαταριών

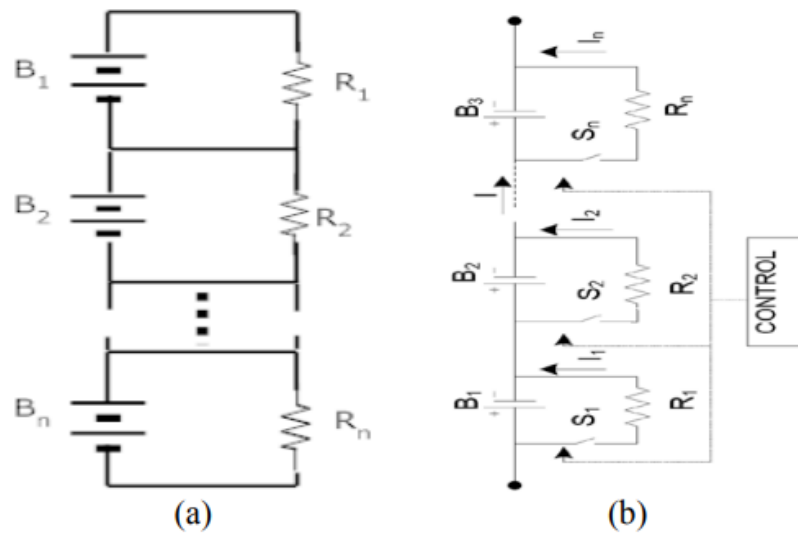
Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η χρήση της χωρητικότητας και της ενέργειας της μπαταρίας, είναι απαραίτητη η εξισορρόπηση της. Αυτό συμβαίνει, λόγω της διαφορετικής εσωτερικής αντίστασης κάθε στοιχείου, των διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας, της ασυνέπειας του αρχικού SoC και της ασυνέπειας της αυτοεκφόρτισης. Άλλος ένας παράγοντας που καθιστά απαραίτητη την εξισορρόπηση της μπαταρίας είναι και η αύξηση της ασυνέπειας ενός στοιχείου της, έπειτα από τη χρήση της μπαταρίας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι τοπολογίες εξισορρόπησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, την παθητική και την ενεργητική εξισορρόπηση, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.21. Οι μέθοδοι παθητικής εξισορρόπησης αφαιρούν το πλεονάζον φορτίο από το πλήρως φορτισμένο στοιχείο μέσω ενός παθητικού στοιχείου, δηλαδή μιας αντίστασης. Οι μέθοδοι ενεργής εξισορρόπησης κελιών αφαιρούν το φορτίο από κελιά υψηλότερης ενέργειας και το μεταφέρουν σε κελιά χαμηλότερης ενέργειας. Έχει διαφορετικές τοπολογίες ανάλογα με το ενεργό στοιχείο που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της ενέργειας, όπως πυκνωτή ή επαγωγικό εξάρτημα, καθώς και ελέγχους διακοπών ή μετατροπέων.[12]



Σχήμα 3.6: Κατηγορίες μεθόδων εξισορρόπησης

#### 3.4.1 Μέθοδος εξισορρόπησης με αντίσταση

Η μέθοδος εξισορρόπησης κελιών με αντίσταση είναι η πιο απλή μέθοδος εξισορρόπησης. Βασίζονται στην αφαίρεση της περίσσειας ενέργειας από τα κελιά υψηλότερης τάσης παρακάμπτοντας το ρεύμα των υψηλότερων κελιών έως ότου τα κελιά χαμηλότερης τάσης βρεθούν στο ίδιο επίπεδο. Οι μέθοδοι αντίστασης διακλάδωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο υποκατηγορίες όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7.[12]



Σχήμα 3.7: Εξισορρόπηση με Αντιστάσεις

Η πρώτη μέθοδος είναι σταθερή αντίσταση διακλάδωσης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7.α. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί συνεχή παράκαμψη του ρεύματος για όλα τα κελιά και η αντίσταση ρυθμίζεται για να περιορίσει την τάση των κελιών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για μπαταρίες μολύβδου και νικελίου, επειδή μπορούν να τειθούν σε συνθήκες υπερφόρτισης χωρίς βλάβη των κελιών. Τα χαρακτηριστικά της είναι η απλότητα και το χαμηλό κόστος, αλλά έχει συνεχή ενέργεια που διαχέεται ως θερμότητα για όλα τα κελιά.[12]

Η δεύτερη μέθοδος είναι η αντίσταση ελεγχόμενης διακλάδωσης, που φαίνεται στο σχήμα 3.7.β. Βασίζεται στην αφαίρεση της ενέργειας από τα υψηλότερα κελιά όχι συνεχώς αλλά ελεγχόμενα με τη χρήση διακοπών/ρελέ. Η μέθοδος μπορεί να υλοποιηθεί με δύο λειτουργίες. Πρώτον, συνεχής λειτουργία, όπου όλα τα ρελέ ελέγχονται από το ίδιο σήμα ενεργοποίησης/απενεργοποίησης. Δεύτερον, η λειτουργία ανίχνευσης, όπου παρακολουθούνται οι τάσεις των κελιών. Όταν γίνουν αντιληπτές οι συνθήκες ανισορροπίας, αποφασίζει ποια αντίσταση πρέπει να ενεργοποιηθεί. Αυτή η μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική από τη μέθοδο της σταθερής αντίστασης, απλή, αξιόπιστη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις μπαταρίες Li-Ion. Το κύριο μειονέκτημα σε αυτές τις μεθόδους είναι η ενέργεια που διαχέεται ως θερμότητα από τα ανώτερα σε τάση κελιά. [12]

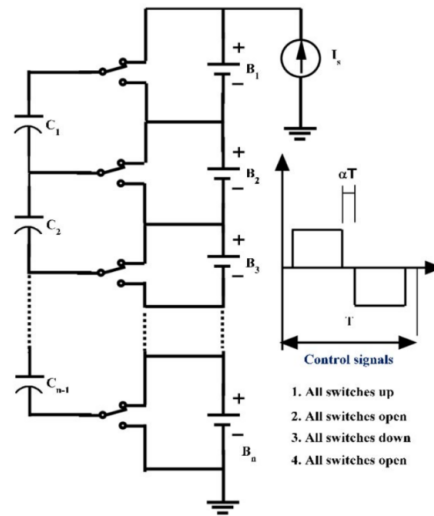
### 3.4.2 Μέθοδος εξισορρόπησης με χρήση πυκνωτών

Η χωρητική εξισορρόπηση κελιών, γνωστή και ως εξισορρόπηση «Charge Shuttling», χρησιμοποιεί βασικά μια εξωτερική συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, έναν πυκνωτή για τη μεταφορά της ενέργειας μεταξύ των κελιών του πακέτου έτσι ώστε να εξισορροπηθεί. Η μετατόπιση πυκνωτή μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις τοπολογίες, τις βασικές τοπολογίες πυκνωτή μεταγωγής, πυκνωτή μονής μεταγωγής και πυκνωτή διπλής βαθμίδας. [12]

#### 1. Πυκνωτής μεταγωγής

Ο πυκνωτής μεταγωγής φαίνεται στο σχήμα 3.8. Όπως φαίνεται, απαιτούνται  $n-1$  πυκνωτές και  $2n$  διακόπτες για να εξισορροπηθούν τα κελιά ( $n$  αριθμός κελιών). Η στρατηγική ελέγχου του είναι απλή γιατί έχει μόνο δύο καταστάσεις. Επιπλέον, δεν χρειάζεται έξυπνο

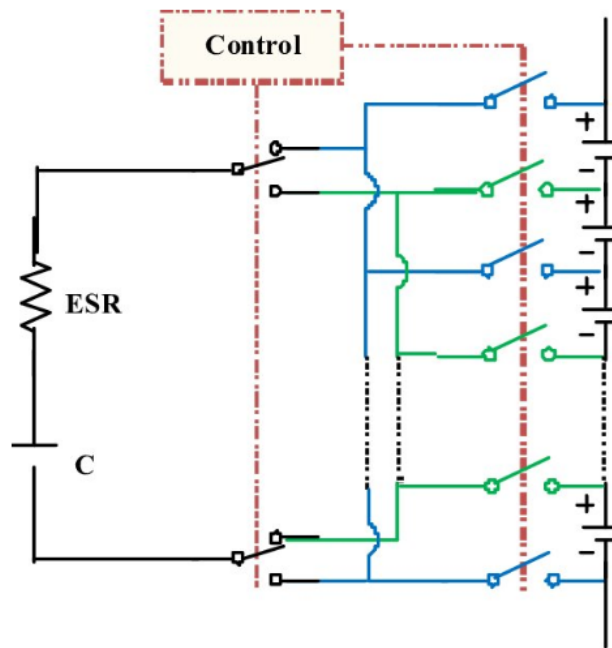
έλεγχο και μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε λειτουργία φόρτισης όσο και σε λειτουργία εκφόρτισης. Το μειονέκτημα της τοπολογίας μεταγωγής πυκνωτή είναι ο σχετικά μεγάλος χρόνος εξισορρόπησης. [12]



Σχήμα 3.8: Εξισορρόπηση με πυκνωτή μεταγωγής

## 2. Πυκνωτής μονής μεταγωγής

Η τοπολογία εξισορρόπησης πυκνωτή μονής μεταγωγής μπορεί να θεωρηθεί ως παράγωγο του πυκνωτή μεταγωγής, αλλά χρησιμοποιεί μόνο έναν πυκνωτή όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9. Ο Πυκνωτής μονής μεταγωγής χρειάζεται μόνο 1 πυκνωτή και  $n+5$  διακόπτες για την εξισορρόπηση  $n$  κελιών. Χρησιμοποιείται μια απλή στρατηγική ελέγχου. Ο ελεγκτής επιλέγει την υψηλότερη και την κατώτερη τάση κελιού και τους αντίστοιχους διακόπτες για τη μεταφορά της ενέργειας μεταξύ τους. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο προηγμένες στρατηγικές ελέγχου για την επιτάχυνση της ταχύτητας εξισορρόπησης. [12]

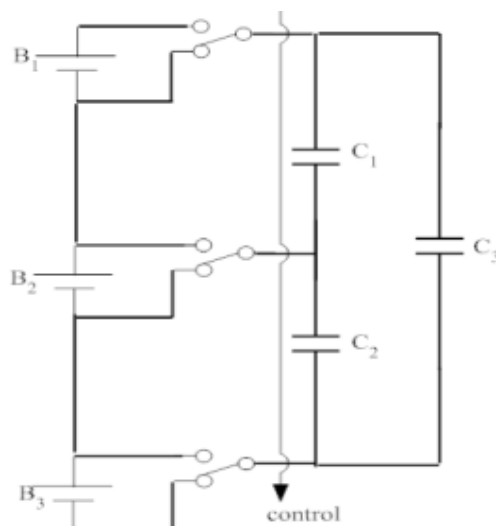


Σχήμα 3.9: Εξισορρόπηση με πυκνωτές μονής μεταγωγής

### 3. Πυκνωτής διπλής βαθμίδας

Αυτή η μέθοδος εξισορρόπησης είναι επίσης παράγωγο της μεθόδου του πυκνωτή μεταγωγής και η διαφορά είναι ότι χρησιμοποιεί δύο επίπεδα πυκνωτών για τη μεταφορά ενέργειας όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10. Χρειάζεται  $n$  πυκνωτές και  $2n$  διακόπτες για να εξισορροπήσει  $n$  κελιά. Το πλεονέκτημα του πυκνωτή με μεταγωγή διπλής βαθμίδας σε σχέση με τη μέθοδο πυκνωτή μεταγωγής είναι ότι η δεύτερη βαθμίδα πυκνωτή μειώνει το χρόνο εξισορρόπησης στο ένα τέταρτο. Επιπλέον, όπως η τοπολογία του πυκνωτή μεταγωγής, ο πυκνωτής μονής μεταγωγής και ο πυκνωτής με μεταγωγή διπλής βαθμίδας μπορούν να λειτουργήσουν τόσο στην επαναφόρτιση όσο και στην λειτουργία εκφόρτισης.[12]





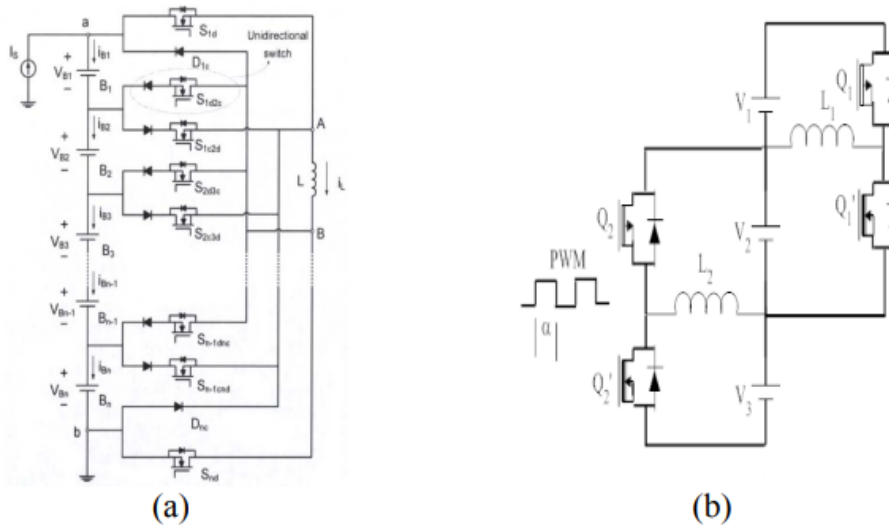
Σχήμα 3.10: Εξισορρόπηση με πυκνωτές διπλής βαθμίδας

### 3.4.3 Εξισορρόπηση με χρήση πηνίου/μετασχηματιστή

Η τοπολογία εξισορρόπησης κυψελών μετατροπής ενέργειας χρησιμοποιεί επαγωγείς ή μετασχηματιστές για τη μεταφορά ενέργειας από ένα κελί ή μια ομάδα κελιών σε ένα άλλο κελί ή ομάδα κελιών. Προσφέρουν μικρότερο χρόνο εκτέλεσης εξισορρόπησης και το μειονέκτημά τους είναι το σχετικά υψηλό κόστος για τους μετασχηματιστές. Επιπλέον, επειδή η συχνότητα μεταγωγής είναι αρκετά υψηλή, πρέπει να τοποθετηθούν πυκνωτές σε κάθε μπαταρία για να φιλτράρουν την υψηλή συχνότητα.[12]

#### 1. Εξισορρόπηση με ένα ή πολλαπλά πηνία

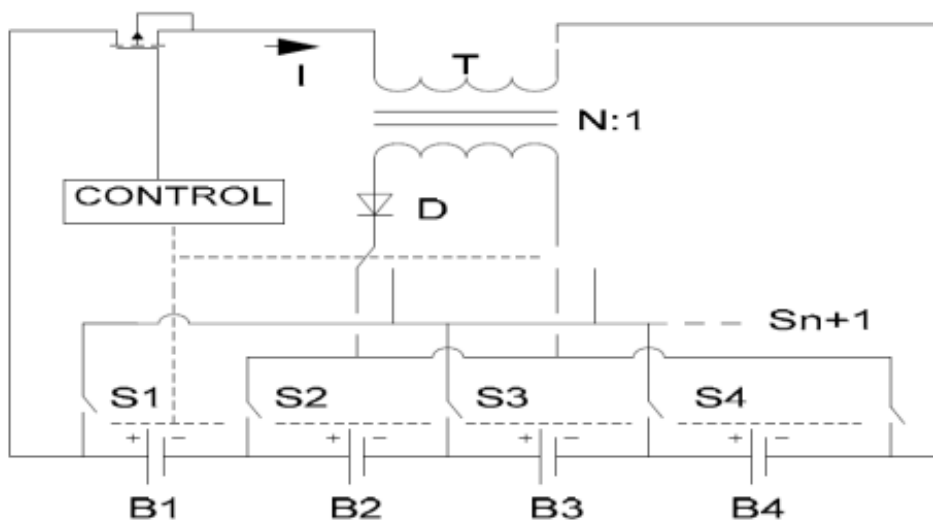
Η χρήση ενός ή περισσότερων πηνίων για την εξισορρόπηση κελιών φαίνεται στο σχήμα 3.11. Το σύστημα εξισορρόπησης ενός πηνίου, που φαίνεται στο σχήμα 3.11 χρησιμοποιεί ένα πηνίο για τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ ολόκληρου του πακέτου. Το σύστημα ελέγχου ανιχνεύει την τάση των κελιών και επιλέγει τα δύο κελιά που θα χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά ενέργειας. Το σύστημα πολλαπλών πηνίων χρησιμοποιεί  $n-1$  πηνία για την εξισορρόπηση  $n$  κελιών και ο ελεγκτής ανιχνεύει τη διαφορά τάσης των δύο γειτονικών κελιών, εφαρμόζοντας στη συνέχεια ένα PWM με την συνθήκη ότι το υψηλότερο κελί πρέπει να ενεργοποιηθεί πρώτο. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, είναι ότι χρειάζεται πολύς χρόνος για τη μεταφορά της ενέργειας από το πρώτο κελί στο τελευταίο. Το μονό πηνίο έχει λιγότερο χρόνο εξισορρόπησης από την τοπολογία πολλαπλών πηνίων.[12]



Σχήμα 3.11: Εξισορρόπηση με χρήση μονού ή πολλαπλών πηνίων

2. Μετασχηματιστής μονής περιέλιξης

Ο μετασχηματιστής μονής περιέλιξης επίσης, γνωστός ως «μετασχηματιστής μεταγωγής», είναι στην πραγματικότητα ένας επιλέξιμος μετατροπέας ενέργειας. Αυτή η μέθοδος έχει δύο τεχνικές για την εξισορρόπηση των κελιών. Η πρώτη τεχνική που ονομάζεται "τοπολογία πακέτο σε κελί" όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12, βασίζεται στη μεταφορά της ενέργειας από το σύνολο του πακέτου μπαταριών μέσω του μετασχηματιστή μεταγωγής και μεταφορά αυτής της ενέργειας στο αδύναμο στοιχείο χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους διακόπτες. Η δεύτερη τεχνική "τοπολογία από κελί σε πακέτο" βασίζεται στη μεταφορά της ενέργειας από το(τα) στοιχείο(α) υψηλής ενέργειας μέσω του μετασχηματιστή στο πακέτο μπαταριών.[12]



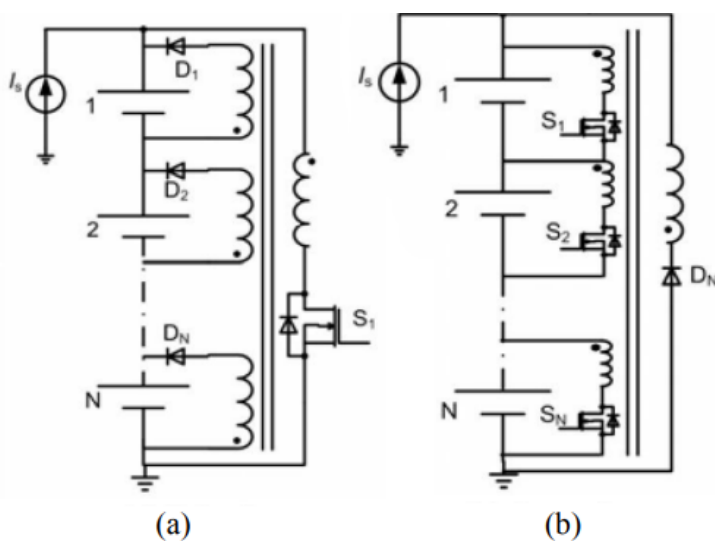
Σχήμα 3.12: Εξισορρόπηση με χρήση μετασχηματιστή μονής περιέλιξης.

### 3. Μετασχηματιστής πολλαπλών περιελίξεων

Ο μετασχηματιστής πολλαπλών περιελίξεων φαίνεται στο σχήμα 3.13. Αυτή η μέθοδος εξισορρόπησης μπορεί να εμπίπτει σε δύο τοπολογίες:

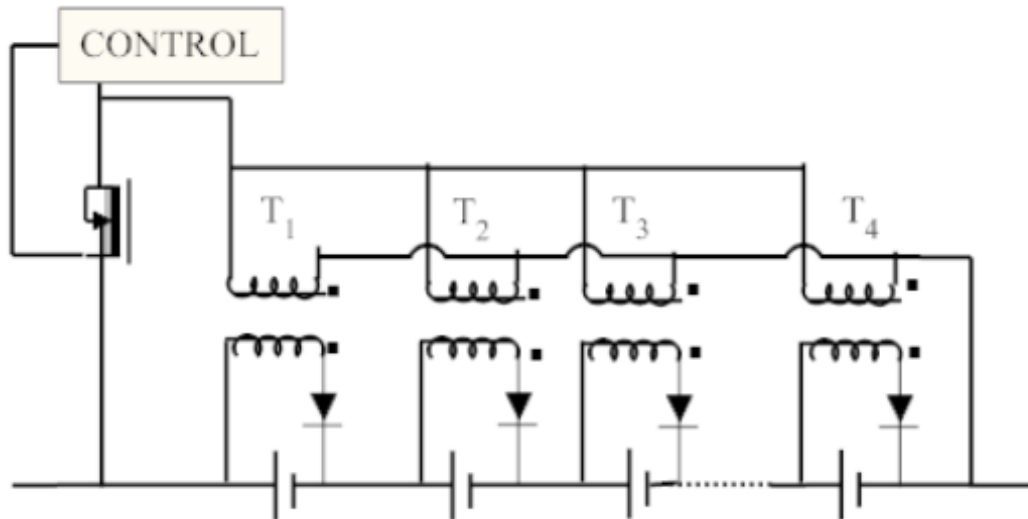
- Μετασχηματιστής πολλαπλών περιελίξεων, που φαίνεται στο σχήμα 3.13.α, είναι επίσης γνωστός ως "κοινόχρηστος μετασχηματιστής".
- Εξισορρόπηση πολλαπλών μετασχηματιστών που όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13.β.

Πρώτη τοπολογία, η τοπολογία "κοινόχρηστος μετασχηματιστής" μετασχηματιστή πολλαπλών περιελίξεων έχει ένα μόνο μαγνητικό πυρήνα με μία κύρια περιέλιξη και πολλαπλές δευτερεύουσες περιελίξεις μία για κάθε στοιχείο. Ακόμη, έχει δύο διαμορφώσεις κυκλώματος. Τις διαμορφώσεις flyback και forward, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11. Στην δομή flyback, ο διακόπτης που είναι συνδεδεμένος στην κύρια πλευρά είναι ενεργοποιημένος. Έτσι, κάποια ενέργεια αποθηκεύεται στον μετασχηματιστή. Στη συνέχεια, όταν είναι απενεργοποιημένος, η ενέργεια αυτή μεταφέρεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή. Το μεγαλύτερο μέρος του επαγόμενου ρεύματος θα παρέχεται στα κελιά με τη χαμηλότερη τάση (ελάχιστη αντίδραση) μέσω της διόδου. Στην μπροστινή διαμόρφωση, όταν ανιχνεύεται η διαφορά τάσης, ενεργοποιείται ο διακόπτης που είναι συνδεδεμένος στο στοιχείο με την υψηλότερη τάση και η ενέργεια μεταφέρεται από αυτό το στοιχείο σε άλλα μέσω του μετασχηματιστή και των αντιπαράλληλων διόδων του διακόπτη. Το κύκλωμα είναι πολύπλοκο και το κόστος υψηλό, ενώ υπάρχει και το πρόβλημα του κορεσμού του μετασχηματιστή πολλαπλών περιελίξεων.[12]



Σχήμα 3.13: Εξισορρόπηση με χρήση μετασχηματιστή πολλαπλών περιελίξεων.

Η δεύτερη τοπολογία, η εξισορρόπηση πολλαπλών μετασχηματιστών όπως στο φαίνεται στο σχήμα 3.14, χρησιμοποιεί πολλούς μετασχηματιστές πολλαπλών πυρήνων, έναν πυρήνα για κάθε κελί. Σε σύγκριση με το σχήμα μετασχηματιστή πολλαπλών περιελίξεων, αυτή η μέθοδος είναι καλύτερη για αριθρωτό σχεδιασμό και επέκταση πακέτου μπαταρίας χωρίς αλλαγή του μαγνητικού πυρήνα, ενώ εξακολουθεί να είναι ακριβή. Ως μέθοδος διαμορφώσεως πυκνωτή μεταγωγής υπάρχει η ίδια τοπολογία για τη διαμορφοποίηση πηνίου/μετασχηματιστή. Χρησιμοποιεί την τεχνική των μονάδων διαιρώντας το πακέτο μπαταριών σε ομάδες ή μονάδες που θα μειώσουν την τάση ή/και το ρεύμα στα εξαρτήματα μεταγωγής.[12]



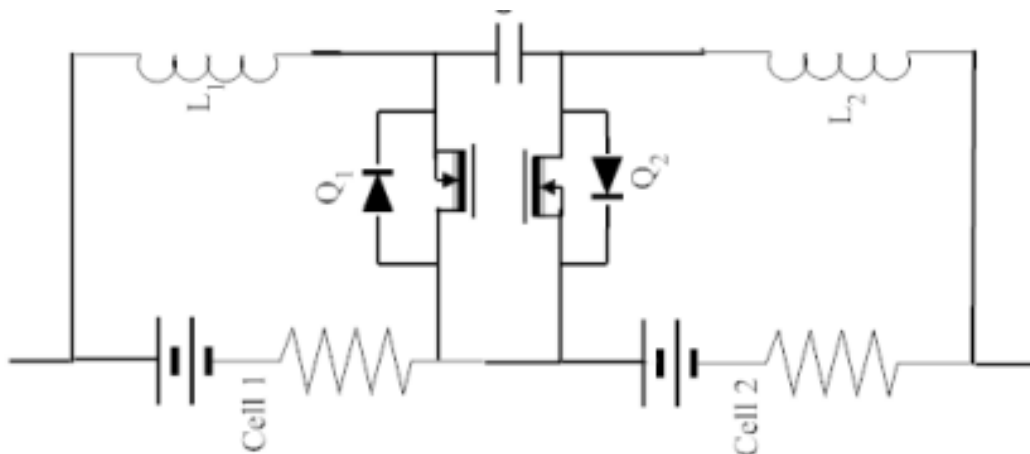
Σχήμα 3.14: Εξισορρόπηση με χρήση μετασχηματιστή πολλαπλών περιελίξεων.

### 3.4.4 Μέθοδοι εξισορρόπησης με χρήση μετατροπών ενέργειας

Οι μετατροπείς ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την εξισορρόπηση κελιών εμπίπτουν σε διάφορες κατηγορίες όπως π.χ. Μετατροπείς Cúk, Buck ή/και Boost, Flyback, Ramp, full-bridge και Quasi-Resonant. Χαρακτηρίζονται από τον πλήρη έλεγχο της διαδικασίας εξισορρόπησης. Δυστυχώς οι μετατροπείς ενέργειας έχουν σχετικά υψηλό κόστος και πολυπλοκότητα.[12]

#### 1. Μετατροπέας Cuk

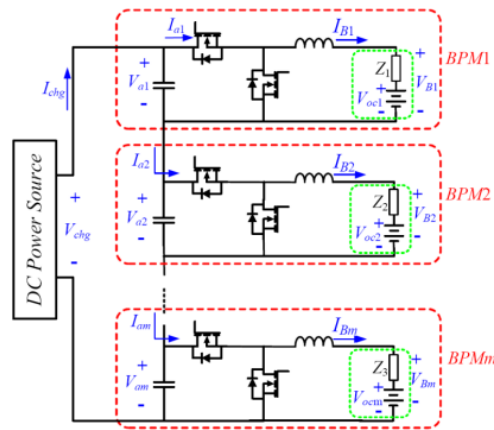
Ο αμφίδρομος μετατροπέας Cuk όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15 μπορεί να θεωρηθεί ως τοπολογία μεμονωμένων ισοσταθμιστών κελιών (ICE), η οποία εξισορροπεί κάθε ζεύγος γειτονικών κελιών. Απαιτεί  $(n-1)$  ICE για την εξισορρόπηση  $n$  κελιών. Κάθε ICE έχει δύο επαγωγείς, δύο διακόπτες και έναν πυκνωτή. Δεδομένου ότι ο μετατροπέας Cuk μεταφέρει την ενέργεια μεταξύ δύο γειτονικών κελιών, θα χρειαστεί σχετικά μεγάλος χρόνος εξισορρόπησης, ειδικά για πακέτο μπαταριών, πολλών κελιών συνδεδεμένων σε σειρά.[12]



Σχήμα 3.15: Εξισορρόπηση με χρήση μετατροπέα Cuk.

