



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση Φορτιστή Μπαταριών Ιόντων Λιθίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Γ. Μπούρχας

Επιβλέπων : Γεώργιος Καμπουράκης

Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση Φορτιστή Μπαταριών Ιόντων Λιθίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Γ. Μπούρχας

Επιβλέπων : Γεώργιος Καμπουράκης

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Οκτωβρίου 2012.

.....

Γεώργιος Καμπουράκης

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ελευθέριος Καγιάφας

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Βασίλειος Λούμος

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

.....

Κωνσταντίνος Γ. Μπούρχας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Γ. Μπούρχας

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

*Αφιερωμένη στα όμορφα ταξίδια της
δημιουργικότητας και της γνώσης που μου
χάρισε ο πατέρας μου...*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά την εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή μου κ. Γεώργιο Καμπουράκη, για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την περάτωση της εργασίας, διαφωτίζοντας τις όποιες απορίες μου επί του θέματος της σχεδίασης του φορτιστή μπαταριών Li-Ion.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους Καθηγητές κ. Ελευθέριο Καγιάφα και κ. Βασίλειο Λούμο για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Δημήτρη Πιπερίδη που πρόθυμα και υπεύθυνα με στήριξε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής.

Ακόμη, ευχαριστώ τον κ. Κωνσταντίνο Λάσκαρη, Διδάκτορα ΕΜΠ, για την έμπνευση που μου παρείχε όσον αφορά τα συστήματα μπαταριών των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Τέλος, εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, Έλλη και Γιώργο, οι οποίοι με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μέσω της κατανόησης που μου έδειξαν και των θυσιών που έκαναν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη της σχεδίασης ενός συστήματος φόρτισης μπαταριών Ιόντων Λιθίου και συγκεκριμένα των μπαταριών Ιόντων Λιθίου που έχουν ως υλικό καθόδου το LiFePO_4 .

Αρχικά γίνεται παρουσίαση των χημικών και φυσικών ιδιοτήτων των μπαταριών που πρόκειται να φορτιστούν. Μέσα από αυτή τη μελέτη γίνεται εμφανής ο τρόπος με τον οποίο πρέπει να φορτίζονται οι μπαταρίες LiFePO_4 .

Κατά τη σχεδίαση του συστήματος φόρτισης αναλύονται όλα τα επιμέρους υποσυστήματα. Επίσης σε κάθε βήμα σχεδίασης ενός υποσυστήματος γίνεται μελέτη εναλλακτικών μεθόδων υλοποίησης, έτσι ώστε να αναδειχθεί ο λόγος επιλογής του τελικού κυκλώματος.

Τα υποσυστήματα του φορτιστή είναι το διακοπτικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος/σταθερής τάσης (CCCV), το κύκλωμα απομόνωσης της τάσης των επιμέρους κελιών από ένα battery pack, το κύκλωμα ισοστάθμισης, το κύκλωμα υπολογισμού της κατάστασης φόρτισης, η ανίχνευση υπερθέρμανσης για διακοπή της φόρτισης και τέλος, ο μικροελεγκτής του φορτιστή, ο οποίος θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ο εγκέφαλος του συνολικού συστήματος.

Αφού μελετηθεί και σχεδιαστεί το κάθε επιμέρους κύκλωμα, στο τέλος παρουσιάζεται η σύνδεση όλων των υποσυστημάτων για να προκύψει το ζητούμενο σύστημα φόρτισης.

Abstract

The purpose of this thesis is the design of a Lithium-Ion battery charger and battery management system.

Physical, chemical and technical characteristics of Lithium-Ion batteries are analyzed and in particular, those which have LiFePO_4 as cathode material.

After this analysis, we can conclude to the exact charging method for Lithium-Ion based batteries, which is constant current/ constant voltage (CCCV) method.

During this thesis, the charger is divided into six subsystems, and each system is being analyzed separately. These subsystems are the CCCV power supply, the voltage isolation circuit, the voltage balancing circuit, the State Of Charge computing circuit, the temperature monitoring circuit and the charger's micro-controller.

Finally, all subsystems are connected together and the result is the final circuit of the charging system.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....7

ABSTRACT.....9

ΜΕΡΟΣ Α'.....15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ 17

1.1	Βασικά συστατικά των κελιών και των μπαταριών	17
1.2	Ταξινόμηση των κελιών και των μπαταριών	18
1.2.1	Πρωτεύοντα Κελιά/ Μπαταρίες (Primary Cells or Batteries)	19
1.2.2	Δευτερεύοντα ή Επαναφορτιζόμενα Κελιά/ Μπαταρίες (Secondary or Rechargeable Cells or Batteries)	19
1.2.3	Αποθεματικές Μπαταρίες (Reserve Batteries).....	19
1.3	Αρχή λειτουργίας ενός κελιού.....	20
1.3.1	Εκφόρτιση	20
1.3.2	Φόρτιση.....	21
1.4	Θεωρητική Τάση, Χωρητικότητα και Ενέργεια Κελιού.....	21
1.4.1	Ελεύθερη ενέργεια	21
1.4.2	Θεωρητική Τάση	22
1.4.3	Θεωρητική Χωρητικότητα (Κουλομπική).....	22
1.4.4	Θεωρητική Ενέργεια	23
1.5	Ειδική Ενέργεια και Πυκνότητα Ενέργειας των Πραγματικών Μπαταριών.....	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΠΙΔΟΣΗ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ 27

2.1	Γενικά Χαρακτηριστικά	27
2.2	Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των Μπαταριών	27
2.2.1	Τάση Κελιού/Μπαταρίας.....	27
2.2.2	Κατανάλωση Ρεύματος κατά την εκφόρτιση	29
2.2.3	Τρόπος Εκφόρτισης (Σταθερού ρεύματος, Σταθερού Φορτίου, Σταθερής Ισχύος)	30
2.2.4	Θερμοκρασία της Μπαταρίας Κατά την Εκφόρτιση	30
2.2.5	Τύπος Εκφόρτισης (Συνεχής, Διακοπτόμενη).....	31
2.2.6	Ρύθμιση Τάσης.....	32
2.2.7	Σχεδίαση Μπαταρίας	32
2.2.8	Γήρανση της Μπαταρίας και Κατάσταση Αποθήκευσης.....	33
2.2.9	Επίδραση του Σχεδιασμού της Μπαταρίας.....	33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΟΙ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ (Li-ION) 35

3.1	Γενικά Χαρακτηριστικά.....	35
3.2	Χημεία	36
3.2.1	Υλικά θετικού ηλεκτροδίου	36
3.2.2	Υλικά αρνητικού Ηλεκτροδίου	37
3.2.3	Ηλεκτρολύτες	37
3.2.4	Υλικά διαχωριστών.....	38
3.2.5	Πρόσθετα ηλεκτρολυτών	38
3.3	Επιδόσεις και χαρακτηριστικά μπαταριών Li-ion.....	39
3.4	Χαρακτηριστικά Φόρτισης των Μπαταριών Li-ion	40
3.5	Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου Πολυμερών (PolymerLi-ionBatteries- LiPO).....	41
3.5.1	Πυκνότητα Ενέργειας των Μπαταριών LiPO	42
3.5.2	Χαρακτηριστικά Φόρτισης Μπαταριών LiPO	42
3.5.3	Δυνατότητες Μπαταριών LiPO ανάλογα με τον Βαθμό Εκφόρτισης	43
3.5.4	Επιδόσεις μπαταριών LiPO στις χαμηλές θερμοκρασίες	43
3.6	Οι Μπαταρίες LiFePO ₄ (Lithium Iron Phosphate)	45
3.6.1	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Μπαταριών LiFePO ₄	45
3.6.2	Ασφάλεια	46

3.6.3	Χαρακτηριστικά των Μπαταριών LiFePO ₄	46
3.6.4	Φόρτιση των Μπαταριών LiFePO ₄	47

ΜΕΡΟΣ Β'49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : DC ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ51

4.1	Εισαγωγή	51
4.2	Γραμμικά Τροφοδοτικά	51
4.3	Διακοπτικοί μετατροπείς DC-DC	53
4.3.1	Εισαγωγή	53
4.3.2	Έλεγχος των μετατροπέων DC-DC.....	54
4.3.3	DC-DC Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης.....	56
4.3.4	DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης	58
4.4	Διακοπτικά Τροφοδοτικά	59
4.5	Σχεδίαση του Τροφοδοτικού του Φορτιστή των Μπαταριών LiFePO ₄	61
4.5.1	Εισαγωγή	61
4.5.2	Επίπεδο Ισχύος Τροφοδοτικού	61
4.5.3	Επιλογή ολοκληρωμένου κυκλώματος DC-DC μετατροπέα	62
4.5.4	Σχεδίαση Κυκλώματος Τροφοδοτικού	65
4.5.4.1	Βασικές απαιτήσεις σχεδίασης.....	65
4.5.4.2	Σχεδίαση κυκλώματος.....	65
4.5.4.3	Περιγραφή και ταξινόμηση των στοιχείων του κυκλώματος του τροφοδοτικού	67
4.5.4.4	Κατασκευή μετασχηματιστή	75
4.5.4.5	Σχέδιο πλακέτας του τροφοδοτικού	77
4.5.4.6	Κατάλογος υλικών για την κατασκευή του τροφοδοτικού	77
4.5.4.7	Σύνοψη.....	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΚΕΛΙΟΥ.....81

5.1	Εισαγωγή	81
5.2	Σχεδίαση κυκλώματος απομόνωσης τάσης	82
5.2.1	Εισαγωγή	82
5.2.2	Σχεδίαση κυκλώματος	83
5.2.3	Σχεδίαση πλακέτας	87
5.3	Ολοκληρωμένο κύκλωμα για μέτρηση τάσης του κάθε κελιού	87
5.4	Σύνοψη	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΙΣΟΣΤΑΘΜΙΣΗ ΚΕΛΙΩΝ ΕΝΟΣ BATTERY PACK91

6.1	Εισαγωγή	91
6.2	Μέθοδος ισοστάθμισης κατά τον τερματισμό της φόρτισης	92
6.2.1	Εισαγωγή	92
6.2.2	Παράκαμψη φόρτισης.....	92
6.3	Μέθοδοι ενεργητικής ισοστάθμισης.....	93
6.3.1	Εισαγωγή	93
6.3.2	Μέθοδος μεταφοράς φόρτισης	93
6.3.3	Μετατροπείς ενέργειας	96
6.4	Μέθοδοι Παθητικής Ισοστάθμισης	98
6.5	Επιλογή τρόπου ισοστάθμισης για τον φορτιστή μπαταριών LiFePO ₄	98
6.6	Σχεδίαση του Κυκλώματος Ισοστάθμισης	99
6.6.1	Διαστασιολόγηση των αντιστάσεων.....	99
6.6.2	Επιλογή Διακοπών.....	101
6.6.2.1	Οι ημιαγωγικοί ελεγχόμενοι διακόπτες	101
6.6.2.2	Transistor μεταλλικών οξειδίων ημιαγωγών με επίδραση πεδίου (MOSFET).....	102
6.6.2.3	Σχεδίαση κυκλώματος ισοστάθμισης με διακόπτη N-MOSFET	103
6.6.3	Τελική πλακέτα ισοστάθμισης	103
6.6.4	Σύνοψη.....	104

6.7 Προγραμματισμός μικροεπεξεργαστή	105
6.7.1 Εισαγωγή	105
6.7.2 Κώδικας ισοστάθμισης	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (STATE OF CHARGE-SOC).....	111
7.1 Ορισμός του SOC	111
7.2 Μέθοδοι Προσδιορισμού του State Of Charge	111
7.2.1 Άμεση Μέτρηση.....	111
7.2.2 Προσδιορισμός του SOC μέσω της μέτρησης του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη.....	111
7.2.3 Προσδιορισμός του SOC μέσω της τάσης.....	112
7.2.4 Προσδιορισμός του SOC με βάση το ρεύμα (μέτρηση Coulomb).....	113
7.2.5 Προσδιορισμός του SOC μέσω μετρήσεων της εσωτερικής αντίστασης.....	114
7.3 Επιλογή ολοκληρωμένου κυκλώματος για τον προσδιορισμό του SOC	114
7.3.1 Εισαγωγή	114
7.3.2 Λειτουργία και χαρακτηριστικά του DS2788	114
7.3.3 Χρήση του DS2788	116
7.3.3.1 Εγκατάσταση και σύνδεση του DS2788 με τον υπολογιστή	116
7.3.3.2 Μενού του προγράμματος.....	118
7.3.3.3 Καρτέλες του προγράμματος.....	118
7.3.4 Σύνοψη.....	123
7.3.5 Παρουσίαση εναλλακτικής μεθόδου εύρεσης του SOC	124
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο : ΔΙΑΚΟΠΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	125
8.1 Εισαγωγή	125
8.2 Τερματισμός φόρτισης λόγω επίτευξης πλήρους φόρτισης	125
8.3 Τερματισμός φόρτισης λόγω υπερθέρμανσης.....	125
8.3.1 Εισαγωγή	125
8.3.2 Ανίχνευση υπερθέρμανσης μέσω ολοκληρωμένου κυκλώματος.....	126
8.3.2.1 Εισαγωγή.....	126
8.3.2.2 Σύνδεση του TMP36 με τον Μικροελεγκτή.....	126
8.3.2.3 Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή	127
8.3.2.4 Συνδεσμολογία διακοπής της φόρτισης	128
8.3.3 Εναλλακτική μέθοδος ανίχνευσης υπερθέρμανσης	129
8.3.4 Σύνοψη.....	130
8.4 Διακοπή της φόρτισης λόγω υπερφόρτισης	130
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο : ΠΡΟΒΟΛΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΟΘΟΝΗ LCD ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗ ..	131
9.1 Εισαγωγή	131
9.2 Σύνδεση της οθόνης με τον μικροελεγκτή	131
9.3 Προγραμματισμός του μικροελεγκτή.....	132
9.4 Τελικός προγραμματισμός μικροεπεξεργαστή	134
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΕΛΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΣΤΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ LiFePO₄	141
10.1 Εισαγωγή	141
10.2 Παρουσίαση τελικού κυκλώματος φορτιστή	148
10.3 Κόστος κατασκευής φορτιστή	150
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11^ο : ΣΥΝΟΨΗ	153
11.1 Σύνοψη σχεδίασης	153
11.2 Πλεονεκτήματα σχεδίασης.....	153
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	155
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	157
ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ CV (9V@0.3A)	159
ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ ARDUINO MEGA 2650.....	162
DS2788	164

ΜΕΡΟΣ Α΄

Το πρώτο μέρος της παρούσας διπλωματικής περιέχει τρία κεφάλαια στα παρουσιάζονται βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά των μπαταριών.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας, τα χαρακτηριστικά και βασικές έννοιες των μπαταριών. Οι αρχές και οι έννοιες που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο αφορούν όλα τα είδη μπαταριών. Ολόκληρο το κεφάλαιο πρόκειται για μία εισαγωγή έτσι ώστε να γίνει ομαλή η μετάβαση στις μπαταρίες Ιόντων Λιθίου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση των παραγόντων που επηρεάζουν την επίδοση των μπαταριών. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς ο τρόπος φόρτισης οποιασδήποτε μπαταρίας καθορίζεται σε σημαντικό βαθμό από αυτούς τους παράγοντες. Επομένως η μελέτη αυτών βοηθάει σημαντικά στον σχεδιασμό του φορτιστή και του κυκλώματος διαχείρισης της μπαταρίας.

Το τρίτο κεφάλαιο είναι και το πιο σημαντικό του πρώτου μέρους. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-ion). Γίνεται επίσης ειδική αναφορά στις μπαταρίες Ιόντων Λιθίου Πολυμερών (LiPO) καθώς και σε ένα σχετικά νέο είδος μπαταρίας Li-ion, της μπαταρίας LiFePO₄. Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να αναδειχτούν οι ιδιαιτερότητες των μπαταριών αυτών. Οι ιδιαιτερότητες αυτές καθορίζουν και σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο φόρτισής τους. Επίσης, στο τέλος του κεφαλαίου αυτού γίνεται κατανοητό ότι οι μπαταρίες Li-ion (άρα και οι LiFePO₄) και οι LiPO φορτίζονται ακριβώς με το ίδιο σύστημα φόρτισης καθώς και τα δύο αυτά είδη βασίζονται σε παρόμοια χημεία. Το σύστημα αυτό είναι το σύστημα σταθερού ρεύματος- σταθερής τάσης (CCCV) και το μόνο που αλλάζει σε κάθε περίπτωση είναι τα όρια της τάσης και του ρεύματος καθώς κάθε μπαταρία έχει διαφορετικά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

Επιλογικά, το πρώτο μέρος της διπλωματικής είναι η βάση για τον σχεδιασμό του φορτιστή και του συστήματος διαχείρισης των μπαταριών Li-ion. Μέσα από τη μελέτη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς μίας μπαταρίας κάτω από ορισμένες συνθήκες, γίνεται κατανοητός ο τρόπος διαχείρισης και φόρτισης, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η διάρκεια ζωής, η επίδοση και η απόδοση των μπαταριών που μας ενδιαφέρουν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Βασικές Έννοιες Μπαταριών

1.1 Βασικά συστατικά των κελιών και των μπαταριών

Μπαταρία είναι μία συσκευή η οποία μετατρέπει τη χημική ενέργεια κατευθείαν σε ηλεκτρική μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξειδοαναγωγής. Στην περίπτωση δε των επαναφορτιζόμενων συστημάτων, η μπαταρία επαναφορτίζεται μέσω της αντιστροφής της αντίδρασης αυτής. Αυτός ο τύπος αντίδρασης έγκειται στη μεταφορά ηλεκτρονίων από ένα υλικό σε ένα άλλο μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Καθώς η μπαταρία μετατρέπει ηλεκτροχημικά τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, δεν υπόκειται στους περιορισμούς του κύκλου Carnot τους οποίους θέτει ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής, όπως γίνεται για παράδειγμα στις θερμικές μηχανές. Οι μπαταρίες επομένως έχουν μεγαλύτερη απόδοση όσον αφορά τη μετατροπή ενέργειας.

Παρόλο που συνήθως χρησιμοποιείται ο όρος «μπαταρία», το βασικό ηλεκτροχημικό στοιχείο στο οποίο αναφερόμαστε είναι το «κελί» (cell). Μία μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα από τέτοια κελιά, τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμό αυτών, ανάλογα με την επιθυμητή τάση και χωρητικότητα.

Ένα κελί αποτελείται από τρία κύρια συστατικά:

1. Την άνοδο ή αρνητικό ηλεκτρόδιο- το αναγωγικό ή ηλεκτρόδιο καυσίμου- το οποίο αφήνει ηλεκτρόνια σε ένα εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
2. Την κάθοδο ή θετικό ηλεκτρόδιο- το οξειδωτικό ηλεκτρόδιο- το οποίο δέχεται ηλεκτρόνια από ένα εξωτερικό κύκλωμα και μειώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
3. Τον ηλεκτρολύτη- τον ιοντικό αγωγό- ο οποίος μέσω ιόντων επιτρέπει τη μετακίνηση φορέων μεταξύ της ανόδου και της καθόδου μέσα σε ένα κελί. Ο ηλεκτρολύτης έχει ως επί το πλείστον υγρή μορφή, όπως για παράδειγμα νερό ή άλλους διαλύτες με διαλυμένα άλατα, οξέα ή αλκάλια ούτως ώστε να διατηρείται η ιοντική αγωγιμότητα. Ορισμένες μπαταρίες χρησιμοποιούν ηλεκτρολύτες στέρεας μορφής, οι οποίοι έχουν την ιδιότητα της ιοντικής αγωγιμότητας στη θερμοκρασία λειτουργίας του κελιού.

Οι πιο συμφέροντες συνδυασμοί υλικών, όσον αφορά την άνοδο και την κάθοδο, είναι αυτοί οι οποίοι έχουν το μικρότερο βάρος και προσδίδουν στο κελί υψηλή τάση και χωρητικότητα. Ωστόσο, τέτοιου είδους συνδυασμοί δεν είναι πάντα πρακτικοί καθώς κάποια υλικά αντιδρούν με κάποια συστατικά του κελιού. Κάποιοι άλλοι λόγοι για την αδυναμία εφαρμογής συνδυασμών υψηλής αποδοτικότητας είναι η πόλωση που μπορεί να παρουσιαστεί, δυσκολία στη διαχείριση αυτών των υλικών και το υψηλό κόστος.

Προκειμένου να επιλεγεί η άνοδος θα πρέπει να διαθέτει ορισμένες ιδιότητες. Αυτές οι ιδιότητες είναι η αποδοτικότητα ως αναγωγικό μέσο, η υψηλή κουλομπική έξοδος (Ah/g), η καλή αγωγιμότητα, η χημική ευστάθεια, η ευκολία στην παραγωγή και το χαμηλό κόστος. Στην πράξη, τα μέταλλα χρησιμοποιούνται κυρίως ως υλικά ανόδου. Το πλέον κυρίαρχο υλικό ανόδου είναι ο ψευδάργυρος καθώς διαθέτει όλες τις παραπάνω επιθυμητές ιδιότητες. Το λίθιο, το

ελαφρύτερο μέταλλο, με υψηλό βαθμό ηλεκτροχημικής ισορροπίας, έχει γίνει πλέον αρκετά ελκυστικό ως υλικό ανόδου και οι συμβατοί ηλεκτρολύτες και τα σχέδια των κελιών έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα ούτως ώστε να ελέγχεται η δραστηριότητά του.

Η κάθοδος πρέπει να είναι ένα αποδοτικό οξειδωτικό μέσο, να έχει σταθερότητα όταν έρχεται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη και να έχει ωφέλιμη τάση λειτουργίας. Το οξυγόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν από το περιβάλλον, έτσι ώστε να εισαχθεί στο εσωτερικό του κελιού, όπως γίνεται στις μπαταρίες ψευδαργύρου/αέρα (zinc- air). Παρόλα αυτά, το πιο κοινό υλικό που χρησιμοποιείται ως κάθοδος είναι τα μεταλλικά οξείδια. Άλλα υλικά, όπως τα αλογόνα, το θείο και τα οξειδιά του, χρησιμοποιούνται σε ειδικά συστήματα μπαταριών.

Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει καλή ιοντική αγωγιμότητα αλλά να μην είναι ηλεκτρικά αγωγίμος, καθώς σε τέτοια περίπτωση θα προκαλούνταν εσωτερικό βραχυκύκλωμα. Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει ο ηλεκτρολύτης είναι να μην αντιδρά με τα υλικά της ανόδου και της καθόδου, η ελάχιστη δυνατή μεταβολή των ιδιοτήτων του κατά την αλλαγή θερμοκρασίας, η ασφάλεια στον χειρισμό του και το χαμηλό κόστος. Η πλειοψηφία των ηλεκτρολυτών είναι υδατικά διαλύματα, ωστόσο υπάρχουν σημαντικές εξαιρέσεις όπως για παράδειγμα στις μπαταρίες με υλικό ανόδου το λίθιο, όπου χρησιμοποιούνται τηγμένα άλατα και άλλοι μη υδατικοί ηλεκτρολύτες, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αντίδραση της ανόδου με τον ηλεκτρολύτη.

Σε ένα κελί, η άνοδος και η κάθοδος πρέπει να είναι ηλεκτρικά απομονωμένες προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν εσωτερικό βραχυκύκλωμα, ενώ και οι δύο περικλείονται από τον ηλεκτρολύτη. Σε ένα πραγματικό κελί, χρησιμοποιείται ένα υλικό προκειμένου να διαχωρίσει μηχανικά την άνοδο με την κάθοδο. Το υλικό διαχωρισμού, ωστόσο, είναι διαπερατό από τον ηλεκτρολύτη ούτως ώστε να διατηρείται η επιθυμητή ιοντική αγωγιμότητα.

Ένα κελί μπαταρίας μπορεί να παρασκευαστεί σε διάφορα σχήματα και διαμορφώσεις (κυλινδρικά, σε σχήμα κουμπιού, επίπεδα και πρισματικά) και επομένως τα συστατικά του κελιού είναι σχεδιασμένα έτσι, ώστε να προσαρμοστούν στην εκάστοτε σχεδίαση. Τα κελιά επίσης είναι σφραγισμένα με διάφορους τρόπους, ούτως ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα διαρροής και ξηρασίας του ηλεκτρολύτη. Κάποια κελιά είναι εφοδιασμένα με μέσα εξαερισμού έτσι ώστε να επιτρέπεται η διαφυγή συσσωρευμένων αερίων.

1.2 Ταξινόμηση των κελιών και των μπαταριών

Τα κελιά και κατ'επέκταση οι μπαταρίες διακρίνονται σε πρωτεύουσες (μη επαναφορτιζόμενες) ή δευτερεύουσες (επαναφορτιζόμενες). Η διάκριση αυτή γίνεται με βάση τη δυνατότητα που έχουν να επαναφορτίζονται ηλεκτρικά. Παράλληλα με αυτή την κύρια διάκριση χρησιμοποιούνται και άλλες ταξινομήσεις οι οποίες προσδιορίζουν συγκεκριμένες δομές ή σχέδια των μπαταριών.

1.2.1 Πρωτεύοντα Κελιά/ Μπαταρίες (Primary Cells or Batteries)

Οι μπαταρίες αυτές δεν έχουν τη δυνατότητα εύκολης ή αποτελεσματικής ηλεκτρικής επαναφόρτισης με αποτέλεσμα να εκφορτίζονται μία φορά και ύστερα να τίθενται σε αχρηστία. Τα κελιά στα οποία ο ηλεκτρολύτης περιέχεται σε κάποιο απορροφητικό ή διαχωριστικό υλικό (δηλαδή δεν υπάρχει ελεύθερος ή υγρής μορφής ηλεκτρολύτης) ονομάζονται « κελιά ξηρού τύπου».

Οι πρωτεύουσες μπαταρίες είναι μία βολική, συνήθως χαμηλού κόστους και ελαφριά πηγή «συσκευασμένης» ενέργειας. Το κύριο πλεονέκτημα των πρωτευουσών μπαταριών είναι ότι έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής κατά την αποθήκευση, μεγάλη πυκνότητα ενέργειας σε χαμηλές και μεσαίες τιμές εκφόρτισης, ελάχιστη έως μηδαμινή ανάγκη συντήρησης και ευκολία στη χρήση.

1.2.2 Δευτερεύοντα ή Επαναφορτιζόμενα Κελιά/ Μπαταρίες (Secondary or Rechargeable Cells or Batteries)

Οι μπαταρίες αυτές έχουν τη δυνατότητα ηλεκτρικής επαναφόρτισης, αφού προηγηθεί η εκφόρτισή τους, περνώντας ρεύμα από μέσα τους αντίθετης φοράς από αυτό της εκφόρτισης. Πρόκειται ουσιαστικά για συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και είναι γνωστές επίσης ως «μπαταρίες αποθήκευσης» ή συσσωρευτές.

Οι εφαρμογές κατά τις οποίες χρησιμοποιούνται δευτερεύουσες μπαταρίες μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

1. Εφαρμογές όπου οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες χρησιμοποιούνται ως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας. Είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένες, φορτίζονται από μία κύρια πηγή ενέργειας και μεταφέρουν την ενέργειά τους σε φορτία, ανάλογα με τη ζήτηση που υπάρχει.
2. Εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται και εκφορτίζονται όπως στην περίπτωση των πρωτευουσών μπαταριών. Ωστόσο, σε αντίθεση με τις πρωτεύουσες, οι δευτερεύουσες μπαταρίες επαναφορτίζονται ύστερα από κάθε χρήση αντί να αχρηστεύονται.

Κύρια χαρακτηριστικά των δευτερευουσών μπαταριών (εκτός από την ιδιότητά τους να επαναφορτίζονται) είναι η υψηλή πυκνότητα ισχύος, η δυνατότητα μεγάλου βαθμού εκφόρτισης (discharge rates), οι επίπεδες χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης και η καλές επιδόσεις τους κατά τη λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η πυκνότητα ενέργειας είναι σε γενικές γραμμές μικρότερη από αυτήν των πρωτευουσών μπαταριών. Επίσης η διατήρηση του φορτίου τους είναι χαμηλότερη από αυτήν των περισσότερων πρωτευουσών μπαταριών. Παρόλα αυτά, η χωρητικότητα των δευτερευουσών μπαταριών, η οποία χάνεται κατά την αποθήκευση, μπορεί να αναπληρωθεί μέσω της επαναφόρτισής τους.

Ορισμένες μπαταρίες, γνωστές ως «μηχανικά επαναφορτιζόμενες», επαναφορτίζονται μέσω της αντικατάστασης του εκφορτισμένου ηλεκτροδίου, συνήθως της μεταλλικής ανόδου, με ένα καινούργιο.

1.2.3 Αποθεματικές Μπαταρίες (Reserve Batteries)

Σε αυτόν τον τύπο μπαταριών, κάποιο από τα βασικά συστατικά τους είναι διαχωρισμένο από το υπόλοιπο της μπαταρίας, με το οποίο υπάρχει πιθανότητα να αντιδράσει. Σε αυτήν την κατάσταση,

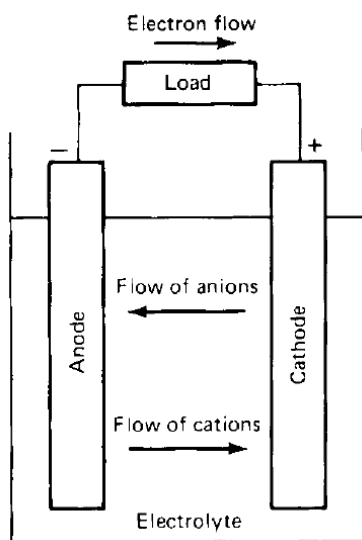
η χημική φθορά ή η αυτό-εκφόρτιση (self-discharge) περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό και η μπαταρία είναι ικανή να αποθηκευτεί για μεγάλες χρονικές περιόδους. Συνήθως ο ηλεκτρολύτης είναι το συστατικό το οποίο απομονώνεται από το υπόλοιπο της μπαταρίας. Σε άλλα συστήματα, όπως στις θερμικές μπαταρίες, η μπαταρία είναι ανενεργή μέχρι να θερμανθεί. Αυτό γίνεται μέσω της τήξης του στερεού ηλεκτρολύτη ο οποίος έπειτα γίνεται αγωγίμος.

Οι αποθεματικές μπαταρίες χρησιμοποιούνται όταν υπάρχουν ανάγκες για υπερβολικά μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης, είτε όταν οι συνθήκες του περιβάλλοντος είναι αντίξοες όσον αφορά την αποθήκευση.

1.3 Αρχή λειτουργίας ενός κελιού

1.3.1 Εκφόρτιση

Η λειτουργία ενός κελιού κατά την εκφόρτιση φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 1.3.1.

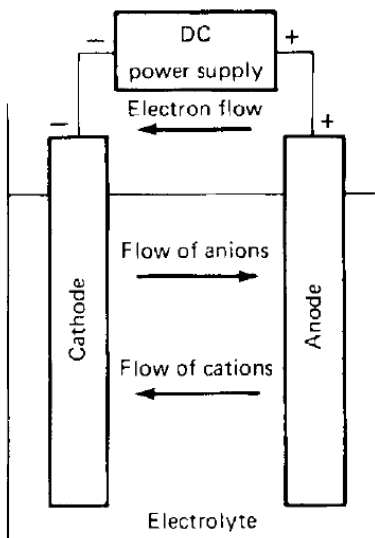


Εικόνα 1.3.1: Ηλεκτροχημική λειτουργία ενός κελιού κατά την εκφόρτιση

Όταν το κελί συνδεθεί σε ένα εξωτερικό φορτίο, τότε υπάρχει διέλευση ηλεκτρονίων από την άνοδο, η οποία οξειδώνεται, μέσω του φορτίου προς την κάθοδο, η οποία υφίσταται χημική αναγωγή. Το ηλεκτρικό κύκλωμα ολοκληρώνεται με τον ηλεκτρολύτη μέσω της ροής ανιόντων (αρνητικών ιόντων) και κατιόντων (θετικών ιόντων) προς την άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα.

1.3.2 Φόρτιση

Κατά την επαναφόρτιση ενός δευτερεύοντος κελιού, η ροή του ρεύματος είναι αντίστροφη και η οξείδωση λαμβάνει χώρα στο θετικό ηλεκτρόδιο ενώ η αναγωγή στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3.2. Καθώς η άνοδος αποτελεί εξ ορισμού το ηλεκτρόδιο στο οποίο γίνεται η οξείδωση και η κάθοδος το ηλεκτρόδιο στο οποίο γίνεται η αναγωγή, το θετικό ηλεκτρόδιο τώρα θα είναι η άνοδος και το αρνητικό η κάθοδος.



Εικόνα 1.3.2: Ηλεκτροχημική λειτουργία ενός κελιού κατά τη φόρτιση

1.4 Θεωρητική Τάση, Χωρητικότητα και Ενέργεια Κελιού

Η θεωρητική τάση και χωρητικότητα ενός κελιού είναι συνάρτηση των υλικών της ανόδου και της καθόδου.

1.4.1 Ελεύθερη ενέργεια

Για να μπορέσουμε να προβλέψουμε αν μια χημική αντίδραση μπορεί να συμβεί σε κάποια θερμοκρασία ή όχι, πρέπει να υπολογίσουμε ένα θερμοδυναμικό μέγεθος που ονομάζεται ελεύθερη ενέργεια ή ελεύθερη ενθαλπία. Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας είναι συνάρτηση της μεταβολής της ενθαλπίας και της εντροπίας της χημικής αντίδρασης. Κάθε φορά που λαμβάνει χώρα μία αντίδραση, υπάρχει μείωση της ελεύθερης ενέργειας του συστήματος η οποία εκφράζεται ως:

$$\Delta G^0 = -nFE^0$$

Όπου:

F = σταθερά Faraday ($\approx 96,500C$ ή $26,8 Ah$)

n = πλήθος ηλεκτρονίων που εμπλέκονται στην αντίδραση

E^0 = τυπικό δυναμικό, V

1.4.2 Θεωρητική Τάση

Η τυπικό δυναμικό ενός κελιού καθορίζεται από τον τύπο των ενεργών στοιχείων που περιέχονται στο κελί. Μπορεί να υπολογιστεί από τα δεδομένα της ελεύθερης ενέργειας ή να ληφθεί πειραματικά. Μία λίστα δυναμικών ηλεκτροδίων (δυναμικά αναγωγής) υπό τυποποιημένες συνθήκες δίνεται στον πίνακα 1.1.

Το τυπικό δυναμικό ενός κελιού μπορεί να υπολογιστεί από τα τυποποιημένα δυναμικά ηλεκτροδίων όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\text{άνοδος(δυναμικό οξειδωσης)} + \text{κάθοδος(δυναμικό αναγωγής)} = \text{τυπικό δυναμικό κελιού}$$

Η τάση ενός κελιού εξαρτάται επίσης από άλλους παράγοντες, όπως η συγκέντρωση και η θερμοκρασία.

1.4.3 Θεωρητική Χωρητικότητα (Κουλομπική)

Η θεωρητική χωρητικότητα ενός κελιού καθορίζεται από την ποσότητα των ενεργών στοιχείων στο εσωτερικό του. Εκφράζεται ως η συνολική ποσότητα ηλεκτρισμού που υφίσταται κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση και έχει ως μονάδες τα coulombs ή τα αμπερώρια (ampere-hours). Η χωρητικότητα μιας μπαταρίας εκφρασμένη σε αμπερώρια είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ποσότητα ηλεκτρισμού που προέρχεται από τα ενεργά στοιχεία. Θεωρητικά 1 γραμοϊσοδύναμο υλικού φέρει 96,487 C ή 26.8 Ah (ένα γραμοϊσοδύναμο είναι το ατομικό ή μοριακό βάρος ενός υλικού σε γραμμάρια διαιρεμένο με τον αριθμό ηλεκτρονίων που εμπλέκονται στην αντίδραση).

Η ηλεκτροχημική ισοδυναμία κάποιων συνήθων υλικών φαίνεται στον πίνακα 1.1.

Η θεωρητική χωρητικότητα ενός κελιού, η οποία βασίζεται εξ ολοκλήρου στα ενεργά υλικά τα οποία συμμετέχουν στην ηλεκτροχημική διαδικασία, υπολογίζεται από το ισοδύναμο βάρος των αντιδρώντων.

Ομοίως, η χωρητικότητα εκφρασμένη σε αμπερώρια (ampere-hour capacity) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα δεδομένα που αφορούν τα αμπερώρια ανά κυβικό εκατοστό (Ah/cm^3), όπως φαίνεται στον πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά Υλικών Ηλεκτροδίων

Material	Atomic or molecular weight, g	Standard reduction potential at 25°C, V	Valence change	Melting point, °C	Density, g/cm ³	Electrochemical equivalents		
						Ah/g	g/Ah	Ah/cm ³ ‡
Anode materials								
H ₂	2.01	0 -0.83	2	—	—	26.59	0.037	
Li	6.94	-3.01	1	180	0.54	3.86	0.259	2.06
Na	23.0	-2.71	1	98	0.97	1.16	0.858	1.14
Mg	24.3	-2.38 -2.69	2	650	1.74	2.20	0.454	3.8
Al	26.9	-1.66	3	659	2.69	2.98	0.335	8.1
Ca	40.1	-2.84 -2.35	2	851	1.54	1.34	0.748	2.06
Fe	55.8	-0.44 -0.88	2	1528	7.85	0.96	1.04	7.5
Zn	65.4	-0.76 -1.25	2	419	7.14	0.82	1.22	5.8
Cd	112.4	-0.40 -0.81	2	321	8.65	0.48	2.10	4.1
Pb	207.2	-0.13	2	327	11.34	0.26	3.87	2.9
(Li)C ₆ ⁽¹⁾	72.06	-2.8	1	—	2.25	0.37	2.68	0.84
MH ⁽²⁾	116.2	-0.83	2	—	—	0.45	2.21	—
CH ₃ OH	32.04	—	6	—	—	5.02	0.20	—
Cathode materials								
O ₂	32.0	1.23 0.40	4	—	—	3.35	0.30	
Cl ₂	71.0	1.36	2	—	—	0.756	1.32	
SO ₂	64.0	—	1	—	—	0.419	2.38	
MnO ₂	86.9	1.28	1	—	5.0	0.308	3.24	1.54
NiOOH	91.7	0.49	1	—	7.4	0.292	3.42	2.16
CuCl	99.0	0.14	1	—	3.5	0.270	3.69	0.95
FeS ₂	119.9	—	4	—	—	0.89	1.12	4.35
Ag ₂ O	123.8	0.57	2	—	7.4	0.432	2.31	3.20
Br ₂	159.8	1.07	2	—	—	0.335	2.98	
HgO	216.6	0.10	2	—	11.1	0.247	4.05	2.74
Ag ₂ O	231.7	0.35	2	—	7.1	0.231	4.33	1.64
PbO ₂	239.2	1.69	2	—	9.4	0.224	4.45	2.11
Li _x CoO ₂ ⁽³⁾	98	-2.7	0.5	—	—	0.137	7.29	—
I ₂	253.8	0.54	2	—	4.94	0.211	4.73	1.04

1.4.4 Θεωρητική Ενέργεια

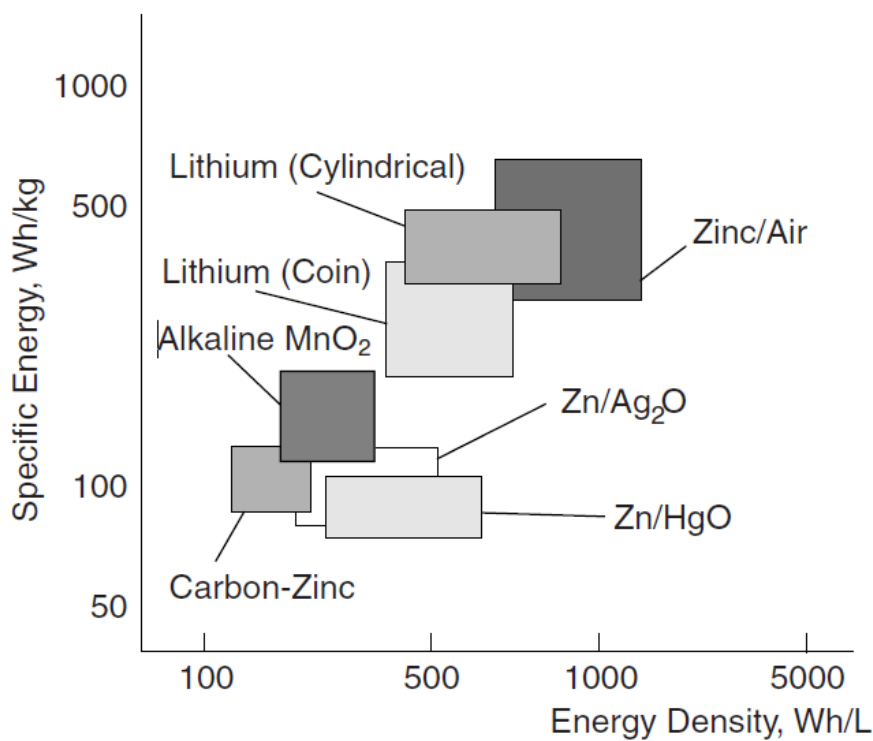
Η χωρητικότητα ενός κελιού μπορεί να εκτιμηθεί και από την ενέργειά του, λαμβάνοντας με αυτόν τον τρόπο υπόψη την τάση και την ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου. Η θεωρητική τιμή της χωρητικότητας είναι και η μέγιστη τιμή που μπορεί να μεταφερθεί από ένα ηλεκτροχημικό σύστημα. Η τιμή αυτή υπολογίζεται ως:

$$Watt\text{hour}(Wh) = Voltage \times Ampere - hour(Ah)$$

1.5 Ειδική Ενέργεια και Πυκνότητα Ενέργειας των Πραγματικών Μπαταριών

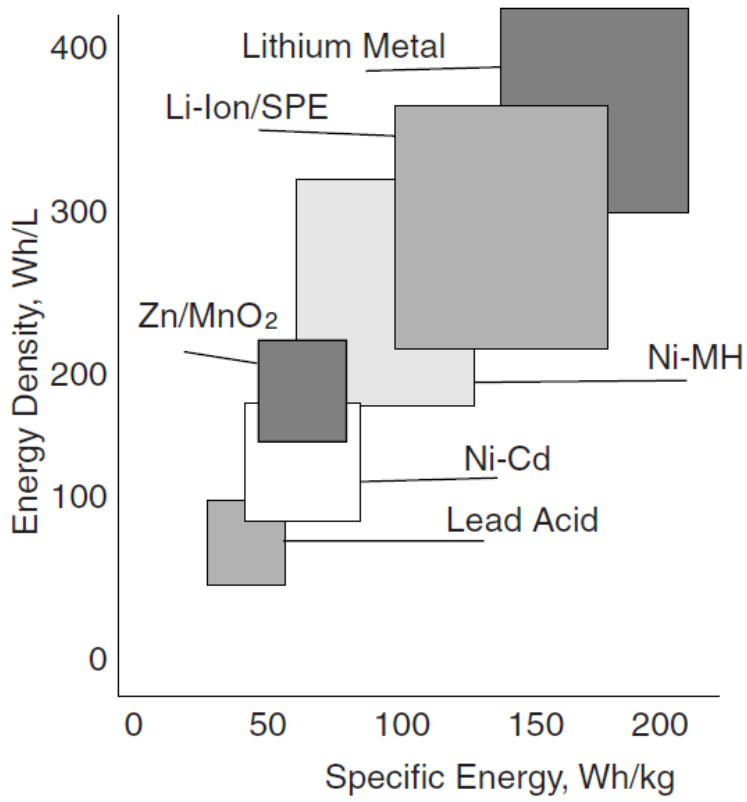
Οι θεωρητικές τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών ενός κελιού συζητήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Συνοπτικά, η μέγιστη ενέργεια που μεταφέρεται από ένα ηλεκτροχημικό σύστημα εξαρτάται από το είδος (καθορίζει την τάση) και την ποσότητα (καθορίζει την χωρητικότητα) των ενεργών στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Στην πραγματικότητα ωστόσο, ένα κελί μπορεί να διαθέτει μόνο ένα μέρος της θεωρητικής ενέργειας του. Αυτό συμβαίνει λόγω του ηλεκτρολύτη και των μη αντιδρώντων συστατικών που προστίθενται στο βάρος και τον όγκο της μπαταρίας. Ένας άλλος παράγοντας που συμβάλλει σε αυτό είναι ότι η μπαταρία δεν εκφορτίζεται στη θεωρητική της τάση (με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η τιμή της μέσης τάσης), ούτε εκφορτίζεται έως ότου φτάσει τα 0 V (με αυτόν τον τρόπο μειώνονται τα αμπερώρια). Εκτός αυτού, τα ενεργά στοιχεία σε μία πραγματική μπαταρία συνήθως δεν διαθέτουν στοιχειωμετρική ισορροπία. Αυτό προκαλεί μείωση της ειδικής ενέργειας καθώς χρησιμοποιείται περισσότερη ποσότητα ενεργών υλικών από αυτή που πραγματικά είναι απαραίτητη.

Στις εικόνες 1.5(a) και 1.5(b) παρουσιάζεται ένα γράφημα της ειδικής ενέργειας (Wh/kg) και της πυκνότητας ενέργειας (Wh/L) των πιο διαδεδομένων μπαταριών.



(a)

Εικόνα 1.3(a) Ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας πρωτεύουσων μπαταριών



(b)

Εικόνα 1.3(b) Ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας επαναφορτιζόμενων μπαταριών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Παράγοντες που επηρεάζουν την επίδοση των Μπαταριών

2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Ένα μέγεθος το οποίο είναι κύριο χαρακτηριστικό μίας μπαταρίας είναι η ειδική ενέργεια. Παρόλο που οι ονομαστική τιμή της ειδικής ενέργειας βοηθά στον χαρακτηρισμό της ενέργειας εξόδου κάθε μπαταρίας, η επίδοση της κάθε μπαταρίας μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά κάτω από ορισμένες συνθήκες χρήσης. Ο κυριότερος λόγος για αυτήν τη διαφοροποίηση είναι η φόρτιση της μπαταρίας κάτω από διαφορετικές συνθήκες από αυτές που είναι προκαθορισμένες για την κάθε μπαταρία.

2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των Μπαταριών

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά, τη χωρητικότητα, την ενέργεια εξόδου και την απόδοση μιας μπαταρίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω πολλών πιθανών αλληλεπιδράσεων, η επίδραση ενός παράγοντα είναι συνήθως μεγαλύτερη κάτω από ορισμένες συνθήκες λειτουργίας.

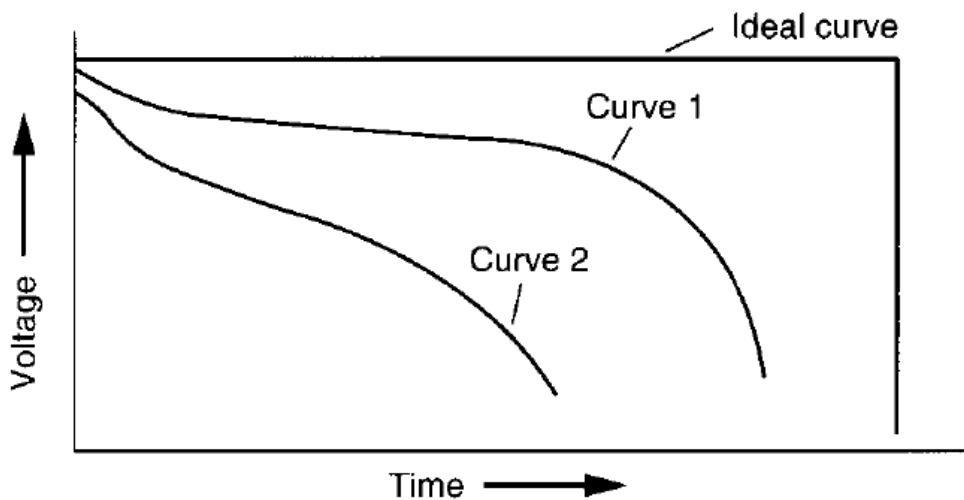
Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και για ένα συγκεκριμένο τύπο κελιού ή μπαταρίας, υπάρχουν διαφορές από κατασκευαστή σε κατασκευαστή, όσον αφορά την επίδοσή τους. Γι αυτό το λόγο, προκειμένου να προσδιοριστούν τα ειδικά χαρακτηριστικά μίας μπαταρίας, θα πρέπει πρώτα να μελετηθούν τα τεχνικά δεδομένα που δίνει ο κατασκευαστής.

2.2.1 Τάση Κελιού/Μπαταρίας

Υπάρχουν διαφορετικές χαρακτηριστικές τιμές τάσης που αφορούν κάποιο κελί ή μπαταρία:

1. Η *θεωρητική τάση* είναι συνάρτηση των υλικών της ανόδου και της καθόδου, της σύνθεσης του ηλεκτρολύτη και της θερμοκρασίας (συνήθως ορίζεται στους 25°C).
2. Η *τάση ανοιχτού κυκλώματος* είναι η τάση που υπάρχει χωρίς την παρουσία κάποιου φορτίου και η τιμή της είναι συνήθως κοντά στην τιμή της θεωρητικής τάσης.
3. Η *τάση κλειστού κυκλώματος* είναι η τάση υπό φορτίο.
4. Η *ονομαστική τάση* είναι η τάση η οποία λαμβάνεται γενικά ως τυπική τάση λειτουργίας μίας μπαταρίας.
5. Η *τάση λειτουργίας* είναι πιο αντιπροσωπευτική της τάσης της μπαταρίας, όταν αυτή λειτουργεί υπό φορτίο και η τιμή της είναι μικρότερη από αυτή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος.
6. Η *μέση τάση* είναι η τάση η μέση τιμή των τάσεων που παρατηρούνται κατά την εκφόρτιση.
7. Η *τάση μέσου* είναι η κεντρική τάση (στο μέσο της καμπύλης εκφόρτισης) κατά την εκφόρτιση του κελιού ή της μπαταρίας.
8. Η *τελική ή τάση αποκοπής* έχει ορισθεί ως τιμή τάσης στην οποία σταματάει η εκφόρτιση. Συνήθως είναι η τάση αυτή κατά την οποία έχει μεταφερθεί σχεδόν όλο το φορτίο του κελιού ή της μπαταρίας. Η τάση αποκοπής μπορεί επίσης να καθοριστεί από τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής.

Κατά την εκφόρτιση ενός κελιού ή μπαταρίας, η τάση του είναι χαμηλότερη από τη θεωρητική τάση. Η διαφορά αυτή προκύπτει από τις ωμικές απώλειες λόγω της αντίστασης του κελιού και της πόλωσης που υπάρχει μεταξύ των ενεργών στοιχείων κατά την εκφόρτιση. Αυτό φαίνεται καθαρά στην εικόνα 2.2.1. Στην ιδανική περίπτωση, η εκφόρτιση της μπαταρίας ακολουθεί τη θεωρητική τάση έως ότου καταναλωθούν τα ενεργά στοιχεία και η χωρητικότητα χρησιμοποιηθεί εξ ολοκλήρου. Η τάση έπειτα πέφτει στο μηδέν. Υπό πραγματικές συνθήκες, η καμπύλη εκφόρτισης προσεγγίζει τη δεύτερη και τρίτη καμπύλη (curve 1, curve 2) της εικόνας 2.2.1. Η αρχική τάση του κελιού υπό φορτίο είναι χαμηλότερη από τη θεωρητική τιμή λόγω της εσωτερικής αντίστασης και των ωμικών απωλειών που υπάρχουν πάνω σε αυτή, καθώς και λόγω του φαινομένου της πόλωσης στα δύο ηλεκτρόδια. Η τάση επίσης πέφτει κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, καθώς η εσωτερική αντίσταση του κελιού αυξάνεται λόγω συσσώρευσης των προϊόντων της εκφόρτισης, της ενεργοποίησης και της συγκέντρωσης, της πόλωσης και άλλων συγγενών παραγόντων. Η καμπύλη 2 (curve 2) είναι παρόμοια με την καμπύλη 1 (curve 1) αλλά αντιπροσωπεύει ένα κελί με υψηλότερη εσωτερική αντίσταση ή μεγαλύτερο ποσοστό εκφόρτισης ή και τα δύο. Όσο η εσωτερική αντίσταση του κελιού ή το ρεύμα εκφόρτισης αυξάνεται, τόσο η τάση εκφόρτισης μειώνεται.



Εικόνα 2.2.1 Χαρακτηριστική καμπύλη εκφόρτισης

Η ειδική ενέργεια που μεταφέρεται στην πράξη από μία μπαταρία είναι επομένως μικρότερη από τη θεωρητική ειδική ενέργεια καθώς:

1. Η μέση τάση κατά την εκφόρτιση είναι χαμηλότερη από τη θεωρητική.
2. Η μπαταρία δεν εκφορτίζεται μέχρι τα μηδέν Volts και δεν χρησιμοποιούνται όλα τα διαθέσιμα αμπερώρια.

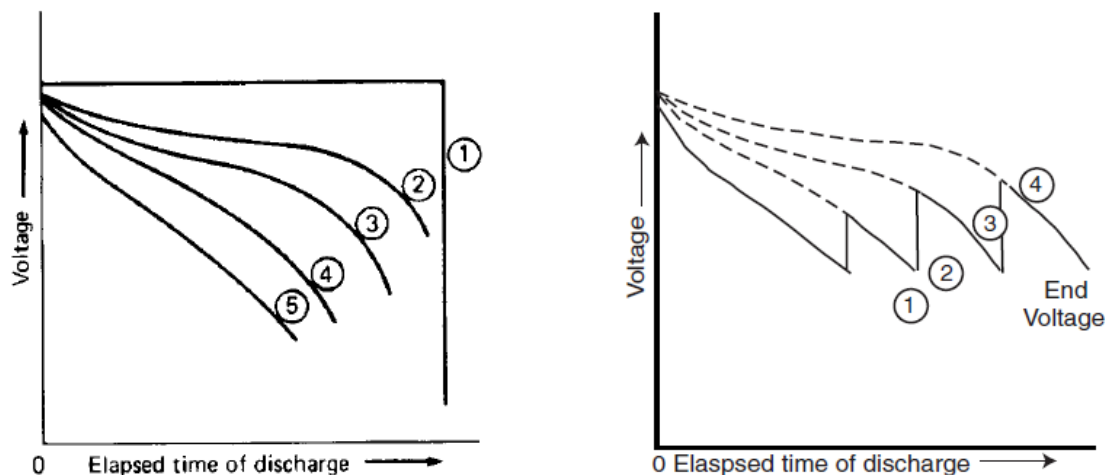
Καθώς η ειδική ενέργεια ισούται με:

$$\frac{\text{Watthours}}{\text{gram}} = \text{Voltage} \times \frac{\text{Ampere hours}}{\text{gram}}$$

η μεταφερόμενη ειδική ενέργεια είναι χαμηλότερη από τη θεωρητική αφού και οι δύο παράγοντες της εξίσωσης είναι χαμηλότεροι.

2.2.2 Κατανάλωση Ρεύματος κατά την εκφόρτιση

Καθώς η κατανάλωση ρεύματος της μπαταρίας αυξάνεται, οι ωμικές απώλειες και τα φαινόμενα πόλωσης αυξάνονται, η εκφόρτιση πραγματοποιείται σε χαμηλότερη τάση και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μειώνεται. Η εικόνα 2.2.2 δείχνει κάποιες τυπικές καμπύλες εκφόρτισης συναρτήσε του ρεύματος που καταναλώνεται. Σε εξαιρετικά χαμηλά ρεύματα (καμπύλη 2), η εκφόρτιση μπορεί να προσεγγίσει τη θεωρητική τάση και χωρητικότητα. Καθώς η κατανάλωση ρεύματος αυξάνεται (καμπύλες 3-5), η τάση εκφόρτισης μειώνεται, η κλίση της καμπύλης εκφόρτισης γίνεται μεγαλύτερη και η διάρκεια ζωής και η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνονται.



Εικόνα 2.2.2 : (a) Χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης μπαταρίας ανάλογα με το επίπεδο τάσης. (b) Χαρακτηριστικές καμπύλες μίας μπαταρίας που εκφορτίζεται από υψηλά σε χαμηλά ποσοστά εκφόρτισης.

Έστω μία μπαταρία φτάνει ένα ορισμένο επίπεδο τάσης (όπως για παράδειγμα την τάση αποκοπής) υπό ένα δεδομένο ρεύμα εκφόρτισης. Αν η μπαταρία αυτή χρησιμοποιηθεί με μικρότερο βαθμό εκφόρτισης, τότε η τάση της θα αυξηθεί και θα κερδίσει επιπλέον χωρητικότητα ή διάρκεια ζωής, μέχρι να φτάσει την τάση αποκοπής. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2.2(b), η εκφόρτιση γίνεται αρχικά με το μεγαλύτερο βαθμό εκφόρτισης μέχρι να φτάσει στην καθορισμένη τάση αποκοπής. Ο βαθμός εκφόρτισης τότε μειώνεται στο επόμενο χαμηλότερο επίπεδο. Η τάση σε αυτήν την περίπτωση αυξάνεται και η εκφόρτιση συνεχίζει έως ότου φτάσει ξανά την τάση αποκοπής. Αυτή η διαδικασία μπορεί να συνεχιστεί αντίστοιχα με επόμενους χαμηλότερους βαθμούς εκφόρτισης. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας λαμβάνεται διαφορετική και τους διάφορους βαθμούς εκφόρτισης. Ωστόσο η συνολική καμπύλη εκφόρτισης για τους χαμηλότερους βαθμούς εκφόρτισης προφανώς χάνεται, όπως φαίνεται από τις διακεκομμένες γραμμές της εικόνας 2.2.2(b).

Βαθμός “C”: Μία διαδεδομένη μέθοδος που βοηθάει στην ένδειξη της εκφόρτισης αλλά και του ρεύματος φόρτισης, είναι ο βαθμός “C”, ο οποίος εκφράζεται ως:

$$I = M \times C_n$$

Όπου

$I =$ ρεύμα εκφόρτισης, *Amperes*

$C =$ είναι η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah

$n =$ είναι ο χρόνος, εκφρασμένος σε ώρες, στον οποίο είναι ιδιωμένη η χωρητικότητα

$M =$ πολλαπλάσιο ή κλάσμα του C

Για παράδειγμα, ο βαθμός εκφόρτισης 0.1C ή C/10 για μία μπαταρία χωρητικότητας 5Ah είναι 0.5 A.

2.2.3 Τρόπος Εκφόρτισης (Σταθερού ρεύματος, Σταθερού Φορτίου, Σταθερής Ισχύος)

Ο τρόπος εκφόρτισης μίας μπαταρίας επιδρά σημαντικά στις επιδόσεις της. Γι αυτό το λόγο, προτείνεται ο τρόπος εκφόρτισης που χρησιμοποιείται κατά την τυποποίηση και τους ελέγχους, να είναι ο ίδιος με αυτόν που απαιτείται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή για την οποία ελέγχεται η μπαταρία.

Όταν μία μπαταρία εκφορτιστεί μέχρι κάποιο συγκεκριμένο σημείο, τότε θα έχει μεταφέρει τα ίδια αμπερόρια στο φορτίο, ανεξάρτητα από τον τρόπο εκφόρτισης. Ωστόσο, εφόσον κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, το ρεύμα διαφέρει ανάλογα με τον τρόπο εκφόρτισης, ο χρόνος εξυπηρέτησης ή οι «ώρες εκφόρτισης» μέχρι εκείνο το σημείο, θα διαφέρουν αντίστοιχα.

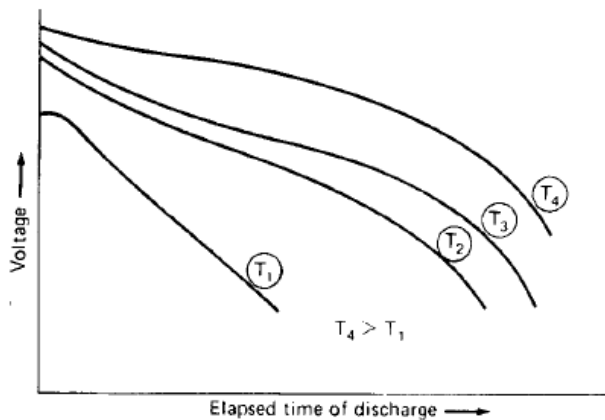
Τρεις από τους βασικούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να εκφορτιστεί μία μπαταρία είναι οι παρακάτω:

1. Σταθερή Αντίσταση: Η αντίσταση του φορτίου παραμένει σταθερή κατά την εκφόρτιση (το ρεύμα μειώνεται κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης ανάλογα με τη μείωση της τάσης της μπαταρίας).
2. Σταθερό Ρεύμα: Το ρεύμα παραμένει σταθερό κατά την εκφόρτιση.
3. Σταθερή Ισχύς: Η τιμή του ρεύματος αυξάνεται κατά την εκφόρτιση όσο η τάση της μπαταρίας μειώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εκφορτίζεται η μπαταρία σε ένα σταθερό επίπεδο ισχύος (ισχύς=ρεύμα * τάση).

2.2.4 Θερμοκρασία της Μπαταρίας Κατά την Εκφόρτιση

Η θερμοκρασία στην οποία μία μπαταρία εκφορτίζεται έχει μεγάλη επίδραση στη διάρκεια ζωής της (χωρητικότητα) και στις χαρακτηριστικές της τάσης της. Αυτό συμβαίνει λόγω της αναγωγής κατά τη χημική δραστηριότητα και της αύξησης της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας στις χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό αναδεικνύεται στην εικόνα 2.2.5, όπου φαίνονται τέσσερις καμπύλες εκφόρτισης ίδιου ρεύματος αλλά με σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας της μπαταρίας (T_1 σε T_4), με την T_4 να αντιπροσωπεύει μία εκφόρτιση σε θερμοκρασία δωματίου. Μείωση της θερμοκρασίας κατά την

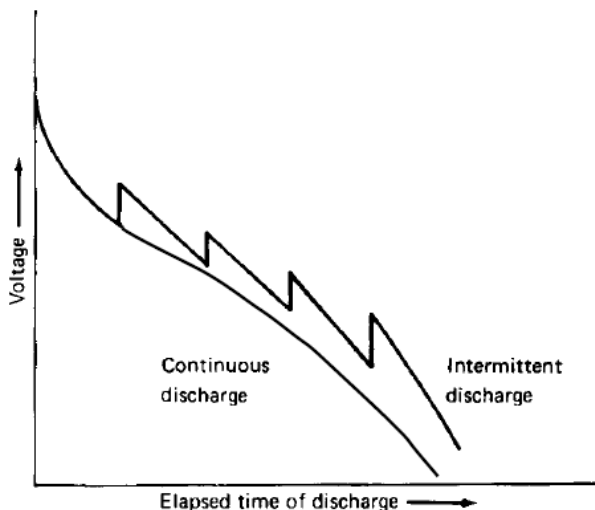
εκφόρτιση οδηγεί σε μείωση της χωρητικότητας καθώς και αύξηση στις κλίσεις της καμπύλης εκφόρτισης. Τα ειδικά χαρακτηριστικά και το προφίλ της εκφόρτισης διαφέρουν από μπαταρία σε μπαταρία, ωστόσο σε γενικές γραμμές, η καλύτερη επίδοση λαμβάνεται μεταξύ 20°C και 40°C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες σημειώνεται μείωση της εσωτερικής αντίστασης, η τάση εκφόρτισης αυξάνεται και επομένως η χωρητικότητα και η ενέργεια εξόδου αυξάνουν επίσης. Παρόλα αυτά, με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνεται και η χημική δραστηριότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κάποιες φορές η αύξηση της χημικής δραστηριότητας να είναι τόσο ραγδαία κατά την εκφόρτιση (φαινόμενο το οποίο ονομάζεται αυτό-εκφόρτιση) που να προκληθεί απώλεια χωρητικότητας.



Εικόνα 2.2.5 Επίδραση της θερμοκρασίας στη χωρητικότητα της μπαταρίας.

2.2.5 Τύπος Εκφόρτισης (Συνεχής, Διακοπτόμενη)

Όταν μία μπαταρία μείνει ανενεργή μετά από μία εκφόρτιση, τότε λαμβάνουν χώρα φυσικές και χημικές αλλαγές οι οποίες οδηγούν σε ανάκτηση της τάσης. Με αυτόν τον τρόπο, η τάση της μπαταρίας, η οποία μειώθηκε κατά τη βαθιά εκφόρτιση, θα αυξηθεί ύστερα από μία περίοδο ηρεμίας. Αυτή η διαδικασία δίνει μία πριονωτή καμπύλη εκφόρτισης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2.6. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε παράταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

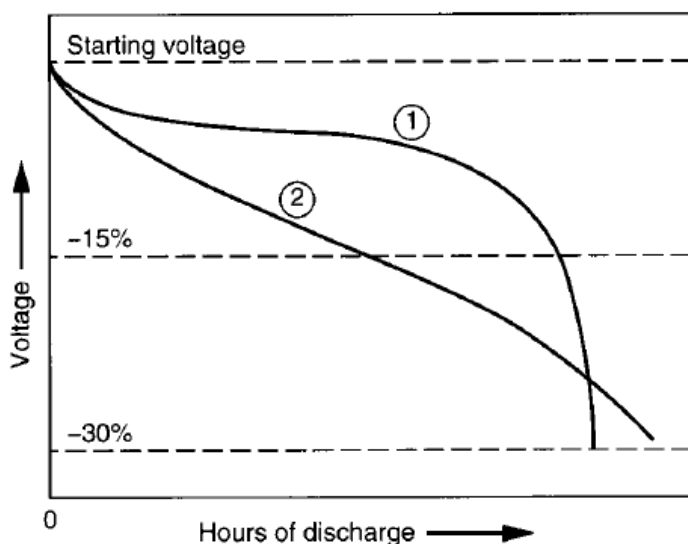


Εικόνα 2.2.6 Επίδραση της διακοπτόμενης εκφόρτισης μίας μπαταρίας.

2.2.6 Ρύθμιση Τάσης

Η ρύθμιση τάσης που απαιτείται από κάποια εφαρμογή παίζει μεγάλο ρόλο στη χωρητικότητα και στη διάρκεια ζωής μίας μπαταρίας. Όταν ο σχεδιασμός μίας συσκευής είναι τέτοιος, ώστε αυτή να λειτουργεί στη χαμηλότερη δυνατή τάση και στο μεγαλύτερο εύρος τάσης, τότε προκύπτει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη χωρητικότητα και μακρύτερη διάρκεια ζωής.

Στην εικόνα 2.2.7 συγκρίνονται δύο τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης: Η καμπύλη 1 απεικονίζει μία μπαταρία η οποία έχει επίπεδη (flat) καμπύλη εκφόρτισης, ενώ η καμπύλη 2 απεικονίζει μία μπαταρία η οποία έχει πιο επικλινή καμπύλη εκφόρτισης. Σε εφαρμογές όπου ο εξοπλισμός δεν έχει ανοχή μεγάλου εύρους τάσεων και είναι περιορισμένος, για παράδειγμα έως τη στάθμη -15%, τότε η μπαταρία με την επίπεδη καμπύλη εκφόρτισης εξυπηρετεί αποτελεσματικότερα την εφαρμογή. Από την άλλη μεριά, αν οι μπαταρίες μπορούν να εκφορτιστούν μέχρι τα χαμηλότερα όρια τάσης, τότε η διάρκεια ζωής των μπαταριών με επικλινή καμπύλη εκφόρτισης είναι μεγαλύτερη και γι αυτό το λόγο υπερτερεί έναντι των μπαταριών με επίπεδη καμπύλη εκφόρτισης.



Εικόνα 2.2.7 Σύγκριση επίπεδης (1) και επικλινούς (2) καμπύλης εκφόρτισης.

2.2.7 Σχεδίαση Μπαταρίας

Σχεδίαση Ηλεκτροδίων: Τα κελιά τα οποία είναι σχεδιασμένα για τη μεγαλύτερη δυνατή διάρκεια ζωής ή για μεγάλη χωρητικότητα σε μικρές ή μέσες εκφορτίσεις περιέχουν τη μέγιστη ποσότητα ενεργών στοιχείων. Σε άλλη περίπτωση, κελιά τα οποία προορίζονται για υψηλές επιδόσεις, είναι σχεδιασμένα με μεγάλα ηλεκτρόδια ή επιφάνειες αντίδρασης και τα χαρακτηριστικά τους είναι τέτοια ώστε να ελαχιστοποιείται η εσωτερική αντίσταση. Αυτό συνήθως οδηγεί ωστόσο σε μικρές χωρητικότητες ή μικρή διάρκεια ζωής.

Σχήμα και Διαμόρφωση: Το σχήμα και η διαμόρφωση του κελιού επίσης επηρεάζει την χωρητικότητα της μπαταρίας καθώς επιδρά στην εσωτερική αντίσταση και στην επαγωγή θερμότητας. Για παράδειγμα, ένα ψηλό, στενό, κυλινδρικό κελί σε σχήμα μπομπίνας θα έχει γενικά χαμηλότερη εσωτερική αντίσταση από ένα που είναι πλατύ και κοντό. Επίσης η επαγωγή θερμότητας είναι καλύτερη στα κελιά που

διαθέτουν μεγάλο λόγο επιφάνειας προς όγκο ή διαθέτουν εσωτερικά συστατικά τα οποία επάγουν τη θερμότητα στο περιβάλλον.

Επίδραση Μεγέθους στη Χωρητικότητα: Το μέγεθος της μπαταρίας επηρεάζει τις χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης καθώς έχει επίδραση στην πυκνότητα ρεύματος. Ένα δεδομένο ρεύμα εκφόρτισης μπορεί να αποτελεί ένα πολύ σοβαρό φορτίο για μία μικρή μπαταρία.

2.2.8 Γήρανση της Μπαταρίας και Κατάσταση Αποθήκευσης

Η μπαταρία είναι ένα προϊόν το οποίο φθείρεται και η φθορά αυτή επιδεινώνεται ως αποτέλεσμα των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν κατά την αποθήκευση. Ο σχεδιασμός, η θερμοκρασία και η διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης είναι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής ή τη διατήρηση φόρτισης της μπαταρίας. Ο τύπος εκφόρτισης που ακολουθεί μετά την περίοδο φόρτισης επηρεάζει επίσης τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

2.2.9 Επίδραση του Σχεδιασμού της Μπαταρίας

Η επιδόσεις των κελιών ως μέρος μίας μπαταρίας πολλών κελιών (multicell battery) συνήθως διαφέρουν από τις επιδόσεις των μεμονωμένων κελιών. Τα κελιά δεν γίνεται να κατασκευαστούν πανομοιότυπα και παρόλο που επιλέγονται να είναι ισοσταθμισμένα, κάθε ένα από αυτά αντιμετωπίζει ένα διαφορετικό περιβάλλον μέσα στο battery pack.

Ο σχεδιασμός μίας μπαταρίας πολλών κελιών και το hardware που χρησιμοποιείται, επηρεάζουν τις επιδόσεις, όπως και το περιβάλλον και τη θερμοκρασία των μεμονωμένων κελιών.

Στην περίπτωση των επαναφορτιζόμενων μπαταριών, η ανομοιομορφία των κελιών μπορεί να οδηγήσει σε μη εξισορροπημένα μεταξύ τους κελιά μέσα στο ίδιο battery pack. Έτσι, η τάση, η χωρητικότητά και άλλα χαρακτηριστικά τους μπορεί να έχουν μεγάλες ανομοιομορφίες αν και όλα μέλη του ίδιου pack.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Οι Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-ion)

3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Οι μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-ion) αποτελούνται από κελιά (cells) στα οποία χρησιμοποιούνται συστατικά που περιέχουν Λίθιο ως υλικό ανόδου και καθόδου. Καθώς μία τέτοια μπαταρία λειτουργεί, ιόντα Λιθίου (Li^+) ανταλλάσσονται μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου. Το θετικό ηλεκτρόδιο είναι συνήθως ένα μεταλλικό οξειδίο με πολυεπίπεδη δομή (όπως το οξειδίο του Λιθίου Κοβαλτίου LiCoO_2) ή ένα υλικό με δομή σήραγγας (όπως το οξειδίο Λιθίου Μαγνησίου LiMn_2O_4) πάνω σε ένα συλλέκτη ρεύματος από φύλλο αλουμινίου. Το αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι συνήθως γραφιτικό άνθρακα, επίσης πολυεπίπεδης δομής, πάνω σε ένα συλλέκτη ρεύματος χαλκού. Κατά τη διαδικασία φόρτισης ή εκφόρτισης, τα ιόντα Λιθίου εισέρχονται ή εξάγονται από τον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ των ατομικών επιπέδων και των ενεργών στοιχείων.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μπαταριών Ιόντων Λιθίου σε σχέση με άλλες μπαταρίες συνοψίζονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μπαταριών Li-ion

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Σφραγισμένα κελιά, δεν απαιτείται συντήρηση	Μέτριο αρχικό κόστος
Μεγάλη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας	Υποβιβασμός τάσης σε υψηλές θερμοκρασίες
Μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας	Ανάγκη για κύκλωμα προστασίας
Μεγάλη διάρκεια ζωής	Απώλεια χωρητικότητας και έκλυση θερμότητας όταν υπερφορτίζεται
Μικρός βαθμός αυτό-εκφόρτισης	Έκλυση αερίων και θερμότητας όταν υποστεί κάποιο μηχανικό χτύπημα
Δυνατότητα γρήγορης φόρτισης	Τα κελιά κυλινδρικού σχήματος προσφέρουν χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας από τα αντίστοιχα τύπου NiCd ή NiMH
Υψηλός βαθμός και υψηλή ισχύς εκφόρτισης	
Μεγάλη απόδοση φορτίου και ενέργειας	
Μεγάλη ειδική ενέργεια και πυκνότητα ενέργειας	
Δεν έχουν φαινόμενο μνήμης	

3.2 Χημεία

Τα ηλεκτροχημικά ενεργά στοιχεία των ηλεκτροδίων στις μπαταρίες Li-ion είναι τα μεταλλικά οξείδια λιθίου για το θετικό ηλεκτρόδιο και ο χαλκός για το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Αυτά τα υλικά είναι τοποθετημένα σε ένα λεπτό, μεταλλικό φύλλο συλλέκτη ρεύματος και το συνδετικό υλικό είναι συνήθως το φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF) ή το συμπολυμερές πολυβινυλιδενοφθορίδιο εξαφθοροπροπυλενίου (PVDF-HFP). Εκεί υπάρχει επίσης και ένας αγωγίμος διαλύτης, συνήθως γραφίτης ή άνθρακας μεγάλης επιφάνειας επαφής. Το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι ηλεκτρικά απομονωμένα μέσω πορώδους διαχωριστικού φύλλου πολυαιθυλενίου ή πολυπροπυλενίου στις μπαταρίες που διαθέτουν υγρό ηλεκτρολύτη, μέσω ενός διαχωριστικού φύλλου πολυμερούς ηλεκτρολύτη σε μορφή γέλης (gel-polymer) στις μπαταρίες gel-polymer και τέλος μέσω ενός φύλλου στερεού ηλεκτρολύτη στις μπαταρίες στερεάς κατάστασης (solid state).

