



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

Κατασκευή Φωτοβολταϊκού Ηλιοστάτη (Solar Tracker)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Στ. Παπανικολάου

Επιβλέπων : Ιωάννης Ν. Αβαριτσιώτης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2008



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

Κατασκευή Φωτοβολταϊκού Ηλιοστάτη (Solar Tracker)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Στ. Παπανικολάου

Επιβλέπων : Ιωάννης Ν. Αβαριτσιώτης
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27^η Ιουνίου 2008.

.....
Ιωάννης Ν. Αβαριτσιώτης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ελευθέριος Καγιάφας
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Βασίλειος Λούμος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2008

.....
Γεώργιος Στ. Παπανικολάου

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

Copyright © Γεώργιος Στ. Παπανικολάου, 2008.
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.

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού ηλιοστάτη. Πρόκειται για μια διάταξη ανίχνευσης της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα (διεθνώς γνωστή με τον όρο solar tracker) που χρησιμοποιείται σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκούς συλλέκτες. Η εφαρμογή της διάταξης αυτής σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αυξάνει σημαντικά την απόδοση του.

Η μέθοδος που υλοποιείται η τεχνική παρακολούθησης του ήλιου σε αυτήν εργασία βασίζεται αποκλειστικά στην ισχύ που παράγει ο κινούμενος συλλέκτης και δεν χρησιμοποιείται άλλος αισθητήρας. Η κίνηση γίνεται σε δυο άξονες (αζιμουθιακή κίνηση και ανύψωση) ενώ βασικός στόχος είναι η μεγιστοποίηση της ισχύος που παράγει ο συλλέκτης. Για τον λόγο αυτό, η ισχύς μετράται συνεχώς από έναν μικροελεγκτή, αφού βέβαια μετατραπεί πρώτα σε σήμα ικανό να οδηγηθεί από αυτόν. Η διάταξη κινείται πρώτα στον ένα άξονα και προς τις δυο κατευθύνσεις, υπολογίζοντας την ισχύ σε διάφορες θέσεις, μέχρι να καταλήξει σε μια καλή προσέγγιση της θέσης μέγιστης ισχύος. Κατόπιν η διαδικασία επαναλαμβάνεται και στον άλλο άξονα κίνησης. Η ανίχνευση του ήλιου γίνεται ανά τακτά διαστήματα κατά την διάρκεια της ημέρας, η επιλογή των οποίων αναλύεται εκτενώς στην εργασία. Η υλοποίηση περιλαμβάνει και επιλογές ελέγχου της διαδικασίας όπως χειροκίνητη χρήση του ηλιοστάτη και ανίχνευση προβλημάτων εκτέλεσης του αλγορίθμου.

Στο εργαστήριο έλαβαν χώρα ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή, η σχεδίαση και τύπωση της πλακέτας (PCB) και οι δοκιμές της λειτουργίας της διάταξης .

Από τις συγκριτικές μετρήσεις που ελήφθησαν και παρουσιάζονται στην εργασία αυτή προκύπτει μια σημαντική αύξηση της ενέργειας που παράγεται από τον φωτοβολταϊκό συλλέκτη, της τάξης του 56,6%, συνυπολογισμένης και της ενέργειας που καταναλώνεται για την λειτουργία της διάταξης .

Λέξεις κλειδιά

Φωτοβολταϊκός Ηλιοστάτης, Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Ανίχνευση θέσης ήλιου, Κίνηση σε δυο άξονες, Μικροελεγκτής AVR mega32, Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, Μοντέλο τροχιάς του ήλιου

Abstract

The scope of this thesis is the study, design and construction of a photovoltaic solar tracker (heliostat). A solar tracker is a device that senses the position of the sun in the sky during daytime. It is mainly used in electric power systems that derive the energy from photovoltaic cells. The application of such devices can increase the performance of power generating systems.

The method implemented to track the sun's orbit in the sky is based exclusively on the electric power generated by the PV collector (no additional sensors are used). A two-dimensional motion takes place, the motion on the azimuthal plane and the motion on the zenithal plane. The prime goal is to maximize the power generated by the PV collector. To accomplish that, the power is measured by the microcontroller, after being degraded in order to be proper for the microcontroller's input. First the device is moved about the one axis towards both directions, measuring power on different points, until it achieves a good approach of the maximum power point. The same procedure is executed for the other axis as well. The optimum frequency, this tracking has to take place during daytime, is analyzed in this thesis. The implementation provides control options of the procedure, like manually moving the tracker and visual help for debugging the microcontroller's program.

The programming of the microcontroller, the design and print of the circuit board (PCB) as well as the functional testing of the device took place in the laboratory.

The processing of the measurements presented in this thesis, show a significant increase of the generated power, about 56.6%. The power consumption of the tracker is counted in as well.

Keywords

Photovoltaic, Solar Tracker, Heliostat, Photovoltaic Technology, Sensing the location of the sun, Two-axis tracking, AVR mega32 Microcontroller, Solar radiation intensity, Model of the solar orbit

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Ιωάννη Αβαριτσιώτη για την ανάθεση της εργασίας, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την παροχή του εργαστηριακού εξοπλισμού που χρειάστηκα. Επίσης ευχαριστώ τον κ. Ιωάννη Θανασόπουλο και Απόστολο Ψαρρό από το εργαστήριο για την βοήθεια τους στην σχεδίαση και τύπωση της πλακέτας, τον συνάδελφο κ. Γεώργιο Ζδράγκα για την πολύτιμη βοήθεια του στον προγραμματισμό του μικροελεγκτή καθώς και τους Βλάσιο Κέφαλο και Αθανάσιο Παπανικολάου για την βοήθεια τους στην κατασκευή των μηχανικών μερών της κατασκευής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που όλα αυτά τα χρόνια με την αγάπη και την ενθάρρυνση τους με στήριξαν με το καλύτερο δυνατό τρόπο.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Κεφάλαιο 1. Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία	13
1.1 Εισαγωγή	13
1.2 Η εξέλιξη της τεχνολογίας	13
1.3 Οι εφαρμογές και το κόστος της φ/β τεχνολογίας	14
1.4 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	15
1.5 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων	18
1.6 Η ηλιακή ακτινοβολία	21
1.6.1 Η συμβατική ακτινοβολία ενός πλήρους ήλιου.....	22
1.6.2 Η θέση του ήλιου στον ορίζοντα	23
1.6.3 Η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη	25
1.6.4 Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	26
1.6.5 Η επίδραση των νεφών	28
1.7 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φ/β στοιχείων	28
1.8 Από τι αποτελείται ένα φ/β σύστημα	31
Κεφάλαιο 2. Θεωρία Φ/Β Ηλιοστάτη	37
2.1 Εισαγωγή	37
2.2 Η εύρεση του μεγίστου της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας	38
2.3 Ο βασικός αλγόριθμος εύρεσης του μεγίστου	38
2.3.1 Η επαναληψιμότητα του αλγορίθμου	42
2.4 Η επιλογή του φορτίου και η χρήση της ηλεκτρικής ισχύος για την εύρεση του μεγίστου	43
Κεφάλαιο 3. Ανάλυση του συστήματος.....	49
3.1 Εισαγωγή	49
3.2 Η πλακέτα ελέγχου και εντολών	49
3.2.1 Το τμήμα εισόδου	50
3.2.2 Το τμήμα εξόδου	51
3.2.3 Σταθεροποίηση της τάσης λειτουργίας	53
3.2.4 Το τμήμα ελέγχου και ανίχνευσης προβλημάτων	54
Κεφάλαιο 4. Ο μικροελεγκτής AVR mega32	59
4.1 Εισαγωγή	59
4.2 Τα γενικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή.....	59
4.3 Η συχνότητα λειτουργίας	61
4.4 Επανεκκίνηση του μικροελεγκτή	62

4.5 Εξωτερικές διακοπές (external interrupts)	63
4.6 Αναλογικός/Ψηφιακός Μετατροπέας (ADC)	64
4.7 Θύρες Εισόδου/Εξόδου (I/O)	67
4.7.1 Εναλλακτικές λειτουργίες Θυρών Εισόδου/Εξόδου	69
Κεφάλαιο 5. Προγραμματίζοντας τον μικροελεγκτή	73
5.1 Εισαγωγή	73
5.2 Ο κώδικας της εργασίας	73
5.2.1 Το αρχείο main.c	74
5.2.2 Το αρχείο board.h	83
5.2.3 Το αρχείο avrdefs.h	84
5.3 Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή	84
Κεφάλαιο 6. Οι κατασκευές τις εργασίας	87
6.1 Σχεδίαση της τυπωμένης πλακέτας	87
6.2 Η τύπωση της πλακέτας	89
6.3 Οι κατασκευές στήριξης και κίνησης του μοτέρ	91
Κεφάλαιο 7. Η διαδικασία των μετρήσεων	95
7.1 Οι δοκιμές στον ήλιο	95
7.2 Η τοποθέτηση των διατάξεων	95
7.3 Οι μετρήσεις	97
7.3.1 Οι μετρήσεις της πρώτης ημέρας	97
7.3.2 Βοηθητικές Μετρήσεις/Εναλλακτικό tracking	102
7.3.3 Οι μετρήσεις της δεύτερης ημέρας	103
7.4 Η κατανάλωση ενέργειας του solar tracker	108
Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα-Προτάσεις για βελτίωση.....	113
8.1 Συμπεράσματα	113
8.2 Προτάσεις για βελτίωση	114
Βιβλιογραφία.....	117
Παράρτημα : Φύλλα δεδομένων (datasheets)	119

Κεφάλαιο 1

Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

1.1 Εισαγωγή

Στην σημερινή εποχή με το έντονο ενεργειακό πρόβλημα λόγω της πετρελαϊκής κρίσης είναι μείζονος σημασίας η ανάπτυξη και ευρεία χρήση εναλλακτικών πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι μορφές ενέργειας πρέπει να είναι φιλικές προς το περιβάλλον καθώς η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενοχοποιείται σε πολύ μεγάλο ποσοστό για την επιβάρυνση του περιβάλλοντος, αλλά και να μην εξαντλούν τους φυσικούς πόρους της γης. Μια μορφή από τις ονομαζόμενες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι και παραγωγή με χρήση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία χρησιμοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το πλεονέκτημα της χρήσης της είναι εμφανές: Η ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ σταθερή και ανεξάντλητη για τον σχετικό χρόνο της παρουσίας του ανθρώπου στην γη. Αξίζει λοιπόν να ασχοληθούμε περισσότερο με αυτήν την μορφή ενέργειας, προσπαθώντας να την βελτιώσουμε και να την αναπτύξουμε.

Προς αυτήν την κατεύθυνση κινείται και η παρούσα εργασία. Σκοπός της είναι η κατασκευή και η μελέτη της απόδοσης μιας διάταξης για την φ/β τεχνολογία γνωστής και ως ηλιοστάτης/παρακολουθητής του ήλιου (διεθνής ορολογία : solar tracker/heliostat). Η διάταξη αυτή ανιχνεύει την θέση του ήλιου στον ουρανό και προσανατολίζει τον φωτοβολταϊκό συλλέκτη κατάλληλα με σκοπό την μεγιστοποίηση της ενέργειας που παράγει. Ο τρόπος υλοποίησης της μεθόδου ανεύρεσης του ήλιου και η διαδικασία κατασκευής ακολουθούν στην συνέχεια της εργασίας. Πριν όμως είναι πολύ σημαντικό να αναφερθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων, γιατί πάνω στην θεωρία αυτή θα βασιστεί η υλοποίηση του solar tracker.

1.2 Η εξέλιξη της τεχνολογίας

Ο όρος φωτοβολταϊκή ενέργεια αναφέρεται στην ενέργεια που προερχόμενη από την ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε ηλεκτρική μορφή μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Η ιστορία της φωτοβολταϊκής ενέργειας ξεκινά με την παρατήρηση του φαινομένου σε μεταλλικά ηλεκτρόδια (Pt,Ag) βυθισμένα σε ηλεκτρολύτες από τον Becquerel το 1839. Η κατασκευή του

πρώτου ηλιακού στοιχείου ήρθε έναν αιώνα περίπου αργότερα το 1937 από τους Fischer και Godden. Η εμπορική παραγωγή ηλιακών στοιχείων ξεκίνησε το 1956, τρία χρόνια μετά την ανακάλυψη της μεθόδου σχηματισμού ενώσεων p-n με διάχυση προσμίξεων. Με την ανάπτυξη νέων τεχνικών κατασκευής των ηλιακών στοιχείων αυξήθηκε σταδιακά και η απόδοση τους στην μετατροπή της ενέργειας από ηλιακή σε ηλεκτρική. Από 1% απόδοση των στοιχείων από Se το 1939 περνάμε σε απόδοση 6% το 1954 με στοιχεία πυριτίου (Si) ένωσης p-n με την μέθοδο διάχυσης προσμίξεων και φτάνουμε στο 14% το 1972 (Lindmayer & Allison). Παράλληλα γίνονται χρήσεις και άλλων υλικών και ενώσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η κατασκευή στοιχείου από αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) απόδοσης 16% το 1976 ενώ γίνεται επίσης προσπάθεια μείωσης του υψηλού κόστους με χρήση φθηνής πρώτης ύλης, όπως άμορφου πυριτίου με σημαντικά αποτελέσματα: Το 1984 βγαίνει στην παραγωγή φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου με απόδοση 5% στην Ιαπωνία.

Στις μέρες μας νέα υλικά είναι υπό έρευνα, άλλα πολύπλοκων ενώσεων (όπως Cadmium telluride και Copper indium diselenide), άλλα οργανικής βάσης ενώ αναπτύσσονται τεχνικές συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως θα αναλυθεί και στα επόμενα κεφάλαια .

1.3 Οι εφαρμογές και το κόστος της φ/β τεχνολογίας

Η χρήση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας έχει μερικά πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα που την κάνουν ιδιαίτερα ελκυστική εναλλακτική μορφή ενέργειας. Αυτός είναι και ο λόγος που δημιουργήθηκαν κίνητρα στην φωτοβολταϊκή αγορά για αύξηση της παραγωγής (βέβαια με παράλληλη βελτίωση των τεχνολογιών), έχοντας ως αποτέλεσμα την ραγδαία πτώση των τιμών τους. Έτσι μπορούμε εμείς σήμερα να μιλάμε για ευρεία χρήση των φωτοβολταϊκών σε εφαρμογές υψηλής ισχύος (οικιακή και βιομηχανική χρήση) ενώ παλιότερα εύρισκαν εφαρμογή σε πολύ χαμηλές απαιτήσεις ισχύος (ηλεκτρονικά ρολόγια , υπολογιστές τσέπης κ.τ.λ.).

Χαρακτηριστικό της πτώσης των τιμών των ηλιακών στοιχείων είναι ότι το κόστος ανά Wp (μονάδα μέτρησης της ισχύος στα φ/β ανάλογη του Watt στην ηλεκτρική ισχύ-θα αναλυθεί εκτενώς στην συνέχεια) το έτος 1956 ήταν περίπου στα 1000\$ ανά Wp (την εποχή που χρησιμοποιούνταν μόνο σε διαστημικές εφαρμογές). Σήμερα πλέον μιλάμε για κόστος περί των 5 \$ ανά Wp, παρέχοντας την δυνατότητα ανάπτυξης ολοκληρωμένων λύσεων σε περιοχές δυσπρόσιτες, εκτός δικτύου ή σε περιοχές και περιπτώσεις που το κόστος της επέκτασης του δικτύου είναι μεγαλύτερο από την πλήρη εγκατάσταση ενός αυτόνομη φ/β συστήματος. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι :

- Ηλεκτροδότηση εξοχικών κατοικιών χαμηλών ηλεκτρικών απαιτήσεων
- Εγκαταστάσεις αφαλάτωσης (σε νησιά) και αντλιοστάσια υδροδότησης
- Φάροι, κεραιές κινητής τηλεφωνίας, κεραιές τηλεόρασης και ραδιοφώνου στην ύπαιθρο
- Αγροτικές γεωτρήσεις, συστήματα ανίχνευσης κινδύνου πυρκαγιάς στα δάση

- Παροχή ισχύος στα συστήματα ασφαλείας και πυρανίχνευσης σε μη ηλεκτροδοτημένους αποθηκευτικούς χώρους
- Οδικός φωτισμός επαρχιακών περιοχών μακριά απ' το δίκτυο
- Φόρτιση μπαταριών υψηλής χωρητικότητας (π.χ. για ηλεκτροκίνητα οχήματα)
- Βοηθητική ηλεκτροδότηση σε πλοία
- Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε διαστημικές εφαρμογές
- Εν γένει απομονωμένες εγκαταστάσεις και πολλά άλλα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα :

- Τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον : δεν προκαλούνται ρύποι κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Η ηλιακή ενέργεια είναι αποκεντρωμένο «καύσιμο», διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα
- Αθόρυβη λειτουργία
- Σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης (για τα σταθερά)
- Μεγάλη διάρκεια ζωής: οι κατασκευαστές εγγυώνται χαρακτηριστικά απόδοσης για 20-30 χρόνια λειτουργίας
- Εύκολη επεκτασιμότητα

Το βασικό μειονέκτημα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας παραμένει το κόστος της. Παρά την ραγδαία μείωση των τιμών εξακολουθεί να παραμένει ακριβή συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρισμού. Όμως οι τελευταίες έχουν μερίδιο ευθύνης για εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου και ως εκ τούτου εναλλακτικές 'πράσινες' μορφές ενέργειας πρέπει να προωθηθούν.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι στην εποχή μας με το σοβαρό ενεργειακό πρόβλημα να προέρχεται κυρίως από την μονομερή εξάρτηση της παγκόσμιας αγοράς από το μονοπώλιο του πετρελαίου, είναι εμφανής η ανάγκη να απαγκιστρωθούμε από την εξάρτηση αυτή. Η λύση είναι η εκμετάλλευση των εναλλακτικών μορφών ενέργειας, με σαφές πλεονέκτημα την φωτοβολταϊκή στην Ελλάδα λόγω της υψηλής μέσης ηλιακής ακτινοβολίας που χαίρει σε σχέση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες .

1.4 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο (Si) το γερμάνιο(Ge) καθώς και από ενώσεις όπως αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) και θειούχο κάδμιο (CdS). Το κυρίαρχο εξ αυτών είναι το πυρίτιο, κατέχοντας το μεγαλύτερο μερίδιο της παραγωγής (όπως και στην παραγωγή των περισσότερων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων).

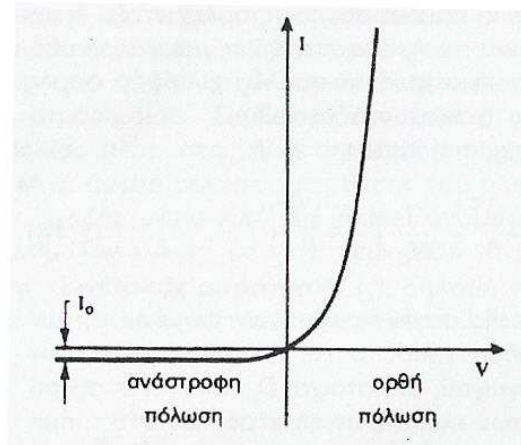
Παρατήρηση : Δεν θα δοθεί αναλυτική επεξήγηση του φαινομένου γιατί αυτό ξεφεύγει από τον σκοπό της παρούσης εργασίας, παρά μόνο τα απαραίτητα για την κατανόηση και την συνοχή του κειμένου .

Στο πυρίτιο (τετρασθενές ημιαγωγίμο υλικό) όταν απορροφηθεί ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας ή θερμότητας προκαλείται διάσπαση ηλεκτρονιακών δεσμών, ελευθερώνοντας έτσι ηλεκτρόνια στο σώμα του ημιαγωγού. Αυτό συμβαίνει και σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου (η αναλογία των ελεύθερων-δεσμευμένων ηλεκτρονίων σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου είναι της τάξης του $1/10^{13}$).

Οι θέσεις από όπου φεύγουν τα ηλεκτρόνια καλούνται οπές (holes). Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές είναι υπεύθυνα για την ηλεκτρική αγωγιμότητα των ημιαγωγών .

Τα παραπάνω ισχύουν στους λεγόμενους ενδογενείς ή καθαρούς ημιαγωγούς. Σε αυτούς γίνεται πρόσμιξη πεντασθενών (αρσενικό) ή τρισθενών (βάριο) στοιχείων που λειτουργούν ως δότες και αποδέκτες ηλεκτρονίων αντίστοιχα. Έτσι δημιουργούνται οι ημιαγωγοί πρόσμιξης τύπου n , στους οποίους κύριοι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι τα αρνητικά φορτισμένα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι ημιαγωγοί πρόσμιξης τύπου p , η αγωγιμότητα των οποίων οφείλεται κυρίως στις οπές (θεωρούνται θετικά φορτισμένες). Σε αυτούς τους φορείς αναφερόμαστε ως φορείς πλειονότητας, σε αντίθεση με τους μειονότητας που οφείλονται στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Βασικός νόμος για τους ημιαγωγούς είναι ο νόμος δράσης των μαζών που λέει : (συγκέντρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων)*(συγκέντρωση οπών)= (ενδογενής συγκέντρωση)².

Για να εκδηλωθούν οι σημαντικές ιδιότητες των ημιαγωγών πρέπει να δημιουργηθεί μια ένωση p-n με τα φαινόμενα διάχυσης που τη συνοδεύουν. Εμφανίζεται τότε μια περιοχή αραίωσης στην ένωση των δυο περιοχών και αναλόγως την πολικότητα της τάσης που εφαρμόζουμε στα άκρα της διάταξης παίρνουμε το παρακάτω διάγραμμα (έχουμε μια ημιαγωγίμη δίοδο) :

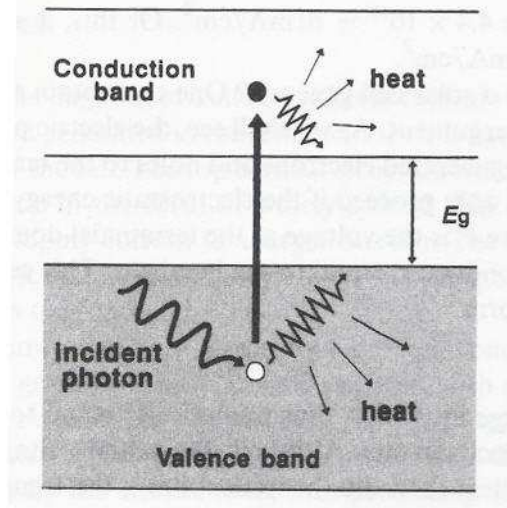


Σχήμα 1.1. Η χαρακτηριστική καμπύλη έντασης(I)-τάσης(V) μιας διόδου p-n

Στο παραπάνω σχήμα διακρίνουμε τις δυο περιοχές ορθής και ανάστροφης πόλωσης καθώς το λεγόμενο ανάστροφο ρεύμα κόρου που εμφανίζεται για αρνητικές τιμές της επιβαλλόμενης τάσης .

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που απασχολούν την εργασία αυτή δεν είναι τίποτε άλλο από ημιαγωγίμες διόδους που λειτουργούν υπό συνθήκες ορθής πόλωσης, των οποίων όμως τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται και από το ανάστροφο ρεύμα κόρου.

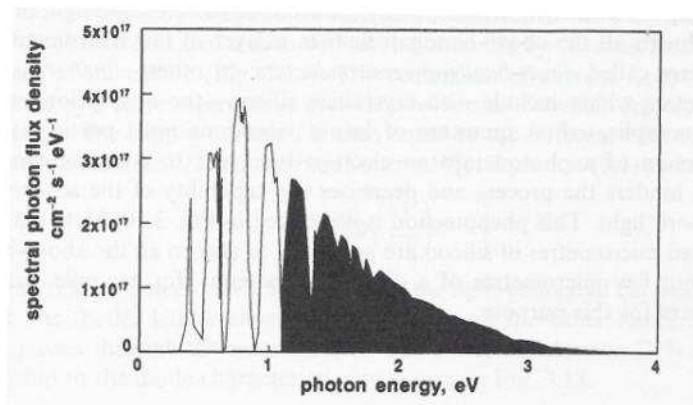
Πώς γίνεται όμως η μετατροπή της ενέργειας από ηλεκτρομαγνητική (ηλιακή) σε ηλεκτρική (ρεύμα); Η μετατροπή βασίζεται στην κβαντική φύση του φωτός: Κβάντα φωτός (φωτόνια) με ενέργεια $E_{ph}(\lambda) = hc/\lambda$ το καθένα προσπίπτουν στην γήινη επιφάνεια με ρυθμό $4,4 \cdot 10^{17}$ κάθε δευτερόλεπτο μιας ηλιόλουστης ημέρας. Προσπίπτοντας τα φωτόνια στην επιφάνεια του φ/β στοιχείου, μπορούν (κάποια εξ αυτών με ενέργεια τουλάχιστον ίση με αυτή του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγού) να διεγείρουν ένα ηλεκτρόνιο (το καθένα) από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας δημιουργώντας ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.2. Η δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής από το φως

Αυτή η κίνηση των φορτίων (ελεύθερου ηλεκτρονίου και οπής) δημιουργούν το ηλεκτρικό ρεύμα που λέμε ότι παράγει το φ/β στοιχείο (ουσιαστικά μετατρέπει).

Είναι προφανές ότι ένα φ/β στοιχείο δεν μπορεί να απορροφήσει όλα τα φωτόνια που προσπίπτουν σε αυτό παρά μόνο ένα μέρος του ηλιακού φάσματος, για τον απλό λόγο ότι δεν ταιριάζουν όλες οι ενέργειες των φωτονίων με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Για να γίνει αυτό κατανοητό ακολουθεί το παρακάτω σχήμα που δείχνει ποιο ποσοστό της ακτινοβολίας απορροφάται :



Σχήμα 1.3. Το φασματική πυκνότητα ροής φωτονίων που εκμεταλλεύεται ένας συλλέκτης

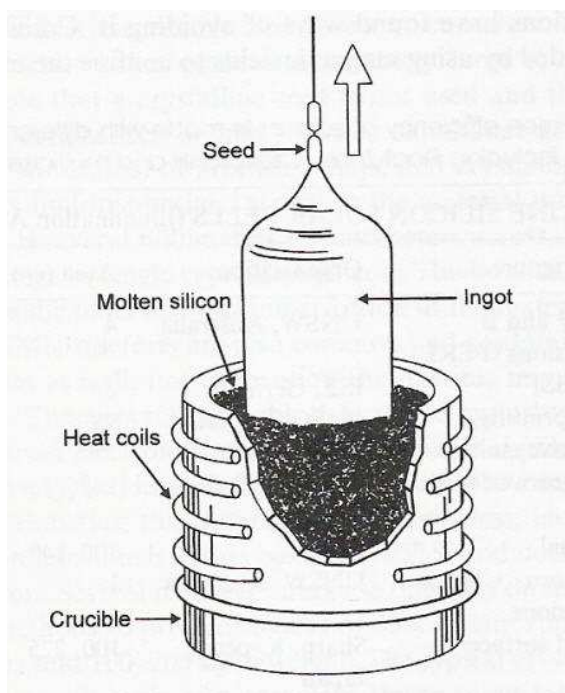
Η τάση που αναπτύσσει η φ/β κυψέλη υπό συνθήκες ακτινοβολίας έχει άνω όριο την τιμή : $V = E_g / q$, στην πράξη όμως εμφανίζονται μικρές διαφοροποιήσεις.

1.5 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα βασικά στάδια κατασκευής ενός φ/β πάνελ (όπως συνηθίζεται να λέγεται) είναι τα εξής τέσσερα :

- Από άμμος σε καθαρό πυρίτιο (from sand to pure silicon)
- Από καθαρό πυρίτιο σε δίσκους & κρυστάλλους (from silicon feedstock to crystals & wafers)
- Από δίσκους σε κυψέλες (from silicon wafers to solar cells)
- Από κυψέλες σε μονάδα (from cells to modules)

Τα στάδια της επεξεργασίας είναι ιδιαίτερος πολύπλοκα και απαιτούν εξεζητημένες τεχνικές (βλέπε μέθοδος Czochralski σχήμα 1.4) που συνδυάζουν γνώση από διάφορα επιστημονικά πεδία (δυναμική των ρευστών, χημεία, ηλεκτροχημεία, ηλεκτρομαγνητισμό) και ως εκ τούτου γίνεται μια απλή αναφορά .



Σχήμα 1.4. Παρασκευή μονοκρυσταλλικού πυριτίου με την μέθοδο Czochralski

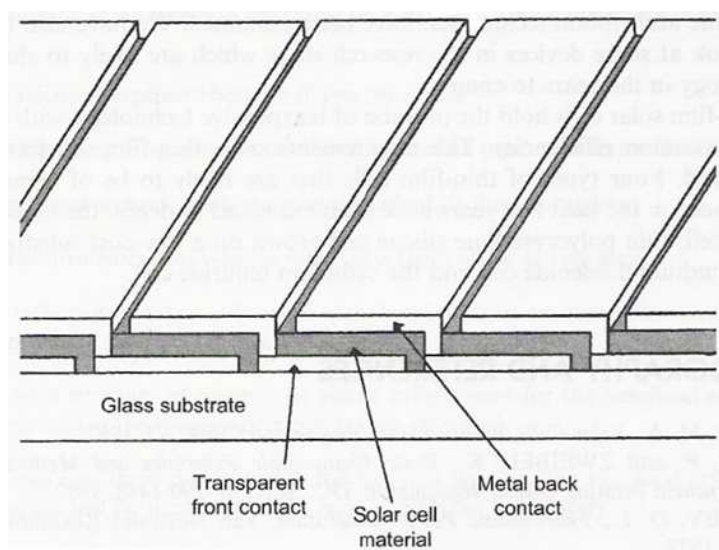
Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες φ/β στοιχείων ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται και αντίστοιχες τεχνολογίες που αυτά κατασκευάζονται. Αποτέλεσμα όμως της πληθώρας των διαφορετικών στοιχείων είναι η ποικιλία σε απόδοση και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των παραχθέντων στοιχείων . Για

λόγους πληρότητας του κειμένου θα αναφερθώ επιγραμματικά στις κατηγορίες των στοιχείων καθ' ότι λεπτομερής ανάλυση αυτών δεν συνάδει με τον χαρακτήρα της εργασίας αυτής.

Οι βασικές κατηγορίες είναι :

- Crystalline silicon solar cell technology (single crystalline or multicrystalline). Στα ελληνικά αποδίδεται με τον όρο μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη τεχνική επί του παρόντος έχοντας επιτύχει εργαστηριακές αποδόσεις κοντά στο 25%, αρκετά κοντά στο θεωρητικά επιτεύξιμο. Σε αυτό συνέβαλαν τα πολλά κοινά που παρουσιάζει η τεχνολογία αυτή με την επεξεργασία που γίνεται στο πυρίτιο από την βιομηχανία της μικροηλεκτρονικής. Αν και η δημιουργία υψηλής ποιότητας υλικών όπως οι μονοκρύσταλλοι πυριτίου απαιτεί πολύπλοκη τεχνολογία, εν τούτοις η βιομηχανία έχει αναπτύξει τους απαραίτητους μηχανισμούς, με αποτέλεσμα να βγαίνουν στην αγορά πλέον φ/β πάνελ με απόδοση 11%-16%. Έτσι από επίσημα στοιχεία, για το έτος 1998, το 83% των φ/β συστημάτων παγκοσμίως χρησιμοποιούσαν τεχνολογία πολυκρυστάλλων (44%) και μονοκρυστάλλων (39%), αφήνοντας μόλις το 13% για την τεχνολογία άμορφου πυριτίου (βλέπε παρακάτω) και ένα 4% για άλλες τεχνολογίες (όπως cells based on ribbon silicon, cadmium telluride και διαφόρων τεχνικών συγκεντρωτικών συστημάτων).

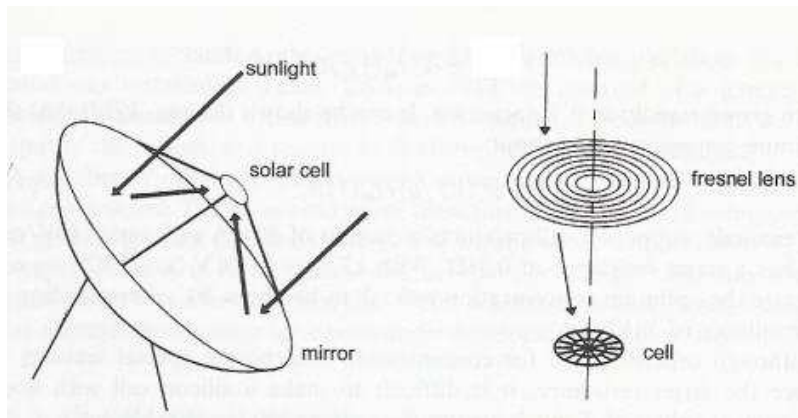
- Thin film solar cell technology (τεχνολογία κυψελών λεπτού στρώματος). Η τεχνολογία αυτή (υπάρχει ήδη στην αγορά φωτοβολταϊκών) υπόσχεται σημαντική μείωση των τιμών με χρήση λιγότερου υλικού και ενέργειας στην διαδικασία κατασκευής των κυψελών. Επιπλέον υπάρχει το σημαντικότερο πλεονέκτημα να κατασκευάζονται μονάδες (modules) σε ολοκληρωμένη μορφή χωρίς την απαίτηση για δαπανηρές διασυνδέσεις των ανεξάρτητων κυψελών. Ο τρόπος που γίνεται η ολοκληρωμένη διασύνδεση στη μονάδα τεχνολογίας λεπτού στρώματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



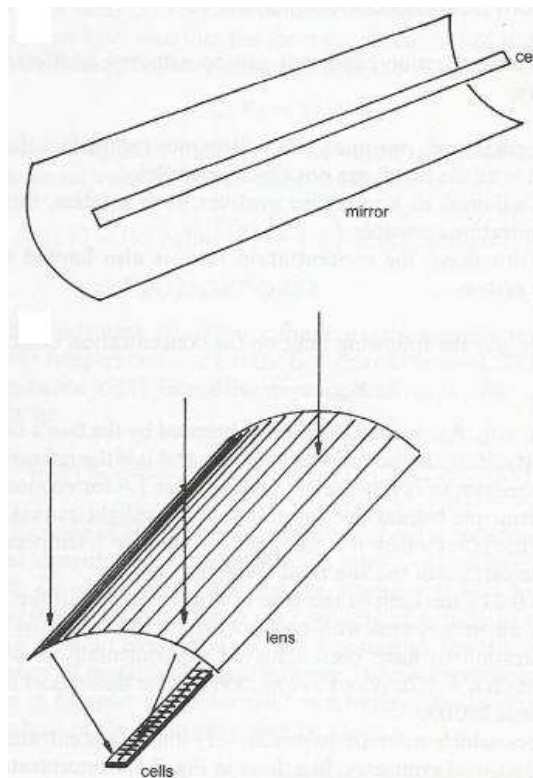
Σχήμα 1.4. Εσωτερικά διασυνδεδεμένη μονάδα

Στην κατηγορία της thin film solar cell technology ανήκουν μερικές ενδιαφέρουσες τεχνικές παραγωγής φ/β στοιχείων όπως :

- Κυψέλες άμορφου πυριτίου (amorphous silicon cells). Εδώ το πυρίτιο διαφέρει από την κρυσταλλική μορφή στο ότι τα άτομα δεν βρίσκονται σ' αρκετά ακριβείς αποστάσεις μεταξύ τους και οι γωνίες των δεσμών πυριτίου δεν έχουν μοναδική τιμή αλλά παρουσιάζουν μια ποικιλία διαφορετικών τιμών σε αντίθεση με την αρκετά συγκεκριμένη δομή των κρυσταλλικών κυψελών
- Copper indium diselenide cells. Πρόκειται για κυψέλες από ένα υλικό που παρουσιάζει άμεση οπτική απορρόφηση με εξαιρετικά υψηλό συντελεστή απορρόφησης. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εξαρτώνται ιδιαίτερα από την αναλογία χαλκού/ίνδιου καθώς και από τον ακριβή έλεγχο της στοιχειομετρίας στην παραγωγή.
- Cadmium telluride cells. Οι κυψέλες αυτού του τύπου έχουν τα ιδανικά χαρακτηριστικά για ηλιακή απορρόφηση αλλά είναι ιδιαίτερος δύσκολες στην κατασκευή (η εναπόθεση του Cadmium telluride σε κενό).
- Concentrator solar cell systems : Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν μια τεχνική συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας που λειτουργεί ως εξής : Παραβολικά κάτοπτρα συγκεντρώνουν την ακτινοβολία από μια μεγάλη περιοχή σε ένα μικρό κομμάτι φ/β στοιχείου πολύ υψηλής απόδοσης (βλέπε GaAs) και βέβαια υψηλότερου κόστους παραγωγής. Το χαμηλό όμως κόστος των παραβολικών σε σχέση με τα φ/β στοιχεία κάνουν οικονομικά συμφέρουσα την τεχνολογία αυτή, αν και παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες όπως το ακριβές tracking του ήλιου σε οπτικό επίπεδο. Μπορεί να γίνει χρήση παραβόλων ή και φακών Fresnel. Ο τρόπος λειτουργίας τους φαίνεται στα παρακάτω σχήματα :



Σχήμα 1.5. Συμμετρικά συγκεντρωτικά συστήματα : αριστερά παραβολικός καθρέπτης, δεξιά φακός fresnel



Σχήμα 1.6. Γραμμικώς συμμετρικά συγκεντρωτικά συστήματα : αριστερά παραβολικός καθρέπτης, δεξιά κυρτός φακός fresnel

Τέλος για λόγους πληρότητας του κειμένου θα πρέπει να αναφερθούν και νέες υπό έρευνα κατηγορίες κυψελών όπως οι οργανικές και πλαστικές φ/β κυψέλες (organic and plastic solar cells) και οι οπτοηλεκτροχημικές (optoelectrochemical cells).

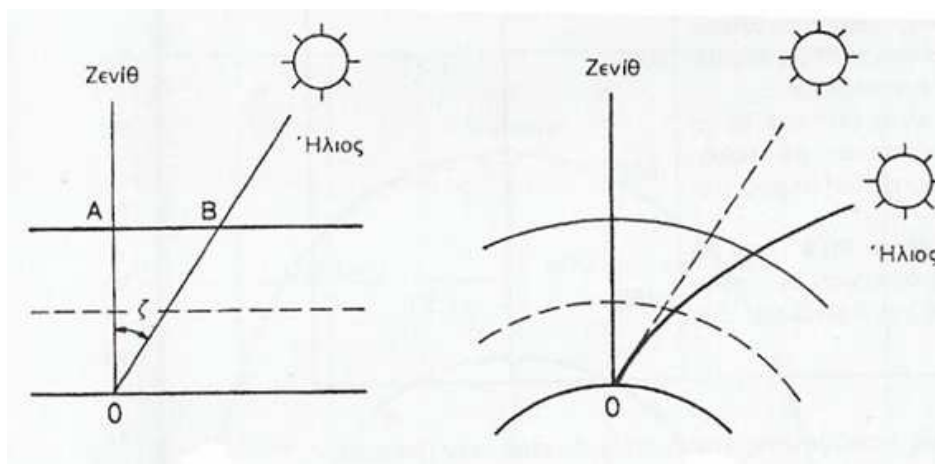
1.6 Η ηλιακή ακτινοβολία

Μετά την ανάλυση του φωτοβολταϊκού φαινομένου και των χαρακτηριστικών που διέπουν την λειτουργία των φ/β στοιχείων, σειρά έχει η μελέτη της ισχύος της ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους από τον ήλιο. Ο λόγος είναι απλός : Θέλουμε όσο το δυνατόν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει άμεσα στο φ/β πάνελ, για όσο το δυνατό περισσότερο χρόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά και κατ' επέκταση καθ' όλη την διάρκεια του έτους.

Το πρόβλημα του σωστού προσανατολισμού της φ/β μονάδας σχετίζεται με την θέση της ως προς τον ορίζοντα, την θέση του ήλιου, το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας, το υψόμετρο, οι μετεωρολογικές συνθήκες, η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία κ.ά.

Συμβατικά, το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην γήινη ατμόσφαιρα μέχρι την στάθμη της θάλασσας (sea level), που είναι άμεση συνέπεια της θέσης του ήλιου, χαρακτηρίζεται από μια κλίμακα μάζας αέρα (air mass) βαθμολογημένης με την τέμνουσα της ζενιθιακής απόστασης,

δηλαδή της γωνίας ανάμεσα στην θέση του ήλιου και στην κατακόρυφο. Η κλίμακα αυτή δείχνει δηλαδή πόσες φορές είναι μεγαλύτερη η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.7. Η εξάρτηση της κλίμακας μάζας αέρα (AM) από την θέση του ήλιου. Αριστερά απλοποιημένη απεικόνιση, δεξιά πραγματική λόγω διάθλασης στην ατμόσφαιρα

1.6.1. Η συμβατική ακτινοβολία του ενός πλήρους ήλιου

Η ηλιακή ακτινοβολία Air Mass 1,5 έχει πυκνότητα ισχύος $935W/m^2$ και αποτελεί μια αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέσης μέγιστης ισχύος που δέχεται μια επιφάνεια κάθετη προς τον ήλιο το καλοκαίρι με ευνοϊκές συνθήκες (μεσημέρι, χωρίς συννεφιά, χαμηλή ατμοσφαιρική υγρασία κ.τ.λ.) σε μεγάλο μέρος της γήινης επιφάνειας (η Ελλάδα ανήκει σε αυτό). Για ευκολία των μετρήσεων η πυκνότητα ισχύος αυτή στρογγυλοποιείται στα $1000W/m^2$ (ή αλλιώς $100mW/cm^2$) και ονομάζεται συμβατικά ακτινοβολία ενός πλήρους ήλιου (προαιρετικό το πλήρης). Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση του φ/β στοιχείου εξαρτάται από τις συνθήκες Air Mass που επικρατούν : Σε συνθήκες AM2 ένα στοιχείο μπορεί να αποδίδει 16%, ενώ σε συνθήκες AM0 να φτάνει το 12% . Οι πρότυπες τιμές της ακτινοβολίας στην κλίμακα Air Mass παρουσιάζονται στον κάτωθι πίνακα :

Τιμή μάζας αέρα	Συμβατικές Συνθήκες	Ισχύς σε W/m^2	Μέση ενέργεια των φωτονίων(eV)
AM0	Στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα	1350	1,48
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στην στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα	1060	1,32

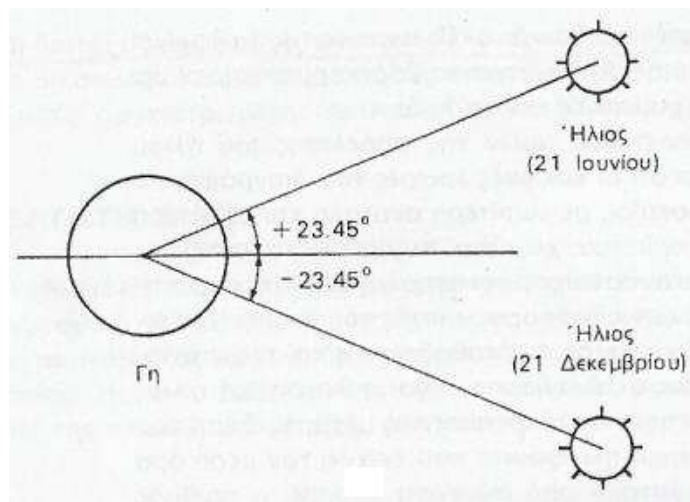
AM2	Απόσταση του ήλιου 60° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στην στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα	880	1,38
AM3	Απόσταση του ήλιου $70,5^\circ$ από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στην στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα	750	1,21

Πίνακας 1.1. Οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα

1.6.2 Η θέση του ήλιου στον ορίζοντα

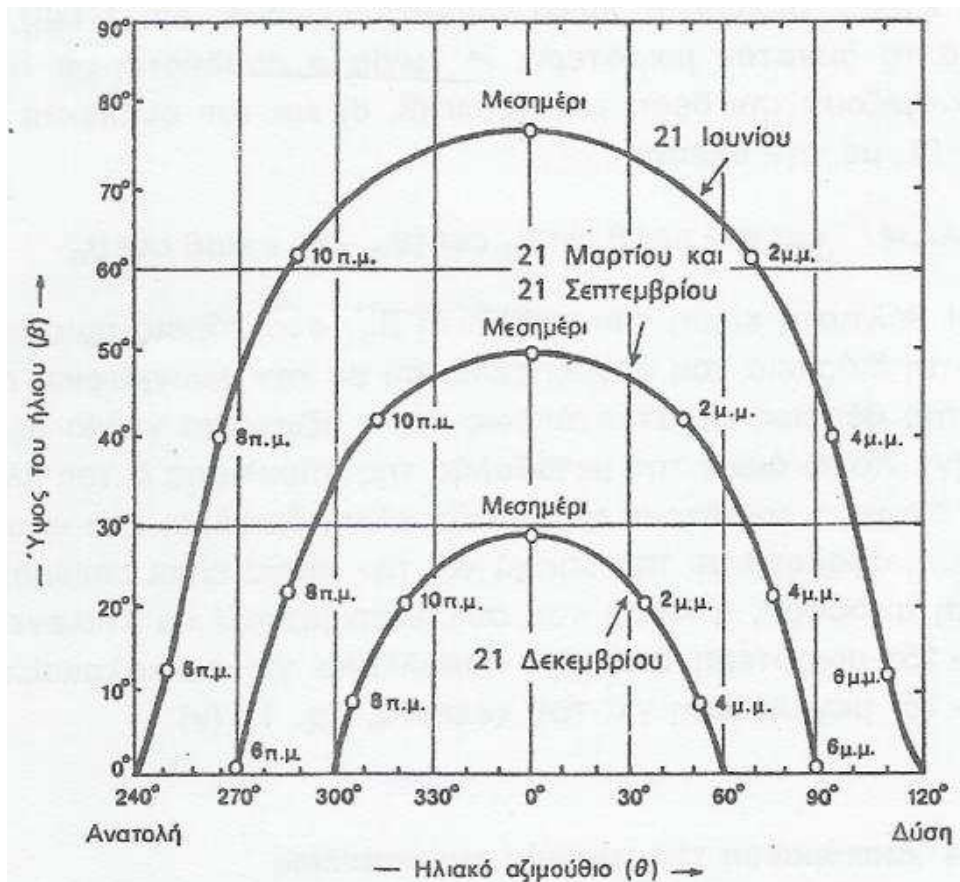
Ο σημαντικότερος και ταυτόχρονα πλήρως προβλεπόμενος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα φ/β πάνελ είναι η θέση του ήλιου αναφορικά με την τοποθεσία στη γη που βρισκόμαστε. Κατά τη διάρκεια του έτους η θέση του ήλιου αποκλίνει σημαντικά από την διάκεντρο γης – ήλιου. Μετρήσεις έχουν γίνει για να προκύψουν τα παρακάτω διαγράμματα που αναφέρονται σε τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος 38° βόρεια, πλάτος που αντιστοιχεί και στην περιοχή των Αθηνών που έλαβαν χώρα η κατασκευή και οι μετρήσεις της εργασίας αυτής.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και το χειμερινό ηλιοστάσιο :



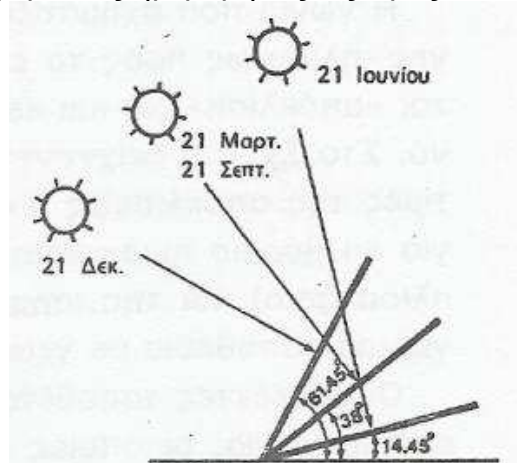
Σχήμα 1.8. Η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο

Ακολουθεί ένα πολύ σημαντικό διάγραμμα της τροχιάς του ήλιου στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας για διάφορες εποχές. Η αναφορά της ώρας δεν είναι το ωρολογιακό αλλά το ηλιακό μεσημέρι :



Σχήμα 1.9. Οι τροχιές του ήλιου για τα ηλιοστάσια και τις ισημερίες σε γεωγραφικό πλάτος βόρειο 38° (Αθήνα). Οι ενδείξεις της ώρας είναι σε ηλιακές τιμές.

