



ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

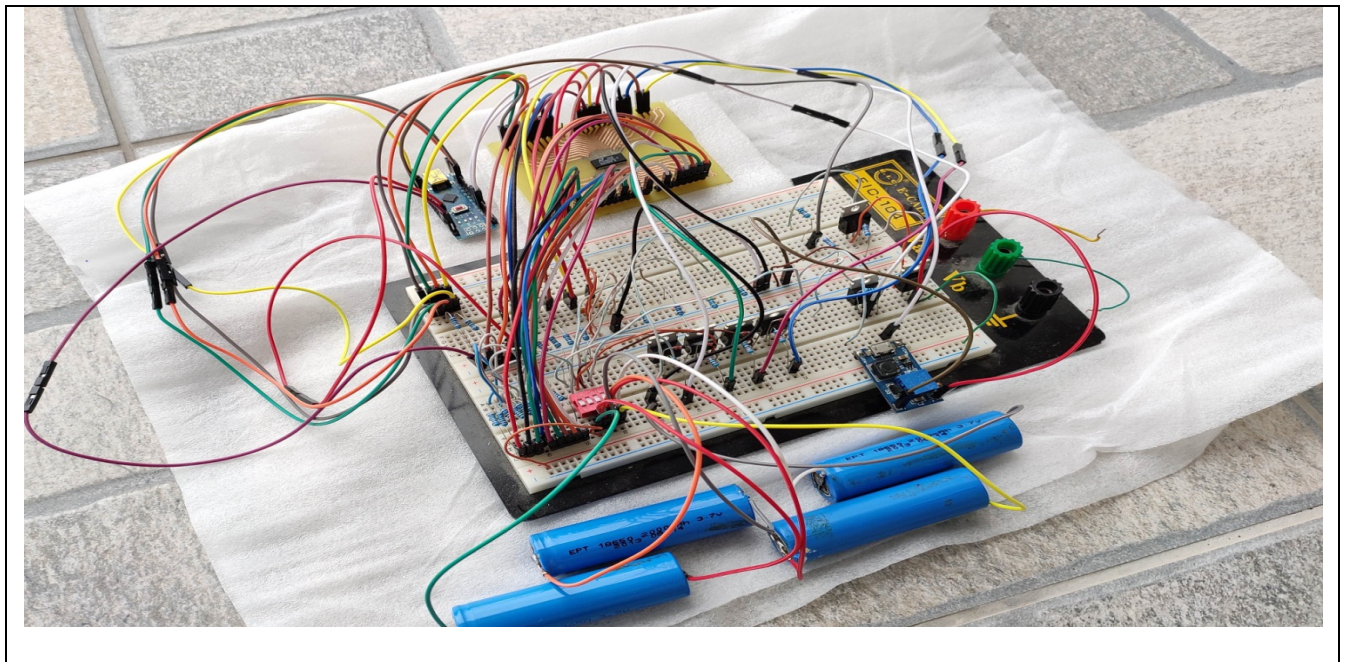
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σχεδίαση και υλοποίηση ευφυούς διάταξης φόρτισης  
συστοιχίας συσσωρευτών ιόντων λιθίου για εφαρμογές  
αναμονής»



Του φοιτητή  
**Καμπούρης Αλέξανδρου**  
Αρ. Μητρώου: 51905m

Επιβλέπων  
**Ιορδάνης Ν. Κιοσκερίδης**

Ημερομηνία 17/10/2021

Τίτλος Δ.Ε.: «Σχεδίαση και υλοποίηση ευφυούς διάταξης φόρτισης συστοιχίας συσσωρευτών ιόντων λιθίου για εφαρμογές αναμονής»

Κωδικός Δ.Ε.:21341

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Καμπούρης Αλέξανδρος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Ιορδάνης Ν. Κιοσκερίδης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 09/09/2020

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 17/10/2021

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα» στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή **Καμπούρη Αλέξανδρου** που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιοδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.



## Πρόλογος

Ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει σχέση με την πολύπλοκη φύση των συσσωρευτών ενέργειας καθώς και την αυξανόμενη ζήτηση και χρήση τους. Οι συστοιχίες μπαταριών ιόντων λιθίου έχουν πολλές δυνατότητες αλλά και πολλές προκλήσεις. Αυτές οι προκλήσεις απαιτούν εξειδικευμένα συστήματα διαχείρισης μπαταριών τα οποία επεμβαίνουν στις συστοιχίες με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία τους. Ο ρόλος των συστημάτων αυτών είναι να εξασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία των μπαταριών, να εξασφαλίζουν την ετοιμότητα της συστοιχίας για χρήση και να επιμηκύνουν την διάρκεια της ζωής τους όσο το δυνατό περισσότερο. Για να συμβεί αυτό, απαιτείται εξειδικευμένο ενσωματωμένο κύκλωμα διαχείρισης μπαταριών αλλά και μικροελεγκτής με πρόγραμμα και εξωτερικό ηλεκτρονικό κύκλωμα. Έτσι, η εργασία έχει να προσφέρει πολλές δυνατότητες ανάπτυξης δεξιοτήτων, από τη χρήση εξειδικευμένων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μέχρι την ανάπτυξη προγράμματος μέσω γραφής κώδικα για μικροελεγκτή. Τέλος, αυτά τα συστήματα έχουν ραγδαία ανάπτυξη, λόγω της ανάπτυξης των μπαταριών ιόντων λιθίου για ηλεκτρικά αυτοκίνητα, που συνεπάγεται ότι είναι μια επίκαιρη τεχνολογία με ακόμα πολλά χρόνια ανάπτυξης. Κατά την διεκπεραίωση της εργασίας τα οφέλη που αποκομίσθηκαν ήταν πολλά, περιλαμβάνοντας την κατανόηση των μπαταριών ιόντων λιθίου, την εξάσκηση γραφής κώδικα και την ικανότητα χρήσης εξειδικευμένων κυκλωμάτων διαχείρισης μπαταριών.

## Περίληψη

Οι εφαρμογές συστημάτων που απαιτούν μεγάλες και ισχυρές μπαταρίες αυξάνονται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια ειδικά με την ανάπτυξη των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Οι μεγάλες σε χωρητικότητα και τάση μπαταρίες αποτελούνται από συστοιχίες πολλών μικρότερων στοιχείων συνδεδεμένες σε σειρά η παράλληλα η και τα δύο. Οι συστοιχίες μπαταριών μπορούν να έχουν μεγάλη ισχύ όμως έχουν και αρκετές αδυναμίες. Τα προβλήματα προκαλούνται από το γεγονός ότι η χημική σύσταση των στοιχείων δεν είναι δυνατό να είναι τέλεια και ίδια μεταξύ τους. Αυτό οδηγεί σε ανομοιομορφίες στην φθορά τους αλλά και στο τρόπο φόρτισης και εκφόρτισης τους. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με τη χρήση ενός ευφυούς ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου και διαχείρισης μπαταριών. Ο ρόλος του συστήματος αυτού είναι να παρακολουθεί τη λειτουργία των στοιχείων της συστοιχίας και να τα προστατεύει από τις συνθήκες εκείνες που θα μπορούσαν να μειώσουν τη διάρκεια ζωής τους και τα καθιστούν επικίνδυνα για ανάφλεξη. Για τον λόγο αυτό υλοποιήθηκε μια διάταξη η οποία αποτελεί ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου και διαχείρισης μπαταριών με βάση ένα εξειδικευμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο λαμβάνει μετρήσεις, προστατεύει τη συστοιχία και εξισορροπεί την ανομοιομορφίες των στοιχείων της. Πραγματοποιήθηκε πειραματικά η εκφόρτιση της συστοιχίας σε διάφορες τιμές αντιστάσεων και η φόρτιση της συστοιχίας με διάφορες τιμές αντιστάσεων εξισορρόπησης. Όλα τα πειράματα υλοποιήθηκαν υπό την επίβλεψη του συστήματος ελέγχου και διαχείρισης μπαταριών το οποίο διασφάλισε ότι όλα τα στοιχεία της μπαταρίας πληρούσαν όλες τις προδιαγραφές ασφαλείας και λειτουργούσαν στο μέγιστο της απόδοσης τους. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αποδεικνύουν την χρησιμότητα των συστημάτων διαχείρισης και ελέγχου μπαταριών σε συστοιχίες μπαταριών και πως μπορούν με ευφυή τρόπο να εξισορροπήσουν την ανομοιότητες των επιμέρους στοιχείων με σκοπό την ασφαλή λειτουργία τους και την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής τους.

# «Design and Implementation of a Smart Charging Configuration of Lithium-Ion Battery Stack for Standby Applications»

«Kampouris Alexandros»

## **Abstract**

Applications that require big and powerful batteries are increasing the last few years mainly due to the development of electric vehicles. Batteries that have high voltage and big capacities consist of stacks of many smaller cells that are connected together either in series or parallel or both. Battery stacks can be powerful but they have many weaknesses. The problems in battery stacks are caused by the chemical differences between the cells. This leads to different degradation in each cell but also in different charging and discharging scheme. This problem can be solved by introducing a smart electronic battery management system (BMS). The role of the battery management system is to supervise the operation of the cells and protect them from any dangerous situations that could lead to quick degradation and make them a fire hazard. For this reason, a configuration is implemented which comprises a complete battery management system based on a special integrated circuit which receives measurements, protects the battery stack and balances the cells' differences. Experiments were conducted with the battery stack discharging to different resistor values and charging with different balancing resistor values. All of the experiments were conducted with the battery management system supervising the operation of charging and discharging, ensuring that all the cells were working within the safety limits and at full power. The results of the experiments proves the necessity of the battery management systems in battery stack applications and that they can balance the cells' differences with a smart implementation in order to achieve safe operation and the prolonging of their lifetime.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	4
Περίληψη .....	5
Abstract .....	6
Κατάλογος Σχημάτων .....	9
Συνομογραφίες.....	12
Κεφάλαιο 1ο: Οι συστοιχίες μπαταριών και οι προκλήσεις τους.....	13
1.1 Εισαγωγή.....	13
1.2 Οι συσσωρευτές ηλεκτρικής ενέργειας – Μπαταρίες .....	13
1.3 Συστοιχίες μπαταριών.....	16
1.4 Στόχος της εργασίας.....	18
1.5 Περιγραφή της εργασίας.....	18
1.6 Επίλογος .....	19
Κεφάλαιο 2ο: Φόρτιση, Εκφόρτιση και Εξισορρόπηση .....	21
2.1 Εισαγωγή.....	21
2.2 Φόρτιση.....	21
2.3 Εκφόρτιση.....	24
2.4 Εξισορρόπηση .....	27
2.5 Επίλογος .....	31
Κεφάλαιο 3ο: Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών .....	32
3.1 Εισαγωγή.....	32
3.2 Battery Management System.....	32
3.3 Επίλογος .....	41
Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση της διάταξης.....	42
4.1 Εισαγωγή.....	42
4.1.1 Φορτιστής.....	44
4.1.2 Μπαταρίες.....	45
4.1.3 Μικροελεγκτής .....	46
4.1.4 Βοηθητικό κύκλωμα .....	47
4.1.5 Πλακέτα .....	47
4.2 Κώδικας .....	49
4.3 Επίλογος .....	52

Κεφάλαιο 5ο: Πειραματικές μετρήσεις.....	53
5.1 Εισαγωγή .....	53
5.2 Λειτουργία χωρίς έλεγχο των στοιχείων.....	56
5.3 Λειτουργία με έλεγχο των στοιχείων και εξισορρόπηση.....	59
5.3.1 Εξισορρόπηση στο τέλος της φόρτισης.....	59
5.3.2 Εξισορρόπηση κατά τη διάρκεια της φόρτισης .....	60
5.3.3 Εκφόρτιση σε σταθερό φορτίο .....	68
5.4 Επίλογος .....	77
Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις.....	78
6.1 Συμπεράσματα .....	78
6.2 Μελλοντικές Βελτιώσεις .....	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ .....	81

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Μπαταρίες διάφορων ειδών και μεγεθών. Πηγή: <a href="http://www.dreamstime.com">www.dreamstime.com</a> .....	14
Σχήμα 1.2: Τέσσερις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Πηγή: <a href="http://www.dreamstime.com">www.dreamstime.com</a> .....	15
Σχήμα 1.3: Συστοιχία μπαταριών με στοιχεία συνδεδεμένα και σε σειρά και παράλληλα.....	16
Σχήμα 1.4: Συστοιχία μπαταριών ιόντων λιθίου. Πηγή: <a href="http://www.shutterstock.com">www.shutterstock.com</a> .....	17
Σχήμα 1.5: Συστοιχία μπαταριών ιόντων λιθίου. Πηγή: <a href="http://www.shutterstock.com">www.shutterstock.com</a> .....	18
Σχήμα 2.1: Σχεδιάγραμμα φόρτισης συστοιχίας μπαταριών από πηγή τάσης. ....	22
Σχήμα 2.2: Σχεδιάγραμμα που απεικονίζει την συστοιχία μπαταριών συνδεδεμένη μέσω διακοπών σε φορτιστή ή σε ωμικό φορτίο. ....	23
Σχήμα 2.3: Σχεδιάγραμμα εκφόρτισης συστοιχίας μπαταριών σε ωμικό φορτίο. ....	26
Σχήμα 2.4: Σχεδιάγραμμα που απεικονίζει την συστοιχία μπαταριών με παράλληλες αντιστάσεις εξισορρόπησης σε κατάσταση φόρτισης.....	28
Σχήμα 2.5: Σχεδιάγραμμα που απεικονίζει την συστοιχία μπαταριών συνδεδεμένη μέσω διακοπών σε ωμικό φορτίο και φορτιστή. Επίσης παράλληλα στα στοιχεία της μπαταρίας είναι τοποθετημένες αντιστάσεις εξισορρόπησης. ....	29
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η συσχέτιση της τάσης ανοικτού βρόχου στοιχείου ιόντων λιθίου με την κατάσταση φόρτισης του. Πηγή: [6].....	33
Σχήμα 3.2: Συνδεσμολογία και εφαρμογή του LTC6802G-2 και σειριακή επικοινωνία με το Arduino Uno. Πηγή: LTC6802G-2 Datasheet.....	35
Σχήμα 3.3: Κάτοψη του LTC6802G-2 με αναγραφόμενες τις μέγιστες τάσεις λειτουργίας των pin του. Πηγή: LTC6802G-2 Datasheet.....	37
Σχήμα 3.4: Συνδεσμολογία του LTC6802G-2 για τη σύνδεση εξωτερικού MOSFET για balancing. Πηγή: LTC6802G-2 Datasheet.....	38
Σχήμα 3.5: Συνδεσμολογία του LTC6802G-2 για τον έλεγχο λιγότερων από 12 στοιχείων ιόντων λιθίου. Πηγή: LTC6802G-2 Datasheet.....	39
Σχήμα 3.6: Εσωτερική ένδειξη διόδων ασφαλείας του LTC6802G-2. Πηγή: LTC6802G-2 Datasheet. ....	40
Σχήμα 3.7: Συνδεσμολογία του LTC6802G-2 για τη χρήση εξωτερικού RC φίλτρου στις εισόδους μέτρησης. Πηγή: LTC6802G-2 Datasheet. ....	41
Σχήμα 4.1: Ολοκληρωμένη διάταξη με τις μπαταρίες συνδεδεμένες. ....	42
Σχήμα 4.2: Σχεδιαστικό κύκλωμα που απεικονίζει όλα τα τμήματα του συστήματος και τις διασυνδέσεις μεταξύ τους. ....	43
Σχήμα 4.3: Block διάγραμμα που απεικονίζει όλα τα μέρη του συστήματος και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. ....	43
Σχήμα 4.4: Ο φορτιστής που χρησιμοποιήθηκε για την φόρτιση της συστοιχίας.....	44
Σχήμα 4.5: Οι μπαταρίες που χρησιμοποιήθηκαν και αποτέλεσαν την συστοιχία. ....	45
Σχήμα 4.6: Το ολοκληρωμένο σύστημα Arduino Uno που περιλαμβάνει τον μικροελεγκτή.....	46
Σχήμα 4.7: Το βοηθητικό κύκλωμα σε ράστερ. ....	47
Σχήμα 4.8: Η κάτοψη της πλακέτας. ....	48
Σχήμα 4.9: Η πλακέτα όπως σχεδιάστηκε σε μία όψη της.....	48
Σχήμα 4.10: Βασικό διάγραμμα ροής του προγράμματος που περιλαμβάνει τις πιο σημαντικές λειτουργίες του κώδικα. ....	49
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα ροής του προγράμματος με έλεγχο των ορίων λειτουργίας των στοιχείων. ..	51



Σχήμα 5.24: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 240ohm.....	67
Σχήμα 5.25: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 470ohm. ....	68
Σχήμα 5.26: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 470ohm.....	68
Σχήμα 5.27: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 8ohm.....	70
Σχήμα 5.28: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 8ohm. ....	70
Σχήμα 5.29: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 25ohm.....	71
Σχήμα 5.30: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 25ohm. ....	72
Σχήμα 5.31: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 68ohm.....	73
Σχήμα 5.32: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 68ohm. ....	73
Σχήμα 5.33: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 120ohm.....	74
Σχήμα 5.34: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 120ohm. ....	75
Σχήμα 5.35: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 240ohm.....	76
Σχήμα 5.36: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 240ohm. ....	76

## Συντομογραφίες

BMS	Battery Management System
CC-CV	Constant Current – Constant Voltage
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

## **Κεφάλαιο 1ο: Οι συστοιχίες μπαταριών και οι προκλήσεις τους**

### **1.1 Εισαγωγή**

Ο λόγος για τον οποίο πραγματοποιείται η εργασία είναι για να αποδειχθεί η συνεισφορά του συστήματος BMS και για ποιον λόγο είναι απαραίτητος ο ευφυής έλεγχος μιας συστοιχίας μπαταριών. Όμως για να γίνει αντιληπτή η χρησιμότητα του θα πρέπει πρώτα να αναδειχθούν τα προβλήματα που υπάρχουν στις συστοιχίες μπαταριών. Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά αναλύονται οι συσσωρευτές ηλεκτρικής ενέργειας, και ειδικότερα οι συσσωρευτές τεχνολογίας ιόντων λιθίου οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία. Έπειτα, γίνεται ανάλυση στο τι είναι συστοιχία και από τι αποτελείται καθώς και τι προκλήσεις υπάρχουν στη χρήση τους. Αφού αναλυθούν τα προβλήματα των συστοιχιών και τι τρόποι αντιμετώπισης υπάρχουν, παρουσιάζονται οι στόχοι που τέθηκαν για την εργασία καθώς και η σύντομη περιγραφή της.

### **1.2 Οι συσσωρευτές ηλεκτρικής ενέργειας – Μπαταρίες**

Οι μπαταρίες είναι συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Κάθε μια τέτοια συσκευή ονομάζεται στοιχείο (cell). Η μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία τα οποία συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα η και τα δύο. Όταν συνδέονται σε σειρά, αυτό συμβαίνει για να αυξηθεί η τάση της μπαταρίας ενώ όταν συνδέονται παράλληλα τότε αυτό συμβαίνει για να αυξηθεί η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας. Τα στοιχεία αποτελούνται από ηλεκτρόδια ανόδου, ηλεκτρόδια καθόδου και τον ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης παρέχει το μέσο μεταφοράς του φορτίου, με τη μορφή ιόντων, ανάμεσα στα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου. Μεταξύ των ηλεκτροδίων παρεμβάλλεται συνήθως ένα διαχωριστικό υλικό. Ο διαχωριστής (separator) πρέπει να παρέχει ιοντική αγωγιμότητα, ενώ σε ορισμένους τύπους μπαταριών αποτελεί και το υλικό απορρόφησης του υγρού του ηλεκτρολύτη.

Οι μπαταρίες ταξινομούνται με βάση τα χαρακτηριστικά τους αλλά ο πιο βασικός διαχωρισμός γίνεται με βάση τη δυνατότητα επαναφόρτισης τους. Οι μπαταρίες που δεν έχουν την δυνατότητα επαναφόρτισης ονομάζονται πρωτεύοντες (primary, non-rechargeable batteries). Τέτοιες μπαταρίες είναι οι αλκαλικές, οι οποίες αφού χρησιμοποιηθούν και εκφορτιστούν μια φορά, πρέπει να απορρίπτονται. Οι μπαταρίες οι οποίες έχουν δυνατότητα επαναφόρτισης ονομάζονται δευτερεύοντες (secondary, rechargeable) και έχουν τη δυνατότητα επαναφοράς στην αρχική τους κατάσταση φόρτισης μετά από κάθε εκφόρτιση. Το μειονέκτημα των επαναφορτιζόμενων μπαταριών είναι ότι έχουν μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις αντίστοιχες μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και ότι είναι ακριβότερες. Η επαναφόρτιση των μπαταριών αυτών γίνεται παρέχοντας ρεύμα φόρτισης με φορά αντίθετη από τη φορά του ρεύματος εκφόρτισης. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η διάρκεια ζωής των επαναφορτιζόμενων μπαταριών θα είναι μεγάλη, η διαδικασία της φόρτισης πρέπει να εκτελείται με συγκεκριμένο τρόπο, ο οποίος διαφέρει ανάλογα τον τύπο της μπαταρίας. Οι πιο διαδεδομένες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες σήμερα είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως (lead-acid), οι νικελίου καδμίου (nickel-cadmium, Ni-Cd), οι νικελίου υδριδίου μετάλλου (nickel-metal hydride, Ni-MH) και οι ιόντων λιθίου (lithium-ion) οι οποίες επιλέχθηκαν για την εργασία αυτή.[1]



Σχήμα 1.1: Μπαταρίες διάφορων ειδών και μεγεθών. Πηγή: [www.dreamstime.com](http://www.dreamstime.com)

Από τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες η τεχνολογία με την μεγαλύτερη ανάπτυξη είναι αυτή των ιόντων λιθίου. Στην τεχνολογία αυτή βασίζονται σχεδόν όλες οι κινητές ηλεκτρονικές συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, φωτογραφικές μηχανές και tablet. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου πέτυχαν την σμίκρυνση αυτών των συσκευών διότι έχουν σαν χαρακτηριστικό ότι μπορούν να σχεδιαστούν σε διάφορα σχέδια και μεγέθη. Αυτό επέτρεψε τις συσκευές αυτές να γίνουν λεπτές, ελαφρότερες και να μπορέσουν να είναι φορητές. Τα τελευταία χρόνια γίνεται εκτεταμένη χρήση τους στα ηλεκτρικά οχήματα ως η καταλληλότερη τεχνολογία.

Η ονομαστική τους τάση είναι περίπου 3.7 Volt και η πιο συνήθης χωρητικότητα τους τα 2Ah. Στις μπαταρίες ιόντων λιθίου το αρνητικό ηλεκτρόδιο κατασκευάζεται από γραφίτη, ο οποίος επικάθεται σε φύλλο χαλκού. Το υλικό του θετικού ηλεκτροδίου είναι το οξειδίο λιθίου κοβαλτίου ( $\text{LiCoO}_2$ ), είτε το οξειδίο του λιθίου μαγγανίου ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), το οποίο φέρεται πάνω σε φύλλο αλουμινίου. Ο ηλεκτρολύτης είναι κάποιο άλας λιθίου σε οργανικό διάλυμα. Ο ηλεκτρολύτης απορροφάται από τον πορώδη διαχωριστή, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στις μπαταρίες ιόντων πολυμερούς, ο ηλεκτρολύτης είναι ένα άλας εμποτισμένο σε κατάλληλο πολυμερές υλικό. Οι μπαταρίες λιθίου πολυμερούς έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να κατασκευασθούν σε οποιοδήποτε σχήμα πράγμα που τις καθιστά εξαιρετικές επιλογές για φορητές συσκευές, εκεί όπου ο χώρος είναι περιορισμένος. Κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας ιόντα λιθίου κινούνται από το αρνητικό προς το θετικό ηλεκτρόδιο. Κατά την φόρτιση της μπαταρίας τα ιόντα λιθίου κινούνται αντίστροφα. Κατά την διάρκεια της φόρτισης πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή μιας και οι μπαταρίες λιθίου είναι εξαιρετικά ευαίσθητες στην υπερφόρτιση. Όταν οι μπαταρίες υπόκεινται υπερφόρτιση ή λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες τότε μειώνεται η χωρητικότητά τους και ο χρόνος ζωής τους. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χαρακτηρίζονται από πολλά πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων

επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Πιο συγκεκριμένα, έχουν πολύ υψηλή ειδική ενέργεια Wh/kg, επομένως έχουν μικρό σχετικά όγκο και βάρος. Επίσης η χωρητικότητα τους επηρεάζεται ελάχιστα από το ρυθμό εκφόρτισης ενώ ο ρυθμός αυτό-εκφόρτισης κυμαίνεται από 2% έως 8% μηνιαίως. Εκτός από αυτά, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής, μεγάλο χρόνο αποθήκευσης, μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης ενώ δεν απαιτούν κάποιο είδος συντήρησης.

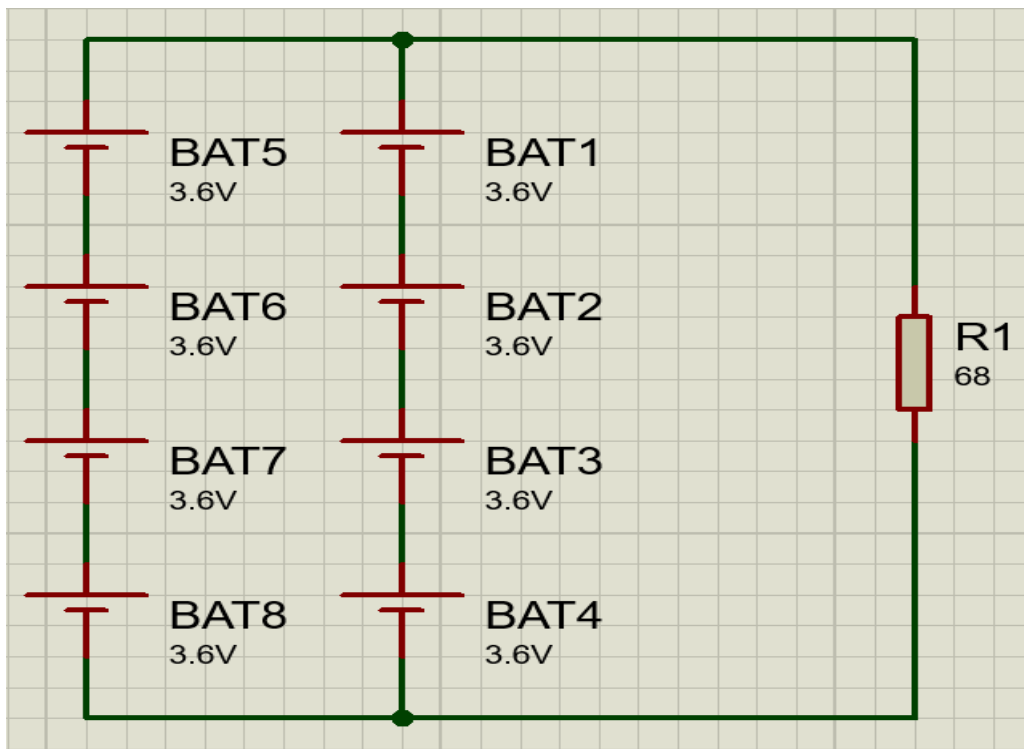
Τέλος η τάση ανά στοιχείο, 3.7 Volt, είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτές των υπολοίπων τύπων μπαταριών. Η μέγιστη τάση φόρτισης ανά στοιχείο θα πρέπει, ανάλογα με τη θερμοκρασία, να περιορίζεται στην τιμή 4.1V έως 4.25V. Σε συστοιχίες μπαταριών η τιμή της μέγιστης τάσης φόρτισης θα πρέπει να εξασφαλίζεται σε κάθε στοιχείο της μπαταρίας. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί εάν εφαρμοστεί τάση μεγαλύτερη από τη μέγιστη τιμή σε κάποιο στοιχείο τότε προκαλείται υπερφόρτιση της μπαταρίας με συνέπεια το σχηματισμό μεταλλικού λιθίου. Το μεταλλικό λίθιο είναι επικίνδυνο ως προς τη δημιουργία έκρηξης ή πυρκαγιάς η οποία μάλιστα δεν μπορεί να κατασβηστεί με νερό. Εκτός από την υπερφόρτιση, θα πρέπει να αποφεύγεται και η βαθιά εκφόρτιση των μπαταριών ιόντων λιθίου, καθώς και σε αυτήν την περίπτωση δημιουργείται μεταλλικό λίθιο. Η ελάχιστη τάση ανοικτού κυκλώματος δεν θα πρέπει να πέσει κάτω από τα 3V ανά στοιχείο. Εάν γίνει εκφόρτιση σε τάση μικρότερη των 2V ανά στοιχείο τότε προκαλείται μόνιμη μείωση της χωρητικότητας της. Συμπερασματικά, για την μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής των μπαταριών ιόντων λιθίου θα πρέπει να αποφεύγεται η υπερφόρτιση και η βαθιά εκφόρτιση. Σε οποιαδήποτε άλλη στάθμη φόρτισης οι μπαταρίες λειτουργούν άψογα. Τα μειονεκτήματα των μπαταριών ιόντων λιθίου περιορίζονται στην ευαισθησία στην υπερφόρτιση και την βαθιά εκφόρτιση, μόνιμη μείωση χωρητικότητας σε θερμοκρασίες άνω των 65 βαθμών κελσίου και υψηλότερο κόστος παραγωγής. Για την ορθή και ασφαλή χρήση των μπαταριών ιόντων λιθίου υπάρχουν αυστηρές προδιαγραφές στις τιμές ρεύματος, τάσης φόρτισης και θερμοκρασίας. [1]



Σχήμα 1.2: Τέσσερις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Πηγή: [www.dreamstime.com](http://www.dreamstime.com)

### 1.3 Συστοιχίες μπαταριών

Οι συστοιχίες μπαταριών χρησιμοποιούνται ευρέως τα τελευταία χρόνια για πολλές και διάφορες εφαρμογές. Μια συστοιχία μπαταριών αποτελείται στην ουσία από πολλές μπαταρίες σε σειρά ή παράλληλα ή και τα δύο. Συνδέοντας πολλές μπαταρίες σε σειρά επιτυγχάνεται μία μεγαλύτερη μπαταρία με υψηλή τάση, ενώ συνδέοντας στοιχεία παράλληλα αυξάνεται η χωρητικότητά τους. Στην πραγματικότητα, όταν τα στοιχεία συνδέονται σε σειρά προστίθενται οι τάσεις των επιμέρους μπαταριών και προσφέρουν μία μπαταρία με μεγαλύτερη τάση ενώ όταν συνδέονται παράλληλα προστίθενται οι χωρητικότητές τους. Στο σχήμα 1.3 φαίνεται μια συστοιχία με παράλληλα και σε σειρά στοιχεία. Λόγω των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των υλικών και της δομής εσωτερικά των μπαταριών η κατασκευή μιας μπαταρίας έχει συγκεκριμένη τιμή τάσης. Κατασκευαστικά λοιπόν δεν μπορεί να δημιουργηθεί μπαταρία με υψηλότερη τάση από αυτές που βλέπουμε στο εμπόριο, δηλαδή με τάση περίπου 3,7 volt στην καλύτερη περίπτωση για την τεχνολογία ιόντων λιθίου. Οι σύγχρονες τεχνολογικές ανάγκες όμως απαιτούν όλο και μεγαλύτερη και ευρεία χρήση συσσωρευτών και σε πολλές περιπτώσεις απαιτούνται συσσωρευτές με πολύ υψηλή τάση. Όταν υπάρχει ανάγκη για μπαταρία υψηλής τάσης τότε επιλέγεται μία συστοιχία μπαταριών η οποία αποτελείται από πολλές μικρότερες τις οποίες ονομάζουμε στοιχεία (cells). Πιο συγκεκριμένα εφοδιάζουν με υψηλή τάση εφαρμογές όπως, υβριδικά αυτοκίνητα (HEV), ηλεκτρικά αυτοκίνητα (EV), τροφοδοτικά (UPS) και φωτοβολταϊκά συστήματα (PV).



Σχήμα 1.3: Συστοιχία μπαταριών με στοιχεία συνδεδεμένα και σε σειρά και παράλληλα.

Παρόλο που οι συστοιχίες συσσωρευτών ενέργειας είναι αναγκαίες και χρήσιμες σε πολλούς τομείς, εμφανίζουν προβλήματα όπως, μειωμένη διάρκεια ζωής, πιθανή βλάβη λόγω χημικών διαφορών εσωτερικά των στοιχείων και διαφορών των στοιχείων μεταξύ τους κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης.[1] Αυτές οι διαφορές οδηγούν σε πολλές ανομοιότητες ανάμεσα στα στοιχεία της συστοιχίας μετά από αρκετούς κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης. Όταν φορτίζεται η συστοιχία τότε κάποια από τα στοιχεία φθάνουν σε πλήρη φόρτιση πριν από τα υπόλοιπα. Αυτή η διαδικασία οδηγεί

σε υπερφόρτιση κάποιων εκ των στοιχείων και κατά συνέπεια φορτίζονται με ρεύμα ενώ ήδη βρίσκονται στο μέγιστο της φόρτισης προκαλώντας μεγάλη φθορά στα στοιχεία αυτά και καθιστώντας τα επικίνδυνα.[2] Άρα σε μία συστοιχία κρίνεται απαραίτητο το να βρίσκονται όλα τα στοιχεία στην ίδια κατάσταση φόρτισης ώστε να μη βρεθεί κάποιο στοιχείο υπερφορτισμένο. Για αυτό το σκοπό απαιτείται ένα κύκλωμα ελέγχου και διαχείρισης μπαταριών, το οποίο κατά βάση αποτελείται από ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου το οποίο ονομάζεται σύστημα διαχείρισης μπαταριών (Battery Management System – BMS).

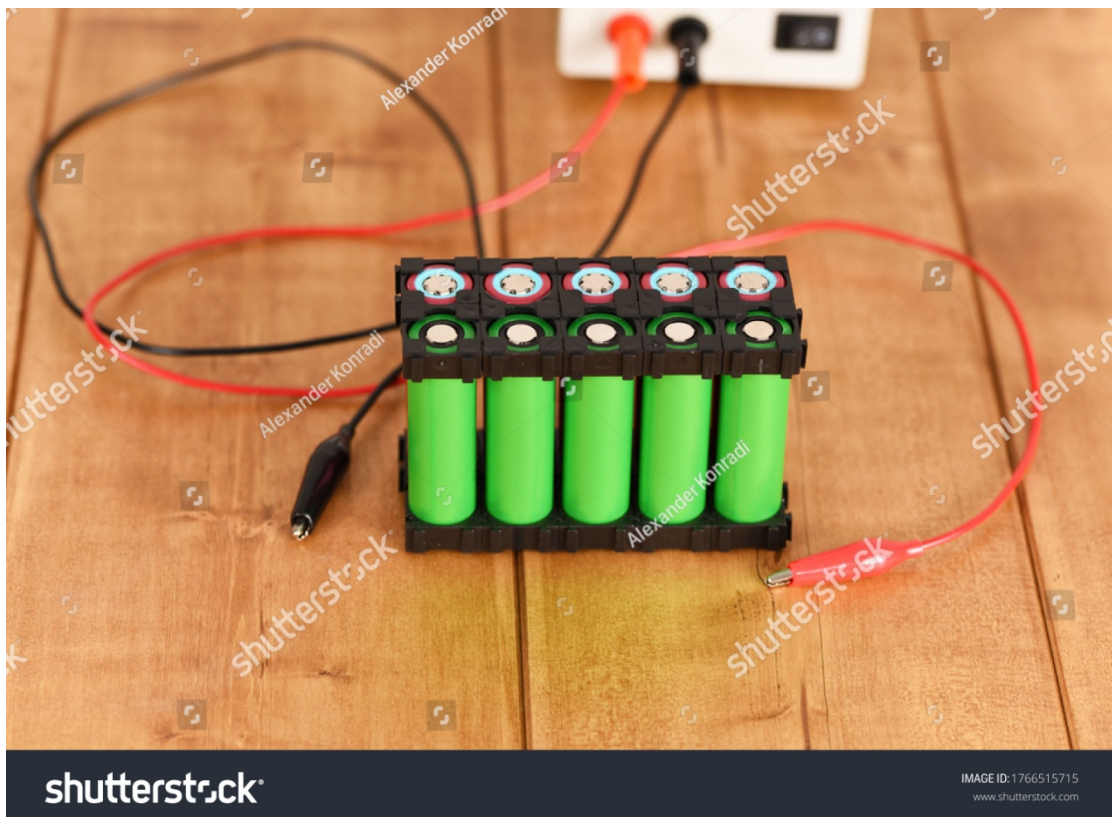
Για να βρίσκονται όλα τα στοιχεία στην ίδια κατάσταση φόρτισης χρειάζεται να γίνεται εξισορρόπηση του ενεργειακού φορτίου ανάμεσα στα στοιχεία από το BMS. Ένας απλός τρόπος για την εξισορρόπηση των στοιχείων είναι η μέθοδος με αντιστάσεις. Σε κάθε ένα στοιχείο συνδέεται παράλληλα μία αντίσταση εκφόρτισης η οποία ενεργοποιείται μέσω ηλεκτρονικού διακόπτη. Με τη μέθοδο αυτή τα στοιχεία τα οποία έχουν μεγαλύτερη τάση από τα υπόλοιπα έχουν μειωμένο ρεύμα φόρτισης κατά τη διάρκεια φόρτισης έως ότου όλα τα στοιχεία να έχουν περίπου την ίδια τάση. Το θετικό αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι σχετικά απλή στην εφαρμογή της αλλά καταναλώνεται ρεύμα άσκοπα στις αντιστάσεις εξισορρόπησης. Υπάρχουν και τρόποι εξισορρόπησης οι οποίοι δεν καταναλώνουν το ρεύμα άσκοπα αλλά το μεταφέρουν για φόρτιση των υπολοίπων κελιών. Αυτές οι μέθοδοι είναι πιο αποδοτικές αλλά έχουν μεγαλύτερο βαθμό πολυπλοκότητας. Οι συστοιχίες μπαταριών λοιπόν είναι αναμφισβήτητα σημαντικές και απαραίτητες στη σημερινή εποχή όμως φέρνουν και προκλήσεις οι οποίες θα πρέπει να αντιμετωπισθούν προκειμένου η αξιοπιστία, η ασφάλεια και η διάρκεια ζωής τους να παραμείνει υψηλή.



