

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**«ΜΕΛΕΤΗ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ**  
**DC ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕΣΩ DC/DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ & ΒΡΟΓΧΟΥ**  
**ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ»**

**ΒΛΑΧΟΥ Α. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ**

**ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ Δ. ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ ΗΡΑΚΛΗΣ [ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ]**

**ΑΙΓΑΛΕΩ 2016**

## **COPYWRITE**

Copyright© Βλάχου Κωνσταντίνα, Λαζαρίδης Ιωάννης, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, η αποθήκευση και η διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, η αποθήκευση και η διανομή για εκπαιδευτικό ή ερευνητικό σκοπό, υπό την προϋπόθεση να αναγράφεται η πηγή προέλευσης.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας αντιπροσωπεύουν τους συγγραφείς και όχι τις επίσημες θέσεις του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ..



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

«Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης λύσης για την οδήγηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος τροφοδοτούμενου από συστοιχία μπαταριών λιθίου με εφαρμογή στη κίνηση πρωτότυπου ηλεκτρικού οχήματος σε διαγωνισμό υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Το κύκλωμα υλοποιείται από διακοπτικά στοιχεία τελευταίας τεχνολογίας τη στιγμή που γράφεται το παρόν και η ανάλυση γίνεται μέσω εξομοίωσης σε υπολογιστικό περιβάλλον. Η κατασκευή της πλακέτας οδήγησης γίνεται με πρακτικές μεθόδους χαμηλού κόστους και το αποτέλεσμα είναι μια ολοκληρωμένη λύση για την οδήγηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος σε συνθήκες χαμηλής κατανάλωσης.»



## **ABSTRACT**

«The scope of this thesis is to develop an integrated solution for driving a direct current motor powered by a lithium ion battery pack with application in moving a prototype electric vehicle in a high energy efficiency competition. The circuit is created by modern technology switching elements - at the time of writing and analysis is conducted with simulations in computational environment. Manufacturing of the driving circuit board is achieved by practical low cost methods and the result is an integrated solution for DC Motor driving in low energy consumption applications.»



## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Μετατροπέας DC/DC, Κινητήρας DC, σύστημα ροής ενέργειας, κατασκευή πλακέτας.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 υπό την επίβλεψη του κ. Βυλλιώτη Ηρακλή, καθηγητή εφαρμογών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ., στον οποίο οφείλουμε ιδιαίτερες ευχαριστίες για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης και της κατασκευής.

Επιπροσθέτως, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Στεργίου Κωνσταντίνο, πρόεδρο του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. για την στήριξη του κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους συμφοιτητές μας και μέλη της φοιτητικής ομάδας «Poseidon» του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. για την βοήθεια τους σε τμήματα της εργασίας.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| COPYWRITE.....                                                       | 2  |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....                                                       | 4  |
| ABSTRACT .....                                                       | 6  |
| ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ .....                                                 | 8  |
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....                                                    | 9  |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....                                                     | 11 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                          | 14 |
| 1.1 Γενικά.....                                                      | 14 |
| 1.2 Στόχος .....                                                     | 15 |
| 1.3 Ειδικές συνθήκες (Shell Eco-marathon Rules & Regulations) .....  | 15 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....            | 16 |
| 2.1 Γενικά.....                                                      | 16 |
| 2.2 Η δίοδος .....                                                   | 19 |
| 2.3 BTJ (Bipolar Junction Transistor) .....                          | 20 |
| 2.3.1 Περιοχές λειτουργίας .....                                     | 22 |
| 2.4 IGBT (Insulated Gate Bipolar Thyristor).....                     | 24 |
| 2.5 GTO (Gate Turn Off Thyristor) .....                              | 26 |
| 2.6 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) ..... | 29 |
| 2.7 Thyristor .....                                                  | 32 |
| 2.8 Ολοκληρωμένα κυκλώματα (Integrated Circuits, IC) LMXXX.....      | 37 |
| 2.8.1 Ο ρυθμιστής τάσης LM317.....                                   | 38 |
| 2.9 Οπτοσυζεύκτες .....                                              | 39 |
| 2.10 Υπολογισμός απωλειών ημιαγωγικών διακοπών .....                 | 40 |
| 2.11 Απαγωγή θερμότητας (Ψυκτικά σώματα) .....                       | 41 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ – DC ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ .....                 | 43 |
| 3.1 Γενικά.....                                                      | 43 |
| 3.2 Οι απώλειες κινητήρα .....                                       | 43 |
| 3.2.1 Απώλειες χαλκού ( $I^2R$ απώλειες).....                        | 44 |
| 3.2.2 Απώλειες ψηκτρών.....                                          | 44 |
| 3.2.3 Απώλειες πυρήνα .....                                          | 45 |
| 3.2.4 Μηχανικές απώλειες .....                                       | 45 |
| 3.2.5 Κατανεμημένες απώλειες .....                                   | 45 |

|                                                            |                                                    |    |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----|
| 3.3                                                        | O Brushed DC Maxon Motor 200W.....                 | 46 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ..... |                                                    | 48 |
| 4.1                                                        | Γενικά.....                                        | 48 |
| 4.2                                                        | Τροφοδοσία.....                                    | 49 |
| 4.3                                                        | Περιφερειακές συσκευές .....                       | 51 |
| 4.3.1                                                      | Ο μικροεπεξεργαστής Tiva C Series.....             | 51 |
| 4.3.2                                                      | BMS (Battery Management System) .....              | 52 |
| 4.3.3                                                      | LM2596 Buck Converters.....                        | 57 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Οι μετατροπείς .....                          |                                                    | 60 |
| 5.1                                                        | Γενικά.....                                        | 60 |
| 5.1.1                                                      | Κατηγορίες μετατροπέων.....                        | 60 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Ο ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ DC/DC.....                      |                                                    | 67 |
| 6.1                                                        | Γενικά.....                                        | 67 |
| 6.2                                                        | Αρχή λειτουργίας του DC/DC Converter .....         | 67 |
| 6.3                                                        | Ηλεκτρονικά Ισχύος.....                            | 68 |
| 6.3.1                                                      | MOSFET IRP064N.....                                | 68 |
| 6.3.2                                                      | Δίοδος Ελευθέρας Ροής .....                        | 69 |
| 6.3.3                                                      | Πηνίο .....                                        | 70 |
| 6.3.4                                                      | Πυκνωτής εξομάλυνσης εξόδου.....                   | 70 |
| 6.3.5                                                      | Πυκνωτής εξομάλυνσης εισόδου .....                 | 70 |
| 6.4                                                        | Ηλεκτρονικά Ελέγχου .....                          | 71 |
| 6.4.1                                                      | Τροφοδοσία κυκλωμάτων ελέγχου.....                 | 71 |
| 6.4.2                                                      | Ενισχυτής τετραγωνικού παλμού Push-Pull.....       | 72 |
| 6.5                                                        | Βρόγχος ανάδρασης – Περιορισμός Ρεύματος.....      | 73 |
| 6.6                                                        | Εξομοίωση κυκλώματος .....                         | 76 |
| 6.6.1                                                      | Το περιβάλλον NI Multisim .....                    | 76 |
| 6.6.2                                                      | Επίλυση γραμμικών κυκλωμάτων με κώδικα SPICE ..... | 77 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ & ΠΛΑΚΕΤΑΣ .....         |                                                    | 78 |
| 7.1                                                        | Γενικά.....                                        | 78 |
| 7.2                                                        | Στάδια της διαδικασίας παραγωγής PCB.....          | 79 |
| 7.2.1                                                      | Σχεδίαση .....                                     | 79 |
| 7.2.2                                                      | Αποτύπωση .....                                    | 79 |
| 7.2.3                                                      | Αποχάλκωση.....                                    | 81 |
| 7.2.4                                                      | Επιφανειακή Προστασία .....                        | 82 |

|                                                |                          |     |
|------------------------------------------------|--------------------------|-----|
| 7.2.5                                          | Διάτρηση Οπών .....      | 84  |
| 7.2.6                                          | Πρόσθετες στρώσεις ..... | 84  |
| 7.2.7                                          | Συναρμολόγηση.....       | 85  |
| 7.2.8                                          | Κόλληση.....             | 86  |
| 7.3                                            | Η κατασκευή.....         | 88  |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Εικόνες, Πίνακες, Γραφήματα ..... |                          | 96  |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. DATASHEETS .....                  |                          | 98  |
| [1] .                                          | IRFP064N .....           | 98  |
| [2] .                                          | BD243C .....             | 105 |
| [3] .                                          | BD244A.....              | 110 |
| [4] .                                          | HEDL-5540-A13.....       | 113 |
| [5] .                                          | SB5XXX.....              | 124 |
| [6] .                                          | PANASONIC NCR 18650..... | 125 |
| [7] .                                          | MAXON 370356.....        | 126 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....                             |                          | 127 |

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά

Στην παρούσα εργασία περιγράφονται όλα τα στάδια της διαδικασίας οδήγησης ηλεκτρικού κινητήρα DC, με αναφορές στις αρχές λειτουργίας και την ενεργειακή συμπεριφορά των επί μέρους στοιχείων. Η έρευνα αυτή αποσκοπεί στην ελάχιστη κατανάλωση κατά την οδήγηση ενός κινητήρα και τη σύγκριση στοιχείων και μεθόδων που συντελούν σε αυτή και έγινε στα πλαίσια της συμμετοχής της φοιτητικής ομάδας «Ποσειδών» του Α.Ε.Ι. Πειραιά, η οποία έλαβε μέρος στον ενεργειακό διαγωνισμό Shell Eco Marathon 2015.

Στο 2ο Κεφάλαιο γίνεται η θεωρητική μελέτη διακοπτικών στοιχείων γενικά, αλλά πιο συγκεκριμένα για τα στοιχεία, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της παρούσας πλακέτας οδήγησης κινητήρα.

Στο 3ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις ηλεκτρικές μηχανές και πιο συγκεκριμένα στους DC Κινητήρες (Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος).

Στο 4ο Κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των τμημάτων του συστήματος ροής της ενέργειας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου “Trireme”, το οποίο κατασκευάστηκε εξολοκλήρου από την φοιτητική ομάδα «Ποσειδών» του Α.Ε.Ι. Πειραιά.

Στο 5ο Κεφάλαιο γίνεται μια γενική ανάλυση των DC/DC μετατροπέων και μια ειδικότερη μελέτη και ανάλυση της κατηγορίας “Step Down DC/DC Converter” (DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης).

Στο 6ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια της κατασκευής του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας οδήγησης του κινητήρα.

Στο Παράρτημα Α παρατίθενται φωτογραφίες από τη διαδικασία μελέτης, σχεδίασης και κατασκευής του τυπωμένου κυκλώματος.

Στο Παράρτημα Β παρατίθενται τα Datasheet όλων των ηλεκτρονικών στοιχείων που αναφέρονται στην παρούσα εργασία.

## **1.2 Στόχος**

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή πλακέτας οδήγησης DC κινητήρα, με σκοπό τις ελάχιστες ενεργειακές απώλειες των επιμέρους εξαρτημάτων.

## **1.3 Ειδικές συνθήκες (Shell Eco-marathon Rules & Regulations)**

Η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή της εν λόγω πλακέτας οδήγησης DC κινητήρα έγιναν υπό κάποιους συγκεκριμένους κανονισμούς και περιορισμούς, τους οποίους υπαγορεύει η εταιρεία πετρελαιοειδών Shell για τις ανάγκες του ενεργειακού διαγωνισμού Shell Eco-marathon. Εν συντομία, οι κανονισμοί προσδιορίζουν το εύρος της τάσης εισόδου και εξόδου της πλακέτας οδήγησης (Motor Controller) και εν μέρη τον τρόπο κατασκευής της. Αναλυτικά οι κανονισμοί βρίσκονται στο site του διαγωνισμού στα Αγγλικά. <http://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon/for-participants/rules-and-competition-overview.html>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

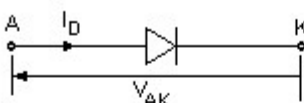
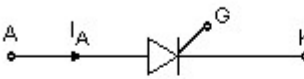
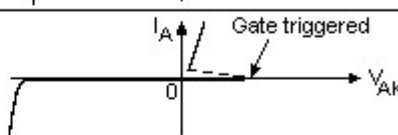
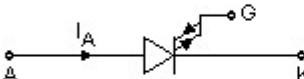
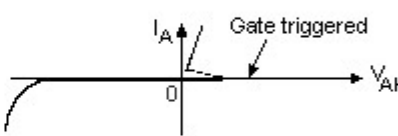
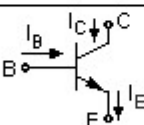
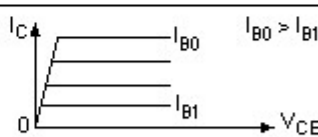
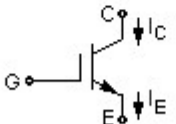
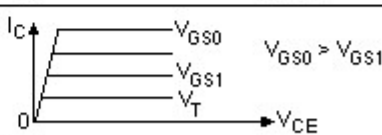
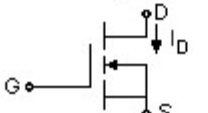
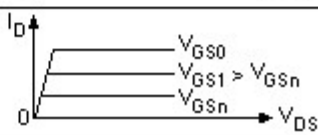
### 2.1 Γενικά

Για την κατασκευή κυκλωμάτων οδήγησης κινητήρων υπάρχει μια ποικιλία ημιαγωγικών διακοπών. Ένας ημιαγωγός είναι ένα στοιχείο με ηλεκτρικές ιδιότητες, μεταξύ εκείνων ενός αγωγού και εκείνων ενός μονωτή. Μερικά από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα ημιαγωγικά στοιχεία είναι το γερμάνιο, το πυρίτιο και ο άνθρακας. Ανάλογα με το σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος, στο οποίο θα χρησιμοποιηθούν οι ημιαγωγικοί διακόπτες, λαμβάνονται υπ όψη κάποιοι παράμετροι, όπως:

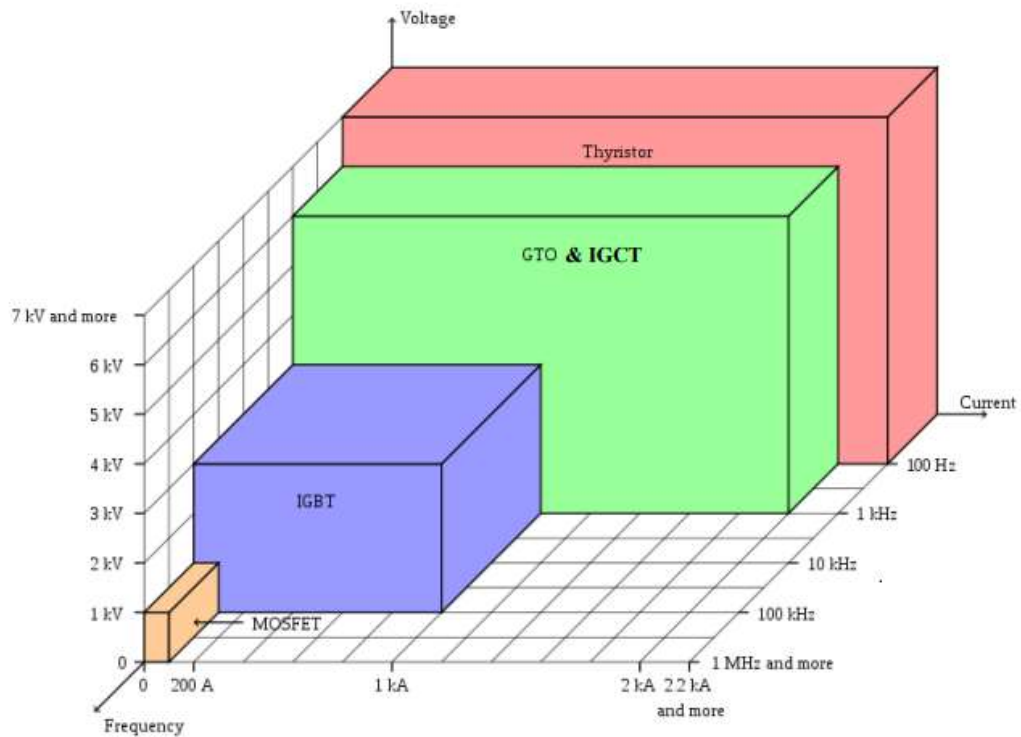
- Τάση
- Ρεύμα
- Ισχύς
- Θερμοκρασία
- Συχνότητα λειτουργίας
- Κόστος
- Βάρος
- Διαστάσεις

Οι περισσότεροι ημιαγωγικοί διακόπτες είναι ημιαγωγοί πυριτίου (Si) και κατηγοριοποιούνται σε διόδους, τρανζίστορ, τρανζίστορ ισχύος (MOSFET, IGBT και GTO) και θυρίστορ. Επικουρικά στα παραπάνω χρησιμοποιούμε και άλλα στοιχεία, όπως τα ολοκληρωμένα τύπου LMXXX και οπτοηλεκτρονικές διατάξεις, όπως οπτοσυζεύκτες (optocoupler)

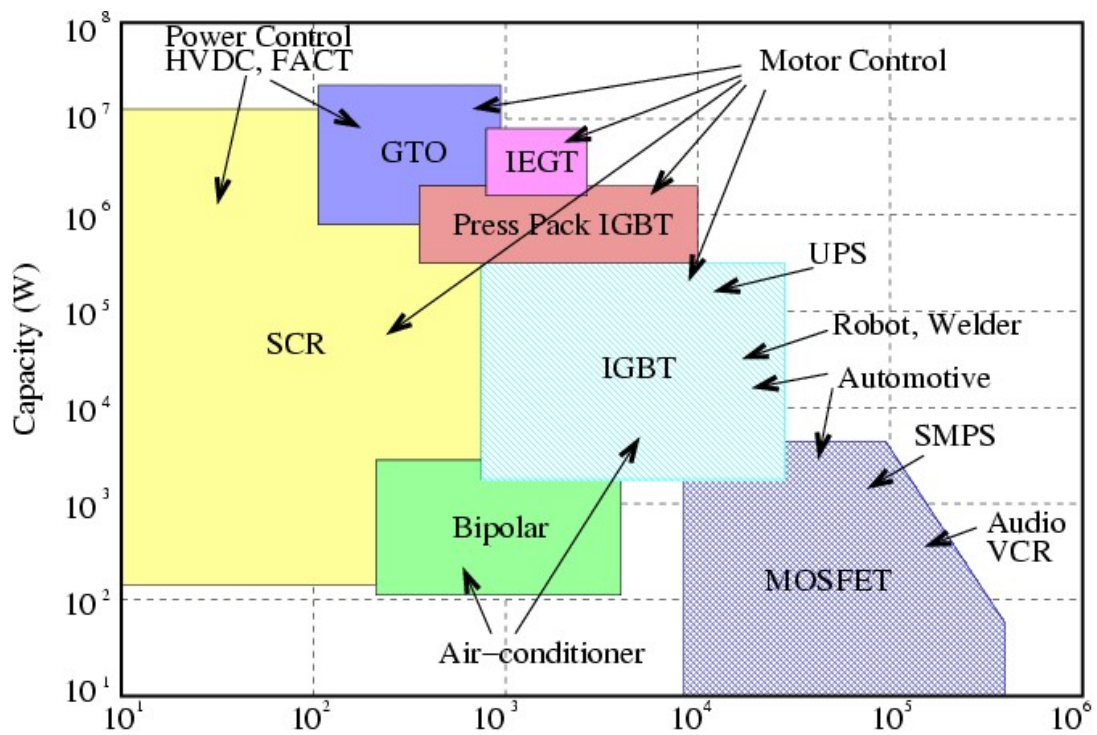
Τα απλά τρανζίστορ έχουν αντικατασταθεί πλήρως από τα MOSFET και τα IGBT, τα οποία χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.

| Devices          | Symbols                                                                            | Characteristics                                                                     |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Diode            |   |   |
| Thyristor        |   |   |
| GTO              |   |   |
| NPN BJT          |   |   |
| IGBT             |   |   |
| N-Channel MOSFET |  |  |

**Εικόνα 1: Σύμβολα & Χαρακτηριστικές των ημιαγωγών που αναλύονται παρακάτω**



Εικόνα 2: Σύγκριση χαρακτηριστικών ημιαγωγών ισχύος.



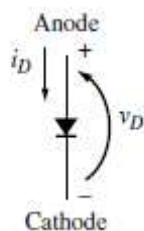
Εικόνα 3: Εφαρμογές των ημιαγωγών ισχύος.

## 2.2 Η δίοδος

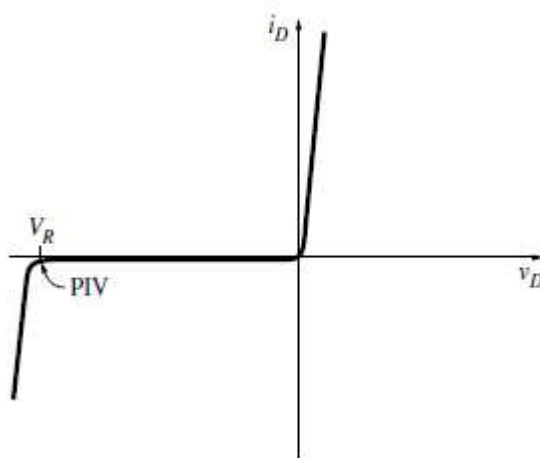
Η δίοδος είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο σχεδιασμένο έτσι ώστε να άγει ένα μεγάλο ποσοστό του ρεύματος κατά την ορθή φορά και ελάχιστο κατά την ανάστροφη. Εάν σε μια δίοδο ανάστροφα πολωμένη, εφαρμοστεί μεγάλη τάση, τότε η δίοδος καταστρέφεται και το ρεύμα κινείται προς την ανάστροφη φορά.

Η δίοδος, σε αντίθεση με μια συνηθισμένη ωμική αντίσταση, αποτελεί μια μη γραμμική διάταξη, διότι η γραφική παράσταση του ρεύματος της σε σχέση με την τάση δεν σχηματίζει ευθεία γραμμή. Ο λόγος είναι το φράγμα δυναμικού. Όταν η τάση της διόδου είναι μικρότερη από το φράγμα δυναμικού, το ρεύμα της διόδου είναι μικρό. Όταν η τάση της διόδου υπερβαίνει το φράγμα δυναμικού, τότε το ρεύμα της διόδου αυξάνεται γρήγορα.

Σε ιδανικές περιπτώσεις μια δίοδος ανόρθωσης λειτουργεί σαν ένας τέλειος αγωγός (μηδενική αντίσταση) όταν είναι ορθά πολωμένη και σαν ένας τέλειος μονωτής (άπειρη αντίσταση) όταν είναι ανάστροφα πολωμένη. Ένας συνηθισμένος διακόπτης έχει μηδέν αντίσταση όταν είναι κλειστός και άπειρη αντίσταση όταν είναι ανοικτός. Συνεπώς μια ιδανική δίοδος λειτουργεί σαν ένας διακόπτης που κλείνει όταν είναι ορθά πολωμένη και σαν ένας διακόπτης που ανοίγει όταν είναι ανάστροφα πολωμένη. Έτσι συνοψίζεται η ιδέα της διόδου ως διακόπτης.



**Εικόνα 4: Σχηματικό διάγραμμα διόδου.**



**Εικόνα 5: Χαρακτηριστική V-I διόδου.**

## 2.3 BTJ (Bipolar Junction Transistor)

Ο πρώτος ημιαγωγός που χρησιμοποιήθηκε σαν στοιχείο ενίσχυσης ήταν το λεγόμενο τρανζίστορ επαφής ή αλλιώς διπολικό τρανζίστορ. Η ονομασία «διπολικό» οφείλεται στο ότι το ρεύμα του δημιουργείται από δυο είδη φορέων φορτίου με διαφορετικές πολικότητες, δηλαδή τα ηλεκτρόνια και τις οπές. Οι δυο τύποι τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι του npn που κατασκευάζεται από πυρίτιο και του pnp που κατασκευάζεται από γερμάνιο. Ένα BJT έχει τρεις ακροδέκτες, τον εκπομπό (Emitter), τη βάση (Base) και τον συλλέκτη (Collector).

Για να λειτουργήσει ένα BJT, πρέπει ο αριθμός των οπών της βάσης (κρύσταλλος p) να είναι μικρότερος από τον αριθμό των ηλεκτρονίων του εκπομπού και του συλλέκτη (κρύσταλλοι n).

Γενικά κατά τη λειτουργία των τρανζίστορ θα πρέπει μεταξύ βάσης και εκπομπού να εφαρμόζεται ορθή πόλωση, ενώ μεταξύ βάσης και συλλέκτη να εφαρμόζεται ανάστροφη πόλωση. Το είδος της πόλωσης εξαρτάται από τη συνδεσμολογία των πηγών.

Όταν στο τρανζίστορ εφαρμοστεί μόνο ορθή πόλωση μεταξύ βάσης και εκπομπού, τότε ο αρνητικός πόλος της πηγής που συνδέεται στον εκπομπό, απωθεί τα ηλεκτρόνια προς την επαφή n-p, ενώ την ίδια στιγμή ο θετικός πόλος της πηγής που συνδέεται στη βάση, απωθεί οπές προς την ίδια επαφή. Οπότε ένας μικρός αριθμός από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του εκπομπού και οι οπές της βάσης ενώνονται, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται το δυναμικό φραγμού και έτσι στο κύκλωμα βάσης και εκπομπού να κυκλοφορεί ένα πολύ μικρό ρεύμα.

Όταν στο τρανζίστορ εφαρμοστεί μόνο ανάστροφη πόλωση μεταξύ βάσης και συλλέκτη, τότε ο θετικός πόλος της πηγής έλκει τα ηλεκτρόνια του συλλέκτη, ενώ ο αρνητικός πόλος της, έλκει τις οπές της βάσης. Επομένως, τα ηλεκτρόνια και οι οπές απομακρύνονται από την επαφή p-n, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης της επαφής και συνεπώς να μην κυκλοφορεί ρεύμα στο κύκλωμα συλλέκτη-βάσης.

Όταν στο τρανζίστορ εφαρμοστούν ταυτόχρονα και οι δυο προαναφερθείσες πολώσεις, τότε το αρνητικό δυναμικό του εκπομπού απωθεί τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του προς την επαφή n-p εκπομπού-βάσης, η οποία λόγω ορθής πόλωσης παρουσιάζει μικρή αντίσταση. Επομένως τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στην περιοχή της βάσης και ενώνονται με τις οπές της.

### 2.3.1 Περιοχές λειτουργίας

*i. Ενεργός περιοχή*

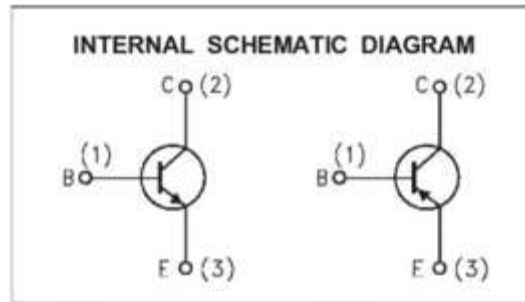
Εφαρμόζουμε ορθή πόλωση στην επαφή εκπομπού-βάσης και ανάστροφη πόλωση στην επαφή βάσης-συλλέκτη.

*ii. Περιοχή αποκοπής*

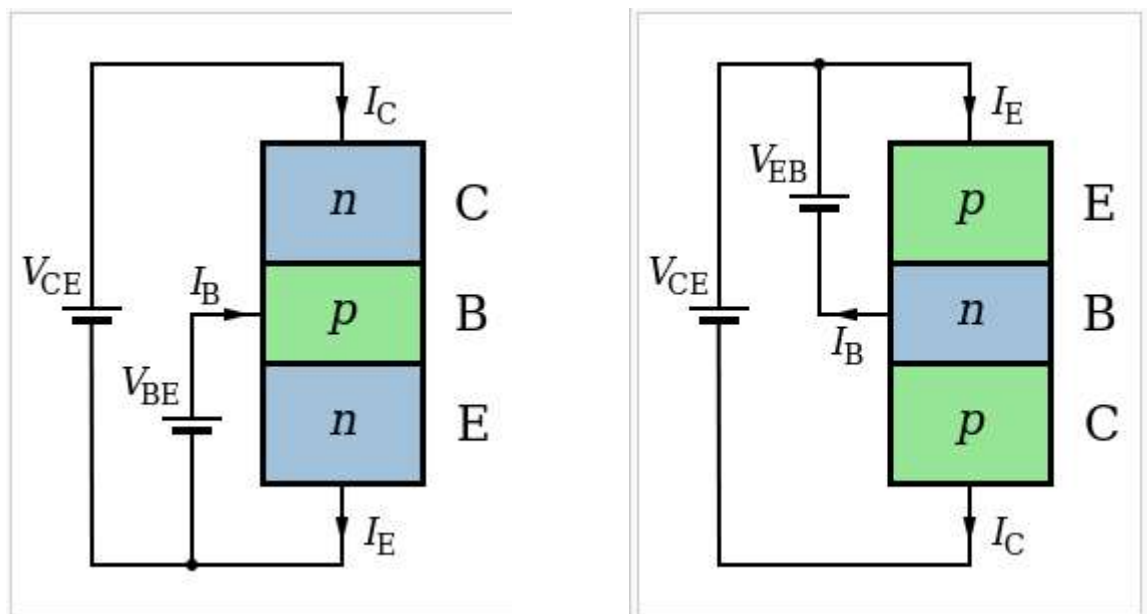
Όταν και οι δυο επαφές n-p είναι αρνητικά πολωμένες, τότε τα ρεύματα που δημιουργούνται στους ακροδέκτες του τρανζίστορ είναι πάρα πολύ μικρά, οπότε λέμε ότι το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή αποκοπής. Στην περιοχή αυτή το τρανζίστορ μπορεί να θεωρηθεί σαν ανοικτός διακόπτης (OFF).

*iii. Περιοχή κορεσμού*

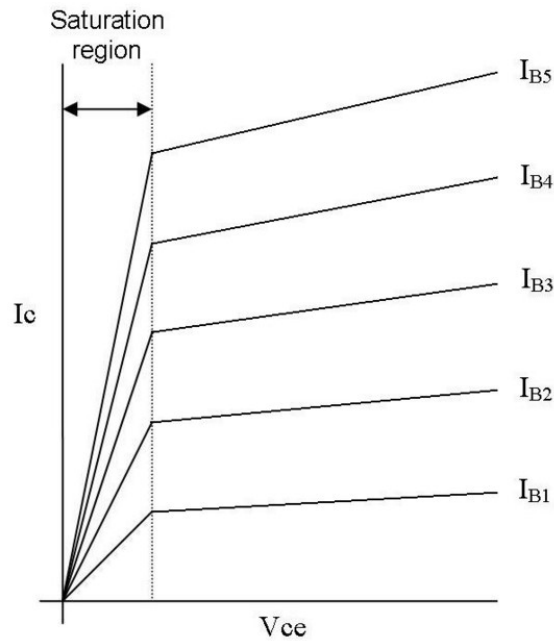
Όταν η θετικά πολωμένη επαφή εκπομπού-βάσης δημιουργεί αρκετό ρεύμα συλλέκτη, που μαζί με το εξωτερικό κύκλωμα προκαλεί την ορθή πόλωση της επαφής συλλέκτη-βάσης, η οποία προηγουμένως ήταν ανάστροφα πολωμένη, λέμε ότι έχουμε λειτουργία στην περιοχή κορεσμού. Δηλαδή σε αυτήν την περιοχή οι δυο επαφές n-p είναι θετικά πολωμένες και το τρανζίστορ μπορεί να θεωρηθεί σαν κλειστός διακόπτης (ON).



Εικόνα 6: (α) Σχηματικό διάγραμμα NPN transistor  
(β) Σχηματικό διάγραμμα PNP transistor.



Εικόνα 7: Εσωτερική δομή (α) NPN (β) PNP.



**Εικόνα 8: Χαρακτηριστική V-I του BJT.**

## **2.4 IGBT (Insulated Gate Bipolar Thyristor)**

Τα MOSFET και τα BJT ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές διακοπών υψηλής ισχύος. Ένα MOSFET έχει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης ταχύτητας μεταγωγής, ενώ ένα BJT έχει λιγότερες απώλειες αγωγιμότητας. Συνδυάζοντας της υψηλή ταχύτητα μεταγωγής ενός MOSFET με τη μικρή απώλεια αγωγιμότητας ενός BJT, πλησιάζουμε την έννοια του ιδανικού διακόπτη.

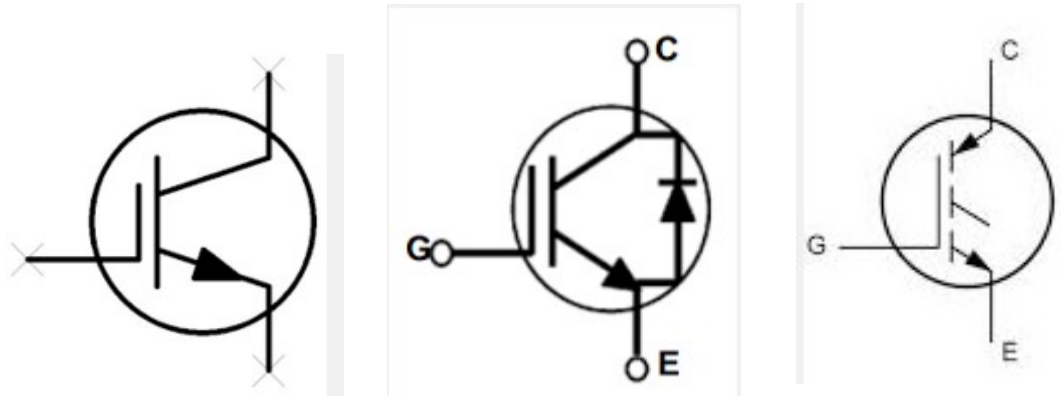
Αυτή η συνδυαστική διάταξη υπάρχει και ονομάζεται διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης ή IGBT (insulated-gate bipolar transistor). Το IGBT αποτελεί ουσιαστικά την εξέλιξη της τεχνολογίας του MOSFET ισχύος, με την δομή και τη λειτουργία του να θυμίζουν σημαντικά ένα MOSFET ισχύος.

Ο έλεγχος της εισόδου γίνεται μέσω της τάσης μεταξύ των ακροδεκτών πύλης και εκπομπού. Τα IGBT είναι μια διάταξη κανονικά σε κατάσταση off υψηλής αντίστασης εισόδου. Όταν η τάση εισόδου  $V_{GE}$  είναι αρκετά μεγάλη το ρεύμα στο συλλέκτη θα αρχίσει να ρέει. Αυτή η ελάχιστη τιμή τάσης είναι η τάση κατωφλίου της πύλης  $V_{GE(th)}$ . Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η τάση κόρου συλλέκτη εκπομπού  $V_{CE(sat)}$ .

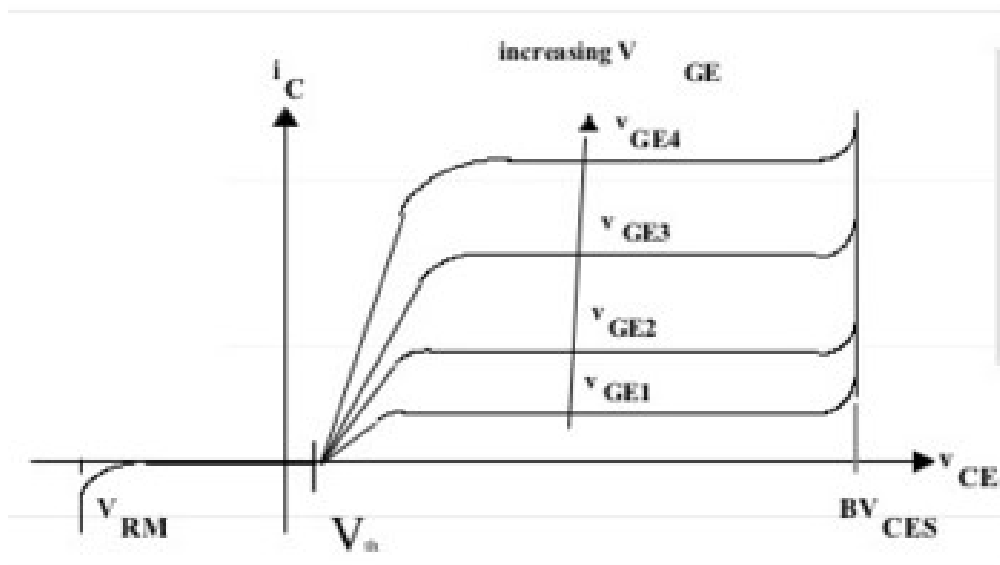
Οι απώλειες αγωγιμότητας των IGBT σχετίζονται με την ορθή πτώση τάσης της διάταξης και οι απώλειες αγωγιμότητας των MOSFET βασίζονται στις τιμές της  $R_{DS(on)}$ . Για εφαρμογές χαμηλής τάσης τα MOSFET ισχύος μπορεί να έχουν εξαιρετικά χαμηλές αντιστάσεις  $R_{DS(on)}$ , ενώ για εφαρμογές υψηλής τάσης έχουν αυξημένες τιμές  $R_{DS(on)}$ , έχοντας σαν αποτέλεσμα και αυξημένες απώλειες αγωγιμότητας. Τα IGBT δεν έχουν αυτό το χαρακτηριστικό. Επιπροσθέτως τα IGBT έχουν πολύ μεγαλύτερη τάση διάσπασης συλλέκτη-εκπομπού σε σύγκριση με τη μέγιστη τιμή της  $V_{DSS}$  των MOSFET. Αυτό είναι σημαντικό στις εφαρμογές που χρησιμοποιούν υψηλής τάσης επαγωγικά φορτία.

Συγκρίνοντας τα με τα BJT, τα IGBT έχουν πολύ μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση εισόδου και πολύ πιο απλές απαιτήσεις για την οδήγηση της πύλης. Παρόλο που τα IGBT δεν μπορούν να συναγωνιστούν τη μεταγωγική ταχύτητα των MOSFET, οι νέες οικογένειες των IGBT κατασκευάζονται για εφαρμογές υψηλής συχνότητας. Συνεπώς τα IGBT αποτελούν σημαντική λύση σε εφαρμογές υψηλής τάσης και ρεύματος σε μέτριες συχνότητες.