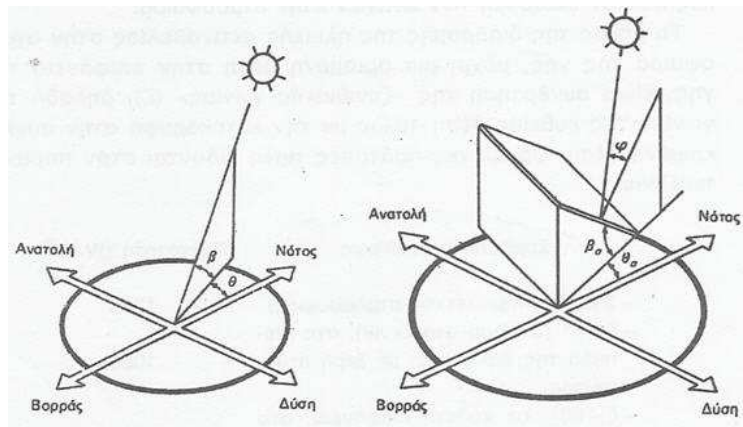
Τέλος, στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η βέλτιστη κλίση του φ/β συλλέκτη για τις διαφορετικές ημερομηνίες ως προς τον ορίζοντα :



Σχήμα 1.10. Βέλτιστη κλίση του συλλέκτη κατά τις αντίστοιχες ημερομηνίες

Συνέπεια της απόκλισης αυτής του ήλιου είναι να διαγράφονται ηλιακές τροχιές βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερη ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ αντίθετα συμβαίνει το χειμώνα.

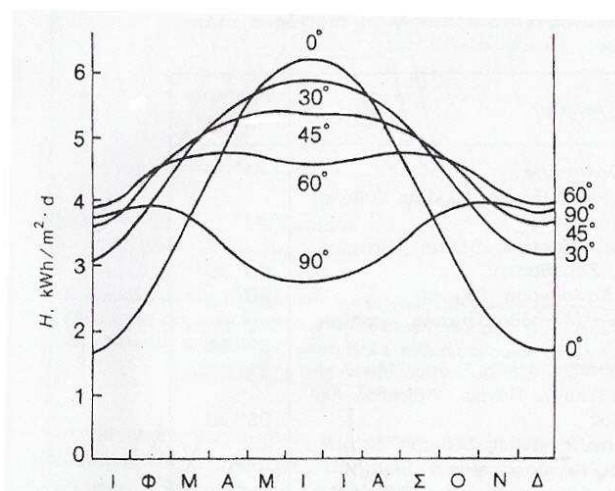
Για να έχουμε σωστή αναφορά της θέσης του ήλιου ορίζουμε δυο γωνίες : το ύψος (β) και το αζιμούθιο (θ), όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Μαζί φαίνεται και ο προσανατολισμός του ϕ/β συλλέκτη με τις χαρακτηριστικές του γωνίες κλίση (β_σ) και αζιμούθια γωνία συλλέκτη (θ_σ) :



Σχήμα 1.11. Η θέση του ήλιου και του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο

1.6.3 Η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη

Αναφερόμενος στο συμβολισμό του παραπάνω σχήματος, η βέλτιστη κλίση του ϕ/β συλλέκτη (β_σ) στο βόρειο ημισφαίριο, για όλη τη διάρκεια του έτους είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο της τοποθεσίας, ενώ η βέλτιστη αζιμούθια γωνία είναι ίση με μηδέν. Παρατήρηση : Η άνω βέλτιστη κλίση του ϕ/β συλλέκτη (β_σ) αναφέρεται καθ' όλη την διάρκεια του έτους και εφαρμόζεται σε ϕ/β εγκαταστάσεις με σταθερά εγκατεστημένους τους συλλέκτες. Συνηθίζεται όμως στις εγκαταστάσεις (όπου είναι δυνατό) να είναι ρυθμιζόμενη αυτή η κλίση, και ο λόγος είναι ο εξής : Λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση των συλλεκτών είναι διαφορετική για κάθε εποχή και κατ' επέκταση για κάθε μήνα. Αυτό είναι φανερό στο παρακάτω σχήμα, που αναφέρεται σε περιοχή με γεωγραφικό πλάτος 45° και διάφορες κλίσεις του συλλέκτη :



Σχήμα 1.12. Η εξάρτηση της μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας για διάφορες κλίσεις σε περιοχή γεωγραφικού πλάτους 45°

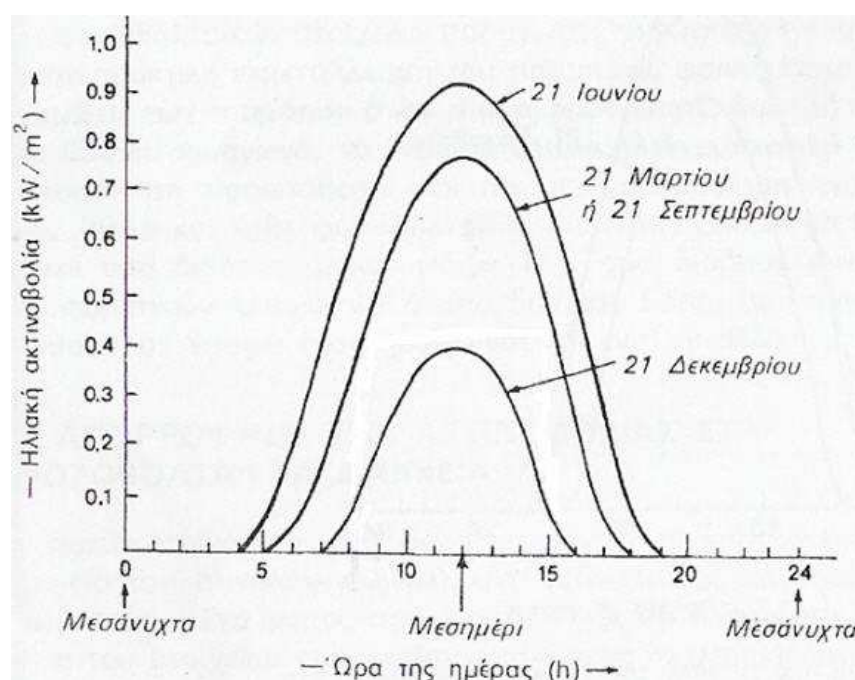
Στο παραπάνω σχήμα είναι φανερό ότι ναι μεν μια κλίση με το γεωγραφικό πλάτος είναι η βέλτιστη για σταθερούς συλλέκτες, αλλά αξίζει τον κόπο να ρυθμίζουμε την κλίση ανάλογα με την εποχή. Πώς; Μα από τα σχήματα 1.8 και 1.10 βλέπουμε την κατεύθυνση των αλλαγών. Συνηθίζεται δε σε συστήματα ρυθμιζόμενης κλίσης, μια κλίση 10° έως 15° μικρότερη από τον παράλληλο της τοποθεσίας για το καλοκαίρι ,ενώ αντίστοιχα μεγαλύτερη για τον χειμώνα. Οι ακραίες θέσεις του ήλιου σε θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο είναι αυτές που φαίνονται στο σχήμα 1.10 με τις αντίστοιχες βέλτιστες θέσεις των συλλεκτών.

Για να κλείσει αυτό το κομμάτι, αξίζει να σημειωθεί ότι η ακτινοβολία που τίθεται υπό συζήτηση μέχρι στιγμής είναι η άμεση από τον ήλιο (σαν δέσμη) και όχι το διάχυτο φως της ατμόσφαιρας. Για παράδειγμα σε περιοχές με πολύ υγρό κλίμα (τροπική ζώνη) λόγω της υψηλής συγκέντρωσης σταγονιδίων νερού στην ατμόσφαιρα, σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Για τον λόγο αυτό μικρότερη κλίση των φ/β συλλεκτών, ώστε να αντικρίζουν περισσότερο τον ουρανό και να δέχονται αφθονότερα την διάχυτη ακτινοβολία.

1.6.4 Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

Ένα βασικό πρόβλημα της χρήσης της ηλιακής ακτινοβολίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι παρουσιάζει έντονη διακύμανση και απότομες, απρόβλεπτες μεταβολές στην εξέλιξη του χρόνου σε σχέση με άλλα συστήματα μετατροπής ενέργειας.

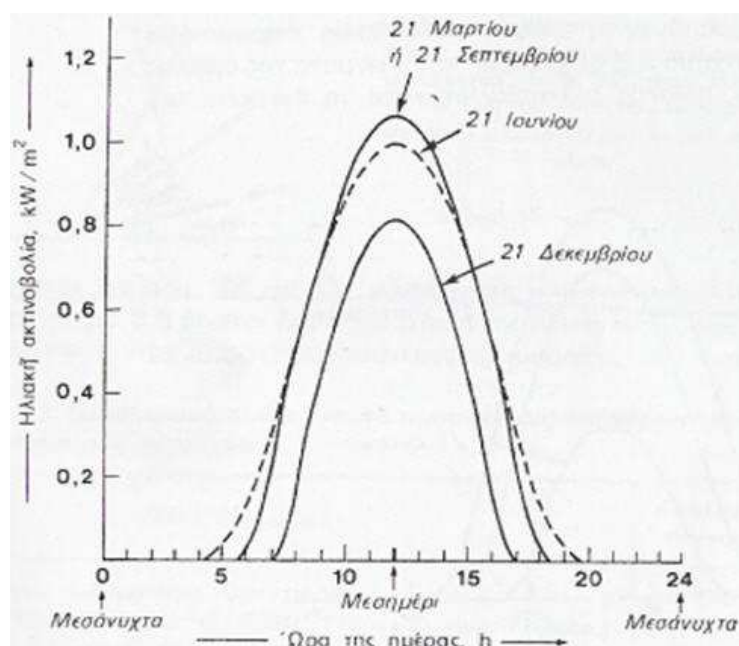
Παρακάτω φαίνεται ένα διάγραμμα της διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια υπό καθαρό ουρανό για διαφορετικές ενδεικτικές ημερομηνίες (ηλιοστάσια και ισημερίες):



Σχήμα 1.13. Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο χρόνο (ο συλλέκτης είναι στο οριζόντιο επίπεδο)

Μιλώντας σε αυστηρότερη ορολογία το μέγεθος που χαρακτηρίζει την ποσότητα της μεταφερόμενης ενέργειας από μια ακτινοβολία είναι η ροή της ακτινοβολίας (H) και εκφράζεται σε μονάδες $kW/m^2, mW/cm^2$. Όταν όμως η ακτινοβολία είναι διάχυτη και μεταδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις (βλέπε ηλιακή), τότε χρησιμοποιείται περισσότερο ο όρος ένταση της ακτινοβολίας, ως μέτρο του ποσού της ενέργειας που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη μονάδα της επιφάνειας. Συνώνυμος όρος είναι και η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας.

Όταν η επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία τεθεί υπό κλίση (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως) παρατηρείται αύξηση της έντασης και προκύπτει το παρακάτω σχεδιάγραμμα :



Σχήμα 1.14. Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο χρόνο (ο συλλέκτης σε κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου)

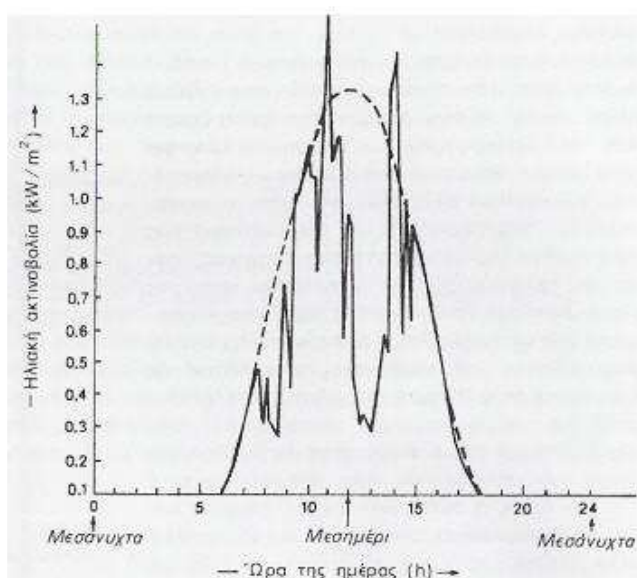
Ένας άλλος τρόπος να βελτιώσουμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια επιφάνεια (εν προκειμένω η φ/β μονάδα) είναι να την τοποθετήσουμε πάνω σε μια διάταξη κινητού πλαισίου που περιστρέφεται κατά διαστήματα, παρακολουθώντας την πορεία του ήλιου στον ουρανό. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουμε την κάθετη πρόσπτωση (σχετικής ακρίβειας) της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού, με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται στα ελληνικά φ/β ηλιοστάτες (διεθνής όρος : sun trackers/solar trackers). Η ακριβής απόδοση του διεθνούς όρου είναι παρακολουθητής του ήλιου.

Με την χρήση του solar tracker επιτυγχάνουμε από την μια αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, από την άλλη όμως καταναλώνουμε ισχύ για την κίνηση της παρακολούθησης. Ο υπολογισμός των ισχύων αυτών είναι που δείχνει αν η χρήση των trackers είναι ενεργειακά αποδοτική. Αυτή την μελέτη διαπραγματεύεται η εργασία αυτή για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μικρής ισχύος. Βέβαια υπάρχουν και άλλα σημαντικά θέματα για την επιλογή

ενός συστήματος ηλιοστάτη όπως το κόστος αυτού, η ανάγκη συντήρησης και η δυνατότητα απόσβεσης του επιπλέον κόστους που αυτό επιφέρει στο φωτοβολταϊκό σύστημα. Με αυτά τα θέματα δεν ασχολείται η εργασία αυτή.

1.6.5 Η επίδραση των νεφών

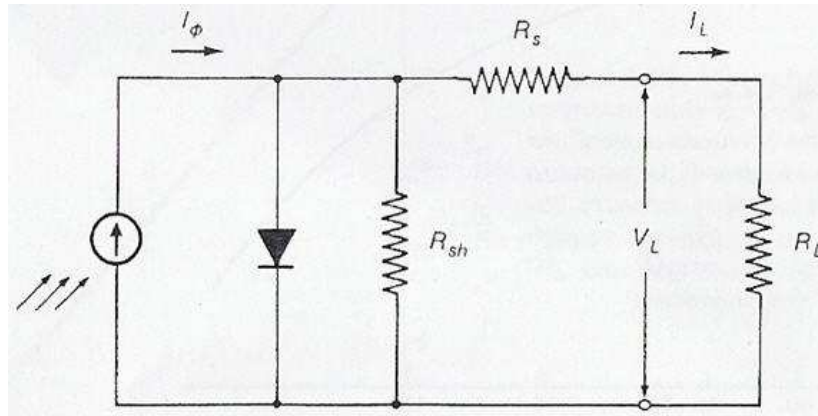
Η παρουσία νεφώσεων έχει άμεση επίδραση στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, εξασθενώντας την απευθείας ακτινοβολία και αυξάνοντας μερικώς την διάχυτη. Τα παραπάνω ισχύουν σε αραιές νεφώσεις, σε αντίθεση περίπτωση (πυκνή νέφωση) μπορεί να αποκοπεί το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας. Η επίπτωση των νεφών στην ένταση της ακτινοβολίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.15. Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας φωτεινής ημέρας με μερική νέφωση. Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη με καθαρό ουρανό

1.7 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φ/β στοιχείων

Σε μια πρώτη προσέγγιση του φ/β στοιχείου μπορούμε να το θεωρήσουμε ως μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από δίοδο. Προσθέτοντας όμως τις αναπόφευκτες αντιστάσεις R_s που παρεμβάλλονται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} λόγω διαρροών ρεύματος της διόδου, καταλήγουμε στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου :

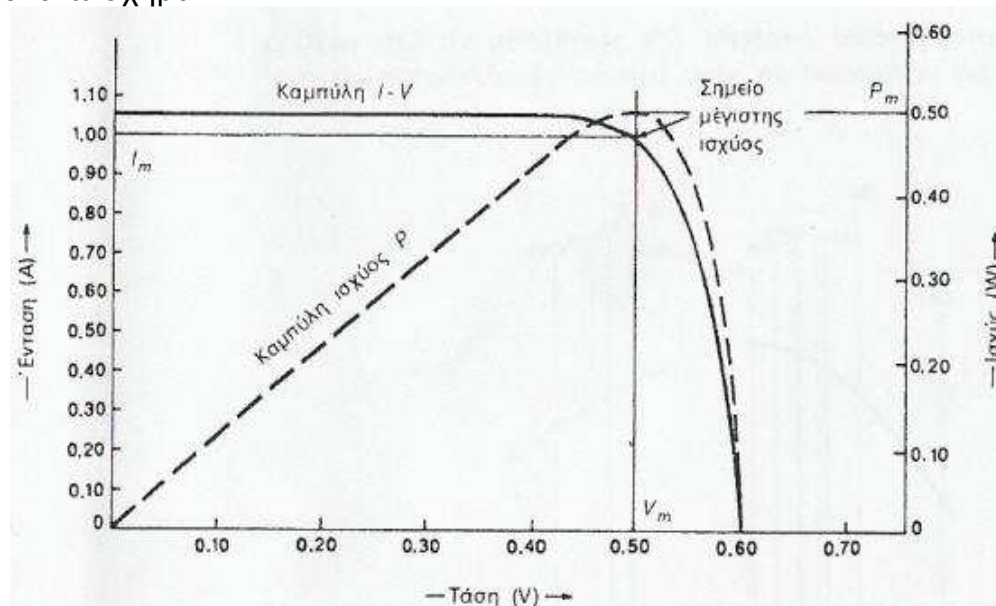


Σχήμα 1.16. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φ/β στοιχείου

Από τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι :

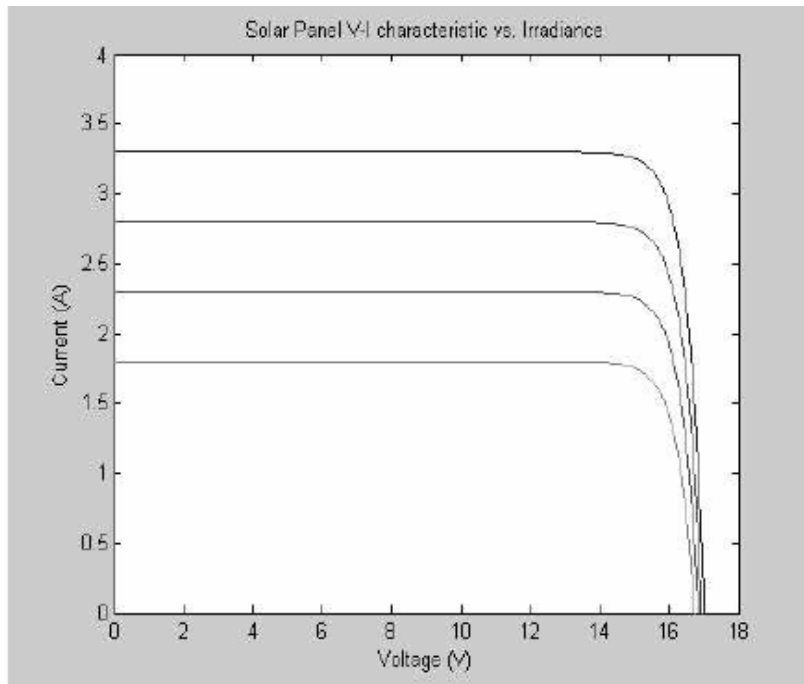
- A) Το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , όταν η τάση στα άκρα του φ/β μηδενιστεί
- B) Η τάση ανοικτοκύκλωσης V_{oc} , όταν το ρεύμα που διαρρέει το φ/β είναι μηδενικό
- Γ) Το ρεύμα και η τάση υπό φορτίο (I_{load}, V_{load})
- Δ) Ο συντελεστής της θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης (σ_θ)

Η βασική καμπύλη I-V χαρακτηριστικών μιας φωτοβολταϊκής μονάδας υπό συνθήκες δεδομένης ακτινοβολίας καθώς και η καμπύλη P-V φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.17. Διάγραμμα I-V και P-V για συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας

Στο σχεδιάγραμμα αυτό φαίνεται και το σημείο μέγιστης ισχύος υπό τις δεδομένες συνθήκες ακτινοβολίας. Για να εκμεταλλευτούμε την ισχύ που μπορεί να παρέχει το φ/β στοιχείο μας πρέπει να έχουμε φορτίο με αντίσταση $R_{load} = V_m / I_m$. Εδώ γίνεται η εξής ερώτηση: Πως αλλάζει το διάγραμμα I-V υπό διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας; Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



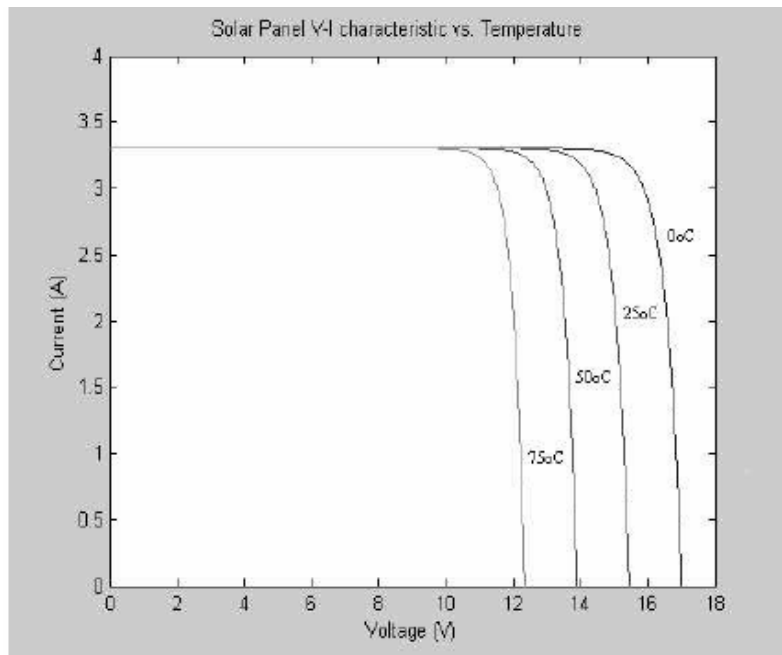
Σχήμα 1.18. Διάγραμμα I-V για μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας

Βλέποντας αυτό το σχήμα καταλαβαίνουμε αμέσως το εξής σημαντικό πρόβλημα: Τα σημεία μέγιστης ισχύος δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από ένα δεδομένο φορτίο για κυμαινόμενη ακτινοβολία. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση ρυθμιστικών διατάξεων που φέρνουν συνεχώς την τάση και το ρεύμα σε ευνοϊκές τιμές για τις συνθήκες κάθε χρονικής στιγμής. Οι διατάξεις αυτές καλούνται MPPT (Maximum Power Point Trackers δηλαδή παρακολουθητές σημείου μέγιστης ισχύος). Επίσης, από το σχήμα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι με την αύξηση της ακτινοβολίας αυξάνεται η V_{oc} και το I_{sc}, αν και το I_{sc} είναι πιο ευαίσθητο στις μεταβολές της ακτινοβολίας από την V_{oc}. Ακόμα παρατηρούμε ότι η ένταση του ρεύματος παραμένει περίπου σταθερή για το μεγαλύτερο τμήμα του διαγράμματος (υπό συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας) λειτουργώντας περίπου ως πηγή ρεύματος.

Το τελικό συμπέρασμα από την ηλεκτρική ανάλυση της φ/β μονάδας είναι η σημαντική εξάρτηση της λειτουργίας από τους εξής τρεις παράγοντες :

- Την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό.
- Την θερμοκρασία του στοιχείου.
- Την αντίσταση του κυκλώματος που λειτουργεί ως φορτίο του φ/β.

Όσον αφορά την θερμοκρασία του στοιχείου, θα περίμενε κανείς ότι με την αύξηση της περιβάλλουσας θερμοκρασίας λειτουργούν καλύτερα τα φωτοβολταϊκά (από διαίσθηση και μόνο). Αυτό όμως σε καμία περίπτωση δεν ισχύει όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.19. Διάγραμμα I-V για αυξανόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος

Ο βασικός λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται η κινητικότητα των φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος.

1.8 Από τι αποτελείται ένα φωτοβολταϊκό σύστημα

Ένα πλήρες φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα :

- α) Την φωτοβολταϊκή γεννήτρια με την μηχανική στήριξη αυτής και ίσως ένα σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς μαζί .
- β) Το υποσύστημα αποθήκευσης (διάταξη μπαταριών) .
- γ) Τον εξοπλισμό ελέγχου και προσαρμογής ισχύος (και συστήματα μετρήσεων και παρακολούθησης αν είναι αναγκαία) .
- δ) Βοηθητικό σύστημα παροχής ισχύος για περίπτωση ανάγκης (όπως γεννήτρια πετρελαίου) , δημιουργώντας έτσι ένα υβριδικό αυτόνομο σύστημα παροχής ηλεκτρικής ισχύος .

Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια : Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (προαναφέρθηκαν ως κυψέλες – solar cells) παράγουν πολύ μικρή ισχύ, γι' αυτό οι κατασκευαστές τα συνενώνουν φτιάχνοντας τις φ/β μονάδες (PV modules). Συνδεόμενες μονάδες δημιουργούν αυτό που κυκλοφορεί και στην αγορά με το όνομα φωτοβολταϊκό πάνελ (αλλιώς γνωστοί και ως συλλέκτες-PV panel). Τέλος στις μεγάλες εγκαταστάσεις παροχής ρεύματος από φ/β ενέργεια εμφανίζονται πάνελ συνδεδεμένα μεταξύ τους και πάνω σε μεγάλες μεταλλικές κατασκευές που καλούνται φ/β συστοιχίες (PV arrays) .

Η αποθήκευση της ενέργειας : Η αποθήκευση της ενέργειας είναι απαραίτητη για τα φ/β συστήματα λόγω της έντονης διακύμανσης της ηλιακής

ακτινοβολίας στη διάρκεια του χρόνου αλλά και της ημέρας. Υπάρχουν πολλές μορφές αποθήκευσης της ενέργειας όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα :

Energy Stored	Technology	Remarks
	Pumped water	1. Common utility use as large-scale energy storage 2. PV pumping
Mechanical	Compressed air Flywheel	Demonstrated technology for large-scale storage Under investigation for small systems
Electromagnetic	Electric current in superconducting ring	New development potential using 'high-temperature' super conducting materials
Chemical	Batteries Hydrogen Production	Mainly used for energy storage

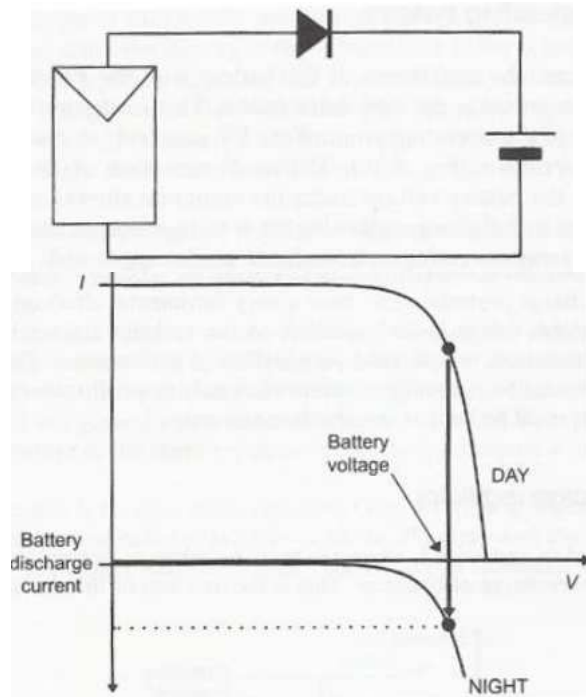
Πίνακας 1.2. Συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας

Ωστόσο τα περισσότερα συστήματα σήμερα χρησιμοποιούν μπαταρίες (συσσωρευτές) και μάλιστα τύπου lead-acid. Η ισχύς που αποθηκεύεται σε ένα συσσωρευτή, δηλαδή η χωρητικότητα του μετράται σε αμπερώρια (Ah). Με γνώμονα την ονομαστική του τάση υπολογίζουμε την μέγιστη δυνατή αποθήκευση ενέργειας με τον τύπο : $V_{ov} * (Ah)$, π.χ. μια μπαταρία των 12Volts, 100Ah, έχει ονομαστική ικανότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας 1,2kWh.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι οι φορτισμένοι συσσωρευτές αυτοεκφορτίζονται με ρυθμό 2-5% τον μήνα. Τέλος πρέπει να αναφερθούμε στο βάθος της εκφόρτισης του συσσωρευτή, από το οποίο εξαρτάται η διάρκεια της χρήσιμης ζωής του. Συσσωρευτής με βάθος εκφόρτισης 10% πρέπει να χρησιμοποιεί μόνο το 10% της ονομαστικής του χωρητικότητας, αν δεν θέλουμε την πρόωρη καταστροφή του.

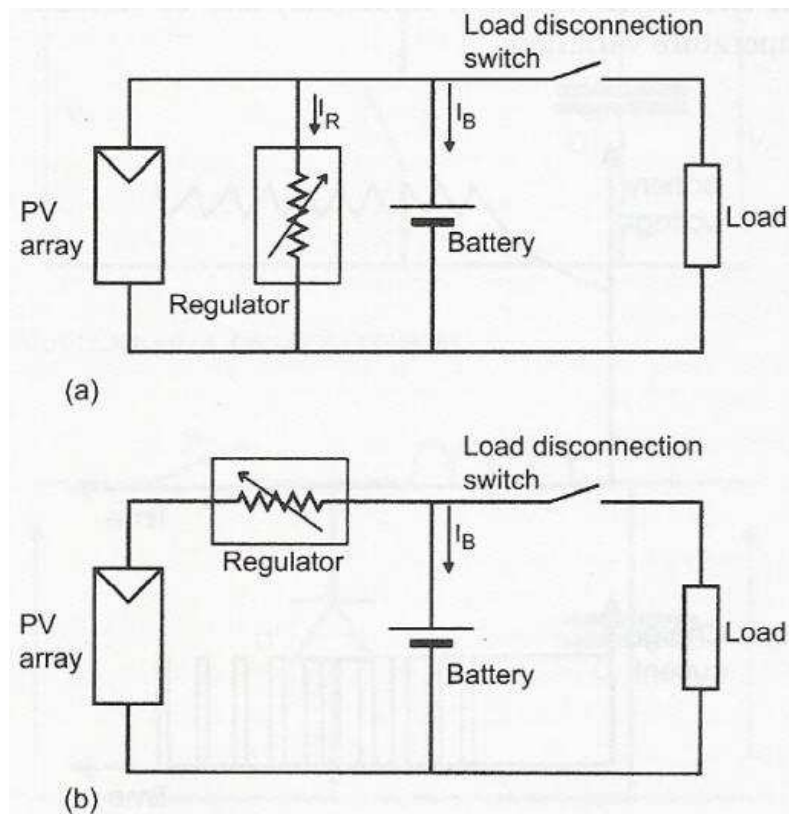
Εξοπλισμός ελέγχου:

- Blocking Diode (δίοδος φραγής) : Όπως έχει αναλυθεί στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, τα φ/β στοιχεία συμπεριφέρονται ως δίοδοι στο σκοτάδι (την νύκτα). Για το λόγο αυτό τοποθετούμε μια δίοδο φραγής ανάμεσα στο στοιχείο και τον συσσωρευτή για να αποτρέψουμε την αποφόρτιση του τελευταίου όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.20. Η λειτουργία της διόδου φραγής

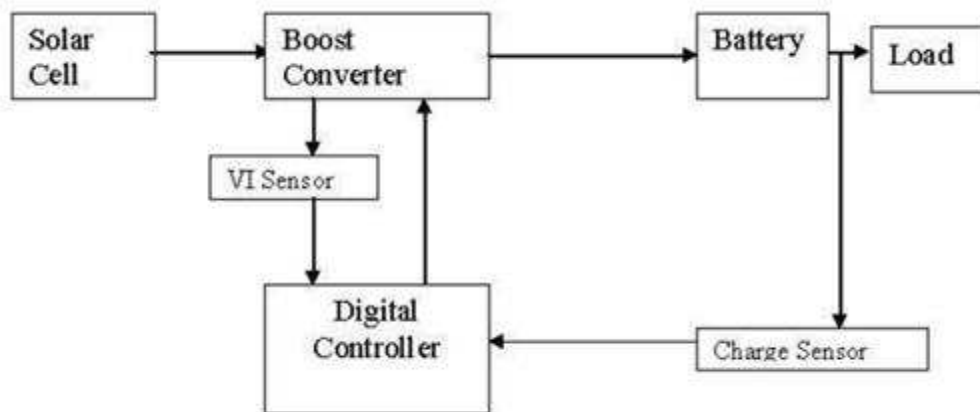
-Charge regulator (ρυθμιστής φόρτισης) : Ο ρυθμιστής φόρτισης περιορίζει την μέγιστη τάση στην μπαταρία για να αποτρέψει την υπερφόρτωση. Δυο είναι οι βασικοί τύποι ρυθμιστών, ο εν σειρά και ο εν παραλλήλω όπως φαίνονται και στο σχήμα 1.21 :



Σχήμα 1.21. Ρυθμιστές φόρτισης (a) εν παραλλήλω (b) εν σειρά

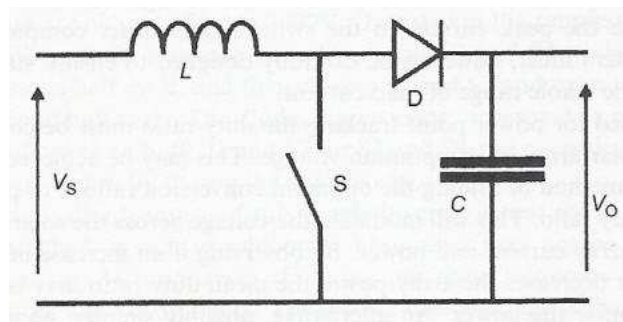
Είναι προφανής η κατανάλωση ισχύος από τις μεταβλητές αντιστάσεις των δυο παραπάνω κυκλωμάτων. Η κατανάλωση αυτή μπορεί να μειωθεί σημαντικά αν αντικατασταθεί η εν σειρά μεταβλητή αντίσταση του δεύτερου κυκλώματος από ένα διακόπτη (είτε μηχανικό αλλά συνήθως ένα MOSFET ή ένα BJT).

- Οι διατάξεις MPPT (Maximum Power Point Trackers) : Όπως έχει εξηγηθεί και στο κεφάλαιο για τις χαρακτηριστικές I-V των φωτοβολταϊκών στοιχείων, για μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας δεν μπορούμε με δεδομένο φορτίο να είμαστε συνεχώς στην θέση μέγιστης ισχύος στο διάγραμμα. Ο MPPT μας δίνει την δυνατότητα αυτή : Έχοντας συνεχώς σταθερό φορτίο, ξεγελά το φωτοβολταϊκό στοιχείο ότι μεταβάλλεται το φορτίο συνεχώς στην τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος για την λαμβανόμενη ακτινοβολία κάθε χρονικής στιγμής. Για το σκοπό αυτό υπολογίζεται κάθε χρονική στιγμή η τάση και το ρεύμα του κυκλώματος, ενώ ένας υπολογιστής υπολογίζει τις αλλαγές των παραμέτρων ενός boost converter (dc/dc converter βλέπε από κάτω) για να επιτύχει την παρακολούθηση του μεγίστου. Ένα μπλοκ διάγραμμα της λειτουργίας αυτής φαίνεται παρακάτω :

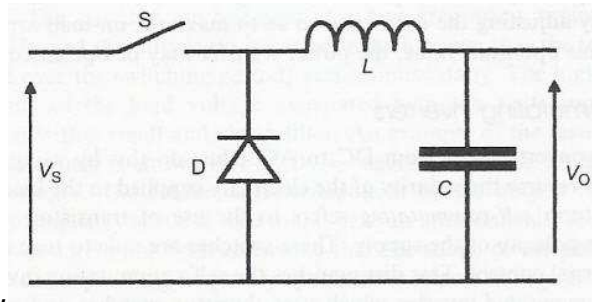


Σχήμα 1.22. Μπλοκ διάγραμμα ενός Maximum Power Point Tracker

-DC/DC Converters (μετατροπείς συνεχούς/συνεχούς) : Μετατρέπουν την ισχύ του φ/β πάνελ σε συνεχή άλλης στάθμης. Βασικότερες τοπολογίες είναι οι buck και boost converters που φαίνονται στα παρακάτω δυο σχήματα :

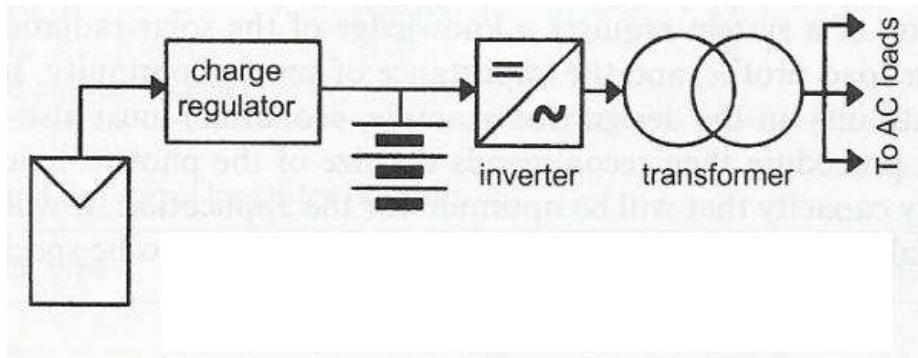


Σχήμα 1.23 Buck Converter



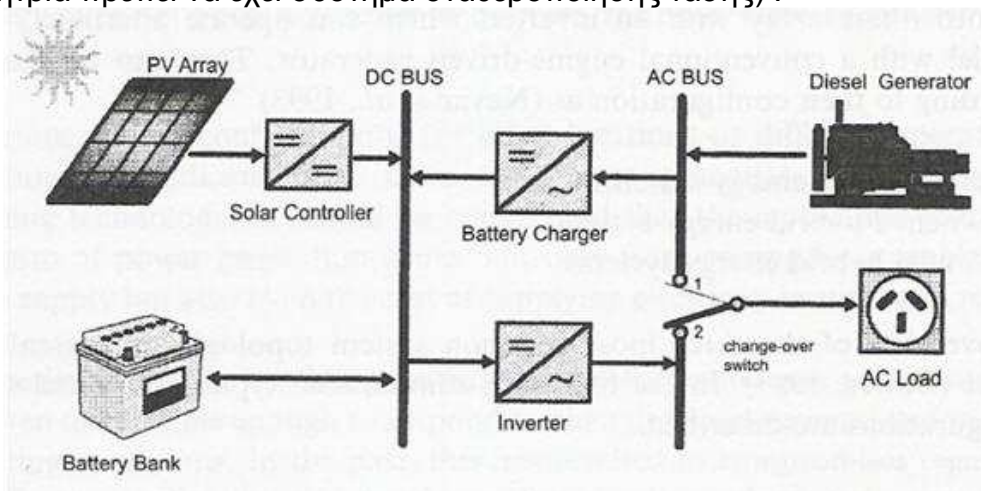
Σχήμα 1.24 Boost Converter

-DC/AC converters-inverters (μετατροπείς συνεχούς/εναλλασσομένου) : Χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται σύνδεση εναλλασσομένου φορτίου στο φ/β σύστημα. Η απόδοση του μετατροπέα μπορεί να φτάσει και το 97% αρκεί να λειτουργεί στην ονομαστική του ισχύ. Αν λειτουργεί υπό μερικό φορτίο η απόδοση του μπορεί να πέσει σημαντικά. Το φ/β σύστημα μπορεί με χρήση inverter να συνδεθεί (υπό προϋποθέσεις) στο δημόσιο δίκτυο παροχής ρεύματος, λειτουργώντας ως πηγή ηλεκτρικής ισχύος για αυτό. Ακολουθεί ένα σχεδιάγραμμα πλήρους εφαρμογής με εναλλασσόμενο φορτίο :



Σχήμα 1.25. Εφαρμογή φ/β συστήματος με ac φορτίο, Inverter ,charge regulator και μπαταρίες

Τέλος μια ολοκληρωμένη , πλήρως αυτόνομη εγκατάσταση φ/β συστήματος με γεννήτρια πετρελαίου και μπαταρίες φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (η γεννήτρια πρέπει να έχει σύστημα σταθεροποίησης τάσης) :



Σχήμα 1.26.Μια ολοκληρωμένη εφαρμογή αυτόνομου φ/β συστήματος

Κεφάλαιο 2

Θεωρία Φ/β Ηλιοστάτη

2.1 Εισαγωγή

Αφού έχουν αναφερθεί όλα όσα χρειάζονται από θεωρητικής άποψης για την φωτοβολταϊκή τεχνολογία, ήρθε η ώρα να δούμε με τι ασχολείται η παρούσα εργασία. Σκοπός της είναι η κατασκευή ενός photovoltaic solar tracking system (φ/β παρακολουθητής της τροχιάς του ήλιου). Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να υλοποιηθεί η εφαρμογή αυτή με ή χωρίς αισθητήρα ανίχνευσης της θέσης του ήλιου, ανοικτού ή κλειστού βρόχου ελέγχου. Η κατασκευή του εν λόγω solar tracker βασίζεται σε έλεγχο κλειστού βρόχου (με ανάδραση) χωρίς χρήση επιπλέον αισθητήρα, καθώς το ίδιο το φωτοβολταϊκό πάνελ θα χρησιμοποιηθεί για να ανιχνευθεί η θέση του ήλιου.

Όπως έχει προαναφερθεί στην θεωρία, στόχος των solar trackers είναι να βρίσκουν την θέση του ήλιου στον ουρανό, μεγιστοποιώντας έτσι την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πάνελ. Η συγκεκριμένη κατασκευή χρησιμοποιεί τον σκοπό του tracking (που είναι η κίνηση του πάνελ) ως μέσο για την εύρεση του προσανατολισμού που πρέπει να έχει η κατασκευή για να επιτύχει μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό περιορίζουμε το αρχικό κόστος κατασκευής, αποφεύγοντας την αγορά ή κατασκευή ενός αρκετά ακριβού αισθητήρα .

Πώς όμως γίνεται η ανίχνευση της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα; Υπάρχει η μέθοδος να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο της κίνησης του ήλιου, αποθηκευμένο στην μνήμη ενός υπολογιστή και ένα πρόγραμμα να εκτελεί έναν αλγόριθμο διαδοχικών προβλεπόμενων θέσεων του ήλιου, ενεργοποιώντας τα μοτέρ κίνησης του πλαισίου της κατασκευής. Και πάλι όμως είναι αναγκαία η χρήση οπτικών κωδικοποιητών ελέγχου θέσης των μοτέρ (σήματα ανάδρασης ελέγχου), για τυχούσες αποκλίσεις της κίνησης των μοτέρ λόγω εξωτερικών παραγόντων (σφάλματα, ολίσθηση, αέρας, γήρανση των ηλεκτρικών και μηχανικών μερών).

Στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιείται κανείς αισθητήρας (ούτε ηλιακός , ούτε θέσης των μοτέρ), παρά μόνο το ίδιο το φωτοβολταϊκό πάνελ. Δημιουργείται συνεπώς το ερώτημα πώς γίνεται η ανίχνευση του μεγίστου της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στον ουρανό; Η εξήγηση ακολουθεί στην επόμενη παράγραφο .

2.2 Η εύρεση του μεγίστου της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Η λειτουργία του αλγορίθμου εύρεσης του μεγίστου της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στον ουρανό βασίζεται σε μια τεχνική μερικής σάρωσης του ουρανού σε δύο άξονες, τους άξονες κίνησης των μοτέρ του solar tracker. Πρόκειται για την οριζόντια αζιμουθιακή κίνηση (θα αναφέρεται στο εξής ως κίνηση West/East δηλαδή Δύση/Ανατολή) και την ζενιθιακή κίνηση, γνωστή και ως ανύψωση (θα αναφέρομαι στο εξής σε αυτήν ως κίνηση Up/Down, δηλαδή Πάνω/Κάτω). Αυτό το πρόβλημα εύρεσης του μεγίστου είναι κυρτό, δυο μεταβλητών. Η κυρτότητα είναι προφανής λόγω της φύσης του γεωμετρικού προβλήματος και συνεπώς η εύρεση του μεγίστου ταυτίζεται με το πρόβλημα εύρεσης τοπικού μεγίστου (στα κυρτά προβλήματα το τοπικό ακρότατο είναι και ολικό). Επίσης λόγω της κυρτότητας μπορούμε να αναλύσουμε την αναζήτηση μεγίστου σε δυο βήματα :

1) Αναζήτηση και εύρεση του μεγίστου στον άξονα West/East (ορίζεται ως max_we)

2) Αναζήτηση και εύρεση του μεγίστου του max_we στον άξονα Up/Down (ορίζεται ως max_ud)

Η θεωρία των κυρτών προβλημάτων αναζήτησης ακροτάτων μας εξασφαλίζει ότι:

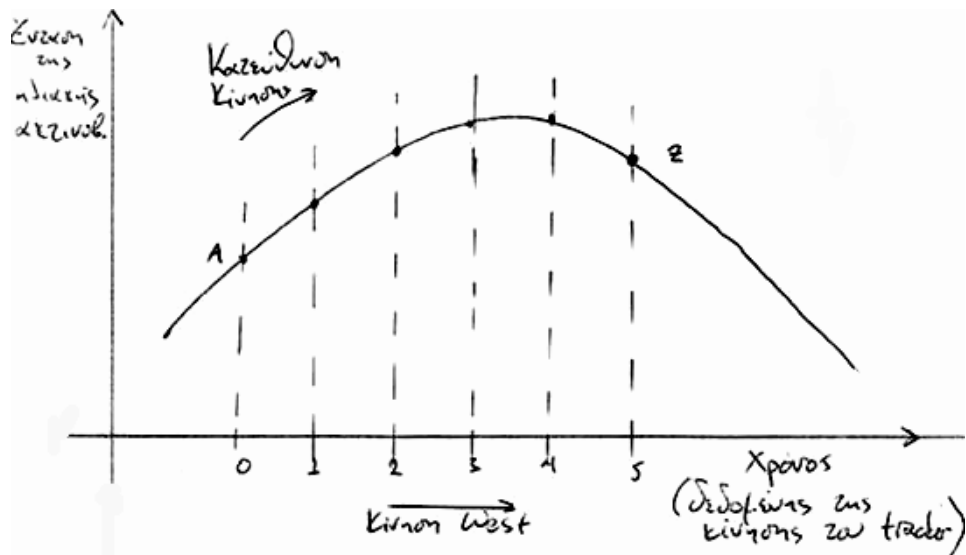
$$\max_{total} = \max_ud = \max(\max_we)$$

Δηλαδή ότι ο προσανατολισμός της μέγιστης ακτινοβολίας μπορεί να βρεθεί αν κινούμενοι αζιμουθιακά (με σταθερή ανύψωση) για κάποια γωνία ανύψωσης εντοπίσουμε το αρχικό μέγιστο, σταματήσουμε σε αυτό και κατόπιν κινηθούμε ζενιθιακά (πάνω-κάτω) μέχρι να βρούμε το μέγιστο του μεγίστου.

Έτσι λοιπόν έχει λυθεί από μαθηματικής σκοπιάς η εύρεση του βέλτιστου προσανατολισμού του πάνελ και αρκεί να υλοποιηθεί ο βασικός αλγόριθμος που να συγκλίνει σε αυτόν .

2.3 Ο βασικός αλγόριθμος εύρεσης του μεγίστου

Βάσει της ανάλυσης που προηγήθηκε, το πρόβλημα σπάει σε δυο πανομοιότυπα υποπροβλήματα ενός άξονα κίνησης (δηλ. μιας μεταβλητής), καθένα εκ των οποίων μπορεί να επιλυθεί με την παρακάτω διαδικασία :



Σχήμα 2.1. Έναρξη του αλγορίθμου

Στο σχήμα 2.1 βλέπουμε την ένταση της ακτινοβολίας συναρτήσει της αζιμουθιακής γωνίας (με αναφορά π.χ. τον νότο), το σημείο μέγιστης έντασης P (ο στόχος μας) και το σημείο εκκίνησης A. Κινείται το φ/β πάνελ με τη βοήθεια του μοτέρ προς τα δυτικά (τυχαία η σύμβαση) με 'παλμούς' κίνησης και κάθε 1 δευτερόλεπτο γίνεται δειγματοληψία της ισχύος που βλέπει το πάνελ στην συγκεκριμένη θέση και αποθηκεύεται. Η κίνηση έχει την εξής λογική :

(Μέτρηση ισχύος στην θέση i) → (κίνηση για χρόνο $< 1 \text{ sec}$)
 → (αναμονή/στάση) →
 (μέτρηση ισχύος στην θέση $\{i+1\}$)

Αυτή η 'ψηφιοποίηση' της κίνησης γίνεται για να γίνεται αποφύγουμε την σύγχυση από τις καθυστερήσεις που υπάρχουν στις εισόδους του μικροελεγκτή (που θα υλοποιήσει τον αλγόριθμο), στην οδήγηση των μοτέρ και στα διάφορα θέματα χρονισμού που προκύπτουν.