Σχήμα 1.4: Συστοιχία μπαταριών ιόντων λιθίου. Πηγή: [www.shutterstock.com](http://www.shutterstock.com)

## 1.4 Στόχος της εργασίας

Ο στόχος της εργασίας αυτής είναι η υλοποίηση ενός ευφυούς συστήματος φόρτισης συστοιχίας συσσωρευτών. Το σύστημα αυτό είναι σε θέση να ελέγχει, να επεξεργάζεται δεδομένα και να ενεργεί στη συστοιχία των μπαταριών κατάλληλα έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή λειτουργία της συστοιχίας. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι συστοιχίες μπαταριών είναι χρήσιμες σε μια πληθώρα εφαρμογών, εμφανίζουν όμως προβλήματα στην λειτουργία τους. Η χρήση μιας διάταξης φόρτισης για συστοιχία μπαταριών είναι απαραίτητη διότι οι συστοιχίες εμφανίζουν προβλήματα ασφάλειας, αξιοπιστίας αλλά και διάρκειας ζωής. Μια τέτοια διάταξη επιχειρήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία προκειμένου να αντιμετωπισθούν με αποτελεσματικότητα τα προβλήματα που εμφανίζουν οι συστοιχίες μπαταριών. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε μια συστοιχία μπαταριών ιόντων λιθίου επειδή οι μπαταρίες αυτής της τεχνολογίας είναι οι πλέον αναπτυσσόμενες και χρησιμοποιούμενες στα ηλεκτρικά οχήματα και όλες τις φορητές ηλεκτρονικές συσκευές. Τα προβλήματα τα οποία η διάταξη καλείται να αντιμετωπίσει είναι, η διάρκεια ζωής της συστοιχίας, η προστασία της από εκτενή φθορά και η εξάλειψη τυχόν διαφορών μεταξύ των στοιχείων. Η διάταξη ελέγχει τα μεμονωμένα στοιχεία της συστοιχίας και με ευφυή τρόπο επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής τους, προστατεύει τα στοιχεία από φθορά κατά της διάρκεια χρήσης τους και εξισορροπεί τις διαφορές στη λειτουργία τους.



Σχήμα 1.5: Συστοιχία μπαταριών ιόντων λιθίου. Πηγή: [www.shutterstock.com](http://www.shutterstock.com)

## 1.5 Περιγραφή της εργασίας

Για την επίτευξη του στόχου της εργασίας απαραίτητη είναι η κατασκευή μιας πρακτικής διάταξης η οποία λειτουργεί σε πραγματικές συνθήκες. Για το λόγο τούτο, δημιουργήθηκε μια κατασκευή αποτελούμενη από πολλά τμήματα η οποία μπορεί να λαμβάνει δεδομένα, να τα επεξεργάζεται, να τα

αποτυπώνει σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και να ελέγχει τη λειτουργία της συστοιχίας. Επειδή η υλοποίηση της διάταξης βασίζεται στην επίλυση των προβλημάτων συστοιχίας μπαταριών ιόντων λιθίου, κατασκευάστηκε εξ αρχής για αυτό και μόνο το σκοπό. Τα τμήματα από τα οποία αποτελείται η συσκευή αυτή είναι ο ελεγκτής, η συστοιχία μπαταριών τεσσάρων στοιχείων, το ολοκληρωμένο κύκλωμα ελέγχου μπαταριών BMS και το βοηθητικό κύκλωμα. Ο ελεγκτής είναι η συσκευή εκείνη η οποία είναι υπεύθυνη για την λήψη δεδομένων από το σύστημα μπαταριών, την αποστολή τους σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για να υπάρχει πρόσβαση στα δεδομένα, την επεξεργασία ορισμένων εκ των δεδομένων και έλεγχος του συστήματος μέσω προγραμματιστικών εντολών. Για την λειτουργία του μικροελεγκτή γράφτηκε κώδικας σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και προγραμματίστηκε με τρόπο τέτοιο ώστε να επιφέρει τα ζητούμενα αποτελέσματα. Ο μικροελεγκτής παρόλο που έχει πολλές δυνατότητες, αδυνατεί να ελέγξει από μόνος του την ορθή λειτουργία συστοιχιών μπαταριών. Για τέτοιες εφαρμογές υπάρχουν εξειδικευμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα τα οποία έχουν σχεδιασθεί για το λόγο αυτό. Έτσι, για τη μέτρηση και τον έλεγχο των κελιών της συστοιχίας χρησιμοποιείται ένα τέτοιο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Για την κατασκευή της συστοιχίας μπαταριών επιλέχθηκαν με συγκεκριμένα κριτήρια τέσσερα στοιχεία ιόντων λιθίου και συνδέθηκαν κατάλληλα ώστε να αποτελέσουν συστοιχία. Το βοηθητικό κύκλωμα, αποτελούμενο από το κύκλωμα εξισορρόπησης, το κύκλωμα φόρτισης και εκφόρτισης, είναι επίσης και η βάση όπου συνδέονται όλα τα υποσυστήματα. Τη λήψη των δεδομένων ανέλαβε το ολοκληρωμένο κύκλωμα διαχείρισης μπαταριών. Τα δεδομένα που λαμβάνονται αφορούν μεμονωμένα όλα τα στοιχεία της συστοιχίας και στέλνονται στον μικροελεγκτή μέσω σειριακής επικοινωνίας. Έπειτα, αποστέλλονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για να είναι ορατά και στους χρήστες και ακολουθεί η επεξεργασία τους από τον ίδιο τον μικροελεγκτή. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον μικροελεγκτή, εκτός του ότι αποστέλλονται, καταγράφονται κιάλας στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει η γραφική τους απεικόνιση και η εξαγωγή συμπερασμάτων. Ο μικροελεγκτής στη συνέχεια αποφασίζει για την λειτουργία της συστοιχίας, την εφαρμογή εξισορρόπησης ή όχι βασιζόμενος στα δεδομένα που έλαβε και κατόπιν γίνεται με ηλεκτρονικό τρόπο η παρέμβαση του μικροελεγκτή στο σύστημα. Οι διαδικασίες που ακολουθούνται για τις πειραματικές μετρήσεις περιλαμβάνουν την πλήρη φόρτιση και πλήρη εκφόρτιση της συστοιχίας. Για την φόρτιση της συστοιχίας πραγματοποιούνται πειράματα με και χωρίς εξισορρόπηση αλλά και με διάφορες τιμές αντιστάσεων εξισορρόπησης. Κατά την εκφόρτιση πραγματοποιούνται πειράματα για εκφόρτιση της συστοιχίας σε σταθερό ωμικό φορτίο. Στη διαδικασία της εκφόρτισης δεν συμπεριλαμβάνεται κάποιου είδους εξισορρόπηση μεταξύ των στοιχείων καθώς δεν χρειάζεται. Κατόπιν, τα δεδομένα παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις και μπορεί να γίνει αντιληπτός ο ρόλος ενός συστήματος ελέγχου και εξισορρόπησης των στοιχείων σε μια συστοιχία αλλά και η αναγκαιότητα του. Με αυτήν την εργασία διεξάγεται μια μελέτη στη χρήση συστοιχίας μπαταριών, γίνεται πειραματική λειτουργία του ελέγχου των στοιχείων και της εξισορρόπησης και αναλύονται τα δεδομένα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Τέλος, υπάρχουν και προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις οι οποίες αφορούν την ορθότερη λειτουργία της συστοιχίας μπαταριών.

## 1.6 Επίλογος

Οι πιο διαδεδομένες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες σήμερα είναι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (lithium-ion). Μια συστοιχία μπαταριών ιόντων λιθίου αποτελείται από πολλά στοιχεία ιόντων λιθίου συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ή και τα δύο. Οι συστοιχίες μπαταριών χρησιμοποιούνται ευρέως τα τελευταία χρόνια για πολλές και διάφορες εφαρμογές. Παρόλο που οι συστοιχίες συσσωρευτών

## Κεφάλαιο 1

ενέργειας είναι αναγκαίες και χρήσιμες σε πολλούς τομείς, εμφανίζουν προβλήματα όπως, μειωμένη διάρκεια ζωής, πιθανή βλάβη λόγω χημικών διαφορών εσωτερικά των στοιχείων και διαφορών των στοιχείων μεταξύ τους κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης. Στην εργασία αυτή σκοπός είναι να επιλυθούν τα προβλήματα τα οποία προκαλούνται κατά τη χρήση συστοιχιών μπαταριών. Τα προβλήματα τα οποία η διάταξη καλείται να αντιμετωπίσει είναι, η διάρκεια ζωής της συστοιχίας, η προστασία της από εκτενή φθορά και η εξάλειψη των διαφορών μεταξύ των στοιχείων.

## Κεφάλαιο 2ο: Φόρτιση, Εκφόρτιση και Εξισορρόπηση

### 2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία φόρτισης μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου, η διαδικασία εκφόρτισης της αλλά και πως υλοποιείται μία εξισορρόπηση ανάμεσα σε διαφορετικά στοιχεία. Η περιγραφή της φόρτισης περιλαμβάνει τις προδιαγραφές φόρτισης, τις προδιαγραφές ασφαλείας και τις απαιτήσεις από το σύστημα φόρτισης και διαχείρισης μπαταριών. Για την εκφόρτιση περιγράφονται οι προδιαγραφές ασφαλείας και πως πραγματοποιείται μια εκφόρτιση σε σταθερό φορτίο. Για την εξισορρόπηση των στοιχείων των μπαταριών αναλύονται οι διάφοροι τρόποι εξισορρόπησης, ο τρόπος που επιλέχθηκε σε αυτήν την εργασία καθώς και η σύγκριση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των διάφορων μεθόδων.

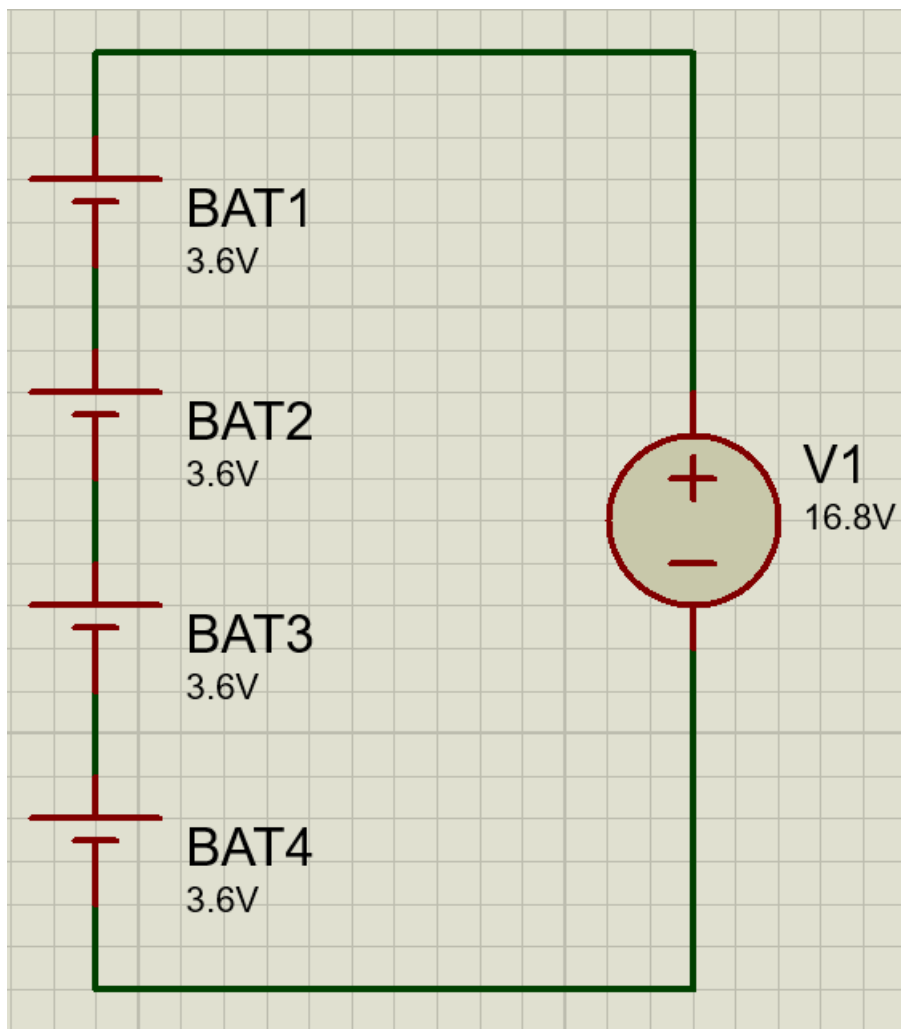
### 2.2 Φόρτιση

Η φόρτιση των μπαταριών ιόντων λιθίου πραγματοποιείται αρχικά με σταθερό ρεύμα και έπειτα με σταθερή τάση. Για την ασφαλή τους χρήση, υπάρχουν αυστηρές προδιαγραφές φόρτισης όσων αφορά τις τιμές του ρεύματος, τάσης αλλά και θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος έχει επιπτώσεις στην φόρτιση μπαταριών ιόντων λιθίου και θα πρέπει να βρίσκεται σε μια ορισμένη περιοχή τιμών για να θεωρηθεί ασφαλής. Φόρτιση μπορεί να πραγματοποιείται μόνο όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος δεν είναι μικρότερη από τους 0 βαθμούς κελσίου και δεν ξεπερνάει τους 45 με 60 βαθμούς κελσίου. Στην περίπτωση όπου μια μπαταρία ιόντων λιθίου έχει υποστεί βαθιά εκφόρτιση και η τάση των αποδεκτών έχει πέσει σε τιμή κάτω του 2,5Volt τότε θα πρέπει η μπαταρία αυτή να φορτισθεί με συγκεκριμένο τρόπο. Αυτός περιλαμβάνει την φόρτιση της μπαταρίας με χαμηλό σταθερό ρεύμα περίπου 0,1C σε ορισμένο χρονικό διάστημα περίπου δέκα λεπτών. Αν σε αυτό το διάστημα η τάση δεν υπερβεί τα 2,5Volt τότε η μπαταρία θεωρείται κατεστραμμένη. Άλλη μια περίπτωση όπου η μπαταρία θεωρείται κατεστραμμένη και δεν φορτίζεται είναι όταν η τάση της είναι μικρότερη από 1,0Volt. Σε μια τυπική κατάσταση φόρτισης, ο φορτιστής φορτίζει την μπαταρία με ρεύμα έως 1.0C, μέχρι η τάση των ακροδεκτών να φθάσει μια μέγιστη προκαθορισμένη τιμή. Η μέγιστη τάση των ακροδεκτών είναι συνήθως από 4.10V έως 4.25V.

Το ενεργειακό φορτίο που αποκτά η μπαταρία, όταν η τάση των ακροδεκτών της φθάσει τη μέγιστη τιμή, εξαρτάται από την τιμή της έντασης του σταθερού ρεύματος φόρτισης. Όσο μεγαλύτερο είναι το σταθερό ρεύμα φόρτισης, τόσο μικρότερο είναι και το φορτίο που αποθηκεύεται στην μπαταρία αλλά ταυτόχρονα είναι μικρότερος και ο χρόνος φόρτισης. Η τιμή της μέγιστης τάσης πρέπει να μετράται από το φορτιστή με σφάλμα μικρότερο των 50mV. Εάν η μπαταρία περιέχει ενσωματωμένο θερμίστορ για την μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας τότε ο φορτιστής ο οποίος λαμβάνει τα δεδομένα του θερμίστορ, διακόπτει την φόρτιση εφόσον ανιχνευθεί αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από ένα όριο. Επιπρόσθετα, για λόγους ασφαλείας υπάρχει ένα μέγιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο εκτελείται φόρτιση με σταθερό ρεύμα και με σταθερή τάση. Μόλις η τάση των ακροδεκτών φθάσει τα την προκαθορισμένη μέγιστη τιμή, ο φορτιστής αλλάζει τον τρόπο λειτουργίας του και πλέον φορτίζει με σταθερή μέγιστη τάση. Με αυτόν τον τρόπο το ρεύμα της φόρτισης μειώνεται. Όταν το ρεύμα λάβει μια τιμή περίπου 0.1C, η μπαταρία θεωρείται πλήρως φορτισμένη και η διαδικασία της φόρτισης λαμβάνει τέλος.[1]

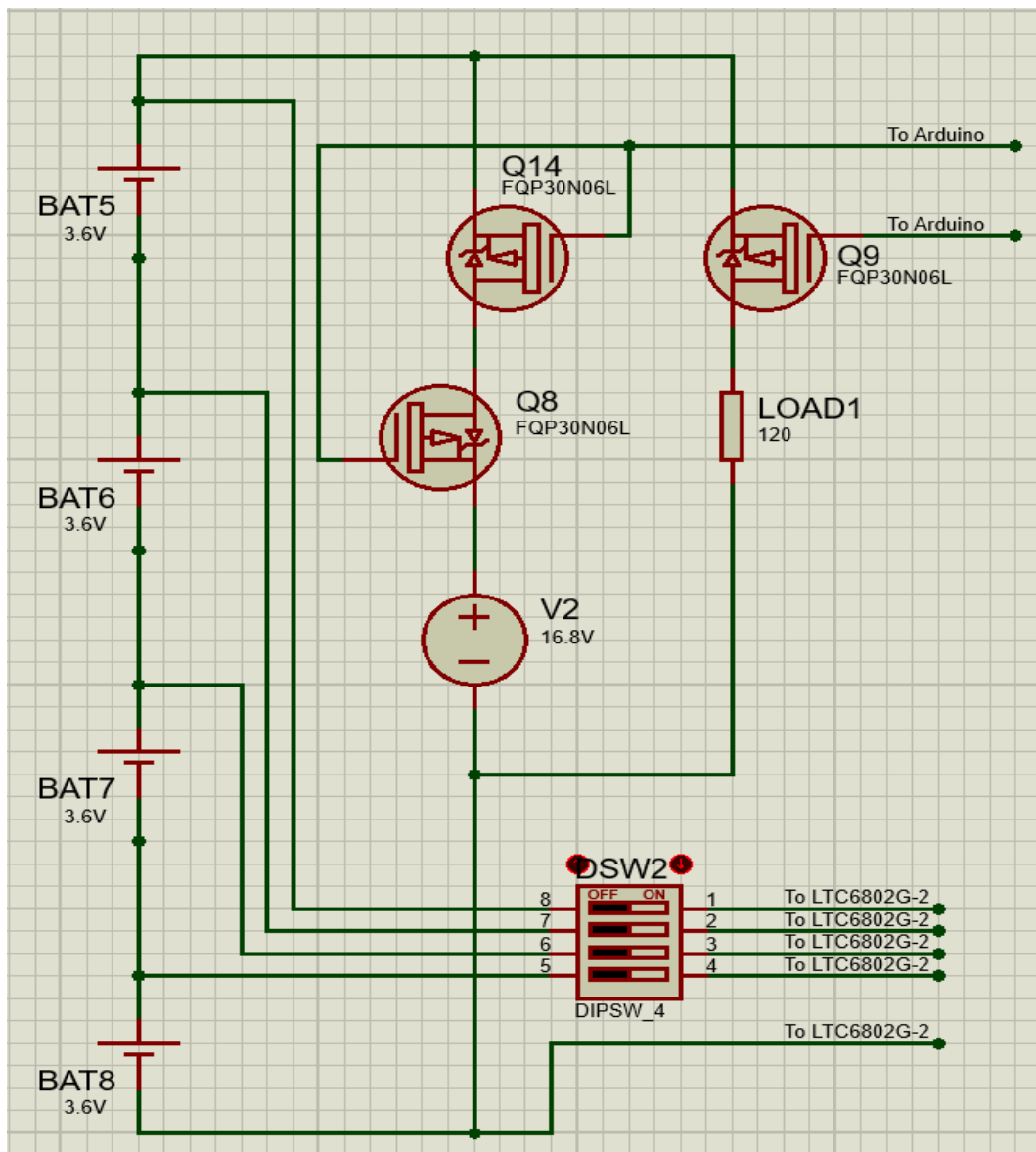
Εάν αντί για μεμονωμένη μπαταρία υπάρχει συστοιχία μπαταριών αποτελούμενη από πολλά στοιχεία ιόντων λιθίου η φόρτιση παραμένει ίδια με μερικές διαφοροποιήσεις. Για την ασφαλή χρήση των

συστοιχιών, ισχύουν οι ίδιες προδιαγραφές φόρτισης όσον αφορά τις τιμές του ρεύματος, τάσης αλλά και θερμοκρασίας. Ιδανικά θα έπρεπε για να φορτίζονται πλήρως και με ασφάλεια όλα τα στοιχεία μιας συστοιχίας, να υπάρχει ξεχωριστός και ανεξάρτητος φορτιστής για κάθε ένα στοιχείο. Στην πραγματικότητα όμως αυτό είναι πολύ δύσκολο, πολύ περίπλοκο και ακριβό. Για το λόγο αυτό υιοθετούνται φορτιστές μεγάλης τάσης και ρεύματος για να φορτίζουν συνολικά όλη τη συστοιχία. Ανάλογα την συνδεσμολογία των στοιχείων, ο φορτιστής θα πρέπει να έχει προκαθορισμένο το ρεύμα σταθερής φόρτισης αλλά και την μέγιστη τάση φόρτισης. Επιπλέον θα πρέπει να γίνεται μεμονωμένος έλεγχος στα στοιχεία της μπαταρίας προκειμένου να διασφαλισθεί ότι όλα τα στοιχεία λειτουργούν με βάση τις προδιαγραφές ασφαλείας. Ο έλεγχος στα στοιχεία της συστοιχίας είναι αυτός που επιτρέπει την σωστή χρήση τους. Για να υπάρξει έλεγχος στα στοιχεία της συστοιχίας χρησιμοποιείται ένα ειδικό σύστημα διαχείρισης μπαταριών το οποίο λαμβάνει μετρήσεις από τα στοιχεία της μπαταρίας. Ένα εξειδικευμένο σύστημα διαχείρισης μπαταριών είναι απαραίτητο διότι ένας απλός μικροελεγκτής αδυνατεί να λάβει μετρήσεις σε μια συστοιχία μπαταριών. Ο λόγος είναι ότι για να ληφθούν οι μετρήσεις θα πρέπει το στοιχείο να είναι απομονωμένο από το σύστημα μέτρησης γιατί διαφορετικά δεν υπάρχει κοινό σημείο αναφοράς τάσης ανάμεσα στο σύστημα μέτρησης και το στοιχείο.



Σχήμα 2.1: Σχεδιάγραμμα φόρτισης συστοιχίας μπαταριών από πηγή τάσης.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μία συστοιχία μπαταριών τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου σε σειρά. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται το σχεδιάγραμμα φόρτισης της συστοιχίας τεσσάρων μπαταριών από πηγή τάσης. Για να αξιολογηθεί η κατάσταση φόρτισης των στοιχείων, λαμβάνονται μετρήσεις στις τάσεις των στοιχείων. Αυτό είναι σημαντικό καθώς στόχος του συστήματος BMS είναι η ομοιόμορφη φόρτιση των στοιχείων. Η πιο βασική μέτρηση που καθορίζει και την υγεία του στοιχείου είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος. Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι η τάση των στοιχείων τη χρονική στιγμή όπου δεν υπάρχει φορτίο συνδεδεμένο σε αυτά. Με βάση την τιμή της τάσης αυτής μπορεί να προσδιοριστεί η κατάσταση φόρτισης του στοιχείου. Για να γίνουν μετρήσεις στη τάση ανοικτού κυκλώματος απαιτείται να μην υπάρχει φορτίο στη μπαταρία αλλά ούτε και φορτιστής συνδεδεμένος. Για αυτό το λόγο είναι τοποθετημένο σε σειρά με την συστοιχία ένας ηλεκτρονικός διακόπτης MOSFET με τον οποίο ο μικροελεγκτής έχει τη δυνατότητα να κόψει την παροχή ρεύματος από και προς την μπαταρία. Έτσι το ολοκληρωμένο έχει τη δυνατότητα να παίρνει μετρήσεις ακόμη και κατά της διάρκεια φόρτισης ή εκφόρτισης. Το σχήμα 2.2 δείχνει τα στοιχεία της μπαταρίας που συνδέονται παράλληλα μέσω διακοπών στο BMS για να ληφθούν μετρήσεις.



Σχήμα 2.2: Σχεδιάγραμμα που απεικονίζει την συστοιχία μπαταριών συνδεδεμένη μέσω διακοπών σε φορτιστή ή σε ωμικό φορτίο.

Όταν ο φορτιστής φορτίζει τη μπαταρία και χρειάζεται να γίνει μέτρηση τότε ο διακόπτης ανοίγει, διακόπτει τη φόρτιση και λαμβάνει το BMS την μέτρηση της τάσης ανοικτού βρόχου. Επειδή η τάση της μπαταρίας δεν επανέρχεται άμεσα στην τάση ανοικτού βρόχου από τη στιγμή που θα διακοπεί η σύνδεση χρειάζεται να μείνει ανοικτός ο διακόπτης για ένα χρονικό διάστημα πριν επανέλθει η φόρτιση. Για να είναι σίγουρο ότι η τάση ανοικτού βρόχου που μετράται είναι σωστή δίνεται διάστημα ενός δευτερολέπτου (1 second) για τα στοιχεία να επαναφέρουν της τάση τους. Ο χρόνος δειγματοληψίας είναι 15 δευτερόλεπτα, δηλαδή ανά 14 δευτερόλεπτα διακόπτεται η φόρτιση για 1 δευτερόλεπτο, λαμβάνεται η μέτρηση και μετά για τα επόμενα 15 δευτερόλεπτα επαναλαμβάνεται η φόρτιση. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για τη δειγματοληψία κατά τη διαδικασία της εκφόρτισης αλλά και κατά τη διαδικασία της εξισορρόπησης. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο ο μικροελεγκτής μπορεί να έχει ενημέρωση της τάσης ανοικτού βρόχου όλων των στοιχείων της μπαταρίας ανά 15 δευτερόλεπτα. Ο χρόνος δειγματοληψίας καθορίστηκε με πειραματικό τρόπο, ώστε να είναι όλες οι αλλαγές στη τάση ανοικτού βρόχου διακριτές αλλά και να μπορεί να τυπωθεί μια γραφική παράσταση της φόρτισης με πολλά δείγματα. Η διακοπή της φόρτισης ή της εκφόρτισης της μπαταρίας στιγμιαία, δεν επηρεάζει αισθητά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας διότι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου δεν απαιτούν συγκεκριμένο τρόπο εκφόρτισης ή φόρτισης όσον αφορά τη συνέχεια της. Αφού ληφθούν οι μετρήσεις και αποσταλούν στον μικροελεγκτή, αυτός με τη σειρά του στέλνει τα δεδομένα της μέτρησης στον υπολογιστή για καταγραφή.

### 2.3 Εκφόρτιση

Στην διαδικασία της εκφόρτισης μιας μπαταρίας συνδέεται ο συσσωρευτής στο εκάστοτε φορτίο. Το φορτίο μπορεί να είναι σταθερό ή αυξομειούμενο. Το φορτίο μπορεί να είναι ωμικό, ή επαγωγικό ή και άλλες μορφές. Στο πείραμα αυτό ενδιαφέρον έχει η χρήση σταθερού ωμικού φορτίου, δηλαδή αντίστασης. Η επιλογή της τιμής της αντίστασης είναι σημαντική γιατί επηρεάζει το χρόνο εκφόρτισης. Εάν η τιμή της αντίστασης είναι μικρή τότε η εκφόρτιση θα είναι πιο γρήγορη με ένα όμως πρόβλημα, την γρήγορη βύθιση τάσης της μπαταρίας. Οι μόνοι περιορισμοί που υπάρχουν στην εκφόρτιση μπαταριών ιόντων λιθίου είναι η τιμή του ρεύματος εκφόρτισης, η θερμοκρασία περιβάλλοντος να είναι εντός συγκεκριμένων τιμών ενώ η τάση της μπαταρίας να μην πέσει κάτω από το ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο. Η ελάχιστη δυνατή τιμή τάσης που μπορεί να αποκτήσει μία μπαταρία ιόντων λιθίου είναι τα 3V για να αποφευχθεί έντονη φθορά. Επίσης θα πρέπει να λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όχι μεγαλύτερη των 40 βαθμών κελσίου και όχι μικρότερη από 0 βαθμούς κελσίου. Το μέγιστο δυνατό ρεύμα εκφόρτισης για την ασφαλή λειτουργία των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι το 1.0C. Εάν οι μπαταρίες εκφορτιστούν με ρεύμα μεγαλύτερο του 1.0C τότε υπάρχει βύθιση τάσης και φθορά της μπαταρίας. Πέραν της φθοράς της μπαταρίας, η βύθιση τάσης της μπαταρίας θα καταγραφεί από το σύστημα διαχείρισης μπαταριών ως πλήρη εκφόρτιση χωρίς όμως η μπαταρία να έχει δώσει όλη της ισχύ που θα μπορούσε. Πιο συγκεκριμένα η βύθιση τάσης θα ενεργοποιήσει το σύστημα αποκοπής των μπαταριών και προστασίας τους από χαμηλή τάση (undervoltage protection) και θα αποκόψει το κύκλωμα των μπαταριών πριν την πλήρη εκφόρτιση τους. Εάν η τιμή της αντίστασης είναι πολύ μεγάλη τότε δεν θα υπάρχει βύθιση τάσης αλλά η πλήρης εκφόρτιση θα πραγματοποιείται αργά και θα απαιτεί περισσότερο χρόνο για την ολοκλήρωση της. Για την εκφόρτιση σε αντίσταση ισχύει:

Για την περίπτωση της μέγιστης τάσης:

$$\frac{V_{stackmax}}{Resistor} = MaxCurrent \quad (2.1)$$

Για την περίπτωση της ελάχιστης τάσης:

$$\frac{V_{stackmin}}{Resistor} = MinCurrent \quad (2.2)$$

Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα στο φορτίο θα κυμαίνεται από MinCurrent έως Maxcurrent. Αυτό συμβαίνει διότι το φορτίο είναι σταθερό ενώ η τάση του συσσωρευτή αλλάζει ανάλογα τη στάθμη φόρτισης. Η ισχύς που καταναλώνεται στην μπαταρία θα είναι:

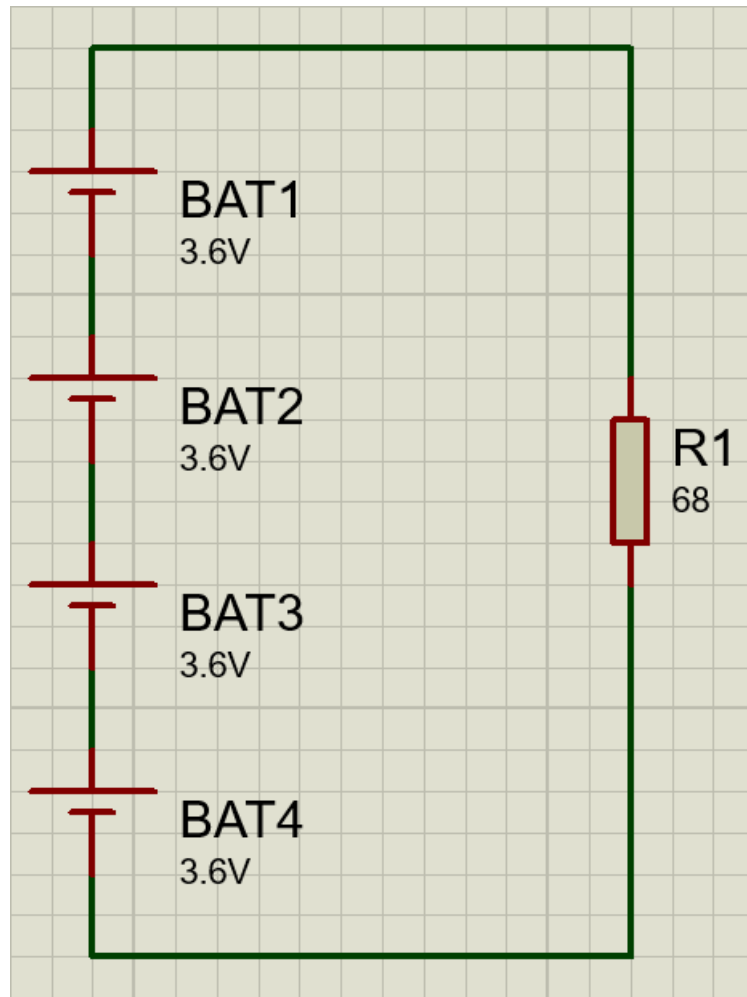
Για την περίπτωση της μέγιστης τάσης:

$$Maxcurrent * V_{stackmax} = MaxWatt \quad (2.3)$$

Για την περίπτωση της ελάχιστης τάσης:

$$Mincurrent * V_{stackmin} = MinWatt \quad (2.4)$$

Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο θα κυμαίνεται από MinWatt έως MaxWatt. Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε η χρήση πέντε διαφορετικών τιμών ωμικής αντίστασης. Δηλαδή πραγματοποιήθηκαν πέντε διαφορετικές εκφορτίσεις σε πέντε διαφορετικές αντιστάσεις με σκοπό την μελέτη της συμπεριφοράς της συστοιχίας σε κατάσταση εκφόρτισης σε σταθερό φορτίο. Για την εκφόρτιση του κυκλώματος οι μπαταρίες συνδέονται στο φορτίο, μέσω ενός ηλεκτρονικά ελεγχόμενου διακόπτη MOSFET, το οποίο για λόγους απλότητας είναι ωμικό, μία αντίσταση δηλαδή. Ο διακόπτης υπάρχει εκεί ώστε να αποκόπτει τη σύνδεση σε περίπτωση υπερφόρτισης (overvoltage) ή βαθιάς εκφόρτισης (undervoltage) αλλά και για να διακόπτει την εκφόρτιση για να ληφθούν μετρήσεις των στοιχείων της μπαταρίας σε κατάσταση ηρεμίας και όχι κατά τη διάρκεια φόρτου. Οι τιμές των αντιστάσεων είναι 8 ohm, 25 ohm, 68 ohm, 120 ohm και 240 ohm. Η πτώση τάσης στον διακόπτη θεωρείται αμελητέα. Δεν υπάρχει ιδανική τιμή αντίστασης για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν αρκεί να ικανοποιεί το κριτήριο της μέγιστης επιτρεπόμενης έντασης ρεύματος. Σε πραγματικές εφαρμογές το φορτίο συνήθως δεν είναι σταθερό αλλά αυξομειούμενο, παρόλα αυτά για πειραματικούς λόγους το σταθερό φορτίο αρκεί για να γίνει κατανοητή η λειτουργία συστοιχίας μπαταριών με σύστημα ελέγχου. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η εκφόρτιση συστοιχίας τεσσάρων στοιχείων σε ωμικό φορτίο.



Σχήμα 2.3: Σχεδιάγραμμα εκφόρτισης συστοιχίας μπαταριών σε ωμικό φορτίο.

Η μπαταρία έχει συγκεκριμένη χωρητικότητα οπότε ανάλογα το ρεύμα εκφόρτισης θα απαιτείται και διαφορετικός χρόνος εκφόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι η εκφόρτιση θα πραγματοποιείται σε χρόνο:

$$\frac{Capacity}{Current} \cong Hours \quad (2.5)$$

Όπου capacity είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας, current το ρεύμα εκφόρτισης και hours ο χρόνος που απαιτείται για να γίνει η εκφόρτισης σε ώρες. Ο χρόνος εκφόρτισης υπολογίζεται σε ιδανικές συνθήκες και με βάση τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας. Όμως τα χαρακτηριστικά είναι ιδανικά και βγαίνουν με βάση τα εργαστηριακά δεδομένα και όχι την χρήση στην πραγματικότητα. Στην πραγματικότητα υπάρχει πληθώρα αιτιών που επηρεάζουν την λειτουργία των συσσωρευτών, από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος έως την εσωτερική χημική σύσταση του στοιχείου. Επίσης, η χωρητικότητα των στοιχείων μειώνεται με την πάροδο του χρόνου οπότε η χωρητικότητα θα είναι αρκετά μικρότερη της αναγραφόμενης τιμής όσο περισσότερο χρησιμοποιείται. Σημειώνεται ότι στη διαδικασία εκφόρτισης η εξισορρόπηση με αντιστάσεις δεν έχει νόημα διότι απαιτείται ολόκληρη η διαθέσιμη ισχύς της μπαταρίας για να καταναλωθεί στο φορτίο και όχι να καταναλώνεται μέρος αυτής στο κύκλωμα εξισορρόπησης. Αυτό συνεπάγεται ότι τα στοιχεία θα εκφορτίζονται ανομοιόμορφα με διαφορετικούς ρυθμούς το καθένα. Όταν δεν υπάρχει έλεγχος σε κάθε ένα στοιχείο ξεχωριστά τότε η συστοιχία θα σταματήσει να παρέχει ενέργεια όταν η συνολική τάση της πέσει στα 12V. Με αυτόν

τον τρόπο όμως κάποιο στοιχείο ενδεχομένως να έχει αποφορτιστεί πολύ περισσότερο από κάποιο άλλο. Έτσι, το στοιχείο αυτό έχει αποφορτιστεί τόσο ώστε να προκαλείται φθορά εσωτερικά, μειώνοντας περαιτέρω την διάρκεια ζωής του και την χωρητικότητα του. Εάν στη συστοιχία αυτήν υπάρχει έλεγχος σε κάθε στοιχείο ξεχωριστά τότε μπορεί να αποκοπεί η μπαταρία τελείως από το κύκλωμα όταν ένα από αυτά αποφορτιστεί πλήρως, έτσι ώστε να προστατεύεται από βαθιά εκφόρτιση (undercharge).