Τα IGBT διατίθενται για ονομαστικές τάσεις των 600V έως 3300V και για ονομαστική τιμή ρεύματος μέχρι 2400A. Τα τελευταία χρόνια κατασκευάστηκαν και IGBT ονομαστικής τάσης 6500V και ονομαστικής έντασης 200A, 400A και 600A.



Εικόνα 9: Σχηματικά σύμβολα IGBT.

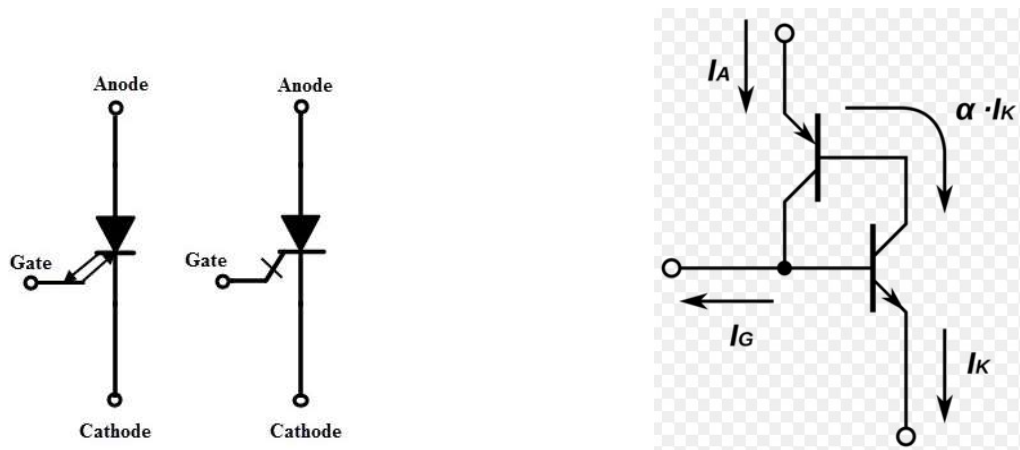


Εικόνα 10: Χαρακτηριστικές V-I του IGBT.

## 2.5 GTO (Gate Turn Off Thyristor)

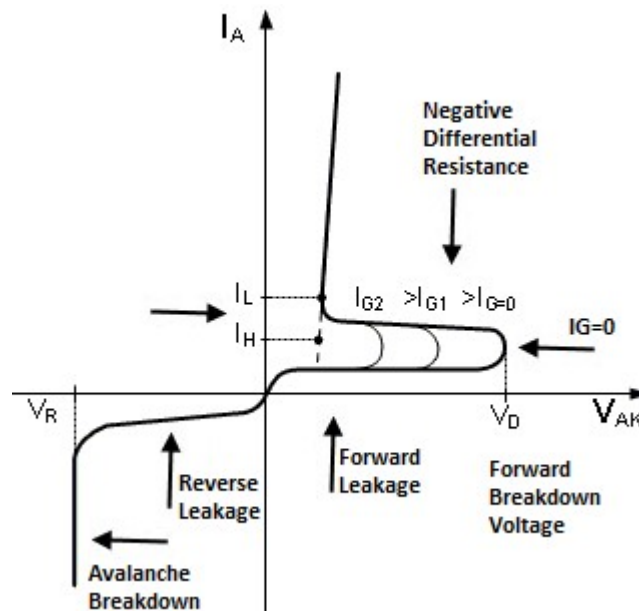
Το ημιαγωγικό στοιχείο «Θυρίστωρ με αποκοπή από την πύλη» ή GTO (Gain Turn Off Thyristor), είναι ένα είδος θυρίστωρ του οποίου η σβέση ή αποκοπή επιτυγχάνεται μέσω της πύλης του (Gate 7). Αυτό

έρχεται σε αντίθεση με το απλό θυρίστορ, του οποίου η αποκοπή δεν επιτυγχάνεται μέσω της πύλης αλλά μέσω του μηδενισμού του ρεύματος του ή μέσω της ανάστροφης πόλωσης του.



Εικόνα 11: Σύμβολα των GTO

Εικόνα 12: Ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας.



Εικόνα 13: Χαρακτηριστική V-I του GTO.

Τα GTO διατίθενται για εφαρμογές ισχύος μεταξύ 3 έως 10 MW και για διακοπτικές συχνότητες έως και 10kHz.

Ένα GTO δύναται να διατηρεί πολύ μικρή πτώση τάσης στα άκρα του κατά την αγωγή του, γεγονός που επιτρέπει τη διέλευση πολύ υψηλών τιμών ρευμάτων. Ωστόσο το GTO έχει μεγάλους χρόνους μετάβασης και κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων αυτών παρουσιάζει υψηλές διακοπτικές απώλειες, γεγονός που περιορίζει τη μέγιστη διακοπτική του συχνότητα σε μερικές εκατοντάδες Hz. Επίσης το GTO είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε απότομες μεταβολές ρεύματος, κατά τη μετάβαση αγωγής και σε απότομες μεταβολές τάσης, κατά τη μετάβαση αποκοπής. Αυτή η ευαισθησία επιβάλλει τη χρήση προστατευτικών κυκλωμάτων (κυκλώματα snubber) ώστε να περιοριστούν οι ρυθμοί αύξησης ρεύματος και τάσης  $(\frac{di}{dt}, \frac{dv}{dt})$ .

Ένα GTO μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής, όταν μια θετική τάση εφαρμοστεί μεταξύ πύλης και καθόδου, δημιουργώντας έτσι ένα θετικό ρεύμα οδήγησης στην πύλη του. Ένα GTO μεταβαίνει από κατάσταση αγωγής σε κατάσταση αποκοπής με την εφαρμογή μιας αρνητικής τάσης μεταξύ της πύλης και της καθόδου του. Το αρνητικό ρεύμα που δημιουργείται στην πύλη του λόγω της εφαρμογής της αρνητικής τάσης είναι αυτό που προκαλεί τη σβέση του.

Τα GTO χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρική κίνηση και σε διάφορες άλλες βιομηχανικές εφαρμογές και διατίθενται σε τιμές ονομαστικής τάσης έως και 3300V. Κάποια από τα μειονεκτήματα των συγκεκριμένων ημιαγωγικών διακοπών είναι ότι απαιτούν για τον έλεγχο τους πολύπλοκα κυκλώματα οδήγησης, υψηλή ισχύ οδήγησης και τέλος ογκώδη και ακριβά κυκλώματα προστασίας (κυκλώματα snubber).

Λόγω των παραπάνω μειονεκτημάτων τα GTO τείνουν να αντικατασταθούν από τα IGCT, τα οποία είναι η βελτιωμένη εκδοχή των GTO με μόνη διαφορά στη λειτουργία τους, ότι απαιτούν παλμό ρεύματος έντασης ίσης τιμής με αυτή του ρεύματος εισόδου. Τα IGCT που κυκλοφορούν στο εμπόριο είναι σε ονομαστικές τάσεις των 4500V (1.9kV/2.7kV dc-link) και 5500V (3.3kV dc-link) και για ονομαστικές τιμές ρεύματος 275A έως 4000A. Τα IGCT και τα IGBT συγκρινόμενα με τα GTO παρουσιάζουν μικρότερο κόστος, διαχειρίζονται μεγαλύτερη ισχύ και δεν χρειάζονται κυκλώματα προστασίας για τη λειτουργία τους.

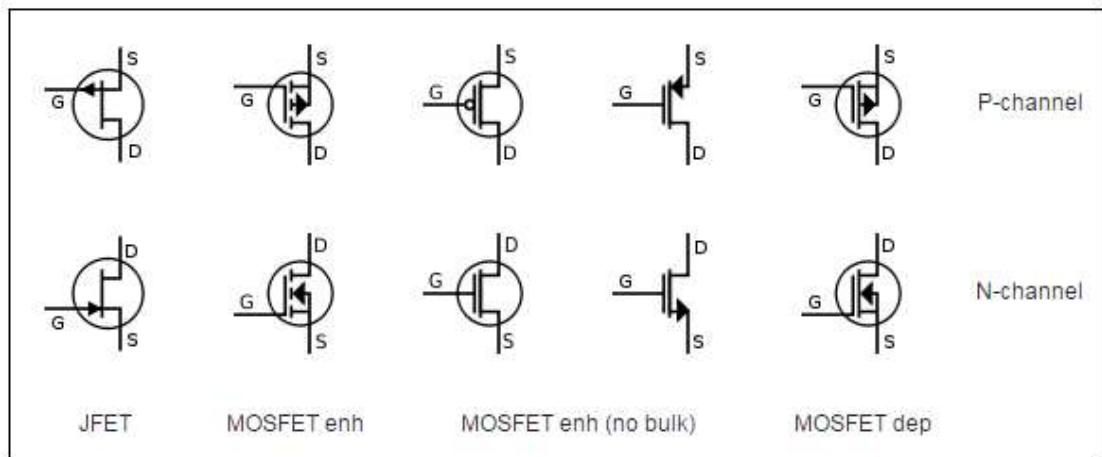
## **2.6 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)**

Το MOSFET όπως και το BJT είναι ημιαγωγός τριών ακροδεκτών, στο οποίο η πύλη (Gate) ελέγχει τη ροή του ρεύματος μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου που είναι η πηγή (Source) και η υποδοχή (Drain).

Στις διατάξεις που χρησιμοποιούνται MOSFET, αυτά λειτουργούν σαν διακόπτες για τον έλεγχο της ισχύος φορτίου, όπως γίνεται και με τα τρανζίστορ ισχύος. Επομένως το MOSFET λειτουργεί είτε στην περιοχή αποκοπής όταν δεν άγει, είτε στην ωμική περιοχή όταν άγει. Για να μεταβεί ένα MOSFET ισχύος στην κατάσταση αγωγής πρέπει να εφαρμόσουμε έναν παλμό τάσης στην πύλη του με μεγάλη κλίση.

Οι διακοπτικοί χρόνοι ενός MOSFET εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τις εσωτερικές του παρασιτικές χωρητικότητες. Οι χωρητικότητες αυτές μπορούν να δημιουργήσουν χρόνους καθυστέρησης κατά τις μεταβατικές καταστάσεις του ημιαγωγού και κατά συνέπεια να μειώνονται οι διακοπτικές του ικανότητες. Για να έχει το MOSFET τη

δυνατότητα γρήγορης φόρτισης και εκφόρτισης αυτών των παρασιτικών χωρητικοτήτων κατά την έναυση και τη σβέση του, έτσι ώστε να μην παρουσιάζονται φαινόμενα μεταβατικών σφαλμάτων και καθυστέρηση έναυσης και σβέσης του ημιαγωγού, θα πρέπει το κύκλωμα οδήγησης του MOSFET (στην περίπτωση της κατασκευής μας το ονομαζόμενο «Κύκλωμα ελέγχου») να συμπεριφέρεται στο MOSFET σαν μια πηγή παλμών με χαμηλή εσωτερική αντίσταση. Η τάση  $V_{GS}$  του MOSFET δεν πρέπει να υπερβαίνει τα +20Volt, γιατί αυτό θα είναι καταστροφικό για το MOSFET.

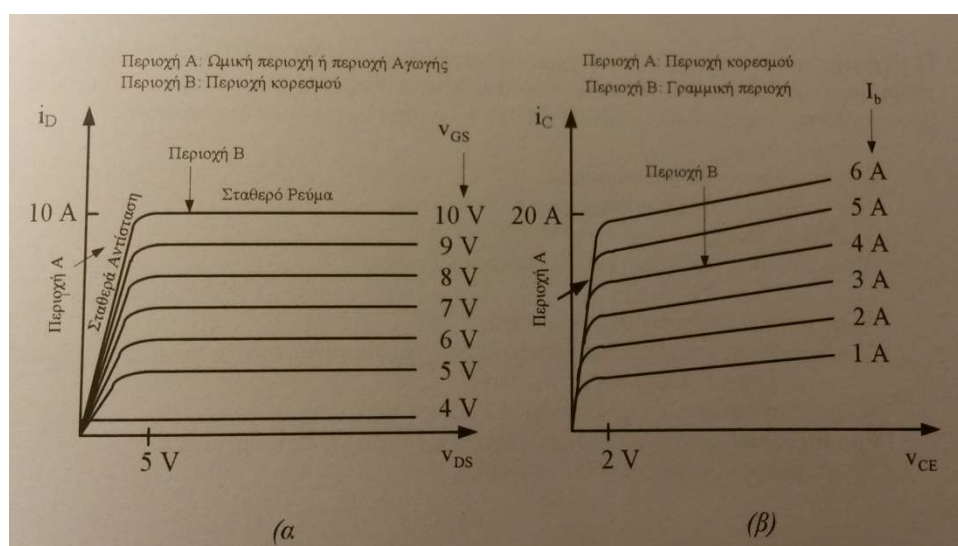


**Εικόνα 14: Σχηματικά MOSFET.**

Οι χαρακτηριστικές  $V-I$  ενός MOSFET διαύλου τύπου  $p$  είναι οι ίδιες με εκείνες ενός MOSFET διαύλου τύπου  $n$ , με τη διαφορά ότι οι πολικότητες ρεύματος και τάσης είναι ανεστραμμένες έτσι, ώστε οι χαρακτηριστικές MOSFET διαύλου τύπου  $p$  να εμφανίζονται στο τεταρτημόριο του πεδίου  $i_D-V_{DS}$ .

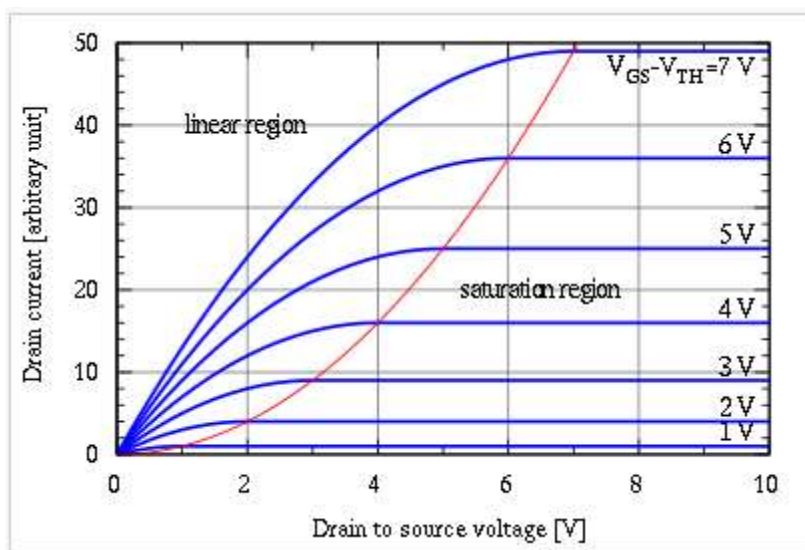
Παρακάτω γίνεται σύγκριση των χαρακτηριστικών δυο ημιαγωγικών διακοπών (MOSFET & BJT) και συμπεραίνουμε τα εξής:

- i. Η ομάδα καμπυλών του MOSFET ισχύος παράγεται από τις αλλαγές της τάσης της πύλης και όχι από τις αλλαγές του ρεύματος βάσης, όπως συμβαίνει με το BJT. Για το λόγο αυτό το MOSFET ονομάζεται ημιαγωγός τάσης, ενώ το BJT ονομάζεται ημιαγωγός ρεύματος.
- ii. Η κλίση της καμπύλης στην περιοχή κορεσμού του BJT είναι μεγαλύτερη από αυτής της ωμικής περιοχής του MOSFET. Αυτό δείχνει ότι η αντίσταση αγωγής  $R_{DS(ON)}$  του MOSFET είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αντίσταση αγωγής του BJT.
- iii. Η κλίση της καμπύλης του BJT στην ενεργό περιοχή είναι μεγαλύτερη από αυτή της αντίστοιχης ενεργού περιοχής του MOSFET. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να καθιστά το MOSFET καλύτερη πηγή σταθερού ρεύματος.



Εικόνα 15: (α) Χαρακτηριστική V-I του MOSFET

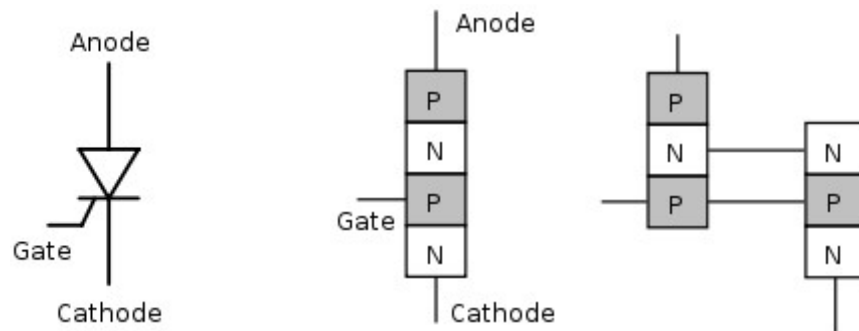
(β) Χαρακτηριστική V-I του BJT



Εικόνα 16: Χαρακτηριστική V-I MOSFET με τις περιοχές λειτουργίας.

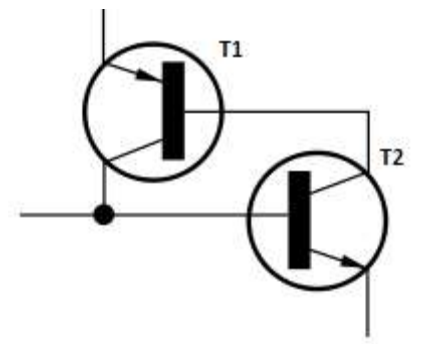
## 2.7 Thyristor

Το θυρίστορ έχει πάρει την ονομασία του από τη λέξη «θύρα» γιατί είναι σαν να ανοίγει μια και να αφήνει να περνά ρεύμα μέσα από αυτήν. Το θυρίστορ είναι μια διάταξη ημιαγωγού που χρησιμοποιεί εσωτερική ανάδραση για τη δημιουργία μεταγωγικής δράσης (συνδυασμός δυο τρανζίστορ). Τα πιο σημαντικά θυρίστορ είναι ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (SCR) και το TRIAC. Όπως και τα FET ισχύος, τα SCR και TRIAC μπορούν να μετάγουν μεγάλα ρεύματα σε καταστάσεις ON και OFF. Γι αυτό το λόγο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προστασία από υπερβολικά μεγάλη τάση, για το έλεγχο κινητήρων, θερμαντήρων, συστημάτων φωτισμού και άλλες παρόμοιες διατάξεις. Τα διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT) παρότι αποτελούν σημαντικές διατάξεις μεταγωγής ισχύος, δεν συμπεριλαμβάνονται στην κατηγορία των θυρίστορ.



**Εικόνα 17: (α) Σύμβολο θυρίστορ (β) Δομή θυρίστορ**

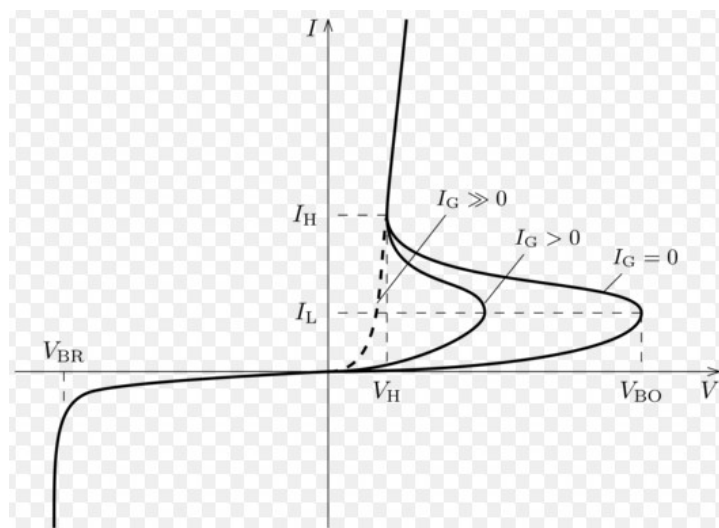
Όταν στην πύλη του θυρίστορ δεν υπάρχει παλμός έναυσης, ακόμα κι αν είναι θετικά πολωμένο, τότε δεν υπάρχει ροή ρεύματος μέσω του θυρίστορ. Για να μεταβεί το θυρίστορ σε κατάσταση αγωγής, θα πρέπει στην πύλη του να δοθεί παλμός έναυσης, με την προϋπόθεση ότι το θυρίστορ είναι θετικά πολωμένο. Ένα τέτοιο στοιχείο, όταν βρεθεί στην κατάσταση αγωγής, μετά την εφαρμογή του παλμού έναυσης, θα εξακολουθεί να παραμένει στην κατάσταση αυτή ακόμα κι αν ο παλμός έναυσης αφαιρεθεί. Η κατάσταση αγωγής μπορεί να διακοπεί μόνο όταν το ρεύμα, το οποίο ρέει μέσα απ το θυρίστορ μηδενιστεί ή η πολικότητα της ανόδου γίνει αρνητική σε σχέση με την κάθοδο.



**Εικόνα 18: Σχηματικό θυρίστορ.**

Όταν δεν υπάρχει παλμός έναυσης στην πύλη του θυρίστορ, δηλαδή στη βάση του τρανζίστορ  $T_2$  (εικόνα 18), τότε και τα δυο εσωτερικά τρανζίστορ βρίσκονται στην κατάσταση αποκοπής, με αποτέλεσμα να εμποδίζουν τη διέλευση ρεύματος μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.

Όταν εφαρμοστεί ένας παλμός έναυσης στην πύλη του θυρίστορ, ο οποίος είναι θετικός σε σχέση με την κάθοδο, τότε το τρανζίστορ  $T_2$  αρχίζει και άγει και έτσι επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος μέσω της βάσης του τρανζίστορ  $T_1$ .



**Εικόνα 19: V-I χαρακτηριστική θυρίστορ.**

Από την παραπάνω χαρακτηριστική, διαπιστώνουμε ότι ένα θυρίστορ μπορεί να βρίσκεται σε μια από τις ακόλουθες τρεις καταστάσεις:

- i. Κατάσταση αγωγής (conduction state). Το θυρίστορ άγει και το ρεύμα ρέει από την άνοδο προς την κάθοδο.
- ii. Κατάσταση θετικής αποκοπής (forward blocking state). Το θυρίστορ είναι θετικά πολωμένο, αλλά βρίσκεται σε

κατάσταση αποκοπής. Αν δοθεί παλμός έναυσης στο θυρίστορ τότε μεταβαίνει στην κατάσταση διέλευσης.

- iii. Κατάσταση αρνητικής αποκοπής (reverse blocking state). Το θυρίστορ μεταβαίνει στην κατάσταση αυτή, όταν μια αρνητική τάση εφαρμοστεί μεταξύ ανόδου και καθόδου. Για παράδειγμα αν το θυρίστορ βρίσκεται στην κατάσταση αγωγής και εφαρμοστεί μια αρνητική τάση μεταξύ ανόδου και καθόδου, τότε το θυρίστορ μεταβαίνει σε κατάσταση αρνητικής αποκοπής και έτσι επιτυγχάνεται η σβέση του.

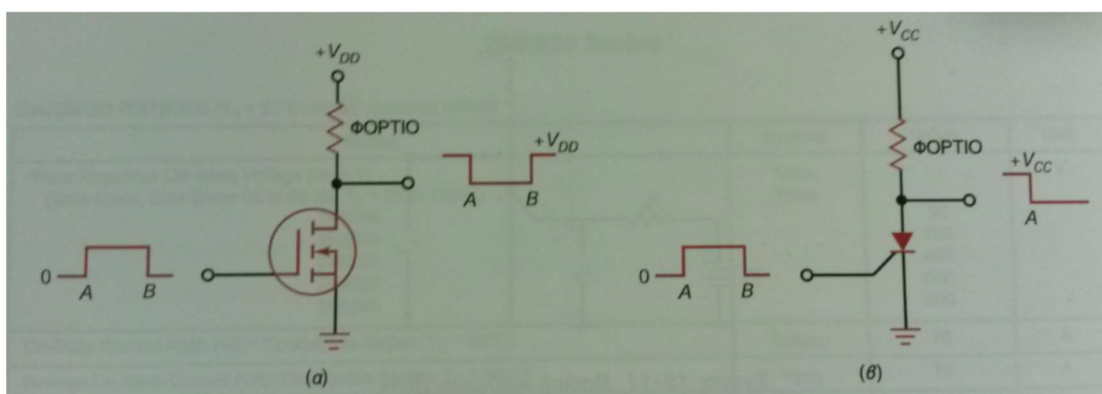
Γενικά το SCR θυρίστορ είναι και αυτό που χρησιμοποιείται περισσότερο, καθότι μπορεί να μετάγει πολύ μεγάλα ρεύματα από κατάσταση ON σε κατάσταση OFF και το αντίθετο. Τα SCR σχεδιάζονται για να χειρίζονται υψηλότερες τιμές ρεύματος και τάσης από οποιονδήποτε άλλο τύπο θυρίστορ. Στις μέρες μας, ορισμένα SCR είναι ικανά να ελέγχουν ρεύματα των οποίων οι τιμές φτάνουν μέχρι και τα 1.5 kA και τιμές τάσεων πάνω από 2 kV.

Συγκριτικά τα FET ισχύος και τα θυρίστορ, παρότι μπορούν να μετάγουν μεγάλα ρεύματα σε κατάσταση ON και OFF, διαφέρουν σε πολύ βασικά σημεία. Η κύρια διαφορά είναι ο τρόπος που τίθενται εκτός λειτουργίας. Η τάση πύλης ενός FET ισχύος μπορεί να θέσει τη διάταξη σε κατάσταση ON και OFF, ενώ η τάση πύλης ενός SCR μπορεί να το θέσει μόνο σε κατάσταση ON.

Όταν τη τάση εισόδου στο FET ισχύος γίνεται υψηλή, η τάση εξόδου γίνεται χαμηλή. Όταν η τάση εισόδου γίνεται χαμηλή, η τάση εξόδου γίνεται υψηλή. Με άλλα λόγια, ένας τετραγωνικός παλμός εισόδου δημιουργεί ανεστραμμένο τετραγωνικό παλμό εξόδου.

Όταν η τάση εισόδου στο SCR γίνεται υψηλή, η τάση εξόδου γίνεται χαμηλή. Όμως όταν η τάση εισόδου γίνεται χαμηλή, η τάση εξόδου παραμένει χαμηλή. Ο τετραγωνικός παλμός εισόδου δημιουργεί αρνητικό βήμα εξόδου. Το SCR δεν μπορεί να επανατοποθετηθεί (reset).

Επειδή οι δυο διατάξεις θα πρέπει να επανατοποθετηθούν με διαφορετικό τρόπο, οι εφαρμογές τους τείνουν να είναι διαφορετικές. Τα FET ισχύος ανταποκρίνονται σαν διακόπτες κουμπιά (push-button), ενώ τα SCR ανταποκρίνονται σαν μονοπολικό διακόπτες απλής ενέργειας (single-pole single-throw). Βλέπουμε λοιπόν ότι είναι πολύ πιο εύκολο να χρησιμοποιήσουμε το FET ισχύος σαν ενδιάμεση βαθμίδα μεταξύ ψηφιακών IC και μεγάλων φορτίων. Αντιθέτως σε εφαρμογές όπου η μανδάλωση είναι πολύ σημαντική, βλέπουμε ότι χρησιμοποιείται το SCR.



Εικόνα 20: Σύγκριση FET ισχύος και SCR.

## 2.8 Ολοκληρωμένα κυκλώματα (Integrated Circuits, IC) LMXXX

Τα αρχικά LM (Linear Monolithic) αναφέρονται στα αναλογικά μέρη που ολοκληρώνονται μέσα σε ένα και μόνο στοιχείο. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία γραμμικών IC σταθεροποιητών τάσης με πλήθος ακροδεκτών από 3 μέχρι 14. Όλοι είναι σταθεροποιητές σειράς, επειδή αυτός ο τύπος σταθεροποιητή είναι πιο αποδοτικός από τον παράλληλο. Ορισμένοι IC σταθεροποιητές χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές, στις οποίες εξωτερικές αντιστάσεις ορίζουν τον περιορισμό του ρεύματος, την τάση εξόδου και άλλα. Οι πιο ευρύτατα χρησιμοποιούμενοι σταθεροποιητές είναι εκείνοι με 3 ακροδέκτες: έναν για τη μη σταθεροποιημένη τάση εισόδου, ένα για τη σταθεροποιημένη τάση εξόδου και ένα για την γείωση. Οι σταθεροποιητές τριών ακροδεκτών διατίθενται σε πλαστική ή μεταλλική συσκευασία και λόγω της εύκολης χρήσης και του μικρού κόστους τους είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς. Εκτός από δυο προαιρετικούς πυκνωτές παράκαμψης, οι IC σταθεροποιητές τριών ακροδεκτών δεν απαιτούν εξωτερικά εξαρτήματα.

Τα LMXXX χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τη χρήση τους. Μερικές από αυτές είναι οι εξής:

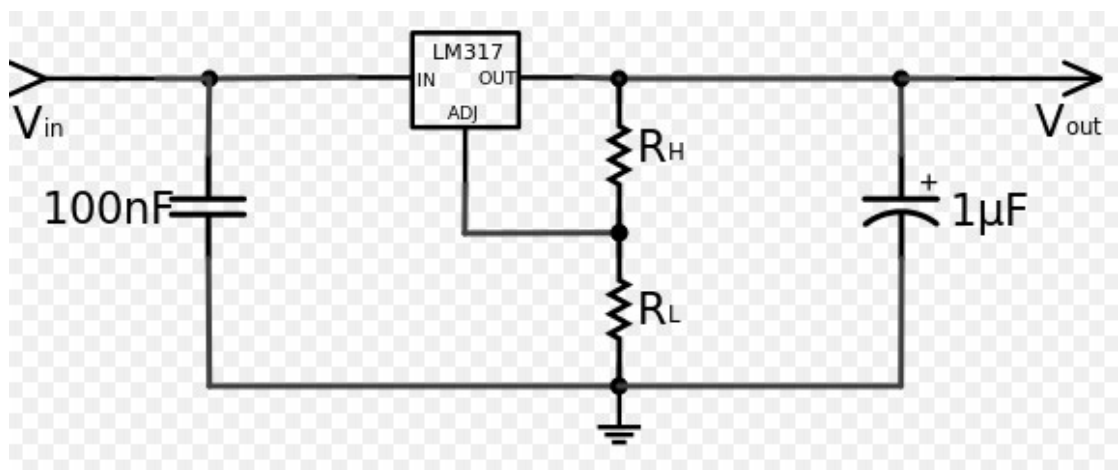
- Τελεστικοί ενισχυτές Op Amp (operational amplifiers)
- Διαφορικοί συγκριτές (Differential comparators)
- Ενισχυτές ρεύματος (Current-mode amplifiers)
- Ενισχυτές μέτρησης (Instrumentation amplifiers)
- Ενισχυτές ήχου (Audio amplifiers)
- Ρυθμιστές τάσης (Voltage regulators)

- Μετατροπείς τάσης-σε-συχνότητα (Voltage-to-frequency converters)
- Πηγές ρεύματος (Current sources)
- Αισθητήρες θερμοκρασίας και θερμοστάτες (Temperature sensors and thermostats)

Στην κατασκευή της πλακέτας χρησιμοποιήσαμε έναν ρυθμιστή τάσης LM317.

### 2.8.1 Ο ρυθμιστής τάσης LM317

Ο LM317 είναι ένας σταθεροποιητής θετικής τάσης τριών ακροδεκτών που μπορεί να παρέχει 1.5 A ρεύματος φορτίου για τιμές ρυθμιζόμενης εξόδου μεταξύ 1.25 V και 37 V. Η απόρριψη κυμάτων είναι 80 dB. Αυτό σημαίνει ότι η κυμάτωση εισόδου είναι 10.000 φορές μικρότερη στην έξοδο του LM317.



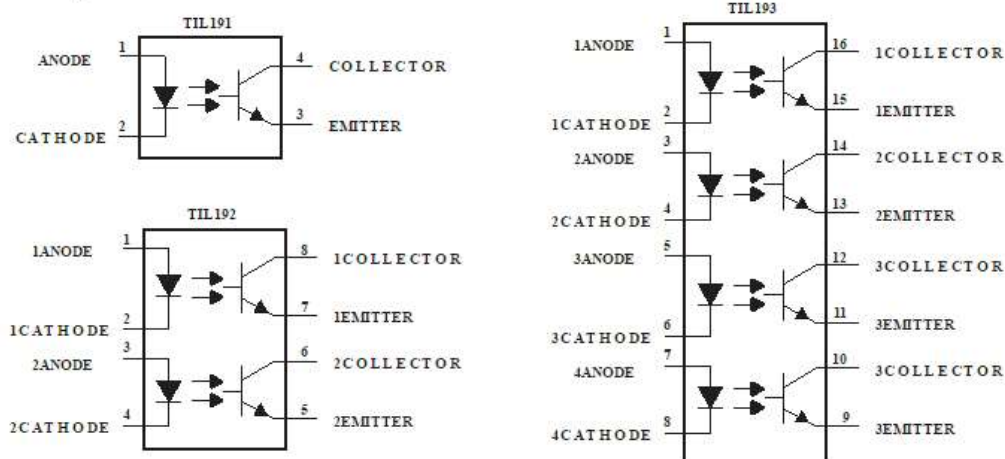
Εικόνα 21: Σχηματικό LM317 σε τυπική εφαρμογή ρύθμισης τάσης.

## 2.9 Οπτοσυζεύκτες

Μια διάταξη ενός LED που οδηγεί ένα φωτο-τρανζίστορ ονομάζεται οπτοσυζεύκτης. Η διάταξη αυτή είναι πολύ πιο ευαίσθητη από τη διάταξη LED-φωτοδίοδος. Οποιοσδήποτε μεταβολές στη  $V_s$  παράγουν μεταβολές στο ρεύμα LED, που μεταβάλει το ρεύμα μέσω του φωτο-τρανζίστορ. Στη συνέχεια, αυτό παράγει μια μεταβαλλόμενη τάση στα άκρα συλλέκτη-εκπομπού. Συνεπώς ένα σήμα τάσης από το κύκλωμα εισόδου συζευγνύεται στο κύκλωμα εξόδου.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα ενός οπτοσυζεύκτη, είναι η ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ των κυκλωμάτων εισόδου και εξόδου. Με άλλα λόγια το κοινό σημείο για το κύκλωμα εισόδου είναι διαφορετικό από το κοινό σημείο για το κύκλωμα εξόδου. Λόγω αυτού δεν υπάρχει αγωγίσιμος δρόμος μεταξύ των δυο κυκλωμάτων. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να γειώσουμε ένα από τα κυκλώματα και το άλλο να «αιωρείται».

schematic diagrams



Εικόνα 22: Σχηματικά διαγράμματα optocoupler.



**Εικόνα 23: Οπτοσυζεύκτης (Optocoupler TIL191)**

## **2.10 Υπολογισμός απωλειών ημιαγωγικών διακοπών**

Οι ολικές λειτουργικές απώλειες ενός ημιαγωγού δίνονται από την εξής σχέση:

*Ολικές Απώλειες = Απώλειες Αγωγής + Απώλειες κατά τη μετάβαση στην Αγωγή + Απώλειες κατά τη μετάβαση στη Σβέση + Απώλειες κατά τη Σβέση*

Επειδή οι απώλειες κατά τη σβέση είναι πάρα πολύ μικρές, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί και ως:

$$W_{\text{μετάβασης σε αγωγή}} = \int_0^{t_{\text{turn-on}}} v(t)i(t)dt$$

$$W_{\text{μετάβασης σε αποκοπή}} = \int_0^{t_{\text{turn-off}}} v(t)i(t)dt$$

$$W_{\text{αγωγής}} = V_{\text{on-state}} \times I_S \times t_{\text{on-state}}$$

$$W_{\text{αποκοπής}} = V_{\text{off-state}} \times I_{\text{leakage}} \times t_{\text{off-state}} \approx 0Ws$$

$$P_{\text{μετάβασης}} = (W_{\text{μετάβασης σε αγωγή}} + W_{\text{μετάβασης σε αποκοπή}}) \times f_{\text{διακοπτική}}$$

$$P_{\text{αγωγής}} = W_{\text{αγωγής}} \times f_{\text{διακοπτική}}$$

## 2.11 Απαγωγή θερμότητας (Ψυκτικά σώματα)

Ένας τρόπος να αυξηθεί η ονομαστική τιμή ισχύος ενός τρανζίστορ είναι να απάγει όσο το δυνατόν γρηγορότερα την εσωτερική θερμότητα. Αυτός είναι και ο σκοπός ενός απαγωγού θερμότητας. Αν αυξάνουμε την επιφάνεια του απαγωγού του τρανζίστορ, επιτυγχάνουμε τη διαφυγή της θερμότητας στον περιβάλλοντα αέρα γρηγορότερα και ευκολότερα. Μερικές φορές ένα τρανζίστορ εφάπτεται με ένα μεγάλο απαγωγό θερμότητας με πτερύγια, κάτι που είναι αποτελεσματικότερο στην απομάκρυνση της θερμοκρασίας.

Ανάλογα με τον τύπο συσκευασίας ενός τρανζίστορ, υπάρχουν διάφοροι τύποι ψυκτικών σωμάτων (ψύκτρες). Για μεγάλες τιμές ισχύος συνδυαστικά χρησιμοποιούνται και ανεμιστήρες, για την επίτευξη μεγάλης πυκνότητας ισχύος.