Συνέχεια του αλγορίθμου : Έχοντας αποθηκευμένες τις τιμές της ισχύος για τις θέσεις (i) και $(i+1)$ μπορούμε να τις συγκρίνουμε.

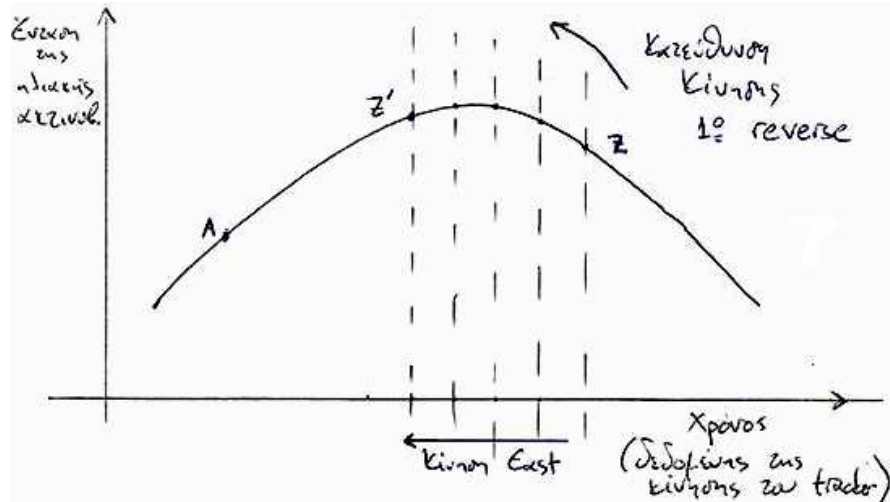
Αν $P(i+1) \geq P(i)$ τότε σημαίνει ότι κινούμαστε προς την σωστή κατεύθυνση, άρα λέμε στον αλγόριθμο να συνεχίσει.

Αν $P(i+1) < P(i)$ τότε κινούμαστε προς την κατεύθυνση μείωσης της ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να αντιστρέψουμε την φορά κίνησης (reverse).

Στο σχήμα 2.1 ακολουθώντας αυτήν την διαδικασία καταλήγουμε στην θέση (Z) όπου και γίνεται το πρώτο reverse (αντιστροφή). Το μυστικό για να συγκλίνει η μέθοδος στο μέγιστο είναι να μειώσουμε τώρα το βήμα της κίνησης και να επαναλάβουμε την διαδικασία. Στην υλοποίησή μου έχω βάλει ως νέο χρόνο κίνησης από τον τύπο

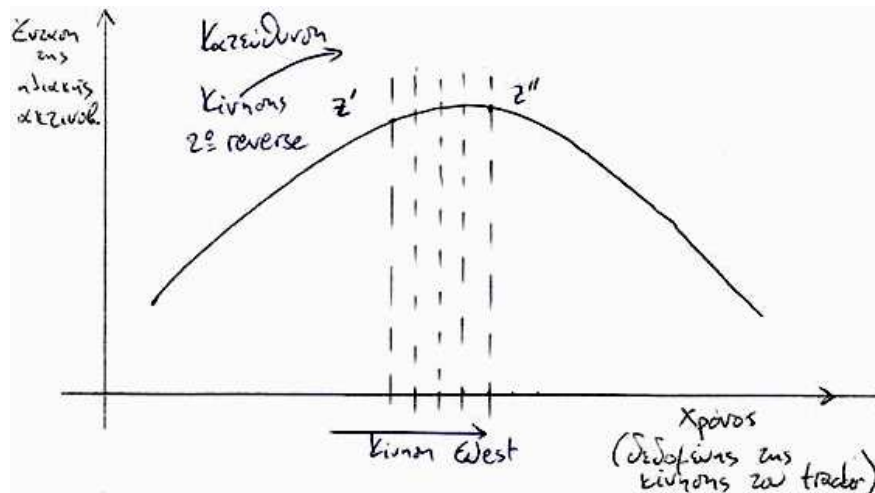
$new_mov_time = \frac{prev_mov_time}{reverse_number + 1}$, όπου $reverse_number$ είναι το πλήθος

των αντιστροφών που έχουν γίνει στην παρούσα φάση (εν προκειμένω μια). Έτσι προκύπτει το παρακάτω σχεδιάγραμμα :



Σχήμα 2.2. Συνέχεια του αλγορίθμου μετά το πρώτο reverse

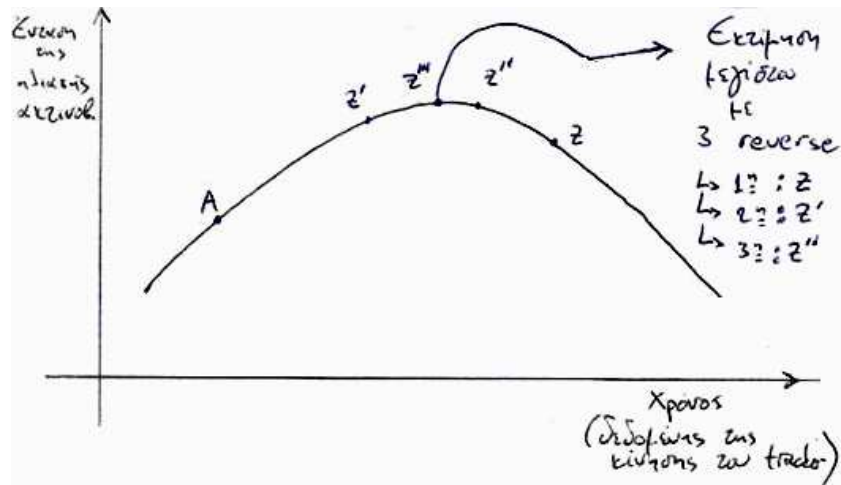
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με προηγουμένως, αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση, καταλήγουμε στην νέα θέση (Z'). Το $reverse_number$ γίνεται τώρα ίσο με δυο, άρα μειώνεται κι άλλο ο χρόνος κίνησης και επαναλαμβάνεται η αρχική διαδικασία προς την αντίθετη κατεύθυνση από πριν με μικρότερο βήμα κίνησης (1/3 του αρχικού) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 2.3. Συνέχεια του αλγορίθμου μετά το δεύτερο reverse

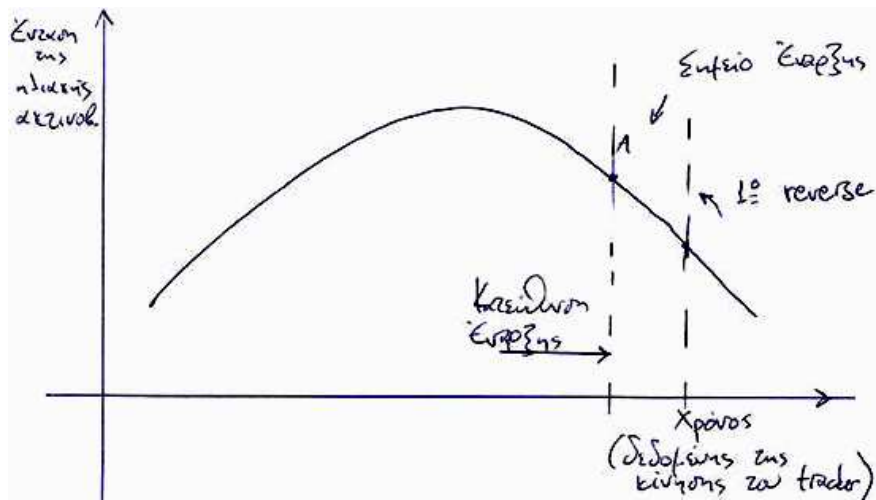
Στην νέα θέση Z'' μπορούμε να επαναλάβουμε την διαδικασία με μικρότερο βήμα κ.τ.λ. Η θεωρία της αριθμητικής ανάλυσης προβλέπει εύρεση του μεγίστου για άπειρες εκτελέσεις της παραπάνω διαδικασίας, ή μια προσέγγιση αυτού μετά από ορισμένες επαναλήψεις με κάποιο σφάλμα ασφαλώς. Μια

εκτίμηση του μεγίστου με τρεις επαναλήψεις της διαδικασίας φαίνεται στο σχεδιάγραμμα :



Σχήμα 2.4. Εκτίμηση του μεγίστου μετά από 3 reverse

Πόσες όμως αντιστροφές πρέπει να κάνεις κανείς για να κάνει μια 'καλή' εκτίμηση της θέσης του μεγίστου; Κατ' αρχάς απαιτούνται οπωσδήποτε δυο για να καλυφθεί η περίπτωση να ξεκινήσει η κίνηση προς την κατεύθυνση μείωσης της ισχύος, όπως φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 2.5. Μια αντιστροφή λόγω εκκίνησης προς λάθος κατεύθυνση

Όσο πιο πολλές επαναλήψεις κάνουμε, αφ' ενός προσεγγίζουμε καλύτερα το μέγιστο, αφ' ετέρου όμως καταναλώνουμε περισσότερη ενέργεια για τις κινήσεις και έχουμε περισσότερη φθορά των κινούμενων μερών της κατασκευής. Προκύπτει λοιπόν το εξής ερώτημα: Αξίζει τον κόπο να προσεγγίσουμε πάρα πολύ 'καλά' το μέγιστο; Αυτό έχει άμεση σχέση με την ευαισθησία του φωτοβολταϊκού πάνελ ως προς την γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια του, συναρτήσει όμως και της έντασης της ακτινοβολίας, για δεδομένο μοντέλο φ/β. Πρόκειται για ένα πολύπλοκο ζήτημα που δεν χρειάζεται να αναλυθεί με εξισώσεις, γιατί από το πείραμα στην κατασκευή προέκυψε το συμπέρασμα ότι το φωτοβολταϊκό πάνελ που χρησιμοποιήθηκε δεν ήταν ιδιαίτερα κατευθυντικό (όρος παρμένος από τη

θεωρία κεραιών) και με τέσσερις επαναλήψεις το αποτέλεσμα της σύγκλισης ήταν αρκετά ικανοποιητικό. Ένας ακόμα λόγος που πρέπει να υλοποιηθεί γρήγορα ο αλγόριθμος είναι ότι υπάρχει ο κίνδυνος να αλλάξουν οι περιβάλλουσες συνθήκες κατά την εξέλιξη αυτού και να προκληθεί σύγχυση.

Θα παρατήρησε κανείς ότι ενώ μετά από κάθε αναστροφή μειώνεται η χρονική διάρκεια της κίνησης, ο χρόνος δειγματοληψίας (1sec) παραμένει σταθερός. Κάλιστα θα μπορούσε να μειωθεί και αυτός αντίστοιχα, μειώνοντας έτσι και τον χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Στην πράξη όμως παρατηρήθηκαν μικρές ταλαντώσεις στον τερματισμό της κίνησης, γι' αυτό κρίθηκε αναγκαίο να μην μειωθεί ο χρόνος δειγματοληψίας, ώστε να έχουμε σαφή δειγματοληψία για σαφή θέση. Οι μικρές αυτές ταλαντώσεις οφείλονται κυρίως στην μη σωστή επιλογή του μοτέρ κίνησης (θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο) με τα πλαστικά του μέρη να κάμπτονται σχετικά εύκολα. Δεν χρειάστηκε σύστημα ελέγχου της κίνησης του μοτέρ, καθ' ότι περιλαμβάνεται στον εξοπλισμό του.

Όταν βρούμε το μέγιστο της ισχύος κινούμενοι οριζόντια όπως κάναμε παραπάνω, εκτελούμε την ίδια διαδικασία για το μοτέρ κίνησης Up/Down με την ίδια λογική. Όταν ολοκληρωθεί ο αριθμός των επαναλήψεων που έχουμε θέσει ως όριο, τότε ο αλγόριθμος έχει ολοκληρωθεί και το φωτοβολταϊκό πάνελ έχει προσεγγίσει τον ήλιο όσο 'καλά' έχουμε απαιτήσει από τον αριθμό των επαναλήψεων.

2.3.1 Η επαναληψιμότητα του αλγορίθμου

Κάθε πότε θα πρέπει να εκτελείται ο αλγόριθμος εύρεσης της θέσης του ήλιου; Αυτό είναι ένα πρόβλημα ιδιαίτερα σύνθετο να επιλυθεί αναλυτικά, ούτε θα επιδιώξουμε κάτι τέτοιο. Πρέπει όμως να γνωρίζει κανείς πότε πρέπει να κινεί το πάνελ. Αυτό σε αρχική ανάλυση εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους :

1. Την ευαισθησία του φ/β στοιχείου ως προς την γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, συναρτήσει πάντα της έντασης της ακτινοβολίας.
2. Πόσο απομακρύνθηκε-κινήθηκε ο ήλιος από την προηγούμενη θέση που είχε βρεθεί και σε πόσο χρόνο.

Η δεύτερη παράμετρος μπορεί να επεξηγηθεί από το μοντέλο του ήλιου. Από το σχήμα 1.9 του προηγούμενου κεφαλαίου βγάζουμε τα εξής συμπεράσματα για την κίνηση του ήλιου :

-Αζιμουθιακή κίνηση : Ο ήλιος κινείται με ταχύτητα περίπου $17,5^{\circ}$ / ώρα το καλοκαίρι (θερινό ηλιοστάσιο) και $13,7^{\circ}$ / ώρα το χειμώνα (χειμερινό ηλιοστάσιο), για όσες ώρες είναι ορατός.

-Ζενιθιακή κίνηση : Ο ήλιος κινείται με ταχύτητα περίπου 11° / ώρα το καλοκαίρι (θερινό ηλιοστάσιο) και 5° / ώρα το χειμώνα (χειμερινό ηλιοστάσιο).

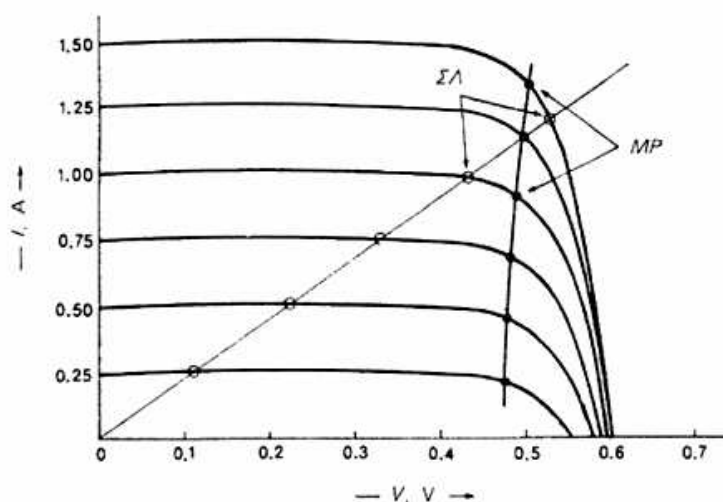
Άρα όπως βλέπουμε δεν μπορούμε να θέσουμε μια σταθερή χρονική διάρκεια ανάμεσα σε δυο tracking για όλο το έτος, αλλά πρέπει να προσαρμόζεται ανά εποχή του έτους.

Όσον αφορά την πρώτη παράμετρο, αυτή αναλύθηκε αρκετά στην παράγραφο του αλγορίθμου με τις δυσκολίες που την χαρακτηρίζουν. Το συμπέρασμα από την παράγραφο αυτή είναι ότι η βέλτιστη χρονική διάρκεια μεταξύ των επαναλήψεων θα καθοριστεί από το πείραμα, ως συγκερασμός του κέρδους της επιπλέον ενέργειας που προσφέρει το φ/β και της ενέργειας που καταναλώνουν τα μοτέρ για το tracking. Για το λόγο αυτό στο πρόγραμμα που υλοποιήθηκε για τον μικροελεγκτή της εργασίας, η έναρξη του αλγορίθμου γίνεται χειροκίνητα για εύκολη επίδειξη και αλλαγές κατά την διάρκεια του πειράματος.

Παρατήρηση : Μέχρι τώρα έχω χρησιμοποιήσει την μεγιστοποίηση της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φωτοβολταϊκό ως κριτήριο για την εύρεση της θέσης του ήλιου . Είναι αυτό σωστό; Και αν ναι, πώς την υπολογίζω; Τα ερωτήματα αυτά θα απαντηθούν στην επόμενη παράγραφο.

2.4 Η επιλογή του φορτίου και η χρήση της ηλεκτρικής ισχύος για την εύρεση του μεγίστου

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, στην υλοποίηση του αλγορίθμου για την εύρεση της θέσης του ήλιου χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο της μεγιστοποίησης της ηλεκτρικής ισχύος που αυτό παράγει. Αυτός ασφαλώς είναι και ο κυρίαρχος στόχος του solar tracker από κατασκευής του: Να μεγιστοποιήσει την ισχύ που παράγει το φωτοβολταϊκό πάνελ, ακόμα και αν η θέση αυτού δεν ευθυγραμμιζόταν με τον ήλιο. Όμως η καθετοποίηση του πάνελ ως προς την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνει την ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό και το αποτέλεσμα αυτού στο διάγραμμα I-V φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 2.6. Διάγραμμα I-V για σταθερό φορτίο και μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας

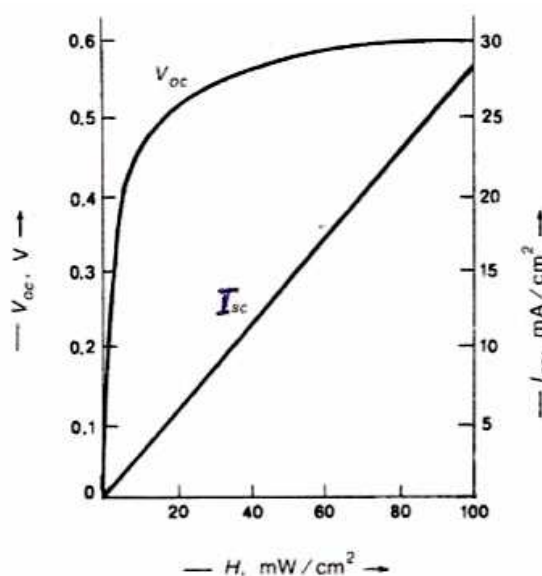
Από αυτό μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι για δεδομένο φορτίο (στην εργασία αυτή μια ωμική αντίσταση ισχύος) οποιασδήποτε τιμής, αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας συνεπάγεται και αύξηση της ισχύος που διατίθεται στο φορτίο. Άρα η μέθοδος του αλγορίθμου έχει λογική συνοχή με την χρήση της ηλεκτρικής ισχύος στην θέση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Όμως από το σχήμα 2.6 παρατηρεί κανείς ότι για μια συγκεκριμένη μεταβολή της ακτινοβολίας δεν έχουμε την ίδια ευαισθησία για διαφορετικές τιμές του φορτίου. Δηλαδή :

-Στην οριακά μεγάλη τιμή φορτίου ($R_{load} \rightarrow \infty$) βλέπουμε ότι μεγάλες μεταβολές στην ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας επιφέρουν εξαιρετικά μικρές μεταβολές στην τάση V_{oc} , έχουμε δηλαδή πολύ μικρή ευαισθησία για να ανιχνεύσουμε την μέγιστη ένταση ακτινοβολίας.

-Στην οριακά μικρή τιμή φορτίου ($R_{load} \rightarrow 0$) βλέπουμε ότι μικρές μεταβολές στην ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας επιφέρουν εξαιρετικά μεγάλες μεταβολές στο ρεύμα I_{sc} , έχουμε δηλαδή μεγάλη ευαισθησία για να ανιχνεύσουμε την μέγιστη ένταση ακτινοβολίας.

Η ευαισθησία των οριακών θέσεων V_{oc} και I_{sc} του διαγράμματος 2.6 ως προς την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 2.7. Η μεταβολή της V_{oc} και του I_{sc} σε συνάρτηση με την ισχύ της ακτινοβολίας

Έχει αναφερθεί παραπάνω ότι στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται ένα απλό ωμικό φορτίο ισχύος γιατί σκοπός είναι η μελέτη της κατασκευής του solar tracker και όχι η ολοκληρωμένη εφαρμογή με battery charge control, converters κ.τ.λ.

Έχοντας αυτό ως βάση, είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουμε μόνο την τάση υπό φορτίο για τον υπολογισμό της ισχύος που θα δέχεται ο μικροελεγκτής για την εκτέλεση του αλγορίθμου :

$$P_{electrical} = V_{load} * I_{load} = (V_{load})^2 / R_{load}$$

κάνοντας έτσι πιο εύκολη την υλοποίηση της μετατροπής των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά από τον μετατροπέα του μικροελεγκτή. Έτσι λοιπόν, ενώ θεωρητικά η βελτιστοποίηση του αλγορίθμου αναφέρεται στην ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, κατέληξε (με όλες τις υποθέσεις που προηγήθηκαν) στην μεγιστοποίηση μονάχα μιας τάσης, της V_{load} . Έχουμε δηλαδή την εξής λογική ακολουθία υλοποίησης για τον solar tracker :

(Θέση ήλιου) → (Ανίχνευση προσανατολισμού μέγιστης έντασης προσπίπτουσας ακτινοβολίας) → (Ανίχνευση προσανατολισμού μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος) → (Ανίχνευση προσανατολισμού μέγιστης V_{load} υπό ωμικό φορτίο δεδομένης τιμής αντίστασης)

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει το πρόβλημα της τιμής της ωμικής αντίστασης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για φορτίο, δεδομένου ότι η ευαισθησία της τιμής αυτής θα επηρεάσει την χρήση του συστήματος ως αισθητήρα ανίχνευσης μέγιστης ακτινοβολίας. Η τιμή θα εξαρτηθεί από τις εξής παραμέτρους :

1. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πάνελ που θα χρησιμοποιηθεί για τις μετρήσεις .
2. Την ευαισθησία της V_{load} ως προς την επιλεγείσα τιμή της R_{load} .
3. Την ανάγκη μεγιστοποίησης της ισχύος που θα παρέχει το φ/β πάνελ στο φορτίο του.

Κυριότερο των τριών είναι αναμφισβήτητα το τρίτο . Για να το επιτύχουμε όμως πρέπει να γνωρίζουμε το επίπεδο της ακτινοβολίας, πράγμα αδύνατο αφού μεταβάλλεται τόσο εποχιακά , όσο και κατά την εξέλιξη της ημέρας. Επιλέγουμε ωστόσο προσεγγιστικά την τιμή εκείνη που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ υπό 'καλές' συνθήκες , ήτοι ακτινοβολία σχεδόν πλήρους ήλιου (έχει αναλυθεί στην θεωρία) $100mW / cm^2$. Η προσέγγιση αυτή δεν είναι κακή, αν λάβει κανείς υπόψη του ότι είναι επιτεύξιμο με τον solar tracker να έχουμε λαμβανόμενη ένταση ακτινοβολίας περίπου ενός πλήρους ήλιου .

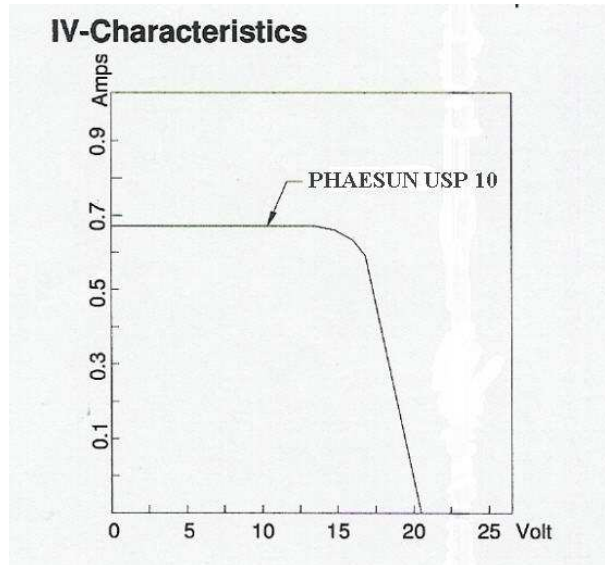
Έλεγχος της δεύτερης παραμέτρου : από το σχήμα 2.6 βλέπουμε ότι με αντίσταση φορτίου αυτήν που μας δίνει μέγιστη ισχύ υπό συνθήκες ενός ήλιου μας παρέχει ευαισθησία αρκετά κοντά στην μέγιστη ευαισθησία της V_{load} συναρτήσει της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ενώ εξακολουθεί να έχει πολύ καλή ευαισθησία για τις περισσότερες σχετικά μεγάλες εντάσεις που φαίνονται στο διάγραμμα. Χάνει βέβαια αρκετά σε πολύ μικρές εντάσεις, που είναι ελάχιστος σημασίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β . Εν κατακλείδι η τιμή της αντίστασης φορτίου που μεγιστοποιεί την ικανότητα του φ/β πάνελ να παράγει ηλεκτρική ενέργεια υπό συνθήκες ‘καλής’ ακτινοβολίας είναι μια εξαιρετική τιμή και από άποψη λειτουργίας του συστήματος ως ανιχνευτή της θέσης του ήλιου .

Επομένως , η τιμή της αντίστασης του φορτίου θα υπολογιστεί από το maximum power point του διαγράμματος του φ/β πάνελ για ακτινοβολία ενός πλήρους ήλιου. Τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συλλέκτη που χρησιμοποιήθηκε (μοντέλο Phaesun USP_10) παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα :

Modeltype	USP 10	
<u>electrical parameters</u>		
rated power (Wp) Pmax		10
configuration		12V
rated current (A) Impp		0,59
rated voltage (V) Vmpp		16,9
short circuit current (A) Isc		0,68
open circuit voltage (V) Voc		20,5
<u>physical parameters</u>		
dimensions (L*B*H mm)		406*346*38
weight (kg)		1,8
packing unit		10
<u>standard test conditions</u>	<u>parameter</u>	<u>value</u>
intensity of illumination	insolation (W/m ²)	1000
spectral density	air mass (AM)	1,5
operating temperature	cell temp (Celsius)	25

Πίνακας 2.1. Τα χαρακτηριστικά του φ/β συλλέκτη

Ακολουθεί και το διάγραμμα I-V του συλλέκτη για ένταση ακτινοβολίας $100mW / cm^2$:



Σχήμα 2.8. Το διάγραμμα I-V του φ/β συλλέκτη που χρησιμοποιήθηκε

Η προς επιλογήν αντίσταση φορτίου μπορεί να εκτιμηθεί :

$$R_{load} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} = \frac{16,9}{0,59} \cong 28,6\Omega$$

Για την υλοποίηση του solar tracker χρησιμοποίησα την πλησιέστερη τιμή που βρήκα στην αγορά $R_{load} = 27\Omega, \pm 5\%, 17Watt$, ισχύος ικανής να ανταπεξέλθει στην ισχύ που παρέχει το πάνελ .

Κεφάλαιο 3

Ανάλυση του συστήματος

3.1 Εισαγωγή

Μέχρι στιγμής έχουμε δει τα βασικά θεωρητικά στοιχεία που χρειάζονται για την κατασκευή του solar tracker καθώς και την βασική αλγοριθμική διαδικασία που θα λειτουργήσει. Το πρόβλημα από την ένταση της ακτινοβολίας ανήχθη στον έλεγχο της τάσης του φορτίου, η κατάλληλη τιμή του οποίου και υπολογίστηκε. Ήρθε η ώρα λοιπόν να προχωρήσουμε στην ανάλυση του υπό σχεδίαση κυκλώματος που υλοποιεί την τεχνική solar tracking και να δούμε τις προδιαγραφές που πληρεί η λειτουργία του.

Η κατασκευή αποτελείται από τα εξής μέρη :

- Την πλακέτα ελέγχου και εντολών του solar tracker
- Το φωτοβολταϊκό πάνελ
- Τα μοτέρ κίνησης (σε μια κατασκευή με δυο μοτέρ)
- Την κατασκευή των μηχανικών συνδέσεων και στηρίξεων
- Τους ηλεκτρικούς συνδετήρες (φισ , κροκοδείλους) και τα καλώδια συνδέσεων των διαφόρων υποσυστημάτων

3.2 Η πλακέτα ελέγχου και εντολών

Θα αρχίσει η ανάλυση από την πλακέτα ελέγχου και εντολών του solar tracker, την καρδιά αυτής της εργασίας. Η πλακέτα αποτελείται από τα εξής διακριτά τμήματα, που μπορούν να αναλυθούν ξεχωριστά :

- Τον μικροελεγκτή
- Το τμήμα εισόδου : Δέχεται ως είσοδο την τάση στα άκρα του φορτίου και την υποβιβάζει για να οδηγήσει με ασφάλεια την είσοδο του Αναλογικού/Ψηφιακού Μετατροπέα (ADC) του μικροελεγκτή
 - Το τμήμα εξόδου: Δέχεται ως είσοδο τις εξόδους του μικροελεγκτή για κίνηση των μοτέρ (4 κινήσεις) και οδηγεί με ασφαλή τρόπο την κίνηση αυτή, ανεξαρτητοποιώντας τμήματα διαφορετικών τύπων και επιπέδου τάσεων λειτουργίας
 - Το τμήμα ελέγχου και χειρισμού της λειτουργίας της πλακέτας (και ανίχνευσης προβλημάτων) : Περιλαμβάνει εισόδους (buttons) και

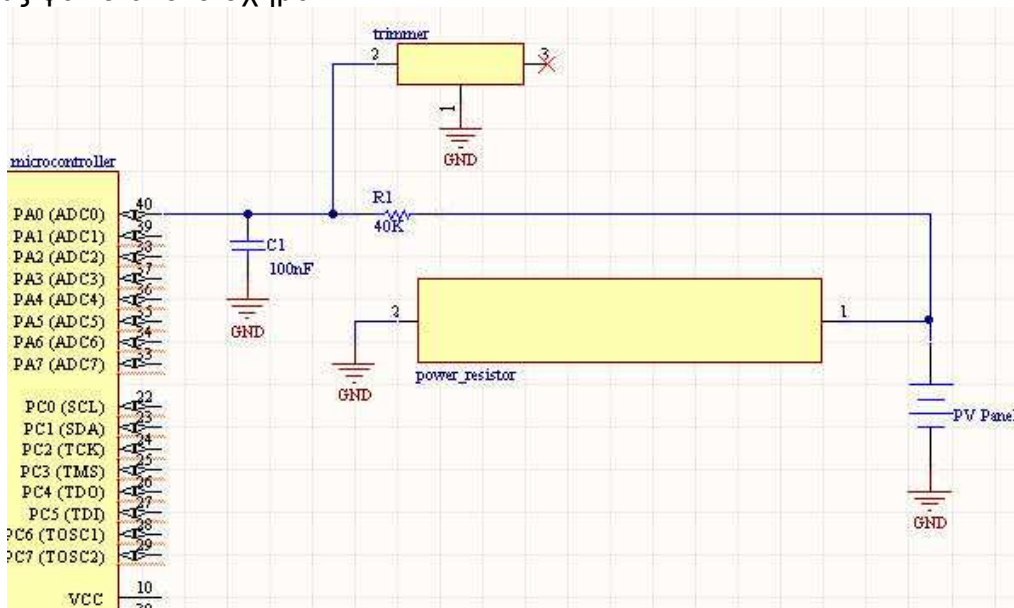
εξόδους (leds) με σκοπό την παρατήρηση της εξέλιξης του αλγορίθμου, της επανεκκίνησής του (reset button) και της διακοπής του για χειροκίνητη κίνηση (interrupt button) .

- Το τμήμα σταθεροποίησης της τάσης λειτουργίας του ψηφιακού τμήματος του κυκλώματος της πλακέτας

Τα παραπάνω τμήματα θα αναλυθούν το καθένα ξεχωριστά και με λογική σειρά για την κατανόηση των προδιαγραφών .

3.2.1 Το τμήμα εισόδου

Το τμήμα εισόδου της πλακέτας δέχεται ως είσοδο την τάση στα άκρα του φορτίου (συνδεδεμένου με το φ/β πάνελ φυσικά) και την υποβιβάζει για να οδηγήσει με ασφάλεια την είσοδο του Αναλογικού/Ψηφιακού Μετατροπέα. Η υποβίβαση αυτή είναι αναγκαία για τον βασικό λόγο ότι η είσοδος του Αναλογικού/Ψηφιακού Μετατροπέα δέχεται σήματα-τάσεις εύρους 0-5 Volts, ενώ η τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού συλλέκτη έχει εύρος 0-20,5 Volts χωρίς φορτίο (ή εύρος 0-16,4 Volts με φορτίο). Για λόγους ασφαλείας (βλέπε κατά λάθος αποσύνδεση φορτίου) θεωρούμε το εύρος χωρίς φορτίο. Η υποβίβαση της τάσης για να την δεχθεί ο ADC γίνεται με ένα διαιρέτη τάσης, όπως φαίνεται στο σχήμα :



Σχήμα 3.1. Το τμήμα εισόδου της πλακέτας

Οι τιμές των αντιστάσεων πρέπει να έχουν τέτοιες τιμές ώστε :

- Να επιτύχουμε τον επιθυμητό λόγο διαίρεσης τάσεων
- Να διέρχεται πολύ μικρό ρεύμα από τον κλάδο αυτό ώστε να μην αλλοιώνεται η κατανάλωση της ηλεκτρικής ισχύος

Η αντίσταση R1 του διαιρέτη τάσης επιλέγεται να έχει τιμή 40kΩ ενώ αντί για δεύτερη αντίσταση χρησιμοποιείται trimmer 20kΩ που λειτουργεί ως μεταβλητή αντίσταση (τα δυο πόδια) για την ακριβή ρύθμιση του επιθυμητού

λόγου τάσεων. Για παράδειγμα , ο λόγος τάσεων εισόδου/εξόδου του διαιρέτη 1:4 (πλησίον του πραγματικά επιδιώξιμου) προκύπτει με ρύθμιση του trimmer στα 10kΩ. Το πλεονέκτημα της μεταβλητής αντίστασης είναι προφανές: ανεξαρτήτως ανοχών των αντιστάσεων, μπορεί να γίνει ακριβής λόγος τάσεων. Το calibration του trimmer μπορεί να γίνει και στο τέλος, υπό συνθήκες ακτινοβολίας αλλά και στο εργαστήριο με ένα τροφοδοτικό που φτάνει στα 20 Volts .

Όσον αφορά την κατανάλωση ισχύος του διαιρέτη τάσης, αρκούν μερικοί υπολογισμοί για να δείξουν ότι είναι αμελητέα. Με αναφορά στους συμβολισμούς του σχήματος 3.1 και για επιθυμητό λόγο υποβιβασμού 1:4 έχουμε :

$$R_{tot} = R_{load} \parallel R_{\text{δαιρετη}}$$

Όμως $R_{\text{δαιρετη}} = R_1 + R_{\text{trimmer}} = 40 + 10 = 50k\Omega$

Άρα $R_{\text{δαιρετη}} = \frac{R_1 * R_{\text{trimmer}}}{R_1 + R_{\text{trimmer}}} \cong 26,985\Omega$

Η αρχική ισχύς είναι : $P_{\text{αρχ}} = V^2 / R_{load}$

Και η τελική (με τον διαιρέτη) : $P_{\text{τελ}} = V^2 / R_{tot}$ (θεωρούμε ότι δεν αλλάζει η τάση του συλλέκτη για μια τόσο μικρή μεταβολή του φορτίου)

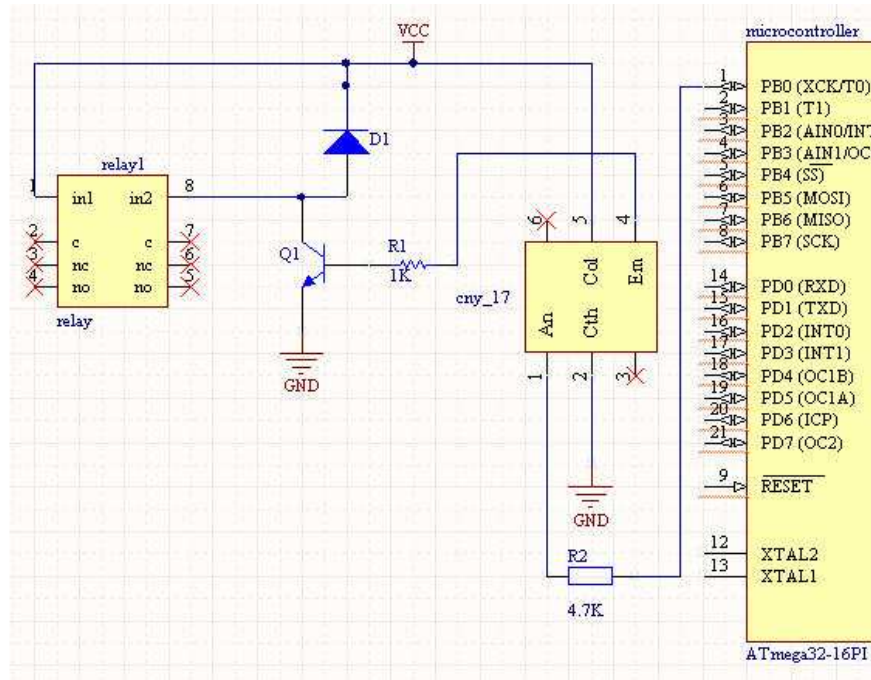
Συνεπώς έχουμε : $\frac{P_{\text{τελ}}}{P_{\text{αρχ}}} = \frac{V^2 / R_{tot}}{V^2 / R_{load}} = \frac{R_{load}}{R_{tot}} = \frac{27}{26,985} = 1,00056$

Δηλαδή παρατηρείται μια κατανάλωση μεγέθους 0,056% που είναι αμελητέα. Επίσης η ισχύς που καταναλώνουν οι αντιστάτες του διαιρέτη είναι της τάξης των 10mW, άρα αρκούν οι κοινοί αντιστάτες του εμπορίου, ισχύος ¼ Watt .

3.2.2 Το τμήμα εξόδου

Το τμήμα εξόδου της πλακέτας δέχεται ως είσοδο τις εξόδους του μικροελεγκτή για κίνηση των μοτέρ (4 κινήσεις) και οδηγεί με ασφαλή τρόπο την κίνηση αυτή, ανεξαρτητοποιώντας τμήματα διαφορετικών τύπων και επιπέδου τάσεων λειτουργίας. Επισημαίνεται εδώ για την αποφυγή σύγχυσης ότι έχουμε δυο μοτέρ κίνησης (κίνηση West/East και κίνηση Up/Down) αλλά τέσσερις εξόδους για να υλοποιήσουμε τις τέσσερις κινήσεις των αμφίδρομων αυτών μοτέρ (κίνηση Up, κίνηση Down, κίνηση West , κίνηση East) . Η κάθε έξοδος θέλει το δικό της drive system.

Προτού δούμε πως θα οδηγήσουμε την κίνηση του μοτέρ, θα πρέπει να δούμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του. Η τάση λειτουργίας είναι 220 Vac και το ρεύμα μόνιμης κατάστασης ισορροπίας περίπου 17,5mA για κάθε κίνηση. Μπορούμε λοιπόν να τροφοδοτήσουμε το μοτέρ με τον οπλισμό μιας normally open (no) επαφής ενός πεντάβολτου ρελέ, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί, που είναι και η υλοποίηση που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία για το τμήμα εξόδου/drive του μοτέρ :



Σχήμα 3.2. Το τμήμα εξόδου της πλακέτας

Η υλοποίηση αυτή είναι αρκετά συχνή όταν θέλουμε να ενεργοποιήσουμε μια διαδικασία από εντολή προερχόμενη από έξοδο μικροελεγκτή. Το ολοκληρωμένο CNY_17 (το datasheet ακολουθεί στο παράρτημα) είναι φωτοτρανζίστορ οπτικά συζευγμένο με μια δίοδο GaAs και παρέχει οπτική απομόνωση (buffer) της εισόδου και της εξόδου του. Με το CNY_17 προστατεύουμε ουσιαστικά την πόρτα του μικροελεγκτή, αφού έτσι δεν υπάρχει καμία ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ του εξωτερικού κυκλώματος και της πόρτας.

Η είσοδος του οπτικού απομονωτή είναι μια δίοδος που εκπέμπει φως. Η αντίσταση 1kΩ τοποθετείται για να περιορίσει το ρεύμα της πόρτας στα 3mA, αρκετό για να οδηγήσει το τρανζίστορ εξόδου.

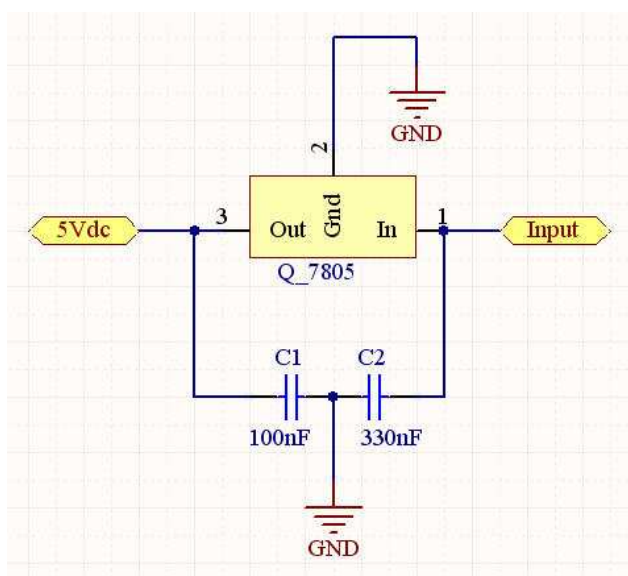
Όταν ενεργοποιηθεί η έξοδος της πόρτας του μικροελεγκτή, ρεύμα διαρρέει την δίοδο του CNY_17 διεγείροντας με την σειρά της το φωτοτρανζίστορ εξόδου και έτσι ρεύμα διαρρέει την αντίσταση 4,7kΩ στην βάση του τρανζίστορ 2N2222 με αποτέλεσμα έρχεται και αυτό στο κόρο, τροφοδοτώντας με αρκετό ρεύμα το πηνίο του ρελέ για να οπλίσει. Η τοπολογία αυτή είναι ικανή να οδηγήσει ρεύματα μέχρι και 100mA στο πηνίο (αρκούν για την εφαρμογή αυτή).

Όταν η έξοδος της πόρτας του μικροελεγκτή είναι απενεργοποιημένη, τόσο το 2N2222 όσο και το φωτοτρανζίστορ του CNY_17 είναι σε αποκοπή, οπότε δεν ρέει ρεύμα στο πηνίο του ρελέ και συνεπώς αφοπλίζεται. Η δίοδος

παρέχει μια διαφυγή για την αποθηκευμένη στο πηνίο ενέργεια, ώστε να μην υπάρξουν backfeeding στο κύκλωμα.

3.2.3 Σταθεροποίηση της τάσης λειτουργίας

Για την ομαλή λειτουργία του ψηφιακού τμήματος της πλακέτας απαιτείται μια σταθερή τάση τροφοδοσίας 5Volts, κυρίως για την σταθερή λειτουργία του μικροελεγκτή (τάση αναφοράς για την δειγματοληψία της εισόδου κ.τ.λ.). Η υλοποίηση του σταθεροποιητή γίνεται με την χρήση του ολοκληρωμένου 7805. Στην είσοδο του δέχεται μη σταθεροποιημένη συνεχή τάση 7-12Volts (ανάλογα το μοντέλο και πιο υψηλή τάση) και δίνει τάση εξόδου προς το κύκλωμα 5Volts αρκετά σταθερά (min 4,8 / typ 5 / max 5,2). Το σχηματικό του σταθεροποιητή μαζί με τους απαιτούμενους πυκνωτές φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :

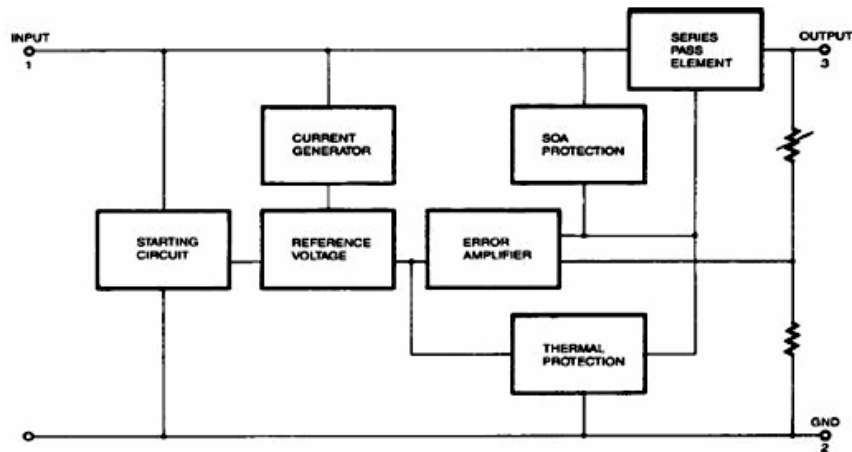


Σχήμα 3.3. Σταθεροποίηση της τάσης λειτουργίας

Το ολοκληρωμένο 7805 (της FAIRCHILD SEMICONDUCTOR) παρουσιάζει τα εξής πολύ χρήσιμα χαρακτηριστικά για την σωστή λειτουργία του κυκλώματος ως σταθεροποιητή τάσης :

- Δυνατότητα οδήγησης ρεύματος εξόδου έως 1A (υπό προϋποθέσεις κατάλληλης θερμικής απαγωγής βέβαια)
- Προστασία έναντι θερμικής υπερφόρτωσης
- Προστασία ασφαλούς περιοχής λειτουργίας εξόδου
- Προστασία έναντι βραχυκυκλώματος

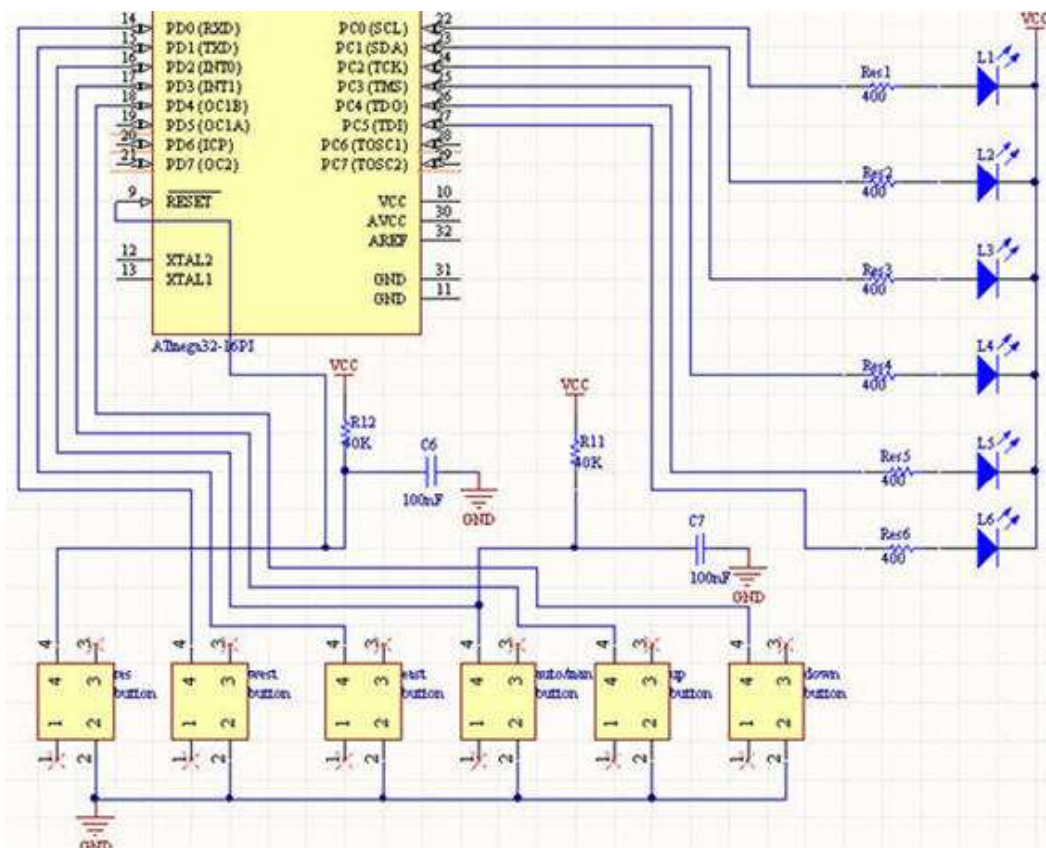
Το εσωτερικό μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας του 7805 φαίνεται στο παρακάτω σχήμα . Για περισσότερες λεπτομέρειες για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του επισυνάπτεται το datasheet στο παράρτημα .



