



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ
ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ – ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ
ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ**

ΜΠΙΜΠΛΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

A.M: 021-172-15

Επιβλέπων Καθηγητής : Τσαραμπάρης Παναγιώτης

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2020

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας του διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Συστήματα Αυτοματισμού» του τμήματος μηχανολόγων μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Αποτελεί μέρος μια συνολικής αυτοματοποιημένης διάταξης φόρτισης και εκφόρτισης μπαταριών μολύβδου-οξέος.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Τσαραμπάρη Παναγιώτη Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου έδωσε να διευρυνθούν οι ορίζοντες των γνώσεών μου και για την εμπιστοσύνη του, καθώς και τους υποψήφιους διδάκτορες κ. Κουτρούμπα Σπύρο για την αμέριστη βοήθεια του, την επιμονή του και για τη μεταδοτικότητα του σε ότι νέο μου έμαθε και τον κ. Πρίφτη Παναγιώτη για τη πολύτιμη βοήθειά του. Ιδιαίτερες και πιο θερμές ευχαριστίες στο πατέρα μου και τη μητέρα μου για ό,τι μου έχουν δώσει ως τώρα στη ζωή μου και πως για μένα είναι οι πιο ψυχικά δυνατοί άνθρωποι στο κόσμο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρότι η τεχνολογία εξελίσσεται με ραγδαία βήματα χρόνο με το χρόνο, τονίζεται όλο και περισσότερο η παρουσία και η σημασία μιας επαναφορτιζόμενης πηγής σε πολλά συστήματα. Και όπως εξελίσσεται η τεχνολογία, η ανάγκη για την παρουσία του αυτομάτου ελέγχου σε όλα τα συστήματα γίνεται όλο και μεγαλύτερη. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος αποτελούν ίσως την πιο παλιά επαναφορτιζόμενη πηγή ενέργειας, μιας και αποτελεί ανακάλυψη από τα μέσα του 19ου αιώνα. Αρχικά, γίνεται μια παρουσίαση ενός θεωρητικού υποβάθρου σχετικά με τους συσσωρευτές, τις αρχές λειτουργίας τους, τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος και στη συνέχεια γίνεται λεπτομερής παρουσίαση του πειραματικού μέρους που περιλαμβάνει το σχεδιασμό, την υλοποίηση της διάταξης και το προγραμματισμό του μικροελεγκτή.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός της διάταξης (μονογραμμικό σχέδιο) με τη βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος EasyEDA. Η διάταξη περιλαμβάνει τη μπαταρία μολύβδου-οξέος με ονομαστική τάση 12V και χωρητικότητα 1,2Ah, ένα τροφοδοτικό πάγκου για τη φόρτιση της μπαταρίας, ένας καταναλωτής (φορτίο) πάνω στο οποίο θα αποφορτίζεται η μπαταρία (Solid State Dummy Load), ένα Arduino UNO, μια πλακέτα 2 channel relay module που θα εκτελεί τον έλεγχο για τη φόρτιση και την εκφόρτιση της μπαταρίας, μια πλακέτα PCB πάνω στην οποία υπάρχει ένας διαιρέτης τάσης, όπου η έξοδος του δίνει την προς μετρούμενη τάση στο Arduino, μπόρνες (banana plugs) για τις συνδέσεις της μπαταρίας, του τροφοδοτικού και του φορτίου και μια οθόνη lcd 16x2 για απεικόνιση κατάλληλων μηνυμάτων. Ο σχεδιασμός της πλακέτας έγινε με τη βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος Sprint-Layout 6.0.

ABSTRACT

Although technology is evolving rapidly throughout the years, the presence and importance of a rechargeable source in many systems is emphasized. And as technology evolves, the need for automatic control in all systems is growing up. Lead-acid batteries are probably the oldest rechargeable energy source, dating back to the middle of the 19th century. Firstly, a theoretical background on batteries is presented, their operating principles, more details about lead-acid batteries, followed by a detailed presentation of the practical part that includes the design, implementation of the whole automatic system and the programming of the microcontroller.

Initially, the layout was designed with the help of the EasyEDA design program. The device includes the lead-acid battery, a power supply unit for charging the battery, a dummy load, on which the battery will be discharged, an Arduino UNO, a 2 channel relay module that will perform the charge and the discharge control of the battery, a PCB board on which there's a voltage divider, who will export the measured voltage from the battery to the Arduino, banana plugs for the connections of the battery, power supply and load, and a 16x2 lcd screen to display appropriate messages. The design of the board was done with the help of the design program Sprint-Layout 6.0.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η δημιουργία ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου με τη βοήθεια ενός Arduino board, που θα επιτρέπει τη φόρτιση και την εκφόρτιση μιας μπαταρίας μολύβδου-οξέος σε συγκεκριμένα επίπεδα τάσης, υπό σταθερή ένταση.

Στο 1^ο κεφάλαιο, γίνεται αρχικά μια ιστορική αναδρομή πάνω στους ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές, στο τρόπο με τον οποίο λειτουργούν, αλλά και μια εμβάθυνση στους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος. Επιπλέον, γίνεται μια εκτενής αναφορά πάνω στα συστήματα ελέγχου, αρχικά με μια ιστορική αναφορά στους μικροελεγκτές και στη συνέχεια γίνεται ανάλυση πάνω στο Arduino Uno, πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε στη πειραματική διάταξη. Το 1^ο κεφάλαιο, ολοκληρώνεται με αναφορές σε παραμέτρους συσσωρευτών, που παίζουν σημαντικό ρόλο για τη λειτουργία τους, όπως το State-of-Charge (SoC) και το Depth-of-Discharge (DoD).

Στο 2^ο κεφάλαιο αναπτύσσεται το πειραματικό μέρος, όπου γίνεται ανάλυση στη διάταξη που υλοποιήθηκε, στα επιμέρους τμήματα της και στο τρόπο που συμβάλλουν για την ορθή λειτουργία της συνολικής αυτοματοποιημένης διάταξης, ενώ παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πάρθηκαν κατά τη λειτουργία της διάταξης.

Στο 3^ο και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στους τρόπους επέκτασης της αυτοματοποιημένης διάταξης που υλοποιήθηκε, αλλά και στην επιπλέον έρευνα που μπορεί να γίνει.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ix
Πίνακας σχημάτων και εικόνων.....	xv
Πίνακες.....	xvii
1. Θεωρητικό μέρος.....	1
1.1. Αποθήκευση ενέργειας και συσσωρευτές.....	1
1.1.1. Ιστορική Ανάλυση.....	1
1.1.2. Αρχές λειτουργίας και τύποι ηλεκτροχημικών συσσωρευτών.....	3
1.1.2.1. Στοιχεία των κελιών ή μπαταριών.....	3
1.1.2.1.1. Άνοδος.....	3
1.1.2.1.2. Κάθοδος.....	4
1.1.2.1.3. Ηλεκτρολύτης.....	4
1.1.2.2. Ηλεκτροχημική αντίδραση ενός κελιού.....	5
1.1.2.3. Κατηγοριοποίηση κελιών ή μπαταριών.....	7
1.1.2.3.1. Πρωτογενείς συσσωρευτές ή πρωτεύουσες μπαταρίες.....	8
1.1.2.3.2. Δευτερεύοντες συσσωρευτές ή δευτερεύουσες μπαταρίες.....	8
1.1.2.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός συσσωρευτή.....	10
1.1.2.4.1. Επίπεδο τάσης.....	10
1.1.2.4.2. Ρεύμα εκφόρτισης.....	12
1.1.2.4.3. Λόγος C (C Rate).....	13
1.1.2.4.4. Λόγος E (E Rate).....	13
1.1.2.4.5. Τρόποι εκφόρτισης.....	13
1.1.2.4.6. Θερμοκρασία κατά την εκφόρτιση και τη φόρτιση της μπαταρίας.....	14
1.1.3. Μπαταρίες μολύβδου-οξέος.....	16
1.1.3.1. Μέθοδοι φόρτισης μπαταριών μολύβδου-οξέος.....	17
1.1.3.1.1. Φόρτιση υπό σταθερή ένταση (Constant Current Charging).....	17
1.1.3.1.2. Φόρτιση υπό σταθερή ένταση και τάση (Constant Current Constant Voltage Charging).....	18
1.1.3.1.3. Συντήρηση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος.....	19
1.1.3.2. Τύποι συσσωρευτών μολύβδου-οξέος.....	21
1.1.3.2.1. Μπαταρίες SLI (Starting, Lightning and Ignition).....	21
1.1.3.2.2. Μπαταρίες βαθύως κύκλου (Deep-cycle).....	22
1.1.3.2.3. Μπαταρίες VRLA (Valve Regulated Lead Acid).....	23

1.2.	Συστήματα ελέγχου.....	23
1.2.1.	Μικροελεγκτές – Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	24
1.2.1.1.	Δομή και λειτουργία ενός μικροελεγκτή.....	25
1.2.2.	Arduino & Arduino IDE (Integrated Development Environment)	27
1.2.2.1.	Arduino Board.....	27
1.2.2.2.	Arduino IDE (Integrated Development Environment)	29
1.2.2.3.	Δομή του Arduino (Structure) και εντολές.....	30
1.2.3.	Η σημασία του ελέγχου στις μπαταρίες.....	30
1.3.	Μαθηματική μοντελοποίηση.....	33
1.3.1.	Διαίρετες (καταμεριστές) τάσης.....	34
1.3.2.	State-of-Charge (SoC).....	35
1.3.3.	State-of-Health (SoH).....	37
1.3.4.	Depth-of-Discharge (DoD).....	38
1.3.5.	Νόμος του Peukert (Peukert Law).....	40
2.	Πειραματικό μέρος.....	43
2.1.	Διάταξη και επιμέρους τμήματα.....	43
2.1.1.	Λίστα υλικών (Bill of materials).....	44
2.1.2.	Περιγραφή των στοιχείων διάταξης.....	45
2.1.2.1.	Μπαταρία μολύβδου-οξέος (12V, 1,2Ah).....	45
2.1.2.2.	Καταναλωτής (φορτίο).....	46
2.1.2.3.	Πλακέτα με τα ρελέ (2-channel relay module).....	47
2.1.2.4.	Πλακέτα microSD (microSD module).....	48
2.1.2.5.	Η οθόνη LCD 16x2.....	49
2.1.2.6.	Η πλακέτα PCB (Printed Circuit Board).....	50
2.1.3.	Αυτοματοποιημένη διάταξη (μονογραμμικό σχέδιο και διαγράμματα).....	55
2.1.3.1.	Μονογραμμικό σχέδιο της διάταξης.....	55
2.1.3.2.	Διάγραμμα ροής (flowchart) και επεξήγηση του κώδικα.....	55
2.1.3.3.	Δομικό διάγραμμα (block diagram) της διάταξης.....	58
2.2.	Διεξαγωγή πειραμάτων και μετρήσεις.....	59
2.3.	Αποτελέσματα μετρήσεων (γραφικές παραστάσεις).....	60
3.	Περαιτέρω έρευνα – επεκτάσεις.....	67
	Βιβλιογραφία.....	69
	Παράρτημα Α – Πηγαίος κώδικας.....	73
	Παράρτημα Β – Σχέδια.....	83
	Μέρος Α – Μονογραμμικό σχέδιο.....	83

Μέρος Β – Σχέδιο πλακέτας 84

Πίνακας σχημάτων και εικόνων

Σχήμα 1: Απεικόνιση της 1ης επαναφορτιζόμενης μπαταρίας μολύβδου-οξέος , αποτελούμενη από 9 κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα	2
Σχήμα 2: Απεικόνιση ανόδου, καθόδου και ηλεκτρολύτη σε μπαταρία μολύβδου-οξέος	5
Σχήμα 3: Απεικόνιση χημικής διαδικασίας κατά την εκφόρτιση.....	6
Σχήμα 4: Απεικόνιση χημικής διαδικασίας κατά τη φόρτιση.....	6
Σχήμα 5: Πρωτεύουσες μπαταρίες	8
Σχήμα 6: Μπαταρία μολύβδου-οξέος, που ανήκει στη κατηγορία των δευτερευόντων συσσωρευτών.....	9
Σχήμα 7: Απεικόνιση καμπυλών εκφόρτισης.	11
Σχήμα 8: Απεικόνιση χαρακτηριστικών καμπυλών εκφόρτισης	12
Σχήμα 9: Καμπύλες εκφόρτισης που απεικονίζουν την επιρροή της θερμοκρασίας κατά την εκφόρτιση	15
Σχήμα 10: Γραφικές αναπαραστάσεις στο χρόνο ρεύματος και τάσης κατά τη φόρτιση με σταθερή ένταση	18
Σχήμα 11: Γραφική αναπαράσταση της έντασης κατά τη φόρτιση Σταθερού ρεύματος - Σταθερής Τάσης	19
Σχήμα 12: Ανατομία μιας μπαταρίας SLI	22
Σχήμα 13: Συσσωρευτής μολύβδου-οξέος (VRLA)	23
Σχήμα 14: Ο μικροελεγκτής Intel 4004	25
Σχήμα 15: Σχεδιάγραμμα γενικής απεικόνισης του εσωτερικού ενός μικροελεγκτή.....	26
Σχήμα 16: Το Arduino UNO board	28
Σχήμα 17: Το περιβάλλον εργασίας μόλις ανοίξει ο χρήστης το Arduino IDE	29
Σχήμα 18: Απεικόνιση εκτέλεσης εντολών σε μια συνάρτηση void loop()	30
Σχήμα 19: Απεικόνιση του συστήματος αυτόματης φόρτισης-εκφόρτισης μπαταριών βαθέως κύκλου	32
Σχήμα 20: Επέκταση της διάταξης αυτομάτου ελέγχου, από το προηγούμενο σχήμα.	32
Σχήμα 21: Απεικόνιση διαιρέτη τάσης	34
Σχήμα 22: Γράφημα που απεικονίζει τη σχέση με τη χωρητικότητα, τη θερμοκρασία και του ρυθμού εκφόρτισης	39
Σχήμα 23: Γράφημα που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της χωρητικότητας, της DOD και του κύκλου ζωής μιας μπαταρίας ρηκού κύκλου	39
Σχήμα 24: Χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης της μπαταρίας σε διάφορα C-Rates.	45
Σχήμα 25: Το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη.	46
Σχήμα 26: Το 2- channel relay module που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη.	47

Σχήμα 27: Απεικόνιση του microSD module που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη.	48
Σχήμα 28: Η φόρμα με την οποία απεικονίζονται τα δεδομένα στο αρχείο .txt.	49
Σχήμα 29: Η οθόνη LCD 16x2 με το ενσωματωμένο κύκλωμα	49
Σχήμα 30: Το τελικό PCB layout όπως σχεδιάστηκε.	51
Σχήμα 31: Το φωτοευαίσθητο μηχανήμα που χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση του σχεδίου στη πλακέτα.	52
Σχήμα 32: Αποχάλκωση της πλακέτας, μετά την τύπωση του σχεδίου.	53
Σχήμα 33: Απεικόνιση της πλακέτας, μετά την αποχάλκωση και το άνοιγμα των οπών.	54
Σχήμα 34: Μονογραμμικό σχέδιο της αυτοματοποιημένης διάταξης φόρτισης-εκφόρτισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος.	55
Σχήμα 35: Απεικόνιση του διαγράμματος ροής (flow chart) του κώδικα για το προγραμματισμό του Arduino.	56
Σχήμα 36: Απεικόνιση του δομικού διαγράμματος (block diagram) της αυτοματοποιημένης διάταξης.	58
Σχήμα 37: Γραφικές παραστάσεις από το πρώτο σετ μετρήσεων. (α) Χωρίς στατιστική επεξεργασία, (β) με στατιστική επεξεργασία	61
Σχήμα 38: Γραφικές παραστάσεις από το δεύτερο σετ μετρήσεων. (α) Χωρίς στατιστική επεξεργασία, (β) με στατιστική επεξεργασία	63
Σχήμα 39: Γραφική παράσταση που απεικονίζονται οι μετρήσεις από το 3ο σετ μετρήσεων.	64

Πίνακες

Πίνακας 1: Επιτρεπόμενα όρια θερμοκρασιών για διαφόρους τύπους μπαταριών	15
Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μπαταριών μολύβδου-οξέος	16
Πίνακας 3: Μέθοδοι εκτίμησης παραμέτρου SoC	36
Πίνακας 4: Λίστα υλικών.	44

1. Θεωρητικό μέρος

1.1. Αποθήκευση ενέργειας και συσσωρευτές

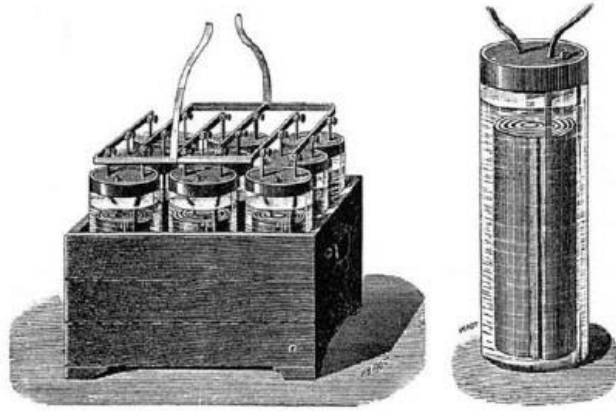
1.1.1. Ιστορική Ανάλυση

Ένα επιστημονικό προϊόν ποτέ δεν γεννιέται αυθόρμητα στο μυαλό ενός ερευνητή. Κανονικά, αυτό είναι ένα αποτέλεσμα προσπαθειών από πολλούς επιστήμονες. Η ουσία του προϊόντος (θεμελιώδεις αρχές), έχουν κατανοηθεί από το πρόσωπο του εφευρέτη, έχουν παραχθεί και πειράματα πάνω στο προϊόν αυτό και τα αποτελέσματα αυτών έχουν παρουσιαστεί δημόσια. Μια τέτοια αντίστοιχη περίπτωση είναι και η εφεύρεση της μπαταρίας μολύβδου-οξέος. Η ανακάλυψη της ηλεκτρικής ενέργειας ως μορφή ενέργειας, αποτελεί σίγουρα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα της ανθρωπότητας, έχοντας αλλάξει σημαντικά την ανθρώπινη ζωή, καθιστώντας τη πιο εύκολη, σύγχρονη και συνεχώς εξελίξιμη.

Η πρώτη μπαταρία που χαρακτηρίστηκε αλλιώς ως βολταϊκός σωρός, κατασκευάστηκε από τον Alessandro Volta, χάρη στη βαθιά γνώση που κατείχε πάνω στις επιστήμες της χημείας και της φυσικής.

Έτσι στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, πολλοί χημικοί και φυσικοί, αφιέρωσαν τη ζωή τους στην εφεύρεση και τη βελτίωση των διαφόρων πηγών χημικής ενέργειας. Το 1801, ο Γάλλος φυσικός N.Gautherot σύνδεσε τα 2 ηλεκτρόδια ενός κελιού με 2 καλώδια πλατίνας βυθισμένα σε αλατούχο διάλυμα και πέρασαν από αυτά ηλεκτρικό ρεύμα. Το νερό διασπάστηκε σε υδρογόνο και οξυγόνο και όταν το κύκλωμα αποκόπηκε και τα καλώδια πλατίνας ήταν συνδεδεμένα μεταξύ τους, το ηλεκτρικό ρεύμα έρεε προς την αντίθετη κατεύθυνση για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Ένα χρόνο αργότερα στη Γερμανία, ο Johann Ritter σύνδεσε ένα κελί Volta με δίσκους, με στρώσεις χαλκού και χαρτονιού που είχαν υγρανθεί με διάλυμα NaCl. Η τάση φόρτισης ήταν 1,3 V. Μετά, όταν το κύκλωμα αποσυνδέθηκε, μια τάση 0,3 V μετρήθηκε μεταξύ των δύο δίσκων χαλκού. Ο Ritter εν συνεχεία, πραγματοποίησε παρόμοια πειράματα με πλάκες μολύβδου, κασσιτέρου και

ψευδαργύρου. Παρατηρήθηκε ότι διαφορετικές τάσεις μετρήθηκαν για τις διάφορες πλάκες που τοποθετήθηκαν.



Σχήμα 1: Απεικόνιση της 1ης επαναφορτιζόμενης μπαταρίας μολύβδου-οξέος, αποτελούμενη από 9 κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα [1].

Το 1859, ο Γάλλος φυσικός Gaston Plante μελέτησε την πόλωση μεταξύ δύο ταυτόσημων ηλεκτροδίων, εμβαπτισμένων σε αραιό υδατικό διάλυμα θειικού οξέος. Διερευνήθηκαν διαφορετικά ηλεκτρόδια, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτροδίων αργύρου, μολύβδου, κασσιτέρου, χαλκού, χρυσού, πλατίνας και αλουμινίου. Το συμπέρασμα ήταν ότι ανάλογα με τον τύπο των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν, τα κελιά ήταν πολωμένα σε διαφορετικά επίπεδα, όταν στα ηλεκτρόδια έρεε ηλεκτρικό ρεύμα και τα κελιά γίνονταν γεννήτριες αντιστρόφου ρεύματος. Τον επόμενο χρόνο, κατέδειξε ενώπιον της Γαλλικής Ακαδημίας Επιστημών τη 1^η επαναφορτιζόμενη μπαταρία που αποτελείτο από 9 κελιά που συνδέονταν παράλληλα. Αυτό ήταν και η γέννηση της πρώτης μπαταρίας μολύβδου οξέος [1].

1.1.2. Αρχές λειτουργίας και τύποι ηλεκτροχημικών συσσωρευτών

Η μπαταρία είναι μια συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια που περιέχεται στα ενεργά υλικά της, σε ηλεκτρική ενέργεια, με μια ηλεκτροχημική αντίδραση που ονομάζεται οξειδοαναγωγή. Στη περίπτωση ενός επαναφορτιζόμενου συστήματος, η μπαταρία επαναφορτίζεται με αναστροφή της διαδικασίας. Κατά την οξειδοαναγωγή πραγματοποιείται μεταφορά ηλεκτρονίων από ένα υλικό σε άλλο, μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Καθώς η μπαταρία μετατρέπει ηλεκτροχημικά τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια δεν υπόκειται, όπως οι κινητήρες καύσης, στους περιορισμούς των θερμοδυναμικών κύκλων, όπως υπαγορεύεται από το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Ως εκ τούτου, οι μπαταρίες μπορούν να έχουν υψηλότερη απόδοση ενεργειακής μετατροπής. Ενώ ο όρος "μπαταρία" χρησιμοποιείται συχνά, η βασική ηλεκτροχημική έννοια που αναφέρεται είναι το "κελί". Μια μπαταρία αποτελείται από ένα ή μια συστοιχία από αυτά τα κελιά, συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα, ή και τα δύο, ανάλογα με την επιθυμητή τάση και χωρητικότητα εξόδου. Ένα κελί είναι η βασική ηλεκτροχημική μονάδα που παρέχει πηγή ηλεκτρικής ενέργειας με άμεση μετατροπή της χημικής ενέργειας. Το κελί αποτελείται από ένα συγκρότημα ηλεκτροδίων, διαχωριστών, ηλεκτρολύτη, δοχείου και τερματικών.

1.1.2.1. Στοιχεία των κελιών ή μπαταριών

Σε αυτό το εδάφιο, περιγράφεται η βασική δομή ενός κελιού. Τα στοιχεία αυτά έχουν ενεργό ρόλο κατά τη διαδικασία της οξειδοαναγωγής και αυτά είναι η άνοδος, η κάθοδος και ο ηλεκτρολύτης.

1.1.2.1.1. Άνοδος

Η άνοδος ή το αρνητικό ηλεκτρόδιο ή το ηλεκτρόδιο αναγωγής, είναι εκείνο το οποίο δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Σε ένα πρακτικό σύστημα, η άνοδος επιλέγεται με τις παρακάτω ιδιότητες: την αποδοτικότητα ως αναγωγικό παράγοντα, την υψηλή ειδική

χωρητικότητα (Ah / g), την καλή αγωγιμότητα, τη σταθερότητα, την ευκολία στην κατασκευή και το χαμηλό κόστος. Το υδρογόνο, ως υλικό ανόδου, έχει το υψηλότερο δυναμικό όμως η διαχείριση του είναι δύσκολη. Τα μέταλλα ή κράματά τους χρησιμοποιούνται κυρίως ως υλικό των ηλεκτροδίων ανόδου. Ο ψευδάργυρος αποτελεί ένα «κυρίαρχο» υλικό ανόδου επειδή έχει αυτές τις ευνοϊκές ιδιότητες. Το λίθιο, το ελαφρύτερο μέταλλο, με υψηλή τιμή ηλεκτροχημικού δυναμικού έχει καταστεί μια συμφέρουσα λύση ως υλικό ανόδου και συμβατοί ηλεκτρολύτες και σχέδια κελιών έχουν αναπτυχθεί για πληθώρα εφαρμογών. Στις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, το στοιχείο που υπάρχει στην άνοδο είναι ο μολύβδος.