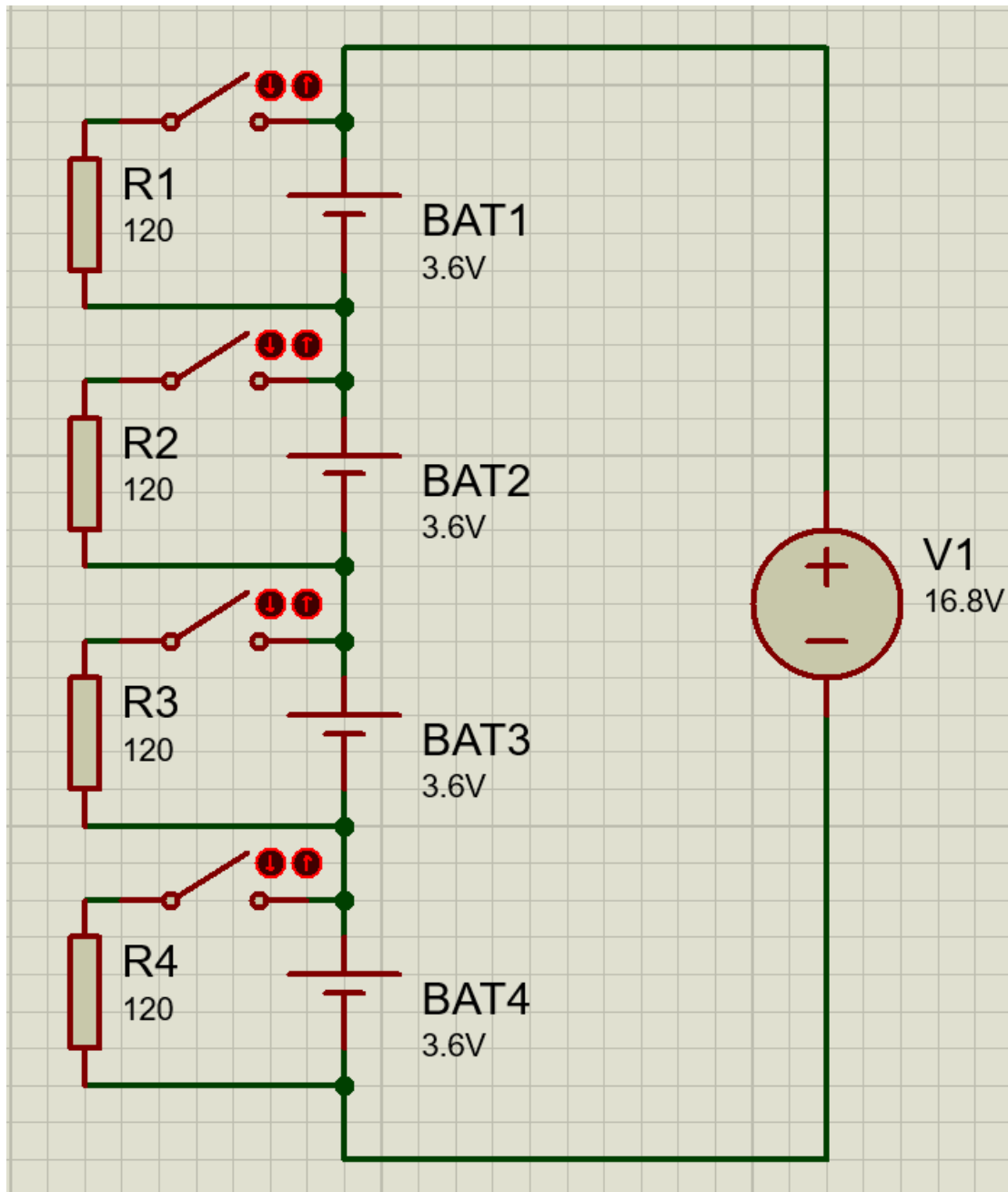
## 2.4 Εξισορρόπηση

Εξισορρόπηση ή balancing, είναι εκείνη η διαδικασία κατά την οποία όλα τα στοιχεία της μπαταρίας αποκτούν την ίδια τιμή τάσης. Η τάση συνδέεται άρρηκτα με την κατάσταση φόρτισης. Ως εκ τούτου, για να αποφευχθούν τα προβλήματα υπερφόρτισης θα πρέπει όλα τα στοιχεία της μπαταρίας να βρίσκονται στην ίδια κατάσταση φόρτισης και κατά συνέπεια να έχουν την ίδια τιμή τάσης. Λόγω των χημικών διαφορών των στοιχείων, κάποια στοιχεία θα εμφανίζουν διαφορετική χωρητικότητα από τα υπόλοιπα και θα φορτίζονται ή θα εκφορτίζονται με διαφορετικό ρυθμό. Αυτό θα ενισχυθεί περαιτέρω και από τη χρόνια χρήση τους ως συστοιχία. Αυτό προκαλεί προβλήματα, ειδικά στη περίπτωση της υπερφόρτισης όπου κάποιο στοιχείο της μπαταρίας φθάσει στο μέγιστο της χωρητικότητας του γρηγορότερα από κάποιο άλλο. Για να αντιμετωπισθεί αυτό το πρόβλημα πρέπει τα στοιχεία της μπαταρίας να εξισορροπούνται μεταξύ τους ώστε να έχουν πάντα το ίδιο φορτίο αποτρέποντας την υπερφόρτιση κάποιου εξ αυτών. Η εξισορρόπηση λαμβάνει χώρα μόνο κατά τη διάρκεια της φόρτισης καθώς κατά την εκφόρτιση απαιτείται από τη μπαταρία να αποδώσει το μέγιστο που μπορεί άσχετα από τις διαφορές των στοιχείων της. Υπάρχουν δυο μεγάλες κατηγορίες εξισορρόπησης: η εξισορρόπηση με μεθόδους απαγωγής θερμότητας (dissipative methods), και εξισορρόπηση με μεθόδους μη απαγωγής θερμότητας (non-dissipative methods). [3] Οι μέθοδοι αυτές αναφέρονται στον τρόπο με τον οποίο το BMS (Battery Management System) διαχειρίζεται την περίσσια ενέργεια των στοιχείων της μπαταρίας τα οποία φορτίζονται ταχύτερα από τα υπόλοιπα. Η μέθοδος απαγωγής ενέργειας απάγει την περίσσια ενέργεια των στοιχείων σε αντιστάσεις οι οποίες την μετατρέπουν σε θερμική ενέργεια η οποία εκπέμπεται στο περιβάλλον. Η δεύτερη μέθοδος διαχειρίζεται την περίσσια ενέργεια των στοιχείων με τέτοιο τρόπο ώστε αυτή να αξιοποιείται στην επαναφόρτιση ολόκληρης της συστοιχίας ή μεμονωμένων στοιχείων.

Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιήθηκε η πιο απλή μέθοδος η οποία είναι αυτή της απαγωγής θερμότητας γιατί είναι εύκολα υλοποιήσιμη και φθηνή ενώ η εξισορρόπηση αφορά την εκφόρτιση των πιο φορτισμένων εκ των στοιχείων σε αντιστάσεις έως ότου η τιμή της τάσης τους φθάσει στα ίδια επίπεδα με τα υπόλοιπα. Η εκφόρτιση αυτή πραγματοποιείται μεμονωμένα από το κάθε ένα στοιχείο σε αντιστάσεις συνδεδεμένες παράλληλα στα στοιχεία της μπαταρίας. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να έχουν ληφθεί μετρήσεις για την κατάσταση φόρτισης των στοιχείων της μπαταρίας, να έχουν επεξεργασθεί από τον μικροελεγκτή και αν χρειαστεί, τότε να ξεκινήσει η διαδικασία. Οι τιμές των αντιστάσεων μπορούν σε πειραματικό στάδιο να έχουν ένα πολύ μεγάλο εύρος τιμών αλλά σε πραγματικές εφαρμογές οι τιμές αυτές περιορίζονται σημαντικά. Ο λόγος για αυτό είναι ότι οι μικρότερες τιμές αντιστάσεων παρόλο που πετυχαίνουν γρήγορα και επιθυμητά αποτελέσματα παρουσιάζουν ζητήματα μεγέθους, κόστους και θερμότητας η οποία θα πρέπει να διοχετευθεί κάπου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως μικρές σε μέγεθος αντιστάσεις με μεγάλη ονομαστική τιμή χωρίς να υπερθερμαίνονται, με τίμημα όμως την πιο αργή εξισορρόπηση των στοιχείων.

Στο συγκεκριμένο πείραμα στα τέσσερα στοιχεία της μπαταρίας υπάρχουν παράλληλα και τέσσερις αντιστάσεις με διάφορες τιμές οι οποίες προσφέρονται για την εξισορρόπηση. Δηλαδή πραγματοποιήθηκαν συνολικά πέντε πειράματα με πέντε διαφορετικές τιμές αντιστάσεων

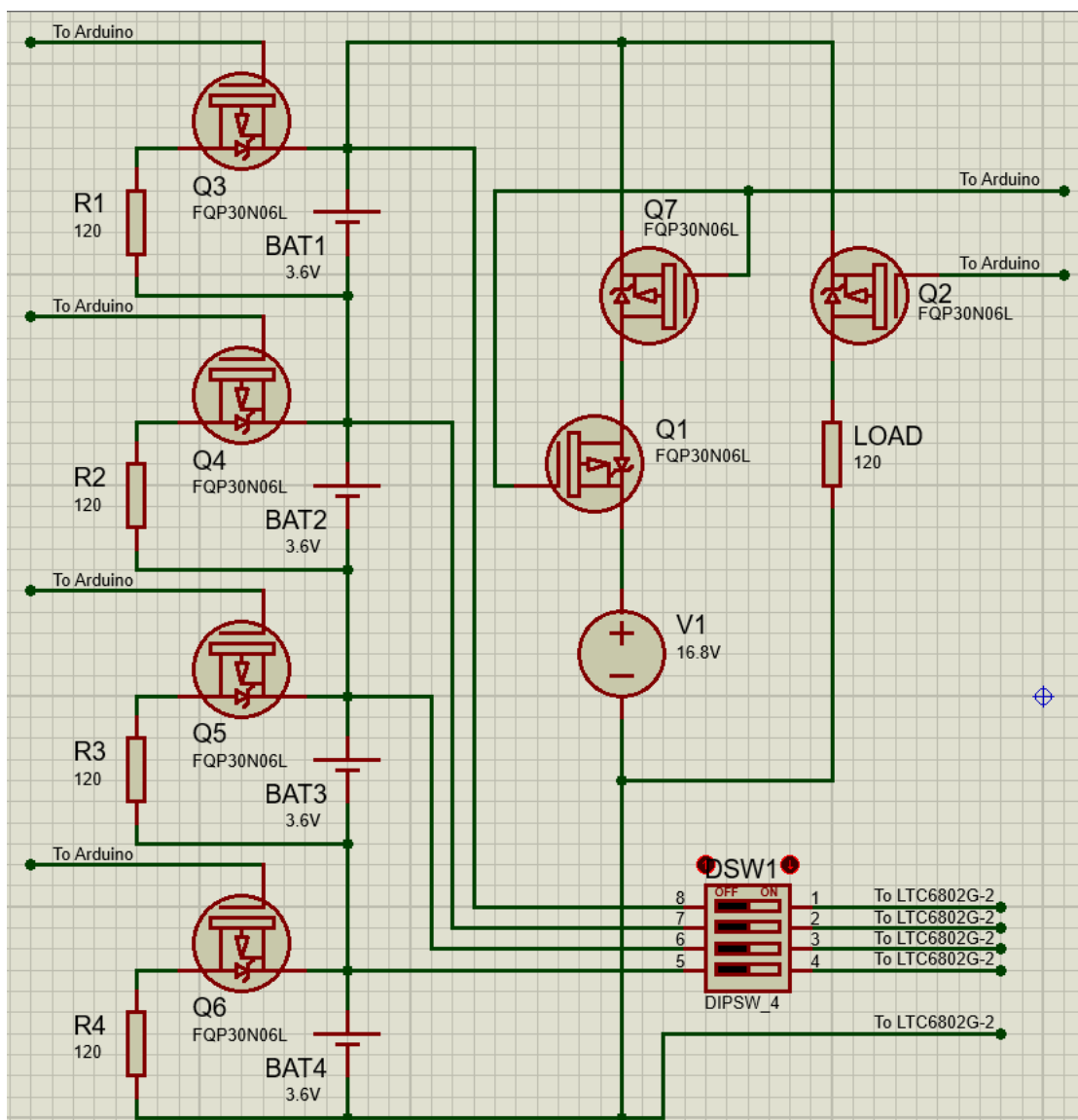
εξισορρόπησης για να μελετηθεί η συμπεριφορά της συστοιχίας για όλες αυτές τις τιμές. Οι τιμές αυτές είναι 33 ohm, 68ohm, 120 ohm, 240ohm και 470 ohm. Αυτές συνδέονται στα στοιχεία μέσω ηλεκτρονικών διακοπών MOSFET τα οποία ενεργοποιούνται από το ολοκληρωμένο όποτε τους δοθεί εντολή από τον μικροελεγκτή. Στο σχήμα 2.4 απεικονίζεται η συστοιχία με παράλληλες αντιστάσεις εξισορρόπησης σε κατάσταση φόρτισης.



Σχήμα 2.4: Σχεδιάγραμμα που απεικονίζει την συστοιχία μπαταριών με παράλληλες αντιστάσεις εξισορρόπησης σε κατάσταση φόρτισης.

Οι τρόποι εξισορρόπησης που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι η εξισορρόπηση κατά το τέλος της φόρτισης και η εξισορρόπηση κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Για την εξισορρόπηση κατά το τέλος της φόρτισης, αυτή πραγματοποιείται όταν η φόρτιση λάβει τέλος. Σε αυτήν την περίπτωση για να λάβει τέλος θα πρέπει ένα από τα τέσσερα στοιχεία της μπαταρίας να έχει φθάσει στο ανώτατο όριο τάσης φόρτισης που είναι τα 4.2V, για να αποφευχθεί η υπερφόρτιση. Όταν συμβεί αυτό τότε θα

σταματήσει η φόρτιση και θα αρχίσει η εξισορρόπηση. Σε αυτή την περίπτωση μόνο ένα στοιχείο θα έχει φθάσει στο ανώτατο όριο τάσης ενώ τα υπόλοιπα θα βρίσκονται χαμηλότερα. Τότε, ενεργοποιείται το σύστημα εξισορρόπησης και ενεργοποιούνται μέσω των διακοπών οι αντιστάσεις εξισορρόπησης των υψηλότερων ενεργειακά στοιχείων. Επειδή τα στοιχεία μπορούν μόνο να εκφορτίζονται για να φθάσουν όλα στο ίδιο επίπεδο πρέπει να εκφορτιστούν ως την χαμηλότερη τιμή της τάσης των στοιχείων. Οπότε, μετά την εξισορρόπηση αναμένεται όλα τα στοιχεία να έχουν την ίδια τιμή τάσης, ίση με την χαμηλότερη τιμή τάσης όταν διακόπηκε η φόρτιση. Αυτή η μέθοδος είναι απλή και εξασφαλίζει γρήγορη φόρτιση για τα στοιχεία της μπαταρίας όμως έχει τα μειονεκτήματα ότι δεν υπάρχει πλήρης φόρτιση των στοιχείων και δαπανάται ενέργεια άσκοπα στις αντιστάσεις εξισορρόπησης με τη μορφή θερμότητας. Στο σχήμα 2.5 απεικονίζεται η συστοιχία μπαταριών συνδεδεμένη μέσω διακοπών σε φορτίο και σε φορτιστή ενώ μέσω διακοπών τα στοιχεία συνδέονται παράλληλα με αντιστάσεις εξισορρόπησης.



Σχήμα 2.5: Σχεδιάγραμμα που απεικονίζει την συστοιχία μπαταριών συνδεδεμένη μέσω διακοπών σε ωμικό φορτίο και φορτιστή. Επίσης παράλληλα στα στοιχεία της μπαταρίας είναι τοποθετημένες αντιστάσεις εξισορρόπησης.

Για την εξισορρόπηση κατά τη φόρτιση η διαδικασία είναι διαφορετική. Στη περίπτωση φόρτισης με την φόρτιση και την εξισορρόπηση να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη αλλαγή στη κύκλωμα. Ταυτόχρονα με την φόρτιση μπορούν να ενεργοποιούνται τμηματικά οι διακόπτες εξισορρόπησης ανάλογα την τάση των στοιχείων προσφέροντας εναλλακτική διαδρομή για το ρεύμα φόρτισης. Στην περίπτωση που τα στοιχεία δεν αποκλίνουν μεταξύ τους τότε δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί εξισορρόπηση. Με αυτόν τον τρόπο, όποιο στοιχείο της μπαταρίας φορτίσει πιο γρήγορα κατά τη διάρκεια φόρτισης, θα υποστεί εξισορρόπηση σε αντίσταση και θα επανέλθει στο ίδιο επίπεδο με τα υπόλοιπα στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιείται μέτρηση κάθε 15 δευτερόλεπτα για να καθοριστεί το επίπεδο της τάσης των στοιχείων της μπαταρίας. Έπειτα τα στοιχεία τα οποία αποκλίνουν μεταξύ τους μια τιμή μεγαλύτερη από την προκαθορισμένη αποθηκεύονται στη μνήμη του μικροελεγκτή ως χρίζοντας εξισορρόπηση. Μόλις περάσει το ένα δευτερόλεπτο μέτρησης της τάσης, αμέσως επανέρχεται η φόρτιση στο κύκλωμα με την διαφορά ότι τα στοιχεία της μπαταρίας που χρειάζονταν εξισορρόπηση πλέον έχουν και παράλληλα τις αντιστάσεις εξισορρόπησης. Αυτές οι αντιστάσεις εξισορρόπησης προσφέρουν εναλλακτική διαδρομή για το ρεύμα το οποίο διαρρέεται στα στοιχεία της μπαταρίας. Έτσι, όταν το ρεύμα ρέει σε ένα στοιχείο όπου έχει ενεργοποιημένο το διακόπτη εξισορρόπησης, τότε το ρεύμα μοιράζεται ανάμεσα στο στοιχείο της μπαταρίας και την αντίσταση φορτίζοντας έτσι το στοιχείο με μικρότερη τιμή ρεύματος από ότι κάποιο άλλο στοιχείο χωρίς εξισορρόπηση.

Η ένταση του ρεύματος που διαρρέεται κάθε στιγμή από ένα στοιχείο το οποίο υπόκεινται σε εξισορρόπηση δίνεται από τον τύπο:

$$I_{cell} = I_{charger} - \frac{V_{cell}}{R+R_{sw}} \quad (2.6)$$

όπου  $I_{cell}$  είναι το ρεύμα που διαρρέει το στοιχείο,  $I_{charger}$  είναι το ρεύμα που παρέχει ο φορτιστής,  $V_{cell}$  είναι η τάση του στοιχείου,  $R$  είναι η αντίσταση εξισορρόπησης και  $R_{sw}$  είναι η εσωτερική αντίσταση του διακόπτη ενεργοποίησης. Το ρεύμα εξισορρόπησης αντιστοιχεί στο:

$$I_{balance} = \frac{V_{cell}}{R+R_{sw}} \quad (2.7)$$

Όπου  $I_{balance}$  είναι το ρεύμα εξισορρόπησης,  $V_{cell}$  είναι η τάση του στοιχείου,  $R$  είναι η αντίσταση εξισορρόπησης και  $R_{sw}$  είναι η εσωτερική αντίσταση του διακόπτη ενεργοποίησης. Έτσι επιβραδύνεται η φόρτιση του στοιχείου, του οποίου η τιμή της τάσης του έχει υπερβεί τα υπόλοιπα, με στόχο να προλάβουν τα υπόλοιπα στοιχεία που φορτίζουν με την κανονική ένταση ρεύματος να φτάσουν στο ίδιο επίπεδο. Στην περίπτωση που τα στοιχεία δεν αποκλίνουν μεταξύ τους περισσότερο από την προκαθορισμένη τιμή τότε δεν ενεργοποιούνται οι διακόπτες εξισορρόπησης και όλη η ένταση του ρεύματος διαρρέει όλα τα στοιχεία ομοίως. Είναι λογικό να θεωρήσουμε ότι ο ρυθμός του balancing, δηλαδή το πόσο γρήγορα θα βρεθούν όλα τα στοιχεία της μπαταρίας στην ίδια κατάσταση φόρτισης, είναι συνάρτηση του ρεύματος φόρτισης και του ρεύματος εξισορρόπησης. Όσο πιο γρήγορα γίνεται αποφόρτιση ενός στοιχείου σε σχέση με το ρεύμα φόρτισης τόσο πιο γρήγορα φθάνουν τα στοιχεία της μπαταρίας να έχουν την ίδια τιμή τάσης. Εάν το balancing πραγματοποιείται με μεγάλες τιμές αντιστάσεων και μικρό ρεύμα, τότε το μικρό συγκριτικά με το ρεύμα φόρτισης ρεύμα εξισορρόπησης δεν είναι αρκετό για να φέρει τα στοιχεία στην ίδια κατάσταση φόρτισης, με αντίκτυπο το να είναι απαραίτητη η χρήση balancing και μετά το πέρας της φόρτισης. Αντίστοιχα, αν οι αντιστάσεις εξισορρόπησης είναι πολύ μικρές και το ρεύμα εξισορρόπησης μεγάλο, τότε όλο το

ρεύμα φόρτισης διαρρέει την αντίσταση εξισορρόπησης συν το ρεύμα της μπαταρίας που χρειάζεται, προκαλώντας ακόμα πιο άμεση εξισορρόπηση αλλά και μεγάλη δαπάνη ενέργειας. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι απαιτείται μεγάλος χρόνος εξισορρόπησης στην περίπτωση χρήσης μικρών αντιστάσεων εξισορρόπησης και η σπατάλη ενέργειας σε μορφή θερμότητας. Τα πλεονεκτήματα είναι ότι το χάσμα της κατάστασης φόρτισης ανάμεσα στα στοιχεία της μπαταρίας μηδενίζεται και πλέον φορτίζονται όλα τα στοιχεία στην πλήρη χωρητικότητα τους.

## 2.5 Επίλογος

Για την ασφαλή χρήση των μπαταριών ιόντων λιθίου, υπάρχουν αυστηρές προδιαγραφές φόρτισης και εκφόρτισης όσον αφορά τις τιμές του ρεύματος, τάσης αλλά και θερμοκρασίας. Όταν υπάρχουν συστοιχίες μπαταριών ιόντων λιθίου θα πρέπει να γίνεται μεμονωμένος έλεγχος στα στοιχεία της μπαταρίας προκειμένου να διασφαλισθεί ότι όλα τα στοιχεία λειτουργούν με βάση τις προδιαγραφές ασφαλείας. Λόγω των χημικών διαφορών των στοιχείων, κάποια στοιχεία θα εμφανίζουν διαφορετική χωρητικότητα από τα υπόλοιπα και θα φορτίζονται ή θα εκφορτίζονται με διαφορετικό ρυθμό. Για να αντιμετωπισθεί αυτό το πρόβλημα πρέπει τα στοιχεία της μπαταρίας να εξισορροπούνται μεταξύ τους ώστε να έχουν πάντα το ίδιο φορτίο αποτρέποντας την υπερφόρτιση κάποιου εξ αυτών. Για τον επιμέρους έλεγχο των στοιχείων μιας συστοιχίας καθώς και για την εξισορρόπηση τους χρησιμοποιείται ένα σύστημα διαχείρισης μπαταριών το οποίο λαμβάνει μετρήσεις από τα στοιχεία της μπαταρίας.

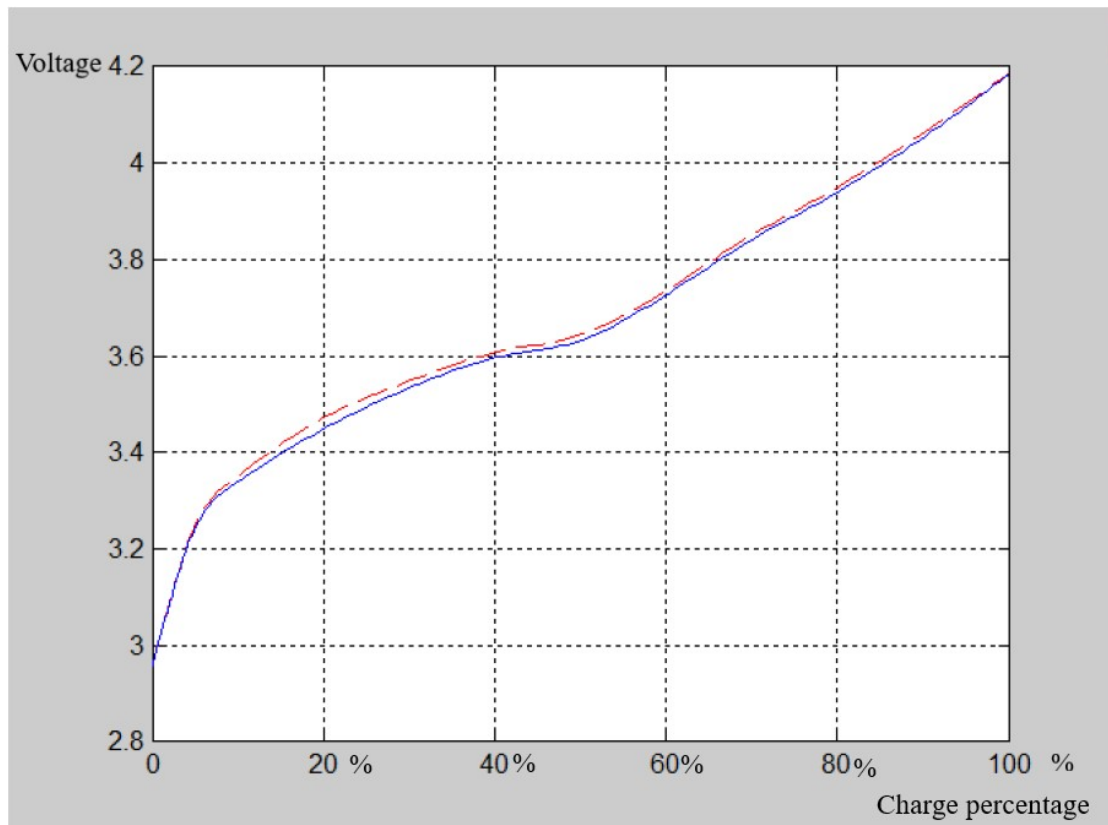
## Κεφάλαιο 3ο: Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών

### 3.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα διαχείρισης μπαταριών η αλλιώς BMS(Battery Management System) είναι συστήματα τα οποία διαχειρίζονται τη λειτουργία των μπαταριών. Υπήρχαν σαν τεχνολογία για πολλά χρόνια όμως τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη τους είναι μεγαλύτερη λόγω των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αναπτύσσονται ταχύτερα τα τελευταία χρόνια και η μοναδική πηγή ενέργειας τους είναι μεγάλες μπαταρίες. Αυτές οι μπαταρίες είναι αποτελούμενες από πολλά στοιχεία και κατά κύριο λόγο είναι τεχνολογίας ιόντων λιθίου. Μία μεγάλη μπαταρία αποτελούμενη από στοιχεία ιόντων λιθίου προκειμένου να είναι αποτελεσματική πρέπει να είναι ασφαλής και αξιόπιστη. Η ασφάλεια και η αξιοπιστία είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με το σύστημα διαχείρισης μπαταριών. Σε μια μπαταρία θα πρέπει να δίνονται δεδομένα στο χρήστη αναφορικά με την κατάσταση φόρτισης, τη κατάσταση υγείας της και την απόδοση της. Επίσης θα πρέπει να υπάρχει προστασία υπερφόρτισης και βαθιάς εκφόρτισης της μπαταρίας διαφορετικά η χρήση της εγκυμονεί κινδύνους ανάφλεξης. [4]

### 3.2 Battery Management System

Για να γίνει αντιληπτό για ποιον λόγο ένα BMS(Battery Management System) είναι απαραίτητο, χρειάζεται πρώτα να γίνει κατανοητό ποιες είναι οι προκλήσεις διαχείρισης των μπαταριών και συγκεκριμένα των μπαταριών ιόντων λιθίου. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν πολλά πλεονεκτήματα όμως πρέπει να διαχειρίζονται με σωστό τρόπο. Για την ακρίβεια, θα πρέπει να λειτουργούν σε μια περιοχή ασφαλείας όσον αφορά το φορτίο τους αλλά και την θερμότητα. Πιο συγκεκριμένα, σε μια μπαταρία ιόντων λιθίου απαιτείται προκειμένου να λειτουργεί στην ασφαλή περιοχή, η θερμοκρασία της να μην υπερβαίνει τους 45 βαθμούς κελσίου αλλά ούτε τους -5 βαθμούς κελσίου και η τάση λειτουργίας της να κυμαίνεται από 2.5 έως 4.2 Volt. Εάν αυτά τα όρια ασφαλής λειτουργίας ξεπεραστούν τότε μειώνεται δραματικά η διάρκεια ζωής της μπαταρίας και μπορεί να αποβεί επικίνδυνη για χρήση. Από αυτές τις ιδιαιτερότητες γίνεται αντιληπτό ότι ένα σύστημα διαχείρισης μπαταριών είναι απαραίτητο προκειμένου οι μπαταρίες να λειτουργούν στην ασφαλή περιοχή λειτουργίας. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι BMS, οι συνηθέστεροι όμως περιλαμβάνουν τη μέτρηση τάσης μπαταριών, τη μέτρηση της έντασης του ρεύματος, τη μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας της μπαταρίας και τη μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ο κύριος ρόλος που έχουν τα συστήματα επίβλεψης μπαταριών BMS είναι να εξασφαλίζουν ότι το ενεργειακό φορτίο της μπαταρίας θα παρέχεται βέλτιστα στον αποδέκτη, να εξασφαλίζουν ότι ο κίνδυνος ζημιάς της μπαταρίας είναι ο μικρότερος δυνατός και να επιβλέπουν και να ελέγχουν τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας.[5] Το BMS λοιπόν πρέπει οπωσδήποτε να εξασφαλίζει ότι τα στοιχεία της μπαταρίας δεν θα βγουν εκτός ορίων ασφαλούς λειτουργίας τόσο στην φόρτιση όσο και στην εκφόρτιση. Επίσης μια πολύ σημαντική εργασία που πραγματοποιεί το BMS είναι η καταγραφή της κατάστασης φόρτισης. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να βρεθεί η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και είναι από τις πιο σημαντικές πληροφορίες που καταγράφει το BMS. Ο πιο κοινός τρόπος εύρεσης της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας είναι μέσω της τάσης ανοικτού βρόχου. Για να μετρηθεί όμως η τάση ανοικτού βρόχου απαιτείται μεγάλος χρόνος μέτρησης και σε πρακτικές εφαρμογές είναι δύσκολο να εφαρμοσθεί.[6] Παρακάτω, στο σχήμα 3.1 φαίνεται το διάγραμμα που αντιστοιχίζει την τάση ανοικτού βρόχου ενός στοιχείου ιόντων λιθίου με την κατάσταση φόρτισης.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η συσχέτιση της τάσης ανοικτού βρόχου στοιχείου ιόντων λιθίου με την κατάσταση φόρτισης του. Πηγή: [6]

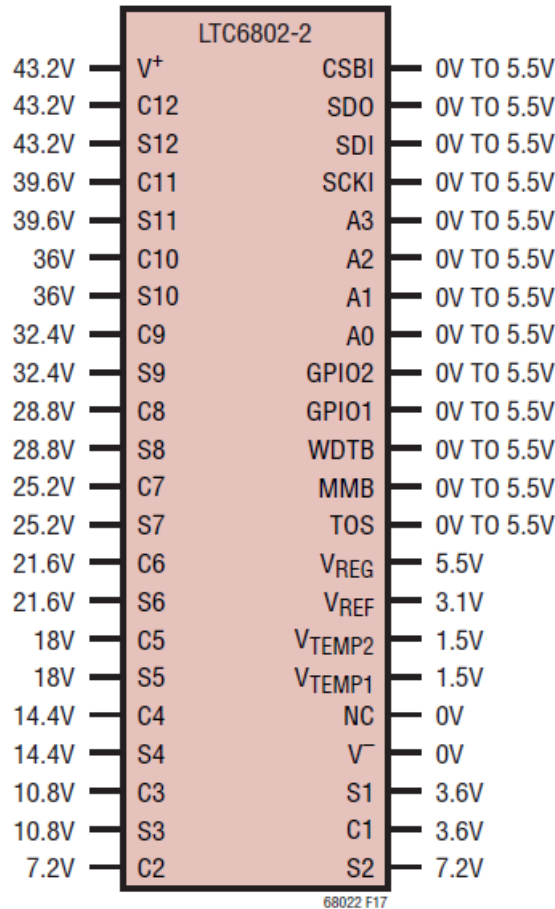
Άλλη μια σημαντική πληροφορία όπου τα BMS εξάγουν είναι η κατάσταση υγείας της μπαταρίας (State of Health – SoH). Η κατάσταση υγείας της μπαταρίας αντικατοπτρίζει τη γενικότερη κατάσταση της μπαταρίας και το κατά πόσο έχει μειωθεί η απόδοση της σε σχέση με μια καινούργια μπαταρία. Επιπρόσθετα μία σημαντική ευθύνη όπου αναλαμβάνει το BMS είναι το balancing, η εξισορρόπηση των στοιχείων της μπαταρίας δηλαδή. Όταν μια μπαταρία αποτελείται από πολλά στοιχεία τότε απαιτείται μεμονωμένος έλεγχος των στοιχείων της μπαταρίας. Όταν οι διαφορές των στοιχείων της μπαταρίας είναι μεγάλες τότε υπάρχει κίνδυνος για τα στοιχεία να μη λειτουργήσουν στην ασφαλή περιοχή λειτουργίας τους αλλά και να μειώσουν τη συνολική απόδοση της μπαταρίας. Όταν εξισορροπείται το ενεργειακό φορτίο ανάμεσα στα στοιχεία της μπαταρίας τότε το πρόβλημα περιορίζεται σημαντικά. Άλλη μια χρήσιμη λειτουργία του BMS είναι η κράτηση της αρχικής κατάστασης των στοιχείων μιας μπαταρίας στη μνήμη του. Με αυτό τον τρόπο το BMS μπορεί να συγκρίνει την κατάσταση υγείας της μπαταρίας με την αρχική της κατάσταση. Τέλος, όλες αυτές οι αρμοδιότητες όπου αναλαμβάνουν τα BMS αποκτούν μεγαλύτερη σημασία όταν αυτά διασυνδέονται με άλλα συστήματα μέσω κάποιας μορφής επικοινωνίας, το οποίο βοηθάει στο να μεταβιβάζεται η πληροφορία των μπαταριών στο υπόλοιπο σύστημα. [5]

Γενικότερα, ένα ικανό και αξιόπιστο BMS θα πρέπει να: λαμβάνει μετρήσεις, να παρέχει προστασία, να καθορίζει και να προβλέπει την κατάσταση της μπαταρίας, να ελέγχει την φόρτιση και την εκφόρτιση, να εξισορροπεί τα στοιχεία της μπαταρίας, να διαχειρίζεται τη θερμότητα στη μπαταρία, να επικοινωνεί και να ενημερώνει με τον χρήστη της μπαταρίας μέσω διεπαφής, να επικοινωνεί με όλα τα υποσυστήματα της μπαταρίας και τελικά να επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής της. Ικανά και ώριμα συστήματα επίβλεψης μπαταριών υπάρχουν ήδη στους φορητούς υπολογιστές και στα κινητά τηλέφωνα αλλά δεν έχουν αναπτυχθεί πλήρως στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Αυτό συμβαίνει γιατί η ισχύς των μπαταριών των αυτοκινήτων είναι πολύ μεγάλη και τα αποτελούμενα στοιχεία των

μπαταριών αυτών πάρα πολλά. Δηλαδή το σύστημα BMS στα αυτοκίνητα θα πρέπει να ελέγχει εκατοντάδες στοιχεία μπαταρίας και να διαχειρίζεται μεγάλη ισχύ, κάτι το οποίο τα καθιστά πολύπλοκα στη κατασκευή τους. Στο εμπόριο κυκλοφορούν πολλά ολοκληρωμένα κυκλώματα BMS τα οποία χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Αυτά τα ολοκληρωμένα κυκλώματα έχουν πολλές δυνατότητες όμως υπάρχουν ακόμα πολλές αδυναμίες. Μία από τις τυπικές τους αδυναμίες είναι η περιορισμένη αποθήκευση δεδομένων, η οποία χρειάζεται για την μακροχρόνια παρακολούθηση της μπαταρίας και θα βοηθούσε σε καλύτερη εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης με την πάροδο του χρόνου. Άλλη πολύ σοβαρή αδυναμία είναι ότι δεν γίνεται υπολογισμός της κατάστασης υγείας μιας μπαταρίας από το ολοκληρωμένο, ενώ εάν μπορούσε ο χρήστης να ενημερωθεί για την κατάσταση υγείας της μπαταρίας θα ήταν εύκολο να υπολογισθεί και ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής της. Μια τελευταία αδυναμία αυτών των συστημάτων επίβλεψης μπαταριών είναι ότι το κάθε BMS έχει δικό του πρωτόκολλο και για το balancing αλλά και για επικοινωνία καθιστώντας αδύνατο το να χρησιμοποιηθούν μαζί. [4]. Ενδεικτικά μερικά ολοκληρωμένα κυκλώματα που κυκλοφορούν στο εμπόριο είναι της Analog Devices τα LTC6802 και LTC6811, της MAXIM το DS2745, της Infineon Technologies το TLE9012AQU, της NXP Semiconductor το MC33771B\_SBS, της ST το L9963 και της Texas Instruments το bq76940. Όλα αυτά τα ολοκληρωμένα κυκλώματα στοχεύουν στον αποτελεσματικό έλεγχο των μπαταριών, έχοντας το καθένα τις δικές του ιδιαιτερότητες και δυνατότητες. Κάποια είναι απλούστερα στη χρήση αλλά με μειωμένες δυνατότητες ενώ άλλα είναι πιο σύνθετα με περισσότερες δυνατότητες. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος επίβλεψης και ελέγχου μπαταριών είναι συνάρτηση πολλών μεταβλητών και εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του συστήματος, το κόστος της εφαρμογής, την ισχύ της μπαταρίας, των αριθμό των στοιχείων της μπαταρίας, τον τρόπο επικοινωνίας του BMS και τις δυνατότητες του.

