



ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σχεδίαση και υλοποίηση εκκινητή οχημάτων με  
υπερπυκνωτές»



Των φοιτητών : Ζιώγα Βασιλείου  
και Σμαραγδά Χρήστου  
Αρ. Μητρώου: 516032 / 516120

Επιβλέπων  
Ονοματεπώνυμο  
Κιοσκερίδης Ν. Ιορδάνης  
Βαθμίδα Καθηγητής

Ημερομηνία 10/9/2023

Τίτλος Δ.Ε. Σχεδίαση και υλοποίηση εκκινήτη οχημάτων με υπερπυκνωτές

Κωδικός Δ.Ε. 21303

Όνοματεπώνυμο φοιτητών Ζιώγας Βασίλειος, Σμαραγδάς Χρήστος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Κιοσκερίδης Ν. Ιορδάνης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 5/10/2021

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 10/9/2023

*Βεβαιώνουμε ότι είμαστε οι συγγραφείς αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχουμε καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες κάναμε χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνουμε ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμάς προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία των φοιτητών Ζιώγα Βασιλείου και Σμαραγδά Χρήστου που την εκπόνησαν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, οι συγγραφείς/δημιουργοί εκχωρούν 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 των συγγραφέων/δημιουργών, 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 των συγγραφέων/δημιουργών.*

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 των συγγραφέων, εκ μέρους του Τμήματος.

## Πρόλογος

Το πάθος μας για τα ηλεκτρονικά, σε συνδυασμό με την αγάπη μας για τον τομέα του αυτοκινήτου, μας οδήγησε στην επιλογή του συγκεκριμένου θέματος για τη διπλωματική μας εργασία. Το ενδιαφέρον μας για τον τρόπο λειτουργίας των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων του αυτοκινήτου, καθώς και η επιθυμία της βελτίωσής τους, αποτέλεσαν μια πρόκληση, την οποία καλούμαστε να «αντιμετωπίσουμε» με την τέλεση της παρούσας διπλωματικής. Με την τεχνολογία των οχημάτων να εξελίσσεται διαρκώς, θελήσαμε να βάλουμε και εμείς το «λιθαράκι» μας στην όλη διαδικασία. Η πειραματική μας διάταξη υβριδικής μπαταρίας αποτελεί την προσπάθειά μας να αναδείξουμε την υπεροχή τέτοιων συστημάτων στον τομέα της αυτοκίνησης. Μέσα από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, αποκτήσαμε επιπλέον γνώσεις, ενώ παράλληλα εισαχθήκαμε στον κόσμο της ερευνητικής μελέτης.

## Περίληψη

Η παρούσα μελέτη αναλύει εκτενώς την αντικατάσταση της μπαταρίας ενός οχήματος (αυτοκινήτου) με ένα υβριδικό υποκατάστατο, που αξιοποιεί τους υπερπυκνωτές. Η τεχνολογική εξέλιξη των υπερπυκνωτών τα τελευταία χρόνια, τους καθιστά πλέον ισχυρό σύμμαχο στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, μελετάται εκτενώς και κατασκευάζεται ένα σύστημα υβριδικής μπαταρίας, το οποίο στον πυρήνα του συνδυάζει μια μπαταρία μολύβδου-οξέος μικρής χωρητικότητας με μια συστοιχία υπερπυκνωτών. Στόχος, είναι η αντικατάσταση της συμβατικής μπαταρίας του αυτοκινήτου με την υβριδική, με σκοπό την επίτευξη ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με αυξημένο χρόνο ζωής, αξιοπιστία και μειωμένο κόστος συντήρησης.

Καθώς η υβριδική μπαταρία αποτελεί τμήμα του αυτοκινήτου, τροφοδοτεί τις εκκινήσεις και τις διάφορες καταναλώσεις, όταν δε λειτουργεί ο κινητήρας και φορτίζεται όταν αυτός λειτουργεί. Προτού, λοιπόν, προβούμε σε ανάλυση της συσκευής μας, στο πρώτο κεφάλαιο παραθέτουμε γενικές πληροφορίες για τα δύο σημαντικότερα τμήματα του αυτοκινήτου, με τα οποία συνεργάζεται η συσκευή μας: τη μίζα για την εκκίνηση και τον εναλλάκτη για τη φόρτιση. Στα επόμενα 2 κεφάλαια, γίνεται συνοπτική αναφορά στις μπαταρίες μολύβδου-οξέος και στους πυκνωτές, καταλήγοντας στην τεχνολογία των υπερπυκνωτών. Στη συνέχεια, αναλύουμε το θεωρητικό υπόβαθρο της συσκευής με τους απαραίτητους υπολογισμούς. Έπειτα, γίνεται εκτενής ανάλυση των κυκλωμάτων που υλοποιήθηκαν, καθώς επίσης και της μηχανικής κατασκευής. Τέλος, καταγράφονται τα αποτελέσματα των δοκιμών και εξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα.

# «Design and implementation of vehicle starter using supercapacitors»

«Ziogas Vasileios, Smaragdas Christos»

## **Abstract**

The current study analyzes in depth the replacement of a vehicle (car) battery with a hybrid substitute, which utilizes supercapacitors. Supercapacitor technology advancement through the recent years makes them a powerful ally in the energy storage sector. In this particular thesis, a hybrid battery system is deeply studied and constructed, which combines a low capacity lead-acid battery with a supercapacitor stack in its core. The target to be achieved is the replacement of the conventional car battery with the hybrid one, aiming to the implementation of an energy storage system with increased time life, reliability and decreased maintenance costs. Due to the hybrid battery being part of the car, it supplies the starting power and all the electric consumptions, while the engine is shut off and it charges while the engine is running. Prior to getting in our device analysis, in the first chapter we appose generic information about the two most significant car parts out device cooperates with: the starter motor for starting the engine and the alternator for charging. In the next two chapters, a synoptic review about lead-acid batteries and capacitors is being made, concluding with the supercapacitor technology. Moving on, we analyze the theoretical background of the device including the necessary calculations. Afterwards, an extensive analysis of the implemented circuits and the structural part is being made. Closing, the results of the tests are registered and the according conclusions are exported.

## **Ευχαριστίες**

Θέλουμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς μας ευχαριστίες προς όλους τους καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε. Χάρη σε αυτούς και τις πολύτιμες γνώσεις που μας προσέφεραν, καταφέραμε να ολοκληρώσουμε τη διπλωματική μας εργασία με επιτυχία. Επιπλέον, θέλουμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερος τον κύριο Ιορδάνη Κιοσκερίδη, ο οποίος υπήρξε επιβλέπων της διπλωματικής μας και μας καθοδήγησε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
Ευχαριστίες .....	vi
Περιεχόμενα .....	vii
Κατάλογος Εικόνων .....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Μίζα και εναλλάκτης .....	1
1.1 Μίζα.....	1
1.1.1 Γενικά .....	1
1.1.2 Τρόπος λειτουργίας .....	1
1.2 Εναλλάκτης .....	3
1.2.1 Γενικά.....	3
1.2.2 Αρχή λειτουργίας .....	3
1.2.3 Ανόρθωση και σταθεροποίηση τάσης.....	5
Κεφάλαιο 2ο: Μπαταρίες μολύβδου-οξέος.....	7
2.1 Δομή και λειτουργία.....	7
2.1.1 Δομή .....	8
2.1.2 Αρχή λειτουργίας .....	8
2.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη.....	9
2.2.1 Χωρητικότητα .....	9
2.2.2 Τάση .....	9
2.2.3 Εσωτερική αντίσταση.....	10
2.2.4 Ρυθμός εκφόρτισης.....	10
2.2.5 Ρεύμα βραχυκύκλωσης.....	10
2.2.6 Ρεύμα κρίας εκκίνησης.....	10
2.3 Τύποι μπαταριών μολύβδου-οξέος.....	10
2.3.1 Ανοιχτού τύπου .....	10
2.3.2 SLA ή VRLA .....	11
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Πυκνωτές .....	12
3.1 Ορισμός .....	12
3.2 Χαρακτηριστικά του πυκνωτή .....	12

3.2.1	Χωρητικότητα .....	12
3.2.2	Ονομαστική τάση .....	13
3.2.3	Ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR) .....	13
3.2.4	Αντίσταση διαρροής.....	13
3.2.5	Χωρητική αντίδραση.....	14
3.3	Τύποι πυκνωτών .....	14
3.3.1	Κεραμικοί πυκνωτές.....	15
3.3.2	Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές αλουμινίου.....	15
3.3.3	Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές τανταλίου.....	15
3.3.4	Πυκνωτές πλαστικής μεμβράνης.....	15
3.4	Εφαρμογές των πυκνωτών στα ηλεκτρονικά κυκλώματα.....	15
3.4.1	Συστήματα UPS.....	15
3.4.2	Κλιματισμός ισχύος και σταθερότητα τάσης .....	15
3.4.3	Φιλτράρισμα για σαφήνεια σήματος.....	16
3.4.4	Αποσύνδεση και ακεραιότητα σήματος .....	16
3.4.5	Λειτουργίες επεξεργασίας σήματος .....	16
3.4.6	Εξοπλισμός ήχου και φιλτράρισμα θορύβου.....	16
3.5	Υπερπυκνωτές.....	16
3.5.1	Γενικά.....	16
3.5.2	Δομή και αρχή λειτουργίας .....	17
3.5.3	Πλεονεκτήματα .....	18
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> : Περιγραφή λειτουργίας συσκευής .....		20
4.1	Εισαγωγή.....	20
4.2	Περιγραφή λειτουργίας του συστήματος .....	22
4.3	Επιλογή υπερπυκνωτών .....	24
4.3.1	Μέγεθος.....	25
4.3.2	Ονομαστική χωρητικότητα.....	25
4.3.3	Ονομαστική τάση .....	26
4.3.4	Υπερπυκνωτής CDCL3000C0-0002R7STZ .....	27
4.3.5	Υπολογισμοί συστοιχίας .....	29
4.4	Συμβατική μπαταρία 12 Volt οξέος μολύβδου.....	31
4.4.1	Χωρητικότητα .....	31
4.4.2	Μέγεθος.....	33
4.4.3	Κόστος.....	34
4.5	Ρελέ απομόνωσης.....	36

4.5.1	Ρελέ συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	36
4.5.2	Ρελέ μπαταρίας.....	37
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> : Πλακέτες.....		38
5.1	Πλακέτα κεντρικού ελέγχου.....	38
5.1.1	Μικροελεγκτής Arduino Mega.....	38
5.1.2	Υποκύκλωμα τροφοδοσίας.....	39
5.1.3	Υποκύκλωμα ισχύος.....	41
5.1.3.1	Ρελέ μπαταρίας.....	41
5.1.3.2	Ρελέ συστοιχίας υπερπυκνωτών.....	41
5.1.3.3	Υποβιβασμός τάσης κλειδοδιακόπτη.....	42
5.1.3.4	Μικρό ρελέ εκκινήτρια (μίζας).....	42
5.1.3.5	Παρακαμπτήρια οδός συστοιχίας.....	42
5.1.4	Υποκύκλωμα συμπληρωματικών εξαρτημάτων.....	44
5.1.5	PCB.....	45
5.2	Πλακέτα μέτρησης τάσεων.....	47
5.2.1	Υποκύκλωμα απομόνωσης.....	48
5.2.2	Υποκύκλωμα τροφοδοσίας.....	50
5.2.3	Υποκύκλωμα μέτρησης.....	51
5.2.3	PCB.....	57
5.3	Πλακέτα φόρτισης.....	58
5.3.1	Ιδιαιτερότητες φόρτισης υπερπυκνωτών.....	58
5.3.2	Διατάξεις φόρτισης.....	59
5.3.3	Διάταξη προς υλοποίηση.....	62
5.3.3.1	Αρχή λειτουργίας.....	62
5.3.3.2	Ταλαντωτής εκθετικής κυματομορφής.....	63
5.3.4	Υποκυκλώματα.....	65
5.3.4.1	Υποκύκλωμα σταθεροποίησης τροφοδοσίας.....	65
5.3.4.2	Υποκύκλωμα απομόνωσης.....	66
5.3.4.3	Υποκύκλωμα παραγωγής σήματος ελέγχου.....	67
5.3.4.4	Υποκύκλωμα εκθετικού ταλαντωτή, παραγωγής PWM και οδήγησης mosfet.....	68
5.3.4.5	Υποκύκλωμα υποβιβαστή τάσης.....	71
5.3.4.6	Υποκύκλωμα μέτρησης ρεύματος.....	72
5.3.5	PCB.....	74
5.4	Πλακέτα προστασίας και εξισορρόπησης.....	76
5.4.1	Αρχή λειτουργίας και επιλογή εξαρτημάτων.....	76

5.4.2	Σχηματικά και επεξήγηση .....	80
5.5	Πλακέτα οθόνης .....	88
5.5.1	Τύποι οθόνης .....	88
5.5.2	Οθόνη lcd tft HR0117 .....	89
5.5.3	Ανάλυση κυκλώματος lcd οθόνης.....	90
5.5.4	PCB .....	91
Κεφάλαιο 6° : Κατασκευή .....		94
Κεφάλαιο 7° : Μετρήσεις και αποτελέσματα .....		103
7.1	Δοκιμές συστοιχίας .....	103
7.2	Δοκιμές κυκλωμάτων .....	104
7.3	Κυματομορφές τάσης συστήματος κατά την εκκίνηση.....	106
Κεφάλαιο 8° : Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης .....		110
8.1	Συμπεράσματα.....	110
8.2	Προτάσεις βελτίωσης .....	111
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ ARDUINO .....		114

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 : Δομή μίζας.....	1
Εικόνα 1.2 : Δομή εναλλάκτη .....	4
Εικόνα 1.3 : Ηλεκτρικό εσωτερικό κύκλωμα εναλλάκτη .....	5
Εικόνα 2.1 : Μπαταρία μολύβδου-οξέος 12 Volt.....	7
Εικόνα 2.2 : Εσωτερική δομή μπαταρίας μολύβδου-οξέως .....	7
Εικόνα 2.3 : Διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης.....	8
Εικόνα 3.1 : Δομή πυκνωτή .....	12
Εικόνα 3.2 : Τύποι πυκνωτών .....	14
Εικόνα 3.3: Κατηγορίες υπερπυκνωτών.....	17
Εικόνα 3.4 : Εσωτερική δομή υπερπυκνωτή EDLC .....	18
Εικόνα 3.5: Υπερπυκνωτής EDLC 3000 F 3 Volt .....	19
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα λειτουργίας συσκευής.....	21
Εικόνα 4.2: Μπαταρία 12 Volt 63 Ah του αυτοκινήτου .....	25
Εικόνα 4.3 : Υπερπυκνωτής CDCL3000C0-0002R7STZ της SPSCAP .....	27
Εικόνα 4.4 : Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών.....	28
Εικόνα 4.5: Μπαταρία SPA 12V - 12Ah της SUNLIGHT .....	34
Εικόνα 4.6 : Τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταρίας SPA 12V - 12Ah της SUNLIGHT.....	35
Εικόνα 4.7 : Ρελέ DCNLM200NB12 για την απομόνωση των πυκνωτών .....	36
Εικόνα 4.8 : Ρελέ AM3-12CF για την απομόνωση της μπαταρίας.....	37
Εικόνα 5.1 : Πλακέτα Arduino Mega 2560.....	39
Εικόνα 5.2 : Υποκύκλωμα σταθεροποίησης τάσης τροφοδοσίας arduino .....	40
Εικόνα 5.3: Σχηματικό υποκυκλώματος ισχύος.....	43
Εικόνα 5.4 : Συμπληρωματικά εξαρτήματα πλακέτας .....	45
Εικόνα 5.5 : Άνω όψη βοηθητικής πλακέτας Arduino Mega.....	46
Εικόνα 5.6 : Κάτω όψη πλακέτας Arduino Mega .....	46
Εικόνα 5.7 : Τελική μορφή πλακέτας με το arduino και τις καλωδιώσεις.....	47
Εικόνα 5.8: Διάγραμμα ροής πλακέτας μετρήσεων .....	48
Εικόνα 5.10 : Σχηματικό διάταξης απομόνωσης τάσεων της πλακέτας μετρήσεων .....	49
Εικόνα 5.11 : Σχηματικό υποκυκλώματος σταθεροποίησης τάσης πλακέτας μετρήσεων .....	50
Εικόνα 5.12 : Σχηματικό υποκυκλώματος μετρήσεων.....	52
Εικόνα 5.13 : Βασική μορφή ενισχυτή διαφοράς.....	53
Εικόνα 5.14 : Απόσπασμα από το φυλλάδιο τεχνικών προδιαγραφών του TLC274 .....	56
Εικόνα 5.15 : Διάγραμμα Τάσης τροφοδοσίας – Μέγιστης τάσης εισόδου TLC274 .....	56
Εικόνα 5.16 : Κάτω όψη πλακέτας μετρήσεων.....	57
Εικόνα 5.17: Άνω όψη πλακέτας μετρήσεων.....	57
Εικόνα 5.18 : Γραμμικός ρυθμιστής τάσης LM7805 σε διάταξη πηγής ρεύματος. ....	59
Εικόνα 5.19 : Βασική μορφή διακοπτικού υποβιβαστή τάσης.....	60
Εικόνα 5.20 : Παραγωγή PWM σήματος.....	62
Εικόνα 5.21 : Βοηθητικό σχήμα υπολογισμού Duty Cycle .....	64
Εικόνα 5.22 : Υποκύκλωμα σταθεροποίησης τροφοδοσίας πλακέτας φόρτισης.....	65
Εικόνα 5.23 : Υποκύκλωμα απομόνωσης τάσεων πλακέτας φόρτισης.....	66
Εικόνα 5.24 : Διάταξη παραγωγής τάσης ελέγχου υποκυκλώματος PWM .....	67
Εικόνα 5.25 : Υποκύκλωμα ταλαντωτή, PWM και οδήγησης mosfet.....	69

Εικόνα 5.26 : Διάταξη υποβιβαστή τάσης.....	71
Εικόνα 5.27 : Υποκύκλωμα μέτρησης ρεύματος πλακέτας φόρτισης.....	73
Εικόνα 5.28 : Άνω όψη πλακετών κυκλώματος φόρτισης.....	74
Εικόνα 5.29 : Κάτω όψη πλακετών κυκλώματος φόρτισης.....	75
Εικόνα 5.30: Τμήμα από το φυλλάδιο προδιαγραφών των υπερπυκνωτών.....	77
Εικόνα 5.31: Διάγραμμα ροής πλακέτας προστασίας και εξισορρόπησης.....	79
Εικόνα 5.32 : 1 <sup>ο</sup> σχηματικό πλακέτας προστασίας και εξισορρόπησης.....	80
Εικόνα 5.33 : 2 <sup>ο</sup> σχηματικό πλακέτας προστασίας και εξισορρόπησης.....	81
Εικόνα 5.34 : Άνω όψη ενιαίας πλακέτας προστασίας και εξισορρόπησης.....	86
Εικόνα 5.35 : Κάτω όψη ενιαίας πλακέτας προστασίας και εξισορρόπησης.....	87
Εικόνα 5.36: Πλακέτα προστασίας και εξισορρόπησης με ψήκτρες.....	88
Εικόνα 5.37: Οθόνη lcd tft “HR0117”.....	89
Εικόνα 5.38 : Σχηματικό βοηθητικής πλακέτας οθόνης.....	91
Εικόνα 5.39 : Άνω όψη βοηθητικής πλακέτας οθόνης.....	92
Εικόνα 5.40 : Κάτω όψη βοηθητικής πλακέτας οθόνης.....	92
Εικόνα 5.41 : Τελική μορφή οθόνης μαζί με την βοηθητική πλακέτα και την καλωδιότητα.....	93
Εικόνα 6.1 : Συστοιχία υπερπυκνωτών με τις απαραίτητες καλωδιώσεις.....	94
Εικόνα 6.2 : Ηλεκτρολογικό κουτί τοποθετημένο εξωτερικά της κατασκευής.....	96
Εικόνα 6.3 : Άνω όψη του κουτιού πριν την τοποθέτηση των υλικών.....	96
Εικόνα 6.4 : Μπροστινή όψη της κατασκευής.....	97
Εικόνα 6.5 : Καπάκι κουτιού με την οθόνη ενδείξεων.....	98
Εικόνα 6.7 : Καλωδίωση του ρελέ συστοιχίας και των διακοπών.....	99
Εικόνα 6.6 : Άνω όψη κατασκευής με τοποθετημένα υλικά.....	99
Εικόνα 6.8 : Όψεις της τελικής κατασκευής προτού τοποθετηθεί στο αυτοκίνητο.....	100
Εικόνα 6.9 : Τελική κατασκευή τοποθετημένη στο αυτοκίνητο.....	101
Εικόνα 6.10 : Καλώδιο μεταφοράς σημάτων θέσεων κλειδοδιακόπτη και ρελέ μίζας.....	101
Εικόνα 6.11 : Στιγμιότυπα λειτουργίας της συσκευής στο αυτοκίνητο.....	102
Εικόνα 7. 1: Κυματομορφή τάσης μπαταρίας κατά την εκκίνηση με αρχή στα 12.35 Volt.....	107
Εικόνα 7.2 : Κυματομορφή τάσης εκκίνησης με συστοιχία στα 13.65 Volt.....	107
Εικόνα 7.3: Κυματομορφή τάσης εκκίνησης με συστοιχία στα 11 Volt.....	109

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1 : Πειραματικά μετρημένες χωρητικότητες υπερπυκνωτών .....	28
Πίνακας 4.2: Βασικές ηλεκτρικές καταναλώσεις αυτοκινήτου.....	32
Πίνακας 5.1: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά μικροελεγκτή AtMega2560.....	38
Πίνακας 7.1: Πτώση τάσης συστοιχίας ανά εκκίνηση .....	103
Πίνακας 7.2: Σύγκριση ενδείξεων οθόνης με τις ενδείξεις του πολύμετρο .....	104

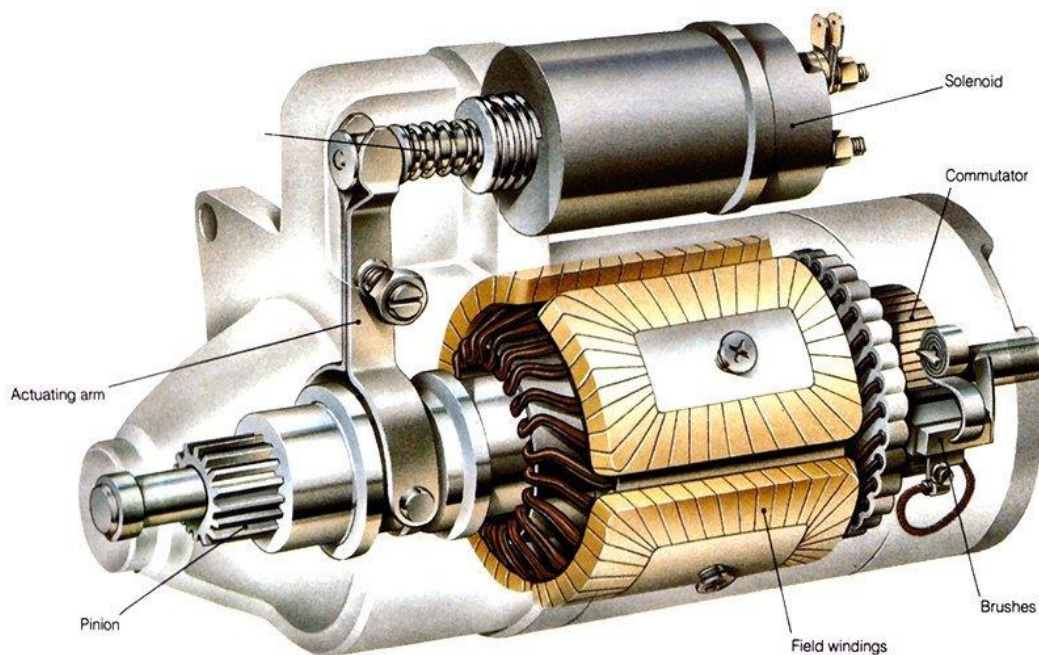
## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μίζα και εναλλάκτης

### 1.1 Μίζα

#### 1.1.1 Γενικά

Το σύστημα μίζας είναι ένα απαραίτητο εξάρτημα του κινητήρα ενός οχήματος και παίζει σημαντικό ρόλο στην έναρξη της διαδικασίας ανάφλεξης. Αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC), ο οποίος αντλεί την ενέργειά του από την μπαταρία του οχήματος, την ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, που βρίσκεται στο σώμα της μίζας, και το ρελέ, που είναι υπεύθυνο για τον έλεγχό του. Η πρωταρχική του λειτουργία, κατά την εκκίνηση του κινητήρα, είναι να προσδίδει τις απαραίτητες στροφές για να ξεπεραστούν οι δυνάμεις τριβής, η συμπίεση των κυλίνδρων αλλά και η αδράνεια, για να τεθεί σε κίνηση ο κινητήρας [9][11]. Στη συνέχεια, θα εξηγήσουμε τη βασική δομή της μίζας.

#### 1.1.2 Τρόπος λειτουργίας



Εικόνα 1.1 : Δομή μίζας

Πηγή : <https://www.allfourx4.com.au/>

Στην εικόνα 1.1, βλέπουμε τα βασικά τμήματα μιας μίζας. Στο επάνω μέρος, διακρίνουμε την ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα της μίζας (solenoid), η οποία συνήθως αποκαλείται ρελέ μίζας, μπουτόν ή «βαρελάκι». Η ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα επιτελεί διπλό έργο. Από τη μια, λειτουργεί ως το κύριο ρελέ ισχύος για τη μίζα και είναι αυτό που διαρρέεται από το ρεύμα της μίζας. Από την άλλη, δρα ως μια ισχυρή ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, που εξασφαλίζει τη σύμπλεξη της μίζας με τον κινητήρα [11][12]. Πιο συγκεκριμένα, όταν δοθεί η εντολή από τον οδηγό για εκκίνηση, το πηνίο του ρελέ μίζας τροφοδοτείται με 12 Volt από την μπαταρία του οχήματος. Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου έλκει

τον οπλισμό του ρελέ προς τους ακροδέκτες του τελευταίου. Ο οπλισμός, ο οποίος εκτείνεται έξω από το ρελέ, τραβά τον βραχίονα συμπλοκής (Actuating arm) και αυτός με τη σειρά του ωθεί προς τα έξω το πινιόν (μικρό γρανάζι) του άξονα της μίζας. Το πινιόν συμπλέκεται με, το πολύ μεγαλύτερό του, γρανάζι του κινητήρα (γρανάζι βολάν). Στη συνέχεια, ο οπλισμός του ρελέ έχει φτάσει στην τερματική του θέση, όπου και γεφυρώνει τις κύριες επαφές ισχύος, επιτρέποντας τη ροή ρεύματος από την μπαταρία προς τη μίζα για την περιστροφή της. Εν τέλει, η μίζα περιστρέφει τον κινητήρα, αφού έχει προηγηθεί η σύμπλεξη και ο κινητήρας εκκινεί [9][11].

Τη στιγμή της εκκίνησης το πινιόν της μίζας βρίσκεται ακόμα σε σύμπλεξη με το γρανάζι του βολάν. Σε αυτήν την κατάσταση, ο κινητήρας θα προκαλούσε πολύστροφη λειτουργία της μίζας, μέχρι να πραγματοποιηθεί η αποσύμπλεξη. Για το λόγο αυτό, οι περισσότερες μίζες διαθέτουν μηχανισμό μονόδρομου συμπλέκτη, που αποτρέπει κάτι τέτοιο [11][12].

Όταν δοθεί η εντολή από τον χρήστη του οχήματος για λήξη της διαδικασίας εκκίνησης, η παροχή 12 Volt στον ηλεκτρομαγνητικό διακόπτη της μίζας διακόπτεται. Ως αποτέλεσμα, ο οπλισμός του επανέρχεται στην αρχική θέση αποσυμπλέκοντας το πινιόν της μίζας από τον κινητήρα. Παράλληλα, η επαφή ισχύος ανοίγει, με αποτέλεσμα να διακοπεί η ροή ρεύματος προς τη μίζα και αυτή να σταματά να περιστρέφεται [9][11][12].

Όσον αφορά το κινητήριο τμήμα της μίζας, αυτό αποτελείται από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος 12 Volt με καρβουνάκια. Ανάλογα τον τύπο της μίζας, αλλάζει και η μέθοδος δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου διέγερσης. Σε κάθε περίπτωση, το περιστρεφόμενο μέρος της μίζας ονομάζεται ρότορας και στην ουσία είναι ένας άξονας, πάνω στον οποίο υπάρχουν τοποθετημένα τυλίγματα χαλκού σε διάφορες γωνίες και τα οποία διαδοχικά διαρρέονται από ρεύμα, μέσω μιας διάταξης, που ονομάζεται commutator. Το σταθερό τμήμα γύρω από τον ρότορα ονομάζεται στάτης. Ο στάτης είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου σταθερής κατεύθυνσης, μέσα στο οποίο θα περιστρέφεται ο ρότορας. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται είτε με μόνιμους μαγνήτες, που είναι σταθερά τοποθετημένοι, είτε με τύλιγμα (field winding), δηλαδή ηλεκτρομαγνήτη. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται τύλιγμα για το μαγνητικό πεδίο, τότε αυτό συνδέεται είτε παράλληλα με τα τυλίγματα του ρότορα, είτε σε σειρά με αυτά, ανάλογα τη μίζα. Σε όλους τους τύπους μίζας η λογική λειτουργίας είναι ίδια [11][12].

Η τάση των 12 Volt εφαρμόζεται στους ακροδέκτες της μίζας, οι οποίοι εσωτερικά συνδέονται με τα καρβουνάκια (brushes) και διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- Η μίζα χρησιμοποιεί μόνιμους μαγνήτες, οπότε τα καρβουνάκια τροφοδοτούν με 12 Volt μόνο τα τυλίγματα του ρότορα
- Η μίζα χρησιμοποιεί τυλίγματα διέγερσης (ηλεκτρομαγνήτης) παράλληλα συνδεδεμένα με τα τυλίγματα ρότορα, οπότε τα καρβουνάκια τροφοδοτούν με 12 Volt τόσο τον ρότορα όσο και τον στάτη
- Η μίζα χρησιμοποιεί τυλίγματα διέγερσης (ηλεκτρομαγνήτης), σε σειρά συνδεδεμένα με τα τυλίγματα ρότορα, οπότε τα καρβουνάκια τροφοδοτούν με 12 Volt τον σειριακό συνδυασμό των τυλιγμάτων ρότορα και στάτη.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, τα μαγνητικά πεδία του ρότορα και του στάτη αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα την άσκηση ροπής στον ρότορα και την περιστροφή του [12].

Η ισχύς που καταναλώνει ο κινητήρας μίζας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος του κινητήρα, το είδος του καυσίμου (ντίζελ, βενζίνη κ.α.), τον αριθμό των κυλίνδρων που διαθέτει,

τον κυβισμό, τον λόγο συμπίεσης και τον λόγο μείωσης μεταξύ γραναζιού μίζας και γραναζιού βολάν (10-15) [12]. Σε γενικές γραμμές, μια μίζα χρειάζεται σε μόνιμη κατάσταση περίπου 100 έως 200 αμπέρ, για να εκκινήσει έναν μέσο κινητήρα τεσσάρων κυλίνδρων. Οι κινητήρες με περισσότερους κυλίνδρους μπορεί να χρειάζονται έως και 400 αμπέρ ή και παραπάνω. Το ρεύμα αυτό διαρρέει τον ηλεκτρομαγνητικό διακόπτη μίζας, όπως αναφέραμε νωρίτερα. Η διπλή λειτουργία του, ως ρελέ ισχύος και ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, για τη σύμπλεξη-αποσύμπλεξη, επιφέρει και την ανάγκη για μεγάλη ισχύ πηνίου [11]. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο πηνία, ένα για αρχική έλξη και ένα για συγκράτηση, έτσι ώστε να μειωθεί η απαιτούμενη ισχύς [12]. Σε κάθε περίπτωση, το ρεύμα παραμένει σε μια προσεγγιστική τιμή των 30 A για ένα μέσο αυτοκίνητο [11]. Η τιμή αυτή είναι απαγορευτικά υψηλή, για να τη διαχειριστεί ο διακόπτης μίζας ή και η ECU του κινητήρα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, όλα τα σύγχρονα οχήματα διαθέτουν ένα συμβατικό ρελέ με πολύ μικρότερη ισχύ πηνίου. Το συγκεκριμένο ρελέ ενεργοποιείται λαμβάνοντας σήμα από τον διακόπτη μίζας ή από την ECU και στη συνέχεια κλείνει την επαφή του, για να τροφοδοτήσει το πηνίο του ηλεκτρομαγνητικού διακόπτη με 12 Volt και να πραγματοποιηθεί η εκκίνηση [11].

## 1.2 Εναλλάκτης

### 1.2.1 Γενικά

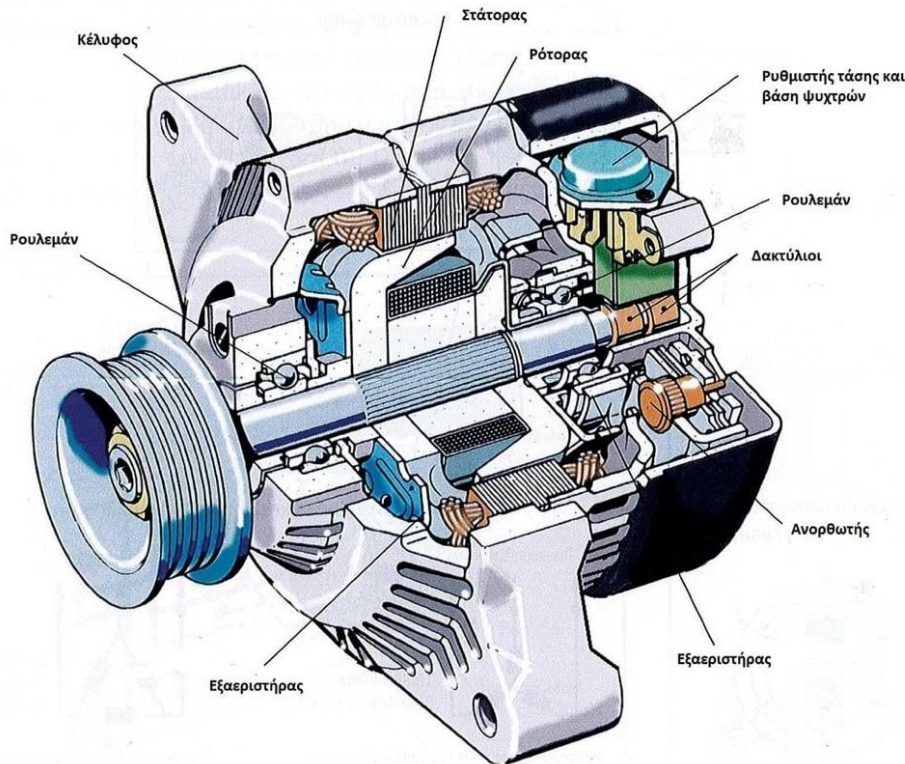
Ο εναλλάκτης είναι ένας τύπος ηλεκτρογεννήτριας που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια παρέχοντας εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Αν και συχνά αναφέρεται χάρην ευκολίας ως «δυναμό», στην πραγματικότητα διαφέρουν σε κάτι πολύ βασικό. Το δυναμό παράγει DC τάση, ενώ ο εναλλάκτης AC τάση [13]. Οι εναλλάκτες χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των εργοστασίων παραγωγής ενέργειας, των αυτοκινήτων, των αεροσκαφών κ.α. Στα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, οι εναλλάκτες χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από άλλες πρωταρχικές πηγές ενέργειας, όπως του ατμού και του λιγνίτη. Στα αεροσκάφη οι εναλλάκτες χρησιμοποιούνται ομοίως με τα αυτοκίνητα για την τροφοδοσία του ηλεκτρικού συστήματος και τη φόρτιση των μπαταριών. Τέλος, οι εναλλάκτες χρησιμοποιούνται και σε μια ποικιλία άλλων εφαρμογών, όπως οι ανεμογεννήτριες και οι γεννήτριες έκτακτης ανάγκης.

Στον τομέα του αυτοκινήτου, ο εναλλάκτης αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τμήματα του ηλεκτρικού συστήματος του αυτοκινήτου από τη δεκαετία του 1970 και μετά. Πριν από αυτό, τα οχήματα χρησιμοποιούσαν δυναμό. Κατά τη λειτουργία του κινητήρα, ο εναλλάκτης επιφορτίζεται με διπλό έργο. Από τη μια, είναι υπεύθυνος για τη φόρτιση της μπαταρίας, έτσι ώστε να αναπληρωθεί η ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε και να είναι ικανή να τροφοδοτήσει τη μελλοντική εκκίνηση του κινητήρα αλλά και τις ηλεκτρικές ανάγκες του σβηστού αυτοκινήτου. Από την άλλη, παρέχει ισχύ σε όλες τις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές του αυτοκινήτου για την ορθή λειτουργία του, όπως αντλία καυσίμου, πολλαπλασιαστής, εγκέφαλος, φώτα, ηλεκτρικά παράθυρα κ.α. [13]

### 1.2.2 Αρχή λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός εναλλάκτη βασίζεται στο νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday. Ο νόμος του Faraday αναφέρει ότι μια τάση επάγεται σε έναν αγωγό όταν αυτός κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Στον εναλλάκτη, έχουμε παρουσία αυτού του φαινομένου, με τη διαφορά ότι η παραγωγή τάσης επιτυγχάνεται με την περιστροφή ενός ηλεκτρομαγνήτη (άρα και περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο), που περικλείεται από σταθερούς αγωγούς και οι οποίοι βρίσκονται

μέσα στο μαγνητικό πεδίο. Η παραγόμενη εναλλασσόμενη τάση εμφανίζεται στα άκρα των αγωγών [12] [13].



Εικόνα 1.2 : Δομή εναλλάκτη

Πηγή : <https://www.powermag.gr>

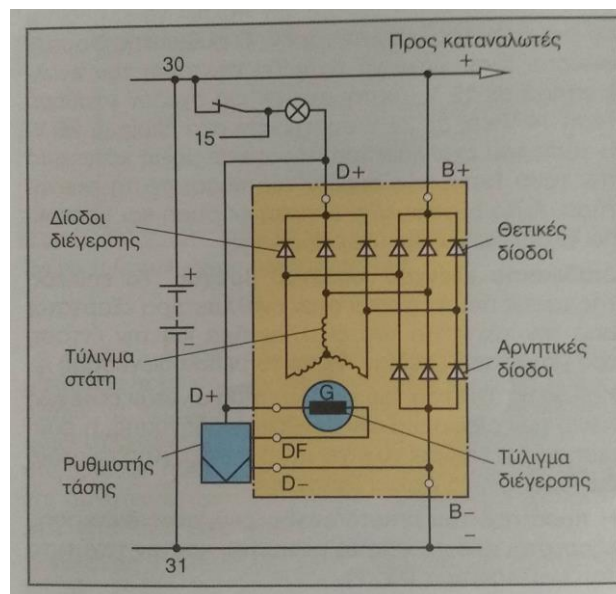
Στην εικόνα 1.2, βλέπουμε την κάτοψη ενός συνηθισμένου εναλλάκτη. Ο εναλλάκτης αποτελείται από δύο κύρια μέρη, τον στάτορα και τον ρότορα. Ο στάτης είναι το στατικό μέρος του εναλλάκτη και αποτελείται από τρεις περιελίξεις (τυλίγματα), που βρίσκονται μέσα σε μεταλλικό οπλισμό σε τέτοια θέση, έτσι ώστε να απέχουν  $120^\circ$  αναμεταξύ τους. Ο ρότορας είναι το περιστρεφόμενο μέρος του εναλλάκτη και αποτελείται από έναν δρομέα, πάνω στον οποίο βρίσκονται τα λεγόμενα τυλίγματα διέγερσης, που λειτουργούν ως ηλεκτρομαγνήτες με βόρειο και νότιο πόλο. Οι περισσότεροι εναλλάκτες στα αυτοκίνητα διαθέτουν 12 ή και 16 πόλους (μισοί βόρειοι και μισοί νότιο) στον ρότορά τους [12] [13].

Όταν ο κινητήρας του αυτοκινήτου λειτουργεί, ο ρότορας του εναλλάκτη περιστρέφεται από τον κινητήρα μέσω τροχαλιών και μάντα. Η σχέση μετάδοσης είναι αυξητική για τον εναλλάκτη για αυτό και η τροχαλία του είναι μικρότερη από αυτήν του κινητήρα. Κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο για την εξασφάλιση πολύστροφης λειτουργίας του εναλλάκτη [13]. Τα τυλίγματα διέγερσης τροφοδοτούνται με την κατάλληλη τιμή ρεύματος μέσω των καρβονακίων, που εφάπτονται στους δακτυλίους του συλλέκτη και δημιουργούν γύρω τους το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο. Η περιστροφή του ρότορα και αναγκαστικά και των τυλιγμάτων διέγερσης έχει ως αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο να είναι περιστρεφόμενο. Τα τυλίγματα του στάτορα που βρίσκονται γύρω από την δομή του ρότορα αλληλεπιδρούν με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και ως αποτέλεσμα δημιουργείται στα άκρα

τους ημιτονική εναλλασσόμενη τάση. Ο αριθμός των τυλιγμάτων που είναι τρία, καθώς και το γεγονός ότι είναι τοποθετημένα ανά  $120^\circ$  γύρω από τον ρότορα, είναι οι παράγοντες που καθορίζουν την εναλλασσόμενη τάση εξόδου να είναι τριφασική με διαφορά φάσης  $120^\circ$  [12]. Η διαδικασία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ολοκληρώνεται σε αυτό το στάδιο, απαιτείται όμως περαιτέρω επεξεργασία.

### 1.2.3 Ανόρθωση και σταθεροποίηση τάσης

Τόσο η μπαταρία όσο και οι διάφορες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές καταναλώσεις απαιτούν την παροχή σταθεροποιημένης DC τάσης. Η μπαταρία απαιτεί συγκεκριμένη DC τάση για την εξασφάλιση ασφαλούς, ελεγχόμενης και πλήρους φόρτισης με αποδεκτές τιμές ρεύματος. Οι διάφορες καταναλώσεις απαιτούν DC σταθεροποιημένη τάση, η κάθε μία σε διαφορετικό βαθμό, ειδικά όταν πρόκειται για μονάδες πολύπλοκων ηλεκτρονικών που είναι ζωτικές για τη λειτουργία του αυτοκινήτου (μονάδα ελέγχου κινητήρα, αισθητήρες, κ.α.) [12] [13].



Εικόνα 1.3 : Ηλεκτρικό εσωτερικό κύκλωμα εναλλάκτη

Πηγή: Rolf Gscheidle, “Μηχανοτρονική Αυτοκινήτων - Οχημάτων 3 – Ηλεκτρικά και Ηλεκτρονικά Συστήματα Οχημάτων”, ΙΩΝ, 2016

Τη μετατροπή της τριφασικής εναλλασσόμενης τάσης σε DC αναλαμβάνει μια διάταξη που ονομάζεται ανορθωτής και φαίνεται στην εικόνα 1.3. Για την ανόρθωση γίνεται χρήση 6 διόδων υψηλής ισχύος σε διάταξη πλήρους γέφυρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η τάση εξόδου να αποτελείται κάθε χρονική στιγμή από το τμήμα της ημιτονικής κορυφής της πολικής φάσης που είναι θετικότερη. Η χρήση πολλαπλών τυλιγμάτων και άρα πόλων στον ρότορα, έχει ως αποτέλεσμα η συχνότητα της παραγόμενης εναλλασσόμενης τάσης να είναι πολλαπλάσια της συχνότητας περιστροφής του ρότορα. Κάτι τέτοιο προσφέρει το όφελος της χαμηλότερης κυμάτωσης εξόδου [12]. Τέλος, οι δίοδοι στηρίζονται σε μεταλλική πλάκα, η οποία βρίσκεται σε επαφή με το αλουμινένιο σώμα του εναλλάκτη για την παροχή επαρκούς ψύξης [12] [13]. Η ανόρθωση σε αυτό το σημείο έχει επιτευχθεί, επιβάλλεται όμως να εξασφαλιστεί και η σταθερότητα της τάσης, κάτι το οποίο αναλαμβάνει ο σταθεροποιητής τάσης. Η τάση εξόδου του εναλλάκτη εξαρτάται από :

- Την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα
- Την ένταση του μαγνητικού πεδίου των τυλιγμάτων διέγερσης
- Τον αριθμό των περιελίξεων στα τυλίγματα του στάτη

Εφόσον τα τυλίγματα του στάτη δε μεταβάλλονται, αποτελούν μια σταθερά. Ως εκ τούτου, για τη ρύθμιση της τάσης στο επιθυμητό επίπεδο ανεξαρτήτου ταχύτητας περιστροφής ρότορα (εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής κινητήρα) και φορτίου, πρέπει να ρυθμίζεται αντίστοιχα και η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα. Για την επίτευξη σταθερής τάσης εξόδου, ο ρυθμιστής τάσης τη συγκρίνει συνεχώς με κάποια τιμή αναφοράς (π.χ. 14 Volt ή 28 Volt) και αυξομειώνει την τάση που παρέχεται στα τυλίγματα διέγερσης. Η μεταβολή της τάσης των τυλιγμάτων προκαλεί μεταβολή στο ρεύμα που τα διαρρέει και άρα μεταβάλλεται και το μαγνητικό τους πεδίο. Οι ρυθμιστές τάσεις χρησιμοποιούν ημιαγωγούς για τη λειτουργία τους και πλέον είναι πολύ μικρού μεγέθους, με την τοποθέτησή τους να γίνεται στο πίσω μέρος του εναλλάκτη [12].

Όταν ο κινητήρας είναι σβηστός και πρόκειται να εκκινηθεί, αφού γυρίσουμε το κλειδί στη θέση ανάφλεξης, τα τυλίγματα διέγερσης τροφοδοτούνται από την μπαταρία για την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου. Αφού εκκινήσει ο κινητήρας και αρχίσει να παράγει ισχύ ο εναλλάκτης, τμήμα της παραγόμενης ισχύος αξιοποιείται για τη συνέχιση της τροφοδοσίας των τυλιγμάτων όσο λειτουργεί ο κινητήρας. Παρατηρούμε, ότι μέχρι να εκκινήσει ο κινητήρας, ο εναλλάκτης χρειάζεται την μπαταρία για να αρχίσει να παράγει ισχύ, ενώ στη συνέχεια αυτοδιεγείρεται, αφού στην ουσία διεγείρει τα τυλίγματα του με τη δική του ισχύ [12].

Η τάση που παράγεται από έναν εναλλάκτη είναι θεωρητικά 12 Volt σε επιβατικά αυτοκίνητα. Σε άλλους τύπους οχημάτων, όπως τα φορτηγά, η τάση που παράγεται από τον εναλλάκτη μπορεί να είναι υψηλότερη, 24 Volt. Η σωστή τάση εξόδου για έναν εναλλάκτη σε επιβατικά αυτοκίνητα είναι μεταξύ 13.5 και 14.5 Volt. Τιμές τάσης πάνω και κάτω από αυτά τα όρια είναι σημάδι δυσλειτουργίας του εναλλάκτη [12].

Η παραγωγή υπερβολικά υψηλής τάσης από έναν εναλλάκτη μπορεί να οδηγήσει σε ξαφνική βλάβη της μπαταρίας. Αυτό συμβαίνει επειδή η υψηλή τάση μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση της μπαταρίας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε βραχυκύκλωμα ή ακόμη και έκρηξη [12]. Παράλληλα, η υψηλή τάση μπορεί να αποδειχτεί καταστροφική για τα διάφορα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά του αυτοκινήτου.

Από την άλλη, η πολύ χαμηλή τάση μπορεί επίσης να προκαλέσει βραχυκύκλωμα και βλάβη στα ηλεκτρικά συστήματα του αυτοκινήτου. Αυτό συμβαίνει επειδή τα ηλεκτρονικά συστήματα του αυτοκινήτου είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν σε μια συγκεκριμένη τάση. Όταν η τάση είναι πολύ χαμηλή, τα συστήματα αυτά μπορεί να μην λειτουργούν σωστά ή μπορεί να υποστούν βλάβη.

Για να επιτευχθεί φόρτιση της μπαταρίας, ο εναλλάκτης πρέπει να παράγει τάση μεγαλύτερη από την τάση της μπαταρίας. Αυτό συμβαίνει επειδή η μπαταρία φορτίζεται όταν εφαρμόζεται στους πόλους της τάση μεγαλύτερη από την τάση της ίδιας της μπαταρίας. Η διαφορά τάσης προκαλεί τη ροή ρεύματος από τον εναλλάκτη προς την μπαταρία, έτσι ώστε να φορτιστεί.

## Κεφάλαιο 2ο: Μπαταρίες μολύβδου-οξέος

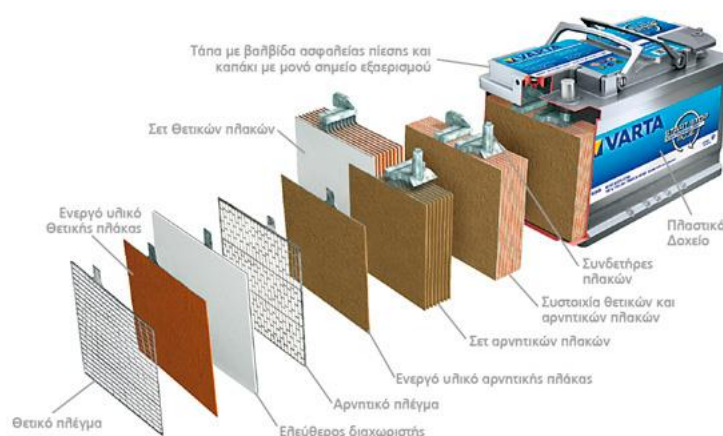


Εικόνα 2.1 : Μπαταρία μολύβδου-οξέος 12 Volt

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος ανήκουν στην ιστορία ως η πρώτη εφεύρεση επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Η σύλληψή τους έγινε από τον Γάλλο φυσικό Gaston Planté το 1859. Έχουν αντέξει στη δοκιμασία του χρόνου, βρίσκοντας χρήση σε διάφορες εφαρμογές, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και τα συστήματα παροχής ενέργειας έκτακτης ανάγκης, κυρίως λόγω της οικονομικής τους υπεροχής για την ποιότητα των χαρακτηριστικών που προσφέρουν [15].

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς όπως: τα συστήματα ασφαλείας, οι τηλεπικοινωνίες για την παροχή ισχύος σε εξοπλισμό (αναμεταδότες και κεραίες), τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα, τα συστήματα φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών για την αποθήκευση ενέργειας που παράγεται και τα συστήματα παροχής αδιάλειπτης ισχύος (UPS) [18].

### 2.1 Δομή και λειτουργία



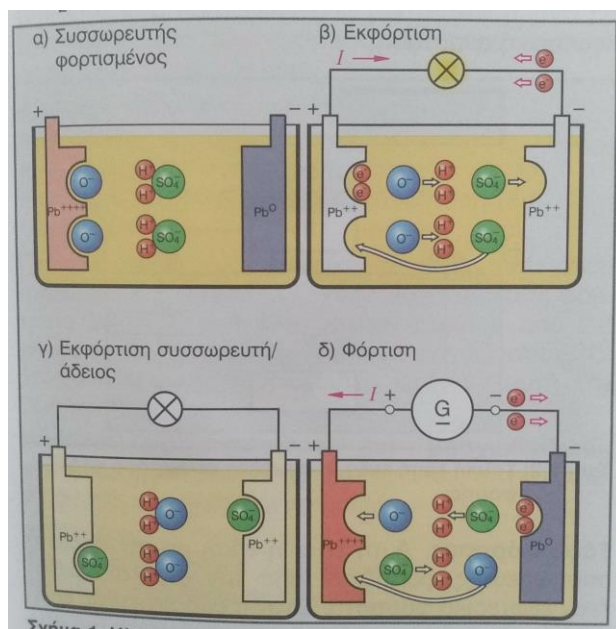
Εικόνα 2.2 : Εσωτερική δομή μπαταρίας μολύβδου-οξέος

### 2.1.1 Δομή

Στην εικόνα 2.2, βλέπουμε την εσωτερική δομή μιας μπαταρίας μολύβδου-οξέως. Οι μπαταρίες αυτές περιέχουν ένα ή περισσότερα στοιχεία, τα οποία στη βάση τους αποτελούνται από δύο πλάκες - ηλεκτρόδια από μόλυβδο, τα οποία βυθίζονται σε υδατικό διάλυμα θεικού οξέος ( $H_2SO_4$ ) που δρα ως ηλεκτρολύτης. Το θετικό ηλεκτρόδιο δομείται από διοξείδιο του μολύβδου ( $PbO_2$ ), ενώ το αρνητικό ηλεκτρόδιο από καθαρό μόλυβδο ( $Pb$ ). Μεταξύ των πλακών υπάρχει διαχωριστική επιφάνεια για την αποφυγή της επαφής μεταξύ τους, η οποία παράλληλα επιτρέπει τη ροή φορτίων μεταξύ των ηλεκτροδίων κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση [15].

Συνήθως, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούν δοχεία και καλύμματα κατασκευασμένα από πλαστικά όπως το πολυπροπυλένιο υψηλής πυκνότητας. Αυτά τα υλικά επιλέγονται επειδή μπορούν να αντέξουν τη φύση του όξινου ηλεκτρολύτη. Το δοχείο χρησιμεύει ως πλαίσιο που συγκρατεί όλα τα εξαρτήματα στη θέση τους, ενώ τα καλύμματα εξασφαλίζουν μια στεγανή σφράγιση για την αποφυγή τυχόν διαρροής ηλεκτρολύτη και την ελαχιστοποίηση των κινδύνων εξωτερικής μόλυνσης.

### 2.1.2 Αρχή λειτουργίας

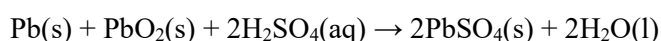


Εικόνα 2.3 : Διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης

Πηγή : Rolf Gscheidle, “Μηχανοτρονική Αυτοκινήτων - Οχημάτων 3 – Ηλεκτρικά και Ηλεκτρονικά Συστήματα Οχημάτων”, Αθήνα: ΙΩΝ, 2016

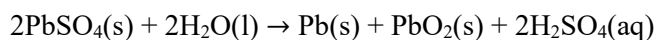
Όλες οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως διέπονται από την ίδια αρχή λειτουργίας. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.3, όταν ένα φορτίο συνδέεται στους πόλους της μπαταρίας, τα ηλεκτρόνια ρέουν από τις πλάκες μολύβδου (αρνητικές) προς τις πλάκες διοξειδίου του μολύβδου (θετικές). Αυτή η κίνηση ηλεκτρονίων πυροδοτεί μια χημική αντίδραση που μετατρέπει τόσο τον μόλυβδο όσο και το διοξείδιο του μολύβδου σε θεικό μόλυβδο ( $PbSO_4$ ). Ως αποτέλεσμα αυτής της αντίδρασης είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι:



Οι δύο πλάκες, μολύβδου και διοξειδίου του μολύβδου, αντιδρούν με το θειικό οξύ με αποτέλεσμα να παράγεται νερό στον ηλεκτρολύτη μειώνοντας τη συγκέντρωση του και θειικός μολύβδος ( $\text{PbSO}_4$ ) που επικάθεται στις πλάκες [17].

Κατά τη φάση της φόρτισης, μια εξωτερική πηγή τάσης εφαρμόζεται στην μπαταρία. Η διαδικασία αυτή αντιστρέφει τη χημική αντίδραση της εκφόρτισης και έτσι αποκαθίσταται η ικανότητα της μπαταρίας να αποθηκεύει ενέργεια. Η αντίδραση που συμβαίνει έχει ως εξής:



Η χημική αντίδραση κατά τη φόρτιση παράγει καθαρό μολύβδο ( $\text{Pb}$ ) που προσκολλάται στην αρνητική πλάκα, διοξείδιο του μολύβδου που προσκολλάται στη θετική πλάκα και θειικό οξύ που ενσωματώνεται στον ηλεκτρολύτη. Μετά το πέρας της φόρτισης, η μπαταρία έχει επαναφερθεί στην αρχική της κατάσταση, με τις πλάκες να έχουν επαναδομηθεί και τον ηλεκτρολύτη να αποκτά την αρχική του πυκνότητα [17].

## 2.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη

### 2.2.1 Χωρητικότητα

Μια πτυχή των μπαταριών μολύβδου οξέος είναι η χωρητικότητά τους (Capacity), η οποία μετρά την ποσότητα φορτίου που μπορούν να αποθηκεύσουν και εκφράζεται σε αμπερώρια (Ah). Η χωρητικότητα καθορίζεται από παράγοντες όπως ο σχεδιασμός και η ενεργή επιφάνεια επαφής ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίων, καθώς και η συγκέντρωση και ο όγκος του ηλεκτρολύτη. Η ονομαστική χωρητικότητα ορίζεται για συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και ρυθμού εκφόρτισης. Το σύνηθες είναι η αναγραφόμενη τιμή να ισχύει για θερμοκρασία 20 °C και ρεύμα εκφόρτισης ίσο με το  $\frac{1}{10}$  ή το  $\frac{1}{20}$  της δεδομένης χωρητικότητας. Αν για παράδειγμα, μια μπαταρία αναγράφει ότι έχει χωρητικότητα 5 Ah στους 20 °C με ρυθμό εκφόρτισης ίσο με  $\frac{C}{10}$ , τότε μας δίνεται η πληροφορία ότι η μπαταρία σε πλήρη φόρτιση μπορεί να παρέχει ρεύμα 0.5 A για 10 ώρες με τελική τάση αποκοπής στα 10.5 Volt. Με την αύξηση του ρεύματος εκφόρτισης μειώνεται η ωφέλιμη χωρητικότητα, ενώ με τη μείωση αυτού προς την αναγραφόμενη τιμή, η ωφέλιμη χωρητικότητα τείνει προς την ονομαστική [15].

Ωστόσο, μπορεί επίσης να επηρεαστεί από παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η ηλικία. Γενικά, με την αύξηση της θερμοκρασίας η χωρητικότητα αυξάνεται, ενώ το ανάποδο συμβαίνει όταν η θερμοκρασία ελαττώνεται. Τέλος, η γήρανση δρα αρνητικά στην μπαταρία, με την χωρητικότητα να ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου.

### 2.2.2 Τάση

Η ονομαστική τάση των μπαταριών οξέος εξαρτάται από το πλήθος των μεμονωμένων στοιχείων που τις αποτελούν. Η πιο εμπορική τιμή είναι αυτή των 12 Volt που επιτυγχάνεται με 6 σειριακά συνδεδεμένα στοιχεία, ενώ συνήθεις είναι και οι μπαταρίες 6 Volt με 3 στοιχεία [15]. Τέλος, υπάρχουν και μπαταρίες με ένα μόνο στοιχείο, οι οποίες προφανώς έχουν ονομαστική τάση 2 Volt. Τέτοιες μπαταρίες έχουν συνήθως πολύ μεγάλες χωρητικότητες και προορίζονται για την κατασκευή «αποθηκών» ενέργειας σε φωτοβολταϊκά και αιολικά συστήματα.

Η πραγματική τάση λειτουργίας μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες, όπως η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και οι συνθήκες φορτίου που αντιμετωπίζει. Για παράδειγμα, όταν μια μπαταρία μολύβδου-οξέος 12 V είναι πλήρως φορτισμένη, η τάση ανοιχτού κυκλώματος, χωρίς

φορτίο, μπορεί να είναι περίπου 12.6 - 12.8 Volt. Σε πλήρη αποφόρτιση, η τάση αντίστοιχα είναι περίπου 11.8 – 11.9 Volt.

### 2.2.3 Εσωτερική αντίσταση

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, ως μη ιδανικά στοιχεία, παρουσιάζουν αντίσταση στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, που οφείλεται σε μη ιδανικότητα των επιμέρους τμημάτων που τις αποτελούν. Η αντίσταση αυτή που ονομάζεται ESR (equivalent series resistance) εμφανίζεται σε σειρά με την ηλεκτρεγερτική δύναμη της μπαταρίας και προκαλεί πτώση τάσης εσωτερικά στη μπαταρία όταν αυτή διαρρέεται από ρεύμα. Η πτώση τάσης προκαλεί θερμικές απώλειες στο εσωτερικό της μπαταρίας, όπως και μικρότερη ωφέλιμη τάση για το φορτίο. Ως μέγεθος, η εσωτερική αντίσταση επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας και από την γηραιότητά της. Ο κατασκευαστής ορίζει την εσωτερική αντίσταση σε συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας και επιπέδου φόρτισης [19].

### 2.2.4 Ρυθμός εκφόρτισης

Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι η ποσότητα ενέργειας που χάνεται από μια μπαταρία σε κατάσταση ηρεμίας. Οι συνήθεις τιμές αυτοεκφόρτισης είναι από 3% έως 5% της ονομαστική χωρητικότητας κάθε μήνα. Η τιμή είναι εξαρτώμενη της θερμοκρασίας, με την άνοδο της θερμοκρασίας να ευνοεί την αυτοεκφόρτιση και με την πτώση της θερμοκρασίας να την αναστέλλει [15].

### 2.2.5 Ρεύμα βραχυκύκλωσης

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των μπαταριών μολύβδου-οξέος είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Το συγκεκριμένο μέγεθος αποτελεί τη μέγιστη τιμή ρεύματος, που δύναται να παρέχει η μπαταρία για χρονική διάρκεια όχι μεγαλύτερη από 2 δευτερόλεπτα [12].

### 2.2.6 Ρεύμα κρύας εκκίνησης

Ειδικά για τις μπαταρίες αυτοκινήτου (συσσωρευτές εκκινήτρια), ο κατασκευαστής μας παρέχει την τιμή του ρεύματος κρύας εκκίνησης (Cold Cranking Amperage). Το CCA ορίζεται ως το ρεύμα που πρέπει να παρέχει η μπαταρία σε θερμοκρασία -18 °C για 10 δευτερόλεπτα, χωρίς η τελική τάση της να πέσει κάτω από τα 7.5 Volt. Είναι βασικό χαρακτηριστικό των μπαταριών εκκίνησης και δείχνει την ικανότητα εκκίνησης ενός κινητήρα σε δυσμενείς συνθήκες ψύχους [12].

## 2.3 Τύποι μπαταριών μολύβδου-οξέος

### 2.3.1 Ανοιχτού τύπου

Ο πιο «πρωτόγονος» τύπος μπαταρίας μολύβδου-οξέος ονομάζεται ανοιχτού τύπου ή πλημμυρισμένη (flooded). Σε αυτές τις μπαταρίες, ο ηλεκτρολύτης είναι σε υγρή μορφή και οι πλάκες βυθίζονται πλήρως μέσα σε αυτόν. Τα κελύφη τέτοιων μπαταριών διαθέτουν οπές επικοινωνίας με το περιεχόμενο της μπαταρίας. Στο στάδιο πλήρους φόρτισής τους, εκλύουν σημαντικές ποσότητες υδρογόνου και οξυγόνου προς το περιβάλλον, λόγω της «ανοιχτής» τους φύσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εγκυμονεί ο κίνδυνος έκρηξης αλλά και να απαιτείται συχνός έλεγχος της στάθμης του ηλεκτρολύτη και πλήρωση αυτού με απιονισμένο νερό, για να παραμείνουν οι πλάκες βυθισμένες. Επιπλέον, διακρίνονται για τον αυξημένο βαθμό αυτοεκφόρτισης. Λόγω των παραπάνω, αυτός ο τύπος μπαταρίας χρησιμοποιείται όλο και λιγότερο στις μέρες μας. Βέβαια, διαθέτει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης αντοχής σε υπερφόρτιση και υψηλή θερμοκρασία από άλλους τύπους μπαταριών

μολύβδου-οξέος και με την προϋπόθεση της σωστής συντήρησης, επιτυγχάνεται σχετικά μεγάλος χρόνος ζωής. Τέλος, είναι ο πιο οικονομικός τύπος μπαταρίας μολύβδου-οξέος [12] [15].

Οι μπαταρίες SLI χρησιμοποιούνται συνήθως σε οχήματα και προορίζονται για την εκκίνηση του κινητήρα (Starting), την παροχή ρεύματος για τον φωτισμό (Lighting) και την ανάφλεξη (Ignition). Ο χαρακτηρισμός τους ως «SLI» οφείλεται στον σκοπό για τον οποίο προορίζονται, που είναι μικρές περιόδους χρήσης με παροχή υψηλού ρεύματος. Αποτελούν παραλλαγή των μπαταριών ανοιχτού τύπου που αναλύσαμε πιο πάνω και παρουσιάζουν την ίδια εσωτερική δομή. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι αυτές οι μπαταρίες γεμίζονται με ηλεκτρολύτη μόνο μια φορά, πριν την πρώτη χρήση και έπειτα σφραγίζονται. Δε διαθέτουν τη δυνατότητα για μετέπειτα πλήρωση του ηλεκτρολύτη, τα αέρια του οποίου εκτονώνονται από σπές εξαερισμού που διαθέτει το κέλυφος. Υποφέρουν ιδιαίτερα από τις βαθιές εκφορτίσεις, οι οποίες προκαλούν ανεπανόρθωτη ελάττωση στον χρόνο ζωής [17]. Είναι σχετικά φθηνές και εύκολο να βρεθούν, όμως δεν επιδέχονται συντήρηση και αν μειωθεί η στάθμη του ηλεκτρολύτη πέρα από κάποιο σημείο, χρήζουν αντικατάστασης [12] [15].

### 2.3.2 SLA ή VRLA

Οι μπαταρίες SLA (Sealed Lead Acid) ή αλλιώς VRLA (Valve Regulated Lead Acid) είναι κλειστού τύπου και διαφέρουν αρκετά από τις ανοιχτού τύπου, τόσο δομικά όσο και λειτουργικά. Οι συγκεκριμένες μπαταρίες δε χρησιμοποιούν υγρό ηλεκτρολύτη περιχυμένο σε όλο τον χώρο του στοιχείου, ενώ παράλληλα είναι στεγανά σφραγισμένες και διαθέτουν βαλβίδες εκτόνωσης πίεσης [15]. Διακρίνονται σε δύο βασικές υποκατηγορίες, τις μπαταρίες στρώματος ινών γυαλιού (AGM) και τις μπαταρίες τζελ (Gell Cell).

