



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Συστήματα διαχείρισης μπαταρίας για ηλεκτρικά
οχήματα»



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

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

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

«Στους γονείς μου»

Πρόλογος

Η εργασία αυτή αποτελεί το τελευταίο έργο προς παράδοση πριν τη λήψη του διπλώματος του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος. Πραγματεύεται καινοτόμες τεχνολογίες που αφορούν σε σύγχρονες εφαρμογές των ηλεκτρικών οχημάτων και της διαχείρισης των πόρων τέτοιων συστημάτων. Δίνεται έμφαση στο σχεδιασμό BMS (Battery Management System) συστήματος το οποίο αφορά την κατάλληλη διαχείριση των μπαταριών οχημάτων. Η επιλογή για ενασχόληση με την εργασία αυτή πηγάζει από το ενδιαφέρον του συγγραφέα για τα ηλεκτρικά οχήματα, την διαχείριση της ενέργειας μπαταριών, την ηλεκτρονική και τις εφαρμογές των παραπάνω στη πράξη.

Περίληψη

Τα BMS συστήματα, είναι ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες επιτρέπουν τη σωστή διαχείριση της παρεχόμενης ισχύος από μπαταρίες ενώ παράλληλα εξασφαλίζουν ομαλή λειτουργία, αντιμετώπιση μεταβατικών φαινομένων και διατηρούν τη θερμοκρασία των συστημάτων στα οποία εφαρμόζονται σε σταθερά, όσο το δυνατόν, επίπεδα. Η κύρια εφαρμογή του BMS συστήματος που καλείται ο φοιτητής αυτού του έργου να καλύψει, αφορά τα ηλεκτρικά οχήματα. Τα οχήματα αυτά, λειτουργούν κατεξοχήν από battery packs, στοιβαγμένα κελιά μπαταριών, και είναι σαφές πως η συνεχής αντιμετώπιση δυσλειτουργιών τους είναι απαραίτητη προκειμένου να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία των συστημάτων αυτών. Οι δυσλειτουργίες αυτές απορρέουν είτε από εξωτερικούς παράγοντες είτε λόγω παρέλευσης χρόνου ζωής των ίδιων των μπαταριών λόγω κατασκευής τους. Σε κάθε περίπτωση, η μονάδα διαχείρισης μπαταριών (BMS) είναι αρμόδια ώστε να ανιχνεύσει τα μεταβατικά φαινόμενα μέσω αισθητήρων και να στείλει τις κατάλληλες εντολές για προστασία του συστήματος.

Στην εργασία αυτή ακολουθείται ολιστική προσέγγιση του ζητήματος, ξεκινώντας από την εισαγωγή στα συστήματα BMS για ηλεκτρικά οχήματα, Στην συνέχεια, σχεδιάζεται το block διάγραμμα έχοντας υπόψιν τις παραμέτρους αλλά και τις εισόδους/εξόδους του τελικού συστήματος. Παράλληλα εκτελούνται εξομοιώσεις για υποπεριπτώσεις συμπεριφορών των υλικών του κυκλώματος BMS καθώς στόχος της εργασίας είναι να σχεδιασθεί μία πρωτότυπη πλακέτα PCB η οποία μπορεί να εκτελέσει στην πράξη όλες τις παραπάνω λειτουργίες. Τέλος, γίνεται εκτίμηση του κόστους κατασκευής και συζητείται η μελλοντική εξέλιξη της παρούσας έρευνας.

«Battery Management System for electric vehicles»

Akantziliotis Alexandros

Abstract

BMS systems are electronic devices that allow the proper management of the power supplied by batteries while at the same time ensuring smooth operation, dealing with transient phenomena and maintaining the temperature of the systems to which they are applied at stable, as possible, levels. The main application of the BMS system that the student of this project is asked to cover concerns electric vehicles. These vehicles operate primarily from battery packs, stacked battery cells, and it is clear that the continuous treatment of their malfunctions is necessary in order to ensure the smooth operation of these systems. These malfunctions result either from external factors or due to the passage of time of the batteries' life due to their construction. In any case, the battery management system (BMS) is responsible for detecting the transient phenomena through sensors and sending the appropriate commands to protect the system.

In this work, a holistic approach to the issue is followed, starting from the introduction to the BMS systems for electric vehicles. Then, the block diagram is drawn taking into account the parameters and the inputs/outputs of the final system. At the same time, simulations are performed for sub-cases of the behaviors of the BMS circuit materials as the aim of the work is to design a prototype PCB board that can perform all the above functions in practice. Finally, the construction cost is estimated and the future development of the present research is discussed.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο **Κιοσκερίδη Ιορδάνη** για την συνεχή επίβλεψη του έργου μου και την βοήθειά του με το υλικό που παρείχε προς μελέτη. Τέλος, αφιερώνω την εργασία αυτή στους γονείς και φίλους μου που επέδειξαν υπομονή και συμπαράσταση στο καθημερινό φοιτητικό μου βίο, καθιστώντας την κατάκτηση του πτυχίου μου σημαντικά ευκολότερη.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract	7
Ευχαριστίες	8
Κατάλογος Σχημάτων	11
Συνομογραφίες.....	12
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή στα συστήματα διαχείρισης μπαταριών	13
1.1 Ο στόχος των BMS	13
1.2 Αρχιτεκτονική BMS.....	15
1.3 Σχεδιασμός συστημάτων	18
1.4 Σχεδιαστική προσέγγιση του BMS.....	19
1.4.1 Block διάγραμμα	19
1.4.2 Εξομοίωση block διαγράμματος σε Simulink	21
1.4.3 Εξομοίωση μεταβατικών κυκλωματικών συμπεριφορών σε LTspice	22
1.4.4 Επιλογή υλικών	23
1.4.5 Σχεδίαση σε PCB.....	24
Κεφάλαιο 2ο:.....	25
Κεφάλαιο 3ο: Εξομοίωση σε Block διάγραμμα	25
3.1 Σήματα εισόδου και εξόδου	25
3.2 Εξισώσεις μεταφοράς για Battery package	27
3.3 Σχεδιασμός Block για Battery Package.....	30
3.4 Σχεδιασμός Block για τον MCU	35
3.5 Προσομοίωση με σταθερή είσοδο και αυξανόμενη θερμοκρασία	38
3.6 Προσομοίωση με μεταβλητή είσοδο και μεταβαλλόμενη θερμοκρασία.....	40
3.7 Συμπεράσματα εξομοιώσεων	41
Κεφάλαιο 4ο: Προσομοίωση κυκλωματικών συμπεριφορών	43
4.1 Προσομοίωση μεταβατικών συμπεριφορών	43
4.2 Παρεμβολές.....	46
Κεφάλαιο 4ο : Σχεδιασμός τυπωμένης πλακέτας.....	48
4.1 Επιλογή υλικών	48
4.2 Σχεδιασμός στο EasyEDA και κανόνες	50
4.3 Σχηματικά διαγράμματα και Layout	56
4.4 Αρχεία σχεδίου και κοστολόγηση	65

Κεφάλαιο 5ο : Συμπεράσματα και εξέλιξη εργασίας.....	66
5.1 Παρατηρήσεις και αναθεωρήσεις στο έργο.....	66
5.2 Μελλοντική έρευνα.....	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	68
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Φυλλάδια υλικών.....	69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Σχηματικά διαγράμματα και Layout.....	75
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C : Πίνακας κοστολόγησης υλικών.....	83

Κατάλογος Σχημάτων

- Σχήμα 1.1 Γράφημα ζήτησης επαναφορτιζόμενων μπαταριών στις Η.Π.Α μεταξύ 1997 και 2012
- Σχήμα 1.2 Παράδειγμα BMS SoM από πλακέτα PCB εμπορίου της εταιρείας ημιαγωγίων NXP
- Σχήμα 1.3 Γενική αρχιτεκτονική BMS συστήματος
- Σχήμα 1.4 Μορφή ανταλλαγής δεδομένων CAN Bus
- Σχήμα 1.5 Διάγραμμα σχεδίασης Hardware εξοπλισμού
- Σχήμα 1.6 Block διάγραμμα BMS συστήματος
- Σχήμα 1.7 Logo Matlab / Simulink πακέτου εξομοίωσης συστημάτων
- Σχήμα 1.8 Logo LTspice πακέτου εξομοίωσης κυκλωμάτων
- Σχήμα 1.9 Επιλογή υλικών από το block διάγραμμα
- Σχήμα 1.10 Logo EasyEDA πακέτου σχεδίασης πλακετών PCB
- Σχήμα 2.1 Συνολικό block διάγραμμα και σήματα εισόδου/εξόδου
- Σχήμα 2.2 Παράμετροι Block διαγράμματος
- Σχήμα 2.3 Ισοδύναμο κύκλωμα cell μπαταρίας
- Σχήμα 2.4 Ισοδύναμο Block διάγραμμα των 4 κελιών μπαταρίας
- Σχήμα 2.5 Ισοδύναμο Block διάγραμμα της συνάρτησης μεταφοράς για τη μπαταρία
- Σχήμα 2.6 Ισοδύναμο Block διάγραμμα της συνάρτησης εξίσωσης θερμότητας
- Σχήμα 2.7 Ισοδύναμο Block διαγράμματα Charge / Discharge
- Σχήμα 2.8 Πολυπλεξία καταστάσεων στην πλευρά της μονάδας ελέγχου της μπαταρίας
- Σχήμα 2.9 Πολυπλεξία σημάτων με πολλαπλασιασμό
- Σχήμα 2.10 Ελεγκτής καταστάσεων
- Σχήμα 2.11 Ελεγκτής τάσεων
- Σχήμα 2.12 Εσωτερικό του ελεγκτή καταστάσεων
- Σχήμα 2.13 Πολυπλεξία εισόδων καταστάσεων
- Σχήμα 2.14 Έλεγχος θερμοκρασίας σε επίπεδο Block υποσυστήματος
- Σχήμα 2.15 Η τελική τάση στο φορτίο είναι περίπου 90 V, το ρεύμα περίπου 4 A και η θερμοκρασία φθάνει έως 350 K όπου και διατηρείται λόγω της χρήσης του ανεμιστήρα
- Σχήμα 2.16 Μεταβατικά φαινόμενα τάσης και ρεύματος
- Σχήμα 3.1 Κύκλωμα κελιών μπαταρίας με φορτίο

- Σχήμα 3.2 Κύκλωμα κελιών μπαταρίας με φορτίο
- Σχήμα 3.3 Κύκλωμα γέφυρας MOSFETs για οδήγηση φορτίου διακοπτικά
- Σχήμα 3.4 Αποτέλεσμα εξομοίωσης γέφυρας
- Σχήμα 3.5 Μεταβατική απόκριση ρεύματος γέφυρας
- Σχήμα 3.6 Παρεμβολή θορύβου και διακοπτικής συχνότητας
- Σχήμα 4.1 Φίλτρο επιλογών στην ιστοσελίδα της LCSC
- Σχήμα 4.2 Σήματα I2C πρωτοκόλλου
- Σχήμα 4.3 Netlist
- Σχήμα 4.4 Ενδεικτικά Capabilities της JLCPCB
- Σχήμα 4.5 Κανόνες σχεδίασης
- Σχήμα 4.6 Layer manager στο EasyEDA
- Σχήμα 4.7 USB και τροφοδοσία ισχύος
- Σχήμα 4.8 Αισθητήρας θερμοκρασίας
- Σχήμα 4.9 Υποκύκλωμα μικροελεγκτή STM32
- Σχήμα 4.10 Drivers για CAN Bus
- Σχήμα 4.11 BMS IC
- Σχήμα 4.12 top και bottom side του layout
- Σχήμα 4.13 POWER και GROUND planes του layout
- Σχήμα 4.14 3D απεικόνιση της πλακέτας PCB
- Σχήμα 4.15 Αρχεία σχεδιασμού του PCB από κατασκευαστή

Συνομογραφίες

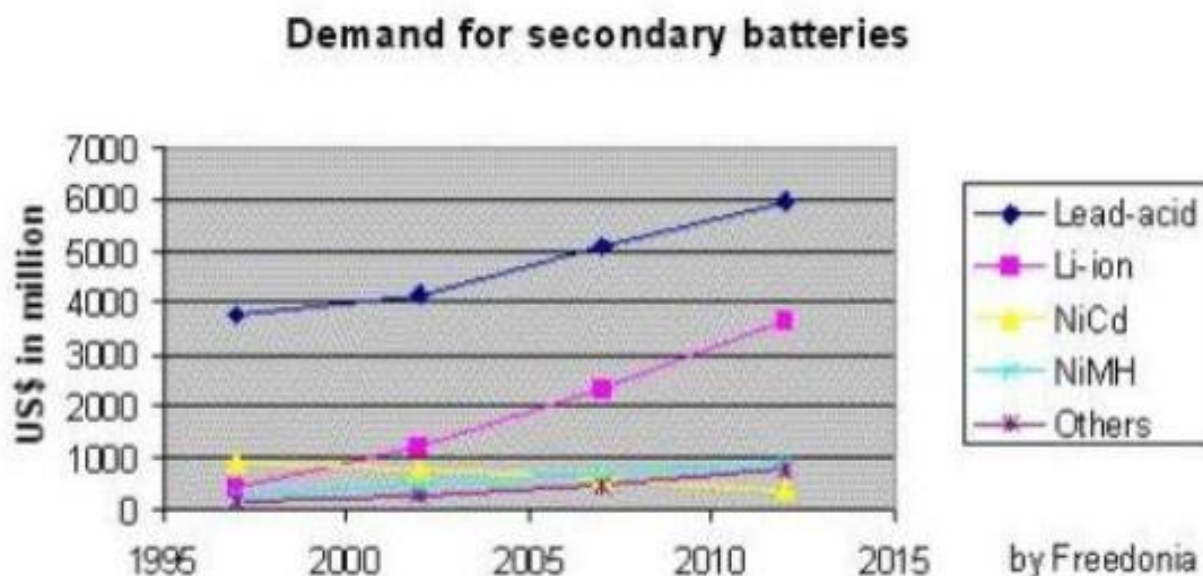
Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
BMS	Battery Management System
IC	Integrated Circuit
SoM	System on Module
MCU	microcontroller unit

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή στα συστήματα διαχείρισης μπαταριών

1.1 Ο στόχος των BMS

Σε πολλά ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται καθημερινά από τον άνθρωπο ζητείται η εξασφάλιση της αυτονομίας τους. Αυτό, σημαίνει πρακτικά πως θα πρέπει αυτά τα συστήματα να λειτουργούν υπό οποιοσδήποτε συνθήκες, ακόμη και εάν υπάρξουν περιβαλλοντικές μεταβολές. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό, ωστόσο, είναι η ανάγκη για παροχή ενέργειας η οποία είναι πολύτιμη και δεν μπορεί να αναπαραχθεί αλλά μόνο να αλλάξει μορφή (λ.χ. από ηλεκτρική να γίνει θερμική λόγω απωλειών).

Οι μπαταρίες είναι υλικά τα οποία παρέχουν την ισχύ σε συνεχόμενη παροχή μέχρις ότου η αποθηκευμένη ενέργεια έχει αποδοθεί εξ ολοκλήρου. Η χρήση των μπαταριών είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη λόγω της μεγάλης αυτονομίας που παρέχουν καθώς μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν στα ηλεκτρικά συστήματα ενώ παράλληλα υπάρχουν μοντέλα πρόβλεψης της διάρκειας ζωής τους. Ωστόσο, το κόστος κατασκευής τους είναι ιδιαίτερα αυξημένο και σε πολλές περιπτώσεις προτιμούνται επαναφορτιζόμενες προκειμένου να μην χρειαστεί η αντικατάστασή τους με νέες¹.



Σχήμα 1.1 Γράφημα ζήτησης επαναφορτιζόμενων μπαταριών στις Η.Π.Α μεταξύ 1997 και 2012

¹ Yunmao Ye, K. W. E. Cheng, *Zero-Current Switching Switched-Capacitor for Series Battery String*, July 2012

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1, η ζήτηση μπαταριών Lead-acid και Li-ion έχει αυξηθεί σημαντικά στα τελευταία χρόνια με την αγορά να ακολουθεί σχεδόν εκθετική αύξηση στο κόστος αγοράς σε USD.

Μια μπαταρία φέρει ορισμένα χαρακτηριστικά ανεξάρτητα από τον τύπο λειτουργίας και κατασκευής της. Από άποψη λειτουργίας της, αναφερόμαστε στη λεγόμενη διάρκεια ζωής της. Αυτός ο χρόνος ζωής, λοιπόν, είναι πληροφορία που θα πρέπει να δώσει ο κατασκευαστής της προκειμένου να γνωρίζει ο εκάστοτε σχεδιάστης εάν μπορεί να συμπεριληφθεί στις σχεδιάσεις του. Για παράδειγμα μια μπαταρία με διάρκεια ζωής μερικών μηνών ίσως να μην είναι ικανή για να τροφοδοτήσει ένα αυτόνομο ηλεκτρικό όχημα, διότι σύντομα θα χρειαστεί να γίνει αντικατάστασή της που δεν θα συμφέρει οικονομικά. Φυσικά, η διάρκεια ζωής εξαρτάται και από την χρήση της μπαταρίας και για το λόγο αυτό υπάρχουν λειτουργίες χαμηλής κατανάλωσης και προστασίας προκειμένου να αποφευχθεί σκόπιμη χρήση της.

Κάθε μπαταρία, βέβαια, φέρει και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Όπως ειπώθηκε παραπάνω, είναι σύστημα παροχής ενέργειας και συγκεκριμένα με σταθερή τάση. Επομένως, από κυκλωματική άποψη, φέρει δύο ακροδέκτες, την άνοδο (+) και την κάθοδο (-) στα άκρα των οποίων μετρείται διαφορά δυναμικού (τάση). Στην πράξη κάθε μπαταρία, όπως θα γίνει αντιληπτό στη συνέχεια με τις εξομοιώσεις, φέρει και παρασιτικά στοιχεία λόγω της μορφής κατασκευής της. Αυτά τα παρασιτικά στοιχεία είναι η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας εν σειρά, και η εσωτερική χωρητικότητά της εν σειρά. Μια ιδανική μπαταρία προφανώς δεν θα έφερε αυτά τα στοιχεία και θα μπορούσε απλά να προσομοιωθεί με μια πηγή συνεχούς τάσης.

Επομένως, είναι αντιληπτό πως οι μπαταρίες θα πρέπει να υποβοηθούνται με εξωτερικά κυκλώματα τα οποία στοχεύουν την διατήρηση της καλής λειτουργίας τους, την προστασία τους από πιθανά σενάρια απότομων μεταβολών στο ρεύμα και την τάση, και από φαινόμενα τα οποία μπορούν να μειώσουν τη διάρκεια ζωής τους όπως οι συνεχείς φορτίσεις-εκφορτίσεις των επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Τα κυκλώματα που είναι υπεύθυνα για τη συνολική διαχείριση της λειτουργίας τους ονομάζονται BMS ²(Battery Management System) και αποτελούνται από επιμέρους ηλεκτρονικά/ηλεκτρικά κυκλώματα και από ICs (Integrated Chips) τα οποία σχεδιάζονται για τέτοιες χρήσεις. Σε επίπεδο ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC) υπάρχουν chips που ονομάζονται PMIC (Power Management IC) και διασφαλίζουν την διαχείριση μπαταριών και της καλής λειτουργίας τους για μικροηλεκτρονικές συσκευές. Ωστόσο, στη κλίμακα που αναπτύσσεται η παρούσα εργασία καθώς αφορά μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων, έχει περισσότερο νόημα η χρήση της έννοιας SoM (System on Module) που αφορά σε συστήματα τα οποία αναπτύσσονται σε τυπωμένη πλακέτα (PCB).

Τελικά, τα συστήματα BMS στοχεύουν στην διασφάλιση της καλής λειτουργίας των μπαταριών στο σύνολό της. Για το λόγο αυτό, τα BMS έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τη τάση των μπαταριών ανά cell, το ρεύμα που τα διαρρέει, τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται και να δέχονται εντολές από εξωτερικά

2 Izadi Yasin, *A comprehensive Review of Battery and Supercapacitor Cells Voltage-Equalizer Circuits*, December 2012

κυκλώματα ή μικροελεγκτές (MCUs) βάσει πρωτοκόλλων επικοινωνίας (SPI/I2C/CAN). Παράλληλα, εξασφαλίζουν προστασίες από ανάστροφα ρεύματα και πολικότητες τάσης που μπορούν να μειώσουν τη ζωή μπαταρίας, εκτελούν πολύπλοκες διεργασίες για την διατήρηση σωστών χρονισμών φόρτισης-εκφόρτισης.



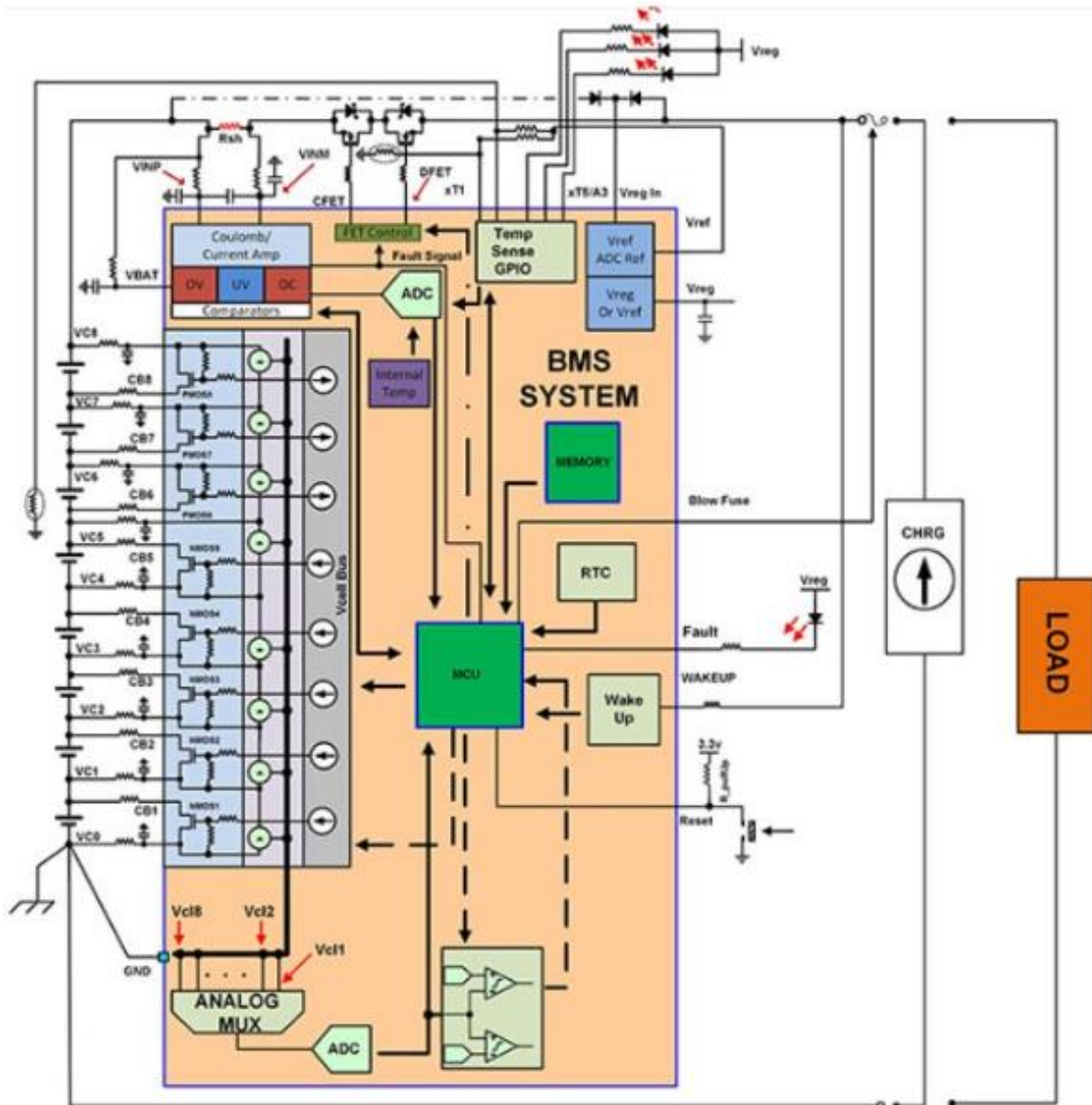
Σχήμα 1.2 Παράδειγμα BMS SoM από πλακέτα PCB εμπορίου της εταιρείας ημιαγωγίων NXP

1.2 Αρχιτεκτονική BMS

Η αρχιτεκτονική ενός BMS³ συστήματος είναι περίπου ίδια σε όλες τις σχεδιάσεις. Αρχικά, υπάρχουν μια σειρά από pins εισόδου εξόδου (IOs) τα οποία δέχονται ψηφιακά δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά ανταλλάσσονται μεταξύ των εξωτερικών μικροελεγκτών και της εσωτερικής μονάδας επεξεργασίας. Αρκετά διαδεδομένα είναι να πρωτόκολλα επικοινωνίας μεταξύ μικροελεγκτών και περιφερειακών κυκλωμάτων βασισμένα στο SPI και το I2C. Η λογική είναι τύπου master-slave ή master-multiple slaves καθώς ένας μικροελεγκτής μπορεί να αποστείλει πληροφορίες προς ένα άλλο μικροελεγκτή ή σε πολλούς ταυτόχρονα. Η διαφορά των SPI και I2C, εκτός της κυκλωματικής σχεδίασης και των σημάτων χρονισμού των δεδομένων, αφορά και τη χρήση τους. Το I2C χρησιμοποιείται για σταθερή αρχική εγγραφή δεδομένων σε buffers εντός του μικροελεγκτή. Η λογική αυτή είναι αρκετά καλή διότι γράφονται τα δεδομένα μία

3 Manenti Antonio, Andrea Abba, Allesandro Merati, Sergio M. Savaresi, *A New BMS Architecture on Cell Redundancy*, September 2011

και μόνο φορά χωρίς να απαιτείται εκ νέου ενημέρωση ενώ θα τρέχει η κυρίως εφαρμογή. Επομένως, χρησιμοποιείται για την στατική αρχικοποίηση λειτουργιών του BMS όπως είναι οι χρονοισμοί φόρτισης-εκφόρτισης, το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα που διαρρέει τη μπαταρία και η μέγιστη επιτρεπτή τάση που θα πρέπει να ανιχνευθεί στα cells αυτής. Από την άλλη, το SPI χρησιμοποιείται μαζί με σήμα ρολογιού για την συνεχή ανταλλαγή δεδομένων, όπως είναι οι εντολές αφύπνισης της μονάδας ή πτώσης σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης. Παράλληλα, μπορεί κανείς να μεταφέρει και τα δεδομένα των μετρήσεων από τάσεις, ρεύματα και αισθητήρες θερμοκρασίας.

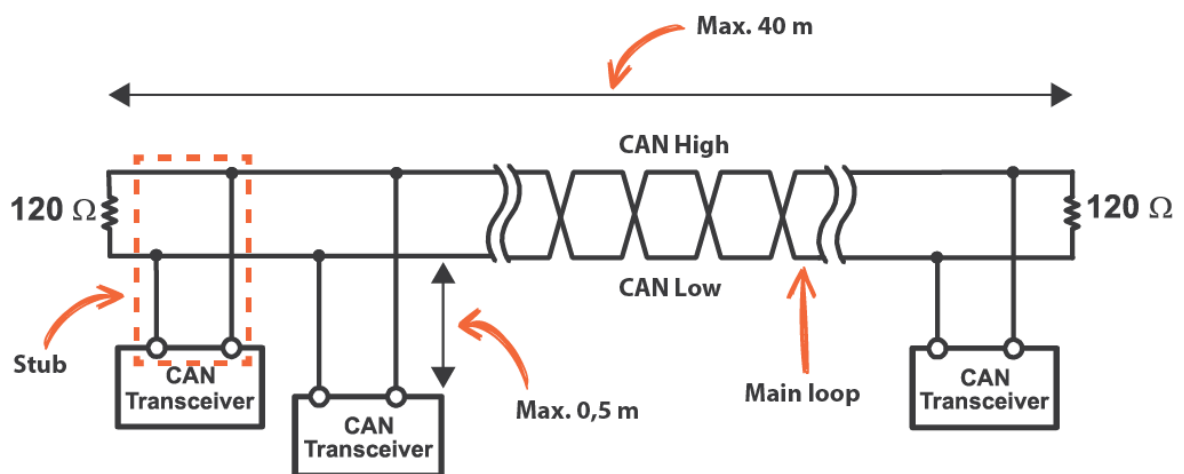


Σχήμα 1.3 Γενική αρχιτεκτονική BMS συστήματος

Στην αρχιτεκτονική αυτή, περιλαμβάνονται και αναλογικές θύρες IOs. Σε αυτές ανήκουν οι μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό που χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα για την περίπτωση ανίχνευσης της θερμοκρασίας με εξωτερική κυκλωματική διάταξη, οι αισθητήρες υπολογισμού του ρεύματος μιας χαμηλής σειριακής αντίστασης με την μπαταρία και οι αισθητήρες τάσης των cells με τα κατάλληλα χαμηλοπερατά κυκλώματα εισόδου.

Για την περίπτωση προστασίας από φορτίσεις και εκφορτίσεις⁴, χρησιμοποιούνται εξωτερικά MOSFETs ισχύος τα οποία σε συνδυασμό με τα μετρούμενα μεγέθη και τις τιμές που έχουν αποθηκευτεί ως μέγιστες επιτρεπτές και τους χρονισμούς, λειτουργούν με καθοδήγηση από εσωτερικό αλγόριθμο της μονάδας επεξεργασίας για να οδηγείται σωστά η ισχύς προς το εξωτερικό φορτίο που συνδέεται στην μπαταρία. Το φορτίο αυτό, για την περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να είναι ο ίδιος ο κινητήρας του οχήματος.

Τέλος, στα ηλεκτρικά οχήματα είναι συνηθισμένη η χρήση του CAN Bus μοντέλου επικοινωνίας. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται διότι είναι απλό για την μεταφορά των ψηφιακών μετρήσεων και εντολών από τον εγκέφαλο του οχήματος προς το ειδικό εργαλείο ECU που εκτελεί τις μετρήσεις. Φυσικά, μπορεί κανείς να πραγματοποιήσει επιπλέον συνδέσεις και λειτουργίες ενσωματώνοντας στον εγκέφαλο του οχήματος εξωτερικό εξοπλισμό που υποστηρίζει την CAN Bus ανταλλαγή δεδομένων. Για την περίπτωση αυτή, η αρχιτεκτονική του BMS συστήματος εξασφαλίζει transceiver (transmitter + receiver) CAN Bus με κατάλληλη γαλβανική απομόνωση για επιπλέον ασφάλεια από υπερτάσεις και υπερρεύματα από τη μία μονάδα προς την άλλη.



