

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Υλοποίηση Ανιχνευτή Σημείου Μεγίστης Ισχύος  
(Maximum Power Point Tracking – MPPT)**



**ΓΚΟΛΦΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ  
ΣΦΥΡΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

Επιβλέπων Καθηγητής: Ηλίας Σταθάτος

Πατρα 2016



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους γονείς μας, οι οποίοι μας συμπαραστάθηκαν και μας στήριξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

Στη συνέχεια θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον καθηγητή μας κ. Ηλία Σταθάτο για την συνεργασία που είχαμε μαζί του για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστιές για την πολύτιμη βοήθεια, την προμύθεια υλικών και την χρηματοδότηση για την υλοποίηση της παρούσας πτυχιακής στην εταιρία Dialog Semiconductor Hellas και συγκεκριμένα στον κ. Μάριο Ηλιόπουλο (Director Application), στον κ. Παναγιώτη Ρόζο (Hardware Application Manager) και στο τμήμα Hardware Application της Dialog Semiconductor Hellas.

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους συμφοιτητές και φίλους μας για την συνεργασία και την στήριξή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μας.

# 1 Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2	ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ.....	7
2.1.	ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΠΡΟΣΜΕΙΞΗΣ.....	7
2.2.	ΔΙΟΔΟΣ ΕΠΑΦΗΣ.....	9
2.3.	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ.....	11
2.4.	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	12
2.5.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	14
2.6.	ΣΗΜΕΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	15
2.7.	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	19
2.8.	ΙΣΧΥΣ ΑΙΧΜΗΣ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	19
2.9.	DC - DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ.....	20
2.10.	Ο ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ BUCK ΚΑΙ Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ MPPT.....	21
2.11.	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ.....	24
2.10.1	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ.....	24
2.10.2	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	25
2.10.3	ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΤΥΠΟΥ MPPT.....	25
3	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (MPPT)....	29
3.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	29
3.2	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΤΑΡΑΞΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ (PERTURB AND OBSERVER P&O).....	31
3.3	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΥΞΗΤΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ (Incremental conductance - INC).....	34
3.4	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (PARASITIC CAPACITANCE).....	38
3.5	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΤΑΣΗΣ (CONSTANT VOLTAGE).....	38
3.6	ΣΥΝΟΨΗ.....	41
4	MAXIMUM POWER POINT TRACKER.....	42
4.1	Εισαγωγή.....	42
4.2	Σχεδιασμός και ανάλυση του κυκλώματος.....	43
4.3	Το κύκλωμα του μικροελεγκτή.....	48
4.4	Το κύκλωμα υλοποίησης του Buck converter, Half Bridge MOSFET, Totem Pole Transistors, PWM.....	51
4.5	Το κύκλωμα μέτρησης ρεύματος του Φ/β πάνελ.....	53
4.6	Το κύκλωμα μέτρησης τάσης του Φ/β πάνελ.....	54
4.7	Το κύκλωμα σειριακής (FTDI) και JTAG σύνδεσης του μικροελεγκτή.....	55
4.8	Το κύκλωμα τροφοδοσίας του μικροελεγκτή.....	57
4.9	Άλλα βοηθητικά κυκλώματα.....	58

4.9.1	Λευκά LEDs.....	58
4.9.2	Κύκλωμα επαναφοράς - επανεκκίνησης του συστήματος (RESET).....	58
4.9.3	Αλλαγή τροφοδοσίας του μικροελεγκτή μεταξύ του USB και Buck Converter.....	59
4.9.4	Λοιπές θύρες μικροελεγκτή και σημεία γείωσης (GND) .....	60
4.10	Σχεδίαση της πλακέτας (PCB).....	61
4.11	Ανάπτυξη του προγράμματος εφαρμογής .....	65
4.11.1	Keil uVision 5 .....	66
4.12	Υλοποίηση του αλγόριθμου ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος MPPT66	
5	. Βιβλιογραφία .....	68
	Βικιπαίδεια:.....	68
	<a href="https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CE%AC">https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CE%AC</a> .....	68
	<a href="http://hermes.di.uoa.gr/exe_activities/algorithmoi/___2.html">http://hermes.di.uoa.gr/exe_activities/algorithmoi/___2.html</a> .....	68
	Google:.....	68

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υλοποίηση της εργασίας αυτής έχει σκοπό να κατασκευάσουμε ένα κύκλωμα το οποίο να εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν γίνεται την ενέργεια που παράγει μια φωτοβολταϊκή συστοιχία. Για την κατασκευή του εντοπισμού σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking ή MPPT) χρησιμοποιήσαμε έναν μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης (Buck converter) και τον μικροελεγκτή DA14583 Bluetooth LE της εταιρίας Dialog Semiconductor. Χρησιμοποιήσαμε αυτόν τον μικροελεγκτή λόγω του χαμηλού κόστους αγοράς και τη χαμηλή κατανάλωση του.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφουμε την αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς και μια μικρή αναφορά στην λειτουργία των ηλεκτρικών συσσωρευτών και στον buck converter.

Στο κεφάλαιο 3, γίνεται μια αναφορά σε κάποιους από τους ήδη υπάρχον αλγόριθμους, για την υλοποίηση λειτουργίας του Maximum power point tracking.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, αναφερόμαστε αναλυτικότερα για το σχεδιασμό της κατασκευής μας, σχηματικά διαγράμματα, υλοποίηση της πλακέτας με τον μικροελεγκτή DA14583 Bluetooth LE.

## 2 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

### 2.1. ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΠΡΟΣΜΕΙΞΗΣ

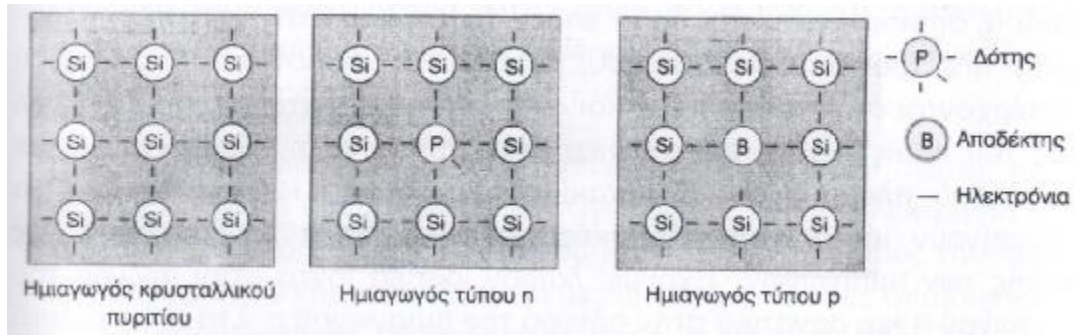
Όταν ένας ημιαγωγός φωτιστεί, τα φωτόνια μεταφέρουν την ενέργειά τους στα ηλεκτρόνια σθένους του ημιαγωγού, τα οποία κατορθώνουν τελικά να αποδεσμευτούν από την έλξη του πυρήνα τους. Καθώς ένα ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται, δημιουργεί μία κενή θέση στο δεσμό, που κατείχε προηγουμένως. Η θέση αυτή ονομάζεται οπή. Αν καταφέρουμε να αποσπάσουμε το ηλεκτρόνιο αυτό έξω από τον ημιαγωγό, τότε ένα ηλεκτρόνιο γειτονικού ατόμου θα καταλάβει τη θέση του. Στη συνέχεια τη θέση του τελευταίου ηλεκτρονίου θα καταλάβει ένα άλλο ηλεκτρόνιο από γειτονικό άτομο και ο μηχανισμός αυτός θα συνεχιστεί. Θα έχουμε, δηλαδή, μία κίνηση ηλεκτρονίων προς μία κατεύθυνση και μία κίνηση οπών προς την άλλη.

Για να κατανοήσουμε εύκολα αυτό το φαινόμενο μπορούμε να φανταστούμε ένα σταθμό αυτοκινήτων, όπου ένας οδηγός αλλάζει θέση και πηγαίνει το αυτοκίνητό του σε μία καλύτερη. Στη θέση που άφησε έρχεται ένα άλλο αυτοκίνητο. Τη θέση του αυτοκινήτου αυτού καταλαμβάνει ένα τρίτο αυτοκίνητο και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται. Παρατηρώντας τη σκηνή καταλαβαίνουμε ότι έχουμε μια κίνηση αυτοκινήτων προς τη μια κατεύθυνση και μια κίνηση κενών θέσεων προς την άλλη.

Η κίνηση των ηλεκτρονίων έξω από τον ημιαγωγό, δηλαδή, η παραγωγή ρεύματος εξασφαλίζεται με τους ημιαγωγούς πρόσμειξης. Οι αγωγοί αυτοί περιέχουν μέσα στο κρυσταλλικό τους πλέγμα διασπαρμένα άτομα από επιλεγμένο διαφορετικό υλικό. Διακρίνουμε δύο τύπους τέτοιων ημιαγωγών:

#### · Ημιαγωγός τύπου n

Προκύπτει από τον αντίστοιχο καθαρό ημιαγωγό, αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομα του με άτομα άλλου υλικού μεγαλύτερου σθένους. Για παράδειγμα, αν μερικά άτομα κρυσταλλικού πυριτίου (Si) με σθένος 4 αντικατασταθούν με άτομα φωσφόρου (P) σθένους 5, δημιουργείται ο ημιαγωγός τύπου n. Στον ημιαγωγό αυτό εάν ηλεκτρόνιο ανά άτομο πρόσμειξης δεν συμμετέχει σε δεσμό και είναι ελεύθερο. Έτσι ο ημιαγωγός τύπου n περιέχει περισσότερα ηλεκτρόνια από το καθαρό αγωγό και τα άτομα της πρόσμειξης ονομάζονται δότες.

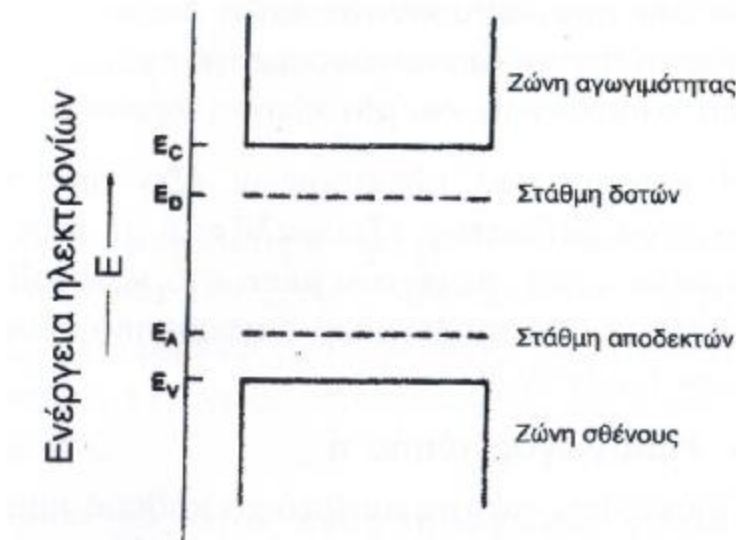


**Εικόνα 1:** Σχηματισμός ημιαγωγών πρόσμειξης

### · Ημιαγωγός τύπου p

Προκύπτει από τον αντίστοιχο καθαρό ημιαγωγό αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομα του, με άτομα άλλου υλικού μικρότερου σθένους. Για παράδειγμα, αν μερικά άτομα κρυσταλλικού πυριτίου (Si) με σθένος 4 αντικατασταθούν με άτομα Βορείου (B) σθένους 3, δημιουργείται ο ημιαγωγός τύπου p. Στον ημιαγωγό αυτό τα άτομα πρόσμειξης μπορούν να δεχτούν ένα ηλεκτρόνιο για να συμπληρωθεί ο ελεύθερος δεσμός και ονομάζονται αποδέκτες (Εικόνα 1).

Τέλος, το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών των ημιαγωγών πρόσμειξης συμπληρώνεται με τις στάθμες δοτών και αποδεκτών (Εικόνα 2), που τοποθετούνται μέσα στην απαγορευμένη ζώνη και σε αποστάσεις από τις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους όσες είναι οι αντίστοιχες ενέργειες για τη διέγερση των προσμείξεων.

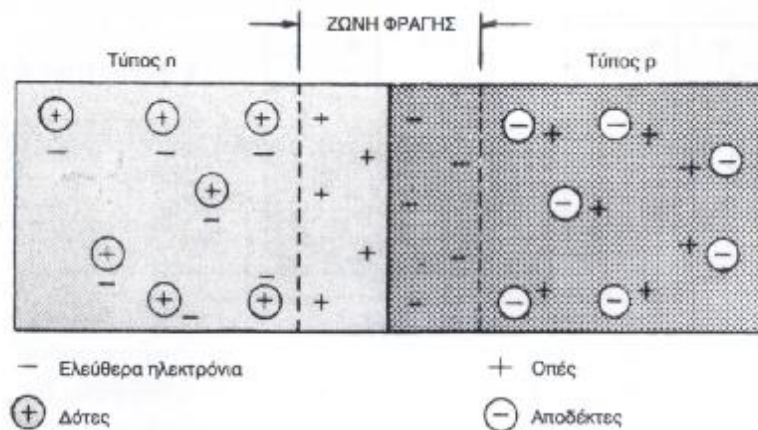


**Εικόνα 2:** Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών σε ημιαγωγούς πρόσμειξης



## 2.2. ΔΙΟΔΟΣ ΕΠΑΦΗΣ

Όταν φέρουμε σε επαφή έναν ημιαγωγό τύπου  $p$  με έναν ημιαγωγό τύπου  $n$ , δημιουργείται στη θέση επαφής μία ζώνη στην οποία εναλλάσσονται ηλεκτρόνια με οπές. (Εικόνα 3)



Εικόνα 3: Επαφή ημιαγωγού τύπου  $p$  με ημιαγωγό τύπου  $n$

Ελεύθερα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού  $n$  εισέρχονται στον ημιαγωγό  $p$  και συμπληρώνουν αντίστοιχες οπές ενώ οπές του ημιαγωγού  $p$  εισέρχονται στον ημιαγωγό  $n$  και ενώνονται με ίσο αριθμό ηλεκτρονίων. Η μετακίνηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να παραμείνουν ιόντα στις γειτονικές περιοχές, δεξιά και αριστερά της επαφής των ημιαγωγών. Έχουμε, λοιπόν, θετικά ιόντα στη πλευρά του ημιαγωγού  $n$  και αρνητικά στη πλευρά του ημιαγωγού  $p$ . Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε ότι ιόν ονομάζεται ένα άτομο που έχει προσλάβει ή έχει απολέσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια.

Έτσι, η πλευρά  $n$  αποκτά θετικό δυναμικό και η πλευρά  $p$  αρνητικό. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των 2 πλευρών εμποδίζει τη ροή ηλεκτρονίων από τον ημιαγωγό  $n$  στον ημιαγωγό  $p$  και οπών αντίστροφα. Έτσι, γύρω από τη θέση επαφής δημιουργείται μία ζώνη αντίστασης (Εικόνα 3) που, απαγορεύει την ανταλλαγή ηλεκτρονίων-οπών και ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης ή ζώνη φραγής.

Η παραπάνω διάταξη των ημιαγωγών  $p$  και  $n$  σε επαφή, ονομάζεται δίοδος επαφής ή κρυσταλλοειδούς ή ημιαγωγή επαφή  $p-n$ . Η χαρακτηριστική της ιδιότητα είναι ότι όταν εφαρμοστεί στα άκρα της ηλεκτρική τάση κατά τη μία ή την άλλη φορά, άγει ηλεκτρικό ρεύμα διαφορετικής έντασης σε κάθε περίπτωση (Εικόνα 4).



**Εικόνα 4:** Ηλεκτρική τάση στα άκρα διόδου επαφής

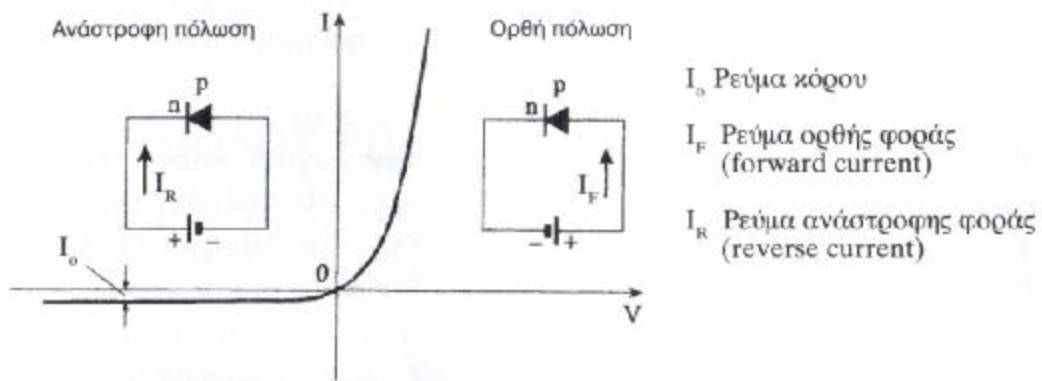
### ΟΠόλωση κατά την ορθή φορά.

Ο θετικός πόλος της πηγής συνεχούς τάσεως συνδέεται με τον ημιαγωγό τύπου **p** και ο αρνητικός με τον αγωγό τύπου **n**. Τότε, τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα από την πηγή διάμεσου του ημιαγωγού **n** προς την περιοχή της επαφής, που επανασυνδέονται με τις οπές η οποίες δημιουργούνται με την απομάκρυνση ηλεκτρονίων προς τον θετικό πόλο της πηγής διαμέσου του ημιαγωγού **p**.

### ΟΠόλωση κατά την ανάστροφη φορά.

Ο αρνητικός πόλος της πηγής συνεχούς τάσεως συνδέεται με τον ημιαγωγό **p** και ο θετικός με τον ημιαγωγό **n**. Τότε, τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή διαμέσου του ημιαγωγού **p** επανασυνδέονται με τις οπές του ημιαγωγού **p**, ενώ τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού **n** κινούνται προς το θετικό πόλο της πηγής.

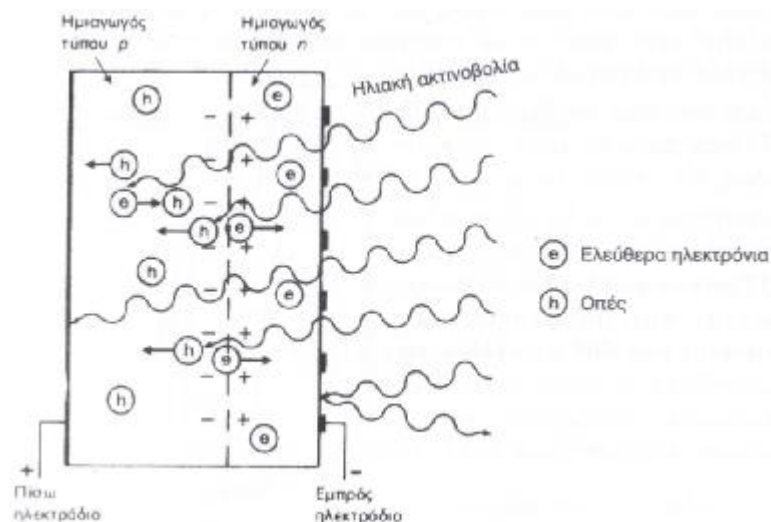
Έτσι, κατά την ορθή πόλωση της διόδου επαφής καταργείται η ζώνη φραγής και επιτρέπεται η διέλευση του ρεύματος από την επαφή των ημιαγωγών. (Εικόνα 5). Αντίθετα, κατά την ανάστροφη πόλωση της διόδου επαφής αυξάνεται η ζώνη φραγής και εμποδίζεται η διέλευση του ρεύματος από την επαφή των ημιαγωγών. Το μόνο ρεύμα που διέρχεται από την δίοδο έχει μικρή και σταθερή τιμή  $I_0$ , οφείλεται στις οπές του ημιαγωγού **n** και στα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού **p** και ονομάζεται ρεύμακ όρου. Η ιδιαιτερότητα αυτή της διόδου επαφής, δηλαδή, το γεγονός ότι επιτρέπει την δίοδο του ρεύματος προς μια μόνοκατεύθυνση, εφ' όσον πολωθεί κατά την ορθή φορά, δικαιολογεί απόλυτα την χρήση της ως διάταξη ανόρθωσης για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές.



Εικόνα 5: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης - τάσης (I-V) διόδου επαφής

### 2.3. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Συμφώνα με τα όσα αναφέραμε στις παραγράφους πιο πάνω, όταν μια δίοδος επαφής δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια  $h\nu$  μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό χάσμα  $E_g$  του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Όσο, λοιπόν, διαρκεί η ακτινοβολία δημιουργείται μια περίσσεια απόζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Όταν τα ζεύγη αυτά βρεθούν στην περιοχή της επαφής των ημιαγωγών, έχουμε εκτροπή των ηλεκτρονίων προς τον ημιαγωγό  $n$  και εκτροπή των οπών προς τον ημιαγωγό  $p$  (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Μηχανισμός εκδήλωσης φωτοβολταϊκού φαινομένου σε φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Δημιουργείται, δηλαδή, μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών των δυο τμημάτων της διόδου, η οποία διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτήν και το γεγονός αυτό ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διάταξη αυτή, η οποία αποτελεί πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο και για λογούσευκολίας γράφεται ΦΒ στοιχείο. Τέλος, το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα λέγεται φωτόρευμα.

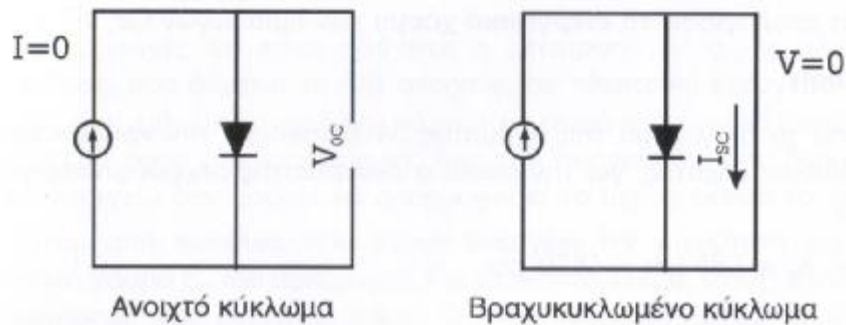
Το φωτόρευμα είναι ευθέως ανάλογο της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $P_{HA} [W/m^2]$ , που προσπίπτει στο ΦΒ στοιχείο και του εμβαδού της επαφής των δυο ημιαγωγών.

Είναι προφανές ότι είναι αδύνατη η μετατροπή όλης της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχεται το ΦΒ στοιχείο, σε ηλεκτρική ενεργεία. Ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του ΦΒ στοιχείου και διαχέεται προς τη ατμόσφαιρα. Από την ακτινοβολία που διεισδύει στο ΦΒ στοιχείο δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος εκείνο το οποίο αποτελείται από φωτόνια, που έχουν ενέργεια  $HV$  μικρότερη από το ενεργειακό χάσμα  $E_g$  του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά, το ΦΒ στοιχείο, συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα, δηλαδή, η αντίστοιχη ακτινοβολία το διαπερνά και απλά θερμαίνει το μεταλλικό ηλεκτρόδιο, που καλύπτει την πίσω όψη του. Ούτε όμως και το μέρος της ακτινοβολίας, που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού αξιοποιείται, γιατί μετατρέπεται σε θερμότητα. Τελικά, μόνο το μέρος της ακτινοβολίας της οποίας τα φωτόνια έχουν ενέργεια  $HV = E_g$  αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Γιατί τα φωτόνια αυτά απορροφώνται και αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του ΦΒ στοιχείου να μετακινηθούν σε άλλη θέση. Και ως, γνωστόν, ηλεκτρισμός σημαίνει κίνηση ηλεκτρονίων.

Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από έναν συντελεστή απορρόφησης  $\alpha$ , ο όποιος εξαρτάται από το μήκος κύματος  $\lambda$  της ηλιακής ακτινοβολίας και το υλικό. Είναι προφανές ότι ο συντελεστής απορρόφησης μηδενίζεται για μια κρίσιμη τιμή  $\lambda_g$  του μήκους κύματος ( $\lambda_g = h \cdot c / E_g$ ), πάνω από την οποία το υλικό γίνεται διαπερατό (διαφανές), δηλαδή, τα φωτόνια δεν απορροφώνται από τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους.