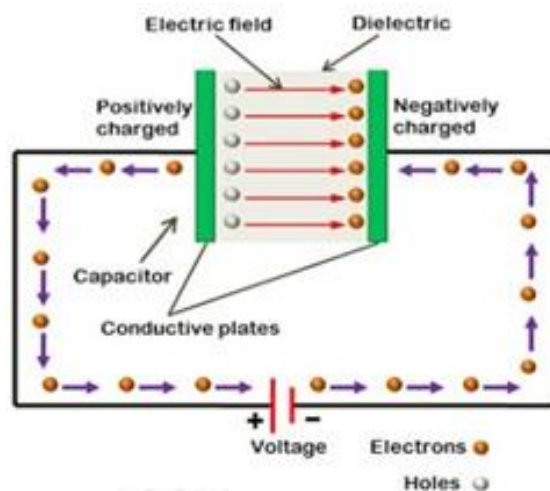
- Οι μπαταρίες AGM (Absorbent Glass Mat), διαθέτουν διαχωριστή πλακών, ο οποίος αποτελείται από απορροφητικά πλέγματα ινών γυαλιού όπου απορροφάται ο υγρός ηλεκτρολύτης.
- Στις μπαταρίες Gell Cell προστίθεται σκόνη πυριτίου στο διάλυμα του ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα να λαμβάνει τη σύσταση ενός τζελ.

Οι δύο αυτοί τύποι μπαταρίας είναι απαλλαγμένοι από τον κίνδυνο διαρροής ηλεκτρολύτη, αφού πλέον δεν κυκλοφορεί ελεύθερος μεταξύ των πλακών αλλά συγκρατείται είτε από τις ίνες γυαλιού είτε επειδή είναι σε μορφή τζελ και έτσι μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε προσανατολισμό. Δεν απαιτούν συντήρηση (πλήρωση με νερό) και παρουσιάζουν μηδαμινή εκπομπή αερίων, επιτυγχάνοντας αυξημένους κύκλους χρήσης και παράλληλα είναι πολύ περισσότερο ασφαλείς. Εμφανίζουν αυξημένη αντοχή σε δονήσεις και μηχανική καταπόνηση, λόγω της συμπαγούς μορφής τους. Έχουν σημαντικά μικρότερη εσωτερική αντίσταση και επομένως παρέχουν υψηλότερα ρεύματα, ενώ έχουν και βελτιωμένη ενεργειακή πυκνότητα. Οι ρυθμοί εκφόρτισης είναι χαμηλότεροι, οπότε παραμένουν χρήσιμες για περισσότερο καιρό σε αδράνεια. Στα πλεονεκτήματά τους ανήκει και το γεγονός ότι δύνανται να υποβληθούν σε βαθιά εκφόρτιση (80%) χωρίς να υποστούν μείωση στην αρχική τους χωρητικότητα. Στον τομέα των μειονεκτημάτων, οι συγκεκριμένες μπαταρίες είναι πολύ πιο ακριβές από τις κλασικές ανοιχτού τύπου και παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία σε ασταθή φόρτιση.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Πυκνωτές

### 3.1 Ορισμός

Οι πυκνωτές, που συχνά αναφέρονται ως "μονάδες αποθήκευσης", στα κυκλώματα παίζουν ρόλο στην αποθήκευση και την απελευθέρωση ενέργειας. Στον πυρήνα τους οι πυκνωτές αποτελούνται από δύο πλάκες από μέταλλο, που χωρίζονται από ένα μονωτικό υλικό που ονομάζεται διηλεκτρικό. Αυτό το διηλεκτρικό μπορεί να είναι κατασκευασμένο από υλικά όπως ο αέρας, το χαρτί ή το κεραμικό. Όταν εφαρμόζεται τάση σε αυτές τις πλάκες δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό το πεδίο επιτρέπει τη συσσώρευση φορτίων στις πλάκες, με τη μία πλάκα να συγκρατεί θετικό φορτίο, ενώ την άλλη πλάκα να συγκρατεί αρνητικό φορτίο (εικόνα 3.1). Η ενέργεια που αποθηκεύεται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο απελευθερώνεται πίσω στο κύκλωμα, όταν αυτό είναι απαραίτητο [1].



Εικόνα 3.1 : Δομή πυκνωτή

Πηγή: [https://i.ytimg.com/vi/M11z1vE\\_QGY/maxresdefault.jpg](https://i.ytimg.com/vi/M11z1vE_QGY/maxresdefault.jpg)

### 3.2 Χαρακτηριστικά του πυκνωτή

#### 3.2.1 Χωρητικότητα

Η χωρητικότητα είναι ένα μέτρο που καθορίζει πόσο καλά ένας πυκνωτής μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια. Η τιμή της εξαρτάται από την επιφάνεια των αγωγικών πλακών, την μεταξύ τους απόσταση και τη διηλεκτρική σταθερά ( $\epsilon$ ) του μονωτικού υλικού που βρίσκεται ανάμεσά τους. Η μαθηματική σχέση που εκφράζει τη χωρητικότητα είναι:

$$C = \epsilon \times \frac{A}{d} \quad \text{Σχέση 3.1}$$

όπου το «A» αντιπροσωπεύει την επιφάνεια των πλακών, το «d» την μεταξύ τους απόσταση και το «ε» την διηλεκτρική σταθερά. Η σχέση 3.1, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επιλογή του υλικού, η γεωμετρία του πυκνωτή και η διαδικασία κατασκευής καθορίζουν τις τιμές της χωρητικότητας [1]. Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή μπορεί, όπως είδαμε παραπάνω, να εξαρτάται από την κατασκευή, εκφράζεται όμως και από την παρακάτω μαθηματική εξίσωση:

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{Σχέση 3.2}$$

Η σχέση 3.2, μας αποδεικνύει ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ χωρητικότητας (C), φορτίου (Q) και τάσης (V). Πιο συγκεκριμένα, με την προϋπόθεση ότι η χωρητικότητα είναι σταθερή για έναν πυκνωτή, μας δείχνει το ποσό του ηλεκτρικού φορτίου που δύναται να αποθηκεύσει ο πυκνωτής για συγκεκριμένη τάση που έχει στα άκρα του. [1]

Η μονάδα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της χωρητικότητας ονομάζεται Farad (F) και πήρε το όνομά της από τον φυσικό Michael Faraday [1]. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι πυκνωτές έχουν τιμές χωρητικότητας πολύ πιο κάτω από Farad, της τάξης των microfarads ( $\mu\text{F}$ ), nanofarads (nF) ή picofarads (pF) [5].

### 3.2.2 Ονομαστική τάση

Η ονομαστική τάση ενός πυκνωτή είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να εφαρμοσθεί στους οπλισμούς του, χωρίς να προκληθεί βλάβη στο διηλεκτρικό του ή να οδηγηθεί σε διάσπαση. Η λειτουργία του πυκνωτή σε τάση μεγαλύτερη της ονομαστικής ενδέχεται να προκαλέσει σπινθηρισμό μεταξύ των οπλισμών, έκλυση θερμότητας και τελικά να οδηγήσει τον πυκνωτή σε πρόωρη ή ακόμα και ολοκληρωτική καταστροφή. Οι ονομαστικές τιμές τάσης επηρεάζονται από παράγοντες όπως η αντοχή του μονωτικού υλικού, το πάχος του διηλεκτρικού στρώματος και η συνολική κατασκευή του πυκνωτή. Διαφορετικοί τύποι υλικών και σχεδιασμοί πυκνωτών μπορούν να έχουν αντίκτυπο στις ονομαστικές τιμές τάσης. Η επιλογή ενός πυκνωτή που έχει τη σωστή ονομαστική τάση για την εφαρμογή, πραγματοποιείται πάντα λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η μέγιστη τάση λειτουργίας στο εκάστοτε κύκλωμα και οι πιθανές αιφνίδιες αιχμές τάσης [6].

### 3.2.3 Ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR)

Η ισοδύναμη αντίσταση σειράς (Equivalent Series Resistance) ή αλλιώς «εσωτερική αντίσταση» αναφέρεται στην «παρασιτική» αντίσταση που εμφανίζεται σε σειρά με το καθαρό χωρητικό τμήμα ενός πυκνωτή. Σε αντίθεση με τον ιδανικό πυκνωτή που απλά χαρακτηρίζεται από τη χωρητικότητα του, οι πυκνωτές στον πραγματικό κόσμο έχουν και εσωτερική αντίσταση. Η εσωτερική αντίσταση είναι αποτέλεσμα ωμικών απωλειών των ακροδεκτών και των οπλισμών του πυκνωτή και άλλων πολύπλοκων απωλειών, λόγω του ηλεκτρολύτη και του διηλεκτρικού. Διάφοροι δομικοί παράγοντες συμβάλλουν στον καθορισμό της τιμής της ESR, συμπεριλαμβανομένου του τύπου του υλικού που χρησιμοποιείται και του τρόπου κατασκευής του πυκνωτή. Από λειτουργικής άποψης, η ESR δεν παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα τη θερμοκρασία και τη συχνότητα. Η αύξηση θερμοκρασίας ελαττώνει την ESR, ενώ το ίδιο συμβαίνει και με την αύξηση της συχνότητας του ρεύματος λειτουργίας μέχρι ένα κατώφλι [2][3][4].

Η ESR επιδρά στην απόδοση των πυκνωτών και κατ' επέκταση στην απόδοση των κυκλωμάτων στα οποία χρησιμοποιούνται οι πυκνωτές. Η ESR προκαλεί απώλεια ενέργειας και οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας. Επιπλέον, μπορεί να προκαλέσει αστάθεια και αυξημένη κυμάτωση εξόδου σε διάφορα συστήματα, όπως DC/DC converters, ή και να οδηγήσει σε ολίσθηση φάσης [4].

### 3.2.4 Αντίσταση διαρροής

Οι πυκνωτές ως μη ιδανικά εξαρτήματα εμφανίζουν ένα μικρό ρεύμα διαρροής, ακόμα και όταν δεν είναι συνδεδεμένοι σε κάποιο κύκλωμα και οφείλεται στο διηλεκτρικό [5]. Το φαινόμενο αυτό ισοδυναμεί με την παρουσία μιας αντίστασης πολύ υψηλής τιμής παράλληλα συνδεδεμένης με την χωρητικότητα του πυκνωτή, η οποία αντλεί ένα ελαχιστότατο αλλά υπαρκτό ρεύμα, αποφορτίζοντας, έτσι, σταδιακά τον πυκνωτή [1].

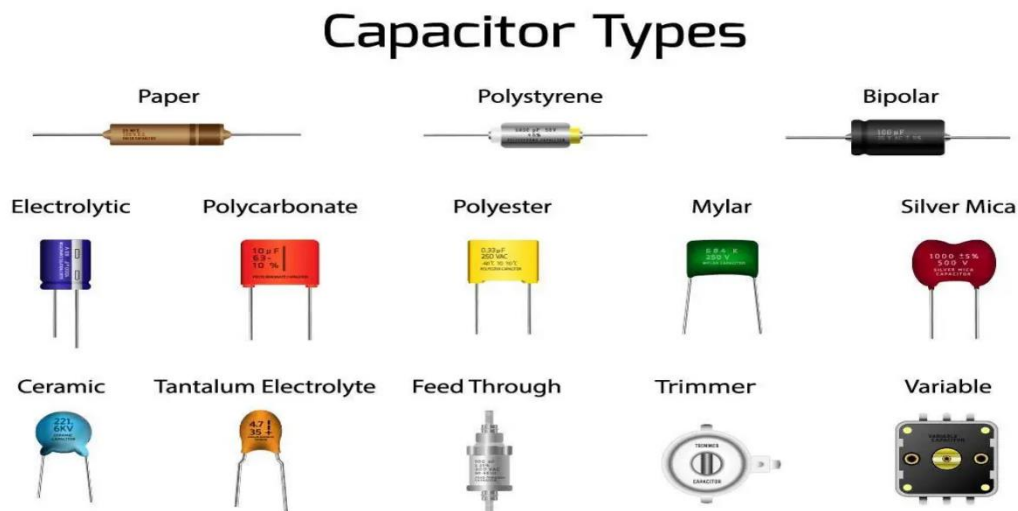
### 3.2.5 Χωρητική αντίδραση

Η χωρητική αντίδραση (capacitive reactance) δεν αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος των πυκνωτών αλλά μας δείχνει τη συμπεριφορά τους στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Στην ουσία, η χωρητική αντίδραση είναι η αντίσταση που προβάλλει ο πυκνωτής στο εναλλασσόμενο ρεύμα και εξαρτάται από τη χωρητικότητά του και τη συχνότητα. Η μαθηματική σχέση που την καθορίζει είναι:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} , \quad \text{Σχέση 3.3}$$

Όπου “f” η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος και “C” η χωρητικότητα του πυκνωτή. Καθώς η χωρητικότητα είναι σταθερή, η χωρητική αντίδραση ελαττώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα, αφού σύμφωνα με τη σχέση 3.3 η συχνότητα βρίσκεται στον παρονομαστή. Προσεγγιστικά, λέμε ότι στο AC ο πυκνωτής δρα ως βραχυκύκλωμα. Στο DC (f=0) μηδενίζεται ο παρονομαστής και η χωρητική αντίδραση πρακτικά απειρίζεται, οπότε ο πυκνωτής θεωρείται ανοιχτό κύκλωμα.

### 3.3 Τύποι πυκνωτών



Εικόνα 3.2 : Τύποι πυκνωτών

Πηγή : [https://www.ultralibrarian.com/wp-content/uploads/2022/07/shutterstock\\_731355235.jpg](https://www.ultralibrarian.com/wp-content/uploads/2022/07/shutterstock_731355235.jpg)

Οι πυκνωτές μπορούν σε γενικές γραμμές να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: σταθεροί και ρυθμιζόμενοι. Οι σταθεροί πυκνωτές έχουν μια προκαθορισμένη τιμή χωρητικότητας που δεν μπορεί να αλλάξει, καθιστώντας τους κατάλληλους για εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η σταθερή χωρητικότητα. Από την άλλη πλευρά, οι ρυθμιζόμενοι πυκνωτές επιτρέπουν αλλαγές στην τιμή της χωρητικότητάς τους. Αυτοί οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται συνήθως σε κυκλώματα συντονισμού, όπως αυτά που βρίσκονται στα ραδιόφωνα, όπου η δυνατότητα τροποποίησης της χωρητικότητας είναι καθοριστική για τη λειτουργία του κυκλώματος.

Οι πυκνωτές μπορούν, επίσης, να κατηγοριοποιηθούν με βάση τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους (Εικόνα 3.2). Οι κύριοι τύποι περιλαμβάνουν κεραμικούς, ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές και πυκνωτές πλαστικής μεμβράνης. Κάθε τύπος διαθέτει ιδιότητες που τον καθιστούν ιδανικό για συγκεκριμένες εφαρμογές.

### 3.3.1 Κεραμικοί πυκνωτές

Οι κεραμικοί πυκνωτές λαμβάνουν το όνομά τους από το κεραμικό υλικό του διηλεκτρικού τους και είναι μη πολωμένοι, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να εγκατασταθούν σε οποιονδήποτε προσανατολισμό μέσα σε ένα κύκλωμα. Έχουν μικρές χωρητικότητες και μικρό επίσης μέγεθος. Είναι γνωστοί για τη σταθερότητά τους, το εξαιρετικά χαμηλό ρεύμα διαρροής και την επίσης πολύ χαμηλή ESR, όντας έτσι κατάλληλοι για εφαρμογές υψηλής συχνότητας. Αυτοί οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται συχνά σε φίλτρα RF, ταλαντωτές και σε εφαρμογές αποσύνδεσης και παράκαμψης (decoupling και bypass capacitors) [5].

### 3.3.2 Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές αλουμινίου

Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές αλουμινίου είναι πολωμένα εξαρτήματα που απαιτούν προσανατολισμό τοποθέτησης κατά την ενσωμάτωσή τους σε ένα κύκλωμα. Συνήθως, χρησιμοποιούν ενός είδους ηλεκτρολύτη ως την κάθοδο και όχι μεταλλική πλάκα. Επιπλέον, το διηλεκτρικό τους, που είναι ένα πολύ λεπτό στρώμα οξειδίου επάνω στην άνοδο αλουμινίου, παρέχει τη δυνατότητα για επίτευξη υψηλών τιμών χωρητικότητας σε μικρό μέγεθος και χρησιμοποιούνται συνήθως σε κυκλώματα τροφοδοσίας για τη σταθεροποίηση των διακυμάνσεων της τάσης [5]. Ωστόσο, δεν είναι κατάλληλοι για εφαρμογές υψηλής συχνότητας, λόγω της αύξησης της ESR τους. Τέλος, υποφέρουν από το ρεύμα διαρροής τους, που είναι σε γενικές γραμμές μεγαλύτερο από άλλους τύπους πυκνωτών [6].

### 3.3.3 Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές τανταλίου

Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές τανταλίου, χρησιμοποιούν ταντάλιο αντί του αλουμινίου και μπορούν να προσφέρουν, επίσης, υψηλές τιμές χωρητικότητας. Υπερέχουν σε περιπτώσεις όπου ο χώρος είναι περιορισμένος ή όταν η αξιοπιστία και η απόδοση είναι ζωτικής σημασίας [6]. Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις που σχετίζονται με τους πυκνωτές τανταλίου, όπως ανησυχίες σχετικά με την έλλειψη υλικών και το υψηλότερο κόστος σε σύγκριση με άλλους τύπους πυκνωτών.

### 3.3.4 Πυκνωτές πλαστικής μεμβράνης

Οι πυκνωτές πλαστικής μεμβράνης χρησιμοποιούν διηλεκτρικά από υλικά όπως πολυκαρβονικό, πολυεστέρα και πολυστυρένιο. Είναι γνωστοί για την ελάχιστη διαρροή και την πολύ καλή σταθερότητά τους. Αυτοί οι πυκνωτές λειτουργούν καλά σε κυκλώματα τροφοδοσίας και εφαρμογές συχνότητας. Η ακρίβεια και η αξιοπιστία τους, τους καθιστούν ιδανικούς για εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια, όπως τα συστήματα μέτρησης και ελέγχου.

## 3.4 Εφαρμογές των πυκνωτών στα ηλεκτρονικά κυκλώματα

### 3.4.1 Συστήματα UPS

Μία από τις κύριες εφαρμογές των πυκνωτών είναι η αποθήκευση ενέργειας. Χρησιμοποιούνται, συνήθως, σε ηλεκτρονικές συσκευές και συστήματα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (UPS), για να εξασφαλίζουν συνεχή παροχή ενέργειας κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος ή αλλαγής μπαταρίας. Η λειτουργία αυτή είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή απώλειας δεδομένων και τη διατήρηση της λειτουργικής συνέχειας των ηλεκτρονικών συστημάτων.

### 3.4.2 Κλιματισμός ισχύος και σταθερότητα τάσης

Οι πυκνωτές διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον κλιματισμό ισχύος, εξομαλύνοντας τις διακυμάνσεις

της τάσης και παρέχοντας σταθερά επίπεδα ισχύος. Ενεργούν ως εφεδρικό σύστημα για την τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος, βοηθώντας τα μηχανήματα κλιματισμού ισχύος να διατηρούν τη σταθερότητά τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου ακόμη και μικρές διακυμάνσεις τάσης μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις.

### 3.4.3 Φιλτράρισμα για σαφήνεια σήματος

Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται εκτενώς για σκοπούς φιλτραρίσματος σε ηλεκτρονικά κυκλώματα. Μπορούν να μπλοκάρουν αποτελεσματικά ανεπιθύμητες υψηλές συχνότητες, ενώ επιτρέπουν τη διέλευση των επιθυμητών χαμηλών συχνοτήτων. Αυτό συμβάλλει στη σαφήνεια και την ποιότητα του σήματος, καθιστώντας τους πυκνωτές απαραίτητους σε εφαρμογές όπως ο ραδιοφωνικός συντονισμός και η επεξεργασία σήματος.

### 3.4.4 Αποσύζευξη και ακεραιότητα σήματος

Η αποσύζευξη είναι μια άλλη σημαντική εφαρμογή των πυκνωτών. Χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό των σημάτων εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος, επιτρέποντας τη διέλευση μόνο των σημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ εμποδίζουν τα σήματα συνεχούς ρεύματος. Αυτός ο διαχωρισμός συμβάλλει στην αποφυγή παρεμβολών και διασφαλίζει τη σωστή ακεραιότητα του σήματος, η οποία είναι ζωτικής σημασίας σε πολύπλοκα ηλεκτρονικά συστήματα όπως οι υπολογιστές και οι συσκευές επικοινωνίας.

### 3.4.5 Λειτουργίες επεξεργασίας σήματος

Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται επίσης σε διάφορες λειτουργίες επεξεργασίας σήματος. Μπορούν να αποθηκεύουν και να απελευθερώνουν ηλεκτρική ενέργεια ανάλογα με τις ανάγκες, επιτρέποντάς τους να λειτουργούν ως μονάδες προσωρινής αποθήκευσης ή στοιχεία χρονισμού σε κυκλώματα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές όπως οι μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και οι ταλαντωτές.

### 3.4.6 Εξοπλισμός ήχου και φιλτράρισμα θορύβου

Στον εξοπλισμό ήχου, οι πυκνωτές εξυπηρετούν πολλαπλούς ρόλους. Χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση του βουητού της γραμμής τροφοδοσίας και το φιλτράρισμα ανεπιθύμητου θορύβου, πριν αυτό εισέλθει στο κύκλωμα σήματος. Αυτό εξασφαλίζει μια καθαρότερη έξοδο ήχου. Οι πυκνωτές λειτουργούν ως τοπικές αποθήκες πλεονασματικής ενέργειας για το τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος και βοηθούν στην παράκαμψη των ρευμάτων εναλλασσόμενου ρεύματος από το τροφοδοτικό, συμβάλλοντας στη συνολική ποιότητα του ήχου.

## 3.5 Υπερπυκνωτές

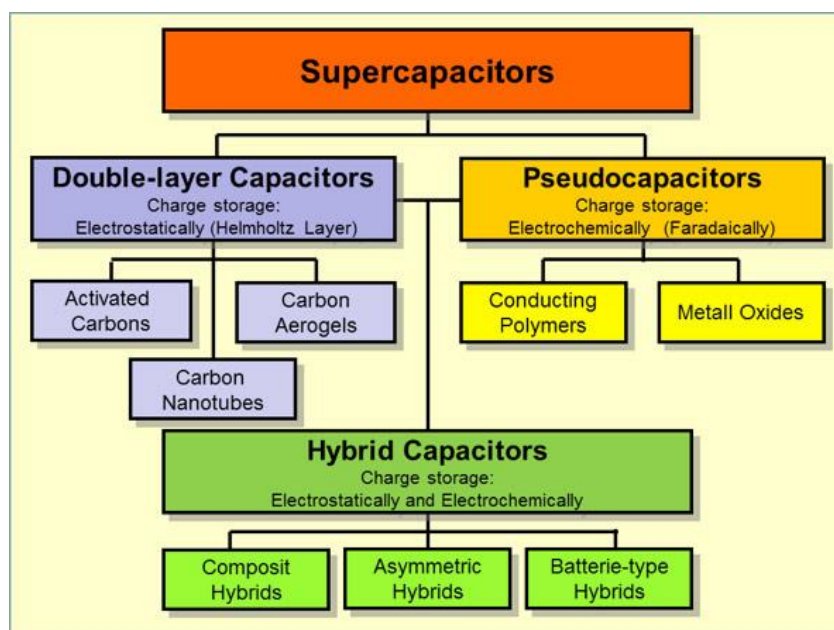
### 3.5.1 Γενικά

Οι υπερπυκνωτές είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία, η οποία εμφανίστηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1950. Τη δεκαετία του 1980 αναπτύχθηκε μια τεχνολογία υπερπυκνωτών η οποία βασίστηκε στο γραφένιο, ένα υλικό με πολύ υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, που επιτρέπει την κατασκευή υπερπυκνωτών με πολύ υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Οι υπερπυκνωτές έγιναν για πρώτη φορά εμπορικά διαθέσιμοι το 1996. Έως και σήμερα εξελίσσονται διαρκώς, αποκτώντας όλο και μεγαλύτερη ζήτηση και παράλληλα γίνονται οικονομικά όλο και πιο προσιτοί [15].

Υπάρχουν 3 βασικές κατηγορίες υπερπυκνωτών (Εικόνα 3.3), οι οποίες είναι [15][20]:

1. EDLC
2. Pseudocapacitor
3. Hybrid capacitor

Στην πρώτη κατηγορία έχουμε τους υπερπυκνωτές ηλεκτροστατικού διπλού στρώματος με ηλεκτρολύτη, οι οποίοι λειτουργούν ομοίως με τους συμβατικούς πυκνωτές, αποθηκεύοντας φορτίο ηλεκτροστατικά. Στη δεύτερη κατηγορία έχουμε τους ψευδοπυκνωτές, οι οποίοι αποθηκεύουν φορτίο με την πραγματοποίηση ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Στην τρίτη κατηγορία έχουμε τους υβριδικούς, οι οποίοι συνδυάζουν χαρακτηριστικά και από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Οι εμπορικότεροι υπερπυκνωτές είναι αυτοί της πρώτης κατηγορίας και αυτούς θα αναλύσουμε στη συνέχεια.



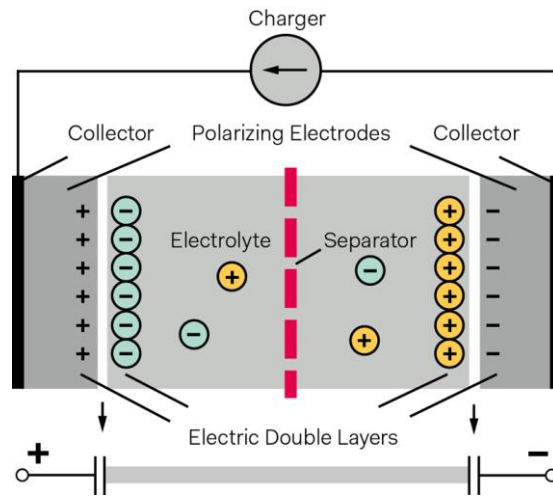
Εικόνα 3.3: Κατηγορίες υπερπυκνωτών

Πηγή: <https://be.farnell.com/capacitor-types-and-performance>

### 3.5.2 Δομή και αρχή λειτουργίας

Στην εικόνα 3.4, βλέπουμε την εσωτερική δομή ενός υπερπυκνωτή EDLC. Οι υπερπυκνωτές EDLC αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, τα οποία παρασκευάζονται από άνθρακα που βρίσκεται σε πορώδη μορφή και διαχωρίζονται από μια πορώδη μονωτική επιφάνεια. Η επιφάνεια αυτή (διαχωριστής) αποτρέπει την επαφή των ηλεκτροδίων, για να μην προκύψει βραχυκύκλωμα και ταυτόχρονα είναι διαπερατή για τον ηλεκτρολύτη. Ο ενδιάμεσος χώρος συμπληρώνεται με διάλυμα ηλεκτρολύτη. Κατά τη φόρτιση του υπερπυκνωτή ασκείται διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες (άρα και στα ηλεκτρόδια) του. Η παρουσία διαφοράς δυναμικού πολώνει τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος απελευθερώνει ανιόντα και κατιόντα. Τα ανιόντα έλκονται στο θετικό ηλεκτρόδιο, ενώ τα κατιόντα στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Μεταξύ του ηλεκτρολύτη και του κάθε ηλεκτροδίου, δημιουργείται μία πολύ λεπτή στρώση από ιόντα, τα οποία απορροφούνται από την πορώδη εσωτερική επιφάνεια του ηλεκτροδίου και προσκολλούνται σε αυτήν. Η επιφάνεια αυτή ονομάζεται ηλεκτροστατικό διπλό στρώμα (Electrostatic Double Layer) ή διπλό στρώμα Helmholtz (Helmholtz double layer) και δρα ως διηλεκτρικό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε κάθε ηλεκτρόδιο να δημιουργείται ένας πυκνωτής. Τα ηλεκτρόδια είναι δύο, οπότε η συνολική

χωρητικότητα του υπερπυκνωτή προκύπτει από τον σειριακό συνδυασμό των χωρητικοτήτων των δύο [15][20][21].



Εικόνα 3.4 : Εσωτερική δομή υπερπυκνωτή EDLC

Πηγή: <https://www.powersystemsdesign.com>

### 3.5.3 Πλεονεκτήματα

Η ιδιαιτερότητα των υπερπυκνωτών που τους διαχωρίζει από τους συμβατικούς πυκνωτές είναι ότι τα ηλεκτρόδια τους εμφανίζουν πολύ υψηλή ενεργό επιφάνεια, λόγω της πορώδους μορφής και αντίστοιχα εξαιρετικά χαμηλή απόσταση, που είναι το πάχος του στρώματος Helmholtz. Το πάχος αυτό εξαρτάται από το πάχος των ιόντων του ηλεκτρολύτη, οπότε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τιμή του παραμένει τάξεις μικρότερο από το πάχος του διηλεκτρικού ενός απλού πυκνωτή. Ο μαθηματικός τύπος της χωρητικότητας  $C = \epsilon \frac{A}{d}$ , λόγω των παραπάνω προϋποθέσεων, ορίζει την υπερυψηλή χωρητικότητα ενός υπερπυκνωτή [15][20][21].

Οι υπερπυκνωτές, λόγω της υψηλής χωρητικότητας, εμφανίζουν πυκνότητα ενέργειας πολύ μεγαλύτερη από έναν συμβατικό ηλεκτρολυτικό αλλά μικρότερη από μια μπαταρία μολύβδου-οξέος. Από την άλλη, εμφανίζουν μικρότερη πυκνότητα ισχύος από έναν απλό πυκνωτή αλλά μεγαλύτερη από μια μπαταρία. Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι αποτελούν τον ενδιάμεσο μεταξύ συμβατικών πυκνωτών και μπαταριών [15][20].

Οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις μπαταρίες. Η πολύ χαμηλότερη εσωτερική αντίστασή τους (ESR), μειώνει τις θερμικές απώλειες και επιτρέπει την ύπαρξη μεγαλύτερων ρευμάτων. Σε κάθε περίπτωση, ένας υπερπυκνωτής έχει τη δυνατότητα για φόρτιση και εκφόρτιση με ραγδαίους ρυθμούς και αντίστοιχα υψηλά ρεύματα, σε αντίθεση με τις μπαταρίες. Επιπλέον, ο αριθμός κύκλων χρήσης ενός υπερπυκνωτή μπορεί να είναι ακόμα και χιλιάδες φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο αριθμό μιας μπαταρία μολύβδου-οξέος. Οι υπερπυκνωτές είναι πιο ανθεκτικοί σε ακραίες θερμοκρασίες από τις μπαταρίες και επίσης πιο ανθεκτικοί σε υπερφόρτιση. Τέλος, οι υπερπυκνωτές ουδεμία επίπτωση έχουν από την υπερβολικά χαμηλή τάση, παρέχοντας αδιάλειπτα ισχύ. Οι μπαταρίες από την άλλη καταστρέφονται αν εκτίθενται συστηματικά σε πολύ βαθιές εκφορτίσεις [21].

Τα πλεονεκτήματα των υπερπυκνωτών έναντι των μπαταριών, τους καθιστούν κατάλληλους για μια πληθώρα εφαρμογών όπως [22]:

- Ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα για ανάκτηση ενέργειας από το φρενάρισμα και απότομες επιταχύνσεις, όπου η ισχύς είναι πολύ υψηλή
- Συστήματα εκκίνησης κινητήρων εσωτερικής καύσης, για την παροχή της σύντομης έξαρσης ισχύος που απαιτείται από τους εκκινήτες
- Συστήματα UPS, για την παροχή ισχύος κατά τη μεταγωγή των κυκλωμάτων



Εικόνα 3.5: Υπερπυκνωτής EDLC 3000 F 3 Volt

Πηγή : <https://www.richardsonrfd.com>

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Περιγραφή λειτουργίας συσκευής

### 4.1 Εισαγωγή

Οι μπαταρίες οξέος χρησιμοποιούνται ευρύτατα ακόμα και σήμερα στα οχήματα, για να τροφοδοτούν το ηλεκτρικό σύστημα, όταν το όχημα δεν χρησιμοποιείται αλλά και για την εκκίνηση του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Η διαδεδομένη χρήση τους δε σημαίνει, όμως, ότι δεν έχουν αρκετά μειονεκτήματα. Το κυριότερο μειονέκτημα είναι το κόστος. Ένα μέσο αυτοκίνητο παραγωγής εξοπλίζεται, συνήθως, με μπαταρία που κυμαίνεται από 50 έως 70 Ah. Μπαταρίες τέτοιας χωρητικότητας μπορεί να βρει κανείς σε πληθώρα στο εμπόριο σε διάφορες ποιότητες και τιμές. Η επιλογή μιας αξιόπιστης μπαταρίας, που θα κρατήσει ένα εύλογο χρονικό διάστημα, συνοδεύεται από το ανάλογο κόστος, το οποίο πολλές φορές είναι αρκετά επιβαρυντικό για τον αγοραστή. Ως παράδειγμα, θα αναφερθούμε στην μπαταρία με την οποία εξοπλίζεται την παρούσα στιγμή το αυτοκίνητο πάνω στο οποίο θα μελετηθεί και υλοποιηθεί η εργασία μας. Η μπαταρία αυτή είναι χωρητικότητας 63 Ah και μπορεί να παρέχει ρεύμα κρύας εκκίνησης έως 610 Ah. Το κόστος της, όταν τοποθετήθηκε, ήταν στα 90 ευρώ. Το ποσό μπορεί να μην δείχνει μεγάλο, το γεγονός όμως, ότι ακόμα και μια ποιοτική μπαταρία με μέση χρήση δε διαρκεί για παραπάνω από 5 με 6 χρόνια, την καθιστά υπολογίσιμο ανταλλακτικό. Εν συνεχεία, τίθεται και το θέμα του βάρους, με τις μπαταρίες των αυτοκινήτων να ζυγίζουν συνήθως πάνω από 13 κιλά κατά μέσο όρο.

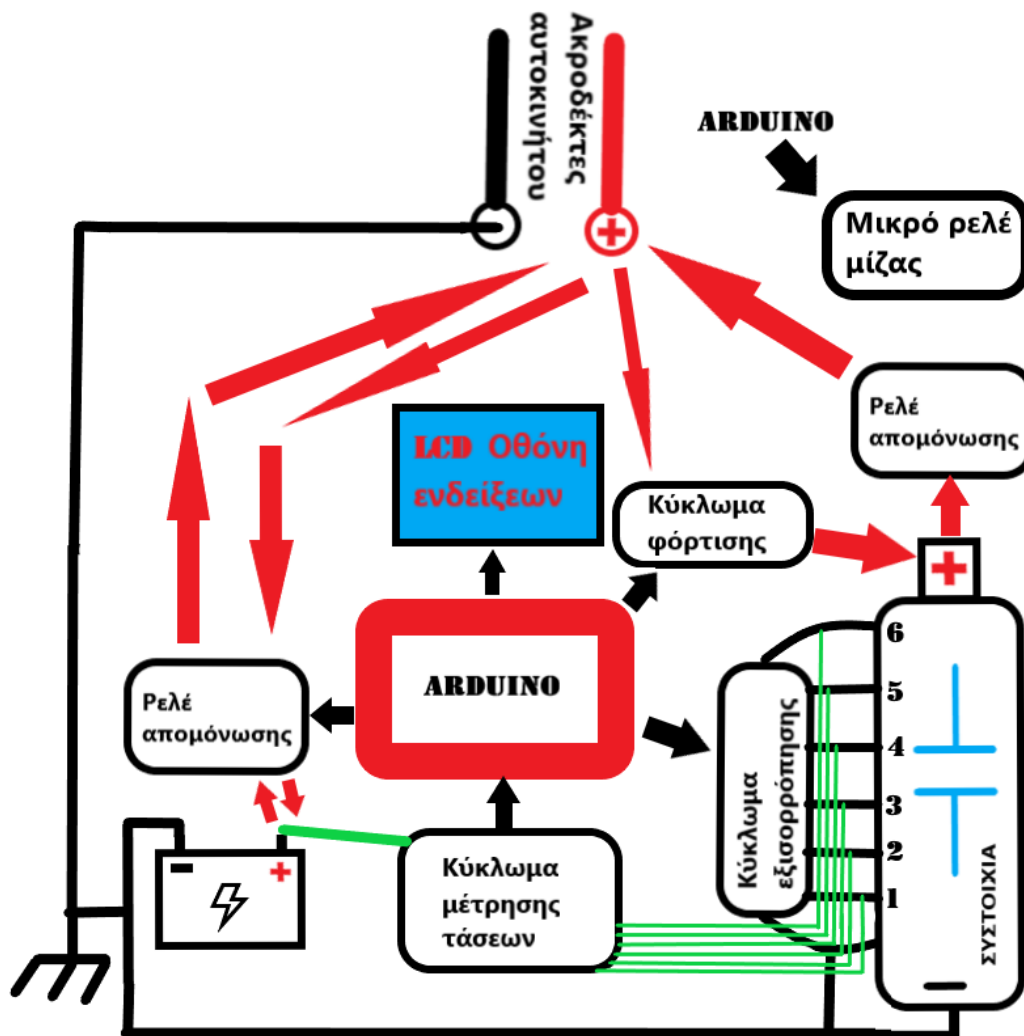
Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι η απότομη και χωρίς σημάδια αχρήστευσή τους. Με το πέρασμα του χρόνου, τη χρήση και τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας οι μπαταρίες γερνάνε. Η γήρανση επιφέρει ελαττωμένη χωρητικότητα, ελαττωμένο ρεύμα κρύας εκκίνησης και αύξηση της εσωτερικής αντίστασης. Μετά από ένα σημείο η γήρανση είναι αρκετά προχωρημένη, ώστε πλέον η μπαταρία αδυνατεί να συντηρεί τις καταναλώσεις του αυτοκινήτου και να εκκινεί τον κινητήρα. Το πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι στις περισσότερες περιπτώσεις τα σημάδια της γήρανσης δεν γίνονται εύκολα αντιληπτά από τον χρήστη του οχήματος, ενώ αρκετές φορές η μπαταρία «νεκρώνει» μέσα σε λίγες ώρες χωρίς να έχει προηγηθεί καμία προειδοποιητική πτώση απόδοσης. Κάτι τέτοιο, μπορεί να επιφέρει μια δυσχερή κατάσταση, αφού το αυτοκίνητο πλέον αδυνατεί να εκκινήσει τον κινητήρα ή ακόμα και να ξεκλειδώσει. Στα παραπάνω αξίζει να προστεθεί και το γεγονός ότι σε συνθήκες ιδιαίτερα χαμηλών θερμοκρασιών, η εσωτερική αντίσταση των συμβατικών μπαταριών αυξάνεται σημαντικά, δυσχεραίνοντας ή ακόμα και αποτρέποντας την έναυση του κινητήρα.

Ο σκοπός πίσω από την παρούσα συσκευή είναι η πλήρης απαλλαγή από την κοστοβόρα συμβατική μπαταρία και τα μειονεκτήματά της. Η συσκευή έχει κατασκευαστεί και προγραμματιστεί με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να καλύπτει όσο το δυνατόν περισσότερα πιθανά σενάρια λειτουργίας. Η συνύπαρξη της συσκευής με το ηλεκτρολογικό σύστημα του αυτοκινήτου, καθώς και η διαδικασία εκκίνησης του κινητήρα, χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα. Κύριοι στόχοι είναι να μην επηρεαστεί η λειτουργικότητα του αυτοκινήτου, να μην τίθενται θέματα ασφαλείας αλλά και να πραγματοποιείται με επιτυχία η εκκίνηση του κινητήρα. Το κίνητρο όμως, για το εγχείρημα αυτό, είναι η συσκευή να μπορεί να πραγματοποιεί όλα τα παραπάνω, εξασφαλίζοντάς μας ότι το αυτοκίνητο δε θα «μένει» απροειδοποίητα από μπαταρία αλλά και μειώνοντας σημαντικά το κόστος που συνεπάγεται η αντικατάσταση μιας μπαταρίας.

Για να υλοποιηθούν όλα τα παραπάνω, η συσκευή μας πρέπει να είναι υβριδική. Η λογική της είναι ο συνδυασμός μιας μπαταρίας οξέος μολύβδου, αρκετά μικρότερης χωρητικότητας από το συνηθισμένο για ένα αυτοκίνητο, με μια συστοιχία υπερπυκνωτών. Οι υπερπυκνωτές έχουν πολύ υψηλή ρευματική

ικανότητα, η οποία ξεπερνά ακόμα και αυτή της συμβατικής μπαταρίας. Παράλληλα, είναι ικανοί να παρέχουν αιχμές ρεύματος εξαιρετικά υψηλής τιμής. Στα θετικά, πρέπει να προστεθεί και το γεγονός ότι η αποθηκευμένη ηλεκτρική τους ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί ακόμα και όταν τείνουν σε σχεδόν πλήρη αποφόρτιση, χωρίς να επηρεάζεται η ένταση του ρεύματος που μπορούν να διατηρήσουν. Όσον αφορά τη θερμοκρασία λειτουργίας, αυτή επηρεάζει την εσωτερική τους αντίσταση, η οποία όμως, όπως θα αναλυθεί αργότερα, είναι τόσο χαμηλή που επηρεάζει σε μικρό βαθμό το ρεύμα που μπορούν να παράσχουν. Τέλος, το αξιοσημείο χαρακτηριστικό τους είναι ο χρόνος ζωής, που συνήθως είναι πολλές εκατοντάδες χιλιάδες πλήρεις κύκλοι φόρτισης – εκφόρτισης, κάτι το οποίο καθιστά περιττή την αντικατάστασή τους καθ' όλο το «κύκλο ζωής» ενός αυτοκινήτου. Όλα τα παραπάνω καθιστούν τους υπερπυκνωτές το ιδανικό υποκατάστατο μπαταρίας για ένα σύστημα εκκίνησης.

Το σημείο όπου «υποφέρουν» οι πυκνωτές είναι η πυκνότητα ενέργειας, που αν και είναι πολύ υψηλότερη από την αντίστοιχη των απλών ηλεκτρολυτικών πυκνωτών, παραμένει αρκετά μικρότερη από αυτή των μπαταριών. Ένα αυτοκίνητο, ακόμα και όταν δε βρίσκεται σε λειτουργία ο κινητήρας του, έχει ηλεκτρική κατανάλωση, η οποία μπορεί να μην αποτελεί σημαντικό φορτίο για μια συμβατική μπαταρία αλλά είναι ικανή να αποφορτίσει ταχύτατα τους υπερπυκνωτές. Σε αυτό το



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα λειτουργίας συσκευής

πρόβλημα τη λύση μας την παρέχει η προσθήκη μιας συμβατικής μπαταρίας, η οποία θα έχει χωρητικότητα κλάσεις μικρότερη από την αντίστοιχη που χρησιμοποιεί το αυτοκίνητο. Ο ρόλος της, που περιορίζεται στο να διατηρεί τις καταναλώσεις ενός σβηστού αυτοκινήτου με κάποιες λίγες εξαιρέσεις έκτακτων φορτίων, καλύπτεται από μικρές χωρητικότητες με την ανάλογη κοστολογική ελάφρυνση που επιφέρει η επιλογή μιας τέτοιας μπαταρίας. Η συνύπαρξη των υπερπυκνωτών με τη μικρής χωρητικότητας συμβατική μπαταρία δεν είναι απλή διαδικασία. Ο διαχωρισμός των ρόλων τους, των πυκνωτών για την εκκίνηση και της μπαταρίας για όλα τα υπόλοιπα, καθώς και η ορθή διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος του εναλλάκτη για τη φόρτιση του συστήματος, απαιτούν την ύπαρξη κυκλωμάτων ελέγχου.

Στην εικόνα 4.1, βλέπουμε ένα συνοπτικό διάγραμμα λειτουργίας της συσκευής. Ο «εγκέφαλος» της συσκευής είναι ένας μικροελεγκτής Arduino, όπως θα αναλύσουμε στη συνέχεια. Ο μικροελεγκτής ελέγχει όλα τα υπόλοιπα κυκλώματα της συσκευής, όπως φαίνεται και στην εικόνα, ενώ μας πληροφορεί και για την κατάσταση του συστήματος μέσω μιας οθόνης LCD. Τέλος, είναι υπεύθυνο και για τον έλεγχο της εκκίνησης του κινητήρα μέσω του μικρού ρελέ μίζας που θα αναλύσουμε σε επόμενο κεφάλαιο.

### 4.2 Περιγραφή λειτουργίας του συστήματος

Η συσκευή που θα κατασκευαστεί, συνοπτικά, τροφοδοτεί το ηλεκτρικό σύστημα του αυτοκινήτου με την μικρή 12 Volt μπαταρία όσο αυτό είναι σβηστό, όπως συμβαίνει και με την κανονική μπαταρία, και όταν επιθυμούμε να εκκινήσουμε τον κινητήρα, η απαιτούμενη ισχύς παρέχεται από τους πυκνωτές. Κατά την περίοδο που το αυτοκίνητο έχει σβηστό κινητήρα και/ή είναι κλειδωμένο, η συσκευή θα απενεργοποιείται πλήρως για εξοικονόμηση ενέργειας. Για να είναι εφικτή η σωστή διαχείριση της μπαταρίας και των υπερπυκνωτών, η συσκευή πρέπει να γνωρίζει σε ποια θέση βρίσκεται ο κλειδοδιακόπτης του αυτοκινήτου. Στην πρώτη θέση του διακόπτη, που ονομάζεται “Accessories”, το ηλεκτρολογικό σύστημα του αυτοκινήτου λειτουργεί πλήρως και το ταμπλό ενδείξεων έχει ενεργοποιηθεί εκτελώντας την διαγνωστική του διαδικασία. Η αντλία καυσίμου ενεργοποιείται για μερικά δευτερόλεπτα για να εξασφαλιστεί η απαραίτητη πίεση καυσίμου για την εκκίνηση. Τέλος, τα ηλεκτρικά παράθυρα ενεργοποιούνται και μπορούν να ελεγχθούν από τους αντίστοιχους διακόπτες. Στην κατάσταση αυτή, παρατηρείται αυξημένη κατανάλωση ενέργειας που δικαιολογείται από τα παραπάνω. Η εκκίνηση του κινητήρα είναι πλέον εφικτή, εφόσον γυρίσουμε το κλειδί στην επόμενη θέση του διακόπτη, που ονομάζεται “Start”. Μέχρι τη στιγμή που θα γίνει η εκκίνηση, το ρεύμα που απαιτείται πρέπει να παρέχεται από την συμβατική μπαταρία και άρα οι υπερπυκνωτές θα παραμένουν σε απομόνωση. Η συσκευή θα ενεργοποιείται με το γύρισμα του κλειδιού στη θέση “Accessories”, κατά την οποία διακρίνονται τρία πιθανά σενάρια.

Το πρώτο και απλούστερο σενάριο είναι οι τάσεις της μπαταρίας και της συστοιχίας να βρίσκονται σε φυσιολογικά επίπεδα για τη λειτουργία των ηλεκτρικών καταναλώσεων. Στην περίπτωση αυτή, με το γύρισμα του κλειδιού στη θέση “Accessories”, η συσκευή ενεργοποιείται και παραμένει σε κατάσταση αναμονής, μέχρις ότου γυρίσουμε το κλειδί για την εκκίνηση του κινητήρα με την μπαταρία να τροφοδοτεί τις καταναλώσεις. Όταν γυρίσουμε το κλειδί στη θέση “Start”, το ρελέ της μπαταρίας την απομονώνει από το αυτοκίνητο, έπειτα συνδέεται η συστοιχία με το ηλεκτρολογικό σύστημα του αυτοκινήτου μέσω του ρελέ υψηλής ισχύος και τέλος δίνεται η εντολή ενεργοποίησης στο μικρό ρελέ μίζας, ώστε να εκκινηθεί ο κινητήρας. Στο σημείο αυτό, είναι καλό να αναφέρουμε πως το μικρό ρελέ της μίζας, το οποίο βρίσκεται στην ασφαλειοθήκη στον χώρο του κινητήρα, όταν ενεργοποιηθεί, τροφοδοτεί το «μπουτόν» της μίζας, το οποίο με τη σειρά του ενεργοποιεί τη μίζα και διαρρέεται από το ρεύμα λειτουργίας της. Αν το αυτοκίνητο δεν αντιμετωπίζει κάποιο λειτουργικό

πρόβλημα, ο κινητήρας θα ξεκινήσει να λειτουργεί. Τέλος, αφού το κλειδί επιστρέψει στη θέση “Accessories”, απενεργοποιείται το μικρό ρελέ της μίζας, η οποία παύει να περιστρέφεται. Η συστοιχία απομονώνεται και επανασυνδέεται η μπαταρία στο ηλεκτρολογικό σύστημα και όλες οι καταναλώσεις τροφοδοτούνται πλέον από τον εναλλάκτη.

Το δεύτερο σενάριο είναι η συστοιχία να μην έχει επαρκή τάση για την εκκίνηση του κινητήρα αλλά η τάση της μπαταρίας να είναι σε φυσιολογικό επίπεδο. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί αν το αυτοκίνητο παραμείνει στάσιμο για αρκετό καιρό, με αποτέλεσμα η συστοιχία να αποφορτιστεί σε μεγάλο ποσοστό, λόγω του ρεύματος διαρροής των υπερπυκνωτών. Ένας επιπλέον λόγος, που μπορεί να οδηγήσει σε αυτήν την κατάσταση, είναι οι επανειλημμένες προσπάθειες εκκίνησης του κινητήρα χωρίς επιτυχία, που μπορεί να οφείλονται για παράδειγμα σε μηχανική βλάβη. Σε κάθε περίπτωση, το αυτοκίνητο δεν επηρεάζεται όσον αφορά τις ηλεκτρικές του καταναλώσεις, αφού η συμβατική μπαταρία έχει απόθεμα ενέργειας. Το κύριο εμπόδιο στην όλη διαδικασία είναι η αδυναμία εκκίνησης του κινητήρα. Η λύση στο πρόβλημα είναι απλή και δεν είναι άλλη από την φόρτιση της συστοιχίας από την συμβατική μπαταρία. Η ενεργειακή πυκνότητα της μπαταρίας είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των πυκνωτών και άρα η παροχή ενέργειας από την μπαταρία προς την συστοιχία για την φόρτισή της δεν θα επηρεάσει σημαντικά την τάση της πρώτης. Όταν γυρίσουμε το κλειδί στη θέση “Accessories” και το σύστημα εντοπίζει χαμηλή τάση συστοιχίας, αυτόματα θα εκκινήσει τη φόρτιση της συστοιχίας από τη μπαταρία μέχρι οι τάσεις να εξισωθούν, ή να γίνει προσπάθεια εκκίνησης από τον χρήστη του οχήματος. Η διαδικασία αυτή θα δύναται να επαναλαμβάνεται αρκετές φορές, αν αυτό καταστεί αναγκαίο για την επιτυχή έναυση του κινητήρα. Μετά το πέρας της φόρτισης της συστοιχίας, γυρνώντας τα κλειδί στη θέση “Start”, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία με το πρώτο σενάριο και ο κινητήρας εκκινεί. Στη συνέχεια, επιστρέφουμε το κλειδί στη θέση “Accessories” και ισχύουν ακριβώς τα ίδια με το πρώτο σενάριο.

Το τρίτο σενάριο, που είναι και το λιγότερο επιθυμητό, είναι η συστοιχία να έχει επαρκή τάση για εκκίνηση αλλά η τάση της μπαταρίας να είναι αρκετά χαμηλή, σε σημείο ώστε να έχει απενεργοποιηθεί το ηλεκτρικό σύστημα του αυτοκινήτου λόγω υπότασης. Στην κατάσταση αυτή, το αυτοκίνητο δε δύναται να ξεκλειδωθεί με τηλεχειρισμό, παρά μόνο μηχανικά με το κλειδί. Αφότου ξεκλειδωθεί, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί η συνήθης διαδικασία εκκίνησης. Με το γύρισμα του κλειδοδιακόπτη στη θέση “Accessories” δεν ενεργοποιείται η συσκευή και παραμένει πλήρως σβηστή, αφού σε αυτό το στάδιο τα πάντα τροφοδοτούνται από την αποφορτισμένη πλέον μπαταρία. Οποιαδήποτε προσπάθεια εκκίνησης απλά δε θα επιτύχει, αφού η διαδικασία μεταγωγής των ρελέ και η εντολή για εκκίνηση προϋποθέτουν τη λειτουργία της συσκευής. Σε αυτό το σημείο, ο χρήστης του αυτοκινήτου αντιλαμβάνεται το πρόβλημα, καθώς τα πάντα στο αυτοκίνητο είναι απενεργοποιημένα και το γύρισμα του κλειδιού στον κλειδοδιακόπτη δεν επιφέρει κανένα αποτέλεσμα. Η φόρτιση της μπαταρίας από τους πυκνωτές δε λύνει το πρόβλημα. Η αποθηκευμένη ενέργεια της συστοιχίας δεν επαρκεί σε καμία περίπτωση, για να αναπληρωθεί έστω και ένα μικρό ποσοστό της χωρητικότητάς της μπαταρίας. Μια εφικτή λύση είναι η προσωρινή παροχή τροφοδοσίας του ηλεκτρικού συστήματος του αυτοκινήτου από την συστοιχία. Η λύση αυτή περιλαμβάνει αρκετά βήματα. Αρχικά, αφού ο χρήστης αντιληφθεί το πρόβλημα γυρνά τον κλειδοδιακόπτη στη θέση off. Θέτοντας στη θέση ON έναν χειροκίνητο DPST διακόπτη, που βρίσκεται στο εξωτερικό της συσκευής, παρέχεται τροφοδοσία στην συσκευή από τους πυκνωτές, καθώς και ένα σήμα ελέγχου στη συσκευή, για να αναγνωρίσει την κατάσταση χαμηλής τάσης μπαταρίας. Στη συνέχεια, η συσκευή ενεργοποιείται και λαμβάνοντας το σήμα ελέγχου μεταβαίνει σε κατάσταση χαμηλής μπαταρίας. Δίνονται οι εντολές για απομόνωση της μπαταρίας και ενεργοποίηση του ρελέ της συστοιχίας, έτσι ώστε το ηλεκτρολογικό σύστημα του αυτοκινήτου να τροφοδοτηθεί από τους υπερπυκνωτές. Το επόμενο βήμα είναι το γύρισμα του

κλειδοδιακόπτη στη θέση “Accessories”, όπως ακριβώς συμβαίνει και στα προηγούμενα σενάρια. Αφού ολοκληρωθούν τα διαγνωστικά που εκτελεί το αυτοκίνητο, μπορεί πλέον να γίνει προσπάθεια εκκίνησης. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα σενάρια, όταν γυρίσουμε το κλειδί στη θέση “Start”, η συσκευή απλά θα δώσει το κατάλληλο σήμα ενεργοποίησης στο ρελέ της μίζας, για να εκκινήσει ο κινητήρας. Εφόσον αυτό συμβεί, επαναφέρουμε το κλειδί στη θέση “Accessories” και ισχύουν τα ίδια με τα προηγούμενα σενάρια. Τέλος, ο χρήστης πρέπει να επαναφέρει τον χειροκίνητο διακόπτη στη θέση OFF για την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Τα κοινό και στα 3 σενάρια που αναλύθηκαν πιο πάνω, είναι τι συμβαίνει μετά την εκκίνηση. Εφόσον ο κινητήρας βρίσκεται πλέον σε λειτουργία, ο εναλλάκτης παράγει την απαιτούμενη ισχύ για να λειτουργεί το ηλεκτρολογικό σύστημα του αυτοκινήτου. Η συμβατική μπαταρία είναι απευθείας συνδεδεμένη στην έξοδο του ανορθωτή μέσω της NC επαφής του ρελέ της και φορτίζει με την παραγόμενη τάση. Η συστοιχία των υπερπυκνωτών που έχει απομονωθεί απαιτεί επίσης φόρτιση. Σε αντίθεση με την μπαταρία, που απαιτεί συνήθως το πολύ 4 A, η απευθείας σύνδεση της συστοιχίας με την έξοδο του ανορθωτή δημιουργεί τον κίνδυνο υπερέντασης ή ακόμα και πρόκληση ζημιάς στον εναλλάκτη. Η εξαιρετικά χαμηλή εσωτερική αντίσταση των υπερπυκνωτών, όπως θα συζητηθεί αργότερα, σε συνδυασμό με την κυμάτωση της τάσης του ανορθωτή δημιουργούν τις συνθήκες για υπερβολικό ρεύμα φόρτισης μη ελεγχόμενης τιμής.

Παρόλο που οι υπερπυκνωτές έχουν την δυνατότητα να διαχειριστούν πολύ μεγάλα ρεύματα χωρίς πρόβλημα, δεν ισχύει το ίδιο και για τον εναλλάκτη. Η απορρόφηση ηλεκτρικής ισχύος κοντά στο ονομαστικό όριο του εναλλάκτη ή και πάνω από αυτό ενδέχεται να προκαλέσει ελλιπή τροφοδοσία των ηλεκτρικών καταναλώσεων του αυτοκινήτου, αύξηση θερμοκρασίας στα καλώδια και ίσως βλάβη στον ίδιο τον εναλλάκτη. Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων, θα χρησιμοποιηθεί ένα κύκλωμα ελεγχόμενης φόρτισης.

Η ορθή λειτουργία του συστήματος επιβάλει τη σωστή διαχείριση των διαφόρων τάσεων. Η επίβλεψη των τάσεων του συστήματος θα λαμβάνει χώρα καθ’ όλη τη διάρκεια που η συσκευή είναι ενεργή, έτσι ώστε να γίνονται οι κατάλληλες ενέργειες. Η πληθώρα και η πολυπλοκότητα των τάσεων απαιτεί την ύπαρξη ενός ξεχωριστού κυκλώματος, το οποίο θα είναι αποκλειστικά υπεύθυνο για τη μέτρηση των τάσεων.

Στις προηγούμενες παραγράφους είδαμε πως το σύστημά μας διαχειρίζεται τόσο σήματα εισόδου (τάσεις, σήματα από διακόπτες), όσο και σήματα εξόδου. Τα σήματα εξόδου ελέγχουν τα ρελέ καθώς και τα διάφορα μεμονωμένα κυκλώματα, όπως θα δούμε παρακάτω. Τον κεντρικό έλεγχο του συστήματος αναλαμβάνει ένας μικροελεγκτής, με την προσθήκη μιας συμπληρωματικής βοηθητικής πλακέτας. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν εκτενώς οι πλακέτες που κατασκευάστηκαν, καθώς και τα χαρακτηριστικά των υπερπυκνωτών και της μπαταρίας 12 Volt που επιλέχθηκαν.

### 4.3 Επιλογή υπερπυκνωτών

Το πρώτο βήμα για τη μελέτη της κατασκευής αποτελεί αδιαμφισβήτητα η επιλογή των υπερπυκνωτών. Οι τρεις παράγοντες, οι οποίοι θα καθορίσουν την επιλογή μας, είναι η χωρητικότητά τους, το μέγεθός τους και η ονομαστική τους τάση. Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε, πως το αυτοκίνητο πάνω στο οποίο έγινε η όλη μελέτη για την κατασκευή και οι τελικές δοκιμές ορθής λειτουργίας, είναι ένα Ford Focus του 2006 με κινητήρα 1600 κυβικών εκατοστών. Ο εναλλάκτης του αυτοκινήτου είναι ικανός για παραγωγή ισχύος 1100 watt. Η όλη κατασκευή αφορά, όπως βλέπουμε, ένα μέσο αυτοκίνητο παραγωγής.

### 4.3.1 Μέγεθος

Ξεκινώντας από τον παράγοντα του μεγέθους, πρέπει αρχικά να μετρηθεί το μέγεθος της υπάρχουσας μπαταρίας του αυτοκινήτου. Το αυτοκίνητο χρησιμοποιεί μια μπαταρία 12 volt οξέος μολύβδου (lead acid), η οποία χαρακτηρίζεται από χωρητικότητα 63 Ah και ρεύμα κρύας εκκίνησης (CCA) 610 A. Οι διαστάσεις της μπαταρίας είναι 17.4cm το πλάτος, 19.2cm το ύψος μαζί με τους πόλους και 24cm το μήκος (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2: Μπαταρία 12 Volt 63 Ah του αυτοκινήτου

Ο χώρος όμως του αυτοκινήτου, όπου τοποθετείται η μπαταρία (μπαταριοθήκη) είναι σημαντικά μεγαλύτερος από την ίδια την μπαταρία, αφού από τον κατασκευαστή προβλέπεται η πιθανή τοποθέτηση μεγαλύτερης μπαταρίας από τον χρήστη του οχήματος, καθώς επίσης και για να είναι εφικτή η τοποθέτηση και απομάκρυνση αυτής. Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει πως ο μέγιστος εκμεταλλεύσιμος χώρος είναι 28cm το μήκος, 22cm το ύψος και 18cm το πλάτος. Οι προαναφερθείσες μετρήσεις έλαβαν χώρα έχοντας υπολογίσει επαρκή περιθώρια για την τοποθέτηση και απομάκρυνση της κατασκευής από το αυτοκίνητο. Το μέγεθος των υπερπυκνωτών είναι καθοριστικό για την επιτυχή ολοκλήρωση της κατασκευής. Η συστοιχία των υπερπυκνωτών πρέπει να χωρά μέσα στο κυτίο της κατασκευής με κάποιες ανοχές από τα τοιχώματα, αφήνοντας παράλληλα επαρκή χώρο για την τοποθέτηση της συμβατικής μπαταρίας και των απαραίτητων κυκλωμάτων.

### 4.3.2 Ονομαστική χωρητικότητα

Ο παράγοντας της χωρητικότητας των υπερπυκνωτών αφορά τη μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια των πυκνωτών, καθώς και την ρευματική τους ικανότητα. Η επιλογή της κατάλληλης χωρητικότητας πρέπει να γίνει με γνώμονα τις ρευματικές ανάγκες του αυτοκινήτου για την εκκίνηση του κινητήρα, όπως επίσης και τον επιθυμητό χρόνο που θα είναι ικανή η συστοιχία μας να την τροφοδοτεί. Πραγματοποιήθηκαν αρκετές μετρήσεις καλύπτοντας αρκετά σενάρια εκκίνησης. Πιο αναλυτικά, μετρήθηκε το ρεύμα εκκίνησης, χωρίς αλλά και με τη χρήση του συμπλέκτη, ενώ όλες οι δοκιμές έγιναν σε διαφορετικές θερμοκρασίες κινητήρα. Μετρήθηκε το ρεύμα τόσο για την περίπτωση του

κρύου κινητήρα που δεν ήταν σε λειτουργία για αρκετές μέρες, όσο και για θερμότερες καταστάσεις που προσομοιώνουν την λειτουργία του κινητήρα από λίγα λεπτά στο ρελαντί έως για πολύωρο ταξίδι. Σημαντικό είναι να αναφερθεί, πως για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε αμπεροτσιμπίδα των 400 A, ενώ λόγω του γεγονότος ότι η αμπεροτσιμπίδα δε διέθετε λειτουργία μέτρησης ρεύματος αιχμής (inrush current), δεν ήταν δυνατή η μέτρηση του ρεύματος αιχμής που διαρρέει τον εκκινητήρα τα πρώτα millisecond της λειτουργίας του. Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι η εκκίνηση του κινητήρα είναι μια διαδικασία αρκετά γρήγορη (συνήθως 1-3 δευτερόλεπτα), οποιαδήποτε μέτρηση θα ήταν δύσκολο να υλοποιηθεί. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, όλες οι δοκιμές έγιναν με αποσυνδεδεμένα τα μπουζοκαλώδια από τα μπουζί. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα ο κινητήρας να μην εκκινεί, όταν εκτελούνταν οι προσπάθειες εκκίνησης αλλά να περιστρέφεται σε χαμηλές στροφές με τη βοήθεια του εκκινητήρα. Για τους ευνόητους λόγους της προστασίας όλου του ηλεκτρολογικού συστήματος του αυτοκινήτου, όλες οι προσπάθειες εκκίνησης διήρκησαν από 5 έως 7 δευτερόλεπτα το πολύ. Στο χρόνο αυτό ήταν εφικτή η καταγραφή μιας σχετικά σταθεροποιημένης ένδειξης στην οθόνη της αμπεροτσιμπίδας. Σε όλες αυτές τις μετρήσεις, τα αποτελέσματα έδειξαν ρεύμα που κυμαινόταν από 92A έως 110 A.

### 4.3.3 Ονομαστική τάση

Τέλος, ο παράγοντας της ονομαστικής τάσης των υπερπυκνωτών είναι ο λιγότερο καθοριστικός. Οι επιλογές είναι ελάχιστες, καθώς η μέγιστη ονομαστική τάση σε έναν υπερπυκνωτή χωρητικότητας χιλιάδων Farad συνήθως κυμαίνεται από 2.7 έως 3.15 Volt. Το γεγονός ότι σε όλα τα αυτοκίνητα παραγωγής η ονομαστική τάση εξόδου του ανορθωτή είναι 14.4 Volt, είναι εύλογο το ότι απαιτείται σειριακή σύνδεση 5 ή 6 πυκνωτών. Στην περίπτωση μας, η τάση αυτή μετρήθηκε αρκετές φορές με την τιμή της να κυμαίνεται από 14 έως 14.22 Volt. Οι τιμές αυτές είναι αποδεκτές καθώς βρίσκονται πολύ κοντά στην ιδανική των 14.4 Volt.

Ο διαθέσιμος χρόνος για εκκινήσεις που μπορούν να μας παρέχουν οι υπερπυκνωτές είναι το κύριο ζητούμενο. Στοχεύοντας, λοιπόν, στη μέγιστη δυνατή αυτονομία, η λογική που ακολουθήσαμε ήταν η επιλογή του μεγίστου μεγέθους πυκνωτή που να χωρά στο χώρο της μπαταριοθήκης. Το σχήμα των υπερπυκνωτών είναι κυλινδρικό με το μήκος να είναι μεγαλύτερο από τη διάμετρο. Αυτό μας οδήγησε στο να λάβουμε αρχικά ως περιορισμό το μήκος να έχει τέτοια τιμή, έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν περισσότερο μία από τις διαστάσεις του χώρου της μπαταριοθήκης. Στα παραπάνω, συνυπολογίστηκαν και οι απαραίτητες ανοχές για το πάχος του κουτιού της κατασκευής. Από ενδεδειγμένη αναζήτηση στο διαδίκτυο προέκυψε πως η διάμετρος των υπερπυκνωτών από 1000 Farad και πάνω είναι συνήθως σταθερή στα 60 χιλιοστά με ελάχιστες εξαιρέσεις στα 50 χιλιοστά. Το μεταβλητό χαρακτηριστικό τους είναι το μήκος, το οποίο αυξάνεται με την αύξηση της χωρητικότητας. Η πιο εκμεταλλεύσιμη τιμή μήκους που εντοπίσαμε ήταν στα 16.5 εκατοστά με την προϋπόθεση τοποθέτησης των πυκνωτών κατά πλάτος μέσα στο κουτί. Η χωρητικότητα σε αυτό το μέγεθος ανέρχεται στα 3000 Farad.