Από το 1990, όταν η Sony έβγαλε στο εμπόριο τις πρώτες μπαταρίες Li-ion, έχει παρουσιαστεί πληθώρα παραλλαγών της μπαταρίας αυτής. Ένας τύπος μπαταρίας, η gel-polymer Li-ion, χρησιμοποιεί τα ίδια ενεργά στοιχεία όπως γίνεται στις μπαταρίες υγρού ηλεκτρολύτη, ωστόσο έχουν διαφορετική κατασκευή που επιτρέπει την παραγωγή κελιών λεπτού σχήματος. Στις μπαταρίες gel-polymer, οι οποίες στην αγορά αναφέρονται και ως μπαταρίες polymer Li-ion (LiPO), το μικροπορώδες διαχωριστικό φιλμ που χρησιμοποιείται στις συμβατικές μπαταρίες, αντικαθίσταται από ένα φύλλο PVDF-HFP, ή από κάποιο άλλο πολυμερές, το οποίο είναι εμποτισμένο με υγρό ηλεκτρολύτη. Επίσης, ο συλλέκτης ρεύματος στερεής μορφής αντικαθίσταται συνήθως από ένα δίκτυο διευρυμένων μεταλλικών συλλεκτών ρεύματος. Στα κελιά gel-polymer, τα θετικά, τα διαχωριστικά και τα αρνητικά φύλλα συνδέονται μεταξύ τους μέσω του πολυμερούς, συνήθως PVDF-HFP, και μπορούν να φτιάξουν μία συσκευή με απανωτές στρώσεις αυτών των φύλλων. Αν και οι μπαταρίες gel-polymer παρουσιάζουν τις παραπάνω διαφορές, η χημική διαδικασία μέσα στο κελί παραμένει ίδια με αυτή των κυλινδρικών ή πρισματικών μπαταριών Li-ion.

3.2.1 Υλικά θετικού ηλεκτροδίου

Τα θετικά ηλεκτρόδια τα οποία χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες Li-ion του εμπορίου χρησιμοποιούν ως ενεργά στοιχεία, μεταλλικά οξείδια του λιθίου. Οι πρώτες μπαταρίες Ιόντων Λιθίου, οι οποίες βγήκαν στο εμπόριο από τη Sony, χρησιμοποιούσαν LiCoO_2 . Πλέον αναπτύσσονται κελιά τα οποία χρησιμοποιούν μικρότερου κόστους υλικά ή υλικά με μεγαλύτερη κουλομπική χωρητικότητα.

Προκειμένου ένα υλικό να είναι κατάλληλο για να χρησιμοποιηθεί ως θετικό ηλεκτρόδιο, θα πρέπει να πληροί κάποιες προδιαγραφές όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2.1.

Πίνακας 3.2.1 Χαρακτηριστικά υλικών προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως θετικό ηλεκτρόδιο σε μπαταρίες Li-ion.

Μεγάλη τιμή ελεύθερης ενέργειας κατά την αντίδραση με Λίθιο
Μπορεί να ενσωματώσει μεγάλες ποσότητες Λιθίου
Μπορεί να ενσωματώσει αντιστρεπτά Λίθιο χωρίς να υποστεί αλλαγές στη δομή του
Μεγάλος βαθμός διάχυσης ιόντων Λιθίου
Καλή αγωγιμότητα ηλεκτρονίων
Αδιάλυτο στον ηλεκτρολύτη
Παρασκευάζεται από ανέξοδους αντιδραστήρες
Σύνθεση χαμηλού κόστους

3.2.2 Υλικά Αρνητικού Ηλεκτροδίου

Οι πρώτες μπαταρίες Li-ion χρησιμοποιούσαν οπτάνθρακα (κωκ) πετρελαίου στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Τα υλικά τα οποία έχουν ως βάση το κωκ, προσφέρουν καλή χωρητικότητα, 180 mAh/g, και είναι σταθερά κατά τη συνύπαρξή τους με τους ηλεκτρολύτες που έχουν ως βάση το ανθρακικό προπυλένιο (PC), σε αντίθεση με τα γραφητικά υλικά. Η δυσλειτουργία ωστόσο στα οπτανθρακικά υλικά είναι ότι κατά την παρουσία του ανθρακικού προπυλενίου, ακιδώνουν τα διάφορα στρώματα αναστέλλοντας κάθε αντίδραση. Πλέον, οι μπαταρίες Li-ion χρησιμοποιούν διάφορους τύπους άνθρακα στα αρνητικά ηλεκτρόδια. Κάποια κελιά χρησιμοποιούν φυσικό γραφίτη, ο οποίος είναι διαθέσιμος με πολύ μικρό κόστος, ενώ άλλα χρησιμοποιούν σκληρούς άνθρακες, οι οποίοι προσφέρουν χωρητικότητες μεγαλύτερες από αυτές των γραφητικών υλικών. Η πλειοψηφία των μπαταριών Li-ion που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικά προϊόντα σήμερα χρησιμοποιούν LiCoO_2 (οξειδίο του κοβαλτιούχου Λιθίου) ως υλικό αρνητικού ηλεκτροδίου. Άλλα είδη μπαταριών Li-ion χρησιμοποιούν LiMn_2O_4 και LiNiO_2 . Τα τελευταία χρόνια έχει εμφανιστεί το LiFePO_4 (iron phosphate) ως υλικό καθόδου. Οι μπαταρίες με αυτό το υλικό καθόδου είναι πολύ δημοφιλείς σε εφαρμογές ηλεκτρικών αυτοκινήτων λόγω των flat καμπύλων εκφόρτισης και της μεγάλης πυκνότητας ισχύος που διαθέτουν (ο συγκεκριμένος τύπος μπαταριών αναλύεται διεξοδικά παρακάτω).

Αξίζει να σημειωθεί ότι το κάθε είδος μπαταρίας ονομάζεται με βάση το υλικό που χρησιμοποιεί ως αρνητικό ηλεκτρόδιο.

3.2.3 Ηλεκτρολύτες

Στις μπαταρίες Li-ion χρησιμοποιούνται τέσσερις τύποι ηλεκτρολυτών: υγροί ηλεκτρολύτες, ηλεκτρολύτες σε μορφή γέλης, ηλεκτρολύτες πολυμερών και κεραμικοί ηλεκτρολύτες. Οι υγροί ηλεκτρολύτες είναι διαλύματα άλατος Λιθίου σε οργανικούς διαλύτες, συνήθως ανθρακικά άλατα. Ο

ηλεκτρολύτης πολυμερών είναι ένα υλικό το οποίο δεν είναι ούτε υγρό, ούτε διαλυτό. Στους ηλεκτρολύτες αυτούς, μία ιονικά αγώγιμη φάση σχηματίζεται από διάλυση άλατος σε πολυμερές μεγάλου μοριακού βάρους. Από την άλλη, στους ηλεκτρολύτες μορφής γέλης, ο ηλεκτρολύτης είναι ένα ιονικά αγώγιμο υλικό όπου άλας και διαλύτης διαλύονται ή αναμιγνύεται σε πολυμερές υψηλού μοριακού βάρους. Οι κεραμικοί ηλεκτρολύτες αναφέρονται σε ανόργανα υλικά στερεής κατάστασης τα οποία είναι ιονικώς αγώγιμα.

3.2.4 Υλικά διαχωριστών

Τα κελιά Li-ion χρησιμοποιούν λεπτές (10 έως 30 μm), μικροπορώδεις ταινίες, έτσι ώστε να απομονώσουν ηλεκτρικά τα θετικά με τα αρνητικά ηλεκτρόδια. Σήμερα, όλα τα κελιά του εμπορίου, τα οποία έχουν υγρό ηλεκτρολύτη, χρησιμοποιούν μικροπορώδη υλικά πολυολεφίνης καθώς προσφέρουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, χημική ευστάθεια και αποδεκτό κόστος.

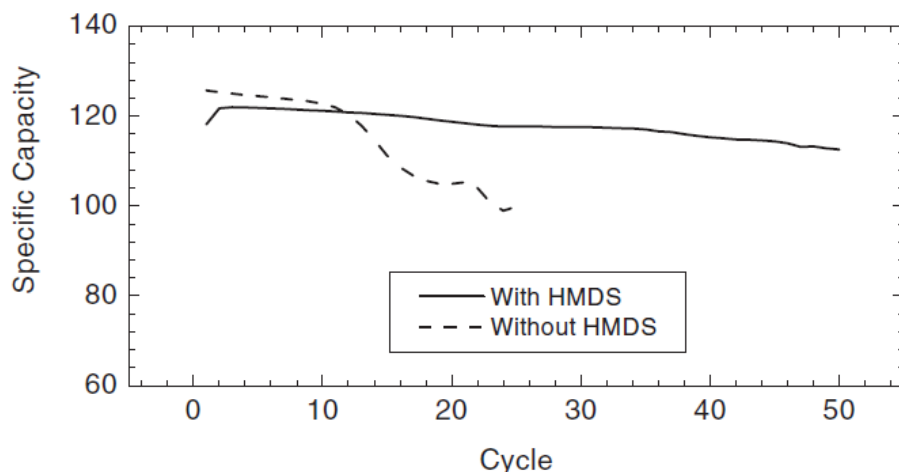
Οι απαιτήσεις για τα υλικά των διαχωριστών των κελιών Li-ion είναι οι παρακάτω:

- Μεγάλη μηχανική κατευθυντική δύναμη έτσι ώστε να επιτρέπει την αυτοματοποιημένη περιέλιξη
- Δεν συρρικνώνεται σε βάθος
- Αντοχή στο τρύπημα από τα υλικά των ηλεκτροδίων
- Το αποτελεσματικό μέγεθος πόρων είναι μικρότερο από 1 μm
- Διαβρέχεται εύκολα από τον ηλεκτρολύτη
- Συμβατό και ευσταθές κατά την επαφή του με τον ηλεκτρολύτη και τα υλικά των ηλεκτροδίων

3.2.5 Πρόσθετα ηλεκτρολυτών

Προκειμένου να βελτιωθούν περαιτέρω οι επιδόσεις των μπαταριών, έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρόσθετα ηλεκτρολυτών. Κάποια πρόσθετα, όπως το BF_3 , και τα συγγενή σύμπλοκα, είναι σχεδιασμένα έτσι, ώστε να παθητικοποιούν την επιφάνεια των υλικών των ηλεκτροδίων και με αυτόν τον τρόπο να μειώνουν τη ροπή τους για υποβιβασμό. Άλλα πρόσθετα, όπως το εξαμεθυλοδισιλαζάνιο (HMDS), χρησιμοποιούνται για να μειώσουν τη διεπιφανειακή αντίσταση και αντιδρούν με το νερό, βελτιώνοντας έτσι την επίδοση του κελιού.

Για να αναδειχθεί η χρησιμότητα ενός τέτοιου προσθέτου, στην εικόνα 3.2.5 φαίνεται η ειδική χωρητικότητα μίας μπαταρίας $\text{Li}/\text{LiMn}_2\text{O}_4$, η οποία χρησιμοποιείται στους 55°C χρησιμοποιώντας ηλεκτρολύτη με πρόσθετο HMDS αλλά και χωρίς αυτό. Όπως αναδεικνύεται, το κελί με το πρόσθετο HMDS παρουσιάζει μικρότερη βύθιση χωρητικότητας.



Εικόνα 3.2.5 : Ειδική χωρητικότητα μιας μπαταρίας C/LiMn₂O₄ καθώς χρησιμοποιείται στους 55°C με έναν ηλεκτρολύτη ο οποίος στη μία περίπτωση διαθέτει πρόσθετο HMDS και στην άλλη όχι.

3.3 Επιδόσεις και χαρακτηριστικά μπαταριών Li-ion

Τα γενικά χαρακτηριστικά επιδόσεων των μπαταριών Li-ion φαίνονται στον πίνακα 3.3.

Χαρακτηριστικά	Εύρος Επίδοσης
Τάση λειτουργίας κελιού	4.2 έως 2.5 V
Ειδική Ενέργεια	100 έως 158 Wh/kg
Πυκνότητα ενέργειας	245 έως 430 Wh/L
Δυνατότητα συνεχούς εκφόρτισης	Τυπικό: 1C Μέγιστο: 5C
Δυνατότητα στιγμιαίας εκφόρτισης	Μέχρι 25C
Κύκλοι λειτουργίας για 100% DOD	Τυπικά 3000
Κύκλοι λειτουργίας για 20 έως 40% DOD	Πάνω από 20000
Διάρκεια ζωής	Πάνω από 5 years
Βαθμός αυτό-εκφόρτισης	2 to 10%/month
Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας	-40°C to 65°C
Φαινόμενο μνήμης	Όχι
Πυκνότητα ισχύος	2000 έως 3000 W/L
Ειδική ισχύς	700 έως 1300 W/Kg

Χαρακτηριστικά και μεγέθη μπαταριών Ιόντων Λιθίου

Στους πίνακες 3.3.1 και 3.3.2 φαίνονται τα φυσικά και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των κυλινδρικών και πρισματικών μπαταριών Li-ion αντίστοιχα.

Πίνακας 3.3.1 Φυσικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των χαρακτηριστικών κυλινδρικών μπαταριών Li-ion C/LiCoO₂

Type	14500	14650	17500	17670	18500	18650	26650	33600
Height, mm	50.0	65	50	67	50	65	65	60
Diameter, mm	14	14	17	17	18	18	26	33
Volume, ml.	7.7	10	11.3	15.2	12.7	16.5	34.5	51.4
Mass, g.	19	26	25	35	31	42	93	125
Capacity (Ah)	.65	.90	0.83	1.25	1.1	1.8	3.2	5.0
Specific energy (Wh/kg)	126	128	123	132	131	155	354	150.4
Energy density (Wh/L)	312	333	273	306	320	410	131	366

Πίνακας 3.3.2 Φυσικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των χαρακτηριστικών πρισματικών μπαταριών Li-ion C/LiCoO₂

Cell type	61/19/48	46/30/48	55/30/48	81/31/48	65/35/67	103/34/50	160/61/78	280/95/151	460/89/128	500/130/208
Shape	Prismatic (thickness (0.1 mm)/width (mm)/height (mm))									
Height, mm	48	48	48	48	67.3	50	78	151	128	208
Width, mm	19.5	30	30	30.5	35.1	34.1	61	95	89	130
Thickness, mm	6.1	4.6	5.5	8.1	6.5	10.3	16	28	46	50
Volume, ml.	5.70	6.6	7.9	11.9	15.3	18.4	76	136	465	1352
Mass, g.	11.5	14	16	24	33	38	185	870	1108	3650
Capacity (Ah)	0.42	.52	0.6	0.9	.96	1.5	7.0	35	40	160
Specific energy (Wh/kg)	135	137	138	139	104	146	145	145	156	160
Energy density (Wh/L)	272	291	281	280	226	301	345	344	372	430

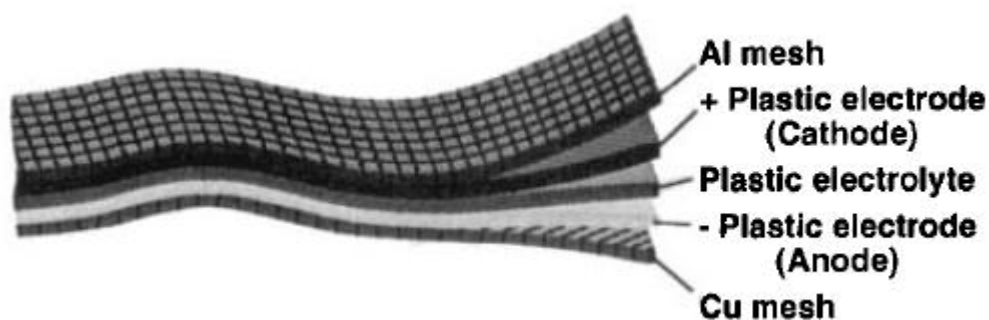
3.4 Χαρακτηριστικά Φόρτισης των Μπαταριών Li-ion

Τα κελιά Li-ion κατασκευάζονται σε μη φορτισμένη κατάσταση κι έτσι πρέπει να φορτιστούν πριν από τη χρήση τους. Τα κελιά Li-ion φορτίζονται τυπικά είτε χρησιμοποιώντας φόρτιση σταθερού ρεύματος (Constant Current- CC), είτε χρησιμοποιώντας φόρτιση η οποία αλλάζει από φόρτιση σταθερού ρεύματος σε φόρτιση σταθερής τάσης (Constant Current-Constant Voltage- CCCV). Αυτό το σύστημα φόρτισης επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης του κυκλώματος διαχείρισης της μπαταρίας. Σε μικρούς βαθμούς φόρτισης (C/5), το σύστημα CC προσεγγίζει το σύστημα CCCV καθώς το κελί είναι πλήρως φορτισμένο όταν επιτευχθεί το άνω όριο τάσης.

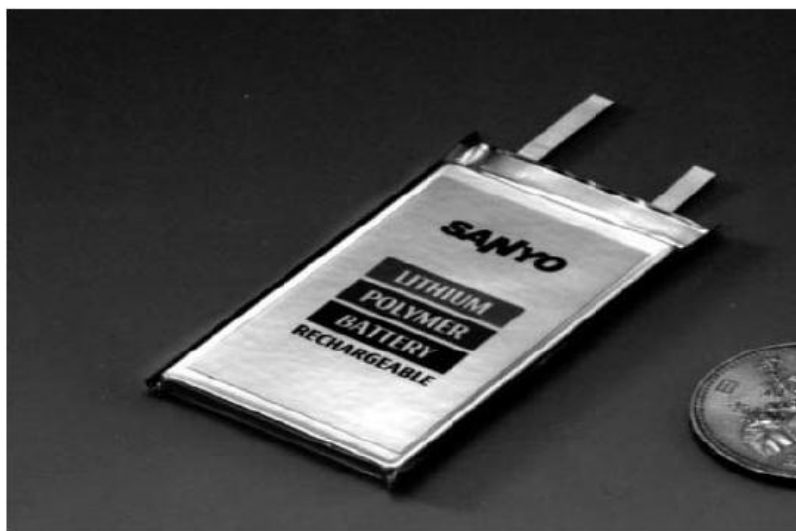
Τα κελιά Li-ion μπορούν να υποβαθμιστούν ανεπανόρθωτα από την υπερφόρτιση ή την υπερ-εκφόρτιση, και μπορούν να εκλύσουν αέρια αν υπερφορτιστούν. Γι αυτό το λόγο, οι μπαταρίες συνήθως χρησιμοποιούν ένα σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας (Battery Management System-BMS) έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία και να αποφευχθεί τυχόν φαινόμενο υπερφόρτισης. Αυτό το σύστημα μπορεί να προσφέρει και επιπλέον λειτουργίες, όπως επιτήρηση της κατάστασης φόρτισης (State Of Charge- SOC) και επιτήρηση της θερμοκρασίας. Πολλοί κατασκευαστές συνιστούν φόρτιση με μικρά ρεύματα (μικρότερα από 0.1C) αν η τάση του κελιού πέσει κάτω από 2.5 V.

3.5 Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου Πολυμερών (PolymerLi-ionBatteries-LiPO)

Οι μπαταρίες LiPO προσφέρουν τα χαρακτηριστικά επίδοσης των μπαταριών Li-ion, όπως η υψηλή ειδική ενέργεια και η υψηλή πυκνότητα ενέργειας, σε ένα σχήμα μικρού πάχους με μεγάλο συντελεστή επιφάνειας. Τα κελιά LiPO χρησιμοποιούν τα ίδια ενεργά στοιχεία όπως τα κυλινδρικά ή πρισματικά κελιά Li-ion. Ωστόσο, στα κελιά LiPO χρησιμοποιούνται επίπεδα, συνδεδεμένα μεταξύ τους ηλεκτρόδια έτσι ώστε να γίνεται δυνατή η παραγωγή λεπτών κελιών τα οποία είναι συσκευασμένα μέσα σε μία ταινία, εν αντιθέσει με τις μεταλλικές ή αλουμινένιες θήκες κελιών που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες Li-ion. Αυτός ο τύπος κατασκευής φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 3.5.1, όπου παρουσιάζονται τα διάφορα επίπεδα κατασκευής. Ένα εμπορικό προϊόν φαίνεται στην εικόνα 3.5.2.



Εικόνα 3.5.1 Σχηματικό διάγραμμα το οποίο δείχνει την κατασκευή ενός κελιού LiPO



Εικόνα 3.5.2 Μία μπαταρία Ιόντων Λιθίου Πολυμερών (LiPO) 0.57Ah

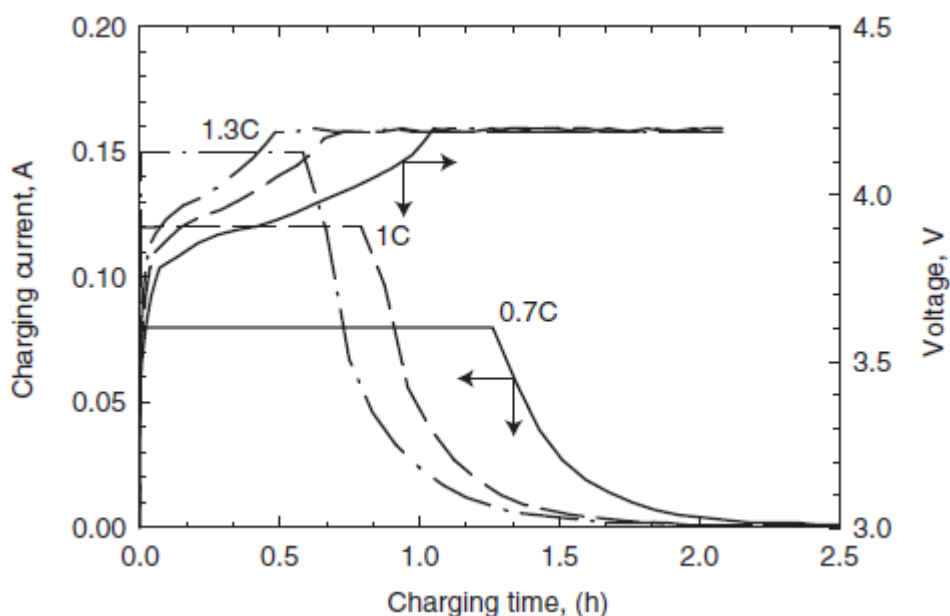
Μία ιδιαίτερα ελκυστική ιδιότητα των μπαταριών LiPO(συγκεκριμένα των C/LiMn₂O₄) είναι η ικανότητά τους να αντέχουν τη φυσική καταπόνηση. Επίσης, οι συγκεκριμένες μπαταρίες, σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους, μπορούν να υποστούν μηχανικό τρύπημα, ενώ είναι πλήρως φορτισμένες ή ακόμα και υπερφορτισμένες, χωρίς να εκδηλώσουν φωτιά ή έκρηξη.

3.5.1 Πυκνότητα Ενέργειας των Μπαταριών LiPO

Οι μπαταρίες LiPO πετυχαίνουν μεγάλες τιμές ειδικής ενέργειας και πυκνότητας ενέργειας, οι οποίες μάλιστα είναι υψηλότερες από αυτές των μπαταριών Li-ion υγρού ηλεκτρολύτη. Εφόσον η ηλεκτροχημεία, όπως επίσης και η ποσότητα και το βάρος των διάφορων συστατικών σε αυτές τις δύο τεχνολογίες (Li-ion υγρού ηλεκτρολύτη και LiPO) είναι παρόμοιες, η διαφορά που παρουσιάζεται έγκειται στα ελαφρύτερα και λεπτότερα υλικά συσκευασίας τα οποία χρησιμοποιούνται σε επίπεδες (flat) μπαταρίες πλεγμένων ηλεκτροδίων, άρα και στην πιο αποδοτική χωρική εκμετάλλευση.

3.5.2 Χαρακτηριστικά Φόρτισης Μπαταριών LiPO

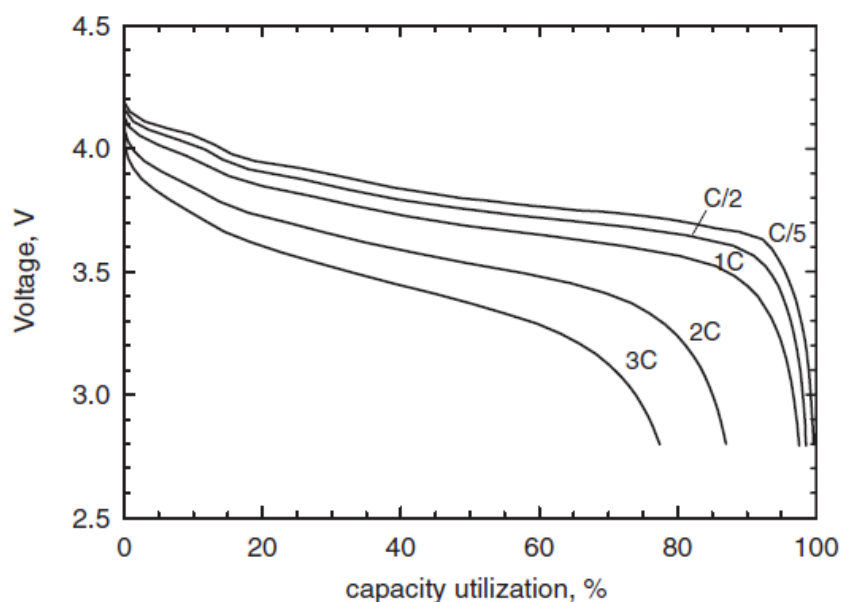
Οι μπαταρίες LiPO, όπως οι κυλινδρικές ή πρισματικές μπαταρίες Li-ion, μπορούν να φορτιστούν είτε με σύστημα σταθερού ρεύματος (CC), είτε με σύστημα σταθερού ρεύματος- σταθερής τάσης (CCCV). Το ρεύμα φόρτισης και η τάση της μπαταρίας κατά τη διάρκεια φόρτισης μίας μπαταρίας LiPO0.120 Ah, C/LiCoO₂ φαίνονται στην εικόνα 3.5.2.1 για βαθμούς φόρτισης 1.3C, 1C και 0.7C. Σε κάθε περίπτωση, η μπαταρία φορτίζεται με σταθερό ρεύμα μέχρι να φτάσει το όριο των 4.2V. Από τη στιγμή εκείνη κι έπειτα, το ρεύμα μειώνεται συνεχώς έτσι ώστε να διατηρείται η τάση στα 4.2V. Με ρυθμό φόρτισης στο 1C, το 40% των 2 ωρών φόρτισης ήταν υπό το σύστημα σταθερού ρεύματος.



Εικόνα 3.5.2.1 Ρεύμα φόρτισης και τάση κατά τη διάρκεια φόρτισης μία μπαταρίας LiPO0.120 Ah, C/LiCoO₂ στα 1.3C, 1.0C και 0.7C, στους 21°C

3.5.3 Δυνατότητες Μπαταριών LiPO ανάλογα με τον Βαθμού Εκφόρτισης

Η δυνατότητες μίας μπαταρίας LiPO C/LiCoO₂ σε βαθμούς εκφόρτισης από 3C έως 2C φαίνεται στην εικόνα 3.5.3.1. Όπως φαίνεται, η μπαταρία αποδίδει πάνω από το 95% της χωρητικότητάς της σε βαθμό 1C, 87% στα 2C και 77% στα 3C. Σε χαμηλούς βαθμούς εκφόρτισης, η μπαταρία απέδωσε μία μέση τάση 3.8V; στα 2C, 3.55V; και στα 3C, 3.45V. Η μπαταρία επίσης απέδωσε πάνω από το 80% της διαθέσιμης ενέργειάς της στα 2C.

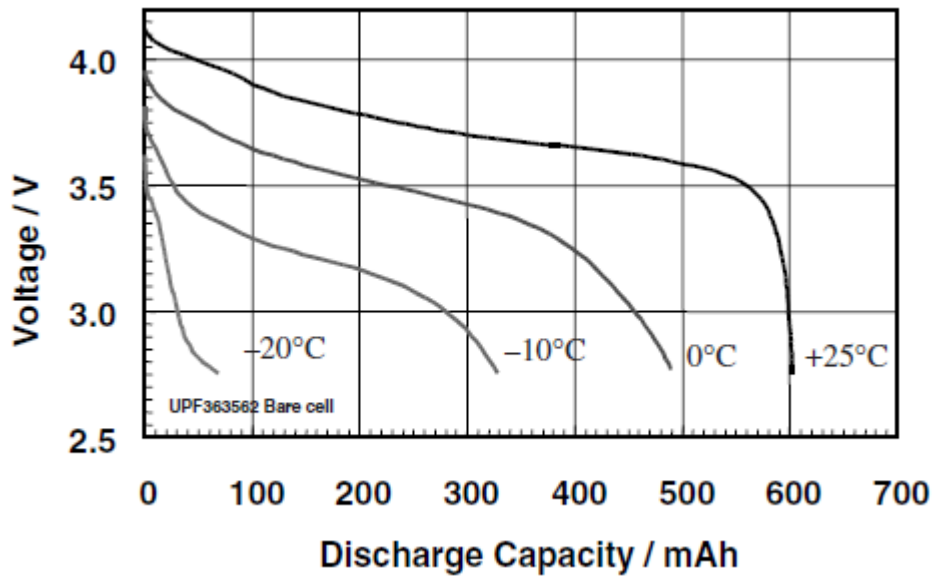


Εικόνα 3.5.3.1 Εκφόρτιση μίας μπαταρίας LiPO 0.12 Ah C/LiCoO₂ από 3C έως 0.2C, στους 21°C

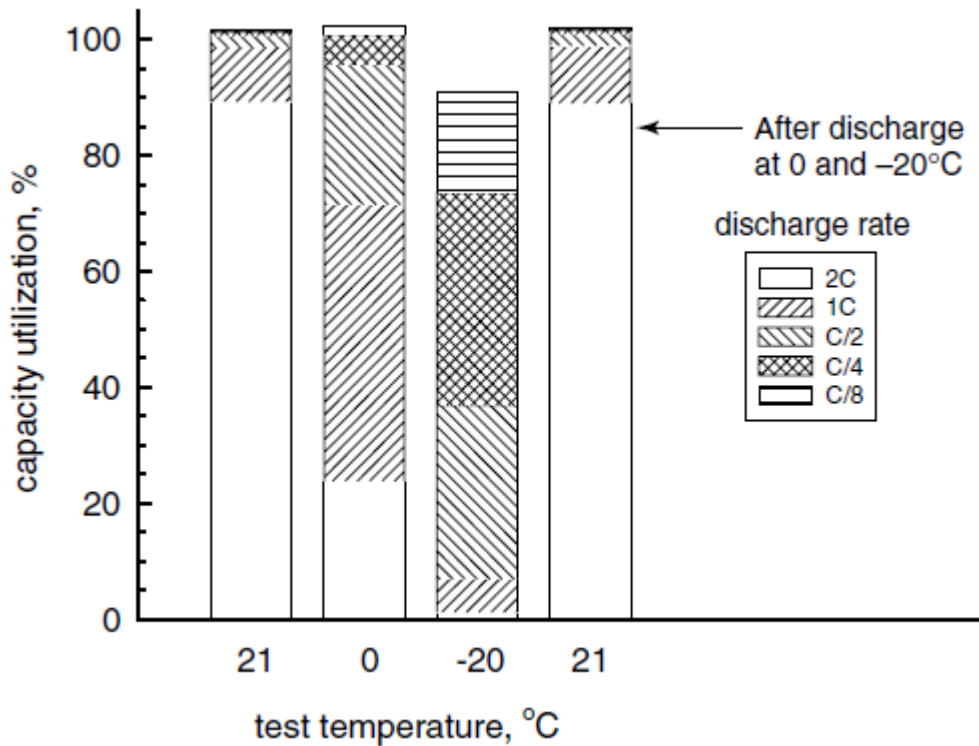
3.5.4 Επιδόσεις μπαταριών LiPO στις χαμηλές θερμοκρασίες

Στην εικόνα 3.5.4.1 φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης μίας μπαταρίας 0.57 Ah Sanyo C/LiCoO₂ Li-ion polymer με ρυθμό εκφόρτισης 1C, για θερμοκρασίες από -20°C έως +25°C. Όπως φαίνεται, η μπαταρία απέδωσε το 58% της χωρητικότητάς της στους -10°C.

Η συμπεριφορά των μπαταριών LiPO C/LiCoO₂ σε χαμηλές θερμοκρασίες συνοψίζεται στην εικόνα 3.5.4.2, για ρυθμούς εκφόρτισης από 0.125C έως 2C και για θερμοκρασίες από -20°C έως 21°C. Στους 0°C, όταν εκφορτίζεται στο 1C, η μπαταρία απέδωσε το 72% της χωρητικότητάς της. Στους -20°C, σε χαμηλά ρεύματα εκφόρτισης (0.125C) η μπαταρία απέδωσε το 90% της χωρητικότητάς της ενώ στην ίδια θερμοκρασία και με ρυθμό εκφόρτισης C/2 απέδωσε το 37% της χωρητικότητάς της. Μετά την εκφόρτιση, σε χαμηλες θερμοκρασίες, η μπαταρία απέδωσε την αρχική της χωρητικότητα όταν εκφορτίστηκε στους 21°C, αναδεικνύοντας ότι δεν υποβαθμίστηκε από τους κύκλους λειτουργίας κάτω από διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας.



Εικόνα 3.5.4.1 Τάση μπαταρίας LiPO 0.57Ah κατά την εκφόρτιση με 0.57 A. Η μπαταρία είχε φορτιστεί με CCCV στα 0.57 A/4.2V (κάτω όριο ρεύματος στα 0.028 A)



Εικόνα 3.5.4.2 Απόδοση χωρητικότητας κατά την εκφόρτιση μπαταρίας LiPO C/LiCoO₂. Η μπαταρία είχε φορτιστεί στους 21°C.

3.6 Οι Μπαταρίες LiFePO_4 (Lithium Iron Phosphate)

Η μπαταρία Λιθίου iron phosphate (LiFePO_4), ή αλλιώς LFP, είναι ένα είδος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας Ιόντων Λιθίου (Li-ion), η οποία χρησιμοποιεί LiFePO_4 ως υλικό καθόδου. Οι μπαταρίες αυτές έχουν κάπως μικρότερη πυκνότητα ενέργειας από τις κοινές μπαταρίες LiCoO_2 . Ωστόσο προσφέρουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και είναι εκ φύσεως ασφαλέστερες. Σήμερα, οι μπαταρίες LiFePO_4 βρίσκουν εφαρμογή σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα και συστήματα εφεδρικής παροχής ενέργειας.

3.6.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Μπαταριών LiFePO_4 .

Στο κεφάλαιο 3.2.2 είδαμε ότι η πλειοψηφία των μπαταριών Li-ion που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικά προϊόντα χρησιμοποιούν LiCoO_2 ως υλικό αρνητικού ηλεκτροδίου. Άλλα είδη μπαταριών Li-ion χρησιμοποιούν LiMn_2O_4 και LiNiO_2 .

Η μπαταρία LiFePO_4 χρησιμοποιεί χημεία η οποία έχει ως βάση αυτή των Ιόντων Λιθίου με αποτέλεσμα να διαθέτουν πολλά κοινά στοιχεία. Ωστόσο παρουσιάζονται και σημαντικές διαφορές.

Πλεονεκτήματα:

- Η χημεία LFP προσφέρει στις μπαταρίες μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σχέση με τις άλλες χημείες Li-ion.
- Η χρήση φωσφόρου έχει ως αποτέλεσμα να αποφεύγεται το κόστος του κοβαλτίου και οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που υπάρχουν, ειδικά όσον αφορά τη διείσδυση του κοβαλτίου στο περιβάλλον μέσω ανεξέλεγκτης απόρριψής του.
- Οι μπαταρίες LiFePO_4 έχουν μεγαλύτερες τιμές ρεύματος ή αιχμές ισχύος από τις LiCoO_2 .
- Τα κελιά LiFePO_4 παρουσιάζουν μικρότερο βαθμό απώλειας χωρητικότητας (άρα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής) από τις μπαταρίες χημείας Li-ion ή LiPO όπως LiCoO_2 και LiMn_2O_4 .

Μειονεκτήματα:

- Η πυκνότητα ενέργειας μίας καινούργιας μπαταρίας LiFePO_4 είναι 14% χαμηλότερη από μία καινούργια μπαταρία LiCoO_2 . Επίσης, μπαταρίες LFP ορισμένων κατασκευαστών παρουσιάζουν μικρότερους ρυθμούς εκφόρτισης από τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος ή τις LiCoO_2 . Εφόσον ο ρυθμός εκφόρτισης είναι ανάλογος της χωρητικότητας της μπαταρίας, ένας υψηλότερος ρυθμός μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη μπαταρία (περισσότερα αμπερώρια Ah).

3.6.2 Ασφάλεια

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των LiFePO_4 έναντι των υπόλοιπων Li-ion είναι η θερμική και χημική ευστάθεια, η οποία βελτιώνει την ασφάλεια της μπαταρίας. Το LiFePO_4 είναι εκ φύσεως πιο ασφαλές υλικό καθόδου από το LiCoO_2 . Ο δεσμός Fe-P-O είναι πιο δυνατός από τον Co-O. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όταν υποστεί κάποια κακοποίηση (βραχυκύκλωμα, υπερθέρμανση κλπ), τα άτομα οξυγόνου είναι πολύ πιο δύσκολο να μετακινηθούν. Η ευστάθεια των ενεργειών της οξειδοαναγωγής βοηθά επίσης στη γρήγορη ιονική μετακίνηση.

Καθώς το λίθιο αποβάλλεται από την κάθοδο σε ένα κελί LiCoO_2 , το CoO_2 υποβάλλεται σε μη γραμμική διαστολή, κάτι το οποίο επηρεάζει την ακεραιότητα της δομής του κελιού. Αντίθετα, στις μπαταρίες LiFePO_4 , οι καταστάσεις στις οποίες υπάρχει μόνο λίθιο και αυτές κατά τις οποίες δεν υπάρχει καθόλου λίθιο είναι δομικά ίδιες. Αυτό σημαίνει ότι τα κελιά LiFePO_4 είναι δομικά πιο σταθερά από τα αντίστοιχα LiCoO_2 .

Σε ένα πλήρως φορτισμένο κελί LiFePO_4 δεν μένει καθόλου λίθιο στην κάθοδο. Σε ένα κελί LiCoO_2 , περίπου το 50% του λιθίου παραμένει στην κάθοδο. Άρα οι μπαταρίες LiFePO_4 είναι πιο ανθεκτικές κατά την απώλεια οξυγόνου.

Επομένως, τα κελιά LFP αναφλέγονται πολύ πιο δύσκολα στην περίπτωση κακομεταχείρισης, ειδικά κατά τη φόρτιση, αν και κάθε μπαταρία αφού φορτιστεί πλήρως μπορεί να αποβάλει την όποια ενέργεια υπερφόρτισης μέσω θερμότητας. Επομένως κίνδυνος ανάφλεξης πάντα υπάρχει, απλά είναι μικρότερος. Είναι γενικά αποδεκτό ωστόσο ότι οι μπαταρίες LiFePO_4 δεν αποσυντίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω πλεονεκτήματα των μπαταριών LFP έναντι των LiPO και των υπόλοιπων Li-ion (όπως LiCoO_2), τις έχουν κάνει πιο ελκυστικές σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και ο αερομοντελισμός.

3.6.3 Χαρακτηριστικά των Μπαταριών LiFePO_4

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά μίας μπαταρίας LiFePO_4 .

Ειδική ενέργεια	90-110 Wh/kg
Πυκνότητα Ενέργειας	220 Wh/L
Ειδική Ισχύς	>300W/kg
Αντοχή στον χρόνο	>10 χρόνια
Κύκλοι λειτουργίαςγια 100% DOD (αριθμός κύκλων στο 80% της αρχικής χωρητικότητας)	2000-7000 κύκλοι
Ονομαστική τάση κελιού	3.3V
Κατώτατη τάση εκφόρτισης κελιού	2.8V
Τάση λειτουργίας	3.0V -3.3V
Μέγιστη τάση φόρτισης	3.6V

3.6.4 Φόρτιση των Μπαταριών LiFePO₄

Όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, οι μπαταρίες LFP έχουν παρόμοια χημική σύσταση με τις υπόλοιπες μπαταρίες Li-ion και LiPO. Επομένως η φόρτιση των μπαταριών LiFePO₄ γίνεται με σύστημα σταθερού ρεύματος-σταθερής τάσης (CCCV), όπως ακριβώς δηλαδή και στις μπαταρίες Li-ion και LiPO.

Πιο συγκεκριμένα, οι μπαταρίες αυτές φορτίζονται με σταθερό ρεύμα μέχρι η τάση κελιού να φτάσει τα 3.6V. Από εκεί και πέρα, το ρεύμα μειώνεται συνεχώς έτσι ώστε να διατηρηθεί σταθερή η τάση. Η φόρτιση διακόπτεται όταν το ρεύμα ιδανικά μηδενιστεί. Στην πράξη, η τιμή του ρεύματος φτάνει περίπου στα 0.005 A. Να σημειωθεί ότι το ρεύμα φόρτισης κατά το σύστημα CC καθορίζεται από τις προδιαγραφές που δίνει ο κάθε κατασκευαστής. Συνήθως, χρησιμοποιείται φόρτιση 1C ενώ ορισμένες μπαταρίες έχουν ονομαστική φόρτιση στα 3C. Σε αυτές τις μπαταρίες η γρήγορη φόρτιση μπορεί να φτάσει και τα 10C.

ΜΕΡΟΣ Β΄

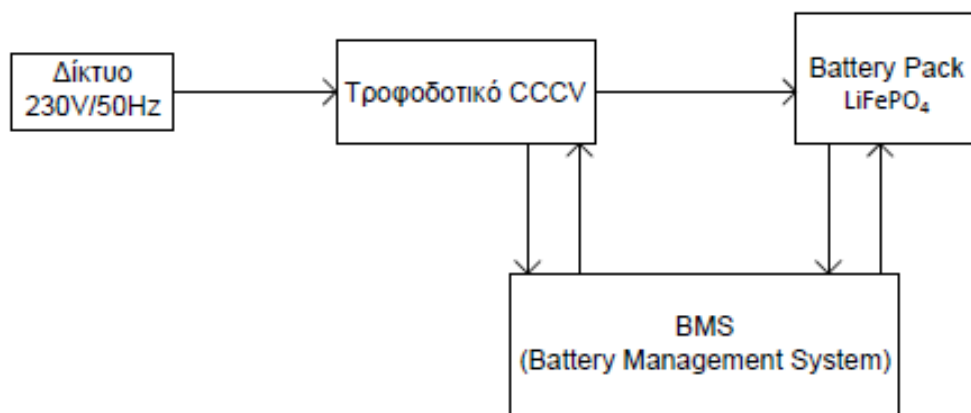
Στο μέρος Α΄ παρουσιάστηκαν βασικές έννοιες και η αρχή λειτουργίας των μπαταριών καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους. Έγινε επίσης εκτενής περιγραφή των μπαταριών Ιόντων Λιθίου.

Με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν οι μπαταρίες LiFePO_4 , οι οποίες είναι ένα είδος μπαταριών Ιόντων Λιθίου, στο Β΄ μέρος της παρούσας διπλωματικής θα πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός ενός συστήματος φόρτισης αυτών των μπαταριών.

Όπως παρουσιάστηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, ο τρόπος φόρτισης των μπαταριών Ιόντων Λιθίου (άρα και των LiFePO_4) και των μπαταριών Ιόντων Λιθίου Πολυμερών (LiPO) είναι ο ίδιος. Το μόνο που αλλάζει για κάθε περίπτωση μπαταρίας είναι τα άνω και κάτω όρια τάσης και ρεύματος που πρέπει να τηρούνται και τα οποία δίνονται από τον κάθε κατασκευαστή.

Στο σχήμα Β.1 παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος φόρτισης που θα σχεδιαστεί.

Εικόνα Β.1 : Μπλοκ διάγραμμα φορτιστή μπαταριών LiFePO_4



Όπως φαίνεται, το σύστημα φόρτισης αποτελείται αρχικά από ένα τροφοδοτικό το οποίο μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή τάση, κατάλληλη να φορτίσει μία συστοιχία τεσσάρων εν σειρά συνδεδεμένων κελιών LiFePO_4 . Το τροφοδοτικό αυτό φορτίζει τις μπαταρίες με σύστημα σταθερού ρεύματος/σταθερής τάσης (CCCV). Όλο το σύστημα φόρτισης ελέγχεται και καθορίζεται κάθε στιγμή από το BMS (Battery Management System), το οποίο είναι ο εγκέφαλος του συστήματος καθώς ελέγχει κάθε στιγμή όλες τις παραμέτρους του συστήματος, έτσι ώστε η φόρτιση να είναι αποδοτική και ασφαλή.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά τα κυριότερα είδη τροφοδοτικών. Έπειτα πραγματοποιείται η σχεδίαση του τροφοδοτικού για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Στο 5^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται ο σχεδιασμός ενός συστήματος απομόνωσης και παρακολούθησης της τάσης του κάθε στοιχείου του battery pack. Επίσης παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα του εμπορίου το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για παρόμοιες εφαρμογές.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότεροι τρόποι ισοστάθμισης της τάσης των κελιών της συστοιχίας του battery pack και επιλέγεται ο τρόπος που εφαρμόζεται στο υπό μελέτη σύστημα φόρτισης. Επίσης παρουσιάζεται ο κώδικας που γράφεται στον μικροελεγκτή του BMS, το οποίο ουσιαστικά ελέγχει την ισοστάθμιση.

Στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τρόποι εύρεσης της κατάστασης φόρτισης (State Of Charge–SOC) μίας μπαταρίας. Αναλύεται ποιος τρόπος είναι ο πιο αξιόπιστος και αποδοτικός για τις μπαταρίες LiFePO₄. Επίσης γίνεται μελέτη της εγκατάστασης ενός συστήματος υπολογισμού του SOC στον υπό σχεδιασμό φορτιστή.

Στο 8^ο κεφάλαιο μελετώνται οι τρόποι τερματισμού της φόρτισης και αναλύεται η διακοπή φόρτισης λόγω υπερθέρμανσης.

Στο 9^ο κεφάλαιο γίνεται μελέτη για την παρουσίαση κάποιων αποτελεσμάτων κατά τη διάρκεια της φόρτισης σε οθόνη LCD. Επίσης σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται ο τελικός προγραμματισμός του μικροεπεξεργαστή του συστήματος φόρτισης.

Στο 10^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η σύνδεση όλων των παραπάνω υποσυστημάτων ώστε να προκύψει το τελικό κύκλωμα του φορτιστή μπαταριών LiFePO₄. Επίσης στο κεφάλαιο αυτό γίνεται και ένας προσεγγιστικός υπολογισμός του κόστους κατασκευής του φορτιστή.

Τέλος, στο 11^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία σύνοψη και αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα του φορτιστή που σχεδιάστηκε έναντι της πλειοψηφίας των φορτιστών που κυκλοφορούν στο εμπόριο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : DC Τροφοδοτικά

4.1 Εισαγωγή

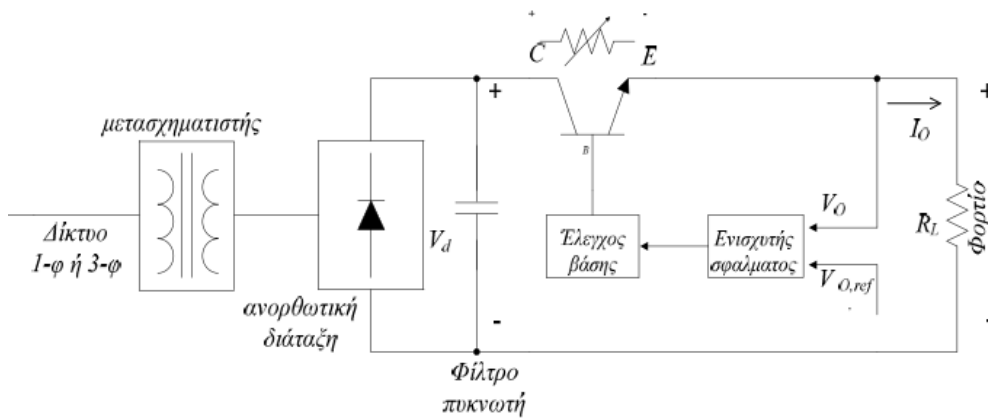
Τα DC τροφοδοτικά με σταθεροποιημένη τάση χρειάζονται σε πληθώρα εφαρμογών. Τα περισσότερα τροφοδοτικά είναι σχεδιασμένα για να ικανοποιούν όλες ή μερικές από τις παρακάτω απαιτήσεις:

- **Σταθεροποιημένη έξοδο.** Η τάση εξόδου πρέπει να παραμένει σταθερή ως προς τις μεταβολές της τάσης εισόδου και του φορτίου στην έξοδο, μέσα σε ορισμένα όρια.
- **Απομόνωση.** Η έξοδος πρέπει να είναι ηλεκτρικά απομονωμένη από την είσοδο.
- **Πολλαπλές εξοδοι.** Πρέπει να υπάρχουν πολλαπλές εξοδοι (θετικές και αρνητικές), οι οποίες πρέπει να διαφέρουν ως προς τις προδιαγραφές τάσης και ρεύματος. Αυτές οι εξοδοι πρέπει να είναι απομονωμένες μεταξύ τους.

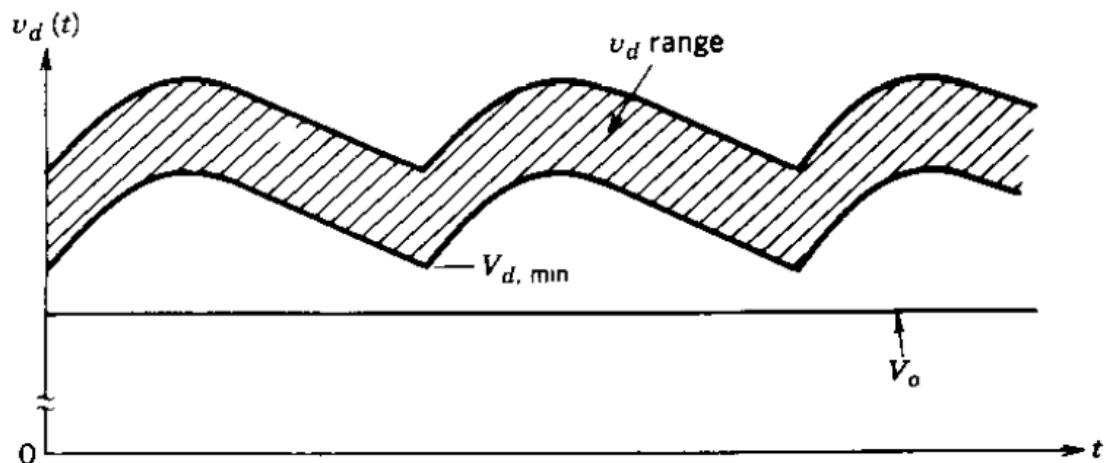
Εκτός από τις παραπάνω απαιτήσεις, κοινή επιδίωξη στα τροφοδοτικά είναι η μείωση των διαστάσεων και του βάρους τους και η αύξηση της απόδοσής τους. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν γραμμικά τροφοδοτικά. Όμως, η πρόοδος της τεχνολογίας των ημιαγωγών οδήγησε στη χρήση διακοπτικών τροφοδοτικών, τα οποία σε σύγκριση με τα γραμμικά τροφοδοτικά έχουν μικρότερο μέγεθος και μεγαλύτερη απόδοση. Το κόστος των γραμμικών και των διακοπτικών τροφοδοτικών εξαρτάται από τη χρήση.

4.2 Γραμμικά Τροφοδοτικά

Προκειμένου να αναδειχτούν τα πλεονεκτήματα των διακοπτικών τροφοδοτικών, θα εξεταστούν πρώτα τα γραμμικά τροφοδοτικά. Στο σχήμα 4.2.α φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός γραμμικού τροφοδοτικού. Για την ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου και για την ανάπτυξη στην έξοδο της επιθυμητής περιοχής τάσης, απαιτείται ένας μετασχηματιστής 50 ή 60Hz. Ένα transistor συνδέεται σε σειρά και λειτουργεί στην ενεργό περιοχή.



Σχήμα 4.2.α: Κυκλωματικό διάγραμμα γραμμικού τροφοδοτικού



Σχήμα 4.2.β: Γραμμικό τροφοδοτικό: Επιλογή του λόγου μετασχηματισμού του μετασχηματιστή έτσι ώστε η $V_{d, \min}$ να είναι λίγο μεγαλύτερη από την V_O

Συγκρίνοντας την τάση V_O με μία τάση αναφοράς V_{ref} , το κύκλωμα ελέγχου του σχήματος 4.2 (α), ρυθμίζει το ρεύμα βάσης του transistor, ώστε η $V_O (=v_d - v_{CE})$ να είναι ίση με την $V_{O,ref}$. Το transistor σε ένα γραμμικό τροφοδοτικό συμπεριφέρεται σαν μία ρυθμιζόμενη αντίσταση. Η διαφορά ανάμεσα στην τάση εισόδου και την επιθυμητή τάση εξόδου, $V_d - V_O$, πέφτει επάνω στο transistor και προκαλεί απώλειες πάνω σε αυτό. Για μία δεδομένη περιοχή ac τάσης εισόδου των 50 ή 60 Hz, η ανορθωμένη και φιλτραρισμένη έξοδος $v_d(t)$ φαίνεται στο σχήμα 4.2.β. Για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες του transistor, ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά, ώστε η τάση $V_{d, \min}$ στο σχήμα 4.2.2 να είναι μεγαλύτερη από τη V_O , αλλά να μην την υπερβαίνει κατά πολύ.

Τα παραπάνω κάνουν φανερά δύο βασικά μειονεκτήματα των γραμμικών τροφοδοτικών:

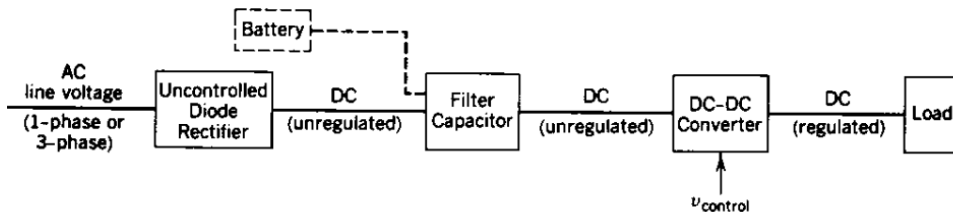
1. Απαιτείται ένας μετασχηματιστής χαμηλών συχνοτήτων (60 ή 50 Hz). Αυτοί οι μετασχηματιστές έχουν μεγάλο μέγεθος και βάρος συγκρινόμενοι με τους μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων.
2. Το transistor λειτουργεί στην ενεργό περιοχή προκαλώντας μεγάλες απώλειες. Ο συντελεστής απόδοσης των γραμμικών τροφοδοτικών κυμαίνεται γενικά στην περιοχή 30-60%,

Από τη θετική πλευρά, τα γραμμικά τροφοδοτικά έχουν απλά κυκλώματα και κατά συνέπεια το κόστος τους για μικρές τιμές ισχύος (<25W) είναι χαμηλό. Ακόμη, δεν προκαλούν μεγάλες EMI στις άλλες συσκευές.

4.3 Διακοπτικοί μετατροπείς DC-DC

4.3.1 Εισαγωγή

Οι μετατροπείς dc-dc χρησιμοποιούνται ευρέως σε σταθεροποιημένες dc τροφοδοσίες διακοπτικού τύπου και σε εφαρμογές dc κινητηρίων συστημάτων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3, η είσοδος αυτών των μετατροπέων είναι συχνά μία μη σταθεροποιημένη dc τάση, η οποία λαμβάνεται με ανόρθωση της τάσης του δικτύου. Εξαιτίας των μεταβολών του πλάτους της τάσης του δικτύου, η dc τάση αυξομειώνεται. Οι dc-dc μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της μη σταθεροποιημένης dc εισόδου σε μία ελεγχόμενη dc έξοδο.



Σχήμα 4.3 : Σύστημα μετατροπέα DC-DC

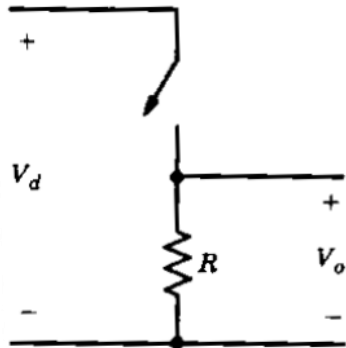
Η dc πηγή τάσης στην είσοδο των μετατροπέων θεωρείται ότι έχει μηδενική εσωτερική αντίσταση. Η πηγή αυτή μπορεί να είναι ένας συσσωρευτής. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, η είσοδος είναι μία ac τάση δικτύου ανορθωμένη με διόδους και με ένα μεγάλο πυκνωτή εξομάλυνσης, ώστε να έχει χαμηλή εσωτερική σύνθετη αντίσταση και να λειτουργεί ως πηγή dc τάσης με μικρή κυμάτωση.

Ένα μικρό φίλτρο στη βαθμίδα εξόδου θεωρείται αναπόσπαστο μέρος του dc-dc μετατροπέα. Η έξοδος θεωρείται ότι τροφοδοτεί ένα φορτίο που μπορεί να παρασταθεί με μία ισοδύναμη αντίσταση, όπως συμβαίνει συνήθως στα dc διακοπτικά τροφοδοτικά. Ένα φορτίο dc κινητήρα (η άλλη εφαρμογή αυτών των μετατροπέων) μπορεί να παρασταθεί με μία dc τάση σε σειρά με την αντίσταση και την αυτεπαγωγή του τυλίγματος του κινητήρα.

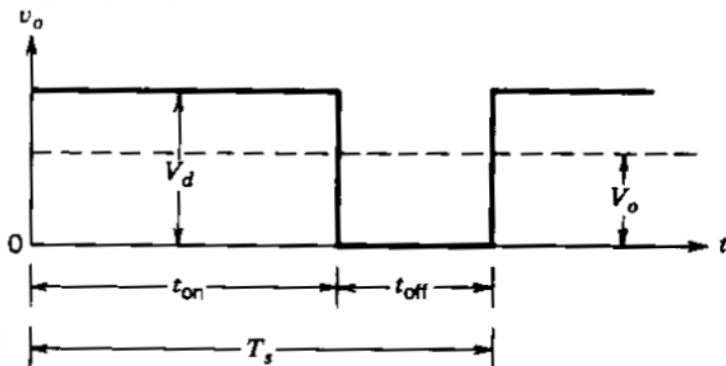
4.3.2 Έλεγχος των μετατροπέων DC-DC

Στους μετατροπείς dc-dc, η μέση dc τάση εξόδου πρέπει να ελέγχεται, ώστε να είναι σε ένα επιθυμητό επίπεδο, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι η τάση εισόδου και το φορτίο ενδέχεται να αυξομειώνονται. Οι μετατροπείς dc-dc διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούν έναν ή περισσότερους διακόπτες για το μετασχηματισμό της dc τάσης από ένα επίπεδο σε ένα άλλο. Σε ένα dc-dc μετατροπέα με δεδομένη τάση εισόδου, η μέση τάση εξόδου ρυθμίζεται ελέγχοντας τους χρόνους έναυσης και σβέσης (t_{on} και t_{off}) των διακοπών. Για να καταστεί φανερή η αρχή μετατροπής διακοπτικού τύπου, ας θεωρηθεί ένας βασικός dc-dc μετατροπέας, όπως αυτός του σχήματος 4.3.2-α. Η μέση τιμή V_o της τάσης εξόδου u_o , στο σχήμα 4.3.2-β εξαρτάται από τους χρόνους t_{on} και t_{off} . Μία από τις μεθόδους ελέγχου της μέσης τάσης εξόδου χρησιμοποιεί σταθερή συχνότητα μετάβασης (και συνεπώς σταθερή περίοδο μετάβασης $T_s = t_{on} + t_{off}$) και ρύθμιση της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Σε αυτή τη μέθοδο, που ονομάζεται μετάβαση με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse-Width-Modulation, PWM) μεταβάλλεται η σχετική διάρκεια αγωγής (duty ratio) $D = t_{on}/T_s$, που ορίζεται ως ο λόγος διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός προς την περίοδο μετάβασης.

Η άλλη μέθοδος ελέγχου είναι γενικότερη. Σύμφωνα με αυτήν μεταβάλλονται, τόσο η συχνότητα μετάβασης (και η περίοδος), όσο και η διάρκεια κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο σε μετατροπείς dc-dc που χρησιμοποιούν thyristors με εξαναγκασμένη μετάβαση. Οι μεταβολές της συχνότητας μετάβασης καθιστούν δύσκολο το φιλτράρισμα της κυμάτωσης των κυματομορφών της εισόδου και της εξόδου.



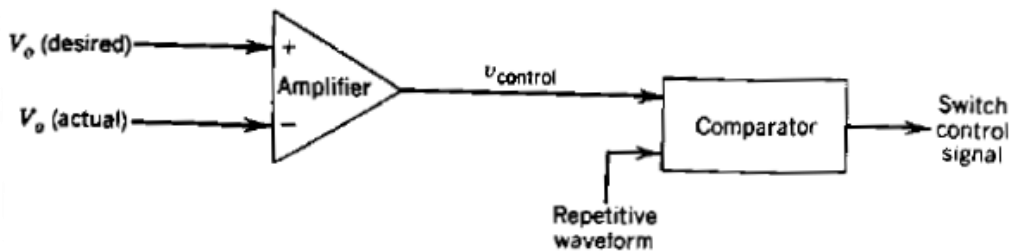
Σχήμα 4.3.2.1-α



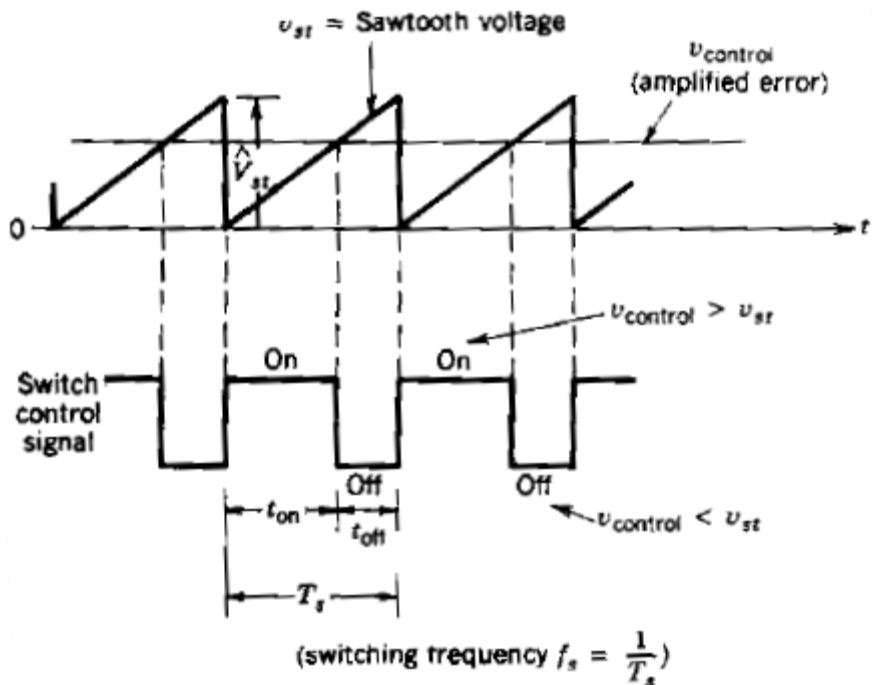
Σχήμα 4.3.2.1-β

Στη διαμόρφωση με PWM με σταθερή συχνότητα μετάβασης, το σήμα ελέγχου του διακόπτη, το οποίο ελέγχει την κατάστασή του (κλειστός ή ανοιχτός), παράγεται με τη σύγκριση του επιπέδου τάσης του σήματος ελέγχου $v_{control}$ με μία περιοδική κυματομορφή σταθερού πλάτους, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.3.2.2-α και 4.3.2.2-β. Γενικά, το σήμα της τάσης ελέγχου λαμβάνεται ενισχύοντας το σφάλμα ή τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τάσης και της επιθυμητής της τιμής. Η συχνότητα της περιοδικής κυματομορφής (συνήθως είναι πριονωτή), καθορίζει τη συχνότητα μετάβασης. Στον έλεγχο με PWM, η συχνότητα αυτή διατηρείται σταθερή και επιλέγεται σε μια περιοχή από μερικά kHz μέχρι μερικές εκατοντάδες kHz. Όταν το ενισχυμένο σήμα σφάλματος, που μεταβάλλεται πολύ αργά με το χρόνο σε σχέση με τη συχνότητα μετάβασης, είναι μεγαλύτερο από την πριονωτή κυματομορφή, το σήμα ελέγχου του διακόπτη γίνεται high, προκαλώντας το κλείσιμο του διακόπτη. Διαφορετικά, ο διακόπτης είναι ανοιχτός. Σύμφωνα με το σχήμα 4.3.2.2, η σχετική διάρκεια αγωγής μπορεί να εκφραστεί, ως συνάρτηση της $v_{control}$ και του πλάτους της πριονωτής κυματομορφής V_{st} , με τη σχέση

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{v_{control}}{V_{st}} \quad (1)$$



Σχλημα 4.3.2.2-α Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού (PWM): λειτουργικό διάγραμμα



Σχήμα 4.3.2.2-α Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού (PWM): σήματα συγκριτή

4.3.3 DC-DC Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης

Όπως υποδηλώνει και το όνομά του, ένας dc-dc μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (step-down ή bulk dc-dc converter) παράγει μία μέση τάση εξόδου χαμηλότερη από τη dc τάση εισόδου V_d . Η κύρια εφαρμογή του είναι τα dc διακοπτικά τροφοδοτικά και ο έλεγχος της ταχύτητας των δσκινητήρων.

Το βασικό κύκλωμα του σχήματος 4.3.2.1-α αποτελεί έναν μετατροπέα υποβιβασμού τάσης για ένα καθαρά ωμικό φορτίο. Θεωρώντας έναν ιδανικό διακόπτη και ένα καθαρά ωμικό φορτίο, η στιγμιαία τάση εξόδου εξαρτάται από την κατάσταση του διακόπτη. Από το σχήμα 4.3.2.1-β μπορεί να υπολογιστεί η μέση τάση εξόδου ως συνάρτηση της σχετικής διάρκειας αγωγής D :

$$V_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_o dt = \frac{1}{T_s} (\int_0^{t_{on}} V_d dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 dt) = \frac{t_{on}}{T_s} V_d = DV_d (2)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) το D από την εξίσωση (2) έχουμε:

$$V_0 = \frac{V_d}{V_{st}} v_{control} = k v_{control}$$

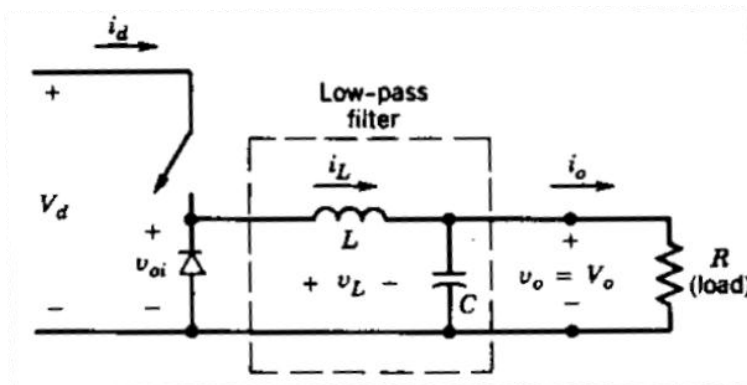
Όπου

$$k = \frac{V_d}{V_{st}} = \text{σταθερά}$$

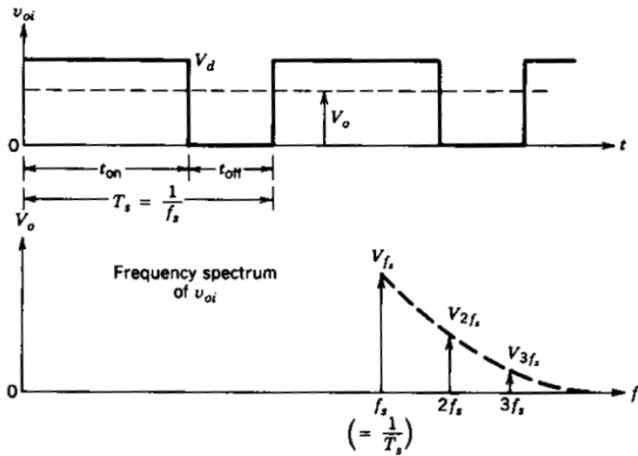
Η V_o μπορεί να ελεγχθεί, μεταβάλλοντας το t_{on}/T_s . Μια άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι η μέση τάση εξόδου V_o μεταβάλλεται γραμμικά με την τάση ελέγχου, όπως στην περίπτωση των γραμμικών ενισχυτών. Σε μια πρακτική εφαρμογή, το προηγούμενο κύκλωμα έχει δύο μειονεκτήματα: (1) Στην πράξη το φορτίο θα είναι επαγωγικό. Ακόμη και με ένα ωμικό φορτίο, θα υπάρχει πάντα κάποια παρασιτική αυτεπαγωγή. Αυτό σημαίνει ότι ο διακόπτης θα πρέπει να απορροφά (ή να καταναλώνει) την ενέργεια που αποθηκεύεται στην αυτεπαγωγή και για το λόγο αυτό μπορεί να καταστραφεί. (2) Η τάση εξόδου κυμαίνεται μεταξύ 0 και V_d , γεγονός μη αποδεκτό στις περισσότερες εφαρμογές. Το πρόβλημα της αποθηκευμένης ενέργειας λύνεται με τη χρήση μιας διόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.3.α. Οι διακυμάνσεις της τάσης εξόδου ελαττώνονται κατά πολύ με τη χρήση ενός χαμηλοπερατού φίλτρου, το οποίο αποτελείται από ένα πηνίο και έναν πυκνωτή. Στο σχήμα 4.3.3.β φαίνεται η κυματομορφή της εισόδου u_{oi} του φίλτρου (που είναι ίδια με την τάση εξόδου του σχήματος 4.3.2.1-β χωρίς το φίλτρο). Αυτή αποτελείται από έναν dc όρο V_o , τις αρμονικές στη συχνότητα μετάβασης f_s και στις πολλαπλάσιές της, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.3.β. Η απόκριση συχνότητας του φίλτρου, με την απόσβεση που προκαλείται από το ωμικό φορτίο R , φαίνεται στο σχήμα 4.3.3.γ. Η συχνότητα αποκοπής f_c αυτού του φίλτρου επιλέγεται πολύ μικρότερη από τη συχνότητα μετάβασης, εξαλείφοντας ουσιαστικά την κυμάτωση στη συχνότητα μετάβασης από την τάση εξόδου.

Όσο ο διακόπτης είναι κλειστός, η διόδος του σχήματος 4.3.3.α πολώνεται ανάστροφα και η είσοδος παρέχει ενέργεια, τόσο στο φορτίο, όσο και στο πηνίο. Όσο ο διακόπτης είναι ανοιχτός, το ρεύμα του πηνίου ρέει δια μέσου της διόδου, μεταφέροντας μέρος της αποθηκευμένης ενέργειάς του στο φορτίο.

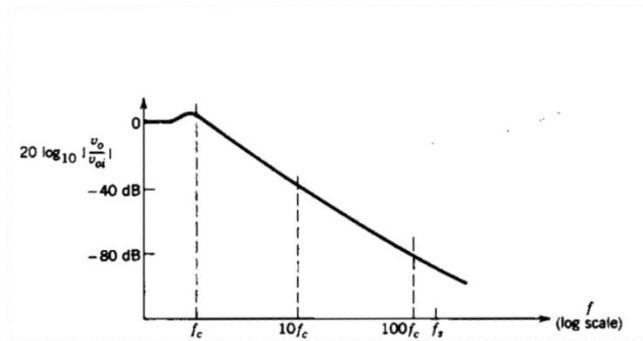
Στο σχήμα 4.3.3.α παρατηρείται ότι σε ένα dc-dc μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, το μέσο ρεύμα του πηνίου ισούται με το μέσο ρεύμα εξόδου I_o , εφόσον το ρεύμα του πυκνωτή στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας είναι μηδέν.



(α)



(β)

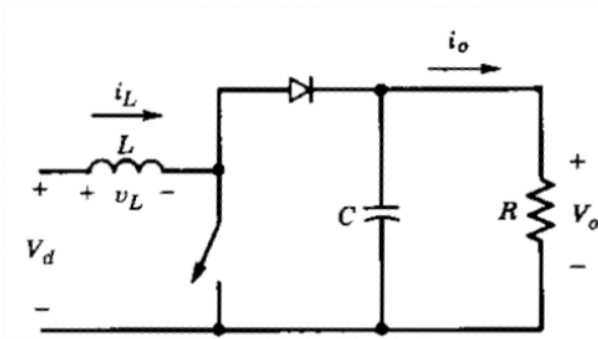


(γ)

Σχήμα 4.3.3: DC-DC μετατροπές υποβιβασμού τάσης

4.3.4 DC-DC Μετατροπές Ανύψωσης Τάσης

Στο σχήμα 4.3.4 δίνεται ένας μετατροπές ανύψωσης τάσης (step-up ή boost dc-dc converter). Η κύρια εφαρμογή του είναι στα dc διακοπτικά τροφοδοτικά και στην πέδηση dc κινητήρων με ανάκτηση ισχύος. Όπως υποδηλώνει το όνομά του, η τάση εξόδου είναι πάντα μεγαλύτερη από την τάση εισόδου. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη, απομονώνοντας έτσι τη βαθμίδα εξόδου. Η είσοδος παρέχει ενέργεια στο πηνίο. Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, η βαθμίδα εξόδου απορροφά ενέργεια από το πηνίο και την είσοδο. Στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, ο πυκνωτής εξομάλυνσης θεωρείται πολύ μεγάλος, ώστε να εξασφαλίζει μία σταθερή τάση εξόδου $u_o \approx V_o$.