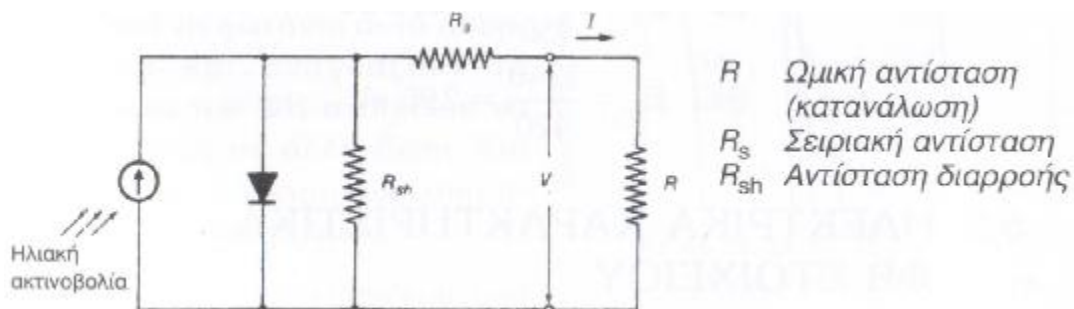
## **2.4. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ**

Προκειμένου να μελετήσουμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός ΦΒ στοιχείου, που δέχεται σταθερή ηλιακή ακτινοβολία, θεωρούμε ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από μια δίοδο επαφής (Εικόνα 7). Αν στο απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα τα άκρα της επαφής συνδεθούν με χάλκινο σύρμα μεγάλης διατομής, άρα πρακτικά μηδενικής αντίστασης, το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο και διαρρέεται από ρεύμα ίσο με το φωτόρευμα, που ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  του ΦΒ στοιχείου. Αν τα άκρα της επαφής δεν συνδέονται μεταξύ τους, δηλαδή, έχουμε ανοιχτό κύκλωμα, η τάση στα άκρα ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  του ΦΒ στοιχείου.



**Εικόνα 7:** Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ΦΒ στοιχείου.

Στην πραγματικότητα το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου (Εικόνα 8), περιλαμβάνει ακόμα δυο αντιστάσεις: α) Τη σειριακή αντίσταση  $R_s$ , η οποία συνδέεται σε σειρά με την δίοδο επαφής της και αφορά στις αντιστάσεις κατά το πέρασμα του ρεύματος μέσα από την δίοδο και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια και β) Την αντίσταση διαρροής  $R_{sh}$ , η οποία συνδέεται παράλληλα με την δίοδο επαφής και αφορά στη διαρροή ρεύματος μεταξύ των ακρών της επαφής. Τα ΦΒ στοιχεία του εμπορίου έχουν συνήθως  $R_s < 5\Omega$  και  $R_{sh} > 500\Omega$ .



**Εικόνα 8:** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ΦΒ στοιχείου

## Συμπέρασμα

Η λειτουργία ενός ΦΒ στοιχείου μοιάζει με αυτή ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή, γιατί και οι δυο διατάξεις δίνουν ηλεκτρική ενέργεια.

Στον ηλεκτρικό συσσωρευτή έχουμε χημικές αντιδράσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων και του διαλύματος και η παραγόμενη ενέργεια αποθηκεύεται στα ηλεκτρόδια. Η ηλεκτρική ενέργεια αποδίδεται με σταθερή ηλεκτρική τάση και ανάλογα με την κατανάλωση (αντίσταση) το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να έχει πολύ μικρή έως πολύ μεγάλη ένταση. Για παράδειγμα, το ρεύμα βραχυκύκλωσης (μέγιστο αποδιδόμενο ρεύμα) ενός συσσωρευτή 12V με εσωτερική αντίσταση  $R=0.01\Omega$  είναι  $I_{sc}=1200A$ .

Αντίθετα, το ΦΒ στοιχείο έχει την ιδιότητα να διατηρεί σταθερή την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, προσαρμόζοντας την τάση στα άκρα της κατανάλωσης (αντίσταση). Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός ΦΒ στοιχείου, που δέχεται ηλιακή ακτινοβολία ισχύος  $1KW/m^2$ , είναι  $I_{sc}=30 - 40mA/cm^2$ .

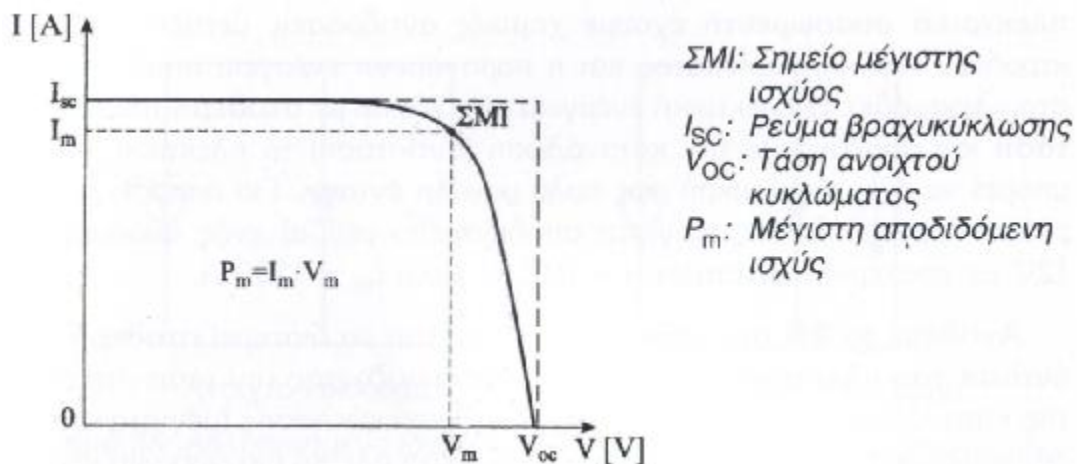
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο ηλεκτρικός συσσωρευτής είναι μια πηγή σταθερής ηλεκτρικής τάσεως και το ΦΒ στοιχείο μια πηγή σταθερούς ηλεκτρικού ρεύματος.

## 2.5. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Σύμφωνα με τα όσα αναπτύξαμε στη προηγούμενη παράγραφο, η τάση των ΦΒ στοιχείων μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν παραμένει σταθερή η ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται.

Όταν το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος παίρνει την μέγιστη τιμή  $I_{sc}$  και η ηλεκτρική τάση μηδενίζεται ( $V=0$ ). Αντίθετα, όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό, η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται ( $I=0$ ) και η τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή  $V_{oc}$ .

Οι μεταβολές έντασης και τάσεως φαίνονται στο διάγραμμα με μια καμπύλη γραμμή, (Εικόνα 9), που αποτελεί την χαρακτηριστική καμπύλη του ΦΒ στοιχείου. Η καμπύλη αυτή ισχύει σε συνθήκες σταθερής ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενη αντίσταση του κυκλώματος από μηδέν μέχρι άπειρη. Είναι προφανές ότι ανάμεσα στις παραπάνω ακραίες καταστάσεις, η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές.



Εικόνα 9: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος  $I$  - τάσης ρεύματος  $V$  ενός ΦΒ στοιχείου.

Όπως είναι γνωστό, η ηλεκτρική ισχύς  $P$  ορίζεται ως το γινόμενο της έντασης  $I$  επί την τάση  $U$  του ρεύματος ( $P=I*U$ ). Το μέγιστο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο μέσα στην καμπύλη  $I-V$  με πλευρές  $I_m$  και  $U_m$ , έχει εμβαδόν ίσο με την μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ  $P_m$  από το ΦΒ στοιχείο. Άρα, εκτός από την τάση και την ένταση του ρεύματος, μεταβάλλεται ομαλά και η ηλεκτρική

ισχύς  $P$  που παράγει το ΦΒ στοιχείο, με μέγιστη τιμή την  $P_m$  για ένα ορισμένο ζεύγος τιμών έντασης  $I_m$  και τάσεως  $U_m$ .

Το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με πλευρές  $I_{sc}$  (ρεύμα βραχυκύκλωσης) και  $V_{oc}$  (τάση ανοιχτού κυκλώματος), που βρίσκεται εξωτερικά της καμπύλης  $I-V$ , περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του ΦΒ στοιχείου ως πηγή σταθερού ρεύματος. Το πηλίκο των εμβαδών των δυο παραλληλόγραμμων ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης  $FF$  του ΦΒ στοιχείου και δίνει το μέτρο προσέγγισης της λειτουργίας ενός στοιχείου προς την ιδανική συμπεριφορά.

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad [-]$$

$$I_m, I_{SC} [A] \quad V_m, V_{OC} [V]$$

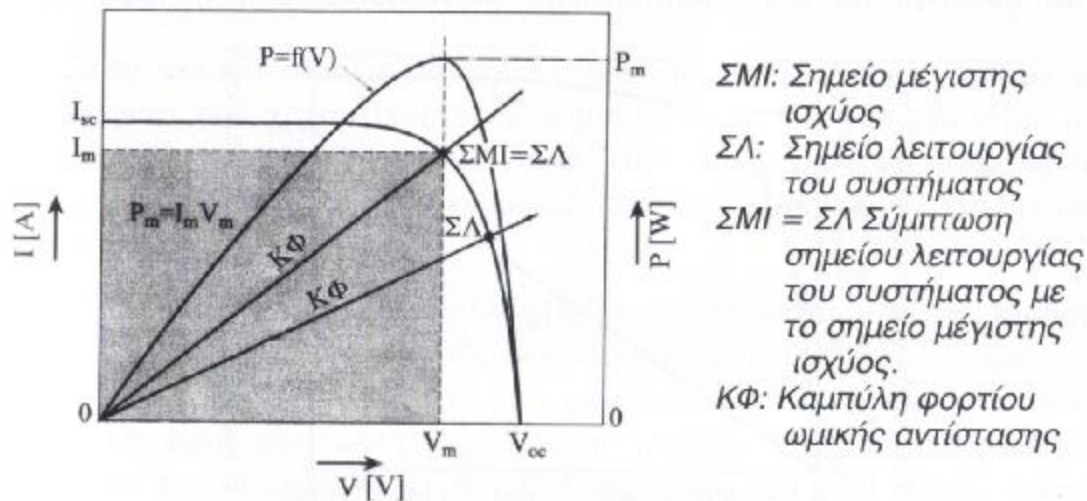
Η τιμή του  $FF$  κυμαίνεται από 0 έως 1. Μια τιμή από 0,7 έως 0,9 χαρακτηρίζει ένα ΦΒ στοιχείο με αποδέκτη έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση.

## 2.6. ΣΗΜΕΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Στις ακραίες καταστάσεις του βραχυκυκλωμένου και ανοιχτού κυκλώματος, όπου  $V=0$  και  $I=0$  αντίστοιχα, η παρεχομένη ηλεκτρική ισχύς από το ΦΒ στοιχείο είναι μηδενική ( $P=0$ ). Άρα, η μεταβολή της ισχύος με τη τάση, που φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος (Εικόνα 10), παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή κοντά στο σημείο όπου αρχίζει η έντονη πτώση της τιμής του ρεύματος.

Συνεπώς, η αντίσταση του κυκλώματος, που τροφοδοτείται από ένα ΦΒ στοιχείο, πρέπει να έχει κατάλληλη τιμή για να παράγεται η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς από το ΦΒ στοιχείο. Δηλαδή η τάση και το ρεύμα τις αντιστάσεις πρέπει να αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ.





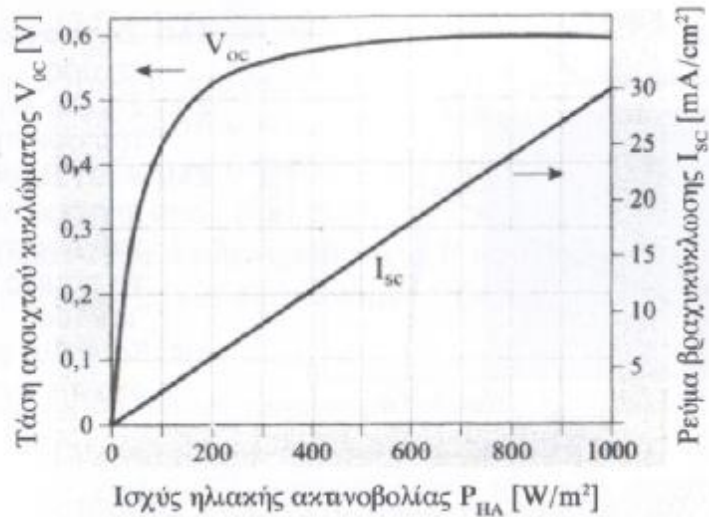
**Εικόνα 10:** Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος  $I$  - τάσης ρεύματος  $V$  ενός ΦΒ στοιχείου, μεταβολή της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος του  $P$  σε συνάρτηση με την τάση  $V$  και καμπύλη φορτίου  $\text{ΚΦ}$

Θεωρώντας ότι ένα ΦΒ στοιχείο τροφοδοτεί μια ωμική αντίσταση, μπορούμε να απεικονίσουμε στο διάγραμμα  $I$ - $V$  του ΦΒ στοιχείου την καμπύλη φορτίου  $\text{ΚΦ}$  της αντίστασης (ευθεία γραμμή), η οποία δείχνει την μεταβολή του ρεύματος  $I$  που την διαρρέει σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη στα άκρα της ηλεκτρική τάση  $V$ . Το σημείο τομής της χαρακτηριστικής καμπύλης και της καμπύλης φορτίου ονομάζεται σημείο λειτουργίας  $\Sigma\Lambda$  του συστήματος και καθορίζει το ρεύμα και την τάση στην αντίσταση.

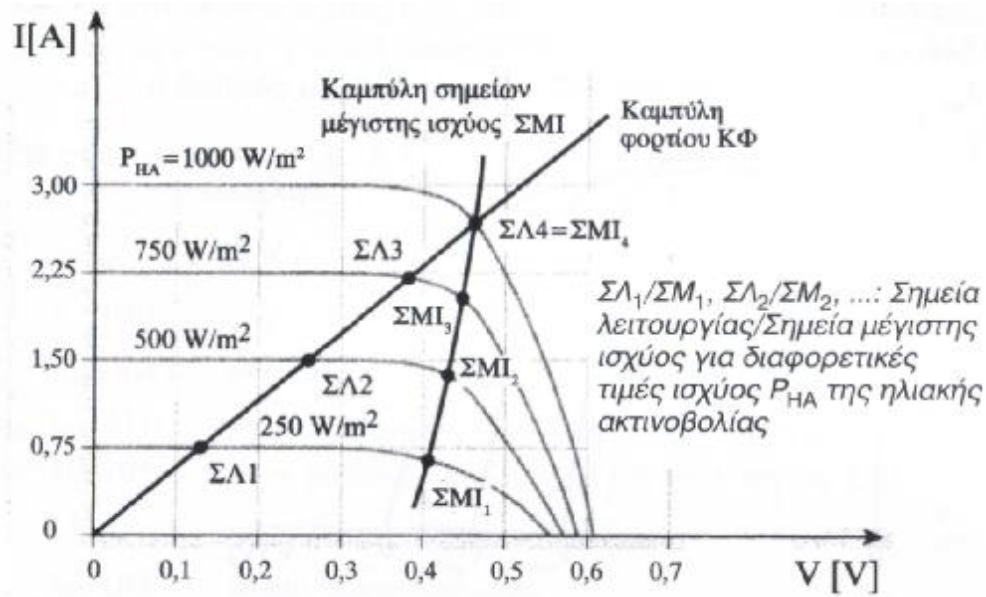
Με την χρήση ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων παρακολούθησης του  $\Sigma MI$  όταν οι συνθήκες αλλάζουν, επιδιώκουμε την συνεχή σύμπτωση του  $\Sigma\Lambda$  του συστήματος με το εκαστοτε  $\Sigma MI$ , ώστε να αποδίδεται η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύς από το ΦΒ στοιχείο. Η προσπάθεια αυτή είναι απαραίτητη γιατί η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας δεν παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της ημέρας.

Στο διάγραμμα του σχήματος (Εικόνα 11), φαίνεται η μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και της τάσεως ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  σε συνάρτηση με την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας. Το ρεύμα  $I_{sc}$  μεταβάλλεται ανάλογα με την προσπίπτουσα ακτινοβολία, ενώ η τάση  $V_{oc}$  αυξάνεται απότομα στην αρχή και μετά παραμένει σχεδόν σταθερή για το υπόλοιπο διάστημα μιας αίθριας ημέρας.





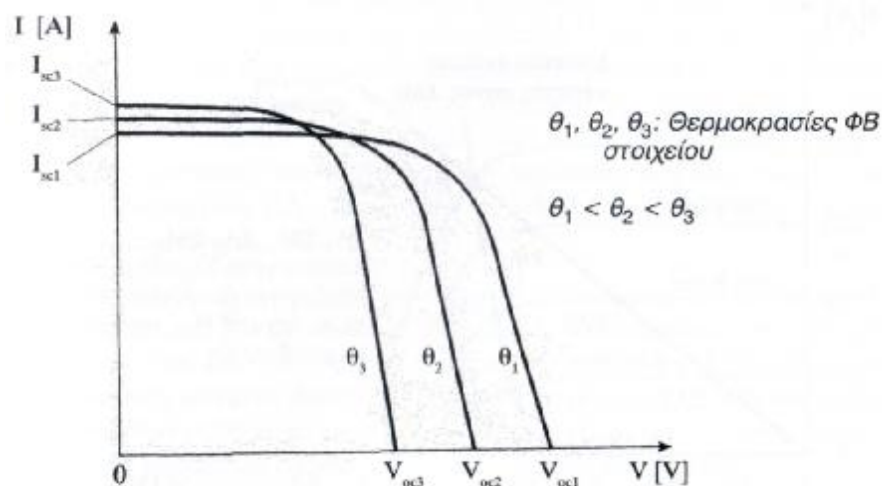
**Εικόνα 11:** Μεταβολή τάσεως ανοιχτού κυκλώματος και ρεύματος βραχυκύκλωσης σε συνάρτηση με την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας.



**Εικόνα 12:** Μετατόπιση των χαρακτηριστικών καμπυλών έντασης ρεύματος  $I$  - τάσεως ρεύματος  $V$  ΦΒ στοιχείου όταν μεταβάλλεται η ισχύς  $P_{HA}$  της ηλιακής ακτινοβολίας

Όταν μεταβάλλεται η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας, έχουμε και μετατόπιση των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V του ΦΒ στοιχείου (Εικόνα 12). Αυτό σημαίνει ότι για σταθερή τιμή της ωμικής αντίστασης του κυκλώματος, τα σημεία λειτουργίας ΣΛ απομακρύνονται από τα αντίστοιχα σημεία μέγιστης ισχύος ΣΜΙ.

Τέλος, η θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου αυξάνεται κατά τον φωτισμό του, γιατί ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα στο στοιχείο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μικρή αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και την μεγάλη ελάττωση της τάσεως ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  του ΦΒ στοιχείου (Εικόνα 13). Είναι λοιπόν, προφανές ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου προκαλεί μείωση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος του  $P_m$ . Η μείωση αυτή είναι περίπου 0,4% για κάθε βαθμό κελσίου πάνω από τους 30 οC μεγαλύτερη από την μέση θερμοκρασία των ΦΒ στοιχείων είναι θερμοκρασία  $t_a$  του αέρα, ορίζουμε τον παρακάτω συντελεστή θερμοκρασίας  $\sigma_\theta$ , ο οποίος χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης των ΦΒ πλαισίων.



**Εικόνα 13:** Μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης έντασης ρεύματος I - τάσεως ρεύματος V ενός ΦΒ στοιχείου με την αύξηση της θερμοκρασίας του.

$$\sigma_\theta = 1 - [(t_a + 30) - 25] * 0,004 \quad [-]$$

όπου

$t_a$  [°C]: μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα

## 2.7. ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Ένα ΦΒ στοιχείο αποδίδει μέγιστη ηλεκτρική ισχύ  $P_m$  και δέχεται ηλιακή ακτινοβολία ισχύος  $P_{HA}$ . Το πηλίκο της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την προσπίπτουσα ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας, ονομάζεται βαθμός απόδοσης  $\eta$  του ΦΒ στοιχείου.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{HA}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{HA}} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{HA}} \quad [-]$$

όπου:

$P_m$  [W]: μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς ΦΒ στοιχείου

$P_{HA}$  [W]: ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

$I_m$  [A]: ένταση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ

$V_m$  [V]: τάση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ

FF [-]: συντελεστής πλήρωσης (§ 5.3.)

$I_{sc}$  [A]: ρεύμα βραχυκύκλωσης

$V_{oc}$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος

## 2.8. ΙΣΧΥΣ ΑΙΧΜΗΣ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Σε ένα ΦΒ στοιχείο ελέγχονται τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά

- α) ο βαθμός απόδοσης  $\eta$ ,
- β) ο συντελεστής πλήρωσης FF,
- γ) το ρεύμα βραχυκυκλώσεως  $I_{sc}$
- δ) η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$ .

Οι πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC (standard test conditions) που έχουν καθοριστεί διεθνώς, είναι οι ακόλουθες

- Θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου ίση με  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ισχύος  $P_{stc} = 1 \text{ kW/m}^2$  και φάσματος αντίστοιχα του ηλιακού με μάζα αέρα  $AM=1,5$
- Κάθετη πρόσπτωση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Με βάση τις πρότυπες συνθήκες εισάγεται η ένια της ισχύος αιχμής ως χαρακτηριστικό του ΦΒ στοιχείου. Η ισχύς αιχμής  $P_p$  (pick αιχμής) ονομάζεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που αποδίδεται από το ΦΒ στοιχείο κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC και έχει μονάδα μέτρησης το  $W_p$  (Watt αιχμής).

## 2.9. DC - DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ

Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με τους μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση (DC - DC converter). Ονομάζονται έτσι διότι, μετατρέπουν μια συνεχή τάση στην είσοδο σε συνεχή τάση διαφορετικής τιμής και κάποιες φορές διαφορετικής πολικότητας στην έξοδο. Αποκαλούνται επίσης και αλλιώς τροφοδοτικά διότι η πιο συνήθης εφαρμογή είναι η τροφοδοσία αναλογικών και ψηφιακών συστημάτων.

Άλλη σημαντική εφαρμογή των μετατροπέων αυτών, είναι η φόρτιση συσσωρευτών και γι αυτό το λόγο οι διατάξεις αυτές περιέχουν πάντα έναν (τουλάχιστον) ημιαγωγικό διακόπτη (δίοδο, mosfet) για να είναι δυνατή μετατροπή της τάσης στα επιθυμητά επίπεδα.

Υπάρχουν 2 τεχνικές για την κατασκευή και τον έλεγχο των μετατροπέων (τροφοδοτικών) αυτών:

- Η τεχνική των γραμμικών μετατροπέων (τροφοδοτικών), όπου το ημιαγωγικό στοιχείο του μετατροπέα συμπεριφέρεται σαν μια ρυθμιζόμενη αντίσταση διότι λειτουργεί στη γραμμική περιοχή και

- Η τεχνική των διακοπτικών μετατροπέων (τροφοδοτικών), όπου εδώ το ημιαγωγικό στοιχείο λειτουργεί σαν διακόπτης.

Στους DC-DC μετατροπείς ο έλεγχός τους πραγματοποιείται με τις παρακάτω τεχνικές:

- Η τεχνική της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (Pulse with modulation - PWM). Με την τεχνική αυτή διατηρούμε σταθερή τη συχνότητα έναυσης και σβέσης των ημιαγωγικών στοιχείων και μεταβάλλουμε το χρόνο αγωγής τους, ενώ με την

- Τεχνική της διαμόρφωσης της συχνότητας των παλμών (Pulse frequency modulation - PFM) διατηρούμε σταθερό το χρόνο αγωγής και μεταβάλλουμε τη συχνότητα λειτουργίας των ημιαγωγικών στοιχείων.