Έπειτα από την επιλογή του σημαντικότερου παράγοντα που είναι η χωρητικότητα, σειρά έχει και η επιλογή της κατάλληλης ονομαστικής τάσης. Για την επίτευξη της ονομαστικής τάσης των 14.4 Volt του ανορθωτή, είναι προφανές πως απαιτείται σειριακή σύνδεση υπερπυκνωτών. Έστω ότι επιθυμούμε τη χρήση 5 υπερπυκνωτών, τότε ο κάθε υπερπυκνωτής απαιτείται να έχει ονομαστική τάση λειτουργίας τουλάχιστον  $\frac{14.4}{5} = 2.88$  Volt. Αντίστοιχα, αν γίνει χρήση 6 υπερπυκνωτών απαιτείται ελάχιστη ονομαστική τάση λειτουργίας ίση με  $\frac{14.4}{6} = 2.4$  Volt. Σε κάθε περίπτωση, η ονομαστική τάση λειτουργίας των πυκνωτών επιβάλλεται να έχει μια ανοχή από τις τιμές που

υπολογίστηκαν. Από τις διαθέσιμες τιμές τάσεων που υπάρχουν στο εμπόριο η μοναδική επιλογή που καλύπτει τα 2.88 Volt είναι τα 3 Volt, όπου και πάλι η ανοχή είναι οριακά αρκετή για την εξασφάλιση ασφαλούς λειτουργίας. Εκτός αυτού, το κόστος των πυκνωτών ονομαστικής τάσης 3 Volt ήταν σημαντικά μεγαλύτερο από πυκνωτές των 2.7 και 2.85 Volt. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα η αγορά 6 πυκνωτών 2.7 ή 2.85 Volt. Τέλος, λαμβάνοντας ως επαρκή την τάση των 2.7 Volt για τα 2.4 Volt, επιλέχθηκαν πυκνωτές 3000 Farad 2.7 Volt για αποφυγή του περιττού κόστους των πυκνωτών 2.85 Volt.

#### 4.3.4 Υπερπυκνωτής CDCL3000C0-0002R7STZ

Η τελική επιλογή ήταν οι υπερπυκνωτές “CDCL3000C0-0002R7STZ” της SPSCAP (εικόνα 4.3) στα 3000 Farad και 2.7 Volt ονομαστική τάση λειτουργίας με το κόστος τους να ανέρχεται στα 45 ευρώ έκαστος.



Εικόνα 4.3 : Υπερπυκνωτής CDCL3000C0-0002R7STZ της SPSCAP

Πηγή : <https://www.distrelec.biz/en/>

Έχουν διάμετρο 61 χιλιοστά και συνολικό μήκος 16.5 εκατοστά. Ο αρνητικός πόλος είναι μπουζόνι πάχους 14 χιλιοστών και ο θετικός πόλος μπουζόνι 12 χιλιοστών. Το βάρος τους ανέρχεται στα 548 γραμμάρια. Στην εικόνα 4.4, βλέπουμε τμήμα από το φυλλάδιο προδιαγραφών, όπου καταγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά.

Η ονομαστική τιμή χωρητικότητας των πυκνωτών στα 3000 Farad μπορεί να απέχει αρκετά από την πραγματική χωρητικότητα. Ο κατασκευαστής μας πληροφορεί πως η απόκλιση της πραγματικής από την ονομαστική τιμή φτάνει έως  $\pm 20\%$ . Με τους κατάλληλους υπολογισμούς προκύπτει ότι η πραγματική χωρητικότητα θα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών:

$$C_{\min} = C_{\text{rated}} \times 80\% = 3000 \times 80\% = 2400 \text{ Farad}$$

$$C_{\max} = C_{\text{rated}} \times 120\% = 3000 \times 120\% = 3600 \text{ Farad}$$

**GENERAL CHARACTERISTICS**

Items	Specification
Rated Voltage (V DC)	2.7
Surge Voltage (V DC)	2.85
Operating Temp. (°C)	-40 ~ +65
Rated Capacitance (F)	3000
Capacitance Tolerance	0% ~ 20%
ESR Max. (AC@1KHz, mΩ)	0.22
ESR Max. (DC, mΩ)	0.29
Maximum Continuous Current ( $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ , A)	129
Maximum Continuous Current ( $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ , A)	211
Maximum Peak Current (A) (1s)	2166
Max.LC (Room Temp. after 72hrs, mA)	5.2
Typical Thermal Resistance ( $R_{th}$ , Housing, °C/W)	3.1
Typical Thermal Capacitance ( $C_{th}$ , J/°C)	645
Weight (g)	548
Energy Stored (Wh)	3.04

Εικόνα 4.4 : Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών

 Πηγή : <https://www.distrelec.biz/en/>

Πίνακας 4.1 : Πειραματικά μετρημένες χωρητικότητες υπερπυκνωτών

Πυκνωτής 1	Πυκνωτής 2	Πυκνωτής 3	Πυκνωτής 4	Πυκνωτής 5	Πυκνωτής 6
3184 Farad	3153 Farad	3161 Farad	3157 Farad	3179 Farad	3180 Farad

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1, οι τιμές χωρητικότητας μετρήθηκαν υψηλότερες από την ονομαστική και με ελάχιστη διακύμανση αναμεταξύ τους. Σε κάθε περίπτωση, υπάρχει η επιφύλαξη οι παραπάνω τιμές να περιέχουν σφάλμα, καθώς η μέθοδος μέτρησης δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί με 100% ακρίβεια.

Η θερμοκρασία λειτουργίας τους, που κυμαίνεται από  $-40$  έως  $65$  °C, μας ενδιαφέρει άμεσα. Από τη μια, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι οι υπερπυκνωτές δύνανται να λειτουργούν σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Από την άλλη, παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι οριακά ανεκτή. Το περιβάλλον λειτουργίας τους, που είναι ο χώρος κάτω από τον κινητήρα και αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες, ειδικά τους θερινούς μήνες, αναγκάζει τους πυκνωτές να

λειτουργούν σε θερμοκρασίες που πλησιάζουν τους 65 °C. Το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία τους σε σημείο που να τους καθιστά ακατάλληλους, αλλά ενδέχεται να έχει αντίκτυπο στη διάρκεια ζωής τους.

Όσον αφορά τη ρευματική ικανότητα των υπερπυκνωτών, τα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν είναι η ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR) στο συνεχές (DC) ρεύμα και τα μέγιστα ρεύματα λειτουργίας. Ο κατασκευαστής δεν μας παρέχει σταθερή τιμή DC ESR αλλά μας γνωστοποιεί ότι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25 °C) η μέγιστη τιμή της είναι 0.29 mΩ. Η DC ESR είναι αναπόφευκτο παρασιτικό στοιχείο των μη ιδανικών πυκνωτών και στην περίπτωση μας, η τιμή της είναι αρκετά σημαντική. Το γινόμενο της DC ESR με το ρεύμα λειτουργίας είναι η ανεπιθύμητη πτώση τάσης που δημιουργείται εσωτερικά στον πυκνωτή, όταν αυτός διαρρέεται από ρεύμα. Τα υψηλά ρεύματα, που καλούνται να διαχειριστούν οι υπερπυκνωτές στη συσκευή μας, ενδέχεται να δημιουργήσουν σημαντικές πτώσεις τάσης και κατ' επέκταση απώλειες ισχύος. Η προαναφερθείσα τιμή των 0.29 mΩ ίσως να φαίνεται αμελητέα αλλά η σύνδεση σε σειρά 6 υπερπυκνωτών αυξάνει τη συνολική DS ESR όλης της συστοιχίας στο μέγιστο θεωρητικό των 1.74 mΩ. Τέλος, η τιμή της ESR είναι εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και έτσι μεταβάλλεται συνεχώς. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της ESR, ενώ αντίστοιχα η μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της ESR. Από τα παραπάνω, συμπεραίνει κανείς πως για επίτευξη χαμηλής ESR είναι επιθυμητό η λειτουργία των υπερπυκνωτών να γίνεται σε θερμό περιβάλλον, πάντα σε ασφαλή πλαίσια σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή.

Τα μέγιστα ρεύματα που μπορούν να παρέχουν με ασφάλεια οι πυκνωτές είναι το κρισιμότερο χαρακτηριστικό. Στην εικόνα 4.4, βλέπουμε πως ο κατασκευαστής μας δίνει δύο τιμές μέγιστου ρεύματος συνεχόμενης λειτουργίας, καθώς και την τιμή του μέγιστου ρεύματος αιχμής. Αναλυτικότερα, βλέπουμε ότι σε θερμοκρασία 15 °C το μέγιστο ρεύμα είναι 129 A και σε θερμοκρασία 40 °C είναι 211 A. Το μέγιστο ρεύμα αιχμής μας δίνεται για μέγιστη διάρκεια 1 δευτερολέπτου και ορίζεται στα 2166 A.

Το τελευταίο χαρακτηριστικό που μας αφορά είναι το ρεύμα διαρροής (leakage current). Όλοι οι πυκνωτές, όταν δεν χρησιμοποιούνται, παρουσιάζουν μια σταδιακή απώλεια αποθηκευμένου φορτίου λόγω εσωτερικών ρευμάτων διαρροής. Ο κατασκευαστής μας δίνει την μέγιστη τιμή του σε θερμοκρασία δωματίου (25 °C) ίση με 5.2 mA. Ανάλογα τη θερμοκρασία, το ρεύμα διαρροής μεταβάλλεται με τον κανόνα να ορίζει ότι αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Συμπεραίνει κανείς, ότι από την άποψη του ρεύματος διαρροής είναι προτιμότερο οι πυκνωτές να βρίσκονται σε ψυχρό περιβάλλον, για να ελαχιστοποιείται το ρεύμα διαρροής και άρα να διατηρείται το αποθηκευμένο φορτίο για περισσότερο χρόνο.

#### 4.3.5 Υπολογισμοί συστοιχίας

Ο έλεγχος της καταλληλότητας των επιλεγμένων υπερπυκνωτών απαιτεί και τη μέτρηση των ρευματικών απαιτήσεων του αυτοκινήτου, όταν γίνεται η έναυση του κινητήρα. Πέρα από το κυριότερο φορτίο που είναι ο εκκινητήρας (μίζα), υπάρχουν και άλλα φορτία που απαιτούν αρκετή ποσότητα ρεύματος, όπως ο εγκέφαλος, η αντλία καυσίμου και ο πολλαπλασιαστής. Η μέτρηση του ρεύματος πραγματοποιήθηκε με αμπεροσιμπίδα 400 A με δυνατότητα για DC ρεύμα. Για τον υπολογισμό όλων των πιθανών περιπτώσεων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε διάφορες θερμοκρασίες του κινητήρα, τόσο με τη χρήση του συμπλέκτη, όσο και χωρίς αυτήν. Ανάλογα την περίπτωση, ο εκκινητήρας επιφορτίζεται λιγότερο ή περισσότερο και απαιτεί την ανάλογη ποσότητα ρεύματος. Οι μετρήσεις έδειξαν συνολικό ρεύμα εκκίνησης από 92 ως 110 A. Σε προηγούμενο

υποκεφάλαιο, είδαμε πως οι υπερπυκνωτές που επιλέξαμε, δύνανται να παρέχουν μέγιστο ρεύμα τουλάχιστον 129 A για θερμοκρασία από 15 °C. Ακόμα και σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από 15 °C, όπου η τιμή του μέγιστου ρεύματος θα είναι ελαφρώς χαμηλότερη από 129 A, οι πυκνωτές θα είναι πλήρως ικανοί να εκκινήσουν τον κινητήρα. Επιπρόσθετα, η διαδικασία της εκκίνησης έχει πολύ μικρή διάρκεια, η οποία συνήθως κυμαίνεται από 1 έως 3 δευτερόλεπτα, οπότε οι πυκνωτές δε θα υποστούν ιδιαίτερη καταπόνηση στις χαμηλές θερμοκρασίες. Το ρεύμα αιχμής που διαρρέει τον εκκινήτηρα τα πρώτα millisecond της λειτουργίας του, έχει τιμή πολλαπλάσια του ρεύματος μόνιμης κατάστασης. Η μέτρησή του απαιτεί αμπεροτσιμπίδα με ειδική λειτουργία μέτρησης αιχμών (inrush current). Δυστυχώς, η αμπεροτσιμπίδα που έχουμε στην κατοχή μας δεν διαθέτει τέτοια δυνατότητα, οπότε η μέτρηση δεν ήταν εφικτή. Ωστόσο, γνωρίζουμε ποια είναι η μέγιστη τιμή της αιχμής από το γεγονός ότι η μπαταρία, που είναι εγκατεστημένη στο αυτοκίνητο και είναι προτεινόμενη από τον κατασκευαστή, μπορεί να παράσχει ρεύμα κρύας εκκίνησης (CCA) ίσο με 610 A. Εύκολα, λοιπόν, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι ο εκκινήτηρας σε καμία περίπτωση δε θα απαιτήσει ρεύμα αιχμής πάνω από 610 A. Οι υπερπυκνωτές μας, όπως έχουμε προαναφέρει, έχουν τη δυνατότητα για αιχμή ρεύματος 2166 A για ένα δευτερόλεπτο. Η τιμή των 610 A απέχει πολύ από τα 2166 A και το γεγονός μάλιστα ότι απαιτείται μόλις για κάποια millisecond, μας επιβεβαιώνουν την καταλληλότητα των υπερπυκνωτών για την εφαρμογή μας.

Έχοντας εξασφαλίσει την καταλληλότητα των υπερπυκνωτών για την εφαρμογή μας, σε δεύτερη φάση πρέπει να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για το ωφέλιμο χρονικό διάστημα λειτουργίας των πυκνωτών. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να υπολογιστεί ο μέγιστος χρόνος για τον οποίο οι πυκνωτές θα δύνανται να τροφοδοτούν την προσπάθεια εκκίνησης του κινητήρα. Ο μέσος χρόνος εκκίνησης ενός «υγιούς» κινητήρα δεν ξεπερνά τα 2 με 3 δευτερόλεπτα. Σε ειδικές περιπτώσεις, όπως κάποια μηχανική βλάβη, ιδιαίτερα χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος ή ακινησία του οχήματος για αρκετό καιρό, η διαδικασία εκκίνησης ενδέχεται να διαρκέσει παραπάνω. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, η συστοιχία να προσφέρει αρκετές εκκινήσεις προτού αποφορτιστεί σε μη επαρκές επίπεδο τάσης. Ο ανορθωτής του εναλλάκτη του οχήματος που μελετάται, παράγει τάση εξόδου που κυμαίνεται ανάλογα το φορτίο και τη θερμοκρασία από 14.05 έως 14.22 Volt. Θέτοντας μια ανοχή στους υπολογισμούς μας, θα ορίσουμε ως μέγιστη τάση της πλήρως φορτισμένης συστοιχίας τα 14 Volt. Στο απέναντι άκρο της χαμηλής τάσης, έγιναν δοκιμές εκκίνησης με τη συστοιχία για να καταλήξουμε στο κατώτατο όριο τάσης με την οποία ο κινητήρας εκκίνησε με επιτυχία. Οι δοκιμές, εν τέλει, μας απέδειξαν ότι με κατώτατο όριο τάσης συστοιχίας τα 8 Volt, ο κινητήρας εκκίνησε με ελάχιστες επιπλοκές στο ηλεκτρολογικό σύστημα του αυτοκινήτου, που προκαλεί η υπόταση. Ακολουθούν οι υπολογισμοί διαθέσιμου χρόνου εκκίνησης για τάση συστοιχίας από 14 έως 8 Volt και ρεύμα εκκίνησης τη χειρότερη περίπτωση των 110 A.

Αρχικά υπολογίζουμε τη συνολική χωρητικότητα της συστοιχίας για την ονομαστική τιμή των 3000 Farad. Οι υπερπυκνωτές είναι σε σειρά συνδεδεμένοι, οπότε:

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_5} + \frac{1}{C_6} \Rightarrow \frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{6}{3000} \Rightarrow C_{total} = 3000/6 = 500 \text{ Farad}$$

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε το αποθηκευμένο ηλεκτρικό φορτίο για τις οριακές τάσεις 14 και 8 Volt:

$$Q_{14V} = C_{total} \times V = 500 \times 14 = 7000 \text{ Coulomb}$$

$$Q_{8V} = C_{total} \times V = 500 \times 8 = 4000 \text{ Coulomb}$$

Το εκμεταλλεύσιμο ηλεκτρικό φορτίο είναι:

$$Q_{14V-8V} = Q_{14V} - Q_{8V} = 7000 - 4000 = 3000 \text{ C}$$

Τέλος, θα υπολογίσουμε τον χρόνο πτώσης της τάσης από τα 14 Volt στα 8 Volt λαμβάνοντας τη προσέγγιση ότι το ρεύμα εκκίνησης είναι σταθερό στα 110 A ανεξαρτήτου τάσης και χωρίς να συνυπολογιστούν οι αιχμές ρεύματος του εκκινητήρα:

$$T_{14V-8V} = \frac{Q_{14V-8V}}{I} = \frac{3000}{110} = 27.3 \text{ second}$$

Ο παράγοντας της διαρροής ή αυτοεκφόρτισης των υπερπυκνωτών πρέπει να συμπεριληφθεί στους θεωρητικούς υπολογισμούς. Ο διαθέσιμος χρόνος εκκίνησης των 27.3 δευτερολέπτων είναι ιδανικός και αφορά μόνο την περίπτωση της πλήρως φορτισμένης συστοιχίας. Η αυτοεκφόρτιση στέκεται εμπόδιο στη μακροπρόθεσμη χρήση της συστοιχίας, ελαττώνοντας το διαθέσιμο φορτίο της συστοιχίας με την πάροδο του χρόνου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, σε πραγματικές συνθήκες ο διαθέσιμος χρόνος εκκίνησης να είναι μικρότερος από 27.3 δευτερόλεπτα ή και μηδενικός, αν η συστοιχία έχει αποφορτιστεί κάτω από τα 8 Volt. Θεωρώντας τη χειρότερη περίπτωση το ρεύμα διαρροής να έχει μονίμως τη μέγιστη τιμή των 5.2 mA (25 °C), το χρονικό διάστημα αποφόρτισης στα 8 Volt είναι:

$$t_{\text{discharged}} = \frac{Q_{14V-8V}}{I_{\text{leakage}}} = \frac{3000}{5.2 \text{ mA}} = 576923 \text{ sec} = 6.7 \text{ μέρες}$$

Αντιλαμβάνεται κανείς ότι το θεωρητικό μέγιστο του ρεύματος διαρροής των 5.2 mA είναι απαγορευτικό για χρήση των υπερπυκνωτών σε μεγάλα διαστήματα αναμονής. Στην πραγματικότητα, η τιμή αυτού του ρεύματος αλλάζει συνεχώς, λόγω διαφόρων παραγόντων και παραμένει σε χαμηλότερη τιμή από αυτήν του κατασκευαστή, όπως θα διαπιστώσουμε και σε επόμενα κεφάλαια

#### 4.4 Συμβατική μπαταρία 12 Volt οξέος μολύβδου

Αφού έχει πραγματοποιηθεί η επιλογή των υπερπυκνωτών, στη συνέχεια πρέπει να γίνει και η κατάλληλη επιλογή της συμβατικής μπαταρίας 12 Volt οξέος μολύβδου. Οι παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή είναι η απαιτούμενη χωρητικότητα σε Ah (αμπερώρια), οι διαστάσεις και το κόστος.

##### 4.4.1 Χωρητικότητα

Η απαιτούμενη χωρητικότητα της μπαταρίας είναι συνέπεια των καταναλώσεων του αυτοκινήτου, όταν αυτό δεν λειτουργεί αλλά και όταν έχουμε γυρίσει τον κλειδοδιακόπτη στη θέση “Accessories”.

Στον πίνακα 4.2, έχουν καταγραφεί οι βασικότερες καταναλώσεις

Όταν το αυτοκίνητο είναι πλήρως σβηστό (σβηστός κινητήρας και κλειδοδιακόπτης), υπάρχουν διάφορες καταναλώσεις αδράνειας που απορροφούν ηλεκτρική ισχύ από την μπαταρία. Η ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου του κινητήρα (εγκέφαλος) παραμένει σε λειτουργία και βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής καταναλώνοντας χαμηλότερη αλλά υπολογίσιμη ενέργεια. Το ίδιο συμβαίνει και με το ταμπλό οργάνων και την πηγή του ηχοσυστήματος (ραδιοCD), τα οποία για λίγα λεπτά μετά την απενεργοποίηση του κινητήρα παραμένουν σε λειτουργία και έπειτα εισέρχονται σε κατάσταση αναμονής. Σημαντική κατανάλωση μπορεί επίσης να έχει και ένα σύστημα συναγερμού, όπου στην περίπτωση μας δεν συνυπολογίστηκε, καθώς το αυτοκίνητο πάνω στο οποίο μελετήθηκε το σύστημά μας δε διαθέτει. Τέλος, το σύστημα immobilizer λειτουργεί μονίμως, όταν το αυτοκίνητο δε

λειτουργεί, για την προστασία του από κλοπή και άρα συμβάλει και αυτό στην κατανάλωση ενέργειας από την μπαταρία.

Πίνακας 4.2: Βασικές ηλεκτρικές καταναλώσεις αυτοκινήτου

Καταναλώσεις	Ρεύμα λειτουργίας
Φώτα «αλάρμ»	7 A
Φώτα θέσεως	2.2 A
Φώτα διασταυρώσεως	10 A
Ανοδική πορεία ηλεκτρικού παραθύρου	5.9 A
Καθοδική πορεία ηλεκτρικού παραθύρου	2.25 A
Άνω νεκρό σημείο ηλεκτρικού παραθύρου (πατημένος διακόπτης)	15.85 A
Κάτω νεκρό σημείο ηλεκτρικού παραθύρου (πατημένος διακόπτης)	15.85 A
Ολική κατανάλωση αυτοκινήτου με κλειστό κλειδοδιακόπτη μετά από ξεκλείδωμα των θυρών	0.83 A
Ολική κατανάλωση αυτοκινήτου με κλειδοδιακόπτη στη θέση “Accessories”	2.1 A
Ανεμιστήρας ψύξης κινητήρα (250 Watt)	16.2 A
Αντλία καυσίμου σε κατάσταση έναυσης	5.8 A

Εύκολα καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν αρκετές καταναλώσεις που μπορούν να χαρακτηριστούν «παρασιτικές», καθώς δεν είναι προφανείς. Ύστερα από μετρήσεις, η συνολική κατανάλωση του ηλεκτρολογικού συστήματος του αυτοκινήτου, εφόσον όλα τα προαναφερθέντα συστήματα βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής, είναι 14mA.

Κάτι το οποίο είναι σημαντικό να αναφερθεί, είναι πως ακόμα και με σβηστό αυτοκίνητο υπάρχουν απαιτητικές καταναλώσεις που είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν και δεν είναι «παρασιτικές». Πρώτον, τα φώτα έκτακτης ανάγκης (alarm) είναι πιθανό να χρειαστούν σε μια περίπτωση έκτακτης βλάβης κατά την οποία ο κινητήρας αδυνατεί να λειτουργήσει και άρα η τροφοδοσία τους γίνεται από την μπαταρία. Οι μετρήσεις που έγιναν και φαίνονται στον πίνακα 4.2 μας δείχνουν ότι τα alarm απαιτούν ρεύμα 7 A. Η λειτουργία τους όμως είναι διακοπτική και πιο συγκεκριμένα ο κύκλος λειτουργίας μετρήθηκε στο 40%. Η μέση τιμή του ρεύματος που χρειάζονται για να λειτουργήσουν είναι:

$$I_{(\text{alarm})\text{average}} = I_{(\text{alarm})\text{peak}} \times \text{Duty Cycle} \Rightarrow I_{(\text{alarm})\text{average}} = 7 \times 0,4 \Rightarrow I_{(\text{alarm})\text{average}} = 2.8 \text{ A}$$

Δεύτερον, στην περίπτωση στάθμευσης σε σημείο με πολύ χαμηλές συνθήκες φωτισμού ίσως γίνει χρήση των φώτων θέσεως ως φώτα σταθμεύσεως. Σύμφωνα με τις μετρήσεις (πίνακας 4.2), τα φώτα θέσεως απαιτούν ρεύμα 2.2 A. Η λογική προτάσσει ότι η χρήση τους θα είναι πολύωρη, οπότε απαιτούν μπαταρία με χωρητικότητα αρκετών αμπερωρίων. Τρίτον, σε περιπτώσεις υψηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος ή και υψηλού φορτίου στον κινητήρα, ο εγκέφαλος του κινητήρα είναι

πιθανό να κρατήσει σε λειτουργία τον ανεμιστήρα του αντιψυκτικού ακόμα και μετά το σβήσιμο του κινητήρα για ελάχιστο χρόνο. Η αρκετά υψηλή ονομαστική ισχύς του ανεμιστήρα, που στην περίπτωση μας είναι 250 Watt, έχει ως επακόλουθο το σημαντικά υψηλό ρεύμα λειτουργίας. Οι μετρήσεις (πίνακας 4.2) έδειξαν ρεύμα λειτουργίας ίσο με 16.2 A. Τέταρτον, η χρήση της πηγής του ηχοσυστήματος για αναπαραγωγή μουσικής συμβάλει σε μεγάλο ποσοστό στην αποφόρτιση της μπαταρίας. Οι μετρήσεις του ρεύματος που απαιτεί η πηγή για μια «φυσιολογική» ένταση ήχου, μας έδωσαν τον μέσο όρο των 2.5 A.

Ενδεικτικά παραδείγματα λειτουργίας των παραπάνω καταναλώσεων:

→ 2 ώρες χρήσης των alarm -> Απαιτούμενη χωρητικότητα =  $2 \times 2.8 = 5.6 \text{ Ah}$

→ 4 ώρες στάθμευσης με ενεργοποιημένα τα φώτα θέσεως ->

Απαιτούμενη χωρητικότητα =  $4 \times 2.2 = 8.8 \text{ Ah}$

→ 2 λεπτά λειτουργίας του ανεμιστήρα ψύξης του κινητήρα ->

Απαιτούμενη χωρητικότητα =  $16.2 \times \frac{2}{60} = 0.54 \text{ Ah}$

→ 1 ώρα αναπαραγωγής μουσικής ->  $1 \times 2.5 = 2.5 \text{ Ah}$

Στον πίνακα 4.2 καταγράφονται και ηλεκτρικές καταναλώσεις οι οποίες ενεργοποιούνται όταν θέσουμε τον κλειδοδιακόπτη στη θέση “Accessories”. Αφού γυρίσουμε το κλειδί, ο εγκέφαλος του κινητήρα βγαίνει από την κατάσταση αναμονής και λειτουργεί κανονικά. Το ταμπλό οργάνων εκτελεί διαγνωστικό έλεγχο και η αντλία καυσίμου ενεργοποιείται για λίγα δευτερόλεπτα για την δημιουργία της απαραίτητης πίεσης καυσίμου. Έπειτα, το αυτοκίνητο είναι έτοιμο για να εκκινηθεί ο κινητήρας. Στην κατάσταση αυτή η κατανάλωση ενέργειας είναι αυξημένη και όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2, αγγίζει τα 2.1 A. Τα ηλεκτρικά παράθυρα πλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στον πίνακα 4.2 φαίνονται τα ρεύματα ανόδου και καθόδου για κάθε μεμονωμένο παράθυρο. Προσοχή πρέπει να δοθεί στις τιμές που αποκτά το ρεύμα όταν τα παράθυρα βρίσκονται στα νεκρά τους σημεία. Σε αυτήν την περίπτωση, οι ηλεκτροκινητήρες των παραθύρων αδυνατούν να περιστραφούν περαιτέρω, με αποτέλεσμα αν πατηθούν τα ανάλογα πλήκτρα ελέγχου, τα παράθυρα να παραμείνουν στάσιμα αλλά τα μοτέρ να επιζητούν μεγάλες ποσότητες ρεύματος από την μπαταρία. Στον πίνακα 4.2, βλέπουμε πως τα ρεύματα αυτά έχουν τιμή 15.85 A, ενώ αν συμβεί το παρόν σενάριο και για τα δύο παράθυρα μαζί, το ολικό ρεύμα αγγίζει τα 31.7 A.

Όλες οι προηγούμενες καταναλώσεις που αναλύθηκαν έχουν ρευματικές απαιτήσεις που ίσως να μην επηρεάζουν την προτεινόμενη από τον κατασκευαστή μπαταρία (60 Ah). Αποτελούν όμως σημαντικό φορτίο για μια μπαταρία αρκετά μικρότερης χωρητικότητας που θα χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση μας. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαστική την επιλογή της μεγαλύτερης κατά το δυνατόν μπαταρίας σε χωρητικότητα που να καλύπτει τις προϋποθέσεις φυσικού μεγέθους και κόστους.

#### 4.4.2 Μέγεθος

Όσον αφορά το μέγεθος, ο περιορισμός προκύπτει από το γεγονός ότι η μπαταρία θα τοποθετηθεί μέσα στο κουτί της συσκευής. Οι διαστάσεις θα πρέπει να είναι τέτοιες, έτσι ώστε να έχει κάποιες ανοχές από τα τοιχώματα του κουτιού και να αφήνει αρκετό περισσευόμενο χώρο για την τοποθέτηση των πλακετών των κυκλωμάτων. Το μέγιστο δυνατό μέγεθος καθορίστηκε μετά τον συνυπολογισμό του χώρου που καταλαμβάνουν οι υπερπυκνωτές, οι πλακέτες με τα κυκλώματα και το ρελέ της μπαταρίας.

### 4.4.3 Κόστος

Τέλος, ο παράγοντας του κόστους επηρέασε την τελική επιλογή, αφού θεωρήθηκε ορθό να γίνει χρήση επώνυμης μπαταρίας για ασφάλεια και αξιοπιστία αλλά να προτιμηθεί μια όχι και τόσο πασίγνωστη επωνυμία για επίτευξη χαμηλότερου κόστους. Έπειτα από ενδελεχή αναζήτηση στο διαδίκτυο μεταξύ διαφόρων επωνυμιών και χωρητικότητων, η τελική επιλογή είναι η μπαταρία SPA 12V - 12Ah της SUNLIGHT, η οποία φαίνεται στην εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5: Μπαταρία SPA 12V - 12Ah της SUNLIGHT

Η συγκεκριμένη μπαταρία έχει χωρητικότητα 12 Ah, είναι τεχνολογίας AGM και το κόστος της είναι στα 27 ευρώ. Έχει μήκος 151mm, πλάτος 98mm, ύψος 95mm και το βάρος της είναι στα 3.45 κιλά. Οι συγκεκριμένες διαστάσεις ταιρίαξαν απόλυτα με το κουτί της συσκευής και επιτρέπουν την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του χώρου. Τους πόλους της αποτελούν δύο αρσενικοί επίπεδοι ακροδέκτες πλάτους 6.3mm και πάχους 1.2 mm. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την εύκολη σύνδεση και αποσύνδεση καλωδίου με αντίστοιχο θηλυκό ακροδέκτη, καθώς ο συγκεκριμένος τύπος ακροδέκτη χρησιμοποιείται ευρύτατα και είναι αρκετά εμπορικός. Η συγκεκριμένη μπαταρία κατά τις συστάσεις του κατασκευαστή προορίζεται για συναγερμούς, UPS, τροφοδοτικά, συστήματα ήχου κ.α.

Στη εικόνα 4.6 του φυλλαδίου προδιαγραφών, βλέπουμε κάποια χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν. Ενδεικτικά, βλέπουμε ότι η μπαταρία έχει εσωτερική αντίσταση με τιμή 19mΩ σε κατάσταση πλήρους φόρτισης και ρυθμό αυτοαποφόρτισης κατά μέσο όρο 3% της ονομαστικής της χωρητικότητας κάθε μήνα. Η σημαντικότερη πληροφορία που μας παρέχεται είναι η ρευματική ικανότητα της μπαταρίας. Όπως διακρίνεται στην εικόνα 4.6, το ρεύμα βραχυκυκλώματος της μπαταρίας ανέρχεται στα 180 A και το μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης είναι 120 A για μέγιστη διάρκεια 5 δευτερολέπτων. Οι δύο αυτές τιμές ρευμάτων υπερκαλύπτουν 100% τις απαιτήσεις του συστήματος, όπως αναφέρθηκαν νωρίτερα

Στην περίπτωση της παρούσας συσκευής, η χρήση της είναι αρκετά συντηρητική, καθώς στην πλειοψηφία της λειτουργίας της θα τροφοδοτεί τις χαμηλές καταναλώσεις ενός σβηστού αυτοκινήτου και σπανιότερα κάποια υψηλότερα φορτία, όπως τα ηλεκτρικά παράθυρα. Έτσι, σε καμία περίπτωση δε θα κληθεί να παράσχει ενέργεια πάνω από το όριό της. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως η εναλλακτική της χρήσης μπαταρίας τύπου μοτοσυκλέτας απορρίφθηκε εξ αρχής, λόγω του αδικαιολόγητα υψηλού κόστους για ανάλογη τιμή χωρητικότητας.

### SPECIFICATIONS

Nominal Voltage		12 V
Number of cells		6
Design Floating Life (20°C)		10 years
Dimensions	Length	151 mm
	Width	98 mm
	Height	95 mm
	Total Height	101 mm
Weight		3.45 kg
Nominal Capacity (25°C)	20 hours rate (1.75)	12.0 Ah
	10 hours rate (1.75)	11.5 Ah
	5 hours rate (1.75)	9.85 Ah
	1 hour rate (1.65)	7.43 Ah
Internal Resistance (fully charged, 25°C)		19 mOhm
Self Discharge		approx. 3% per month at 25°C
Nominal Operating Temperature		25°C
Operating Temperature range	Discharge	-15°C to 45°C
	Charge	0°C to 40°C
	Storage	-15°C to 40°C
Float Charging Voltage		2.27 to 2.30 V/cell at 25°C
Temperature compensation		-20mV/°C
Maximum charging current		3.60 A
Maximum discharge current (25°C)		120 A (5 sec.)
Short Circuit Current (25°C)		180 A

Εικόνα 4.6 : Τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταρίας SPA 12V - 12Ah της SUNLIGHT

Πηγή : <https://www.e-kiriazis.gr/ell/>

## 4.5 Ρελέ απομόνωσης

### 4.5.1 Ρελέ συστοιχίας υπερπυκνωτών

Στο πρώτο στάδιο πρέπει να υπάρξει κάποια απομόνωση μεταξύ υπερπυκνωτών και μπαταρίας. Η απευθείας παράλληλη σύνδεσή τους δεν εξυπηρετεί τον σκοπό της συσκευής. Για την εναλλαγή μεταξύ των δύο, ανάλογα την απαιτούμενη ενέργεια, απαιτείται ένα κύκλωμα διαχείρισης.



Εικόνα 4.7 : Ρελέ DCNLM200NB12 για την απομόνωση των πυκνωτών

Το πρώτο βήμα είναι η επιλογή του τρόπου απομόνωσης. Οι πυκνωτές είναι υπεύθυνοι αποκλειστικά για την εκκίνηση του αυτοκινήτου. Το υπόλοιπο χρονικό διάστημα, αν δεν φορτίζουν, πρέπει να είναι αποκομμένοι από το ηλεκτρικό σύστημα του αυτοκινήτου, για να μην αποφορτίζονται και να διατηρούν την ενέργειά τους για τις εκκινήσεις. Ο ασφαλέστερος τρόπος εφαρμογής απομόνωσης είναι η χρήση ενός ηλεκτρονόμου υψηλής ισχύος (ρελέ). Το συγκεκριμένο ρελέ θα κρατά γαλβανικά απομονωμένους τους πυκνωτές και το μικρό χρονικό διάστημα της εκκίνησης θα τους επιτρέπει να παράσχουν την ηλεκτρική τους ενέργεια. Όπως προαναφέραμε, το μέσο συνεχές ρεύμα εκκίνησης φτάνει τα 110 A, με την αρχική αιχμή λόγω αδράνειας να ξεπερνά τα 400A αλλά να βρίσκεται και κάτω από τα 600 A λόγω περιορισμού του ρεύματος κρύας εκκίνησης της μπαταρίας. Το ρελέ, που θα χρησιμοποιηθεί, πρέπει να αντέχει συνεχές ρεύμα αγωγής που να ξεπερνά κατά πολύ τα 110 A για περιθώριο ασφαλείας αλλά να είναι ανθεκτικό και στις αιχμές ρεύματος μικρής διάρκειας που προαναφέρθηκαν. Η αναζήτηση στο διαδίκτυο για ρελέ, που να πληροί τις παραπάνω προϋποθέσεις και να μην ξεφεύγει από άποψη κόστους, μας οδήγησε στην επιλογή του "DCNLM200NB12" της Littelfuse, το οποίο και φαίνεται στην εικόνα 4.7.

Το συγκεκριμένο ρελέ έχει δυνατότητα για συνεχές ρεύμα μέχρι 200 A και αιχμές μέχρι 800 A. Τα χαρακτηριστικά αυτά υπερκαλύπτουν τις απαιτήσεις μας, ενώ και η αντοχή σε μέγιστη τάση των 48 Volt είναι παραπάνω από επαρκής για το 12 Volt ηλεκτρολογικό σύστημα του αυτοκινήτου. Οι ακροδέκτες της επαφής ισχύος αποτελούνται από μπουλόνια 8 χιλιοστών, ενώ οι ακροδέκτες του

πηνίου από μπουλόνια 4 χιλιοστών. Το κόστος του ανήλθε στα 63 ευρώ και αποτέλεσε την οικονομικότερη από τις επώνυμες επιλογές σε αυτά τα χαρακτηριστικά.

#### 4.5.2 Ρελέ μπαταρίας

Η μπαταρία των 12 Ah επιφορτίζεται με το έργο να τροφοδοτεί τις παρασιτικές καταναλώσεις του αυτοκινήτου, όταν ο κινητήρας του είναι σβηστός, αλλά και τα «αξεσουάρ» του αυτοκινήτου, όπως τα ηλεκτρικά παράθυρα, το ραδιοCD, τα alarm, τα φώτα καμπίνας κ.α. Το μικρό χρονικό διάστημα που πρόκειται να πραγματοποιηθεί η εκκίνηση του κινητήρα, η μπαταρία πρέπει να απομονωθεί, έτσι ώστε η υψηλή ισχύς που χρειάζεται ο εκκινητήρας να προέλθει αποκλειστικά από τους υπερπυκνωτές. Σε αντίθετη περίπτωση, που δεν απομονωθεί η μπαταρία, υπάρχει το ενδεχόμενο της αλληλοεκφόρτισης μεταξύ μπαταρίας και πυκνωτών, αν οι τάσεις τους δεν είναι ίδιες. Το σημαντικότερο είναι πως αν η τάση της μπαταρίας είναι υψηλότερη από αυτή των πυκνωτών τη στιγμή της εκκίνησης, όλο το απαιτούμενο ρεύμα εκκίνησης θα το επωμιστεί η μπαταρία. Καθώς η ρευματική ικανότητα της μπαταρίας δεν επαρκεί σε καμία περίπτωση για κάτι τέτοιο, στην καλύτερη περίπτωση ο κινητήρας δε θα εκκινήσει και στη χειρότερη θα προκληθεί ζημιά στην μπαταρία λόγω της υπερέντασης. Όπως και με τους πυκνωτές, η πιο αποδοτική μέθοδος απομόνωσης είναι η χρήση ρελέ. Για την επιλογή του κατάλληλου ρελέ πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μέγιστες καταναλώσεις που η μπαταρία χρειάζεται να τροφοδοτεί. Στον πίνακα 4.2, βλέπουμε πως τις βαρύτερες καταναλώσεις αποτελούν ο ανεμιστήρας ψύξης, τα ηλεκτρικά παράθυρα, η αντλία καυσίμου και τα φωτιστικά σώματα του αυτοκινήτου. Όλες αυτές οι καταναλώσεις λειτουργούν για ελάχιστο συνήθως χρόνο από την μπαταρία και κατά κύριο λόγο από την ισχύ του εναλλάκτη, όταν λειτουργεί ο κινητήρας. Βάσει των προαναφερθέντων, καταλήξαμε στο “AM3-12CF” της Rayex, το οποίο φαίνεται στην εικόνα 4.8.



Εικόνα 4 8 · Ρελέ AM3-12CF για την απομόνωση της μπαταρίας

Το συγκεκριμένο ρελέ είναι τύπου αυτοκινητοβιομηχανίας, διαθέτει δύο επαφές NO και NC και έχει δικό του στήριγμα. Έχει συνεχή ρευματική ικανότητα 80 A, καθιστώντας το ικανό να τροφοδοτεί με ασφάλεια τα προαναφερθέντα φορτία. Οι ακροδέκτες ισχύος είναι επίπεδοι πλάτους 9.3 χιλιοστών και πάχους 1.3 χιλιοστών. Το κόστος του ανήλθε στα 4.8 ευρώ, τιμή αρκετά καλή για τα χαρακτηριστικά που προσφέρει.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : Πλακέτες

### 5.1 Πλακέτα κεντρικού ελέγχου

#### 5.1.1 Μικροελεγκτής Arduino Mega

Όπως έγινε αναφορά νωρίτερα, η συσκευή διαχειρίζεται αρκετά σήματα εισόδου και έπειτα από την επεξεργασία τους εκτελεί τις απαραίτητες ενέργειες με τα αντίστοιχα σήματα εξόδου. Πολλές από τις εντολές εκτέλεσης απαιτούν χρονικό συντονισμό και συγκεκριμένη ακολουθία. Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτείται κύκλωμα με ψηφιακά εξαρτήματα που να λαμβάνει τις κατάλληλες αποφάσεις και να παράγει τις απαραίτητες χρονοκαθυστερήσεις. Η υλοποίηση ενός τέτοιου κυκλώματος με ψηφιακές πύλες θα ήταν απαγορευτική στην περίπτωση μας. Η πολυπλοκότητα και το πλήθος των πιθανών ενεργειών που θα εκτελούνται, θα απαιτούσε πλακέτα με τεράστιο φυσικό μέγεθος και ανάλογα υψηλό κόστολόγιο. Το σημαντικότερο όμως εμπόδιο αποτελεί η ελάχιστη παραμετροποίηση που είναι εφικτό να γίνει σε ένα τέτοιο κύκλωμα.

Για την αποφυγή όλων των παραπάνω προβλημάτων αλλά και για την δυνατότητα προσθήκης οθόνης ενδείξεων καταλήξαμε στη χρήση μικροελεγκτή. Στο εμπόριο υπάρχουν αρκετοί μικροελεγκτές που να καλύπτουν τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής. Η προσωπική μας εμπειρία και ενασχόληση με τους μικροελεγκτές Arduino, καθώς και το χαμηλό σχετικά κόστος τους ήταν οι καθοριστικοί παράγοντες επιλογής. Το πλήθος των απαιτούμενων ψηφιακών εισοδοεξόδων για την ολοκληρωμένη λειτουργία της συσκευής, τον έλεγχο της οθόνης, καθώς και των αναλογικών εισόδων για τις μετρούμενες τάσεις μας οδήγησε στην επιλογή του Arduino Mega.

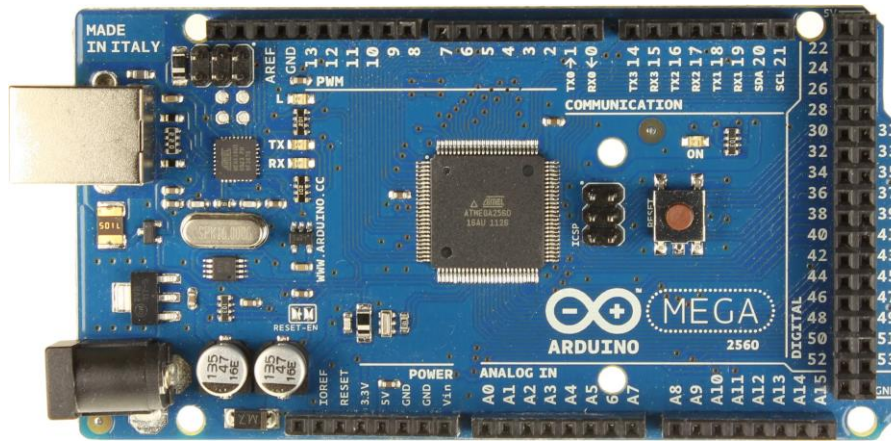
Το Arduino Mega είναι μια πλακέτα που βασίζεται μεταξύ άλλων και στον μικροελεγκτή AtMega 2560, που επιλέχθηκε στην περίπτωση μας, μαζί με ορισμένα περιφερειακά εξαρτήματα που είναι απαραίτητα για διάφορες έξτρα λειτουργίες. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή καταγράφονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά μικροελεγκτή AtMega2560

Οικογένεια μικροελεγκτών	AVR
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	8-bit
Μνήμη Flash (αποθήκευση προγράμματος)	256 Kbyte
Μνήμη EEPROM	4Kbyte
Διαθέσιμοι ADC (αναλογικές εισοδοί)	16
Ψηφιακές επαφές	54
Ανάλυση των ADC	10-bit
Συχνότητα ρολογιού	16 MHz
Τάση λειτουργίας	4.5 – 5.5 Volt

Στην εικόνα 5.1, βλέπουμε την πλακέτα του arduino mega που θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση της διπλωματικής. Το κόστος της ανήλθε στα 17 ευρώ. Στο κέντρο της εικόνας διακρίνεται ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα τετράγωνου σχήματος που είναι ο μικροελεγκτής. Περιμετρικά της πλακέτας

υπάρχουν θηλυκές ακίδοσειρές οι οποίες συνδέονται με τις επαφές του ολοκληρωμένου του μικροελεγκτή και με άλλα διάφορα σημεία της πλακέτας. Φαίνονται χαρακτηριστικά οι 16 αναλογικές επαφές (A0-A15) και οι 54 ψηφιακές επαφές (0-53). Στο αριστερό τμήμα βλέπουμε τον κρύσταλλο των 16 MHz που παρέχει τη συχνότητα ρολογιού, τον DC κοννέκτορα για εξωτερική τροφοδοσία 7-12 Volt και τη θύρα USB τύπου B για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή.



Εικόνα 5.1 : Πλακέτα Arduino Mega 2560

<https://www.electroschematics.com/>

Ο προγραμματισμός του arduino πραγματοποιείται στο προγραμματιστικό περιβάλλον Arduino IDE. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται είναι κατά βάση η C++ αλλά εμπλουτίζεται με αμέτρητες έτοιμες βιβλιοθήκες και εντολές ανώτερου επιπέδου, με αποτέλεσμα να είναι σχετικά εύκολος ο προγραμματισμός.

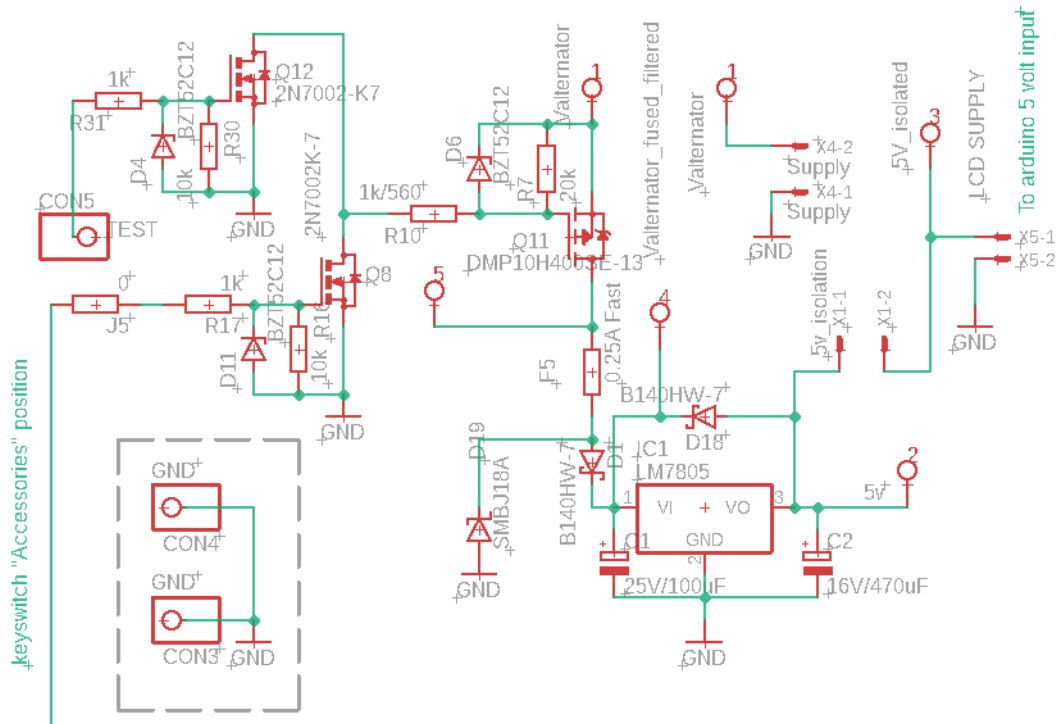
Το arduino δεν δύναται να λειτουργεί πλήρως ανεξάρτητο. Ορισμένα από τα σήματα εισόδου, όπως οι μετρούμενες τάσεις της πλακέτας μετρήσεων και κάποια σήματα εξόδου για τις υπόλοιπες πλακέτες, δεν χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία. Από την άλλη, σήματα όπως αυτά που θα ελέγχουν τα ρελέ μπαταρίας, συστοιχίας και μίζας απαιτούν την ύπαρξη ενός ενδιάμεσου σταδίου για την τροφοδοσία των πηνίων, ενώ και τα σήματα εισόδου από τον κλειδοδιακόπτη του αυτοκινήτου χρειάζονται περαιτέρω μετατροπή. Η τροφοδοσία του arduino, που όπως είδαμε νωρίτερα πρέπει να έχει τάση από 4.5 έως 5.5 Volt, χρειάζεται το κατάλληλο κύκλωμα ρύθμισης τάσης. Όλες οι παραπάνω απαιτήσεις καθιστούν απαραίτητη την κατασκευή μιας βοηθητικής πλακέτας που θα λειτουργεί παράλληλα με το arduino.

Παρακάτω θα αναλυθούν τα σχηματικά της πλακέτας που κατασκευάστηκε, πάνω στην οποία στηρίζεται και μηχανικά η πλακέτα του arduino. Το σχηματικό της πλακέτας είναι ενιαίο αλλά για λόγους ευκολότερης ανάλυσης και επεξήγησης θα χωριστεί σε επιμέρους βασικά τμήματα.

### 5.1.2 Υποκύκλωμα τροφοδοσίας

Στην εικόνα 5.2, βλέπουμε το σχηματικό του υποκυκλώματος που παρέχει την σταθεροποιημένη τάση τροφοδοσίας στο arduino. Η τροφοδοσία της πλακέτας θα γίνεται από την μπαταρία όταν ο κινητήρας δε λειτουργεί αλλά ο κλειδοδιακόπτης βρίσκεται στη θέση “Accessories” και από την έξοδο του ανορθωτή όταν ο κινητήρας θα βρίσκεται σε λειτουργία, μέσω του κοννέκτορα X4. Επιπρόσθετα, η συσκευή θα διαθέτει έναν μηχανικό διακόπτη, ο οποίος θα την ενεργοποιεί χωρίς να χρειάζεται να γυρίσουμε το κλειδί. Η τοποθέτηση του διακόπτη είναι βοηθητική και θα μας επιτρέπει να ελέγχουμε

οποιαδήποτε στιγμή θελήσουμε, τις τιμές των τάσεων του συστήματος χωρίς να χρειαστεί να ενεργοποιούμε τα ρεύματα του αυτοκινήτου.



Εικόνα 5.2 : Υποκύκλωμα σταθεροποίησης τάσης τροφοδοσίας arduino

Στην εικόνα 5.2, βλέπουμε δύο ίδια δικτυώματα με τα mosfet Q8 και Q12, τα οποία επιτελούν την ίδια λειτουργία. Έστω ότι γυρνάμε το κλειδί στη θέση “Accessories”. Η τάση της μπαταρίας εφαρμόζεται μέσω του κλειδοδιακόπτη στον κοινέκτορα CON5 και στη συνέχεια, μέσω του διαιρέτη τάσης R31/R30 στην πύλη του Q12, οδηγώντας το σε κόρο. Ομοίως, αν πατήσουμε τον μηχανικό διακόπτη, το Q11 εισέρχεται σε κατάσταση κόρου αυτή τη φορά λόγω του Q8. Η σχεδόν μηδενική τάση που εμφανίζεται στον απαγωγό του Q8, οδηγεί στη συνέχεια το p-channel Q11 σε κόρο. Το Q11 άγει και μέσω της ασφάλειας F5 των 0.25 A τροφοδοτεί ανάλογα την περίπτωση, είτε από την μπαταρία είτε από τον ανορθωτή, το υποκύκλωμα του ρυθμιστή τάσης. Οι δίοδοι zener D4, D11 και D6 που έχουν τοποθετηθεί παράλληλα με τις πύλες των Q8, Q12 και Q11 διατηρούν την τάση πύλης-πηγής κοντά στα 12 Volt, ανεξαρτήτου της τάσης εισόδου που μπορεί να ξεπερνά και τα 14 Volt (τάση ανορθωτή).

Ο γραμμικός ρυθμιστής τάσης που επιλέχθηκε είναι ο αρκετά εμπορικός LM7805 (IC1) σε πακέτο TO-220 με ονομαστική τάση εξόδου 5 Volt. Για την ομαλότερη λειτουργία του, τοποθετήθηκε πυκνωτής εισόδου (C1), ο οποίος μειώνει αισθητά την κυμάτωση της τάσης του ανορθωτή που δέχεται σαν είσοδο ο ρυθμιστής και βοηθά στην διατήρηση ευστάθειας. Αντίστοιχα, τοποθετήθηκε και πυκνωτής εξόδου για βελτίωση της απόκρισης του ρυθμιστή σε απότομες μεταβολές της τάσης του ανορθωτή.

Η δίοδος D18 χρησιμοποιείται για την προστασία του ρυθμιστή από βραχυκύκλωμα της εισόδου. Η δίοδος D1 αναλαμβάνει την τοπική απομόνωση της φιλτραρισμένης τάσης του πυκνωτή εξομάλυνσης C1, έτσι ώστε να μην υπάρχει επιστροφή ενέργειας στην έξοδο του ανορθωτή. Κάτι τέτοιο, θα καθιστούσε ανούσια τη χρήση του πυκνωτή C1, αφού θα ήταν παράλληλα συνδεδεμένος με την έξοδο του ανορθωτή και δε θα επιτυγχανόταν καμία εξομάλυνση λόγω του υψηλού ρεύματος με το οποίο

τροφοδοτείται το ηλεκτρικό σύστημα του αυτοκινήτου. Η D19 είναι δίοδος προστασίας ESD και προστατεύει την είσοδο του ρυθμιστή από πιθανές αιχμές τάσης άνω των 22 Volt, που είναι πιθανό να εμφανιστούν στην έξοδο του ανορθωτή.

Ολοκληρώνοντας την ανάλυση του υποκυκλώματος, μας απομένουν οι κοννέκτορες CON3, CON4, X1 και X5. Οι CON3 και CON4 είναι επίπεδοι αρσενικοί ακροδέκτες πλακέτας πλάτους 2.8 mm, οι οποίοι παρέχουν γείωση στις υπόλοιπες πλακέτες. Εν τέλει, έγινε χρήση μόνο του ενός εκ των δύο για την παροχή γείωσης στην πλακέτα μετρήσεων που θα αναλυθεί αργότερα. Κάτι τέτοιο επιτρέπει στις δύο πλακέτες να έχουν το ίδιο επίπεδο γείωσης, χωρίς ανεπιθύμητες πτώσεις τάσεις που θα δημιουργούσαν σφάλμα στις αναγνωσμένες από το arduino τάσεις. Ο X1 είναι ένας αρσενικός κοννέκτορας πλακέτας 2 επαφών με βήμα 2.54mm, στον οποίο συνδέεται ένας μηχανικός διακόπτης ON/OFF που ελέγχει την παροχή ή την απομόνωση των 5 Volt της εξόδου του ρυθμιστή στην πλακέτα. Η προσθήκη του διακόπτη κρίθηκε αναγκαία, καθώς το arduino πρόκειται να προγραμματίζεται χωρίς να απομακρύνεται από την πλακέτα. Χωρίς την ύπαρξή του, όταν θα συνδεθεί το arduino στον υπολογιστή, η τάση των 5 Volt που παρέχει το USB θα εμφανιζόταν και στην έξοδο του ρυθμιστή τάσης, προκαλώντας ακόμα και καταστροφή του ολοκληρωμένου λόγω αναστροφών ρευμάτων. Τέλος, ο κοννέκτορας X5 είναι ίδιος με τον X1 και παρέχει γείωση και τροφοδοσία 5 Volt στην οθόνη, που θα αναλύσουμε αργότερα.

### 5.1.3 Υποκύκλωμα ισχύος

Στην εικόνα 5.3, βλέπουμε το κυριότερο τμήμα της πλακέτας που είναι το υποκύκλωμα ισχύος. Το συγκεκριμένο υποκύκλωμα είναι υπεύθυνο για την μεταγωγή των πηνίων των ρελέ ισχύος ανάλογα τις λογικές τιμές των αντίστοιχων εξόδων του arduino. Στο κάτω μέρος της εικόνας, διακρίνεται ένας κοννέκτορας CON1, ο οποίος είναι μια κλέμα πλακέτας 6 επαφών με βήμα 10mm και χρήση βιδών για σύσφιξη.

#### 5.1.3.1 Ρελέ μπαταρίας

Ο έλεγχος του ρελέ της μπαταρίας γίνεται πολύ απλά με ένα n-channel mosfet (Q3). Το ένα άκρο του πηνίου του ρελέ είναι μόνιμα συνδεδεμένο με τον θετικό πόλο της συστοιχίας και το άλλο άκρο στον απαγωγό του mosfet μέσω της πρώτης επαφής του CON1. Όταν πρέπει να ενεργοποιηθεί το ρελέ και άρα να απομονωθεί η μπαταρία, το arduino αλλάζει την αντίστοιχη έξοδό του σε λογικό 1 (5 Volt). Η τάση των 5 Volt, μέσω του διαιρέτη τάσης R5/R3, εφαρμόζεται ελαφρώς υποβιβασμένη στην πύλη του Q3 οδηγώντας το σε κόρο. Το mosfet πλέον άγει και το ρελέ έχει ενεργοποιηθεί. Η αντίσταση R5 1KΩ περιορίζει το ρεύμα αιχμής φόρτισης της πύλης. Η R3 φροντίζει για την αποφόρτιση της πύλης και δρα ως pull down αντίσταση για το χρονικό διάστημα που το arduino θα είναι απενεργοποιημένο, έτσι ώστε να μην παραμένει η πύλη σε κατάσταση floating λόγω απουσίας σήματος ελέγχου. Το mosfet Q3 είναι το IRLML0060 σε smd πακέτο SOT-23 και επιλέχθηκε λόγω χαμηλού κόστους, χαμηλής  $R_{DS(on)}$  και βολικού μικρού μεγέθους. Τέλος, η ασφάλεια F8 250 mA τοποθετήθηκε για προστασία από υπερένταση σε περίπτωση πιθανού βραχυκυκλώματος του πηνίου του ρελέ.

#### 5.1.3.2 Ρελέ συστοιχίας υπερπυκνωτών

Ο έλεγχος του ρελέ της συστοιχίας υπερπυκνωτών ακολουθεί ακριβώς την ίδια λογική με το ρελέ της μπαταρίας. Για την ενεργοποίησή του, το arduino αλλάζει σε λογικό 1 την αντίστοιχη έξοδο. Το Q1 οδηγείται σε κόρο και το ρελέ ενεργοποιείται. Οι αντιστάσεις R1 και R2 επιτελούν την ίδια λειτουργία με τις R5 και R3 αντίστοιχα. Το mosfet που επιλέχθηκε είναι το n-channel DMN6068SE-13 σε smd πακέτο SOT-223 και επιλέχθηκε για τους ίδιους λόγους με το Q3. Τέλος, από τις ασφάλειες F2 και F6

τοποθετήθηκε μόνο η F2 στα 2 A για προστασία από βραχυκύκλωμα του πηνίου.

### 5.1.3.3 Υποβιβασμός τάσης κλειδοδιακόπτη

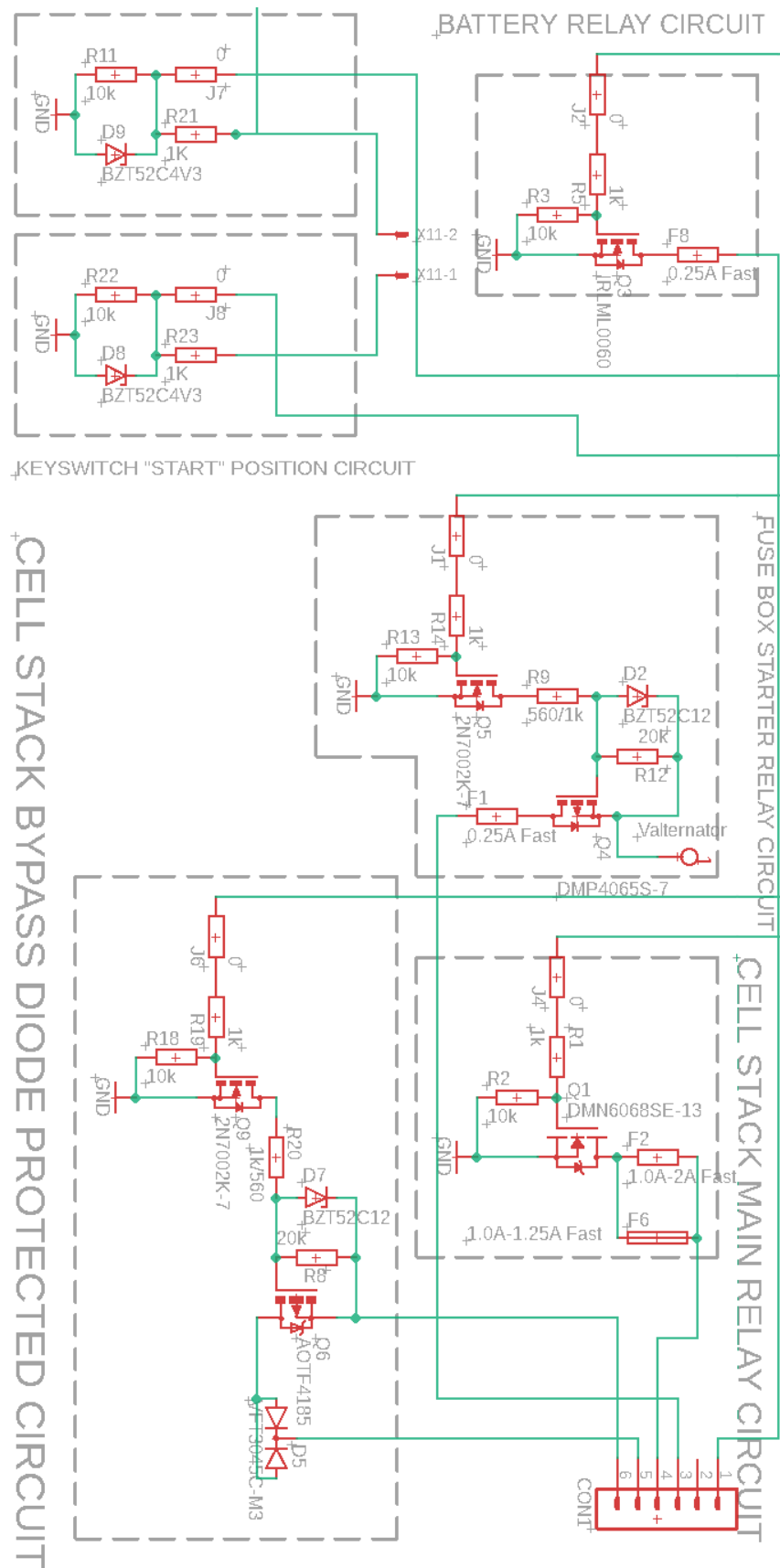
Για την ορθή λειτουργία του συστήματος, το arduino «διαβάζει» τη θέση του κλειδοδιακόπτη. Οι θέσεις του κλειδοδιακόπτη που επηρεάζουν το σύστημά μας είναι δύο. Η μία θέση ονομάζεται “Accessories” και στην οποία έχουμε ενεργοποιήσει πλήρως το ηλεκτρικό σύστημα του αυτοκινήτου και η άλλη θέση ονομάζεται “Start”, στην οποία ενεργοποιείται η μίζα. Όταν ο κλειδοδιακόπτης βρεθεί σε μία θέση βραχυκυκλώνει και τις ανάλογες επαφές εξόδου του με την μπαταρία. Λόγω αυτού, τα σήματα ένδειξης της θέσης του κλειδοδιακόπτη είναι επιπέδου 12 Volt και απαιτούν υποβιβασμό για να εφαρμοστούν στις εισόδους του arduino που λειτουργεί στα 5 Volt. Η υλοποίηση γίνεται πολύ απλά με τη χρήση διόδων zener (D8, D9) παράλληλα με τις εισόδους του arduino. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν zener των 4.3 Volt με κωδικό BZT52C4V3 σε σειρά με αντιστάσεις 1 KΩ (R22, R23) για περιορισμό του ρεύματος. Τέλος, τοποθετήθηκαν οι αντιστάσεις R11 και R22 ως pull down αντιστάσεις για την αποφυγή του να εισέλθουν σε κατάσταση floating οι εισοδοί, όταν δε θα δέχονται το σήμα των 12 Volt από τον κλειδοδιακόπτη. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε, πως η τάση των zener επιλέχθηκε χαμηλότερα από 5 Volt στα 4.3 Volt, καθώς οι μεγάλες διακυμάνσεις που παρουσιάζει δεν πρέπει να ξεπεράσουν τα 5 Volt δημιουργώντας κίνδυνο για το arduino. Παράλληλα, το arduino αναγνωρίζει λογικού επιπέδου 1 όλα τα σήματα με τάση πάνω από 3.3 Volt.