Σχήμα 1.4 Μορφή ανταλλαγής δεδομένων CAN Bus

4 Thomas Conway, *An isolated active balancing and monitoring system for Lithium Ion battery stacks*, April 2021

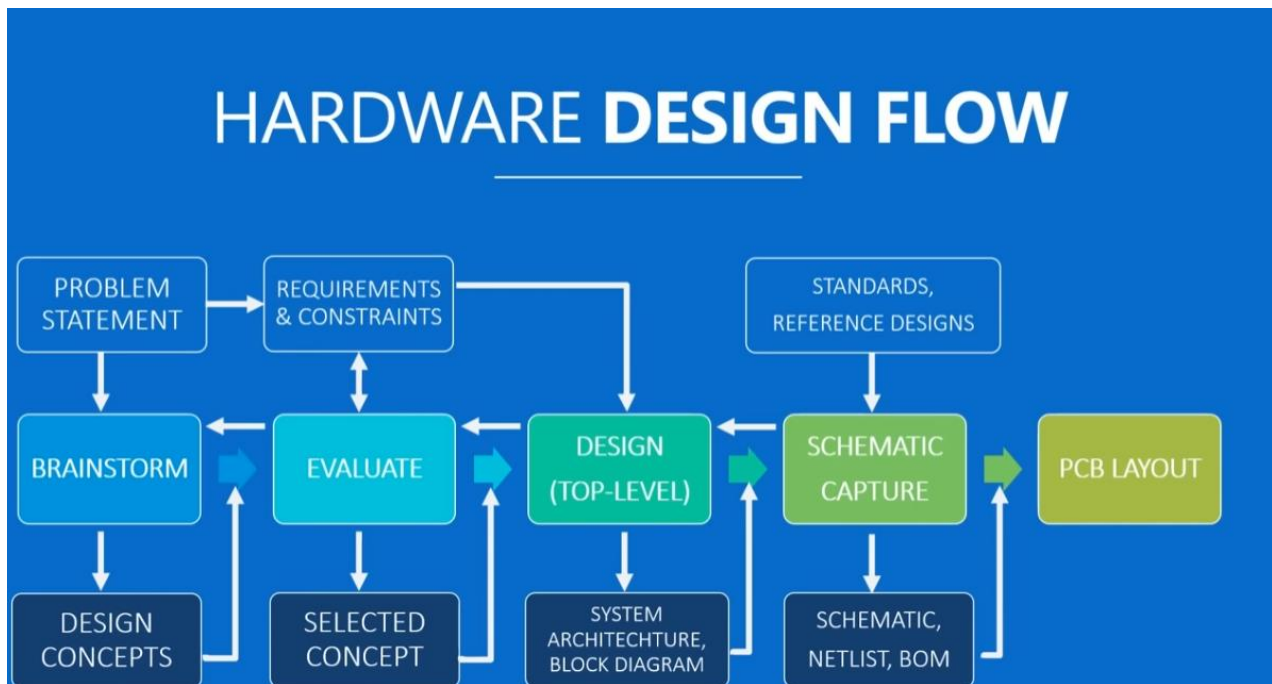
1.3 Σχεδιασμός συστημάτων

Ο σχεδιασμός συστημάτων απαιτεί πολύπλευρη μελέτη ⁵ σύμφωνα με τις απαιτήσεις που δημιουργούνται. Αρχικά θα πρέπει να γίνουν σαφείς οι είσοδοι και οι έξοδοι του συστήματος καθώς αυτές οι παράμετροι καθορίζουν τη συνολική λειτουργία του συστήματος. Στη συνέχεια ακολουθεί η σχηματική αποτύπωση του συστήματος με τη χρήση block διαγράμματος. Ένα τέτοιο διάγραμμα περιλαμβάνει όλες τις μονάδες και υπομονάδες του τελικού συστήματος χωρίς εκτεταμένη ανάλυση παρά μόνον να αποτυπώνονται όλες οι είσοδοι και έξοδοι των blocks και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Αυτός ο τρόπος θεώρησης του συστήματος είναι ικανός να δώσει μια πρώτη μορφή στην αρχιτεκτονική του. Έπειτα ακολουθεί ο σχεδιασμός των επιμέρους blocks σε κυκλώματα και εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία τους με τη χρήση εξομοιώσεων. Προκειμένου να εξαλειφθεί κάθε περίπτωση, δοκιμάζονται αρκετές αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων και γίνονται αποδεκτά τα αποτελέσματα που βρίσκονται εντός των ορίων σφάλματος που έχουν καθοριστεί για τη σχεδίαση.

Έχοντας υλοποιήσει τα επιμέρους κυκλώματα και προσομοιώσει τις λειτουργίες τους, σειρά έχει η σχεδίαση του πρωτότυπου συστήματος. Στο στάδιο αυτό θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι κάτωθι προδιαγραφές :

- **Κόστος κατασκευής :** Η επιλογή των υλικών και της πλακέτας του πρωτότυπου σε συνδυασμό με την κόλληση των components διαμορφώνουν ένα συνολικό κόστος κατασκευής. Σε αυτό συμβάλλει και η ελάχιστη παραγγελία τεμαχίων υλικών/πλακετών και assembled PCB πλακετών. Συνεπώς, ο σχεδιαστής οφείλει να γνωρίζει το περιθώριο του διαθέσιμου χρηματικού ποσού που χρειάζεται το σύστημά του.
- **Επιλογή υλικών :** Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν συστήνεται να είναι γνωστά προς το σχεδιαστή (λ.χ. να τα έχει χρησιμοποιήσει σε παρελθοντικές σχεδιάσεις συστημάτων) ή να φέρουν κατάλληλες οδηγίες χρήσης (datasheets) και να υπάρχει διαθέσιμο υλικό στο διαδίκτυο ώστε να πληροφορηθεί σχετικά. Ακόμη, υπάρχει περίπτωση ορισμένα υλικά να λάβουν την ένδειξη discontinued καθώς σταματά η παραγωγή τους. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο σχεδιαστής οφείλει να αντικαταστήσει το υλικό και να ανανεώσει τα σχέδιά του.
- **Όγκος κατασκευής :** Ο όγκος της κατασκευής ή της συσκευής του συστήματος θα πρέπει να είναι ορισμένος σε διαστάσεις. Ο σχεδιαστής οφείλει να λάβει ως παραμέτρους τις διαστασιολογήσεις που έχουν δωθεί καθώς είναι πιθανό το σύστημα να ενσωματωθεί σε κάποια άλλη διάταξη ή να περικλείεται από ειδικό κάλυμα.

⁵ Zhengqi Wei, *Bidirectional Constant Current String-to-cell battery equalizer*, January 2023



Σχήμα 1.5 Διάγραμμα σχεδίασης Hardware εξοπλισμού

1.4 Σχεδιαστική προσέγγιση του BMS

Το BMS σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας ακολουθεί το design flow που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5 και είναι σύμφωνο με τους κανόνες σχεδίασης συστημάτων που διατυπώθηκαν στη παράγραφο 1.3. Για το λόγο αυτό, η εργασία εφεξής επιμερίζεται σε υποενότητες οι οποίες δίνουν περισσότερο βάθος στις σχεδιαστικές προσεγγίσεις και τεχνικές που εφαρμόστηκαν προκειμένου να σχεδιαστεί το block διάγραμμα, να γίνουν οι εξομοιώσεις των κυκλωμάτων, να επιλεχθούν τα υλικά και τελικά να σχεδιαστεί μια πρωτότυπη πλακέτα που περιλαμβάνει τα κυκλώματά μας.

1.4.1 Block διάγραμμα

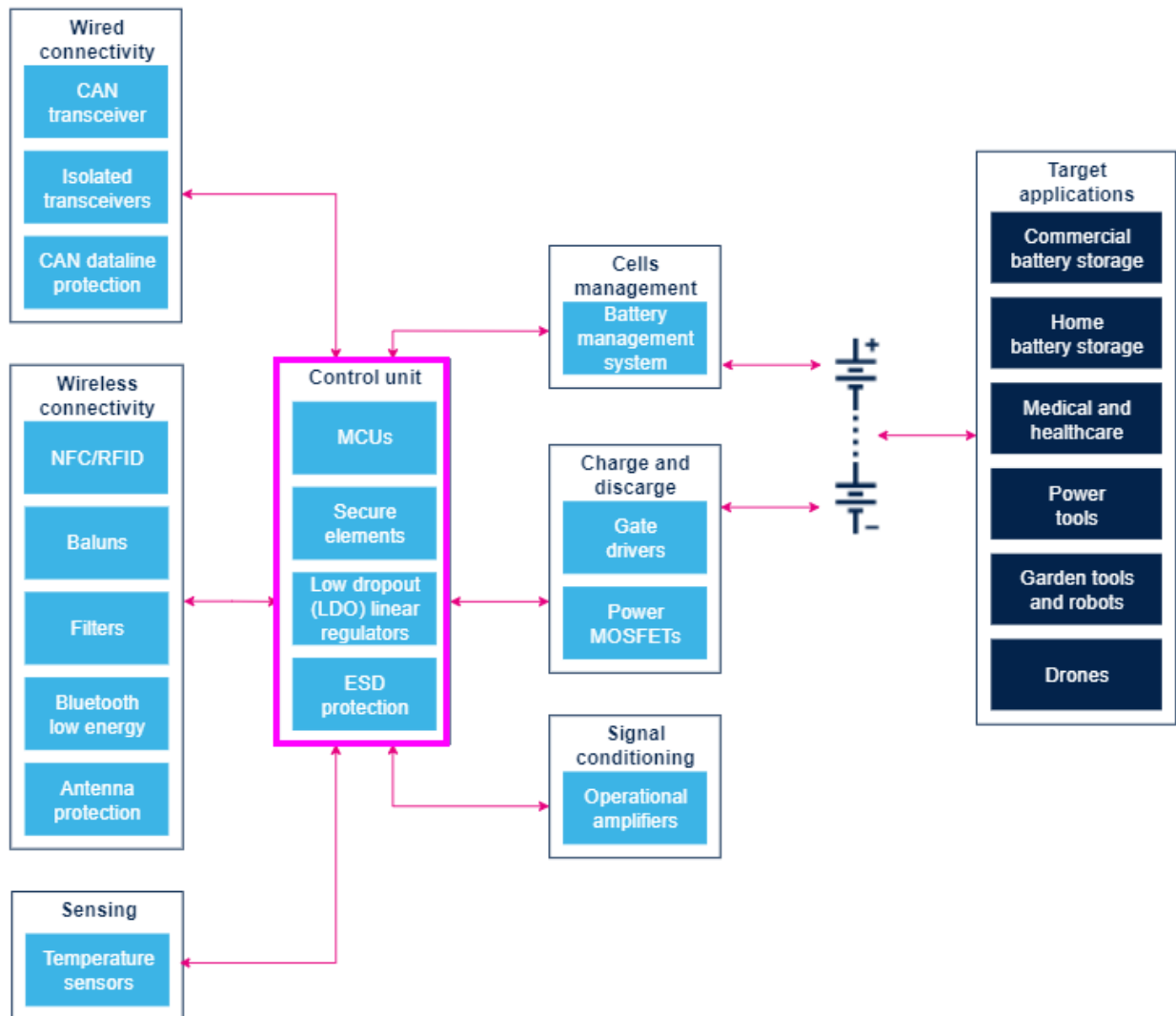
Το σύστημα BMS βασίστηκε κυρίως σε υλικά της εταιρείας STMicroelectronics. Η εταιρεία εξειδικεύεται στη κατασκευή ICs μικροελεγκτών με αρχιτεκτονική ARM και σε επιμέρους περιφερειακά ICs σχετικά με το industry επεξεργασίας ήχου, εικόνας, ανταλλαγής δεδομένων, τηλεπικοινωνιών και αυτόνομης ηλεκτρικής οδήγησης. Ιδιαίτερα οι μικροελεγκτές STM32 φημίζονται για την πολύ μεγάλη τους ισχύ σε επεξεργαστικές τεχνικές, το πολύ εύχρηστο περιβάλλον του STM32CubeIDE το οποίο προσφέρει αρχικοποίηση λειτουργιών των pins

και κορμό του βασικού κώδικα (C, C++) όπου αναπτύσσονται οι εφαρμογές. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε το προτεινόμενο block διάγραμμα για industrial BMS σύστημα.

Το σύστημα αυτό περιέχει τις παρακάτω μονάδες :

- **Wired Connectivity** : Χρήση μονάδων αποστολής – λήψης δεδομένων μέσω του πρωτοκόλλου CAN Bus (CAN transceivers). Τα ICs αυτά προσφέρουν σε πολλές περιπτώσεις και γαλβανική απομόνωση για προστασία των συστημάτων που διασυνδέονται.
- **Wireless Connectivity** : Χρήση μονάδων ασύρματης διάδοσης δεδομένων όπως το Bluetooth, RFID και διάδοση με κεραίες. Στη παρούσα σχεδίαση το τμήμα αυτό παραλείπεται διότι ξεφεύγει από τα όρια του αντικείμενου που είναι καθαρά η χρήση του BMS συστήματος. Ωστόσο, σε πραγματικές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται τέτοια υποσυστήματα προκειμένου να μπορεί να γίνεται monitoring των δεδομένων απομακρυσμένα χωρίς φυσική διασύνδεση με τη συσκευή ενώ παράλληλα μπορούν να αποσταλούν εντολές προς το BMS σύστημα μέσω κατάλληλου γραφικού περιβάλλοντος (GUI) σε εφαρμογή κινητού ή στο panel του οχήματος.
- **Sensing** : Χρήση αισθητήρων, κυρίως για την ανίχνευση της θερμοκρασίας του συστήματος και αποφυγής υπερφόρτωσής του.
- **Control unit** : Χρήση μικροελεγκτή και περιφερειακών συστημάτων. Ο μικροελεγκτής μπορεί να μεσολαβήσει στην επικοινωνία των περιφερειακών συσκευών και να μεταφέρει εξωτερικές εντολές προς την μονάδα επεξεργασίας του BMS. Παράλληλα, εκτελεί επιπλέον ρουτίνες προκειμένου να τρέξει η γενικότερη εφαρμογή του BMS και να αρχικοποιηθούν καταστάσεις και χρονοισμοί στο σύστημα.
- **Cells management** : Εδώ συμπεριλαμβάνεται η χρήση του IC που λειτουργεί ως BMS και φέρει την αρχιτεκτονική που αναλύθηκε στη παράγραφο 1.2.
- **Charge and Discharge** : Γίνεται χρήση των MOSFETs ισχύος και των drivers που οδηγούν κατάλληλα το BMS σύστημα, την μπαταρία και το φορτίο εξόδου.
- **Signal Conditioning** : Χρήση εξωτερικών τελεστικών ενισχυτών και αναλογικών κυκλωμάτων για περαιτέρω επεξεργασία αναλογικών σημάτων. Στην περίπτωση της παρούσας σχεδίασης αρκούμαστε στη δειγματοληψία τάσεων, ρεύματος και θερμοκρασίας από τις αισθητήριες θύρες που παρέχονται στο BMS IC, οπότε η σχεδίαση είναι λιγότερο σύνθετη.

Industrial Battery Management System (BMS)



Σχήμα 1.6 Block διάγραμμα BMS συστήματος

1.4.2 Εξομοίωση block διαγράμματος σε Simulink

Από το block διάγραμμα που προτάθηκε, μπορεί να εκτελεσθεί μια σειρά από εξομοιώσεις και καταστάσεις λειτουργίας του κυκλώματος. Για απλούστευση των εξομοιώσεων χρησιμοποιούνται ορισμένες περιπτώσεις των block υποσυστημάτων στα περιβάλλοντα Matlab / Simulink και άλλες εκτελούνται σε σχεδιαστικά πακέτα κυκλωμάτων όπως το LTspice.

Στόχος του Matlab / Simulink είναι να βοηθήσει στην εξομοίωση του συστήματος υπό απλές συνθήκες όπου τοποθετείται η μπαταρία και το φορτίο εν σειρά, ενώ μετρούνται οι τάσεις των cells, το ρεύμα και η θερμοκρασία. Παράλληλα, λειτουργεί μια λειτουργία ανάδρασης καταστάσεων όπου με ειδική εντολή μεταβαίνει το σύστημα από τη μία στην άλλη κάτω από συγκεκριμένες περιπτώσεις. Το σύστημα του Simulink είναι σχετικά απλό στην σχεδίασή του και βασίζεται κατεξοχήν στις εξισώσεις που διέπουν το σύστημα με δυναμικές και στατικές μεταβολές. Ο ρόλος του είναι να προσομοιωθούν στην λογική τους οι διεργασίες.



Σχήμα 1.7 Logo Matlab / Simulink πακέτου εξομοίωσης συστημάτων

1.4.3 Εξομοίωση μεταβατικών κυκλωματικών συμπεριφορών σε LTspice

Το κύκλωμα φέρει, ωστόσο, και μεταβατικά φαινόμενα τα οποία πρέπει να ελεγχθούν και να εξομοιωθούν με την βοήθεια εργαλείου εξομοίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων για ακρίβεια στα αποτελέσματα. Τέτοια φαινόμενα είναι η εισαγωγή παρασιτικών στοιχείων στις πηγές τάσης της μπαταρίας και η εισαγωγή λευκού θορύβου με μικρή ισχύ που να προσομοιώνει τυχόν σφάλματα τάσης ή μεταβατικά φαινόμενα εξαιτίας περιβαλλοντικών παραγόντων (π.χ. θερμικός θόρυβος όταν αυξηθεί η θερμοκρασία του συστήματος).

Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία και η χρήση του LTspice, ένα πακέτο εξομοίωσης κυκλωμάτων της Analog Devices το οποίο φέρει λειτουργίες όπως η εισαγωγή θορύβου, η μελέτη φάσματος συχνοτήτων και η εξαγωγή διαγραμμάτων Bode που μπορούν να μας βοηθήσουν να αποκτήσουμε πιο ολοκληρωμένη αντίληψη για τη συμπεριφορά της μπαταρίας και των κυκλωμάτων οδήγησης στην έξοδο. Το λογισμικό διατίθεται δωρεάν.



Σχήμα 1.8 Logo LTspice πακέτου εξομίωσης κυκλωμάτων

1.4.4 Επιλογή υλικών

Τα υλικά επιλέχθηκαν στη συνέχεια με τη βοήθεια του block διαγράμματος που παρέχει η STMicroelectronics. Συγκεκριμένα, με κάθε πάτημα επάνω στα εικονίδια των υποσυστημάτων, ο σχεδιαστής έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών στοιχείων τα οποία φέρουν περιγραφή των λειτουργειών τους και επισυνάπτονται τα datasheets τους. Έτσι, η επιλογική διαδικασία των υλικών από distributors είναι αρκετά πιο εύκολη.

Industrial Battery Management System (BMS)

Control unit

Products HW Evaluation Tools Documentation Tools & Software eDesignSuite

▼ Low dropout (LDO) linear regulators 10 total entries [Open full selector](#)

Ultra Low Dropout LDO regulators

Sort by: A-Z Datasheet

- ▶ ESD protection
 - ★ **LD39100** - 1 A low quiescent current low noise voltage regulator [D]
 - ACTIVE [I] [C]
- ▶ MCUs
 - ★ **LD49100** - 1 A, low quiescent current, low-noise voltage regulator with soft start - Automotive grade [D]
 - ACTIVE [I] [C]
- ▶ Secure elements
 - ★ **STLQ015** - 150 mA - ultra low quiescent current linear voltage regulator [D]
 - ACTIVE [C]
 - LD39015** - 150 mA low quiescent current low noise voltage regulator [D]
 - ACTIVE [C]
 - LD39050** - 500 mA low quiescent current and low noise voltage regulator [D]
 - ACTIVE [I] [C]
 - LD56020** - Low input voltage 200 mA ultra low dropout linear regulator [D]
 - ACTIVE [I] [C]
 - LDCL015** - 150 mA capless ultra low drop linear regulator ICs [D]
 - ACTIVE [C]

Σχήμα 1.9 Επιλογή υλικών από το block διάγραμμα

1.4.5 Σχεδίαση σε PCB

Έπειτα, ακολουθεί η σχεδίαση της πρωτότυπης πλακέτας PCB σε κατάλληλο λογισμικό. Προτείνεται να χρησιμοποιηθεί το EasyEDA καθώς περιλαμβάνει απλό σχετικά γραφικό περιβάλλον ενώ δίνει τη δυνατότητα να σχεδιασθούν ακόμη και μέτριας έως σχετικά καλής ποιότητας PCBs διότι παρέχει αρκετές λειτουργίες όπως είναι ο έλεγχος των συνδέσεων του κυκλώματος, ο DRC έλεγχος των tracks που συνδέουν τα υλικά μεταξύ τους προκειμένου να τηρούνται οι προϋποθέσεις του κατασκευαστή και η εύκολη εξαγωγή των αρχείων για παραγγελία του σχεδίου. Το λογισμικό αυτό προτείνεται ιδιαίτερα σε νέους σχεδιαστές λόγω της εύκολης πρόσβασης σε πληθώρα διαθέσιμων υλικών από την δικτυακή πλατφόρμα αναζήτησης που ενσωματώνει. Τα υλικά αυτά διαθέτουν footprints και δεν χρειάζεται να γίνει σχεδίαση με βάση το μηχανολογικό σχέδιο και τις διαστασιολογήσεις τους. Τέλος, το EasyEDA συνεργάζεται με τη κατασκευαστική εταιρεία JLCPCB η οποία είναι αρκετά ανερχόμενη την τελευταία 5ετία εξαιτίας των πολύ χαμηλών κόστων παραγωγής πρωτότυπων πλακετών και των εξαιρετικά πολλών διαφορετικών παροχών υπηρεσιών σε πλακέτες 6+ στρώσεων.



Σχήμα 1.10 Logo EasyEDA πακέτου σχεδίασης πλακετών PCB⁶

Στα επόμενα κεφάλαια αναλύονται περισσότερο τα τμήματα της σχεδίασης χωριστά και επισημαίνονται οι παρατηρήσεις που προκύπτουν.

⁶ <https://prodocs.easyeda.com/en/faq/editor/index.html>

Κεφάλαιο 2ο:

Κεφάλαιο 3ο: Εξομοίωση σε Block διάγραμμα

3.1 Σήματα εισόδου και εξόδου

Τα σήματα εισόδου και εξόδου του συστήματος προς ανάπτυξη θα πρέπει να ορισθούν στο πρώτο βήμα της συνολικής σχεδίασης διότι θα καθορίσουν την δομή των συστημάτων και του τρόπου διασύνδεσης αυτών. Επομένως, είναι σημαντικό να καθοριστούν αντίστοιχα τα blocks που θα λάβουν μέρος στην εξομοίωση του Block διαγράμματος. Η εκτέλεση της τελευταίας γίνεται στα πλαίσια του λογισμικού Matlab και Simulink.

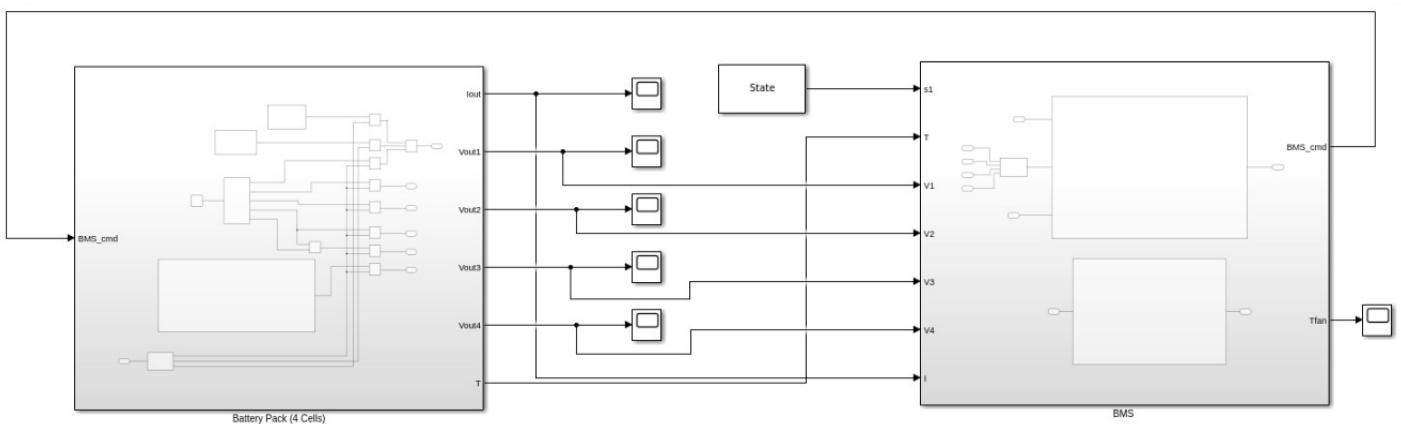
Η μπαταρία, όπως είναι γνωστό, αποτελείται από κελιά (cells) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους είτε παράλληλα είτε σε σειρά. Για την περίπτωση της σχεδίασης αυτής, υποθέτουμε πως η συνδεσμολογία είναι σειριακή, με αποτέλεσμα να μετρείται διαφορετική τάση ανά κόμβο σύνδεσης cell και ένα κοινό ρεύμα που τα διαπερνά. Συνεπώς, η λειτουργία της μπαταρίας θα πρέπει να εξομοιωθεί ως ένα χωριστό block υποσύστημα. Στόχος είναι να ενσωματωθούν σε αυτό οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία των cells και θεωρείται παράλληλα πως φέρει μια υπομονάδα ελέγχου η οποία επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή και ανταλλάσει μηνύματα σχετικά με την τρέχουσα θερμοκρασία, τις τάσεις ανά κόμβο και το ρεύμα.

Από τα παραπάνω, συμπεραίνει κανείς πως τα σήματα εισόδου και εξόδου μπορούν εύκολα να θεωρηθούν εφόσον γνωρίζουμε τις λειτουργίες που θα πρέπει να εκτελεί το block της μπαταρίας. Το υποσύστημα της μπαταρίας μπορεί να θεωρηθεί ως plant, δηλαδή αφορά το σύστημα το οποίο θέλουμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του και να κατευθυνθεί η λειτουργία του. Επομένως, στην είσοδο θεωρείται ένα σήμα BMS_cmd το οποίο λαμβάνει τιμές ανάλογα με τη κατάσταση που ο μικροελεγκτής του BMS πρόκειται να επιβάλλει. Ουσιαστικά είναι μια εντολή για επιλογή λειτουργίας του συστήματος μπαταριών. Στην έξοδο αυτού του γενικού συστήματος θα πρέπει να προσομοιωθεί η λειτουργία των αισθητήρων τάσης, ρεύματος και θερμοκρασίας. Επομένως, οι έξοδοι είναι μια πληθώρα τέτοιων μετρήσιμων σημάτων τα οποία μπορούν να προβληθούν σε παλμογράφους και να γίνει γραφική αναπαράσταση όλων των δυναμικών ή στατικών μεταβολών.

Ένα ακόμη block που χρησιμοποιείται παράλληλα με το πρώτο, είναι αυτό του μικροελεγκτή του BMS συστήματος (μονάδα επεξεργασίας). Αυτό έχει το ρόλο της δειγματοληψίας των μετρούμενων μεγεθών και εκεί αποφασίζεται η εντολή προς το plant. Αυτή η εντολή μπορεί να αφορά την αλλαγή κατάστασης λειτουργίας του ολικού συστήματος ή μπορεί να ενεργοποιεί ένα σύστημα ψύξης για να διατηρείται σε σωστά επίπεδα η θερμοκρασία της μπαταρίας και της πλακέτας. Στην τελική έκδοση της πλακέτας που σχεδιάστηκε δεν συμπεριλήφθηκε το

σύστημα ψύξης από ανεμιστήρα, ωστόσο μπορεί να ενσωματωθεί καθώς υπάρχουν διαθέσιμα θύρες IOs για τον έλεγχο.

Συνεπώς, για το block του BMS μικροελεγκτή, τα σήματα εισόδου είναι η κατάσταση που θέλουμε να προσομοιωθεί (State) και οι μετρούμενες ποσότητες από τους αισθητήρες στα cells της μπαταρίας (τάσεις, ρεύμα, θερμοκρασία). Στην έξοδο υπάρχει η εντολή BMS_cmd η οποία ανατροφοδοτείται προς το σύστημα ελέγχου επάνω στο block της μπαταρίας και, επίσης, υπολογίζεται η νέα θερμοκρασία λόγω ενεργοποίησης ανεμιστήρα όταν υπάρχει κίνδυνος αύξησής της.



Σχήμα 2.1 Συνολικό block διάγραμμα και σήματα εισόδου/εξόδου

Ωστόσο, τα σήματα εισόδου/εξόδου που αναφέρθηκαν προηγουμένως σχετίζονται με την συνολική σχεδίαση της προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει πως κάθε λειτουργία που ακολουθεί επιμερίζεται σε μικρότερα υποσυστήματα προκειμένου να γίνει πιο εύκολη και κατανοητή η σχεδίαση. Για το σύστημα των 4 κελιών μπαταρίας υπάρχουν τα blocks που εξομοιώνουν την λειτουργίας της μπαταρίας, τις περιπτώσεις φόρτισης-εκφόρτισης χωριστά, η μονάδα που προσομοιώνει τον αισθητήρα θερμοκρασίας και η μονάδα ελέγχου κατάστασης που επιτρέπει συγκεκριμένες εξόδους να διαβαστούν ανάλογα με τη τρέχουσα κατάσταση που ορίζει το BMS_cmd σήμα. Στο σύστημα BMS υπάρχουν δύο υπομονάδες όπου η πρώτη αφορά στον έλεγχο της κατάστασης και επιβολή μεταβολών ανάλογα με τις τάσεις και το ρεύμα που μετρούνται, ενώ η δεύτερη αφορά το υποσύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας μέσω του ανεμιστήρα.

Τέλος, πρέπει να επισημανθεί η χρήση παραμέτρων όπως οι εσωτερικές εμπεδήσεις, η ονομαστική τάση της μπαταρίας, το ονομαστικό ρεύμα που ρέει προς δεδομένο φορτίο εξόδου και σταθερές υπολογισμού θερμοκρασίας. Αυτά τα δεδομένα έχουν καταγραφεί σε ξεχωριστό κώδικα Matlab με την ονομασία params.m. Προκειμένου να εκτελεσθεί σωστά η εξομοίωση

και χωρίς σφάλματα, πρέπει ο χρήστης να τρέξει πρώτα αυτό το αρχείο για να αποθηκευτούν οι τιμές στη μνήμη, και στη συνέχεια να γίνει η εξομοίωση στο Simulink.

```

params.m × +
/MATLAB Drive/params.m
1      clc;
2      clear all;
3      R1 = 10;
4      R2 = 0.01;
5      RL = 10;
6      C = 1e-6;
7      mc = 1e-4;
8      Vbat = 50;
9      Imean = 4*Vbat/(4*R1 + 4*R2 + RL);
10     State = 'NORMAL';
11

```

Σχήμα 2.2 Παράμετροι Block διαγράμματος

3.2 Εξισώσεις μεταφοράς για Battery package

Οι εξισώσεις μεταφοράς των block συστημάτων συνδέουν την είσοδο και την έξοδο μέσω ενός λόγου ο οποίος συνήθως είναι υπολογισμός στο πεδίο της συχνότητας. Η συχνότητα αυτή, μέσω του μετασχηματισμού Laplace, συμβολίζεται με s και η γενική σχέση είναι η ακόλουθη :

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = G(s) = \frac{a(s)}{b(s)} = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots}{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots}$$

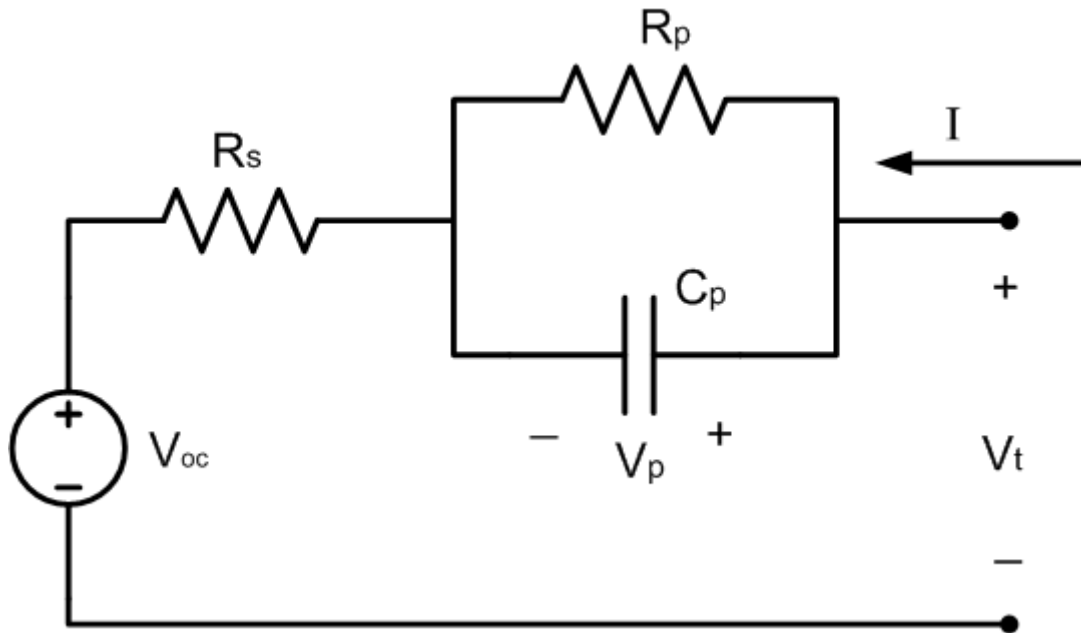
Σύμφωνα με την ανωτέρων μαθηματική σχέση η οποία συνδέει την έξοδο Y με την είσοδο X , κάθε συνάρτηση μεταφοράς ενός block συστήματος μπορεί να λάβει μια τελική μορφή λόγου πολυωνύμων. Οι βαθμοί των πολυωνύμων n και m δηλώνουν κατά πόσο το σύστημα συγκλίνει. Ακόμη είναι γνωστό από το μετασχηματισμό Laplace των παθητικών στοιχείων (R , L , C) πως οι νέες ισοδύναμες αντιστάσεις (εμπεδήσεις) είναι :

$$Z_R = R \text{ Ohms}$$

$$Z_C = \frac{1}{sC} \text{ Ohms}$$

$$Z_L = sL \text{ Ohms}$$

Αυτές οι μετατροπές είναι απαραίτητες προκειμένου να σχεδιασθεί το ισοδύναμο κύκλωμα μεταφοράς της μπαταρίας και στη συνέχεια να υλοποιηθεί ως block σύστημα μεταφοράς το οποίο θα υπολογίζει ρεύμα και τάσεις στην έξοδο. Προφανώς, αντίστοιχες μετατροπές ισχύουν και για τα dc σήματα ή τα σήματα που μεταβάλλονται στο χρόνο. Το Simulink, ωστόσο, παρέχει έτοιμο block Transfer Function το οποίο εκτελεί τις μετατροπές συνεχώς.



