



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μελέτη και Κατασκευή Συστήματος Μέτρησης Ροπής Ηλεκτρικού  
Οχήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σεβαστιανός Ευάγγελος Χ. Πολίτης

**Επιβλέπων :** Ιωάννης Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα Μάιος 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## Μελέτη και Κατασκευή Συστήματος Μέτρησης Ροπής Ηλεκτρικού Οχήματος

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σεβαστιανός Ευάγγελος Χ. Πολίτης

**Επιβλέπων :** Ιωάννης Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Μάιο του 2014.

.....  
Ιωάννης Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Αντώνιος Κλαδάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ηλίας Κουκούτσης  
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα Μάιος 2014



.....  
Σεβαστιανός Ευάγγελος Χ. Πολίτης  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Σεβαστιανός Ευάγγελος Χ. Πολίτης , 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά την εκπόνησή της. Η συμβολή τους ήταν σημαντική για την ολοκλήρωσή της.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή μου κ. Ιωάννη Αβαριτσιώτη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δέχοντας την επιλογή μου στο θέμα αυτό, αλλά και για την άψογη συνεργασία για την περάτωση της εργασίας.

Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά για την άριστη συνεργασία του και που δέχτηκε να ασχοληθώ με θέμα πάνω στην ομάδα του «Προμηθέα».

Ιδιαίτερος ευχαριστώ επίσης τον κύριο Απόστολο Ψαρρό μέλος του Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού στον Τομέα Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής ο οποίος με στήριξε δυναμικά στην περάτωση της διπλωματικής εργασίας μου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ερευνητικής ομάδας «Προμηθέας» και ειδικότερα τον συνάδελφο Νικόλαο Αδαμόπουλο, που συνέβαλλαν στην κατασκευή του ηλεκτρικού οχήματος «Πυρφόρος» και που με βοήθησαν στις μετρήσεις της εργασίας μου.







## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την κατασκευής ενός πλήρους συστήματος μέτρησης ροπής κινητήρα.

Η κατασκευή αυτή θα μετράει τη ροπή και έτσι θα μπορέσουμε να αξιολογήσουμε την παρούσα μηχανή και τις μελλοντικές μηχανές του ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου “ΠΥΡΦΟΡΟΣ”.

Το όχημα αυτό θα λάβει μέρος σε πανευρωπαϊκό διαγωνισμό εξοικονόμησης ενέργειας και η επίγνωση της ροπής της μηχανής του είναι ένα μεγάλο κομμάτι στην εύρεση της αποδοτικότητας και της συνολικής αξιολόγησής του .

Στην αρχή της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται περιληπτικά ο κινητήρας μόνιμων μαγνητών του οχήματος που μετρήθηκε .

Στη συνέχεια παρουσιάζετε αναλυτικά ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται με επεξήγηση των επιμέρους υποσυνόλων του.

Το κομμάτι της κατασκευής χωρίζεται σε 3 υποσύνολα :

- Στην τροφοδοσία του συνολικού κυκλώματος,
- το στάδιο της ενίσχυσης του σήματος προς μέτρηση,
- και τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή και της οθόνης .

Και τα 3 στάδια αναπτύσσονται λεπτομερώς στην παρούσα διπλωματική έκθεση παρακάτω.

Τέλος αναλύονται τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα του κινητήρα καθώς και τα σχέδια που αναπτύχθηκαν για τη δημιουργία της πλακέτας

Λέξεις Κλειδιά :

Αισθητήρας Ροπής, Προγραμματισμός Μικροελεγκτή, Ενίσχυση Σήματος, Απόδοση Κινητήρα, Μετασχηματιστές.



## ABSTRACT

This diploma thesis concerns the constructions of an autonomous sensing device which is able of measuring torque, specifically motor torque. Measuring torque with this device will help us evaluate the motor of the electric vehicle “PYRFOROS” of team “PROMETHEUS” as well as any other motors that might be used.

This vehicle will participate in a European competition of fuel saving and therefore measuring the motor’s torque is of great importance in order to improve the vehicles efficiency and evaluating it overall.

First the permanent magnet motor that was calculated is presented summarily.

Next the sensing device in presented thoroughly.

The part of the construction is separated in 3 major chapters:

- the power source of each operational device that was used,
- the amplifying section,
- and the programming of the microprocessor and the LCD monitor.

Finally we show the designs of the sensor that was built and we analyze the results and the diagram of the motor.

Key words:

Microprocessor Programming, Signal Amplifier, Torque Sensor, Motor Efficiency, Voltage transformer.



## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ :**

|  |           |
|--|-----------|
| Ευχαριστίες.....   | 3         |
| Περίληψη.....  | 5         |
| Abstract .....   | 7         |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>                         | <b>13</b> |
| 1.1 Σκοπός .....   | 13        |
| 1.2 Δομή .....   | 13        |
| 1.3 Επιστημονική συνεισφορά .....                        | 14        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ .....</b> | <b>15</b> |
| 2.1 Ο κινητήρας.....                                     | 15        |
| 2.2 Η συνδεσμολογία του αισθητήρα.....                   | 17        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΡΟΠΗΣ.....</b>                | <b>19</b> |
| 3.1 Ηλεκτρονικοί αισθητήρες .....                        | 19        |
| 3.1.1 Εισαγωγή .....                                     | 19        |
| 3.1.2 Χαρακτηριστικά αισθητήρων.....                     | 19        |
| 3.2 Load cells.....                                      | 22        |
| 3.2.1 Εισαγωγή στα Load cells.....                       | 22        |
| 3.2.2 Χαρακτηριστικά των load cells .....                | 23        |
| 3.2.3 Η αρχή της μέτρησης.....                           | 26        |
| 3.2.4 Ταξινόμηση load cell .....                         | 33        |
| 3.2.5 Προδιαγραφές των load cell.....                    | 33        |
| 3.2.6 Διαμόρφωση του load cell.....                      | 35        |
| 3.2.7. Η Γέφυρα Wheatstone.....                          | 36        |
| 3.2.8 Επιλογή των load cell.....                         | 37        |
| 3.2.9 Οφέλη .....  | 37        |
| 3.2.10 Η τελική επιλογή του αισθητήρα.....               | 38        |

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Η ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.....41**

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Μετασηματιστές.....                            | 42 |
| 4.1.1 Εισαγωγή .....                               | 42 |
| 4.1.2 Κατασκευή μετασηματιστών.....                | 43 |
| 4.1.3 Μονοφασικοί μετασηματιστές.....              | 44 |
| 4.2 Κύκλωμα ανόρθωσης.....                         | 45 |
| 4.2.1 Απλή ανόρθωση χωρίς πυκνωτή εξομάλυνσης..... | 45 |
| 4.2.2 Διπλή ανόρθωση με 2 διόδους.....             | 48 |
| 4.2.3 Συμμετρική διπλή ανόρθωση.....               | 50 |
| 4.3 Ο ρυθμιστής τάσης.....                         | 52 |
| 4.3.1 Εισαγωγή .....                               | 52 |
| 4.3.2 Η σειρά LM78XX .....                         | 52 |
| 4.3.3 Η σειρά LM79XX .....                         | 58 |

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ .....61**

|   |    |
|---|----|
| 5.1 Ο τελεστικός ενισχυτής.....           | 61 |
| 5.1.1 Εισαγωγή .....                      | 61 |
| 5.1.2 Μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία ..... | 62 |
| 5.1.3 Αναστρέφουσα συνδεσμολογία.....     | 63 |
| 5.2 Ο ενισχυτής διαφορών .....            | 64 |
| 5.3 Ο ενισχυτής οργάνων.....              | 66 |
| 5.4 Ο τελεστικός ενισχυτής OPA2604 .....  | 68 |
| 5.4.1 Εισαγωγή .....                      | 68 |
| 5.4.2 Χαρακτηριστικά.....                 | 69 |

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Ο ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ ..... 75**

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 6.1 Ο Μικροελεγκτής.....             | 75 |
| 6.1.1 Εισαγωγή .....                 | 75 |
| 6.1.2 Λειτουργίες Μικροελεγκτή ..... | 76 |
| 6.1.3 Πλεονεκτήματα.....             | 79 |
| 6.1.4 Analog to Digital.....         | 80 |
| 6.1.5 Ο ATMega32A.....               | 81 |
| 6.2 Η Οθόνη LCD.....                 | 85 |

|   |            |
|---|------------|
| 6.2.1 Winstar wh1602b .....   | 85         |
| 6.3 Ο κώδικας .....   | 86         |
| 6.3.1 Ο main κώδικας .....  | 86         |
| 6.3.2 Η βιβλιοθήκη LCD .....  | 89         |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ .....</b>                                 | <b>95</b>  |
| 7.1 Τα σχηματικά.....   | 95         |
| 7.2 Τα αποτελέσματα.....  | 96         |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΚΕΤΑΣ.....</b>                           | <b>99</b>  |
| 8.1 Σχεδιασμός της πλακέτας.....                                    | 99         |
| 8.2 Η κατασκευή.....  | 101        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ<br/>ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....</b> | <b>103</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>                                | <b>107</b> |
| 10.1 Συμπεράσματα .....   | 107        |
| 10.2 Προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση .....                         | 107        |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>   | <b>109</b> |





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Σκοπός

Το παρόν σύστημα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της μηχανής μονίμων μαγνητών του πειραματικού μονοθέσιου ηλεκτρικού οχήματος «Πυρφόρος» το οποίο έλαβε συμμετοχή στον πανευρωπαϊκό διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου της Shell Eco Marathon. Η κατασκευή αυτή χρησιμοποιήθηκε για τις προετοιμασίες της ομάδας «Προμηθέας» πριν λάβει μέρος για 6<sup>η</sup> φορά στο διαγωνισμό στο Rotterdam της Ολλανδίας το Μάιο του 2014. Σκοπός της διπλωματικής εργασία αυτής είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός εύχρηστου και ακριβούς συστήματος μέτρησης ροπής ενός κινητήρα in-wheel. Στα πλαίσια αυτού πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις απόδοσης του κινητήρα.

### 1.2 Δομή

Η εργασία αυτή περιγράφει και εξηγεί το κάθε μέρος της τελικής πλακέτας που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση ροπής. Εξηγεί ξεχωριστά την κάθε δομή σε κάθε κεφάλαιο και αναλύει στο τέλος τη σχεδίαση και τη κατασκευή της πλακέτας. Στο τέλος αναφέρονται οι πειραματικές μετρήσεις και αξιολογείται η λειτουργία και η απόδοση του κινητήρα.

Συγκεκριμένα στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο εξηγείται η γενική δομή του ροπόμετρου και της ιδέας σύνδεσης αυτού με τον κινητήρα κατά τις πειραματικές μετρήσεις.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη κατασκευή του αισθητήρα, των συγκεκριμένων κυψελίδων φορτίου, των strain gauges και του τρόπου λειτουργίας τους στο ροπόμετρο μας.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η τροφοδοσία της συνολικής πλακέτας με την κατασκευή κυκλώματος μετασχηματιστή και ανόρθωσης που τροφοδοτεί συνεχόμενη τάση στα επιμέρους τμήματα της πλακέτας με σταθεροποιητές τάσης.

Το 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο πραγματεύεται το στάδιο της ενίσχυσης του σήματος. Αναλυτικότερα εξηγεί την κατασκευή ενισχυτή οργάνων με τη χρήση τελεστικών ενισχυτών εξηγώντας την λειτουργία του.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή και της οθόνη LCD όπου θα εμφανίζονται τα αποτελέσματα και στο τέλος παρουσιάζεται ο κώδικας προγραμματισμού τους.

Το 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο δείχνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Το 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της κατασκευής της πλακέτας και των σχεδίων της.

Το 9<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων του κινητήρα του πρωτότυπου αυτοκινήτου.

Και τέλος στο 10<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

### 1.3 Επιστημονική συνεισφορά

Η κύρια συνεισφορά της παρούσας εργασίας είναι η υλοποίηση ενός συστήματος μέτρησης ενός βασικού μεγέθους για την ανάπτυξη και τη μελέτη των in-wheel κινητήρων, την ροπή. Με την κατασκευή αυτή θα μπορέσει η παρούσα, αλλά και οι μελλοντικές ομάδες του «Προμηθέα» να αξιολογήσουν και να αναπτύξουν την επίδοση των κινητήρων τους.



Σχήμα 2.1 Το όχημα

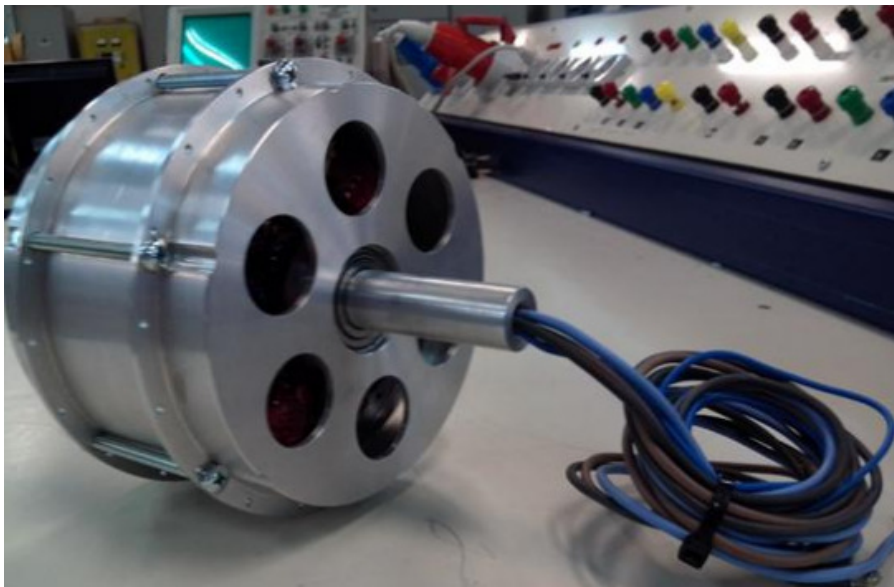
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η συνολική δομή των πειραματικών μετρήσεων του ηλεκτρικού κινητήρα. Συγκεκριμένα θα παρουσιαστεί ο κινητήρας και η κατάλληλη συνδεσμολογία του αισθητήρα.

### 2.1 Ο κινητήρας

Ο κινητήρας αποτελεί της βασική συνιστώσα του συστήματος κίνησης του πειραματικού μονοθέσιου ηλεκτρικού οχήματος. Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την μέτρηση ροπής ενός ηλεκτρικού κινητήρα, και ιδιαίτερα ενός κινητήρα μόνιμων επιφανειακών μαγνητών εξωτερικού δρομέα.

Ο κινητήρας που σχεδιάστηκε και ενσωματώθηκε στο ερευνητικό όχημα "Πυρφόρος" που θα συμμετάσχει στον διαγωνισμό εξοικονόμησης καυσίμου Shell Eco Marathon είχε κάποιες προδιαγραφές που έπρεπε να τηρηθούν. Απαραίτητα χαρακτηριστικά του τελευταίου πρέπει σε γενικές γραμμές να είναι το χαμηλό βάρος και η υψηλή απόδοση, χωρίς να μας ενδιαφέρουν παράγοντες όπως η υψηλή επίδοση ή η λειτουργία σε υψηλές στροφές.



Σχήμα 2.2 Ο κινητήρας

Το σύστημα κίνησης του Πυρφόρου, αποτελείται από έναν κινητήρα τροχό. Πιο συγκεκριμένα, ο στάτης του κινητήρα είναι αναρτημένος στο αμάξωμα και ο δρομέας είναι ένα σώμα με τον πίσω τροχό κίνησης.

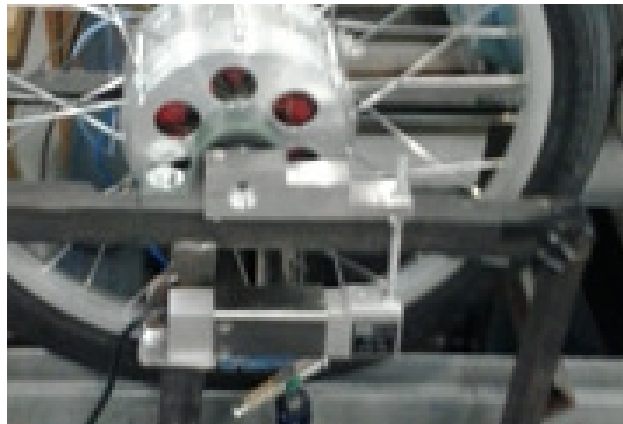
Ο κινητήρας αυτός είναι σχεδιασμένος στο εσωτερικό της πίσω ρόδας (in-wheel motor) για την μείωση απωλειών μετάδοσης. Συγκεκριμένα, ο σύγχρονος κινητήρας μονίμων επιφανειακών μαγνητών χαρακτηρίζεται από χαμηλή ισχύ (~ 220 W), χαμηλή ταχύτητα περιστροφής (~ 300 Σαλ), και ταυτόχρονα πολύ υψηλή απόδοση (> 90%), με δυνατότητα παροχής υψηλής ροπής εκκινήσεως.



Σχήμα 2.3 Ο κινητήρας ενσωματωμένος στο τροχό

## 2.2 Η συνδεσμολογία του αισθητήρα

Για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την ροπή του κινητήρα μας έπρεπε να βρούμε έναν τρόπο που θα ανταποκρινόταν στην ιδιαιτερότητα του in-wheel κινητήρα. Ένας τρόπος είναι η μέτρηση ροπής μέσω ενός εξαρτήματος που συνδέεται στον άξονα της ρόδας που δέχεται την δύναμη και την μεταφέρει στον αισθητήρα. Καθώς ο δρομέας περιστρέφεται του στάτη κρατάμε πακτωμένο τον άξονα της ρόδας και ταυτόχρονα συνδεδεμένο στο εξάρτημα που προαναφέρθηκε. Για να αναπαραστήσουμε στοιχεία αγώνα στην άκρη της ρόδας τοποθετήθηκε μια πέδη η οποία επέφερε μια αντίσταση στην κίνηση του τροχού και προκαλούσε μια ανάλογη αύξηση ροπής του κινητήρα. Έτσι ο κινητήρας εν λειτουργία περιστρέφει την ρόδα και ο άξονας αντιστέκεται, μεταφέροντας στην αντίδραση αυτή στον αισθητήρα.



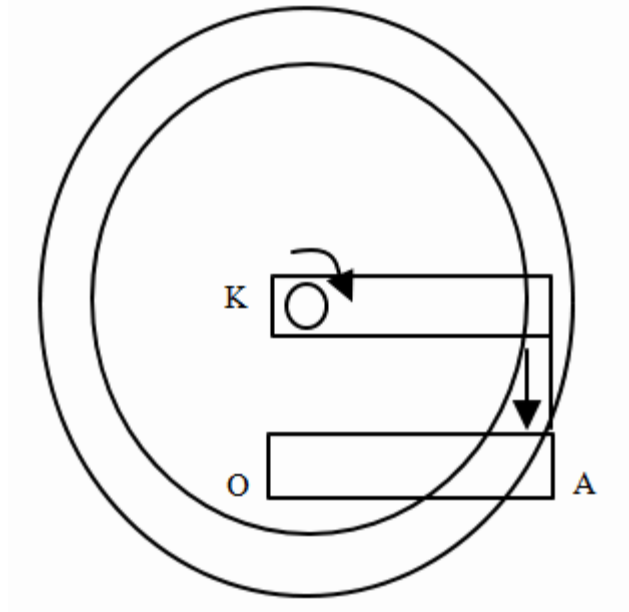
Σχήμα 2.4 Ο αισθητήρας συνδεδεμένος στον κινητήρα

Ο αισθητήρας υπολογίζει την δύναμη που δέχεται και επιστρέφει στην έξοδο του ένα σήμα τάσης, το οποίο στην συνέχεια θα ενισχυθεί, θα φιλτραρισθεί, θα γίνει ψηφιακό και θα παρουσιαστεί σε μία οθόνη LCD.

## Κεφάλαιο 2 Η δομή της πειραματικής διάταξης

Η δύναμη που δέχεται ο αισθητήρας εφαρμόζεται σε σημείο το οποίο δεν είναι παράλληλο του κέντρου του άξονα, έτσι πρέπει να υπολογιστεί η απόσταση για να βρεθεί η ροπή.

Έχουμε το σχήμα



Σχήμα 2.5 Σχέδιο σύνδεσης

Η ροπή ισούται με  $T = \text{Newton} * \text{meters}$  και η απόσταση που θα μετρήσουμε είναι η προβολή της ευθείας, μεταξύ του κέντρου του άξονα και του σημείου εφαρμογής της δύναμης(KA), πάνω στην ευθεία που δημιουργείται από τα σημεία OA.

Η απόσταση OA είναι ίση με 9,7cm και έτσι η ροπή υπολογίζεται ως  $T = \text{Newton} * 0,097$ .

Ο αισθητήρας μας υπολογίζει βάρος σε kg οπότε αρκεί να τα μετατρέψουμε με την εξής σχέση  $1\text{Kg}=9,8\text{N}$ . Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζετε η πλήρης μετατροπή στο επιθυμητό μας σήμα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΡΟΠΗΣ

### 3.1 Ηλεκτρονικοί Αισθητήρες

#### 3.1.1 Εισαγωγή

Με τον όρο αισθητήρες περιγράφονται όλες εκείνες οι συσκευές που μετρούν μια φυσική ποσότητα και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικό -συνήθως- σήμα. Στη βιβλιογραφία εμφανίζονται πολλοί τρόποι κατηγοριοποίησης των αισθητήρων, τρεις από τους οποίους αναφέρονται στη συνέχεια. Ο πρώτος αφορά το τι μπορεί να μετρήσει ένας αισθητήρας με πιο σημαντική διάκριση αυτή μεταξύ των φυσικών και χημικών αισθητήρων. Οι φυσικοί αισθητήρες ελέγχουν φυσικά μεγέθη όπως θέση, μάζα, ρεύμα, χρόνο και σχετικά τους μεγέθη ενώ οι χημικοί ελέγχουν την παρουσία διαφορετικών αερίων σε συγκεκριμένη ατμόσφαιρα. Η δεύτερος τρόπος σχετίζεται με τα υλικά στις φυσικές ιδιότητες των οποίων βασίζεται η λειτουργία του αισθητήρα, με κύριες κατηγορίες τους αισθητήρες με αγωγή, ημιαγωγή, διηλεκτρικά, μαγνητικά και υπεραγωγή υλικά. Τέλος η τρίτος τρόπος κατηγοριοποίησης αναφέρεται στη χρήση του αισθητήρα με σημαντικότερες κατηγορίες τους βιομηχανικούς, τους ιατρικούς, στρατιωτικούς, περιβαλλοντικούς αισθητήρες καθώς και τους αισθητήρες μεταφοράς και αυτοματισμού.

#### 3.1.2 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Χαρακτηριστικά των αισθητήρων Αυτές οι διατάξεις που περιγράφηκαν αποτελούν τις πιο ευρέως διαδεδομένες συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της μετατόπισης. Το φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η λειτουργία κάθε αισθητήρα καθορίζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που εμφανίζει αυτός απέναντι στις υπόλοιπες αισθητήριες διατάξεις. Για την επιλογή του κατάλληλου οργάνου για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, σημασία έχει η γνώση των χαρακτηριστικών του αισθητήρα που αποτυπώνουν την απόδοση και την συμπεριφορά του κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Τα σημαντικότερα από αυτά τα χαρακτηριστικά για τα γεωτεχνικά όργανα περιγράφονται στη συνέχεια.

- Συμβατότητα
- Εύρος λειτουργίας
- Αβεβαιότητα

- Ακρίβεια
- Επαναληψιμότητα
- Διακριτότητα
- Ευαισθησία
- Υστέρηση
- Θόρυβος
- Διαστάσεις
- Γραμμικότητα

Η συμβατότητα είναι ένα μέγεθος που περιγράφει κατά πόσον η εγκατάσταση του οργάνου θα επηρεάσει την τιμή της παραμέτρου που πρόκειται να μετρήσει. Ιδανικό από άποψη συμβατότητας θεωρείται ένα όργανο που δεν την επηρεάζει καθόλου.

Το εύρος λειτουργίας ενός αισθητήρα ορίζεται από τα όρια, εντός των οποίων μπορεί να λειτουργεί αξιόπιστα. Συνήθως, εκφράζεται με την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή που μπορεί να μετρήσει. Επιπλέον, ως εύρος λειτουργίας αναφέρεται το θερμοκρασιακό εύρος, το εύρος τιμών πίεσης ή το εύρος τιμών υγρασίας, εννοώντας την περιοχή τιμών θερμοκρασίας, πίεσης ή υγρασίας αντίστοιχα, στην οποία είναι δυνατή η χρήση του αισθητήρα.

Η ακρίβεια ενός αισθητήρα καθορίζεται από το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να περιέχεται στην ένδειξή του. Στην πράξη όλες οι συσκευές παράγουν σφάλμα στις μετρήσεις τους και το ζητούμενο είναι αυτό το σφάλμα να είναι το μικρότερο δυνατό.

Επαναληψιμότητα ονομάζεται ο βαθμός στον οποίο μια συσκευή παρέχει το ίδιο αποτέλεσμα τροφοδοτούμενος με την ίδια είσοδο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Η διακριτότητα ή διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα καθορίζεται από το μικρότερο διάστημα που μπορεί να μετρηθεί από αυτόν. Όσο μεγαλύτερη διακριτότητα διαθέτει μία αισθητήρια διάταξη, τόσο μικρότερο βήμα μετράει.

Η ευαισθησία ενός οργάνου είναι η ελάχιστη μεταβολή της εισόδου του που είναι σε θέση να δώσει μεταβολή στην έξοδό του.



Η υστέρηση προκαλεί διαφορές στην έξοδο ενός αισθητήρα όταν η κατεύθυνση μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί. Έτσι παράγεται σφάλμα και επηρεάζεται η ακρίβεια της συσκευής.

Θόρυβος δημιουργείται κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης από εξωτερικούς παράγοντες, όπως γεινίαση με πηγές τάσης υψηλής συχνότητας, πηγές εκπομπής ήχου κ.α.. Η βάση λειτουργίας κάθε αισθητήρα καθορίζει κατά πόσο επηρεάζεται η ακρίβειά του και η διακριτότητά του λόγω θορύβου.