### 5.1.3.4 Μικρό ρελέ εκκινητήρα (μίζας)

Ο έλεγχος του μικρού ρελέ της μίζας, που βρίσκεται στην ασφαλειοθήκη στον χώρο του κινητήρα, είναι διαφορετικός, καθώς το συγκεκριμένο βρίσκεται στο αυτοκίνητο και απαιτεί ενός είδους ηλεκτρολογική παρέμβαση για τον έλεγχο του από το arduino. Σε κατάσταση αναμονής, κανένας από τους ακροδέκτες του πηνίου δεν συνδέεται ούτε με τη γείωση αλλά ούτε και με τα 12 Volt. Ο ένας ακροδέκτης είναι συνδεδεμένος με τη μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU) και γειώνεται κατ' εντολή από αυτήν. Ο άλλος ακροδέκτης είναι συνδεδεμένος με την επαφή εξόδου του κλειδοδιακόπτη που παρέχει 12 Volt μόνο όταν γυρίσουμε το κλειδί στη θέση “Start”. Ο μοναδικός τρόπος για να ελέγχεται το ρελέ από το arduino, είναι να παρέμβουμε ηλεκτρολογικά στο αυτοκίνητο και να αποσυνδέσουμε τον αντίστοιχο ακροδέκτη του πηνίου από τον κλειδοδιακόπτη. Έπειτα από αυτή την παρέμβαση, ο ακροδέκτης συνδέεται με τη βοηθητική πλακέτα του arduino στην τρίτη επαφή του CON1. Η λογική σε αυτή την παρέμβαση είναι ότι το arduino θα ελέγχει πλήρως την ενεργοποίηση του ρελέ τροφοδοτώντας τον ακροδέκτη του πηνίου του με 12 Volt, όταν αυτό απαιτείται. Σε αντίθεση με τα ρελέ μπαταρίας και συστοιχίας, ο έλεγχος γίνεται με την διακόπτηση των 12 Volt και όχι της γείωσης και άρα θα χρησιμοποιηθεί p-channel mosfet. Αναλυτικότερα, όταν πρέπει να ενεργοποιηθεί το ρελέ, η αντίστοιχη έξοδος του arduino μεταβαίνει σε λογικό 1 οδηγώντας σε κόρο το n-channel Q5. Το Q5 γειώνει την πύλη του Q4 μέσω του διαιρέτη τάσης R9/R12 και το οδηγεί σε κόρο, ενεργοποιώντας έτσι το ρελέ. Το Q4 έχει κωδικό DMP4065S-7 και είναι σε smd πακέτο SOT-23 και επιλέχθηκε λόγω χαμηλού κόστους, χαμηλής  $R_{DS(on)}$  και μικρού μεγέθους. Τέλος, η ασφάλεια F1 250 mA παρέχει προστασία από πιθανό βραχυκύκλωμα του πηνίου του ρελέ.

### 5.1.3.5 Παρακαμπτήρια οδός συστοιχίας

Το υποκύκλωμα ισχύος περιλαμβάνει ακόμα μία διάταξη. Όπως αναλύσαμε στο κεφάλαιο 4, κατά την διαδικασία εκκίνησης, το ρελέ μπαταρίας απομονώνει την μπαταρία και έπειτα συνδέεται η συστοιχία. Στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της μεταγωγής και των δύο ρελέ και διαρκεί κάποια millisecond, δεν τροφοδοτείται το ηλεκτρικό σύστημα του αυτοκινήτου. Ως αποτέλεσμα, απενεργοποιούνται στιγμιαία όλα τα συστήματα του αυτοκινήτου, καθώς και η πλακέτα του arduino.



Εικόνα 5.3: Σχηματικό υποκυκλώματος ισχύος

Η απενεργοποίηση του arduino θα επαναφέρει το ρελέ της μπαταρίας στην αρχική του κατάσταση, αφού δε θα δέχεται πλέον σήμα ενεργοποίησης και άρα θα γίνει άμεσα επανεκκίνηση της πλακέτας και των ηλεκτρικών του αυτοκινήτου. Βλέπουμε, πως με κάθε προσπάθεια εκκίνησης θα γίνεται στιγμιαία επανεκκίνηση όλου του συστήματος και κατ' επέκταση αποτυχία εκκίνησης.

Για την επίλυση του βασικού αυτού προβλήματος απαιτείται η προσθήκη μιας διάταξης που θα παρέχει ισχύ αυτά τα ελάχιστα millisecond της μεταγωγής των ρελέ. Για την υλοποίηση της διάταξης θα γίνει χρήση ενός p-channel mosfet και μίας διόδου schottky πολύ χαμηλής τάσης αγωγής. Η λογική είναι ότι ακριβώς πριν την μεταγωγή των ρελέ, ενεργοποιείται η διάταξη και η συστοιχία των υπερπυκνωτών συνδέεται με το ηλεκτρικό σύστημα του αυτοκινήτου μέσω του mosfet και της διόδου. Το mosfet λειτουργεί ως ο διακόπτης της διάταξης και η διάταξη αποτρέπει τη ροή ρεύματος προς τη συστοιχία, στην περίπτωση που η τάση της είναι χαμηλότερη από αυτήν της μπαταρίας. Όταν ολοκληρωθεί η μεταγωγή των ρελέ, η διάταξη απενεργοποιείται, έτσι ώστε το ρεύμα εκκίνησης να διαρρεύσει αποκλειστικά μέσω του ρελέ. Μετά την επιτυχή εκκίνηση και αφότου απενεργοποιηθεί το μικρό ρελέ του εκκινητήρα, η διάταξη ενεργοποιείται και πάλι για ελάχιστο χρόνο, για να τροφοδοτήσει το αυτοκίνητο στο χρονικό διάστημα μεταγωγής των ρελέ μπαταρίας και συστοιχίας. Το mosfet που χρησιμοποιήθηκε είναι το AOTF4185 με ρευματική ικανότητα συνεχούς αγωγής 34 A, που είναι επαρκής για τον σκοπό μας και  $R_{DS(on)}$  που μπορεί να φτάσει ιδιαίτερα χαμηλή τιμή, ακόμα και κάτω από 16 mΩ για ελαχιστοποίηση της πτώσης τάσης. Για την διάταξη επιλέχθηκε τύπου schottky, λόγω της χαμηλότερης τάσης αγωγής που διατηρούν στα άκρα τους σε σύγκριση με άλλους τύπους διόδων. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η VFT3045C-M3, η οποία έχει ονομαστική τάση αγωγής στα 15 A μόλις 0.39 Volt. Το γεγονός, επίσης, ότι ως εξάρτημα περιέχει δύο διόδους με κοινή κάθοδο, μας επιτρέπει να τις συνδέσουμε παράλληλα και να μοιράσουμε έτσι το ρευματικό φορτίο για την επίτευξη χαμηλότερων απωλειών. Καθώς, όπως προαναφέραμε, η διάταξη χρησιμοποιεί p-channel mosfet ως κύριο διακοπτικό μέσο, ο έλεγχός της γίνεται με τη χρήση ενδιάμεσου n-channel mosfet με κωδικό 2N7002K-7. Για την ενεργοποίηση της διάταξης, η αντίστοιχη έξοδος του arduino μεταβαίνει σε λογικό 1 και οδηγεί σε κόρο το Q9. Το Q9 στη συνέχεια γειώνει την πύλη του Q6 και το οδηγεί σε κόρο. Τέλος, η πηγή του Q6 λαμβάνει την τάση της συστοιχίας από την έκτη επαφή του CON1.

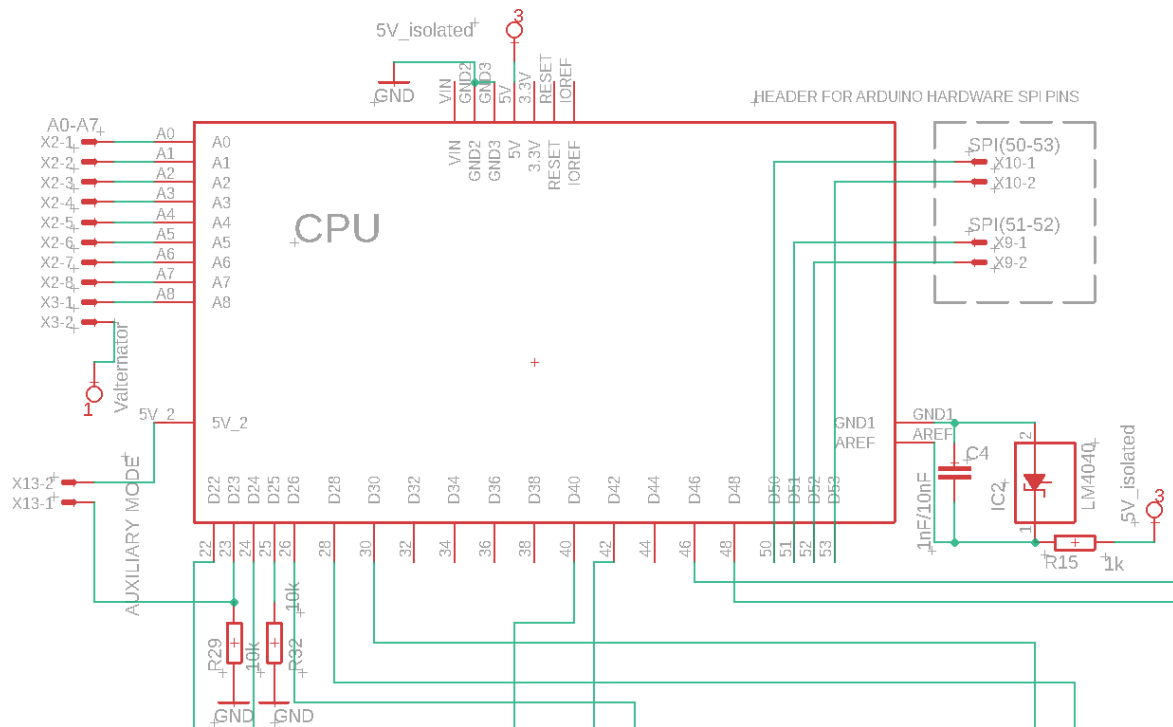
### 5.1.4 Υποκύκλωμα συμπληρωματικών εξαρτημάτων

Στην εικόνα 5.4, βλέπουμε κάποια συμπληρωματικά εξαρτήματα της βοηθητικής πλακέτας. Το μεγαλύτερο και σημαντικότερο εξάρτημα είναι το custom socket, που κατασκευάσαμε για την τοποθέτηση του arduino mega επάνω στην πλακέτα και την σύνδεσή του με αυτήν. Η ένδειξη «CPU» που φαίνεται στην εικόνα είναι στην ουσία ένα σύνολο από θηλυκές ακιδοσειρές τοποθετημένες με ακρίβεια στην πλακέτα, έτσι ώστε να «κουμπώσει» σε αυτές το arduino με τις αντίστοιχες αρσενικές ακιδοσειρές που διαθέτει.

Οι X9 και X10 είναι αρσενικοί κοννέκτορες πλακέτας 2 επαφών με βήμα 2.54mm και συνδέονται με τις επαφές “Hardware SPI” του arduino για τον έλεγχο της οθόνης. Κατά τη συναρμολόγηση της πλακέτας χρησιμοποιήθηκε μόνο ο X9, η επικοινωνία του οποίου με την οθόνη γίνεται με τη χρήση ζευγαριού καλωδιοταινίας.

Ο X2 είναι αρσενικός κοννέκτορας πλακέτας 8 επαφών με βήμα 2.54mm και συνδέεται με τις αναλογικές επαφές του arduino A0 έως A7. Σε αυτόν τον κοννέκτορα φθάνουν μέσω καλωδιοταινίας τα 8 σήματα των μετρούμενων τάσεων της πλακέτας μέτρησης. Ο X3 είναι αρσενικός κοννέκτορας πλακέτας 2 επαφών με βήμα 2.54mm. Στη μία του επαφή φθάνει το σήμα του μετρούμενου ρεύματος

φόρτισης της συστοιχίας και συνδέεται με την αναλογική είσοδο A8 του arduino για την ανάγνωση του σήματος. Η εναπομένουσα επαφή συνδέεται με τον απαγωγό του Q11 και λαμβάνει την τάση τροφοδοσίας κάθε φορά που ενεργοποιείται η πλακέτα. Μέσω καλωδίου συνδέεται με την πλακέτα εξισορρόπησης παρέχοντας κατά τη λειτουργία της την τάση του ανορθωτή στα mosfet εξισορρόπησης, όπως θα δούμε παρακάτω.



Εικόνα 5.4 : Συμπληρωματικά εξαρτήματα πλακέτας

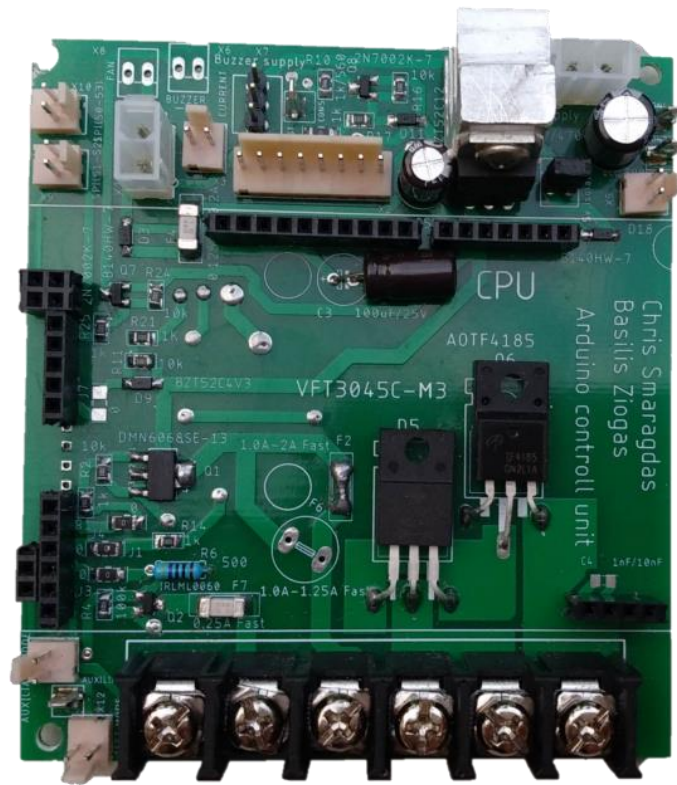
Ο X13 είναι επίσης αρσενικός κοννέκτορας πλακέτας 2 επαφών με βήμα 2.54mm. Σε αυτόν συνδέεται μία εκ των on-off επαφών του DPST διακόπτη κατάστασης χαμηλής μπαταρίας. Όταν πατηθεί ο διακόπτης, η τάση των 5 Volt εφαρμόζεται στην ψηφιακή είσοδο 23 του arduino για αναγνώριση της κατάστασης. Η R29 λειτουργεί ως pull down αντίσταση.

Τέλος, για την δημιουργία σταθεροποιημένης τάσης αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο LM4040 (IC2). Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο παράγει τάση εξόδου ίση με 3 Volt με πολύ καλή σταθεροποίηση, ανεξαρτήτου τάσης εισόδου και θερμοκρασίας. Ο πυκνωτής C4 συμβάλει στην καλύτερη μεταβατική απόκριση του ολοκληρωμένου. Η τάση εξόδου του IC2 συνδέεται με την επαφή AREF του arduino.

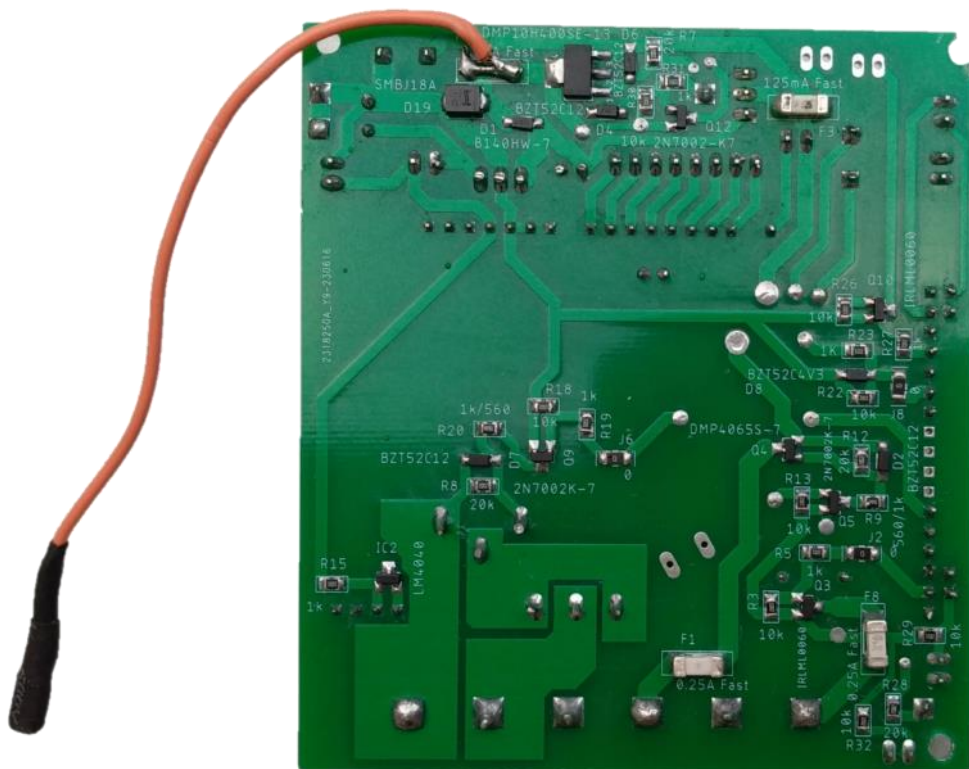
### 5.1.5 PCB

Στην εικόνα 5.5, βλέπουμε την άνω όψη της πλακέτας. Στο επάνω μέρος διακρίνουμε ενδεικτικά τον κοννέκτορα 8 επαφών για τα σήματα των μετρούμενων τάσεων και τον ρυθμιστή τάσης LM7805 με την ψήκτρα αλουμινίου για απαγωγή θερμότητας. Στο μέσο της πλακέτας διακρίνονται το mosfet και η διάταξη της παρακαμπτήριας διάταξης με τους ιδιαίτερα πλατιούς χαλκοαγωγούς για απροβλημάτιστη διαχείριση των ρευμάτων. Στο κάτω μέρος βρίσκεται η κλέμα ισχύος 6 επαφών με τις βίδες σύσφιξης. Τέλος, οι θηλυκές ακιδοσειρές που βρίσκονται διάσπαρτες στην επιφάνεια της

πλακέτας αποτελούν «αποτύπωμα» των ακιδοσειρών του arduino και σε αυτές εδράζεται.

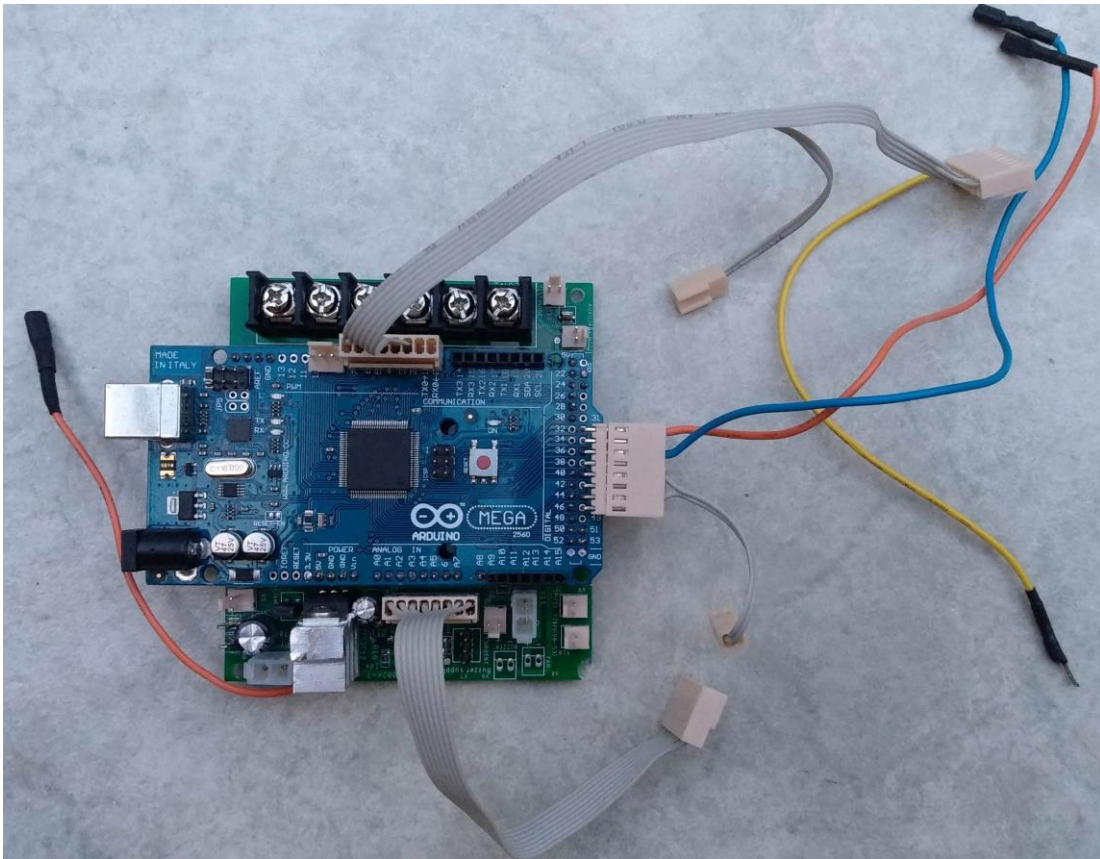


Εικόνα 5.5 : Άνω όψη βοηθητικής πλακέτας Arduino Mega



Εικόνα 5.6 : Κάτω όψη πλακέτας Arduino Mega

Στην εικόνα 5.6, βλέπουμε την κάτω όψη της πλακέτας. Τα εξαρτήματα σε αυτή την όψη είναι αποκλειστικά smd, με κυριότερο το mosfet ελέγχου της τροφοδοσίας της πλακέτας που βρίσκεται στο πάνω μέρος της εικόνας. Οι χαλκοαγωγοί για το mosfet και την διόδο της παρακαμπτήριας διάταξης τοποθετήθηκαν και σε αυτήν την όψη για επίτευξη της ελάχιστης δυνατής αντίστασης. Τέλος, το πορτοκαλί καλώδιο μεταφέρει την τάση του ανορθωτή (μπαταρίας), όταν η πλακέτα λειτουργεί, στην πλακέτα εξισορρόπησης, όπως θα αναλυθεί και αργότερα.



Εικόνα 5.7 : Τελική μορφή πλακέτας με το arduino και τις καλωδιώσεις

Στην εικόνα 5.7, βλέπουμε την τελική μορφή της πλακέτας με τοποθετημένο το arduino και τις διάφορες καλωδιώσεις. Το μπλε-πορτοκαλί ζεύγος συνδέεται με την πλακέτα φόρτισης για τον έλεγχό της. Η οκταπλή καλωδιοταινία στο κάτω μέρος, συνδέεται στην πλακέτα μέτρησης για τη μεταφορά των μετρούμενων τάσεων. Η διπλή καλωδιοταινία μικρού μήκους συνδέεται με την πλακέτα μετρήσεων για τον έλεγχό της. Η καλωδιοταινία στο πάνω μέρος, εφαρμόζει απευθείας πάνω σε κοννέκτορα του arduino και συνδέεται με την πλακέτα εξισορρόπησης.

## 5.2 Πλακέτα μέτρησης τάσεων

Αναπόσπαστο κομμάτι της συσκευής είναι η μέτρηση και επίβλεψη των τάσεων. Σε ένα σύστημα που διαχειρίζεται μπαταρία αλλά και μια συστοιχία υπερπυκνωτών σε όχημα, ο έλεγχος των διαφόρων τάσεων είναι απαραίτητος για την ορθή και πάνω από όλα ασφαλή λειτουργία του. Η μέτρηση των τάσεων της μπαταρίας (ανορθωτή), της συστοιχίας αλλά και κάθε μεμονωμένου υπερπυκνωτή παρέχει την απαραίτητη πληροφορία στον εγκέφαλο του συστήματος (arduino) για να εκτελέσει τις ανάλογες ενέργειες και παράλληλα δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιβλέπει την κατάσταση του συστήματος.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.8, η πλακέτα που μελετήθηκε και κατασκευάστηκε λαμβάνει ως σήματα εισόδου τις τάσεις που προαναφέρθηκαν, με το κατάλληλο υποκύκλωμα απομόνωσης για λόγους ασφαλείας. Στη συνέχεια, ένα κύκλωμα με τελεστικούς ενισχυτές και διαιρέτες τάσης μετατρέπει τη μετρούμενη τάση σε τέτοια κλίμακα που να είναι εφικτή η ανάγνωση από τις αναλογικές εισόδους του arduino, το οποίο προβάλλει τις ανάλογες τιμές στην οθόνη lcd.



Εικόνα 5.8: Διάγραμμα ροής πλακέτας μετρήσεων

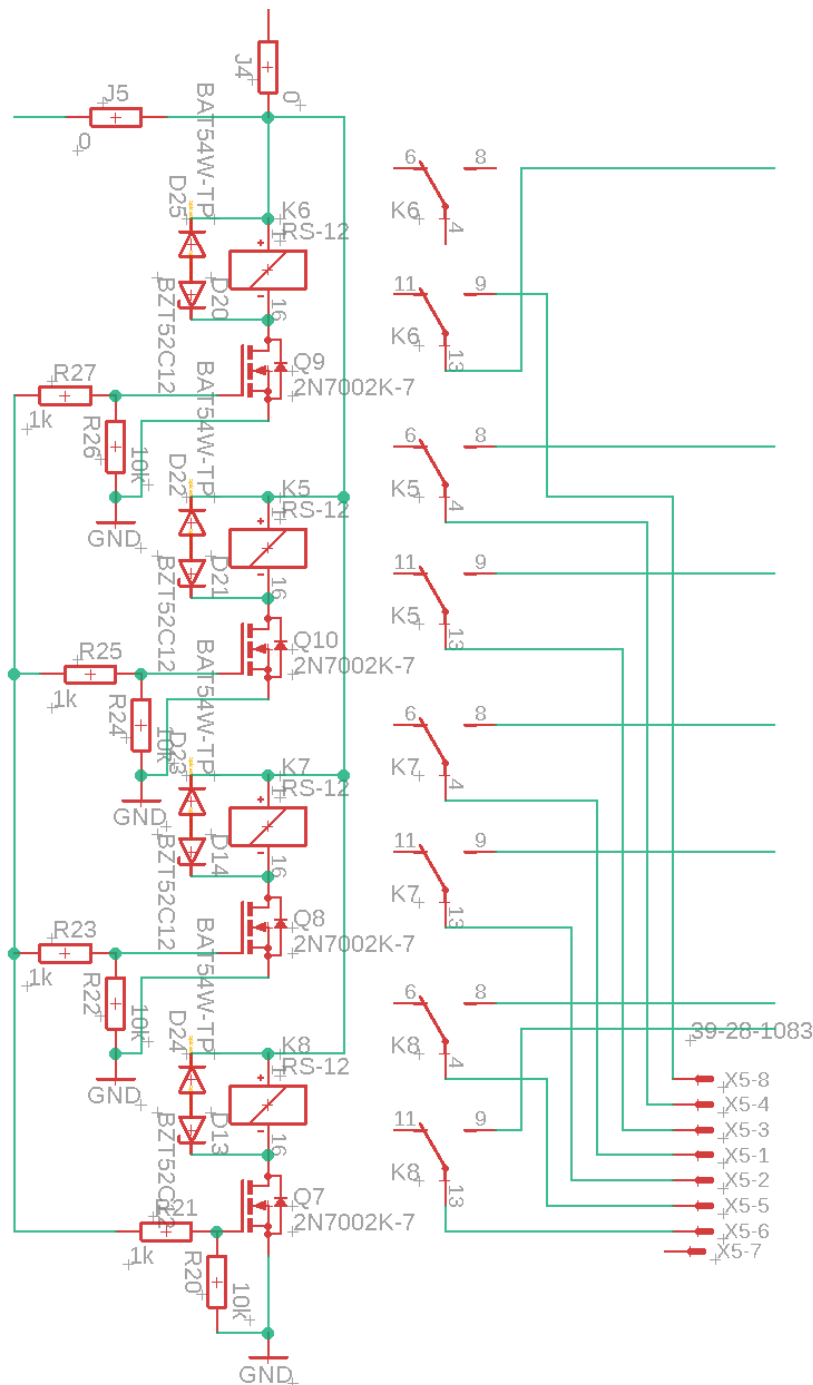
### 5.2.1 Υποκύκλωμα απομόνωσης

Αρχικά, θα αναλύσουμε το υποκύκλωμα απομόνωσης των τάσεων. Για τη μέτρηση των τάσεων έγινε χρήση ψιλών καλωδίων τα οποία συνδέουν τον θετικό πόλο της μπαταρίας (ανορθωτή), καθώς επίσης και όλους τους κόμβους της συστοιχίας των πυκνωτών με την πλακέτα. Οι μετρούμενες τάσεις είναι 8, μία είναι της μπαταρίας (και κατ' επέκταση του ανορθωτή όταν λειτουργεί ο κινητήρας), άλλες 6 μία για κάθε πυκνωτή και τέλος, η τάση όλης της συστοιχίας. Η τάση της συστοιχίας είναι η τάση στον θετικό πόλο του 6<sup>ου</sup> πυκνωτή, οπότε πρακτικά απαιτούνται 7 καλώδια. Για πρακτικούς λόγους, τα καλώδια για τις τάσεις των πυκνωτών συνδέονται μέσω ακροδέκτη τύπου δαχτυλίδι στις βίδες 4mm που διαθέτουν οι χάλκινες λάμες που συνδέουν τους πυκνωτές. Τα καλώδια συνδέονται με την πλακέτα με τη χρήση ενός ζευγαριού κωνεκτόρων “Molex Mini Fit Jr.” 8 θέσεων σε διάταξη 4 X 2 με βήμα 4.2mm (εικόνα 5.9).



Εικόνα 5.9 : Κοννέκτορες Molex Mini-Fit Jr. 8 επαφών

Οι κοννέκτορες παρέχουν την ευκολία της άμεσης σύνδεσης και αποσύνδεσης των σημάτων τάσης, έτσι ώστε η πλακέτα να είναι μηχανικά ανεξάρτητη από τη μπαταρία και τη συστοιχία. Όσον αφορά το κυρίως κομμάτι της απομόνωσης, υπάρχει το εξής πρόβλημα. Όταν το σύστημά μας θα είναι απενεργοποιημένο (πλήρως σβηστό αυτοκίνητο), το κύκλωμα μέτρησης, όπως και το arduino θα απενεργοποιούνται για τον προφανή λόγο της εξοικονόμησης ενέργειας. Η ύπαρξη των τάσεων των πυκνωτών και της μπαταρίας στις εισόδους των τελεστικών και του arduino, χωρίς να έχουν τροφοδοσία, μπορεί να οδηγήσει στην πρόκληση ζημιάς. Η χρήση κυκλώματος απομόνωσης κρίθηκε απαραίτητη και για την υλοποίησή του χρησιμοποιήθηκαν ρελέ απομόνωσης με τις NO (normally open) επαφές τους, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.10.

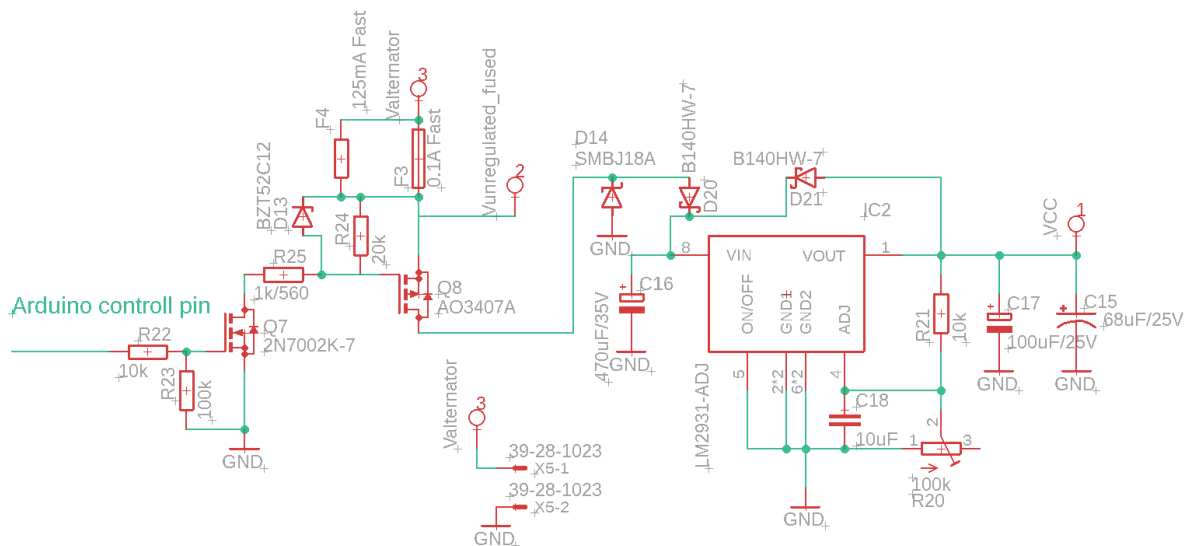


Εικόνα 5.10 : Σχηματικό διάταξης απομόνωσης τάσεων της πλακέτας μετρήσεων

Ο έλεγχος των πηνίων των ρελέ γίνεται με χαμηλής ισχύος smd n-channel mosfet. Όταν θα ενεργοποιηθεί η συσκευή, το arduino στέλνει τα κατάλληλα σήματα ελέγχου στα αντίστοιχα mosfet και τα ρελέ (K5-K8) ενεργοποιούνται, μεταβαίνοντας σε κατάσταση ON και οι τάσεις πλέον εφαρμόζονται στο υποκύκλωμα μέτρησης. Η ύπαρξη 7 σημάτων τάσης και η μηδαμινή απαίτηση σε ρεύμα οδήγησε στην επιλογή 4 miniature DPDT ρελέ και πιο συγκεκριμένα των “RS-12” της Rayex με ονομαστική τάση πηνίου 12 Volt. Τα n-channel mosfet που χρησιμοποιήθηκαν είναι 2N7002K-7. Για την εξάλειψη των αιχμών τάσης που εμφανίζονται κατά την διακοπή τροφοδοσίας των πηνίων των ρελέ, έγινε χρήση δικτυωμάτων αντιπαράλληλων διόδων. Η μία εκ των δύο διόδων είναι μια διάδος zener των 12 Volt και η δεύτερη μια διάδος schottky. Ο συνδυασμός τους αποτρέπει την ανάστροφη τάση, που παράγει το πηνίο του ρελέ, να αυξηθεί πάνω από τα 12 Volt κατά προσέγγιση, προστατεύοντας με αυτόν τον τρόπο τα mosfet ελέγχου. Τέλος, όπως διακρίνουμε στην εικόνα 5.10, ο αρσενικός κοννέκτορας X5 με τις 8 επαφές, που είναι όπως προαναφέρθηκε τύπου “Mini-Fit Jr.”, συνδέεται με τον αντίστοιχο θηλυκό στον οποίο τερματίζουν τα καλώδια που μεταφέρουν τα σήματα των προς μέτρηση τάσεων. Οι τάσεις αυτές οδηγούνται απευθείας στις NO επαφές των ρελέ απομόνωσης.

### 5.2.2 Υποκύκλωμα τροφοδοσίας

Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε το κομμάτι της τροφοδοσίας. Η αφιλτράριστη και με ελαφρά αλλά σημαντική αστάθεια τάση του ανορθωτή (μπαταρίας με σβηστό κινητήρα) μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την λειτουργία των τελεστικών και να ελαττώσει την ακρίβεια των μετρήσεων. Για το λόγο αυτό, η παρεχόμενη τάση στο κύκλωμα σταθεροποιείται με τη χρήση υποκυκλώματος, που βασίζεται σε γραμμικό σταθεροποιητή τάσης και το οποίο φαίνεται στην εικόνα 5.11.



Εικόνα 5.11 : Σχηματικό υποκυκλώματος σταθεροποίησης τάσης πλακέτας μετρήσεων

Η απαίτηση σε ρεύμα μόλις 11 mA, καθιστά εφικτή τη χρήση ρυθμιστή με χαμηλή ρευματική ικανότητα εξόδου. Η σταθεροποιημένη τάση εξόδου ορίστηκε στα 11 Volt, και λόγω του ότι η τιμή αυτή προσεγγίζει τα 12 Volt της μπαταρίας και τα περίπου 14 Volt της εξόδου του ανορθωτή, απαιτείται ρυθμιστής με χαμηλή ελάχιστη διαφορά εισόδου-εξόδου (low dropout voltage). Τα δύο αυτά προηγούμενα κριτήρια καλύπτει πλήρως ο αρκετά εμπορικός LM2931 στην “Adjustable”

έκδοσή του. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η smd έκδοσή του σε πακέτο SO-8 καθαρά για χωροταξικούς λόγους στην πλακέτα. Για την επίτευξη της σταθεροποιημένης τάσης εξόδου στα 11 Volt, έγινε χρήση των απαραίτητων πυκνωτών και αντιστάσεων σύμφωνα με τις οδηγίες του φυλλαδίου προδιαγραφών, με την τελική ρύθμιση της τάσης να πραγματοποιείται με ένα smd ποτενσιόμετρο των 100KΩ (R20).

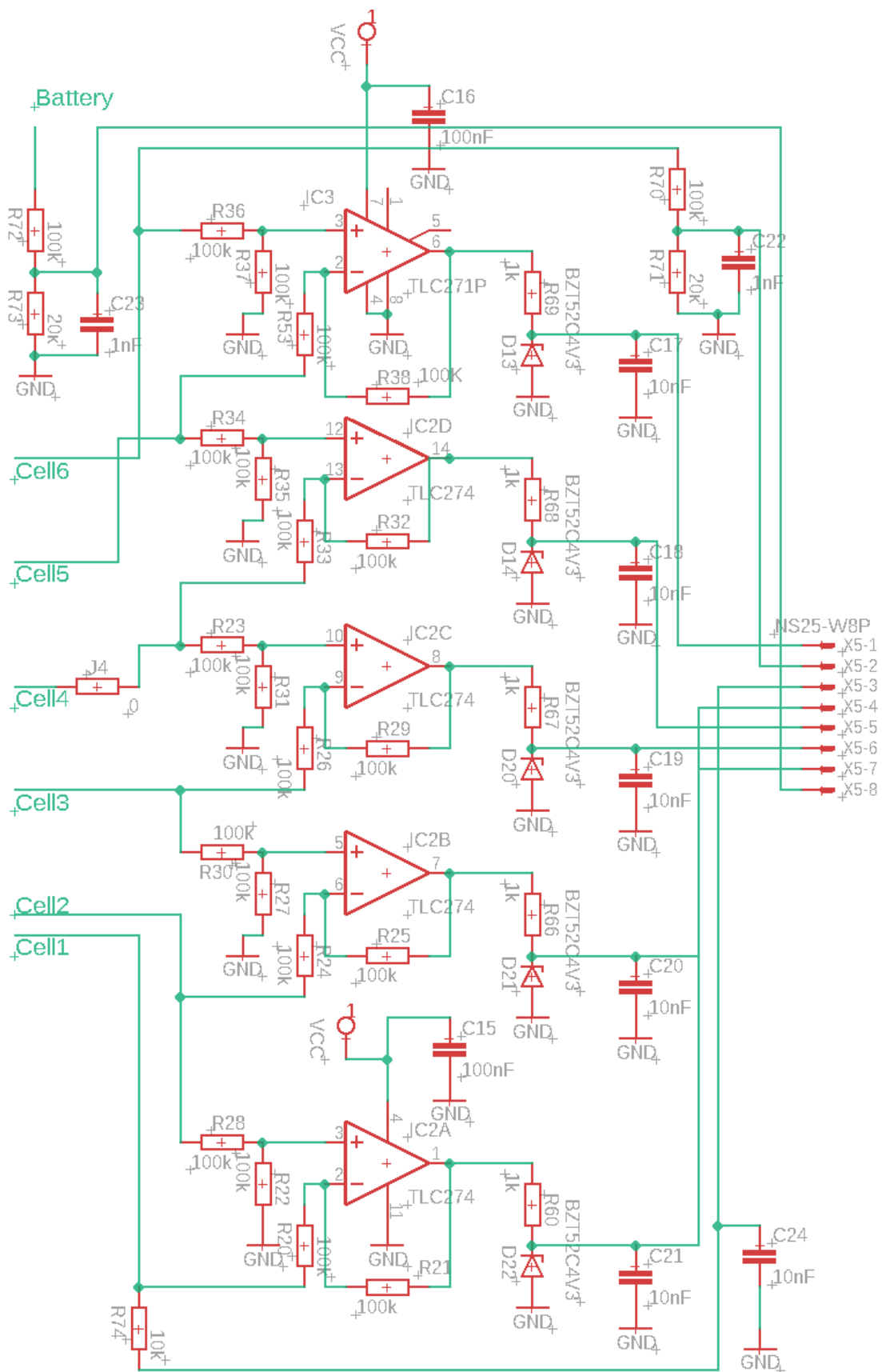
Η διάδος D18 χρησιμοποιείται για την προστασία του ρυθμιστή από βραχυκύκλωμα της εισόδου. Η διάδος D9 αναλαμβάνει την τοπική απομόνωση της φιλτραρισμένης τάσης του πυκνωτή εξομάλυνσης C11, έτσι ώστε να μην υπάρχει επιστροφή ενέργειας στην έξοδο του ανορθωτή. Κάτι τέτοιο, θα καθιστούσε ανούσια τη χρήση του πυκνωτή C11, αφού θα ήταν παράλληλα συνδεδεμένος με την έξοδο του ανορθωτή και δε θα επιτυγχανόταν καμία εξομάλυνση, λόγω του υψηλού ρεύματος με το οποίο τροφοδοτείται το ηλεκτρικό σύστημα του αυτοκινήτου. Η D19 είναι διάδος προστασίας ESD και προστατεύει την πλακέτα από πιθανές αιχμές τάσης άνω των 22 Volt, που είναι πιθανό να εμφανιστούν στην έξοδο του ανορθωτή.

Ο έλεγχος της τροφοδοσίας στην πλακέτα γίνεται από το arduino μέσω του συνδυασμού των mosfet Q5 και Q6. Σε κάθε περίπτωση, η παροχή τροφοδοσίας στην πλακέτα έχει την προϋπόθεση να λειτουργεί ήδη το arduino. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς τα σήματα εξόδου της πλακέτας (μετρούμενες τάσεις) εφαρμόζονται στις αναλογικές εισόδους του arduino και άρα πρέπει πρώτα να έχει τροφοδοτηθεί το ίδιο και έπειτα η πλακέτα, για αποφυγή ζημιάς στον μικροελεγκτή. Ο έλεγχος γίνεται από μία εκ των ψηφιακών εξόδων του arduino. Όταν πρέπει να ενεργοποιηθεί η τροφοδοσία στην πλακέτα, η αντίστοιχη έξοδος του arduino μεταβαίνει σε λογικό 1 (5 Volt) και οδηγεί σε κόρο το Q5, που είναι ένα χαμηλής ισχύος n-channel mosfet με κωδικό 2N7002K-7. Στη συνέχεια, το Q5 έχοντας γειωμένο τον απαγωγό του επιτρέπει σχεδόν μηδενική τάση πύλης στο Q6 και άρα το οδηγεί σε κόρο. Η τάση του ανορθωτή πλέον παρέχεται στον ρυθμιστή τάσης και η πλακέτα λειτουργεί. Τέλος, οι ασφάλειες F1 και F2 των 100 mA και 125 mA αντίστοιχα τοποθετήθηκαν για την προστασία του κυκλώματος από πιθανή υπερένταση ρεύματος. Κατά τη συγκόλληση των υλικών, χρησιμοποιήθηκε μόνο μία εκ των δύο ασφαλειών, μετά από δοκιμές της ρευματικής απαίτησης της πλακέτας.

### 5.2.3 Υποκύκλωμα μέτρησης

Το σημαντικότερο τμήμα της πλακέτας είναι το υποκύκλωμα που μετρά τις τάσεις και μετά από επεξεργασία εφαρμόζονται στις αναλογικές εισόδους του arduino. Στην εικόνα 5.12 φαίνεται το σχηματικό του υποκυκλώματος μέτρησης.

Ξεκινώντας από το απλούστερο τμήμα του υποκυκλώματος, έχουμε τη μέτρηση της τάσης της μπαταρίας-ανορθωτή, της τάσης του 1<sup>ου</sup> πυκνωτή και την συνολική τάση της συστοιχίας. Οι τρεις αυτές τάσεις έχουν αναφορά τη γείωση και αυτό καθιστά τη μέτρησή τους εύκολη. Η τάση του 1<sup>ου</sup> πυκνωτή, όπως και των υπολοίπων πυκνωτών, δε θα ξεπερνά τα 2.6 Volt στη χειρότερη περίπτωση και άρα δε χρειάζεται υποβιβασμό για την μέτρησή της από τον ADC του arduino. Η μοναδική επεξεργασία που γίνεται είναι η προσθήκη ενός χαμηλοπερατού φίλτρου 10KΩ/10nF (R74,C24) για την εξάλειψη πιθανών υψίσυχων θορύβων (π.χ. από το διακοπτόμενο κύκλωμα φόρτισης) που μπορεί να επηρεάσουν την σταθερότητα των μετρούμενων τιμών κατά τη δειγματοληψία του ADC. Η είσοδος του ADC λαμβάνει το σήμα της τάσης από τον πυκνωτή του φίλτρου. Η τάση της μπαταρίας-ανορθωτή μπορεί να φτάσει τα 14.22 Volt, ενώ λόγω της κυμάτωσης που εμφανίζει κατά τη λειτουργία του κινητήρα (φόρτιση μπαταρίας) μπορεί να αυξηθεί ελαφρώς πάνω από αυτή την τιμή. Με τη μέγιστη τάση που μπορεί να διαβάσει ο ADC να είναι στα 3 Volt λόγω της ρύθμισης της τάσης αναφοράς σε αυτή την τιμή, απαιτείται ένα κύκλωμα υποβιβασμού της τάσης σε ασφαλές επίπεδο.



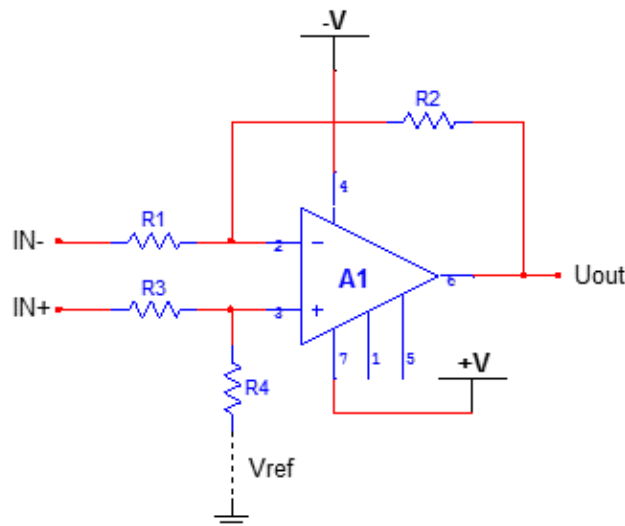
Εικόνα 5.12 : Σχηματικό υποκυκλώματος μετρήσεων

Παράλληλα, για την κατά το δυνατόν καλύτερη εξάλειψη της κυμάτωσης είναι αναγκαία η χρήση και ενός χαμηλοπερατού φίλτρου. Ο υποβιβασμός της τάσης και το φιλτράρισμα συνδυάστηκαν σε έναν διαιρέτη τάσης  $100\text{K}\Omega/20\text{K}\Omega, 1\text{nF}$  (R72,R73,C23). Σε ένα πιθανό σενάριο κατά το οποίο λόγω αστάθειας η μετρούμενη τάση μπορεί να φτάσει ακόμα και τα 14.5 Volt, η τάση εξόδου του διαιρέτη θα είναι:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times \frac{20\text{K}\Omega}{120\text{K}\Omega} \Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{6} \Rightarrow V_{\text{out}} = 2.417 \text{ Volt},$$

μια τιμή που είναι ασφαλής για τον ADC. Ο πυκνωτής, που είναι παράλληλα συνδεδεμένος με την αντίσταση  $20\text{K}\Omega$ , αναλαμβάνει να φιλτράρει τις υψίσυχνες κυματώσεις, ενώ στις χαμηλότερες συχνότητες η σύνθετη αντίστασή του είναι αρκετά υψηλή, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει την DC τάση εξόδου του διαιρέτη και άρα τη δειγματοληφθείσα τιμή. Για την μέτρηση της τάσης της συστοιχίας ισχύουν ακριβώς τα ίδια με την τάση της μπαταρίας και χρησιμοποιήθηκε η ίδια μορφή δικτύωματος (R70,R71,C22).

Οι υπόλοιπες τάσεις προς μέτρηση είναι αυτές των πυκνωτών 2 έως 6, οι οποίες δεν έχουν αναφορά τη γείωση. Αυτό καθιστά τη μέτρησή τους πιο περίπλοκη, αφού οι τάσεις αυτές είναι διαφορικές. Μία εύκολα υλοποιήσιμη και με σχετικά καλή ακρίβεια λύση, είναι η χρήση τελεστικών σε διάταξη ενισχυτών διαφοράς με έναν τελεστικό ανά μέτρηση. Οι ενισχυτές διαφοράς «μετρούν» την διαφορά των τάσεων στις δύο εισόδους τους και την οδηγούν στην έξοδό τους πολλαπλασιασμένη με την εκάστοτε απολαβή. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.12, ο κάθε πυκνωτής συνδέεται με έναν τελεστικό με τα κατάλληλα δικτύωματα αντιστάσεων. Πιο συγκεκριμένα, ο αρνητικός πόλος συνδέεται με την αναστρέφουσα και ο θετικός πόλος με τη μη αναστρέφουσα είσοδο. Καθώς η τάση του κάθε πυκνωτή δεν πρόκειται να υπερβεί τα 2.6 Volt, η τάση εξόδου των ενισχυτών ορίστηκε να είναι ίση με τη διαφορική είσοδο, δηλαδή η απολαβή να ισούται με 1. Στην εικόνα 5.13, βλέπουμε τη βασική μορφή του ενισχυτή διαφοράς.



Εικόνα 5.13 : Βασική μορφή ενισχυτή διαφοράς

Πηγή : <http://www.porlidas.gr/InstrAmp/InstrAmpGR.htm>

Για τον υπολογισμό της ολικής τάσης εξόδου χρησιμοποιούμε τη μέθοδο της υπέρθεσης. Στην περίπτωση μας δεν απαιτείται η χρήση τάσης αναφοράς, οπότε η τιμή της  $V_{\text{ref}}$  λαμβάνεται ίση με 0

## Κεφάλαιο 5

Volt (γείωση). Η απολαβή για την τάση εισόδου στην αναστρέφουσα είναι αυτή του αναστρέφοντος ενισχυτή:  $A_{v(-)} = -\frac{R_2}{R_1}$

Η τάση εξόδου από την αναστρέφουσα είναι:  $V_{out(-)} = A_{v(-)} \times V_{in(-)} = -V_{in(-)} \times \frac{R_2}{R_1}$

Η απολαβή για την τάση εισόδου στη μη αναστρέφουσα λόγω και του διαιρέτη τάσης R3-R4 είναι:

$$A_{v(+)} = \frac{R_4}{R_3+R_4} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Η τάση εξόδου από την μη αναστρέφουσα είναι:  $V_{out(+)} = A_{v(+)} \times V_{in(+)} = V_{in(+)} * \frac{R_4}{R_3+R_4} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$

Η συνολική τάση εξόδου που προκύπτει από την υπέρθεση των δύο εισόδων πολλαπλασιασμένων με την απολαβή τους είναι:

$$V_{out} = V_{out(+)} + V_{out(-)} = V_{in(+)} * \frac{R_4}{R_3+R_4} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - V_{in(-)} * \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{Σχέση 5.1})$$

Στην περίπτωση μας όπου επιθυμούμε η έξοδος να είναι η διαφορά των εισόδων χωρίς καμία απολαβή, ισχύει:

$$V_{out} = V_{in(+)} - V_{in(-)} \quad (\text{Σχέση 5.2})$$

Παρατηρούμε ότι οι παράγοντες της σχέσης 5.2 πρέπει να είναι μοναδιαίοι, δηλαδή:

$$\frac{R_2}{R_1} = 1 \quad \text{και} \quad \frac{R_4}{R_3+R_4} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 1$$

Με την αντικατάσταση του λόγου  $\frac{R_2}{R_1}$  με την μονάδα στον δεύτερο παράγοντα προκύπτει ότι:

$$\frac{R_4}{R_3+R_4} * (1 + 1) = 1 \Rightarrow \frac{R_4}{R_3+R_4} * 2 = 1 \Rightarrow \frac{R_4}{R_3+R_4} = \frac{1}{2} \Rightarrow R_3 + R_4 = 2R_4 \Rightarrow R_3 = R_4.$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς καταλήγουμε στο συμπέρασμα, ότι για να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα στην έξοδο, θέλουμε ίσες αντιστάσεις R1-R2 και R3-R4. Καθαρά για πρακτικούς λόγους ελάττωσης των προς αγορά υλικών, επιλέχθηκε ίδια τιμή και για τις 4 αντιστάσεις. Στην εικόνα 5.12 φαίνονται οι αντιστάσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση της απολαβής, έτσι ώστε αυτή να είναι ίση με τη μονάδα. Η τιμή των 100 KΩ που αναγράφεται είναι ενδεικτική. Στο τελικό κύκλωμα χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις 10 KΩ. Η τιμή αυτή προέκυψε ως μέση λύση για δύο λόγους. Αρχικά, η χρήση αντιστάσεων πολύ μεγάλης τιμής ενέχει τον κίνδυνο της λήψης ανεπιθύμητου θορύβου. Δεύτερον, η απευθείας σύνδεση των αντιστάσεων στους υπερπυκνωτές, καθιστά μη αποδοτική τη χρήση μικρής τιμής αντιστάσεων. Στην περίπτωση όπου η πλακέτα μέτρησης είναι ενεργοποιημένη αλλά ο κινητήρας δε λειτουργεί (κατάσταση αναμονής), η παρασιτική εκφόρτιση των πυκνωτών θα ήταν υπολογίσιμη. Τέλος, οι πυκνωτές που έχουν τοποθετηθεί παράλληλα με τις επαφές τροφοδοσίας των ολοκληρωμένων TLC271 και TL274 είναι κεραμικοί σε πακέτο 1206 smd. Ο ρόλος τους είναι βοηθητικός προς τους μεγάλους ηλεκτρολυτικούς του γραμμικού ρυθμιστή τάσης για την εξάλειψη υψίσυχων θορύβων, χρησιμοποιούνται δηλαδή ως πυκνωτές παράκαμψης (bypass capacitors). Η χρήση τους προτείνεται και από τον κατασκευαστή των ολοκληρωμένων.

Η επιλογή των κατάλληλων τελεστικών ενισχυτών έγινε έπειτα από μελέτη των απαιτήσεων του συστήματος. Ο πρώτος περιορισμός είναι αυτός της τροφοδοσίας. Το κύκλωμα έχει μόνο μία θετική τροφοδοσία των 11 Volt, οπότε απαιτείται τελεστικός ο οποίος να δύναται να λειτουργήσει με μονή τροφοδοσία άνω των 11 Volt, για περιθώριο ασφαλείας. Ο δεύτερος περιορισμός είναι το επίπεδο τάσης εισόδου. Το χειρότερο σενάριο λειτουργίας είναι ένας ή και παραπάνω πυκνωτές της συστοιχίας να έχουν πολύ χαμηλή τάση ή ακόμα και μηδενική. Λόγω της χρήσης διαιρετών τάσης, οι

τάσεις που εφαρμόζονται στις εισόδους των τελεστικών είναι χαμηλότερες από αυτές των αντίστοιχων πυκνωτών και στη χειρότερη περίπτωση μηδενικές. Οι τελεστικοί που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να μπορούν να δεχτούν τάσεις πολύ χαμηλές και ιδανικά μηδενικές στις εισόδους τους, χωρίς τον κίνδυνο να καταστραφούν αλλά και να ξεφύγουν από τα όρια της γραμμικής τους λειτουργίας. Ο τρίτος περιορισμός είναι το επίπεδο της τάσης εξόδου. Η κάθε βαθμίδα τελεστικού παράγει τάση εξόδου ίση με την τάση που έχει στα άκρα του ο αντίστοιχος πυκνωτής, επομένως το επιθυμητό εύρος τάσης εξόδου είναι 0 - 2.6 Volt. Οι τελεστικοί που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να έχουν τη δυνατότητα για τάση εξόδου πολύ κοντά στο 0 και ιδανικά καθαρά 0 Volt. Ο τέταρτος περιορισμός είναι το εύρος τάσης εισόδου. Η μέγιστη τάση που θα εφαρμοστεί σε είσοδο τελεστικού είναι αυτή του θετικού πόλου του 6<sup>ου</sup> πυκνωτή (ολική τάση συστοιχίας). Όπως θα επεξηγηθεί σε επόμενο κεφάλαιο, η μέγιστη τάση της συστοιχίας δε θα ξεπερνά τα 14 Volt. Η τάση στη μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού του 6<sup>ου</sup> πυκνωτή θα είναι η μισή της συστοιχίας και άρα 7 Volt, λόγω της ύπαρξης του διαιρέτη τάσης R36-R37 (υποδιπλασιασμός τάσης).

Περιορισμοί, όπως ο ρυθμός μεταβολής της τάσης εξόδου (slew rate) και ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος (CMRR) δεν μας επηρεάζουν. Από τη μια, οι τάσεις των πυκνωτών προς μέτρηση είναι μεγέθη με αρκετά βραδύ ρυθμό μεταβολής, λόγω της εξαιρετικά μεγάλης χωρητικότητάς τους (3000 Farad) και άρα η τάση εξόδου δεν χαρακτηρίζεται από γρήγορες μεταβολές. Από την άλλη, η απόλυτη ακρίβεια δεν αποτελεί στόχο για το συγκεκριμένο κύκλωμα και η απόκλιση λίγων δεκάδων millivolt θεωρείται αποδεκτή. Λόγω αυτού, το σφάλμα που οφείλεται στο κοινό σήμα των εισόδων δε θα προξενήσει πρόβλημα στην απαιτούμενη ακρίβεια των τελικών μετρήσεων.

Η τήρηση των παραπάνω περιορισμών σε συνδυασμό με τη θέσπιση ενός ανώτατου ορίου κόστους οδήγησε στην επιλογή των ολοκληρωμένων TLC271 και TLC274. Οι τάσεις που πρέπει να μετρηθούν με τη χρήση τελεστικών είναι 5 και είναι για τους πυκνωτές 2 έως 6. Οι υπόλοιπες τάσεις δεν απαιτούν τη χρήση τελεστικών, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα. Η κάθε βαθμίδα χρησιμοποιεί έναν τελεστικό και ως συνέπεια αυτού, απαιτείται η χρήση 5 ανεξάρτητων τελεστικών. Για χωροταξικούς λόγους στην πλακέτα και διευκόλυνση της δρομολόγησης των σημάτων, επιλέχθηκαν ένα ολοκληρωμένο με 4 ενσωματωμένους τελεστικούς (TLC274) και ένα ολοκληρωμένο ενός τελεστικού (TLC271), καλύπτοντας έτσι τις απαιτήσεις του κυκλώματος χωρίς περισσευόμενους τελεστικούς. Τα συγκεκριμένα ολοκληρωμένα φέρουν τις ίδιες προδιαγραφές με την μόνη διαφορά να έγκειται στον αριθμό των τελεστικών που ενσωματώνουν.

Στη εικόνα 5.14, διακρίνονται τα ζητούμενα χαρακτηριστικά επισημασμένα στα κόκκινα πλαίσια. Πιο συγκεκριμένα, το εύρος τάσεως τροφοδοσίας είναι 3 έως 16 Volt, καλύπτοντας τα 11 Volt και παράλληλα μπορεί να είναι ασύμμετρη (μόνο θετική). Επιπλέον, οι εισοδοί μπορούν να δεχτούν σήμα 0 Volt, κάτι το οποίο αποτελεί επίσης κριτήριο επιλογής.

Σε συνέχεια ανάλυσης του φυλλαδίου προδιαγραφών, από το σχετικό διάγραμμα της εικόνας 5.15 προκύπτει ότι όταν το σήμα εισόδου έχει τιμή 7 Volt η τροφοδοσία πρέπει να είναι τουλάχιστον 8 Volt. Η τροφοδοσία του κυκλώματος είναι εξασφαλισμένη να παραμένει πάνω από 8 Volt σε κάθε περίπτωση. Οι εξοδοί μπορούν να παράγουν τάση ίση με τη γείωση (πρακτικά 50 mV). Το χαρακτηριστικό αυτό καλύπτει την απαίτηση του συστήματος για τάση εξόδου ίση με τη γείωση, ενώ το γεγονός ότι η πραγματική ελάχιστη τάση κυμαίνεται στα 50 mV δεν επηρεάζει τη λειτουργικότητα του κυκλώματός μας. Παράλληλα, το γεγονός ότι οι συγκεκριμένοι τελεστικοί έχουν πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου, μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε αντιστάσεις με σχετικά υψηλή τιμή, χωρίς τον κίνδυνο να εμφανιστούν μεγάλες τάσεις απόκλισης στις εισόδους.

SLOS002D – SEPTEMBER 1987 – REVISED MARCH 2001

electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{DD} = 10\text{ V}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_A^\dagger$	TLC274C, TLC274AC, TLC274BC, TLC279C			UNIT
			MIN	TYP	MAX	
$V_{IO}$ Input offset voltage	TLC274C $V_O = 1.4\text{ V}$ , $R_S = 50\ \Omega$ , $V_{IC} = 0$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$	25°C		1.1	10	mV
		Full range			12	
	TLC274AC $V_O = 1.4\text{ V}$ , $R_S = 50\ \Omega$ , $V_{IC} = 0$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$	25°C		0.3	3	
		Full range			6.5	
TLC274BC $V_O = 1.4\text{ V}$ , $R_S = 50\ \Omega$ , $V_{IC} = 0$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$	25°C		390	2000	$\mu\text{V}$	
	Full range			3000		
TLC279C $V_O = 1.4\text{ V}$ , $R_S = 50\ \Omega$ , $V_{IC} = 0$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$	25°C		370	1200	$\mu\text{V}$	
	Full range			1900		
$\alpha_{VIO}$ Average temperature coefficient of input offset voltage		25°C to 70°C		2	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
$I_{IO}$ Input offset current (see Note 4)		25°C		0.1	60	pA
		70°C		7	300	
$I_{IB}$ Input bias current (see Note 4)	$V_O = -5\text{ V}$ , $V_{IC} = -5\text{ V}$	25°C		0.7	60	pA
		70°C		50	600	
$V_{ICR}$ Common-mode input voltage range (see Note 5)		25°C	-0.2 to 9	-0.3 to 9.2	V	
		Full range	-0.2 to 8.5		V	
$V_{OH}$ High-level output voltage	$V_{ID} = 100\text{ mV}$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$	25°C	8	8.5	V	
		0°C	7.8	8.5		
		70°C	7.8	8.4		
$V_{OL}$ Low-level output voltage	$V_{ID} = -100\text{ mV}$ , $I_{OL} = 0$	25°C	0	50	mV	
		0°C	0	50		
		70°C	0	50		
$A_{VD}$ Large-signal differential voltage amplification	$V_O = 1\text{ V to }6\text{ V}$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$	25°C	10	36	V/mV	
		0°C	7.5	42		
		70°C	7.5	32		
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICRmin}$	25°C	65	85	dB	
		0°C	60	88		
		70°C	60	88		

- Wide Range of Supply Voltages Over Specified Temperature Range:  
0°C to 70°C ... 3 V to 16 V  
-40°C to 85°C ... 4 V to 16 V  
-55°C to 125°C ... 4 V to 16 V
- Single-Supply Operation
- Common-Mode Input Voltage Range Extends Below the Negative Rail (C-Suffix and I-Suffix Versions)
- Low Noise ... Typically 25 nV/√Hz at f = 1 kHz
- Output Voltage Range Includes Negative Rail
- High Input Impedance ... 10<sup>12</sup> Ω Typ
- ESD-Protection Circuitry
- Small-Outline Package Option Also Available in Tape and Reel
- Designed-In Latch-Up Immunity

**Description**

The TLC274 and TLC279 quad operational amplifiers combine a wide range of input offset voltage grades with low offset voltage drift, high input impedance, low noise, and speeds approaching that of general-purpose BiFET devices.

These devices use Texas Instruments silicon-gate LinCMOS™ technology, which provides offset voltage stability far exceeding the stability available with conventional metal-gate processes.

The extremely high input impedance, low bias currents, and high slew rates make these cost-effective devices ideal for applications which have previously been reserved for BiFET and NFET products. Four offset voltage grades are available (C-suffix and I-suffix types), ranging from the low-cost TLC274 (10 mV) to the high-

Εικόνα 5.14 : Απόσπασμα από το φυλλάδιο τεχνικών προδιαγραφών του TLC274

Πηγή : <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc274.pdf>

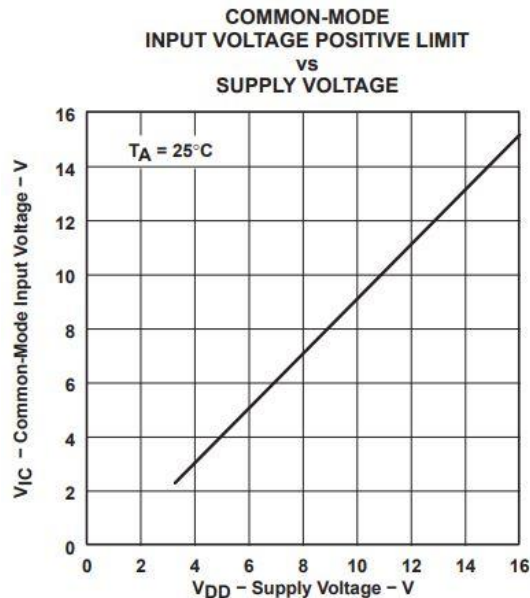
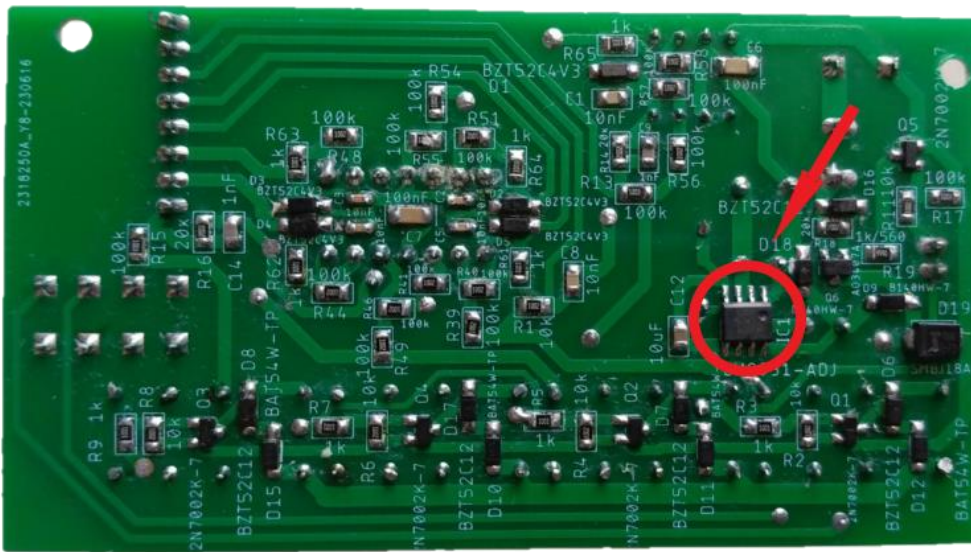


Figure 23

Εικόνα 5.15 : Διάγραμμα Τάσης τροφοδοσίας – Μέγιστης τάσης εισόδου TLC274

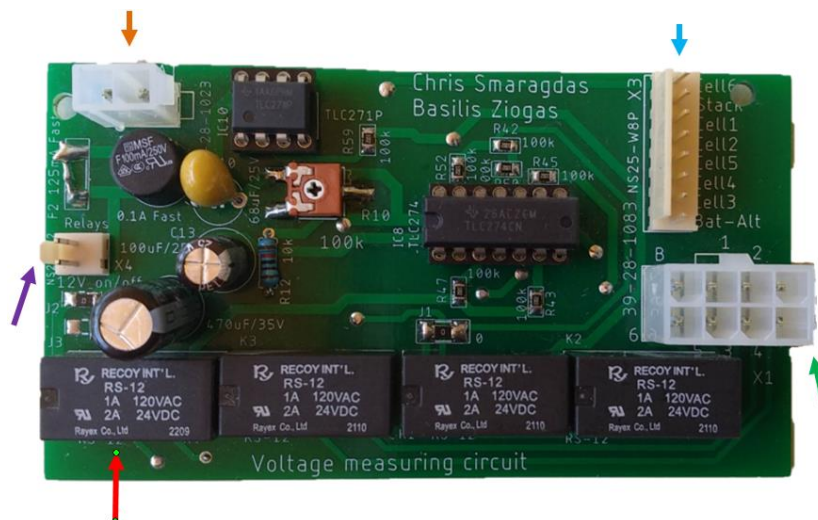
Πηγή : <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc274.pdf>

## 5.2.3 PCB



Εικόνα 5.16 : Κάτω όψη πλακέτας μετρήσεων

Η πλακέτα υλοποιήθηκε στο EAGLE σε δύο όψεις με τελικές διαστάσεις 53mm X 96mm. Στην εικόνα 5.16, βλέπουμε την κάτω όψη της πλακέτας όπου κυριαρχούν αποκλειστικά smd εξαρτήματα, αντιστάσεις, πυκνωτές, δίοδοι, mosfet, ακόμα και ο ρυθμιστής τάσης (κόκκινο κύκλος). Η χρήση smd εξαρτημάτων είναι σύμφωνη με την μικρή κατανάλωση ισχύος και παράλληλα μας δίνει τη δυνατότητα το τυπωμένο κύκλωμα να παραμείνει σε μικρό μέγεθος.



