

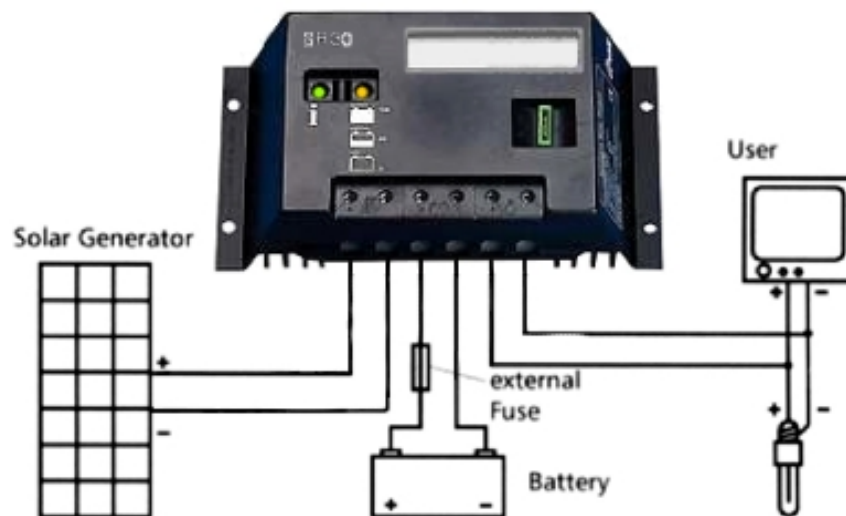
ΑΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ

Πρόγραμμα Σπουδών Επιλογής

Ενεργειακή και Περιβαλλοντική Τεχνολογία

Πτυχιακή Εργασία

Θέμα: «Σχεδίαση – μελέτη - κατασκευή ψηφιακού μικροελεγκτή για Φ/Β σύστημα»



Εισηγητής : Μαραγκάκης Δημήτρης

Σπουδαστής : Καραμέτσης Χρήστος

1. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	2
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
2.1 Οι πηγές ενέργειας σήμερα	6
2.2 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	8
2.3 Τα πλεονεκτήματα της φωτοβολταϊκής μετατροπής	12
2.4 Η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών εφαρμογών.....	16
3. Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	22
3.1 Η ηλιακή ενέργεια.....	22
3.2 Οι συμβατικές ηλιακές ακτινοβολίες	23
3.3 Η ακτινοβολία του "ενός ήλιου"	25
3.4 Οι διακυμάνσεις της προσπίπτουσας σε ένα τόπο ηλιακής ενέργειας	27
3.4.1 Ηλιακή γεωμετρία	27
3.4.2 Ο προσανατολισμός του συλλέκτη	30
3.4.3 Η βέλτιστη κλίση	31
4. Η ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ	36
4.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	36
4.2 Η Απορρόφηση της Ακτινοβολίας στα Φωτοβολταϊκά Στοιχεία.....	37
4.3 Η Δημιουργία του Φωτορεύματος.	40
4.4 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων	42
4.4.1 Πρώτη Προσέγγιση	42
4.4.2 Ο συντελεστής πλήρωσης.	45
4.4.3 Δεύτερη Προσέγγιση.....	47

4.5 Η αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων	49
4.5.1 Σταθερές Συνθήκες	49
4.5.2 Μεταβαλλόμενες Συνθήκες	51
4.6 Αξιολόγηση των Ημιαγωγών για Ηλιακές Φωτοβολταϊκές Εφαρμογές.	53
4.6.1.Φωτοβολταϊκά στοιχεία Πυριτίου	55
4.6.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άλλων υλικών, λεπτών επιστρώσεων	58
4.6.2.1 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες του Φ/Β στοιχείου. Αντιανακλαστική επίστρωση.	58
5. ΦΟΡΤΙΣΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ.....	61
5.1 Μαθηματική διερεύνηση των καταστάσεων λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με την παρουσία μπαταρίας.....	61
5.2 Ανάλυση του ηλεκτρικού κυκλώματος σε ένα απλό αυτόνομο Φ/Β σύστημα.....	64
5.3. Ρυθμιστής φόρτισης.....	67
5.3.1. Είδη ρυθμιστών	68
5.3.2. Μελέτη δύο ειδικών τύπων	68
5.3.2.1. Κύριο κύκλωμα ελέγχου ρυθμιστή φόρτισης	68
5.3.2.2 Ηλεκτρονικοί ρυθμιστές (solid state regulators).....	70
5.3.2.3. Ρυθμιστές με ηλεκτρονόμους.....	71
5.3.2.4. Κύκλωμα – σκλάβος ρυθμιστή φόρτισης	72
5.3.3 Σύγκριση των δύο τύπων ρυθμιστών (με ηλεκτρονόμο – ηλεκτρονικοί).....	73
3.4. Πρακτικά κυκλώματα.....	74
3.4.1. Γενικά	74
3.4.2. Κατάλληλες συνθήκες για φόρτιση μπαταριών μολύβδου- οξέως	75
6 ΠΑΛΜΙΚΟΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΕΣ	78
6.1 Εισαγωγή	78
6.2 Βασικές συνδεσμολογίες.....	78
6.3 Λειτουργία παλμικού σταθεροποιητή υποβιβασμού τάσης.....	79
6.4 Παλμικός διαμορφωτής διάρκειας παλμών.....	81