1.1.2.1.2. Κάθοδος

Η κάθοδος ή το θετικό ηλεκτρόδιο ή το οξειδωτικό ηλεκτρόδιο είναι εκείνο που δέχεται ηλεκτρόνια από ένα εξωτερικό κύκλωμα και ανάγεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Πρέπει να είναι αποτελεσματικός οξειδωτικός παράγοντας και τα περισσότερα υλικά καθόδου είναι μεταλλικά οξείδια. Στις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, το υλικό είναι το διοξείδιο του μολύβδου.

1.1.2.1.3. Ηλεκτρολύτης

Ο ηλεκτρολύτης ή αλλιώς ιονικός αγωγός, είναι στην ουσία η γέφυρα του φορτίου ιόντων, εντός του κελιού, μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Ο ηλεκτρολύτης συνήθως συναντάται σε υγρή μορφή (υδατικού διαλύματος) με τη πρόσμιξη διαλυμένων αλάτων, οξέων ή αλκαλίων για να προσδώσουν ιοντική αγωγιμότητα. Εξίσου σημαντικά χαρακτηριστικά είναι η μη αντίδραση του με τα ηλεκτρόδια (θετικό και αρνητικό), η μικρή αλλαγή στις ιδιότητες του διαλύματος σε ενδεχόμενη αλλαγή θερμοκρασίας, και φυσικά το χαμηλό κόστος. Η πλειοψηφία των ηλεκτρολυτών είναι υδατικά διαλύματα, με ελάχιστες εξαιρέσεις, όπως π.χ. ηλεκτρολύτες με τη μορφή γέλης (gel). Φυσικά, τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου, απομονώνονται ηλεκτρονικά στο κελί για την αποτροπή εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων, αλλά περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη. Σε σχέδια κελιών, ένα υλικό χρησιμοποιείται ως διαχωριστής για τον μηχανικό διαχωρισμό των

ηλεκτροδίων ανόδου και καθόδου. Ο διαχωριστής είναι διαπερατός στον ηλεκτρολύτη προκειμένου να διατηρηθεί η επιθυμητή ιοντική αγωγιμότητα. Ηλεκτρικά αγωγίμες κατασκευές ή υλικά μπορούν επίσης να προστεθούν στα ηλεκτρόδια για να μειωθεί η εσωτερική αντίσταση [2].

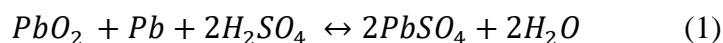
<u>Fully Charged</u>			<u>Fully Discharged</u>		
Anode	Electrolyte	Cathode	Anode	Electrolyte	Cathode
Pb	H ₂ SO ₄	PbO ₂	PbSO ₄	H ₂ SO ₄	PbSO ₄

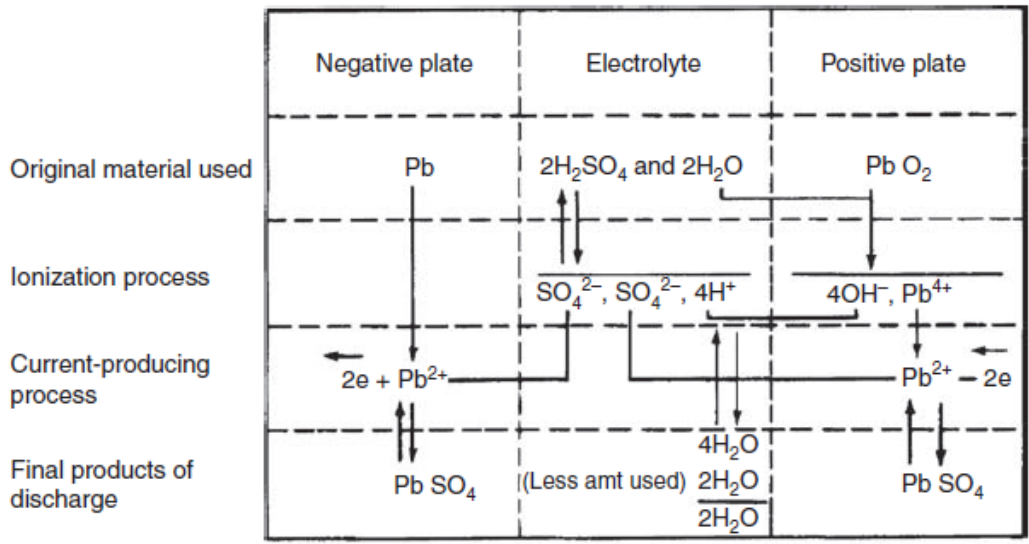
Σχήμα 2: Απεικόνιση ανόδου, καθόδου και ηλεκτρολύτη σε μπαταρία μολύβδου-οξέος [3].

Το ίδιο το κελί μπορεί να κατασκευαστεί σε πολλά σχήματα και διαμορφώσεις (κυλινδρικά, επίπεδα) και τα κελιά σφραγίζονται με διάφορους τρόπους για να αποφευχθεί διαρροή ή ξήρανση. Ορισμένα κελιά είναι εφοδιασμένα με συσκευές εξαερισμού ή άλλα μέσα που επιτρέπουν τη διαφυγή συσσωρευμένων αερίων [2].

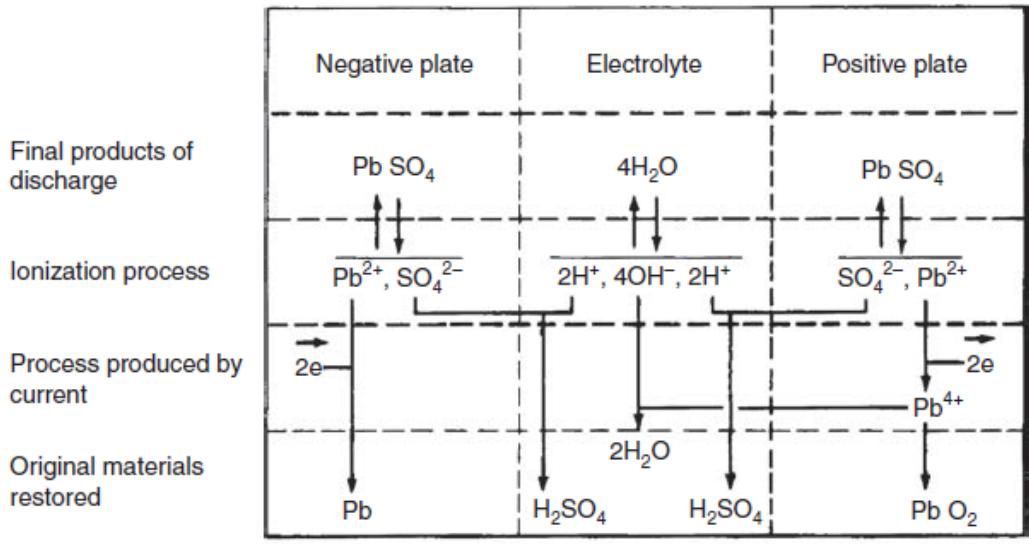
1.1.2.2. Ηλεκτροχημική αντίδραση ενός κελιού

Ένας συσσωρευτής παρέχει ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντας την αποθηκευμένη χημική της ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, επιτυγχάνεται με μια χημική αντίδραση στην μπαταρία που απελευθερώνονται ηλεκτρόνια και η διαδικασία είναι αντιστρέψιμη. Εάν τοποθετηθεί φορτίο στους ακροδέκτες του συσσωρευτή, η χημική αντίδραση παράγει ηλεκτρική ισχύ. Εάν η ηλεκτρική ενέργεια κατευθύνεται στο συσσωρευτή, η χημική αντίδραση αντιστρέφει και με αυτό το τρόπο γίνεται η φόρτιση της μπαταρίας. Όπως ήδη αναφέρθηκε πιο πάνω, στις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, το υλικό της ανόδου είναι ο μολύβδος, το υλικό της καθόδου είναι το διοξείδιο του μολύβδου, ενώ ο ηλεκτρολύτης είναι θειικό οξύ. Η συνολική αντίδραση που γίνεται μέσα σε ένα κελί, περιγράφεται από την παρακάτω αντίδραση:





Σχήμα 3: Απεικόνιση χημικής διαδικασίας κατά την εκφόρτιση [2].



Σχήμα 4: Απεικόνιση χημικής διαδικασίας κατά τη φόρτιση [2].

Στα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 3 & Σχήμα 4), απεικονίζεται πιο αναλυτικά η περιγραφή της παραπάνω αντίδρασης. Όταν οι ακροδέκτες του συσσωρευτή συνδεθούν σε ένα κύκλωμα, το ρεύμα που διαρρέει τη μπαταρία είναι ανάλογο με τη διαφορά δυναμικού

που υπάρχει στην άνοδο και στη κάθοδο, ενώ περιορίζεται κυρίως από την αντίσταση του κυκλώματος. Αν η αντίσταση του εξωτερικού κυκλώματος είναι μικρή, τότε η ένταση περιορίζεται κυρίως από την αποτελεσματικότητα της χημικής αντίδρασης. Το θειικό οξύ καταναλώνεται κατά τη διαδικασία της εκφόρτισης και το προϊόν αντίδρασης είναι νερό. Με αυτό το τρόπο, το οξύ αραιώνεται διαρκώς κατά την εκφόρτιση. Αυτή η μείωση στη συγκέντρωση του οξέος στον ηλεκτρολύτη, μαζί με την οξειδοαναγωγή των ηλεκτροδίων, είναι εκείνες που αντιπροσωπεύουν τη μείωση της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας (State of Charge), το οποίο θα αναλυθεί περισσότερο στη συνέχεια.

Τα ενεργά υλικά που υπάρχουν στην άνοδο και στην κάθοδο (μόλυβδος και διοξείδιο του μολύβδου), καταναλώνονται κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, ενώ στη διαδικασία ιονισμού στον ηλεκτρολύτη, λαμβάνει χώρα διάσπαση του θειικού οξέος σε θειικά ανιόντα και κατιόντα υδρογόνου και το τελικό προϊόν της αντίδρασης εναποτίθεται στα δύο ηλεκτρόδια (θειικός μόλυβδος). Έτσι η υλική σύνθεση στα 2 ηλεκτρόδια αλλάζει κατά τη διαδικασία της εκφόρτισης. Η διαδικασία της φόρτισης στο συσσωρευτή, αντιστρέφει τη χημική αντίδραση στο κελί. Για να πραγματοποιηθεί η χημική αντίδραση στη φόρτιση, θα πρέπει η μπαταρία να απορροφήσει ενέργεια. Με αυτό το τρόπο, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική ενέργεια κατά τη φόρτιση.

Επειδή ο ηλεκτρολύτης είναι αγωγίμος, η χημική αντίδραση είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί χωρίς να έχει συνδεθεί ο συσσωρευτής σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Αυτό το φαινόμενο, ονομάζεται αυτό-εκφόρτιση (self-discharge) και είναι μια αργή διαδικασία που μπορεί να διαρκέσει από μερικούς μήνες μέχρι και παραπάνω από ένα έτος, προτού αποφορτιστεί εντελώς [4].

1.1.2.3. Κατηγοριοποίηση κελιών ή μπαταριών

Τα ηλεκτροχημικά κελιά και οι μπαταρίες, διαχωρίζονται σε 2 κύριες κατηγορίες, στα πρωτεύοντα (μη επαναφορτιζόμενα) και στα δευτερεύοντα (επαναφορτιζόμενα) κελιά, ανάλογα με την ικανότητά τους να επαναφορτίζονται ηλεκτρικά.

1.1.2.3.1. Πρωτογενείς συσσωρευτές ή πρωτεύουσες μπαταρίες

Αυτές οι μπαταρίες δεν είναι ικανές να επαναφοριστούν (ηλεκτρικά) εύκολα και αποτελεσματικά και, ως εκ τούτου, αποφορτίζονται μία φορά και δεν έχουν έκτοτε άλλη χρήση. Πρωτεύοντα κελιά, στα οποία ο ηλεκτρολύτης περικλείεται από απορροφητικό υλικό (δεν υπάρχει υγρός ηλεκτρολύτης) ονομάζονται "ξηρά κελιά". Η πρωτεύουσα μπαταρία είναι μια βολική, συνήθως φθηνή και ελαφριά πηγή ενέργειας για φορητές ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές φωτισμού, ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, παιχνίδια, συσκευές GPS και μια πληθώρα άλλων εφαρμογών.



Σχήμα 5: Πρωτεύουσες μπαταρίες [5].

Τα γενικά πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας, είναι ότι έχουν καλή διάρκεια ζωής, υψηλή πυκνότητα ενέργειας από χαμηλές έως μέτριες ταχύτητες εκφόρτισης και ευκολία χρήσης. Η συντριπτική πλειοψηφία των πρωτογενών συσσωρευτών είναι η γνωστή κυλινδρική μπαταρία ή μπαταρίες πολλαπλών χρήσεων που χρησιμοποιούν αυτά τα στοιχεία [2].

1.1.2.3.2. Δευτερεύοντες συσσωρευτές ή δευτερεύουσες μπαταρίες

Αυτές οι μπαταρίες μπορούν να επαναφοριστούν ηλεκτρικά, μετά την εκφόρτιση, στην αρχική τους κατάσταση, με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με τη φορά του ρεύματος αντίθετη προς τη φορά του ρεύματος φόρτισης. Οι εφαρμογές των δευτερευουσών μπαταριών εμπίπτουν σε δύο κύριες κατηγορίες:

- i. Οι εφαρμογές στις οποίες η δευτερεύουσα μπαταρία χρησιμοποιείται γενικά ως συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, συνδέεται ηλεκτρικά και φορτίζεται από μια πρωτεύουσα πηγή ενέργειας, αποθηκεύοντας ενέργεια και εν συνεχεία εκχέοντας την προς ένα φορτίο. Παραδείγματα είναι τα συστήματα αυτοκινήτων και αεροσκαφών, οι συσκευές UPS, υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας (BESS – Battery Energy Storage Systems) για την ισορροπία φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας.
- ii. Οι εφαρμογές στις οποίες η δευτερεύουσα μπαταρία χρησιμοποιείται ή εκκενώνεται ουσιαστικά ως πρωτεύουσα μπαταρία, αλλά επαναφορτίζεται μετά τη χρήση αντί να αχρηστεύεται. Τέτοιες περιπτώσεις είναι για παράδειγμα στα φορητά ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης, όπως τα κινητά τηλέφωνα, οι φορητοί υπολογιστές, ηλεκτρικά εργαλεία κλπ. για εξοικονόμηση κόστους (καθώς μπορούν να επαναφοριστούν παρά να αντικατασταθούν).



Σχήμα 6: Μπαταρία μολύβδου-οξέος, που ανήκει στη κατηγορία των δευτερευόντων συσσωρευτών [6].

Οι δευτερεύουσες μπαταρίες χαρακτηρίζονται (εκτός από την ικανότητά τους να επαναφορτίζονται) από υψηλή ισχύ, από έναν βαθμό υψηλής εκφόρτισης, από καμπύλες επίπεδης εκφόρτισης και, στις περισσότερες περιπτώσεις, από καλές επιδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες [2].

1.1.2.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός συσσωρευτή

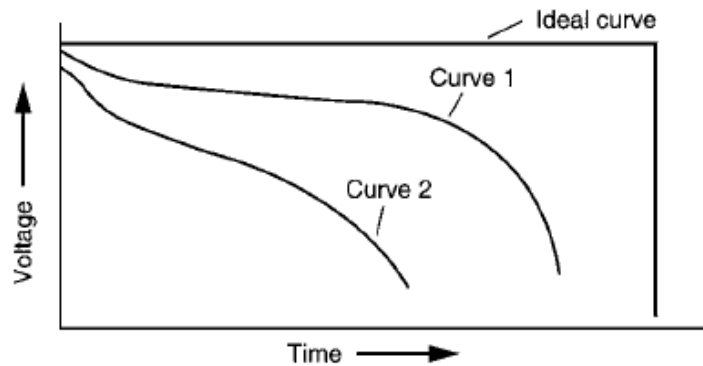
Η απόδοση μίας μπαταρίας μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετική υπό πραγματικές συνθήκες χρήσης, ιδιαίτερα εάν η μπαταρία έχει αποφορτιστεί υπό ακραίες συνθήκες, για τις οποίες δεν έχει σχεδιαστεί (υψηλή ένταση εκφόρτισης, πολύ χαμηλές ή πολύ υψηλές θερμοκρασίες). Η απόδοση της μπαταρίας θα πρέπει να εξετάζεται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες χρήσης, προτού εξαχθούν τελικά συμπεράσματα. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά μιας μπαταρίας (χωρητικότητα, θερμοκρασία, απόδοση). Σημειώνεται ότι ακόμη και σε ένα δεδομένο σχεδιασμό κελιού ή μπαταρίας, θα υπάρχουν διαφορές στην απόδοση από κατασκευαστή σε κατασκευαστή και μεταξύ διαφορετικών εκδόσεων της ίδιας μπαταρίας.

1.1.2.4.1. Επίπεδο τάσης

Αξίζει να γίνουν ορισμένες αναφορές σε ότι έχει να κάνει με το επίπεδο τάσης ενός κελιού ή μιας μπαταρίας:

- i. Η **θεωρητική τάση**, που είναι η διαφορά της τάσης του υλικού στην άνοδο, από τη τάση του υλικού στη κάθοδο (συνήθως αναφέρεται στους 25°C).
- ii. Η **τάση ανοιχτού κυκλώματος**, που είναι η τάση υπό συνθήκες χωρίς φορτίο και είναι συνήθως κοντινή προσέγγιση της θεωρητικής τάσης.
- iii. Η **τάση κλειστού κυκλώματος** που είναι η τάση υπό συνθήκες φορτίου.
- iv. Η **ονομαστική τάση** που είναι η αποδεκτή ως τυπική της τάσης λειτουργίας της μπαταρίας, για παράδειγμα, 1,5 V για μπαταρία διοξειδίου του ψευδαργύρου-μαγγανίου.
- v. Η **μέση τάση** που είναι ο μέσος όρος της τάσης κατά την εκφόρτιση.
- vi. Η **τάση αποκοπής** που ορίζεται ως το τέλος της εκφόρτισης. Συνήθως είναι η τάση που έχει παρασχεθεί το μεγαλύτερο μέρος της χωρητικότητας του κελιού ή της μπαταρίας. Η τάση αποκοπής μπορεί επίσης να εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Χρησιμοποιώντας μια μπαταρία μολύβδου-οξέος ως παράδειγμα, οι θεωρητικές και ανοιχτές τάσεις είναι 2,1 V, η ονομαστική τάση είναι 2,0 V, η τάση λειτουργίας είναι μεταξύ 1,8 και 2,0 V και η τάση αποκοπής είναι συνήθως 1,75 V σε χαμηλές αποφορτίσεις και 1,5 V για μεγαλύτερα φορτία (π.χ. φορτίο εκκίνησης κινητήρα). Κατά τη λειτουργία μιας φόρτισης, η τάση μπορεί να κυμαίνεται από 2,3 έως 2,8 V. Η τάση λειτουργίας είναι πιο αντιπροσωπευτική της πραγματικής τάσης λειτουργίας της μπαταρίας που έχει φορτίο στην έξοδο και θα είναι χαμηλότερη από την τάση ανοιχτού κυκλώματος.



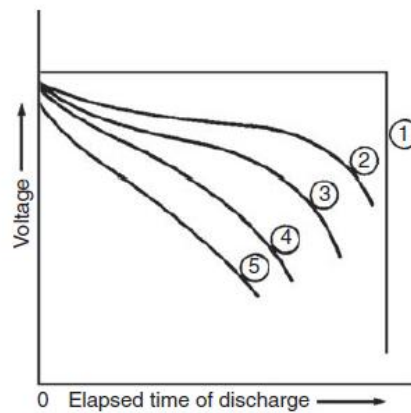
Σχήμα 7: Απεικόνιση καμπυλών εκφόρτισης [2].

Όταν ένα κελί ή μια μπαταρία αποφορτίζεται, η τάση είναι χαμηλότερη από τη θεωρητική τάση. Η διαφορά αυτή προκαλείται από πτώση τάσης ή αλλιώς απώλειες IR (το γινόμενο του ρεύματος εκφόρτισης και της εσωτερικής αντίστασης) στην αντίσταση κυψέλης και της πολικότητας των ενεργών υλικών κατά την εκφόρτιση. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 7. Στην ιδανική περίπτωση, η εκφόρτιση της μπαταρίας προχωρά προς τη θεωρητική τάση έως ότου καταναλωθούν τα ενεργά υλικά και αξιοποιηθεί πλήρως η χωρητικότητα. Η τάση τότε πέφτει στο μηδέν. Η καμπύλη 2 είναι παρόμοια με τη καμπύλη 1, αλλά αντιπροσωπεύει ένα κελί με υψηλότερη εσωτερική αντίσταση ή υψηλότερο ρυθμό εκφόρτισης, ή και τα δύο, σε σύγκριση με το κελί που αντιπροσωπεύεται από την καμπύλη 1. Καθώς η αντίσταση του κελιού ή το ρεύμα εκφόρτισης αυξάνεται, η τάση εκφόρτισης μειώνεται και η εκφόρτιση δείχνει μια πιο απότομη κλίση.

Η πραγματική ενέργεια που παρέχεται από μια μπαταρία, είναι χαμηλότερη από τη θεωρητική ενέργεια των ενεργών υλικών της, επειδή η μέση τάση κατά την εκφόρτιση είναι χαμηλότερη από τη θεωρητική τάση και η μπαταρία δεν αποφορτίζεται στα 0V και δεν χρησιμοποιείται όλη η διαθέσιμη χωρητικότητα της.

1.1.2.4.2. Ρεύμα εκφόρτισης

Καθώς η πρόσδοση ρεύματος της μπαταρίας αυξάνεται, οι απώλειες IR και οι επιδράσεις πόλωσης αυξάνονται, η εκφόρτιση είναι σε χαμηλότερη τάση και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μειώνεται.



Σχήμα 8: Απεικόνιση χαρακτηριστικών καμπυλών εκφόρτισης [2].

Το Σχήμα 8 δείχνει τυπικές καμπύλες εκφόρτισης καθώς μεταβάλλεται η ένταση του ρεύματος. Σε εξαιρετικά χαμηλές εντάσεις ρεύματος (καμπύλη 2), η εκφόρτιση μπορεί να προσεγγίσει τη θεωρητική τάση και τη θεωρητική χωρητικότητα. Με την αύξηση της έντασης του ρεύματος (καμπύλες 3–5), η τάση μειώνεται, η κλίση της καμπύλης εκφόρτισης αποκτά μεγαλύτερη κλίση και η διάρκεια ζωής, καθώς και η χωρητικότητα, μειώνονται [2].

1.1.2.4.3. Λόγος C (C Rate)

Ο λόγος C (C Rate), αποτελεί μια ένδειξη για τη διαδικασία της εκφόρτισης και πιο συγκεκριμένα συσχετίζει το ρεύμα βάσει του οποίου αποφορτίζεται μια μπαταρία με την χωρητικότητα της μπαταρίας. Η χωρητικότητα μιας μπαταρίας ορίζεται συνήθως σε 1C, που αυτό σημαίνει ότι μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία με ονομαστική τιμή 1 Ah, θα πρέπει να παρέχει 1A για 1 ώρα. Η εκφόρτιση της μπαταρίας στα 0,5C, θα πρέπει να παρέχει 500mA για 2 ώρες και όταν είναι 2C να παρέχει 2A για 30 λεπτά [7].

1.1.2.4.4. Λόγος E (E Rate)

Μια μέθοδος, ανάλογη με το λόγο C , μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έκφραση του ρυθμού εκφόρτισης ή φόρτισης σε όρους ισχύος, και ονομάζεται λόγος E (E Rate). Αυτή, από τη μαθηματική σκοπιά, μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P = M E \quad (2)$$

Όπου P, η ισχύς εκφρασμένη σε W, E η αριθμητική τιμή της μετρούμενης ενέργειας της μπαταρίας εκφρασμένη σε Wh και M παράγοντας που εξαρτάται από το ρυθμό εκφόρτισης και έχει μονάδες s^{-1} .

Για παράδειγμα, το επίπεδο ισχύος με ρυθμό 0,5E ή E/2 για μπαταρία μετρούμενη στα 1200 mWh, στα 0,2E, είναι 600 mW [2].