Εικόνα 5.17: Άνω όψη πλακέτας μετρήσεων

Στην εικόνα 5.17, βλέπουμε την άνω όψη της πλακέτας, στην οποία κυριαρχούν τα through hole εξαρτήματα με την παρουσία ελάχιστων smd εξαρτημάτων. Τα βέλη που διακρίνονται στην εικόνα δείχνουν τα βασικά τμήματα της πλακέτας. Το κόκκινο βέλος δείχνει τα 4 ρελέ απομόνωσης των σημάτων τάσης. Το πράσινο βέλος δείχνει τον αρσενικό κοννέκτορα 8 επαφών, μέσω του οποίου η

πλακέτα δέχεται τα σήματα τάσης. Το γαλάζιο βέλος δείχνει τον αρσενικό κοννέκτορα 8 επαφών, στον οποίο είναι συνδεδεμένα όλα τα σήματα τάσεων εξόδου που οδηγούνται στις αναλογικές εισόδους του arduino. Το πορτοκαλί βέλος δείχνει στον κοννέκτορα όπου καταφτάνει το ζεύγος καλωδίων που παρέχει την τροφοδοσία ισχύος στην πλακέτα. Το μωβ βέλος δείχνει τον αρσενικό κοννέκτορα 2 επαφών μέσω του οποίου η πλακέτα λαμβάνει από το arduino 2 σήματα ελέγχου. Το ένα σήμα είναι υπεύθυνο για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της πλακέτας και το άλλο σήμα είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των ρελέ απομόνωσης.

### 5.3 Πλακέτα φόρτισης

#### 5.3.1 Ιδιαιτερότητες φόρτισης υπερπυκνωτών

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που επιφέρει η χρήση υπερπυκνωτών είναι η φόρτισή τους. Οι πυκνωτές, ως ηλεκτρονικά εξαρτήματα, χαρακτηρίζονται από τη χαμηλή τους εσωτερική αντίσταση (ESR). Κατά τη διαδικασία της φόρτισής τους με σταθερή DC τάση απαιτείται η ύπαρξη κάποιας αντίστασης που να περιορίζει το ρεύμα φόρτισης σε ασφαλές επίπεδο, τόσο για τους ίδιους, όσο και για την πηγή της τάσης φόρτισης. Στην περίπτωση που η σύνδεση της DC πηγής τάσης γίνει απευθείας στον πυκνωτή, ο μοναδικός παράγοντας περιορισμού του ρεύματος φόρτισης είναι η ESR του πυκνωτή και η αντίσταση εξόδου της πηγής. Η τιμή της ESR στους υπερπυκνωτές, όπως έχει προαναφερθεί, είναι εξαιρετικά χαμηλή, ενώ συγκεκριμένα για τους υπερπυκνωτές 3000 F που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία είναι μόλις 0.29mΩ σύμφωνα με τον κατασκευαστή (1.74 mΩ για όλη τη συστοιχία). Με έναν γρήγορο προσεγγιστικό υπολογισμό, λαμβάνοντας την αντίσταση εξόδου της πηγής ίση με 0, αν η τάση της DC πηγής είναι για παράδειγμα μόλις 0.1 Volt μεγαλύτερη από την αρχική τάση της συστοιχίας, τότε το αρχικό ρεύμα φόρτισης θα έχει τιμή αιχμής ίση με:

$$I_{\text{initial}} = \frac{V_{DC} - V_{\text{capacitor}}}{ESR} = \frac{0.1}{0.00174} = 57.47 \text{ A.}$$

Παρατηρεί κανείς, ότι με ελάχιστη διαφορά τάσης μεταξύ συστοιχίας και πηγής, το ρεύμα φόρτισης έχει αρκετά υψηλή τιμή. Στην πραγματικότητα, το ρεύμα θα έχει ελαφρώς χαμηλότερη τιμή αφού καμία πηγή τάσης δεν είναι ιδανική. Η ύπαρξη αντίστασης εξόδου μη μηδενικής τιμής, καθώς και πιθανών μηχανισμών ασφαλείας στην πηγή, περιορίζουν την τάση, άρα και το ρεύμα, το οποίο και πάλι όμως μπορεί να παραμένει σε υψηλά επίπεδα. Οι υπερπυκνωτές είναι εξαρτήματα που προορίζονται για αρκετά μεγάλα ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης, κάτι το οποίο παρέχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για τον σκοπό της εκκίνησης ενός κινητήρα. Το κύριο πρόβλημα έγκειται στην πηγή DC τάσης που θα τους φορτίζει, που δεν είναι άλλη από τον ανορθωτή του εναλλάκτη. Σε ένα μέσο αυτοκίνητο, ο εναλλάκτης μπορεί να παράξει κατά το μέγιστο, ηλεκτρική ισχύ 1000 Watt στα 14.4 Volt. Με έναν γρήγορο υπολογισμό το μέγιστο ρεύμα εξόδου είναι:

$$I_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{V_{\text{rect}}} \Rightarrow I_{\text{max}} = \frac{1000}{14.4} \Rightarrow I_{\text{max}} = 69.44 \text{ A.}$$

Η απευθείας φόρτιση των υπερπυκνωτών από τον ανορθωτή θα προσέγγιζε κατά πολύ τη μέγιστη ρευματική ικανότητά του ή και θα την ξεπερνούσε σε περίπτωση μεγαλύτερης διαφοράς τάσης ανορθωτή-συστοιχίας. Κάτι τέτοιο, θα δημιουργούσε κίνδυνο καταστροφής του εναλλάκτη και ελλιπή τροφοδοσία ισχύος στο ηλεκτρολογικό σύστημα του αυτοκινήτου (φωτισμός, μονάδα ελέγχου κινητήρα, αντλία καυσίμου, πολλαπλασιαστής, αισθητήρες κ.α.).

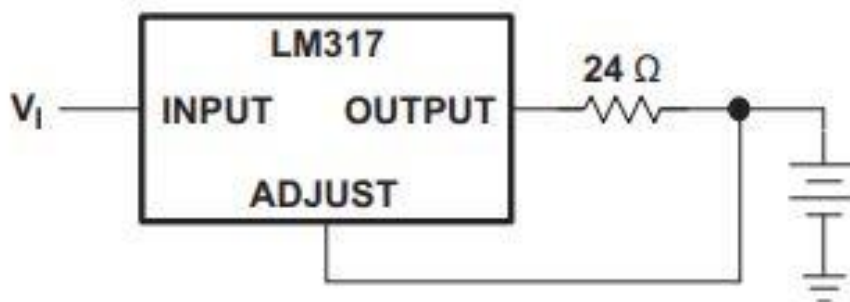
Για την αποφυγή όλων των παραπάνω, η προσθήκη μιας διάταξης ελεγχόμενης φόρτισης κρίνεται απαραίτητη. Η συγκεκριμένη διάταξη θα λαμβάνει τροφοδοσία από τον ανορθωτή και θα υποβιβάζει

την τάση σε τέτοιο επίπεδο, έτσι ώστε το ρεύμα φόρτισης να διατηρείται σε ασφαλή τιμή. Υπάρχουν 3 είδη κύριων διατάξεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό.

### 5.3.2 Διατάξεις φόρτισης

Η πιο απλή διάταξη φόρτισης περιλαμβάνει αντιστάσεις ισχύος, οι οποίες τοποθετούνται μεταξύ της παροχής τάσης του ανορθωτή και της συστοιχίας των υπερπυκνωτών. Η λογική λειτουργίας μιας τέτοιας διάταξης είναι ότι οι αντιστάσεις εμφανίζουν στα άκρα τους τάση ίση με τη διαφορά τάσης του ανορθωτή και της τάσης της συστοιχίας. Ως αποτέλεσμα, η τάση του ανορθωτή δεν εφαρμόζεται απευθείας στα άκρα της συστοιχίας και οι πυκνωτές φορτίζονται με σταδιακά αυξανόμενη τάση και φθίνων ελεγχόμενο ρεύμα, η τιμή του οποίου καθορίζεται από την ολική αντίσταση που χρησιμοποιήθηκε. Μια διάταξη αυτού του τύπου είναι εύκολα υλοποιήσιμη και σχετικά οικονομική. Υπάρχουν, όμως, δύο βασικά μειονεκτήματα που καθιστούν μη αποδεκτή τη χρήση της. Πρώτον, οι απώλειες ενέργειας στις αντιστάσεις ισχύος σε μορφή θερμότητας είναι συνήθως αρκετά υψηλές, με αποτέλεσμα η διάταξη να λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες και με χαμηλό συντελεστή απόδοσης. Δεύτερον, το ρεύμα φόρτισης παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση η οποία οφείλεται στη διαφορά τάσης μεταξύ ανορθωτή και συστοιχίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά τάσης τόσο μεγαλύτερο είναι και το ρεύμα φόρτισης. Στην αρχή της φόρτισης, όπου η διαφορά τάσης είναι και η μεγαλύτερη δυνατή, το ρεύμα φόρτισης έχει τη μέγιστη τιμή του, η οποία πιθανώς να ξεφεύγει από τους υπολογισμούς. Καθώς πραγματοποιείται η φόρτιση, η τάση της συστοιχίας αυξάνεται και η διαφορά τάσης ανορθωτή-συστοιχίας μειώνεται, καθώς η τάση του ανορθωτή είναι σταθερή. Το ρεύμα φόρτισης ακολουθεί πτωτική πορεία και λίγο πριν την πλήρη φόρτιση κατά την οποία οι προαναφερθείσες τάσεις εξισώνονται, η τιμή του μειώνεται σημαντικά τείνοντας προς το 0.

Μια πιο αποτελεσματική και σταθερή διάταξη περιλαμβάνει έναν γραμμικό ρυθμιστή τάσης (linear voltage regulator) σε λειτουργία πηγής ρεύματος. Ένας γραμμικός ρυθμιστής τάσης δέχεται μια τάση στην είσοδό του και στην έξοδό του παράγει μια καθορισμένη σταθεροποιημένη τάση τιμής μικρότερης από την αντίστοιχη της εισόδου. Η εικόνα 5.18 αποτελεί απόσπασμα από το φυλλάδιο προδιαγραφών του ολοκληρωμένου LM317 που είναι ένας ευρέως διαδεδομένος γραμμικός ρυθμιστής τάσης.



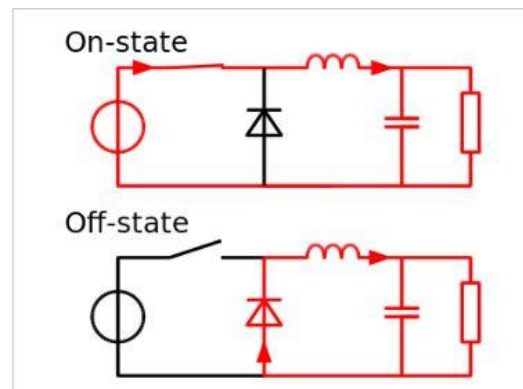
Εικόνα 5.18 : Γραμμικός ρυθμιστής τάσης LM7805 σε διάταξη πηγής ρεύματος.

Πηγή : <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, με την προσθήκη μιας αντίστασης χαμηλής τιμής μεταξύ της εξόδου του ρυθμιστή και του φορτίου (στην περίπτωσή μας είναι η συστοιχία), επιτυγχάνουμε σταθερό ρεύμα εξόδου. Ο ρυθμιστής ελέγχει συνεχώς τη διαφορά τάσης μεταξύ της εξόδου και της επαφής «ADJUST» και «προσπαθεί» να την διατηρήσει σταθερή (1.25V για τον LM317). Αυτή η διαφορά

τάσης εφαρμόζεται στα άκρα της αντίστασης ( $24\Omega$  στο παράδειγμα). Ο ρυθμιστής διατηρώντας σταθερή τη διαφορά τάσης OUTPUT-ADJUST δημιουργεί ουσιαστικά σταθερό ρεύμα στην αντίσταση, το οποίο εν συνεχεία διαρρέει και το φορτίο. Η τιμή της αντίστασης είναι υπεύθυνη για τον καθορισμό του ρεύματος εξόδου. Μια διάταξη τέτοιου τύπου λειτουργεί ως ελεγχόμενη μεταβλητή αντίσταση και ομοίως με την προηγούμενη διάταξη που αναλύθηκε, η ρύθμιση του ρεύματος πραγματοποιείται με τη μετατροπή της περισσευούμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμικές απώλειες. Οι ρυθμιστές τάσης είναι ολοκληρωμένα κυκλώματα και έχουν περιορισμό ρεύματος εξόδου και απαγωγής θερμότητας. Συνήθως, οι κατασκευαστές παρέχουν τη δυνατότητα για αύξηση του ρεύματος με χρήση εξωτερικών τρανζίστορ, αλλά το πρόβλημα της απαγωγής θερμότητας παραμένει και απαιτεί την χρήση ψηκτρών με απαγορευτικό μέγεθος για την υλοποίηση της παρούσας κατασκευής. Τέλος, ο συντελεστής απόδοσης παραμένει και σε αυτή την περίπτωση χαμηλός.

Η αποτελεσματικότερη διάταξη για τη φόρτιση, η οποία υλοποιήθηκε για τη συσκευή μας, ρυθμίζει την τάση με διακόπτηση. Στην εικόνα 5.19 βλέπουμε την πιο βασική μορφή ενός διακοπτικού ρυθμιστή υποβιβασμού τάσης. Τα βασικά λειτουργικά μέρη είναι η πηγή τάσης εισόδου, ο διακόπτης (τρανζίστορ), το πηνίο, η δίοδος, ο πυκνωτής εξόδου και το φορτίο. Η αρχή λειτουργίας είναι η εξής:



Εικόνα 5.19 : Βασική μορφή διακοπτικού υποβιβαστή τάσης

Πηγή : [https://en.wikipedia.org/wiki/Buck\\_converter](https://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter)

Έστω ότι ξεκινάμε με ανοιχτό διακόπτη (τρανζίστορ). Όταν δοθεί το κατάλληλο σήμα ενεργοποίησης στο τρανζίστορ, αυτό πλέον άγει. Η δίοδος πολώνεται ανάστροφα και δεν διαρρέεται από ρεύμα και συνεπώς δεν επηρεάζει το κύκλωμα. Το ρεύμα διαρρέει τον βρόχο πηγή → πηνίο → πυκνωτής-φορτίο με γραμμικά αυξανόμενη τιμή και το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια υπό τη μορφή μαγνητικού πεδίου. Το πηνίο αντιστέκεται σε απότομες μεταβολές του ρεύματός του, δημιουργώντας στα άκρα του την ανάλογη τάση, κάτι που προκύπτει και από τον μαθηματικό τύπο για τη σχέση τάσης-ρεύματος:

$$V_{\text{coil}} = L \times \frac{dI}{dt}$$

Καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της φάσης λειτουργίας του κυκλώματος, η τάση στα άκρα του πηνίου έχει αντίθετη πολικότητα από αυτή της πηγής. Ο συνδυασμός φορτίο-πυκνωτής λαμβάνει τάση ίση με:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} - V_{\text{coil}},$$

η τιμή της οποίας είναι σαφώς μικρότερη από την τιμή της τάσης εισόδου. Όταν το τρανζίστορ λάβει σήμα απενεργοποίησης παύει πλέον να άγει και η πηγή αποσυνδέεται από το κύκλωμα. Η

αποθηκευμένη ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου επιστρέφει στο κύκλωμα, με το πηνίο να λειτουργεί πλέον ως πηγή ρεύματος με τάση αναστροφής πολικότητας από την προηγούμενη κατάσταση. Η δίοδος πολώνεται ορθά και άγει συμπληρώνοντας τον βρόχο. Το ρεύμα έχει τιμή που φθίνει γραμμικά και η τάση του φορτίου παραμένει και πάλι μικρότερη από την τάση εισόδου. Το κύκλωμα, στη συνέχεια, εναλλάσσεται συνεχώς μεταξύ αγωγής του διακόπτη και τροφοδοσίας ισχύος από την πηγή και αποκοπής του διακόπτη και τροφοδοσίας ισχύος από το πηνίο.

Ένα κύκλωμα τέτοιου τύπου υποβιβάζει την τάση, πραγματοποιώντας ελεγχόμενη διακόπωση της τροφοδοσίας σε υψηλή συχνότητα με την κατάλληλη αναλογία χρόνου on-off, αξιοποιώντας δηλαδή ένα σήμα PWM που παράγει το κύκλωμα ελέγχου. Το κύκλωμα ελέγχου λαμβάνει ανάδραση της τάσης εξόδου και μεταβάλλει συνεχώς το Duty Cycle του PWM σήματος, με σκοπό την σταθεροποίηση της εξόδου ανεξαρτήτως της τάσης εισόδου και του ρεύματος φορτίου.

Οι απώλειες που παρουσιάζει ένα τέτοιο κύκλωμα οφείλονται στις πτώσεις τάσεις του διακόπτη (τρανζίστορ), των τυλιγμάτων του πηνίου, της δίοδου και της εσωτερικής αντίστασης του πυκνωτή, καθώς και στην διακόπωση. Οι συνολική απώλεια ενέργειας παραμένει σημαντικά χαμηλότερη από την αντίστοιχη ενός γραμμικού ρυθμιστή τάσης, ειδικά όταν διαχειριζόμαστε υψηλά ρεύματα και η διαφορά τάσης εισόδου-εξόδου είναι μεγάλη.

Οι ρυθμιστές τάσης με διακόπωση είναι μονόδρομος όταν διαχειριζόμαστε υψηλά ρεύματα φορτίου και επιθυμούμε έναν υψηλό συντελεστή απόδοσης και μείωση των θερμικών απωλειών. Στην περίπτωση μας, το φορτίο του ρυθμιστή είναι η συστοιχία των υπερπυκνωτών και αυτό θέτει έναν κρίσιμο περιορισμό, που δεν είναι άλλος από τον έλεγχο του ρεύματος φόρτισης. Η φόρτιση των πυκνωτών και ειδικότερα των υπερπυκνωτών με πηγή σταθερής τάσης, έχει νόημα μόνον εφόσον υπάρξει κάποιος παράγοντας περιορισμού του ρεύματος. Η ESR των υπερπυκνωτών είναι τόσο χαμηλή, σε σημείο που από μόνη της δεν είναι εφικτός ο περιορισμός του ρεύματος φόρτισης και ως αποτέλεσμα απαιτείται η προσθήκη επιπλέον αντίστασης. Κάτι τέτοιο, αναιρεί πλήρως τη λογική χρήσης διακοπώμενου ρυθμιστή, αφού οι απώλειες σε θερμότητα λόγω της αντίστασης δεν προσφέρουν πλεονέκτημα σε σύγκριση με ένα γραμμικό κύκλωμα ή και κύκλωμα χωρίς ρυθμιστή. Πέρα από τις θερμικές απώλειες, δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος στο ρεύμα φόρτισης, το οποίο είναι φθίνον και με αρχική τιμή που εξαρτάται πάντοτε από την αρχική τάση των πυκνωτών.

Για την επίτευξη ασφαλούς και ελεγχόμενης φόρτισης απαιτείται πηγή σταθερού ρεύματος. Στο εμπόριο υπάρχουν αμέτρητες επιλογές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, τα οποία με την προσθήκη ελάχιστων περιφερειακών εξαρτημάτων λειτουργούν ως διακοπώμενοι ρυθμιστές τάσης. Η ανάγκη για σταθερό ρεύμα, μας οδηγεί σε επιλογή ολοκληρωμένου που να διαθέτει τη δυνατότητα εναλλαγής μεταξύ σταθερής τάσης και σταθερού ρεύματος. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε είναι ότι τέτοια ολοκληρωμένα δεν είναι εύκολο να τα εμπορευτεί κανείς στο λιανικό εμπόριο, ενώ και οι τιμές τους δεν είναι ιδιαίτερα δελεαστικές. Επιπρόσθετα, η ρευματική τους ικανότητα στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι επαρκής για την συσκευή μας, ενώ ακόμα και να είναι, έχουν απώλειες που προκαλούν προβληματισμό για την ανάγκη ψύξης τους. Μια ενδιάμεση λύση είναι η μετατροπή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, που προορίζεται για παραγωγή σταθερής τάσης, έτσι ώστε να παράγει σταθερό ρεύμα εξόδου. Μετά από δοκιμές που πραγματοποιήσαμε με τέτοια ολοκληρωμένα, καταλήξαμε σε προβλήματα με την ακρίβεια του ελεγχόμενου ρεύματος και την ευστάθεια του συστήματος.

Όλα τα παραπάνω εμπόδια που συζητήθηκαν, μας οδήγησαν στη μελέτη και κατασκευή ενός διακοπτικού κυκλώματος με διακριτά εξαρτήματα, αντί ολοκληρωμένου κυκλώματος, ειδικά προσαρμοσμένο στις ανάγκες της συσκευής μας.

### 5.3.3 Διάταξη προς υλοποίηση

#### 5.3.3.1 Αρχή λειτουργίας

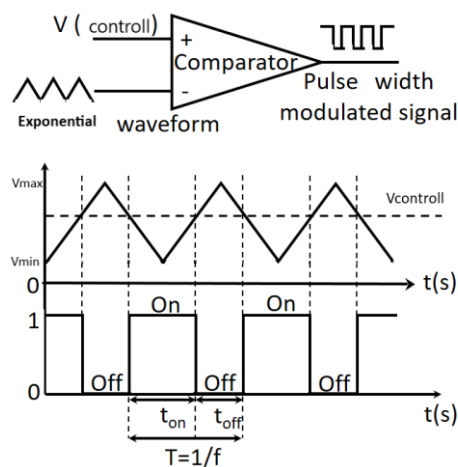
Η βάση του κυκλώματος είναι ένας διακοπώμενος ρυθμιστής υποβιβασμού τάσης, όπως αυτός που αναλύθηκε νωρίτερα. Το κύριο χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί το συγκεκριμένο κύκλωμα από έναν τέτοιο ρυθμιστή, είναι το κύκλωμα ελέγχου της εξόδου. Η έξοδος του υποβιβαστή τάσης συνδέεται με τη συστοιχία μέσω αντίστασης ισχύος πολύ χαμηλής τιμής και υψηλής ακρίβειας. Η αντίσταση τοποθετείται για περιορισμό του ρεύματος και τη ρύθμιση αυτού στην επιθυμητή τιμή. Η μέθοδος διατήρησης του ρεύματος σε μία σταθερή τιμή είναι η εξής. Η συστοιχία έχει πάντοτε στα άκρα της μία τάση. Για την παροχή σταθερού ρεύματος φόρτισης αρκεί να σταθεροποιούμε την τάση εξόδου του υποβιβαστή σε τιμή που να έχει σταθερή διαφορά με την τάση της συστοιχίας. Θεωρώντας την τάση συστοιχίας  $V_{stack}$ , την τάση εξόδου του υποβιβαστή  $V_{out}$ , την αντίσταση ρύθμισης ρεύματος  $R_{sense}$  και  $I_{charge}$  το ρεύμα φόρτισης, ισχύουν τα παρακάτω:

$$V_{out} - V_{stack} = x, \text{ όπου } x \text{ μια ρυθμιζόμενη σταθερή τιμή} \quad \text{Σχέση 5.3}$$

$$I_{charge} = \frac{V_{out} - V_{stack}}{R_{sense}} \quad \text{Σχέση 5.4}$$

Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός του κυκλώματος ελέγχου του υποβιβαστή. Η ανάδραση τάσης δε θα γίνεται από την έξοδο του υποβιβαστή αλλά από την τάση της συστοιχίας. Με αυτόν τον τρόπο, το κύκλωμα θα προσπαθεί συνεχώς να διατηρεί όχι σταθερή τάση εξόδου, αλλά σταθερή διαφορά τάσης εξόδου και τάσης συστοιχίας για την επίτευξη σταθερού ρεύματος, όπως ορίζουν οι σχέσεις 5.3 και 5.4.

Το κύκλωμα ελέγχου παράγει στην ουσία ένα PWM σήμα μεταβλητού κύκλου εργασίας (Duty Cycle), με το οποίο οδηγεί τον διακόπτη ισχύος του υποβιβαστή, έτσι ώστε να παράξει την απαιτούμενη τάση εξόδου. Για την παραγωγή του PWM, ένα εκθετικό σήμα σταθερής συχνότητας συγκρίνεται με μια τάση ελέγχου που μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα την τάση εισόδου (ανορθωτή) και την απαιτούμενη τάση εξόδου. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης είναι το απαραίτητο, για την οδήγηση του διακόπτη ισχύος, PWM σήμα. Στην εικόνα 5.20 παρουσιάζεται η λογική λειτουργίας ενός τέτοιου κυκλώματος. Το εκθετικό σήμα, στο οποίο γίνεται αναφορά, έχει αποτυπωθεί ως τριγωνικό στην εικόνα, καθαρά για λόγους ευκολίας σχεδίασης της κυματομορφής.



Εικόνα 5.20 : Παραγωγή PWM σήματος

### 5.3.3.2 Ταλαντωτής εκθετικής κυματομορφής

Αρχικά, θα αναλύσουμε την παραγωγή του εκθετικού σήματος. Η παραγωγή καθαρής τριγωνικής κυματομορφής, που συνήθως χρησιμοποιείται σε κυκλώματα PWM, δεν είναι ιδιαίτερα απλή διαδικασία και συνήθως απαιτεί εξειδικευμένα ολοκληρωμένα. Ως υποκατάστατο, θα χρησιμοποιήσουμε εκθετική κυματομορφή, δηλαδή ένα σήμα τάσης που προκύπτει από αλληπάλληλες φορτίσεις και εκφορτίσεις ενός πυκνωτή και που είναι συμμετρικό. Η τάση του τριγωνικού σήματος θα κυμαίνεται μεταξύ των κατωφλίων  $V_{\min} = \frac{V_{\text{rect}}}{3}$  και  $V_{\max} = \frac{2V_{\text{rect}}}{3}$ , όπου  $V_{\text{rect}}$  είναι η τάση του ανορθωτή. Στην ουσία, θα παράγεται ένα εκθετικό σήμα πλάτους  $\frac{V_{\text{rect}}}{3}$  με offset ίσο με  $\frac{V_{\text{rect}}}{2}$ . Η επιλογή των τιμών των κατωφλίων έγινε με γνώμονα τη διευκόλυνση υπολογισμού του σήματος ελέγχου, που θα αναλυθεί παρακάτω, καθώς και για την χωρίς προβλήματα διαχείριση των τάσεων από τα αντίστοιχα ολοκληρωμένα.

Έχοντας εξασφαλίσει το εκθετικό σήμα, ως δεύτερο βήμα, πρέπει να παράξουμε το σωστό σήμα ελέγχου ( $V_{\text{control}}$ ) που θα συγκρίνεται με το πρώτο για την εξαγωγή του επιθυμητού σήματος PWM. Το σήμα ελέγχου εξαρτάται από την τάση εισόδου και από την επιθυμητή τάση εξόδου και αποτελεί συνάρτηση αυτών. Σε έναν διακοπτόμενο υποβιβαστή τάσης, το θεωρητικό Duty Cycle για την επίτευξη συγκεκριμένης τάσης εξόδου είναι:  $DC = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}$ , Σχέση 5.5

όπου στην περίπτωσή μας η τάση εισόδου  $V_{\text{in}}$  είναι η τάση του ανορθωτή  $V_{\text{rect}}$ . Με την προϋπόθεση εφαρμογής του εκθετικού σήματος στην αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή και του σήματος ελέγχου στην μη αναστρέφουσα, το παραγόμενο PWM σήμα έχει Duty Cycle:

$$DC = \frac{V_{\text{control}} - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \Rightarrow DC = \frac{V_{\text{control}} - \frac{V_{\text{rect}}}{3}}{\frac{2V_{\text{rect}}}{3} - \frac{V_{\text{rect}}}{3}} \Rightarrow DC = \frac{V_{\text{control}} - \frac{V_{\text{rect}}}{3}}{\frac{V_{\text{rect}}}{3}} \quad \text{Σχέση 5.6}$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 5.5 και 5.6 προκύπτει ότι:

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{V_{\text{control}} - \frac{V_{\text{rect}}}{3}}{\frac{V_{\text{rect}}}{3}} \Rightarrow \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{rect}}} = \frac{V_{\text{control}} - \frac{V_{\text{rect}}}{3}}{\frac{V_{\text{rect}}}{3}} \Rightarrow V_{\text{out}} \times \frac{V_{\text{rect}}}{3} = V_{\text{rect}} \times (V_{\text{control}} - \frac{V_{\text{rect}}}{3}) \Rightarrow \frac{V_{\text{out}}}{3} = V_{\text{control}} - \frac{V_{\text{rect}}}{3} \Rightarrow V_{\text{control}} = \frac{V_{\text{rect}} + V_{\text{out}}}{3} \quad \text{Σχέση 5.7}$$

Η σχέση 5.7 μας δείχνει το πώς οι τιμές των τάσεων εισόδου (ανορθωτή) και εξόδου καθορίζουν την τάση ελέγχου. Η επιλογή των κατωφλίων του εκθετικού σήματος στα  $\frac{V_{\text{rect}}}{3}$  και  $\frac{2V_{\text{rect}}}{3}$  απλοποίησε τις πράξεις και έτσι καταλήξαμε σε απλή μαθηματική σχέση για την  $V_{\text{control}}$ . Η παραγωγή του σήματος υλοποιείται με τελεστικούς, με βασική διάταξη τον ενισχυτή άθροισης.

Το παραγόμενο σήμα ελέγχου οδηγεί (μέσω ενός υποκυκλώματος) το κυρίως κύκλωμα του υποβιβαστή και ανάλογα το Duty Cycle, παράγεται και η ανάλογη τάση εξόδου. Για την απόδειξη της ορθότητας της σχέσης 5.7 παραθέτουμε το εξής παράδειγμα:

Έστω ότι  $V_{\text{rect}} = 12$  Volt και επιθυμητή  $V_{\text{out}} = 6$  Volt

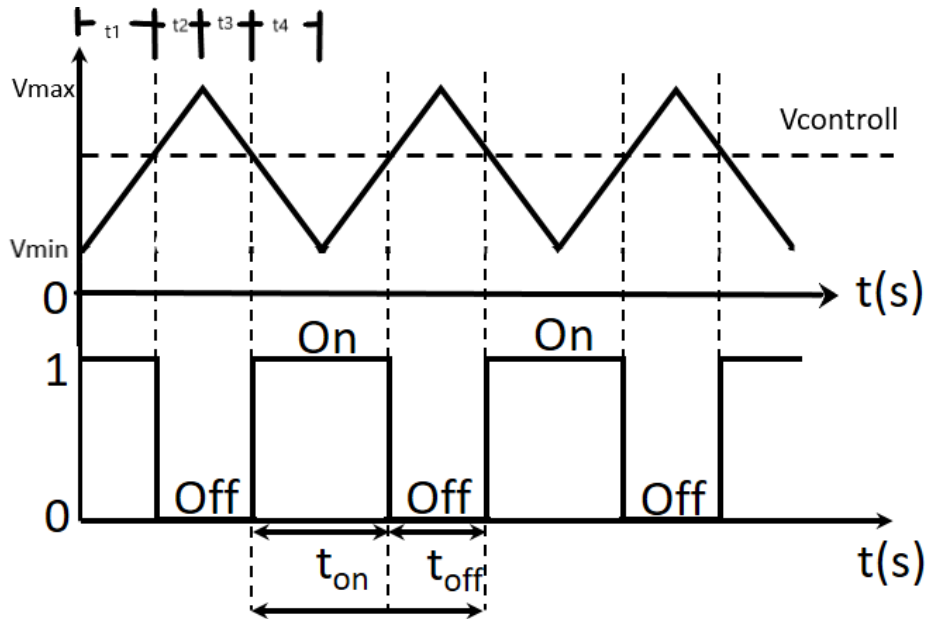
Τα κατώφλια του εκθετικού σήματος είναι:

$$V_{\min} = \frac{V_{\text{rect}}}{3} = \frac{12}{3} = 4 \text{ Volt} \text{ και } V_{\max} = \frac{2V_{\text{rect}}}{3} = \frac{24}{3} = 8 \text{ Volt}$$

Το σήμα ελέγχου θα έχει τιμή:

$$V_{\text{control}} = \frac{V_{\text{rect}} + V_{\text{out}}}{3} = V_{\text{control}} = \frac{12 + 6}{3} = V_{\text{control}} = \frac{18}{3} = 6 \text{ Volt}$$

Το επιθυμητό Duty Cycle είναι:  $DC = \frac{V_{out}}{V_{rect}} = \frac{6}{12} = 0.5 = 50\%$



Εικόνα 5.21 : Βοηθητικό σήμα υπολογισμού Duty Cycle

Η εικόνα 5.21 θα βοηθήσει στην επεξήγηση του υπολογισμού του Duty Cycle που προκύπτει. Σύμφωνα με την εικόνα, όταν η  $V_{control}$  είναι μεγαλύτερη από την  $V_{exponential}$ , η έξοδος του συγκριτή είναι HIGH. Αντιθέτως, όταν η  $V_{control}$  είναι μικρότερη από την  $V_{exponential}$ , η έξοδος του συγκριτή είναι LOW. Το Duty Cycle είναι:

$$DC = \frac{t_{HIGH}}{T} = \frac{t_1 + t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} \quad \text{Σχέση 5.8}$$

$t_1$  είναι ο χρόνος φόρτισης του πυκνωτή από τάση  $\frac{V_{rect}}{3}$  σε τάση  $V_{control}$

$t_2$  είναι ο χρόνος φόρτισης από τάση  $V_{control}$  σε τάση  $\frac{2V_{rect}}{3}$

$t_3$  είναι ο χρόνος εκφόρτισης από τάση  $\frac{2V_{rect}}{3}$  σε τάση  $V_{control}$

$t_4$  είναι ο χρόνος εκφόρτισης από τάση  $V_{control}$  σε τάση  $\frac{V_{rect}}{3}$

Οι γενικοί τύποι φόρτισης και εκφόρτισης για τους πυκνωτές είναι:

$$\text{Κατά τη φόρτιση: } V_{cap} = V_{source} \times (1 - e^{(-t/RC)}) \quad \text{Σχέση 5.9}$$

$$\text{Κατά την εκφόρτιση: } V_{cap} = V_{initial} \times e^{(-t/RC)} \quad \text{Σχέση 5.10}$$

Σύμφωνα με την σχέση 5.10 οι χρόνοι  $t_3$  και  $t_4$  είναι:

$$t_3 \rightarrow V_{control} = \frac{2V_{rect}}{3} \times e^{(-t/RC)} \Rightarrow 6 = 8 \times e^{(-t/RC)} \Rightarrow 0.75 = e^{(-t/RC)} \Rightarrow \ln(0.75) = \ln(e^{(-t/RC)}) \Rightarrow -0.288 = -t/RC \Rightarrow t_3 = \frac{0.288}{RC}$$

$$t_4 \rightarrow \text{Ομοίως με } t_3 \rightarrow \frac{V_{rect}}{3} = V_{control} \times e^{(-t/RC)} \Rightarrow t_4 = \frac{0.405}{RC}$$

Σύμφωνα με τη σχέση 5.9:

$$\begin{aligned} \text{Έστω } t_a \text{ ο χρόνος φόρτισης από } 0 \text{ Volt σε } \frac{V_{rect}}{3} : t_a \rightarrow \frac{V_{rect}}{3} &= V_{rect} \times (1 - e^{(-t/RC)}) \Rightarrow \\ 4 &= 12 \times (1 - e^{(-t/RC)}) \Rightarrow \frac{1}{3} = 1 - e^{(-t/RC)} \Rightarrow -\frac{2}{3} = -e^{(-t/RC)} \Rightarrow \frac{2}{3} = e^{(-t/RC)} \Rightarrow \ln\left(\frac{2}{3}\right) = \ln(e^{(-t/RC)}) \Rightarrow \\ -0.405 &= -t/RC \Rightarrow t_a = \frac{0.405}{RC} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Έστω } t_b \text{ ο χρόνος φόρτισης από } 0 \text{ Volt σε } V_{control} . \text{ Ομοίως με } t_a : t_b \rightarrow V_{control} &= V_{rect} \times (1 - e^{(-t/RC)}) \Rightarrow \\ t_b &= \frac{0.693}{RC} \end{aligned}$$

Έστω  $t_c$  ο χρόνος φόρτισης από 0 Volt σε  $\frac{2V_{rect}}{3}$ . Ομοίως με  $t_a$  και  $t_b$ :  $t_c \rightarrow$

$$\frac{2V_{rect}}{3} = V_{rect} \times (1 - e^{(-t/RC)}) \Rightarrow t_c = \frac{1.098}{RC}$$

Οι χρόνοι  $t_1$  και  $t_2$  είναι:

$$t_1 = t_b - t_a = \frac{0.693}{RC} - \frac{0.405}{RC} = \frac{0.288}{RC}$$

$$t_2 = t_c - t_b = \frac{1.098}{RC} - \frac{0.693}{RC} = \frac{0.405}{RC}$$

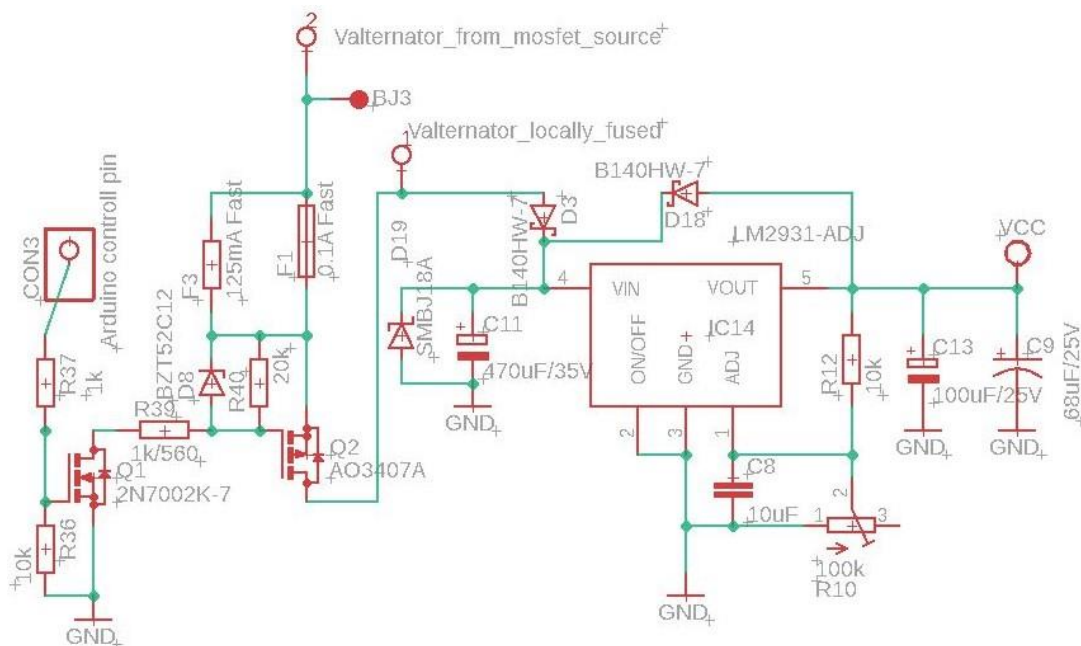
Αντικαθιστώντας τους χρόνους  $t_1, t_2, t_3$  και  $t_4$  στη σχέση 5.8 προκύπτει:

$$DC = \frac{\frac{0.288}{RC} + \frac{0.405}{RC}}{\frac{0.288}{RC} + \frac{0.405}{RC} + \frac{0.288}{RC} + \frac{0.405}{RC}} = \frac{0.693}{1.386} = 0.5 = 50\%$$

Οι υπολογισμοί επιβεβαιώνουν την ορθότητα του παραγόμενου Duty Cycle.

### 5.3.4 Υποκυκλώματα

#### 5.3.4.1 Υποκύκλωμα σταθεροποίησης τροφοδοσίας



Εικόνα 5.22 : Υποκύκλωμα σταθεροποίησης τροφοδοσίας πλακέτας φόρτισης



Το συγκεκριμένο κύκλωμα υλοποιείται με ένα DPDT 12 Volt ρελέ “RS-12” (K1), του οποίου οι NO επαφές δέχονται σαν εισόδους τις προαναφερόμενες τάσεις. Όταν η πλακέτα δέχεται τροφοδοσία και η ασφάλεια της δεν είναι καμένη, είναι ασφαλές να εφαρμοσθούν οι τάσεις στο κύκλωμα. Η τάση τροφοδοσίας από την έξοδο της ασφάλειας (1) εφαρμόζεται στην πύλη του Q5 και το οδηγεί σε κόρο. Το Q5 γειώνει με τη σειρά του το πηνίο του ρελέ και έτσι το τελευταίο ενεργοποιείται. Οι NO επαφές μεταβαίνουν σε κατάσταση αγωγής και οι τάσεις εφαρμόζονται στο κύκλωμα.

### 5.3.4.3 Υποκύκλωμα παραγωγής σήματος ελέγχου

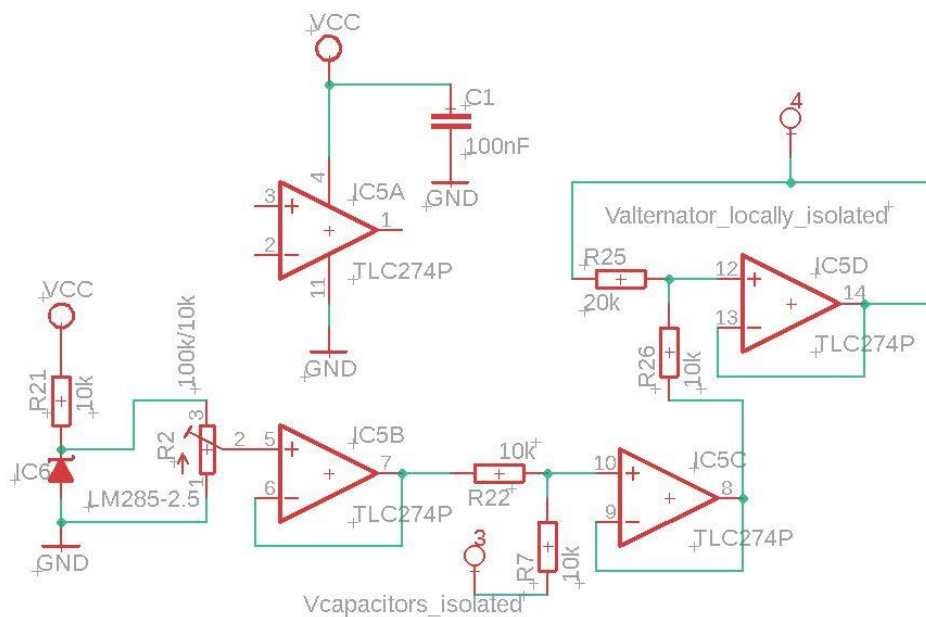
Το υποκύκλωμα παραγωγής του σήματος ελέγχου ( $V_{\text{control}}$ ) είναι πολύ απλό και υλοποιείται με τη χρήση δύο μη αναστρεφόντων ενισχυτών άθροισης και ενός μη αναστρέφοντος ενισχυτή μοναδιαίας απολαβής. Η μαθηματική σχέση 5.7 του σήματος ελέγχου είναι:

$$V_{\text{control}} = \frac{V_{\text{rect}} + V_{\text{out}}}{3}$$

Η τάση εξόδου  $V_{\text{out}}$  είναι η τάση της συστοιχίας αυξημένη κατά μία σταθερή τιμή, η οποία θα καθορίσει και το ρεύμα φόρτισης. Η μαθηματική σχέση της  $V_{\text{out}}$  είναι:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{stack}} + x, \text{ όπου } V_{\text{stack}} \text{ η τάση της συστοιχίας και } \langle x \rangle \text{ η σταθερή διαφορά μεταξύ } V_{\text{out}} \text{ και } V_{\text{stack}}.$$

Για τον καθορισμό της  $V_{\text{out}}$  θα χρησιμοποιηθεί μια σταθερή τάση αναφοράς, η οποία θα προστίθεται στην  $V_{\text{stack}}$ .



Εικόνα 5.24 : Διάταξη παραγωγής τάσης ελέγχου υποκυκλώματος PWM

Στην εικόνα 5.24, βλέπουμε το σχηματικό της διάταξης που παράγει το σήμα ελέγχου. Η ανάγκη για 3 τελεστικούς μας οδήγησε στην επιλογή του ολοκληρωμένου TLC274, το οποίο περιέχει 4 ανεξάρτητους τελεστικούς σε πακέτο DIP14.

Αρχικά, δημιουργούμε μία σταθερή τάση αναφοράς των 2.5 Volt με το ολοκληρωμένο IC6, το οποίο είναι “LM285-2.5”. Για τον καθορισμό της επιθυμητής διαφοράς  $V_{\text{out}}$  και  $V_{\text{stack}}$  από 0 έως 2.5 Volt, χρησιμοποιούμε το ποτενσιόμετρο R2 των 10 KΩ. Η τάση εξόδου του ποτενσιόμετρου διέρχεται από τον ενισχυτή απομόνωσης IC5B για αποφυγή απώλειας ακρίβειας. Στη συνέχεια, η έξοδος του IC5B

αθροίζεται με την τάση της συστοιχίας με το συμμετρικό δικτύωμα R7-R22 των 10 ΚΩ. Η έξοδος του αθροιστή IC5C είναι:

$$V_{IC5C} = A_v \times V_+ = 1 \times (V_{IC5B} \times \frac{10K\Omega}{20K\Omega} + V_{stack} \times \frac{10K\Omega}{20K\Omega}) = \frac{V_{IC5B}}{2} + \frac{V_{stack}}{2} \quad \text{Σχέση 5.11}$$

Τέλος, η  $V_{IC5C}$  αθροίζεται με την τάση του ανορθωτή (4) με το δικτύωμα R25-R26. Η έξοδος του αθροιστή IC5D είναι:

$$V_{IC5D} = V_{IC5C} \times \frac{20K\Omega}{30K\Omega} + V_4 \times \frac{10K\Omega}{30K\Omega} = \frac{2}{3} \times (\frac{V_{IC5B}}{2} + \frac{V_{stack}}{2}) + \frac{1}{3} \times V_4 = \frac{V_{IC5B}}{3} + \frac{V_{stack}}{3} + \frac{V_4}{3} \Rightarrow$$

$$V_{IC5D} = \frac{V_{IC5B} + V_{stack} + V_4}{3} \quad \text{Σχέση 5.12}$$

Η τάση εξόδου του IC5B  $V_{IC5B}$  είναι η διαφορά μεταξύ  $V_{out}$  και  $V_{stack}$ . Ισχύει δηλαδή ότι:

$$V_{out} = V_{stack} + V_{IC5B} \quad \text{Σχέση 5.13}$$

Αντικαθιστώντας την σχέση 6.11 στην 6.10 και με την ισότητα  $V_4 = V_{rect}$  προκύπτει:

$$V_{IC5D} = \frac{V_{out} + V_{rect}}{3} \quad \text{Σχέση 5.14}$$

Η σχέση 5.14 επιβεβαιώνει ότι η συγκεκριμένη διάταξη παράγει το ορθό σήμα ελέγχου.

#### 5.3.4.4 Υποκύκλωμα εκθετικού ταλαντωτή, παραγωγής PWM και οδήγησης mosfet

Το κυριότερο υποκύκλωμα που απαιτεί ακρίβεια είναι ο ταλαντωτής παραγωγής του εκθετικού σήματος. Το εκθετικό σήμα πρέπει να είναι συμμετρικό, να χαρακτηρίζεται δηλαδή από ίσους χρόνους φόρτισης και εκφόρτισης ανεξαρτήτως της τάσης του ανορθωτή. Επιπλέον, τα κατώφλια εναλλαγής φόρτισης-εκφόρτισης πρέπει αυστηρά να είναι το ένα τρίτο και τα δύο τρίτα της τάσης του ανορθωτή και άρα θα μεταβάλλονται με τη μεταβολή της τάσης του. Η αυστηρή τήρηση των παραπάνω περιορισμών είναι αναγκαία για την επίτευξη του απαιτούμενου Duty Cycle στο τελικό PWM σήμα. Για την υλοποίηση του κυκλώματος θα χρησιμοποιήσουμε ολοκληρωμένο κύκλωμα συγκριτή με τα κατάλληλα περιφερειακά εξαρτήματα.

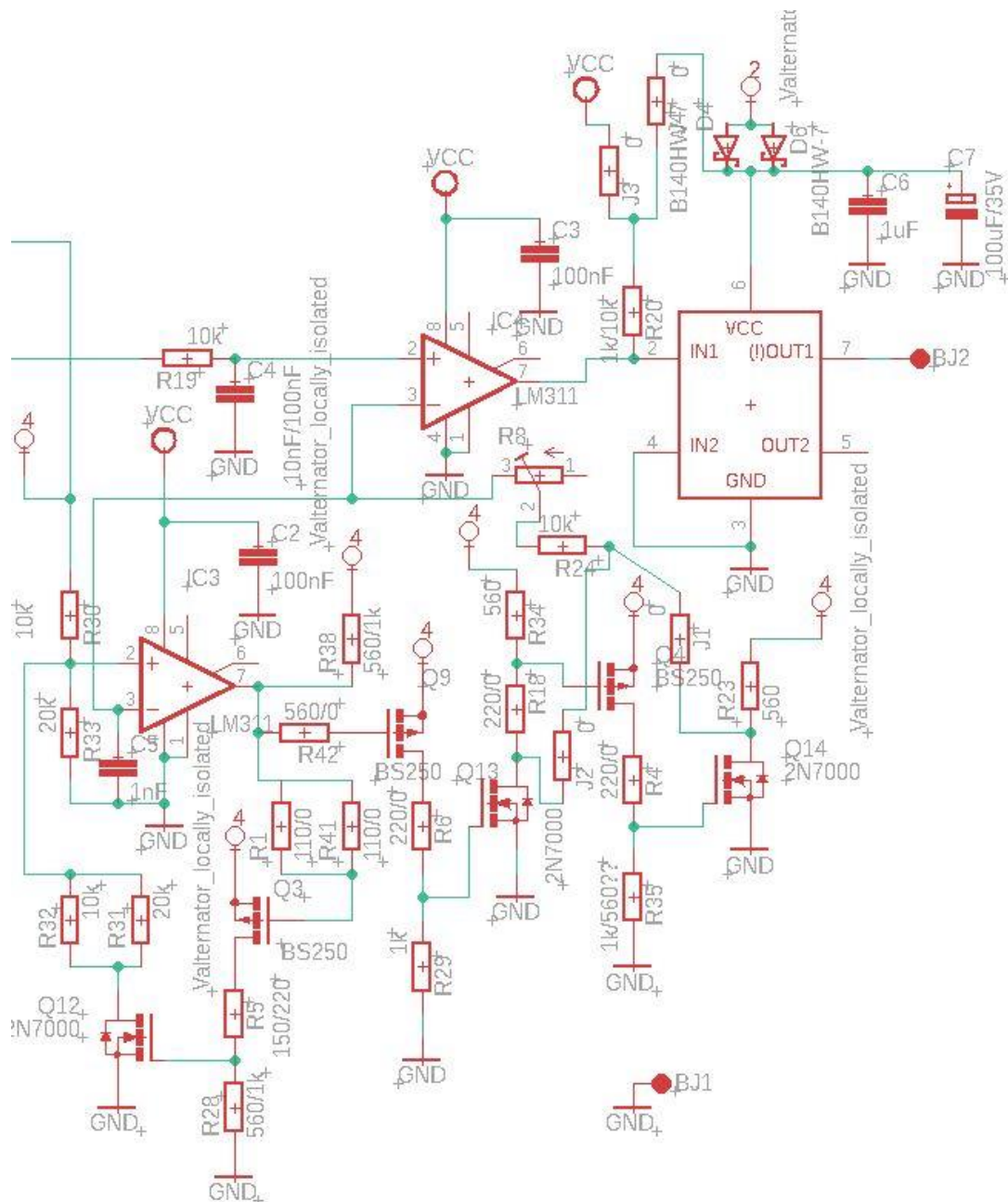
Στην εικόνα 5.25, βλέπουμε το σχηματικό της διάταξης παραγωγής του PWM σήματος. Ως συγκριτής, επιλέχθηκε ο LM311 (IC3), ο οποίος διαθέτει έξοδο ανοιχτού συλλέκτη. Η δελεαστική τιμή, ο μικρός χρόνος απόκρισης εξόδου και η ενισχυμένη ρευματική ικανότητα εξόδου αποτέλεσαν τους παράγοντες επιλογής. Για την εξασφάλιση της επιθυμητής ταλάντωσης, θα πραγματοποιείται συνεχής σύγκριση τη τάσης ενός πυκνωτή με μια τάση αναφοράς.

Για την επεξήγηση λειτουργίας της διάταξης, θεωρούμε ως αρχικές συνθήκες τη μηδενική τάση του πυκνωτή C5, που έχει ως συνέπεια τον θετικό κόρο της εξόδου του IC3 και την εξίσωση της τάσης εξόδου με την τάση του ανορθωτή. Η τάση του ανορθωτή διατηρεί σε αποκοπή το p-channel mosfet Q3. Με τη σειρά του, το n-channel mosfet Q12 παραμένει επίσης σε αποκοπή. Σε αυτή την κατάσταση, οι παράλληλες αντιστάσεις R31-R32 δεν επηρεάζουν τη λειτουργία της διάταξης και μπορούν να αγνοηθούν. Η τάση στη μη αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή καθορίζεται αποκλειστικά από τον διαιρέτη τάσης R30-R33 και ισούται με:

$$V_+ = V_4 \times \frac{20K\Omega}{30K\Omega} = \frac{2V_{rect}}{3}$$

Παράλληλα, ο θετικός κόρος της εξόδου του συγκριτή διατηρεί σε αποκοπή το p-channel mosfet Q9. Με τη σειρά του, το n-channel mosfet Q13 παραμένει σε αποκοπή. Σε αυτή την κατάσταση, ο πυκνωτής C5 φορτίζει από την τάση του ανορθωτή μέσω του σειριακού συνδυασμού των αντιστάσεων R34 και R24 και του ποτενσιόμετρου R8. Καθ' όλη τη διάρκεια φόρτισης του C5 μέχρι

την τάση τιμής  $\frac{2V_{rect}}{3}$  Volt, η μη αναστρέφουσα είσοδος έχει μεγαλύτερη τάση από την αναστρέφουσα και ως αποτέλεσμα η έξοδος παραμένει σε θετικό κόρο.



Εικόνα 5.25 : Υποκύκλωμα ταλαντωτή, PWM και οδήγησης mosfet

Τη στιγμή κατά την οποία η τάση του πυκνωτή C5 θα ξεπεράσει την τάση  $\frac{2V_{rect}}{3}$  Volt της μη αναστρέφουσας, η έξοδος θα οδηγηθεί σε αρνητικό κόρο και άρα δυναμικό γείωσης (0.3 Volt κατά προσέγγιση). Η γειωμένη έξοδος θα οδηγήσει σε κόρο το Q3, το οποίο με τη σειρά του θα αναγκάσει το Q12 να οδηγηθεί επίσης σε κόρο. Η χαμηλή  $R_{DS(on)}$  του Q12 στα 8 Ω είναι ελάχιστη σε σύγκριση με τις R31-R32 (20 KΩ και 10 KΩ αντίστοιχα) και επομένως μπορεί να αγνοηθεί χωρίς την ύπαρξη σφαλμάτων. Οι R31-R32 πρακτικά είναι γειωμένες και παραλληλίζονται με την R33. Ο παράλληλος συνδυασμός των 3 αντιστάσεων έχει συνολική αντίσταση με τιμή:

$$\frac{1}{R_{R31} \parallel R_{R32} \parallel R_{R33}} = \frac{1}{R_{R31}} + \frac{1}{R_{R32}} + \frac{1}{R_{R33}} \Rightarrow \frac{1}{R_{R31} \parallel R_{R32} \parallel R_{R33}} = \frac{1}{20K\Omega} + \frac{1}{10K\Omega} + \frac{1}{20K\Omega} \Rightarrow \frac{1}{R_{R31} \parallel R_{R32} \parallel R_{R33}} = \frac{4}{20K\Omega} \Rightarrow$$

$$4R_{R31} \parallel R_{R32} \parallel R_{R33} = 20K\Omega \Rightarrow R_{R31} \parallel R_{R32} \parallel R_{R33} = 5K\Omega$$

Η τάση στη μη αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή μεταβάλλεται και ισούται πλέον με:

$$V_+ = V_4 \times \frac{5K\Omega}{15K\Omega} = \frac{V_{rect}}{3}$$

Σε δεύτερη φάση, η γείωση της εξόδου του συγκριτή οδηγεί σε κόρο το Q9, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε κόρο το Q13. Σε αυτήν την κατάσταση ο πυκνωτής C5 παύει να φορτίζει και μεταβαίνει σε κατάσταση εκφόρτισης μέσω του σειριακού συνδυασμού των R8 και R24. Σε όλη τη διάρκεια της εκφόρτισης του C5, η αναστρέφουσα είσοδος έχει μεγαλύτερη τάση από τη μη αναστρέφουσα και ως αποτέλεσμα η έξοδος παραμένει σε αρνητικό κόρο. Την στιγμή που η τάση του C5 πέσει κάτω από την τάση  $\frac{V_{rect}}{3}$  Volt της μη αναστρέφουσας, η έξοδος θα μεταβεί και πάλι σε θετικό κόρο.

Για το υπόλοιπο της λειτουργίας του κυκλώματος πραγματοποιείται μια συνεχής ταλάντωση μεταξύ δύο καταστάσεων. Στη μία κατάσταση, η έξοδος του συγκριτή βρίσκεται σε θετικό κόρο και ο πυκνωτής C5 φορτίζει από την τάση του ανορθωτή  $V_{rect}$ , με αρχική τάση  $\frac{V_{rect}}{3}$  Volt μέχρι την τάση των  $\frac{2V_{rect}}{3}$  Volt. Στην άλλη κατάσταση, η έξοδος του συγκριτή βρίσκεται σε αρνητικό κόρο και ο C5 αποφορτίζεται από την τάση των  $\frac{2V_{rect}}{3}$  Volt μέχρι την τάση των  $\frac{V_{rect}}{3}$  Volt. Συμπεραίνοντας, το κύκλωμα μας παράγει ένα σήμα PWM στην έξοδο του συγκριτή και ένα εκθετικό σήμα τάσης στα άκρα του πυκνωτή C5. Η φόρτιση και εκφόρτιση του C5 παρουσιάζουν μια ελαχιστότατη απόκλιση στη χρονική τους διάρκεια, λόγω του γεγονότος ότι η αντίσταση R34 των 560Ω επηρεάζει μόνο την φόρτιση και ως συνέπεια το Duty Cycle διατηρείται στο 50% με κάποια ελάχιστη απόκλιση. Η συνολική αντίσταση των R8 και R24 καθορίστηκε να είναι σε κάθε περίπτωση πάνω από 20KΩ, με την ανάλογη ρύθμιση του R8, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το παραπάνω σφάλμα.

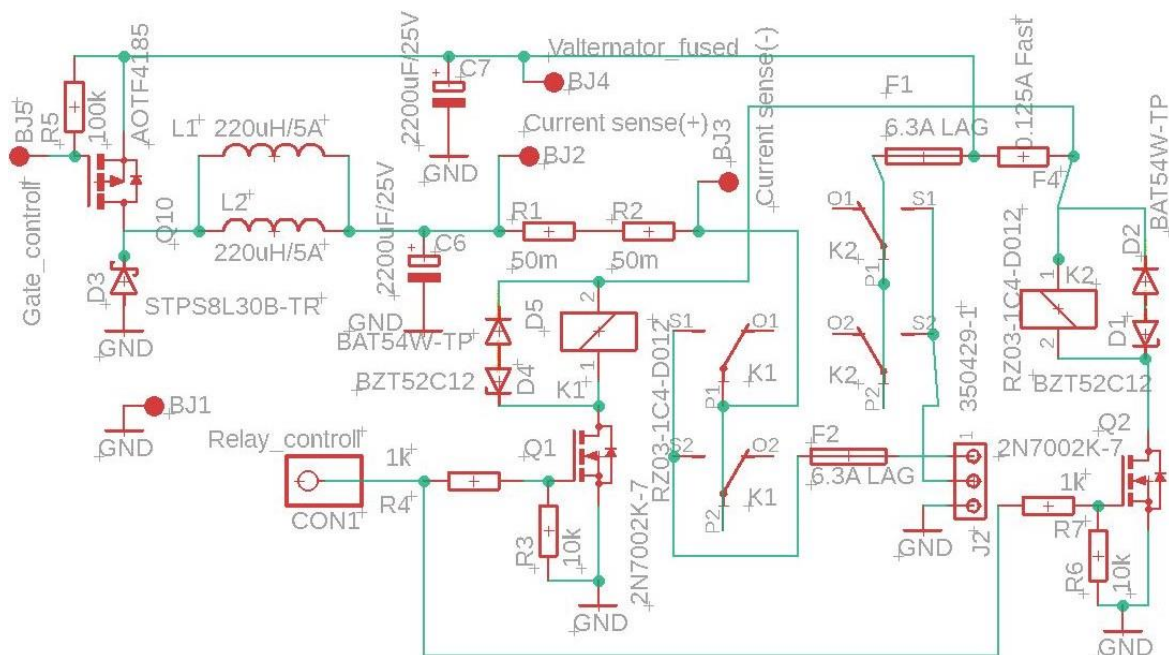
Η εκθετική τάση του C5 ακολουθεί τις μεταβολές της τάσης του ανορθωτή και παραμένει πάντα μεταξύ των κατωφλίων  $\frac{V_{rect}}{3}$  και  $\frac{2V_{rect}}{3}$ . Οι χρόνοι φόρτισης και εκφόρτισης δεν επηρεάζονται από την τάση του ανορθωτή, αφού η χρονική σταθερά RC παραμένει σταθερή και τα κατώφλια τάσης έχουν σταθερή αναλογία με την τάση ανορθωτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται σταθερή συχνότητα του εκθετικού σήματος, ανεξάρτητα από την τάση του ανορθωτή. Για την μεταβολή της συχνότητας αρκεί να μεταβάλλουμε τη σταθερά RC. Ο C5 και η R24 έχουν σταθερές τιμές, οπότε μεταβάλλοντας τη συνολική αντίσταση R μέσω της ρύθμισης του ποτενσιόμετρου R8, καθορίζουμε την επιθυμητή συχνότητα. Στην τελική κατασκευή η συχνότητα ρυθμίστηκε στα 40 KHz.

Έχοντας εξασφαλίσει, τόσο το εκθετικό σήμα, όσο και το σήμα ελέγχου, σειρά έχει η σύγκρισή τους. Ως συγκριτής, επιλέχθηκε και πάλι ο LM311 (IC4). Το εκθετικό σήμα από το άκρο του C5 εφαρμόζεται απευθείας στην αναστρέφουσα του IC4. Η τάση ελέγχου  $V_{control}$  από την έξοδο του IC5D της προηγούμενης διάταξης εφαρμόζεται στη μη αναστρέφουσα του IC4, μέσω ενός χαμηλοπερατού φίλτρου R19/C4 για εξάλειψη των υψίσυχνων θορύβων που ενδέχεται να επηρεάσουν τη σύγκριση των τάσεων. Η έξοδος του συγκριτή IC4 είναι ένα PWM σήμα με το κατάλληλο Duty Cycle για την οδήγηση του mosfet του υποβιβαστή. Η χωρητική φύση της πύλης του mosfet ισχύος απαιτεί μεγάλα ποσά ρεύματος για την εξασφάλιση πλήρους μεταγωγής από αποκοπή σε κόρο και το αντίστροφο και άρα η έξοδος του συγκριτή δεν έχει τη δυνατότητα να οδηγήσει απευθείας το mosfet. Για την ορθή οδήγηση του mosfet αξιοποιείται ένα ολοκληρωμένο (IC7), εξειδικευμένο για αυτό το σκοπό. Πιο συγκεκριμένα, είναι το TC4428 της MicroChip. Ενσωματώνει δύο drivers, έναν αναστρέφων και έναν

μη αναστρέφων. Το μέγιστο ρεύμα οδήγησης που μπορεί να παρέχει είναι στα 1.5 A, τιμή επαρκής για τη συχνότητα των 40 KHz που επιλέξαμε.

Με την πάροδο της φόρτισης της συστοιχίας, η τάση της αυξάνεται, όπως και η απαιτούμενη τάση εξόδου  $V_{out}$ . Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται και το Duty Cycle του PWM σήματος που παράγεται από τον συγκριτή IC4. Το mosfet ισχύος του υποβιβαστή είναι p-channel και άρα απαιτεί όλο και μικρότερο Duty Cycle όσο αυξάνεται η τάση εξόδου. Λόγω των παραπάνω, επιλέχθηκε η χρήση του αναστρέφοντος driver του TC4428. Η έξοδος του IC4 συνδέεται με την είσοδο του αναστρέφοντος driver του IC7. Η έξοδος του driver συνδέεται απευθείας με την πύλη του mosfet μέσω του συνδέσμου BJ2, καθώς αυτό βρίσκεται στην πλακέτα του υποβιβαστή. Η τάση τροφοδοσίας του TC4428 αξιοποιεί δύο πυκνωτές, C6 και C7, για την ομαλότερη παροχή των απαιτούμενων αιχμών ρεύματος κατά την οδήγηση του mosfet.