Οι διαστάσεις ενός αισθητήρα αναφέρονται στο μέγεθός του.

Γραμμικότητα ονομάζεται ο βαθμός στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου ως προς την είσοδο του αισθητήρα προσεγγίζει μια ευθεία γραμμή. Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός για μια περιοχή τιμών.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται δεν μπορούν συνήθως να συνδυάσουν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε ικανοποιητικά επίπεδα για το χρήστη. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας μπορεί να διαθέτει μεγάλη ακρίβεια και ευαισθησία, αλλά να έχει υψηλό κόστος. Για αυτό το λόγο προτείνεται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία η κατασκευή ενός μαγνητικού αισθητήρα μετατόπισης, που βασίζεται στη μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης και τις ιδιότητες που έχει. Ένας τέτοιος αισθητήρας επιδεικνύει ικανοποιητικές επιδόσεις στα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν και μάλιστα δεν έχει υψηλό κόστος λόγω των υλικών που απαιτούνται για την κατασκευή του.

## 3.2 Load cells

### 3.2.1 Εισαγωγή στα Load cells

Καθημερινά χρησιμοποιούνται από τους ανθρώπους οι ηλεκτρονικές ζυγαριές ή οι μηχανές ζύγισης. Από οποιοδήποτε μανάβικο μέχρι και το πιο εκλεπτυσμένο χρυσοχοείο τα αντικείμενα προς πώληση ζυγίζονται από ηλεκτρονικές μηχανές ζύγισης.

Στην καρδιά των ηλεκτρονικών ζυγαριών βρίσκεται ένας αισθητήρας που ονομάζεται κυψελίδα φορτίου (load cell). Αυτοί οι αισθητήρες μετράνε την εφαρμογή πίεσης (ή βάρους) των αντικειμένων και το ηλεκτρικό κύκλωμα επεξεργάζεται την έξοδο του αισθητήρα και εμφανίζει το αποτέλεσμα.

Τα load cells είναι πολύ υψηλής ακρίβειας αισθητήρες που προσφέρουν πληροφορίες που άλλες τεχνολογίες δεν μπορούν.



Σχήμα 3.1 Αισθητήρας Load Cell

Η χρήση των load cells δεν περιορίζεται στις ηλεκτρονικές ζυγαριές υπάρχουν μηχανές δοκιμών φορτίων, βιομηχανικές ζυγαριές, ροόμετρα κ.α., αν και σπάνια ερχόμαστε σε άμεση επαφή με load cells. Με λίγα λόγια οι κυψελίδες φορτίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου χρειάζεται η μέτρηση πίεσης.

### 3.2.2 Χαρακτηριστικά των load cells

Η κυψελίδα φορτίου περιγράφεται ως “μετρητικός μηχανισμός απαραίτητος για ηλεκτρονικές ζυγαριές που εμφανίζουν αποτελέσματα σε ψηφία” . Παρόλα αυτά δεν περιορίζεται μόνον εκεί η εφαρμογή της.

Η κυψελίδα φορτίου είναι ένας παθητικός αισθητήρας που μετατρέπει την πίεση εφαρμογή πίεσης σε ηλεκτρικό σήμα.

Διάφορες χρήσεις των load cells με διαφορετικές αρχές λειτουργίας :

- Load cells βασισμένα στην πίεση ροής
- Load Cells βασισμένα στην ελαστικότητα
- Και τα πιεζοηλεκτρικά Load Cells

Όμως τα μόνα load cells που έχουν επιβληθεί είναι αυτά που βασίζονται στα strain gages. Οι λόγοι που έχουν επιβληθεί έναντι των άλλων στις εφαρμογές είναι τα παρακάτω χαρακτηριστικά τους :

1. Υψηλή ακρίβεια και γραμμικότητα στις μετρήσεις.
2. Μικρή μεταβλητότητα στις θερμοκρασιακές εναλλαγές.
3. Μικρό μέγεθος σε σχέση με άλλα είδη load cells.
4. Μεγάλο χρόνο ζωής λόγω της έλλειψης κινούμενων εξαρτημάτων μηδενίζοντας έτσι την οποιαδήποτε τριβή.
5. Ευκολία στην παραγωγή λόγω των ελάχιστων εξαρτημάτων.
6. Εξαιρετικά χαρακτηριστικά σε συνθήκες καταπόνησης.

### 3.2.3 Η Αρχή της μέτρησης

Τα Load cells αρχικά αποτελούνται από ένα είδος ελατηρίου και από strain gauge. Το ελατήριο τεντώνει το strain gauge λόγω του εφαρμοσμένου φορτίου και το strain gauge μεταβάλλει την τιμή της αντίστασής του αναλογικά με το εκάστοτε φορτίο.

#### 1. Το υλικό του ελατηρίου

Το ελατήριο αποτελεί το κύριο μέρος του αισθητήριου. Το στοιχείο αυτό είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να προκαλεί ένταση ανάλογη του φορτίου. Όταν εφαρμόζεται μια εξωγενής δύναμη, μια μοριακή δύναμη δημιουργείται μεταξύ των μορίων που συγκροτούν τον αισθητήρα, δημιουργώντας μια εσωτερική δύναμη που αντιστέκεται στην παραμόρφωση που τείνει να προκαλέσει η εξωτερική εφαρμοσμένη δύναμη. Όταν η εξωτερική δύναμη έρθει σε ισορροπία με την εσωτερική τότε η παραμόρφωση του αισθητήρα παύει να υφίσταται.

Σε αυτό το σημείο η εσωτερική δύναμη ανά μονάδα εμβαδού που δημιουργείται στη διατομή του αισθητήρα είναι η πίεση και η παραμόρφωση των διαστάσεων ανά μονάδα αρχικών διαστάσεων του αισθητήρα είναι η τάση. Το ελατήριο προκαλεί τάση ανάλογη με την εφαρμοσμένη δύναμη.

Για να ενισχύσουμε την επίδοση του αισθητήρα, τα χαρακτηριστικά του ελατηρίου είναι πολύ σημαντικά.

Ο ερπυσμός, το φαινόμενο κατά το οποίο σε στερεό σώμα στο οποίο ασκείται μια σταθερή δύναμη εκδηλώνεται αργή και συνεχής παραμόρφωση παρότι η τάση η οποία το καταπονεί είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού, πρέπει να είναι μικρός.

- Το υλικό πρέπει να έχει μεγάλη τιμή αναλογικού ορίου που εγγυείται το μεγάλο εύρος γραμμικότητας.

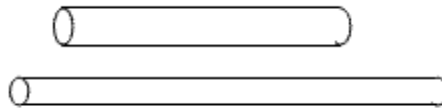
- Κοσμική αλλαγή, η παραμόρφωση αντικειμένου λόγω μόνιμης τάσης με την πάροδο του χρόνου, πρέπει να είναι μικρή.

Η αντίσταση σε κρούση πρέπει να είναι μεγάλη

Χάλυβας νικελίου-χρωμίου-μολύβδου, ανοξείδωτος χάλυβας και ανοξείδωτο αλουμίνιο είναι μερικά από τα υλικά που πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις.

## 2. Strain Gauge

Τα strain gages χρησιμοποιούν την αρχή αλλαγής τιμής της αντίστασης πολλών μεταλλικών στοιχείων όταν αυτά επιμηκυνθούν ή συσταλθούν.

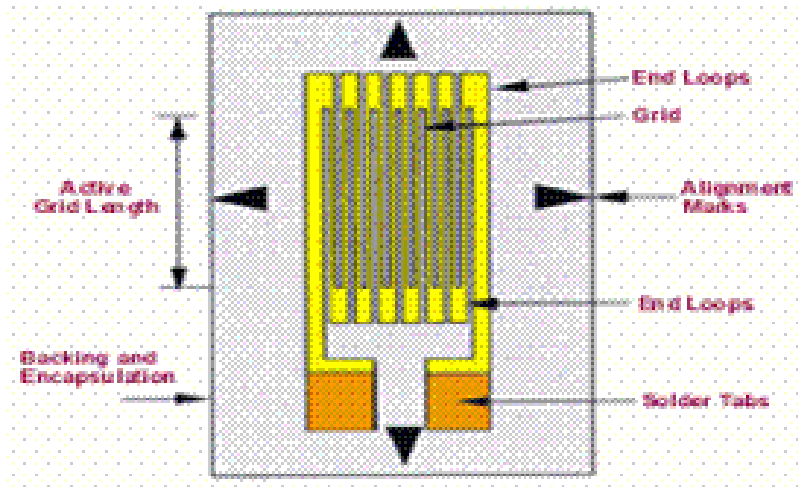


Εφόσον η αντίσταση εξαρτάται από το μήκος της αντίστασης και της διατομής του υλικού, το ίδιο μεταλλικό σύρμα θα έχει διαφορετική ηλεκτρική αντίσταση σύμφωνα με το αν συστέλλεται ή αν επιμηκύνεται. Όσο μεγαλώνει το μήκος του σύρματος τόσο μεγαλώνει και η αντίστασή του. Το strain gauge χρησιμοποιεί αυτή την αρχή και ορίζεται ως μια συσκευή που η αντίστασή της αλλάζει σύμφωνα με το φορτίο.

Το μεταλλικό strain gauge αποτελείται από ένα πολύ λεπτό σύρμα, ή αλλιώς ένα μεταλλικό φύλλο, διαταγμένο σε μορφή πλέγματος.

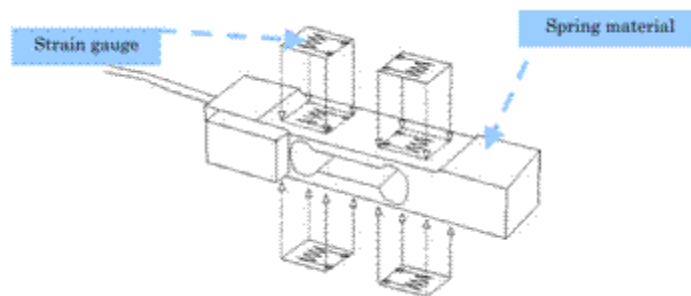
Η διάταξη του πλέγματος αυτού μεγιστοποιεί το ποσό του μεταλλικού υλικού που υπόκειται σε τάνυση. Η διατομή του πλέγματος ελαχιστοποιείται για να μειωθεί το φαινόμενο της διατμητικής τάνυσης και της τάνυσης Poisson. Το πλέγμα είναι συνδεδεμένο σε ένα λεπτό τοίχωμα, που ονομάζεται carrier, που είναι άμεσα συνδεδεμένο στο δείγμα προς εξέταση Έτσι η τάνυση που δέχεται το δείγμα προς εξέταση μεταδίδεται κατευθείαν στο strain gauge με αποτέλεσμα την γραμμική αλλαγή στην τιμή της αντίστασής του.

Τα strain gauges είναι διαθέσιμα στο εμπόριο με τιμές αντιστάσεων που κυμαίνονται από 30 έως 3000 Ω, με τιμές 120,350 και 1000Ω να είναι οι πιο συνηθισμένες

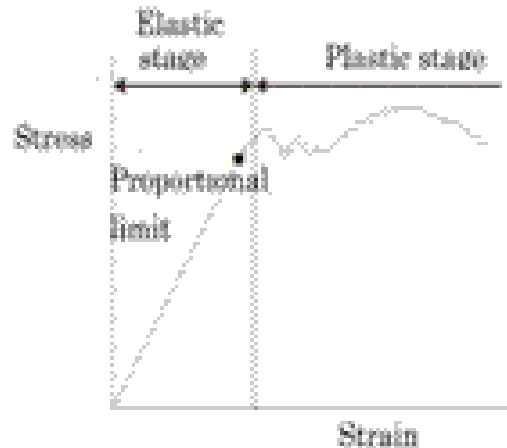


Σχήμα 3.2 Strain gauge

Η κυψελίδα φορτίου δημιουργείται με την σύνδεση των strain gauges με το υλικό του ελατηρίου. Για την αποδοτική μέτρηση της τάνυσης τα strain gauges είναι συνδεδεμένα στα σημεία του ελατηρίου που η τάνυση είναι μέγιστη. Όταν η δύναμη που προκαλείται από το εφαρμοσμένο φορτίο είναι χαμηλότερη από το αναλογικό όριό του, τότε η τάνυση μεταβάλλεται γραμμικά με την πίεση του φορτίου και η αντίσταση μεταβάλλεται γραμμικά με την παραμόρφωση.



Σχήμα 3.3 κυψελίδα φορτίου



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ελαστικότητας

Η σχέση της αλλαγής στην τάνυση με την αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση διέπεται από τον συντελεστή Gage, που ορίζεται ως ο λόγος της αλλαγής της αντίστασης ανά μονάδα αντίστασης προς την αλλαγή στο μήκος του strain gauge ανά μονάδα μήκους. Έτσι :

Αλλαγή τιμής αντίστασης = Αντίσταση Gage \* Gage συντελεστής \* τάνυση.  
Ο συντελεστής Gage υπολογίζεται για τα μεταλλικά strain gauges περίπου 1,5-2.

### 3. Σύνδεση των strain gauges

Για την σύνδεση των strain gauges bonding, υλικό συγκόλλησης πρέπει να μεταδίδει αξιόπιστα την τάνυση από το ελατήριο στο strain gauge.

Θεμελιώδη χαρακτηριστικά του υλικού συγκόλλησης είναι :

Το υλικό πρέπει να είναι αρκετά δυνατό έτσι ώστε να αντέχει τις αλλαγές στην θερμοκρασία και την υγρασία.

Η συγκόλληση πρέπει να έχει επαρκή απομόνωση από εξωτερικές θερμοκρασίες και υγρασία.

Ο Βαθμός σμίκρυνσης πρέπει να είναι μικρός καθώς σκληραίνει.

Υλικά συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται είναι :

1. Κόλλες Solvent-vaporization, που σκληραίνουν σε θερμοκρασία δωματίου και κολλάνε εύκολα χάρτινα strain gauges.
2. Κόλλες Contact-curing οι οποίες σκληραίνουν σε λίγα λεπτά.
3. Εποξικές κόλλες.
4. Κόλλες φαινόλης (οι οποίες θέλουν μεγάλη πίεση κατά την εφαρμογή τους και μεγάλο χρονικό διάστημα για να σκληρύνουν).

#### 4. Ταξινόμηση κατά σχήμα ελατηρίου

Πέντε συνηθισμένα σχήματα load cell είναι :

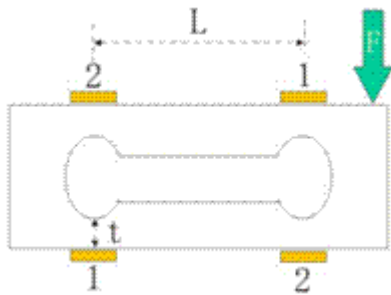
1. Σχήμα στύλου



Χρησιμοποιεί απλή κατασκευή και χρησιμοποιεί 2 strain gauge, το ένα σε διαμήκη και το άλλο σε εγκάρσια κατεύθυνση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μέτρηση δυνάμεων τάνυσης και πίεσης.



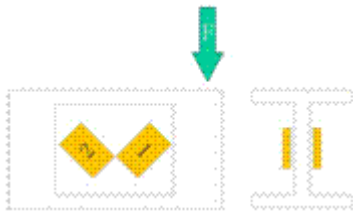
## 2. Roberval τύπος



Αυτά τα load cells χρησιμοποιούν την κάμψη ως αρχή της μέτρησης. Όταν μια δύναμη  $F$  εφαρμόζεται στον Roberval τύπο αισθητήρα, το strain gauge 1 συστέλλεται ενώ ταυτόχρονα το 2 τεντώνεται. Η τιμή της τάνυσης εξαρτάται από το μήκη  $L$ ,  $t$  και το πλάτος της δοκού.

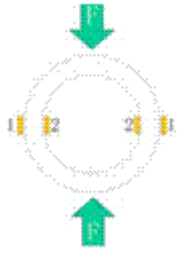
Η κατασκευή αυτή είναι κατάλληλη για υψηλής ακρίβειας load cells. Οι δοκοί κάμψης προσφέρουν υψηλά επίπεδα τάνυσης σε σχετικά μικρές δυνάμεις, πράγμα το οποίο τα καθιστά ιδανικά για μικρού φορτίου load cells. Τυπικά εύροι μετρήσεων κυμαίνονται ανάμεσα σε 1Kg με 1T, και δεν ενδείκνυνται για μεγάλα φορτία.

## 3. Διάτμητοι Τύποι



Τα Strain gauges τοποθετούνται σε γωνία  $45^\circ$  πάνω στον ουδέτερο άξονα του load cell. Οι τύποι αυτοί μπορούν να γίνουν μικρότεροι από Roberval τύπου με την ίδια αντοχή σε φορτία. Είναι ανθεκτικά σε εγκάρσια φορτία και εύκολα γίνετε υψηλής ακρίβειας. Οι μετρήσεις του κυμαίνονται από 100Kg μέχρι 20T .

#### 4. Τύποι δακτυλίου



Οι τύποι δακτυλίου είναι υψηλής ακρίβειας και πρωτίστως έχουν ενδιάμεσο εύρος φορτίου από 500Kg μέχρι 20T.

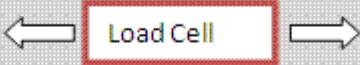
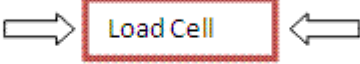
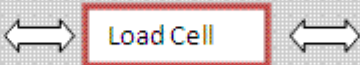
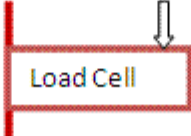
#### 5. Τύπου διαφράγματος



Οι τύποι αυτοί έχουν στρογγυλό σχήμα. Το πρώτιστο πλεονέκτημά χρησιμοποίησής τους είναι ότι το ύψος του μπορεί να μειωθεί και είναι ανθεκτικό σε εγκάρσια φορτία.

3.2.4 Ταξινόμηση load cell

*Κατά κατεύθυνση φορτίου*

| Sl No | Type             | Loading Direction  | Remarks   |
|-------|------------------|--|---|
| 1     | Tension type     |  | Load Cells responds only to tensile loads               |
| 2     | Compressive type |  | Load Cells responds only to compressive loads           |
| 3     | Universal type   |  | Load Cells responds to both compressive & tensile loads |
| 4     | Bending type     |  | Load Cells responds to bending                          |

Κατά εξωτερικό σχήμα

| Sl No | Type                           | Outer Shape   |
|-------|--------------------------------|---|
| 1     | Beam type                      |   |
| 2     | S type                         |   |
| 3     | Canister type OR Column type   |   |
| 4     | Diaphragm type OR Pancake type |  |

Κατά στεγανότητα αέρα

| Sl No | Type                | Protection  |
|-------|---------------------|---|
| 1     | Hermetically Sealed | This type encloses the areas of the strain gauges within a case (filled with inactive gas) and shields them from the outside air. |
| 2     | Open                | Only a soft resin or rubber is used as the temperature-proof material   |
| 3     | Explosion Proof     | These are encased for protection against flames   |

### 3.2.5 Προδιαγραφές των load cell

#### 1. Ονομαστικό φορτίο

Το ονομαστικό φορτίο ορίζεται ως το μέγιστο φορτίο που μπορεί να μετρήσει ο αισθητήρας και να πληροί τις προδιαγραφές του. Στο εκάστοτε φορτίο που μετριέται το αποτέλεσμα της μέτρησης δεν πρέπει να επηρεάζεται από σφάλμα μεγαλύτερο από το επιτρεπτό.

#### 2. Ονομαστική τιμή εξόδου

Η ονομαστική τιμή εξόδου είναι η διαφορά μεταξύ της μέτρησης σε κενό φορτίο και της μέτρησης στο ονομαστικό φορτίο. Γενικά η έξοδος μετριέται σε mV/V ή αλλιώς “span”.

#### 3. Ασφάλεια υπερφόρτωσης

Η ασφάλεια υπερφόρτωσης είναι το μέγιστο φορτίο που μπορεί να επιβληθεί του αισθητήρα χωρίς να του προκαλέσει μόνιμη παραμόρφωση στα χαρακτηριστικά. Συνήθως ορίζεται ως ποσοστό του ονομαστικού φορτίου π.χ. 150% το ονομαστικό φορτίο.

#### 4. Εύρος αντιστάθμισης θερμοκρασίας

Το εύρος αντιστάθμισης θερμοκρασίας είναι το εύρος στο οποίο η ονομαστική τιμή εξόδου αντισταθμίζεται με το σημείο ισορροπίας για να αντεπεξέλθει ο αισθητήρας στις προδιαγραφές του.

#### 5. Σημείο ισορροπίας

Το σημείο ισορροπίας είναι η τάση εξόδου του αισθητήρα όταν σε αυτό δεν εφαρμόζεται φορτίο. Συνήθως εκφράζεται σε ποσοστό της ονομαστικής τιμής εξόδου. Π.χ.  $10 \pm 5\%$  της ονομαστικής τιμής εξόδου.

#### 6. Θερμοκρασιακή επίδραση στο σημείο ισορροπίας

Η θερμοκρασιακή επίδραση στο σημείο ισορροπίας είναι η μετακίνηση του σημείου ισορροπίας λόγω θερμοκρασιακών αλλαγών. Εκφράζεται ως ποσοστό της ονομαστικής τιμής εξόδου. Π.χ.  $0.04\%$  της ονομαστικής τιμής εξόδου/ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

7. Θερμοκρασιακή επίδραση στην ονομαστική τιμή εξόδου

Είναι η αλλαγή της ονομαστικής τιμής εξόδου λόγω της θερμοκρασίας.

8. Μη γραμμικότητα

Είναι η μέγιστη παρέκκλιση από την γραμμή που ενώνει το σημείο ισορροπίας με την ονομαστική τιμή εξόδου.

9. Σφάλμα υστέρησης

Το σφάλμα υστέρησης είναι η μέγιστη διαφορά μεταξύ της εξόδου καθώς ένα φορτίο αυξάνεται και μειώνεται.

10. Συνδυαστικό σφάλμα

Το συνδυαστικό σφάλμα είναι η μέγιστη παρέκκλιση της εξόδου από τη γραμμή ένωσης του σημείου ισορροπίας με την ονομαστική τιμή εξόδου καθώς ένα φορτίο αυξομειώνεται. Εκφράζεται σε ποσοστό της ονομαστικής τιμής εξόδου.

11. Συνιστώμενη/Μέγιστη τάση τροφοδοσίας

Η συνιστώμενη/μέγιστη τάση τροφοδοσίας είναι η τάση που τροφοδοτεί τον αισθητήρα μας. Συνήθως είναι 10V dc.

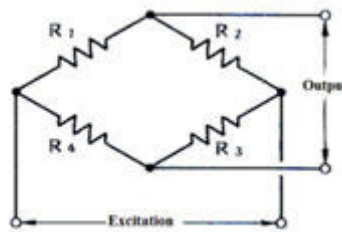
12. Αντίσταση μόνωσης

Η αντίσταση μόνωσης είναι η άμεση αντίσταση μεταξύ του load cell και του κυκλώματός του. Π.χ. 500MΩ/DC .

### 3.2.6 Διαμόρφωση του load cell

Στην εφαρμογή εξωτερικής δύναμης, δυνάμεις που δημιουργούνται στο ελατήριο μετατρέπονται σε αλλαγή αντίστασης των strain gauge. Καθώς οι μεταβολές αυτές είναι μικρές χρησιμοποιείται μια συνδεσμολογία που ονομάζεται γέφυρα Wheatstone, το κύκλωμα αυτό ανιχνεύει μικρές μεταβολές στην τιμή της αντίστασης.

Αποτελείται από 4 αντιστάσεις όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 3.5 Γέφυρα Wheatstone

Ανάλογα με τα πόσα strain gauge χρησιμοποιούνται στο load cell υπάρχουν και οι παρακάτω 3 ταξινομήσεις :

#### 1. Γέφυρα 1/4

Στη οποία γέφυρα μόνο μία από τις 4 αντιστάσεις είναι strain gauge ενώ οι υπόλοιπες 3 βρίσκονται το εσωτερικό κύκλωμα του αισθητήρα.

#### 2. Μισή γέφυρα

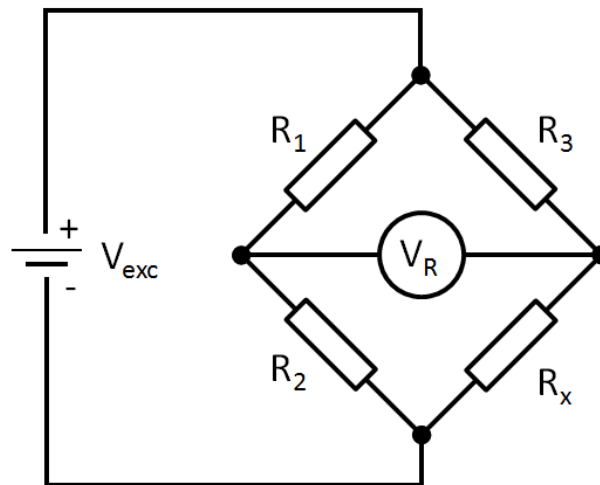
Σε αυτή την συνδεσμολογία υπάρχουν 2 strain gauges ενώ οι άλλες 2 είναι απλές αντιστάσεις στο κύκλωμα.

#### 3. Ολόκληρη γέφυρα

Σε αυτή την διάταξη και οι 4 αντιστάσεις είναι strain gauge και διεγείρονται από τις δυνάμεις τάνυσης, προσφέροντας την μέγιστη δυνατή ευαισθησία καθώς και δεν επηρεάζεται από αλλαγές στην θερμοκρασία.

### 3.2.7 Η Γέφυρα Wheatstone

Το κύκλωμα της γέφυρας Wheatstone αποτελείται από μια πηγή τάσης (ή ρεύματος) και τέσσερις αντιστάτες  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_x$  συνδεδεμένους όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Ουσιαστικά πρόκειται για δύο παράλληλους διαιρέτες τάσεων, ο πρώτος αποτελείται από τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  και ο δεύτερος από τις υπόλοιπες δύο. Στο παραπάνω σχήμα της γέφυρας Wheatstone η  $R_2$  είναι μια μεταβλητή αντίσταση και η  $R_x$  είναι το strain gauge μας. Με την οποιαδήποτε αλλαγή στην τιμή της αντίστασης  $R_x$  αλλάζει και η τάση εξόδου  $V_R$  αναλόγως.