**Εικόνα 24: Τύποι ψυκτικών σωμάτων.**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ – DC ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

### 3.1 Γενικά

Ο απλός κινητήρας DC λειτουργεί μόνο με συνεχές ρεύμα. Το ρεύμα διοχετεύεται στο πηνίο και αυτό περιστρέφεται ανάμεσα στους πόλους ενός μόνιμου μαγνήτη. Τα μαγνητικά πεδία του πηνίου και του μαγνήτη αλληλεπιδρούν και αναγκάζουν το πηνίο να στραφεί. Ένας εναλλάκτης αντιστρέφει τις συνδέσεις στην μπαταρία σε κάθε μισή στροφή και διατηρεί τη φορά περιστροφής του πηνίου σταθερή. Ο εναλλάκτης (ή μεταλλάκτης) διαθέτει μια σειρά μεταλλικών συνδέσεων πάνω σε έναν κύλινδρο. Οι ψήκτρες παρέχουν ρεύμα σε κάθε σύνδεση εναλλάξ, καθώς ο εναλλάκτης περιστρέφεται. Οι ψήκτρες από γραφίτη εξασφαλίζουν την ηλεκτρική σύνδεση του εναλλάκτη. Οι brushed DC motors (ψηκτροφόροι κινητήρες συνεχούς ρεύματος) αναπτύσσουν μέγιστη ροπή κατά την εκκίνηση, η οποία μειώνεται γραμμικά καθώς αυξάνεται η ταχύτητα.

### 3.2 Οι απώλειες κινητήρα

Οι DC κινητήρες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Όμως η ισχύς εισόδου δεν μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε χρήσιμη μορφή ισχύος στην έξοδο της μηχανής. Πάντοτε κατά τη διαδικασία της μετατροπής της ισχύος εμφανίζονται κάποιες απώλειες. Ο συντελεστής απόδοσης (efficiency) ορίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} * 100\%$$

Όπου η διάφορα μεταξύ της ισχύος εισόδου και της ισχύος εξόδου είναι ακριβώς οι απώλειες της μηχανής.

Οι απώλειες που εμφανίζονται στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίζονται σε 5 βασικές κατηγορίες:

### 3.2.1 Απώλειες χαλκού ( $I^2R$ απώλειες)

Εμφανίζονται στα τυλίγματα του οπλισμού και της διέγερσης.

Απώλειες τυλίγματος οπλισμού:  $P_A = I_A^2 \cdot R_A$

Απώλειες τυλίγματος διέγερσης :  $P_F = I_F^2 \cdot R_F$

Όπου  $I_A$  = το ρεύμα οπλισμού

$I_F$  = το ρεύμα στα τυλίγματα πεδίου

$R_A$  = η αντίσταση τυλιγμάτων οπλισμού

$R_F$  = η αντίσταση τυλιγμάτων διέγερσης

Οι αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς είναι οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων σε θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας.

### 3.2.2 Απώλειες ψηκτρών

Πρόκειται για τις απώλειες που οφείλονται στην τάση επαφής των ψηκτρών του κινητήρα και δίδονται από την εξίσωση:

$$P_{BD} = V_{BD} \cdot I_A$$

Όπου  $V_{BD}$  = η πτώση τάσης στις ψήκτρες

$I_A$  = το ρεύμα οπλισμού

Με την παραπάνω σχέση υπολογίζουμε τις απώλειες ψηκτρών, επειδή η πτώση τάσης στην επαφή τους είναι σχετικά σταθερή για μεγάλο εύρος τιμών του ρεύματος οπλισμού. Συνήθως η πτώση τάσης

στις ψήκτρες είναι της τάξης των 2 volt , εκτός και αν έχει οριστεί διαφορετικά.

### 3.2.3 Απώλειες πυρήνα

Πρόκειται για την κατηγορία που περιλαμβάνει τις απώλειες υστέρησης και δινορρευσμάτων του μετάλλου της μηχανής. Αυτές μεταβάλλονται με το τετράγωνο της μαγνητικής επαγωγής ( $B^2$ ) και για το δρομέα θεωρούνται ότι είναι ανάλογες της τιμής ( $n^{1.5}$ ), όπου  $n$  η ταχύτητα περιστροφής του.(Chapman 2003)

### 3.2.4 Μηχανικές απώλειες

Είναι αυτές που σχετίζονται με τα μηχανικά φαινόμενα. Οι δυο βασικοί τύποι μηχανικών απωλειών είναι οι απώλειες τριβών (friction losses) και οι απώλειες εξαερισμού (windage losses). Οι πρώτες οφείλονται στα ρουλεμάν του κινητήρα, ενώ οι δεύτερες οφείλονται στην τριβή των κινητών μερών της μηχανής με τον αέρα.

### 3.2.5 Κατανεμημένες απώλειες

Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται απώλειες οι οποίες δεν μπορούν να ενταχθούν σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες. Όσο προσεκτικά και αν υπολογιστούν οι απώλειες του κινητήρα, ένα ποσοστό ξεφεύγει από τους υπολογισμούς με βάση τις παραπάνω εξισώσεις. Αυτό το ποσοστό στις περισσότερες μηχανές θεωρείται ότι είναι το 1% της ισχύος εξόδου κατά τη λειτουργία με πλήρες φορτίο.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*.

### 3.3 Ο Brushed DC Maxon Motor 200W

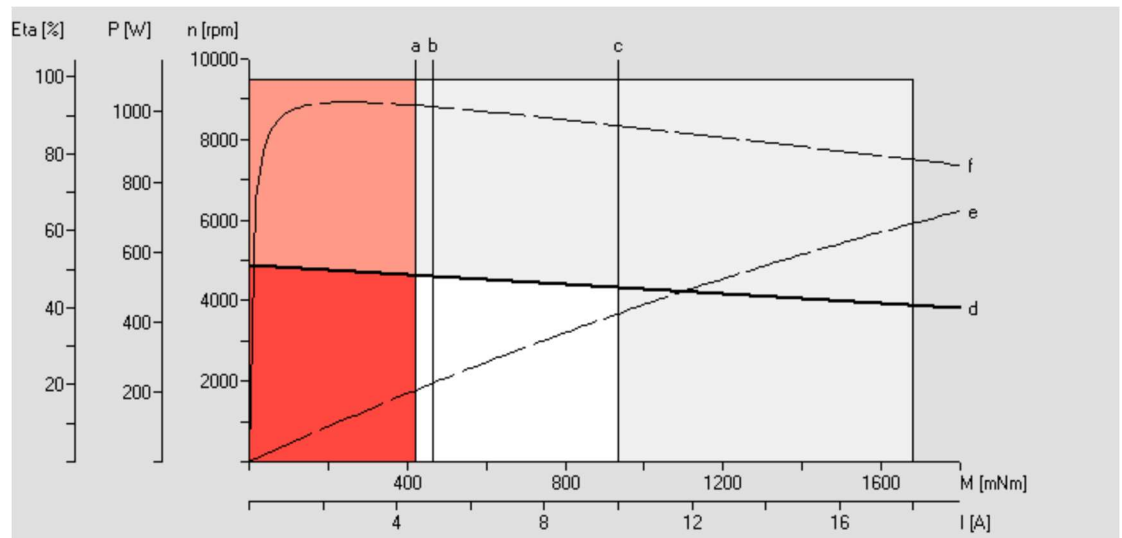
Ο κινητήρας 370356 της Maxon είναι κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες ονομαστικής τάσης 48V σχεδιασμένος για μέγιστο συνεχές ρεύμα 5 A. Εν κενώ μπορεί να φτάσει τις 4900 rpm, ενώ στο μέγιστο συνεχές ρεύμα παρέχει ροπή 420mNm. Η ωμική αντίσταση των περιελίξεων κυμαίνεται από 0.51Ω έως 0.6Ω και η επαγωγική αντίδραση είναι 0.528mH. Ο μέγιστος συντελεστής απόδοσης είναι 93.8%. Τα στοιχεία αυτά είναι υπολογισμένα απο τον κατασκευαστή για θερμοκρασία 25°C.<sup>2</sup>



**Εικόνα 25: Ο Brushed DC Maxon Motor 200W.**

---

<sup>2</sup> Maxon Motors, "Maxon Motor 200W Brushed Datasheet."

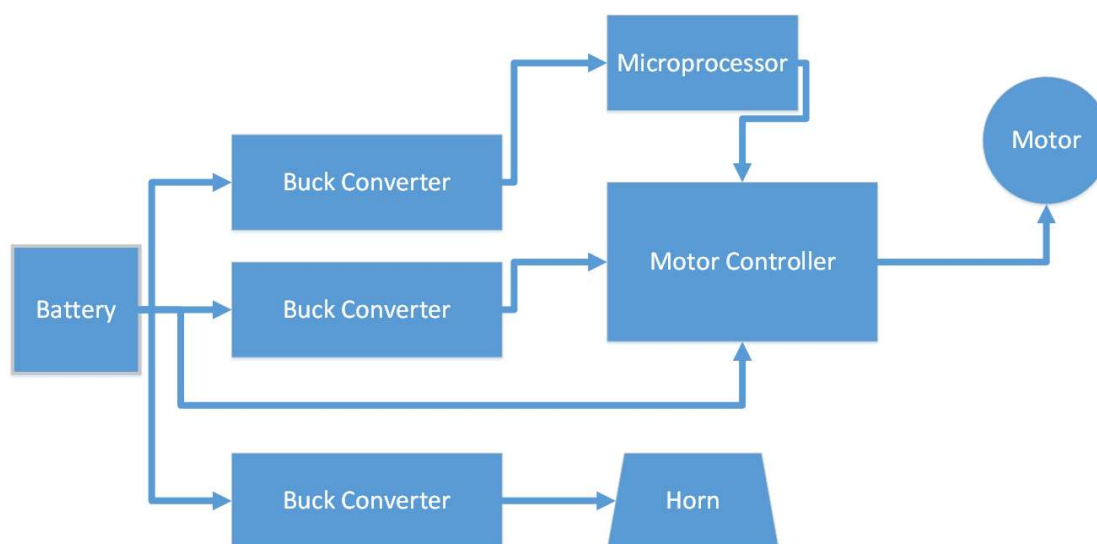


**Εικόνα 26: Διάγραμμα χαρακτηριστικών λειτουργίας.**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 4.1 Γενικά

Το διάγραμμα ροής ενέργειας ακολουθεί την εξής πορεία: Από την τροφοδοσία (μπαταρίες λιθίου) τροφοδοτούνται η πλακέτα ελέγχου και οι τρεις buck converters. Ο ένας buck converter έχει έξοδο 12V και τροφοδοτεί κόρνα και τυχόν άλλες συσκευές ασφαλείας και υποστήριξης. Ο δεύτερος έχει έξοδο 5V και τροφοδοτεί τον μικροεπεξεργαστή (Tina). Ο τρίτος με έξοδο 12 V τροφοδοτεί το κύκλωμα ελέγχου και ενίσχυσης παλμού της πλακέτας οδήγησης. Η πλακέτα συνδέεται με τον κινητήρα και έχει εξόδους και για σύνδεση με εξωτερικό τρανζίστορ ισχύος (MOSFET) ή συστοιχία πολλαπλών τρανζίστορ.



Εικόνα 27: Μπλοκ διάγραμμα του συστήματος ροής ενέργειας.

## 4.2 Τροφοδοσία

Για την τροφοδοσία του κινητήρα και του Motor Controller και με βάση τους περιορισμούς, οι οποίοι διέπονται από τους κανονισμούς του Shell Eco Marathon επιλέχθηκε η μπαταρία ιόντων λιθίου (Li-ion) Panasonic NCR 18650 3100mah με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Χωρητικότητα 3100mAh
- Nominal voltage 3.6V 3.7V
- Charging voltage 4.2V
- Ενέργεια 11.2 Wh

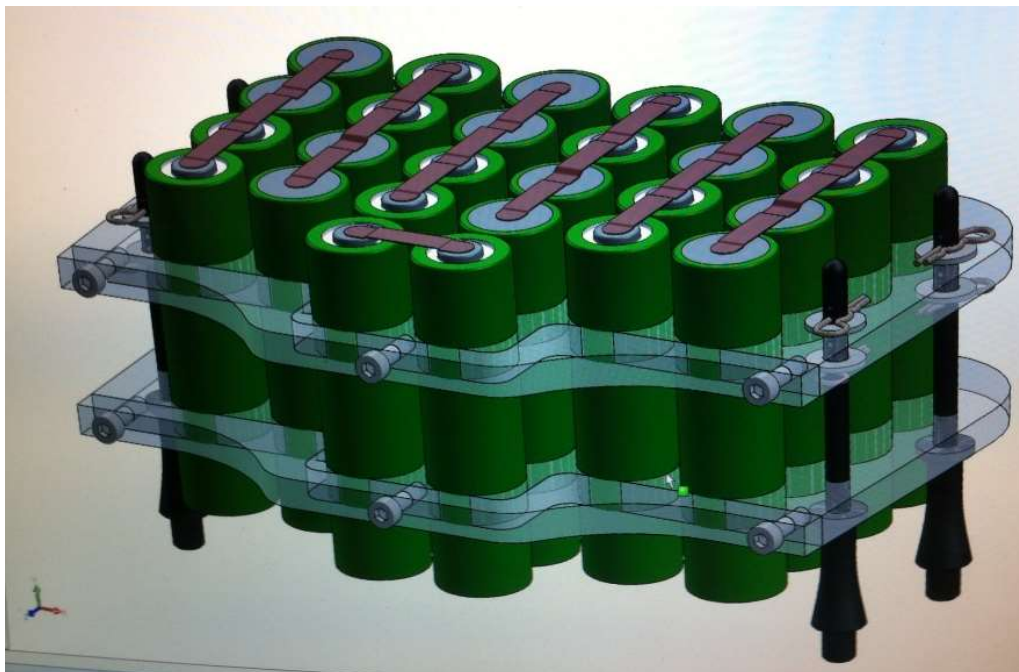
Κύριο μέλημα της ομάδας ήταν η μπαταρία να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- να είναι επαναφορτιζόμενη
- να έχει μεγάλο βαθμό απόδοσης
- να έχει όσο το δυνατό λιγότερο βάρος και όγκο
- να είναι οικονομική
- να είναι ανθεκτική

Η βάση στήριξης της μπαταρίας σχεδιάστηκε σε συνεργασία με τους Μηχανολόγους της ομάδας μας, έχοντας ως βασικά κριτήρια τη σωστή τοποθέτηση του κάθε κελιού ξεχωριστά, αλλά και ως σύνολο για την ευκολότερη και σωστότερη τοποθέτηση μέσα στο όχημα. Για τα παραπάνω ελήφθησαν υπόψη η θερμοκρασία που αναπτύσσεται, ο σωστός εξαερισμός της μπαταρίας, το δοχείο συλλογής τυχόν χημικών υγρών αυτής κτλ.



**Εικόνα 28: Στοιχείο μπαταρίας Panasonic NCR18650.**

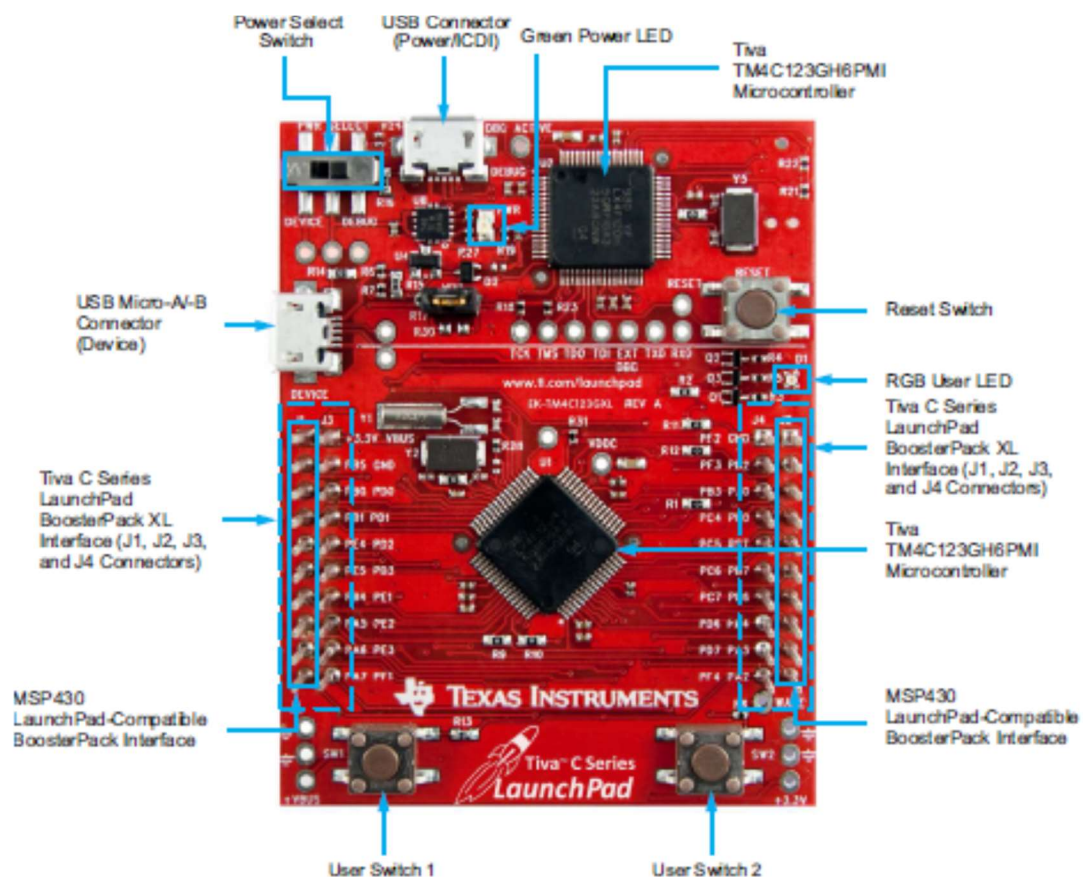


**Εικόνα 29: Η βάση στήριξης των μπαταριών.**

## 4.3 Περιφερειακές συσκευές

### 4.3.1 Ο μικροεπεξεργαστής Tiva C Series

Για την παραγωγή τετραγωνικού παλμού και την διεπαφή με τον οδηγό του οχήματος χρησιμοποιήθηκε ολοκληρωμένη πλακέτα μικροελεγκτή Tiva C Series της Texas Instruments. Η πλακέτα έχει ενσωματωμένο επεξεργαστή TM4C123GH6PMI- ARM® Cortex™-M4F, διεπαφή για προγραμματισμό USB 2.0 και αναλογικές εξόδους PWM με συχνότητα 1049Hz και ανάλυση αναλογικού/ψηφιακού μετατροπέα 12bit. Η τάση τροφοδοσίας της είναι από 4.75V μέχρι 5.25V και το πλάτος του τετραγωνικού παλμού είναι 3.3V.



Εικόνα 30: Tiva C Series της Texas Instruments.

### 4.3.2 BMS (Battery Management System)

Το BMS είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα που διαχειρίζεται μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία και παρακολουθεί διάφορες παραμέτρους, όπως οι τάσεις και τα ρεύματα κατά την διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης και η παρακολούθηση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Σε κάποια BMS υπάρχουν επιπλέον υποδοχές για την ενσωμάτωση συσκευών προστασίας, οι οποίες ενεργοποιούνται όταν κάποια από τις παραπάνω παραμέτρους ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και τον έλεγχο ποιότητας, επιλέξαμε και το κατάλληλο BMS που καλύπτει τις προδιαγραφές μας.

Ένα BMS μπορεί να παρακολουθεί *την κατάσταση της μπαταρίας*, όπως:

- i. Τάση : συνολική τάση, τάσεις των μεμονωμένων κελιών, ελάχιστη και μέγιστη τάση.
- ii. Θερμοκρασία : μέση θερμοκρασία, θερμοκρασία εισαγωγής ψυκτικού, θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού υγρού, ή θερμοκρασίες μεμονωμένων κελιών.
- iii. Κατάσταση της φόρτισης ( SOC ) ή το βάθος της εκφόρτισης (DOD ): για να δείχνουν το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας
- iv. Κατάσταση υγείας ( SOH ): μια ποικιλοτρόπως καθορισμένη μέτρηση για τη γενική κατάσταση της μπαταρίας
- v. Ροή ψυκτικού: για τον αέρα ή το υγρό που ψύχει τις μπαταρίες
- vi. Ρεύμα: εντός ή εκτός μπαταρίας

Το BMS επίσης μπορεί και *ελέγχει την επαναφόρτιση της μπαταρίας* με αναγεννητική πέδηση .

Επιπλέον, ένα BMS μπορεί να υπολογίζει τιμές με βάση τα παραπάνω στοιχεία, όπως :

- i. Μέγιστο ρεύμα φόρτισης ( CCL )
- ii. Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης ( DCL )
- iii. Ενέργεια [ kWh ] παραδιδόμενη από τον περασμένο κύκλο φόρτισης
- iv. Εσωτερική αντίσταση του κελιού (για τον προσδιορισμό της τάσης ανοικτού κυκλώματος)
- v. Φόρτιση [ Ah ] η οποία παραδίδεται ή αποθηκεύεται (μερικές φορές αυτό το χαρακτηριστικό ονομάζεται “Μετρητής Coulomb”)
- vi. Συνολική ενέργεια που παρέχεται από την πρώτη χρήση
- vii. Συνολικός χρόνος λειτουργίας από την πρώτη χρήση
- viii. Συνολικός αριθμός των κύκλων

Το BMS μπορεί να προστατεύσει την μπαταρία του από :

- i. Υπερεντάσεις (μπορεί να είναι διαφορετική σε φόρτιση και την αποφόρτιση)
- ii. Υπερτάσεις (κατά τη διάρκεια της φόρτισης )
- iii. Υποτάσεις (κατά την εκφόρτιση ), στοιχείο που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για μπαταρίες μολύβδου-οξέος και μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li – ion)
- iv. Υπερβολικά χαμηλές ή υπερβολικά ψηλές θερμοκρασίες
- v. Υπερβολική πίεση (για μπαταρίες NiMH )

vi. Βραχυκύκλωμα ή διαρροή

Τα παραπάνω επιτυγχάνονται με την χρήση ενός εσωτερικού διακόπτη, όπως ένα ρελέ, αποσυνδέοντας τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες με την μπαταρία και με συνεχή έλεγχο του περιβάλλοντος με ανεμιστήρες, κλιματισμό ή υγρόψυξη.

Υπάρχουν 3 βασικοί στόχοι σε όλα τα BMS

- i. Προστασία των στοιχείων της μπαταρίας
- ii. Παράταση της ζωής της μπαταρίας
- iii. Διατήρηση της μπαταρίας σε μια σταθερή κατάσταση λειτουργίας.

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, το BMS ενεργοποιεί μια ή περισσότερες από τις παρακάτω λειτουργίες:

**a) Cell Protection (Προστασία των στοιχείων)**

Η προστασία της μπαταρίας είναι η θεμελιώδης λειτουργία του BMS. Στην πράξη πρέπει να παρέχει πλήρη προστασία των στοιχείων, ώστε να καλυφθεί κάθε ενδεχόμενο καταστροφής της μπαταρίας.

**b) Charge control (Έλεγχος φόρτισης)**

Μέσω τελεστικών ενισχυτών γίνεται ο έλεγχος φόρτισης των κελιών και το επίπεδο της τάσης αναλύεται σε έναν analog-to-digital converter.

**c) Demand Management (Έλεγχος εκφόρτισης)**

Ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ρεύματος, χρησιμοποιώντας τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας, παρατείνοντας έτσι τον χρόνο εκφόρτισης.

#### **d) SOC (State of Charge)**

Δίνει στον χρήστη ενδείξεις, όπως η υπολειπόμενη χωρητικότητα της μπαταρίας ή τον έλεγχο του κυκλώματος φόρτισης ώστε να επιτευχθεί η ιδανική φόρτιση.

#### **e) SOH (State of Health)**

Μας δίνει μια εκτίμηση, της δυνατότητας να αποδώσει η μπαταρία τα ονομαστικά της μεγέθη.

#### **f) Cell Balancing (Εξισορρόπηση των στοιχείων)**

Σε μπαταρίες με πολλά στοιχεία, οι μικρές διαφορές ανάμεσά τους, μπορεί να οδηγήσει σε καταπόνηση των πιο αδύναμων κατά την διάρκεια της φόρτισης με αποτέλεσμα την καταστροφή τους. Με αυτή την λειτουργία το φορτίο αντισταθμίζεται σε αυτά τα στοιχεία, μεγαλώνοντας τη ζωή της μπαταρίας.

#### **g) History - Log Book Function (Ιστορικό)**

Διατηρώντας το ιστορικό, μπορεί να προσδιορίσει το State of health (SOH), όπως και άλλες παραμέτρους π.χ. κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης, ελάχιστες/μέγιστες τάσεις και ρεύματα κ.α.

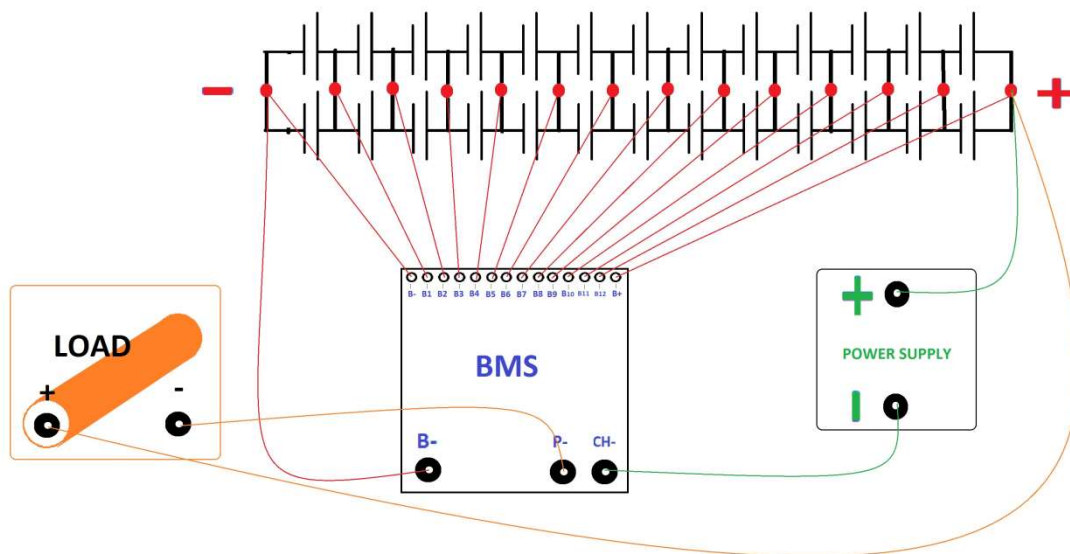
#### **h) Authentication and Identification**

Καταγράφει πληροφορίες σχετικά με τα στοιχεία της μπαταρίας, όπως serial number, ηλεκτροχημικά στοιχεία, στοιχεία κατασκευαστή κ.α.

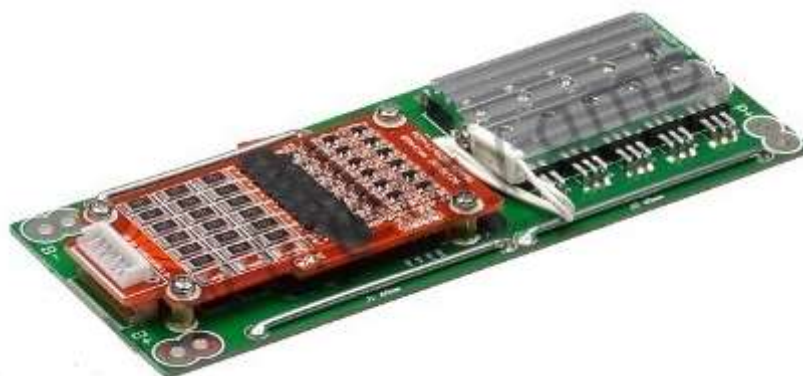
#### **i) Communications (Επικοινωνία)**

Μπορεί να υποστηρίξει επικοινωνία μεταξύ φορτιστή-μπαταρίας.

Επίσης υπάρχει η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου και παρακολούθησης του BMS.



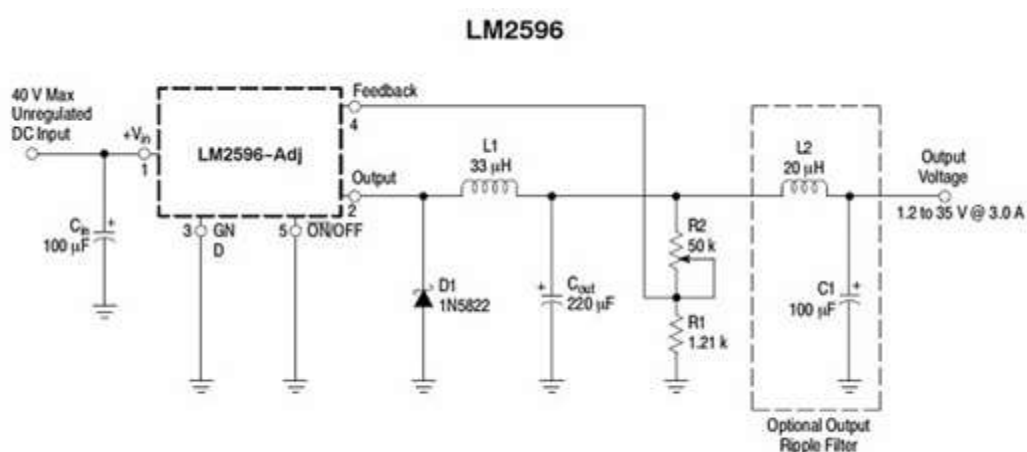
**Εικόνα 31: Συνδεσμολογία BMS και μπαταριών.**



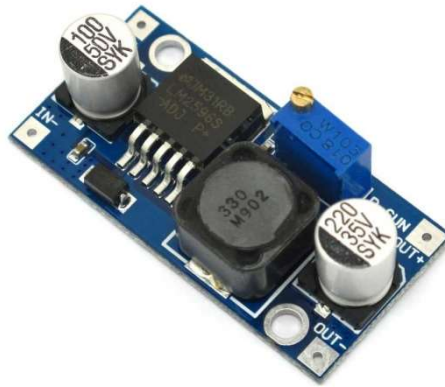
**Εικόνα 32: BMS 25A 13s Li-ion της Linergy.de.**

### 4.3.3 LM2596 Buck Converters

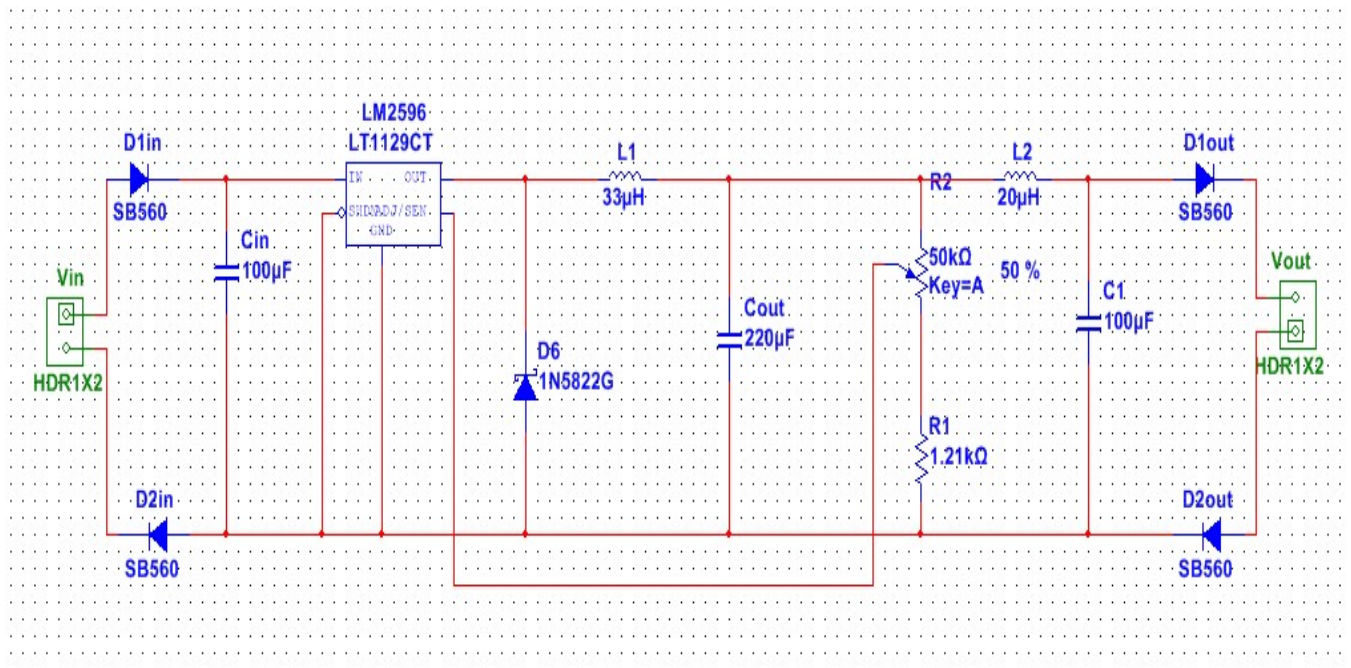
Για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή, των τρανζίστορ για το totem pole της πλακέτας οδήγησης και της κόρνας, χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα ολοκληρωμένα buck converters βασισμένα στο ολοκληρωμένο LM2596. Η κατασκευή αποτελείται από το ολοκληρωμένο LM2596HV της Texas Instruments συνοδευόμενο από πηνίο 22 $\mu$ H για τις απότομες μεταβολές ρεύματος, δίοδο Schottky τύπου 1N5824 συνδεδεμένη παράλληλα με την έξοδο και κεραμικούς πυκνωτές 680 $\mu$ F και 220 $\mu$ F στην είσοδο και έξοδο αντίστοιχα για την εξομάλυνση της τάσης εισόδου και εξόδου σε μεταβατικά φαινόμενα. Τα χαρακτηριστικά του έτοιμου προϊόντος είναι: συχνότητα μεταγωγής 150kHz, 60V μέγιστη είσοδος και 3 A μέγιστο ρεύμα εισόδου/εξόδου. (Texas Instruments 2013, 2)



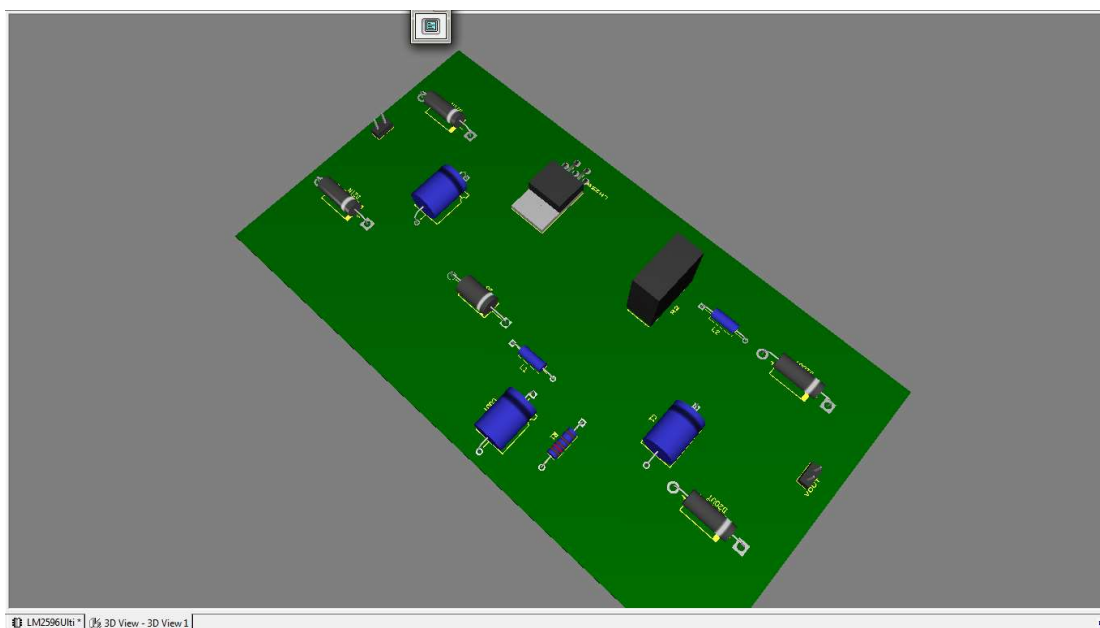
Εικόνα 33: Μπλοκ διάγραμμα buck converter με LM2596.



**Εικόνα 34: Βιομηχανικός Buck Converter με LM2596.**



**Εικόνα 35: Σχέδιο σε MultiSim του ολοκληρωμένου buck converter με προσθήκη διόδων σε είσοδο και έξοδο για μεγαλύτερη προστασία.**



**Εικόνα 36 : Σχέδιο σε Ultiboard του ολοκληρωμένου buck converter με προσθήκη  
διόδων σε είσοδο και έξοδο για μεγαλύτερη προστασία.**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Οι μετατροπείς**

### **5.1 Γενικά**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια γενική περιγραφή των βασικών διατάξεων οδήγησης και ελέγχου κινητήρων (έλεγχος ταχύτητας, ροπής). Οι τεχνικές μετατροπής ή αλλιώς τεχνικές επεξεργασίας ηλεκτρικής ισχύος από μια μορφή σε μια άλλη μορφή, γίνεται χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς ισχύος, οι οποίοι περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2.

#### **5.1.1 Κατηγορίες μετατροπέων**

Ανάλογα με το είδος μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος, οι μετατροπείς διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- i. Αντιστροφείς (DC-AC Inverters)
- ii. Ανορθωτές (AC-DC Rectifiers)
- iii. Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης (AC-AC Cycloconverter)
- iv. Μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC Converters)

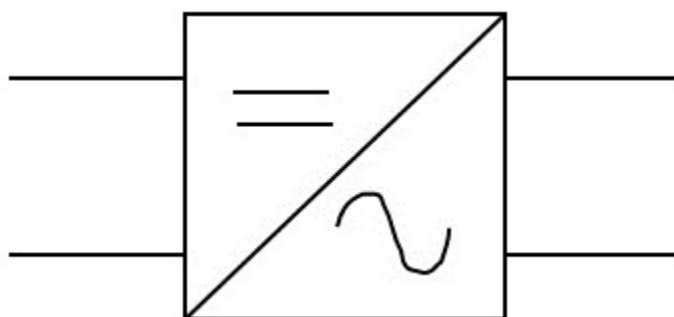
Οι μετατροπείς των ηλεκτρονικών ισχύος υλοποιούνται με κατάλληλες διατάξεις από ελεγχόμενους ηλεκτρονικούς διακόπτες (ημιαγωγούς) όπως θυρίστορ, τρανζίστορ ισχύος (MOSFET, IGBT), GTO, με διόδους και LC κυκλώματα.