Σχήμα 2.3 Ισοδύναμο κύκλωμα cell μπαταρίας⁷

Από το σχήμα 2.3 διαπιστώνουμε πως το ισοδύναμο κύκλωμα ενός cell μπαταρίας φέρει παρασιτικές αντιστάσεις και χωρητικότητα. Οι ακροδέκτες μεταξύ διαδοχικών cells ακολουθούν την εκάστοτε συνδεσμολογία, επομένως για την περίπτωση αυτής της σχεδίασης, τα cells είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Έτσι, κάθε θετικός ακροδέκτης συνδέεται στον αρνητικό του επόμενου cell και τελικά παραμένουν διαθέσιμοι δύο ακροδέκτες για σύνδεση του φορτίου εξόδου (το - του πρώτου cell και το + του τελευταίου cell). Επίσης, υποθέτουμε σχετικά μικρές τιμές για τις αντιστάσεις (ιδιαίτερα για την αντίσταση παράλληλα με τον πυκνωτή).

Για την εξαγωγή της συνολικής εξίσωσης μεταφοράς 4 όμοιων cells πρακτικά αρκεί να βρεθεί η συνάρτηση μεταφοράς για ένα μόνο block σύστημα. Η σειρά συνδεσμολογία, τελικά, εκτελεί πολλαπλασιασμό των blocks διαδοχικά, και το τελικό αποτέλεσμα θα είναι ο λόγος των πολωνύμων υψωμένος με δύναμη το πλήθος των cells (4). Για τον υπολογισμό ενός block αρχικά εκτελούνται οι μετατροπές με τον μετασχηματισμό Laplace για να αντιμετωπίζονται όλα τα στοιχεία ως εμπεδήσεις (μιγαδικές αντιστάσεις). Συμβολίζεται R1 η σε σειρά

⁷ Νικόλαος Βασιλείου, *Μελέτη συστήματος διαχείρισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος και ανάπτυξη οικιακού συστήματος διαχείρισης ενέργειας με χρήση μπαταρίας*, Οκτώβριος 2017, Αθήνα

αντίσταση, R_2 η αντίσταση παράλληλα με τη χωρητικότητα και C ο πυκνωτής. Ο πυκνωτής και η R_2 είναι σε παραλληλία μεταξύ τους, οπότε η εμπέδηση είναι :

$$\frac{1}{sC} // R_2 = \frac{R_2}{sCR_2 + 1}$$

Η αντίσταση R_1 είναι σε σειρά με την προηγούμενη εμπέδηση, οπότε :

$$Z_{eq} = R_1 + \frac{R_2}{sCR_2 + 1}$$

Τέλος, αφού όλα τα cells είναι σε σειρά, η τάση εξόδου στο τέλος θα εξαρτάται από το φορτίο εξόδου R_L . Με χρήση της εξίσωσης του διαιρέτη τάσεως που υπάρχει στο σημείο αυτό, υπολογίζεται η συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ τάσης εξόδου και εισόδου για 4 κελιά σε σειρά μεταξύ τους (επαναλαμβάνεται 4 φορές η εμπέδηση Z_{eq}).

$$\frac{V_{out}}{V} = \frac{R_L}{R_L + 4Z_{eq}}$$

Επομένως, το σύστημά μας φέρει την συνάρτηση μεταφοράς :

$$\frac{V_{out}}{4V_{cell}} = \frac{R_L}{R_L + 4R_1 + \frac{4R_2}{sCR_2 + 1}} =$$

$$\frac{V_{out}}{4V_{cell}} = \frac{R_L(sCR_2 + 1)}{(R_L + 4R_1)(sCR_2 + 1) + 4R_2} =$$

$$\frac{V_{out}}{4V_{cell}} = \frac{sR_LR_2C + R_L}{sCR_2(R_L + 4R_1) + R_L + 4R_1 + 4R_2}$$

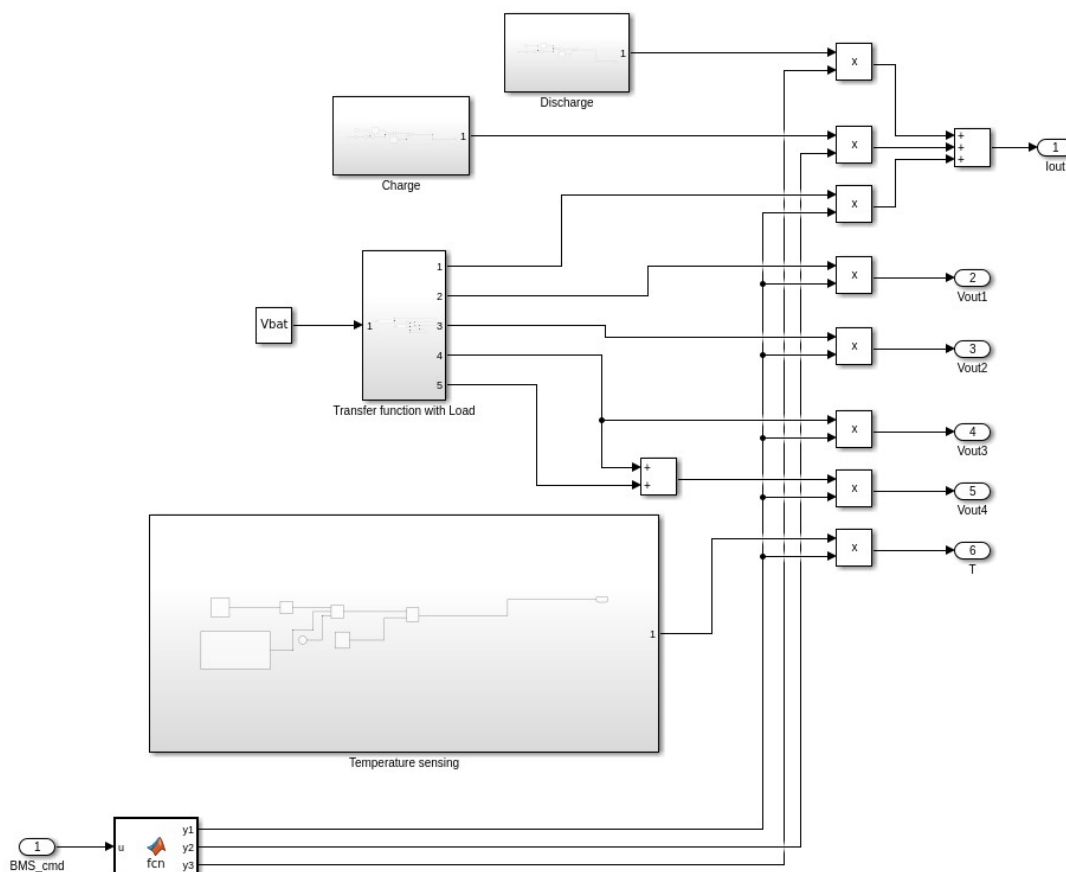
Και το ρεύμα υπολογίζεται με τη σχέση :

$$I = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{sR_2C + 1}{sCR_2(R_L + 4R_1) + R_L + 4R_1 + 4R_2}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις υλοποιούνται σε block διαγράμματα και αναλύονται στη παράγραφο 2.3 που ακολουθεί.

3.3 Σχεδιασμός Block για Battery Package

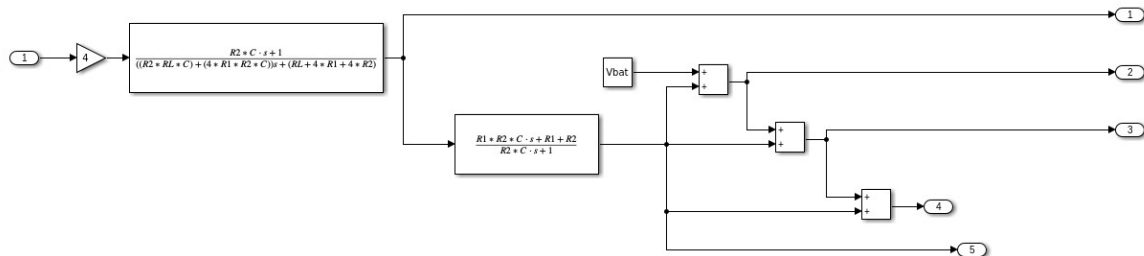
Τις προηγήθηκε στην ανάλυση της παραγράφου 2.2, το Block των cells της μπαταρίας διαμορφώνεται σε συνδυασμό με ένα πλήθος από υποσυστήματα ελέγχου εντολής από τον μικροελεγκτή, μέτρησης θερμοκρασίας και των block φόρτισης – εκφόρτισης των κελιών. Αυτά τα υποσυστήματα αναλύονται στη παρούσα παράγραφο με περισσότερη λεπτομέρεια. Φυσικά σε αυτά τα blocks περιλαμβάνεται και η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος μπαταριών σύμφωνα με τις εξισώσεις που προέκυψαν.



Σχήμα 2.4 Ισοδύναμο Block διάγραμμα των 4 κελιών μπαταρίας

Η εξίσωση της συνάρτησης μεταφοράς υλοποιείται σε ξεχωριστό block όπου εισάγονται οι παράμετροι που δίνονται από το αρχείο params.m. Όταν το αρχείο τρέξει στη πλατφόρμα του Matlab, μπορεί κανείς να αποθηκεύσει τις τιμές σε buffers προκειμένου να γίνεται συμβολική χρήση των τιμών. Στο παράδειγμα αυτό, τέτοιες τιμές αφορούν τα στοιχεία που εμφανίζονται

παρασιτικά στη μπαταρία σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο της παραγράφου 2.2. Στην συνέχεια φαίνεται το block διάγραμμα στο εσωτερικό της συνάρτησης μεταφοράς.



Σχήμα 2.5 Ισοδύναμο Block διάγραμμα της συνάρτησης μεταφοράς για τη μπαταρία

Στο διάγραμμα αυτό υπολογίζονται ως έξοδοι η τάση στο φορτίο, οι ενδιάμεσες τιμές τάσης ανά cell και το ρεύμα που διαρρέει τη διάταξη εν σειράς συνδεσμολογίας.

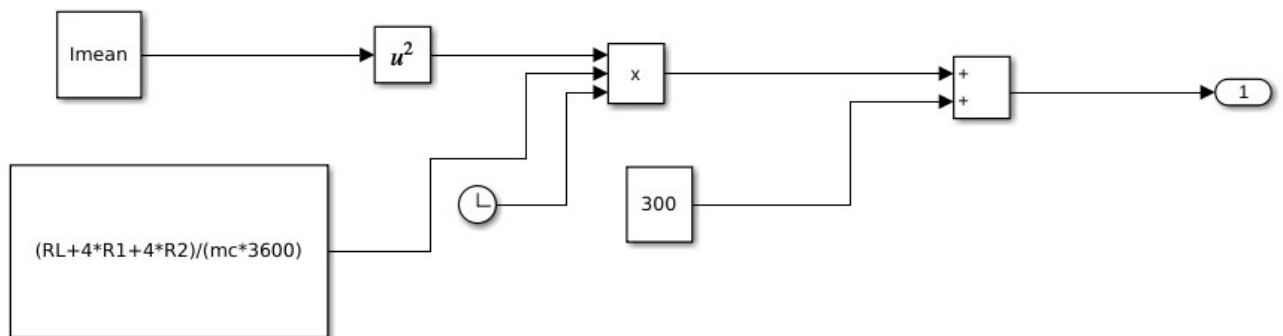
Σχετικά με τον υπολογισμό της θερμοκρασίας σε μια χρονική στιγμή η οποία είναι δεδομένη, ακολουθείται η μαθηματική εξίσωση :

$$T(t) = 300 + \frac{P}{mc} * t$$

Όπου P είναι η ισχύς η οποία γίνεται θερμότητα. Αυτή η ισχύς είναι γνωστό πως συναντάται στις ωμικές απώλειες, δηλαδή είναι ενέργεια η οποία καταναλώνεται στις αντιστάσεις που υπάρχουν στο κύκλωμα. Συνεπώς η σχέση αναδιαμορφώνεται ως εξής :

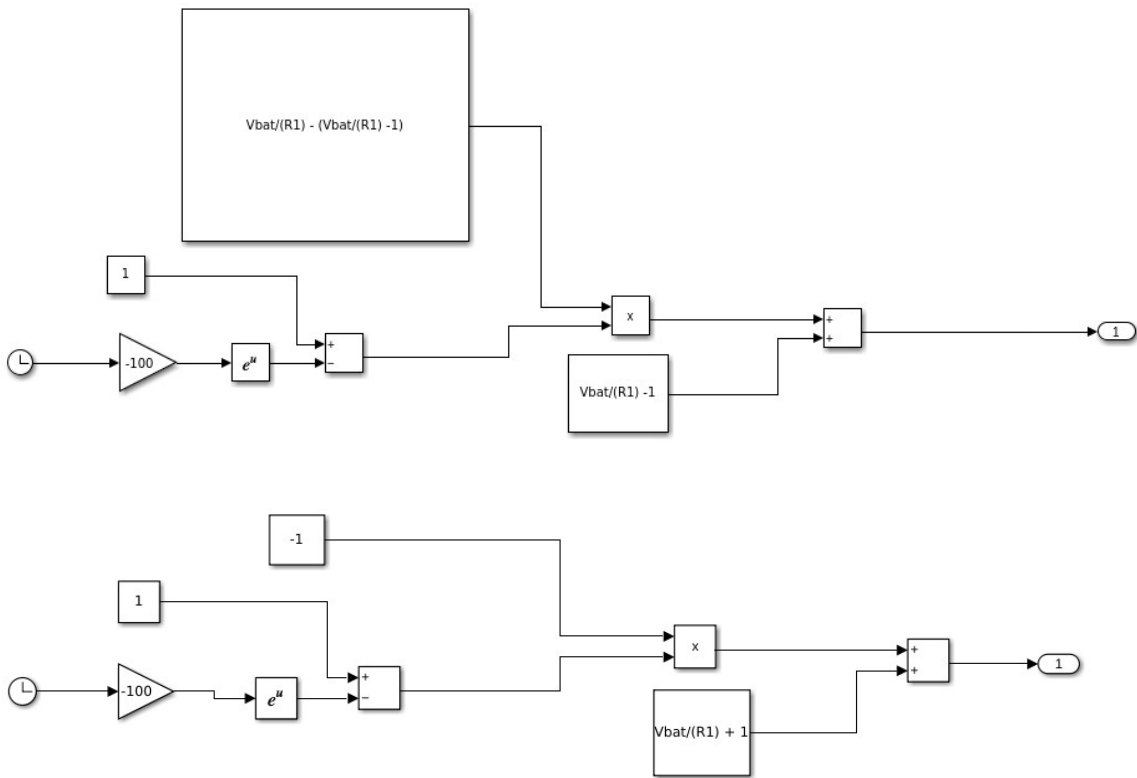
$$T(t) = 300 + \frac{I_{mean}^2 R_{total} * t}{mc}$$

Στο block διάγραμμα, έχουμε τη κάτωθι απεικόνιση :



Σχήμα 2.6 Ισοδύναμο Block διάγραμμα της συνάρτησης εξίσωσης θερμότητας

Σχετικά με τις λειτουργίες που πρέπει να εξομοιωθούν, έχουν συμπεριληφθεί και οι περιπτώσεις charge / discharge (φόρτιση / εκφόρτιση). Για τις περιπτώσεις αυτές είναι γνωστό πως λόγω χαμηλοπερατού φίλτρου που αναπτύσσεται στην πλευρά των πηγών από την εν σειρά συνδεσμολογία των παρασιτικών πυκνωτών και αντιστάσεων, η τάση ακολουθεί σχεδόν εκθετική μεταβολή και στις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση φόρτισης, η τάση λαμβάνει τιμές από το σημείο της τρέχουσας τιμής της έως τη μέγιστη τάση που μπορεί να δώσει κατά τη πλήρη φόρτιση (υποθέτονται μπαταρίες με κελιά των 50 V). Στην εκφόρτιση συμβαίνει η αντίστροφη μεταβολή της τάσης στο διάγραμμα χρόνου, καθώς από το σημείο της τρέχουσας τιμής της, φθίνει εκθετικά έως ένα οριακό σημείο πτώσης σύμφωνα με τα επιτρεπτά όρια που ανιχνεύει ο μικροελεγκτής.



Σχήμα 2.7 Ισοδύναμο Block διαγράμματα Charge / Discharge

Για τις σταθερές χρόνου των εκθετικών μεταβολών έχουν γίνει κατάλληλες αποδόσεις τιμών προκειμένου να μπορούν να αναπαρασταθούν σε ένα μικρό χρονικό διάστημα εξομοίωσης και για να εκτελείται πιο γρήγορα.

Τέλος, υλοποιείται η πολυπλεξία των σημάτων ανάλογα με τη περίπτωση της εντολής BMS_cmd. Η εντολή είναι αριθμητική τιμή η οποία λαμβάνει τις τιμές 1,2,3 και 4 ανάλογα με τις 4 καταστάσεις που επιλέγονται. Αυτές οι καταστάσεις με τη σειρά τους είναι :

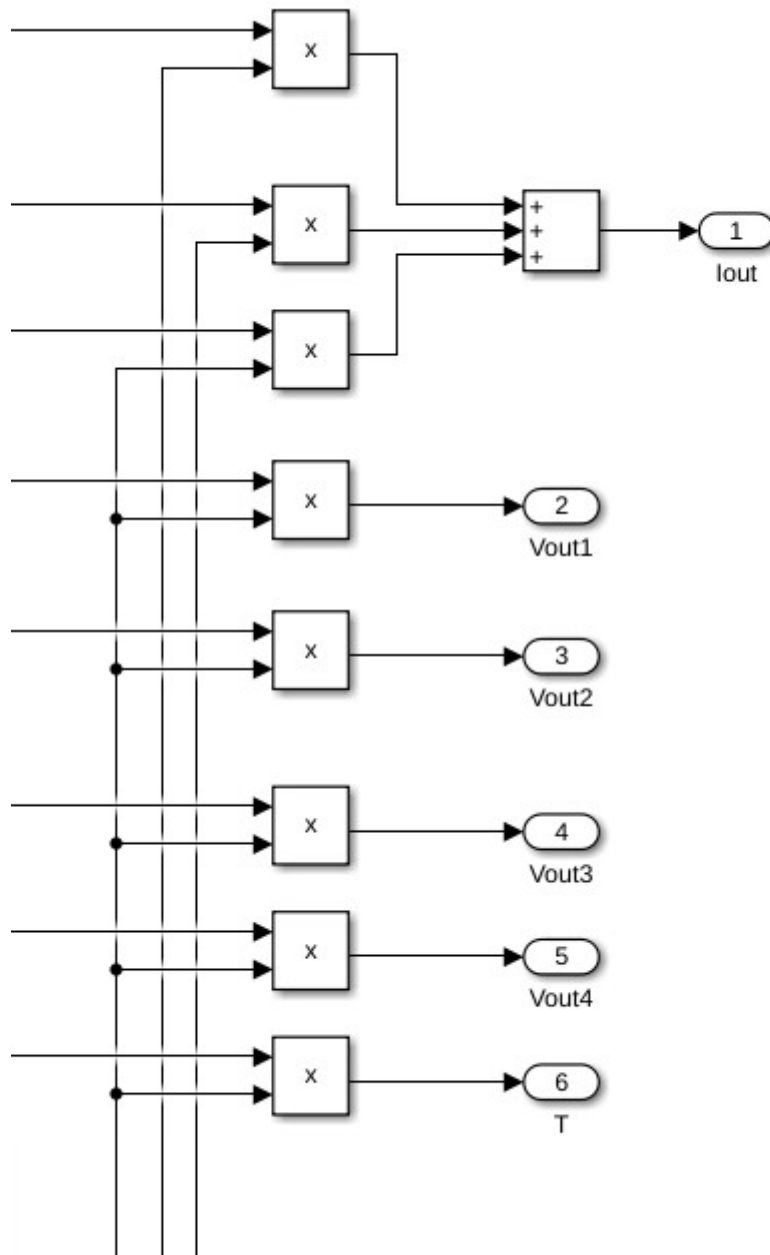
- **NORMAL** (1): Στην κατάσταση αυτή έχουμε απλή λειτουργία της μπαταρίας η οποία τροφοδοτεί το φορτίο. Παράλληλα μετρούνται οι τάσεις, το ρεύμα και η θερμοκρασία στο χρονικό διάγραμμα.
- **SLEEP** (2): Στην κατάσταση αυτή ο μικροελεγκτής στέλνει εντολή ύπνου προς τη μπαταρία. Αυτό σημαίνει πως σταματά η παροχή προς το φορτίο για να μειωθεί η κατανάλωση και αναμένεται επαναφορά της κανονικής λειτουργίας με άλλη εντολή.
- **CHARGE** (3): Η κατάσταση αυτή σχετίζεται με την φόρτιση της μπαταρίας με εκθετική αύξηση της τάσης στο χρόνο.
- **DISCHARGE** (4): Η κατάσταση αυτή σχετίζεται με την εκφόρτιση της μπαταρίας με εκθετική μείωση της τάσης στο χρόνο.

Η επιλογική διαδικασία γίνεται με τη μορφή πολυπλεξίας των εξόδων y_1 , y_2 και y_3 σε block τύπου Matlab function. Οι περιπτώσεις διακρίνονται στο σχήμα :

```
function [y1,y2,y3] = fcn(u)
switch(u)
case 1
    y1 = 1;
    y2 = 0;
    y3 = 0;
case 2
    y1 = 0;
    y2 = 0;
    y3 = 0;
case 3
    y1 = 0;
    y2 = 1;
    y3 = 0;
case 4
    y1 = 0;
    y2 = 0;
    y3 = 1;
otherwise
    y1 = 0;
    y2 = 0;
    y3 = 0;
end
```

Σχήμα 2.8 Πολυπλεξία καταστάσεων στην πλευρά της μονάδας ελέγχου της μπαταρίας

Οι τιμές είναι δυαδικές για τις εξόδους και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται δικτύωμα πολλαπλασιαστών τιμών προκειμένου να επιλέγεται η αντίστοιχη σωστή έξοδος ανά περίπτωση κατάστασης.



Σχήμα 2.9 Πολυπλεξία σημάτων με πολλαπλασιασμό

Η παραπάνω δομή στο σύνολο της αποτελεί το γενικότερο Block διάγραμμα της μπαταρίας και δέχεται ως είσοδο την εντολή BMS_cmd και εξάγει τις τιμές Iout, Vout1, Vout2, Vout3, Vout4 και T που αντιστοιχούν σε ρεύμα, τάσεις των 4 κελιών και θερμοκρασία υπολογισμένη σε βαθμούς Kelvin.

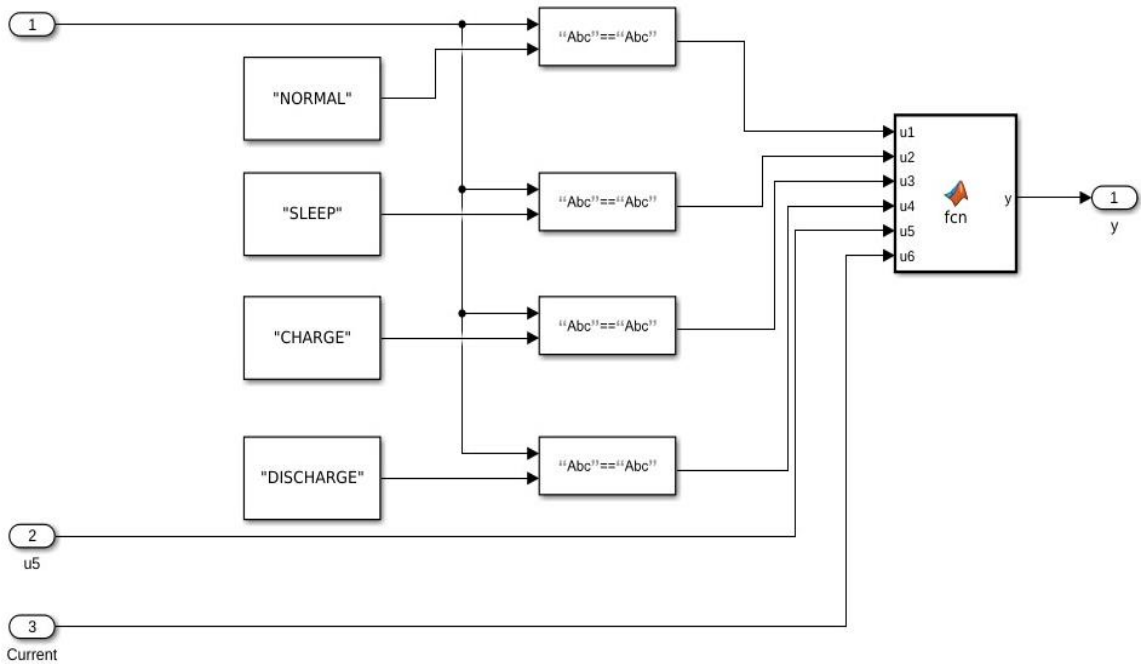

```

function y = fcn(u1,u2,u3,u4)
Vprotection = 52;
if u1>Vprotection
    y = 1;
elseif u2>Vprotection
    y = 1;
elseif u3>Vprotection
    y = 1;
elseif u4>Vprotection
    y = 1;
else
    y = 0;
end

```

Σχήμα 2.11 Ελεγκτής τάσεων

Στο εσωτερικό του block ελέγχου καταστάσεων, γίνεται σύγκριση μεταξύ των διαφόρων δυνατών καταστάσεων και των τιμών ρεύματος / σήματος ελέγχου τάσεων.



Σχήμα 2.12 Εσωτερικό του ελεγκτή καταστάσεων

Στο σχήμα 2.11 φαίνεται πως γίνεται άμεση σύγκριση της χειροκίνητης εντολής με καθεμία από τις πιθανές καταστάσεις. Σαφώς, ως είσοδοι ελέγχονται το ρεύμα και το αποτέλεσμα της λογικής σύγκρισης των τάσεων με το ανώτατο όριο.

```

function y = fcn(u1,u2,u3,u4,u5,u6)

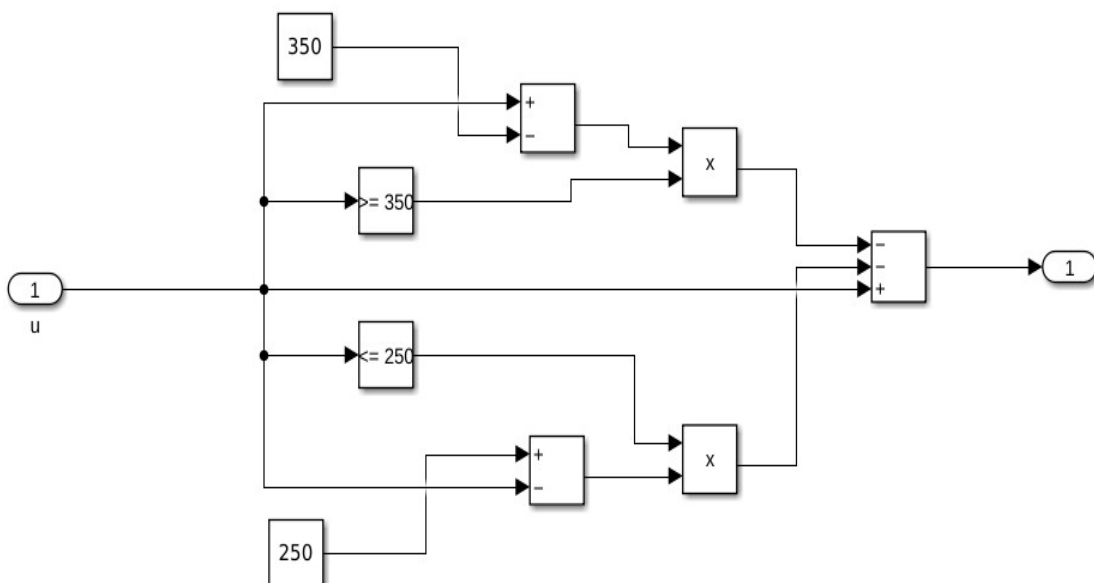
if u1==1
    y = 1;
elseif u2==1
    y = 2;
elseif u3==1
    y = 3;
elseif u4==1
    y = 4;
elseif u5==1
    y = 2;
elseif u6<(50/80 - 1)
    y = 3;
elseif u6>(50/20 + 1)
    y = 4;
else
    y = 0;
end

```

Σχήμα 2.13 Πολυπλεξία εισόδων καταστάσεων

Η έξοδος y του τελικού block της Matlab function είναι στην πράξη η BMS_cmd που λαμβάνει τιμές 1,2,3 και 4. Οι αδιάφορες περιπτώσεις αποδίδουν τιμή 0.

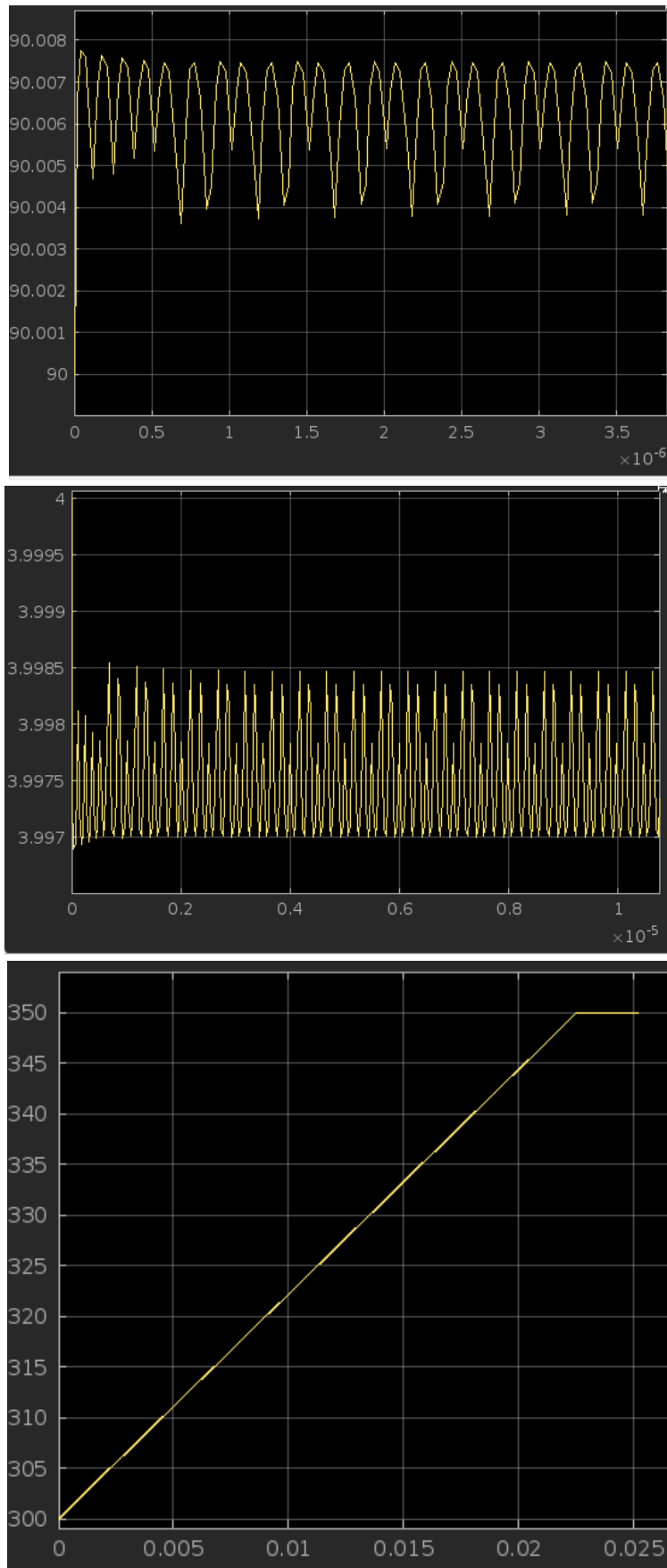
Για το block διάγραμμα του MCU του BMS συστήματος, απομένει το υποσύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας με την χρήση του ανεμιστήρα. Το σύστημα αυτό βασίζεται σε ένα κάτω και ένα πάνω όριο θερμοκρασίας, μεταξύ των οποίων θεωρείται πως υπάρχει καλή – κανονική λειτουργία. Πέριξ των 300 K (θερμοκρασία δωματίου) θεωρείται ιδανική περίπτωση λειτουργίας των cells της μπαταρίας, οπότε τέθηκαν τα όρια κάτω – άνω όρια από 250 K έως 350 K (ισοδυναμεί με μεταβολές της τάξης των 50 βαθμών Κελσίου). Το υποσύστημα αυτό παρουσιάζεται κάτωθι και λειτουργεί με τη βοήθεια blocks σύγκρισης τιμών.