6.5 Κυκλώματα παλμικών τροφοδοτικών.....	83
6.6 Αναλύοντας τη λειτουργία των σταθεροποιητών που χρησιμοποιούμε	92
6.6.1 Απλός φορτιστής μπαταρίας	93
6.6.2 Φορτιστής μπαταρίας με έλεγχο του σημείου μέγιστης ισχύος.....	96
6.7 Υπολογισμός των επιμέρους εξαρτημάτων των σταθεροποιητών	99
6.7.1 Υπολογίζοντας το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει την free - wheeling diode.....	99
6.7.2 Υπολογίζοντας τα χαρακτηριστικά του switching διακοπτικού.	100
7. ΤΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ	102
7.1 Εισαγωγή.....	102
7.2 Το MOSFET ενίσχυσης	102
7.3 Η δομή του MOS ενίσχυσης.	103
7.4 Φυσική συμπεριφορά του MOSFET ενίσχυσης.....	104
7.5 Χαρακτηριστικές του MOSFET ενίσχυσης	106
7.6 Αναλυτικές εκφράσεις των χαρακτηριστικών V - I.	106
7.7 Ωμική Περιοχή.....	106
7.8 Περιοχή κορεσμού	107
7.9 Χαρακτηριστικές των MOSFET ενίσχυσης καναλιού p.....	109
7.10 Σύγκριση των τρανζίστορ PMOS και NMOS.....	110
7.11 Δίοδος φράγματος SCHOTTKY.....	110
7.12 ΟΔΗΓΩΝΤΑΣ MOSFET ΙΣΧΥΟΣ	112
7.12.1 Οδήγηση MOSFET από TTL.	112
7.12.2 Οδήγηση MOSFET από πύλες CMOS.....	115
7.12.3 Οδήγηση MOSFET από γραμμικά κυκλώματα	117
7.13 Υπολογισμός των στοιχείων οδήγησης του DC - DC converter.....	121
7.14 Κυκλώματα προστασίας των εξαρτημάτων switching τροφοδοτικών	123

7.14.1 Κύκλωμα προστασίας διόδων Schottky	123
7.14.2 Κυκλώματα προστασίας MOSFET Ισχύος.	124
7.15 Υπολογισμός κυκλωμάτων προστασίας εξαρτημάτων switching τροφοδοτικών	129
7.15.1 Κύκλωμα προστασίας διόδων Schottky	129
7.15.1 Κύκλωμα προστασίας MOSFET Ισχύος.....	129
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	134

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2.1 Οι πηγές ενέργειας σήμερα

Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεσή του, διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στο στερεό φλοιό της Γης, με συγκεκριμένη αποθέματα και επομένως διάρκεια ζωής και σ' αυτές που καθημερινά και αέναα, μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης. Στις πρώτες ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο), αναφερόμενα και ως συμβατικά καύσιμα. και η χαρακτηριστικά μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια.

Οι δεύτερες έχουν βασική τους προέλευση τον Ήλιο. Η ακτινοβολούμενη απ' τον Ήλιο ενέργεια, που φτάνει στη Γη, εκτός από την γενικότερη συμβολή της στην δημιουργία και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, μας δίδει ακατάπαυστα ενέργεια, σε διάφορες μορφές αξιοποίησης.

- Άμεσα θερμαίνει, εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας τις λίμνες και τα ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις).
- Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (Αιολική ενέργεια),
- Δημιουργεί τα κύματα (Ταλαντωτική ενέργεια κυμάτων).
- Απορροφούμενη από συνδυασμένα υλικά παράγει ηλεκτρισμό (Φωτοβολταϊκό φαινόμενο).
- Συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η καύση δε των φυτικών προϊόντων, παράγει ενέργεια (βιομάζα).

Οι κύριες πηγές ενέργειας, που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι:

- Το κάρβουνο. Απετέλεσε για πολλά χρόνια μέχρι σήμερα, την κύρια καύσιμη ύλη. Σ' αυτό βασίστηκε κατά κύριο λόγο, η βιομηχανική επανάσταση. Μεγάλο μέρος της σημερινής παγκόσμιας βιομηχανικής παραγωγής βασίζεται στην ενέργεια από την καύση του ορυκτού άνθρακα.