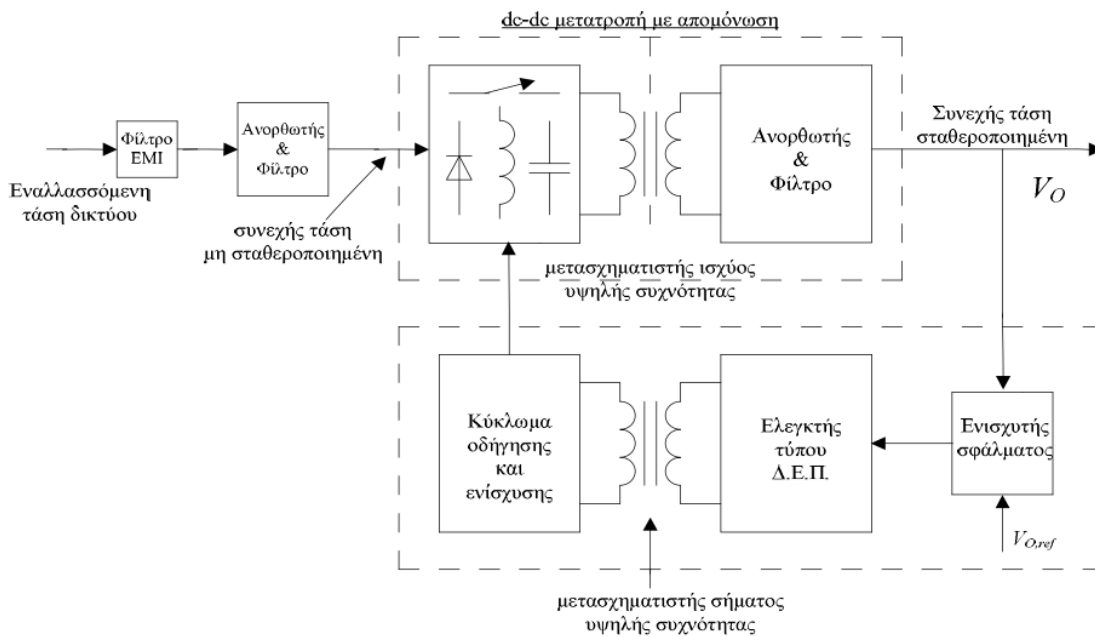


Σχήμα 4.3.4 DC-DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης

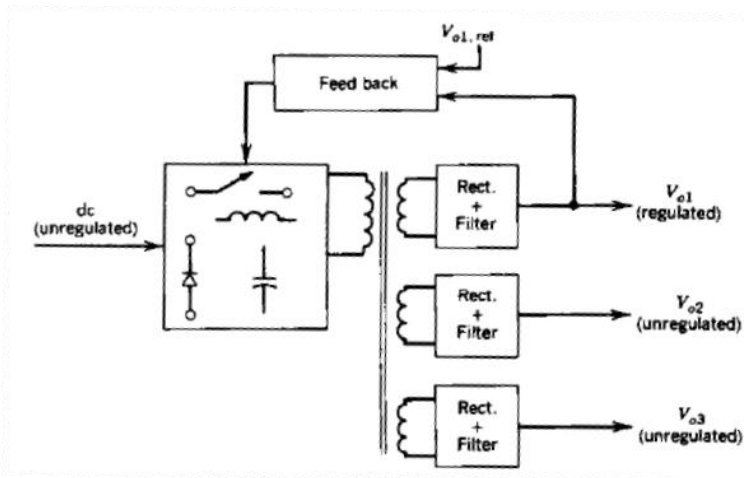
4.4 Διακοπτικά Τροφοδοτικά

Σε αντίθεση με τα γραμμικά, στα διακοπτικά τροφοδοτικά η μεταβολή της dc τάσης από μια στάθμη σε μια άλλη επιτυγχάνεται με τη χρήση dc-dc μετατροπέων, οι οποίοι αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4.3. Τα κυκλώματα αυτά χρησιμοποιούν ημιαγωγικά στοιχεία (transistor, MOSFET, κ.λ.π) τα οποία λειτουργούν ως διακόπτες, δηλαδή είτε κλειστά είτε ανοικτά. Εφόσον τα στοιχεία ισχύος δεν χρειάζεται να λειτουργούν στην ενεργό περιοχή, αυτός ο τρόπος λειτουργίας προκαλεί πολύ μικρές απώλειες. Η αύξηση της ταχύτητας μετάβασης, οι μεγαλύτεροι περιορισμοί τάσης και ρεύματος και το σχετικά χαμηλότερο κόστος αυτών των στοιχείων είναι οι παράγοντες που συνέβαλαν στην εμφάνιση των διακοπτικών τροφοδοτικών.

Στο σχήμα 4.4.α δίνεται ένα απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα ενός διακοπτικού τροφοδοτικού με ηλεκτρική απομόνωση. Η ac τάση εισόδου ανορθώνεται σε μια μη σταθεροποιημένη dc τάση με τη βοήθεια των ανορθωτών με διόδους. Πρέπει να τονιστεί ότι ένα φίλτρο EMI χρησιμοποιείται στην είσοδο για την καταστολή της EMI. Η βαθμίδα του dc-dc μετατροπέα μεταβάλλει τη dc τάση από ένα επίπεδο σε ένα άλλο. Αυτό επιτυγχάνεται με διακοπτική λειτουργία υψηλής συχνότητας, η οποία τροφοδοτεί με ac τάση υψηλής συχνότητας τον μετασχηματιστή απομόνωσης. Η έξοδος του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή ανορθώνεται και φιλτράρεται, ώστε να προκύψει η τάση V_o . Η έξοδος του dc τροφοδοτικού του σχήματος 4.4.α σταθεροποιείται αυτόματα με έναν ελεγκτή PWM, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 4.3.2, στον οποίο μια τάση ελέγχου συγκρίνεται με μία πριονωτή κυματομορφή με συχνότητα τη συχνότητα μετάβασης. Η ηλεκτρική απομόνωση στο βρόχο ανάδρασης επιτυγχάνεται με έναν μετασχηματιστή απομόνωσης ή με οπτική σύζευξη.



Σχήμα 4.4.α Λειτουργικό διάγραμμα ενός διακοπτικού τροφοδοτικού



Σχήμα 4.4.β Τροφοδοτικό με πολλές εξόδους

Σε πολλές εφαρμογές χρειάζονται πολλαπλές εξόδους, θετικές και αρνητικές. Ανάλογα με την εφαρμογή, αυτές οι εξόδους πρέπει να είναι ηλεκτρικά απομονωμένες μεταξύ τους. Στο σχήμα 4.4.β δίνεται το λειτουργικό διάγραμμα ενός διακοπτικού τροφοδοτικού, στο οποίο μόνο η έξοδος V_{o1} είναι

σταθεροποιημένη, ενώ οι άλλες δύο είναι χωρίς σταθεροποίηση. Αν χρειάζεται αυτές οι δύο να σταθεροποιηθούν, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν γραμμικά τροφοδοτικά.

Τα δύο κύρια πλεονεκτήματα των διακοπτικών τροφοδοτικών σε σχέση με τα γραμμικά είναι πλέον εμφανής. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι:

- Τα διακοπτικά στοιχεία (transistor ισχύος ή MOSFET) λειτουργούν ως διακόπτες, δηλαδή ανοικτά ή κλειστά. Αποφεύγοντας τη λειτουργία στην ενεργό περιοχή, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των απωλειών, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης στο 70-90%. Επιπλέον, ένα διακοπτικό στοιχείο μπορεί να χειρίζεται μεγαλύτερες τιμές ισχύος σε σχέση με το transistor που λειτουργεί στη γραμμική περιοχή.
- Εφόσον χρησιμοποιείται μετασχηματιστής απομόνωσης υψηλής συχνότητας (σε σύγκριση με τους μετασχηματιστές των γραμμικών τροφοδοτικών που λειτουργούν στα 50 ή 60 Hz), το μέγεθος και το βάρος τους μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

Ένα από τα αρνητικά σημεία των διακοπτικών τροφοδοτικών είναι ότι είναι περισσότερο πολύπλοκα και ότι πρέπει να γίνουν κατάλληλες μετρήσεις για να κατασταλεί η EMI, που οφείλεται στις υψίσυχνες μεταβάσεις των διακοπών.

Τα πλεονεκτήματα των διακοπτικών τροφοδοτικών (σε σχέση με τα γραμμικά), που αναφέρθηκαν παραπάνω, αντισταθμίζουν τα μειονεκτήματά τους μέχρι ένα ορισμένο επίπεδο ισχύος. Το επίπεδο αυτό μειώνεται σταθερά με το χρόνο, εξαιτίας των προόδων της τεχνολογίας των ημιαγωγών.

4.5 Σχεδίαση του Τροφοδοτικού του Φορτιστή των Μπαταριών LiFePO_4

4.5.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε μία συνοπτική παρουσίαση των γραμμικών και των διακοπτικών τροφοδοτικών. Έγινε κατανοητό ότι από ένα επίπεδο ισχύος και πάνω, τα διακοπτικά τροφοδοτικά υπερτερούν κατά πολύ των γραμμικών τροφοδοτικών. Γι αυτό το λόγο θα χρησιμοποιηθεί ένα διακοπτικό τροφοδοτικό ως τροφοδοτικό του φορτιστή των μπαταριών LiFePO_4 .

4.5.2 Επίπεδο Ισχύος Τροφοδοτικού

Το battery pack για το οποίο σχεδιάζεται ο φορτιστής αποτελείται από τέσσερα εν σειρά κελιά LiFePO_4 . Συγκεκριμένα, τα κελιά για τα οποία σχεδιάζεται ο φορτιστής είναι τεχνολογίας nanophosphate και παρασκευάζονται από την εταιρία *A123 Systems*. Τα χαρακτηριστικά των εν λόγω κελιών συνοψίζονται παρακάτω:

Όνομαστική χωρητικότητα και τάση	2.3 Ah, 3.3 V
Εσωτερική αντίσταση (1kHz AC)	8 mΩ typical
Εσωτερική αντίσταση (10A, 1sDC)	10 mΩ typical
Προτεινόμενη μέθοδος κανονικής φόρτισης	3A to 3.6V CCCV, 45 min
Προτεινόμενη μέθοδος γρήγορης φόρτισης	10A to 3.6V CCCV, 15 min
Max continuous discharge	70A
Pulse discharge at 10 sec	120A
Cycle life at 10C discharge, 100%DOD	Over 1,000 cycles
Recommended charge and cut-off V at 25°C	3.6V to 2V
Recommended charge and cut-off V below 0°C	4.2V to 0.5V
Operating temperature range	-30°C to +60°C
Storage temperature range	-50°C to +60°C
Core cell weight	70 grams

Όπως αναλύθηκε στο Α' μέρος, οι μπαταρίες αυτού του τύπου φορτίζονται με τεχνική σταθερού ρεύματος-σταθερής τάσης (CCCV). Όπως φαίνεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κελιών αυτών, η κανονική φόρτιση γίνεται με την τεχνική CCCV στα 3A/3.6V. Αυτό σημαίνει ότι η φόρτιση γίνεται με τροφοδοσία σταθερού ρεύματος 3 A έως ότου η τάση του κελιού φτάσει τα 3.6 V. Στο υπό μελέτη σύστημα έχουμε τέσσερα εν σειρά κελιά, επομένως η τροφοδοσία σταθερού ρεύματος υφίσταται έως ότου η τάση του battery pack φτάσει τα:

$$3.6 V \times 4 \text{ cells} = 14.4 V$$

Από εκεί και μετά, η φόρτιση συνεχίζει με τροφοδοσία σταθερής τάσης. Το ρεύμα φόρτισης δηλαδή συνεχώς μειώνεται έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή η τάση στα 14.4 V. Η φόρτιση σταματά όταν το ρεύμα ιδανικά μηδενιστεί.

Επομένως, με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κελιών LiFePO₄, και με δεδομένο ένα battery pack τεσσάρων εν σειρά κελιών, θα σχεδιαστεί ένα τροφοδοτικό CCCV, 3 A/ 14.4V ισχύος:

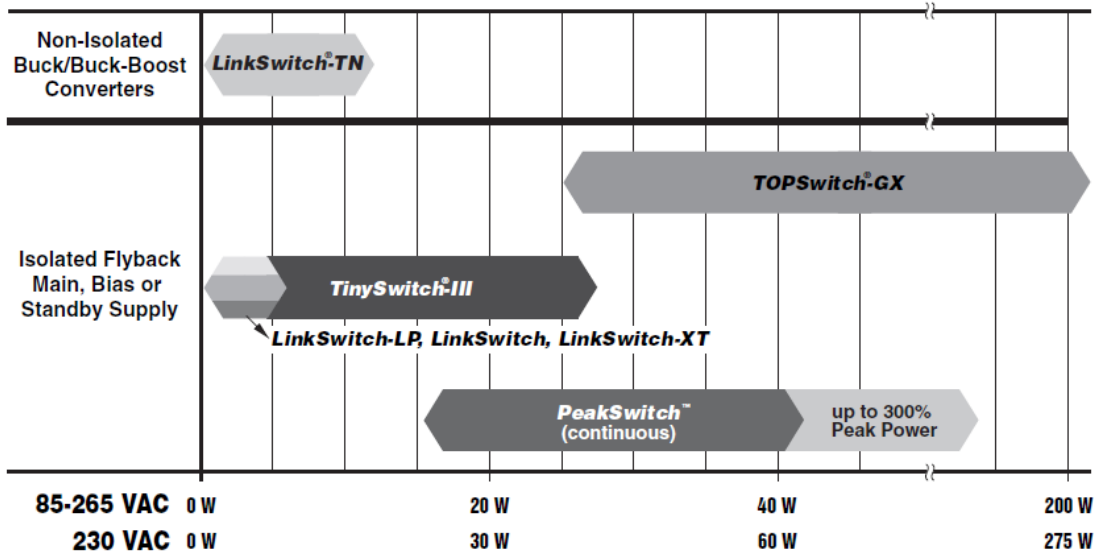
$$P = 3 A \times 14.4 V = 43.2 \text{ Watts}$$

4.5.3 Επιλογή ολοκληρωμένου κυκλώματος DC-DC μετατροπέα

Για τον υπό μελέτη φορτιστή μπαταριών LiFePO₄ επιλέγεται ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα dc-dc μετατροπέα και συγκεκριμένα από την εταιρεία *Power Integrations*. Η επιλογή έγινε με βάση το databook του κατασκευαστή. Με βάση τους πίνακες 4.5.3.α και 5.4.5.β, οι οποίοι περιέχονται στο databook της *Power Integrations* και το επιθυμητό επίπεδο ισχύος που υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 4.5.2, θα επιλεγθεί το κατάλληλο ολοκληρωμένο κύκλωμα για τη ζητούμενη εφαρμογή.

Πίνακας 4.5.3.α: Επιλογή προϊόντος του κατασκευαστή ολοκληρωμένων Power Integrations

AC-DC Product Selector Guide



Πίνακας 4.5.3.β: Πίνακας επιλογής προϊόντος από τη σειρά TOPSwitch-GX

Product	Continuous Output Power	
	Adapter	Open Frame
TOPSwitch-GX	230 VAC ± 15%	
TOP242 P or G	9 W	15 W
TOP242 R	21 W	22 W
TOP242 Y or F	10 W	22 W
TOP243 P or G	13 W	25 W
TOP243 R	29 W	45 W
TOP243 Y or F	20 W	45 W
TOP244 P or G	16 W	28 W
TOP244 R	34 W	50 W
TOP244 Y or F	30 W	65 W
TOP245 P or G	19 W	30 W
TOP245 R	37 W	57 W
TOP245 Y or F	40 W	85 W
TOP246 P or G	21 W	34 W
TOP246 R	40 W	64 W
TOP246 Y or F	60 W	125 W
TOP247 R	42 W	70 W
TOP247 Y or F	85 W	165 W
TOP248 R	43 W	75 W
TOP248 Y or F	105 W	205 W
TOP249 R	44 W	79 W
TOP249 Y or F	120 W	250 W
TOP250 R	45 W	82 W
TOP250 Y or F	135 W	290 W

Στην ενότητα 4.5.2 υπολογίστηκε ότι το τροφοδοτικό του φορτιστή θα πρέπει να έχει ισχύ 43.2W. Επομένως, με βάση τους παραπάνω πίνακες, θα επιλεγθεί ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα της σειράς **TOPSwitch-GX** και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο **TOP246Y**.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.5.3.β, το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα καλύπτει τις απαιτήσεις ισχύος του τροφοδοτικού. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η ισχύς που αποδίδει είναι διαφορετική ανάλογα με τον τύπο της εφαρμογής που χρησιμοποιείται. Σε εφαρμογές όπου η συσκευασία είναι αντάπτορας (adapter) αποδίδει 60W ενώ όταν η συσκευασία είναι open frame αποδίδει 125W. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις open frame συσκευασίες υπάρχουν αισθητά καλύτερες συνθήκες εξαερισμού και ψύξης συγκριτικά με τις αντίστοιχες συσκευασίες αντάπτορα. Το τροφοδοτικό του φορτιστή θα σχεδιαστεί για συσκευασία αντάπτορα, επομένως το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο καλύπτει πλήρως τις ανάγκες ισχύος.

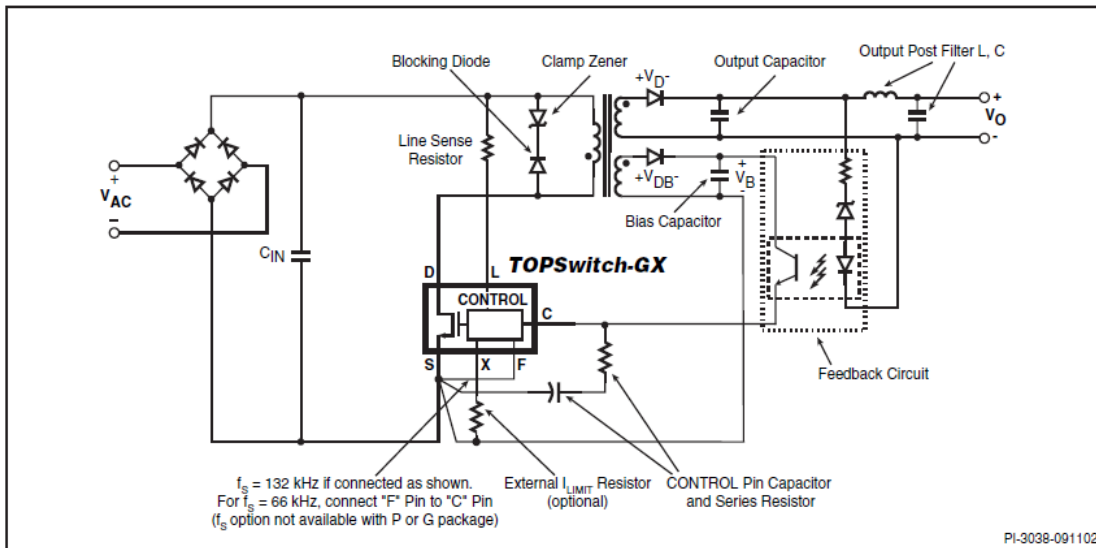
4.5.4 Σχεδίαση Κυκλώματος Τροφοδοτικού

4.5.4.1 Βασικές απαιτήσεις σχεδίασης

Αφού επιλέχθηκε ο ολοκληρωμένος dc-dc μετατροπέας, πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του τροφοδοτικού του φορτιστή των μπαταριών LiFePO₄. Όπως προαναφέρθηκε, το τροφοδοτικό θα φορτίζει τη μπαταρία με τεχνική σταθερού ρεύματος-σταθερής τάσης (CCCV) στα 3A/14.4 V. Αυτό σημαίνει ότι θα φορτίζει με σταθερό ρεύμα 3Amps μέχρις ότου το battery pack φτάσει τα 14.4Volts. Από εκεί και πέρα, η φόρτιση θα συνεχίζει με τεχνική σταθερής τάσης. Δηλαδή το ρεύμα φόρτισης θα μειώνεται συνεχώς έτσι ώστε η τάση να παραμένει σταθερή στα 14.4 Volts. Επομένως, οι βασικές απαιτήσεις σχεδίασης του τροφοδοτικού είναι να ικανοποιεί την τεχνική CCCV και στην έξοδο να δίνει ρεύμα 3A (κατά τη λειτουργία σταθερού ρεύματος) και τάση 14.4V (κατά τη λειτουργία σταθερής τάσης).

4.5.4.2 Σχεδίαση κυκλώματος

Λόγω του μεγάλου βαθμού ολοκλήρωσης που διαθέτει η σειρά *TOPSwitch-GX*, πολλά θέματα που αφορούν τον σχεδιασμό του τροφοδοτικού επιλύονται μέσα στο ίδιο το chip. Οι υπόλοιπες παράμετροι σχεδίασης του τροφοδοτικού ικανοποιούνται μέσω διάφορων στοιχείων που πλαισιώνουν το chip. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσον αφορά τη σχεδίαση τροφοδοτικού μέσω του ολοκληρωμένου dc-dc μετατροπέα της σειράς *TOPSwitch-GX*, υπάρχει ένα κύκλωμα διαμόρφωσης το οποίο είναι παρόμοιο για όλες τις εφαρμογές, ωστόσο ανάλογα με την εφαρμογή και τις απαιτήσεις που υπάρχουν, αλλάζουν οι τιμές ορισμένων στοιχείων του κυκλώματος διαμόρφωσης. Το κύκλωμα αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5.4.α.

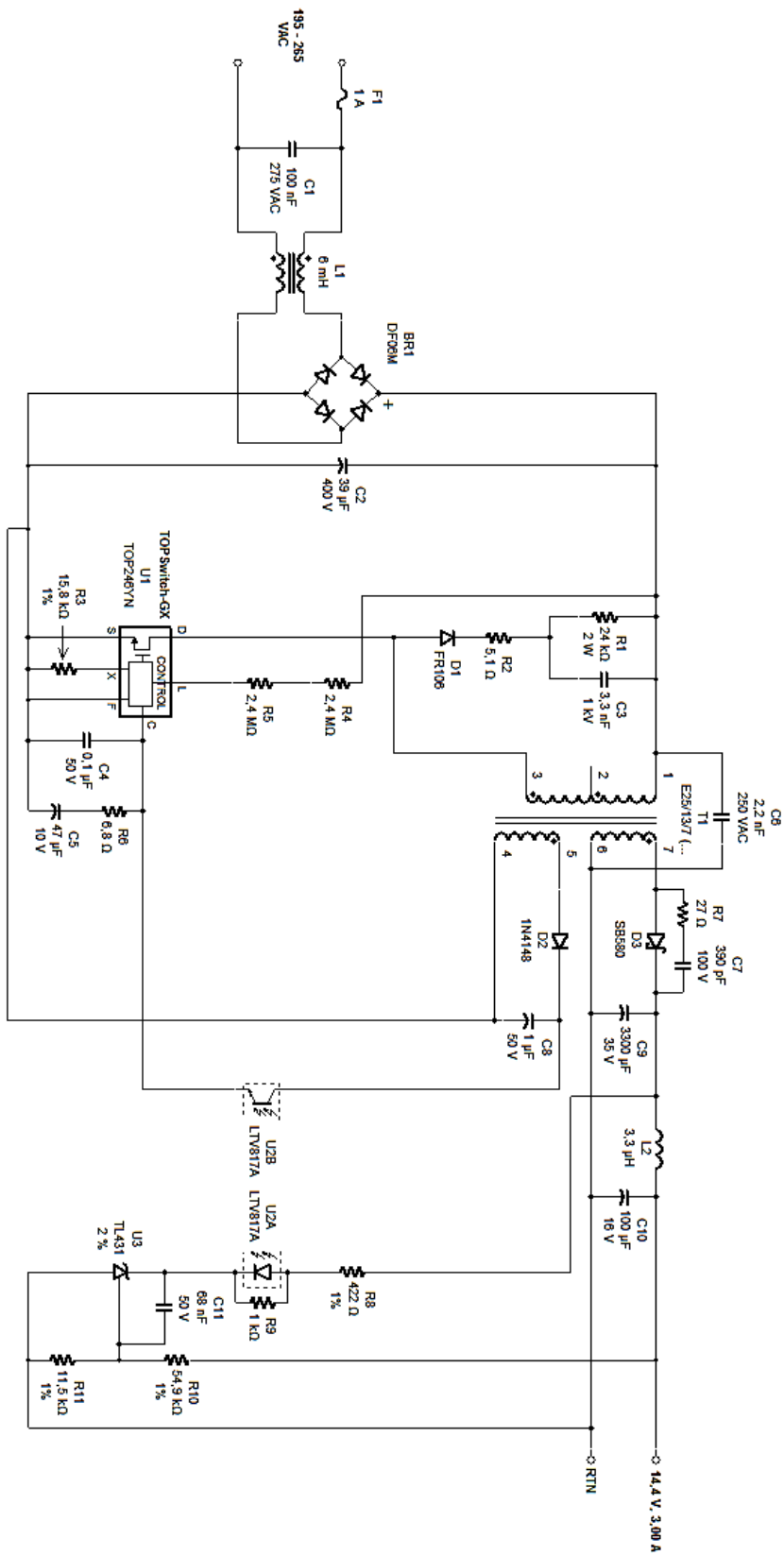


Σχήμα 4.5.4.α: Κύκλωμα διαμόρφωσης τροφοδοτικού με TOPSwitch-GX

Αφού προσδιορίστηκαν οι απαιτήσεις του συστήματος και επιλέχθηκε το κατάλληλο ολοκληρωμένο κύκλωμα dc-dc μετατροπέα, υπολογίζονται έπειτα τα στοιχεία του κυκλώματος ανάδρασης αντίστοιχα. Ο υπολογισμός των τιμών των στοιχείων ανάδρασης και γενικά των στοιχείων που πλαισιώνουν τον ολοκληρωμένο dc-dc μετατροπέα, γίνεται μέσω του application note του κατασκευαστή.

Να σημειωθεί ότι η λειτουργία CCCV επιτυγχάνεται μέσω ορισμένων στοιχείων τα οποία συνδέονται με το pin ελέγχου του ολοκληρωμένου dc-dc μετατροπέα. Μέσω των στοιχείων αυτών διαμορφώνεται ένα ρεύμα ανάδρασης το οποίο ρυθμίζει την έξοδο μέσω ελέγχου PWM κατά τη λειτουργία σταθερής τάσης. Κατά τη λειτουργία σταθερού ρεύματος μειώνεται το εσωτερικό όριο ρεύματος.

Επομένως, το κύκλωμα του τροφοδοτικού που προκύπτει παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5.4.β.



Σχήμα 4.5.4.β: Σχέδιο κυκλώματος τροφοδοτικού φορτιστή μπαταριών LiFePO₄ (4s1p)

4.5.4.3 Περιγραφή και ταξινόμηση των στοιχείων του κυκλώματος του τροφοδοτικού

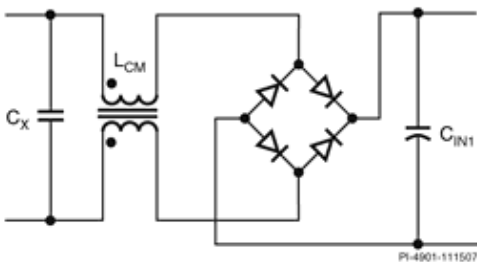
Παρακάτω θα πραγματοποιηθεί μία παρουσίαση και ταξινόμηση των στοιχείων του παραπάνω κυκλώματος. Παράλληλα γίνεται και παρουσίαση των χαρακτηριστικών μεγεθών του κυκλώματος.

Είσοδος Τροφοδοτικού

Μεταβλητή	Τιμή	Μονάδες
Ελάχιστη τιμή ac τάσης εισόδου	195	V
Μέγιστη τιμή ac τάσης εισόδου	265	V
Συχνότητα Δικτύου	50	Hz
Ελάχιστη τιμή dc τάσης εισόδου	231,6	V
Μέγιστη τιμή dc τάσης εισόδου	374,8	V

Στάδιο Εισόδου και Φίλτρο EMI

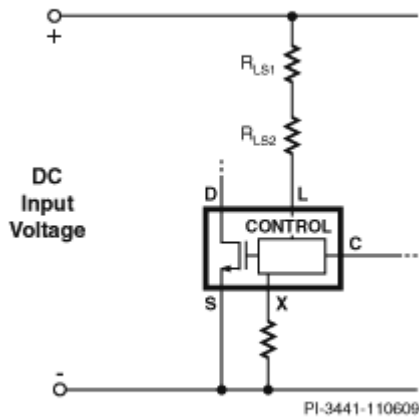
Όνομα Στοιχείου	Τιμή	Μονάδες	Περιγραφή
F1	1,00	A	Input Fuse Rated Current
BR1	DF06M		Δίοδοι Ανόρθωσης
C2	39,0	μF	Input Bulk Capacitor
L1	6,0	mH	Πηνίο εισόδου (choke)
C1	100,0	nF	Πυκνωτής 1-Φίλτρο EMI
C6	2,20	nF	Πυκνωτής 2-Φίλτρο EMI



Παράμετροι Συσκευής

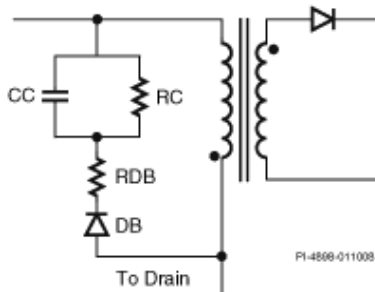
Όνομα Στοιχείου	Τιμή	Μονάδες	Περιγραφή
U1	TOP246YN		Όνομα συσκευής PI
C4	0,10	μF	Πυκνωτής παράκαμψης (bypass capacitor)
R3	15,80	kΩ	Αντίσταση Περιορισμού Ρεύματος
R4	2,4	MΩ	Αντίσταση παρακολούθησης της γραμμής (line sense resistor)
R5	2,4	MΩ	Αντίσταση παρακολούθησης της γραμμής (line sense resistor)

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδες
Συνολική Ισχύς Εξόδου	46,27	W
Actual Estimated Drain Voltage	587,74	V
On state Drain to Source Voltage	5,86	V
Διακοπτική Συχνότητα	132000	Hz
Ποσοστό συνεχούς/ασυνεχούς λειτουργίας	0,93	
Current Limit Reduction Factor	0,52	
Προγραμματιζόμενο όριο ρεύματος	1,29	A
Ελάχιστο όριο ρεύματος	2,51	A
Μέγιστο όριο ρεύματος	2,89	A
Εκτιμώμενη ισχύς εισόδου υπό μηδενικό φορτίο	500	mW
Μέγιστο Duty Cycle	0,37	
Μέγιστη θερμική αντίσταση συσκευής PI	29,86	°C/W
Είδος ψύκτρας συσκευής PI	Custom Aluminum	
Περιοχή ψύξης συσκευής PI	1348	mm ²



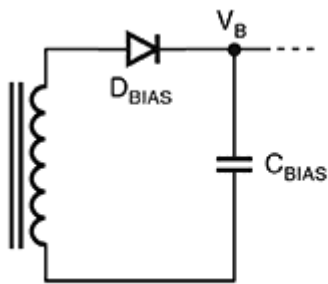
Στοιχεία Μανδάλωσης

Μεταβλητή	Τιμή	Μονάδες	Περιγραφή
D1	FR106		Δίοδος προστασίας από ρεύμα αντίθετης φοράς
R1	24,00	kΩ	Αντίσταση μανδάλωσης
RC_NUM	1		Αριθμός αντιστάσεων μανδάλωσης
C3	3,300	nF	Πυκνωτής μανδάλωσης
R2	5,10	Ω	Αντίσταση απόσβεσης για κύκλωμα μανδάλωσης
VCLAMP	175	V	Μέση τάση μανδάλωσης
Estimated Clamp Loss	1,25	W	Απώλειες κατά τη μανδάλωση



Μεταβλητές Δυναμικού Πολώσεως (Bias)

Μεταβλητή	Τιμή	Μονάδες
Τάση Bias	12,0	V
Ρεύμα Bias	0,006	A
Πτώση τάσης διόδου Bias	1,00	V
Πυκνωτής BIAS	1,0	μF
Πλήθος περιελίξεων	5	
Εσωτερική διάμετρος καλωδίου	0,45	mm
Είδος καλωδίου	Bifilar (x2)	
Στρώματα τυλίγματος	0,33	
Pins έναρξης τυλίγματος	5	
Pins τερματισμού τυλίγματος	4	

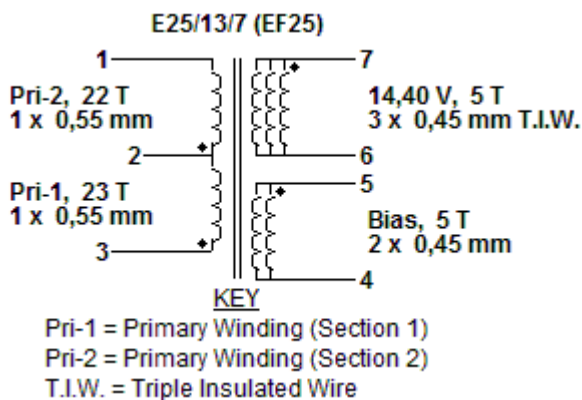


PI-5925-042310

Παράμετροι Κατασκευής Μετασχηματιστή

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδες
Είδος πυρήνα	E25/13/7 (EF25)	
Υλικό πυρήνα	NC-2H (Nicera) or Equivalent	
Μπομπίνα	Generic, 5 pri. + 5 sec.	
Είδος μπομπίνας	Vertical	
Αριθμός χρησιμοποιούμενων pins στο πρωτεύον	5	
Αριθμός χρησιμοποιούμενων pins στο δευτερεύον	2	
Επαγωγή Πρωτεύοντος	572	μH
Ανοχή επαγωγής πρωτεύοντος	10,0	%
Ονομαστική επαγωγή πρωτεύοντος	635	μH

Υπολογισμένος συνολικός αριθμός περιελίξεων του πρωτεύοντος	44,3	
Πλήθος περιελίξεων δευτερεύοντος	5	
Πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος πρωτεύοντος	2	A/mm ²
Τάση εξόδου	135,0	V
Πλάτος τυλίγματος μπομπίνας	15,30	mm
Κενό ασφαλείας στο αριστερό πλάτος	0,00	mm
Κενό ασφαλείας στο δεξί πλάτος	0,00	mm
Περιοχή διατομής πυρήνα	52,50	mm ²
Μέγιστη πυκνότητα ροής	289	mT
Peak πυκνότητας ροής	366	mT



Πρώτο Τμήμα Πρωτεύοντος Τυλίγματος

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδες
Πλήθος περιελίξεων πρωτεύοντος τυλίγματος στο πρώτο τμήμα πρωτεύοντος	23	
Πραγματική εσωτερική διάμετρος πρωτεύοντος τυλίγματος	0,55	mm
Πλήθος παράλληλων σκελών καλωδίων πρωτεύοντος τυλίγματος	Single (x1)	
Πλήθος επιπέδων πρωτεύοντος	0,85	
Απώλειες DC πρωτεύοντος	0,02	W
Pins έναρξης για το πρώτο τμήμα του πρωτεύοντος τυλίγματος	3	
Pins τερματισμού για το πρώτο τμήμα του πρωτεύοντος τυλίγματος	2	

Δεύτερο Τμήμα Πρωτεύοντος Τυλίγματος

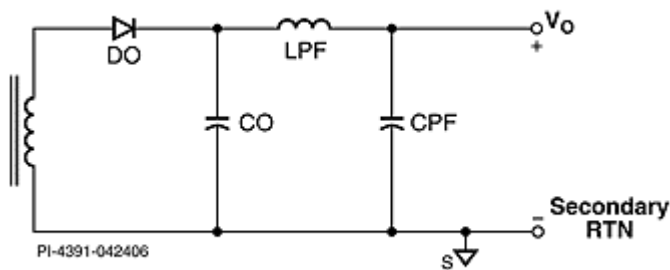
Μέγεθος	Τιμή	Μονάδες
Πλήθος περιελίξεων πρωτεύοντος τυλίγματος στο δεύτερο τμήμα πρωτεύοντος	22	
Πραγματική εσωτερική διάμετρος τυλίγματος	0,55	mm
Πλήθος παράλληλων σκελών καλωδίων τυλίγματος	Single (x1)	
Πλήθος επιπέδων στο δεύτερο τμήμα του πρωτεύοντος	0,81	
Απώλειες DC 2ου τμήματος πρωτεύοντος	0,02	W
Pins έναρξης για το δεύτερο τμήμα του πρωτεύοντος τυλίγματος	2	
Pins τερματισμού για το δεύτερο τμήμα του πρωτεύοντος τυλίγματος	1	

Εξόδος

Όνομα στοιχείου	Τιμή	Μονάδες	Περιγραφή
D3	SB580		Δίοδος εξόδου
R7	27,0	Ω	Αντίσταση απόσβεσης
C7	390	pF	Πυκνωτής απόσβεσης
C9	3300 x 1	μ F	Πυκνωτής εξόδου
L2	3,30	μ H	Πηνίο-Φίλτρο
C10	100,00	μ F	Πυκνωτής-Φίλτρο

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδες
Τάση εξόδου	14,40	V
Ρεύμα Εξόδου	3,00	A
Πραγματική τάση εξόδου	14,40	V
Αριθμός περιελίξεων δευτερεύοντος τυλίγματος	5	
Εσωτερική διάμετρος καλωδίου δευτερεύοντος τυλίγματος	0,45	mm
Πλήθος παράλληλων σκελών τυλίγματος εξόδου	Trifilar (x3)	
Επίπεδα δευτερεύοντος τυλίγματος εξόδου	0,64	
Απώλειες dc δευτερεύοντος	0,25	W

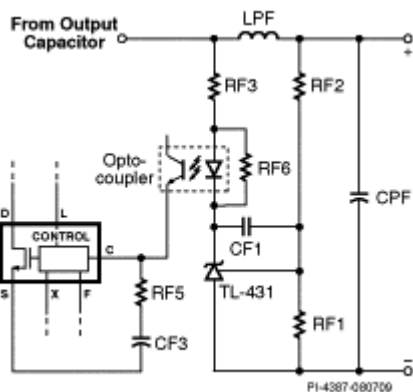
Pins έναρξης δευτερεύοντος τυλίγματος	7	
Pins τερματισμού δευτερεύοντος τυλίγματος	6	
Πτώση τάσης διόδου τυλίγματος εξόδου	0,85	V
Peak τιμή ρεύματος δευτερεύοντος	9,72	A
RMS τιμή ρεύματος δευτερεύοντος	4,60	A
Μέγιστη θερμική αντίσταση διόδου εξόδου	13,74	°C/W
Είδος ψήκτρας διόδου εξόδου	Custom Aluminum	
Περιοχή ψύξης διόδου εξόδου	7150	mm ²
RMS τιμή ρεύματος κυμάτωσης πυκνωτή εξόδου	3,49	A
Εκτιμώμενος χρόνος ζωής πυκνωτή εξόδου	68727	hr



Κύκλωμα Ανάδρασης

Μεταβλητή	Τιμή	Μονάδες	Περιγραφή
R11	11,50	kΩ	Αντίσταση ανάδρασης για ενισχυτή σφάλματος
R10	54,90	kΩ	Αντίσταση αντιστάθμισης
R8	422,00	Ω	Αντίσταση περιορισμού κέρδους
R6	6,80	Ω	Αντίσταση στο pin ελέγχου της συσκευής PI
R9	1,00	kΩ	Αντίσταση ρυθμιστή διακλάδωσης
C11	68,00	nF	Πυκνωτής αντιστάθμισης
C5	47	μF	Πυκνωτής στο pin ελέγχου της συσκευής PI

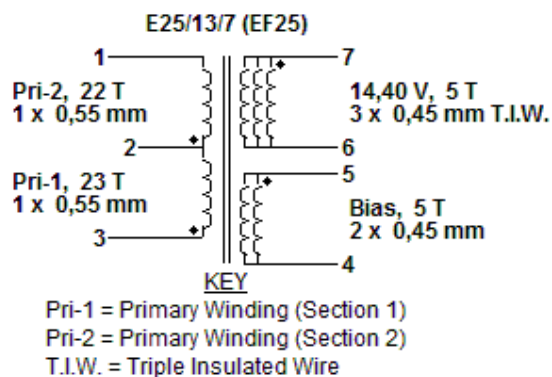
Μέγεθος	Τιμή	Μονάδες
Κωδικός προϊόντος optocoupler ανάδρασης	LTV817A	
Feedback Optocoupler Current Minimum Transfer Rate	80	%
Ολοκληρωμένο κύκλωμα ρυθμιστή διακλάδωσης	TL431	
Κέρδος ανοικτού βρόχου ενισχυτή σφάλματος	55,00	dB



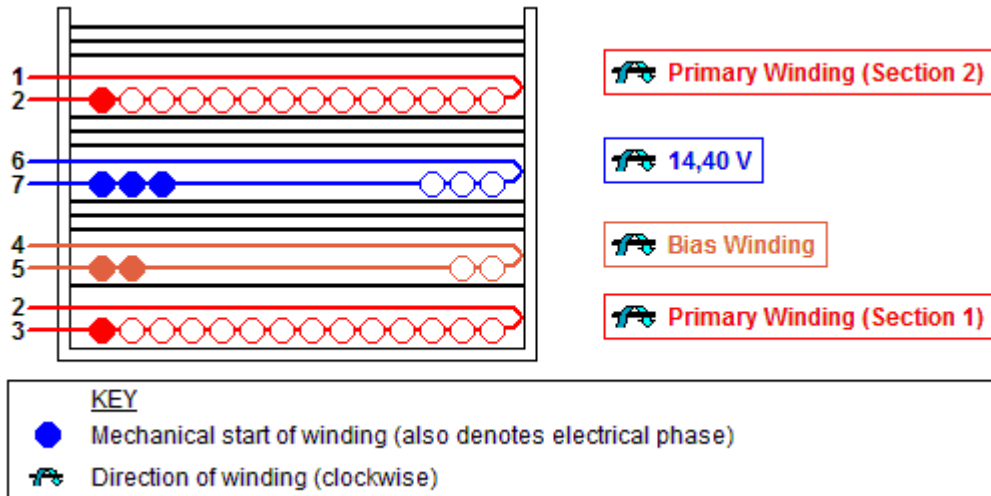
4.5.4.4 Κατασκευή μετασχηματιστή

Το ηλεκτρολογικό και το μηχανολογικό σχέδιο του μετασχηματιστή του τροφοδοτικού παρουσιάζεται παρακάτω:

Ηλεκτρολογικό διάγραμμα μετασχηματιστή



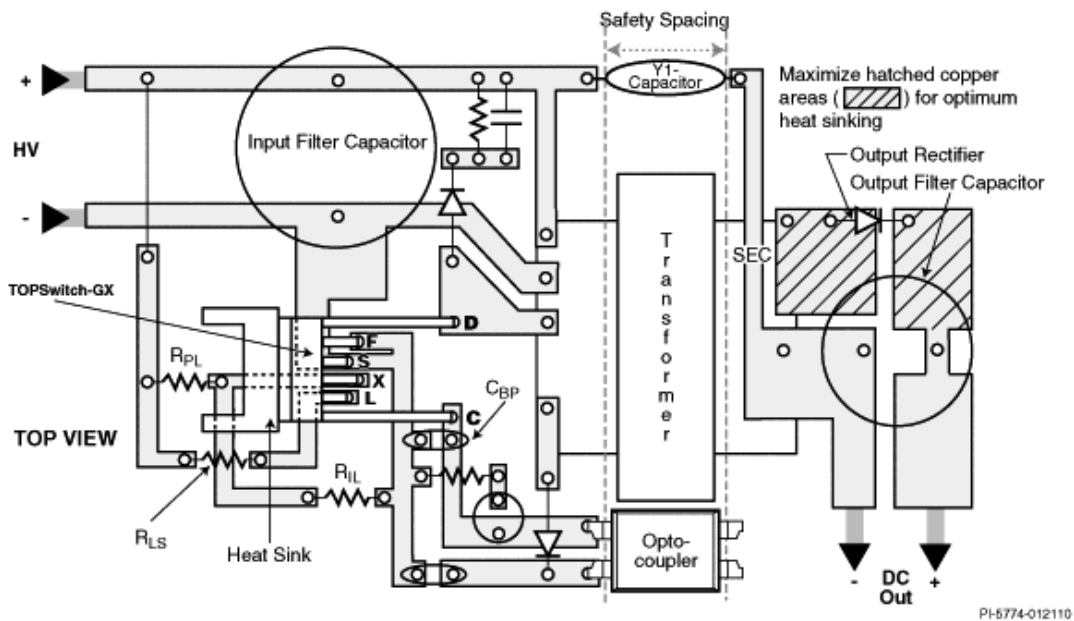
Μηχανολογικό διάγραμμα μετασχηματιστή



Item	Description
[1]	Core: E25/13/7 (EF25), NC-2H (Nicera) or Equivalent, gapped for ALG of 292 nH/T ²
[2]	Bobbin: Generic, 5 pri. + 5 sec.
[3]	Barrier Tape: Polyester film [1 mil (25 μm) base thickness], 15,30 mm wide
[4]	Varnish
[5]	Magnet Wire: 0,55 mm, Solderable Double Coated
[6]	Magnet Wire: 0,45 mm, Solderable Double Coated
[7]	Triple Insulated Wire: 0,45 mm

4.5.4.5 Σχέδιο πλακέτας του τροφοδοτικού

Το σχέδιο της τυπωμένης πλακέτας του κυκλώματος φαίνεται παρακάτω:



4.5.4.6 Κατάλογος υλικών για την κατασκευή του τροφοδοτικού

Ο συνολικός κατάλογος των υλικών που απαιτούνται για την κατασκευή του τροφοδοτικού παρατίθεται παρακάτω:

Κατάλογος Υλικών

Item #	Ποσότητα	Part Ref	Value	Περιγραφή	Mfg	Mfg Part Number
1	1	BR1	DF06M	600 V, 1,00 A, Standard Recovery Bridge, DFM	International Rectifier	DF06M
2	1	C1	100 nF	100 nF, 275 VAC, Ceramic, X Class	Panasonic	ECQ-U2A104ML
3	1	C2	39 μ F	39 μ F, 400 V, High Voltage Al Electrolytic, 5101 m Ω , (40 mm x 10 mm)	United Chemi-Con	EPAG400VB39RM10X40LL
4	1	C3	3,3 nF	3,3 nF, 1 kV, High Voltage Ceramic Disc	NIC Components Corp	NCD332M1KVZ5U
5	1	C4	0,1 μ F	0,1 μ F, 50 V, Ceramic, X7R	Murata	RPER71H104K2P1A03B

6	1	C5	47 μ F	47 μ F, 10 V, Electrolytic, Gen Purpose, 1040 m Ω , (11 mm x 5 mm)	United Chemi-Con	KME10VB47RM5X11LL
7	1	C6	2,2 nF	2,2 nF, 250 VAC, Ceramic, Y Class	Vishay	440LD22-R
8	1	C7	390 pF	390 pF, 100 V, Ceramic, X7R	Epcos	B37979N1391J000
9	1	C8	1 μ F	1 μ F, 50 V, Electrolytic, Gen Purpose, 1080 m Ω , (11 mm x 5 mm)	United Chemi-Con	EKMG500ELL1R0ME11D
10	1	C9	3300 μ F	3300 μ F, 35 V, Electrolytic, Low ESR, 16 m Ω , (35 mm x 18 mm)	United Chemi-Con	LXZ35VB332L40LL
11	1	C10	100 μ F	100 μ F, 16 V, Electrolytic, Low ESR, 250 m Ω , (11,5 mm x 6,3 mm)	United Chemi-Con	ELXZ160ELL101MFB5D
12	1	C11	68 nF	68 nF, 50 V, Ceramic, X7R	Murata	RPER71H683K2P1A03B
13	1	D1	FR106	800 V, 1,00 A, Fast Recovery, 250 ns, DO-41	Diodes Inc.	FR106
14	1	D2	1N4148	75 V, 0,30 A, Fast Recovery, 8 ns, DO-35	Vishay	1N4148
15	1	D3	SB580	80 V, 5,00 A, Schottky, DO-201AD	Vishay	SB580
16	1	F1	1 A	250 VAC, 1 A, Radial TR5, Time Lag Fuse	Littelfuse / Wickmann(R)	37411000410
17	1	HS1		33,7 mm x 20,0 mm. Aluminum Alloy (3003 OR 5052), 1.6 mm thickness. Heatsink for use with Device U1.	Custom	
18	1	HS2		178,8 mm x 20,0 mm. Aluminum Alloy (3003 OR 5052), 1.6 mm thickness. Heatsink for use with Diode D3.	Custom	
19	1	L1	6 mH	6 mH, 1,6 A	Panasonic	ELF18N016
20	1	L2	3,3 μ H	3,3 μ H, 5,5 A	JW Miller	RL622-3R3K-RC
21	1	R1	24 k Ω	24 k Ω , 5 %, 2 W, Metal Oxide	Generic	
22	1	R2	5,1 Ω	5,1 Ω , 5 %, 0,25 W, Carbon Film	Generic	
23	1	R3	15,8 k Ω	15,8 k Ω , 1 %, 0,125 W, Metal Film	Generic	
24	2	R4, R5	2,4 M Ω	2,4 M Ω , 5 %, 0,25 W, Carbon Film	Generic	
25	1	R6	6,8 Ω	6,8 Ω , 5 %, 0,125 W, Carbon Film	Generic	

26	1	R7	27 Ω	27 Ω, 5 %, 0,25 W, Carbon Film	Generic	
27	1	R8	422 Ω	422 Ω, 1 %, 0,125 W, Metal Film	Generic	
28	1	R9	1 kΩ	1 kΩ, 5 %, 0,125 W, Carbon Film	Generic	
29	1	R10	54,9 kΩ	54,9 kΩ, 1 %, 0,125 W, Metal Film	Generic	
30	1	R11	11,5 kΩ	11,5 kΩ, 1 %, 0,125 W, Metal Film	Generic	
31	1	T1	E25/13/7 (EF25)	NC-2H (Nicera) or Equivalent Core Material See Transformer Construction's Materials List for complete information	Epcos	B66317-G-X127
32	1	U1	TOP246YN	TOPSwitch-GX, TOP246YN, TO-220	Power Integrations	TOP246YN
33	1	U2	LTV817A	Optocoupler LTV817A, 35 V, CTR 80 - 160 %, 4-DIP	Liteon	LTV817A
34	1	U3	TL431	2,495 V, Shunt Regulator IC, 2 %, TO- 92	ON Semiconductor	TL431

4.5.4.7 Σύνοψη

Στις παραπάνω παραγράφους της ενότητας 4.5.4 παρουσιάστηκαν όλα τα στοιχεία της σχεδίασης του τροφοδοτικού του φορτιστή ενός battery pack το οποίο αποτελείται από 4 εν σειρά κελιά LiFePO_4 . Το τροφοδοτικό αυτό έχει ισχύ 43.2 W και λειτουργεί με την τεχνική CCCV. Η έξοδος του είναι 3A/ 14.4 V.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : Κύκλωμα Απομόνωσης της Τάσης του Κάθε Κελιού

5.1 Εισαγωγή

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του τροφοδοτικού του φορτιστή μπαταριών LiFePO_4 . Πιο συγκεκριμένα, ο φορτιστής αυτός σχεδιάζεται για τη φόρτιση ενός battery pack το οποίο αποτελείται από τέσσερα εν σειρά κελιά (4s1p).

Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της φόρτισης ελέγχεται κάθε στιγμή η τάση του κάθε κελιού, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλότητα της φόρτισης. Ανάλογα με την τιμή της τάσης του κάθε κελιού, ο «εγκέφαλος» του φορτιστή, ο οποίος είναι ένας μικροελεγκτής, καθορίζει τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν, όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενα κεφάλαια.

Το πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι ο μικροελεγκτής που θα χρησιμοποιηθεί (Arduino Mega), αλλά και η πλειοψηφία των μικροελεγκτών και μικροεπεξεργαστών που υπάρχουν, δέχεται τάσεις μεταξύ 0 και 5 V. Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, η τάση ενός κελιού LiFePO_4 παίρνει τιμές μέχρι 3.6 V. Στο battery pack που θα φορτίζεται, υπάρχουν τέσσερα τέτοια κελιά συνδεδεμένα σε σειρά. Αυτό σημαίνει ότι τα δυναμικά του κάθε κελιού σε κατάσταση πλήρους φόρτισης έχουν ως εξής:

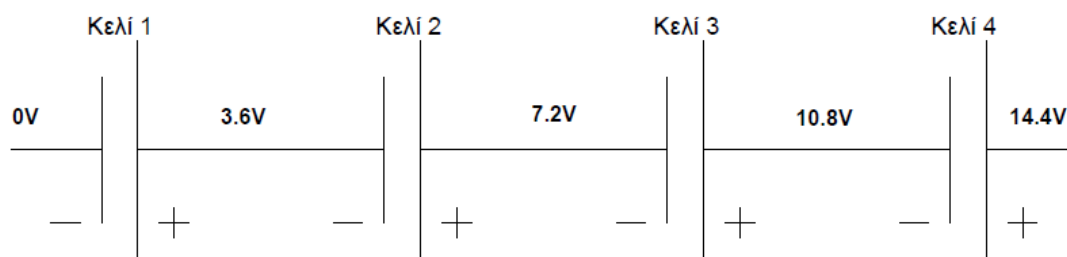
Κελί 1: 0V-3.6V

Κελί 2: 3.6V-7.2V

Κελί 3: 7.2V-10.8V

Κελί 4: 10.8V-14.4V

Στο σχήμα 5.1.α παρουσιάζονται σχηματικά τα παραπάνω:



Σχήμα 5.1.α: Εν σειρά συστοιχία τεσσάρων πλήρως φορτισμένων κελιών LiFePO_4

Ο μικροεπεξεργαστής κάθε φορά δέχεται το δυναμικό ενός ηλεκτροδίου και η τάση που διαβάζει είναι το δυναμικό αυτό μείον το μηδέν. Επομένως, μετά το πρώτο κελί στη συστοιχία, όλα τα υπόλοιπα κελιά, θα ξεπερνούν το όριο τάσης των 5V, αφού τα δυναμικά στα άκρα τους θα έχουν μεγαλύτερες τιμές.

Επομένως, δεν γίνεται ο μικροελεγκτής να δεχτεί άμεσα την τάση του κάθε κελιού καθώς μόνο το πρώτο κελί ικανοποιεί τα όρια τάσης στην είσοδο του.

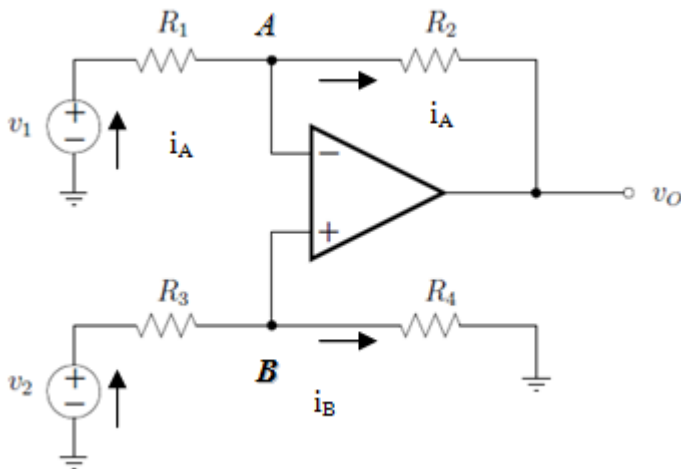
Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα είναι να λαμβάνεται η τάση του κάθε κελιού με αναφορά το μηδενικό δυναμικό (0V). Δηλαδή να απομονώνεται η τάση του κάθε κελιού, σαν να μην ήταν μέρος μίας συστοιχίας, αλλά μόνο του.

5.2 Σχεδίαση κυκλώματος απομόνωσης τάσης

5.2.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να απομονωθεί η τάση του κάθε κελιού, θα σχεδιαστεί ένα κύκλωμα, η λειτουργία του οποίου βασίζεται στους τελεστικούς ενισχυτές (opamp) και συγκεκριμένα στη συνδεσμολογία ενισχυτή διαφορών.

Η έξοδος ενός ενισχυτή διαφορών παρέχει τη διαφορά των σημάτων εισόδων του, με κάποια ενίσχυση. Ένας ενισχυτής διαφορών με δύο εισόδους δίνεται στο σχήμα 5.2.1.α. Ως είσοδο στον ενισχυτή μπορούμε να έχουμε είτε DC είτε AC σήμα. Το δυναμικό στο σημείο *A* είναι ίσο το δυναμικό στο σημείο *B* και επομένως ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις.



Σχήμα 5.2.1.α: Ενισχυτής διαφορών

$$\begin{aligned} i_A &= \frac{u_1 - u_o}{R_1 + R_2} \\ i_B &= \frac{u_2}{R_3 + R_4} \end{aligned} \quad (5.2.1.1)$$

Τα δυναμικά στα σημεία *A* και *B* είναι περίπου ίσα ενισχυτή και επομένως θα έχουμε τις παρακάτω σχέσεις.

$$i_A = \frac{u_A - u_o}{R_2} = \frac{u_1 - u_o}{R_1 + R_2} \Leftrightarrow u_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (u_1 + u_o)$$

$$u_B = \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_2$$

(5.2.1.2)

Εξισώνοντας τα δυναμικά στα σημεία A και B με βάση τη σχέση 5.2.1.1 ισχύει για τη τάση εξόδου του ενισχυτή διαφορών:

$$u_o = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{1 + \frac{R_3}{R_4}} \cdot u_2 - u_1 \right)$$

(5.2.1.3)

και στην ειδική περίπτωση όπου $\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2}$, τότε η τάση εξόδου είναι η ενισχυμένη διαφορά των δύο τάσεων :

$$u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1)$$

(5.2.1.4)

Ειδικά αν $R_1=R_2=R_3=R_4$, τότε η σχέση 5.2.1.4 γίνεται:

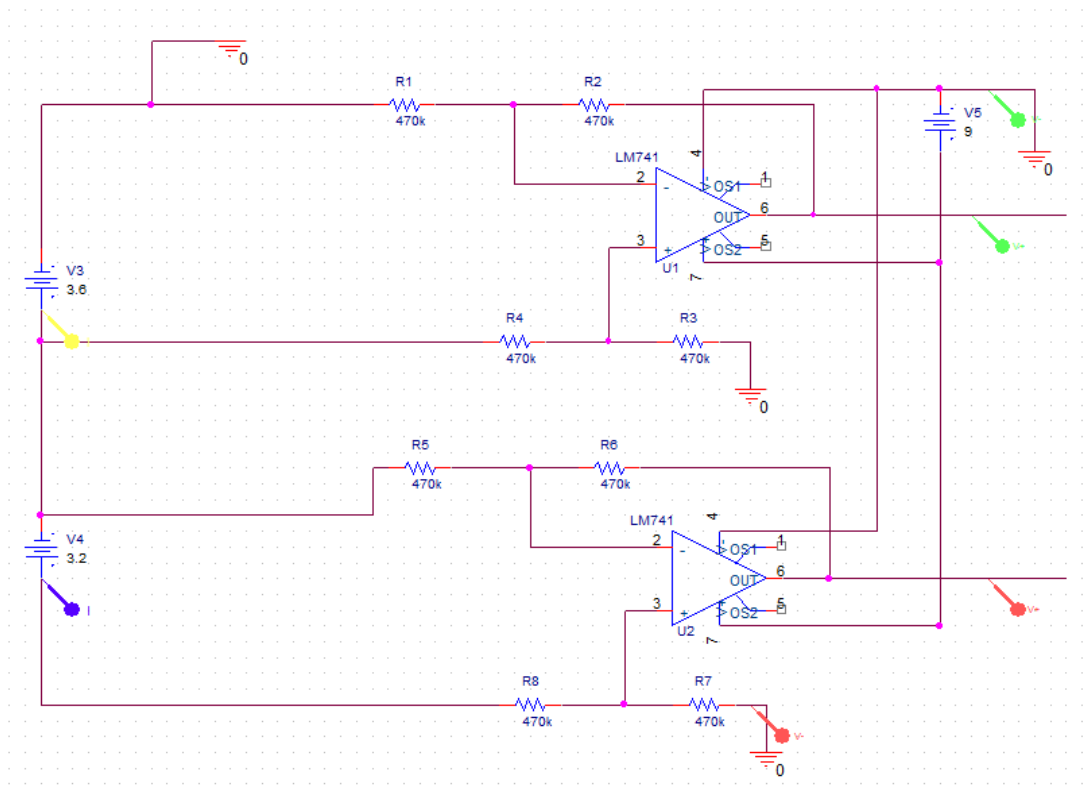
$$u_o = u_2 - u_1$$

5.2.2 Σχεδίαση κυκλώματος

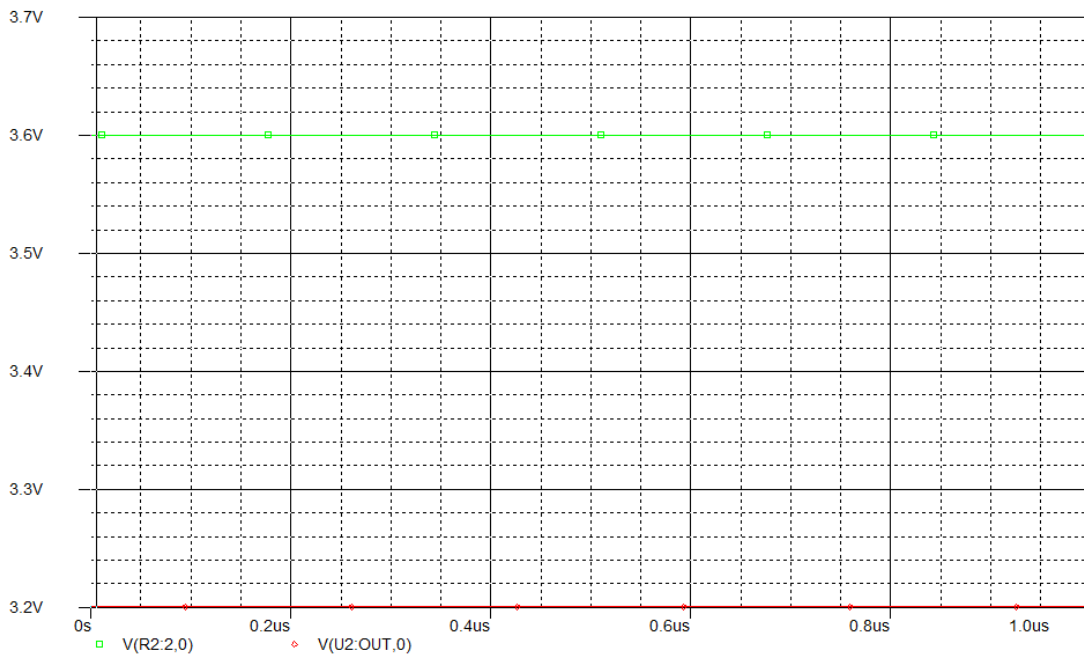
Επομένως, παράλληλα με κάθε κελί, θα συνδεθεί ένα κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή σε συνδεσμολογία ενισχυτή διαφορών, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2.1.α. Ως u_2 θα χρησιμοποιηθεί η τάση του θετικού ηλεκτροδίου και ως u_1 η τάση του αρνητικού ηλεκτροδίου. Η τάση του κελιού που θα μπαίνει στον μικροεπεξεργαστή θα λαμβάνεται από την έξοδο του κυκλώματος, δηλαδή τη u_o .

Οι τιμές των αντιστάσεων R_1, R_2, R_3, R_4 πρέπει να έχουν μεγάλη τιμή έτσι ώστε να μην περνάει μεγάλο ρεύμα στον μικροεπεξεργαστή αλλά και για να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρχει σημαντική κατανάλωση της χωρητικότητας του κελιού. Επομένως η τιμή των αντιστάσεων θα είναι περίπου 470k Ω. Σε προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό PSPICE, επαληθεύτηκε η λειτουργία του

κυκλώματος για μία μπαταρία που αποτελείται από 2 κελιά τάσης 3.2 V και 3.6 V. Στην εικόνα 5.2.β φαίνεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε:



Εικόνα 5.2.β: Προσομοίωση απομονωτή τάσης για μία μπαταρία 2 κελιών.

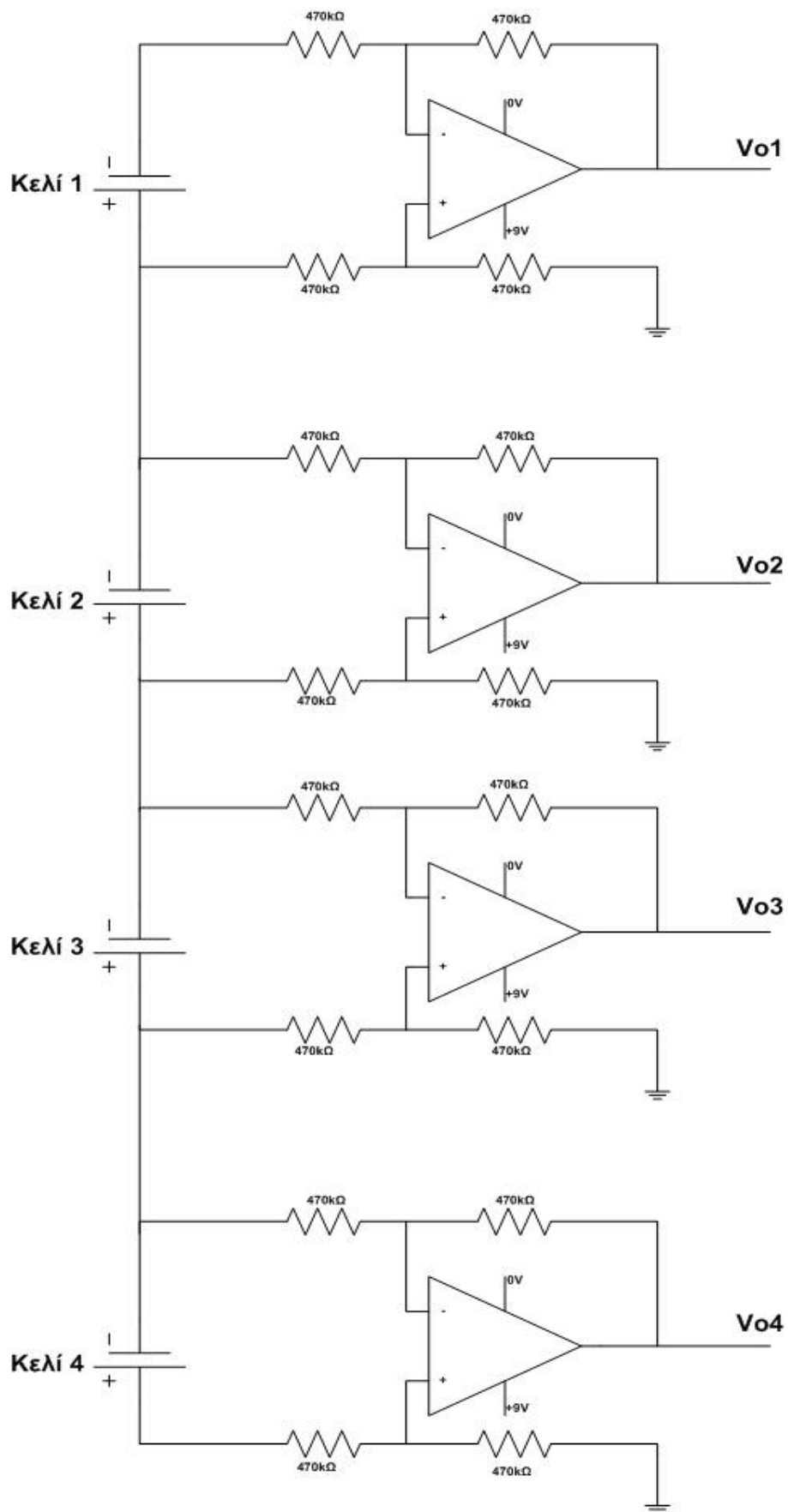


Γράφημα 5.2.γ: Αποτελέσματα προσομοίωσης

Επομένως, μέσω της προσομοίωσης επαληθεύτηκε η λειτουργία του κυκλώματος και μέσω δοκιμών διαπιστώθηκε ότι η τιμές των αντιστάσεων θα πάρουν την τιμή των 470kΩ. Για αυτή την τιμή των αντιστάσεων, το κύκλωμα λειτουργεί κανονικά, ενώ η κατανάλωση ρεύματος από τις μπαταρίες είναι ελάχιστη. Πιο συγκεκριμένα, οι αντιστάσεις που θα επιλεγθούν θα έχουν ανοχή 1% καθώς η ακρίβεια παίζει μεγάλο ρόλο στη μέτρηση της τάσης του κάθε κελιού.

Να τονιστεί επίσης ότι οι τελεστικοί ενισχυτές του κυκλώματος αυτού τροφοδοτούνται από μία dc πηγή 9V. Αυτή η τροφοδοσία γίνεται από ένα διακοπτικό τροφοδοτικό, η λεπτομέρειες της σχεδίασης του οποίου παρουσιάζονται στο τέλος της παρούσας διπλωματικής (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ, σελ. 142).

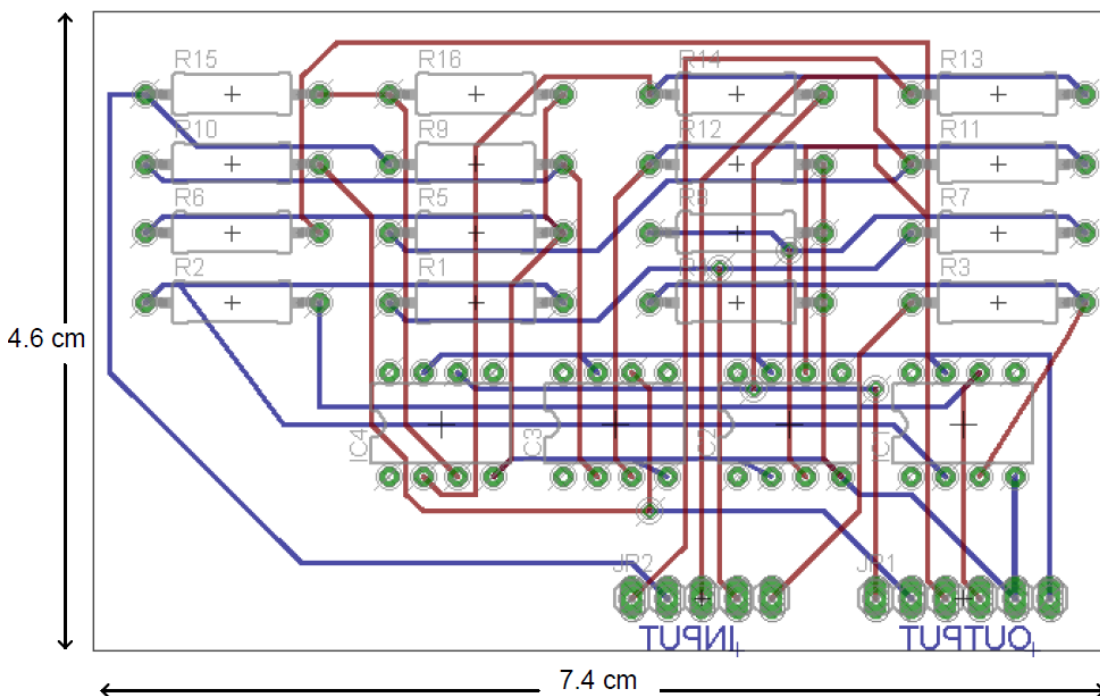
Το τελικό σχέδιο του κυκλώματος παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2.δ.



Εικόνα 5.2.δ: Σχέδιο κυκλώματος απομόνωσης τάσης κάθε κελιού

5.2.3 Σχεδίαση πλακέτας

Εν συνεχεία, με το πρόγραμμα σχεδίασης PCB, EAGLE, σχεδιάστηκε η πλακέτα του παραπάνω κυκλώματος. Η πλακέτα διαθέτει πέντε εισόδους και έξι εξόδους. Στις πέντε εισόδους εισέρχονται τα δυναμικά των ηλεκτροδίων του κάθε κελιού. Στην έξοδο βγαίνουν οι τάσεις κάθε κελιού με αναφορά το μηδέν ενώ στο έκτο pin συνδέεται η τροφοδοσία των τελεστικών ενισχυτών. Επίσης, στο CD που συνοδεύει τη διπλωματική, υπάρχουν τα αρχεία σχεδίασης (όνομα αρχείου: “PCB_αρομονοσι”)

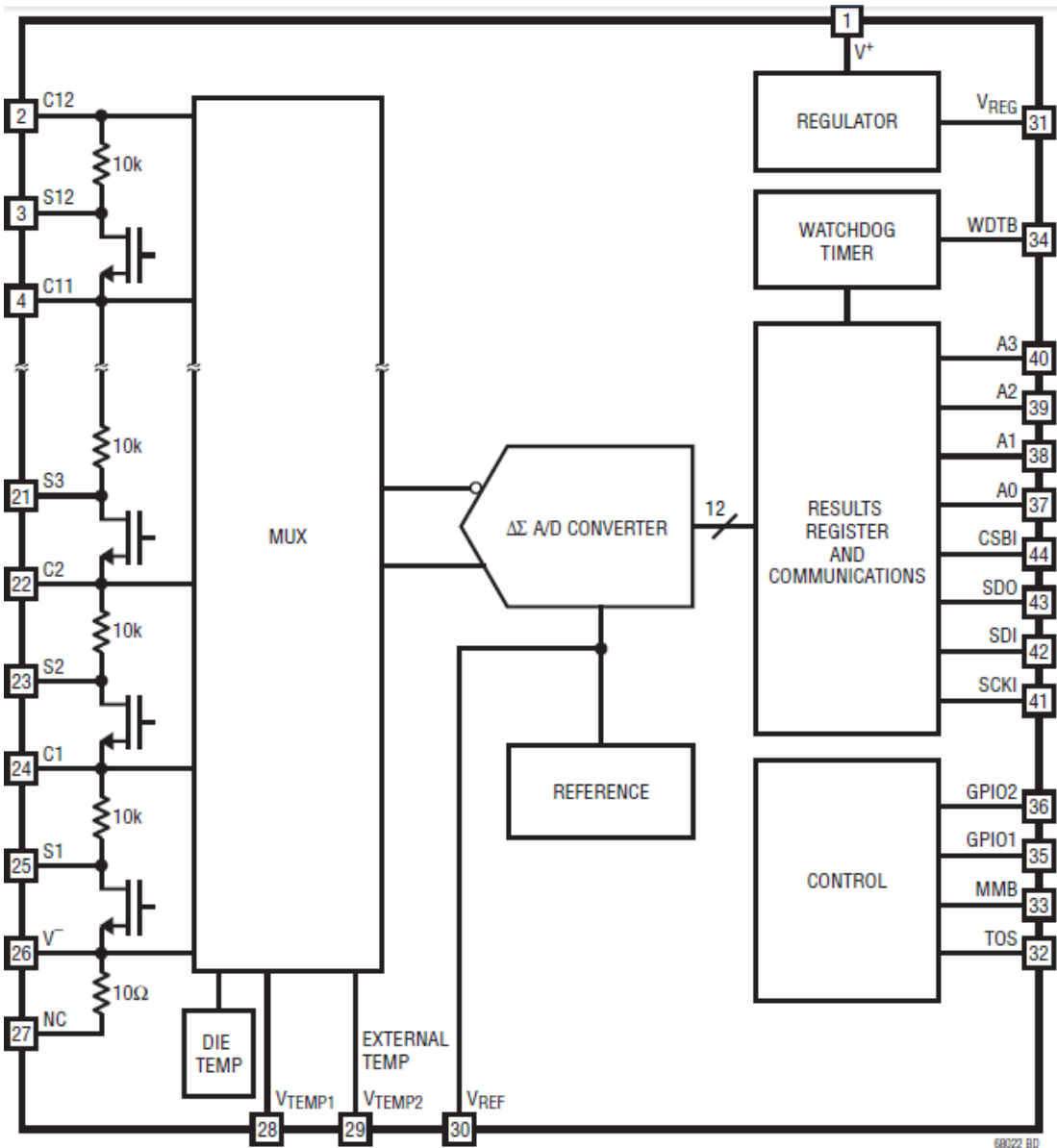


5.3 Ολοκληρωμένο κύκλωμα για μέτρηση τάσης του κάθε κελιού

Στην ενότητα 5.2 παρουσιάστηκε ένα κύκλωμα μέσω του οποίου ο μικροεπεξεργαστής δέχεται την τάση του κάθε κελιού με αναφορά το μηδέν. Ωστόσο, το κύκλωμα αυτό ενδέχεται να μην παρουσιάζει την ακρίβεια και την αξιοπιστία που απαιτείται. Αυτό μπορεί να γίνει λόγω των ανοχών που παρουσιάζουν οι αντιστάσεις αλλά και των μη ιδανικών τελεστικών ενισχυτών.