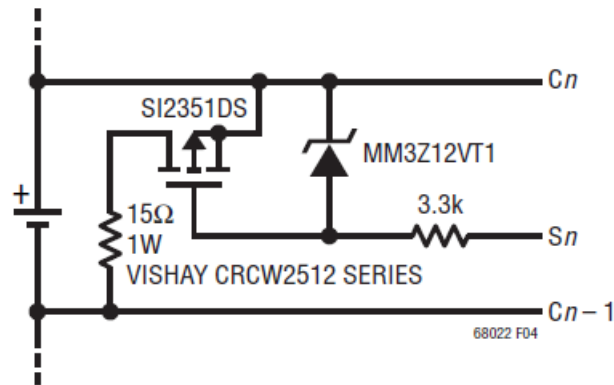


Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) είναι ένα συμπαγές ολοκληρωμένο κύκλωμα για επίβλεψη μπαταριών (battery monitoring) το οποίο περιλαμβάνει ένα 12bit ADC (Analog to Digital Converter) δηλαδή μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα, μέτρηση τάσης ακρίβειας, πολυπλέκτη υψηλής τάσης και σειριακή επικοινωνία. Επίσης μπορεί να λάβει μετρήσεις τάσης σε έως και 12 στοιχεία σε συστοιχία σε μόλις 13ms, με μέγιστη τάση μέτρησης τα 60V και παρέχει και τη δυνατότητα για επιμέρους εξισορρόπηση της κάθε μιας μπαταρίας ανάλογα τις ανάγκες της εφαρμογής.[7] Επειδή οι μπαταρίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι 4 σε αριθμό, η δυνατότητα του LTC6802G-2 υπερκαλύπτει τις ανάγκες αφού μπορούν να μετρηθούν έως και 12 μπαταρίες. Πολλά LTC6802G-2 ολοκληρωμένα μπορούν να συνδεθούν μαζί για να μετρήσουν μεγάλες μπαταρίες με αριθμό στοιχείων μεγαλύτερο από 12. Συγκεκριμένα μέχρι 16 LTC6802G-2 μπορούν να διασυνδεθούν ταυτόχρονα και να ελέγχονται ταυτόχρονα από έναν μόνο μικροελεγκτή για να ελέγξουν ένα τεράστιο αριθμό μπαταριών. Ο τρόπος διασύνδεσης μεταξύ τους είναι επίσης μέσω της σειριακής επικοινωνίας. Το LTC6802G-2 προσφέρει επίσης και μία λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας με την οποία το ολοκληρωμένο ελέγχει τα στοιχεία της μπαταρίας μόνο για τη περίπτωση της υπερφόρτισης και την βαθειάς εκφόρτισης. Διαθέτει επίσης και λειτουργία αδράνειας με κατανάλωση ρεύματος 50μΑ. Όλες οι εισοδοί για τη μέτρηση τάσης των στοιχείων έχουν και μία έξοδο με διακόπτη MOSFET για την εξισορρόπηση των υπερφορτισμένων στοιχείων. Για τη σωστή λειτουργία του, το LTC6802G-2 χρησιμοποιεί έναν 12bit delta-sigma αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα (Analog to digital converter). Ο μετατροπέας delta-sigma εισάγει το σήμα μέτρησης πολλές φορές και φιλτράρεται ώστε να παραχθεί ένα ψηφιακό αποτέλεσμα. Επίσης ο συγκεκριμένος μετατροπέας είναι εξαιρετικός στην απόρριψη θορύβου σε μία μόλις μετατροπή ενώ έχει άριστα χαρακτηριστικά για DC εφαρμογές. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές με διακόπτες υψηλής τάσης οι οποίοι εισάγουν θόρυβο διακοπών κατά τις μετρήσεις.[7] Οι τυπικές μέγιστες τάσεις λειτουργίας για το κάθε pin του LTC6802G-2 φαίνονται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Κάτοψη του LTC6802G-2 με αναγραφόμενες τις μέγιστες τάσεις λειτουργίας των pin του.  
 Πηγή: LTC6802G-2 Datasheet.

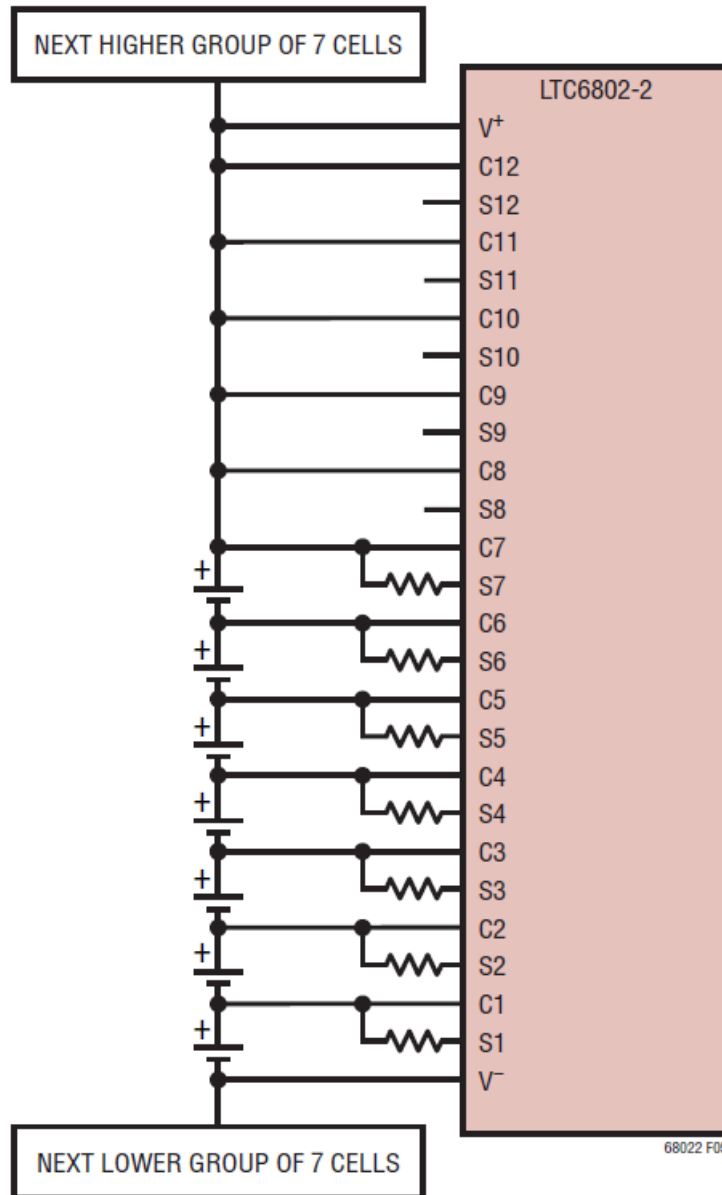
Το LTC6802G-2 διαθέτει και κύκλωμα εξισορρόπηση μπαταριών με εσωτερικούς διακόπτες MOSFET. Το μέγιστο ρεύμα εξισορρόπησης που μπορεί να αντέξει το LTC6802G-2 περιορίζεται από την αντοχή του στην θερμοκρασία. Η υπερβολική θερμοκρασία κατά την εξισορρόπηση ανεβάζει την συνολική θερμοκρασία του ολοκληρωμένου. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του παραμένουν αναλλοίωτα μέχρι τη θερμοκρασία των 85 βαθμών κελσίου ενώ ζημιιά προκαλείται στο κύκλωμα σε θερμοκρασία 150 βαθμών κελσίου. Για αυτό το λόγο, το ολοκληρωμένο LTC6802G-2 περιέχει ένα κύκλωμα αποκοπής όπου διακόπτει τη λειτουργία του εάν υπερθερμανθεί. Για τη χρήση μεγαλύτερου ρεύματος εξισορρόπησης απαιτείται η χρήση εξωτερικών διακοπών και εξωτερικής αντίστασης τα οποία θα ελέγχονται από τους εσωτερικούς διακόπτες MOSFET. Οι εσωτερικοί διακόπτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγχουν και ένα εξωτερικό κύκλωμα εξισορρόπησης προσφέροντας έτσι μεγαλύτερες δυνατότητες ανοχής ρεύματος. Εσωτερικά αυτές οι έξοδοι περιέχουν μία pull-up αντίσταση τιμής 10k Ohm και έτσι οι έξοδοι αυτοί συμπεριφέρονται σαν ψηφιακές έξοδοι όταν χρειαστεί. Για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές τιμές ρεύματος εξισορρόπησης μπαταριών μπορούν να συνδεθούν σε αυτές τις εξόδους κατάλληλοι διακόπτες P-channel MOSFET μαζί με μια αντίσταση χαμηλότερης τιμής. Οι έξοδοι αυτές του LTC6802G-2 συνδέονται στην πύλη (gate) του MOSFET. Στη παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν εξωτερικά MOSFET και εξωτερικές αντιστάσεις για την εξισορρόπηση για την δυνατότητα χρήσης μεγαλύτερου ρεύματος εξισορρόπησης. Στο σχήμα 3.4 φαίνεται ο τρόπος σύνδεσης ενός εξωτερικού MOSFET για το balancing ενός στοιχείου της μπαταρίας.



Σχήμα 3.4: Συνδεσμολογία του LTC6802G-2 για τη σύνδεση εξωτερικού MOSFET για balancing.  
Πηγή: LTC6802G-2 Datasheet.

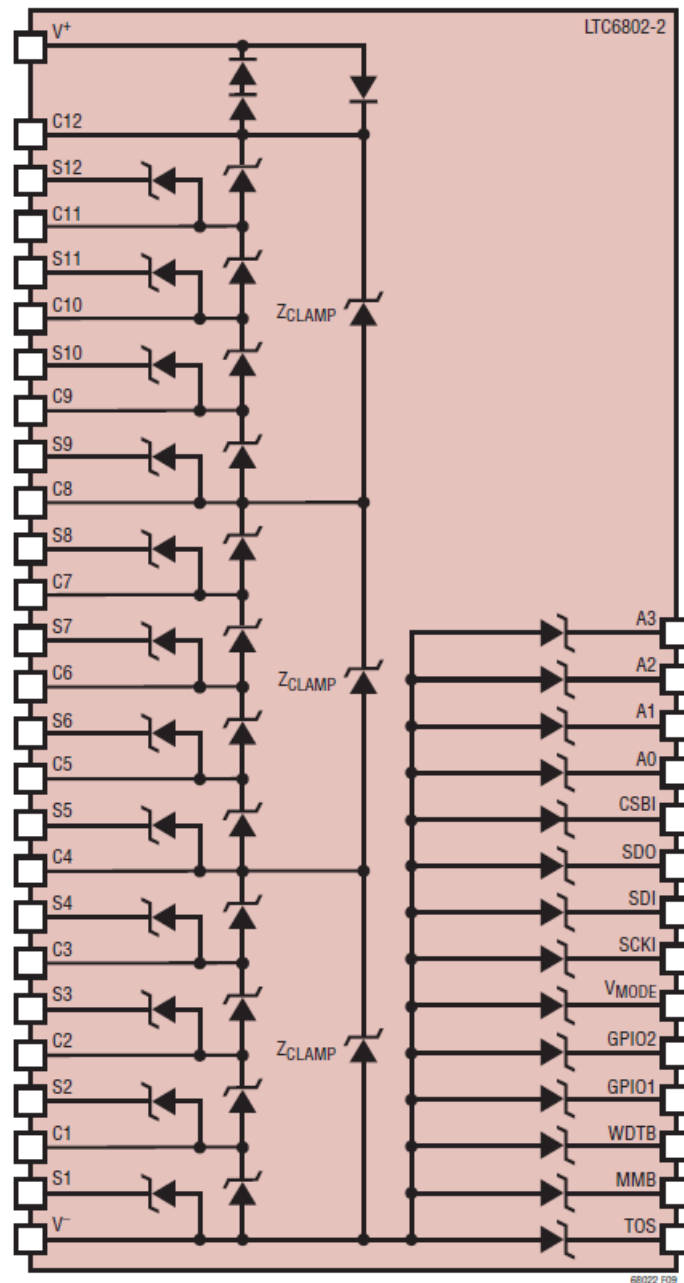
Εάν ένα στοιχείο της μπαταρίας διακοπεί από το κύκλωμα μέτρησης, τότε αυτό επηρεάζει την μέτρηση των υπολοίπων στοιχείων. Για την ανίχνευση του ανοικτού κυκλώματος στις μετρήσεις υπάρχει ειδική εντολή η οποία όταν δοθεί στο LTC6802G-2 από τον μικροελεγκτή τότε βρίσκεται η θέση του στοιχείου που έχασε την σύνδεση. Εάν χρησιμοποιηθεί το LTC6802G-2 για τη μέτρηση λιγότερων των 12 στοιχείων τότε υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργήσει με ελάχιστα 4 στοιχεία. Ο αριθμός αυτός καθορίζεται από τις απαιτήσεις του ολοκληρωμένου σε παροχή ελάχιστης τάσης. Το σύνολο των τάσεων αθροιστικά πρέπει να είναι τουλάχιστον 10Volt για να εξασφαλισθεί ότι όλες οι ηλεκτρικές προδιαγραφές καλύπτονται επαρκώς.[7] Στο σχήμα 3.5 φαίνεται πως πρέπει να πραγματοποιείται η σύνδεση σε περίπτωση χρήσης λιγότερων από 12 στοιχεία.

Στα περαιτέρω χαρακτηριστικά του LTC6802G-2 υπάρχει η δυνατότητα για τρεις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Αυτές είναι η standby mode, measure mode και monitor mode. Στην κατάσταση standby, το κύκλωμα τροφοδοτείται από το ελάχιστο δυνατό ρεύμα και οι μόνες λειτουργίες σε ενεργεία είναι η σειριακή επικοινωνία και ο σταθεροποιητής τάσης. Στην κατάσταση measure, το ολοκληρωμένο κύκλωμα διαβάζει τις τάσεις των στοιχείων στα οποία συνδέεται αλλά και τις καταστάσεις υπερφόρτισης ή βαθιάς εκφόρτισης που μπορεί να εμφανίσουν και τις αποστέλλει στον μικροελεγκτή μέσω σειριακής επικοινωνίας. Κατά την κατάσταση monitor το ολοκληρωμένο λειτουργεί όπως και στην measure κατάσταση αλλά χωρίς τη χρήση σειριακής επικοινωνίας, ενώ για τις καταστάσεις υπερφόρτισης και βαθιάς εκφόρτισης δίνει σήμα σε μία συγκεκριμένη έξοδο για να αναγνωσθεί από τον μικροελεγκτή.[7] Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η measure mode.



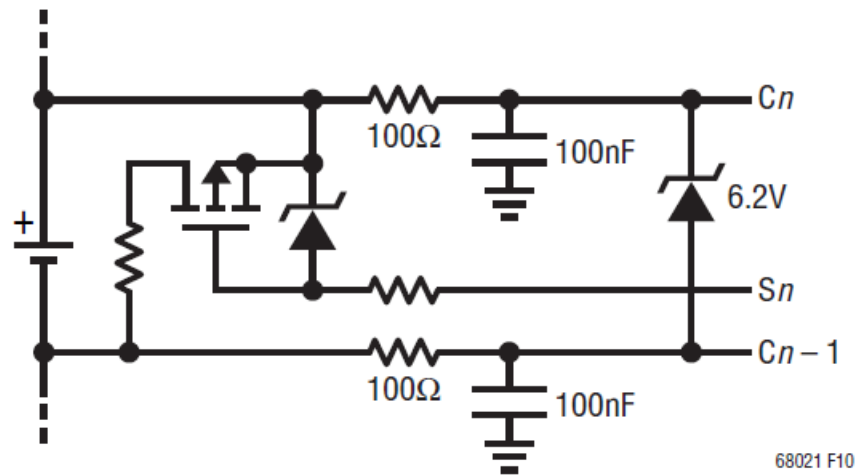
Σχήμα 3.5: Συνδεσμολογία του LTC6802G-2 για τον έλεγχο λιγότερων από 12 στοιχείων ιόντων λιθίου. Πηγή: LTC6802G-2 Datasheet.

Για την προστασία του ολοκληρωμένου κυκλώματος υπάρχουν επίσης ενσωματωμένες διόδους προστασίας οι οποίες βοηθούν στην αποτροπή ζημιάς στα εσωτερικά εξαρτήματα του ολοκληρωμένου. Στο σχήμα 3.6 φαίνεται η διάταξη όλων των διόδων προστασίας. Οι διόδους που χρησιμοποιούνται είναι απλές διόδους πυριτίου με τάση διάσπασης τα 0,5V. Οι διόδους Zener έχουν τάση αντίστροφης διάσπασης τα 12V αρχικά όπου μετά σταθεροποιούνται στα 7v. Οι διόδους Zener όπου στο σχήμα ονομάζονται Zclamp είναι διόδους Zener υψηλότερης τάσης διάσπασης, με αρχική τάση τα 30V και σταθεροποίηση στα 25V. Η τάση ορθής πόλωσης όλων των διόδων είναι τα 0.5V.[7]



Σχήμα 3.6: Εσωτερική ένδειξη διόδων ασφαλείας του LTC6802G-2. Πηγή: LTC6802G-2 Datasheet.

Στις εισόδους μετρήσεων τάσης των στοιχείων μπορούν να συνδεθούν αντιστάσεις των 100Ω σε σειρά με το μετρούμενο στοιχείο για μεγαλύτερη ασφάλεια στις τιμές ρεύματος χωρίς να επιφέρει σημαντικές διαφορές στο μετρούμενο αποτέλεσμα αλλά μόνο υπό την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούνται εξωτερικά MOSFET εξισορρόπησης. Δεν είναι δυνατό να τοποθετηθεί αντίσταση σε σειρά με την τάση αναφοράς της μπαταρίας V-, καθώς αυτό θα επηρέαζε σημαντικά το σύστημα μετρήσεων και θα οδηγούσε σε λανθασμένο αποτέλεσμα. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν οι αντιστάσεις των 100Ω σε σειρά με το μετρούμενο στοιχείο διότι χρησιμοποιήθηκαν και εξωτερικά MOSFET εξισορρόπησης.



Σχήμα 3.7: Συνδεσμολογία του LTC6802G-2 για τη χρήση εξωτερικού RC φίλτρου στις εισόδους μέτρησης. Πηγή: LTC6802G-2 Datasheet.

Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και εξωτερικά πυκνωτές στα στοιχεία της μπαταρίας δημιουργώντας ένα RC φίλτρο στις εισόδους του LTC6802G-2 για τη μέτρηση της τάσης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7. Αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την εξισορρόπηση με χρήση των εσωτερικών MOSFET.[7] Στη παρούσα εφαρμογή δεν χρησιμοποιήθηκε RC φίλτρο.

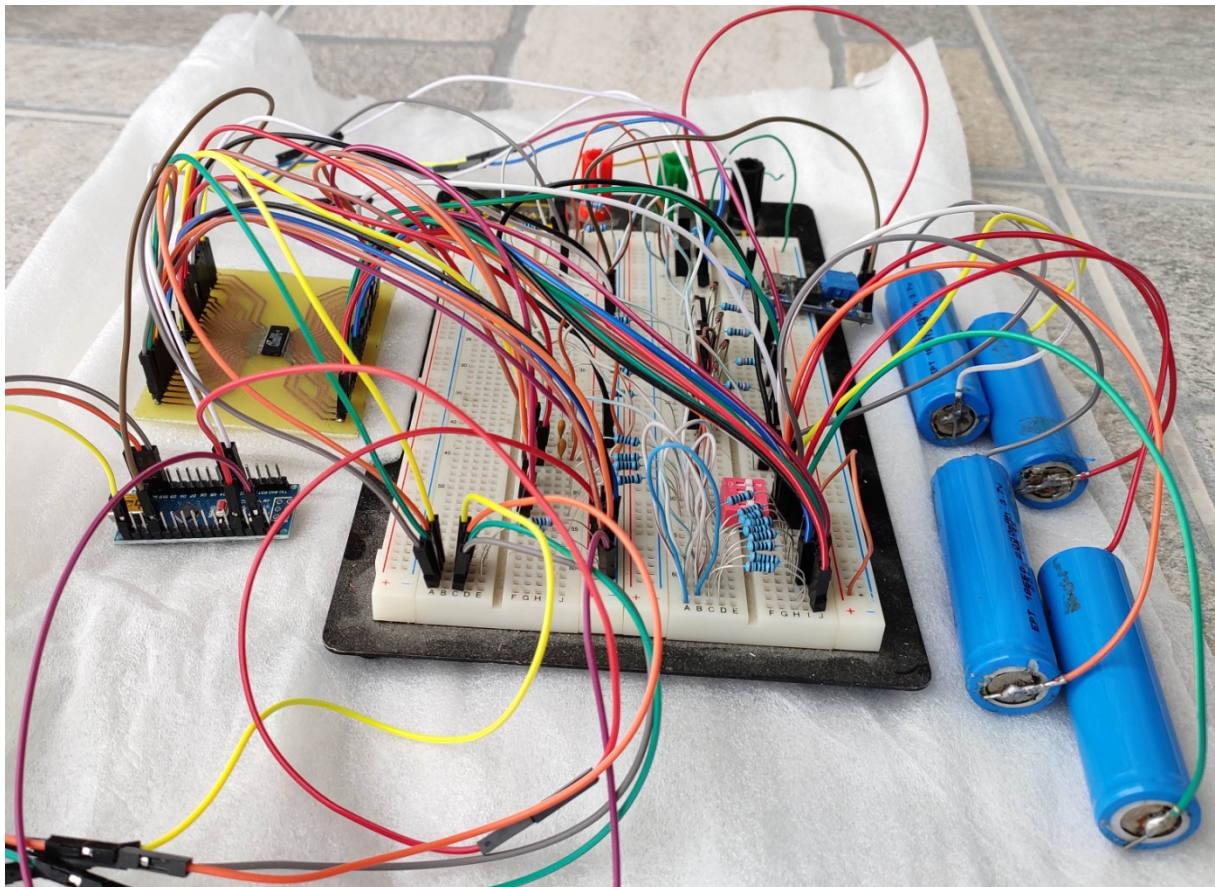
### 3.3 Επίλογος

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν πολλά πλεονεκτήματα όμως θα πρέπει να λειτουργούν σε μια περιοχή ασφαλείας όσον αφορά την τάση λειτουργίας τους, την ένταση του ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης αλλά και την θερμότητα. Από αυτές τις ιδιαιτερότητες γίνεται αντιληπτό ότι ένα σύστημα διαχείρισης μπαταριών είναι απαραίτητο προκειμένου οι μπαταρίες να λειτουργούν στην ασφαλή περιοχή λειτουργίας. Ο κύριος ρόλος που έχουν τα συστήματα διαχείρισης μπαταριών είναι να εξασφαλίζουν ότι το ενεργειακό φορτίο της μπαταρίας θα παρέχεται βέλτιστα στον αποδέκτη, να εξασφαλίζουν ότι ο κίνδυνος ζημιάς της μπαταρίας είναι ο μικρότερος δυνατός και να επιβλέπουν και να ελέγχουν τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Επίσης μια πολύ σημαντική εργασία που πραγματοποιεί το BMS είναι η καταγραφή της κατάστασης φόρτισης αλλά και η καταγραφή της κατάστασης υγείας της μπαταρίας. Στο εμπόριο κυκλοφορούν πολλά ολοκληρωμένα κυκλώματα BMS τα οποία χρησιμοποιούνται εκτενώς τα οποία έχουν πολλές δυνατότητες όμως έχουν ακόμα αρκετές αδυναμίες.

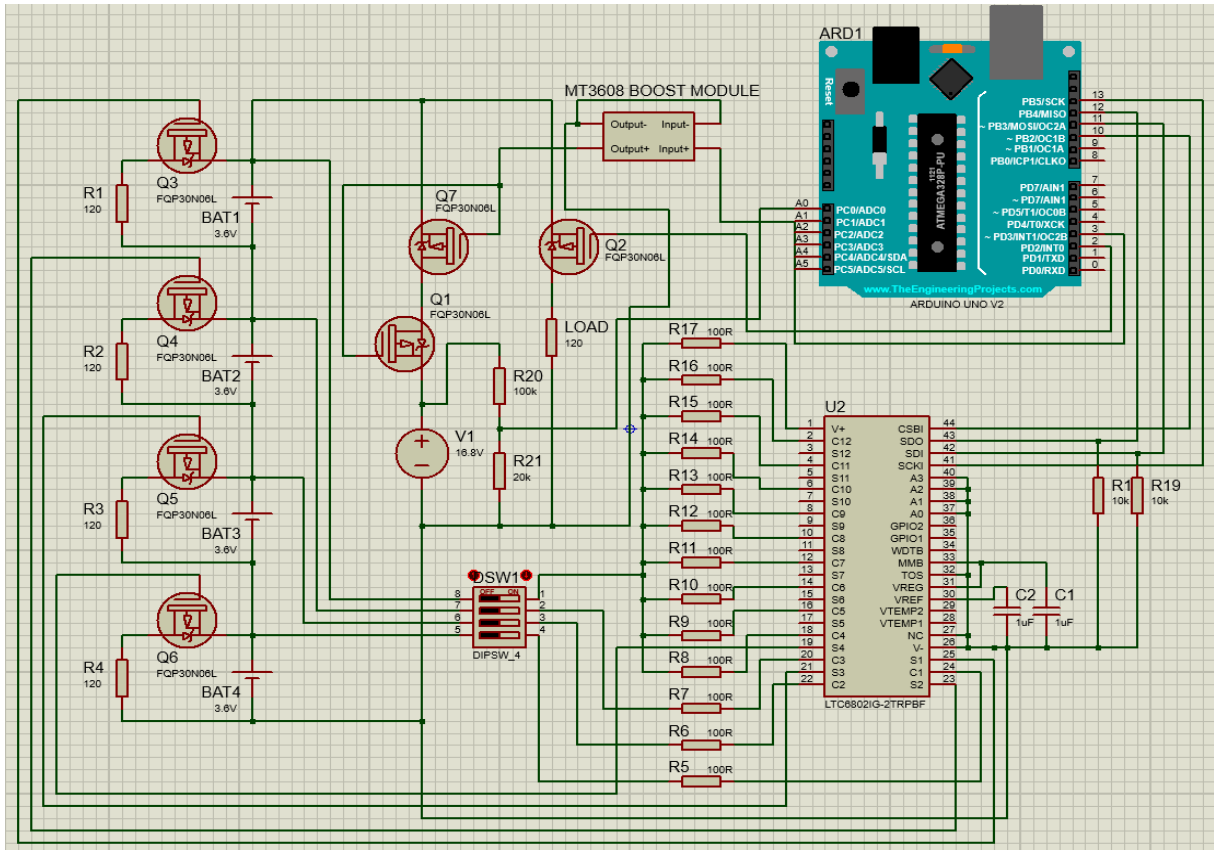
## Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση της διάταξης

### 4.1 Εισαγωγή

Η κατασκευή η οποία χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της διάταξης αποτελείται από πολλά διαφορετικά τμήματα. Αυτά είναι ο φορτιστής, οι μπαταρίες, ο ελεγκτής, το ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) ελέγχου των μπαταριών και το βοηθητικό κύκλωμα. Τα διαφορετικά τμήματα συνδέονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο προκειμένου να αποφέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Όλα τα επιμέρους τμήματα, για να λειτουργήσουν αρμονικά χρειάζονται ένα πρόγραμμα το οποίο θα τα διευθύνει ώστε να επιτευχθεί η σωστή διαχείριση των μπαταριών. Το πρόγραμμα γράφτηκε σαν κώδικας σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και περάστηκε στον μικροελεγκτή μέσω σειριακής επικοινωνίας. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται η ολοκληρωμένη διάταξη με τις μπαταρίες συνδεδεμένες. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται το σχεδιαστικό κύκλωμα που απεικονίζει όλα τα τμήματα της διάταξης και τις συνδέσεις μεταξύ τους. Στο σχήμα 4.3 φαίνεται το block διάγραμμα που απεικονίζει όλα τα μέρη της διάταξης και τις διασυνδέσεις μεταξύ τους.



Σχήμα 4.1: Ολοκληρωμένη διάταξη με τις μπαταρίες συνδεδεμένες.



Σχήμα 4.2: Σχεδιαστικό κύκλωμα που απεικονίζει όλα τα τμήματα του συστήματος και τις διασυνδέσεις μεταξύ τους.



Σχήμα 4.3: Block διάγραμμα που απεικονίζει όλα τα μέρη του συστήματος και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους.

### 4.1.1 Φορτιστής

Η διαδικασία φόρτισης μιας μπαταρίας είναι πολύ απλή στις μέρες μας ενώ οι φορτιστές κυκλοφορούν ευρέως σε πολύ χαμηλές τιμές. Οι φορτιστές είναι απλοί στην κατασκευή και επαναφέρουν τους συσσωρευτές στις μέγιστη τους ισχύ. Ο φορτιστής αποτελείται από μία ανεξάρτητη μονάδα φόρτισης μπαταριών ιόντων λιθίου με τη μέθοδο CC-CV (Constant Current – Constant Voltage) με προστασία από υπερφόρτιση και βραχυκύκλωμα. Όπως για ένα στοιχείο ιόντων λιθίου έτσι και για τη φόρτιση της συστοιχίας απαιτείται φορτιστής ο οποίος θα φορτίζει τη μπαταρία με τη μέθοδο CC-CV. Αυτή είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος φόρτισης μπαταριών ιόντων λιθίου δηλαδή η χρήση σταθερής πηγής ρεύματος στην αρχή της φόρτισης και μετέπειτα η χρήση σταθερής πηγής τάσης φόρτισης έως το τέλος της φόρτισης της μπαταρίας. Για τη διαδικασία φόρτισης χρησιμοποιήθηκε ένας φορτιστής του εμπορίου με ονομαστική τάση φόρτισης 16.8 V και μέγιστη έξοδο ρεύματος 2A. Ο συγκεκριμένος φορτιστής συνδέεται στην τάση του δικτύου και πληροί όλες τις προδιαγραφές φόρτισης της συστοιχίας αλλά και όλες τις προδιαγραφές ασφαλείας. Ο φορτιστής συνδέεται στη συστοιχία μέσω ενός ηλεκτρονικά ελεγχόμενου διακόπτη MOSFET. Ο διακόπτης υπάρχει εκεί ώστε να αποκόπτει τη σύνδεση σε περίπτωση υπερφόρτισης (overvoltage) ή βαθιάς εκφόρτισης (undervoltage) αλλά και για να διακόπτει την φόρτιση προκειμένου να λαμβάνονται μετρήσεις σε κατάσταση ηρεμίας και όχι υπό φόρτο, από το ολοκληρωμένο κύκλωμα. Στο σχήμα 4.4 φαίνεται ο φορτιστής που χρησιμοποιήθηκε για την φόρτιση της συστοιχίας.

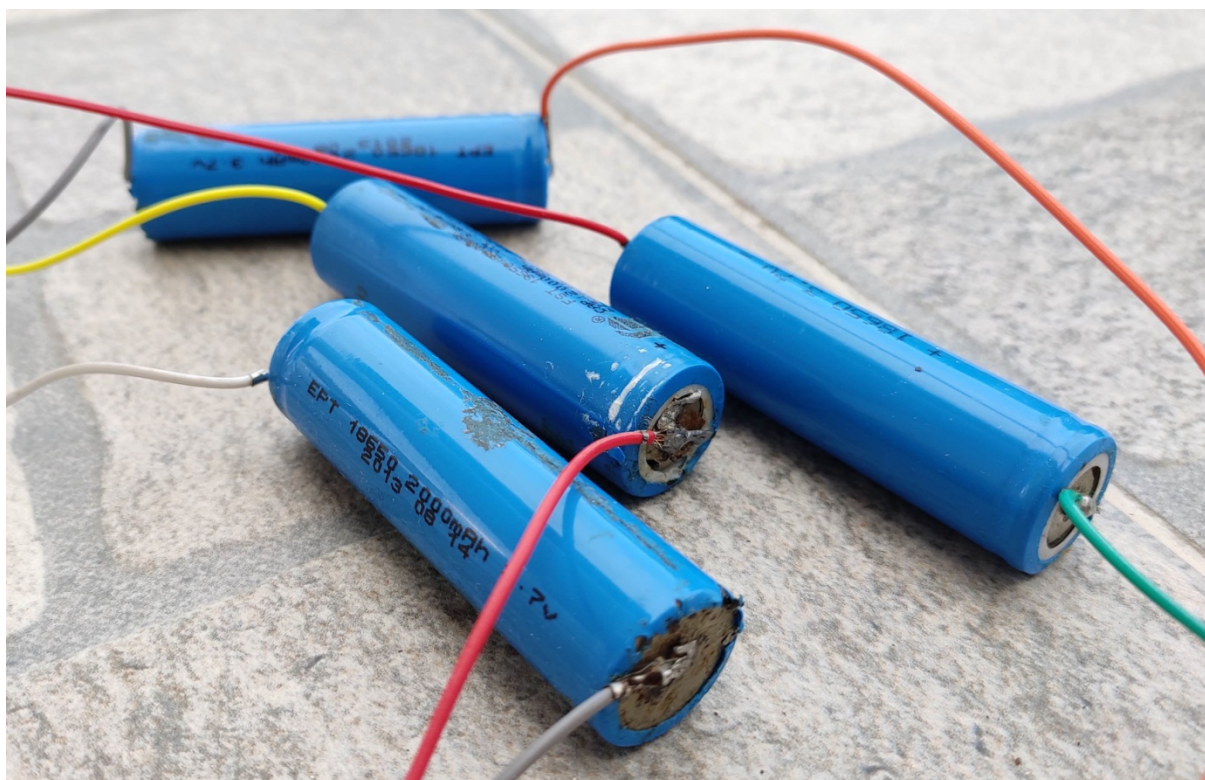


Σχήμα 4.4: Ο φορτιστής που χρησιμοποιήθηκε για την φόρτιση της συστοιχίας.

#### 4.1.2 Μπαταρίες

Οι μπαταρίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι τεχνολογίας ιόντων λιθίου. Οι μπαταρίες αυτές είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες ιδιαίτερα στα φορητά τεχνολογικά προϊόντα λόγω των πολύ καλών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους. Τέτοια είναι, η υψηλή τάση στοιχείου σε σύγκριση με άλλους τύπους μπαταριών, η μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, η δυνατότητα επαναφόρτισης τους και η καλή αντοχή στο χρόνο μετά από πολλούς κύκλους εκφόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν τυπική τάση λειτουργίας 3,6-3,7 volt, συγκριθείς με τις μπαταρίες μολύβδου οι οποίες έχουν τυπική τάση λειτουργίας περίπου 3 volt, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι αρκετά καλύτερες.

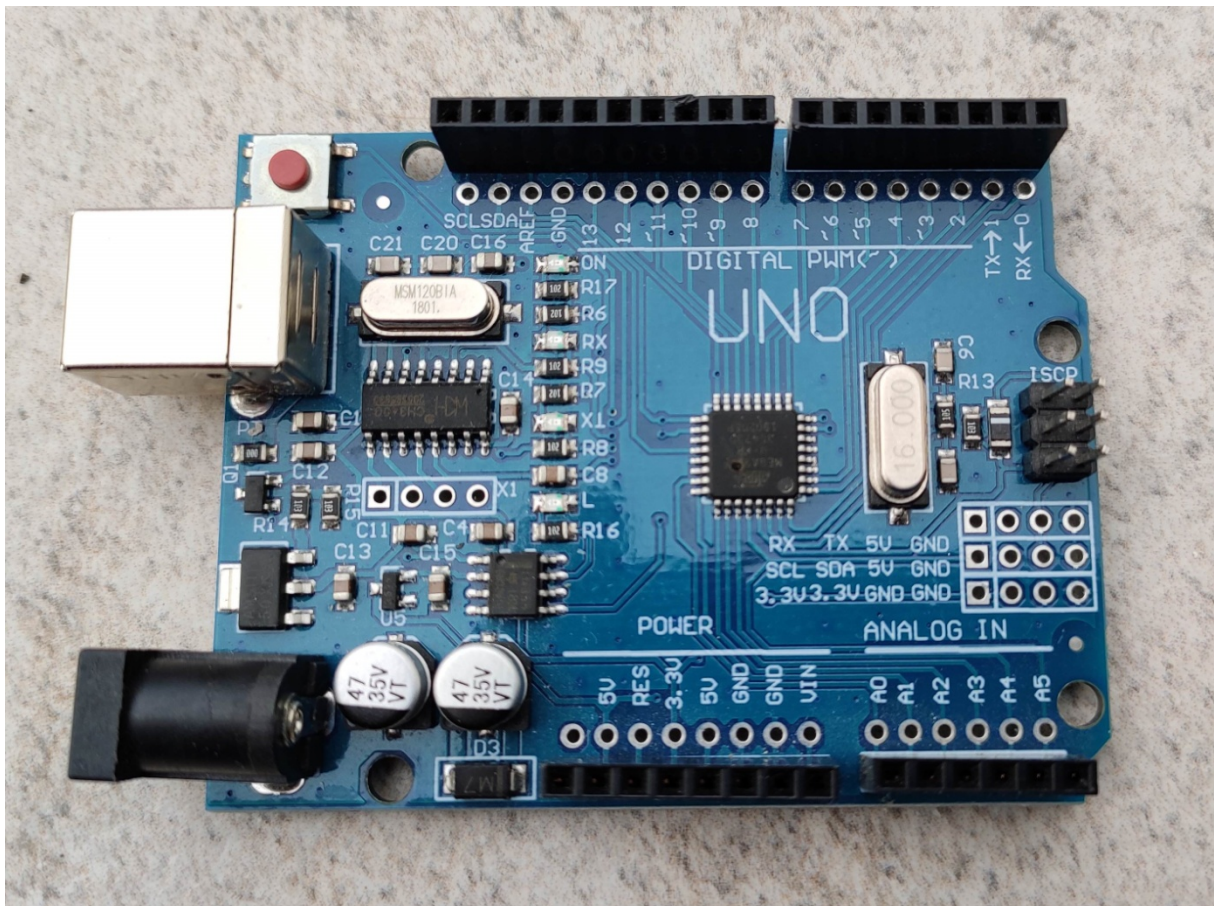
Οι μπαταρίες που χρησιμοποιήθηκαν για να αποτελέσουν τη συστοιχία είναι τέσσερις μπαταρίες ιόντων λιθίου 18650 οι οποίες μάλιστα είναι χρησιμοποιημένες ώστε οι λειτουργικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων να είναι εμφανείς. Ο συγκεκριμένος τύπος μπαταριών έχει διάμετρο κυλίνδρου μπαταρίας 18mm, μήκος μπαταρίας 65mm, τυπική τάση μπαταρίας 3,7 Volt και τυπική χωρητικότητα από 1500-3500 mAh. Αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία έχουν τυπική τάση 3,7 Volt και χωρητικότητα 2000 mAh. Για να δημιουργηθεί η συστοιχία, οι τέσσερις μπαταρίες (στοιχεία) συνδέθηκαν σε σειρά. Το αποτέλεσμα είναι μία μπαταρία αποτελούμενη από τέσσερα στοιχεία τις οποίες τα χαρακτηριστικά είναι: τυπική τάση 14,8 Volt και χωρητικότητα 2000mAh. Στα πειράματα που διενεργήθηκαν αυτές οι μπαταρίες φορτίζονται και εκφορτίζονται διαδοχικά. Οι φορτίσεις πραγματοποιούνται από τον φορτιστή που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ενώ οι εκφορτίσεις των μπαταριών πραγματοποιούνται σε ωμικό φορτίο αντίστασης. Στις μπαταρίες προστέθηκαν με κόλληση ακροδέκτες jumper cable για να είναι δυνατή η σύνδεση τους στο βοηθητικό κύκλωμα. Στο σχήμα 4.5 φαίνονται οι μπαταρίες που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία.