- Το πετρέλαιο. Ήταν γνωστό από την αρχαιότητα, στους Εβραίους και τους Αιγυπτίους. Στη Δύση, γινόταν περιορισμένη χρήση του σε φωτισμό και την ιατρική, μέχρι το τέλος του 15^{ου} αιώνα, οπότε άρχισε η βιομηχανική του εκμετάλλευση. Η παγκόσμια παραγωγή του εντατικοποιήθηκε από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, ενώ από τα μέσα του 20^{ου}, οι ρυθμοί εκμετάλλευσης πήραν εκρηκτικές διαστάσεις. Σήμερα, μετά από δύο πετρελαϊκές κρίσεις (1973 και 1979) βρισκόμαστε σε φάση μείωσης του ρυθμού εκμετάλλευσής του, με κύριες αιτίες την χρησιμοποίηση προηγμένων τεχνολογικά λύσεων προς την κατεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την εφαρμογή αυστηρότερης πολιτικής στους τομείς της ορθολογικής χρήσης και της εξοικονόμησης ενέργειας.

Τα συμβατικά καύσιμα καλύπτουν, το 85% της καταναλισκόμενης ενέργειας στις αναπτυσσόμενες χώρες και το 55% στις υπό ανάπτυξη. Στις τελευταίες η χρήση πετρελαίου συνεχίζει να αυξάνει, σε αντίθεση με τις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου η χρήση του περιορίζεται, με σταδιακή διεύρυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εκτιμάται ότι τα γνωστά και εκμεταλλεύσιμα υπάρχοντα αποθέματα των πηγών αυτών θα επαρκέσουν ακόμα για 200 χρόνια για το κάρβουνο, 60 χρόνια για το φυσικό αέριο και 50 χρόνια για το πετρέλαιο.

Η καύση του άνθρακα, του πετρελαίου και των παραγώγων του, δίδει ως άμεσα προϊόντα, το CO₂, τα οξείδια του αζώτου και θείου. Οι αυξημένες ποσότητες των αερίων αυτών, που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, αποτελούν μια μόνιμη απειλή για το μέλλον μας, προκαλώντας ισχυρές κλιματικές αλλαγές και επιβαρυντική απόκλιση από τις κανονικές συνθήκες ισορροπίας του φαινομένου του θερμοκηπίου.

- **Η πυρηνική ενέργεια.** Από το 1945 και μετά, προστέθηκε στις μεγάλης ισχύος πηγές ενέργειας, η πυρηνική, στην οποία αρχικά βασίστηκαν πολλές ελπίδες. Η Γαλλία είναι από τις χώρες που έδωσαν μεγάλη έμφαση στην ανάπτυξη της, χρησιμοποιώντας, κατά την περίοδο της δεκαετίας του 70, το μη πειστικό πια επιχείρημα, της παραγωγής καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα αντιλαμβανόμαστε με απόγνωση, την αδυναμία μας να λύσουμε το πρόβλημα της ανεξέλεγκτης διασποράς τους ή της δήθεν διασφαλισμένης αποθήκευσης των πυρηνικών αποβλήτων και αισθανόμαστε τρόμο για τα ολοένα και πιο πιθανά πυρηνικά ατυχήματα. Από τα πιο σημαντικά, εκείνο στον πυρηνικό σταθμό του Three Mile Island της Πενσυλβάνιας (ΗΠΑ), τον Απρίλιο του 1979 και εκείνο στο Τσέρνοβιλ της Ρωσίας, τον Απρίλιο του 1986, τρομοκράτησαν όλο τον κόσμο, ο οποίος συνειδητοποίησε με φρίκη την ανικανότητά του να αντιμετωπίσει ένα ύπουλο και αόρατο εχθρό, που μόνιμα τον απειλεί με αφανισμό.

Η πυρηνική ενέργεια προορίζεται, στο βαθμό που έχει αναπτυχθεί σήμερα, μόνο για παραγωγή ηλεκτρισμού βάσεως, δηλαδή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος χωρίς διακυμάνσεις ζήτησης. Καλύπτει το 4 - 5% της παγκόσμιας ενεργειακής απαίτησης. Η παραγόμενη ισχύς σε πυρηνικά εργοστάσια της Ευρώπης ανέρχεται σε ~110 GW, με πρωτοπόρο τη Γαλλία, με ~ 60 GW. Ο περιορισμός των ποσοτήτων του βασικού υλικού (Ουράνιο 235), τα πυρηνικά απόβλητα και η απειλητική πιθανότητα ολοσχερούς καταστροφής του κόσμου μας, είτε από την υποτιθέμενη υπό έλεγχο πυρηνική αντίδραση είτε από την ανεξέλεγκτη διασπορά των πυρηνικών όπλων, βάζουν φρένο στην χρήση της.