##### **5.1.1.1 Αντιστροφείς (DC-AC Inverters)**

Ένας αντιστροφέας DC-AC είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο έχει τη δυνατότητα αλλαγής του συνεχούς ρεύματος (DC) σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Οι τιμές τάσης εισόδου και εξόδου, συχνότητας και συνολικής ενέργειας, εξαρτώνται από τον σχεδιασμό και

την κατασκευή του κυκλώματος. Οι DC-AC αντιστροφείς βρίσκουν εφαρμογή σε:

- Φορητές συσκευές καταναλωτών, οι οποίες επιτρέπουν στο χρήστη να συνδέσει στη συσκευή διάταξη μπαταριών, με σκοπό την παράγωγή AC ενέργειας, ώστε να τροφοδοτήσει ποικίλες ηλεκτρικές συσκευές όπως ηλεκτρικές κουζίνες, ηλεκτρικά εργαλεία, φωτισμό σπιτιού κτλ
- Συστήματα παραγωγής ενέργειας όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικές εταιρείες κοινής ωφελείας ή σε ηλιακά συστήματα παραγωγής ενέργειας, για τη μετατροπή της DC ενέργειας σε AC.
- Οποιοδήποτε άλλο μεγαλύτερο ηλεκτρονικό σύστημα, στο οποίο ο μηχανικός χρειάζεται να μετατρέψει μια πηγή DC σε μια πηγή AC.



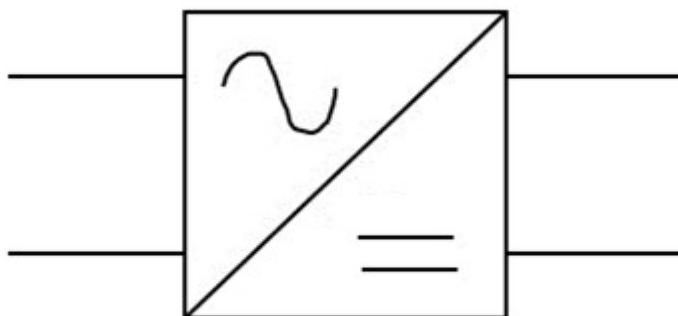
**Εικόνα 37: Μπλοκ διάγραμμα αναστροφέα DC/AC**

### 5.1.1.2 Ανορθωτές (AC-DC Rectifiers)

Οι AC-DC μετατροπείς είναι ανορθωτικές διατάξεις οι οποίες μέσω της μεταβολής την γωνίας έναυσης διαφόρων διακοπτικών στοιχείων, είναι ικανές να μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση εισόδου σε ελεγχόμενου μεγέθους συνεχή τάση..

Η ανορθωτές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

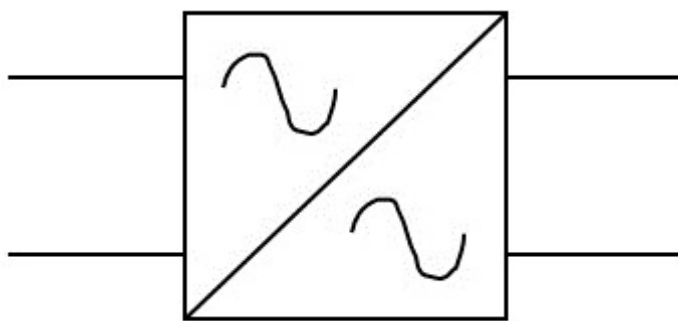
- Μονοφασικές ανορθωτικές διατάξεις
  - i. Απλή ανόρθωση μισού κύματος
  - ii. Μονοφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα
  - iii. Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα
  - iv. Μονοφασικός διπλομετατροπέας
- Τριφασικές ανορθωτικές διατάξεις
  - i. Τριφασική ανόρθωση μισού κύματος
  - ii. Τριφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα
  - iii. Πλήρως ελεγχόμενη τριφασική γέφυρα
  - iv. Τριφασικός διπλομετατροπέας



Εικόνα 38: Μπλοκ διάγραμμα μετατροπέα AC/DC

### 5.1.1.3 Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης (AC-AC Cycloconverter)

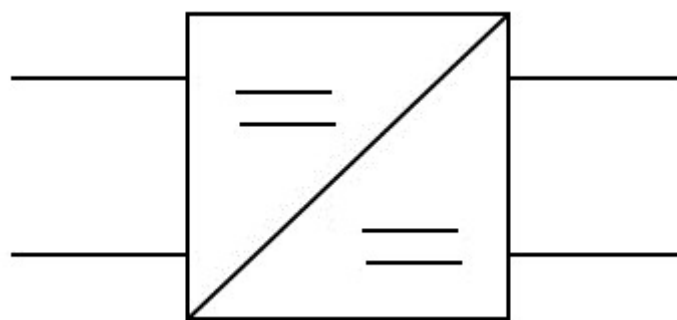
Οι απαιτήσεις της ρύθμισης της εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοσίας μιας ηλεκτρικής συσκευής, είχε ως αποτέλεσμα τη χρήση των AC-AC μετατροπέων. Για μικρές τιμές ισχύος η ρύθμιση αυτή γίνεται με τη χρήση μιας αντίστασης συνδεδεμένης σε σειρά με την ηλεκτρική συσκευή. Όμως για μεγάλες τιμές ισχύος, οι απώλειες της εν λόγω αντίστασης είναι μεγάλες. Για αυτό και σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται οι ελεγχόμενοι διακόπτες εναλλασσόμενου ρεύματος σε κατάλληλες διατάξεις. Οι διακόπτες αυτοί αποτελούνται από θυρίστορ και η ρύθμιση της τάσης και του ρεύματος του φορτίου γίνεται με τη μεταβολή της γωνίας έναυσης των θυρίστορ του διακόπτη. Οι συγκεκριμένοι μετατροπείς χωρίζονται σε 2 κατηγορίες και βρίσκουν εφαρμογή σε ηλεκτροσυγκολλητικές μηχανές, σε ηλεκτρικούς κινητήρες με ρύθμιση στροφών, σε εγκαταστάσεις φωτισμού και σε θερμαντικά σώματα.



Εικόνα 39: Μπλοκ διάγραμμα μετατροπέα AC/AC

#### 5.1.1.4 Μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC Converters)

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC Converters) ή αλλιώς ψαλιδιστές συνεχούς τάσης (DC Chopper) είναι κάποια κυκλώματα τα οποία έχουν τη δυνατότητα να μετατρέπουν τη συνεχή τάση μιας ορισμένης τιμής και πολικότητας σε συνεχή τάση άλλης τιμής, μεγαλύτερης ή μικρότερης και κατά περιπτώσεις άλλης πολικότητας. Πλεονεκτήματα τους είναι η γρήγορη δυναμική απόκριση, το χαμηλό κόστος και ο υψηλός βαθμός απόδοσης.



Εικόνα 40: Μπλοκ διάγραμμα μετατροπέα DC/DC

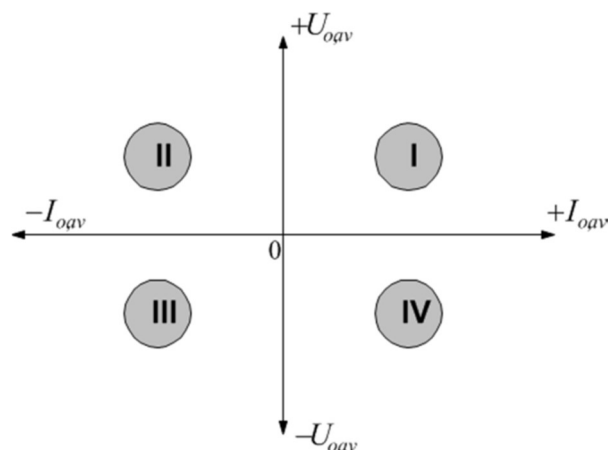
Οι μετατροπείς DC-DC μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε:

- i. Συστήματα τηλεπικοινωνιών
- ii. Συστήματα ηλεκτρικής έλξης και κίνησης
- iii. Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- iv. Φωτοβολταϊκά συστήματα
- v. Παλμοτροφοδοτικά ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών διατάξεων τα οποία χρησιμοποιούνται ως τροφοδοτικά υψηλής συχνότητας και απόδοσης
- vi. Διόρθωση του συντελεστή ισχύος (Σ.Ι.) ανορθωτικών διατάξεων με διόδους

- vii. Συστήματα ελέγχου ταχύτητας ηλεκτρικών αυτοκινήτων, τρένων και σε διάφορες άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.

#### 5.1.1.4.1.1 Κριτήρια ταξινόμησης των ψαλιδιστών

- Ανάλογα με τη σχέση τάσης εισόδου-εξόδου
  - i.  $U_{out} < U_{in}$  : step down dc-dc converters
  - ii.  $U_{out} > U_{in}$  : step up dc-dc converters
  - iii.  $U_{out} \neq U_{in}$  : step down/up dc-dc converters
- Ανάλογα με τα τεταρτημόρια λειτουργίας
  - i. Λειτουργία σε 1 τεταρτημόριο :  $+U_o, +I_o$
  - ii. Λειτουργία σε 2 τεταρτημόρια:  $\pm U_o, +I_o$  ή  $+U_o, \pm I_o$
  - iii. Λειτουργία σε 4 τεταρτημόρια:  $\pm U_o, \pm I_o$



Εικόνα 41: Τεταρτημόρια λειτουργίας.

- Εάν μεταξύ ψαλιδιστή και φορτίου παρεμβάλλεται μια ενδιάμεση βαθμίδα προσωρινής αποθήκευσης ενέργειας (μεταφορά ενέργειας)
  - i. Δεν διαθέτουν τέτοια βαθμίδα, δηλαδή συνδέονται απευθείας με την έξοδο
  - ii. Διαθέτουν τέτοια βαθμίδα, δηλαδή είναι ψαλιδιστές με έμμεση σύνδεση
  
- Τρόποι ελέγχου συνεχούς τάσεως εξόδου:
  - i. Με διαμόρφωση του εύρους παλμών (PWM)
  - ii. Με διαμόρφωση της συχνότητας (FM)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Ο ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ DC/DC**

### **6.1 Γενικά**

Για την οδήγηση ενός κινητήρα DC η ιδανική τροφοδοσία είναι με ρεύμα τάσης ίσης με την ονομαστική του (δεδομένη από τον κατασκευαστή, στη συγκεκριμένη περίπτωση 48V). Οι παράμετροι λειτουργίας του κινητήρα απαιτούν κατά περίπτωση ομαλή εκκίνηση από 20V μέχρι 48V για έλεγχο του ρεύματος εκκίνησης. Η αρχική τροφοδοσία προέρχεται από μπαταρίες ιόντων λιθίου με δυναμικό 54.6V σε συνθήκες πλήρους φόρτισης. Ως εκ των άνω απαιτείται μεταβλητός υποβιβασμός της τάσης εισόδου. Για τον σκοπό αυτό ο ελεγκτής του κινητήρα πρέπει να μετατρέπει συνεχές ρεύμα εισόδου σε συνεχές ρεύμα εξόδου με μεταβλητό υποβιβασμό. Ιδανική διάταξη γι αυτή την εφαρμογή κρίνεται ο μετατροπέας DC/DC τύπου chopper.

### **6.2 Αρχή λειτουργίας του DC/DC Converter**

Ο μετατροπέας DC/DC τύπου chopper βασίζεται στον έλεγχο ενός διακοπτικού στοιχείου με τετραγωνικό παλμό μεταβλητού κύκλου λειτουργίας (Duty Cycle). Στον χρόνο που το διακοπτικό στοιχείο κλείνει το κύκλωμα, το ρεύμα εισόδου φορτίζει το πεδίο ενός πηνίου. Στον χρόνο που το διακοπτικό στοιχείο ανοίγει το κύκλωμα, η αποθηκευμένη ενέργεια στο πηνίο καταναλώνεται εντός του κυκλώματος μέσω διόδου ελευθέρως ροής ως θερμότητα και κινητική ενέργεια. Δεδομένου ότι το κύκλωμα τροφοδοτείται από την πηγή σε ποσοστό ίσο με το duty cycle του τετραγωνικού παλμού, η τάση εξόδου θα είναι ίση με το ποσοστό duty cycle επί της αρχικής τροφοδοσίας. Αριθμητικά προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 V_{L1} &= L_1 \cdot \frac{d i_{L1}}{d t} \\
 &= L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L1}}{(1 - D) \cdot T} = V_{out}
 \end{aligned}$$

### 6.3 Ηλεκτρονικά Ισχύος

Για την υλοποίηση του μετατροπέα απαιτούνται συγκεκριμένα στοιχεία: ένας διακόπτης με γρήγορη απόκριση και ελάχιστη αντίσταση, ένα επαγωγικό στοιχείο που θα αποθηκεύει ενέργεια και δύο χωρητικά στοιχεία για την εξομάλυνση της εισόδου και της εξόδου. Για την χρήση του ρεύματος εισόρμησης από το πηνίο απαιτείται δίοδος ελευθέρως ροής υψηλής χρονικής απόκρισης.

#### 6.3.1 MOSFET IRP064N

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2, το βέλτιστο διακοπτικό στοιχείο για υψηλές συχνότητες με την χαμηλότερη εσωτερική αντίσταση και απώλεια μεταγωγής είναι το τρανζίστορ τύπου MOSFET. Για την επιλογή συγκεκριμένου τύπου MOSFET οι παράμετροι έχουν ως εξής

- Τάση drain-source : minimum 55V
- Ρεύμα drain-source: minimum 15A
- Τάση gate : minimum 12V
- Θερμική διάχυση : 200W

Με τα παραπάνω στοιχεία, βέλτιστο για την εφαρμογή είναι το n-MOSFET transistor IRP064N.



**Εικόνα 42: MOSFET IRP064N.**

### 6.3.2 Δίοδος Ελευθέρας Ροής

Η δίοδος ελευθέρας ροής διαρρέεται από ρεύμα τάξεως 6 A με συχνότητα ίδια της μεταγωγής (1049Hz). Η τάση ανάστροφης πόλωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη της τάσης εισόδου, η πτώση τάσης ορθής πόλωσης ελάχιστη δυνατή και η κατασκευή της να επιτρέπει γρήγορη διάχυση θερμότητας στο περιβάλλον. Η δίοδος BYV26A έχει αντοχή 10A σε παλμικό φορτίο και αντοχή 600V ανάστροφης πόλωσης ενώ η πτώση τάσης της είναι 1.1V. Για την απόκρισή της με συχνότητα 1049Hz είναι βέλτιστη λύση καθώς ο χρόνος απόκρισής της είναι 35 nsec.



**Εικόνα 43: δίοδος BYV26A .**

### 6.3.3 Πηνίο

Για την αποθήκευση ενέργειας κατά τη μεταγωγή χρησιμοποιείται η επαγωγικότητα του κινητήρα τάξεως 0.425mH. Αν η εφαρμογή προοριζόταν για SMPS τροφοδοτικό ή buck converter υψηλής συχνότητας το πηνίο θα βρισκόταν σε high side θέση εκτός του φορτίου.

### 6.3.4 Πυκνωτής εξομάλυνσης εξόδου

Ο πυκνωτής εξόδου δρα σα φίλτρο RC με το φορτίο και εξομαλύνει την τάση εξόδου σε ένα επιτρεπτό όριο. Για την εφαρμογή σε συνθήκες γρήγορης μεταγωγής επιλέγεται ηλεκτρολυτικός πυκνωτής μέγιστης τάσης 55V και χωρητικότητας 470nF. Παράλληλα τοποθετείται κεραμικός πυκνωτής ίδιας τάσης 0.01μF για την απορρόφηση ταλαντώσεων υψηλών συχνοτήτων.

### 6.3.5 Πυκνωτής εξομάλυνσης εισόδου

Στα ηλεκτρονικά ακριβείας και στις εφαρμογές που ο θόρυβος εισόδου επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα τοποθετείται κεραμικός πυκνωτής αποσύμπλεξης (decoupling) ώστε στις μεταβατικές αλλαγές των στοιχείων η τάση εισόδου να παραμένει σταθερή. Για την εφαρμογή, κεραμικός πυκνωτής 0.1μF στην είσοδο είναι επαρκής λύση με την επιφύλαξη ότι για χρήση σε υψηλότερες συχνότητες το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο προκαλεί ταλάντωση του πυκνωτή.

## 6.4 Ηλεκτρονικά Ελέγχου

### 6.4.1 Τροφοδοσία κυκλωμάτων ελέγχου

Τα κυκλώματα ελέγχου λειτουργούν σε σαφώς χαμηλότερη τάση από το κύκλωμα ισχύος. Η συνήθης πρακτική για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και τις τυπικές εφαρμογές είναι είτε με voltage regulator είτε μέσω εξωτερικής τροφοδοσίας.

#### 6.4.1.1 Τροφοδοσία με Voltage Regulator

Η χρήση voltage regulator τύπου LM317 είναι μια τυπική λύση για την τροφοδοσία δευτερευόντων συστημάτων σε πλακέτες και ολοκληρωμένα κυκλώματα. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η τάση dropout ξεπερνά τα 40V και ο regulator θερμαίνεται πέραν των προκαθορισμένων ορίων. Πέραν τούτου η απόδοση των regulators είναι πάντα χαμηλότερη των μετατροπέων και σε τέτοιου μεγέθους εφαρμογή η καταναλωθείσα ισχύς σε απώλειες υπολογίζεται ως  $V_{\text{dropout}} * I_{\text{out}}$  που για τη συγκεκριμένη περίπτωση  $40V \times 0.3A = 12Watt$ . Ο μετατροπέας λειτουργεί για αρκετή ώρα σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά σαν βελτιστοποίηση ως προς τη κατανάλωση επιλέχθηκε εξωτερική τροφοδοσία με Buck Converters.

#### 6.4.1.2 Τροφοδοσία με Buck Converter

Για την τροφοδοσία του opto-coupler, του totem-pole push-pull amplifier, της Tiva C Series και άλλων περιφερειακών αρχικά τοποθετήθηκε linear voltage regulator τύπου LM317 ο οποίος λόγω χαμηλής απόδοσης αντικαταστάθηκε στη συνέχεια με ολοκληρωμένα buck converters βασισμένα στο ολοκληρωμένο LM2596. Το

συγκεκριμένο ολοκληρωμένο έχει δυνατότητα εξόδου εισόδου τάσης 45V και εξόδου 3A ονομαστικές, αλλά πειραματικά αποδείχτηκε ότι είσοδος 54V δεν του προκαλεί ζημιά. Το συγκεκριμένο buck converter χρησιμοποιεί φίλτρο RLC στην έξοδο για εξομάλυνση και συχνότητα μεταγωγής 150kHz. Επειδή το buck converter είναι απ' τη κατασκευή του ευαίσθητο σε υψηλά ρεύματα εισόδου/εξόδου και υπερευαίσθητο στην ανάστροφη σύνδεση, προτάθηκε η προσαρμογή διόδων τύπου SB5100 σε κάθε είσοδο και έξοδο όπως επίσης και ασφάλειες 3A σε είσοδο και έξοδο, ούτως ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του μετατροπέα και των συνδεδεμένων περιφερειακών συσκευών.

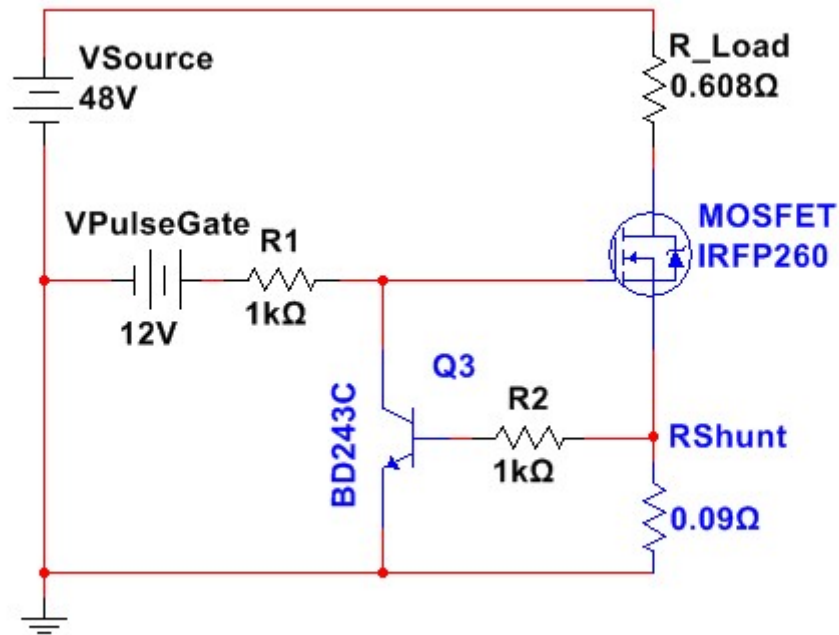
#### **6.4.2 Ενισχυτής τετραγωνικού παλμού Push-Pull**

Ο παλμός που παράγει η Tina είναι παλμός πλάτους 3.3V από την αναλογική της έξοδο. Το πλάτος αυτό είναι ανεπαρκές για να οδηγήσει το διακοπτικό στοιχείο και γι' αυτό απαιτείται ενίσχυσή του. Ταυτόχρονα, απαιτείται προστασία του κυκλώματος ελέγχου και παραγωγής παλμού απ' το κύκλωμα ισχύος καθώς ένα υψηλό ανάστροφο ρεύμα, λόγω κινητήρα ή λόγω επαγωγικών φαινομένων μπορεί να κάψει τα λογικά κυκλώματα. Για την απομόνωση παλμού – ισχύος χρησιμοποιήθηκε opto-coupler isolator τύπου TIL191. Για την ενίσχυση του παλμού σε επίπεδο οδήγησης του διακοπτικού στοιχείου (στο εύρος 12V-25V) χρησιμοποιήθηκε διάταξη totem pole – push pull amplifier με 2 διπολικά τρανζίστορ τύπου NPN και PNP. Η μέθοδος υπερέχει της απλής διάταξης Darlington καθώς δημιουργεί κατά το χρόνο κλεισίματος, οδό διαφυγής της παραμένουσας τάσης στο διακοπτικό οπότε θεωρήθηκε ιδανική. Για την υλοποίηση του push-pull χρησιμοποιήθηκαν διπολικά τρανζίστορ ισχύος τύπου BD243C και BD244C. Η επιλογή των συγκεκριμένων τρανζίστορ ισχύος έγινε λόγω

της χαμηλής εσωτερικής αντίστασής τους και της μικρής αυξομοίωσης των χαρακτηριστικών με τη μεταβολή της θερμότητας. Με την διάταξη totem pole σε push-pull κατάσταση ο παλμός ενισχύεται από 3.3V σε 12V+ αναλόγως την εφαρμογή και υπάρχει πρόβλεψη για αρνητικό παλμό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ανάδραση για περεταίρω έλεγχο.

## 6.5 Βρόγχος ανάδρασης – Περιορισμός Ρεύματος

Στα πλαίσια της εξοικονόμησης ενέργειας, θεωρήθηκε απαραίτητο να κατασκευαστεί σύστημα περιορισμού του ρεύματος που διέρχεται από το κύκλωμα ισχύος. Για την επίτευξη του σκοπού σχεδιάστηκε σύστημα κλειστού βρόγχου που διακόπτει την μεταγωγή του τρανζίστορ ισχύος μόλις το ρεύμα ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή αφήνοντας το να καταναλωθεί στο πηνίο του κινητήρα. Το σύστημα υλοποιείται στο κύκλωμα ως εξής: Μετά το MOSFET ισχύος, τοποθετείται αντίσταση μέτρησης ρεύματος τιμής 0.09Ω. Από το θετικό άκρο της αντίστασης (στο σημείο που δημιουργείται η πτώση τάσης ως προς τη γείωση) ενώνεται αγωγός που οδηγεί στη βάση ενός NPN διπολικού τρανζίστορ τύπου BD243C. Η τάση βάσης – εκπομπού που οδηγεί το τρανζίστορ στην ενεργό περιοχή είναι της τάξεως των 604,8mV. Ο εκπομπός του τρανζίστορ συνδέεται στην πύλη του MOSFET και ο συλλέκτης στη γείωση. Μόλις το ρεύμα είναι τέτοιο ώστε η πτώση τάσης στον αισθητήρα ρεύματος φτάσει να ισούται με την ενεργό τάση του τρανζίστορ, το τρανζίστορ εισέρχεται στην ενεργό περιοχή διοχετεύοντας τον τετραγωνικό παλμό στη γείωση. Η πύλη του MOSFET βρίσκεται στιγμιαία χωρίς τάση, αυξάνοντας ραγδαία την αντίσταση του ημιαγωγού και το ρεύμα καταναλώνεται στο πηνίο του κινητήρα μέχρι η πτώση τάσης στην αντίσταση μέτρησης μειωθεί κάτω των 604,8mV.



Εικόνα 44: Υλοποίηση Current Limiter σε MultiSim.

Υπολογιστικά προκύπτουν τα εξής:

$$V_{shunt} = 604.8mV$$

$$R_{shunt} = 0.09\Omega$$

$$I_{Limit} = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} = \frac{604.8mV}{0.09A} = 6.72A$$

Ο στόχος για περιορισμό του ρεύματος αφορά την προστασία του κινητήρα από τις υπερεντάσεις εκκίνησης και τις στιγμιαίες πτώσεις ταχύτητας λόγω αυξημένης ροπής αντίστασης στην άτρακτο. Ο κατασκευαστής δίνει 5A μέγιστο συνεχόμενο ρεύμα και μέγιστο

στιγμιαίο ρεύμα 10 A για διάρκεια 1 sec. Δεδομένου από μηχανολογική μελέτη ότι στιγμιαία η ροπή αντίστασης μπορεί να υπερβεί τα 420mNm άρα και για διάρκεια 1-2 sec το ρεύμα μπορεί να υπερβεί τα 6 A αλλά όχι τα 10 A θεωρήθηκε βέλτιστο όριο τα 6.72 A . Η αντίσταση – αισθητήρας ρεύματος υλοποιήθηκε με 2 παράλληλες αντιστάσεις 0.18Ω αντοχής 15W. Για την επαλήθευση της αντοχής θεωρήθηκε ότι το μέγιστο δυνατό ρεύμα είναι 10A, έτσι η διάχυση θερμότητας προκύπτει ως εξής:

$$R_{total}^{-1} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow$$

$$R_{total}^{-1} = \frac{1}{0.18\Omega} + \frac{1}{0.18\Omega} = 0.09\Omega$$

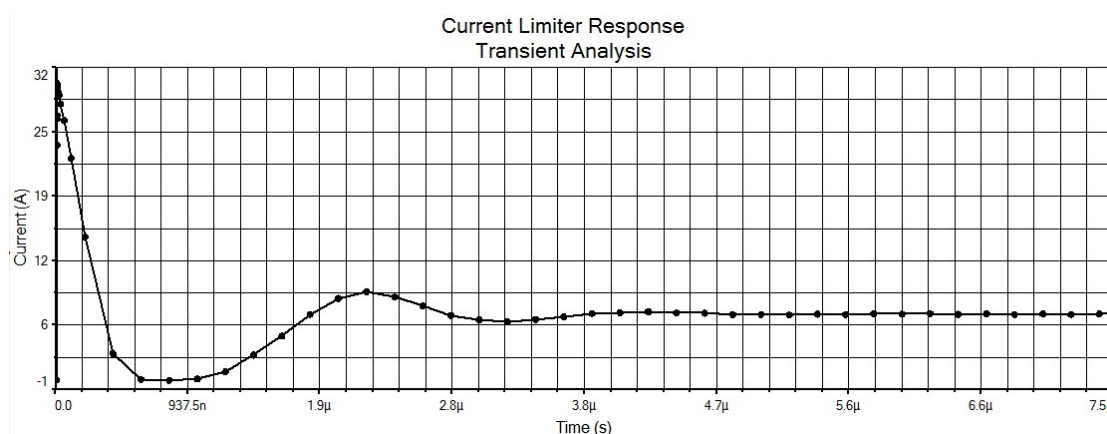
$$P_{total} = P_{R1} + P_{R2} = 2 \cdot 15W = 30W$$

$$P_{dissipation} = I^2 \cdot R \Rightarrow$$

$$P_{dissipation} = (10A)^2 \cdot 0.09\Omega = 9W$$

$$P_{total} > P_{dissipation}$$

Σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης το σύστημα συγκλίνει στο επιθυμητό όριο σε 4  $\mu\text{sec}$ . Το αποτέλεσμα προκύπτει από ανάλυση σε περιβάλλον εξομοίωσης του προγράμματος NI Multisim με τον SPICE Solver.



**Εικόνα 45: Απόκριση current limiter.**

## 6.6 Εξομοίωση κυκλώματος

### 6.6.1 Το περιβάλλον NI Multisim

Το NI MultiSIM είναι ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα ηλεκτρονικών κυκλωμάτων το οποίο δουλεύει με βάση τη σχηματική αναπαράσταση των στοιχείων του εκάστοτε κυκλώματος και της εξομοίωσης αυτού. Η ανάλυση και η εξομοίωση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων βασίζεται σε ανάπτυξη κώδικα SPICE.

Μέρος του σχεδιαστικού αυτού προγράμματος είναι και το NI Ultiboard, το οποίο αναπαριστά σχηματικά σε δισδιάστατη (2D) και τρισδιάστατη μορφή (3D) το τελικό κύκλωμα, το οποίο είναι έτοιμο για εκτύπωση σε πλακέτα. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του Ultiboard είναι το «Real Time Design Rule Check», δηλαδή ο έλεγχος σωστής

τοποθέτησης, κατανομής και αγωγής σύνδεσης των στοιχείων πάνω στην πλακέτα σε πραγματικό χρόνο.

### **6.6.2 Επίλυση γραμμικών κυκλωμάτων με κώδικα SPICE**

Ο κώδικας SPICE για κάθε στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε παρέχεται έτοιμος από τη βιβλιοθήκη του Multisim. Το πρόγραμμα επίλυσης υπολογίζει, σε κάθε χρονικό σημείο, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας συνεχούς ρεύματος και ολοκληρώνει ανά συγκεκριμένο χρόνο για να υπολογίσει τα μη γραμμικά φαινόμενα. Με κάθε κύκλο υπολογισμού αποθηκεύει το σχετικό σφάλμα από τον προηγούμενο κύκλο (iteration) και όταν το σφάλμα σταθεροποιηθεί αυξάνει τον ρυθμό εξομοίωσης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί κανείς για ένα κύκλωμα να δει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή και με οποιοδήποτε βήμα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ & ΠΛΑΚΕΤΑΣ

### 7.1 Γενικά

Η κατασκευή πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος (από εδώ και στο εξής PCB) είναι η κυρίαρχη διαδικασία στην ηλεκτρολογία και την ηλεκτρονική που μεταφέρει τις αρχές λειτουργίας ενός ηλεκτρικού/ηλεκτρονικού συστήματος από την πρωτότυπη μορφή σε τελικό προϊόν. Υποδεέστερες εναλλακτικές είναι η μέθοδος περιέλιξης καλωδίου (wire wrap) και η μέθοδος point-to-point σε διάτρητη πλακέτα, breadboard ή άλλη επιφάνεια. Αναφέρονται ως υποδεέστερες σε ποιότητα καθώς οι αυτοματοποιημένες παραλλαγές τους έχουν σταματήσει να χρησιμοποιούνται από τη δεκαετία του '60 και σαν κατασκευή είτε χειροκίνητα είτε αυτοματοποιημένα είναι επιρρεπείς στη δημιουργία γεφυρών (εσφαλμένη σύνδεση δύο σημείων), έχουν ανομοιογενή κατανομή της αντίστασης των αγωγών και εφόσον εκτείνονται σαν κατασκευές στις τρεις διαστάσεις έχουν υψηλότερη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή ως εκ τούτου και μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας ή σήματος στις υψηλές συχνότητες.

Δεδομένων των ανωτέρω, η μελέτη της διαδικασίας παραγωγής PCB έχει υψηλή σημασία για τα έργα εκείνα που εμπεριέχουν χρήση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και κυρίως αυτά που προορίζονται για βιομηχανική και εμπορική εφαρμογή.

## **7.2 Στάδια της διαδικασίας παραγωγής PCB**

### **7.2.1 Σχεδίαση**

Για την σχεδίαση ενός PCB μέχρι και τη δεκαετία του '70 συνήθως πρακτική ήταν η δια χειρός σχεδίαση της μάσκας αποχάλκωσης σε διαφάνεια και η διαδικασία ήταν εξίσου τεχνική και καλλιτεχνική. Στα μέσα της δεκαετίας του '70 εταιρίες όπως η Calma άρχισαν να χρησιμοποιούν τον photoplotter της Gerber Scientific για παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα σχεδίων PCB. Σήμερα υπάρχουν πολλά διαφορετικά προγράμματα που αναλαμβάνουν μια ή περισσότερες διαδικασίες σχεδίασης με τον περιεκτικό τίτλο “EDA” (Electronic Design Automation). Το αντικείμενο της σχεδίασης καθαυτής αποτελεί ξεχωριστή ενότητα και ξεφεύγει του πεδίου μελέτης της παρούσας αναφοράς και για την μελέτη της διαδικασίας θα θεωρηθεί ότι υφίσταται έτοιμο σχέδιο του κυκλώματος προς υλοποίηση.

### **7.2.2 Αποτύπωση**

Για την αποχάλκωση μιας πλακέτας με χημική προσβολή ή με μηχανουργική κατεργασία χρειάζεται η δημιουργία αποτυπώματος (stencil - mask). Αν πρόκειται για μηχανουργική κατεργασία CNC, αποτύπωση θεωρείται η παραγωγή G-Code για την εργαλειομηχανή. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση χρειάζεται αποτύπωση του σχεδίου με μέθοδο που να καθιστά την αποχάλκωση συμφέρουσα και αποδοτική σε χρόνο και αναλώσιμα υλικά. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι η δημιουργία μάσκας σε φωτοευαίσθητη επίστρωση ή η μέθοδος μεταφοράς γραφίτη.

### **7.2.2.1 Μέθοδος μεταφοράς γραφίτη (Toner Transfer)**

Με την μέθοδο μεταφοράς γραφίτη τυπώνεται το σχέδιο καθρεπτισμένο σε μια επιφάνεια και προσαρμόζεται στην χάλκινη επιφάνεια. Με ομοιόμορφη θέρμανση της περιοχής ο γραφίτης προσκολλάται στη χάλκινη επιφάνεια και αποκολλάται πλήρως από το αρχικό μέσο. Τα καλύτερα αποτελέσματα μεταφοράς γραφίτη επιτυγχάνονται με υψηλής ποιότητας φωτογραφικό χαρτί, χαρτί PNP ή διαφάνεια προβολής. Σαν μέσο θέρμανσης της περιοχής, συνήθως χρησιμοποιείται κοινός πλαστικοποιητής εγγράφων. Συνηθίζεται να γίνεται παρέμβαση στον πλαστικοποιητή για αλλαγή σχέσης μετάδοσης του οδηγού των ράουλων μετακίνησης έτσι ώστε η πλακέτα να εξέρχεται με ταχύτητα περίπου στο 1/10 της κανονικής ώστε η μεταφορά γραφίτη να γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Το τελικό προϊόν της διαδικασίας είναι πλακέτα της οποίας η πλευρά με τη χάλκινη επίστρωση έχει αποτυπωμένους τους διαδρόμους του κυκλώματος με γραφίτη.

### **7.2.2.2 Μέθοδος φωτοευαίσθητης επίστρωσης**

Η τυπική μέθοδος αποτύπωσης στη μικρομεσαία βιομηχανία παραγωγής PCB όταν ακολουθεί χημική προσβολή για αποχάλκωση είναι ο πολυμερισμός επίστρωσης φωτοευαίσθητου film με ακτινοβολία UV. Τυπώνεται το κύκλωμα σε διαφάνεια και επικολλάται στην χάλκινη επιφάνεια μεμβράνη φωτοευαίσθητου σκουρόχρωμου υλικού. Εφαρμόζεται η διαφάνεια πάνω στην πλακέτα με το film και ακολουθεί έκθεση σε ακτινοβολία UV. Ακολουθεί η βύθιση της πλακέτας σε διάλυμα για εμφάνιση και το πολυμερισμένο μέρος διαλύεται αφήνοντας το αποτύπωμα του κυκλώματος.

### **7.2.2.3 CNC Laser Toner Removal**

Με την μέθοδο CNC Laser χρησιμοποιείται εργαλειομηχανή Laser etching και πλακέτα επικαλυμμένη πλήρως με γραφίτη. Η εργαλειομηχανή αφαιρεί τον γραφίτη με ακτίνα laser και στο τέλος της διαδικασίας απομένει η μάσκα από γραφίτη προς αποχάλκωση.

### **7.2.3 Αποχάλκωση**

Για την αποχάλκωση (αφαίρεση του χαλκού για τη δημιουργία κυκλώματος) αναλόγως το μέγεθος της παραγωγής και τον εξοπλισμό χρησιμοποιούνται χημικές ή μηχανουργικές διαδικασίες.

#### **7.2.3.1 Χημική Προσβολή**

Η μέθοδος αποχάλκωσης με χημική προσβολή είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος σε εφαρμογές μικρής κλίμακας και ερασιτεχνικές κατασκευές. Η επιχαλκωμένη επιφάνεια βυθίζεται σε διάλυμα τριχλωριούχου σιδήρου το οποίο αντιδρά με τον χαλκό επιφανειακά και τον αφαιρεί στα σημεία που δεν υπάρχει μάσκα. Η διαδικασία διαρκεί 20-30 λεπτά για διάλυμα καθαρό σε θερμοκρασία 50 βαθμών κελσίου και με συνεχή ανάδευση.