Η γέφυρα Wheatstone αποτελεί βασικό κύκλωμα σε διάφορα συστήματα μετρήσεων με πολλές εφαρμογές, μία από τις οποίες είναι και οι μετρήσεις αντιστάσεων στην περιοχή  $1 \Omega$  μέχρι  $1 M\Omega$ .

Πριν από οποιαδήποτε μέτρηση πρέπει να ισορροπηθεί το κύκλωμά μας, δηλαδή πρέπει να μηδενιστεί η τιμή της εξόδου σε κατάσταση ηρεμίας με την βοήθεια του ποτενσιόμετρου  $R_2$ . Αυτό εργοστασιακά πριν κυκλοφορήσει στο εμπόριο ο αισθητήρας.



### 3.2.8 Επιλογή των load cell

Πριν επιλεγθεί κάποιο load cell πρέπει να ληφθούν υπόψη μερικά πράγματα.

- Φορτίο

Πέρα από το προς μέτρηση φορτίο πρέπει να δοθεί σημασία στον συντελεστή κρούσης και στο συντελεστή κέντρου μάζας του φορτίου. Επίσης το φορτίο που μπορεί να μετρήσει το load cell πρέπει είναι τουλάχιστον κατά 10% μεγαλύτερο από το προς μέτρηση φορτίο.

- Δυναμικό εύρος

Αν επιλεγθεί ένα load cell με μεγάλη ικανότητα φορτίου τότε μπορεί να μην μετράει με ακρίβεια μικρά φορτία. Σαν γενικός κανόνας τα φορτία πρέπει να βρίσκονται μεταξύ του 10% και του 90% του ονομαστικού φορτίου.

- Σχήμα

Το σχήμα του load cell πρωτίστως εξαρτάται από τη βάση εγκατάστασης της εκάστοτε εφαρμογής. Για παράδειγμα ένα σχήμα τύπου S είναι κατάλληλο για εφαρμογές που η δύναμη ασκείται και στις 2 άκρες, ενώ ένα διαφραγματικού τύπου είναι κατάλληλο για εφαρμογή δύναμης στην μία μόνο άκρη.

Πέρα από αυτά άλλες προδιαγραφές όπως η ονομαστική έξοδος, η θερμοκρασιακή αλλαγή, σφάλματα και βαθμός προστασίας είναι σημαντικά και δεν πρέπει να παραληφθούν.

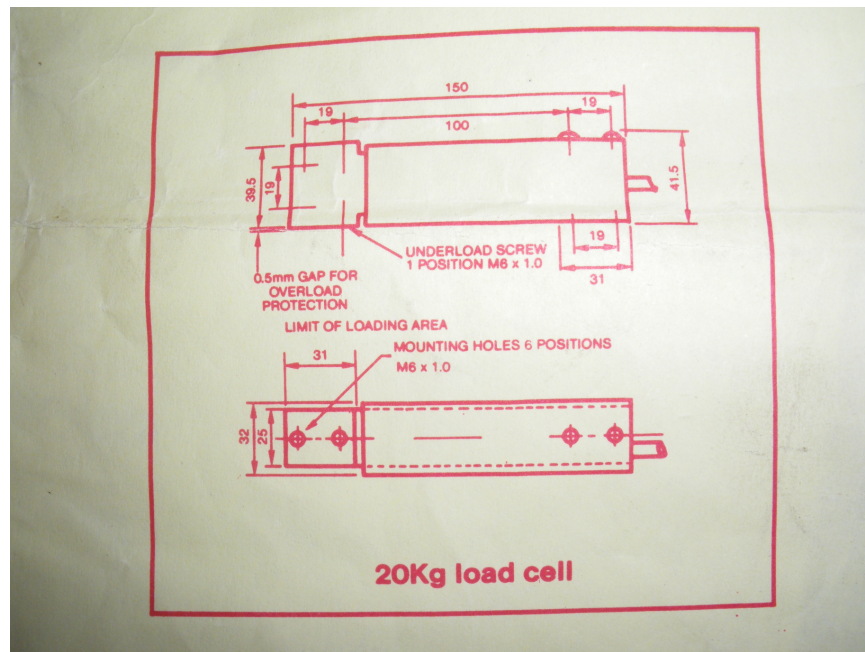
### 3.2.9 Οφέλη

Τα Οφέλη είναι :

- Τα Load cells χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανίες για να μετρήσουν μάζα ή βάρος ηλεκτρονικά. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν οποτεδήποτε.
- Τα Load cells δίνουν γρήγορες και ακριβείς μετρήσεις.
- Συγκρίνοντας με άλλους αισθητήρες τα load cells είναι οικονομικότερα και με μεγάλο χρόνο ζωής.

### 3.2.10 Η τελική επιλογή αισθητήρα

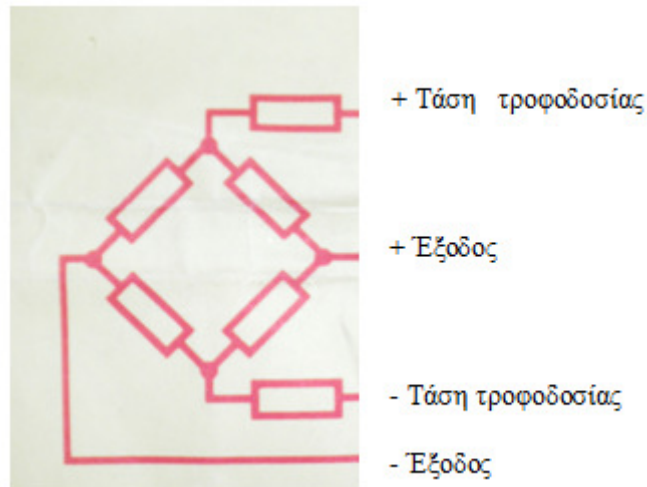
Τελικά χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας 632-742 της εταιρείας RS. Ο αισθητήρας αυτός είναι τύπου ράβδου με τα χαρακτηριστικά των διαστάσεων του παρακάτω :



Σχήμα 3.4 Διαστάσεις αισθητήρα

Η ράβδος αυτή βιδώνεται στην μία άκρη της, σταθερά σε μία βάση ενώ στην άλλη άκρη ξεπροβάλλει μία ντίζα η οποία δέχεται την μετρούμενη δύναμη. Κάπου ενδιάμεσα καλύπτεται με μεταλλικό φύλλο αλουμινίου η διάταξη των strain gauges έτσι ώστε να μπορεί να κάμπτεται σύμφωνα με τις δυνάμεις που δέχεται ο αισθητήρας.

Παρακάτω βλέπουμε τις συνδέσεις του αισθητήρα :



Σχήμα 3.4 Συνδεσμολογία αισθητήρα

Βλέπουμε ότι τροφοδοτείται από 2 σημεία η διάταξη της γέφυρας Wheatstone και ότι η έξοδος της είναι η διαφορά τάσης των 2 σημείων.

Μέγιστες τιμές :

- Μέγιστη τροφοδοσία 15V dc
- Μέγιστη υπερφόρτωση 150%
- Εύρος θερμοκρασίας -10 έως +50° C
- Παραμόρφωση ράβδου 0,5mm

Τυπικές τιμές

- Τροφοδοσία 10 V dc
- Έξοδος 2mV/V  $\pm$  10%
- Αντίσταση εισόδου 415 $\pm$ 15  $\Omega$
- Αντίσταση Εξόδου 350 $\pm$ 3  $\Omega$

Η επιλογή του αισθητήρα αυτού αποδείχθηκε σωστή καθώς πληροί τις προϋποθέσεις που ζητούσαμε για την παρούσα διπλωματική εργασία μας και όπως θα δούμε στη συνέχεια παρέχει καλά χαρακτηριστικά στις μετρήσεις.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Η ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το κομμάτι επεξηγείται η τροφοδοσία της συνολικής πλακέτας .

Όλη η πλακέτα τροφοδοτείται από το δίκτυο μέσω μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής που χρησιμοποιείται είναι 2x9Volt. Για τις επιμέρους τροφοδοσίες του κυκλώματος γίνεται η χρήση ρυθμιστών τάσης (voltage regulators) .

Ειδικότερα χρειαζόμαστε να τροφοδοτήσουμε τα εξής :

1. Μικροελεγκτή με τάση 5V .
2. Οθόνη LCD με τάση 5V.
3. 4 τελεστικούς ενισχυτές με τάση +9V και -9V.
4. Αισθητήρα ροπής με +5V και -5V .



## 4.1 Μετασχηματιστές

### 4.1.1 Εισαγωγή

Είναι συνηθισμένο φαινόμενο να χρειάζεται η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας με τάση διαφορετική από αυτή που έχει το ηλεκτρικό δίκτυο. Στο συνεχές ρεύμα αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με μία αντίσταση η πτώση τάσης στα άκρα της οποίας δίνει την απαραίτητη χαμηλή τάση τροφοδοσίας μίας συσκευής με μικρότερη τάση. Το βασικό μειονέκτημα στην περίπτωση αυτή είναι οι μεγάλες απώλειες ενέργειας λόγω της θερμότητας που αναπτύσσεται στην αντίσταση. Σε σοβαρές περιπτώσεις θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ζεύγος γεννήτριας-κινητήρα με τον κινητήρα να τροφοδοτείται από το δίκτυο και την γεννήτρια να δίνει την απαραίτητη τάση με μεταβολή της έντασης διέγερσής της. Πάλι όμως ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος θα είναι χαμηλός. Η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας για να συμφέρει οικονομικά πρέπει να γίνεται με υψηλή τάση που θα διατηρεί χαμηλό το ρεύμα ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες μεταφοράς. Στην συνέχεια η υψηλή τάση πρέπει να μειώνεται σημαντικά ώστε να μπορεί να διανεμηθεί στους καταναλωτές χωρίς κίνδυνο.

Για το συνεχές ρεύμα τέτοιες μετατροπές τάσης δεν είναι οικονομικά δυνατές ενώ στο εναλλασσόμενο υπάρχουν συσκευές που μπορούν να κάνουν τις απαραίτητες μετατροπές χωρίς κινούμενα τμήματα με ελάχιστες απώλειες ισχύος. Οι συσκευές αυτές είναι γνωστές με το όνομα μετασχηματιστές και έχουν βαθμούς απόδοσης που ξεπερνούν και το 98%. Οι μετασχηματιστές κάνουν δυνατή την χρησιμοποίηση συσκευών σχεδιασμένων να λειτουργούν με οποιαδήποτε τάση αρκεί να υπάρχουν μετασχηματιστές που μπορούν να δώσουν τέτοιες τάσεις.

#### 4.1.2 Κατασκευή μετασχηματιστών

Το κύριο μέρος κάθε μετασχηματιστή που ονομάζεται και ενεργό μέρος αποτελείται από ένα μαγνητικό κύκλωμα στο οποίο είναι τυλιγμένα δύο τυλίγματα, το τύλιγμα υψηλής τάσης και το τύλιγμα χαμηλής τάσης.

Το μαγνητικό κύκλωμα, που ονομάζεται και πυρήνας του μετασχηματιστή, κατασκευάζεται από πολλά μαγνητικά ελάσματα, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του πυρήνα του επαγωγικού τυμπάνου των ηλεκτρικών μηχανών. Τα ελάσματα αυτά είναι επιφανειακά μονωμένα και έχουν εξαιρετικά χαμηλές ολικές απώλειες με αποτέλεσμα πολύ καλό βαθμό απόδοσης.

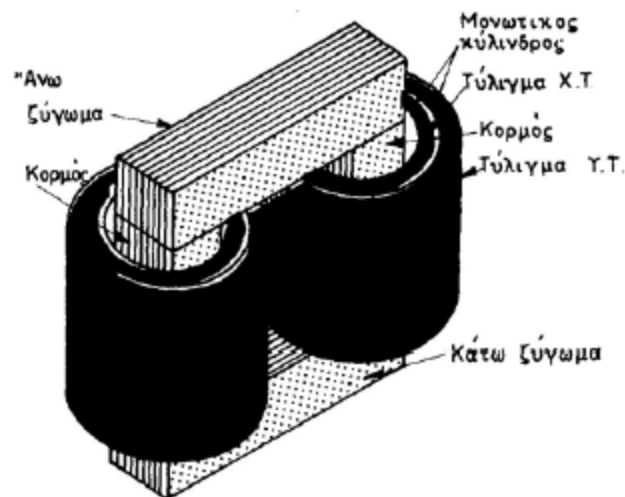
Το τύλιγμα υψηλής τάσης αποτελείται από πολλές σπείρες μονωμένου χάλκινου αγωγού κυκλικής διατομής. Το τύλιγμα χαμηλής τάσης κατασκευάζεται συνήθως από αγωγό ορθογώνιας ή τετραγωνικής διατομής μονωμένο με χαρτί ή βαμβάκι, έχει μικρότερο αριθμό σπειρών από το τύλιγμα υψηλής τάσης και μεγαλύτερη διατομή. Και τα δύο τυλίγματα είναι πολύ καλά μονωμένα μεταξύ τους.

Στην περίπτωση μετασχηματιστών υποβιβασμού τάσης, το τύλιγμα υψηλής τάσης συνδέεται με την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας και από το τύλιγμα χαμηλής τάσης τροφοδοτούνται οι καταναλωτές. Στην περίπτωση αυτή το τύλιγμα υψηλής τάσης ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα ή απλά πρωτεύον και το τύλιγμα χαμηλής τάσης ονομάζεται δευτερεύον τύλιγμα ή δευτερεύον. Στους μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης συμβαίνει το αντίθετο.

### 4.1.3 Μονοφασικοί μετασχηματιστές

Το Σχήμα 3.1 παριστάνει μικρό μονοφασικό μετασχηματιστή. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από μαγνητικά ελάσματα, αποτελείται από τούς δύο κορμούς (τα κατακόρυφα τμήματα) και τα δύο ζυγώματα (τα οριζόντια τμήματα). Το άνω ζύγωμα αφαιρείται από τον υπόλοιπο πυρήνα για να είναι δυνατή η τοποθέτηση των τυλιγμάτων στους κορμούς.

Σε κάθε κορμό του μετασχηματιστή του Σχήματος 3.1 υπάρχει ένα τύλιγμα χαμηλής τάσης διαμορφωμένο υπό μορφή κυλίνδρου και ένα τύλιγμα υψηλής τάσης διαμορφωμένο επίσης με κυλινδρική μορφή. Το τύλιγμα υψηλής τάσης περιβάλλει το τύλιγμα χαμηλής τάσης και μονώνονται μεταξύ τους και προς τον κορμό. Τα τυλίγματα χαμηλής τάσης των δύο κορμών συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά ώστε τελικά να μένουν ελεύθερα τα δύο άκρα του τυλίγματος χαμηλής τάσης. Με τον ίδιο τρόπο υπάρχουν δύο άκρα του τυλίγματος υψηλής τάσης. Τα τυλίγματα με τον παραπάνω τρόπο κατασκευής λέγονται συγκεντρικά ή κυλινδρικά τυλίγματα.

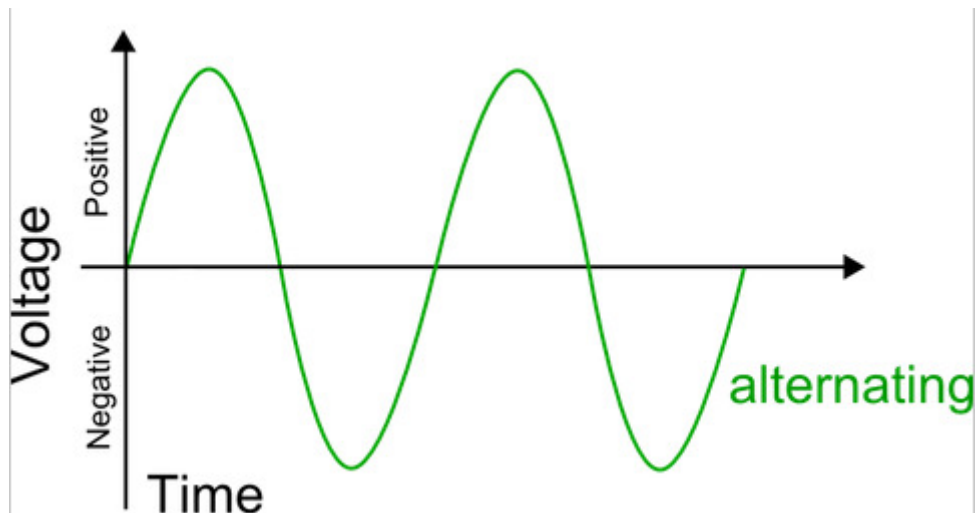


Σχήμα 4.1 Μονοφασικός μετασχηματιστής.



## 4.2 Κύκλωμα ανόρθωσης

Από το δίκτυο της ΔΕΗ και μετά τον μετασχηματιστή μας θα πάρουμε τελικά μία AC τάση της παρακάτω μορφής . Τώρα για να χρησιμοποιηθεί η τάση αυτή στη τροφοδοσία του κυκλώματος θα χρειαστεί να μετατραπεί σε DC τάση. Αυτό θα γίνει με το κύκλωμα ανόρθωσης.

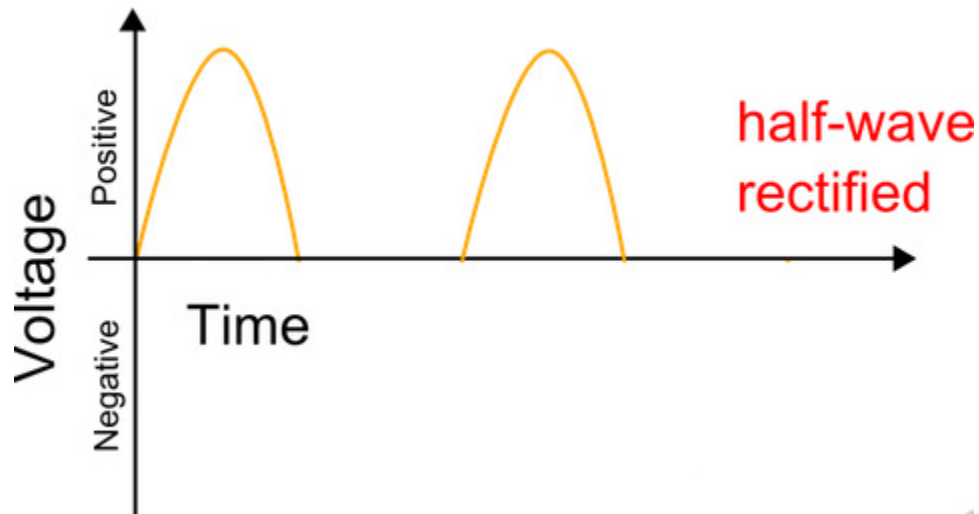


Σχήμα 4.2 Τάση εισόδου Δικτύου

### 4.2.1 Απλή ανόρθωση χωρίς πυκνωτή εξομάλυνσης

Στην απλή ανόρθωση συνδέεται μια διάδος στο δευτερεύον του Μ/Τ, σε μια τάση  $V_1$  που είναι εναλλασσόμενη όπως το παραπάνω σχήμα. Όταν έχουμε θετική ημιπερίοδο, η τάση  $V$  που εμφανίζεται στο δευτερεύον του Μ/Τ έχει το (+) επάνω και το (-) κάτω. Η διάδος πολώνεται ορθά και άγει (μόλις η τάση ανόδου ξεπεράσει τα  $0,7\text{ V}$  ως προς την κάθοδο), με αποτέλεσμα να κλείνει κύκλωμα και να έχουμε ροή ρεύματος από το (+)

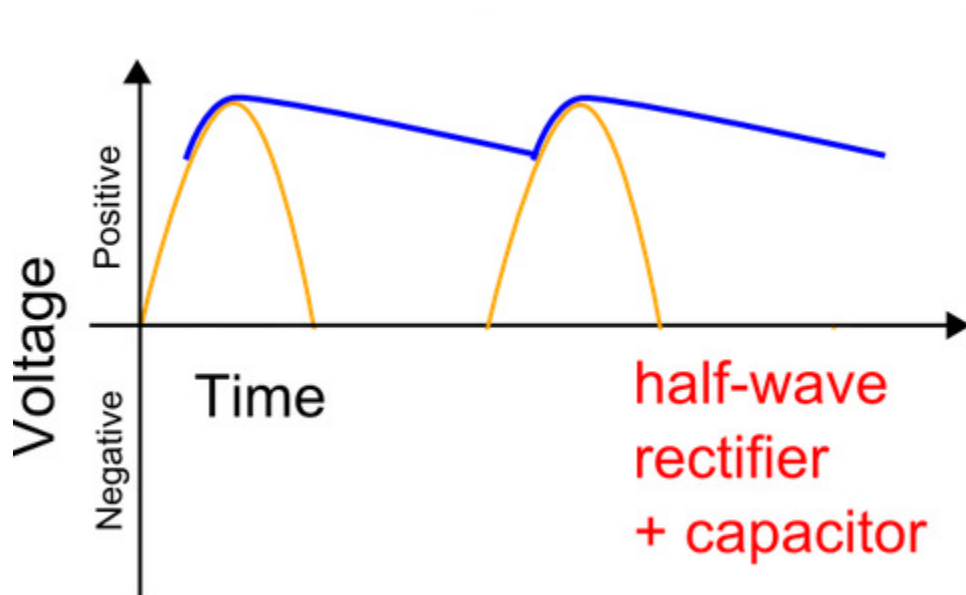
της  $V$  διαμέσου της διόδου. Η ροή του ρεύματος δημιουργεί μια τάση στα άκρα του φορτίου μας με τη μορφή της κυματομορφής του παρακάτω σχήματος. Στην αρνητική ημιπερίοδο της  $V$  η διόδος πολώνεται ανάστροφα και δεν άγει με αποτέλεσμα να μη περνάει ρεύμα από το φορτίο και η τάση να είναι μηδέν.



Σχήμα 4.3 Τάση εξόδου απλής ανόρθωσης

Αν τώρα τοποθετηθεί ένας πυκνωτής, παράλληλα με το φορτίο μας τότε στη θετική ημιπερίοδο και μέχρι να πάρει τη μέγιστη τιμή, ο πυκνωτής φορτίζει γρήγορα στην τάση κορυφής από την πηγή μέσα από τη μικρή αντίσταση της διόδου που άγει, μειωμένη βέβαια κατά  $0,7\text{ V}$  που κρατάει στα άκρα της η διόδου ( $2^{\text{ος}}$  κανόνας Kirchhoff). Έτσι αν η τάση κορυφής πηγής είναι π.χ.  $10\text{ V}$ , τότε η άνοδος της διόδου επειδή συνδέεται στη πηγή θα έχει  $10\text{V}$ , η κάθοδος όμως θα έχει  $9,3\text{ V}$  η οποία θα είναι και τάση του πυκνωτή, γιατί αυτός συνδέεται στην κάθοδο της διόδου. Καθώς η τάση  $V_p$  αρχίζει να μειώνεται, η διόδος παύει να άγει, γιατί η άνοδος έχει μικρότερη τάση από  $0,7\text{ V}$  ως προς την κάθοδο. Από το σημείο αυτό, η διόδος διακόπτει το κύκλωμα με την πηγή και το μόνο κύκλωμα που απομένει είναι αυτό του πυκνωτή με την αντίσταση φορτίου. Έτσι ο πυκνωτής

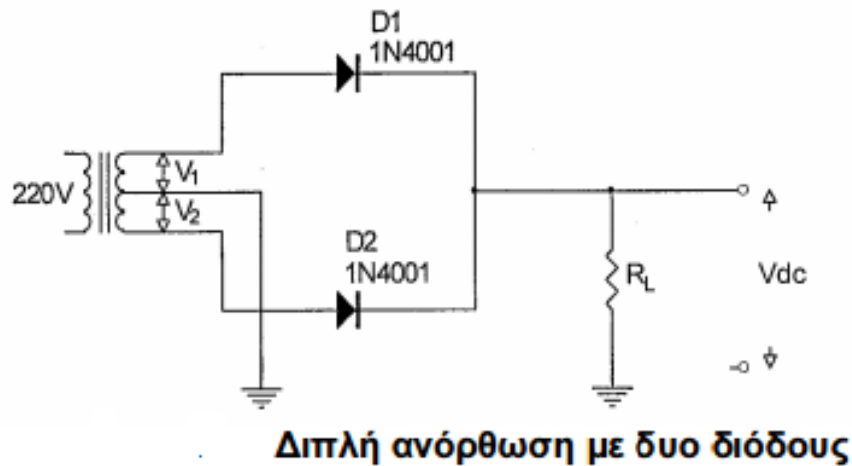
εκφορτίζει αργά μέσα από τη αντίσταση του φορτίου μας. Η εκφόρτιση θα συνεχιστεί μέχρι να ξανασυνδεθεί η πηγή στο κύκλωμα μέσω της διόδου. Αυτό θα συμβεί στο σημείο, όπου η επόμενη θετική ημιπερίοδος της πηγής θα πολώσει και πάλι ορθά την δίοδο δίνοντας της στην άνοδο 0,7 V περισσότερη τάση από όση έχει εκείνη τη στιγμή η κάθοδος ή ο πυκνωτής που είναι παράλληλα. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται συνεχώς.