### 5.3.4.5 Υποκύκλωμα υποβιβαστή τάσης



Εικόνα 5.26 : Διάταξη υποβιβαστή τάσης

Στην εικόνα 5.26, βλέπουμε το σχηματικό του υποβιβαστή τάσης που υλοποιήθηκε σύμφωνα με τη λογική λειτουργίας που αναλύθηκε νωρίτερα. Τα εξαρτήματα επιλέχθηκαν με την προϋπόθεση παροχής ρεύματος εξόδου 5 – 6 A. Τη μεταφορά ενέργειας από και προς την πλακέτα αναλαμβάνει ο αρσενικός κωννέκτορας J2. Ο J2 ανήκει στην οικογένεια “ Universal Mate & Lock” της TE Connectivity. Είναι 3 επαφών και διαθέτει κούμπωμα με κλείδωμα. Η γείωση συνδέεται στην 3<sup>η</sup> επαφή του, ενώ στην 2<sup>η</sup> επαφή του φτάνει η τάση του ανορθωτή. Στη συνέχεια, η τάση του ανορθωτή διέρχεται από το ρελέ K2 και μέσω της βραδύκαυστης ασφάλειας F1 6.3 A τροφοδοτεί τη διάταξη ισχύος του υποβιβαστή και την συμπληρωματική πλακέτα ελέγχου μέσω του συνδέσμου BJ4. Ο πυκνωτής εισόδου χαμηλής ESR C7 λειτουργεί ως “Bulk capacitor” και παρέχει βοηθητική ισχύ στον ανορθωτή κατά τη διακόπωση του mosfet. Ως διακόπτης ισχύος, επιλέχθηκε το p-channel mosfet AOTF4185. Η εξαιρετικά χαμηλή  $R_{DS(on)}$  στα 16 mΩ, που μας επιτρέπει την επίτευξη αρκετά χαμηλών απωλειών και το κόστος του, μόλις στο 1.5 ευρώ, ήταν οι παράγοντες επιλογής. Μέσω του συνδέσμου BJ5, η πύλη του mosfet συνδέεται με την έξοδο του mosfet driver της συμπληρωματικής πλακέτας,

που είναι υπεύθυνος για την οδήγησή της. Η αντίσταση R5 φροντίζει για την πλήρη εκφόρτιση της πύλης του mosfet κατά την απενεργοποίηση της πλακέτας. Για τη διάοδο D3 επιλέξαμε την τύπου schottky “STPS8L30B-TR”, λόγω του βολικού smd πακέτου D-Pak, του μεγίστου συνεχούς ρεύματος αγωγής στα 8 A και της χαμηλής τάσης αγωγής στα 0.35 Volt. Κατά την επιλογή των πηνίων, ήταν δύσκολη η εύρεση ενός, που να έχει δυνατότητα για συνεχές ρεύμα αγωγής περισσότερο από 5 A σε φυσιολογικό κόστος και επαρκή τιμή αυτεπαγωγής. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήσαμε δύο πηνία των 5A παράλληλα συνδεδεμένα με τιμή αυτεπαγωγής στα 220  $\mu\text{H}$  και αντίσταση τυλιγμάτων στα 180 m $\Omega$ . Ο παράλληλος συνδυασμός τους έχει δυνατότητα για συνεχές ρεύμα αγωγής στα 10 A. Η συνολική αυτεπαγωγή είναι το ήμισυ της αρχικής και άρα ισούται με 110  $\mu\text{H}$  και ομοίως η συνολική αντίσταση είναι ίση με 90 m $\Omega$ . Ο πυκνωτής εξόδου C6 είναι ίδιος με τον C7 και συμβάλει στην ελάττωση της κυμάτωσης της τάσης εξόδου. Οι R1 και R2 των 50 m $\Omega$  και 5 Watt είναι οι αντιστάσεις ακριβείας υπεύθυνες για τον περιορισμό, αλλά και τη μέτρηση του ρεύματος. Η συνολική τους αντίσταση είναι 100 m $\Omega$  και η συνολική τους τάση, που αποτελεί τον τρόπο μέτρησης του ρεύματος, μεταφέρεται μέσω των συνδέσμων BJ2 και BJ3 στη συμπληρωματική πλακέτα. Τέλος, το ρεύμα εξόδου διέρχεται από το ρελέ K1, την βραδύκαυστη ασφάλεια F2 6.3 A και την πρώτη επαφή του J2, για να καταλήξει στον θετικό πόλο της συστοιχίας.

Οι τιμές των πηνίων και του πυκνωτή εξόδου C6 υπολογίζονται με ακρίβεια με μαθηματικούς τύπους, που διέπουν τη λειτουργία του διακοπτικού υποβιβαστή τάσης, για διάφορες τιμές συχνότητας, Duty Cycle και κυμάτωσης εξόδου. Στην περίπτωσή μας, δεν αποτελούσε κύριο κριτήριο η ακρίβεια στην επιλογή των τιμών και για το λόγο αυτό οι χρησιμοποιούμενες τιμές προέκυψαν από συστάσεις κατασκευαστών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που λειτουργούν ως διακοπτικοί ρυθμιστές τάσης.

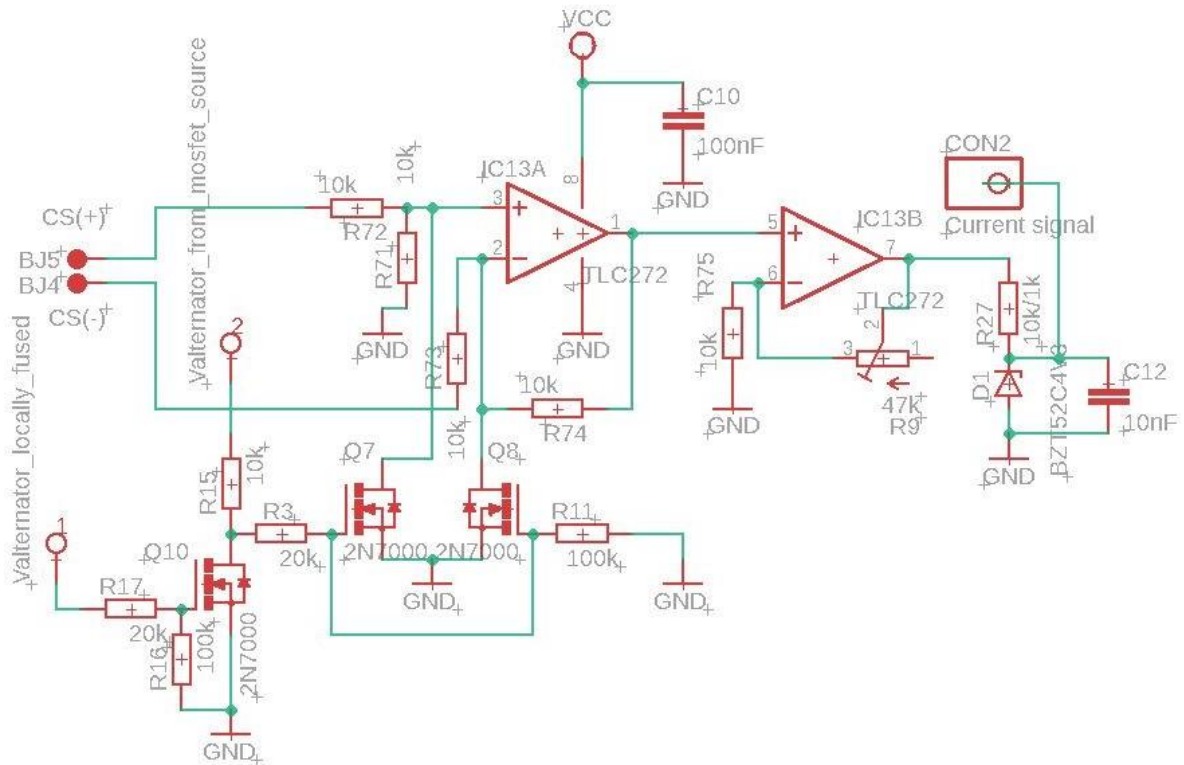
Τα ρελέ K1 και K2 χρησιμεύουν στην απομόνωση του ανορθωτή και της συστοιχίας από το κύκλωμα του υποβιβαστή τάσης, όταν το αυτοκίνητο θα είναι σβηστό, αλλά και όταν θα λειτουργεί αλλά θα πρέπει να διακοπεί η φόρτιση. Χωρίς τα ρελέ, η τάση του ανορθωτή και κατ' επέκταση και της μπαταρίας, θα ήταν παρούσα στο κύκλωμα ακόμα και με σβηστό κινητήρα, κάτι το οποίο ενδεχομένως να προκαλούσε μικρά αλλά υπολογίσιμα ρεύματα διαρροής. Επιπλέον, χωρίς την απομόνωση της συστοιχίας, όταν αυτή δε θα φόρτιζε, θα υπήρχε ανάστροφο ρεύμα από την ίδια προς το ηλεκτρικό σύστημα του αυτοκινήτου μέσω των R1-R2, των πηνίων και της παρασιτικής διάόδου σώματος του mosfet. Κάτι τέτοιο, θα οδηγούσε σε παρασιτική εκφόρτιση της συστοιχίας, στην περίπτωση που η τάση ήταν μεγαλύτερη από της μπαταρίας.

Τα ρελέ έχουν παράλληλα συνδεδεμένα στα πηνία τους δικτύωματα διόδων για την κατάπνιξη των αιχμών τάσης κατά την σβέση τους. Ο έλεγχος των ρελέ πραγματοποιείται με τα n-channel mosfet 2N7002K-7 και το κατάλληλο σήμα ελέγχου καταφθάνει στην πλακέτα από τη αντίστοιχη έξοδο του arduino μέσω του ακροδέκτη CON1.

### 5.3.4.6 Υποκύκλωμα μέτρησης ρεύματος

Το τελευταίο τμήμα του κυκλώματος φόρτισης αποτελεί η διάταξη μέτρησης του ρεύματος φόρτισης. Η μέτρηση του ρεύματος φόρτισης και προβολή αυτού στην οθόνη ενδείξεων, εκτός από πληροφοριακό χαρακτήρα, βοηθά και στον έλεγχο ορθής λειτουργίας του κυκλώματος έπειτα από την ολοκλήρωση της συσκευής. Για την μέτρηση του ρεύματος, θα αξιοποιηθούν οι δύο αντιστάσεις ισχύος των 50m $\Omega$  που παρεμβάλλονται μεταξύ εξόδου του ρυθμιστή ρεύματος και της συστοιχίας. Η συνολική τους τάση διαιρούμενη με την ακριβή τιμή της ολικής αντίστασης μας δίνει τη ζητούμενη τιμή ρεύματος. Η τάση των αντιστάσεων δεν έχει ως αναφορά τη γείωση, αλλά αντιθέτως είναι διαφορική. Για το λόγο αυτό, θα γίνει χρήση ενός ενισχυτή διαφοράς με μοναδιαία απολαβή, η έξοδος

του οποίου θα οδηγηθεί σε έναν μη αναστρέφον ενισχυτή με ρυθμιζόμενο κέρδος. Το τελικό σήμα θα οδηγείται σε μία εκ των αναλογικών εισόδων του arduino. Η αναμενόμενη τάση των αντιστάσεων ισχύος θα είναι της τάξης των εκατοντάδων mVolt. Η μοναδιαία απολαβή του ενισχυτή διαφοράς θα έχει ως αποτέλεσμα η έξοδος του να είναι επίσης χαμηλή. Για την μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση της τάσης αναφοράς των ADC του arduino (3 Volt), το σήμα εξόδου του ενισχυτή διαφοράς απαιτεί περαιτέρω ενίσχυση, γεγονός που δικαιολογεί τη χρήση του επιπρόσθετου σταδίου ενίσχυσης.



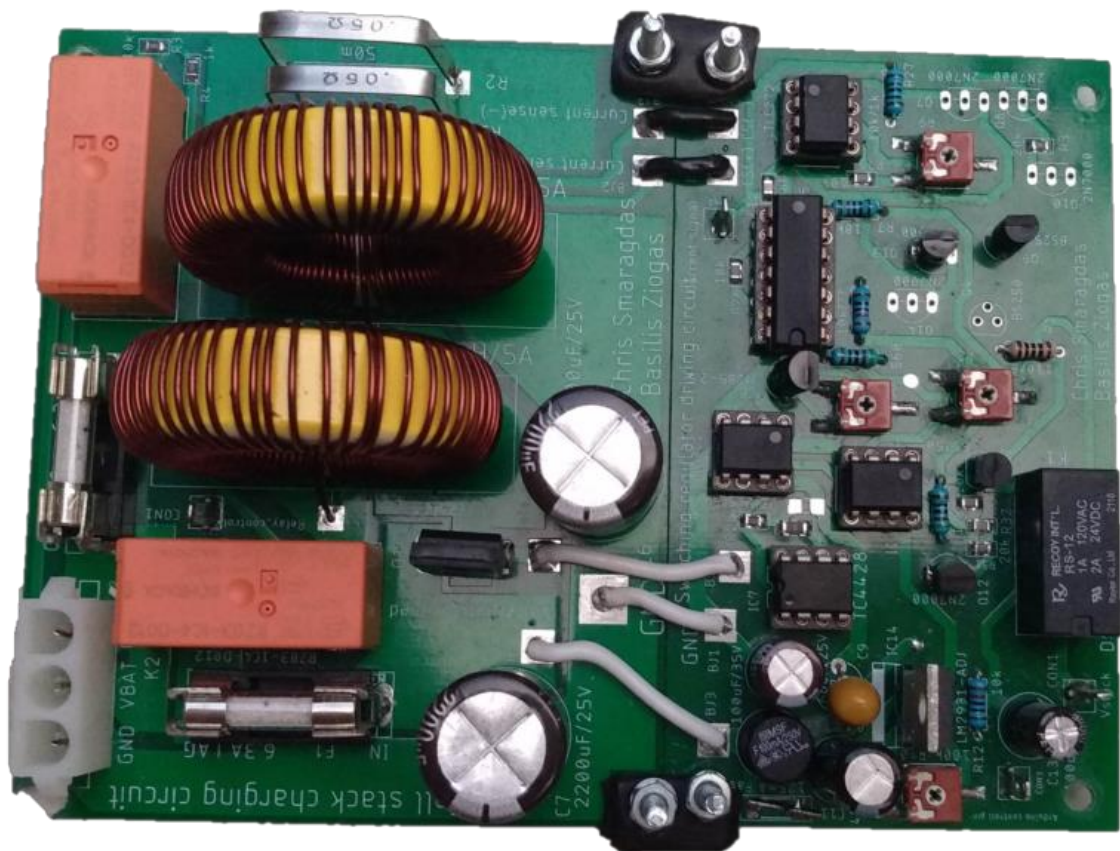
Εικόνα 5.27 : Υποκύκλωμα μέτρησης ρεύματος πλακέτας φόρτισης

Στην εικόνα 5.27, βλέπουμε το σχηματικό του συγκεκριμένου υποκυκλώματος της πλακέτας. Για την υλοποίηση των δύο διατάξεων ενίσχυσης επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο TLC272, το οποίο ενσωματώνει 2 ανεξάρτητους τελεστικούς. Αρχικά, το διαφορικό σήμα τάσης μεταφέρεται από το άλλο μισό της πλακέτας με τους συνδέσμους BJ4 και BJ5. Μέσω των αντιστάσεων R71, R72, R73, R74 ίδιας τιμής, το σήμα εφαρμόζεται στις εισόδους του ενός ενισχυτή και η τιμή της απολαβής ορίζεται να είναι μονάδα. Στη συνέχεια, η έξοδος του πρώτου σταδίου εφαρμόζεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο του δεύτερου ενισχυτή. Με τον συνδυασμό των R9 και R75 το κέρδος ρυθμίζεται στην επιθυμητή τιμή. Μετά από δοκιμές, καταλήξαμε στη ρύθμιση του κέρδους σε 4, με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου R75. Τέλος, το ενισχυμένο σήμα διέρχεται μέσα από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο R27, C12 για την εξάλειψη της υψίσυχνης κυμάτωσης που παράγεται στην έξοδο του διακοπτικού κυκλώματος. Η φιλτραρισμένη έξοδος οδηγείται στην αντίστοιχη αναλογική είσοδο του arduino μέσω καλωδίου που συνδέεται στον CON2. Η δίοδος zener D1 προστατεύει την αναλογική είσοδο του arduino από υπέρταση της εξόδου του τελεστικού. Αν, για παράδειγμα, υπάρξει βλάβη στον τελεστικό ή το κύκλωμα βρίσκεται σε έναυση, η τάση εξόδου του τελεστικού μπορεί να είναι αυξημένη ή ακόμα και να αγγίξει τον θετικό κόρο. Σε αυτή την περίπτωση, η D1 δε θα επιτρέψει το σήμα που λαμβάνει το arduino να ξεπεράσει τα 4.3 Volt κατά προσέγγιση, προστατεύοντας την

αναλογική είσοδο. Τέλος, το δικτύωμα των mosfet Q7, Q8 και Q10 δρα και αυτό προστατευτικά, γειώνοντας τις εισόδους του ενισχυτή διαφοράς σε περίπτωση που διακοπεί η τροφοδοσία της πλακέτας (π.χ. λόγω καμένης ασφάλειας).

### 5.3.5 PCB

Το κύκλωμα φόρτισης που αναλύσαμε νωρίτερα, χωρίστηκε σε δύο πλακέτες. Το μέγεθός του ξεπερνούσε το μέγιστο επιτρεπτό όριο της δωρεάν έκδοσης του EAGLE, οπότε δεν υπήρχε άλλη επιλογή. Θεωρήθηκε ορθότερο η μία πλακέτα να περιέχει το υποκύκλωμα του διακοπτικού υποβιβαστή τάσης, με όλα τα εξαρτήματα ισχύος, και η άλλη πλακέτα τα εναπομείναντα υποκυκλώματα ελέγχου. Ο συγκεκριμένος διαχωρισμός αποδείχτηκε αργότερα αρκετά αποδοτικός, αφού ελαχιστοποιήθηκαν οι απαιτούμενες συνδέσεις μεταξύ των δύο πλακετών.

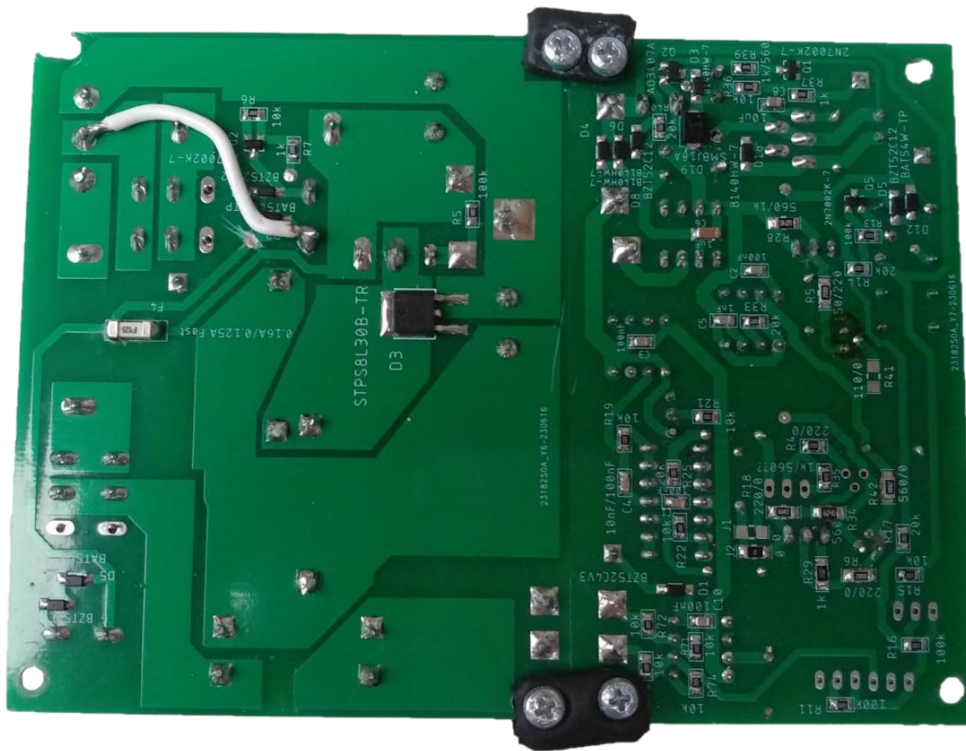


Εικόνα 5.28 : Άνω όψη πλακετών κυκλώματος φόρτισης

Στην εικόνα 5.28, βλέπουμε την άνω όψη των πλακετών του κυκλώματος φόρτισης, όπου διακρίνονται ξεκάθαρα οι δύο αυτόνομες πλακέτες που απαρτίζουν το σύνολο. Στα δεξιά, βρίσκεται η πλακέτα ελέγχου του υποβιβαστή, στην οποία συνυπάρχουν το υποκύκλωμα παραγωγής του σήματος ελέγχου, το υποκύκλωμα παραγωγής του PWM σήματος και το υποκύκλωμα μέτρησης του ρεύματος φόρτισης. Στο κάτω μέρος της συγκεκριμένης πλακέτας βρίσκεται το υποκύκλωμα σταθεροποίησης με το ρυθμιστικό ποτενσιόμετρο. Τα υπόλοιπα τρία ποτενσιόμετρα είναι υπεύθυνα για τη ρύθμιση της συχνότητας του PWM, τη ρύθμιση του ρεύματος φόρτισης και τη ρύθμιση της απολαβής της διάταξης μέτρησης ρεύματος. Το μαύρο ρελέ είναι υπεύθυνο για την απομόνωση της τάσης της συστοιχίας και του ανορθωτή.

Στα αριστερά, βρίσκεται η πλακέτα του υποβιβαστή τάσης. Μεγάλο ποσοστό της πλακέτας καταλαμβάνουν τα πηνία, των οποίων η διάμετρος αγγίζει τα 45 mm. Επιπλέον, διακρίνονται οι δύο μεγάλοι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές εισόδου και εξόδου, οι δύο γυάλινες ασφάλειες εισόδου και εξόδου, τα δύο ρελέ ισχύος απομόνωσης της συστοιχίας και του ανορθωτή (πορτοκαλί), ο κοννέκτορας 3 επαφών για τη μεταφορά ενέργειας και οι δύο αντιστάσεις ακριβείας στο πάνω μέρος. Τέλος, το σημαντικότερο ίσως εξάρτημα του κυκλώματος, που είναι το p-channel mosfet ισχύος, βρίσκεται δεξιά από το πορτοκαλί ρελέ. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός, ότι δεν έχει τοποθετηθεί ψήκτρα. Η διακοπτική λειτουργία του κυκλώματος, σε συνδυασμό με την πολύ χαμηλή  $R_{DS(on)}$  του mosfet, το καθιστούν ικανό να διαχειριστεί τα 5.6 A κατά μέσο όρο με ελάχιστες απώλειες και μηδαμινή αύξηση θερμοκρασίας.

Οι δύο πλακέτες έχουν ενωθεί μηχανικά με λαμάκια αλουμινίου στις δύο άκρες, τη συγκράτηση των οποίων αναλαμβάνουν βίδες 3mm. Για τη μεταφορά ενέργειας αλλά και των απαραίτητων σημάτων μεταξύ των πλακετών, χρησιμοποιήθηκαν καλώδια, οι άκρες των οποίων κολλήθηκαν στις αντίστοιχες αναμονές που είχαν προβλεφθεί στα pcb. Πιο συγκεκριμένα, τα καλώδια είναι 5 και αναλαμβάνουν τη διασύνδεση της γείωσης, της τάσης του ανορθωτή, του παλμού ρεύματος για την οδήγηση της πύλης του mosfet και της τάσης των αντιστάσεων ακριβείας.



Εικόνα 5.29 : Κάτω όψη πλακετών κυκλώματος φόρτισης

Στην εικόνα 5.29, βλέπουμε την κάτω όψη των πλακετών του κυκλώματος φόρτισης. Παρατηρούμε, ότι όλα τα εξαρτήματα είναι smd, κάτι το οποίο έγινε για χωροταξικούς λόγους. Το κυριότερο εξάρτημα εδώ, είναι η schottky δίοδος του υποβιβαστή τάσης. Οι ενώσεις των εξαρτημάτων του υποβιβαστή που διαχειρίζονται το κυρίως ρεύμα της φόρτισης έχουν γίνει με planes και στις όψεις, όπου αυτό ήταν εφικτό. Η χρήση planes αντί απλών αγωγών μειώνει την συνολική αντίσταση και παρασιτική αυτεπαγωγή των χαλκοδιαδρομών και παράλληλα συμβάλει στην αποδοτικότερη απαγωγή θερμότητας.

Η ορθή λειτουργία του κυκλώματος απαιτεί μια σχετική σταθερότητα στην συνολική ωμική αντίσταση μεταξύ καθαρής τάσης εξόδου του υποβιβαστή και της συστοιχίας, έτσι ώστε το ρεύμα εξόδου να μην έχει διακύμανση. Η συνολική αυτή αντίσταση αποτελείται από την ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων των πηνίων, την  $R_{DS(on)}$  του mosfet ισχύος, τη συνολική τιμή των αντιστάσεων ακριβείας, τη συνολική «παρασιτική» αντίσταση των ενδιάμεσων χαλκοδιαδρομών της πλακέτας, καθώς και την αντίσταση του καλωδίου που συνδέει την έξοδο της πλακέτας με τη συστοιχία. Επιπρόσθετα, η διόδος ισχύος του υποβιβαστή εμφανίζει μια σχεδόν σταθερή πτώση τάσης το χρονικό διάστημα που το mosfet δεν άγει.

Αντίσταση πηνίων :  $R_{coils} = 90 \text{ m}\Omega$

Αντίσταση mosfet :  $R_{DS(on)} < 20 \text{ m}\Omega$

Αντιστάσεις ακριβείας :  $R_{sense} = 100 \text{ m}\Omega$

Σε όλο τον κύκλο λειτουργίας του υποβιβαστή συμμετέχουν οι  $R_{coils}$  και  $R_{sense}$  με συνολική αντίσταση ίση με  $190 \text{ m}\Omega$ . Κατά τη διάρκεια αγωγής του mosfet συμμετέχει και η  $R_{DS(on)}$  αυξάνοντας τη συνολική αντίσταση. Κατά τη διάρκεια της αποκοπής του, η  $R_{DS(on)}$  δεν επηρεάζει το κύκλωμα, αφού δε διαρρέεται από ρεύμα. Την ίδια χρονική περίοδο, η αγωγή της διόδου συνοδεύεται από την πτώση τάσης στα άκρα της, που είναι στην ουσία η τάση αγωγής. Η αντίσταση των  $190 \text{ m}\Omega$  μαζί με την συνολική αντίσταση χαλκοαγωγών και καλωδίου συμμετέχουν σταθερά στον καθορισμό του ρεύματος φόρτισης. Από την άλλη, η επιρροή της  $R_{DS(on)}$  και της τάσης αγωγής της διόδου είναι πιο περίπλοκη. Όταν η αρχική τάση της συστοιχίας είναι αρκετά χαμηλότερη από την τάση του ανορθωτή, το Duty Cycle του PWM σήματος απέχει αρκετά από την μονάδα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μικρότερη χρονικά αγωγή του mosfet και αντίστοιχα μεγαλύτερη χρονικά αγωγή της διόδου. Αντιθέτως, όταν η τάση της συστοιχίας βρίσκεται κοντά στην τάση του ανορθωτή, η τιμή του Duty Cycle προσεγγίζει τη μονάδα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεγάλη χρονικά αγωγή του mosfet και αντίστοιχα μικρή χρονικά αγωγή της διόδου. Παρατηρούμε, ότι σε χαμηλότερες τιμές DC έχουμε αυξημένη απώλεια τάσης λόγω  $R_{DS(on)}$  αλλά και μειωμένη απώλεια τάσης που οφείλεται στη διόδο. Σε υψηλότερες τιμές DC έχουμε μειωμένη απώλεια τάσης λόγω  $R_{DS(on)}$  αλλά και αυξημένη απώλεια τάσης που οφείλεται στη διόδο. Συμπεραίνοντας, κατά τη μεταβολή του DC, η αυξομείωση των απωλειών από την  $R_{DS(on)}$  εξουδετερώνεται μέχρι έναν βαθμό από την αυξομείωση των απωλειών της διόδου. Ως αποτέλεσμα, το ρεύμα φόρτισης επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την σταθερή αντίσταση που προαναφέραμε και λόγω αυτού το κύκλωμα επιτυγχάνει ικανοποιητική σταθερότητα ρεύματος.

### 5.4 Πλακέτα προστασίας και εξισορρόπησης

#### 5.4.1 Αρχή λειτουργίας και επιλογή εξαρτημάτων

Η σύνδεση των υπερπυκνωτών σε σειρά για τον σχηματισμό της συστοιχίας, δημιουργεί μία μεγάλη πρόκληση. Αυτή δεν είναι άλλη από την επίτευξη εξισορροπημένης φόρτισης ανά στοιχείο υπερπυκνωτή. Η τάση με την οποία φορτίζονται οι υπερπυκνωτές εφαρμόζεται στα άκρα της συστοιχίας και όχι μεμονωμένα σε κάθε στοιχείο. Με αυτόν τον τρόπο, όλοι οι υπερπυκνωτές διαρρέονται με το ίδιο ρεύμα φόρτισης. Σε ιδανικές συνθήκες, θα επιτυγχανόταν ίδιο επίπεδο φόρτισης για όλους τους υπερπυκνωτές, αφού όλοι διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα φόρτισης. Στην πραγματικότητα όμως, τίποτα δεν είναι ιδανικό, όπως και οι υπερπυκνωτές.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύσαμε εκτενώς τη μη ιδανικότητα των υπερπυκνωτών, όσον αφορά την πραγματική τιμή χωρητικότητας. Η μη ιδανικότητα των υπερπυκνωτών εκτείνεται και στην εσωτερική

τους αντίσταση στο συνεχές ρεύμα (DC ESR). Ο κατασκευαστής δίνει την τιμή των 0.29 mΩ όχι ως σταθερή αλλά ως τη μέγιστη. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι ο κάθε υπερπυκνωτής έχει εσωτερική αντίσταση στο DC άγνωστης τιμής, η οποία απλά δεν υπερβαίνει τα 0.29 mΩ.



RELIABILITY SPECIFICATIONS				
ITEM		SPECIFICATION		CONDITION
Temp. Characteristics	Capacitance	Step. 1	Change within 5% of Initial Value	Step 1: +25±2°C, 1h Step 2: +65±2°C, 1h Step 3: -25±2°C, 1h Step 4: -40±2°C, 1h
	ESR		Change within 50% of rated value	
	Capacitance	Step. 2	Change within 5% of Initial Value	
	ESR		Change within 50% of rated value	
	Capacitance	Step. 3	Change within 5% of Initial Value	
	ESR		Change within 50% of rated value	
	Capacitance	Step. 4	Change within 5% of Initial Value	
	ESR		Change within 50% of rated value	

Εικόνα 5.30: Τμήμα από το φυλλάδιο προδιαγραφών των υπερπυκνωτών

Πηγή: <https://www.distrelec.biz/en/>

Στην εικόνα 5.30, μας δίνονται δεδομένα που αφορούν τις διακυμάνσεις της χωρητικότητας και της εσωτερικής αντίστασης των υπερπυκνωτών για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας. Παρατηρεί κανείς, ότι πέρα από τις αρχικές ανοχές της χωρητικότητας και της εσωτερικής αντίστασης, η διακύμανση της θερμοκρασίας προκαλεί περαιτέρω απόκλιση των τιμών.

Πέρα από τις παραπάνω αποκλίσεις, δεν πρέπει να αποκλείεται και ο παράγοντας της γήρανσης. Οι υπερπυκνωτές, όπως και οποιοδήποτε άλλο ηλεκτρονικό εξάρτημα, επηρεάζονται αρνητικά από τη γήρανση. Πιο συγκεκριμένα, οι υπερπυκνωτές με την πάροδο του χρόνου τείνουν να ελαττώνουν την χωρητικότητά τους και να αυξάνουν την εσωτερική τους αντίσταση. Ο ρυθμός γήρανσης είναι διαφορετικός για κάθε πυκνωτή, γεγονός το οποίο δημιουργεί ακόμα μεγαλύτερη αβεβαιότητα για την απόκλιση των τιμών χωρητικότητας και εσωτερικής αντίστασης. Η σειριακή σύνδεση των πυκνωτών έχει σαν επακόλουθο, το ρεύμα που διαρρέει τους πυκνωτές κατά τη φόρτιση αλλά και την αποφόρτιση να είναι το ίδιο σε όλους. Οι αποκλίσεις στη χωρητικότητα και την ESR, που συζητήθηκαν παραπάνω, έχουν δύο βασικές επιπτώσεις. Από τη μια, κατά τη φόρτιση, η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της συστοιχίας δεν ισομοιράζεται στους 6 πυκνωτές. Οι πυκνωτές με μεγαλύτερη χωρητικότητα έχουν μικρότερο ρυθμό αύξησης τάσης στα άκρα τους. Παράλληλα, η εσωτερική αντίσταση δημιουργεί μια εσφαλμένη εικόνα της τάσης στα άκρα του κάθε πυκνωτή, αφού το γινόμενο της πρώτης με το ρεύμα φόρτισης αποτελεί μια πλαστική τάση, που προστίθεται στην πραγματική τάση του πυκνωτή που μετριέται, σε κατάσταση ηρεμίας. Από την άλλη, κατά την αποφόρτιση, οι πυκνωτές με μεγαλύτερη χωρητικότητα έχουν μικρότερο ρυθμό ελάττωσης της τάσης τους. Από όλα τα παραπάνω, προκύπτει ότι οι πυκνωτές της συστοιχίας θα εμφανίσουν υπολογίσιμες αποκλίσεις στις τιμές των τάσεών τους με την πάροδο των κύκλων χρήσης.

Στις συστοιχίες μπαταριών, η εξισορρόπηση των στοιχείων είναι απαραίτητη, λόγω του στενού εύρους τάσης ασφαλούς χρήσης τους. Οι υπερπυκνωτές από την άλλη, δεν επηρεάζονται αρνητικά από την υπόταση και προσφέρουν την αποθηκευμένη ηλεκτρική τους ενέργεια χωρίς πρόβλημα, ακόμα και όταν η τάση στα άκρα τους αγγίζει οριακά τα 0 Volt. Το μόνο που χρειάζονται είναι απλά προστασία από υπέρταση και μια υποτυπώδη εξισορρόπηση φόρτισης. Η υπέρταση μειώνει τον κύκλο ζωής τους και προκαλεί καταστροφή του διηλεκτρικού. Η εξισορρόπηση φόρτισης, η οποία προκύπτει και ως αποτέλεσμα της προστασίας από υπέρταση, βοηθά στο να μην υπάρχει σημαντική διακύμανση μεταξύ των τάσεων των πυκνωτών. Σε μια απλή υποθετική περίπτωση, κατά την οποία δεν εφαρμόζεται προστασία από υπέρταση και άρα εξισορρόπηση, θεωρούμε ότι μετά το πέρας της φόρτισης της συστοιχίας, οι πέντε από τους έξι πυκνωτές έχουν φορτιστεί στα 2.7 Volt. Η συνολική τους τάση θα είναι  $2.7 \times 5 = 13.5$  Volt. Θέτοντας ένα λογικό όριο διακοπής της φόρτισης στα 14 Volt, η τάση του τελευταίου πυκνωτή θα είναι  $14 - 13.5 = 0.5$  Volt. Οι παραπάνω υπολογισμοί μας οδηγούν σε πολλά συμπεράσματα. Αρχικά, οι πυκνωτές βρίσκονται στο όριο της ονομαστικής τάσης λειτουργίας τους (2.7 Volt), με ότι αυτό συνεπάγεται για τη μακροζωία τους. Επιπλέον, η αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια της συστοιχίας ελαττώνεται σημαντικά. Αυτό προκύπτει από το γεγονός, ότι η αποφόρτιση της συστοιχίας έχει νόημα μόνο μέχρι τη στιγμή που θα μηδενιστεί η τάση του ελάχιστου φορτισμένου πυκνωτή. Θεωρώντας ότι όλοι οι πυκνωτές αποφορτίζονται με ακριβώς τον ίδιο ρυθμό, όταν θα εκφορτιστεί πλήρως ο πυκνωτής με αρχική τάση 0.5 Volt, οι υπόλοιποι πυκνωτές θα έχουν πτώση στην τάση τους κατά 0.5 Volt. Η τάση όλης της συστοιχίας θα μειωθεί από τα 14 Volt στα 11 Volt ( $14 - 6 \times 0.5$ ). Το αξιοποιήσιμο εύρος τάσης προκύπτει να είναι μόνο 3 Volt, κάτι το οποίο δεν καλύπτει τις ανάγκες της κατασκευής και ξεφεύγει από τις αρχικές προδιαγραφές που τέθηκαν. Παράλληλα, αν η αποφόρτιση συνεχιζόταν πέρα από το παραπάνω όριο, ο μηδενισμένος ενεργειακά πυκνωτής θα αποτελούσε πλέον φορτίο για τους υπόλοιπους και θα πραγματοποιούνταν «παρασιτική» φόρτισή του με ανεστραμμένη τάση. Η ανεστραμμένη τάση ενδέχεται να προκαλέσει προβλήματα, όπως μείωση του ορίου ζωής του υπερπυκνωτή ή ακόμα και πλήρη καταστροφή του.

Λόγω των παραπάνω, κρίθηκε απαραίτητη η κατασκευή ενός κυκλώματος που προστατεύει τους υπερπυκνωτές από υπέρταση και προσφέρει παράλληλα ένα ποσοστό εξισορρόπησης. Για την επίτευξη των δύο αυτών λειτουργιών θα γίνει χρήση ωμικών και ημιαγωγικών στοιχείων. Θέτοντας σαν όρο τη μακροζωία του συστήματος και για την κατά το δυνατόν ορθότερη εξισορρόπηση των πυκνωτών, τέθηκε σαν όριο ασφαλείας η τάση των 2.42 Volt έπειτα και από κάποιες δοκιμές. Η επιλογή τιμής μικρότερης της ονομαστικής εξασφαλίζει ένα περιθώριο ασφαλείας από πιθανά σφάλματα και ανοχές του κυκλώματος μέτρησης των τάσεων και επίσης παρατείνει τον κύκλο ζωής των πυκνωτών, αφού δεν λειτουργούν στο απόλυτο όριό τους. Για την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της τάσης του ανορθωτή και την ελεγχόμενη φόρτιση της συστοιχίας, τέθηκε σαν όριο αυτής τα 14 Volt. Με την επιλογή ανώτατου ορίου φόρτισης στα 2.42 Volt, στην περίπτωση που οι πέντε εκ των έξι πυκνωτών έχουν τάση 2.42 Volt, η συνολική τους τάση θα είναι:

$$5 \times 2.42 = 12.1 \text{ Volt.}$$

Σε κατάσταση πλήρους φόρτισης της συστοιχίας στα 14 Volt, η τάση του τελευταίου πυκνωτή είναι:

$$14 - 12.1 = 1.9 \text{ Volt.}$$

Το επιθυμητό εύρος λειτουργίας της συστοιχίας, όπως αυτό ορίστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι 14 έως 9 Volt, δηλαδή 5.5 Volt. Σύμφωνα με τον θεωρητικό ισομοιρισμό της πτώσης τάσης στους πυκνωτές, στα 8.5 Volt τάσης συστοιχίας ο κάθε ένας πυκνωτής θα ελαττώσει την τάση του κατά:

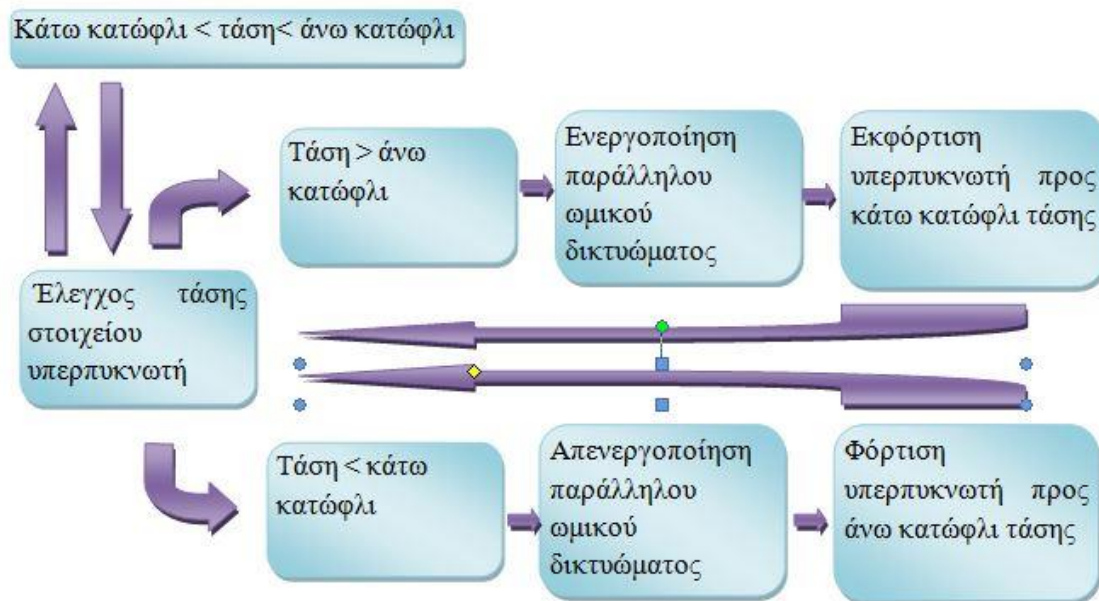
$$\frac{5.5}{6} = 0.92 \text{ Volt.}$$

Ο πυκνωτής με αρχική τάση 1.9 Volt θα έχει πλέον τάση ίση με:

$$1.9 - 0.92 = 0.98 \text{ Volt.}$$

Παρατηρούμε, πως σε καμία περίπτωση κατά την αποφόρτιση της συστοιχίας δε θα μηδενιστεί η τάση σε κάποιον από τους πυκνωτές, εφόσον δεν υπάρξει κάποιο μεμονωμένο ελαττωματικό στοιχείο.

Αναλύοντας την λειτουργία του κυκλώματος, πρέπει να ξεκινήσουμε από τον βασικό κορμό του κυκλώματος, που είναι τα ωμικά δικτύωματα, που συνδέονται παράλληλα με κάθε πυκνωτή. Η λογική που ακολουθήθηκε και φαίνεται στην εικόνα 5.31, είναι η εξής:



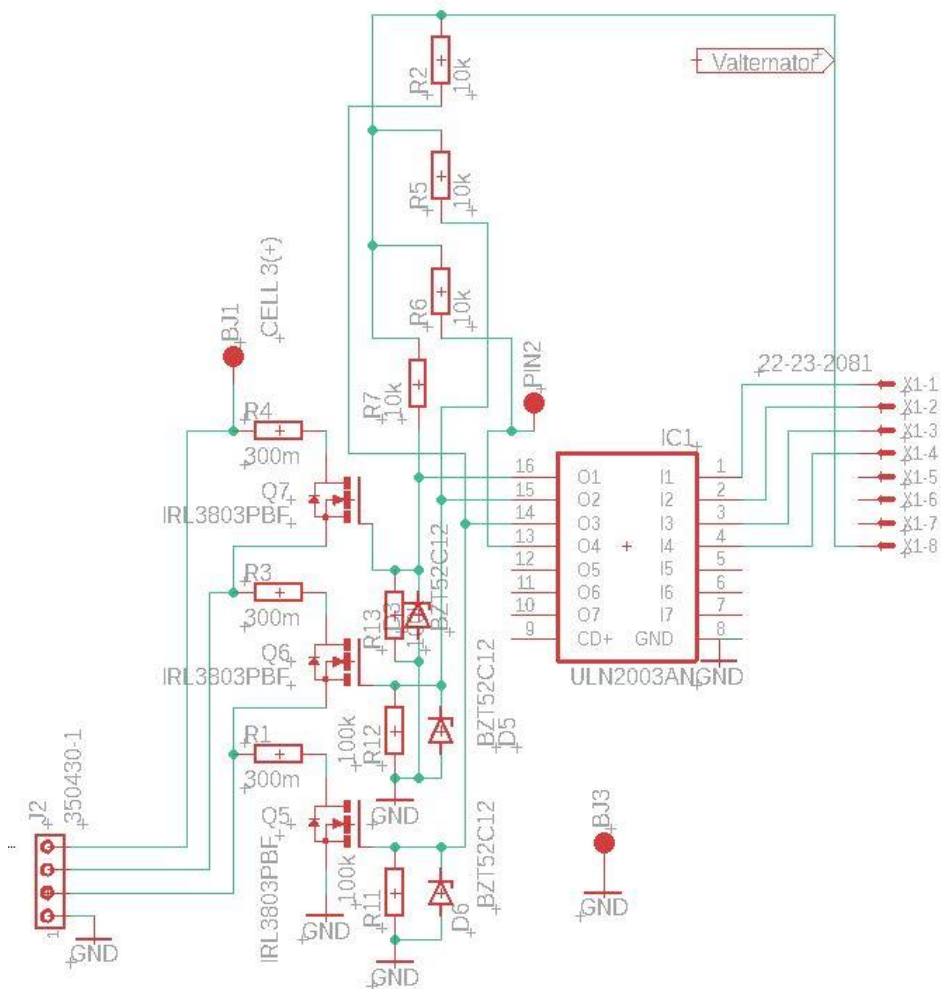
Εικόνα 5.31: Διάγραμμα ροής πλακέτας προστασίας και εξισορρόπησης

Όταν ένας πυκνωτής, κατά τη φόρτιση της συστοιχίας, αποκτήσει τάση στα άκρα του ίση με το προκαθορισμένο άνω κατώφλι ασφαλείας, πρέπει αρχικά με κάποιο τρόπο να διακοπεί η φόρτισή του. Η διακοπή της φόρτισης τουλάχιστον ενός εκ των πυκνωτών συνεπάγεται και διακοπή φόρτισης όλης της συστοιχίας, λόγω της σειριακής σύνδεσης. Η λύση στο πρόβλημα είναι η τοποθέτηση ενός δικτύωματος παράλληλα σε κάθε πυκνωτή, το οποίο διαδραματίζει διπλό ρόλο. Ο πρώτος ρόλος είναι η δημιουργία ενός παρακαμπτήριου μονοπατιού για το ρεύμα φόρτισης. Αυτό πρακτικά σημαίνει, ότι όταν ο πυκνωτής φορτίσει στο μέγιστο επιθυμητό όριο (κατώφλι), το παράλληλο δίκτυωμα θα ενεργοποιείται και πλέον το ρεύμα φόρτισης παύει να διαρρέει τον συγκεκριμένο πυκνωτή αλλά περνά μέσα από το δίκτυωμα (bypass). Ο στόχος της προστασίας των πυκνωτών από υπέρταση έχει επιτευχθεί σε αυτό το σημείο, ενώ παράλληλα δε διαταράσσεται η φόρτιση των υπόλοιπων μη πλήρως φορτισμένων πυκνωτών, οι οποίοι συνεχίζουν κανονικά να φορτίζονται. Ο δεύτερος ρόλος είναι η ελαφρά αποφόρτιση του πυκνωτή, ταυτόχρονα με τη διακοπή της φόρτισής του. Το δίκτυωμα, πλέον, διαρρέεται από το άθροισμα του ρεύματος φόρτισης της συστοιχίας και του ρεύματος που του παρέχει ο πυκνωτής για την αποφόρτισή του. Αυτό συμβαίνει, καθώς τα δίκτυωματα επιτελούν το έργο, να προκαλούν μια συνεχή αυξομείωση της τάσης του πυκνωτή μεταξύ δύο στενών κατωφλίων. Το υψηλό κατώφλι είναι η μέγιστη τάση ασφαλείας κατά την οποία ενεργοποιείται το δίκτυωμα. Το χαμηλό κατώφλι είναι η τάση κατά την οποία το δίκτυωμα απενεργοποιείται και ο πυκνωτής φορτίζεται και πάλι με το ρεύμα φόρτισης της συστοιχίας.

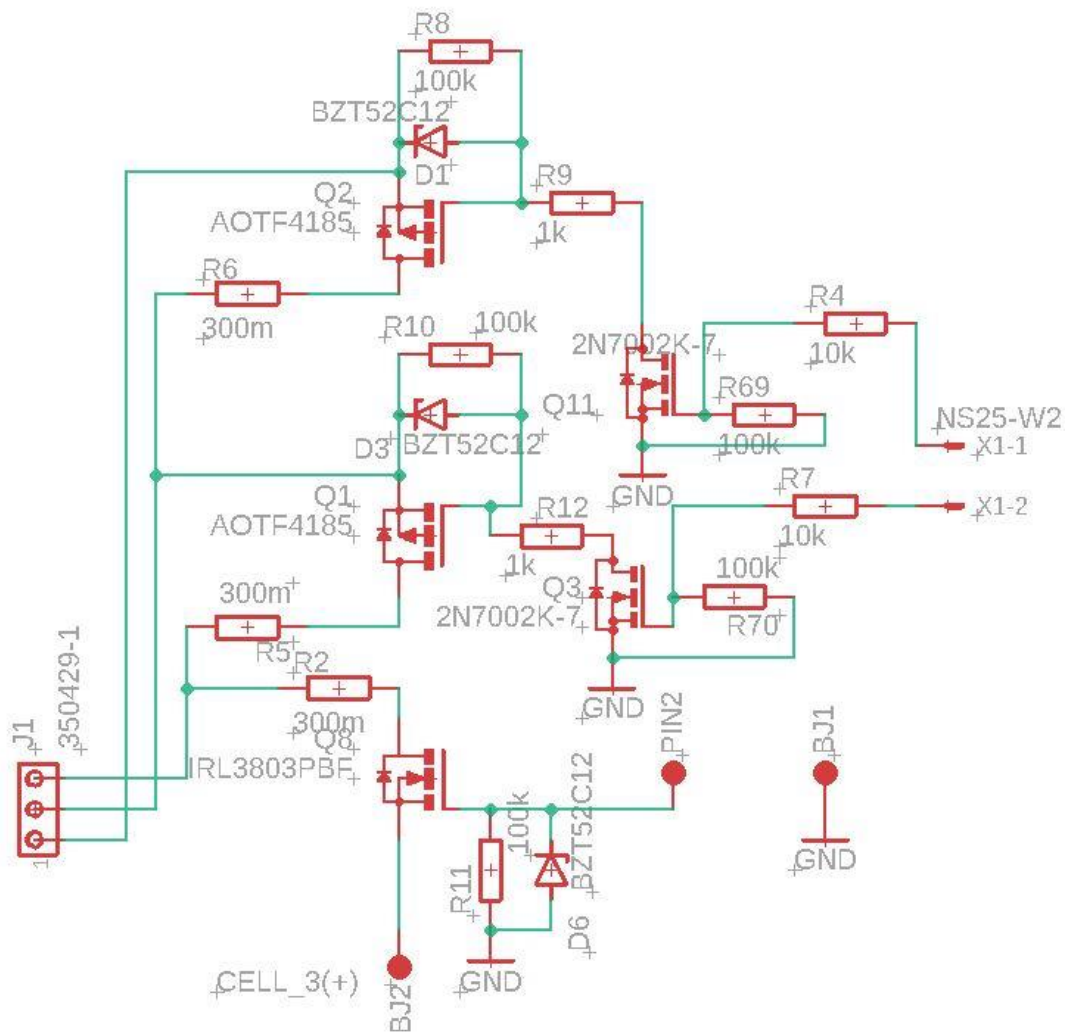
Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι ο κάθε πυκνωτής εισέρχεται σε δύο διαφορετικά στάδια κατά την φόρτισή του και μέχρι την περάτωση της πλήρους φόρτισης όλης της συστοιχίας. Στην αρχή, έχουμε συνεχή φόρτιση και την πρώτη φορά που η τάση του πυκνωτή θα αγγίξει το άνω κατώφλι ασφαλείας, αρχίζει ένας συνεχής κύκλος αποφόρτισης και φόρτισης μεταξύ των κατωφλίων, μέχρις ότου δοθεί η εντολή για διακοπή της φόρτισης της συστοιχίας από το αντίστοιχο κύκλωμα. Ο συνεχής αυτός κύκλος φόρτισης και αποφόρτισης θα ονομαστεί στο εξής ως κατάσταση διατήρησης για τη συντόμευση της αναφοράς του.

### 5.4.2 Σχηματικά και επεξήγηση

Τα δικτυώματα που συνδέονται με τους πυκνωτές, δεν είναι τίποτα άλλο παρά μία κεραμική αντίσταση χαμηλής τιμής και υψηλής ισχύος, σε σειρά με ένα mosfet επίσης υψηλής ισχύος και εξαιρετικά χαμηλής  $R_{DS(on)}$ . Στις εικόνες 5.32 και 5.33, βλέπουμε τα δύο μέρη που αποτελούν το σχηματικό του κυκλώματος εξισορρόπησης. Ο διαχωρισμός του κυκλώματος σε δύο πλακέτες και κατά συνέπεια σε δύο σχηματικά έγινε καθαρά λόγω περιορισμού του λογισμικού EAGLE. Η δωρεάν έκδοση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε, επιτρέπει τη σχεδίαση πλακέτας με επιφάνεια που να μην ξεπερνά τα 80 τετραγωνικά εκατοστά. Καθώς η επιφάνεια δεν ήταν αρκετή για όλο το κύκλωμα, σχεδιάστηκαν δύο σχηματικά και δύο πλακέτες, οι οποίες λειτουργούν ως ενιαίο σύνολο.



Εικόνα 5.32 : 1<sup>ο</sup> σχηματικό πλακέτας προστασίας και εξισορρόπησης



Εικόνα 5.33 : 2<sup>ο</sup> σχηματικό πλακέτας προστασίας και εξισορρόπησης

Η επιλογή mosfet, ως διακόπτες για τα δικτύωματα, δεν ήταν τυχαία. Μια ακόμα εφαρμόσιμη επιλογή αποτελούν και τα διπολικά τρανζίστορ. Το χαρακτηριστικό που τα ξεχωρίζει και που αποτέλεσε τον καθοριστικό παράγοντα χρήσης των mosfet, είναι η αγωγιμότητά τους. Τα διπολικά τρανζίστορ ισχύος, όταν βρεθούν σε κατάσταση κόρου, αναπτύσσουν μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού τάση που συνήθως κυμαίνεται από 0.2 έως 0.3 Volt. Τα mosfet από την άλλη, σε κατάσταση κόρου λειτουργούν ως ωμικές αντιστάσεις και εμφανίζουν μεταξύ απαγωγού και πηγής, αντίσταση κάποιας τιμής. Ειδικότερα, τα περισσότερα mosfet ισχύος με την παροχή τάσης πύλης-πηγής συνήθως πάνω από 4 Volt, εμφανίζουν εξαιρετικά χαμηλή αντίσταση, που μπορεί να φτάσει ακόμα και τα λίγα mΩ. Το απαιτούμενο ρεύμα, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, δε θα ξεπερνά τα 6 A. Η πτώση τάσης στο μονοπάτι απαγωγού-πηγής θα είναι το γινόμενο του ρεύματος και της  $R_{DS(on)}$ . Έστω ότι η  $R_{DS(on)}$  ισούται με 10 mΩ, τότε η πτώση τάσης στο mosfet είναι:

$$V_{DS} = R_{DS(on)} \times I \Rightarrow V_{DS} = 0.01 \times 6 \Rightarrow V_{DS} = 60 \text{ mVolt.}$$

Η τιμή των 60mVolt είναι σημαντικά μικρότερη από το εύρος τιμών 0.2 – 0.3 Volt και έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα, ότι τα mosfet αποτελούν την καλύτερη επιλογή στην περίπτωση μας.

Τα mosfet ισχύος επιλέχθηκαν με γνώμονα την αποφυγή της θερμικής τους καταπόνησης. Η ωμική φύση των δικτυωμάτων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις θερμικές απώλειες, οι οποίες στην περίπτωση μας είναι υπολογίσιμες λόγω των σχετικά μεγάλων ρευμάτων. Προτιμήθηκε, λοιπόν, η χρήση mosfet ισχύος με τιμή  $R_{DS(on)}$  μόλις κάποια mΩ, έτσι ώστε το μεγαλύτερο τμήμα του θερμικού φορτίου του κυκλώματος να το επωμιστούν οι αντιστάσεις, οι οποίες μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τα mosfet, χωρίς να καταστραφούν. Η χαμηλή  $R_{DS(on)}$ , μας προσφέρει ένα έξτρα πλεονέκτημα, αφού προσεγγιστικά η τιμή της μπορεί να θεωρηθεί μηδενική, απλουστεύοντας με αυτόν τον τρόπο τους υπολογισμούς μας. Το φυσικό μέγεθος των mosfet δεν αποτελεί εμπόδιο, καθώς η πλακέτα διαθέτει επαρκή χώρο για την τοποθέτησή τους. Προτιμήθηκαν, λοιπόν, through hole mosfet σε πακέτο TO-220, που είναι αρκετά εμπορικό και προσφέρει αμέτρητες επιλογές. Το χαρακτηριστικό της μέγιστης τάσης αντοχής δεν επηρεάζει την τελική επιλογή, καθώς οι τάσεις που θα διαχειρίζονται τα mosfet είναι αρκετά χαμηλές. Μετά από αναζήτηση σε διάφορους προμηθευτές και με γνώμονα την εύρεση της χαμηλότερης δυνατής  $R_{DS(on)}$  σε φυσιολογικά πλαίσια κόστους, καταλήξαμε στα εξής mosfet:

Για τα n-channel mosfet επιλέχθηκε το IRL3803, το οποίο είναι λογικού επιπέδου 5 Volt. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το συνεχές ρεύμα αγωγής αγγίζει τα 140 A στους 25 °C. Το σημαντικότερο είναι πως η  $R_{DS(on)}$  είναι μόλις 9 mΩ για  $V_{GS} = 4.5$  Volt και 6 mΩ για  $V_{GS} = 10$  Volt.

Για τα p-channel mosfet επιλέχθηκε το AOTF4185. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το συνεχές ρεύμα αγωγής αγγίζει τα 34 A στους 25 °C. Η  $R_{DS(on)}$  είναι μικρότερη από 20 mΩ για  $V_{GS} = -4.5$  Volt και μικρότερη από 16 mΩ για  $V_{GS} = -10$  Volt.

Αφού έγινε η επιλογή των mosfet, σε δεύτερη φάση πρέπει να γίνει σωστή επιλογή των αντιστάσεων. Οι αντιστάσεις θα πρέπει να έχουν τέτοια τιμή, έτσι ώστε αθροιστικά με την  $R_{DS(on)}$  των mosfet να καλύπτουν την ελάχιστη απαίτηση για ρεύμα. Η ρευματική ικανότητα των δικτυωμάτων πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μέγιστο ρεύμα φόρτισης των πυκνωτών, έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί και η αποφόρτιση του εκάστοτε πυκνωτή. Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι η ελάχιστη απαίτηση για ρεύμα είναι το άθροισμα του επιθυμητού ρεύματος φόρτισης και του προσεγγιστικού ρεύματος, με το οποίο θα αποφορτίζονται οι πυκνωτές που βρίσκονται σε κατάσταση διατήρησης. Θέτοντας το ρεύμα φόρτισης ίσο με 6 A και συνυπολογίζοντας μια αποδεκτή μέγιστη προσεγγιστική τιμή για το ρεύμα αποφόρτισης 1 A, η αντίσταση θα πρέπει να μπορεί να διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $6 + 1 = 7$  A. Λόγω της προαναφερθείσας προσέγγισης με την  $R_{DS(on)}$  των mosfet, η τάση που θα έχει στα άκρα της η αντίσταση, είναι αυτή του πυκνωτή σε λειτουργία συντήρησης και θα κυμαίνεται από 2.37 έως 2.42 Volt. Λαμβάνοντας υπόψη την χαμηλότερη εκ των δύο οριακών τιμών, η τιμή της αντίστασης θα πρέπει να είναι:

$$R = \frac{V}{I} \Rightarrow R = \frac{2.37}{7} \Rightarrow R = 338 \text{ m}\Omega.$$

Στην πραγματικότητα όμως, η αντίσταση των χαλκοαγωγών της πλακέτας, καθώς και η αντίσταση των καλωδιώσεων από τη συστοιχία στη πλακέτα αυξάνουν τη συνολική τιμή της αντίστασης που βλέπει το κύκλωμα. Αυτό μας οδηγεί, στο να επιλέξουμε αντίσταση με τιμή μικρότερη των 338 mΩ. Με αναζήτηση στο εμπόριο για τις διαθέσιμες τιμές αντιστάσεων και με πρόχειρους προσεγγιστικούς υπολογισμούς των παρασιτικών αντιστάσεων καταλήξαμε στην επιλογή της τιμής των 300 mΩ. Στη συνέχεια, πρέπει να γίνει ορθή επιλογή στην ισχύ των αντιστάσεων. Το χειρότερο σενάριο λειτουργίας των αντιστάσεων, με βάση και το οποίο θα γίνει η επιλογή είναι η τάση άνω κατωφλίου, δηλαδή τα 2.42 Volt. Η κατανάλωση ισχύος είναι  $P = V \times I \Rightarrow P = 2.42 \times 7 \Rightarrow P = 16.94$  Watt. Καθοριστικό ρόλο παίζει το γεγονός ότι το δικτύωμα (και άρα και η αντίσταση) δε λειτουργεί συνεχώς αλλά μόνο

κατά την διαδικασία εκφόρτισης των πυκνωτών από τα 2.42 Volt στα 2.37 Volt. Λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός, ότι τα δικτυώματα θα λειτουργούν για μικρή σχετικά χρονική διάρκεια σε κάθε κύκλο φόρτισης της συστοιχίας (ή και καθόλου), η επιλογή αντιστάσεων ισχύος 15 Watt είναι αποδεκτή και ασφαλής.

Τα mosfet δρουν ως διακόπτες για τα δικτύωμα και δέχονται το κατάλληλο σήμα ελέγχου από τις αντίστοιχες εξόδους του arduino. Η απευθείας οδήγηση των πυλών των mosfet από το arduino δεν είναι εφικτή, καθώς το λογικό επίπεδο των εξόδων του είναι μόλις 5 Volt. Για την εξασφάλιση του κόρου στα mosfet, η τάση πύλης-πηγής πρέπει να είναι σημαντικά υψηλότερη από την  $V_{GS(threshold)}$ . Τα περισσότερα mosfet ισχύος έχουν  $V_{GS(threshold)}$  της τάξεως των 2-3 Volt. Το mosfet του δικτυώματος του 1<sup>ου</sup> πυκνωτή έχει την πηγή του συνδεδεμένη στη γείωση. Το γεγονός αυτό του επιτρέπει να οδηγηθεί απευθείας από το arduino, όμως, όπως θα επεξηγηθεί αργότερα, δεν επιλέχθηκε αυτή η μέθοδος. Μελετώντας τα υπόλοιπα mosfet (εικόνες 5.32 και 5.33), παρατηρούμε ότι οι πηγές τους δεν είναι συνδεδεμένες με τη γείωση αλλά με τον αρνητικό πόλο του πυκνωτή που το καθένα προστατεύει. Κατά τη φόρτιση της συστοιχίας, οι πυκνωτές έχουν άγνωστη τάση στα άκρα τους. Το χειρότερο σενάριο για κάθε πυκνωτή, πλην του πρώτου, είναι τη στιγμή που θα τεθεί σε λειτουργία το δικτύωμά του, οι υπόλοιποι πυκνωτές, που βρίσκονται σε χαμηλότερο επίπεδο (προς τη γείωση), να βρίσκονται ήδη σε κατάσταση διατήρησης και να έχουν δηλαδή στα άκρα τους την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση των 2.42 Volt. Υπολογισμοί:

Χειρότερο σενάριο για τον 2<sup>ο</sup> πυκνωτή: Ο 1<sup>ος</sup> πυκνωτής να είναι πλήρως φορτισμένος στα 2.42 Volt και άρα η τάση πηγής του 2<sup>ου</sup> να είναι ίση με 2.42 Volt. Σε αυτήν την περίπτωση, η ελάχιστη τάση πύλης για το κατώφλι αγωγιμότητας είναι:

$$V_{GS(threshold)} + 2.42 = 4.42 - 5.42 \text{ Volt.}$$

Χειρότερο σενάριο για τον 3<sup>ο</sup> πυκνωτή: Ο 1<sup>ος</sup> και ο 2<sup>ος</sup> πυκνωτής να είναι πλήρως φορτισμένοι στα 2.42 Volt έκαστος και άρα η τάση πηγής του 3<sup>ου</sup> να είναι ίση με 4.84 Volt. Σε αυτή την περίπτωση η ελάχιστη τάση πύλης για το κατώφλι αγωγιμότητας είναι  $V_{GS(threshold)} + 4.84 = 6.84 - 7.84 \text{ Volt.}$

Χειρότερο σενάριο για τον 4<sup>ο</sup> πυκνωτή: Ο 1<sup>ος</sup>, ο 2<sup>ος</sup> και ο 3<sup>ος</sup> πυκνωτής να είναι πλήρως φορτισμένοι στα 2.42 Volt έκαστος και άρα η τάση πηγής του 4<sup>ου</sup> να είναι ίση με 7.26 Volt. Σε αυτήν την περίπτωση, η ελάχιστη τάση πύλης για το κατώφλι αγωγιμότητας είναι  $V_{GS(threshold)} + 7.26 = 9.26 - 10.26 \text{ Volt.}$

Χειρότερο σενάριο για τον 5<sup>ο</sup> πυκνωτή: Ο 1<sup>ος</sup>, ο 2<sup>ος</sup>, ο 3<sup>ος</sup> και ο 4<sup>ος</sup> πυκνωτής να είναι πλήρως φορτισμένοι στα 2.42 Volt έκαστος και άρα η τάση πηγής του 5<sup>ου</sup> να είναι ίση με 9.68 Volt. Σε αυτήν την περίπτωση, η ελάχιστη τάση πύλης για το κατώφλι αγωγιμότητας είναι  $V_{GS(threshold)} + 9.6 = 11.68 - 12.68 \text{ Volt.}$

Χειρότερο σενάριο για τον 6<sup>ο</sup> πυκνωτή: Ο 1<sup>ος</sup>, ο 2<sup>ος</sup>, ο 3<sup>ος</sup>, ο 4<sup>ος</sup> και ο 5<sup>ος</sup> πυκνωτής να είναι πλήρως φορτισμένοι στα 2.42 Volt έκαστος και άρα η τάση πηγής του 6<sup>ου</sup> να είναι ίση με 12.1 Volt. Σε αυτήν την περίπτωση, η ελάχιστη τάση πύλης για το κατώφλι αγωγιμότητας είναι  $V_{GS(threshold)} + 12.1 = 14.1 - 15.1 \text{ Volt.}$

Οι τάσεις, που προκύπτουν από τους παραπάνω υπολογισμούς είναι οριακές για τη λειτουργία των mosfet. Για την επίτευξη «σκληρού» κόρου και άρα χαμηλής  $R_{DS(on)}$  απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερη τάση πύλης-πηγής, συνήθως από 4 Volt και πάνω. Τα 5 Volt των εξόδων του arduino είναι προφανές πως δεν επαρκούν για την οδήγηση των mosfet. Παράλληλα, το mosfet του 5<sup>ου</sup> πυκνωτή απαιτεί τάση πύλης που οριακά αγγίζει το επίπεδο τάσης του εναλλάκτη (14.22 Volt), ενώ το mosfet του 6<sup>ου</sup> πυκνωτή απαιτεί τάση πηγής που ξεπερνά την τάση του εναλλάκτη. Για τον ορθό έλεγχο των mosfet

του 5<sup>ου</sup> και 6<sup>ου</sup> πυκνωτή, χρησιμοποιήθηκαν p-channel mosfet αντί n-channel, απαλλάσσοντας από την ανάγκη ύπαρξης υψηλότερων τάσεων από αυτήν του ανορθωτή.