Όλες, οι υψηλής ισχύος συμβατικές πηγές ενέργειας, εκτός από την αδιαμφισβήτητη προσφορά τους στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και της επιστήμης και την μεγάλη συμβολή τους στη βελτίωση της διαβίωσης του ανθρώπου, συνδέονται δυστυχώς με πολύ σοβαρές και μόνιμες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Έτσι, ενισχύεται συνεχώς η διάθεση για, μερική έστω, σ' αυτή τη φάση, αντικατάστασή τους με άλλες πηγές ενέργειας, που να μη ρυπαίνουν και να ενσωματώνονται φιλικά στο περιβάλλον.

2.2 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), έχουν τη ρίζα τους κατά βάση στην ηλιακή δράση, εκτός από την ενέργεια των παλιρροϊκών κινήσεων που οφείλεται στη βαρυτική δράση, κυρίως, της Σελήνης πάνω στους υδάτινους όγκους που καλύπτουν την επιφάνεια της Γης:

- **Υδατόπτωση.** Είναι ένας από τους πιο φυσικούς τρόπους παραγωγής μεγάλης ισχύος ηλεκτρικής ενέργειας, με ανανεώσιμη συμπεριφορά. Έχει όμως περιορισμένη εφαρμογή και ταυτόχρονα δύο βασικά μειονεκτήματα,

- σε. πολλές περιπτώσεις, η δημιουργία των κατάλληλων εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης, να καταστρέφει εύφορες εκτάσεις, που σχετίζονται με την ύπαρξη του υδάτινου αυτού πλούτου.
- Η επάρκεια του υδατικού δυναμική είναι τοπικά «περιορισμένη»

Η σύγχρονη προσέγγιση στην εκμετάλλευση της ενέργειας από τις υδατοπτώσεις είναι η κατασκευή μικρών σε μέγεθος και ισχύ υδροηλεκτρικών σταθμών με την μικρότερη δυνατή «επέμβαση» στο περιβάλλον.

Καλύπτει, περίπου, το 7 % της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής.

- **Ενέργεια κυμάτων ή παλιρροϊκών κινήσεων.** Η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ή τις παλιρροϊκές κινήσεις, έχει αξιοποιηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, κυρίως στις βόρειες θάλασσες. Στη Βρετάνη της Γαλλίας λειτουργεί από το 1966 σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 240 MW.

- **Βιομάζα.** Η βιομάζα καλύπτει σήμερα το 14% της παγκόσμιας παραγωγής. Η καύση αποτελεί ουδέτερη λίγο - πολύ διαδικασία από την άποψη του φαινομένου του θερμοκηπίου, αρκεί να αντικαθίστανται αμέσως τα χρησιμοποιούμενα φυτά, κυρίως τα δένδρα. Συνήθως η εκμετάλλευση της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας γίνεται σε αναπτυσσόμενες περιοχές ή χώρες με αντικείμενο κυρίως την θέρμανση και το μαγείρεμα.

-**Αιολική ενέργεια.** Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, με τις οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα πτερυγίων, ανεμογεννήτριες, βρίσκεται σήμερα σε θεαματική εξέλιξη. Οι προηγμένες τεχνολογικά χώρες, με πρωτοπόρο την Δανία, έχουν αναπτύξει σε σημαντικό βαθμό την αξιοπιστία και την απόδοση των μηχανών αυτών. Στις ΗΠΑ η εγκαταστημένη ισχύς, ξεπερνά το 1,5 GW, ενώ στην Αγγλία και την Γερμανία οι προοπτικές στοχεύουν στην κάλυψη του 4% της εσωτερικής παραγωγής, μέχρι το 2005 μ.Χ.. Παρόμοια ισχύουν για την Ολλανδία.

Το αιολικό δυναμικό, δηλαδή η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, σε πολλά σημεία της χώρας μας βρίσκεται σε επιθυμητά επίπεδα. Στα νησιά του Αιγαίου το αιολικό δυναμικό παρουσιάζει μια μέση ετησίως τιμή, από 7 έως 11 m/sec, το οποίο υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια των νησιών αυτών. Γι' αυτό το λόγο, ο νησιωτικός χώρος αποτελεί ιδανικό πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας των αιολικών συστημάτων.

Στη χώρα μας, λειτουργούν αρκετά αιολικά πάρκα, με δυνατότητα ισχύος από μερικές

εκατοντάδες kW έως μερικά MW, κυρίως διασυνδεδεμένα με το δίκτυο της ΔΕΗ. Συνολικά, η ΔΕΗ έχει εγκαταστήσει στον Ελλαδικό χώρο, 24 MW, μεταξύ αυτών αρκετά στο νησιωτικό χώρο (Κύθνος 5x20 kW, Μύκονος 100 kW, Κάρπαθος 175 kW κ.α.). Άλλα 13 MW έχουν εγκατασταθεί από άλλους φορείς, κυρίως από την Τοπική Αυτοδιοίκηση και ιδιώτες. Στην Κρήτη, στα πλαίσια της συνολικής προβλεπόμενης εγκατεστημένης ισχύος των 110 MW, έχουν δοθεί άδειες εγκατάστασης για 90 MW. Ήδη λειτουργούν σε ορισμένες περιοχές του νησιού (Μονή Τοπλού Λασιθίου, Μούλια Ηρακλείου) μικρά αιολικά πάρκα.