## 2. Μετατροπέας Buck- Boost

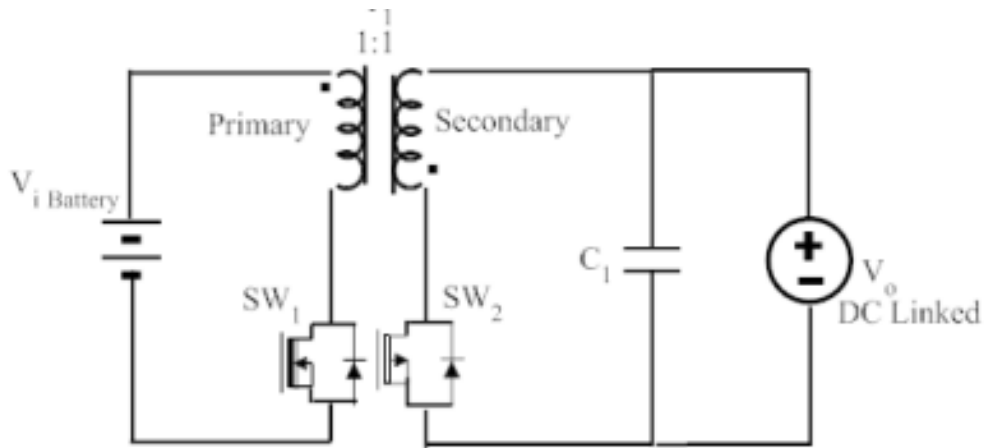
Οι μετατροπείς ενέργειας step down (Buck), step-up (Boost) και Buck-Boost χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα εξισορρόπησης κελιών. Αυτές οι μέθοδοι έχουν πολλές τοπολογίες εξισορρόπησης, όπως μετατροπέα ενίσχυσης που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της περίσσειας ενέργειας από μεμονωμένο κελί στο συνολικό πακέτο ή μετατροπέα buck-boost που χρησιμοποιείται για αφαίρεση περίσσειας ενέργειας από τα υψηλότερα κελιά στη σύνδεση με τους DC link πυκνωτές, στοιχείο αποθήκευσης και επαναμεταφορά ενέργειας στα αδύναμα κελιά. Οι μέθοδοι εξισορρόπησης μετατροπέων είναι σχετικά ακριβές και πολύπλοκες αλλά είναι κατάλληλα για αρθρωτό σχεδιασμό.[12]



Σχήμα 3.16: Εξισορρόπηση με χρήση μετατροπέα Buck-Boost.

## 3. Μετατροπέας Flyback

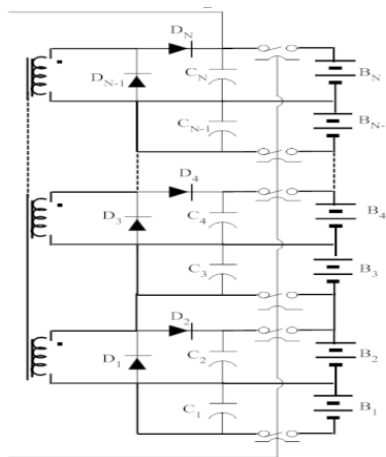
Οι μετατροπείς Flyback χρησιμοποιούνται σε απομονωμένη δομή και μπορεί να είναι μονοκατευθυντικοί ή αμφίδρομοι, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.17. Στη μονοκατευθυντική δομή, η ενέργεια του πιο φορτισμένου κελιού αποθηκεύεται στον μετασχηματιστή όταν ο συζευγμένος διακόπτης είναι ενεργοποιημένος και μεταφέρεται στο πακέτο όταν είναι απενεργοποιημένος. Ο αμφίδρομος μετατροπέας flyback είναι πιο ευέλικτος στη μεταφορά ενέργειας, σε περιπτώσεις όπου η ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί από το πακέτο στα κελιά. Το μειονέκτημά του οφείλεται στην ομοιομορφία του πολλαπλού τυλίγματος καθώς και στις μαγνητικές απώλειες.[12]



Σχήμα 3.17: Εξισορρόπηση με χρήση μετατροπέα Flyback.

#### 4. Μετατροπέας ράμπας

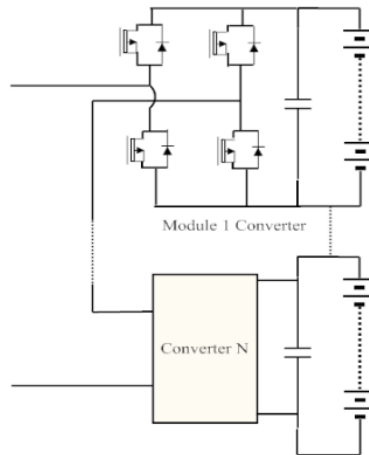
Η τοπολογία εξισορρόπησης κελιών μετατροπέα ράμπας φαίνεται στο σχήμα 3.18 έχει την ίδια λογική με τους μετασχηματιστές πολλαπλών περιελίξεων. Απαιτεί μόνο ένα δευτερεύον τύλιγμα για κάθε ζεύγος κελιών αντί για ένα ανά κελί. Η λειτουργία του μετατροπέα ράμπας μπορεί να συνοψιστεί ως εξής: Σε πρώτη φάση, το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος χρησιμοποιείται για τη φόρτιση περιττού αριθμού κελιών με τη χαμηλότερη τάση. Ενώ σε δεύτερη φάση τροφοδοτεί τα ομοιόμορφα κελιά και για αυτό τον λόγο ονομάστηκε μετατροπέας ράμπας.[12]



Σχήμα 3.18: Εξισορρόπηση με χρήση μετατροπέα ράμπας.

#### 5. Μετατροπέας πλήρους γέφυρας(Full Bridge)

Ο μετατροπέας ενέργειας πλήρους γέφυρας μπορεί να θεωρηθεί ως πλήρως ελεγχόμενος μετατροπέας ενέργειας που φαίνεται στο σχήμα 3.19, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μετατροπέας AC-DC που είναι κατάλληλος για plug-in υβριδικό ηλεκτρικό όχημα ή ως μετατροπέας DC-DC. Το κύριο μειονέκτημα του μετατροπέα Fullbridge είναι το σχετικά υψηλό κόστος και ο πολύπλοκος έλεγχος.[12]



Σχήμα 3.19: Εξισορρόπηση με χρήση μετατροπέα Full Bridge.

## 3.5 Μέτρηση Ρεύματος

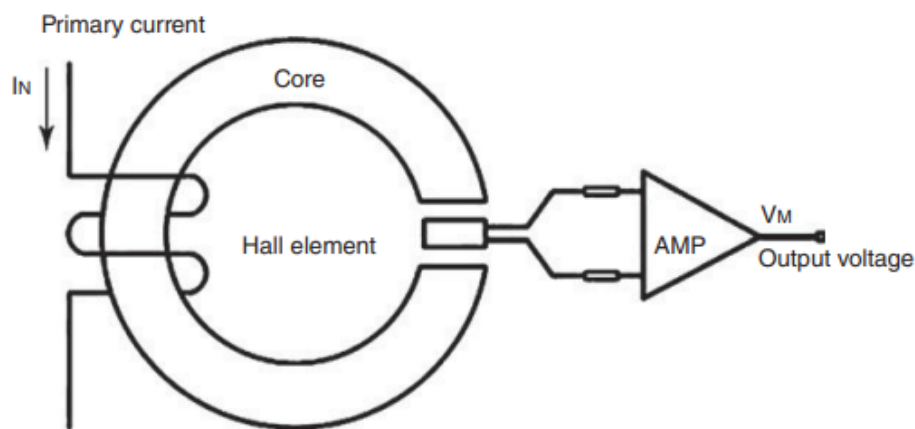
Το ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης είναι η εξωτερική αντανάκλαση της μεταφοράς ενέργειας και επίσης η σημαντική βάση της διαχείρισης ενέργειας του BMS. Η μέτρηση ρεύματος παρέχει δεδομένα για την εκτίμηση του SoC και για τον έλεγχο φόρτισης και εκφόρτισης του BMS. Τα αισθητήρια μέτρησης ρεύματος περιλαμβάνουν τον αισθητήρα ρεύματος Hall effect, τη μέτρηση με Shunt Resistor και ούτω καθεξής.

### 1. Hall effect

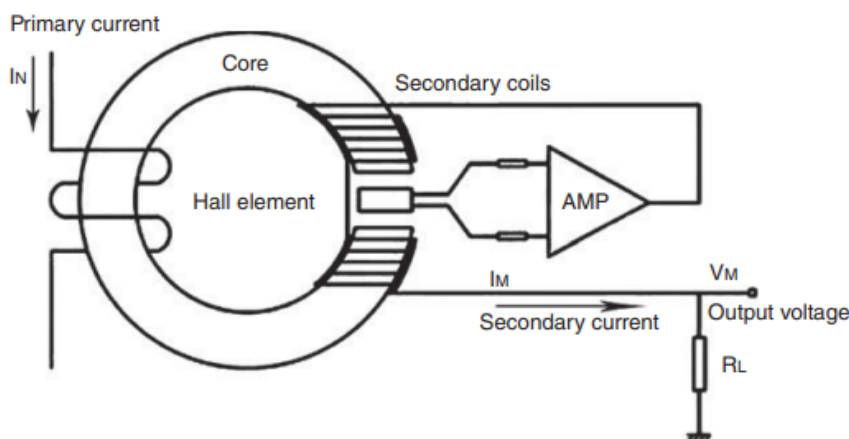
Το σήμα εξόδου ενός αισθητήρα ρεύματος είναι ένα δευτερεύον ρεύμα, σε αναλογία με το σήμα εισόδου (πρωτεύον ρεύμα). Το δευτερεύον ρεύμα έχει γενικά μόνο μια τιμή και κυμαίνεται μεταξύ 10–400 mA. Εάν το ρεύμα εξόδου περάσει από μια αντίσταση μέτρησης, θα δώσει ένα σήμα εξόδου τάσης που είναι ανάλογο με το πρωτεύον ρεύμα. Στη συνέχεια, ενισχύεται και μετατρέπεται σε ψηφιακό μέσω ενός ADC. Σύμφωνα με τη μορφή του ρεύματος, ο αισθητήρας ρεύματος Hall effect ταξινομείται σε δύο τύπους: DC και AC και από τη μορφή της ανάδρασης, ταξινομείται σε τύπους ανοιχτού και κλειστού βρόχου. Το σχήμα 3.20 είναι ένα διάγραμμα του αισθητήρα ρεύματος ανοιχτού βρόχου. Η αρχή λειτουργίας του είναι ότι εάν τα εξαρτήματα τοποθετηθούν στο χώρο του μαγνητικού βρόχου, το ρεύμα Hall (δευτερεύον ρεύμα) και η τάση Hall θα αλλάξουν καθώς το μετρούμενο ρεύμα αγωγού  $I_N$  (πρωτεύον ρεύμα) αλλάζει. Η αλλαγή της τάσης θα ενισχυθεί μέσω του ενισχυτή που αντανακλά το μετρούμενο ρεύμα.[10][14]

Προκειμένου να μετρηθεί σταθερά και με ακρίβεια το ρεύμα  $I_N$ , τοποθετούνται περιελίξεις αντιστάθμισης γύρω από τον μαγνητικό δακτύλιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.21. Ο αισθητήρας Hall και το βοηθητικό κύκλωμα παράγουν το δευτερεύον μαγνητικό ρεύμα αντιστάθμισης  $I_M$ , το οποίο αντανακλά το μετρούμενο ρεύμα  $I_N$ . Μέσω μιας αντίστασης δειγματοληψίας  $R_L$ , το ρεύμα αντιστάθμισης  $I_M$  μπορεί να προκαλέσει πτώση τάσης, η οποία εξέρχεται με τη μορφή τάσης  $V$ . Στη συνέχεια η τάση διέρχεται από το εξωτερικό κύκλωμα ενίσχυσης φίλτρου και εντός του ADC υπολογίζοντας έτσι το μετρούμενο ρεύμα. Ο αισθητήρας ρεύματος Hall έχει τα χαρακτηριστικά υψηλής ακρίβειας, γρήγορης ταχύτητας, ευρείας ζώνης, καλύτερης λειτουργίας απομόνωσης, ισχυρής ικανότητας υπερφόρτωσης και μη απώλειας ενέργειας στο κύκλωμα μέτρησης. Ωστόσο, στο πολύπλοκο

περιβάλλον ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών των οχημάτων, είναι δύσκολο να διασφαλιστεί η γραμμικότητα της μέτρησης με ορισμένα ζητήματα όπως η μετατόπιση της θερμοκρασίας και ούτω καθεξής[10][14]



Σχήμα 3.20: Αισθητήριο Hall Effect ανοιχτού βρόχου



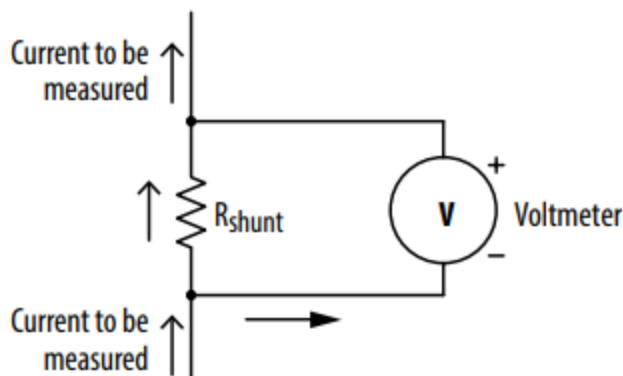
Σχήμα 3.21: Αισθητήριο Hall Effect κλειστού βρόχου

## 2. Αισθητήρας Shunt Resistor

Οι Shunt resistors αναγνωρίζονται ως εξαρτήματα που συμβάλλουν στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, συμβάλλοντας παράλληλα και στην μείωση των απωλειών λόγω της υψηλής ακρίβειας μέτρησής τους σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες. Αν και είναι ιδανικές για όλες τις εφαρμογές, οι shunt resistors είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στην ακριβή μέτρηση ρεύματος στην αυτοκινητοβιομηχανία. Λειτουργούν ανιχνεύοντας και μετατρέποντας το ρεύμα σε τάση. Αυτές οι συσκευές διαθέτουν πολύ χαμηλές τιμές αντίστασης, και ως εκ τούτου, προκαλούν μόνο μια ασήμαντη πτώση τάσης 10 έως 130 mV. Η αντίσταση τοποθετείται σε σειρά με το ηλεκτρικό φορτίο. Συνέπεια αυτού είναι το ρεύμα να περνά μέσα από αυτή την αντίσταση. Σύμφωνα με το νόμο του Ohm, δημιουργείται μια πτώση τάσης στην αντίσταση γνωστή τιμής, η οποία είναι ανάλογη του ρεύματος. Η τάση αυτή μετρείται με την χρήση ενός αναλογικού σε ψηφιακού μετατροπέα, την πληροφορία αυτή



την επεξεργάζεται η μονάδα επεξεργασίας και υπολογίζεται το ρεύμα.[10][15]



Σχήμα 3.22: Αισθητήριο Shunt Resistor

### 3.6 Δεδομένα και πρωτόκολλα επικοινωνίας

Ένα σημαντικό στοιχείο για το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας είναι η επικοινωνία. Η επικοινωνία είναι πολύ σημαντική όχι μόνο για την εσωτερικό σύστημα, αλλά και για την μετάδοση δεδομένων μεταξύ του συστήματος διαχείρισης και άλλων συσκευών. Μετά τη μέτρηση της τάσης και της θερμοκρασίας, οι μονάδες θα πρέπει να μεταδώσουν αυτά τα δεδομένα στη μονάδα διαχείρισης μπαταρίας, η οποία επεξεργάζεται τις πληροφορίες και λαμβάνει αποφάσεις ελέγχου σχετικά με την κατάσταση του συστήματος. Ο όγκος των δεδομένων επικοινωνίας είναι πολύ μεγάλος. Η αξιοπιστία, η έγκαιρη συλλογή και η μετάδοση είναι οι βασικές προϋποθέσεις για την απόδοση του συστήματος διαχείρισης της μπαταρίας στα ηλεκτρικά οχήματα. [10][16]

Η επιλογή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας βασίζεται στον τύπο της εφαρμογής, τον αριθμό των μονάδων και το συνολικό κόστος του συστήματος. Για επικοινωνία μεταξύ μονάδων, οι κυριότερες επιλογές είναι το Serial Peripheral interface (SPI) και το Inter-Integrated Circuit (I2C). Έχουν χαμηλό κόστος επικοινωνίας, κατάλληλο για περιβάλλον με χαμηλές παρεμβολές. Άλλη επιλογή είναι ο διάυλος Controller Area Network (CAN), ο οποίος έχει ευρεία χρήση σε εφαρμογές οχημάτων. Ο διάυλος CAN είναι πολύ αξιόπιστος παρέχοντας ανίχνευση σφαλμάτων. Είναι κατάλληλος για το σύστημα επικοινωνίας της μπαταρίας με το κύριο όχημα, ενώ για εντός της μπαταρίας υπερτερούν τα υπόλοιπα λόγω του χαμηλού κόστους. Παρά το αυξημένο κόστος και την πολυπλοκότητα, στα περισσότερα συστήματα διαχείρισης μπαταριών για ηλεκτρικά οχήματα, προτιμάται ξεχωριστή επικοινωνία διαύλου CAN εντός της μπαταρίας, κυρίως λόγω των υψηλών παρεμβολών που δημιουργούν η υψηλή τάση και τα υψηλά ρεύματα που περιέχονται εντός της μπαταρίας, τα οποία θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα των δεδομένων. [10]

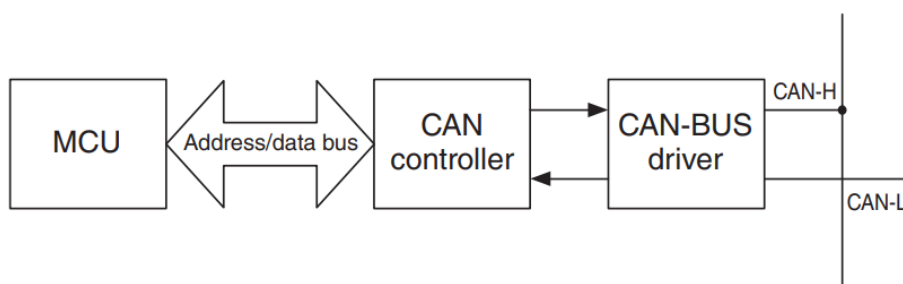
#### Επικοινωνία μέσω Controller Area Network (CAN)

Το Controller Area Network αναπτύχθηκε από τη γερμανική εταιρεία Bosch και είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα από το 1993 (ISO 11898-1). Είναι το κύριο δίκτυο επικοινωνίας στο αυτοκίνητο, έλεγχος ηλεκτρονικών, αντικαθιστώντας σταδιακά την παραδοσιακή μηχανική κίνηση και έλεγχο. Οι κόμβοι δικτύου του CAN είναι διαφορετικές ηλεκτρικές μονάδες ελέγχου (ECU). Επί του παρόντος, μερικοί από τους πιο διάσημους κατασκευαστές αυτοκινήτων στο κόσμο (όπως Benz, BMW, Porsche, Rolls-Royce, Jaguar κ.λπ.) έχουν

υιοθετήσει το CAN ως τον κυρίαρχο δίαυλο επικοινωνίας δεδομένων μεταξύ του συστήματος εσωτερικού ελέγχου του αυτοκινήτου. Το CAN λειτουργεί με τρόπο πολλαπλών Master. Κάθε κόμβος μπορεί να στείλει πληροφορίες σε άλλους κόμβους όταν κρίνεται απαραίτητο. [10][16]

- Οι κόμβοι του CAN έχουν διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας (αναγνωριστικό μηνύματος).
- Οι κόμβοι του CAN μπορούν να πραγματοποιήσουν τη μετάδοση είτε ένα-προς-ένα, είτε ένα προς-πολλά ή με καθολική μετάδοση.
- Η μεγαλύτερη απόσταση άμεσης επικοινωνίας του CAN μπορεί να φτάσει τα 10 km σε απομακρυσμένες περιοχές και η μέγιστη ταχύτητα επικοινωνίας είναι 1 Mbps (όταν η απόσταση επικοινωνίας δεν είναι μεγαλύτερη από 40 m).
- Το μήνυμα χρησιμοποιεί τη σύντομη δομή.
- Οι πληροφορίες σε κάθε πλαίσιο του CAN εμπεριέχουν κώδικα κυκλικού πλεονασμού για την ανίχνευση σφαλμάτων.
- Τα μέσα επικοινωνίας ενός διαύλου CAN μπορεί να είναι συνεστραμμένο ζεύγος, ομοαξονικό καλώδιο ή οπτική ίνα.
- Σε περίπτωση σοβαρού σφάλματος, οι κόμβοι CAN έχουν τη δυνατότητα να κλείνουν αυτόματα την έξοδο τους.
- Το CAN έχει υψηλό κόστος κατασκευής υλικού αλλά έχει απλή δομή.

Το διάγραμμα βασικής δομής ενός διαύλου CAN φαίνεται στο σχήμα 3.23. Τα δεδομένα επικοινωνίας μεταδίδονται στο CAN μέσω ειδικών ελεγκτών (CAN-Controller).

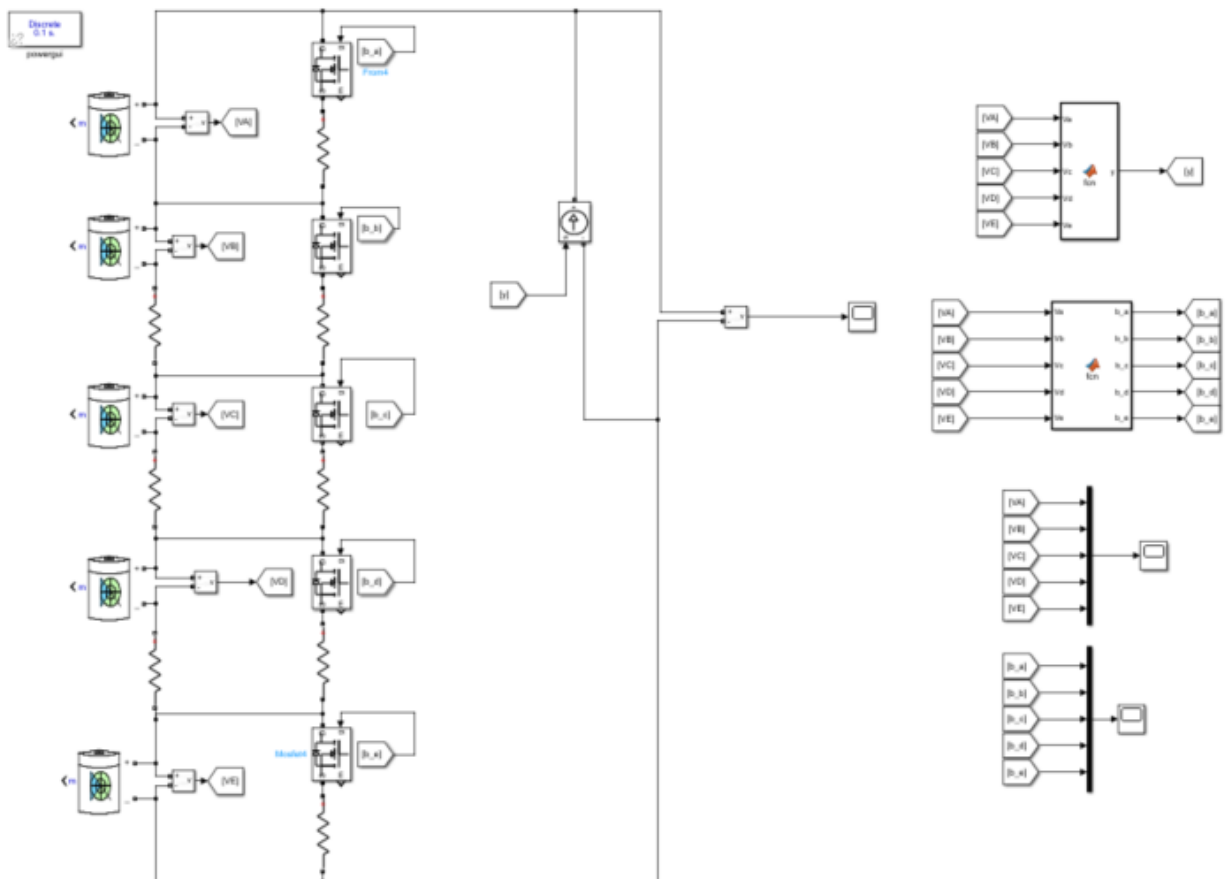


Σχήμα 3.23: Δομή διαύλου CAN

# Κεφάλαιο 4

## Προσομοίωση κυκλώματος εξισορρόπησης σε περιβάλλον Matlab/Simulink

### 4.1 Περιγραφή του Μοντέλου



Σχήμα 4.1: Προσομοίωση κυκλώματος εξισορρόπησης μπαταριών

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε το μαθηματικό μοντέλο του αλγορίθμου και του κυκλώματος εξισορρόπησης μπαταριών. Το μοντέλο αποτελείται από μία συστοιχία 5 μπαταριών σε σειρά στις οποίες έχουν καταχωρηθεί οι τιμές των χαρακτηριστικών τους από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή. Συγκεκριμένα, στην προσομοίωση χρησιμοποιήσαμε το κελί που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του συσσωρευτή ενέργειας του αγωνιστικού μονοθέσιου της χρονιάς 2020-2021, όπου η χωρητικότητά του ήταν 8000mAh. Παρακάτω στο σχήμα 4.2 φαίνονται πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά του κελιού από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή.

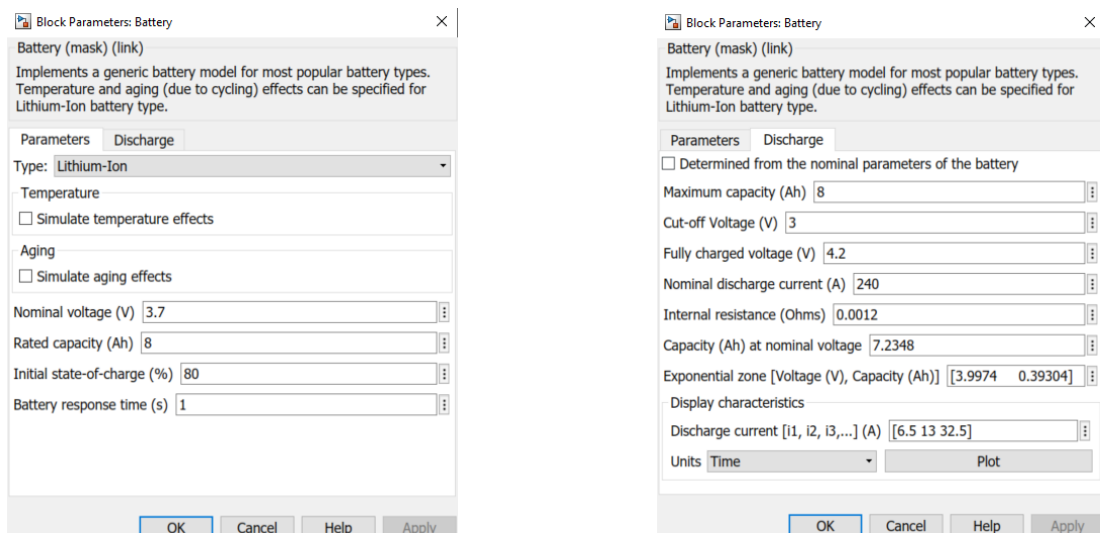
◆ 电芯正极材料 Cell Cathode Material	LiCoO <sub>2</sub>	
◆ 标称容量 Typical Capacity①	8000mAh	
◆ 标称电压 Nominal Voltage	3.7V	
◆ 充电条件 Charge Condition	最大充电电流 Max. Continuous charge Current	16A
	峰值充电电流 Peak charge current	24A(≤1sec)
	电压 Voltage	4.2V±0.03V
◆ 放电条件 Discharge Condition	最大放电电流 Max Continuous Discharge Current	240A
	峰值放电电流 Peak Discharge Current	280A(≤1sec)
	放电截止电压 Cut-off Voltage	3.0V
◆ 交流内阻 AC Impedance(mΩ)	≤1.2	
◆ 循环寿命 【充电:0.2C,放电:30C】 Cycle Life 【CHA:0.2C,DCH:30C】	>100cycles	

◆ 使用温度 Operating Temp.	充电 Charge	10℃~45℃
	放电 Discharge	-20℃~60℃
◆ 电芯尺寸 Cell Dimensions	厚度 Thickness(T)	8.3±0.3mm
	宽度 Width(W)	59.0±0.5mm
	长度 Length(L)	156.0±0.5mm
	极耳间距 Distance between 2 tabs	29±1.0mm
◆ 极耳尺寸 Dimensions of Cell tabs	极耳材料 Tab Material	Nickel-plated Copper
	极耳宽度 Tab Width	20mm
	极耳厚度 Tab Thickness	0.2mm
	极耳长度 Tab Length	32±1.5mm
◆ 重量 Weight(g)	172.0±3.0g	
① 标称容量: 0.2C,4.2V~3.0V@23℃±2℃ Typical Capacity:0.2C,4.2V~3.0V@23℃±2℃		

Σχήμα 4.2: Datasheet του κελιού

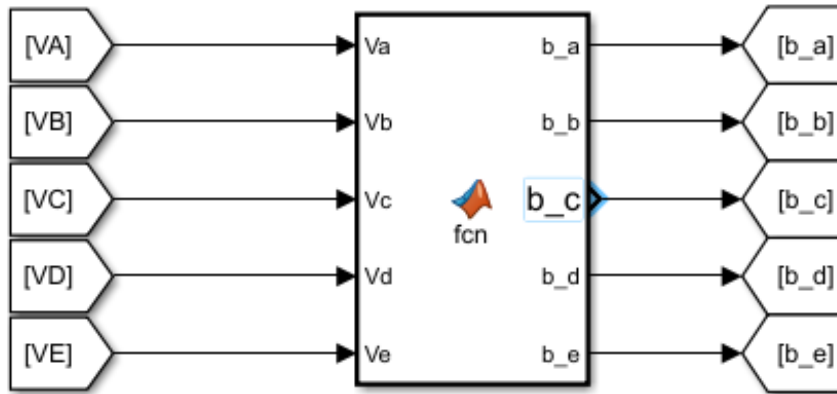
Στο πρόγραμμα προσομοίωσης Matlab / Simulink χρησιμοποιήσαμε την βιβλιοθήκη simscape για την χρήση ηλεκτρονικών υλικών. Το κελί είναι ένα από αυτά τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε, στο οποίο συμπληρώσαμε χειροκίνητα τα χαρακτηριστικά του.