Για την οδήγηση των n-channel mosfet των πυκνωτών 2,3 και 4, επιλέχθηκε η τάση του εναλλάκτη (14.22 Volt), ενώ το ίδιο ισχύει και για το mosfet του 1<sup>ου</sup> πυκνωτή, αφού αν και αρκούν τα 5 Volt για επίτευξη κόρου, η υψηλότερη τάση  $V_{GS}$  θα μειώσει σημαντικά την  $R_{DS(on)}$ . Για την ορθή αξιοποίηση των εξόδων του arduino, έγινε χρήση του ολοκληρωμένου ULN2003A (IC1). Το ULN2003 είναι ένα ολοκληρωμένο, το οποίο περιέχει 7 ανεξάρτητα διπολικά darlington τρανζίστορ με ενσωματωμένες διόδους προστασίας και έτοιμα δικτυώματα πόλωσης για έλεγχο με σήματα 5 Volt. Τα τρανζίστορ έχουν μία κοινή επαφή, που είναι οι εκπομποί τους. Οι εκπομποί (επαφή GROUND) συνδέθηκαν στη γείωση και οι βάσεις (επαφές Π1 έως Π4) κάθε μία στην ανάλογη έξοδο του arduino. Οι συλλέκτες των τρανζίστορ (επαφές Ο1 έως Ο4) συνδέθηκαν στις πύλες των mosfet των 4 πρώτων πυκνωτών. Για τον ορθό έλεγχο των mosfet, η κάθε πύλη συνδέεται με τη γείωση με ένα παράλληλο συνδυασμό αντίστασης 100 KΩ και μιας διόδου zener 12 Volt και με την τάση του ανορθωτή μέσω μιας αντίστασης 10 KΩ. Όταν το δικτύωμα πρέπει να είναι απενεργοποιημένο (τάση του πυκνωτή κάτω από 2.42 Volt), η υπεύθυνη για αυτό έξοδος του arduino μεταβαίνει σε λογικό 1 (5 Volt) και οδηγεί το αντίστοιχο darlington σε κόρο. Σε αυτήν την κατάσταση, ο συλλέκτης του darlington και άρα και η πύλη του mosfet έχουν τάση περίπου 0.65 Volt ( $V_{CE(sat)}$ ). Ανάλογα τη θέση του δικτυώματος και την κατάσταση φόρτισης των πυκνωτών της συστοιχίας, η τάση πηγής του ελεγχόμενου mosfet θα κυμαίνεται από 0 έως 7.2 Volt. Αντίστοιχα, η τάση πύλης-πηγής θα κυμαίνεται από -6.55 έως 0.65 Volt. Η διακύμανση αυτή της τάσης, από σχεδόν μηδενική έως αρκετά αρνητική, εξασφαλίζει την επιθυμητή αποκοπή του mosfet. Στην αντίθετη περίπτωση, που το δικτύωμα πρέπει να ενεργοποιηθεί (για την εκφόρτιση του πυκνωτή), η αντίστοιχη έξοδος του arduino θα μεταβεί σε λογικό 0 (0 Volt) και οδηγεί το αντίστοιχο darlington σε αποκοπή. Σε αυτήν την κατάσταση, το μονοπάτι συλλέκτη εκπομπού εμφανίζει πολύ μεγάλη αντίσταση (πρακτικά άπειρη) και το τρανζίστορ δεν επηρεάζει το κύκλωμα. Η τάση στην πύλη του mosfet καθορίζεται αποκλειστικά από τον διαιρέτη τάσης των αντιστάσεων 10KΩ/100KΩ. Η τιμή της θα είναι:

$$V_{gate} = V_{rectifier} \times \frac{100K\Omega}{110K\Omega} = \frac{143}{11} = 13 \text{ Volt.}$$

Ανάλογα τη θέση του δικτυώματος και την κατάσταση φόρτισης των πυκνωτών της συστοιχίας, η τάση πηγής του ελεγχόμενου mosfet θα κυμαίνεται από 0 έως 7.2 Volt. Αντίστοιχα, η τάση πύλης-πηγής θα κυμαίνεται από 5.8 έως 13 Volt. Η διακύμανση αυτή της τάσης παραμένει αισθητά υψηλότερη από την  $V_{GS(threshold)}$  ενός μέσου mosfet και εξασφαλίζει την επιθυμητή κατάσταση κόρου.

Για την οδήγηση των p-channel mosfet των πυκνωτών 5 και 6, δε χρησιμοποιείται η τάση του ανορθωτή. Σε αντίθεση με τα n-channel mosfet, οι πηγές των συγκεκριμένων mosfet είναι συνδεδεμένες με τους θετικούς πόλους των αντίστοιχων πυκνωτών. Στα συγκεκριμένα mosfet, δε χρησιμοποιήθηκε το ULN2003A ως ενδιάμεσος αλλά τα n-channel mosfet χαμηλής ισχύος 2N7000. Οι εξοδοί του arduino συνδέονται με τις πύλες των 2N7000 (Q3, Q11) με τη χρήση ενός διαιρέτη τάσης 10KΩ/100KΩ. Η αντίσταση 10KΩ περιορίζει το ρεύμα αιχμής της πύλης και η αντίσταση 100KΩ αναλαμβάνει να γειώνει την πύλη όταν το arduino είναι απενεργοποιημένο (pull down αντίσταση). Οι πηγές των 2N7000 είναι γειωμένες και οι απαγωγοί τους συνδέονται ο καθένας στη πύλη του p-mosfet που ελέγχουν μέσω μιας αντίστασης 1KΩ, για περιορισμό του ρεύματος αιχμής της πύλης. Για την ολοκλήρωση των δικτυωμάτων των p-mosfet, μεταξύ των πυλών και των πηγών τους, τοποθετήθηκαν μια αντίσταση 100KΩ και μια διάδος zener 12 Volt. Όταν το δικτύωμα πρέπει να ενεργοποιηθεί, η υπεύθυνη έξοδος του arduino μεταβαίνει σε λογικό 1 (5 Volt) και οδηγεί το αντίστοιχο 2N7000 σε κόρο. Σε αυτήν την κατάσταση, το 2N7000 δρα σαν ωμική αντίσταση λίγων

Ωμ προς τη γείωση και προκαλεί την παρουσία πολύ χαμηλής τάσης στην πύλη (σχεδόν τη γειώνει). Η πηγή του mosfet έχει θετική τάση ίση με την αθροισμένη τάση των υπερπυκνωτών από τη γείωση έως τον υπερπυκνωτή που προστατεύει. Η προσεγγιστικά μηδενική τάση πύλης σε συνδυασμό με το παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα η τάση πύλης – πηγής να είναι αρκετά Volt αρνητική, και έτσι να οδηγείται σε κόρο το mosfet και να εκφορτίζεται ο πυκνωτής.

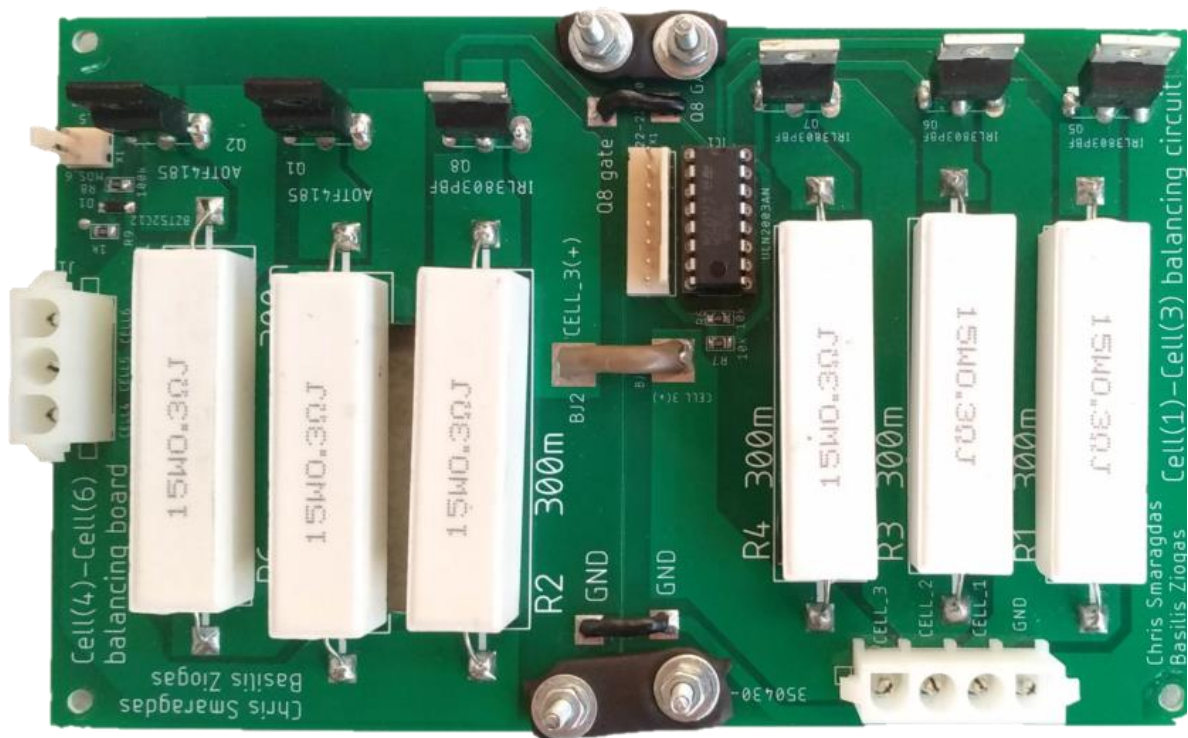
Όταν το δικτύωμα πρέπει να είναι απενεργοποιημένο, η υπεύθυνη έξοδος του arduino μεταβαίνει σε λογικό 0 (0 Volt) και οδηγεί το αντίστοιχο 2N7000 σε αποκοπή. Σε αυτήν την κατάσταση, το 2N7000 δεν επηρεάζει το p-mosfet, αφού δρα σαν μία αντίσταση πολύ μεγάλης τιμής (πρακτικά άπειρης) και μπορεί να θεωρηθεί από το κύκλωμα. Η παρασιτική χωρητικότητα πύλης - πηγής εκφορτίζεται μέσω της παράλληλης αντίστασης 100 KΩ και έτσι η τάση πύλης-πηγής εκμηδενίζεται, οδηγώντας σε αποκοπή το mosfet.

Οι δίοδοι zener 12 Volt με κωδικό BZT52C12 που έχουν συνδεθεί παράλληλα με τις αντιστάσεις των 100KΩ και των 6 mosfet ισχύος, επιτελούν προστατευτικό ρόλο. Τα περισσότερα mosfet του εμπορίου μπορούν να δεχτούν μέγιστη τάση πύλης-πηγής από 16 έως 20 Volt χωρίς να καταστραφούν. Στην περίπτωση μας, βλέπουμε πως η μέγιστη τάση πύλης-πηγής που εφαρμόζεται είναι 13 Volt, για τα mosfet των πυκνωτών 1 έως 4, που είναι χαμηλότερη από τα προαναφερθέντα όρια. Το γεγονός ότι η τάση του ανορθωτή δε διακρίνεται από καλή σταθερότητα (μεγάλη κυμάτωση), ενώ «υποφέρει» και από συχνές μικρές αιχμές, μπορεί κατά στιγμές να αυξήσει επικίνδυνα την τάση πύλης-πηγής. Για την προστασία, λοιπόν, των mosfet κρίθηκε απαραίτητη η χρήση των δίοδων zener, οι οποίες μανδαλώνουν την τάση της πύλης στα 12 Volt, ανεξαρτήτου της τάσης του ανορθωτή.

Όταν ο κινητήρας είναι σβηστός και το αυτοκίνητο δε λειτουργεί, ο μικροελεγκτής arduino είναι επίσης απενεργοποιημένος και οι πυκνωτές πρέπει να διατηρούν το φορτίο τους για μελλοντική χρήση. Στην κατάσταση αυτή, οι βάσεις των darlington δε διαρρέονται από ρεύμα και άρα βρίσκονται σε αποκοπή. Όπως έγινε αναφορά και νωρίτερα, η αποκοπή των darlington οδηγεί σε ενεργοποίηση των n-channel mosfet. Παρατηρούμε δηλαδή, ότι, όταν θα απενεργοποιήσουμε πλήρως το σύστημα, τα mosfet θα ξεκινήσουν να άγουν, προκαλώντας μετά από ορισμένο χρόνο την πλήρη αποφόρτιση των πυκνωτών. Για την επίλυση αυτού του ζωτικού προβλήματος, η παροχή της τάσης του ανορθωτή (κοννέκτορας X1 επαφή 8) στην πλακέτα γίνεται από τον απαγωγό του κεντρικού p-channel mosfet, που είναι υπεύθυνο για την παροχή και διακοπή ισχύος στην πλακέτα του arduino και βρίσκεται σε αυτήν. Η απενεργοποίηση του συστήματος σημαίνει και απουσία τάσης στον απαγωγό του p-channel mosfet και άρα απουσία της τάσης του ανορθωτή στα δικτυώματα. Τέλος, για την εξασφάλιση απόλυτης αποκοπής στα mosfet, έγινε η τοποθέτηση των 100KΩ αντιστάσεων. Σκοπός είναι η παροχή ενός μονοπατιού ολικής εκφόρτισης των πυλών των mosfet και η αποφυγή να παραμείνουν στον αέρα (floating), που θα οδηγούσε σε αβεβαιότητα για την αγωγιμότητα.

### 5.4.3 PCB

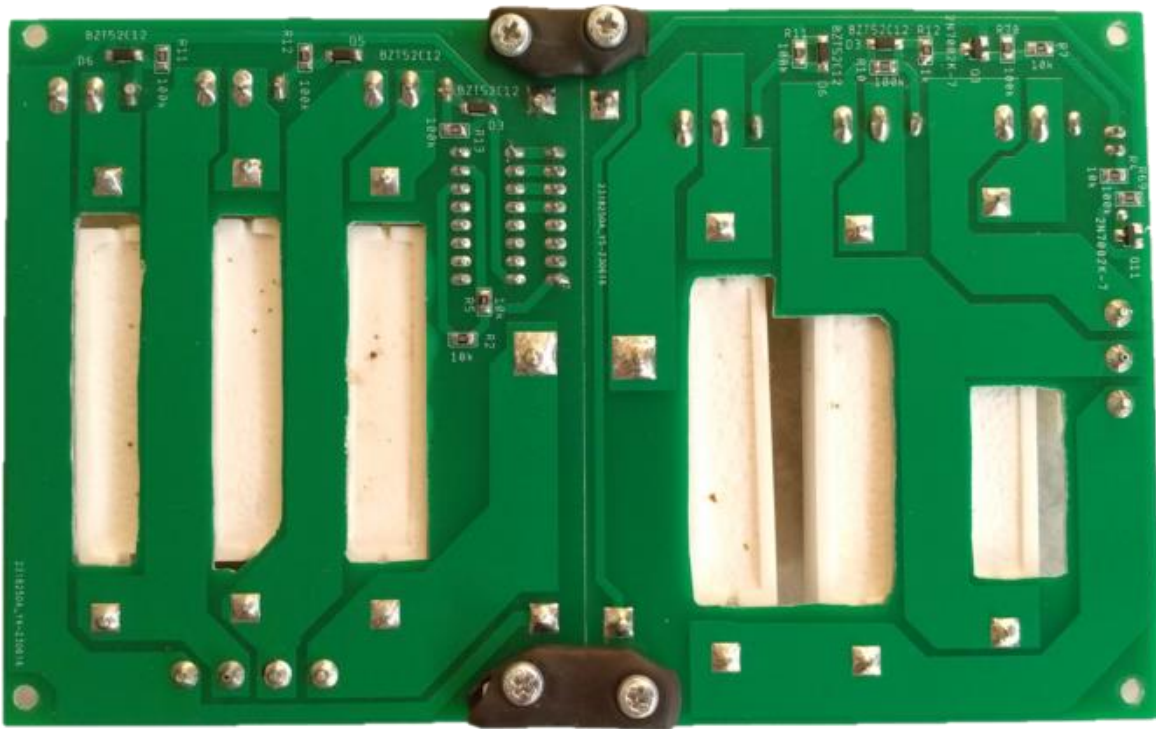
Στην εικόνα 5.34, βλέπουμε την άνω όψη της πλακέτας, η οποία αποτελείται από τις δύο επιμέρους πλακέτες, όπως έγινε αναφορά νωρίτερα. Στο μέσο του άνω και κάτω μέρους της πλακέτας, διακρίνονται τα μονωμένα (μαύρα) λαμάκια μαζί με τις βίδες, που χρησιμοποιήθηκαν για την μηχανική ένωση των δύο πλακετών. Επίσης, τα 3 καλώδια που εκτείνονται στο μέσο της πλακέτας, φροντίζουν για τις απαραίτητες ηλεκτρικές συνδέσεις. Τα mosfet ισχύος έχουν τοποθετηθεί κατά σειρά, με το τέρμα δεξιά να είναι του 1<sup>ου</sup> πυκνωτή (προς τη γείωση) και το τέρμα αριστερό να είναι του 6<sup>ου</sup> πυκνωτή. Οι αντιστάσεις ισχύος έχουν και αυτές τοποθετηθεί με σειρά αντίστοιχη με αυτή των mosfet. Το ολοκληρωμένο 16 επαφών που βρίσκεται δίπλα στην τρίτη αντίσταση είναι το ULN2003A, το οποίο είναι υπεύθυνο για την «οδήγηση» των 4 n-channel mosfet. Ακριβώς δίπλα στο



Εικόνα 5.34 : Άνω όψη ενιαίας πλακέτας προστασίας και εξισορρόπησης

ολοκληρωμένο, υπάρχει ένας αρσενικός κοννέκτορας 8 επαφών, μέσω του οποίου καταφτάνουν στις βάσεις των darlington του ULN2003A τα σήματα ελέγχου του arduino μέσω καλωδιοταινίας. Αριστερά στην εικόνα, βρίσκεται και ο αρσενικός κοννέκτορας 2 επαφών, στον οποίο καταφτάνουν τα σήματα ελέγχου για τα δύο 2n7000, που είναι υπεύθυνα για την «οδήγηση» των p-channel mosfet. Οι δύο μεγάλοι λευκοί κοννέκτορες εκ των οποίων ο ένας είναι 4 επαφών και ο άλλος 3 επαφών, συνδέονται απευθείας με όλους τους πόλους των πυκνωτών της συστοιχίας με καλώδιο 2.5 mm<sup>2</sup> και διαρρέονται με το ρεύμα διατήρησης, όταν πραγματοποιείται η διαδικασία της εξισορρόπησης. Τέλος, εύκολα διακρίνονται στην εικόνα οι χαλκοαγωγοί που συμμετέχουν ενεργά στα δικτυώματα εξισορρόπησης, δηλαδή μεταξύ αντιστάσεων, mosfet και κοννεκτόρων. Το πλάτος επιλέχθηκε να είναι το κατά το δυνατόν μεγαλύτερο, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ελάχιστη δυνατή αντίσταση τους αλλά και για να δρουν βοηθητικά στην απαγωγή θερμότητας από την πλακέτα.

Στην εικόνα 5.35, βλέπουμε την κάτω όψη της ενιαίας πλακέτας. Τα μοναδικά εξαρτήματα που υπάρχουν στην κάτω όψη είναι smd και αποτελούν αντιστάσεις, διόδους και τρανζίστορ, όλα εκ των οποίων έχουν βοηθητικό ρόλο στην οδήγηση των mosfet ισχύος. Τα στοιχεία ισχύος που βρίσκονται στην άνω όψη, συνδέονται με χαλκοαγωγούς και στην κάτω όψη, όπως φαίνεται στην εικόνα. Αυτό έγινε για να μειωθεί περαιτέρω η συνολική αντίσταση των χαλκοαγωγών και για μεγαλύτερη θερμική απαγωγή. Τέλος, το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας της πλακέτας, που βρίσκεται κάτω από τις αντιστάσεις, έχει αφαιρεθεί με κοπτικό εργαλείο (dremel), όπως φαίνεται και στην εικόνα. Η συγκεκριμένη «μετατροπή» επιτρέπει σε ένα σημαντικό ποσοστό της παραγόμενης θερμότητας των αντιστάσεων να διαφεύγει στον περιβάλλοντα χώρο της πλακέτας και να μην εγκλωβίζεται κάτω από αυτές, προκαλώντας επικίνδυνη αύξηση θερμοκρασίας.



Εικόνα 5.35 : Κάτω όψη ενιαίας πλακέτας προστασίας και εξισορρόπησης

Στην εικόνα 5.36, βλέπουμε την πλακέτα στην τελική της μορφή με τοποθετημένες κατάλληλες ψήκτρες. Η πλακέτα δοκιμάστηκε εργαστηριακά στο χειρότερο πιθανό σενάριο, που είναι η συνεχής και ταυτόχρονη λειτουργία και των 6 δικτυωμάτων εξισορρόπησης. Στα πρώτα 2 με 3 λεπτά, οι θερμοκρασίες των αντιστάσεων, των mosfet και των χαλκοαγωγών ήταν σε φυσιολογικά επίπεδα. Πέρα από το χρονικό διάστημα αυτό, οι αντιστάσεις άρχισαν να αυξάνουν σημαντικά τη θερμοκρασία τους, σε σημείο, που ήταν αδύνατο να αγγιχτούν με γυμνό χέρι και πέρα από ένα σημείο παρήγαγαν μια δυσάρεστη οσμή, που παρέπεμπε σε καμένο. Το πρόβλημα με την αύξηση της θερμοκρασίας, στη συνέχεια, επεκτάθηκε τόσο στα mosfet όσο και στους χαλκοαγωγούς. Η θερμότητα των αντιστάσεων μεταφέρθηκε, μέσω των ακροδεκτών τους, στους χαλκοαγωγούς και κατά συνέπεια, μέσω αυτών, στα mosfet. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, να αυξηθεί ανησυχητικά η θερμοκρασία των αγωγών αλλά και των mosfet, τη στιγμή που οι θερμικές απώλειες τους, λόγω  $R_{DS(on)}$ , δεν είναι επαρκείς για να προκαλέσουν κάποια αντιληπτή αύξηση θερμοκρασίας. Πέρα από κάποιο χρονικό διάστημα λειτουργίας, η θερμοκρασία στην κεραμική επιφάνεια των αντιστάσεων μετρήθηκε λίγο πάνω από τους 92 °C. Η συνέχιση της λειτουργίας του κυκλώματος σε αυτές τις συνθήκες θα είχε ως άμεσο αντίκτυπο την περαιτέρω αύξηση θερμοκρασίας. Με τη μεταφορά της θερμότητας να γίνεται πολύ γρήγορα και στα υπόλοιπα στοιχεία, θα δημιουργούνταν σύντομα ο κίνδυνος καταστροφής των mosfet και ίσως αποκόλλησης των χαλκοαγωγών από το υλικό βάσης της πλακέτας. Για την επίλυση σε ένα βαθμό του προβλήματος, τοποθετήθηκαν ψήκτρες αλουμινίου στις αντιστάσεις και στα mosfet. Για την κατασκευή των ψηκτρών, χρησιμοποιήθηκαν μεγάλες ψήκτρες αλουμινίου από μη λειτουργικές ηλεκτρονικές συσκευές. Αφού μετρήθηκαν οι επιθυμητές διαστάσεις, έγινε κοπή των μεγάλων ψηκτρών σε μικρότερες. Η μηχανική στερέωση των ψηκτρών στις αντιστάσεις έγινε με τη χρήση θερμοαγώγιμης κόλλας (thermal glue). Στις ψήκτρες των mosfet έγιναν οι κατάλληλες τρύπες και στη συνέχεια η διάνοιξη μετρικού σπειρώματος 3 χιλιοστών. Τέλος,

στηρίχθηκαν στα mosfet, μέσω της προϋπάρχουσας οπής, που διαθέτουν, με βίδα πάχους 3 χιλιοστών μαζί με την προσθήκη θερμοαγωγίμης πάστας (thermal paste). Έπειτα από δοκιμές λειτουργίας της πλακέτας με τις ψήκτρες, η θερμοκρασία διατηρήθηκε σε σημαντικά χαμηλότερο επίπεδο. Κάτι τέτοιο, καθιστά τη λειτουργία του κυκλώματος πιο ασφαλή και σίγουρη, ειδικά στο χώρο του κινητήρα, όπου οι θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλότερες από τις αντίστοιχες ενός ελεγχόμενου εσωτερικού χώρου.



Εικόνα 5.36: Πλακέτα προστασίας και εξισορρόπησης με ψήκτρες

### 5.5 Πλακέτα οθόνης

Η συσκευή της παρούσας διπλωματικής δε θα μπορούσε να είναι ολοκληρωμένη και πλήρως λειτουργική χωρίς την ύπαρξη μιας οθόνης. Η ύπαρξη πολλαπλών τάσεων (τάση συμβατικής μπαταρίας 12 Volt, τάση της συστοιχίας των υπερπυκνωτών, καθώς και των μεμονωμένων στοιχείων) δημιούργησε την ανάγκη για γρήγορη και αποδοτική παρακολούθηση αυτών. Εκτός των προαναφερθέντων τάσεων, περαιτέρω δεδομένα όπως η ένδειξη πιθανών σφαλμάτων, το ρεύμα φόρτισης της συστοιχίας αλλά και η κατάσταση φόρτισης του εκάστοτε υπερπυκνωτή (φόρτιση, αποφόρτιση εξισορρόπησης και διακοπή φόρτισης λόγω πληρότητας) βοηθούν τόσο στην ομαλότερη υλοποίηση της κατασκευής, ενώ παράλληλα καθιστούν τη συσκευή πιο φιλική προς τον μελλοντικό χρήστη (user-friendly).

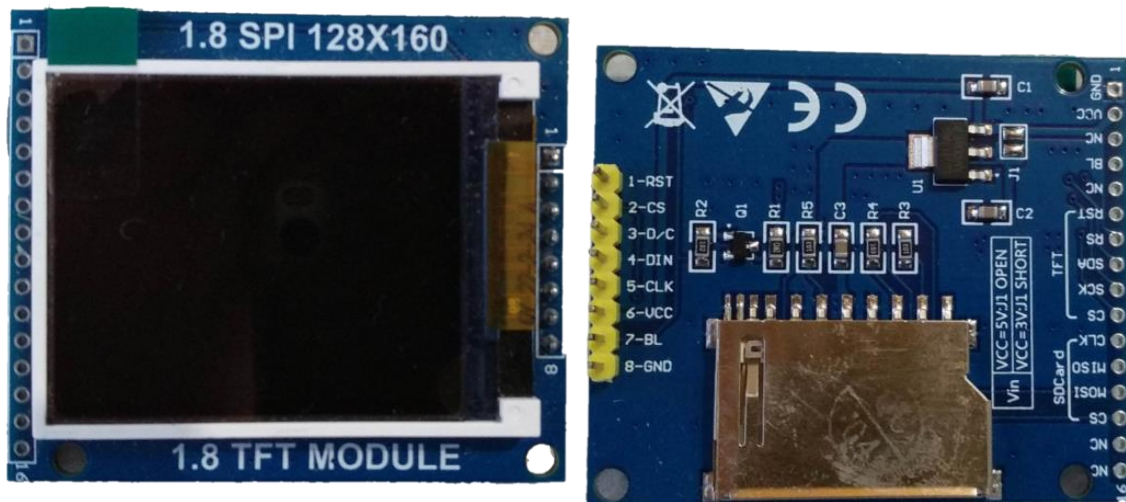
#### 5.5.1 Τύποι οθόνης

Οι προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω επιβάλλουν την χρήση οθόνης με δυνατότητα προβολής αλφαριθμητικών χαρακτήρων και κάποιων βασικών γραφικών χαμηλού επιπέδου. Οι συνήθεις τύποι οθόνης που καλύπτουν τις προϋποθέσεις αυτές είναι δύο ειδών.

Πρώτον, οι οθόνες αλφαριθμητικών χαρακτήρων (lcd alphanumerical displays). Οι οθόνες αυτές προβάλλουν σε προκαθορισμένο από την κατασκευή τους μέγεθος τους βασικούς αλφαριθμητικούς χαρακτήρες αλλά και ειδικούς (custom) με τον κατάλληλο προγραμματισμό της μνήμης τους. Ως βασικό χαρακτηριστικό έχουν τον αριθμό γραμμών και στηλών, το γινόμενο των οποίων αποτελεί και το μέγιστο αριθμό χαρακτήρων που η οθόνη μπορεί να προβάλλει στην επιφάνειά της. Συνήθη μεγέθη αποτελούν οι συνδυασμοί  $2 \times 16$ ,  $4 \times 16$ ,  $2 \times 20$ ,  $4 \times 20$  κ.α. Στην περίπτωση της συσκευής μας η πληθώρα των δεδομένων προς προβολή απαιτούσε την χρήση οθόνης  $4 \times 20$  χαρακτήρων. Οι οθόνες με τον συγκεκριμένο συνδυασμό χαρακτήρων έχουν σημαντικά μεγάλο μέγεθος, μη δελεαστική τιμή, ενώ δεν είναι και ιδιαίτερα εμπορικές, με την εύρεση μιας τέτοιας να μην είναι εύκολη. Λόγω των εμποδίων αυτών, αφέθηκε η ιδέα χρήσης οθόνης τέτοιου τύπου.

Δεύτερον, οι οθόνες tft lcd προβολής γραφικών (graphical tft lcd display). Οι οθόνες αυτού του τύπου υπάρχουν στο εμπόριο σε διάφορους συνδυασμούς μεγέθους και ανάλυσης εικόνας. Έχουν τη δυνατότητα προβολής αλφαριθμητικών χαρακτήρων, ειδικών χαρακτήρων, καθώς και οποιουδήποτε επιθυμητού γραφικού, αφού ο έλεγχός τους μπορεί να γίνει ακόμα και ανά μεμονωμένο εικονοστοιχείο (pixel by pixel). Κάποιες από τις δυνατότητες όπως η προβολή 256000 χρωμάτων και η περιστροφή της προβαλλόμενης εικόνας κατά ανάγκη, σε συνδυασμό με την χαμηλή τιμή αποτέλεσαν καθοριστικούς παράγοντες στην επιλογή αυτού του τύπου οθόνης για την συσκευή μας.

### 5.5.2 Οθόνη lcd tft HR0117



Εικόνα 5.37: Οθόνη lcd tft “HR0117”

Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η οθόνη με κωδική ονομασία HR0117, η οποία φαίνεται στην εικόνα 5.37. Οι διαστάσεις της (του pcb) είναι  $45\text{mm} \times 55\text{mm}$ , η διαγώνιάς της είναι 1.8 ίντσες και έχει ανάλυση  $128 \times 160$  εικονοστοιχεία. Διαθέτει τη δυνατότητα επιλογής τάσης τροφοδοσίας 5v ή 3.3 Volt μέσω ενός ενσωματωμένου βραχυκυκλωτήρα στο pcb (J1) . Εάν επιλεγεί η τροφοδοσία των 5 Volt, αυτή στη συνέχεια υποβιβάζεται στα 3.3 Volt μέσω του ενσωματωμένου γραμμικού ρυθμιστή τάσης που διαθέτει (ολοκληρωμένο U1 στην εικόνα 2.1). Αν πάλι επιλεγεί η τροφοδοσία των 3.3v, τότε αυτή εφαρμόζεται απευθείας στην πλακέτα. Η μεταφορά δεδομένων πραγματοποιείται με πρωτόκολλο SPI 5 γραμμών λογικού επιπέδου 3.3volt. Το pcb διαθέτει τρύπες 3mm σε κάθε γωνία, χρήσιμες για την στήριξη της οθόνης στην βοηθητική πλακέτα της που κατασκευάστηκε και θα

αναλυθεί παρακάτω. Διαθέτει προκολλημένη ακιδοσειρά 8 επαφών, η οποία εξυπηρετεί τις 5 επαφές του πρωτοκόλλου SPI (Chip Select, Reset, Serial Clock, Data/Command, Serial Data Input), καθώς επίσης τη γείωση, την τροφοδοσία των 5 (ή 3.3) Volt και την παροχή τροφοδοσίας για τις διόδους LED του οπίσθιου φωτισμού. Ο έλεγχός της πραγματοποιείται με το ολοκληρωμένο κύκλωμα ST7735, το οποίο βρίσκεται πάνω στο pcb της οθόνης. Τέλος, είναι πλήρως συμβατή με το arduino mega, ενώ υπάρχουν στο διαδίκτυο έτοιμες βιβλιοθήκες που καθιστούν σχετικά εύκολο τον προγραμματισμό της.

### 5.5.3 Ανάλυση κυκλώματος lcd οθόνης

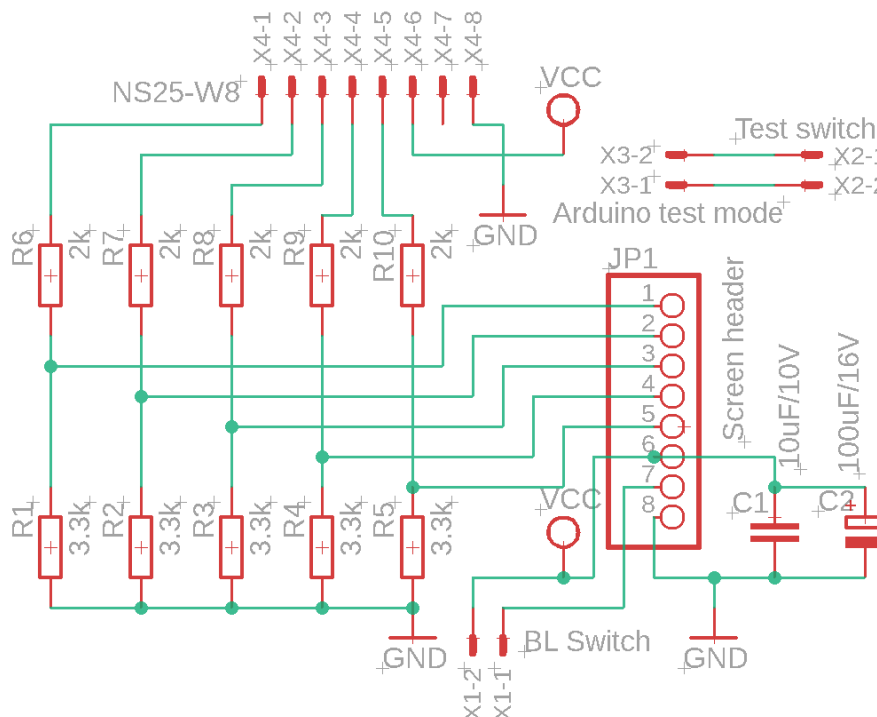
Όσον αφορά την επικοινωνία arduino-οθόνης, η απευθείας σύνδεση τους δεν είναι εφικτή. Το λογικό επίπεδο του arduino είναι στα 5 Volt, ενώ της οθόνης στα 3.3 Volt ανεξαρτήτου της τάσης τροφοδοσίας που επιλέχθηκε. Το πρόβλημα αυτό λύνεται εύκολα με την προσθήκη ενός διαιρέτη τάσης για κάθε μία από τις 5 επαφές ελέγχου (SPI) της οθόνης. Οι διαιρέτες τάσης αναλαμβάνουν το έργο να υποβιβάζουν τους παλμούς ελέγχου του arduino με πλάτος 5 Volt σε παλμούς πλάτους 3.3 Volt, τους οποίους αναγνωρίζει το ολοκληρωμένο κύκλωμα οδήγησης της οθόνης προβάλλοντας έτσι με ορθότητα τα επιθυμητά δεδομένα.

Η ορθή λειτουργία της οθόνης για την παρούσα κατασκευή απαιτεί, εκτός της μεταβολής των λογικών επιπέδων τάσης, την χρήση πυκνωτή για την τροφοδοσία της. Η σύνδεση της οθόνης με το arduino γίνεται με καλωδιοταινία μήκους 17 εκατοστών. Με το μέσο ρεύμα λειτουργίας με ενεργοποιημένο οπίσθιο φωτισμό να κυμαίνεται στα 60 mA καθίσταται σημαντική η χρήση πυκνωτή για την εξομάλυνση της τάσης τροφοδοσίας και την εξάλειψη υψίσυχνων θορύβων.

Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι η οθόνη έχει αποκλειστικά πληροφοριακό και όχι λειτουργικό χαρακτήρα. Η προβολή των διαφόρων δεδομένων (τάσεις, ρεύματα κ.α.) συμβάλλουν στον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του συστήματος, στην ανίχνευση πιθανού σφάλματος, καθώς και στον ορθό τελικό προγραμματισμό του arduino. Η συσκευή μπορεί να λειτουργήσει πλήρως και χωρίς την οθόνη. Η τοποθέτηση της κατασκευής σε κουτί το οποίο στη συνέχεια θα βρίσκεται στο χώρο της μπαταριοθήκης του αυτοκινήτου και θα αναλυθεί περαιτέρω σε επόμενο κεφάλαιο, καθιστά περιττή τη συνεχή λειτουργία της οθόνης αφού δε θα είναι ορατή από τον χρήστη του αυτοκινήτου. Το μέσο ρεύμα λειτουργίας (60 mA) αποτελεί σημαντικό φορτίο για τον ρυθμιστή τάσης LM7805 που τροφοδοτεί την οθόνη με 5 Volt, συμβάλλοντας στην θερμική καταπόνηση του ολοκληρωμένου. Λόγω των παραπάνω κρίνεται απαραίτητη η χρήση ενός μηχανικού διακόπτη «push to close» χαμηλής ισχύος. Ο διακόπτης δεν ελέγχει την τροφοδοσία όλης της οθόνης, αλλά την τροφοδοσία του οπίσθιου φωτισμού. Η επιλογή αυτή έγινε για δύο λόγους. Ο πρώτος και πιο κύριος είναι ότι στον προγραμματισμό του arduino δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη αλλά ούτε και αποδοτική η προσθήκη κώδικα που να αποτρέπει την αποστολή δεδομένων προς την οθόνη όταν αυτή δε θα λαμβάνει τροφοδοσία. Στην περίπτωση που ο διακόπτης διέκοπτε πλήρως την τροφοδοσία της οθόνης και το arduino έστελνε παλμούς ελέγχου θα μπορούσε ακόμα και να προκληθεί βλάβη στο κύκλωμα ελέγχου της οθόνης, λόγω μη τροφοδοσίας του. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι από μετρήσεις προέκυψε πως το 90% της κατανάλωσης ισχύος της οθόνης οφείλεται στον οπίσθιο φωτισμό και όχι στο υπόλοιπο κύκλωμα ελέγχου. Καταλήγουμε με αυτόν τον τρόπο στο συμπέρασμα ότι η διακόπτηση του οπίσθιου φωτισμού αντί της κεντρικής τροφοδοσίας της οθόνης είναι επαρκής για τον σκοπό της μείωσης της καταναλισκόμενης ισχύος και αποτελεί την αποδοτικότερη χρονικά μέθοδο.

Οι απαιτήσεις που συζητήθηκαν παραπάνω κατέστησαν υποχρεωτική τη χρήση μιας βοηθητικής πλακέτας, πάνω στην οποία θα συνδέεται το pcb της οθόνης με τη χρήση της ακιδοσειράς 8 επαφών.

Στην εικόνα 5.38, βλέπουμε το σχηματικό της πλακέτας σχεδιασμένο στο λογισμικό Eagle.



Εικόνα 5.38 : Σχηματικό βοηθητικής πλακέτας οθόνης

Η πλακέτα ελέγχου διαθέτει θηλυκή ακιδοσειρά 8 επαφών (JP1) στην οποία συνδέεται η αντίστοιχη αρσενική ακιδοσειρά της οθόνης. Ένας γωνιακός αρσενικός κοννέκτορας 8 επαφών με βήμα 2.54mm (X4) στο ένα άκρο της πλακέτας λαμβάνει μέσω της καλωδιοταινίας τροφοδοσία, γείωση και τα σήματα από τις 5 γραμμές ελέγχου του arduino μέσω του πρωτοκόλλου SPI. Η τροφοδοσία και η γείωση είναι άμεσα συνδεδεμένες με το ζευγάρι των ακιδοσειρών, ενώ μεταξύ των δύο υπάρχουν δύο πυκνωτές φίλτραρίσματος, ο C2 που είναι ηλεκτρολυτικός 16 Volt 100 uF και ο C1 που είναι smd κεραμικός 50 V 10 uF. Τα 5 σήματα ελέγχου συνδέονται το καθένα στην είσοδο ενός διαιρέτη τάσης με τιμές αντιστάσεων 3.3 KΩ και 2 KΩ. Οι έξοδοι των διαιρετών τάσης, με πλάτος παλμού υποβιβασμένο στα 3.1 Volt, που είναι συμβατό με τα 3.3 Volt, συνδέονται με τις αντίστοιχες επαφές της ακιδοσειράς JP1 και κατά συνέπεια και με τις 5 επαφές ελέγχου της οθόνης. Η επιλογή των τιμών των αντιστάσεων έγινε έπειτα από αναζήτηση στο διαδίκτυο. Οι τιμές 2 KΩ και 3.3 KΩ που επιλέχθηκαν είναι στο αποδεκτό εύρος τιμών και παράλληλα παράγουν το επιθυμητό πλάτος παλμού. Τέλος, στην πλακέτα ελέγχου υπάρχει και ένας γωνιακός αρσενικός κοννέκτορας 2 επαφών με βήμα 2.54mm (X1), στον οποίο συνδέεται μέσω ζεύγους καλωδίων ο διακόπτης του οπίσθιου φωτισμού. Η μία επαφή του κοννέκτορα είναι συνδεδεμένη με την τροφοδοσία της πλακέτας και η άλλη επαφή συνδέεται με την αντίστοιχη επαφή της ακιδοσειράς που είναι υπεύθυνη για τον οπίσθιο φωτισμό. Με αυτό τον τρόπο το πάτημα του διακόπτη ελέγχει το άναμμα και το σβήσιμο της οθόνης.

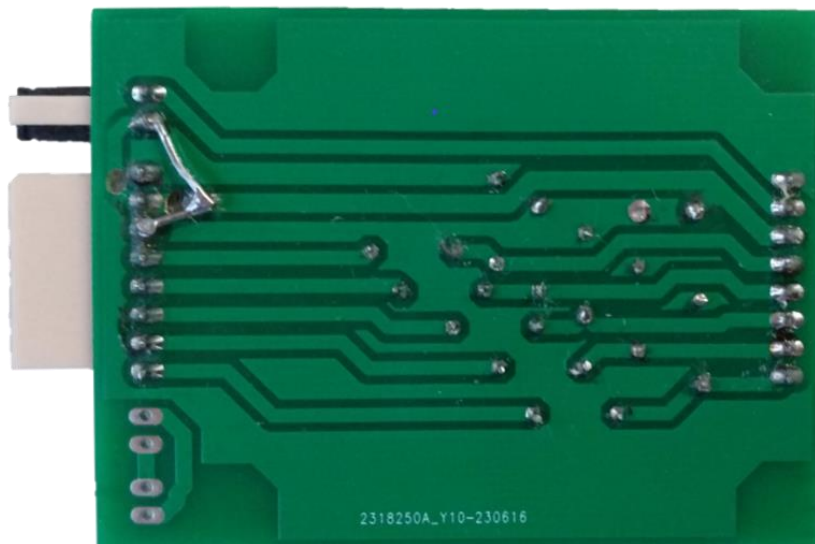
#### 5.5.4 PCB

Στην εικόνα 5.39 βλέπουμε την άνω όψη της βοηθητικής πλακέτας της οθόνης. Αριστερά διακρίνουμε την μαύρη ακιδοσειρά 8 επαφών στην οποία συνδέεται το pcb της οθόνης. Στο μέσο της πλακέτας βρίσκονται οι 10 through hole αντιστάσεις μεγέθους 0207 οι οποίες απαρτίζουν τους διαιρέτες τάσης.



Εικόνα 5.39 : Άνω όψη βοηθητικής πλακέτας οθόνης

Στο δεξιό τμήμα της πλακέτας βλέπουμε την ακιδοσειρά 2 επαφών στην οποία συνδέεται ο διακόπτης και πιο κάτω την ακιδοσειρά 8 επαφών στην οποία συνδέεται η καλωδιοταινία του arduino. Το περισσευόμενο κομμάτι της πλακέτας που δεν φιλοξενεί εξαρτήματα μετατράπηκε σε ground plane για την παροχή σταθερής γείωσης και την προστασία από θορύβους. Οι 4 λευκοί κύκλοι είναι τα σημεία της πλακέτας που δεν υπάρχει χαλκός, καθώς αυτά τρυπήθηκαν για να τοποθετηθούν βίδες.



Εικόνα 5.40 : Κάτω όψη βοηθητικής πλακέτας οθόνης

Στην εικόνα 5.40 βλέπουμε την κάτω όψη της πλακέτας. Η αρκετά μικρή ποσότητα εξαρτημάτων δεν έκρινε απαραίτητη την τοποθέτηση κάποιων εξ' αυτών στην κάτω όψη. Για τον λόγο αυτό, η κάτω όψη χρησιμοποιήθηκε μόνο για τους χαλκοαγωγούς που ενώνουν τα διάφορα εξαρτήματα μεταξύ τους, ενώ η επιφάνεια που περίσσευε μετατράπηκε, όπως και στην άνω όψη, σε ground plane.



Εικόνα 5.41 : Τελική μορφή οθόνης μαζί με την βοηθητική πλακέτα και την καλωδιοταινία

Στην εικόνα 5.41 βλέπουμε την ολοκληρωμένη μορφή της οθόνης μαζί με την πλακέτα της. Στα δεξιά της εικόνας διακρίνονται οι δύο βίδες με τις οποίες το pcb της οθόνης στηρίζεται μηχανικά στην βοηθητική πλακέτα με τη βοήθεια μεταλλικών αποστατών. Οι δύο εναπομένουσες τρύπες της πλακέτας, οι οποίες δεν φαίνονται στην εικόνα, χρησιμοποιούνται για την στήριξη του συνόλου στο κουτί της κατασκευής.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> : Κατασκευή



Εικόνα 6.1 : Συστοιχία υπερπυκνωτών με τις απαραίτητες καλωδιώσεις

Για τη δόμηση της συστοιχίας, οι υπερπυκνωτές τοποθετήθηκαν σε διάταξη  $2 \times 3$ . Για τη μηχανική και ηλεκτρική τους σύνδεση, χρησιμοποιήσαμε λάμα ηλεκτρολογικού χαλκού διατομής  $3\text{mm} \times 30\text{mm}$  και μήκους ενός μέτρου. Από τη λάμα κόψαμε 5 μικρότερα κομμάτια των 9 cm, στα οποία ανοίξαμε τρύπες 12mm και 14mm στα άκρα τους. Επιπλέον, σε κάθε κομμάτι λάμας, κολλήσαμε με κολλητήρι ορειχάλκινα μπουλόνια 4mm, για την στερέωση των απαραίτητων καλωδίων με χρήση δαχτυλιδωτών ακροδεκτών. Η στερέωση των λαμών στους ακροδέκτες των πυκνωτών έγινε με inox παξιμάδια και ροδέλες. Τέλος, για μεγαλύτερη μηχανική σταθερότητα της συστοιχίας, τοποθετήθηκε κόλλα πολυουρεθάνης στις επιφάνειες επαφής των υπερπυκνωτών.

Το τελικό στάδιο στην υλοποίηση της συσκευής είναι η κατασκευή του κουτιού που θα τοποθετηθούν η συστοιχία των υπερπυκνωτών, η μπαταρία, οι πλακέτες, τα ρελέ, η οθόνη, καθώς και όλη η απαραίτητη καλωδίωση. Αφού αφαιρέθηκε η μπαταρία, η οποία έχει αρκετό περιθώριο από την μπαταριοθήκη, μετρήθηκε αρκετές φορές ο διαθέσιμος χώρος που απομένει. Ο καθορισμός του μέγιστου δυνατού όγκου του κουτιού έχει και την προϋπόθεση να είναι εφικτή η τοποθέτησή του χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία. Μετά το πέρας των μετρήσεων και τις δοκιμές με χάρτινη μακέτα του κουτιού, καταλήξαμε στις εξής διαστάσεις:

Μήκος : 28.5 εκατοστά Πλάτος : 18.5 εκατοστά Ύψος : 20.2 εκατοστά.

Αφού λήφθηκε η απόφαση για τις διαστάσεις, σειρά έχει η επιλογή του υλικού κατασκευής. Τις δύο βασικές επιλογές αποτελούν το πλαστικό και το μέταλλο. Με το μέταλλο επιτυγχάνουμε ισχυρή μηχανική και θερμική αντοχή και σταθερότητα σχήματος του κουτιού. Από την άλλη, το τελικό βάρος είναι σημαντικά αυξημένο, το κόστος είναι επίσης υψηλό και το κυριότερο, τίθενται ζητήματα μόνωσης. Οι διάφορες πλακέτες που θα τοποθετηθούν μέσα στο κουτί, καθώς και οι πόλοι των υπερπυκνωτών, εκτίθενται στην μεταλλική επιφάνεια του κουτιού, με άμεσο κίνδυνο βραχυκυκλώματος.

Για να αποφύγουμε όλα τα μειονεκτήματα του μετάλλου, καταλήξαμε στην επιλογή του πλαστικού. Η εύρεση πλαστικού κουτιού στο εμπόριο στις ακριβείς διαστάσεις που ορίσαμε, προφανώς δεν ήταν δυνατό να συμβεί. Η λύση του 3D printing θα μας εξυπηρετούσε, αλλά το γεγονός ότι δεν διαθέτουμε γνώσεις πάνω στο αντικείμενο, καθιστά την επιλογή αυτή μη υλοποιήσιμη. Ως τελική λύση καταφύγαμε στη χρήση ακρυλικού γυαλιού (plexiglass). Το συγκεκριμένο είδος πλαστικού έχει ενισχυμένη μηχανική αντοχή σε σχέση με άλλα είδη πλαστικού και δεν επηρεάζεται από τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στον χώρο του κινητήρα. Το βρίσκει κανείς στο εμπόριο σε ορθογώνια φύλλα με πάχη 3mm, 5mm, 8mm κ.α. Το κόστος του δεν είναι ιδιαίτερα δελεαστικό. Μετά από αναζήτηση βρήκαμε ένα μεγάλο φύλλο plexiglass λευκού χρώματος σε μάντρα ανακύκλωσης υλικών, αποφεύγοντας έτσι την οικονομική επιβάρυνση. Το πάχος του στα 5mm αποτέλεσε τη χρυσή τομή μεταξύ βάρους, αντοχής και απώλειας καθαρού εσωτερικού όγκου.

Για την κατασκευή του κουτιού, μετρήθηκαν οι απαραίτητες διαστάσεις για τα κομμάτια των 6 πλευρών του. Οι διαστάσεις είναι οι εξής:

Πάτος, καπάκι → 28.5 mm × 18.5 mm

2 πλευρές → 28.5 mm × 19.1 mm

2 πλευρές → 17.4mm × 19.1 mm

Με χρήση δισκοπρίονου κόπηκαν τα κομμάτια στις διαστάσεις και τροχίστηκαν οι οποιεσδήποτε ατέλειες. Όλα τα κομμάτια εκτός του καπακιού ενώθηκαν μεταξύ τους με κόλλα πολυουρεθάνης στις εσωτερικές γωνίες και εξωτερικά με μεταλλικές γωνίες επιπλοποιίας στηριζόμενες με πριτσίνια. Στη συνέχεια, έγιναν οι απαραίτητες τρύπες για να τοποθετηθούν βίδες 4mm που χρησιμεύουν στη στήριξη των περιεχομένων του κουτιού.

Στο επόμενο στάδιο, τοποθετήθηκε ένα επιπλέον πλαστικό ηλεκτρολογικό κουτί εξωτερικά της κύριας κατασκευής, το οποίο φαίνεται στην εικόνα 6.2. Αφού αφαιρέθηκε ο πάτος του, βιδώθηκε στην κατασκευή και με τη χρήση φλατζόκολλας μονώθηκε η επιφάνεια που εφάπτονται. Στο κουτί αυτό θα «φιλοξενηθεί» το ρελέ της συστοιχίας μαζί με την απαραίτητη καλωδίωσή του, έτσι ώστε να προφυλάσσεται από το εξωτερικό περιβάλλον. Το μεγάλο μέγεθος του ρελέ είναι απαγορευτικό για την τοποθέτησή του μέσα στο κυρίως κουτί, οπότε και για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε να στερεωθεί

## Κεφάλαιο 6

εξωτερικά. Στον ίδιο χώρο θα βρίσκονται ο διακόπτης για τον προγραμματισμό του arduino και ο διακόπτης ελέγχου του οπίσθιου φωτισμού της οθόνης. Στο καπάκι του εξωτερικού κουτιού στερεώνονται δύο αδιάβροχοι διακόπτες ON/OFF, ένας εκ των οποίων είναι για τη δοκιμαστική ενεργοποίηση της συσκευής και ο άλλος για την εναλλαγή σε κατάσταση χαμηλής μπαταρίας.



Εικόνα 6.2 : Ηλεκτρολογικό κουτί τοποθετημένο εξωτερικά της κατασκευής



Εικόνα 6.3 : Άνω όψη του κουτιού πριν την τοποθέτηση των υλικών

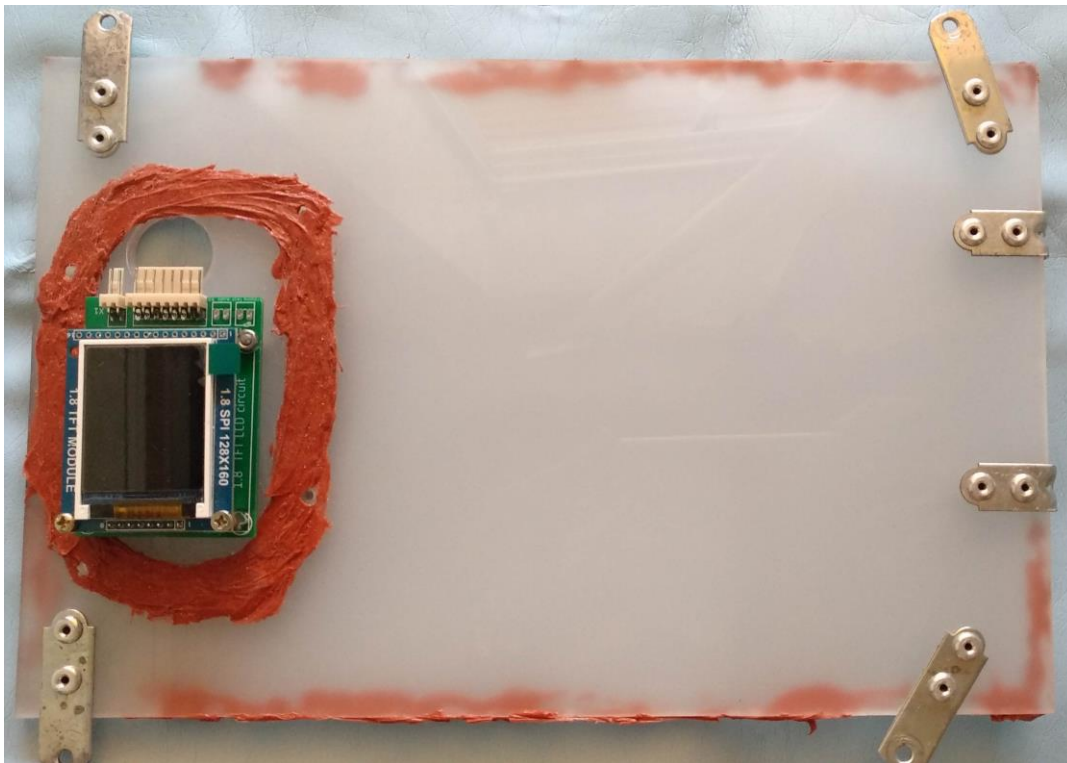
Στην εικόνα 6.3, βλέπουμε έτοιμο το κυρίως κουτί μαζί με το εξωτερικό πριν την τοποθέτηση των υλικών. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η επιφάνεια στην οποία εδράζεται το καπάκι έχει ένα στρώμα φλατζόκολλας (κόκκινο χρώμα), έτσι ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη στεγανότητα.

Στην εικόνα 6.4, βλέπουμε την μπροστινή όψη της κατασκευής. Το ηλεκτρολογικό κουτί έχει αφαιρεμένο πάτο έτσι ώστε τα απαραίτητα καλώδια να περνούν από το χώρο αυτό στον χώρο του κυρίως κουτιού μέσω των τρυπών που έχουν γίνει στο plexiglass. Στα δεξιά διακρίνεται ο διακόπτης της οθόνης, μόνιμα στερεωμένος στο κουτί. Τέλος, στο κάτω μέρος βλέπουμε με το μαύρο χρώμα τους στυπιοθλίπτες για το καλώδιο της γείωσης και το καλώδιο των 12 Volt, οι οποίοι επίσης προστέθηκαν για στεγανότητα.



Εικόνα 6.4 : Μπροστινή όψη της κατασκευής

Στην εικόνα 6.5, βλέπουμε το καπάκι του κυρίως κουτιού. Για τη στήριξή του στο κουτί έχουν τοποθετηθεί μεταλλικά λαμάκια με τη βοήθεια των οποίων το καπάκι σφίγγεται πάνω στο κουτί με βίδες. Η στερέωση της πλακέτας της οθόνης γίνεται με 2 βίδες 3mm και μέσω τρύπας περνούν η καλωδιοταινία ελέγχου και το ζεύγος καλωδίων για τον διακόπτη του οπίσθιου φωτισμού. Για την προστασία της οθόνης από τις καιρικές συνθήκες θα τοποθετηθεί διάφανο κάλυμμα πάνω από αυτήν στερεωμένο με βίδες και με προσθήκη φλατζόκολλας για στεγανότητα.

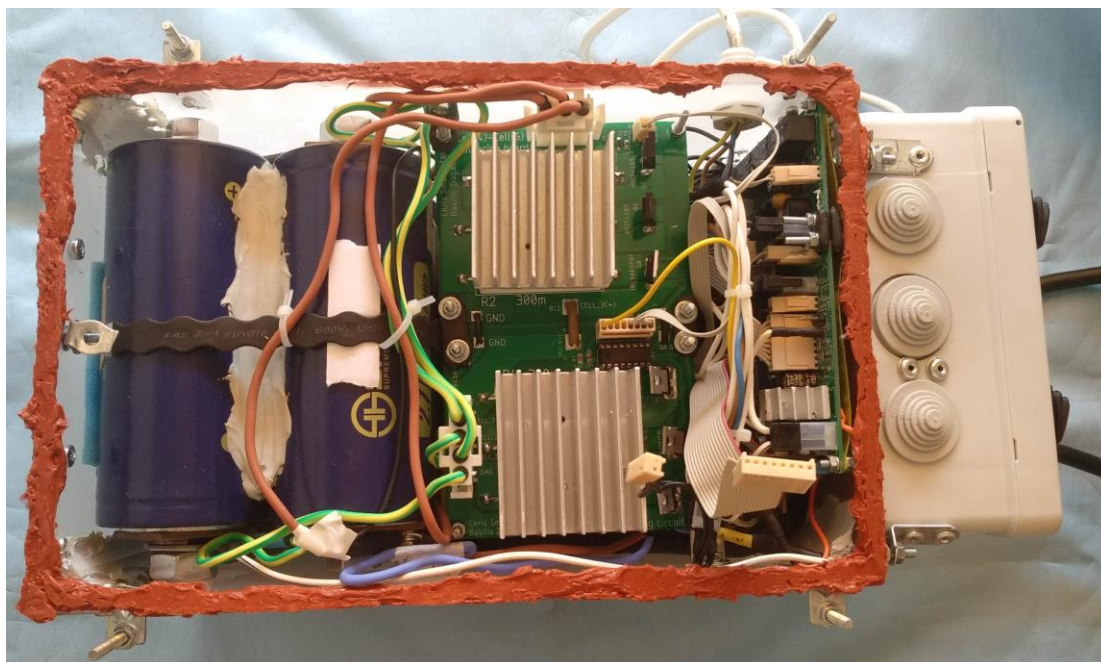


Εικόνα 6.5 : Καπάκι κουτιού με την οθόνη ενδείξεων

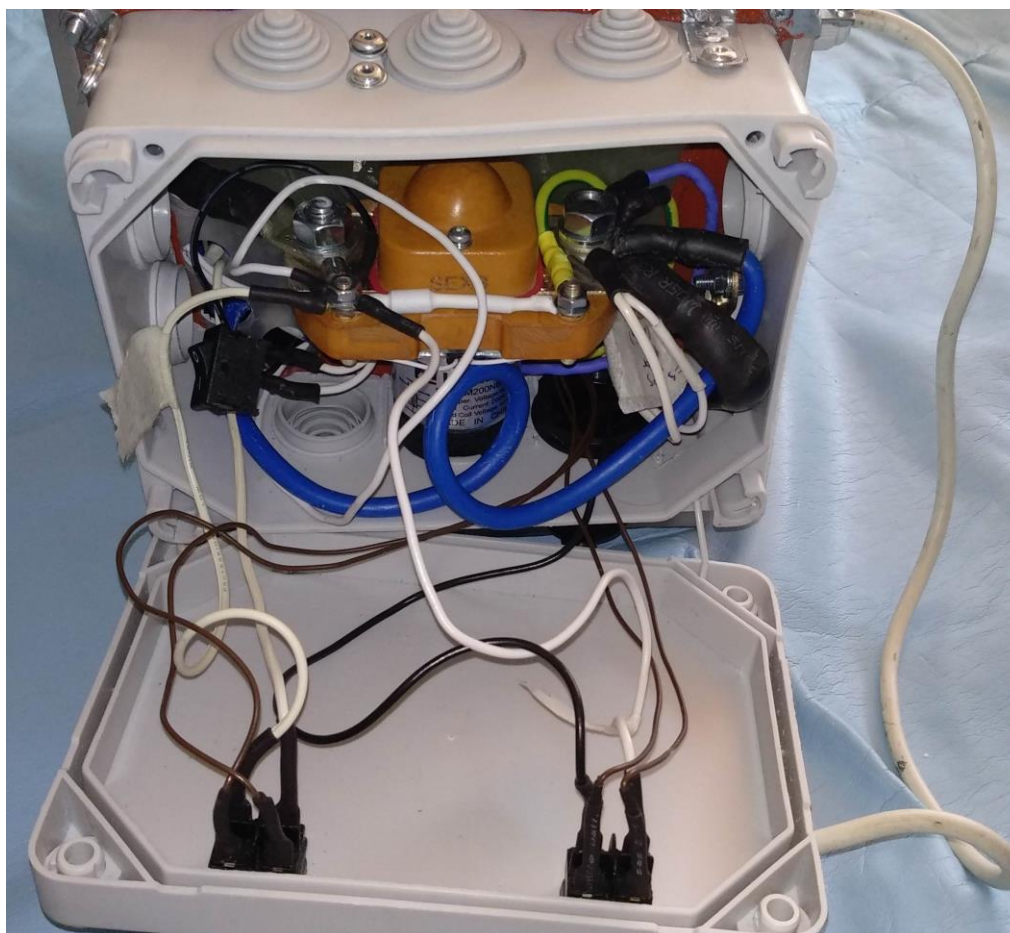
Μετά την ολοκλήρωση του κουτιού σειρά έχει η τοποθέτηση των διαφόρων υλικών. Αρχικά τοποθετήθηκαν η συστοιχία των υπερπυκνωτών και η μπαταρία, με την συγκράτηση και των δύο να γίνεται με τσέρκι. Για την ελάττωση της μεταφοράς των κραδασμών δε γίνεται άμεση επαφή των παραπάνω με το plexiglass αλλά τοποθετήθηκαν κομμάτια από μαλακό σφουγγάρι. Η μπαταρία για χωροταξικούς λόγους τοποθετήθηκε με το πλάι της να ακουμπά στον πάτο του κουτιού. Λόγω της τεχνολογίας AGM που χρησιμοποιεί, δε διατρέχει τον κίνδυνο διαρροής ηλεκτρολύτη, οπότε αυτός ο τρόπος τοποθέτησης είναι εφικτός. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε το ρελέ απομόνωσης της μπαταρίας, το οποίο βιδώθηκε στο τοίχωμα του κουτιού. Σειρά τώρα έχει η τοποθέτηση των πλακετών. Η διπλή πλακέτα εξισορρόπησης τοποθετήθηκε πάνω από τη διπλή πλακέτα φόρτισης με σταθερή απόσταση ίση με 50 mm και για την μεταξύ τους στήριξη αξιοποιήθηκαν ντίζες 3mm, οι οποίες κόπηκαν στο κατάλληλο μήκος.

Το παραπάνω σύνολο τοποθετήθηκε πάνω από την μπαταρία και στηρίχθηκε στα αντικριστά τοιχώματα του κουτιού με μεταλλικές γωνίες. Στον εναπομείναντα χώρο τοποθετήθηκαν η πλακέτα του arduino και η πλακέτα μετρήσεων, οι οποίες για καλύτερη στήριξη ενώθηκαν μεταξύ τους. Τέλος, έγιναν οι απαραίτητες καλωδιακές συνδέσεις μεταξύ των πλακετών. Στην εικόνα 6.6, βλέπουμε την άνω όψη της κατασκευής με όλα τα υλικά τοποθετημένα.

Έχοντας ολοκληρώσει το κυρίως κουτί, απομένουν να γίνουν οι διάφορες συνδέσεις καλωδίων στους ακροδέκτες του ρελέ συστοιχίας και των διακοπών που βρίσκονται στο εξωτερικό κουτί. Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί πως η έξοδος του ρελέ μπαταρίας συνδέεται με την έξοδο του ρελέ συστοιχίας και εν συνεχεία με το παχύ καλώδιο που τροφοδοτεί το ηλεκτρικό σύστημα του αυτοκινήτου. Στην εικόνα 6.7, βλέπουμε ολοκληρωμένες τις καλωδιώσεις, το πλήθος των οποίων δικαιολογεί την ανάγκη κάλυψής τους.