Κατά το αρχικό διάστημα εφαρμογής της τεχνολογίας αυτής, η έλλειψη τακτικής συντήρησης των εγκαταστημένων συστημάτων καθώς και η μη άμεση αντιμετώπιση των παρουσιαζόμενων μηχανικών ζημιών, δημιούργησαν σχετικά προβλήματα αξιοπιστίας, τα οποία φαίνεται να εξαλείφονται σταδιακά, με την αξιοποίηση των μέχρι σήμερα εμπειριών από τις εταιρείες που παράγουν ή εισάγουν και εγκαθιστούν τα συστήματα αυτά.

Το μεγάλο πρόβλημα διείσδυσης της αιολικής ενέργειας σε μεγαλύτερο ποσοστό στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος είναι κατ' αρχή η μη σταθερή παροχή ενέργειας κατά την διάρκεια της ημέρας και το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια των μεγάλων απαιτήσεων σε ενέργεια λόγω π.χ. καύσωνα η παραγωγή είναι περιορισμένη. Μια λύση είναι η κατασκευή αντλιοσταμιευτήρων που θα αποθηκεύουν την ενέργεια από τα αιολικά πάρκα υπό μορφή δυναμική ενέργειας νερού και στη συνέχεια με υδροηλεκτρικούς σταθμούς να την μετατρέπουν σε ηλεκτρική αποκτώντας όμως και τα περιβαλλοντικά μειονεκτήματα των υδροηλεκτρικών σταθμών (μεγάλη επέμβαση στο περιβάλλον).

- **Η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια.** Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (*photovoltaic cell*) είναι, γενικά, ένα σύστημα δύο ουσιών σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται, παράγει στα δύο άκρα του, συνεχή ηλεκτρική τάση. Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία των οποίων η βιομηχανική παραγωγή έχει προωθηθεί, είναι αυτά που βασίζονται στην δημιουργία δύο ημιαγωγικών στρωμάτων σε επαφή. Τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο βασικό υλικό, το ένα στρώμα ημιαγωγός τύπου η και το άλλο τύπου ρ. Εξωτερικά τοποθετούνται κατάλληλα ηλεκτρόδια. Η κατασκευή έχει τη μορφή μιας σχεδόν τετράγωνης πλάκας, ώστε η εσωτερική επαφή των ημιαγωγών να καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του πλακιδίου.

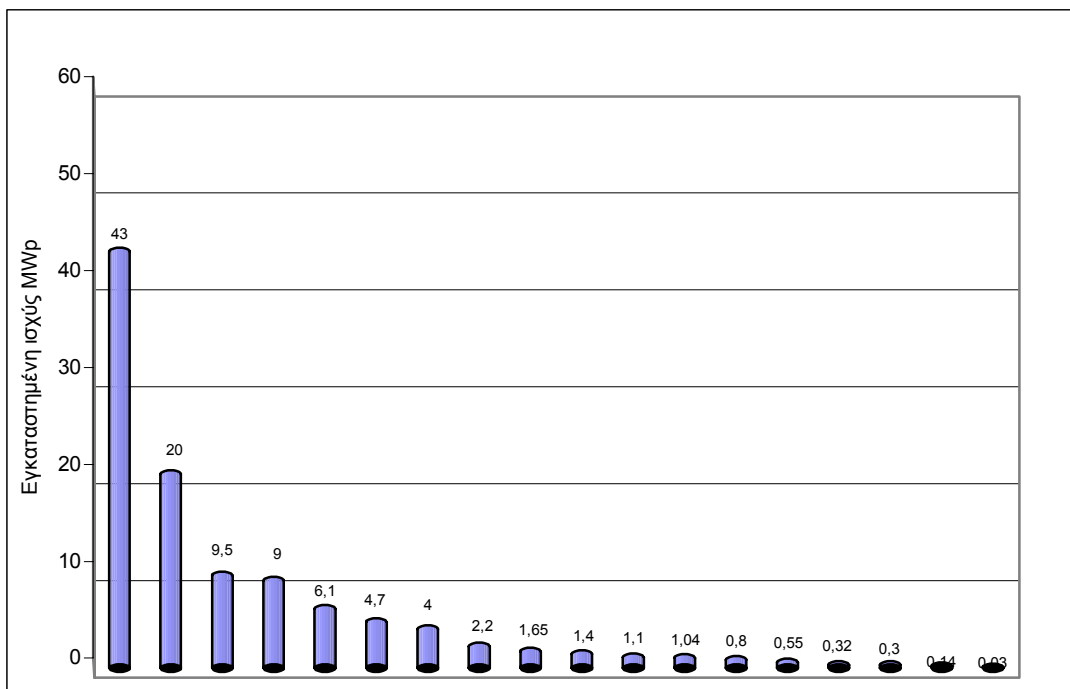
Όταν οι εξωτερικές επαφές του φωτιζόμενου Φ/Β στοιχείου, συνδεθούν σε αντίσταση κατανάλωσης, διέρχεται μέσα απ' αυτήν ηλεκτρικό ρεύμα (Φωτόρευμα). Το ηλεκτρικό ρεύμα που μπορεί να δώσει ένα Φ/Β στοιχείο είναι ευθέως ανάλογο του πλήθους των φωτονίων, ανά μονάδα χρόνου, που απορροφώνται, στην περιοχή της επαφής των ημιαγωγών. Κατ' επέκταση το ρεύμα αυτό είναι ανάλογο του πλήθους των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνειά του, ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή, της πυκνότητας ισχύος του φωτός και της επιφάνειας του ενεργού υλικού του στοιχείου. Η αναπτυσσόμενη σε ένα τυπικό Φ/Β στοιχείο, συνεχής ηλεκτρική τάση (DC), ανοικτού κυκλώματος, είναι περίπου 0,5 V, ενώ το αντίστοιχο ηλεκτρικό ρεύμα στην περιοχή των 10 ~ 40 mA/cm², για πυκνότητα ισχύος ηλιακού φωτός 1 kW/m².