Σχήμα 4.4 Τάση εξόδου απλής ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης

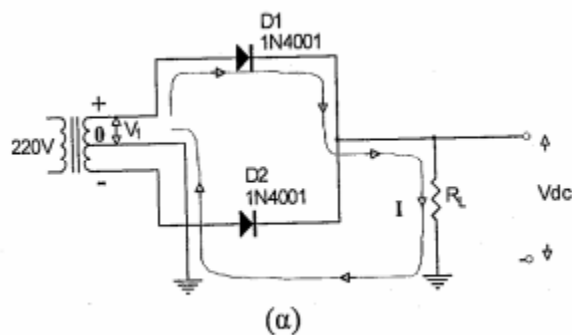
4.2.2 Διπλή ανόρθωση με δυο διόδους

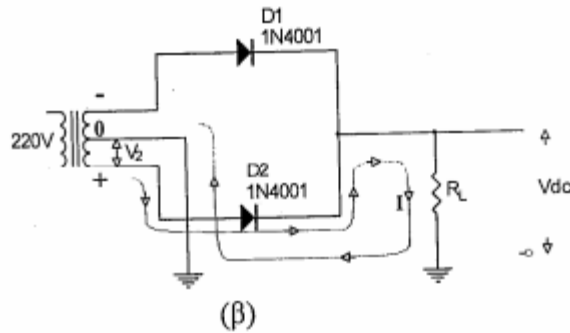
Στη διπλή ανόρθωση με δυο διόδους συνδέονται οι δυο δίοδοι στο δευτερεύον ενός Μ/Τ, ο οποίος όμως πρέπει να έχει δυο τυλίγματα με μεσαία λήψη όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 4.5 Σχηματικό διπλής ανόρθωσης

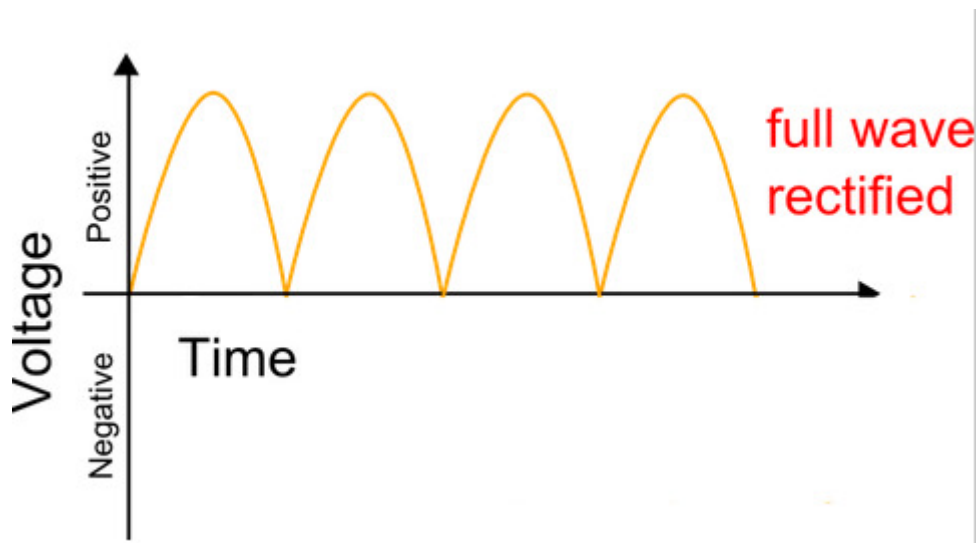
Το κάθε τυλίγμα αποτελεί ξεχωριστή πηγή με τάσεις  $V_1$  και  $V_2$ , ίδιου μέτρου με διαφορά φάσης  $180^\circ$ . Όταν εφαρμοστεί η μια ημιπερίοδος της τάσης του δικτύου στο πρωτεύον του Μ/Τ, στα δευτερεύοντα τυλίγματα θα εμφανιστούν οι τάσεις  $V_1$  και  $V_2$  όπως φαίνεται στα σχήματα (α) και (β).





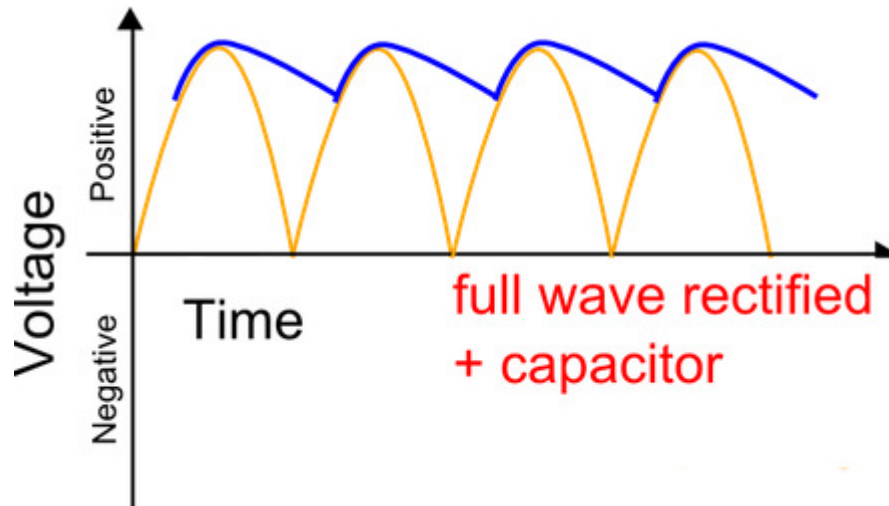
Σχήμα 4.6 (α)Θετική ημιπερίοδο ,(β) Αρνητική ημιπερίοδο

Στην άλλη ημιπερίοδο της τάσης του δικτύου θα εμφανιστούν ανάποδα. Έτσι τελικά θα έχουμε στην έξοδό μας.



Σχήμα 4.7 Τάση εξόδου διπλής ανόρθωσης

Και με τη σύνδεση ενός πυκνωτή των 1000μF παράλληλα με το φορτίο μας θα έχουμε την εξομάλυνση της τάσης όπως στο σχήμα .

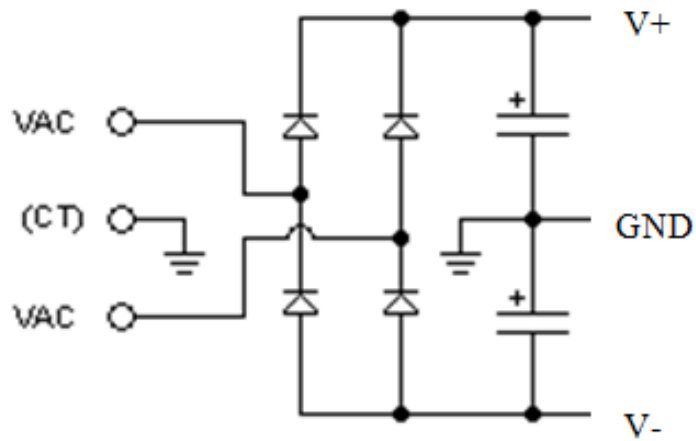


Σχήμα 4.8 Τάση εξόδου διπλής ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης

#### 4.2.3 Συμμετρική διπλή ανόρθωση

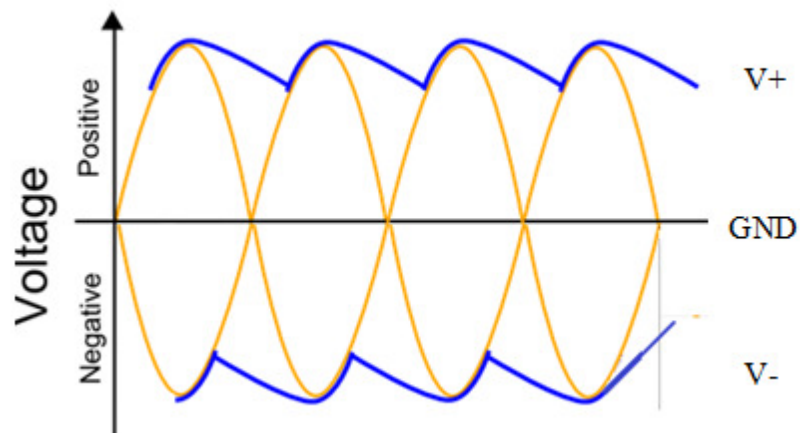
Όπως χρησιμοποιήσαμε το κύκλωμα διπλής ανόρθωσης για να ανορθώσουμε και να εξομαλύνουμε την θετική ημιπερίοδο της εξόδου του μετασχηματιστή έτσι μπορούμε και να το χρησιμοποιήσουμε για την αρνητική ημιπερίοδο για να αποκτήσουμε τελικά ένα συμμετρικό κύκλωμα τροφοδοσίας.

Παρακάτω βλέπουμε το σχηματικό της τελικής συνδεσμολογίας :



Σχήμα 4.9 Σχηματικό διπλής συμμετρικής ανόρθωσης

Και έχουμε τελικά στην έξοδό μας :



Σχήμα 4.10 Τάση εξόδου διπλής συμμετρικής ανόρθωσης με πυκνωτές εξομάλυνσης

## 4.3 Ο ρυθμιστής τάσης

### 4.3.1 Εισαγωγή

Οι ρυθμιστές τάσης είναι σχεδιασμένοι για να διατηρούν αυτόματα μια σταθερή τάση .Αναλόγως τη κατασκευή αυτή η τάση μπορεί να είναι είτε AC είτε DC με τον κατάλληλο ρυθμιστή.

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από τις παραμέτρους που επηρεάζουν την τάση εξόδου το ρυθμιστή :

- το φορτίο το οποίο τροφοδοτεί .
- στον λόγο της μεταβολής της τάσης εξόδου προς την μεταβολή της τάσης εισόδου.
- Την θερμοκρασία
- Το κατασκευαστικό σφάλμα του ρυθμιστή
- Την ελάχιστη διαφορά μεταξύ τάσης τροφοδοσίας ρυθμιστή και της εξόδου του ,η τάσης τροφοδοσίας πρέπει να είναι τουλάχιστον μερικά Volt παραπάνω από την τάσης εξόδου (αναλόγως τον ρυθμιστή).

### 4.3.2 Η σειρά LM78XX

Για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή και της οθόνης χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος ρυθμιστής τάσης καθώς τροφοδοτούνται παρομοίως με 5V .Επίσης έτσι τροφοδοτείται και η θετική τροφοδοσία του αισθητήρα.

Επιλέχθηκαν ρυθμιστές της εταιρείας ST και συγκεκριμένα το μοντέλο L7805CV .





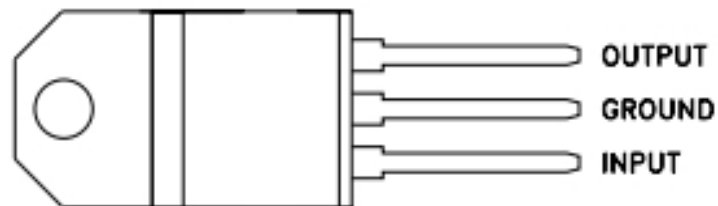
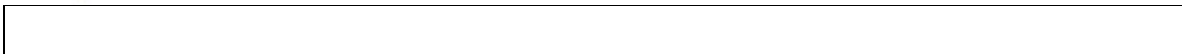
**L7800  
SERIES**

## POSITIVE VOLTAGE REGULATORS

- OUTPUT CURRENT TO 1.5A
- OUTPUT VOLTAGES OF 5; 5.2; 6; 8; 8.5; 9; 10; 12; 15; 18; 24V
- THERMAL OVERLOAD PROTECTION
- SHORT CIRCUIT PROTECTION
- OUTPUT TRANSITION SOA PROTECTION



TO-220



CS05710

TO-220 (Any Type)

Σχήμα 4.11 Βασικά χαρακτηριστικά και αναγνώριση ακροδεκτών

Για την ομαλή λειτουργία του ρυθμιστή τοποθετήθηκαν πυκνωτές ανάμεσα στην είσοδο και την γείωση και αντιστοίχως μεταξύ εξόδου και γείωσης .

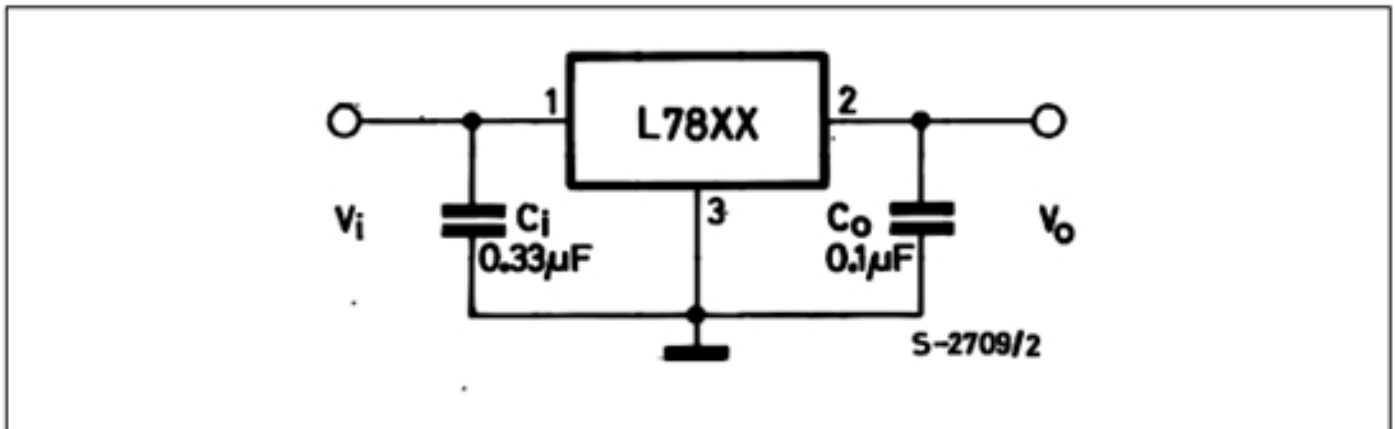
Συγκεκριμένα ο πυκνωτής ανάμεσα στην είσοδο και την γείωση μπορεί τροφοδοτήσει με ρεύμα τον ρυθμιστή όταν υπάρξει στιγμιαία ανάγκη και ο ρυθμιστής βρίσκεται μακριά από την τροφοδοσία .

Ενώ ο δεύτερος πυκνωτής έχει 2 σκοπούς :

Πρώτον τροφοδοτεί το φορτίο στιγμιαία υπό σταθερή τάση όταν αυτό το απαιτήσει, έτσι ώστε να προλάβει να αντεπεξέλθει ο ρυθμιστής .

Δεύτερον αποκόβει την οποιαδήποτε ταλάντωση στην έξοδο του ρυθμιστή .

Ο πρώτος πυκνωτής χρειάζεται να είναι  $0.33\mu\text{F}$  ενώ ο δεύτερος  $0.1\mu\text{F}$ .



Σχήμα 4.12 Σύνδεση πυκνωτών

Παρακάτω αναγράφονται ορισμένα στοιχεία από το datasheet τα οποία είναι απαραίτητα για την σωστή κατανόηση του συγκεκριμένου ρυθμιστή τάσης.

**Table 1: Absolute Maximum Ratings**

| Symbol    | Parameter                            |                     | Value              | Unit |
|-----------|--------------------------------------|---------------------|--------------------|------|
| $V_I$     | DC Input Voltage                     | for $V_O= 5$ to 18V | 35                 | V    |
|           |                                      | for $V_O= 20, 24V$  | 40                 |      |
| $I_O$     | Output Current                       |                     | Internally Limited |      |
| $P_{tot}$ | Power Dissipation                    |                     | Internally Limited |      |
| $T_{stg}$ | Storage Temperature Range            |                     | -65 to 150         | °C   |
| $T_{op}$  | Operating Junction Temperature Range | for L7800           | -55 to 150         | °C   |
|           |                                      | for L7800C          | 0 to 150           |      |

Absolute Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation under these condition is not implied.

**Table 2: Thermal Data**

| Symbol         | Parameter                               | D <sup>2</sup> PAK | TO-220 | TO-220FP | TO-220FM | TO-3 | Unit |
|----------------|---|--------------------|--------|----------|----------|------|------|
| $R_{thj-case}$ | Thermal Resistance Junction-case Max    | 3                  | 5      | 5        | 5        | 4    | °CW  |
| $R_{thj-amb}$  | Thermal Resistance Junction-ambient Max | 62.5               | 50     | 60       | 60       | 35   | °CW  |

Σχήμα 4.13 Μέγιστα και θερμικά χαρακτηριστικά του LM7805

**Table 4: Electrical Characteristics Of L7805** (refer to the test circuits,  $T_J = -55$  to  $150^\circ\text{C}$ ,  $V_I = 10\text{V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $C_I = 0.33\ \mu\text{F}$ ,  $C_O = 0.1\ \mu\text{F}$  unless otherwise specified).

| Symbol                | Parameter                  | Test Conditions  | Min. | Typ. | Max. | Unit              |
|-----------------------|----------------------------|--|------|------|------|-------------------|
| $V_O$                 | Output Voltage             | $T_J = 25^\circ\text{C}$   | 4.8  | 5    | 5.2  | V                 |
| $V_O$                 | Output Voltage             | $I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ $P_O \leq 15\text{W}$<br>$V_I = 8\text{ to }20\text{ V}$ | 4.65 | 5    | 5.35 | V                 |
| $\Delta V_O(^*)$      | Line Regulation            | $V_I = 7\text{ to }25\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$                                   |      | 3    | 50   | mV                |
|                       |                            | $V_I = 8\text{ to }12\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$                                   |      | 1    | 25   |                   |
| $\Delta V_O(^*)$      | Load Regulation            | $I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$                               |      |      | 100  | mV                |
|                       |                            | $I_O = 250\text{ to }750\text{ mA}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$                               |      |      | 25   |                   |
| $I_d$                 | Quiescent Current          | $T_J = 25^\circ\text{C}$   |      |      | 6    | mA                |
| $\Delta I_d$          | Quiescent Current Change   | $I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$  |      |      | 0.5  | mA                |
|                       |                            | $V_I = 8\text{ to }25\text{ V}$  |      |      | 0.8  |                   |
| $\Delta V_O/\Delta T$ | Output Voltage Drift       | $I_O = 5\text{ mA}$  |      | 0.6  |      | mV/°C             |
| eN                    | Output Noise Voltage       | $B = 10\text{Hz to }100\text{kHz}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$                                |      |      | 40   | $\mu\text{V}/V_O$ |
| SVR                   | Supply Voltage Rejection   | $V_I = 8\text{ to }18\text{ V}$ $f = 120\text{Hz}$   | 68   |      |      | dB                |
| $V_d$                 | Dropout Voltage            | $I_O = 1\text{ A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$  |      | 2    | 2.5  | V                 |
| $R_O$                 | Output Resistance          | $f = 1\text{ KHz}$   |      | 17   |      | m $\Omega$        |
| $I_{sc}$              | Short Circuit Current      | $V_I = 35\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$   |      | 0.75 | 1.2  | A                 |
| $I_{scp}$             | Short Circuit Peak Current | $T_J = 25^\circ\text{C}$   | 1.3  | 2.2  | 3.3  | A                 |

(\*) Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

#### Σχήμα 4.14 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του LM7805

Για την θετική τάση τροφοδοσίας των ενισχυτών χρησιμοποιήθηκε ρυθμιστής τάσης των 9V. Συγκεκριμένα το μοντέλο L7809CV της ίδιας σειράς με πριν.

Έτσι καθώς χρησιμοποιούμε την ίδια σειρά ρυθμιστών τάσης η τοποθέτηση πυκνωτών στην είσοδο και στην έξοδο είναι πανομοιότυπη.

Παρακάτω βρίσκονται βασικά χαρακτηριστικά του.

**Table 17: Electrical Characteristics Of L7809C** (refer to the test circuits,  $T_J = 0$  to  $125^\circ\text{C}$ ,  $V_I = 15\text{V}$ ,  $I_O = 500$  mA,  $C_I = 0.33$   $\mu\text{F}$ ,  $C_O = 0.1$   $\mu\text{F}$  unless otherwise specified).

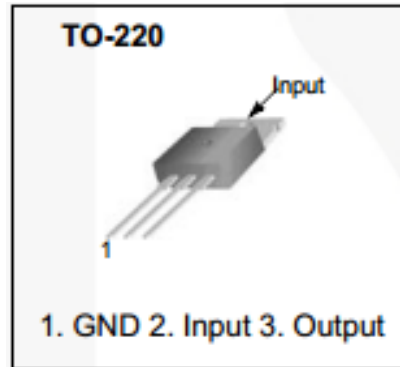
| Symbol                | Parameter                  | Test Conditions   | Min. | Typ. | Max. | Unit                 |
|-----------------------|----------------------------|---|------|------|------|----------------------|
| $V_O$                 | Output Voltage             | $T_J = 25^\circ\text{C}$  | 8.64 | 9    | 9.36 | V                    |
| $V_O$                 | Output Voltage             | $I_O = 5$ mA to 1 A $P_O \leq 15\text{W}$<br>$V_I = 11.5$ to 26 V | 8.55 | 9    | 9.45 | V                    |
| $\Delta V_O(^*)$      | Line Regulation            | $V_I = 11.5$ to 26 V $T_J = 25^\circ\text{C}$                     |      |      | 180  | mV                   |
|                       |                            | $V_I = 12$ to 18 V $T_J = 25^\circ\text{C}$                       |      |      | 90   |                      |
| $\Delta V_O(^*)$      | Load Regulation            | $I_O = 5$ mA to 1.5 A $T_J = 25^\circ\text{C}$                    |      |      | 180  | mV                   |
|                       |                            | $I_O = 250$ to 750 mA $T_J = 25^\circ\text{C}$                    |      |      | 90   |                      |
| $I_d$                 | Quiescent Current          | $T_J = 25^\circ\text{C}$  |      |      | 8    | mA                   |
| $\Delta I_d$          | Quiescent Current Change   | $I_O = 5$ mA to 1 A   |      |      | 0.5  | mA                   |
|                       |                            | $V_I = 11.5$ to 26 V  |      |      | 1    |                      |
| $\Delta V_O/\Delta T$ | Output Voltage Drift       | $I_O = 5$ mA  |      | -1   |      | mV/ $^\circ\text{C}$ |
| eN                    | Output Noise Voltage       | B = 10Hz to 100KHz $T_J = 25^\circ\text{C}$                       |      | 70   |      | $\mu\text{V}/V_O$    |
| SVR                   | Supply Voltage Rejection   | $V_I = 12$ to 23 V $f = 120\text{Hz}$                             | 55   |      |      | dB                   |
| $V_d$                 | Dropout Voltage            | $I_O = 1$ A $T_J = 25^\circ\text{C}$                              |      | 2    |      | V                    |
| $R_O$                 | Output Resistance          | $f = 1$ KHz   |      | 17   |      | m $\Omega$           |
| $I_{sc}$              | Short Circuit Current      | $V_I = 35$ V $T_J = 25^\circ\text{C}$                             |      | 0.40 |      | A                    |
| $I_{scp}$             | Short Circuit Peak Current | $T_J = 25^\circ\text{C}$  |      | 2.2  |      | A                    |

(\*) Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

Σχήμα 4.15 Βασικά χαρακτηριστικά του LM7809

### 4.3.3 Η σειρά LM79XX

Για την αρνητική τροφοδοσία των τελεστικών ενισχυτών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο L7909 το οποίο σταθεροποιεί την τάση στα -9 Volt.



Σχήμα 4.16 Σχήμα LM79XX

Παρακάτω αναφέρονται οι μέγιστες τιμές του σταθεροποιητή:

| Symbol          | Parameter  | Value        | Unit |
|-----------------|--|--------------|------|
| $V_I$           | Input Voltage                                      | -35          | V    |
| $R_{\theta JC}$ | Thermal Resistance, Junction-Case <sup>(1)</sup>   | 5            | °C/W |
| $R_{\theta JA}$ | Thermal Resistance, Junction-Air <sup>(1, 2)</sup> | 65           | °C/W |
| $T_{OPR}$       | Operating Temperature Range                        | 0 to +125    | °C   |
| $T_{STG}$       | Storage Temperature Range                          | - 65 to +150 | °C   |

Σχήμα 4.17 Μέγιστες τιμές του LM7909



Και εδώ τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του.