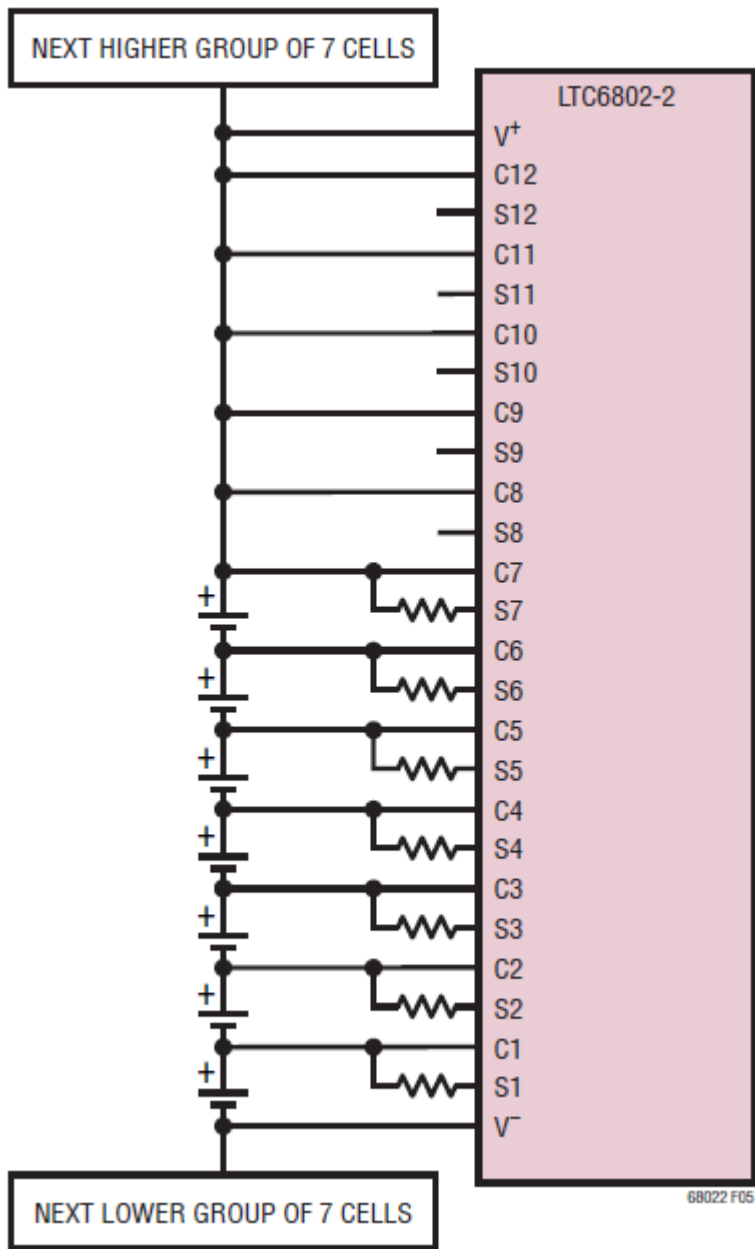
Γι αυτό το λόγο θα παρουσιαστεί συνοπτικά ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείται από πολλά Battery Management Systems του εμπορίου για τη μέτρηση της τάσης των κελιών ενός battery pack. Το ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα διαθέτει και λειτουργία ισοστάθμισης της τάσης των κελιών, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο, αλλά και προστασία από υπέρτασεις και υπέρβαση της θερμοκρασίας του battery pack. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα αποτελεί μία έτοιμη λύση για τη μέτρηση της τάσης κάθε κελιού ξεχωριστά και τα δεδομένα που συλλέγονται στη μνήμη του, μπορούν να μεταφερθούν στον μικροεπεξεργαστή του φορτιστή όπου από εκεί και πέρα γίνονται οι απαραίτητες κάθε φορά διαδικασίες.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα αυτό κατασκευάζεται από την εταιρία *Linear Technology* και συγκεκριμένα είναι το **LTC6802**. Στην εικόνα 5.3.α φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα του LTC6802.



Εικόνα 5.3.α: Μπλοκ διάγραμμα του LTC6802

Επίσης, μέσα από το datasheet του LTC6802 αναδεικνύεται και ο τρόπος σύνδεσης του ολοκληρωμένου με κάθε ένα κελί του battery pack. Ενδεικτικά, στην εικόνα 5.3.β φαίνεται η σύνδεση ενός battery pack εφτά κελιών.



Εικόνα 5.3.β: Σύνδεση μπαταρίας επτά κελιών στο LTC6802

Στην περίπτωση των τεσσάρων κελιών, η σύνδεση είναι αντίστοιχη.

5.4 Σύνοψη

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναδείχθηκε ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κατά τη διαδικασία της μέτρησης της τάσης του κάθε κελιού από έναν μικροεπεξεργαστή. Το πρόβλημα αυτό έγκειται στο ότι ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να δεχτεί στην είσοδό του τάσεις έως 5V. Αν και κάθε κελί ξεχωριστά έχει τάση μικρότερη από 5V, όταν το κελί αυτό είναι μέρος μίας εν σειρά συστοιχίας πολλών κελιών, τότε είναι πολύ πιθανό, τα δυναμικά στα άκρα του να ξεπερνούν κατά πολύ το όριο των 5V (σχήμα 5.1.α). Επομένως, η τάση που θα διαβάσει ο μικροεπεξεργαστής (δυναμικό μείον μηδέν), μπορεί να προκαλέσει βλάβη ή και καταστροφή σε αυτόν.

Γι αυτό το λόγο, παρουσιάστηκε ένας τρόπος με τον οποίο η τάση κάθε κελιού θα λαμβάνεται με αναφορά το μηδενικό δυναμικό. Δηλαδή ο μικροεπεξεργαστής θα «βλέπει» κάθε κελί σαν να ήταν μόνο του και όχι μέρος μιας εν σειρά συστοιχίας. Το κύκλωμα που υλοποιεί αυτή τη σκέψη αποτελείται από έναν τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία ενισχυτή διαφορών με κέρδος τη μονάδα. Δηλαδή τα δυναμικά του κάθε κελιού αφαιρούνται μεταξύ τους κι έτσι μένει ουσιαστικά η τάση του κελιού ως προς το μηδενικό δυναμικό. Εν συνεχεία, παρουσιάστηκε το κύκλωμα αλλά και το σχέδιο της τυπωμένης πλακέτας αυτού του κυκλώματος.

Τέλος, για την πληρότητα της μελέτης, παρουσιάστηκε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα του εμπορίου το οποίο χρησιμοποιείται κατά κόρον σε συστοιχίες μπαταριών ηλεκτρικών αυτοκινήτων και όχι μόνο. Αυτό το ολοκληρωμένο κύκλωμα, το LTC6802, παρέχει μία πληθώρα λειτουργιών συμπεριλαμβανομένης της μέτρησης της τάσης του κάθε κελιού. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσής του με εξωτερικό μικροεπεξεργαστή ο οποίος μπορεί να διαβάσει τα δεδομένα που καταγράφει το LTC6802.

Στη συνέχεια της διπλωματικής ωστόσο, θα χρησιμοποιηθεί το κύκλωμα με τους τελεστικούς ενισχυτές, που σχεδιάστηκε και προσομοιώθηκε για την εφαρμογή του φορτιστή μπαταριών LiFePO_4 , καθώς το LTC6802 διαθέτει λειτουργίες που θα αναλυθούν ξεχωριστά σε επόμενες ενότητες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : Ισοστάθμιση Κελιών ενός Battery Pack

6.1 Εισαγωγή

Οι μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-Ion), Λιθίου Πολυμερών (LiPO) και Λιθίου Iron Phosphate (LiFePO₄) δεν γίνεται να υποστούν υπερφόρτιση χωρίς να προκληθεί καταστροφή των ενεργών υλικών τους. Η τάση κατάρρευσης (break down voltage) του ηλεκτρολύτη είναι προληπτικά κοντά στην τερματική τάση πλήρους φόρτισης, γενικά στο εύρος από 4.1 έως 4.3 Volts για τις Li-ion και LIPO και 3.6-3.8 Volts για τις LiFePO₄. Επομένως σε κάθε battery pack πρέπει να υπάρχει προσεκτική παρακολούθηση και έλεγχος έτσι ώστε κανένα κελί να μην αποκτήσει τάση άνω των επιτρεπόμενων ορίων λόγω υπερφόρτισης.

Κάθε κελί μιας μπαταρίας λιθίου απαιτεί επίβλεψη έτσι ώστε η τάση του να μην υπερβεί τα προκαθορισμένα όρια που θέτει η χημική του σύσταση. Τα εν σειρά συνδεδεμένα καλώς χημείας ιόντων λιθίου παρουσιάζουν ένα πιο πολύπλοκο πρόβλημα: ότι κάθε κελί της συστοιχίας πρέπει να επιβλέπεται και να ελέγχεται. Αν και η τάση του battery pack ενδέχεται να βρίσκεται στα επιτρεπτά όρια, ένα κελί της εν σειρά συνδεδεμένης συστοιχίας μπορεί να έχει τάση η οποία να οδηγήσει σε καταστροφή του. Αυτό οφείλεται στις ανομοιομορφίες που υπάρχουν ανάμεσα στα διάφορα κελιά.

Οι μπαταρίες μολύβδου Οξέος (Lead-Acid) μπορούν να βρεθούν σε κατάσταση υπερφόρτισης χωρίς να προκληθεί μόνιμη ζημιά στα κελιά της. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιπλέον ενέργεια απελευθερώνεται μέσω έκλυσης αερίων. Αυτός ο μηχανισμός έκλυσης είναι και η φυσική μέθοδος για την εξισορρόπηση μίας εν σειρά συνδεδεμένης συστοιχίας κελιών μιας μπαταρίας μολύβδου οξέος. Μπαταρίες διαφορετικής χημικής σύστασης, όπως οι Νικελίου- Υδριδίων Μετάλλου (NiMH) παρουσιάζουν παρόμοιους μηχανισμούς εξισορρόπησης μεταξύ των κελιών.

Καθώς μία μπαταρία Λιθίου δεν γίνεται να υπερφορτιστεί, δεν υπάρχει φυσικός μηχανισμός για την εξίσωση/εξισορρόπηση των κελιών της. Επομένως πρέπει να εφαρμοστεί μία εναλλακτική μέθοδος. Τρεις κατηγορίες μεθόδων εξισορρόπησης κελιών είναι: οι μέθοδοι φόρτισης (charging methods), οι ενεργητικές μέθοδοι (active methods) και οι παθητικές μέθοδοι (passive methods).

Η ισοστάθμιση των κελιών είναι απαραίτητη για εφαρμογές μπαταριών Λιθίου όπου παρουσιάζονται αυξημένα μεταβατικά φαινόμενα, ειδικά σε εφαρμογές όπου συμβαίνει συχνή φόρτιση, όπως για παράδειγμα η αναγεννητική πέδηση στα ηλεκτρικά (EV) και στα υβριδικά αυτοκίνητα (HEV). Η αναγεννητική πέδηση μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στις μπαταρίες Ιόντων Λιθίου καθώς το στιγμιαίο ρεύμα της αναγεννητικής πέδησης μπορεί να αυξήσει απότομα την τάση, πιθανώς περισσότερο από την τάση διάσπασης του ηλεκτρολύτη.

Διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά του κάθε κελιού γενικά συμβαίνουν λόγω δύο κυρίως φαινομένων: αλλαγές της εσωτερικής αντίστασης του κελιού ή μείωση της χωρητικότητας του κελιού λόγω γήρανσης. Σε κάθε περίπτωση, αν ένα κελί σε ένα battery pack παρουσιάσει διαφοροποιημένη συμπεριφορά, τότε το κελί αυτό πιθανώς να ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια τάσης κατά τη διάρκεια φορτίσεων υψηλού ρεύματος. Κελιά με μειωμένη χωρητικότητα ή με υψηλή εσωτερική αντίσταση έχουν συνήθως αυξημένες ταλαντεύσεις στην τάση τους κατά τη φόρτιση και την εκ-φόρτιση. Σε εφαρμογές υβριδικών ηλεκτρικών

αυτοκινήτων (HEV) είναι απαραίτητη η ισοστάθμιση των μπαταριών Λιθίου λόγω της πιθανότητας να παρουσιαστεί τάση άνω των επιτρεπτών χημικών ορίων της μπαταρίας.

Σε εφαρμογές ηλεκτρικών αυτοκινήτων (EV), είναι επιθυμητό η ισοστάθμιση των κελιών να εξασφαλίσει τη μέγιστη χρησιμοποιήσιμη χωρητικότητα από το battery pack. Κατά τη φόρτιση, ένα μη ισοσταθμισμένο κελί είναι πιθανό να προσεγγίσει πρόωρα την τάση τερματισμού της φόρτισης και να προκαλέσει τερματισμό της φόρτισης. Η ισοστάθμιση των κελιών είναι χρήσιμο να ελέγχει τα κελιά υψηλής φόρτισης μέχρις ότου τα υπόλοιπα κελιά μπορέσουν να φτάσουν στα ίδια επίπεδα φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο, ο φορτιστής δεν τερματίζει τη λειτουργία του, μέχρι όλα τα κελιά να φτάσουν ταυτόχρονα την τάση τερματισμού φόρτισης και το 100% της φόρτισής τους.

6.2 Μέθοδος ισοστάθμισης κατά τον τερματισμό της φόρτισης

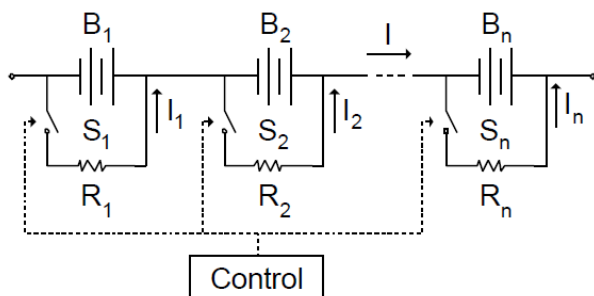
6.2.1 Εισαγωγή

Τυπικά, οι μέθοδοι ισοστάθμισης οι οποίες εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια και κατά τη διακοπή της φόρτισης είναι χρήσιμες μόνο για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτό συμβαίνει επειδή οι μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων γενικά φορτίζονται πλήρως σε κάθε φόρτιση του οχήματος (μεταξύ κάθε κύκλου χρήσης). Οι μπαταρίες των υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι σίγουρο ότι διατηρούνται πλήρως φορτισμένες, γεγονός που οδηγεί σε απρόβλεπτες καταστάσεις διακοπής φόρτισης.

Οι μπαταρίες υβριδικών οχημάτων απαιτούν επίσης δυνατότητες φόρτισης και εκ-φόρτισης υψηλού ρεύματος. Γι αυτό το λόγο, οι μπαταρίες αυτές συνήθως διατηρούνται σε επίπεδο φόρτισης το οποίο να επιτρέπει την απαιτούμενη εκ-φόρτιση αλλά να έχει επίσης περιθώριο να δεχτεί την απαραίτητη ενέργεια (ρεύμα) από την αναγεννητική πέδηση.

6.2.2 Παράκαμψη φόρτισης

Η μέθοδος ισοστάθμισης μέσω παρακάμψεων, παρακάμπτει επιλεκτικά το ρεύμα φόρτισης από τα κελιά τα οποία είναι πλήρως φορτισμένα. Αυτή η μέθοδος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόδοση σε συστήματα με γνωστά ρεύματα φόρτισης. Η αντίσταση R έχει τέτοια τιμή ώστε να διαφεύγει το ρεύμα φόρτισης I όταν το κελί φτάσει την τάση πλήρους φόρτισης. Αν το ρεύμα φόρτισης μειωθεί, τότε η αντίσταση R θα εκ-φορτίσει το cell το οποίο έχει παρακαμφθεί. Για να αποφευχθούν οι υπερβολικά μεγάλες ωμικές απώλειες, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως από φορτιστές βηματικού ρεύματος με μικρή τιμή ρεύματος προς το τέλος της φόρτισης.



Εικόνα 6.2.2.α: Παράκαμψη φόρτισης

Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ανάγκη για αντιστάσεις μεγάλης ισχύος, οι διακόπτες ισχύος και η απαίτηση διαχείρισης θερμοκρασίας. Η μέθοδος αυτή είναι ιδανική για συστήματα τα οποία φορτίζονται συχνά με μικρές τιμές ρεύματος.

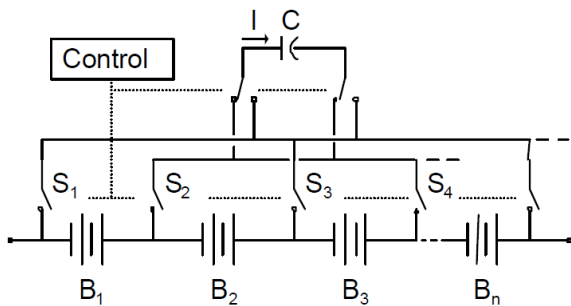
6.3 Μέθοδοι ενεργητικής ισοστάθμισης

6.3.1 Εισαγωγή

Οι ενεργητικές μέθοδοι ισοστάθμισης βασίζονται στη μεταφορά της ενέργειας από το ένα κελί στο άλλο. Τα στοιχεία τα οποία πραγματοποιούν αυτή τη μεταφορά ελέγχονται είτε αναλογικά είτε ψηφιακά. Οι δύο κυριότερες κατηγορίες των ενεργητικών μεθόδων ισοστάθμισης είναι η μέθοδος μεταφοράς φόρτισης και η μέθοδος μετατροπής ενέργειας.

6.3.2 Μέθοδος μεταφοράς φόρτισης

Ο μηχανισμός ισοστάθμισης μέσω μεταφοράς της φόρτισης αποτελείται από ένα στοιχείο το οποίο αφαιρεί φόρτιση από ένα επιλεγμένο κελί, αποθηκεύει αυτή τη φόρτιση και έπειτα τη μεταφέρει σε ένα άλλο κελί. Υπάρχουν διάφορες υλοποιήσεις αυτής της μεθόδου και η πιο αξιοσημείωτη είναι αυτή του «flying capacitor». Η υλοποίηση αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα 6.3.2.α.



Εικόνα 6.3.2.α: Μέθοδος ισοστάθμισης μέσω flying capacitor

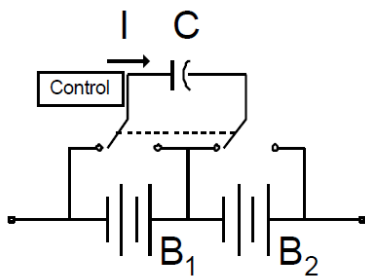
Το κύκλωμα ελέγχου κλείνει τους κατάλληλους διακόπτες για να φορτίσει τον πυκνωτή C μέσω του κελιού B₁. Μόλις φορτιστεί ο πυκνωτής C, οι διακόπτες ανοίγουν. Έπειτα, οι διακόπτες κλείνουν με τέτοιο τρόπο ώστε να συνδεθεί ο πυκνωτής C με το κελί B₂. Ο πυκνωτής τότε μεταφέρει φόρτιση στο B₂ με βάση τη διαφορά της τάσης μεταξύ των κελιών B₁ και B₂. Η εξίσωση 3.3.2.1 δείχνει τη ποσότητα φόρτισης που μεταφέρεται.

$$Charge = \frac{1}{2}CV_{B_1}^2 - \frac{1}{2}CV_{B_2}^2 \quad (6.3.2.1)$$

Ο πυκνωτής έπειτα συνδέεται, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, με τα κελιά B₃, B₄,... B_n. Τα κελιά με την υψηλότερη φόρτιση θα φορτίσουν τον πυκνωτή C και τα κελιά με τη χαμηλότερη φόρτιση θα δεχτούν φόρτιση από τον C. Με αυτόν τον τρόπο, η φόρτιση των κελιών με υψηλή φόρτιση διανέμεται στα κελιά με χαμηλή φόρτιση. Ο μόνος ηλεκτρονικός έλεγχος που απαιτείται για την υλοποίηση αυτής της μεθόδου είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος ανοίγει και κλείνει τους κατάλληλους διακόπτες.

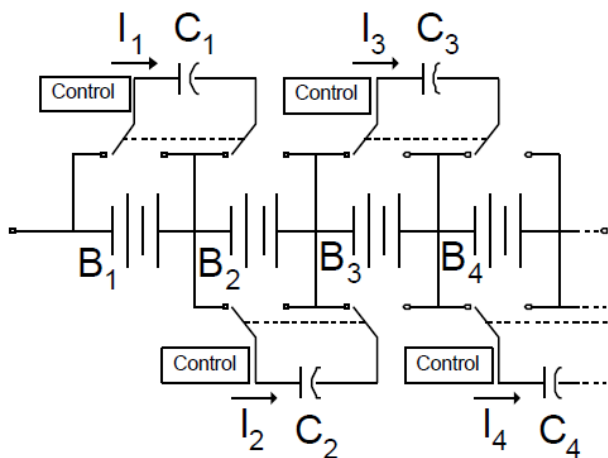
Η συγκεκριμένη μέθοδος ισοστάθμισης απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό διακοπτικών στοιχείων ($n+5$) τα οποία είναι προδιαγεγραμμένα για το μέγιστο ρεύμα φόρτισης του C. Για ένα ιδανικό σύστημα με πολύ μεγάλες ανομοιομορφίες στην τάση των κελιών ($B_n=3.0V$, $B_m=4.0V$), η μέθοδος του flying capacitor θα μπορούσε να ισοσταθμίσει αυτά τα κελιά με ένα ρυθμό 1 Ahr ανά 1000μF χωρητικότητας, με διακοπτική συχνότητα 1kHz και με μέση τιμή ρεύματος 1A. Όσο μεγαλύτερος είναι ο πυκνωτής που χρησιμοποιείται, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για να μεταφερθεί η ζητούμενη φόρτιση. Ένα μεγάλο battery pack (100 Ahr) θα χρειαζόταν μία συσκευή ισοστάθμισης με ένα πολύ μεγάλο πυκνωτή με υπερβολικά μεγάλα ρεύματα διακοπτικών στοιχείων. Μία σημαντική ποσότητα ενέργειας χάνεται σε απώλειες ως θερμότητα στα διακοπτικά στοιχεία και στον πυκνωτή. Ένα μεγάλο μέρος της ισοστάθμισης επιτυγχάνεται πολύ απλά καθώς διαχέεται η φόρτιση από τα κελιά υψηλής φόρτισης με τη μορφή θερμότητας.

Μία άλλη μέθοδος ισοστάθμισης μέσω μεταφοράς ενέργειας μοιράζει ανά δύο κελιά έναν πυκνωτή μεταφοράς (flying capacitor). Ο πυκνωτής συνεχώς συνδέεται και αποσυνδέεται (μέσω διακοπών) μεταξύ των δύο κελιών κι έτσι μεταφέρει φόρτιση από το κελί υψηλής φόρτισης, στο κελί χαμηλής φόρτισης. Κάθε πυκνωτής χρειάζεται μόνο έναν απλό έλεγχο ο οποίος θα ενεργοποιεί τα διακοπτικά στοιχεία. Στην εικόνα 6.3.2.β φαίνεται η υλοποίηση της μεθόδου αυτής.



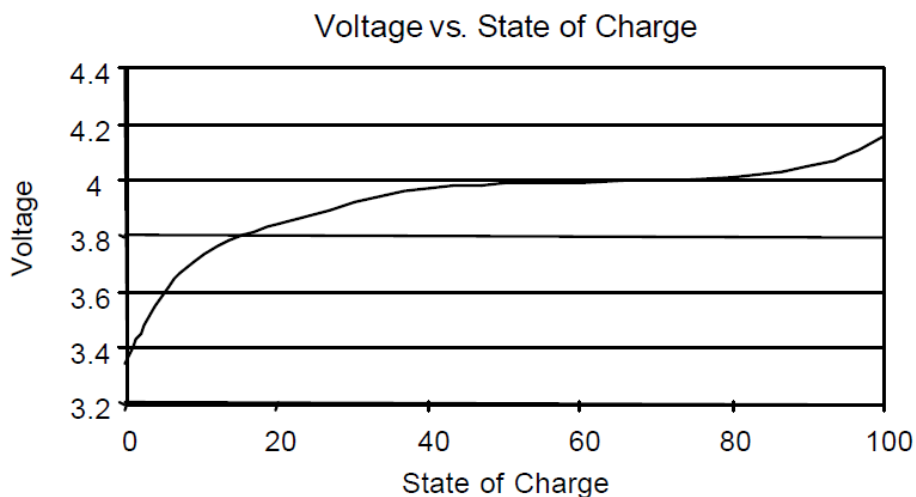
Εικόνα 6.3.2.β: Μεταφορά φόρτισης μεταξύ δύο κελιών

Πολλές μονάδες μεταφοράς φόρτισης μεταξύ δύο κελιών μπορούν να συνδυαστούν για χρήση σε battery packs μεγάλης τάσης. Μία τέτοια υλοποίηση παρουσιάζεται στην εικόνα 6.3.2.γ. Καθώς τα κελιά B_2, \dots, B_{n-1} μοιράζονται τον πυκνωτή μεταφοράς με τα δύο γειτονικά τους κελιά, η φόρτιση μπορεί να μεταφερθεί από τη μία άκρη της συστοιχίας στην άλλη. Αυτή η μέθοδος θα απαιτούσε πολύ χρόνο για να μεταφέρει τη φόρτιση από τα πολύ φορτισμένα κελιά στα λιγότερο φορτισμένα αν αυτά βρίσκονται στις δύο αντίθετες άκρες του battery pack, επειδή η φόρτιση θα έπρεπε να περνάει από κάθε κελί, πράγμα το οποίο θα είχε κόστος σε χρόνο και απόδοση. Αυτή η μέθοδος έχει ένα πλεονέκτημα συσκευασίας: για κάθε δύο κελιά, το κύκλωμα ελέγχου, η τροφοδοσία και ο πυκνωτής μπορούν να συσκευαστούν σε μία μόνο μονάδα η οποία τροφοδοτείται από τα κελιά τα οποία ισοσταθμίζει. Τέτοιες μονάδες μπορούν να προστίθενται όσο ο αριθμός των κελιών αυξάνεται.



Εικόνα 6.3.2.γ: Μεταφορά ενέργειας με πυκνωτή ανά δύο κελιά για συστοιχία πολλών κελιών

Οι τεχνικές μεταφοράς φόρτισης έχουν περιορισμένη χρησιμότητα σε εφαρμογές υβριδικών αυτοκινήτων. Η χημεία των μπαταριών λιθίου προσφέρει σχετικά επίπεδες χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης καθώς το επίπεδο φόρτισης (state of charge-SOC) κυμαίνεται μεταξύ του 40-80% (γράφημα 6.3.2.δ). Ένα κελί με υψηλό SOC δεν έχει σημαντική διαφορά τάσης σε σχέση με ένα κελί χαμηλού SOC, εκτός κι αν ένα από αυτά τα κελιά έχει φτάσει πάνω από το 90% του SOC ή κάτω από το 20% του SOC. Οι μπαταρίες των υβριδικών αυτοκινήτων λειτουργούν σε ένα μέσο SOC, εκεί όπου οι διαφορές της τάσης μεταξύ των κελιών είναι οι μικρότερες δυνατές, με αποτέλεσμα να περιορίζεται σημαντικά η χρησιμότητα των μεθόδων μεταφοράς ενέργειας.



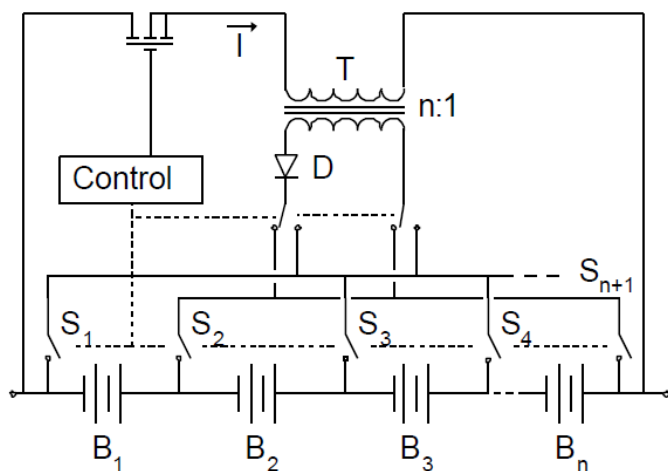
Γράφημα 6.3.2.δ: Τάση ανοιχτοκύκλωσης μπαταρίας LIPO

Οι μέθοδοι μεταφοράς φόρτισης είναι χρήσιμες ωστόσο σε εφαρμογές ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Πράγματι, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα συνήθως φορτίζονται πλήρως και ισχύει ότι η διαφορά τάσης μεταξύ ενός πλήρως φορτισμένου κελιού και ενός όχι τόσο φορτισμένου είναι μεγαλύτερη κοντά στα άκρα της καμπύλης τάσης (γράφημα 6.3.2.δ). Αυτό αυξάνει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

3.3.3 Μετατροπείς ενέργειας

Οι μέθοδοι ισοστάθμισης μέσω μετατροπής ενέργειας, χρησιμοποιούν πηνία ή μετασχηματιστές ούτως ώστε να μεταφέρουν την ενέργεια από ένα κελί σε ένα άλλο ή από μία ομάδα κελιών σε μία άλλη. Δύο μέθοδοι μετατροπής ενέργειας είναι η μέθοδος του μετασχηματιστή μεταγωγής (switched transformer) και του μετασχηματιστή διαμοιρασμού (shared transformer).

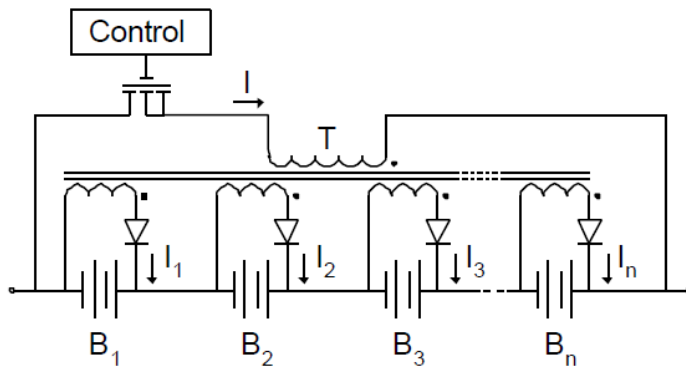
Η μέθοδος του μετασχηματιστή μεταγωγής διαθέτει την ίδια τοπολογία διακοπτικών στοιχείων με τη μέθοδο του πυκνωτή μεταφοράς (flying capacitor). Η τοπολογία αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα 6.3.3.α. Το ρεύμα I λαμβάνεται από ολόκληρο το pack και μετάγεται στον μετασχηματιστή T . Η έξοδος του μετασχηματιστή ανορθώνεται μέσω της διόδου D και μεταφέρεται στο κελί B_n , το οποίο καθορίζεται από τη ρύθμιση των διακοπτικών στοιχείων S . Απαιτείται επομένως ηλεκτρονικός έλεγχος έτσι ώστε να επιλεγθεί το κατάλληλο κελί και να κλείσουν οι απαραίτητοι διακόπτες S .



Εικόνα 6.3.3.α: Μετασχηματιστής μεταγωγής

Αυτή η μέθοδος μπορεί πολύ γρήγορα να ισοσταθμίσει κελιά χαμηλής φόρτισης αφαιρώντας ενέργεια από ολόκληρο το pack. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η μεγάλη πολυπλοκότητα, το υψηλό κόστος υλικών λόγω του ελέγχου, των μαγνητικών υλικών και των διακοπτικών στοιχείων και τέλος ο μικρός βαθμός απόδοσης λόγω των διακοπτικών και των μαγνητικών απωλειών.

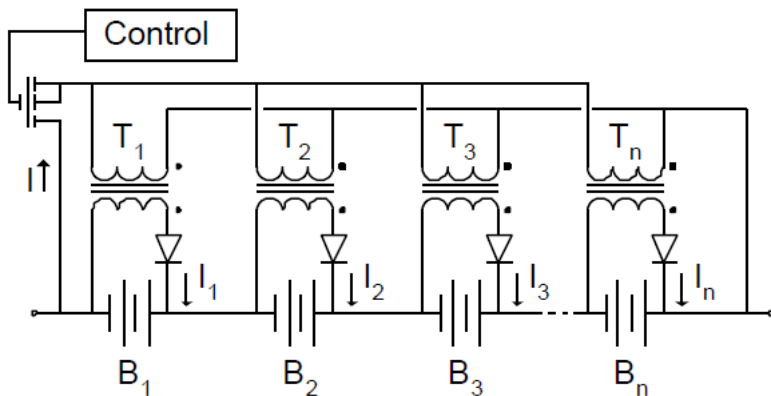
Ο μετασχηματιστής διαμοιρασμού διαθέτει ένα μαγνητικό πυρήνα με δευτερεύοντα taps που αντιστοιχούν σε κάθε κελί. Η τοπολογία αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα 6.3.3.β. Το ρεύμα I λαμβάνεται από ολόκληρη τη συστοιχία και επάγει ρεύματα σε κάθε ένα από τα δευτερεύοντα. Το δευτερεύον με τη μικρότερη επαγωγική αντίδραση (λόγω της χαμηλής τερματικής τάσης του κελιού B_n) θα έχει το περισσότερο επαγόμενο ρεύμα. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε κελί δέχεται ρεύμα φόρτισης το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο του επιπέδου φόρτισής του (SOC).



Εικόνα 6.3.3.β: Μετασχηματιστής διαμοιρασμού

Το μόνο ενεργό στοιχείο της μεθόδου του μετασχηματιστή διαμοιρασμού είναι ένα διακοπτικό τρανζίστορ για το πρωτεύον του μετασχηματιστή. Δεν απαιτείται έλεγχος κλειστού βρόχου. Ο μετασχηματιστής διαμοιρασμού μπορεί να ισοσταθμίσει πολύ γρήγορα μία μπαταρία πολλών κελιών με ελάχιστες απώλειες. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι τα πολύπλοκα μαγνητικά μέρη και το υψηλό κόστος λόγω του ανορθωτή του κάθε δευτερεύοντος. Επίσης το κύκλωμα ισοστάθμισης θα πρέπει να σχεδιάζεται για το μέγιστο αναμενόμενο αριθμό κελιών. Επιπλέον δευτερεύοντα tap δεν μπορούν να προστεθούν εύκολα.

Αρκετοί μετασχηματιστές μπορούν να χρησιμοποιηθούν με το ίδιο αποτέλεσμα με της σύνδεση μέσω των πρωτευόντων τυλιγμάτων αντί της σύνδεσης μέσω ενός μόνο μαγνητικού πυρήνα. Αυτή η διάταξη φαίνεται στην εικόνα 6.3.3.γ. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι κάθε κελί μπορεί να έχει το δικό του μαγνητικό πυρήνα, επιτρέποντας έτσι την πρόσθεση επιπλέον κελιών στη συστοιχία, χωρίς να απαιτούνται μεγάλες αλλαγές.



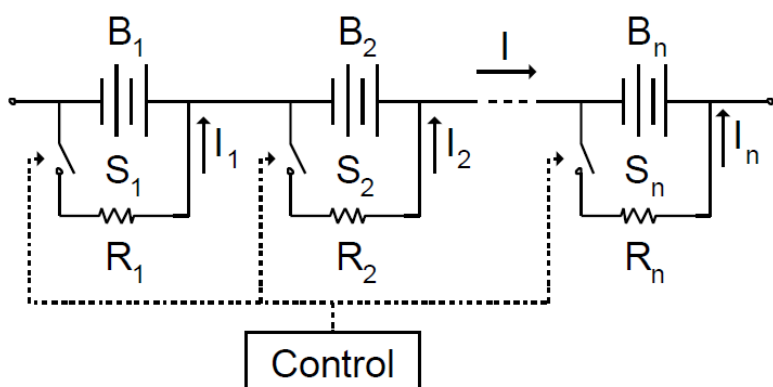
Εικόνα 6.3.3γ: Πολλαπλοί μετασχηματιστές

Η μέθοδος του μετασχηματιστή διαμοιρασμού είναι κατάλληλη για εφαρμογές ηλεκτρικών και υβριδικών αυτοκινήτων. Αν το ρεύμα I_1 είναι μικρό, τότε η συσκευή ισοστάθμισης θα μπορούσε να λειτουργεί συνεχώς με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από όλες τις υπόλοιπες μεθόδους ενεργητικής ισοστάθμισης.

6.4 Μέθοδοι Παθητικής Ισοστάθμισης

Αντιστάσεις απαγωγής ενέργειας

Η μέθοδος απαγωγής ενέργειας συνδέει τα κελιά υψηλής φόρτισης με ωμικές αντιστάσεις. Έτσι, αφαιρείται ενέργεια από τα κελιά υψηλής φόρτισης μέχρι αυτά να φτάσουν το επίπεδο φόρτισης των χαμηλότερων σε φόρτιση κελιών. Η διάταξη που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στην εικόνα 6.4.α. Το κύκλωμα που χρησιμοποιείται αποτελεί την πιο απλή και χαμηλή σε κόστος υλοποίηση ισοστάθμισης. Αν η τιμή της αντίστασης επιλεγθεί ώστε το ρεύμα I να είναι μικρό, τότε το φυσικό μέγεθος της αντίστασης δύναται να είναι μικρό. Μία αντίσταση 10mA/Ahr μπορεί να ισοσταθμίσει τα πολύ υψηλής φόρτισης κελιά με ένα ρυθμό του 1% ανά ώρα. Αν λειτουργεί συνεχώς, μία τέτοια τεχνική θα μπορούσε να εκφορτίσει ολόκληρο το battery pack μέσα σε μερικές μέρες.



Εικόνα 6.4.α: Μέθοδος απαγωγής ενέργειας

Η ισοστάθμιση μέσω της απαγωγής ενέργειας μπορεί να λειτουργεί συνεχώς, με τις αντιστάσεις να τίθενται εντός και εκτός σύνδεσης όπως απαιτείται κάθε φορά.

Η τεχνική της ισοστάθμισης αυτής είναι κατάλληλη για εφαρμογές υβριδικών αυτοκινήτων. Τα πλεονεκτήματα της είναι το χαμηλό κόστος και η μικρή πολυπλοκότητα. Το μειονέκτημά της είναι οι μεγάλες απώλειες ενέργειας.

6.5 Επιλογή τρόπου ισοστάθμισης για τον φορτιστή μπαταριών LiFePO_4

Στις παραπάνω ενότητες του έκτου κεφαλαίου παρουσιάστηκε το πρόβλημα και η ανάγκη της ισοστάθμισης των κελιών μίας μπαταρίας κατά τη φόρτιση. Συγκεκριμένα, για τις μπαταρίες Ιόντων Λιθίου, Λιθίου πολυμερών και LiFePO_4 , οι οποίες δεν διαθέτουν μηχανισμούς φυσικής ισοστάθμισης, απαιτείται η εφαρμογή ενός κυκλώματος που θα επιτελεί αυτή τη διαδικασία. Παρουσιάστηκαν επίσης οι κυριότερες μέθοδοι ισοστάθμισης που υπάρχουν σήμερα και αναδείχθηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών.

Εφόσον ο φορτιστής που θα σχεδιαστεί δεν θα είναι συνδεδεμένος με τη μπαταρία κατά την εκφόρτιση, δεν μας αφορά η απώλεια ενέργειας που παρουσιάζουν κάποιες μέθοδοι όταν είναι συνδεδεμένες κατά την εκφόρτιση.

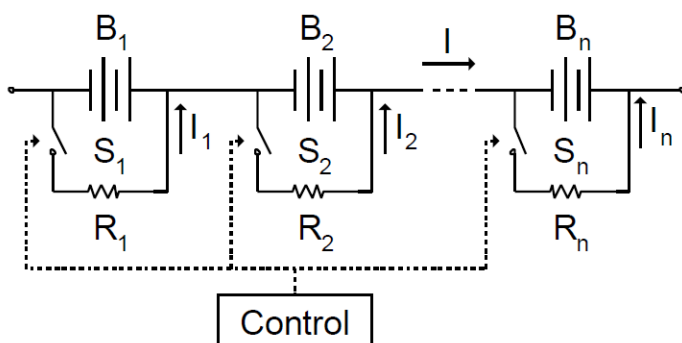
Η μέθοδος που επιλέγεται για την ισοστάθμιση των κελιών της μπαταρίας είναι η τεχνική της απαγωγής ενέργειας μέσω ωμικών αντιστάσεων. Η επιλογή αυτή γίνεται με κριτήριο τον μικρό βαθμό πολυπλοκότητας και το μικρό κόστος κατασκευής.

6.6 Σχεδίαση του Κυκλώματος Ισοστάθμισης

Αφού έγινε η επιλογή της μεθόδου ισοστάθμισης, θα πραγματοποιηθεί η διαστασιολόγηση των αντιστάσεων και η επιλογή των ημιαγωγών διακοπτικών στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν.

6.6.1 Διαστασιολόγηση των αντιστάσεων

Το κύκλωμα που θα σχεδιαστεί θα ικανοποιεί τη διάταξη που φαίνεται στην εικόνα 6.6.1.α.



Εικόνα 6.6.1.α: Μέθοδος απαγωγής ενέργειας

Οι ωμικές αντιστάσεις θα έχουν τέτοια τιμή ώστε όταν συνδέονται με ένα κελί, να παρακάμπτουν όλο το ρεύμα φόρτισης και να το εκφορτίζουν ελάχιστα. Να τονιστεί ότι η ισοστάθμιση των κελιών λαμβάνει χώρα μόνο κατά τη διάρκεια της φόρτισης με σταθερό ρεύμα. Όταν η φόρτιση συνεχιστεί με την τεχνική σταθερής τάσης, τότε η τάση του battery pack θα παραμένει σταθερή, άρα δεν θα υπάρχουν μεταβολές στις τάσεις των κελιών.

Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα, η φόρτιση θα γίνεται αρχικά με σταθερό ρεύμα τιμής 3A. Επίσης, κατά τη διάρκεια της ισοστάθμισης η τάση του κελιού θα αλλάζει συνεχώς έως ότου φτάσει την τιμή των 3.6V. Η τιμή της αντίστασης θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε όταν συνδέεται με ένα κελί, να παρακάμπτει το ρεύμα φόρτισης και να το εκφορτίζει με μικρό ρεύμα.

Από τις προδιαγραφές των μπαταριών LiFePO₄ και συγκεκριμένα των κελιών A123 ANR26650, φαίνεται ότι τα όρια τάσης των κελιών στους 25°C είναι 2V-3.6V. Επομένως η διαστασιολόγηση των αντιστάσεων θα γίνει με βάση την τιμή των 3 V, οποία βρίσκεται ουσιαστικά στη μέση των ορίων λειτουργίας ενός κελιού (σπάνια θα πέσει η τάση στα 2 V). Αυτό σημαίνει ότι όταν ένα κελί έχει τάση 3 V και συνδεθεί η αντίσταση παράλληλα με αυτό, τότε απλά θα παρακάμπτει το ρεύμα φόρτισης (3A) και δεν θα το εκφορτίζει. Όταν το κελί έχει τάση μικρότερη από 3V, τότε το κελί αυτό θα φορτίζεται με μικρότερο

ρεύμα από τα 3A. Τέλος, όταν το κελί έχει τάση μεγαλύτερη από 3V , τότε το κελί αυτό θα εκφορτίζεται από την ωμική αντίσταση.

Επομένως, η αντίσταση θα έχει τιμή που υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$R = \frac{V_{\text{κελιού}}}{I_{\text{φόρτισης}}} \Rightarrow$$

$$R = \frac{3V}{3A} \Rightarrow$$

$$R = 1 \Omega$$

Επίσης η αντίσταση θα είναι ισχύος 13W, όπως υπολογίζεται από τη σχέση :

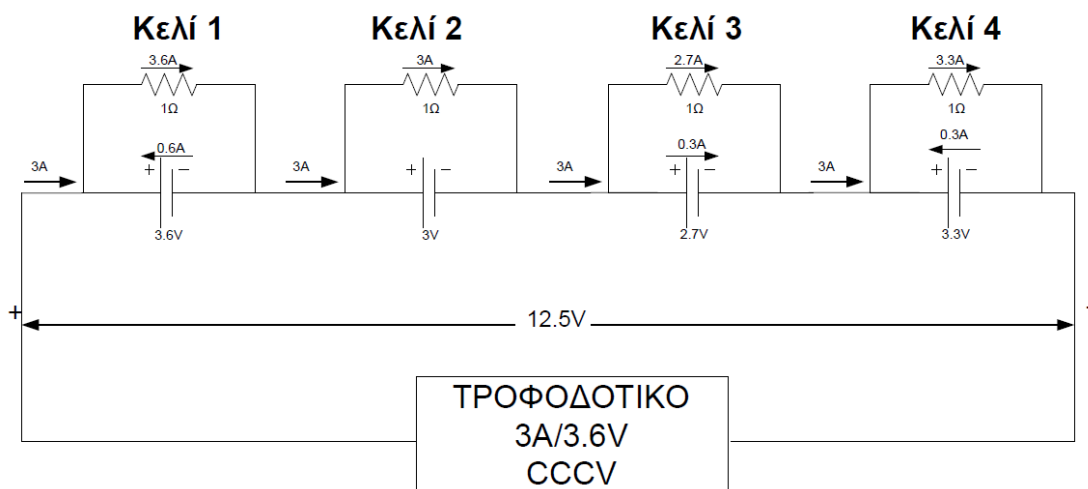
$$P = I_{\text{max}} \times V_{\text{max}} \Rightarrow$$

$$P = 3.6A \times 3.6V \Rightarrow$$

$$P \approx 13W$$

Όπου I_{max} και V_{max} είναι το μέγιστο ρεύμα και τάση αντίστοιχα που θα έχει η αντίσταση της ισοστάθμισης.

Για παράδειγμα, όταν το battery pack έχει τάση 12.5 V και τα κελιά που το αποτελούν έχουν τάσεις 3.5V, 3V, 2.7V και 3.3V τότε θα έχουμε:



Σχήμα 6.6.1.β: Κύκλωμα ισοστάθμισης για 4 κελιά

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6.1.β, όταν το κελί 1 έχει τάση 3.6V (>3V), τότε εκφορτίζεται με ρεύμα 600 mA . Όταν το κελί 2 έχει τάση 3V (=3V), τότε το κελί αυτό δεν φορτίζεται καθόλου αλλά ούτε εκφορτίζεται. Όταν το κελί 3 έχει τάση 2.7 V (<3V), τότε το κελί αυτό φορτίζεται αλλά με πολύ

μικρότερο ρεύμα φόρτισης (300mA). Τέλος, το κελί 4 έχει ίδια συμπεριφορά με το κελί 1 (>3V) και άρα εκφορτίζεται, αλλά με μικρότερο ρεύμα (300mA).

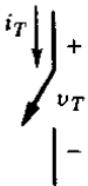
Επομένως υπολογίστηκαν οι τιμές των αντιστάσεων που απαιτούνται για το κύκλωμα ισοστάθμισης.

6.6.2 Επιλογή Διακοπών

6.6.2.1 Οι ημιαγωγικοί ελεγχόμενοι διακόπτες

Οι διακόπτες που θα επιλεγθούν, έτσι ώστε να θέτουν εντός και εκτός σύνδεσης τις ωμικές αντιστάσεις, θα είναι ημιαγωγικοί ελεγχόμενοι διακόπτες.

Αρκετά είδη ημιαγωγικών στοιχείων, όπως τα BJT, τα MOSFET, τα GTO και τα IGBT, μπορούν να κλείνουν και να ανοίγουν με σήματα ελέγχου που εφαρμόζονται στον ακροδέκτη ελέγχου του στοιχείου. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται ελεγχόμενοι διακόπτες και παριστάνονται γενικά με το κυκλωματικό σύμβολο που δίνεται στο σχήμα 6.6.2.1.α. Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός δεν ρέει καθόλου ρεύμα, ενώ όταν είναι κλειστός το ρεύμα μπορεί να ρέει μόνο κατά τη φορά του βέλους.



Σχήμα 6.6.2.1.α: Τυπικός ελεγχόμενος διακόπτης

Ο ιδανικός διακόπτης έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Όταν είναι ανοιχτός, αποκόπτει αυθαίρετα υψηλές ορθές και ανάστροφες τάσεις και δεν διαρρέεται από ρεύμα.
2. Όταν είναι κλειστός, άγει αυθαίρετα υψηλά ρεύματα με μηδενική πτώση τάσης.
3. Όταν διεγερθεί, μεταβαίνει ακαριαία από την κατάσταση αγωγιμότητας στην κατάσταση αποκοπής και αντίστροφα.
4. Για να διεγερθεί ο διακόπτης, απαιτείται μηδαμινή ισχύς από την πηγή ελέγχου.

Οι πραγματικοί ημιαγωγοί ισχύος ωστόσο δεν έχουν αυτά τα ιδανικά χαρακτηριστικά και κατά τη χρήση τους καταναλώνουν ισχύ. Αυτή η ισχύς είναι ανάλογη φυσικά των ρευμάτων που περνούν από τους διακόπτες αυτούς.

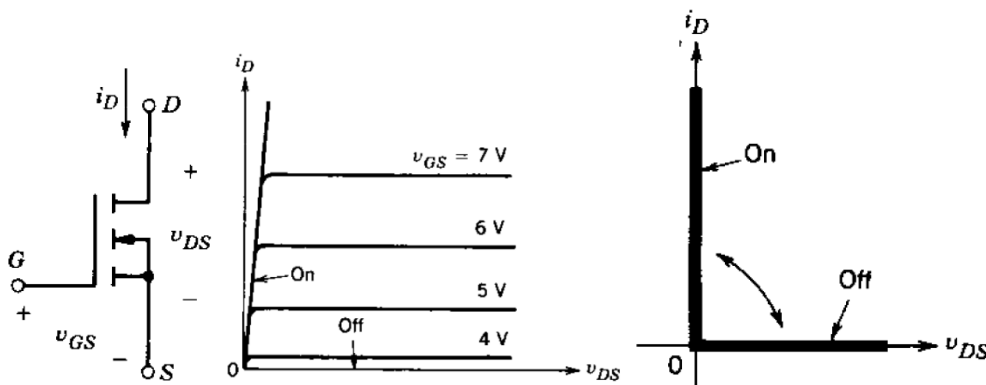
Στο κύκλωμα ισοστάθμισης που μελετάται θα αγνοηθούν οι απώλειες ισχύος αφού τα ρεύματα που υπάρχουν δεν προκαλούν αξιοσημείωτες απώλειες.

6.6.2.2 Transistor μεταλλικών οξειδίων ημιαγωγών με επίδραση πεδίου (MOSFET)

Το συγκεκριμένο ημιαγωγικό στοιχείο που θα χρησιμοποιηθεί στο κύκλωμα ισοστάθμισης είναι το N-MOSFET.

Το κυκλωματικό σύμβολο του MOSFET n-καναλιού δίνεται στο σχήμα 6.6.2.2.α. Το ημιαγωγικό αυτό στοιχείο είναι μία διάταξη ελεγχόμενη από τάση, όπως φαίνεται από τις $i-v$ χαρακτηριστικές του σχήματος 6.6.2.2.β. Η διάταξη είναι σε πλήρη αγωγιμότητα και προσεγγίζει έναν κλειστό διακόπτη, όταν η τάση πύλης-πηγής είναι επαρκώς υψηλή. Το MOSFET είναι σε κατάσταση αποκοπής, όταν η τάση πύλης-πηγής είναι χαμηλότερη από την τιμή κατωφλίου (gate-source threshold voltage) $V_{GS(th)}$. Οι ιδανικές χαρακτηριστικές της διάταξης κατά τη διακοπτική της λειτουργία δίνονται στο σχήμα 6.6.2.2.γ.

Τα MOSFET απαιτούν τη συνεχή εφαρμογή μιας τάσης κατάλληλου μεγέθους μεταξύ της πύλης (gate) και της πηγής (source) για να βρίσκονται σε κατάσταση αγωγιμότητας. Από την πύλη δεν περνά ρεύμα, παρά μόνο κατά τις μεταβάσεις σβέσης και έναυσης, όταν η χωρητικότητα της πύλης φορτίζεται ή εκφορτίζεται. Οι χρόνοι μετάβασης είναι πολύ μικροί, από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες nsec, ανάλογα με το είδος του στοιχείου.



Σχήμα 6.6.2.2 Transistor MOSFET n-καναλιού: (α) σύμβολο, (β) $i-v$ χαρακτηριστικές, (γ) ιδανικές χαρακτηριστικές

Η αντίσταση αγωγιμότητας $r_{DS(on)}$ του MOSFET μεταξύ του απαγωγού (drain) και της πηγής αυξάνεται γρήγορα με την ονομαστική τιμή της τάσης αποκοπής. Σε ανηγμένες ανά μονάδα μονάδες, η αντίσταση αγωγιμότητας μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της ονομαστικής τάσης αποκοπής BV_{DSS} ως

$$r = kB V_{DSS}^{2.5-2.7}$$

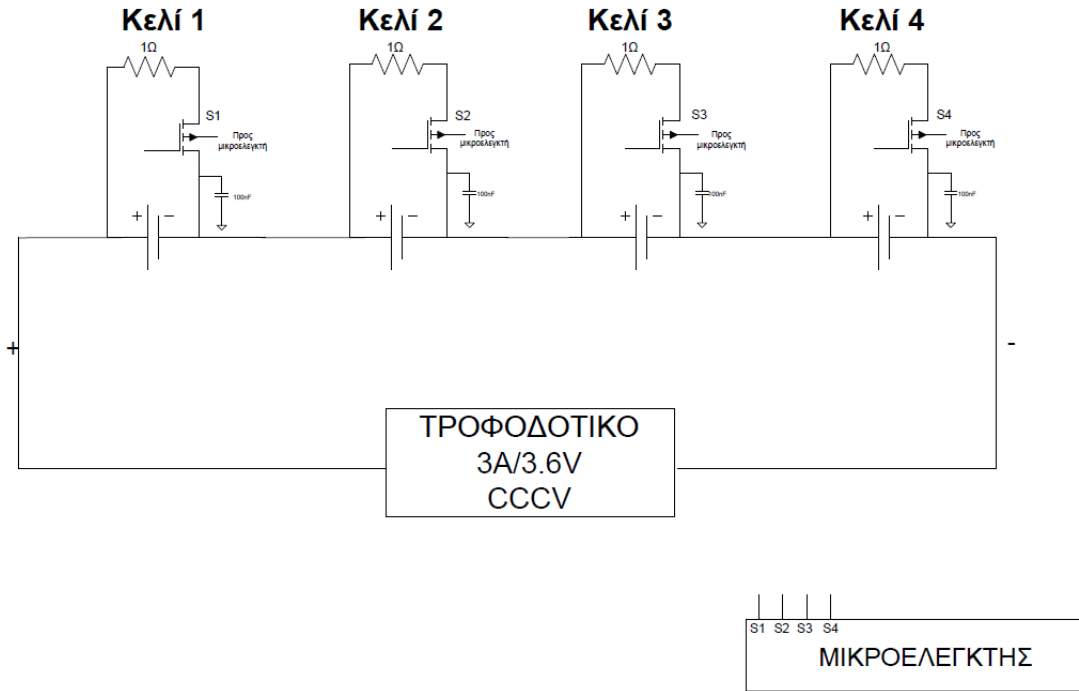
Όπου k είναι μία σταθερά που εξαρτάται από τη γεωμετρία της διάταξης. Για το λόγο αυτό, στην αγορά διατίθενται μόνο MOSFET με χαμηλές ονομαστικές τάσεις, που έχουν χαμηλή αντίσταση αγωγιμότητας και κατά συνέπεια μικρές απώλειες αγωγιμότητας.

Τα MOSFET διατίθενται με ονομαστικές τάσεις μεγαλύτερες από 1000V αλλά με μικρά ονομαστικά ρεύματα, και με ονομαστικά ρεύματα μέχρι τα 100A σε μικρές ονομαστικές τάσεις. Η μέγιστη τάση πύλης-πηγής είναι $\pm 20V$, αλλά διατίθενται και MOSFET που μπορούν να ελέγχονται με σήματα των 5V.

6.6.2.3 Σχεδίαση κυκλώματος ισοστάθμισης με διακόπτη N-MOSFET

Για το υπό μελέτη κύκλωμα ισοστάθμισης θα επιλεγθεί το N-MOSFET **IRFZ44**. Το MOSFET αυτό ελέγχεται με τάση 5V. Δηλαδή όταν δέχεται τάση 5V στην πύλη του συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης ενώ όταν δεν δέχεται τάση, τότε συμπεριφέρεται σαν ανοικτός διακόπτης.

Το κύκλωμα ισοστάθμισης επομένως θα έχει την παρακάτω μορφή:



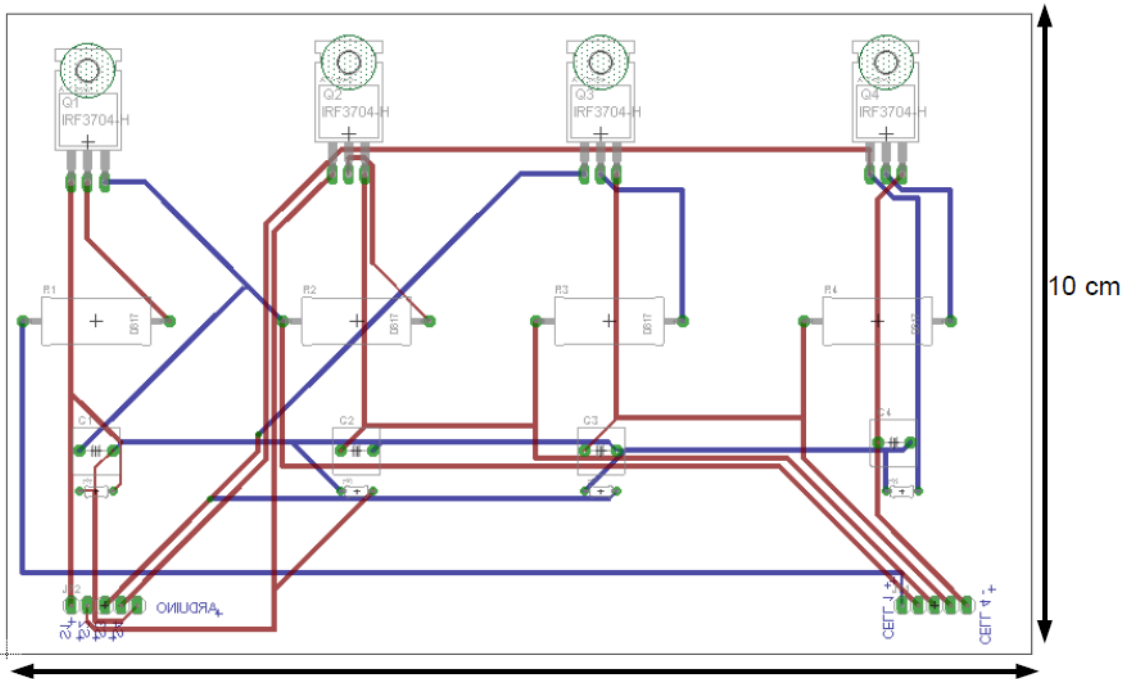
Σχήμα 6.6.2.3.α: Κύκλωμα ισοστάθμισης φορτιστή

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η αγωγή των MOSFET καθορίζει ποιες αντιστάσεις συνδέονται παράλληλα με κάποιο κελί.

Για παράδειγμα, όταν το κελί 2 έχει υψηλότερη φόρτιση από τα άλλα κελιά, τότε θα πρέπει να συνδεθεί παράλληλα με αυτό η ωμική αντίσταση έτσι ώστε να καθυστερήσει η φόρτιση του συγκεκριμένου κελιού μέχρις ότου τα υπόλοιπα κελιά φτάσουν το επίπεδο φόρτισής του. Σε αυτήν την περίπτωση, ο μικροελεγκτής, ο οποίος θα έχει καταγράψει αυτήν την πληροφορία, θα δώσει έξοδο 5V στον ακροδέκτη ο οποίος συνδέεται με την πύλη του S2. Τότε το MOSFET S2 θα τεθεί σε αγωγή, δηλαδή θα συμπεριφερθεί σαν κλειστός διακόπτης και η ωμική αντίσταση θα συνδεθεί παράλληλα με το κελί 2.

6.6.3 Τελική πλακέτα ισοστάθμισης

Μέσω του προγράμματος σχεδίασης PCB,EAGLE, πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση της τυπωμένης πλακέτας του κυκλώματος ισοστάθμισης. Υπάρχουν δύο pin headers των 5 ακροδεκτών όπου γίνεται η σύνδεση του μικροελεγκτή και των κελιών με το κύκλωμα. Παρακάτω φαίνεται η πλακέτα που σχεδιάστηκε. Επίσης, στο CD που συνοδεύει τη διπλωματική, υπάρχουν τα αρχεία σχεδίασης (όνομα αρχείου: "PCB_isostathmisi").



Εικόνα 6.6.3.α: Σχέδιο τυπωμένης πλακέτας του κυκλώματος ισοστάθμισης

Να σημειωθεί ότι στο τελικό κύκλωμα η πύλη του κάθε mosfet συνδέεται με το GND μέσω μίας ωμικής αντίστασης 100kΩ. Αυτό γίνεται έτσι ώστε τα mosfet να λειτουργούν ως ανοιχτές επαφές όταν δεν διεγείρεται η πύλη τους με 5V. Αυτό φαίνεται και στο σχέδιο της πλακέτας παραπάνω.

6.6.4 Σύνοψη

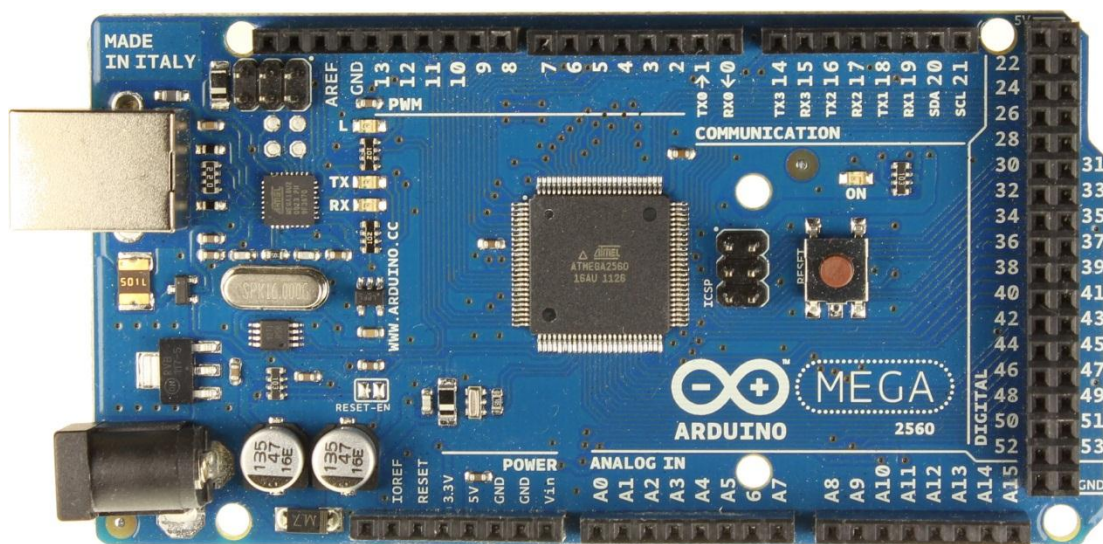
Στις παραπάνω παραγράφους παρουσιάστηκε η σχεδίαση του κυκλώματος ισοστάθμισης. Αφού επιλέχθηκε η κατάλληλη μέθοδος ισοστάθμισης, διαστασιολογήθηκαν οι αντιστάσεις που απαιτούνται και επιλέχθηκαν τα ημιαγωγικά στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν ως διακόπτες. Στο σχήμα 6.6.2.3.α παρουσιάστηκε το σχέδιο του κυκλώματος ισοστάθμισης. Παρακάτω θα παρουσιαστεί ο κώδικας ο οποίος θα πρέπει να γραφτεί στον μικροεπεξεργαστή ούτως ώστε να λειτουργεί αποτελεσματικά το κύκλωμα ισοστάθμισης.

6.7 Προγραμματισμός μικροεπεξεργαστή

6.7.1 Εισαγωγή

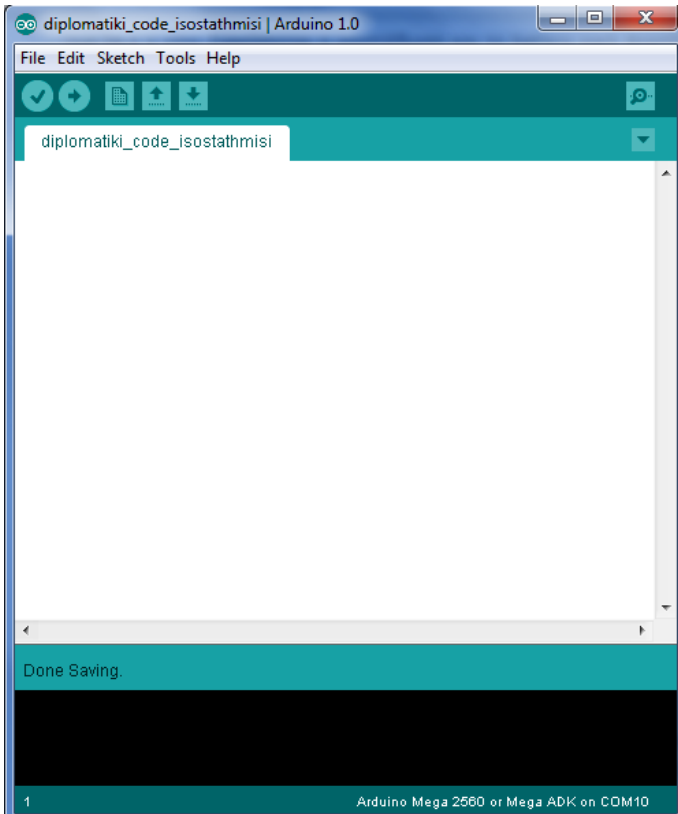
Η μονάδα του μικροελεγκτή αποτελεί ουσιαστικά τον «εγκέφαλο» του φορτιστή. Αυτός ρυθμίζει και ελέγχει τη διακοπτική ακολουθία κατά την ισοστάθμιση, ενώ παράλληλα παρακολουθεί τη θερμοκρασία του battery pack και τα όρια τάσης που θα πρέπει να ικανοποιούνται. Σε κάθε περίπτωση συνδέει ή αποσυνδέει, όταν είναι αναγκαίο, το battery pack από τον φορτιστή.

Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο *Arduino MEGA 2560* ο οποίος χρησιμοποιεί τον μικροεπεξεργαστή *ATmega2560*. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία του μικροελεγκτή παρατίθενται στο τέλος της διπλωματικής (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ, σελ. 145). Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο, ότι ο μικροελεγκτής τροφοδοτείται εξωτερικά από ένα διακοπτικό τροφοδοτικό 9V, του οποίου παρουσιάζεται στο τέλος της διπλωματικής (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ, σελ. 142). Στην εικόνα 6.7.1.α παρουσιάζεται ο μικροελεγκτής που θα χρησιμοποιηθεί, όπου φαίνονται όλες οι θύρες εισόδου, εξόδου και τροφοδοσίας.



Εικόνα 6.7.1.α Ο μικροελεγκτής ArduinoMEGA 2560

Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή γίνεται μέσα από το ελεύθερο λογισμικό για τον προγραμματισμό του Arduino. Στην εικόνα 6.7.1.β παρουσιάζεται το προγραμματιστικό περιβάλλον πριν την προσθήκη κάποιου κώδικα. Ο κώδικας που θα γραφτεί θα πρέπει να ελέγχει τη διακοπτική ακολουθία των MOSFET κατά τη διαδικασία ισοστάθμισης. Η λογική του αλγορίθμου είναι ότι κάθε φορά που ένα κελί έχει μεγαλύτερη τάση από τα άλλα, τότε είτε εκφορτίζεται, είτε παρακάμπτεται η φόρτίσή του μέχρι τα υπόλοιπα κελιά να φτάσουν στο ίδιο επίπεδο τάσης. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι και τα τέσσερα κελιά να φτάσουν την τάση των 3.6V. Φυσικά, κάθε στιγμή πρέπει να ελέγχεται αν τηρούνται τα όρια τάσης των κελιών LiFePO_4 , τα οποία είναι 2V-3.6V. Να σημειωθεί επίσης ότι η ισοστάθμιση λαμβάνει χώρα κατά τη φόρτιση με σταθερό ρεύμα. Όταν το battery pack φτάσει την τάση των 14.4 V τότε διακόπτεται η ισοστάθμιση και το battery pack φορτίζεται με σταθερή τάση.



Εικόνα 6.7.1.β Προγραμματιστικό περιβάλλον Arduino

6.7.2 Κώδικας ισοστάθμισης

Σύμφωνα με αυτά που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, ο κώδικας που θα γραφεί στο προγραμματιστικό περιβάλλον του arduino ,όσον αφορά την ισοστάθμιση, παρουσιάζεται παρακάτω:

```
/*ΚΩΔΙΚΑΣ ΙΣΟΣΤΑΘΜΙΣΗΣ

Δημιουργός : Κωνσταντίνος Μπούρχας
Ημερομηνία Δημιουργίας: Αύγουστος 2012*/

/* τα MOSFET που συνδέουν το κάθε κελί με την αντίσταση ισοστάθμισης συνδέονται με μία ψηφιακή θύρα */

intMOS1=31; /* καθορισμός θύρας στην οποία συνδέεται η πύλη του MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το
κελί 1 . Η ψηφιακή αυτή θύρα ελέγχει και την αγωγή του MOSFET*/
intMOS2=32; /* ομοίως για το MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 2 */
intMOS3=33; /* ομοίως για το MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 3 */
intMOS4=34; /* ομοίως για το MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 4 */

voidsetup () {
pinMode(MOS1, OUTPUT); /*η θύρα MOS1 δηλώνεται ως έξοδος, αφού ανάλογα με τις συνθήκες θα παίρνει την
τιμή 0 ή 5 V ανοιγοκλείνοντας έτσι το MOSFET */
```

```

pinMode(MOS2, OUTPUT); /*ομοίως για τη θύρα MOS2 */
pinMode(MOS3, OUTPUT); /* ομοίως για τη θύρα MOS3 */
pinMode(MOS4, OUTPUT); /* ομοίως για τη θύρα MOS4 */
Serial.begin(9600);
}

voidloop() {
// μέτρηση της τάσης του κάθε κελιού
/* Στην αναλογική θύρα A1 συνδέεται η έξοδος του τελεστικού ενιχυτή που συνδέεται με το κελί 1 και δείχνει την
τάση του κελιού 1 με αναφορά το 0.
Ομοίως για τις θύρες A2,A3,A4
*/
intsensor_V1=analogRead(A1); //διαβάζει την τάση στη αναλογική θύρα A1
intsensor_V2=analogRead(A2); //διαβάζει την τάση στη αναλογική θύρα A2
intsensor_V3=analogRead(A3); //διαβάζει την τάση στη αναλογική θύρα A3
intsensor_V4=analogRead(A4); //διαβάζει την τάση στη αναλογική θύρα A4

floatV1=sensor_V1 * (5.0/1023.0); /*μετατρέπει την αναλογική τιμή που διαβάζει (η οποία κυμαίνεται από 0-
1023) σε τιμή τάσης (0-5V) */
float V2=sensor_V2 * (5.0/1023.0);
float V3=sensor_V3 * (5.0/1023.0);
floatV4=sensor_V4 * (5.0/1023.0);

/* Αν τα κελιά είναι μέσα στα ασφαλή όρια τάσης (2.3V-3.6V), τότε λαμβάνει χώρα η ισοστάθμιση.
Όποιο κελί βρίσκεται με την μεγαλύτερη τάση, τότε αυτό εκφορτίζεται ή φορτίζεται πιο αργά έως ότου φτάσουν
το επίπεδο τάσης του τα υπόλοιπα κελιά. Αυτή διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς με όποιο κελί έχει κάθε
στιγμή τη μεγαλύτερη τάση. Με αυτόν τον τρόπο, τα κελιά θα φτάσουν όλα μαζί την τάση των 3.6V(για την
ακρίβεια θα ξεπεράσουν την τάση των 3.595V) και από εκεί και πέρα θα σταματήσει η ισοστάθμιση αφού το
batteryrack θα φορτιστεί με σταθερή τάση */

if (V1>2.3 && V2>2.3 && V3>2.3 && V4>2.3 && V1<3.595 && V2<3.595 && V3<3.595 && V4<3.595) {
floathigh_cell=V1; // το κελί 1 αρχικοποιείται ως το κελί με τη μεγαλύτερη τάση
intflag= MOS1; /* αρχικοποιείται η θύρα που συνδέεται με το κελί 1 ως η θύρα που συνδέεται με το κελί με την
υψηλότερη τάση */

    if (V2 >high_cell) {
        high_cell=V2; /* αν η τάση του κελιού 2 ξεπερνά την τάση high_cell, τότε η μεταβλητή high_cell
παίρνει την τιμή της τάσης του κελιού 2 */
        flag=MOS2; /*η θύρα που θα δώσει 5V ορίζεται ως η θύρα που συνδέεται με το MOSFET που
συνδέει την αντίσταση ισοστάθμισης στο κελί 2 */
    }
    if (V3 >high_cell) {
        high_cell=V3; /* αν η τάση του κελιού 3 ξεπερνά την τάση high_cell, τότε η μεταβλητή high_cell
παίρνει την τιμή της τάσης του κελιού 3 */
        flag=MOS3; /*η θύρα που θα δώσει 5V ορίζεται ως η θύρα που συνδέεται με το MOSFET που
συνδέει την αντίσταση ισοστάθμισης στο κελί 3 */
    }
}
if (V4 >high_cell) {

```

```

    high_cell=V4; /* αν η τάση του κελιού 4 ξεπερνά την τάση high_cell, τότε η μεταβλητή high_cell
    παίρνει την τιμή της τάσης του κελιού 4 */
    flag=MOS4; /*η θύρα που θα δώσει 5V ορίζεται ως η θύρα που συνδέεται με το MOSFET που
    συνδέει την αντίσταση ισοστάθμισης στο κελί 4 */

}

digitalWrite(flag,HIGH); /* δίνονται 5V στη θύρα που συνδέεται με το MOSFET, το οποίο συνδέει την αντίσταση
ισοστάθμισης με το κελί που έχει τη μεγαλύτερη τάση */
}

/* αν η τάση έστω και ενός κελιού είναι κάτω από 2.3V και η τάση των υπολοίπων είναι κάτω από 3.6V, τότε
διακόπτεται η ισοστάθμιση και φορτίζονται όλα τα κελιά με σταθερό ρεύμα. Αυτό γίνεται με σκοπό να
κρατούνται οι τάσεις των κελιών στο ασφαλές όριο άνω των 2.3V */

else if ((V1<2.3 || V2<2.3 || V3<2.3 || V4<2.3) && (V1<3.6 && V2<3.6 && V3<3.6 && V4<3.6)) {
    digitalWrite(MOS1,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 1
    digitalWrite(MOS2,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 2
    digitalWrite(MOS3,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 3
    digitalWrite(MOS4,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 4
}

/* όταν η τάση και των τεσσάρων κελιών φτάσει τα 3.595V, τότε σταματάει η διαδικασία της ισοστάθμισης
καθώς τότε το battery pack φορτίζεται με σύστημα σταθερής τάσης. Δεν τέθηκε σαν συνθήκη να είναι ίση η τάση
με 3.6V διότι υπάρχει περίπτωση να μην φτάσουν τα κελιά ταυτόχρονα στην τάση των 3.6V. Ωστόσο αν
ξεπεράσουν όλα μαζί την τάση των 3.595V, τότε σημαίνει ότι έχουν ισοσταθμιστεί επαρκώς και οποιαδήποτε
ανισοροπία από εκεί και πέρα δεν επηρεάζει τα κελιά αφού στη χειρότερη περίπτωση θα έχουν τρία κελιά τάση
3.596V και ένα κελί τάση 3.612, κάτι το οποίο είναι αποδεκτό */
else if (V1>3.595 && V2>3.595 && V3>3.595 && V4>3.595) {
    digitalWrite(MOS1,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 1
    digitalWrite(MOS2,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 2
    digitalWrite(MOS3,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 3
    digitalWrite(MOS4,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 4
}
}

/* Τέλος Ισοστάθμισης */

```

Ο παραπάνω κώδικας περάστηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Arduino και μεταγλωττίστηκε επιτυχώς. Στην εικόνα 6.7.2.α φαίνεται ένα στιγμιότυπο από τον παραπάνω κώδικα στο προγραμματιστικό περιβάλλον. Στο cd το οποίο περιέχεται στη διπλωματική παρέχεται το αρχείο του παραπάνω κώδικα ισοστάθμισης (όνομα αρχείου: “code_isostathmisi”).

```
diplomatiki_code_isostathmisi | Arduino 1.0
File Edit Sketch Tools Help
diplomatiki_code_isostathmisi$
/*ΚΩΔΙΚΑΣ ΙΣΟΣΤΑΘΜΙΣΗΣ
Δημιουργός : Κωνσταντίνος Ηπούργας
*/

/* τα MOSFET που συνδέονται το κάθε κελί με την αντίσταση ισοστάθμισης συνδέονται με μία ψηφιακή θύρα */
int MOS1=31; /* καθορισμός θύρας στην οποία συνδέεται η πύλη του MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 1 . Η ψηφιακή αυτή θύρα ελέγχει και την αγωγή του MOSFET*/
int MOS2=32; /* ομοίως για το MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 2 */
int MOS3=33; /* ομοίως για το MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 3 */
int MOS4=34; /* ομοίως για το MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 4 */

void setup () {
pinMode(MOS1, OUTPUT); /*η θύρα MOS1 δηλώνεται ως έξοδος, αφού ανάλογα με τις συνθήκες θα παίρνει την τιμή 0 ή 5 V ανοιγοκλείνοντας έτσι το MOSFET */
pinMode(MOS2, OUTPUT); /*ομοίως για τη θύρα MOS2 */
pinMode(MOS3, OUTPUT); /* ομοίως για τη θύρα MOS3 */
pinMode(MOS4, OUTPUT); /* ομοίως για τη θύρα MOS4 */
Serial.begin(9600);
}
void loop() {
// μέτρηση της τάσης του κάθε κελιού
/* Στην αναλογική θύρα A1 συνδέεται η έξοδος του τελευταίου ενιχυτή που συνδέεται με το κελί 1 και δείχνει την τάση του κελιού 1 με αναφορά το 0.
Ομοίως για τις θύρες A2,A3,A4
*/
int sensor_V1=analogRead(A1); //διαβάζει την τάση στη αναλογική θύρα A1
int sensor_V2=analogRead(A2); //διαβάζει την τάση στη αναλογική θύρα A2
int sensor_V3=analogRead(A3); //διαβάζει την τάση στη αναλογική θύρα A3
int sensor_V4=analogRead(A4); //διαβάζει την τάση στη αναλογική θύρα A4

float V1=sensor_V1 * (5.0/1023.0); /*μετατρέπει την αναλογική τιμή που διαβάζει (η οποία κυμαίνεται από 0-1023) σε τιμή τάσης (0-5V) */
float V2=sensor_V2 * (5.0/1023.0);
float V3=sensor_V3 * (5.0/1023.0);
}
Done compiling
Binary sketch size: 5618 bytes (of a 258048 byte maximum)
```

Εικόνα 6.7.2.α: Κομμάτι του κώδικα ισοστάθμισης στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Arduino

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : Εκτίμηση της Κατάστασης Φόρτισης (State Of Charge-SOC)

7.1 Ορισμός του SOC

Το SOC ορίζεται ως η εναπομένουσα χωρητικότητα εκφραζόμενη ως ποσοστό κάποιας αναφοράς. Κάποιες φορές αυτή η αναφορά είναι η ονομαστική χωρητικότητα, αν και τις περισσότερες φορές είναι η χωρητικότητα που είχε κατά τον τελευταίο κύκλο χρήσης. Ωστόσο, η ασάφεια που παρουσιάζει η χωρητικότητα αυτή οδηγεί πολλές φορές σε λάθος εκτιμήσεις.