Σχήμα 4.5: Οι μπαταρίες που χρησιμοποιήθηκαν και αποτέλεσαν την συστοιχία.

### 4.1.3 Μικροελεγκτής

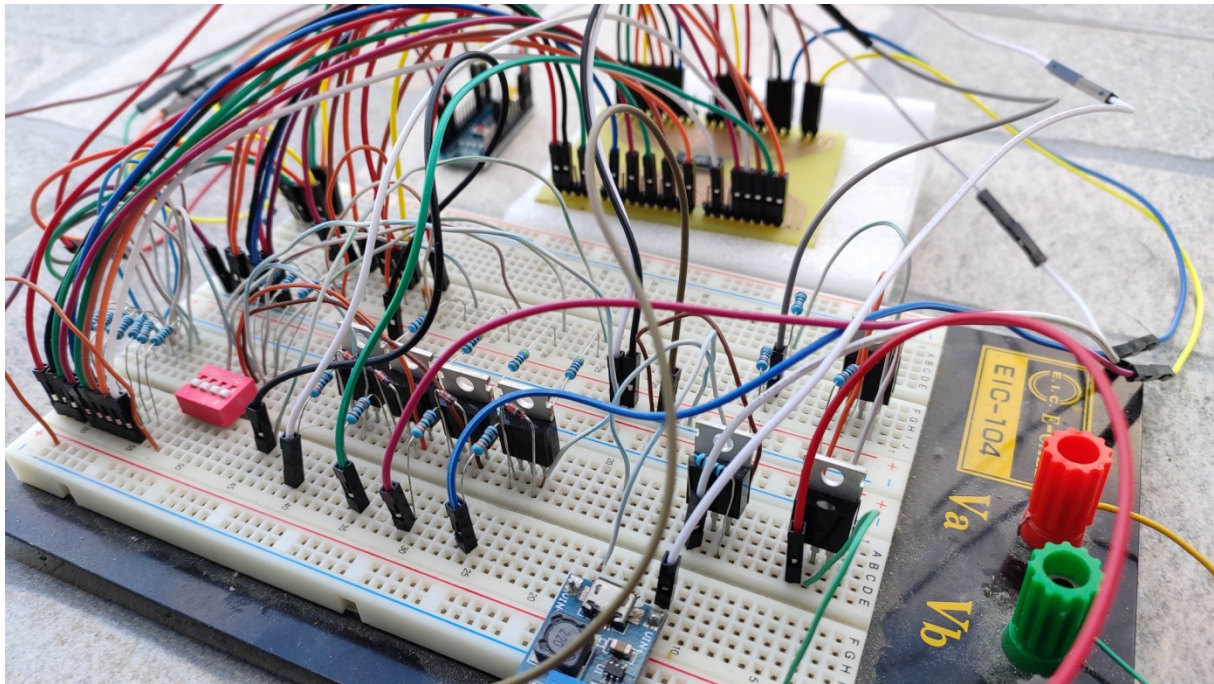
Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε είναι το ολοκληρωμένο σύστημα Arduino Uno. Το Arduino Uno είναι μία πλακέτα βασισμένη στον μικροελεγκτή ATmega328P. Διαθέτει 14 ψηφιακές εισόδους/εξόδους, 6 αναλογικές εισόδους και σύνδεση με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω θύρας USB. Το Arduino Uno προγραμματίζεται στο περιβάλλον του Arduino IDE μέσω του υπολογιστή και φορτώνεται ο κώδικας στον μικροελεγκτή. Ενώ ο μικροελεγκτής είναι ικανός να πάρει μετρήσεις από τις μπαταρίες αδυνατεί να το κάνει σε μια συστοιχία μπαταριών διότι για να μετρηθούν όλα τα στοιχεία μεμονωμένα σε μια συστοιχία θα πρέπει να υπάρχει γαλβανική απομόνωση στις εισόδους του μικροελεγκτή. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν πραγματοποιούνται μετρήσεις, το σημείο αναφοράς της τάσης θα πρέπει να είναι το ίδιο ανάμεσα στο στοιχείο και τον μικροελεγκτή. Σε μια συστοιχία μπαταριών αυτό δεν συμβαίνει καθώς η τάση αναφοράς κάθε στοιχείου είναι διαφορετική και όχι κοινή με τον μικροελεγκτή. Επειδή λοιπόν οι μικροελεγκτές που κυκλοφορούν στο εμπόριο δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα μέτρησης συστοιχίας μπαταριών απαιτείται ένα εξειδικευμένο εργαλείο όπως είναι το παρών ολοκληρωμένο κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για να μπορέσει να γίνει σωστή μέτρηση ακρίβειας στα στοιχεία της συστοιχίας μπαταριών. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση και τον έλεγχο των μπαταριών είναι το LTC6802G-2 της εταιρίας Analog Devices το οποίο αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο μικροελεγκτής εκτός από τον έλεγχο όλου του βοηθητικού κυκλώματος, ελέγχει και τη λειτουργία του LTC6802G-2. Στο σχήμα 4.6 φαίνεται το ολοκληρωμένο σύστημα Arduino Uno.



Σχήμα 4.6: Το ολοκληρωμένο σύστημα Arduino Uno που περιλαμβάνει τον μικροελεγκτή.

#### 4.1.4 Βοηθητικό κύκλωμα

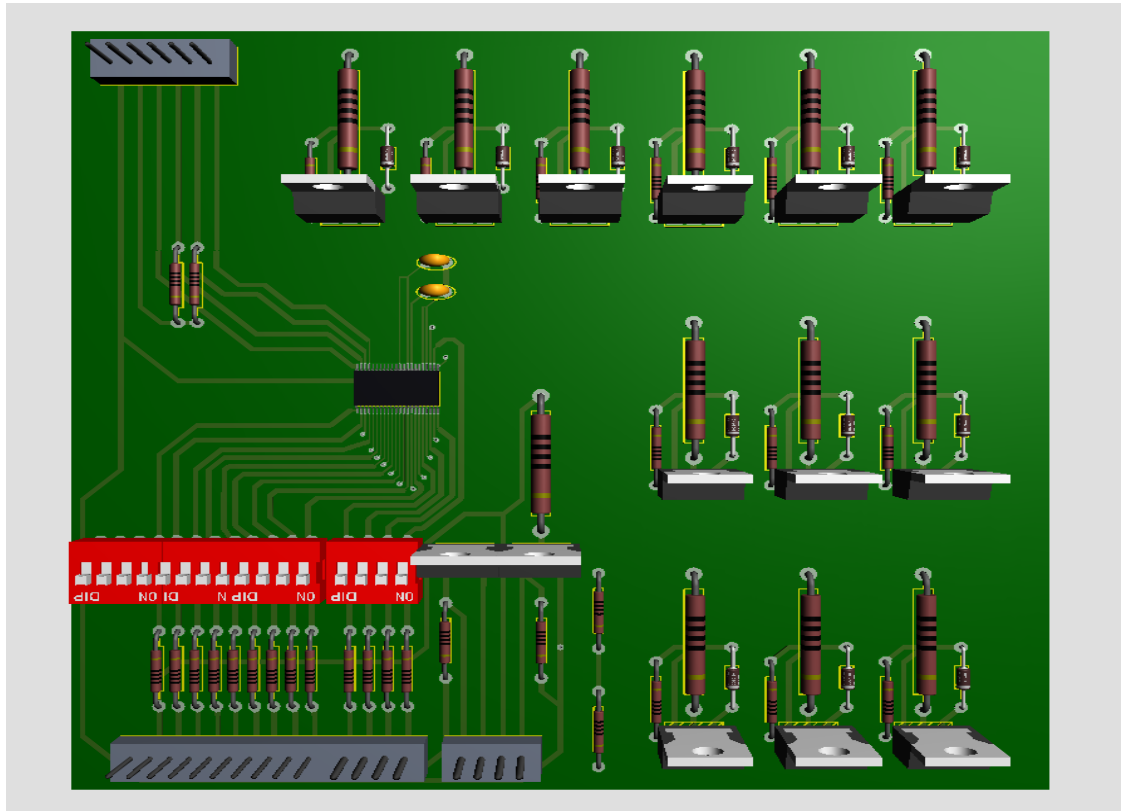
Το βοηθητικό κύκλωμα του συστήματος πραγματοποιήθηκε σε πειραματική πλακέτα (ράστερ) και αποτελείται από διάφορα μικροεξαρτήματα. Το ράστερ λειτουργεί σαν μητρική πλακέτα καθώς επάνω του συνδέονται όλα τα τμήματα του συστήματος. Στο ράστερ συνδέονται οι μπαταρίες, ο μικροελεγκτής, ο φορτιστής, το ολοκληρωμένο μέτρησης μπαταριών αλλά εκεί βρίσκεται και το βοηθητικό κύκλωμα. Αυτό αποτελείται από διακόπτες (ψηφιακούς και μηχανικούς), το κύκλωμα εξισορρόπησης αλλά και το σύστημα φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών. Στο σχήμα 4.7 φαίνεται το βοηθητικό κύκλωμα σε ράστερ.



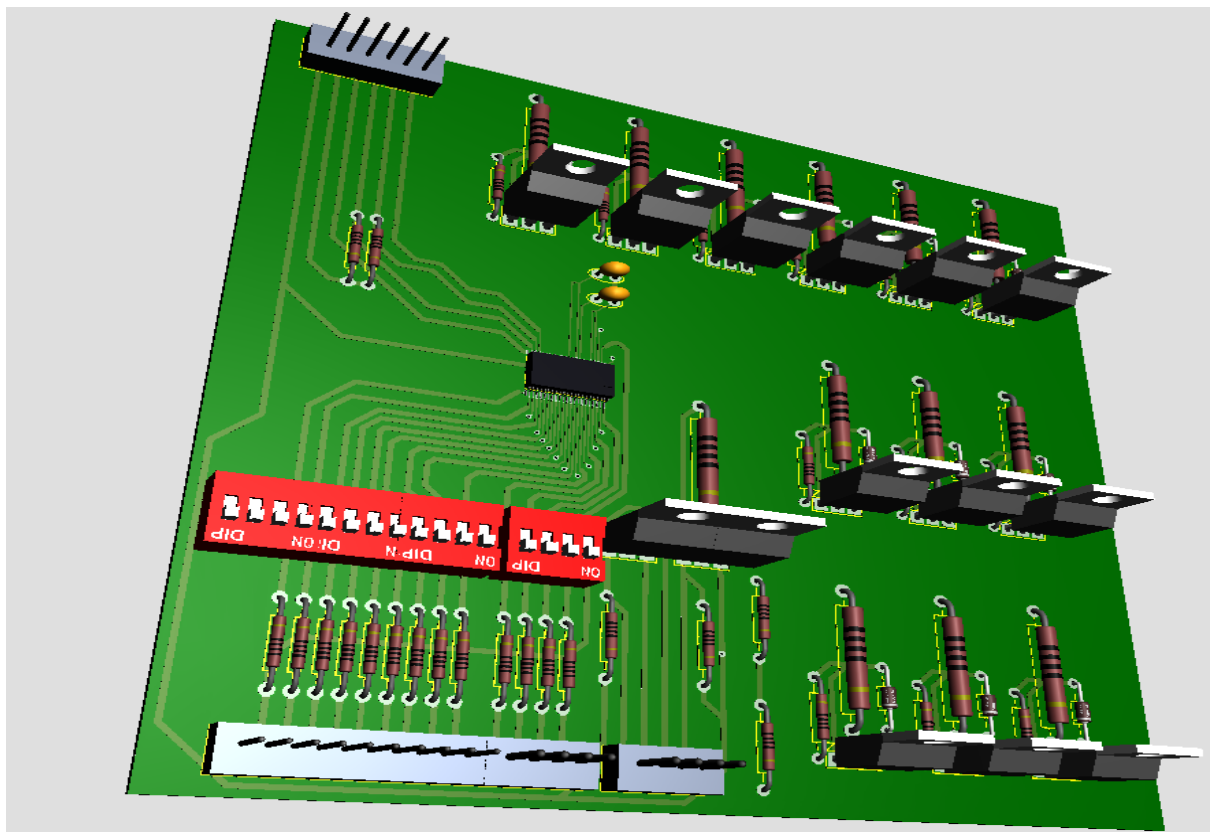
Σχήμα 4.7: Το βοηθητικό κύκλωμα σε ράστερ.

#### 4.1.5 Πλακέτα

Για την ορθότερη υλοποίηση του συστήματος σχεδιάστηκε μία πλακέτα στην οποία αποτυπώνεται το ολοκληρωμένο κύκλωμα διαχείρισης μπαταριών LTC6802G-2, το βοηθητικό κύκλωμα καθώς και pins για την διασύνδεση της πλακέτας με τον μικροελεγκτή, τις μπαταρίες και τον φορτιστή. Με τον τρόπο που σχεδιάστηκε η πλακέτα, αξιοποιεί τις πλήρεις δυνατότητες του LTC6802G-2 καθώς διαθέτει και τις δώδεκα διασυνδέσεις για δώδεκα μπαταρίες. Επίσης διαθέτει ενσωματωμένα και δώδεκα ξεχωριστά εξωτερικά συστήματα εξισορρόπησης με αντιστάσεις. Ο μέγιστος αριθμός των στοιχείων που μπορούν να ελεγχθούν με το συγκεκριμένο BMS είναι δώδεκα οπότε όσα στοιχεία και αν συνδεθούν η πλακέτα μπορεί να τα καλύψει. Επίσης εάν υπάρχει ανάγκη χρήσης παραπάνω από δώδεκα μπαταριών για τον σχηματισμό συστοιχίας, τότε μπορεί να υλοποιηθεί μία ακριβώς ίδια πλακέτα για τον έλεγχο των υπολοίπων στοιχείων. Λόγω της δυνατότητας του ολοκληρωμένου για χρήση πολλών LTC6802G-2 ταυτόχρονα με την ίδια σύνδεση, μπορούν 16 τέτοιες πλακέτες να διασυνδεθούν και να επικοινωνούν όλες με τον μικροελεγκτή μέσω σειριακής επικοινωνίας χρησιμοποιώντας μόνο τέσσερα καλώδια σύνδεσης και καμία αλλαγή ανάμεσα στις διάφορες πλακέτες. Αυτή η τμηματική λογική δίνει πολλές δυνατότητες για την υλοποίηση συστημάτων με βάση ξεχωριστά τμήματα τα οποία έχουν δυνατότητα διασύνδεσης μεταξύ τους. Η πλακέτα όπως σχεδιάστηκε στο σύστημα προσομοίωσης Proteus 8 φαίνεται στα σχήματα 4.8 και 4.9.



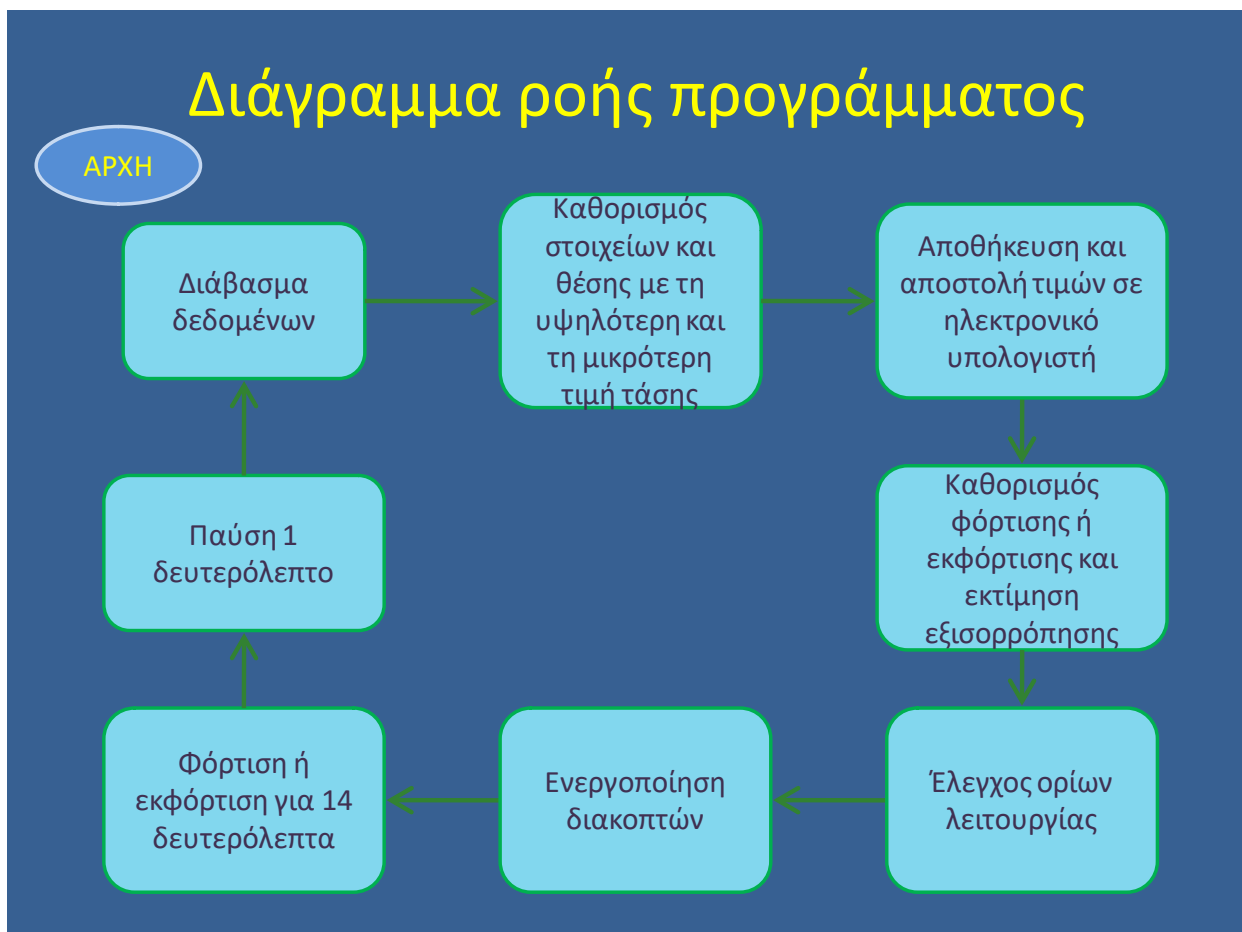
Σχήμα 4.8: Η κάτοψη της πλακέτας.



Σχήμα 4.9: Η πλακέτα όπως σχεδιάστηκε σε μία όψη της.

## 4.2 Κώδικας

Για να λειτουργήσει η διάταξη απαιτείται κάποιου είδους έλεγχος τόσο στη μπαταρία όσο και στα υπόλοιπα κυκλώματα αλλά και επικοινωνία με ηλεκτρονικό υπολογιστή και αυτή την εργασία μπορεί να πραγματοποιήσει εύκολα ένας μικροελεγκτής με κώδικα. Επίσης το ολοκληρωμένο κύκλωμα μέτρησης της μπαταρίας χρειάζεται τον μικροελεγκτή με τον κώδικα για να λειτουργήσει. Ο κώδικας που γράφτηκε για αυτήν την εφαρμογή έχει πολλαπλό ρόλο. Οι λειτουργίες που αναλαμβάνει είναι η προστασία από υπερφόρτιση, προστασία από βαθιά εκφόρτιση, λήψη δεδομένων από το ολοκληρωμένο, επεξεργασία των δεδομένων, εφαρμογή εξισορρόπησης όποτε χρειάζεται και καταγραφή της διαδικασίας σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο κώδικας γράφτηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή στο προγραμματιστικό περιβάλλον Arduino IDE και μεταφέρθηκε μέσω σειριακής επικοινωνίας USB στον μικροελεγκτή ο οποίος βρίσκεται ενσωματωμένος στην πλατφόρμα Arduino Uno. Η δομή του προγράμματος είναι απλή και περιλαμβάνει όλες τις λειτουργίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στο σχήμα 4.10 φαίνεται το διάγραμμα ροής του προγράμματος.



Σχήμα 4.10: Βασικό διάγραμμα ροής του προγράμματος που περιλαμβάνει τις πιο σημαντικές λειτουργίες του κώδικα.

Όταν ξεκινάει το πρόγραμμα, αφού γίνουν οι απαραίτητες αρχικοποιήσεις και ρυθμίσεις, η πρώτη ενέργεια είναι να διαβαστούν οι τάσεις των στοιχείων της μπαταρίας. Ο κύκλος μέτρησης των τάσεων των στοιχείων είναι 15 δευτερόλεπτα. Τα δεκατέσσερα αυτά δευτερόλεπτα ο κατάλληλος ηλεκτρονικός διακόπτης MOSFET είναι ενεργοποιημένος και ρεύμα ρέει από την μπαταρία προς το

φορτίο ή από το φορτιστή προς τη μπαταρία ανάλογα με το εάν η μπαταρία βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης ή εκφόρτισης. Μετά ο ηλεκτρονικός διακόπτης απενεργοποιείται κόβοντας ουσιαστικά το ρεύμα προς κάθε κατεύθυνση για να ληφθούν μετρήσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί το μέγεθος που έχει ενδιαφέρον για να αξιολογηθεί η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας είναι η τάση ανοικτού βρόχου ή ανοικτού κυκλώματος. Έτσι για να μετρηθεί αυτή η τάση θα πρέπει να έχει αποσυνδεθεί το φορτίο ή ο φορτιστής από την μπαταρία και να επανέλθει αυτή σε κατάσταση ηρεμίας. Το να γίνει αυτό σε πραγματική εφαρμογή συνεχούς λειτουργίας είναι δύσκολο όμως σε κατάσταση αναμονής της μπαταρίας ή σε πειραματικό στάδιο είναι δυνατό να υπάρχει διακοπή της φόρτισης ή εκφόρτισης για μετρήσεις. Δίνεται διάστημα ενός δευτερολέπτου διότι η επαναφορά της τάσης δεν είναι άμεση. Ο μικροελεγκτής για να διαβάσει τις τάσεις των στοιχείων της μπαταρίας στέλνει την εντολή στο ολοκληρωμένο κύκλωμα να κάνει την μέτρηση αυτή και κατόπιν αυτού, οι μετρήσεις στέλνονται πίσω στον μικροελεγκτή όπου και αποθηκεύονται προσωρινά. Έπειτα, ο μικροελεγκτής επεξεργάζεται τις τιμές αυτές και καταλήγει στο ποιο στοιχείο έχει την υψηλότερη τιμή και ποιο την χαμηλότερη. Αποθηκεύονται και οι τιμές αλλά και οι θέσεις των στοιχείων στα οποία αντιστοιχούν και εκτυπώνονται στην οθόνη του υπολογιστή για να ενημερωθεί ο χρήστης. Αυτή η επεξεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί για όσα στοιχεία μπορεί να υπάρχουν στην συστοιχία. Αφού ο μικροελεγκτής έχει στη διάθεση του τα δεδομένα των στοιχείων της μπαταρίας, ελέγχει μετέπειτα εάν στο κύκλωμα είναι συνδεδεμένος ο φορτιστής της μπαταρίας. Ανάλογα με το αν ο φορτιστής είναι συνδεδεμένος ή όχι, τότε ο μικροελεγκτής κρατάει στη μνήμη του αυτό το δεδομένο και παρακάτω ενεργοποιεί τον κατάλληλο διακόπτη είτε για φόρτιση είτε για εκφόρτιση. Ο τρόπος με τον οποίο ο μικροελεγκτής αντιλαμβάνεται αν είναι συνδεδεμένος ο φορτιστής είναι με τη μέτρηση της τάσης στη θέση όπου συνδέεται. Ο μικροελεγκτής έχει μέγιστη τιμή μέτρησης 5V ενώ ο φορτιστής της μπαταρίας επειδή πρόκειται για συστοιχία τεσσάρων μπαταριών έχει τιμή 16,8V. Επειδή λοιπόν η τάση του φορτιστή είναι μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να μετρήσει ο μικροελεγκτής, λαμβάνει την μέτρηση μέσω ενός διαιρέτη τάσης και έτσι διαβάζει την χαμηλωμένη τιμή. Ο διαιρέτης τάσης αποτελείται από δύο αντιστάσεις, μία αντίσταση των 20k ohm και μία αντίσταση των 100k ohm. Ο λόγος του διαιρέτη τάσης είναι 1/5 δηλαδή η τάση η οποία διαβάζεται από τον μικροελεγκτή είναι 5 φορές μικρότερη από την πραγματική. Στη συνέχεια και μετά το διάβασμα της τάσης υπολογίζεται με βάση τον κώδικα, η πραγματική τιμή της τάσης που υπήρχε πριν τον διαιρέτη. Οι αντιστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι μεγάλες διότι η ένταση ρεύματος δεν έχει νόημα να είναι μεγάλη εφόσον διαβάζεται μόνο η τάση. Το περιθώριο λάθους στη μέτρηση είναι το περιθώριο σφάλματος των αντιστάσεων δηλαδή 1% σε συνδυασμό με το περιθώριο λάθους του A/D converter του μικροελεγκτή. Το σφάλμα παραμένει σε χαμηλά επίπεδα παρόλα αυτά και ακόμη και στην χειρότερη περίπτωση δεν είναι αρκετό να προκαλέσει πρόβλημα στην ομαλή λειτουργία της συγκεκριμένης εφαρμογής. Εάν κριθεί από τον μικροελεγκτή ότι ο φορτιστής είναι συνδεδεμένος στο κύκλωμα, τότε θεωρεί ότι πραγματοποιείται φόρτιση και ενεργοποιεί και τη διαδικασία της εξισορρόπησης. Η εξισορρόπηση προϋποθέτει την συστοιχία να βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης. Στον κώδικα υπάρχει μία συνάρτηση ειδική για αυτή τη δουλειά. Η συνάρτηση αυτή εκτελείται μόνον αφού ο μικροελεγκτής έχει καταλήξει στα στοιχεία με την υψηλότερη και χαμηλότερη τάση και θεωρεί ότι πραγματοποιείται φόρτιση. Έχοντας αυτά τα δεδομένα, η συνάρτηση αυτή συγκρίνει όλες τις τάσεις των στοιχείων με την μικρότερη τιμή αυτών και εάν αποκλίνουν τάση μεγαλύτερη των 0.03 Volt τότε καθορίζεται ποιοι διακόπτες πρέπει να ενεργοποιηθούν για να εκφορτιστούν τα εκάστοτε στοιχεία της μπαταρίας. Στη συνέχεια ελέγχεται από τον μικροελεγκτή εάν η χαμηλότερη και η υψηλότερη τάση των στοιχείων της μπαταρίας ξεπερνάνε το ελάχιστο ή το μέγιστο αντίστοιχα όριο τάσης. Εάν αποδειχθεί ότι ένα στοιχείο έχει υπερβεί την ανώτατη τάση ή την κατώτατη τάση, τότε ο μικροελεγκτής σταματάει τη διαδικασία της φόρτισης ή εκφόρτισης απενεργοποιώντας τον ηλεκτρονικό διακόπτη. Επίσης εμφανίζει ενημερωτικό

μήνυμα στην οθόνη του υπολογιστή ότι το εκάστοτε στοιχείο έχει βρεθεί στη μέγιστη ή ελάχιστη δυνατή για λόγους ασφαλείας τάση και διακόπτεται η φόρτιση ή η εκφόρτιση. Στην περίπτωση όπου οι τιμές των τάσεων των στοιχείων βρίσκονται μεταξύ των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας τότε δίνεται η εντολή από τον μικροελεγκτή να ενεργοποιηθεί ο κατάλληλος διακόπτης MOSFET για να συνεχιστεί η φόρτιση ή η εκφόρτιση ανάλογα με το αν είναι συνδεδεμένος ο φορτιστής ή όχι. Σημειώνεται ότι εάν ο μικροελεγκτής διακόψει το κύκλωμα λόγω μη ασφαλούς λειτουργίας της μπαταρίας, τότε αυτή μπορεί να επανέλθει σε κατάσταση φόρτισης ή εκφόρτισης μόνο με την παρέμβαση ανθρώπου και χειροκίνητης επανεκκίνησης του συστήματος. Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζεται ένα αναλυτικό διάγραμμα ροής του προγράμματος.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα ροής του προγράμματος με έλεγχο των ορίων λειτουργίας των στοιχείων.

Εφόσον οι τάσεις βρίσκονται στις επιτρεπόμενες τιμές λειτουργίας για λόγους ασφαλείας, επόμενο βήμα είναι η φόρτιση ή η εκφόρτιση της μπαταρίας. Διαφορετική λειτουργία έχει η εκφόρτιση και διαφορετική η φόρτιση κυρίως λόγω της εξισορρόπησης η οποία πραγματοποιείται μόνο κατά την φόρτιση της μπαταρίας. Για την εκφόρτιση ο διακόπτης ενεργοποιείται κάθε φορά για 14 δευτερόλεπτα, όσα θα μεσολαβήσουν δηλαδή ανάμεσα σε κάθε μέτρηση συν ένα δευτερόλεπτο επιπλέον που χρειάζεται για το διάβασμα των τάσεων των στοιχείων και την ενημέρωση του μικροελεγκτή από το ολοκληρωμένο. Αφού περάσουν τα 14 δευτερόλεπτα τότε ο διακόπτης απενεργοποιείται και πάλι για να ληφθούν οι μετρήσεις και να γίνει η ενημέρωση του μικροελεγκτή. Επειδή η ενημέρωση έχει 1 δευτερόλεπτο καθυστέρηση για να προλάβουν τα στοιχεία να ανακτήσουν την τάση ανοικτού βρόχου, συνολικά ο κύκλος των μετρήσεων χρειάζεται 15 δευτερόλεπτα για να πραγματοποιηθεί. Για την εκφόρτιση ενεργοποιείται ο διακόπτης για να γίνει η φόρτιση της

μπαταρίας για 14 δευτερόλεπτα, με τη διαφορά ότι τώρα ενεργοποιούνται και οι διακόπτες για την εξισορρόπηση μόνο όσων στοιχείων χρειάζεται. Αφού περάσουν 14 δευτερόλεπτα όπου τα κατάλληλα στοιχεία φορτίζονται με μικρότερο ρεύμα με παράλληλες αντιστάσεις ενώ τα υπόλοιπα με ολόκληρη την ένταση ρεύματος, οι διακόπτες εξισορρόπησης απενεργοποιούνται μαζί με τον κεντρικό διακόπτη φόρτισης και υπάρχει διακοπή της φόρτισης για ένα δευτερόλεπτο προκειμένου να επανέλθει η μπαταρία σε κατάσταση ηρεμίας και να ληφθούν μετρήσεις εκ νέου. Αυτή είναι η ροή με την ενσωμάτωση της εξισορρόπησης των στοιχείων της μπαταρίας η οποία πραγματοποιείται μόνο κατά τη διάρκεια φόρτισης της μπαταρίας. Αυτή είναι η συνοπτική ροή του προγράμματος, με το οποίο ο μικροελεγκτής ενημερώνεται για όλα τα στοιχεία της μπαταρίας, ελέγχει ποια στοιχεία έχουν τη μεγαλύτερη τάση και τη μικρότερη, καθορίζει εάν η μπαταρία θα τεθεί σε λειτουργία φόρτισης ή εκφόρτισης, καθορίζει ποια στοιχεία της μπαταρίας χρίζουν εξισορρόπησης, αποφασίζει τη διακοπή λειτουργίας σε περίπτωση υπέρβασης των οριακών τιμών και ελέγχει τους κατάλληλους διακόπτες. Αυτή η ροή του προγράμματος αντιστοιχεί στον ολοκληρωμένο κώδικα που γράφθηκε για τη διεκπεραίωση των πειραμάτων.

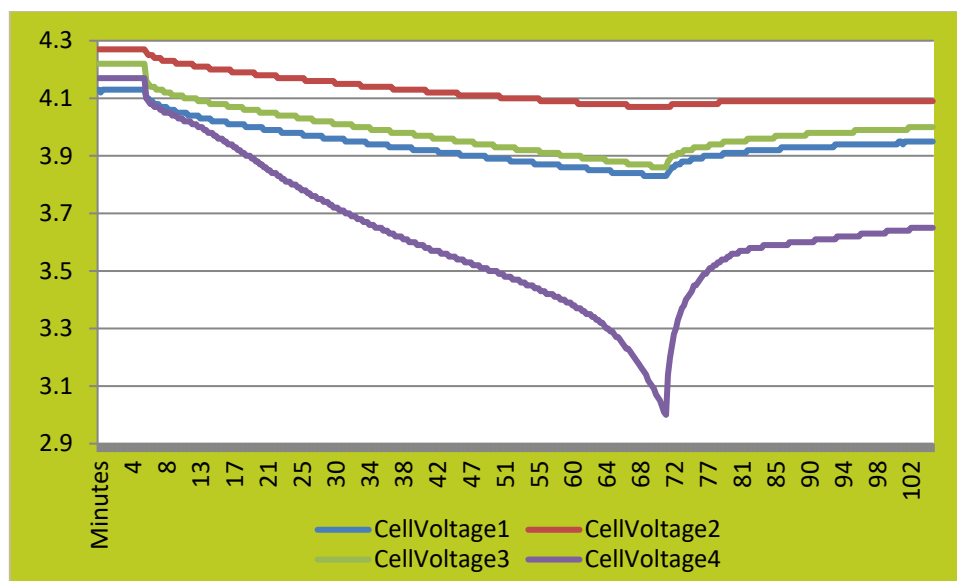
### 4.3 Επίλογος

Όλα τα τμήματα της κατασκευής είναι απαραίτητα για την σωστή λειτουργία της διάταξης. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι χρησιμοποιημένες μπαταρίες τεχνολογίας ιόντων λιθίου. Το κύκλωμα φόρτισης αποτελείται από ένα φορτιστή του εμπορίου ενώ το κύκλωμα εκφόρτισης αποτελείται από απλές αντιστάσεις. Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε είναι το ολοκληρωμένο σύστημα Arduino Uno. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα διαχείρισης μπαταριών που χρησιμοποιήθηκε είναι το LTC6802G-2 το οποίο λειτουργεί και ελέγχεται μέσω του μικροελεγκτή. Το βοηθητικό κύκλωμα του συστήματος πραγματοποιήθηκε σε πειραματική πλακέτα (ράστερ) και αποτελείται από διάφορα μικροεξαρτήματα. Για την πλήρη κατασκευή του συστήματος σχεδιάστηκε μία πλακέτα στην οποία αποτυπώνεται το ολοκληρωμένο κύκλωμα ελέγχου μπαταριών LTC6802G-2, το βοηθητικό κύκλωμα καθώς και pins για την διασύνδεση της πλακέτας με τον μικροελεγκτή, τις μπαταρίες και τον φορτιστή. Για να λειτουργήσει η διάταξη απαιτείται η χρήση μικροελεγκτή με κώδικα με συγκεκριμένη ροή προγράμματος ο οποίος θα ελέγχει τόσο τη συστοιχία όσο και τα υπόλοιπα κυκλώματα.

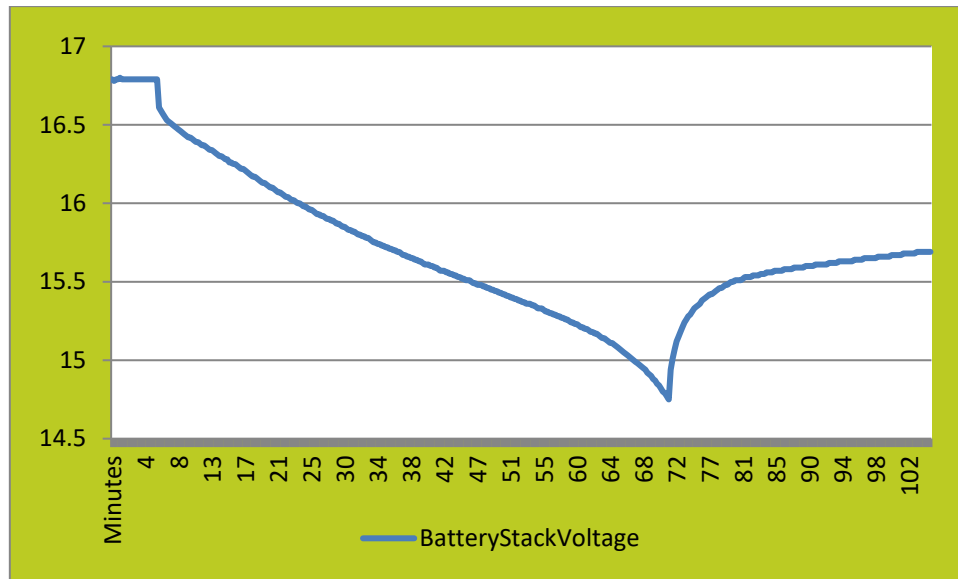
## Κεφάλαιο 5ο: Πειραματικές μετρήσεις

### 5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο διεξάχθηκαν πειράματα με σκοπό την αντιμετώπιση των προκλήσεων των συστοιχιών μπαταριών αλλά και την ανάδειξη της συμβολής του BMS στην επίλυση των προβλημάτων. Για να παραχθούν χρήσιμα αποτελέσματα απαιτούνται αξιόπιστα δεδομένα από κύκλους φορτίσεων και εκφορτίσεων της συστοιχίας. Όλα τα δεδομένα τα οποία λαμβάνονται από τον μικροελεγκτή καταγράφονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω ανάλυση και εξαγωγή γραφημάτων. Για την αποθήκευση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PLX-DAQ το οποίο λαμβάνει τα δεδομένα του μικροελεγκτή από τη σειριακή επικοινωνία και τα καταγράφει όλα σε αρχεία xml. Με την βοήθεια του προγράμματος Microsoft Excel τα δεδομένα αυτά μετατρέπονται σε γραφήματα για την εύκολη κατανόηση τους. Το αρχικό πείραμα διεκπεραιώθηκε για να διαπιστωθεί η καταλληλότητα των στοιχείων που επρόκειτο να στελεχώσουν τη συστοιχία. Το δεύτερο πείραμα αφορά την λειτουργία συστοιχίας μπαταριών χωρίς έλεγχο στα στοιχεία. Στο τρίτο πείραμα παρουσιάζονται οι τρόποι εξισορρόπησης με balancing στο τέλος της φόρτισης αλλά και κατά τη διάρκεια της φόρτισης ενώ πραγματοποιείται και πείραμα εκφορτίσεων σε σταθερό ωμικό φορτίο. Για κάθε περίπτωση φόρτισης ή εκφόρτισης στα επόμενα πειράματα, παρουσιάζονται γραφήματα τα οποία έχουν στον κάθετο άξονα την τάση και τον οριζόντιο άξονα τον χρόνο. Για κάθε πείραμα παρουσιάζονται γραφήματα και των μεμονωμένων στοιχείων αλλά και της συνολικής τάσης της συστοιχίας.