### Electrical Characteristics (KA7909 / LM7909)

( $V_I = -15\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$ ,  $C_I = 2.2\ \mu\text{F}$ ,  $C_O = 1\ \mu\text{F}$ ; unless otherwise specified.)

| Symbol                | Parameter                        | Conditions  | Min.                                    | Typ. | Max. | Unit          |
|-----------------------|----------------------------------|---|---|------|------|---------------|
| $V_O$                 | Output Voltage                   | $T_J = +25^\circ\text{C}$   | -8.7                                    | -9.0 | -9.3 | V             |
|                       |                                  | $I_O = 5\text{ mA to } 1\text{ A}$ , $P_O \leq 15\text{ W}$ ,<br>$V_I = -1.5\text{ V to } -23\text{ V}$ | -8.6                                    | -9.0 | -9.4 |               |
| $\Delta V_O$          | Line Regulation <sup>(6)</sup>   | $T_J = +25^\circ\text{C}$   | $V_I = -11.5\text{ V to } -26\text{ V}$ | 10   | 180  | mV            |
|                       |                                  |   | $V_I = -12\text{ V to } -18\text{ V}$   | 5    | 90   |               |
| $\Delta V_O$          | Load Regulation <sup>(6)</sup>   | $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 5\text{ mA to } 1.5\text{ A}$  |   | 12   | 180  | mV            |
|                       |                                  | $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 250\text{ mA to } 750\text{ mA}$                                     |   | 4    | 90   |               |
| $I_Q$                 | Quiescent Current                | $T_J = +25^\circ\text{C}$   |   | 3    | 6    | mA            |
| $\Delta I_Q$          | Quiescent Current Change         | $I_O = 5\text{ mA to } 1\text{ A}$  |   | 0.05 | 0.50 | mA            |
|                       |                                  | $V_I = -11.5\text{ V to } -26\text{ V}$   |   | 0.10 | 1.00 |               |
| $\Delta V_O/\Delta T$ | Temperature Coefficient of $V_O$ | $I_O = 5\text{ mA}$   |   | -0.6 |      | mV/°C         |
| $V_N$                 | Output Noise Voltage             | $f = 10\text{ Hz to } 100\text{ kHz}$ , $T_A = +25^\circ\text{C}$                                       |   | 175  |      | $\mu\text{V}$ |
| RR                    | Ripple Rejection                 | $f = 120\text{ Hz}$ , $\Delta V_I = 10\text{ V}$  | 54                                      | 60   |      | dB            |
| $V_D$                 | Dropout Voltage                  | $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 1\text{ A}$  |   | 2    |      | V             |
| $I_{SC}$              | Short-Circuit Current            | $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $V_I = -35\text{ V}$  |   | 300  |      | mA            |
| $I_{PK}$              | Peak Current                     | $T_J = +25^\circ\text{C}$   |   | 2.2  |      | A             |

Σχήμα 4.18 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά LM7909

Για την αρνητική τροφοδοσία του αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε από την ίδια σειρά LM79XX το μοντέλο LM7905 του οποίου τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά είναι :

### Electrical Characteristics (KA7905 / LM7905)

( $V_I = -10\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$ ,  $C_I = 2.2\ \mu\text{F}$ ,  $C_O = 1\ \mu\text{F}$ ; unless otherwise specified.)

| Symbol                | Parameter                        | Conditions  | Min.                                | Typ.  | Max.  | Unit |               |
|-----------------------|----------------------------------|---|-------------------------------------|-------|-------|------|---------------|
| $V_O$                 | Output Voltage                   | $T_J = +25^\circ\text{C}$   | -4.80                               | -5.00 | -5.20 | V    |               |
|                       |                                  | $I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ , $P_O \leq 15\text{ W}$ ,<br>$V_I = -7\text{ V to }-20\text{ V}$ | -4.75                               | -5.00 | -5.25 |      |               |
| $\Delta V_O$          | Line Regulation <sup>(3)</sup>   | $T_J = +25^\circ\text{C}$   | $V_I = -7\text{ V to }-25\text{ V}$ |       | 35    | 100  | mV            |
|                       |                                  |   | $V_I = -8\text{ V to }-12\text{ V}$ |       | 8     | 50   |               |
| $\Delta V_O$          | Load Regulation <sup>(3)</sup>   | $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$                                     |                                     |       | 10    | 100  | mV            |
|                       |                                  | $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 250\text{ mA to }750\text{ mA}$                                  |                                     |       | 3     | 50   |               |
| $I_Q$                 | Quiescent Current                | $T_J = +25^\circ\text{C}$   |                                     | 3     | 6     | mA   |               |
| $\Delta I_Q$          | Quiescent Current Change         | $I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$   |                                     |       | 0.05  | 0.50 | mA            |
|                       |                                  | $V_I = -8\text{ V to }-25\text{ V}$   |                                     |       | 0.10  | 0.80 |               |
| $\Delta V_O/\Delta T$ | Temperature Coefficient of $V_D$ | $I_O = 5\text{ mA}$   |                                     |       | -0.4  |      | mV/°C         |
| $V_N$                 | Output Noise Voltage             | $f = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$ , $T_A = +25^\circ\text{C}$                                    |                                     |       | 40    |      | $\mu\text{V}$ |
| RR                    | Ripple Rejection                 | $f = 120\text{ Hz}$ , $\Delta V_I = 10\text{ V}$  |                                     | 54    | 60    |      | dB            |
| $V_D$                 | Dropout Voltage                  | $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $I_O = 1\text{ A}$  |                                     |       | 2     |      | V             |
| $I_{SC}$              | Short-Circuit Current            | $T_J = +25^\circ\text{C}$ , $V_I = -35\text{ V}$  |                                     |       | 300   |      | mA            |
| $I_{PK}$              | Peak Current                     | $T_J = +25^\circ\text{C}$   |                                     |       | 2.2   |      | A             |

Σχήμα 4.19 Χαρακτηριστικά του LM7905

Έτσι έχουν τροφοδοτηθεί συνολικά όλα τα εξαρτήματα της πλακέτας μας από έναν μετασχηματιστή και τέσσερις σταθεροποιητές τάσης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΤΑΔΙΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

### 5.1 Ο τελεστικός ενισχυτής

#### 5.1.1 Εισαγωγή

Μια απλή επεξεργασία σήματος είναι αυτή της ενίσχυσης σήματος. Η ανάγκη για ενίσχυση προκύπτει από το γεγονός ότι ο αισθητήρας ροπής μεταδίδει στην έξοδό του πολύ μικρό σήμα, με εύρος 0-20 mV. Το μικρό αυτό σήμα χαρακτηρίζεται ως ασθενές σήμα και δεν μπορεί να υποστεί αξιόπιστη επεξεργασία. Ο μικροελεγκτής δεν θα μπορέσει να προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα εάν στην είσοδό του τροφοδοτηθεί ένα ασθενές σήμα. Έτσι χρειάστηκε να μεγαλώσουμε το πλάτος του σήματος και για αυτό χρησιμοποιήσαμε την βοήθεια του τελεστικού ενισχυτή (signal amplifier).

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένα δίθυρο δίκτυο που αποτελείται από την θύρα εισόδου και την θύρα εξόδου. Η διαφορά του από τον μετασχηματιστή είναι ότι ναι μεν και οι δύο παρουσιάζουν αύξηση τάσης στην έξοδό τους αλλά μόνο ο τελεστικός ενισχυτής έχει και αύξηση ισχύος. Άρα έχει κέρδος ισχύος :

$$A_p = \text{ισχύς φορτίου}(P_L) / \text{ισχύς εισόδου}(P_i)$$

Συνήθως ο τελεστικός αποτελείται από 5 ακροδέκτες :

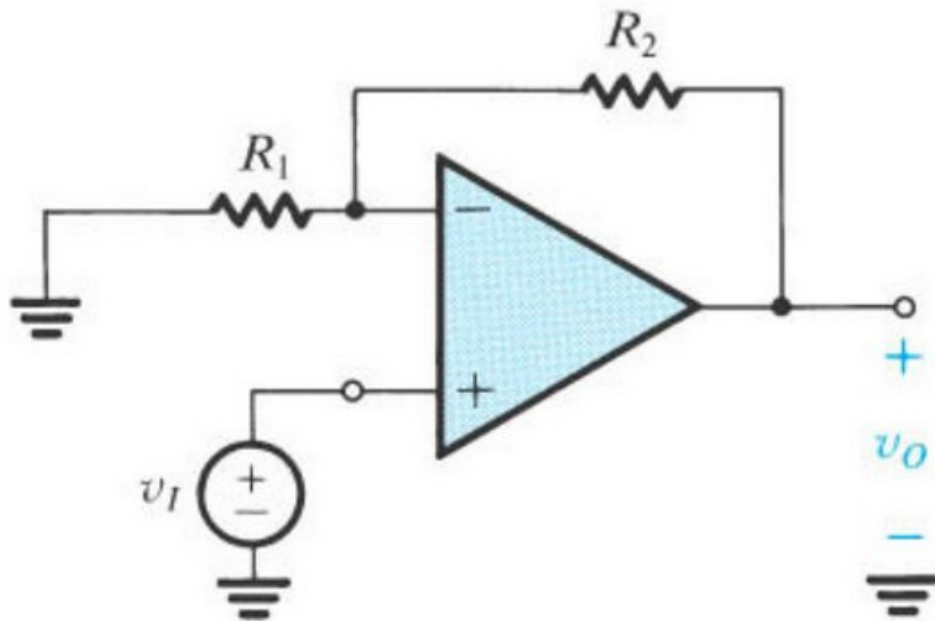
- Τον θετικό ακροδέκτη εισόδου του  $V_{in+}$ .
- Τον αρνητικό ακροδέκτη εισόδου του  $V_{in-}$ .
- Τον ακροδέκτη την θετικής τάσης τροφοδοσίας  $V_{DD}$ .
- Τον ακροδέκτη της αρνητικής τάσης τροφοδοσίας  $V_{SS}$ .
- Τον ακροδέκτη της εξόδου του.

Βασικό γνώρισμα του κάθε ενισχυτή είναι η χαρακτηριστική μεταφοράς . Ένας ιδανικός ενισχυτής θα ενισχύσει το σήμα στην είσοδο του κατά ένα συγκεκριμένο κέρδος χωρίς να παραμορφώσει το σήμα μας με κανένα άλλο τρόπο. Στους πραγματικούς ενισχυτές όμως υπάρχει μόνο ένα εύρος μέσα στο οποίο το σήμα μας θα είναι γραμμικό με ελάχιστη παραμόρφωση, συνήθως πολύ κοντά στα άκρα λειτουργίας του ενισχυτή το σήμα τείνει να χάνει την γραμμικότητά του.

Η βασική λειτουργία του τελεστικού ενισχυτή δηλαδή η ενίσχυση μπορεί να επιτευχθεί με 2 τρόπους, την αναστρέφουσα συνδεσμολογία και την μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία. Η πρώτη έχει σαν αποτέλεσμα να αντιστρέφει το σήμα στην έξοδο ενώ η μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία έχει θετική έξοδο.

### 5.1.2 Μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία

Το βασικό κύκλωμα της μη αναστρέφουσας συνδεσμολογίας είναι:



Σχήμα 5.1 Μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία

Όπως βλέπουμε το σήμα μας εφαρμόζεται απευθείας στον θετικό ακροδέκτη του τελεστικού μας ενισχυτή ενώ στον αρνητικό ακροδέκτη έχουμε μια συνδεσμολογία που οδηγεί στον ακροδέκτη εξόδου.

Γενικότερα το τελεστικός ενισχυτής παρουσιάζει ιδανικά άπειρη αντίσταση εισόδου στους 2 ακροδέκτες του και δεν διαρρέεται από ρεύμα μέσω των εισόδων του. Ακόμα ,λόγο της άπειρης αντίστασης εισόδου

δημιουργείται ένα εικονικό βραχυκύκλωμα στις εισόδους του με αποτέλεσμα να υπάρχει τάση  $U_i$  στον ακροδέκτη  $V_{in-}$ . Έτσι με τον νόμο του Kirchhoff έχουμε :

$$U_o = i_1 \cdot R_1 + i_2 \cdot R_2$$

Όμως λόγω της άπειρης αντίστασης εισόδου τις αντιστάσεις τις διαρρέει το ίδιο ρεύμα  $I = U_1/R_1$

Και έχουμε

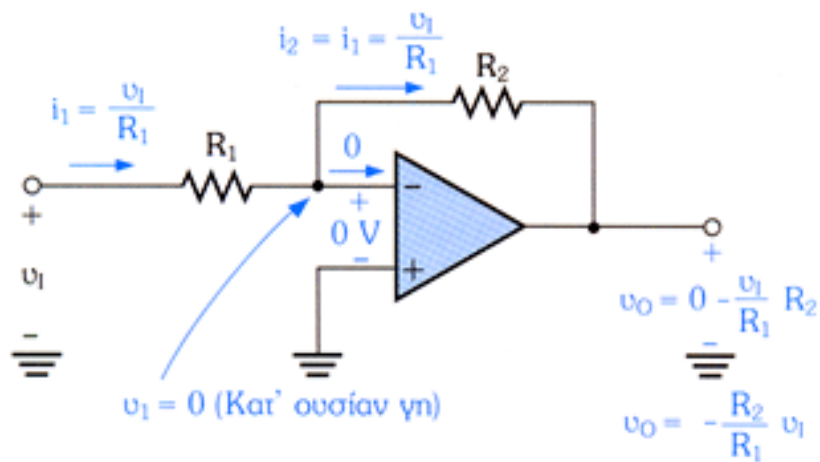
$$U_o = (U_1/R_1) \cdot R_1 + (U_1/R_1) \cdot R_2$$

Και το κέρδος είναι :

$$A = U_o/U_i = (1 + R_2/R_1).$$

### 5.1.3 Αναστρέφουσα συνδεσμολογία

Το κύκλωμα της αναστρέφουσας συνδεσμολογίας είναι:



Σχήμα 5.2 Αναστρέφουσα Συνδεσμολογία

Αντίστοιχα με την μη αναστρέφουσα βρίσκεται ότι το κέρδος του κυκλώματος αυτού είναι

$$A = U_o/U_i = - R_2/R_1$$

Βλέπουμε ότι το κέρδος αυτό είναι αρνητικό.

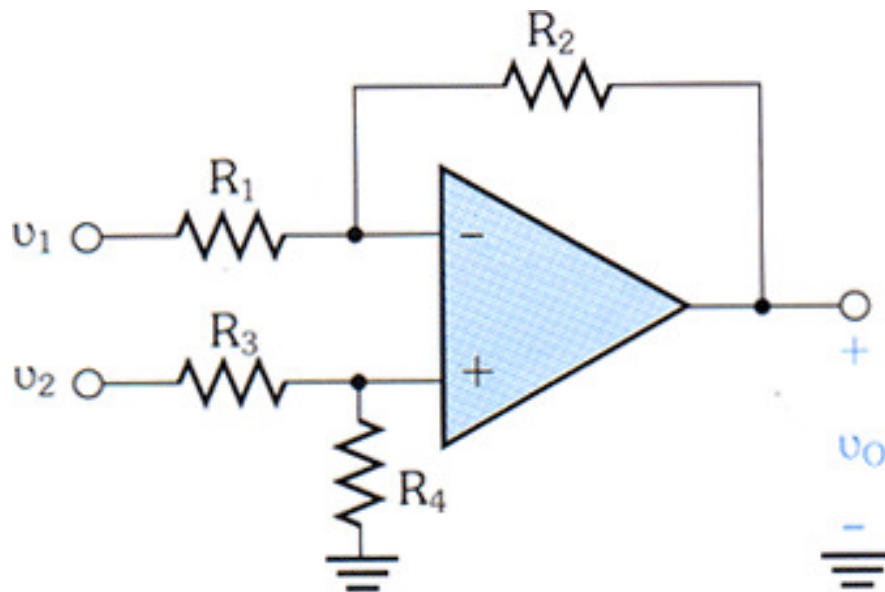
Η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή σχηματίζει ένα διαιρέτη τάσης με την αντίσταση της πηγής που τροφοδοτεί τον ενισχυτή. Άρα για την αποτροπή της μείωσης της έντασης του σήματος, οι ενισχυτές τάσεις πρέπει να έχουν υψηλή αντίσταση εισόδου.

Έτσι στην αναστρέφουσα συνδεσμολογία πρέπει η  $R_1$  να πάρει μεγάλη τιμή, όμως ταυτόχρονα αν το κέρδος  $R_2/R_1$  είναι επίσης μεγάλο τότε η τιμή της  $R_2$  μπορεί να φτάσει εξαιρετικά μεγάλες και ασύμφορες τιμές.

Οπότε η αναστρέφουσα συνδεσμολογία υποφέρει από το πρόβλημα της χαμηλής αντίστασης εισόδου.

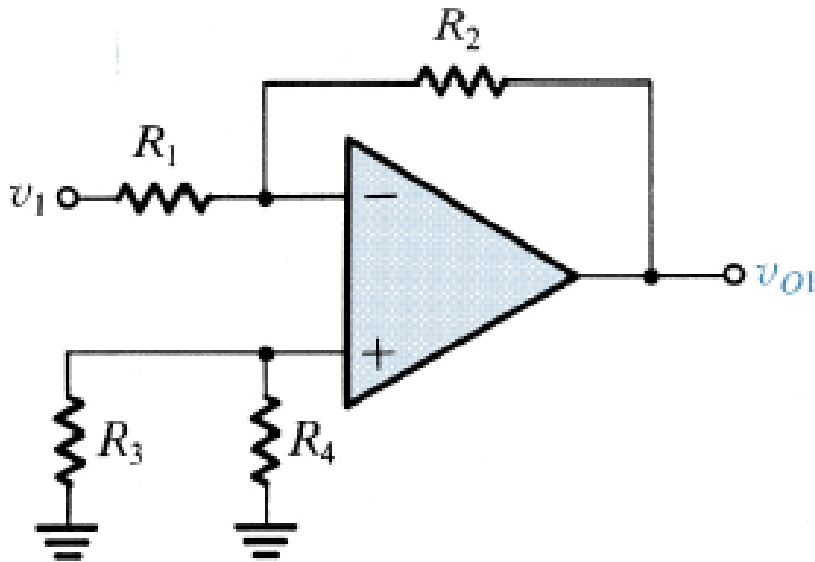
## 5.2 Ο ενισχυτής διαφορών

Ο ενισχυτής διαφορών είναι ένα κύκλωμα που αποτελείται από ένα τελεστικό ενισχυτή από τον οποίο έχουμε χρησιμοποιήσει ταυτόχρονα την αναστρέφουσα και μη ενίσχυση 2 εισόδων.



Σχήμα 5.3 Ενισχυτής διαφορών

Δηλαδή εάν στο παραπάνω σχήμα γειώναμε την  $U_2$  τότε θα προέκυπτε το κύκλωμα :

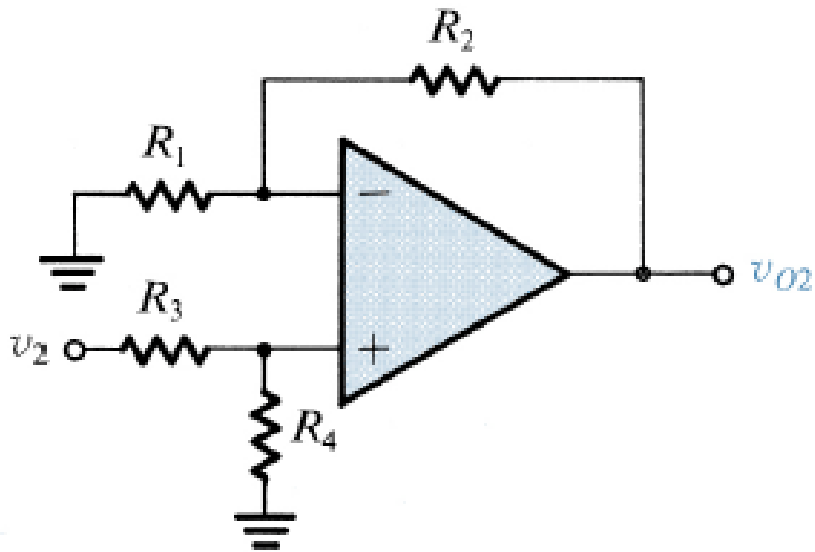


Σχήμα 5.4 Ενισχυτής διαφορών με γειωμένη την θετική είσοδο

Βλέπουμε ότι έχει δημιουργηθεί το σχήμα που προαναφέρθηκε πριν στην αναστρέφουσα συνδεσμολογία, η ύπαρξη των αντιστάσεων στο θετικό ακροδέκτη δεν επηρεάζει καθόλου το κύκλωμα μας ως αναστρέφον ενισχυτής.

Σύμφωνα με τον τύπο της αναστρέφουσας συνδεσμολογίας το κέρδος του παραπάνω κυκλώματος είναι  $U_{O1}/U_1 = -R_2/R_1$ .

Παρομοίως εάν γειώναμε το σήμα στον αρνητικό ακροδέκτη και αφήναμε το σήμα στο θετικό ως έχει αυτή τη φορά, θα είχαμε συνδεσμολογία μη αναστρέφουσα. Τώρα οι αντιστάσεις στο θετικό ακροδέκτη αποτελούν διαιρέτη τάσης και το κέρδος μας είναι  $U_{O2}/U_2 = R_2/R_1$



Σχήμα 5.5 Ενισχυτής διαφορών με γειωμένη την αρνητική είσοδο

Έτσι έχουμε τώρα βάσει της αρχής της υπέρθεσης ότι η τάση εξόδου του αρχικού μας σχήματος, δηλαδή του ενισχυτή διαφορών, είναι :

$$U_0 = U_{01} + U_{02} = - (R_2/R_1) * U_1 + (R_2/R_1) * U_2 = (R_2/R_1) * U_{in}$$

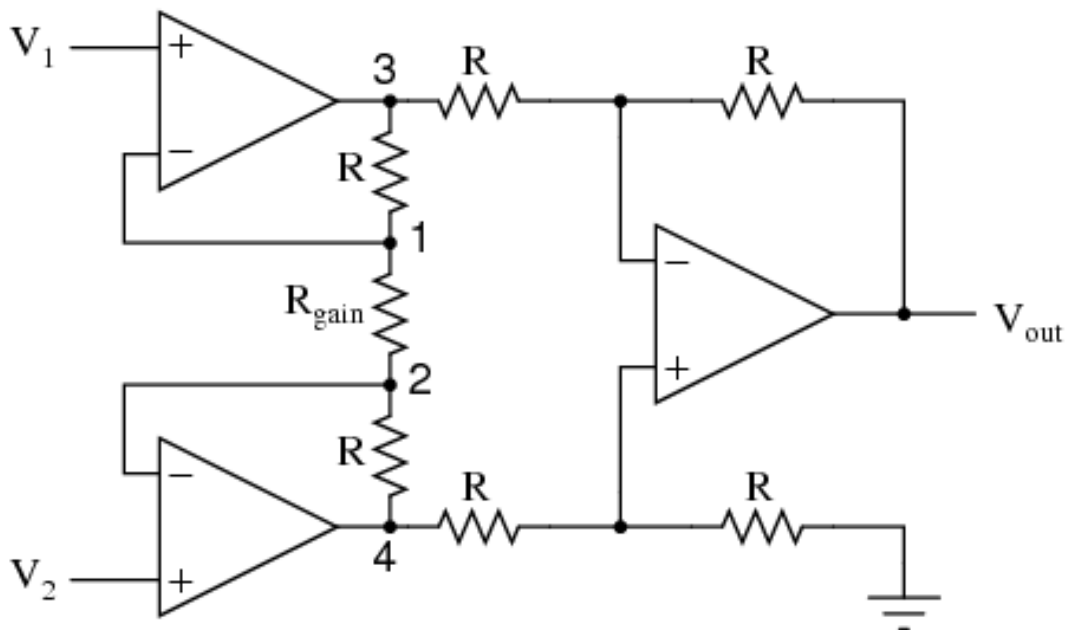
Άρα

$$A = R_2/R_1 .$$

### 5.3 Ο ενισχυτής οργάνων

Εάν ένας ενισχυτής απαιτείται να έχει μεγάλο διαφορικό κέρδος  $(R_2/R_1)$  τότε η απαιτούμενη  $R_1$  θα είναι σχετικά μικρή και η αντίσταση εισόδου θα είναι αντίστοιχα χαμηλή, έτσι προκύπτει ένα μειονέκτημα καθώς για την σωστή λειτουργία του ενισχυτή απαιτείται υψηλή τιμή αντίστασης εισόδου.

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί απομονώνοντας τους 2 ακροδέκτες εισόδου με τη χρήση ακόλουθων τάσης, δηλαδή συνδέεται ένας ακόλουθος τάσης μεταξύ κάθε ακροδέκτη εισόδου και του αντίστοιχου ακροδέκτη εισόδου του ενισχυτή διαφορών. Όμως μπορούμε να πάρουμε κάτι παραπάνω από την απομόνωση εμπεδήσεων, μπορούμε να πάρουμε και κάποιο κέρδος, ή ένα μέρος του συνολικού επιθυμητού κέρδους.



Σχήμα 5.6 Ενισχυτής οργάνων

Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από 2 στάδια.

Το 1<sup>ο</sup> στάδιο αποτελείται από 2 τελεστικούς ενισχυτές και τις αντιστάσεις τους και το 2<sup>ο</sup> στάδιο από των ενισχυτή διαφορών.

Οι 2 πρώτοι ενισχυτές είναι συνδεδεμένοι σε μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία και πετυχαίνουν το αντίστοιχο κέρδος στις εισόδους V1 και V2 οι οποίες μετά την ενίσχυσή τους προχωράνε στον ενισχυτή διαφορών.

Στο συγκεκριμένο κύκλωμα ο ενισχυτής διαφορών δεν από φέρει κανένα κέρδος καθώς  $R_2 = R_1$ . Αλλά στην περίπτωση που είχαμε διαφορετικές αντιστάσεις τότε το σήμα μας θα ενισχυόταν σε 2 στάδια με κέρδος :

$$A = (R_4/R_3) * (1 + R_2/R_1).$$

Το κύκλωμα αυτό έχει το πλεονέκτημα της πολύ υψηλής αντίστασης εισόδου και του υψηλού διαφορικού κέρδους. Έτσι λύσαμε το πρόβλημα της χαμηλής αντίστασης εισόδου που αντιμετώπιζαν τα κυκλώματα της αναστρέφουσας και μη συνδεσμολογίας.

Ο ενισχυτής οργάνων (instrumentation amplifier) με την ύπαρξη των buffer ενισχυτών στο 1<sup>ο</sup> στάδιο προσφέρει χαμηλό θόρυβο, σταθερότητα στο κύκλωμα, χαμηλή DC offset, μεγάλο κέρδος ανοιχτού βρόγχου, μεγάλο συντελεστή απόρριψης κοινού σήματος (CMRR).

## 5.4 Ο τελεστικός ενισχυτής OPA2604

### 5.4.1 Εισαγωγή



Σχήμα 5.7 Ο τελεστικός OPA2604



Ο τελεστικός ενισχυτής που χρησιμοποιήσαμε έπρεπε να έχει πολύ καλή γραμμικότητα στις χαμηλές εισόδους. Το σήμα που έπρεπε να ενισχύσουμε ήταν στο εύρος 0-20mV και οι περισσότεροι ενισχυτές δεν μπορούν να δουλέψουν σωστά σε αυτές τις τιμές.

Ύστερα από αρκετές δοκιμές βρέθηκε ότι ένας συγκεκριμένος τελεστικός ενισχυτής έχει καλή συμπεριφορά στις εισόδους αυτές. Ο τελεστικός αυτός χρησιμοποιείται στην ενίσχυση σήματος ηχητικών σημάτων (π.χ. μουσική) και αποτελεί μια καλή λύση και για το δικό μας σήμα.

Πρόκειται για τον OPA2604 της εταιρείας Burr-Brown.