Η προτιμότερη αναφορά για το SOC είναι η ονομαστική χωρητικότητα ενός καινούριου κελιού. Αυτό επειδή η χωρητικότητα ενός κελιού μειώνεται καθώς αυτό παλαιώνει. Για παράδειγμα, η πραγματική χωρητικότητα ενός πλήρως φορτισμένου κελιού προς το τέλος της ζωής του προσεγγίζει μόλις το 80% της αρχικής ονομαστικής του χωρητικότητας. Η θερμοκρασία και ο βαθμός εκφόρτισης επιδρούν επίσης περαιτέρω στη διαμόρφωση της χωρητικότητας. Αυτή η διαφορά που παρουσιάζεται ανάμεσα στις αναφορές για το SOC είναι εξαιρετικά σημαντική αν το SOC παίζει το ρόλο της μέτρησης του καυσίμου, όπως γίνεται στις εφαρμογές των αυτοκινήτων.

Συνήθως, η αναφορά μέτρησης του SOC ορίζεται ως η χωρητικότητα του κελιού εκείνη τη στιγμή (αν είναι πλήρως φορτισμένο). Σε αυτήν την περίπτωση, ένα πλήρως φορτισμένο κελί, το οποίο όμως φτάνει στο τέλος της ζωής του, θα διαθέτει SOC ίσο με 100% ενώ η χωρητικότητά του θα προσεγγίζει μόλις το 80% της ονομαστικής του τιμής.

7.2 Μέθοδοι Προσδιορισμού του State Of Charge

Για τον προσδιορισμό του SOC χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Μερικές από αυτές εξειδικεύονται σε κελιά συγκεκριμένης χημικής σύστασης. Η περισσότερες ωστόσο βασίζονται στην μέτρηση ορισμένων παραμέτρων οι οποίες αλλάζουν ανάλογα με το SOC.

7.2.1 Άμεση Μέτρηση

Η μέθοδος αυτή θα ήταν ιδιαίτερα εύκολη αν η μπαταρία εκφορτιζόταν με σταθερό ρυθμό. Η φόρτιση σε μία μπαταρία είναι ίση με το γινόμενο του ρεύματος επί τον χρόνο στον οποίο ρέει. Δυστυχώς, προκύπτουν δύο προβλήματα με αυτό. Σε όλες τις πραγματικές μπαταρίες, το ρεύμα εκφόρτισης δεν είναι σταθερό αλλά μειώνεται καθώς η μπαταρία εκφορτίζεται, συνήθως με μη γραμμικό τρόπο. Κάθε συσκευή μέτρησης επομένως θα πρέπει να είναι σε θέση να υπολογίζει το ολοκλήρωμα του ρεύματος στον χρόνο που ρέει. Δεύτερον, η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εκφόρτιση της μπαταρίας με σκοπό τον προσδιορισμό της φόρτισης που αυτή περιείχε. Στις περισσότερες εφαρμογές υπάρχει ανάγκη προσδιορισμού του SOC χωρίς να χρειάζεται να εκφορτιστεί η μπαταρία.

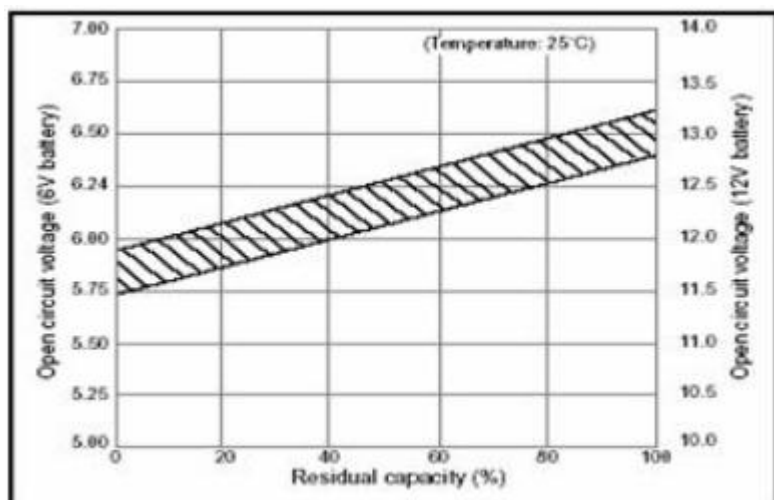
7.2.2 Προσδιορισμός του SOC μέσω της μέτρησης του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη.

Μία μέθοδος μέσω της οποίας μπορεί να εκτιμηθεί το SOC του μπαταριών μολύβδου οξέος είναι η μέτρηση του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη. Αυτή ορίζεται ως το κλάσμα της πυκνότητας του διαλύματος του ηλεκτρολύτη προς την πυκνότητα του καθαρού νερού. Σε έναν πλήρως φορτισμένο

συσσωρευτή μολύβδου, η περιεκτικότητα σε θειικό οξύ (H_2SO_4) είναι 36% κατά βάρος ή 25% κατ' όγκο και το ειδικό βάρος του διαλύματος είναι περίπου 1.25 στους 27°C. Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται το ειδικό βάρος του διαλύματος του μειώνεται και επανέρχεται όταν επαναφορτίζεται.

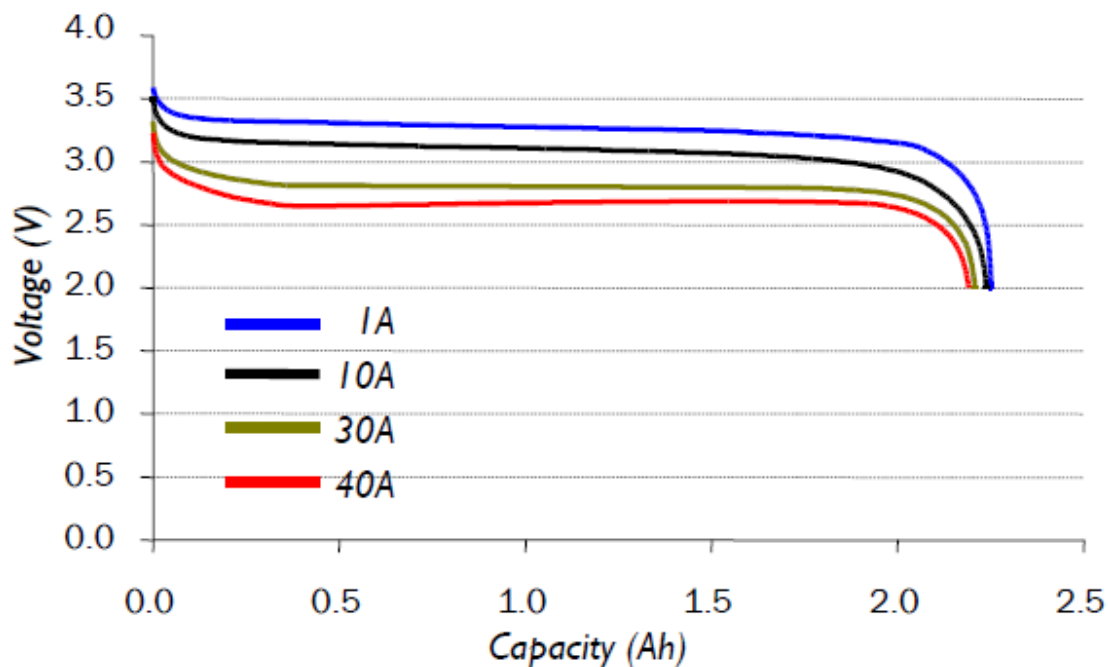
7.2.3 Προσδιορισμός του SOC μέσω της τάσης

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη χρήση της τάσης του κάθε κελιού με σκοπό τον προσδιορισμό του SOC. Τα αποτελέσματα ποικίλουν ανάλογα με την πραγματική στάθμη της τάσης, τη θερμοκρασία, τον ρυθμό εκφόρτισης και τη γήρανση του κελιού. Γι αυτό το λόγο παρέχεται κάποιου είδους αντιστάθμιση, ούτως ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Το γράφημα 7.2.3.a παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και της εναπομένουσας χωρητικότητας σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας για ένα κελί μολύβδου οξέος. Όπως φαίνεται, η τάση του κελιού μειώνεται ανάλογα με την εναπομένουσα χωρητικότητα.



Γράφημα 7.2.3.a: Σχέση τάσης ανοιχτού κυκλώματος και χωρητικότητας για ένα κελί μολύβδου οξέος

Ωστόσο, σε συγκεκριμένες χημείες μπαταριών μπορεί να προκύψουν προβλήματα. Αυτά τα προβλήματα είναι ιδιαίτερα αισθητά στις μπαταρίες χημείας Λιθίου οι οποίες επιδεικνύουν πολύ μικρή μεταβολή της τάσης τους κατά τον κύκλο λειτουργίας τους. Στο γράφημα 7.2.3.β φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης ενός κελιού $2.3Ah / LiFePO_4$. Αυτές οι καμπύλες είναι ιδανικές για ένα κελί καθώς η τάση του δεν μειώνεται σημαντικά καθώς εκφορτίζεται. Για τον ίδιο λόγο όμως, η τάση του κελιού αυτού δεν αποτελεί καθόλου καλή ένδειξη του SOC του κελιού.



Γράφημα 7.2.3.β: Καμπύλες εκφόρτισης σε θερμοκρασία 25°C ενός κελιού 2300mAh LiFePO₄ της εταιρίας A123 Systems

Η ραγδαία πτώση τάσης κατά το τέλος του κύκλου λειτουργίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη επικείμενης πλήρους εκφόρτισης του κελιού, ωστόσο σε πολλές εφαρμογές απαιτείται μία πιο πρόωρη προειδοποίηση. Η πλήρης εκφόρτιση των κελιών χημείας Λιθίου οδηγεί σε δραματική μείωση της διάρκειας ζωής τους. Ενώ η τάση του κελιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ένδειξη του σημείου τερματισμού λειτουργίας, μία πιο ακριβής μέτρηση είναι απαραίτητη στις περισσότερες εφαρμογές.

7.2.4 Προσδιορισμός του SOC με βάση το ρεύμα (μέτρηση Coulomb)

Η ενέργεια η οποία περιέχεται σε μία ηλεκτρική φόρτιση μετρείται σε Coulombs και είναι ίση με το ολοκλήρωμα του ρεύματος, το οποίο μεταφέρθηκε κατά τη φόρτιση, στο χρόνο φόρτισης. Η εναπομένουσα χωρητικότητα ενός κελιού μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας το ρεύμα το οποίο εισέρχεται (φόρτιση) ή εξέρχεται (εκφόρτιση) από τα κελιά και ολοκληρώνοντάς το στον χρόνο. Το σημείο αναφοράς είναι ένα πλήρως φορτισμένο κελί και το SOC λαμβάνεται αφαιρώντας την καθαρή ροή φόρτισης από ένα πλήρως φορτισμένο κελί. Αυτή η μέθοδος, γνωστή και ως μέτρηση Coulomb (Coulomb counting), προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια από τις άλλες μεθόδους μέτρησης του SOC καθώς μετράει κατευθείαν τη ροή φόρτισης. Παρόλα αυτά, χρειάζεται κι αυτή περαιτέρω αντιστάθμιση έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι συνθήκες λειτουργίας.

Για τη μέτρηση του ρεύματος χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι:

- Διακλάδωση ρεύματος. Είναι η πιο απλή μέθοδος για τον προσδιορισμό του ρεύματος. Βασίζεται στη μέτρηση της πτώσης τάσης στα άκρα μίας ωμικής αντίστασης υψηλής ακρίβειας η οποία είναι συνδεδεμένη σε σειρά ανάμεσα στην μπαταρία και το φορτίο. Αυτή η μέθοδος μέτρησης προκαλεί μία ελαφρά απώλεια ισχύος, θερμαίνει τη μπαταρία και είναι ανακριβής σε χαμηλά ρεύματα.
- Οι μετατροπείς του φαινομένου Hall δεν παρουσιάζουν το παραπάνω πρόβλημα ωστόσο έχουν μεγαλύτερο κόστος. Ένα μειονέκτημα είναι ότι έχουν μικρή ανοχή σε υψηλά ρεύματα και είναι επιρρεπείς στο θόρυβο.

- Οι αισθητήρες μαγνητοαντιστάσεων έχουν ακόμα υψηλότερο κόστος αλλά έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία και καλύτερη ευστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες από ότι οι αισθητήρες Hall.

Η μέτρηση Coulomb εξαρτάται από το ρεύμα το οποίο ρέει από τη μπαταρία σε ένα εξωτερικό κύκλωμα και δεν λαμβάνει υπόψη το ρεύμα αυτοεκφόρτισης ή την κουλομπική απόδοση της μπαταρίας.

7.2.5 Προσδιορισμός του SOC μέσω μετρήσεων της εσωτερικής αντίστασης

Κατά τους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης ενός κελιού, η σύνθεση των ενεργών στοιχείων του κελιού μεταβάλλεται, κάτι το οποίο έχει άμεση επίδραση στην εσωτερική αντίσταση του κελιού. Επομένως, οι μετρήσεις της εσωτερικής αντίστασης ενός κελιού μπορεί να βοηθήσει στον προσδιορισμό του SOC . Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται ευρέως λόγω των δυσκολιών στη μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης κατά τη λειτουργία καθώς και λόγω των μεταβολών που υφίσταται λόγω θερμοκρασιακών αλλαγών.

7.3 Επιλογή ολοκληρωμένου κυκλώματος για τον προσδιορισμό του SOC

7.3.1 Εισαγωγή

Ο φορτιστής των μπαταριών LiFePO₄ σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο εφαρμόζει με μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία τη μέθοδο του μετρητή Coulomb. Η επιλογή του κυκλώματος αυτού γίνεται από την εταιρεία MAXIM. Το συγκεκριμένο chip που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το DS2788, το οποίο μετράει την τάση, τη θερμοκρασία και το ρεύμα ενός κελιού χημείας Li-ion και υπολογίζει το SOC. Επίσης, μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας *I-wire*® μπορεί να επικοινωνεί άμεσα με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή και να μεταφέρει σε αυτόν, όλα τα στοιχεία του battery pack, όσον αφορά την τάση, το ρεύμα και τη θερμοκρασία του. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει πλήρης εποπτεία της φόρτισης και την κατάστασης των κελιών.

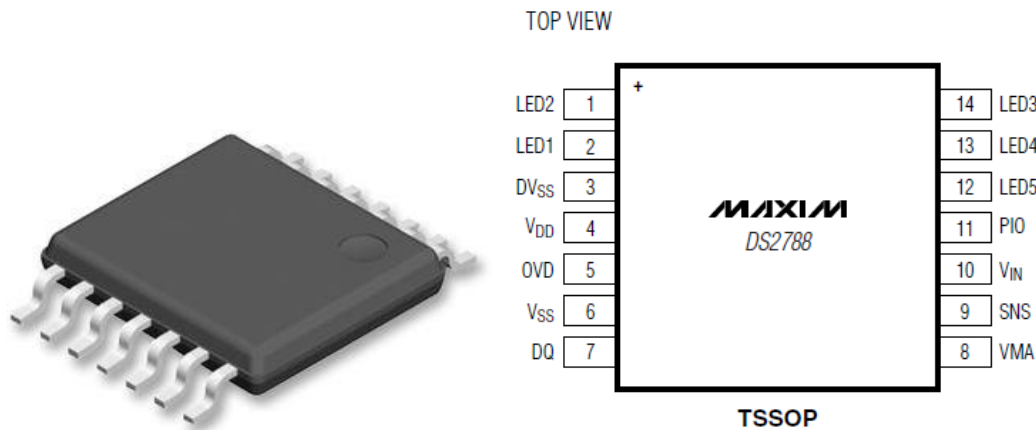
7.3.2 Λειτουργία και χαρακτηριστικά του DS2788

Παρακάτω συνοψίζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του ολοκληρωμένου κυκλώματος DS2788 :

- Ακριβής μέτρηση της τάσης, της θερμοκρασίας και του ρεύματος του υπό μέτρηση συστήματος.
- Υπολογισμός της απόλυτης και σχετικής χωρητικότητας λαμβάνοντας υπόψη τη μέτρηση Coulomb, τον βαθμό εκφόρτισης, τη θερμοκρασία και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των κελιών της μπαταρίας.
- Προειδοποίηση σε περίπτωση χαμηλής τάσης του battery pack.
- Διαθέτει αυτόματο καλιμπράρισμα κέρδους κι έτσι είναι δυνατή η χρησιμοποίηση αντιστάσεων (Rsense) μικρού κόστους.

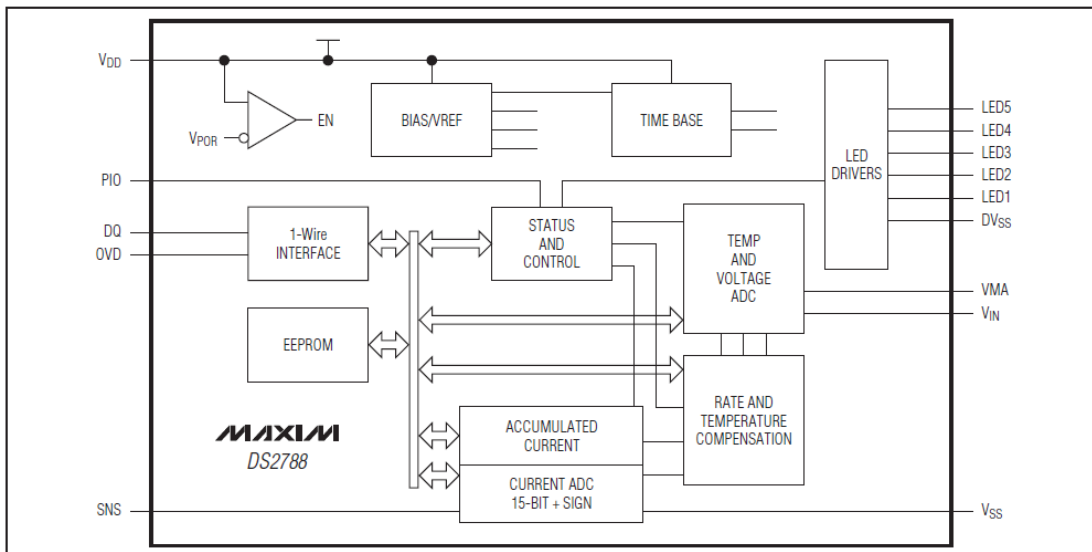
Όλα τα δεδομένα που συλλέγονται και χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς αποθηκεύονται στην ενσωματωμένη EEPROM. Επίσης, οι πληροφορίες που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των κελιών, της τάσης και του ρεύματος φόρτισης και της χωρητικότητας εισάγονται από τον χρήστη. Τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται σε καταχωρητές της μνήμης του DS2788. Η

πρόσβαση στους καταχωρητές αυτούς παρουσιάζεται στην ενότητα που ακολουθεί. Η λειτουργία του κάθε καταχωρητή παρουσιάζεται αναλυτικά στο datasheet του DS2788 στο τέλος της διπλωματικής (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ σελ. 147)



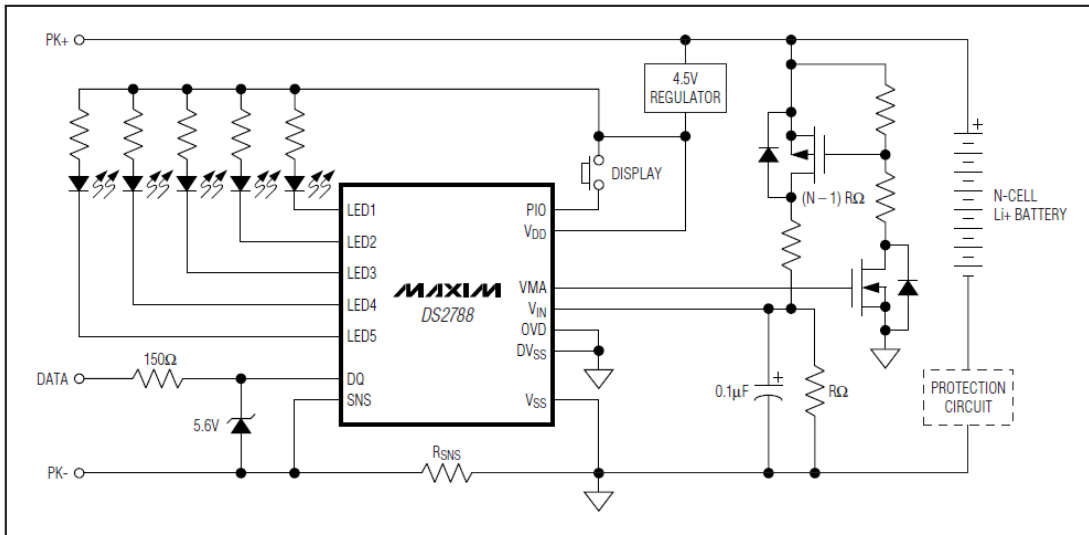
Εικόνα 7.3.α: DS2788 ICchip

Το block διάγραμμα του DS2788 παρουσιάζεται στην εικόνα 7.3.2.β.



Εικόνα 7.3.2.β: Block διάγραμμα του DS2788

Το τυπικό λειτουργικό διάγραμμα του DS2788 παρουσιάζεται στην εικόνα 7.3.2.γ.



Εικόνα 7.3.2.γ: Λειτουργικό διάγραμμα του DS2788

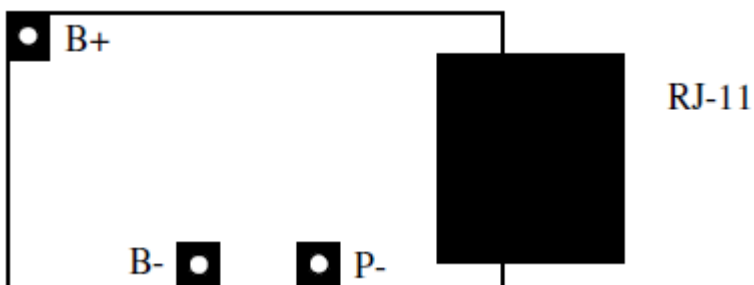
Καθώς το υπό μελέτη battery pack αποτελείται από μία συστοιχία τεσσάρων κελιών, στο παραπάνω λειτουργικό διάγραμμα τοποθετούμε όπου R μία αντίσταση 100kΩ και θέτουμε όπου N = 4.

7.3.3 Χρήση του DS2788

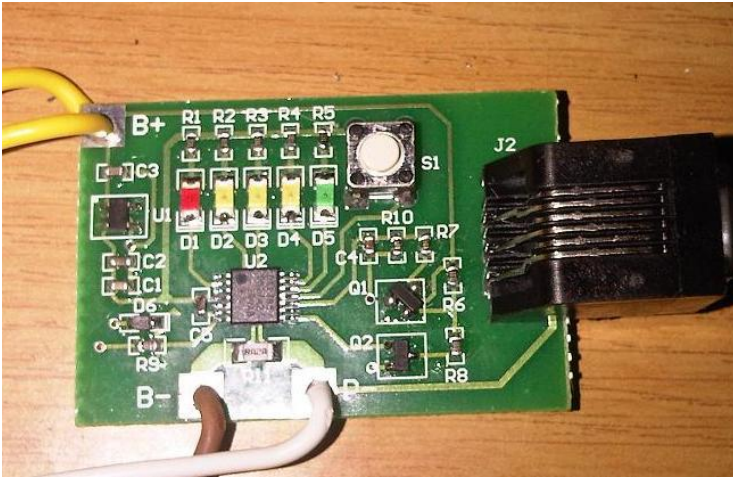
7.3.3.1 Εγκατάσταση και σύνδεση του DS2788 με τον υπολογιστή

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά το DS2788, απαιτείται πρώτα η εγκατάσταση και η χρησιμοποίηση του DS2788K Evaluation Kit. Το EV Kit είναι μία αναπτυξιακή πλατφόρμα μέσω της οποίας πραγματοποιείται η ανάπτυξη του software του DS2788 και η οπτικοποίηση και αξιολόγηση των επιδόσεων. Το DS2788K προσφέρει πλήρη έλεγχο όλων των λειτουργιών του ολοκληρωμένου DS2788. Μέσω του προσδιορισμού διάφορων παραμέτρων, προσαρμόζεται κάθε φορά η λειτουργία του ολοκληρωμένου ανάλογα με τον αριθμό και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των κελιών της κάθε μπαταρίας. Δηλαδή, μέσα από το DS2788K δίνονται οι απαραίτητες τιμές στους καταχωρητές του DS2788 και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

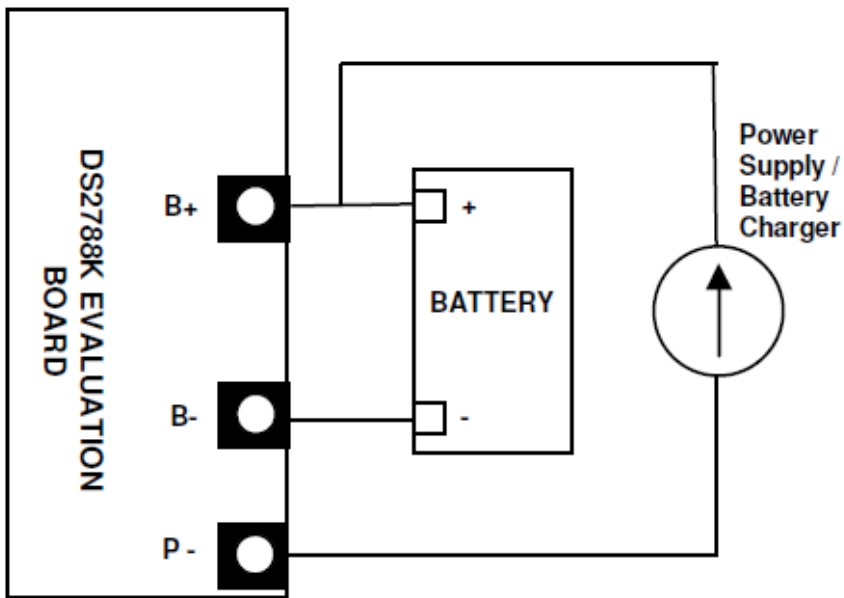
Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες εικόνες σχετικά με τις θύρες επικοινωνίας και τη σύνδεση του DS2788K με το battery pack και τον φορτιστή.



Εικόνα 7.3.3.1.α: Θύρες επικοινωνίας του DS2788K



Εικόνα 7.3.3.1.β: Το DS2788K



Εικόνα 7.3.3.1.γ: Σύνδεση του DS2788K με το battery pack και τον φορτιστή.

Μέσω του DS91230 USB Adapter, ο χρήστης μπορεί να χειριστεί το DS2788K μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Στην εικόνα 7.3.3.1.δ παρουσιάζεται το DS91230.

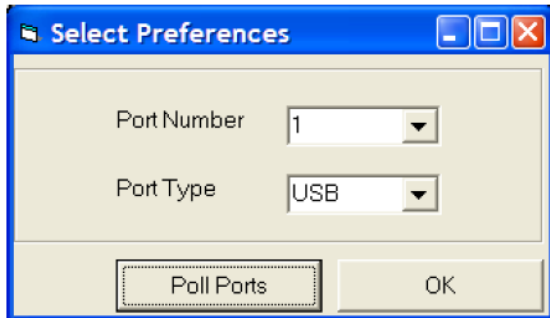


Εικόνα 7.3.3.1.δ: DS91230 USB Adapter.

Επομένως, το DS2788K συνδέεται μέσω του RJ-11 με τοDS91230 και αυτό με τη σειρά του συνδέεται με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Έπειτα, μέσω του ιστότοπου www.maxim-ic.com , γίνεται το «κατέβασμα» του λογισμικού μέσω του οποίου γίνεται η διαχείριση του DS2788K. Στη συνέχεια εγκαθίσταται το λογισμικό και είναι έτοιμο για τις απαραίτητες ρυθμίσεις σύνδεσης.

Παρακάτω φαίνεται το παράθυρο που εμφανίζεται όταν επιλέγεται η θύρα USB στην οποία είναι συνδεδεμένο το DS2788K (μέσω του DS91230).



Εικόνα 7.3.3.1.ε: Επιλογή θύρας σύνδεσης του PC με το DS2788K

7.3.3.2 Μενού του προγράμματος

Υπάρχουν διάφορα μενού τα οποία κάνουν πιο εύκολη τη χρήση του software του DS2788K. Η λειτουργία του καθενός περιγράφεται παρακάτω. Συνοπτικά τα μενού που υπάρχουν είναι τα παρακάτω:

- FILE MENU
- REGISTERS MENU
- STATUS REGISTER
- 1-WIRE SPEED MENU
- PREFERENCES MENU
- HELP MENU

Τα παραπάνω μενού αφορούν τη σύνδεση της συσκευής με τον Η/Υ καθώς και στην επίβλεψη των τιμών που παίρνουν κάθε στιγμή οι καταχωρητές του DS2788. Η λειτουργία του κάθε μενού παρουσιάζεται πιο αναλυτικά στο datasheet που υπάρχει στο τέλος της διπλωματικής (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ σελ. 181).

7.3.3.3 Καρτέλες του προγράμματος

Όλες οι λειτουργίες του προγράμματος κατανέμονται σε τέσσερις καρτέλες στο κεντρικό παράθυρο του προγράμματος. Οι καρτέλες αυτές είναι:

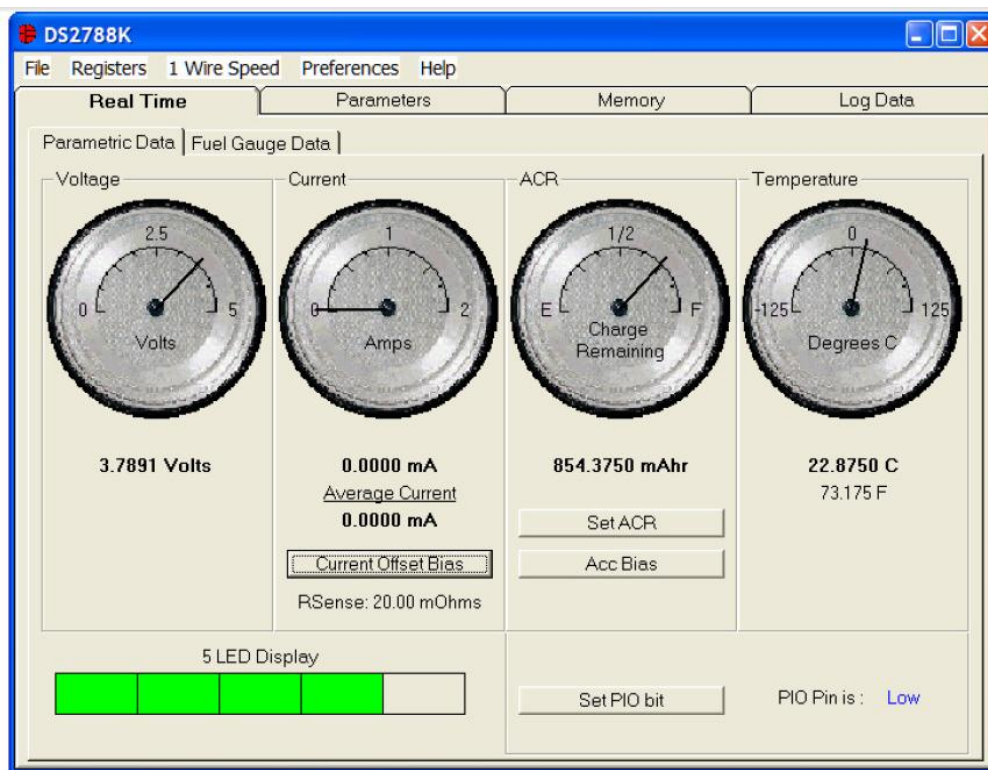
- **Real time tab-** Περιέχονται όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιεί το DS2788.
- **Parameters tab-** Ο χρήστης έχει πρόσβαση στα στοιχεία της EEPROM.

- **Memory tab**- Παρουσιάζονται και δίνεται η δυνατότητα αλλαγής των περιεχομένων του κάθε καταχωρητή και θέσης μνήμης στο εσωτερικό του DS2788.
- **Datalog tab**- Δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να αποθηκεύσει real-time πληροφορίες σε ένα αρχείο και να δει αυτά τα δεδομένα σε γραφική μορφή.

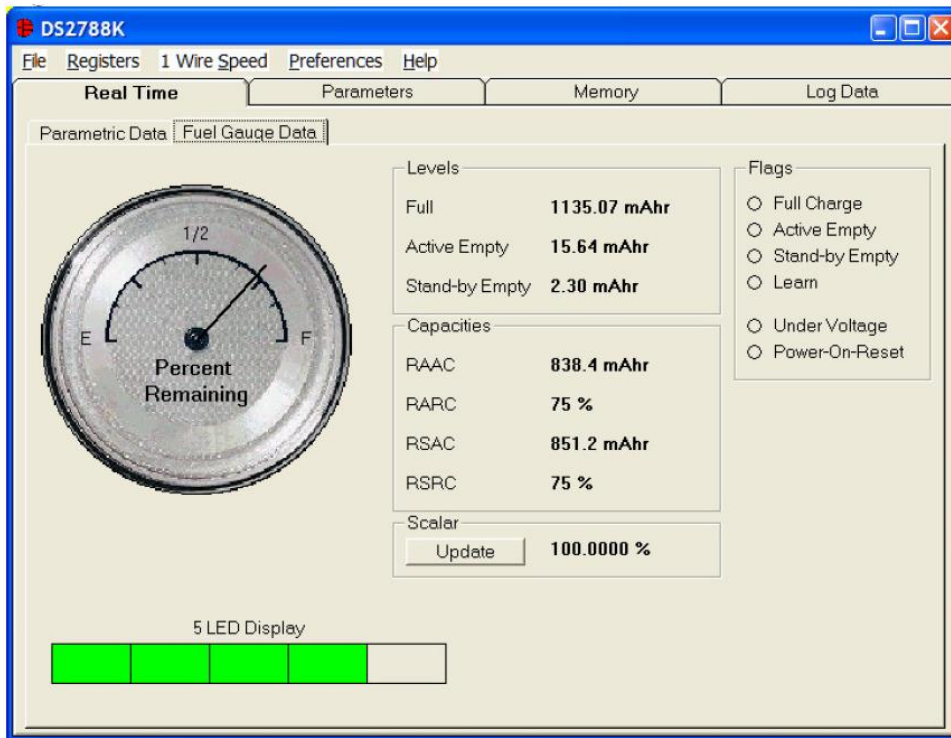
Η κάθε καρτέλα παρουσιάζεται πιο λεπτομερώς παρακάτω.

REAL TIME TAB

Η καρτέλα αυτή χωρίζεται σε δύο επιμέρους καρτέλες : Parametric data tab και Fuel Gauge data. Στην πρώτη περιέχονται όλες οι real time μετρήσεις που παίρνει το DS2788 ενώ η δεύτερη καρτέλα περιέχει όλες τις τιμές που υπολογίζει το DS2788. Παρακάτω φαίνονται οι δύο αυτές καρτέλες όπως φαίνονται στον χρήστη.



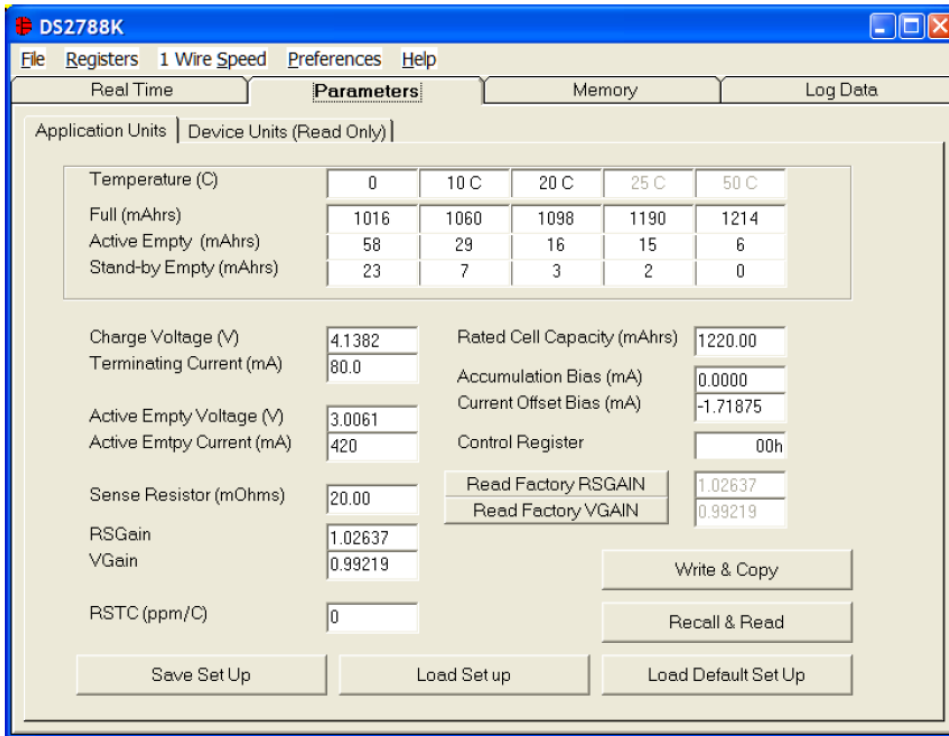
Εικόνα 7.3.3.3.α: Parametric Data Tab



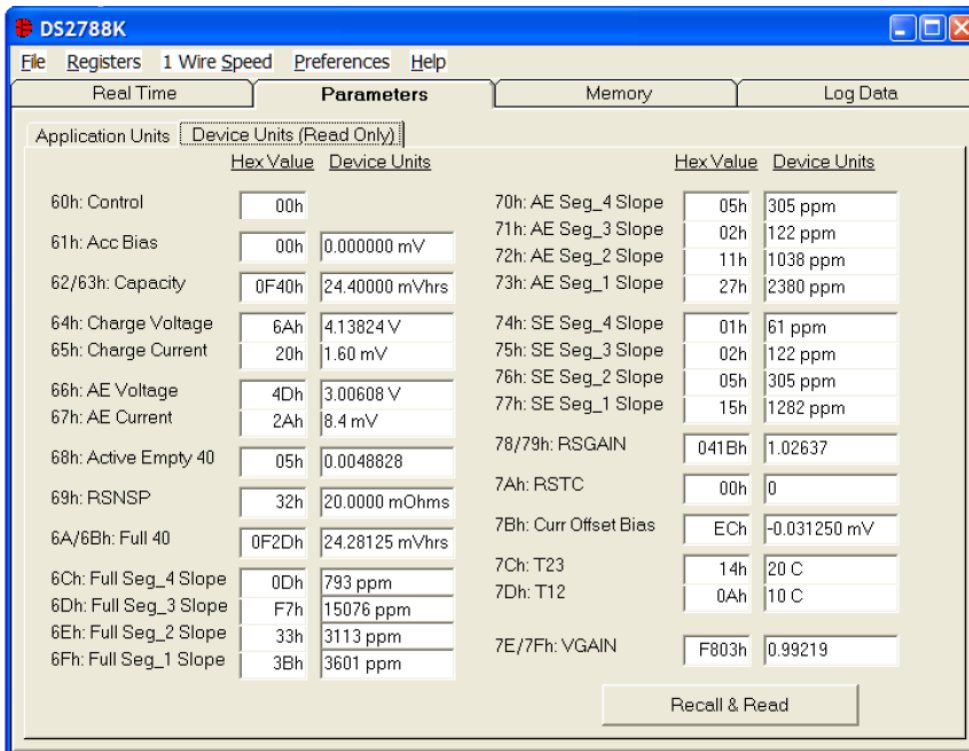
Εικόνα 7.3.3.3.β: Fuel Gauge Data Tab

PARAMETERS TAB

Η καρτέλα αυτή δίνει πρόσβαση σε όλες τις παραμέτρους που υπάρχουν στο memory block της EEPROM. Χωρίζεται σε Application Units tab και Device Units Tab. Η καρτέλα Application Units παρουσιάζει όλες τις παραμέτρους σε μονάδες όπως mA , mAh και Volt. Η καρτέλα Device Units εφαρμόζει τους υπολογισμούς που είναι απαραίτητη , έτσι ώστε να παρουσιαστούν τα δεδομένα στην καρτέλα Application Units. Παρακάτω φαίνονται οι δύο καρτέλες όπως φαίνονται στον χρήστη.



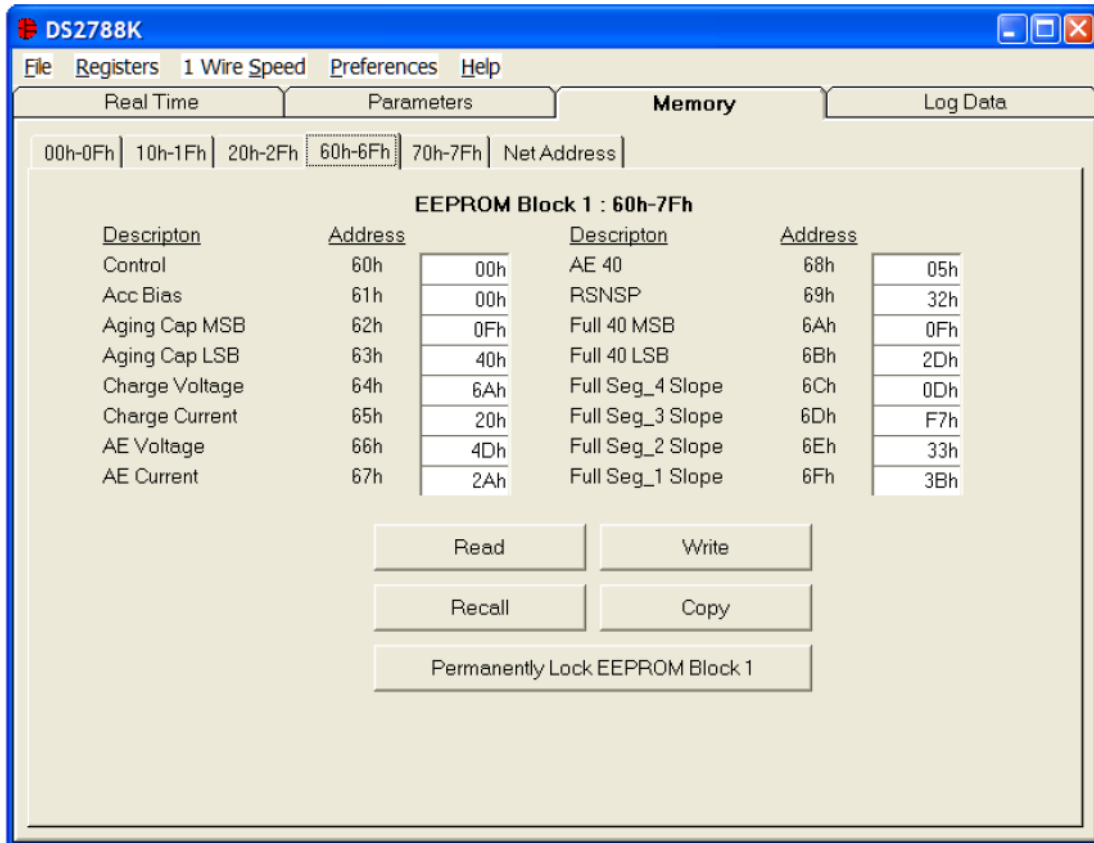
Εικόνα 7.3.3.γ: Application Units Tab



Εικόνα 7.3.3.δ: Device Units Tab.

MEMORY TAB

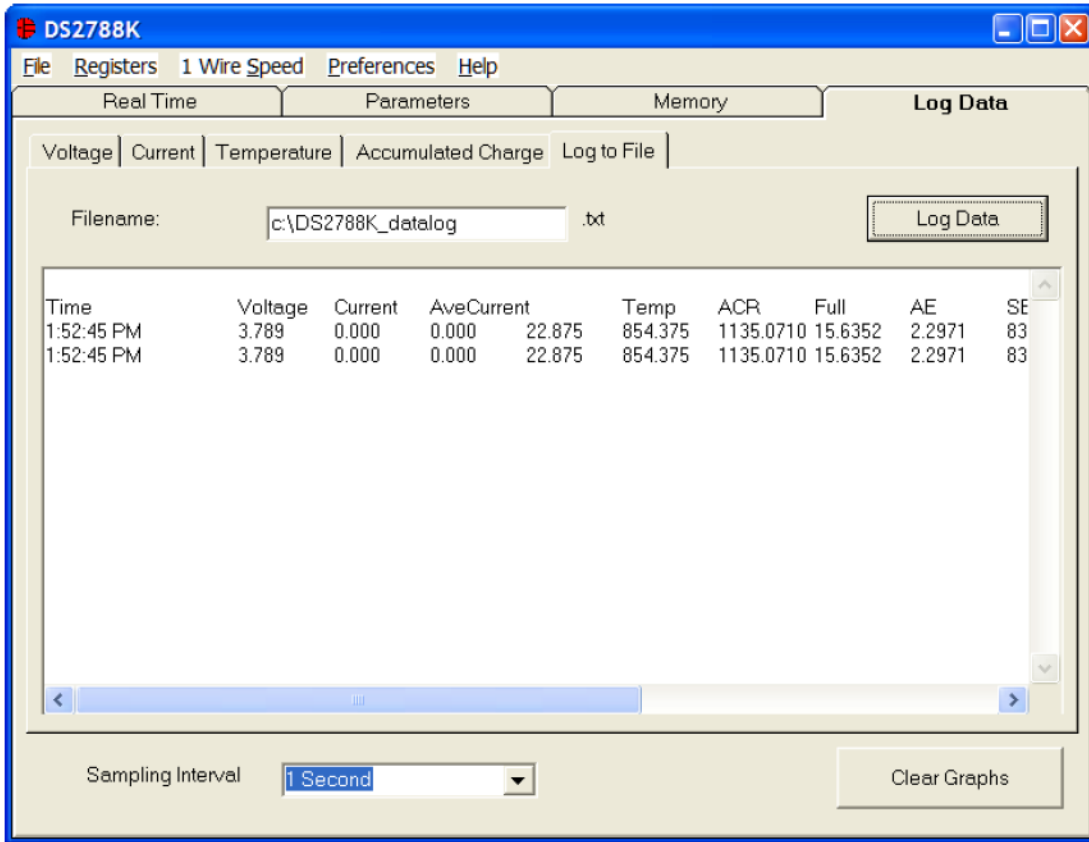
Η καρτέλα memory tab δίνει πρόσβαση στα 32 bytes της SRAM και στα 48 bytes της EEPROM στο εσωτερικό του DS2788. Παρακάτω φαίνεται η σχετική καρτέλα.



Εικόνα 7.3.3.3.ε: Memory Tab

LOG DATA TAB

Η καρτέλα log data tab επιτρέπει στον χρήστη να δει σε γραφήματα τις real time μετρήσεις που παίρνει το DS2788. Υπάρχουν ξεχωριστές υποκαρτέλες για την τάση, το ρεύμα, τη θερμοκρασία και τη φόρτιση της μπαταρίας. Κάθε γράφημα προβάλλει τα τελευταία 500 σημεία που συλλέχθηκαν από το software του DS2788. Η διάρκεια κατά την οποία πραγματοποιείται η δειγματοληψία μπορεί να φτάσει και τα 15 λεπτά. Παρακάτω φαίνεται η σχετική καρτέλα.



Εικόνα 7.3.3.3.ζ: Log Data Tab

7.3.4 Σύνοψη

Στις παραπάνω ενότητες παρουσιάστηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα DS2788 και μελετήθηκε η σύνδεσή του με το battery pack και τον φορτιστή του.

Μέσω του DS2788 και της πλακέτας DS2788K πραγματοποιείται μέτρηση της τάσης, του ρεύματος και της θερμοκρασίας του battery pack. Με τη χρησιμοποίηση του DS2788K υπάρχει οπτικοποίηση μέσω Η/Υ της λειτουργίας και όλων των παραμέτρων του battery pack. Η κυριότερη λειτουργία που επιτελεί είναι ότι υπολογίζει αξιόπιστα το State of Charge του battery pack και μάλιστα λαμβάνοντας υπόψη την παλαίωση των κελιών. Αυτό γίνεται καλιμπράροντας κάθε φορά μέσω software το επίπεδο μέγιστης φόρτισης του battery pack.

Μία επιπρόσθετη λειτουργία που επιτελεί το DS2788 είναι ότι μετράει τη θερμοκρασία του battery pack. Μέσω του DS2788K προβάλλονται οι τιμές θερμοκρασίας.

Τέλος, το DS2788K διαθέτει πέντε LEDs τα οποία ανάβουν ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης του battery pack.

7.3.5 Παρουσίαση εναλλακτικής μεθόδου εύρεσης του SOC

Στις παραπάνω ενότητες παρουσιάστηκε η εγκατάσταση ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος το οποίο μετράει το SOC του battery pack μέσω της μέτρησης της τάσης, του ρεύματος και της θερμοκρασίας. Για την ακρίβεια, η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η μέτρηση Coulomb.

Ωστόσο, υπήρχε η δυνατότητα σχεδίασης ενός απλού κυκλώματος για τη μέτρηση της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας, χωρίς να απαιτείται η χρήση κάποιου ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Ένα τέτοιο κύκλωμα αποτελείται από μία αντίσταση μικρής τιμής, R_{sense} , η οποία συνδέεται σε σειρά με το battery pack. Τα άκρα αυτής της αντίστασης συνδέονται στον μικροελεγκτή ο οποίος μετράει συνέχεια την τάση της. Γνωρίζοντας την τάση και την αντίσταση της R_{sense} μπορεί να υπολογιστεί πολύ εύκολα το ρεύμα το οποίο διαρρέει το battery pack μέσω της σχέσης :

$$I = \frac{V_{R_{sense}}}{R_{sense}}$$

Έπειτα, μέσω του μικροελεγκτή οι τιμές του I αποθηκεύονται στη μνήμη και ολοκληρώνονται στο χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η ποσότητα του φορτίου που εισέρχεται ή εξέρχεται από το battery pack και επομένως η κατάσταση φόρτισης.

Παρόλα αυτά, η μέθοδος που μόλις περιγράφηκε έχει ένα μεγάλο μειονέκτημα το οποίο την καθιστά αρκετά αναξιόπιστη. Το μειονέκτημα αυτό έγκειται στο γεγονός ότι η ωμική αντίσταση R_{sense} διαρρέεται από το ρεύμα φόρτισης, ή το ρεύμα εκφόρτισης, το οποίο έχει αρκετά μεγάλη τιμή (έως 3 Amps για τη φόρτιση). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η αντίσταση αυτή να θερμαίνεται. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει επίδραση στην τιμή της ωμικής αντίστασης κι έτσι ο υπολογισμός του I μπορεί να διαφέρει για ίδιες τιμές του V .

Εδώ παρατηρείται και το μεγάλο πλεονέκτημα που παρουσιάζει η χρήση του DS2788, το οποίο μετράει τη μεταβολή της θερμοκρασίας και προσαρμόζει ανάλογα τους υπολογισμούς του stateofcharge.

Κεφάλαιο 8^ο : Διακοπή της Φόρτισης

8.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο θα σταματάει η φόρτιση. Γενικά, υπάρχουν δύο λόγοι για τους οποίους τερματίζεται η φόρτισης της μπαταρίας. Ο πρώτος λόγος είναι ότι η μπαταρία έχει φορτιστεί πλήρως και ο δεύτερος λόγος είναι ότι συνέβη κάποιο μη επιθυμητό γεγονός, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας του battery pack ή η υπέρβαση των ορίων τάσης από κάποιο κελί.

8.2 Τερματισμός φόρτισης λόγω επίτευξης πλήρους φόρτισης

Ένας από τους λόγους για τους οποίους διακόπτεται η φόρτισης μίας μπαταρίας είναι η επίτευξη της πλήρους φόρτισης. Ωστόσο, για να θεωρηθεί μία φόρτιση ως πλήρης θα πρέπει να μελετηθούν προσεκτικά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των κελιών της μπαταρίας καθώς και η μέθοδος φόρτισης που ακολουθείται.

Ένα κελί Ιόντων Λιθίου LiFePO_4 φορτίζεται με τεχνική CC/CV στα 3A/ 3.6 V. Αυτό σημαίνει ότι φορτίζεται με σταθερό ρεύμα 3 Amps και όταν η τάση του φτάσει τα 3.6 V, τότε το ρεύμα αρχίζει να μειώνεται συνεχώς έτσι ώστε να διατηρηθεί η τάση σταθερή στα 3.6V. Η φόρτιση σταματάει όταν το ρεύμα φόρτισης μηδενιστεί .

Επομένως, ο τερματισμός φόρτισης λόγω επίτευξης πλήρους φόρτισης γίνεται με φυσικό τρόπο. Δηλαδή δεν χρειάζεται να επέμβει κάποιος έλεγχος για να σταματήσει η φόρτιση.

Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση του υπό μελέτη φορτιστή, ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας των τεσσάρων κελιών, ανάβουν σταδιακά τα 5 LEDs που βρίσκονται πάνω στην πλακέτα του DS2788K. Όταν η φόρτιση τελειώσει, δηλαδή όταν η μπαταρία φτάσει το επίπεδο πλήρους φόρτισης, τότε ανάβουν και τα πέντε LEDs.

8.3 Τερματισμός φόρτισης λόγω υπερθέρμανσης

8.3.1 Εισαγωγή

Ένας άλλος λόγος για τον οποίο πρέπει να σταματήσει η φόρτιση της μπαταρίας είναι η υπέρβαση των ορίων θερμοκρασίας. Πράγματι, λόγω μηχανικής καταπόνησης ενός κελιού της μπαταρίας, είτε λόγω δυσμενών συνθηκών περιβάλλοντος, υπάρχει περίπτωση να αυξηθεί η θερμοκρασία στο battery pack. Σε αυτήν την περίπτωση, προκειμένου να προστατευτεί η μπαταρία, πρέπει να διακοπεί η φόρτιση.

Το όριο θερμοκρασίας πάνω από το οποίο θα πρέπει να διακόπτεται η φόρτιση προσδιορίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά που δίνει ο κατασκευαστής των κελιών της μπαταρίας. Τα κελιά για τα οποία γίνεται η μελέτη είναι τα ANR26650 της εταιρίας A123 Systems. Όπως φαίνεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά τους (σελ.51), τα θερμοκρασιακά όρια λειτουργίας είναι -30°C έως 60°C . Επομένως στους 65°C θα διακόπτεται η φόρτιση μέσω του ανοίγματος ενός διακόπτη. Ο διακόπτης αυτός θα συνδέεται στον καλώδιο φόρτισης το οποίο συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της μπαταρίας.

Η ανίχνευση της υπέρβασης του ορίου θερμοκρασίας μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Είτε χρησιμοποιώντας ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας, είτε μέσω ενός thermistor σε συνδεσμολογία γέφυρας Wheatstone. Παρακάτω θα αναλυθούν περαιτέρω οι δύο αυτές υλοποιήσεις.

8.3.2 Ανίχνευση υπερθέρμανσης μέσω ολοκληρωμένου κυκλώματος

8.3.2.1 Εισαγωγή

Η ανίχνευση υπερθέρμανσης του battery pack και το άνοιγμα ενός διακόπτη μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα που θα χρησιμοποιηθεί είναι το TMP36 της εταιρίας ANALOG DEVICES.

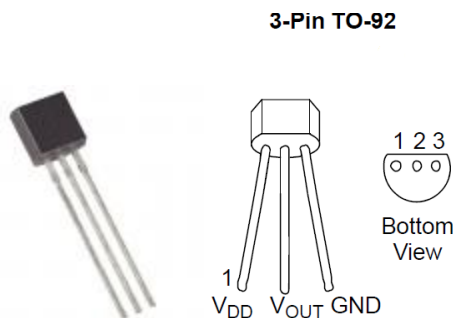
Το πλεονέκτημα της χρήσης αυτού του chip έναντι της χρήσης ενός thermistor είναι ότι η θερμοκρασία μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρικό σήμα. Έτσι, δεν χρειάζεται η χρήση ενός επιπλέον κυκλώματος το οποίο θα μετατρέπει τη μέτρηση θερμοκρασίας σε ηλεκτρικό σήμα. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εξοικονόμηση χώρου ενώ και το κόστος παραμένει σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα.

Το TMP36 έχει ακρίβεια $\pm 2^{\circ}\text{C}$ για εύρος θερμοκρασιών -40 έως 125°C . Επομένως, είναι ιδανικό για την υπό μελέτη εφαρμογή. Επίσης, το συγκεκριμένο chip θα χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τον μικροελεγκτή του φορτιστή.

Για την ακρίβεια, ο μικροελεγκτής Arduino θα δέχεται τις μετρήσεις από το TMP36 και όταν υπάρχει υπερθέρμανση, θα ελέγχει ένα mosfet το οποίο θα λειτουργεί ως διακόπτης. Όταν υπάρχει υπερθέρμανση, η φόρτιση θα διακόπτεται, ενώ όταν η θερμοκρασία πέφτει στα επιτρεπτά όρια, τότε το mosfet θα λειτουργεί σαν κλειστή επαφή και η φόρτιση θα συνεχίζεται.

8.3.2.2 Σύνδεση του TMP36 με τον Μικροελεγκτή

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα που θα χρησιμοποιηθεί φαίνεται στην εικόνα 8.3.2.2.α.



Εικόνα 8.3.2.2.α: TMP36

Η σύνδεση με τον μικροελεγκτή θα γίνει ως εξής:

- Το V_{DD} συνδέεται με το pin 5V που υπάρχει στον Arduino
- Το GND με το pin GND που υπάρχει στον Arduino
- Το Vout με το pin A8 (analog pin)

8.3.2.3 Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή

Προκειμένου το TMP36 να επιτελεί την επιθυμητή λειτουργία, θα πρέπει να γραφεί ο κατάλληλος κώδικας στον Arduino. Για την ακρίβεια, ο κώδικας θα γραφεί στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Arduino και έπειτα θα περαστεί στον μικροελεγκτή.

Ο κώδικας είναι ο ακόλουθος:

```
//Δημιουργός: Κωνσταντίνος Μπούρχας

inttemperaturePin = analogRead(A8); /* ο Μικροελεγκτής διαβάζει το σήμα του TMP36
από το αναλογικό pin A8 το οποίο συνδέεται με το Vout (sense)

η ανάλυση είναι 10 mV / degree centigrade

(500 mV offset) για να υπάρχει ως επιλογή και αρνητικές θερμοκρασίες */

voidsetup()
{
Serial.begin(9600); //Ξεκινάει η σειριακή σύνδεση με τον Η/Υ

pinMode(40,OUTPUT);/* δηλώνω ότι το ψηφιακό pin 40 θα λειτουργεί ως έξοδος */
}

voidloop()          // αρχίζει ο βρόχος επανάληψης
{
floattemperature = getVoltage(temperaturePin); /*λαμβάνεται η τάση από τον αισθητήρα θερμοκρασίας*/
temperature = (temperature - .5) * 100; /*δημιουργώ το offset των 500mV στην ανάλυση έτσι ώστε να έχω και
αρνητικές θερμοκρασίες */

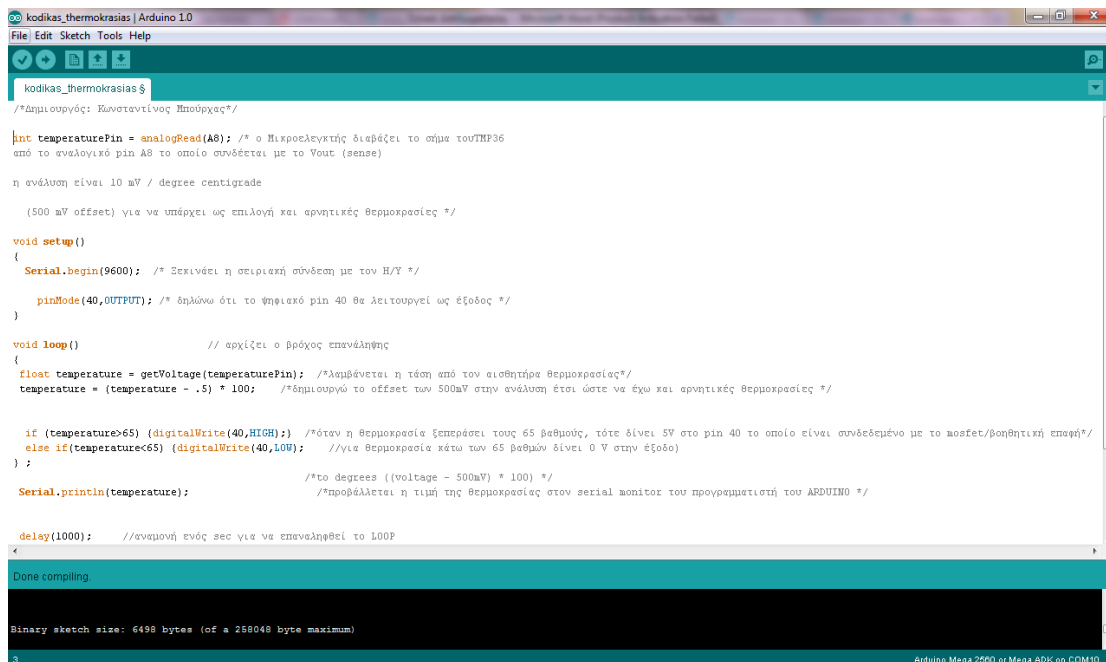
if (temperature>65) {digitalWrite(40,LOW);} /*όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 65 βαθμούς, τότε δίνει 0V
στο pin 40 το οποίο είναι συνδεδεμένο με το mosfet/βοηθητική επαφή*/
elseif(temperature<65) {digitalWrite(40,HIGH); /*για θερμοκρασία κάτω των 65 βαθμών δίνει 5V στην έξοδο
έτσι ώστε να διατηρείται κλειστή η επαφή) */
};

/*to degrees ((voltage - 500mV) * 100) */
Serial.println(temperature); /*προβάλλεται η τιμή της θερμοκρασίας στον serial monitor του
προγραμματιστή του ARDUINO */

delay(1000); //αναμονή ενός sec για να επαναληφθεί το LOOP
}

floatgetVoltage(intpin){
return (analogRead(pin) * .004882814); /*μετατροπή ψηφιακών τιμών0 - 1023σε αναλογικές τιμές 0 έως 5 volts,
δηλαδή ADC*/
}
```

Ο παραπάνω κώδικας μεταγλωττίστηκε επιτυχώς. Στην εικόνα 8.3.2.3.α φαίνεται ο κώδικας όπως περάστηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Arduino (ο κώδικας περιέχεται στο CD με ονομασία “code_thermokrasia”).



```
Arduino IDE | kodikas_thermokrasias | Arduino 1.0
File Edit Sketch Tools Help

kodikas_thermokrasias $
/*Δημιουργός: Κωνσταντίνος Ππούργας*/

int temperaturePin = analogRead(A8); /* ο μικροελεγκτής διαβάζει το σήμα του TMP36
από το αναλογικό pin A8 το οποίο συνδέεται με το Vout (sense)

η ανάλυση είναι 10 mV / degree centigrade

(500 mV offset) για να υπάρχει ως επιλογή και αρνητικές θερμοκρασίες */

void setup ()
{
  Serial.begin(9600); /* ξεκινάει η σειριακή σύνδεση με τον Η/Υ */
  pinMode(40,OUTPUT); /* δηλώνω ότι το ψηφιακό pin 40 θα λειτουργεί ως έξοδος */
}

void loop()
// αρχίζει ο βρόχος επανάληψης
{
  float temperature = getVoltage(temperaturePin); /*λαμβάνεται η τάση από τον αισθητήρα θερμοκρασίας*/
  temperature = (temperature - .5) * 100; /*δημιουργώ το offset των 500mV στην ανάλυση έτσι ώστε να έχω και αρνητικές θερμοκρασίες */

  if (temperature>65) (digitalWrite(40,HIGH)); /*όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 65 βαθμούς, τότε δίνει 5V στο pin 40 το οποίο είναι συνδεδεμένο με το mosfet/βοηθητική επαφή*/
  else if(temperature<65) (digitalWrite(40,LOW)); /*για θερμοκρασία κάτω των 65 βαθμών δίνει 0 V στην έξοδο)
};

Serial.println(temperature); /*to degrees ((voltage - 500mV) * 100) */
/*προβάλλεται η τιμή της θερμοκρασίας στον serial monitor του προγραμματιστή του ARDUINO */

delay(1000); //αναμονή ενός sec για να επαναληφθεί το LOOP

Done compiling.

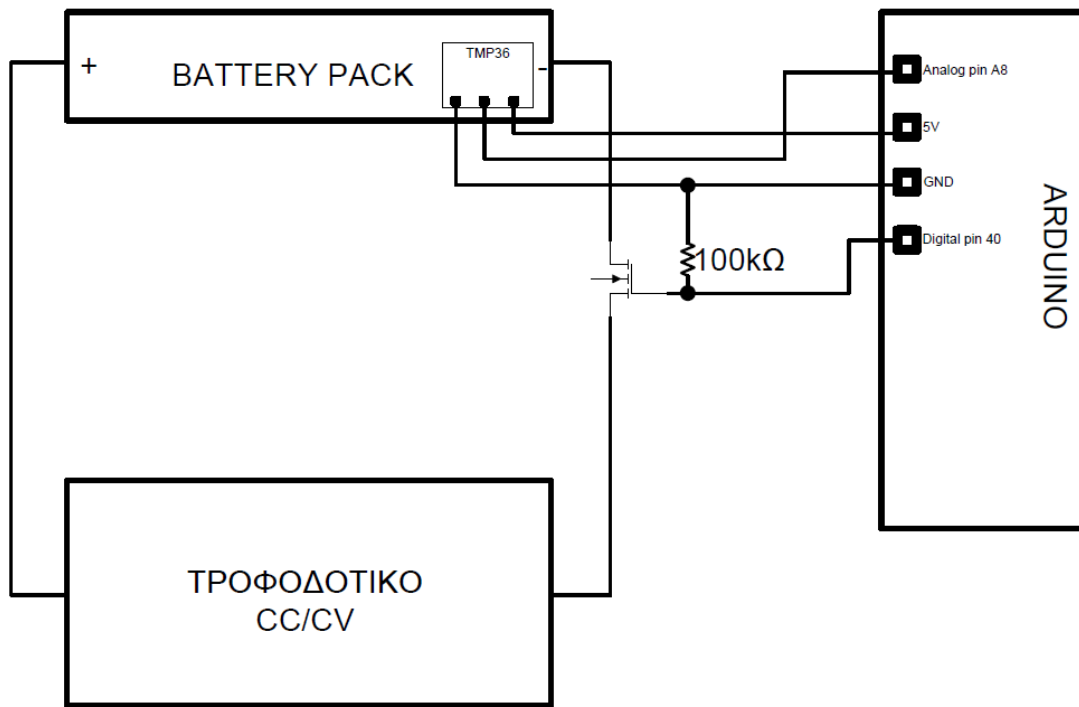
Binary sketch size: 6498 bytes (of a 258048 byte maximum)

Arduino Mega 2560 or Mega ADK on COM10
```

Εικόνα 8.3.2.3.α: Ο κώδικας ελέγχου θερμοκρασίας στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Arduino

8.3.2.4 Συνδεσμολογία διακοπής της φόρτισης

Παραπάνω παρουσιάστηκε η σύνδεση του TMP36 με τον μικροελεγκτή και ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή έτσι ώστε να διακόπτεται η φόρτιση σε περίπτωση υπερθέρμανσης. Στην εικόνα 8.3.2.4.α παρουσιάζεται η σύνδεση του αισθητήρα TMP36 με τον μικροεπεξεργαστή. Επίσης φαίνεται η σύνδεση του N-channel mosfet με το καλώδιο φόρτισης και τον μικροεπεξεργαστή. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται μία ωμική αντίσταση 100kΩ για τη σύνδεση της πύλης με τη γείωση έτσι ώστε το mosfet να λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης όταν δεν του δίνεται κάποια τάση στην πύλη του.



Εικόνα 8.3.2.4.a : Σύνδεση TMP36 με το κύκλωμα φόρτισης

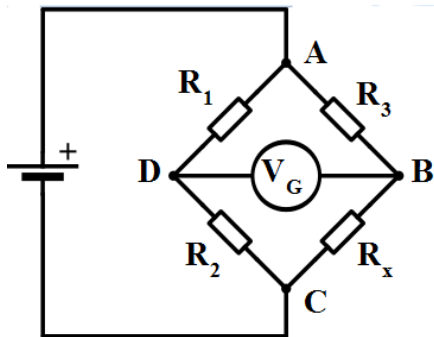
8.3.3 Εναλλακτική μέθοδος ανίχνευσης υπερθέρμανσης

Ένας άλλος τρόπος ανίχνευσης υπερθέρμανσης της μπαταρίας είναι μέσω της χρήσης ενός thermistor. Τα thermistors αποτελούνται από κεραμικά οξειδία μετάλλων, είναι οι πιο μη γραμμικοί αισθητήρες θερμοκρασίας με υψηλή ευαισθησία και σχετικά χαμηλό κόστος.

Υπάρχουν δύο τύποι thermistors. Το NTC (Negative Temperature Coefficient) thermistor και το PTC (Positive Temperature Coefficient) thermistor. Τα του πρώτου τύπου χρησιμοποιούνται σαν αισθητήρες θερμοκρασίας ενώ τα του δεύτερου τύπου χρησιμοποιούνται συνήθως σαν ενεργοποιητές. Με άλλα λόγια, τα thermistors λειτουργούν σαν ωμικές αντιστάσεις η τιμή των οποίων εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία. Στα NTC η τιμή της αντίστασης μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ενώ στα PTC η τιμή της αντίστασής τους αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Ωστόσο, όπως ορίστηκε παραπάνω, η μεταβολή της θερμοκρασίας προκαλεί απλά μία μεταβολή της αντίστασης των thermistors. Για να γίνει αντιληπτή όμως η μεταβολή αυτή από έναν μικροεπεξεργαστή ή από ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει ένα διακοπτικό στοιχείο, θα πρέπει το σήμα που παράγεται από τη μεταβολή αυτή να είναι ηλεκτρικό. Δηλαδή τη μεταβολή της θερμοκρασίας να την ακολουθεί μία μεταβολή τάσης ή ρεύματος.

Προκειμένου να γίνει η μετατροπή αυτή χρησιμοποιείται μία διάταξη που ονομάζεται γέφυρα Wheatstone. Η διάταξη αυτή ουσιαστικά μετατρέπει τη μεταβολή της αντίστασης ενός στοιχείου σε μεταβολή τάσης. Η διάταξη αυτή φαίνεται στην εικόνα 8.3.3.a.



Εικόνα 8.3.3.α: Κυκλωματικό διάγραμμα γέφυρας Wheatstone

Η γέφυρα Wheatstone αποτελείται από δύο διαιρέτες τάσης. Η σχέση που δίνει την έξοδο της V_G συναρτήσει της τάσης εισόδου V_S είναι η ακόλουθη:

$$V_G = \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_S$$

Προφανώς, στη θέση της αντίστασης R_x μπαίνει το thermistor και οι υπόλοιπες τρεις αντιστάσεις έχουν γνωστές τιμές. Μετρώντας την τιμή της αντίστασης του thermistor στους 65°C , ρυθμίζουμε έτσι τις υπόλοιπες αντιστάσεις ώστε για τη συγκεκριμένη τιμή της R_x να υπάρχει στην έξοδο της γέφυρας τέτοια τάση η οποία να είναι ικανή να διεγείρει ένα διακοπτικό στοιχείο, ένα mosfet στη συγκεκριμένη περίπτωση.