#### **7.2.3.2 CNC Milling**

Η αποχάλκωση μπορεί να γίνει με τυπική μηχανουργική διεργασία. Η πλακέτα τοποθετείται σε έδρανο φρέζας CNC και ο χαλκός αφαιρείται με εργαλείο. Η μέθοδος είναι συμφέρουσα για παραγωγή πολλών κυκλωμάτων και θεωρείται σε ποιότητα απευθείας ανάλογη της ακρίβειας της εργαλειομηχανής. Σε πλακέτες με πολλές διαδρομές

μικρού μεγέθους όπως κάρτες γραφικών και μνήμες η χρήση CNC Mill για αποχάλκωση και διάνοιξη οπών είναι αδύνατη με συμβατικές εργαλειομηχανές.

### **7.2.3.3 Laser Etching**

Στις περιπτώσεις που χρειάζεται μεγάλη ακρίβεια κατεργασίας ώστε να είναι απαγορευτική η χρήση συμβατικής εργαλειομηχανής και ταυτόχρονα το μέγεθος και ο αριθμός των προς κατασκευή κυκλωμάτων καθιστά την χημική αποχάλκωση χρονοβόρα χρησιμοποιείται CNC Laser etching. Η διαδικασία είναι συμφέρουσα για εργοστάσια και μεγάλες μονάδες παραγωγής και για μεγάλες πλακέτες που περιέχουν πολλαπλά κυκλώματα ή πολλαπλές στρώσεις κυκλωμάτων.

### **7.2.4 Επιφανειακή Προστασία**

Μια επιφάνεια χαλκού μετά από χημική προσβολή ή μηχανουργική κατεργασία είναι υπερευαίσθητη στην οξείδωση. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι δακτυλικό αποτύπωμα διαβρώνει την επιφάνεια σε 10 με 15 λεπτά και έκθεση σε ατμοσφαιρική υγρασία μπορεί να διαβρώσει μέχρι και το 20% της επιφάνειας σε 24 ώρες. Η ευαίσθητη επιφάνεια απαιτεί άμεσα προστασία από τη διάβρωση εντός των 10 λεπτών από το πέρας της αποχάλκωσης. Οι πιο συνηθισμένες διαδικασίες των μικρών παραγωγικών μονάδων και των ιδιωτών και ερασιτεχνών είναι η προστασία με φωτοευαίσθητη μεμβράνη, η επίστρωση με υγρό διάλυμα κασσίτερου (liquid tin) ή η χρήση κόλλησης.

#### **7.2.4.1 Φωτοευαίσθητη μεμβράνη – Solder Mask**

Με αυτή τη μέθοδο, μετά την αποχάλκωση της πλακέτας προστίθεται μεμβράνη φωτοευαίσθητου υλικού και η πλακέτα περνάει από πρέσα με θερμοκρασία 60-80 βαθμών κελσίου. Αφού κολλήσει η μεμβράνη πάνω στο κύκλωμα, τοποθετείται μάσκα σε διαφάνεια που περιέχει αρνητικό των σημείων συγκόλλησης των υλικών. Με τη διαδικασία του πολυμερισμού με ακτινοβολία UV και λουτρό σε διάλυμα developer στην πλακέτα μένουν έκθετα τα σημεία συγκόλλησης και το υπόλοιπο κύκλωμα προστατεύεται από την πολυμερισμένη μεμβράνη.

#### **7.2.4.2 Liquid Tin**

Η φωτοευαίσθητη μεμβράνη μαζί με την πάστα κόλλησης προστατεύει ένα κύκλωμα από τη διάβρωση και διευκολύνει τη συγκόλληση αλλά σε γραμμές παραγωγής μεγάλης κλίμακας που η διαδικασία συγκόλλησης είναι αυτοματοποιημένη και υπάρχει περίπτωση να καθυστερήσει η αποχαλκωμένη πλακέτα να φτάσει στο στάδιο της μεμβράνης, ή σε περίπτωση που πρόκειται για ενδιάμεσο επίπεδο πλακέτας είναι απαραίτητη μια ακόμα διεργασία που καλύπτει και τις 2 παραμέτρους. Σε αυτή τη φάση χρησιμοποιούνται διαλύματα μετάλλων με πολυμερή που δημιουργούν επίστρωση στους χάλκινους αγωγούς. Η επίστρωση είναι συνήθως κασσίτερος στις εφαρμογές χαμηλού κόστους / μικρού μεγέθους αλλά οι μεγάλες μονάδες παραγωγής χρησιμοποιούν κράματα αργύρου – χρυσού – κασσιτέρου αναλόγως τη μέθοδο συγκόλλησης που χρησιμοποιούν. Η επίστρωση εν τέλει βοηθά την προστασία από διάβρωση, τη συγκόλληση και εφόσον διευρύνει με αγωγίμο υλικό τους αγωγούς, αυξάνει και την αντοχή σε υψηλά ρεύματα κατά ένα ποσοστό αναλόγως το πάχος της επίστρωσης.

### 7.2.5 Διάτρηση Οπών

Υπάρχουν 3 είδη οπών σε ένα PCB. Οι οπές στήριξης που δεν συμμετέχουν στη λειτουργία, οι οπές για τα στοιχεία που συγκολλούνται μέσω της οπής και οι οπές που μεταφέρουν ρεύμα από τη μια στρώση της πλακέτας στην άλλη (Via). Στις μικρομεσαίες και τις ερασιτεχνικές εφαρμογές η χρήση via σπανίζει και οι οπές διανοίγονται με κανονικό δράπανο της επιθυμητής διαμέτρου. Σε μεγάλες μονάδες παραγωγής χρησιμοποιείται ειδική εργαλειομηχανή CNC με τρυπάνια διαφόρων διαμέτρων καθώς στις οπές via χρειάζεται ελάχιστο μέγεθος και μέγιστη ακρίβεια καθώς αγωγός μεταξύ 2 στρώσεων μεταφέρει ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή μεταξύ των 2 επιπέδων.

### 7.2.6 Πρόσθετες στρώσεις

Ένα πολύπλοκο κύκλωμα με πολλές γέφυρες, ένα κύκλωμα που προορίζεται για υψηλές συχνότητες όπου ο θόρυβος και η εμπέδηση επηρεάζουν την απόδοση σημαντικά ή ένα κύκλωμα που πρέπει να προστατέψει βιομηχανικά μυστικά από reverse engineering έχει μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας αν πρέπει να υλοποιηθεί σε μια επιφάνεια. Οι συνηθισμένες μικρομεσαίες και ερασιτεχνικές εφαρμογές υλοποιούνται σε PCB απλής ή διπλής όψης αλλά υπάρχουν περιπτώσεις που κυκλώματα πρέπει να υλοποιηθούν σε περισσότερα από 2 επίπεδα. Δυνατότητα για τέτοιου είδους παραγωγή έχουν μόνο τα μεγάλα εργοστάσια και γραμμές παραγωγής PCB. Σε αυτή τη περίπτωση κάθε επίπεδο αποχαλκώνεται ξεχωριστά και στα άκρα του τοποθετούνται χαρακτηριστικές οπές κεντραρίσματος. Με το πέρας της κατασκευής όλων των επιπέδων το τελικό προϊόν εισέρχεται σε πρέσα που κολλά τις στρώσεις μεταξύ τους με μονωτικά κολλητικά υλικά ανάμεσα. Η

«επικοινωνία» μεταξύ των επιπέδων γίνεται με πολυβάθμιες οπές τύπου via. Συνήθως οι διάδρομοι ισχύος (power planes – ground planes) ή οι αποκωδικοποιητές τοποθετούνται σε ενδιάμεσες στρώσεις έτσι ώστε να θωρακιστούν εντός 2 μονωτικών στρώσεων και να μην επηρεάζουν ηλεκτρομαγνητικά τις υπόλοιπες λειτουργίες.

### 7.2.7 Συναρμολόγηση

Τα λειτουργικά στοιχεία που τοποθετούνται σε ένα PCB έχουν 3 χαρακτηριστικές τεχνολογίες συναρμολόγησης: THT (Through-Hole Technology), SMT (Surface Mount Technology) , BGA (Ball Grid Array). Η THT είναι η παλαιότερη μέθοδος, στην οποία τα λειτουργικά στοιχεία εισέρχονται σε οπές με άμεση επαφή με τον αγωγίμο διάδρομο που αντιστοιχεί στη λειτουργία. Η τεχνολογία αυτή προορίζεται για στοιχεία με μέχρι 16 ακροδέκτες, είναι ασύμβατη με πολλαπλές στρώσεις αλλά έχει την ευκολότερη διαδικασία κόλλησης. Επίσης η THT απαιτεί χειροκίνητη τοποθέτηση των στοιχείων που σε περιπτώσεις αυτοματοποιημένης γραμμής παραγωγής την καθιστά αδύνατη προς χρήση. Η SMT είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται στις μεγάλες γραμμές παραγωγής. Τα στοιχεία εφάπτονται με περιοχές των αγωγίμων διαδρομών και δεν διαπερνούν το επίπεδο στο οποίο βρίσκονται. Η SMT έχει πολύ καλύτερη ποιότητα συγκόλλησης και στις περισσότερες περιπτώσεις η διαδικασία τοποθέτησης μπορεί να γίνει πλήρως αυτοματοποιημένη. Η χειροκίνητη συναρμολόγηση είναι δύσκολη και επίπονη διαδικασία αλλά η μέθοδος προτιμάται λόγω εργονομίας (τα SMT στοιχεία είναι σαφώς μικρότερα σε μέγεθος από τα THT αντίστοιχά τους).

Η BGA είναι μια υποκατηγορία της SMT στην οποία ένα στοιχείο έχει στην μια επιφάνειά του σφαιρικούς ακροδέκτες που εφαρμόζουν σε

ανάλογα διαμορφωμένες περιοχές της πλακέτας. Η μέθοδος αυτή προορίζεται για επεξεργαστές και ολοκληρωμένα με άνω των 64 ακροδεκτών, η μόνη μέθοδος συγκόλλησης είναι το reflow και είναι αδύνατος κάθε έλεγχος μετά τη συγκόλληση. Παρά τις δυσκολίες υλοποίησης είναι η μόνη μέθοδος που μπορεί αξιόπιστα να κολλήσει ολοκληρωμένα των 256 και άνω ακροδεκτών.

### **7.2.8 Κόλληση**

Ως κόλληση (solder) ορίζεται η σύνδεση δυο μετάλλων με ένα υγρό μέταλλο ενδιάμεσα. Διαφέρει από τη συγκόλληση καθώς στη συγκόλληση τα συνδεόμενα μέλη λιώνουν και παρόλο που είναι ετερογενής συγκόλληση εν θερμώ, το σημείο τήξης του ενδιάμεσου μετάλλου είναι χαμηλότερο από των συνδεόμενων μελών. Στη διαδικασία παραγωγής PCB χρησιμοποιούνται ευτηκτικά κράματα μολύβδου ή κασσιτέρου. Η πιο διαδεδομένη κόλληση είναι το καλάι (60%Pb-40%Sn) αλλά λόγω της τοξικότητας του μολύβδου η βιομηχανία κινείται προς τα κράματα χαλκού – κασσιτέρου με άργυρο, νικέλιο ή χρυσό. Οι μέθοδοι συγκόλλησης είναι ο φούρνος ανάτηξης (reflow oven) , η τοπική συγκόλληση με θερμό στοιχείο (soldering iron) η τοπική συγκόλληση με HPLD και η συγκόλληση με κύμα ( wave soldering).

#### **7.2.8.1 Reflow Oven**

Στη μέθοδο με φούρνο ανάτηξης τα στοιχεία τοποθετούνται στην πλακέτα στα σημεία κόλλησης που έχει προβλέψει ο σχεδιαστής και ανάμεσα τοποθετείται πάστα κόλλησης που αποτελείται από σκόνη ευτηκτικού κράματος και ρητίνη για την προστασία από οξείδωση και αφαίρεση των ακαθαρσιών. Η συναρμολογημένη πλακέτα τοποθετείται

σε φούρνο στη θερμοκρασία τήξης της κόλλησης και όλα τα στοιχεία συγκολλούνται ταυτόχρονα μόλις λιώσει η κόλληση. Αυτή είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος κόλλησης SMT.

#### **7.2.8.2 Soldering Iron**

Η τοπική συγκόλληση με θερμό στοιχείο είναι η πιο διαδεδομένη για ερασιτεχνικές και μικρές εφαρμογές καθώς και για επιτόπου επισκευές και διορθώσεις. Το θερμό στοιχείο (κολλητήρι) θερμαίνεται στη θερμοκρασία τήξης της κόλλησης και με επαφή ανάμεσα στα στοιχεία δημιουργεί την κόλληση.

#### **7.2.8.3 HPLD**

Η μέθοδος τοπικής κόλλησης με δίοδο laser υψηλής ισχύος (High Power Laser Diode) είναι μια φτηνή λύση για τοπικές κολλήσεις μικρού μεγέθους. Την περιοχή συγκόλλησης θερμαίνει ακτίνα laser 30-50W και λιώνει είτε σύρμα είτε πάστα του ευτηκτικού κράματος. Η διαδικασία σε SMT στοιχεία μπορεί να γίνει πλήρως αυτοματοποιημένη.

#### **7.2.8.4 Wave soldering**

Η μέθοδος κόλλησης με κύμα αφορά τα THT στοιχεία και είναι η πιο γρήγορη και αποδοτική για μεγάλες γραμμές παραγωγής. Σε αυτή τη διαδικασία οι πλακέτες τοποθετούνται κοντά στην επιφάνεια δεξαμενής που περιέχει υγρή κόλληση. Οι δεξαμενές διεγείρονται μηχανικά και κύματα κόλλησης περνούν από το κάτω μέρος της πλακέτας που εξέχουν οι ακροδέκτες των THT στοιχείων. Σταδιακά επιτυγχάνεται η πλήρης κόλληση στο κάτω μέρος της πλακέτας.

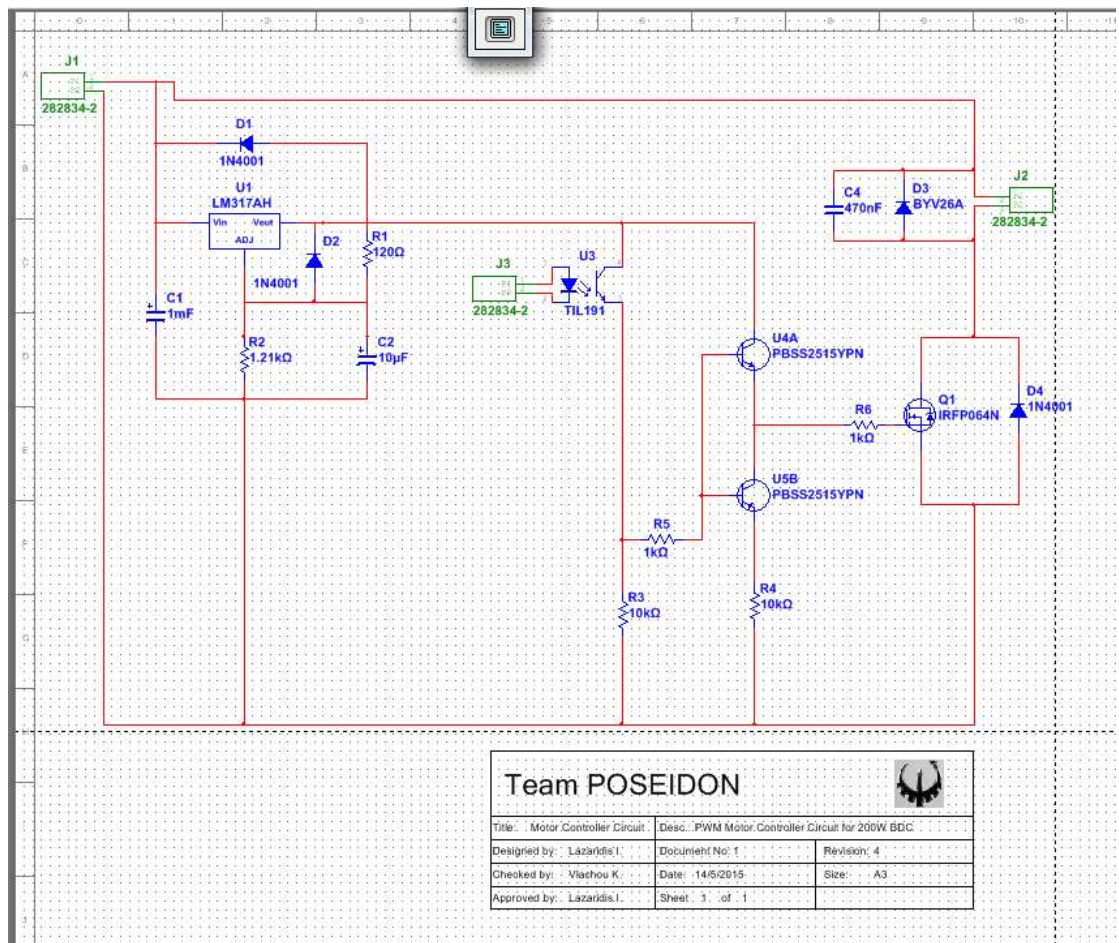
### 7.3 Η κατασκευή

Για την κατασκευή της συγκεκριμένης πλακέτας οδήγησης κινητήρα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της «Αποχάλκωσης» και ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- i. Σχεδιασμός του κυκλώματος στο σχεδιαστικό πρόγραμμα της National Instruments “Multisim”
- ii. Αποτύπωση των footprints του κυκλώματος στο σχεδιαστικό πρόγραμμα της National Instruments “Ultiboard”
- iii. Εκτύπωση του κυκλώματος με τη μέθοδο μεταφοράς γραφίτη (Toner Transfer) με θερμαινόμενο πιεστικό μηχάνημα.
- iv. Αποχάλκωση με χημικό διάλυμα τριχλωριούχου σιδήρου ( $\text{Fe}_3\text{Cl}$ )
- v. Διάτρηση οπών
- vi. Συναρμολόγηση
- vii. Κόλληση

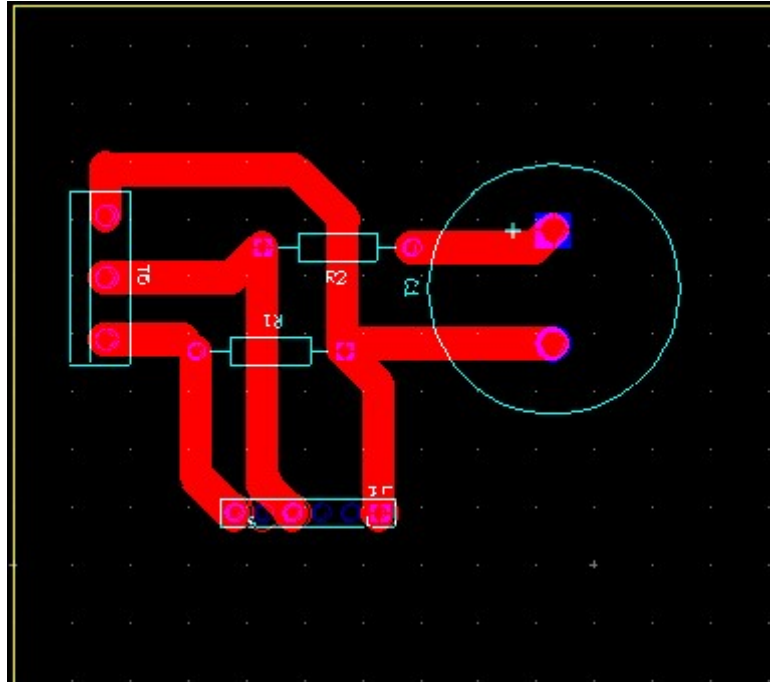
Στο παράρτημα Α παρατίθεται η λίστα των υλικών (Bill of Materials) που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή.

Στις παρακάτω φωτογραφίες βλέπουμε τη διαδικασία κατασκευής της πλακέτας.

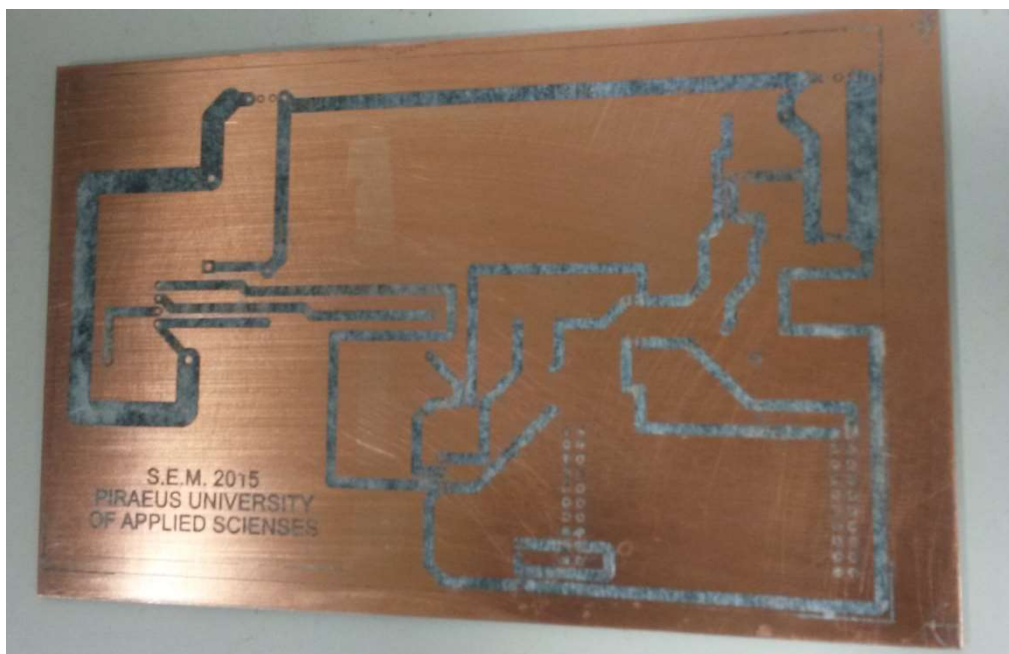


**Εικόνα 46: Σχεδίαση κυκλώματος ελέγχου στο MultiSim.**





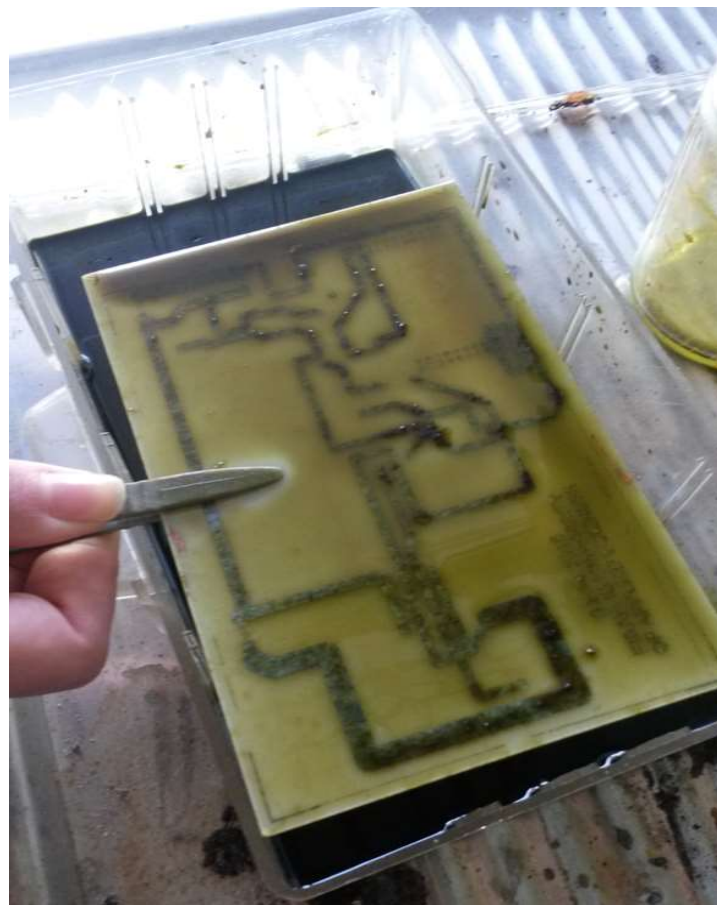
**Εικόνα 49: Σχεδίαση κυκλώματος ισχύος σε UltiBoard.**



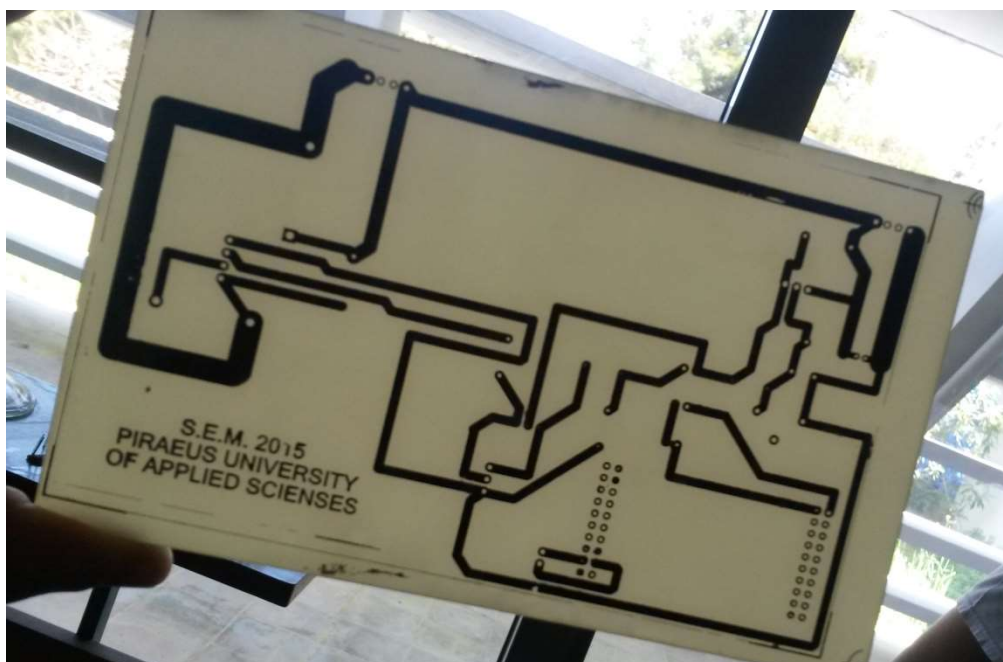
**Εικόνα 50: Τυπωμένη πλακέτα (μέθοδος μεταφοράς γραφίτη).**



**Εικόνα 51 : Αρχή αποχάλκωσης με διάλυμα τριχλωριούχου σιδήρου ( $\text{FeCl}_3$ ).**



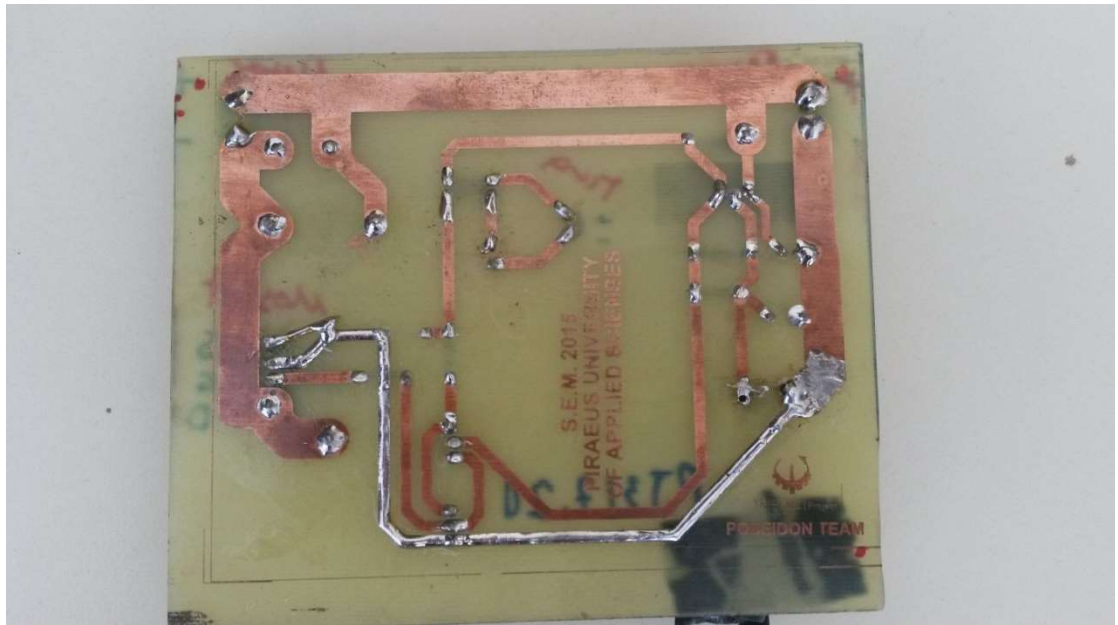
**Εικόνα 52: Πέρασ αποχάλκωσης.**



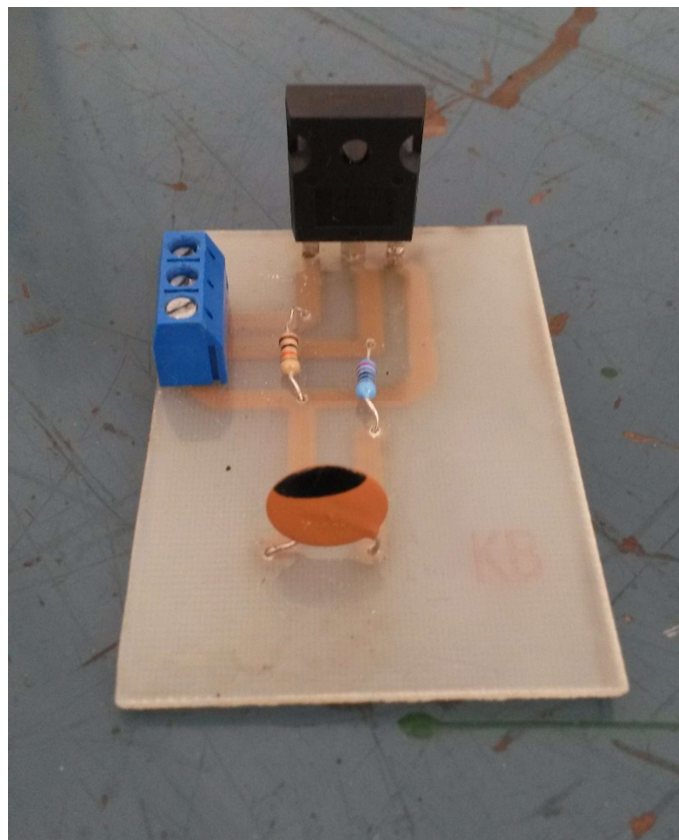
Εικόνα 53: Διάτρηση οπών.



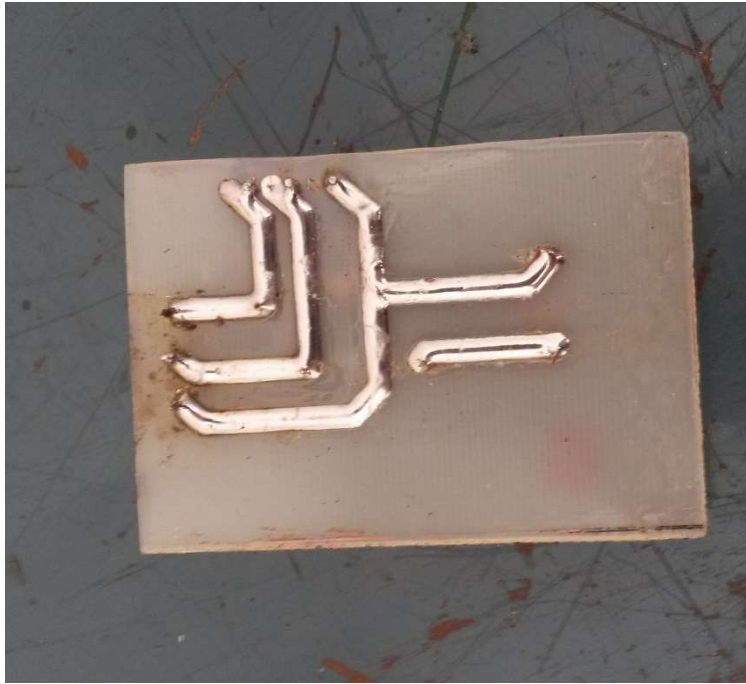
Εικόνα 54: Συναρμολόγηση πλακέτας ελέγχου.



**Εικόνα 55: Κόλληση πλακέτας ελέγχου.**



**Εικόνα 56: Συναρμολόγηση πλακέτας ισχύος.**



**Εικόνα 57: Κόλληση πλακέτας ισχύος.**

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Εικόνες, Πίνακες, Γραφήματα

| Bill of Materials: |                            |               |
|--------------------|----------------------------|---------------|
| Quantity           | Part                       | Rating        |
| 1                  | LM317 voltage regulator    |               |
| 1                  | TIL191 Optocoupler         |               |
| 2                  | SB5100 Diodes              |               |
| 1                  | BD243C BJT Transistor      |               |
| 1                  | BD244C BJT Transistor      |               |
| 1                  | Ceramic capacitor 104      | 0.1 $\mu$ F   |
| 1                  | Ceramic capacitor 474      | 0.47 $\mu$ F  |
| 2                  | Diode 1N4001               |               |
| 2                  | Resistors                  | 10 k $\Omega$ |
| 1                  | Resistor                   | 1 k $\Omega$  |
| 1                  | Resistor                   | 120 $\Omega$  |
| 1                  | Potentiometer 10k $\Omega$ |               |
| 1                  | IRFP064N MOSFET            |               |
| 1                  | LED                        |               |

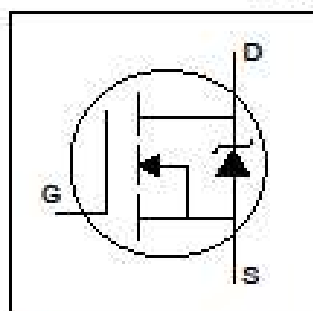
**Πίνακας 1: Λίστα Υλικών Κατασκευής.**



# IRFP064N

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic  $dv/dt$  Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



$$V_{DS} = 55V$$

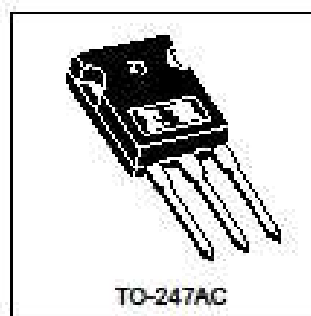
$$R_{DS(on)} = 0.008\Omega$$

$$I_D = 110A @$$

## Description

Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole.