Σχήμα 2.14 Έλεγχος θερμοκρασίας σε επίπεδο Block υποσυστήματος

3.5 Προσομοίωση με σταθερή είσοδο και αυξανόμενη θερμοκρασία

Στην περίπτωση μελέτης αυτής της παραγράφου γίνεται η υπόθεση πως το σύστημα λειτουργεί κανονικά και η τάση δεν φέρει θόρυβο στην πηγή της. Επομένως, όλες οι μεταβολές και μεταβατικά φαινόμενα που εμφανίζονται προκύπτουν εξαιτίας των παρασιτικών μεγεθών που μεσολαβούν. Ωστόσο, λόγω πέρασ του χρόνου, η θερμοκρασία αυξάνεται συνεχώς (προφανώς με πιο αργό ρυθμό από αυτόν της εξομοίωσης, ωστόσο για ευκολία της εκτέλεσης του προγράμματος, αυξήθηκε ιδιαίτερα).

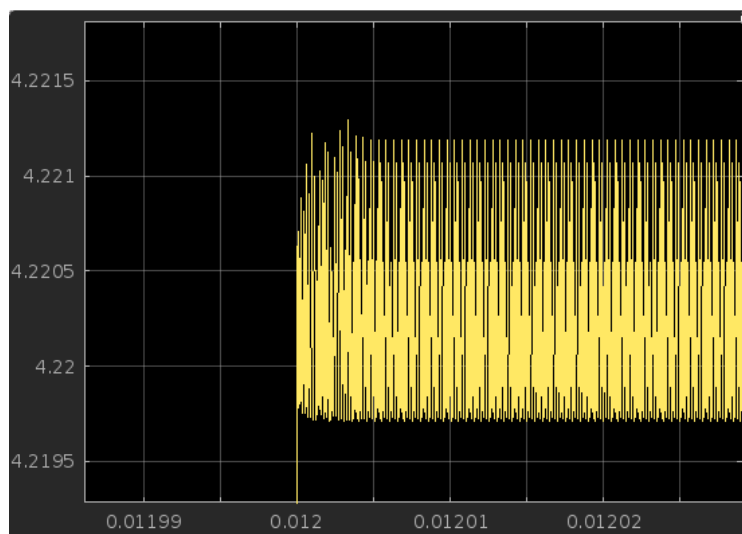


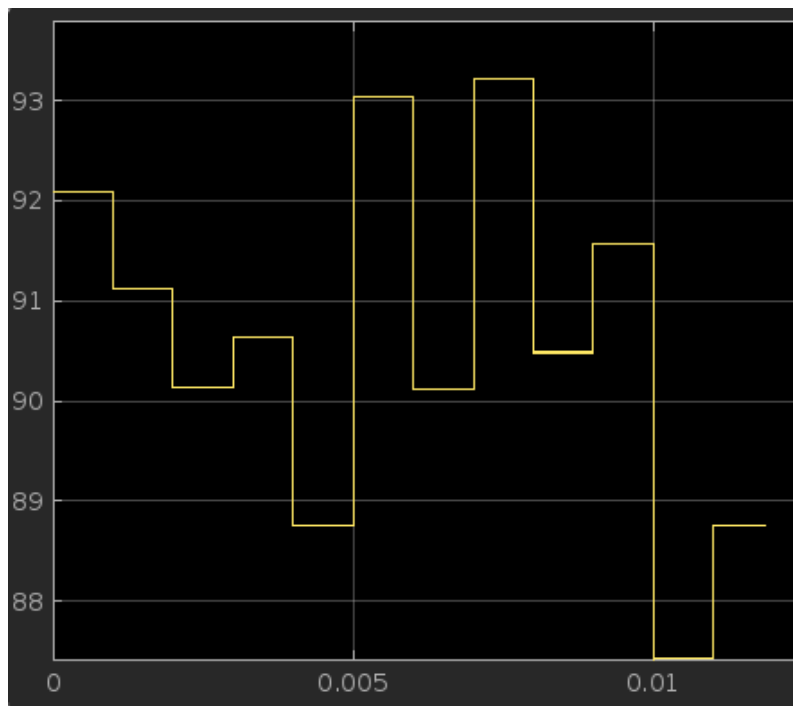
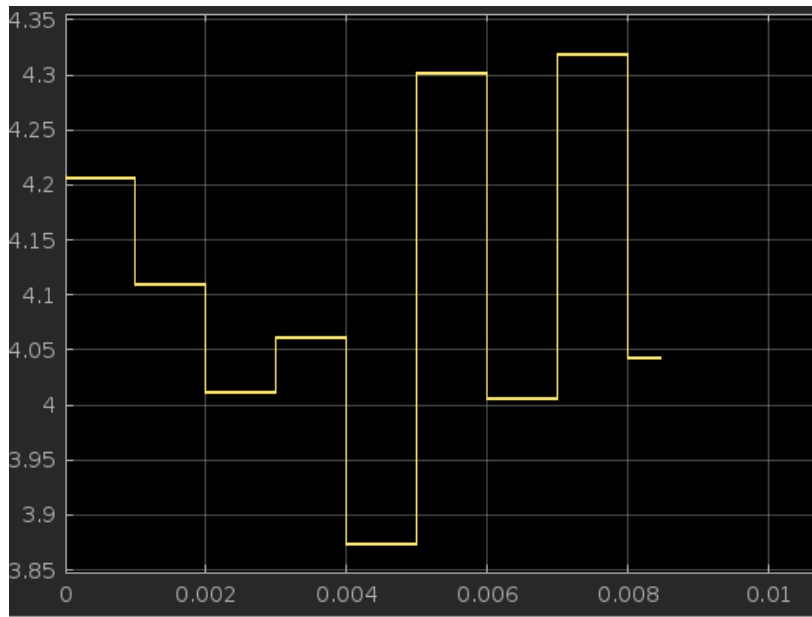
Σχήμα 2.15 Η τελική τάση στο φορτίο είναι περίπου 90 V, το ρεύμα περίπου 4 A και η θερμοκρασία φθάνει έως 350 K όπου και διατηρείται λόγω της χρήσης του ανεμιστήρα

Οι τιμές των αποτελεσμάτων είναι σαφώς λογικές καθώς υποθέτοντας φορτίο εξόδου $10\ \Omega$ και σε σειρά αντίσταση περίπου $40\ \Omega$ (4 κελιά σε σειρά) η dc τάση θα ήταν $90\ \text{V}$ με χρήση της εξίσωσης διαίρεσης τάσης. Το ρεύμα, επίσης, υπολογίζεται $4\ \text{A}$ στην dc ανάλυση. Τα μεταβατικά φαινόμενα που διακρίνονται σχετίζονται με την εμφάνιση των παρασιτικών στοιχείων. Η κυμάτωση στην dc τάση των μπαταριών είναι συχνό φαινόμενο και για το λόγο αυτό σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούνται decoupling πυκνωτές κοντά σε pins τροφοδοσίας τάσης προκειμένου να αυξηθεί η τάξη του χαμηλοπερατού φίλτρου και να απαλειφθεί ο μη επιθυμητός θόρυβος.

3.6 Προσομοίωση με μεταβλητή είσοδο και μεταβαλλόμενη θερμοκρασία

Στην περίπτωση μελέτης αυτής της παραγράφου γίνεται η υπόθεση πως το σύστημα λειτουργεί κανονικά και η τάση φέρει θόρυβο στην πηγή της. Οι μεταβολές στην τάση συμβαίνουν με σφάλμα περίπου 10% (+5 V έως -5 V γύρω από την dc τιμή). Συνεπώς, τα αποτελέσματα τώρα είναι αρκετά πιο αλλοιωμένα και τα μεταβατικά φαινόμενα περισσότερα. Επιπλέον, παρατηρούνται και μεταβολές κυμάτωσης όπως προηγουμένως λόγω των παθητικών στοιχείων και είναι διακριτές εάν γίνει μεγάλη εμβάθυνση στην κάθετη κλίμακα τιμών.





Σχήμα 2.16 Μεταβατικά φαινόμενα τάσης και ρεύματος

3.7 Συμπεράσματα εξομοιώσεων

Τα συστήματα που αναλύθηκαν σχεδιάστηκαν με απλότητα ως προς τις βασικές τους λειτουργίες προκειμένου να εκτελεσθεί εξομοίωση της συμπεριφοράς κατά την αλληλεπίδραση του συστήματος των cells μπαταρίας και της μονάδας επεξεργασίας. Τα αποτελέσματα είναι λογικά τόσο στη περίπτωση σταθερής πηγής (ιδανικό φαινόμενο) όσο και

στη μεταβαλλόμενη πηγή από Γκαουσιανό θόρυβο (λευκός θόρυβος). Στη διάταξη της μπαταρίας υλοποιείται η λογική των παρασιτικών στοιχείων για να εξομοιωθεί με ακρίβεια η πτώση τάσης και οι δυναμικές αλλαγές στο χρόνο κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων. Η διάταξη του μικροελεγκτή υλοποιεί τη πολυπλεξία των σημάτων τάσεων, ρεύματος και θερμοκρασία προκειμένου να γίνει έλεγχος των επιτρεπόμενων ορίων και να επιλεγθεί η επόμενη κατάσταση λειτουργίας του συνολικού συστήματος στο BMS.

Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί επιπλέον ανάλυση των κυκλωμάτων με τη χρήση της εφαρμογής LTspice. Συνδυαστικά το παρόν κεφάλαιο με το επόμενο, συγκροτούν το σύνολο της γενικότερης διαδικασίας εξομοιώσεων που οδήγησαν στην τελική σχεδίαση της PCB πλακέτας. Σε επίπεδο block διαγραμμάτων υπάρχει σαφής εικόνα της συνολικής σχεδίασης και σε επίπεδο κυκλωμάτων θα μελετηθούν επιπλέον συμπεριφορές.

Κεφάλαιο 4ο: Προσομοίωση κυκλωματικών συμπεριφορών

4.1 Προσομοίωση μεταβατικών συμπεριφορών

Οι μεταβατικές συμπεριφορές είναι φαινόμενα τα οποία εξελίσσονται με γνώμονα το χρόνο. Αφορούν κυρίως αλλαγές οι οποίες συμβαίνουν στα μετρούμενα μεγέθη της διάταξης και διαταράσσουν την ισορροπία του συστήματος.⁸ Τέτοια φαινόμενα εμφανίζονται αρκετά συχνά σε ηλεκτρονικές διατάξεις και οφείλονται σε :

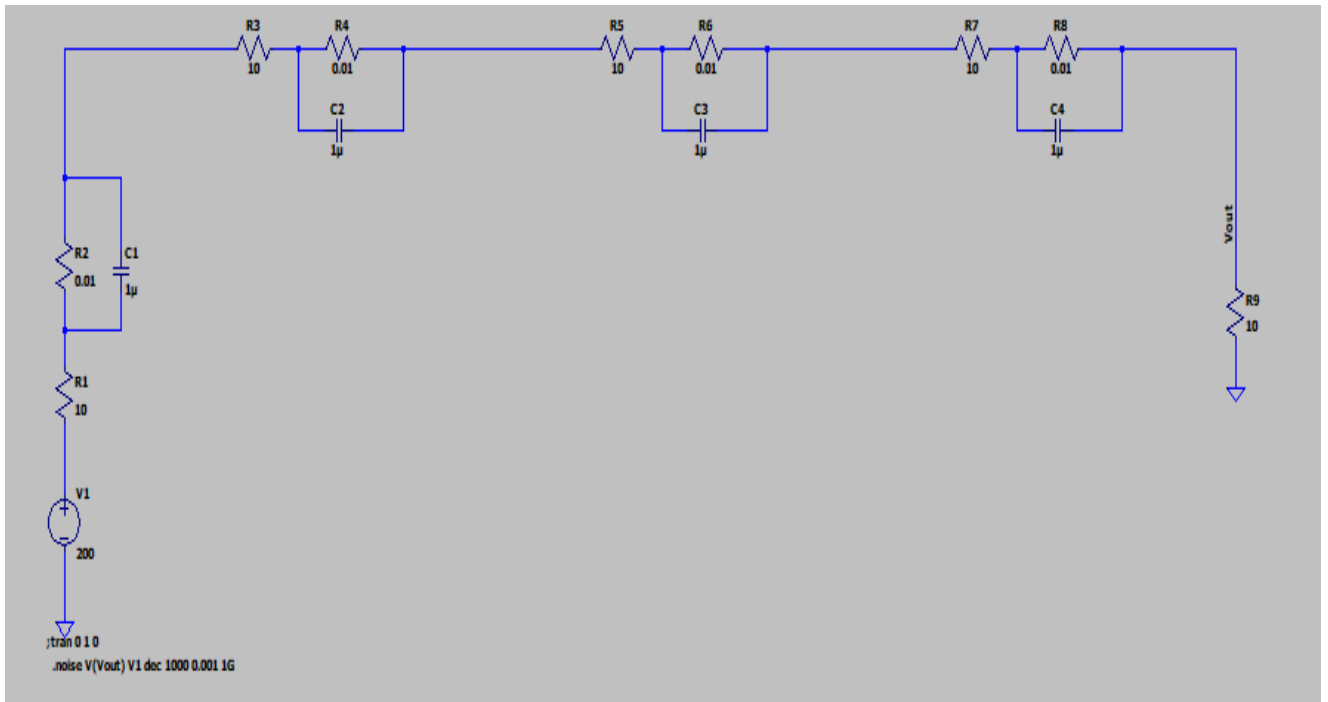
- **Περιβαλλοντικούς παράγοντες** : Η υγρασία και η θερμοκρασία αποτελούν ενδεικτικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες των οποίων η μεταβολή δημιουργεί διαφορές στην χαρακτηριστική λειτουργία των ηλεκτρονικών υλικών. Για παράδειγμα η αύξηση της θερμοκρασίας, οδηγεί σε μεταβατική συμπεριφορά τους αντιστάτες με αποτέλεσμα να εμφανιστεί θερμικός θόρυβος στο κύκλωμα. Τέτοια φαινόμενα πρέπει να μελετηθούν, ειδικά στην περίπτωση των μπαταριών των οποίων η σύσταση είναι χημική.
- **Χρονικές μεταβολές των σημάτων** : Οι απότομες χρονικές μεταβολές των σημάτων (π.χ. τάσης με μορφή παλμοσειράς) δημιουργούν φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Αυτά τα φαινόμενα μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές δυσλειτουργίες σε υψηλές συχνότητες.
- **Κακή φυσική σχεδίαση** : Η φυσική σχεδίαση του συστήματος αποτελεί το layout της τελικής πλακέτας PCB. Όπως θα γίνει αντιληπτό στην αντίστοιχη ενότητα, η κακή σχεδίαση των κυκλωμάτων (μεγάλα μήκη γραμμών, λεπτά πάχη γραμμών, αποφυγή χρήσης decoupling πυκνωτών κ.ά.) μπορούν να οδηγήσουν σε δημιουργία παρασιτικών ισοδύναμων παθητικών στοιχείων (κυρίως αντιστάσεις και πηνία). Αυτά τα παρασιτικά στοιχεία αλληλεπιδρούν με φαινόμενα όπως η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή και οδηγούν σε μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με την αναμενόμενη λειτουργία της διάταξης.

Τα μεταβατικά φαινόμενα που θα μελετηθούν στην υποενότητα αυτή αφορούν στην συμπεριφορά της μπαταρίας κατά τη τροφοδοσία φορτίου όταν υπάρχει παρουσία θορύβου και στην συμπεριφορά του ρεύματος του φορτίου όταν υπάρχει συνδυασμός θορύβου στο κύκλωμα και απότομες χρονικές μεταβάσεις στις on / off λειτουργίες των MOSFETs οδήγησης. Ειδικότερα για την δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιούνται ενδεικτικά μικρότερες τιμές τάσης για απλούστευση της σχεδίασης και εύκολης εκτέλεσης της εξομοίωσης. Τα φαινόμενα αναμένεται να είναι ανάλογα με την τάξη μεγέθους του πραγματικού συστήματος.

Για το κύκλωμα των κελιών της μπαταρίας, δημιουργείται το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα με τις τιμές που δόθηκαν στο πρόγραμμα Matlab / Simulink. Τα κελιά συνδέονται σε σειρά και καταλήγουν σε ένα φορτίο των 10 Ω. Το ρεύμα πράγματι υπολογίζεται περίπου στην τιμή των 4 A όπως αναμένεται και από την εξομοίωση των block διαγραμμάτων. Στη συνέχεια

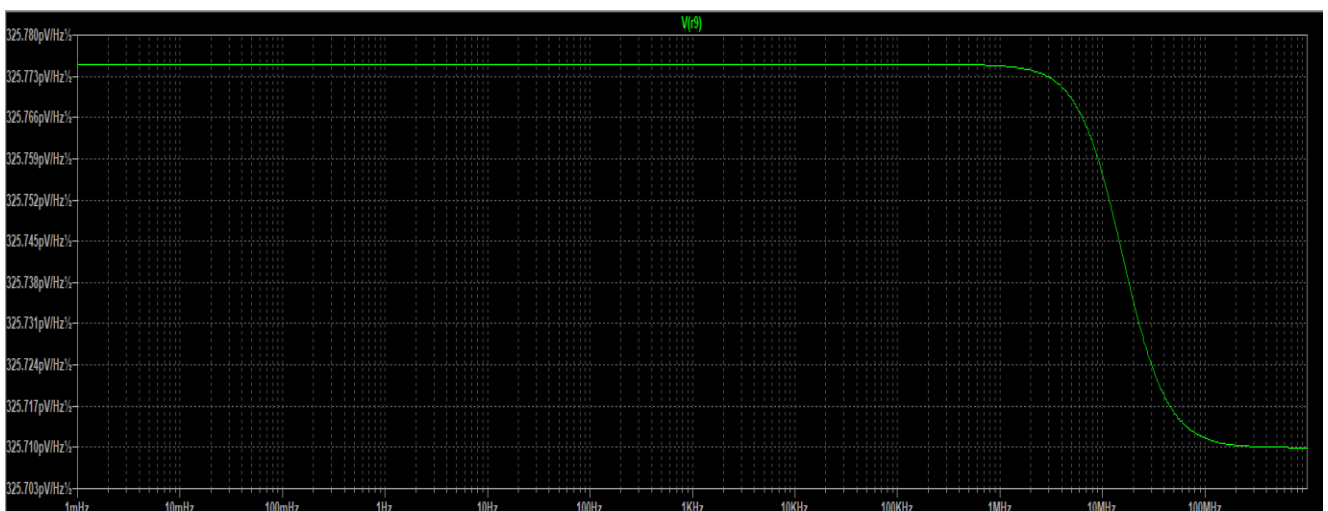
⁸ https://www.cet.edu.in/noticefiles/230_power_system_stability.pdf

τοποθετείται η τάση V_{out} ως κόμβος αναφοράς εξόδου στο φορτίο των 10Ω και εκτελείται προσομοίωση με παρουσία θορύβου από την συχνότητα 0.001 Hz έως 1 GHz . Το διάγραμμα το οποίο προκύπτει ονομάζεται Bode και αποτελεί τη συνάρτηση μεταφοράς για την έξοδο καθώς σημειώνονται, στον άξονα του πλάτους, τα πλάτη θορύβου ανά συχνότητα.



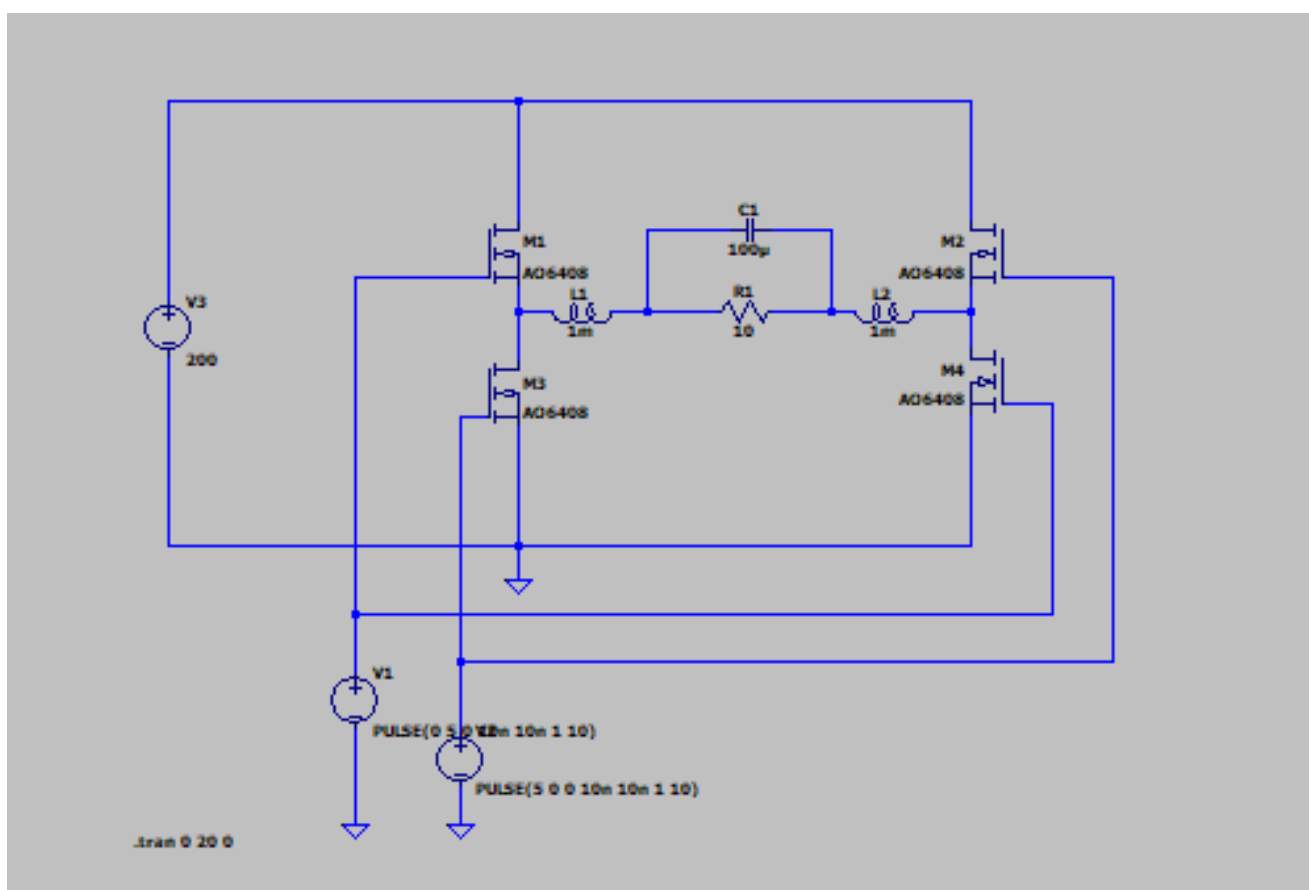
Σχήμα 3.1 Κύκλωμα κελιών μπαταρίας με φορτίο

Στο διάγραμμα συχνοτήτων παρατηρείται σχετικά ιδανική συμπεριφορά για μεγάλο εύρος συχνοτήτων και ο θόρυβος είναι ιδιαίτερα μικρός για την περίπτωση αυτή. Προφανώς, λαμβάνεται υπόψιν πως οι μεταβολές στην τιμή της τάσης είναι μικρές από την εξομοίωση.



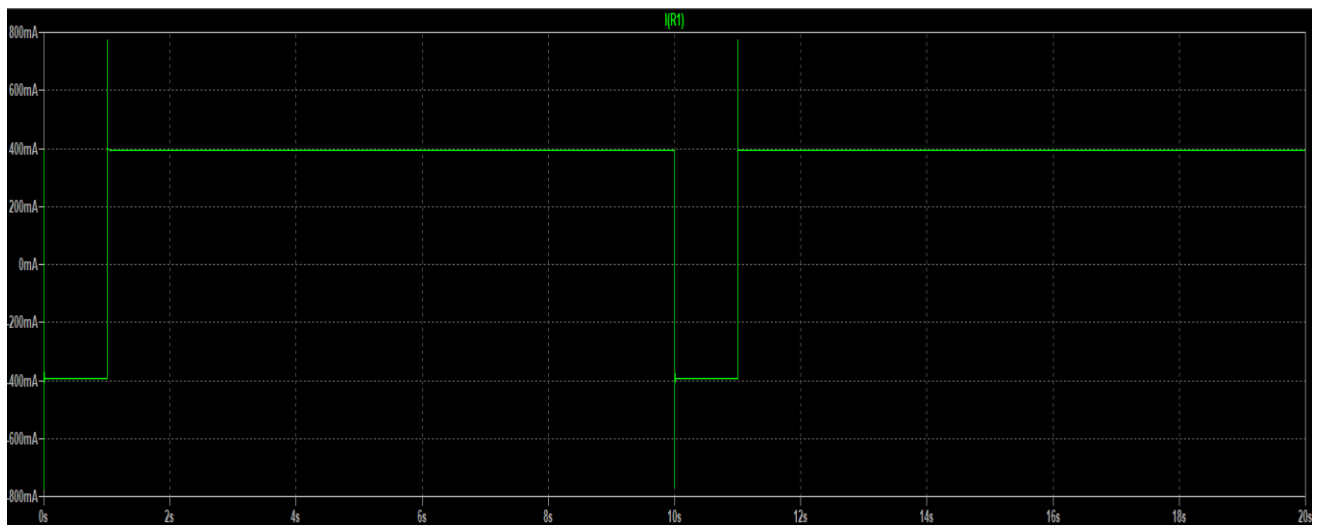
Σχήμα 3.2 Κύκλωμα κελιών μπαταρίας με φορτίο

Το επόμενο κύκλωμα αφορά την ενεργοποίηση ροής φορτίου από την μπαταρία προς το φορτίο με διακοπές της συνεχόμενης τροφοδοσίας. Αυτό το κύκλωμα υλοποιείται πρακτικά και στο BMS σύστημα διότι υπάρχει ανάγκη για φόρτιση των μπαταριών, άρα ροής ρεύματος από την μονάδα προς τα κελιά, και εκφόρτισης μέσω του φορτίου, άρα υπάρχει εξερχόμενη ροή ρεύματος από τα κελιά. Το κύκλωμα αυτό βασίζεται σε MOSFET drivers τύπου NMOS τα οποία λειτουργούν διακοπτικά. Έτσι, με υψηλό δυναμικό τα MOSFETs άγουν ενώ με χαμηλό παύουν να επιτρέπουν τη διέλευση ρεύματος. Η μορφή των τέσσερων MOSFETs που συνδυάζονται ανά δύο, καλείται H-Bridge και οδηγεί φορτίο με κατάλληλο φίλτρο εξόδου. Ουσιαστικά αποτελεί την καλύτερη υλοποίηση σε θέμα απόδοσης ισχύος διότι οι χρόνοι on / off είναι μικροί και οι απώλειες λιγότερες.



Σχήμα 3.3 Κύκλωμα γέφυρας MOSFETs για οδήγηση φορτίου διακοπτικά

Οι τιμές των μεγεθών είναι σαφώς ενδεικτικές για λόγους ευκολότερης εξομοίωσης. Τα NMOS άγουν ανά δύο προκειμένου σε κάθε αγωγή να υπάρχει ένα πάνω και ένα κάτω σε κατάσταση αγωγής. Το αποτέλεσμα των μεταβολών αυτών οδηγεί σε επίσης διακοπτική μορφή της τάσης εξόδου. Όμως, τα παθητικά στοιχεία στο φορτίο εξόδου σχηματίζουν χαμηλοπερατό φίλτρο το οποίο αποκόπτει τις συχνότητες εμφάνισης των μεταβολών ως ένα σημαντικό ποσοστό. Οι τάσεις στις πύλες των NMOS είναι παλμοί και η τροφοδοσία είναι dc.



Σχήμα 3.4 Αποτέλεσμα εξομοίωσης γέφυρας

Από το σχήμα 3.4 γίνεται σαφές πως για αργές μεταβολές μεταξύ τους, η τιμή του ρεύματος παραμένει και αυτή σχεδόν σταθερή. Σαφώς υπάρχουν μεταβατικά φαινόμενα από τη μια κατάσταση στην άλλη και μελετώνται στην παράγραφο που ακολουθεί. Σε κάθε περίπτωση, όμως, η λειτουργία του κυκλώματος είναι αναμενόμενη καθώς υπάρχουν διαστήματα αγωγής ρεύματος (ροή από τα κελιά προς το φορτίο) και διαστήματα μη αγωγής (ροή ρεύματος από το σύστημα BMS προς τα κελιά, οπότε το φορτίο μένει στον αέρα).

4.2 Παρεμβολές

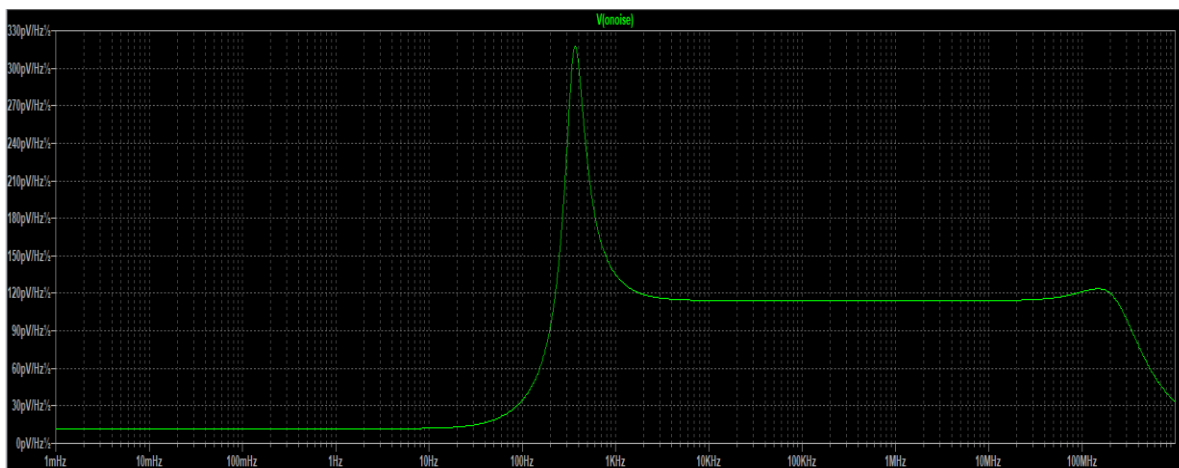
Οι παρεμβολές που αναπτύσσονται στο παραπάνω κύκλωμα προέρχονται κυρίως από τη διακοπτική συμπεριφορά της τάσεως στις πύλες των NMOS. Προφανώς, όσο μικρότερος είναι ο χρόνος των μεταβολών τόσο υψηλότερη θα είναι και η συχνότητα εμφάνισής τους. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε υψίσυχνα συστήματα που οδηγούν σε αλλοίωση των δεδομένων και δυσλειτουργίες. Για την περίπτωση του BMS συστήματος, ωστόσο, οι συχνότητες είναι σχετικά χαμηλές. Αφενός οι μεταβολές καταστάσεων όπως η φόρτιση και η εκφόρτιση απέχουν μεγάλα χρονικά περιθώρια μεταξύ τους και αφετέρου η σχεδίαση στοχεύεται να είναι όσο πιο ακριβής γίνεται για να μην εμφανιστούν παρασιτικά στοιχεία που να ενισχύσουν τις παρεμβολές.

Στην χρονική απόκριση του συστήματος, υπάρχουν μεταβατικές διακυμάνσεις στο ρεύμα όπως στο σχήμα 3.5 που ακολουθεί. Η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη είναι σχετικά ακαριαία, όμως εμφανίζεται υπέρρευμα σε σχέση με την αναφορά το οποίο πιθανόν να είναι επιζήμιο σε υλικά τα οποία δεν μπορούν να το υποστούν.