8.3.4 Σύνοψη

Στις ενότητες 8.3.2 και 8.3.3 παρουσιάστηκαν δύο τρόποι ανίχνευσης υπερθέρμανσης της μπαταρίας. Για τον υπό μελέτη φορτιστή θα επιλεγεί η χρήση του chip TMP36.

Η μέθοδος ανίχνευσης υπερθέρμανσης μέσω thermistor δεν επιλέχθηκε, καθώς η διάταξη δεν περιλαμβάνει απλά έναν αισθητήρα θερμοκρασίας αλλά και το κύκλωμα μετατροπής της μεταβολής της τιμής της αντίστασης σε μεταβολή τάσης.

Επίσης, ένα ακόμα πλεονέκτημα της χρήσης του ολοκληρωμένου αισθητήρα TMP36 είναι ότι μεταφέρονται όλες οι μετρήσεις θερμοκρασίας στον μικροελεγκτή. Από εκεί και πέρα χρησιμοποιώντας απλά μία οθόνη και γράφοντας κάποιες γραμμές κώδικα, μπορεί ο χρήστης να παρακολουθεί συνεχώς τη θερμοκρασία του battery pack. Αυτή η υλοποίηση θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

8.4 Διακοπή της φόρτισης λόγω υπερφόρτισης

Η μπαταρία είναι είναι πλήρως προστατευμένη από κάποια ενδεχόμενη υπερφόρτιση λόγω του σχεδιασμού του τροφοδοτικού και του κυκλώματος ισοστάθμισης. Πράγματι, το τροφοδοτικό είναι σχεδιασμένο έτσι, ώστε να παρέχει έως 14.4V στη μπαταρία. Από εκεί και πέρα, εάν κάποιο κελί πάει να ξεπεράσει το όριο των 3.6V , τότε το κύκλωμα ισοστάθμισης εντοπίζει αυτή την υπερφόρτιση και παρακάμπτει το κελί. Οι απαραίτητοι έλεγχοι για την τάση του κάθε κελιού πραγματοποιήθηκαν ήδη στον κώδικα της ισοστάθμισης.

Κεφάλαιο 9^ο : Προβολή στοιχείων σε οθόνη LCD και τελικός προγραμματισμός του μικροεπεξεργαστή

9.1 Εισαγωγή

Μία μεγάλη ανάγκη που υπάρχει κατά τη φόρτιση των μπαταριών Ιόντων Λιθίου είναι να υπάρχει κάθε στιγμή επίβλεψη της τάσης του κάθε κελιού και της θερμοκρασίας του battery pack. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται το επίπεδο ασφάλειας, αφού ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παρατηρεί την εξέλιξη της φόρτισης και να επέμβει σε περίπτωση που το κρίνει αναγκαίο.

Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο φορτιστής έχει ήδη τη δυνατότητα να ανάβει διαδοχικά 5 LEDs ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης. Επίσης, συνδέοντας το DS2788K με τον υπολογιστή μπορεί ο χρήστης να δει γραφικά την εξέλιξη της φόρτισης και του State of Charge της μπαταρίας.

Παρακάτω θα παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο θα προβάλλεται σε μία οθόνη LCD η τάση του κάθε κελιού και η θερμοκρασία του battery pack.

9.2 Σύνδεση της οθόνης με τον μικροελεγκτή

Ως οθόνη θα χρησιμοποιηθεί κάποια η οποία είναι συμβατή με τον driver Hitachi HD44780. Ουσιαστικά πρόκειται για τις οθόνες LCD οι οποίες έχουν διασύνδεση με 16 pins. Μία τέτοια οθόνη αποτελείται από τα ακόλουθα pins:

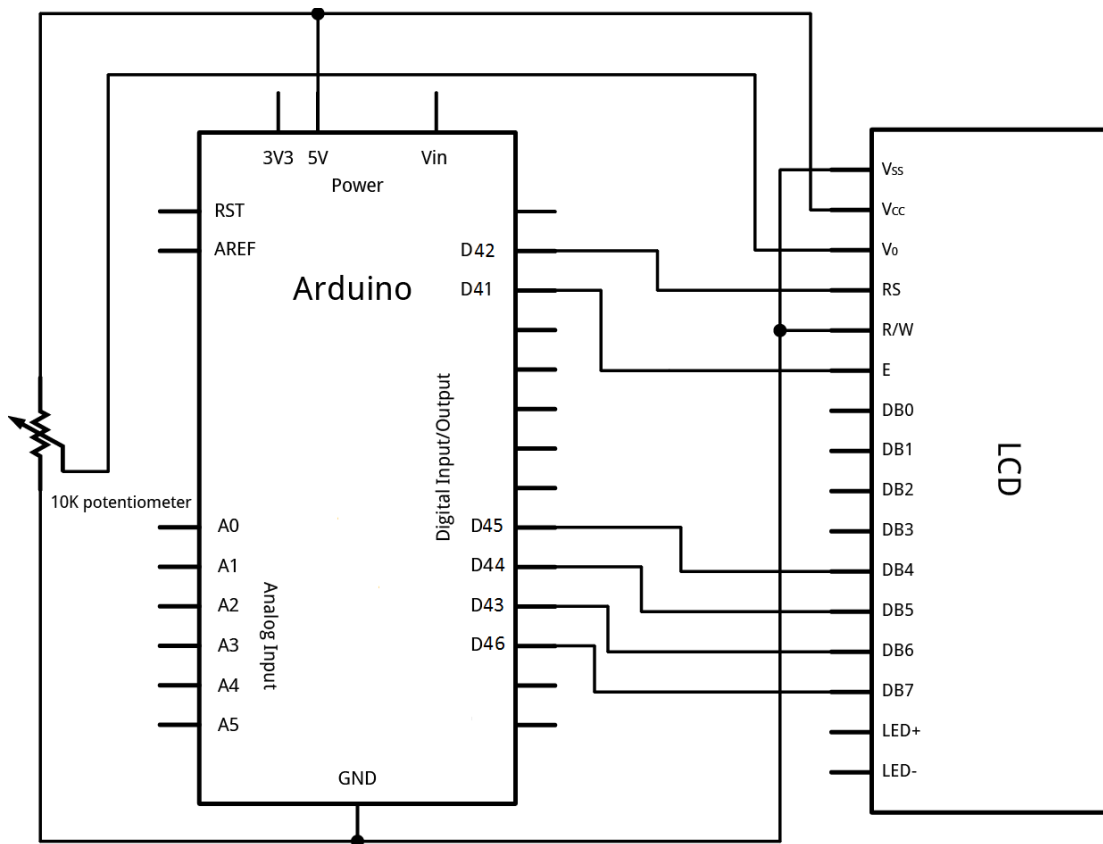
- Register select (RS) pin: Ελέγχουν σε ποιες θέσεις μνήμης γράφονται τα διάφορα δεδομένα.
- Read/Write (R/W) pin: Μέσω των οποίων γίνεται επιλογή ανάμεσα σε Reading ή Writing mode.
- Enable pin: Μέσω του οποίου επιτρέπεται το γράψιμο σε καταχωρητές.
- 8 data pins (D0 -D7): Οι καταστάσεις αυτών των pins (High ή Low) είναι τα bits τα οποία γράφονται σε έναν καταχωρητή ή διαβάζονται από τον μικροελεγκτή.
- Display contrast pin(V_o): Μέσω του οποίου ελέγχεται η αντίθεση της οθόνης.
- Power supply pins (+5V and Gnd): Μέσω των οποίων γίνεται η τροφοδοσία της οθόνης.
- LED Backlight (Bklt+ and Bklt-)pins: Μέσω των οποίων μπορεί να ανοιγοκλείσει το φως της οθόνης.

Η σύνδεση της οθόνης με τον μικροελεγκτή Arduino έχει ως εξής:

- LCD RS pin στο digital pin 42
- LCD Enable pin στο digital pin 41
- LCD D4 pin στο digital pin 45
- LCD D5 pin στο digital pin 44

- LCD D6 pin στο digital pin 43
- LCD D7 pin στο digital pin 46

Στην εικόνα 9.2.α φαίνεται η συνδεσμολογία της οθόνης με τον Arduino.



Εικόνα 9.2.α: Σύνδεση οθόνης LCD με τον ArduinoMega

9.3 Προγραμματισμός του μικροελεγκτή

Αφού συνδέθηκε η οθόνη με τον μικροελεγκτή, μένει να γραφεί ο κατάλληλος κώδικας έτσι ώστε να παρουσιάζονται τα επιθυμητά δεδομένα πάνω στην οθόνη.

Στην ενότητα 6.7.2 υπάρχει ο κώδικας της ισοστάθμισης των κελιών. Στον κώδικα αυτόν, οι μεταβλητές V1, V2, V3 και V4 περιέχουν την τιμή της τάσης του κάθε κελιού εκφρασμένη σε Volts.

Επίσης, στην ενότητα 8.3.2.3 υπάρχει ο κώδικας της ανίχνευσης υπερθέρμανσης. Σε αυτόν τον κώδικα η μεταβλητή temperature περιέχει την τιμή της θερμοκρασίας του battery pack εκφρασμένη σε βαθμούς Κελσίου.

Ακολουθεί ο κώδικας που γράφεται στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Arduino προκειμένου να προβάλλονται στην οθόνη τα παραπάνω αποτελέσματα. Εδώ να τονιστεί ότι ο κώδικας αυτός δεν μπορεί να σταθεί μόνος του αφού υπάρχουν σε αυτόν οι μεταβλητές V1, V2, V3, V4, temperature οι οποίες έχουν δηλωθεί σε κομμάτια κώδικα που υπάρχουν σε προηγούμενες ενότητες. Εδώ θα παρουσιαστεί το κομμάτι κώδικα που αφορά την παρουσίαση αποτελεσμάτων στην οθόνη LCD και στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ο τελικός κώδικας που θα περαστεί στον μικροεπεξεργαστή. Σε εκείνη τη φάση θα γίνει και η μεταγλώττιση του κώδικα.

```
/* Προβολή τάσης κελιών και θερμοκρασίας battery pack σε οθόνη LCD

Δημιουργός: Κωνσταντίνος Μπούρχας */

// include the library code:
#include<LiquidCrystal.h> /*εδώ περιλαμβάνουμε στον κώδικα τη βιβλιοθήκη για την οθόνη LCD */

LiquidCrystal lcd(42, 41, 45,44, 43, 46); /*Αρχικοποιούμε την οθόνη με τον αριθμό των pins διεπαφής */

void setup() {

  lcd.begin(16, 2); /* δηλώνουμε το πλήθος των στηλών και γραμμών της οθόνης LCD */
}

void loop() /* εδώ αρχίζει το Loop */

lcd.clear(); /*καθαρίζει την οθόνη από προηγούμενα αποτελέσματα έτσι ώστε να γράψει τα νέα αποτελέσματα
*/
lcd.setCursor(0,0); /*δηλώνουμε ουσιαστικά ότι αυτό που θα γράψουμε θα παρουσιαστεί στην πρώτη γραμμή
της οθόνης και θα ξεκινάει από την πρώτη στήλη */
lcd.print("Cell1 Voltage=");/*αυτό που θα γραφτεί στην πρώτη γραμμή της οθόνης είναι «Cell1 Voltage=» */
lcd.setCursor(0,1); /*δηλώνουμε ουσιαστικά ότι αυτό που θα γράψουμε θα παρουσιαστεί στη δεύτερη γραμμή
της οθόνης και θα ξεκινάει από την πρώτη στήλη */
lcd.print(V1); /*αυτό που θα γραφτεί στην πρώτη γραμμή της οθόνης είναι η τιμή της τάσης του κελιού 1,
δηλαδή θα εμφανιστεί η τιμή της τάσης της μεταβλητής V1 */
delay(5000);/*το παραπάνω αποτέλεσμα εμφανίζεται για 5 δευτερόλεπτα και έπειτα παρουσιάζεται το επόμενο
αποτέλεσμα */

/*η εμφάνιση των τιμών των τάσεων των άλλων τριών κελιών ακολουθεί την ίδια λογική γι αυτό και δεν θα
γραφούν σχόλια */

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Cell2 Voltage=");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(V2);
delay(5000);

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
```

```

lcd.print("Cell3 Voltage=");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(V3);
delay(5000);

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Cell4 Voltage=");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(V4);
delay(5000);

/* τέλος, θα εμφανίζεται η θερμοκρασία του battery pack εκείνη τη στιγμή */

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Battery Temp=");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(temperature);
delay(5000);

}

```

9.4 Τελικός προγραμματισμός μικροεπεξεργαστή

Στην ενότητα 6.7.2 παρουσιάστηκε ο κώδικας ισοστάθμισης, στην ενότητα 8.3.2.3 ο κώδικας ανίχνευσης υπερθέρμανσης και στην ενότητα 9.2 παρουσιάστηκε ο κώδικας προβολής των αποτελεσμάτων σε οθόνη LCD.

Στην παρούσα ενότητα θα ενωθούν όλα τα παραπάνω προγράμματα σε ένα. Το τελικό αυτό πρόγραμμα θα περαστεί στον μικροελεγκτή Arduino κι έτσι θα επιτελούνται μαζί οι λειτουργίες της ισοστάθμισης, της ανίχνευσης υπερθέρμανσης και διακοπής φόρτισης και τέλος της προβολής των αποτελεσμάτων σε μία οθόνη LCD.

Επομένως, ο τελικός κώδικας που θα περαστεί στον μικροεπεξεργαστή του ARDUINO είναι ο παρακάτω.

```

/* Διπλωματική: Σχεδίαση φορτιστή μπαταριών LiFePO4
Τελικός κώδικας μικροεπεξεργαστή
Δημιουργός: Κωνσταντίνος Μπούρχας */

/* τα MOSFET που συνδέουν το κάθε κελί με την αντίσταση ισοστάθμισης συνδέονται με μία ψηφιακή θύρα */
int MOS1=31; /* καθορισμός θύρας στην οποία συνδέεται η πύλη του MOSFET που συνδέει την αντίσταση με
το κελί 1 . Η ψηφιακή αυτή θύρα ελέγχει και την αγωγή του MOSFET*/

```



```

int MOS2=32; /* ομοίως για το MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 2 */
int MOS3=33; /* ομοίως για το MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 3 */
int MOS4=34; /* ομοίως για το MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 4 */

int temperaturePin = 8; /* ο Μικροελεγκτής διαβάζει το σήμα τουTMP36
από το αναλογικό pin A8 το οποίο συνδέεται με το Vout (sense)

η ανάλυση είναι 10 mV / degree centigrade

(500 mV offset) για να υπάρχει ως επιλογή και αρνητικές θερμοκρασίες */
#include <LiquidCrystal.h> /*εδώ περιλαμβάνουμε στον κώδικα τη βιβλιοθήκη για την οθόνη LCD */

LiquidCrystal lcd(42, 41, 45, 44, 43, 46); /*Αρχικοποιούμε την οθόνη με τον αριθμό των pins διεπαφής */

void setup() {
pinMode(MOS1, OUTPUT); /*η θύρα MOS1 δηλώνεται ως έξοδος, αφού ανάλογα με τις συνθήκες θα παίρνει την
τιμή 0 ή 5 V ανοιγοκλείνοντας έτσι το MOSFET */
pinMode(MOS2, OUTPUT); /*ομοίως για τη θύρα MOS2 */
pinMode(MOS3, OUTPUT); /* ομοίως για τη θύρα MOS3 */
pinMode(MOS4, OUTPUT); /* ομοίως για τη θύρα MOS4 */
pinMode(40,OUTPUT); /*δηλώνω ότι το ψηφιακό pin 40 θα λειτουργεί ως έξοδος */

Serial.begin(9600);
lcd.begin(16, 2); /* δηλώνουμε το πλήθος των στηλών και γραμμών της οθόνης LCD */

}

void loop()           // αρχίζει ο βρόχος επανάληψης

{
// μέτρηση της τάσης του κάθε κελιού
/* Στην αναλογική θύρα A1 συνδέεται η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή που συνδέεται με το κελί 1 και δείχνει
την τάση του κελιού 1 με αναφορά το 0.
Ομοίως για τις θύρες A2,A3,A4
*/
int sensor_V1=analogRead(A1); //διαβάζει την τάση στη αναλογική θύρα A1
int sensor_V2=analogRead(A2); //διαβάζει την τάση στη αναλογική θύρα A2
int sensor_V3=analogRead(A3); //διαβάζει την τάση στη αναλογική θύρα A3
int sensor_V4=analogRead(A4); //διαβάζει την τάση στη αναλογική θύρα A4

float V1=sensor_V1 * (5.0/1023.0); /*μετατρέπει την αναλογική τιμή που διαβάζει (η οποία κυμαίνεται από 0-
1023) σε τιμή τάσης (0-5V) */
float V2=sensor_V2 * (5.0/1023.0);
float V3=sensor_V3 * (5.0/1023.0);
float V4=sensor_V4 * (5.0/1023.0);

/* Αν τα κελιά είναι μέσα στα ασφαλή όρια τάσης (2.3V-3.6V), τότε λαμβάνει χώρα η ισοστάθμιση.
Όποιο κελί βρίσκεται με την μεγαλύτερη τάση, τότε αυτό εκφορτίζεται ή φορτίζεται πιο αργά έως ότου φτάσουν
το επίπεδο τάσης του τα υπόλοιπα κελιά. Αυτή διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς με όποιο κελί έχει κάθε

```

στιγμή τη μεγαλύτερη τάση. Με αυτόν τον τρόπο, τα κελιά θα φτάσουν όλα μαζί την τάση των 3.6V(για την ακρίβεια θα ξεπεράσουν την τάση των 3.595V) και από εκεί και πέρα θα σταματήσει η ισοστάθμιση αφού το battery pack θα φορτιστεί με σταθερή τάση */

```
if (V1>2.3 && V2>2.3 && V3>2.3 && V4>2.3 && V1<3.595 && V2<3.595 && V3<3.595 && V4<3.595) {
float high_cell=V1; // το κελί 1 αρχικοποιείται ως το κελί με τη μεγαλύτερη τάση
int flag= MOS1; /* αρχικοποιείται η θύρα που συνδέεται με το κελί 1 ως η θύρα που συνδέεται με το κελί με την
υψηλότερη τάση */

    if (V2 > high_cell) {
        high_cell=V2; /* αν η τάση του κελιού 2 ξεπερνά την τάση high_cell, τότε η μεταβλητή high_cell
παίρνει την τιμή της τάσης του κελιού 2 */
        flag=MOS2; /*η θύρα που θα δώσει 5V ορίζεται ως η θύρα που συνδέεται με το MOSFET που
συνδέει την αντίσταση ισοστάθμισης στο κελί 2 */
    }
    if (V3 > high_cell) {
        high_cell=V3; /* αν η τάση του κελιού 3 ξεπερνά την τάση high_cell, τότε η μεταβλητή high_cell
παίρνει την τιμή της τάσης του κελιού 3 */
        flag=MOS3; /*η θύρα που θα δώσει 5V ορίζεται ως η θύρα που συνδέεται με το MOSFET που
συνδέει την αντίσταση ισοστάθμισης στο κελί 3 */
    }
    if (V4 > high_cell) {
        high_cell=V4; /* αν η τάση του κελιού 4 ξεπερνά την τάση high_cell, τότε η μεταβλητή high_cell
παίρνει την τιμή της τάσης του κελιού 4 */
        flag=MOS4; /*η θύρα που θα δώσει 5V ορίζεται ως η θύρα που συνδέεται με το MOSFET που
συνδέει την αντίσταση ισοστάθμισης στο κελί 4 */
    }

digitalWrite(flag,HIGH); /* δίνονται 5V στη θύρα που συνδέεται με το MOSFET, το οποίο συνδέει την αντίσταση
ισοστάθμισης με το κελί που έχει τη μεγαλύτερη τάση */
}

/* αν η τάση έστω και ενός κελιού είναι κάτω από 2.3V και η τάση των υπολοίπων είναι κάτω από 3.6V, τότε
διακόπτεται η ισοστάθμιση και φορτίζονται όλα τα κελιά με σταθερό ρεύμα. Αυτό γίνεται με σκοπό να
κρατιούνται οι τάσεις των κελιών στο ασφαλές όριο άνω των 2.3V */
else if ((V1<2.3 || V2<2.3 || V3<2.3 || V4<2.3) && (V1<3.6 && V2<3.6 && V3<3.6 && V4<3.6)) {
digitalWrite(MOS1,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 1
digitalWrite(MOS2,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 2
digitalWrite(MOS3,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 3
digitalWrite(MOS4,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 4
}

/* όταν η τάση και των τεσσάρων κελιών φτάσει τα 3.595V, τότε σταματάει η διαδικασία της ισοστάθμισης
καθώς τότε το battery pack φορτίζεται με σύστημα σταθερής τάσης. Δεν τέθηκε σαν συνθήκη να είναι ίση η τάση
με 3.6V διότι υπάρχει περίπτωση να μην φτάσουν τα κελιά ταυτόχρονα στην τάση των 3.6V. Ωστόσο αν
ξεπεράσουν όλα μαζί την τάση των 3.595V, τότε σημαίνει ότι έχουν ισοσταθμιστεί επαρκώς και οποιαδήποτε
ανισοροπία από εκεί και πέρα δεν επηρεάζει τα κελιά αφού στη χειρότερη περίπτωση θα έχουν τρία κελιά τάση
3.596V και ένα κελί τάση 3.612, κάτι το οποίο είναι αποδεκτό */
else if (V1>3.595 && V2>3.595 && V3>3.595 && V4>3.595) {
```

```

digitalWrite(MOS1,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 1
digitalWrite(MOS2,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 2
digitalWrite(MOS3,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 3
digitalWrite(MOS4,LOW); // αποσυνδέει την αντίσταση από το κελί 4
}

float temperature = getVoltage(temperaturePin); /*λαμβάνεται η τάση από τον αισθητήρα θερμοκρασίας*/
temperature = (temperature - .5) * 100; /*δημιουργώ το offset των 500mV στην ανάλυση έτσι ώστε να έχω και
αρνητικές θερμοκρασίες */

if (temperature>65) {digitalWrite(40,LOW);} /*όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 65 βαθμούς, τότε δίνει 5V
στο pin 40 το οποίο είναι συνδεδεμένο με το mosfet*/
else if(temperature<65) {digitalWrite(40,LOW); /*για θερμοκρασία κάτω των 65 βαθμών δίνει 0 V στην
έξοδο)*/
};

/*to degrees ((voltage - 500mV) * 100) */
Serial.println(temperature); /*προβάλλεται η τιμή της θερμοκρασίας στον serial monitor του
προγραμματιστή του ARDUINO */

Icd.setCursor(0, 0); /*δηλώνουμε ουσιαστικά ότι αυτό που θα γράψουμε θα παρουσιαστεί στην πρώτη γραμμή
της οθόνης και θα ξεκινάει από την πρώτη στήλη */
Icd.print("Cell1 Voltage="); /*αυτό που θα γραφτεί στην πρώτη γραμμή της οθόνης είναι «Cell1 Voltage=» */
Icd.setCursor(0, 1); /*δηλώνουμε ουσιαστικά ότι αυτό που θα γράψουμε θα παρουσιαστεί στη δεύτερη γραμμή
της οθόνης και θα ξεκινάει από την πρώτη στήλη */
Icd.print(V1,DEC); /*αυτό που θα γραφτεί στην πρώτη γραμμή της οθόνης είναι η τιμή της τάσης του κελιού 1,
δηλαδή θα εμφανιστεί η τιμή της τάσης της μεταβλητής V1 */
delay(5000); /*το παραπάνω αποτέλεσμα εμφανίζεται για 5 δευτερόλεπτα και έπειτα παρουσιάζεται το επόμενο
αποτέλεσμα */

/*η εμφάνιση των τιμών των τάσεων των άλλων τριών κελιών ακολουθεί την ίδια λογική γι αυτό και δεν θα
γραφούν σχόλια */

Icd.clear();
Icd.setCursor(0, 0);
Icd.print("Cell2 Voltage=");
Icd.setCursor(0, 1);
Icd.print(V2,DEC);
delay(5000);

Icd.clear();
Icd.setCursor(0, 0);
Icd.print("Cell3 Voltage=");
Icd.setCursor(0, 1);
Icd.print(V3,DEC);
delay(5000);

Icd.clear();
Icd.setCursor(0, 0);

```

```

lcd.print("Cell4 Voltage=");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(V4,DEC);
delay(5000);

/* τέλος, θα εμφανίζεται η θερμοκρασία του battery pack εκείνη τη στιγμή */

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Battery Temp=");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(temperature,DEC);
delay(5000);
lcd.clear();

}

float getVoltage(int pin){
return (analogRead(pin) * .004882814); /*μετατροπή ψηφιακών τιμών 0 - 1023 */
}

```

Ο παραπάνω κώδικας περάστηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του ARDUINO και μεταγλωττίστηκε επιτυχώς. Στην εικόνα 9.4.α φαίνεται ένα στιγμιότυπο από το προγραμματιστικό περιβάλλον του ARDUINO αφού έχει μεταγλωττίσει τον παραπάνω κώδικα.

```
diplomatiki_final_code | Arduino 1.0
File Edit Sketch Tools Help

diplomatiki_final_code
/* Διπλωματική: Σχεδίαση φορτιστή μπαταριών LiFeP04
Τελικός κώδικας μικροεπεξεργαστή
Δημιουργός: Κωνσταντίνος Μπούργας */

/* το MOSFET που συνδέουν το κάθε κελί με την αντίσταση ισοστάθμισης συνδέονται με μία ψηφιακή θύρα */
int MOS1=31; /* καθορισμός θύρας στην οποία συνδέεται η πύλη του MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 1 . Η ψηφιακή αυτή θύρα ελέγχει και την αγωγή του MOSFET*/
int MOS2=32; /* ομοίως για το MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 2 */
int MOS3=33; /* ομοίως για το MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 3 */
int MOS4=34; /* ομοίως για το MOSFET που συνδέει την αντίσταση με το κελί 4 */

int temperaturePin = 8; /* ο Μικροελεγκτής διαβάζει το σήμα τουTMP36
από το αναλογικό pin A8 το οποίο συνδέεται με το Vout (sense)

η ανάγνωση είναι 10 mV / degree centigrade

(500 mV offset) για να υπάρχει ως επιλογή και αρνητικές θερμοκρασίες */
#include <LiquidCrystal.h> /*εδώ περιλαμβάνουμε στον κώδικα τη βιβλιοθήκη για την οθόνη LCD */

LiquidCrystal lcd(42, 41, 45, 44, 43, 46); /*Αρχικοποιούμε την οθόνη με τον αριθμό των pins διεπαφής */

void setup() {
pinMode(MOS1, OUTPUT); /*η θύρα MOS1 δηλώνεται ως έξοδος, αφού ανάλογα με τις συνθήκες θα παίρνει την τιμή 0 ή 5 V ανοιγοκλείνοντας έτσι το MOSFET */
pinMode(MOS2, OUTPUT); /*ομοίως για τη θύρα MOS2 */
pinMode(MOS3, OUTPUT); /* ομοίως για τη θύρα MOS3 */
pinMode(MOS4, OUTPUT); /* ομοίως για τη θύρα MOS4 */
pinMode(40,OUTPUT); /*δηλώνω ότι το ψηφιακό pin 40 θα λειτουργεί ως έξοδος */

}

Done compiling.

Binary sketch size: 8988 bytes (of a 258048 byte maximum)

7 Arduino Mega 2560 or Mega ADK on COM10
```

Εικόνα 9.4.α: Ο τελικός κώδικας μεταγλωττισμένος στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Arduino

Ο τελικός κώδικας του μικροεπεξεργαστή υπάρχει στο CD που συνοδεύει τη διπλωματική (όνομα αρχείου: diplomatiki_final_code).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο : Παρουσίαση Τελικού Κυκλώματος του Φορτιστή Μπαταριών LiFePO_4

10.1 Εισαγωγή

Στο Β' μέρος της διπλωματικής παρουσιάστηκε ξεχωριστά το κάθε υποσύστημα του φορτιστή μπαταριών Ιόντων Λιθίου με υλικό καθόδου το LiFePO_4 . Για την ακρίβεια:

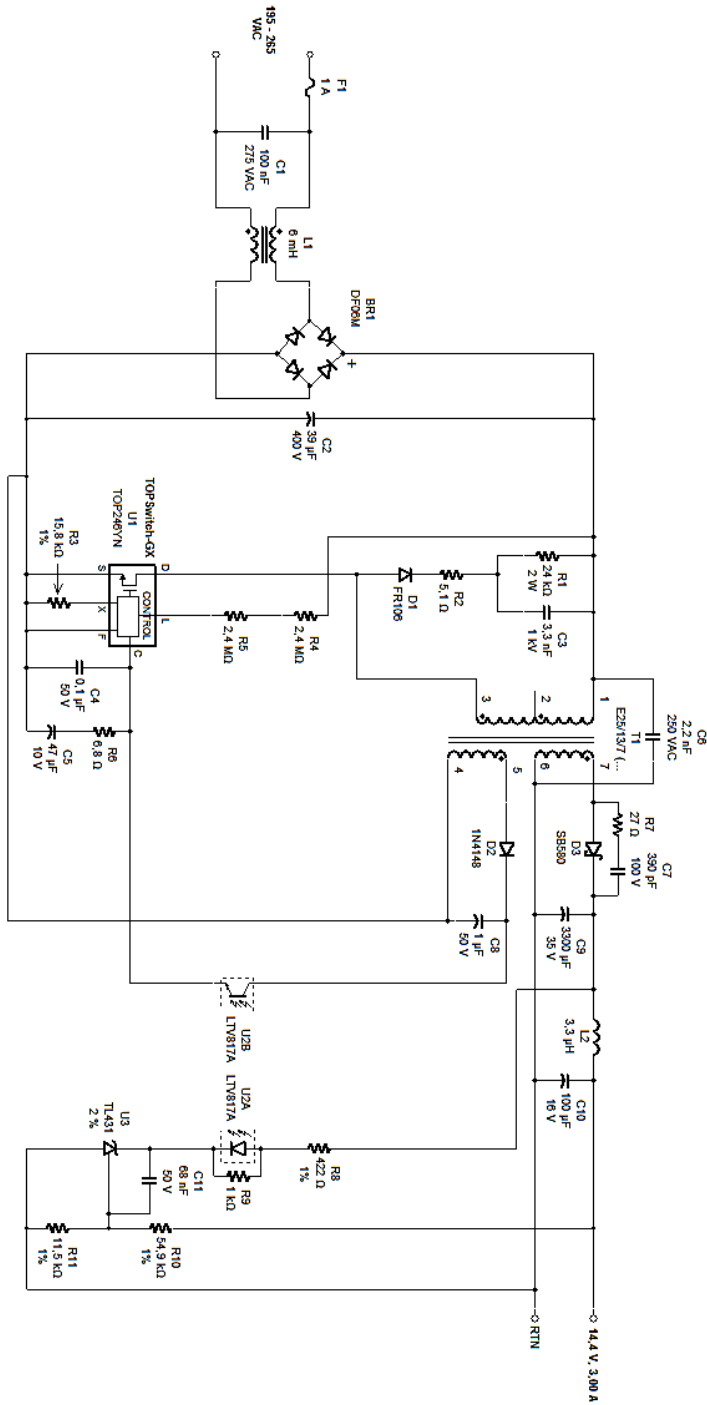
- 4^ο Κεφάλαιο: Πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση του τροφοδοτικού του φορτιστή. Πιο συγκεκριμένα ένα τροφοδοτικό CC/CV 3Amps/3.6Volts.
- 5^ο Κεφάλαιο: Έγινε η σχεδίαση του κυκλώματος απομόνωσης της τάσης του κάθε κελιού του battery pack, έτσι ώστε να μπορεί να περαστεί χωρίς πρόβλημα στον μικροελεγκτή.
- 6^ο Κεφάλαιο: Σχεδιάστηκε το κύκλωμα ισοστάθμισης της τάσης των κελιών.
- 7^ο Κεφάλαιο: Παρουσιάστηκε το κύκλωμα υπολογισμού του State of Charge της μπαταρίας.
- 8^ο Κεφάλαιο: Μελετήθηκαν οι τρόποι διακοπής της φόρτισης και αναλύθηκε διεξοδικά η ανίχνευση υπερθέρμανσης στο battery pack.
- 9^ο Κεφάλαιο: Μελετήθηκε ο τρόπος προβολής κάποιων αποτελεσμάτων σε οθόνη LCD και γράφτηκε το τελικός κώδικας που θα περάσει στον μικροεπεξεργαστή.

Επομένως, μελετήθηκαν και σχεδιάστηκαν όλα τα υποσυστήματα του φορτιστή μπαταριών LiFePO_4 . Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία σύνοψη έτσι ώστε να αναδειχτεί ο φορτιστής ως μία ενιαία συσκευή.

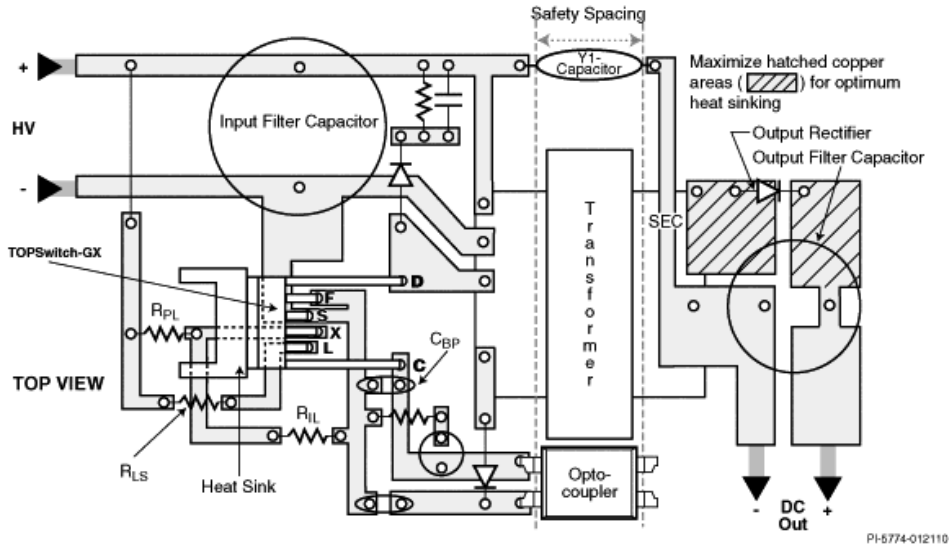
Παρακάτω γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση όλων των υποσυστημάτων του φορτιστή.

1) ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ CC/CV

Κυκλωματικό διάγραμμα

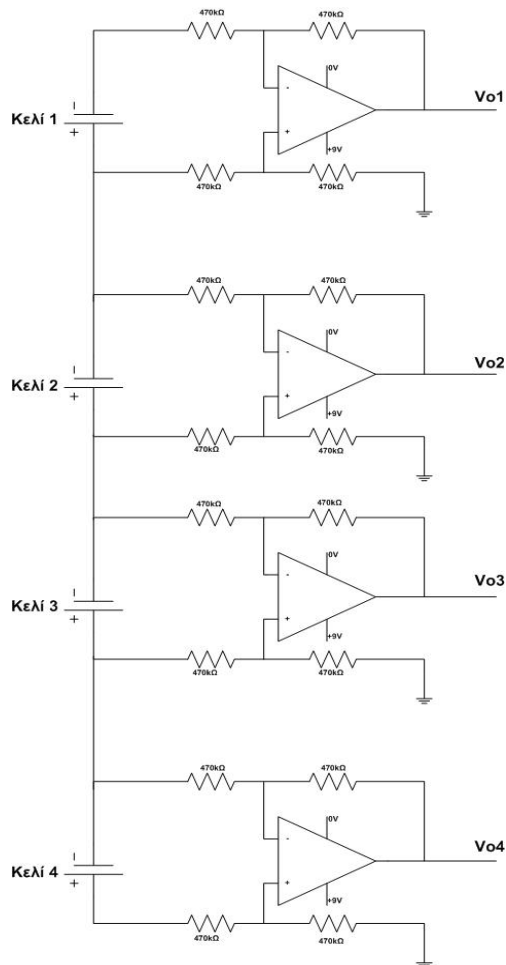


Σχέδιο πλακέτας

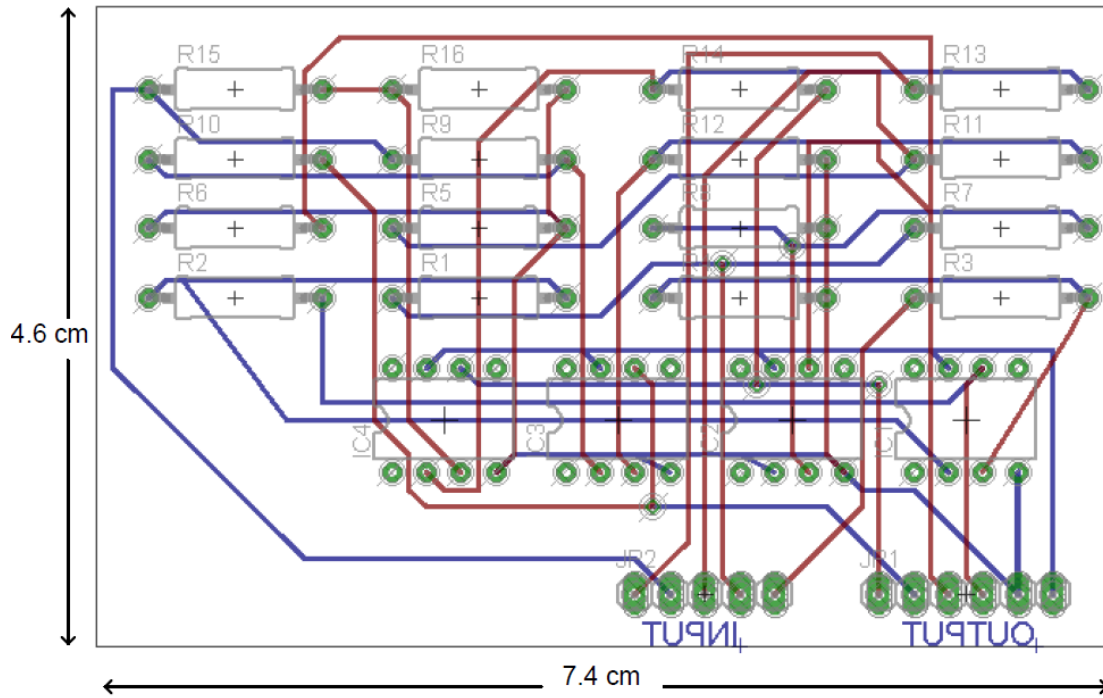


2) ΑΠΟΜΟΝΩΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΚΕΛΙΟΥ

Κυκλωματικό διάγραμμα

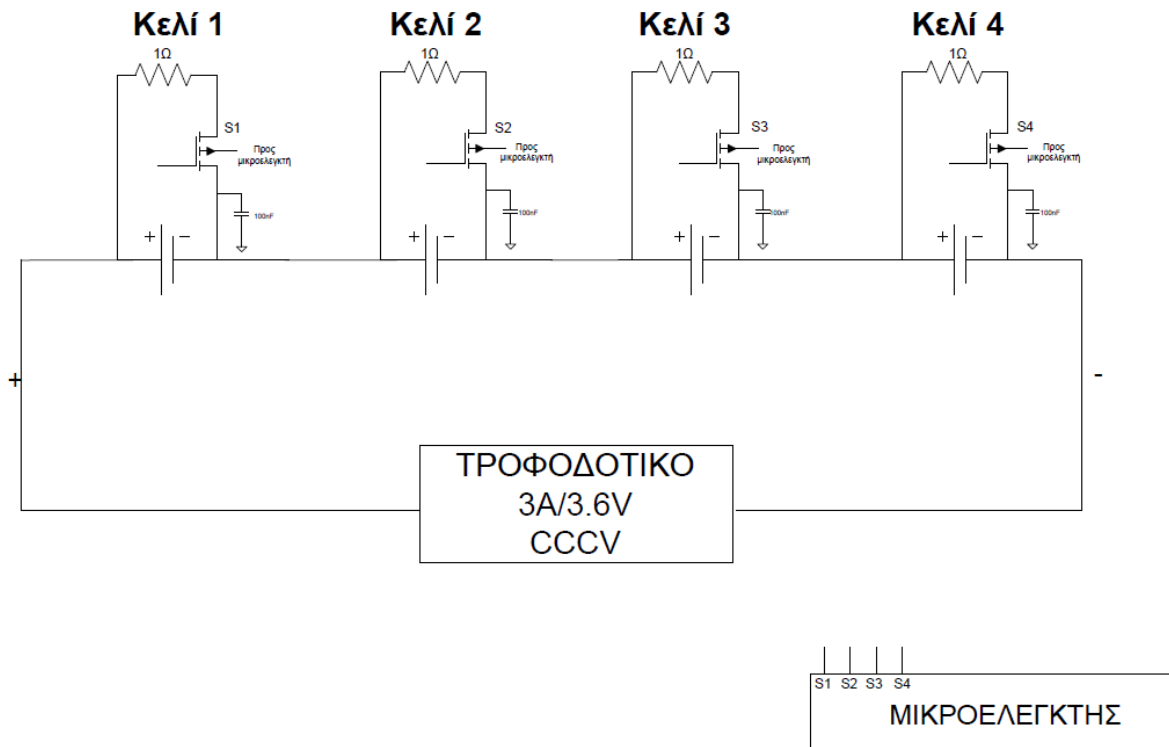


Σχέδιο πλακέτας

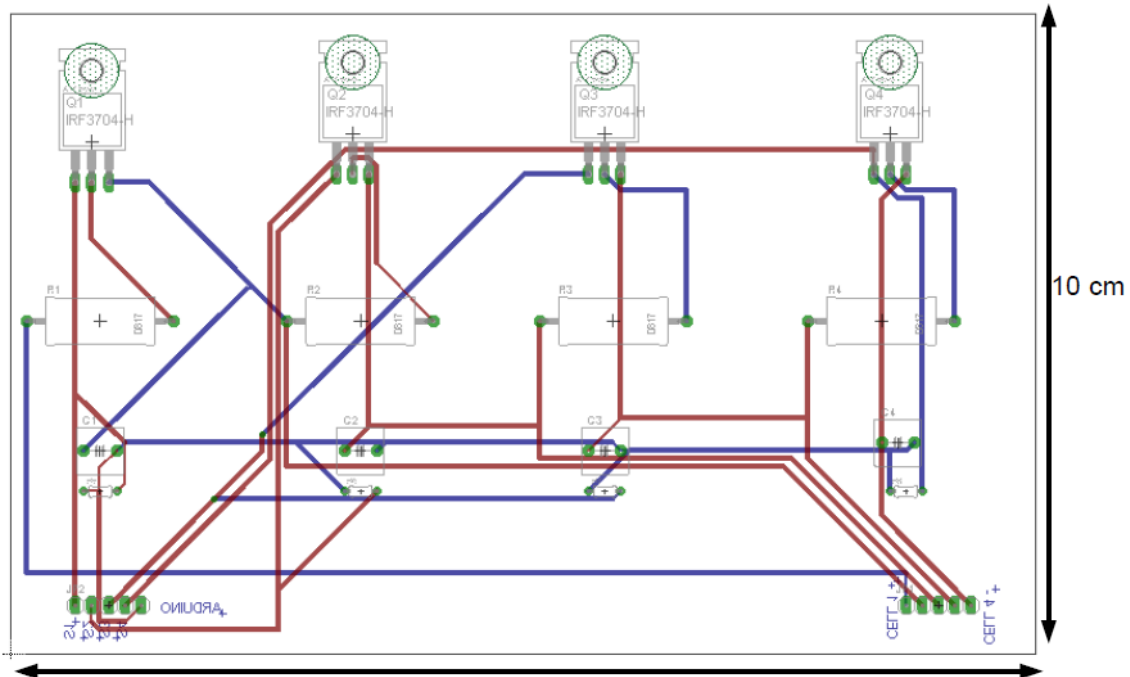


3) ΚΥΚΛΩΜΑ ΙΣΟΣΤΑΘΜΙΣΗΣ

Κυκλωματικό διάγραμμα

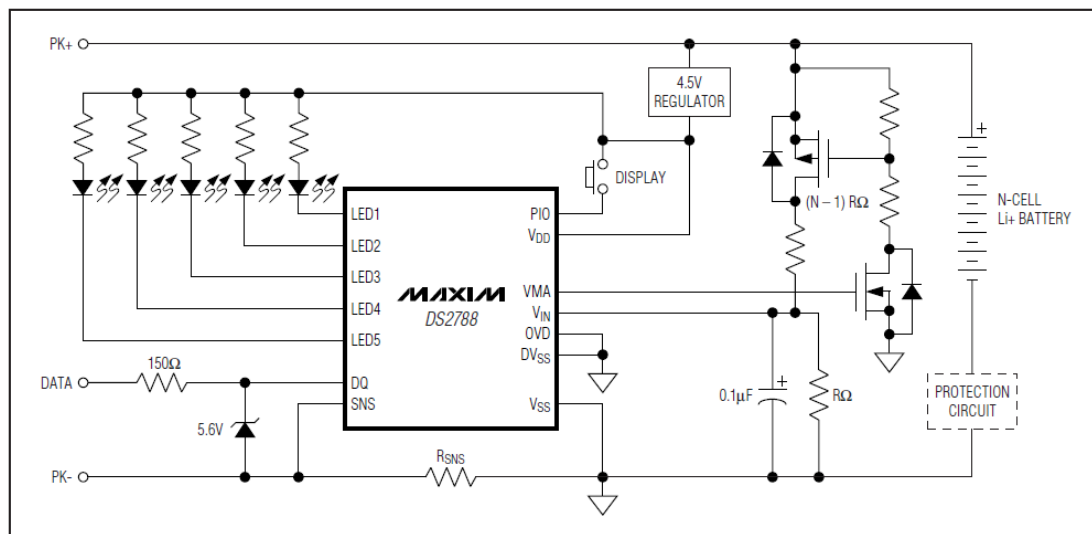


Σχέδιο πλακέτας

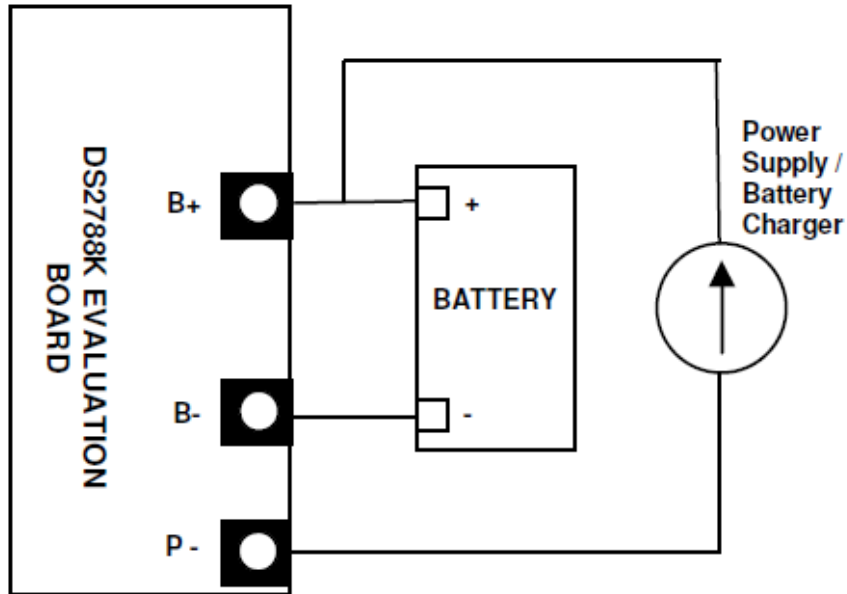


4) ΚΥΚΛΩΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ SOC

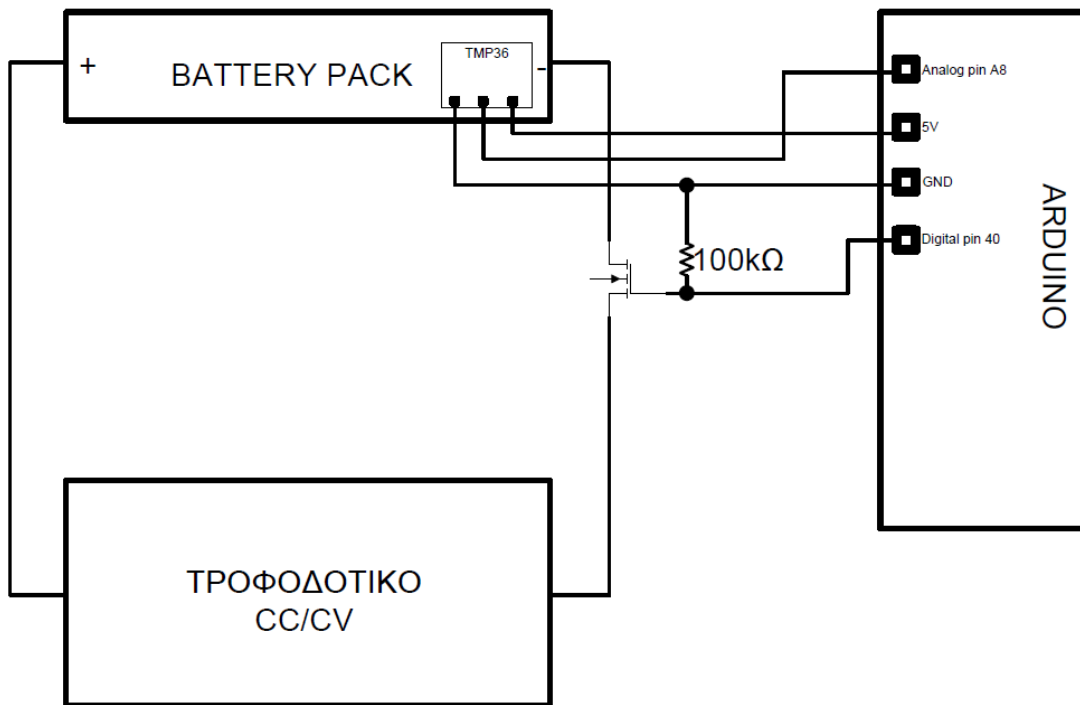
Λειτουργικό διάγραμμα DS2788



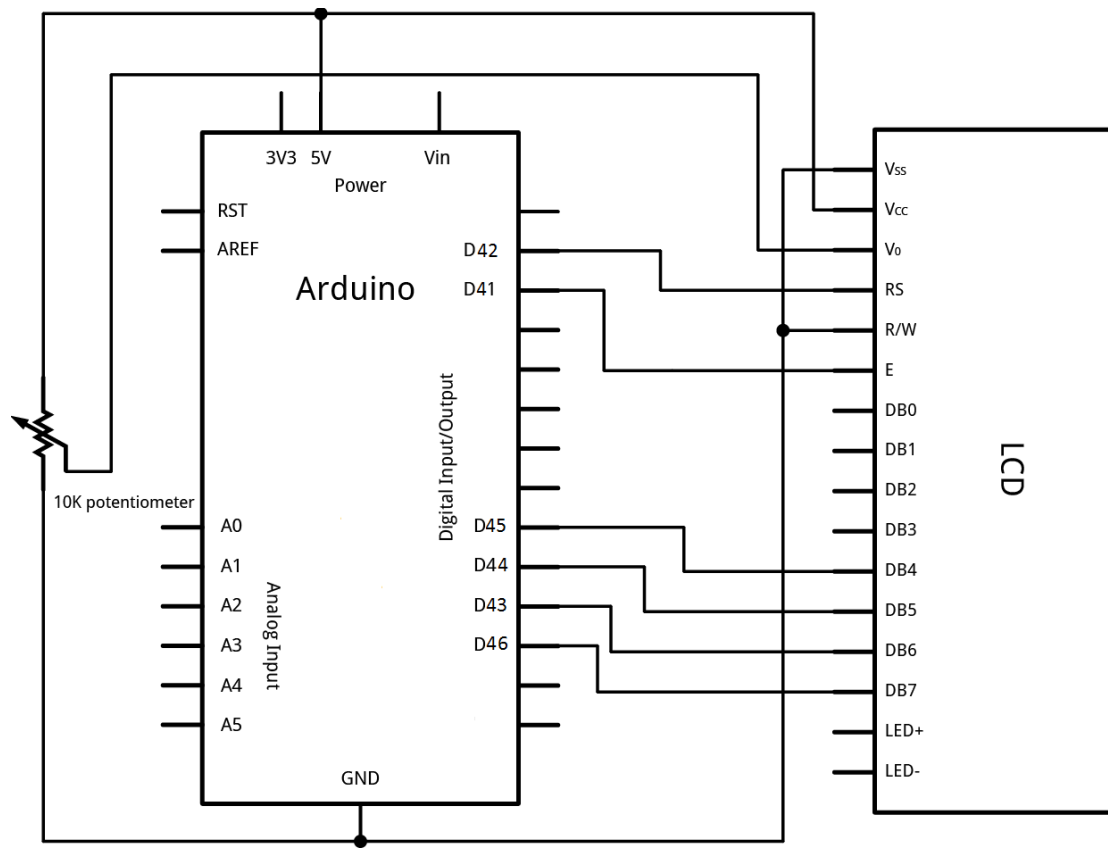
Σύνδεση πλακέτας DS2788K με το κύκλωμα του φορτιστή



5) ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ



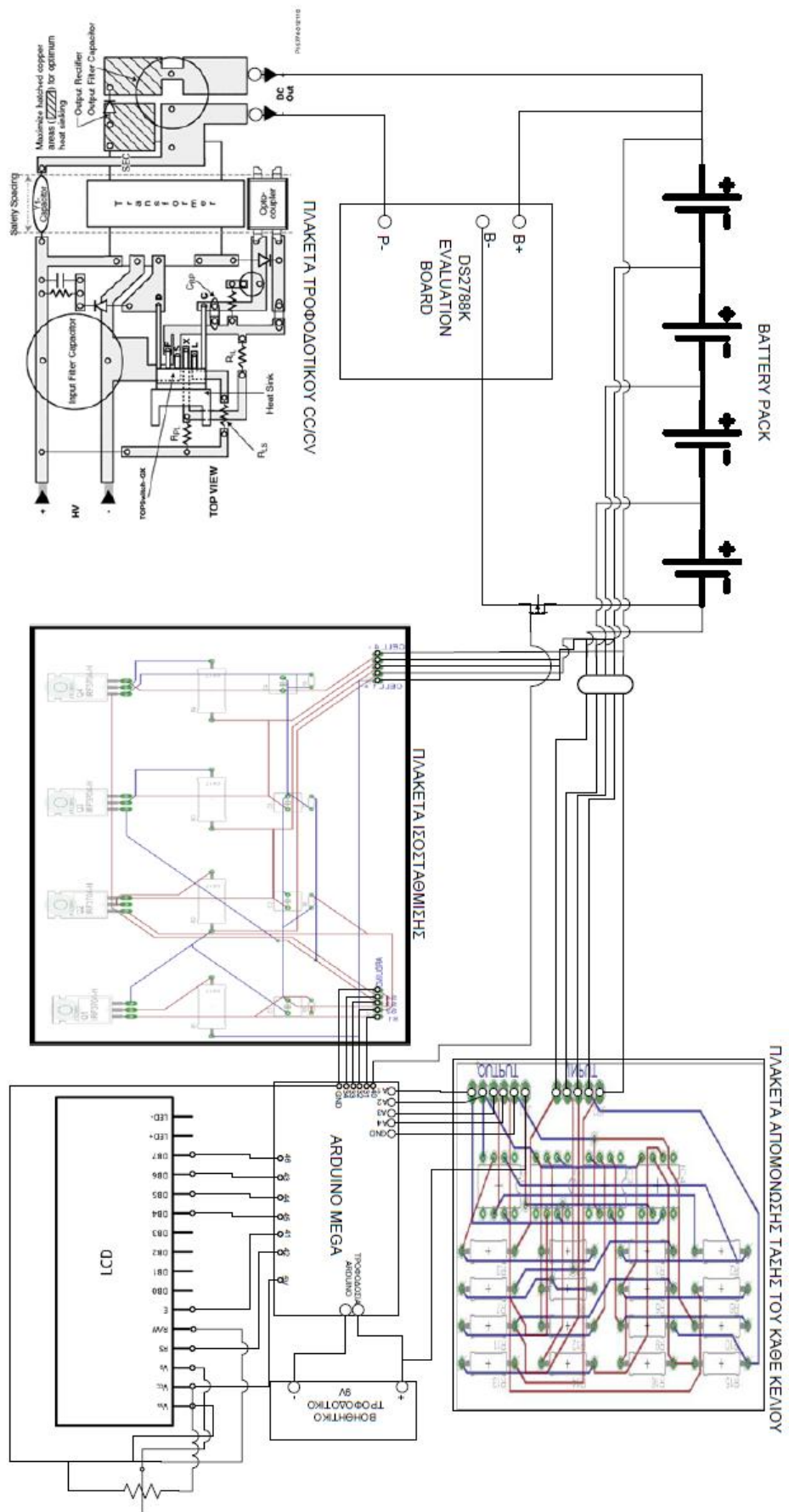
6) ΣΥΝΔΕΣΗ ΟΘΟΝΗΣ LCD ΜΕ ΤΟΝ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ



10.2 Παρουσίαση τελικού κυκλώματος φορτιστή

Συνδέοντας κατάλληλα τα παραπάνω υποσυστήματα, προκύπτει το τελικό ζητούμενο κύκλωμα. Να σημειωθεί ότι στην εικόνα που ακολουθεί δεν φαίνεται το κύκλωμα μέτρησης της θερμοκρασίας καθώς παραλείφθηκε σκοπίμως για λόγους απλότητας στην παρουσίαση του σχεδίου. Η σύνδεσή του με τον μικροελεγκτή είναι άλλωστε εξαιρετικά απλή.

Επομένως, το τελικό κύκλωμα του φορτιστή μίας συστοιχίας τεσσάρων κελιών LiFePO_4 φαίνεται στην πίσω σελίδα.



Εικόνα 10.2.α: Τελικό κύκλωμα του φορτιστή 4s LiFePO₄

10.3 Κόστος κατασκευής φορτιστή

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστεί μία ενδεικτική τιμή για το κόστος κατασκευής του φορτιστή.

1)Τροφοδοτικό

Item #	Ποσότητα	Περιγραφή	Τιμή (\$)
1	1	600 V, 1,00 A, Standard Recovery Bridge, DFM	0.53
2	1	100 nF, 275 VAC, Ceramic, X Class	0.1
3	1	39 μ F, 400 V, High Voltage Al Electrolytic, 5101 m Ω , (40 mm x 10 mm)	0.5
4	1	3,3 nF, 1 kV, High Voltage Ceramic Disc	0.5
5	1	0,1 μ F, 50 V, Ceramic, X7R	0.33
6	1	47 μ F, 10 V, Electrolytic, Gen Purpose, 1040 m Ω , (11 mm x 5 mm)	0.5
7	1	2,2 nF, 250 VAC, Ceramic, Y Class	0.375
8	1	390 pF, 100 V, Ceramic, X7R	0.25
9	1	1 μ F, 50 V, Electrolytic, Gen Purpose, 1080 m Ω , (11 mm x 5 mm)	0.28
10	1	3300 μ F, 35 V, Electrolytic, Low ESR, 16 m Ω , (35 mm x 18 mm)	0.3
11	1	100 μ F, 16 V, Electrolytic, Low ESR, 250 m Ω , (11,5 mm x 6,3 mm)	0.113
12	1	68 nF, 50 V, Ceramic, X7R	0.55
13	1	800 V, 1,00 A, Fast Recovery, 250 ns, DO-41	0.3
14	1	75 V, 0,30 A, Fast Recovery, 8 ns, DO-35	0.2
15	1	80 V, 5,00 A, Schottky, DO-201AD	0.205
16	1	250 VAC, 1 A, Radial TR5, Time Lag Fuse	0.88
17	1	33,7 mm x 20,0 mm. Aluminum Alloy (3003 OR 5052), 1.6 mm thickness. Heatsink for use with Device U1.	1.5
18	1	178,8 mm x 20,0 mm. Aluminum Alloy (3003 OR 5052), 1.6 mm thickness. Heatsink for use with Diode D3.	1.5
19	1	6 mH, 1,6 A	4.14
20	1	3,3 μ H, 5,5 A	0.73
21	1	24 k Ω , 5 %, 2 W, Metal Oxide	0.01
22	1	5,1 Ω , 5 %, 0,25 W, Carbon Film	0.01
23	1	15,8 k Ω , 1 %, 0,125 W, Metal Film	0.01
24	2	2,4 M Ω , 5 %, 0,25 W, Carbon Film	0.02
25	1	6,8 Ω , 5 %, 0,125 W, Carbon Film	0.01

26	1	27 Ω, 5 %, 0,25 W, Carbon Film	0.01
27	1	422 Ω, 1 %, 0,125 W, Metal Film	0.01
28	1	1 kΩ, 5 %, 0,125 W, Carbon Film	
29	1	54,9 kΩ, 1 %, 0,125 W, Metal Film	0.01
30	1	11,5 kΩ, 1 %, 0,125 W, Metal Film	0.01
31	1	NC-2H (Nicera) or Equivalent Core Material See Transformer Construction's Materials List for complete information	1
32	1	TOPSwitch-GX, TOP246YN, TO-220	4.37
33	1	Optocoupler LTV817A, 35 V, CTR 80 - 160 %, 4-DIP	0.42
34	1	2,495 V, Shunt Regulator IC, 2 %, TO-92	0.4
	Σύνολο		20.064

2) Κύκλωμα απομόνωσης τάσης

Item #	Περιγραφή	Ποσότητα	Τιμή (\$)
1	Τελεστικός ενισχυτής LM741	4	4*1.45
2	Ωμική αντίσταση 470k 0.125W, 1% ανοχή	16	16*0.008
	Σύνολο		5.9

3) Κύκλωμα ισοστάθμισης

Item #	Περιγραφή	Ποσότητα	Τιμή (\$)
1	Αντίσταση 1Ω , 13W ±10% ανοχή	4	4*0.8
2	N-MOSFET IRFZ44	4	4*1.6
3	Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής 100nF	4	4*0.04
4	Αντίσταση 100kΩ, 0.125 W, 10% ανοχή	4	4*0.01
	Σύνολο		9.8

4) Κύκλωμα υπολογισμού του SOC

Item#	Περιγραφή	Ποσότητα	Τιμή (\$)
1	DS2788	1	3
2	DS2788 EV Kit	1	50
3	DS91230USB adapter	1	20
	Σύνολο		73

5) Αισθητήρας θερμοκρασίας

Item#	Περιγραφή	Ποσότητα	Τιμή (\$)
1	TMP36	1	1.5

6) Μικροελεγκτής

Item#	Περιγραφή	Ποσότητα	Τιμή (\$)
1	Arduino MEGA	1	40

7) Οθόνη αποτελεσμάτων

Item#	Περιγραφή	Ποσότητα	Τιμή (\$)
1	LCD 16X2,16 pins	1	8

Άρα το συνολικό κόστος του συστήματος φόρτισης ανέρχεται στα 158 \$ (120 €) . Πρέπει να τονιστεί ωστόσο ότι εάν παραλειφθεί το σύστημα ένδειξης του SOC στον υπολογιστή, τότε το κόστος πέφτει στο μισό αφού στην περίπτωση αυτή απαιτείται μόνο το ολοκληρωμένο κύκλωμα DS2788 και πέντε LEDs τα οποία θα ανάβουν ανάλογα με τη χωρητικότητα της μπαταρίας εκείνη τη στιγμή.

Σε περίπτωση που κατασκευαστούν οι τυπωμένες πλακέτες του τροφοδοτικού, του κυκλώματος απομόνωσης και του κυκλώματος ισοστάθμισης, τότε το κόστος θα αυξηθεί περίπου κατά 100 €.

Επίσης ένα άλλο πολύ σημαντικό στοιχείο, όσον αφορά το κόστος, είναι ότι σε περίπτωση μαζικής παραγωγής μειώνεται δραματικά, αφού όλες οι προμηθεύτριες εταιρίες ηλεκτρονικών ειδών κοστολογούν με μικρότερη τιμή μονάδας μεγάλο μέγεθος παραγγελιών.

Κεφάλαιο 11^ο : Σύνοψη

11.1 Σύνοψη σχεδίασης

Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάστηκε διεξοδικά ο σχεδιασμός ενός φορτιστή μπαταριών Ιόντων Λιθίου με υλικό καθόδου LiFePO_4 , αφού πρώτα εξετάστηκαν τα χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητες των μπαταριών αυτών. Ο φορτιστής χωρίστηκε αρχικά σε επιμέρους υποσυστήματα. Τα υποσυστήματα αυτά είναι:

- Το τροφοδοτικό CC/CV
- Το κύκλωμα απομόνωσης της τάσης του κάθε κελιού
- Το κύκλωμα ισοστάθμισης
- Το κύκλωμα μέτρησης της κατάστασης φόρτισης
- Το κύκλωμα ανίχνευσης υπερθέρμανσης και διακοπής φόρτισης
- Το κύκλωμα ένδειξης της τάσης του κάθε κελιού και της θερμοκρασίας σε μία οθόνη
- Ο προγραμματισμός του μικροεπεξεργαστή που αποτελεί τον «εγκέφαλο» του φορτιστή

Για την πληρότητα της μελέτης, για κάθε υποσύστημα παρουσιάστηκαν και εναλλακτικές μέθοδοι υλοποίησης και διευκρινίστηκαν οι λόγοι για τους οποίους δεν προτιμήθηκαν αντί των τελικών επιλογών.

Τέλος, σχεδιάστηκε το τελικό κύκλωμα του φορτιστή. Με άλλα λόγια, παρουσιάστηκε η σύνδεση όλων των υποσυστημάτων, έτσι ώστε να προκύψει το τελικό ζητούμενο κύκλωμα.

11.2 Πλεονεκτήματα σχεδίασης

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότεροι φορτιστές μπαταριών Ιόντων Λιθίου του εμπορίου αποτελούνται μόνο από το τροφοδοτικό CC/CV. Αυτό συμβαίνει επειδή τις περισσότερες φορές, τα battery packs ενσωματώνουν το κύκλωμα ισοστάθμισης. Επίσης, η λειτουργία της μέτρησης του State of Charge, η ένδειξη της τάσης του κάθε κελιού και η ανίχνευση υπερθέρμανσης, συναντώνται σπάνια σε τέτοιους φορτιστές. Αντίθετα, οι φορτιστές αυτοί έχουν μία απλή ένδειξη κατά τον τερματισμό της φόρτισης, η οποία προκύπτει από τον μηδενισμό του ρεύματος κατά το τέλος της φόρτισης.

Να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι το σύστημα φόρτισης που σχεδιάστηκε, πρόκειται ουσιαστικά για ένα σύστημα το οποίο ενσωματώνει ένα φορτιστή των μπαταριών μαζί με ένα Battery Management System (BMS).

Ένα άλλο πλεονέκτημα του συστήματος φόρτισης που σχεδιάστηκε είναι ότι χρησιμοποιεί έναν μικροελεγκτή για τις περισσότερες λειτουργίες του. Για τη μέτρηση του SOC επίσης χρησιμοποιείται ένα προγραμματιζόμενο chip. Κάτι τέτοιο έχει μεγάλη σημασία, αφού σε περίπτωση που αλλάξει ο αριθμός των εν σειρά κελιών, ή σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν κελιά με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά (όρια τάσης και θερμοκρασίας), τότε οι περισσότερες αλλαγές μπορούν να γίνουν απλά αλλάζοντας κάποιες γραμμές κώδικα στο πρόγραμμα του μικροεπεξεργαστή.

Ακόμα και στο τροφοδοτικό το οποίο δεν ελέγχεται από τον μικροελεγκτή, μπορεί πολύ εύκολα να αλλάξει η έξοδος της τάσης και του ρεύματος μεταβάλλοντας τις τιμές των στοιχείων ανάδρασης στον ολοκληρωμένο DC-DC μετατροπέα. Επίσης, στα κυκλώματα απομόνωσης τάσεων και ισοστάθμισης, πολύ εύκολα και οικονομικά μπορούν να προστεθούν κάποια συμπληρωματικά στοιχεία, έτσι ώστε να λειτουργούν και για μπαταρίες περισσότερων κελιών.

Συνοπτικά, η σχεδίαση που πραγματοποιήθηκε αφορά ένα σύστημα φόρτισης το οποίο είναι ικανό να φορτίσει μία συστοιχία τεσσάρων κελιών τα οποία απλά είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και δεν έχουν ενσωματωμένο κανένα κύκλωμα ισοστάθμισης ή ανίχνευσης υπερθέρμανσης. Επίσης, η σχεδίαση αυτή πλεονεκτεί έναντι άλλων υλοποιήσεων καθώς μπορεί να προσαρμοστεί πολύ απλά σε περίπτωση μετατροπής του battery pack.

Βιβλιογραφία

- [1] David Linden, Thomas B.Reddy, Handbook of Batteries, Third Edition.
- [2] Ned Mochan, Tore M.Undeland, William P.Robbins Power Electronics, Converters, Applications and Designs.
- [3] Power Integration, Data Book and Design Guide, 2007.
- [4] Stephen W.Moore, Peter J.Schneider, "A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems", IEEE publication.
- [5] Shuo Pang, Jay Farrell, Jie Du and Matthew Barth, Electrical Engineering, University of California, Riverside, "Battery State-of-Charge Estimation", Proceedings of the American Control Conference.
- [6] ON Semiconductor Linear & Switching Voltage Regulator Handbook.
- [7] John Chiasson, Baskar Vairamohan, "Estimating the State of Charge of a Battery", IEEE publication.
- [8] Yevgen Barsukov, Texas Instruments, "Battery Cell Balancing: What to Balance and How".
- [9] Rajashekara, K., Bhat, A.K.S., Bose, B.K. "Power Electronics".
- [10] Sandeep Djameja, "Electric Vehicle Battery Systems", Newnes.
- [11] ON Semiconductor, "Rectifier Applications Handbook".
- [12] Carmelo Speltino, "The Lithium-Ion Cell: Model, State of Charge Estimation and Battery Management System".
- [13] Abusaleh M. Imtiaz and Faisal H. Khan, Haresh Kamath, "A Low-Cost Time Shared Cell Balancing Technique for Future Lithium-Ion Battery Storage System Featuring Regenerative Energy Distribution", IEEE publication.
- [14] Thomas A.Stuart, Wei Zhu, "A Targeted Equalizer for Lithium Ion Battery Packs".
- [15] Davide Andrea, "Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs", chapter 1.
- [16] Tan Ji Xiang, "Battery Management System For Autonomous Robots".
- [17] Chol-Ho Kim, Moon-Young Kim, Young-Do Kim, and Gun-Woo Moon, "A Modularized Charge Equalizer Using Battery Monitoring IC for Series Connected Li-Ion Battery Strings in an Electric Vehicle", 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia.
- [18] John Chiasson, Baskar Vairamohan, "Estimating the State of Charge of a Battery".
- [19] XP POWER, "Power Supply Technical Guide".
- [20] Carmelo Speltino, Anna Stefanopoulou and Giovanni Fiengo, "Cell Equalization In Battery Stacks Through State Of Charge Estimation Polling", 2010 American Control Conference Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA, June 30-July 02, 2010
- [21] Pablo A. Cassani and Sheldon S. Williamson, "Significance of Battery Cell Equalization and Monitoring for Practical Commercialization of Plug-In Hybrid Electric Vehicles", IEEE publication.
- [22] Jonathan W. Kimball and Brian T. Kuhn, Philip T. Krein, "Increased Performance of Battery Packs by Active Equalization", IEEE publication.
- [23] http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate_battery
- [24] <http://arduino.cc/en/Reference/HomePage>
- [25] <http://arduino.cc/en/Tutorial/LiquidCrystalDisplay>
- [26] <http://www.mpoweruk.com/soc.htm>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

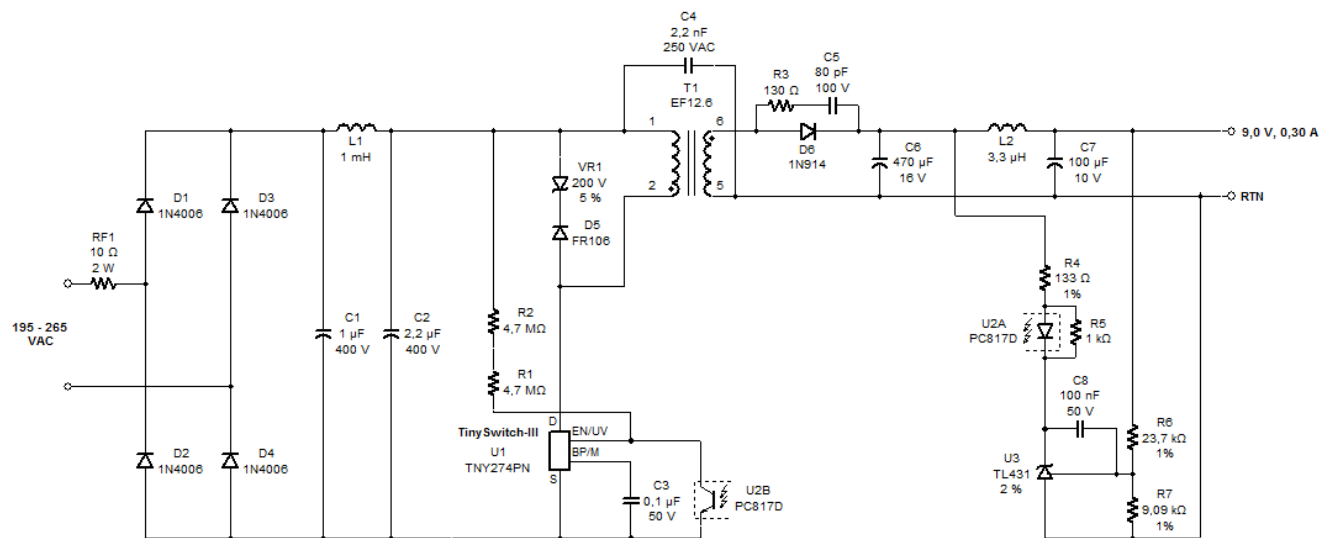
ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ CV (9V@0.3A)

Το συγκεκριμένο διακοπτικό τροφοδοτικό χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή και των τελεστικών ενισχυτών.

Επιλέχθηκε διακοπτικό τροφοδοτικό έναντι γραμμικού λόγω της μεγαλύτερης απόδοσης που παρουσιάζει. Πιο συγκεκριμένα είναι ένα τροφοδοτικό σταθερής τάσης στα 9V και το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να δώσει είναι 0.3 A. Φυσικά αυτά τα μεγέθη συμβαδίζουν με τις προδιαγραφές του μικροελεγκτή που χρησιμοποιείται.

Ο σχεδιασμός του τροφοδοτικού αυτού έγινε με βάση έναν ολοκληρωμένο DC-DC converter της εταιρίας PowerIntegrations και συγκεκριμένα με βάση το TinySwitch-III.

Παρακάτω παρουσιάζεται το κύκλωμα του τροφοδοτικού αυτού.