Η τεχνολογία των Φ/Β στοιχείων, παρ' ότι το Φ/Β φαινόμενο είχε παρατηρηθεί από τον Becquerell, το 1839, αναπτύχθηκε έντονα το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα (Το 1954 ανακοινώθηκε η πρώτη κατασκευή ηλιακού στοιχείου Si, με σχηματισμό επαφής ρ-η, με διάχυση και με απόδοση 6%, από τους Fuller, Pearson και Chapin). Οι αρχικές εμπορικές κατασκευές,

πολύ υψηλού κόστους (1000 \$/W_p, το 1956) με σχετικά μικρή απόδοση της τάξης του 5-10% έγιναν από κρυσταλλικά υλικά, κυρίως από κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si).

Σήμερα οι αποδόσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων από κρυσταλλικό πυρίτιο, βρίσκονται στα επίπεδα του 22%, για Φ/Β πλαίσια διαστημικών κατασκευών και στο επίπεδο του 14-16% για βιομηχανική-οικιακή χρήση, το δε κόστος των τελευταίων κυμαίνεται μεταξύ 5 έως 6 \$/W_p, για εγκαταστάσεις μικρών συγκροτημάτων, της τάξεως του 1 kW_p. Εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος αιχμής, 50-100 kW_p, έχουν σχεδόν το μισό κόστος προμήθειας Φ/Β πλαισίων, ανά W_p, απ' ότι εγκαταστάσεις μικρής ισχύος.

Μέσα στην δεκαετία του 1980, οι προσπάθειες μείωσης του κόστους βιομηχανικής παρασκευής των Φ/Β στοιχείων, οδήγησαν στην χρησιμοποίηση οικονομικότερων μεθόδων παρασκευής του ενεργού υλικού. Οι μέθοδοι αυτές χαρακτηρίζονται από τη δημιουργία πολύ λεπτών στρωμάτων ή υμενίων υλικού (film), κυρίως πυριτίου, σε επιμελημένα καθαρισμένα επιφάνεια, που επιτρέπει την πρόσφυση του αποτιθέμενου υλικού (άμορφο πυρίτιο, α-Si). Βασίζονται στην μεταφορά και εναπόθεση του υλικού, με τη μορφή ατόμων είτε από στερεό στόχο, με κρούσεις επαρκώς ενεργοποιημένων ιόντων πλάσματος (Sputtering), είτε από λιωμένο υλικό σε συνθήκες υψηλού κενού (Εξαέρωση) είτε κατά τη διάρκεια εκκένωσης αερίου ενώσεως του αποτιθέμενου στοιχείου (Glow Discharge, GD), είτε με καταλυτική θερμική διάσπαση υδρογονούχων ενώσεων πυριτίου (Σιλάνιο).



Σχήμα 2.1: Εγκαταστημένη ισχύς αιχμής φωτοβολταϊκών (σε MWp) σε διάφορες χώρες στον κόσμο. (στοιχεία 1994).