1.1.2.4.5. Τρόποι εκφόρτισης

Ο τρόπος εκφόρτισης μιας μπαταρίας, μεταξύ άλλων παραγόντων, μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση της μπαταρίας. Για το λόγο αυτό, συνιστάται ο τρόπος εκφόρτισης που χρησιμοποιείται σε μια δοκιμή ή σε ένα πρόγραμμα αξιολόγησης να είναι ίδιος με τον τρόπο εκφόρτισης της εν λόγω εφαρμογής για την οποία δοκιμάζεται. Μια

μπαταρία, όταν αποφορτίζεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας (ίδια τάση κλειστού κυκλώματος, στο ίδιο ρεύμα εκφόρτισης, στην ίδια θερμοκρασία, κ.λπ.) θα έχει παραδώσει τις ίδιες αμπερώρες σε ένα φορτίο, ανεξάρτητα του τρόπου εκφόρτισης. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, το ρεύμα εκφόρτισης δύναται να διαφέρει ανάλογα με τον τρόπο εκφόρτισης. Ο χρόνος λειτουργίας (ή οι «ώρες εκφόρτισης») που έγινε μέχρι εκείνο το σημείο (που είναι το συνηθισμένο μέτρο της απόδοσης της μπαταρίας) θα είναι επίσης διαφορετικός.

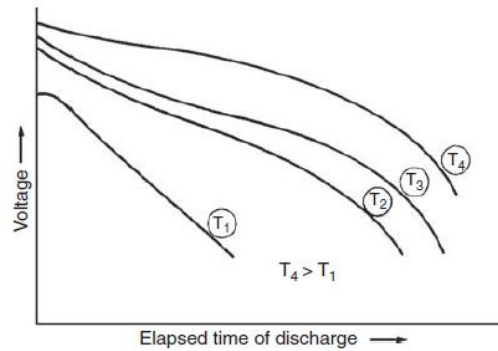
Υπάρχουν 3 βασικές λειτουργίες κάτω από τις οποίες μια μπαταρία μπορεί να αποφορτιστεί:

- i. **Σταθερή αντίσταση**, όπου η αντίσταση του φορτίου παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της εκφόρτισης (το ρεύμα μειώνεται κατά την εκφόρτιση ανάλογα με τη μείωση της τάσης της μπαταρίας).
- ii. **Σταθερή ένταση**, όπου η ένταση του ρεύματος παραμένει σταθερή κατά την εκφόρτιση.
- iii. **Σταθερή ισχύς**., όπου το ρεύμα αυξάνεται κατά την εκφόρτιση καθώς μειώνεται η τάση της μπαταρίας αποφορτίζοντας έτσι τη μπαταρία σε σταθερό επίπεδο ισχύος [2].

1.1.2.4.6. Θερμοκρασία κατά την εκφόρτιση και τη φόρτιση της μπαταρίας

Η θερμοκρασία στην οποία αποφορτίζεται η μπαταρία έχει έντονη επίδραση στη διάρκεια ζωής της μπαταρίας (χωρητικότητα). Αυτό οφείλεται στη μείωση της χημικής δραστηριότητας και στην αύξηση της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Στο Σχήμα 9, απεικονίζονται εκφορτίσεις στο ίδιο ρεύμα εκφόρτισης αλλά σε προοδευτικά αυξανόμενες θερμοκρασίες της μπαταρίας (T1 έως T4), με το T4 να αντιπροσωπεύει μια εκφόρτιση σε κανονική θερμοκρασία δωματίου.

Οι μπαταρίες μπορούν να φορτιστούν κάτω από συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας [2].



Σχήμα 9: Καμπύλες εκφόρτισης που απεικονίζουν την επιρροή της θερμοκρασίας κατά την εκφόρτιση [2].

Οι επιδόσεις της λειτουργίας φόρτισης μειώνονται σε υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες, επομένως η μπαταρία πρέπει να φθάσει σε μέτρια θερμοκρασία πριν από τη φόρτιση.

Πίνακας 1: Επιτρεπόμενα όρια θερμοκρασιών για διαφόρους τύπους μπαταριών [8].		
Τύπος μπαταρίας	Θερμοκρασία κατά τη φόρτιση (°C)	Θερμοκρασία κατά την εκφόρτιση (°C)
Μολύβδου-οξέος	-20°C - 50°C	-20°C - 50°C
Ιόντων Λιθίου	0°C - 45°C	-20°C - 60°C

Οι μπαταρίες μπορούν να αποφορτιστούν σε μεγάλο εύρος θερμοκρασίας, αλλά η θερμοκρασία φόρτισης είναι περιορισμένη. Για καλύτερα αποτελέσματα, συστήνεται η

φόρτιση να είναι μεταξύ 10 ° C και 30 ° C και για χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 0 - 5° C) να είναι μειωμένο το ρεύμα φόρτισης [8].

1.1.3. Μπαταρίες μολύβδου-οξέος

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος έχουν ένα θετικό στοιχείο, αυτό της ευρείας εφαρμογής σε πολλά συστήματα, όπως σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, τηλεφωνικά δίκτυα, ηλεκτρικά εργαλεία, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη ναυτιλία, ακόμα και σε εφαρμογές εξόρυξης μετάλλων. Αυτό εξηγείται διότι, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι φθηνές στην αγορά και η κατασκευή τους είναι σχετικά εύκολη. Η ασφάλεια των μπαταριών μολύβδου-οξέος, έχει ενισχυθεί με την ανάπτυξη των μπαταριών VRLA (Valve Regulated Lead Acid), όπου ο σφραγισμένος σχεδιασμός τους, ελαχιστοποιεί τη διαρροή οξέος στο μέγιστο δυνατό.

Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μπαταριών μολύβδου-οξέος [2].	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αποτελεί έναν συσσωρευτή χαμηλού κόστους.	Έχουν σχετικά χαμηλή διάρκεια κύκλου (low-life cycle).
Διαθέσιμος σε μεγάλες ποσότητες και διάφορα μεγέθη.	Περιορισμένη ενεργειακή πυκνότητα (τυπικά 30-40Wh / Kg).
Καλή απόδοση (π.χ. για εκκίνηση κινητήρα).	Δυσκολία στην κατασκευή σε μικρά μεγέθη.
Ακραίες θερμοκρασίες δεν επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση.	
Υψηλή τάση κελιού (τάση ανοιχτού κυκλώματος >2,0V).	
Ευκολία στην ανακύκλωση.	

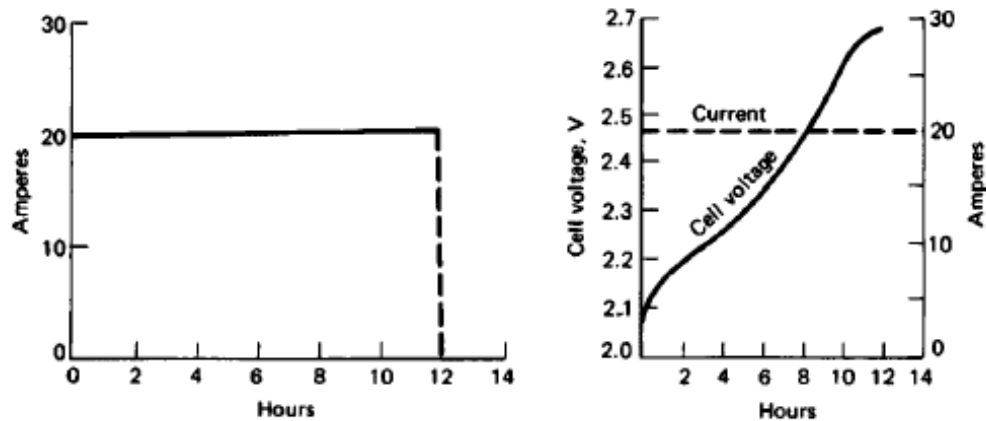
Πέρα από αυτά, τέτοιου τύπου συσσωρευτές είναι προϊόντα εξαιρετικά ανακυκλώσιμα, μιας και είναι δυνατή η ανακύκλωση τους σε ποσοστό άνω του 97%. Επιπλέον, για σχεδόν πολλές δεκαετίες, εξακολουθεί να κατέχει ένα μεγάλο τμήμα στην αγορά συσσωρευτών σε όλο το κόσμο. Στον παραπάνω πίνακα, αναφέρονται μερικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σχετικά με τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος [2].

1.1.3.1. Μέθοδοι φόρτισης μπαταριών μολύβδου-οξέος

Σε αυτό το εδάφιο, θα αναλυθούν μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν για τη φόρτιση ενός συσσωρευτή μπαταρίας μολύβδου-οξέος, καθώς και τρόποι που ενδείκνυνται για τη σωστή συντήρηση ενός συσσωρευτή μολύβδου-οξέος.

1.1.3.1.1. Φόρτιση υπό σταθερή ένταση (Constant Current Charging)

Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν χρησιμοποιείται ευρέως για μπαταρίες τέτοιου τύπου. Αυτό οφείλεται στο ότι είναι αναγκαία η προσαρμογή της έντασης, εκτός αν αυτή διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια της επαναφόρτισης. Η μέθοδος αυτή έχει μεγάλη χρήση σε εφαρμογές εργαστηρίων, κυρίως λόγω της πραγματοποίησής της με απλό και φθινό εξοπλισμό.



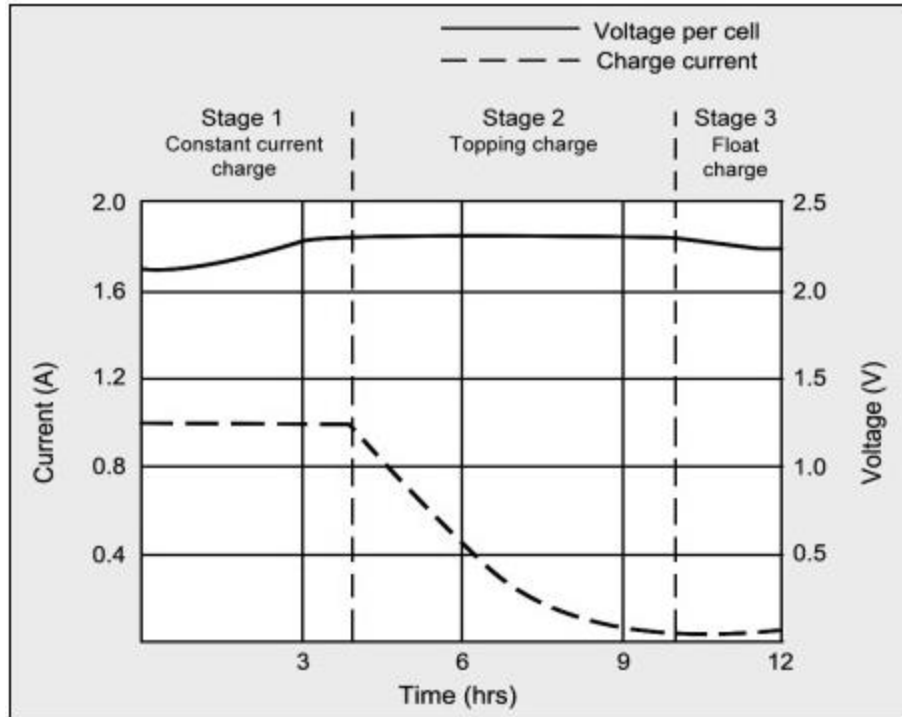
Σχήμα 10: Γραφικές αναπαραστάσεις στο χρόνο ρεύματος και τάσης κατά τη φόρτιση με σταθερή ένταση [2].

Τα παραπάνω γραφήματα, απεικονίζουν την ένταση στο χρόνο (σταθερή ένταση) και την τάση του κελιού στο χρόνο, για όσο διάστημα εκτελείται η λειτουργία φόρτισης υπό σταθερή ένταση [2].

1.1.3.1.2. Φόρτιση υπό σταθερή ένταση και τάση (Constant Current Constant Voltage Charging)

Σε αυτή τη περίπτωση, η διαδικασία αποτελείται από 3 στάδια, τα οποία είναι:

- Φόρτιση υπό σταθερό ρεύμα.
- Φόρτιση σε χαμηλότερη ένταση.
- Επίπεδη φόρτιση.



Σχήμα 11: Γραφική αναπαράσταση της έντασης κατά τη φόρτιση Σταθερού ρεύματος - Σταθερής Τάσης [9].

Η φόρτιση σταθερού ρεύματος εφαρμόζεται συνήθως στο μεγαλύτερο μέρος της μεθόδου αυτής, η φόρτιση σε χαμηλότερη ένταση παρέχει κορεσμό και η επίπεδη φόρτιση γίνεται για να αντισταθμιστεί η όποια απώλεια προκαλείται από την αυτο-εκφόρτιση (self-discharge). Το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 11), απεικονίζει τα 3 στάδια που αναφέρθηκαν συνοπτικά [9].

1.1.3.1.3. Συντήρηση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος

Αρκετά σημαντικό κομμάτι που αξίζει να αναφερθεί, είναι η συντήρηση των μπαταριών μολύβδου-οξέος και αυτό διότι ακολουθώντας συγκεκριμένες ενέργειες, μπορεί να επιτευχθεί η επιμήκυνση της ζωής της μπαταρίας. Τέτοιες ενέργειες που μπορούν να γίνουν είναι :

- Αντιστοίχιση της φόρτισης της μπαταρίας με τις απαιτήσεις φόρτισης του κατασκευαστή της μπαταρίας.

- Αποφυγή υπερεκφόρτισης (overdischarge) της μπαταρίας.
- Διατήρηση του ηλεκτρολύτη σε κατάλληλα επίπεδα.
- Διατήρηση της μπαταρίας όσο το δυνατόν γίνεται καθαρή.
- Αποφυγή υπερθέρμανσης.

Όταν δεν συμβαδίζει η φόρτιση του συσσωρευτή με τις απαιτήσεις των προδιαγραφών σχεδίασης, τότε αυτός είναι σημαντικός λόγος για τη σύντομη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Στις μπαταρίες μολύβδου-οξέος τα φυσικά και τα χημικά χαρακτηριστικά κάνουν τον έλεγχο της φόρτισης αρκετά απλό. Αν στη μπαταρία παρέχεται σταθερή τάση, πάντα σε κατάλληλα επίπεδα τάσης, τότε η μπαταρία αντλεί μόνο το ρεύμα που μπορεί να δεχθεί και αυτό μειώνεται όσο η μπαταρία πλησιάζει σε κατάσταση πλήρης φόρτισης.

Η υπερεκφόρτιση της μπαταρίας πρέπει να αποφεύγεται. Πιο συγκεκριμένα, η εκφόρτιση κελιών κάτω από τα καθορισμένα όρια μειώνουν τη συγκέντρωση στον ηλεκτρολύτη, κάτι που έχει αρνητικές συνέπειες στη δομή της μπαταρίας. Εξαιρέση αποτελούν οι μπαταρίες βαθύς κύκλου (deep-cycle batteries), που είναι σχεδιασμένες να εκτελούν πολλούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης και έχουν ευρεία χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός συσσωρευτή, χάνεται μια ποσότητα νερού ως αποτέλεσμα της ηλεκτρόλυσης σε υδρογόνο και οξυγόνο. Είναι σημαντικό ο ηλεκτρολύτης να διατηρείται σε κατάλληλα επίπεδα συγκέντρωσης σε μια μπαταρία διότι, εκτός από το ότι αποτελεί αγωγό ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για τη μεταφορά θερμότητας από τα ηλεκτρόδια. Αν ο ηλεκτρολύτης είναι κάτω από τα επίπεδα που πρέπει να είναι, τότε αμέσως ένα μέρος του ηλεκτροδίου δεν είναι ηλεκτροχημικά ενεργό, προκαλώντας συγκέντρωση θερμότητας σε άλλα μέρη του κελιού.

Διατηρώντας τη μπαταρία καθαρή, ελαχιστοποιείται η διάβρωση των συνδέσμων του συσσωρευτή. Στις μπαταρίες πολλές φορές μαζεύονται σκόνες, που εύκολα μπορούν να καθαριστούν, προτού η υγρασία προκαλέσει επιπλέον ζημιά. Στο κομμάτι που έχει να

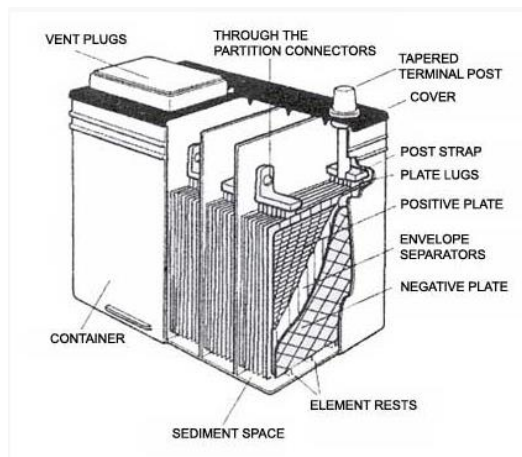
κάνει με την υπερθέρμανση, μπορεί να προκληθεί αύξηση του ρυθμού της διάβρωσης των μεταλλικών εξαρτημάτων του συσσωρευτή, καθώς και αύξηση της αυτο-εκφόρτισης (self-discharge). Συσσωρευτές που προορίζονται για χρήση σε περιβάλλον με υψηλές θερμοκρασίες, πρέπει να έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως χαμηλότερο ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη [2].

1.1.3.2. Τύποι συσσωρευτών μολύβδου-οξέος

Οι κυριότεροι τύποι συσσωρευτών μολύβδου-οξέος είναι οι μπαταρίες εκκίνησης (Starting, Lighting and Ignition - SLI), οι μπαταρίες βαθέως κύκλου (deep-cycle batteries) και οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος ρυθμιζόμενη με βαλβίδες (Valve Regulated Lead Acid - VRLA).

1.1.3.2.1. Μπαταρίες SLI (Starting, Lightning and Ignition)

Οι μπαταρίες SLI, έχουν ευρεία χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία για την εκκίνηση κινητήρων εσωτερικής καύσης. Υφίστανται έναν κύκλο εκφόρτισης σε υψηλές τιμές έντασης για μικρό χρονικό διάστημα για την εκκίνηση ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης και στη συνέχεια μια γεννήτρια είναι υπεύθυνη για την επαναφόρτιση της μπαταρίας, διατηρώντας την σε επίπεδα πλήρους φόρτισης [10].



Σχήμα 12: Ανατομία μιας μπαταρίας SLI [11].

Οι μπαταρίες SLI, έχουν την ικανότητα να φτάσουν έως και 80% του βάθους εκφόρτισης (Depth of Discharge, παράμετρος που αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο), κάτι το οποίο συμβαίνει στιγμιαία (π.χ. εκκίνηση κινητήρα) [10].

1.1.3.2.2. Μπαταρίες βαθέως κύκλου (Deep-cycle)

Ο συγκεκριμένος τύπος συσσωρευτών παρέχει καλή διάρκεια ζωής, υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και χαμηλό κόστος. Συγκριτικά με έναν συσσωρευτή SLI, οι συσσωρευτές βαθέως κύκλου έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, εφόσον ικανοποιείται το σημείο λειτουργίας για το οποίο έχουν κατασκευαστεί και ένας λόγος είναι η χαμηλή ειδική βαρύτητα του ηλεκτρολύτη. Το τέλος της διάρκειας ζωής του εν λόγω συσσωρευτή γίνεται αντιληπτό, όταν δε μπορεί να προσδώσει περισσότερο από το 60% - 80% της ονομαστικής χωρητικότητας στην εκφόρτιση. Πλεονέκτημα αποτελεί η πιθανότητα αντικατάστασης ενός ή περισσοτέρων κελιών, εφόσον η συνολική απόδοση της μπαταρίας πέφτει εξαιτίας της μείωσης της χωρητικότητας συγκεκριμένων κελιών.

1.1.3.2.3. Μπαταρίες VRLA (Valve Regulated Lead Acid)

Αυτός ο τύπος συσσωρευτή, έχει την ιδιαίτερη ικανότητα το οξυγόνο που υπάρχει στο αρνητικό ηλεκτρόδιο να συνδυάζεται με το υδρογόνο, δημιουργώντας νερό. Το νερό αυτό αντί να απελευθερώνεται από το κελί, περιστρέφεται ηλεκτροχημικά, απορροφώντας το υπερβολικό ρεύμα που μπορεί να παρουσιαστεί για τη μετατροπή του ενεργού υλικού. Έτσι, μπορούν να φορτιστούν επαρκώς, μετατρέποντας το ενεργό υλικό χωρίς καμία απώλεια νερού [10].



Σχήμα 13: Συσσωρευτής μολύβδου-οξέος (VRLA) [12].

Το κελί είναι γεμισμένο με ηλεκτρολύτη που καλύπτει τις επιφάνειες των ηλεκτροδίων. Η χωρητικότητα μιας τέτοιας μπαταρίας, περιορίζεται από τη ποσότητα του υλικού στο θετικό ηλεκτρόδιο, ενώ ο ηλεκτρολύτης και η περίσσεια υλικού στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, διευκολύνουν τον συνδυασμό του οξυγόνου που παράγεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Ο ηλεκτρολύτης απομονώνεται με τη χρήση διαχωριστή τύπου AGM (Absorbent Glass Mat) ή με τη μορφή γέλης (gel) [10].

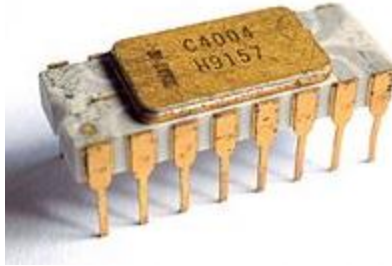
1.2. Συστήματα ελέγχου

Σε αυτό το εδάφιο, γίνεται μια εκτενής αναφορά πάνω στους μικροελεγκτές, στη δομή και τον τρόπο λειτουργίας τους. Επίσης, γίνεται μια εισαγωγή στο Arduino που

χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος, στο πως μπορεί να προγραμματιστεί, ενώ το εδάφιο κλείνει με τη σημασία του ελέγχου στις μπαταρίες.

1.2.1. Μικροελεγκτές – Σύντομη ιστορική αναδρομή

Το 1959, οι Robert Noyce και Gordon Moore εφηύραν ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (Integrated Circuit-IC), ενώ εργάζονταν στην Fairchild Semiconductor, ενώ το 1968 ίδρυσαν τη δική τους εταιρεία με την ονομασία NM electronics που ασχολούνταν αποκλειστικά με τη κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Για μια χρονική περίοδο, η NM Electronics μετονομάστηκε σε «Intel» (Integrated Electronics). Ο πρώτος μικροεπεξεργαστής στον κόσμο είναι ο Intel 4004. Αρκετά χρόνια αργότερα, και συγκεκριμένα στις αρχές της δεκαετίας του 80, ο David Paterson στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια ολοκλήρωσε μια πολυετή έρευνα με την ανάπτυξη ενός μικροελεγκτή με την ονομασία RISC (Reduced Instruction Set Computer) και στις αρχές της δεκαετίας του 90, η Atmel ανέπτυξε πιο ισχυρούς μικροελεγκτές [13]. Στις αρχές της επόμενης δεκαετίας, και πιο συγκεκριμένα το 2005, δημιουργήθηκε το Arduino από τους Massimo Banzi και David Cuartiles και είναι μια πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα που μπορεί να προγραμματιστεί κατάλληλα για τον έλεγχο μικρών ηλεκτρονικών συσκευών, όπως ρελέ, μότερες και αισθητήρες. Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε αρχικά, ήταν ένας 8-bit επεξεργαστής της Atmel. Έκτοτε, το Arduino έχει εξελιχθεί με την ανάπτυξη πολλών πλατφόρμων, όπως το Arduino LilyPad, το Arduino Nano, το Arduino Mega κ.α. [14]. Για τις ανάγκες του πειραματικού μέρους, χρησιμοποιήθηκε το Arduino UNO, με τον ενσωματωμένο μικροελεγκτή της Atmel ATmega328P.



Σχήμα 14: Ο μικροελεγκτής Intel 4004 [15].

Ένα από τα πολύ μεγάλα πλεονεκτήματα των μικροελεγκτών είναι το χαμηλό τους κόστος, μιας και είναι διαθέσιμοι στην αγορά σε πολύ χαμηλές τιμές. Αυτό επεκτείνεται σε μια κατασκευή ενός συστήματος με χαμηλό κόστος. Επιπλέον, οι μικροελεγκτές είναι αρκετά εύελκτοι, με την έννοια ότι το ίδιο ολοκληρωμένο μπορεί να προγραμματιστεί πολλές φορές, ανάλογα με την επιθυμητή λειτουργία. Αξίζει να προστεθεί, ότι οι μικροελεγκτές μπορούν να προσφέρουν υψηλές ταχύτητες και αξιοπιστία στην επεξεργασία δεδομένων.