Σχήμα 4.3: Χαρακτηριστικά κελιού στο Matlab

Για την εξισορρόπηση των κελιών χρησιμοποιήθηκαν 5 αντιστάσεις και 5 διακόπτες, οι οποίοι με την χρήση αλγορίθμου που θα εξηγήσουμε παρακάτω ενεργοποιούν την εξισορρόπηση σε κάθε κελί ξεχωριστά όταν αυτό χρειάζεται. Επίσης για την προσομοίωση υλοποιήθηκε αλγόριθ-

μος εξισορρόπησης, ο οποίος έχει σαν είσοδο την τάση των μπαταριών και σαν έξοδο έχει τις εισόδους των διακοπών της εξισορρόπησης. Επίσης χρησιμοποιείται άλλος ένας αλγόριθμος για τον τερματισμό της φόρτισης των κελιών όταν αυτές φτάσουν σε τάση 4.2V. Για τον έλεγχο της φόρτισης χρησιμοποιήθηκε ελεγχόμενη πηγή ρεύματος με είσοδο την έξοδο του αλγορίθμου ελέγχου φόρτισης.



Σχήμα 4.4: Function στο Matlab

```
function [b_a, b_b , b_c , b_d , b_e] = fcn(Va, Vb , Vc , Vd ,Ve)

if (Va < 3.5 && Vb < 3.5 && Vc < 3.5 && Vd < 3.5 && Ve < 3.5)
    b_a = 0;
    b_b = 0;
    b_c = 0;
    b_d = 0;
    b_e = 0;
elseif (Va - Vb > 0.01 || Va - Vc > 0.01 || Va - Vd > 0.01 || Va - Ve > 0.01)
    b_a = 1;
    b_b = 0;
    b_c = 0;
    b_d = 0;
    b_e = 0;
elseif (Vb - Va > 0.01 || Vb - Vc > 0.01 || Vb - Vd > 0.01 || Vb - Ve > 0.01)
    b_a = 0;
    b_b = 1;
    b_c = 0;
    b_d = 0;
    b_e = 0;
elseif (Vc - Va > 0.01 || Vc - Vb > 0.01 || Vc - Vd > 0.01 || Vc - Ve > 0.01)
    b_a = 0;
    b_b = 0;
    b_c = 1;
    b_d = 0;
    b_e = 0;
```

Σχήμα 4.5: Αλγόριθμος εξισορρόπησης με είσοδο τις τάσεις

```

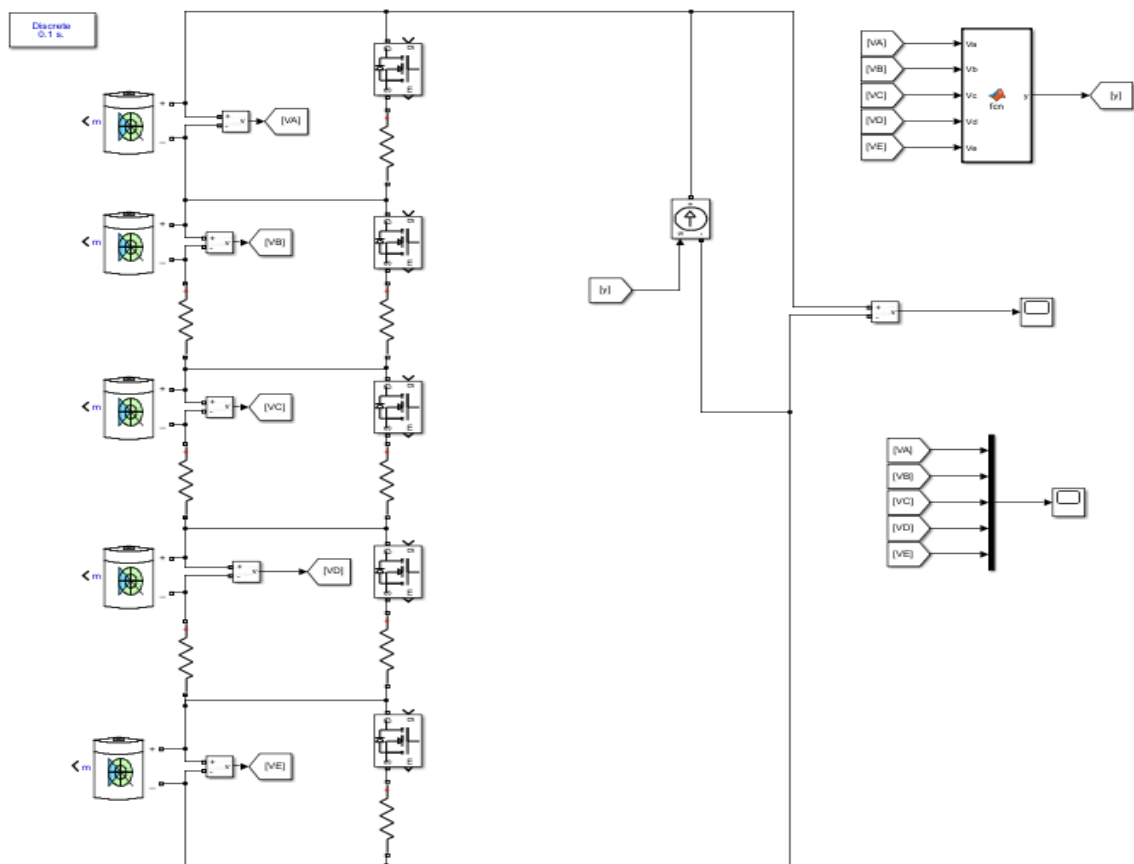
elseif(Vd - Va > 0.01 || Vd - Vb > 0.01 || Vd - Vc > 0.01 || Vd - Ve > 0.01)
    b_a = 0;
    b_b = 0;
    b_c = 0;
    b_d = 1;
    b_e = 0;
elseif(Ve - Va > 0.01 || Ve - Vb > 0.01 || Ve - Vc > 0.01 || Ve - Vd > 0.01)
    b_a = 0;
    b_b = 0;
    b_c = 0;
    b_d = 0;
    b_e = 1;
else
    b_a = 0;
    b_b = 0;
    b_c = 0;
    b_d = 0;
    b_e = 0;
end

```

Σχήμα 4.6: Αλγόριθμος εξισορρόπησης με είσοδο τις τάσεις

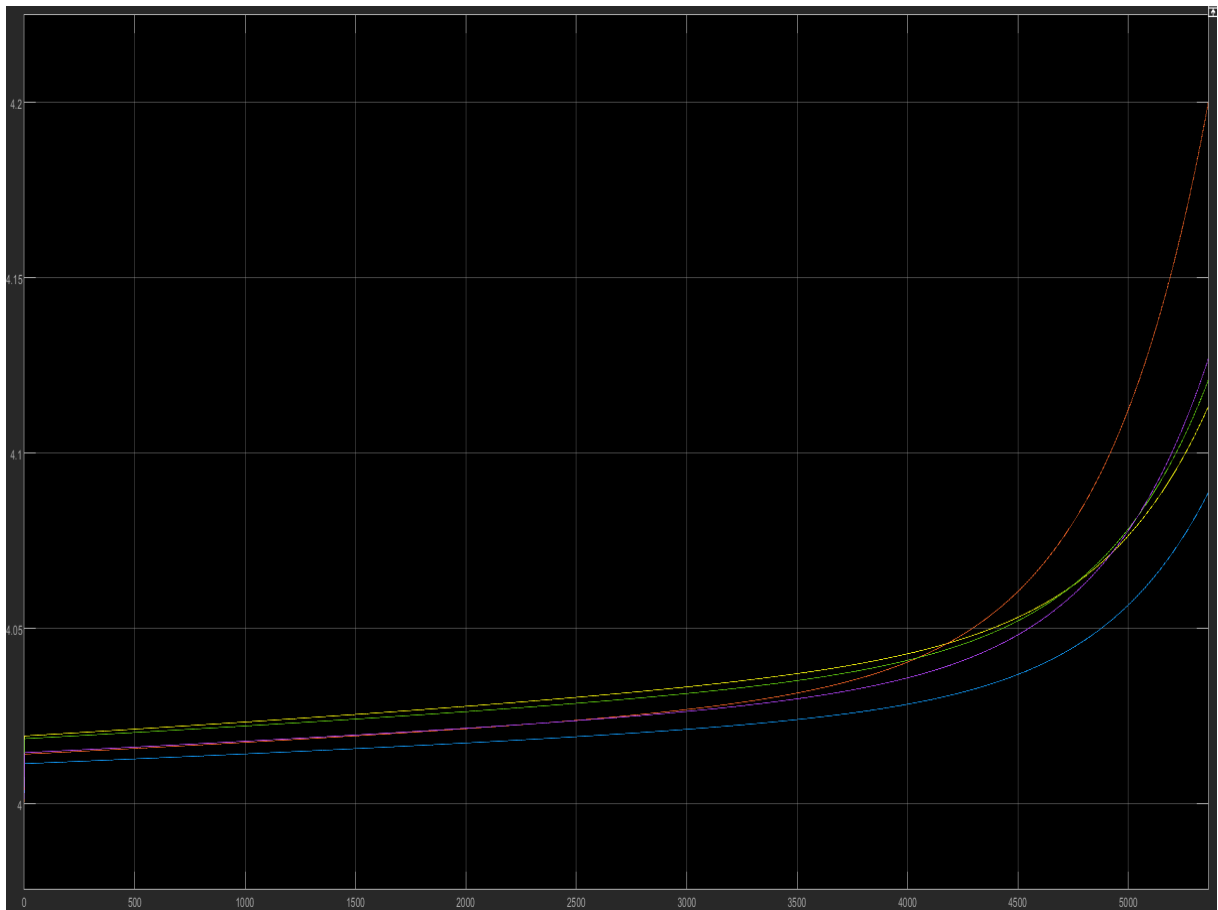
Για την καλύτερη προσομοίωση των συνθηκών των κελιών σε ένα σύστημα μπαταρίας και λόγω των μικρών αποκλίσεων των κελιών μεταξύ τους, εξαιτίας της κατασκευής τους, η εσωτερική αντίσταση αλλά και η χωρητικότητα σε κάθε κελί είναι ελάχιστα διαφορετική έτσι ώστε να προσομοιωθεί η διαφορετικότητα του κάθε κελιού. Επίσης ανάμεσα στις συνδέσεις των μπαταριών σε σειρά τοποθετήθηκε μία πολύ μικρή αντίσταση τάξεως mOhm για να προσομοιωθούν οι διαφορετικές αντιστάσεις που μπορεί να έχουν τα μέσα (busbars), με τα οποία γίνονται οι συνδέσεις σε ένα σύστημα μπαταρίας. Με αυτές τις συνθήκες μπορούμε να δούμε την συμπεριφορά των κελιών χωρίς μεγάλες αποκλίσεις στην κατάσταση φόρτισης τους, καθώς στην κατασκευή των συστημάτων μπαταρίας τα κελιά είναι φορτισμένα στην ίδια κατάσταση φόρτισης για να μην υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις, με συνέπεια να υπάρχουν ανομοιόμορφες τάσεις στα πακέτα των μπαταριών.

- Φόρτιση συστοιχίας 5 μπαταριών σε σειρά με ρεύμα 1A χωρίς εξισορρόπηση.



Σχήμα 4.7: Φόρτιση συστοιχίας χωρίς εξισορρόπηση

Παρακάτω φαίνεται η γραφική παράσταση της φόρτισης των 5 κελιών με ρεύμα 1A με απενεργοποιημένη την εξισορρόπηση τάσης.

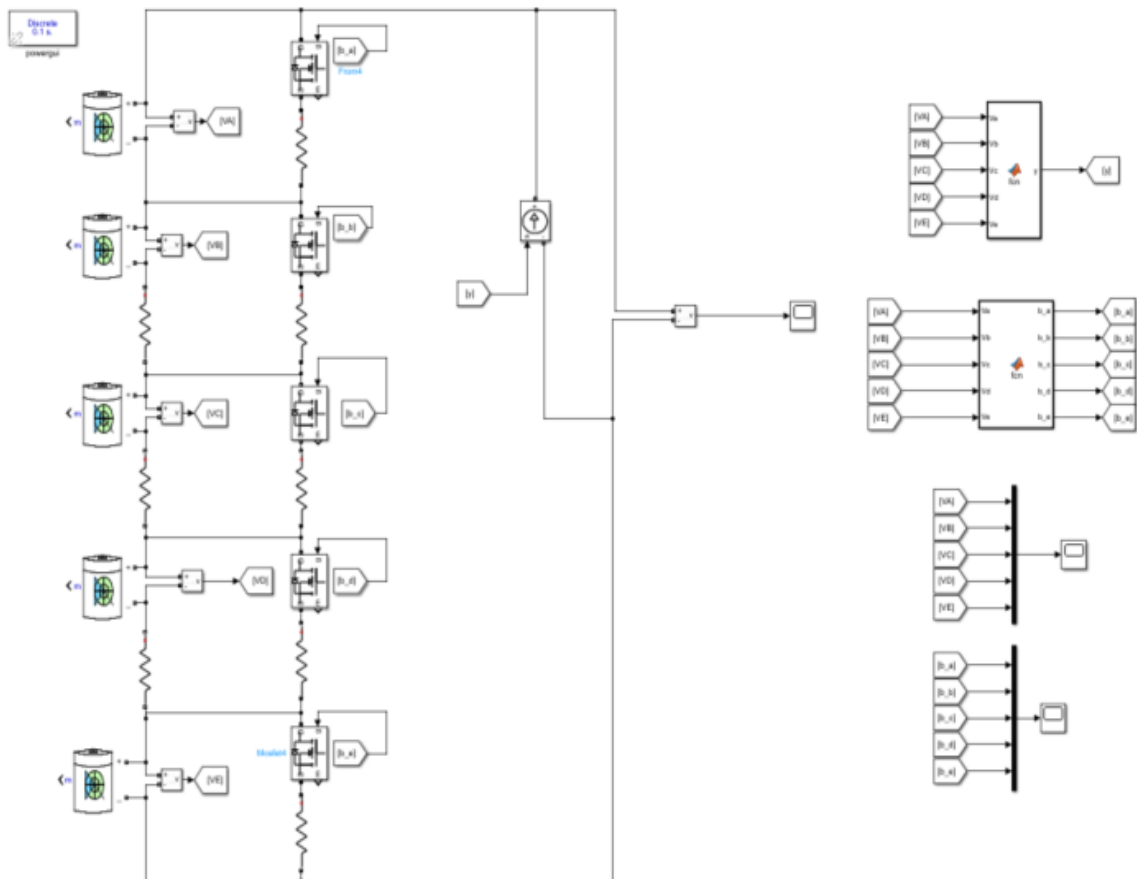


Σχήμα 4.8: Γραφική παράσταση τάσεων μετά από φόρτιση χωρίς εξισορρόπηση

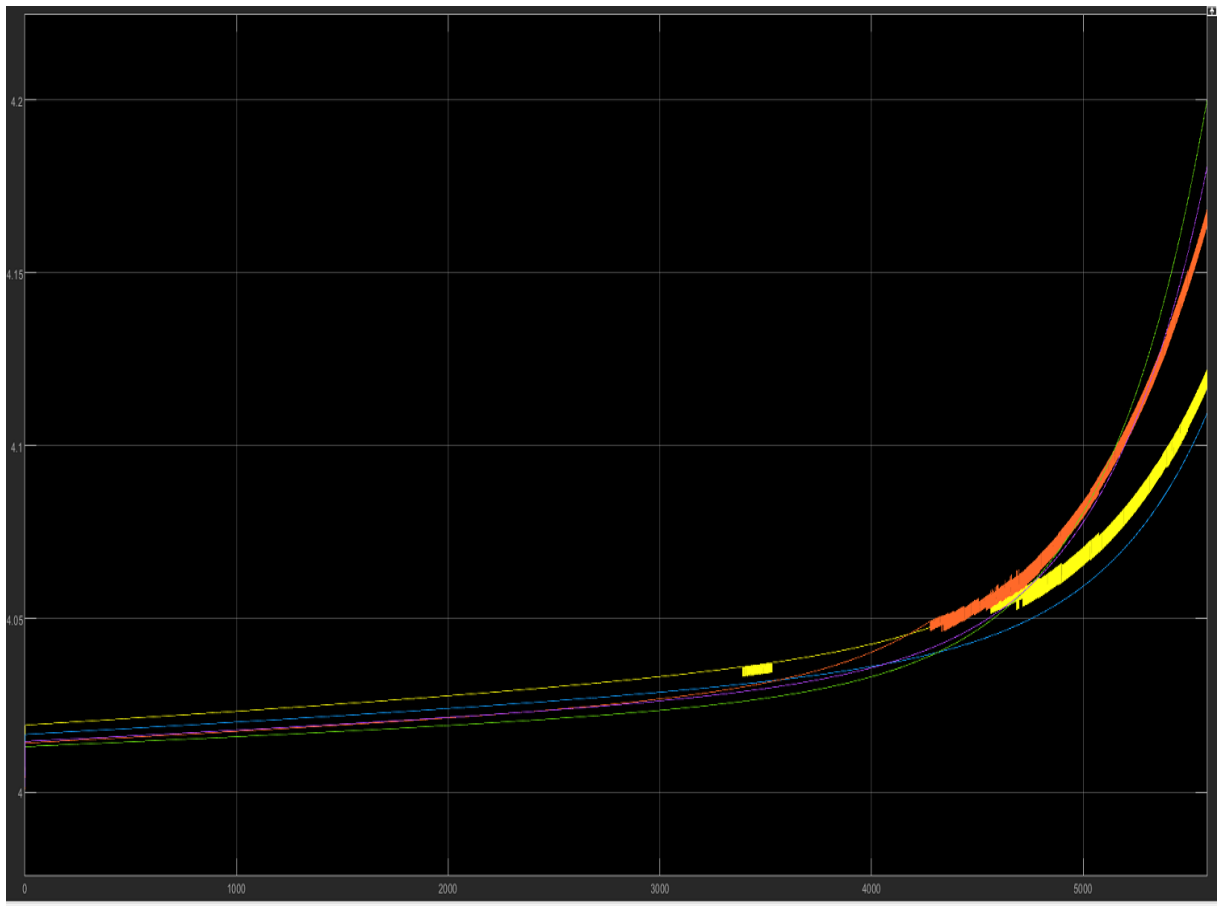
Στην γραφική παράσταση μπορούμε να διακρίνουμε από την τελική τάση των κελιών τις διαφορές στην εσωτερική αντίσταση και την χωρητικότητα, αφού τα κελιά δεν έχουν την ίδια τάση μετά την φόρτιση. Όπως φαίνεται στην μπλε γραμμή, δηλαδή στην χαμηλότερη τάση από το πακέτο, η τάση του κελιού είναι 4.08 V, ενώ η μεγαλύτερη τάση στα 4.2 V λόγω αλγορίθμου που τερματίζει την φόρτιση όταν η μέγιστη τάση ενός ή παραπάνω κελιών φτάσει σε αυτή τη τιμή. Στην συνέχεια γίνεται ακριβώς η ίδια διαδικασία αλλά με ενεργοποιημένη την διαδικασία της εξισορρόπησης των κελιών. Παρακάτω φαίνεται το κύκλωμα και η γραφική παράσταση τάσεων.



- Φόρτιση συστοιχίας 5 μπαταριών σε σειρά με ρεύμα 1A με χρήση εξισορρόπησης.



Σχήμα 4.9: Φόρτιση συστοιχίας με εξισορρόπηση



Σχήμα 4.10: Γραφική παράσταση τάσεων μετά από φόρτιση με εξισορρόπηση

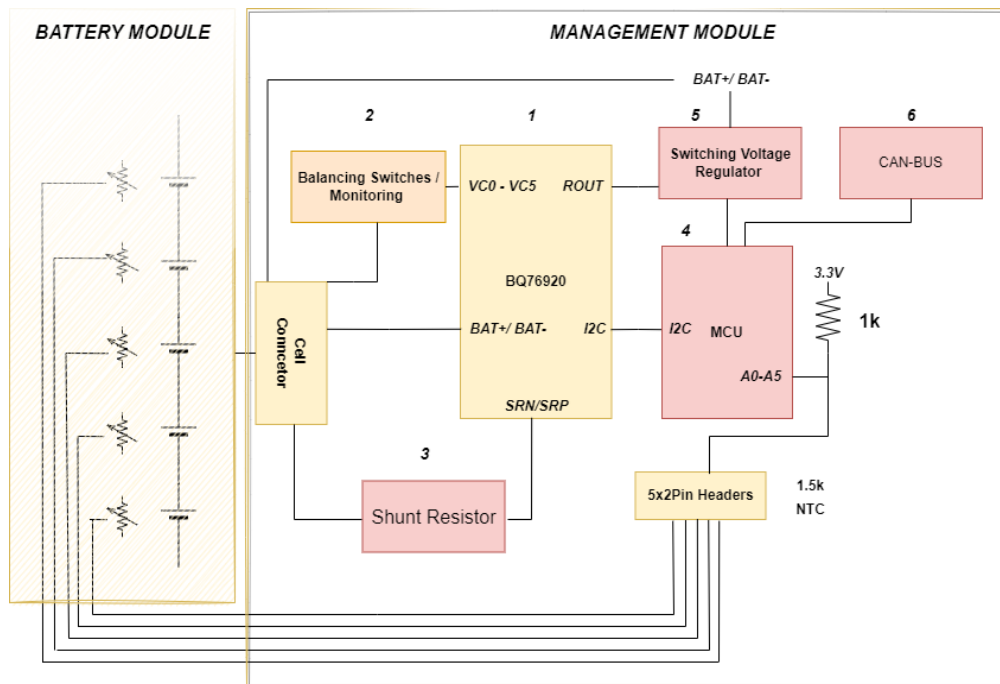
Σε αυτή την γραφική παράσταση μπορούμε να διακρίνουμε ότι οι τάσεις τερματισμού μετά την φόρτιση των κελιών είναι αρκετά μεγαλύτερες από αυτές χωρίς εξισορρόπηση. Σε αυτή την γραφική το κελί με την χαμηλότερη τάση είναι αυτό με την πράσινη γραμμή του οποίου η τάση είναι 4.12V, δηλαδή 40mV μεγαλύτερη τάση από αυτή χωρίς εξισορρόπηση. Επίσης βλέπουμε ότι οι τελικές τάσεις μετά την φόρτιση έχουν πολύ μικρότερη απόκλιση, κάτι που εξασφαλίζει ότι τα κελιά θα έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις στις καταστάσεις φόρτισης τους.

# Κεφάλαιο 5

## Σχεδιασμός του Συστήματος διαχείρισης μπαταριών

Σε αυτήν την ενότητα θα περιγράψουμε το προτεινόμενο σύστημα διαχείρισης μπαταριών , που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε κατά την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Για την διευκόλυνση της διπλωματικής και για να είναι εφικτή η υλοποίηση της στο διάστημα που είχαμε διαθέσιμο αποφασίσαμε να ακολουθήσουμε μία απλοποιημένη σχεδίαση του, έτσι ώστε να εξακριβώσουμε την ορθή λειτουργία των κυκλωμάτων και στην συνέχεια να έχουμε την δυνατότητα να κάνουμε την ολική ανάπτυξη. Επιλέξαμε το πλήθος των κελιών να είναι 5, και το ολοκληρωμένο κύκλωμα για την παρακολούθηση των μπαταριών είναι το BQ76920 της Texas Instruments.

### 5.1 Περιγραφή του HARDWARE



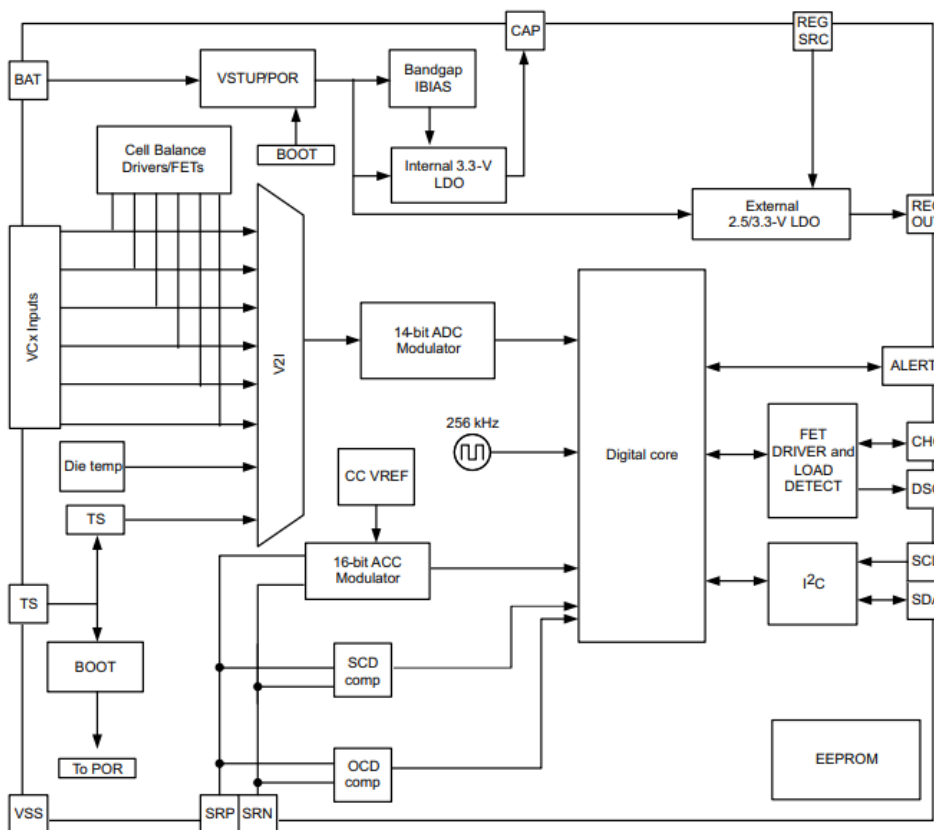
Σχήμα 5.1: System Design του συστήματος διαχείρισης μπαταριών

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η αρχιτεκτονική του συστήματος μας, όπως αποφασίστηκε κατά την

σχεδίαση του. Οι δομικές μονάδες που το αποτελούν είναι:

### 1. Ολοκληρωμένο Κύκλωμα BQ76920

Στην οικογένεια ολοκληρωμένων κυκλωμάτων BQ769x0, το ολοκληρωμένο BQ76920 υποστηρίζει έως και 5 κελιά, το BQ76930 έως και 10 και το BQ76940 υποστηρίζει έως και 15 κελιά σε σειρά. Μέσω επικοινωνίας με I2C ένας μικροελεγκτής μπορεί να εφαρμόσει λειτουργίες διαχείρισης μπαταριών, όπως παρακολούθηση των κελιών ως προς τάση, ρεύμα και θερμοκρασία και να παρέχει προστασία κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση και εξισορρόπηση. Μέσω των ενσωματωμένων ADC γίνεται ψηφιακή ανάγνωση κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των τάσεων και των θερμοκρασιών των κελιών.



Σχήμα 5.2: Ολοκληρωμένο BQ76920

Περιγραφή των ακροδεκτών ολοκληρωμένου :

- VC0 με VC5: Μέτρηση τάσης κελιών
- BAT : Είσοδος του πιο θετικού κελιού της μπαταρίας
- SRP : Είσοδος θετικού pin από την μέτρηση ρεύματος
- SRN : Είσοδος αρνητικού pin από την μέτρηση ρεύματος
- SDA / SCL: Επικοινωνία I2C με τον μικροελεγκτή

- REGSRC : Είσοδος τάσης για τον εσωτερικό Regulator
- REGOUT: Έξοδος του Regulator
- ALERT: Έξοδος pin για την ένδειξη σφάλματος
- ALERT: Έξοδος pin για την ένδειξη σφάλματος
- CHG: Pin οδήγησης διακόπτη για σφάλμα κατά την φόρτιση

#### Καταστάσεις του ολοκληρωμένου :

**Πλήρως λειτουργική κατάσταση(Normal Mode):** Τόσο το ADC όσο και το coulomb counter ενδέχεται να είναι ενεργοποιημένα ή απενεργοποιημένα από τον μικροελεγκτή. Η προστασία από υπέρταση και υπόταση ενεργοποιείται εάν το ADC είναι ενεργοποιημένο. Η προστασία από υπέρταση στην αποφόρτιση και η προστασία από βραχυκύκλωμα κατά την αποφόρτιση είναι ενεργοποιημένα. Το ADC και το coulomb counter μπορούν να απενεργοποιηθούν για να μειωθεί η κατανάλωση ρεύματος.