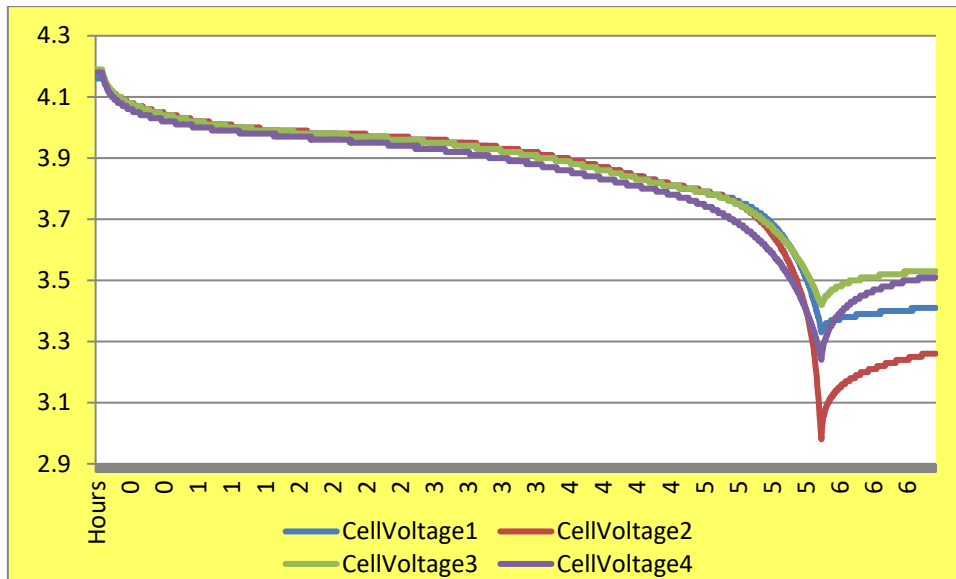


Σχήμα 5.1: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων παλιών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 68ohm.

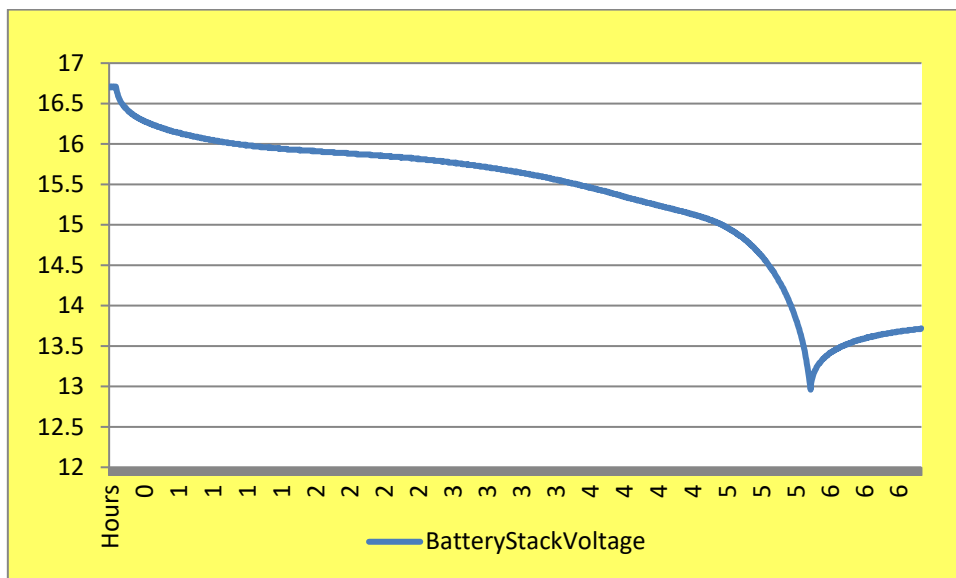


Σχήμα 5.2: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων παλιών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 68ohm.

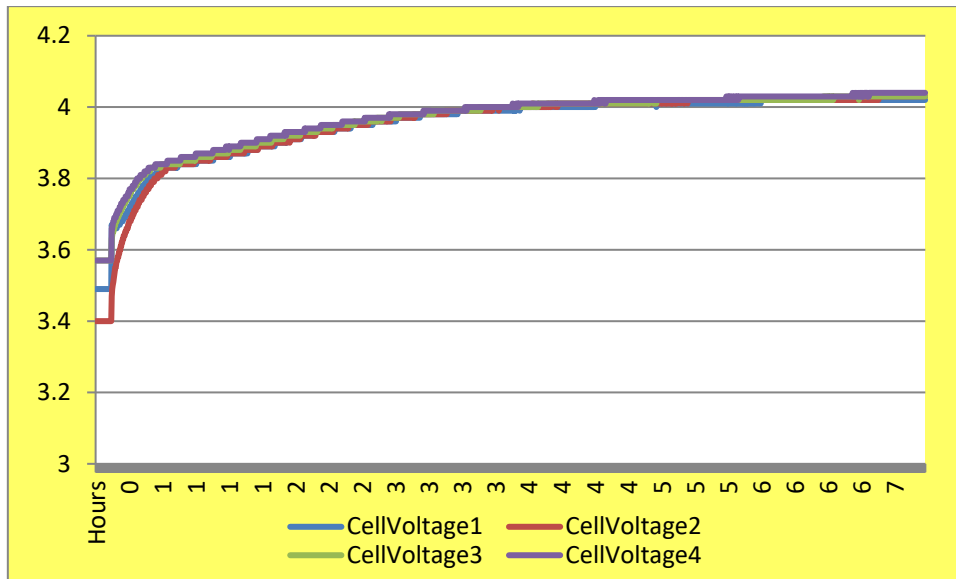
Αρχικά δοκιμάστηκαν τέσσερα στοιχεία χρησιμοποιημένα τα οποία αποτέλεσαν την αρχική συστοιχία εκ των οποίων όλα έχουν διαφορές μεταξύ τους όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1 και 5.2. Ένα πρόβλημα που υπήρξε ήταν ότι το στοιχείο νούμερο τέσσερα ήταν αρκετά φθαρμένο και είχε πολύ ασταθή λειτουργία και κατά τη φόρτιση και κατά την εκφόρτιση ενώ η χωρητικότητά του ήταν ιδιαίτερα μικρή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την πολύ γρήγορη εκφόρτιση του και ως επέκταση δεν ήταν δυνατό να αποτελέσει μέρος του πειράματος. Για το λόγο αυτό δοκιμάστηκαν επιπλέον τέσσερις χρησιμοποιημένες μπαταρίες οι οποίες αποτέλεσαν μία νέα συστοιχία. Αφού δοκιμάστηκαν σε φόρτιση και εκφόρτιση βρέθηκε ότι και τα τέσσερα στοιχεία ήταν σε αρκετά καλή κατάσταση και εφόσον ήταν και σχετικά καινούργια αυτό ήταν αναμενόμενο διότι οι διαφορές μεταξύ των στοιχείων εμφανίζονται με την πάροδο του χρόνου. Ενώ οι τέσσερις αυτές μπαταρίες ήταν σε καλή κατάσταση όπως φαίνεται από τα σχήματα 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 δεν εξυπηρετούσαν τον σκοπό του πειράματος καθώς δεν υπήρχε ανισορροπία μεταξύ τους για να επιλυθεί. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την ανάγκη χρήσης της πρώτης συστοιχίας που δοκιμάστηκε αλλά με αλλαγή στο τέταρτο στοιχείο το οποίο είναι ασταθές με ένα στοιχείο από την δεύτερη συστοιχία. Όλα τα πειράματα που ακολουθούν έχουν πραγματοποιηθεί με αυτή την καινούργια συστοιχία η οποία παρουσιάζει μεγάλη ανισορροπία στη κατάσταση φόρτισης των στοιχείων αλλά χωρίς τη χρήση κάποιου ελαττωματικού στοιχείου.



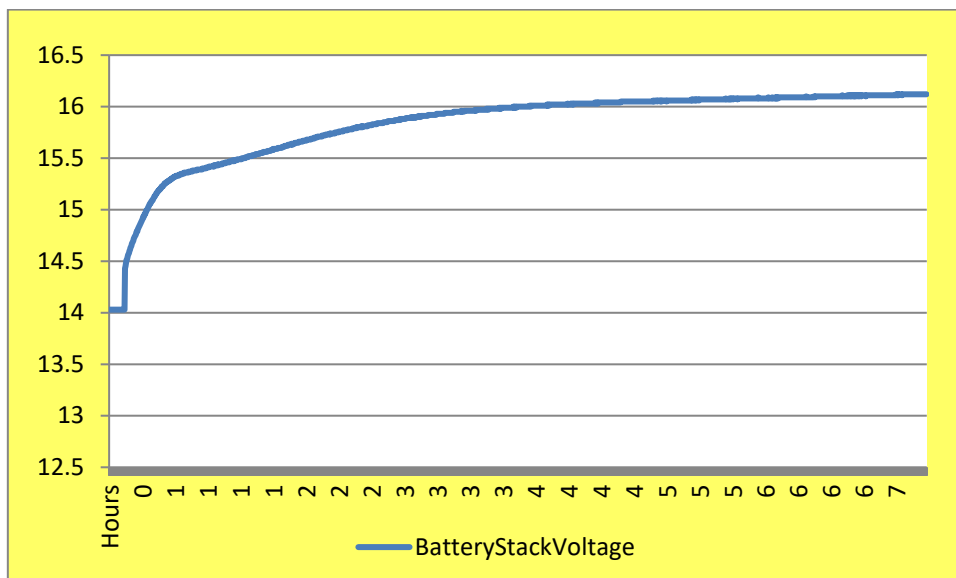
Σχήμα 5.3: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων καινούργιων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 68ohm.



Σχήμα 5.4: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων καινούργιων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 68ohm.



Σχήμα 5.5: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων καινούργιων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση χωρίς balancing.

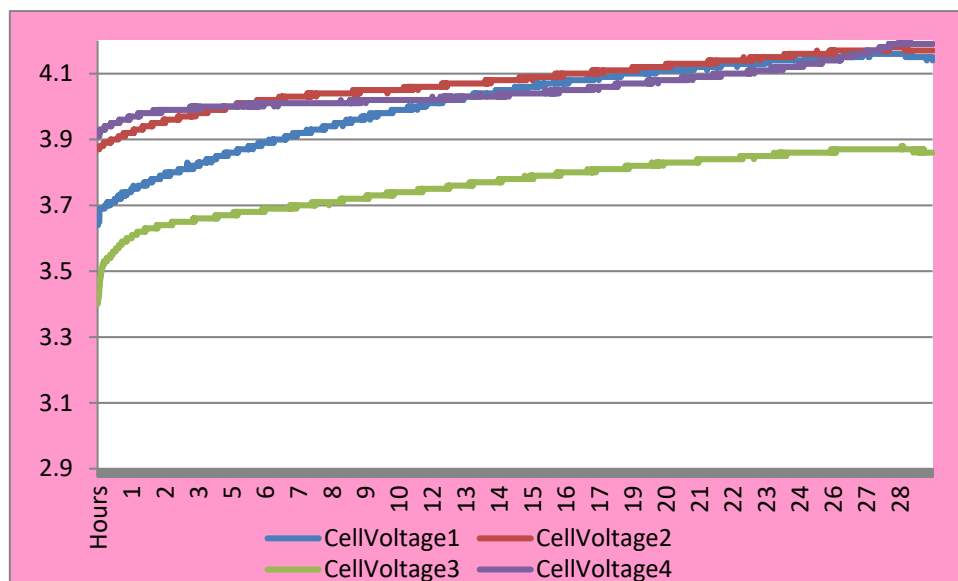


Σχήμα 5.6: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων καινούργιων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση χωρίς balancing.

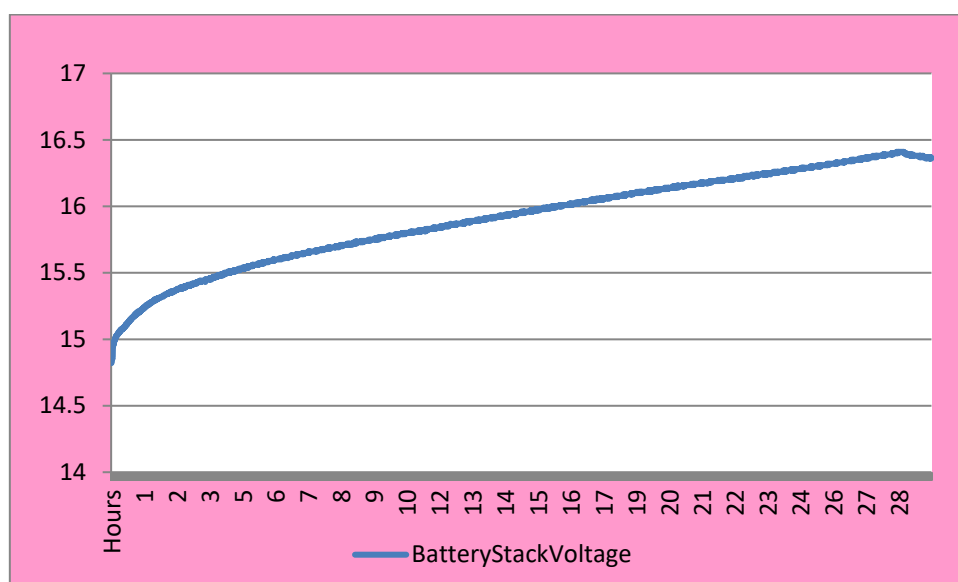
## 5.2 Λειτουργία χωρίς έλεγχο των στοιχείων

Αυτό το πείραμα είναι ενδεικτικό και σκοπό έχει να αποδείξει το πώς τα στοιχεία μιας συστοιχίας μπαταριών φορτίζονται και εκφορτίζονται ανομοιόμορφα. Σε αυτό το πείραμα λαμβάνονται μετρήσεις από όλα τα στοιχεία της μπαταρίας και σκοπός του είναι να αναδείξει την ανισορροπία που προκαλείται από τη μη χρήση εξισορρόπησης. Αυτό συμβαίνει και όταν δεν υπάρχει ολοκληρωμένο κύκλωμα ελέγχου μιας συστοιχίας μπαταριών και το μόνο στοιχείο το οποίο διαθέτει ο μικροελεγκτής ή ο χρήστης είναι η συνολική τάση της μπαταρίας. Με αυτόν τον τρόπο ο μικροελεγκτής και ο χρήστης της συστοιχίας δεν μπορούν να γνωρίζουν σε τι κατάσταση φόρτισης βρίσκεται το κάθε στοιχείο της μπαταρίας και η φόρτιση επηρεάζεται μόνον από τη τάση της συστοιχίας. Αυτή η πρακτική είναι επικίνδυνη και μπορεί να οδηγήσει σε ανάφλεξη κάποιου υπερφορτισμένου στοιχείου

το οποίο συνεχίζει να φορτίζεται. Όπως φαίνεται στα σχήματα 5.7 και 5.8 η συνολική τάση της συστοιχίας βρίσκεται στα 16.41Volt, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει ακόμα περιθώριο 0,4 V για φόρτιση αφού ο φορτιστής σε αυτή τη φάση φόρτισης φορτίζει με σταθερή τάση 16.8 Volt. Αυτό που συμβαίνει όμως όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7 είναι ότι το ένα στοιχείο, συγκεκριμένα το στοιχείο 4, έχει ήδη φτάσει το μέγιστο σημείο φόρτισης 4,2Volt και η περαιτέρω φόρτιση προκαλεί την υπερφόρτιση του. Επίσης στο ίδιο σχήμα παρατηρείται η μικρή τάση του στοιχείου 3 η οποία δίνει την δυνατότητα στον φορτιστή να συνεχίζει την φόρτιση. Σε περίπτωση λοιπόν που δεν υπάρχει κάποιος έλεγχος στα στοιχεία μιας μπαταρίας, φαινόμενα σαν αυτά συμβαίνουν προκαλώντας έντονη φθορά της συστοιχίας αλλά και εγκυμονώντας κίνδυνο ανάφλεξης της.

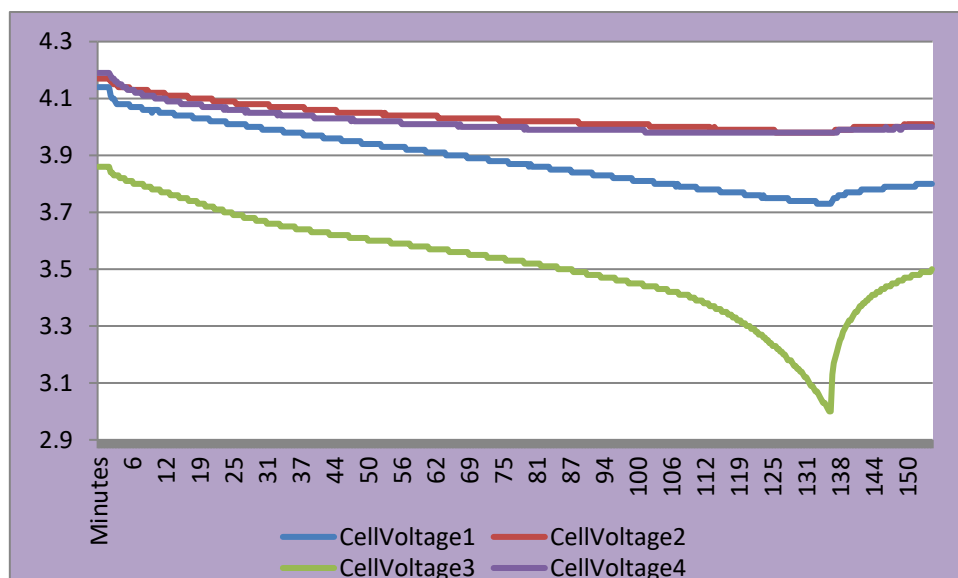


Σχήμα 5.7: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση χωρίς balancing.

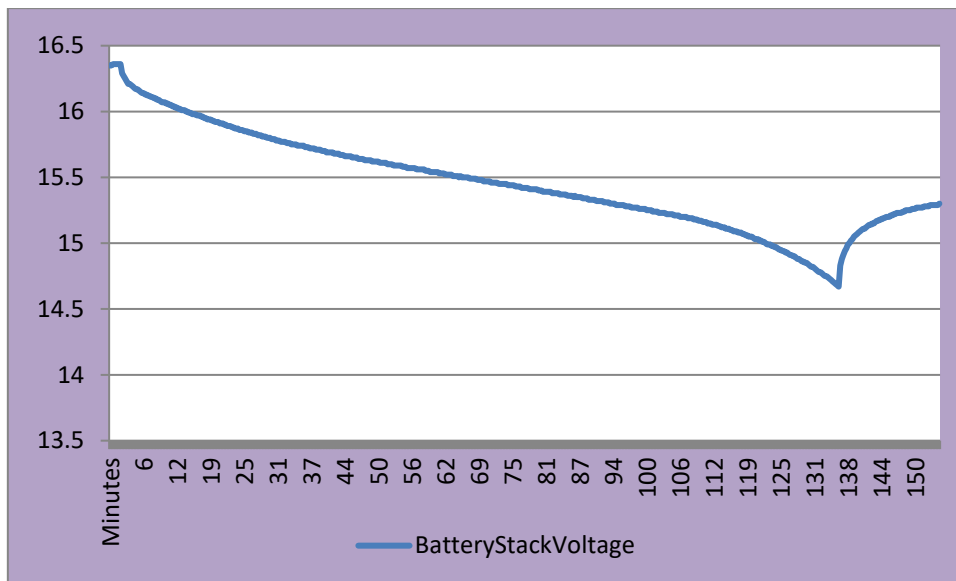


Σχήμα 5.8: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση χωρίς balancing.

Σε αυτό το πείραμα λαμβάνονται μετρήσεις από όλα τα στοιχεία της μπαταρίας και ελέγχονται μεμονωμένα με σκοπό να μην υπερβεί κάποιο στοιχείο τα όρια λειτουργίας του. Έτσι ο μικροελεγκτής μπορεί να γνωρίζει τη κατάσταση φόρτισης των στοιχείων της μπαταρίας και να διακόψει τη λειτουργία του συστήματος όποτε χρειαστεί. Επίσης ο μικροελεγκτής ενημερώνει το χρήστη σε περίπτωση που κάποιο στοιχείο υπερβεί τα όρια λειτουργίας του ώστε να αποσυνδέσει το φορτιστή ή το φορτίο ανάλογα τη λειτουργία της μπαταρίας. Με αυτόν τον τρόπο η συστοιχία παραμένει προστατευμένη και επιμηκώνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Παρόλο που υπάρχει έλεγχος το αρνητικό σε αυτή τη μέθοδο είναι ότι τα στοιχεία της μπαταρίας που εμφανίζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, μειώνουν σημαντικά τη χωρητικότητα της μπαταρίας διότι κάποια παραμένουν μη σωστά φορτισμένα. Επίσης όταν δεν φορτίζονται ομοιόμορφα τείνει το χάσμα ανάμεσα τους να γίνεται όλο και μεγαλύτερο μετά από πολλές διαδοχικές φορτίσεις και εκφορτίσεις. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί μόνο με την εφαρμογή εξισορρόπησης των στοιχείων. Οπότε με αυτή τη μέθοδο εξασφαλίζεται ότι τα στοιχεία της μπαταρίας δεν θα αποτελέσουν κίνδυνο ούτε θα καταστραφούν από κακή χρήση αλλά ταυτόχρονα η συνολική ποιότητα της μπαταρίας θα είναι μικρή λόγω των διαφορών των στοιχείων στη φόρτιση και εκφόρτιση. Στα σχήματα 5.9 και 5.10 φαίνεται η εκφόρτιση μετά από φόρτιση χωρίς balancing και παρατηρείται ο μειωμένος χρόνος εκφόρτισης λόγω των μη σωστά φορτισμένων στοιχείων.



Σχήμα 5.9: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση χωρίς balancing σε αντίσταση 68ohm.



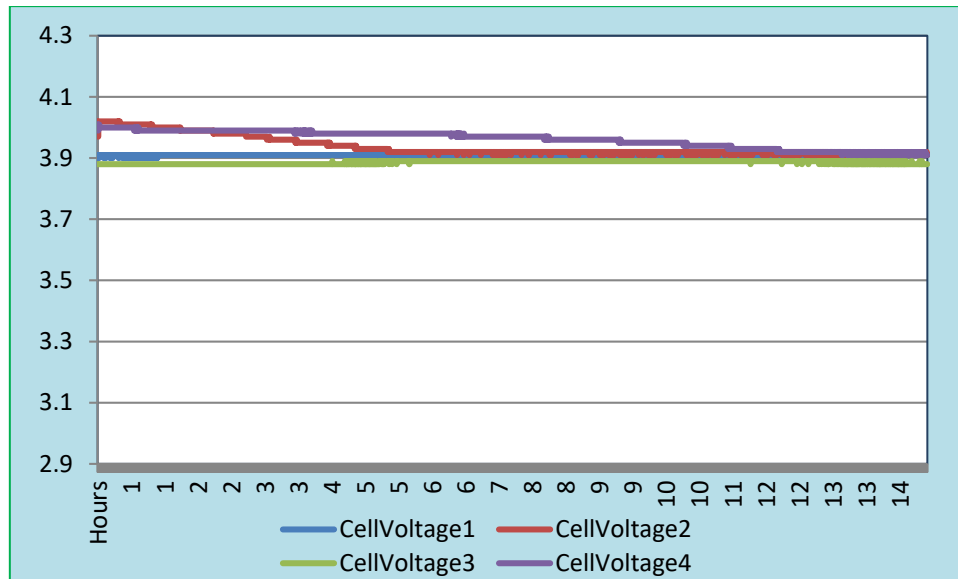
Σχήμα 5.10: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση χωρίς balancing σε αντίσταση 68ohm.

### 5.3 Λειτουργία με έλεγχο των στοιχείων και εξισορρόπηση

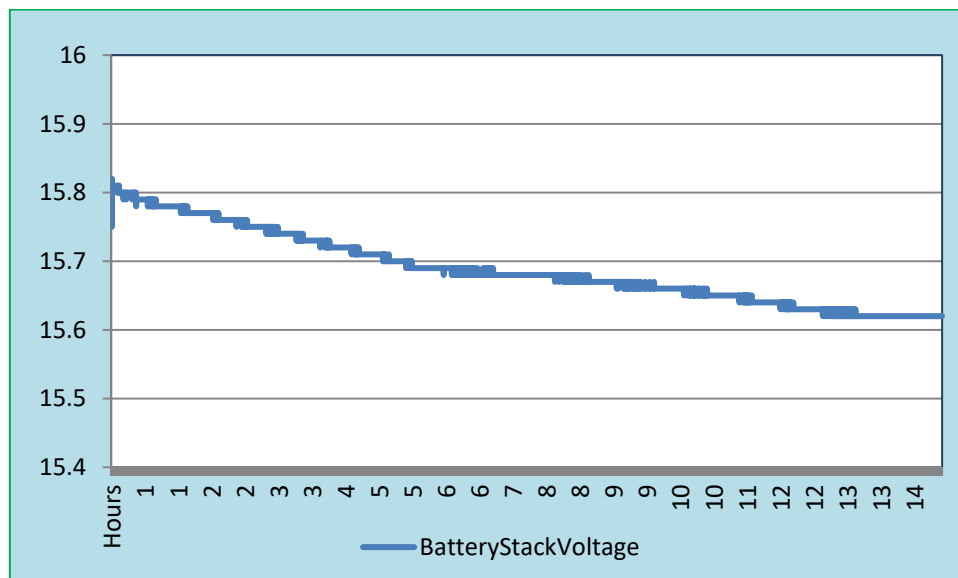
Το πείραμα αυτό αποτελεί προσπάθεια για την επίλυση του προβλήματος του προηγούμενου πειράματος. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτό το πείραμα λαμβάνονται μετρήσεις από τα στοιχεία της μπαταρίας για να μην υπερβεί κάποιο στοιχείο τα όρια λειτουργίας του και γίνεται εξισορρόπηση στα στοιχεία της μπαταρίας. Ο μικροελεγκτής γνωρίζει την κατάσταση φόρτισης των στοιχείων από τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το ολοκληρωμένο κύκλωμα μέτρησης. Έτσι ο μικροελεγκτής μπορεί να διακόψει τη διαδικασία φόρτισης ή εκφόρτισης εάν χρειαστεί αλλά μπορεί και να εφαρμόσει εξισορρόπηση στα στοιχεία της μπαταρίας εάν αυτό χρειαστεί. Η διαδικασία της εξισορρόπησης πραγματοποιείται μόνο κατά τη διάρκεια της φόρτισης της συστοιχίας ενώ κατά την εκφόρτιση τα στοιχεία δεν εξισορροπούνται για να εκφορτίσουν το μέγιστο δυνατό ρεύμα που μπορούν να δώσουν χωρίς απώλειες. Η μέγιστη δυνατή απόκλιση τάσης μεταξύ των στοιχείων είναι τα 0.03 Volt. Δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικοί τρόποι εξισορρόπησης, ο ένας είναι αυτός της εξισορρόπησης στο τέλος της φόρτισης και ο άλλος είναι η εξισορρόπηση κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

#### 5.3.1 Εξισορρόπηση στο τέλος της φόρτισης

Η εξισορρόπηση στο τέλος της φόρτισης δεν λύνει το προηγούμενο πρόβλημα γιατί πάλι τα στοιχεία της μπαταρίας παραμένουν μη πλήρως φορτισμένα ακόμα και μετά από την εξισορρόπηση. Αυτό συμβαίνει γιατί όλα τα στοιχεία αποκτούν την ίδια τάση ίση με αυτήν του χαμηλότερου στοιχείου μετά την εξισορρόπηση. Το μοναδικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μειώνει το μεγάλο χάσμα μεταξύ των τάσεων των στοιχείων που διογκώνεται μετά από πολλές διαδοχικές φορτίσεις και εκφορτίσεις. Εκτός από αυτό το πλεονέκτημα, η συστοιχία παραμένει μη πλήρως φορτισμένη και δαπανάται ρεύμα άσκοπα στο κύκλωμα εξισορρόπησης. Στα σχήματα 5.11 και 5.12 φαίνεται ο τρόπος λειτουργίας της εξισορρόπησης στη τέλος της φόρτισης και πιο συγκεκριμένα το στοιχείο νούμερο 3 το οποίο ήταν το χαμηλότερο είχε τάση 3,88 V και μετά το πέρας του balancing όλα τα υπόλοιπα στοιχεία είχαν τάση 3,91V.



Σχήμα 5.11: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για balancing μετά από φόρτιση με αντιστάσεις balancing 120ohm.

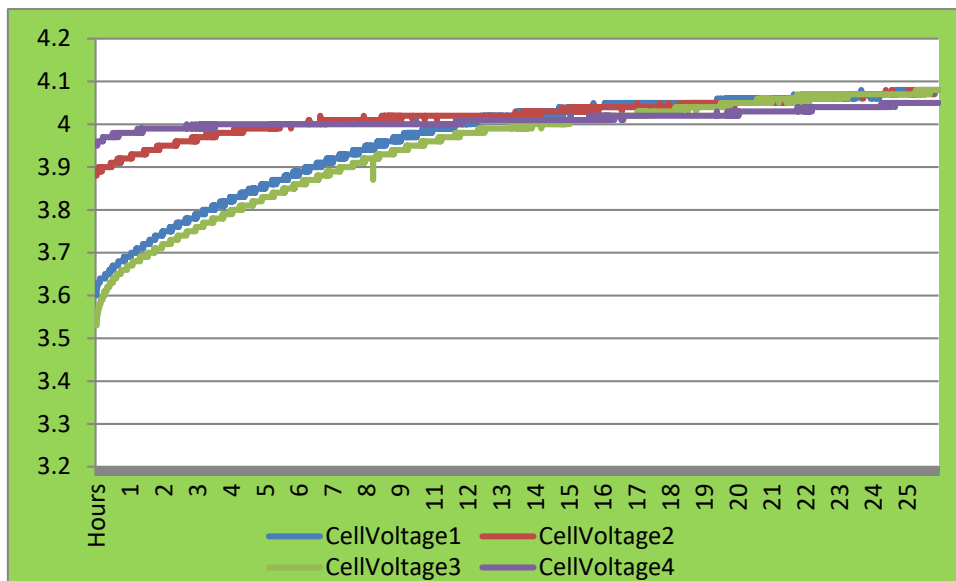


Σχήμα 5.12: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για balancing μετά από φόρτιση με αντιστάσεις balancing 120ohm.

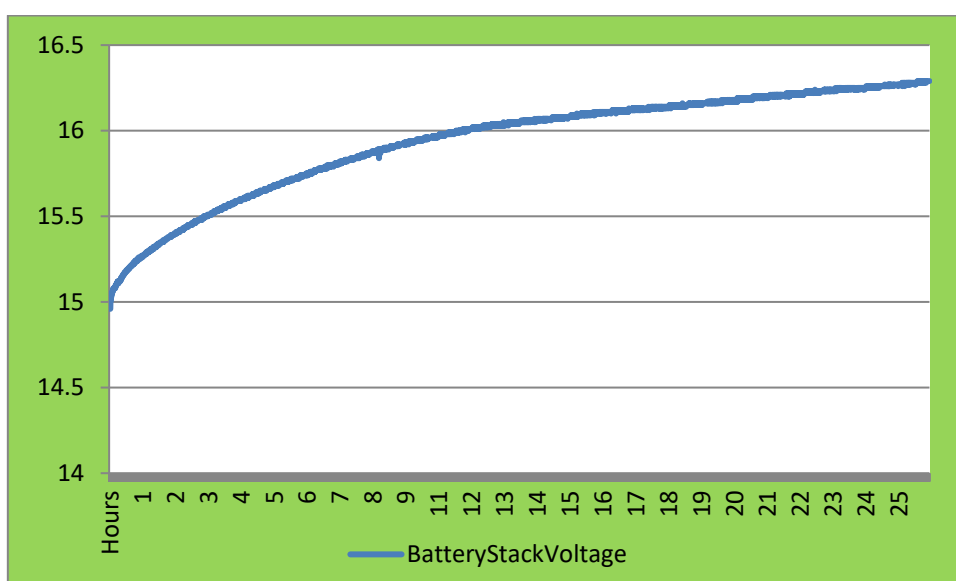
### 5.3.2 Εξισορρόπηση κατά τη διάρκεια της φόρτισης

Ο άλλος τρόπος αφορά την εξισορρόπηση κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Αυτή η εξισορρόπηση πραγματοποιείται σταδιακά κατά την ομαλή ροή της φόρτισης για να επιχειρήσει ο μικροελεγκτής να φέρει τα στοιχεία της μπαταρίας στην ίδια κατάσταση φόρτισης. Αυτή η διαδικασία όταν χρησιμοποιηθεί για αρκετό χρόνο φέρνει τα στοιχεία της μπαταρίας στο ίδιο ενεργειακό επίπεδο επιτρέποντας την ταυτόχρονη και πλήρη φόρτιση τους. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι φορτίζονται πλήρως και βρίσκονται όλα τα στοιχεία στην ίδια κατάσταση φόρτισης. Το μειονέκτημα είναι ο μεγαλύτερος χρόνος φόρτισης και η κατανάλωση ενέργειας στο κύκλωμα εξισορρόπησης. Το balancing κατά τη διάρκεια της φόρτισης μας δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σχετικά με την κατάσταση φόρτισης των στοιχείων της μπαταρίας και διασφαλίζει ότι όλα τα στοιχεία θα φορτιστούν πλήρως λειτουργώντας μέσα στις τιμές ασφαλείας. Όλες οι δοκιμές από αυτό το σημείο και έπειτα

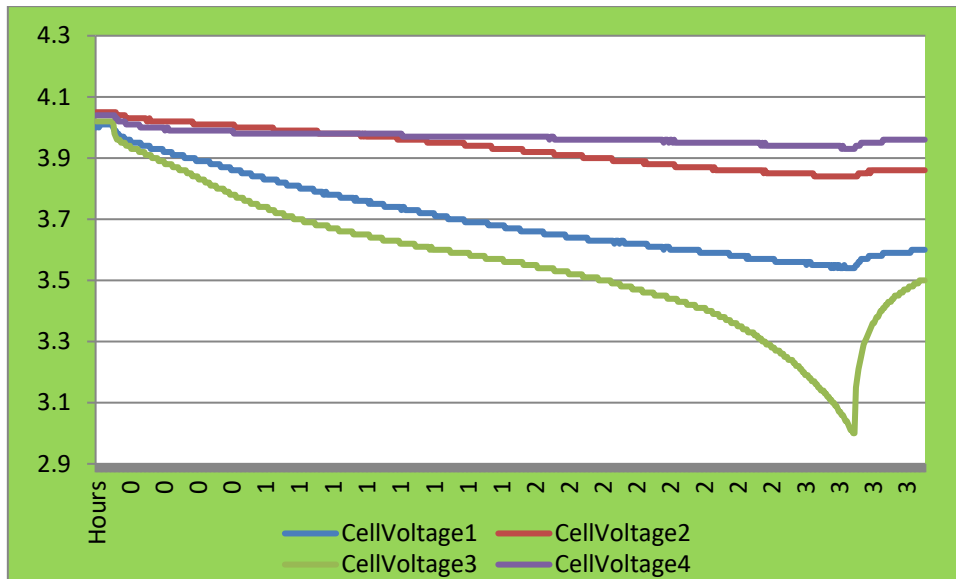
πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση εξισορρόπησης κατά τη διάρκεια της φόρτισης και όχι στο τέλος της. Στα σχήματα 5.13 και 5.14 φαίνεται η φόρτιση με balancing. Στα σχήματα 5.15 και 5.16 που αφορούν σε εκφόρτιση μετά από φόρτιση με balancing, σε σύγκριση με τα σχήματα 5.9 και 5.10, φαίνεται ότι η φόρτιση με balancing έφερε τα στοιχεία σε πλήρη φόρτιση και η εκφόρτιση στην ίδια αντίσταση διήρκεσε περισσότερο χρόνο σε σχέση με την φόρτιση χωρίς εξισορρόπηση. Η εκφόρτιση σε αντίσταση 680hm από φορτισμένη συστοιχία χωρίς balancing πραγματοποιήθηκε σε περίπου δύο ώρες ενώ η εκφόρτιση στην ίδια αντίσταση μετά από φόρτιση με balancing πραγματοποιήθηκε σε λίγο περισσότερο από 3 ώρες. Αυτό σημαίνει ότι η φόρτιση με balancing έφερε όλα τα στοιχεία σε πλήρη φόρτιση σε σχέση με τη φόρτιση χωρίς balancing όπου δεν φόρτισε πλήρως τα στοιχεία. Παρακάτω διεξάγονται τα πειράματα για φόρτιση με εξισορρόπηση και διάφορες τιμές αντιστάσεων εξισορρόπησης.



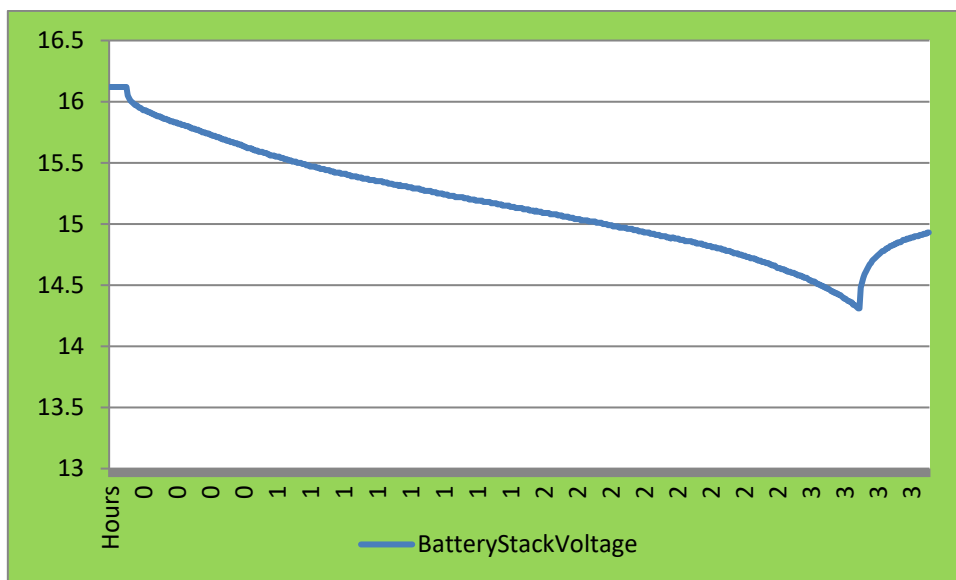
Σχήμα 5.13: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 120ohm.