Οι βασικότερες τοπολογίες των μετατροπέων αυτών είναι:

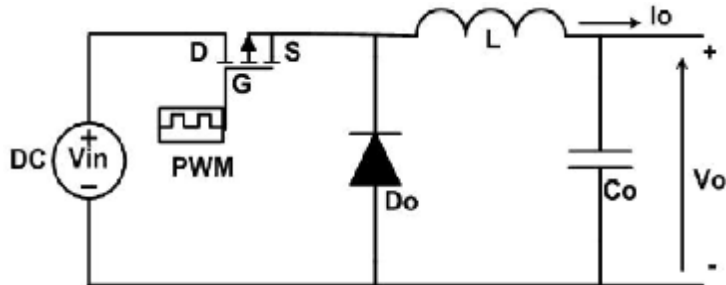
- 1.Ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης εξόδου (Buck converter), ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω.

- 2.Ο μετατροπέας ανύψωσης της τάσης εξόδου (Boost converter)

- 3.Ο μετατροπέας υποβιβασμού - ανύψωσης της τάσης εξόδου (Buck - Boost converter).

## Ο DC-DC μετατροπέας (Buck)

Ο μετατροπέας υποβιβασμού τύπου Buck, υποβιβάζει την τάση εισόδου και στην έξοδο βγάζει μια τάση χαμηλότερης τιμής και ανάλογα με τον χρόνο αγωγής του ημιαγωγικού στοιχείου, αυτή η τάση μπορεί να μεταβληθεί. Παρακάτω (Εικόνα 14) φαίνεται το κύκλωμα του μετατροπέα αυτού.



Εικόνα 14: Κύκλωμα μετατροπέα Buck

Ο μετατροπέας αυτός, όπως φαίνεται στη παραπάνω εικόνα, ελέγχεται με τη τεχνική της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (PWM) και μπορεί να δουλέψει, είτε συνεχή αγωγή, αν το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο εξομάλυνσης είναι μεγαλύτερο του μηδενός, είτε σε ασυνεχή αγωγή, εάν το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο εξομάλυνσης παρουσιάζει διαστήματα όπου μηδενίζεται.

Όταν το ημιαγωγικό στοιχείο (Mosfet) είναι σε κατάσταση αγωγής (διακόπτης κλειστός), η διόδος πολώνεται ανάστροφα και η είσοδος παρέχει ενέργεια τόσο στο φορτίο όσο και στο πηνίο το οποίο φορτίζεται γραμμικά. Όσο το ημιαγωγικό στοιχείο είναι σε κατάσταση αποκοπής η αποθηκευμένη ενέργεια ρέει διαμέσου της διόδου.

Τέλος για την ανάλυση της λειτουργίας του μετατροπέα αυτού ορίζεται ο λόγος κατάτμησης  $D$  ως το πηλίκο του χρόνου αγωγής ( $t_{on}$ ) του ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου προς την περίοδο ( $T_s$ )

$$D = \frac{t_{on}}{T_s}$$

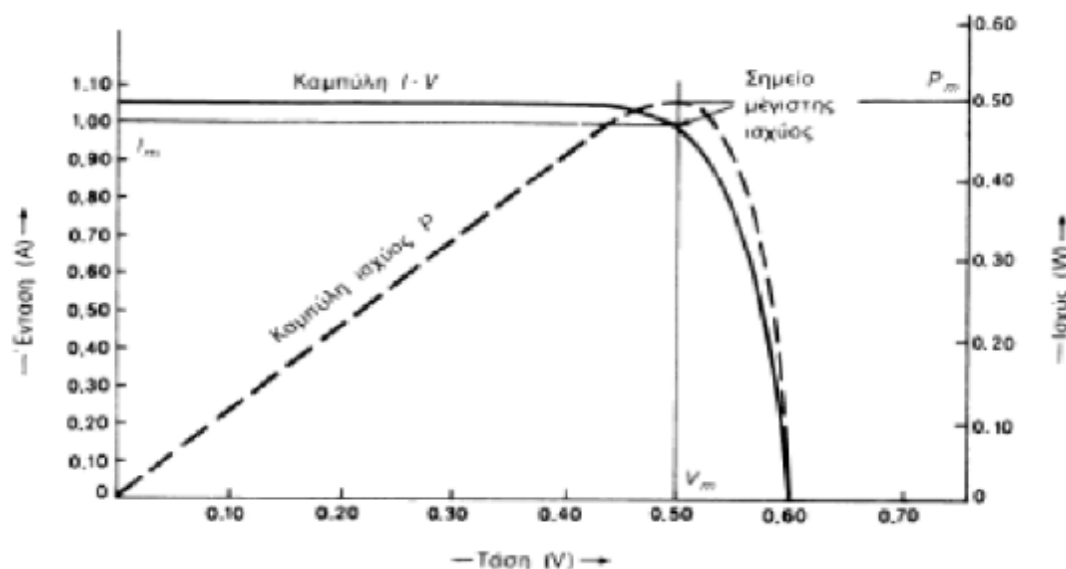
## **2.10. Ο ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ BUCK ΚΑΙ Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ MPPT**

Κατά την διάρκεια της μεταβολής τόσο της θερμοκρασίας όσο και της ηλιακής ακτινοβολίας, η τάση που παράγεται από το πάνελ, πρέπει να εφαρμοστεί σε μετατροπείς ισχύος οι οποίοι παρέχουν τις κατάλληλες συνθήκες που απαιτούνται ανάλογα με το είδος του φορτίου. Για να αυξήσουμε την απόδοση του ΦΒ συστήματος, είναι απαραίτητο ο έλεγχος του μετατροπέα να γίνεται με τρόπο που να εξασφαλιστεί ότι το σύστημα δίνει τη μέγιστη δυνατή ισχύ σε κάθε χρονική στιγμή, ανεξάρτητα από τις συνθήκες της ηλιακής ακτινοβολίας ή και της θερμοκρασίας.

## Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)

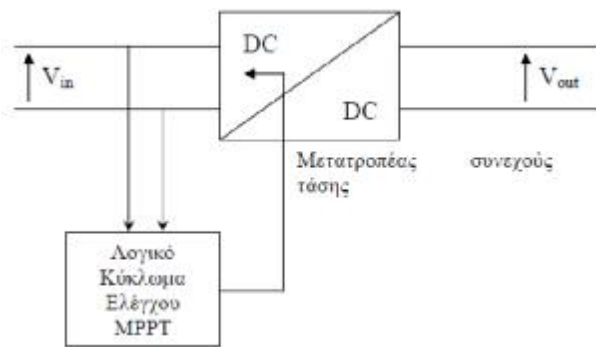
Η λειτουργία των ανιχνευτών σημείου μέγιστης ισχύος MPPT βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των τιμών της τάσης και της έντασης εξόδου των ΦΒ στοιχείων, προκαλώντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης λειτουργίας, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει το πάνελ, τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό θα είναι και το σημείο μέγιστης απόδοσης του ΦΒ στοιχείου. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν με την αύξηση της τάσης επέλθει μείωση της παραγόμενης ισχύος, τότε γίνεται μείωση της τάσης του πάνελ προς τα κάτω.

Η ένταση που παράγεται από ένα ΦΒ στοιχείο, δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα απ' ό,τι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο όμως ζεύγος τάσης - έντασης, το ΦΒ στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό κάθε στιγμή το ΦΒ στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης - έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του.



**Εικόνα 15:** Η συνεχής καμπύλη δείχνει την χαρακτηριστική  $I - V$ , σε συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, ενώ η διακεκομμένη καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται.

Για να επιτευχθεί λοιπόν η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος χρησιμοποιείται, όπως αναφέραμε και παραπάνω ένα κύκλωμα DC-DC μετατροπέα, ανύψωσης - υποβιβασμού τάσης όπου με τη βοήθεια ενός κυκλώματος ελέγχου επιτυγχάνεται η επιθυμητή λειτουργία. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται ο buck μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης εξόδου. Ένα block διάγραμμα της χρήσης του DC-DC μετατροπέα για την ανίχνευση και παρακολούθηση της μέγιστης ισχύος του ΦΒ πάνελ φαίνεται στην παρακάτω *Εικόνα 16*.



**Εικόνα 16:** Απλοποιημένη διάταξη ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος MPPT

Όπως γνωρίζουμε η ισχύς που παράγεται από ένα ΦΒ στοιχείο είναι:

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv}$$

Εάν λόγω μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας ή της μεταβολής του φορτίου, αλλάξει η παραγόμενη ισχύς, μετατοπιστεί δηλαδή σε διαφορετικό σημείο λειτουργίας πάνω στη καμπύλη  $I - V$ , τότε θα υπάρξει μεταβολή της τάσης και της έντασης κατά  $dV$  και  $dI$  αντίστοιχα. Η ισχύς επομένως στο καινούργιο σημείο λειτουργίας θα είναι τώρα:

$$P' = (V + dV) \cdot (I + dI) = V \cdot I + V \cdot dI + IdV$$

όπου αγνοήθηκαν οι όροι δεύτερης τάξης. Άρα η μεταβολή στην ισχύ προκύπτει τώρα:

$$dP = P' - P = V \cdot dI + IdV$$

Στο σημείο της μέγιστης ισχύος η κλίση της καμπύλης ισχύος του ΦΒ στοιχείου μηδενίζεται, δηλαδή ισχύει:

$$\frac{dP}{dV} = 0 > V \frac{dI}{dV} + I = 0 > \frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I}$$

όπου ο πρώτος όρος εκφράζει τη δυναμική αντίσταση της πηγής ( $Z_d$ ), ενώ ο δεύτερος την στατική αντίσταση ( $Z_s$ ). Με βάση αυτή τη παραπάνω εξίσωση υπάρχουν λοιπόν δύο διαφορετικοί τρόποι για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος:

- Μια μεταβολή του ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην ΦΒ πηγή ενώ παράλληλα μετρούνται η δυναμική αντίσταση αυτής  $Z_d$  και η στατική αντίσταση  $Z_s$ . Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση του σημείου μέγιστης ισχύος, όπου:

$$Z_d = -Z_s$$

· Σύμφωνα με μια δεύτερη μέθοδο ελέγχου, η τάση αυξάνεται όσο η ισχύει η συνθήκη:

$$\frac{dP}{dV} > 0$$

που συνεπάγεται και ταυτόχρονη αύξηση της ισχύος. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται, ενώ όταν ο ρυθμός μεταβολής είναι πολύ κοντά στο μηδέν, η τάση σταθεροποιείται. Εφαρμόζοντας μια από τις δύο παραπάνω μεθόδους, η λειτουργία του DC-DC μετατροπέα ρυθμίζεται ώστε η τάση να μεταβληθεί κατάλληλα προκειμένου να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος.

Εναλλακτικές μορφές ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος χρησιμοποιούν κυκλώματα με μνήμη ώστε να συγκρίνουν τις τρέχουσες μετρούμενες τιμές ισχύος, τάσης, έντασης με προηγούμενες οπότε προσαρμόζουν ανάλογα τη στάθμη της τάσης που θα απορροφήσει ο αντιστροφέας.

## **2.11. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ**

### **2.10.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ**

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές είναι ουσιαστικά μετατροπείς χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και συνήθως, έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν αυτή τη μετατροπή και προς την αντίθετη κατεύθυνση παρέχοντας με άμεσο τρόπο τη δυνατότητα συσσώρευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα που έχουν να αποταμιεύουν ενέργεια ανά πάσα στιγμή ή όχι είναι αυτή που χωρίζει τους συσσωρευτές σε δύο κατηγορίες.

Στην κατηγορία των πρωτεύοντων συσσωρευτών ανήκουν αυτοί που έχουν αποθηκευμένη χημική ενέργεια την οποία και μπορούν να την αποδώσουν ως ηλεκτρική, δεν μπορούν όμως να επαναφορτιστούν. Οι τυπικές μπαταρίες λιθίου που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές ευρείας κατανάλωσης ανήκουν σε αυτή την κατηγορία και επειδή δεν μπορούν να επαναφορτιστούν δεν είναι λειτουργικές στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Αυτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ΦΒ συστήματα ανήκουν στη κατηγορία των δευτερευόντων συσσωρευτών. Η δυνατότητά τους να επαναφορτίζονται είναι αυτή που τους κάνει κατάλληλους για φωτοβολταϊκά συστήματα και ο πιο συνηθισμένος τύπος τους είναι οι μπαταρίες μολύβδου - οξειδίου.

Οι πιο γνωστοί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι συσσωρευτών μολύβδου είναι οι συσσωρευτές μολύβδου - θειικού οξέος, μολύβδου - αντιμονίου, οι συσσωρευτές μολύβδου - ασβεστίου, οι υβριδικοί συσσωρευτές μολύβδου - αντιμονίου / μολύβδου - ασβεστίου, οι μολύβδου με δεσμευμένο καταλύτη.

Οι συσσωρευτές μολύβδου - θειικού οξέος έχουν υψηλή μηχανική αντοχή, αυξημένη δυνατότητα για βαθιές εκφορτίσεις, με δυνατότητα μεγάλων ρευμάτων σε αντίθεση με τους κοινούς συσσωρευτές μολύβδου. Στις



περισσότερες εφαρμογές φωτοβολταϊκών και γενικά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, χρησιμοποιούνται οι συσσωρευτές μολύβδου - αντιμονίου και οι συσσωρευτές μολύβδου - ασβεστίου βυθισμένες σε διάλυμα θειικού οξέος, λόγω του ότι είναι πιο φθηνά στην αρχικής του αγοράς.

### **2.10.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ**

Ένα στοιχείο ηλεκτρικού συσσωρευτή αποτελείται από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια, συνήθως με τη μορφή επίπεδων πλακών τα οποία βρίσκονται μέσα σε διάλυμα ηλεκτρολύτη, ο οποίος αντιδρά επιφανειακά με τις πλάκες. Κατά το στάδιο της φόρτισης του μια ηλεκτρική πηγή συνεχούς τάσης συνδέεται στα άκρα του και δημιουργεί στο εσωτερικό του ηλεκτρικό πεδίο το οποίο κινεί ευκίνητα ιόντα του ηλεκτρολύτη προς τις αντίθετα πολωμένες πλάκες του συσσωρευτή όπου αποδίδουν το φορτίο τους.

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός συσσωρευτή είναι η ονομαστική τάση και η ονομαστική χωρητικότητα.

#### **· Ονομαστική τάση**

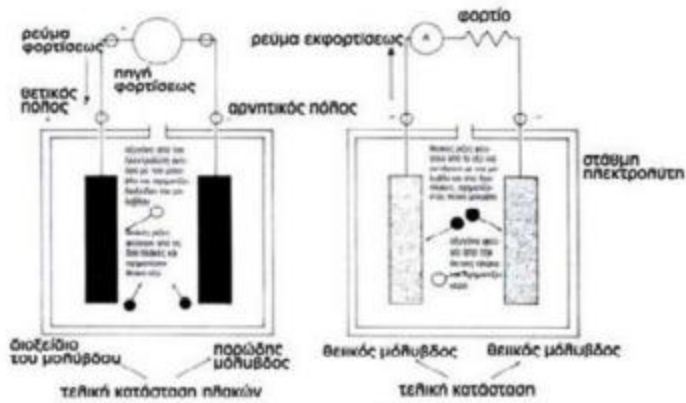
Η ονομαστική τάση στους πόλους του εκφράζεται με την έννοια της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ)  $E$ , που μετράται σε  $V$ .

#### **· Ονομαστική χωρητικότητα**

Η ονομαστική χωρητικότητα  $C$  ενός συσσωρευτή είναι το ηλεκτρικό φορτίο, που μπορεί να αποθηκευτεί στο εσωτερικό του με την μορφή χημικής ενέργειας και μετράται σε  $[Ah]$ . Είναι, δηλαδή, το γινόμενο της έντασης του ρεύματος  $I$  που δίνει ο συσσωρευτής (ανεξάρτητα από την τάση του), επί το πλήθος των ωρών  $n_h$  μέχρι να εκφορτιστεί ( $C=I * n_h$ ).

### **2.10.3 ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΤΥΠΟΥ ΜΡΡΤ**

Η μπαταρία έχει σταθερή πολικότητα και για να την φορτίσουμε χρειάζεται ρεύμα σταθερής πολικότητας. Μπορεί να μην είναι συνεχές αλλά διακοπτόμενο, ποτέ όμως δεν πρέπει να δώσουμε εναλλασσόμενο ρεύμα. Αν η ηλεκτρεγερτική δύναμη, δηλαδή τάση χωρίς φορτίο, της μπαταρίας είναι  $12V$  τότε για να την φορτίσουμε χρειαζόμαστε ρεύμα της τάξεως των  $14 - 16 V$  ανάλογα με τον ρυθμό φόρτισης που θέλουμε αλλά και με την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας δηλαδή η τάση στα άκρα του φορτιστή πρέπει να ξεπερνά την ηλεκτρεγερτική δύναμη της μπαταρίας αλλά και την πτώση τάσεως στο εσωτερικό της μπαταρίας λόγω της εσωτερικής αντίστασης. Στην παρακάτω *Εικόνα 17*, παρατηρούμε ότι κατά τη φόρτιση της μπαταρίας, το ρεύμα διασπά τον ηλεκτρολύτη και το οξυγόνο που παράγεται κινείται προς τη θετική πλάκα, όπου όσο προχωράει η φόρτιση σχηματίζεται διοξείδιο του μολύβδου.

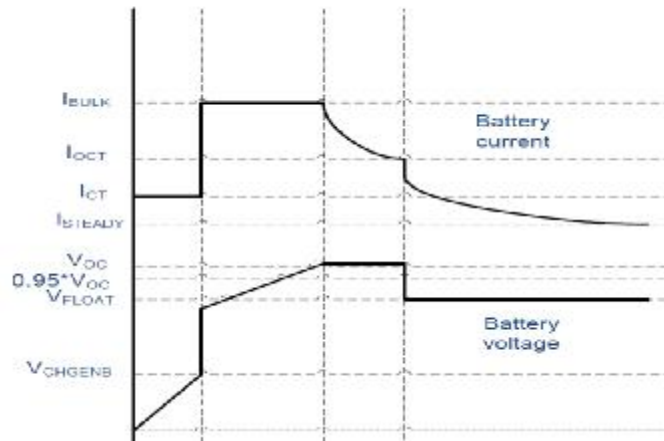


**Εικόνα 17:** Φόρτιση - Εκφόρτιση μπαταρίας μολύβδου - οξέος.

Στις υλοποιήσεις των ρυθμιστών φόρτισης συσσωρευτών με κύριο μέλημά τους τη προστασία του συσσωρευτή από υπέρταση, όπως και τη προστασία του συσσωρευτή από υπερβολική εκφόρτιση, η ισχύς που τροφοδοτεί η φωτοβολταϊκή συστοιχία στο σύστημα δεν είναι για όλες τις συνθήκες λειτουργίας η μέγιστη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μεταφορά ισχύος από την ΦΒ συστοιχία στη μπαταρία και το φορτίο είναι αποδοτική μόνο για ορισμένες τιμές από μια σχετικά μεγάλη περιοχή τιμών των παραμέτρων λειτουργίας, όπως το μέγεθος του φορτίου της μπαταρίας, τη θερμοκρασία των ΦΒ κυττάρων, τη πυκνότητα ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, το βαθμό γήρανσης των ΦΒ κυττάρων κλπ. Έτσι παρουσιάζονται απώλειες οι οποίες κυμαίνονται από πολύ μικρές ως και 10% κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ηλιόλουστης ημέρας. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος.

Σε αυτόνομα ΦΒ συστήματα είναι πολύ σημαντικό να φορτίζουμε τις μπαταρίες σε μικρό χρονικό διάστημα. Αυτή όμως η ανάγκη της γρήγορης μεταφοράς ενέργειας στη μπαταρία δεν πρέπει να συνοδεύεται από τυχόν βλάβη της μπαταρίας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής. Γι αυτό το λόγο οι κατασκευαστές προτείνουν 4 στάδια φόρτισης των μπαταριών τα οποία είναι:

- 1) **Ήπια φόρτιση**
- 2) **Κυρίως φόρτιση**
- 3) **Υπερφόρτιση**
- 4) **Φόρτιση συντήρησης.**



**Εικόνα 18:** Τάση και ρεύμα μπαταρίας σε ένα κύκλο φόρτισης χρησιμοποιώντας τα 4 διαφορετικά στάδια φόρτισης.

Ο ρυθμιστής μπαταριών τύπου MPPT περιλαμβάνει λοιπόν τον MPPT βρόγχο και τον ρυθμιστή μπαταρίας. Το πότε θα ενεργοποιηθεί ο κάθε βρόγχος εξαρτάται σε πιο στάδιο φόρτισης της μπαταρίας είμαστε. Παρακάτω λοιπόν, περιγράφονται τα 4 στάδια για την σωστή φόρτιση μιας μπαταρίας.

### **Ήπια φόρτιση:**

Όταν η τάση της μπαταρίας είναι κάτω από την τάση πλήρους εκφόρτισης (κατώφλι χαμηλής τάσης) VCHGENB, η μπαταρία είναι πλήρως εκφορτισμένη. Σε αυτό το στάδιο η φόρτιση αρχίζει με ένα μικρό ρεύμα εκκίνησης ICT στην μπαταρία. Εάν η μπαταρία είναι εκφορτισμένη, η τάση της μπαταρίας θα παραμείνει περίπου στη τάση VCHGENB παρεμποδίζοντας το φορτιστή να μεταβεί στη διαδικασία της κυρίως φόρτισης. Σε άλλη περίπτωση, η φόρτιση θα αρχίσει και η τάση της μπαταρίας θα αυξηθεί, για να φτάσει στην ονομαστική του τιμή έως ότου φτάσει στην τάση VCHGENB. Σε αυτό το σημείο η φόρτιση θα προχωρήσει στο στάδιο της γρήγορης φόρτισης. Στο στάδιο της φόρτισης συντήρησης, ο βρόγχος της τάσης της μπαταρίας καθώς και του MPPT βρόγχου είναι εκτός λειτουργίας. Το ρεύμα εκκίνησης της μπαταρίας θα είναι ίσο με την τιμή του ρεύματος ICT.

### **Κυρίως φόρτιση:**

Σε αυτό το στάδιο ο φορτιστής ενεργοποιεί μια σταθερή πηγή ρεύματος στην τιμή IBULK. Τώρα ο αλγόριθμος MPPT είναι ενεργοποιημένος, ενώ ο βρόγχος τάσης της μπαταρίας είναι απενεργοποιημένος. Το ρεύμα αναφοράς στο βρόγχο ρεύματος της μπαταρίας είναι το IBULK. Μόλις η τάση της μπαταρίας φτάσει το  $0.95 \cdot V_{oc}$  αρχίζει το τρίτο στάδιο.

### **Υπερφόρτιση:**

Σε αυτό το στάδιο αποδίδεται στη μπαταρία όλη η χωρητικότητα σε μικρό χρονικό διάστημα αποφεύγοντας την υπερφόρτιση. Τόσο ο βρόγχος της τάσης όσο και του ρεύματος της μπαταρίας ενεργοποιούνται, ενώ η λειτουργία του MPPT σε αυτή τη λειτουργία απενεργοποιείται. Αρχικά το στάδιο υπερφόρτισης είναι ίδιο με το στάδιο της κυρίως φόρτισης αλλά καθώς η τάση υπερφόρτισης προσεγγίζει τη σταθερή τιμή, το ρεύμα φόρτισης αρχίζει να μειώνεται. Όταν η τιμή του ρεύματος γίνει ίση με τη τιμή IOCT μεταβαίνουμε στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο της φόρτισης της μπαταρίας.

### **Φόρτιση συντήρησης:**

Κατά το στάδιο αυτό η τάση της μπαταρίας διατηρείται σταθερή στη τιμή VFLOAT για να διατηρήσει τη χωρητικότητα της μπαταρίας έναντι της αυτοεκφόρτισης. Ο φορτιστής θα διαθέσει όσο ρεύμα χρειάζεται για να διατηρήσει τη τάση στο επίπεδο VFLOAT. Η μπαταρία θα παραμείνει στο στάδιο της επιπλέον φόρτισης μέχρι η τάση της μπαταρίας να πέσει στο 90% της VFLOAT κατά την διάρκεια της εκφόρτισης όπου σε αυτό το σημείο η διαδικασία θα επανέλθει στο στάδιο της κυρίως φόρτισης.

## 3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (MPPT)

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η υλοποίηση ενός ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος, μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε το μέγιστο κέρδος ισχύς της ενέργειας που μας δίνει ο ήλιος μέσω ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Οι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να αυξήσουμε τη παραγόμενη ισχύς ενός ΦΒ στοιχείου είναι οι εξής:

- Η χρησιμοποίηση ενός ηλεκτρικού κυκλώματος που να προσαρμόζει και να ανιχνεύει το μέγιστο σημείο λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου. Με αυτό το τρόπο απορροφούμε από το ΦΒ στοιχείο τη μέγιστη δυνατή παραγόμενη ενέργεια (1).