Σχήμα 3.4. Μπλοκ διάγραμμα του 7805

3.2.4 Το τμήμα ελέγχου και ανίχνευσης προβλημάτων

Το τμήμα ελέγχου, χειρισμού και ανίχνευσης προβλημάτων της λειτουργίας του αλγορίθμου αποτελείται από buttons και leds που χρησιμεύουν στον απόλυτο χειρισμό του solar tracker σε οποιαδήποτε κατάσταση και αν βρεθεί, ενώ παράλληλα με την υλοποίηση του κατάλληλου κώδικα εντολών μπορούμε να βλέπουμε τα βήματα της διαδικασίας εκτέλεσης του αλγορίθμου, κατανοώντας έτσι τα ενδεχόμενα προβλήματα/κολλήματα της διαδικασίας (ουσιαστικά είναι για το debugging του κώδικα στην φάση της υλοποίησης και των δοκιμών αυτού). Το τμήμα αυτό του ελέγχου φαίνεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα :



Σχήμα 3.5. Το τμήμα ελέγχου και ανίχνευσης προβλημάτων

Ας εξηγήσουμε τώρα λίγο αναλυτικά τα διάφορα κομμάτια αυτού του τμήματος . Έχουμε λοιπόν τα εξής :

1. Το πλήκτρο επανεκκίνησης (reset button). Στον κώδικα του μικροελεγκτή είναι ρυθμισμένο να γίνεται επανεκκίνηση του προγράμματος με το πάτημα του πλήκτρου reset. Ουσιαστικά θέλει χαμηλή στάθμη τάσης (low level-γείωση) για χρόνο τουλάχιστον 1,5 msec. Η σχεδίαση περιλαμβάνει και μια pull-up resistor 40kΩ μαζί με ένα πυκνωτή 100nF για τον σαφή καθορισμό του υψηλού επιπέδου της τάσεως όταν το πλήκτρο επανεκκίνησης δεν είναι πατημένο (συνήθης τεχνική σε ψηφιακά κυκλώματα για τις αστάθειες των αναπηδήσεων).

2. Το πλήκτρο αυτόματο/χειροκίνητο (auto/manual button). Πρόκειται για ένα πλήκτρο που σε κανονικές συνθήκες δεν χρησιμοποιείται. Η τεχνική υλοποίησης του είναι ίδια με το reset button (pull-up resistor) και το πάτημα του πλήκτρου (η ακμή του παλμού χαμηλής στάθμης) επιφέρει διακοπή (interrupt) στην ομαλή ακολουθία της εξέλιξης του αλγορίθμου και μεταπήδηση σε ένα τμήμα όπου ο solar tracker μπορεί να χειριστεί χειροκίνητα. Η σύνδεση του πλήκτρου interrupt γίνεται στην πόρτα D θέση PD2 (INT0). Η χειροκίνητη χρήση είναι πολύ σημαντική για τις δοκιμές και το καλιμπράρισμα του solar tracker, καθώς επειδή έχει τερματοδιακόπτες το σύστημα των μοτέρ, μπορεί να σταματήσει η κίνηση και να χρειαστεί να το επαναφέρουμε χειροκίνητα. Επίσης είναι προγραμματισμένο να μην φεύγει ποτέ το πρόγραμμα από την διακοπή, παραμένοντας εκεί μέχρι την επόμενη επανεκκίνηση .

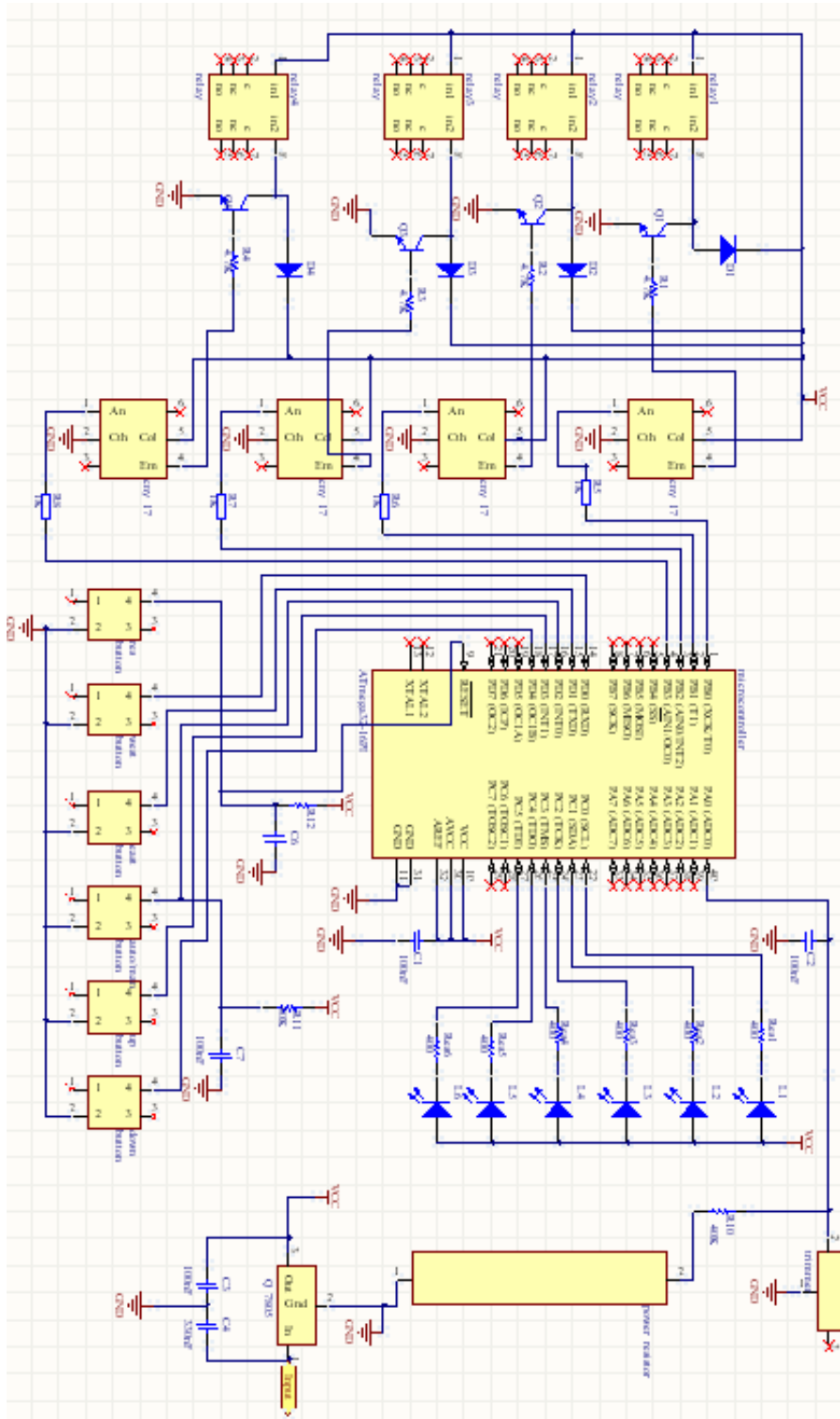
3. Τα πλήκτρα για χειροκίνητη χρήση των μοτέρ (πλήκτρο West , πλήκτρο East , πλήκτρο Up , πλήκτρο Down). Τα πλήκτρα αυτά είναι συνδεδεμένα στην PortD (PD0 , PD1, PD3 , PD4) από την μια και άμεσα στην γη από την άλλη. Η λειτουργία του ενεργοποιείται μετά το πάτημα του πλήκτρου διακοπής και μπορούμε να οδηγήσουμε τον tracker σε όποιο προσανατολισμό επιθυμούμε. Αν επιθυμούμε να επανέλθει το πρόγραμμα στην αυτόματη ανίχνευση της θέσης του ήλιου δεν έχουμε παρά να πατήσουμε το reset button και το πρόγραμμα επανέρχεται στην ομαλή ροή του .

4. Τα leds ένδειξης της φάσης του προγράμματος. Τα leds είναι τοποθετημένα στην PortC (PC0...PC5) και ο σκοπός τους είναι να παρατηρούμε σε ποια φάση βρίσκεται το πρόγραμμα, αν έχει κολλήσει ή που δυσκολεύεται να ανιχνεύσει τον ήλιο. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στην φάση των δοκιμών (για το debugging του προγράμματος) αλλά και στην κανονική λειτουργία του solar tracker. Στην κατασκευή υπάρχουν τέσσερα κόκκινα led (PC0...PC3) καθένα από τα οποία ανάβει όταν υπάρχει η αντίστοιχη εντολή κίνησης (West , East , Up, Down) για την περίπτωση που κάτι δεν πάει καλά στο drive των μοτέρ, και δυο πράσινα led (PC4 , PC5) που ανάβουν όταν το πρόγραμμα βρίσκεται μέσα στα West/East loop και Up/Down loop αντίστοιχα, που βοηθούν στην κατανόηση της εξέλιξης του αλγορίθμου. Τα led συνδέονται στη θετική τάση 5Volt μέσω μιας αντίστασης 400Ω για να λειτουργεί η πόρτα του μικροελεγκτή ως καταβόθρα ρεύματος, η τιμή του οποίου καθορίζεται από την αντίσταση και την τάση του led υπό

συνθήκες ακτινοβολίας (εν προκειμένω 2,2Volt) , όπως φαίνεται παρακάτω :

$$I = \frac{(5 - 2,2)V}{400\Omega} = 7mA \text{ ρεύμα ικανό να φωτίσει ικανοποιητικά το led .}$$

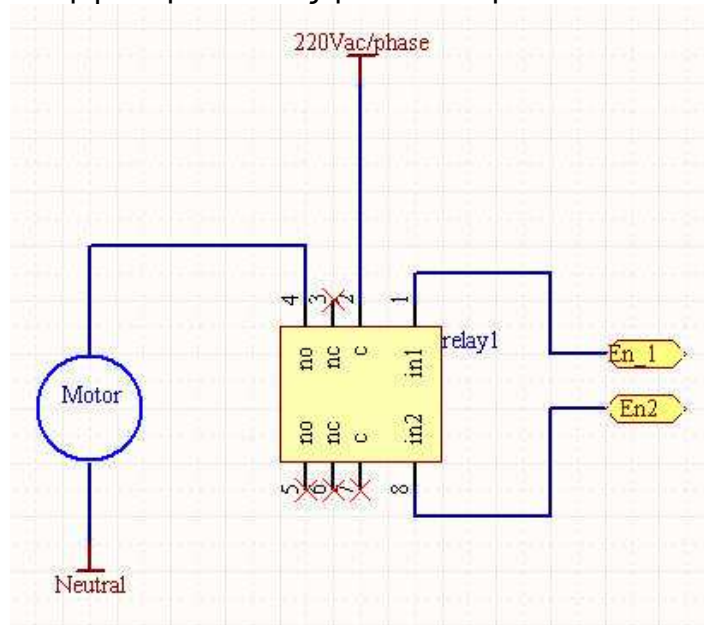
Έχοντας αναλύσει επαρκώς όλα τα τμήματα από τα οποία αποτελείται η πλακέτα που υλοποιεί την τεχνική του solar tracking μπορούμε να δούμε το τελικό σχηματικό που ενώνει όλα τα παραπάνω :



Σχήμα 3.6. Το τελικό σχηματικό της πλακέτας

Στο τελικό σχήμα που φαίνεται παραπάνω έχουν προστεθεί τρεις πυκνωτές των 100nF, οι δυο ανάμεσα στην τροφοδοσία και την γη κοντά στον μικροελεγκτή για να μειώσουν τυχόν μικρές διακυμάνσεις και ο τρίτος στην είσοδο του ADC του μικροελεγκτή για τον ίδιο λόγο.

Στο σχήμα το στάδιο εξόδου φαίνεται μέχρι και το πηνίο του ρελέ. Οι τέσσερις εντολές που κινούν τα μοτέρ υπό τάση 220Vac συνδέονται στην normally open επαφή του ρελέ όπως φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 3.7. Η συνδεσμολογία των επαφών των ρελέ με το μοτέρ

Μέχρι στιγμής ο μικροελεγκτής παρουσιάζεται ως ένα τετράγωνο κουτί με πόρτες που συνδέουμε τα διάφορα τμήματα εισόδου/εξόδου/ελέγχου του κυκλώματος. Στην επόμενη παράγραφο θα αναλυθούν πλήρως τα χαρακτηριστικά του που μας ενδιαφέρουν στην εργασία αυτή .

Κεφάλαιο 4

Ο μικροελεγκτής mega32

4.1 Εισαγωγή

Ο μικροελεγκτής είναι η 'καρδιά' του συστήματος που ελέγχει τον solar tracker. Δέχεται την τροποποιημένη τάση από τα άκρα του συνδεδεμένου στον φωτοβολταϊκό συλλέκτη φορτίου, την ψηφιοποιεί με τον Analog/Digital Converter, την αποθηκεύει και την συγκρίνει με την προηγούμενη αποθηκευμένη τιμή, ενώ δίνει εντολή στα τμήματα εξόδου να κινήσουν τα μοτέρ. Παράλληλα δίνει και την δυνατότητα χειροκίνητης παράκαμψης του προγράμματος, το οποίο και είναι αποθηκευμένο στην μνήμη ταχείας προσπέλασής του (flash memory) .

Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιείται στην σχεδίαση είναι ο AVR mega32 της εταιρίας ATMEL. Παρέχει όλες τις δυνατότητες για την κατασκευή του solar tracker, ενώ το datasheet του δεν περιλαμβάνεται στο παράρτημα γιατί είναι πάνω από 300 σελίδες. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα αναλυθούν μόνο τα κομμάτια αυτά του datasheet που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της λειτουργίας του κυκλώματος αλλά και των εντολών του προγράμματος .

4.2 Τα γενικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή

Ο μικροελεγκτής AVR mega32 κατασκευάζεται από την εταιρία ATMEL, συνδυάζει αρχιτεκτονική RISC με σταθερού μήκους εντολές και 32*8 καταχωρητές γενικής χρήσης και έχει τα εξής χαρακτηριστικά (ο συγκεκριμένος) :

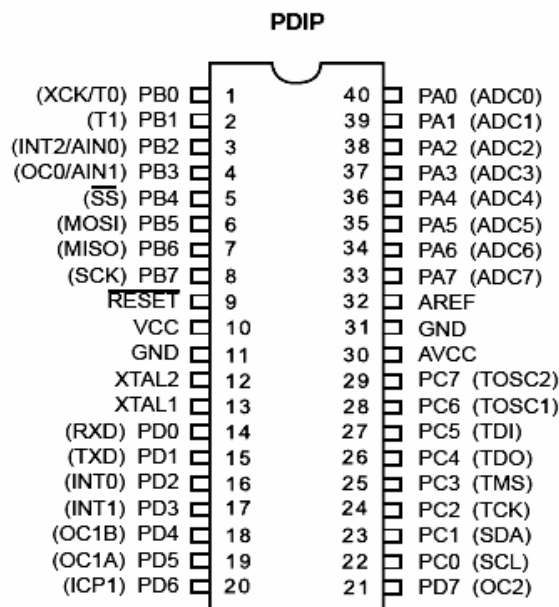
- Τάση λειτουργίας 4.5-5.5V
- Συχνότητα λειτουργίας 0-16MHz
- 40 ακροδέκτες (pins) σε συσκευασία τύπου PDIP
- 32 προγραμματιζόμενες θύρες για χρήση εισόδου/εξόδου (I/O)
- Εσωτερικό ταλαντωτή τύπου RC συχνότητας 1-8 MHz
- Εσωτερικές και εξωτερικές πηγές διακοπών (interrupts)
- Ο επεξεργαστής ξυπνάει από κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας με εξωτερική διακοπή , real time clock και Brown-out Detection

- Έξι διαφορετικές δυνατές sleep modes για εξοικονόμηση ενέργειας
 - Power On Reset (σύστημα επανεκκίνησης του μικροελεγκτή κατά την έναρξη της τροφοδοσίας)
 - 131 εντολές εκ των οποίων οι περισσότερες εκτελούνται σε μόνο ένα κύκλο του ρολογιού
 - Διατήρηση δεδομένων για 100 χρόνια σε θερμοκρασία 25° C (20 χρόνια σε συνεχή θερμοκρασία 85° C)
 - In-System Programming By On-Chip Boot Program True Read-While-Write Operation (προγραμματισμός πάνω στο κύκλωμα)
 - 32K Bytes Flash Memory , 1024 Bytes EEPROM , 2048 Byte SRAM με 10.000 κύκλους εγγραφής/διαγραφής για την flash memory και 100.000 κύκλους για την EEPROM

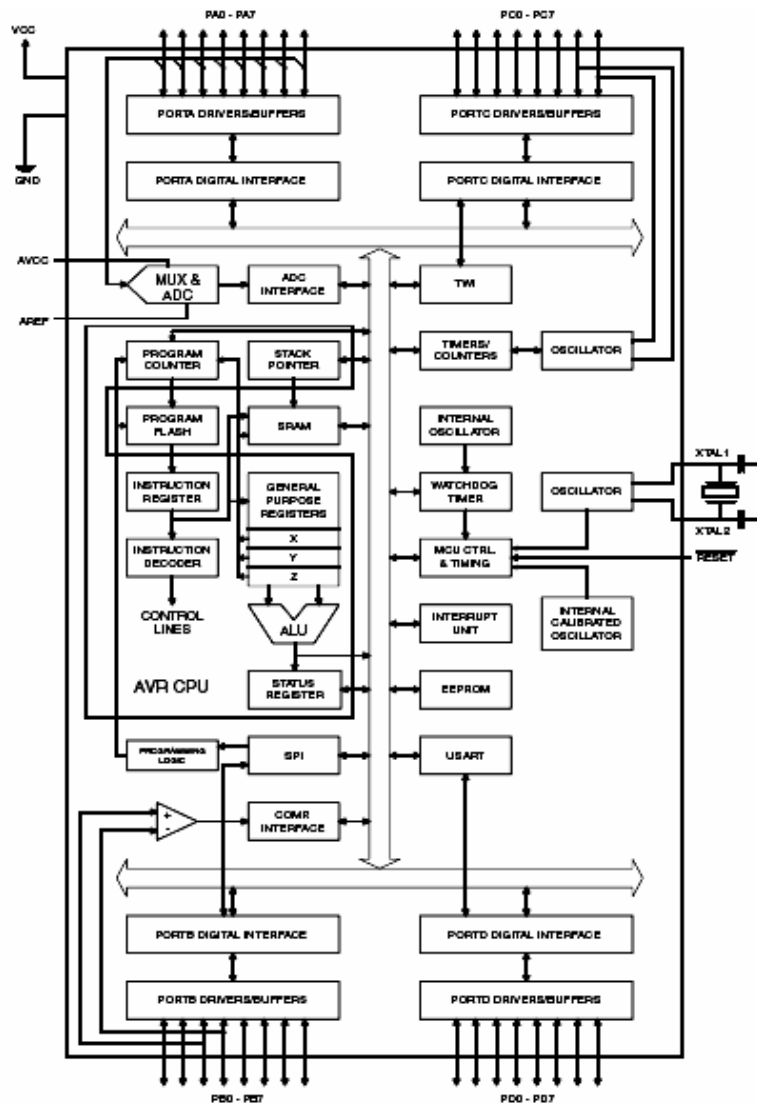
Περιφερειακά χαρακτηριστικά :

- Τέσσερα κανάλια PWM (Pulse Width Modulation)
- Οκτώ κανάλια 10μπιτων ADC (Αναλογικός/Ψηφιακός Μετατροπέας) με δυνατότητα χρήσης 2 διαφορικών καναλιών με προγραμματιζόμενο κέρδος 1x , 10x και 200x
 - Προγραμματιζόμενος χρονιστής Watchdog με ξεχωριστό On-Chip ταλαντωτή
 - Δυο μετρητές/χρονιστές των 8 bit , ένας 16 bit και μετρητή πραγματικού χρόνου (Real Time Counter) με ξεχωριστό ταλαντωτή

Το μπλοκ διάγραμμα του μικροελεγκτή μαζί με την αντιστοίχιση των ακροδεκτών για την συνδεσμολογία του παρουσιάζονται στα δυο παρακάτω σχήματα :



Σχήμα 4.1. Η αντιστοίχιση των ακροδεκτών του μικροελεγκτή



Σχήμα 4.2. Το μπλοκ διάγραμμα του μικροελεγκτή

Ένας πίνακας με το σετ των εντολών και των καταχωρητών για τον μικροελεγκτή που χρησιμοποιήθηκε ακολουθεί στο παράρτημα της εργασίας.

Λόγω του μεγάλου όγκου των χαρακτηριστικών του μικροελεγκτή, παρακάτω θα αναλυθούν μόνο τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται με κάποιο τρόπο στην παρούσα εργασία και χρειάζονται για να εξηγηθεί τόσο ο κώδικας όσο και η υλοποίηση της σχεδίασης .

4.3 Η συχνότητα λειτουργίας

Στην εργασία αυτή δεν απαιτείται εξαιρετική ακρίβεια στον χρονισμό, ούτε υψηλή συχνότητα ρολογιού, γι' αυτό χρησιμοποιείται ως βασικός ταλαντωτής ο εσωτερικός καλιμπραρισμένος ταλαντωτής τύπου RC με δυνατότητα ρύθμισης συχνότητας 1,2,4 και 8 MHz με αναφορά σε ονομαστική τάση 5V και θερμοκρασία 25° C. Τεχνικές calibration υπάρχουν για επίτευξη ακρίβειας +/-

1% για οποιαδήποτε τάση και θερμοκρασία λειτουργίας, αλλά εν προκειμένω δεν μας ενδιαφέρει τέτοια ακρίβεια. Η ρύθμιση της επιθυμητής συχνότητας λειτουργίας στο 1MHz γίνεται βάσει του παρακάτω πίνακα :

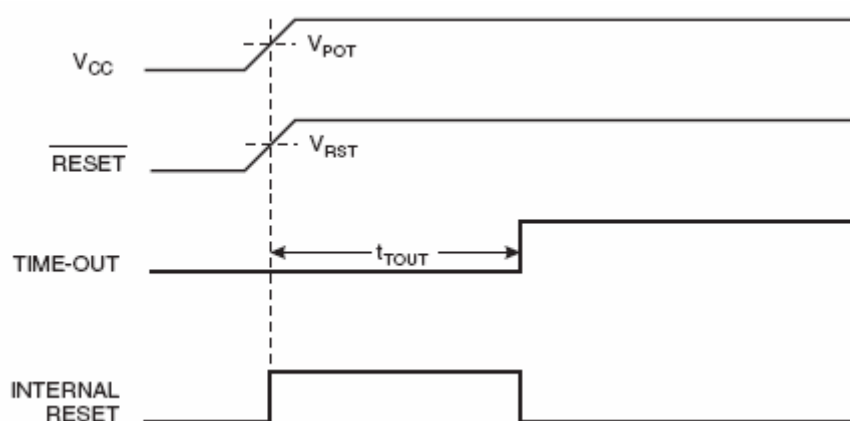
CKSEL3...0	Nominal Frequency (MHz)
0001	1.0
0010	2.0
0011	4.0
0100	8.0

Πίνακας 4.1. Ρύθμιση της συχνότητας του εσωτερικού ταλαντωτή

4.4 Επανεκκίνηση του μικροελεγκτή

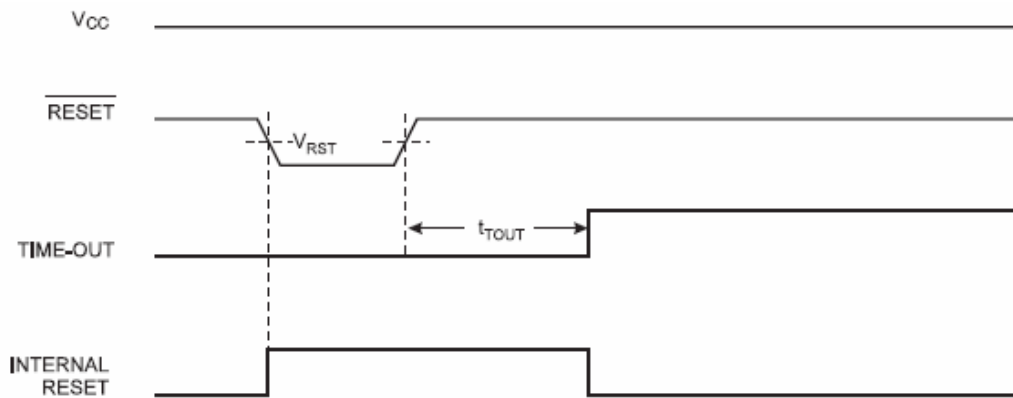
Στο μικροελεγκτή υπάρχουν διάφοροι τρόποι επανεκκίνησης, στην εργασία όμως χρησιμοποιούνται οι εξής δυο :

-Power-On reset : Ο μικροελεγκτής εκτελεί επανεκκίνηση , όταν η τάση τροφοδοσίας πέσει κάτω από μια τάση κατώφλι , εξασφαλίζοντας έτσι την σωστή εκκίνηση του μικροελεγκτή . Τα χαρακτηριστικά χρονισμού της λειτουργίας αυτής φαίνονται στο σχήμα 4.3 :



Σχήμα 4.3. Τα χαρακτηριστικά χρονισμού του PoR

-External reset : Η επανεκκίνηση γίνεται όταν ανιχνευθεί τάση αναφοράς (γείωση) στο πλήκτρο RESET για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του 1,5μsec, ακόμα και αν το ρολόι δεν τρέχει . Παλμός μικρότερης διάρκειας από 1,5 μsec δεν είναι εγγυημένο ότι θα προκαλέσει επανεκκίνηση . Όταν ο εφαρμοζόμενος παλμός φτάσει την τάση κατωφλίου επανεκκίνησης V_{RST} στην θετική του ακμή, ο μετρητής καθυστέρησης ξεκινά την MCU αφού έχει λήξει η περίοδος Time-Out , όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί :

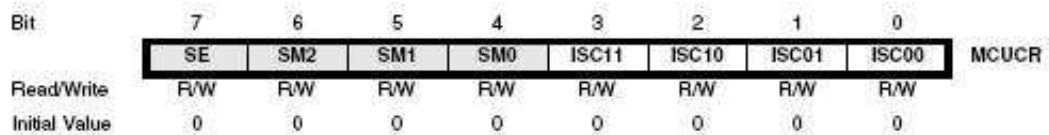


Σχήμα 4.4. Τα χαρακτηριστικά χρονισμού της εξωτερικής επανεκκίνησης

4.5 Εξωτερικές διακοπές (external interrupts)

External Interrupt (εξωτερική διακοπή) χρησιμοποιούμε στην εργασία για αυτή για την μετάβαση από την αυτόματη εκτέλεση του προγράμματος στην χειροκίνητη λειτουργία, με το πάτημα του auto/manual button.

Ο καταχωρητής που ρυθμίζει την λειτουργία των εξωτερικών διακοπών είναι ο MCUCR (MCU Control Register) με τα οκτώ bit του να φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.5. Ο καταχωρητής MCUCR

Στην κατασκευή χρησιμοποιείται η θύρα PD2 ή αλλιώς INT0 οπότε ρυθμίζουμε τα bit ISC01 και ISC00 από τις επιλογές του παρακάτω πίνακα :

ISC01	ISC00	Description
0	0	The low level of INT0 generates an interrupt request.
0	1	Any logical change on INT0 generates an interrupt request.
1	0	The falling edge of INT0 generates an interrupt request.
1	1	The rising edge of INT0 generates an interrupt request.

Πίνακας 4.2. Ρύθμιση των εξωτερικών διακοπών

Η επιλογή που ταιριάζει εν προκειμένω είναι η τρίτη του πίνακα. Επίσης πρέπει να ενεργοποιήσουμε την χρήση της INT0 και αυτό γίνεται από τον καταχωρητή GICR (General Interrupt Control Register) :

Bit:	7	6	5	4	3	2	1	0	
	INT1	INT0	INT2	-	-	-	IVSEL	IVCE	GICR
Read/Write:	R/W	R/W	R/W	R	R	R	R/W	R/W	
Initial Value:	0	0	0	0	0	0	0	0	

Σχήμα 4.6. Ο καταχωρητής GICR

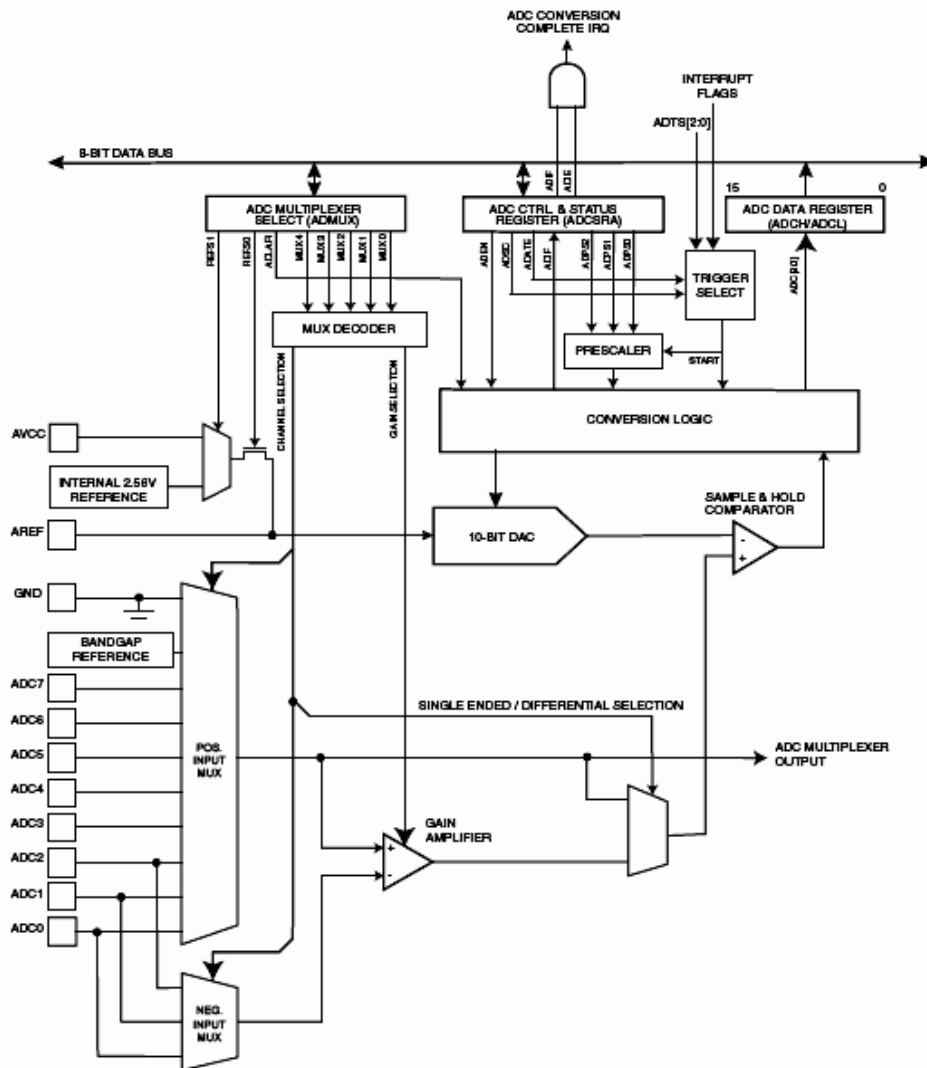
Για να ενεργοποιήσουμε την INT0 πρέπει το bit 6 να γίνει 1 (external interrupt request 0 enabled).

4.6 Αναλογικός/Ψηφιακός Μετατροπέας (ADC)

Ο αναλογικός/ψηφιακός μετατροπέας του μικροελεγκτή mega32 έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- 10-bit διακριτική ικανότητα (resolution)
- 0.5 LSB εσωτερική μη-γραμμικότητα
- Ελάχιστο χρόνο μετατροπής (13-260μsec)
- Εύρος 0-V_{CC} για σήματα στην είσοδο του ADC
- Επιλεγόμενη τάση αναφοράς την V_{CC} ή την εσωτερική 2.56V
- Οκτώ απλά κανάλια για μετατροπή (αναφορά την γη) ή επτά διαφορικά κανάλια
- Δυο διαφορικά κανάλια εισόδου με ρυθμιζόμενη ενίσχυση 1x , 10x και 200x

Το μπλοκ διάγραμμα του Αναλογικού/Ψηφιακού Μετατροπέα ακολουθεί :



Σχήμα 4.7. Το μπλοκ διάγραμμα του ADC

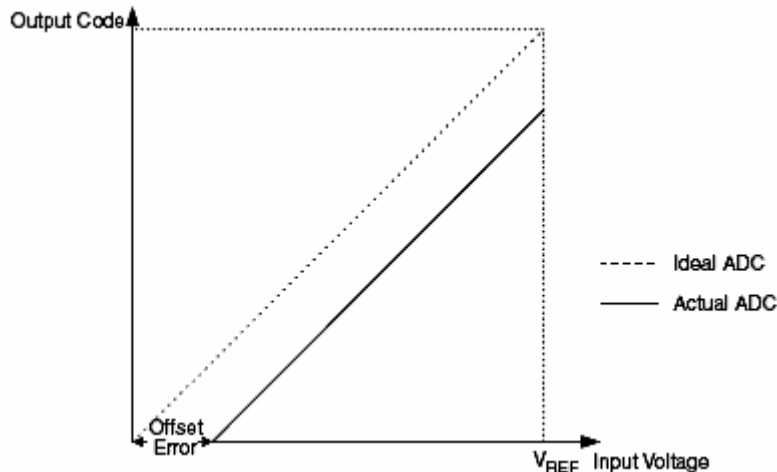
Η πρώτη μετατροπή που εκτελεί δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αν μας ενδιαφέρει η ακρίβεια , γιατί ο χρόνος πρώτης μετατροπής είναι πολύ μεγαλύτερος από τον χρόνο των επόμενων μετατροπών όπως φαίνεται και στον πίνακα :

Condition	Sample & Hold (Cycles from Start of Conversion)	Conversion Time (Cycles)
First conversion	13.5	25
Normal conversions, single ended	1.5	13
Auto Triggered conversions	2	13.5
Normal conversions, differential	1.5/2.5	13/14

Πίνακας 4.3. Χρόνος μετατροπής του ADC

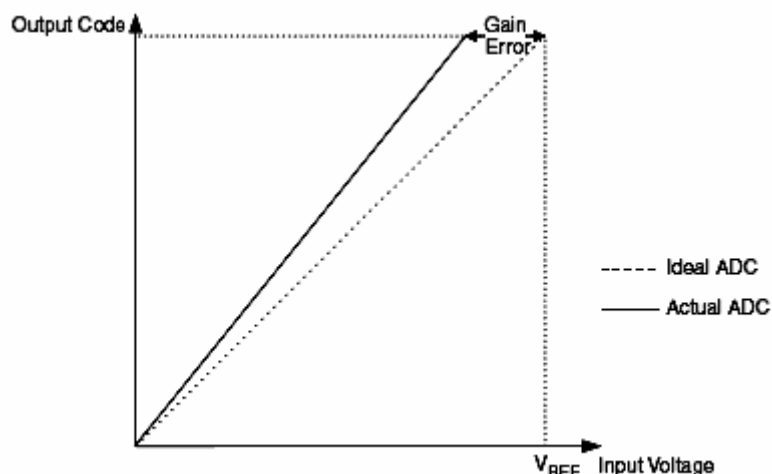
Όσον αφορά την ακρίβεια, ο ADC μετατρέπει την τάση στη είσοδο του γραμμικά μεταξύ γείωσης και τάσης V_{ref} (εν προκειμένω 5Volt) σε 2^n διακριτά βήματα. Η μικρότερη τιμή κώδικα διαβάζεται ως 0 και η μέγιστη ως $2^n - 1$. Αυτή είναι η ιδανική συμπεριφορά. Αποκλίσεις από αυτήν εμφανίζονται και εξαρτώνται κυρίως από τις εξής παραμέτρους :

-Offset error (σφάλμα αντιστάθμισης) : Η απόκλιση της πρώτης μετάβασης σε σύγκριση με την ιδανική μετάβαση , όπως φαίνεται στο σχήμα :



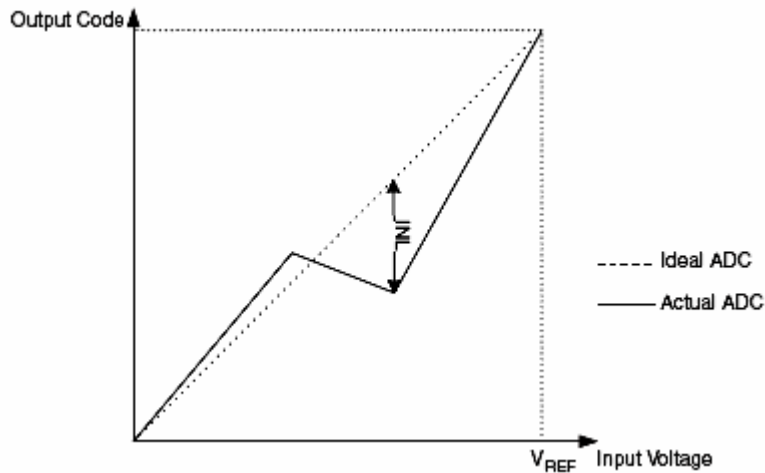
Σχήμα 4.8. Σφάλμα αντιστάθμισης (offset error)

-Gain error (σφάλμα κέρδους) : Αφού προσαρμοστεί το offset error , το gain error είναι η απόκλιση της τελευταίας μετάβασης εν συγκρίσει με την ιδανική μετάβαση , όπως φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 4.9. Σφάλμα κέρδους (Gain error)

-Integral Non-Linearity (Εσωτερικές μη-γραμμικότητες) : Είναι η απόκλιση από την ιδανική συμπεριφορά αφού έχουμε λύσει το πρόβλημα του offset error και του gain error και παρουσιάζεται παρακάτω :

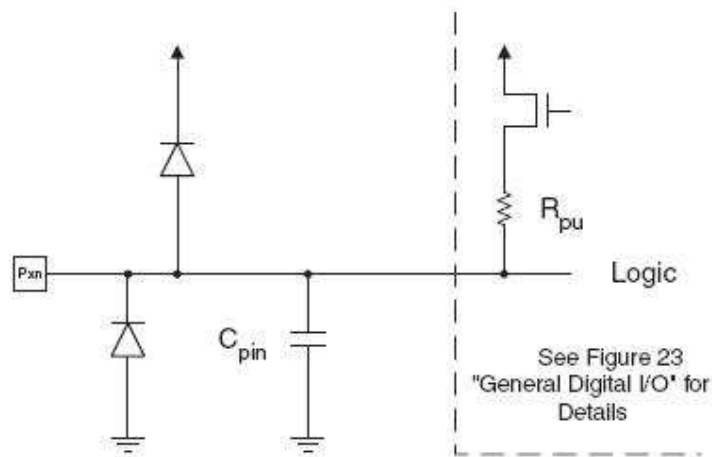


Σχήμα 4.10. Εσωτερικές μη-γραμμικότητες

-Σφάλμα κβαντοποίησης (Quantization error) : Εμφανίζεται λόγω της κβαντοποίησης ενός εύρους τιμών τάσεων εισόδου στην ίδια ψηφιακή τιμή . Το εύρος των τιμών είναι ίσο με 1 LSB (Less Significant Bit) και το σφάλμα κβαντοποίησης +/- 0,5 LSB .

4.7 Θύρες Εισόδου/Εξόδου (I/O)

Όλες οι θύρες I/O του AVR μπορούν να προγραμματιστούν ανεξάρτητα να λειτουργήσουν ως είσοδοι ή έξοδοι (είναι bi-directional δηλαδή αμφίδρομες), εφόσον δεν χρησιμοποιούνται οι δεύτερες λειτουργίες που έχει η κάθε μια (βλέπε pin configuration) όπως ADC , interrupts , σειριακή σύνδεση κ.ά. Το ισοδύναμο σχηματικό των θυρών I/O ακολουθεί :



Σχήμα 4.11. Ισοδύναμο κύκλωμα θυρών εισόδου/εξόδου

Ο driver του pin είναι αρκετά δυνατός να οδηγήσει την απεικόνιση με LED άμεσα, ενώ όλα τα port pins έχουν ανεξάρτητες επιλέξιμες pull-up αντιστάσεις. Επίσης όλες οι θύρες έχουν διόδους προστασίας προς την Vcc και την γείωση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.11 .

Ο κάθε ακροδέκτης θύρας αποτελείται από τρία μπιτ καταχωρητή : DDxn, PORTxn και PINxn. Το DDxn μπιτ στον καταχωρητή DDx καθορίζει την 'κατεύθυνση' του ακροδέκτη. Αν το DDxn είναι στο λογικό 1, τότε ο ακροδέκτης Pxn έχει χρήση εξόδου. Αν το DDxn είναι στο λογικό 0, τότε ο ακροδέκτης Pxn είναι είσοδος .

Εάν το μπιτ PORTxn είναι γραμμένο στο λογικό 1 και ο ακροδέκτης είναι διαμορφωμένος ως είσοδος, τότε ενεργοποιείται η pull-up resistor. Για να απενεργοποιηθεί η pull-up resistor θα πρέπει το μπιτ PORTxn να είναι στο λογικό 0 ή να διαμορφωθεί ο ακροδέκτης ως ακροδέκτης εξόδου. Οι ακροδέκτες όλων των θυρών είναι τρισταθείς (tri-stated) .

Εάν το μπιτ PORTxn είναι γραμμένο στο λογικό 1 και ο ακροδέκτης είναι διαμορφωμένος ως έξοδος , τότε οδηγείται στο λογικό υψηλό (high/1) . Εάν το μπιτ PORTxn είναι στο λογικό 0 και ο ακροδέκτης είναι διαμορφωμένος ως έξοδος , τότε οδηγείται στο λογικό χαμηλό (low/0) .

Όλες οι παραπάνω διαμορφώσεις των ακροδεκτών των θυρών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

DDxn	PORTxn	PUD (In SFIOR)	I/O	Pull-up	Comment
0	0	X	Input	No	Tri-state (Hi-Z)
0	1	0	Input	Yes	Pxn will source current if ext. pulled low.
0	1	1	Input	No	Tri-state (Hi-Z)
1	0	X	Output	No	Output Low (Sink)
1	1	X	Output	No	Output High (Source)

Πίνακας 4.4 Οι καταχωρητές των εισόδων/εξόδων

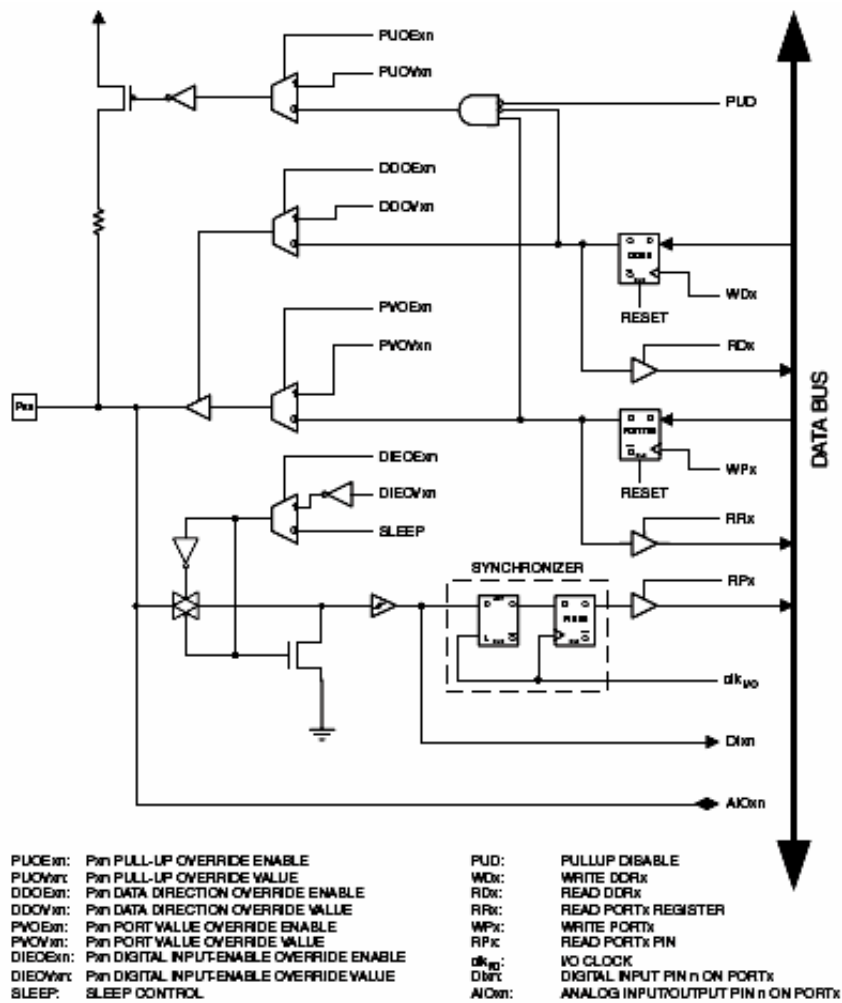
Ακολουθεί ένα παράδειγμα κώδικα με το οποίο καθορίζουμε για την πόρτα B τους ακροδέκτες 0 και 1 high (υψηλό/λογικό 1) , 2 και 3 low (λογικό 0) και από 4 έως 7 εισόδους, με ενεργοποιημένες pull-υραντιστάσεις για τους ακροδέκτες 6 και 7. Οι τιμές των ακροδεκτών διαβάζονται ξανά χρησιμοποιώντας όμως και την εντολή por. Το παράδειγμα υλοποιείται τόσο σε κώδικα σε assembly όσο και σε γλώσσα C :

Assembly Code Example
<pre> ... ; Define pull-ups and set outputs high ; Define directions for port pins ldi r16, (1<<PB7) (1<<PB6) (1<<PB1) (1<<PB0) ldi r17, (1<<DDB3) (1<<DDB2) (1<<DDB1) (1<<DDB0) out PORTB,r16 out DDRB,r17 ; Insert nop for synchronization nop ; Read port pins in r16,PINB ... </pre>
C Code Example
<pre> unsigned char i; ... /* Define pull-ups and set outputs high */ /* Define directions for port pins */ PORTB = (1<<PB7) (1<<PB6) (1<<PB1) (1<<PB0); DDRB = (1<<DDB3) (1<<DDB2) (1<<DDB1) (1<<DDB0); /* Insert nop for synchronization*/ _NOP(); /* Read port pins */ i = PINB; ... </pre>

Πίνακας 4.5. Παράδειγμα κώδικα σε Assembly και C

4.7.1 Εναλλακτικές λειτουργίες Θυρών Εισόδου/Εξόδου

Όπως φαίνεται και στον pin configuration του mega32 οι θύρες I/O έχουν και προγραμματιζόμενες δεύτερες εναλλακτικές λειτουργίες, κυρίως περιφερειακής επικοινωνίας, πολύ χρήσιμες. Στην παρούσα παράγραφο θα αναλυθούν όσες από τις λειτουργίες αυτές χρησιμοποιούνται στην υλοποίηση του solar tracker για να μην διογκωθεί η εργασία. Το παρακάτω σχήμα δείχνει κατ' αρχάς τον τρόπο που παρακάμπτονται τα σήματα ελέγχου των ακροδεκτών από τις εναλλακτικές λειτουργίες των θυρών :



Note: 1. WPx, WDx, RRx, RPx, and RDx are common to all pins within the same port. clk_{iod}, SLEEP, and PUD are common to all ports. All other signals are unique for each pin.

Σχήμα 4.12. Εναλλακτικές λειτουργίες θυρών εισόδου/εξόδου

Εναλλακτικές λειτουργίες της θύρας A (ADC) : Εμείς χρησιμοποιούμε τον ADC στον ακροδέκτη PA0 (ADC0-input channel 0), συνεπώς πρέπει να παρακάψουμε την λειτουργία I/O του ακροδέκτη αυτού. Ακολουθεί η γενική περιγραφή των σημάτων παράκαμψης για τις εναλλακτικές λειτουργίες (πίνακας 4.6) και ο πίνακας για να χρησιμοποιηθεί ο ADC0 (πίνακας 4.7) :

Signal Name	Full Name	Description
PUOE	Pull-up Override Enable	If this signal is set, the pull-up enable is controlled by the PUOV signal. If this signal is cleared, the pull-up is enabled when {DDxn, PORTxn, PUD} = 0b010.
PUOV	Pull-up Override Value	If PUOE is set, the pull-up is enabled/disabled when PUOV is set/cleared, regardless of the setting of the DDxn, PORTxn, and PUD Register bits.
DDOE	Data Direction Override Enable	If this signal is set, the Output Driver Enable is controlled by the DDOV signal. If this signal is cleared, the Output driver is enabled by the DDxn Register bit.
DDOV	Data Direction Override Value	If DDOE is set, the Output Driver is enabled/disabled when DDOV is set/cleared, regardless of the setting of the DDxn Register bit.
PVOE	Port Value Override Enable	If this signal is set and the Output Driver is enabled, the port value is controlled by the PVOV signal. If PVOE is cleared, and the Output Driver is enabled, the port Value is controlled by the PORTxn Register bit.
PVOV	Port Value Override Value	If PVOE is set, the port value is set to PVOV, regardless of the setting of the PORTxn Register bit.
DIEOE	Digital Input Enable Override Enable	If this bit is set, the Digital Input Enable is controlled by the DIEOV signal. If this signal is cleared, the Digital Input Enable is determined by MCU-state (Normal Mode, sleep modes).
DIEOV	Digital Input Enable Override Value	If DIEOE is set, the Digital Input is enabled/disabled when DIEOV is set/cleared, regardless of the MCU state (Normal Mode, sleep modes).
DI	Digital Input	This is the Digital Input to alternate functions. In the figure, the signal is connected to the output of the schmitt trigger but before the synchronizer. Unless the Digital Input is used as a clock source, the module with the alternate function will use its own synchronizer.
AIO	Analog Input/ output	This is the Analog Input/output to/from alternate functions. The signal is connected directly to the pad, and can be used bi-directionally.