Σχήμα 5.14: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 120ohm.



Σχήμα 5.15: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση, μετά από φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 120ohm, σε αντίσταση 68ohm.



Σχήμα 5.16: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση, μετά από φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 120ohm, σε αντίσταση 68ohm.

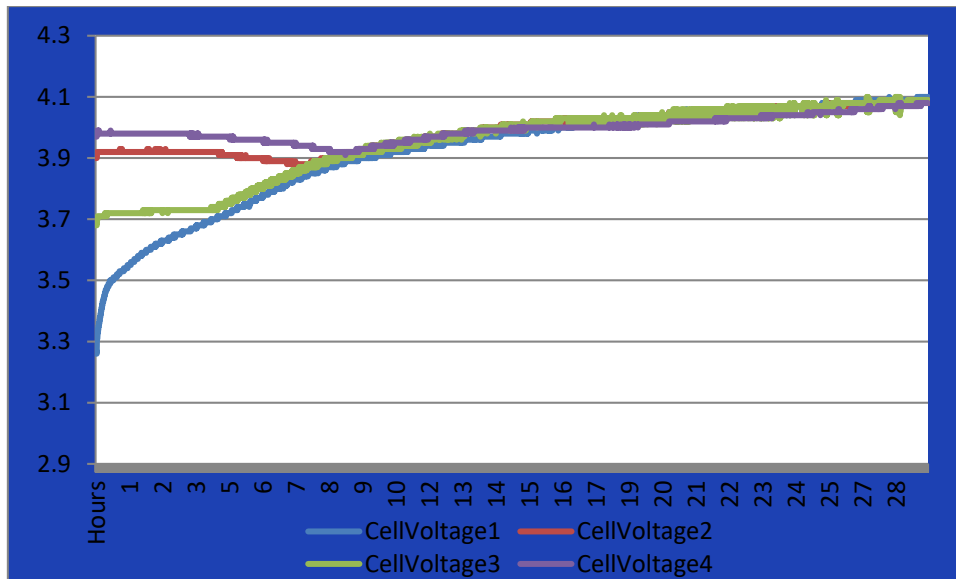
Για την φόρτιση χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα παρακάτω ο ίδιος φορτιστής και ο ίδιος τρόπος φόρτισης. Αυτό που αλλάζει ανάμεσα στις δοκιμές είναι οι αντιστάσεις εξισορρόπησης. Δηλαδή αλλάζοντας τις αντιστάσεις εξισορρόπησης επηρεάζεται ο τρόπος που γίνεται το balancing. Με βάση την εξίσωση για το ρεύμα εξισορρόπησης (2.6), προκύπτει ότι αυτό που κάνει η αντίσταση εξισορρόπησης είναι να παρεκτρέπει μέρος του ρεύματος φόρτισης του στοιχείου στην ίδια την αντίσταση με αποτέλεσμα την φόρτιση του στοιχείου με μικρότερο ρεύμα.

Οπότε, ανάλογα τις διαφορετικές τιμές αντιστάσεων κάθε φορά, διαφορετικό θα είναι και το balancing. Κατά την φόρτιση δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές αντιστάσεων εξισορρόπησης προκειμένου να διαπιστωθεί και πειραματικά ποιες τιμές ταιριάζουν στη συγκεκριμένη διαδικασία φόρτισης για τον καλύτερο δυνατό χρόνο φόρτισης. Στα πέντε πειράματα που ακολουθούν η φόρτιση της συστοιχίας πραγματοποιήθηκε από πλήρη εκφόρτιση με πέντε διαφορετικές αντιστάσεις

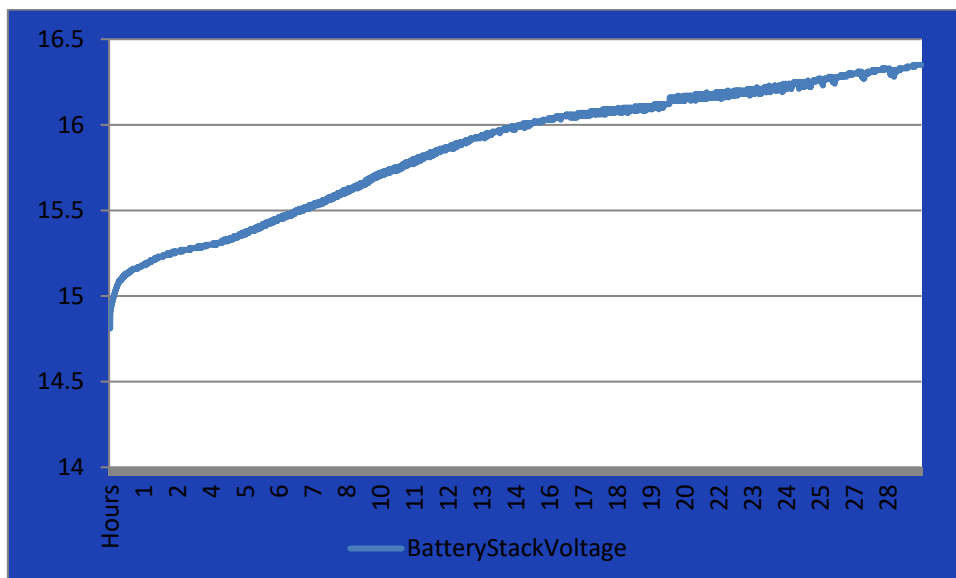
εξισορρόπησης με τιμές 33 Ohm, 68 Ohm, 120 Ohm, 240 Ohm και 470Ohm. Σε ένα πείραμα επιχειρήθηκε φόρτιση με αντιστάσεις εξισορρόπησης 8 ohm όμως τα αποτελέσματα ήταν απογοητευτικά καθώς το ρεύμα εξισορρόπησης ήταν μεγαλύτερο από το ρεύμα φόρτισης και έτσι η φόρτιση ήταν στάσιμη και χρησιμοποιούσε άσκοπα το ρεύμα φόρτισης αλλά και το ρεύμα της μπαταρίας.

Στο πρώτο πείραμα για φόρτιση με αντιστάσεις εξισορρόπησης 33 Ohm παρατηρείται ένα πολύ ενδιαφέρον φαινόμενο. Φαίνεται στα σχήματα 5.17 και 5.18 ότι οι τάσεις των τεσσάρων στοιχείων συγκλίνουν μεταξύ τους, αποτέλεσμα του balancing μέσω των αντιστάσεων. Αυτό που προκαλεί εντύπωση είναι ότι τα στοιχεία 2 και 4 τα οποία βρίσκονται σε μεγαλύτερη κατάσταση φόρτισης από ότι τα στοιχεία 1 και 3, φαίνονται αρχικά να εκφορτίζονται έως ότου έρθουν στην ίδια κατάσταση φόρτισης με τα άλλα δύο. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί το ρεύμα του στοιχείου είναι αρνητικό, δηλαδή δεν φορτίζεται αλλά εκφορτίζεται μερικώς στην αντίσταση εξισορρόπησης. Από την εξίσωση εξισορρόπησης (2.6) φαίνεται ότι για την συγκεκριμένη περίπτωση το ρεύμα φόρτισης είναι μικρότερο από αυτό που πρέπει να καταναλωθεί μέσω της σταθερής αντίστασης εξισορρόπησης και ως επακόλουθο πρέπει το στοιχείο να προσφέρει και αυτό ρεύμα για να συμπληρωθεί το ρεύμα που απαιτείται. Εάν λοιπόν στην παραπάνω εξίσωση το ρεύμα φόρτισης είναι μικρότερο του ρεύματος της αντίστασης εξισορρόπησης, τότε συνεπάγεται ότι και το ρεύμα φόρτισης του στοιχείου θα έχει αρνητική τιμή, δηλαδή δεν θα φορτίζεται αλλά θα εκφορτίζεται και θα συμπληρώνει το ρεύμα που απαιτείται. Ένα ακόμα ενδιαφέρον στοιχείο σε αυτό το πείραμα είναι ότι παρόλο που τα δύο πιο φορτισμένα στοιχεία φαίνεται να εκφορτίζονται πριν συγκλίνουν με το στοιχείο νούμερο 1, το οποίο είναι το πιο εκφορτισμένο, το στοιχείο νούμερο 3 δεν φαίνεται να εκφορτίζεται. Για το στοιχείο νούμερο 3 φαίνεται ότι δεν ισχύει το ίδιο όπως τα στοιχεία νούμερο 2 και 4 και ο λόγος είναι ότι το ρεύμα εξισορρόπησης που διαρρέει την αντίσταση εξισορρόπησης είναι άμεσα εξαρτώμενο από την τιμή της τάσης του στοιχείου όπως φαίνεται και στην εξίσωση (2.7).

Αυτό μας δείχνει ότι το ρεύμα εξισορρόπησης του κάθε στοιχείου θα είναι συσχετισμένο με την τάση του στοιχείου και στο πείραμα το στοιχείο νούμερο 3 έχει τιμή τάσης περίπου 3,7 V ενώ τα στοιχεία νούμερο 2 και 4 τιμή τάσης περίπου 4-4.1 V. Όπως φαίνεται αυτό είναι αρκετό ώστε να μην εκφορτίζεται το στοιχείο αλλά μόνο να φορτίζεται με πολύ μικρή τιμή ρεύματος μέχρι να συγκλίνει η τάση του με την τάση του μικρότερου στοιχείου νούμερο 1. Παρότι έχει ενδιαφέρον αυτή η μέθοδος δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική ενεργειακά διότι με αυτόν τον τρόπο καταναλώνεται μεγάλη ποσότητα ρεύματος στις αντιστάσεις εξισορρόπησης και επιπλέον του ρεύματος του φορτιστή, καταναλώνεται και το ρεύμα που υπάρχει αποθηκευμένο στις μπαταρίες με το υψηλότερο ενεργειακό φορτίο. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και από το σχήμα 5.18 όπου η συνολική τάση φόρτισης της συστοιχίας δεν έχει ομαλή ροή ακριβώς διότι στην αρχή της φόρτισης κάποια στοιχεία φορτίζονται ενώ κάποια άλλα εκφορτίζονται, μέχρι να γίνει η σύγκλιση των τιμών τους. Ο χρόνος φόρτισης σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 28 ώρες.

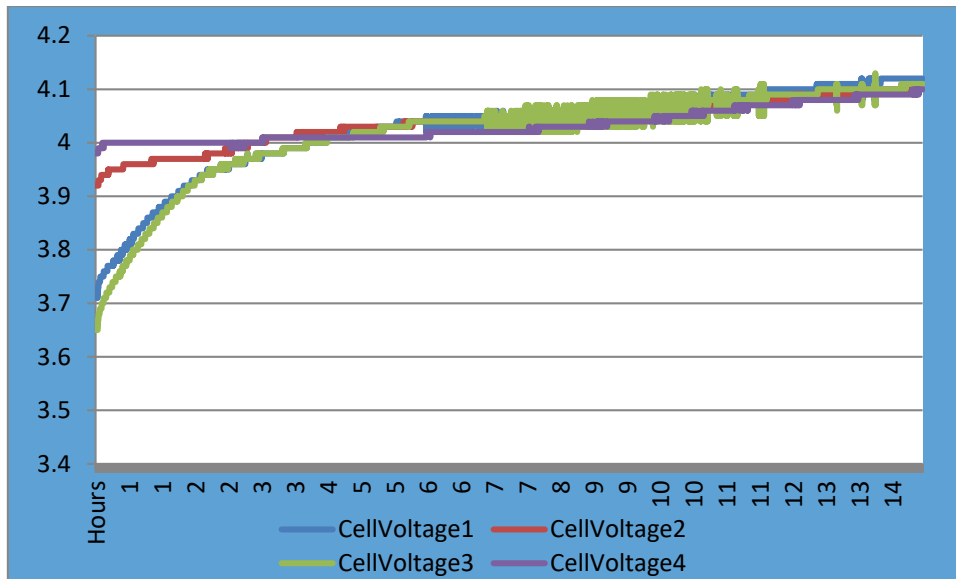


Σχήμα 5.17: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 33ohm.

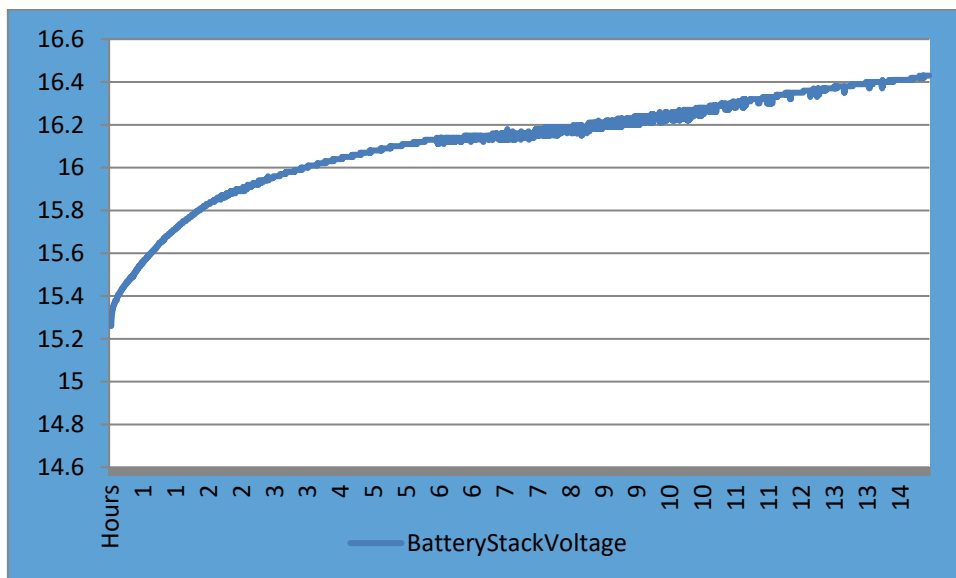


Σχήμα 5.18: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 33ohm.

Στο δεύτερο πείραμα για φόρτιση με αντιστάσεις εξισορρόπησης 68 Ohm τα αποτελέσματα δείχνουν σχετικά ομαλή φόρτιση. Στα σχήματα 5.19 και 5.20 φαίνονται τα αποτελέσματα της φόρτισης. Σε αυτή την περίπτωση οι αντιστάσεις εξισορρόπησης έχουν μεγαλύτερη τιμή ενώ η σύγκλιση των τιμών των τάσεων πραγματοποιείται σε γρήγορο χρονικό διάστημα με το στοιχείο νούμερο 3 να έχει περισσότερες διακυμάνσεις στην τάση του έναντι των υπολοίπων λόγω της μεγαλύτερης φθοράς του. Ο χρόνος φόρτισης σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 14 ώρες.

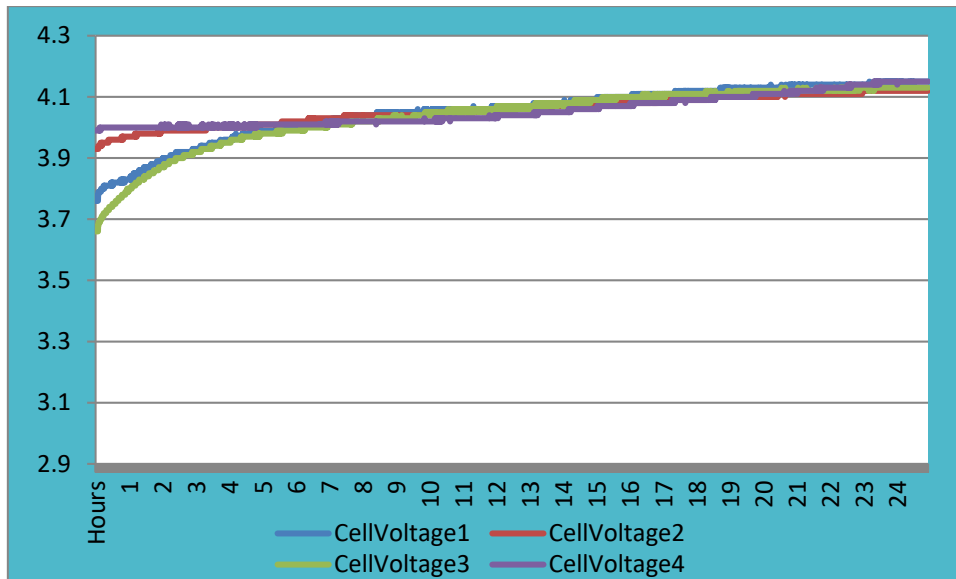


Σχήμα 5.19: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 68ohm.

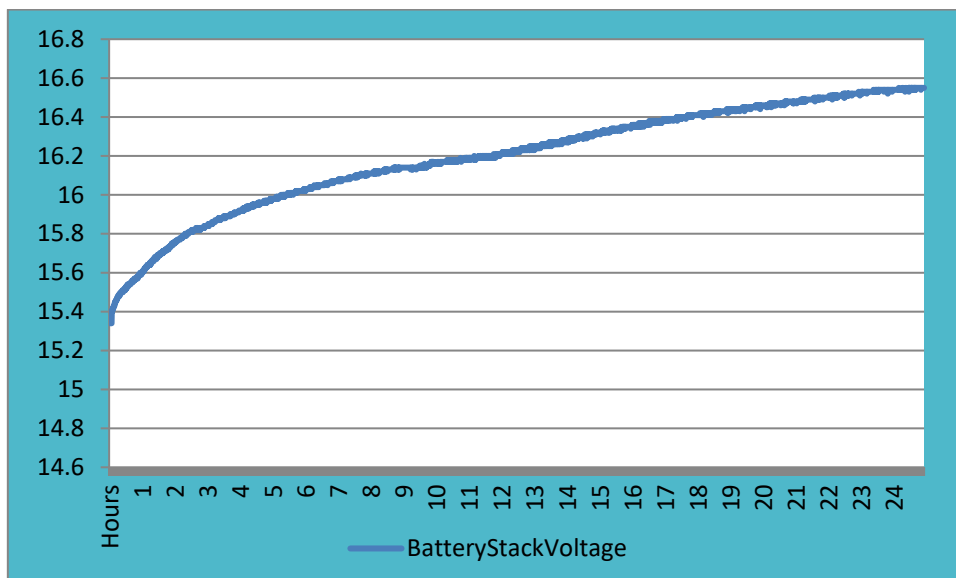


Σχήμα 5.20: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 68ohm.

Στο τρίτο πείραμα για φόρτιση με αντιστάσεις εξισορρόπησης 120 Ohm τα αποτελέσματα δείχνουν ομαλή φόρτιση. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 5.21 και 5.22. Σε αυτήν την περίπτωση οι αντιστάσεις εξισορρόπησης έχουν μεγαλύτερη τιμή ενώ η σύγκλιση των τιμών των τάσεων πραγματοποιείται σε γρήγορο χρονικό διάστημα. Ο χρόνος φόρτισης σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 24 ώρες.

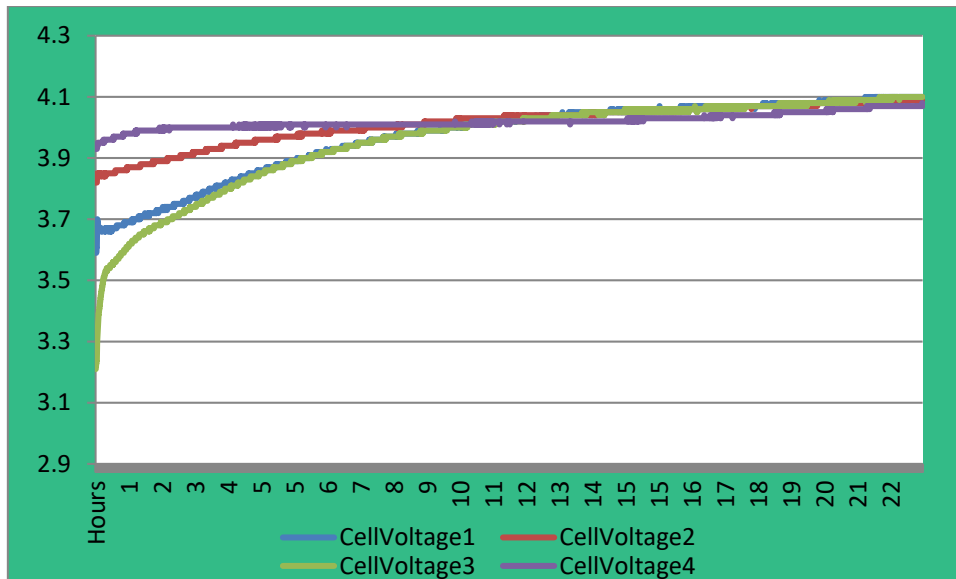


Σχήμα 5.21: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 120ohm.

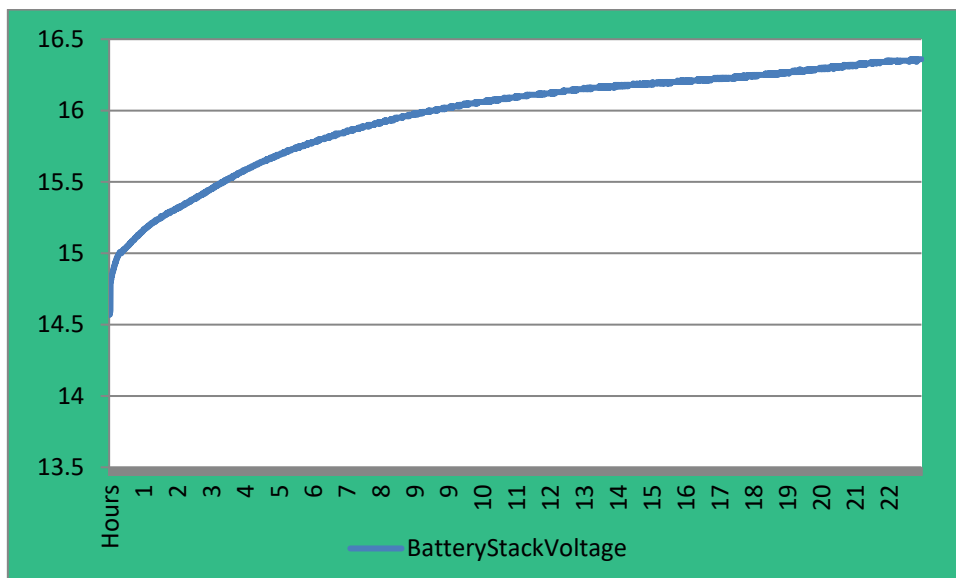


Σχήμα 5.22: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 120ohm.

Στο τέταρτο πείραμα για φόρτιση με αντιστάσεις εξισορρόπησης 240 Ohm τα αποτελέσματα δείχνουν ομαλή φόρτιση. Στα σχήματα 5.23 και 5.24 φαίνονται τα αποτελέσματα της φόρτισης. Σε αυτήν την περίπτωση οι αντιστάσεις εξισορρόπησης έχουν μεγάλη τιμή και ο χρόνος σύγκλισης είναι μεγαλύτερος από τα προηγούμενα πειράματα όπως φαίνεται από το σχήμα 5.23 αλλά δεν προκαλεί πρόβλημα στην φόρτιση και τα στοιχεία συγκλίνουν πριν πραγματοποιηθεί η πλήρης φόρτιση. Ο χρόνος σύγκλισης σε αυτή την περίπτωση αυξήθηκε από περίπου 4-5 ώρες σε περίπου 9-10 ώρες. Ο χρόνος φόρτισης σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 22 ώρες.



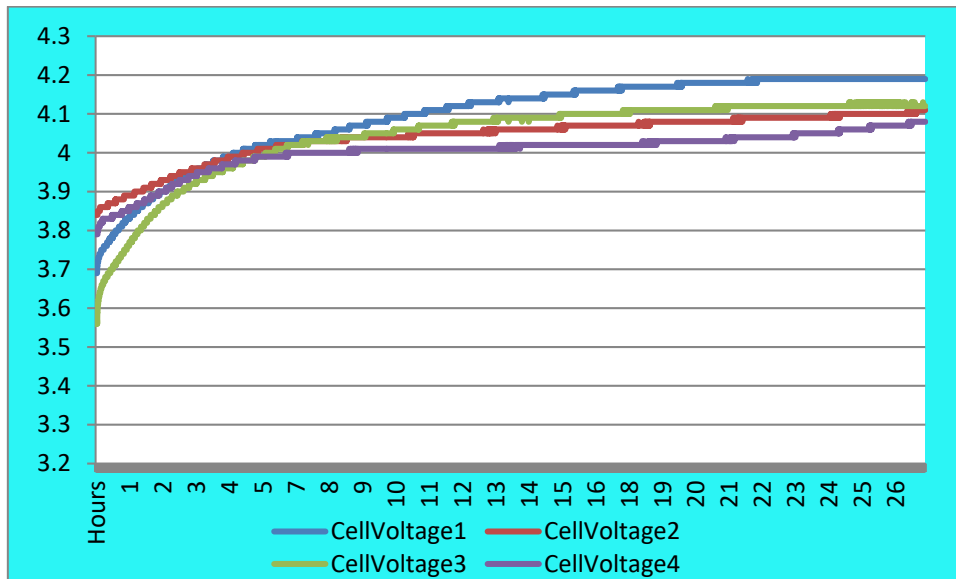
Σχήμα 5.23: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 240ohm.



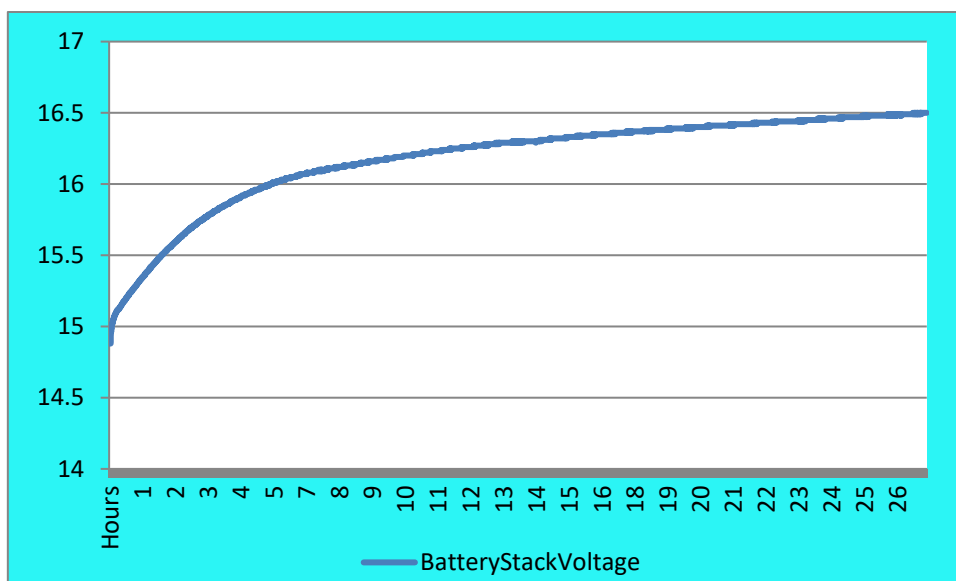
Σχήμα 5.24: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 240ohm.

Στο πέμπτο πείραμα για φόρτιση με αντιστάσεις εξισορρόπησης 470 Ohm τα αποτελέσματα στα σχήματα 5.25 και 5.26 δείχνουν ομαλή φόρτιση όμως παρατηρείται ένα ενδιαφέρον φαινόμενο. Σε αυτή τη περίπτωση οι αντιστάσεις εξισορρόπησης έχουν μεγάλη τιμή και ο χρόνος σύγκλισης είναι μεγάλος όπως φαίνεται από το σχήμα 5.25 το οποίο όμως προκαλεί πρόβλημα στην φόρτιση και τα στοιχεία δεν συγκλίνουν πριν πραγματοποιηθεί η πλήρης φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα από μια χρονική στιγμή και μετά βλέπουμε ότι παρόλο που υπάρχει αντίσταση εξισορρόπησης, η τιμή είναι μεγάλη και το ρεύμα εξισορρόπησης μικρό σε τέτοιο σημείο ώστε να μην μπορεί να υπάρξει σωστή εξισορρόπηση των στοιχείων. Σε τέτοιες περιπτώσεις όπου η τιμή της αντίστασης εξισορρόπησης είναι μεγάλη, απαιτείται εξισορρόπηση και εκτός της διάρκειας φόρτισης. Από αυτό το σημείο και έπειτα όσο μεγαλύτερες αντιστάσεις εξισορρόπησης και να χρησιμοποιηθούν στα πειράματα δεν έχει

νόημα καθώς η αποτελεσματικότητά τους θα είναι μειωμένη. Ο χρόνος φόρτισης σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 26 ώρες.



Σχήμα 5.25: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 470ohm.



Σχήμα 5.26: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για φόρτιση με balancing με αντιστάσεις balancing 470ohm.

### 5.3.3 Εκφόρτιση σε σταθερό φορτίο

Η μέγιστη τάση αποκοπής της μπαταρίας είναι τα 16,8 V, δηλαδή όταν όλα τα στοιχεία έχουν 4,2 V τάση και ελάχιστη τάση αποκοπής τα 12 V, δηλαδή όταν όλα τα στοιχεία έχουν τάση 3 V. Επειδή τα στοιχεία δεν είναι ιδανικώς ίδια μεταξύ τους υπάρχει πολύ μικρή πιθανότητα να φθάσουν όλα στην ίδια ελάχιστη τάση καθώς ο μικροελεγκτής θα αποκόψει την μπαταρία μόλις ένα μόνο στοιχείο φθάσει τα 3V. Παρόλα αυτά στους υπολογισμούς θα χρησιμοποιηθούν αυτές οι δύο ακραίες τιμές του συσσωρευτή για να καλυφθεί όλο το φάσμα των πιθανοτήτων. Για την εύρεση του ρεύματος

χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (2.1) και (2.2). Για την εύρεση της ισχύος χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (2.3) και (2.4).

Για τις εκφορτίσεις πραγματοποιήθηκαν πειράματα με διαφορετικό φορτίο κάθε φορά. Δηλαδή η αντίσταση εκφόρτισης σε κάθε πείραμα είχε διαφορετική τιμή. Η εκφόρτιση της συστοιχίας από πλήρη φόρτιση πραγματοποιήθηκε σε πέντε διαφορετικές αντιστάσεις με τιμές 8 Ohm, 25 Ohm, 68 Ohm, 120 Ohm και 240 Ohm αντίστοιχα. Στα πειράματα αυτά δοκιμάστηκε η συστοιχία σε εκφόρτιση με αυτές τις πέντε διαφορετικές τιμές αντιστάσεων.

Στο πρώτο πείραμα για εκφόρτιση σε αντίσταση 8 Ohm, το ρεύμα το οποίο διαρρέει την αντίσταση προκύπτει να είναι:

Για την περίπτωση της μέγιστης τάσης:

$$\frac{16,8 V}{8 Ohm} = 2.1 A \quad (6.1)$$

Για την περίπτωση της ελάχιστης τάσης:

$$\frac{12 V}{8 Ohm} = 1.5 A \quad (6.2)$$

Η ισχύς που καταναλώνεται στην μπαταρία είναι:

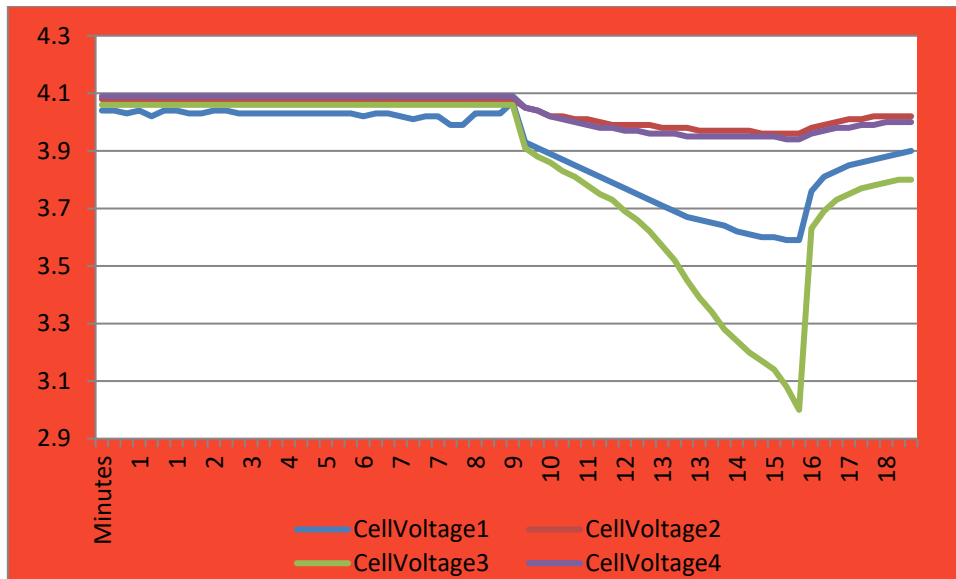
Για την περίπτωση της μέγιστης τάσης:

$$2.1 A * 16.8 V = 35,28 Watt \quad (6.3)$$

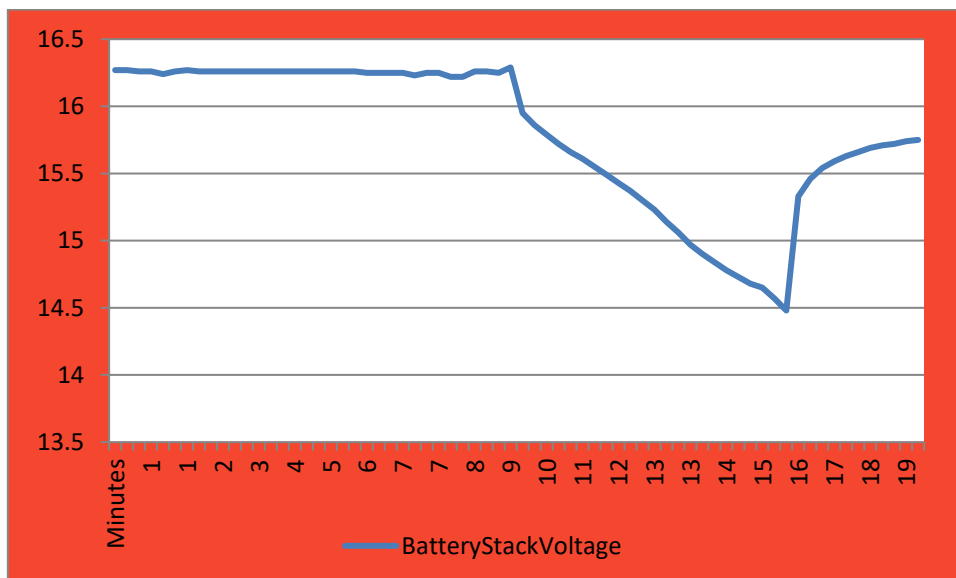
Για την περίπτωση της ελάχιστης τάσης:

$$1,5 A * 12 V = 18 Watt \quad (6.4)$$

Το ελάχιστο ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση είναι 1,5A ενώ το μέγιστο 2,1A. Η ελάχιστη ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο είναι 18 Watt ενώ η μέγιστη είναι 35,28 Watt. Αυτό το ρεύμα είναι οριακά μεγάλο για τη συγκεκριμένη συστοιχία μπαταριών καθώς το μέγιστο ασφαλές ρεύμα εκφόρτισης είναι έως 1.0C δηλαδή περίπου 2A για τη συγκεκριμένη συστοιχία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 5.27 και 5.28. Παρότι δεν ενδείκνυται το συγκεκριμένο πείραμα λόγω μείωσης διάρκειας ζωής της συστοιχίας μπαταριών, έχει ενδιαφέρον το γεγονός της πτώσης τάσης των στοιχείων. Δηλαδή, παρότι τα στοιχεία φθάνουν σε χαμηλή τάση σε πολύ γρήγορο χρόνο λόγω μικρής αντίστασης, μόλις σταματάει η εκφόρτιση επειδή το στοιχείο νούμερο 3 φθάνει στο κατώτατο όριο λειτουργίας του, τότε οι τάσεις των στοιχείων επανέρχονται σε υψηλό επίπεδο. Αυτό συμβαίνει όταν γίνεται εκφόρτιση με πολύ μεγάλη τιμή ρεύματος, δηλαδή η πτώση τάσης να μην ακολουθεί πιστά την κατάσταση φόρτισης των στοιχείων αλλά να είναι πολύ μεγαλύτερη η πτώση τάσης σε σχέση με την πτώση του φορτίου της συστοιχίας. Ο χρόνος εκφόρτισης σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 16 λεπτά.



Σχήμα 5.27: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 8ohm.



Σχήμα 5.28: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 8ohm.