- Η χρησιμοποίηση ενός κινητού συστήματος στήριξης των ΦΒ στοιχείων όπου με τη κίνησή του θα ακολουθεί τη πορεία του ήλιου, έτσι ώστε να έχουμε κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στα ΦΒ στοιχεία (2).

- Αύξηση της απαγωγής του ΦΒ στοιχείου προς την ατμόσφαιρα, έτσι ώστε να μειώσουμε την θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου και να μεγιστοποιήσουμε την απόδοσή του στη ενέργεια (3).

Οι περιπτώσεις (2) και (3) είναι αυτές που σχετίζονται με τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες και μπορούν να μας βοηθήσουν να αυξήσουμε τη μέγιστη δυνατή παραγόμενη ενέργεια. Αυτό όμως δεν εγγυάται ότι θα έχουμε τη μέγιστη παραγόμενη ενέργεια στο φορτίο. Η υλοποίηση ενός ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος μπορεί να μας το δώσει αυτό, να αποθηκεύσει την ενέργεια σε μία μπαταρία ή να την διοχετεύσει κατευθείαν στο φορτίο. Αν είχαμε τη δυνατότητα και των τριών περιπτώσεων σε μια κατασκευή, τότε θα είχαμε το μέγιστο δυνατό της παραγόμενης ενέργειας. Το υψηλό κόστος πολλές φορές δεν επιτρέπει την υλοποίηση μιας τέτοιας κατασκευής.

Ένα κύκλωμα ενός ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος, προσαρμόζει τη σύνθετη αντίσταση εισόδου - εξόδου που έχει ένα ΦΒ στοιχείο κάθε στιγμή. Με το τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε τη μέγιστη μεταφορά ισχύος από ένα ΦΒ στοιχείο σε ένα κύκλωμα ανίχνευσης ισχύος. Στη συνέχεια, το κύκλωμα ανίχνευσης ισχύος αποδίδει την ισχύ, στην μπαταρία ή και στο φορτίο, προσαρμόζοντας την αντίστασή του έτσι ώστε να έχουμε όσο το δυνατό μικρότερες απώλειες.

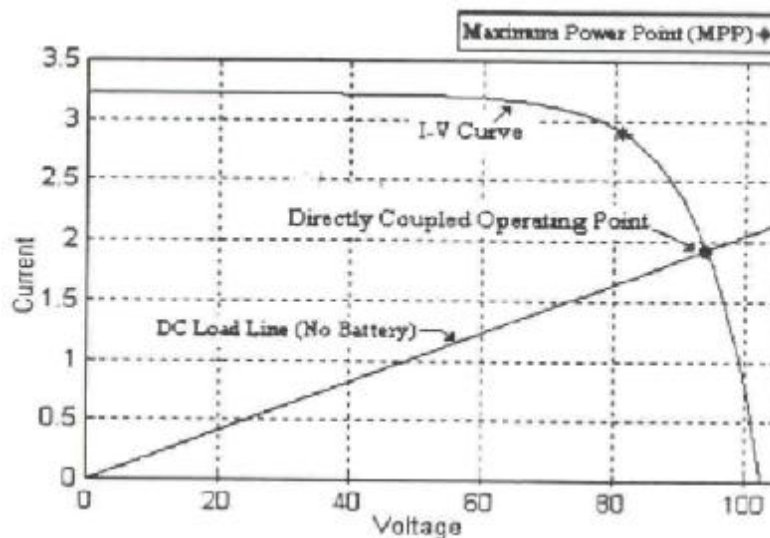
Παρακάτω θα μιλήσουμε αναλυτικότερα για 4 διαφορετικούς αλγόριθμους ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος - MPPT και θα εξηγήσουμε την λειτουργία τους. Οι ανιχνευτές μέγιστου σημείου, έχουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση των ΦΒ στοιχείων και ο λόγος είναι ότι μεγιστοποιούν την

παραγωγή ισχύος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Έτσι, με σχετικά μικρό κόστος, μπορούμε να έχουμε τη βέλτιστη απόδοση του συστήματός μας.

Κάθε ΦΒ στοιχείο σε λειτουργία υπό κανονικές συνθήκες (σταθερή ακτινοβολία), μας αποδίδει μια χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης (I - V) όπως φαίνεται στην *Εικόνα 19*. Υπάρχει ένας συνδυασμός ρεύματος και τάσης, στον οποίο το ΦΒ στοιχείο έχει τη μέγιστη απόδοσή του και ονομάζεται μέγιστο σημείο ισχύος (Maximum Power Point - MPPT). Αυτό όμως δεν είναι το σημείο λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου και δεν συμπίπτει με το μέγιστο σημείο ισχύος. Η δουλειά ενός ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος είναι να ελέγχει την τάση και το ρεύμα του ΦΒ στοιχείου, και με τη βοήθεια ενός DC-DC μετατροπέα, να φέρει στη θέση του σημείου λειτουργίας το σημείο μέγιστης ισχύος. Η θέση του σημείου μέγιστης ισχύος μπορεί να υπολογισθεί μέσω αλγορίθμων. Η διαδικασία αυτή είναι πολύπλοκη λόγω του ότι το σημείο μέγιστης ισχύος είναι αποτέλεσμα της μη γραμμικής συνάρτησης ακτινοβολίας σε σχέση με τη θερμοκρασία.

Οι αλγόριθμοι που μπορούν να υπολογίσουν το σημείο μέγιστης ισχύος είναι οι παρακάτω:

1. Διατάραξης και παρατήρησης
2. Αυξητικής αγωγιμότητας
3. Παρασιτικής χωρητικότητας
4. Σταθερής τάσης



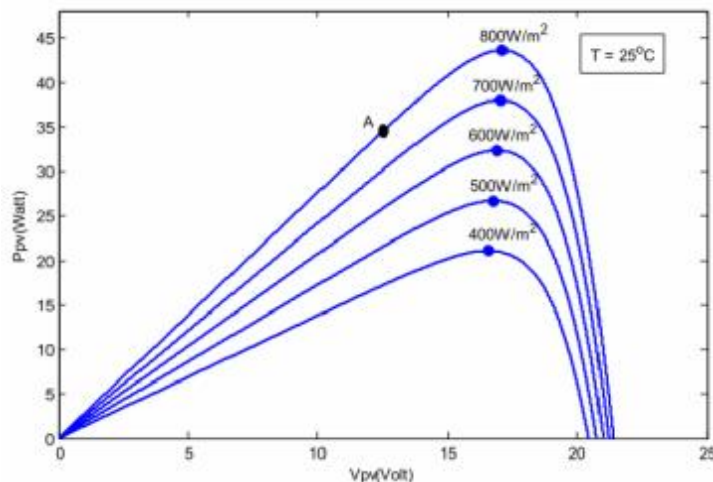
*Εικόνα 19: Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V).*

### 3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΤΑΡΑΞΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ (PERTURB AND OBSERVER P&O).

Ο αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης είναι αυτός που χρησιμοποιείται συνήθως και ο λόγος είναι ότι είναι εύκολος στη χρήση του. υπολογίζει την ισχύ που παράγει ένα ΦΒ στοιχείο και η μεταβολή που δημιουργείται γίνεται ελέγχοντας είτε τη τάση είτε το ρεύμα του ΦΒ στοιχείου.

Αν εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης, το σημείο μέγιστης ισχύος θα εντοπιστεί με τη μεταβολή της τάσης του ΦΒ στοιχείου και ταυτόχρονα θα ελέγχει την μεταβολή της ισχύος. Έστω ότι το ΦΒ στοιχείο, λειτουργεί στο σημείο A της καμπύλης (Εικόνα 20). Το σημείο αυτό βρίσκεται αριστερά από το σημείο μέγιστης ισχύος με αποτέλεσμα η ισχύς να είναι μικρότερη της μέγιστης για μια συγκεκριμένη τιμή τάσης. Ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος μετατρέπει τη τιμή της τάσης αυτής και ελέγχει την μεταβολή της ισχύος. Αυτός είναι ένας εύκολος τρόπος να εντοπίσει το σημείο μέγιστης ισχύος. Αυξάνοντας την τάση, μετατοπίζουμε το σημείο A της καμπύλης σε περιοχές με μεγαλύτερη ισχύ, οπότε η μεταβολή της ισχύος θα είναι θετική. Η αύξηση της τάσης θα συνεχιστεί έως ότου η μεταβολή της ισχύος να πάρει αρνητικό πρόσημο, δηλαδή το σημείο A να βρεθεί σε περιοχές της καμπύλης με χαμηλότερη ισχύ. Αφού η μεταβολή της ισχύος γίνει αρνητική ο αλγόριθμος επαναλαμβάνει τη προηγούμενη διαδικασία, αλλά αντίστροφα αυτή τη φορά, δηλαδή μειώνει την τιμή της τάσης και ελέγχει την μεταβολή της ισχύος. Αυτό συνεχίζεται έως ότου η τάση πάρει ξανά θετικό πρόσημο.

Με αυτή την επαναλαμβανόμενη διαδικασία, ο αλγόριθμος δεν μπορεί να βρει με ακρίβεια το σημείο μέγιστης ισχύος. Ακόμα και αν το εντοπίσει δεν θα είναι δυνατό να διακρίνει ότι είναι πράγματι το σημείο μέγιστης ισχύος, έτσι ώστε να σταματήσει να μεταβάλλει την τιμή της τάσης. Αυτό γίνεται γιατί στην ουσία γιατί η διαδικασία βασίζεται στην απλή παρατήρηση (έλεγχος τάσης - ισχύος) και όχι σε πολύπλοκες πράξεις και έχει σαν αποτέλεσμα την μετατόπιση του σημείου A της γραφικής παράστασης είτε δεξιά, είτε αριστερά του σημείου μέγιστης ισχύος.

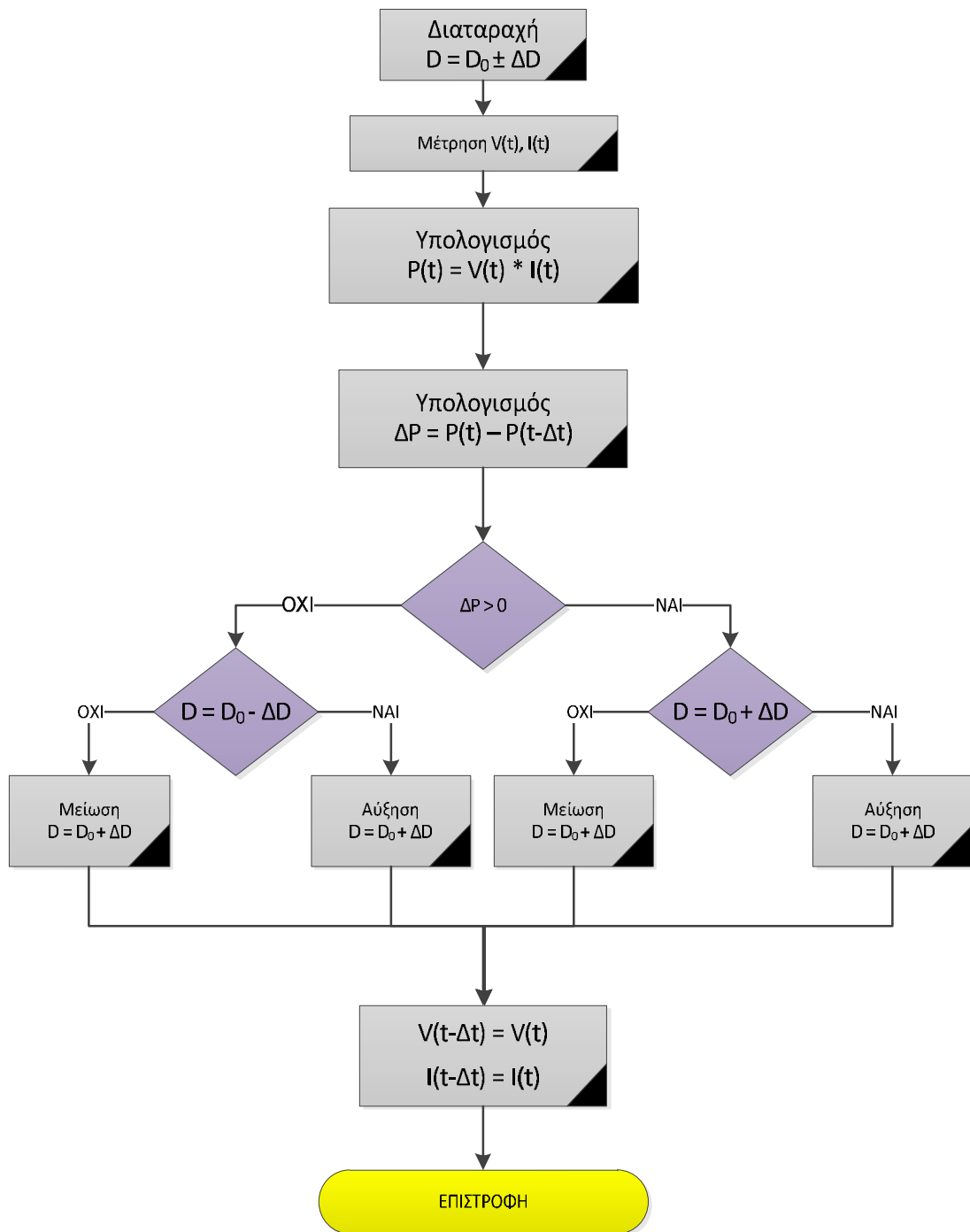


Εικόνα 20: Χαρακτηριστική καμπύλη P - V και σημείο λειτουργίας A.

Από την παραπάνω *Εικόνα 20* μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όσο η ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρότερη τόσο πιο επίπεδη γίνεται η καμπύλη  $P - V$ . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορεί να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύς εύκολα από τον αλγόριθμο, καθώς όσο η κλίση της καμπύλης γίνεται μικρή, τόσο μειώνεται η μεταβολή της ισχύς σε σχέση με τη αλλαγή της τάσης και για να παρατηρήσουμε την μεταβολή της ισχύς θα πρέπει να αλλάξουμε περισσότερο την τιμή της τάσης.

Μεγαλύτερο πρόβλημα στο συγκεκριμένο αλγόριθμο παρατηρείται στις απότομες καιρικές αλλαγές. Για να αποφύγουμε όλα αυτά τα προβλήματα έχουν γίνει κάποιες βελτιώσεις στον αλγόριθμο. Συγκεκριμένα έχει εισαχθεί μια συνάρτηση καθυστέρησης η οποία σταματάει τις αλλαγές της τάσης όταν η μεταβολή της ισχύς εναλλάσσει πρόσημα πολλές φορές σε μικρό χρονικό διάστημα. Αυτός είναι ένας τρόπος όπου το σύστημα αντιλαμβάνεται ότι το σημείο  $A$  βρίσκεται πολύ κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύς και διακόπτει της μεταβολές της τάσης. Έτσι επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση του ΦΒ στοιχείου κάτω από σταθερές καιρικές συνθήκες.





**Εικόνα 21:** Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης.

### 3.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΥΞΗΤΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ (Incremental conductance - INC)

Ο αλγόριθμος της αυξητικής αγωγιμότητας στηρίζεται σε μια μαθηματική ανάλυση. Η ισχύς αναλύεται σε μια συνάρτηση του ρεύματος και της τάσης. Η λογική είναι ότι για να βρούμε τη μέγιστη τιμή της ισχύς θα πρέπει να παραγωγίσουμε την ισχύ ως προς το ρεύμα ή την τάση και η εξίσωση που θα προκύψει να την θέσουμε ίση με το μηδέν. Παραγωγίζουμε ως προς την τάση και έχουμε:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{d(V \cdot I)}{dV} = 0 \Rightarrow I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0$$

Άρα:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης εκφράζει την αυξητική αγωγιμότητα του ΦΒ στοιχείου και ο δεύτερος είναι η αρνητική στιγμιαία αγωγιμότητα του ΦΒ στοιχείου, δηλαδή η στιγμιαία αγωγιμότητα με αρνητικό πρόσημο. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η σχέση ελέγχου για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύς, όπου στο σημείο αυτό σύμφωνα με την παραπάνω σχέση πρέπει τα δύο μεγέθη που αναφέραμε, να είναι ίσα. Από την παραπάνω σχέση προκύπτουν επίσης κάποιες ανισωτικές σχέσεις, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα στον αλγόριθμο να εντοπίσει αν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται δεξιά ή αριστερά του σημείου μέγιστης ισχύς και επομένως να κάνει τις κατάλληλες ρυθμίσεις για να προσεγγίσει το σημείο μέγιστης ισχύς. Όλες οι σχέσεις του ελέγχου που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας είναι οι παρακάτω.

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad \left( \frac{dP}{dV} = 0 \right)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \left( \frac{dP}{dV} > 0 \right)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \left( \frac{dP}{dV} < 0 \right)$$

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τις δύο τελευταίες σχέσεις για να συγκρίνει αν η τάση λειτουργίας είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος και ταυτόχρονα ελέγχει την τιμή του ρεύματος του ΦΒ στοιχείου. Το αποτέλεσμα των σχέσεων αυτών καθορίζει την αλλαγή της τάσης, δηλαδή αν πρέπει να μειωθεί ή να αυξηθεί ώστε να εντοπισθεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η πρώτη σχέση. Μόλις ικανοποιηθεί η πρώτη σχέση θα έχουμε το σημείο μέγιστης ισχύος και ο αλγόριθμος κρατάει το σημείο λειτουργίας σταθερό μέχρι να παρατηρήσει μία αλλαγή στη τιμή του ρεύματος. Αν έχουμε αλλαγή στη τιμή του ρεύματος σημαίνει ότι έχουμε αλλαγή στην ηλιακή ακτινοβολία και έτσι ο αλγόριθμος μπορεί να αντιληφθεί την αλλαγή των καιρικών συνθηκών και να ανταποκριθεί καλύτερα στις απότομες καιρικές αλλαγές ή της αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό τον κάνει αποτελεσματικότερο από τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης. Δεν τον αναγκάζει να αλλάζει συνέχεια την τιμή της τάσης και να μετατοπίζει το σημείο λειτουργίας, αλλά το κρατάει σταθερό έως ότου αλλάξει η τιμή του ρεύματος που σημαίνει αλλαγή θερμοκρασίας ή φωτεινότητας.

Για να δώσουμε ένα παράδειγμα λειτουργίας του αλγορίθμου αυξητικής αγωγιμότητας, έχουμε δύο τιμές τάσης και δύο τιμές ρεύματος και ελέγχουμε τις μεταβολές τους. Αν  $dV = 0$  και  $dI = 0$  σημαίνει οι καιρικές συνθήκες δεν έχουν αλλάξει και το ΦΒ στοιχείο μας λειτουργεί ακόμα στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Αν έχουμε  $dV = 0$  και  $dI > 0$  τότε έχουμε αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας με συνέπεια της αύξησης της τιμής της τάσης στον MPP. Τότε ο αλγόριθμος αυξάνει την τάση λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου για να εντοπίσει το νέο σημείο μέγιστης ισχύος.

Αν έχουμε  $dV = 0$  και  $dI < 0$  τότε έχουμε μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας με συνέπεια την μείωση της τιμής της τάσης στον MPP. Τότε ο αλγόριθμος μειώνει την τάση λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου για να εντοπίσει το νέο σημείο μέγιστης ισχύος.

Σε περίπτωση που οι μεταβολές στη τιμή της τάσης και του ρεύματος, δεν είναι μηδέν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις για να καθορίσουν την κατεύθυνση την οποία πρέπει να αλλάξει η τάση προκειμένου να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος.

Αν

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$$

τότε

$$\frac{dP}{dV} > 0$$

Το σημείο λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου θα είναι αριστερά από το σημείο μέγιστης ισχύος στην καμπύλη P - V, οπότε η τιμή της τάσης του ΦΒ στοιχείου θα πρέπει να αυξηθεί για να εντοπιστεί το νέο σημείο μέγιστης ισχύος.

Αν

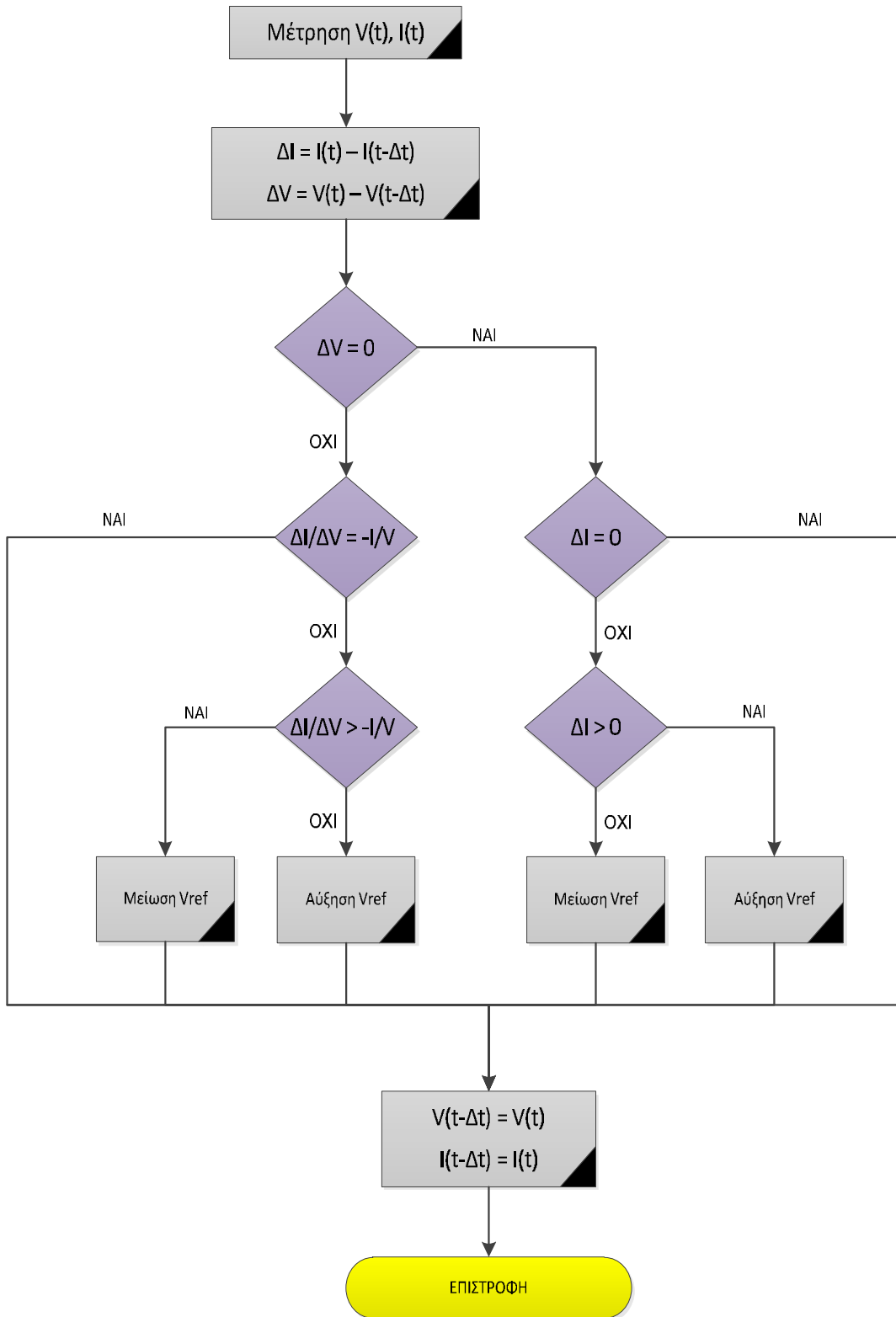
$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$$

τότε

$$\frac{dP}{dV} < 0$$

Το σημείο λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου θα είναι δεξιά από το σημείο μέγιστης ισχύος στην καμπύλη P - V, οπότε η τιμή της τάσης του ΦΒ στοιχείου θα πρέπει να μειωθεί για να εντοπιστεί το νέο σημείο μέγιστης ισχύος.