1.2.1.1. Δομή και λειτουργία ενός μικροελεγκτή

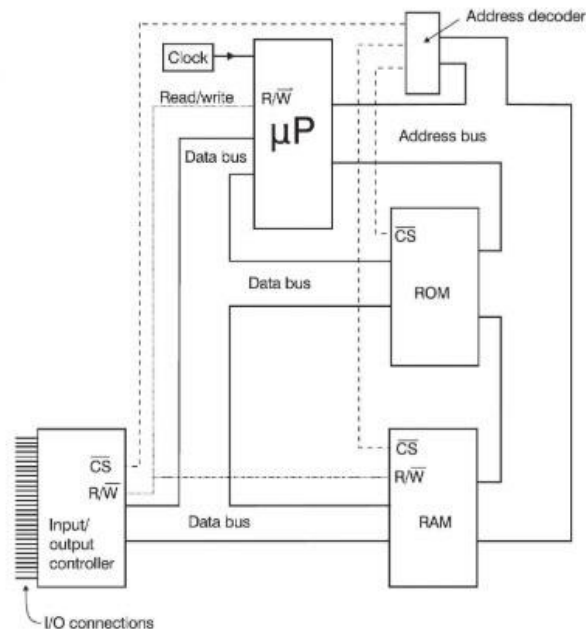
Οι μικροελεγκτές έχουν σαν κύρια χαρακτηριστικά τα εξής:

- i. **Το ρολόι συγχρονισμού (Clock).** Ένα τέτοιο κύκλωμα ελέγχει τον μικροελεγκτή και παράγει μια σειρά από παλμούς. Όλο το σύστημα εκτελεί διαδοχικά τις εργασίες που πρέπει να εκτελέσει, ανάλογα με τον παλμό.
- ii. **Τους αγωγούς (Busses).** Σε ένα ολοκληρωμένο ενός μικροελεγκτή, υπάρχουν 3 βασικοί αγωγοί, ο αγωγός διευθύνσεων (address bus), ο αγωγός δεδομένων (data bus) και ο αγωγός ελέγχου (control bus). Ο αγωγός δεδομένων είναι αγωγός διπλής κατεύθυνσης, μεταφέροντας δεδομένα σε όλο το σύστημα. Ο αγωγός διευθύνσεων μεταφέρει διευθύνσεις από τον μικροελεγκτή προς τη μνήμη και μόνο, μιας και είναι διαδρομή μονής κατεύθυνσης. Ο αγωγός ελέγχου, είναι απαραίτητος για τη σύνδεση

επιμέρους κομματιών του ολοκληρωμένου με τον μικροελεγκτή, όπως των read/write pins.

iii. **Η Μνήμη.** Χρησιμοποιείται για αποθήκευση δεδομένων και υπάρχουν πολλών ειδών όπως Flash memory, OTP (One-time programmable), ROM (Read Only Memory), RAM (Random Access Memory) κ.α.

iv. **Pins εισόδου/εξόδου (I/O pins).** Χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή και την εξαγωγή δεδομένων. Τα σήματα που υπάρχουν στον αγωγό δεδομένων, είναι σήματα πολύ χαμηλής τάσης. Την ενίσχυση των σημάτων αυτών, την αναλαμβάνουν κυκλώματα εισόδου/εξόδου δεδομένων (I/O pins).



Σχήμα 15: Σχεδιάγραμμα γενικής απεικόνισης του εσωτερικού ενός μικροελεγκτή [16].

Παρότι οι μικροελεγκτές έχουν σχετικά μικρή μνήμη, αυτή επαρκεί για την εκτέλεση των εντολών. Στην εκτέλεση των εντολών, ο μικροελεγκτής ελέγχει τις μνήμες RAM και ROM καθώς τα I/O pins. Ο έλεγχος της κίνησης των δεδομένων γίνεται με την αποστολή σήματος στο chip select και εντολών ανάγνωσης/εγγραφής (read/write) κατά μήκος του αγωγού ελέγχου. Το chip select δεν είναι τίποτα άλλο από ένας μικρός διακόπτης on/off που επιτρέπει τη λειτουργία του αντίστοιχου κυκλώματος. Για την αποφυγή αλλοίωσης δεδομένων, κατά τη μεταφορά τους στον αγωγό δεδομένων,

χρησιμοποιείται ένας αποκρυπτογράφος δεδομένων (address decoder) που ρυθμίζει κατάλληλα τη κίνηση των δεδομένων μεταξύ των μνημών [16].

1.2.2. Arduino & Arduino IDE (Integrated Development Environment)

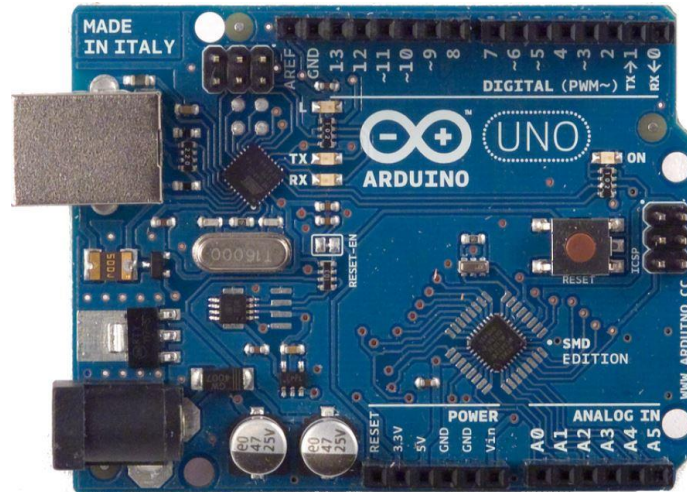
Αποτελείται από 2 κύρια μέρη, το Arduino board και το λογισμικό προγραμματισμού, το Arduino IDE (Intergrated Development Environment). Τα κύρια χαρακτηριστικά του Arduino UNO είναι:

- 14 ψηφιακά pins εισόδου / εξόδου.
- 6 αναλογικά pins εισόδου / εξόδου.
- Ταχύτητα επεξεργασίας 16MHz.
- Μνήμη 32KB.
- Τάση λειτουργίας 5V
- Μέγιστη ένταση για κάθε αναλογικό ή ψηφιακό pin 40mA.

Οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε το Arduino UNO, είναι γιατί διαθέτει πληθώρα αναλογικών και ψηφιακών εξόδων (14 ψηφιακά pins, 6 αναλογικά pins), αποτελεί μια φθηνή επιλογή σε σχέση με άλλες εκδόσεις του Arduino καθώς και η δυνατότητα αντικατάστασης του επεξεργαστή της πλακέτας σε περίπτωση ζημιάς.

1.2.2.1. Arduino Board

Η πλακέτα Arduino είναι μια PCB (Printed Circuit Board) πλακέτα με ολοκληρωμένο κύκλωμα που περιέχει έναν επεξεργαστή (μικροελεγκτή) και πιο συγκεκριμένα το Arduino Uno που περιλαμβάνει τον ATmega 128. Η εν λόγω πλακέτα επιτυγχάνει την επιθυμητή λειτουργία με τη βοήθεια του προγράμματος (sketch) μέσω των πολλαπλών ψηφιακών και αναλογικών εισόδων και εξόδων που είναι ενσωματωμένα πάνω στη πλακέτα.



Σχήμα 16: Το Arduino UNO board [14].

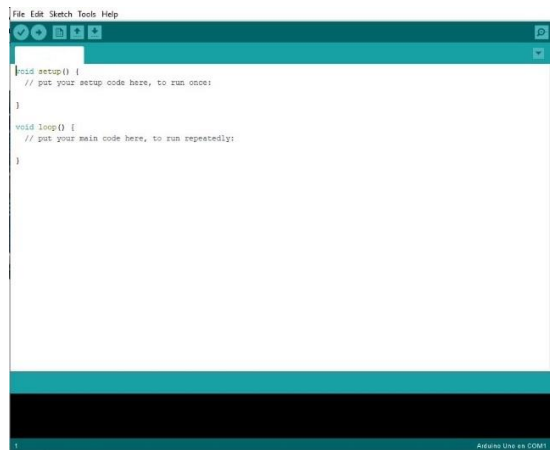
Πιο συγκεκριμένα η πλακέτα έχει ενσωματωμένα pins που κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- **14 ψηφιακά I/O pins (pins 0-13):** Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως είσοδοι είτε ως έξοδοι, ανάλογα με τις εντολές που υπάρχουν στο πρόγραμμα.
- **6 αναλογικά pins εισόδου (pins 0-5):** Τα συγκεκριμένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι για να διαβάζουν π.χ. τάσεις από αισθητήρες και στη συνέχεια μετατρέπονται σε αριθμούς από 0-1023.
- **6 αναλογικά pins εξόδου (pins 3,5,6,9,10 & 11):** Πιο πάνω αναφέρθηκαν 14 I/O ψηφιακά pins. Από αυτά, υπάρχουν 6 pins που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αναλογικές εξοδοι.
- **8 power pins:** Υπάρχουν ακόμα 8 pins στο Arduino που χρησιμοποιούνται είτε ως τροφοδοσία (2 pins 5V & 3,3V) είτε ως γείωση (3 pins GND) είτε ως εξωτερική τροφοδοσία (V_{in} pin που χρησιμοποιείται ως τάση εισόδου στη πλακέτα Arduino όταν χρησιμοποιεί εξωτερική πηγή τροφοδοσίας, που αναφέρεται κάποιες φορές και ως 9V pin) είτε ως τάση αναφοράς για αναλογικές εισόδους (AREF, pin που μας επιτρέπει να τροφοδοτήσουμε το Arduino με μια τάση αναφοράς από μια εξωτερική πηγή). Υπάρχει επίσης και

ένα RESET pin, που χρησιμεύει για να πραγματοποιείται reset του μικροελεγκτή [14].

1.2.2.2. Arduino IDE (Integrated Development Environment)

Το Arduino IDE (Integrated Development Environment) αποτελεί το περιβάλλον διεπαφής του Arduino με το χρήστη μέσω του οποίου προγραμματίζεται ο μικροελεγκτής. Ο κώδικας που συντάσσεται, μεταφράζεται στη γλώσσα C, και στη συνέχεια μεταβιβάζεται στον μεταγλωττιστή, ένα σημαντικό κομμάτι λογισμικού ανοιχτού κώδικα που κάνει την τελική μετάφραση σε μια γλώσσα κατανοητή από τον μικροελεγκτή.



Σχήμα 17: Το περιβάλλον εργασίας μόλις ανοίξει ο χρήστης το Arduino IDE [17].

Ο προγραμματιστικός κύκλος στο Arduino έχει εν συντομία ως εξής:

- Η πλακέτα συνδέεται σε μια θύρα USB στον υπολογιστή μέσω ενός καλωδίου.
- Συντάσσεται ένα πρόγραμμα (sketch) ανάλογα με τη λειτουργία που πρέπει να επιτευχθεί.
- Το sketch που έχει συνταχθεί, φορτώνεται στο Arduino board.
- Το Arduino board εκτελεί το πρόγραμμα που έχει φορτωθεί.

1.2.2.3. Δομή του Arduino (Structure) και εντολές

Η βασική δομή για το προγραμματισμό του Arduino είναι αρκετά απλή και λειτουργεί σε τουλάχιστον δύο μέρη. Αυτά τα δύο απαιτούμενα μέρη ή αλλιώς συναρτήσεις περικλείουν ένα μπλόκ δηλώσεων (statements). Γίνεται αρχικά η αρχικοποίηση των βιβλιοθηκών, βάσει των οποίων στηρίζονται οι εντολές ή οι συναρτήσεις που θα χρησιμοποιηθούν στην εκτέλεση του προγράμματος. Στη συνέχεια, αρχικοποιούνται οι μεταβλητές (αριθμητικές ή χαρακτήρων) που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα. Το 1^ο μέρος της βασικής δομής, περιλαμβάνει τη συνάρτηση void setup(), στην οποία οτιδήποτε δηλωθεί εκτελείται μια φορά μόνο, όσο εκτελείται όλο το πρόγραμμα. Το 2^ο μέρος περιλαμβάνει τη συνάρτηση void loop(), όπου εκεί εντάσσεται το κύριο μέρος προγράμματος που συνήθως περιλαμβάνει υπολογισμούς και ελέγχους, με τη βοήθεια κατάλληλων εντολών. Σε αυτό το κομμάτι, οι όποιες εντολές βρίσκονται εντός της void loop(), εκτελούνται συνεχώς [17].

```
void loop() {
  sensors.requestTemperatures();

  Celsius = sensors.getTempCByIndex(0);
  Fahrenheit = sensors.toFahrenheit(Celsius);

  Serial.print(Celsius);
  Serial.print(" C ");
  Serial.print(Fahrenheit);
  Serial.println(" F");

  delay(1000);
}
```

Σχήμα 18: Απεικόνιση εκτέλεσης εντολών σε μια συνάρτηση void loop() [17].

1.2.3. Η σημασία του ελέγχου στις μπαταρίες

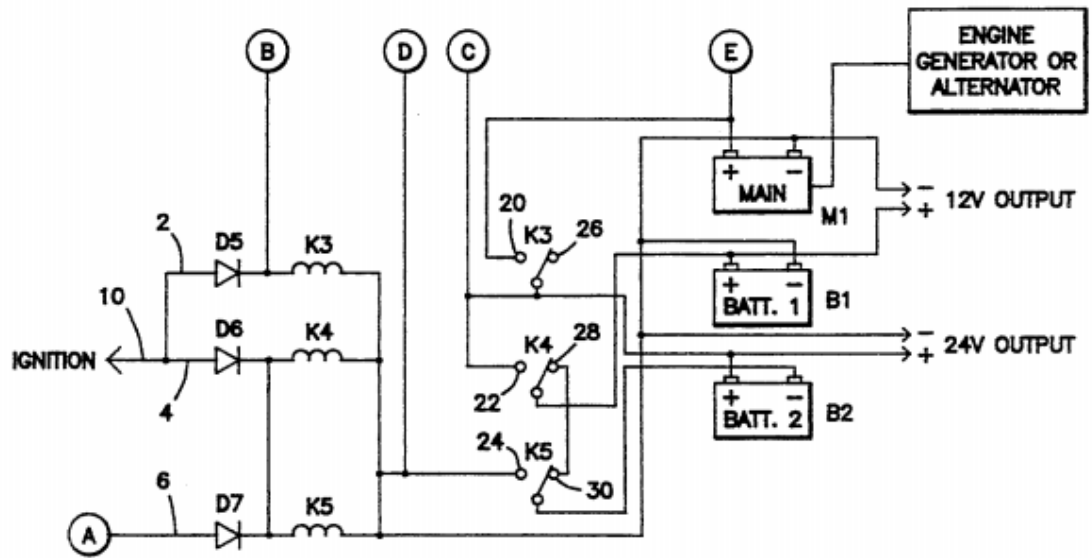
Η ανάγκη του ελέγχου στους συσσωρευτές, συνοδεύεται πολλές φορές με την έννοια ενός ευρύτερου συστήματος που ονομάζεται σύστημα διαχείρισης μπαταριών (Battery Management System - BMS). Υπάρχουν αρκετοί τύποι BMS που χρησιμοποιούνται για την αποφυγή ενδεχόμενης βλάβης σε μια μπαταρία. Ο πιο συνηθισμένος, είναι ένα σύστημα παρακολούθησης μπαταρίας που καταγράφει τις

βασικές λειτουργικές παραμέτρους όπως τάση, ρεύμα και εσωτερική θερμοκρασία της μπαταρίας μαζί με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Το BMS παρέχει επικοινωνία σε συσκευές προστασίας, έτσι ώστε τα κυκλώματα που παρακολουθούν τους κύκλους λειτουργίας της μπαταρίας, να παράγουν σήματα κατάλληλα ή ακόμα και να αποσυνδέουν τη μπαταρία από το φορτίο, αν κάποιες από τις παραμέτρους υπερβούν τις ανώτατες τιμές.

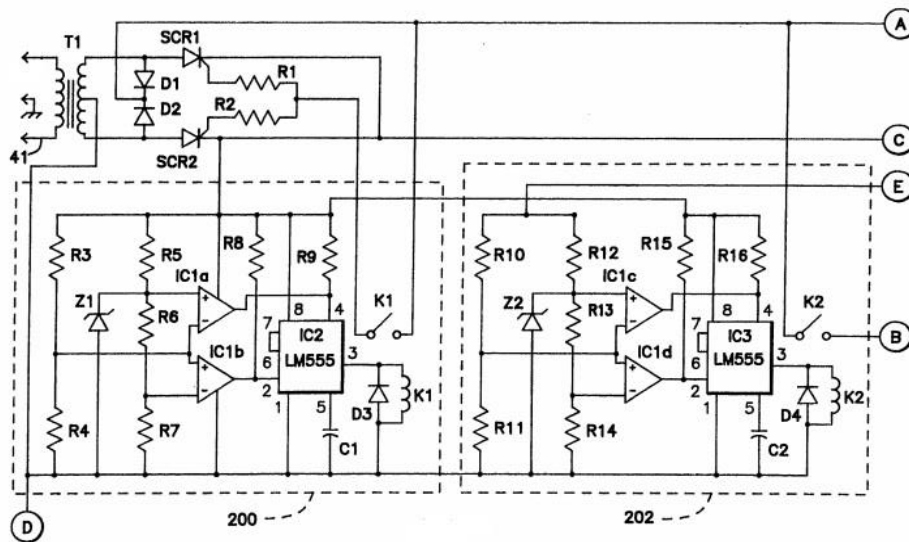
Παρότι υπάρχει πληθώρα εφαρμογών των συστημάτων διαχείρισης μπαταριών, τα βασικά καθήκοντα ενός τέτοιου συστήματος, θα μπορούσαν να οριστούν ως:

- Να εξασφαλίζεται ότι η ενέργεια της μπαταρίας είναι βελτιστοποιημένη για τη τροφοδοσία του φορτίου.
- Να διασφαλίζεται όσο το δυνατόν γίνεται, η αποφυγή κινδύνου ενδεχόμενης βλάβης στη μπαταρία.
- Να παρακολουθείται και να ελέγχεται η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή [18].

Προτού γίνει αναφορά στο πειραματικό μέρος, αξίζει να γίνει αναφορά σε μια παρόμοια διάταξη όπου πραγματοποιείται έλεγχος φόρτισης-εκφόρτισης σε μια συστοιχία μπαταριών. Η παρούσα διάταξη είναι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που επιτρέπει τη φόρτιση όλων των μπαταριών από μια κύρια μπαταρία συνδεδεμένη απευθείας με τη γεννήτρια ενός κινητήρα χωρίς να γίνεται αποσύνδεση των μπαταριών. Το πιο σημαντικό είναι ότι σε αυτό το σύστημα ελέγχου συνδέονται όλες τις μπαταρίες με την κύρια μπαταρία του κινητήρα, έτσι ώστε κάθε φορά που τίθεται σε λειτουργία ο κινητήρας, οι μπαταρίες να φορτίζονται αυτόματα. Το εν λόγω σύστημα έχει ευρεία εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία (π.χ. τροχόσπιτα) και σε σκάφη.



Σχήμα 19: Απεικόνιση του συστήματος αυτόματης φόρτισης-εκφόρτισης μπαταριών βαθέως κύκλου [19].



Σχήμα 20: Επέκταση της διάταξης αυτομάτου ελέγχου, από το προηγούμενο σχήμα [19].

Το σύστημα περιλαμβάνει μια γεννήτρια που συνδέεται με τον κινητήρα. Μια κύρια μπαταρία συνδέεται απευθείας με τη γεννήτρια. Το κύκλωμα μεταγωγής, συνδέεται με τη κύρια μπαταρία και με τη συστοιχία των μπαταριών που έχουν βοηθητικό ρόλο. Αυτή η συστοιχία αποτελείται από μπαταρίες βαθέως κύκλου, ενώ η κύρια μπαταρία αποτελεί μια μπαταρία μολύβδου-οξέος. Όταν η μίζα (ignition) εκκινήσει, ένα ρεύμα διέρχεται από τα πηνία K3, K4 και K5. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από αυτά, έχει ως αποτέλεσμα τα αντίστοιχα ρελέ K3, K4 και K5 να κλείσουν κύκλωμα, συνδέοντας με αυτό το τρόπο την κύρια μπαταρία και την συστοιχία μπαταριών παράλληλα. Ως αποτέλεσμα της απευθείας σύνδεσης της κύριας μπαταρίας με τη γεννήτρια, οι μπαταρίες B1 και B2 λόγω της παράλληλης σύνδεσης τους με την κύρια μπαταρία, θα φορτίζονται ταυτόχρονα με την κύρια μπαταρία.

Πιο συγκεκριμένα, τα πηνία K4 και K5 και οι αντίστοιχοι διακόπτες K4 και K5 εφόσον εκκινήσει η μίζα, τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τα πηνία, προκαλούν τα αντίστοιχα ρελέ να κλείσουν κύκλωμα και με αυτό το τρόπο οι μπαταρίες B1 και B2 συνδέονται παράλληλα. Αντίστοιχα, όταν η μίζα δεν εκκινήσει, δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο και τα ρελέ δεν κλείνουν κύκλωμα και οι μπαταρίες B1 και B2 συνδέονται σε σειρά. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με το πηνίο K3 και το αντίστοιχο ρελέ. Όταν δεν εκκινήσει η μίζα, το ρελέ K3 είναι ανοιχτό και με αυτό το τρόπο η κύρια μπαταρία είναι απομονωμένη από τις μπαταρίες B1 και B2. Πρακτικά η απομόνωση της κύριας μπαταρίας, επιτρέπει την εκφόρτιση των μπαταριών B1 και B2, χωρίς να επηρεάζεται το επίπεδο τάσης της κύριας μπαταρίας και έτσι δίνεται η δυνατότητα στην κύρια μπαταρία να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ για την εκκίνηση του κινητήρα. Στο Σχήμα 20, το κύκλωμα που περικλείεται από τη διακεκομμένη γραμμή με τον αριθμό 200 είναι το κύκλωμα φόρτισης των μπαταριών B1 και B2, ενώ το κύκλωμα που περικλείεται από τη διακεκομμένη γραμμή με τον αριθμό 202, αποτελεί το κύκλωμα που ελέγχει το ρεύμα της κύριας μπαταρίας κατά τη φόρτιση [19].

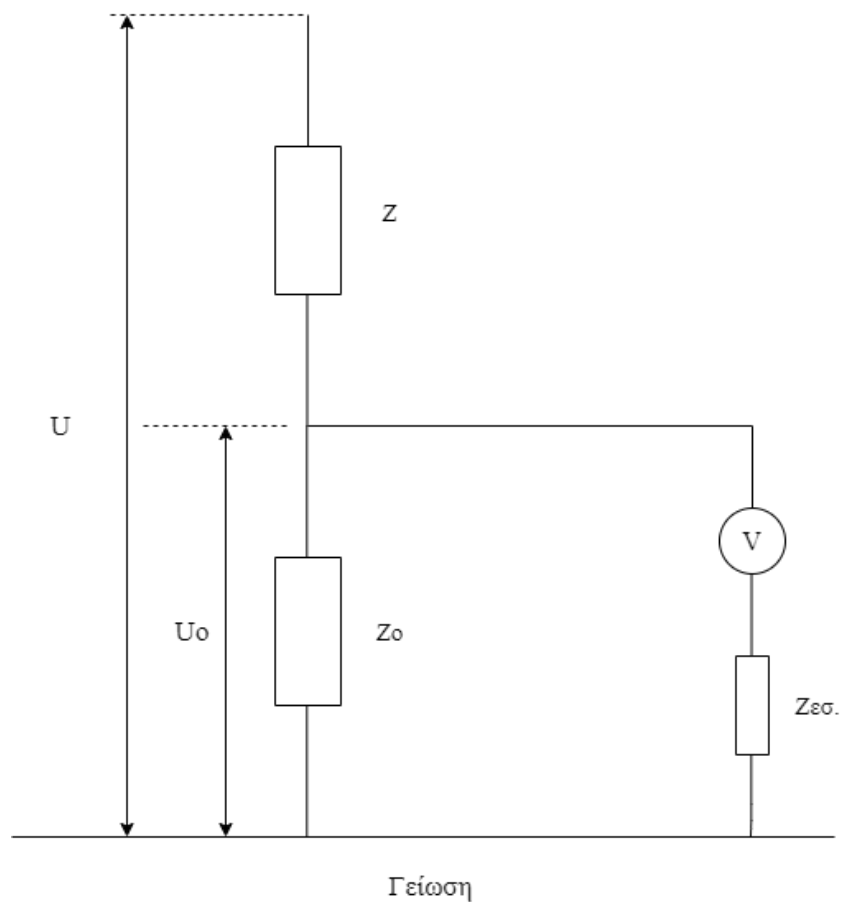
1.3.Μαθηματική μοντελοποίηση

Τα συστήματα διαχείρισης μπαταριών (BMS) όντας ενσωματωμένα συστήματα που εκτελούν αλγορίθμους σε πραγματικό χρόνο, έχουν ευρεία εφαρμογή στη βιομηχανία.

Διαχειρίζονται έναν συσσωρευτή, και μπορούν να συλλέξουν πληροφορίες που είναι χρήσιμες για την εξαγωγή κρίσιμων μεταβλητών όπως είναι το State-of-Health (SoH) και το State-of-Charge (SoC) [20]. Προτού όμως αναδειχθεί η σημασία των μεταβλητών αυτών, θα γίνει μια σύντομη περιγραφή πάνω στους διαιρέτες τάσης, μιας και μια τέτοια διάταξη αντιστάσεων, χρησιμοποιείται στο πειραματικό μέρος.