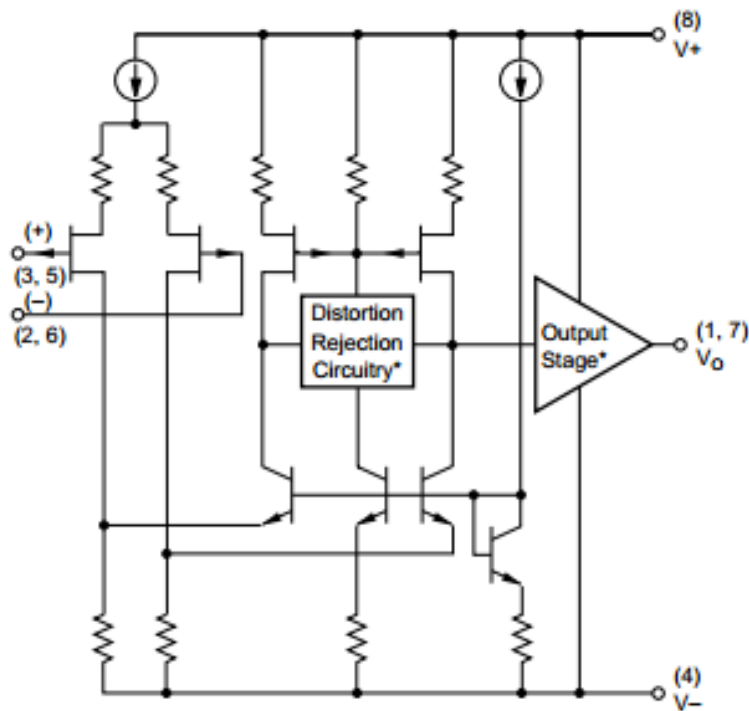
#### 5.4.2 Χαρακτηριστικά

Παρακάτω βλέπουμε τα κύρια χαρακτηριστικά του :

- Χαμηλή παραμόρφωση: 0.0003% στα 1kHz
- Χαμηλό θόρυβο: 10nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- Υψηλό μέγιστο ρυθμό μεταβολής: 25V/ $\mu\text{s}$
- Μεγάλο εύρος ζώνης ενίσχυσης: 20MHz
- Σταθερή ενίσχυση
- Μεγάλο εύρος τροφοδοσίας: Vs  $\pm 4.5\text{V}$  μέχρι  $\pm 24\text{V}$
- Μπορεί να δουλέψει μέχρι και 600 $\Omega$  φορτία

Για να φτάσουμε στην επιλογή του συγκεκριμένου τελεστικού ενισχυτή απορρίφθηκαν αρκετοί προηγούμενοι ενισχυτές.

Κύριο πρόβλημα που προέκυπτε ήταν η μη γραμμική απόκριση των τελεστικών αυτών σε τόσο χαμηλές εισόδους, καθώς και μη ανταπόκριση τους σε μεταβολές της τάξης του 0.01mV.



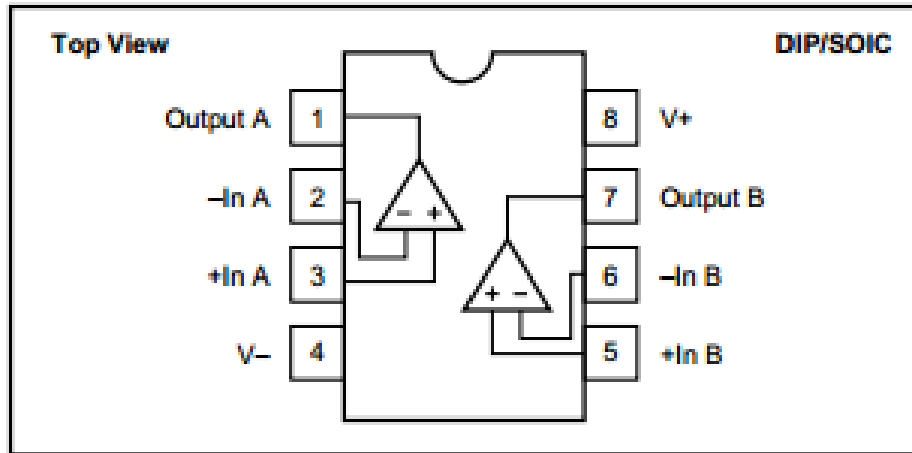
Σχήμα 5.8 Κύκλωμα του OPA2604

Ο OPA2604 είναι ένας διπλός τελεστικός ενισχυτής σχεδιασμένος και για AC σήματα. Έχει πολύ μικρή παραμόρφωση σήματος, χαμηλό θόρυβο και ευρύ εύρος ζώνης (bandwidth). Έτσι μπορούμε να δουλέψουμε με σχεδόν αναλλοίωτο το σήμα στην έξοδο μας.

Ο OPA2604 αποτελείται από 8 ακροδέκτες οι οποίοι προσδιορίζονται ως εξής :

1. Ακροδέκτης εξόδου 1<sup>ου</sup> τελεστικού
2. Αναστρέφον ακροδέκτης εισόδου 1<sup>ου</sup> τελεστικού
3. Μη αναστρέφον ακροδέκτης εισόδου 1<sup>ου</sup> τελεστικού
4. Ακροδέκτης αρνητικής τάσης τροφοδοσίας
5. Ακροδέκτης εξόδου 2<sup>ου</sup> τελεστικού
6. Αναστρέφον ακροδέκτης εισόδου 2<sup>ου</sup> τελεστικού
7. Μη αναστρέφον ακροδέκτης εισόδου 2<sup>ου</sup> τελεστικού
8. Ακροδέκτης θετικής τάσης τροφοδοσίας

## PIN CONFIGURATION



Σχήμα 5.9 Ακροδέκτες του OPA2604

Μέγιστες τιμές λειτουργίας :

- Μέγιστη τροφοδοσία  $\pm 25\text{V}$
- Τάση εισόδου (V-)  $-1\text{V}$  μέχρι (V+)  $+1\text{V}$
- Θερμοκρασία λειτουργίας  $-40^\circ\text{C}$  μέχρι  $+100^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία αποθήκευσης  $-40^\circ\text{C}$  μέχρι  $+125^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία ημιαγωγού  $+150^\circ\text{C}$

Παρακάτω έχουμε τις λεπτομερείς παραμέτρους του OPA2604

## SPECIFICATIONS

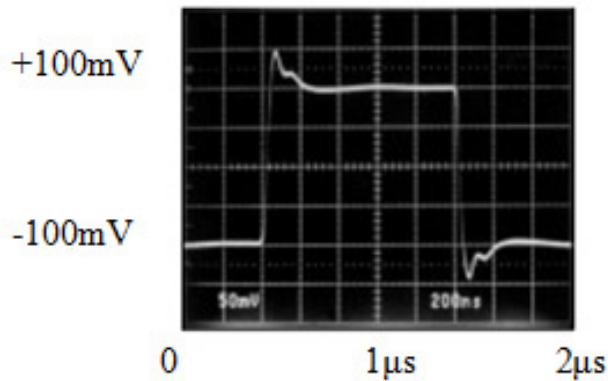
### ELECTRICAL

At  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = \pm 15\text{V}$ , unless otherwise noted.

| PARAMETER   | CONDITION   | OPA2604AP, AU  |   |                      | UNITS  |
|---|---|----------------|---|----------------------|--|
|   |   | MIN            | TYP   | MAX                  |  |
| <b>OFFSET VOLTAGE</b><br>Input Offset Voltage<br>Average Drift<br>Power Supply Rejection  | $V_S = \pm 5$ to $\pm 24\text{V}$   | 70             | $\pm 1$<br>$\pm 8$<br>80                        | $\pm 5$              | mV<br>$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$<br>dB   |
| <b>INPUT BIAS CURRENT<sup>(1)</sup></b><br>Input Bias Current<br>Input Offset Current   | $V_{CM} = 0\text{V}$<br>$V_{CM} = 0\text{V}$  |                | 100<br>$\pm 4$                                  |                      | $\mu\text{A}$<br>$\mu\text{A}$   |
| <b>NOISE</b><br>Input Voltage Noise<br>Noise Density: $f = 10\text{Hz}$<br>$f = 100\text{Hz}$<br>$f = 1\text{kHz}$<br>$f = 10\text{kHz}$<br>Voltage Noise, BW = 20Hz to 20kHz<br>Input Bias Current Noise<br>Current Noise Density, $f = 0.1\text{Hz}$ to 20kHz |   |                | 25<br>15<br>11<br>10<br>1.5<br>6                |                      | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$<br>$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$<br>$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$<br>$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$<br>$\mu\text{Vp-p}$<br>$\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| <b>INPUT VOLTAGE RANGE</b><br>Common-Mode Input Range<br>Common-Mode Rejection  | $V_{CM} = \pm 12\text{V}$   | $\pm 12$<br>80 | $\pm 13$<br>100                                 |                      | V<br>dB  |
| <b>INPUT IMPEDANCE</b><br>Differential<br>Common-Mode   |   |                | $10^{12} \parallel 8$<br>$10^{12} \parallel 10$ |                      | $\Omega \parallel \text{pF}$<br>$\Omega \parallel \text{pF}$   |
| <b>OPEN-LOOP GAIN</b><br>Open-Loop Voltage Gain   | $V_O = \pm 10\text{V}$ , $R_L = 1\text{k}\Omega$  | 80             | 100   |                      | dB   |
| <b>FREQUENCY RESPONSE</b><br>Gain-Bandwidth Product<br>Slew Rate<br>Settling Time: 0.01%<br>0.1%<br>Total Harmonic Distortion + Noise (THD+N)<br>Channel Separation   | $G = 100$<br>$20\text{Vp-p}$ , $R_L = 1\text{k}\Omega$<br>$G = -1$ , 10V Step<br><br>$G = 1$ , $f = 1\text{kHz}$<br>$V_O = 3.5\text{Vrms}$ , $R_L = 1\text{k}\Omega$<br>$f = 1\text{kHz}$ , $R_L = 1\text{k}\Omega$ | 15             | 20<br>25<br>1.5<br>1<br>0.0003<br>142           |                      | MHz<br>$\text{V}/\mu\text{s}$<br>$\mu\text{s}$<br>$\mu\text{s}$<br>%<br>dB   |
| <b>OUTPUT</b><br>Voltage Output<br>Current Output<br>Short Circuit Current<br>Output Resistance, Open-Loop  | $R_L = 600\Omega$<br>$V_O = \pm 12\text{V}$   | $\pm 11$       | $\pm 12$<br>$\pm 35$<br>$\pm 40$<br>25          |                      | V<br>mA<br>mA<br>$\Omega$  |
| <b>POWER SUPPLY</b><br>Specified Operating Voltage<br>Operating Voltage Range<br>Current, Total Both Amplifiers   | $I_O = 0$   | $\pm 4.5$      | $\pm 15$<br>$\pm 10.5$                          | $\pm 24$<br>$\pm 12$ | V<br>V<br>mA   |
| <b>TEMPERATURE RANGE</b><br>Specification<br>Storage<br>Thermal Resistance <sup>(2)</sup> , $\theta_{JA}$   |   | -25<br>-40     |   | +85<br>+125          | $^\circ\text{C}$<br>$^\circ\text{C}$<br>$^\circ\text{C}/\text{W}$  |

Σχήμα 5.10 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του OPA2604

Εδώ βλέπουμε την απόκριση του ενισχυτή μας σε μικρή είσοδο



Σχήμα 5.11 Απόκριση σε μικρή είσοδο

Χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο αυτό σε 8-pin plastic mini-DIP μορφή.

Στην εφαρμογή μας χρησιμοποιήσαμε 2 συσκευές του OPA2604 καθώς χρειαστήκαμε 3 συνολικούς τελεστικούς ενισχυτές για τον ενισχυτή οργάνων και ένας επιπλέον ενισχυτής για απλή μη αναστρέφουσα ενίσχυση.

Στην πρώτη συσκευή χρησιμοποιήθηκαν και οι 2 τελεστικοί για το 1<sup>ο</sup> στάδιο ενώ από την 2<sup>η</sup> χρησιμοποιήθηκε ο ένας για το 1<sup>ο</sup> στάδιο και ο δεύτερος για την μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Ο ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ

### 6.1 Ο μικροελεγκτής

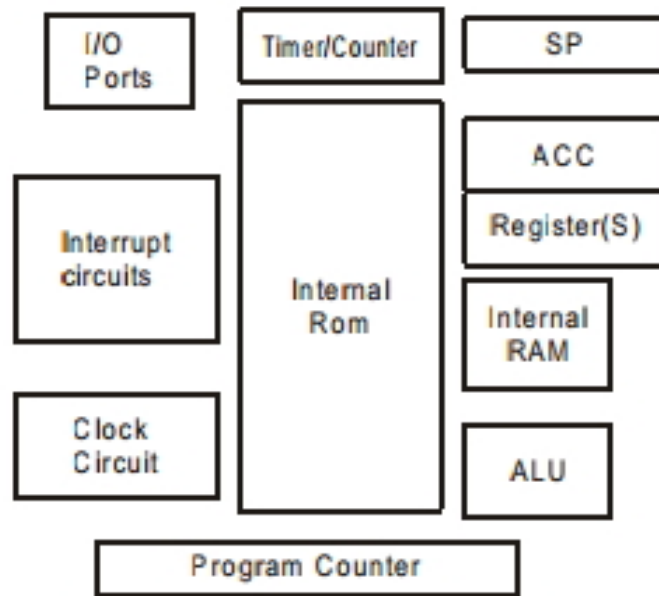
#### 6.1.1 Εισαγωγή

Η σύγχρονη τεχνολογία πλέον βασίζεται κατά μεγάλο ποσοστό στους μικροεπεξεργαστές. Ειδικότερη μορφή τους είναι οι μικροελεγκτές και εμφανίζονται σχεδόν σε κάθε σύγχρονη ηλεκτρονική συσκευή.

Δύο μεγάλες κατηγορίες νεότερης τεχνολογίας μικροελεγκτών είναι οι AVR και PIC των εταιρειών Atmel και Microchip αντίστοιχα, στη παρούσα διπλωματική έκθεση χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής AVR και συγκεκριμένα ο AtMega32A.

Ο μικροελεγκτής είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα που όλες ή οι περισσότερες εφαρμογές βρίσκονται σε μια ψηφίδα. Τα βασικά μέρη ενός μικροελεγκτή είναι :

- CPU (Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας)
- RAM
- EPROM/PROM/ROM(Erasable Programmable Read Only Memory)
- I/O (input/output)-σειριακή και παράλληλη μορφή
- Χρονιστές
- Μετατροπείς αναλογικών σημάτων σε ψηφιακή μορφή και αντίστροφα
- Διαθέτουν ενσωματωμένο προγραμματιζόμενο χρονιστή με μονάδα διαίρεσης συχνότητας (prescaler). Η μονάδα αυτή χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η ακρίβεια του χρονισμού είναι κρίσιμη.
- Προγραμματιζόμενο χρονιστή επιτήρησης (Watch dog Timer-WDT). Ο συνήθης ρόλος του είναι η αποφυγή εσφαλμένων λειτουργιών σε περίπτωση κατάρρευσης του προγράμματος
- Έως 4 παράλληλες θύρες (των 8-bit) και πληθώρα περιφερειακών .όπως UART, SPI, αναλογικός συγκριτής κ.α.. Διαθέτει έως και 64 καταχωρητές
- Δυνατότητα για εσωτερικές και εξωτερικές διακοπές
- Λειτουργίες αποκοπής (Power Down) και ηρεμίας (Sleep) .



Σχήμα 6.1 Βασικά μέρη μικροελεγκτή

### 6.1.2 Λειτουργίες Μικροελεγκτή

#### Κεντρική μονάδα επεξεργασίας

Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας είναι το εγκέφαλος του συστήματος, διαχειρίζεται όλες τις ενέργειες στο σύστημα και εκτελεί όλες τις πράξεις που περιέχονται στα δεδομένα.

Εκτελεί συνεχόμενα δύο λειτουργίες :

- Κάλεσε εντολή
- Εκτέλεσε εντολή

Κατανοεί και εκτελεί εντολές βασισμένες σε μία λίστα δυαδικών κωδικών που ονομάζεται instruction set.

#### Κύκλος Μηχανής

Για να εκτελέσει μια εντολή ο επεξεργαστής πρέπει να:

1. Φέρει την εντολή από την μνήμη
2. Αποκωδικοποιήσει την εντολή
3. Εκτελέσει την εντολή
4. Αποθηκεύσει το αποτέλεσμα πίσω στην μνήμη.



Γενικά ένας κύκλος μηχανής = X κύκλους ρολογιού ( το X εξαρτάται από την συγκεκριμένη εντολή που εκτελείται)

Όσο μικρότερος ο κύκλος ρολογιού τόσο λιγότερος χρόνος χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί ένας κύκλος μηχανής, έτσι οι εντολές εκτελούνται πιο γρήγορα και άρα έχουμε γρηγορότερο επεξεργαστή.

### Κάλεσμα και εκτέλεση εντολής

Το κάλεσμα μιας εντολής περιέχει τα ακόλουθα:

1. Τα στοιχεία του PC (Μετρητής Προγράμματος) τοποθετούνται στην address bus
2. Το σήμα READ ενεργοποιείται
3. Η RAM διαβάζει τα δεδομένα (instruction opcode) και τα διαβιβάζει στο data bus
4. τα δεδομένα μεταφέρονται στη CPU στο Instruction register
5. Το PC αυξάνεται για το επόμενο κάλεσμα από την μνήμη.

### Θύρες: Address, Data και Control

Η θύρα είναι μια συλλογή καλωδίων που μεταφέρουν πληροφορίες με έναν κοινό στόχο. Για κάθε Read ή Write πράξη, ο CPU εξειδικεύει την τοποθεσία της πληροφορίας ή της εντολής τοποθετώντας μια διεύθυνση στην θύρα Address , ύστερα ενεργοποιεί ένα σήμα στο Control bus για να γράψει ή να διαβάσει.

### Read εκτελέσεις

Καλεί ένα byte από το Data σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία στην μνήμη και την τοποθετεί στο Data bus. Ο CPU bus την διαβάζει και την τοποθετεί σε έναν από τους καταχωρητές του.

### Write εκτελέσεις

Βάζει δεδομένα από το CPU στην Data θύρα και την αποθηκεύει στην συγκεκριμένη τοποθεσία

### Address Bus

Μεταφέρει την διεύθυνση μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας .Για  $n$  γραμμές ,  $2^n$  τοποθεσίας μπορούν να προσεγγιστούν.

Π.χ. ένα 16-bit address bus μπορεί να έχει πρόσβαση σε  $2^{16} = 65,536$  τοποθεσίες ή 64K τοποθεσίες ( $2^{10} = 1024 = 1K$ , locations ( $2^{10} = 1024 = 1K$ ,  $2^6 = 64$ ).

### Data Bus

Μεταφέρει πληροφορίες μεταξύ της CPU και της μνήμης ή μεταξύ της CPU και των I/O συσκευών.

### Control Bus

Μεταφέρει σήματα ελέγχου από την CPU που χρησιμοποιούνται για να συγχρονιστούν οι κινήσεις των πληροφοριών μεταξύ του address και του data bus.

### Control/Monitor Input/Output Συσκευές

Οι Control συσκευές είναι έξοδοι ή πραγματοποιητές που μπορούν να επηρεάσουν το περιβάλλον γύρω τους όταν τροφοδοτηθούν διαφορά τάσης ή ρεύμα.

### Monitoring συσκευές

Είναι είσοδοι ή αισθητήρες που ενεργοποιούνται με την θερμοκρασία , την πίεση, το φως, την κίνηση κ.α. και μετατρέπουν την επιρροή αυτή σε διαφορά τάσης ή ρεύμα και διαβάζεται από τον υπολογιστή

Το κύκλωμα διεπαφής μετατρέπει αυτή την διαφορά τάσης ή ρεύματος σε δυαδικό κώδικα και αντίστροφα.

### 6.1.3 Πλεονεκτήματα

Γενικά οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται αν μη τι άλλο ευρύτατα στον χειρισμό και στην επεξεργασία σημάτων .Κάθε είδους σήματος όπως ήχος, εικόνα κλπ. Δειγματοληπτείται και η αντίστοιχη στιγμιαία τιμή του μετατρέπεται σε ένα δυαδικό αριθμό .Στη νέα του αυτή μορφή το λεγόμενο ψηφιακό σήμα προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα .Τα πλεονεκτήματα της ψηφιακής τεχνολογίας στην επεξεργασία ,αποθήκευση και μετάδοση της πληροφορίας φαίνονται παρακάτω :

#### *Επεξεργασία :*

- I. Ευελιξία
- II. Υλοποίηση αλγορίθμων με λογισμικό

#### *Αποθήκευση :*

- I. Μεγάλη χωρητικότητα
- II. Ακρίβεια
- III. Ελαχιστοποίηση σφαλμάτων
- IV. Ευκολία και ταχύτητα ενταμίευσης/ανάκτησης

#### *Μετάδοση:*

- I. Υψηλές ταχύτητες
- II. Ευκολία και ευελιξία
- III. Υλοποίηση με λογισμικό πρωτοκόλλων ,δρομολόγησης και ελέγχου σφαλμάτων
- IV. Ακρίβεια
- V. Ελαχιστοποίηση σφαλμάτων

### 6.1.4 Analog to Digital

Η εφαρμογή του μικροελεγκτή που θα μας απασχολήσει στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι αυτή του ADC ( Analog to Digital Converter).

Στις εφαρμογές αυτού του τύπου η έμφαση είναι στην ταχύτητα και στην βέλτιστη υλοποίηση ειδικών αλγορίθμων όπως ψηφιακών φίλτρων κ.α.



Σχήμα 6.2 ADC (Analog to Digital)

Ο ADC λαμβάνει ένα αναλογικό σήμα στην είσοδό του και επιστρέφει στην έξοδο του το αντίστοιχο σήμα υπό ψηφιακή μορφή. Η μετατροπή αυτή επιφέρει τον κβαντισμό της εισόδου και έτσι παρουσιάζει ένα μικρό ποσοστό σφάλματος. Ο ADC δεν κάνει μια μετατροπή αλλά κάνει μετατροπές περιοδικά με αποτέλεσμα η έξοδός του να είναι μια συνοχή ψηφιακών τιμών που έχουν μετατρέψει ένα συνεχούς-χρόνου και συνεχούς πλάτους αναλογικό σήμα σε ένα διακριτού-χρόνου και διακριτού-πλάτους ψηφιακό σήμα .

Κύρια χαρακτηριστικά ενός ADC είναι το bandwidth ( το μήκος συχνοτήτων που μπορεί να διαβάσει) και ο λόγος του θορύβου προς το σήμα εισόδου ( δηλαδή το πόσο αξιόπιστα μπορεί να μετρήσει ένα σήμα σε σχέση με το θόρυβο που προκύπτει ) .

### 6.1.5 Ο ATMega32A



Σχήμα 6.3 Φωτογραφία του ATMega32A

Παρακάτω περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μικροελεγκτή :



## 8-bit Microcontroller with 32KBytes In-System Programmable Flash

### ATmega32A

#### Features

- High-performance, Low-power Atmel®AVR® 8-bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
  - 131 Powerful Instructions – Most Single-clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General Purpose Working Registers
  - Fully Static Operation
  - Up to 16MIPS Throughput at 16MHz
  - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory segments
  - 32Kbytes of In-System Self-programmable Flash program memory
  - 1024Bytes EEPROM
  - 2Kbytes Internal SRAM
  - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
  - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C<sup>(1)</sup>
  - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
    - In-System Programming by On-chip Boot Program
    - True Read-While-Write Operation
  - Programming Lock for Software Security
- JTAG (IEEE std. 1149.1 Compliant) Interface
  - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
  - Extensive On-chip Debug Support
  - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface
- Atmel QTouch® library support
  - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
  - Atmel QTouch and QMatrix acquisition
  - Up to 64 sense channels
- Peripheral Features
  - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescalers and Compare Modes
  - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
  - Real Time Counter with Separate Oscillator
  - Four PWM Channels
  - 8-channel, 10-bit ADC
    - 8 Single-ended Channels
    - 7 Differential Channels in TQFP Package Only
    - 2 Differential Channels with Programmable Gain at 1x, 10x, or 200x
  - Byte-oriented Two-wire Serial Interface
  - Programmable Serial USART
  - Master/Slave SPI Serial Interface
  - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
  - On-chip Analog Comparator
- Special Microcontroller Features
  - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
  - Internal Calibrated RC Oscillator
  - External and Internal Interrupt Sources
  - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby and Extended Standby
- I/O and Packages
  - 32 Programmable I/O Lines
  - 40-pin PDIP, 44-lead TQFP, and 44-pad QFN/MLF
- Operating Voltages
  - 2.7V - 5.5V
- Speed Grades
  - 0 - 16MHz
- Power Consumption at 1MHz, 3V, 25°C
  - Active: 0.6mA
  - Idle Mode: 0.2mA
  - Power-down Mode: < 1µA

Οι ακροδέκτες του ATMega23A είναι 40. Υπάρχουν 4 διαφορετικά 8-bit ports A,B,C,D από τα οποία το πρώτο λειτουργεί ως η θύρα μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό σήμα.

Ακόμα υπάρχουν:

*Ο ακροδέκτης VGG*

Συνδέουμε την τροφοδοσία των 5V του μικροελεγκτή.

*Ο ακροδέκτης GND*

Συνδέουμε την γείωση.

*Ακροδέκτης RESET*

Μια χαμηλή στάθμη σε αυτό τον ακροδέκτη για περισσότερη ώρα από ότι τη χαμηλότερη περίοδο θα δημιουργήσει μια επανεκκίνηση, ακόμα και αν το ρολόι δεν τρέχει.

*Ακροδέκτης XTAL1*

Είσοδο στον αναστρέφον ενισχυτή και είσοδο στον εσωτερικό χρονοιστή.

*Ακροδέκτης XTAL2*

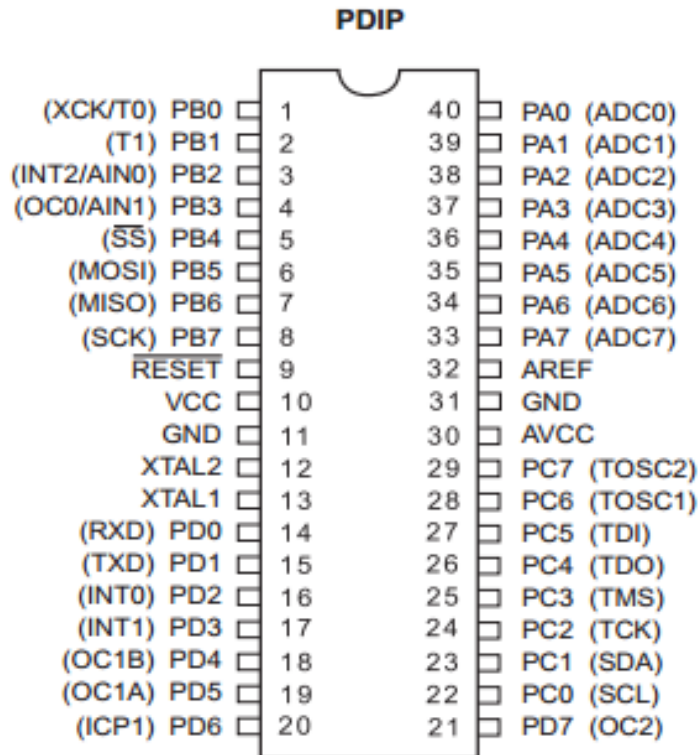
Έξοδο του αναστρέφον ενισχυτή.