Το πλεονέκτημα του αλγορίθμου αυξητικής αγωγιμότητας σε σχέση με τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης είναι ότι υπολογίζει και δεν παρατηρεί την κατεύθυνση στην οποία πρέπει να μετακινηθεί το σημείο λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου για να προσεγγίσει το σημείο μέγιστης ισχύος. Είναι ποιό αποτελεσματικός στις απότομες καιρικές και περιβαλλοντολογικές αλλαγές και αποφεύγει τις λανθασμένες μεταβολές της τάσης σε σχέση με τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης. Όταν προσεγγίσει το σημείο μέγιστης ισχύος κρατάει το σημείο λειτουργίας σταθερό.



**Εικόνα 22:** Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου αυξητικής αγωγιμότητας.

### 3.4 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (PARASITIC CAPACITANCE)

Ο αλγόριθμος παρασιτικής χωρητικότητας είναι παρόμοιος με αυτόν της αυξητικής αγωγιμότητας, με την διαφορά ότι περιλαμβάνει και την επίδραση της παρασιτικής χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών κυττάρων  $C_P$ , το οποίο περιλαμβάνει και την περιγραφή της συσσώρευσης φορτίου στην περιοχή p-n. Με την προσθήκη αυτής της χωρητικότητας στην παρακάτω εξίσωση και παριστάνοντας την χωρητικότητα με την σχέση  $I(t)=C \frac{dV}{dt}$ , προκύπτει η σχέση:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_P + R_S I}{a} \right) - 1 \right] + C_P \frac{dV_P}{dt} = F(V_P) + C_P \frac{dV_P}{dt}$$

Ο δεξιός όρος παρουσιάζει δύο συνιστώσες του ρεύματος  $I$ . Η μία είναι συνάρτηση της τάσης  $F(V_P)$  και η άλλη του ρεύματος στην παρασιτική χωρητικότητα. Με βάση αυτή την παρατήρηση, η αυξητική αγωγιμότητα της συστοιχίας  $g_P$  μπορεί να οριστεί ως  $dF(V_P)/dV_P$  και η στιγμιαία αγωγιμότητα της συστοιχίας φωτοβολταϊκών,  $g_L$  μπορεί να οριστεί ως  $-F(V_P)/V_P$ . Το MPP βρίσκεται στο σημείο όπου  $dP/dV_P=0$ . Πολλαπλασιάζοντας την παραπάνω εξίσωση με τη τάση  $V_P$  της συστοιχίας και διαφορίζοντας το αποτέλεσμα προκύπτει η εξίσωση για την ισχύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο MPP:

$$\frac{dF(V_P)}{dV_P} + C_P \left( \frac{\dot{V}}{V} + \frac{\ddot{V}}{\dot{V}} \right) + \frac{F(V_P)}{V_P} = 0$$

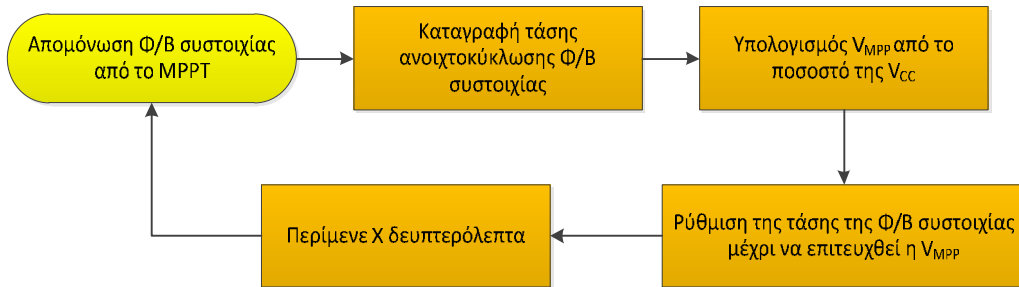
Οι τρεις όροι στην εξίσωση αντιπροσωπεύουν τη στιγμιαία αγωγιμότητα, την αυξητική αγωγιμότητα και την επαγόμενη κυμάτωση της παρασιτικής χωρητικότητας. Η πρώτη και δεύτερη παράγωγος της τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας λαμβάνουν υπόψη τις συνιστώσες κυμάτωσης του εναλλασσόμενου ρεύματος που παράγονται από το μετατροπέα, εφόσον έχει συνδεθεί τέτοιος στην έξοδο του ρυθμιστή MPPT. Αξίζει να σημειωθεί ότι εάν το  $C_P$  είναι ίσο με μηδέν, η εξίσωση απλοποιείται σε αυτή που χρησιμοποιείται για τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας.

### 3.5 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΤΑΣΗΣ (CONSTANT VOLTAGE)

Η βάση για τον αλγόριθμο σταθερής τάσης είναι η παρατήρηση, μέσω των καμπυλών I-V. Η αναλογία της μέγιστης τάσης ισχύος της συστοιχίας φωτοβολταϊκών VMPP, και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος VOC, είναι περίπου σταθερή:

$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} = K < 1$$

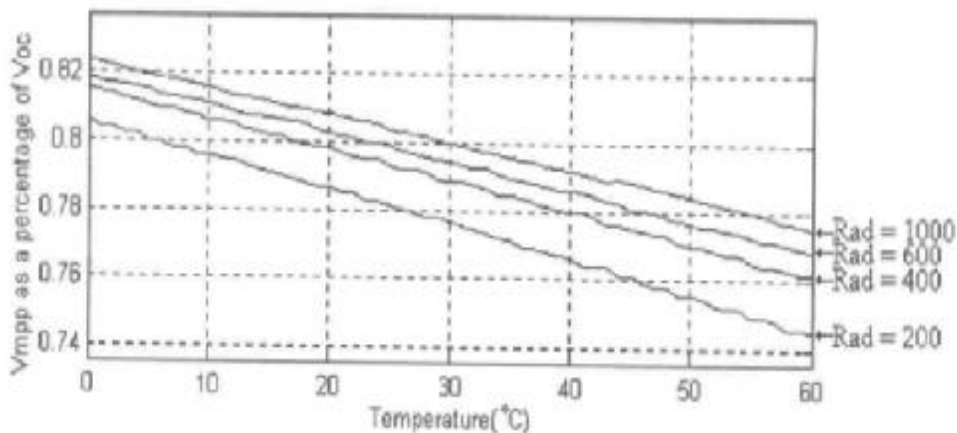
Ο αλγόριθμος σταθερής τάσης μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας το διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στην **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**



**Εικόνα 23:** Τυπικό διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο σταθερής τάσης.

Η συστοιχία φωτοβολταϊκών απομονώνεται προσωρινά από τον MPPT και λαμβάνεται μια μέτρηση του  $V_{OC}$ . Στη συνέχεια ο αλγόριθμος υπολογίζει το σωστό σημείο λειτουργίας χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση και την καθορισμένη τιμή του  $K$ , και ρυθμίζει την τάση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μέχρι να επιτευχθεί η υπολογισμένη τιμή  $V_{MPP}$ . Αυτή η λειτουργία επαναλαμβάνεται περιοδικά για να ακολουθηθεί η θέση του MPP.

Αν και αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά απλή είναι δύσκολο να επιλεγεί η βέλτιστη τιμή της σταθεράς  $K$ . Η εικόνα 30 παρουσιάζει πραγματικές τιμές  $K$  που απαιτούνται για ένα δεδομένο φωτοβολταϊκό σύστημα για ένα εύρος θερμοκρασίας 0 - 600 και ακτινοβολία από 200 σε 1000  $W/m^2$ .



**Εικόνα 24:** Η τάση  $V_{mpp}$  σαν ποσοστό του  $V_{oc}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας.





Οι εξισώσεις ρεύματος και τάσεως για μια φωτοβολταϊκή κυψέλη δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$I = I_L - I_{OS} \left[ \exp \frac{q}{Ak_B T} (V - IR) - 1 \right]$$

$$I_{OS} = I_{OR} \left( \frac{T}{T_R} \right) \exp \left[ \frac{qE_G}{Ak_B} \left( \frac{i}{T_R} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

$$I_L = \left( \frac{G}{1000} \right) [I_{SC} + K_{T1}(T - T_R)]$$

Όπου:

$I_{OS}$ : Συνάρτηση του ρεύματος κορεσμού  $I_{OR}$

A: Συντελεστής των διόδων

Q: Το φορτίου του ηλεκτρονίου

$I_L$ : Ρεύμα συναρτήσει της θερμοκρασίας

$I_{OR}$ : Αντίστροφο ρεύμα κορεσμού

R: Αντίσταση σειράς φωτοβολταϊκού

$K_{T1}$ : Συντελεστής θερμοκρασίας

$T_R$ : Τυπική θερμοκρασία αναφοράς

T: Θερμοκρασία,

G: Ακτινοβολία σε  $W/m^2$

$I_{SC}$ : Ρεύμα βραχυκυκλώματος σε τυπικές θερμοκρασίες δοκιμών

$K_B$ : Σταθερά Boltzman

Είναι επίσης δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος MPPT σταθερού ρεύματος αντί της σταθερής τάσης ο οποίος υπολογίζει το MPP ρεύμα ως σταθερό ποσοστό του ρεύματος βραχυκυκλώματος. Για να υλοποιηθεί αυτός ο αλγόριθμος, τοποθετείται ένας διακόπτης στους ακροδέκτες εισόδου του μετατροπέα ο οποίος κλείνει στιγμιαία. Στην συνέχεια μετρίεται το ρεύμα βραχυκυκλώματος και υπολογίζεται το MPP ρεύμα. Κατόπιν ρυθμίζεται το ρεύμα εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας από το MPPT έως ότου επιτευχθεί το υπολογισμένο ρεύμα. Αυτή η λειτουργία επαναλαμβάνεται περιοδικά. Ο έλεγχος σταθερής τάσης όμως υπερτερεί έναντι του σταθερού ρεύματος λόγω της σχετικής ευκολίας μέτρησης των τάσεων και επειδή είναι σχετικά απλό να βραχυκυκλωθεί η φωτοβολταϊκή συστοιχία.

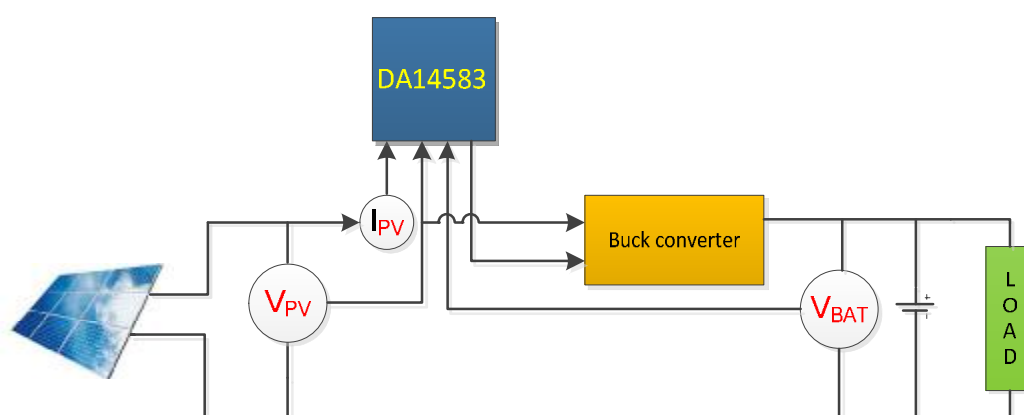
### 3.6 ΣΥΝΟΨΗ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύσαμε ξεχωριστά ορισμένους από τους πλέον χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους MPPT. Ο αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης είναι ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος στην πράξη λόγω της εύκολης εφαρμογής του και αυτό είναι και το πλεονέκτημά του σε σχέση με τους υπόλοιπους. Ο αλγόριθμός αυξητικής αγωγιμότητας έχει ένα πλεονέκτημα έναντι του αλγόριθμου "διατάραξης και παρατήρησης": κάτω από γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες ο αλγόριθμος αυξητικής αγωγιμότητας μπορεί να εντοπίσει τη σωστή κατεύθυνση στην οποία πρέπει να κινηθεί για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος και να σταθεροποιηθεί σε αυτό και έτσι αποφεύγεται η περίπτωση να ακολουθηθεί λανθασμένη κατεύθυνση, όπως συμβαίνει με το P&O αλγόριθμο, και να υπάρχει ταλάντευση γύρω από το σημείο MPP όταν αυτό προσεγγιστεί. Ο αλγόριθμος παρασιτικής χωρητικότητας είναι παρόμοιος με αυτόν της αυξητικής αγωγιμότητας, εκτός από το ότι περιλαμβάνει και την επίδραση της παρασιτικής χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών κυττάρων CP. Τέλος, ο αλγόριθμος σταθερής τάσης βασίζεται στην παρατήρηση, μέσω των καμπυλών I-V, ότι η αναλογία της μέγιστης τάσης ισχύος της συστοιχίας φωτοβολταϊκών VMPP, και της τάσης βραχυκυκλώματος VOC, είναι περίπου σταθερή. Λαμβάνεται υπόψη ότι πρέπει να καθοριστεί η σωστή τιμή του K για να λειτουργήσει σωστά ο αλγόριθμος αυτός. Ανάλογα λοιπόν με την κάθε εφαρμογή που εκτελείται και τις απαιτήσεις αυτής, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και τον εκάστοτε αλγόριθμο MPPT.

## 4 MAXIMUM POWER POINT TRACKER

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την υλοποίηση του ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα (Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.) αναλύουμε το ηλεκτρικό κύκλωμα με το οποίο ελέγχουμε τη μέγιστη ισχύ του ΦΒ πάνελ και τροφοδοτούμε ένα φορτίο. Επίσης υπάρχει επιλογή ο μικροελεγκτής DA14583 Bluetooth LE να χρησιμοποιηθεί ως φορτίο και να τροφοδοτηθεί από το ΦΒ πάνελ.



Εικόνα 25: Σχηματικό διάγραμμα του Φ/Β συστήματος.

Μέσω του μετατροπέα ADC του μικροελεγκτή DA14583 BluetoothLE, λαμβάνονται συνεχώς μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος του πάνελ, όπως και της τάσης του φορτίου. Στη συνέχεια, μέσω του αλγόριθμου, διατάραξης και παρατήρησης, υπολογίζουμε την διαθέσιμη ισχύ του Φ/Β πάνελ και μέσω ενός PWM που δημιουργείται από τον μικροελεγκτή, ελέγχουμε κατάλληλα το κύκλωμα του Buckconverter (P-Mosfet, δίοδο, πηνίο, πυκνωτή) ώστε να παρέχουμε στο φορτίο μας τη μέγιστη δυνατή ισχύ.

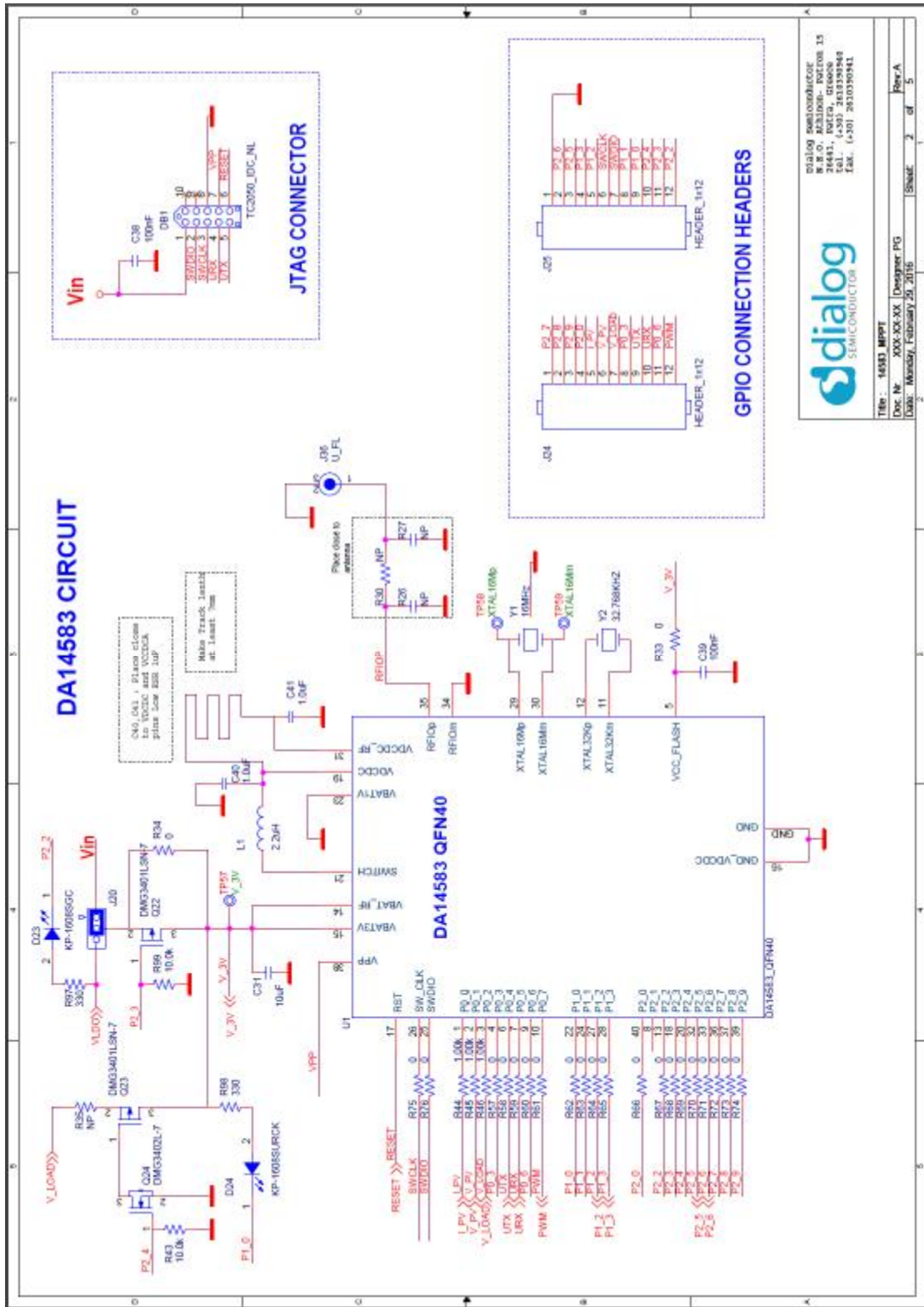
Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στη υλοποίηση της κατασκευής του MPPT (Schematic, PCB), και θα αναλύσουμε τα επιμέρους κομμάτια της κατασκευής μας.

## **4.2 Σχεδιασμός και ανάλυση του κυκλώματος**

Στο κομμάτι αυτό, φαίνεται το σχηματικό που σχεδιάστηκε για την κατασκευή του ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος. Τα κύρια στοιχεία τα οποία απαρτίζουν την διάταξη αυτή είναι:

1. Το κύκλωμα σύνδεσης του ΦΒ πάνελ
2. Το κύκλωμα υλοποίησης του Buck converter, των Half bridge MOSFET, Totem Pole Transistors, PWM.
3. Το κύκλωμα μέτρησης ρεύματος του Φ/β πάνελ
4. Το κύκλωμα μέτρησης τάσης του Φ/β πάνελ
5. Το κύκλωμα σειριακής (FTDI) σύνδεσης του μικροελεγκτή
6. Το κύκλωμα τροφοδοσίας του μικροελεγκτή
7. Άλλα βοηθητικά κυκλώματα

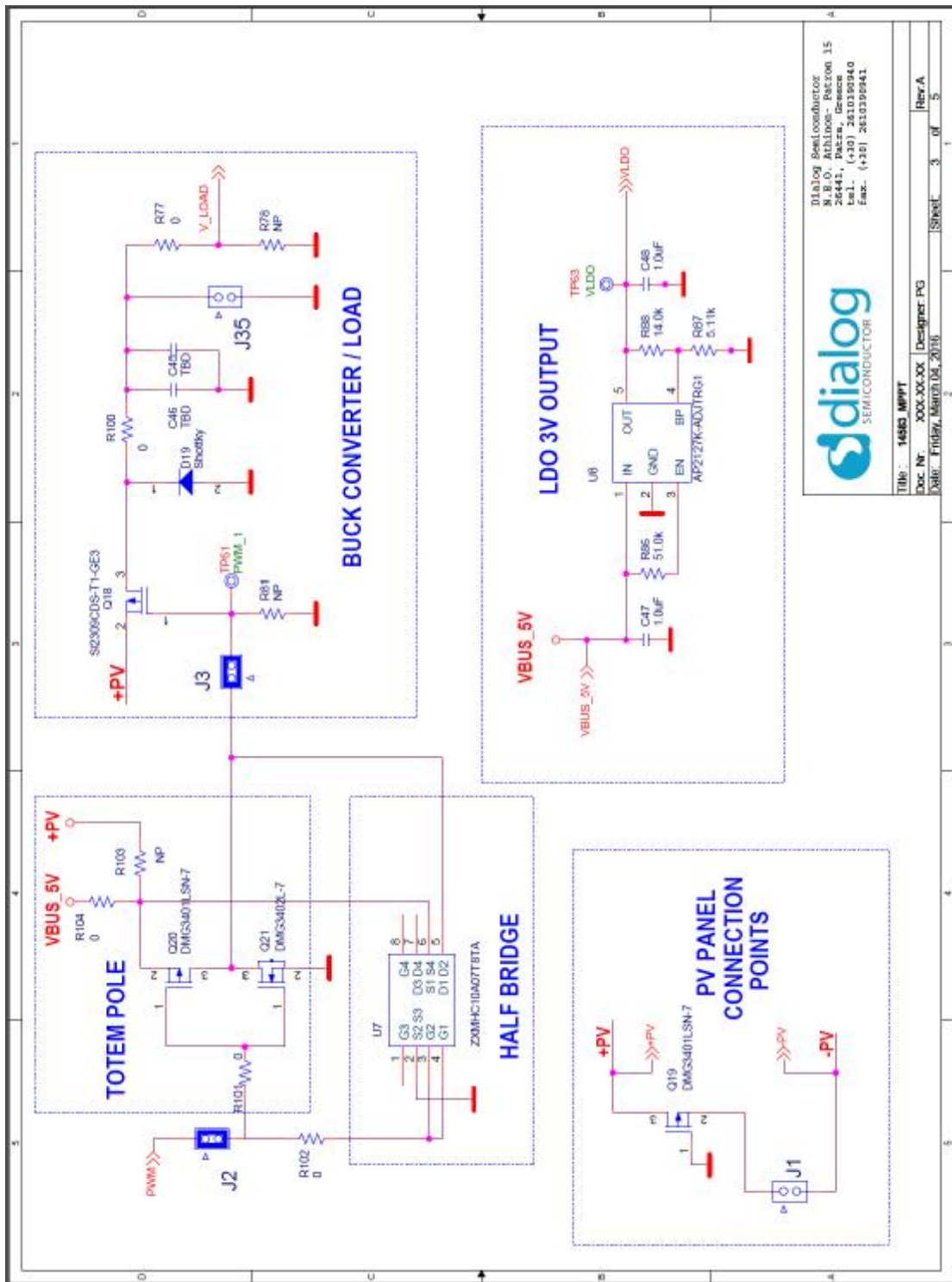
Παρακάτω θα εξηγήσουμε αναλυτικά το κάθε κομμάτι του κυκλώματος ξεχωριστά.