1.3.1. Διαιρέτες (καταμεριστές) τάσης

Το παρακάτω σχήμα, παριστάνει τη διάταξη ενός διαιρέτη ή καταμεριστή τάσης. Έστω ότι Z και Z_0 οι σύνθετες αντιστάσεις του καταμεριστή και στην έξοδο του συνδέεται ένα βολτόμετρο με εσωτερική αντίσταση $Z_{εσ}$.



Σχήμα 21: Απεικόνιση διαιρέτη τάσης [21].

Αν υποτεθεί ότι η $Z_{\varepsilon\sigma}$ είναι άπειρη, τότε:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{I(Z_0+Z)}{I Z_0} \rightarrow \frac{U}{U_0} = 1 + \frac{Z}{Z_0} = k \quad (3)$$

όπου k , ο λόγος διαίρεσης ή η σχέση καταμερισμού.

Αν πάλι υποτεθεί ότι η $Z_{\varepsilon\sigma}$ δεν είναι άπειρη, τότε:

$$\frac{U'}{U_0} = \frac{I(Z'_o+Z)}{I Z'_o} \rightarrow \frac{U'}{U_0} = 1 + \frac{Z}{Z'_o} = k' \quad (4)$$

$$\text{με } Z'_o = \frac{Z_0 Z_{\varepsilon\sigma}}{Z_0 + Z_{\varepsilon\sigma}}.$$

Οπότε η παραπάνω εξίσωση θα γίνεται [21]:

$$\frac{U'}{U_0} = 1 + \frac{Z}{Z_0} \frac{Z_0+Z_{\varepsilon\sigma}}{Z_{\varepsilon\sigma}} = 1 + \frac{Z}{Z_0} \left(1 + \frac{Z_0}{Z_{\varepsilon\sigma}}\right) = 1 + \frac{Z}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z_{\varepsilon\sigma}} = k' \quad (5)$$

Με τη χρήση του καταμεριστή τάσης, επιτυγχάνεται η υποβάθμιση της τάσης στην έξοδο. Στο πειραματικό μέρος, χρησιμοποιήθηκαν ωμικές αντιστάσεις με υψηλή τιμή της τάξης των $M\Omega$, ώστε το ρεύμα που θα διέρχεται να μην έχει υψηλή τιμή έντασης, αποφεύγοντας με αυτό το τρόπο να προκληθεί ζημιά στο Arduino.

1.3.2. State-of-Charge (SoC)

Μια από τις βασικές παραμέτρους αποτελεί το State-of-Charge (SoC), που υποδεικνύει την υπολειπόμενη χωρητικότητα της μπαταρίας. Μια αρκετά ακριβής εκτίμηση του SoC, μπορεί να συμβάλει στο καθορισμό μιας αποτελεσματικής στρατηγικής διαχείρισης που θα βοηθήσει στην αποφυγή ενδεχόμενης βλάβης στο κελί από υπερβολική

φόρτιση ή από υπερβολική εκφόρτιση [22]. Με άλλα λόγια, το SoC αναφέρεται στο λόγο της τρέχουσας εναπομείνουσας χωρητικότητας της μπαταρίας προς τη διαθέσιμη χωρητικότητα κάτω από ορισμένες συνθήκες (θερμοκρασία, αναλογία φόρτισης και εκφόρτισης κ.α.).

Από τη μαθηματική σκοπιά, η παράμετρος SoC εκφράζεται από τη παρακάτω εξίσωση [23]:

$$SoC = \frac{Q_c}{Q} 100\% \quad (6)$$

Όπου Q_c , η εναπομείνουσα χωρητικότητα και Q , η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή.

Πίνακας 3: Μέθοδοι εκτίμησης παραμέτρου SoC [23].		
ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	ΜΟΝΤΕΡΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ	ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΕ ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΙΔΕΕΣ
Τάση ανοιχτού κυκλώματος	Μέθοδος νευρωνικών δικτύων	Ανάλυση κυρίων εξαρτημάτων
Μέθοδος εσωτερικής αντίστασης	Μέθοδος φίλτρου Kalman	Αλγόριθμος Fuzzy Logic
Μέθοδος εκφόρτισης	Μέθοδος γραμμικού μοντέλου	Αλγόριθμος συνδυασμού

Οι πρώτες μέθοδοι προσδιορισμού αυτής της παραμέτρου, βασίζονται στην μέθοδο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (Open Circuit Voltage - OCV) και στη μέθοδο μέτρησης των αμπερ-ωρών.

Η μέθοδος που βασίζεται στο OCV, απαιτεί μεγάλη περίοδο ανάπαυσης του κελιού, και ως εκ τούτου δεν είναι πρακτικό για εφαρμογές όπως τα ηλεκτρονικά αυτοκίνητα. Επιπλέον, η απόδοση της μεθόδου που βασίζεται στο OCV γίνεται αυστηρότερη όταν η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης της μπαταρίας είναι επίπεδη, όπως συμβαίνει στις μπαταρίες λιθίου (LiFePO₄). Η μέθοδος μέτρησης των αμπερ-ωρών, εκτιμά το SoC ενσωματώνοντας τη ροή του ρεύματος εισόδου και εξόδου της μπαταρίας. Σύμφωνα με πληροφορίες, αυτή η μέθοδος έχει αρκετούς θεωρητικούς περιορισμούς και είναι μια μέθοδος ανοιχτού βρόχου. Επιπλέον, η ακρίβεια της εκτίμησης εξαρτάται από την αρχική SoC. Αυτή η μέθοδος έχει χαμηλή αντοχή έναντι της ληθθείσας ποιότητας σήματος, καθώς και των αρχικών πληροφοριών της παραμέτρου SoC. Αναφορικά, άλλες μέθοδοι που αποτελούν κατηγορία από μόνες τους είναι η μέθοδος τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Network–ANN), η μέθοδος Fuzzy Logic και η Support Vector Machine (SVM).

1.3.3. State-of-Health (SoH)

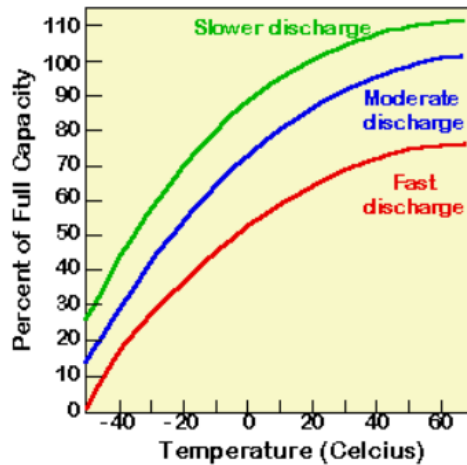
Η παράμετρος κατάστασης υγείας (State of Health- SoH) περιγράφει τη φυσική κατάσταση μιας μπαταρίας, που χαρακτηρίζεται από την κατάσταση της μπαταρίας, όπως η απώλεια ονομαστικής χωρητικότητας μέχρι την εξωτερική συμπεριφορά της μπαταρίας. Σε αντίθεση με την παράμετρο SoC, δεν υπάρχει ξεκάθαρος και σαφής ορισμός της παραμέτρου SoH. Ένας γενικός ορισμός της παραμέτρου SoH είναι ότι αντικατοπτρίζει την κατάσταση «υγείας» μιας μπαταρίας ως προς την ικανότητά της να παρέχει συγκεκριμένη απόδοση σε σύγκριση με μια νέα μπαταρία, σε συνθήκες αναφοράς. Για παράδειγμα, η παράμετρος SoH σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων, χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει την ικανότητα αυτονομίας του οχήματος. Η απόσταση που έχει διανυθεί μεταφράζεται σε ένδειξη της χωρητικότητας του συσσωρευτή. Οι μελετητές και οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν το ποσοστό της ονομαστικής

χωρητικότητας ως το όριο υγείας της μπαταρίας. Όταν η χωρητικότητα μειώνεται στο 80% της αρχικής χωρητικότητας ζωής μετά τον κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης, ορίζεται ως αστοχία μπαταρίας. Ωστόσο, μελέτες έχουν ορίσει διαφορετικούς κανόνες ή δείκτες για τον ποσοτικό προσδιορισμό της SoH όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας, τον εξοπλισμό δοκιμών και τις διαφορετικές εφαρμογές [24].

1.3.4. Depth-of-Discharge (DoD)

Η παράμετρος Depth-of-Discharge (DoD), σε συνδυασμό με την χωρητικότητα της μπαταρίας είναι μια θεμελιώδης παράμετρος χρήσιμη όπως στο σχεδιασμό μιας συστοιχίας μπαταριών για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, καθώς η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από την μπαταρία υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την χωρητικότητα της μπαταρίας με το βάθος της εκφόρτισης. Οι μπαταρίες κατηγοριοποιούνται είτε ως μπαταρίες βαθέως κύκλου (deep-cycle batteries) είτε ρηχού κύκλου (shallow-cycle batteries). Μια μπαταρία βαθέως κύκλου θα έχει βάθος εκφόρτισης (DoD) μεγαλύτερο από 50% και μπορεί να φτάσει το 80%. Για την επίτευξη της ίδιας χρησιμοποιήσιμης χωρητικότητας, μια συστοιχία μπαταριών ρηχού κύκλου πρέπει να έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από μια συστοιχία μπαταριών βαθέως κύκλου.

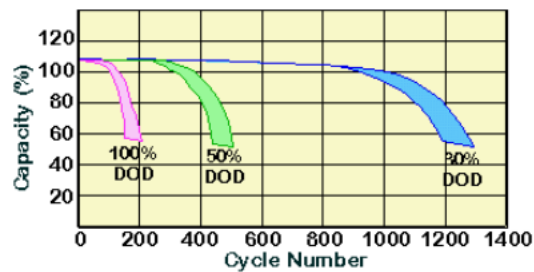
Εκτός από το βάθος εκφόρτισης και την ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας, η διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας επηρεάζεται έντονα από το ρυθμό εκφόρτισης της μπαταρίας και τη θερμοκρασία λειτουργίας της. Η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται περίπου κατά 1% ανά βαθμό κελσίου, κάτω από τους 20 ° C. Ωστόσο, οι υψηλές θερμοκρασίες δεν αποτελούν ιδανικές συνθήκες για μπαταρίες, καθώς αυτές επιταχύνουν τη γήρανση, την αυτοεκφόρτιση και τη χρήση ηλεκτρολυτών. Το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 22), δείχνει την επίδραση της θερμοκρασίας της μπαταρίας και του ρυθμού εκφόρτισης στη χωρητικότητα της μπαταρίας [25].



Σχήμα 22: Γράφημα που απεικονίζει τη σχέση με τη χωρητικότητα, τη θερμοκρασία και του ρυθμού εκφόρτισης [25].

Η παράμετρος DoD, συσχετίζεται άμεσα με τον χρόνο ζωής της μπαταρίας. Με την πάροδο του χρόνου, η χωρητικότητα της μπαταρίας πέφτει λόγω θείωσης της. Η υποβάθμιση της χωρητικότητας της μπαταρίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σχέση μεταξύ των ακόλουθων παραμέτρων:

- i. Τις φορτίσεις / εκφορτίσεις που έγιναν στη μπαταρία.
- ii. Της παραμέτρου DoD της μπαταρίας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της.
- iii. Την έκθεσή της σε παρατεταμένες περιόδους χαμηλής εκφόρτισης.
- iv. Τη μέση θερμοκρασία της μπαταρίας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της.



Σχήμα 23: Γράφημα που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της χωρητικότητας, της DOD και του κύκλου ζωής μιας μπαταρίας ρηχού κύκλου [25].

Το παραπάνω γράφημα (Σχήμα 23), δείχνει την εξέλιξη λειτουργίας της μπαταρίας ως έναν αριθμό κύκλων και βάθος εκφόρτισης για μια μπαταρία μολύβδου-οξέος. Μια μπαταρία μολύβδου-οξέος βαθέως κύκλου, θα πρέπει να διατηρεί διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 1.000 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης, ακόμη και σε DoD πάνω από 50% [24].

1.3.5. Νόμος του Peukert (Peukert Law)

Ο νόμος του Peukert εκφράζει την εμπειρική αλλαγή της διαθέσιμης χωρητικότητας ως προς διαφόρους ρυθμούς εκφόρτισης σε σχέση με έναν ρυθμό αναφοράς. Ο Wilhem Peukert, ένας Γερμανός επιστήμονας (1855-1932), γνώριζε ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα μιας μπαταρίας μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού εκφόρτισης και επινόησε έναν τύπο για τον υπολογισμό των απωλειών σε αριθμούς. Ο νόμος εφαρμόζεται κυρίως για τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος και βοηθά στην εκτίμηση του χρόνου λειτουργίας υπό διαφορετικά φορτία εκφόρτισης.

Ο νόμος Peukert λαμβάνει υπόψη την εσωτερική αντίσταση και το ρυθμό επαναφοράς μιας μπαταρίας. Μια τιμή κοντά στο ένα, υποδεικνύει μια μπαταρία με καλή απόδοση και ελάχιστη απώλεια. Ένας υψηλότερος αριθμός αντικατοπτρίζει μια λιγότερο αποδοτική μπαταρία. Ο νόμος του Peukert είναι εκθετικός. Οι μετρήσεις για τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος κυμαίνονται μεταξύ 1,3 και 1,5 και αυξάνονται με τη πάροδο του χρόνου. Η θερμοκρασία επηρεάζει επίσης τις μετρήσεις. Για παράδειγμα, μια μπαταρία μολύβδου-οξέος 120Ah που αποφορτίζεται στα 15A θα πρέπει να διαρκεί 8 ώρες. Η αναποτελεσματικότητα που προκαλείται από το φαινόμενο Peukert μειώνει το χρόνο εκφόρτισης.

Ο νόμος του Peukert μπορεί να εκφραστεί με πολλούς τρόπους μαθηματικά. Ο πιο γνωστός είναι με τη παρακάτω μαθηματική εξίσωση και ουσιαστικά δείχνει πόσο μια μπαταρία, μπορεί να διαρκέσει κάτω από ένα ορισμένο φορτίο [26].

$$t = H \left(\frac{C}{IH}\right)^k \quad (7)$$

Όπου: t ο χρόνος εκφρασμένος σε ώρες, H ο χρόνος εκφόρτισης, όπου οι προδιαγραφές ορίζουν σε Ah (για παράδειγμα, αν έχουμε μια 100Ah μπαταρία σε έναν ρυθμό εκφόρτισης 20 ωρών τότε το H θα είναι ίσο με 20), C η χωρητικότητα της μπαταρίας εκφρασμένη σε Ah βασισμένη σε συγκεκριμένο χρόνο εκφόρτισης, I το ρεύμα για το οποίο επιλύεται η εξίσωση. Για παράδειγμα, θα ήταν χρήσιμο να ήταν γνωστή η διάρκεια εκφόρτισης μιας μπαταρίας, ενώ έχει σχεδιαστεί να παρέχει 10A και k ο εκθέτης Peukert. Κάθε μπαταρία έχει το δικό της εκθέτη Peukert και τις περισσότερες φορές παρέχεται από τον κατασκευαστή [27].

2. Πειραματικό μέρος

2.1. Διάταξη και επιμέρους τμήματα

Στο πειραματικό μέρος θα αναλυθεί η αυτοματοποιημένη διάταξη φόρτισης-εκφόρτισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος. Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει τη μπαταρία μολύβδου-οξέος (12V, 1,2Ah), η οποία κατά τη διάρκεια της φόρτισης θα συνδέεται με το κύκλωμα φόρτισης που περιλαμβάνει τη μπαταρία και το τροφοδοτικό πάγκου (Power Supply Unit) και κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης η μπαταρία θα συνδέεται με ένα φορτίο κατάλληλο για τις ανάγκες της διάταξης (7,5 – 15 V, 0-4 A). Η σύνδεση της μπαταρίας με τα επιμέρους κυκλώματα, θα γίνεται με τη βοήθεια μιας πλακέτας με 2 ρελέ (2-channel relay module), όπου ανάλογα με το επίπεδο της τάσης που βρίσκεται η μπαταρία, τα ρελέ δέχονται τις ανάλογες εντολές από το Arduino, ώστε να κλείνουν ή να ανοίγουν κύκλωμα με τα επιμέρους κυκλώματα. Η τάση της μπαταρίας, αλλά και ο χρόνος λειτουργίας και η κατάσταση του κυκλώματος (δηλαδή αν βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης ή εκφόρτισης) καταγράφονται ανά ένα λεπτό σε μια κάρτα microSD, όπου εκεί δημιουργούνται 2 αρχεία .txt (ένα αρχείο για τη καταγραφή των τάσεων της μπαταρίας κατά τη φόρτιση και ένα αρχείο για τη καταγραφή των τάσεων κατά την εκφόρτιση) και μέσω ενός διαιρέτη τάσης (λόγος διαίρεσης = 0,2) οδηγείται σε μια αναλογική είσοδο στο Arduino. Η διάταξη περιλαμβάνει επίσης και μια οθόνη LCD 16x2, για την απεικόνιση του επιπέδου της τάσης της μπαταρίας ανά ένα λεπτό, το χρονικό διάστημα που έχει διανυθεί από την αρχή της λειτουργίας της διάταξης σε λεπτά και τη κατάσταση που βρίσκεται η μπαταρία (αν είναι σε κατάσταση φόρτισης ή εκφόρτισης). Επιπροσθέτως, κατασκευάστηκε μια πλακέτα για τις επιμέρους συνδέσεις του Arduino με την οθόνη LCD και τα ρελέ, αλλά και για τις συνδέσεις της μπαταρίας, των ρελέ, του τροφοδοτικού και του φορτίου. Για τις συνδέσεις της μπαταρίας, του τροφοδοτικού και του φορτίου στη πλακέτα, προστέθηκαν μπόρνες (banana plugs).

Σκοπός της διάταξης είναι η λειτουργία ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου που θα ελέγχει και θα καταγράφει την τάση της μπαταρίας, στις λειτουργίες της φόρτισης και της εκφόρτισης υπό σταθερή ένταση (constant current). Η χρησιμότητα μιας τέτοιας

διάταξης, έχει να κάνει με τον έλεγχο των επιπέδων της τάσης του συσσωρευτή, που με τη σειρά του οδηγεί στην αποφυγή υπερφόρτισης (overcharge) αλλά και στην αποφυγή υπερεκφόρτισης (overdischarge).

2.1.1. Λίστα υλικών (Bill of materials)

Ο παρακάτω πίνακας, παρουσιάζει τη λίστα υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση συνολικά της αυτοματοποιημένης διάταξης:

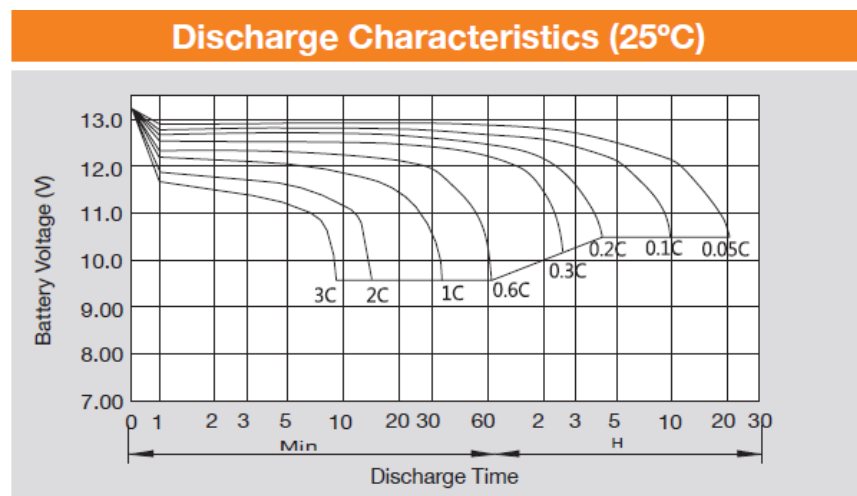
Πίνακας 4: Λίστα υλικών.	
Υλικό	Ποσότητα
Μπαταρία μολύβδου-οξέος (12V, 1,2Ah)	1
Arduino UNO	1
Τροφοδοτικό πάγκου (LABORATORY DC POWER SUPPLY)	1
Φορτίο (Dummy Load 7,5V-15V , 0-4A)	1
Πλακέτα PCB (12,2cm x 17,1cm)	1
2 channel relay module (30V DC, 10A)	1
Αντιστάσεις (1,8MΩ \pm 5%, 470kΩ \pm 5%)	2
Αντίσταση ισχύος (100mΩ , 25W)	1
Οθόνη LCD 16 x 2 (8cm x 3,5cm)	1
Μπόρνα (banana plug, διάμετρος 30mm)	6
Καλώδιο banana-plug to banana-plug (42,1 cm)	4
Καλώδια banana-plug to alligator clip (92,4 cm)	2
Project Box (120mm x 170mm)	1

2.1.2. Περιγραφή των στοιχείων διάταξης

Σε αυτό το εδάφιο, παρουσιάζονται και αναλύονται, όλα τα στοιχεία της διάταξης που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της, με σκοπό τη δυνατότητα λήψης μετρήσεων.

2.1.2.1. Μπαταρία μολύβδου-οξέος (12V, 1,2Ah)

Η μπαταρία μολύβδου-οξέος, είναι από τα κυρίαρχα στοιχεία της διάταξης και πάνω σε αυτή θα γίνεται ο έλεγχος, μιας και θα ελέγχονται τα επίπεδα της τάσης της.



Σχήμα 24: Χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης της μπαταρίας σε διάφορα C-Rates [6].

Η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε έχει ονομαστική τάση 12V, χωρητικότητα 1,2Ah και το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα φόρτισης, σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή, είναι 0,36A. Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης της μπαταρίας στα διάφορα C rates, όπως αυτές απεικονίζονται στο datasheet του κατασκευαστή.

2.1.2.2. Καταναλωτής (φορτίο)

Η μπαταρία μολύβδου-οξέος κατά τη φόρτιση, συνδέεται με ένα τροφοδοτικό πάγκου και θα φορτίζεται υπό σταθερή ένταση 0,3A. Κατά την εκφόρτιση ο συσσωρευτής, συνδέεται με ένα φορτίο (Dummy Load) κατάλληλο για την υλοποίηση της διάταξης (7,5V – 15V , 0-4 A) και το οποίο απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 25).

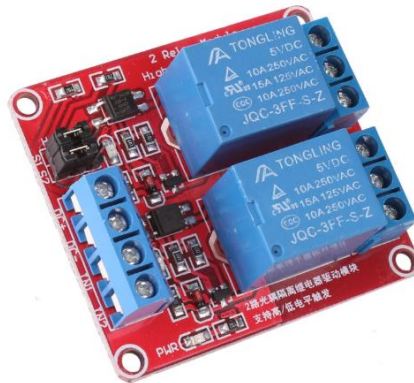


Σχήμα 25: Το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη.

Ο καταναλωτής, μαζί με τη μπαταρία και το ρελέ εκφόρτισης, είναι τα στοιχεία που συνθέτουν το κύκλωμα εκφόρτισης, κατά την οποία η μπαταρία θα εκφορτίζεται υπό σταθερή ένταση. Η έννοια της εκφόρτισης υπό σταθερή ένταση, είναι ότι δεν χρειάζεται να ρυθμίζεται συνεχώς το ρεύμα καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας και έτσι στη συνέχεια μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση των μετρήσεων που πάρθηκαν με τις καμπύλες εκφόρτισης της μπαταρίας του κατασκευαστή.

2.1.2.3. Πλακέτα με τα ρελέ (2-channel relay module)

Σημαντικό ρόλο στο κομμάτι του ελέγχου, αποτελεί η χρήση της πλακέτας των ρελέ (2-channel relay module). Η εν λόγω πλακέτα περιλαμβάνει 2 ρελέ κατάλληλα για την υλοποίηση της διάταξης (30V DC, 10A).



Σχήμα 26: Το 2-channel relay module που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη [28].

Η συγκεκριμένη πλακέτα, περιλαμβάνει στη μια μεριά 4 υποδοχές (DC+, DC-, IN1 & IN2) και στην άλλη μεριά της επαφές C, NO και NC. Το DC+, συνδέεται με τη τροφοδοσία 5V από το Arduino, το DC- στη γείωση (ground) και τα IN1 & IN2 είναι εκείνα που λαμβάνουν εντολή από το Arduino UNO από τις ψηφιακές εξόδους του. Τα IN1 & IN2, δέχονται εντολές από το Arduino HIGH ή LOW. Στη περίπτωση που δοθεί εντολή HIGH, τότε βραχυκυκλώνονται οι επαφές C και NO, ενώ στη περίπτωση που δοθεί εντολή LOW, τότε βραχυκυκλώνονται οι επαφές C και NC. Στην αυτοματοποιημένη διάταξη, το IN1 αφορά το 1^ο ρελέ, που είναι εκείνο που θα συνδέει τη μπαταρία με το κύκλωμα εκφόρτισης και από το πρόγραμμα που κατασκευάστηκε, το IN1 θα δέχεται εντολή από το pin εξόδου 2, ενώ το IN2 αφορά το 2^ο ρελέ, που είναι εκείνο που θα συνδέει τη μπαταρία με το κύκλωμα φόρτισης και θα δέχεται εντολή από το pin εξόδου 3. Συγκριτικά με τη διάταξη που παρουσιάστηκε στα σχήματα 19 και 20, η πλακέτα με τα ρελέ μαζί με το Arduino, προσδίδουν ευελιξία στη διάταξη που υλοποιήθηκε, καθώς ο έλεγχος γίνεται, εκτός από τη πλακέτα των ρελέ, με τη βοήθεια του προγράμματος βάσει

του οποίου προγραμματίζεται ο μικροελεγκτής και σε ενδεχόμενη αλλαγή του τύπου του συσσωρευτή, αρκεί να πραγματοποιηθεί αλλαγή στις εντολές του προγράμματος.