## Absolute Maximum Ratings

|                           | Parameter                                | Max.                   | Units |
|---------------------------|------------------------------------------|------------------------|-------|
| $I_D @ T_C = 25^\circ C$  | Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$ | 110 @                  | A     |
| $I_D @ T_C = 100^\circ C$ | Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$ | 80 @                   |       |
| $I_{DM}$                  | Pulsed Drain Current @                   | 390                    |       |
| $P_D @ T_C = 25^\circ C$  | Power Dissipation                        | 200                    | W     |
|                           | Linear Derating Factor                   | 1.3                    | W/°C  |
| $V_{GS}$                  | Gate-to-Source Voltage                   | $\pm 20$               | V     |
| $E_{AS}$                  | Single Pulse Avalanche Energy @          | 480                    | mJ    |
| $I_{AR}$                  | Avalanche Current @                      | 59                     | A     |
| $E_{AR}$                  | Repetitive Avalanche Energy @            | 20                     | mJ    |
| $dv/dt$                   | Peak Diode Recovery $dv/dt$ @            | 5.0                    | V/ns  |
| $T_J$                     | Operating Junction and                   | -55 to + 175           | °C    |
| $T_{STG}$                 | Storage Temperature Range                |                        |       |
|                           | Soldering Temperature, for 10 seconds    | 300 (1.6mm from case ) |       |
|                           | Mounting torque, 6-32 or M3 screw        | 10 lbf-in (1.1N-m)     |       |

## Thermal Resistance

|                 | Parameter                           | Typ. | Max. | Units |
|-----------------|-------------------------------------|------|------|-------|
| $R_{\theta JC}$ | Junction-to-Case                    | —    | 0.75 | °C/W  |
| $R_{\theta CS}$ | Case-to-Sink, Flat, Greased Surface | 0.24 | —    |       |
| $R_{\theta JA}$ | Junction-to-Ambient                 | —    | 40   |       |

8/25/97

## Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

|                                 | Parameter                            | Min. | Typ.  | Max.  | Units    | Conditions                                           |
|---------------------------------|--------------------------------------|------|-------|-------|----------|------------------------------------------------------|
| $V_{(BR)DSS}$                   | Drain-to-Source Breakdown Voltage    | 55   | —     | —     | V        | $V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$                        |
| $\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$ | Breakdown Voltage Temp. Coefficient  | —    | 0.057 | —     | V/°C     | Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1mA$ Ⓣ         |
| $R_{DS(on)}$                    | Static Drain-to-Source On-Resistance | —    | —     | 0.008 | $\Omega$ | $V_{GS} = 10V, I_D = 59A$ Ⓢ                          |
| $V_{GS(th)}$                    | Gate Threshold Voltage               | 2.0  | —     | 4.0   | V        | $V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$                    |
| $g_m$                           | Forward Transconductance             | 42   | —     | —     | S        | $V_{DS} = 25V, I_D = 59A$ Ⓢ                          |
| $I_{DSS}$                       | Drain-to-Source Leakage Current      | —    | —     | 25    | $\mu A$  | $V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$                          |
|                                 |                                      | —    | —     | 250   |          | $V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$ |
| $I_{GSS}$                       | Gate-to-Source Forward Leakage       | —    | —     | 100   | nA       | $V_{GS} = 20V$                                       |
|                                 | Gate-to-Source Reverse Leakage       | —    | —     | -100  |          | $V_{GS} = -20V$                                      |
| $Q_g$                           | Total Gate Charge                    | —    | —     | 170   | nC       | $I_D = 59A$                                          |
| $Q_{gs}$                        | Gate-to-Source Charge                | —    | —     | 32    |          | $V_{DS} = 44V$                                       |
| $Q_{gd}$                        | Gate-to-Drain ("Miller") Charge      | —    | —     | 74    |          | $V_{GS} = 10V$ , See Fig. 6 and 13 Ⓢ Ⓢ               |
| $t_{d(on)}$                     | Turn-On Delay Time                   | —    | 14    | —     | ns       | $V_{DD} = 28V$                                       |
| $t_r$                           | Rise Time                            | —    | 100   | —     |          | $I_D = 59A$                                          |
| $t_{d(off)}$                    | Turn-Off Delay Time                  | —    | 43    | —     |          | $R_G = 2.5\Omega$                                    |
| $t_f$                           | Fall Time                            | —    | 70    | —     |          | $R_D = 0.39\Omega$ , See Fig. 10 Ⓢ Ⓢ                 |
| $L_D$                           | Internal Drain Inductance            | —    | 5.0   | —     | nH       | Between lead, 6mm (0.25in.)                          |
| $L_S$                           | Internal Source Inductance           | —    | 13    | —     |          | from package and center of die contact               |
| $C_{iss}$                       | Input Capacitance                    | —    | 4000  | —     | pF       | $V_{DS} = 0V$                                        |
| $C_{oss}$                       | Output Capacitance                   | —    | 1300  | —     |          | $V_{DS} = 25V$                                       |
| $C_{rss}$                       | Reverse Transfer Capacitance         | —    | 480   | —     |          | $f = 1.0MHz$ , See Fig. 5 Ⓢ                          |



## Source-Drain Ratings and Characteristics

|          | Parameter                              | Min. | Typ. | Max.  | Units | Conditions                                                     |
|----------|----------------------------------------|------|------|-------|-------|----------------------------------------------------------------|
| $I_S$    | Continuous Source Current (Body Diode) | —    | —    | 110 Ⓢ |       | MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. |
| $I_{SM}$ | Pulsed Source Current (Body Diode) Ⓣ   | —    | —    | 390   |       |                                                                |
| $V_{SD}$ | Diode Forward Voltage                  | —    | —    | 1.3   | V     | $T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 59A, V_{GS} = 0V$ Ⓢ             |
| $t_{rr}$ | Reverse Recovery Time                  | —    | 110  | 170   | ns    | $T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 59A$                            |
| $Q_{rr}$ | Reverse Recovery Charge                | —    | 450  | 680   | nC    | $dI/dt = 100A/\mu s$ Ⓢ Ⓢ                                       |

### Notes:

- Ⓢ Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. ( See fig. 11 )
- Ⓣ  $V_{DD} = 25V$ , starting  $T_J = 25^\circ\text{C}$ ,  $L = 190\mu H$ ,  $R_G = 25\Omega$ ,  $I_{AS} = 59A$ . (See Figure 12)
- Ⓢ  $I_{SD} \leq 59A$ ,  $dI/dt \leq 290A/\mu s$ ,  $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$ ,  $T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- Ⓢ Pulse width  $\leq 300\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .
- Ⓢ Uses IRF3205 data and test conditions
- Ⓢ Calculated continuous current based on maximum allowable junction temperature; for recommended current-handling of the package refer to Design Tip # 93-4

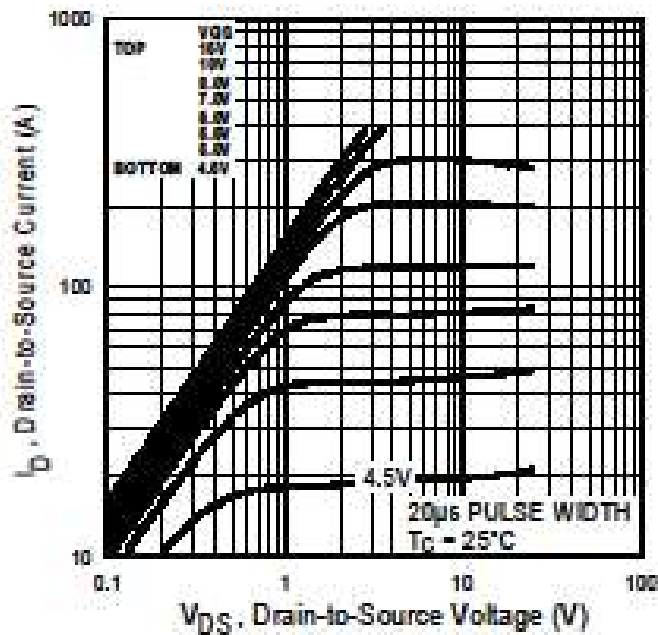


Fig 1. Typical Output Characteristics

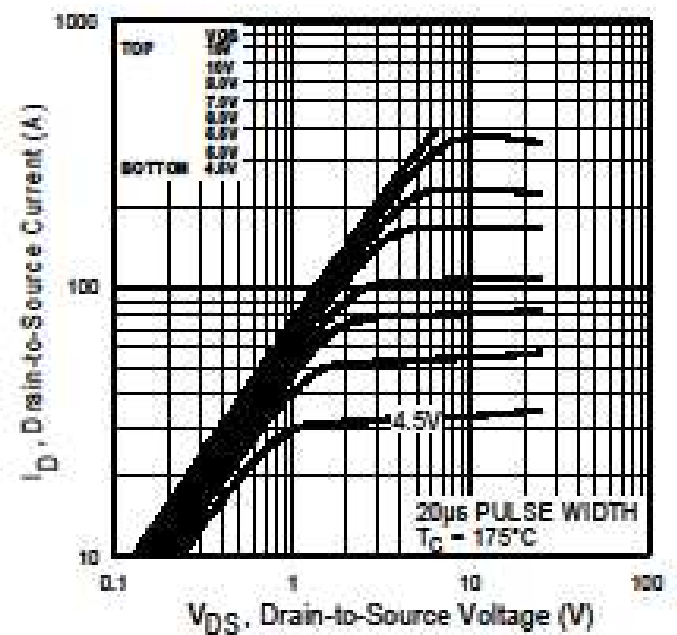


Fig 2. Typical Output Characteristics

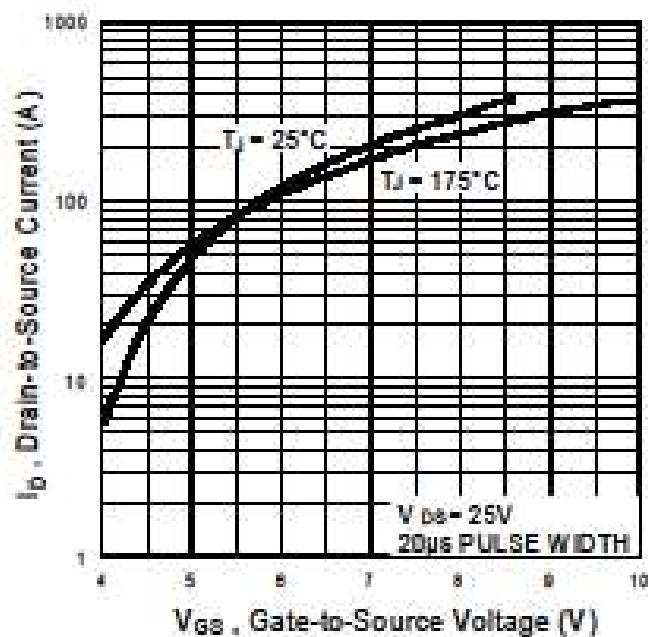


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

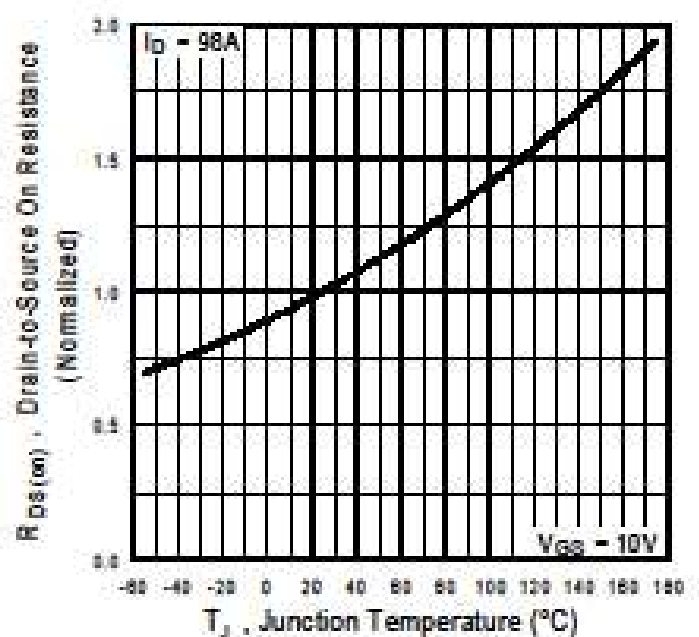


Fig 4. Normalized On-Resistance  
Vs. Temperature

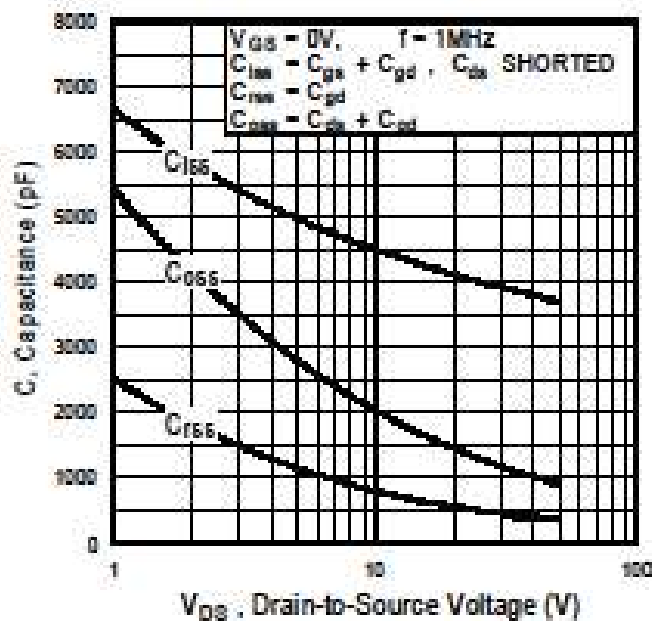


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

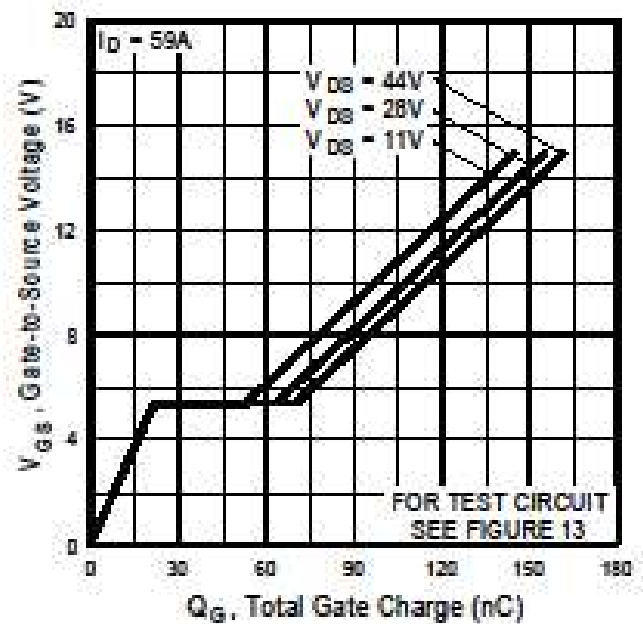


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

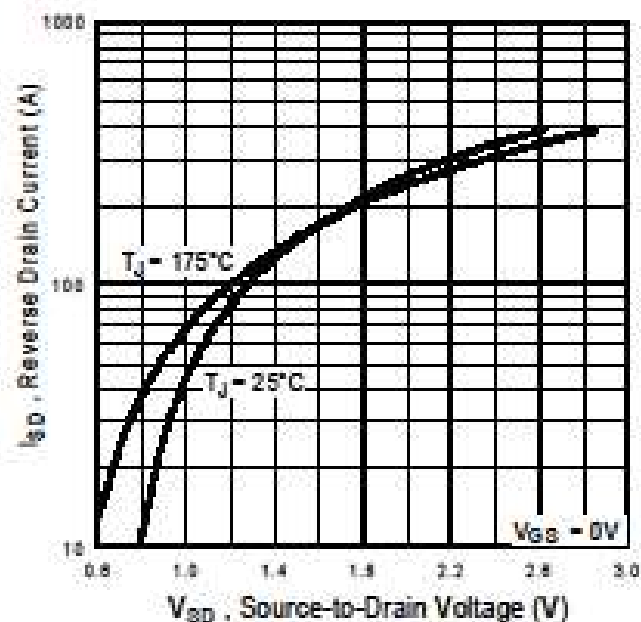


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

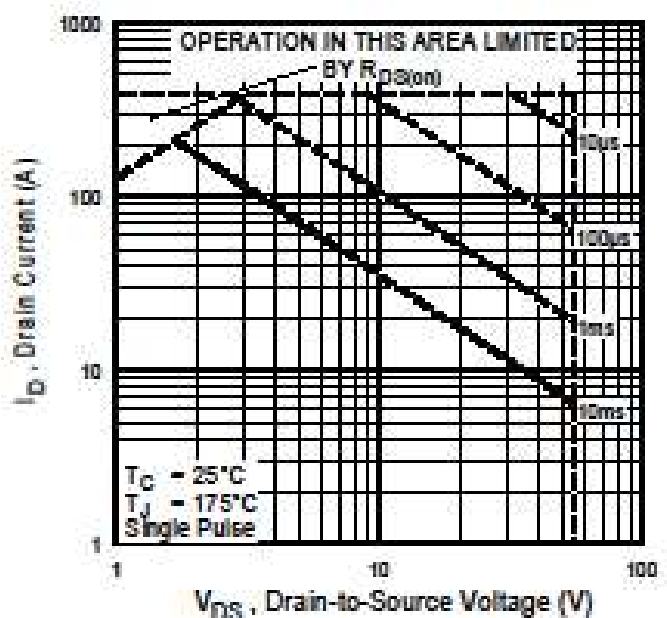


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

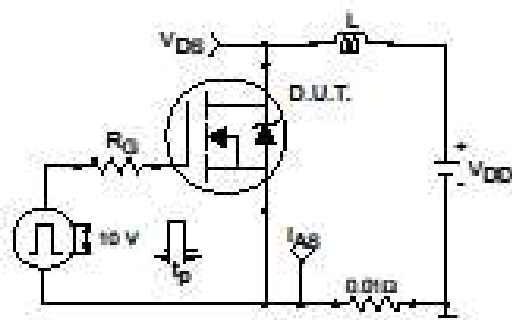


Fig 12a. Undamped Inductive Test Circuit

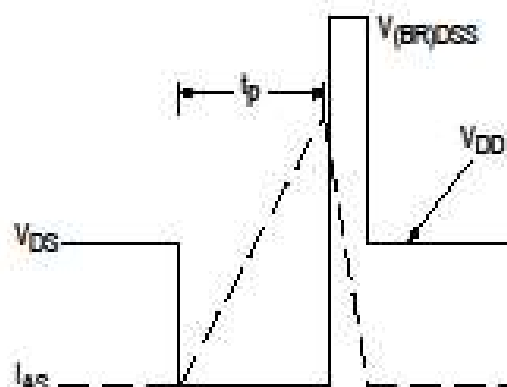


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

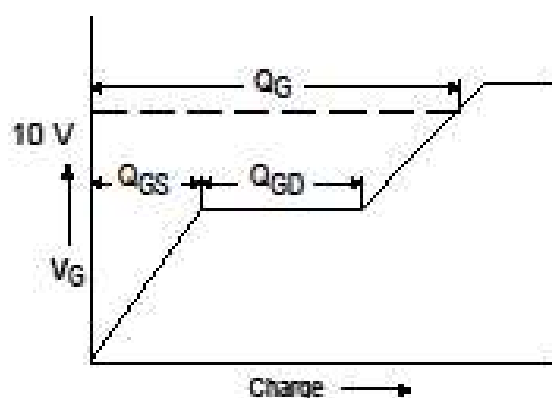


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

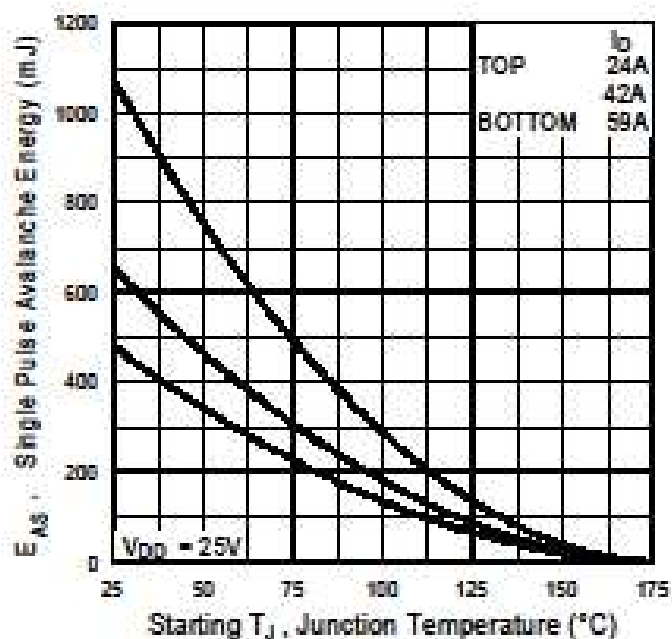


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy  
Vs. Drain Current

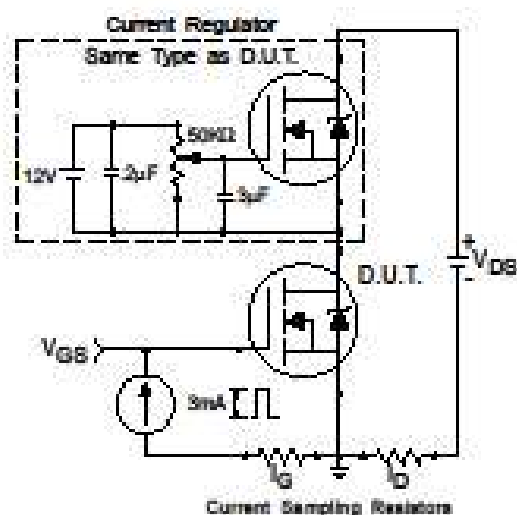


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

### Peak Diode Recovery $dv/dt$ Test Circuit

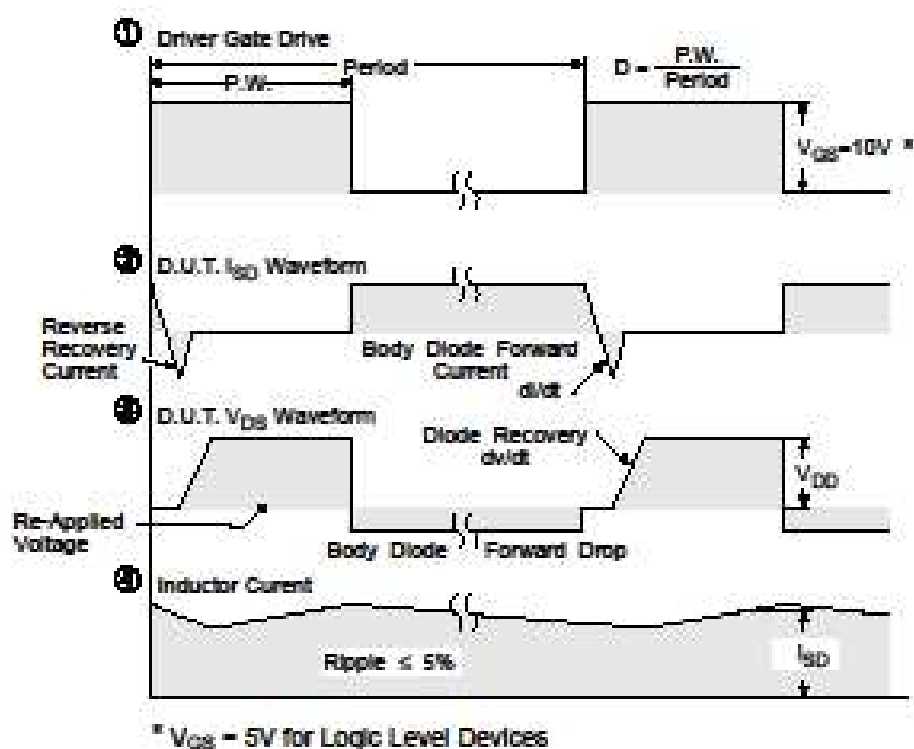
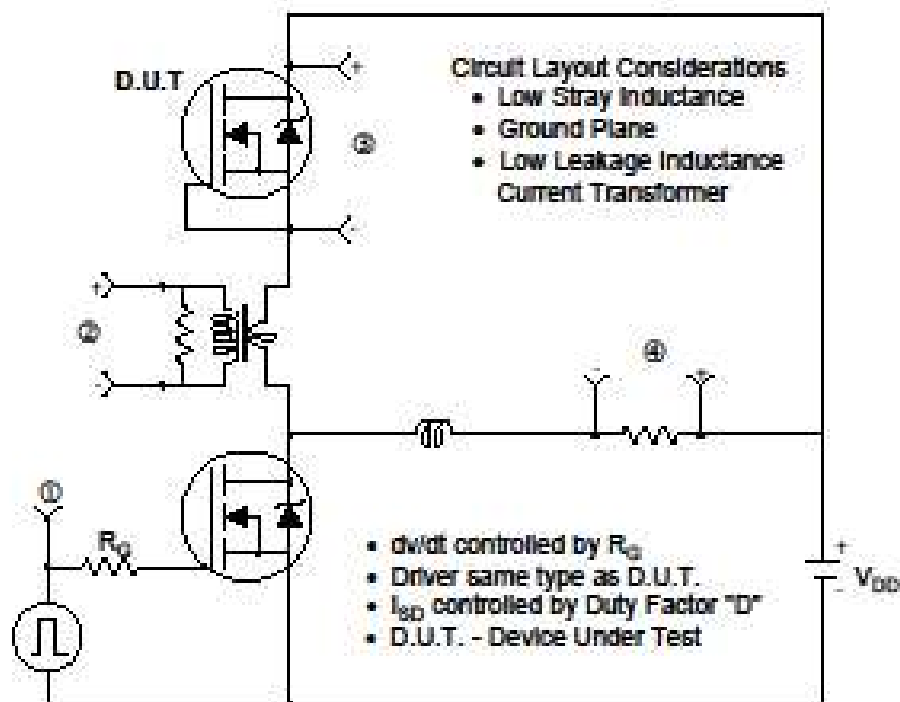
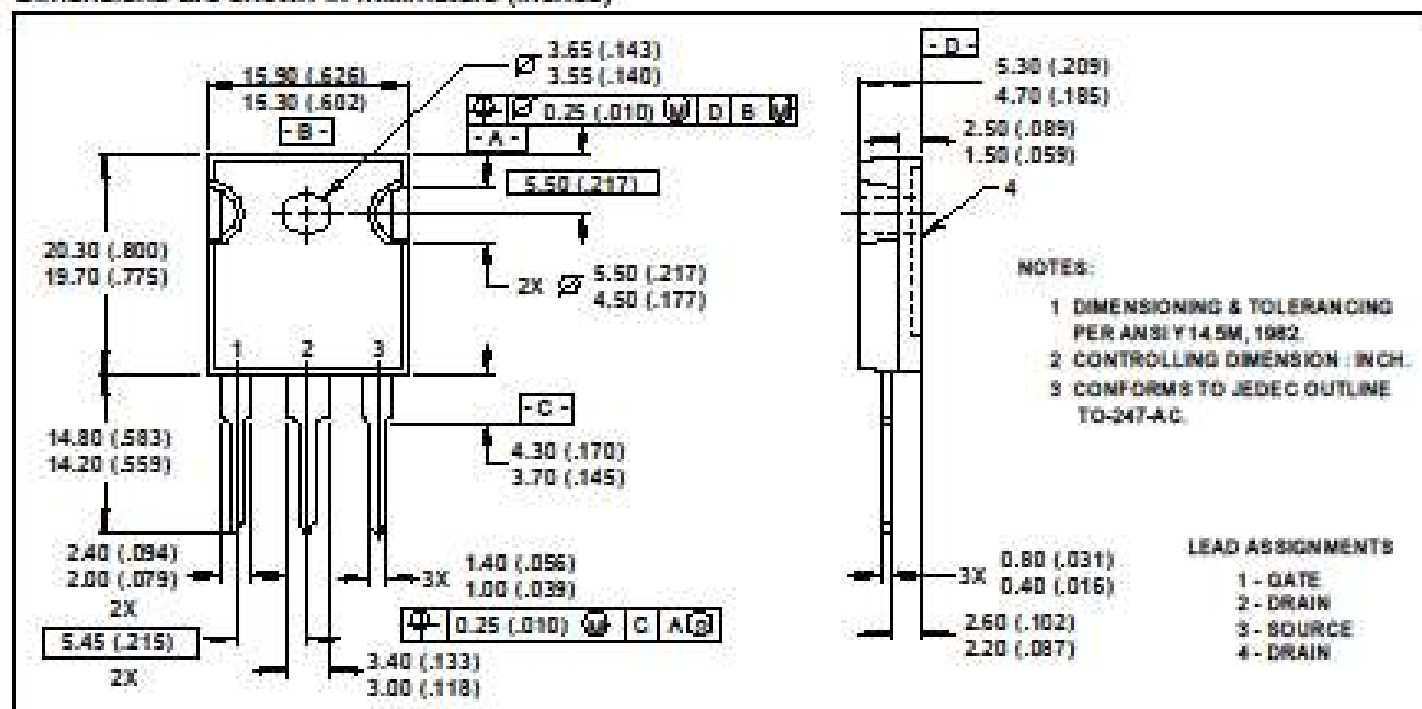


Fig 14. For N-Channel HEXFETS

## Package Outline

### TO-247AC Outline

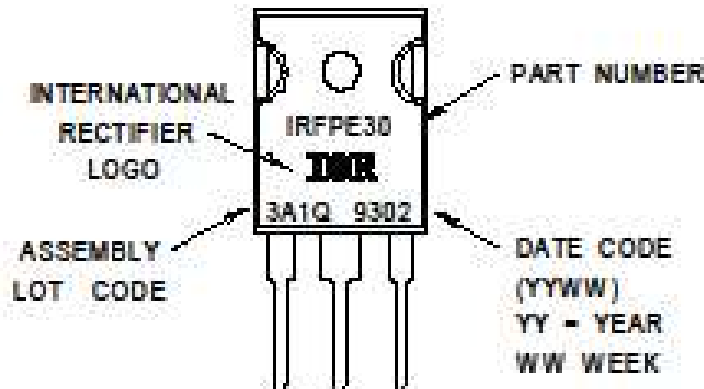
Dimensions are shown in millimeters (inches)



## Part Marking Information

### TO-247AC

EXAMPLE: THIS IS AN IRFPE30  
WITH ASSEMBLY  
LOT CODE 3A1Q



International  
**IOR** Rectifier

WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, Tel: (310) 322 3331  
EUROPEAN HEADQUARTERS: Hurst Green, Oxted, Surrey RH8 9BB, UK Tel: ++ 44 1883 732020

IR CANADA: 7321 Victoria Park Ave., Suite 201, Markham, Ontario L3R 2Z8, Tel: (905) 475 1897

IR GERMANY: Saalburgstrasse 157, 61350 Bad Homburg Tel: ++ 49 6172 96590

IR ITALY: Via Liguria 49, 10071 Borgaro, Torino Tel: ++ 39 11 451 0111

IR FAR EAST: K&H Bldg., 2F, 30-4 Nishi-Ikebukuro 3-Chome, Toshima-Ku, Tokyo Japan 171 Tel: 81 3 3983 0086

IR SOUTHEAST ASIA: 315 Outram Road, #10-02 Tan Boon Liat Building, Singapore 0316 Tel: 65 221 8371

<http://www.irf.com/>

Data and specifications subject to change without notice.

8/97

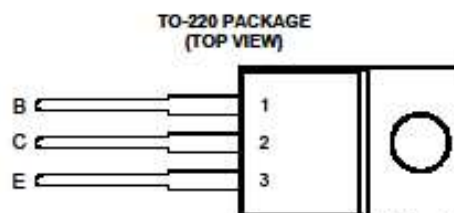
## [2]. BD243C

### BD243, BD243A, BD243B, BD243C NPN SILICON POWER TRANSISTORS

Copyright © 1997, Power Innovations Limited, UK

JUNE 1973 - REVISED MARCH 1997

- Designed for Complementary Use with the BD244 Series
- 65 W at 25°C Case Temperature
- 6 A Continuous Collector Current
- 10 A Peak Collector Current
- Customer-Specified Selections Available



Pin 2 is in electrical contact with the mounting base.

MDTRACA

absolute maximum ratings at 25°C case temperature (unless otherwise noted)

| RATING                                                                             |        | SYMBOL              | VALUE       | UNIT |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------|-------------|------|
| Collector-emitter voltage ( $R_{BE} = 100 \Omega$ )                                | BD243  | $V_{CE}$            | 55          | V    |
|                                                                                    | BD243A |                     | 70          |      |
|                                                                                    | BD243B |                     | 90          |      |
|                                                                                    | BD243C |                     | 115         |      |
| Collector-emitter voltage ( $I_C = 30 \text{ mA}$ )                                | BD243  | $V_{CE0}$           | 45          | V    |
|                                                                                    | BD243A |                     | 60          |      |
|                                                                                    | BD243B |                     | 80          |      |
|                                                                                    | BD243C |                     | 100         |      |
| Emitter-base voltage                                                               |        | $V_{EB0}$           | 5           | V    |
| Continuous collector current                                                       |        | $I_C$               | 6           | A    |
| Peak collector current (see Note 1)                                                |        | $I_{CM}$            | 10          | A    |
| Continuous base current                                                            |        | $I_B$               | 3           | A    |
| Continuous device dissipation at (or below) 25°C case temperature (see Note 2)     |        | $P_{tot}$           | 65          | W    |
| Continuous device dissipation at (or below) 25°C free air temperature (see Note 3) |        | $P_{tot}$           | 2           | W    |
| Unclamped inductive load energy (see Note 4)                                       |        | $\frac{1}{2}LI_C^2$ | 62.5        | mJ   |
| Operating junction temperature range                                               |        | $T_J$               | -65 to +150 | °C   |
| Storage temperature range                                                          |        | $T_{stg}$           | -65 to +150 | °C   |
| Lead temperature 3.2 mm from case for 10 seconds                                   |        | $T_L$               | 250         | °C   |

NOTES: 1. This value applies for  $t_p \leq 0.3 \text{ ms}$ , duty cycle  $\leq 10\%$ .  
 2. Derate linearly to 150°C case temperature at the rate of 0.52 W/°C.  
 3. Derate linearly to 150°C free air temperature at the rate of 16 mW/°C.  
 4. This rating is based on the capability of the transistor to operate safely in a circuit of:  $L = 20 \text{ mH}$ ,  $I_{B(on)} = 0.4 \text{ A}$ ,  $R_{BE} = 100 \Omega$ ,  $V_{BE(off)} = 0$ ,  $R_B = 0.1 \Omega$ ,  $V_{CC} = 20 \text{ V}$ .

## PRODUCT INFORMATION

Information is current as of publication date. Products conform to specifications in accordance with the terms of Power Innovations standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.



# BD243, BD243A, BD243B, BD243C

## NPN SILICON POWER TRANSISTORS

JUNE 1973 - REVISED MARCH 1997

### electrical characteristics at 25°C case temperature

| PARAMETER                                              | TEST CONDITIONS                                                                                           |                                                              |                                     | MIN                   | TYP | MAX                      | UNIT |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----|--------------------------|------|
| $V_{(BR)CEO}$ Collector-emitter breakdown voltage      | $I_C = 30 \text{ mA}$<br>(see Note 5)                                                                     | $I_B = 0$                                                    | BD243<br>BD243A<br>BD243B<br>BD243C | 45<br>60<br>80<br>100 |     |                          | V    |
| $I_{CES}$ Collector-emitter cut-off current            | $V_{CE} = 55 \text{ V}$<br>$V_{CE} = 70 \text{ V}$<br>$V_{CE} = 90 \text{ V}$<br>$V_{CE} = 115 \text{ V}$ | $V_{BE} = 0$<br>$V_{BE} = 0$<br>$V_{BE} = 0$<br>$V_{BE} = 0$ | BD243<br>BD243A<br>BD243B<br>BD243C |                       |     | 0.4<br>0.4<br>0.4<br>0.4 | mA   |
| $I_{CEO}$ Collector cut-off current                    | $V_{CE} = 30 \text{ V}$<br>$V_{CE} = 60 \text{ V}$                                                        | $I_B = 0$<br>$I_B = 0$                                       | BD243/243A<br>BD243B/243C           |                       |     | 0.7<br>0.7               | mA   |
| $I_{EBO}$ Emitter cut-off current                      | $V_{EB} = 5 \text{ V}$                                                                                    | $I_C = 0$                                                    |                                     |                       |     | 1                        | mA   |
| $h_{FE}$ Forward current transfer ratio                | $V_{CE} = 4 \text{ V}$<br>$V_{CE} = 4 \text{ V}$                                                          | $I_C = 0.3 \text{ A}$<br>$I_C = 3 \text{ A}$                 | (see Notes 5 and 6)                 | 30<br>15              |     |                          |      |
| $V_{CE(sat)}$ Collector-emitter saturation voltage     | $I_B = 1 \text{ A}$                                                                                       | $I_C = 6 \text{ A}$                                          | (see Notes 5 and 6)                 |                       |     | 1.5                      | V    |
| $V_{BE}$ Base-emitter voltage                          | $V_{CE} = 4 \text{ V}$                                                                                    | $I_C = 6 \text{ A}$                                          | (see Notes 5 and 6)                 |                       |     | 2                        | V    |
| $h_{fe}$ Small signal forward current transfer ratio   | $V_{CE} = 10 \text{ V}$                                                                                   | $I_C = 0.5 \text{ A}$                                        | $f = 1 \text{ kHz}$                 | 20                    |     |                          |      |
| $ h_{fe} $ Small signal forward current transfer ratio | $V_{CE} = 10 \text{ V}$                                                                                   | $I_C = 0.5 \text{ A}$                                        | $f = 1 \text{ MHz}$                 | 3                     |     |                          |      |

NOTES: 5. These parameters must be measured using pulse techniques,  $t_p = 300 \mu\text{s}$ , duty cycle  $\leq 2\%$ .

6. These parameters must be measured using voltage-sensing contacts, separate from the current carrying contacts.

### thermal characteristics

| PARAMETER                                               | MIN | TYP | MAX  | UNIT |
|---------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|
| $R_{\theta JC}$ Junction to case thermal resistance     |     |     | 1.92 | °C/W |
| $R_{\theta JA}$ Junction to free air thermal resistance |     |     | 62.5 | °C/W |

### resistive-load-switching characteristics at 25°C case temperature

| PARAMETER               | TEST CONDITIONS †              |                             |                                        | MIN | TYP | MAX | UNIT          |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|-----|-----|-----|---------------|
| $t_{on}$ Turn-on time   | $I_C = 1 \text{ A}$            | $I_{B(on)} = 0.1 \text{ A}$ | $I_{B(off)} = -0.1 \text{ A}$          |     | 0.3 |     | $\mu\text{s}$ |
| $t_{off}$ Turn-off time | $V_{BE(off)} = -3.7 \text{ V}$ | $R_L = 20 \Omega$           | $t_p = 20 \mu\text{s}$ , dc $\leq 2\%$ |     | 1   |     | $\mu\text{s}$ |

† Voltage and current values shown are nominal; exact values vary slightly with transistor parameters.

## PRODUCT INFORMATION

# TYPICAL CHARACTERISTICS

TYPICAL DC CURRENT GAIN  
VS  
COLLECTOR CURRENT

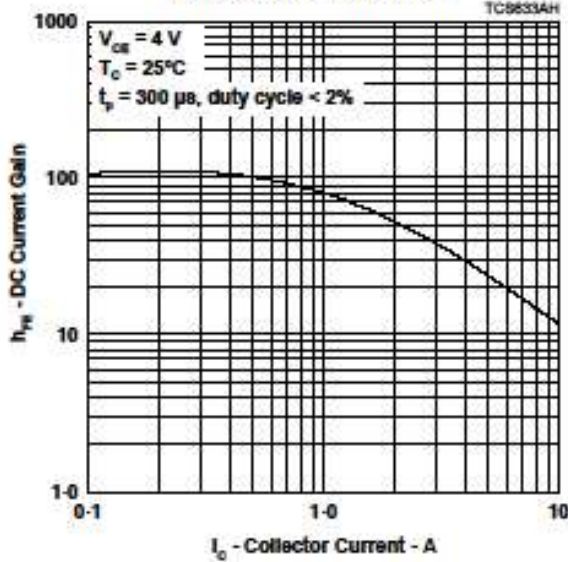


Figure 1.

COLLECTOR-EMITTER SATURATION VOLTAGE  
VS  
BASE CURRENT

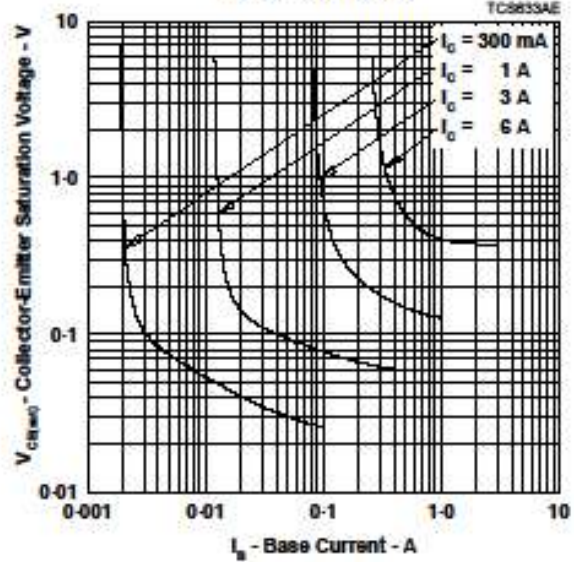


Figure 2.