Σχήμα 3.5 Μεταβατική απόκριση ρεύματος γέφυρας

Η μεταβατική απόκριση του κυκλώματος βέβαια είναι σχετικά όμοια με αυτή των συστημάτων 2^{ης} τάξης, καθώς υπάρχει σύντομος χρόνος rise, και μέτριος χρόνος settling. Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να ελεγχθεί η συμπεριφορά του κυκλώματος στην περίπτωση ύπαρξης θορύβου στην πηγή dc στο ίδιο διάστημα συχνοτήτων που μελετήθηκε το πρώτο κύκλωμα.



Σχήμα 3.6 Παρεμβολή θορύβου και διακοπτικής συχνότητας

Στην περίπτωση αυτή, φαίνεται πως η μέγιστη κορυφή θορύβου συναντάται στην συχνότητα λειτουργίας της παλμοσειράς στις πύλες των MOSFETs. Τελικά, η στάθμη των παρεμβολών διατηρούνται σε ικανοποιητικά επίπεδα και είναι ανεκτή η συμπερίληψη του κυκλώματος των drivers για το κύκλωμα του BMS. Με χρήση καταλληλότερου φίλτρου στην έξοδο, είναι δυνατή η εξ ολοκλήρου αποκοπή των μη επιθυμητών συχνοτήτων. Έτσι, αντιμετωπίζονται τυχόν μεταβολές από εξωτερικούς παράγοντες και τα παρασιτικά φαινόμενα, ακόμη και σχετικά λανθασμένων σχεδιάσεων σε δοκιμαστική πλακέτ

Κεφάλαιο 4ο : Σχεδιασμός τυπωμένης πλακέτας

4.1 Επιλογή υλικών

Με το πέρας της ανάλυσης του συστήματος BMS μέσω block διαγραμμάτων και εξομοίωσης αυτών όπως και των απαρτιζόμενων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, σειρά έχει η επιλογή των κατάλληλων υλικών για το σχεδιασμό της πλακέτας PCB. Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι είτε παθητικά είτε ενεργά στοιχεία. Τα παθητικά στοιχεία είναι οι αντιστάσεις, οι πυκνωτές και τα πηνία (φερίτες). Ονομάζονται έτσι διότι η λειτουργία τους δεν εξαρτάται από επιπλέον τροφοδοσία τάσης ή ρεύματος, οπότε η συμπεριφορά τους είναι αναμενόμενη. Χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα συχνά για την πόλωση των κυκλωμάτων που οδηγούν προκειμένου να ορισθεί το ρεύμα που τα διαρρέει και να υλοποιηθούν φίλτρα σε επιθυμητές συχνότητες. Τα ενεργά στοιχεία, ωστόσο, είναι κυρίως ημιαγωγικά (transistors, ICs κτλ). Τα στοιχεία αυτά ισοδυναμούν με πολύπλοκα ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα (ICs) υλοποιημένα σε chips και βασισμένα σε πληθώρα από transistors. Για να επιτευχθεί η λειτουργία τους σε ορισμένες συνθήκες είναι απαραίτητη η εξωτερική τροφοδοσία τάσης ή ρεύματος.

Η επιλογή των υλικών εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως :

- ✓ **Όγκος** : Οι διαστάσεις των σχεδιάσεων είναι πολλές φορές προκαθορισμένες είτε από κάποιο περίβλημα είτε από κάποιου είδους μηχανολογική σχεδίαση στην οποία θα εγκατασταθεί η πλακέτα. Συνεπώς, η επιλογή υλικών με κατάλληλο σχήμα και όγκο είναι καθοριστική στην τελική μορφή της. Συχνά επιλέγονται υλικά τα οποία να εξυπηρετούν στη χρήση τους ενώ παράλληλα καταλαμβάνουν σχετικά μικρό χώρο.
- ✓ **Budget σχεδίασης** : Τα οικονομικά περιθώρια είναι καθοριστικά για την σχεδίαση ενός συστήματος. Θα πρέπει να επιλεγθούν υλικά τα οποία να βρίσκονται σε καθορισμένο εύρος τιμών και να ελεγχθεί το κέρδος κατά τη μαζική παραγωγή συστημάτων εφόσον υπάρχει. Συνηθισμένο φαινόμενο είναι να υπάρχει σχετικά χαμηλή τιμή ανά τεμάχιο όταν οι παραγγελίες υπερβαίνουν ορισμένους αριθμούς, δηλαδή όταν το σχέδιο προορίζεται για μαζική παραγωγή.
- ✓ **Αξιοπιστία** : Είναι σημαντικό να επιλεγθούν υλικά τα οποία πράγματι να φέρουν τα χαρακτηριστικά που αναγράφονται στα datasheets. Επομένως, πρέπει να επιλέγονται υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί σε παρελθοντικές σχεδιάσεις τα οποία να φέρουν documentation σχετικά με τη χρήση τους. Επιπλέον, η συνεργασία με αξιόπιστους distributors, όπως η Mouser και η Digikey, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογική διαδικασία των υλικών.
- ✓ **Σωστή επιλογή ορίων αντοχής** : Ειδικότερα για το BMS σύστημα θα πρέπει να επιλεγθούν υλικά τα οποία να αντέχουν ορισμένες θερμοκρασίες, υπερτάσεις και υπερρεύματα. Επομένως, πρέπει να γίνει καλός έλεγχος των datasheets και των τιμών που περιλαμβάνουν.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν τα υλικά σε συνδυασμό από την STMicroelectronics και την εταιρεία LCSC. Η τελευταία συνεργάζεται με την κατασκευαστική εταιρεία PCBs JLCPCB και με την εφαρμογή EasyEDA όπου έγινε το σχέδιο του BMS. Στη βιβλιοθήκη της LCSC περιλαμβάνονται μεγάλη γκάμα από ηλεκτρονικά και μηχανολογικά στοιχεία καθώς παρέχεται άμεση πρόσβαση σε τιμολόγηση τεμαχίων, datasheets και έτοιμα ισοδύναμα σχηματικά των components για να προστεθούν στο κύκλωμα. Το GUI της LCSC διαθέτει φίλτρο για την επιλογή τιμών, συγκεκριμένης αντοχής σε διάφορες παραμέτρους κ.ά. Ενδεικτικά, στο σχήμα 4.1 φαίνεται η αναζήτηση μιας SMD αντίστασης με τιμή 10 kΩ με αντοχή έως 0.25 Watts.

The screenshot shows the LCSC Electronics website interface. At the top, there is a search bar with the text "Part #/ Keyword" and a magnifying glass icon. To the right, there are links for "Log In", "Register", and "Account & Orders". Below the search bar, the results are displayed for "Chip resistor - Surface Mount" with a quantity of 746380. The interface includes several filter tabs: "Deals", "In Stock", "RoHS", and "Datasheet". A search bar within the results area is also present. The main filter section is divided into columns: "Manufacturer" (listing AEM, ASJ, ATC, Bel Fuse, BOURNS, Caddock, CAL-CHIP ELECTRONICS, INC.), "Package" (listing 01005, 0102, 0201, 02016, 0202, 0204), "Resistance" (listing 10k, 10kΩ, 110kΩ, 210kΩ, 310kΩ, 410kΩ, 510kΩ, 910kΩ), "Power(Watts)" (listing 250m, 250mW), "Type" (listing Alloy Resistor, Carbon Resistor, Ceramic resistor, Current Sensing Resistors, Metal Film Resistors, Non-inductive Power Resistor), "Operating Temperature Range" (listing 0°C→+70°C, -25°C→+125°C, -40°C→+85°C, -40°C→+125°C, -40°C→+130°C, -40°C→+155°C), "Overload Voltage (Max)" (listing 15V, 20V, 22V, 25V, 28V, 30V), and "Tolerance" (listing ±0.01%, ±0.02%, ±0.05%, ±0.1%, ±0.2%, ±0.25%). Below the filters, the results are shown as "Results: 946380" with "Smart Filtering" and "700 Remaining". A pagination bar shows "25" items per page, with page "1" selected. The results table has columns: "Images", "Pricing", "Quantity", "Availability", "Mfr:Part #", "Manufacturer", "Description", "RoHS", "LCSC Part#", and "Package". The first result is for a "250mW Thick Film Resistor" with a price of \$0.0028 for 100+ units, a quantity of 2649100, and a manufacturer of UNI-ROYAL(Uniroyal Elec). The description includes "200V ±100ppm/°C ±1% 10kΩ 1206 Chip Resistor - Surface Mount ROHS".

Σχήμα 4.1 Φίλτρο επιλογών στην ιστοσελίδα της LCSC

Η επιλογή υλικών με ROHs compliance είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς φέρουν πιστοποίηση πως δεν είναι επιβλαβή για το περιβάλλον και καθιστούν το σύνολο της σχεδίασης ROHs compliant.

Τα βασικά ICs που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα παρακάτω :

- USB type micro-B και προστασία TVS.
- Regulator (AMS117S) 3.3V για παροχή σταθερής στάθμης τάσης τροφοδοσίας του μικροελεγκτή.
- Αισθητήρας θερμοκρασίας (STTS22HTR).

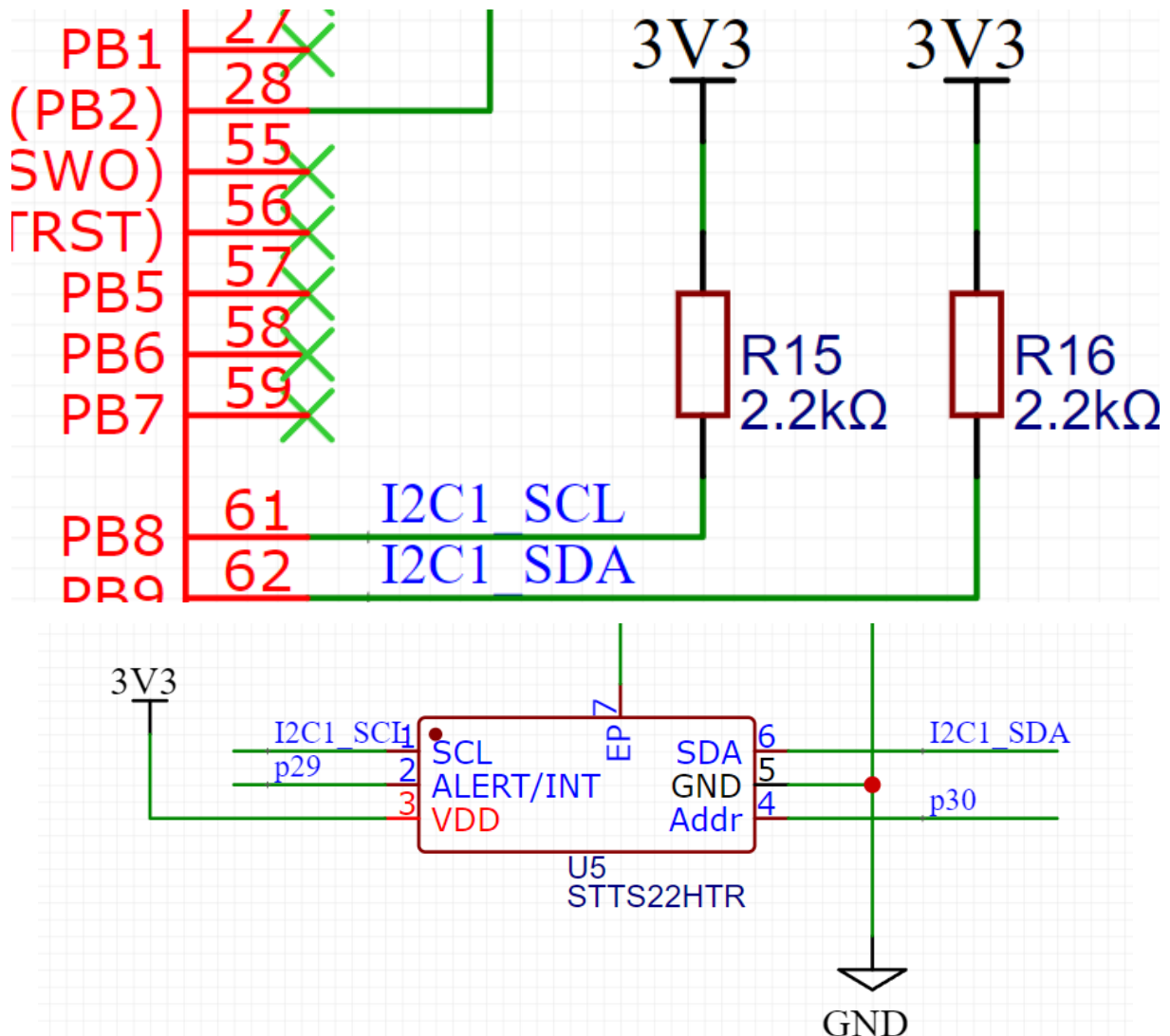
- Μικροελεγκτής (STM32F405RGT6).
- Crystall oscillator 16 MHz.
- Drivers για CAN επικοινωνία και γαλβανική απομόνωση (L9963T-TR).
- BMS IC (L9963E-TR)
- SMD πυκνωτές για coupling / decoupling.
- SMD αντιστάσεις για πόλωση.

4.2 Σχεδιασμός στο EasyEDA και κανόνες

Ο σχεδιασμός της πλακέτας έγινε στο λογισμικό του EasyEDA λόγω απλότητας της χρήσης του και της δωρεάν διάθεσης του προγράμματος στο διαδίκτυο με αρκετό βοηθητικό υλικό. Το EasyEDA αποτελεί ένα CAD πρόγραμμα το οποίο εξειδικεύεται σε σχεδιασμό κυκλωμάτων, εξομοίωσης αυτών και σε δημιουργία PCB πλακετών.

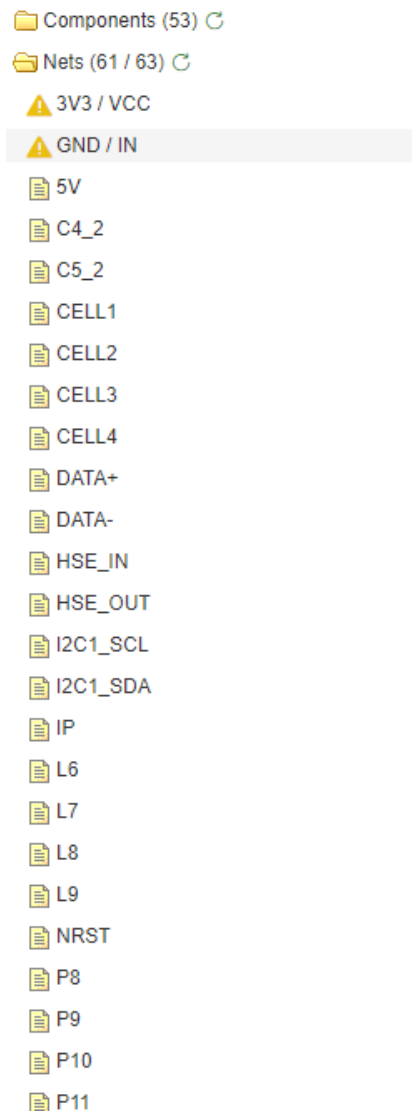
Για το σχεδιασμό του σχηματικού διαγράμματος συμβουλευόμαστε παρελθοντικές σωστές σχεδιάσεις ή τα datasheets με τα προτεινόμενα κυκλώματα. Σε αυτά συνήθως υπάρχουν και οι τιμές των αντιστάσεων / πυκνωτών που χρησιμοποιούνται, καθώς επίσης δίνονται βοηθητικές ενδείξεις για τη φυσική σχεδίαση του κυκλώματος. Στο γραφικό περιβάλλον του EasyEDA, δημιουργείται ένα αρχικό νέο project με την ονομασία που επιθυμούμε. Παράλληλα μπορεί να δηλωθεί και κάποια περιγραφή του. Στην συνέχεια επιλέγεται ο τύπος σελίδας του σχηματικού διαγράμματος (A3, A4 κτλ.) ώστε να μπορούν να συμπεριληφθούν τα στοιχεία που θέλουμε να εμφανίζονται στο φύλλο. Τέλος, επιλέγουμε τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε στο κεφάλαιο 4.1.

Είναι γενικά καλή πρακτική να τοποθετούνται τα υποκυκλώματα του συστήματος σε ενδεικτικά blocks με περιγραφή από TEXT. Έτσι είναι εύκολα αναγνώσιμο το διάγραμμα ακόμη και από συνάδελφους που δεν είχαν εργαστεί στο ίδιο project στο παρελθόν. Τα κυκλώματα σχεδιάζονται συνδέοντας κατάλληλα τα υλικά μεταξύ τους, προσέχοντας πάντοτε τους κόμβους των ενώσεων. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο να επιλέγονται διαφορετικά ονόματα ακόμη και για εσωτερικές συνδέσεις κόμβων μέσω labels. Παράδειγμα φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν.



Σχήμα 4.2 Σήματα I2C πρωτοκόλλου

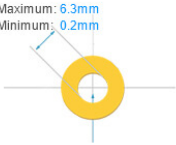
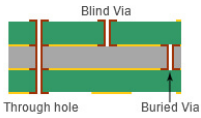

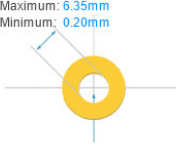
Για τα σήματα του I2C πρωτοκόλλου του σχήματος 4.2 φαίνεται πως χρησιμοποιήθηκε η λογική των labels για διασύνδεση μεταξύ απομακρυσμένων blocks στο ίδιο σχηματικό. Προκειμένου να είναι ευανάγνωστο, είναι προτιμότερη η τακτική αυτή από την περίπτωση χάραξης γραμμών και κόμβων μεταξύ των υλικών. Ομοίως ισχύει και για σήματα εισόδου / εξόδου που θέλουμε αναφορικά να λάβουν κάποια τιμή τύπου label. Αυτό γίνεται με την χρήση της μεθόδου port που αποδίδει ένα όνομα τύπου net. Το σύνολο των διασυνδέσεων μεταξύ των κόμβων και της σχέσης τους μεταξύ τους, εμφανίζεται στο λεγόμενο netlist, δηλαδή μια λίστα από nets με ορισμένα ονόματα τα οποία χρησιμοποιούνται για να δείχνουν στον χρήστη πώς συνδέονται τα υλικά όταν φτάσει στην στιγμή της φυσικής σχεδίασης.



Σχήμα 4.3 Netlist

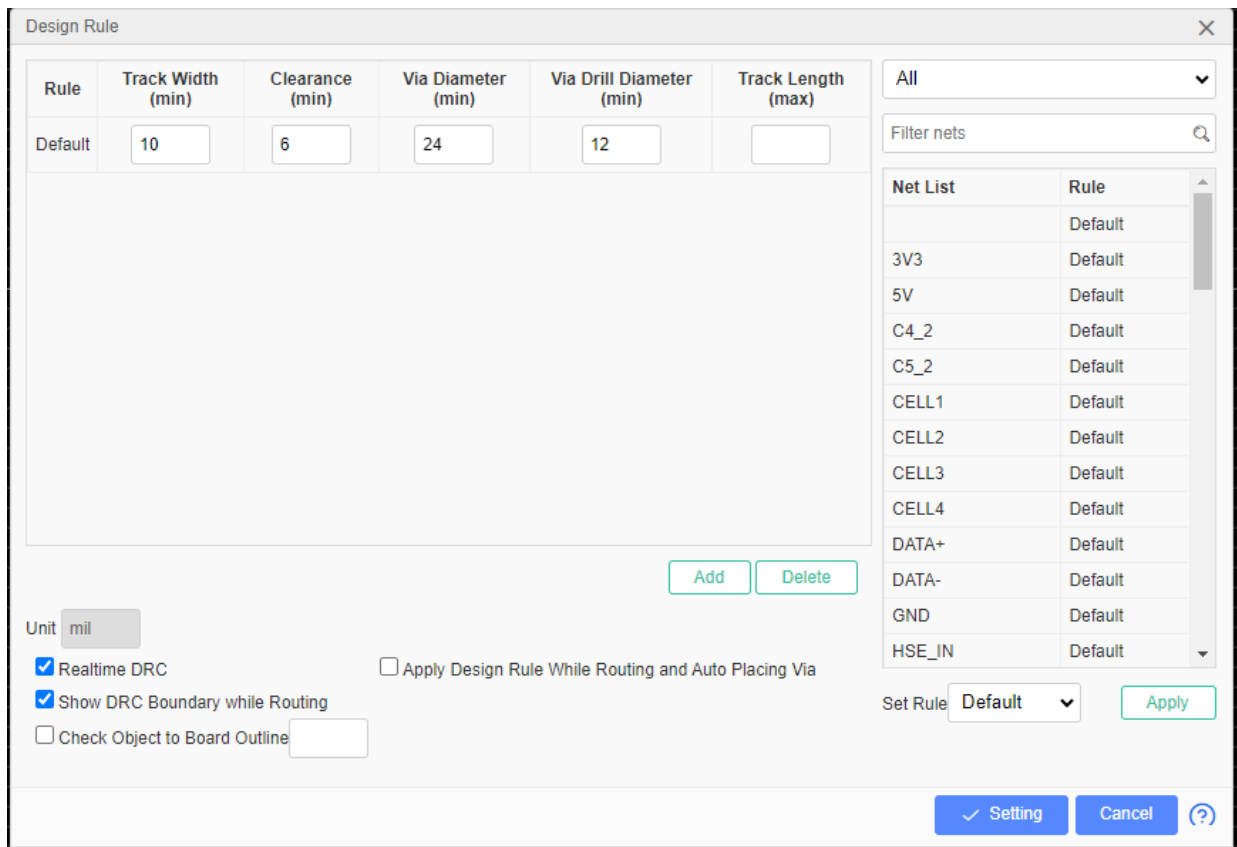
Ο ρόλος του Netlist δεν περιορίζεται μόνο στην εμφάνιση των διασυνδέσεων αλλά παράλληλα σχετίζεται με τον ορθό έλεγχο πως όλες οι φυσικές διαδρομές υπάρχουν στο σχέδιο και πως οι συνδέσεις είναι έγκυρες μεταξύ τους, ειδικά στην περίπτωση των γραμμών τροφοδοσίας.

Τέλος, ακολουθεί η φυσική σχεδίαση εφόσον ο έλεγχος των nets διαπιστωθεί πως είναι ορθός. Στην αρχική φάση, δίνεται ένα περίγραμμα (board outline) το οποίο δεν πρέπει να ξεπεραστεί, δηλαδή όλες οι γραμμές θα βρίσκονται εντός του πλαισίου. Ωστόσο, οι διαστάσεις του μπορούν να μεταβληθούν κατά το δοκούν ανάλογα με την πλακέτα που θα σχεδιασθεί. Δίνεται η επιλογή διαστασιολόγησης σε mils ή σε mm. Γενικά, προτιμάται η χρήση των mils διότι υπάρχει έτοιμη αντιστοίχιση των standards που ορίζουν οι κατασκευαστικές εταιρείες όπως η JLCPCB.

Drill/Hole Size			
Features	Capability	Notes	Patterns
Drill Hole Size	0.15mm - 6.30mm	1 & 2 Layer PCB: 0.3 - 6.3mm Multi-Layer PCB: 0.15 - 6.3mm (0.15mm more costly)	Maximum: 6.3mm Minimum: 0.2mm 
Drill Hole Size Tolerance	+0.13/-0.08mm	e.g. for the 0.6mm hole size, the finished hole size between 0.52mm to 0.73mm is acceptable.	
Blind/Buried Vias	Don't support	Currently we don't support Blind/Buried Vias, only make through holes.	
Min. Via hole size/diameter	0.15mm / 0.25mm	- 1 & 2 Layer PCB: 0.3mm(hole size) / 0.5mm(diameter) - Multi-Layer PCB: 0.15mm(Via hole size) / 0.25mm(Via diameter) ① Via diameter should be 0.1mm(0.15mm preferred) larger than Via hole size ② Preferred Min. Via hole size: 0.2mm	
PTH hole Size	0.20mm - 6.35mm	The annular ring size will be enlarged to 0.15mm in production.	Maximum: 6.35mm Minimum: 0.20mm 

Σχήμα 4.4 Ενδεικτικά Capabilities της JLCPCB

Στα capabilities των κατασκευαστικών εταιρειών, εν προκειμένω της JLCPCB, φαίνεται πληθώρα στοιχείων που σχετίζονται με τις δυνατότητες που παρέχουν. Ουσιαστικά, πρόκειται για κάτω όρια σχεδίασης τα οποία δεν πρέπει να υπερβούν. Επομένως, μπορούμε στη συνέχεια να τα συμπεριλάβουμε ως κανόνες για τις οριακές συνθήκες διαστασιολόγησης στον έλεγχο DRC. Αυτές οι συνθήκες αφορούν αποστάσεις μεταξύ γραμμών χαλκού, γραμμών με annular rings, διαστάσεις σε διαμέτρους τρυπανιού για vias, επιλογή υλικών στις στρώσεις κ.ά. Σε κάθε περίπτωση επιθυμούμε να κάνουμε απλή τη σχεδίαση οπότε θέτουμε σχετικά απλά όρια όπως φαίνεται με το σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 Κανόνες σχεδίασης

Βέβαια οι κανόνες σχεδίασης ενός layout PCB⁹ δεν περιορίζεται μόνο στην χρήση των ορίων αλλά και σε περιορισμό λογικών λαθών. Επομένως, εφαρμόζονται επιπλέον οι κάτωθι προσεγγίσεις :

- Τοποθετούνται περίπου στο κέντρο με σωστό προσανατολισμό τα ICs με τις περισσότερες διασυνδέσεις (π.χ. το BMS και ο STM32 MCU).
- Τοποθετούνται σχετικά κοντά στα pins τροφοδοσίας οι decoupling πυκνωτές (πυκνωτές από γραμμή τροφοδοσίας προς τη γείωση που ισοδυναμούν με χαμηλοπερατό φίλτρο για αποκοπή κυματώσεων και θορύβου).
- Τοποθετείται κοντά στον MCU ο κρύσταλλος του ρολογιού. Είναι σημαντικό να είναι μικρές οι συνδέσεις για να μην εμφανιστούν φαινόμενα ταλάντωσης και παρασιτικός θόρυβος ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.
- Δρομολογούνται σωστά τα σήματα ανάλογα με την φύση τους (αναλογικά ή ψηφιακά). Τα αναλογικά και τα ψηφιακά κυκλώματα είναι καλό να απέχουν ορισμένη απόσταση μεταξύ τους και να μην επικαλύπτονται traces χαλκού ούτε να ταξιδεύουν παράλληλα επάνω στην πλακέτα.
- Επιλέγεται κατάλληλο σημείο τοποθέτησης του USB σε άκρο της πλακέτας.
- Τα traces χαλκού χαράσσονται στις πάνω και κάτω επιφάνειες του PCB τέσσερων στρώσεων. Προσέχουμε ώστε να δημιουργούμε ελάχιστο δυνατό

⁹ <https://www.altium.com/training>

μονοπάτι με μέγιστο πλάτος ίχνους προκειμένου η αντίσταση που εμφανίζεται παρασιτικά να είναι μικρή και αντίστοιχα οι πτώσεις τάσης. Σε σημεία όπου είναι πολύ δύσκολο να δρομολογηθούν σήματα, κάνουμε χρήση των νίας και προσπαθούμε να διατηρήσουμε την παρασιτική χωρητικότητα μεταξύ των σταθμών τάσης για να μην εμφανιστούν υψίσυχρες μεταβολές (η παρασητική χωρητικότητα εμφανίζεται όπου υπάρχει διαφορά δυναμικού, οπότε και μεταξύ των στρώσεων).

- Τοποθετούνται σημεία ενώσεως με τα κελιά των μπαταριών.
- Τα πάχη των γραμμών τροφοδοσίας διαλέγουμε να είναι ιδιαίτερα μεγάλα για να έχουν αντοχή σε υψηλά ρεύματα.
- Γίνεται χρήση των νίας και για θερμική απομόνωση και αντιμετώπιση αύξησης θερμοκρασίας τοπικά στη πλακέτα. Παράλληλα, εξυπηρετούν στις νησίδες γείωσης καθώς μειώνονται οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Η σχεδίαση γίνεται σε τέσσερις στρώσεις με την λογική SIGNAL, POWER, GROUND και SIGNAL. Επομένως, στα top, bottom sides υπάρχει δρομολόγηση σημάτων και τα δύο ενδιάμεσα στρώματα φέρουν planes, δηλαδή μεγάλα πολύγωνα χαλκού, με τις τάσεις αναφοράς τροφοδοσίας και γείωσης.

Layer Manager					
Copper Layer: 4					
No.	<input type="checkbox"/> Display	Name	Type	Color	Transparency(%)
1	<input checked="" type="checkbox"/>	TopLayer	Signal	#FF0000	0
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Inner1	Signal	#999966	0
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Inner2	Signal	#008000	0
4	<input checked="" type="checkbox"/>	BottomLayer	Signal	#0000FF	0
5	<input checked="" type="checkbox"/>	TopSilkLayer	Non-Signal	#FFCC00	0
6	<input checked="" type="checkbox"/>	BottomSilkLayer	Non-Signal	#66CC33	0
7	<input checked="" type="checkbox"/>	TopPasteMaskLayer	Non-Signal	#808080	0
8	<input checked="" type="checkbox"/>	BottomPasteMaskLayer	Non-Signal	#300000	0
9	<input checked="" type="checkbox"/>	TopSolderMaskLayer	Non-Signal	#800080	30
10	<input checked="" type="checkbox"/>	BottomSolderMaskLayer	Non-Signal	#AA00FF	30
11	<input checked="" type="checkbox"/>	Ratlines	Other	#6464FF	
12	<input checked="" type="checkbox"/>	BoardOutline	Other	#FF00FF	0
13	<input checked="" type="checkbox"/>	Multi-Layer	Signal	#C0C0C0	0

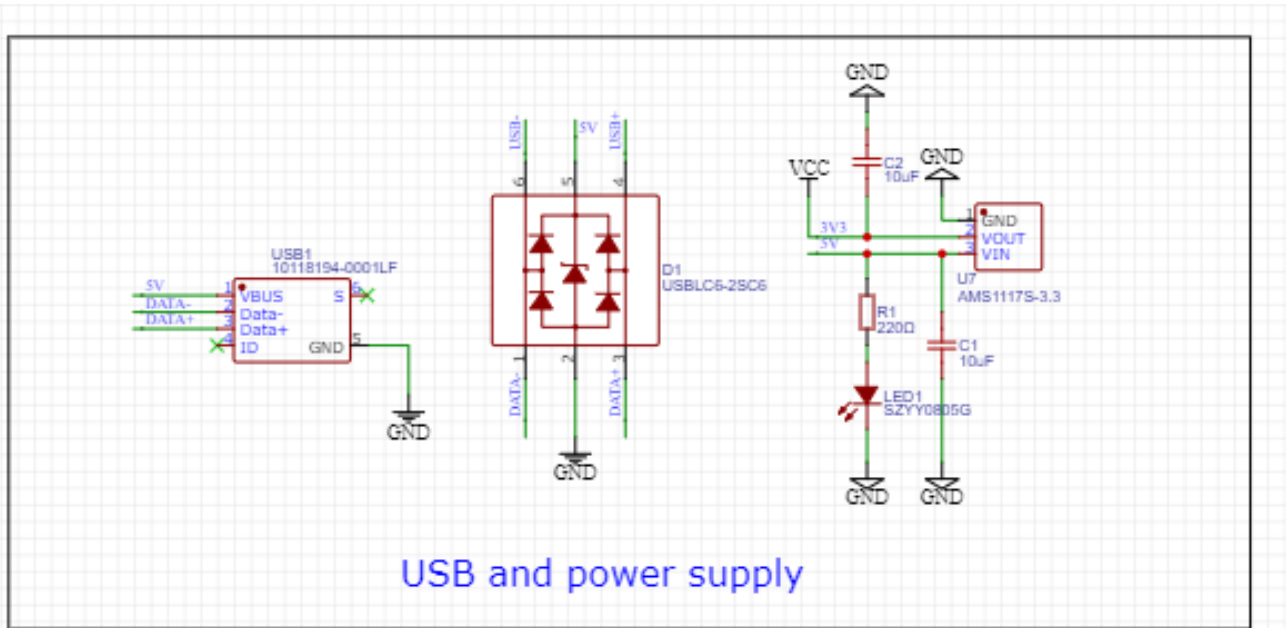
4.3 Σχηματικά διαγράμματα και Layout

Στη παράγραφο αυτή γίνεται ανάλυση των κυκλωμάτων σε επίπεδο διαγραμμάτων και φυσικής σχεδίασης. Αρχικά υλοποιείται το υποκύκλωμα της θύρας USB micro-B. Φέρει δύο συνδέσεις για ανταλλαγή δεδομένων (D+, D-) και αποτελεί διαφορικό σήμα. Στο επίπεδο layout θα πρέπει να σχεδιασθούν επίσης διαφορικά, δηλαδή οι γραμμές να ταξιδεύουν σχετικά κοντά μεταξύ τους εν παραλληλία. Η τάση εισόδου είναι dc περίπου στα 5V και εισέρχονται περίπου 2 A κατά το μέγιστο επιτρεπτό όριο για τροφοδοσία του μικροελεγκτή κατά το προγραμματισμό του.