2.1.2.4. Πλακέτα microSD (microSD module)

Η πλακέτα της microSD είναι εκείνη που θα βοηθήσει στη δημιουργία των αρχείων .txt και συνεπώς στη καταγραφή των μετρήσεων.



Σχήμα 27: Απεικόνιση του microSD module που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη [29].

Το συγκεκριμένο module έχει την ακόλουθη συνδεσμολογία στο Arduino, για την ορθή λειτουργία του:

- 3V → 3V3 pin
- GND → GND pin
- CLK → D13 pin
- DO → D12 pin
- DI → D11 pin
- CS → D10 pin

Για να αναγνωριστεί η κάρτα microSD από το module, θα πρέπει η κάρτα να είναι διαμορφωμένη σε FAT32 και όχι NTFS. Τα δεδομένα που θα εμφανίζονται στα αρχεία .txt θα έχουν την εξής μορφή, όπως απεικονίζεται παρακάτω:

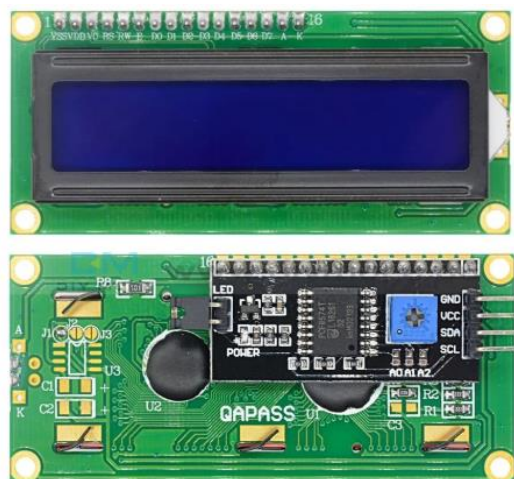
S.N	Voltage	Time(m)	Condition
1	11.64	1	Charge
2	11.67	2	Charge
3	11.71	3	Charge
4	11.74	4	Charge

Σχήμα 28: Η φόρμα με την οποία απεικονίζονται τα δεδομένα στο αρχείο .txt.

Από εκεί συλλέγονται τα δεδομένα, προκειμένου να σχεδιαστούν οι γραφικές παραστάσεις και να εξαχθούν τα ανάλογα συμπεράσματα. Σε σύγκριση με τη διάταξη που παρουσιάστηκε στα σχήματα 19 και 20, ο ρόλος της πλακέτας microSD είναι αξιοσημείωτος, καθώς τα κείμενα .txt που δημιουργούνται δίνουν τη πληροφορία για τη κατάσταση του συσσωρευτή και τα επίπεδα της τάσης και εφόσον αξιοποιηθούν οι πληροφορίες αυτές μπορούν να εξαχθούν αποτελέσματα και συμπεράσματα για την κατάσταση του συσσωρευτή (αν π.χ. χρειάζεται να αντικατασταθεί κ.α.).

2.1.2.5. Η οθόνη LCD 16x2

Η οθόνη LCD 16x2, χρησιμοποιείται για την καλύτερη διεπαφή του συστήματος με το χρήστη. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην οθόνη ανά λεπτό, όπως ακριβώς συμβαίνει με την κάρτα microSD.



Σχήμα 29: Η οθόνη LCD 16x2 με το ενσωματωμένο κύκλωμα [30].

Η οθόνη που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα. Στο πίσω μέρος υπάρχουν 4 pins (GND, VCC, SDA & SCL). Τα 2 τελευταία pins είναι αυτά που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση δεδομένων. Η συνδεσμολογία που έγινε στη διάταξη είναι η ακόλουθη:

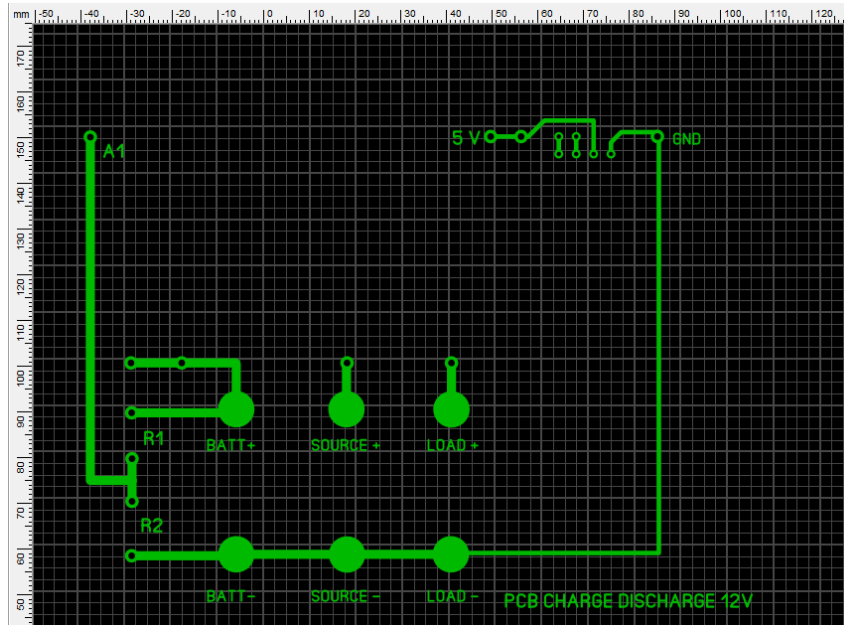
- GND → GND pin
- VCC → 5V pin
- SDA → A4 pin
- SCL → A5 pin

Αξίζει να σημειωθεί πως ο ρόλος της οθόνης, είναι η απεικόνιση ανά ένα λεπτό των μετρήσεων που λαμβάνονται και καταγράφονται στην κάρτα microSD, κάνοντας με αυτό τον τρόπο πιο εύκολη τη διεπαφή της διάταξης με το χρήστη, κάτι που δεν υπάρχει στη διάταξη που παρουσιάστηκε στα σχήματα 19 και 20.

2.1.2.6. Η πλακέτα PCB (Printed Circuit Board)

Για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων μεταξύ των στοιχείων της διάταξης, υλοποιήθηκε και μια PCB πλακέτα, πάνω στην οποία υπάρχουν μπόρνες (banana plugs) για τις συνδέσεις της μπαταρίας, του τροφοδοτικού και του φορτίου. Αρχικά υλοποιήθηκε μια πλακέτα, η οποία περιείχε μόνο τις μπόρνες για τον συσσωρευτή, το τροφοδοτικό και το φορτίο, το διαίρητη τάσης και ένα pin για το A1 του Arduino. Ωστόσο, για τις επιμέρους συνδέσεις των ρελέ (C και NO), χρειάστηκαν επιπλέον καλώδια. Έτσι, για την αποφυγή χρήσης περισσότερων καλωδίων, για την απλούστευση της υλοποίησης και την τοποθέτηση της πλακέτας των ρελέ και της οθόνης, σχεδιάστηκε μια νέα πλακέτα, με τη μάσκα της (PCB layout) να απεικονίζεται στο Σχήμα 28.

Έγινε εγκατάσταση του καταμεριστή τάσης (αντιστάσεις R1 & R2) και τοποθετήθηκαν ακίδες (pins) για τις επιμέρους συνδέσεις, A1 pin (έξοδος του διαίρητη τάσης), 5V και GND για τις ανάγκες λειτουργίας των πλακετών με τα ρελέ και την οθόνη αλλά και της γείωσης του κυκλώματος, A4 & A5 pins για την οθόνη LCD και τέλος pins για τα C και NO όπου εκεί θα γίνουν οι συνδέσεις για τα ρελέ.



Σχήμα 30: Το τελικό PCB layout όπως σχεδιάστηκε.

Τα 2 pins που συνδέονται με το BATT + , είναι τα common pins από τα ρελέ και στα SOURCE + και LOAD + θα είναι τα NO pins των ρελέ, της φόρτισης και της εκφόρτισης αντίστοιχα. Στο κομμάτι της σχεδίασης οι αγωγοί χαλκού που σχεδιάστηκαν έχουν πάχος 2,0mm και είναι αρκετό σαν διάσταση αν υπολογιστεί ότι οι μέγιστες τιμές ρευμάτων δε ξεπερνούν τα 1,5A. Στο κομμάτι που συνδέεται η οθόνη, το πάχος των διαύλων είναι 1,0mm μιας και εκεί οι εντάσεις είναι πολύ μικρότερες. Οι διάμετροι που επιλέχθηκαν για όλα τα pins είναι 3mm η διάμετρος, με εξαίρεση τα pins της οθόνης LCD όπου επιλέχθηκαν pads με διάμετρο 2mm και αυτό διότι η αποστάσεις μεταξύ των pins της οθόνης είναι πολύ κοντινές. Οι αποστάσεις μεταξύ των pins της LCD είναι 3,2mm. Τέλος για τις μπόρνες, επιλέχθηκαν pads με διάμετρο 8mm, μέγεθος ικανό για την τοποθέτησή τους. Ο σχεδιασμός τους PCB layout, έγινε με τη βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος Sprint-Layout 6.0.

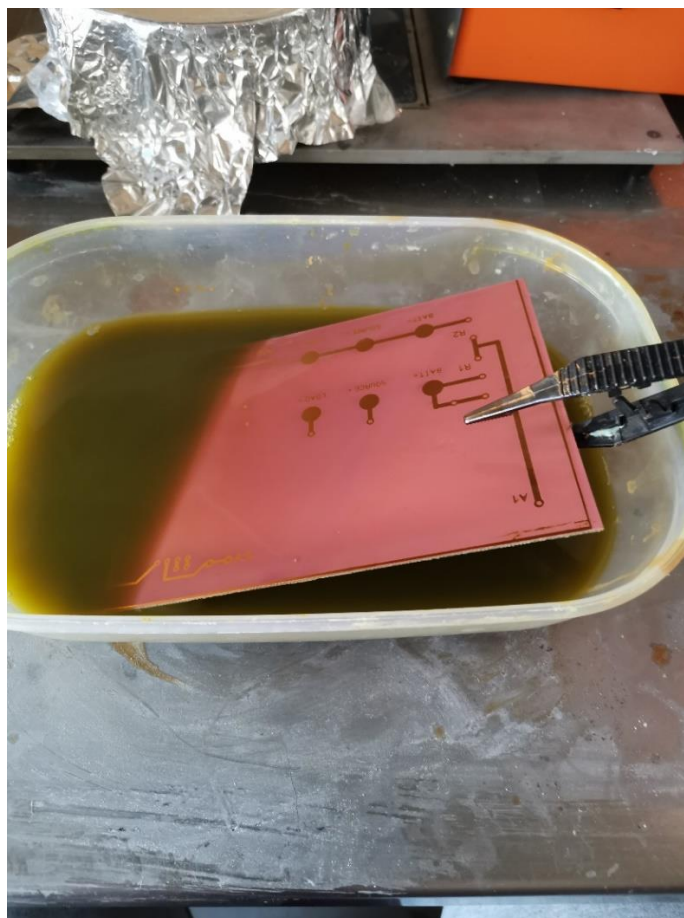
Αφού έγινε ο σχεδιασμός της πλακέτας, ακολούθησε η κοπή της πλακέτας χαλκού στις κατάλληλες διαστάσεις που αναφέρθηκαν πιο πάνω και με αυτό το τρόπο ξεκίνησε η διαδικασία δημιουργίας της πλακέτας, ξεκινώντας από την αποτύπωση του σχεδίου πάνω στη πλακέτα που έγινε με τη βοήθεια φωτοευαίσθητου μηχανήματος.



Σχήμα 31: Το φωτοευαίσθητο μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση του σχεδίου στη πλακέτα.

Στο φωτοευαίσθητο μηχάνημα έμεινε 5 λεπτά, μέχρι να τυπωθεί το σχέδιο πάνω στη πλακέτα. Αφού ολοκληρώθηκε αυτή η διαδικασία, στη συνέχεια έγινε εμφάνιση του κυκλώματος με τη βοήθεια καυστικού νατρίου (NaOH) και νερού. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν 100gr καυστικού νατρίου σε μορφή σκόνης διαλυμένο σε 500ml νερού. Σε αυτό το διάλυμα, η πλακέτα έμεινε αυστηρά για 10 λεπτά.

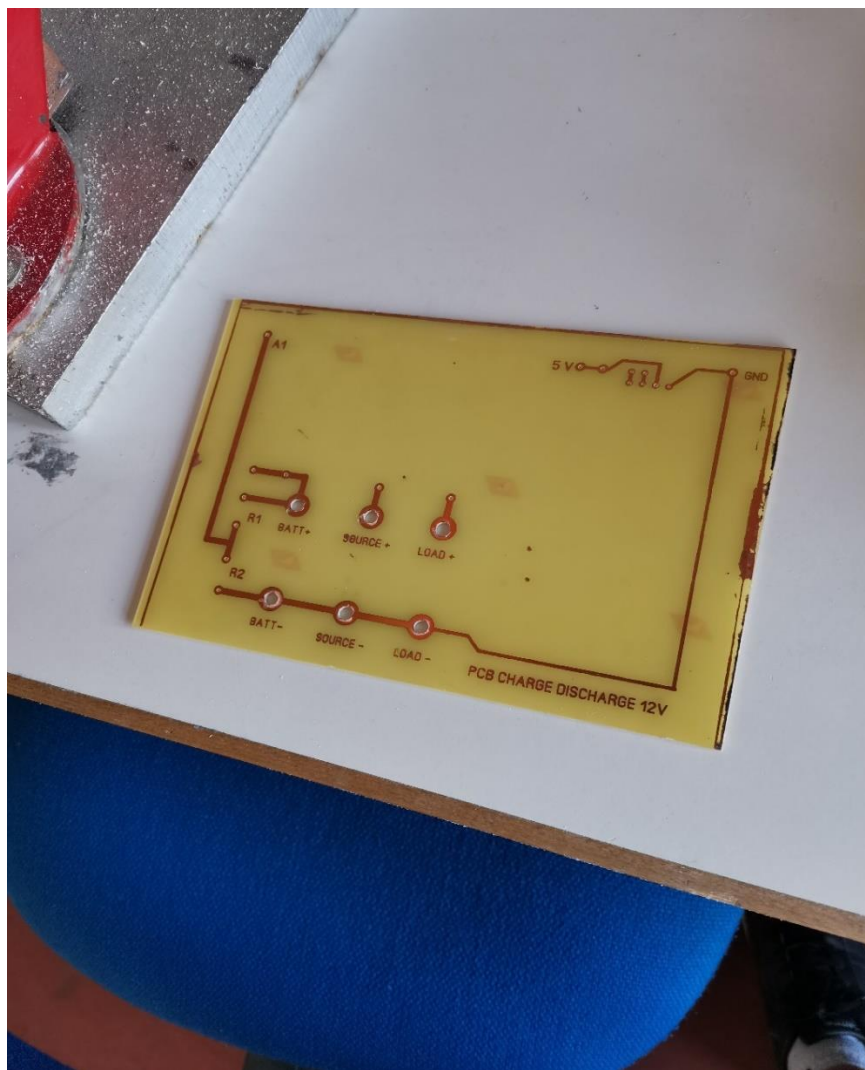
Αφού τελείωσε η προηγούμενη διαδικασία, η πλακέτα πλένεται με απιονισμένο νερό και έπειτα θα εισαχθεί σε ένα νέο διάλυμα, προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία της αποχάλκωσης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια τριχλωριούχου σιδήρου ($FeCl_3$) σε μορφή σκόνης και με τη προσθήκη απιονισμένου νερού. Οι ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 150gr σκόνης τριχλωριούχου σιδήρου σε 400ml απιονισμένου νερού.



Σχήμα 32: Αποχάλκωση της πλακέτας, μετά την τύπωση του σχεδίου.

Κατά τη διαδικασία αυτή, απαιτείται υπομονή και προσοχή καθότι η διαδικασία της αποχάλκωσης διήρκτησε περισσότερο από 2 ώρες και αν δεν τοποθετηθούν οι σωστές αναλογίες ή η πλακέτα ξεχαστεί μέσα στο διάλυμα, τότε πολύ πιθανό να αποχαλκωθούν και οι δίαυλοι χαλκού που σχεδιάστηκαν. Σε όλη αυτή τη διαδικασία, βοηθάει πάρα πολύ η ανακίνηση της πλακέτας σε συνεχή βάση.

Μετά από περίπου 2 ώρες, το αποτέλεσμα που βγήκε εμφανίζεται στη παρακάτω φωτογραφία και ακολούθησε το άνοιγμα των οπών στη πλακέτα με τη βοήθεια ενός dremel, για να είναι δυνατή η τοποθέτηση των υλικών.



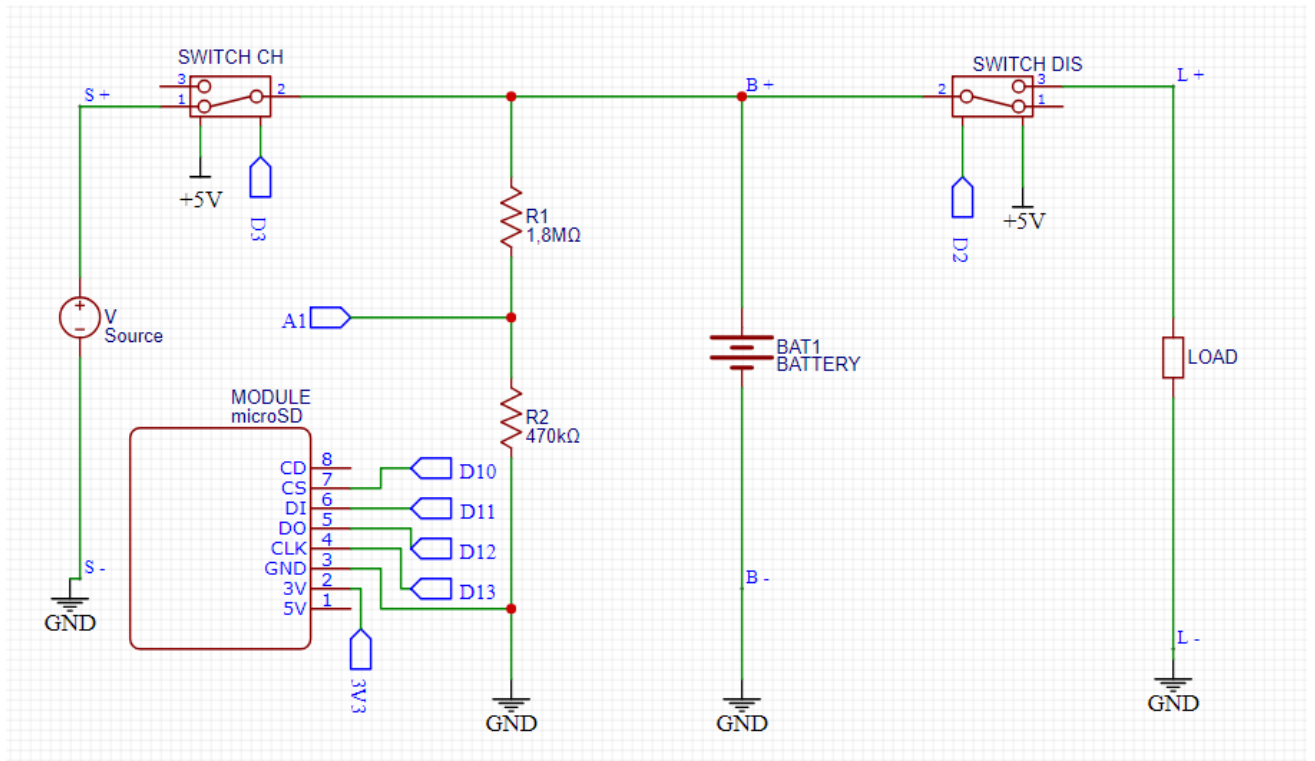
Σχήμα 33: Απεικόνιση της πλακέτας, μετά την αποχάλκωση και το άνοιγμα των οπών.

Αν έπρεπε να διαπιστωθεί ότι η διαδικασία της αποχάλκωσης όδευε στο επιθυμητό αποτέλεσμα, τότε η πλακέτα έβγαινε για λίγα δευτερόλεπτα από το διάλυμα τριχλωριούχου σιδήρου, ξεπλενόταν αρχικά με απιονισμένο νερό και στη συνέχεια με προπανόνη ή ακετόνη (C_3H_6O), προτού ξαναμπεί στο αρχικό διάλυμα για αποχάλκωση.

2.1.3. Αυτοματοποιημένη διάταξη (μονογραμμικό σχέδιο και διαγράμματα)

2.1.3.1. Μονογραμμικό σχέδιο της διάταξης

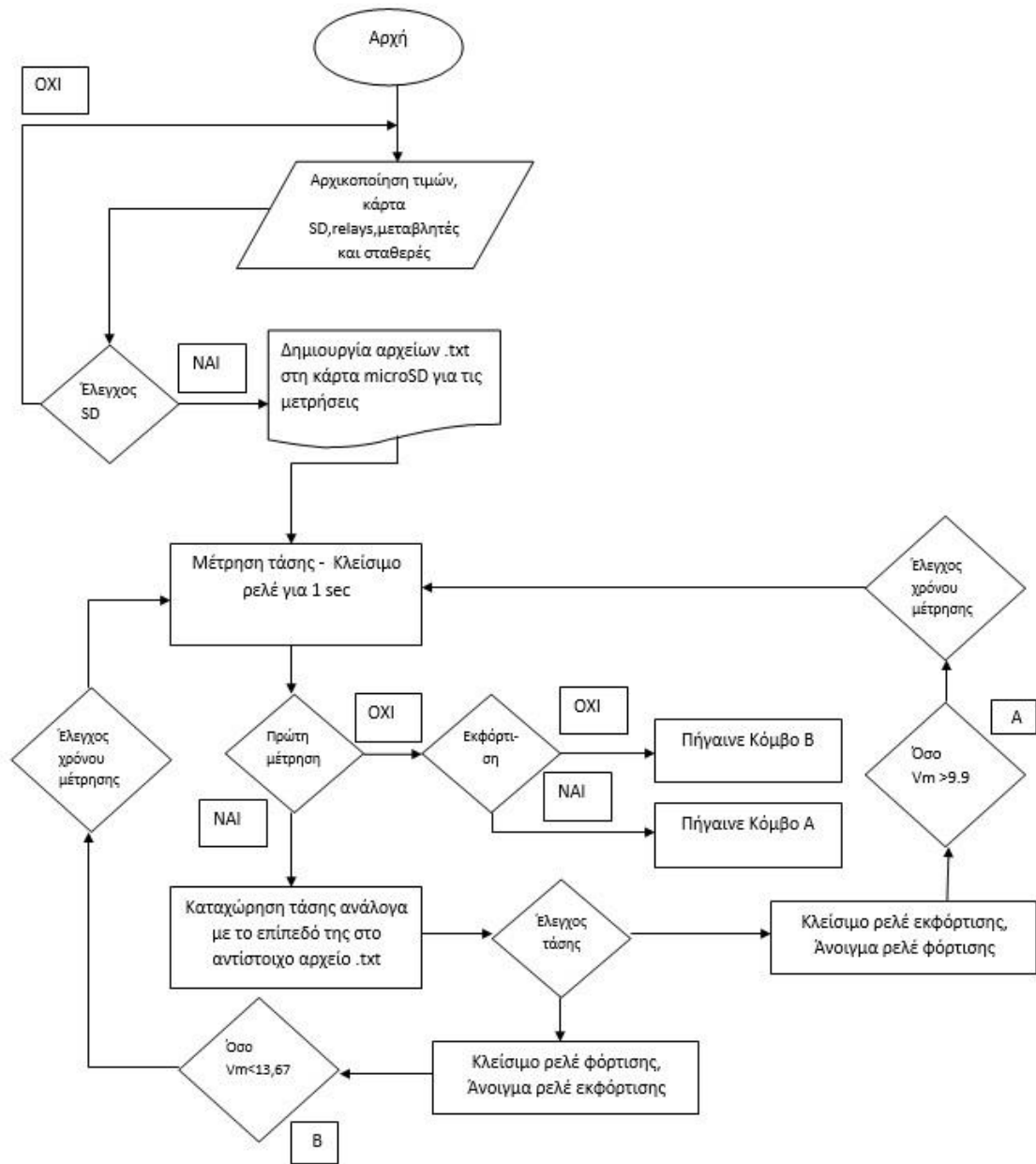
Το παρακάτω σχέδιο, απεικονίζει το μονογραμμικό σχέδιο της συνολικής αυτοματοποιημένης διάταξης και πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος EasyEDA:



Σχήμα 34: Μονογραμμικό σχέδιο της αυτοματοποιημένης διάταξης φόρτισης-εκφόρτισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος.