Πίνακας 4.6. Γενική περιγραφή των σημάτων παράκαμψης

Signal Name	PA3/ADC3	PA2/ADC2	PA1/ADC1	PA0/ADC0
PUOE	0	0	0	0
PUOV	0	0	0	0
DDOE	0	0	0	0
DDOV	0	0	0	0
PVOE	0	0	0	0
PVOV	0	0	0	0
DIEOE	0	0	0	0
DIEOV	0	0	0	0
DI	-	-	-	-
AIO	ADC3 INPUT	ADC2 INPUT	ADC1 INPUT	ADC0 INPUT

Πίνακας 4.7. Σήματα παράκαμψης για τις εναλλακτικές λειτουργίες της θύρας A

Εναλλακτικές λειτουργίες της θύρας D : Από τις εναλλακτικές λειτουργίες της θύρας D θα γίνει χρήση μόνο της εξωτερικής διακοπής 0 (INT0) στον ακροδέκτη PD2 .Ο πίνακας για τα σήματα παράκαμψης για εναλλακτική λειτουργία στον ακροδέκτη PD2 ακολουθεί στον επόμενο πίνακα :

Signal Name	PD3/INT1	PD2/INT0	PD1/TXD	PD0/RXD
PV0E	0	0	TXEN	RXEN
PV0V	0	0	0	PORTD0 • \overline{PUD}
DD0E	0	0	TXEN	RXEN
DD0V	0	0	1	0
PV0E	0	0	TXEN	0
PV0V	0	0	TXD	0
DIE0E	INT1 ENABLE	INT0 ENABLE	0	0
DIE0V	1	1	0	0
DI	INT1 INPUT	INT0 INPUT	-	RXD
AIO	-	-	-	-

Πίνακας 4.8. Σήματα παράκαμψης για τις εναλλακτικές λειτουργίες της θύρας D

Κεφάλαιο 5

Προγραμματίζοντας τον μικροελεγκτή

5.1 Εισαγωγή

Μέχρι στιγμής έχει γίνει πλήρης ανάλυση της αρχής λειτουργίας του αλγορίθμου για την κίνηση του solar tracker και έχει αποδειχθεί η σύγκλιση της μεθόδου. Επίσης έχουν περιγραφεί οι βασικές απαιτήσεις της διαδικασίας από τον μικροελεγκτή, του οποίου τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την διαδικασία έχουν επεξηγηθεί επαρκώς για να προχωρήσουμε στην δημιουργία του προγράμματος. Επίσης έχει προηγηθεί η σχεδίαση της ηλεκτρονικής κατασκευής (πλακέτα) σε θεωρητικό επίπεδο και έχουν αναλυθεί όλα τα τμήματα που την περιλαμβάνουν. Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία του προγράμματος και η διαδικασία προγραμματισμού του μικροελεγκτή .

5.2 Ο κώδικας της εργασίας

Έχουμε την δυνατότητα να προγραμματίσουμε τον μικροελεγκτή άμεσα σε assembly αλλά και σε γλώσσα C και να το μεταφράσουμε μετά σε γλώσσα μηχανής με έναν compiler. Αυτή τη μέθοδο θα χρησιμοποιήσουμε εδώ. Το αρχείο πηγαίου κώδικα έχει γραφτεί στο περιβάλλον Programmer's Notepad του WinAVR και έχει μεταφραστεί από το δεύτερο. Τα αρχεία που αποτελούν την εφαρμογή είναι τα εξής :

1. main.c
2. board.h
3. makefile
4. avrdefs.h

Το αρχείο main.c είναι το βασικό αρχείο της εργασίας. Περιλαμβάνει τον αλγόριθμο της μεθόδου solar tracking και είναι ουσιαστικά ο κώδικας που εκτελείται από τον μικροελεγκτή. Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιεί δεδομένα και συναρτήσεις που ορίζονται από άλλα αρχεία. Ο λόγος είναι να έχει μια μορφή το πρόγραμμα που να γίνεται εύκολα αντιληπτή χωρίς περιττές λεπτομέρειες που προκαλούν σύγχυση. Το board.h καθορίζει τους ακροδέκτες των θυρών I/O, σε ποια από αυτά είναι συνδεδεμένα leds, buttons ή τα drive των εξόδων προς ρελέ και περιέχει εντολές για τον χειρισμό τους. Το αρχείο avrdefs.h περιλαμβάνει απαραίτητους ορισμούς για τους αριθμούς που

χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα και την συχνότητα λειτουργίας. Τέλος το αρχείο Makefile παρέχει πληροφορίες στον μεταγλωττιστή (compiler) για τον τρόπο που θα γίνει η μεταγλώττιση του κώδικα σε γλώσσα μηχανής .

5.2.1 Το αρχείο main.c

```
#include <stdio.h>
#include <inttypes.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/eeprom.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/signal.h>
#include <avr/delay.h>

#include "avrdefs.h"
#include "board.h"

#define VOLT_ERROR_W 2 //VOLT_ERROR*5mV=100mV
#define VOLT_ERROR_U 2
//attention: voltage errors must be one quarter of the desired on the
//PV panel due to the voltage division of the adc

#define MS 1000
#define MSU 1000
#define ORIO 240
#define ORIOU 240

#define STATEW 0
#define STATEE 1
#define STATEU 2
#define STATED 3
#define STATES 4

u16 voltage_0;
u16 voltage_1;
u08 rev_counterw;
u08 rev_counteru;
u08 state;

void init_hardware(void);
void delay_ms(u32 ms);

void adc_init(void);
u16 read_adc_chan(char n);

u16 move_relay(u08 relay, u16 time_ms);

#####
##### MAIN #####
#####

void main(void)
```

```

{
    init_hardware();
    adc_init();
    delay_ms(1000);
    sei();
    RELAYS_OFF;
    rev_counterw=1;
    rev_counteru=1;
    state = STATEW;
    voltage_0 = read_adc_chan(0);

    while(1)
    {
        switch (state)
        {
            case STATEW:
            {
                voltage_1 = move_relay(RELAY_WEST,(MS/rev_counterw));
                if(voltage_1 >= (voltage_0 - VOLT_ERROR_W))
                {
                    voltage_0 = voltage_1;
                    state = STATEW;
                }
                else
                {
                    rev_counterw++;
                    if( (MS/rev_counterw) < ORIO)
                    {
                        voltage_0 = voltage_1;
                        state = STATEU;
                    }
                    else
                    {
                        state = STATEE;
                        voltage_0=voltage_1;
                    }
                }
            }
            break;
        }
        case STATEE:
        {
            voltage_1 = move_relay(RELAY_EAST,(MS/rev_counterw));
            if(voltage_1 >= (voltage_0 - VOLT_ERROR_W))
            {
                voltage_0 = voltage_1;
                state = STATEE;
            }
            else
            {
                rev_counterw++;
                if( (MS/rev_counterw) < ORIO)
                {
                    voltage_0 = voltage_1;
                    state = STATEU;
                }
                else
                {
                    state = STATEW;
                    voltage_0=voltage_1;
                }
            }
        }
        break;
    }
}

```

```

}
case STATEU:
{
    voltage_1 = move_relay(RELAY_UP,(MSU/rev_counteru));
    if(voltage_1 >= (voltage_0 - VOLT_ERROR_U))
    {
        voltage_0 = voltage_1;
        state = STATEU;
    }
    else
    {
        rev_counteru++;
        if((MSU/rev_counteru) < ORIOU)
        {
            state = STATES;
        }
        else
        {
            state = STATED;
            voltage_0=voltage_1;
        }
    }
    break;
}
case STATED:
{
    voltage_1 = move_relay(RELAY_DOWN,(MSU/rev_counteru));
    if(voltage_1 >= (voltage_0 - VOLT_ERROR_U))
    {
        voltage_0 = voltage_1;
        state = STATED;
    }
    else
    {
        rev_counteru++;
        if((MSU/rev_counteru) < ORIOU)
        {
            state = STATES;
        }
        else
        {
            state = STATEU;
            voltage_0=voltage_1;
        }
    }
    break;
}
case STATES:
{
    RELAYS_OFF;
    state = STATES;
}
default:
{
    RELAYS_OFF;
    state = STATES;
}
}

```

```

    }//swich()
    }//while(1);
}
#####
##### END OF MAIN #####
#####

#####
##### init hardware #####
#####

void init_hardware(void)
{
    PORTD=0xFF;          // pull-up enable at PORTD
    DDRD=0x00;          //PORTD defined as input for buttons

    PORTC = 0xFF;
    DDRC = 0xFF; //PORTC defined as outputs- leds

    PORTB = 0x00;
    DDRB = 0xFF; //PORTB defined as outputs - relays

    PORTA = 0x00;
    DDRA = 0x00;

    MCUCR = BIT(1);
    GICR = BIT(6);
}

#####
##### delay_ms #####
#####

void delay_ms(u32 ms)
{
    while(ms--)
    {
        _delay_ms(1);
    }
}

#####
##### ADC init #####
#####

void adc_init(void)
{
    ADMUX = BIT(6) ; // | 0b01000000; //0x40
    ADCSRA |= 0x80; //enable ADC - ADC0
}

#####
##### ADC read #####
#####

```

```

u16 read_adc_chan(char n)
{
//read ch n of internal 10 bit a/d
u16 retval;

ADMUX = n;
ADMUX |= 0x40;
ADCSRA |= 0x44;
    //ADCSRA |= 0x43;

while((ADCSRA & 0x40) !=0) ; //wait for conv complete
    //while( !(ADCSRA & 0x10) ) ; //wait for conv complete
//while((ADCSRA & ADIF) ==0);
    //ADCSRA |= BIT(4);    //clear ADIF mine
    retval = ADC;
    retval &=0x03FF;

return retval;
}
#####
##### move_relay #####
#####
u16 move_relay(u08 relay, u16 time_ms)
{
u16 adc_val;

DDRB = 0xFF;
RELAYS_OFF;
LEDS_OFF;
switch (relay)
{
    case RELAY_WEST:
    {
        WEST_ON;
        LED0_ON;
        break;
    }
    case RELAY_EAST:
    {
        EAST_ON;
        LED1_ON;
        break;
    }
    case RELAY_UP:
    {
        UP_ON;
        LED2_ON;
        break;
    }
    case RELAY_DOWN:
    {
        DOWN_ON;
        LED3_ON;
        break;
    }
    default:
    {
        ;
    }
}
}

```

```

    delay_ms(time_ms);
    RELAYS_OFF;
    LEDS_OFF;
    delay_ms(MS);
    adc_val = read_adc_chan(0);

    return adc_val;
}
#####
##### EINT0 #####
#####

ISR(INT0_vect)
{
    u08 readport;
    u08 tempport;
    readport=0x00;
    RELAYS_OFF;
    /*
    readport = PIND;
    readport &= BIT(2);
    do{
        ;
    }while(readport==0x00);
    delay_ms(200);
    readport = PIND;
    readport &= BIT(2);
    do{
        ;
    }while(readport==0x00);
    */

    while(1)
    {
        PORTD = 0xff;
        readport = PIND;

        tempport = readport & BIT(0);
        if(tempport == 0x00)
        {
            WEST_ON;
            LED0_ON;
        }
        tempport = readport & BIT(1);
        if(tempport == 0x00)
        {
            EAST_ON;
            LED1_ON;
        }
        tempport = readport & BIT(3);
        if(tempport == 0x00)
        {
            UP_ON;
            LED2_ON;
        }
        tempport = readport & BIT(4);
        if(tempport == 0x00)

```

```

        {
            DOWN_ON;
            LED3_ON;
        }
        tempport = readport & ( BIT(4) |BIT(3) | BIT(1) |BIT(0));
        if(tempport == (BIT(4) |BIT(3) | BIT(1) |BIT(0)))
        {
            RELAYS_OFF;
            LEDS_OFF;
        }
    }

    delay_ms(1000);
    GIFR = BIT(6);
}

```

Το πρόγραμμα main.c ξεκινά με την συμπερίληψη των απαραίτητων αρχείων και βιβλιοθηκών που χρησιμοποιούνται στην συνέχεια. Στην συνέχεια καθορίζονται οι μεταβλητές VOLT_ERROR_W και VOLT_ERROR_U που καθορίζουν μια 'ανοχή' στην σύγκριση των τιμών δειγματοληψίας των διαδοχικών τάσεων στον ADC. Κυρίως βοηθά στην επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του προγράμματος στο εργαστήριο με πηγή είσοδο τροφοδοτικό και όχι φωτοβολταϊκό πάνελ. Επίσης χρησιμοποιείται ως κριτήριο συνέχειας της κίνησης, εάν δεν παρατηρείται αισθητή μεταβολή της τάσης στον ADC. Στην συνέχεια ορίζονται οι μεταβλητές MS, MSU, ORIO, και ORIOU που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα για να καθορίζουν το χρόνο κίνησης των μοτέρ και τον αριθμό εκτέλεσης των επαναλήψεων αντίστοιχα, ανάλογα με τις τιμές που παίρνουν. Ακολουθεί ο ορισμός των καταστάσεων STATEW, STATEE, STATEU, STATED, STATES όπου είναι οι τέσσερις δυνατές κινήσεις του tracker και η πέμπτη κατάσταση είναι η τελική κατάσταση μετά το πέρας των κινήσεων (κατάσταση ακινησίας). Μετά ορίζεται ο αριθμητικός τύπος των μεταβλητών κατάσταση (state), voltage_0 και voltage_1 (είναι οι μεταβλητές που αποθηκεύονται οι τάσεις της δειγματοληψίας του ADC), rev_counterw και rev_counteru που είναι μετρητές των αντιστροφών του αλγορίθμου στα δυο διαδοχικά τμήματα κίνησης West/East και Up/Down.

Μετά τις δηλώσεις των αρχείων και των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται έρχεται η δήλωση (ενημέρωση) των συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται στο κύριο πρόγραμμα και αυτές είναι :

- init_hardware : Η συνάρτηση αυτή αρχικοποιεί το hardware για τις απαιτήσεις της εργασίας. Συγκεκριμένα δηλώνει ενεργοποίηση των pull-up resistors στην PortD και την PortC, διαμορφώνει την PortD ως είσοδο (για χειροκίνητη χρήση με μπουτόν) και την PortC ως έξοδο (για LEDs), την PortB ως έξοδο χωρίς pull-up resistors (λειτουργεί ως καταβόθρα ρεύματος για ενεργοποίηση του σταδίου εξόδου προς τα μοτέρ), την PortA ως είσοδο χωρίς pull-up resistors, ενώ τέλος ενεργοποιεί και την Interrupt_0 με ρύθμιση των καταχωρητών MCUCR και GICR. Ο κώδικας της συνάρτησης init_hardware ακολουθεί μετά τον κώδικα του main.

- `delay_ms` : Η συνάρτηση αυτή υλοποιεί χρονική καθυστέρηση. Δέχεται ως όρισμα τον χρόνο της επιθυμητής καθυστέρησης σε `millisecond` και δεν εκτελεί καμία λειτουργία για τον χρόνο αυτό, ούτε επιστρέφει κάποια τιμή στο πρόγραμμα, καθυστερώντας απλά την εκτέλεση της επόμενης εντολής στην σειρά.

- `adc_init` : Η συνάρτηση αυτή ενεργοποιεί την χρήση του ADC στην θύρα PA0 για την δειγματοληψία των τάσεων φορτίου. Η υλοποίηση της φαίνεται στο τμήμα με την ίδια ονομασία μετά το `main` .

- `read_adc_chan` : Η συνάρτηση `read_adc_chan` δέχεται ως όρισμα τον αριθμό του καναλιού του adc που χρησιμοποιείται (εν προκειμένω το κανάλι 0 αντιστοιχεί στην θύρα PA0), ενεργοποιεί την εκκίνηση της μετατροπής, περιμένει την ολοκλήρωση της και επιστρέφει την τιμή του αποτελέσματος της μετατροπής σε μορφή μη προσημασμένου 16bit ακέραιου αριθμού. Βέβαια η μετατροπή που κάνει ο ADC δίνει 10 bit αποτέλεσμα (10μπιτος μετατροπέας), γι' αυτό προσθέτουμε τα έξι μηδενικά που λείπουν με τις εντολές `retval = ADC;` (παίρνει το αποτέλεσμα του ADC) και `retval &= 0x03FF;` (προσθέτει τα μηδενικά που λείπουν) και `return retval;` (επιστρέφει την τιμή στο πρόγραμμα).

- `move_relay` : Η συνάρτηση `move_relay` κατέχει πολύ σημαντική θέση στην λειτουργία του αλγορίθμου . Η υλοποίηση της ακολουθεί στο τέλος του κώδικα. Δέχεται ως ορίσματα :

1. Την έξοδο προς ρελέ (PortB) που θέλουμε να ενεργοποιήσουμε από τις τέσσερις δυνατές κινήσεις (West/East/Up/Down) .Τα `RELAY_WEST` κ.τ.λ. δηλώνονται στο `board.h`
2. Τον επιθυμητό χρόνο κίνησης των μοτέρ

Και επιστρέφει την τιμή της δειγματοληπτούμενης τάσης από τον ADC στην θέση που έχει καταλήξει το φωτοβολταϊκό πάνελ μετά την κίνηση . Ανάλογα με ποιο από τα δυνατά ορίσματα `RELAY_WEST`, `RELAY_EAST`, `RELAY_UP`, `RELAY_DOWN` δέχεται ,ενεργοποιεί την αντίστοιχη θύρα `drive` εξόδου (υπό μορφή `WEST_ON` κ.τ.λ.) και ανάβει το αντίστοιχο LED. Αυτό γίνεται για όσο χρόνο δηλώνουμε στο δεύτερο όρισμα. Κατόπιν απενεργοποιούμε όλα τα LED και τα `drive` των εξόδων , καθυστερούμε για χρόνο MS (για να ηρεμήσει το πάνελ), διαβάζουμε τον ADC με την συνάρτηση `read_adc_chan` και επιστρέφουμε την τιμή αυτή στο πρόγραμμα.

- `EINT0 (interrupt0)` : Στο τμήμα αυτό του κώδικα φαίνεται η λειτουργία του μικροελεγκτή όταν ενεργοποιηθεί εξωτερική διακοπή της ομαλής λειτουργίας με το πάτημα του `auto/manual button`. Ουσιαστικά διαβάζει συνεχώς την λογική στάθμη των θυρών που είναι συνδεδεμένα τα μπουτόν κίνησης και όταν ανιχνεύει γείωση ενεργοποιεί τόσο την αντίστοιχη θύρα εξόδου, όσο και το αντίστοιχο LED. Δυο κινήσεις ταυτόχρονα επιτρέπονται από το πρόγραμμα και εκτελούνται από τα μοτέρ εφόσον δεν είναι αντίθετες. Για παράδειγμα δεν μπορεί να γίνει ταυτόχρονη κίνηση West-East ή Up-Down αλλά οι συνδυασμοί West-Up, East-Down ,West-Down και East-Up μπορούν να εκτελεστούν από τα μοτέρ . Άπαξ και εισέλθει το πρόγραμμα σε `interrupt` δεν επανέρχεται στο κυρίως παρά μόνο με επανεκκίνηση .

Έχοντας μέχρι στιγμής δηλώσει όλες τις μεταβλητές και τις συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα ήρθε η ώρα να αναλύσουμε το βασικό πρόγραμμα που εκτελείται από τον μικροελεγκτή , το main :

Αρχικά εκτελούνται τα `init_hardware` και `adc_init` για τους λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω . Γίνεται μια καθυστέρηση 1 sec (`delay_ms(1000)`) για να είναι πιο εμφανής η διαδικασία στην κίνηση του tracker και ακολουθεί η εντολή `sei()` που ενεργοποιεί τις διακοπές (`interrupts`) για χειροκίνητη λειτουργία . Εν συνεχεία αρχικοποιούνται οι μεταβλητές αντιστροφής και η απενεργοποίηση των ρελέ. Δηλώνεται έναρξη κίνησης κατά την κατεύθυνση West (συμβατική φορά) και μεταφέρεται η τιμή της τάσης δειγματοληψίας στην μεταβλητή `voltage_0` . Το πρόγραμμα έχει μπει στην κατάσταση STATEW. Ακολουθούν τώρα οι τέσσερις βασικές καταστάσεις με όμοια δομή και λειτουργία :

Μπαίνοντας το πρόγραμμα στην κατάσταση STATEW εκτελεί μια κίνηση στην αυτή κατεύθυνση χρονικής διάρκειας `MS/rev_counterw` εκτελώντας την συνάρτηση `move_relay` (αναλύθηκε προηγουμένως). Η συνάρτηση επιστρέφει την τιμή δειγματοληψίας στην νέα θέση και συγκρίνονται οι δυο τιμές, παλιά και νέα. Αν η νέα είναι μεγαλύτερη ή ίση από την παλιά συνεχίζεται η κίνηση (κριτήριο είναι το `VOLT_ERROR_W` για πολύ μικρές διαφορές) και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Αν όχι τότε αυξάνεται η τιμή του `rev_counterw` και μεταπίπτει η διαδικασία στην κατάσταση STATEE .

Στην κατάσταση STATEE εκτελείται η ίδια διαδικασία για την κατεύθυνση East, η χρονική διάρκεια της κίνησης όμως έχει μειωθεί στο $\frac{1}{2}$ της προηγούμενης καθώς αυξήθηκε η τιμή του `rev_counterw` και ο χρόνος κίνησης ισούται με `MS/rev_counterw` . Οι συγκρίσεις νέων και προηγούμενων τιμών τάσης γίνονται εν κινήσει και όταν η διαφορά βγει πάλι αρνητική, αυξάνεται για μια ακόμη φορά η τιμή του `rev_counterw` και μεταφερόμαστε στην κατάσταση STATEW με μικρότερη ακόμα χρονική διάρκεια κίνησης. Αυτή η διαδικασία θα συνεχιστεί όσες φορές επιτάσσει η ικανοποίηση της συνθήκης $(MS/rev_counterw) < ORIO$ που ρυθμίζεται από τον χρήστη αναλόγως πόσα reverse θέλουμε να εκτελέσει ο αλγόριθμος(έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο του αλγορίθμου).

Βγαίνοντας το πρόγραμμα από τις καταστάσεις STATEW ή STATEE ανάλογα την συνθήκη $(MS/rev_counterw) < ORIO$ συνεχίζει στην κατάσταση STATEU εκτελώντας κίνηση άνω (`up`) . Η διαδικασία είναι ίδια με πριν, μόνο που τώρα έχουμε τις νέες μεταβλητές `rev_counteru`, `MSU` και `ORIOU` αντίστοιχες με τις αυτές χωρίς την κατάληξη U. Η μεταπήδηση γίνεται από την STATEU στην STATED και εναλλάξ μέχρι να μην ικανοποιείται η συνθήκη $(MSU/rev_counteru)$. Τότε το πρόγραμμα πηγαίνει στην κατάσταση STATES (state stable) όπου σταματά κάθε κίνηση και παραμένει εκεί για πάντα, εκτός αν γίνει διακοπή του προγράμματος .

5.2.2 Το αρχείο board.h

Στο αρχείο αυτό περιέχονται οι βασικοί ορισμοί για το hardware που χρησιμοποιείται στις θύρες του μικροελεγκτή . Σε αυτό ορίζονται οι χρήσεις των εισόδων/εξόδων του και πως υλοποιούνται αυτά .Οι ορισμοί #define LED0 BIT(0) από 0...5 αναφέρονται στην λειτουργία των έξι LED που έχει η πλακέτα και μαζί με τις #define LED0_ON PORTC = ~LED0 μπορούμε να υλοποιήσουμε μια εντολή την LED0_ON που χρησιμοποιείται στο κυρίως πρόγραμμα και αναφέρεται στην PORTC στο BIT(0) δηλαδή στην θύρα PC0 που είναι το αντίστοιχο LED .Ομοίως και για τους άλλους αριθμούς , ενώ το LED5_OFF σβήνει μόνο τα τέσσερα LED που αναφέρονται στις ανεξάρτητες κινήσεις και αφήνει να λειτουργούν βάση προγράμματος τα δυο πράσινα LED ελέγχου της φάσης του αλγορίθμου . Οι ορισμοί #define RELAY_WEST BIT(0) κ.τ.λ. χρησιμοποιούνται ομοίως για την υλοποίηση των εντολών WEST_ON με ανάλογο τρόπο για την θύρα B. Ο κώδικας του αρχείου board.h ακολουθεί :

```
#ifndef _board_h_
#define _board_h_

#define LED0    BIT(0)
#define LED1    BIT(1)
#define LED2    BIT(2)
#define LED3    BIT(3)
#define LED4    BIT(4)
#define LED5    BIT(5)

#define BUTTON0    BIT(0)
#define BUTTON1    BIT(1)
#define BUTTON2    BIT(2)
#define BUTTON3    BIT(3)

#define RELAY_WEST    BIT(0)
#define RELAY_EAST    BIT(1)
#define RELAY_UP      BIT(2)
#define RELAY_DOWN    BIT(3)

#define LED0_ON      PORTC = ~LED0;
#define LED1_ON      PORTC = ~LED1;
#define LED2_ON      PORTC = ~LED2;
#define LED3_ON      PORTC = ~LED3;
#define LED5_OFF     PORTC = PORTC | 0b11001111;

#define WEST_ON      PORTB = RELAY_WEST
#define EAST_ON      PORTB = RELAY_EAST
#define UP_ON        PORTB = RELAY_UP
#define DOWN_ON      PORTB = RELAY_DOWN
#define RELAYS_OFF   PORTB = 0x00

#endif
```

5.2.3 Το αρχείο avrdefs.h

Το αρχείο avrdefs.h είναι αρχείο επικεφαλίδας και σε αυτό ορίζονται μακροεντολές που χρησιμοποιούνται από το κύριο πρόγραμμα και τις διάφορες συναρτήσεις, κυρίως ορίζονται νέα ονόματα για τους τύπους μεταβλητών που χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα η συνάρτηση `move_relay` επιστρέφει στο πρόγραμμα αποτέλεσμα σε μορφή `u16`. Οι δύο `reverse_counter` του προγράμματος είναι μεταβλητές τύπου `u08`. Αυτές οι μορφές καθορίζονται εδώ, με την `u08` να είναι ακέραια μεταβλητή μεγέθους 8 bit χωρίς πρόσημο (`unsigned`) παίρνοντας δηλαδή θετικές ακέραιες τιμές από 0 μέχρι $2^8 - 1$. Ο κώδικας του αρχείου ακολουθεί :

```
#ifndef MAIN_H
#define MAIN_H

#define TRUE 1
#define FALSE 0

#ifndef P
#define P(s) ({static const uint8_t c[] __attribute__((progmem)) = s;c;})
#endif

// datatype definitions macros

typedef unsigned char      u08;
typedef signed char       s08;
typedef unsigned short    u16;
typedef signed short      s16;
typedef unsigned long     u32;
typedef signed long       s32;
typedef unsigned long long u64;
typedef signed long long  s64;

#endif
```

5.3 Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή

Το πρόγραμμα που έχει αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο πρέπει να περάσει στην μνήμη του μικροελεγκτή δηλαδή να προγραμματιστεί. Ο κώδικας έχει γραφτεί στο περιβάλλον Programmer's Notepad του WinAVR.

```

Programmer's Notepad [main3.c]
File Edit View Tools Window Help
C/C++
main3.c
main3.c
board.h

uint8 move_relay(uint8 relay, uint8 time_ms);

//----- MAIN -----

void main(void)
{
    init_hardware();
    adc_init();
    delay_ms(1000);
    sei();
    RELAYS_OFF;
    rev_counterw=1;
    rev_counteru=1;
    state = STATEW;

    voltage_0 = read_adc_chan(0);

    while(1)
    {
        switch (state)
        {
            //-----

Output:
.debug_str      443    0
.debug_loc     247    0
Total          5679

----- end -----

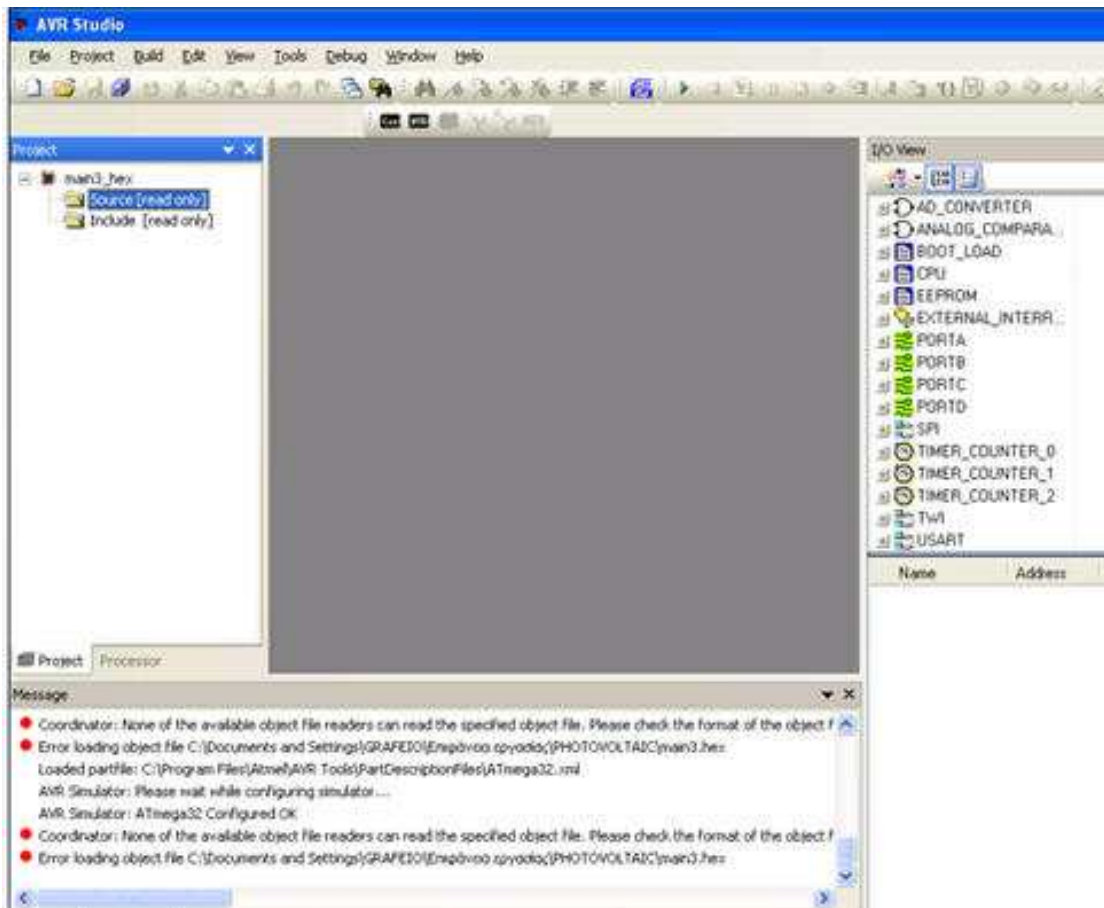
> Process Exit Code: 0
> Time Taken: 00:02

```

Σχήμα 5.1. Ο κώδικας στο Programmer's Notepad

Η μεταγλώττιση γίνεται με την εντολή “Tools→Make All” και στο αποτέλεσμα φαίνονται ενδεχόμενα λάθη που έχουν γίνει στον κώδικα. Αν δεν υπάρχουν λάθη τότε εμφανίζεται στο παράθυρο Output το μέγεθος του κώδικα, τα αρχεία που δημιουργήθηκαν και τις διευθύνσεις που έχουν στον μικροελεγκτή τα διάφορα τμήματα του κώδικα.

Για να περάσουμε το πρόγραμμα στον μικροελεγκτή χρησιμοποιούμε το περιβάλλον AVR Studio 4, ένα ολοκληρωμένο αναπτυξιακό εργαλείο για σχεδόν όλους τους μικροελεγκτές AVR. Ο μικροελεγκτής τοποθετείται στην κατάλληλη γι’ αυτόν βάση της αναπτυξιακής κάρτας STK500 (προγραμματιστής) και η σειριακή θύρα ελέγχου του συνδέεται με μια σειριακή θύρα του υπολογιστή. Ανοίγοντας το AVR Studio 4 επιλέγουμε να ανοίξουμε το αρχείο που έχει δημιουργήσει ο μεταγλωττιστής με την κατάληξη .hex , με την ονομασία που έχουμε δώσει εν προκειμένω main.hex. Κατόπιν επιλέγουμε τον τύπο του μικροελεγκτή από μια λίστα και κάνουμε Upload το πρόγραμμα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το AVR Studio 4 αναγνωρίζει αυτόματα την σειριακή θύρα που είναι συνδεδεμένο το STK500 και δεν χρειάζεται ρύθμιση. Έχουμε καταφέρει με αυτήν την διαδικασία να περάσουμε το πρόγραμμα από τον υπολογιστή στον μικροελεγκτή.



Σχήμα 5.2. Ο προγραμματισμός με το AVR Studio4

Κεφάλαιο 6

Οι κατασκευές της εργασίας

6.1 Σχεδίαση της τυπωμένης πλακέτας (PCB)

Έχοντας σχεδιάσει το ηλεκτρονικό κύκλωμα και προγραμματίσει τον μικροελεγκτή, το επόμενο στάδιο είναι η σχεδίαση της τυπωμένης πλακέτας (PCB, Printed Circuit Board) και η τοποθέτηση των υλικών σε αυτήν. Σε προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε την τελική μορφή του κυκλώματος σε σχηματική μορφή, υλοποιημένο σε σχεδιαστικό πρόγραμμα του Εργαστηρίου Μικροηλεκτρονικής. Μέσα από το πρόγραμμα δημιουργείται βάσει των χαρακτηριστικών των ηλεκτρονικών υλικών και των μεταξύ της συνδέσεων μια πρώτη προσέγγιση της τυπωμένης πλακέτας .

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με εξαίρεση κάποια ηλεκτρονικά εξαρτήματα, τα περισσότερα βρίσκονται της βιβλιοθήκης του προγράμματος και η τοποθέτηση τους στο σχηματικό είναι εύκολη. Κυρίως μας απασχολούν για το τυπωμένο κύκλωμα οι θέσεις των ακροδεκτών (ποδιών) τους και το πλήθος τους γνωστό με τον όρο footprint. Για υλικά που δεν ήταν δυνατό να βρεθούν της βιβλιοθήκης έγιναν κατασκευές τόσο σχηματικών συμβόλων, όσο και footprints για το PCB. Τέτοια υλικά ήταν τα μπουτόν, η αντίσταση ισχύος ,τα ρελέ, το 7805 και οι πυκνωτές που χρησιμοποιήσα.

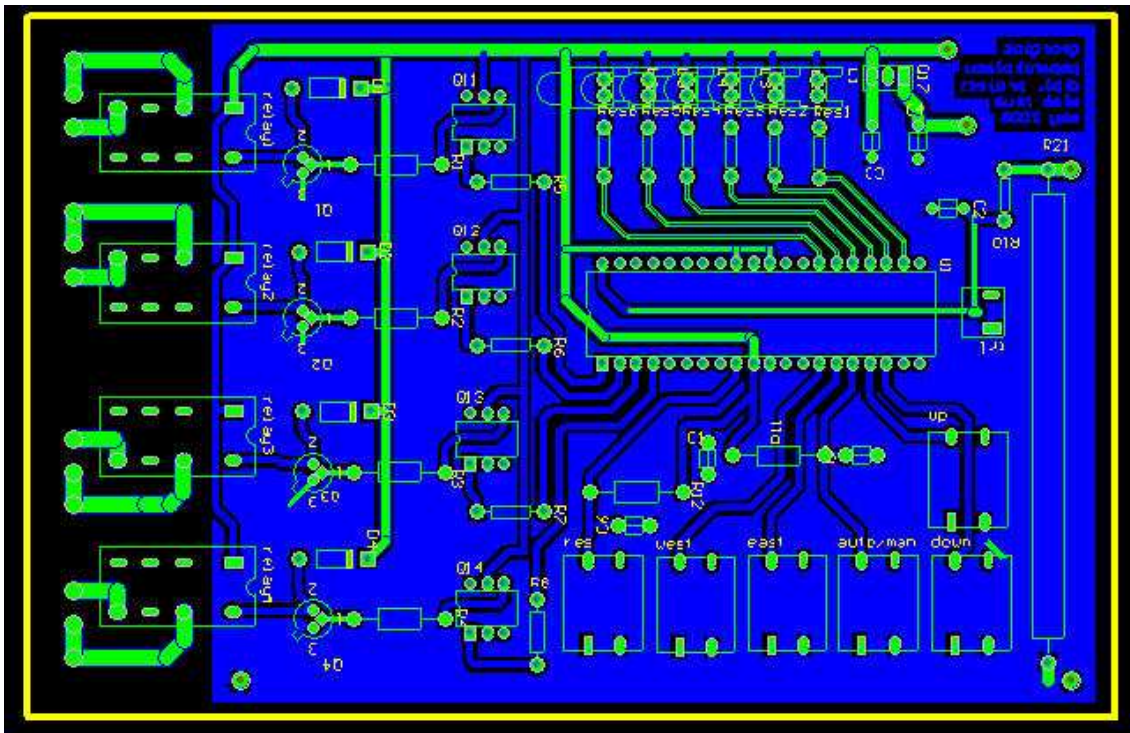
Η κατασκευή της πλακέτας παρουσίαζε δυο βασικά προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν :

1. Οι επαφές των ρελέ που βρίσκονται πάνω στην πλακέτα βρίσκονται υπό τάση 220Vac και διαρρέονται από ρεύμα μικρής έντασης (~17mA), ενώ η υπόλοιπη πλακέτα έχει τροφοδοσία 5Vdc .
2. Το ωμικό φορτίο (αντίσταση ισχύος) επιβαρύνεται όλη την ισχύ που παράγει το φωτοβολταϊκό πάνελ και αναπτύσσει θερμοκρασία που μπορεί να επηρεάσει τα υπόλοιπα υλικά .

Το πρώτο αντιμετωπίστηκε αποφεύγοντας την εφαρμογή ground plane κάτω από της επαφές που έχουν τάση 220Vac και δεν περνά καμία γραμμή του ψηφιακού κυκλώματος κοντά σε αυτές. Το δεύτερο λύθηκε με την τοποθέτηση της αντίστασης ισχύος στην άκρη της πλακέτας μακριά από ευαίσθητο

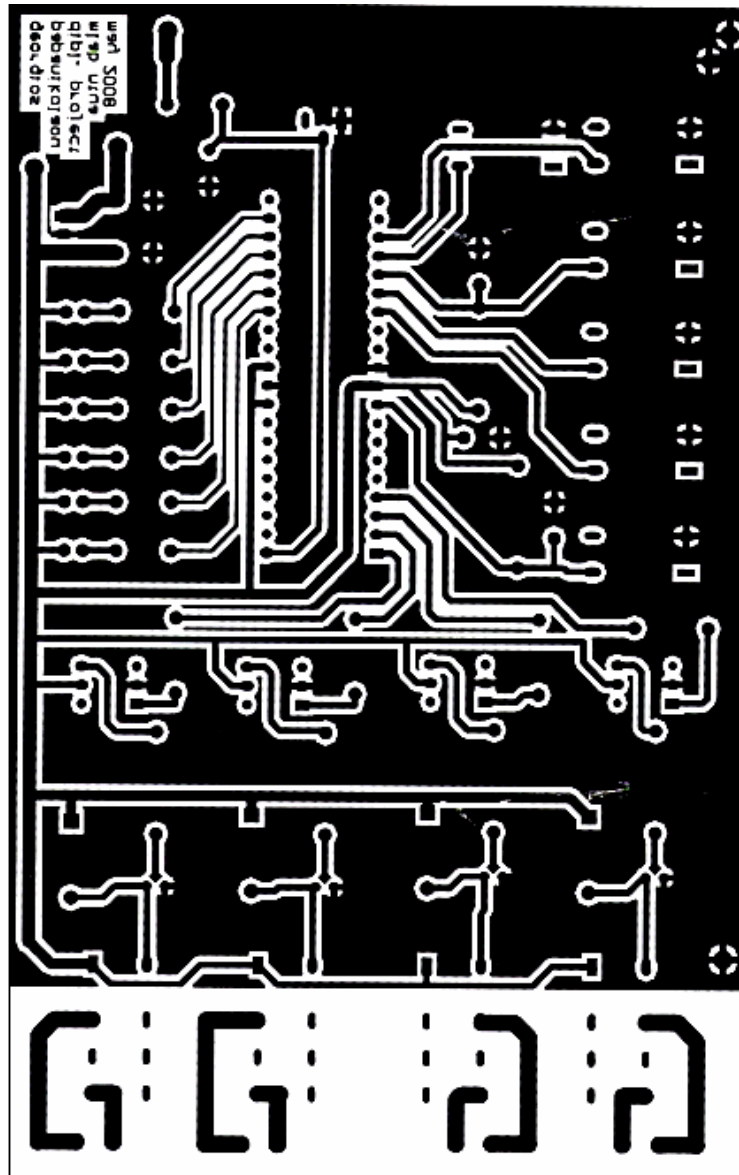
hardware όπως ο μικροελεγκτής. Το ground plane (στο τμήμα της πλακέτας με τις χαμηλές τάσεις) χρησιμοποιήθηκε αφενός για τον περιορισμό των φαινομένων cross talk και του θορύβου που επιτυγχάνει, και αφετέρου για λιγότερη αποχάλκωση κατά την φάση της τύπωσης της πλακέτας.

Το τελικό σχήμα της κατασκευής παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Σε αυτό φαίνονται οι γραμμές και το ground plane που βρίσκονται στην κάτω όψη της πλακέτας αλλά και η θέση των υλικών που πρέπει να τοποθετηθούν. Να σημειωθεί ότι η κατασκευή είναι μιας όψης/στρώματος και δεν υπάρχουν γεφυρώσεις στην άνω μη επιχάλκωμένη όψη της πλακέτας .



Σχήμα 6.1 Τα υλικά της πλακέτας τοποθετημένα και συνδεδεμένα (φαίνονται και οι δυο όψεις)

Στην συνέχεια ακολουθεί η εικόνα της διαφάνειας που χρησιμοποιήθηκε για την τύπωση της πλακέτας. Πρόκειται για την κάτω όψη/στρώμα του προηγούμενου σχηματικού σε φυσικό μέγεθος, ίδια με αυτή που κατασκευάστηκε στην πράξη.



Σχήμα 6.2 Η μάσκα της πλακέτας σε πραγματικό μέγεθος

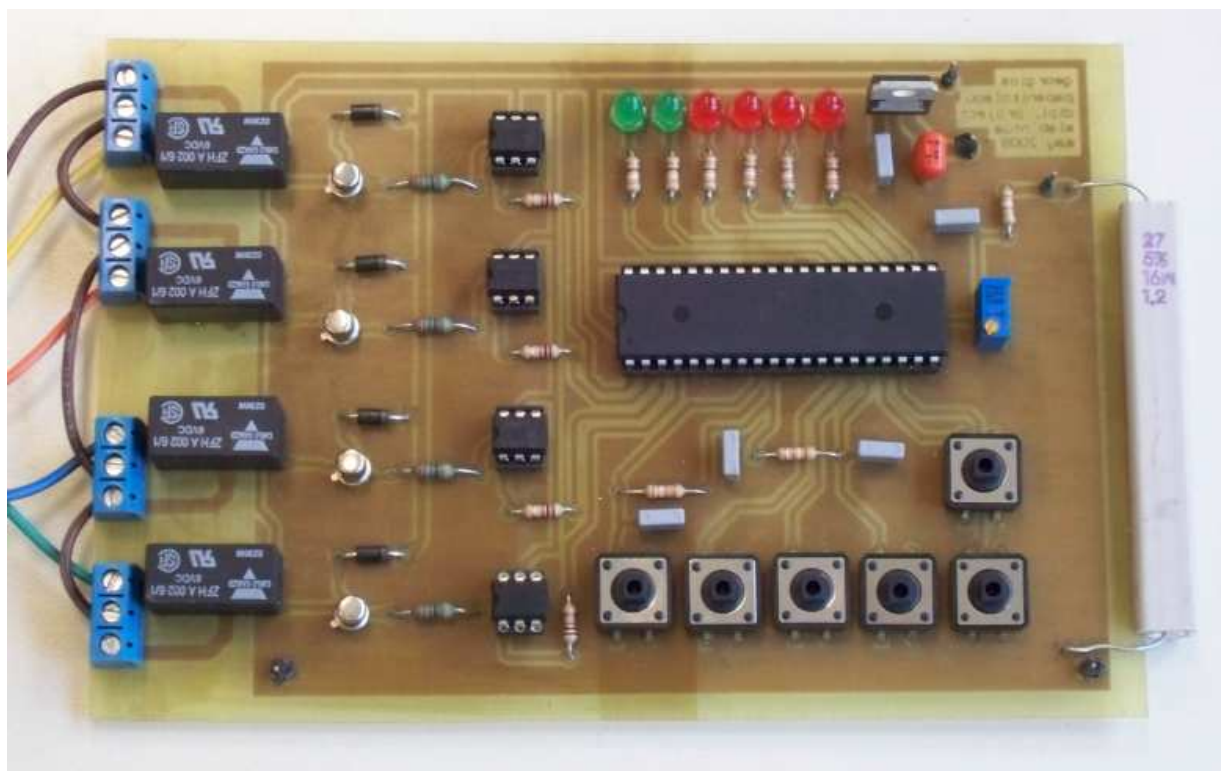
6.2 Η τύπωση της πλακέτας

Η διαφάνεια της κάτω όψης του κυκλώματος που φαίνεται λίγο παραπάνω είναι αυτή που θα τυπωθεί στην επιχάλκωμένη πλευρά της αδιαμόρφωτης πλακέτας. Η διαδικασία της κατασκευής αυτής έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Αισθητήρων. Αρχικά η αδιαμόρφωτη πλακέτα δέχεται την διαφάνεια με το σχηματισμένο κύκλωμα στην επιχάλκωμένη όψη της και στερεώνεται υπό την ακτινοβολία υπεριώδους φως για τρεισήμισι περίπου λεπτά για να πολυμεριστεί το φωτοευαίσθητο υλικό που είναι κολλημένο πάνω στον χαλκό και το φως διαπερνά την διαφάνεια από τις περιοχές που δεν υπάρχει μελάνι. Έπειτα ξεπλένεται η πλακέτα σε χημικό που απομακρύνει το πολυμερισμένο φωτοευαίσθητο υλικό και εν συνεχεία μπαίνει σε ένα πλυντήριο χημικών που 'τρώνε' τον χαλκό που είναι εκτεθειμένος (διαδικασία αποχάλκωσης). Έτσι

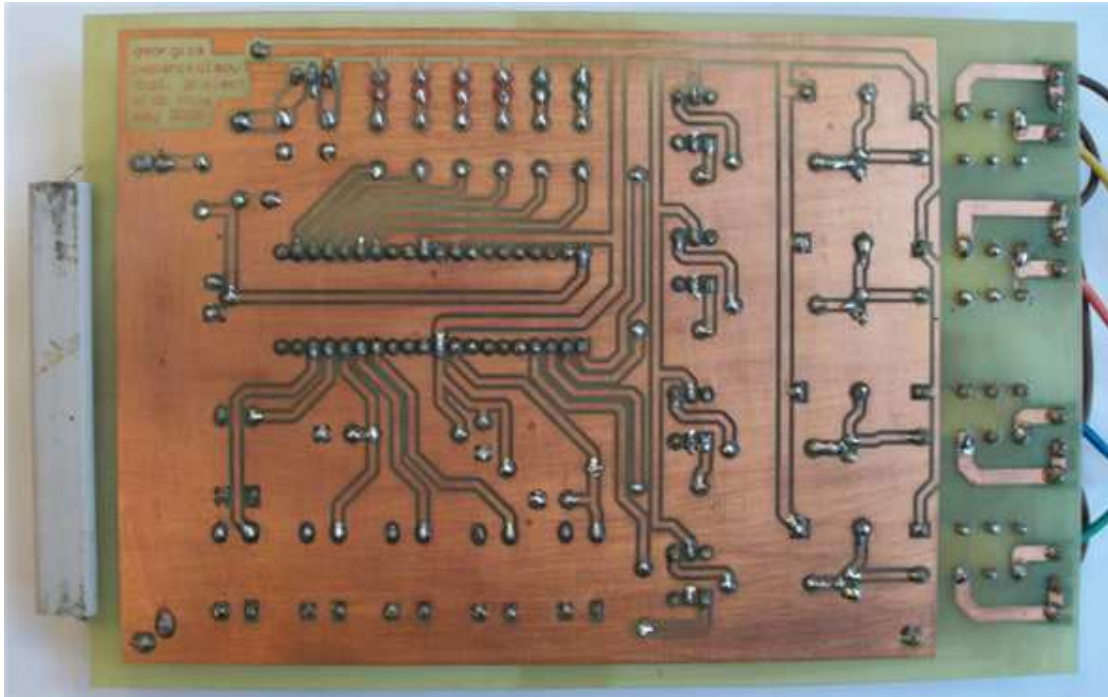
παίρνουμε την έτοιμη πλακέτα που θέλει όμως τρίψιμο με ψηλό σύρμα (ή σμυριδόπανο) για να απομακρυνθεί το φωτοευαίσθητο υλικό που σημειωτέων δεν είναι αγώγιμο.