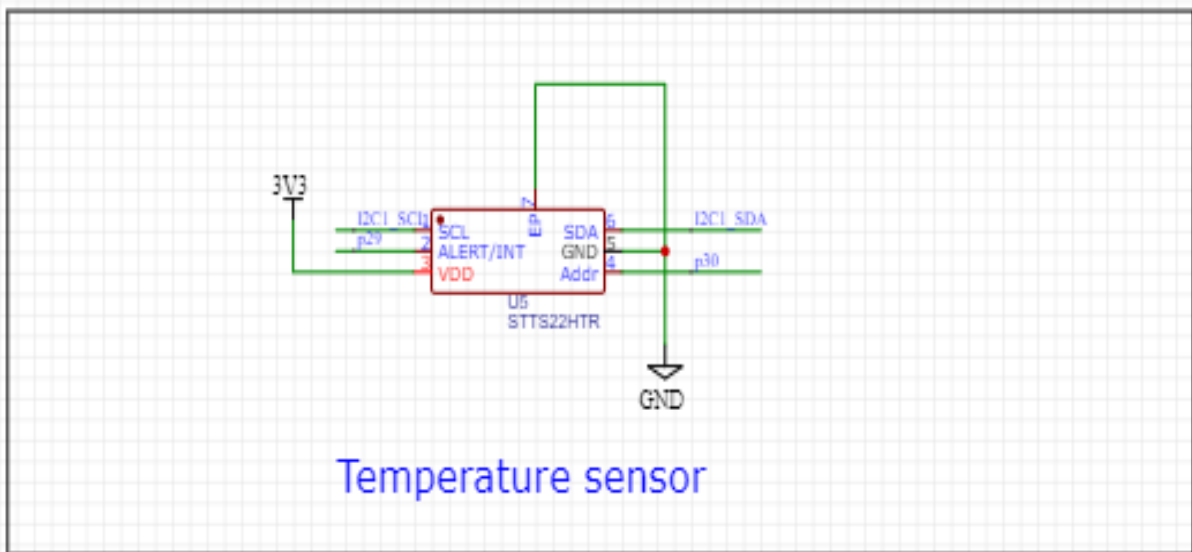
Σημαντικό είναι να υπάρχει ασφάλεια κατά τη μετάδοση των δεδομένων και της τάσης των 5 V ακόμη και αν γίνεται ανταλλαγή πληροφοριών από το ένα σύστημα στο άλλο. Επομένως, η χρήση TVS διόδων είναι καθοριστική για το ρόλο αυτό διότι αποκόπτουν τη ροή ρεύματος όταν εμφανιστεί ανάστροφη πόλωση στην τάση και πέραν της οριακής.

Έπειτα, υλοποιείται και το υποκύκλωμα του αισθητήρα θερμοκρασίας ο οποίος είναι σημαντικός για τη συνεχή ενημέρωση του BMS συστήματος και του STM32 μικροελεγκτή σχετικά με την κατάσταση της θερμοκρασίας στο PCB και στα κελιά των μπαταριών. Η επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων γίνεται με τη βοήθεια του πρωτοκόλλου I2C το οποίο αρχικοποιεί με δεκαεξαδικές τιμές τις λειτουργίες του chip.

Η τροφοδοσία παρά το ότι παρέχεται σε συνεχή τάση των 5 V, θα πρέπει να γίνει υποβάθμιση της στάθμης στα 3.3 V για καλή λειτουργία και αντοχή των κυκλωμάτων, κυρίως του STM32. Η χρήση σταθεροποιητή τάσης (regulator) είναι αναπόφευκτη και για αυτό χρησιμοποιείται μαζί με την ένδειξη από LED εισόδου που δηλώνει εάν το κύκλωμα λαμβάνει ισχύ ή όχι. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται πυκνωτές decoupling τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του IC τα οποία τοποθετούνται πολύ κοντά στα αντίστοιχα pins.



Σχήμα 4.7 USB και τροφοδοσία ισχύος



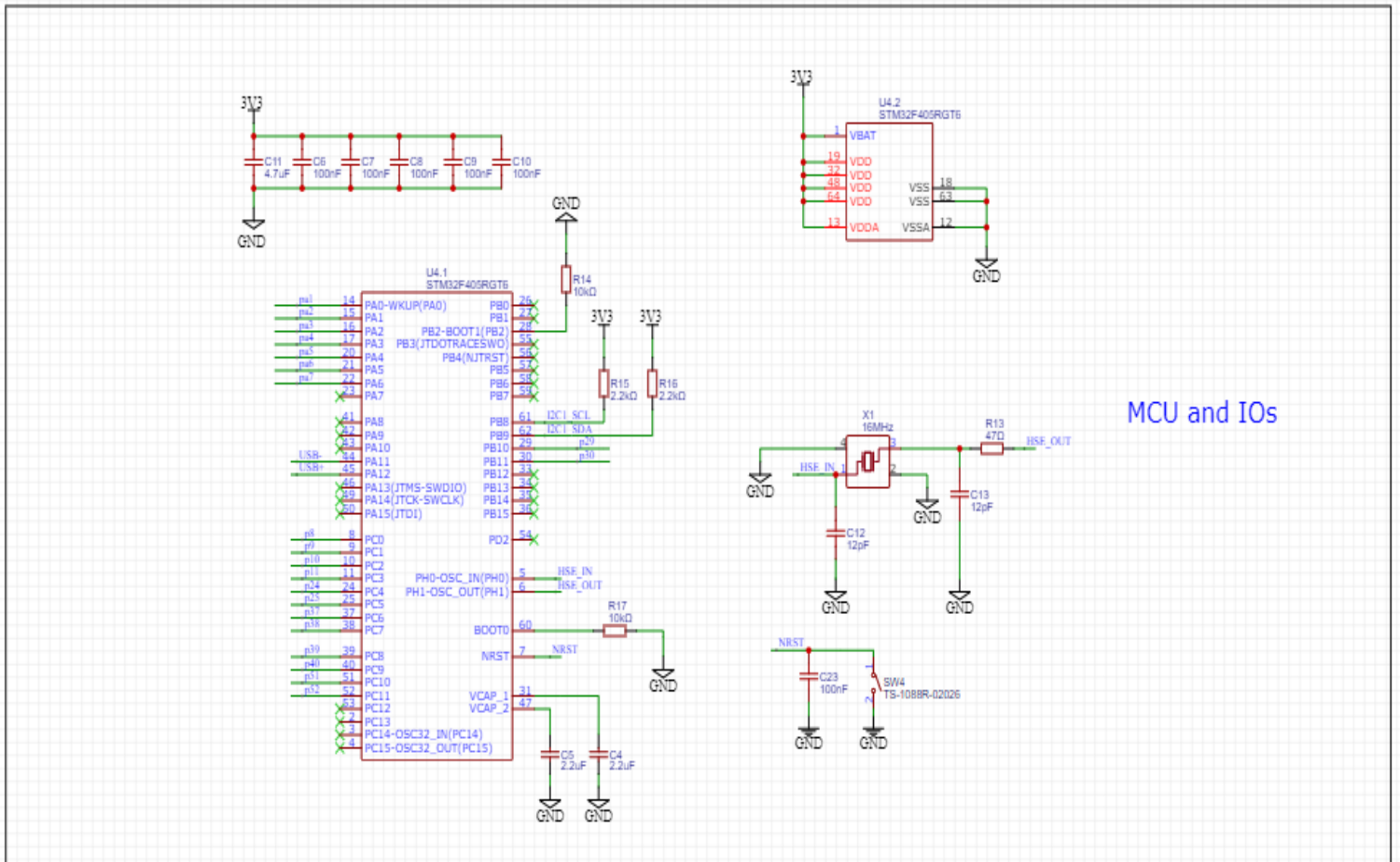
Σχήμα 4.8 Αισθητήρας θερμοκρασίας

Για το κύκλωμα του μικροελεγκτή STM32F405RGT6 θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν πολλές παράμετροι από το datasheet. Αρχικά, πρέπει να σκεφτεί ο χρήστης της πλακέτας πώς θα αναπτύξει την εφαρμογή του ελέγχου των καταστάσεων και τους αναλογικούς σε ψηφιακό μετατροπείς για τη σωστή λειτουργία του BMS IC. Επομένως, πρέπει να προκαθοριστεί ένα πλήθος από IOs ως αναλογικές ή ψηφιακές θύρες, εισόδου ή εξόδου. Κατόπιν, ονοματίζονται με labels για περαιτέρω χρήση. Τέτοιο παράδειγμα αποτελούν interfaces όπως το I2C, το SPI, η USB επικοινωνία, το RESET button για το προγραμματισμό του STM32, η λειτουργία USB DFU για εγγραφή της μνήμης του μικροελεγκτή με το hex file του προγράμματος μέσω του

USB και η χρήση του κρύσταλλου για συγχρονισμό του ρολογιού και επέκταση της λειτουργικότητάς του σε υψηλές συχνότητες (έως 168 MHz).

Για τα pins τροφοδοσίας είναι απαραίτητη η χρήση των πυκνωτών decoupling, περίπου της τάξης των 100 nF σύμφωνα με το datasheet. Η χρήση τους αποτρέπει διέλευση θορύβου από τη τροφοδοσία προς τον μικροελεγκτή που ενδεχομένως να προκαλέσει προβλήματα σε άλλες περιπτώσεις. Ο προγραμματισμός του γίνεται μέσω του DFU οπότε ήδη θέτονται οι στάθμες των pins προγραμματισμού μέσω αντιστάσεων πόλωσης. Το πρόγραμμα μπορεί να αναπτυχθεί μέσω των STMCubeMX και STMCubeIDE όπου :

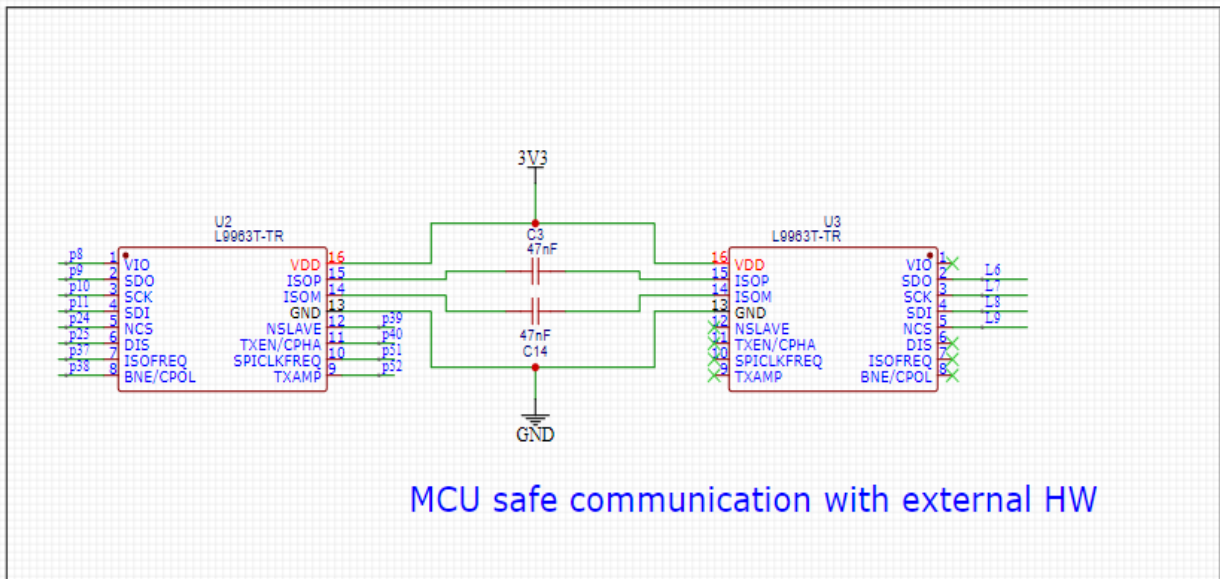
- Αρχικοποιούνται οι χρονισμοί.
- Αρχικοποιούνται οι θύρες εισόδου / εξόδου και οι τρόποι επικοινωνίας / πρωτόκολλα που τα συνοδεύουν.
- Δημιουργείται αυτοματοποιημένος κώδικας με αρχικοποίηση των παραπάνω.
- Συντάσσεται ο κώδικας της εφαρμογής του BMS συμπεριλαμβάνοντας τους drivers για επικοινωνία με I2C, SPI για τα περιφερειακά ICs.
- Γίνεται compile και build του κώδικα με αποτέλεσμα να υλοποιηθεί ένα hex αρχείο που αντιστοιχεί στο πρόγραμμα.
- Συνδέεται μέσω USB και επιλέγεται το DFU από το STMCubeProgrammer.
- Επιλέγεται το αρχείο hex και γίνεται προγραμματισμός του STM32.
- Με χρήση του reset button, εφεξής γίνεται έναρξη της εφαρμογής η οποία θα τρέχει κάθε φορά που θα δέχεται τροφοδοσία η πλακέτα.



MCU and IOs

Σχήμα 4.9 Υποκύκλωμα μικροελεγκτή STM32

Ένα αρκετά χρήσιμο κύκλωμα επικοινωνίας μέσω CAN Bus και μεταξύ BMS συστημάτων ή BMS και MCU, παρέχεται μέσω του L9963T-TR. Το συγκεκριμένο IC παρέχει γαλβανική απομόνωση για προστασία από υπερτάσεις στα δύο άκρα επικοινωνίας. Τα pins είναι κυρίως ψηφιακά και προέρχονται από το BMS και το STM32 για τη προκειμένη σχεδίαση. Χρειάζεται προσοχή στη χρήση των πυκνωτών coupling διότι αντιστοιχούν σε γραμμές με έλεγχο εμπέδησης των 120 Ω όπως ορίζει το CAN Bus πρωτόκολλο. Αυτό σημαίνει πως τα ίχνη χαλκού είναι τέτοια προκειμένου η ισοδύναμη αντίσταση από οποιοδήποτε άκρο να είναι ίση με 120 Ω χωρίς να υπάρχουν μεταβολές λόγω παρασιτικών παθητικών στοιχείων. Το CAN Bus είναι απαραίτητο για τη παρούσα σχεδίαση καθώς αναφέρεται κυρίως σε BMS ηλεκτρικών οχημάτων.

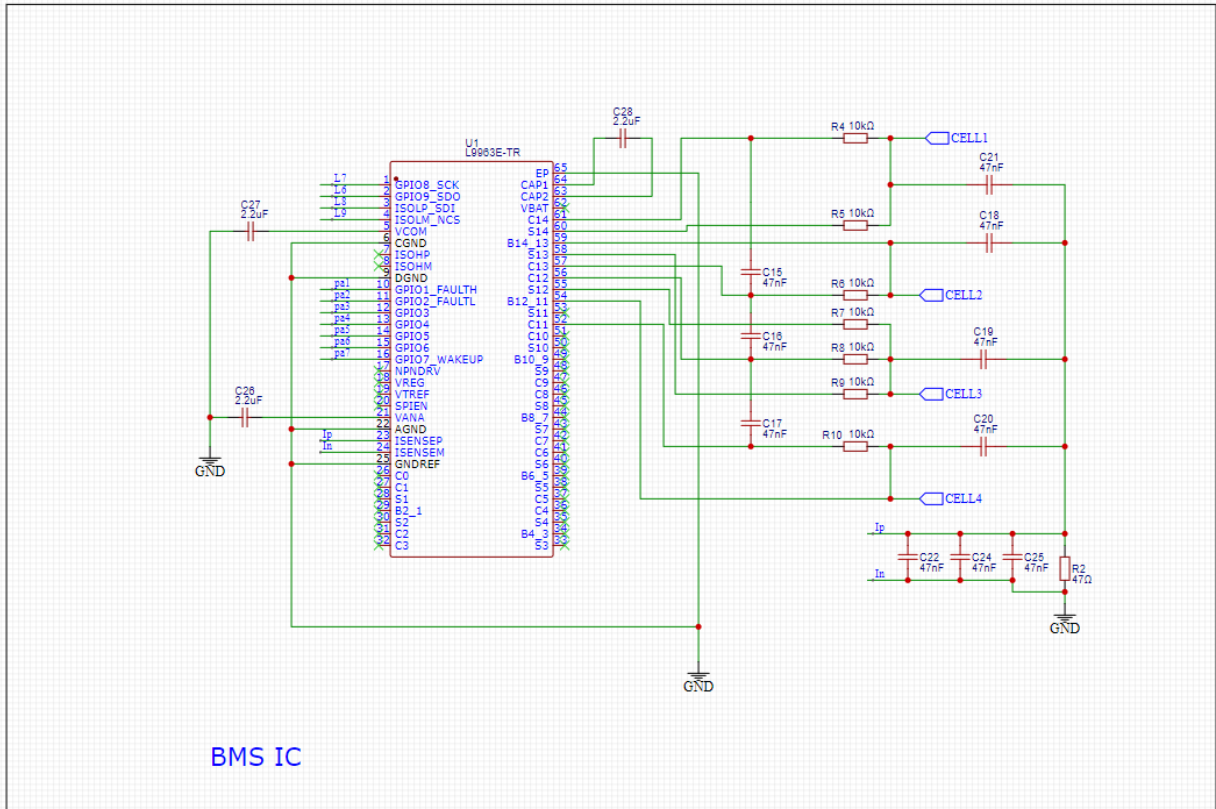


Σχήμα 4.10 Drivers για CAN Bus

Τέλος, ακολουθεί το υποκύκλωμα του BMS IC. Σε αυτό υλοποιούνται όλες οι λογικές πράξεις μέσω του προγράμματος που έχει φορτωθεί στον μικροελεγκτή STM32. Υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των μονάδων αλλά και με τους drivers CAN Bus για εξωτερική χρήση. Το BMS αποτελείται από ένα πλήθος συνδέσεων κελιών όπου υπολογίζεται και η τάση εξόδου. Επίσης, ένα μικρό σχετικά φορτίο αντίστασης είναι συνδεδεμένο σε σειρά με τον αρνητικό ακροδέκτη της μπαταρίας προκειμένου να μετρείται το ρεύμα που τη διαρρέει με ακρίβεια. Στην πλευρά των κελιών υπάρχουν δικτυώματα πυκνωτών και αντιστατών που υλοποιούν χαμηλοπερατά φίλτρα προκειμένου να υπάρχει καλύτερη απομόνωση του dc σήματος από μεταβατικά φαινόμενα και συχνότητες που εμφανίζονται από θόρυβο.

Στην προκειμένη σχεδίαση έχει παραλειφθεί το δίκτυο των MOSFETs για απλούστερη υλοποίηση του συστήματος. Στο datasheet προφανώς υπάρχουν ενδείξεις για επιλογή κατάλληλων υλικών, όμως η χρήση των gate drivers σε H-bridge είναι μελέτη που υλοποιήθηκε κυρίως στα πλαίσια εξομοίωσης στο κεφάλαιο 3.

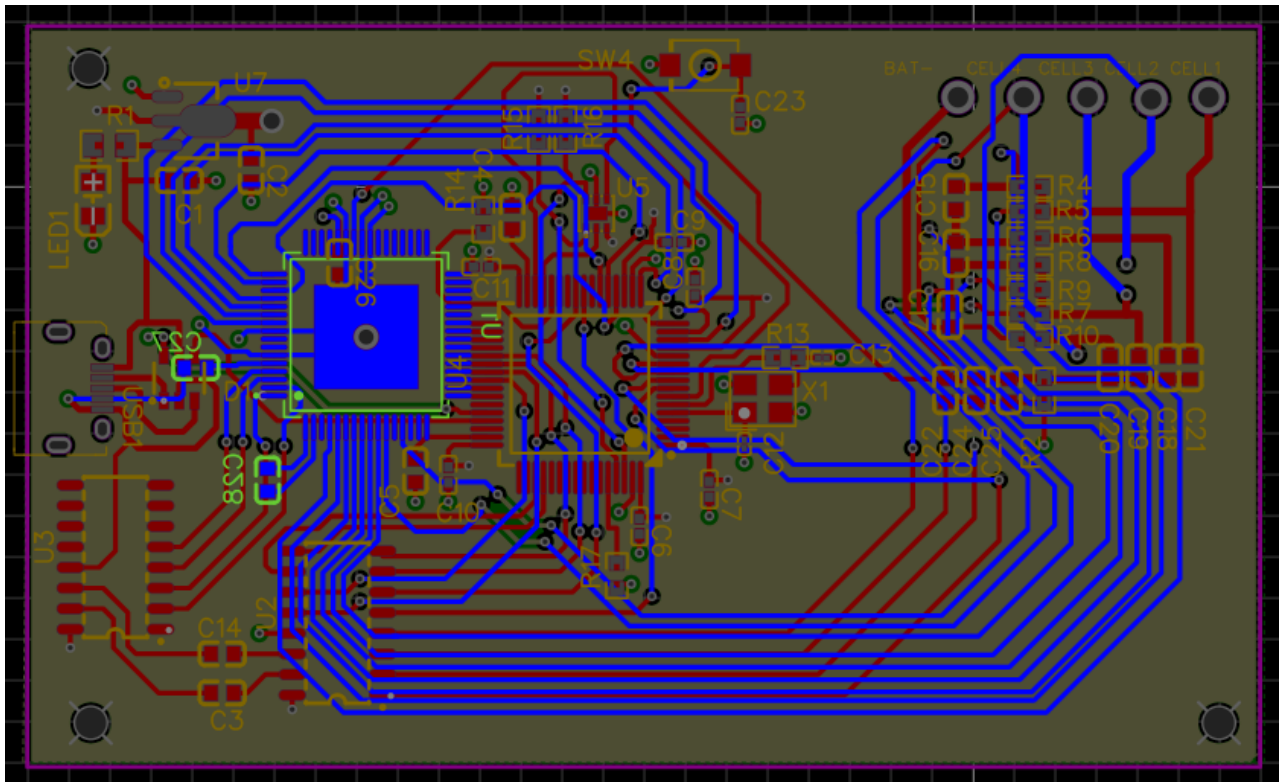
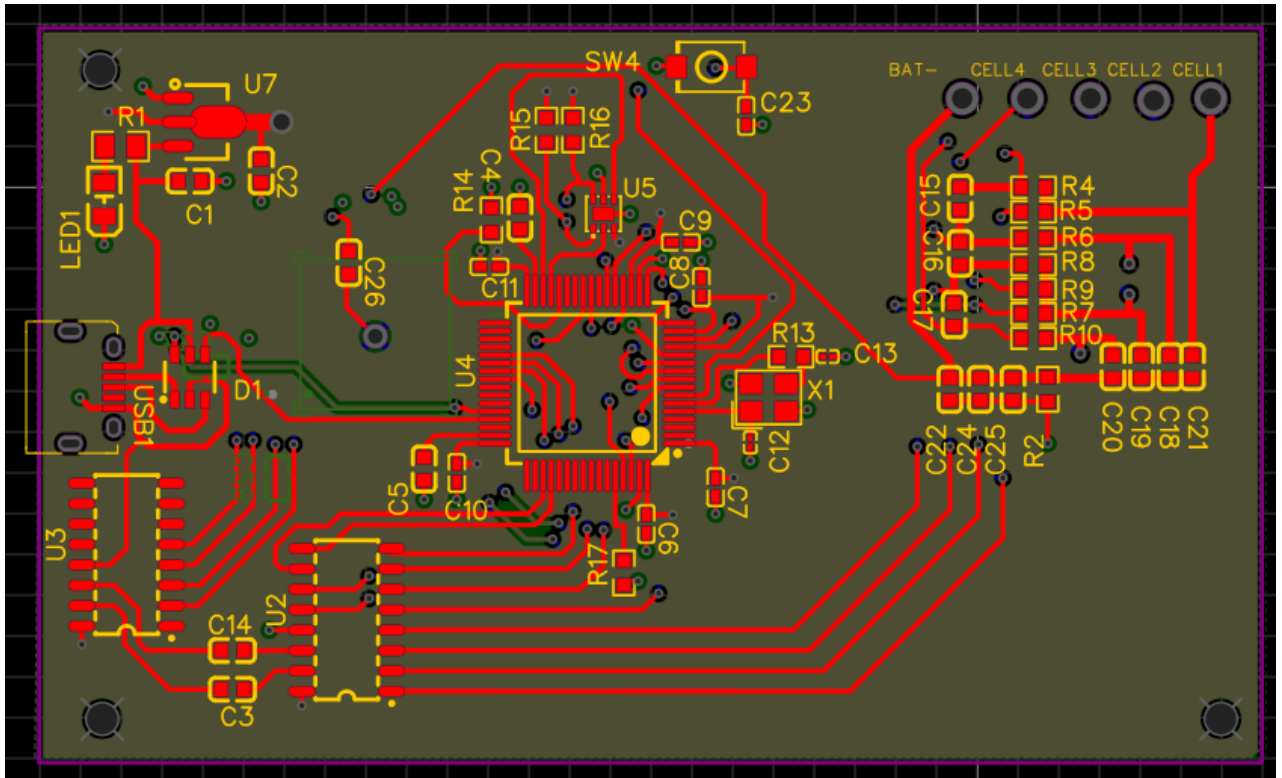
Σε αρκετά ICs υπήρξαν IOs που δεν χρησιμοποιήθηκαν. Συνεπώς, τοποθετείται το σύμβολο “X” στα pins αυτά προκειμένου να απαλειφθούν τυχόν warnings ή σφάλματα κατά τη δημιουργία του netlist. Έχοντας λάβει την έγκυρη επαλήθευσή του από εκτέλεση του ελέγχου netlist, σειρά έχει η σχεδίαση του PCB με κατάλληλο routing (διαδικασία χάραξης ιχνών χαλκού για διασύνδεση των υλικών).



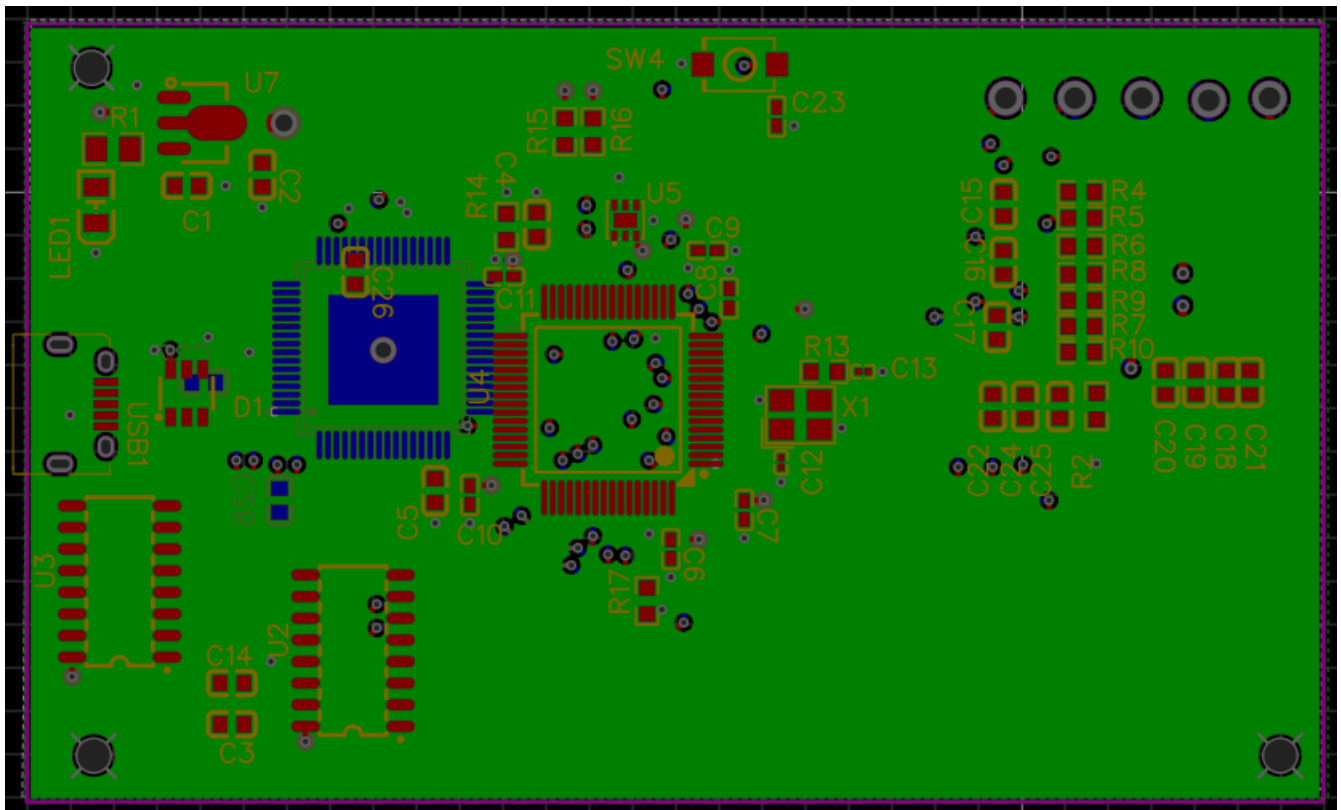
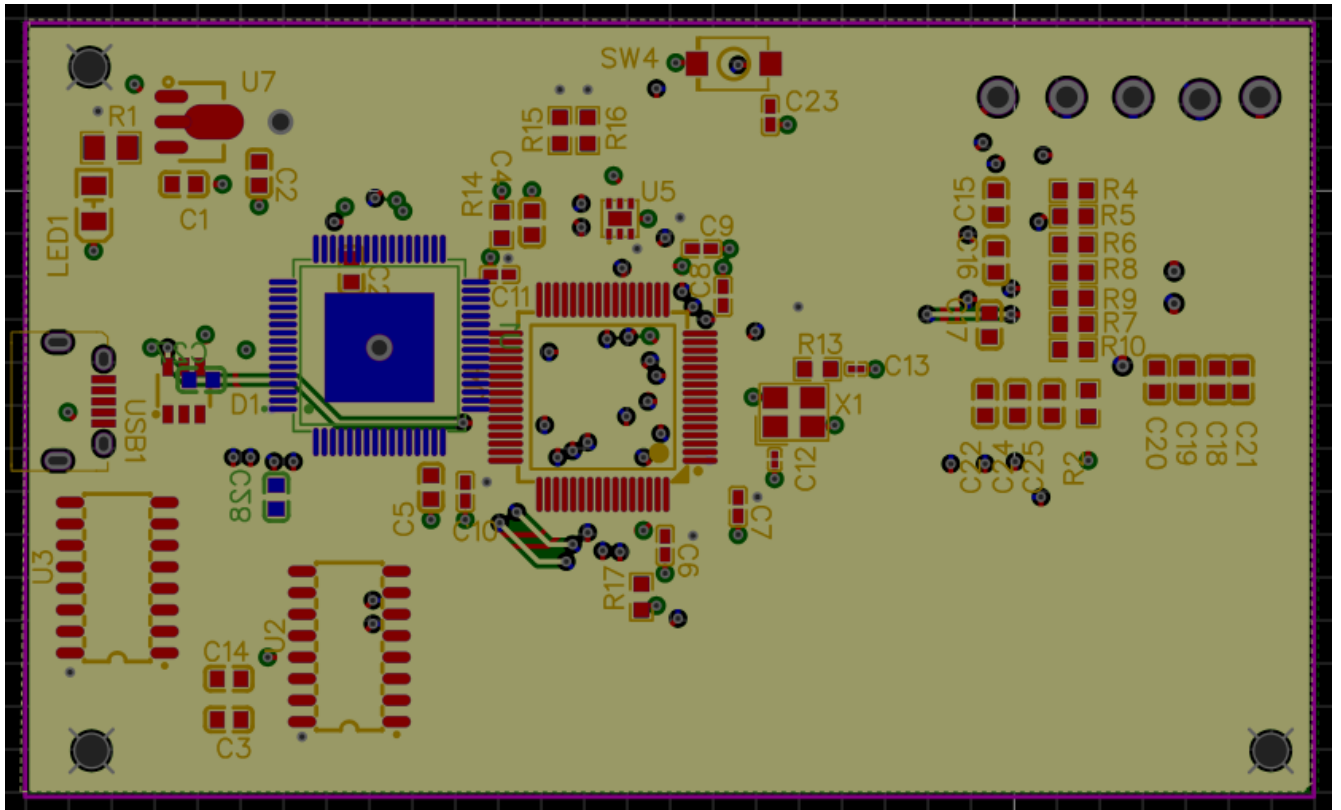
Σχήμα 4.11 BMS IC

Στην σχεδίαση των γραμμών χαλκού δόθηκε λεπτομέρεια στην αρχική τοποθέτηση των υλικών και των κανόνων σχεδίασης που θεωρήθηκαν εξ αρχής. Επιπλέον, τηρήθηκαν οι κανόνες των design rules για να μπορεί η πλακέτα να παραχθεί από το κατασκευαστή. Παρατηρώντας το σχέδιο layout, οι γραμμές, κυρίως των μεγάλων IC όπως ο μικροελεγκτής και το BMS, εξέρχονται πάντοτε κάθετα από τα pins. Με το τρόπο αυτό εξασφαλίζεται καλή σύνδεση των pins με τα υλικά ακόμη και σε περίπτωση μικρών αστοχιών από το μηχάνημα σχεδιασμού ιχνών.