BASE-EMITTER VOLTAGE  
VS  
COLLECTOR CURRENT

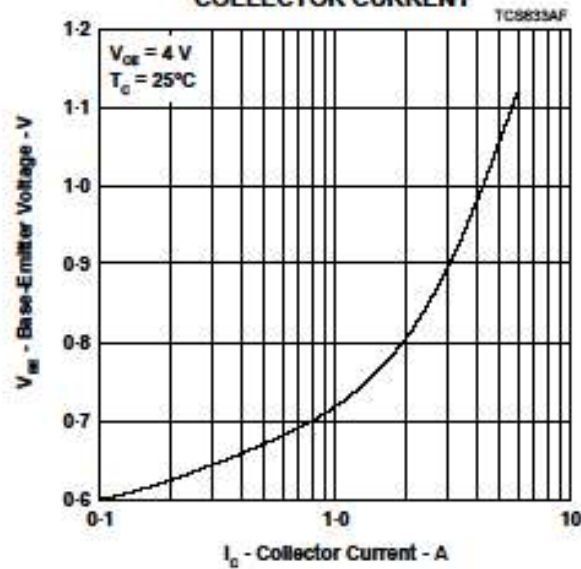


Figure 3.

## PRODUCT INFORMATION



# BD243, BD243A, BD243B, BD243C NPN SILICON POWER TRANSISTORS

JUNE 1973 - REVISED MARCH 1997

## MAXIMUM SAFE OPERATING REGIONS

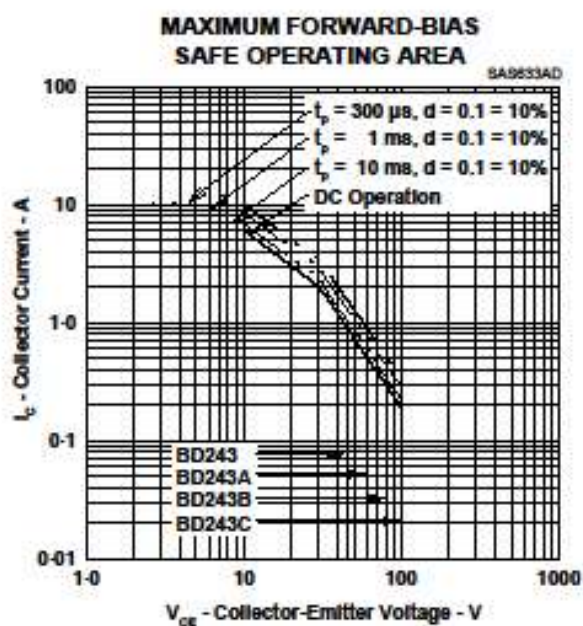


Figure 4.

## THERMAL INFORMATION

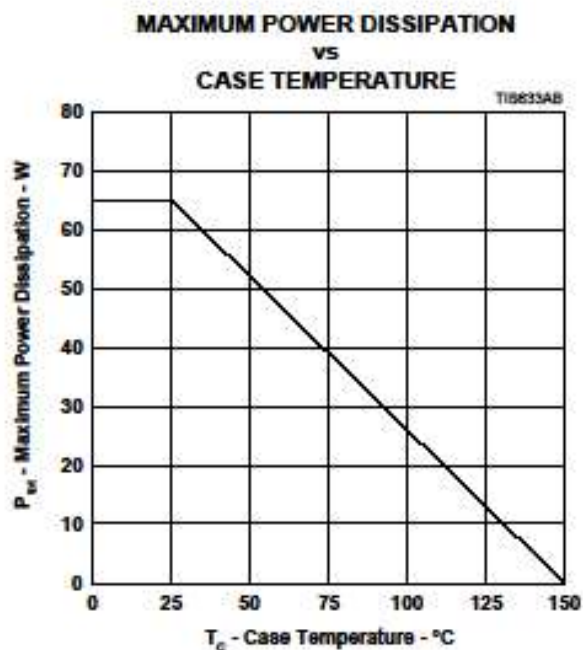


Figure 5.

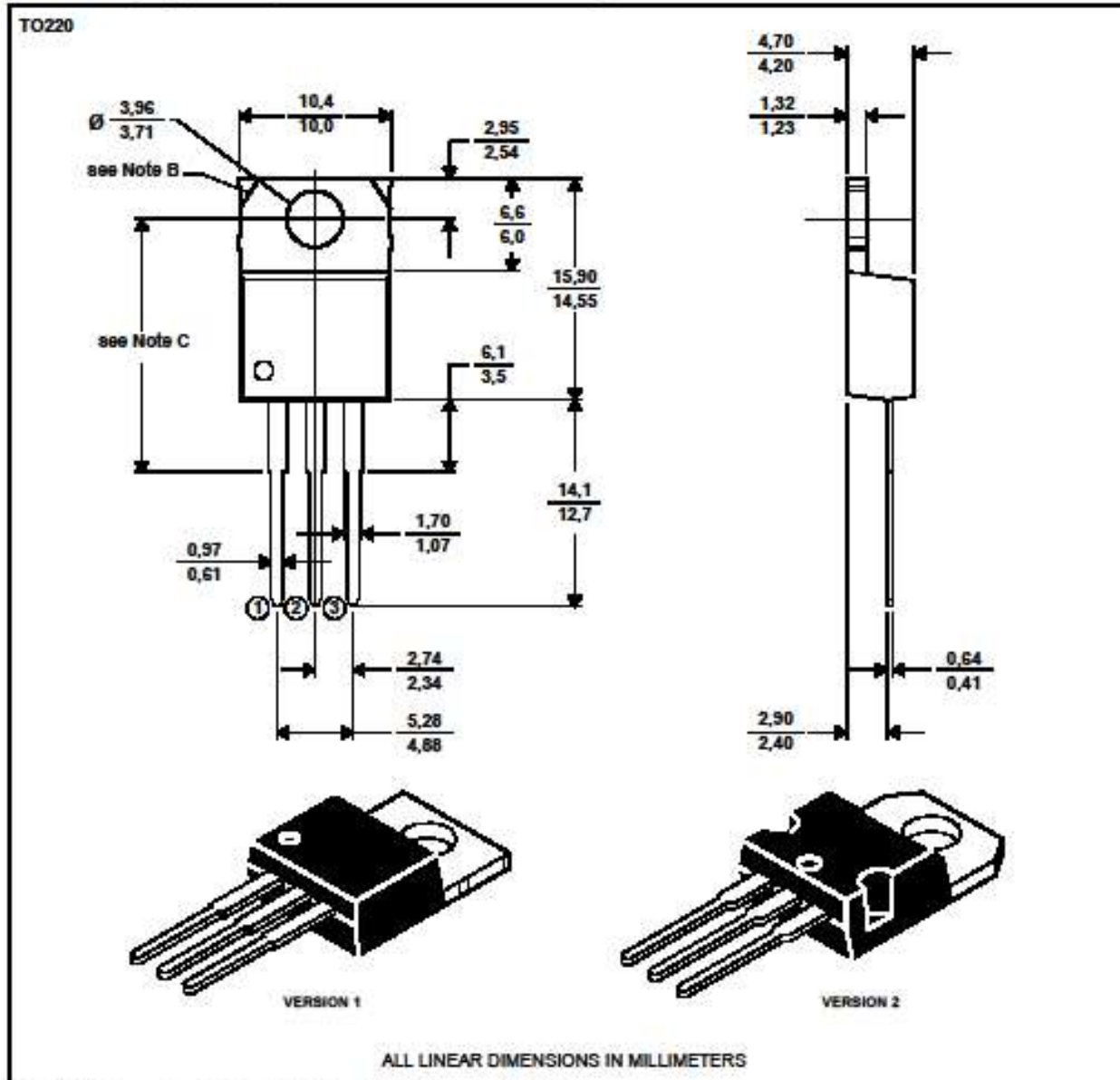
## PRODUCT INFORMATION

# MECHANICAL DATA

## TO-220

### 3-pin plastic flange-mount package

This single-in-line package consists of a circuit mounted on a lead frame and encapsulated within a plastic compound. The compound will withstand soldering temperature with no deformation, and circuit performance characteristics will remain stable when operated in high humidity conditions. Leads require no additional cleaning or processing when used in soldered assembly.



- NOTES: A. The centre pin is in electrical contact with the mounting tab.  
B. Mounting tab corner profile according to package version.  
C. Typical fixing hole centre stand off height according to package version.  
Version 1, 18.0 mm. Version 2, 17.6 mm.

MOXXBE

## PRODUCT INFORMATION



### [3]. BD244A

#### COMPLEMENTARY SILICON PLASTIC POWER TRANSISTORS

... designed for use in general purpose power amplifier and switching applications.

##### FEATURES:

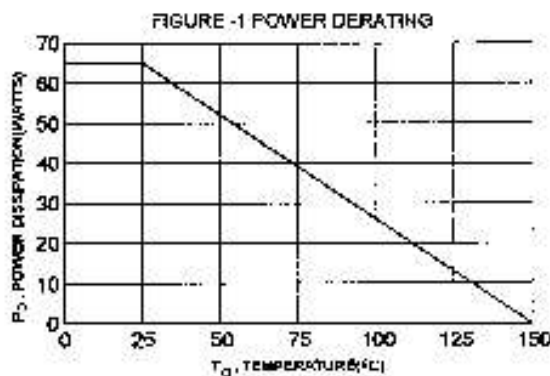
- \* Collector-Emitter Sustaining Voltage -  
 $V_{CE(sat)}$  = 45V(Min)- BD243,BD244  
 60V(Min)- BD243A,BD244A  
 80V(Min)- BD243B,BD244B  
 100V(Min)- BD243C,BD244C
- \* DC Current Gain  $hFE = 30$ (Min)@  $I_C = 0.3A$
- \* Current Gain-Bandwidth Product  $fT = 3.0$  MHz (Min)@  $I_C = 500mA$

##### MAXIMUM RATINGS

| Characteristic                                                           | Symbol         | BD243<br>BD244 | BD243A<br>BD244A | BD243B<br>BD244B | BD243C<br>BD244C | Unit      |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|-----------|
| Collector-Emitter Voltage                                                | $V_{CE}$       | 45             | 60               | 80               | 100              | V         |
| Collector-Base Voltage                                                   | $V_{CB}$       | 45             | 60               | 80               | 100              | V         |
| Emitter-Base Voltage                                                     | $V_{EB}$       | 5.0            |                  |                  |                  | V         |
| Collector Current - Continuous<br>- Peak                                 | $I_C$          | 5.0<br>10      |                  |                  |                  | A         |
| Base Current                                                             | $I_B$          | 2.0            |                  |                  |                  | A         |
| Total Power Dissipation@ $T_C = 25^\circ C$<br>Derate above $25^\circ C$ | $P_D$          | 65<br>0.52     |                  |                  |                  | W<br>W/°C |
| Operating and Storage Junction<br>Temperature Range                      | $T_J, T_{stg}$ | -65 to +150    |                  |                  |                  | °C        |

##### THERMAL CHARACTERISTICS

| Characteristic                      | Symbol          | Max  | Unit |
|-------------------------------------|-----------------|------|------|
| Thermal Resistance Junction to Case | $R_{\theta jc}$ | 1.92 | °C/W |

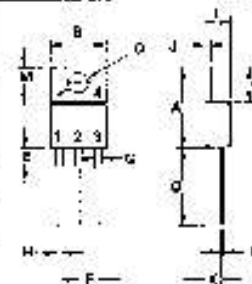


| NPN    | PNP    |
|--------|--------|
| BD243  | BD244  |
| BD243A | BD244A |
| BD243B | BD244B |
| BD243C | BD244C |

6 AMPERE  
COMPLEMENTARY SILICON  
POWER TRANSISTORS  
45 -100 VOLTS  
65 WATTS



TO-220



MIN 1 BASE  
2 COLLECTOR  
3 EMITTER  
4 COLLECTION (CASE)

| DIM | MILLIMETERS |       |
|-----|-------------|-------|
|     | MIN         | MAX   |
| A   | 14.88       | 15.31 |
| B   | 9.78        | 10.42 |
| C   | 5.01        | 6.52  |
| D   | 13.08       | 14.57 |
| E   | 3.57        | 4.07  |
| F   | 2.42        | 3.96  |
| G   | 1.12        | 1.36  |
| H   | 0.72        | 0.96  |
| I   | 4.22        | 4.88  |
| J   | 1.14        | 1.36  |
| K   | 2.20        | 2.97  |
| L   | 0.33        | 0.55  |
| M   | 2.48        | 2.96  |
| N   | 3.73        | 3.80  |

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (  $T_C = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted )

| Characteristic | Symbol | Min | Max | Unit |
|----------------|--------|-----|-----|------|
|----------------|--------|-----|-----|------|

## OFF CHARACTERISTICS

|                                                                                                                                                                                                               |                                                                |               |                          |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------|----|
| Collector-Emitter Sustaining Voltage(1)<br>( $I_C = 30\text{ mA}$ , $I_B = 0$ )                                                                                                                               | BD243,BD244<br>BD243A,BD244A<br>BD243B,BD244B<br>BD243C,BD244C | $V_{CE(sus)}$ | 45<br>60<br>80<br>100    | V  |
| Collector Cutoff Current<br>( $V_{CE} = 30\text{ V}$ , $I_B = 0$ )<br>( $V_{CE} = 60\text{ V}$ , $I_B = 0$ )                                                                                                  | BD243/44/43A/44A<br>BD243B/44B/43C/44C                         | $I_{CBO}$     | 0.7<br>0.7               | mA |
| Collector Cutoff Current<br>( $V_{CE} = 45\text{ V}$ , $V_{EB} = 0$ )<br>( $V_{CE} = 60\text{ V}$ , $V_{EB} = 0$ )<br>( $V_{CE} = 80\text{ V}$ , $V_{EB} = 0$ )<br>( $V_{CE} = 100\text{ V}$ , $V_{EB} = 0$ ) | BD243/44<br>BD243A/44A<br>BD243B/44B<br>BD243C/44C             | $I_{CEA}$     | 0.4<br>0.4<br>0.4<br>0.4 | mA |
| Emitter Cutoff Current<br>( $V_{EB} = 5.0\text{ V}$ , $I_C = 0$ )                                                                                                                                             |                                                                | $I_{EBO}$     | 1.0                      | mA |

## ON CHARACTERISTICS (1)

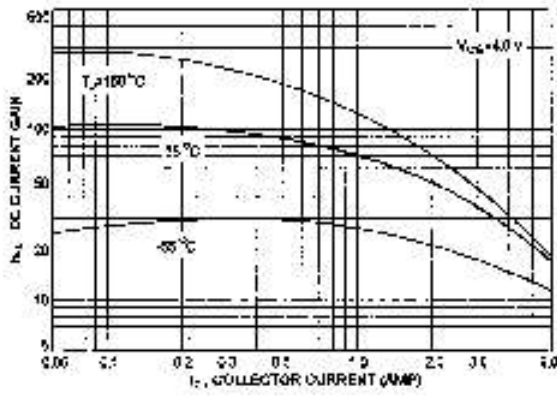
|                                                                                                                             |               |          |     |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------|-----|---|
| DC Current Gain<br>( $V_{CE} = 4.0\text{ V}$ , $I_C = 0.3\text{ A}$ )<br>( $V_{CE} = 4.0\text{ V}$ , $I_C = 3.0\text{ A}$ ) | $h_{FE}$      | 30<br>15 |     |   |
| Collector-Emitter Saturation Voltage<br>( $I_C = 5.0\text{ A}$ , $I_B = 1.0\text{ A}$ )                                     | $V_{CE(sat)}$ |          | 1.5 | V |
| Base-Emitter On Voltage<br>( $I_C = 5.0\text{ A}$ , $V_{CE} = 4.0\text{ V}$ )                                               | $V_{BE(on)}$  |          | 2.0 | V |

## DYNAMIC CHARACTERISTICS

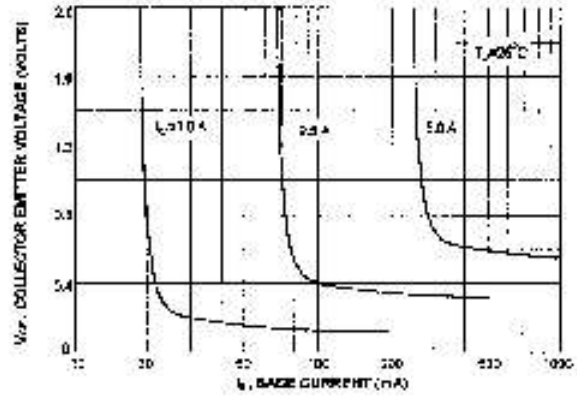
|                                                                                                               |          |     |  |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----|--|-----|
| Current Gain-Bandwidth Product (2)<br>( $I_C = 500\text{ mA}$ , $V_{CE} = 10\text{ V}$ , $f = 1\text{ MHz}$ ) | $f_T$    | 3.0 |  | MHz |
| Small-Signal Current Gain<br>( $I_C = 500\text{ mA}$ , $V_{CE} = 10\text{ V}$ , $f = 1\text{ kHz}$ )          | $h_{fe}$ | 20  |  |     |

(1) Pulse Test: Pulse width  $\approx 300\text{ }\mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\approx 2.0\%$ (2)  $f_T = |h_{fe}| \cdot f_{mid}$

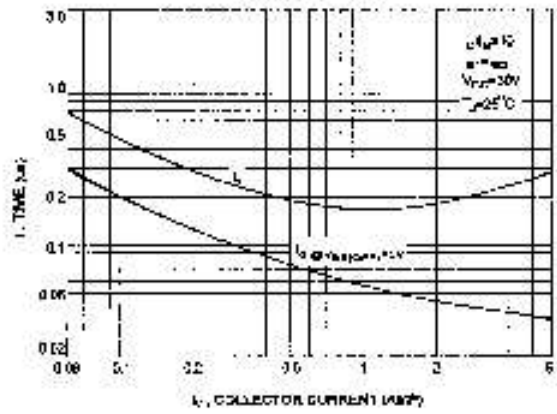
DC CURRENT GAIN



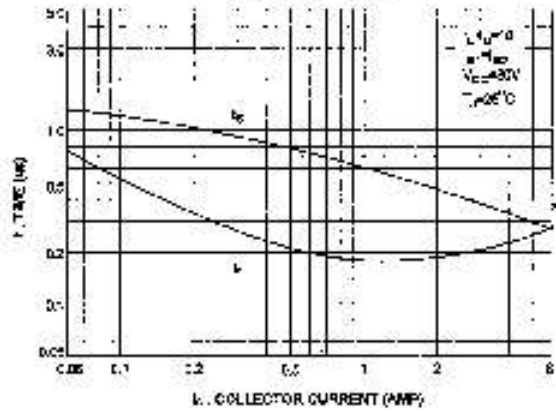
COLLECTOR SATURATION REGION



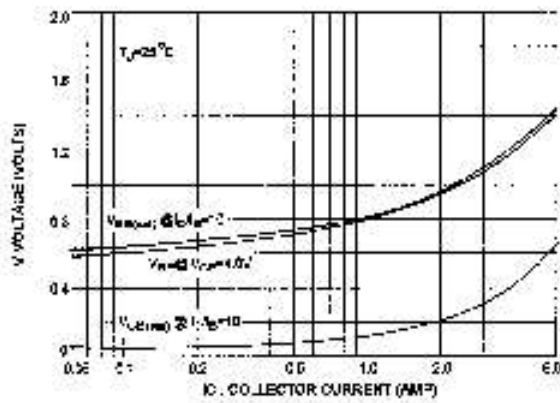
TURN-ON TIME



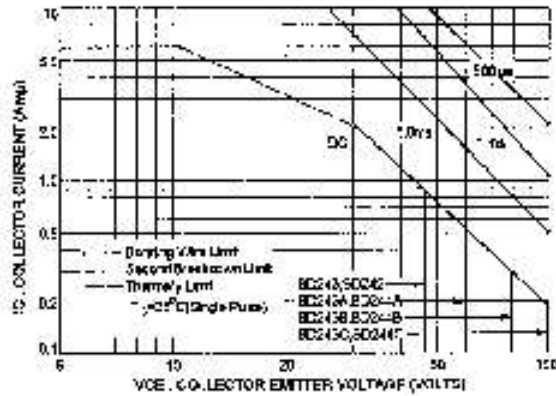
TURN-OFF TIME



"ON" VOLTAGES



ACTIVE REGION SAFE OPERATING AREA

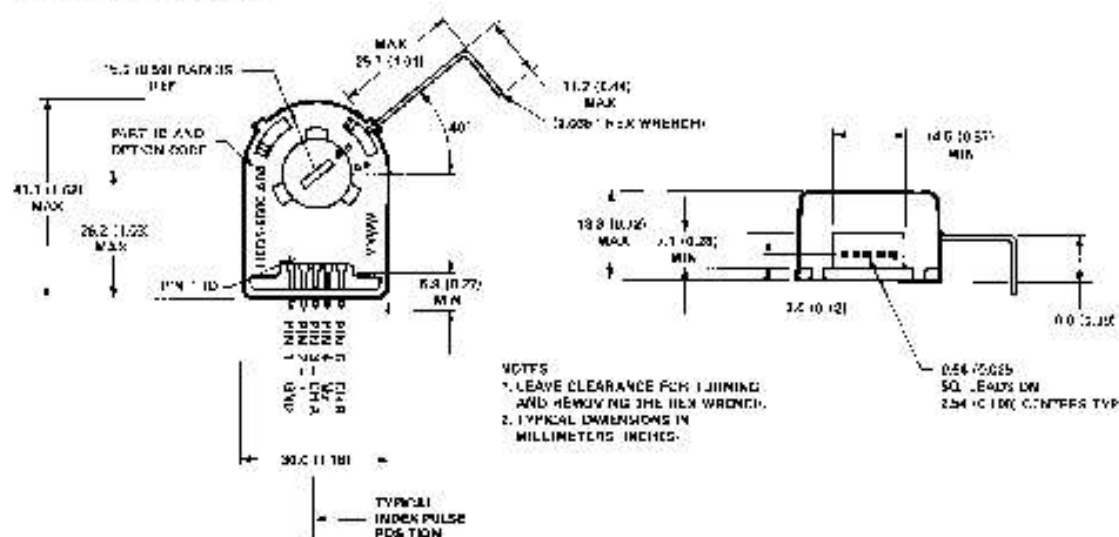


## [4]. HEDL-5540-A13

2

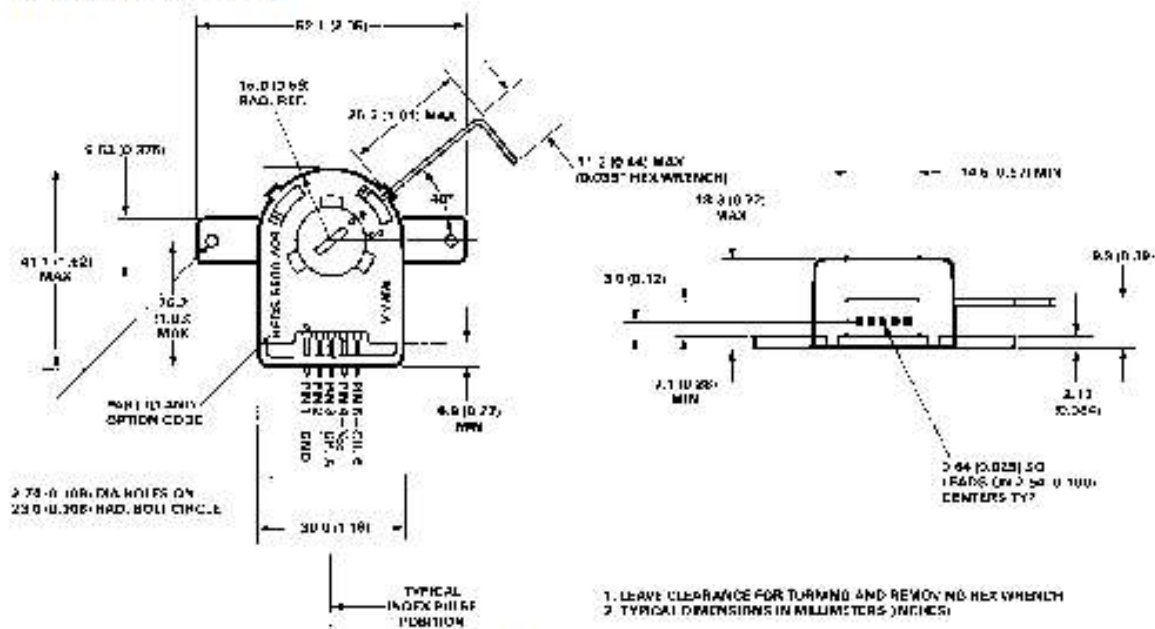
### Package Dimensions

HEDS-5500/5540, HEDM-5500



\*Note: For the HEDS-5500 and HEDM-5500, Pin #2 is a No Connect. For the HEDS-5540, Pin #2 is CH. 1, the index output.

HEDS-5600/5640, HEDM-5600



\*Note: For the HEDS-5600 and HEDM-5600, Pin #2 is a No Connect. For the HEDS-5640, Pin #2 is CH. 1, the index output.

## Theory of Operation

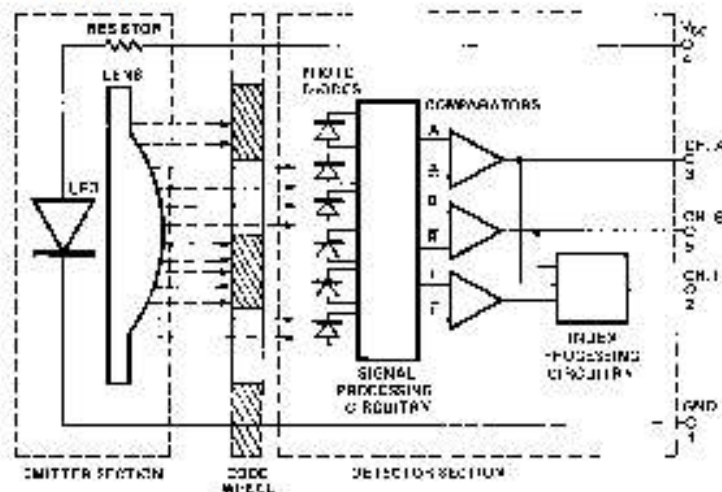
The HEDS-5500, 5540, 5600, 5640, and HEDM-5500, 5600 translate the rotary motion of a shaft into either a two- or a three-channel digital output.

As seen in the block diagram, these encoders contain a single Light Emitting Diode (LED) as its light source. The light is collimated into a parallel beam by means of a single polycarbonate lens located directly over the LED. Opposite the emitter is the integrated detector circuit. This IC consists of multiple sets of photodiodes and the signal processing circuitry necessary to produce the digital waveforms.

The codewheel rotates between the emitter and detector, causing the light beam to be interrupted by the pattern of spaces and bars on the codewheel. The photodiodes which detect these interruptions are arranged in a pattern that corresponds to the radius and design of the codewheel. These detectors are also spaced such that a light period on one pair of detectors corresponds to a dark period on the adjacent pair of detectors. The photodiode outputs are then fed through the signal processing circuitry resulting in  $A$ ,  $\overline{A}$ ,  $B$  and  $\overline{B}$  (also  $I$  and  $\overline{I}$  in the HEDS-5540 and 5640). Comparators receive these signals and produce the final outputs for channels A and B. Due to this integrated phasing technique, the digital output of channel A is in quadrature with that of channel B (90 degrees out of phase).

In the HEDS-5540 and 5640, the output of the comparator for  $I$  and  $\overline{I}$  is sent to the index processing circuitry along with the outputs of channels A and B.

## Block Diagram



NOTE: CIRCUITRY FOR CH. 1 IS ONLY IN HEDM 5540 AND 5640 THREE CHANNEL ENCODERS.

The final output of channel I is an index pulse  $P_0$  which is generated once for each full rotation of the codewheel. This output  $P_0$  is a one state width (nominally 90 electrical degrees), high true index pulse which is coincident with the low states of channels A and B.

## Definitions

**Count ( $N$ ):** The number of bar and window pairs or counts per revolution (CPR) of the codewheel.

**One Cycle ( $C$ ):** 360 electrical degrees ( $^\circ$ ), 1 bar and window pair.

**One Shaft Rotation:** 360 mechanical degrees,  $N$  cycles.

**Position Error ( $\Delta\theta$ ):** The normalized angular difference between the actual shaft position and the position indicated by the encoder cycle count.

**Cycle Error ( $\Delta C$ ):** An indication of cycle uniformity. The difference between an observed shaft angle which gives rise to one electrical cycle, and the nominal angular increment of  $1/N$  of a

revolution.

**Pulse Width ( $P$ ):** The number of electrical degrees that an output is high during 1 cycle. This value is nominally  $180^\circ$  or  $1/2$  cycle.

**Pulse Width Error ( $\Delta P$ ):** The deviation, in electrical degrees, of the pulse width from its ideal value of  $180^\circ$ .

**State Width ( $S$ ):** The number of electrical degrees between a transition in the output of channel A and the neighboring transition in the output of channel B. There are 4 states per cycle, each nominally  $90^\circ$ .

**State Width Error ( $\Delta S$ ):** The deviation, in electrical degrees, of each state width from its ideal value of  $90^\circ$ .

**Phase ( $\phi$ ):** The number of electrical degrees between the center of the high state of channel A and the center of the high state of channel B. This value is nominally  $90^\circ$  for quadrature output.

**Phase Error ( $\Delta\phi$ ):** The deviation of the phase from its ideal value of  $90^\circ$ .

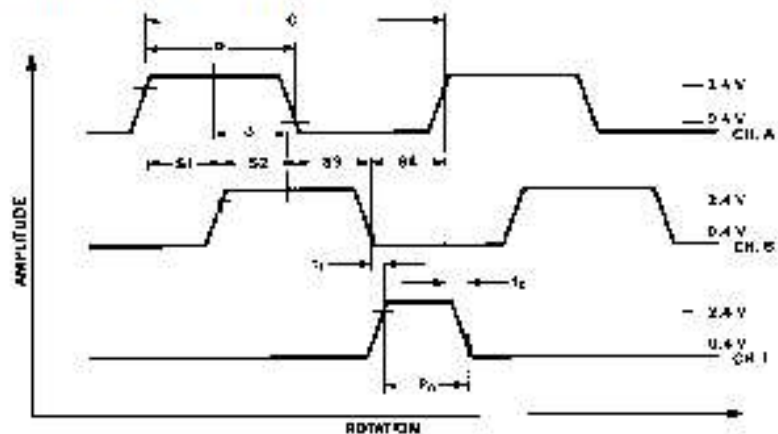
### Absolute Maximum Ratings

| Parameter                             | HEDS-55XX/56XX                   | HEDM-550X/560X                    |
|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Storage Temperature, $T_S$            | -40°C to 100°C                   | -40°C to +70°C                    |
| Operating Temperature, $T_A$          | -40°C to 100°C                   | -40°C to +70°C                    |
| Supply Voltage, $V_{CC}$              | -0.5 V to 7 V                    | -0.5 V to 7 V                     |
| Output Voltage, $V_O$                 | -0.5 V to $V_{CC}$               | -0.5 V to $V_{CC}$                |
| Output Current per Channel, $I_{OIT}$ | -1.0 mA to 5 mA                  | -1.0 mA to 5 mA                   |
| Vibration                             | 20 g, 5 to 1000 Hz               | 20 g, 5 to 1000 Hz                |
| Shaft Axial Play                      | $\pm 0.25$ mm ( $\pm 0.010$ in.) | $\pm 0.175$ mm ( $\pm 0.007$ in.) |
| Shaft Eccentricity Plus Radial Play   | 0.1 mm (0.004 in.) TIR           | 0.04 mm (0.0015 in.) TIR          |
| Velocity                              | 30,000 RPM                       | 30,000 RPM                        |
| Acceleration                          | 250,000 rad/sec <sup>2</sup>     | 250,000 rad/sec <sup>2</sup>      |

**Direction of Rotation:** When the codewheel rotates in the counter-clockwise direction (as viewed from the encoder end of the motor), channel A will lead channel B. If the codewheel rotates in the clockwise direction, channel B will lead channel A.

**Index Pulse Width ( $P_O$ ):** The number of electrical degrees that an index output is high during one full shaft rotation. This value is nominally 90° or 1/4 cycle.

### Output Waveforms



### Recommended Operating Conditions

| Parameter                                               | Symbol          | Min. | Typ. | Max.                 | Units           | Notes                                      |
|---------------------------------------------------------|-----------------|------|------|----------------------|-----------------|--------------------------------------------|
| Temperature HEDS Series                                 | T <sub>A</sub>  | -40  |      | 100                  | °C              |                                            |
| Temperature HEDM Series                                 | T <sub>A</sub>  | -40  |      | 70                   | °C              | non-condensing atmosphere                  |
| Supply Voltage                                          | V <sub>CC</sub> | 4.5  | 5.0  | 5.5                  | Volts           | Ripple < 100 mV <sub>p-p</sub>             |
| Load Capacitance                                        | C <sub>L</sub>  |      |      | 100                  | pF              | 2.7 kΩ pull-up                             |
| Count Frequency                                         | f               |      |      | 100                  | kHz             | Velocity (rpm) x N/60                      |
| Shaft Perpendicularity<br>Plus Axial Play (HEDS Series) |                 |      |      | ± 0.25<br>(± 0.010)  | mm<br>(in.)     | 6.9 mm (0.27 in.) from<br>mounting surface |
| Shaft Eccentricity Plus<br>Radial Play (HEDS Series)    |                 |      |      | 0.04<br>(0.0015)     | mm (in.)<br>TIR | 6.9 mm (0.27 in.) from<br>mounting surface |
| Shaft Perpendicularity<br>Plus Axial Play (HEDM Series) |                 |      |      | ± 0.175<br>(± 0.007) | mm<br>(in.)     | 6.9 mm (0.27 in.) from<br>mounting surface |
| Shaft Eccentricity Plus<br>Radial Play (HEDM Series)    |                 |      |      | 0.04<br>(0.0015)     | mm (in.)<br>TIR | 6.9 mm (0.27 in.) from<br>mounting surface |

**Note:** The module performance is guaranteed to 100 kHz but can operate at higher frequencies. 2.7 kΩ pull-up resistors required for HEDS-5540 and 5640.

### Encoding Characteristics

Encoding Characteristics over Recommended Operating Range and Recommended Mounting Tolerances unless otherwise specified. Values are for the worst error over the full rotation.

| Part No.                                     | Description                             | Sym.           | Min.            | Typ.* | Max. | Units       |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------|-----------------|-------|------|-------------|
| HEDS-5500<br>HEDS-5600<br>(Two Channel)      | Pulse Width Error                       | ΔP             |                 | 7     | 45   | °e          |
|                                              | Logic State Width Error                 | ΔS             |                 | 5     | 45   | °e          |
|                                              | Phase Error                             | Δφ             |                 | 2     | 20   | °e          |
|                                              | Position Error                          | ΔΘ             |                 | 10    | 40   | min. of arc |
|                                              | Cycle Error                             | ΔC             |                 | 3     | 5.5  | °e          |
| HEDM-5500<br>HEDM-5600<br>(Two Channel)      | Pulse Width Error                       | ΔP             |                 | 10    | 45   | °e          |
|                                              | Logic State Width Error                 | ΔS             |                 | 10    | 45   | °e          |
|                                              | Phase Error                             | Δφ             |                 | 2     | 15   | °e          |
|                                              | Position Error                          | ΔΘ             |                 | 10    | 40   | min. of arc |
|                                              | Cycle Error                             | ΔC             |                 | 3     | 7.5  | °e          |
| HEDS-5540<br>HEDS-5640<br>(Three<br>Channel) | Pulse Width Error                       | ΔP             |                 | 5     | 35   | °e          |
|                                              | Logic State Width Error                 | ΔS             |                 | 5     | 35   | °e          |
|                                              | Phase Error                             | Δφ             |                 | 2     | 15   | °e          |
|                                              | Position Error                          | ΔΘ             |                 | 10    | 40   | min. of arc |
|                                              | Cycle Error                             | ΔC             |                 | 3     | 5.5  | °e          |
|                                              | Index Pulse Width                       | P <sub>O</sub> |                 | 55    | 90   | 125<br>°e   |
|                                              | CH. I rise after<br>CH. A or CH. B fall | t <sub>2</sub> | -40°C to +100°C | -300  | 100  | 250<br>ns   |
|                                              | CH. I fall after<br>CH. B or CH. A rise | t <sub>2</sub> | -40°C to +100°C | 70    | 150  | 1000<br>ns  |

**Note:** See Mechanical Characteristics for mounting tolerances.

\*Typical values specified at V<sub>CC</sub> = 5.0 V and 25°C.

## Electrical Characteristics

Electrical Characteristics over Recommended Operating Range.

| Part No.                                         | Parameter                 | Sym.     | Min. | Typ.* | Max. | Units | Notes                          |
|--------------------------------------------------|---------------------------|----------|------|-------|------|-------|--------------------------------|
| HEDS-5500<br>HEDS-5600                           | Supply Current            | $I_{CC}$ |      | 17    | 40   | mA    |                                |
|                                                  | High Level Output Voltage | $V_{OH}$ | 2.4  |       |      | V     | $I_{OH} = -40 \mu A$ max.      |
|                                                  | Low Level Output Voltage  | $V_{OL}$ |      |       | 0.4  | V     | $I_{OL} = 3.2$ mA              |
|                                                  | Rise Time                 | $t_r$    |      | 200   |      | ns    | $C_L = 25$ pF                  |
|                                                  | Fall Time                 | $t_f$    |      | 50    |      | ns    | $R_L = 11$ k $\Omega$ pull-up  |
| HEDS-5540<br>HEDS-5640<br>HEDM-5500<br>HEDM-5600 | Supply Current            | $I_{CC}$ | 30   | 57    | 85   | mA    |                                |
|                                                  | High Level Output Voltage | $V_{OH}$ | 2.4  |       |      | V     | $I_{OH} = -200 \mu A$ max.     |
|                                                  | Low Level Output Voltage  | $V_{OL}$ |      |       | 0.4  | V     | $I_{OL} = 3.86$ mA             |
|                                                  | Rise Time                 | $t_r$    |      | 180   |      | ns    | $C_L = 25$ pF                  |
|                                                  | Fall Time                 | $t_f$    |      | 40    |      | ns    | $R_L = 2.7$ k $\Omega$ pull-up |
| HEDM-5500<br>HEDM-5600                           | Supply Current            | $I_{CC}$ | 30   | 57    | 85   | mA    |                                |
|                                                  | High Level Output Voltage | $V_{OH}$ | 2.4  |       |      | V     | $I_{OH} = -40 \mu A$ max.      |
|                                                  | Low Level Output Voltage  | $V_{OL}$ |      |       | 0.4  | V     | $I_{OL} = 3.86$ mA             |
|                                                  | Rise Time                 | $t_r$    |      | 180   |      | ns    | $C_L = 25$ pF                  |
|                                                  | Fall Time                 | $t_f$    |      | 40    |      | ns    | $R_L = 3.2$ k $\Omega$ pull-up |

\*Typical values specified at  $V_{CC} = 5.0$  V and 25°C.