Μετά την διαδικασία τύπωσης της πλακέτας ακολουθεί δοκιμή των αγώγιμων διαδρομών και του ground plane με buzzer (βομβητής) για τον έλεγχο τυχόν ασυνεχειών ή ανεπιθύμητων βραχυκυκλωμάτων. Ακολουθεί το τρύπημα της πλακέτας στα pads των υλικών με τρυπάνι διατομής 1mm (για τα διακριτά στοιχεία) και 0,8mm (για τα ολοκληρωμένα). Σειρά τώρα έχει η κόλληση των εξαρτημάτων στην πλακέτα και μετά ο έλεγχος των κολλήσεων, οπτικός (για ψυχρές κολλήσεις) και με buzzer (για βραχυκυκλώματα μεταξύ κολλήσεων).

Έχοντας κάνει όλα τα παραπάνω, έχουμε την τελική ολοκληρωμένη μορφή του κυκλώματος που φαίνεται στα δυο σχήματα που ακολουθούν , άνω και κάτω όψη. Στο άκρο της πλακέτας είναι οι κλέμες σύνδεσης για την κίνηση των μοτέρ και η τροφοδοσία τους με 220Vac και ένα εξαπολικό φως για εύκολη σύνδεση και αποσύνδεση της καλωδίωσης .



Σχήμα 6.3 Φωτογραφία της άνω όψης της πλακέτας



Σχήμα 6.4 Φωτογραφία της κάτω όψης της πλακέτας

Με την πλακέτα έτοιμη και δοκιμασμένη για αστοχίες τύπωσης και κολλήσεων ήρθε η ώρα για να δοκιμάσουμε την λειτουργία της. Αρχικά δίνουμε τροφοδοσία 5Vdc με περιορισμό στο ρεύμα από τροφοδοτικό για να αποφύγουμε καταστροφή κάποιου εξαρτήματος, χωρίς τον μικροελεγκτή στην βάση του. Κατόπιν μπαίνει στην θέση του ο μικροελεγκτής και χρησιμοποιούμε την δεύτερη πηγή του τροφοδοτικού στην αντίσταση ισχύος για να εξομοιώσει την λειτουργία του φωτοβολταϊκού συλλέκτη. Αυξομειώνοντας την τάση της γίνεται έλεγχος της λειτουργίας του αλγορίθμου και εν γένει του προγράμματος παρατηρώντας τα LED πως αναβοσβήνουν αλλά και τον οπλισμό των αντίστοιχων ρελέ. Για την λειτουργία αυτή με το τροφοδοτικό όμως πρέπει να αυξηθεί λίγο η τιμή των μεταβλητών VOLT_ERROR (VOLT_ERROR_W & VOLT_ERROR_U) για να ανταποκριθεί επαρκώς το πρόγραμμα στην χειροκίνητη αλλαγή της τάσης.

6.3 Οι κατασκευές στήριξης και κίνησης του μοτέρ

Σε αυτό το σημείο που έχει φτάσει η εργασία, ένα στάδιο πριν τις τελικές δοκιμές υπό ηλιακή ακτινοβολία, και έχοντας λειτουργήσει ικανοποιητικά ο αλγόριθμος σε συνθήκες εργαστηρίου, ήρθε η ώρα για την κατασκευή της στήριξης του φωτοβολταϊκού πάνελ πάνω στο μοτέρ κίνησης και η δημιουργία βάσης γι' αυτό. Πριν όμως να δούμε τα χαρακτηριστικά του μοτέρ που θα χρησιμοποιηθεί :



Σχήμα 6.5. Το μοτέρ κίνησης του solar tracker

Τα χαρακτηριστικά
του μοτέρ

Τάση Λειτουργίας	Γωνία περιστροφής	Ταχύτητα περιστροφής
220VAC	Pan: 360° Tilt: 45°	Pan: 6°/sec Tilt: 4°/sec
Διαστάσεις (ΠxΥxB) mm	Μέγιστο φορτίο	
279x180x161	5kg	

Πίνακας 6.1. Τα χαρακτηριστικά του μοτέρ

Ο τύπος αυτός μοτέρ χρησιμοποιείται σε συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής εικόνας. Πάνω τους τοποθετείται κάμερα, η οποία μπορεί να κινηθεί από απόσταση με τις κατάλληλες εντολές. Αποτελεί μια αρκετά καλή λύση για κίνηση σε δυο άξονες χωρίς να απαιτείται ειδική για την συγκεκριμένη εφαρμογή κατασκευή. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει όμως είναι η γωνία περιστροφής στο Up/Down : Έχει δυνατότητα -45° έως $+45^{\circ}$ ως προς τον ορίζοντα, ενώ εμείς επιθυμούμε εύρος 0° μέχρι 90° . Απαιτείται δηλαδή μια σχετική γωνία για να τοποθετηθεί το πάνελ πάνω στο μοτέρ. Η λύση δίνεται και μάλιστα με ρυθμιζόμενη γωνία ανάμεσα στην εξέδρα του μοτέρ και το επίπεδο του πάνελ. Ακολουθεί η φωτογραφία της μηχανικής κατασκευής του solar tracker :



Σχήμα 6.6. Η ολοκληρωμένη κατασκευή του solar tracker

Στην φωτογραφία φαίνεται η 'άρθρωση' που στηρίζει το πάνελ (με δυο απαραίτητες γωνίες) πάνω στην εξέδρα του μοτέρ. Η κατασκευή της είναι αυτοσχέδια: Χρησιμοποιήθηκε γωνιακός συνδετήρας κουπαστής που τοποθετείται σε κάγκελα αλουμινίου, ο οποίος υπέστη διαμπερές τρύπημα, για να περάσει βίδα 7mm διαμέτρου και να σφίξει με παξιμάδι (ο γωνιακός συνδετήρας δεν χρησιμοποιείται για να σφίγγει σε φυσιολογικές συνθήκες).

Επειδή στις μετρήσεις θα γίνει σύγκριση της απόδοσης του solar tracker με ένα σταθερό φωτοβολταϊκό πάνελ με το αυτό φορτίο, πρέπει να γίνει βάση στήριξης και για αυτό, με μεταβαλλόμενη γωνία ανύψωσης. Όμως κατά την διάρκεια των μετρήσεων το σταθερό πάνελ θα βρίσκεται τοποθετημένο πάνω σε επίπεδο έδρανο, άρα αρκούν δυο ισομήκη ρυθμιζόμενα στηρίγματα

(πόδια) για να στηθεί όπως πρέπει . Η κατασκευή φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία :



Σχήμα 6.7. Το σταθερού πάνελ με την βάση του

Κεφάλαιο 7

Η διαδικασία των μετρήσεων

7.1 Οι δοκιμές στον ήλιο

Έχοντας ολοκληρώσει και την κατασκευή των μηχανικών μερών του solar tracker είμαστε σε θέση πλέον να δοκιμάσουμε την λειτουργία του υπό πραγματικές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας. Οι δοκιμές έγιναν στην ταράτσα του τρίτου ορόφου των Παλαιών Κτιρίων της Σχολής ΗΜΜΥ του ΕΜΠ στα μέσα του μήνα Μαΐου. Για την τροφοδοσία της πλακέτας χρησιμοποιήθηκε μη-σταθεροποιημένο τροφοδοτικό στα 7,5Volt (σταθεροποίηση γίνεται με το κύκλωμα του 7805), ενώ για την κίνηση των μοτέρ ρεύμα 220Vac με μπαλαντέζα. Επίσης υπήρχε ένα πολύμετρο για την παρακολούθηση της τάσης στα άκρα του φορτίου. Θέτοντας σε λειτουργία την κατασκευή, συμπεριφέρθηκε αναμενόμενα (βάσει αλγορίθμου) και προσέγγισε ικανοποιητικά την θέση του ήλιου. Αυτό βέβαια έγινε μετά από αλλαγές που χρειάστηκε να γίνουν κυρίως στις εξής μεταβλητές :

- VOLT_ERROR_W και VOLT_ERROR_U : Οι τιμές των μεταβλητών αυτών μειώθηκαν πολύ σε σχέση με τις δοκιμές σε τροφοδοτικό, καθώς η μεταβλητότητα της τάσης είναι πιο ομαλή .

- MS και MSU : Οι τιμές αυτές προσαρμόστηκαν στις δυνατότητες ταχύτητας κίνησης που έχουν τα μοτέρ.

- ORIO και ORIOU : Οι τιμές των μεταβλητών αυτών ρυθμίζουν το πλήθος των αντιστροφών του αλγορίθμου. Στην πράξη φαίνεται ότι 4 αντιστροφές είναι αρκετές για ικανοποιητική εύρεση του ήλιου .

Η ικανοποιητική προσέγγιση της θέσης του ήλιου γίνεται τόσο από τις μετρήσεις με χρήση του πολυμέτρου, όσο και με οπτική παρατήρηση (μέθοδος σκιάς σε πρότυπο αισθητήρα).

7.2 Η τοποθέτηση των διατάξεων

Βλέποντας ότι ο solar tracker λειτουργεί ικανοποιητικά, το επόμενο βήμα είναι να δούμε αν αυξάνεται η απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ που φέρει

συγκριτικά με ένα σταθερό πάνελ, υπό ίδιο φορτίο. Αφού το πρόβλημα του solar tracker έχει λυθεί, μένει να υπολογιστεί η γωνία ανύψωσης που θα τοποθετηθεί το σταθερό πάνελ .

Ως θέση του σταθερού πάνελ θα χρησιμοποιήσουμε την βέλτιστη κλίση που προβλέπει η θεωρία για τον μήνα αυτό και όχι απλώς γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος όπως συμβαίνει στην πράξη με τις σταθερές εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών. Έτσι θέλουμε να συγκρίνουμε την απόδοση του solar tracker με την βέλτιστη δυνατή που μπορεί να έχει ένα σταθερό φωτοβολταϊκό πάνελ. Για τις ημερομηνίες που έλαβαν χώρα οι τελικές μετρήσεις, η βέλτιστη κλίση μπορεί να υπολογιστεί (βλέπε κεφάλαιο 1 σχήμα 1.10) από την παρακάτω σχέση :

$$\beta_{\sigma} = 38 - \frac{2}{3} * (38 - 14,55) = 38 - 15,63$$
$$= 22,37 \cong 22,4^{\circ}$$

Η βέλτιστη αζιμουθιακή γωνία του σταθερού πάνελ είναι η μηδενική με αναφορά το Νότο. Η εύρεση της κατεύθυνσης του Νότου έγινε προσεγγιστικά με δυο τρόπους: Με χρήση πυξίδας και με την μέθοδο των προσκόπων (χρήση ρολογιού και ήλιου). Οι δυο μέθοδοι είχαν απόκλιση 5 μοιρών και το πάνελ τοποθετήθηκε στην κατεύθυνση της διχοτόμου της γωνίας που σχηματίζουν οι δυο προηγούμενες κατευθύνσεις στο οριζόντιο επίπεδο.

Ακολουθεί η φωτογραφία της τελικής διάταξης των μετρήσεων με solar tracker και σταθερό πάνελ τοποθετημένα, καθώς και τα πολύμετρα για την λήψη των μετρήσεων :



Σχήμα 7.1. Η διάταξη των μετρήσεων

7.3 Οι μετρήσεις

Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα την Πέμπτη 22 και την Κυριακή 25 Μαΐου 2008 , σε ταράτσα πολυκατοικίας κοντά στο ΕΜΠ (περιοχή Ζωγράφου) υπό καλές καιρικές συνθήκες (πλήρης ηλιοφάνεια και υψηλές σχετικά θερμοκρασίες). Οι μετρήσεις υπό φορτίο έγιναν πάνω στο ίδιο φορτίο (της πλακέτας) διαδοχικά για τον solar tracker και το σταθερό πάνελ και όχι σε δυο διαφορετικά για να μην υπάρχουν αποκλίσεις των αποτελεσμάτων λόγω μικρών διαφορών στις τιμές των αντιστάσεων.

Μετρήσεις ελήφθησαν και για τις δυο ημέρες από τις 6:30πμ μέχρι τις 8:15μμ όποτε και παρατηρήθηκε ανιχνεύσιμη από τα φωτοβολταϊκά πάνελ ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπόμενη σε ηλεκτρική ενέργεια. Κατά την εκτέλεση του πειράματος γίνονται οι εξής μετρήσεις, τόσο για τον solar tracker, όσο και για το σταθερό πάνελ :

1. V_{load} (τάση υπό φορτίο)
2. I_{load} (ρεύμα υπό φορτίο)
3. V_{oc} (τάση ανοικτοκυκλώσεως)
4. I_{sc} (ρεύμα βραχυκυκλώσεως)

Παρατήρηση : Για να μην θερμαίνεται άνευ λόγου η αντίσταση ισχύος και κατ' επέκταση και η πλακέτα, συνδέεται με την πηγή (δηλαδή τα φ/β πάνελ) μόνο κατά την διάρκεια των μετρήσεων και αποσυνδέεται μετά μέχρι την επόμενη μέτρηση .

7.3.1 Μετρήσεις ημέρας 1^{ης}

Την πρώτη μέρα γίνεται tracking του ήλιου κάθε μισή ώρα και λαμβάνονται μετρήσεις κάθε 15 λεπτά . Λόγω της σχετικά αργής κίνησης του ήλιου (έχει αναλυθεί εκτενώς στα πρώτα κεφάλαια) είναι η θεώρηση του 'συνεχούς' tracking για την εργασία αυτή . Προφανώς λόγω της συνεχόμενης κίνησης των μοτέρ καταναλώνεται αρκετή από την ενέργεια που κερδίζεται και άρα δεν είναι η καλύτερη λύση , από τις παρατηρήσεις των μετρήσεων όμως θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε μια καλύτερη λύση (από άποψη ενεργειακής εξοικονόμησης).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της πρώτης ημέρας παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα :

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΜΠΤΗ 22/5/08

	TRACKER				ΣΤΑΘΕΡΟ			
ΩΡΑ	V_{load}	I_{load}	I_{sc}	V_{oc}	V_{load}	I_{load}	I_{sc}	V_{oc}
6:30 πμ	5,82	0,25	0,26	19,8	0,9	0,03	0,03	17,9

6:45 πμ	6,95	0,29	0,31	19,8	2,6	0,12	0,13	19,3
7:00 πμ	10,2	0,42	0,44	19,7	3,1	0,12	0,14	19,4
7:15 πμ	12,3	0,48	0,52	19,7	3,9	0,13	0,16	19,4
7:30 πμ	13,6	0,55	0,59	19,6	5,1	0,21	0,24	19,7
7:45 πμ	14,4	0,57	0,55	19,5	6,4	0,25	0,28	19,7
8:00 πμ	15,1	0,58	0,7	19,4	7,7	0,3	0,33	19,7
8:15 πμ	15,3	0,6	0,73	19,3	9,1	0,33	0,38	19,6
8:30 πμ	15,6	0,6	0,77	19,3	10,5	0,39	0,43	19,5
8:45 πμ	15,9	0,61	0,81	19,3	11,4	0,45	0,48	19,5
9:00 πμ	16	0,61	0,82	19,3	12,6	0,5	0,53	19,5
9:15 πμ	16	0,61	0,84	19,2	13,1	0,53	0,56	19,3
9:30 πμ	16,1	0,61	0,83	19,3	13,8	0,55	0,61	19,5
9:45 πμ	16,1	0,61	0,84	19,3	14,4	0,56	0,65	19,3
10:00 πμ	16,1	0,62	0,85	19,2	15	0,58	0,68	19,3
10:15 πμ	16,1	0,62	0,84	19,3	15,6	0,59	0,73	19,4
10:30 πμ	16,1	0,62	0,86	19,2	15,7	0,6	0,78	19,3
10:45 πμ	16,1	0,62	0,86	19,3	15,7	0,6	0,8	19,3
11:00 πμ	16,1	0,61	0,87	19	15,9	0,6	0,83	19,1
11:15 πμ	16,1	0,61	0,87	19	15,9	0,6	0,85	19,1
11:30 πμ	16,1	0,61	0,85	19	16	0,61	0,87	19
11:45 πμ	16,1	0,61	0,87	19	16	0,61	0,87	19
12:00 μμ	16,2	0,6	0,89	18,9	16,1	0,61	0,88	19
12:15 μμ	16,1	0,61	0,88	19	16	0,61	0,87	19
12:30 μμ	16,1	0,61	0,9	19	16,1	0,61	0,88	19
12:45 μμ	16,1	0,62	0,89	19	16	0,61	0,87	19
1:00 μμ	16,1	0,62	0,89	19	16,1	0,61	0,88	19
1:15 μμ	16,1	0,62	0,89	19	16,1	0,61	0,87	19
1:30 μμ	16,1	0,62	0,89	19	16,1	0,61	0,88	19
1:45 μμ	16,2	0,62	0,88	19,1	16,1	0,61	0,88	19
2:00 μμ	16,22	0,62	0,89	19,2	16,1	0,6	0,85	19
2:15 μμ	16,4	0,62	0,9	19,4	16,1	0,61	0,86	19
2:30 μμ	16,5	0,63	0,9	19,4	16,3	0,62	0,86	19,3
2:45 μμ	16,3	0,62	0,88	19,3	16,1	0,62	0,85	19,2
3:00 μμ	16,27	0,62	0,88	19,4	16	0,6	0,75	19,1
3:15 μμ	16,3	0,62	0,87	19,4	15,5	0,58	0,71	19,2
3:30 μμ	16,34	0,61	0,86	19,48	15,1	0,56	0,68	19,4
3:45 μμ	16,33	0,61	0,86	19,48	14,2	0,54	0,64	19,4
4:00 μμ	16,34	0,61	0,86	19,45	13,6	0,51	0,6	19,4
4:15 μμ	16,3	0,61	0,86	19,45	12,6	0,48	0,55	19,35
4:30 μμ	16,3	0,61	0,86	19,43	11,7	0,44	0,49	19,35
4:45 μμ	16,3	0,61	0,86	19,4	10,6	0,4	0,45	19,35
5:00 μμ	16,24	0,61	0,83	19,35	9,3	0,36	0,39	19,4
5:15 μμ	16,1	0,61	0,83	19,35	8,2	0,3	0,33	19,4
5:30 μμ	16,09	0,6	0,82	19,35	7,1	0,26	0,29	19,43
5:45 μμ	16	0,6	0,81	19,3	5,9	0,21	0,24	19,3
6:00 μμ	15,67	0,59	0,79	19,18	4,49	0,16	0,19	19,16
6:15 μμ	15,5	0,58	0,76	19,2	3,4	0,11	0,13	18,9
6:30 μμ	15,22	0,58	0,71	19,5	2,28	0,07	0,08	18,51
6:45 μμ	14,75	0,56	0,67	19,5	1,74	0,05	0,055	17,9
7:00 μμ	14,26	0,55	0,61	19,5	1,23	0,048	0,049	17,6
7:15 μμ	13,42	0,51	0,55	19,5	1,05	0,04	0,042	17,31
7:30 μμ	12,01	0,46	0,49	19,5	0,89	0,035	0,036	17,1
7:45 μμ	10,24	0,39	0,41	19,5	0,8	0,032	0,033	16,88
8:00 μμ	7,72	0,3	0,31	19,5	0,75	0,029	0,03	16,5

8:15 μμ 2,5 0,11 0,11 18,6 0,71 0,025 0,028 16,1

Πίνακας 7.1. Οι μετρήσεις της πρώτης ημέρας

Με δεδομένα τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούμε να υπολογίσουμε την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης που επιτυγχάνεται με την χρήση του solar tracker. Αρχικά θα υπολογίσουμε την ισχύ που παράγει σε κάθε χρονική στιγμή μέτρησης τόσο ο solar tracker, όσο και το σταθερό πάνελ από την σχέση $P_{load} = V_{load} * I_{load}$ και στην συνέχεια βάσει αυτής θα γίνει μια πρώτης τάξης προσέγγιση της παραγόμενης ενέργειας θεωρώντας ότι η ισχύς παραμένει σταθερή από την στιγμή κάποιας μέτρησης μέχρι την επόμενη (η προσέγγιση αυτή δεν έχει σημαντικό σφάλμα λόγω των πυκνών χρονικά μετρήσεων).

Η ενέργεια υπολογίζεται από τον τύπο $P = \frac{E}{t} \Rightarrow E = P * t$, έχει μονάδα μέτρησης την kWh ενώ εδώ λόγω της μικρής ισχύος θα μετρήσουμε σε Wh (βατώρα). Προσαρμόζοντας τον παραπάνω τύπο στον τρόπο μέτρησης που εφαρμόστηκε, παίρνουμε την ενέργεια από τον τύπο :

$$E_{meas} = \sum_{all_meas} (P_{measured} * \frac{15 \text{ min}}{60 \text{ min}}) = \frac{1}{4} * [\sum_{all_meas} (P_{measured})] (*)$$

Τα αποτελέσματα εκτίμησης της ισχύος και ενέργειας ανά μέτρηση καθώς και η συνολική παραγόμενη ενέργεια, τόσο για τον solar tracker όσο και για το σταθερό πάνελ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΜΠΤΗΣ

ΩΠΑ	TRACKER		ΣΤΑΘΕΡΟ	
	Ptracker	Etr_meas	Pstb	Est_meas
6:30 πμ	1,455	0,36375	0,027	0,00675
6:45 πμ	2,0155	0,503875	0,312	0,078
7:00 πμ	4,284	1,071	0,372	0,093
7:15 πμ	5,904	1,476	0,507	0,12675
7:30 πμ	7,48	1,87	1,071	0,26775
7:45 πμ	8,208	2,052	1,6	0,4
8:00 πμ	8,758	2,1895	2,31	0,5775
8:15 πμ	9,18	2,295	3,003	0,75075
8:30 πμ	9,36	2,34	4,095	1,02375
8:45 πμ	9,699	2,42475	5,13	1,2825
9:00 πμ	9,76	2,44	6,3	1,575
9:15 πμ	9,76	2,44	6,943	1,73575
9:30 πμ	9,821	2,45525	7,59	1,8975
9:45 πμ	9,821	2,45525	8,064	2,016
10:00 πμ	9,982	2,4955	8,7	2,175
10:15 πμ	9,982	2,4955	9,204	2,301
10:30 πμ	9,982	2,4955	9,42	2,355
10:45 πμ	9,982	2,4955	9,42	2,355

11:00 πμ	9,821	2,45525	9,54	2,385
11:15 πμ	9,821	2,45525	9,54	2,385
11:30 πμ	9,821	2,45525	9,76	2,44
11:45 πμ	9,821	2,45525	9,76	2,44
12:00 μμ	9,72	2,43	9,821	2,45525
12:15 μμ	9,821	2,45525	9,76	2,44
12:30 μμ	9,821	2,45525	9,821	2,45525
12:45 μμ	9,982	2,4955	9,76	2,44
1:00 μμ	9,982	2,4955	9,821	2,45525
1:15 μμ	9,982	2,4955	9,821	2,45525
1:30 μμ	9,982	2,4955	9,821	2,45525
1:45 μμ	10,044	2,511	9,821	2,45525
2:00 μμ	10,0564	2,5141	9,66	2,415
2:15 μμ	10,168	2,542	9,821	2,45525
2:30 μμ	10,395	2,59875	10,106	2,5265
2:45 μμ	10,106	2,5265	9,982	2,4955
3:00 μμ	10,0874	2,52185	9,6	2,4
3:15 μμ	10,106	2,5265	8,99	2,2475
3:30 μμ	9,9674	2,49185	8,456	2,114
3:45 μμ	9,9613	2,490325	7,668	1,917
4:00 μμ	9,9674	2,49185	6,936	1,734
4:15 μμ	9,943	2,48575	6,048	1,512
4:30 μμ	9,943	2,48575	5,148	1,287
4:45 μμ	9,943	2,48575	4,24	1,06
5:00 μμ	9,9064	2,4766	3,348	0,837
5:15 μμ	9,821	2,45525	2,46	0,615
5:30 μμ	9,654	2,4135	1,846	0,4615
5:45 μμ	9,6	2,4	1,239	0,30975
6:00 μμ	9,2453	2,311325	0,7184	0,1796
6:15 μμ	8,99	2,2475	0,374	0,0935
6:30 μμ	8,8276	2,2069	0,1596	0,0399
6:45 μμ	8,26	2,065	0,087	0,02175
7:00 μμ	7,843	1,96075	0,05904	0,01476
7:15 μμ	6,8442	1,71105	0,042	0,0105
7:30 μμ	5,5246	1,38115	0,03115	0,007788
7:45 μμ	3,9936	0,9984	0,0256	0,0064
8:00 μμ	2,316	0,579	0,02175	0,005438
8:15 μμ	0,275	0,06875	0,01775	0,004438

Etr_tot(Wh)=
121,45

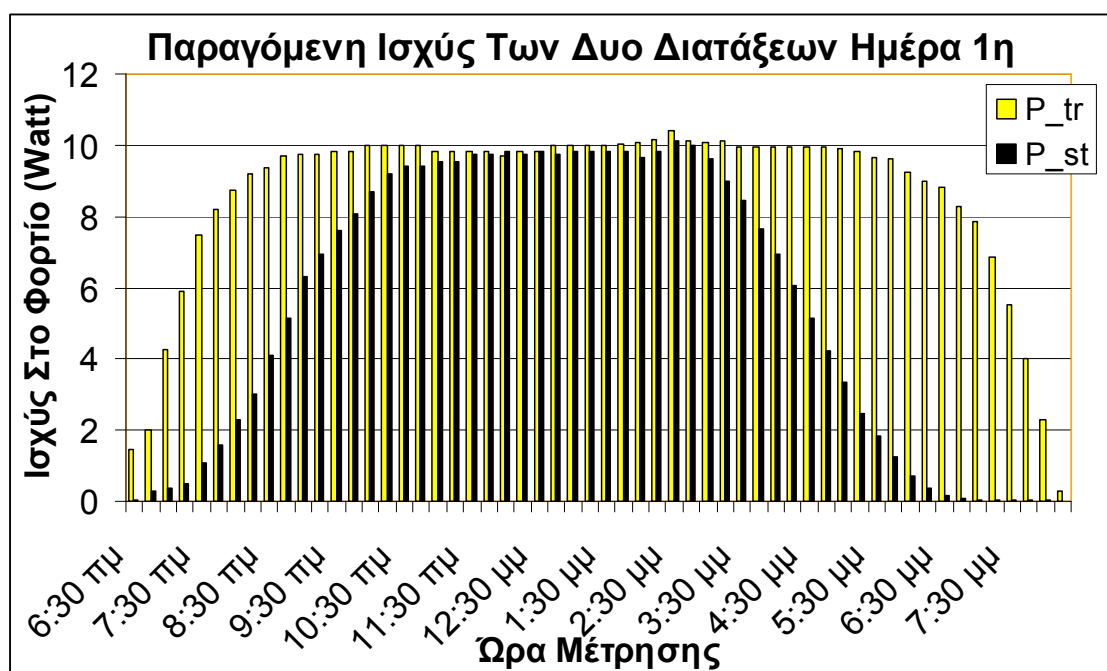
Est_tot(Wh)=
77,05

Πίνακας 7.2. Η επεξεργασία των μετρήσεων της πρώτης ημέρας

Στο πίνακα έχει υπολογιστεί με την βοήθεια του Microsoft Excel η ολική ενέργεια που παράγεται από τον solar tracker και το σταθερό πάνελ κατά την διάρκεια ολόκληρης της ημέρας .Τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά : Η χρήση του solar tracker αύξησε την παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συλλέκτη κατά :

$$\frac{121,45-77,05}{77,05} * 100 \cong 57,62\%$$

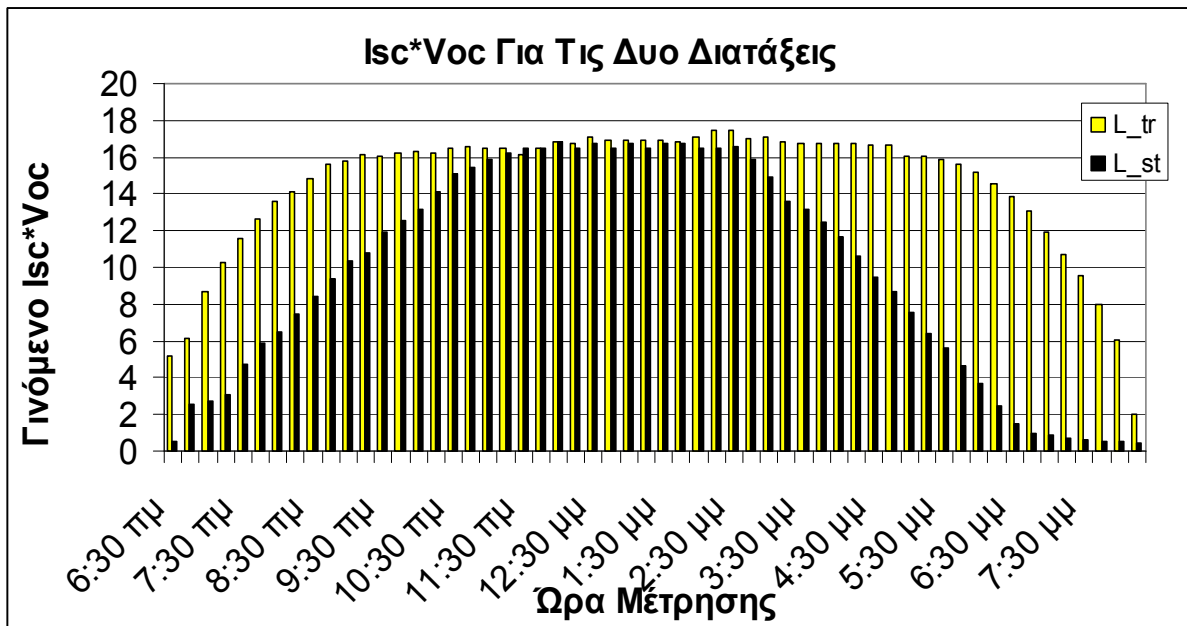
Για να έχουμε πιο σαφή εικόνα του αποτελέσματος αξίζει τον κόπο να δούμε ένα συγκριτικό διάγραμμα της παραγόμενης ενέργειας των δυο συστημάτων συναρτήσει του χρόνου για να παρατηρήσουμε που υπερτερεί η χρήση του solar tracker :



Σχήμα 7.2. Το διάγραμμα ισχύος υπό φορτίο (ημέρα πρώτη)

Τα παραπάνω αποτελέσματα βασίζονται στις μετρήσεις τάσης και ρεύματος φορτίου για τον solar tracker και το σταθερό πάνελ. Αν θέλει κανείς να ανεξαρτητοποιήσει τις μετρήσεις από την τιμή της αντίστασης ισχύος (η επιλογή της οποίας έχει αναλυθεί εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο), μπορεί να υπολογίσει το γινόμενο $V_{oc} * I_{sc}$. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα I-V υπό διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας (βλέπε κεφάλαιο θεωρίας), αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλεί αναλογική αύξηση στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως και μικρότερης τάξης αύξηση στην τάση ανοικτοκυκλώσεως. Το γινόμενο των δυο αυτών μεγεθών ως προς τη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μια συνάρτηση γνησίως αύξουσα .

Συνεπώς αν θέλουμε να ανεξαρτητοποιήσουμε τις μετρήσεις από το φορτίο, το γινόμενο $V_{oc} * I_{sc}$ μπορεί να δώσει μια 'εκτίμηση' της διαφοράς των εντάσεων ακτινοβολίας που δέχονται οι δυο διαφορετικές διατάξεις, solar tracker και σταθερό πάνελ. Το διάγραμμα που ακολουθεί είναι ενδεικτικό :



Σχήμα 7.3. Το διάγραμμα Isc*Voc (ημέρα πρώτη)

Τα δυο προηγούμενα διαγράμματα έχουν παρόμοια μορφή και μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα :

-Από τις 11:30 πμ μέχρι τις 2:30 μμ οι δυο διατάξεις παράγουν την σχεδόν την ίδια ισχύ .

-Από τις 9:30 πμ μέχρι τις 11:30 πμ και από τις 2:30 μμ μέχρι τις 4:30 μμ το σταθερό πάνελ παρουσιάζει σημαντική και ταχύτατη μείωση της παραγωγής, ενώ ο solar tracker εξακολουθεί σχεδόν αμείωτη την παραγωγή του .

-Από τις 6:30 πμ μέχρι τις 9:30 πμ και από τις 4:30 μμ μέχρι τις 8:15 μμ το σταθερό πάνελ παράγει μάλλον ελάχιστη ενέργεια (κάτω από το 50%) ενώ παρουσιάζεται και μείωση της παραγωγής του solar tracker, ιδίως στο ξημέρωμα και το σούρουπο.

-Είναι εμφανές ότι τις μεσημεριανές ώρες δεν χρειάζεται τόσο πυκνή χρονικά παρακολούθηση του ήλιου .

7.3.2 Βοηθητικές Μετρήσεις/Εναλλακτικό tracking

Ήταν αναμενόμενο εξ αρχής ότι η παρακολούθηση του ήλιου κάθε μισή ώρα (ουσιαστικά συνεχής παρακολούθηση) είναι υπερβολική, αν λάβει κανείς υπ' όψη την αφενός την αργή κίνηση του ήλιου (έχει αναλυθεί στην θεωρία), και αφετέρου την μικρή ευαισθησία του φ/β πάνελ ως προς την γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας σε αυτό. Τις δυο επόμενες ημέρες έγιναν δοκιμές με διαφορετικά χρονικά διαστήματα ανάμεσα σε διαδοχικά tracking καθ' όλη την εξέλιξη της ημέρας προσπαθώντας να ικανοποιήσουμε τα βασικά κριτήρια που είναι :

- Για δεδομένη παραγωγή ενέργειας, όσο το δυνατόν λιγότερη λειτουργία του solar tracker συνεπάγεται μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από τα μοτέρ και το κύκλωμα της πλακέτας .
- Λιγότερες κινήσεις σημαίνουν και λιγότερες φθορές στα κινούμενα μηχανικά μέρη της κατασκευής (σε βάθος χρόνου βέβαια) .
- Η αύξηση των χρονικών διαστημάτων ανίχνευσης του ήλιου δεν πρέπει να επιβαρύνει σε καμία περίπτωση αισθητά την ενδεχόμενη απώλεια παραγωγής ενέργειας από την μη επαρκή παρακολούθηση

Μετά από αρκετές δοκιμές με διαφορετικά διαστήματα ανίχνευσης καταλήγουμε στην καλύτερης δυνατή ικανοποίηση των κριτηρίων με :

- Εκτέλεση του αλγορίθμου tracking κάθε μιάμιση ώρα για το πρωί και το απόγευμα που λόγω μειωμένης έντασης της ακτινοβολίας η διάταξη είναι πιο ευαίσθητη στην γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας .
- Για τις μεσημεριανές ώρες tracking κάθε δυο ώρες, γιατί λόγω της μεγάλης έντασης της ακτινοβολίας δεν παρατηρούνται πτώσεις της παραγόμενης ισχύος ενδιάμεσα .

Παρατήρηση : Για να είμαστε ακριβής, το βέλτιστο tracking μπορεί να βρεθεί κάνοντας και πραγματικό υπολογισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας για την κίνηση. Όμως οι μετρήσεις στο εργαστήριο έδειξαν μικρή κατανάλωση, κάνοντας το τρίτο κριτήριο πιο σημαντικό για τα βέλτιστα διαστήματα. Μετά την παρουσίαση των μετρήσεων της τελευταίας ημέρας ακολουθεί και ο υπολογισμός της καταναλισκόμενης ενέργειας για την κίνηση του solar tracker .

7.3.3 Μετρήσεις ημέρας 2^{ης}

Με τις παρατηρήσεις της προηγούμενης παραγράφου για το βέλτιστο tracking υπό αυτές τις συνθήκες παίρνουμε τις παρακάτω μετρήσεις :

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΥΡΙΑΚΗ 25/5/08

ΩΡΑ	TRACKER				ΣΤΑΘΕΡΟ			
	Vload	Iload	Isc	Voc	Vload	Iload	Isc	Voc
6:30 πμ	5,78	0,24	0,25	19,98	0,9	0,03	0,03	17,9
6:45 πμ	6,8	0,28	0,3	19,8	1,6	0,07	0,08	18,7
7:00 πμ	10,6	0,4	0,44	19,7	2,6	0,12	0,13	19,4
7:15 πμ	12,2	0,48	0,52	19,7	3,9	0,13	0,17	19,7
7:30 πμ	13,6	0,53	0,59	19,6	5,1	0,21	0,22	19,7

7:45 πμ	14,4	0,56	0,66	19,6	6,5	0,25	0,26	19,7
8:00 πμ	15	0,58	0,69	19,4	7,8	0,29	0,32	19,7
8:15 πμ	15,3	0,59	0,73	19,3	9	0,33	0,38	19,6
8:30 πμ	15,55	0,59	0,76	19,3	10,1	0,37	0,41	19,5
8:45 πμ	15,6	0,6	0,77	19,3	11,4	0,43	0,48	19,5
9:00 πμ	16	0,61	0,81	19,3	12,5	0,49	0,53	19,4
9:15 πμ	16,1	0,61	0,82	19,3	13,4	0,52	0,56	19,4
9:30 πμ	16,1	0,61	0,82	19,3	14	0,54	0,62	19,3
9:45 πμ	16,1	0,61	0,82	19,3	14,5	0,56	0,65	19,3
10:00 πμ	16,1	0,61	0,81	19,3	14,8	0,58	0,68	19,3
10:15 πμ	16	0,61	0,81	19,3	15,23	0,58	0,7	19,15
10:30 πμ	15,85	0,61	0,79	19,3	15,43	0,59	0,73	19,12
10:45 πμ	15,8	0,6	0,77	19,25	15,5	0,6	0,75	19,1
11:00 πμ	16,21	0,61	0,86	19,16	15,67	0,6	0,79	19,07
11:15 πμ	16,25	0,62	0,86	19,2	16	0,6	0,82	19,1
11:30 πμ	16,3	0,62	0,88	19,28	16,06	0,61	0,86	19,12
11:45 πμ	16,2	0,62	0,86	19,2	16	0,61	0,86	19,15
12:00 μμ	16,2	0,62	0,84	19,3	16	0,6	0,84	19,2
12:15 μμ	16,2	0,62	0,85	19,25	16	0,61	0,86	19,1
12:30 μμ	16,15	0,62	0,84	19,3	15,95	0,6	0,86	19,2
12:45 μμ	16,1	0,61	0,84	19,24	16	0,6	0,85	19,1
1:00 μμ	16,35	0,63	0,87	19,44	16,19	0,61	0,87	19,07
1:15 μμ	16,1	0,62	0,85	19,2	16	0,6	0,85	19,1
1:30 μμ	16,2	0,62	0,86	19,2	16	0,6	0,86	19,15
1:45 μμ	16,2	0,62	0,86	19,2	16	0,6	0,86	19,2
2:00 μμ	16,22	0,62	0,87	19,18	15,97	0,6	0,85	19
2:15 μμ	16,2	0,61	0,86	19,3	16	0,61	0,86	19,1
2:30 μμ	16,6	0,63	0,86	19,47	16	0,61	0,84	19,3
2:45 μμ	16,3	0,61	0,85	19,27	15,9	0,6	0,82	19,14
3:00 μμ	16,47	0,63	0,89	19,37	15,71	0,59	0,79	19,05
3:15 μμ	16,38	0,63	0,89	19,3	15,6	0,59	0,76	19,2
3:30 μμ	16,6	0,64	0,9	19,38	15,5	0,59	0,73	19,6
3:45 μμ	16,47	0,63	0,89	19,4	15,3	0,57	0,69	19,4
4:00 μμ	16,27	0,62	0,89	19,14	14,4	0,53	0,66	19,3
4:15 μμ	16,1	0,61	0,86	19,3	13,4	0,51	0,58	19,2
4:30 μμ	16	0,6	0,82	19,35	12,01	0,46	0,5	19,4
4:45 μμ	15,9	0,59	0,77	19,34	11,2	0,41	0,44	19,3
5:00 μμ	16,17	0,62	0,8	19,55	9,9	0,37	0,39	19,3
5:15 μμ	16,1	0,61	0,8	19,3	8,8	0,34	0,35	19,3
5:30 μμ	15,81	0,6	0,77	19,39	7,76	0,3	0,31	19,42
5:45 μμ	15,6	0,59	0,75	19,32	5,95	0,24	0,25	19,2
6:00 μμ	15,39	0,59	0,7	19,36	4,92	0,18	0,19	19,1
6:15 μμ	14,99	0,58	0,66	19,58	4,82	0,15	0,16	18,9
6:30 μμ	15,15	0,59	0,68	19,66	2,91	0,11	0,11	18,7
6:45 μμ	14,5	0,57	0,61	19,6	1,95	0,079	0,08	18,2
7:00 μμ	13,53	0,52	0,57	19,61	1,33	0,052	0,053	17,62
7:15 μμ	12,41	0,48	0,51	19,6	1,16	0,045	0,046	17,5
7:30 μμ	10,54	0,42	0,45	19,6	1,05	0,041	0,0415	17,3
7:45 μμ	9,12	0,33	0,35	19,5	0,9	0,035	0,036	16,9
8:00 μμ	7,72	0,3	0,31	19,5	0,75	0,029	0,03	16,5
8:15 μμ	2,62	0,1	0,036	16,4	0,59	0,021	0,021	16

Πίνακας 7.3. Οι μετρήσεις της δεύτερης ημέρας

Με την ίδια μέθοδο που αναλύθηκε και για τις μετρήσεις της πρώτης ημέρας, ακολουθούν οι εκτιμήσεις για την ισχύ και την ενέργεια που παράγουν οι δυο διατάξεις :

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΥΡΙΑΚΗΣ

ΩΡΑ	TRACKER		ΣΤΑΘΕΡΟ	
	Ptracker	Etr_meas	Pstb	Est_meas
6:30 πμ	1,3872	0,3468	0,027	0,00675
6:45 πμ	1,904	0,476	0,112	0,028
7:00 πμ	4,24	1,06	0,312	0,078
7:15 πμ	5,856	1,464	0,507	0,12675
7:30 πμ	7,208	1,802	1,071	0,26775
7:45 πμ	8,064	2,016	1,625	0,40625
8:00 πμ	8,7	2,175	2,262	0,5655
8:15 πμ	9,027	2,25675	2,97	0,7425
8:30 πμ	9,1745	2,293625	3,737	0,93425
8:45 πμ	9,36	2,34	4,902	1,2255
9:00 πμ	9,76	2,44	6,125	1,53125
9:15 πμ	9,821	2,45525	6,968	1,742
9:30 πμ	9,821	2,45525	7,56	1,89
9:45 πμ	9,821	2,45525	8,12	2,03
10:00 πμ	9,821	2,45525	8,584	2,146
10:15 πμ	9,76	2,44	8,8334	2,20835
10:30 πμ	9,6685	2,417125	9,1037	2,275925
10:45 πμ	9,48	2,37	9,3	2,325
11:00 πμ	9,8881	2,472025	9,402	2,3505
11:15 πμ	10,075	2,51875	9,6	2,4
11:30 πμ	10,106	2,5265	9,7966	2,44915
11:45 πμ	10,044	2,511	9,76	2,44
12:00 μμ	10,044	2,511	9,6	2,4
12:15 μμ	10,044	2,511	9,76	2,44
12:30 μμ	10,013	2,50325	9,57	2,3925
12:45 μμ	9,821	2,45525	9,6	2,4
1:00 μμ	10,3005	2,575125	9,8759	2,468975
1:15 μμ	9,982	2,4955	9,6	2,4
1:30 μμ	10,044	2,511	9,6	2,4
1:45 μμ	10,044	2,511	9,6	2,4
2:00 μμ	10,0564	2,5141	9,582	2,3955
2:15 μμ	9,882	2,4705	9,76	2,44
2:30 μμ	10,458	2,6145	9,76	2,44
2:45 μμ	9,943	2,48575	9,54	2,385
3:00 μμ	10,3761	2,594025	9,2689	2,317225
3:15 μμ	10,3194	2,57985	9,204	2,301
3:30 μμ	10,624	2,656	9,145	2,28625
3:45 μμ	10,3761	2,594025	8,721	2,18025
4:00 μμ	10,0874	2,52185	7,632	1,908
4:15 μμ	9,821	2,45525	6,834	1,7085
4:30 μμ	9,6	2,4	5,5246	1,38115
4:45 μμ	9,381	2,34525	4,592	1,148
5:00 μμ	10,0254	2,50635	3,663	0,91575

5:15 μμ	9,821	2,45525	2,992	0,748
5:30 μμ	9,486	2,3715	2,328	0,582
5:45 μμ	9,204	2,301	1,428	0,357
6:00 μμ	9,0801	2,270025	0,8856	0,2214
6:15 μμ	8,6942	2,17355	0,723	0,18075
6:30 μμ	8,9385	2,234625	0,3201	0,080025
6:45 μμ	8,265	2,06625	0,15405	0,038513
7:00 μμ	7,0356	1,7589	0,06916	0,01729
7:15 μμ	5,9568	1,4892	0,0522	0,01305
7:30 μμ	4,4268	1,1067	0,04305	0,010763
7:45 μμ	3,0096	0,7524	0,0315	0,007875
8:00 μμ	2,316	0,579	0,02175	0,005438
8:15 μμ	0,262	0,0655	0,01239	0,003098

Etr_tot(Wh)=
120,18

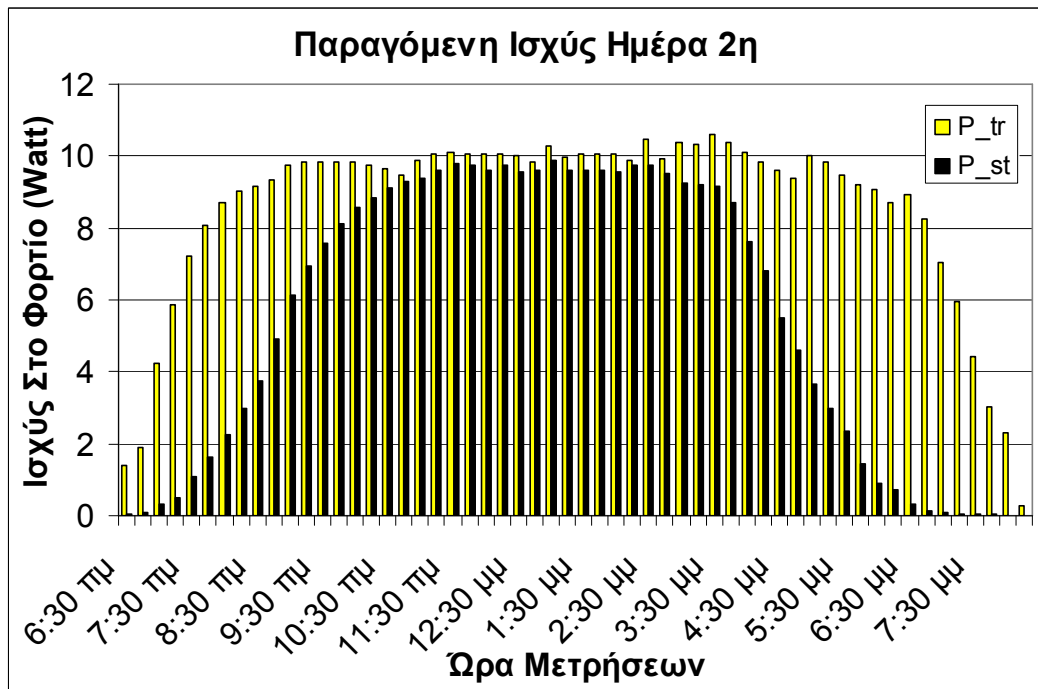
Est_tot(Wh)=
77,54

Πίνακας 7.4. Η επεξεργασία των μετρήσεων της δεύτερης ημέρας

Παρατηρούμε ότι η χρήση του solar tracker αύξησε την παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συλλέκτη κατά

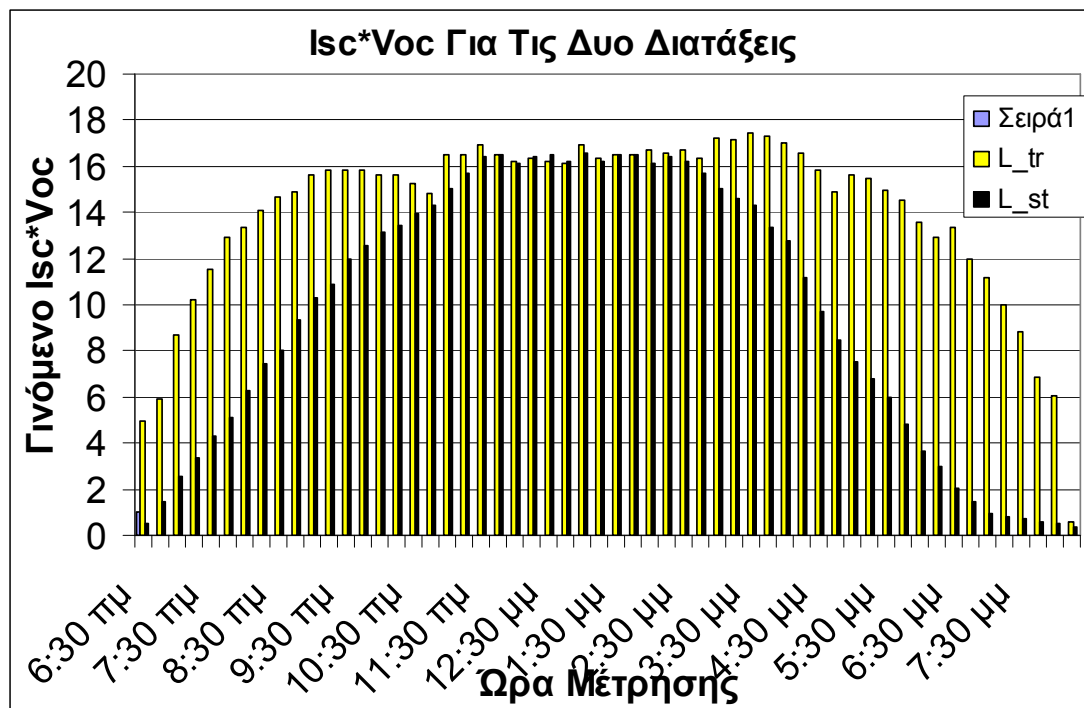
$$\frac{120,18-77,54}{77,54} * 100 \cong 54,99\%$$

Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω σε διάγραμμα παραγόμενης ενέργειας στο φορτίο συναρτήσει του χρόνου :



Σχήμα 7.4. Το διάγραμμα ισχύος υπό φορτίο (δεύτερη ημέρα)

Στην συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα $V_{oc} * I_{sc}$ για τις δυο διατάξεις όπως και στα αποτελέσματα της πρώτης ημέρας μετρήσεων για να δώσει μια εκτίμηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες :



Σχήμα 7.5. Το διάγραμμα $I_{sc} * V_{oc}$ (ημέρα δεύτερη)

Από την επεξεργασία των μετρήσεων υπό πραγματικές συνθήκες ακτινοβολίας προέκυψε :

1. Αύξηση 57,62 % στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο επιλεγμένο φορτίο (η επιλογή του οποίου έχει αναλυθεί στην παράγραφο 2.4) για tracking κάθε μισή ώρα
2. Αύξηση 54,99 % στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για το μεταβλητό tracking της δεύτερης ημέρας μετρήσεων (κάθε 1,5 και 2 ώρες)
3. Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν παρατηρώντας τα διαγράμματα $V_{oc} * I_{sc}$ ως προς τον χρόνο για τις δυο ημέρες, ανεξαρτητοποιώντας δηλαδή τα αποτελέσματα από το φορτίο .