*Ακροδέκτης AVCC*

Είναι η τροφοδοσία της θύρας A και του ADC.

*Ακροδέκτης AREF*

Είναι η αναλογική τιμή αναφοράς για τον A/D μετατροπέα.



Σχήμα 6.4 Ακροδέκτες του ATMega32A

Από τους 40 ακροδέκτες χρησιμοποιήθηκαν οι 17 ακροδέκτες για την παρούσα εργασία. 8 ακροδέκτες για την μετάδοση γενικών πληροφοριών στην οθόνη, 1 ακροδέκτης τροφοδοσίας του μικροεπεξεργαστή, 1 ακροδέκτης τροφοδοσίας του συστήματος ADC, αντίστοιχα 2 ακροδέκτες GND, 1 ακροδέκτης εισόδου του αναλογικού σήματος, 1 ακροδέκτης για το Register select signal της οθόνης, ένας για το Read/Write της οθόνης, ακόμα ένας για enable της οθόνης και τέλος ένας ακροδέκτης για την τάση αναφοράς του ADC.



## 6.2 Η Οθόνη LCD

### 6.2.1 Winstar wh1602b

Για την οθόνη χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο Winstar wh1602b.



Σχήμα 6.5 Φωτογραφία της οθόνης LCD

Οι ακροδέκτες της οθόνης περιγράφονται παρακάτω :

1. Vss : σύνδεση της γείωσης.
2. Vdd : η τροφοδοσία των 5V για την λειτουργία της οθόνης.
3. Vo : ακροδέκτης ρύθμισης αντίθεσης.
4. RS : Register select signal (RS), καθορίζει εάν η πληροφορία που θα δεχτεί η οθόνη θα υποδεχτεί ως εντολή ή πληροφορία (π.χ. συμβολο για επίδειξη).
5. R/W : Read/Write, καθορίζει εάν θα γραφτεί η πληροφορία στο register ή θα διαβαστεί.
6. E : Enable, προσδιορίζει στην οθόνη ότι η πληροφορία ή εντολή από το register είναι έτοιμη να διαβαστεί.
7. DB0-DB7 : Μέχρι και τον ακροδέκτη 14 είναι data bus lines.
15. A/Vee : 4,2 Volt για Led/ Αρνητική τάση εξόδου.
16. K : Τάση τροφοδοσίας για B/L (0Ω).

## Χαρακτηριστικά της LCD οθόνης

| Item   | Symbol | Condition        | Standard Value |      |      | Unit |    |
|--|--------|------------------|----------------|------|------|------|----|
|  |        |                  | min.           | typ. | max. |      |    |
| Input Voltage  | VDD    | VDD=+5V          | 4.7            | 5.0  | 5.3  | V    |    |
| Supply Current   | IDD    | VDD=5V           | ---            | 1.2  | 1.5  | mA   |    |
| Recommended LC Driving Voltage for Normal Temp. Version module | VDD-V0 | -20°C            | ---            | ---  | 5.2  | V    |    |
|  |        | 0°C              | ---            | ---  | 4.2  |      |    |
|  |        | 25°C             | ---            | 3.8  | ---  |      |    |
|  |        | 50°C             | 3.5            | ---  | ---  |      |    |
|  |        | 70°C             | 3.2            | ---  | ---  |      |    |
| LED Forward Voltage  | VF     | 25°C             | ---            | 4.2  | 4.6  | V    |    |
| LED Forward Current  | IF     | 25°C             | Array          | ---  | 100  | ---  | mA |
|  |        |                  | Edge           | ---  | 20   | 40   |    |
| EL Power Supply Current  | IEL    | Vel=110VAC;400Hz | ---            | ---  | 5.0  | mA   |    |

## 6.3 Ο κώδικας

### 6.3.1 Ο main κώδικας

Ο κύριος κώδικας που γράφτηκε main έχει την δυνατότητα να προγραμματίσει τον μικροελεγκτή έτσι ώστε να μετατρέψει τις αναλογικές τιμές που του δίνουμε σε ψηφιακές.

Χρησιμοποιήθηκε η τεχνική των interrupts η οποία μας δίνει την δυνατότητα να μετρήσουμε την επόμενη τιμή στην είσοδό μας και να την ψηφιοποιήσουμε όταν αυτή σταλθεί στην είσοδο.

Με λίγα λόγια όταν υπάρξει μια καινούργια αναλογική τιμή ο μικροεπεξεργαστής θα εκτελέσει το πρόγραμμα και θα την μετατρέψει σε ψηφιακή μορφή αυτόματα.

Ο μικροεπεξεργαστής αποστέλλει ως έξοδο έναν αριθμό από 0 έως 1023.

Ο αριθμός αυτός χωρίς κάποια τροποποίηση δεν έχει κάποιο νόημα και έτσι πρέπει να τον φέρουμε στην μορφή N/m για να μετράμε ροπή. Έτσι εφόσον ο αριθμός αυτός συμβολίζει την ενισχυμένη τάση από το στάδιο της ενίσχυσης πρέπει να το φέρουμε στην αρχική τάση που προερχόταν από την έξοδο του αισθητήρα μας.

Άρα ο αριθμός 0 έως 1023 συμβολίζει 0 έως 5Volt ενισχυμένα 250 φορές, οπότε διαιρούμε με 1024, πολλαπλασιάζουμε επί 5 και διαιρούμε διά 250.

Έτσι φτάσαμε στο σήμα τάσης από το αισθητήριο. Τώρα μας μένει να τροποποιήσουμε την τάση αυτή σε ροπή. Ξέροντας ότι ο αισθητήρας μετράει από 0 έως 20 Kg με μέγιστη έξοδο τα 20mV και με επιτάχυνση βαρύτητας ίση με  $9.8\text{m/s}^2$  βρίσκουμε ότι 1mV αντιστοιχεί σε 9.8N.

Στη συνέχεια απλά χρειάζεται να μετρήσουμε την απόσταση του κέντρου του άξονα με το σημείο εφαρμογής η οποία είναι 0.097m.

Τελικά βρίσκουμε ότι κάθε mV στη έξοδο του αισθητήρα αντιστοιχεί σε 0.95N/m .

Δηλαδή πρέπει να πολλαπλασιάσουμε τον αριθμό από 0 έως 1023 με :

$$*[(5/1024)/250*0.95] = 0.01855 .$$

Για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων σε δεκαδική μορφή αρχικά χωρίσαμε τον αριθμό στο ακέραιο μέρος και στο δεκαδικό μέρος υπό την μορφή ακεραίων. Στη συνέχεια με την συνάρτηση Send\_Integer στάλθηκαν οι αριθμοί αυτοί σε συγκεκριμένη θέση ώστε να δημιουργηθεί η εμφάνισή του ως δεκαδικός αριθμός.

Κώδικας main.c γραμμένος σε C :

```

#include <avr/io.h>
#include "LCD_teliko.h"
#include <stdlib.h>
#include <avr/interrupt.h>

char adcResult[4];
float display;
float before_display;
int part_one;
int part_oneA;
int part_oneB;
int part_two;

int main(void)
{
    Initialize_LCD();
    Send_String_Location(1,1,"Torque ");

                                     //ρύθμιση ADC
    ADCSRA |= 1<<ADIE; // ενεργοποίηση Interrupts συνάρτηση στο ADC
    ADMUX |= (1<<REFS0) | (1<<REFS1);
    ADCSRA |= 1 << ADPS2; // ενεργοποίηση prescaler
    ADCSRA |= 1<<ADEN; // ενεργοποίηση ADC ρύθμισης

    sei(); // ενεργοποίηση interrupts

    ADCSRA |= 1<<ADSC; // εκκίνηση 1ης μετατροπής A/D

    while (1)
    {
    }
}
ISR(ADC_vect) //Interrupt
{

    uint8_t lownumber = ADCL;
    uint16_t tenbit = ADCH << 8 | lownumber;
}

```

```
before_display = (tenbit-60)*0.01855;

part_one = before_display;
part_oneA = part_one/10;
part_oneB = part_one-part_oneA*10;
part_two = (before_display-part_one)*100;

Send_Integer(6,2,part_oneA,1);
Send_Integer(7,2,part_oneB,1);
Send_Integer(9,2,part_two,2);

Send_Integer(6,2,tenbit,4);

ADCSRA |= 1<<ADSC;           // εκκίνηση επόμενης μετατροπής
}
```

### 6.3.2 Η βιβλιοθήκη LCD

Η βιβλιοθήκη LCD έχει γραφτεί έτσι ώστε να ενεργοποιείται η οθόνη και να εμφανίζει τα αποτελέσματα που της ζητάμε από την main.

Αποτελείται από 9 συναρτήσεις :

- Check\_LCD\_Busy η οποία τσεκάρει εάν η οθόνη είναι έτοιμη να πάρει μια εντολή.
- Execute η οποία ενεργοποιεί την οθόνη να δεχτεί μια εντολή.
- Send\_Command η οποία στέλνει στην οθόνη μια εντολή.
- Send\_Character αποστέλλει έναν χαρακτήρα προς εμφάνιση στην οθόνη.
- Send\_String αποστέλλει μια σειρά από χαρακτήρες χρησιμοποιώντας την προηγούμενη συνάρτηση.

- `Go_LDC_Location` η οποία αποστέλλει πληροφορία σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία στην οθόνη.
- `Initialize_LCD` η οποία κάνει αρχικοποίηση της οθόνης.
- `Send_String_Location` στέλνει μια συμβολοσειρά σε συγκεκριμένη θέση στην οθόνη.
- `Send_Integer` η οποία στέλνει έναν αριθμό προς εμφάνιση στην οθόνη σε συγκεκριμένη θέση.

Παρακάτω βλέπουμε και τον αντίστοιχο κώδικα.

Κώδικας `LCD.h` γραμμένος σε C :

```
#ifndef LCD_teliko
#define LCD_teliko

#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include <stdlib.h>

#define LCD_Connection PORTB
#define Data_LCDConnection DDRB
#define LCD_Control PORTD
#define Data_LCDControl DDRD
#define Execution 5
#define ReadWrite 7
#define Option 2

char PositionsLCD[2] = {0, 40};

void Check_LCD_Busy(void);
void Execute(void);
```

```
void Send_Command(unsigned char command);
void Send_Character(unsigned char character);
void Send_String(char *StringOfCharacters);
void Go_LDC_Location(uint8_t x, uint8_t y);
void Initialize_LCD(void);
void Send_String_Location(uint8_t x,uint8_t y,char *StringofCharacters);
void Send_Integer(uint8_t x,uint8_t y, int toDisplay ,char numberofdigits);
```

```
void Check_LCD_Busy()
{
Data_LCDConnection = 0;
LCD_Control |= 1<<ReadWrite;
LCD_Control &= ~1<<Option;

while (LCD_Connection >= 0x80)
{
Execute();
}

Data_LCDConnection = 0xFF; //0xFF diladi 0b11111111
}
```

```
void Execute()
{
LCD_Control |= 1<<Execution;
asm volatile ("nop");
asm volatile ("nop");
LCD_Control &= ~1<<Execution;
}
```

```
void Send_Command(unsigned char command)
{
Check_LCD_Busy();
LCD_Connection = command;
LCD_Control &= ~ ((1<<ReadWrite)|(1<<Option));
Execute();
LCD_Connection = 0;
}
```

```
void Send_Character(unsigned char character)
{
    Check_LCD_Busy();
    LCD_Connection = character;
    LCD_Control &= ~ (1<<ReadWrite);
    LCD_Control |= 1<<Option;
    Execute();
    LCD_Connection = 0;
}
```

```
void Send_String(char *StringOfCharacters)
{
    while(*StringOfCharacters > 0)
    {
        Send_Character(*StringOfCharacters++);
    }
}
```

```
void Go_LDC_Location(uint8_t x, uint8_t y)
{
    Send_Command(0x80 + PositionsLCD[y-1] + (x-1));
}
```

```
void Initialize_LCD()
{
    Data_LCDControl |= 1<<Execution | 1<<ReadWrite | 1<<Option;
    _delay_ms(15);
```

```
Send_Command(0x01); //Clear Screen 0x01 = 00000001
_delay_ms(2);
Send_Command(0x38);
_delay_us(50);
Send_Command(0b00001110);
_delay_us(50);
}
```

```
void Send_String_Location(uint8_t x,uint8_t y,char *StringofCharacters)
{
    Go_LDC_Location(x,y);
```



```
Send_String(StringofCharacters);}
```

```
void Send_Integer(uint8_t x,uint8_t y, int toDisplay ,char numberofdigits)
{
    char StringDisplay[numberofdigits];
    itoa(toDisplay,StringDisplay, 10);
    Send_String_Location(x,y,StringDisplay);
}
```

```
#endif
```

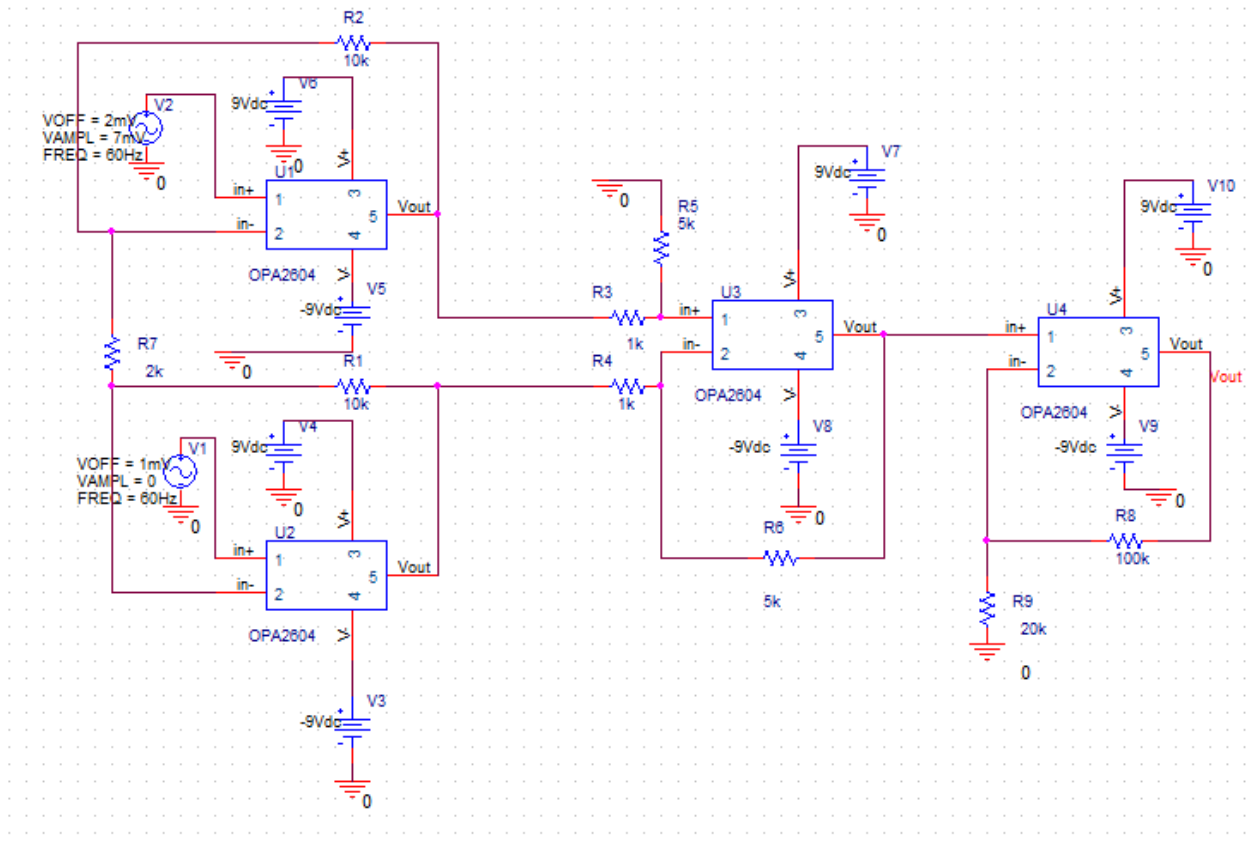


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

### 7.1 Τα σχηματικά

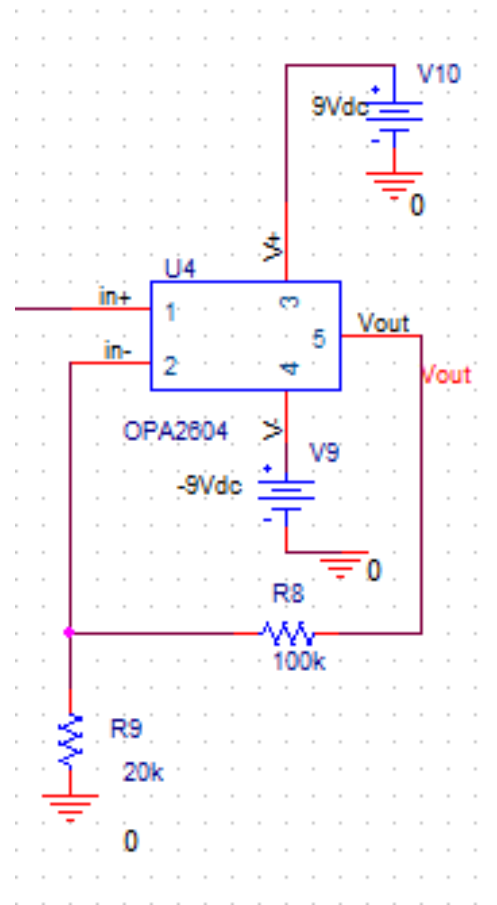
Στη συνέχεια, εφόσον επιλέχθηκαν τα στοιχεία του κυκλώματος πραγματοποιήθηκαν κυκλωματικές προσομοιώσεις στη σουίτα OrCAD της εταιρίας Cadence.

Η κυκλωματική διάταξη του ενισχυτή οργάνων κατά τη διαμόρφωσή του στο OrCAD, είναι η εξής:



Σχήμα 7.1 Σχηματικό στο Pspice

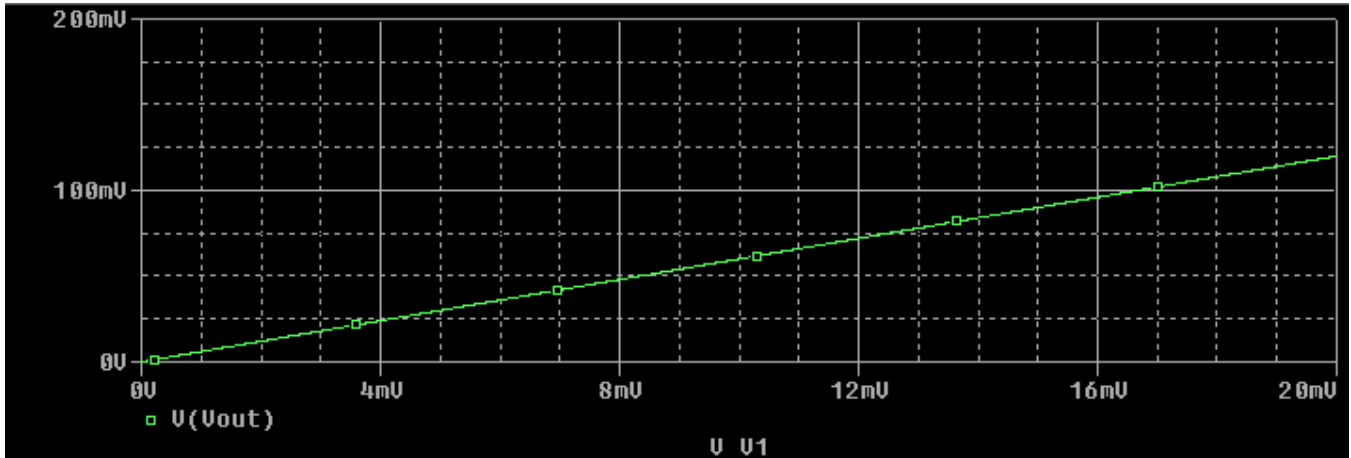
Αρχικά έγινε προσομοίωση στην απόκριση σήματος του τελεστικού ενισχυτή OPA2604 σε μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία. Η κυκλωματική διάταξή του είναι η εξής :



Σχήμα 7.2 Σχηματικό του OPA2604

## 7.2 Τα αποτελέσματα

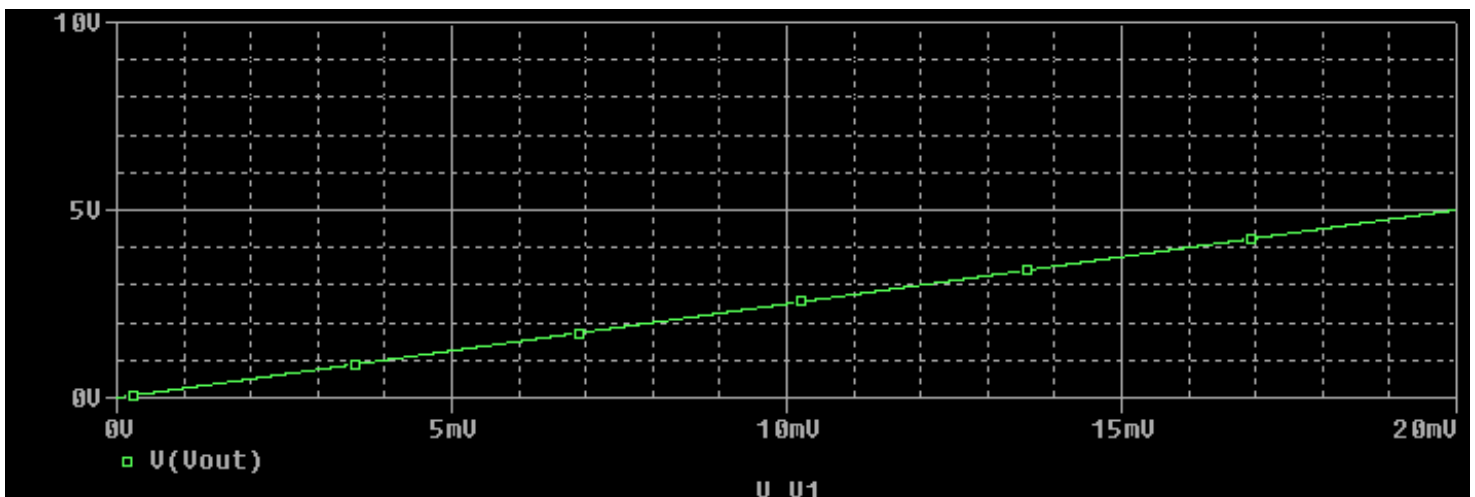
Έγινε προσομοίωση του ενισχυτή για είσοδο από 0 έως 20mV με βήμα 0.01mV και κέρδος τάσης  $A=5$  για να παρατηρήσουμε το σήμα εξόδου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως τα ανέδειξε το πρόγραμμα.



Σχήμα 7.3 Προσομοίωση μη αναστρέφουσας συνδεσμολογίας του OPA2604

Όπως βλέπουμε ο τελεστικός ενισχυτής μας δίνει πολύ καλά αποτελέσματα στις χαμηλές εισόδους με πολύ καλή γραμμικότητα σε σχεδόν όλο το εύρος.

Για την προσομοίωση του ενισχυτή οργάνων και της επιπλέον ενίσχυσης στο τέλος της διάταξης τα αποτελέσματα δεν ήταν πολύ διαφορετικά. Πάλι είναι πολύ καλή η ενίσχυση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάταξή μας.



Σχήμα 7.4 Προσομοίωση του σταδίου ενίσχυσης στο Pspice



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΚΕΤΑΣ

### 8.1 Σχεδιασμός της πλακέτας

Η βασική απαίτηση στο σχεδιασμό του τυπωμένου κυκλώματος είναι η όσο το δυνατόν πιο σωστή αξιοποίηση του χώρου που ορίζεται από τις διαστάσεις μήκους και πλάτους, με σκοπό την ελαχιστοποίησή τους.

Το τύπωμα του σχεδίου επάνω στην πλακέτα σχεδιάστηκε από τον συγγραφέα της παρούσας εργασίας και η κατασκευή του έγινε με την βοήθεια του εργαστηρίου Ηλεκτρονικών του ΕΜΠ με τη μέθοδο της μεταξοτυπίας.

Επίσης, επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση των συνδέσεων με τη χρήση εξωτερικών καλωδίων, καθώς μειώνεται η αξιοπιστία του κυκλώματος. Η σύνδεση αυτή επιλύει το πρόβλημα της διασταύρωσης δύο χαλκοδιαδρόμων όταν η εκτύπωση του κυκλώματος γίνεται σε ένα επίπεδο (single layer). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή σχεδιάστηκε τυπωμένο κύκλωμα πολλών επιπέδων (multi layer), καθώς ο αριθμός των απαιτούμενων διαδρόμων ήταν μεγάλος για single layer στις συγκεκριμένες διαστάσεις.