Dialog Semiconductor  
 W.R.O. 2631008- P02E08 15  
 26441, P02E9, 026008  
 Tel.: (+33) 243398940  
 Fax: (+33) 243398941

Title: 14583 MPPT  
 Doc No: XXX-XX-XX Designer: PG  
 Date: Monday, February 20, 2016 Sheet: 2 of 5 Rev: A

Εικόνα26: DA14583 MPPT schematic Page 2

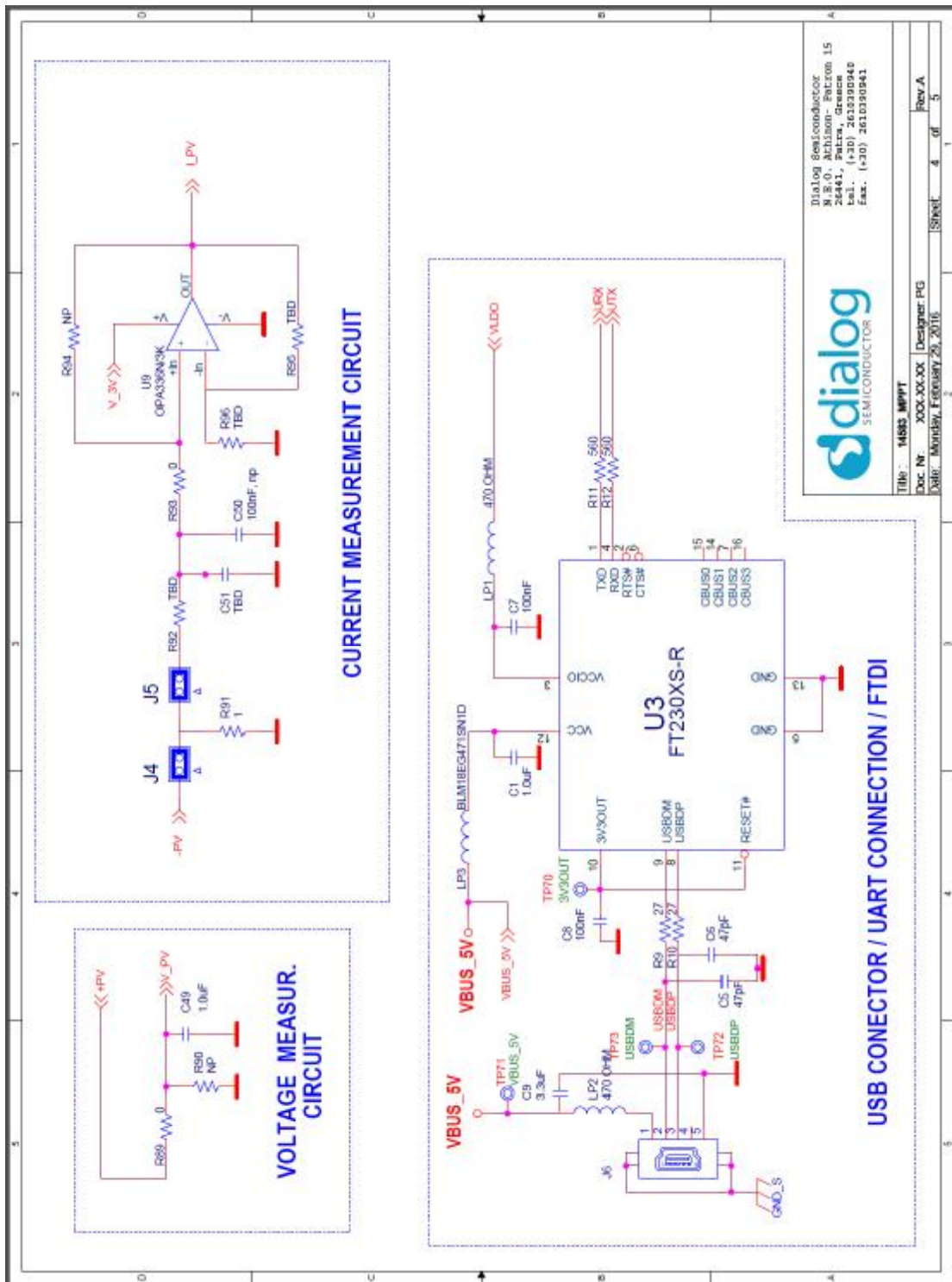


Dialog Semiconductor  
 N. E. O. Achlous - Patzosa 15  
 26103 Patzosa  
 26103 Patzosa  
 Fax: (+30) 261030940



Title:	14583 MPPT
Doc. No.:	XXX-XX-XX Designer: PG
Date:	Friday, 18 April 2016
Sheet:	3 of 5
Rev:	Rev A

Εικόνα27: DA14583 MPPT schematic Page 3



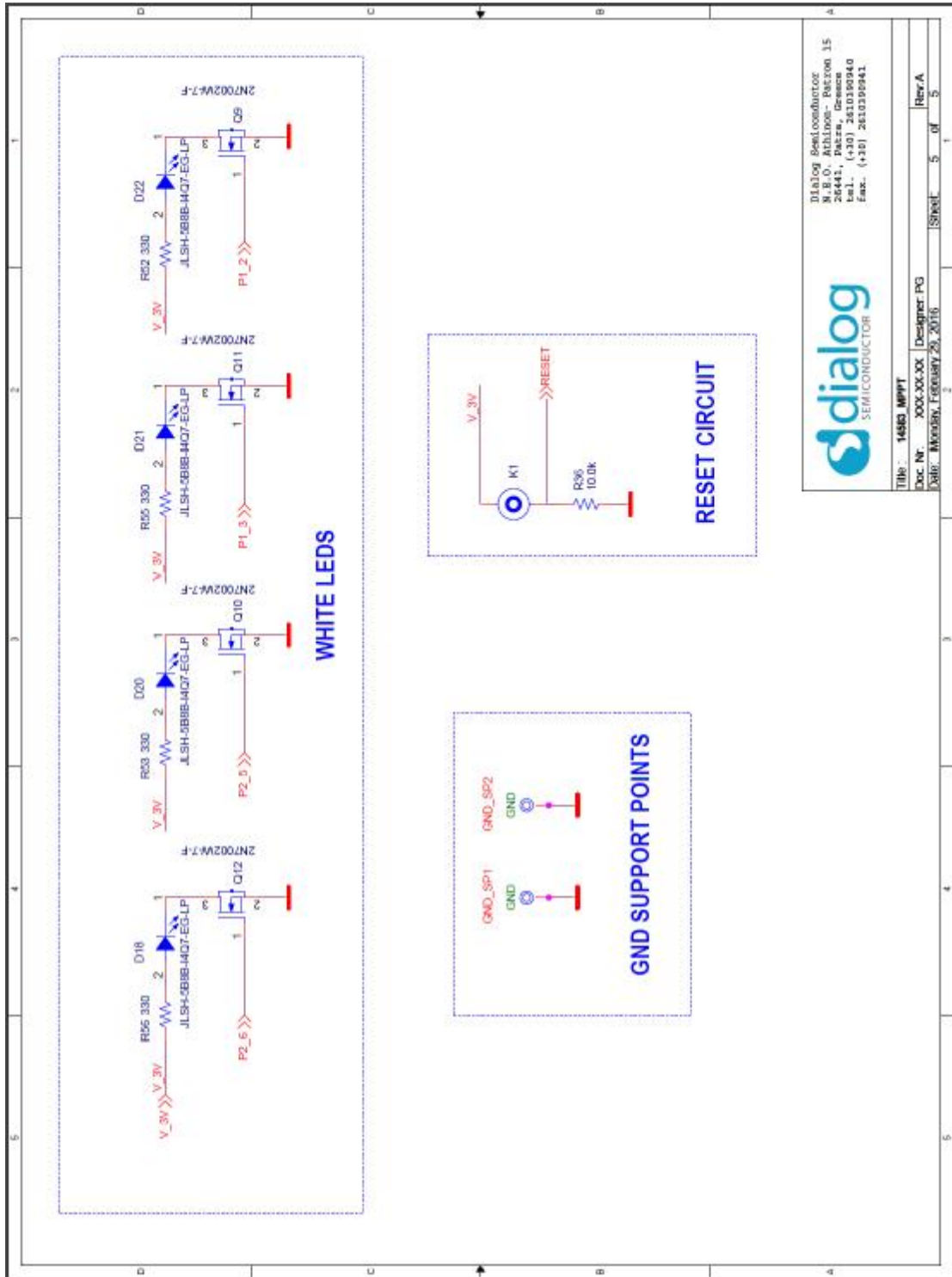
Dialog Semiconductor  
 M.S.O. Achimbor - Patrom 15  
 E-mail: msos@dialog.com  
 Fax: (+30) 2610390940  
 Fax: (+30) 2610390941



Title:	14583 MPPT
Doc. No:	XXX-XX-XX Designer: PG
Date:	Monday, February 23, 2016
Sheet:	4 of 5
Rev:	Rev A

Eικόνα28: DA14583 MPPT schematic Page 4





Dialog Semiconductor  
 N. B. O. Achilios - POC006 15  
 28441, Patras, Greece  
 Tel.: +30 271 038940  
 Fax: +30 271 038941

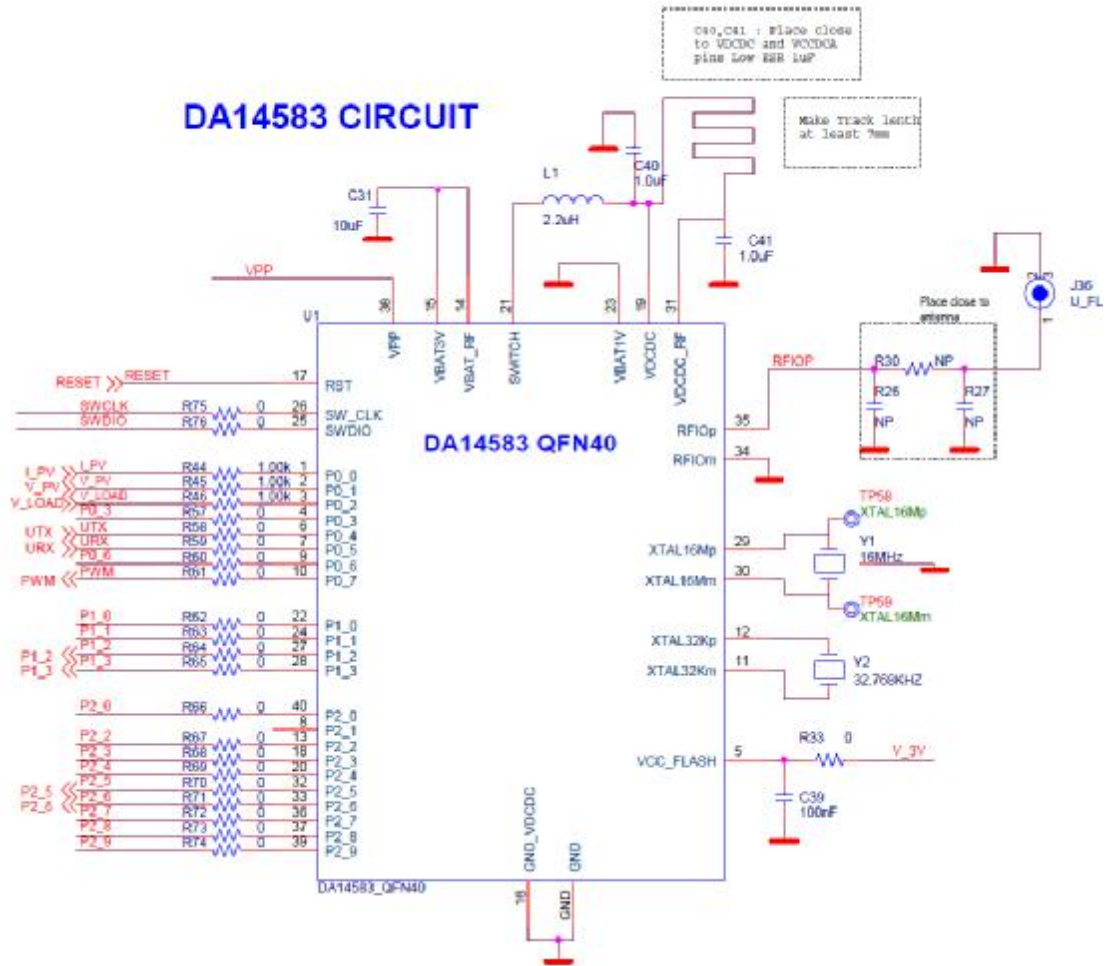


Title:	14583 MPPT	Rev:	A
Doc. No.:	XXX-XX-XX	Designer:	PG
Date:	Monday, February 28, 2016	Sheet:	5 of 5

Εικόνα29: DA14583 MPPT schematic Page 5



## 4.3 Το κύκλωμα του μικροελεγκτή

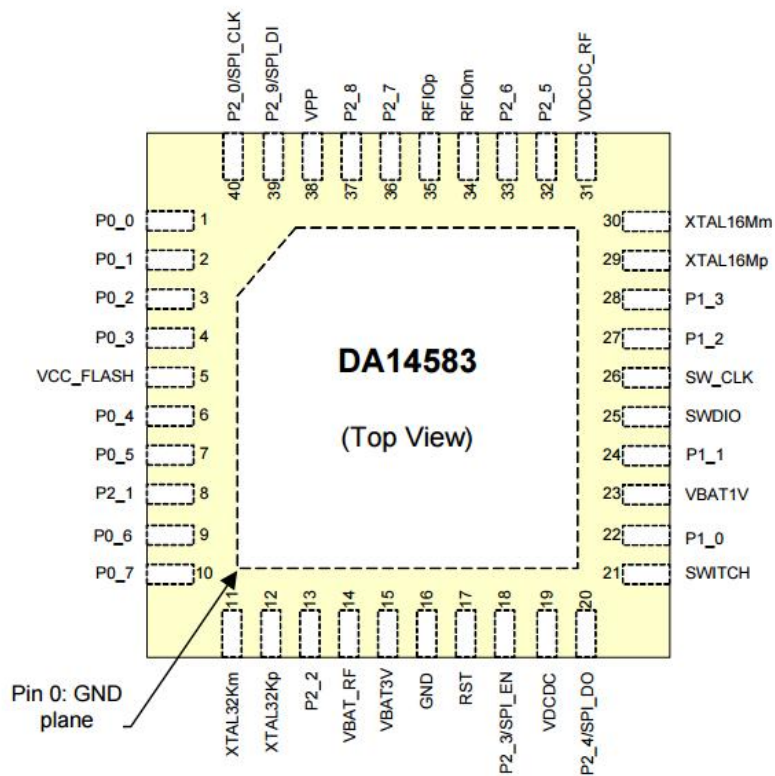


Εικόνα 30: Το κύκλωμα του μικροελεγκτή

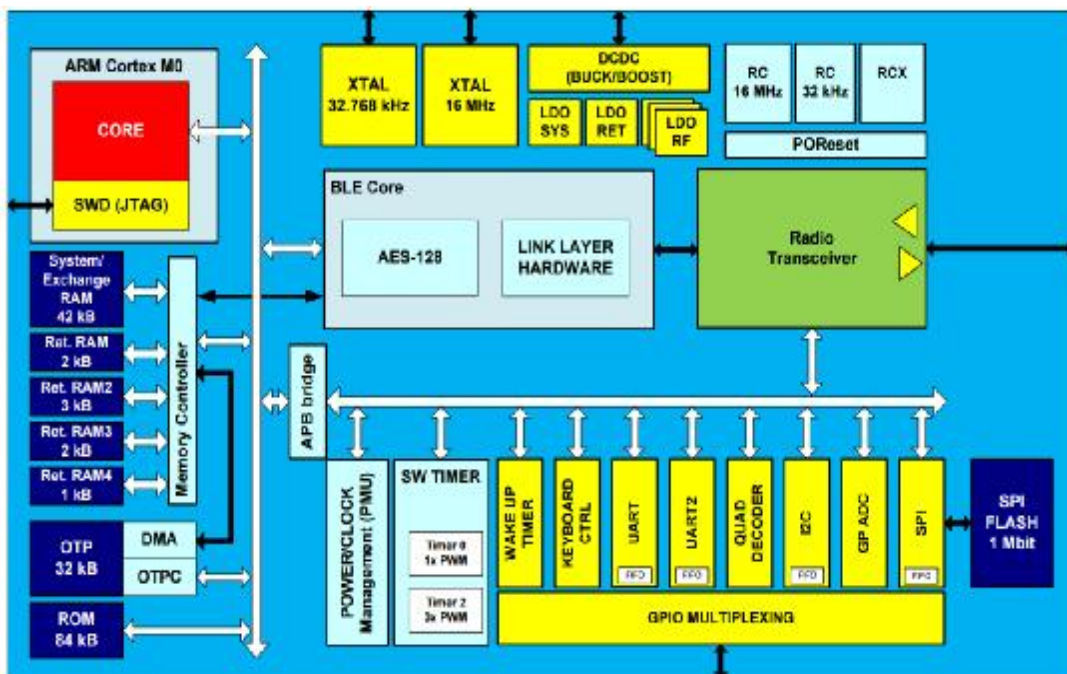
Το συγκεκριμένο μικροελεγκτή [DA14583](#) μπορεί κάποιος να τον προμηθευτεί από το site της Digi-key (Distributor - Διανομέας). Περισσότερες πληροφορίες για τις λειτουργίες και τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή υπάρχουν στο [Datasheet](#) (εγχειρίδιο).

Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή είναι ο DA14583 Bluetooth LE της εταιρίας Dialog Semiconductor, με τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

- § Είναι συμβατό με το πρωτόκολλο Bluetooth V4.1
- § Επεξεργαστική Ισχύς
  - 16 MHz 32 bit ARM Cortex-M0 with SWD interface
  - Dedicated Link Layer Processor
  - AES-128 bit encryption Processor
- § Μνήμες
  - 1 Mbit Flash memory
  - 32 kB One-Time-Programmable (OTP) memory
  - 42 kB System SRAM
  - 84 kB ROM
  - 8 kB Retention SRAM
- § Διαχείριση ενέργειας
  - Integrated Buck mode DC-DC converter
  - Embedded charge pump for Flash programming
  - P0, P1, and P2 ports with 3.3 V tolerance
  - Supports coin (typ. 3.0 V) battery cells
  - 10-bit ADC for battery voltage measurement
- § Digital controlled oscillators
  - 16 MHz crystal ( $\pm 20$  ppm max) and RC oscillator
  - 32 kHz crystal ( $\pm 50$  ppm,  $\pm 500$  ppm max) and RCX oscillatorGeneral purpose
- § Digital interfaces
  - 24 general purpose I/Os
  - 2 UARTs with hardware flow control up to 1 MBd
  - SPI+™ interface
  - I2C bus at 100 kHz, 400 kHz
  - 3-axes capable Quadrature Decoder
- § Analog interfaces
  - 4-channel 10-bit ADC
- § Radio transceiver Fully integrated 2.4 GHz CMOS transceiver
  - Single wire antenna: no RF matching or RX/TX switching required
  - Supply current at VBAT3V:n TX: 3.4 mA, RX: 3.7 mA (with ideal DC-DC) 0 dBm transmit output power
  - -20 dBm output power in “Near Field Mode”
  - -93 dBm receiver sensitivity
- § Packages:
  - QFN 40 pins, 5 mm x 5 mm



Εικόνα 31: QFN40 - Αντιστοίχιση των Pin



Εικόνα 32: DA14583 Σχηματικό διάγραμμα

Για να εκτελεστεί κάθε εντολή, που καθορίζεται από το πρόγραμμα, η κεντρική μονάδα επεξεργασίας εκτελεί μια σειρά από διαδοχικές λειτουργίες. Για να συγχρονιστούν οι λειτουργίες αυτές, χρειάζεται ένα σήμα ρολογιού. Οι μικροελεγκτές υποστηρίζουν διάφορες πηγές παραγωγής σήματος ρολογιού του συστήματος. Η συγκεκριμένη κατασκευή συγχρονίζεται από ένα εξωτερικό ταλαντωτή (Clock) 16MHz. Επιλέξαμε το συγκεκριμένο τύπο ρολογιού λόγω της μεγάλης ακρίβειας, του χαμηλού κόστους και της ανθεκτικότητας στις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Ο ADC μετατροπέας, μετατρέπει ένα αναλογικό σήμα εισόδου σε ψηφιακό σήμα των 10-bit με την μέθοδο των διαδοχικών προσεγγίσεων για να έχουμε την δυνατότητα της εμφάνιση των δεδομένων του συστήματος.

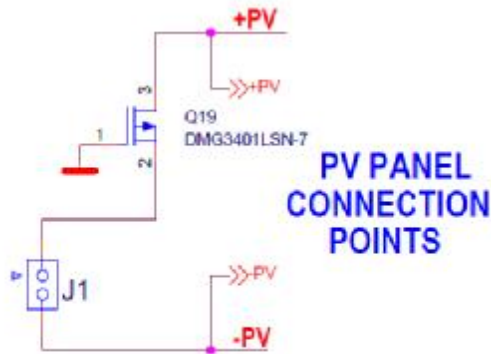
Στις θύρες (GPIO) A, που είναι ο μετατροπέας ADC, συνδέουμε τις τρεις αναλογικές εισόδους για την μέτρηση της τάσης του Φ/B πάνελ (V\_PV- P0\_1), τη μέτρηση του ρεύματος του Φ/B πάνελ (I\_PV - P0\_0) και την μέτρηση της τάσης του Φορτίου (V\_LOAD - P0\_2).

Στις θύρες P0\_4 και P0\_5 έχουμε συνδέσει αντίστοιχα τα σήματα UTX και URX (UART signals). Τη θύρα P0\_7 θα την χρησιμοποιήσουμε σαν έξοδο για το PWM.

Η τροφοδοσία του μικροελεγκτή και άλλων στοιχείων του συστήματος (5V) παρέχεται από την θύρα USB. Μετατρέπουμε την τροφοδοσία αυτή στα 3V μέσω ενός LDO (U8) όπως φαίνεται στο σχηματικό. Στη περίπτωση που η θύρα USB δεν θα είναι συνδεδεμένη με τον υπολογιστή ή με άλλη παροχή τροφοδοσίας (π.χ. Power Bank), ο μικροελεγκτής και το υπόλοιπο σύστημα του MPPT δεν θα μπορεί να ξεκινήσει. Αν το σύστημα έχει ξεκινήσει κανονικά, τότε έχουμε την δυνατότητα να τροφοδοτήσουμε τον μικροελεγκτή μέσω του Buck converter. Η διαδικασία αναφέρεται στην παράγραφο 4.9.3 (εναλλαγή τροφοδοσίας του μικροελεγκτή μεταξύ του USB και Buck Converter).

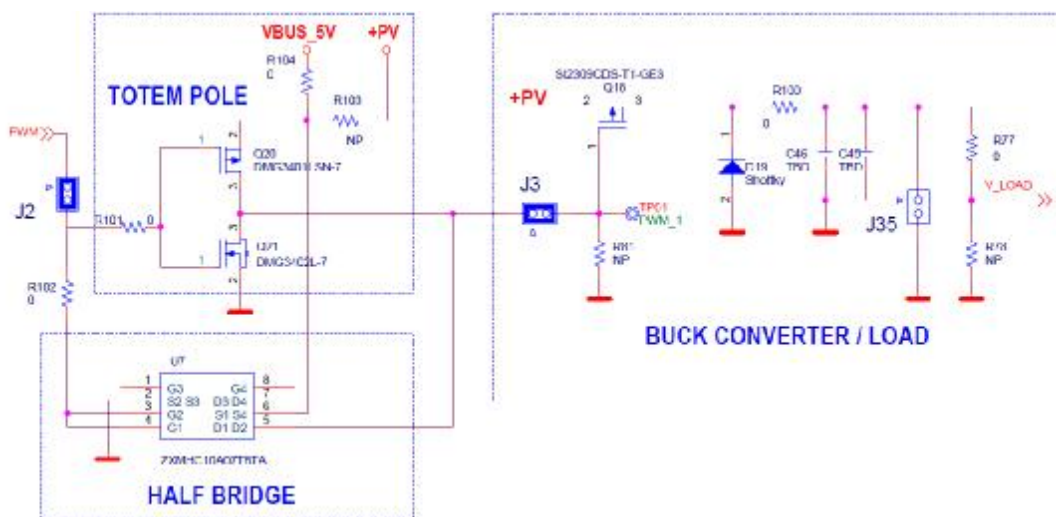
#### **4.4 Το κύκλωμα υλοποίησης του Buck converter, Half Bridge MOSFET, Totem Pole Transistors, PWM**

Στον connector J1 συνδέεται το ΦB πάνελ όπως φαίνεται στην *Εικόνα 33*. Έχει τοποθετηθεί σε σειρά ένα P-MOSFET Q19 (DMG3401LSN-7) για προστασία σε περίπτωση που έχουμε λάθος συνδεσμολογία στους ακροδέκτες του ΦB πάνελ με την πλακέτα μας.