Για να έχουμε δυνατότητα ισολογισμού της επιπλέον ενέργειας που επιτυγχάνεται με την χρήση του solar tracker, θα πρέπει να γίνει μια εκτίμηση της ενέργειας που καταναλώνει για την λειτουργία του. Ο υπολογισμός της κατανάλωσης ακολουθεί στην επόμενη παράγραφο.

7.4 Η κατανάλωση ενέργειας του solar tracker

Η κατανάλωση ενέργειας στην διάταξη που χρησιμοποιεί τον solar tracker μπορεί να αναλυθεί στις εξής υποκατηγορίες :

1. Η κατανάλωση των μοτέρ: Ο αλγόριθμος προβλέπει μια κίνηση κάθε φορά, οπότε μια αρχική εκτίμηση της ενέργειας που καταναλώνεται προκύπτει από τον τύπο $E_{motor} = P * t_{ac} = V * I * t_{ac}$ (προσοχή βλέπε υποσημείωση (*)), όπου t_{ac} είναι ο χρόνος που ένα ρελέ κίνησης είναι ενεργοποιημένο

2. Η κατανάλωση της πλακέτας ελέγχου των μοτέρ : Η κατανάλωση αυτή πρέπει να αναλυθεί περαιτέρω επειδή η ενεργοποίηση ενός ρελέ επιφέρει σημαντική μεταβολή στην κατανάλωση 'ηρεμίας'. Έτσι αναλύουμε σε :

- Κατανάλωση υπό συνθήκη διέγερσης ενός ρελέ (συνθήκη κίνησης): Μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$E_{relay_activ} = V_{source} * I_{source} * t_{ac}$$

- Κατανάλωση υπό συνθήκη ηρεμίας των ρελέ (συνθήκη ακινησίας-εν αναμονή κίνησης) : Υπολογίζεται από την εξίσωση που ακολουθεί $E_{relay_deact} = V_{source} * I_{source} * (t_{comp} - t_{ac})$ όπου t_{comp} είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης του αλγορίθμου .

- Κατανάλωση σε sleep mode : Μόλις ολοκληρωθεί ο αλγόριθμος και μέχρι να επανεκτελεστεί πατώντας το reset button μπορεί να τεθεί ο μικροελεγκτής σε αυτή την κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας. Η κατανάλωση είναι αμελητέα και δεν θα υπολογιστεί .

Υποσημείωση () : Ως γνωστόν η ισχύς που καταναλώνει ένας κινητήρας δεν ισοδυναμεί με το γινόμενο της τάσης με το ρεύμα καθώς παρατηρείται αυξημένο ρεύμα στην εκκίνηση του (ρεύμα εκκίνησης). Το μοτέρ που χρησιμοποιείται όμως έχει σύστημα εκκίνησης για να περιορίζει το υψηλό αυτό ρεύμα , όπως παρατηρήθηκε και στις δοκιμές στο εργαστήριο. Συνεπώς μια προσέγγιση με χρήση του ρεύματος φορτίου κρίνεται ικανοποιητική (είναι η worst case) αφού δεν μας ενδιαφέρει παρά μονάχα μια εκτίμηση της τάξης μεγέθους της κατανάλωσης του solar tracker .*

Κατά την λήψη των μετρήσεων που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο έγινε παράλληλα και μέτρηση των κινήσεων του solar tracker με ρύθμιση 4 αντιστροφών (με MS και MSU να έχουν τιμή 1000, ORIO και ORIOU την τιμή 230). Έτσι εκτελείται αλληλουχία κινήσεων με χρόνο t_{ac} διαδοχικά 1sec, 0.5sec, 0.33sec, 0.25sec και 0.2sec, ο αριθμός των οποίων ακολουθεί για κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου tracking και για τις δυο ημέρες των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα ακολουθούν στον παρακάτω πίνακα και για τις δυο ημέρες :

ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΜΠΤΗ 22/5/08

tracking no	ΚΙΝΗΣΗ WEST/EAST					ΚΙΝΗΣΗ UP/DOWN				
	ΒΗΜΑΤΑ					ΒΗΜΑΤΑ				
	t=1sec	t=0,5sec	t=0,33sec	t=0,25sec	t=0,2sec	t=1sec	t=0,5sec	t=0,33sec	t=0,25sec	t=0,2sec
1	6	6	7	4	4	4	4	5	6	5
2	8	7	6	5	5	3	5	5	7	4
3	8	5	7	5	5	4	5	6	5	5
4	7	5	5	4	3	4	4	5	6	4
5	7	6	7	5	5	3	5	6	5	5
6	6	8	7	6	5	3	5	5	7	6
7	6	6	8	5	3	4	4	4	5	5
8	8	7	6	5	5	4	3	5	4	5
9	8	7	7	4	4	3	5	4	5	6
10	6	8	5	5	4	3	5	5	6	5
11	6	8	7	5	5	4	4	6	5	5
12	6	6	6	4	4	4	5	5	5	4
13	7	7	5	4	3	4	5	5	5	4
14	6	8	8	5	5	3	3	5	6	4
15	6	7	7	5	5	3	4	6	7	5
16	6	6	7	7	4	3	4	5	5	5
17	8	7	8	4	4	3	4	5	5	5
18	7	6	6	5	5	3	5	4	5	6
19	7	5	7	6	3	4	4	5	6	5
20	6	7	7	4	5	4	5	6	6	4
21	8	7	6	6	6	4	5	5	4	5
22	8	7	7	5	4	4	5	4	5	5
23	7	7	6	5	4	4	5	5	4	6
24	7	6	5	6	5	4	4	5	5	7
25	7	5	8	5	4	4	4	4	6	6
26	8	8	7	6	3	3	4	5	6	5
27	8	6	7	5	5	3	4	5	5	5
	188	89	59,07	33,75	23,4	96	59,5	44,55	36,5	27,2

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΥΡΙΑΚΗ 25/5/08

tracking no	ΚΙΝΗΣΗ WEST/EAST					ΚΙΝΗΣΗ UP/DOWN				
	t=1sec	t=0,5sec	t=0,33sec	t=0,25sec	t=0,2sec	t=1sec	t=0,5sec	t=0,33sec	t=0,25sec	t=0,2sec
1	8	7	8	4	4	5	4	7	6	5
2	9	6	8	5	5	4	4	5	7	4
3	10	7	7	5	4	4	5	6	5	5
4	8	7	6	4	3	5	4	5	6	4
5	9	6	7	5	5	4	5	6	5	5
6	7	5	8	6	5	5	4	5	7	6
7	10	6	8	5	3	5	4	7	5	5
8	9	7	6	5	5	4	3	5	4	5
9	8	6	7	4	4	4	5	6	5	6
	78	28,5	21,45	10,75	7,6	40	19	17,16	12,5	9

Πίνακας 7.5. Το πλήθος των μετρημένων κινήσεων του solar tracker

Από τις παραπάνω μετρήσεις που ελήφθησαν μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος t_{ac} για τις δυο ημέρες. Επίσης κατά την διάρκεια των μετρήσεων διαπιστώθηκε ότι για την εκτέλεση του αλγορίθμου είναι αρκετά δυο λεπτά, τόσο για tracking κάθε μισή ώρα, όσο και για tracking κάθε μιάμιση ώρα. Συνεπώς θέτουμε $t_{comp} = 2 \text{ min} = 120 \text{ sec}$ και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούμε να υπολογίσουμε την κατανάλωση του solar tracker. Πριν όμως μετρήθηκαν στο εργαστήριο τα χαρακτηριστικά των ισχύων :

-Καταναλισκόμενη ισχύς στην πλακέτα με τα ρελέ σε ηρεμία :

$$P_{relay_deactiv} = 64,575mW (7,5Vdc * 8,61mA)$$

-Καταναλισκόμενη ισχύς στην πλακέτα με ένα ρελέ διεγερμένο :

$$P_{relay_activ} = 270mW (7,5Vdc * 36mA)$$

-Καταναλισκόμενη ισχύς στο μοτέρ με κίνηση υπό φορτίο :

$$P_{motor} = 3,85W (220Vac * 17,5mA)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις και τους χρόνους κίνησης και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις των ενεργειών πιο πάνω καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα :

ΠΡΩΤΗ ΗΜΕΡΑ

tac(sec)=	656,97	Κατανάλωση μοτέρ (Wh) =	0,702592917
tcomp(sec)=	3240	Κατανάλωση Ηρεμίας Pcb (Wh)=	0,046
tcomp-tac(sec)=	2583,03	Κατανάλωση Διηγ.Ρελέ Pcb (Wh)=	0,049
Συνολική Κατανάλωση (Wh) =			0,797592917

ΔΕΥΤΕΡΗ ΗΜΕΡΑ

tac(sec)=	243,96	Κατανάλωση μοτέρ (Wh) =	0,260901667
tcomp(sec)=	1080	Κατανάλωση Ηρεμίας Pcb (Wh)=	0,014996
tcomp-tac(sec)=	836,04	Κατανάλωση Διηγ.Ρελέ Pcb (Wh)=	0,018297
Συνολική Κατανάλωση (Wh) =			0,294194667

Πίνακας 7.6. Ο Υπολογισμός της συνολικής κατανάλωσης του solar tracker

Έχοντας υπολογίσει και την κατανάλωση ενέργειας του solar tracker για τις μετρήσεις των δυο ημερών, είμαστε τώρα σε θέση να κάνουμε τον ισολογισμό των ενεργειών που απαιτείται για να έχουμε την πραγματική εικόνα της απόδοσης της κατασκευής, όπως ακολουθεί στον παρακάτω πίνακα :

ΤΕΛΙΚΟΣ ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ

(ΤΙΜΕΣ ΣΕ Wh)	ΜΕΡΑ 1Η	ΜΕΡΑ 2Η
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛ.ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ TRACKER	121,449	120,18
ΣΥΝ. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ TRACKER	0,798	0,294
ΚΑΘΑΡΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ ΤΟΝ TRACKER	120,651	119,886
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛ.ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΣΤΑΘΕΡΟ ΠΑΝΕΛ	77,049	77,543
ΚΕΡΔΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ TRACKER	43,602	42,343
ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (%)	56,58996223	54,60583

Πίνακας 7.7. Ο ισολογισμός των ενεργειών των δυο διατάξεων για τις δυο ημέρες

Παρατηρούμε από τις τιμές του πίνακα ότι η χρήση του solar tracker επιτυγχάνει αύξηση της παραγόμενης ενέργειας κατά 56,59% με tracking κάθε μισή ώρα και 54,6% για tracking κάθε μιάμιση (και δυο) ώρα. Τα συμπεράσματα και οι δυνατότητες περαιτέρω ανάλυσης και βελτίωσης ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο .

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα-Προτάσεις Για βελτίωση

8.1 Συμπεράσματα

Έχοντας μελετήσει, κατασκευάσει, προγραμματίσει τον solar tracker και λάβει συγκριτικές μετρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων προηγήθηκαν, είμαστε σε θέση να εξάγουμε τα συμπεράσματά μας για την χρήση μιας διάταξης παρακολούθησης της θέσης του ήλιου για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα :

- Η χρήση του solar tracker προσφέρει μια σημαντική αύξηση της παραγόμενης ενέργειας κατά 56,59% για tracking κάθε μισή ώρα και 54,6% για tracking κάθε μιάμιση ώρα. Η αύξηση αυτή είναι απαλλαγμένη από την κατανάλωση ενέργειας για την λειτουργία της διάταξης.
- Η αύξηση της ενέργειας είναι μόλις 2% μικρότερη για tracking κάθε μιάμιση ώρα σε σχέση με το tracking κάθε μισή ώρα. Από την άλλη όμως μειώνουμε την εκτέλεση της διαδικασίας εύρεσης του ήλιου στο 1/3 (από 27 εκτελέσεις μόνο 9). Αυτό σημαίνει λιγότερες μηχανικές καταπονήσεις της διάταξης, λιγότερες φθορές στον χρόνο και μειωμένες πιθανότητες σφαλμάτων κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Συνεπώς είναι προτιμητέα η εκτέλεση της διαδικασίας με τον τρόπο της δεύτερης ημέρας λήψης μετρήσεων (βέβαια όπως έχει προαναφερθεί έγιναν αρκετές δοκιμές για να βρεθούν τα βέλτιστα χρονικά διαστήματα).
- Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας είναι αδιαμφισβήτητη. Όμως αξίζει τον κόπο από οικονομικής πλευράς η χρήση του solar tracker ; Αυτό μπορεί να απαντηθεί εκτιμώντας το κόστος κατασκευής του (**). Αν η αύξηση του συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος με solar tracker υπερβαίνει το ποσοστό της προσαύξησης της παραγόμενης ενέργειας που επιφέρει, τότε δεν είναι οικονομικά συμφέρον. Για παράδειγμα αν χωρίς tracker πληρώνουμε 100€ για τον φ/β συλλέκτη και την στήριξη του, και με τον tracker το κόστος ανέρχεται στα 170€ τότε είναι οικονομικά ασύμφορο. Η αύξηση του κόστους θα πρέπει να είναι μικρότερη από 54,6% για να γίνει

απόσβεση του έξτρα κεφαλαίου από την έξτρα ενέργεια που παράγεται (το 54,6% αναφέρεται στις μετρήσεις θεωρώντας ότι είναι η 'μέση' αύξηση της παραγόμενης ενέργειας για ολόκληρο το έτος).

- Όπως και να έχει από την σκοπιά των οικονομικών, η χρήση του solar tracker είναι πολύ χρήσιμη σε εγκαταστάσεις με περιορισμένο εμβαδόν και ανάγκη για όσο το δυνατόν υψηλότερη απόδοση. Τέτοιες μπορεί να είναι αυτόνομες βιοτεχνίες με φ/β συλλέκτες στην ταράτσα χωρίς αρκετούς περιβάλλοντες χώρους κ.τ.λ.

** Παρατήρηση : Η τεχνοοικονομική μελέτη δεν ήταν δυνατό να γίνει καθώς η αγορά των υλικών έγινε χωρίς ιδιαίτερη αναζήτηση των προμηθευτών. Επίσης δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν ικανοποιητικές εκπτώσεις χωρίς μαζικές παραγγελίες και ειδικές συμφωνίες μεταξύ επαγγελματιών. Άλλωστε δεν ήταν σκοπός της εργασίας η οικονομική διάσταση της κατασκευής. Η αγορά των υλικών έγινε με αποκλειστικά κριτήρια την διαθεσιμότητα και την ταχύτητα παράδοσης .

8.2 Προτάσεις για βελτίωση

Οι προτάσεις για βελτίωση της κατασκευής είναι αρκετές καθώς πολλές από τις παραμέτρους είναι μεταβαλλόμενες από εποχή σε εποχή και λόγω περιορισμένου χρόνου δεν είναι δυνατή η μελέτη τους. Ακολουθούν μερικές βασικές προτάσεις βελτίωσης :

-Για μια πλήρη εικόνα της απόδοσης του solar tracker θα πρέπει να γίνουν μετρήσεις για όλη την διάρκεια του έτους. Από άλλες υλοποιήσεις αντίστοιχων διατάξεων παρακολούθησης του ήλιου προκύπτει σημαντικότερη αύξηση της παραγόμενης ενέργειας της ημέρες με ηλιοφάνεια των χειμερινών μηνών. Αυτό μπορεί να εξεταστεί και από αυτήν την διάταξη, απαραίτητη προϋπόθεση όμως είναι η προσαρμογή της κατασκευής για επικοινωνία μέσω σειριακής θύρας με Η/Υ για συνεχή αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων των μετρήσεων. Έχοντας δεδομένα για ένα ολόκληρο έτος, μπορούμε να έχουμε ολοκληρωμένη άποψη για την απόδοση της διάταξης και κατ' επέκταση να κάνουμε μια ακριβή μελέτη για το κόστος, την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας και την απόσβεση του κόστους που επιφέρει η χρήση του solar tracker .

-Σημαντική βελτίωση στο κόστος της κατασκευής θα επιτευχθεί με πιο λεπτομερή αναζήτηση των υλικών κατασκευής. Το ακριβότερο στοιχείο είναι το μοτέρ κίνησης, η επιλογή του οποίου έγινε βάσει της διαθεσιμότητας του στην ελληνική αγορά. Αξίζει τον κόπο να βρεθεί ή να κατασκευαστεί καλύτερης ποιότητας μοτέρ (λιγότερες ταλαντώσεις) και μικρότερου κόστους. Τα παραπάνω βέβαια αναφέρονται σε ενδεχόμενη κατασκευή για εμπορικούς σκοπούς και όχι για μια πειραματική διάταξη όπως αυτή της εργασίας .

-Οι μετρήσεις που αναφέρονται στην εργασία ελήφθησαν υπό ιδανικές καιρικές συνθήκες (πλήρης ηλιοφάνεια). Επίσης ο αλγόριθμος αναζήτησης της θέσης του ήλιου συγκλίνει στην θέση μέγιστης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας υπό την προϋπόθεση της κυρτότητας του προβλήματος των δυο μεταβλητών. Σε περίπτωση παρουσίας νεφών στην νοητή ευθεία που περνά από τον φ/β συλλέκτη και τον ήλιο, δεν είναι βέβαιο ότι ο solar tracker θα ανιχνεύσει σωστά την θέση του ήλιου. Εξαρτάται από την πυκνότητα της νέφωσης και την διασπορά της στον ουρανό. Τα δυο ακραία παραδείγματα που ακολουθούν δείχνουν την αβεβαιότητα: 1) Αραιή νέφωση ομοιόμορφα κατανεμημένη σε μεγάλο τμήμα του ουρανού γύρω από τον ήλιο δεν θα εμποδίσει την εύρεση της θέσης του ήλιου από τον tracker. 2) Πυκνό και μικρό σύννεφο που καλύπτει τον ήλιο με τον υπόλοιπο ουρανό καθαρό θα προκαλέσει αποτυχία του tracking ή καλύτερα εύρεση της θέσης μέγιστης ακτινοβολίας για την συγκεκριμένη χρονική στιγμή που δεν είναι η θέση του ήλιου. Ο αλγόριθμος μπορεί να προσαρμοστεί με μια συνθήκη μη εκτέλεσης, εάν η λαμβανόμενη ισχύς παρουσιάσει απότομη πτώση (λόγω παρουσίας σύννεφου), ή ακόμα και να εκτιμά την θέση του ήλιου κάνοντας μια προσέγγιση της θέσης του ήλιου από την αναμενόμενη συνάρτηση της έντασης ακτινοβολίας ως προς την θέση βάσει της κυρτότητας του προβλήματος (εκμάθηση του αλγορίθμου). Το θέμα αυτό χρίζει περεταίρω μελέτης.

-Αν και έχει αναφερθεί στην παράγραφο υπολογισμού της κατανάλωσης του tracker, εντούτοις δεν υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα sleep mode. Πρόκειται για μια κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας του μικροελεγκτή αφού εκτελεστεί ο αλγόριθμος και μέχρι την επόμενη εκτέλεση του πατώντας το πλήκτρο επανεκκίνησης. Περιορίζουμε με αυτό τον τρόπο την κατανάλωση της ενέργειας από τον tracker στο ελάχιστο .

-Μια σημαντική παράμετρος που αναλύθηκε με τον αλγόριθμο είναι η ευαισθησία του φωτοβολταϊκού πάνελ ως προς την γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια του, συναρτήσει όμως και της έντασης της ακτινοβολίας . Αυτή η ευαισθησία θα πρέπει να εξεταστεί και για τις άλλες εποχές. Για παράδειγμα, τον χειμώνα που η απόσταση ήλιου-γης μεγαλώνει μειώνεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης και συνεπώς αυξάνεται η ευαισθησία ως προς την γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας πάνω στον φ/β συλλέκτη. Ενδεχομένως να είναι απαραίτητο πιο πυκνό χρονικά tracking από ότι κάναμε στα τέλη του μήνα Μαΐου. Και αυτό το θέμα χρίζει περεταίρω μελέτης.

-Στην θεωρία των φωτοβολταϊκών συστημάτων (Κεφάλαιο 1) είδαμε την χρήση των διατάξεων MPPT (Maximum Power Point Trackers) όπου και αναλύθηκε η χρήση τους. Προκύπτει το ερώτημα τι βελτίωση στην απόδοση θα επιτύχουμε σε ένα πλήρες και αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα χρησιμοποιώντας μαζί solar tracker με Maximum Power Point Tracker και αν τελικά αξίζει τον κόπο μια τέτοια προσπάθεια στην αύξηση της απόδοσης.

-Εν κατακλείδι , μια ενδιαφέρουσα πρόταση για βελτίωση είναι η κατασκευή ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με solar tracker και τον πλήρη εξοπλισμό που απαιτείται : Σύστημα αποθήκευσης της ενέργειας (μπαταρίες), charge regulator για την προστασία από υπερφόρτωση της μπαταρίας, dc/ac converter για την τροφοδοσία του μοτέρ και των ενδεχόμενων ac φορτίων, ή απλώς εύρεση dc μοτέρ που να λειτουργεί αντλώντας ενέργεια απευθείας από την μπαταρία και χρήση για dc φορτίο. Ενδεχομένως σε αυτήν την περίπτωση να χρειαστεί dc/dc converter για τις διαφορετικές τάσεις λειτουργίας .

Βιβλιογραφία

- [1] Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία , Κ.Καγκαράκη
- [2] Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Από Ανανεώσιμες Πηγές, Μ.Π.Παπαδόπουλος , Εκδόσεις ΕΜΠ, 1997
- [3] Τεχνολογία αισθητήρων και μικροσυστημάτων, Ι.Ν.Αβαριτσιώτης, 2003
- [4] Προγραμματίζοντας Τον Μικροελεγκτή AVR , Dhananjay V. Gadre , Εκδόσεις Τζιόλα
- [5] Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα , Sendra/Smith , Πρώτη Έκδοση
- [6] Ψηφιακή Σχεδίαση , Μ.Morris Mano , Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [7] Ολοκληρωμένη Ηλεκτρονική , J.Millman/Χ.Χαλκιάς, Εκδόσεις Συμμετρία, 1990
- [8] Τεχνολογία Πολυψηφιδικών Πακέτων, Ι.Ν.Αβαριτσιώτης Εκδόσεις ΕΜΠ, 1997
- [9] Practical handbook of photovoltaics : fundamentals and applications , Tom Markvart/ Luis Castaner
- [9] Solar electricity , Tom Markvart ,1994
- [11] Modelling photovoltaic systems using PSpice , Luis Castaner and Santiago Silvestre
- [12] AVR Mega32 Datasheet , Atmel
- [13] CNY17_3 Datasheet , Agilent
- [14] KA7805A Datasheet, Fairchild Semiconductor
- [15] 2N2222 Datasheet, ST
- [15] <http://en.wikipedia.org/wiki/Heliostat>

Παράρτημα

Φύλλα Δεδομένων (Datasheets)

- 1) KA7805, Fairchild Semiconductor**
- 2) CNY17-2, Vishay**
- 3) 2N2222, ST**
- 4) Καταχωρητές και εντολές του mega32**

1) KA7805, Fairchild Semiconductor



www.fairchildsemi.com

KA78XX/KA78XXA

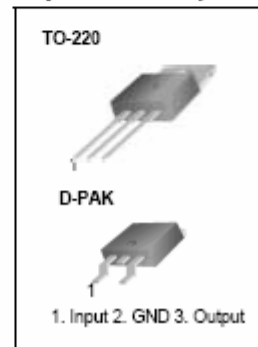
3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator

Features

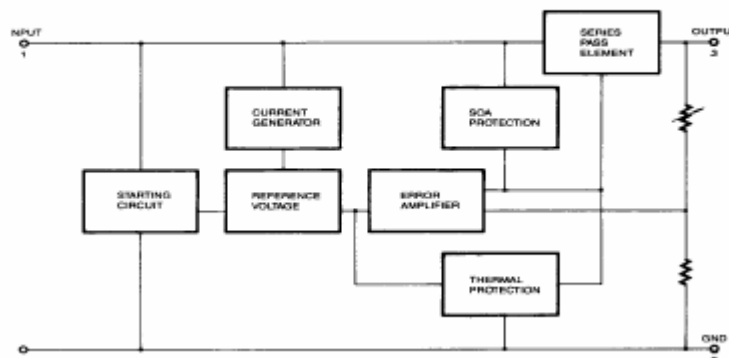
- Output Current up to 1A
- Output Voltages of 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24V
- Thermal Overload Protection
- Short Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Protection

Description

The KA78XX/KA78XXA series of three-terminal positive regulator are available in the TO-220/D-PAK package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut down and safe operating area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.



Internal Block Diagram



Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Input Voltage (for $V_O = 5V$ to $18V$)	V_I	35	V
(for $V_O = 24V$)	V_I	40	V
Thermal Resistance Junction-Cases (TO-220)	$R_{\theta JC}$	5	$^{\circ}C/W$
Thermal Resistance Junction-Air (TO-220)	$R_{\theta JA}$	65	$^{\circ}C/W$
Operating Temperature Range (KA78XX/A/R)	T_{OPR}	0 ~ +125	$^{\circ}C$
Storage Temperature Range	T_{STG}	-65 ~ +150	$^{\circ}C$

Electrical Characteristics (KA7805/KA7805R)

(Refer to test circuit, $0^{\circ}\text{C} < T_J < 125^{\circ}\text{C}$, $I_O = 500\text{mA}$, $V_I = 10\text{V}$, $C_I = 0.33\mu\text{F}$, $C_O = 0.1\mu\text{F}$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	KA7805			Unit	
			Min.	Typ.	Max.		
Output Voltage	VO	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	4.8	5.0	5.2	V	
		$5.0\text{mA} \leq I_O \leq 1.0\text{A}$, $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 7\text{V to } 20\text{V}$	4.75	5.0	5.25		
Line Regulation (Note1)	Regline	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$V_O = 7\text{V to } 25\text{V}$	-	4.0	100	mV
			$V_I = 8\text{V to } 12\text{V}$	-	1.6	50	
Load Regulation (Note1)	Regload	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$I_O = 5.0\text{mA to } 1.5\text{A}$	-	9	100	mV
			$I_O = 250\text{mA to } 750\text{mA}$	-	4	50	
Quiescent Current	IQ	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	5.0	8.0	mA	
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$I_O = 5\text{mA to } 1.0\text{A}$ $V_I = 7\text{V to } 25\text{V}$	-	0.03	0.5	mA	
			-	0.3	1.3		
Output Voltage Drift	$\Delta V_O / \Delta T$	$I_O = 5\text{mA}$	-	-0.8	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$	
Output Noise Voltage	VN	$f = 10\text{Hz to } 100\text{kHz}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	42	-	$\mu\text{V}/V_O$	
Ripple Rejection	RR	$f = 120\text{Hz}$ $V_O = 8\text{V to } 18\text{V}$	62	73	-	dB	
Dropout Voltage	VDrop	$I_O = 1\text{A}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2	-	V	
Output Resistance	rO	$f = 1\text{kHz}$	-	15	-	m Ω	
Short Circuit Current	ISC	$V_I = 35\text{V}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	230	-	mA	
Peak Current	IPK	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2.2	-	A	

Note:

1. 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 is used.

Electrical Characteristics (KA7805A)

(Refer to the test circuits, $0^{\circ}\text{C} < T_J < +125^{\circ}\text{C}$, $I_O = 1\text{A}$, $V_I = 10\text{V}$, $C_I = 0.33\mu\text{F}$, $C_O = 0.1\mu\text{F}$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Output Voltage	VO	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	4.9	5	5.1	V
		$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$, $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 7.5\text{V to } 20\text{V}$	4.8	5	5.2	
Line Regulation (Note1)	Regline	$V_I = 7.5\text{V to } 25\text{V}$ $I_O = 500\text{mA}$	-	5	50	mV
		$V_I = 8\text{V to } 12\text{V}$	-	3	50	
		$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$V_I = 7.3\text{V to } 20\text{V}$ $V_I = 8\text{V to } 12\text{V}$	-	5 1.5	
Load Regulation (Note1)	Regload	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$ $I_O = 5\text{mA to } 1.5\text{A}$	-	9	100	mV
		$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$	-	9	100	
		$I_O = 250\text{mA to } 750\text{mA}$	-	4	50	
Quiescent Current	IQ	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	5.0	6.0	mA
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$ $V_I = 8\text{V to } 25\text{V}$, $I_O = 500\text{mA}$	-	-	0.5 0.8	mA
		$V_I = 7.5\text{V to } 20\text{V}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	-	0.8	
Output Voltage Drift	$\Delta V / \Delta T$	$I_O = 5\text{mA}$	-	-0.8	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
Output Noise Voltage	VN	$f = 10\text{Hz to } 100\text{kHz}$ $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	10	-	$\mu\text{V}/V_O$
Ripple Rejection	RR	$f = 120\text{Hz}$, $I_O = 500\text{mA}$ $V_I = 8\text{V to } 18\text{V}$	-	68	-	dB
Dropout Voltage	VDrop	$I_O = 1\text{A}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2	-	V
Output Resistance	rO	$f = 1\text{kHz}$	-	17	-	m Ω
Short Circuit Current	ISC	$V_I = 35\text{V}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	250	-	mA
Peak Current	IPK	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2.2	-	A

Note:

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Change in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty is used.

Typical Performance Characteristics

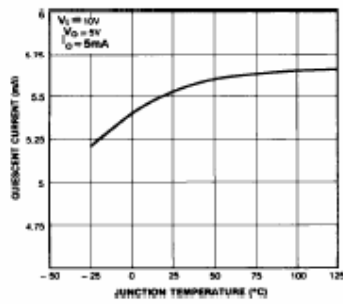


Figure 1. Quiescent Current

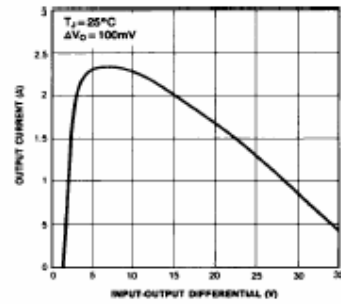


Figure 2. Peak Output Current

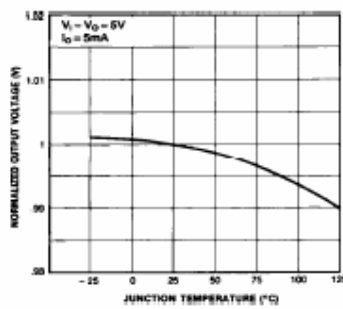


Figure 3. Output Voltage

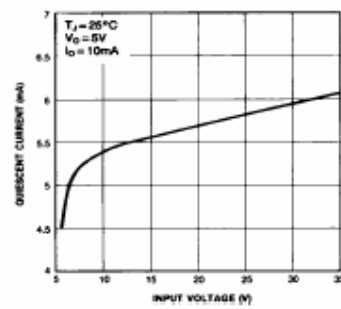


Figure 4. Quiescent Current

Ordering Information

Product Number	Output Voltage Tolerance	Package	Operating Temperature
KA7805 / KA7806	±4%	TO-220	0 ~ +125°C
KA7806 / KA7809			
KA7810			
KA7812 / KA7815			
KA7816 / KA7824			
KA7805A / KA7806A	±2%		
KA7808A / KA7809A			
KA7810A / KA7812A			
KA7815A / KA7816A			
KA7824A			
KA7805R / KA7806R	±4%	D-PAK	
KA7806R / KA7809R			
KA7812R			

Typical Applications

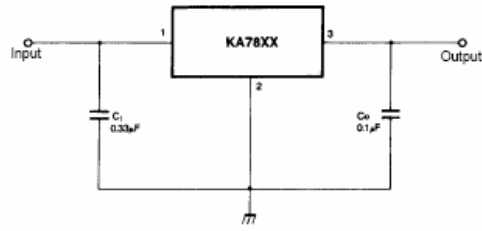


Figure 5. DC Parameters

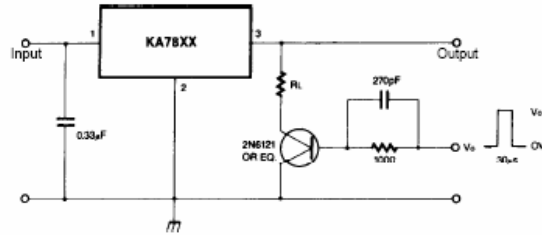


Figure 6. Load Regulation

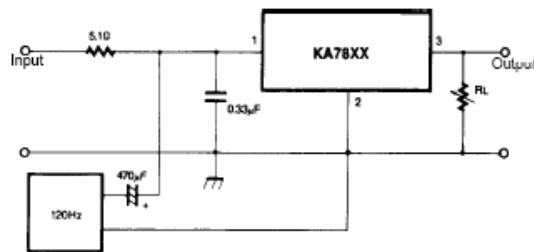


Figure 7. Ripple Rejection

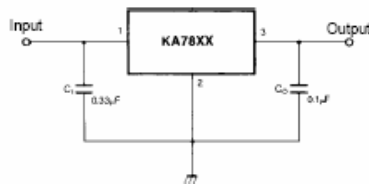
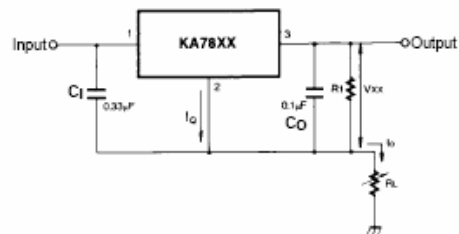
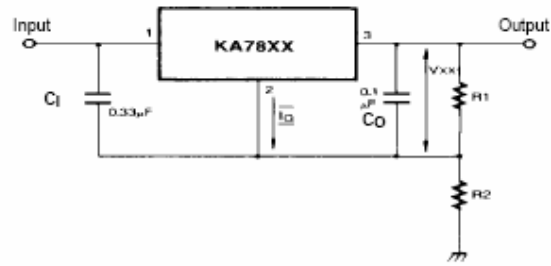


Figure 8. Fixed Output Regulator



$$I_0 = \frac{V_{XX}}{R_1} + I_Q$$

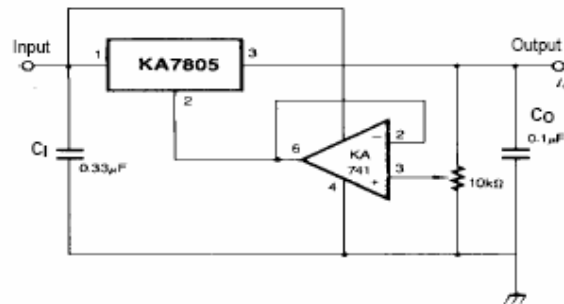
Figure 9. Constant Current Regulator



$$I_{R1} \geq 5I_Q$$

$$V_O = V_{XX}(1+R_2/R_1)+I_Q R_2$$

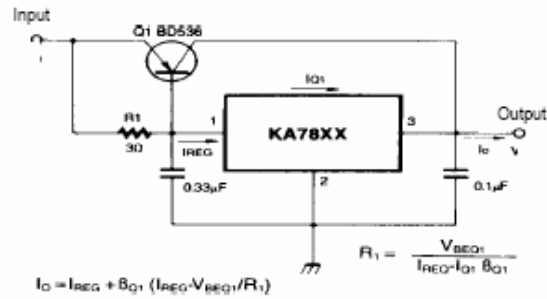
Figure 10. Circuit for Increasing Output Voltage



$$I_{R1} \geq 5I_Q$$

$$V_O = V_{XX}(1+R_2/R_1)+I_Q R_2$$

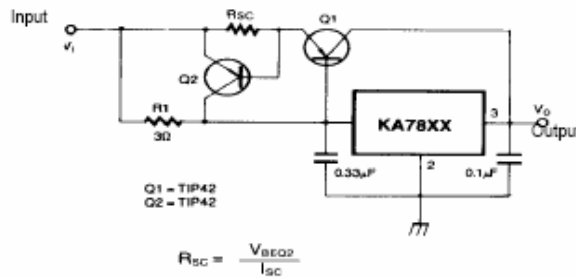
Figure 11. Adjustable Output Regulator (7 to 30V)



$$I_O = I_{REQ} + \beta_{Q1} (I_{REQ} - V_{BEQ1}/R_1)$$

$$R_1 = \frac{V_{BEQ1}}{I_{REQ} - I_{O1} \beta_{Q1}}$$

Figure 12. High Current Voltage Regulator



$$R_{SC} = \frac{V_{EEQ2}}{I_{SC}}$$

Figure 13. High Output Current with Short Circuit Protection

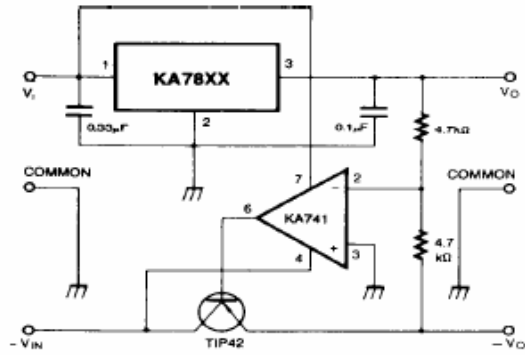


Figure 14. Tracking Voltage Regulator

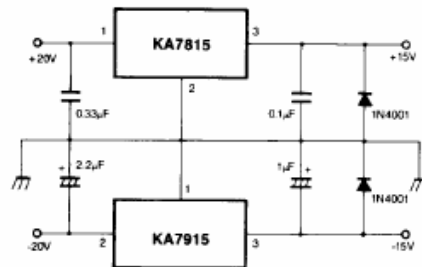


Figure 15. Split Power Supply (±15V-1A)

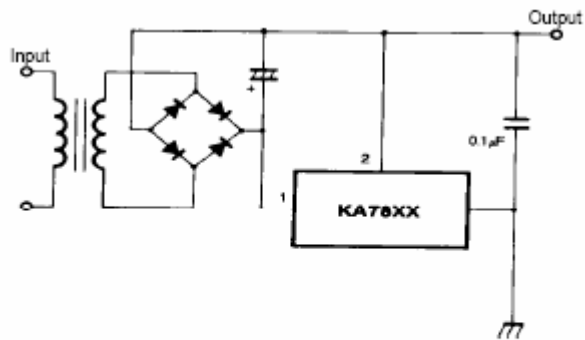


Figure 16. Negative Output Voltage Circuit

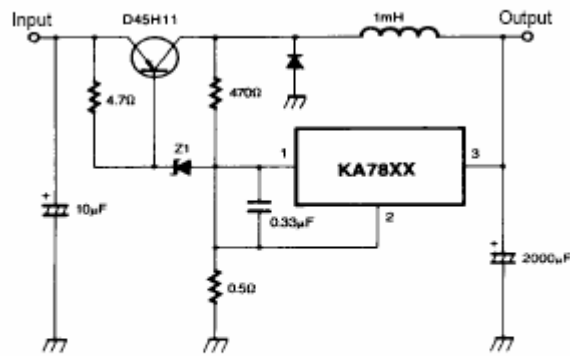
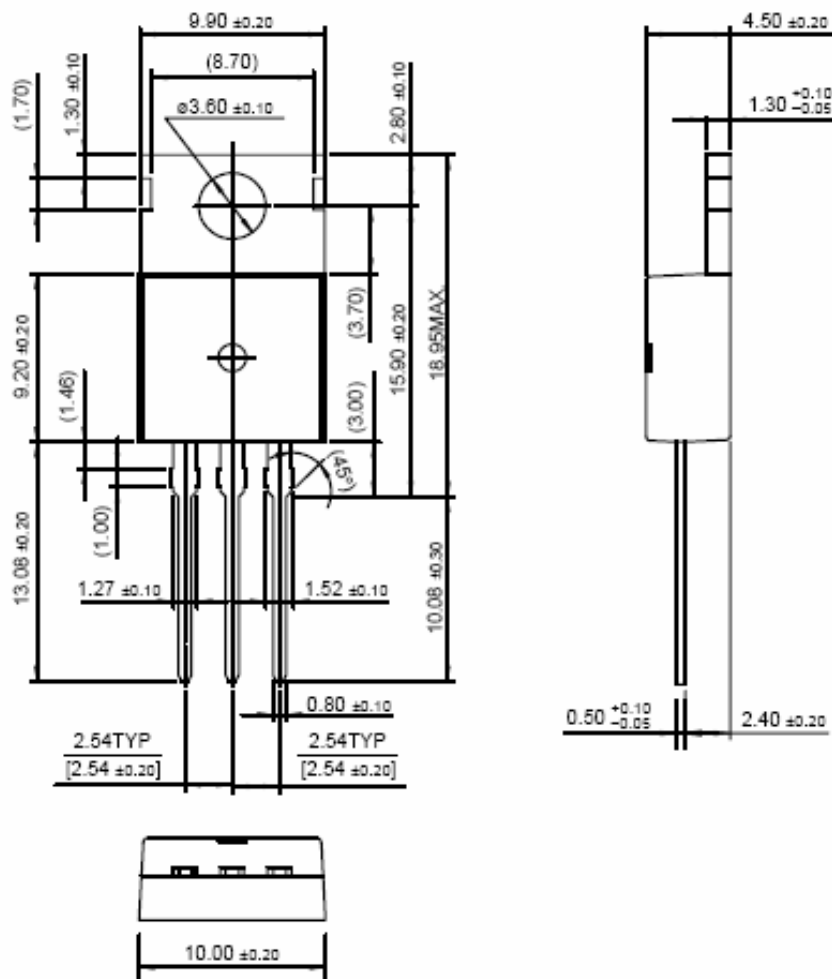


Figure 17. Switching Regulator

Mechanical Dimensions

Package

TO-220



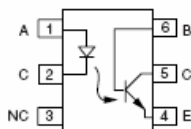
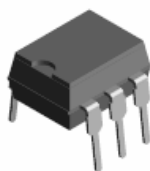
2) CNY17-2, Vishay



CNY17

Vishay Semiconductors

Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection



FEATURES

- Isolation test voltage 5300 V_{RMS}
- Long term stability
- Industry standard dual-in-line package
- Lead (Pb)-free component
- Component in accordance to RoHS 2002/95/EC and WEEE 2002/96/EC



RoHS COMPLIANT

AGENCY APPROVALS

- Underwriters lab file no. E52744 system code H or J
- DIN EN 60747-5-2 (VDE 0884)/DIN EN 60747-5-5 pending
- BSI IEC 60950 IEC 60065
- FIMKO

DESCRIPTION

The CNY17 is an optically coupled pair consisting of a gallium arsenide infrared emitting diode optically coupled to a silicon NPN phototransistor.

Signal information, including a DC level, can be transmitted by the device while maintaining a high degree of electrical isolation between input and output.

The CNY17 can be used to replace relays and transformers in many digital interface applications, as well as analog applications such as CRT modulation.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
INPUT				
Reverse voltage		V_R	6.0	V
Forward current		I_F	60	mA
Surge current	$t \leq 10 \mu\text{s}$	I_{FSM}	2.5	A
Power dissipation		P_{diss}	100	mW

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
OUTPUT				
Collector emitter breakdown voltage		BV_{CEO}	70	V
Emitter base breakdown voltage		BV_{EBO}	7.0	V
Collector current		I_C	50	mA
	$t < 1.0 \text{ ms}$	I_C	100	mA
Power dissipation		P_{diss}	150	mW
COUPLER				
Isolation test voltage between emitter and detector referred to climate DIN 50014, part 2, Nov. 74	$t = 1.0 \text{ s}$	V_{ISO}	5300	V _{RMS}
Creepage distance			≥ 7.0	mm
Clearance distance			≥ 7.0	mm
Isolation thickness between emitter and detector			≥ 0.4	mm
Comparative tracking index per DIN IEC 112/VDE 0303, part 1			175	
Isolation resistance	$V_{IO} = 500 \text{ V}, T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	R_{IO}	$\geq 10^{12}$	Ω
	$V_{IO} = 500 \text{ V}, T_{amb} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$	R_{IO}	$\geq 10^{11}$	Ω
Storage temperature		T_{stg}	- 55 to + 150	$^\circ\text{C}$
Operating temperature		T_{amb}	- 55 to + 100	$^\circ\text{C}$
Soldering temperature	max. 10 s, dip soldering: distance to seating plane $\geq 1.5 \text{ mm}$	T_{sld}	260	$^\circ\text{C}$

Note

$T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified.

Stresses in excess of the absolute maximum ratings can cause permanent damage to the device. Functional operation of the device is not implied at these or any other conditions in excess of those given in the operational sections of this document. Exposure to absolute maximum ratings for extended periods of the time can adversely affect reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS							
PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
INPUT							
Forward voltage	$I_F = 60 \text{ mA}$		V_F		1.25	1.65	V
Breakdown voltage	$I_R = 10 \text{ mA}$		V_{BR}	6.0			V
Reverse current	$V_R = 6.0 \text{ V}$		I_R		0.01	10	μA
Capacitance	$V_R = 0 \text{ V}, f = 1.0 \text{ MHz}$		C_O		25		pF
Thermal resistance			R_{th}		750		K/W
OUTPUT							
Collector emitter capacitance	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, f = 1.0 \text{ MHz}$		C_{CE}		5.2		pF
Collector base capacitance	$V_{CB} = 5.0 \text{ V}, f = 1.0 \text{ MHz}$		C_{CB}		6.5		pF
Emitter base capacitance	$V_{EB} = 5.0 \text{ V}, f = 1.0 \text{ MHz}$		C_{EB}		7.5		pF
Thermal resistance			R_{th}		500		K/W
COUPLER							
Collector emitter, saturation voltage	$V_F = 10 \text{ mA}, I_C = 2.5 \text{ mA}$		V_{CEsat}		0.25	0.4	V
Coupling capacitance			C_C		0.6		pF
Collector emitter, leakage current	$V_{CE} = 10 \text{ V}$	CNY17-1	I_{CEO}		2.0	50	nA
		CNY17-2	I_{CEO}		2.0	50	nA
		CNY17-3	I_{CEO}		5.0	100	nA
		CNY17-4	I_{CEO}		5.0	100	nA

Note

$T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified.