Στο δεύτερο πείραμα για εκφόρτιση σε αντίσταση 25 Ohm, το ρεύμα το οποίο διαρρέει την αντίσταση προκύπτει να είναι:

Για την περίπτωση της μέγιστης τάσης:

$$\frac{16,8 V}{25 Ohm} = 672 mA \quad (6.5)$$

Για την περίπτωση της ελάχιστης τάσης:

$$\frac{12 V}{25 Ohm} = 480 mA \quad (6.6)$$

Η ισχύς που καταναλώνεται στην μπαταρία είναι:

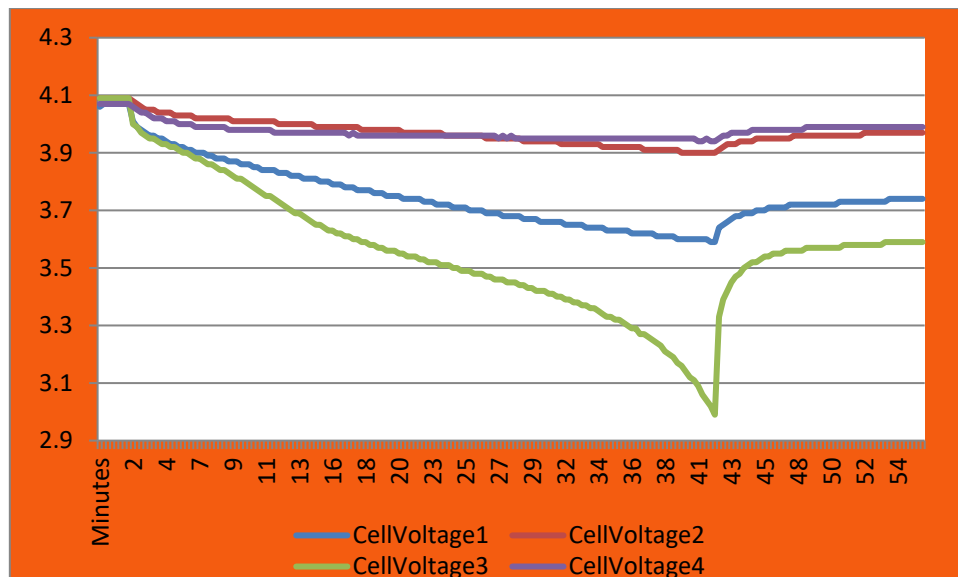
Για την περίπτωση της μέγιστης τάσης:

$$672 \text{ mA} * 16.8 \text{ V} = 11,29 \text{ Watt} \quad (6.7)$$

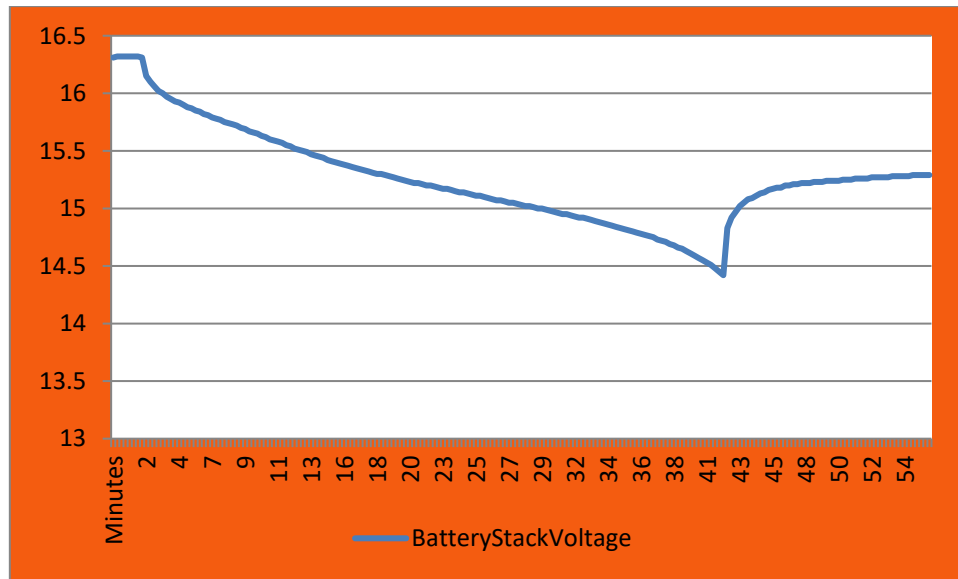
Για την περίπτωση της ελάχιστης τάσης:

$$480 \text{ mA} * 12 \text{ V} = 5.76 \text{ Watt} \quad (6.8)$$

Το ελάχιστο ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση είναι 480 mA ενώ το μέγιστο 672 mA. Η ελάχιστη ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο είναι 5.76 Watt ενώ η μέγιστη είναι 11,29 Watt. Η συγκεκριμένη ένταση ρεύματος βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλής λειτουργίας της συστοιχίας και τα αποτελέσματα μας επιβεβαιώνουν ακριβώς αυτό. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 5.29 και 5.30. Ο χρόνος εκφόρτισης σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 43 λεπτά.



Σχήμα 5.29: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 25ohm.



Σχήμα 5.30: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 25ohm.

Στο τρίτο πείραμα για εκφόρτιση σε αντίσταση 68 Ohm, το ρεύμα το οποίο διαρρέει την αντίσταση προκύπτει να είναι:

Για την περίπτωση της μέγιστης τάσης:

$$\frac{16,8 V}{68 Ohm} = 247 mA \quad (6.9)$$

Για την περίπτωση της ελάχιστης τάσης:

$$\frac{12 V}{68 Ohm} = 176.5 mA \quad (6.10)$$

Η ισχύς που καταναλώνεται στην μπαταρία είναι:

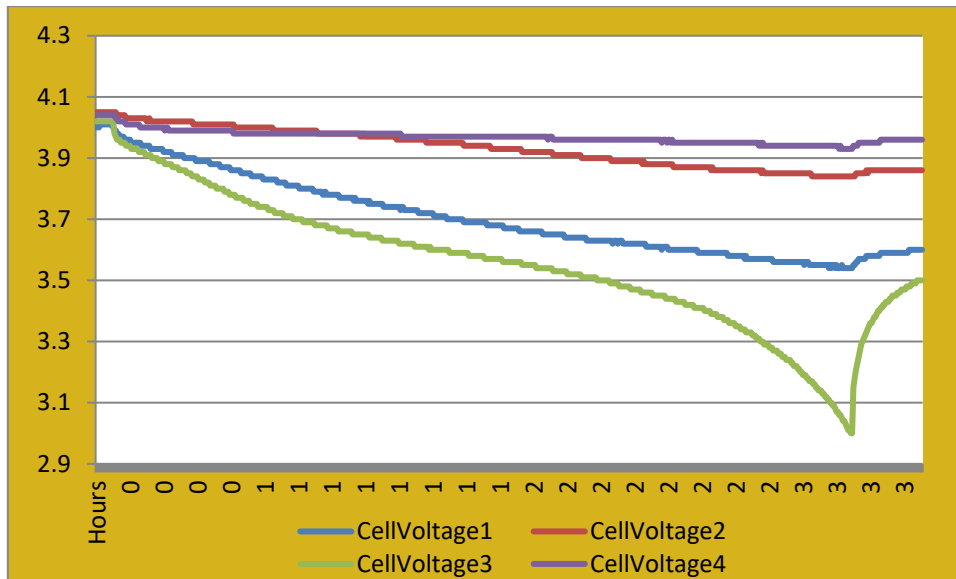
Για την περίπτωση της μέγιστης τάσης:

$$247 mA * 16.8 V = 4.15 Watt \quad (6.11)$$

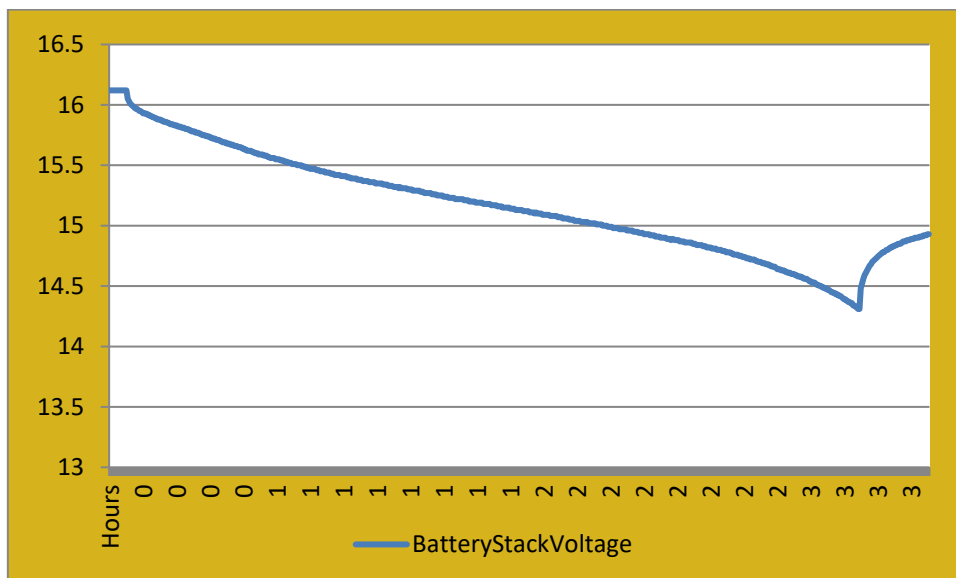
Για την περίπτωση της ελάχιστης τάσης:

$$176.5 mA * 12 V = 2.12 Watt \quad (6.12)$$

Το ελάχιστο ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση είναι 176,5 mA ενώ το μέγιστο 247 mA. Η ελάχιστη ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο είναι 2.12 Watt ενώ η μέγιστη είναι 4.15 Watt. Η συγκεκριμένη ένταση ρεύματος βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλής λειτουργίας της συστοιχίας και τα αποτελέσματα δείχνουν ομαλή εκφόρτιση της συστοιχίας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 5.31 και 5.32. Ο χρόνος εκφόρτισης σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 3 ώρες.



Σχήμα 5.31: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 68ohm.



Σχήμα 5.32: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 68ohm.

Στο τέταρτο πείραμα για εκφόρτιση σε αντίσταση 120 Ohm, το ρεύμα το οποίο διαρρέει την αντίσταση προκύπτει να είναι:

Για την περίπτωση της μέγιστης τάσης:

$$\frac{16,8 V}{120 Ohm} = 140 mA \quad (6.13)$$

Για την περίπτωση της ελάχιστης τάσης:

$$\frac{12 V}{120 Ohm} = 100 mA \quad (6.14)$$

Η ισχύς που καταναλώνεται στην μπαταρία είναι:

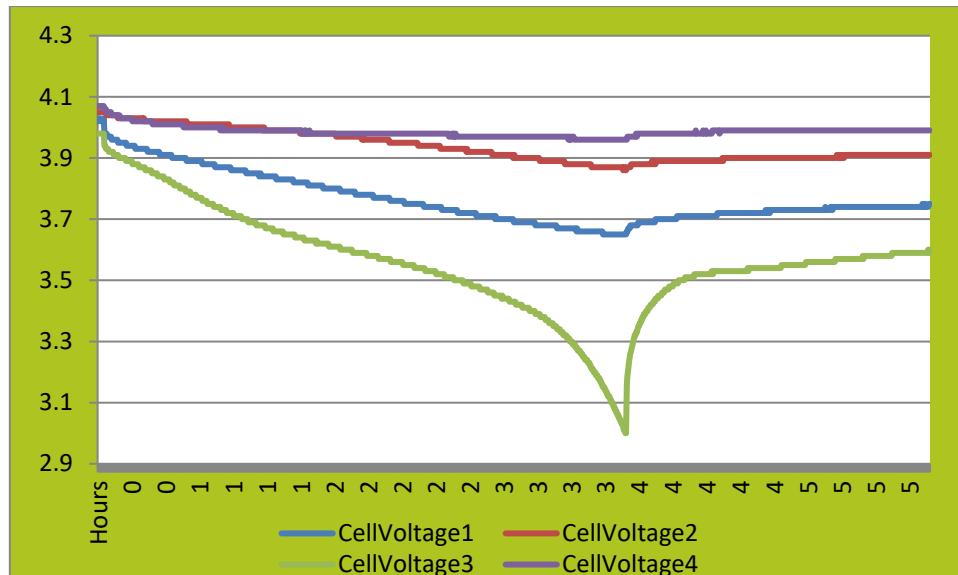
Για την περίπτωση της μέγιστης τάσης:

$$140 \text{ mA} * 16.8 \text{ V} = 2.35 \text{ Watt} \quad (6.15)$$

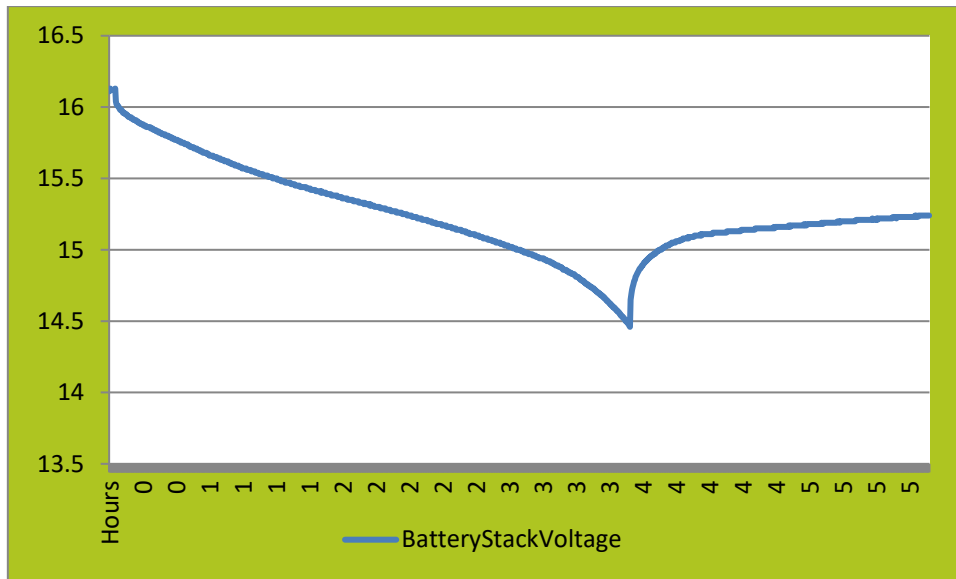
Για την περίπτωση της ελάχιστης τάσης:

$$100 \text{ mA} * 12 \text{ V} = 1.2 \text{ Watt} \quad (6.16)$$

Το ελάχιστο ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση είναι 100 mA ενώ το μέγιστο 140 mA. Η ελάχιστη ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο είναι 1.2 Watt ενώ η μέγιστη είναι 2.35 Watt. Η συγκεκριμένη ένταση ρεύματος βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλής λειτουργίας της συστοιχίας και τα αποτελέσματα δείχνουν ομαλή εκφόρτιση. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 5.33 και 5.34. Ο χρόνος εκφόρτισης σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 4 ώρες.



Σχήμα 5.33: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 120ohm.



Σχήμα 5.34: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 120ohm.

Στο πέμπτο και τελευταίο πείραμα για εκφόρτιση σε αντίσταση 240 Ohm, το ρεύμα το οποίο διαρρέει την αντίσταση προκύπτει να είναι:

Για την περίπτωση της μέγιστης τάσης:

$$\frac{16,8 V}{240 Ohm} = 70 mA \quad (6.17)$$

Για την περίπτωση της ελάχιστης τάσης:

$$\frac{12 V}{240 Ohm} = 50 mA \quad (6.18)$$

Η ισχύς που καταναλώνεται στην μπαταρία είναι:

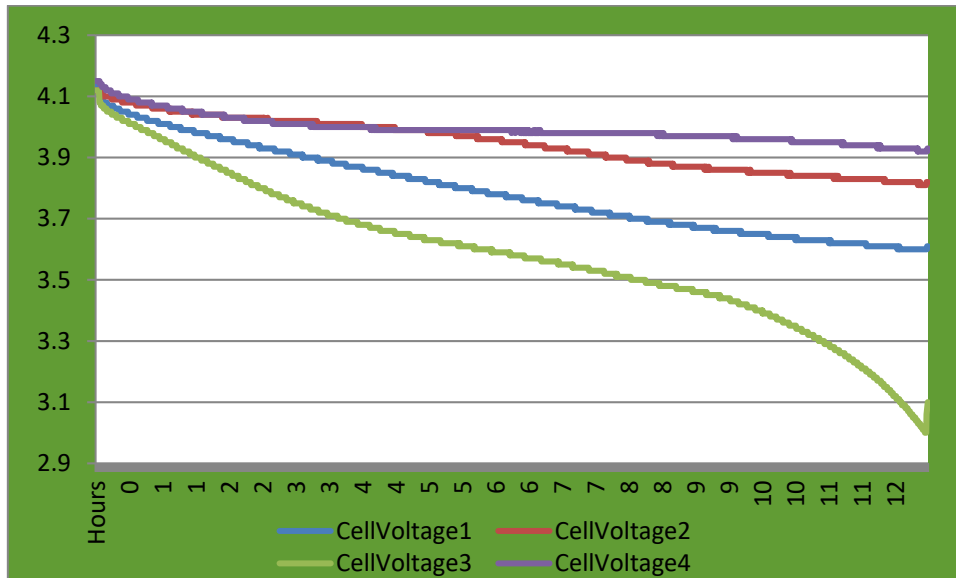
Για την περίπτωση της μέγιστης τάσης:

$$70 mA * 16.8 V = 1.17 Watt \quad (6.19)$$

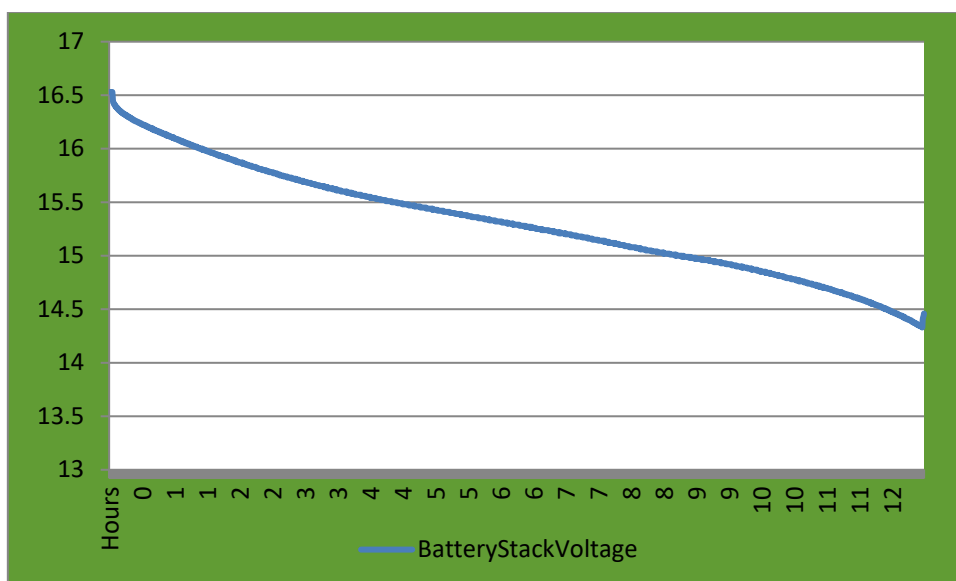
Για την περίπτωση της ελάχιστης τάσης:

$$50 mA * 12 V = 0.6 Watt \quad (6.20)$$

Το ελάχιστο ρεύμα που θα διαρρέει την αντίσταση είναι 50 mA ενώ το μέγιστο 70 mA. Η ελάχιστη ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο είναι 0.6 Watt ενώ η μέγιστη είναι 1.17 Watt. Η συγκεκριμένη ένταση ρεύματος βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλής λειτουργίας της συστοιχίας και τα αποτελέσματα δείχνουν ομαλή και αργή εκφόρτιση. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 5.35 και 5.36. Όσο μεγαλύτερη και να είναι η αντίσταση από αυτό το σημείο και μετά, αναμένεται ότι το διάγραμμα εκφόρτισης θα έχει ίδια μορφή αλλά με μεγαλύτερη διάρκεια σε χρόνο. Ο χρόνος εκφόρτισης σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 13 ώρες.



Σχήμα 5.35: Μεμονωμένες τάσεις των τεσσάρων στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 240ohm.



Σχήμα 5.36: Συνολική τάση συστοιχίας τεσσάρων τελικών στοιχείων ιόντων λιθίου για εκφόρτιση σε αντίσταση 240ohm.

Τα πειράματα αυτά παρουσιάζουν την συστοιχία μπαταριών σε εκφόρτιση από πλήρη φόρτιση για πέντε διαφορετικές τιμές αντιστάσεων εκφόρτισης. Η εκφόρτιση που έχει ενδιαφέρον είναι η πρώτη γιατί πραγματοποιείται με ρεύμα εκτός των ορίων λειτουργίας αλλά επίσης φανερώνει το φαινόμενο της απότομης πτώσης τάσης παρόλο που το ενεργειακό φορτίο της μπαταρίας παραμένει υψηλό. Οι υπόλοιπες τιμές αντιστάσεων δείχνουν μια τυπική εκφόρτιση της συστοιχίας και ουσιαστικά το μόνο που αλλάζει ανάμεσα σε αυτές τις πειραματικές μετρήσεις είναι ο χρόνος εκφόρτισης όπου εμφανίζεται να είναι μεγαλύτερος για μεγαλύτερες τιμές αντιστάσεων εκφόρτισης.

## 5.4 Επίλογος

Τα αποτελέσματα από τα πειράματα είναι ενδιαφέροντα και δείχνουν την δυσκολία σχεδίασης ενός συστήματος με συστοιχίες μπαταριών. Όσον αφορά την εκφόρτιση του συστήματος, αυτό διενεργήθηκε σε πέντε σταθερά φορτία διαφορετικών τιμών. Αυτό που έχει μεγάλη σημασία στην εκφόρτιση του ενεργειακού φορτίου των μπαταριών είναι η χρήση τους σε τιμές ρεύματος οι οποίες είναι στις προδιαγραφές των μπαταριών. Αποδείχθηκε ότι με την χρήση υψηλότερου ρεύματος από το μέγιστο επιτρεπτό όριο υπήρξε πρόβλημα πτώσης τάσης κατά την εκφόρτιση, ενώ με τη χρήση ρεύματος εντός των επιτρεπτών ορίων τα αποτελέσματα ήταν ομαλά και αναμενόμενα. Επειδή το φορτίο στα πειράματα ήταν σταθερό, διότι χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις, ο υπολογισμός του ρεύματος εκφόρτισης ήταν εύκολος. Για την φόρτιση του συστήματος, η διαδικασία είναι πιο πολύπλοκη και απαιτείται η χρήση εξισορρόπησης (balancing) προκειμένου τα στοιχεία της μπαταρίας να διατηρήσουν τη μέγιστη απόδοση και διάρκεια ζωής. Στα πειράματα δοκιμάστηκε εξισορρόπηση μέσω αντιστάσεων και συγκεκριμένα για πέντε διαφορετικές τιμές αντιστάσεων. Αυτό που έχει σημασία στην εξισορρόπηση με αντιστάσεις, είναι το να γίνει κατάλληλη επιλογή των αντιστάσεων εξισορρόπησης, διότι στα πειράματα αποδείχθηκε ότι οι πολύ μικρές τιμές αντιστάσεων, όπως και οι πολύ μεγάλες δεν έχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Η σωστή απόδοση του συστήματος εξισορρόπησης με αντιστάσεις είναι συνάρτηση του ρεύματος φόρτισης και του ρεύματος εξισορρόπησης. Στην εργασία αυτή δεν υπήρχε επιλογή του ρεύματος φόρτισης διότι επιλέχθηκε για την φόρτιση ένας έτοιμος φορτιστής του εμπορίου με προκαθορισμένες τιμές ρεύματος φόρτισης. Για το λόγο τούτο, η μόνη επιλογή που μπορούσε να έχει αποτέλεσμα ήταν η επιλογή των τιμών των αντιστάσεων εξισορρόπησης. Η καλύτερη απόδοση του συστήματος αποδείχθηκε με την αντίσταση τιμής 120 Ohm τόσο στο χρόνο φόρτισης όσο και στην σύγκλιση των τιμών των τάσεων των στοιχείων. Η μικρότερη αντίσταση που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα (33 Ohm) είχε γρήγορη σύγκλιση αλλά με μεγάλη κατανάλωση ρεύματος ενώ η μεγαλύτερη αντίσταση (470 Ohm) είχε μικρή κατανάλωση ρεύματος και όχι σύγκλιση των τάσεων. Τα αποτελέσματα αυτά τόσο στην φόρτιση όσο και στην εκφόρτιση της συστοιχίας μπαταριών αποδεικνύουν την ανάγκη χρήσης ικανού συστήματος διαχείρισης μπαταριών(BMS).

## Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις

### 6.1 Συμπεράσματα

Σε κάθε εφαρμογή όπου απαιτεί μεγάλη ισχύ ρεύματος και μεγάλη τάση λειτουργίας από συσσωρευτή ενέργειας, συναντώνται μπαταρίες αποτελούμενες από πολλά στοιχεία. Η σύνδεση των στοιχείων είναι είτε σε σειρά, είτε παράλληλα είτε και τα δύο, για την αύξηση της χωρητικότητας και της τάσης λειτουργίας της. Η συνδεσμολογία αυτή μπορεί να επιφέρει σημαντικά αποτελέσματα στην ισχύ ενός συσσωρευτή ενέργειας αλλά δημιουργεί και προβλήματα λειτουργίας. Τα συστήματα διαχείρισης μπαταριών - battery management systems αποτελούν αναγκαία προσθήκη σε κάθε εφαρμογή όπου απαιτείται η χρήση συστοιχίας μπαταριών. Τα συστήματα διαχείρισης μπαταριών BMS εξασφαλίζουν ότι το ενεργειακό φορτίο της μπαταρίας θα παρέχεται βέλτιστα στον αποδέκτη, εξασφαλίζουν ότι ο κίνδυνος ζημιάς της μπαταρίας είναι ο μικρότερος δυνατός και επιβλέπουν και ελέγχουν τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Επίσης φροντίζουν μέσω της διαδικασίας της εξισορρόπησης, να κρατάνε το ίδιο ενεργειακό επίπεδο σε όλα τα στοιχεία, έτσι ώστε να λειτουργούν ομοιόμορφα. Έτσι, διασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργίας της μπαταρίας, αλλά και η επιμήκυνση διάρκειας ζωής της. Παρότι υπάρχουν πολλά συστήματα ελέγχου και επίβλεψης μπαταριών τα οποία είναι διαθέσιμα και χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, υπάρχει ακόμα πολύ μεγάλη ανάπτυξη στον συγκεκριμένο τομέα. Τα υπάρχοντα συστήματα διαχείρισης μπαταριών έχουν πολλές δυνατότητες όμως και αρκετές αδυναμίες. Σε πραγματικές εφαρμογές όπου οι συνθήκες λειτουργίας τέτοιων συστημάτων είναι πολύπλοκες δεν υπάρχει ιδανική λύση για την σωστή επίβλεψη των μπαταριών. Συνήθως επιλέγεται να υλοποιηθεί η πιο απλή λύση για λόγους κόστους και ευκολίας στην κατασκευή ενώ πιο πολύπλοκες λύσεις δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμες. Όπως γίνεται κατανοητό, λόγω της ανάπτυξης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και της ραγδαίας ανάπτυξης στον τομέα των τεχνολογιών μπαταριών ιόντων λιθίου, η ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης μπαταριών είναι αναγκαία και απαραίτητη. Όσο μεγαλύτερη ανάγκη υπάρχει για χρήση μεγαλύτερων και αποδοτικότερων συσσωρευτών ενέργειας τόσο πιο απαιτητικό και εξειδικευμένο θα πρέπει να είναι και το σύστημα διαχείρισης τους. Σαν συνέπεια, η σωστή σχεδίαση και υλοποίηση τέτοιων συστημάτων διαχείρισης μπαταριών είναι μείζονος σημασίας για τα επόμενα χρόνια στον χώρο των συσσωρευτών ενέργειας.

## 6.2 Μελλοντικές Βελτιώσεις

Πιθανές βελτιώσεις του συστήματος διαχείρισης και επίβλεψης μπαταριών υπάρχουν πάρα πολλές, εφόσον αφορά μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Μια αρχική βελτίωση θα ήταν η ενσωμάτωση συστήματος μέτρησης ρεύματος φόρτισης ή εκφόρτισης της συστοιχίας. Αυτό θα έδινε περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας της μπαταρίας και θα μπορούσε να αποφευχθεί η εκφόρτιση και η φόρτιση σε περίπτωση λειτουργίας εκτός ορίων έντασης ρεύματος. Άλλη μία βελτίωση θα μπορούσε να είναι η χρήση κατασκευασμένου φορτιστή με συγκεκριμένες προδιαγραφές ο οποίος θα επικοινωνεί και θα ελέγχεται από τον μικροελεγκτή. Σε μια τέτοια περίπτωση ο έλεγχος του μικροελεγκτή στον φορτιστή θα είχε πολλαπλά οφέλη στον συνολικό σχεδιασμό ενός συστήματος. Μία ακόμα πιθανή βελτίωση είναι η χρήση τρόπου υπολογισμού δεδομένων κατάστασης φόρτισης με ακρίβεια. Στην εργασία αυτή συσχετίζεται η τάση ανοικτού βρόχου των στοιχείων της μπαταρίας με την κατάσταση φόρτισης τους. Αυτό αποτελεί μία καλή πρακτική ένδειξη της κατάστασης φόρτισης τους που όμως δεν έχει μεγάλη ακρίβεια και πολλές φορές δεν υπάρχει και η δυνατότητα μέτρησης της τάσης ανοικτού βρόχου. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υπολογισμού της κατάστασης φόρτισης με μαθηματικά μοντέλα που θα μπορούσαν να εφαρμοσθούν για το λόγο αυτό. Επίσης μπορεί να βελτιωθεί η διάταξη με τη χρήση περαιτέρω μαθηματικών μοντέλων για την εκτίμηση της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Όλα αυτά δεν θα είχαν νόημα εάν δεν αποκτήσει η διάταξη κάποιου είδους διεπαφή με τον χρήστη μέσω οθόνης ενημέρωσης για την κατάσταση φόρτισης αλλά και την κατάσταση υγείας και την εκτίμηση υπολειπόμενης διάρκειας ζωής. Οπότε και αυτή η προσθήκη σε συνδυασμό με τους υπολογισμούς αποτελεί βελτίωση. Μία ακόμη βελτίωση στην διάταξη αυτή θα ήταν η χρήση τρόπου εξισορρόπησης χωρίς απαγωγή θερμότητας σε αντιστάσεις. Χρησιμοποιώντας τρόπους balancing μη απαγωγής θερμότητας δεν θα χανόταν μεγάλο μέρος της ενέργειας σε αντιστάσεις υπό τη μορφή θερμότητας αλλά θα χρησιμοποιούταν για την περαιτέρω φόρτιση της συστοιχίας. Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους θα μπορούσε η διάταξη αυτή να βελτιωθεί και να αποτελέσει μία πολύ καλή λύση για χρήση σε συστοιχίες μπαταριών με σκοπό την βέλτιστη και ασφαλή λειτουργία τους σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη δυνατή διάρκεια ζωής τους.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ιορδάνης Ν. Κιοσκερίδης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2019
- [2] J. Garche, A. Jossen, “Battery management systems (BMS) for increasing battery life time” Telescon 2000, Third International Telecommunications Energy Special Conference (IEEE Cat. No.00EX424),10-5-2000, pp. 85-88.
- [3] Javier Gallardo-Lozano, Enrique Romero-Cadaval, M. Isabel Mialnes-Montero, Miguel A. Guerrero-Martinez , “Battery equalization active methods” *Journal of Power Sources*, vol. 246, pp. 934-949, 2014.
- [4] Yinjiao Xing, Eden W. M. Ma, Kwok L. Tsui, Michael Pecht, “Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles” *Energies*, vol. 4, pp. 1840-1857, 2011.
- [5] H.J Bergveld, W.S. Kruijt, P.H.L Notten, *Battery Management Systems Design by Modeling*, Springer, 2001.
- [6] Han Lei, Yuan Yuan Han, “The measurement and analysis for Open Circuit Voltage of Lithium-Ion Battery” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1325, 2019.
- [7] Analog Devices, “Multicell Addressable Battery Stack Monitor,” LTC6802-2 datasheet, June. 2019.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ

```
#include "SPI.h"
#define WRCFG 0x01 //Write Configuration Registers
#define RDCFG 0x02 // Read config
#define RDCV 0x04 // Read cells
#define STCVAD 0x10 // Start all A/D's - poll status
#define RDFLG 0x06 //Read Flags
#define RDTMP 0x08 //Read Temperatures
#define STCDC 0x60 //A/D converter and poll Status
#define STOWAD 0x20 //Start Test - poll status
#define STTMPAD 0x30// Temperature Reading - ALL
#define address 0x80
byte byteTemp;
byte CFGR1 = 0x00;
byte CFGR2 = 0x00;
int total = 4;
int stoplow = 0;
int stophigh = 0;
int t = 14000;
int td = 50;
int xt = (t/td);
float low = 0;
float high = 0;
float Vc=0;
float Vch=0;
float ch=0;
int cordis=0;
int charge=0;
int lowcellnum = 0;
float CellVoltage[4];
float BatteryStackVoltage=0;
int batmos=2;
int batch=3;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(10,OUTPUT);
  pinMode(11,OUTPUT);
  pinMode(12,INPUT);
  pinMode(13,OUTPUT);
  pinMode(batch,OUTPUT);
  pinMode(batmos, OUTPUT);
  digitalWrite(batch, LOW);
```

```

digitalWrite(batmos, LOW);
Serial.println("CLEARDATA");
Serial.println("LABEL,Acolumn,Bcolumn,CellVoltage1,CellVoltage2,CellVoltage3,CellVoltage4,Bat
teryStackVoltage");
Serial.println("RESETTIMER");
digitalWrite(10, HIGH);
SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
SPI.setDataMode(SPI_MODE3);
SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV16);
SPI.begin();
writeReg();
}

```

```

void loop()
{
digitalWrite(batch, LOW);
digitalWrite(batmos, LOW);
CFGR1 = 0x00;
writeReg();
delay(1000);
readV();
low = lowCell();
high = highCell();
Serial.print("Lowest cell voltage is ");
Serial.println(low);
Serial.print("Highest cell voltage is ");
Serial.println(high);
lowcellnum = lowCellnum();
charge = readch();
if( charge == 1)
{
startBalance();
}

if ( low <= 3)
{
stoplow = 1;
}

if ( high >= 4.2)
{
stophigh = 1;
}

if( stoplow == 1)
{

```

```

digitalWrite(batmos, LOW);
digitalWrite(batch, LOW);
Serial.println("Battery cell voltages too low, please recharge");
for(int i = 0; i <= 13; i++)
{
writeReg();
delay(1000);
}
}

else if ( stophigh == 1)
{
digitalWrite(batmos, LOW);
digitalWrite(batch, LOW);
Serial.println("Battery cell voltages too high, please remove charger");
for(int i = 0; i <= 13; i++)
{
writeReg();
delay(1000);
}
}

else
{

if( charge == 1)
{
digitalWrite(batmos, LOW);
digitalWrite(batch, HIGH);
}
else if(charge == 0)
{
digitalWrite(batmos, HIGH);
digitalWrite(batch, LOW);
}
for(int i = 0; i <= 13; i++)
{
writeReg();
delay(1000);
}
}
}
}

```

```

void writeReg()
{
//Serial.println("Writing config...");
digitalWrite(10, LOW);
SPI.transfer(address);
SPI.transfer(WRCFG);
SPI.transfer(0x01);//0
SPI.transfer(CFGR1);//1
SPI.transfer(0x00);//2
SPI.transfer(0x00);//3
SPI.transfer(0x71);//4
SPI.transfer(0xAB);//5
digitalWrite(10, HIGH);
}

```

```

void readReg()
{
Serial.println("Reading config...");
digitalWrite(10, LOW);
SPI.transfer(address);
SPI.transfer(RDCFG);
for(int i = 0; i < 6; i++)
{
byteTemp = SPI.transfer(RDCFG);
Serial.println(byteTemp, HEX);
}
digitalWrite(10, HIGH);
}

```

```

int readch()
{
Vc = analogRead(A0);
Vc = Vc*0.00494;
Vch = Vc*5;
ch = Vch+Vc;
Serial.println(ch);
if(ch>=5)
{
cordis = 1;
}
}

```

```

else
{
    cordis = 0;
}
return cordis;
}

```

```
float lowCell() //find lowest cell value
```

```

{
    int num = 0;
    float lowcell = 5;
    for(int i = 0; i < total;)
    {
        if(CellVoltage[i] < lowcell)
        {
            lowcell = CellVoltage[i];
            num = i+1;
        }
        i++;
    }
    return lowcell;
}

```

```
int lowCellnum() //find lowest cell number
```

```

{
    int num = 0;
    float cellTemp = 5;
    for(int i = 0; i < total;)
    {
        if(CellVoltage[i] < cellTemp)
        {
            cellTemp = CellVoltage[i];
            num = i+1;
        }
        i++;
    }
    return num;
}

```

```

float highCell() //find highest voltage cell value
{
  int num = 0;
  float highcell = 0;
  for(int i = 0; i < total;)
  {
    if(CellVoltage[i] > highcell)
    {
      highcell = CellVoltage[i];
      num = i+1;
    }
    i++;
  }
  return highcell;
}

```

```

void readV()
{
  digitalWrite(10,LOW);
  SPI.transfer(STCVAD);
  delay(20); // wait at least 12ms as per data sheet, p.24
  digitalWrite(10,HIGH);
  byte volt[18];
  digitalWrite(10,LOW);
  SPI.transfer(0x80);
  SPI.transfer(RDCV);
  for(int j = 0; j<18;j++)
  {
    volt[j] = SPI.transfer(RDCV);
  }
  digitalWrite(10,HIGH);
  CellVoltage[0]=(((volt[0] & 0xFF) | (volt[1] & 0x0F) << 8)*1.5*0.001);
  CellVoltage[1]=(((volt[1] & 0xF0) >> 4 | (volt[2] & 0xFF) << 4)*1.5*0.001);
  CellVoltage[2]=(((volt[3] & 0xFF) | (volt[4] & 0x0F) << 8)*1.5*0.001);
  CellVoltage[3]=(((volt[4] & 0xF0) >> 4 | (volt[5] & 0xFF) << 4)*1.5*0.001);
  BatteryStackVoltage = CellVoltage[0] + CellVoltage[1] + CellVoltage[2] + CellVoltage[3];
  Serial.print("DATA,TIME,TIMER,");
  Serial.print(CellVoltage[0]);
  Serial.print(",");
  Serial.print(CellVoltage[1]);

```

```

Serial.print(",");
Serial.print(CellVoltage[2]);
Serial.print(",");
Serial.print(CellVoltage[3]);
Serial.print(",");
Serial.print(BatteryStackVoltage);
Serial.print(",");
Serial.println("-----");
}

```

```

int startBalance()
{
CFGR1 = 0x00;
CFGR2 = 0x00;
for(int i = 1; i < total+1; i++)
{
if(i != lowcellnum)
{
balanceCell(i);//set each cell individually; discharge if not lowest cell
}
}
Serial.println(CFGR1,BIN);
Serial.println(CFGR2,BIN);
}

```

```

int balanceCell(int x)
{
double diff = CellVoltage[x-1] - CellVoltage[lowcellnum-1]; //check the difference between current
cell and lowestCell
if(diff > 0.03) //discharge if difference more than 0.03V
{
CFGR1 += 0x01<<(x-1);
}
else if(diff <= 0.03)
{
CFGR1 += 0x00<<(x-1);
}
}
}

```