**Εικόνα 33:** Σημεία σύνδεσης του ΦΒ πάνελ

Στη συνέχεια έχουμε δύο διαφορετικές διατάξεις που ελέγχουμε τη διακοπτική λειτουργία του Q18 P-MOSFET (SI2309CDS-T1-GE3). Η πρώτη είναι η συνδεσμολογία των τρανζίστορ Q20 και Q21, γνωστή και ως Totem Pole, και η δεύτερη μέσω του U7, Half-Bridge Mosfet (ZXMHFC10A07T8TA) το οποίο αποτελείται από 2 ζεύγη N-MOSFET και P-MOSFET, με μια επιπλέον προστασία από διόδους, για την περίπτωση αυτή όπου θα γίνει η αλλαγή κατάστασης στο PWM και ξεκινήσει να άγει το N-MOSFET, ενώ ταυτόχρονα θα άγει και το P-MOSFET. Αυτό θα μας δημιουργήσει ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ της τάσης τροφοδοσίας από το USB προς το GND. Η κατάσταση του PWM (από High σε Low και αντίστροφα) καθώς και η διάρκεια της, θα ρυθμίζεται από το κώδικα και θα εξαρτάται από την τιμή της τάσης στα άκρα του φορτίου.



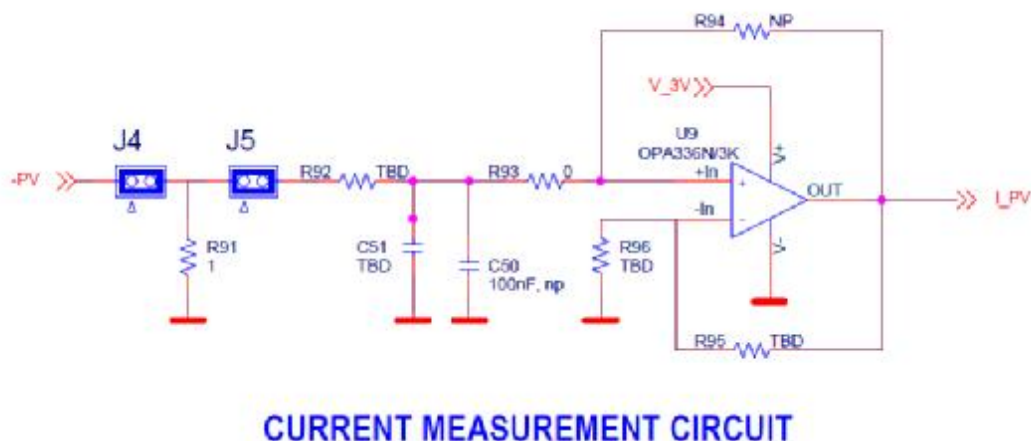
**Εικόνα34:** Τοκύκλωμα του Buck Converter - Totem pole transistor - Half Bridge MOSFET

Όταν λοιπόν το σήμα του PWM θα είναι High, τότε θα ενεργοποιηθεί το Q21 (N-MOSFET). Η βάση του Q18 (P-MOSFET) θα συνδεθεί με το GND και με τη σειρά του θα ενεργοποιηθεί και αυτό. Όταν το σήμα του PWM θα είναι Low, τότε θα ενεργοποιηθεί το Q20 (P-MOSFET). Η βάση του Q18 (P-

MOSFET) θα συνδεθεί με το VBUS\_5V και τότε θα διακόψει την σύνδεση του θετικού ακροδέκτη του ΦΒ πάνελ με το Buck Converter.

Η συνδεσμολογία του Buck Converter αποτελείται από μια δίοδο D19 ανάστροφα συνδεδεμένη (άνοδος προς το GND), ένα πηνίο L1 που συνδέει την έξοδο του Q18 με τη θύρα P0\_2 που κάνει την μέτρηση της τάσης του φορτίου, και δύο πυκνωτές προς τη γη C45 και C46, οι οποίοι θα αποθηκεύουν ενέργεια (φόρτιση) όσο το Q18 να είναι σε κατάσταση κλειστού διακόπτη και το πηνίο θα διαρρέεται από ρεύμα, ενώ το φορτίο θα καταναλώνει την ενέργεια αυτή όταν το Q18 θα είναι σε κατάσταση ανοικτού διακόπτη και το πηνίο δεν θα διαρρέεται από ρεύμα. Επειδή οι θύρες του ADC του μικροελεγκτή λειτουργούν σε τάση από 0 έως 3V, έχουν τοποθετηθεί ένας διαιρέτης τάσης για την περίπτωση που η τάση στην έξοδο του Buck Converter ξεπερνάει τα 3V. Με βάση τις τιμές των αντιστάσεων του διαιρέτη τάσης, θα υπολογίζεται μέσω του κώδικα η τιμή της τάσης στα άκρα του φορτίου (V\_LOAD).

#### 4.5 Το κύκλωμα μέτρησης ρεύματος του Φ/β πάνελ



**Εικόνα 35:** Το κύκλωμα μέτρησης του ρεύματος του ΦΒ πάνελ

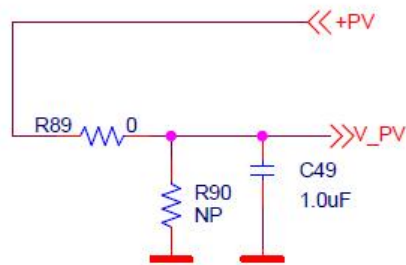
Για να τον υπολογισμό της ισχύς του ΦΒ πάνελ είναι αναγκαία η μέτρηση της τάσης και του ρεύματος του ΦΒ πάνελ. Στη παραπάνω *Εικόνα 35* φαίνεται το κύκλωμα που έχουμε υλοποιήσει για την μέτρηση του ρεύματος του ΦΒ πάνελ. Στην ουσία έχουμε συνδέσει το αρνητικό ακροδέκτη του ΦΒ πάνελ πάνω στην αντίσταση R91, όπου η τιμή της είναι 1Ω και μετράμε την τάση στα άκρα της αντίστασης αυτής. Έχουμε τοποθετήσει δύο jumper (J31, J32) πριν και μετά την αντίσταση ώστε να μπορούμε να παρεμβάλουμε δύο αμπερόμετρα και να έχουμε την τιμή του ρεύματος και στις δύο περιπτώσεις. Αυτό μπορεί να χρειαστεί να γίνει προληπτικά για την περίπτωση που θα χρειαστεί να συγκρίνουμε την τιμή του ρεύματος που μετράμε μέσω του κώδικα και της πραγματικής τιμής του ρεύματος.

Η αντίσταση R92 καθώς και οι πυκνωτές C50, C51 έχουν τοποθετηθεί για φιλτράρισμα του σήματος. Στη συνέχεια ενισχύουμε την τάση με την διάταξη του ενισχυτή U9 και καταλήγουμε στη θύρα του ADC, P0\_0 (I\_PV).

Μέσω του κώδικα γίνεται ο υπολογισμός του ρεύματος με βάση την ενίσχυση που κάνουμε και την τιμή της αντίστασης  $R3=1\Omega$  ( $V/R$ ).

## 4.6 Το κύκλωμα μέτρησης τάσης του Φ/β πάνελ

Για τον υπολογισμό της τάσης του Φ/Β πάνελ έχουμε συνδέσει το θετικό ακροδέκτη του Φ/Β πάνελ με την θύρα του ADC του μικροελεγκτή και μέσω του κώδικα μετράμε την τιμή αυτή. Επειδή οι θύρες του ADC του μικροελεγκτή λειτουργούν σε τάση από 0 έως 3V, έχουν τοποθετηθεί ένας διαιρέτης τάσης για την περίπτωση που η τάση στο θετικό ακροδέκτη του Φ/Β πάνελ ξεπερνάει τα 3V. Με βάση τις τιμές των αντιστάσεων R1, R2 του διαιρέτη τάσης, θα υπολογίζεται μέσω του κώδικα η τιμή της τάσης στο θετικό ακροδέκτη του Φ/Β πάνελ. Ο πυκνωτής C2=1μF, έχει τοποθετηθεί προληπτικά για την εξομάλυνση της τάσης αναφοράς.

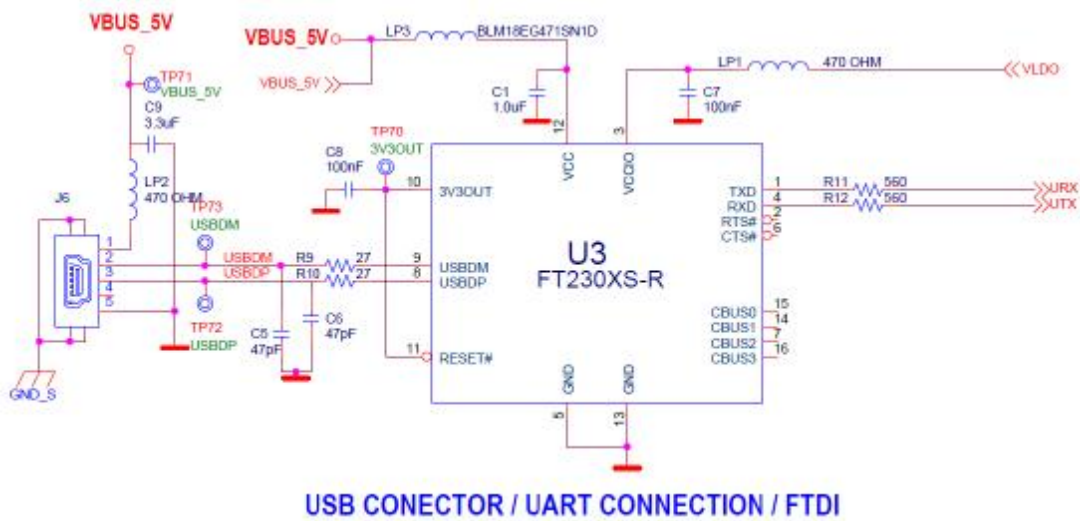


### VOLTAGE MEASUR. CIRCUIT

**Εικόνα 36:** Το κύκλωμα μέτρησης της τάσης του ΦΒ πάνελ



## 4.7 Το κύκλωμα σειριακής (FTDI) και JTAG σύνδεσης του μικροελεγκτή



**Εικόνα37: USB Connector - FDTI & UART Connection**

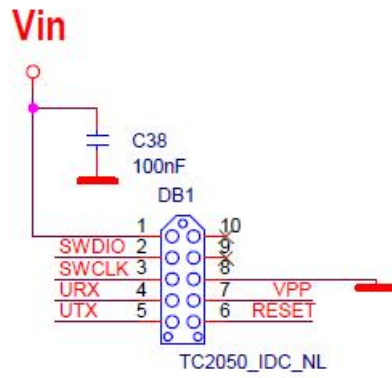
Για τον προγραμματισμό και την επικοινωνία του μικροελεγκτή υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι, με σειριακή σύνδεση (UART) και με σύνδεση JTAG.

Για την τροφοδοσία του μικροεπεξεργαστή καθώς και για την σειριακή σύνδεση, έχουμε τοποθετήσει ένα USB mini Connector (J6) όπως φαίνεται στη παραπάνω *Εικόνα37*. Για την εξομάλυνση της τάσης τροφοδοσίας έχουμε προσθέσει ένα πυκνωτή 3,3µF. τα σήματα USBDM και USBDP καταλήγουν στο ολοκληρωμένο FT230XS-R και παρεμβάλλονται σε σειρά οι αντιστάσεις  $R9=27\Omega$  και  $R10=27\Omega$  για το τερματισμό των γραμμών. Επίσης έχουν τοποθετηθεί δύο πυκνωτές  $C5=47pF$  και  $C6=47pF$  για το φιλτράρισμα των σημάτων αυτών.

Για την σειριακή σύνδεση με τον υπολογιστή χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο USB to serial UART interface FX230X-R το οποίο τροφοδοτείται με 5VDC. Το ολοκληρωμένο αυτό χρησιμοποιεί διατάξεις με πυκνωτές μέσω του οποίου παράγει την απαιτούμενη τάση που χρειάζεται η σειριακή θύρα για να είναι εφικτή η επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον υπολογιστή. Στη δική μας κατασκευή, οι θύρες ADC του μικροελεγκτή (URX/P0\_5, UTX/P0\_4) λειτουργούν από 0 έως 3V. Για το λόγο αυτό έχουμε συνδέσει στην θύρα VCCIO του FX230X-R την τάση εξόδου του LDO (U8) ώστε οι θύρες του FX230X-R με τις θύρες του μικροελεγκτή να έχουν την ίδια τάση.

Για την σύνδεση JTAG (DB1), θα χρειαστεί ένα εξωτερικό Interface Programming Board και ένα καλώδιο σύνδεσης Tag-Connect που συνδέεται στο JTAG connector (TC2050-ids-nl). Το σχηματικό του JTAG Connector φαίνεται στη παρακάτω *Εικόνα 38*. Τα σήματα που επιλέξαμε να ελέγχουμε μέσω της σύνδεσης JTAG είναι τα εξής:

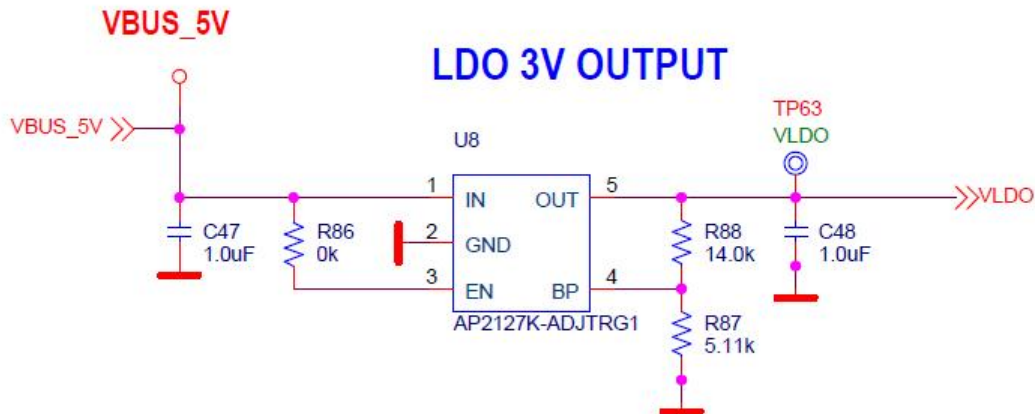




**Εικόνα 38:** JTAG Connector

- § Pin 1 --> Vin
- § Pin 2 --> SWDIO
- § Pin 3 --> SWCLK
- § Pin 4 --> URX
- § Pin 5 --> UTX
- § Pin 6 --> RESET
- § Pin 7 --> VPP
- § Pin 8 --> GND
- § Pin 9 --> No Connect
- § Pin 10 --> No Connect

## 4.8 Το κύκλωμα τροφοδοσίας του μικροελεγκτή



**Εικόνα 39:** U8 - Adjustable LDO

Η τροφοδοσία της πλακέτας παρέχεται μέσω του USBconnector (J6). Η τάση τροφοδοσίας είναι 5 VDC. Ο μικροελεγκτής μας δουλεύει σε τάση τροφοδοσίας από 2.4V έως 3.3V. Για το λόγο αυτό έχουμε παρεμβάλειτο U8 ένα adjustable LDO (Low-dropout regulator), όπως φαίνεται στην παραπάνω *Εικόνα 39*. Η συνδεσμολογία που απαιτείται για να λειτουργήσει είναι η εξής:

1. Pin 1 (IN): Έχει συνδεθεί με τη τάση τροφοδοσίας VBUS\_5V από το USB connector
2. Pin 2 (GND): Έχει συνδεθεί με το GND της πλακέτας μας
3. Pin 3 (EN): Έχει συνδεθεί μέσω μιας αντίστασης 0Ω με την τάση τροφοδοσίας. Το Pin αυτό ελέγχει την λειτουργία του LDO. Επειδή εμείς θέλουμε να είναι συνέχεια σε λειτουργία, βάση του εγχειρίδιου λειτουργίας (datasheet), πρέπει το Pin αυτό να είναι σε κατάσταση High.
4. Pin 4 (FB): Το Pin αυτό ορίζει την τάση εξόδου του LDO, από 0,8V έως 5.5V. Δουλεύει ως είσοδος ανατροφοδότησης η οποία έχει τη τιμή που ορίζεται από το διαιρέτη τάσης. Η τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V_{OUT} = 0.8 \times (1 + R1/R2) \times V$$

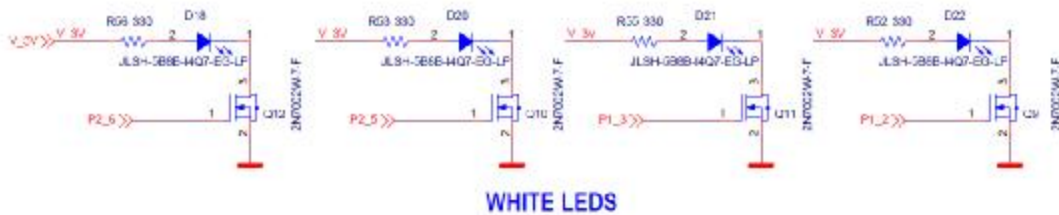
5. Pin 5 (OUT): Έξοδος του LDO (VLDO).

Στην έξοδο του LDO, έχουμε προσθέσει ένα πυκνωτή C43 = 1μF, για την περίπτωση που έχουμε μια μικρή αλλαγή της τάσης, ώστε να μην επηρεάσει τον μικροελεγκτή μας.

## 4.9 Άλλα βοηθητικά κυκλώματα

Στην ενότητα αυτή θα αναφέρουμε τα κυκλώματα που έχουμε προσθέσει για συμπληρωματικές λειτουργίες της πλακέτας μας.

### 4.9.1 Λευκά LEDs



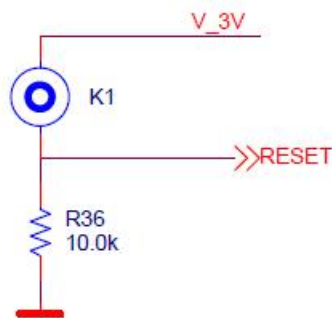
Εικόνα 40: Λευκά LEDs (White LEDs)

Με τις θύρες P2\_6, P2\_5, P1\_3, P1\_2, ελέγχουμε τις βάσεις τεσσάρων N-MOSFET (2N7002W-7-F) που το κάθε ένα από αυτά είναι συνδεδεμένο σε σειρά με ένα λευκό LED, όπως φαίνεται στην παραπάνω Εικόνα 40.

Όταν οι θύρες αυτές βρίσκονται σε κατάσταση Low και έχω τάση 3V στην άνοδο του λευκού LED τότε το N-MOSFET λειτουργεί σαν κλειστός διακόπτης και συνδέει την κάθοδο του κάθε λευκού LED με το GND, και το LED ανάβει. Όταν οι θύρες αυτές βρίσκονται σε κατάσταση High, ακόμα και αν έχω τάση 3V στην άνοδο του λευκού LED τότε το N-MOSFET λειτουργεί σαν ανοιχτός διακόπτης και διακόπτει την σύνδεση της καθόδου του λευκού LED με το GND, και το LED δεν ανάβει.

### 4.9.2 Κύκλωμα επαναφοράς - επανεκκίνησης του συστήματος (RESET)

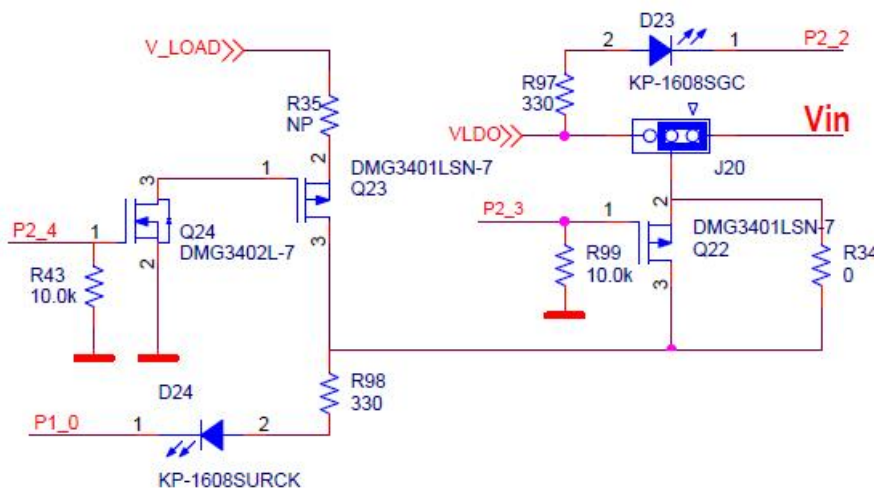
Ο μικροελεγκτής μας διαθέτει μια θύρα για επαναφορά - επανεκκίνηση του συστήματος, γνωστή και ως Reset, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 41. Όσο η θύρα αυτή είναι Low τότε το σύστημά μας λειτουργεί κανονικά. Για να είμαστε σίγουροι ότι η κατάσταση του σήματος Reset είναι Low έχουμε τοποθετήσει μια αντίσταση R36 = 10KΩ (Pull-down). Για να γίνει το Reset πρέπει η θύρα αυτή να πάρει είσοδο High. Για το λόγο αυτό έχουμε τοποθετήσει ένα διακόπτη Reset (K1). Πατώντας το διακόπτη αυτό, τροφοδοτούμε την θύρα μέσω του V\_3V και έτσι κάνουμε χειροκίνητη επαναφορά - επανεκκίνηση του μικροελεγκτή μας.



## RESET CIRCUIT

**Εικόνα 41:** Το κύκλωμα επαναφοράς - επανεκκίνησης του συστήματος

### 4.9.3 Αλλαγή τροφοδοσίας του μικροελεγκτή μεταξύ του USB και Buck Converter



**Εικόνα 42:** Το κύκλωμα εναλλαγής τροφοδοσίας

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα *Εικόνα 42*, η θύρα P2\_3 είναι συνδεδεμένη στη βάση του P-MOSFET Q22, η P2\_4 είναι συνδεδεμένη στη βάση του N-MOSFET Q24, που με τη σειρά του και αυτό είναι συνδεδεμένο στη βάση του P-MOSFET Q23. Το συγκεκριμένο κύκλωμα αυτό εξυπηρετεί την αλλαγή τροφοδοσίας του μικροελεγκτή από το LDO στο ΦΒ πάνελ.

Αναλυτικότερα, όταν η θύρα P2\_3 είναι σε κατάσταση Low ο μικροελεγκτής τροφοδοτείται από την έξοδο του LDO, όταν έχουμε τοποθετήσει το jumper στις θέσεις 2-3 του connector J20. Ταυτόχρονα η θύρα P2\_4 είναι και αυτή σε κατάσταση Low οπότε και η βάση του P-MOSFET είναι σε κατάσταση High και ο μικροελεγκτής δεν τροφοδοτείται από την έξοδο του Buck converter. Όταν η τάση εξόδου του Buck converter είναι σε επίπεδα μεταξύ 2.7V και 3.1V, τότε μέσω του κώδικα που είναι προγραμματισμένος ο

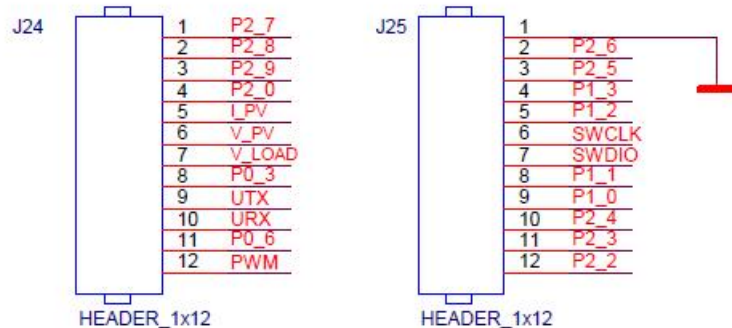
μικροελεγκτής, γίνεται η αλλαγή κατάστασης των θυρών. Η κατάσταση των θυρών P2\_3 και P2\_4 γίνεται High και ο μικροελεγκτής παίρνει τροφοδοσία από την έξοδο του Buck converter. Για να αποφύγουμε την έλλειψη τροφοδοσίας του μικροελεγκτή στην αλλαγή των καταστάσεων αυτών, έχει τοποθετηθεί ένας πυκνωτής 10μF στην είσοδο τροφοδοσίας του μικροελεγκτή (C31).

Στην περίπτωση που δεν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε την παραπάνω διαδικασία και θέλουμε να τροφοδοτούμε τον μικροελεγκτή μας με σταθερή τάση εξόδου του LDO = 3V, τότε παρακάμπτουμε το κύκλωμα αυτό τοποθετώντας την αντίσταση R34 = 0Ω και αφαιρώντας την αντίσταση R35 = 0Ω.