**Ship Mode :** Η λειτουργία SHIP είναι η βασική και χαμηλότερης ισχύος λειτουργία που υποστηρίζει το BQ769x0. Η λειτουργία SHIP ενεργοποιείται αυτόματα κατά τη συναρμολόγηση και μετά από κάθε συμβάν Power on Reset. Όταν η συσκευή βρίσκεται σε κανονική λειτουργία, μπορεί να εισέλθει σε λειτουργία SHIP από τον μικροελεγκτή μέσω μιας συγκεκριμένης ακολουθίας εντολών από την επικοινωνία με την I2C. Η αφύπνιση από τη λειτουργία SHIP στη λειτουργία NORMAL απαιτείται η τάση του ακροδέκτη TS1 να είναι μεγαλύτερη από το VBOOT, το οποίο ενεργοποιεί την ακολουθία εκκίνησης της συσκευής.

#### Μέτρηση Τάσης

Κάθε συσκευή BQ769x0 μετρά τις τάσεις και τις θερμοκρασίες των κελιών χρησιμοποιώντας ένα ADC 14-bit. Αυτό το ADC μετρά όλες τις διαφορικές τάσεις κελιών και του thermistor. Για να ενεργοποιήσετε τον ADC, πρέπει να οριστεί το bit [ADC EN] στον καταχωρητή SYS CTRL1.

SYS_CTRL1	0x04	LOAD_PRESENT	RSVD	RSVD	ADC_EN	TEMP_SEL	RSVD	SHUT_A	SHUT_B
-----------	------	--------------	------	------	--------	----------	------	--------	--------

Σχήμα 5.3: Καταχωρητής υπεύθυνος για την ενεργοποίηση του ADC

Αυτό το bit ρυθμίζεται αυτόματα κάθε φορά που η συσκευή μπαίνει σε λειτουργία NORMAL. Όταν είναι ενεργοποιημένο, το ADC διασφαλίζει ότι οι ενσωματωμένες προστασίες υπέρτασης και υπότασης είναι λειτουργικές.

Παρακάτω φαίνεται η μετατροπή της μέτρησης του ADC σε αναλογική τάση. Σε κάθε ολοκληρωμένο υπάρχει αποθηκευμένο στην μνήμη μια τιμή για το κέρδος(GAIN) και το OFFSET.

$$V_{cell} = GAIN \times ADC_{cell} + OFFSET \quad (5.1)$$

## Εξισορρόπηση

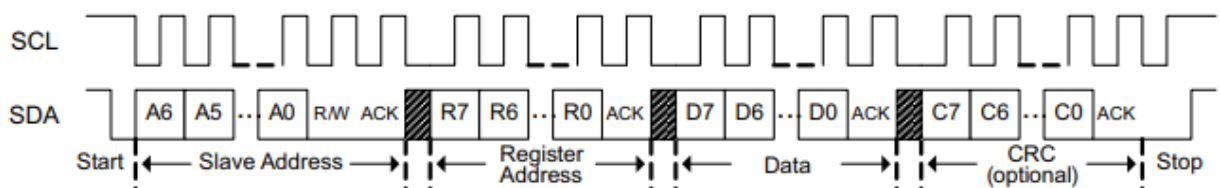
Τόσο η εσωτερική όσο και η εξωτερική παθητική εξισορρόπηση κελιών υποστηρίζονται πλήρως από το BQ76920, ενώ η εξωτερική εξισορρόπηση κελιών συνιστάται για BQ76930 και BQ76940. Επαφίεται στον μικροελεγκτή να καθορίσει τον αλγόριθμο ακριβούς εξισορρόπησης που θα χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε δεδομένο σύστημα. Κάθε συσκευή BQ769x0 παρέχει τις τάσεις των κελιών και τους οδηγητές εξισορρόπησης για να ενεργοποιηθούν. Εάν χρησιμοποιηθεί η εσωτερική εξισορρόπησης κελιών, ενδέχεται το ρεύμα που θα μπορεί να οδηγηθεί να είναι μέχρι 50mA. Εάν χρησιμοποιηθεί εξωτερική εξισορρόπηση κελιού, μπορεί να επιτευχθούν πολύ υψηλότερα ρεύματα εξισορρόπησης.

## Επικοινωνία με τον μικροελεγκτή

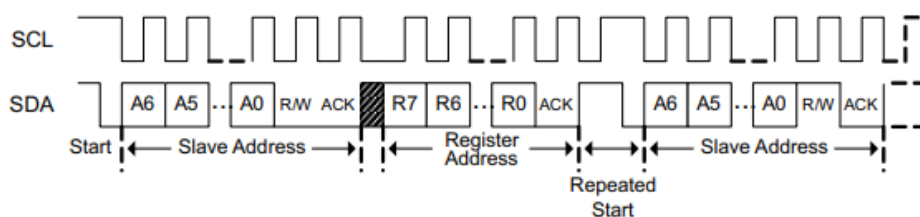
Στο ολοκληρωμένο που έχουμε επιλέξει η επικοινωνία με τον μικροελεγκτή γίνεται μέσω I2C . Η διεύθυνση κάθε συσκευής αποτελείται από 7bit και είναι προγραμματισμένη εργοστασιακά . Η εγγραφή γίνεται γράφοντας τα δεδομένα πριν από το byte τερματισμού. Το μπλοκ I2C θα αυξάνει αυτόματα τη διεύθυνση καταχωρητή μετά από κάθε byte δεδομένων. Όταν είναι ενεργοποιημένο το CRC υπολογίζεται ως εξής:

- Σε μια εγγραφή ενός byte, το CRC υπολογίζεται μέσω της διεύθυνσης του slave, της διεύθυνσης καταχωρητή και των δεδομένων.
- Σε μια εγγραφή πολλών μπλοκ, το CRC για το πρώτο byte δεδομένων υπολογίζεται πάνω από την διεύθυνση του slave, διεύθυνση καταχωρητή και δεδομένα.

Το CRC για τα επόμενα byte δεδομένων υπολογίζεται μόνο μέσω του byte δεδομένων. Το πολυώνυμο CRC είναι  $x^8 + x^2 + x + 1$  και η αρχική τιμή είναι 0. Όταν ο slave ανιχνεύσει ένα λάθος CRC, ο slave I2C θα στείλει NACK(Negative Acknowledgement) το CRC, κάτι που κάνει τον slave να μεταβεί σε κατάσταση αδράνειας.



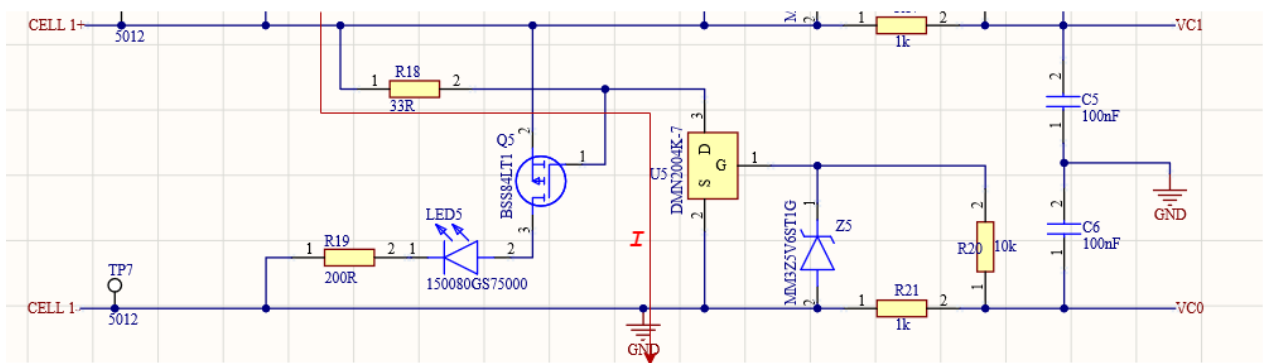
Σχήμα 5.4: Ανάγνωση μηνύματος από το ολοκληρωμένο



Σχήμα 5.5: Απόστολή μηνύματος από τον μικροελεγκτή

## 2. Μέθοδος εξισορρόπησης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το ολοκληρωμένο υποστηρίζει εσωτερική και εξωτερική παθητική εξισορρόπηση τάσης των κελιών. Στην υλοποίηση που έχουμε κάνει, έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε εξωτερικούς διακόπτες για την παθητική εξισορρόπηση λόγω των χαμηλών ρευμάτων που μας παρέχει η χρήση της εσωτερικής εξισορρόπησης. Συγκεκριμένα στην εσωτερική εξισορρόπηση μπορούμε αποφορτίσουμε με μέγιστο ρεύμα τα 50 mA, ενώ με την χρήση των εξωτερικών διακοπτών και αντίστασης μπορούμε να αποφορτίσουμε ρεύμα έντασης 90 μέχρι 130 mA. Το ρεύμα εκφόρτισης ενδέχεται να είναι υψηλότερο με την αλλαγή της αντίστασης αποφόρτισης με αντίσταση μικρότερης τιμής.

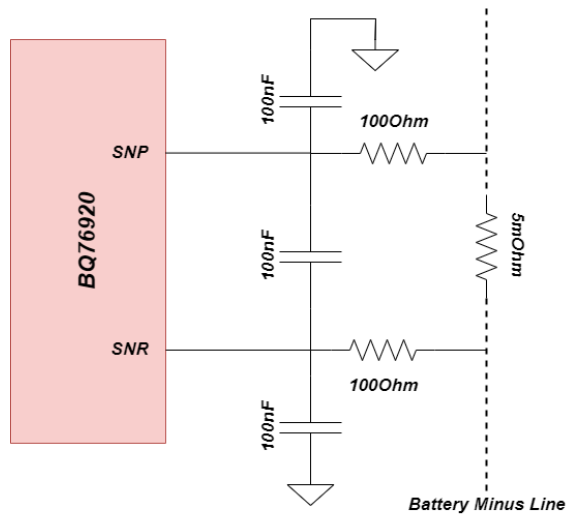


Σχήμα 5.6: Κύκλωμα παθητικής εξωτερικής εξισορρόπησης κελιών

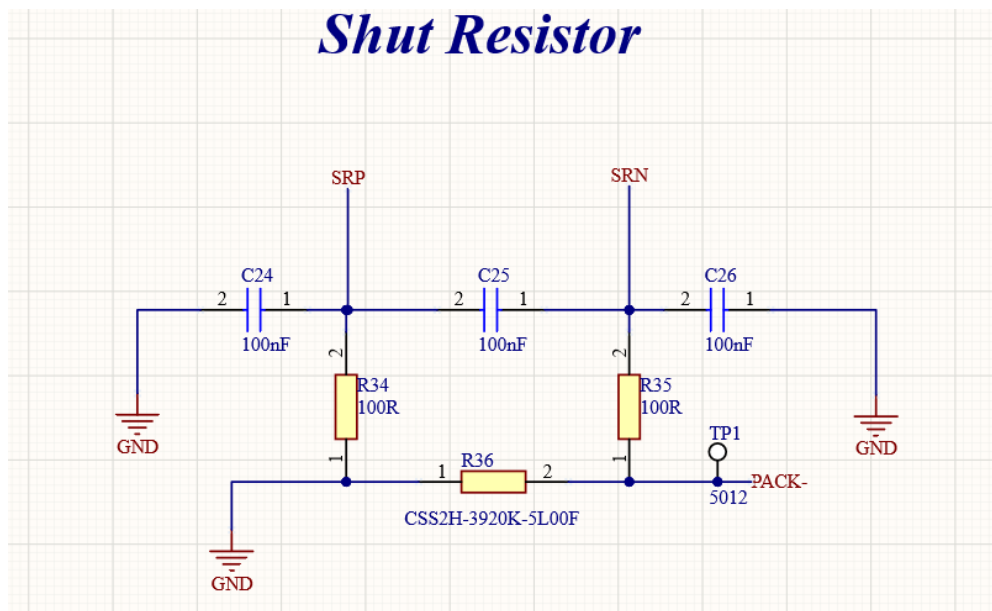
Στο σχηματικό βλέπουμε την τοπολογία του κυκλώματος εξισορρόπησης. Έχουμε χρησιμοποιήσει ένα N-Channel Mosfet το οποίο ενεργοποιείται από το ολοκληρωμένο όταν από τον μικροελεγκτή δοθεί η εντολή για εξισορρόπηση εκείνου του κελιού. Για την αναγνώριση της εξισορρόπησης από τον χρήστη χρησιμοποιούμε ένα P-Channel Mosfet και ένα LED, το οποίο ενεργοποιείται κατά την εξισορρόπηση.

## 3. Αισθητήριο μέτρησης ρεύματος

Για την μέτρηση του ρεύματος της μπαταρίας χρησιμοποιήθηκε Shunt Resistor. Η επιλογή αυτή έγινε διότι το ολοκληρωμένο μας δίνει την δυνατότητα της ενσωματωμένης μέτρησης ρεύματος (ακροδέκτες ολοκληρωμένου SRN/SRP) με τον κατάλληλο αλγόριθμο στον μικροελεγκτή.



Σχήμα 5.7: Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος



Σχήμα 5.8: Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος με Shunt Resistor

Στο παραπάνω σχήμα 5.8 βλέπουμε την συνδεσμολογία της Shunt Resistor με το ολοκληρωμένο. Η αντίσταση είναι η R36 και ουσιαστικά παρεμβαίνει από την γραμμή του αρνητικού πόλου του συστήματος της μπαταρίας και με την χρήση φίλτρων (C24, C25, C26) οδηγείται στο ολοκληρωμένο.

#### 4. Μικροελεγκτής

Ως μονάδα επεξεργασίας επιλέχθηκε ένα Arduino MKR Zero. Παρακάτω φαίνονται τα χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή.



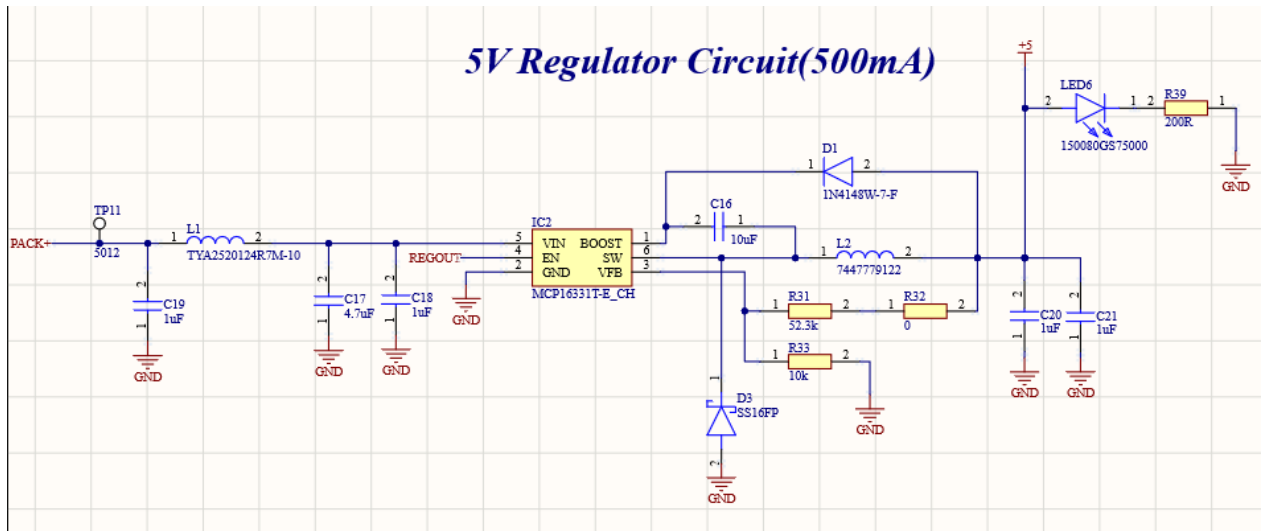
Τύπος	Arduino MKR Zero
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40 με 125οC
Επεξεργαστής	SAMD21 Cortex®-M0+ 32bit low power ARM MCU
Clock Frequency	48 MHz
Μνήμη Flash	256 KB
RAM	32 KB
Τάση λειτουργίας	5 - 5,5V
I/O Voltage	3.3V
AD Inputs	7(12Bit)
Communication	SPI – I2C

Σχήμα 5.9: Πίνακας χαρακτηριστικών Arduino MKR Zero

Ο επεξεργαστής επιλέχθηκε λόγω της γνώσης δημιουργίας αλγορίθμων στο περιβάλλον Arduino IDE κάνοντας έτσι εφικτή την υλοποίηση του αλγορίθμου στο χρονικό διάστημα που είχαμε για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

## 5. Κύκλωμα Τροφοδοσίας

Για την τροφοδοσία των επιμέρους συσκευών του κυκλώματος αποφασίσαμε να μην χρησιμοποιήσουμε τον ενσωματωμένο regulator που διαθέτει το ολοκληρωμένο κύκλωμα για την παρακολούθηση των μπαταριών. Αντί αυτού επιλέξαμε έναν Switching Voltage regulator, ο οποίος έχει δυνατότητα εισόδου μεγαλύτερη από την τάση του συστήματος μπαταριών και η έξοδος του προσαρμόζεται από ένα συνδυασμό αντιστάσεων οι οποίες οδηγούν την ανάδραση της τάσης εξόδου στο ολοκληρωμένο. Οι τάσεις που θα χρησιμοποιηθούν στα κυκλώματά μας είναι τα 5 και τα 3,3Volt . Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν 2 regulators. Ο ένας αναφέρθηκε παραπάνω και είναι υπεύθυνος για την μετατροπή της τάσης του συστήματος μπαταριών(από 15 μέχρι 21 Volt) σε 5 Volt. Ο συγκεκριμένος regulator είναι υπεύθυνος για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή.



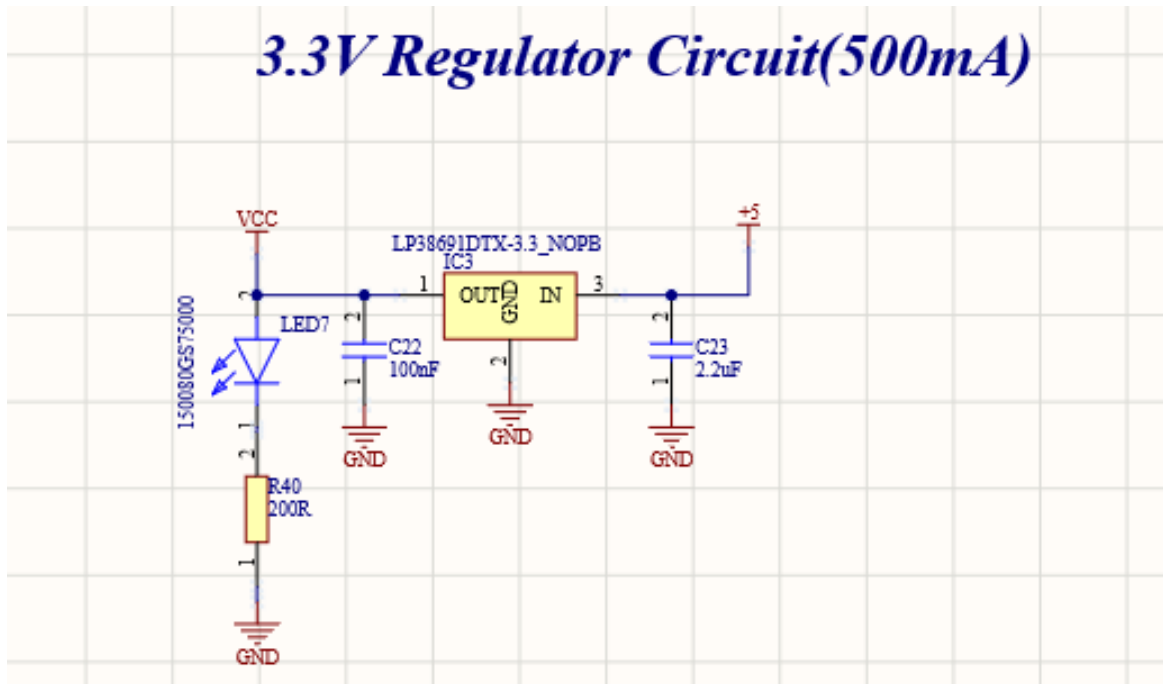
Σχήμα 5.10: Σχηματικό κύκλωμα Regulator 5V

Το ολοκληρωμένο που χρησιμοποιήθηκε είναι το MCP16331T-E CH. Παραπάνω βλέπουμε το κύκλωμα της τροφοδοσίας. Αρχικά έχουν χρησιμοποιηθεί decoupling πυκνωτές τόσο την είσοδο, όσο και στην έξοδο του regulator, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για το φιλτράρισμα τυχόν ηλεκτρομαγνητικού θορύβου στην τροφοδοσία. Επίσης οι αντιστάσεις R32 και R33 είναι οι αντιστάσεις οι οποίες οδηγούν την ανάδραση στο regulator για τον καθορισμό της τάσης εξόδου.

Ο τύπος υπολογισμού της τάσης είναι :

$$R_{top} = R_{bot} \times \left( \frac{V_{out}}{V_{fb}} \right) - 1 \quad (5.2)$$

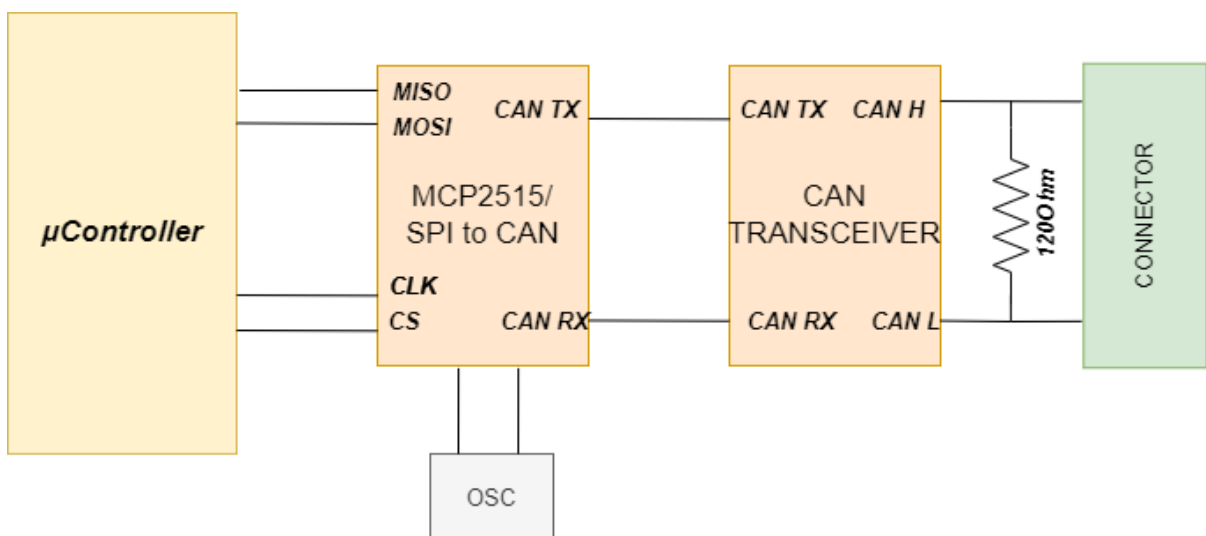
για διαφορετικές αντιστάσεις  $R_{top}$  και  $R_{bot}$  η τάση εξόδου αλλάζει. Για την τάση των 3.3 Volt χρησιμοποιήθηκε ένας LDO (Low Dropout Regulator). Η τάση εισόδου έρχεται από τον πρώτο regulator και η έξοδος του μας δίνει 3.3 Volt.



Σχήμα 5.11: Σχηματικό κύκλωμα Regulator 3.3V

## 6. Επικοινωνία

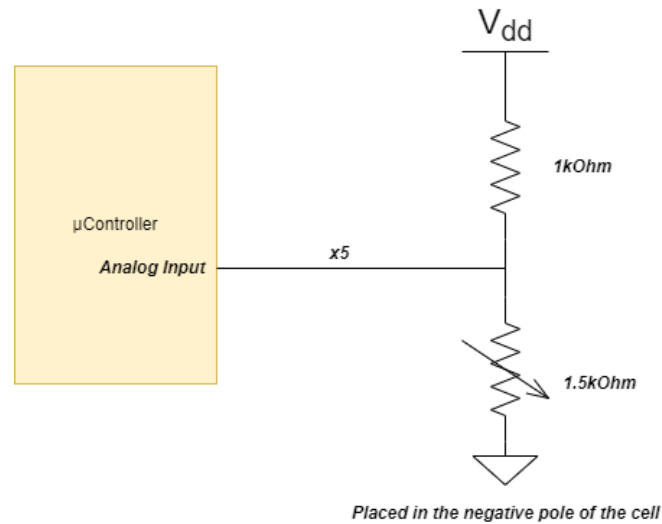
Η επικοινωνία του συστήματος μας με τα διάφορα επιμέρους συστήματα του οχήματος γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου CAN BUS. Ο μικροελεγκτής που επιλέξαμε δεν έχει ενσωματωμένη επικοινωνία CAN. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο το οποίο μετατρέπει την επικοινωνία μέσω SPI (Serial Peripheral Interface) σε CAN BUS επικοινωνία. Τα δύο ολοκληρωμένα που χρησιμοποιήθηκαν για την μετατροπή του SPI σε CAN είναι το MCP2515-I SO, το SN65HVD230D και ένα κρύσταλλος 16MHz.



Σχήμα 5.12: Σχηματικό κύκλωμα CAN-BUS

## 7. Μέτρηση Θερμοκρασίας

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας η λύση που επιλέχθηκε είναι ένα αισθητήριο Negative Temperature Coefficient. Παρακάτω φαίνεται το σχηματικό κύκλωμα του NTC Thermistor.



Σχήμα 5.13: Σχηματικό κύκλωμα NTC Thermistor

Το thermistor το οποίο επιλέχθηκε είναι το B57891M0152J000, και παρακάτω φαίνονται τα χαρακτηριστικά του.

R <sub>25</sub> Ω	No. of R/T characteristic	B <sub>25/100</sub> K	Ordering code
1 k	1009	3930 ±3%	B57891M0102+000
1.5 k	1008	3560 ±3%	B57891M0152+000
2.2 k	1013	3900 ±3%	B57891M0222+000
3.3 k	2003	3980 ±3%	B57891M0332+000
4.7 k	2003	3980 ±3%	B57891M0472+000
6.8 k	2003	3980 ±3%	B57891M0682+000
10 k	4901	3950 ±3%	B57891M0103+000
15 k	2004	4100 ±3%	B57891M0153+000
22 k	2904	4300 ±3%	B57891M0223+000

Σχήμα 5.14: Χαρακτηριστικά NTC Thermistor από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας, θα πρέπει να αντιστοιχιστεί η τάση η οποία διαβάζει ο μικροελεγκτής μας. Η λογική που ακολουθήθηκε είναι:

- Ο μικροελεγκτής διαβάζει μια τιμή στην είσοδο του
- Μετατροπή της τιμής αυτής σε αναλογική τάση

- Βρίσκουμε την τάση που πέφτει πάνω στην αντίσταση

$$V_{resistor} = V_{cc} - V_{thermistor} \quad (5.3)$$

- Βρίσκουμε την τωρινή αντίσταση του thermistor

$$R_{thermistor} = \frac{V_{thermistor}}{I_{resistor}} \quad (5.4)$$

όπου :

$$I_{resistor} = \frac{V_{resistor}}{R_{resistor}} \quad (5.5)$$

- Και από την τωρινή αντίσταση υπολογίζεται η θερμοκρασία

## 5.2 Περιγραφή Firmware

- Βιβλιοθήκες

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκαν και τροποποιήθηκαν οι βιβλιοθήκες bq769x0 και υλοποιήθηκε αλγόριθμος στο προγραμματιστικό περιβάλλον Arduino IDE. Η βιβλιοθήκη χωρίζεται σε τρία αρχεία. Το πρώτο, είναι το αρχείο των δηλώσεων, το δεύτερο είναι το αρχείο δήλωσης καταχωρητών και το τρίτο αρχείο είναι αυτό που αναλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ του μικροελεγκτή και του ολοκληρωμένου που χρησιμοποιήσαμε για την παρακολούθηση των κελιών. Στο πρώτο αρχείο παρέχεται δυνατότητα σύνδεσης τριών διαφορετικών ολοκληρωμένων, της ίδιας σειράς της εταιρίας Texas Instruments. Τα ολοκληρωμένα διαφέρουν στον μέγιστο αριθμό κελιών που μπορούν να παρακολουθούν και παρουσιάζονται παρακάτω στο σχήμα 5.15. Ανάλογα με το ολοκληρωμένο που θα χρησιμοποιήσουμε γίνονται και οι αντίστοιχες δηλώσεις μεταβλητών και συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται από το αρχείο διαχείρισης επικοινωνίας του μικροελεγκτή με το ολοκληρωμένο.

```
#define MAX_NUMBER_OF_CELLS 15
#define MAX_NUMBER_OF_THERMISTORS 3

// IC type/size
#define bq76920 1
#define bq76930 2
#define bq76940 3
```

Σχήμα 5.15: Απόσπασμα του κώδικα για την δήλωση ολοκληρωμένου.