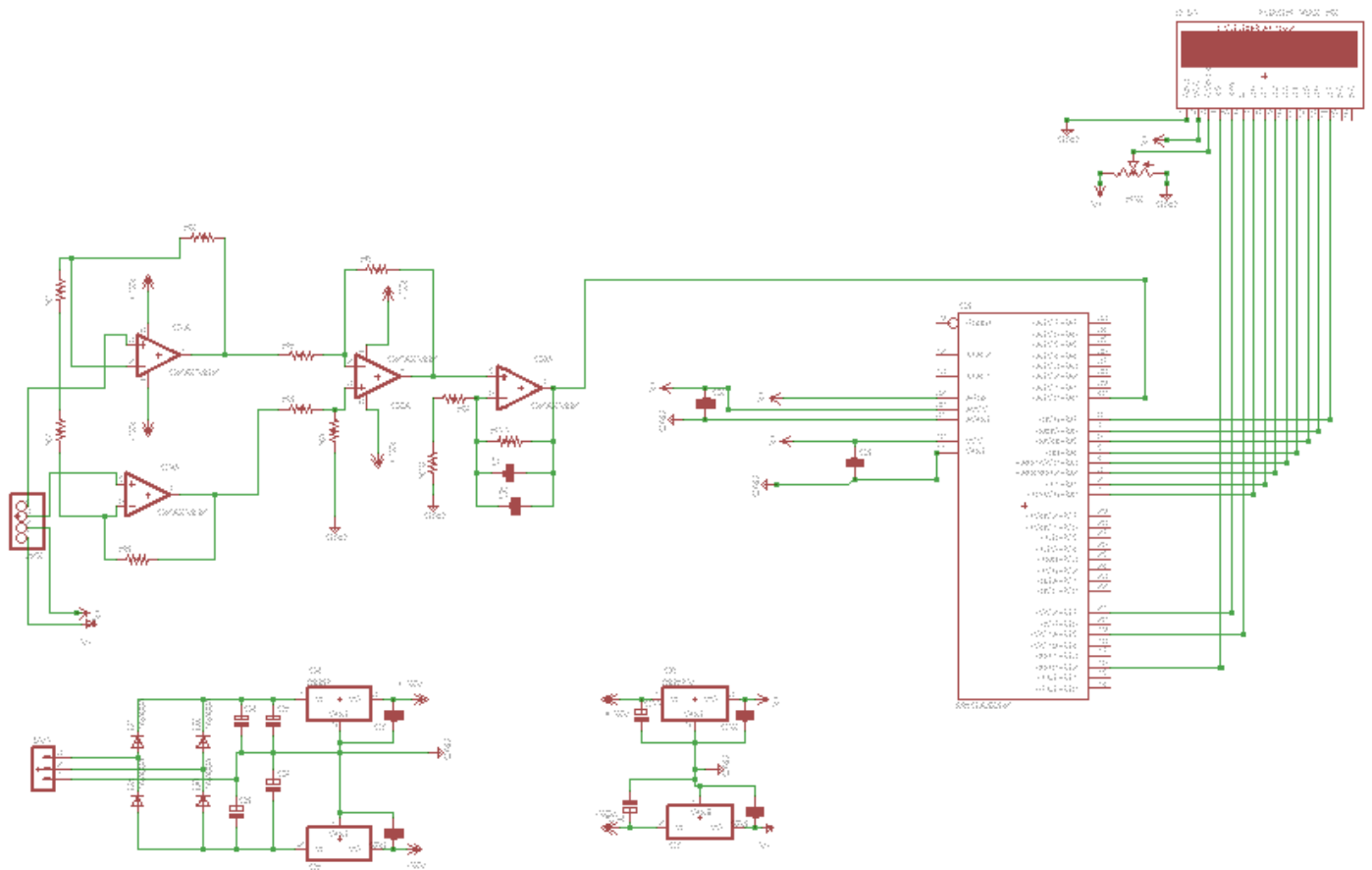
Αναλυτικότερα έγιναν 2 layers στην πάνω όψη της πλακέτας και στην κάτω όψη αντίστοιχα.

Οι περιορισμοί που τίθενται αφορούν στην ελάχιστη απόσταση μεταξύ των αγωγών και καθορίζεται από τον κατασκευαστή ανάλογα με το υλικό κατασκευής περίπτωση ορίζεται στα 10mil (0.254mm).

Επίσης, το εύρος των χαλκοδιαδρόμων πρέπει να συνάδει με τη μέγιστη τιμή του ρεύματος που αναμένεται να περάσει μέσα από αυτούς, ώστε να μην καταστραφούν. Επίσης αποφεύχθηκε η δημιουργία χαλκοδιαδρόμων με κλίση 90 μοιρών καθώς έχει αποδειχθεί ότι δεν παρουσιάζουν καλά χαρακτηριστικά στη διέλευση του ρεύματος. Έτσι προτιμήθηκε η δημιουργία διαδρομών κλίσης 45 μοιρών.

Χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα CAD για το σχεδιασμό της πλακέτας, συγκεκριμένα το πρόγραμμα EAGLE 6.5.0 .

Το σχέδιο που δημιουργήθηκε αρχικά ήταν το σχηματικό της συνολικής πλακέτας και παρουσιάζεται παρακάτω :

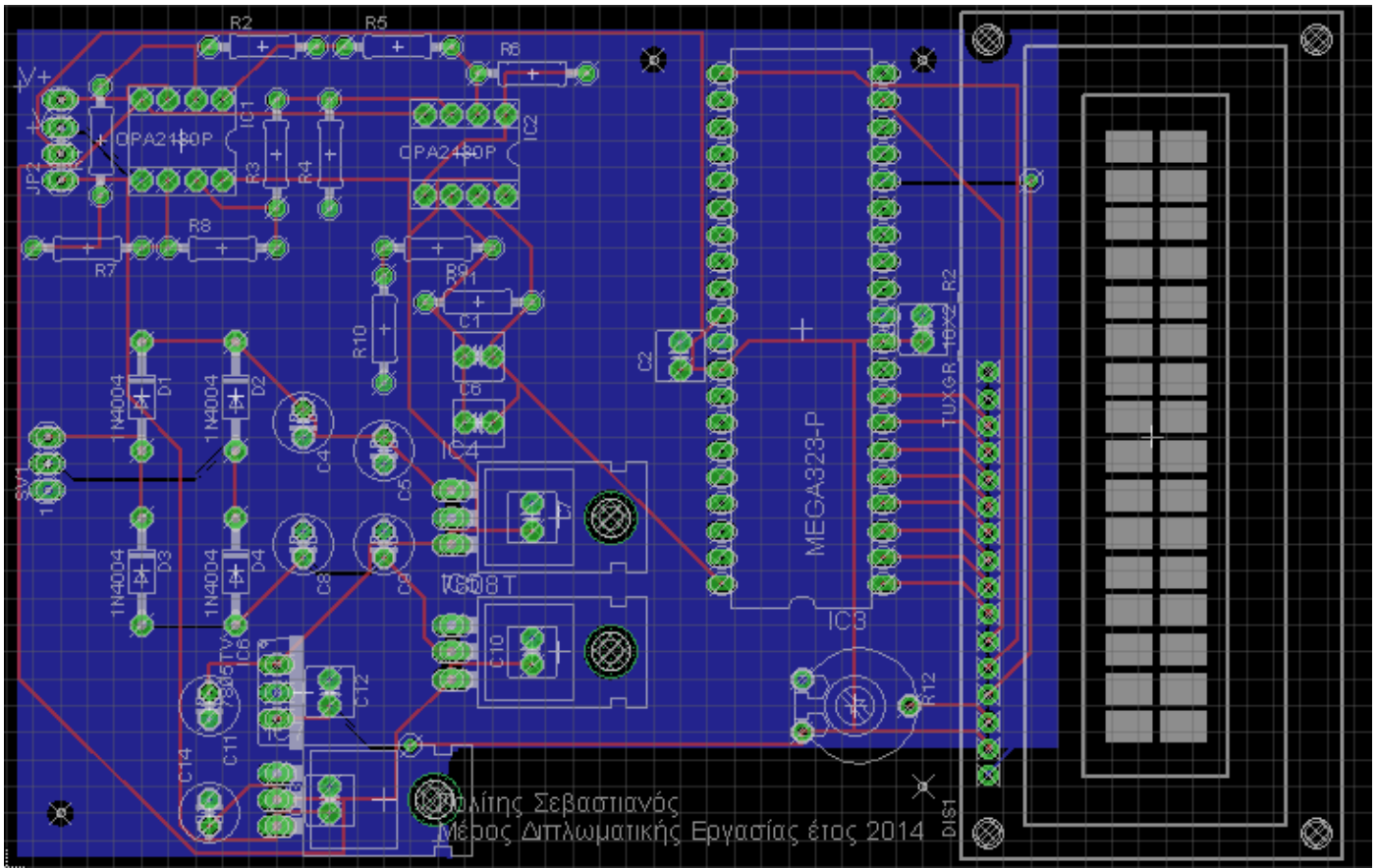


Σχήμα 8.1 Σχηματικό της πλακέτας στο Eagle



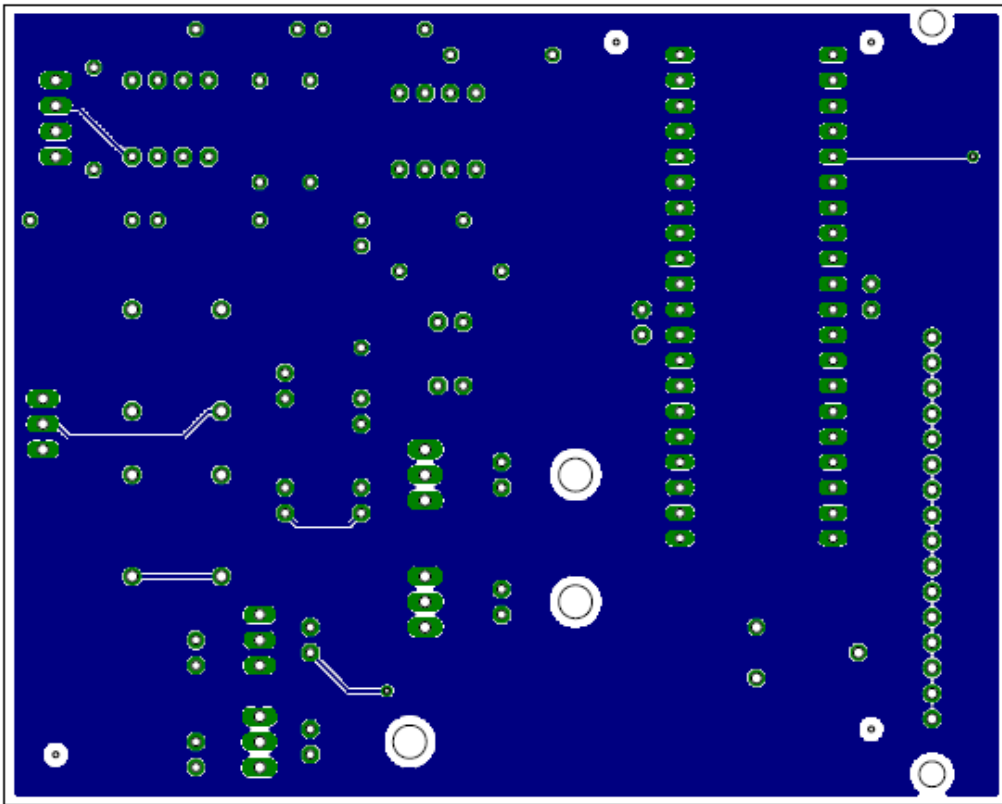
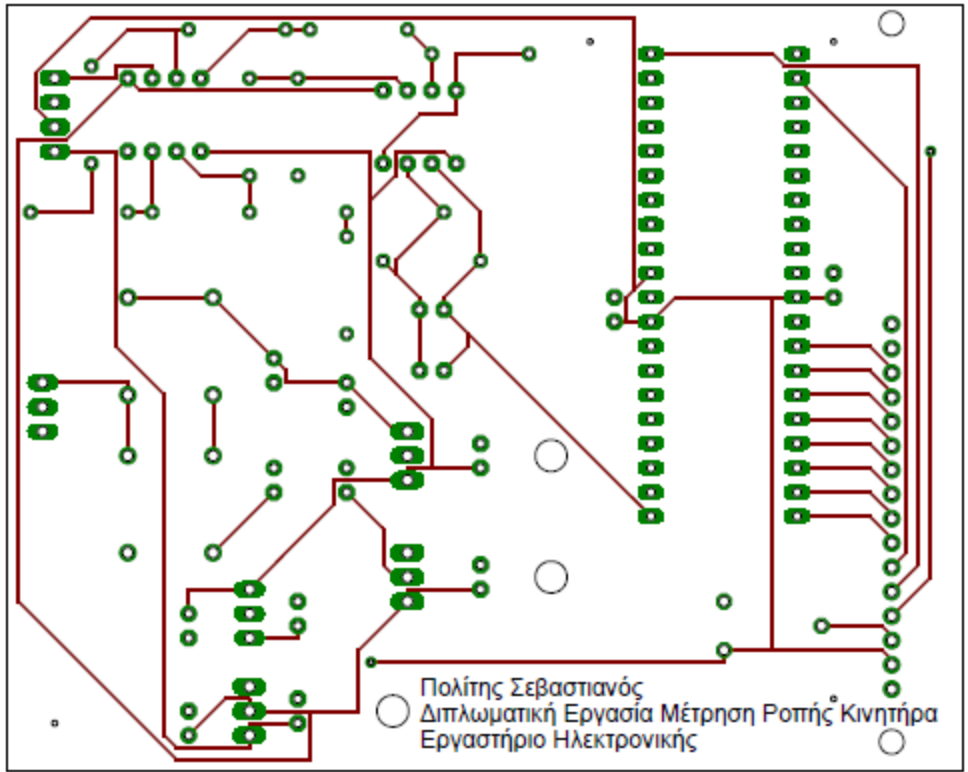
## 8.2 Η κατασκευή

Το τελικό σχέδιο που δημιουργήθηκε ήταν το παρακάτω



Σχήμα 8.2 Η πλακέτα στο Eagle

Και συγκεκριμένα για τύπωση πλακέτας πήγαν οι 2 όψεις:



Σχήμα 8.3 Πάνω και κάτω όψη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Τα αποτελέσματα του πειράματος όπως προέκυψαν με τη βοήθεια των υποψήφιων διδασκτόρων στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος είναι τα εξής :

| Τάση<br>(V) | Ρεύμα<br>(A) | Ροπή<br>(N/m) | Ισχύς<br>(W) | εισόδου | Απόδοση<br>(%) |
|-------------|--------------|---------------|--------------|---------|----------------|
| 11.8        | 1.83         | 1.45          | 54           |         | 86.547         |
| 12.09       | 2.19         | 1.74          | 64           |         | 88.066         |
| 12.37       | 3.2          | 2.55          | 97           |         | 86.346         |
| 12.08       | 3.82         | 3.05          | 116          |         | 87.089         |
| 13.05       | 4.48         | 3.75          | 148          |         | 84.442         |
| 13.43       | 5.17         | 4.11          | 165          |         | 84.046         |
| 13.66       | 5.84         | 4.63          | 189          |         | 83.417         |
| 14.3        | 6.94         | 5.44          | 230          |         | 81.806         |
| 14.7        | 7.9          | 6.12          | 264          |         | 81.301         |
| 14.43       | 8.8          | 6.64          | 295          |         | 80.126         |
| 15.84       | 9.23         | 6.97          | 322          |         | 77.492         |
| 16.45       | 10.1         | 7.54          | 359          |         | 76.178         |
| 16.39       | 10.54        | 7.87          | 381          |         | 75.357         |

Σχήμα 9.1 Πίνακας μετρήσεων

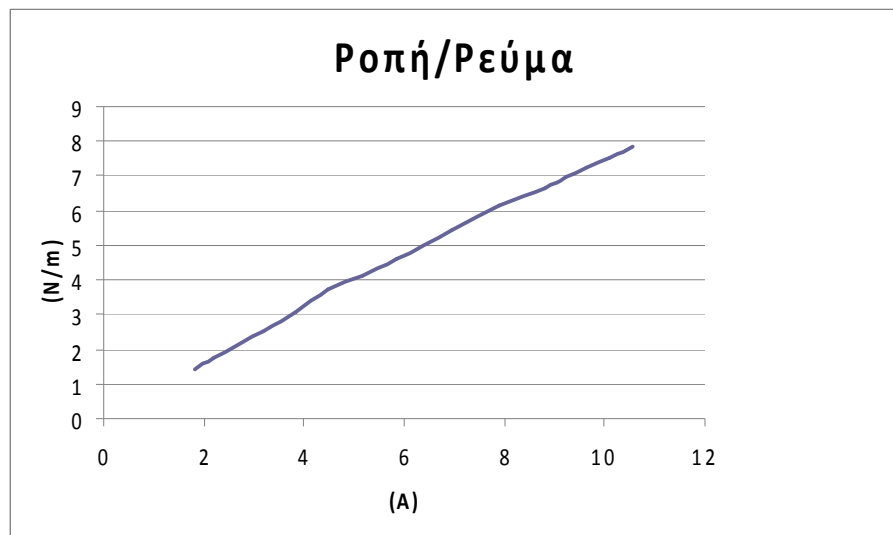
Οι μετρήσεις αυτές αφορούν την τάση του κινητήρα, το ρεύμα του κινητήρα, την ροπή που μετρήσαμε με την διάταξή μας και την ισχύ της εισόδου. Και έτσι μπορέσαμε να υπολογίσουμε την απόδοση του κινητήρα στην τελευταία στήλη.

### Ακρίβεια

Παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις μας είναι σε δεκαδική μορφή με ακρίβεια έως και το 2<sup>ο</sup> δεκαδικό ψηφίο .Ο μικροελεγκτής μας μπορεί να κάνει μέχρι 1024 μετρήσεις στο εύρος 0-20mV. Η απόκλιση σε μετρήσεις μεγαλύτερης ακρίβειας ονομάζεται «οργανικό όριο σφάλματος» και ισούται στην περίπτωση μας με  $\delta = 0,005$

Η ακρίβεια αυτή του μικροελεγκτή υπολογίστηκε από το εύρος της τάσης διά τα bit, δηλαδή  $5V/1024= 4,88mV$ . Τώρα αν διαιρέσουμε την ακρίβεια με την μέγιστη τάση που δίνει ο αισθητήρας στην έξοδό του, θα βρούμε ότι η ακρίβεια μεταφράζεται σε 0,0244% του ονομαστικού φορτίου. Στη συνέχεια ξέροντας ότι η μέγιστη ροπή που μπορεί να μετρήσει ο αισθητήρας είναι 19N/m, καθώς έχει μέγιστη τάση 20mV και όπως είδαμε στο κεφάλαιο 6 είναι  $1mV=0,95N/m$ , βρίσκουμε  $0,000244*19 = 0,00463N/m$ . Έτσι μπορέσαμε και μετράμε μέχρι και το 2<sup>ο</sup> δεκαδικό ψηφίο καθώς η απόκλισή μας δεν επέτρεπε περαιτέρω ακρίβεια, πάραυτα η ακρίβεια αυτή πληροί τις ανάγκες του πειράματός μας.

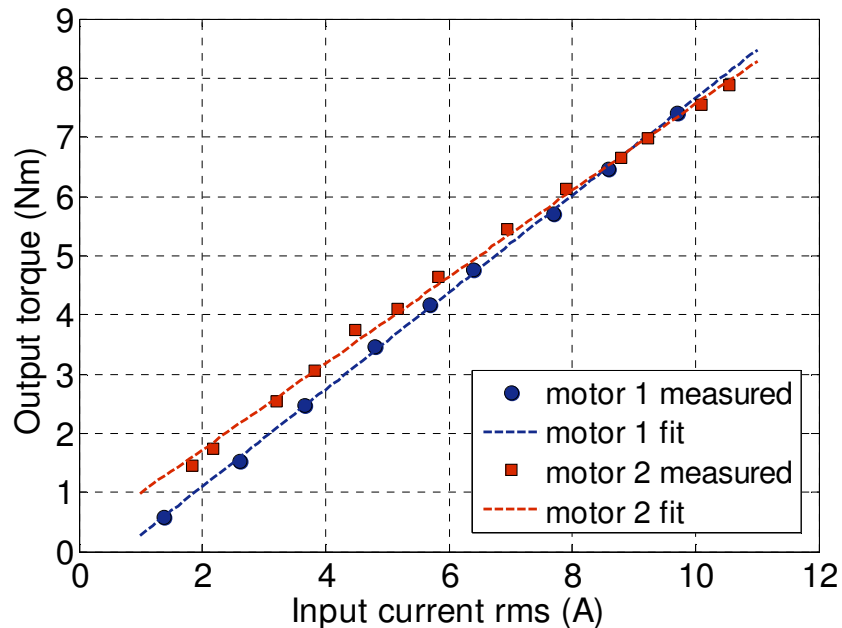
Ακόμα σχεδιάσαμε το διάγραμμα ροπής ανά το ρεύμα



Σχήμα 8.3 Διάγραμμα Ροπής/ρεύματος

Οι μετρήσεις της προηγούμενης πειραματικής διάταξης αφορούσαν το κινητήρα που κατασκευάστηκε από το εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος για να συμμετάσχει το έτος 2014 στο διαγωνισμό της Shell eco marathon. Για λόγους αξιολόγησης της μηχανής αυτής μετρήθηκε και ο παλιός κινητήρας του «Πυρφόρου» έτσι ώστε να συγκριθούν μεταξύ τους.

Τα αποτελέσματα των 2 κινητήρων παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα το οποίο μας δείχνει τις τιμές του ρεύματος και την αντίστοιχη ροπή του κινητήρα στις τιμές αυτές:



Σχήμα 9.2 Διάγραμμα ροπών

Με μπλέ ο κινητήρας 1 παρουσιάζεται ο παλιός κινητήρας ενώ με κόκκινο ο κινητήρας 2 είναι ο καινούργιος.

Όπως βλέπουμε στις χαμηλές τιμές του ρεύματος ο κινητήρας 2 παρουσιάζει αυξημένη ροπή σε σχέση με τον 1, αυτό λαμβάνει μέρος μέχρι και για τιμές ρεύματος ίση με 8 Ampere, ύστερα έχουν παρόμοια ροπή και από τα 10 Ampere και μετά βλέπουμε να παρουσιάζει μεγαλύτερη ροπή ο κινητήρας 1. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι ο καινούργιος κινητήρας είναι αρκετά καλύτερος από τον παλιό καθώς μας ενδιαφέρει το εύρος χαμηλών τιμών ρεύματος. Στις συνθήκες του αγώνα ο κινητήρας δεν πρόκειται να ξεπεράσει ποτέ την τιμή των 8 Ampere οπότε καταφέραμε και προσδιορίσαμε ποιος από τους 2 κινητήρες είναι καταλληλότερος.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 10.1 Συμπεράσματα

Από την όλη διαδικασία σχεδίασης, κατασκευής και μέτρησης των επιδόσεων του συστήματος, έγιναν αρκετές παρατηρήσεις για την λειτουργικότητα του συστήματος αλλά και για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Στο ξεκίνημα της εργασίας είχαμε θέσει κάποιους βασικούς στόχους που σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της μας καθοδήγησαν και φτάνοντας στο σημείο αυτό μπορούμε να πούμε ότι τους εκπληρώσαμε με αξιοσημείωτη επιτυχία.

Η πειραματική μας διάταξη υλοποιήθηκε, σίγουρα όχι με τα καλύτερα δυνατά μέσα, και οι θεωρητικοί υπολογισμοί που έγιναν για να εξασφαλίσουν τη σωστή λειτουργία της αποδείχτηκαν σωστοί, αφού η συμπεριφορά της δεν εμφάνισε κάποιες σοβαρές αποκλίσεις σε σχέση με τη θεωρητικώς αναμενόμενη. Αυτό το γεγονός μας επέτρεψε να λάβουμε απρόσκοπτα μετρήσεις, ικανές να μας δώσουν τις απαιτούμενες πληροφορίες και, φυσικά, εξασφάλισε την αντοχή της διάταξης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά και για άλλους κινητήρες της ομάδας.

### 10.2 Προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση

Η διάταξή μας είχε τελικά πολύ καλά αποτελέσματα με αντικειμενικά μικρά σφάλματα καθώς οι τιμές της ροπής του κινητήρα δεν απείχαν πολύ από τις θεωρητικές τιμές που περιμέναμε. Ορισμένοι λόγοι σφαλμάτων θα μπορούσαν να οφείλονται στην διάταξη σύνδεσης του αισθητήρα στον κινητήρα. Αυτό θα μπορούσε να γίνει από την χαλάρωση της βίδας που κρατάει σταθερά την σύνδεση του αισθητήρα με το μηχανικό εξάρτημα που κατασκευάσαμε. Έτσι για περαιτέρω βελτίωση θα μπορούσε να βρεθεί ένα σύστημα σύνδεσης με καλύτερα χαρακτηριστικά το οποίο δεν θα επέτρεπε την χαλάρωση της διάταξης.

Ακόμα στο μέλλον καλή ιδέα θα ήταν δημιουργηθεί ένα σύστημα μέτρησης ροπής του κινητήρα το οποίο θα ήταν ενσωματωμένο στο όχημα και έτσι δεν θα χρειαζόταν να αποσυνδεθεί ο κινητήρας από το όχημα με αποτέλεσμα την μέτρηση ροπής την ώρα του διαγωνισμού. Για την ανάλυση των μετρήσεων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα τηλεμετρίας που θα απέστρελλε τις μετρήσεις σε κάποιο φορητό υπολογιστή.





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith. Microelectronic Circuits, fifth edition, 2004 by Oxford University Press, Inc.
2. Jacob Millman, Χρήστου Κ. Χαλκιά, Ολοκληρωμένη Ηλεκτρονική, Αναλογικά και Ψηφιακά Κυκλώματα και Συστήματα, εκδόσεις Συμμετρία Αθήνα.
3. Κ Πεκμεστζή, Συστήματα Μικροϋπολογιστών, Μικροελεγκτές AVR και PIC, εκδόσεις Συμμετρία Αθήνα 2009.
4. Brian W. Kernighan, Dennis M. Ritchie, The C Programming Language (Second edition), by Prentice Hall Inc 1988.
5. Ιωάννης Ν. Αβαριτσιώτης, Τεχνολογία Πολυψηφιδικών Πακέτων, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1997.
6. Ιωάννης Ν. Αβαριτσιώτης, Τεχνολογία Αισθητήρων και Μικροσυστημάτων με Εργαστηριακές Ασκήσεις, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2011.
7. Γ. Καραγιάννης, Κ. Τζιτζιράχου, Εισαγωγή Στα Σήματα και Συστήματα, Αθήνα 2003, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
8. Κρασόπουλος Χρήστος, Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μονίμων μαγνητών για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα, Διπλωματική εργασία, Οκτώβριος 2013.
9. Texas Instruments Home Page <http://www.ti.com> .
10. Atmel Cooperation Home Page <http://www.atmel.com>.
11. STMicroelectronics Home Page <http://www.st.com>.
12. RS Load Cells <http://uk.rs-online.com>.