#### 4.9.4 Λοιπές θύρες μικροελεγκτή και σημεία γείωσης (GND)

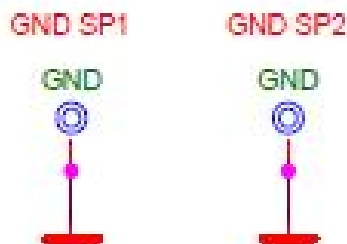
Όλες οι υπόλοιπες θύρες είναι συνδεδεμένες σε 2 Headers (2 x 12 οκαθένας), ώστε αν χρειαστεί να έχουμε επικοινωνία με όλες τις θύρες μέσω καλωδίων (Εικόνα43). Η μοναδική θύρα που δεν είναι προσβάσιμη είναι η θύρα P2\_1.

Τα σημεία γείωσης (GND) έχουν τοποθετηθεί ως σημεία στήριξης των probe ενός παλμογράφου (Εικόνα 44), προκειμένου να μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις σε διάφορα σημεία της πλακέτας χρησιμοποιώντας και τα αντίστοιχα test points.



### GPIO CONNECTION HEADERS

Εικόνα43: GPIO Connection Headers 2x12

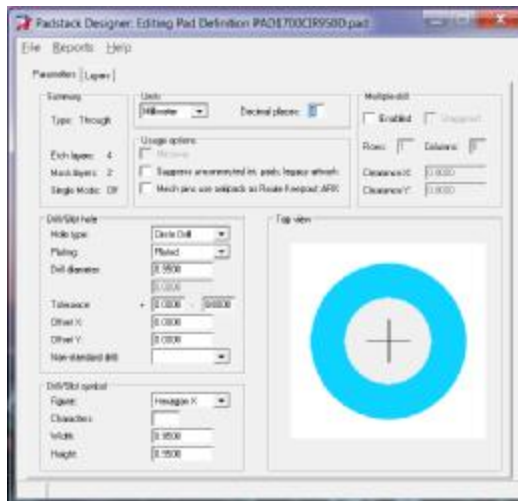


Εικόνα 44: Σημεία γείωσης - στήριξης των probe ενός παλμογράφου

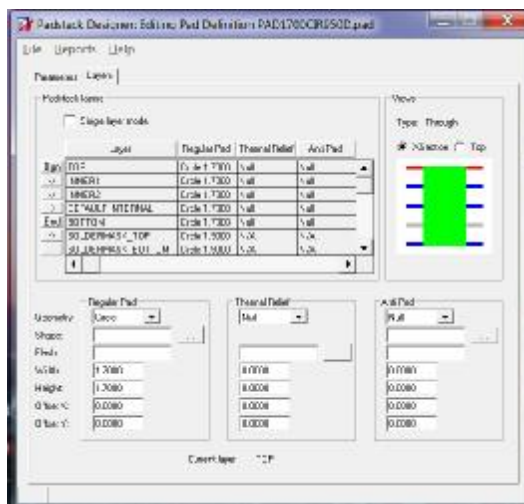
## 4.10 Σχεδίαση της πλακέτας (PCB)

Η σχεδίαση της πλακέτας μας έγινε χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα της Cadence. Ο σχεδιασμός ξεκίνησε σχεδιάζοντας τα υλικά-στοιχεία που θα τοποθετηθούν πάνω στην πλακέτα δηλαδή αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία, τρανζιστορ, headers, connectors, του μικροελεγκτή μας (DA14583) και άλλα ολοκληρωμένα.

Πρώτο βήμα ήταν να σχεδιάσουμε τα Pad του κάθε στοιχείου, δηλαδή τα σημεία εκείνα που θα γινόταν η ηλεκτρική σύνδεση ή τα σημεία στήριξης του κάθε στοιχείου – υλικού με την πλακέτα μας. Αυτό έγινε χρησιμοποιώντας το Pad designer. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το περιβάλλον εργασίας του συγκεκριμένου προγράμματος.

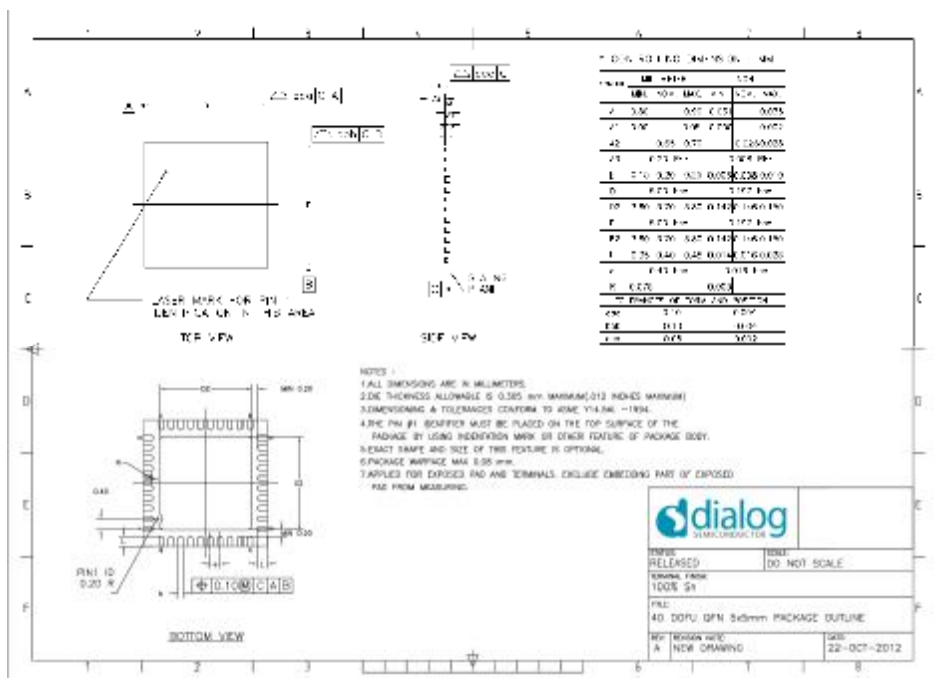


Εικόνα 45: Pad Designer – Parameters

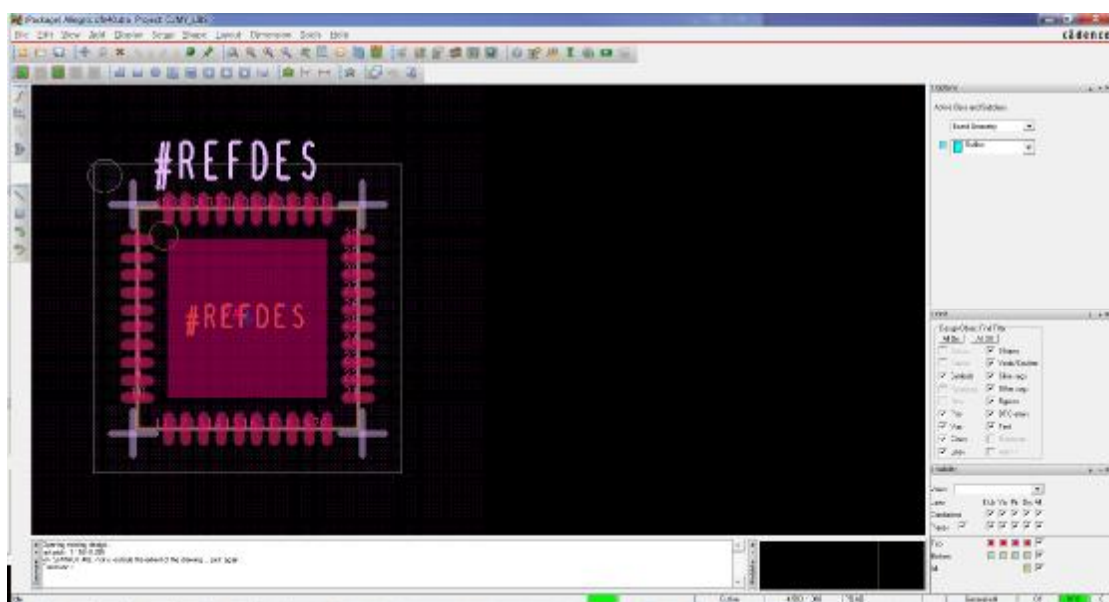


Εικόνα 46: PadDesigner - Layers

Στη συνέχεια σχεδιάσαμε τα στοιχεία. Αυτό έγινε χρησιμοποιώντας το PCB Editor. Με βάση τις πληροφορίες από το datasheet του κάθε στοιχείου ξεχωριστά, ορίσαμε τις διαστάσεις, το ύψος, τον αριθμό των pin, την απόσταση μεταξύ του κάθε pin από το άλλο και όποια άλλη πληροφορία μας χρειάστηκε για το σχεδιασμό. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το περιβάλλον εργασίας του συγκεκριμένου προγράμματος, η σχεδίαση του μικροελεγκτή μας, καθώς και η 3D απεικόνιση.

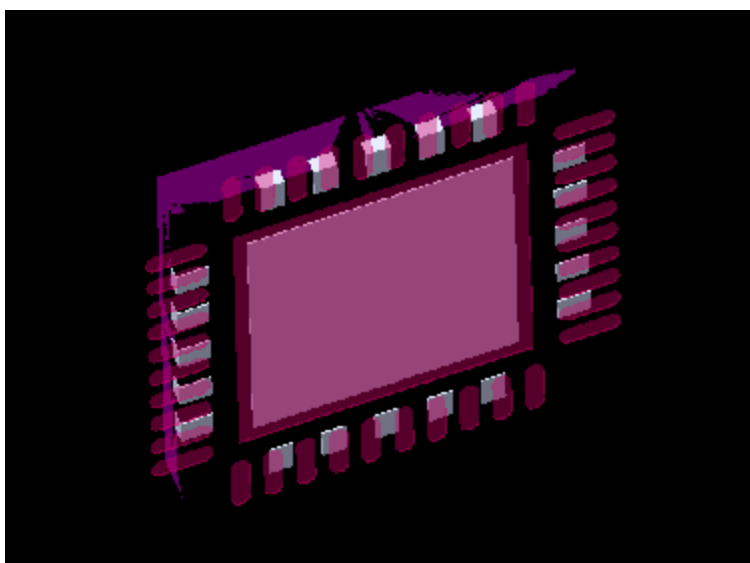


Εικόνα 47: DA14583 – Διαστάσεις



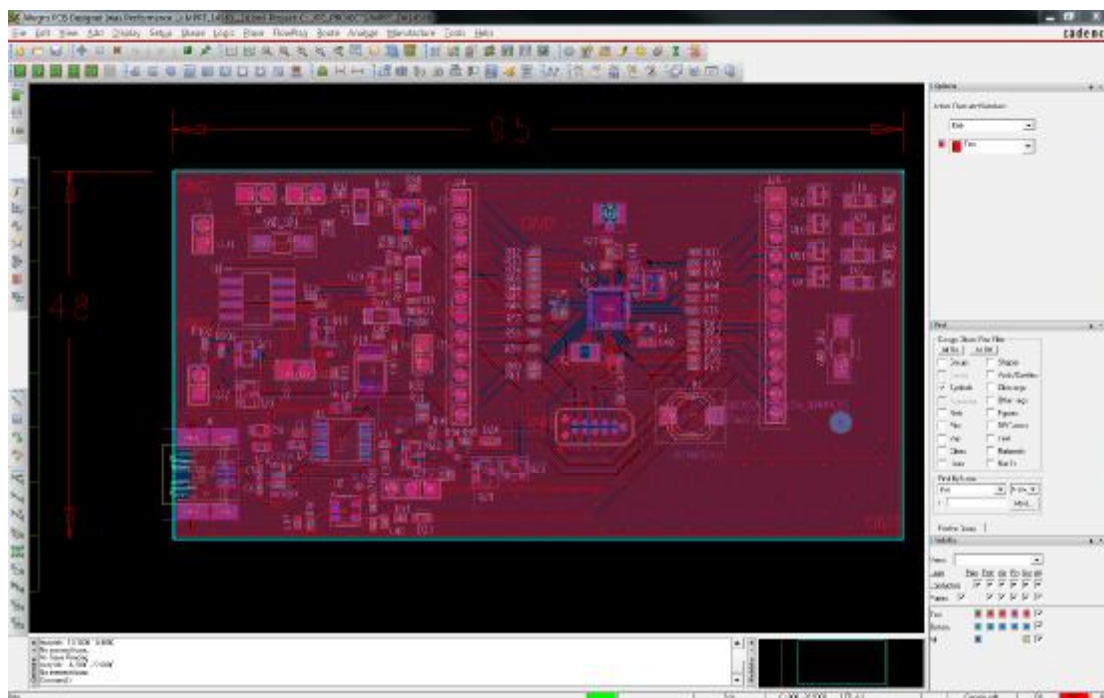
Εικόνα 48: PCB Editor – DA14583





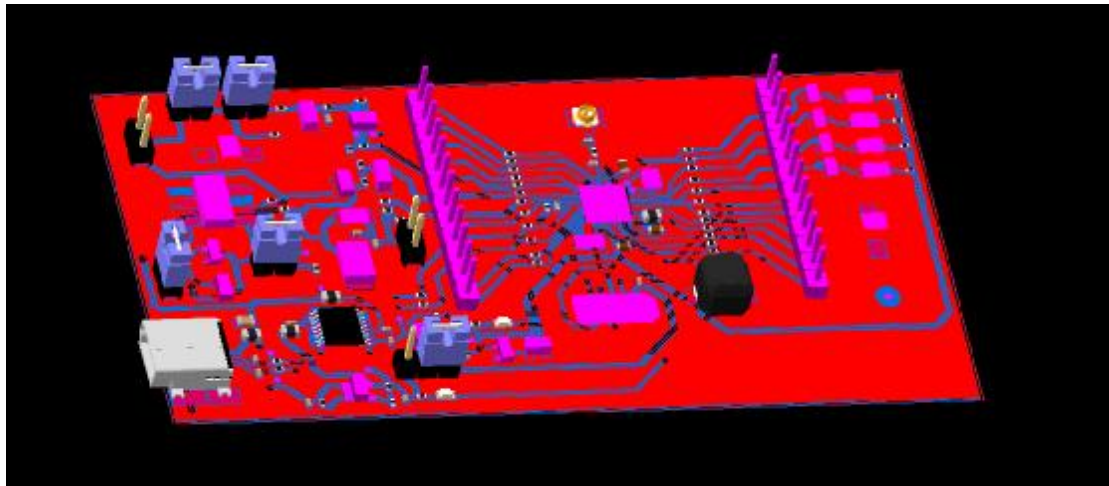
**Εικόνα 49:** PCBEditor – DA14583 – 3D απεικόνιση

Επόμενο βήμα ήταν η σχεδίαση ολόκληρης της πλακέτας που και αυτό έγινε χρησιμοποιώντας το PCB Editor της Cadence. Ορίσαμε τη θέση των στοιχείων, ορίσαμε το μέγεθος της πλακέτας μας και κάναμε τις ενώσεις των γραμμών με όπως είχαμε ορίσει στο σχηματικό. Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται το αποτέλεσμα της σχεδίασης αυτής.



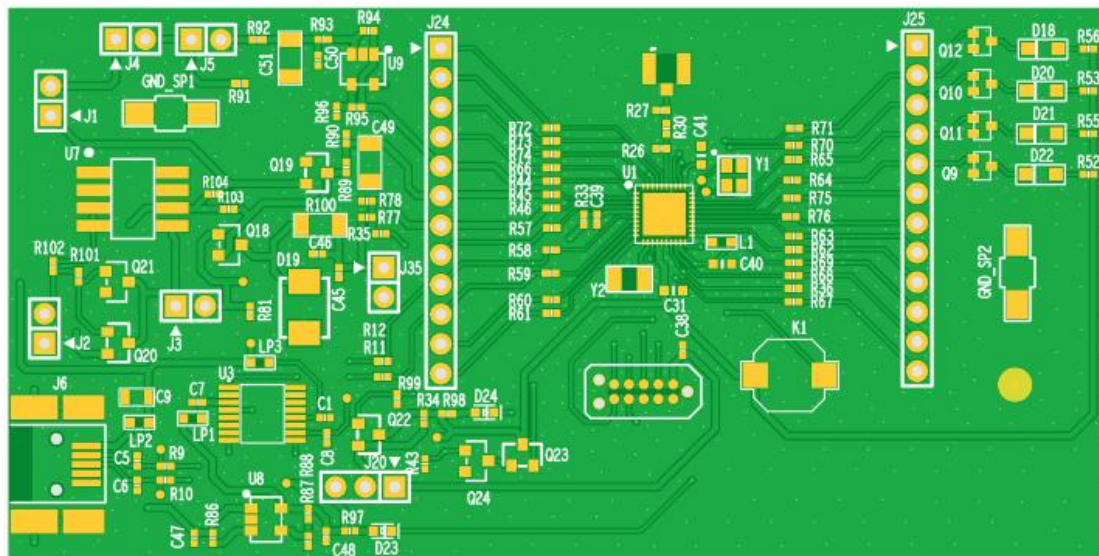
**Εικόνα 50:** PCBEditor – MPPT design





**Εικόνα 51:** PCBEditor – MPPT design – 3Dαπεικόνιση

Μετά από αυτό μας έμεινε η δημιουργία της πλακέτας. Με βάση την σχεδίαση που κάναμε, παραγγείλαμε την πλακέτα μας από την EuroCircuits, δίνοντας τις απαραίτητες πληροφορίες για αυτή. Οι πληροφορίες αυτές είναι γνωστές και ως Gerber files. Η παρακάτω εικόνα μας δείχνει το αποτέλεσμα της κατασκευής μας.



**Εικόνα 52:** Υλοποίηση της πλακέτας MPPT από την EuroCircuits

Τελευταίο κομμάτι όλης της κατασκευής είναι να τοποθετηθούν τα στοιχεία στη θέση τους, χρησιμοποιώντας ειδική κόλληση για τις ενώσεις των στοιχείων με τα pads. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το τελικό αποτέλεσμα της κατασκευής μας.



*Εικόνα 53: Τελική μορφή της κατασκευής*

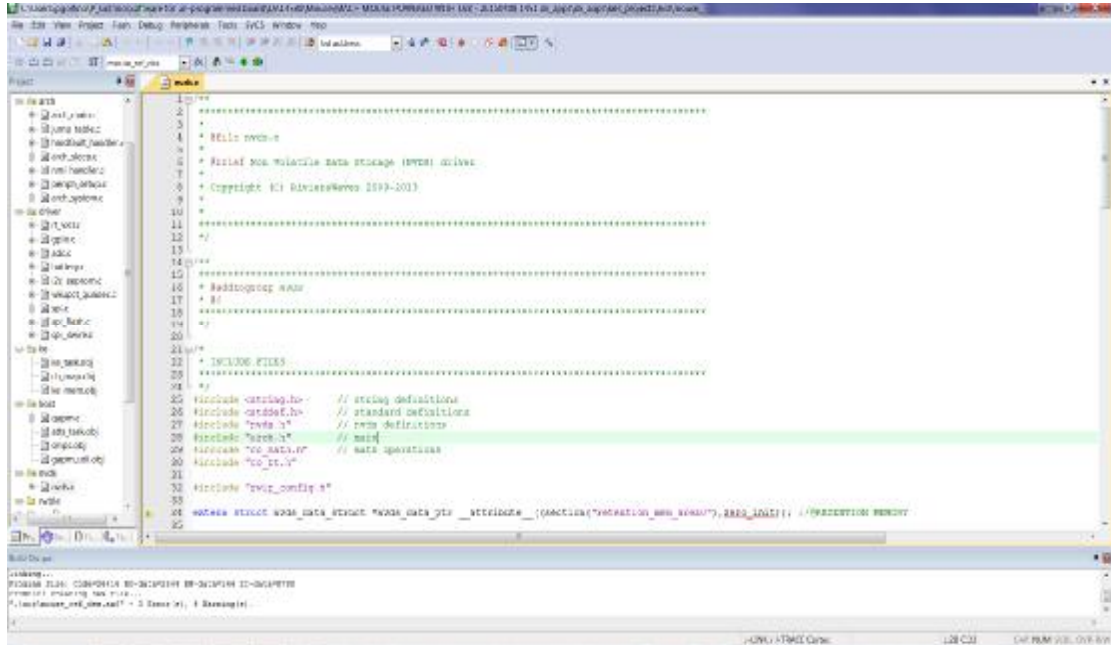
## **4.11 Ανάπτυξη του προγράμματος εφαρμογής**

Ο μικροελεγκτής μαζί με το υπόλοιπο κύκλωμα που υλοποιήθηκε πάνω στην πλακέτα, αποτελεί το κομμάτι του υλικού (Hardware). Το Hardware από μόνο του δεν είναι αρκετό για την λειτουργία της πλακέτας. Είναι απαραίτητο και το κομμάτι του προγραμματισμού (Software) ώστε ο μικροελεγκτής μας να ανταποκρίνεται στις λειτουργίες όπως εμείς θα τις έχουμε ορίσει. Οι περισσότεροι μικροελεγκτές μπορούν να προγραμματιστούν με γλώσσες όπως η assembly, Java, C, C++, Matlab, SQL, Pascal, Fortran και άλλες. Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήσαμε στην συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού C και ο επεξεργαστής του είναι ο ARM Cortex-M0.

Βασική προϋπόθεση για να φορτώσουμε ή να κατεβάσουμε ένα πρόγραμμα στον μικροελεγκτή είναι να παρεμβάλουμε ένα μεταγλωττιστή (Compiler), ώστε να μετατραπεί το πρόγραμμα σε γλώσσα μηχανής. Ο μεταγλωττιστής που χρησιμοποιήσαμε είναι ο KeilVision 5.

### 4.11.1 Keil uVision 5

Όπως προαναφέραμε ο μεταγλωττιστής Keil uVision 5, χρησιμοποιείται κατά βάση για το προγραμματισμό όλων των επεξεργαστών της οικογένειας ARM και διαθέτει λειτουργία μεταφοράς του προγράμματος στον μικροελεγκτή.



Εικόνα 54: Το περιβάλλον προγραμματισμού του Keil uVision 5

## 4.12 Υλοποίηση του αλγόριθμου ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος MPPT

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος για την τροφοδοσία του φορτίου, δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα όπου περιλαμβάνει όλα τα στάδια για την σωστή τροφοδοσία του φορτίου ή του μικροελεγκτή μας, σε κάθε φάση ανάλογα με την διαθέσιμη χωρητικότητά τους.

Για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος έχουμε φτιάξει δύο παραλλαγές του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης (Perturband Observation). Στην πρώτη παραλλαγή η αυξομείωση του σήματος PWM (High ή Low) εξαρτάται από την μεταβολή της αποδιδόμενης ισχύος συναρτήσει της προηγούμενης της τιμής. Στη δεύτερη παραλλαγή η αυξομείωση του σήματος PWM (High ή Low), εξαρτάται από την μεταβολή της αποδιδόμενης ισχύος συναρτήσει της μεταβολής του ρεύματος του πάνελ. Τα διαγράμματα των αλγορίθμων αυτών έχουν αναλυθεί στο κεφάλαιο 3 στην ενότητα που αναφέρεται για τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης (Perturband Observation).

Για την επιτήρηση της τροφοδοσίας του φορτίου ή του μικροελεγκτή μας, έχουν προγραμματιστεί 4 διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας, όπου η κάθε μία από αυτές πραγματοποιεί τις ενδεδειγμένες ενέργειες για το εύρος τιμών της τάσης του φορτίου ή του μικροελεγκτή μας στο οποίο αντιστοιχίζεται.

Καθ' όλη την λειτουργία του συστήματος, όλες οι μετρήσεις που γίνονται δηλαδή η μέτρηση του ρεύματος του Φ/Β πάνελ, η μέτρηση της τάσης του Φ/Β πάνελ, η μέτρηση τάσης του φορτίου, ο υπολογισμός της ισχύος, η κατάσταση του PWM, γίνονται σε πραγματικό χρόνο μέσω των θυρών του μικροελεγκτή. Σε κάθε ένα από αυτά έχουν τοποθετηθεί Test Point ώστε με τη βοήθεια του παλμογράφου να επαληθεύσουμε τις μετρήσεις αυτές.

## 5 . Βιβλιογραφία

Βικιπαίδεια:

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CE%AC>

[http://hermes.di.uoa.gr/exe\\_activities/algorithmoi/\\_2.html](http://hermes.di.uoa.gr/exe_activities/algorithmoi/_2.html)

Google:

<https://www.google.gr/>