Στο δεύτερο αρχείο ορίζουμε το χάρτη των καταχωρητών του ολοκληρωμένου.

```
#define SYS_STAT      0x00
#define CELLBAL1     0x01
#define CELLBAL2     0x02
#define CELLBAL3     0x03
#define SYS_CTRL1    0x04
#define SYS_CTRL2    0x05
#define PROTECT1     0x06
#define PROTECT2     0x07
#define PROTECT3     0x08
#define OV_TRIP      0x09
#define UV_TRIP      0x0A
#define CC_CFG       0x0B
```

Σχήμα 5.16: Απόσπασμα του κώδικα από το χάρτη των καταχωρητών.

Το τρίτο αρχείο διαχειρίζεται την επικοινωνία μεταξύ του ολοκληρωμένου και του μικροελεγκτή περιέχει δηλώσεις 5 βασικών βιβλιοθηκών. Μία βιβλιοθήκη διαχείρισης σειριακών επικοινωνιών, βιβλιοθήκη για την εκτέλεση μαθηματικών πράξεων, την βιβλιοθήκη δήλωσης μικροελεγκτή (Arduino), την βιβλιοθήκη που περιλαμβάνει τον χάρτη των καταχωρητών του ολοκληρωμένου που χρησιμοποιούμε και την βιβλιοθήκη δήλωσης συναρτήσεων που αναφέρθηκε παραπάνω.

```
#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>      // I2C
#include <math.h>

#include "bq769x0.h"
#include "registers.h"
```

Σχήμα 5.17: Απόσπασμα του κώδικα με την δήλωση βιβλιοθηκών.

Αρχικά ξεκινάμε την σειριακή επικοινωνία με το ολοκληρωμένο το οποίο επιλέξαμε. Από την στιγμή που ξεκινήσει η σειριακή επικοινωνία κάθε δεδομένο ελέγχεται με κώδικα κυκλικού πλεονασμού (CRC) ο οποίος περιλαμβάνεται ως συνάρτηση μέσα στην βιβλιοθήκη. Προκειμένου να βρεθεί το ολοκληρωμένο που χρησιμοποιούμε, πραγματοποιούμε σειριακή επικοινωνία σε όλες τις διαθέσιμες υποδιευθύνσεις από ειδική συνάρτηση που περιλαμβάνεται. Στην συνέχεια ελέγχεται η κατάσταση του ολοκληρωμένου, ελέγχεται αν οι καταχωρητές βρίσκονται στις προεπιλεγμένες τιμές τους η αν υπάρχει κάποιο σφάλμα, όπως για παράδειγμα βραχυκύκλωμα.

```

bq769x0::bq769x0(byte bqType, int bqI2CAddress)
{
    type = bqType;
    I2CAddress = bqI2CAddress;

    if (type == bq76920) {
        numberOfCells = 5;
    }
    else if (type == bq76930) {
        numberOfCells = 10;
    }
    else {
        numberOfCells = 15;
    }

    // prevent errors if someone reduced MAX_NUMBER_OF_CELLS accidentally
    if (numberOfCells > MAX_NUMBER_OF_CELLS) {
        numberOfCells = MAX_NUMBER_OF_CELLS;
    }
}

```

Σχήμα 5.18: Απόσπασμα κώδικα εύρεσης ολοκληρωμένου.

Η επόμενη συνάρτηση που περιλαμβάνεται είναι εκείνη της δήλωσης του αισθητηρίου ρεύματος και συγκεκριμένα της Shunt Resistor που στην δικιά μας περίπτωση έχει επιλεγεί στα 5 mOhm.

```

void bq769x0::setShuntResistorValue(int res_mOhm)
{
    shuntResistorValue_mOhm = res_mOhm;
}

```

Σχήμα 5.19: Απόσπασμα κώδικα δήλωσης Shunt Resistor.

Μία από τις κυριότερες συναρτήσεις είναι αυτή που διαβάζει την τάση από το ολοκληρωμένο και κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς για την μετατροπή των δεδομένων που λαμβάνει σε τιμή που μπορεί να αναγνωριστεί από τον χρήστη. Επίσης εκτός την τάση μεμονωμένων κελιών διαβάζουμε την συνολική τάση του πακέτου μπαταριών και το συνολικό ρεύμα που διέρχεται από και προς το πακέτο.

```

Wire.requestFrom(I2CAddress, 2);
buf[0] = Wire.read(); // VCx_HI
buf[2] = Wire.read(); // VCx_LO -
}

adcVal = (buf[0] & 0b00111111) << 8 | buf[2];
cellVoltages[i] = adcVal * adcGain / 1000 + adcOffset;
LOG_PRINT(byte2char(cellVoltages[i]));

```

Σχήμα 5.20: Απόσπασμα κώδικα για την διαδικασία ανάγνωσης τάσης.

Ακόμα μία συνάρτηση που είναι επίσης σημαντική να αναφέρουμε είναι εκείνη της ενεργοποίησης της εξισορρόπησης τάσης των κελιών. Για την ενεργοποίηση της εξισορρόπησης κοιτάμε αν η μέγιστη τάση μεμονωμένου κελιού από το πακέτο μείον την μικρότερη μεμονωμένη τάση κελιού είναι μεγαλύτερη από μία τάση που έχουμε ορίσει εμείς ως όριο. Και αν ισχύει αυτό ενεργοποιείται ο καταχωρητής για το συγκεκριμένο κελί.

```
// check if balancing allowed
if (checkStatus() == 0 &&
    idleSeconds >= balancingMinIdleTime_s &&
    cellVoltages[idCellMaxVoltage] > balancingMinCellVoltage_mV &&
    (cellVoltages[idCellMaxVoltage] - cellVoltages[idCellMinVoltage]) > balancingMaxVoltageDifference_mV)
{
    balancingActive = true;
    LOG_PRINTLN("Balancing enabled!");

    regCELLBAL_t cellbal;
    byte balancingFlags;
    byte balancingFlagsTarget;
```

Σχήμα 5.21: Απόσπασμα κώδικα για την ενεργοποίηση εξισορρόπησης.

### • Κυρίως κώδικας

Στον κυρίως κώδικα στην αρχή δηλώνουμε ότι θα χρησιμοποιήσουμε τις βασικές βιβλιοθήκες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στην συνέχεια δηλώνουμε σταθερές που αφορούν το HW του συστήματος, όπως η διεύθυνση της σειριακής επικοινωνίας με το ολοκληρωμένο, τον ακροδέκτη ενεργοποίησης. Επιπλέον δηλώνουμε σταθερές οι οποίες χρησιμεύουν για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας και αφορούν παραμέτρους λειτουργίας του NTC, όπως η αρχική αντίσταση του στους 25°C, αντίσταση στον διαιρέτη τάσης για την αναλογική τάση που διαβάζουμε και η τάση λειτουργίας του NTC.

```
#include <bq769x0.h> // Library for Texas Instruments bq76920 battery management IC

#define BMS_ALERT_PIN 2
#define BMS_BOOT_PIN 7
#define BMS_I2C_ADDRESS 0x18 |

//Variables for NTC
#define RT0 1500 // Ω
#define B 3560 // K
#define VCC 3.3 //Supply voltage
#define R 1000 //R=1KΩ
float RT, VR, ln, TX, T0, VRT;
```

Σχήμα 5.22: Απόσπασμα κώδικα δήλωσης βιβλιοθήκης και μεταβλητών.

Επίσης δηλώνουμε μεταβλητές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την είσοδο σειριακών δεδομένων και τον έλεγχο ασφαλείας του συστήματος. Ο βασικός κώδικας αποτελείται από 3 βασικές συναρτήσεις: την `setup()`, την κύρια συνάρτηση `main loop()` και την `get temp()`. Στην συνάρτηση `setup()` ξεκινάει η σειριακή επικοινωνία και στέλνει στο σύστημα παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος, όπως μεταβλητές για την δήλωση της Shunt Resistor,



δηλώσεις για την προστασία του συστήματος και τα όρια για την εξισορρόπηση των κελιών.

```
BMS.setShuntResistorValue(5);
BMS.setBalancingThresholds(0.1,3000,50); // minIdleTime_min, minCellV_mV, maxVoltageDiff_mV
```

Σχήμα 5.23: Απόσπασμα κώδικα δήλωσης ορίων.

Η κύρια συνάρτηση ελέγχει συνεχώς αν υπάρχουν δεδομένα στον buffer της σειριακής θύρας, εάν δεν βρεθούν δεδομένα περνάμε στην βασική λειτουργία κατά την οποία ελέγχονται όλες οι τάσεις των κελιών, οι θερμοκρασίες και το συνολικό ρεύμα και σε περίπτωση που κάποια από αυτά ξεπεράσει τα όρια που έχουμε ορίσει ενεργοποιεί μία ένδειξη ή κάποιο ρελέ. Αν βρεθούν σειριακά δεδομένα ελέγχει αν απευθύνονται σε αυτό με βάση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Αν δεν απευθύνεται στο σύστημα μας τότε επιστρέφει μία τιμή σφάλματος στην σειριακή. Σε αντίθετη περίπτωση ο αποστολέας είναι ένα γραφικό περιβάλλον για τον χρήστη (GUI) και η μεταβλητή ελέγχεται για το αν ανήκει σε μία από τις 13 περιπτώσεις. Αν το byte έχει τιμή από 1 έως 5 το γραφικό περιβάλλον ζητά από το σύστημα τις τάσεις των κελιών και επιστρέφει την τάση του ζητούμενου κελιού.

```
case 1:
  BMS.cell_1_voltage();
  detect_voltage_value(BMS.return_Cell1(),1);
  break;
```

Σχήμα 5.24: Απόσπασμα κώδικα περίπτωσης ερώτησης τάσης.

Σε περίπτωση που το byte έχει τιμή από 6 έως 10 τότε το σύστημα επιστρέφει την θερμοκρασία του κάθε κελιού με την εξής αντιστοιχία:

Ο αριθμός 6 ανήκει στο πρώτο κελί και αντίστοιχα ο αριθμός 10 στο πέμπτο.

```
case 6:
  TX=get_temp(A0);
  Serial.println(TX);
  break;
```

Σχήμα 5.25: Απόσπασμα κώδικα περίπτωσης ερώτησης θερμοκρασίας.

Για την διευκόλυνση του υπολογισμού της θερμοκρασίας υλοποιήθηκε συνάρτηση(get temp) η οποία δέχεται αναλογική είσοδο στην οποία είναι συνδεδεμένο το thermistor κάθε κελιού και μας επιστρέφει την θερμοκρασία των κελιών.

```

float get_temp(int analog_pin)
{
    VRT = analogRead(analog_pin);
    VRT = (3.30 / 1023.00) * VRT;
    VR = VCC - VRT;
    RT = VRT / (VR / R);
    ln = log(RT / RT0);
    TX = (1 / ((ln / B) + (1 / T0)));
    TX = TX - 273.15;
    return TX;
}

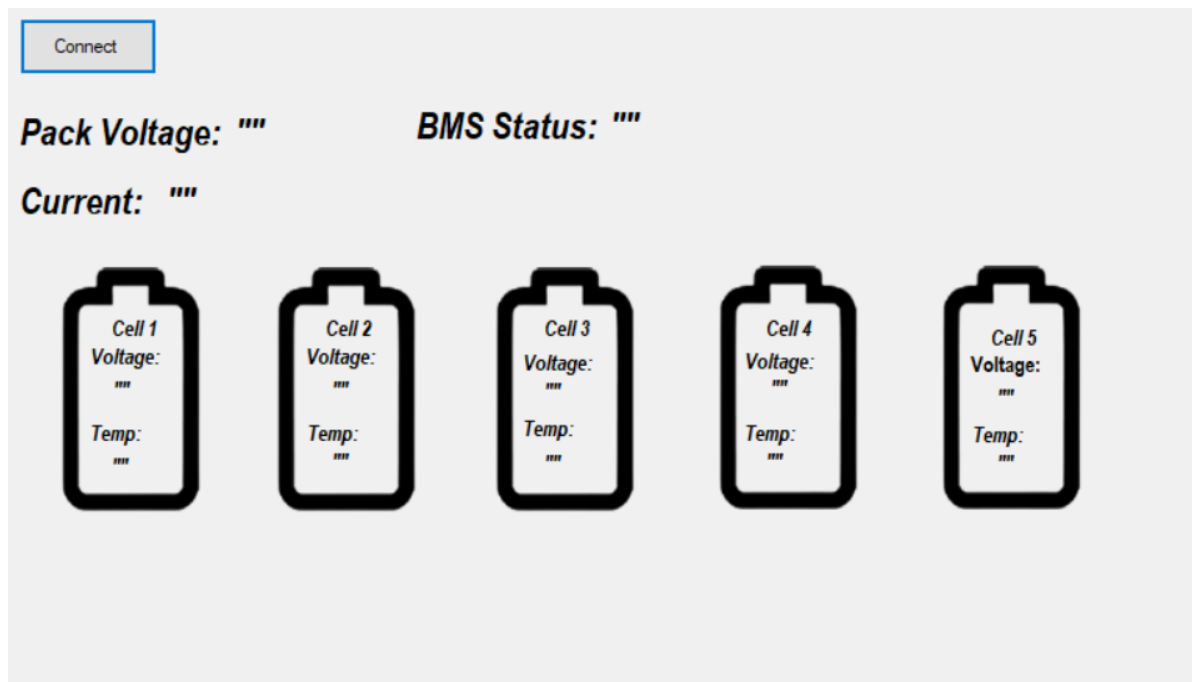
```

Σχήμα 5.26: Συνάρτηση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας.

Αν το byte εισόδου έχει την τιμή 11 το σύστημα τότε επιστρέφει την τιμή τάσης του συνολικού πακέτου των κελιών, ενώ αν έχει την τιμή 12 το συνολικό ρεύμα που διαρρέεται από και προς το πακέτο. Στην τελευταία περίπτωση το σύστημα ελέγχει και δίνει πληροφορίες στο χρήστη για την κατάσταση του πακέτου και για οποιοδήποτε σφάλμα το εμφανίζει.

### 5.3 Περιγραφή Software

Για την εύκολη κατανόηση των μηνυμάτων που επιστρέφει το σύστημα στο χρήση δημιουργήθηκε ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη το οποίο εμφανίζει τις τάσεις των 5 κελιών, το ρεύμα, την τάση του πακέτου και την κατάσταση λειτουργίας.



Σχήμα 5.27: Γραφική περιβάλλον χρήστη.

Για την σύνδεση με το σύστημα πατάμε το κουμπί connect. Πίσω από το κουμπί εκτελείται μία ρουτίνα η οποία ανιχνεύει τις διαθέσιμες σειριακές του συστήματος και ψάχνει σε ποία είναι συνδεδεμένο το σύστημα μας, αποστέλλοντας σε αυτές έναν ειδικό χαρακτήρα τον οποίο μόλις αναγνωρίσει το σύστημα εκτελεί σύνδεση. Αφού συνδεθεί με το σύστημα ενεργοποιεί 13 thread το οποία ζητάνε πληροφορίες από αυτό.

```

Private Sub Button1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles autoconnect_button.Click
    If (is_gui_connected = False) Then
        For Each sp As String In My.Computer.Ports.SerialPortNames
            Try
                BMS_Serial_Port.PortName = sp
                BMS_Serial_Port.BaudRate = 9600
                BMS_Serial_Port.WriteTimeout = 100
                BMS_Serial_Port.ReadTimeout = 100
                BMS_Serial_Port.Open()
                BMS_Serial_Port.DiscardInBuffer()
                BMS_Serial_Port.DiscardOutBuffer()
                BMS_Serial_Port.Write(detection_character, 0, detection_character.Length)
                response_buffer(0) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
                If (response_buffer(0) = expected_response) Then
                    is_gui_connected = True
                    autoconnect_button.Text = "Connected"
                    V_C_1_T.Enabled = True
                    V_C_2_T.Enabled = True
                    V_C_T_3.Enabled = True
                    V_C_T_4.Enabled = True
                    V_C_T_5.Enabled = True
                    T_C_1_T.Enabled = True
                    T_C_2_T.Enabled = True
                    T_C_3_T.Enabled = True
                    T_C_4_T.Enabled = True
                    T_C_5_T.Enabled = True
                    T_V_T.Enabled = True
                    T_C.Enabled = True
                    BMS_Status.Enabled = True
                End If
            Catch
            End Try
        Next
    End If
End Sub

```

Σχήμα 5.28: Διεργασία εύρεσης σειριακής.

Τα πρώτα 5 thread ζητάνε επιστροφή της τάσης των κελιών, τα επόμενα 5 την θερμοκρασία και τα 3 τελευταία την συνολική τάση πακέτου, το ρεύμα και την κατάσταση του συστήματος. Τα δεδομένα του συστήματος ανανεώνονται περίπου κάθε ένα δευτερόλεπτο ενώ αν παρουσιαστεί δυσλειτουργία θα εμφανιστεί χαρακτηριστική κόκκινη ένδειξη στο γραφικό περιβάλλον του χρήστη. Σε επίπεδο κώδικα δηλώνουμε τις μεταβλητές που αναμένει το σύστημα προκειμένου να επιτευχθεί σειριακή επικοινωνία καθώς τους 5 buffer οι οποίοι αποθηκεύουν τα δεδομένα που επιστρέφονται. Στην συνέχεια ορίζουμε τις παραμέτρους λειτουργίας της θύρας σειριακής επικοινωνίας, όπως το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων το χρόνο εγγραφής και ανάγνωσης σειριακής. Αν επιτευχθεί σειριακή επικοινωνία ενεργοποιούνται τα 13 thread που αναφέραμε, των οποίων η λειτουργία θα παρουσιαστεί συνοπτικά παρακάτω για ένα από αυτά που επιστρέφει την τάση του πρώτου κελιού.

```
Private Sub Timer1_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles V_C_1_T.Tick
    Clear_Serial_Buffer()
    BMS_Serial_Port.Write(Cell_1_Voltage_Inquiry, 0, Cell_1_Voltage_Inquiry.Length)
    For i = 0 To 5
        Try
            voltage_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
        Catch ex As Exception
        End Try
    Next
    Cell_1_Voltage.Text = ReturnVoltage(voltage_buffer)
    BMS_Serial_Port.Write(Cell_5_Voltage_Inquiry, 0, Cell_5_Voltage_Inquiry.Length)
End Sub
```

Σχήμα 5.29: Επιστροφή τάσης στο περιβάλλον χρήστη.

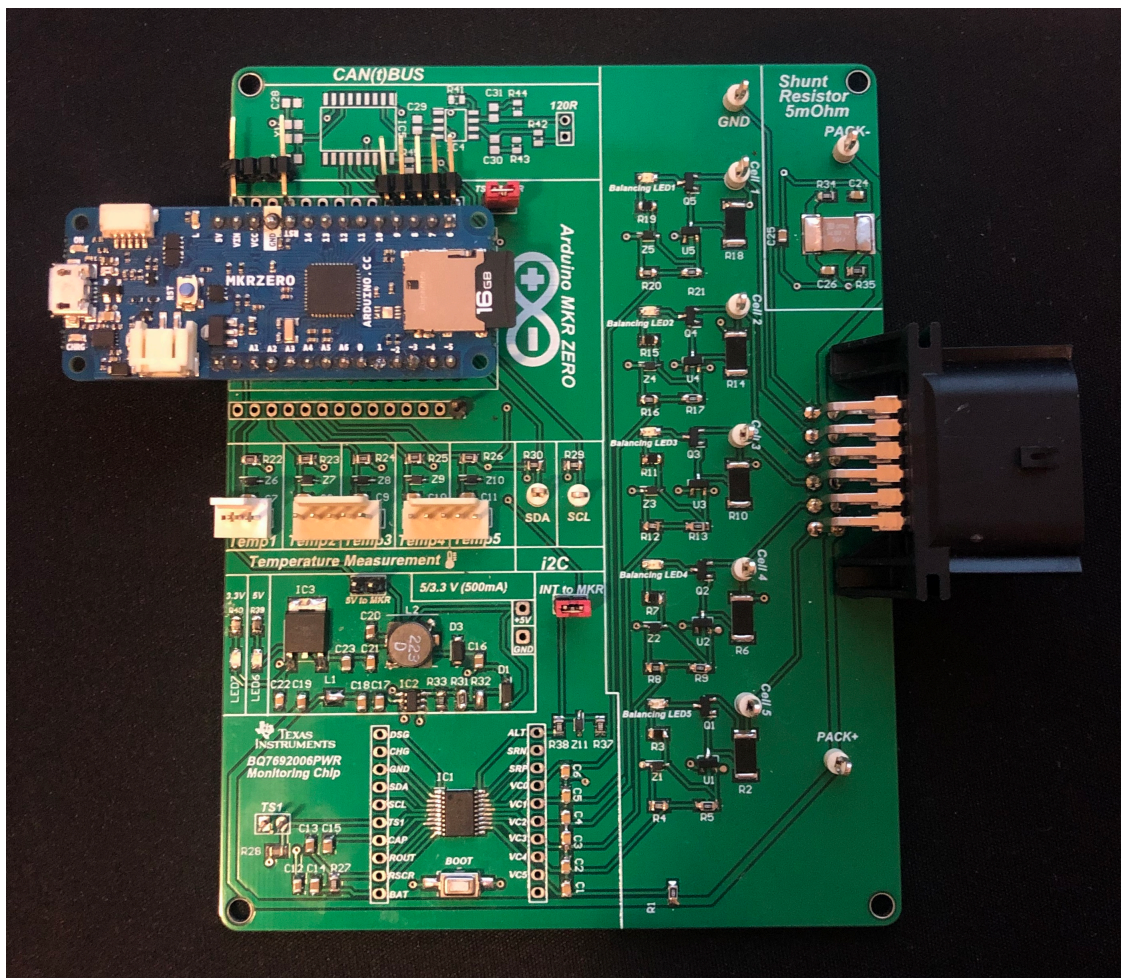
Πρώτα καθαρίζεται ο buffer της σειριακής επικοινωνίας από προηγούμενα δεδομένα, στην συνέχεια αποστέλλουμε το χαρακτηριστικό byte, το οποίο βάσει του πρωτοκόλλου αφορά την τάση του πρώτου κελιού και στην συνέχεια την αποθηκεύουμε. Τέλος αποκωδικοποιούμε τα δεδομένα που επέστρεψαν και εκχωρούμε την τιμή σε μία ετικέτα η οποία γίνεται ορατή από το χρήστη. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο λειτουργούν και τα υπόλοιπα thread.

Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε είναι η VB.net με περιβάλλον εργασίας το οποίο παρέχει το Visual Studio 2022 ως περιβάλλον ανάπτυξης IDE και τα Windows 10 ως λειτουργικό σύστημα.

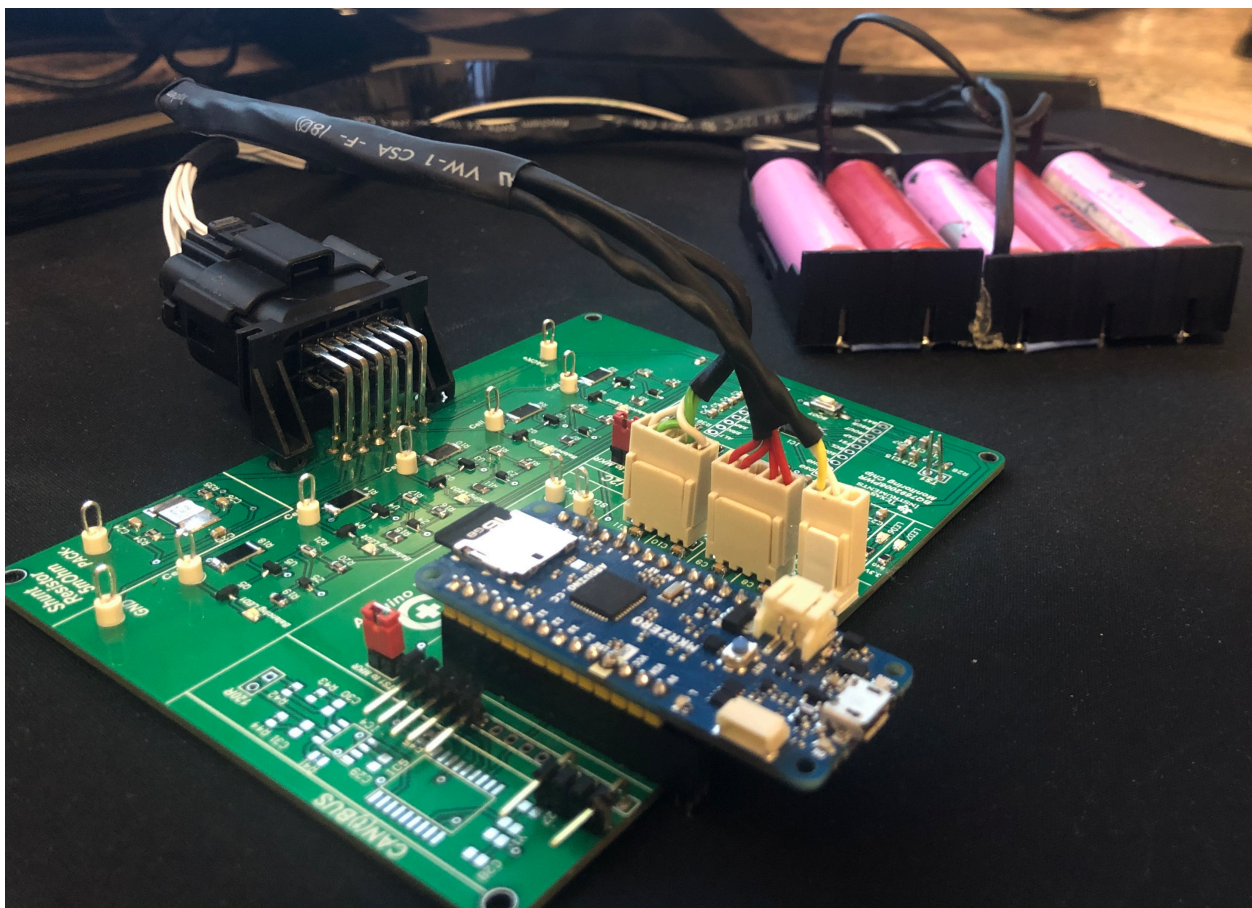
# Κεφάλαιο 6

## Αποτελέσματα και μετρήσεις

Αφού σχεδιάστηκε η πλακέτα προχωρήσαμε στην κατασκευή της, αλλά και στην κατασκευή του συνολικού συστήματος για να ελεγχθεί η λειτουργία του. Για την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας ακολούθησε έλεγχος σε κάθε κομμάτι του κύκλωματος ανεξάρτητα. Αμέσως μετά τον έλεγχο λειτουργικότητας κάθε υποσυστήματος προχωρήσαμε στις δοκιμές αλλά τώρα σε επίπεδο συνολικού συστήματος. Παρακάτω φαίνεται το τυπωμένο κύκλωμα καθώς και η διάταξη στην οποία έγιναν οι δοκιμές.



Σχήμα 6.1: Τυπωμένο κύκλωμα συστήματος.

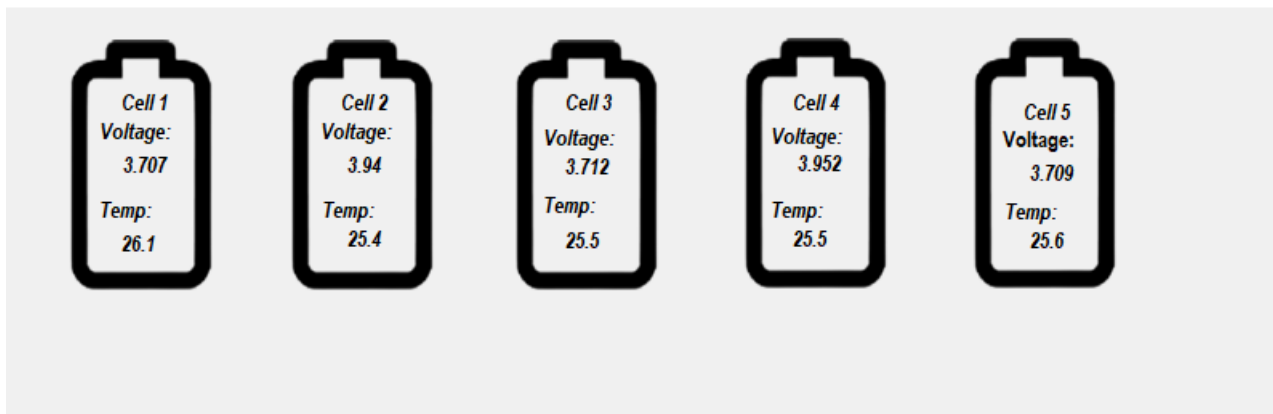


Σχήμα 6.2: Διάταξη συστήματος.