2.1.3.2. Διάγραμμα ροής (flowchart) και επεξήγηση του κώδικα

Παρακάτω, απεικονίζεται το διάγραμμα ροής (flowchart), στο οποίο αποτυπώνεται η διαδικασία με την οποία εκτελείται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για το προγραμματισμό του Arduino .



Σχήμα 35: Απεικόνιση του διαγράμματος ροής (flow chart) του κώδικα για το προγραμματισμό του Arduino.

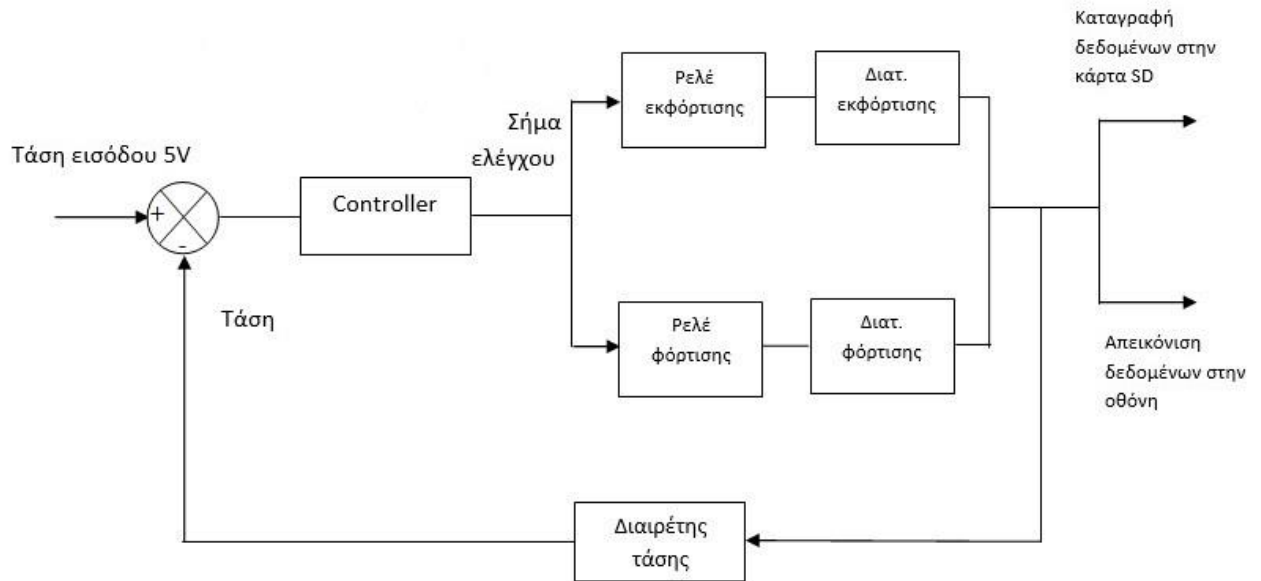
Αφού δηλωθούν οι βιβλιοθήκες και οι μεταβλητές, το πρόγραμμα αναμένει την εισαγωγή της κάρτας microSD στο Arduino module. Ο κώδικας δε θα εκτελεσθεί, αν δεν γίνει εισαγωγή της κάρτας. Αφού εισαχθεί η κάρτα, τότε δημιουργούνται αμέσως 2 αρχεία για τη καταγραφή των δεδομένων με κατάλληλες ονομασίες (charges.txt και

discharges.txt) και μέσα σε αυτά τα αρχεία θα υπάρχουν 4 στήλες, με τη μορφή που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο σχήμα (Σχήμα 29). Η αρχική κατάσταση της διάταξης βρίσκει τα ρελέ ανενεργά (δεν συνδέεται ο συσσωρευτής σε κανένα κύκλωμα). Με τη συμπλήρωση ενός λεπτού, γίνεται ανάγνωση της τάσης του συσσωρευτή από την αναλογική είσοδο. Αν η τάση είναι μικρότερη των 13,7V, τότε ενεργοποιείται το ρελέ φόρτισης και η μπαταρία θα συνδεθεί με το κύκλωμα φόρτισης. Αυτό θα συμβαίνει, μέχρι η μπαταρία να ξεπεράσει το επίπεδο των 13,7V. Από αυτό το σημείο και μετά η μπαταρία, θα εισέλθει σε εκφόρτιση, αφού ενεργοποιηθεί το ρελέ της εκφόρτισης και αυτό θα συμβαίνει μέχρι η τάση να γίνει μικρότερη των 9,9V. Όλες οι μετρήσεις που λαμβάνονται καταγράφονται ανά ένα λεπτό στη κάρτα microSD και εμφανίζονται αντίστοιχα μηνύματα στην οθόνη LCD.

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την υλοποίηση του κώδικα, ήταν ο έλεγχος του επιπέδου τάσης (πότε δηλαδή θα φορτίζει η μπαταρία και πότε όχι). Αυτό, διότι η υλοποίηση μιας απλής εκδοχής με τη χρήση των εντολών if & else if ελέγχοντας μόνο τη τιμή της μεταβλητής που θα περιείχε τη τιμή της τάσης της μπαταρίας, δε μπορούσε να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία του συστήματος. Αν για παράδειγμα υπήρχε μια εντολή if (voltage < 13,7V) και δεν ικανοποιούνταν αυτή η συνθήκη (άρα με μια άλλη εντολή else if να εκτελεσθεί η λειτουργία της εκφόρτισης), τότε αναγκαστικά θα ικανοποιούνταν συνεχώς η λειτουργία εκφόρτισης και με αυτό το τρόπο η μπαταρία δε θα μπορούσε να φορτιστεί. Αυτός είναι και ο λόγος της δημιουργίας μιας μεταβλητής (Vd), που θα αφαιρεί κάθε φορά τη προηγούμενη μέτρηση από τη τρέχουσα, εκφράζοντας με αυτό το τρόπο τη μονοτονία της τάσης.

Επιπλέον, ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά την εκτέλεση του κώδικα, ήταν κατά πόσο εξασφαλιζόταν η πιστότητα της κατάστασης της διάταξης. Δηλαδή πόσο εξασφαλιζόταν ότι η τάση που καταγράφηκε, θα αφορούσε τη κατάσταση φόρτισης ή την κατάσταση εκφόρτισης. Γι' αυτό στα αρχεία .txt που δημιουργήθηκαν προστέθηκε μια επιπλέον στήλη (Condition) που θα αναγράφει τη κατάσταση στην οποία βρίσκεται η αυτοματοποιημένη διάταξη.

2.1.3.3. Δομικό διάγραμμα (block diagram) της διάταξης



Σχήμα 36: Απεικόνιση του δομικού διαγράμματος (block diagram) της αυτοματοποιημένης διάταξης.

Στο παραπάνω σχήμα, γίνεται απεικόνιση του συστήματος αυτομάτου ελέγχου της διάταξης που υλοποιήθηκε. Η είσοδος του συστήματος είναι η τάση εισόδου που δέχεται το Arduino (5V). Στη συνέχεια, αν το επίπεδο τάσης της μπαταρίας είναι κάτω από τα 13,67V, τότε το Arduino δίνει ένα κατάλληλο σήμα ελέγχου στο ρελέ της φόρτισης, ώστε η μπαταρία να συνδεθεί με τη διάταξη φόρτισης και να πραγματοποιηθεί η φόρτιση. Αν το επίπεδο τάσης της μπαταρίας ξεπεράσει τα 13,67V, τότε το Arduino θα δώσει ένα σήμα ελέγχου κατάλληλο στο ρελέ της εκφόρτισης, ώστε η μπαταρία να συνδεθεί με το κύκλωμα εκφόρτισης και η μπαταρία να αρχίσει να εκφορτίζεται, μέχρι η τάση της μπαταρίας να φτάσει στα επίπεδα των 9,9V. Η κάθε διάταξη στην έξοδό της δίνει τη προς μετρούμενη τάση, οδηγείται στον διαιρέτη τάσης και η τελευταία διάταξη με τη σειρά της οδηγεί τη τάση πίσω στον ελεγκτή και πιο συγκεκριμένα στο pin A1. Η έξοδος του συστήματος είναι η καταγραφή των αποτελεσμάτων που γίνεται ανά ένα λεπτό στο microSD module, μέσα στα .txt αρχεία που έχουν δημιουργηθεί για τις μετρήσεις που λαμβάνονται κατά τη

διάρκεια των λειτουργιών της φόρτισης και της εκφόρτισης (Αύξων αριθμός, επίπεδο τάσης, χρόνος, κατάσταση), αλλά και τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στην οθόνη.

2.2. Διεξαγωγή πειραμάτων και μετρήσεις

Από τη στιγμή που διεξάγονται μετρήσεις, γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να υπάρχει εκτίμηση της ακρίβειας των μετρήσεων που θα παρθούν. Ο μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακού του Arduino Uno (ADC converter) είναι 10-bit. Από τη στιγμή που στις αναλογικές εισόδους είναι δυνατό να αναγνωριστούν τιμές τάσης από 0 – 5V, αυτό έχει την αντιστοιχία:

- 0V \longrightarrow 0
- 5V \longrightarrow 1023

Επομένως, αν σε ένα αναλογικό pin, εισαχθούν 5V, τότε αυτό θα σημαίνει ότι το μέγιστο σφάλμα μέτρησης θα είναι 4,8 mV.

Για τον καταμεριστή τάσης, προτού τοποθετηθούν οι αντιστάσεις στη πλακέτα, έγινε μέτρηση της ωμικής αντίστασής τους με ένα βολτόμετρο. Οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων που θα απαρτίζουν το διαιρέτη τάσης, θα είναι:

- $R1 = 1,8M\Omega \pm 5\%$ και με πολύμετρο η τιμή που καταγράφηκε ήταν 1,803M Ω .
- $R2 = 470k\Omega \pm 5\%$ και με πολύμετρο η τιμή που καταγράφηκε ήταν 463k Ω .

Οι τιμές αυτές που κατεγράφησαν, τοποθετήθηκαν και ως αντίστοιχες τιμές στις μεταβλητές R1 & R2 στο κώδικα που κατασκευάστηκε.

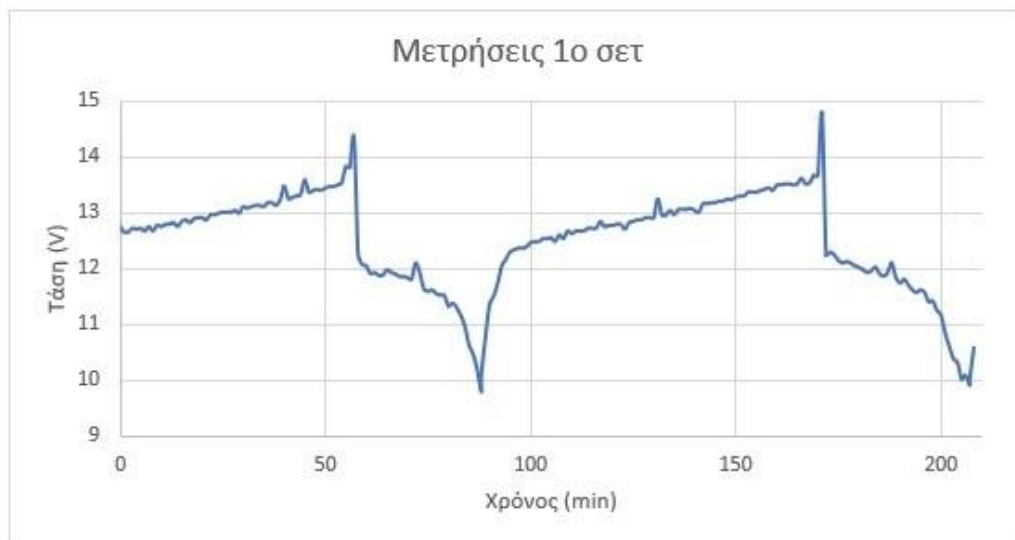
Στο πλαίσιο της ακρίβειας των μετρήσεων, κρίθηκε αναγκαία και πραγματοποιήθηκε διαβάθμιση του καταναλωτή (φορτίο). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε μια βατική αντίσταση, όπου η ονομαστική τιμή της ήταν 100m Ω στα 25W και μετρήθηκε από το πολύμετρο 0,22 Ω . Ο λόγος που επιλέχθηκε μια τόσο μικρή

αντίσταση, ήταν γιατί με την εφαρμογή μιας τάσης στα άκρα της θα υπήρχε μια πολύ μικρή πτώση τάσης και εύκολα θα μπορούσε να υπολογιστεί το ρεύμα που θα τη διαρρέει.

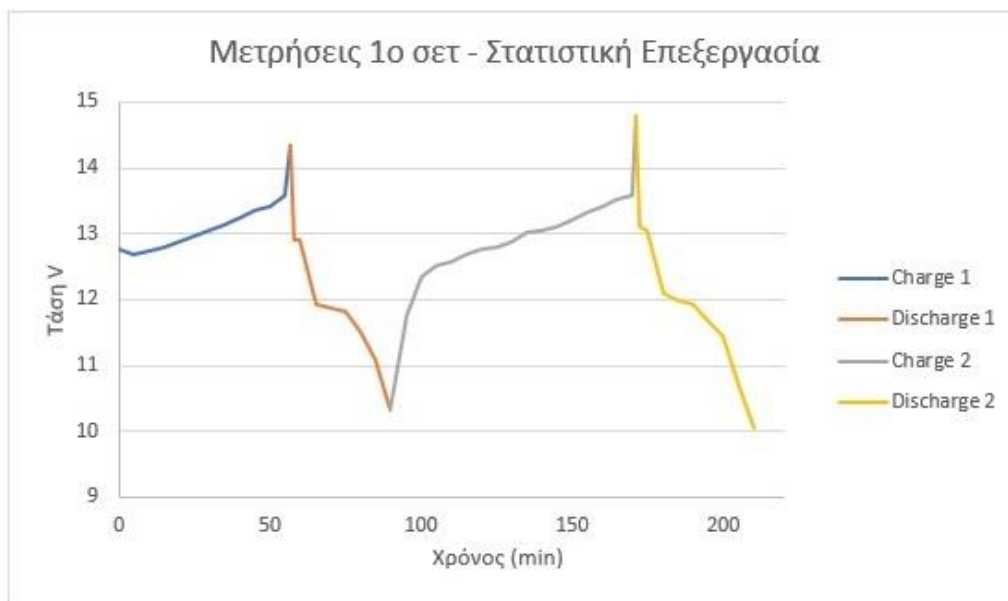
Έπειτα από τους παραπάνω υπολογισμούς, η αυτοματοποιημένη διάταξη ήταν έτοιμη για τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Πραγματοποιήθηκαν 3 σετ μετρήσεων όπου για το πρώτο σετ έγιναν μετρήσεις για 207 λεπτά, με ρεύμα εκφόρτισης 0,28A και πάντα σταθερή ένταση φόρτισης στα 0,3A. Η θερμοκρασία στο εργαστήριο στο πρώτο σετ μετρήσεων ήταν 27 °C. Στο δεύτερο σετ, κατεγράφησαν μετρήσεις για 1742 λεπτά (δηλαδή για περίπου 29 ώρες), κρατώντας το ρεύμα εκφόρτισης ίδιο με το πρώτο σετ και με τη θερμοκρασία στο χώρο του εργαστηρίου να έχει παραμείνει αμετάβλητη και στο τρίτο σετ πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για 259 λεπτά, με ρεύμα εκφόρτισης 0,4A.

2.3. Αποτελέσματα μετρήσεων (γραφικές παραστάσεις)

Στα παρακάτω γραφήματα, απεικονίζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο:



(α)



(β)

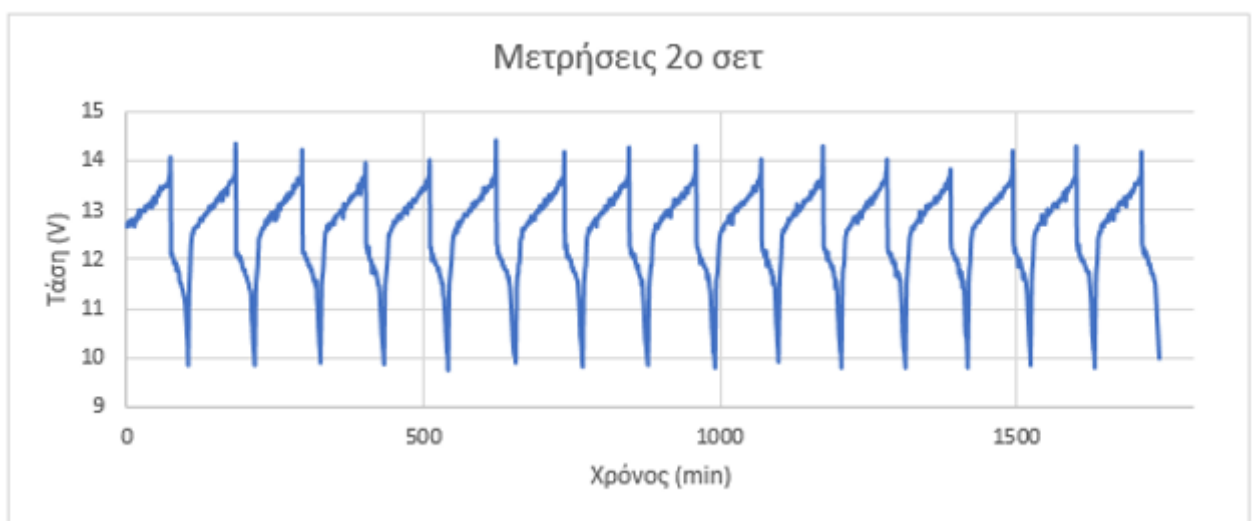
Σχήμα 37: Γραφικές παραστάσεις από το πρώτο σετ μετρήσεων. (α) Χωρίς στατιστική επεξεργασία, (β) με στατιστική επεξεργασία

Στα δύο διαγράμματα που απεικονίζονται παραπάνω, οι γραφικές παραστάσεις με τη συνεχή μπλε γραμμή είναι τα δεδομένα όπως πάρθηκαν χωρίς επεξεργασία και οι γραφικές παραστάσεις με τους χρωματικούς διαχωρισμούς είναι τα δεδομένα που έχουν υποστεί στατιστική επεξεργασία για την απαλοιφή του θορύβου. Ο θόρυβος στις μετρήσεις που πάρθηκαν, έχει να κάνει με την αστάθεια της μπαταρίας κατά τους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης σε σχέση με το χρόνο ανοιγοκλεισίματος των ρελέ και στα σφάλματα της μέτρησης.

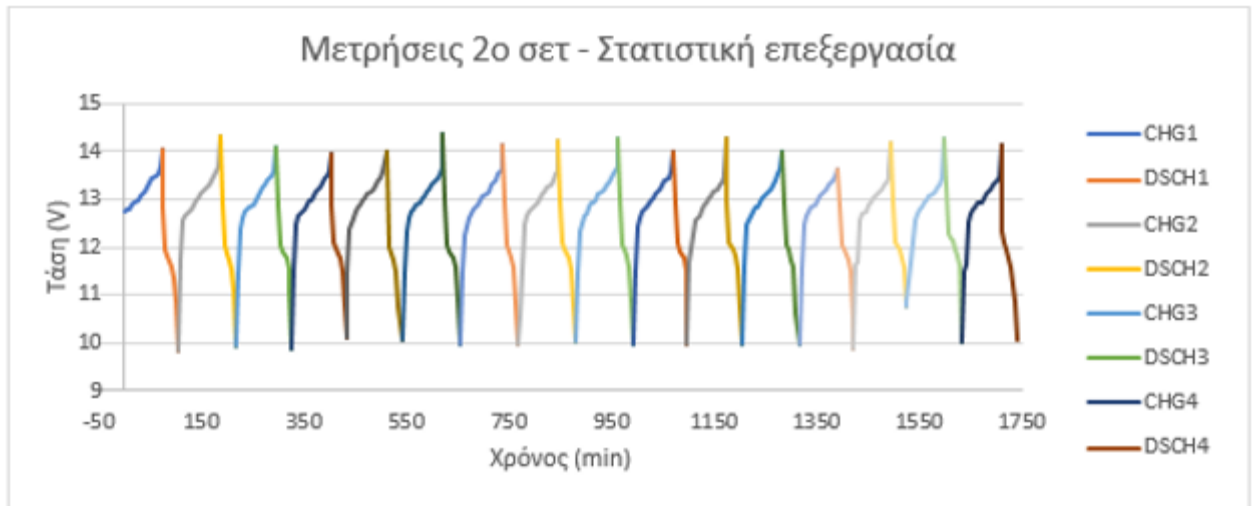
Παρατηρείται αρχικά ότι η τάση της μπαταρίας είναι στα 12,76V, κάτι το οποίο σημαίνει ότι ο συσσωρευτής συνδέθηκε με το κύκλωμα φόρτισης ξεκινώντας έτσι η διαδικασία της φόρτισης. Αυτή η διαδικασία, μέχρι η τάση της μπαταρίας να φτάσει το επίπεδο των 13,7V, διήρκεσε 55 λεπτά ακριβώς. Όταν ξεκίνησε η διαδικασία της εκφόρτισης του συσσωρευτή, παρατηρείται ότι η τάση κάνει μια υπερύψωση με το επίπεδο της τάσης να ανεβαίνει πάνω από τα 14V και ένα λεπτό αργότερα να γίνεται μια απότομη

πτώση της τάσης. Αυτή η συμπεριφορά συμφωνεί απόλυτα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης του κατασκευαστή της μπαταρίας μολύβδου-οξέος, όπως απεικονίστηκαν σε προηγούμενο σχήμα στο κεφάλαιο 2.1.2.1. Γνωρίζοντας ότι η ένταση εκφόρτισης της μπαταρίας είναι 0,28Α, τότε βάσει του διαγράμματος με τις χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης του κατασκευαστή, ο συσσωρευτής θα έπρεπε να αποφορτιστεί σε περίπου 3 ώρες. Η 1^η εκφόρτιση ολοκληρώθηκε μέσα σε 33 λεπτά και μόλις η τάση της μπαταρίας ήταν λιγότερο από 9,9V, τότε ξεκίνησε ο 2^ο κύκλος, όπου εδώ υπήρξε μια πρώτη ξεκάθαρη εικόνα σχετικά με τη συμπεριφορά της μπαταρίας. Παρατηρήθηκε λοιπόν, ότι η φόρτιση διήρκεσε 2 ώρες ακριβώς (120 λεπτά). Στην αρχή της φόρτισης, παρατηρείται μια γρήγορη υπερύψωση της τάσης σε σύντομο χρονικό διάστημα προτού ακολουθηθεί μια πιο ομαλή συμπεριφορά, κάτι που οφείλεται στη μείωση της εσωτερικής αντίστασης των κελιών της μπαταρίας. Στην εκφόρτιση, υπήρξε ένα μεγαλύτερο βάθος που συνολικά διήρκεσε 37 λεπτά. Κατά την διαδικασία της φόρτισης η μέση τάση ήταν 12,99 V, ενώ κατά την εκφόρτιση η μέση τάση ήταν 11,62 V.