Minimum and maximum values were tested requirements. Typical values are characteristics of the device and are the result of engineering evaluations. Typical values are for information only and are not part of the testing requirements.

CURRENT TRANSFER RATIO							
PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
I_C/I_F	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_F = 10 \text{ mA}$	CNY17-1	CTR	40		80	%
		CNY17-2	CTR	63		125	%
		CNY17-3	CTR	100		200	%
		CNY17-4	CTR	160		320	%
	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_F = 1 \text{ mA}$	CNY17-1	CTR	13	30		%
		CNY17-2	CTR	22	45		%
		CNY17-3	CTR	34	70		%
		CNY17-4	CTR	56	90		%

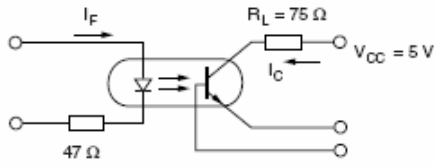
Note

Current transfer ratio and collector-emitter leakage current by dash number ($T_{amb} \text{ }^\circ\text{C}$).

SWITCHING CHARACTERISTICS							
PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
LINEAR OPERATION (WITHOUT SATURATION)							
Turn-on time	$I_F = 10 \text{ mA}, V_{CC} = 5.0 \text{ V}, R_L = 75 \text{ } \Omega$		t_{on}		3.0		μs
Rise time	$I_F = 10 \text{ mA}, V_{CC} = 5.0 \text{ V}, R_L = 75 \text{ } \Omega$		t_r		2.0		μs
Turn-off time	$I_F = 10 \text{ mA}, V_{CC} = 5.0 \text{ V}, R_L = 75 \text{ } \Omega$		t_{off}		2.3		μs
Fall time	$I_F = 10 \text{ mA}, V_{CC} = 5.0 \text{ V}, R_L = 75 \text{ } \Omega$		t_f		2.0		μs
Cut-off frequency	$I_F = 10 \text{ mA}, V_{CC} = 5.0 \text{ V}, R_L = 75 \text{ } \Omega$		f_{CO}		250		kHz
SWITCHING OPERATION (WITH SATURATION)							
Turn-on time	$I_F = 20 \text{ mA}$	CNY17-1	t_{on}		3.0		μs
	$I_F = 10 \text{ mA}$	CNY17-2	t_{on}		4.2		μs
		CNY17-3	t_{on}		4.2		μs
	$I_F = 5 \text{ mA}$	CNY17-4	t_{on}		6.0		μs
Rise time	$I_F = 20 \text{ mA}$	CNY17-1	t_r		2.0		μs
	$I_F = 10 \text{ mA}$	CNY17-2	t_r		3.0		μs
		CNY17-3	t_r		3.0		μs
	$I_F = 5 \text{ mA}$	CNY17-4	t_r		4.6		μs
Turn-off time	$I_F = 20 \text{ mA}$	CNY17-1	t_{off}		18		μs
	$I_F = 10 \text{ mA}$	CNY17-2	t_{off}		23		μs
		CNY17-3	t_{off}		23		μs
	$I_F = 5 \text{ mA}$	CNY17-4	t_{off}		25		μs
Fall time	$I_F = 20 \text{ mA}$	CNY17-1	t_f		11		μs
	$I_F = 10 \text{ mA}$	CNY17-2	t_f		14		μs
		CNY17-3	t_f		14		μs
	$I_F = 5 \text{ mA}$	CNY17-4	t_f		15		μs

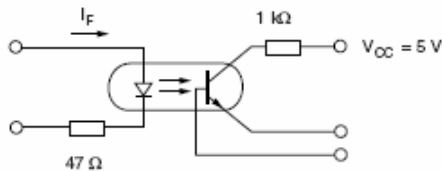
TYPICAL CHARACTERISTICS

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified



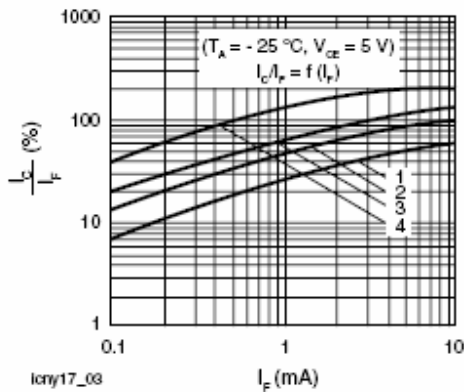
icny17_01

Fig. 1 - Linear Operation (without Saturation)



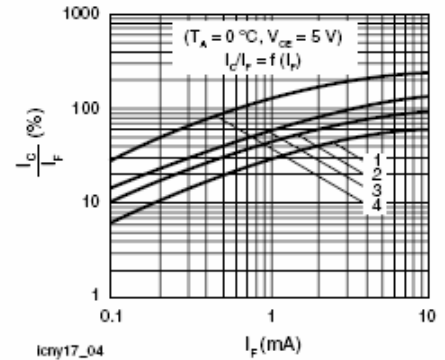
icny17_02

Fig. 2 - Switching Operation (with Saturation)



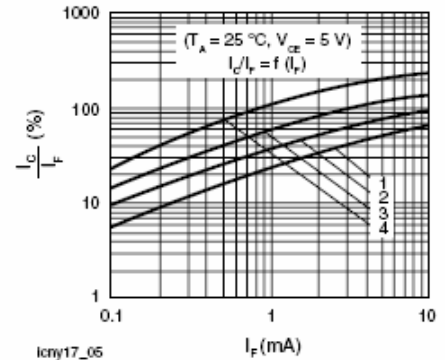
icny17_03

Fig. 3 - Current Transfer Ratio vs. Diode Current



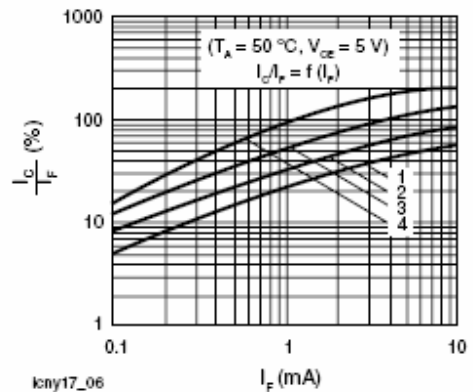
icny17_04

Fig. 4 - Current Transfer Ratio vs. Diode Current



icny17_05

Fig. 5 - Current Transfer Ratio vs. Diode Current



icny17_06

Fig. 6 - Current Transfer Ratio vs. Diode Current

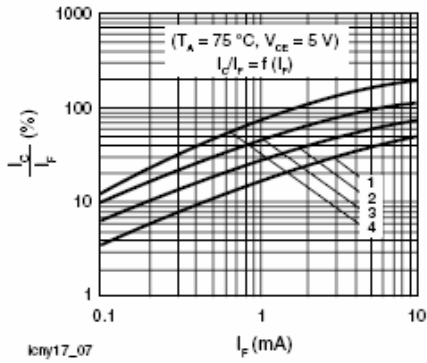


Fig. 7 - Current Transfer Ratio vs. Diode Current

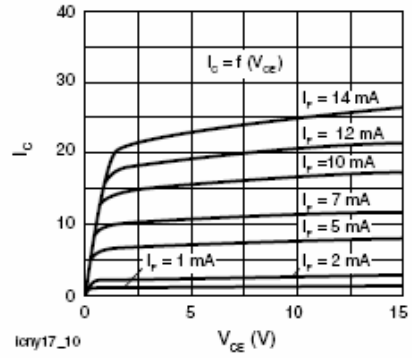


Fig. 10 - Output Characteristics

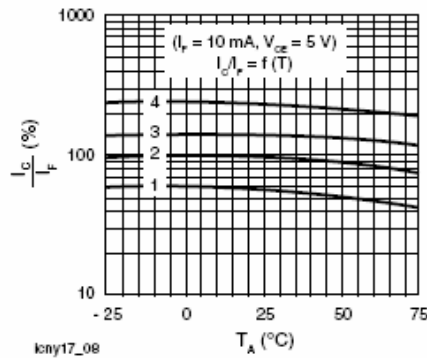


Fig. 8 - Current Transfer Ratio (CTR) vs. Temperature

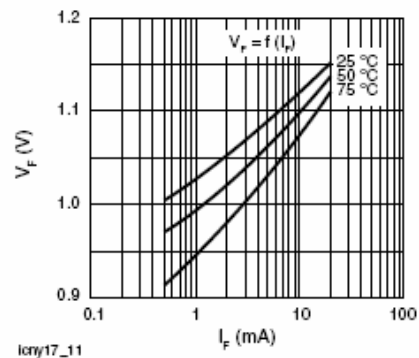


Fig. 11 - Forward Voltage

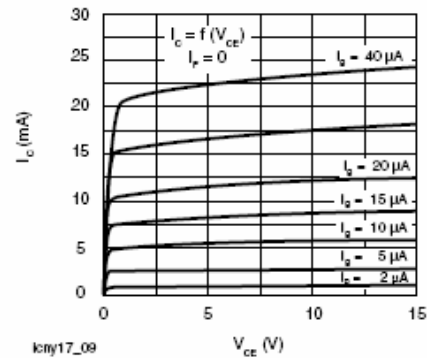


Fig. 9 - Transistor Characteristics

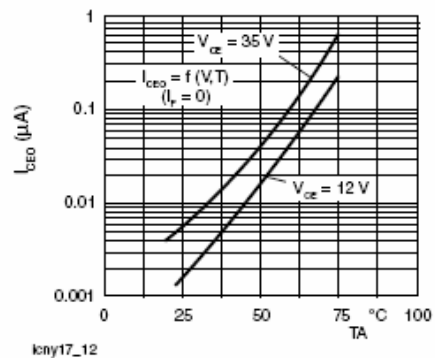


Fig. 12 - Collector Emitter Off-state Current

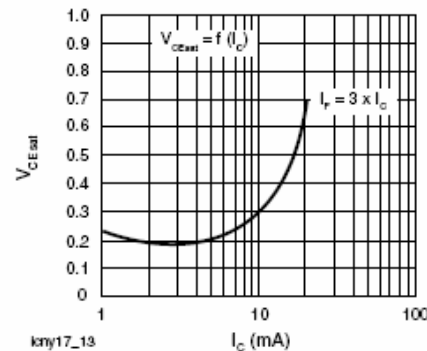


Fig. 13 - Saturation Voltage vs. Collector Current and Modulation Depth CNY17-1

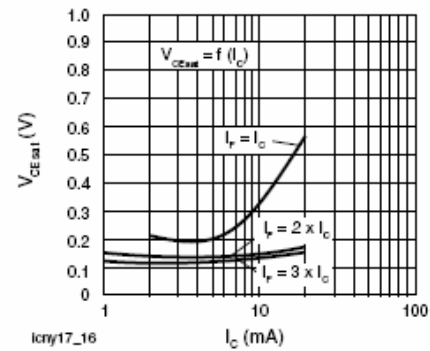


Fig. 16 - Saturation Voltage vs. Collector Current and Modulation Depth CNY17-4

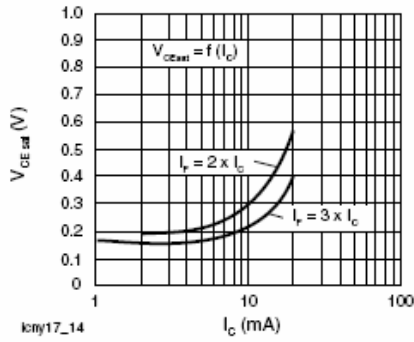


Fig. 14 - Saturation Voltage vs. Collector Current and Modulation Depth CNY17-2

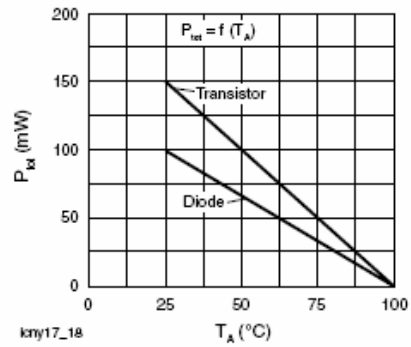


Fig. 17 - Permissible Power Dissipation for Transistor and Diode

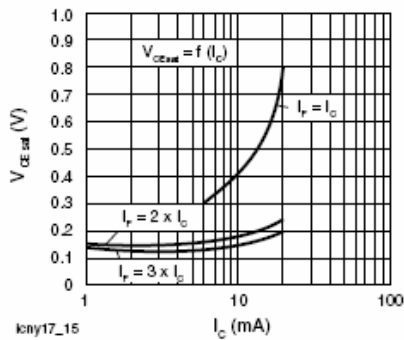
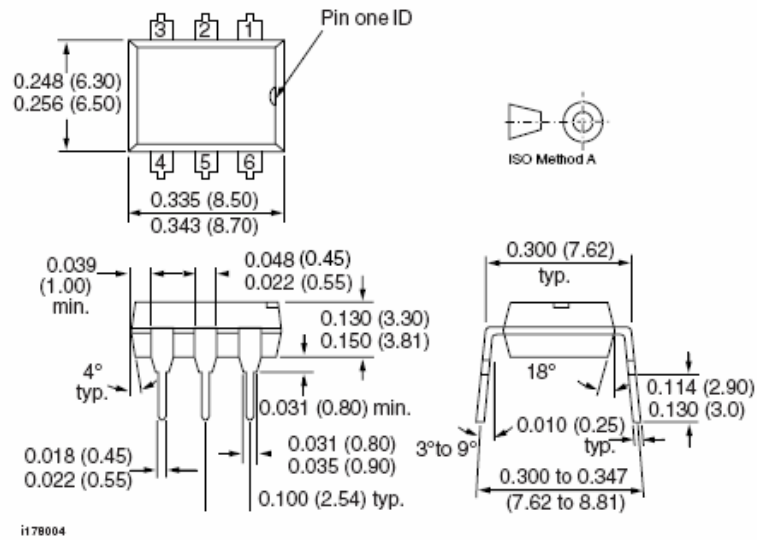
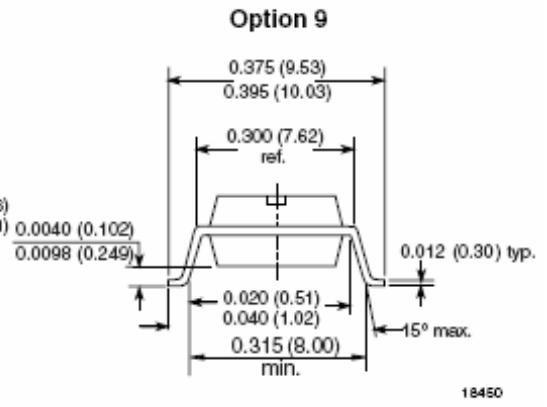
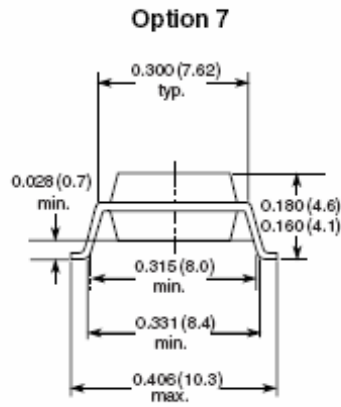
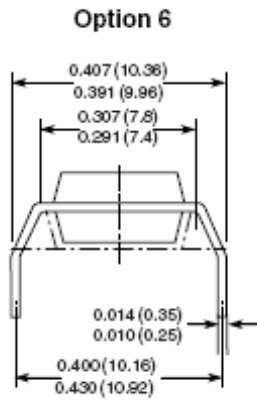


Fig. 15 - Saturation Voltage vs. Collector Current and Modulation Depth CNY17-3

PACKAGE DIMENSIONS in inches (millimeters)





18450

3) 2N2222, ST

Hand Tool



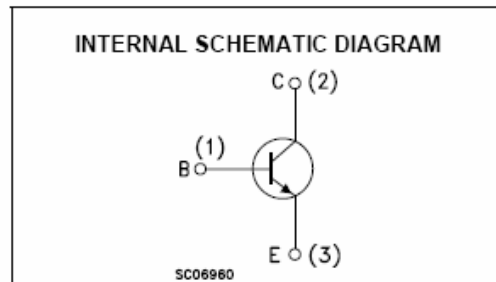
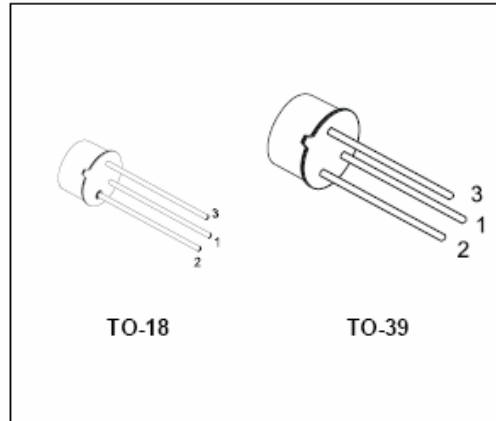
2N2219A
2N2222A

HIGH SPEED SWITCHES

PRELIMINARY DATA

DESCRIPTION

The 2N2219A and 2N2222A are silicon Planar Epitaxial NPN transistors in Jedec TO-39 (for 2N2219A) and in Jedec TO-18 (for 2N2222A) metal case. They are designed for high speed switching application at collector current up to 500mA, and feature useful current gain over a wide range of collector current, low leakage currents and low saturation voltage.



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{CBO}	Collector-Base Voltage ($I_E = 0$)	75	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage ($I_B = 0$)	40	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage ($I_C = 0$)	6	V
I_C	Collector Current	0.6	A
I_{CM}	Collector Peak Current ($t_p < 5$ ms)	0.8	A
P_{tot}	Total Dissipation at $T_{amb} \leq 25$ °C for 2N2219A for 2N2222A at $T_C \leq 25$ °C for 2N2219A for 2N2222A	0.8	W
		0.5	W
		3	W
		1.8	W
T_{stg}	Storage Temperature	-65 to 175	°C
T_J	Max. Operating Junction Temperature	175	°C

THERMAL DATA

		TO-39	TO-18	
$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-Case	50	83.3	°C/W
$R_{thj-amb}$	Thermal Resistance Junction-Ambient	187.5	300	°C/W

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{case} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
I_{CBO}	Collector Cut-off Current ($I_E = 0$)	$V_{CB} = 60\text{ V}$ $V_{CB} = 60\text{ V}$ $T_J = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$			10 10	nA μA
I_{CEX}	Collector Cut-off Current ($V_{BE} = -3\text{V}$)	$V_{CE} = 60\text{ V}$			10	nA
I_{BEX}	Base Cut-off Current ($V_{BE} = -3\text{V}$)	$V_{CE} = 60\text{ V}$			20	nA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current ($I_C = 0$)	$V_{EB} = 3\text{ V}$			10	nA
$V_{(BR)CBO}$	Collector-Base Breakdown Voltage ($I_E = 0$)	$I_C = 10\text{ }\mu\text{A}$	75			V
$V_{(BR)CEO*}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage ($I_B = 0$)	$I_C = 10\text{ mA}$	40			V
$V_{(BR)EBO}$	Emitter-Base Breakdown Voltage ($I_C = 0$)	$I_E = 10\text{ }\mu\text{A}$	6			V
$V_{CE(sat)*}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 150\text{ mA}$ $I_B = 15\text{ mA}$ $I_C = 500\text{ mA}$ $I_B = 50\text{ mA}$			0.3 1	V V
$V_{BE(sat)*}$	Base-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 150\text{ mA}$ $I_B = 15\text{ mA}$ $I_C = 500\text{ mA}$ $I_B = 50\text{ mA}$	0.6		1.2 2	V V
h_{FE*}	DC Current Gain	$I_C = 0.1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 150\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 500\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 150\text{ mA}$ $V_{CE} = 1\text{ V}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $T_{amb} = -55\text{ }^{\circ}\text{C}$	35 50 75 100 40 50 35		300	
h_{re*}	Small Signal Current Gain	$I_C = 1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $f = 1\text{KHZ}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $f = 1\text{KHZ}$	50 75		300 375	
f_T	Transition Frequency	$I_C = 20\text{ mA}$ $V_{CE} = 20\text{ V}$ $f = 100\text{ MHz}$		300		MHZ
C_{EBO}	Emitter-Base Capacitance	$I_C = 0$ $V_{EB} = 0.5\text{ V}$ $f = 100\text{KHz}$			25	pF
C_{CBO}	Collector-Base Capacitance	$I_E = 0$ $V_{CB} = 10\text{ V}$ $f = 100\text{ KHz}$			8	pF
$R_{e(hie)}$	Real Part of Input Impedance	$I_C = 20\text{ mA}$ $V_{CE} = 20\text{ V}$ $f = 300\text{MHz}$			60	Ω

* Pulsed: Pulse duration = 300 μs , duty cycle $\leq 1\%$

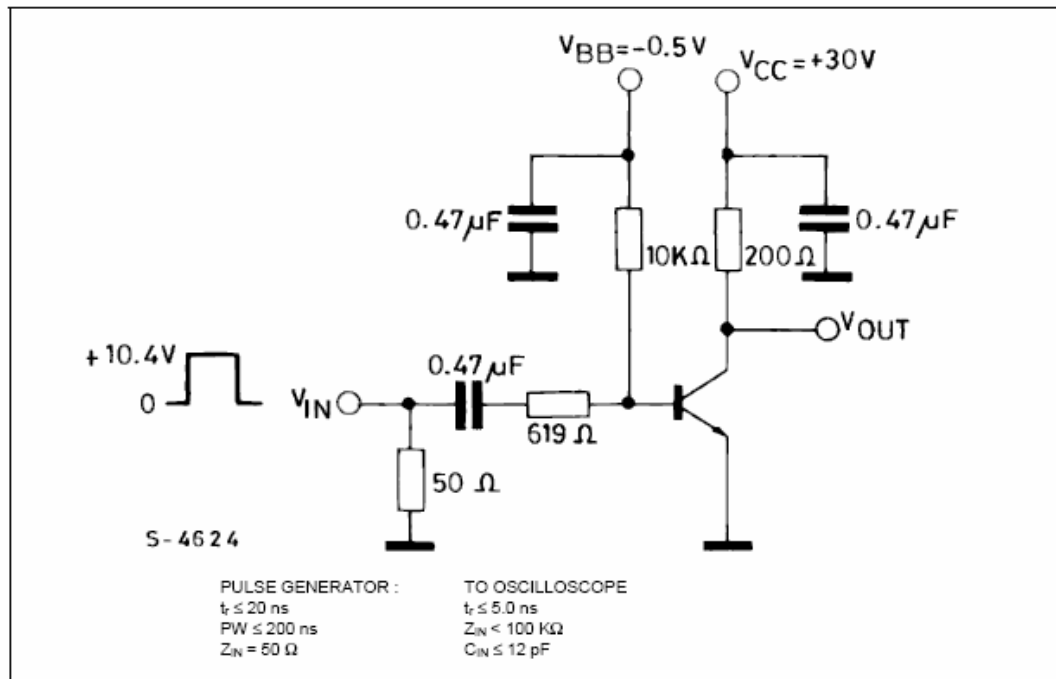
ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
NF	Noise Figure	$I_C = 0.1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $f = 1\text{KHz}$ $R_g = 1\text{K}\Omega$		4		dB
h_{ie}	Input Impedance	$I_C = 1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$	2 0.25		8 1.25	k Ω k Ω
h_{re}	Reverse Voltage Ratio	$I_C = 1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$			8 4	10^{-4} 10^{-4}
h_{oe}	Output Admittance	$I_C = 1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$	5 25		35 200	μS μS
t_d^{**}	Delay Time	$V_{CC} = 30\text{ V}$ $I_C = 150\text{ mA}$ $I_{B1} = 15\text{ mA}$ $V_{BE} = -0.5\text{ V}$			10	ns
t_r^{**}	Rise Time	$V_{CC} = 30\text{ V}$ $I_C = 150\text{ mA}$ $I_{B1} = 15\text{ mA}$ $V_{BE} = -0.5\text{ V}$			25	ns
t_s^{**}	Storage Time	$V_{CC} = 30\text{ V}$ $I_C = 150\text{ mA}$ $I_{B1} = -I_{B2} = 15\text{ mA}$			225	ns
t_f^{**}	Fall Time	$V_{CC} = 30\text{ V}$ $I_C = 150\text{ mA}$ $I_{B1} = -I_{B2} = 15\text{ mA}$			60	ns
t_{fb}^* $C_{b'c}$	Feedback Time Constant	$I_C = 20\text{ mA}$ $V_{CE} = 20\text{ V}$ $f = 31.8\text{MHz}$			150	ps

* Pulsed: Pulse duration = 300 μs , duty cycle $\leq 1\%$

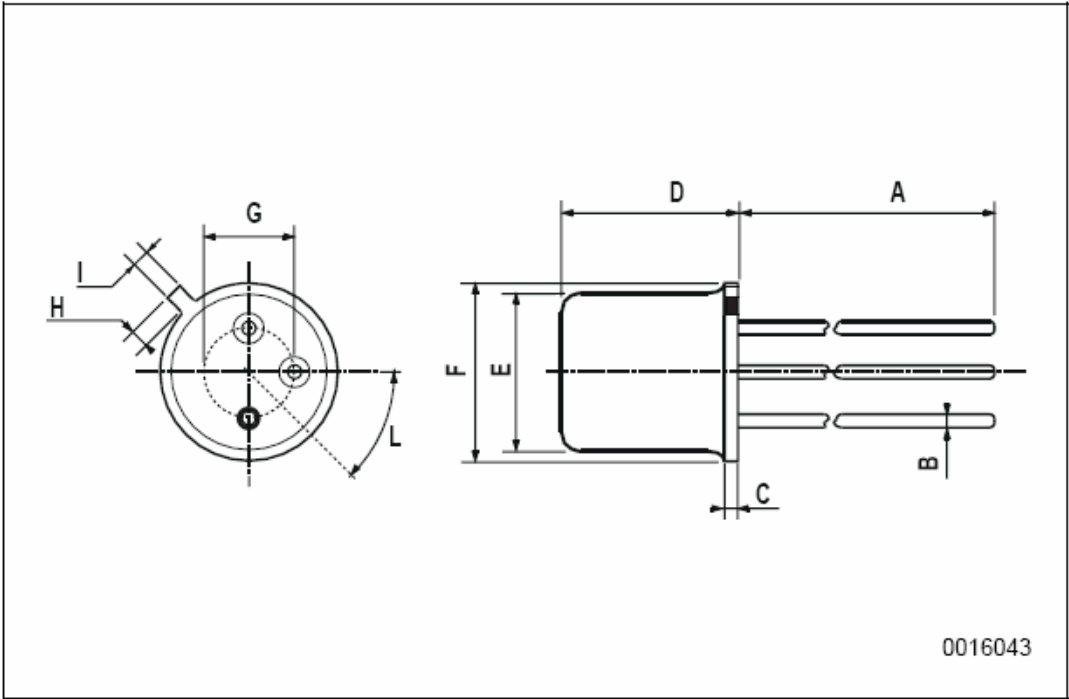
** See test circuit

Test Circuit for t_d , t_r .



TO-18 MECHANICAL DATA

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A		12.7			0.500	
B			0.49			0.019
D			5.3			0.208
E			4.9			0.193
F			5.8			0.228
G	2.54			0.100		
H			1.2			0.047
I			1.16			0.045
L	45°			45°		



4) Καταχωρητές και εντολές του mega32

Register Summary

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Page
\$3F (\$5F)	SREG	I	T	H	S	V	N	Z	C	10
\$3E (\$5E)	SPH	–	–	–	–	SP11	SP10	SP9	SP8	12
\$3D (\$5D)	SPL	SP7	SP8	SP6	SP4	SP3	SP2	SP1	SP0	12
\$3C (\$5C)	OCR0	Timer/Counter0 Output Compare Register								82
\$3B (\$5B)	GICR	INT1	INT0	INT2	–	–	–	IVSEL	IVCE	47, 67
\$3A (\$5A)	GIFR	INTF1	INTF0	INTF2	–	–	–	–	–	68
\$39 (\$59)	TIMSK	OCIE2	TOIE2	TICIE1	OCIE1A	OCIE1B	TOIE1	OCIE0	TOIE0	82, 112, 130
\$38 (\$58)	TIFR	OCF2	TOV2	ICF1	OCF1A	OCF1B	TOV1	OCF0	TOV0	83, 112, 130
\$37 (\$57)	SPMCR	SPMIE	RWWSB	–	RWWSRE	BLBSET	PGWRT	PGERS	SPMEN	248
\$36 (\$56)	TWCR	TWINT	TWEA	TWSTA	TWSTO	TWWC	TWEN	–	TWIE	177
\$35 (\$55)	MCUCR	SE	SM2	SM1	SM0	ISC11	ISC10	ISC01	ISC00	32, 66
\$34 (\$54)	MCUCSR	JTD	ISC2	–	JTRF	WDRF	BORF	EXTRF	PORF	40, 67, 228
\$33 (\$53)	TCCR0	FOC0	WGM00	COM01	COM00	WGM01	CS02	CS01	CS00	80
\$32 (\$52)	TCNT0	Timer/Counter0 (8 Bits)								82
\$31 ⁽¹⁾ (\$51) ⁽¹⁾	OSCCAL	Oscillator Calibration Register								30
	ODDR	On-Chip Debug Register								224
\$30 (\$50)	SFIOR	ADTS2	ADTS1	ADTS0	–	ACME	PUD	PSR2	PSR10	58, 85, 131, 198, 218
\$2F (\$4F)	TCCR1A	COM1A1	COM1A0	COM1B1	COM1B0	FOC1A	FOC1B	WGM11	WGM10	107
\$2E (\$4E)	TCCR1B	ICNC1	ICES1	–	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10	110
\$2D (\$4D)	TCNT1H	Timer/Counter1 – Counter Register High Byte								111
\$2C (\$4C)	TCNT1L	Timer/Counter1 – Counter Register Low Byte								111
\$2B (\$4B)	OCR1AH	Timer/Counter1 – Output Compare Register A High Byte								111
\$2A (\$4A)	OCR1AL	Timer/Counter1 – Output Compare Register A Low Byte								111
\$29 (\$49)	OCR1BH	Timer/Counter1 – Output Compare Register B High Byte								111
\$28 (\$48)	OCR1BL	Timer/Counter1 – Output Compare Register B Low Byte								111
\$27 (\$47)	ICR1H	Timer/Counter1 – Input Capture Register High Byte								111
\$26 (\$46)	ICR1L	Timer/Counter1 – Input Capture Register Low Byte								111
\$25 (\$45)	TCCR2	FOC2	WGM20	COM21	COM20	WGM21	CS22	CS21	CS20	126
\$24 (\$44)	TCNT2	Timer/Counter2 (8 Bits)								127
\$23 (\$43)	OCR2	Timer/Counter2 Output Compare Register								127
\$22 (\$42)	ASSR	–	–	–	–	AS2	TCN2UB	OCR2UB	TCR2UB	128
\$21 (\$41)	WDTOR	–	–	–	WDTOE	WDE	WDP2	WDP1	WDP0	42
\$20 ⁽²⁾ (\$40) ⁽²⁾	UBRRH	URSEL	–	–	–	UBRR[11:8]				184
	UCSRC	URSEL	UMSEL	UPM1	UPM0	USBS	UCSZ1	UCSZ0	UCPOL	182
\$1F (\$3F)	EEARH	–	–	–	–	–	–	EEAR9	EEAR8	19
\$1E (\$3E)	EEARL	EEPROM Address Register Low Byte								19
\$1D (\$3D)	EEDR	EEPROM Data Register								19
\$1C (\$3C)	EEDR	–	–	–	–	EERIE	EEMWE	EEWE	EERE	19
\$1B (\$3B)	PORTA	PORTA7	PORTA6	PORTA5	PORTA4	PORTA3	PORTA2	PORTA1	PORTA0	64
\$1A (\$3A)	DDRA	DDA7	DDA6	DDA5	DDA4	DDA3	DDA2	DDA1	DDA0	64
\$19 (\$39)	PINA	PINA7	PINA6	PINA5	PINA4	PINA3	PINA2	PINA1	PINA0	64
\$18 (\$38)	PORTB	PORTB7	PORTB6	PORTB5	PORTB4	PORTB3	PORTB2	PORTB1	PORTB0	64
\$17 (\$37)	DDRB	ddb7	ddb6	ddb5	ddb4	ddb3	ddb2	ddb1	ddb0	64
\$16 (\$36)	PINB	PINB7	PINB6	PINB5	PINB4	PINB3	PINB2	PINB1	PINB0	65
\$15 (\$35)	PORTC	PORTC7	PORTC6	PORTC5	PORTC4	PORTC3	PORTC2	PORTC1	PORTC0	65
\$14 (\$34)	DDRC	DDC7	DDC6	DDC5	DDC4	DDC3	DDC2	DDC1	DDC0	65
\$13 (\$33)	PINC	PINC7	PINC6	PINC5	PINC4	PINC3	PINC2	PINC1	PINC0	65
\$12 (\$32)	PORTD	PORTD7	PORTD6	PORTD5	PORTD4	PORTD3	PORTD2	PORTD1	PORTD0	65
\$11 (\$31)	DDRD	DDD7	DDD6	DDD5	DDD4	DDD3	DDD2	DDD1	DDD0	65
\$10 (\$30)	PIND	PIND7	PIND6	PIND5	PIND4	PIND3	PIND2	PIND1	PIND0	65
\$0F (\$2F)	SPDR	SPI Data Register								138
\$0E (\$2E)	SPSR	SPIF	WCOL	–	–	–	–	–	SPI2X	138
\$0D (\$2D)	SPCR	SPIE	SPE	DORD	MSTR	CPOL	CPHA	SPR1	SPR0	136
\$0C (\$2C)	UDR	USART I/O Data Register								159
\$0B (\$2B)	UCSRA	RXC	TXC	UDRE	FE	DOR	PE	U2X	MPCM	180
\$0A (\$2A)	UCSRB	RXCIE	TXCIE	UDRIE	RXEN	TXEN	UCSZ2	RXB8	TXB8	181
\$09 (\$29)	UBRRL	USART Baud Rate Register Low Byte								164
\$08 (\$28)	ACSR	ACD	ACBG	ACO	ACI	ACIE	ACIC	ACIS1	ACIS0	199
\$07 (\$27)	ADMUX	REFS1	REFS0	ADLAR	MUX4	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0	214
\$06 (\$26)	ADCSRA	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0	216
\$05 (\$25)	ADCH	ADC Data Register High Byte								217
\$04 (\$24)	ADCL	ADC Data Register Low Byte								217
\$03 (\$23)	TWDR	Two-wire Serial Interface Data Register								179
\$02 (\$22)	TWAR	TWA8	TWA5	TWA4	TWA3	TWA2	TWA1	TWA0	TWGCE	179

Instruction Set Summary

Mnemonics	Operands	Description	Operation	Flags	#Clocks
ARITHMETIC AND LOGIC INSTRUCTIONS					
ADD	Rd, Rr	Add two Registers	$Rd \leftarrow Rd + Rr$	Z,C,N,V,H	1
ADC	Rd, Rr	Add with Carry two Registers	$Rd \leftarrow Rd + Rr + C$	Z,C,N,V,H	1
ADIW	Rdl,K	Add Immediate to Word	$Rdh:Rdl \leftarrow Rdh:Rdl + K$	Z,C,N,V,S	2
SUB	Rd, Rr	Subtract two Registers	$Rd \leftarrow Rd - Rr$	Z,C,N,V,H	1
SUBI	Rd, K	Subtract Constant from Register	$Rd \leftarrow Rd - K$	Z,C,N,V,H	1
SBC	Rd, Rr	Subtract with Carry two Registers	$Rd \leftarrow Rd - Rr - C$	Z,C,N,V,H	1
SBCI	Rd, K	Subtract with Carry Constant from Reg.	$Rd \leftarrow Rd - K - C$	Z,C,N,V,H	1
SBIW	Rdl,K	Subtract Immediate from Word	$Rdh:Rdl \leftarrow Rdh:Rdl - K$	Z,C,N,V,S	2
AND	Rd, Rr	Logical AND Registers	$Rd \leftarrow Rd \bullet Rr$	Z,N,V	1
ANDI	Rd, K	Logical AND Register and Constant	$Rd \leftarrow Rd \bullet K$	Z,N,V	1
OR	Rd, Rr	Logical OR Registers	$Rd \leftarrow Rd \vee Rr$	Z,N,V	1
ORI	Rd, K	Logical OR Register and Constant	$Rd \leftarrow Rd \vee K$	Z,N,V	1
EOR	Rd, Rr	Exclusive OR Registers	$Rd \leftarrow Rd \oplus Rr$	Z,N,V	1
COM	Rd	One's Complement	$Rd \leftarrow \$FF - Rd$	Z,C,N,V	1
NEG	Rd	Two's Complement	$Rd \leftarrow \$00 - Rd$	Z,C,N,V,H	1
SBR	Rd,K	Set Bit(s) in Register	$Rd \leftarrow Rd \vee K$	Z,N,V	1
CBR	Rd,K	Clear Bit(s) in Register	$Rd \leftarrow Rd \bullet (\$FF - K)$	Z,N,V	1
INC	Rd	Increment	$Rd \leftarrow Rd + 1$	Z,N,V	1
DEC	Rd	Decrement	$Rd \leftarrow Rd - 1$	Z,N,V	1
TST	Rd	Test for Zero or Minus	$Rd \leftarrow Rd \bullet Rd$	Z,N,V	1
CLR	Rd	Clear Register	$Rd \leftarrow Rd \oplus Rd$	Z,N,V	1
SER	Rd	Set Register	$Rd \leftarrow \$FF$	None	1
MUL	Rd, Rr	Multiply Unsigned	$R1:R0 \leftarrow Rd \times Rr$	Z,C	2
MULS	Rd, Rr	Multiply Signed	$R1:R0 \leftarrow Rd \times Rr$	Z,C	2
MULSU	Rd, Rr	Multiply Signed with Unsigned	$R1:R0 \leftarrow Rd \times Rr$	Z,C	2
FMUL	Rd, Rr	Fractional Multiply Unsigned	$R1:R0 \leftarrow (Rd \times Rr) \lll 1$	Z,C	2
FMULS	Rd, Rr	Fractional Multiply Signed	$R1:R0 \leftarrow (Rd \times Rr) \lll 1$	Z,C	2
FMULSU	Rd, Rr	Fractional Multiply Signed with Unsigned	$R1:R0 \leftarrow (Rd \times Rr) \lll 1$	Z,C	2
BRANCH INSTRUCTIONS					
RJMP	k	Relative Jump	$PC \leftarrow PC + k + 1$	None	2
JMP		Indirect Jump to (Z)	$PC \leftarrow Z$	None	2
JMP	k	Direct Jump	$PC \leftarrow k$	None	3
RCALL	k	Relative Subroutine Call	$PC \leftarrow PC + k + 1$	None	3
ICALL		Indirect Call to (Z)	$PC \leftarrow Z$	None	3
CALL	k	Direct Subroutine Call	$PC \leftarrow k$	None	4
RET		Subroutine Return	$PC \leftarrow Stack$	None	4
RETI		Interrupt Return	$PC \leftarrow Stack$	I	4
CPSE	Rd,Rr	Compare, Skip if Equal	if (Rd = Rr) $PC \leftarrow PC + 2$ or 3	None	1 / 2 / 3
CP	Rd,Rr	Compare	$Rd - Rr$	Z, N, V, C, H	1
CPC	Rd,Rr	Compare with Carry	$Rd - Rr - C$	Z, N, V, C, H	1
CPI	Rd,K	Compare Register with Immediate	$Rd - K$	Z, N, V, C, H	1
SBRC	Rr, b	Skip if Bit in Register Cleared	if (Rr(b)=0) $PC \leftarrow PC + 2$ or 3	None	1 / 2 / 3
SBRS	Rr, b	Skip if Bit in Register is Set	if (Rr(b)=1) $PC \leftarrow PC + 2$ or 3	None	1 / 2 / 3
SBIC	P, b	Skip if Bit in I/O Register Cleared	if (P(b)=0) $PC \leftarrow PC + 2$ or 3	None	1 / 2 / 3
SBIS	P, b	Skip if Bit in I/O Register is Set	if (P(b)=1) $PC \leftarrow PC + 2$ or 3	None	1 / 2 / 3
BRBS	s, k	Branch if Status Flag Set	if (SREG(s) = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRBC	s, k	Branch if Status Flag Cleared	if (SREG(s) = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BREQ	k	Branch if Equal	if (Z = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRNE	k	Branch if Not Equal	if (Z = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRCS	k	Branch if Carry Set	if (C = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRCC	k	Branch if Carry Cleared	if (C = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRSH	k	Branch if Same or Higher	if (C = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRLO	k	Branch if Lower	if (C = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRMI	k	Branch if Minus	if (N = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRPL	k	Branch if Plus	if (N = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRGE	k	Branch if Greater or Equal, Signed	if (N \oplus V = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRLT	k	Branch if Less Than Zero, Signed	if (N \oplus V = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRHS	k	Branch if Half Carry Flag Set	if (H = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRHC	k	Branch if Half Carry Flag Cleared	if (H = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRTS	k	Branch if T Flag Set	if (T = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRTC	k	Branch if T Flag Cleared	if (T = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRVS	k	Branch if Overflow Flag is Set	if (V = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRVC	k	Branch if Overflow Flag is Cleared	if (V = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
Mnemonics					
BRIE	k	Branch if Interrupt Enabled	if (I = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2
BRID	k	Branch if Interrupt Disabled	if (I = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1 / 2

DATA TRANSFER INSTRUCTIONS					
MOV	Rd, Rr	Move Between Registers	$Rd \leftarrow Rr$	None	1
MOVW	Rd, Rr	Copy Register Word	$Rd+1:Rd \leftarrow Rr+1:Rr$	None	1
LDI	Rd, K	Load Immediate	$Rd \leftarrow K$	None	1
LD	Rd, X	Load Indirect	$Rd \leftarrow (X)$	None	2
LD	Rd, X+	Load Indirect and Post-Inc.	$Rd \leftarrow (X), X \leftarrow X + 1$	None	2
LD	Rd, -X	Load Indirect and Pre-Dec.	$X \leftarrow X - 1, Rd \leftarrow (X)$	None	2
LD	Rd, Y	Load Indirect	$Rd \leftarrow (Y)$	None	2
LD	Rd, Y+	Load Indirect and Post-Inc.	$Rd \leftarrow (Y), Y \leftarrow Y + 1$	None	2
LD	Rd, -Y	Load Indirect and Pre-Dec.	$Y \leftarrow Y - 1, Rd \leftarrow (Y)$	None	2
LDD	Rd, Y+q	Load Indirect with Displacement	$Rd \leftarrow (Y + q)$	None	2
LD	Rd, Z	Load Indirect	$Rd \leftarrow (Z)$	None	2
LD	Rd, Z+	Load Indirect and Post-Inc.	$Rd \leftarrow (Z), Z \leftarrow Z + 1$	None	2
LD	Rd, -Z	Load Indirect and Pre-Dec.	$Z \leftarrow Z - 1, Rd \leftarrow (Z)$	None	2
LDD	Rd, Z+q	Load Indirect with Displacement	$Rd \leftarrow (Z + q)$	None	2
LDS	Rd, k	Load Direct from SRAM	$Rd \leftarrow (k)$	None	2
ST	X, Rr	Store Indirect	$(X) \leftarrow Rr$	None	2
ST	X+, Rr	Store Indirect and Post-Inc.	$(X) \leftarrow Rr, X \leftarrow X + 1$	None	2
ST	-X, Rr	Store Indirect and Pre-Dec.	$X \leftarrow X - 1, (X) \leftarrow Rr$	None	2
ST	Y, Rr	Store Indirect	$(Y) \leftarrow Rr$	None	2
ST	Y+, Rr	Store Indirect and Post-Inc.	$(Y) \leftarrow Rr, Y \leftarrow Y + 1$	None	2
ST	-Y, Rr	Store Indirect and Pre-Dec.	$Y \leftarrow Y - 1, (Y) \leftarrow Rr$	None	2
STD	Y+q, Rr	Store Indirect with Displacement	$(Y + q) \leftarrow Rr$	None	2
ST	Z, Rr	Store Indirect	$(Z) \leftarrow Rr$	None	2
ST	Z+, Rr	Store Indirect and Post-Inc.	$(Z) \leftarrow Rr, Z \leftarrow Z + 1$	None	2
ST	-Z, Rr	Store Indirect and Pre-Dec.	$Z \leftarrow Z - 1, (Z) \leftarrow Rr$	None	2
STD	Z+q, Rr	Store Indirect with Displacement	$(Z + q) \leftarrow Rr$	None	2
STS	k, Rr	Store Direct to SRAM	$(k) \leftarrow Rr$	None	2
LPM		Load Program Memory	$R0 \leftarrow (Z)$	None	3
LPM	Rd, Z	Load Program Memory	$Rd \leftarrow (Z)$	None	3
LPM	Rd, Z+	Load Program Memory and Post-Inc	$Rd \leftarrow (Z), Z \leftarrow Z + 1$	None	3
SPM		Store Program Memory	$(Z) \leftarrow R1:R0$	None	-
IN	Rd, P	In Port	$Rd \leftarrow P$	None	1
OUT	P, Rr	Out Port	$P \leftarrow Rr$	None	1
PUSH	Rr	Push Register on Stack	$Stack \leftarrow Rr$	None	2
POP	Rd	Pop Register from Stack	$Rd \leftarrow Stack$	None	2
BIT AND BIT-TEST INSTRUCTIONS					
SBI	P, b	Set Bit in I/O Register	$I/O(P, b) \leftarrow 1$	None	2
CBI	P, b	Clear Bit in I/O Register	$I/O(P, b) \leftarrow 0$	None	2
LSL	Rd	Logical Shift Left	$Rd(n+1) \leftarrow Rd(n), Rd(0) \leftarrow 0$	Z, C, N, V	1
LSR	Rd	Logical Shift Right	$Rd(n) \leftarrow Rd(n+1), Rd(7) \leftarrow 0$	Z, C, N, V	1
ROL	Rd	Rotate Left Through Carry	$Rd(0) \leftarrow C, Rd(n+1) \leftarrow Rd(n), C \leftarrow Rd(7)$	Z, C, N, V	1
ROR	Rd	Rotate Right Through Carry	$Rd(7) \leftarrow C, Rd(n) \leftarrow Rd(n+1), C \leftarrow Rd(0)$	Z, C, N, V	1
ASR	Rd	Arithmetic Shift Right	$Rd(n) \leftarrow Rd(n+1), n=0..6$	Z, C, N, V	1
SWAP	Rd	Swap Nibbles	$Rd(3..0) \leftarrow Rd(7..4), Rd(7..4) \leftarrow Rd(3..0)$	None	1
BSET	s	Flag Set	$SREG(s) \leftarrow 1$	SREG(s)	1
BCLR	s	Flag Clear	$SREG(s) \leftarrow 0$	SREG(s)	1
BST	Rr, b	Bit Store from Register to T	$T \leftarrow Rr(b)$	T	1
BLD	Rd, b	Bit load from T to Register	$Rd(b) \leftarrow T$	None	1
SEC		Set Carry	$C \leftarrow 1$	C	1
CLC		Clear Carry	$C \leftarrow 0$	C	1
SEN		Set Negative Flag	$N \leftarrow 1$	N	1
CLN		Clear Negative Flag	$N \leftarrow 0$	N	1
SEZ		Set Zero Flag	$Z \leftarrow 1$	Z	1
CLZ		Clear Zero Flag	$Z \leftarrow 0$	Z	1
SEI		Global Interrupt Enable	$I \leftarrow 1$	I	1
CLI		Global Interrupt Disable	$I \leftarrow 0$	I	1
SES		Set Signed Test Flag	$S \leftarrow 1$	S	1
CLS		Clear Signed Test Flag	$S \leftarrow 0$	S	1
SEV		Set Twos Complement Overflow	$V \leftarrow 1$	V	1
CLV		Clear Twos Complement Overflow	$V \leftarrow 0$	V	1
SET		Set T in SREG	$T \leftarrow 1$	T	1
CLT		Clear T in SREG	$T \leftarrow 0$	T	1
SEH		Set Half Carry Flag in SREG	$H \leftarrow 1$	H	1

Mnemonics	Operands	Description	Operation	Flags	#Clocks
CLH		Clear Half Carry Flag in SREG	$H \leftarrow 0$	H	1
MCU CONTROL INSTRUCTIONS					
NOP		No Operation		None	1
SLEEP		Sleep	(see specific descr. for Sleep function)	None	1
WDR		Watchdog Reset	(see specific descr. for WDR/timer)	None	1
BREAK		Break	For On-Chip Debug Only	None	N/A