Η διάταξη που υλοποιήσαμε αποτελείται από το τυπωμένο κύκλωμα που σχεδιάσαμε, μία βάση για μπαταρίες η οποία είναι κατάλληλη για μπαταρίες τύπου 18650. Χρησιμοποιήσαμε 5 μπαταρίες Li-Ion, οι οποίες συνδέθηκαν σε σειρά με καλώδια μέσω των επαφών που βρίσκονται στο κάτω μέρος της βάσης. Κατασκευάσαμε καλωδίωση για την σύνδεση του πακέτου μπαταριών με το σύστημα μας. Επίσης τοποθετήθηκαν 5 αισθητήρες θερμοκρασίας, ένας σε κάθε αρνητικό πόλο κελιού.

## 6.1 Επαλήθευση μετρήσεων τάσης

Για την επαλήθευση των μετρήσεων του συστήματος που υλοποιήσαμε, χρησιμοποιήσαμε ένα πολύμετρο. Αρχικά το σύστημα διαχείρισης μπαταριών θα πρέπει να παρακολουθεί την τάση και την θερμοκρασία του κάθε κελιού μεμονωμένα. Για τις μετρήσεις που επιστρέφονται από το σύστημα και για να είναι κατανοητές οι πληροφορίες από τον χρήστη χρησιμοποιήσαμε ως μέσο απεικόνισης το γραφικό περιβάλλον που αναπτύξαμε και αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρακάτω φαίνονται οι τάσεις των κελιών του πακέτου μπαταριών καθώς και οι θερμοκρασίες τους.

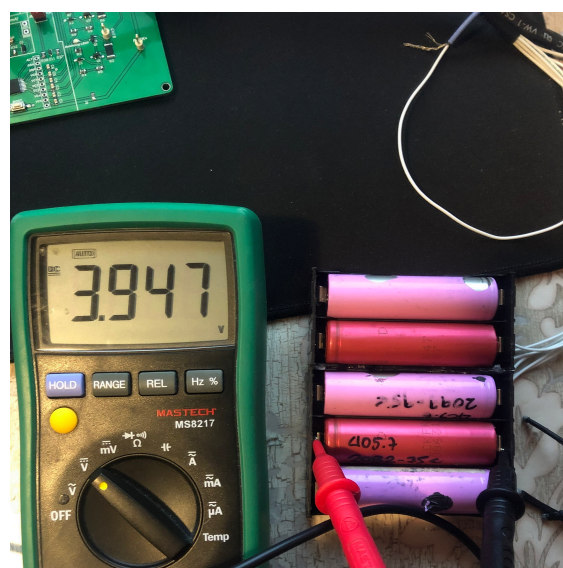


Σχήμα 6.3: Μέτρηση τάσεων και θερμοκρασιών από το σύστημα.

Για να επαληθεύσουμε τα δεδομένα από το σύστημα μετρήσαμε την τάση του πρώτου και του δεύτερου κελιού. Όπως βλέπουμε από το σχήμα 6.4 και 6.5, η μέτρηση από το σύστημα μας είναι σωστή, καθώς υπάρχει απόκλιση κάτω από 10mV. Δηλαδή όσο αναγράφεται στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή του ολοκληρωμένου που είναι υπεύθυνο για την παρακολούθηση των κελιών. Στο πρώτο κελί συγκεκριμένα η απόκλιση της τάσης είναι 8mV ενώ στο δεύτερο 7 mV. Στα σχήματα 6.4 και 6.5 φαίνονται οι μετρήσεις των τάσεων των κελιών 1 και 2 που πήραμε με την χρήση πολύμετρου.

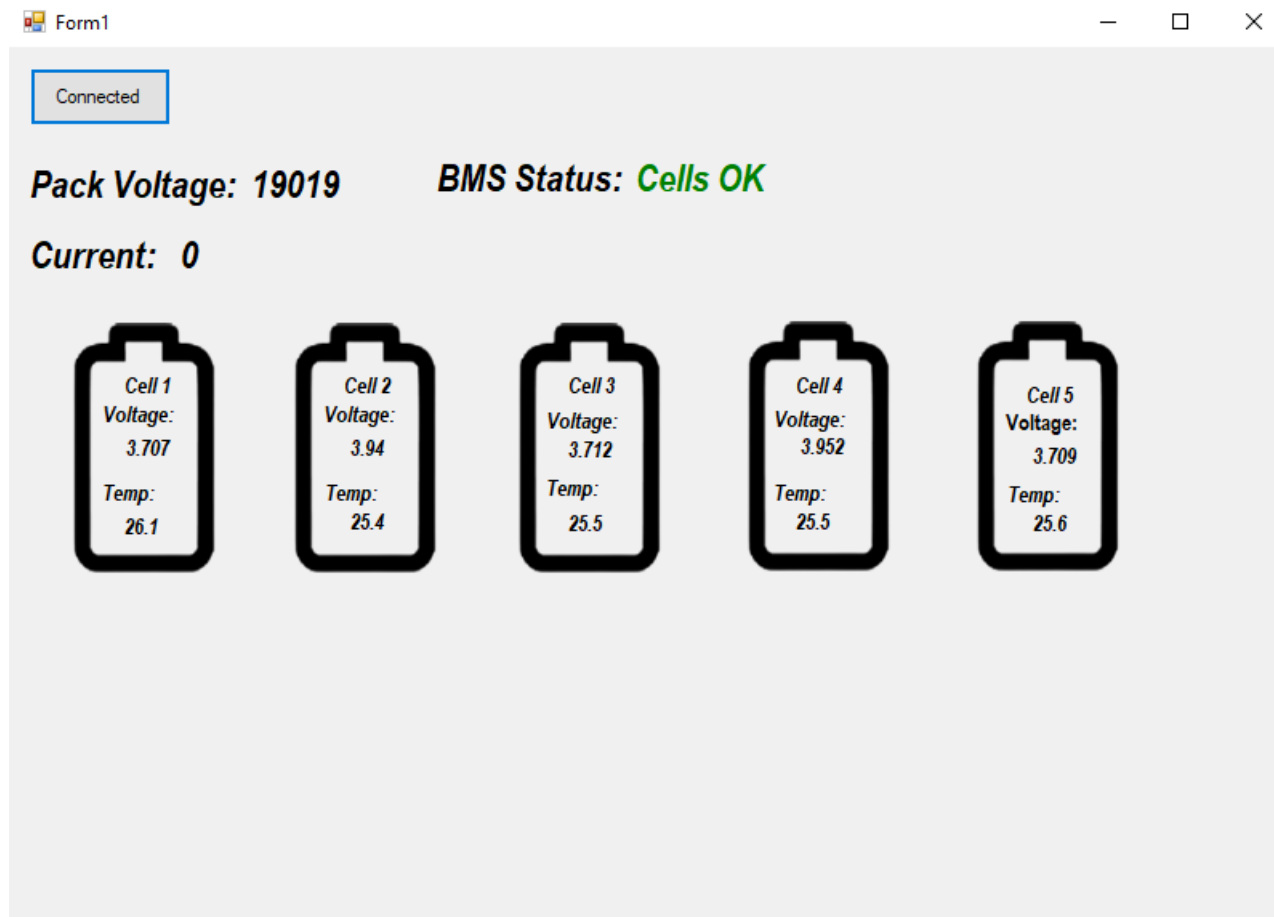


Σχήμα 6.4: Μέτρηση τάσης πρώτου κελιού.



Σχήμα 6.5: Μέτρηση τάσης δεύτερου κελιού.

Ακόμα μία λειτουργία του συστήματος διαχείρισης μπαταριών είναι η μέτρηση τάσης του συνολικού πακέτου. Παρακάτω φαίνεται η τάση του συνολικού συστήματος από την διεπαφή χρήστη. Αυτή φαίνεται στο πάνω αριστερά μέρος. Κάτω από το σχήμα της διεπαφής χρήστη φαίνεται η μέτρηση που πήραμε με το πολύμετρο και βλέπουμε να έχει απόκλιση κάτω από 20mV.



Σχήμα 6.6: Μέτρηση συνολικής τάσης από το σύστημα.

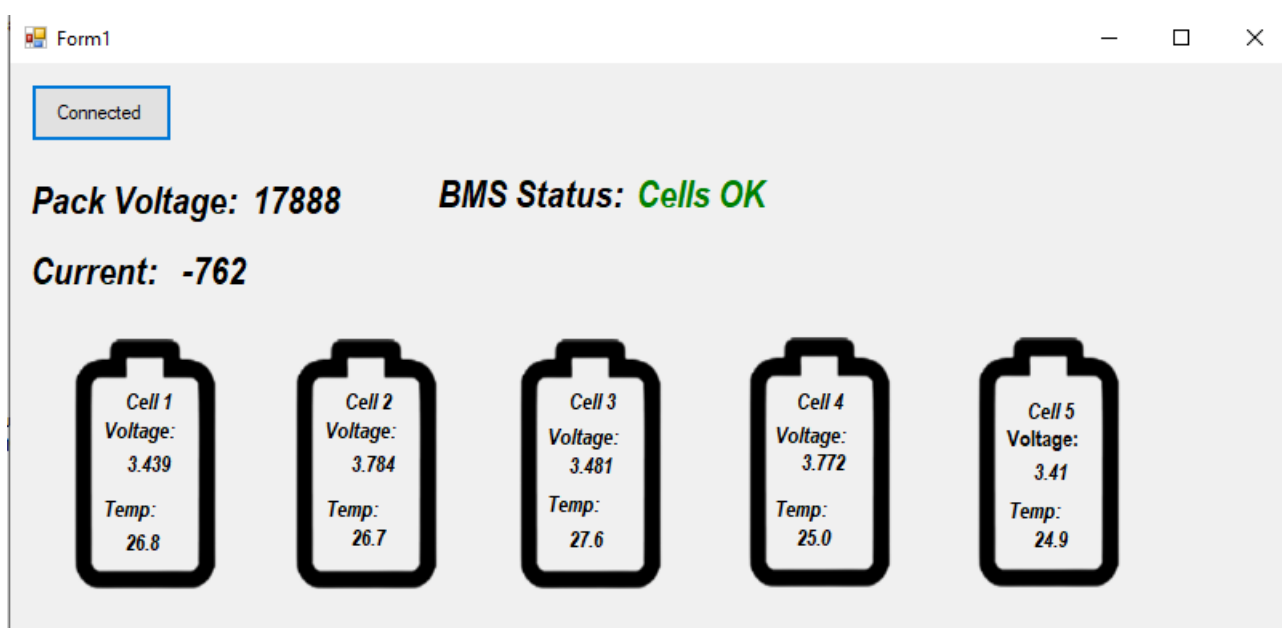




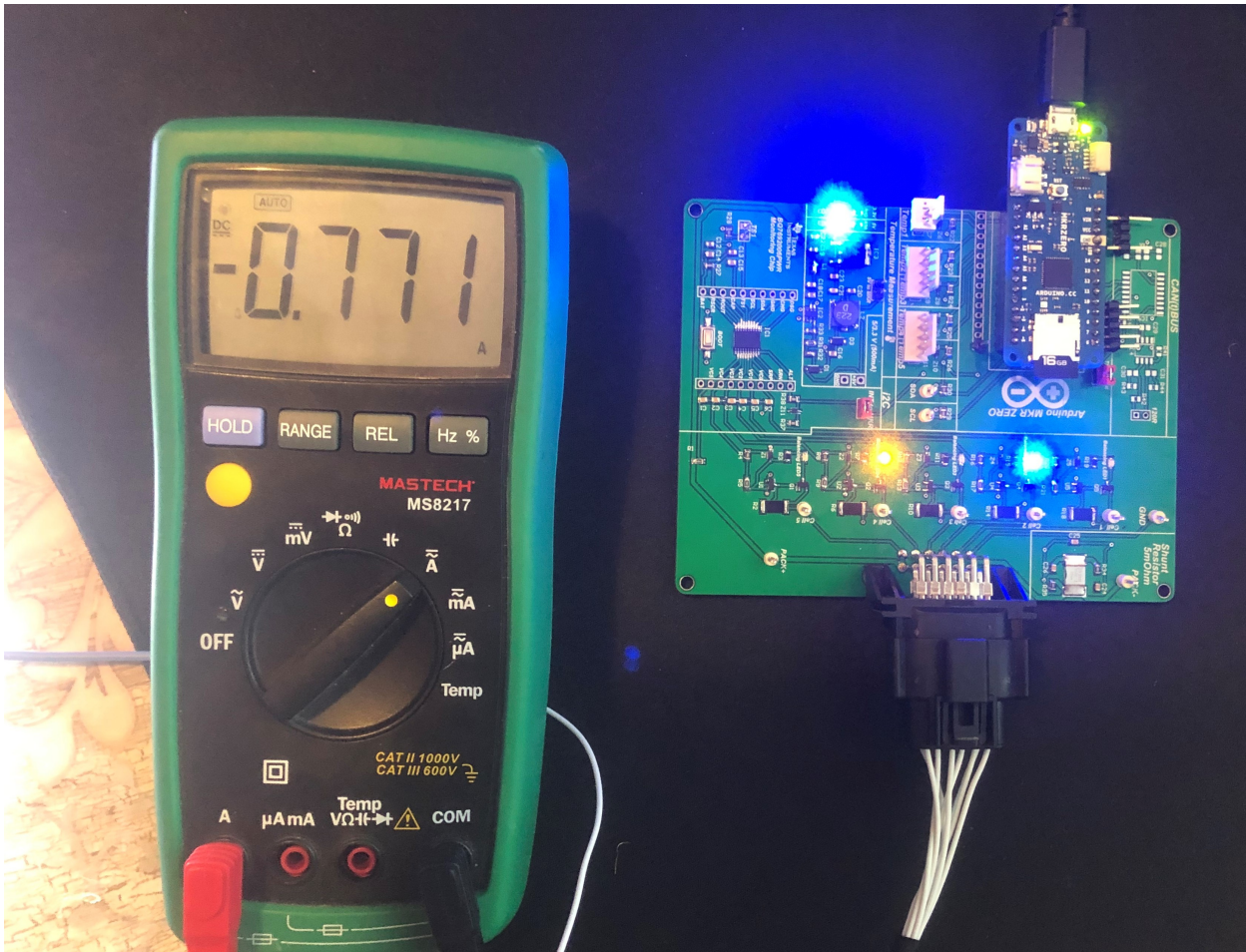
Σχήμα 6.7: Επαλήθευση της συνολικής τάσης με πολύμετρο.

## 6.2 Επαλήθευση μέτρησης ρεύματος

Σημαντική λειτουργία του συστήματος είναι η μέτρηση του συνολικού ρεύματος που διαρρέεται από και προς το πακέτο μπαταριών. Για την μέτρηση ρεύματος συνδέσαμε σε σειρά με το πακέτο μπαταριών φορτίο για να εξακριβώσουμε την μέτρηση ρεύματος, στην συγκεκριμένη περίπτωση το φορτίο που συνδέσαμε είναι μια λεντοταινία. Στο σχήμα 6.8 απεικονίζεται το ρεύμα το οποίο διαρρέεται προς την λεντοταινία και η αρνητική τιμή του υποδηλώνει την φορά του ρεύματος. Παρακάτω στο σχήμα 6.9 φαίνεται το πολύμετρο το οποίο έχει συνδεθεί σε σειρά με το φορτίο έτσι ώστε να επαληθεύσουμε ότι τα δεδομένα που επιστρέφονται από το σύστημα μας είναι σωστά.



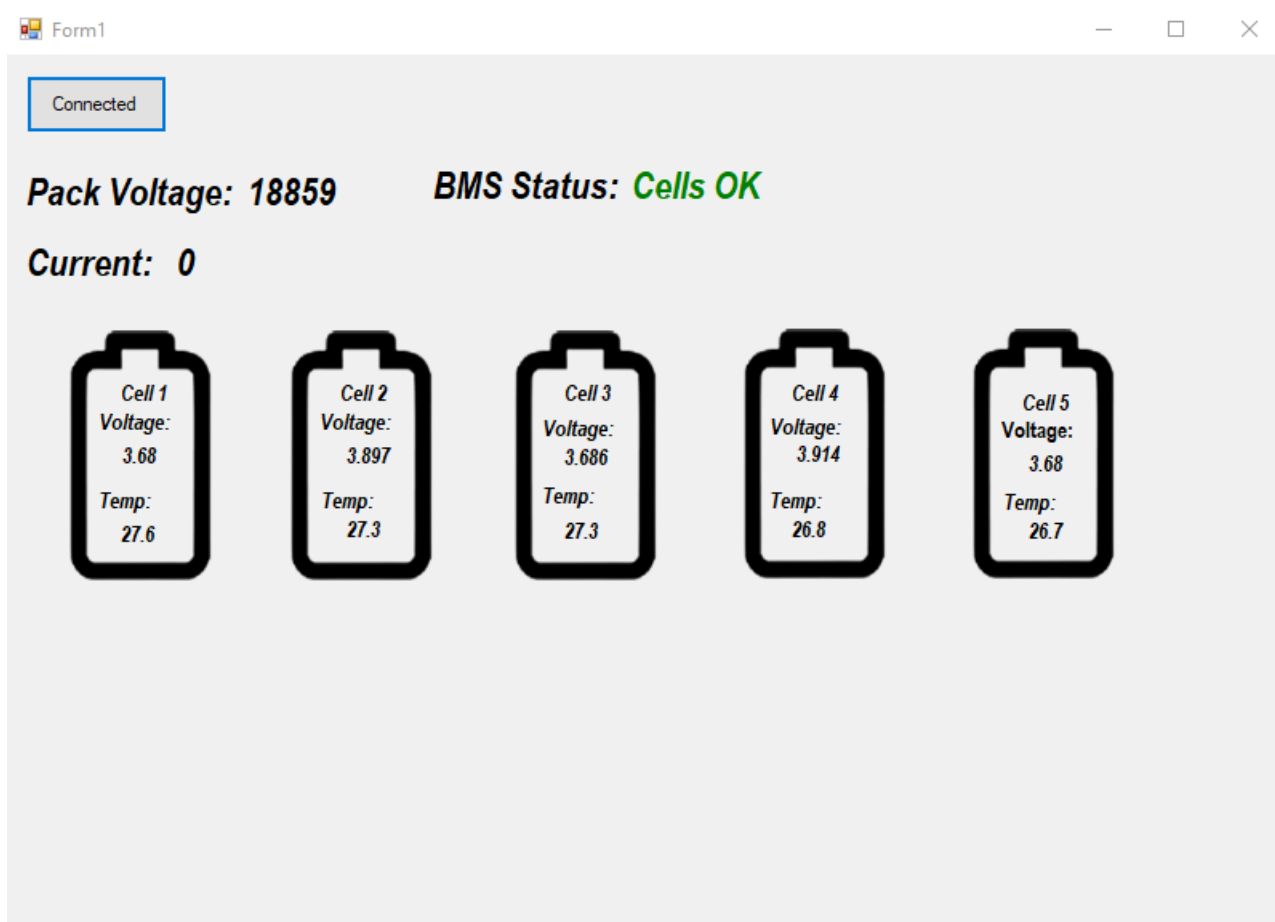
Σχήμα 6.8: Παρακολούθηση ρεύματος.



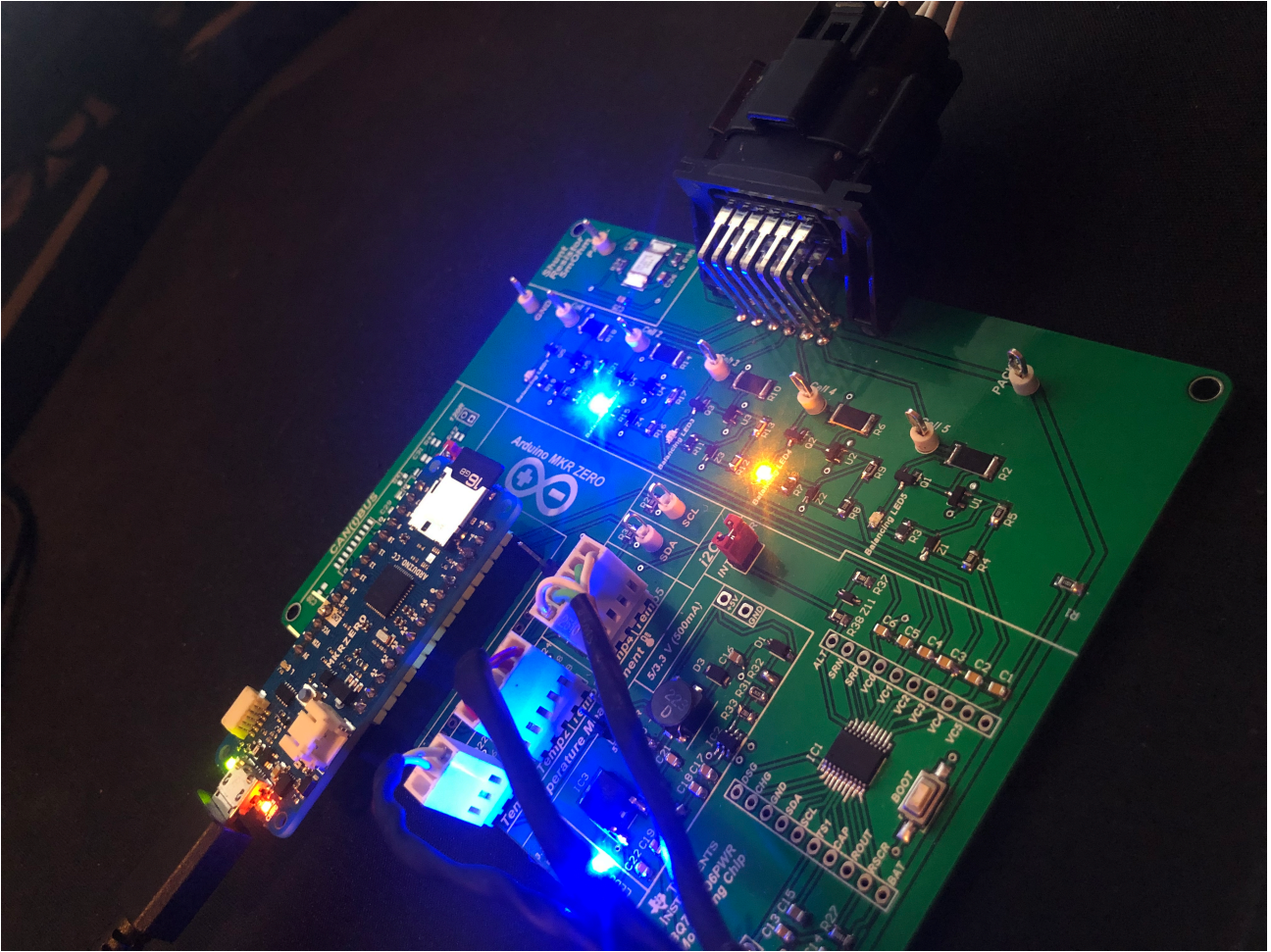
Σχήμα 6.9: Επαλήθευση μέτρησης ρεύματος.

## 6.3 Επαλήθευση εξισορρόπησης τάσης

Ακόμα μία βασική λειτουργία που πρέπει να αναφερθεί είναι η εξισορρόπηση της τάσης των κελιών. Για τον λόγο αυτό τα 2 κελιά που τοποθετήθηκαν στην συστοιχία είχαν μεγαλύτερη τάση από τα υπόλοιπα 3 κελιά. Όπως φαίνεται στο πρώτο σχήμα 6.10 οι τάσεις των κελιών 2 και 4 είναι 3.897V και 3.914V αντίστοιχα. Το σύστημα ανιχνεύει μέσω του αλγορίθμου τα κελιά με υψηλότερη τάση και ενεργοποιεί διακόπτες με τους οποίους η περίσσεια ενέργεια καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ότι οι ενδείξεις(LED) των κελιών 2 και 4 που βρίσκονται πάνω στην πλακέτα είναι ενεργοποιημένες το οποίο υποδεικνύει ότι στα συγκεκριμένα πραγματοποιείται εξισορρόπηση τάσης.



Σχήμα 6.10: Τάσεις πακέτου μπαταριών



Σχήμα 6.11: Εξισορρόπηση κελιών 2 και 4.

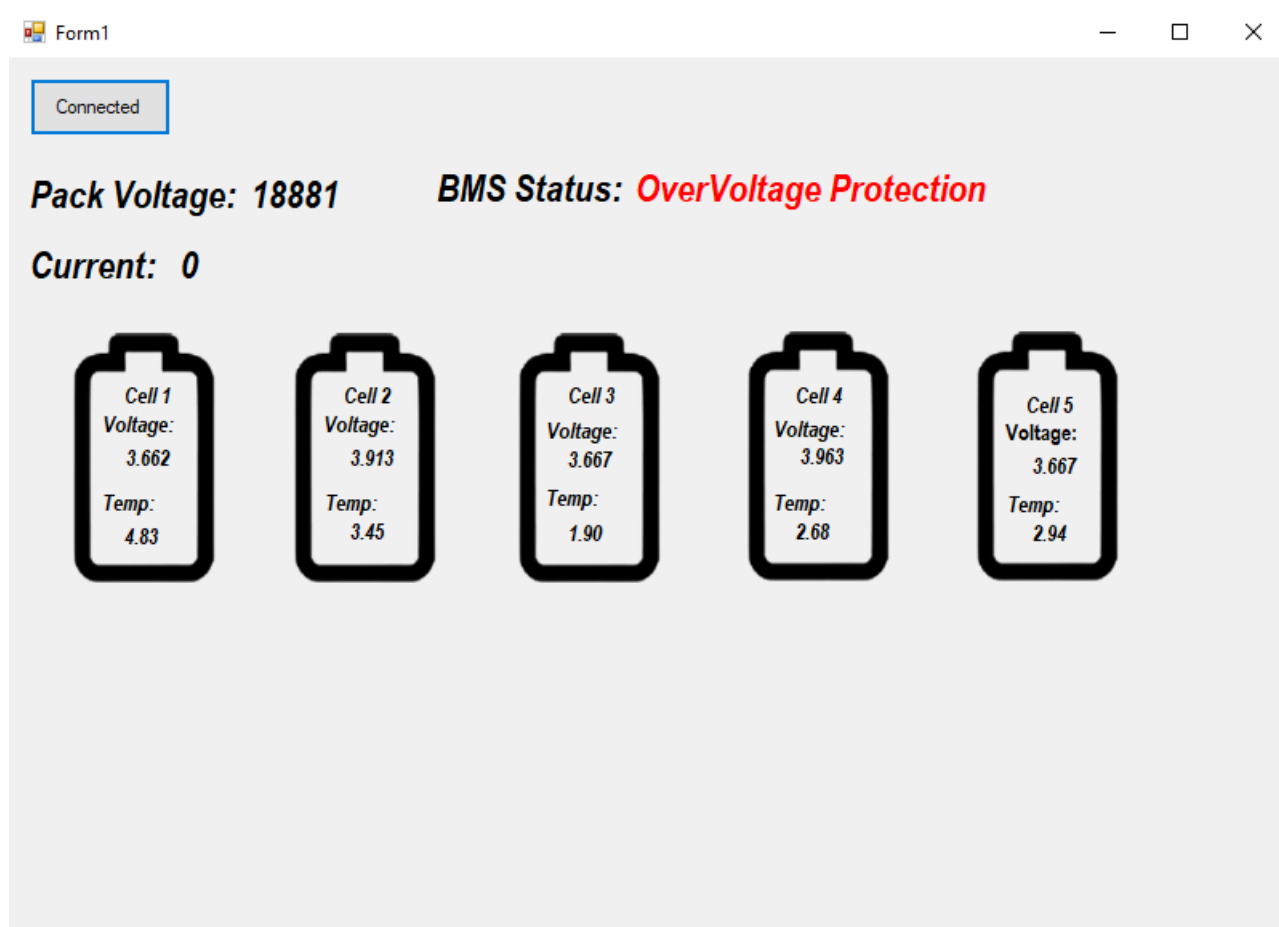
## 6.4 Σφάλματα

Η βασικότερη λειτουργία του συστήματος είναι η αποτροπή της εκτός ορίων λειτουργίας των κελιών. Για τον λόγο αυτό στον κώδικα δηλώνουμε τα όρια στα οποία θέλουμε να λειτουργούν τα κελιά. Το σύστημα, αν τα κελιά βρίσκονται στα φυσιολογικά όρια λειτουργίας, εμφανίζει στην διεπαφή χρήστη χαρακτηριστικό μήνυμα με πράσινα γράμματα το οποίο υποδεικνύει την καλή λειτουργία των κελιών (Cells OK). Για κάθε περίπτωση από τις παρακάτω το σύστημα εμφανίζει με κόκκινα γράμματα το σφάλμα που έχει προκύψει.

- Προστασία από υπόταση.
- Προστασία από υπέρταση.
- Προστασία από υψηλό ρεύμα.
- Προστασία από υπερβολική θερμοκρασία.