Παρατηρείται, επιπλέον, στο top side, πως ο κρύσταλλος τοποθετήθηκε αρκετά κοντά στο μικροελεγκτή, οι πυκνωτές decoupling επίσης κοντά στα pins τροφοδοσίας και επίσης υπάρχουν αρκετά vias για μείωση θορύβου, αύξηση αντοχής σε μεγάλες θερμοκρασίες και χρήση drill holes για να γίνει soldering (κόλληση) των κελιών των μπαταριών. Οι περισσότερες διασυνδέσεις συμβαίνουν στα top και bottom sides, με μερικές εξαιρέσεις στη περίπτωση που ήταν σχεδόν αδύνατη η δρομολόγηση στο ίδιο side και χρειάστηκε η ενδιάμεση στρώση στο POWER plane. Και σε αυτή τη περίπτωση, βέβαια, προσέχουμε να είναι μικρές οι διαδρομές και τα vias να μην μπλοκάρουν την απευθείας ροή του ρεύματος από την πηγή (regulator και μπαταρίες) προς το υπόλοιπο κύκλωμα. Στο GROUND plane υπάρχει μόνο μια στάθμη αναφοράς, αυτή του GND net (γείωση).

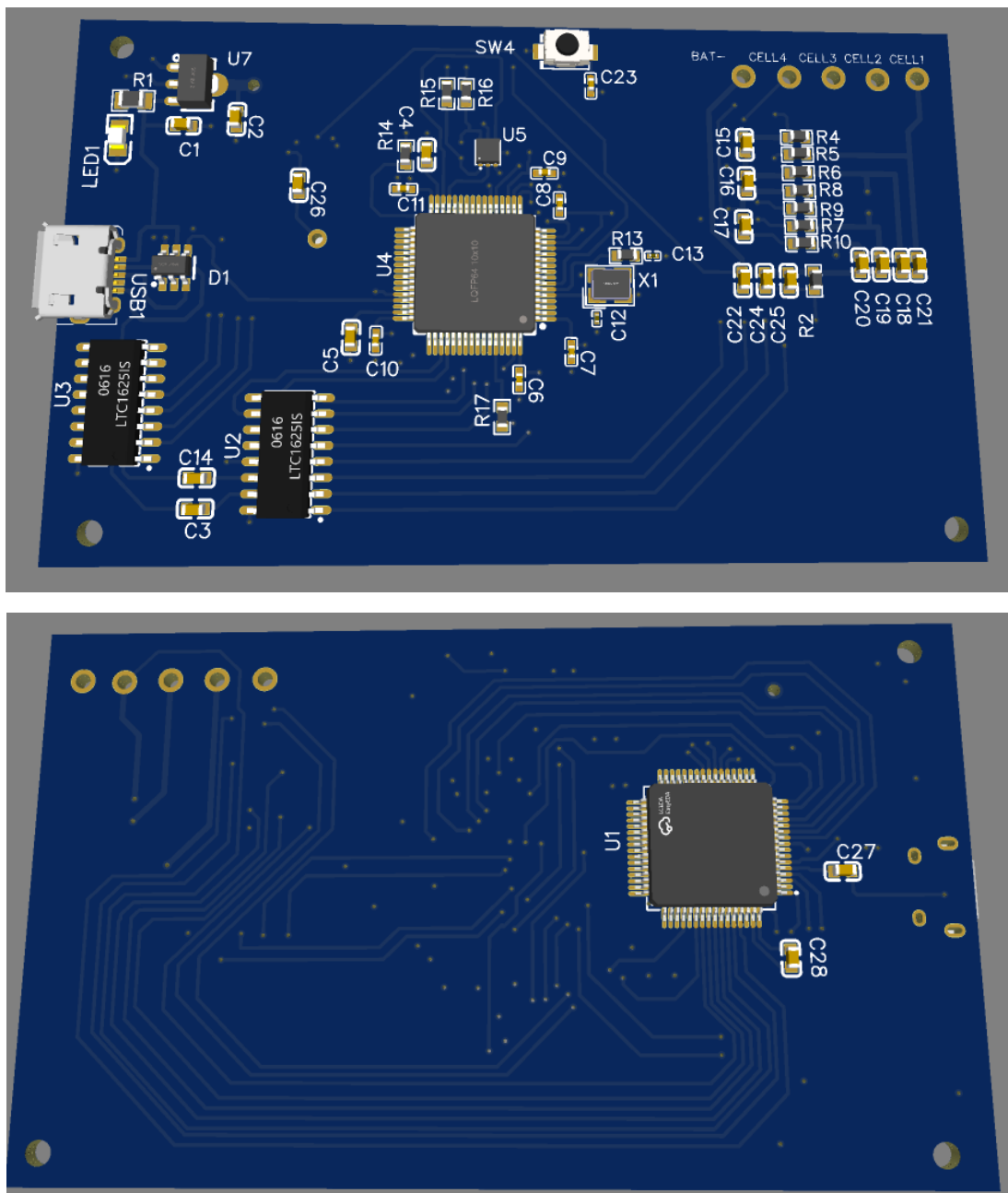


Σχήμα 4.12 top και bottom side του layout



Σχήμα 4.13 POWER και GROUND planes του layout

Στην τρισδιάστατη απεικόνιση του συστήματος φαίνεται η τελική μορφή που θα έχει η πλακέτα όταν θα μπορεί κανείς να εκτελέσει παραγγελία της προς κάποιο κατασκευαστή. Οι θέσεις των υλικών είναι σχετικά ικανοποιητικές τηρώντας τις προδιαγραφές των ορίων του board outline. Με τη χρήση του DRC (Design Rule Check) γίνεται έλεγχος της φυσικής σχεδίασης και εντοπίζονται τυχόν ελλείψεις από το netlist ή σφάλματα που προκύπτουν εξαιτίας αποστάσεων και χωροταξίας, δηλαδή μετρικών αποστάσεων που δεν τηρούν τους κανόνες σχεδίασης (ελάχιστες αποστάσεις, διαμέτρους κτλ). Στο παρόν σχέδιο έγινε ο έλεγχος DRC με επιτυχία.



Σχήμα 4.14 3D απεικόνιση της πλακέτας PCB

4.4 Αρχεία σχεδίου και κοστολόγηση

Στα εργαλεία του EasyEDA περιλαμβάνεται το export αρχείων σχεδίασης. Τα κυριότερα αρχεία που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι τα εξής :

- **BoM** : αρχείο με κατάλογο υλικών, τεμαχίων και τιμών ανά τεμάχιο. Αυτό το αρχείο είναι σημαντικό καθώς περιλαμβάνει σειριακούς κωδικούς για τα ICs που χρησιμοποιούνται και μπορεί κανείς να κάνει reverse engineering (ανακατασκευή) οποιουδήποτε κυκλώματος βάσει αυτού.
- **Gerber** : Αρχείο με στοιχεία σχετικά με το PCB. Συμπεριλαμβάνει πληροφορίες για τα traces, τα σχέδια στις στρώσεις, τον τύπο υλικού PCB (συνήθως επιλέγεται FR-4), το τύπο του διηλεκτρικού υλικού μεταξύ των στρώσεων, την οριοθέτηση του board outline κ.ά.
- **Drill / Pick and Place** : Αρχείο σχετικό με την χωροταξική τοποθέτηση των υλικών και τις τρύπες που θα χρειαστεί να δημιουργήσει η μηχανή σχεδίασης (vias, drill holes κτλ). Όσον αφορά την χωροταξική τοποθέτηση των υλικών, αφορά τόσο τα sides όσο και το orientation αυτών με βάση το σημείο αναφοράς τους (η τελεία στο IC).



Σχήμα 4.15 Αρχεία σχεδιασμού του PCB από κατασκευαστή

Η κοστολόγηση γίνεται κυρίως στο πεδίο συμπλήρωσης των αρχείων στην πλατφόρμα της εκάστοτε κατασκευαστικής εταιρείας. Από default, δίνονται οι διαστάσεις και τα υλικά των πλακετών διότι γίνονται αντιληπτά τα Gerber αρχεία. Συνήθως το κόστος είναι μεγάλο για κατασκευή λίγων πλακετών, ειδικά όταν αυξάνονται οι στρώσεις και οι τρύπες της πλακέτας σε πλήθος. Επιπλέον κόστος είναι τα υλικά τα οποία τοποθετούνται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά εάν ζητηθεί PCBA υπηρεσία, δηλαδή κόλλησής τους. Με τη χρήση του BoM αρχείου μπορεί κανείς να ενημερωθεί για τυχόν ελλείψεις σε υλικά και να παραγγείλει επιπλέον ή νέα μέσω του κατασκευαστή του. Τέλος, το κόστος φτάνει το τελικό του ποσό συμπεριλαμβάνοντας ΦΠΑ, φόρους τελωνείων και μεταφορών από το εξωτερικό. Η παρούσα σχεδίαση εκτιμάται πως με περίπου 300 Ευρώ είναι εφικτός ο σχεδιασμός της δοκιμαστικής πλακέτας σε 5 αντίτυπα (ελάχιστη ποσότητα παραγγελίας).

Κεφάλαιο 5ο : Συμπεράσματα και εξέλιξη εργασίας

5.1 Παρατηρήσεις και αναθεωρήσεις στο έργο

Το έργο αυτό υλοποιήθηκε από ενδιαφέρον σχετικά με τις μπαταρίες και της ενσωμάτωσής τους σε ηλεκτρικά οχήματα. Η χρήση των μπαταριών, είναι ιδιαίτερα σημαντική όπως αποδείχθηκε καθώς προσφέρουν αυτονομία και αυτοκίνηση. Ωστόσο, η ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου της λειτουργίας τους είναι μείζον ζητούμενο προκειμένου να εξασφαλισθεί αξιόπιστη λειτουργία.

Τα BMS συστήματα φέρουν σχεδόν όμοια αρχιτεκτονική ως προς τη σχεδιάσή τους όπως αποδείχθηκε. Λειτουργούν βάση αλλαγής καταστάσεων και ανταλλαγής εντολών μεταξύ του εγκεφάλου των ηλεκτρικών οχημάτων (μικροελεγκτής) με τη χρήση πρωτοκόλλου CAN Bus και ενημερώνουν την μονάδα επεξεργασίας του BMS IC για τυχόν μεταβολές σε τιμές μεγεθών όπως οι τάσεις, το ρεύμα και η θερμοκρασία. Αυτά τα μεγέθη είναι τα πλέον σημαντικά και συμβάλουν άμεσα στην λειτουργία της μπαταρίας με ή χωρίς φορτίο εξόδου.

Στο έργο αυτό έγινε προσπάθεια προσομοίωσης του BMS συστήματος σε στάδια. Αρχικά με χρήση απλού block διαγράμματος ελέγχθηκε η λειτουργία του σε καταστάσεις όπου αλλάζει η στάθμη τάσης λόγω εξωτερικών μεταβολών ή αποστέλλεται εντολή από τον μικροελεγκτή. Στην συνέχεια, έγινε εξομοίωση των βασικότερων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που συναντώνται στη συνδεσμολογία του BMS IC όπως είναι τα κελιά των μπαταριών και η φόρτιση / εκφόρτιση μέσω MOSFET drivers. Τα φαινόμενα αυτά προσομοιώθηκαν και με παρουσία θορύβου προκειμένου να ελεγχθεί κατά πόσο μπορούν να συμπεριληφθούν τα κυκλώματα αυτά σε ένα πρωτότυπο σχέδιο.

Τέλος, υλοποιήθηκε το φυσικό σχέδιο σε πλακέτα PCB του πρωτότυπου συστήματος σύμφωνα με πρόταση από την επίσημη ιστοσελίδα της STMicroelectronics. Το κύκλωμα αυτό σχεδιάστηκε με το λογισμικό EasyEDA το οποίο είναι open source και εύκολο στη χρήση. Το layout βασίζεται σε κανόνες σχεδίασης που είναι σύμφωνοι με κατασκευαστικές εταιρείες και των δυνατών υπηρεσιών που προσφέρουν. Βέβαια εκ της κοστολόγησης της πλακέτας, γίνεται αντιληπτό πως το budget είναι αρκετά περιορισμένο για αγορά της.

Στις γενικότερες παρατηρήσεις, το έργο αυτό μελετήθηκε με την ανάλυση που αρμόζει για τα πλαίσια διπλωματικής εργασίας. Οι εξομοιώσεις, ωστόσο, ήταν σχετικά απλοϊκές ως προς την υλοποίησή τους μιας και τα ισοδύναμα συστήματα αποτελούνταν από απλά παθητικά στοιχεία επί το πλείστον. Περισσότερη έμφαση θα μπορούσε να δοθεί και στις επιμέρους διατάξεις που υλοποιούνται σε ένα BMS, όπως το πρωτόκολλο CAN Bus και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας μεταξύ μικροελεγκτών (I2C, SPI). Ωστόσο, θεωρήθηκε σκόπιμο να περιοριστεί η ανάλυση σε κυκλώματα που έχουν άμεση αλληλεπίδραση με την λειτουργία της μπαταρίας και του φορτίου της. Ωστόσο, αποτιμάται πως το σύνολο των εξομοιώσεων βρίσκεται σε αποδεκτά πλαίσια με σωστές συμπεριφορές για τα σήματα που μελετήθηκαν.

Αναφορικά με το σχέδιο της πλακέτας, θα ήταν σημαντικό να μειωθεί το κόστος της και να γίνει re-design σε ορισμένα σημεία όπου απαιτείται. Η μείωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί αν επιλεγθούν διαφορετικά υλικά και ICs, ωστόσο στη παρούσα εργασία σκόπιμα έγινε επιλογή των κυκλωμάτων της STMicroelectronics για διευκόλυνση της σχεδίασης. Οι κανόνες σχεδίασης, ωστόσο, είναι αρκετά σωστοί και τηρούνται όπως πρέπει προκειμένου το σχέδιο να είναι υλοποιήσιμο από κατασκευαστική εταιρεία. Σε αναθεωρημένη έκδοση της πλακέτας θα μπορούσαν, τέλος, να προστεθούν επιπλέον κυκλώματα και περιφερειακά, όπως οι MOSFET drivers που δεν υπήρχαν στην παραπάνω σχεδίαση.

5.2 Μελλοντική έρευνα

Η εργασία αυτή μπορεί να εξελιχθεί σε πολλούς τομείς μελλοντικά. Αρχικά μπορεί να γίνει διόρθωση επί των σχεδίων και υλοποίηση του συστήματος με τις προσθήκες που παραλείφθηκαν. Ακόμη, συνίσταται η περαιτέρω εξομοίωση περιπτώσεων όπως για παράδειγμα χρήση μεταβλητού φορτίου στην έξοδο ή η χρήση κινητήρα / γεννήτριας για την πλήρη εξομοίωση του συστήματος BMS στο όχημα. Με την ανακατασκευή της συσκευής μπορεί, επίσης, να γίνει εφικτή η μείωση του ποσού για παραγγελία και να μπορέσει το σύστημα να λειτουργήσει στην πράξη σε ένα πραγματικό ηλεκτρικό όχημα, ακόμη και αν αυτό είναι απλά σχεδιασμένο.

Το μέλλον των BMS συστημάτων είναι ιδιαίτερα υποσχόμενο μιας και υπάρχει συνεχής εξέλιξη στο τομέα της τεχνολογίας και διατήρησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικά με την άνοδο της αγοράς των ηλεκτρικών οχημάτων, τέτοιου τύπου συστήματα κρίνεται αναγκαίο να υπάρχουν και να εξελίσσονται, βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας το κόστος κατασκευής

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Yunmao Ye, K. W. E. Cheng, *Zero-Current Switching Switched-Capacitor for Series Battery String*, July 2012
- [2] Izadi Yasin, *A comprehensive Review of Battery and Supercapacitor Cells Voltage-Equalizer Circuits*, December 2012
- [3] Manenti Antonio, Andrea Abba, Allesandro Merati, Sergio M. Savaresi, *A New BMS Architecture on Cell Redundancy*, September 2011
- [4] Thomas Conway, *An isolated active balancing and monitoring system for Lithium Ion battery stacks*, April 2021
- [5] Zhengqi Wei, *Bidirectional Constant Current String-to-cell battery equalizer*, January 2023
- [6] <https://prodocs.easyeda.com/en/faq/editor/index.html>
- [7] Νικόλαος Βασιλείου, *Μελέτη συστήματος διαχείρισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος και ανάπτυξη οικιακού συστήματος διαχείρισης ενέργειας με χρήση μπαταρίας*, Οκτώβριος 2017, Αθήνα
- [8] https://www.cet.edu.in/noticefiles/230_power_system_stability.pdf
- [9] <https://www.altium.com/training>
- [10] D. Holmes & T.Lipo, *Pulse Width Modulation for Power Converters. Principles and Practice*, 2003
- [11] Electric Vehicle Team, *A Guide to Understanding Battery Specifications*, 2008, MIT
- [12] H. Bergveld, W. Kruijt, *Battery Management Systems. Design by Modelling*, 2002
- [13] W.Y. Chang, *The State of Charge Estimating Methods for Battery*, 2013
- [14] S. Jeon, & S. Bae, *Comparative Study on the Battery State-of-Charge Estimation Method*, 2015
- [15] J. Alzieu, H. Smimite, C. Glaize, *Improvement of intelligent battery*, 1996
- [16] S. Sindhuja & K. Vasanth, *Modified Coulomb counting method of SOC estimation for uninterruptible power supply system's battery management system*, 2015
- [17] H. İzmitligil & H. Özkan, *A home power management system using mixed integer linear programming for scheduling appliances and power resources*, 2016
- [18] <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_management_system
- [20] <https://www.sensata.com/products/battery-management-systems>
- [21] <https://www.st.com/en/applications/industrial-tools-motor-drives-and-equipment/industrial-battery-management-system-bms.html>

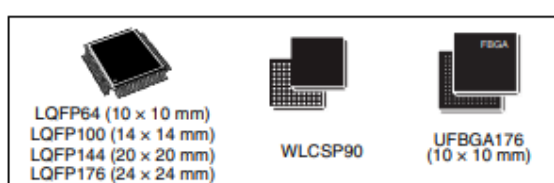
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Φυλλάδια υλικών



STM32F405xx STM32F407xx

ARM Cortex-M4 32b MCU+FPU, 210DMIPS, up to 1MB Flash/192+4KB RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 15 comm. interfaces & camera

Datasheet - production data



Features

- Core: ARM 32-bit Cortex™-M4 CPU with FPU, Adaptive real-time accelerator (ART Accelerator™) allowing 0-wait state execution from Flash memory, frequency up to 168 MHz, memory protection unit, 210 DMIPS/1.25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1), and DSP instructions
- Memories
 - Up to 1 Mbyte of Flash memory
 - Up to 192+4 Kbytes of SRAM including 64-Kbyte of CCM (core coupled memory) data RAM
 - Flexible static memory controller supporting Compact Flash, SRAM, PSRAM, NOR and NAND memories
- LCD parallel interface, 8080/6800 modes
- Clock, reset and supply management
 - 1.8 V to 3.6 V application supply and I/Os
 - POR, PDR, PVD and BOR
 - 4-to-26 MHz crystal oscillator
 - Internal 16 MHz factory-trimmed RC (1% accuracy)
 - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
 - Internal 32 kHz RC with calibration
- Low power
 - Sleep, Stop and Standby modes
 - V_{DD} supply for RTC: 20×32 bit backup
- IC/OC/PWM or pulse counter and quadrature (incremental) encoder input
- Debug mode
 - Serial wire debug (SWD) & JTAG interfaces
 - Cortex-M4 Embedded Trace Macrocell™
- Up to 140 I/O ports with interrupt capability
 - Up to 136 fast I/Os up to 84 MHz
 - Up to 138 5 V-tolerant I/Os
- Up to 15 communication interfaces
 - Up to 3 × I²C interfaces (SMBus/PMBus)
 - Up to 4 USARTs/2 UARTs (10.5 Mbit/s, ISO 7816 interface, LIN, IrDA, modem control)
 - Up to 3 SPIs (42 Mbits/s), 2 with muxed full-duplex I²S to achieve audio class accuracy via internal audio PLL or external clock
 - 2 × CAN interfaces (2.0B Active)
 - SDIO interface
- Advanced connectivity
 - USB 2.0 full-speed device/host/OTG controller with on-chip PHY
 - USB 2.0 high-speed/full-speed device/host/OTG controller with dedicated DMA, on-chip full-speed PHY and ULPI
 - 10/100 Ethernet MAC with dedicated DMA: supports IEEE 1588v2 hardware, MII/RMII
- 8- to 14-bit parallel camera interface up to 54 Mbytes/s
- True random number generator
- CRC calculation unit
- 96-bit unique ID
- RTC: subsecond accuracy, hardware calendar


Table 1. Device summary


Automotive Multicell battery monitoring and balancing IC



TQFP 10x10 64L
exposed pad down

Features

- AEC-Q100 qualified 
- Measures 4 to 14 cells in series, with 0 μ s desynchronization delay between samples. Supports also busbar connection without altering cell results
- Coulomb counter supporting pack overcurrent detection in both ignition on and off states. Fully synchronized current and voltage samples
- 16-bit voltage ADC with maximum error of ± 2 mV in the [0.5 – 4.3] V range, after soldering, in [-40; +105] °C Tj range
- 2.66 Mbps isolated serial communication with regenerative buffer, supporting dual access ring. Less than 4 μ s latency between start of conversion of the 1st and the 31st device in a chain. Less than 4 ms to convert and read 96 cells in a system using 8 L9963E and L9963T transceiver. Less than 8 ms to convert and read 210 cells in a system using 15 L9963E and L9963T transceiver. Less than 16 ms to convert and read 434 cells in a system using 31 L9963E and L9963T transceiver. Supports both XFMR and CAP based isolation
- 200 mA passive internal balancing current for each cell in both normal and silent-balancing mode. Possibility of executing cyclic wake up measurements. Manual/Timed balancing, on multiple channels simultaneously; Internal/External balancing
- Fully redundant cell measurement path, with ADC Swap, for enhanced safety and limp home functionality
- Intelligent diagnostic routine providing automatic failure validation. Redundant fault notification through both SPI Global Status Word (GSW) and dedicated FAULT line
- Two 5 V regulators supporting external load connection with 25 mA (VCOM) and 50 mA (VTREF) current capability
- 9 GPIOs, with up to 7 analog inputs for NTC sensing
- Robust hot-plug performance. No Zeners needed in parallel to each cell
- Full ISO26262 compliant, ASIL-D systems ready

Product status link		
L9963E		
Product summary		
Order code	Package	Packing
L9963E	TQFP64EP	Tray
L9963E-TR		Tape and Reel
Product label		
		

Application

- Automotive: 48 V and high-voltage battery packs
- Backup energy storage systems and UPS
- E-bikes, e-scooters
- Portable and semi-portable equipment

Description


The L9963E is a Li-ion battery monitoring and protecting chip for high-reliability automotive applications and energy storage systems. Up to 14 stacked battery cells can be monitored to meet the requirements of 48 V and higher voltage systems.

Each cell voltage is measured with high accuracy, as well as the current for the on-chip coulomb counting. The device can monitor up to 7 NTCs. The information is transmitted through SPI communication or isolated interface.

Automotive general purpose SPI to isolated SPI transceiver



Features

- AEC-Q100 qualified 
- Full ISO26262 compliant, ASIL-D systems ready
- Compatible with both 3.3 V and 5 V logics
- Supports both XFMR and Capacitive isolation
- 10 MHz SPI peripheral for SPI Slave operation. Configurable SPI frequency (250 kHz to 8 MHz) for SPI Master operation
- 333 kbps and 2.66 Mbps Vertical InterFace (VIF) for isolated SPI communication
- Low standby current

Application

- Automotive: 48 V and high-voltage systems
- Backup energy storage systems and UPS
- Industrial communication networks
- Portable and semi-portable equipment
- Remote sensors

Description

L9963T is a general purpose SPI to isolated SPI transceiver intended to create a communication bridge between devices located into different voltage domains.

L9963T is able to transfer communication data incoming from a classical 4-wire based SPI interface to a 2-wire isolated interface (and viceversa).

The transceiver supports both transformer and capacitive isolation, since the isolated signal generated according to a proprietary protocol is suitable to be transmitted over both decoupling circuitries.

The device can be configured either as Slave or as Master of the SPI bus and supports any protocol made of SPI frames 8 to 64 bit long. The transceiver manages the transfer of the information without performing any protocol check.

SPI peripheral can work up to 10 MHz when configured as Slave. SPI clock frequency can be programmed among (250 kHz; 1 MHz; 4 MHz; 8 MHz) when configured as Master.


Isolated SPI peripheral features two different operating modes: slow @333 kbps and fast @2.66 Mbps.

The asynchronicity between the two sides is internally managed, allowing all possible configuration frequencies on both peripherals to be used in application.

L9963T features an internal queue of 3 slots for the frames received on the SPI port and a queue of 20 slots for the ones received on the isolated SPI side. This allows buffering and decoupling the two different clock domains.

The device is natively compatible with L9963 Isolated SPI, allowing its usage in the BMS applications.

L9963T is compatible with both 3.3 V and 5 V logics.

Product status link		
L9963T		
Product summary		
Order code	Package	Packing
L9963T	SO16N	Tube
L9963T-TR		Tape&Reel
Product label		
		

Low-voltage, ultralow-power, 0.5 °C accuracy I²C/SMBus 3.0 temperature sensor

 UDFN-6L
2.0 x 2.0 x 0.5 mm

Features

Key features

- Integrated high-accuracy temperature sensor
- Factory calibrated
- NIST traceability
- One-shot mode for power saving

Electrical specifications

- Supply voltage: 1.5 to 3.6 V
- I²C, SMBus 3.0 with ALERT (ARA) support
- Programmable thresholds with interrupt pin
- Supports up to 1 MHz serial clock
- Up to 4 I²C/SMBus slave addresses
- Ultralow current: 1.75 µA in one-shot mode

Sensing specifications

- Operating temperature -40 °C to +125 °C
- Temperature accuracy (max.):
± 0.5 °C (-10 °C to +60 °C)
- 16-bit temperature data output

Package specifications

- UDFN 2.0 x 2.0 x 0.50 mm, 6 leads with exposed pad down
- ECOPACK and RoHS compliant

Applications

- Wearable devices
- Smart home automation
- Asset and goods tracking
- Smartphones
- HVAC
- Refrigerators
- Air humidifiers
- Portable consumer devices
- White goods
- Thermostats

Product status link	
STTS22H	
Product summary	
Order code	STTS22HTR
Temp. range [°C]	-40 to +125
Package	UDFN-6L
Packing	Tape and reel
Product labels	
 	

Description

The AMS1117S is a series of low dropout voltage regulators which can provide up to 1A of output current. The AMS1117S is available in six fixed voltage, 1.2, 1.5, 1.8, 2.5, 3.3 and 5.0V. Additionally it is also available in adjustable version. On chip precision trimming adjusts the reference/ output voltage to within $\pm 2\%$. On-chip thermal limiting provides protection against any combination of overload and ambient temperatures that would create excessive junction temperatures.

The AMS1117S series is available in SOT-223, TO-252, SOT89 packages. A minimum of 10 μ F tantalum capacitor is required at the output to improve the transient response and stability.