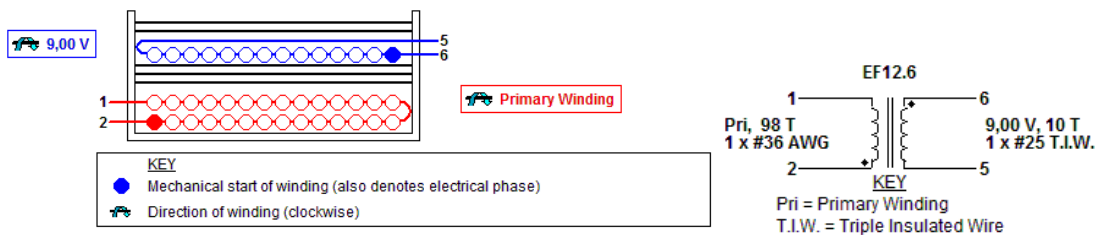


Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Item #	Ποσότητα	Part Ref	Τιμή	Περιγραφή
1	1	C1	1 μ F	1 μ F, 400 V, High Voltage Al Electrolytic, 397800 m Ω , (11 mm x 6 mm)
2	1	C2	2,2 μ F	2,2 μ F, 400 V, High Voltage Al Electrolytic, 180800 m Ω , (11 mm x 8 mm)
3	1	C3	0,1 μ F	0,1 μ F, 50 V, Ceramic, X7R
4	1	C4	2,2 nF	2,2 nF, 250 VAC, Ceramic, Y Class
5	1	C5	80 pF	80 pF, 100 V, Ceramic, X7R
6	1	C6	470 μ F	470 μ F, 16 V, Electrolytic, Super Low ESR, 53 m Ω , (15 mm x 8 mm)
7	1	C7	100 μ F	100 μ F, 10 V, Electrolytic, Low ESR,

				500 mΩ, (11,5 mm x 5 mm)
8	1	C8	100 nF	100 nF, 50 V, Ceramic, X7R
9	4	D1, D2, D3, D4	1N4006	800 V, 1,00 A, Standard Recovery, DO-41
10	1	D5	FR106	800 V, 1,00 A, Fast Recovery, 250 ns, DO-41
11	1	D6	1N914	75 V, 0,30 A, Fast Recovery, 4 ns, DO-35
12	1	L1	1 mH	1 mH, 0,15 A
13	1	L2	3,3 μH	3,3 μH, 2,66 A
14	2	R1, R2	4,7 MΩ	4,7 MΩ, 5 %, 0,25 W, Carbon Film
15	1	R3	130 Ω	130 Ω, 5 %, 0,25 W, Carbon Film
16	1	R4	133 Ω	133 Ω, 1 %, 0,125 W, Metal Film
17	1	R5	1 kΩ	1 kΩ, 5 %, 0,125 W, Carbon Film
18	1	R6	23,7 kΩ	23,7 kΩ, 1 %, 0,125 W, Metal Film
19	1	R7	9,09 kΩ	9,09 kΩ, 1 %, 0,125 W, Metal Film
20	1	RF1	10 Ω	10 Ω, 2 W, Fusible/Flameproof Wire-Wound Resistor
21	1	T1	EF12.6	NC-2H (Nicera) or Equivalent Core Material See Transformer Construction's Materials List for complete information
22	1	U1	TNY274PN	TinySwitch-III, TNY274PN, DIP-8
23	1	U2	PC817D	Optocoupler PC817D, 35 V, CTR 300 - 600 %, 4-DIP
24	1	U3	TL431	2,495 V, Shunt Regulator IC, 2 %, TO-92
25	1	VR1	P6KE200A	200 V, 5 W, 5 %, DO-204AC, TVS
26	1			52 mm ² area on Copper PCB. 2 oz (70 μm) thickness. Heatsink for use with Device U1.
27	1			52 mm ² area on Copper PCB. 2 oz (70 μm) thickness. Heatsink for use with Diode D6.

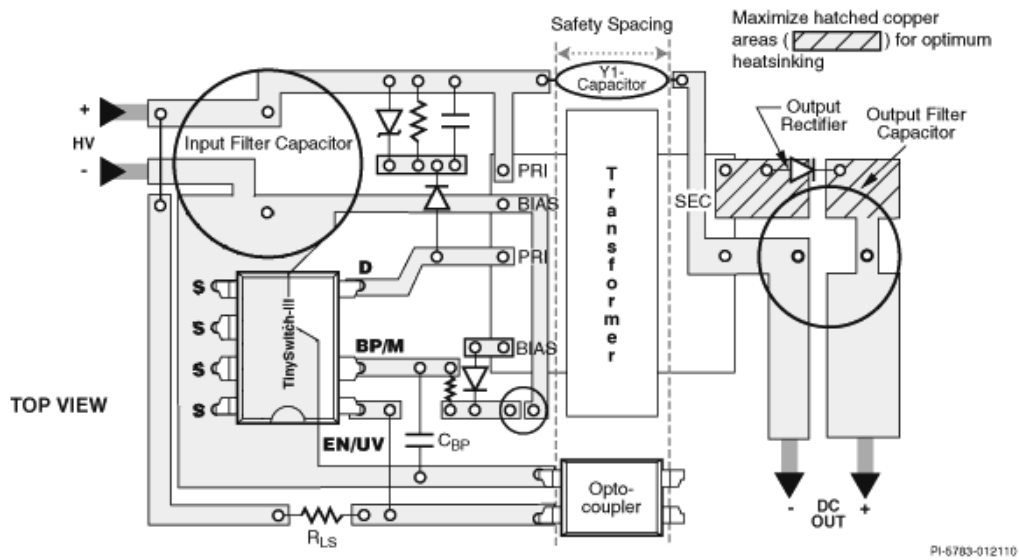
Η κατασκευή του μετασχηματιστή γίνεται με βάση το παρακάτω μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό σχέδιο:



Μηχανολογικό Σχέδιο Ηλεκτρολογικό σχέδιο

Item	Description
[1]	Core: EF12.6, NC-2H (Nicera) or Equivalent, gapped for ALG of 108 nH/T ²
[2]	Bobbin: Generic, 4 pri. + 2 sec.
[3]	Barrier Tape: Polyester film [1 mil (25 μm) base thickness], 7,50 mm wide
[4]	Varnish
[5]	Magnet Wire: 36 AWG, Solderable Double Coated
[6]	Triple Insulated Wire: 25 AWG

Το σχέδιο της τυπωμένης πλακέτας:



Τέλος, το τροφοδοτικό που θα δημιουργηθεί θα έχει την παρακάτω μορφή:



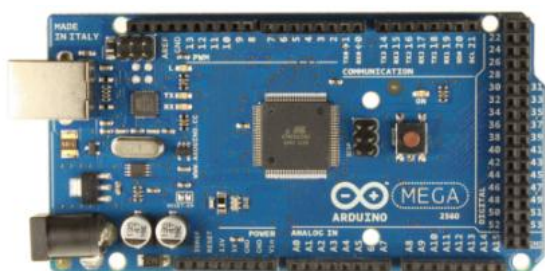
ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ ARDUINO MEGA 2650

Ο ArduinoMega 2650 είναι ο μικροελεγκτής που θα χρησιμοποιηθεί. Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής βασίζεται στον μικροεπεξεργαστή ATmega2560.

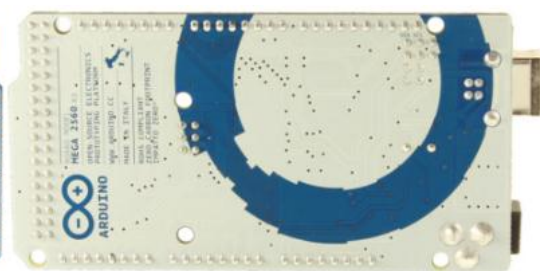
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

Παρακάτω φαίνεται ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής:



Arduino Mega 2560 R3 Front



Arduino Mega2560 R3 Back



DS2788

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

DS2788

General Description

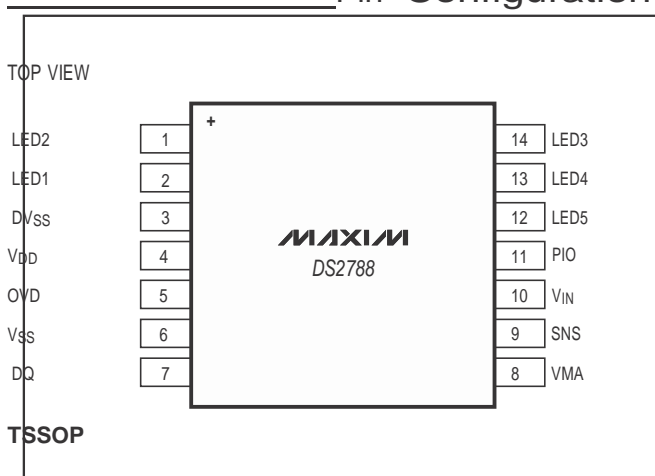
The DS2788 measures voltage, temperature, and current, and estimates available capacity for rechargeable lithium-ion (Li+) and Li+ polymer batteries. Cell characteristics and application parameters used in the calculations are stored in on-chip EEPROM. The available capacity registers report a conservative estimate of the amount of charge that can be removed given the current temperature, discharge rate, stored charge, and application parameters. Capacity estimation is reported in mAh remaining and percentage of full.

LED display drivers and a debounced input make display of the capacity information easy. The LED pins can directly sink current, requiring only a resistor for setting the current in the LED display, thus reducing space and cost.

Applications

- Power Tools Electric
- Bicycles Electric
- Vehicles
- Uninterruptible Power Supply
- Digital Cameras

Pin Configuration



Typical Operating Circuit appears at end of data sheet.

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

Features

- ◆ Five 30mA Open-Drain Drivers for Driving LED Fuel-Gauge Display
- ◆ Debounced Fuel-Gauge Display Enable
- ◆ Internal Voltage Measurement Gain Register for Trimming External Voltage-Divider
- ◆ Pin for Driving FETs to Enable Voltage-Divider Only During Voltage Measurement, Conserving Power
- ◆ Precision Voltage, Temperature, and Current Measurement System
- ◆ Accurate, Temperature-Stable, Internal Time Base
- ◆ Absolute and Relative Capacity Estimated from Coulomb Count, Discharge Rate, Temperature, and Battery Cell Characteristics
- ◆ Accurate Warning of Low Battery Conditions
- ◆ Automatic Backup of Coulomb Count and Age Estimation to Nonvolatile (NV) EEPROM
- ◆ Gain and Tempco Calibration Allows the Use of Low-Cost Sense Resistors
- ◆ 24-Byte Battery/Application Parameter EEPROM
- ◆ 16-Byte User EEPROM
- ◆ Unique ID and Multidrop 1-Wire® Interface
- ◆ 14-Pin TSSOP Package

Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
DS2788E+	-25°C to +70°C	14 TSSOP
DS2788E+T&R	-25°C to +70°C	14 TSSOP

+Denotes a lead(Pb)-free/RoHS-compliant package.
T&R = Tape and reel.

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim Direct at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at www.maxim-ic.com.

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Voltage Range on Any Pin Relative to V_{SS} -0.3V to +6.0V
 Voltage Range on V_{IN} , VMA Relative to V_{SS} ...-0.3V to $V_{DD} + 0.3V$
 DV_{SS} to V_{SS} -0.3V to +0.3V
 LED1-5.....60mA each pin

Operating Temperature Range-40°C to +85°C
 Storage Temperature Range-55°C to +125°C
 Soldering Temperature (10s)Refer to IPC/JEDEC-020 Specification.

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

RECOMMENDED DC OPERATING CHARACTERISTICS

($V_{DD} = 2.5V$ to $4.5V$, $T_A = -25^\circ C$ to $+70^\circ C$, unless otherwise noted. Typical values are at $T_A = +25^\circ C$.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V_{DD}	(Note 1)	+2.5		+4.5	V
V_{IN} , VMA Voltage Range		(Note 1)	0		V_{DD}	V
DQ, PIO, OVD, LED1-LED5 Voltage Range		(Note 1)	0		+5.5	V

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

($V_{DD} = 2.5V$ to $4.5V$, $T_A = -25^\circ C$ to $+70^\circ C$, unless otherwise noted. Typical values are at $T_A = +25^\circ C$.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
ACTIVE Current	I_{ACTIVE}	2.5V V_{DD} 4.2V	70		95	μA
					105	
SLEEP Mode Current	I_{SLEEP}		1		3	μA
Input Logic-High: DQ, PIO	V_{IH}	(Note 1)	1.5			V
Input Logic-Low: DQ, PIO	V_{IL}	(Note 1)			0.6	V
Output Logic-Low: DQ, PIO, VMA	V_{OL}	$I_{OL} = 4mA$ (Note 1)			0.4	V
Output Logic-High: VMA	V_{OH}	$I_{OH} = 1mA$ (Note 1)	$V_{DD} - 0.5$			V
VMA Precharge Time	t_{PRE}		13.3		14.2	ms
Pulldown Current: DQ, PIO	I_{PD}	$V_{DQ}, V_{PIO} = 0.4V$	0.2		5	μA
Output Logic-Low: LED1-LED5	V_{OL}	$I_{OL} = -30mA$ (Note 1)			1	V
Input Logic-High: OVD	V_{IH}	(Note 1)	$V_{DD} - 0.2$			V
Input Logic-Low: OVD	V_{IL}	(Note 1)			$V_{SS} + 0.2$	V
V_{IN} Input Resistance	R_{IN}		15			M
DQ SLEEP Timeout	t_{SLEEP}	$DQ < V_{IL}$	1.8	2.0	2.2	s
Undervoltage SLEEP Threshold	V_{SLEEP}	(Note 1)	2.40	2.45	2.50	V
PIO Switch Debounce			100		130	ms
LED1 Display Blink Rate		50% duty cycle	0.9	1.0	1.1	Hz
LED Display-On Time			3.6	4.0	4.4	s

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

ELECTRICAL CHARACTERISTICS: TEMPERATURE, VOLTAGE, CURRENT

($V_{CC} = 2.5V$ to $4.5V$, $T_A = -25^{\circ}C$ to $+70^{\circ}C$, unless otherwise noted. Typical values are at $T_A = +25^{\circ}C$.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Temperature Resolution	T_{LSB}		0.125			$^{\circ}C$
Temperature Error	T_{ERR}				± 3	$^{\circ}C$
Voltage Resolution	V_{LSB}		4.88			mV
Voltage Full-Scale	V_{FS}		0		4.5	V
Voltage Error	V_{ERR}				± 50	mV
Current Resolution	I_{LSB}		1.56			μV
Current Full-Scale	I_{FS}				± 51.2	mV
Current Gain Error	I_{GERR}	(Note 2)			± 1	% Full Scale
Current Offset Error	I_{OERR}	$0^{\circ}C$ T_A $+70^{\circ}C$, $2.5V$ V_{DD} $4.2V$ (Notes 3, 4)	-7.82		+12.5	μV
Accumulated Current Offset	Q_{OERR}	$0^{\circ}C$ T_A $+70^{\circ}C$, $2.5V$ V_{DD} $4.2V$, $V_{SNS} = V_{SS}$ (Notes 3, 4, 5)	-188		0	$\mu Vhr/day$
Timebase Error	t_{ERR}	$V_{DD} = 3.8V$, $T_A = +25^{\circ}C$			± 1	%
		$0^{\circ}C$ T_A $+70^{\circ}C$, $2.5V$ V_{DD} $4.2V$			± 2	
					± 3	

ELECTRICAL CHARACTERISTICS: 1-Wire INTERFACE, STANDARD

($V_{CC} = 2.5V$ to $4.5V$, $T_A = -25^{\circ}C$ to $+70^{\circ}C$.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Time Slot	t_{SLOT}		60		120	μs
Recovery Time	t_{REC}		1			μs
Write-0 Low Time	t_{LOW0}		60		120	μs
Write-1 Low Time	t_{LOW1}		1		15	μs
Read Data Valid	t_{RDV}				15	μs
Reset-Time High	t_{RSTH}		480			μs
Reset-Time Low	t_{RSTL}		480		960	μs
Presence-Detect High	t_{PDH}		15		60	μs
Presence-Detect Low	t_{PDL}		60		240	μs

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

ELECTRICAL CHARACTERISTICS: 1-Wire INTERFACE, OVERDRIVE

($V_{CC} = 2.5V$ to $4.5V$, $T_A = -25^{\circ}C$ to $+70^{\circ}C$.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Time Slot	t _{SLOT}		6		16	μs
Recovery Time	t _{REC}		1			μs
Write-0 Low Time	t _{LOW0}		6		16	μs
Write-1 Low Time	t _{LOW1}		1		2	μs
Read Data Valid	t _{RDV}				2	μs
Reset-Time High	t _{RSTH}		48			μs
Reset-Time Low	t _{RSTL}		48		80	μs
Presence-Detect High	t _{PDH}		2		6	μs
Presence-Detect Low	t _{PDL}		8		24	μs

EEPROM RELIABILITY SPECIFICATION

($V_{CC} = 2.5V$ to $4.5V$, $T_A = -25^{\circ}C$ to $+70^{\circ}C$, unless otherwise noted. Typical values are at $T_A = +25^{\circ}C$.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
EEPROM Copy Time	t _{EEC}				10	ms
EEPROM Copy Endurance	N _{EEC}	$T_A = +50^{\circ}C$ (Note 6)	50,000			Cycles

Note 1: All voltages are referenced to V_{SS} .

Note 2: Factory-calibrated accuracy. Higher accuracy can be achieved by in-system calibration by the user.

Note 3: Parameters guaranteed by design.

Note 4: At a constant regulated V_{DD} voltage, the Current Offset Bias register can be used to obtain higher accuracy.

Note 5: Accumulation Bias register set to 00h.

Note 6: EEPROM data retention is 10 years at $+50^{\circ}C$.

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Pin Description

DS2788

PIN	NAME	FUNCTION
1	LED2	Display Driver. Connect to an LED connected to V_{DD} for display of relative pack capacity.
2	LED1	Display Driver. Connect to an LED connected to V_{DD} for display of relative pack capacity.
3	DVSS	Display Ground. Ground connection for the LED display drivers. Connect to V_{SS} .
4	V_{DD}	Power-Supply Input. Connect to the positive terminal of the battery cell through a decoupling network.
5	OVD	1-Wire Bus Speed Control. Input logic level selects the speed of the 1-Wire bus. Logic 1 selects overdrive (OVD) and Logic 0 selects standard (STD) timing. On a multidrop bus, all devices must operate at the same speed.
6	V_{SS}	Device Ground. Connect directly to the negative terminal of the battery cell. Connect the sense resistor between V_{SS} and SNS.
7	DQ	Data Input/Output. 1-Wire data line, open-drain output driver. Connect this pin to the DATA terminal of the battery pack. This pin has a weak internal pulldown (IPD) for sensing pack disconnection from host or charger.
8	VMA	Voltage Measurement Active. Output is driven high before the start of a voltage conversion and driven low at the end of the conversion cycle.
9	SNS	Sense Resistor Connection. Connect to the negative terminal of the battery pack. Connect the sense resistor between V_{SS} and SNS.
10	V_{IN}	Voltage Sense Input. The voltage of the battery cell is monitored through this input pin.
11	PIO	Programmable I/O Pin. Can be configured as input or output to monitor or control user-defined external circuitry. Output driver is open drain. This pin has a weak internal pulldown (IPD). When configured as an input, upon recognition of a rising edge, the fuel-gauge display is enabled.
12	LED5	Display Driver. Connect to an LED connected to V_{DD} for display of relative pack capacity. Leave floating in LED4 configuration.
13	LED4	Display Driver. Connect to an LED connected to V_{DD} for display of relative pack capacity.
14	LED3	Display Driver. Connect to an LED connected to V_{DD} for display of relative pack capacity.

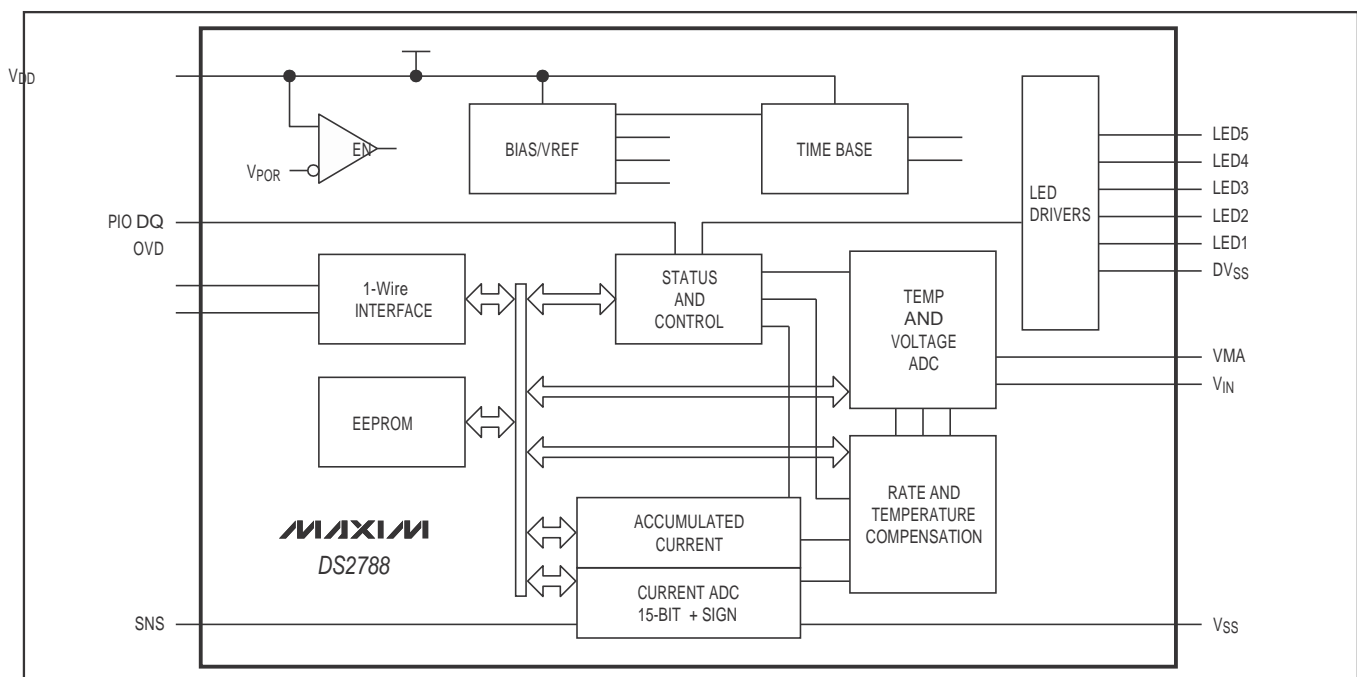


Figure 1. Block Diagram

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Detailed Description

The DS2788 operates directly from 2.5V to 4.5V and supports single-cell Li+ battery packs. As shown in Figure 2, the DS2788 accommodates multicell applications by adding a trim resistor for calibration of an external voltage-divider for V_{IN} . NV storage is provided for cell compensation and application parameters. Host-side development of fuel-gauging algorithms is eliminated. On-chip algorithms and convenient status reporting of operating conditions reduce the serial polling required of the host processor.

Additionally, 16 bytes of EEPROM memory are made available for the exclusive use of the host system and/or pack manufacturer. The additional EEPROM memory can be used to facilitate battery lot and date tracking and NV storage of system or battery usage statistics.

A 1-Wire interface provides serial communication at the standard 16kbps or overdrive 140kbps speeds, allowing access to data registers, control registers, and user memory. A unique, factory-programmed, 64-bit registration

number (8-bit family code + 48-bit serial number + 8-bit CRC) assures that no two parts are alike and enables absolute traceability. The 1-Wire interface on the DS2788 supports multidrop capability so that multiple slave devices can be addressed with a single pin.

Power Modes

The DS2788 has two power modes: ACTIVE and SLEEP. On initial power-up, the DS2788 defaults to ACTIVE mode. While in ACTIVE mode, the DS2788 is fully functional with measurements and capacity estimation continuously updated. In SLEEP mode, the DS2788 conserves power by disabling measurement and capacity estimation functions, but preserves register contents. SLEEP mode is entered under two different conditions and an enable bit for each condition makes entry into SLEEP optional. SLEEP mode can be enabled using the power mode (PMOD) bit or the undervoltage enable (UVEN) bit.

The PMOD type SLEEP is entered if the PMOD bit is set and DQ is low for t_{SLEEP} (2s nominal). The condition of DQ low for t_{SLEEP} can be used to detect a pack discon-

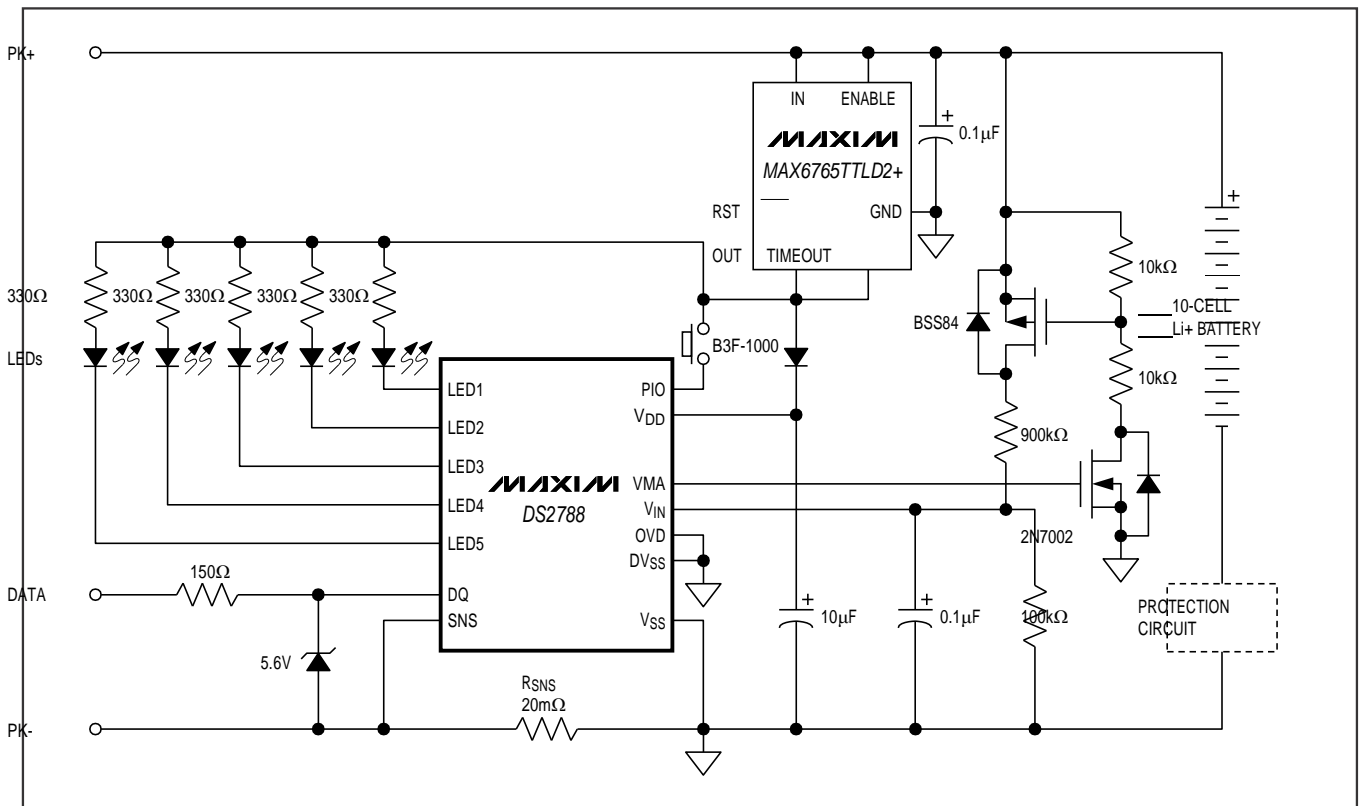


Figure 2. Multicell Application Example

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

nection or system shutdown, in which no charge or discharge current flows. A PMOD SLEEP condition transitions back to ACTIVE mode when DQ is pulled high.

The second option for entering SLEEP is an undervoltage condition. When the UVEN bit is set, the DS2788 transitions to SLEEP if the voltage on V_{IN} is less than V_{SLEEP} (2.45V nominal) and DQ is stable at a low or high logic level for t_{SLEEP} . An undervoltage condition occurs when a pack is fully discharged, where loading on the battery should be minimized. UVEN SLEEP relieves the battery of the IACTIVE load until communication on DQ resumes.

Note: PMOD and UVEN SLEEP features must be disabled when a battery is charged on an external charger that does not connect to the DQ pin. PMOD SLEEP can be used if the charger pulls DQ high. UVEN SLEEP can be used if the charger toggles DQ. The DS2788 remains in SLEEP and therefore does not measure or accumulate current when a battery is charged on a charger that fails to properly drive DQ.

Initiating Communication in Sleep

When beginning communication with a DS2788 in PMOD SLEEP, DQ must be pulled up first and then a 1-Wire reset pulse must be issued by the master. In UVEN SLEEP, the procedure depends on the state of DQ when UVEN SLEEP was entered. If DQ was low, DQ must be pulled up and then a 1-Wire reset pulse

must be issued by the master as with PMOD SLEEP. If DQ was high when UVEN SLEEP was entered, then the DS2788 is prepared to receive a 1-Wire reset from the master. In the first two cases with DQ low during SLEEP, the DS2788 does not respond to the first rising edge of DQ with a presence pulse.

Voltage Measurement

Battery voltage is measured at the V_{IN} input with respect to V_{SS} over a range of 0 to 4.5V, with a resolution of 4.88mV. The result is updated every 440ms and placed in the Voltage (VOLT) register in two's complement form. Voltages above the maximum register value are reported at the maximum value; voltages below the minimum register value are reported at the minimum value. Figure 3 shows the format of the Voltage register.

V_{IN} is usually connected to the positive terminal of a single-cell Li+ battery by a 1k Ω resistor. The input impedance is sufficiently large (15M Ω) to be connected to a high-impedance voltage-divider in order to support multiple-cell applications. The pack voltage should be divided by the number of series cells to present a single-cell average voltage to the V_{IN} input. In Figure 2, the value of R can be up to 1M Ω without incurring significant error due to input loading. The VMA pin is driven high t_{PRE} before the voltage conversion begins. This allows an external switching element to enable the voltage-divider, and allows settling to occur before the start of the conversion.

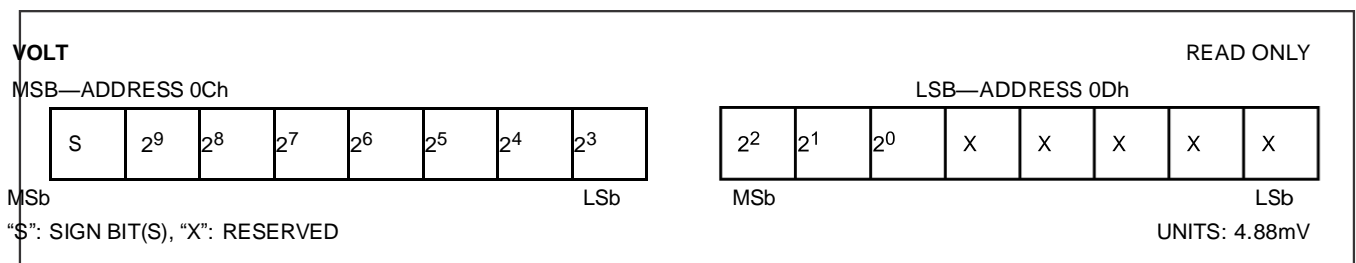


Figure 3. Voltage Register Format

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Temperature Measurement

The DS2788 uses an integrated temperature sensor to measure battery temperature with a resolution of 0.125°C. Temperature measurements are updated every 440ms and placed in the Temperature (TEMP) register in two's complement form. Figure 4 shows the format of the Temperature register.

Current Measurement

In the ACTIVE mode of operation, the DS2788 continually measures the current flow into and out of the battery by measuring the voltage drop across a low-value current-sense resistor, R_{SNS} . The voltage-sense range

between SNS and V_{SS} is $\pm 51.2\text{mV}$. The input linearly converts peak signal amplitudes up to 102.4mV as long as the continuous signal level (average over the conversion cycle period) does not exceed $\pm 51.2\text{mV}$. The ADC samples the input differentially at 18.6kHz and updates the Current (CURRENT) register at the completion of each conversion cycle.

The Current register is updated every 3.515s with the current conversion result in two's complement form. Charge currents above the maximum register value are reported at the maximum value (7FFFh = +51.2mV). Discharge currents below the minimum register value are reported at the minimum value (8000h = -51.2mV).

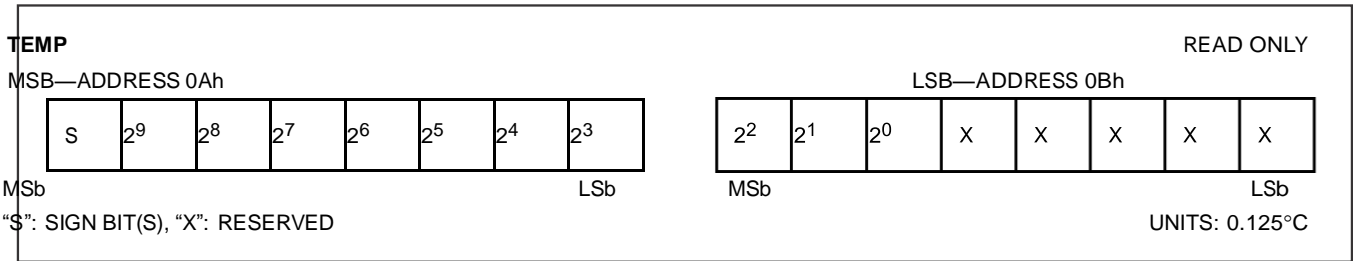


Figure 4. Temperature Register Format

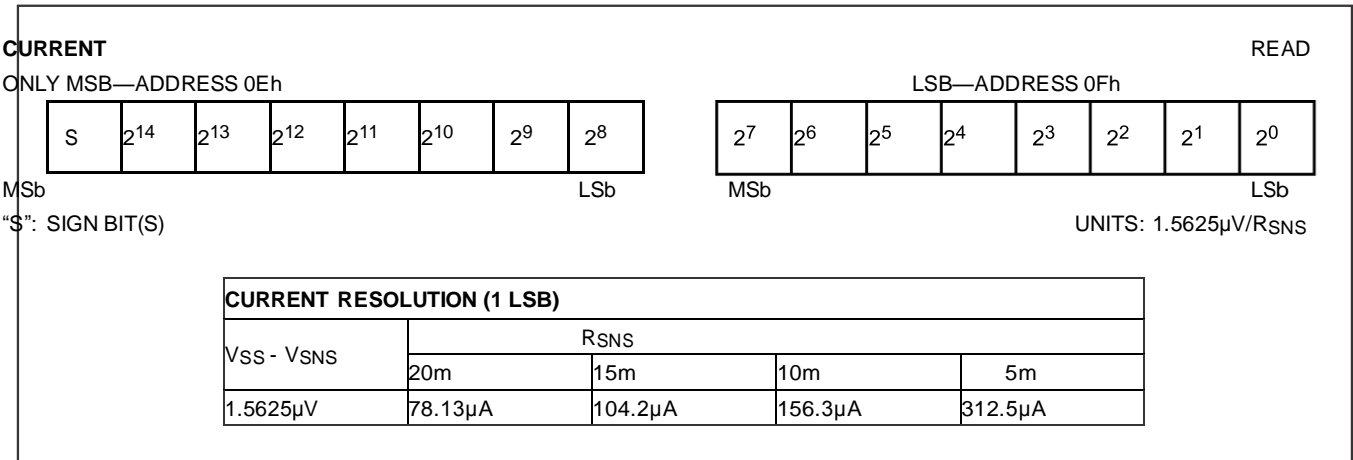


Figure 5. Current Register Format

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Average Current Measurement

The Average Current (IAVG) register reports an average current level over the preceding 28 seconds. The register value is updated every 28s in two's complement form, and is the average of the eight preceding Current register updates. Figure 6 shows the format of the Average Current register. Charge currents above the maximum register value are reported at the maximum value (7FFFh = +51.2mV). Discharge currents below the minimum register value are reported at the minimum value (8000h = -51.2mV).

Current Offset Correction

Every 1024th conversion the ADC measures its input offset to facilitate offset correction. Offset correction occurs approximately once per hour. The resulting correction factor is applied to the subsequent 1023 measurements. During the offset correction conversion, the ADC does not measure the sense resistor signal. A maximum error of 1/1024 in the Accumulated Current (ACR) register is possible; however, to reduce the error, the current measurement made just prior to the offset conversion is displayed in the Current register and is substituted for the dropped current measurement in the current accumulation process. This results in an accumulated current error due to offset correction of less than 1/1024.

Current Offset Bias

The Current Offset Bias (COB) register allows a programmable offset value to be added to raw current measurements. The result of the raw current measurement plus COB is displayed as the current measurement result in the Current register, and is used for current accumulation. COB can be used to correct for a static offset error, or can be used to intentionally skew the current results and therefore the current accumulation.

COB allows read and write access. Whenever the COB is written, the new value is applied to all subsequent current measurements. COB can be programmed in 1.56μV steps to any value between +198.1μV and -199.7μV. The COB value is stored as a two's complement value in nonvolatile memory.

Current Measurement Calibration

The DS2788's current measurement gain can be adjusted through the RSGAIN register, which is factory-calibrated to meet the data sheet specified accuracy. RSGAIN is user accessible and can be reprogrammed after module or pack manufacture to improve the current measurement accuracy. Adjusting RSGAIN can correct for variation in an external sense resistor's nominal value, and allows the use of low-cost, nonprecision

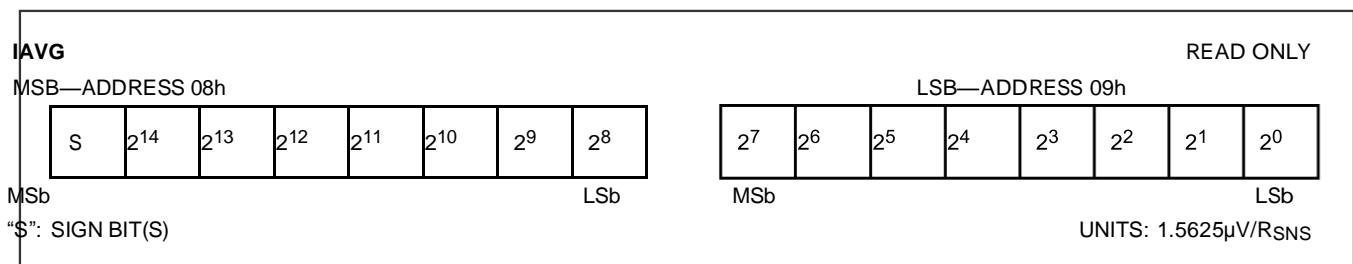


Figure 6. Average Current Register Format

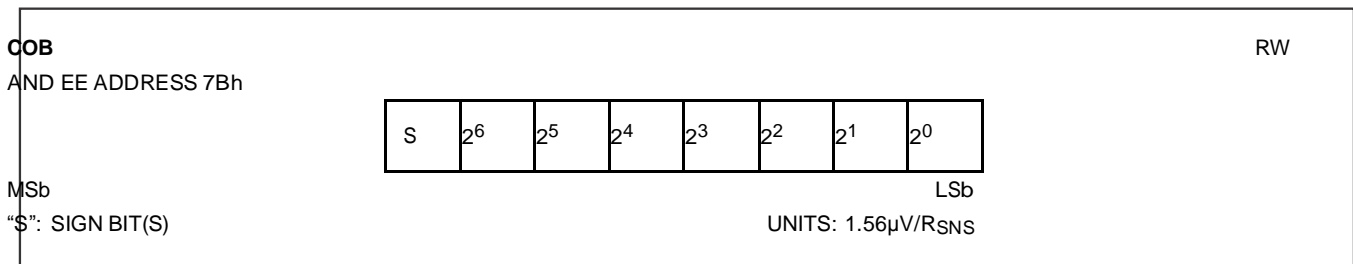


Figure 7. Current Offset Bias Register Format

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

current-sense resistors. RSGAIN is an 11-bit value stored in 2 bytes of the parameter EEPROM memory block. The RSGAIN value adjusts the gain from 0 to 1.999 in steps of 0.001 (precisely 2^{-10}). The user must program RSGAIN cautiously to ensure accurate current measurement. When shipped from the factory, the gain calibration value is stored in two separate locations in the parameter EEPROM block: RSGAIN, which is reprogrammable, and FRSGAIN, which is read only. RSGAIN determines the gain used in the current measurement. The read-only FRSGAIN (address B0h and B1h) is provided to preserve the factory value only and is not used in the current measurement.

Sense Resistor Temperature Compensation

The DS2788 is capable of temperature compensating the current-sense resistor to correct for variation in a sense resistor's value over temperature. The DS2788 is factory programmed with the sense resistor temperature coefficient, RSTC, set to zero, which turns off the temperature compensation function. RSTC is user accessible and can be reprogrammed after module or pack manufacture to improve the current accuracy when using a high temperature coefficient current-sense resistor. RSTC is an 8-bit value stored in the parameter EEPROM memory block. The RSTC value sets the temperature coefficient from 0 to +7782ppm/°C in steps of 30.5ppm/°C. The user must program RSTC cautiously to ensure accurate current measurement.

Temperature compensation adjustments are made when the Temperature register crosses 0.5°C boundaries. The temperature compensation is most effective with the resistor placed as close as possible to the V_{SS} terminal to optimize thermal coupling of the resistor to

the on-chip temperature sensor. If the current shunt is constructed with a copper PCB trace, run the trace under the DS2788 package if possible.

Current Accumulation

Current measurements are internally summed, or accumulated, at the completion of each conversion period with the results displayed in the ACR. The accuracy of the ACR is dependent on both the current measurement and the conversion time base. The ACR has a range of 0 to 409.6mVh with an LSB (least significant bit) of 6.25μVh. Additional read-only registers (ACRL) hold fractional results of each accumulation to avoid truncation errors. Accumulation of charge current above the maximum register value is reported at the maximum register value (7FFFh); conversely, accumulation of discharge current below the minimum register value is reported at the minimum value (8000h).

Read and write access is allowed to the ACR. The ACR must be written MSB (most significant byte) first, then LSB (least significant byte). The write must be completed within 3.515s (one ACR register update period). A write to the ACR forces the ADC to perform an offset correction conversion and update the internal offset correction factor. Current measurement and accumulation begins with the second conversion following a write to the ACR. Writing the ACR clears the fractional values in ACRL. ACR's format is shown in Figure 8, and ACRL's format is shown in Figure 9.

To preserve the ACR value in case of power loss, the ACR value is backed up to EEPROM. The ACR value is recovered from EEPROM on power-up. See the memory map in Table 3 for specific address location and backup frequency.

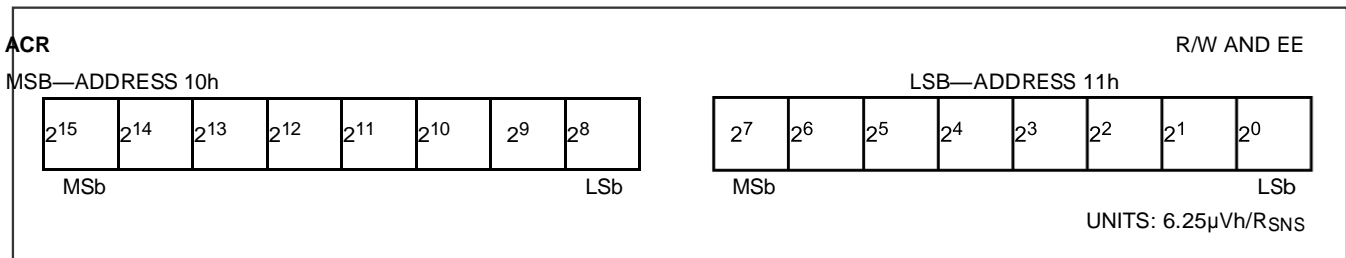


Figure 8. Accumulated Current Register (ACR) Format

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

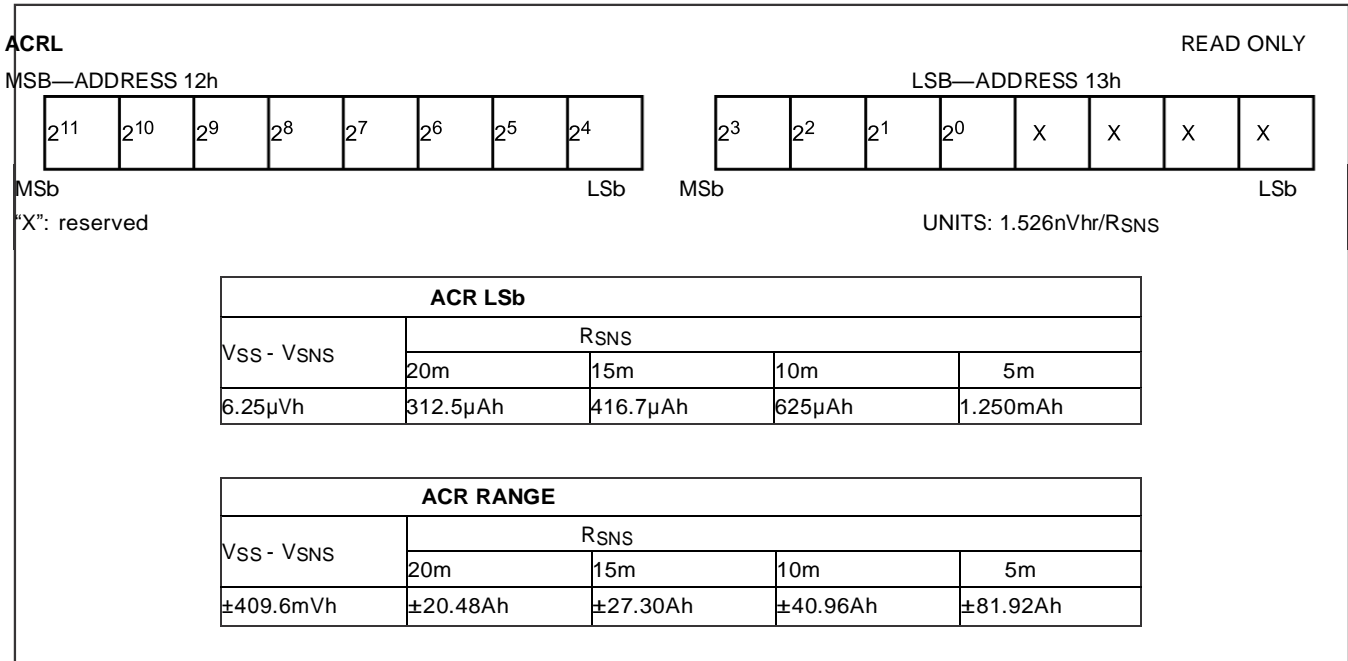


Figure 9. Fractional/Low Accumulated Current Register (ACRL) Format

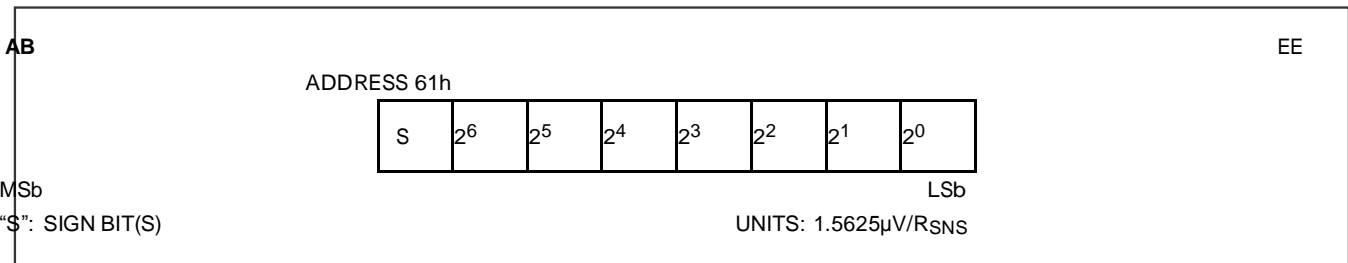


Figure 10. Accumulation Bias Register Formats

Current Blanking

The current blanking feature modifies the current measurement result prior to being accumulated in the ACR. Current blanking occurs conditionally when a current measurement (raw current + COB) falls in one of two defined ranges. The first range prevents charge currents less than 100μV from being accumulated. The second range prevents discharge currents less than 25μV in magnitude from being accumulated. Charge-current blanking is always performed, however, discharge-current blanking must be enabled by setting the NBEN bit in the Control register. See the register description for additional information.

Accumulation Bias

The Accumulation Bias (AB) register allows an arbitrary bias to be introduced into the current-accumulation process. The AB can be used to account for currents that do not flow through the sense resistor, estimate currents too small to measure, estimate battery self-discharge, or correct for static offset of the individual DS2788 device. The AB register allows a user-programmed positive or negative constant bias to be included in the current accumulation process. The user-programmed two's complement value, with bit weighting the same as the Current register, is added to the ACR once per current conversion cycle. The AB value is loaded on power-up from EEPROM memory. Figure 10 shows the format of the AB register.

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

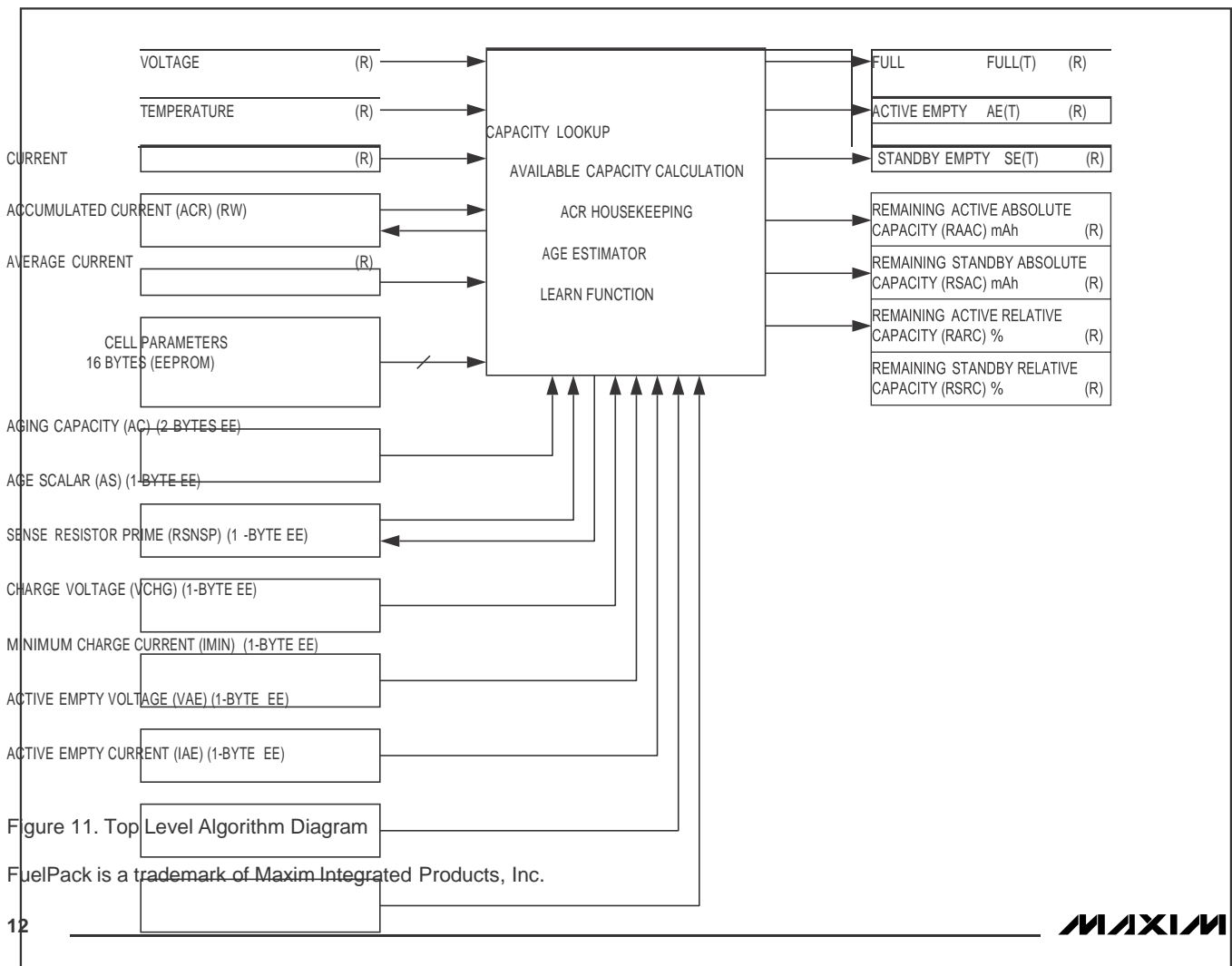
Capacity Estimation Algorithm

Remaining capacity estimation uses real-time measured values and stored parameters describing the cell characteristics and application operating limits. Figure 11 describes the algorithm inputs and outputs.

Modeling Cell Stack Characteristics

To achieve reasonable accuracy in estimating remaining capacity, the cell stack performance characteristics over temperature, load current, and charge termination

point must be considered. Since the behavior of Li+ cells is nonlinear, these characteristics must be included in the capacity estimation to achieve an acceptable level of accuracy in the capacity estimation. The FuelPack™ method used in the DS2788 is described in general in Application Note 131: Lithium-Ion Cell Fuel Gauging with Maxim Battery Monitor ICs. To facilitate efficient implementation in hardware, a modified version of the method outlined in AN131 is used to store cell characteristics in the DS2788. Full and empty points are retrieved in a lookup process that retraces piece-wise linear model consisting of three curves



Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

named full, active empty, and standby empty. Each model curve is constructed with five line segments, numbered 1 through 5. Above +50°C, the segment 5 model curves extend infinitely with zero slope, approximating the nearly flat change in capacity of Li+ cells at temperatures above +50°C. Segment 4 of each model curves originates at +50°C on its upper end and extends downward in temperature to +25°C. Segment 3 joins with segment 2, which in turn joins with segment 1. Segment 1 of each model curve extends from the junction with segment 2 to infinitely colder temperatures. Segment slopes are stored as $\mu\text{Vh ppm change per } ^\circ\text{C}$. The two junctions or breakpoints that join the segments (labeled TBP12 and TBP23 in Figure 12) are programmable in 1°C increments from -128°C to +25°C. They are stored in two's complement format, TBP23 at 7Ch, and TBP12 at 7Dh. The slope or derivative for segments 1, 2, 3, and 4 are also programmable.

Full: The full curve defines how the full point of a given cell stack depends on temperature for a given charge termination. The charge termination method used in the application is used to determine the table values. The DS2788 reconstructs the full line from cell characteristic table values to determine the full capacity of the battery at each temperature. Reconstruction occurs in one-degree temperature increments. Full values are stored as ppm change per °C. For example, if a cell had a nominal capacity of 1214mAh at +50°C, a full value of 1199mAh at +25°C, and 1182mAh at 0°C (TBP23), the slope for segment 3 would be:

$$\frac{((1199\text{mAh} - 1182\text{mAh}) / (1214\text{mAh} / 1\text{M}))}{(25^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})} = 560\text{ppm}/^\circ\text{C}$$

1 LSB of the slope registers equals 61ppm so the full segment 3 slope register (location 0x6Dh) would be programmed with a value of 0x09h. Each Slope register has a dynamic range 0ppm to 15555ppm.

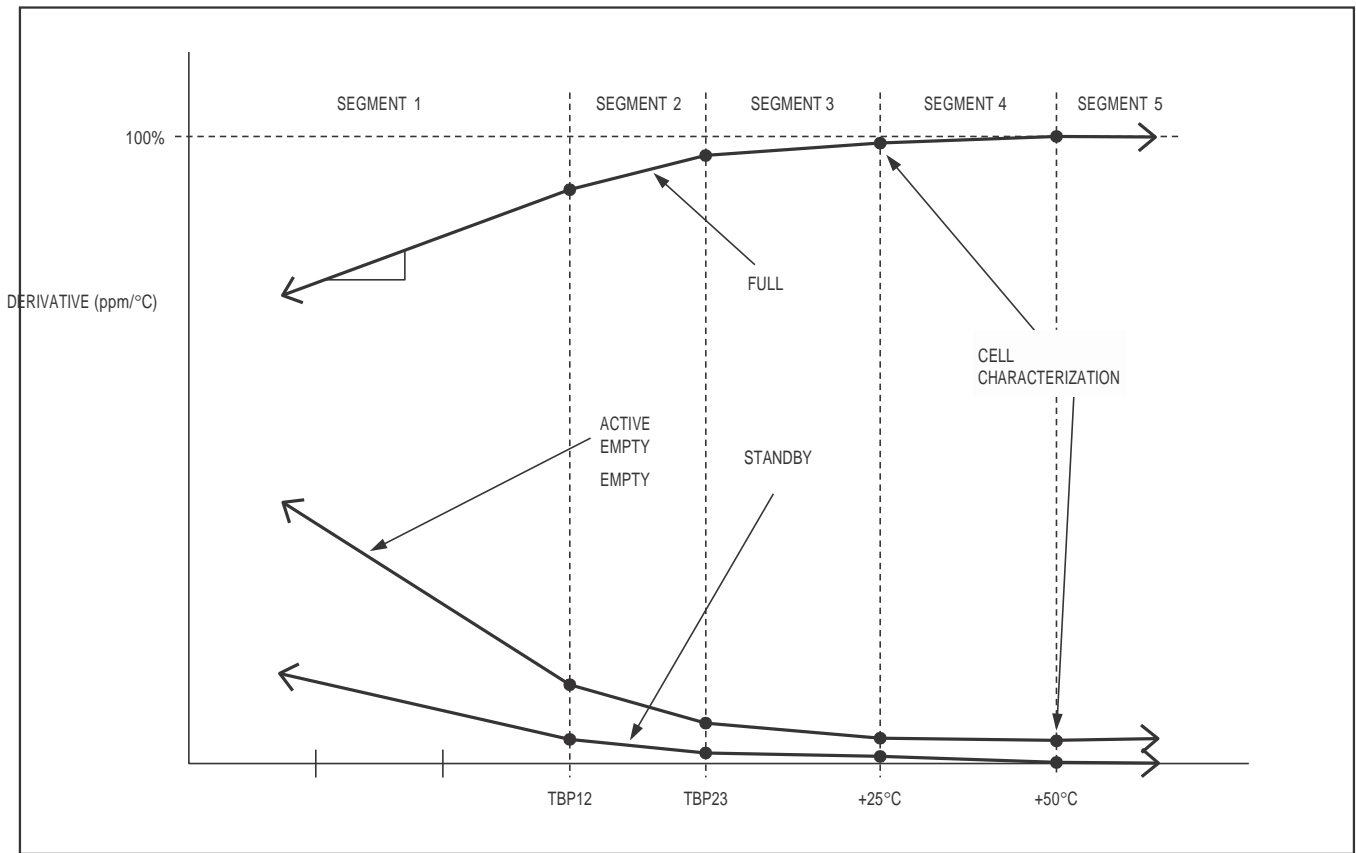


Figure 12. Cell Model Example Diagram

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Active Empty: The active empty curve defines the temperature variation in the empty point of the discharge profile based on a high-level load current (one that is sustained during a high-power operating mode) and the minimum voltage required for system operation. This load current is programmed as the active empty current (IAE), and should be a 3.5s average value to correspond to values read from the Current register and the specified minimum voltage, or active empty voltage (VAE) should be a 250ms average to correspond to values read from the Voltage register. The DS2788 reconstructs the active empty line from cell characteristic table values to determine the active empty capacity of the battery at each temperature. Reconstruction occurs in one-degree temperature increments. Active empty segment slopes are stored the same as described for the full segments.

Standby Empty: The standby empty curve defines the temperature variation in the empty point in the discharge defined by the application standby current and the minimum voltage required for standby operation. Standby empty represents the point that the battery can no longer support a subset of the full application operation, such as memory data retention or organizer functions on a wireless handset. Standby empty segment slopes are stored the same as described for the full segments.

The standby load current and voltage are used for determining the cell characteristics but are not programmed into the DS2788. The DS2788 reconstructs the standby empty line from cell characteristic table values to determine the standby empty capacity of the battery at each temperature. Reconstruction occurs in one-degree temperature increments.

Cell Stack Model Construction

The model is constructed with all points normalized to the fully charged state at +50°C. The cell parameter EEPROM block stores the initial values, the +50°C full value in mVh units, and the +50°C active empty value as a fraction of the +50°C value. Standby empty at +50°C is by definition zero and therefore no storage is required. The slopes (derivatives) of the 4 segments for each model curve are also stored in the cell parameter EEPROM block along with the break point temperatures of each segment. Table 1 shows an example of data stored in this manner.

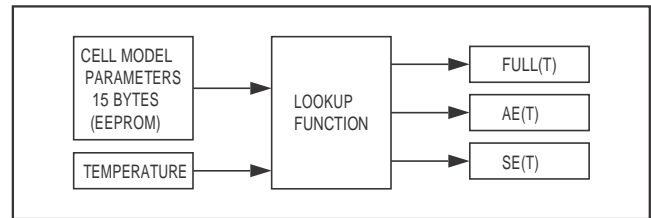


Figure 13. Lookup Function Diagram

Table 1. Example Cell Characterization Table (Normalized to +50°C)

Manufacturer's Rated Cell Capacity: 1220mAh		
Charge Voltage: 4.2V	Charge Current: 500mA	Termination Current: 50mA
Active Empty (V, I): 3.0V, 500mA		Standby Empty (V, I): 3.0V, 4mA
Sense Resistor: 0.020		

SEGMENT BREAKPOINTS
TBP12 = -12°C
TBP23 = 0°C

CALCULATED VALUE	+50°C NOMINAL (mAh)	SEGMENT 1 (ppm/°C)	SEGMENT 2 (ppm/°C)	SEGMENT 3 (ppm/°C)	SEGMENT 4 (ppm/°C)
Full	1214	488	549	1587	2686
Active Empty		854	1526	2686	3113
Standby Empty		244	183	916	244

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Application Parameters

In addition to cell model characteristics, several application parameters are needed to detect the full and empty points, as well as calculate results in mAh units.

Sense Resistor Prime (RSNSP) RSNSP stores the value of the sense resistor for use in computing the absolute capacity results. The value is stored as a 1-byte conductance value with units of mhos. RSNSP supports resistor values of 1Ω to $3.922\text{m}\Omega$. RSNSP is located in the parameter EEPROM block.

Charge Voltage (VCHG) VCHG stores the charge voltage threshold used to detect a fully charged state. The value is stored as a 1-byte voltage with units of 19.52mV and can range from 0 to 4.978V . VCHG should be set marginally less than the cell voltage at the end of the charge cycle to ensure reliable charge termination detection. VCHG is located in the parameter EEPROM block.

Minimum Charge Current (IMIN) IMIN stores the charge current threshold used to detect a fully charged state. The value is stored as a 1-byte value with units of $50\mu\text{V}$ and can range from 0 to 12.75mV . Assuming $\text{RSNS} = 20\text{m}\Omega$, IMIN can be programmed from 0 to 637.5mA in 2.5mA steps. IMIN should be set marginally greater than the charge current at the end of the charge cycle to ensure reliable charge termination detection. IMIN is located in the parameter EEPROM block.

Active Empty Voltage (VAE) VAE stores the voltage threshold used to detect the active empty point. The value is stored in 1 byte with units of 19.52mV and can range from 0 to 4.978V . VAE is located in the parameter EEPROM block.

Active Empty Current (IAE) IAE stores the discharge current threshold used to detect the active empty point. The unsigned value represents the magnitude of the discharge current and is stored in 1 byte with units of $200\mu\text{V}$ and can range from 0 to 51.2mV . Assuming $\text{RSNS} = 20\text{m}\Omega$, IAE can be programmed from 0mA to 2550mA in 10mA steps. IAE is located in the parameter EEPROM block.

Aging Capacity (AC) AC stores the rated battery capacity used in estimating the decrease in battery capacity that occurs in normal use. The value is stored in 2 bytes in the same units as the ACR ($6.25\mu\text{Vh}$). Setting AC to the manufacturer's rated capacity sets the aging rate to approximately

2.4% per 100 cycles of equivalent full capacity discharges. Partial discharge cycles are added to form equivalent full capacity discharges. The default estimation results in 88% capacity after 500 equivalent cycles. The estimated aging rate can be adjusted by setting AC to a different value than the cell manufacturer's rating. Setting AC to a lower value, accelerates the estimated aging. Setting AC to a higher value retards the estimated aging. AC is located in the parameter EEPROM block.

Age Scalar (AS) AS adjusts the capacity estimation results downward to compensate for cell aging. AS is a 1-byte value that represents values between 49.2% and 100% . The LSB is weighted at 0.78% (precisely 2^{-7}). A value of 100% (128 decimal or 80h) represents an unaged battery. A value of 95% is recommended as the starting AS value at the time of pack manufacture to allow learning a larger capacity on batteries that have an initial capacity greater than the nominal capacity programmed in the cell characteristic table. AS is modified by the cycle-count-based age estimation introduced above and by the capacity learn function. The host system has read and write access to AS, however caution should be exercised when writing AS to ensure that the cumulative aging estimate is not overwritten with an incorrect value. Typically, it is not necessary for the host to write AS because the DS2788 automatically saves AS to EEPROM on a periodic basis. (See the Memory section for details.) The EEPROM-stored value of AS is recalled on power-up.

Capacity Estimation Utility Functions

Aging Estimation As previously discussed, the AS register value is adjusted occasionally based on cumulative discharge. As the ACR register decrements during each discharge cycle, an internal counter is incremented until equal to 32 times AC. AS is then decremented by one, resulting in a decrease in the scaled full battery capacity of 0.78% . See the AC register description for recommendations on customizing the age estimation rate.

Learn Function Since Li^+ cells exhibit charge efficiencies near unity, the charge delivered to a Li^+ cell from a known empty point to a known full point is a dependable measure of the cell capacity. A continuous charge from empty to full results in a "learn cycle." First, the active empty point must be detected. The learn flag (LEARNF) is set at this point. Second, once charging starts, the charge must

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

continue uninterrupted until the battery is charged to full. Upon detecting full, LEARNF is cleared, the charge-to-full (CHGTF) flag is set, and the age scalar (AS) is adjusted according to the learned capacity of the cell.

ACR Housekeeping The ACR register value is adjusted occasionally to maintain the coulomb count within the model curve boundaries. When the battery is charged to full (CHGTF set), the ACR is set equal to the age-scaled full lookup value at the present temperature. If a learn cycle is in progress, correction of the ACR value occurs after the age scalar (AS) is updated.

When an empty condition is detected (AEF or LEARNF set), the ACR adjustment is conditional. If AEF is set and LEARNF is not, the active empty point was not detected and the battery is likely below the active empty capacity of the model. The ACR is set to the active empty model value only if it is greater than the active empty model value. If LEARNF is set, the battery is at the active empty point and the ACR is set to the active empty model value.

Full Detect Full detection occurs when the voltage (VOLT) readings remain continuously above the VCHG threshold for the period between two average current (I AVG) readings, where both I AVG readings are below IMIN. The two consecutive I AVG readings must also be positive and nonzero. This ensures that removing the battery from the charger does not result in a false detection of full. Full detect sets the charge-to-full (CHGTF) bit in the Status (STATUS) register.

Active Empty Point Detect Active empty point detection occurs when the Voltage register drops below the VAE threshold and the two previous current readings are above IAE. This captures the event of the battery reaching the active empty point. Note that the two previous current readings must be negative and greater in magnitude than IAE, that is, a larger discharge current than specified by the IAE threshold. Qualifying the voltage level with the discharge rate ensures that the active empty point is not detected at loads much lighter than those used to construct the model. Also, active empty must not be detected when a deep discharge at a very light load is followed by a load greater than IAE. Either case would cause a learn cycle on the following charge-to-full to include part of the standby capacity in the measurement of the active capacity. Active empty detection sets the learn flag bit (LEARNF) in STATUS.

Result Registers

The DS2788 processes measurement and cell characteristics on a 3.5s interval and yields seven result registers. The result registers are sufficient for direct display to the user in most applications. The host system can produce customized values for system use or user display by combining measurement, result, and user EEPROM values.

FULL(T): The full capacity of the battery at the present temperature is reported normalized to the +50°C full value. This 15-bit value reflects the cell model full value at the given temperature. FULL(T) reports values between 100% and 50% with a resolution of 61ppm (precisely 2^{-14}). Though the register format permits values greater than 100%, the register value is clamped to a maximum value of 100%.

Active Empty, AE(T): The active empty capacity of the battery at the present temperature is reported normalized to the +50°C full value. This 13-bit value reflects the cell model active empty at the given temperature. AE(T) reports values between 0% and 49.8% with a resolution of 61ppm (precisely 2^{-14}).

Standby Empty, SE(T): The standby empty capacity of the battery at the present temperature is reported normalized to the +50°C full value. This 13-bit value reflects the cell model standby empty value at the current temperature. SE(T) reports values between 0% and 49.8% with a resolution of 61ppm (precisely 2^{-14}).

Remaining Active Absolute Capacity, RAAC [mAh]: RAAC reports the capacity available under the current temperature conditions at the active empty discharge rate (IAE) to the active empty point in absolute units of milliamp/hours (mAh). RAAC is 16 bits. See Figure 14.

Remaining Standby Absolute Capacity, RSAC [mAh]: RSAC reports the capacity available under the current temperature conditions at the standby empty discharge rate (ISE) to the standby empty point capacity in absolute units of mAh. RSAC is 16 bits. See Figure 15.

Remaining Active Relative Capacity, RARC [%]: RARC reports the capacity available under the current temperature conditions at the active empty discharge rate (IAE) to the active empty point in relative units of percent. RARC is 8 bits. See Figure 16.

Remaining Standby Relative Capacity, RSRC [%]: RSRC reports the capacity available under the current temperature conditions at the standby empty discharge rate (ISE) to the standby empty point capacity in relative units of percent. RSRC is 8 bits. See Figure 17.

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

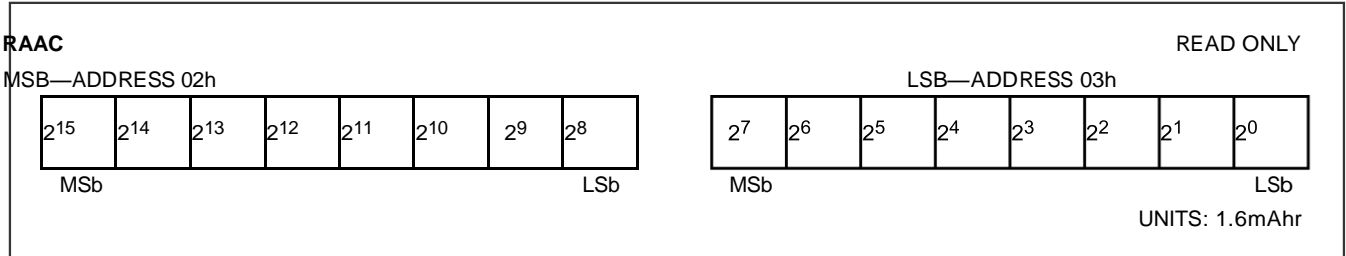


Figure 14. Remaining Active Absolute Capacity Register Format

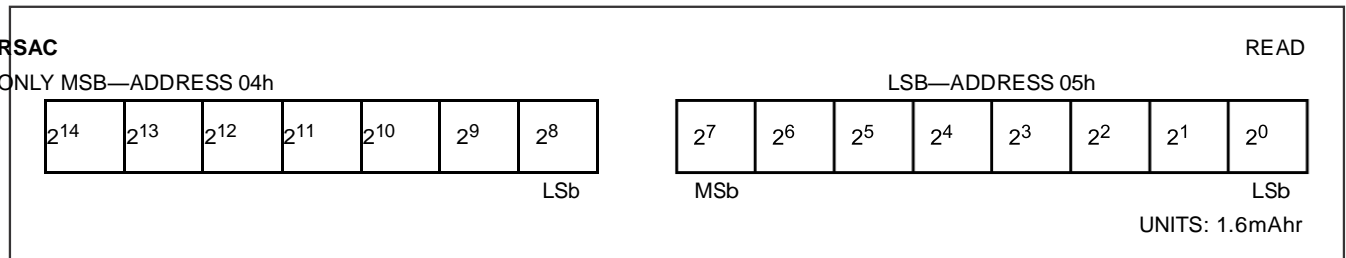


Figure 15. Remaining Standby Absolute Capacity Register Format

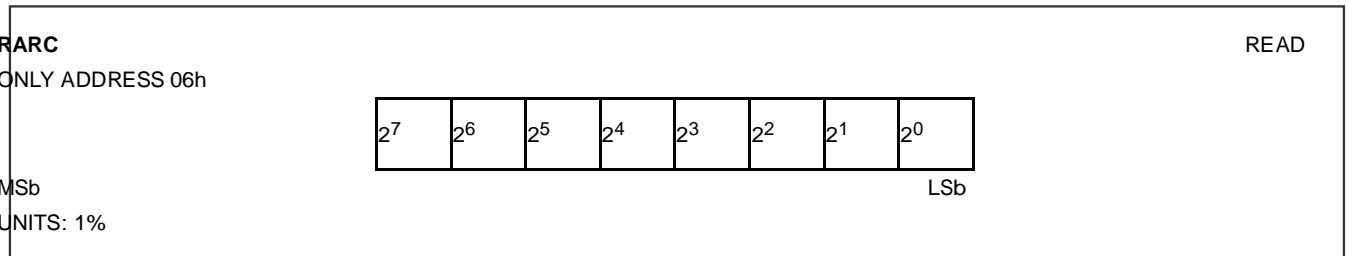


Figure 16. Remaining Active Relative Capacity Register Format

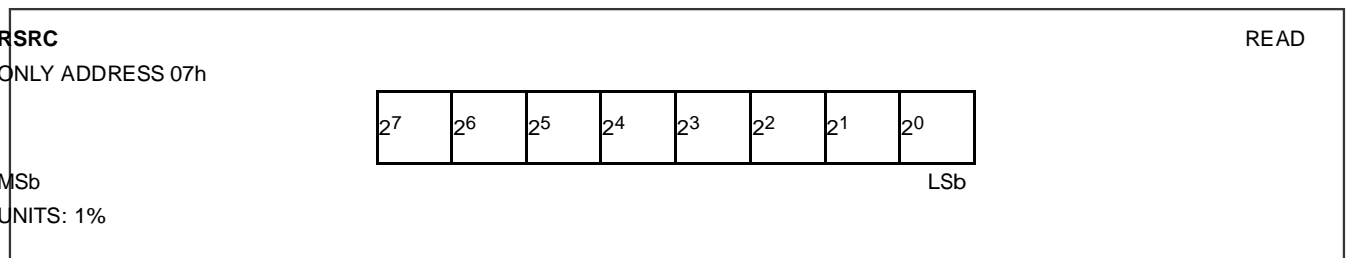


Figure 17. Remaining Standby Relative Capacity Register Format

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Calculation of Results

$$RAAC [mAh] = (ACR[mVh] - AE(T) \times FULL50[mVh]) \times RSNSP [mhos]$$

$$RSAC [mAh] = (ACR[mVh] - SE(T) \times FULL50[mVh]) \times RSNSP [mhos]$$

$$RARC [\%] = 100\% \times (ACR[mVh] - AE(T) \times FULL50[mVh]) / \{(AS \times FULL(T) - AE(T)) \times FULL50[mVh]\}$$

$$RSRC [\%] = 100\% \times (ACR[mVh] - SE(T) \times FULL50[mVh]) / \{(AS \times FULL(T) - SE(T)) \times FULL50[mVh]\}$$

Status Register

The Status register contains bits that report the device status. The bits can be set internally by the DS2788. The CHGTF, AEF, SEF, and LEARNF bits are read-only

bits that can be cleared by hardware. The UVF and PORF bits can only be cleared through the 1-Wire interface.