Οι προσπάθειες μείωσης του κόστους κατασκευής ενός Φ/Β στοιχείου, οδήγησαν τελικά, σε νέες διαφορετικές μεθόδους εναπόθεσης. π.χ. με σχηματισμό ταινιών υλικού, από λειωμένη φάση, παρασκευάστηκαν Φ/Β στοιχεία, με πολύ καλή απόδοση. Η επιφάνειά τους εμφανίζει μονο-

κρυσταλλικότητα κατά περιοχές, το δε υλικό ονομάζεται πολύ-κρυσταλλικό. Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (P-Si), χρησιμοποιείται για την παρασκευή Φ/Β στοιχείων, που μπορούν να καλύψουν μεγάλη επιφάνεια, με απόδοση 12-13%, πολύ κοντά στην απόδοση των Φ/Β στοιχείων μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Οι παραπάνω τιμές απόδοσης είναι ενδεικτικές, εξαρτώμενες από το βασικό υλικό και τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες της διάταξης.

Πολλά Φ/Β στοιχεία (33 με 36) συνδέονται σε σειρά, ώστε, όταν η διάταξη αυτή φωτίζεται, να προκύπτει συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος (*Open circuit*) 17~22V. Το πλήθος των Φ/Β στοιχείων επιλέγεται έτσι ώστε να ταιριάζει με την απαιτούμενη τάση φόρτισης ενός κοινού ηλεκτρικού συσσωρευτή μολύβδου-θειικού οξέως (pb/H₂SO₄), ονομαστικής τάσης 12 V.

Η ολοκληρωμένη αυτή φωτοβολταϊκή διάταξη ονομάζεται *φωτοβολταϊκό πλαίσιο*, αποτελεί δε τη βασική μονάδα (*module*) σύνθεσης μεγαλύτερων συστημάτων. Χρησιμοποιείται επίσης η ορολογία, *φωτοβολταϊκή γεννήτρια* (*Photovoltaic generator*), όταν αναφερόμαστε στο κύριο τμήμα, του Φ/Β σταθμού, το οποίο παράγει την Φ/Β ηλεκτρική ενέργεια. Η εμπρός επιφάνεια του πλαισίου προστατεύεται από γυάλινη πλάκα, ενώ η πίσω μεριά καλύπτεται από μονωτική ουσία. Κάθε Φ/Β πλαίσιο ή γενικότερα Φ/Β γεννήτρια χαρακτηρίζεται από την μέγιστη ισχύ. Είναι η ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να αποδώσει, κάτω από ορισμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας υλικού. Στο εμπόριο διατίθενται Φ/Β πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου σε ευρεία περιοχή τιμών ισχύος αιχμής. Μικρές κατασκευές Φ/Β στοιχείων, μερικών W_p, για εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλή ηλεκτρική ισχύ, όπως οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές «τσέπης». Σε εφαρμογές αυτόνομων ή συνδεδεμένων στο δίκτυο της ΔΕΗ, Φ/Β συστημάτων, χρησιμοποιούνται συνήθως Φ/Β πλαίσια ισχύος αιχμής από 30 έως 140 W_p.

Μεγάλοι Φ/Β σταθμοί μερικών MW, λειτουργούν ήδη στην Αμερική και στη Ευρώπη. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β συστημάτων ανερχόταν το 1994 σε ~ 80 MW_p. Απ' αυτά περίπου 32 MW_p βρίσκονται στην Ευρώπη και τα υπόλοιπα σε ΗΠΑ (~ 43 MW_p), Ιαπωνία 4 MW_p). Η εργοστασιακή παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων στις περιοχές αυτές, την ίδια χρονική περίοδο, ήταν: Ευρώπη 21,6 MW_p, ΗΠΑ 25,6 MW_p, Ιαπωνία 19,5 MW_p, η δε αντίστοιχη σε παγκόσμια αγορά ξεπερνούσε τα 72 MW_p.

Στην Ελλάδα, η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων, μόλις ξεπερνά το 0,65 MW_p, Βρίσκονται διασπαρμένα σε διάφορες περιοχές, κυρίως νησιωτικές. Τα εγκατεστημένα συστήματα αποτελούνται από μικρούς Φ/Β σταθμούς σε συνεργασία με αιολικά συστήματα και diesel, όπως π. χ. στην Κύθνος (100 kW_p), στην νήσο Γαύδο (30 kW_p) καθώς και Φ/Β αντλητικά συστήματα σε διάφορα νησιά. Μικρής ισχύος Φ/Β συστήματα τροφοδοτούν αυτόνομης λειτουργίας φάρους. Επίσης έχουν ήδη τεθεί σε δοκιμαστική λειτουργία Φ/Β ψυγεία, πρόψυξης γάλακτος, σε κτηνοτροφικές περιοχές (Πρασές Χανίων Κρήτης, 8 kW_p). Μέχρι το 1991, βρισκόταν σε λειτουργία στην Αγία Ρουμέλη, ο πρώτος στην Ευρώπη, πιλοτικός Φ/Β σταθμός με ισχύ 50 kW_p, υπό την ευθύνη της ΔΕΗ. Το 1993 αποσύρθηκαν οι εγκαταστάσεις του. Σύντομα αναμένεται να λειτουργήσει και το πρώτο ιδιωτικό Φ/Π για εμπορικούς σκοπούς εγκατεστημένης ισχύος 176 KW_p.