Εικόνα 6.6 : Άνω όψη κατασκευής με τοποθετημένα υλικά



Εικόνα 6.7 : Καλωδίωση του ρελέ συστοιχίας και των διακοπών

## Κεφάλαιο 6

Η συσκευή είναι έτοιμη και αφότου κλείσουμε το κάλυμμα του εξωτερικού κουτιού, μπορεί να τοποθετηθεί στο αυτοκίνητο. Η τοποθέτηση έγινε σχετικά εύκολα, ενώ και το γεγονός ότι οι διαστάσεις της είναι οριακά υπολογισμένες για τον χώρο κάτω από το καπό, μάς απαλλάσσει από την ανάγκη για σύσφιξη επάνω στο σασί του αυτοκινήτου. Ακολουθούν εικόνες της τελικής κατασκευής.



Εικόνα 6.8 : Όψεις της τελικής κατασκευής προτού τοποθετηθεί στο αυτοκίνητο

Στην εικόνα 6.8, διακρίνεται ένα λευκό καλώδιο που εξέρχεται από το κουτί. Το καλώδιο αυτό είναι 3 X 0.75 και μέσω αυτού μεταδίδονται τα 12 Volt σήματα για τις θέσεις του κλειδοδιακόπτη “Accessories” και “Start”, καθώς επίσης και η τροφοδοσία των 12 Volt για τον έλεγχο του μικρού ρελέ της μίζας. Στην άκρη του καλωδίου έχει συνδεθεί θηλυκός κοννέκτορας 3 επαφών, ο οποίος διαθέτει προδιαγραφές αυτοκινητοβιομηχανίας και στεγανότητα IP67.

Στην εικόνα 6.9, βλέπουμε την κατασκευή τοποθετημένη στο χώρο του κινητήρα. Η σύνδεση των καλωδίων ισχύος με τους ακροδέκτες μπαταρίας του αυτοκινήτου έγινε με μπουλόνια και παξιμάδια 10mm.



Εικόνα 6.9 : Τελική κατασκευή τοποθετημένη στο αυτοκίνητο

Στην εικόνα 6.10, βλέπουμε το καλώδιο με το οποίο λαμβάνουμε τα σήματα για τις θέσεις του κλειδοδιακόπτη και παρέχουμε την ελεγχόμενη θετική τροφοδοσία στο μικρό ρελέ της μίζας. Όλες οι παραπάνω ενέργειες πραγματοποιούνται στην ασφαλειοθήκη του χώρου του κινητήρα και άρα από εκεί ξεκινά το καλώδιο. Στο άλλο του άκρο, έχει συνδεδεμένο έναν αρσενικό κοννέκτορα 3 επαφών, ο οποίος ενώνεται στη συνέχεια με τον αντίστοιχο θηλυκό του καλωδίου της συσκευής.



Εικόνα 6.10 : Καλώδιο μεταφοράς σημάτων θέσεων κλειδοδιακόπτη και ρελέ μίζας

Θεωρούμε σημαντικό να επισημάνουμε σε αυτό το σημείο, πως η καλωδίωση που ενώνεται με την ασφαλειοθήκη του αυτοκινήτου, μελετήθηκε και υλοποιήθηκε αποκλειστικά από τους υπεύθυνους φοιτητές της παρούσας διπλωματικής, χωρίς την παραμικρή βοήθεια από κάποιον επαγγελματία. Οι βασικές μας γνώσεις στον τομέα της ηλεκτρολογίας οχημάτων και η πρόσβαση στο ηλεκτρικό σχέδιο του αυτοκινήτου, μας οδήγησαν στην επιτυχή υλοποίηση των παρεμβάσεων που προαναφέρθηκαν.



Εικόνα 6.11 : Στιγμιότυπα λειτουργίας της συσκευής στο αυτοκίνητο

Στην εικόνα 6.11, βλέπουμε δύο στιγμιότυπα που καταγράψαμε κατά τη λειτουργία της συσκευής στο αυτοκίνητο. Στο επάνω στιγμιότυπο, ο κινητήρας βρίσκεται σε λειτουργία και η συστοιχία με τάση 10.89 Volt φορτίζει στα 5.63 A. Στο κάτω στιγμιότυπο, ο κινητήρας δε λειτουργεί και έχουμε απλά γυρίσει το κλειδί στη θέση “Accessories”. Διακρίνουμε την τάση της μπαταρίας στα 12.42 Volt και την τάση της συστοιχίας στα 13.8 Volt.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> : Μετρήσεις και αποτελέσματα

Μετά από την επιτυχή εγκατάσταση της συσκευής στο αυτοκίνητο, πρέπει να εκτελεστούν όλες οι απαραίτητες δοκιμές, τόσο βραχυπρόθεσμες όσο και μακροπρόθεσμες για την εξασφάλιση της ασφαλούς και πλήρους λειτουργίας όλων των χαρακτηριστικών της συσκευής.

### 7.1 Δοκιμές συστοιχίας

Ο κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής, που είναι η έναυση του κινητήρα με υπερπυκνωτές, μας στρέφει το ενδιαφέρον στην επίδοση αυτών όσον αφορά την ικανότητα εκκίνησης. Πραγματοποιήθηκαν υπεραρκετές δοκιμές, με σκοπό να καλύψουμε όλα τα πιθανά σενάρια λειτουργίας.

Σε όλες τις δοκιμές εκκίνησης με τάση επαρκή τάση μπαταρίας και τάση συστοιχίας άνω των 9.5 Volt, η εκκίνηση του κινητήρα εκτελέστηκε επιτυχώς. Ειδικότερα, με αρχική τάση συστοιχίας άνω των 10.5 Volt, η διαδικασία εκκίνησης ήταν άμεση και χωρίς κομπιάσματα, με μέγιστη διάρκεια που δεν ξεπέρασε το 1 δευτερόλεπτο. Στις δοκιμές με αρχική τάση συστοιχίας από 9.5 έως 10.5 Volt, οι εκκινήσεις ήταν και πάλι επιτυχείς, αλλά με εμφανή διευρυμένη διάρκεια και «ατονία» του κινητήρα τα πρώτα δευτερόλεπτα της αυτόνομης λειτουργίας του. Σε τάσεις συστοιχίας κάτω από 9.5 Volt, οι δοκιμές εκκίνησης δεν είχαν 100% επιτυχία. Η αιτία αυτού δε βρίσκεται στη συστοιχία αλλά στο ίδιο το αυτοκίνητο. Με τις τάσεις της συστοιχίας σε τέτοιο χαμηλό επίπεδο, η μίζα περιστρέφεται ικανοποιητικά χωρίς όμως να λειτουργούν επαρκώς και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά του αυτοκινήτου. Η χαμηλή τάση προκαλεί προβληματική λειτουργία της αντλίας καυσίμου, της κεντρικής μονάδας ελέγχου του κινητήρα, του πολλαπλασιαστή και της μονάδας του immobilizer. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να ήταν μη προβλέψιμη η συμπεριφορά τους σε χαμηλή τάση και να μην συμβάλουν θετικά στην εκκίνηση του κινητήρα. Επιπρόσθετα, το χαρακτηριστικό ασφαλείας που προστέθηκε στη συσκευή και που αποκόπτει τη συστοιχία, όταν η τάση της πέσει κάτω από 8 Volt, συνέβαλε στις αποτυχημένες προσπάθειες εκκίνησης.

Αντίστοιχα, πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές εκκίνησης για το σενάριο της υπερβολικά χαμηλής τάσης μπαταρίας, αλλά επαρκούς τάσης συστοιχίας, με την ενεργοποίηση του εξωτερικού διακόπτη «κατάστασης χαμηλής τάσης». Για την αποφυγή πρόκλησης ζημιάς στη μπαταρία της συσκευής, δεν την αποφορτίσαμε. Για την προσομοίωση του σεναρίου χαμηλής τάσης, την αποσυνδέσαμε γαλβανικά από τη συσκευή. Αυτό είναι εφικτό, καθώς είτε η τάση είναι πολύ χαμηλή (κάτω από 7 Volt περίπου), είτε αποσυνδεθεί πλήρως η μπαταρία, το αποτέλεσμα σε κάθε περίπτωση είναι η πλήρης απενεργοποίηση των συστημάτων του αυτοκινήτου. Όλες οι δοκιμές εκκίνησης σε αυτό το σενάριο ήταν επίσης επιτυχείς.

Με σκοπό τη μέτρηση της ελάχιστης απαιτούμενης ενέργειας για κάθε μεμονωμένη εκκίνηση, καταγράψαμε την τάση της συστοιχίας πριν και μετά από κάθε εκκίνηση για διάφορες τιμές τάσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Πτώση τάσης συστοιχίας ανά εκκίνηση

ΠΡΙΝ→ΜΕΤΑ	ΠΡΙΝ→ΜΕΤΑ	ΠΡΙΝ→ΜΕΤΑ	ΠΡΙΝ→ΜΕΤΑ	ΠΡΙΝ→ΜΕΤΑ
13.83V→13.51V	13.57V→13.3V	13.3V→13.02V	13.02V→12.74V	12.74V→12.48V
12.48V→12.21V	12.21V→11.95V	11.95V→11.68V	11.68V→11.44V	11.44V→11.17V
11.17V→10.91V	10.91V→10.6V	10.66V→10.36V	10.36V→10.08V	10.08V→9.76V

Οι τιμές του πίνακα 7.1 έχουν μικρή διακύμανση σε όλο το φάσμα της αρχικής τάσης και παραμένουν κοντά στον μέσο όρο των 0.28 Volt ανά εκκίνηση. Ακόμα και όταν η τάση της συστοιχίας πλησιάζει τα 10 Volt, η απώλεια τάσης εκκίνησης παραμένει σχεδόν σταθερή, αποδεικνύοντας την καταλληλότητα των υπερπυκνωτών για εφαρμογές εκκίνησης κινητήρων. Οι δοκιμές κάτω των 10 Volt δεν συμπεριλήφθηκαν στον πίνακα, καθώς οι τιμές της πτώσης τάσης απέχουν πολύ από τις αρχικές, λόγω της οριακής επίτευξης εκκίνησης. Από τα παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως με την συστοιχία σε πλήρη φόρτιση έχουμε περιθώριο 15 επιτυχών εκκινήσεων, προτού η τάση πέσει κάτω από τα 10 Volt.

Στο πιθανό σενάριο δυσλειτουργίας του κινητήρα, με αποτέλεσμα να δυσκολεύεται να εκκινήσει, δοκιμάστηκε η μέγιστη χρονική διάρκεια συνεχούς προσπάθειας εκκίνησης μέχρι το κατώφλι των 8 Volt, όπου και ενεργοποιείται η αποκοπή της συστοιχίας για ασφάλεια. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με αποσυνδεδεμένα τα μπουζοκαλώδια από τον πολλαπλασιαστή, με σκοπό την ηθελημένη αδυναμία του κινητήρα να εκκινήσει. Με την προσπάθεια εκκίνησης, ο κινητήρας απλά περιστρέφεται συνεχώς χωρίς να εκκινεί. Για την αποφυγή πρόκλησης ζημιάς, έγιναν διαδοχικές προσπάθειες μέγιστης χρονικής διάρκειας 5 δευτερολέπτων με κατάλληλα χρονικά διαλλείματα για την ψύξη του εκκινητήρα. Στο τέλος, αθροίστηκαν οι μεμονωμένοι χρόνοι για τον υπολογισμό του συνολικού χρόνου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας έδειξαν 25.2 δευτερόλεπτα συνολικής διάρκειας εκκίνησης μέχρι η τάση της συστοιχίας να βρεθεί στα 8 Volt και να χρειάζεται επαναφόρτιση από την μπαταρία. Η τιμή αυτή προσεγγίζει ικανοποιητικά τους θεωρητικούς υπολογισμούς, σύμφωνα με τους οποίους η μέγιστη χρονική διάρκεια εκκίνησης είναι 27.3 δευτερόλεπτα.

## 7.2 Δοκιμές κυκλωμάτων

Πίνακας 7.1: Σύγκριση ενδείξεων οθόνης με τις ενδείξεις του πολύμετρο

Τάση συστοιχίας	Τάση πυκνωτή 1	Τάση πυκνωτή 2	Τάση πυκνωτή 3	Τάση πυκνωτή 4	Τάση πυκνωτή 5	Τάση πυκνωτή 6	Τάση μπαταρίας
13.80 V (13.75 V)	2.202 V (2.211 V)	2.191 V (2.206 V)	2.249 V (2.251 V)	2.258 V (2.258 V)	2.384 V (2.401 V)	2.408 V (2.446 V)	12.69 V (12.64 V)
13.14 V (13.12V)	2.094 V (2.102 V)	2.085 V (2.098 V)	2.144 V (2.144 V)	2.153 V (2.152 V)	2.282 V (2.297 V)	2.311 V (2.343 V)	12.55 V (12.5 V)
12.09 V (12.05 V)	1.915 V (1.924 V)	1.909 V (1.919 V)	1.968 V (1.966 V)	1.98 V (1.978 V)	2.114 V (2.124 V)	2.147 V (2.174 V)	12.5 V (12.45 V)
11.01 V (10.99 V)	1.736 V (1.744 V)	1.730 V (1.739 V)	1.789 V (1.787 V)	1.804 V (1.8 V)	1.938 V (1.946 V)	1.977 V (1.999 V)	12.49 V (12.44 V)
9.87 V (9.84 V)	1.541 V (1.549 V)	1.537 V (1.543 V)	1.595 V (1.593 V)	1.61 V (1.605 V)	1.751 V (1.758 V)	1.792 V (1.813 V)	12.47 V (12.42 V)
8.92 V (8.9 V)	1.381 V (1.39 V)	1.378 V (1.383 V)	1.437 V (1.435 V)	1.455 V (1.452 V)	1.598 V (1.604 V)	1.642V (1.66 V)	12.44 V (12.4 V)

Η ορθή λειτουργία της συσκευής προϋποθέτει και την ορθή λειτουργία των μεμονωμένων κυκλωμάτων μέτρησης και φόρτισης. Η ένδειξη των τάσεων στην οθόνη, η εξισορρόπηση των υπερπυκνωτών στα

προκαθορισμένα κατώφλια και η φόρτιση με το επιθυμητό ρεύμα απαιτούν την πλήρη λειτουργικότητα και ένα ελάχιστο επίπεδο ακρίβειας. Η πλακέτα των μετρήσεων, που είναι υπεύθυνη για τη μέτρηση όλων των τάσεων, δοκιμάστηκε με τη συσκευή τοποθετημένη στο αυτοκίνητο για διάφορες τιμές τάσης της συστοιχίας. Οι τιμές ένδειξης της οθόνης συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες ενδείξεις του πολύμετρου αναφοράς. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον πίνακα 7.2.

Σε κάθε κελί υπάρχουν δύο τιμές τάσης. Η πάνω τιμή είναι η ένδειξη της οθόνης και η κάτω τιμή, που βρίσκεται στην παρένθεση, η ένδειξη του πολύμετρου. Σε γενικές γραμμές, οι ενδείξεις της οθόνης έχουν ελάχιστη απόκλιση από τις πραγματικές τιμές (τιμές πολύμετρου), σε όλο το φάσμα μετρήσεων. Οι μέσοι όροι τάσης απόκλισης είναι:

Τάση συστοιχίας → 30 mVolt

Τάση 1<sup>ο</sup> πυκνωτή → 8.3 mVolt

Τάση 2<sup>ο</sup> πυκνωτή → 9.7 mVolt

Τάση 3<sup>ο</sup> πυκνωτή → 1.7 mVolt

Τάση 4<sup>ο</sup> πυκνωτή → 2 mVolt

Τάση 5<sup>ο</sup> πυκνωτή → 10.5 mVolt

Τάση 6<sup>ο</sup> πυκνωτή → 26.8 mVolt

Τάση μπαταρίας → 48.3 mVolt

Οι αποκλίσεις οφείλονται σε σφάλματα των κυκλωμάτων μέτρησης και του ADC του arduino. Το κύκλωμα με τους τελεστικούς παράγει σφάλματα, που οφείλονται σε ασυμμετρία των αντιστάσεων καθορισμού απολαβής, στην τάση μετατόπισης των εισόδων (offset voltage) και στην ύπαρξη κοινού σήματος. Αντίστοιχα, οι απλοί διαιρέτες τάσης παράγουν σφάλμα λόγω της ανοχής των τιμών των αντιστάσεων. Τέλος, ο ADC του arduino έχει πάντοτε ένα εσωτερικό σφάλμα το οποίο ενισχύεται από τις ανοχές της τάσης αναφοράς που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση μας, πετύχαμε ικανοποιητική ακρίβεια παρά την ύπαρξη όλων των παραπάνω σφαλμάτων. Ειδικότερα, όσον αφορά τις τάσεις συστοιχίας και μπαταρίας, η ανάγνωση τους από τον ADC του arduino γίνεται μέσω διαιρετών τάσης 20KΩ/100KΩ για να μην υπερβούμε το όριο των 3 Volt, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 6. Ο υποβιβασμός της τάσης στο ένα έκτο, πριν αυτή οδηγηθεί στο arduino, έχει ως αποτέλεσμα η υψηλότερη ακρίβεια που να είναι εφικτό να επιτευχθεί, να βρίσκεται περίπου στα 18 mVolt. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η μετρούμενες τάσεις μπαταρίας και συστοιχίας έχουν ελάχιστο βήμα μεταβολής τα 18 mVolt.

Το ρεύμα φόρτισης της συστοιχίας μετρήθηκε για διάφορες τιμές της τάσης συστοιχίας από τα 8.5 V έως τα 14 Volt, με σκοπό την επαλήθευση της σταθερότητάς του. Η τάση του ανορθωτή σε όλες τις μετρήσεις κυμαινόταν από 14.05 έως 14.22 Volt. Σε χαμηλή τάση συστοιχίας περίπου στα 9 Volt, η ένδειξη ρεύματος στην οθόνη της συσκευής ήταν στα 5.74 A. Με την πάροδο της φόρτισης υπήρξε ελάχιστη μεταβολή της τιμής προς κάτω. Πιο συγκεκριμένα, με τάση συστοιχίας στα 12.4 Volt, το ρεύμα φόρτισης είχε μειωθεί μόλις στα 5.48 A. Στη συνέχεια, όταν η τάση συστοιχίας πλησίασε τα 12.8 Volt, υπήρξε μια αύξηση στα 6.2 A για λίγα δευτερόλεπτα. Στο υπόλοιπο της φόρτισης, το ρεύμα ελαττωνόταν συνεχώς μέχρι την κατώτατη τιμή των 0.75 A που κατεγράφη ακριβώς πριν την διακοπή φόρτισης στα 14 Volt της συστοιχίας. Όλες οι παραπάνω τιμές ρευμάτων μετρήθηκαν και με αμπεροτσιμπίδα και η απόκλιση παρέμενε πάντοτε μεταξύ 50 και 100 mA. Η λειτουργία του κυκλώματος φόρτισης μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής, αφού το ρεύμα φόρτισης είχε καλή σταθερότητα

σε όλη τη διάρκεια της φόρτισης και η μετρούμενη τιμή του είχε ελάχιστη απόκλιση από την πραγματική τιμή.

Δοκιμές πραγματοποιήθηκαν και στη διαρροή (παρασιτική εκφόρτιση) των υπερπυκνωτών. Για την εξαγωγή του αποτελέσματος, καταγράφηκε η τάση της συστοιχίας, μέσω της οθόνης, πριν και μετά από διαστήματα ακινησίας του αυτοκινήτου. Ενδεικτικά, λάβαμε μετρήσεις για διαστήματα 3, 7 και 10 ημερών. Για την εξαγωγή του μέσου όρου της τάσης εκφόρτισης ανά ημέρα, αθροίστηκαν μεταξύ τους οι απώλειες για κάθε διάστημα ακινησίας και αντίστοιχα έγινε το ίδιο για τα χρονικά διαστήματα. Εν τέλει, καταλήξαμε ότι ο ρυθμός εκφόρτισης της συστοιχίας ισούται με 32.4 mVolt ανά ημέρα. Η ωφέλιμη διάρκεια ζωής της συστοιχίας από πλήρη φόρτιση στα 14 Volt έως την τάση αποκοπής στα 8 Volt είναι:

$$T_{usable} = \frac{V_{charged} - V_{discharged}}{32.4 \text{ mVolt}} = \frac{14 - 8}{32.4 \text{ mVolt}} = \frac{6}{32.4 \text{ mVolt}} = 185 \text{ μέρες}$$

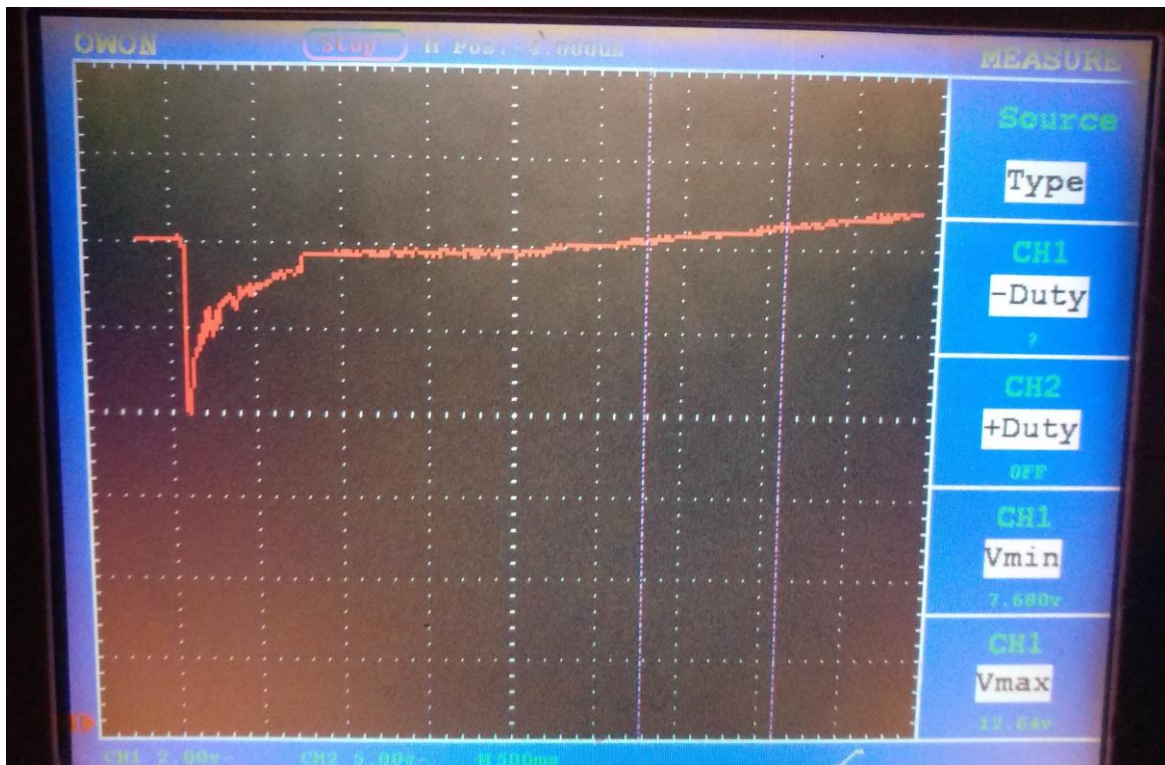
Η παραπάνω τιμή είναι εξαιρετικά ικανοποιητική, ειδικά αν συγκριθεί και με τη θεωρητικά υπολογισμένη τιμή των 6.7 ημερών, για το χειρότερο σενάριο διαρροής στα 5.2 mA. Παράλληλα, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να λάβουμε υπόψη τις συνθήκες μέτρησης. Όλες οι μετρήσεις έγιναν Αύγουστο και Σεπτέμβριο, μήνες κατά τους οποίους καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας η θερμοκρασία σπανίως πέφτει κάτω από τους 30°C. Οι θερμοκρασίες που επικρατούν στον χώρο του κινητήρα τη συγκεκριμένη περίοδο μπορεί να ξεπεράσουν τους 50°C και παραμένουν σε υψηλό επίπεδο για πολλές ώρες μετά από τη χρήση του αυτοκινήτου. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε ψυχρότερες συνθήκες, η διάρκεια ζωής είναι ακόμα μεγαλύτερη λόγω μειωμένης διαρροής των υπερπυκνωτών, με την επιφύλαξη, ότι η αντίστοιχη μείωση της χωρητικότητας λόγω ψύχους να μην είναι μεγάλη. Σε κάθε περίπτωση, η πειραματική διάρκεια ζωής που υπολογίσαμε, είναι παραπάνω από επαρκής για ένα όχημα.

### 7.3 Κυματομορφές τάσης συστήματος κατά την εκκίνηση

Η διαδικασία της εκκίνησης χαρακτηρίζεται από αρκετά μεταβατικά φαινόμενα. Το κυριότερο είναι η πτώση της τάσης της συστοιχίας κατά τα πρώτα millisecond της λειτουργίας του εκκινητήρα. Η μεγάλη ρευματική αιχμή προκαλεί πτώση τάσης λόγω της ESR της συστοιχίας, η οποία είναι υπολογίσιμη. Για την παρακολούθηση λοιπόν, της πορείας της τάσης κατά την εκκίνηση, έγινε χρήση φορητού παλμογράφου. Οι ακροδέκτες του παλμογράφου συνδέθηκαν με τη γείωση και τα 12 Volt του οχήματος. Ο άξονας χρόνου ρυθμίστηκε στα 0.5 second/division. Οι δοκιμές εκκίνησης έγιναν τόσο με τη συμβατική μπαταρία στα 12.35 Volt όσο και με τη συστοιχία στα 13.65 Volt και στα 11 Volt. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί, πως ο παλμογράφος με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις χρειάζεται calibration, με αποτέλεσμα οι αναγραφόμενες τιμές των τάσεων να μην είναι απόλυτα ακριβείς.

Στην εικόνα 7.1, βλέπουμε την κυματομορφή της τάσης της συμβατικής μπαταρίας κατά την εκκίνηση. Με αρχική τάση τα 12.35 Volt, τιμή η οποία μετρήθηκε με πολύμετρο, η πτώση τάσης της μπαταρίας κατά την αιχμή ρεύματος εκκίνησης, που διακρίνεται με την απότομη κάθετη γραμμή, είναι περίπου 4 Volt. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η πτώση τάσης καταλαμβάνει δύο division στον κάθετο άξονα της τάσης, ο οποίος έχει ρυθμιστεί στα 2Volt / division. Θεωρούμε προσεγγιστικά, ότι η τάση της μπαταρίας έφτασε το ελάχιστο των 8.35 Volt κατά την εκκίνηση. Μετά το πέρας της εκκίνησης, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση διήρκησε 0.68 δευτερόλεπτα, η μπαταρία επαναφέρεται σε ελάχιστα λιγότερη τάση από την αρχική. Τέλος, από το μέσο του άξονα του χρόνου

και μετά, παρατηρούμε μια ελαφρά ανοδική πορεία της τάσης, η οποία οφείλεται στην τάση του ανορθωτή που αυξάνεται σταδιακά μέχρι τη σταθεροποίηση στα 14.22 Volt.



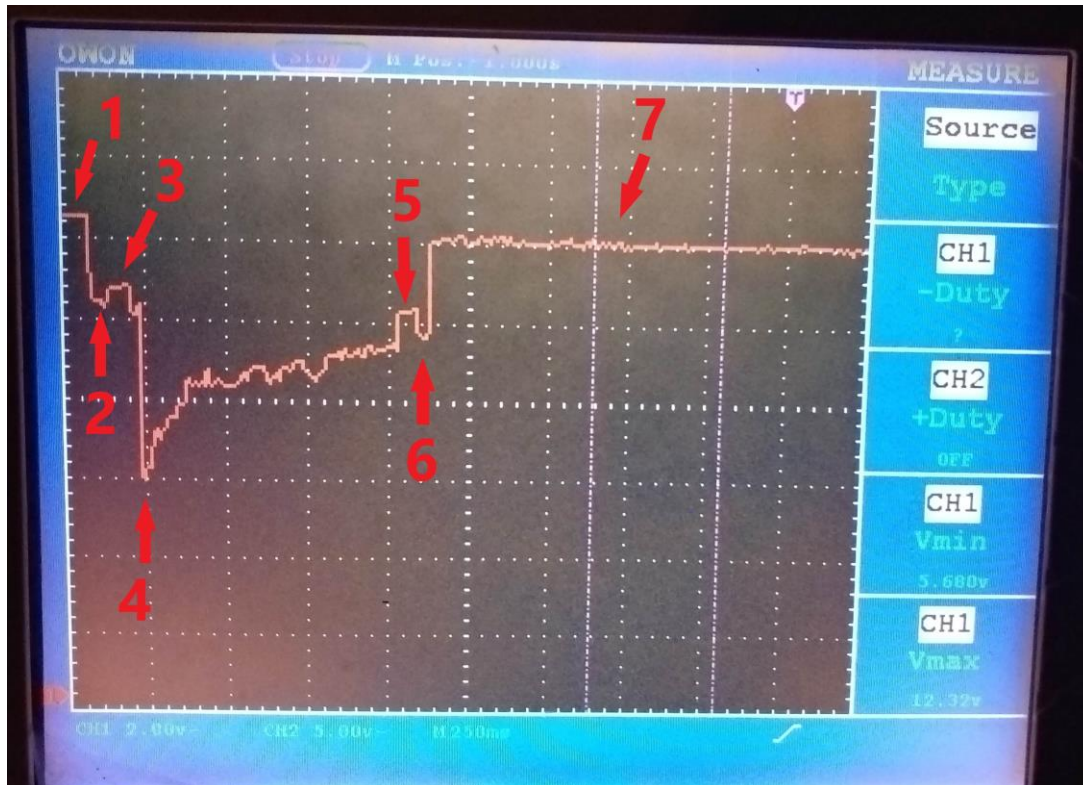
Εικόνα 7. 1: Κυματομορφή τάσης μπαταρίας κατά την εκκίνηση με αρχή στα 12.35 Volt



Εικόνα 7.2 : Κυματομορφή τάσης εκκίνησης με συστοιχία στα 13.65 Volt

Στην εικόνα 7.2, βλέπουμε την κυματομορφή της τάσης του αυτοκινήτου κατά την εκκίνηση με τη χρήση της συσκευής μας. Η τάση της μικρής συμβατικής μπαταρίας είναι στα 12.5 Volt και της συστοιχίας στα 13.65 Volt. Στην αρχή, πριν την προσπάθεια εκκίνησης, παρατηρούμε μια ευθεία γραμμή στην οθόνη του παλμογράφου, που είναι η τάση των 12.5 Volt της μπαταρίας. Μόλις γυρίσουμε το κλειδί για την εκκίνηση του κινητήρα, το σύστημα ακολουθεί την καθορισμένη ακολουθία. Αρχικά, ενεργοποιείται η παρακαμπτήρια διάταξη της συστοιχίας. Το βέλος νούμερο 1 δείχνει τη χρονική στιγμή, κατά την οποία η τάση του συστήματος είναι περίπου ίση με 13.2 Volt. Η τιμή αυτή δικαιολογείται από το γεγονός, ότι η τάση των 13.65 Volt της συστοιχίας διερχόμενη από τη δίοδο ισχύος της διάταξης ελαττώνεται κατά 0.45 περίπου, λόγω της τάσης αγωγής. Καθώς η τιμή των 13.2 Volt παραμένει μεγαλύτερη από την τάση των 12.5 Volt της μπαταρίας, η δίοδος πολώνεται ορθά και άγει, με αποτέλεσμα η τάση της συστοιχίας να υπερισχύει. Στη συνέχεια, το ρελέ της συστοιχίας ενεργοποιείται, με αποτέλεσμα η τάση της συστοιχίας να εμφανίζεται αυτούσια στα άκρα του συστήματος. Το βέλος νούμερο 2 δείχνει την τάση των 13.65 Volt μετά από την ενεργοποίηση του ρελέ. Έπειτα, απενεργοποιείται η παρακαμπτήρια διάταξη και δίνεται η εντολή ενεργοποίησης στο μικρό ρελέ μίζας και ξεκινά να περιστρέφεται ο εκκινητήρας. Το βέλος νούμερο 3 δείχνει την χρονική στιγμή της αιχμής ρεύματος που προκαλείται κατά τα πρώτα millisecond της λειτουργίας του εκκινητήρα. Η αιχμή ρεύματος προκαλεί και την ανάλογη σημαντική πτώση τάσης λόγω της ESR της συστοιχίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η πτώση τάσης καταλαμβάνει περίπου 3 divisions στην οθόνη του παλμογράφου, οπότε προσεγγιστικά θεωρούμε πως ισούται με 6 Volt και άρα το ελάχιστο της τάσης της συστοιχίας είναι 7.65 Volt. Για το υπόλοιπο της εκκίνησης, η τάση επανέρχεται με προσεγγιστικά εκθετικό ρυθμό, παρουσιάζοντας συνεχείς αιχμές αυξομειώσεως. Αυτό συμβαίνει καθώς, όσο προχωρά η διαδικασία της εκκίνησης, συμμετέχουν και άλλα φορτία όπως η αντλία καυσίμου, οι εγχυτήρες και ο πολλαπλασιαστής, των οποίων οι ρευματικές ανάγκες δεν είναι γραμμικές. Παράλληλα, ο κινητήρας δεν αποτελεί σταθερό φορτίο για τη μίζα, αφού ανάλογα τη θέση των εμβόλων στους κυλίνδρους και τη φάση που βρίσκονται (εισαγωγή, συμπίεση, ανάφλεξη, εξαγωγή), αυξομειώνεται συνεχώς η απαιτούμενη ροπή για την περιστροφή του. Τέλος, λίγο πριν επαναφέρουμε το κλειδί στην αρχική του θέση για να διακοπεί η διαδικασία, ο κινητήρας έχει ήδη εκκινήσει, με αποτέλεσμα το φορτίο της μίζας να μειώνεται απότομα και άρα η ρευματική ανάγκη είναι ελαττωμένη. Το βέλος 4 δείχνει τη στιγμή που ο κινητήρας έχει εκκινήσει. Η τιμή του ρεύματος, που έχει ελαττωθεί σημαντικά, αποτυπώνεται με την απότομη ελάττωση της πτώσης τάσης (αιχμή που δείχνει το βέλος). Το βέλος νούμερο 5 δείχνει τη χρονική στιγμή που επαναφέρουμε το κλειδί στην αρχική του θέση για να διακόψουμε τη διαδικασία εκκίνησης. Το σύστημά μας απενεργοποιεί το μικρό ρελέ της μίζας, οπότε δεν απαιτεί ρεύμα από τη συστοιχία. Το βέλος νούμερο 6 δείχνει τη χρονική περίοδο κατά την οποία ο κινητήρας έχει εκκινήσει αλλά ο εκκινητήρας δε λειτουργεί πλέον και άρα η τάση της συστοιχίας επανέρχεται σε τιμή ελάχιστα λιγότερη από την αρχική (περίπου 0.3 Volt λιγότερο). Σε αυτό το διάστημα ενεργοποιείται και πάλι η παρακαμπτήρια διάταξη. Το βέλος νούμερο 7 δείχνει το χρονικό διάστημα αφού έχει απενεργοποιηθεί το ρελέ της συστοιχίας για αποφυγή της απευθείας φόρτισής της από τον ανορθωτή. Η τάση της συστοιχίας παρέχεται στο όχημα μέσω της παρακαμπτήριας διάταξης, για αυτό και το επίπεδο τάσης βρίσκεται ελαφρώς χαμηλότερα από το βέλος νούμερο 6. Στο τέλος, ενεργοποιείται και πάλι το ρελέ της μπαταρίας και απενεργοποιείται η παρακαμπτήρια διάταξη, έχοντας πλέον ολοκληρωθεί πλήρως η διαδικασία εκκίνησης. Το βέλος νούμερο 8 δείχνει το χρονικό διάστημα που έπεται της διαδικασίας εκκίνησης, κατά το οποίο παρατηρούμε την τάση της μπαταρίας να είναι μικρότερη από την αρχική πριν την εκκίνηση. Αυτό συμβαίνει, καθώς τα πρώτα δευτερόλεπτα λειτουργίας του κινητήρα ο ανορθωτής αυξάνει σταδιακά την παραγόμενη τάση εξόδου μέχρι την μόνιμη τιμή. Μέχρις ότου η τάση εξόδου

του ανορθωτή υπερβεί την τάση της μπαταρίας, η μπαταρία τροφοδοτεί όλες τις καταναλώσεις και σε αυτό οφείλεται η πτώση της τάσης της.



Εικόνα 7.3: Κυματομορφή τάσης εκκίνησης με συστοιχία στα 11 Volt

Στην εικόνα 7.3, βλέπουμε την κυματομορφή της τάσης κατά την εκκίνηση με συστοιχία φορτισμένη στα 11 Volt. Το βέλος νούμερο 1 δείχνει το χρόνο πριν την εκκίνηση με τάση μπαταρίας στα 12.5 Volt. Τη στιγμή που θα γυρίσουμε το κλειδί για την εκκίνηση, θα ενεργοποιηθεί αρχικά η παρακαμπτήρια διάταξη αλλά το γεγονός ότι αυτή τη φορά η τάση της συστοιχίας είναι χαμηλότερη από αυτήν της μπαταρίας, έχει σαν αποτέλεσμα την ανάστροφη πόλωση της διόδου της συστοιχίας και την επικράτηση της τάσης της μπαταρίας. Όταν απενεργοποιηθεί το ρελέ της μπαταρίας, η διάταξη πλέον τροφοδοτεί το όχημα με τάση περίπου 10.6 Volt, όπως δείχνει το βέλος νούμερο 2. Στη συνέχεια, ενεργοποιείται το ρελέ της συστοιχίας και απενεργοποιείται η παρακαμπτήρια διάταξη και έτσι το όχημα τροφοδοτείται με την πλήρη τάση της συστοιχίας, όπως δείχνει το βέλος νούμερο 3. Στη συνέχεια, ενεργοποιείται ο εκκινητήρας και το βέλος νούμερο 4 δείχνει την πτώση τάσης της συστοιχίας κατά τη διάρκεια της απότομης αιχμής ρεύματος. Αυτή τη φορά, η πτώση τάσης καταλαμβάνει 2.5 divisions, οπότε θεωρούμε ότι προσεγγιστικά η τάση ελαττώθηκε κατά 5 Volt, με τάση ελαχίστου ίση με 6 Volt. Το βέλος νούμερο 5 δείχνει την χρονική περίοδο κατά την οποία έχει εκκινήσει ο κινητήρας και η μίζα έχει απενεργοποιηθεί, με αποτέλεσμα η τάση της συστοιχίας να επαναφέρεται σε τιμή ελαφρώς μικρότερη της αρχικής (0.3 Volt περίπου). Σε αυτό το διάστημα ενεργοποιείται και πάλι η παρακαμπτήρια διάταξη για να μεσολαβήσει της μεταγωγής των ρελέ. Αφού απενεργοποιηθεί το ρελέ της συστοιχίας, η διάταξη τροφοδοτεί το όχημα για κάποια milliseconds, όπως φαίνεται με το βέλος νούμερο 6. Τέλος, ενεργοποιείται το ρελέ μπαταρίας, η οποία τροφοδοτεί το όχημα μέχρι να αυξηθεί επαρκώς η τάση εξόδου του ανορθωτή. Το βέλος νούμερο 7 δείχνει την πτώση τάσης της μπαταρίας κατά 0.5 Volt, που οφείλεται στην παροχή ισχύος στο όχημα στο προαναφερθέν χρονικό διάστημα.

## Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup> : Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

### 8.1 Συμπεράσματα

Μετά από την πληθώρα των δοκιμών του συστήματος σε όλα τα πιθανά σενάρια που μπορέσαμε να προσομοιώσουμε και από την τελική μορφή που απέκτησε, μπορούμε να προβούμε σε ορισμένα συμπεράσματα.

Ο σημαντικότερος παράγοντας είναι αδιαμφισβήτητα η λειτουργικότητα και το ποσοστό εκπλήρωσης των απαιτήσεων. Η συσκευή καταφέρνει να εκκινήσει τον κινητήρα με απόλυτη επιτυχία και σε σύντομο χρονικό διάστημα, ακόμα και σε συνθήκες πολύ χαμηλής τάσης όπως είδαμε νωρίτερα. Η θεωρητικά και σε ένα βαθμό πειραματικά αποδεδειγμένη αντοχή σε ακινησία οχήματος, συμβάλει ακόμα περισσότερο στη θετική οπτική του όλου εγχειρήματος. Το θετικό σύνολο συμπληρώνει και η ελάφρυνση που προσφέρει το σύστημά μας στον εναλλάκτη του αυτοκινήτου, αφού σε σύγκριση με μία συμβατική μπαταρία αυτοκινήτου, η ρευματική απαίτηση για τις ανάγκες φόρτισης είναι πολύ χαμηλότερη. Η υποτιθέμενη διάρκεια ζωής του συστήματος είναι κλάσεις ανώτερη από αυτήν μιας συμβατικής μπαταρίας. Με τους πυκνωτές να αντέχουν θεωρητικά 1000000 κύκλους χρήσης και τα διάφορα ηλεκτρονικά εξαρτήματα να μην έχουν πρακτικά όριο ζωής, η συσκευή θα είναι λειτουργική για πολλά χρόνια, με μόνη απαίτηση την αλλαγή της μικρής 12 Volt μπαταρίας ανά κάποια χρόνια. Τέλος, η περίπτωση ξαφνικής αποτυχίας του συστήματος είναι λιγότερο πιθανή από την αντίστοιχη περίπτωση της συμβατικής μπαταρίας. Η χαμηλή τάση συστοιχίας όπως είδαμε είναι ένα πρόβλημα που λύνεται άμεσα με τη φόρτιση της συστοιχίας από την μπαταρία. Από την άλλη, η χαμηλή τάση μπαταρίας είναι ένα πρόβλημα που επίσης λύνεται με την ενεργοποίηση της κατάστασης «χαμηλής τάσης μπαταρίας» και την τροφοδοσία του αυτοκινήτου εξ' ολοκλήρου από τη συστοιχία μέχρι την επιτυχή εκκίνηση. Ακόμα και στο σενάριο γερασμένης μπαταρίας, η αντικατάστασή της δεν επείγει, καθώς η συστοιχία θα μπορεί να εκκινήσει τον κινητήρα σε κάθε περίπτωση. Η πιθανότητα, οι τάσεις μπαταρίας και συστοιχίας να βρίσκονται ταυτόχρονα σε χαμηλό επίπεδο, έτσι ώστε να είναι αδύνατη η εκκίνηση του κινητήρα, είναι πολύ χαμηλή και σίγουρα χαμηλότερη από το να είναι αποφορτισμένη η συμβατική μπαταρία που διαθέτει το αυτοκίνητο.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός, ότι το σύστημά μας δύναται, θεωρητικά πάντα, να εκκινεί επιτυχώς τον κινητήρα σε συνθήκες πολύ χαμηλών θερμοκρασιών. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, οι συμβατικές μπαταρίες μολύβδου οξέος αδυνατούν να εκκινήσουν τον κινητήρα κάτω από κάποια θερμοκρασία, λόγω της υπερβολικής αύξησης της εσωτερικής τους αντίστασης. Οι υπερπυκνωτές από την άλλη, αν και ίδιοι θα υποστούν μια αύξηση στην εσωτερική τους αντίσταση λόγω ψύχους, δεν είναι τόσο μεγάλη η αύξηση που να αναστέλλει την εκκίνηση. Συμπεραίνουμε δηλαδή, πως με το σύστημα που κατασκευάσαμε αποφεύγουμε τη δυσάρεστη εμπειρία να μείνουμε από μπαταρία λόγω κρύου.

Όλα τα θετικά που προαναφέραμε αντικρούονται από τον παράγοντα του κόστους. Αν και η τεχνολογία των υπερπυκνωτών έχει εξελιχθεί από την απαρχή της εφεύρεσής τους, το κόστος τους παραμένει υψηλό. Παράλληλα, η χρήση μιας μικρής συμβατικής μπαταρίας σε συνδυασμό με την ανάγκη για όλα τα κυκλώματα ελέγχου που αναλύσαμε, διατηρούν το κόστος σε αρκετά υψηλό επίπεδο. Για να είναι συμφέρουσα η χρήση ενός τέτοιου συστήματος αντί της συμβατικής μπαταρίας, πρέπει το κόστος να είναι τέτοιο, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται απόσβεση. Η απόσβεση είναι εφικτή μόνο εάν το κόστος της συσκευής αθροιστικά με το συνολικό κόστος των μικρών 12 Volt μπαταριών, που θα αλλάζονται ανά κάποια χρόνια, παραμείνει μικρότερο από το αντίστοιχο συνολικό κόστος

αντικατάστασης της συμβατικής μπαταρίας για όσες φορές χρειαστεί. Δυστυχώς, κάτι τέτοιο δεν προέκυψε από τους υπολογισμούς μας, αφού τουλάχιστον σε τιμές λιανικής, το όλο εγχείρημα δεν αποδίδει κοστολογικά.

Πέρα από το κόστος, η αντικατάσταση της συμβατικής μπαταρίας με τη συσκευή που κατασκευάσαμε δεν είναι μια απλή «plug and play» εγκατάσταση. Για να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε αυτοκίνητο η συγκεκριμένη συσκευή, απαιτείται ηλεκτρολογική παρέμβαση, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Μια τέτοια ενέργεια, επιφέρει και το ανάλογο κόστος στον χρήστη της συσκευής, ο οποίος έχει ήδη επιβαρυνθεί με το αρχικό κόστος της συσκευής.

Τέλος, ένα λειτουργικό μειονέκτημα της συσκευής είναι η μικρή χωρητικότητα της 12 Volt μπαταρίας. Η χρήση των αξεσουάρ του αυτοκινήτου με σβηστό κινητήρα (μουσική, φώτα, ηλεκτρικά παράθυρα) αποτελεί σημαντικό φορτίο για την μπαταρία, αφού με μόλις 12 Ah δε δύναται να παρέχει ισχύ για μεγάλο χρονικό διάστημα. Βέβαια, ένα τέτοιο σενάριο δεν είναι προβλεπόμενο, οπότε η σημαντικότητα του συγκεκριμένου μειονεκτήματος δε λαμβάνεται ως κύρια.

## 8.2 Προτάσεις βελτίωσης

Η παρούσα διπλωματική μπορεί να υποστεί βελτιώσεις, που θα καθιστούν τη συσκευή ακόμα πιο λειτουργική. Το κύκλωμα φόρτισης μπορεί να υλοποιηθεί διαφορετικά, με τη χρήση εξειδικευμένου ολοκληρωμένου αντί διακριτών εξαρτημάτων για τη μέγιστη δυνατή σταθερότητα ρεύματος, με το ανάλογο πάντα κόστος. Η αξιοποίηση μεγαλύτερης συχνότητας λειτουργίας μπορεί να μειώσει δραματικά την απαιτούμενη αυτεπαγωγή των πηνίων και άρα και το μέγεθός τους. Με τις δύο αυτές αλλαγές επιτυγχάνουμε αυξημένη λειτουργικότητα και μικρότερο μέγεθος πλακέτας, κυρίως λόγω των μικρότερων πηνίων. Το κύκλωμα εξισορρόπησης δύναται να υλοποιηθεί και με άλλους τύπους διατάξεων, οι οποίοι δεν χρησιμοποιούν αντιστάσεις ισχύος. Τέτοιες διατάξεις χαρακτηρίζονται από αυξημένο κόστος και πολυπλοκότητα υλοποίησης, αλλά μας απαλλάσσουν από τις ογκώδεις αντιστάσεις και τη θερμότητα που αυτές εκλύουν. Με αυτόν τον τρόπο, η πλακέτα θα είχε πολύ μικρότερο μέγεθος και άρα θα βοηθούσε στη χωροταξία της συσκευής. Το κύκλωμα των μετρήσεων μπορεί επίσης να βελτιωθεί με τη χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ενισχυτή οργανολογίας αντί απλών τελεστικών. Κάτι τέτοιο θα μας παρείχε αυξημένη ακρίβεια στις μετρήσεις των τάσεων και θα απαιτούσε μικρότερη επιφάνεια πλακέτας.

Από κατασκευαστικής άποψης, η συσκευή μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά όσον αφορά το κουτί. Με τη μέτρηση των ακριβών διαστάσεων, θα μπορούσε να κατασκευαστεί ένα πλαστικό κουτί με τη μέθοδο του 3D-printing. Σε αυτήν την περίπτωση, το κουτί θα κατασκευαζόταν με απόλυτη ακρίβεια με έτοιμες όλες τις απαραίτητες τρύπες, αναμονές και βάσεις στήριξης. Έτσι, το κουτί θα ήταν ενιαίο και θα ήταν ευκολότερη η τοποθέτηση των υλικών στο εσωτερικό του. Τέλος, με αυτή τη μέθοδο θα επιτυγχανόταν καλύτερη στεγανοποίηση του καπακιού, αφού οι επιφάνειες θα ήταν λείες, κάτι το οποίο είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την προστασία από τις εξωτερικές συνθήκες.

Πέρα από τις πιθανές βελτιώσεις που προτείνουμε, η συσκευή θα μπορούσε να λειτουργεί με διαφορετική λογική. Πιο συγκεκριμένα, η αλλαγή που προτείνουμε είναι η λειτουργία της συσκευής παράλληλα με τη συμβατική μπαταρία του αυτοκινήτου και όχι η αντικατάσταση αυτής με μικρότερη. Η λογική πίσω από αυτή την πρόταση είναι ότι η μπαταρία μικρής χωρητικότητας είναι επαρκής για τη συντήρηση των ρευμάτων διατήρησης του αυτοκινήτου μόνο στις περιπτώσεις που το αυτοκίνητο δε διαθέτει εξελιγμένα ηλεκτρονικά. Τα περισσότερα αυτοκίνητα πλέον διαθέτουν μεγάλη πληθώρα ηλεκτρονικών, τα οποία παραμένουν ενεργά και κατά το διάστημα που το αυτοκίνητο δε χρησιμοποιείται. Εκτός αυτού, τα διάφορα συστήματα ασφαλείας με συναγερμό, εντοπισμό

τοποθεσίας αυτοκινήτου και απομακρυσμένο έλεγχο, που πλέον οι περισσότεροι οδηγοί τοποθετούν στα οχήματά τους, αυξάνουν κατά πολύ την κατανάλωση ισχύος όταν το αυτοκίνητο δε χρησιμοποιείται. Η χρήση μικρής μπαταρίας, όπως έγινε στη συσκευή μας, δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να καλύψει τις ανάγκες ενός τέτοιου οχήματος και θα οδηγηθεί πολύ σύντομα σε πλήρη αποφόρτιση. Σε κάθε περίπτωση, ο κινητήρας θα μπορούσε να εκκινηθεί χωρίς πρόβλημα από την ισχύ της συστοιχίας. Το ζήτημα είναι ότι η αποφορτισμένη μπαταρία θα οδηγούσε σε απενεργοποίηση όλων των ηλεκτρονικών του αυτοκινήτου. Κάτι τέτοιο αχρηστεύει τα διάφορα συστήματα ασφαλείας, όπως αυτά που προαναφέραμε, ενώ αρκετά εξαρτήματα του αυτοκινήτου θα απαιτούν επαναρύθμιση (ρολόι, μετρητής χιλιομέτρων, ραδιοCD) ή και calibration (ηλεκτρικά παράθυρα).

Η λογική λοιπόν που προτείνουμε, προϋποθέτει η μπαταρία που θα τοποθετηθεί στο αυτοκίνητο να ακολουθεί τις προδιαγραφές του κατασκευαστή αλλά να γίνεται η επιλογή μιας οικονομικής. Η κοστολογική διαφορά μεταξύ μιας οικονομικής συμβατικής μπαταρίας και της επώνυμης μπαταρίας μικρής χωρητικότητας που επιλέξαμε είναι μικρή και μη συγκρίσιμη με την ασφάλεια που προσφέρει η αυξημένη χωρητικότητα. Εν τέλει, η μπαταρία θα εξυπηρετεί τις συνεχείς καταναλώσεις του αυτοκινήτου και η εκκίνηση θα γίνεται από τη συστοιχία. Η μπαταρία, λοιπόν, θα λειτουργεί πολύ πιο ξεκούραστα, αφού δε θα τροφοδοτεί τις απαιτητικές εκκινήσεις του κινητήρα, οπότε θα αυξηθεί και ο χρόνος ζωής της, εξισορροπώντας έτσι την πιθανή χαμηλότερη ποιότητα λόγω μειωμένου κόστους. Τέλος, στο σενάριο χαμηλής τάσης συστοιχίας, δε θα απαιτείται αναμονή για τη φόρτιση της συστοιχίας από την μπαταρία αλλά η εκκίνηση θα γίνεται με τη χρήση ισχύος από τη συμβατική μπαταρία αυτοκινήτου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Charles K. Alexander, Matthew N.O Sadiku, *Foundamentals of Electric Circuits*, Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑΣ, 2015
- [2] IETlabs application note 035002
- [3] <https://www.skeletontech.com/skeleton-blog/what-is-esr>
- [4] <https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-equivalent-series-resistance-esr/>
- [5] <https://learn.sparkfun.com/tutorials/capacitors/all>
- [6] [https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/capacitors/capacitor-types.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/capacitors/capacitor-types.php)
- [7] <https://studentlesson.com/types-of-capacitors/>
- [8] <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/passive-components/capacitors/plasticfilmcapacitor.html>
- [9] <https://www.kalaher.gr/faq/ti-einai-i-miza/>
- [10] Automotive Ignition Systems and Starting Systems," by James E. Miller, 1996.
- [11] <https://www.powermag.gr/el/know-how-ilektriko-sistema-part-vii.html>
- [12] Rolf Gscheidle, *Μηχανοτρονική Αυτοκινήτων - Οχημάτων 3 – Ηλεκτρικά και Ηλεκτρονικά Συστήματα Οχημάτων*, Αθήνα: ΙΩΝ, 2016
- [13] <https://www.powermag.gr/el/know-how-ilektriko-sistema-part-v.html>
- [14] [https://www.dri.dk/media/1169/troubleshooting\\_alternators.pdf](https://www.dri.dk/media/1169/troubleshooting_alternators.pdf)
- [15] Ιορδάνης Ν. Κιοσκερίδης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος*, Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑΣ, 2017
- [16] <https://www.smart-cover.gr/563146/>
- [17] <https://www.electricity-magnetism.org/electric-battery/vrla-battery/>
- [18] <https://www.batteryclub.gr/blog-news/ti-einai-oi-bataries-vrla>
- [19] <https://www.recorbatteries.gr/τι-είναι-οι-μπαταρίες-μολύβδου-οξέως/>
- [20] G Gautham Prasad et al 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 561 012105
- [21] <https://studiousguy.com/working-principle-supercapacitor/>
- [22] [https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/08/whitepaper\\_top\\_10\\_reasons\\_for\\_ultracaps.pdf](https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/08/whitepaper_top_10_reasons_for_ultracaps.pdf)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ ARDUINO

```
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_ST7735.h>
#include <SPI.h>

#define voltage_reference 3.003
#define cell_lockout_threshold 0.500
#define stack_lockout_threshold 8.000
#define upper_limit 2.42
#define lower_limit 2.37
#define cell_stack_voltage_divider 120.0/20.0
#define battery_voltage_divider 120.0/20.0
#define TFT_CS 10
#define TFT_RST 8
#define TFT_DC 9

Adafruit_ST7735 screen = Adafruit_ST7735(10,9,8);
float cellV[6],cell_stack_voltage,battery_voltage,current;
unsigned long prev=millis(),lockPrev;
uint16_t color[6]={0x0000,0x0000,0x0000,0x0000,0x0000,0x0000};
boolean keyStartPosition=false , keyswitchReset=false, overVoltage=false, stackCharging=false,
emergencyStackCharging=false,temp = 0,low_bat = false;

void setup()
{
  pinMode(2,OUTPUT);
  pinMode(3,OUTPUT);
  pinMode(4,OUTPUT);
  pinMode(5,OUTPUT);
  pinMode(6,OUTPUT);
  pinMode(7,OUTPUT);
  pinMode(22,OUTPUT);
  pinMode(24,OUTPUT);
  pinMode(26,OUTPUT);
  pinMode(28,OUTPUT);
  pinMode(30,OUTPUT);
```

```
pinMode(40,INPUT);
pinMode(42,INPUT);
pinMode(23,INPUT);
pinMode(25,INPUT);
pinMode(33,OUTPUT);
pinMode(37,OUTPUT);
pinMode(41,OUTPUT);
pinMode(45,OUTPUT);
pinMode(46,OUTPUT);
pinMode(48,OUTPUT);
digitalWrite(2,HIGH);
digitalWrite(3,HIGH);
digitalWrite(4,HIGH);
digitalWrite(5,HIGH);
digitalWrite(6,LOW);
digitalWrite(7,LOW);
digitalWrite(22,LOW);
digitalWrite(24,LOW);
digitalWrite(26,LOW);
digitalWrite(28,LOW);
digitalWrite(30,LOW);
digitalWrite(33,LOW);
digitalWrite(37,LOW);
digitalWrite(41,LOW);
digitalWrite(45,LOW);
digitalWrite(46,LOW);
digitalWrite(48,LOW);
analogReference(EXTERNAL);
TFT_initialize();
screen.setCursor(93,68);
screen.print("----");
digitalWrite(45,HIGH);
delay(200);
```

```

digitalWrite(41,HIGH);
delay(1000);
}
void loop() {
if (digitalRead(23)==1)
{
if (low_bat == false)
{
digitalWrite(22,HIGH);
delay(40);
digitalWrite(28,HIGH);
delay(50);
screen.setCursor(93,68);
screen.print("----");
low_bat = true;
}
voltageMeasure();
if (millis()-prev>1000)
{
prev=millis();
for (int i=0;i<6;i++)
{
screen.setCursor(14,i*17);
screen.print(cellV[i],3);
screen.fillCircle(77,i*17+2,2,color[i]);
}
screen.setCursor(93,18);
screen.print(battery_voltage,2);
screen.setCursor(93,45);
screen.print(cell_stack_voltage,2);
}
emergencyStarting();
}

```

```

}
else
{
voltageMeasure();
if ((cell_stack_voltage<=10.0) && (keyswitchReset==false) && (battery_voltage >=11.0) &&
(battery_voltage - cell_stack_voltage >=0.200))
{
stackChargingThroughBattery();
emergencyStackCharging = true;
chargingCurrentMeasure();
screen.setCursor(93,68);
screen.print(current,2);
}
else if ((emergencyStackCharging==true) && ((keyswitchReset==true) || (battery_voltage < 11.0) ||
(battery_voltage - cell_stack_voltage < 0.200)))
{
digitalWrite(37,LOW);
delay(50);
digitalWrite(33,LOW);
screen.setCursor(93,68);
screen.print("----");
emergencyStackCharging=false;
}
if (emergencyStackCharging==true)
{
chargingCurrentMeasure();
screen.setCursor(93,68);
screen.print(current,2);
}
boolean lockout = underVoltageLockOut();
startingProcedure(lockout);
if (emergencyStackCharging==false)
{
chargeCircuitSwitching();
}

```

```

}
transition();
if (millis()-prev>1000)
{
prev=millis();
for (int i=0;i<6;i++)
{
screen.setCursor(14,i*17);
screen.print(cellV[i],3);
screen.fillCircle(77,i*17+2,2,color[i]);
}
screen.setCursor(93,18);
screen.print(battery_voltage,2);
screen.setCursor(93,45);
screen.print(cell_stack_voltage,2);
}
}
}
void OverVoltageShutDown(float cell[])
{
if (cell[0]>=2.60 || cell[1]>=2.60 || cell[2]>=2.60 || cell[3]>=2.60 || cell[4]>=2.60 || cell[5]>=2.60)
{
digitalWrite(37,LOW);
delay(50);
digitalWrite(33,LOW);
overVoltage=true;
}
}
boolean underVoltageLockOut()
{
boolean lockOut;
if (cellV[0] <=cell_lockout_threshold || cellV[1]<=cell_lockout_threshold ||
cellV[2]<=cell_lockout_threshold || cellV[3]<=cell_lockout_threshold ||

```

```

cellV[4]<=cell_lockout_threshold || cellV[5]<=cell_lockout_threshold || cell_stack_voltage <
stack_lockout_threshold)
{
  if (temp == 0)
  {lockPrev=millis();
  temp =1;}
  if (millis()-lockPrev>=2500)
  {
    lockOut=1;
    screen.setTextColor(0xF800,0x0000);
    screen.setCursor(15,105);
    screen.print("Low voltage");
    screen.setTextColor(0x07E0,0x0000);
  }
}
else
{
  lockOut=0;
  temp = 0;
}
return lockOut;
}
void voltageMeasure()
{
  float cell_ground=0;
  for(int i=0;i<10;i++)
  {
    cell_ground=cell_ground+analogRead(A2);
  }
  cellV[0] = (float)cell_ground*voltage_reference/10240.0;
  cellV[1] = (float)analogRead(A3)*voltage_reference/1024.0;
  cellV[2] = (float)analogRead(A6)*voltage_reference/1024.0;
  cellV[3] = (float)analogRead(A5)*voltage_reference/1024.0;

```

```

cellV[4] = (float)analogRead(A4)*voltage_reference/1024.0;
cellV[5] = (float)analogRead(A0)*voltage_reference/1024.0;
cell_stack_voltage = (float)analogRead(A1)*voltage_reference/1024.0*cell_stack_voltage_divider;
float total = 0.0;
for (int i=0;i<13;i++)
{
total = total + (float)analogRead(A7);
delay(4);
}
battery_voltage = total*voltage_reference/13312.0*battery_voltage_divider;
}
void chargeCircuitSwitching()
{
if (cell_stack_voltage>=14.0 || (cell_stack_voltage - battery_voltage >=0))
{
digitalWrite(37,LOW);
delay(100);
digitalWrite(33,LOW);
screen.setCursor(93,68);
screen.print("----");
stackCharging=false;
}
else if (battery_voltage>=13.55 && digitalRead(42)==0 && overVoltage==false)
{
if ((cell_stack_voltage<=13.9) && (stackCharging == false))
{
digitalWrite(33,HIGH);
delay(2000);
digitalWrite(37,HIGH);
stackCharging=true;
}
}
if (stackCharging==true)
{

```

```

    chargingCurrentMeasure();
    screen.setCursor(93,68);
    screen.print(current,2);
  }
}
else
{
  digitalWrite(37,LOW);
  delay(100);
  digitalWrite(33,LOW);
  screen.setCursor(93,68);
  screen.print("----");
  stackCharging=false;
}
}
void chargingCurrentMeasure()
{
  float total = 0.0;
  for (int i=0;i<10;i++)
  {
    total=total+(float)analogRead(A8);
    delay(3);
  }
  current = total*2.5000*voltage_reference/10240.0;
}
void startingProcedure(boolean lockOut)
{
  if (lockOut==false && digitalRead(42)==1 && keyStartPosition==false &&
  keyswitchReset==false)
  {
    keyStartPosition=true;
    keyswitchReset=true;
  }
}

```

```

if (emergencyStackCharging==true)
{
    digitalWrite(37,LOW);
    delay(50);
    digitalWrite(33,LOW);
}
    digitalWrite(30,HIGH);
    delay(25);
    digitalWrite(22,HIGH);
    delay(40);
    digitalWrite(28,HIGH);
    delay(50);
    digitalWrite(30,LOW);
    delay(25);
    digitalWrite(26,HIGH);
}
else if ((digitalRead(42)==0 || lockOut==true) && keyStartPosition==true) {
    digitalWrite(26,LOW);
    delay(30);
    digitalWrite(30,HIGH);
    delay(30);
    digitalWrite(28,LOW);
    delay(50);
    digitalWrite(22,LOW);
    delay(40);
    digitalWrite(30,LOW);
    keyStartPosition=false;
}
}
void transition ()
{
    if (battery_voltage>=13.3 && cell_stack_voltage<=13.9)
    for (int i=0;i<4;i++)

```

```

{
if (cellV[i]>=upper_limit)
{
digitalWrite(2+i,LOW);
color[i]=0xF800;
}
else if (cellV[i]<=lower_limit)
{
digitalWrite(2+i,HIGH);
color[i]=0x001F;
}
}
for (int j=4;j<6;j++)
{
if (cellV[j]>=upper_limit)
{
digitalWrite(2+j,HIGH);
color[j]=0xF800;
}
else if (cellV[j]<=lower_limit)
{
digitalWrite(2+j,LOW);
color[j]=0x001F;
}
}
}

void emergencyStarting()
{
if (digitalRead(42)==1 && keyswitchReset==false )
{
digitalWrite(26,HIGH);
keyswitchReset=true;
}
}

```

```

else if (digitalRead(42)==0 && keyswitchReset==true )
{
digitalWrite(26,LOW);
delay(40);
digitalWrite(30,HIGH);
delay(15);
digitalWrite(28,LOW);
delay(50);
}
}
void stackChargingThroughBattery()
{
if (emergencyStackCharging == false)
digitalWrite(33,HIGH);
delay(2000);
digitalWrite(37,HIGH);
}
void TFT_initialize()
{
screen.initR(INITR_BLACKTAB);
screen.setSPISpeed(4000000);
screen.setRotation(1);
screen.fillScreen(0x0000);
screen.setTextSize(2);
screen.setTextColor(0x07E0,0x800C);
screen.setCursor(0,0);
screen.print("Ultra");
screen.setCursor(0,37);
screen.print("Capacitor");
screen.setCursor(0,74);
screen.print("Battery");
screen.setCursor(0,111);

```

```

screen.print("System");
delay(800);
screen.setTextColor(0x07E0,0x0000);
screen.fillRect(0,0,160,128,0x0000);
screen.setCursor(0,0);
screen.setTextSize(1);
for (int i=1;i<7;i++)
{
screen.setCursor(0,(i-1)*17+3);
screen.print(i);
screen.print(">");
screen.setCursor(75,(i-1)*17+7);
screen.print("V");
}
screen.setCursor(142,50);
screen.print("V");
screen.setCursor(142,74);
screen.print("A");
screen.drawFastVLine(83,0,100,0xFFFF);
drawBatterySymbol();
screen.setTextSize(2);
}
void drawBatterySymbol()
{
int x=7,y=-3;
screen.drawRect(82+x,15+y,70,28,0xFFE0);
screen.drawRect(83+x,16+y,68,26,0xFFE0);
screen.drawRect(84+x,17+y,66,24,0xFFE0);
screen.fillRect(87+x,12+y,5,3,0xFFE0);
screen.fillRect(142+x,12+y,5,3,0xFFE0);
screen.fillRect(86+x,8+y,7,2,0xFFE0);
screen.fillRect(140+x,6+y,8,2,0xFFE0);
screen.fillRect(143+x,3+y,2,8,0xFFE0); }

```