Στο δεύτερο σετ μετρήσεων, η διάταξη λειτούργησε 1742 λεπτά και τα αποτελέσματα που πάρθηκαν απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



(α)

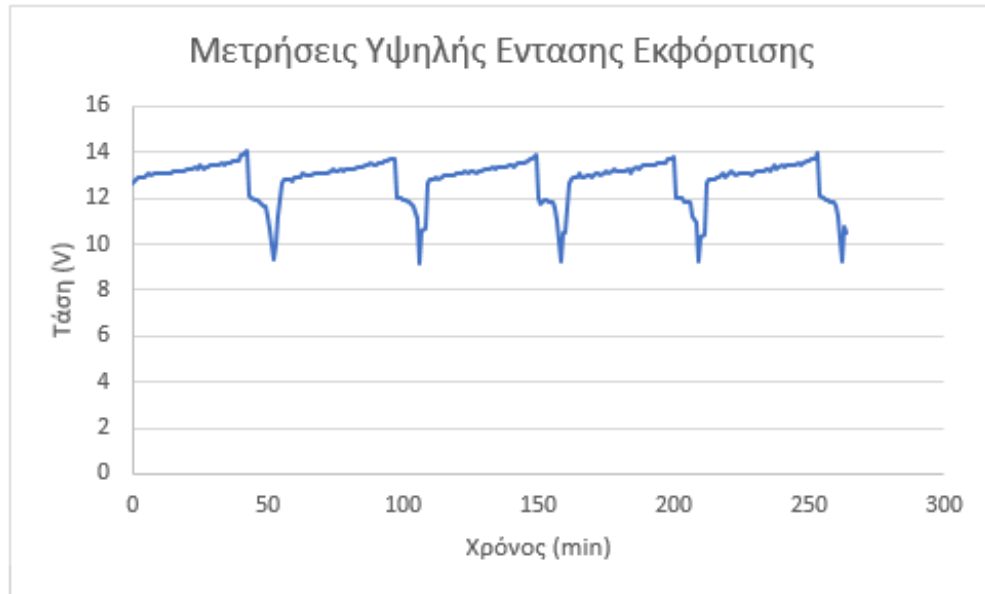


(β)

Σχήμα 38: Γραφικές παραστάσεις από το δεύτερο σετ μετρήσεων. (α) Χωρίς στατιστική επεξεργασία, (β) με στατιστική επεξεργασία

Η τάση της μπαταρίας αρχικά, ήταν 12,66V και ξεκίνησε η διαδικασία της φόρτισης, όπου για να φτάσει το ανώτατο επίπεδο που ορίστηκε στο πρόγραμμα για τη φόρτιση, διήρκεσε 71 λεπτά. Η διάρκεια των φορτίσεων στους υπολοίπους κύκλους κυμάνθηκε περίπου από 78-82 λεπτά. Όπως και στα αποτελέσματα του πρώτου σετ μετρήσεων, με το πέρας μιας εκφόρτισης, παρατηρείται μια απότομη υπερύψωση της τάσης της μπαταρίας, προτού ακολουθήσει μια πιο ομαλή πορεία. Στο κομμάτι της εκφόρτισης, υπάρχει και εδώ μια παρόμοια συμπεριφορά με την υπερύψωση της τάσης μόλις η μπαταρία εισέλθει σε κατάσταση εκφόρτισης. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 16 κύκλοι φόρτισης- εκφόρτισης της μπαταρίας. Ο μέσος όρος του χρόνου εκφόρτισης του συσσωρευτή σε όλους τους κύκλους ήταν 32 λεπτά. Σε αυτό το σετ μετρήσεων οι μέσες τιμές τάσης καταγράφηκαν στο επίπεδο των 12,99 V και 11.55 V αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι καταγράφηκε το ίδιο επίπεδο τάσης στην φόρτιση και ελάχιστη απόκλιση της τάξης των 70 mV, αποτέλεσμα αναμενόμενο καθότι έχει διατηρήσει το ίδιο επίπεδο C-rate στην εκφόρτιση και η φόρτιση γίνεται υπό τις ίδιες συνθήκες σταθερής έντασης στα 0.3 A. Μεγαλύτερη απόκλιση θα ήταν ένδειξη ότι δεν αποφορτίζεται η

μπαταρία στο ίδιο C-rate ,οπότε θα είχαμε διακύμανση στο ρεύμα εκφόρτισης και δεν θα μπορούσε να αξιοποιηθεί η διάταξη για τους σκοπούς του πειράματος.



Σχήμα 39: Γραφική παράσταση που απεικονίζονται οι μετρήσεις από το 3ο σετ μετρήσεων.

Στο 3^ο σετ μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε αύξηση του ρεύματος εκφόρτισης, με αυτό να είναι 0,4A. Η συνολική λειτουργία της διάταξης ήταν 259 λεπτά και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο παραπάνω γράφημα. Στο συγκεκριμένο σετ, λόγω της μη καταγραφής υψηλού θορύβου σε σχέση με τα προηγούμενα 2 σετ μετρήσεων, δεν πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία για την απαλοιφή του. Στο κομμάτι της εκφόρτισης, παρατηρείται μια παρόμοια συμπεριφορά με τις προηγούμενες μετρήσεις, δηλαδή μια μικρή υπερύψωση στην αρχή και μια άμεση πτώση του επιπέδου της τάσης της μπαταρίας. Η διάρκεια εκφόρτισης κυμάνθηκε από 5 έως 11 λεπτά. Στο κομμάτι της φόρτισης, παρατηρήθηκε ότι ο μέσος όρος χρονικά ήταν 42 λεπτά. Επίσης, έχουμε μια παρόμοια συμπεριφορά μόλις ξεκινήσει η φόρτιση (μια απότομη υπερύψωση), η οποία σε σχέση με τα προηγούμενα σετ δεν γίνεται τόσο απότομα, αλλά μεσολαβεί ένα διάστημα 2-3 λεπτών που τα επίπεδα τάσης της μπαταρίας παραμένουν σταθερά. Σε αυτό το σετ μετρήσεων η μέση τάση στην φόρτιση ήταν 13 V και της εκφόρτισης 12 V. Ενώ η μέση τάση κατά την φόρτιση έχει μικρή απόκλιση της τάξης των 10 mV, η εκφόρτιση

παρουσιάζει μια απόκλιση της τάξης των 500 mV, αποτέλεσμα που οφείλεται στην υψηλότερη ένταση εκφόρτισης σε σχέση με τα σετ 1 και 2, με αποτέλεσμα η τάση αποκοπής να επιτυγχάνεται γρηγορότερα και η εκφόρτιση να είναι πιο σύντομη.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει και από τα 3 σετ μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, σε σύγκριση με τις καμπύλες που απεικονίζονται από το datasheet του κατασκευαστή, είναι ότι υπάρχει μια απόκλιση στις καμπύλες φόρτισης και εκφόρτισης και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι συνθήκες που διεξήχθησαν οι μετρήσεις, δεν ήταν ίδιες με αυτές που διεξήχθησαν από τη μεριά του κατασκευαστή του συσσωρευτή (π.χ. θερμοκρασία). Ένας άλλος παράγοντας για την απόκλιση αυτή είναι ότι δεν υπήρχε σαφή εικόνα για τα σφάλματα των υπολοίπων οργάνων και μια πιο λεπτομερής καταγραφή μετρήσεων απαιτεί πιο ακριβό εξοπλισμό, πράγμα που είναι εκτός του πλαισίου αυτής της διπλωματικής εργασίας. Τέλος σημαντικό ρόλο παίζει το γεγονός ότι η μέτρηση γινόταν με την μέθοδο της απομόνωσης της μπαταρίας από το κύκλωμα φόρτισης – εκφόρτισης, παράγοντας που επηρεάζει στην εμφάνιση αυτή την απόκλιση με τις χαρακτηριστικές του κατασκευαστή.

3. Περαιτέρω έρευνα – επεκτάσεις

Η παρούσα διάταξη, ούσα μια υλοποίηση πάνω στον αυτόματο έλεγχο, έχει πολλές επεκτάσεις που μπορούν να υλοποιηθούν, αλλά και περαιτέρω έρευνα που μπορεί να γίνει πάνω σε αυτή.

Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να εστιαστεί στο κομμάτι που έχει να κάνει με τις συνθήκες φόρτισης-εκφόρτισης και αντί να γίνεται υπό σταθερή ένταση, όπως πραγματοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος, να γίνεται υπό σταθερή ισχύ και αυτό να μην έχει εφαρμογή μόνο σε συσσωρευτές μολύβδου-οξέος αλλά και σε άλλους τύπους δευτερευόντων συσσωρευτών όπως νικελίου-καδμίου ή ιόντων λιθίου. Αντίστοιχα, ενδιαφέρον θα είχε η μέτρηση της συμπεριφοράς της μπαταρίας σε πραγματικές συνθήκες για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της μπαταρίας σε πραγματικά σενάρια.

Μια επιπλέον επέκταση που θα μπορούσε να υλοποιηθεί είναι η διάταξη να εξελιχθεί όντας ένα υποσύστημα ενός συστήματος διαχείρισης μπαταριών (BMS) , το οποίο θα χρησιμοποιείται για την απεικόνιση σημαντικών χαρακτηριστικών ενός συσσωρευτή ή μιας συστοιχίας συσσωρευτών, όπως η τάση, η θερμοκρασία, το State-of-Health (SoH), το Depth-of-Discharge (DoD), το State-of-Charge (SoC) και η απεικόνιση αυτή να πραγματοποιείται μέσω μιας σελίδας σε ένα δίκτυο (web interface) πληκτρολογώντας την IP διεύθυνση που θα δημιουργείται από τον controller. Σε αυτή τη περίπτωση, όπως γίνεται αντιληπτό δε θα γίνεται χρήση του Arduino UNO ως ελεγκτή, αλλά μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ενός esp32 ή esp64 που έχουν μεγαλύτερη μνήμη RAM και περισσότερους πυρήνες επεξεργασίας δεδομένων με αρκετά μεγάλη ταχύτητα σε σχέση με ένα Arduino. Το esp είναι εκείνο, που με τη χρήση κατάλληλων εντολών κατά το προγραμματισμό του, θα δημιουργεί το web interface. Η υλοποίηση αυτή θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και με τη χρήση ενός Raspberry PI, αφού φυσικά προηγηθεί η εγκατάσταση ενός λειτουργικού συστήματος σε μια κάρτα microSD.

Τέλος, έχοντας μια βάση παρόμοια σαν αυτή που περιγράφηκε στη παραπάνω παράγραφο, θα μπορούσε να υφίσταται σαν υποσύστημα σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον, (π.χ PLC – Programmable Logic Controllers , SCADA – Supervisory Control and Data

Acquisition) , όπου με τη βοήθεια PLC δρομολογητών (routers) ή δρομολογητών εικονικού δικτύου (VPN routers), να αποστέλλονται δεδομένα για τους συσσωρευτές απομακρυσμένα, με τη βοήθεια ειδοποιήσεων (notifications) σε μια εφαρμογή είτε σε ένα έξυπνο τηλέφωνο είτε σε έναν υπολογιστή ανά ένα χρονικό διάστημα που θα μπορεί να οριστεί από το χρήστη ή ακόμα και αποστολή μηνιαίων αναφορών (reports) για τη κατάσταση και τη διακύμανση των συσσωρευτών με την αποστολή μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mail) ή με την αποστολή σε ένα cloud.

Βιβλιογραφία

- [1] D. Pavlov, A Handbook of Lead- Acid Battery Technology and it's Influence on the product, Elsevier, 2011.
- [2] T. Reddy, Linden's Handbook of Batteries, 4th edition, McGraw-Hill, 2011.
- [3] G. Albright, J. Edie και S. Al-Hallaj, A Comparison of Lead-Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications, AllCell Technologies, March 2012.
- [4] R. Hansen, «Valve-Regulated Lead-Acid Batteries for Stationary Applications,» Air Force Pamphlet, August 1999.
- [5] Anon., «Korean-electronics.com,» 28 06 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://korean-electronics.com/2016/06/28/lithium-primary-batteries-3/>.
- [6] Sunlight, Reliable Battery Solutions, [Online]. Available: www.sunlight.com.
- [7] Anon., "batteryuniversity.com, What is C-Rate," 09 03 2017. [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate..
- [8] Anon., "batteryuniversity.com, Charging at High and Low Temperatures," 2017. [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures.
- [9] Anon., "batteryuniversity.com, Charging the Lead-Acid Battery," 21 11 2019. [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/charging_the_lead_acid_battery.
- [10] J. Jung, L. Zhang και J. Zhang, Lead-Acid Battery Technologies Fundamentals, Materials and Applications, CRC Press, 2016.
- [11] Anon., "upsbatterycenter.com, What is an SLI Battery," 22 12 2014. [Online]. Available: <https://www.upsbatterycenter.com/blog/what-is-an-sli-battery/#prettyPhoto>.
- [12] «wikipedia.com, VRLA battery,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/VRLA_battery.
- [13] S. C. Mhatre, Microprocessors and Interfacing Techniques, Jaico Publishing House, 2012.
- [14] M. Banzi, Getting Started with Arduino, O'Reilly, 2008.

- [15] Anon., "wikipedia.org, Intel 4004," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Intel_4004.
- [16] J. Crisp, Introduction to Microprocessors and Microcontrollers, Elsevier, 2004.
- [17] B. Evans, Arduino Programming Notebook, 1st edition, Creative Commons, 2007.
- [18] R. Hu, Battery Management System for electric Vehicle Applications: A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies, Master of Applied Science, University of Windsor, Ontario, Canada, 2011.
- [19] G. Cook και B. Nelson, «Automatic Battery Charge and Discharge Control System,» United States Patent, 23 May 1995.
- [20] A. Papazoglou, S. Longo, D. Auger και F. Assadian, «Non-linear Filtering Techniques Comparison for Battery State Estimation,» *Journal of Sustainable Development of Energy*, τόμ. 2, p. 259, 2014.
- [21] N. Θεοδώρου, Ηλεκτρικές Μετρήσεις, Αθήνα: Συμμετρία, 1997.
- [22] C. Zhang, F. Yan, C. Du και G. Rizzoni, «An improved model-based self-adaptive filter for online State-of-Charge estimation of Li-ion Batteries,» *Applied Sciences*, p. 1, 2018.
- [23] M. Zhang και X. Fan, «Review on the State of Charge estimation methods for Electric Vehicle Battery,» *World Electric Vehicle Journal*, p. 2, 2020.
- [24] Y. Xing, E. Ma, K. Tsui και M. Pecht, «Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles,» *energies*, p. 1846, 2011.
- [25] C. Honsberg and S. Bowden, "pveducation.org, Depth of Discharge and Battery Capacity," 2019. [Online]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/lead-acid-batteries/characteristics-of-lead-acid-batteries>.
- [26] Anon., «batteryuniversity.com, How to calculate battery runtime,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_503_how_to_calculate_battery_runtime.
- [27] Anon., "VALUE @ Amrita, Peukert Law," 2015. [Online]. Available: <http://vlab.amrita.edu/?sub=77&brch=270&sim=1760&cnt=1>.
- [28] Anon., "diyelectronics.co.za," [Online]. Available: <https://www.diyelectronics.co.za/store/electro-mechanical-relays/218-2-channel-5v-relay-module-5amp.html>.

[29] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.canadarobotix.com/products/1056>.

[30] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.diygore.cc/products/blue-1602-16x2-lcd-iic-i2c-twi-spi-serial-interface-module-display>.

Παράρτημα Α – Πηγαίος κώδικας

```
#include <SPI.h>

#include <SD.h>

#include <stdio.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

File myfile1;

File myfile2;

LiquidCrystal_I2C lcd (0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);

float Vprev =0.0;

const int RELAY_CH=3;

const int RELAY_DIS=2;

const int chipSelect = 10; // the chipSelect pin from the microSD module

int sn =0;

float voltage=0.0; //voltage counter

float Vd=0.0;

int analogval; //analog value voltage

float R1=1803000.00; // The resistors in voltage divider, expressed in Ohm's

float R2=463000.00;

float Vo=0.0;

float a=0.0;

int Time=0; // Time counter in seconds

const long meas =60000; //long constant value to control the millis function

unsigned long previousTime=0; //variable value for millis function

char ch[]=" Charge"; //txt in charge condition
```

```

char dch[]= "  Discharge"; //...the same for discharge condition

void setup() {

  lcd.begin(16, 2);

  Serial.begin(9600); //initialize the serial monitor (9600 baud rate)

  Serial.println("Initializing the SD card...");

  if(!SD.begin(10)){

    Serial.println("initialization failed. Things to check:");

    Serial.println("* is a card inserted?");

    Serial.println("* is your wiring correct?");

    Serial.println("* did you change the chipSelect pin to match your shield or module?");

    return;

  }

  Serial.println("Initialization complete"); //if the initialization finished,print in Serial windows and open
  txt's

  Serial.println("SN:  Voltage  Time(m)  Condition");

  Serial.println();

  myfile1 = SD.open("CHARGES.txt", FILE_WRITE); //write in the txt doc, in the sd card the 3 columns
  with data

  myfile1.println("S.N  Voltage  Time(m)  Condition");

  myfile1.println();

  myfile1.close();

  myfile2 = SD.open("DISCHARGES.txt", FILE_WRITE); //write in the txt doc, in the sd card the 3
  columns with data

  myfile2.println("S.N  Voltage  Time(m)  Condition");

  myfile2.println();

  myfile2.close();

  a=R2/(R1+R2); //voltage divider

```

```

pinMode(RELAY_CH,OUTPUT);
pinMode(RELAY_DIS,OUTPUT);

digitalWrite(RELAY_CH,LOW);
digitalWrite(RELAY_DIS,LOW);

}

void loop(){

analogval = analogRead(A1); // read the running voltage of the battery
Vo= (analogval * 5.0)/1024.0;
voltage = Vo / a;
Vprev=voltage;
Vd=voltage-Vprev;

    Serial.print(sn);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(voltage);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(" ");
    Serial.print(Time);
    Serial.print(" ");

    Serial.println("Charging up to 14V");

myfile1 = SD.open("CHARGES.txt", FILE_WRITE);
myfile1.print(sn);
myfile1.print("\t");
myfile1.print(voltage);
myfile1.print("\t ");
myfile1.print(Time);

```

```

myfile1.print("\t ");
myfile1.print(ch);
myfile1.println();
myfile1.close();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Voltage :");
lcd.setCursor(10,0);
lcd.print(voltage);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Time:");
lcd.print(Time);
lcd.print("m");
lcd.setCursor(11,1);
lcd.print("C:");
lcd.print("CHA");
delay(60000);

unsigned long currentTime = millis();

if(currentTime - previousTime >= meas){

    if (voltage < 13.7 && Vd==0){
while (voltage <13.7){

    Time++;
sn++;

    digitalWrite(RELAY_CH,HIGH);
    digitalWrite(RELAY_DIS,LOW);
digitalWrite(RELAY_CH,LOW);
delay(1000);

```

```

analogval = analogRead(A1);
Vo= (analogval * 5.0)/1024.0;
voltage = Vo / a;
Vd=voltage-Vprev;
Vprev=voltage;
Serial.print(sn);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(voltage);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(" ");
    Serial.print(Time);
    Serial.print(ch);
    Serial.println();
    myfile1 = SD.open("CHARGES.txt", FILE_WRITE);
myfile1.print(sn);
myfile1.print("\t");
myfile1.print(voltage);
myfile1.print("\t ");
myfile1.print(Time);
myfile1.print("\t ");
myfile1.print(ch);
myfile1.println();
myfile1.close();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Voltage :");
lcd.setCursor(10,0);
lcd.print(voltage);
lcd.setCursor(0,1);

```

```

lcd.print("Time:");

lcd.print(Time);

lcd.print("m");

lcd.setCursor(11,1);

lcd.print("C:");

lcd.print("CHA");

previousTime=currentTime;

delay(50);

digitalWrite(RELAY_CH,HIGH);

delay(59000);

}

}

if (voltage >=12.0 && Vd>=0){ // in any other case, battery must be discharged

while (voltage > 9.9){ // do this until the voltage will reach 9,9V

Time++;

sn++;

digitalWrite(RELAY_DIS,HIGH); // open the discharge relay

digitalWrite(RELAY_CH,LOW); //close the charge relay

Serial.print(sn); // show the appropriate messages in the serial monitor

Serial.print("\t");

Serial.print(voltage);

Serial.print("\t");

Serial.print(" ");

Serial.print(Time);

Serial.print(dch);

Serial.println();

myfile1 = SD.open("DISCHARGES.txt", FILE_WRITE); // write the measurements in the .txt

myfile1.print(sn);

```



```

myfile1.print("\t");
myfile1.print(voltage);
myfile1.print("\t ");
myfile1.print(Time);
myfile1.print(dch);
myfile1.println();
myfile1.close();

lcd.setCursor(0,0);    //show the appropriate messages in lcd screen
lcd.print("Voltage :");
lcd.setCursor(10,0);
lcd.print(voltage);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Time:");
lcd.print(Time);
lcd.print("m");
lcd.setCursor(11,1);
lcd.print("C:");
lcd.print("DIS");

previousTime=currentTime;

analogval = analogRead(A1);

Vprev=voltage;

delay(60000);

Vo= (analogval * 5.0)/1024.0;

voltage = Vo / a;

Vd=voltage-Vprev;

    }

}

else {    // in any other case, charge

```

```

do {
sn++;

    Time++;

    digitalWrite(RELAY_CH,HIGH);

    digitalWrite(RELAY_DIS,LOW);
digitalWrite(RELAY_CH,LOW);

delay(1000);

analogval = analogRead(A1);
Vo= (analogval * 5.0)/1024.0;

voltage = Vo / a;

Vd=voltage-Vprev;

Vprev=voltage;

Serial.print(sn);

    Serial.print("\t");

    Serial.print(voltage);

    Serial.print("\t");

    Serial.print("  ");

    Serial.print(Time);

    Serial.print(ch);

    Serial.println();

    myfile1 = SD.open("CHARGES.txt", FILE_WRITE);

myfile1.print(sn);

myfile1.print("\t");

myfile1.print(voltage);

myfile1.print("\t ");

myfile1.print(Time);

myfile1.print("\t ");

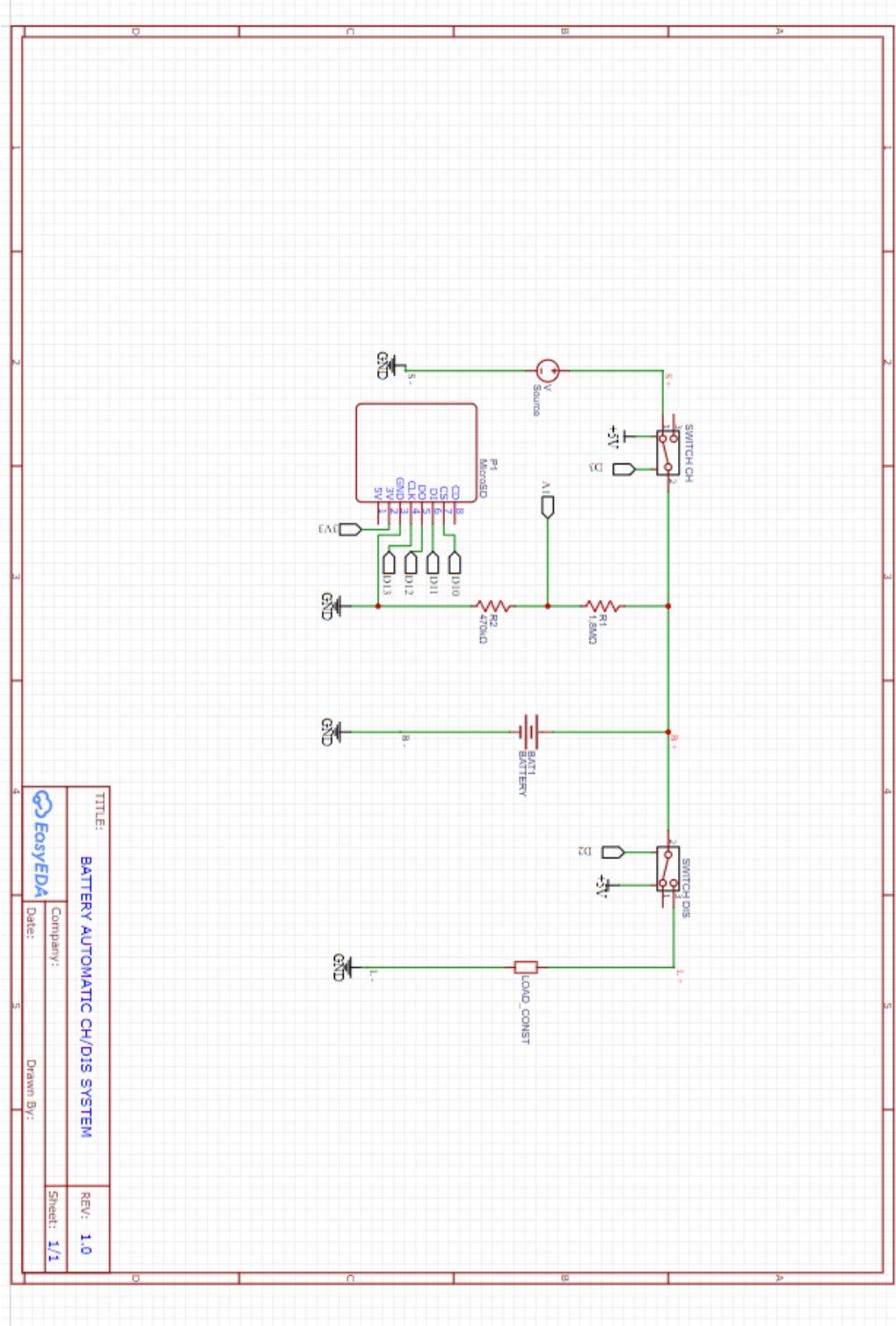
myfile1.print(ch);

```

```
myfile1.println();  
myfile1.close();  
lcd.setCursor(0,0);  
lcd.print("Voltage :");  
lcd.setCursor(10,0);  
lcd.print(voltage);  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("Time:");  
lcd.print(Time);  
lcd.print("m");  
lcd.setCursor(11,1);  
lcd.print("C:");  
lcd.print("CHA");  
delay(50);  
previousTime=currentTime;  
digitalWrite(RELAY_CH,HIGH);  
delay(60000);  
} while (voltage < 13.67);  
}  
}  
}
```


Παράρτημα Β – Σχέδια

Μέρος Α – Μονογραμμικό σχέδιο



Μέρος Β – Σχέδιο πλακέτας