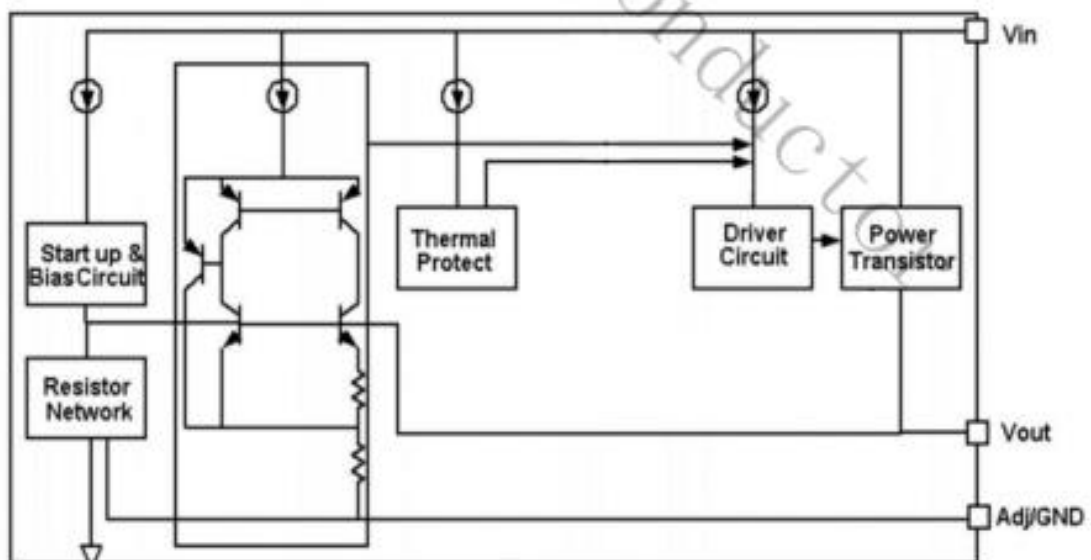
Features

- ◆ Low Dropout Voltage.
- ◆ Load regulation: 0.5% Max.
- ◆ Optimized for Low Voltage
- ◆ On-chip thermal limiting.
- ◆ Maximum Input Voltage : 30V
- ◆ Adjustable Output Voltage or Fixed 1.2V, 1.5V, 1.8V, 2.5V, 3.3V,5V
- ◆ Standard SOT-223,TO-252 ,SOT89 Packages

Applications

- ◆ Post Regulator for switching DC/DC Converter
- ◆ High Efficiency Linear Regulator
- ◆ Battery Chargers
- ◆ PC Add on Card
- ◆ Motherboard clock supplies
- ◆ LCD Monitor r
- ◆ Set-top Box

Block Diagram



Very low capacitance ESD protection

Features

- 2 data-line protection
- Protects V_{BUS}
- Very low capacitance: 3.5 pF max.
- Very low leakage current: 150 nA max.
- SOT-666 and SOT23-6L packages
- RoHS compliant

Benefits

- Very low capacitance between lines to GND for optimized data integrity and speed
- Low PCB space consumption: 2.9 mm² max for SOT-666 and 9 mm² max for SOT23-6L
- Enhanced ESD protection: IEC 61000-4-2 level 4 compliance guaranteed at device level, hence greater immunity at system level
- ESD protection of V_{BUS}
- High reliability offered by monolithic integration
- Low leakage current for longer operation of battery powered devices
- Fast response time
- Consistent D+ / D- signal balance:
 - Very low capacitance matching tolerance
 - I/O to GND = 0.015 pF
 - Compliant with USB 2.0 requirements

Complies with the following standards:

- IEC 61000-4-2 level 4:
 - 15 kV (air discharge)
 - 8 kV (contact discharge)

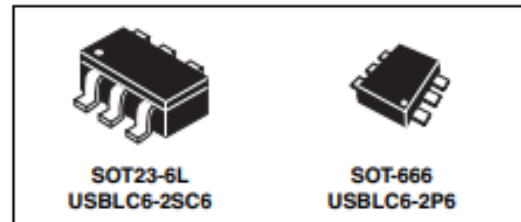
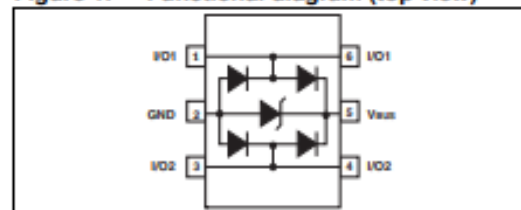


Figure 1. Functional diagram (top view)



Applications

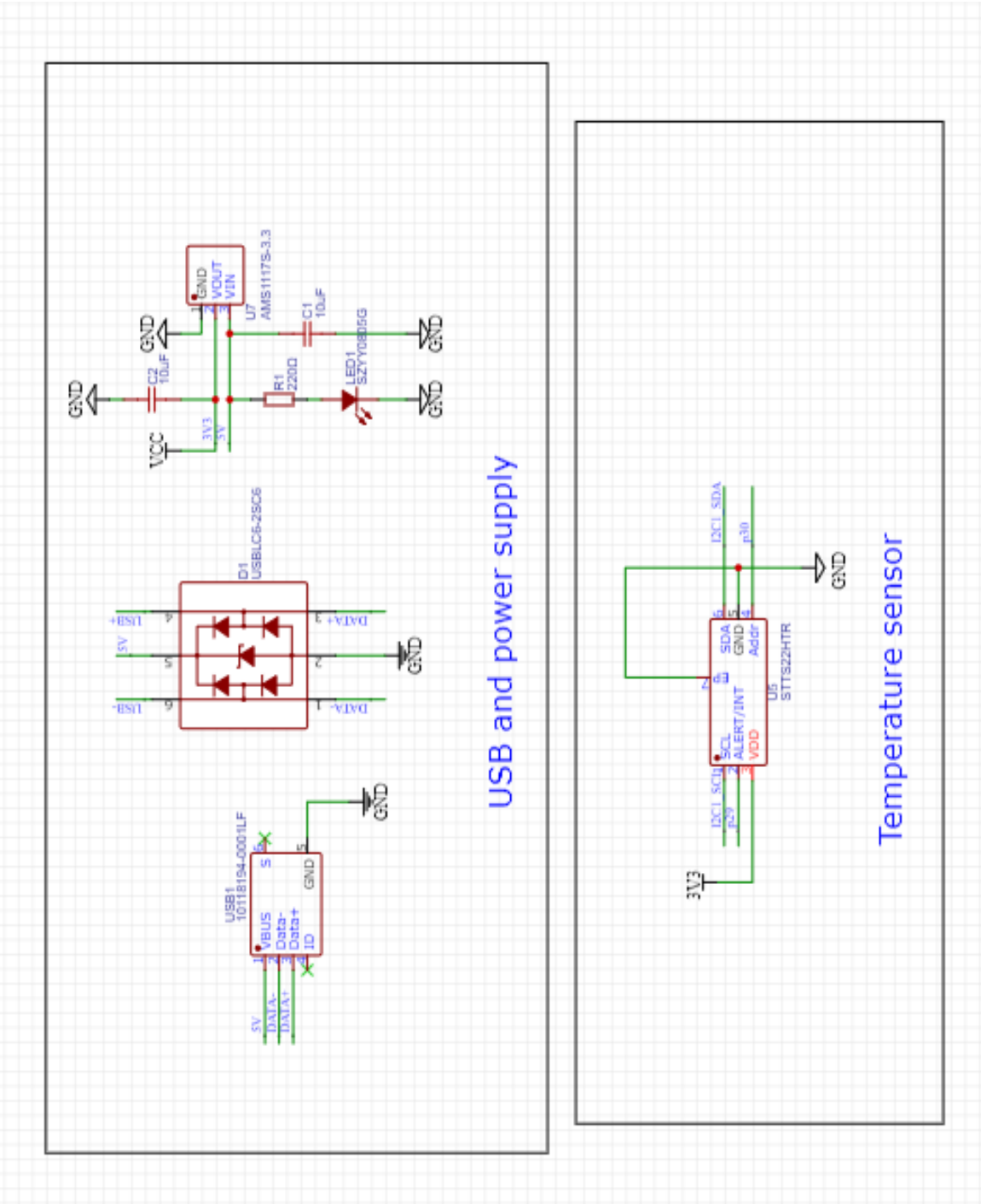
- USB 2.0 ports up to 480 Mb/s (high speed)
- Compatible with USB 1.1 low and full speed
- Ethernet port: 10/100 Mb/s
- SIM card protection
- Video line protection
- Portable electronics

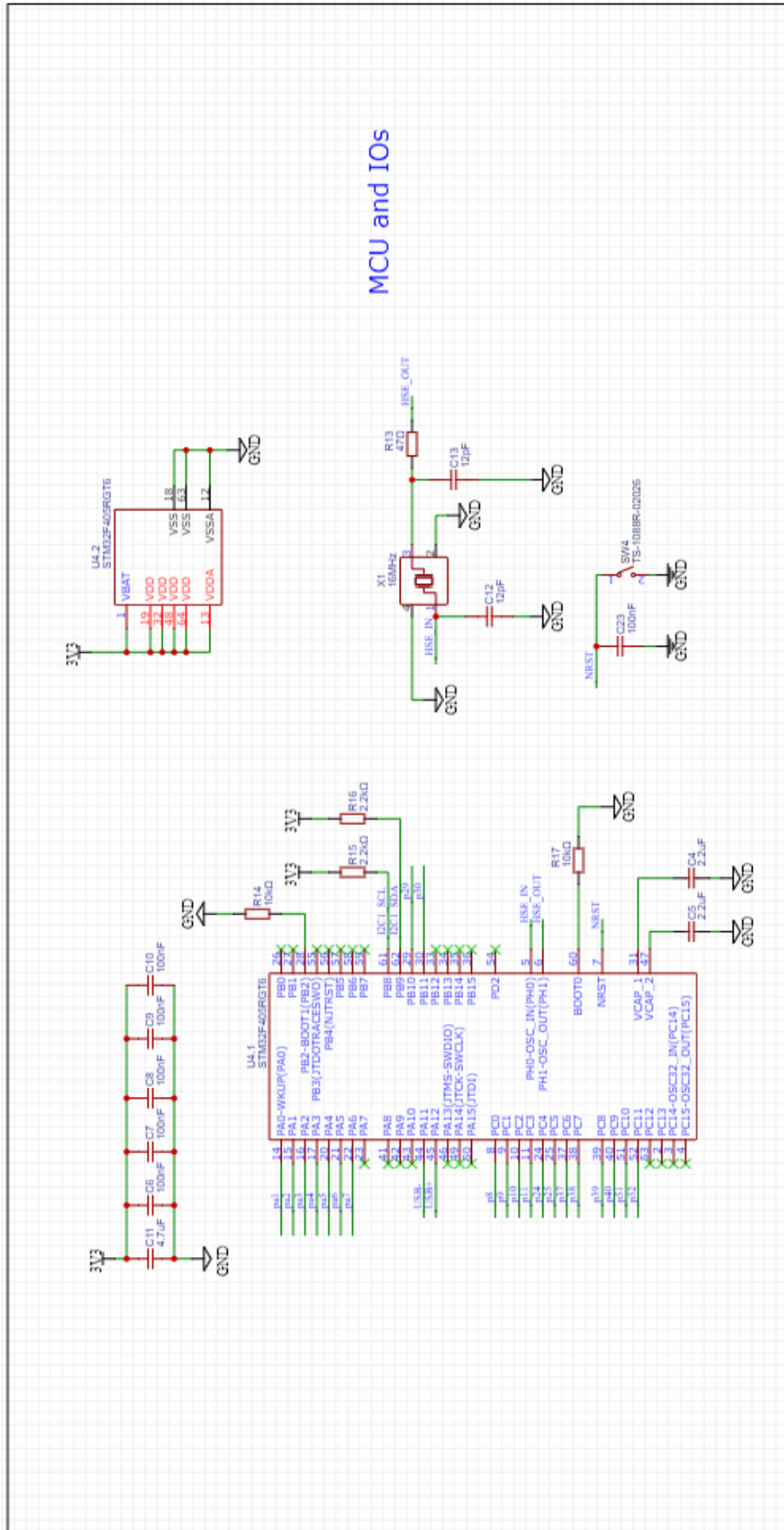
Description

The USBLC6-2SC6 and USBLC6-2P6 are monolithic application specific devices dedicated to ESD protection of high speed interfaces, such as USB 2.0, Ethernet links and video lines.

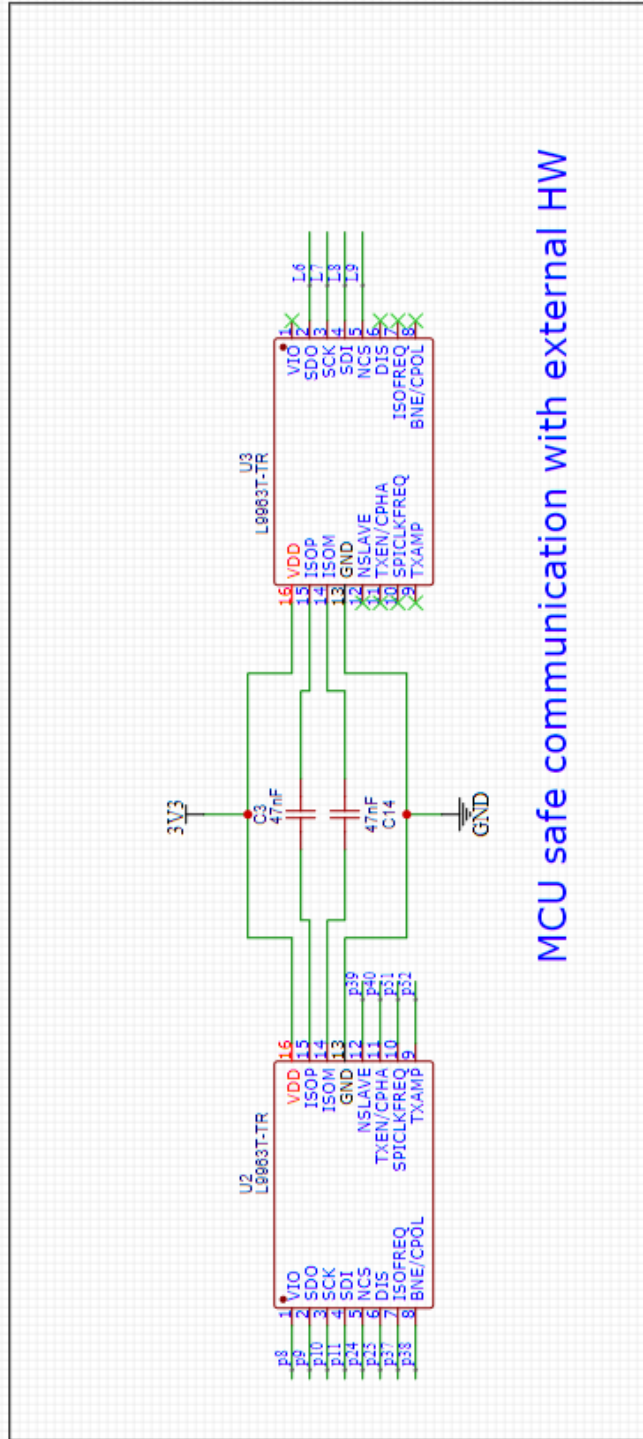
The very low line capacitance secures a high level of signal integrity without compromising in protecting sensitive chips against the most stringently characterized ESD strikes.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Σχηματικά διαγράμματα και Layout

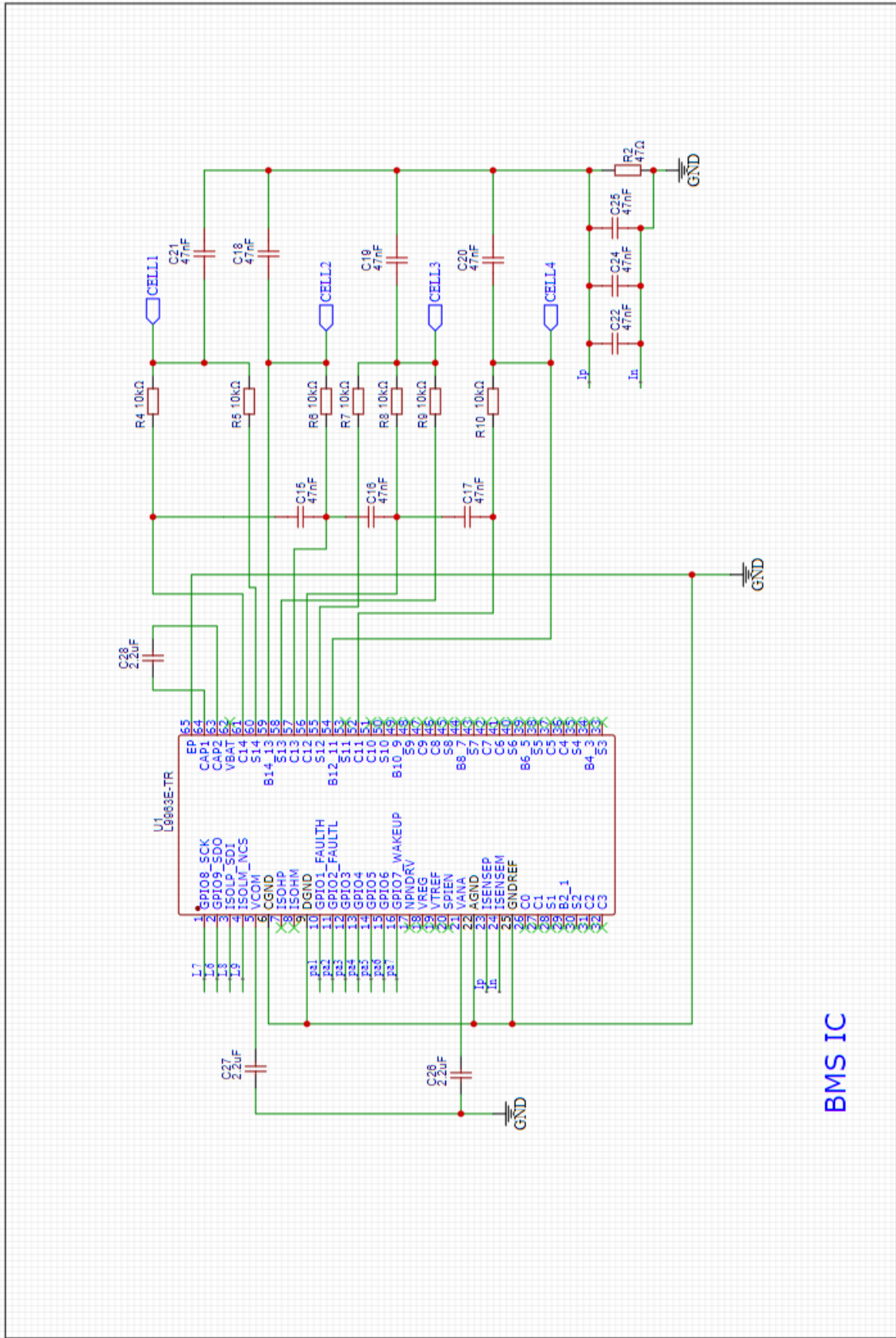




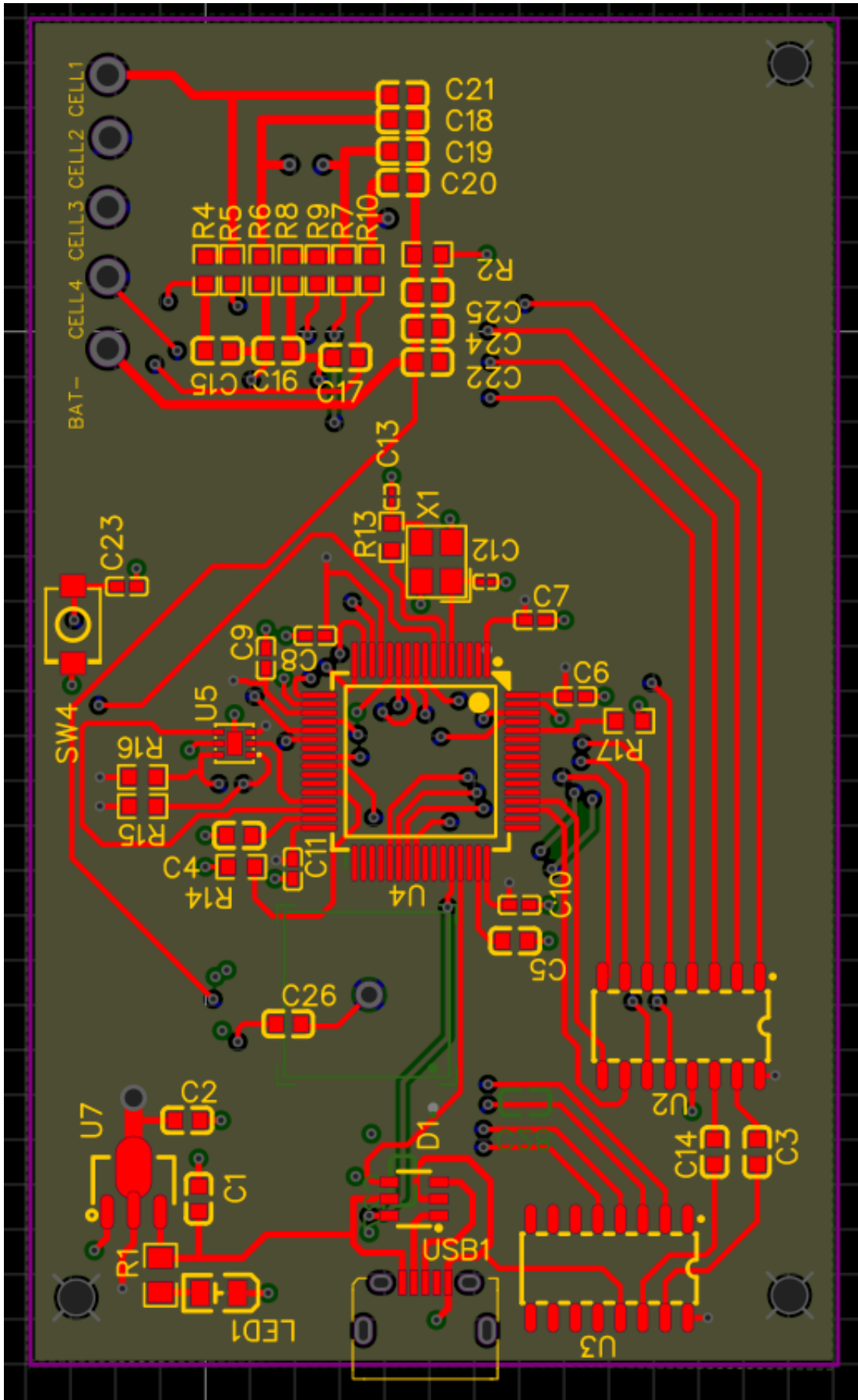
MCU and I/Os

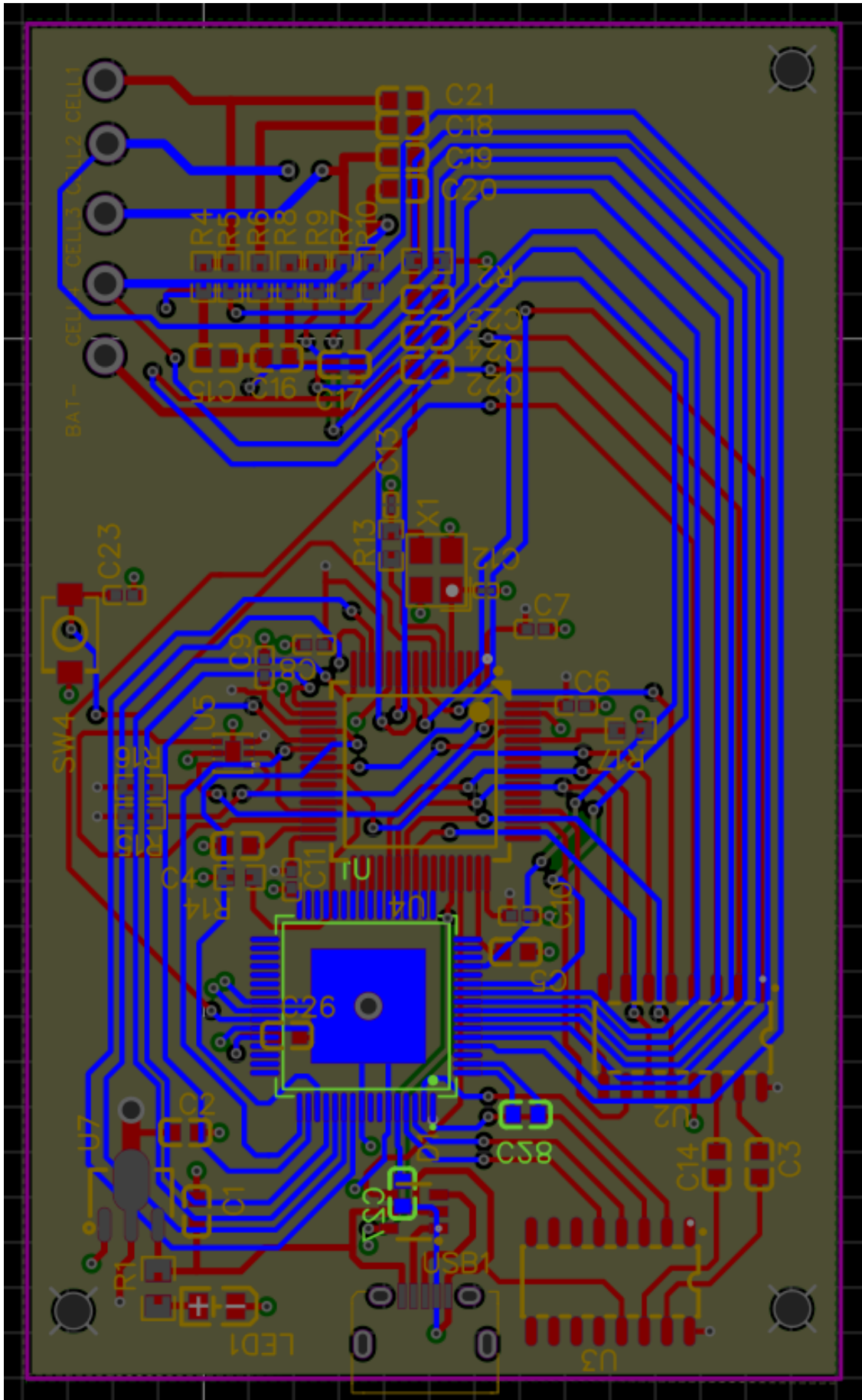


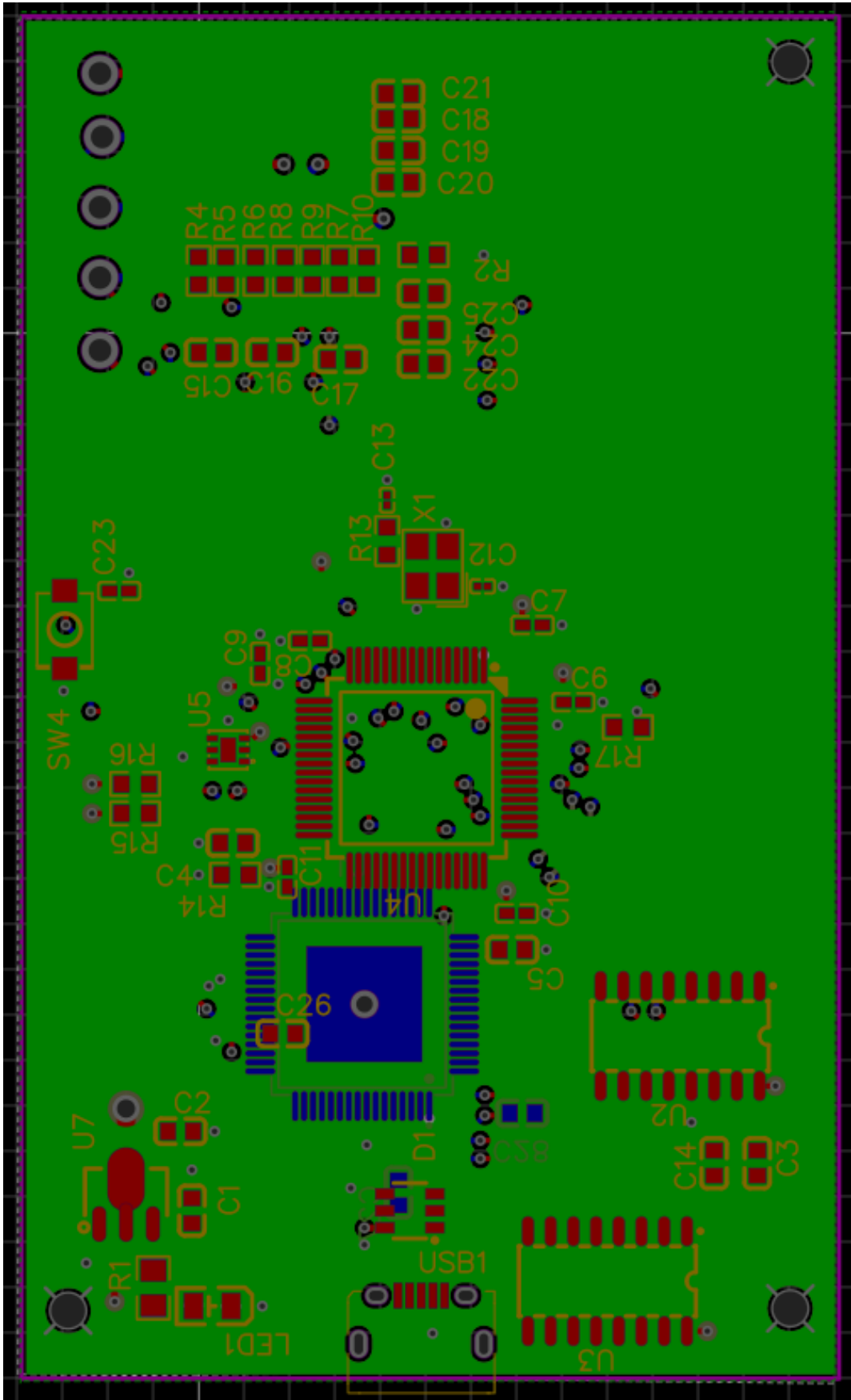
MCU safe communication with external HW

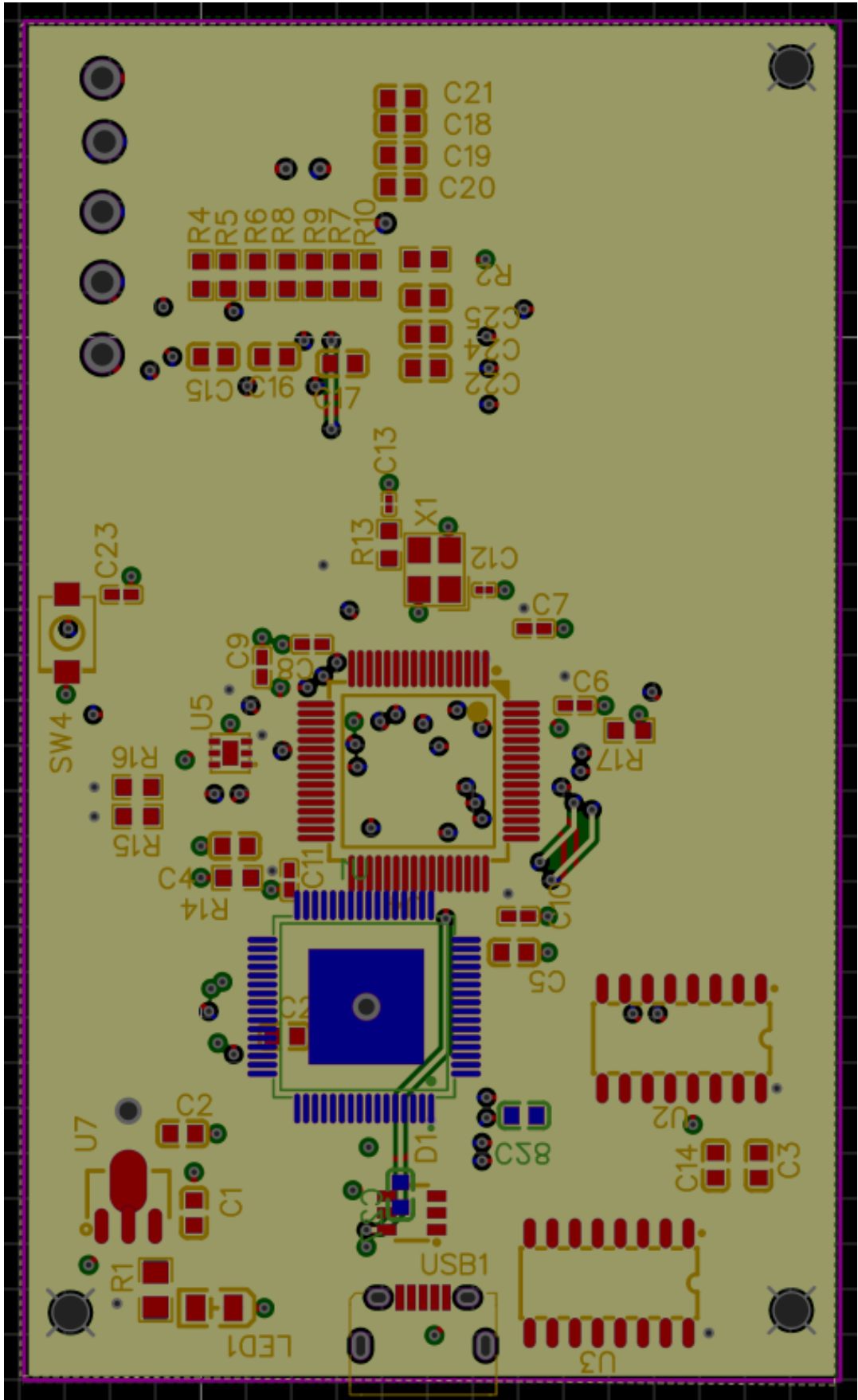


BMS IC









ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C : Πίνακας κοστολόγησης υλικών

ID	Name	Designator	Footprint	Quantity	Manufacturer	Manufacturer	Supplier	Supplier Part Number	Supplier Price
1	2.2uF	C26,C4,C5	C0603	5	CL10A225F	SAMSUNG	LCSC	C1607	0.005
2	L9963T-TR U3,U2	SO-16_L9		2	L9963T-TR ST	(意法半)	LCSC	C3682043	7.384
3	10uF	C1,C2	C0603	2	CL10A106F	SAMSUNG	LCSC	C85713	0.005
4	47nF	C3,C14,C1	C0603	12	AC0603KR	YAGEO(国)	LCSC	C469624	0.011
5	100nF	C6,C7,C8,C	C0402	6	CC0402KR	YAGEO	LCSC	C129131	0.001
6	4.7uF	C11	C0402	1	CL05A475F	Samsung	LCSC	C368809	0.006
7	12pF	C12,C13	C0201	2	GRM0335C	Murata Elc	LCSC	C161372	0.003
8	USBL6-25D1		SOT-23-6	1	USBL6-25	STMicroel	LCSC	C7519	0.102
9	SZYY0805CLED1		LED0805-R	1	SZYY0805C	Yongyu Pt	LCSC	C434432	0.012
10	220Ω	R1	R0805	1	0805W8F2	UniOhm	LCSC	C17557	0.002
11	47Ω	R2,R13	R0603	2	0603WAJ0	UniOhm	LCSC	C1211	0.001
12	10kΩ	R4,R5,R6,F	R0603	9	0603WAF1	UniOhm	LCSC	C25804	0.001
13	2.2kΩ	R15,R16	R0603	2	0603WAF2	UniOhm	LCSC	C4190	0.001
14	TS-1088R- SW4		SW-SMD	1	TS-1088R-	XUNPU	LCSC	C455280	0.046
15	STTS22HTF U5		DFN-6_L2	1	STTS22HTF	ST(意法半)	LCSC	C2969838	2.015
16	AMS1117S U7		SOT-89-3	1	AMS1117S	JSMSEMI	LCSC	C917152	0.097
17	10118194- USB1		MICRO-USB	1	10118194-	Ampheno	LCSC	C132563	0.184
18	16MHz X1		CRYSTAL-S	1	X322516M	YXC	LCSC	C12668	0.055
19	STM32F40 U4		LQFP-64_L	1	STM32F40	ST	LCSC	C15742	3.141
20	L9963E-TR U1		TQFP-64_L	1	L9963E-TR	ST(意法半)	LCSC	C3682039	17.06