Για την εξακρίβωση της συγκεκριμένης λειτουργίας του συστήματος ορίστηκε στον κώδικα το κατάλληλο όριο έτσι ώστε να εξετάσουμε την λειτουργικότητά του. Για παράδειγμα ορίσαμε ως όριο προστασίας από υπέρταση τα 3.5 Volt, διότι η μικρότερη τιμή κελιού που υπάρχει στο πακέτο είναι τα 3.662 Volt. Το σύστημα πρέπει να επιστρέφει στο χρήστη την κατάσταση του συστήματος εκείνη την στιγμή, στην συγκεκριμένη περίπτωση στο πεδίο της κατάστασης

υπάρχει το μήνυμα OverVoltage Protection. Αντίστοιχα το σύστημα μπορεί να αναγνωρίσει και να επιστρέψει στο χρήστη την κατάσταση λειτουργίας για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις που αφορούν την προστασία των μπαταριών.



Σχήμα 6.12: Εξακριβωση λειτουργίας προστασίας από υπέρταση.

# Κεφάλαιο 7

## Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη

### 7.1 Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας , στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών ενέργειας με σκοπό την μελλοντική χρήση σε όχημα formula student. Αρχικά έγινε παρουσίαση σχετικά με την ιστορία του διαγωνισμού , αλλά και την αρχιτεκτονική των οχημάτων όσον αφορά τα ηλεκτρονικά συστήματα και τα συστήματα ασφαλείας. Παρουσιάστηκαν τα δομικά στοιχεία , χημικές τεχνολογίες , αλλά και τρόποι κατασκευής κελιών. Επίσης αναλύθηκαν οι πιθανές τεχνολογίες μπαταριών οι οποίες είναι κατάλληλες για χρήση σε ηλεκτρικό όχημα. Στην συνέχεια παρουσιάστηκε η χρησιμότητα του συστήματος διαχείρισης των μπαταριών, οι διάφορες τεχνολογίες σχετικά με την μέτρηση ρεύματος και θερμοκρασίας αλλά και μέθοδοι εξισορρόπησης τάσης των κελιών. Ακόμη έγινε μία σύντομη περιγραφή μοντέλου προσομοίωσης του κυκλώματος εξισορρόπησης τάσης. Παρουσιάστηκε αναλυτικά το σύστημα, αναλύθηκαν όλα τα κυκλώματα αλλά και οι αλγόριθμοι που είναι αναγκαίοι για την λειτουργικότητα αυτού. Τέλος έγινε παρουσίαση των μετρήσεων που καταγράφηκαν κατά τις εργαστηριακές δοκιμές και ακολούθησαν οι σχετικές παρατηρήσεις και σχολιασμοί.

### 7.2 Προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη

Στην συνέχεια, ακολουθούν προτάσεις για την βελτίωση του συστήματος διαχείρισης μπαταριών.

1. Η μέθοδος εξισορρόπησης που ακολουθήθηκε είναι παθητική εξισορρόπηση. Αυτό που προτείνεται είναι η μελέτη και η ανάπτυξη ενός ενεργητικού συστήματος εξισορρόπησης τάσης, μειώνοντας έτσι τις απώλειες κατά την εξισορρόπηση.
2. Ακόμη μία πρόταση, είναι η σχεδίαση του συστήματος για μεγαλύτερα συστήματα μπαταρίας, καθώς στην ίδια οικογένεια ολοκληρωμένων παρέχεται παρακολούθηση έως και 15 κελιών σε σειρά.
3. Λόγω της χαμηλής τάσης του συστήματος που υλοποιήσαμε δεν ήταν αναγκαία η χρήση γαλβανικής απομόνωσης με τον μικροελεγκτή , επομένως για συστήματα με μεγαλύτερη τάση είναι αναγκαία η απομόνωση με τα υπόλοιπα συστήματα.

4. Τέλος μία ακόμα πρόταση είναι η αντικατάσταση των καλωδιώσεων από ασύρματες επικοινωνίες όπως Bluetooth ή άλλα πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας.

# Βιβλιογραφία

- [1] Wikipedia(2018),”Formula SAE”, [online] Available at :  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Formula\\_SAE](https://en.wikipedia.org/wiki/Formula_SAE)
- [2] Formula Student Germany Rules 2022 , [online] Available at :  
<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [3] Linden and T. B. Reddy, Handbook of Batteries, 3rd Edition, McGraw - Hill, 1995.
- [4] Yuping Wu , Lithium - Ion Batteries: Fundamentals and Applications,CRC Press , 2015 , Available at:  
<https://www.perlego.com/book/1603262/lithiumion-batteries-fundamentals-and-applications-pdf>
- [5] Johnson Matthey, Our Guide to Batteries,2015 , Available at :  
<http://www.altomelbilen.dk/presentationer/Guide%20To%20Batteries.pdf>
- [6] Budde-Meiwes, H., Drillkens, J., Lunz, B., Muennix, J., Rothgang, S., Kowal, J., & Sauer, D. U. (2013). A review of current automotive battery technology and future prospects. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 227(5), 761–776, Available at :  
<https://doi.org/10.1177/0954407013485567>
- [7] Bruno Scrosati, Jürgen Garche, Werner Tillmetz , 2015 , Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles ,2015 , Available at : <https://www.sciencedirect.com/book/9781782423775/advances-in-battery-technologies-for-electric-vehicles>
- [8] A. Khaligh and Z. Li, ”Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art,” in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no. 6, pp. 2806-2814, July 2010, doi: 10.1109/TVT.2010.2047877.
- [9] Gregory Plett, Battery Management Systems, Volume II: Equivalent-Circuit Methods , Artech, 2015.
- [10] J. Jiang and C. Zhang, Fundamentals and Applications of Lithium-ion Batteries in Electric Drive Vehicles, John Wiley & Sons, 2015.
- [11] Lelie, Markus et al. “Battery Management System Hardware Concepts: An Overview.” Applied Sciences 8 ,2018.



- 
- [12] M. Daowd, N. Omar, P. Van Den Bossche and J. Van Mierlo, "Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation," 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011.
- [13] Douglass, J. D.. "Battery management for high-power battery stacks." (2012).
- [14] Wikipedia , Hall-effect sensor , 2021 ,[online] Available at :  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Hall\\_effect\\_sensor](https://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect_sensor)
- [15] Wikipedia , Current sensing , 2021 ,[online] Available at :  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Current\\_sensing](https://en.wikipedia.org/wiki/Current_sensing)
- [16] Wikipedia , CAN bus , 2022 , [online] Available at :  
[https://en.wikipedia.org/wiki/CAN\\_bus](https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus)
- [17] Thomas Bruen, James Marco, Miguel Gama, Model Based Design of Balancing Systems for Electric Vehicle Battery Packs, 2015.
- [18] Changhao Piao, Zhaoguang Wang, Ju Cao, Wei Zhang, Sheng Lu, "Lithium-Ion Battery Cell-Balancing Algorithm for Battery Management System Based on Real-Time Outlier Detection", Mathematical Problems in Engineering, 2015.
- [19] J. Qi and D. Dah-Chuan Lu, "Review of battery cell balancing techniques," 2014.

# Παράρτημα Α΄

## Ακρωνυμιά και συντομογραφίες

**DC** Direct Current

**AC** Alternating Current

**HV** High Voltage

**FW** Firmware

**HW** Hardware

**SW** Software

**ADC** Analog to Digital Converter

**PCB** Printed Circuit Board

**EMI** Electro-Magnetic Interference

**IC** Integrated circuit

**NTC** Negative temperature coefficient

**BMU** Battery measurement unit

**BCU** Battery control unit

**SoC** Syate of charge

**SoH** State of health

**PWM** Pulse Width Modulation

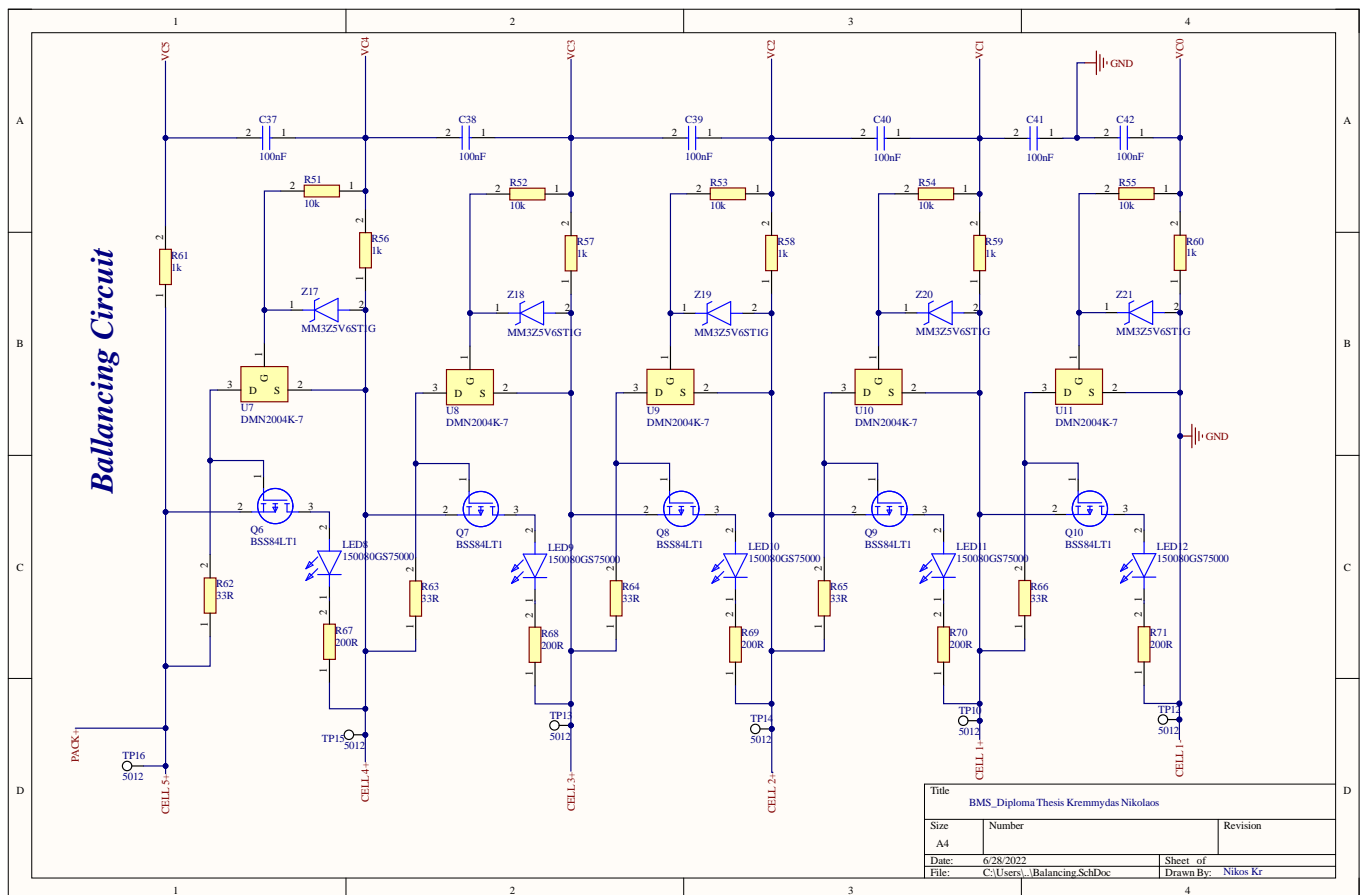
**GUI** Graphic user interface

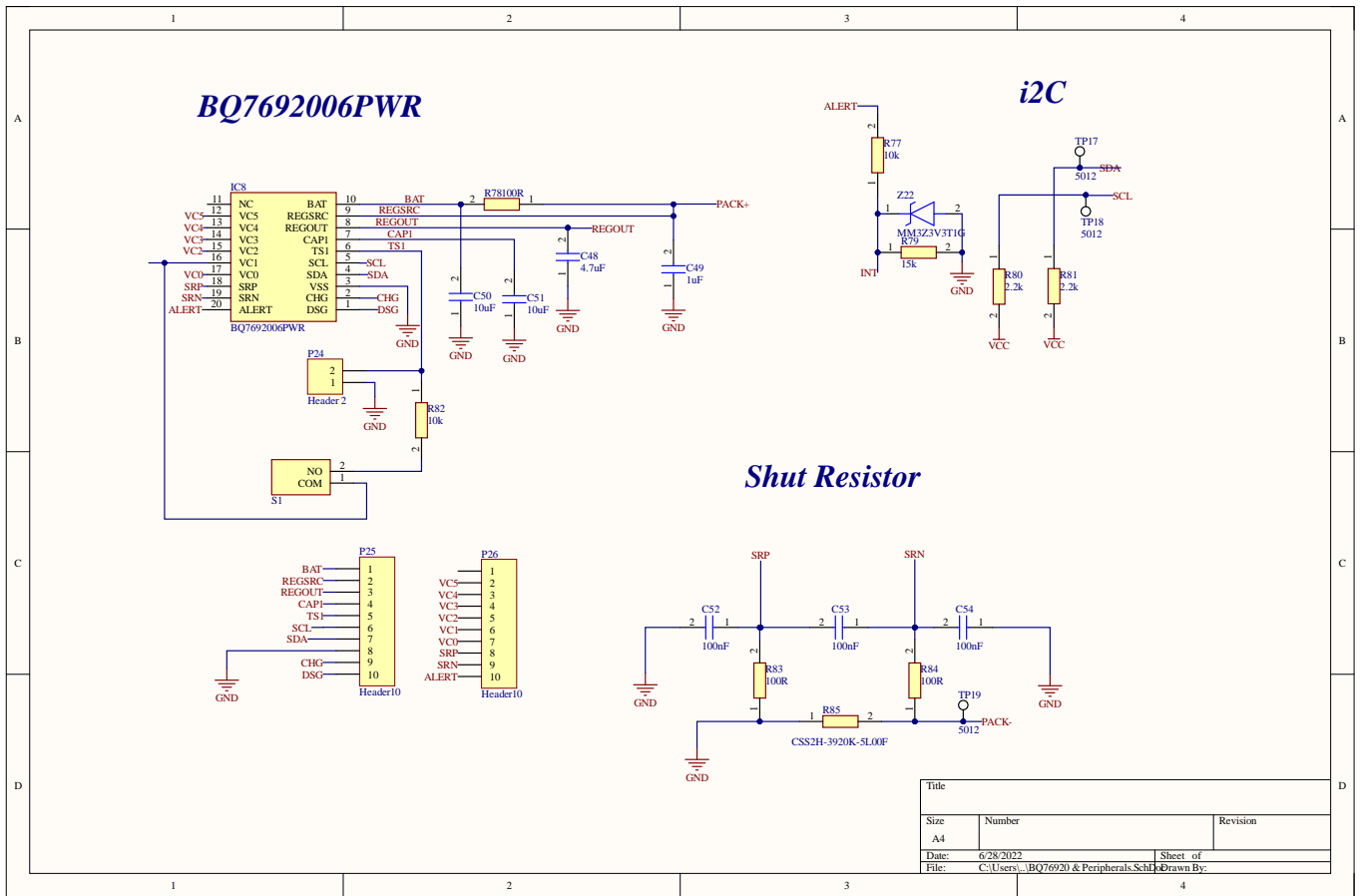
**CAN** Controller Area Network

**ICE** Individual cell equalizers

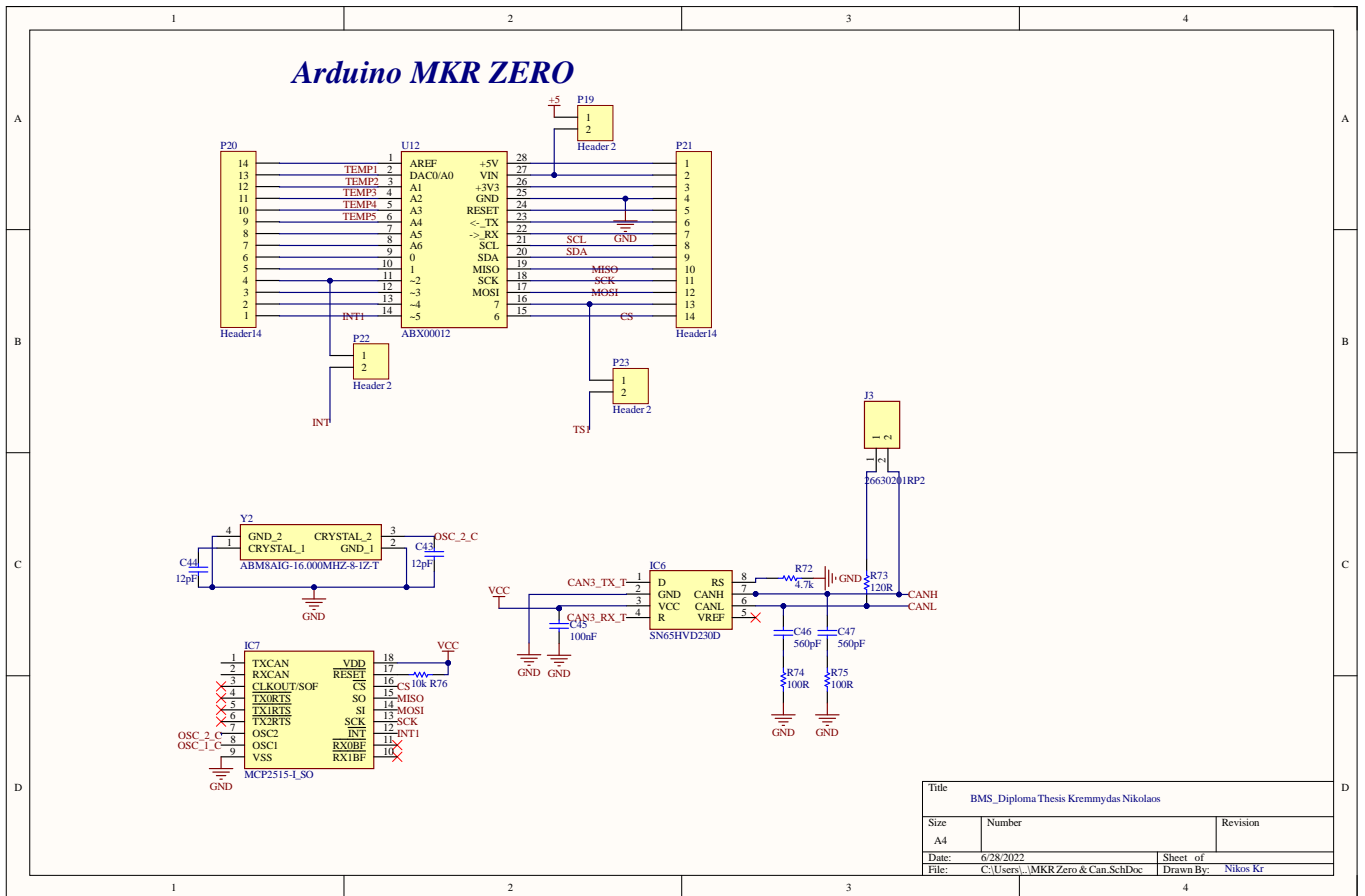
# Παράρτημα Β'

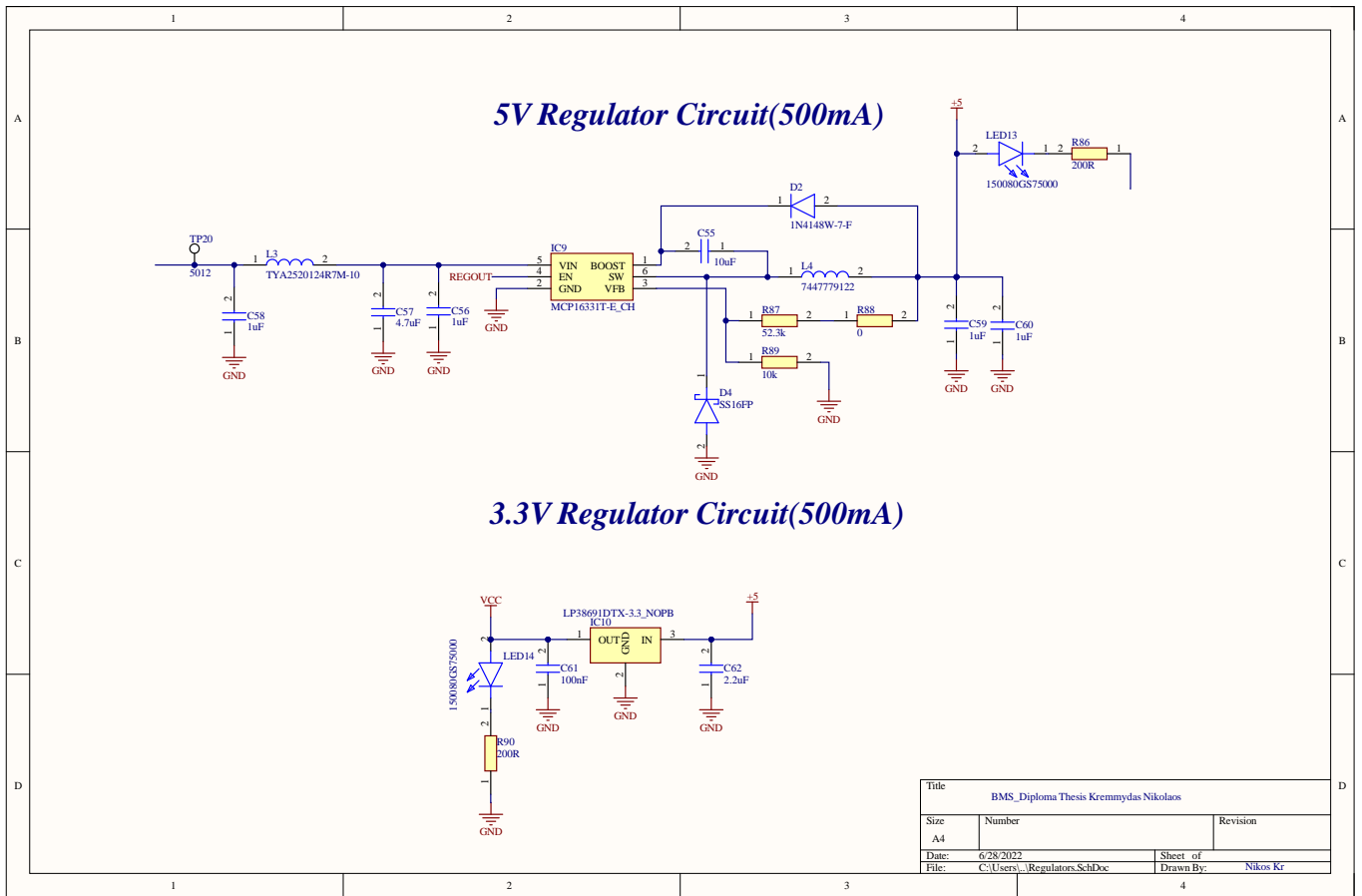
## Σχέδια Κυκλωμάτων και το τυπωμένο κύκλωμα

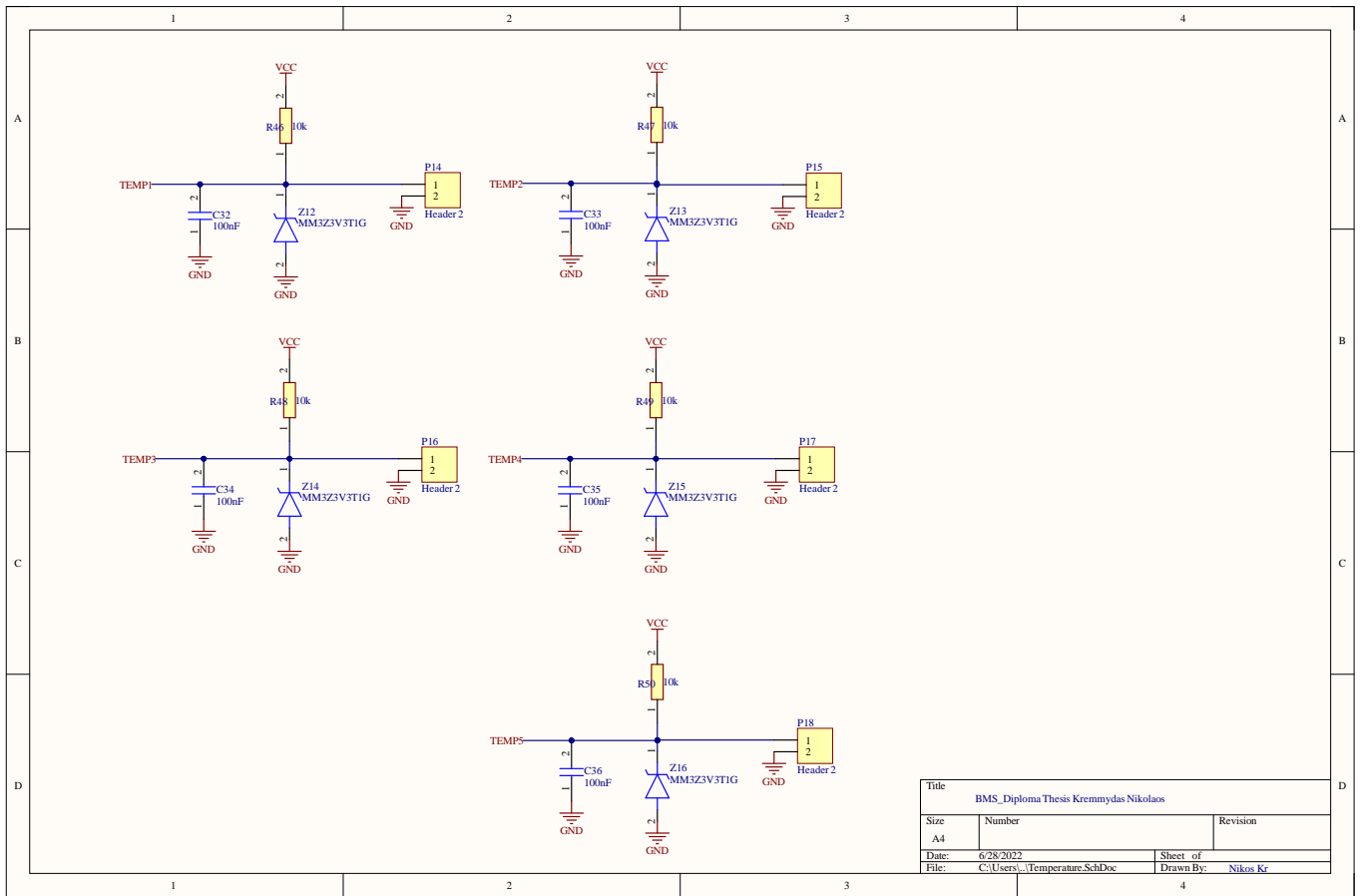


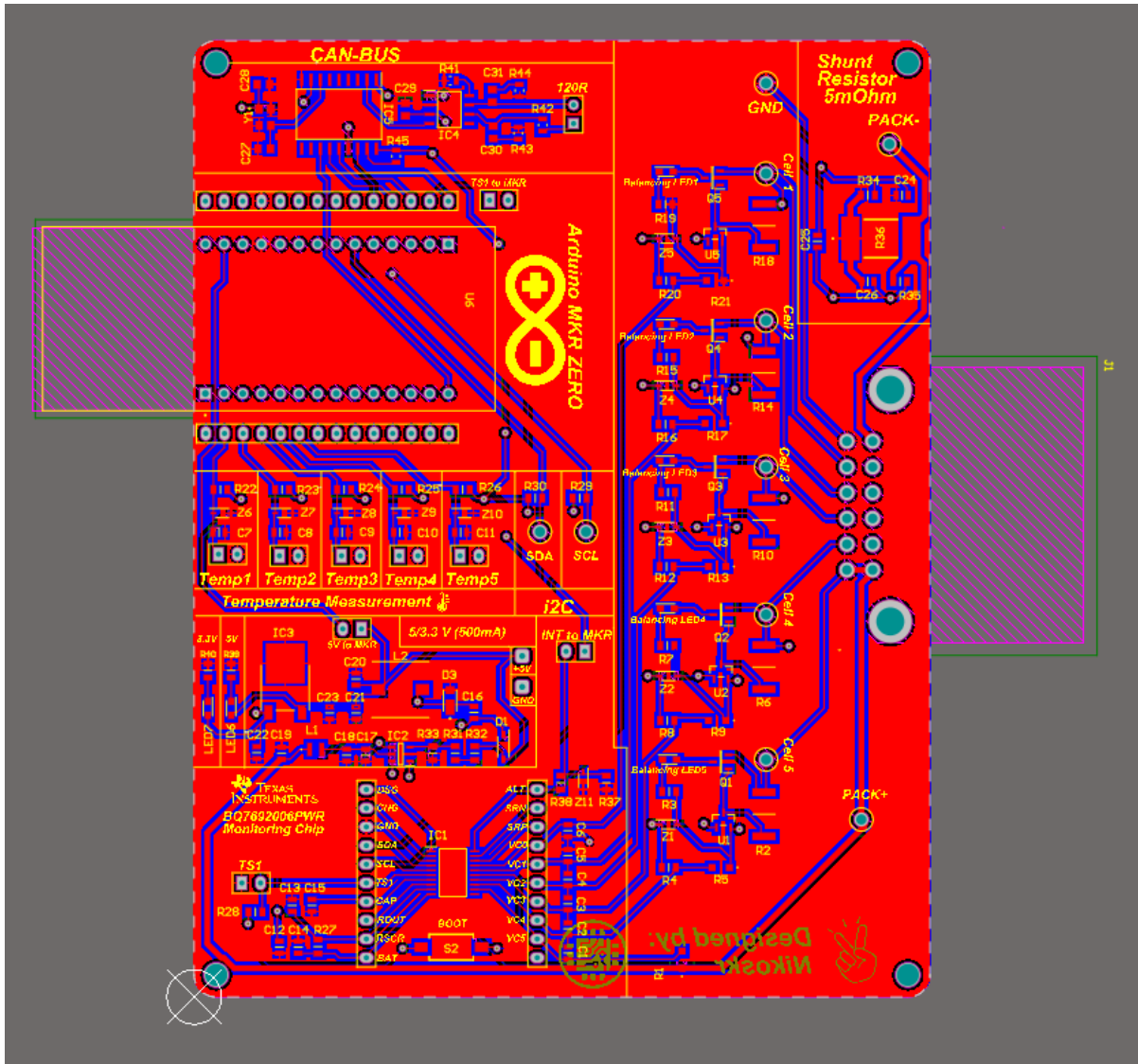


Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	6/28/2022	Sheet of
File:	C:\Users\...BQ76920 & Peripherals.Sch	Drawn By:

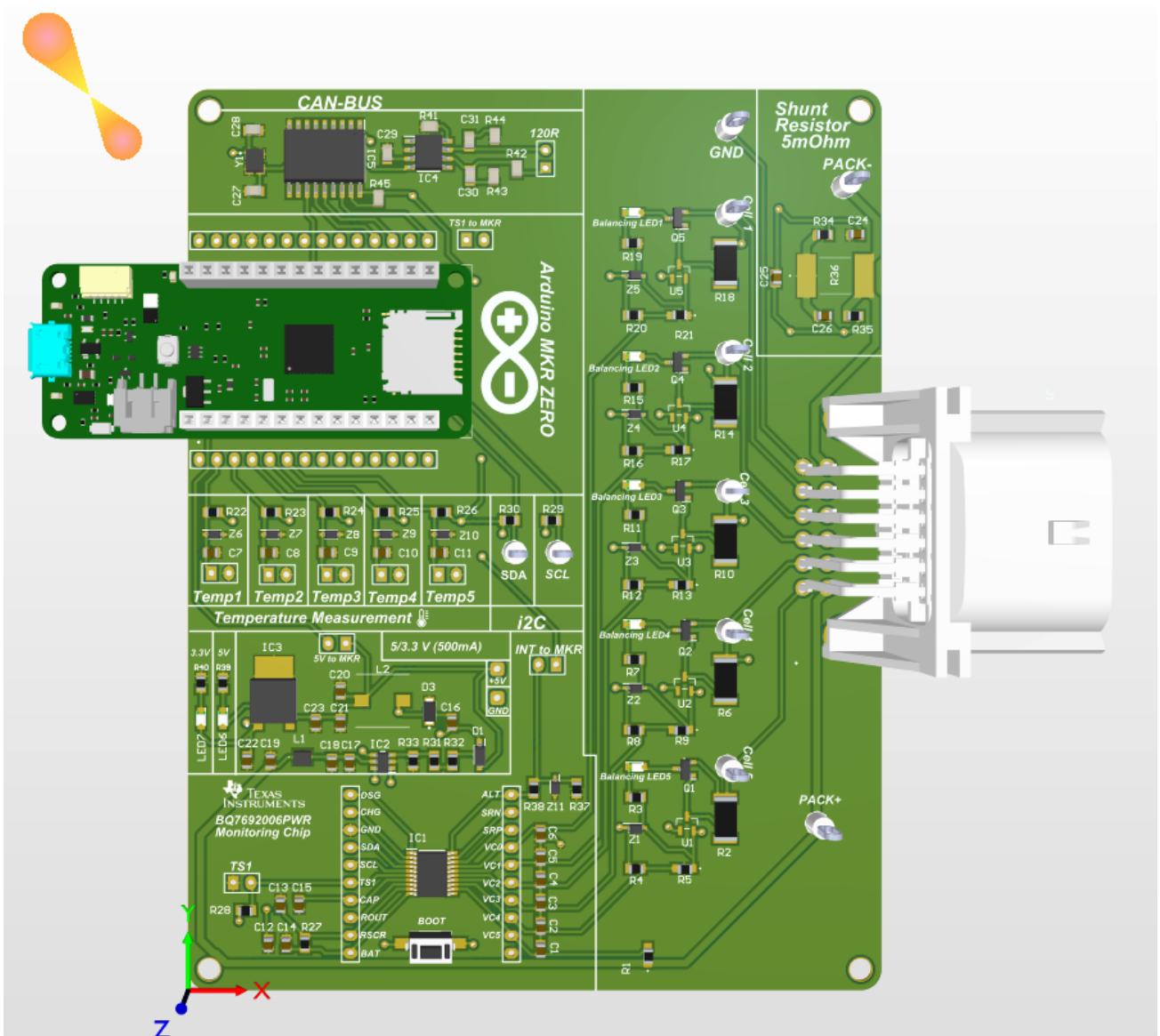








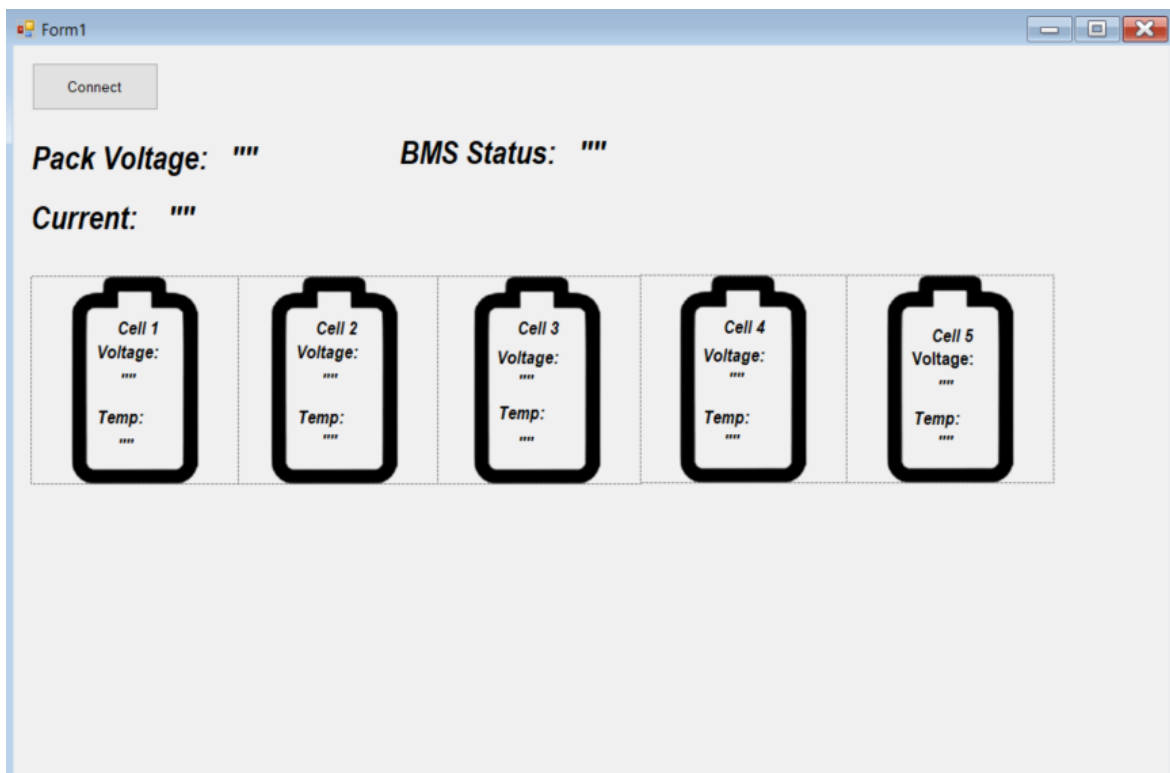






# Παράρτημα Γ'

## Κώδικας του Software



```
1 Imports System.Threading
2 Public Class Form1
3     Dim detection_character() As Byte = {}
4     Dim response_buffer(60) As Byte
5     Dim expected_response As Byte = 36
6
7     Dim Arduino_Port As String = ""
8
9     Dim Cell_1_Voltage_Inquiry() As Byte = {1}
10    Dim Cell_1_Temperature_Inquiry() As Byte = {6}
11
12    Dim Cell_2_Voltage_Inquiry() As Byte = {2}
13    Dim Cell_2_Temperature_Inquiry() As Byte = {7}
14
15    Dim Cell_3_Voltage_Inquiry() As Byte = {3}
16    Dim Cell_3_Temperature_Inquiry() As Byte = {8}
17
18    Dim Cell_4_Voltage_Inquiry() As Byte = {4}
19    Dim Cell_4_Temperature_Inquiry() As Byte = {9}
20
21    Dim Cell_5_Voltage_Inquiry() As Byte = {5}
22    Dim Cell_5_Temperature_Inquiry() As Byte = {10}
23
24    Dim Pack_Voltage_Inquiry() As Byte = {11}
25    Dim Current_Inquiry() As Byte = {12}
26
27    Dim BMS_Status_Inquiry() As Byte = {13}
28
29    Dim is_gui_connected As Boolean = False
30
31
32
33    Dim voltage_buffer(60) As Byte
34    Dim temperature_buffer(60) As Byte
35    Dim total_current_buffer(60) As Byte
36    Dim total_voltage_buffer(60) As Byte
37    Dim status_buffer(60) As Byte
38
39 Private Sub Button1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles autoconnect_button.Click
40     If (is_gui_connected = False) Then
41         For Each sp As String In My.Computer.Ports.SerialPortNames
42             Try
43                 BMS_Serial_Port.PortName = sp
44                 BMS_Serial_Port.BaudRate = 9600
45                 BMS_Serial_Port.WriteTimeout = 100
46                 BMS_Serial_Port.ReadTimeout = 160
47                 BMS_Serial_Port.Open()
48                 BMS_Serial_Port.DiscardInBuffer()
49                 BMS_Serial_Port.DiscardOutBuffer()
50                 BMS_Serial_Port.Write(detection_character, 0, detection_character.Length)
51                 response_buffer(0) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
52                 If (response_buffer(0) = expected_response) Then
53                     is_gui_connected = True
54                     autoconnect_button.Text = "Connected"
55                     V_C_1_T.Enabled = True
56                     V_C_2_T.Enabled = True
```

```
57         V_C_T_3.Enabled = True
58         V_C_T_4.Enabled = True
59         V_C_T_5.Enabled = True
60         T_C_1_T.Enabled = True
61         T_C_2_T.Enabled = True
62         T_C_3_T.Enabled = True
63         T_C_4_T.Enabled = True
64         T_C_5_T.Enabled = True
65         T_V_T.Enabled = True
66         T_C.Enabled = True
67         BMS_Status.Enabled = True
68
69     Else
70         BMS_Serial_Port.Close()
71         Continue For
72     End If
73 Catch ex As Exception
74     If (BMS_Serial_Port.IsOpen) Then
75         BMS_Serial_Port.Close()
76     End If
77 End Try
78 Next
79 Else
80     is_gui_connected = False
81     autoconnect_button.Text = "Disconnected"
82     V_C_1_T.Enabled = False
83     V_C_2_T.Enabled = False
84     V_C_T_3.Enabled = False
85     V_C_T_4.Enabled = False
86     V_C_T_5.Enabled = False
87     T_C_1_T.Enabled = False
88     T_C_2_T.Enabled = False
89     T_C_3_T.Enabled = False
90     T_C_4_T.Enabled = False
91     T_C_5_T.Enabled = False
92     T_V_T.Enabled = False
93     BMS_Serial_Port.Close()
94     T_C.Enabled = False
95     BMS_Status.Enabled = False
96 End If
97
98
99 End Sub
100
101 0 references
102 Private Sub Timer1_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles V_C_1_T.Tick
103     Clear_Serial_Buffer()
104     BMS_Serial_Port.Write(Cell_1_Voltage_Inquiry, 0, Cell_1_Voltage_Inquiry.Length)
105     For i = 0 To 5
106         Try
107             voltage_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
108         Catch ex As Exception
109     End Try
```

```
110     Next
111     Cell_1_Voltage.Text = ReturnVoltage(voltage_buffer)
112     Clear_Serial_Buffer()
113 End Sub
114
115 0 references
116 Private Sub Timer2_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles V_C_2_T.Tick
117     Clear_Serial_Buffer()
118     BMS_Serial_Port.Write(Cell_2_Voltage_Inquiry, 0, Cell_2_Voltage_Inquiry.Length)
119     For i = 0 To 5
120         Try
121             voltage_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
122         Catch ex As Exception
123         End Try
124     Next
125     Cell_2_Voltage.Text = ReturnVoltage(voltage_buffer)
126     Clear_Serial_Buffer()
127 End Sub
128
129 0 references
130 Private Sub Timer3_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles V_C_T_3.Tick
131     Clear_Serial_Buffer()
132     BMS_Serial_Port.Write(Cell_3_Voltage_Inquiry, 0, Cell_3_Voltage_Inquiry.Length)
133     For i = 0 To 5
134         Try
135             voltage_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
136         Catch ex As Exception
137         End Try
138     Next
139     Cell_3_Voltage.Text = ReturnVoltage(voltage_buffer)
140     Clear_Serial_Buffer()
141 End Sub
142
143 0 references
144 Private Sub Timer4_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles V_C_T_4.Tick
145     Clear_Serial_Buffer()
146     BMS_Serial_Port.Write(Cell_4_Voltage_Inquiry, 0, Cell_4_Voltage_Inquiry.Length)
147     For i = 0 To 5
148         Try
149             voltage_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
150         Catch ex As Exception
151         End Try
152     Next
153     Cell_4_Voltage.Text = ReturnVoltage(voltage_buffer)
154     Clear_Serial_Buffer()
155 End Sub
156
157 0 references
158 Private Sub Timer5_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles V_C_T_5.Tick
159     Clear_Serial_Buffer()
160     BMS_Serial_Port.Write(Cell_5_Voltage_Inquiry, 0, Cell_5_Voltage_Inquiry.Length)
```

```
158 BMS_Serial_Port.Write(Cell_5_Voltage_Inquiry, 0, Cell_5_Voltage_Inquiry.Length)
159 For i = 0 To 5
160     Try
161         voltage_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
162     Catch ex As Exception
163     End Try
164
165     Next
166     Cell_5_Voltage.Text = ReturnVoltage(voltage_buffer)
167     Clear_Serial_Buffer()
168 End Sub
169
170 5 references
171 Private Function ReturnVoltage(ByVal bytes() As Byte) As String
172     Dim input As String
173     Dim input_array() As String
174     input = System.Text.Encoding.ASCII.GetString(bytes)
175     Try
176         input_array = input.Split(" ")
177         Return Cdbl(input_array(0) / 1000)
178     Catch ex As Exception
179     End Try
180 End Function
181
182 26 references
183 Private Sub Clear_Serial_Buffer()
184     BMS_Serial_Port.DiscardInBuffer()
185     BMS_Serial_Port.DiscardOutBuffer()
186 End Sub
187
188 0 references
189 Private Sub Button1_Click_1(sender As Object, e As EventArgs)
190     T_C_1_T.Enabled = False
191     V_C_1_T.Enabled = False
192     T_C_2_T.Enabled = False
193     V_C_2_T.Enabled = False
194     T_C_3_T.Enabled = False
195     V_C_3_T.Enabled = False
196     T_C_4_T.Enabled = False
197     V_C_4_T.Enabled = False
198     T_C_5_T.Enabled = False
199     V_C_5_T.Enabled = False
200 End Sub
201
202 0 references
203 Private Sub Button2_Click(sender As Object, e As EventArgs)
204     T_C_1_T.Enabled = True
205     V_C_1_T.Enabled = True
206     T_C_2_T.Enabled = True
207     V_C_2_T.Enabled = True
208     T_C_3_T.Enabled = True
209     V_C_3_T.Enabled = True
210     T_C_4_T.Enabled = True
211     V_C_4_T.Enabled = True
212     T_C_5_T.Enabled = True
213     V_C_5_T.Enabled = True
214 End Sub
```

```
208 End Sub
209 Private Function ReturnTemp(ByVal bytes() As Byte) As String
210     Dim Input As String
211     Dim input_array() As String
212     Input = System.Text.Encoding.ASCII.GetString(bytes)
213     Try
214         input_array = Input.Split(" ")
215         Return input_array(0)
216     Catch ex As Exception
217     End Try
218 End Function
219
220 Private Sub T_C_1_T_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles T_C_1_T.Tick
221     Clear_Serial_Buffer()
222     BMS_Serial_Port.Write(Cell_1_Temperature_Inquiry, 0, Cell_1_Temperature_Inquiry.Length)
223     For i = 0 To 3
224         Try
225             temperature_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
226         Catch ex As Exception
227         End Try
228     Next
229     Cell_1_temp.Text = ReturnTemp(temperature_buffer)
230     Clear_Serial_Buffer()
231 End Sub
232
233 Private Sub T_C_2_T_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles T_C_2_T.Tick
234     Clear_Serial_Buffer()
235     BMS_Serial_Port.Write(Cell_2_Temperature_Inquiry, 0, Cell_2_Temperature_Inquiry.Length)
236     For i = 0 To 3
237         Try
238             temperature_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
239         Catch ex As Exception
240         End Try
241     Next
242     Cell_2_temp.Text = ReturnTemp(temperature_buffer)
243     Clear_Serial_Buffer()
244 End Sub
245
246 Private Sub T_C_3_T_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles T_C_3_T.Tick
247     Clear_Serial_Buffer()
248     BMS_Serial_Port.Write(Cell_3_Temperature_Inquiry, 0, Cell_3_Temperature_Inquiry.Length)
249     For i = 0 To 3
250         Try
251             temperature_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
252         Catch ex As Exception
253         End Try
254     Next
255     Cell_3_temp.Text = ReturnTemp(temperature_buffer)
256     Clear_Serial_Buffer()
257 End Sub
258
259
```



```
259     Clear_Serial_Buffer()
260 End Sub
261
262 0 references
263 Private Sub T_C_4_T_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles T_C_4_T.Tick
264     Clear_Serial_Buffer()
265     BMS_Serial_Port.Write(Cell_4_Temperature_Inquiry, 0, Cell_4_Temperature_Inquiry.Length)
266     For i = 0 To 3
267         Try
268             temperature_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
269         Catch ex As Exception
270         End Try
271     Next
272     Cell_4_temp.Text = ReturnTemp(temperature_buffer)
273     Clear_Serial_Buffer()
274 End Sub
275
276 0 references
277 Private Sub T_C_5_T_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles T_C_5_T.Tick
278     Clear_Serial_Buffer()
279     BMS_Serial_Port.Write(Cell_5_Temperature_Inquiry, 0, Cell_5_Temperature_Inquiry.Length)
280     For i = 0 To 3
281         Try
282             temperature_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
283         Catch ex As Exception
284         End Try
285     Next
286     Cell_5_temp.Text = ReturnTemp(temperature_buffer)
287     Clear_Serial_Buffer()
288 End Sub
289
290 0 references
291 Private Sub TextBox1_TextChanged(sender As Object, e As EventArgs)
292 End Sub
293
294 2 references
295 Private Function ReturnFull(ByVal bytes() As Byte) As String
296     Dim Input As String
297     Dim input_array() As String
298     Input = System.Text.Encoding.ASCII.GetString(bytes)
299     Return Input
300 End Function
301
302 0 references
303 Private Sub Timer10_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles T_V_T.Tick
304     Clear_Serial_Buffer()
305     BMS_Serial_Port.Write(Current_Inquiry, 0, Current_Inquiry.Length)
306     For i = 0 To 3
307         Try
308             total_current_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte()
309         Catch ex As Exception
310         End Try
311     Next
312     Total_Current.Text = ReturnFull(total_current_buffer)
```

```
310     Total_Current.Text = ReturnFull(total_current_buffer)
311     Clear_Serial_Buffer()
312 End Sub
313
314 0 references
315 Private Sub T_C_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles T_C.Tick
316     Clear_Serial_Buffer()
317     BMS_Serial_Port.Write(Pack_Voltage_Inquiry, 0, Pack_Voltage_Inquiry.Length)
318     For i = 0 To 4
319         Try
320             total_voltage_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte
321         Catch ex As Exception
322         End Try
323     Next
324     Pack_Voltage.Text = ReturnFull(total_voltage_buffer)
325     Clear_Serial_Buffer()
326 End Sub
327
328 0 references
329 Private Sub Label12_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles BMS_Status_Label.Click
330 End Sub
331
332 0 references
333 Private Sub BMS_Status_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles BMS_Status.Tick
334     Clear_Serial_Buffer()
335     Dim x As Integer
336
337     BMS_Serial_Port.Write(BMS_Status_Inquiry, 0, BMS_Status_Inquiry.Length)
338     For i = 0 To 4
339         Try
340             status_buffer(i) = BMS_Serial_Port.ReadByte
341         Catch ex As Exception
342         End Try
343     Next
344     Try
345         x = ReturnStatus(status_buffer)
346     Catch ex As Exception
347         x = 4
348     End Try
349
350     If (x = 0) Then
351         BMS_Status_Label.Text = "OverVoltage Protection"
352         BMS_Status_Label.ForeColor = Color.Red
353     ElseIf (x = 1) Then
354         BMS_Status_Label.Text = "UnderVoltage Protection"
355         BMS_Status_Label.ForeColor = Color.Red
356     ElseIf (x = 2) Then
357         BMS_Status_Label.Text = "OverCurrent Protection"
358         BMS_Status_Label.ForeColor = Color.Red
359     ElseIf (x = 3) Then
360         BMS_Status_Label.Text = "Cells OK"
361         BMS_Status_Label.ForeColor = Color.Green
```

```
361         BMS_Status_Label.ForeColor = Color.Green
362     Else
363         BMS_Status_Label.Text = "Response Problem"
364         BMS_Status_Label.ForeColor = Color.Red
365     End If
366     Clear_Serial_Buffer()
367 End Sub
368
369 1 reference
370 Private Function ReturnStatus(ByVal bytes() As Byte) As String
371     Dim Input As String
372     Dim input_array() As String
373     Input = System.Text.Encoding.ASCII.GetString(bytes)
374     Try
375         input_array = Input.Split(" ")
376         Return input_array(0)
377     Catch ex As Exception
378     End Try
379 End Function
380
381 0 references
382 Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
383     End Sub
384 End Class
385
```

Παράρτημα Δ΄

Κώδικας του Firmware

```

BMS §
#include <bq769x0.h> // Library for bq76920
#include <SPI.h>
#include <mcp2515.h>

#define BMS_ALERT_PIN 2 // interrupt INT0
#define BMS_BOOT_PIN 7 // TS1 input
#define BMS_I2C_ADDRESS 0x18 //BQ76920 Chip Address

struct can_frame canMsg;
MCP2515 mcp2515(5);

// metavlites gia to NTC
#define RT0 1500 // Ohm
#define B 3560 // K
#define VCC 3.3 //Supply voltage
#define R 1000 //R=1KΩ
float RT, VR, ln, TX, T0, VRT;

int bms_status=0;
int incomingByte = 0;
char output_buffer[50];

int Relay = 3;
int BMS_Status=0;
int Cell_Voltage = 0;

-----

bq769x0 BMS(bq76920, BMS_I2C_ADDRESS);

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);
  SPI.begin();
  int err = BMS.begin(BMS_ALERT_PIN, BMS_BOOT_PIN);

  BMS.setTemperatureLimits(-20, 45, 0, 45);
  BMS.setShuntResistorValue(5);
  BMS.setShortCircuitProtection(14000, 200); // delay in us
  BMS.setOvercurrentChargeProtection(10000, 200); // delay in ms
  BMS.setOvercurrentDischargeProtection(8000, 320); // delay in ms
  BMS.setCellUndervoltageProtection(2600, 2); // delay in s
  BMS.setCellOvervoltageProtection(4000, 2); // delay in s

  BMS.setBalancingThresholds(0,3000,1); // minIdleTime_min, minCellV_mV, maxVoltageDiff_mV
  BMS.setIdleCurrentThreshold(100);
  BMS.enableAutoBalancing();
  BMS.enableDischarging();

  T0 = 25 + 273.15;
}

```

```
pinMode(BMS_ERROR, OUTPUT);
digitalWrite(BMS_ERROR, LOW);

mcp2515.reset();
mcp2515.setBaudrate(CAN_500KBPS, MCP_8MHZ);
mcp2515.setNormalMode();
}

void loop() {
  gui();
  bmssequences();
  BMS.update_Balancing();
}

void gui()
{
  BMS.update_Balancing();
  if (Serial.available() > 0) {
    incomingByte = Serial.read();
    BMS.update();
    switch (incomingByte)
    {
      case 0:
        Serial.println("$");
        break;

      case 1:
        BMS.cell_1_voltage();
        //detect_voltage_value(BMS.return_Cell1(),1);

        BMS.cell_2_voltage();
        //detect_voltage_value(BMS.return_Cell2(),2);
        break;

      case 3:
        BMS.cell_3_voltage();
        //detect_voltage_value(BMS.return_Cell3(),3);
        break;

      case 4:
        BMS.cell_4_voltage();
        //detect_voltage_value(BMS.return_Cell4(),4);
        break;

      case 5:
        BMS.cell_5_voltage();
        //detect_voltage_value(BMS.return_Cell5(),5);
        break;

      case 6:
        TX=get_temp(A0);
        Serial.println(TX);
        break;

      case 7:
        TX=get_temp(A1);
        Serial.println(TX);
        break;
    }
  }
}
```

---

```
case 8:
TX=get_temp(A2);
Serial.println(TX);
break;

case 9:
TX=get_temp(A3);
Serial.println(TX);
break;

case 10:
TX=get_temp(A4);
Serial.println(TX);
break;

case 11:
BMS.total_voltage();
break;

case 12:
BMS.Current();
break;

case 13:
if( BMS.return_Cell1(>4100 || BMS.return_Cell2(>4100 || BMS.return_Cell3(>4100
|| BMS.return_Cell4(>4100 || BMS.return_Cell5(>4100){
Serial.println("0");
BMS_Status=1;
digitalWrite(BMS_ERROR,LOW);
}
else if ( BMS.return_Cell1(<3530 || BMS.return_Cell2(<3530 || BMS.return_Cell3(<3530
|| BMS.return_Cell4(<3530 || BMS.return_Cell5(<3530){
Serial.println("1");
BMS_Status=1;
digitalWrite(BMS_ERROR,LOW);
}
else if ( BMS.return_Current(<-500){
Serial.println("2");
BMS_Status=1;
digitalWrite(BMS_ERRORRelay,LOW);
}
else {
Serial.println("3");
BMS_Status=0;
digitalWrite(BMS_ERROR,HIGH);
}
break;
default :
Serial.println("!");
}
}
}
```

---

```
void bmssequences()
{
    BMS.update_Balancing();
    BMS.update();

    int voltage_cell_1 = BMS.return_Cell1();
    int voltage_cell_2 = BMS.return_Cell2();
    int voltage_cell_3 = BMS.return_Cell3();
    int voltage_cell_4 = BMS.return_Cell4();
    int voltage_cell_5 = BMS.return_Cell5();
    int pack_Voltage = BMS.return_TotalVoltage();
    int pack_Current = BMS.return_Current();

    canMsg.can_id = 0x01;
    canMsg.can_dlc = 8;
    canMsg.data[0] = voltage_cell_1;
    canMsg.data[1] = voltage_cell_2;
    canMsg.data[2] = voltage_cell_3;
    canMsg.data[3] = voltage_cell_4;
    canMsg.data[4] = voltage_cell_5;
    canMsg.data[5] = pack_Voltage;
    canMsg.data[6] = pack_Current;
    canMsg.data[7] = 0x00;
    mcp2515.sendMessage(&canMsg); //Sends the CAN message

}

float get_temp(int analog_pin)
{
    VRT = analogRead(analog_pin);
    VRT = (3.30 / 1023.00) * VRT;
    VR = VCC - VRT;
    RT = VRT / (VR / R);
    ln = log(RT / RT0);
    TX = (1 / ((ln / B) + (1 / T0)));
    TX = TX - 273.15;
    return TX;
}

int detect_voltage_value( int Cell_Voltage , int Cell_Number)
{
    char buffer[40];
    if((Cell_Voltage) > 3500)
    {
        sprintf(buffer,"Cell %d OverVoltage" ,Cell_Number);
        // Serial.println(buffer);
    }
    else if((Cell_Voltage) < 4000)
    {
        sprintf(buffer,"Cell %d UnderVoltage" ,Cell_Number);
        // Serial.println(buffer);
    }
    else {
        sprintf(buffer,"Cell %d Normal Voltage Level" ,Cell_Number);
        //Serial.println(buffer);
    }
}
}
```