## Mechanical Characteristics

| Parameter                                     | Symbol                 | Dimension                     | Tolerance <sup>[1]</sup> | Units                                     |
|-----------------------------------------------|------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|
| Codewheel Fits These Standard Shaft Diameters |                        | 2 3 4<br>5 6 8                | +0.000<br>-0.015         | mm                                        |
|                                               |                        | 5/32 1/8<br>3/16 1/4          | +0.0000<br>-0.0007       | in                                        |
| Moment of Inertia                             | J                      | 0.6 (8.0 x 10 <sup>-6</sup> ) |                          | g-cm <sup>2</sup> (oz-in-s <sup>2</sup> ) |
| Required Shaft Length <sup>[2]</sup>          |                        | 14.0 (0.55)                   | ± 0.5<br>(± 0.02)        | mm<br>(in.)                               |
| Bolt Circle <sup>[3]</sup>                    | 2 screw mounting       | 19.05<br>(0.750)              | ± 0.13<br>(± 0.005)      | mm<br>(in.)                               |
|                                               | 3 screw mounting       | 20.90<br>(0.823)              | ± 0.13<br>(± 0.005)      | mm<br>(in.)                               |
|                                               | external mounting ears | 46.0<br>(1.811)               | ± 0.13<br>(± 0.005)      | mm<br>(in.)                               |
| Mounting Screw Size <sup>[4]</sup>            | 2 screw mounting       | M 2.5 or (2-56)               |                          | mm (in.)                                  |
|                                               | 3 screw mounting       | M 1.6 or (0-80)               |                          | mm (in.)                                  |
|                                               | external mounting ears | M 2.5 or (2-56)               |                          | mm (in.)                                  |
| Encoder Base Plate Thickness                  |                        | 0.33 (0.130)                  |                          | mm (in.)                                  |
| Hub Set Screw                                 |                        | (2-56)                        |                          | (in.)                                     |

### Notes:

1. These are tolerances required of the user.

2. The HEDS-55X5 and 56X5, HEDM-5505, 5605 provide an 8.9 mm (0.35 inch) diameter hole through the housing for longer motor shafts. See Ordering Information.

3. The HEDS-5540 and 5640 must be aligned using the aligning pins as specified in Figure 3, or using the alignment tool as shown in "Encoder Mounting and Assembly". See also "Mounting Considerations."

4. The recommended mounting screw torque for 2 screw and external ear mounting is 1.0 kg-cm (0.88 in-lbs). The recommended mounting screw torque for 3 screw mounting is 0.50 kg-cm (0.43 in-lbs).

## Electrical Interface

To insure reliable encoding performance, the HEDS-5540 and 5640 three channel encoders require 2.7 k $\Omega$  ( $\pm$  10%) pull-up resistors on output pins 2, 3, and 5 (Channels I, A, and B) as shown in Figure 1. These pull-up resistors should be located as

close to the encoder as possible (within 4 feet). Each of the three encoder outputs can drive a single TTL load in this configuration.

The HEDS-5500, 5600, and HEDM-5500, 5600 two channel encoders do not normally require pull-up resistors. However, 3.2 k $\Omega$

pull-up resistors on output pins 3 and 5 (Channels A and B) are recommended to improve rise times, especially when operating above 100 kHz frequencies.

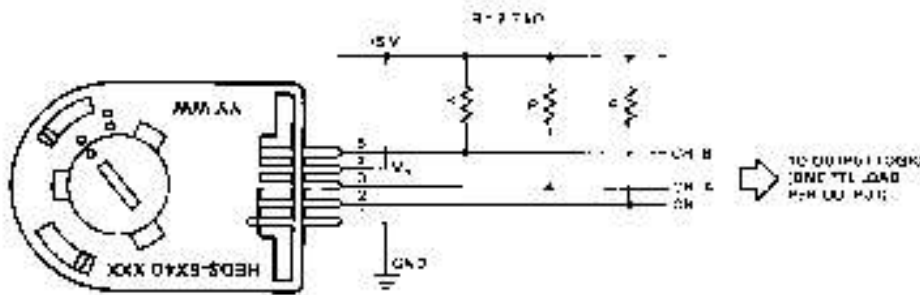


Figure 1. Pull-up Resistors on HEDS-5X40 Encoder Outputs.

### Mounting Considerations

The HEDS-5540 and 5640 three channel encoders and the HEDM Series high resolution encoders must be aligned using the aligning pins as specified in Figure 3, or using the HEDS-8910 Alignment Tool as shown in Encoder Mounting and Assembly.

The use of aligning pins or alignment tool is recommended but not required to mount the HEDS-5500 and 5600. If these

two channel encoders are attached to a motor with the screw sizes and mounting tolerances specified in the mechanical characteristics section without any additional mounting bosses, the encoder output errors will be within the maximums specified in the encoding characteristics section.

The HEDS-5500 and 5540 can be mounted to a motor using either the two screw or three screw

mounting option as shown in Figure 2. The optional aligning pins shown in Figure 3 can be used with either mounting option.

The HEDS-5600, 5640, and HEDM-5600 have external mounting ears which may be used for mounting to larger motor base plates. Figure 4 shows the necessary mounting holes with optional aligning pins and motor boss.

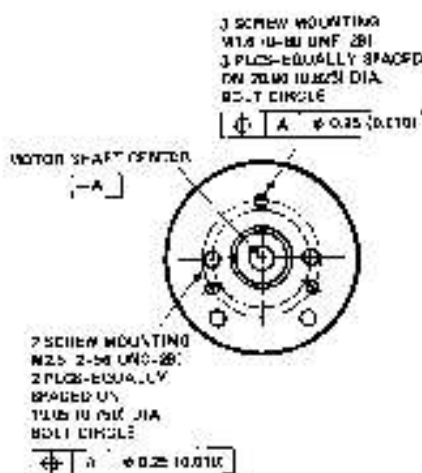


Figure 2. Mounting Holes.

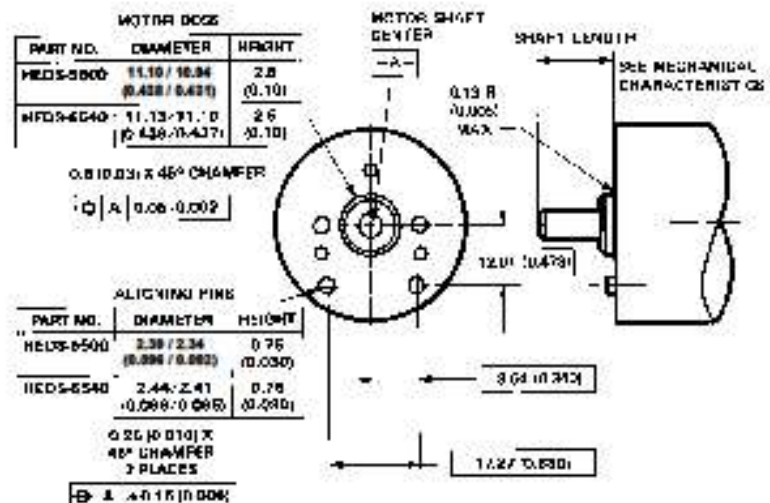
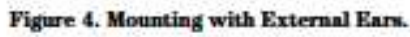
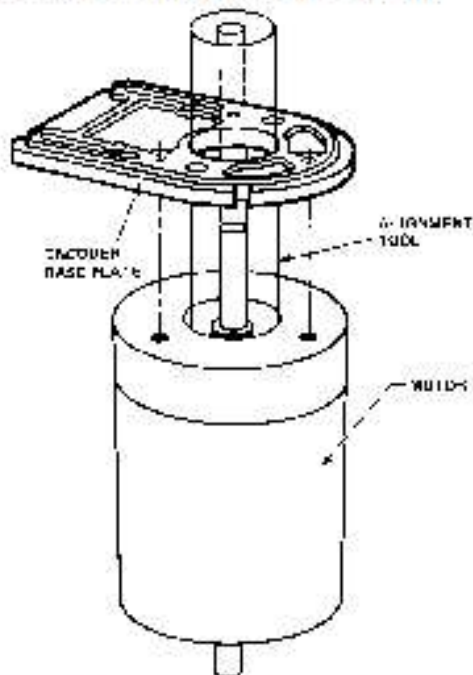


Figure 3. Optional Mounting Aids.

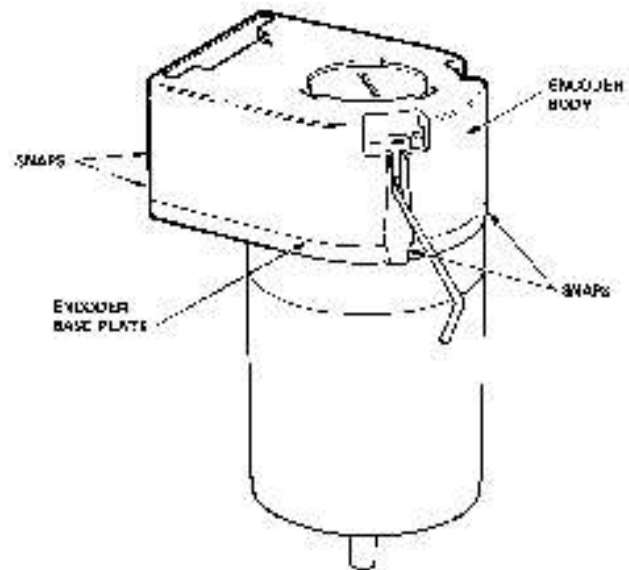


## Encoder Mounting and Assembly

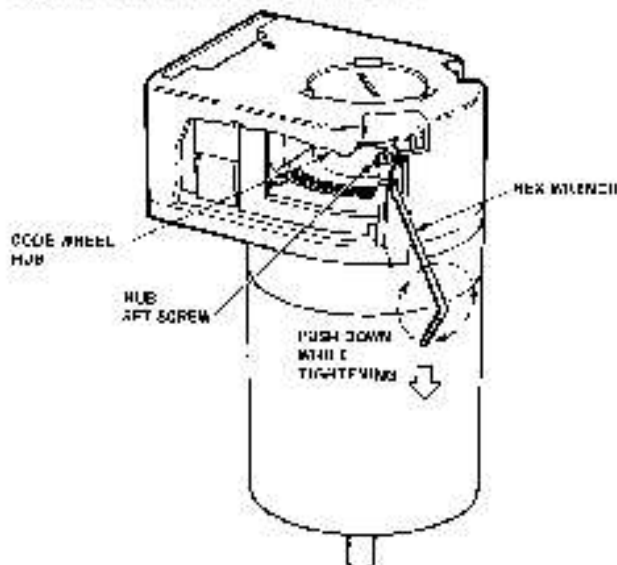


1. For HEDS-5500 and 5600: Mount encoder base plate onto motor. Tighten screws. Go on to step 2.

1a. For HEDS-5540, 5640 and HEDM-5500, 5600: Slip alignment tool onto motor shaft. With alignment tool in place, mount encoder baseplate onto motor as shown above. Tighten screws. Remove alignment tool.



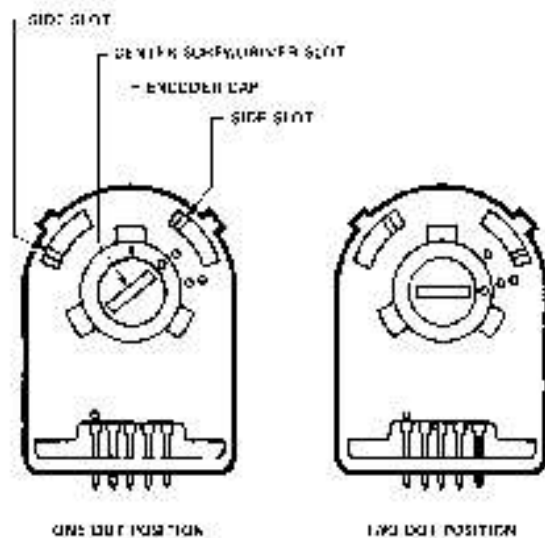
2. Snap encoder body onto base plate locking all 4 snaps.



3a. Push the hex wrench into the body of the encoder to ensure that it is properly seated into the code wheel hub set screws. Then apply a downward force on the end of the hex wrench. This sets the code wheel gap by levering the code wheel hub to its upper position.

3b. While continuing to apply a downward force, rotate the hex wrench in the clockwise direction until the hub set screw is tight against the motor shaft. The hub set screw attaches the code wheel to the motor's shaft.

3c. Remove the hex wrench by pulling it straight out of the encoder body.



4. Use the center screwdriver slot, or either of the two side slots, to rotate the encoder cap dot clockwise from the one dot position to the two dot position. Do not rotate the encoder cap counterclockwise beyond the one dot position.

The encoder is ready for use!

## Connectors

| Manufacturer                                                                       | Part Number                         |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| AMP                                                                                | 103686-4<br>640442-5                |
| Dupont/Berg                                                                        | 65039-032 with 4825X-000 term.      |
| Agilent<br>(designed to mechanically lock into the<br>HEDS-5XXX, HEDM-5X0X Series) | HEDS-8902 (2 ch.) with 4-wire leads |
|                                                                                    | HEDS-8903 (3 ch.) with 5-wire leads |
| Molex                                                                              | 2695 series with 2759 series term.  |

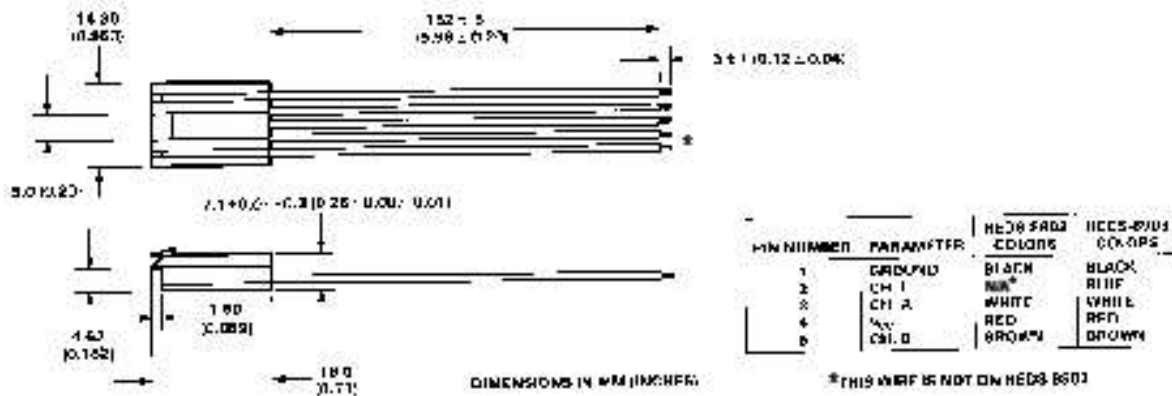
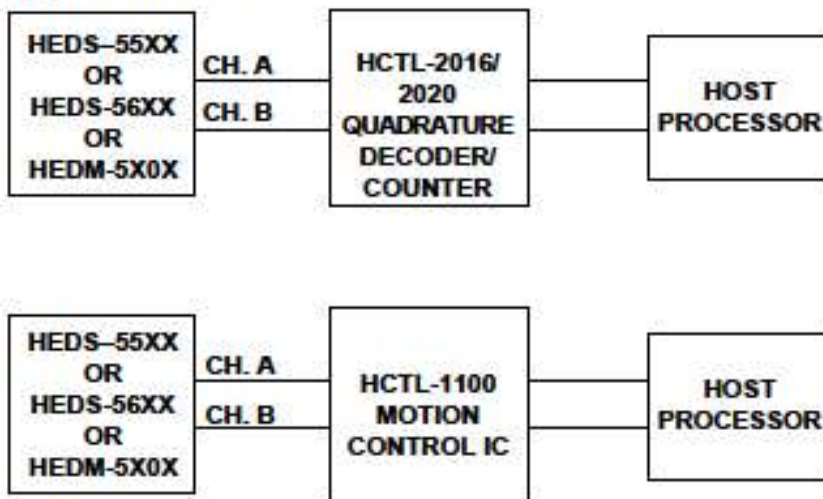


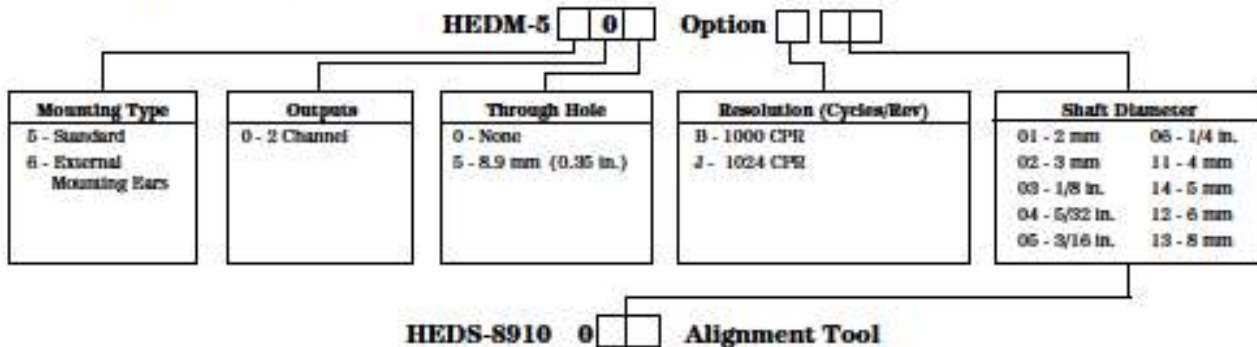
Figure 5. HEDS-8902 and 8903 Connectors.

## Typical Interfaces



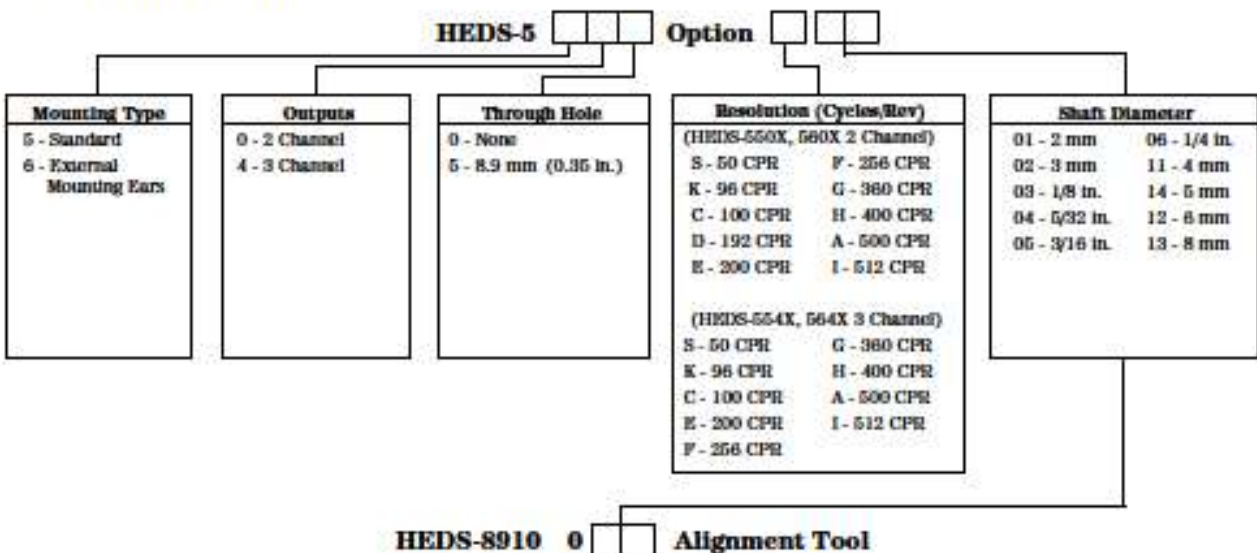
## Ordering Information

### Encoders with Film Codewheels



(Included with each order of HEDM-550X/560X two channel encoders)

### Encoders with Metal Codewheels



(Included with each order of HEDS-554X/564X three channel encoders)

[5]. SB5XXX

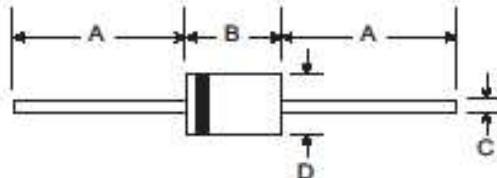


## SB570 - SB5100

### 5.0A SCHOTTKY BARRIER RECTIFIER

#### Features

- Guard Ring Die Construction for Transient Protection
- Low Power Loss, High Efficiency
- High Surge Capability
- High Current Capability
- Surge Overload Rating to 150A Peak
- For Use in Low Voltage, High Frequency Inverters, Free Wheeling, and Polarity Protection Applications
- Lead Free Finish, RoHS Compliant (Note 2)



#### Mechanical Data

- Case: DO-201AD
- Case Material: Molded Plastic. UL Flammability Classification Rating 94V-0
- Moisture Sensitivity: Level 1 per J-STD-020C
- Terminals: Finish - Bright Tin. Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Cathode Band
- Ordering Information: See Last Page
- Marking: Type Number
- Weight: 1.1 grams (approximate)

| DO-201AD             |       |      |
|----------------------|-------|------|
| Dim                  | Min   | Max  |
| A                    | 25.40 | —    |
| B                    | 7.20  | 9.50 |
| C                    | 1.20  | 1.30 |
| D                    | 4.80  | 5.30 |
| All Dimensions in mm |       |      |

#### Maximum Ratings and Electrical Characteristics @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Single phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.  
For capacitive load, derate current by 20%.

| Characteristic                                                                                                  | Symbol          | SB570       | SB580 | SB590 | SB5100 | Unit             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------|-------|-------|--------|------------------|
| Peak Repetitive Reverse Voltage                                                                                 | $V_{RRM}$       | 70          | 80    | 90    | 100    | V                |
| Working Peak Reverse Voltage                                                                                    | $V_{RWM}$       |             |       |       |        |                  |
| DC Blocking Voltage                                                                                             | $V_R$           |             |       |       |        |                  |
| RMS Reverse Voltage                                                                                             | $V_{R(RMS)}$    | 49          | 58    | 63    | 70     | V                |
| Average Rectified Output Current @ $T_J = 80^\circ\text{C}$                                                     | $I_O$           | 5.0         |       |       |        | A                |
| Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method) | $I_{FSM}$       | 150         |       |       |        | A                |
| Forward Voltage @ $I_F = 5.0\text{A}$                                                                           | $V_{FM}$        | 0.80        |       |       |        | V                |
| Peak Reverse Current @ $T_A = 25^\circ\text{C}$                                                                 | $I_{RM}$        | 0.5         |       |       |        | mA               |
| at Rated DC Blocking Voltage @ $T_A = 100^\circ\text{C}$                                                        |                 | 50          |       |       |        |                  |
| Typical Junction Capacitance (Note 1)                                                                           | $C_j$           | 400         |       |       |        | pF               |
| Typical Thermal Resistance Junction to Ambient                                                                  | $R_{\theta JA}$ | 10          |       |       |        | K/W              |
| Operating and Storage Temperature Range                                                                         | $T_J, T_{STG}$  | -65 to +150 |       |       |        | $^\circ\text{C}$ |

Notes: 1. Measured at 1.0MHz and applied reverse voltage of 4.0V DC.  
2. RoHS revision 13.2.2003. Glass and High Temperature Solder Exemptions Applied, see EU Directive Annex Notes 5 and 7.

**Panasonic**

Lithium Ion  
**NCR18650**

### Features & Benefits

- High energy density
- Long stable power and long run time
- Ideal for notebook PCs, boosters, portable devices, etc.

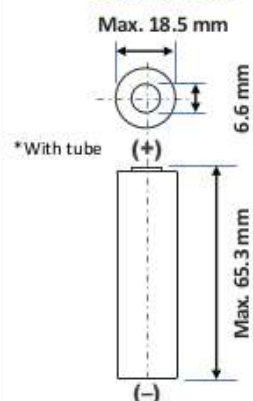
\* At temperatures below 10°C, charge at a 0.35C rate.

### Specifications

|                               |                                                                         |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Rated capacity <sup>(1)</sup> | Min. 2700mAh                                                            |
| Capacity <sup>(2)</sup>       | Min. 2750mAh<br>Typ. 2900mAh                                            |
| Nominal voltage               | 3.6V                                                                    |
| Charging                      | CC-CV, Std. 1925mA, 4.20V, 3.0 hrs                                      |
| Weight (max.)                 | 46.5 g                                                                  |
| Temperature                   | Charge*: 0 to +45°C<br>Discharge: -20 to +60°C<br>Storage: -20 to +50°C |
| Energy density <sup>(3)</sup> | Volumetric: 577 Wh/l<br>Gravimetric: 214 Wh/kg                          |

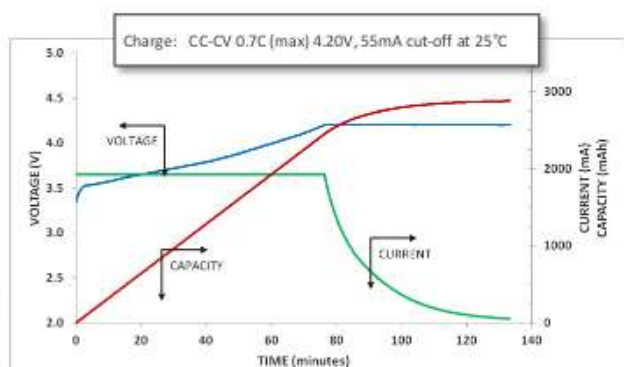
(1) At 20°C (2) At 25°C (3) Energy density based on bare cell dimensions

### Dimensions

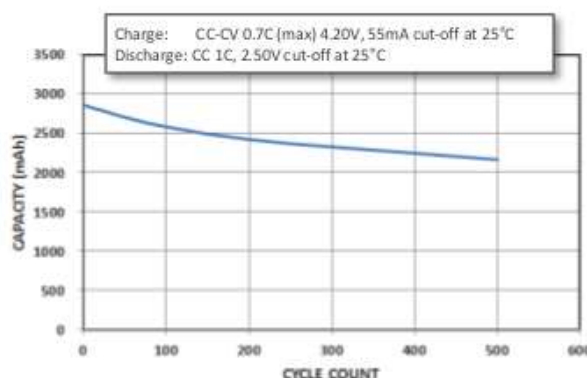


For Reference Only

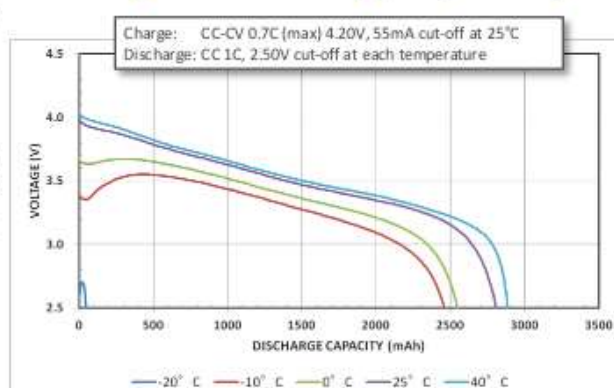
### Charge Characteristics



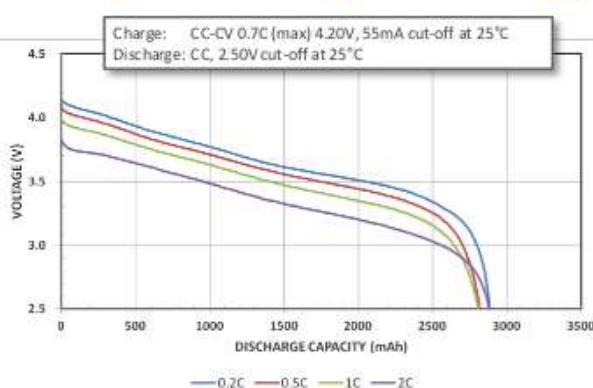
### Cycle Life Characteristics



### Discharge Characteristics (by temperature)



### Discharge Characteristics (by rate of discharge)



The data in this document is for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.

## [7]. MAXON 370356

maxon motor

370356

### Working Point:

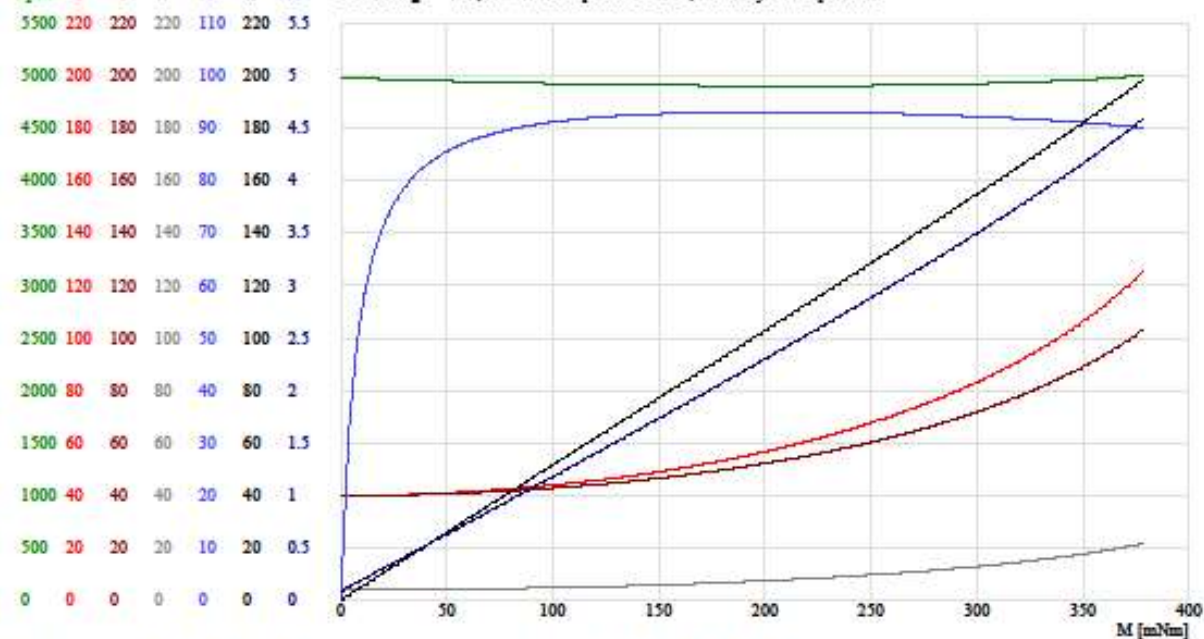
|                     |      |     |
|---------------------|------|-----|
| DC Voltage          | 48   | V   |
| DC Link Current     | 4.16 | A   |
| Motor Current       | 4.16 | A   |
| Motor speed         | 4960 | rpm |
| Output speed (gear) | 4960 | rpm |
| Torque              | 350  | mNm |

|                             |                           |    |
|-----------------------------|---------------------------|----|
| Temperature Calculation     | in steady state operation |    |
| Ambient temperature         | 25                        | °C |
| Average housing temperature | 89                        | °C |
| Average magnet temperature  | 101                       | °C |
| Average winding temperature | 106                       | °C |

|                                          |      |   |
|------------------------------------------|------|---|
| El. feeding power (amplifier)            | 200  | W |
| El. input power (motor)                  | 200  | W |
| Mech. output power                       | 182  | W |
| - Overall losses in the amplifier        |      | W |
| - Joule losses winding                   | 13.9 | W |
| - Joule losses in the commutation system | 0    | W |
| - Joule losses cable                     | 0    | W |
| - Speed dependent losses                 | 3.95 | W |
| - Overall motor losses                   | 17.8 | W |
| - Overall gear losses                    |      | W |
| Overall losses                           | 17.8 | W |
| - Amplifier efficiency                   | 100  | % |
| - Motor efficiency                       | 91.1 | % |
| - Gear efficiency                        |      | % |
| Overall efficiency                       | 91.1 | % |

|                                     |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|
| Torque constant, warm               | 85.9  | mNm/A |
| Winding Resistance, warm            | 0.801 | Ohm   |
| Cable resistance                    | 0     | Ohm   |
| Brush resistance                    | 0     | Ohm   |
| Electrical frequency (1st harmonic) | 82.7  | Hz    |
| Commutation frequency               | 2480  | Hz    |

370356  
DC Voltage = 48V, Ambient temperature 25°C, in steady state operation



All motor data are typical values. Thermal calculations refer to operation in air without any additional heat sink.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] . “1x Step-down HV Spannungsregler Modul 2-3A  $U_{in}=4,5-60V$  Einstellbar LM2596 HV.” *eBay*. Accessed June 3, 2015. <http://www.ebay.com/itm/1x-Step-down-HV-Spannungsregler-Modul-2-3A-Uin-4-5-60V-einstellbar-LM2596-HV-/371234533325>.
- [2] . Blair, Peter. “Bipolar Transistors for MOSFET Gate Driving Applications.” ZETEX Semiconductors, February 2008. DN80. [www.zetex.com](http://www.zetex.com).
- [3] . Bose, Bimal K. *Power Electronics And Motor Drives: Advances and Trends*. 1st edition. Amsterdam ; Boston: Academic Press, 2006.
- [4] . Chapman, Stephen. *Electric Machinery Fundamentals*. 4 edition. New York, NY: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2003.
- [5] . Cook, Nigel P. *Electronics: A Complete Course*. 2 edition. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2003.
- [6] . Dorf, James A. Svoboda James A. Svoboda, James A. Svoboda Richard C. *Introduction to Electric Circuits: 6th (Sixfth) Edition*. Wiley, John & Sons, Incorporated, 2003.
- [7] . Dorf, Richard C., and Robert H. Bishop. *Modern Control Systems*. 12 edition. Prentice Hall: Prentice Hall, 2010.
- [8] . Fitzgerald, A. E. *Electric Machinery*. A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, JR., Stephen D. Umans. 6th edition. Boston, Mass.: McGraw-Hill, 2005.

- [9] . Golnaraghi, Farid, and Benjamin C. Kuo. *Automatic Control Systems*. 9th edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2009.
- [10] . Hickey, Robert. *Electrical Engineer's Portable Handbook*. 2 edition. New York: McGraw-Hill Professional, 2003.
- [11] . Holt, Mike. "Mike Holt's Illustrated Guide to Understanding Basic Motor Controls," n.d.
- [12] . Horowitz, Paul. *By Paul Horowitz - The Art of Electronics*. 2nd Edition edition. Cambridge University Press, 1989.
- [13] . Husain, Iqbal. *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals, Second Edition*. 2 edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.
- [14] . "ICM7555 General Purpose CMOS Timer." NXP Semiconductors, n.d.
- [15] . Maxon Motors. "Maxon Motor 200W Brushed Datasheet," 2013.
- [16] . Mohan, Ned. *First Course on Power Electronics and Drives*. Minneapolis: MNPERE, 2003.
- [17] . "OpenStax CNX - Electrical and Electronic Materials Science." Accessed December 25, 2014. [http://cnx.org/contents/04851ca5-6fc7-4e58-ac9b-db092962acff@14.1:6/Electrical\\_and\\_Electronic\\_Mate](http://cnx.org/contents/04851ca5-6fc7-4e58-ac9b-db092962acff@14.1:6/Electrical_and_Electronic_Mate).
- [18] . Philips Semiconductors. "Power Semiconductor Applications," n.d.
- [19] . Rashid, Muhammad H., ed. *Power Electronics Handbook*. San Diego: Academic Press, 2001.

- [20] . Rockett, Angus. *The Materials Science of Semiconductors*. Softcover reprint of hardcover 1st ed. 2008 edition. Springer, 2010.
- [21] . Scherz, Paul. *Practical Electronics for Inventors*. New York: McGraw-Hill/TAB Electronics, 2000.
- [22] . Sedra, Adel S., and Kenneth C. Smith. *Microelectronic Circuits*. 6 edition. New York: Oxford University Press, 2009.
- [23] . Shenkman, Arie L. *Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook*. 2005 edition. Dordrecht: Springer, 2005.
- [24] . Sueker, Keith H. *Power Electronics Design: A Practitioner's Guide*. 1 edition. Newnes, 2011.
- [25] . Texas Instruments. "LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150 kHz 3A Step-Down Voltage Regulator." "Tiva C Series TM4C123G LaunchPad Evaluation Board." TexasInstruments2013.
- [26] . "xx555 Precision Timers." Texas Instruments, n.d.
- [27] . Young, Hugh D., Roger A. Freedman, and A. Lewis Ford. *University Physics with Modern Physics*. 13 edition. Boston: Addison-Wesley, 2011.
- [28] . Λάσκαρης, Κωνσταντίνος. "Σχεδιασμός και Κατασκευή Κινητήρων Μονίμων Μαγνητών για Ηλεκτρικά Οχήματα." PhD, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, 2011.
- [29] . Μαλατέστας, Παντελής. *Ηλεκτρικές Μηχανές*. 2η εκδ. Αθήνα, 2013.
- [30] . ΜΑΝΙΑΣ, ΣΤΕΦΑΝΟΣ. *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ*. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ, 2007.

#### LINKS:

- <http://www.mpoweruk.com/bms.htm>
- <http://www.batterysupports.com/battery-pcbnbsbmsnbsbpcm-c-32.html>
- <http://www.batteryspace.com/pcmforli-coli-mn-nibatterypacks.aspx>
- <http://www.bestechpower.com/pcmbmspcbforli-ionli-polymerbatterypacks/>
- <http://www.rectifier.co.za/Inverters.html>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_LM-series\\_integrated\\_circuits](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_LM-series_integrated_circuits)