ADDRESS	01h		BIT DEFINITION
Field	Bit	Format	Allowable Values
CHGTF	7	Read Only	Charge Termination Flag Set to 1 when: (VOLT > VCHG) and (0 < IAVG < IMIN) continuously for a period between two IAVG register updates (28s to 56s). Cleared to 0 when: RARC < 90%
AEF	6	Read Only	Active Empty Flag Set to 1 when: VOLT < VAE Cleared to 0 when: RARC > 5%
SEF	5	Read Only	Standby Empty Flag Set to 1 when: RSRC < 10% Cleared to 0 when: RSRC > 15%
LEARNF	4	Read Only	Learn Flag—When set to 1, a charge cycle can be used to learn battery capacity. Set to 1 when: (VOLT falls from above VAE to below VAE) and (CURRENT > IAE) Cleared to 0 when: (CHGTF = 1) or (CURRENT < 0) or (ACR = 0**) or (ACR written or recalled from EEPROM) or (SLEEP Entered).
Reserved	3	Read Only	Undefined
UVF	2	Read/Write*	Undervoltage Flag Set to 1 when: VOLT < VSLEEP Cleared to 0 by: User
PORF	1	Read/Write*	Power-On Reset Flag—Useful for reset detection, see text below. Set to 1 when: upon power-up by hardware. Cleared to 0 by: User
Reserved	0	Read Only	Undefined

*This bit can be set by the DS2788, and can only be cleared through the 1-Wire interface.

**LEARNF is only cleared if ACR reaches 0 after VOLT < VAE.

Figure 18. Status Register Format

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Control Register

All Control register bits are read and write accessible. The Control register is recalled from parameter EEPROM memory at power-up. Register bit values can

be modified in shadow RAM after power-up. Shadow RAM values can be saved as the power-up default values by using the Copy Data command.

DS2788

ADDRESS	60h		BIT DEFINITION
Field	Bit	Format	Allowable Values
NBEN	7	Read/Write	Negative Blanking Enable 0: Allows negative current readings to always be accumulated. 1: Enables blanking of negative current readings up to -25 μ V.
UVEN	6	Read/Write	Undervoltage SLEEP Enable 0: Disables transition to SLEEP mode based on V_{IN} voltage. 1: Enables transition to SLEEP mode if $V_{IN} < V_{SLEEP}$ and DQ are stable at either logic level for t_{SLEEP} .
PMOD	5	Read/Write	Power Mode Enable 0: Disables transition to SLEEP mode based on DQ logic state. 1: Enables transition to SLEEP mode if DQ is at a logic-low for t_{SLEEP} .
RNAOP	4	Read/Write	Read Net Address Op Code 0: Read net address command = 33h. 1: Read net address command = 39h.
DC	3	Read/Write	Display Control 0: Enables LED5 fuel-gauge display. 1: Enables LED4 fuel-gauge display.
Reserved	0:2		Undefined

Figure 19. Control Register Format

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Special Feature Register

All Special Feature register bits are read and write accessible, with default values specified in each bit definition.

ADDRESS	15h		BIT DEFINITION
Field	Bit	Format	Allowable Values
Reserved	1:7		Undefined
PIOSC	0	Read/Write	PIO Sense and Control Read values: 0: PIO pin V_{IL} 1: PIO pin V_{IH} Write values: 0: Activates PIO pin open-drain output driver, forcing the PIO pin low. 1: Disables the output driver, allowing the PIO pin to be pulled high or used as an input. Power-up and SLEEP mode default: 1 (PIO pin is high-Z). Note: PIO pin has weak pulldown.

Figure 20. Special Feature Register Format

Fuel-Gauge Display

The DS2788 provides five open-drain drivers capable of sinking 30mA. These can be used to directly drive either 4 or 5 LEDs to display Remaining Active Relative Pack Capacity (RARC). The LEDs are enabled when the PIO is configured as an input and the PIO pin recognizes a rising edge. The display lights for 4s and then is disabled regardless of the state of the PIO pin. Further presses or releases of the button connected to the PIO pin after the 100ms debounce delay causes the display to be enabled (the display does not light continuously if the button is held down).

Table 2 summarizes how the LEDs are enabled. B signifies that the LED is blinking at a 50% duty cycle, 0.5s on, 0.5s off, to be repeated for the display time of 4s. L signifies the pin is pulled low, and the LED is lit. X signifies the pin is high impedance, and the LED is unlit.

Table 2. Fuel-Gauge Display Summary

CAPACITY		5 LEDs, DC: 0 LED5–LED1	4 LEDs, DC: 1 LED4–LED1
RARC 10		XXXXB	XXB
10 < RARC 20		XXXXL	XXL
20 < RARC 25		XXXLL	XXL
25 < RARC 40		XXXLL	XXLL
40 < RARC 50		XXLLL	XXLL
50 < RARC 60		XXLLL	XLLL
60 < RARC 75		XLLLL	XLLL
75 < RARC 80		XLLLL	LLLL
80 < RARC 100		LLLLL	LLLL

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

EEPROM Register

The EEPROM register provides access control of the EEPROM blocks. EEPROM blocks can be locked to prevent alteration of data within the block. Locking a block

disables write access to the block. Once a block is locked, it cannot be unlocked. Read access to EEPROM blocks is unaffected by the lock/unlock status.

DS2788

ADDRESS		1Fh		BIT DEFINITION	
Field	Bit	Format	Allowable Values		
EEC	7	Read Only	EEPROM Copy Flag Set to 1 when: Copy Data command executed. Cleared to 0 when: Copy Data command completes. Note: While EEC = 1, writes to EEPROM addresses are ignored. Power-up default: 0		
LOCK	6	Read/Write to 1	EEPROM Lock Enable Host write to 1: Enables the Lock command. Host must issue Lock command as next command after writing lock enable bit to 1. Cleared to 0 when: Lock command completes or when Lock command is not the command issued immediately following the Write command used to set the lock enable bit. Power-up default: 0		
Reserved	2:6		Undefined		
BL1	1	Read Only	EEPROM Block 1 Lock Flag (Parameter EEPROM 60h–7Fh) 0: EEPROM is not locked. 1: EEPROM block is locked. Factory default: 0		
BL0	0	Read Only	EEPROM Block 0 Lock Flag (User EEPROM 20h–2Fh) 0: EEPROM is not locked. 1: EEPROM block is locked. Factory default: 0		

Figure 21. EEPROM Register Format

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Memory

The DS2788 has a 256-byte linear memory space with registers for instrumentation, status, and control, as well as EEPROM memory blocks to store parameters and user information. Byte addresses designated as “Reserved” return undefined data when read. Reserved bytes should not be written. Several byte registers are paired into two-byte registers in order to store 16-bit values. The MSB of the 16-bit value is located at an even address and the LSB is located at the next address (odd) byte. When the MSB of a two-byte register is read, the MSB and LSB are latched simultaneously and held for the duration of the Read-Data command to prevent updates to the LSB during the read. This ensures synchronization between the two register bytes. For consistent results, always read the MSB and the LSB of a two-byte register during the same Read Data command sequence.

EEPROM memory consists of the NV EEPROM cells overlaid with volatile shadow RAM. The Read Data and Write Data commands allow the 1-Wire interface to directly access only the shadow RAM. The Copy Data and Recall Data function commands transfer data between the shadow RAM and the EEPROM cells. To modify the data stored in the EEPROM cells, data must be written to the shadow RAM and then copied to the EEPROM. To

verify the data stored in the EEPROM cells, the EEPROM data must be recalled to the shadow RAM and then read from the shadow RAM.

User EEPROM

A 16-byte user EEPROM memory (block 0, addresses 20h–2Fh) provides NV memory that is uncommitted to other DS2788 functions. Accessing the user EEPROM block does not affect the operation of the DS2788. User EEPROM is lockable, and once locked, write access is not allowed. The battery pack or host system manufacturer can program lot codes, date codes, and other manufacturing, warranty, or diagnostic information and then lock it to safeguard the data. User EEPROM can also store parameters for charging to support different size batteries in a host device as well as auxiliary model data such as time to full charge estimation parameters.

Parameter EEPROM Model data for the cells and application operating parameters are stored in the parameter EEPROM memory (block 1, addresses 60h–7Fh). The ACR (MSB and LSB) and AS registers are automatically saved to EEPROM when the RARC result crosses 4% boundaries. This allows the DS2788 to be located outside the protection FETs. In this manner, if a protection device is triggered, the DS2788 cannot lose more than 4% of charge or discharge data.

Table 3. Memory Map

ADDRESS (HEX)	DESCRIPTION	READ/WRITE
00	Reserved	R
01	STATUS: Status Register	R/W
02	RAAC: Remaining Active Absolute Capacity MSB	R
03	RAAC: Remaining Active Absolute Capacity LSB	R
04	RSAC: Remaining Standby Absolute Capacity MSB	R
05	RSAC: Remaining Standby Absolute Capacity LSB	R
06	RARC: Remaining Active Relative Capacity	R
07	RSRC: Remaining Standby Relative Capacity	R
08	I AVG: Average Current Register MSB	R
09	I AVG: Average Current Register LSB	R
0A	TEMP: Temperature Register MSB	R
0B	TEMP: Temperature Register LSB	R
0C	VOLT: Voltage Register MSB	R
0D	VOLT: Voltage Register LSB	R
0E	CURRENT: Current Register MSB	R
0F	CURRENT: Current Register LSB	R
10	ACR: Accumulated Current Register MSB	R/W*
11	ACR: Accumulated Current Register LSB	R/W*

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Table 3. Memory Map (continued)

ADDRESS (HEX)	DESCRIPTION	READ/WRITE
12	ACRL: Low Accumulated Current Register MSB	R
13	ACRL: Low Accumulated Current Register LSB	R
14	AS: Age Scalar	R/W*
15	SFR: Special Feature Register	R/W
16	FULL: Full Capacity MSB	R
17	FULL: Full Capacity LSB	R
18	AE: Active Empty MSB	R
19	AE: Active Empty LSB	R
1A	SE: Standby Empty MSB	R
1B	SE: Standby Empty LSB	R
1C to 1E	Reserved	—
1F	EEPROM: EEPROM Register	R/W
20 to 2F	User EEPROM, Lockable, Block 0	R/W
30 to 5F	Reserved	—
60 to 7F	Parameter EEPROM, Lockable, Block 1	R/W
80 to AD	Reserved	—
AE	FVGAIN: Factory Voltage Gain MSB	R
AF	FVGAIN: Factory Voltage Gain LSB	R
B0	FRSGAIN: Factory Sense Resistor Gain MSB	R
B1	FRSGAIN: Factory Sense Resistor Gain LSB	R
B2 to FF	Reserved	—

*Register value is automatically saved to EEPROM during ACTIVE mode operation and recalled from EEPROM on power-up.

Table 4. Parameter EEPROM Memory Block 1

ADDRESS (HEX)	DESCRIPTION	ADDRESS (HEX)	DESCRIPTION
60	CONTROL: Control Register	70	AE Segment 4 Slope
61	AB: Accumulation Bias	71	AE Segment 3 Slope
62	AC: Aging Capacity MSB	72	AE Segment 2 Slope
63	AC: Aging Capacity LSB	73	AE Segment 1 Slope
64	VCHG: Charge Voltage	74	SE Segment 4 Slope
65	IMIN: Minimum Charge Current	75	SE Segment 3 Slope
66	VAE: Active Empty Voltage	76	SE Segment 2 Slope
67	IAE: Active Empty Current	77	SE Segment 1 Slope
68	Active Empty 50	78	RSGAIN: Sense Resistor Gain MSB
69	RSNSP: Sense Resistor Prime	79	RSGAIN: Sense Resistor Gain LSB
6A	Full 50 MSB	7A	RSTC: Sense Resistor Temp Coefficient
6B	Full 50 LSB	7B	COB: Current Offset Bias
6C	Full Segment 4 Slope	7C	TBP23
6D	Full Segment 3 Slope	7D	TBP12
6E	Full Segment 2 Slope	7E	VGAIN: Voltage Gain MSB
6F	Full Segment 1 Slope	7F	VGAIN: Voltage Gain LSB

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

1-Wire Bus System

The 1-Wire bus is a system that has a single bus master and one or more slaves. A multidrop bus is a 1-Wire bus with multiple slaves. A single-drop bus has only one slave device. In all instances, the DS2788 is a slave device. The bus master is typically a micro-processor in the host system. The discussion of this bus system consists of four topics: 64-bit net address, hardware configuration, transaction sequence, and 1-Wire signaling.

64-Bit Net Address

Each DS2788 has a unique, factory-programmed 1-Wire net address that is 64 bits in length. The first eight bits are the 1-Wire family code (32h for DS2788). The next 48 bits are a unique serial number. The last eight bits are a cyclic redundancy check (CRC) of the first 56 bits (see Figure 22). The 64-bit net address and the 1-Wire I/O circuitry built into the device enable the DS2788 to communicate through the 1-Wire protocol detailed in the 1-Wire Bus System section.

CRC Generation

The DS2788 has an 8-bit CRC stored in the MSB of its 1-Wire net address. To ensure error-free transmission of the address, the host system can compute a CRC value from the first 56 bits of the address and compare it to the CRC from the DS2788. The host system is responsible for verifying the CRC value and taking action as a result. The DS2788 does not compare CRC

values and does not prevent a command sequence from proceeding as a result of a CRC mismatch. Proper use of the CRC can result in a communication channel with a very high level of integrity.

The CRC can be generated by the host using a circuit consisting of a shift register and XOR gates as shown in Figure 23, or it can be generated in software. Additional information about the Maxim 1-Wire CRC is available in Application Note 27: Understanding and Using Cyclic Redundancy Checks with Maxim iButton Products.

In the circuit in Figure 23, the shift register bits are initialized to 0. Then, starting with the LSB of the family code, one bit at a time is shifted in. After the 8th bit of the family code has been entered, then the serial number is entered. After the 48th bit of the serial number has been entered, the shift register contains the CRC value.

Hardware Configuration Because the 1-Wire bus has only a single line, it is important that each device on the bus be able to drive it at the appropriate time. To facilitate this, each device attached to the 1-Wire bus must connect to the bus with open-drain or three-state output drivers. The DS2788 uses an open-drain output driver as part of the bidirectional interface circuitry shown in Figure 24. If a bidirectional pin is not available on the bus master, separate output and input pins can be connected together.

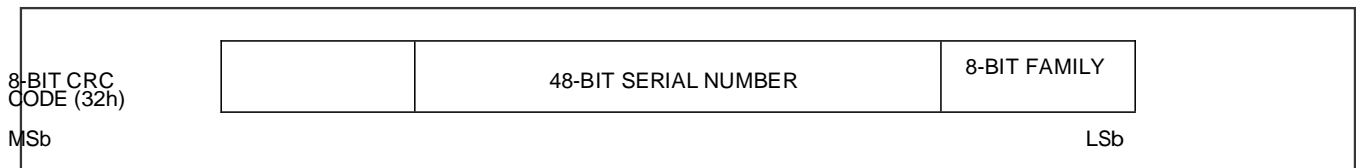


Figure 22. 1-Wire Net Address Format

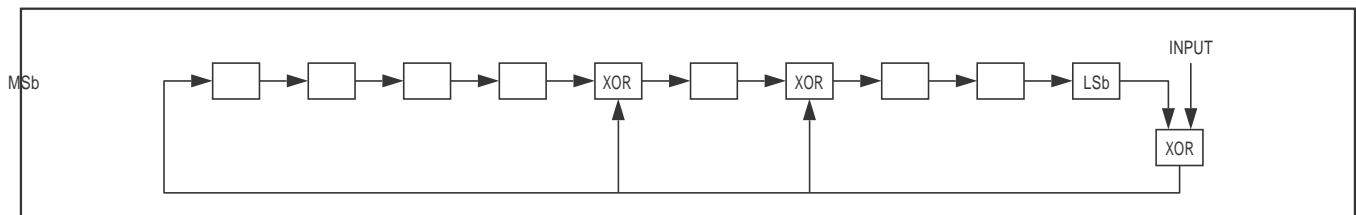


Figure 23. 1-Wire CRC Generation Block Diagram

iButton is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

The 1-Wire bus must have a pullup resistor at the bus-master end of the bus. For short line lengths, the value of this resistor should be approximately $5k\Omega$. The idle state for the 1-Wire bus is high. If, for any reason, a bus transaction must be suspended, the bus must be left in the idle state to properly resume the transaction later. If the bus is left low for more than $120\mu s$ ($16\mu s$ for overdrive speed), slave devices on the bus begin to interpret the low period as a reset pulse, effectively terminating the transaction.

The DS2788 can operate in two communication speed modes, standard and overdrive. The speed mode is determined by the input logic level of the OVD pin with a logic 0 selecting standard speed and a logic 1 selecting overdrive speed. The OVD pin must be at a stable logic level of 0 or 1 before initializing a transaction with a reset pulse. All 1-Wire devices on a multi-node bus must operate at the same communication speed for proper operation. 1-Wire timing for both standard and overdrive speeds are listed in the Electrical Characteristics: 1-Wire Interface tables.

Transaction Sequence

The protocol for accessing the DS2788 through the 1-Wire port is as follows:

- Initialization
- Net Address Commands
- Function Command

• Transaction/Data

The sections that follow describe each of these steps in detail.

All transactions of the 1-Wire bus begin with an initialization sequence consisting of a reset pulse transmitted by the bus master, followed by a presence pulse simultaneously transmitted by the DS2788 and any other slaves on the bus. The presence pulse tells the bus master that one or more devices are on the bus and ready to operate. For more details, see the 1-Wire Signaling section.

Net Address Commands Once the bus master has detected the presence of one or more slaves, it can issue one of the net address commands described in the following paragraphs. The name of each ROM command is followed by the 8-bit op code for that command in square brackets. Figure 25 presents a transaction flowchart of the net address commands.

Read Net Address [33h or 39h]. This command allows the bus master to read the DS2788's 1-Wire net address. This command can only be used if there is a single slave on the bus. If more than one slave is present, a data collision occurs when all slaves try to transmit at the same time (open drain produces a wired-AND result). The RNAOP bit in the Status register selects the op code for this command, with RNAOP = 0 indicating 33h and RNAOP = 1 indicating 39h.

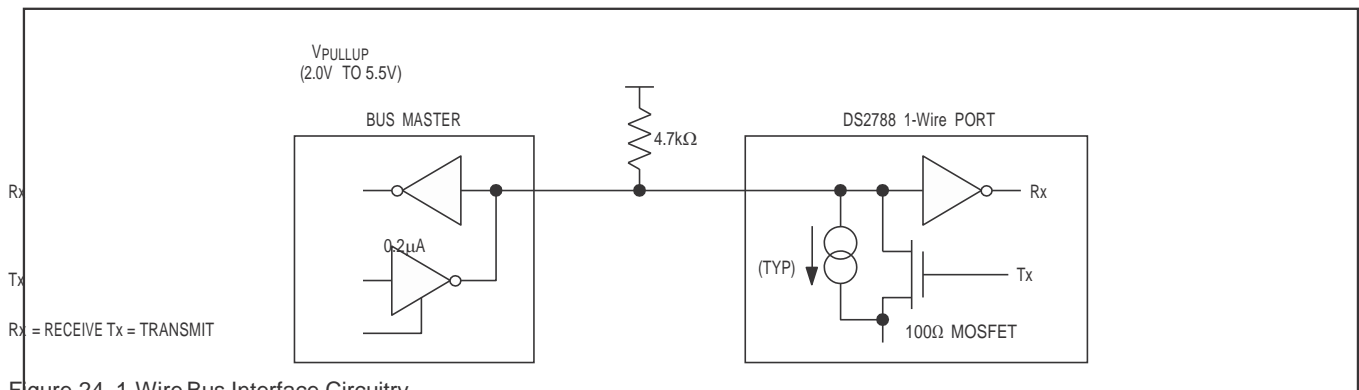


Figure 24. 1-Wire Bus Interface Circuitry

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Match Net Address [55h]. This command allows the bus master to specifically address one DS2788 on the 1-Wire bus. Only the addressed DS2788 responds to any subsequent function command. All other slave devices ignore the function command and wait for a reset pulse. This command can be used with one or more slave devices on the bus.

Skip Net Address [CCh]. This command saves time when there is only one DS2788 on the bus by allowing the bus master to issue a function command without specifying the address of the slave. If more than one slave device is present on the bus, a subsequent function command can cause a data collision when all slaves transmit data at the same time.

Search Net Address [F0h]. This command allows the bus master to use a process of elimination to identify the 1-Wire net addresses of all slave devices on the bus. The search process involves the repetition of a simple three-step routine: read a bit, read the complement of the bit, then write the desired value of that bit. The bus master performs this simple three-step routine on each bit location of the net address. After one complete pass through all 64 bits, the bus master knows the address of one device. The remaining devices can then be identified on additional iterations of the process. See Chapter 5 of the Book of *iButton Standards* for a comprehensive discussion of a net address search, including an actual example (www.maxim-ic.com/ibuttonbook).

Resume [A5h]. This command increases data throughput in multidrop environments where the DS2788 needs to be accessed several times. Resume is similar to the Skip Net Address command in that the 64-bit net address does not have to be transmitted each time the DS2788 is accessed. After successfully executing a Match Net Address command or Search Net Address command, an internal flag is set in the DS2788. When the flag is set, the DS2788 can be repeatedly accessed through the Resume command function. Accessing another device on the bus clears the flag, thus preventing two or more devices from simultaneously responding to the Resume command function.

Function Commands After successfully completing one of the net address commands, the bus master can access the features of the DS2788 with any of the function commands described in the following paragraphs. The name of each function is followed by the 8-bit op code for that command in square brackets. Table 5 summarizes the function commands.

Read Data [69h, XX]. This command reads data from the DS2788 starting at memory address XX. The LSb of the data in address XX is available to be read immediately after the MSb of the address has been entered. Because the address is automatically incremented after the MSb of each byte is received, the LSb of the data at address XX + 1 is available to be read immediately after the MSb of the data at address XX. If the bus master continues to read beyond address FFh, data is read starting at memory address 00 and the address is automatically incremented until a reset pulse occurs. Addresses labeled “Reserved” in the memory map contain undefined data values. The Read Data command can be terminated by the bus master with a reset pulse at any bit boundary. Reads from EEPROM block addresses return the data in the shadow RAM. A Recall Data command is required to transfer data from the EEPROM to the shadow. See the Memory section for more details.

Write Data [6Ch, XX]. This command writes data to the DS2788 starting at memory address XX. The LSb of the data to be stored at address XX can be written immediately after the MSb of address has been entered. Because the address is automatically incremented after the MSb of each byte is written, the LSb to be stored at address XX + 1 can be written immediately after the MSb to be stored at address XX. If the bus master continues to write beyond address FFh, the data starting at address 00 is overwritten. Writes to read-only addresses, reserved addresses, and locked EEPROM blocks are ignored. Incomplete bytes are not written. Writes to unlocked EEPROM block addresses modify the shadow RAM. A Copy Data command is required to transfer data from the shadow to the EEPROM. See the Memory section for more details.

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Copy Data [48h, XX]. This command copies the contents of the EEPROM shadow RAM to EEPROM cells for the EEPROM block containing address XX. Copy data commands that address locked blocks are ignored. While the copy data command is executing, the EEC bit in the EEPROM register is set to 1 and writes to EEPROM addresses are ignored. Reads and writes to non-EEPROM addresses can still occur while the copy is in progress. The copy data command takes t_{EEC} time to execute, starting on the next falling edge after the address is transmitted.

Recall Data [B8h, XX]. This command recalls the contents of the EEPROM cells to the EEPROM shadow memory for the EEPROM block containing address XX.

Lock [6Ah, XX]. This command locks (write protects) the block of EEPROM memory containing memory address XX. The lock bit in the EEPROM register must be set to 1 before the lock command is executed. To help prevent unintentional locks, one must issue the lock command immediately after setting the lock bit (EEPROM register, address 1Fh, bit 06) to a 1. If the lock bit is 0 or if setting the lock bit to 1 does not immediately precede the lock command, the lock command has no effect. The lock command is permanent; a locked block can never be written again.

Table 5. Function Commands

COMMAND	DESCRIPTION	COMMAND PROTOCOL	BUS STATE AFTER COMMAND PROTOCOL	BUS DATA
Read Data	Reads data from memory starting at address XX.	69h, XX	Master Rx	Up to 256 bytes of data
Write Data	Writes data to memory starting at address XX.	6Ch, XX	Master Tx	Up to 256 bytes of data
Copy Data	Copies shadow RAM data to EEPROM block containing address XX.	48h, XX	Master Reset	None
Recall Data	Recalls EEPROM block containing address XX to RAM.	B8h, XX	Master Reset	None
Lock	Permanently locks the block of EEPROM containing address XX.	6Ah, XX	Master Reset	None

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

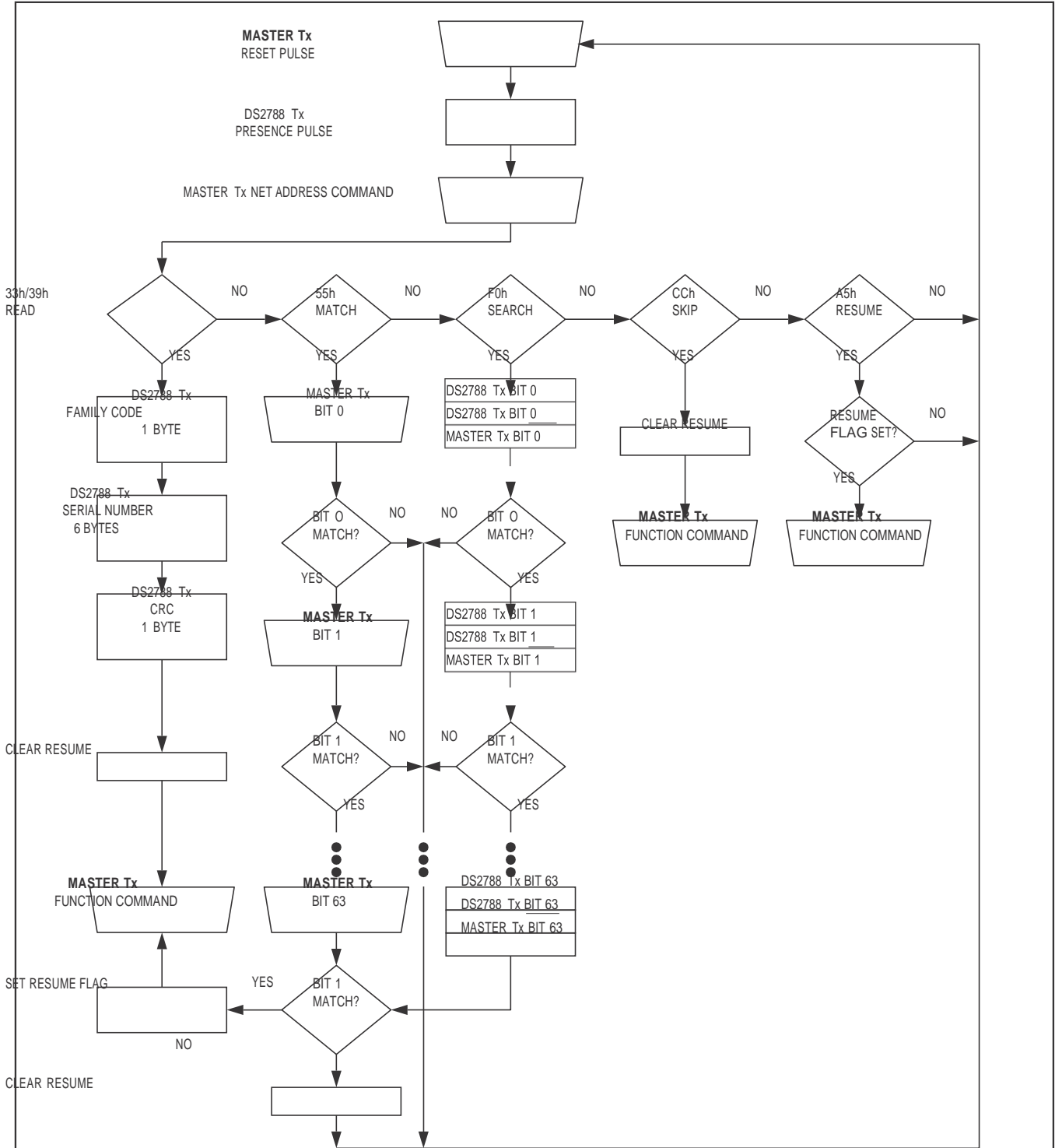


Figure 25. Net Address Command Flowchart

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

1-Wire Signaling The 1-Wire bus requires strict signaling protocols to ensure data integrity. The four protocols used by the DS2788 are as follows: the initialization sequence (reset pulse followed by presence pulse), write-0, write-1, and read data. All these types of signaling except the presence pulse are initiated by the bus master.

Figure 26 shows the initialization sequence required to begin any communication with the DS2788. A presence pulse following a reset pulse indicates that the DS2788 is ready to accept a net address command. The bus master transmits (Tx) a reset pulse for t_{RSTL} . The bus master then releases the line and goes into receive mode (Rx). The 1-Wire bus line is then pulled high by the pullup resistor. After detecting the rising edge on the DQ pin, the DS2788 waits for t_{PDH} and then transmits the presence pulse for t_{PDL} .

Write-Time Slots A write-time slot is initiated when the bus master pulls the 1-Wire bus from a logic-high (inactive) level to a logic-low level. There are two types of write-time slots: write-1 and write-0. All write-time slots must be t_{SLOT} in duration with a $1\mu s$ minimum recovery time, t_{REC} ,

between cycles. The DS2788 samples the 1-Wire bus line between $15\mu s$ and $60\mu s$ (between $2\mu s$ and $6\mu s$ for overdrive speed) after the line falls. If the line is high when sampled, a write-1 occurs. If the line is low when sampled, a write-0 occurs (see Figure 27). For the bus master to generate a write-1 time slot, the bus line must be pulled low and then released, allowing the line to be pulled high within $15\mu s$ ($2\mu s$ for overdrive speed) after the start of the write-time slot. For the host to generate a write-0 time slot, the bus line must be pulled low and held low for the duration of the write-time slot.

Read-Time Slots A read-time slot is initiated when the bus master pulls the 1-Wire bus line from a logic-high level to a logic-low level. The bus master must keep the bus line low for at least $1\mu s$ and then release it to allow the DS2788 to present valid data. The bus master can then sample the data t_{RDV} from the start of the read-time slot. By the end of the read-time slot, the DS2788 releases the bus line and allows it to be pulled high by the external pullup resistor. All read-time slots must be t_{SLOT} in duration with a $1\mu s$ minimum recovery time, t_{REC} , between cycles. See Figure 27 for more information.

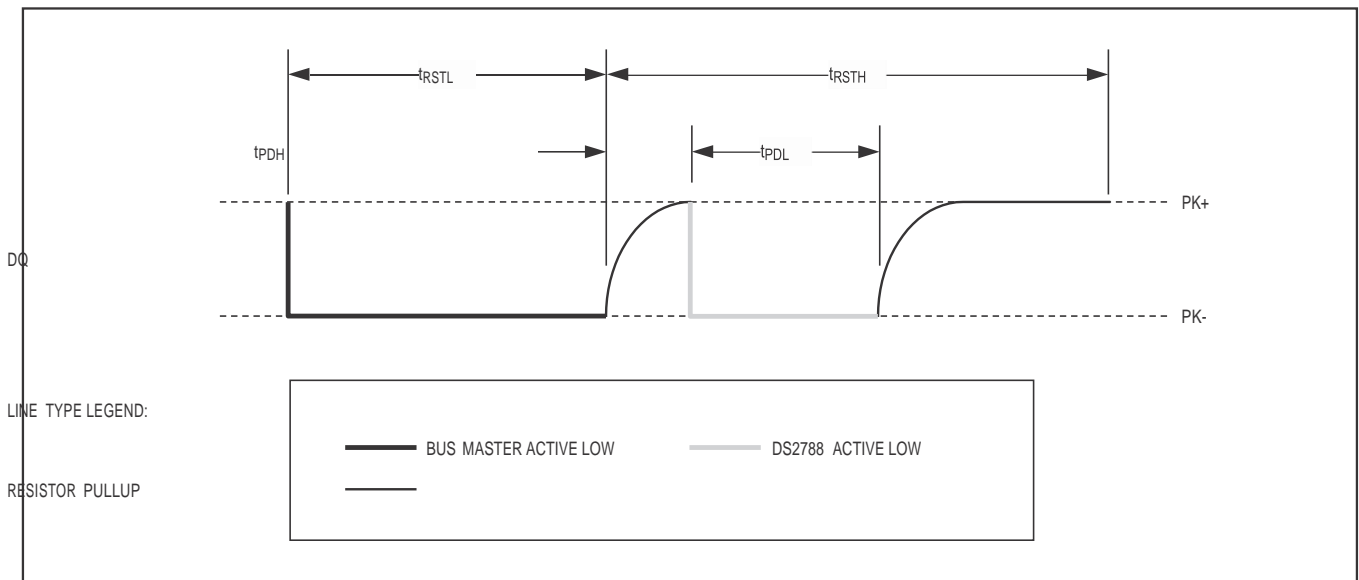
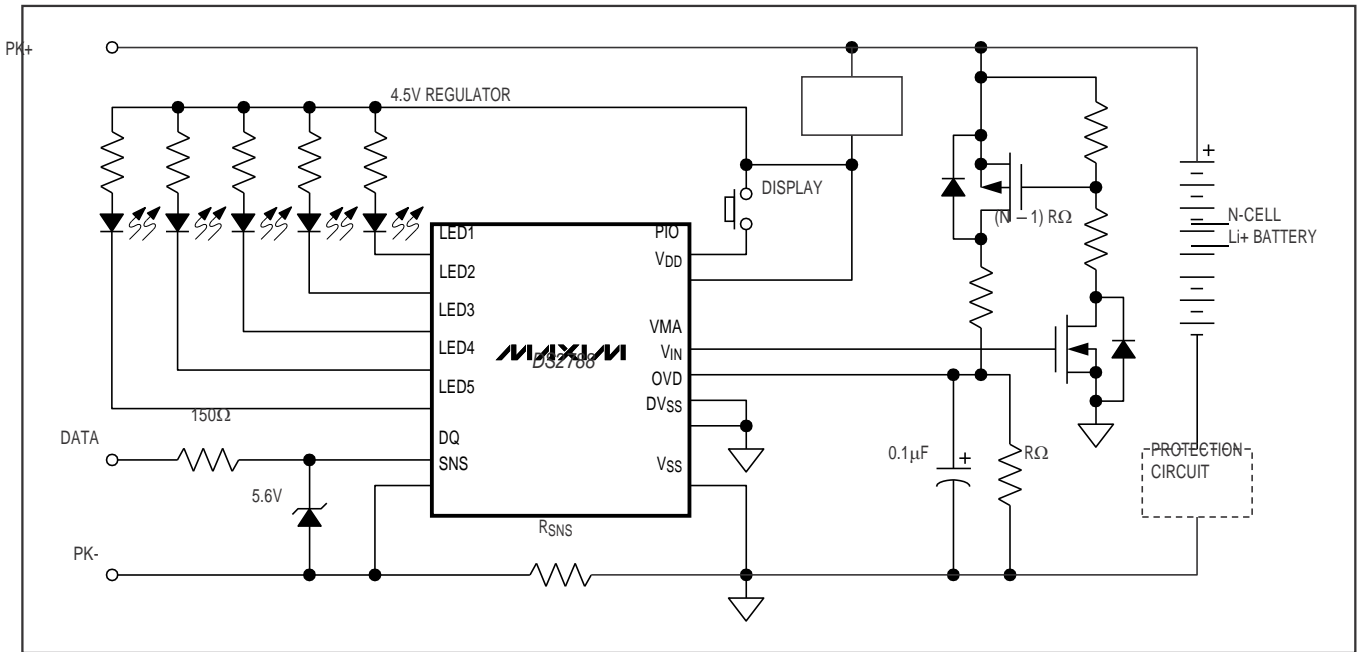


Figure 26. 1-Wire Initialization Sequence

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Typical Operating Circuit

DS2788



Package Information

For the latest package outline information and land patterns, go to www.maxim-ic.com/packages.

PACKAGE TYPE	PACKAGE CODE	DOCUMENT NO.
14 TSSOP	U14+1	21-0066

Stand-Alone Fuel-Gauge IC with LED Display Drivers

Revision History

DS2788

REVISION NUMBER	REVISION DATE	DESCRIPTION	PAGES CHANGED
0	10/07	Initial release.	—
1	6/08	Added Figures 14 to 17 for the RAAC, RSAC, RARC, and RSRC descriptions.	17
2	5/09	Changed operations voltage to 4.5V maximum.	2-4, 6, 7, 31

Maxim cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Maxim product. No circuit patent licenses are implied. Maxim reserves the right to change the circuitry and specifications without notice at any time.

32 _____ Maxim Integrated Products, 120 San Gabriel Drive, Sunnyvale, CA 94086 408-737-7600

© 2009 Maxim Integrated Products

Maxim is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

DS2788K Evaluation Kit

Standalone Fuel Gauge IC with LED Display Drivers

www.maxim-ic.com

FEATURES

Demonstrates the capabilities of the DS2788 Standalone Fuel Gauge IC with LED Display Drivers, including:

- Estimation of available capacity for Li+ cells
 - Voltage measurement
 - Voltage divider circuit
 - Current measurement
 - Current accumulation
 - Temperature measurement
 - Information storage
 - Identification
 - LED Display
- Interfaces to the USB Port of a PC running Windows® XP or older

INDEX

Evaluation Kit Contents
Equipment Needed
Introduction
Setup and Installation Board
Connections Software
Installation Selecting the COM Port
Program Menus
Menu Windows
Status Register
Program Tabs

Parameters Tab
Memory Tab Log
Data Tab Real Time
Tab

INTRODUCTION

The DS2788 Evaluation Kit (EV Kit) makes performance evaluation, software development, and prototyping with the DS2788 Standalone Fuel Gauge IC with LED Display Drivers easy. The evaluation board interfaces to a PC through a DS9123O USB Adapter and RJ-11 cable connection. All related data sheets along with the evaluation software can be found on our website at www.maxim-ic.com.

ORDERING INFORMATION

PART	TYPE
DS2788EVKIT+	EV Kit

+ Denotes lead(Pb)-free and RoHS compliant.

EVALUATION KIT CONTENTS

- 1 pc. Evaluation Board
- 1 pc. DS9123O USB Adapter
- 1 pc. RJ-11 Cable

EQUIPMENT NEEDED

1. A PC running Windows® XP or older and an available USB port.
2. Cables with mini-grabber style clips or the ability to solder directly to connection pads.
3. A Lithium-Ion battery and a power supply and/or load circuit.

The DS2788K evaluation software gives the user complete control of all functions of the DS2788. Separate control tabs allow the user access to all EEPROM and RAM memory locations, all control registers, and real-time updates of all monitored parameters. The software also incorporates a data-logging feature to monitor a cell over time.

The evaluation board circuit is designed to provide the DS2788 with accurate parameter measurements. The initial evaluation board, PD033007, is configured with a 2 cell voltage divider with the circuitry to turn the voltage divider on and off using the VMA pin of the DS2788. Kit demonstration boards will vary as they are improved upon over time. For information on the demonstration board circuits refer to the individual board datasheets located on our website at www.maxim-ic.com.

SETUP AND INSTALLATION

BOARD CONNECTIONS

Connections to the TSSOP demonstration board are best made either by soldering directly to the pads or by using cables with mini-grabber clips. Communication to the TSSOP board can be accomplished either through the RJ-11 jack by connecting the provided standard six conductor RJ-11 cord or by wiring directly to the DQ and P- pads. To utilize the demonstration software, the DQ and PAC- lines must be connected to the DS91230 communication brick using either of the two methods described.

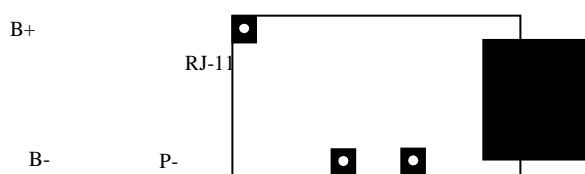


Figure 1: Communication Connections

Figures 2a and 2b show the recommended circuits to simulate charging and discharging. The Lithium-Ion cell is connected between the B+ and B- pads. The battery charger/power supply or circuit load is connected between the P+ and P- pads. The evaluation software can be run in either configuration as long as a cell is connected between the B+ and B- terminals providing a minimum of 2.5 volts to power the DS2788.

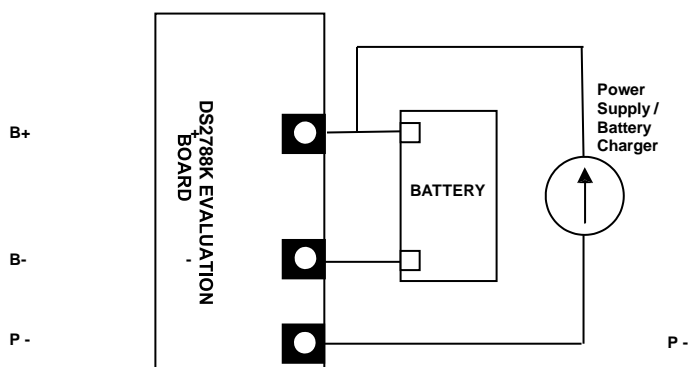


Figure 2a: Charging Circuit

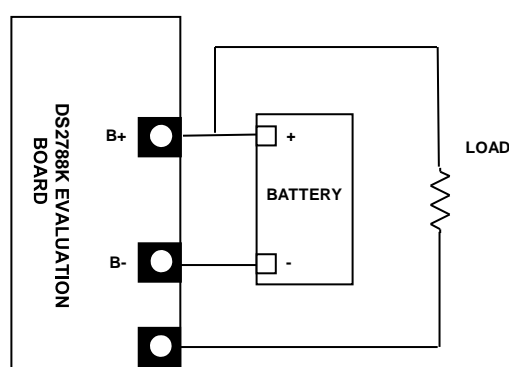


Fig 2b: Discharging Circuit

SOFTWARE INSTALLATION

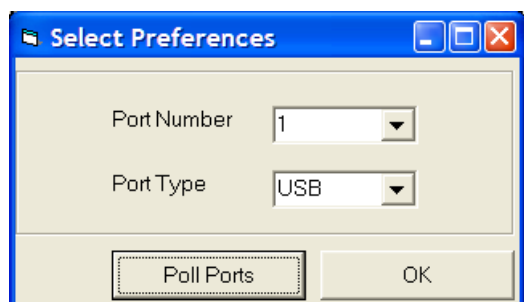
To install the DS2788K software, exit all programs currently running and download the DS2788K software from our website at www.maxim-ic.com. Unzip the compressed file and double click the SETUP.EXE icon to begin the installation process. Follow the prompts to complete the installation. The

DS2788K software can be uninstalled in the Add/Remove Programs tool in the Control Panel. After the installation is complete, open the DS2788K folder and run DS2788K.EXE or select DS2788K from the program menu. A splash screen containing information about the evaluation kit appears as the program is being loaded. All relevant data sheets and application notes on the DS2788 and DS2788 EV Kit can be found on our website at www.maxim-ic.com.

SELECTING THE COMMUNICATION PORT

If the DS9123O is connected when the DS2788K software is launched, the program will start up automatically. If it is not connected, the Select Preferences window will open.

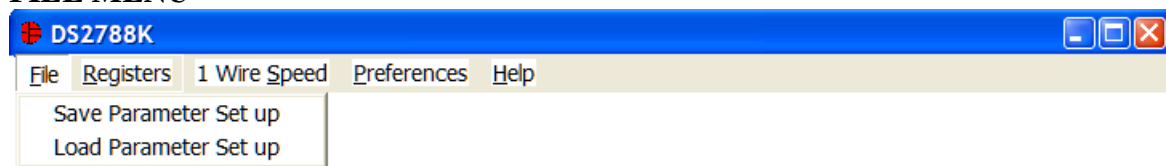
In this window, select either serial port or USB communication and the port number; then hit OK. The DS2788K software saves this port selection and automatically uses the selection each time the program starts. To change the port later, click the Preferences option on the menu bar, select Edit Preferences, and then select the appropriate port. To attempt to automatically locate the DS9123O or DS9123, click the Poll Ports button. Warning - automatically polling for the DS9123 can disrupt other devices connected to your computer's COM ports.



PROGRAM MENUS

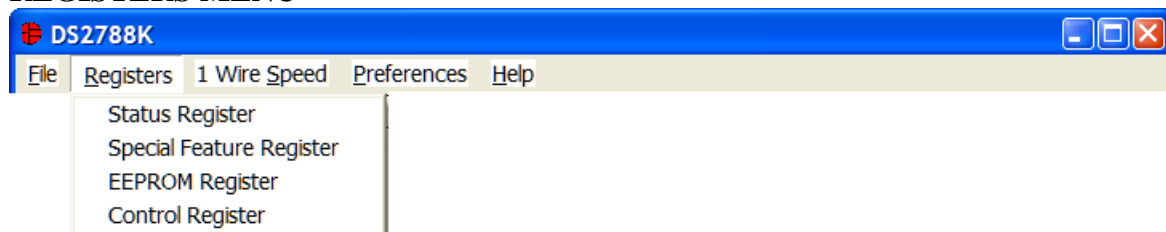
Several pull down menu options have been provided to simplify use of the DS2788K software for the user. Their functions are individually detailed below.

FILE MENU



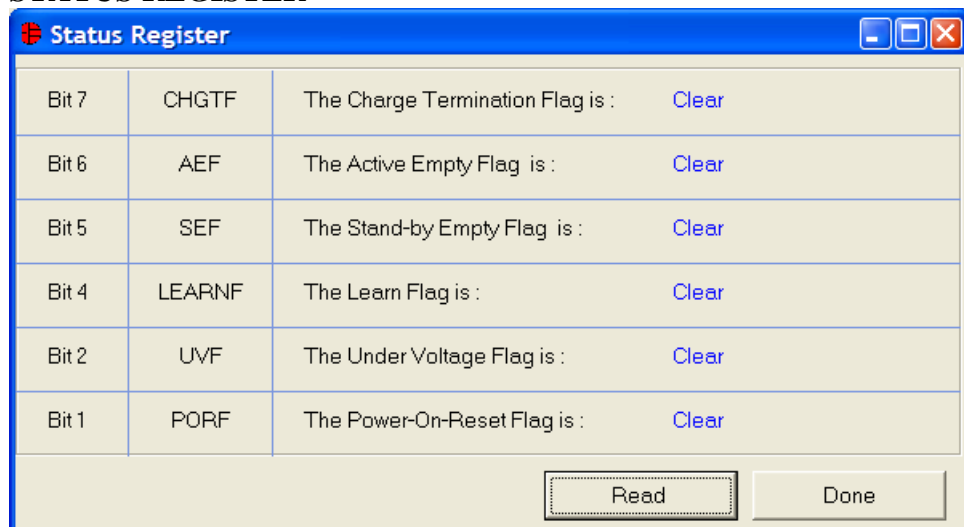
The File Menu allows the user to store and recall information to and from a file directly into the text boxes on the Parameters Tab. These functions do not directly write or read the DS2788. It is still necessary for the user to store or recall this information to or from the device by clicking on the Write & Copy or Recall & Read buttons on the Parameters Tab.

REGISTERS MENU



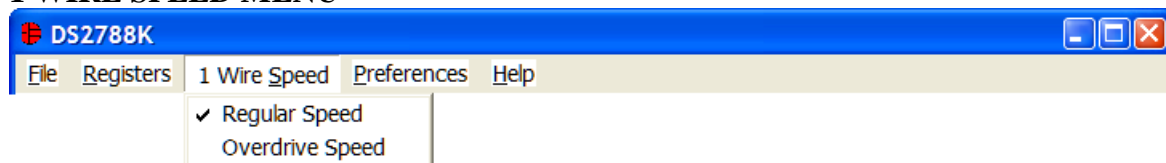
The Registers Menu gives immediate access to all four status and function registers of the DS2788. Selecting any of the registers will open an individual control window giving the user a description of each register bit and the ability to read or write it. See the status register window example.

STATUS REGISTER



The present state of all register bits are displayed immediately upon opening the register window. R/W locations contain a selection field or command button to allow the user to determine their state. Pressing the WRITE button will write the new value to the register and read the corresponding register inside the DS2788 to verify the correct value was written. The Control Register and Protection Threshold Register are stored in EEPROM, so when the WRITE command is issued, the value is written and copied to EEPROM without changing the values of the remainder of the Parameter EEPROM block.

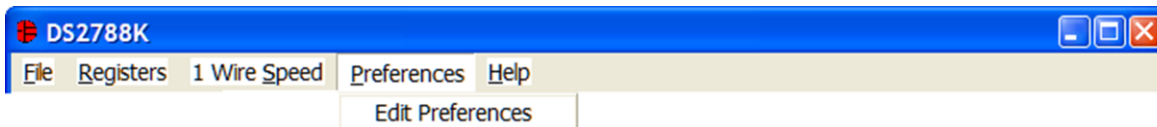
1 WIRE SPEED MENU



The 1 Wire Speed Menu allows the user to select the appropriate 1 Wire timing. The 1-Wire speed of the device is selected by sending the Set Overdrive or Clear Overdrive commands.

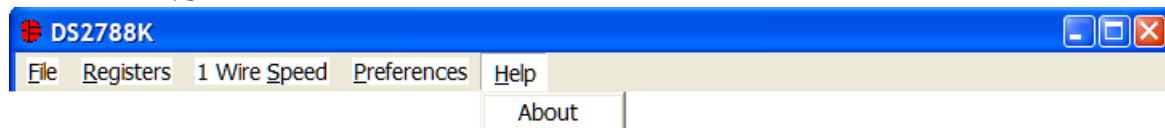
In order to change the speed of the device, simply left-click on Regular Speed or Overdrive Speed from the 1 Wire Speed Menu. Selecting either option will send the Clear Overdrive or Set Overdrive command. The software will send the command in the current 1 Wire speed, and then begin communicating in the new 1 Wire speed. If the software and the DS2788 get out of sync, simply left-click on the Detect Device Speed to match the software's 1 Wire speed to the DS2788's 1 Wire speed.

PREFERENCES MENU



The Preferences Menu allows the user to change COM port settings at any time. Edit Preferences opens the Select Preferences window. See Selecting the communication port above.

HELP MENU



Selecting the About topic from the Help Menu will open a window containing information about the current revision of this program and Dallas Semiconductor.

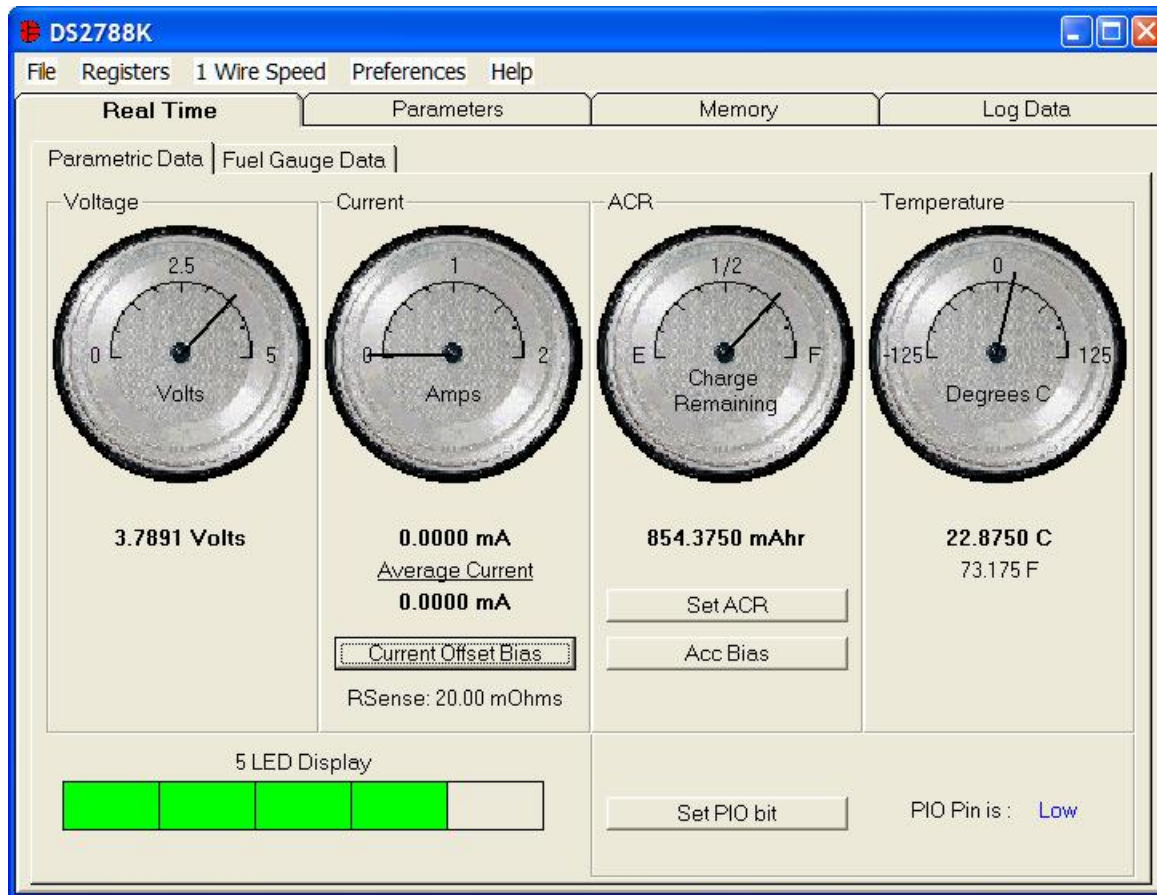
PROGRAM TABS

All functions of the program are divided under four tabs in the main program window. Left click on the appropriate tab to move to the desired function page. Located on the Real Time tab is all of the information measured and calculated by the DS2788. That data is divided between the Parametric Data Tab and Fuel Gauging Tab. The Parameters Tab gives the user access to the entire Parameter EEPROM memory block in terms of Application Units and Device Units. The Memory tab displays the contents of every register and memory location inside the DS2788 and allows the user to alter the data. The Data Log tab allows the user to store all real time information to a file and view the data in a graphical form.

REAL TIME TAB

The Real Time data is divided into three tabs: Parametric Data and Fuel Gauge Data. The Parametric Data Tab contains all of the real time measurements taken by the DS2788. The Fuel Gauge Data contains all of the Fuel Gauge values calculated by the DS2788.

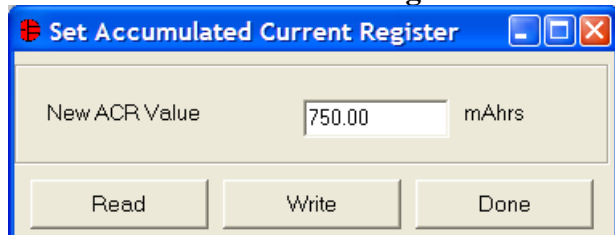
Parametric Data Tab



The Parametric Data Sub Tab displays the latest real-time measurements of cell voltage, temperature, current and accumulated charge with both analog meter readouts and digital values. The sense resistor value used to calculate the current reading is shown in the temperature section. Go to the sense resistor value on the Parameters Tab to change this value.

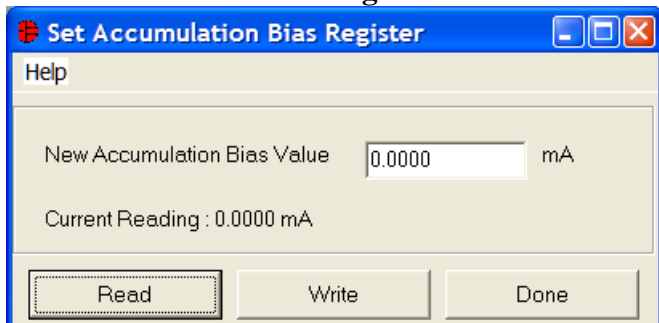
The present state of the PIO pin is shown in text. The Set/Clear PIO bit will set or clear the PIO bit in the Special Feature Register to toggle the state of the pin.

Set Accumulated Current Register



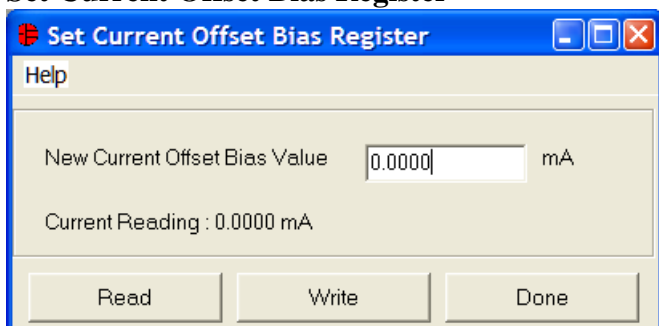
The user can bring up the Set Accumulated Current Register window by left clicking the Set ACR button. This window allows the user to enter a value for the Accumulated Current Register in mAH.

Set Accumulation Bias Register



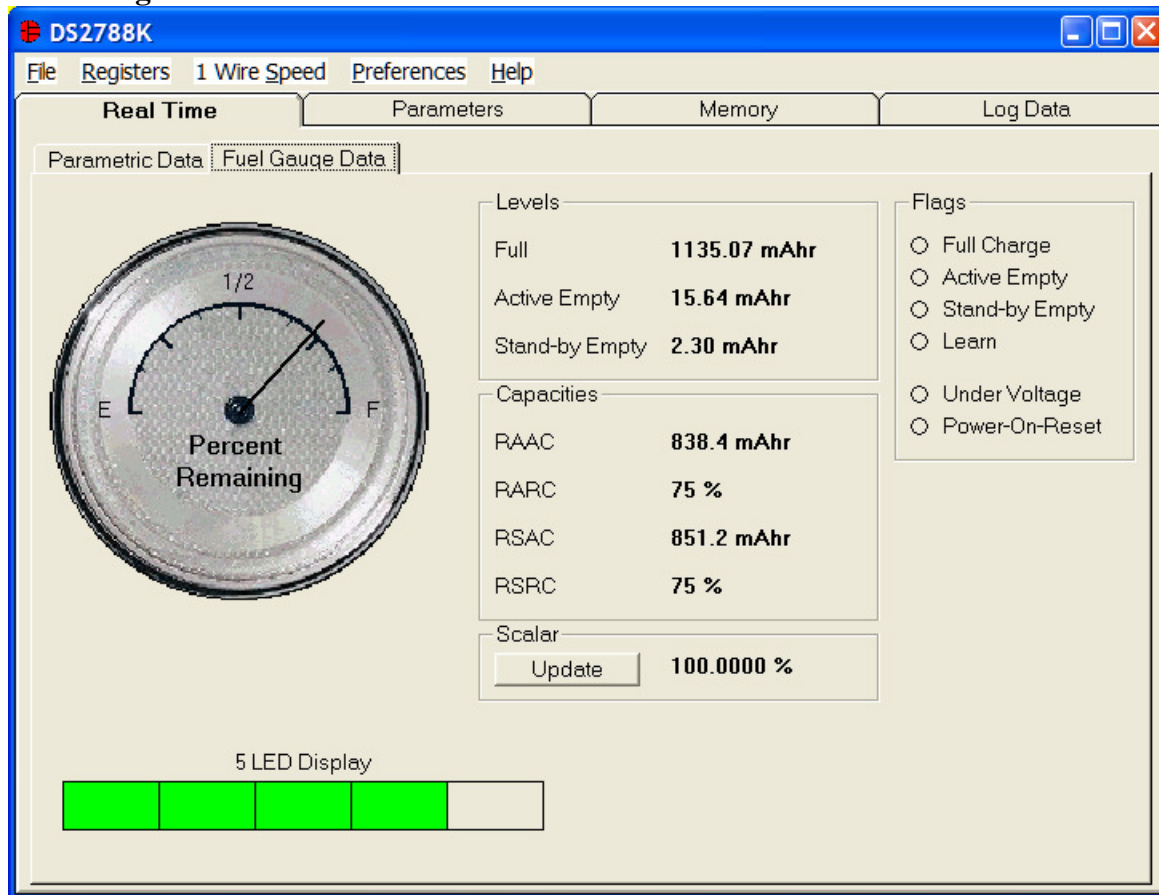
The user can bring up the Set Accumulation Bias Register window by left clicking the Acc Bias button. This window allows the user to enter values for the Accumulation Bias Register in mA. Left-clicking on the Write button will write the Accumulation Bias Register and copy the value to EEPROM. The value entered here will be added to the Accumulated Current Register during each current conversion. The bias value will not affect the Current Register reading, but will be reflected in the Accumulated Current Register.

Set Current Offset Bias Register



The user can bring up the Set Current Offset Bias Register window by left clicking the Current Offset Bias button. This window allows the user to enter values for the Current Offset Bias Register in mA. Left-clicking on the Write button will write the Current Offset Bias Register and copy the value to EEPROM. The value entered here will be added to the Current Register during each current conversion.

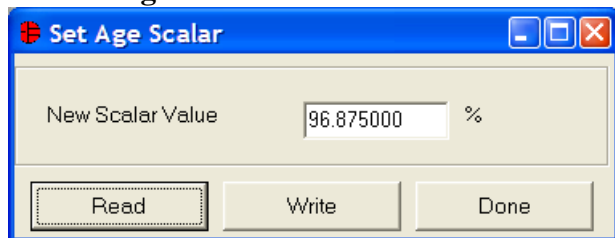
Fuel Gauge Data Tab



The Fuel Gauge Data Sub Tab displays the latest fuel gauge calculations. The Full, Active Empty, and Standby Empty levels are calculated from the data input on the Parameters Tab. The Remaining Active Absolute Capacity (RAAC) and the Remaining Stand-by Absolute Capacity (RSAC) are displayed in terms of mAhrs. The Remaining Active Relative Capacity (RARC), Remaining Stand-by Relative Capacity (RSRC) are displayed in terms of percent of capacity remaining. The Analog Meter on the left displays the Remaining Active Absolute Capacity (RAAC).

The flags found in the Status Register are displayed on the right side of the window. When the Under Voltage Flag or the Power-on-Reset Flag is set, a button will appear that will allow the user to clear those bits.

Scalar Register



The user can bring up the Set Age Scalar window by left clicking the Update button in the Scalar area. This window allows the user to read and write the Scalar value in terms of percent of the nominal capacity.

PARAMETERS TAB

The Parameters Tab gives the user access to the entire Parameter EEPROM memory block (block 1, addresses 60h-7Fh) in terms of Application Units and Device Units. The Application Units Tab displays the parameters in units like mA, mAhrs, and volts. The Device Units Tabs performs the calculations needed to get the application units into the units that are stored in the device like μV , μVhrs , and ppm as well as show the hexadecimal values that get written to the device.

Application Units Tab

The screenshot shows the DS2788K software interface. The 'Parameters' tab is active, and the 'Application Units' sub-tab is selected. The interface displays a table of temperature parameters and various input fields for electrical and capacity parameters.

Temperature (C)	0	10 C	20 C	25 C	50 C
Full (mAhrs)	1016	1060	1098	1190	1214
Active Empty (mAhrs)	58	29	16	15	6
Stand-by Empty (mAhrs)	23	7	3	2	0

Other parameters and their values:

- Charge Voltage (V): 4.1382
- Terminating Current (mA): 80.0
- Active Empty Voltage (V): 3.0061
- Active Empty Current (mA): 420
- Sense Resistor (mOhms): 20.00
- RSGain: 1.02637
- VGain: 0.99219
- RSTC (ppm/C): 0
- Rated Cell Capacity (mAhrs): 1220.00
- Accumulation Bias (mA): 0.0000
- Current Offset Bias (mA): -1.71875
- Control Register: 00h
- Read Factory RSGAIN: 1.02637
- Read Factory VGAIN: 0.99219

Buttons: Save Set Up, Load Set up, Load Default Set Up, Write & Copy, Recall & Read.

The Application Units Sub Tab allows the user to read and write the Parameter EEPROM memory block. To change any of this information, simply click on the desired text field and enter the new value.

Clicking on the Load Default Set Up button will enter example data into the information fields of the Application Units Sub Tab. Once all data is in the desired format, click on the Write & Copy button to copy it to the EEPROM of the DS2788.

This information can also be stored to a file and recalled later using the Load/Save Set Up buttons or the Load/Save Parameters Set Up Menu Items. These functions do not directly write or read the DS2788. It is still necessary for the user to store or recall this information to or from the device by issuing a Write & Copy or Recall & Read buttons.

Device Units Tab

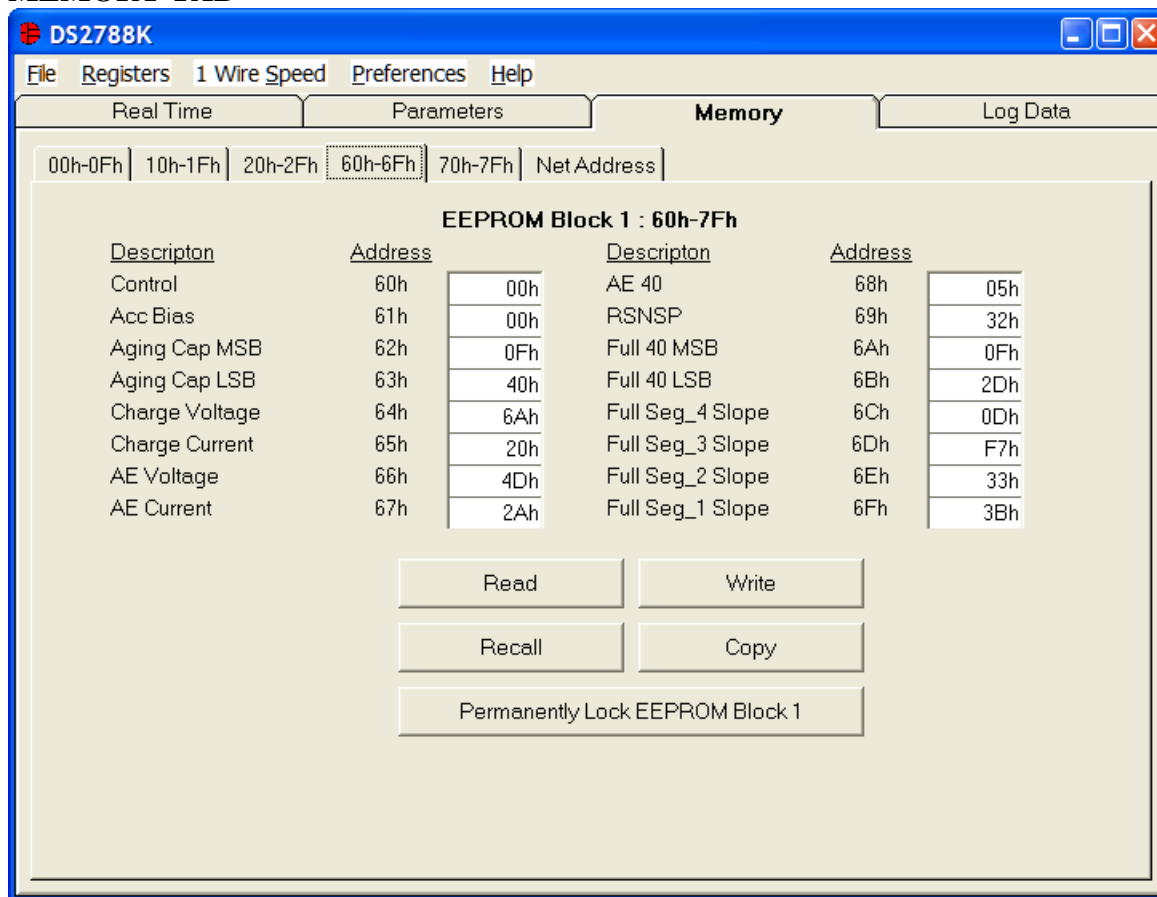
The screenshot shows the DS2788K software interface with the 'Device Units (Read Only)' sub-tab selected. The interface is divided into four main sections: Real Time, Parameters, Memory, and Log Data. The Parameters section is further divided into Application Units and Device Units (Read Only). The Device Units (Read Only) section displays a table of parameters with their hex values and device units.

	Hex Value	Device Units	Hex Value	Device Units
60h: Control	00h		70h: AE Seg_4 Slope	05h 305 ppm
61h: Acc Bias	00h	0.000000 mV	71h: AE Seg_3 Slope	02h 122 ppm
62/63h: Capacity	0F40h	24.40000 mVhrs	72h: AE Seg_2 Slope	11h 1038 ppm
64h: Charge Voltage	6Ah	4.13824 V	73h: AE Seg_1 Slope	27h 2380 ppm
65h: Charge Current	20h	1.60 mV	74h: SE Seg_4 Slope	01h 61 ppm
66h: AE Voltage	4Dh	3.00608 V	75h: SE Seg_3 Slope	02h 122 ppm
67h: AE Current	2Ah	8.4 mV	76h: SE Seg_2 Slope	05h 305 ppm
68h: Active Empty 40	05h	0.0048828	77h: SE Seg_1 Slope	15h 1282 ppm
69h: RSNSP	32h	20.0000 mOhms	78/79h: RSGAIN	041Bh 1.02637
6A/6Bh: Full 40	0F2Dh	24.28125 mVhrs	7Ah: RSTC	00h 0
6Ch: Full Seg_4 Slope	0Dh	793 ppm	7Bh: Curr Offset Bias	ECh -0.031250 mV
6Dh: Full Seg_3 Slope	F7h	15076 ppm	7Ch: T23	14h 20 C
6Eh: Full Seg_2 Slope	33h	3113 ppm	7Dh: T12	0Ah 10 C
6Fh: Full Seg_1 Slope	3Bh	3601 ppm	7E/7Fh: VGAIN	F803h 0.99219

A 'Recall & Read' button is located at the bottom of the Device Units (Read Only) section.

The Device Units Sub Tab is read-only. It displays the actual hexadecimal values read from the DS2788 and displays the units that are stored in the device.

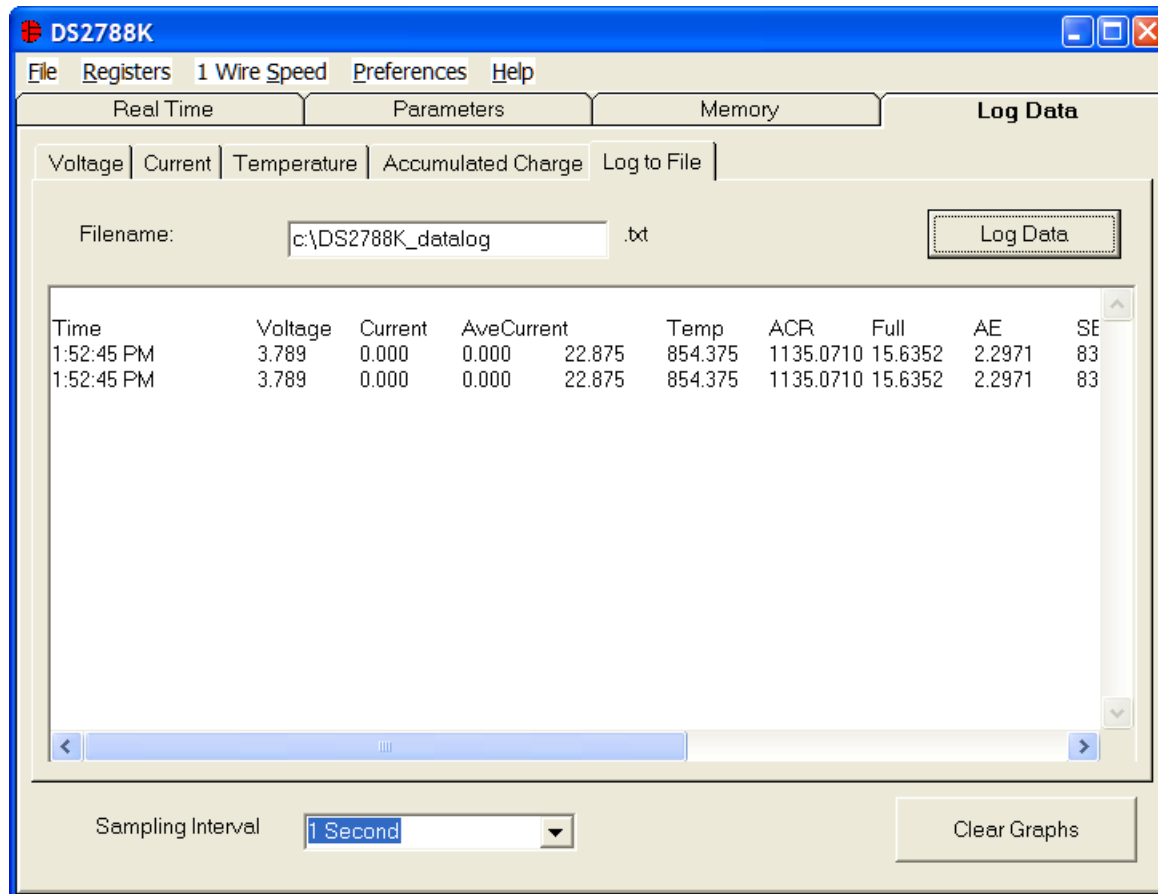
MEMORY TAB



The Memory Tab gives the user access to all 32 bytes of SRAM and all 48 bytes of EEPROM inside the DS2788. They are separated into four sub-tabs for convenience. Any value can be modified by clicking in that address' text box and typing a new value in hexadecimal format. The Write button will copy the entire block of data to the corresponding location inside the DS2788 (Scratchpad RAM on the EEPROM blocks). The Read button will update the entire block's text boxes with data from the DS2788 (Scratchpad RAM on the EEPROM blocks). Sub-tabs displaying any EEPROM data will also have Copy and Recall buttons to allow the user to transfer the data between Scratchpad and EEPROM memory internal to the DS2788. The Permanently Lock Block 0/1 buttons will permanently store the data currently located in that block's EEPROM. Warning – this data can never be changed once locked. Verify your data first by issuing a Recall and a Read.

The Net Address Sub Tab allows the user to perform a Search Net Address to find all of the 1-Wire devices on the 1 Wire bus. All devices found on the bus will be listed in the Net Addresses field. To communicate to any device on the bus, click on its address inside the Net Addresses field to select it. The program will now use this Net Address for all operations until a different Net Address is chosen.

LOG DATA TAB



The Log Data tab allows the user to see the DS2788's real time measurements graphed over time. There are separate sub-tabs for voltage, current, temperature, and accumulated charge. Each graph displays the last 500 data points collected by the DS2788K software. The sampling interval can be adjusted from as fast as possible to 15 minutes and can be adjusted from the Sampling Interval Menu at the bottom of the window. The Clear Graphs button will clear all data from all four graphs, but does not reset the log to file function. When the Fastest sampling interval is selected, the graphs will not be updated, only the data logging is enabled.

The Log to File Sub Tab contains control information for storing all data to an ASCII file. The default filename is c:\DS2788K_datalog.txt, but can be modified in the filename text field. The Log Data button toggles data logging off and on. Data will be stored at the same interval selected for updating the graphs in the tab-delimited format of

```
"Time<tab>Voltage<tab>Current<tab>AveCurrent<tab>Temperature<tab>ACR<tab>Full<tab>
AE<tab>SE<tab>RAAC<tab>RARC<tab>RSAC<tab>RSRC<tab>Status<tab> Scalar"
```

for easy import into a spreadsheet. The most recent 50 samples are displayed in the window for observation. Warning - The Log Data function overwrites previous file information. Data previously stored in the file will be lost.