2.3 Τα πλεονεκτήματα της φωτοβολταϊκής μετατροπής

Η φωτοβολταϊκή μέθοδος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, όπως δείχνεται συνοπτικά στον πίνακα 2.1 έχει μόνον πλεονεκτήματα, αν εξαιρεθούν το κόστος, που είναι ακόμα αρκετά υψηλό για τις περισσότερες εφαρμογές, και οι ανάγκες για την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω των διακυμάνσεων της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του 24ώρου, καθώς και για τη χρησιμοποίηση σχετικά μεγάλων επιφανειών για τη συλλογή του ηλιακού φωτός και την τροφοδότηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Ανάλογα με τον βαθμό πολυπλοκότητας στην κατασκευή και τη λειτουργία, μπορούμε να κατατάξουμε τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες σε 3 κυρίως κατηγορίες:

1. Τις απλές διατάξεις, όπου τα ηλιακά στοιχεία είναι τοποθετημένα σε σταθερά πλαίσια και δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία με τη φυσική της πυκνότητα και διακύμανση στη διάρκεια της ημέρας.
2. Τις διατάξεις με κινητά πλαίσια που περιστρέφονται αυτόματα και παρακολουθούν συνεχώς την πορεία του ήλιου στον ουρανό, ώστε τα ηλιακά στοιχεία να δέχονται κάθετα την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει ένα ηλιακό στοιχείο μέχρι 30 % περίπου, αφού δέχεται πυκνότερη ακτινοβολία, ανά μονάδα εμβαδού της επιφανείας του.
3. Τις διατάξεις που με τη χρησιμοποίηση φακών ή κατόπτρων συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία και την στέλνουν πολύ συμπυκνωμένη πάνω στα ηλιακά στοιχεία. Για την αποφυγή θέρμανσης, στις συγκεντρωτικές φωτοβολταϊκές διατάξεις απαιτείται συνήθως η τεχνική ψύξη των ηλιακών στοιχείων με κυκλοφορία ψυχρού αέρα ή ψυκτικών υγρών.

Πλεονεκτήματα

1. Ανανέωση και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή.
2. Ικανοποιητική απόδοση μετατροπής.
3. Σχετικά εύκολη μέθοδος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων από πρώτες ύλες που αφθονούν.
4. Πρακτικά απεριόριστη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων. (Τουλάχιστον 20- 30 χρόνια)
5. Τα ηλιακά στοιχεία δεν έχουν κινούμενα μέρη, επομένως είναι σχεδόν απαλλαγμένα από την ανάγκη επίβλεψης και συντήρησης (αρκεί συνήθως η επιθεώρηση τους μια φορά κάθε εξάμηνο. Αλλά και σε περίπτωση βλάβης, η αποκατάσταση της λειτουργίας γίνεται εύκολα λόγω της σπονδυλωτής μορφής της φωτοβολταϊκής διάταξης.)
6. Η φωτοβολταϊκή μετατροπή δεν προκαλεί ρύπανση στο περιβάλλον ούτε θόρυβο ή άλλη ενόχληση και δεν δημιουργεί άχρηστα παραπροϊόντα.
7. Δίνει τη δυνατότητα ανεξαρτησίας από κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής.
8. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν με όσο μικρή ισχύ ζητηθεί.
9. Η ανάλογη της παραγόμενης ισχύος προς το βάρος της διάταξης είναι αρκετά μεγάλη, που είναι σημαντική ιδιότητα για τις διαστημικές εφαρμογές.

Μειονεκτήματα

1. Υψηλό κόστος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων.
2. Για τις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται η δαπανηρή αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της αστάθειας και της μεγάλης διακύμανσης της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.
3. Απαιτείται η χρησιμοποίηση μεγάλων σχετικά επιφανειών, λόγω της μικρής πυκνότητας της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.

Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φωτοβολταϊκής μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Πάντως, το διεθνές ενδιαφέρον για την φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν διατηρείται στην ίδια ένταση με την πάροδο του χρόνου, αλλά, όπως είναι φυσικό αυξάνει ή ελαττώνεται ανάλογα με τις παράλληλες εξελίξεις στο κόστος του πετρελαίου και των άλλων καυσίμων και στις θετικές ή αρνητικές προοπτικές ανάπτυξης των άλλων ανταγωνιστικών μεθόδων. Το ίδιο άλλωστε ισχύει και για τις άλλες (δηλαδή τις θερμικές) μεθόδους εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και για τη γενικότερη αξιοποίηση των εναλλακτικών ενεργειακών πηγών. Πάντως η γενική εκτίμηση είναι ότι σε 10 ή 20 χρόνια τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα καλύπτουν σε πολλές χώρες ένα σημαντικό ποσοστό (π.χ. το 10 - 20%) των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ενώ παράλληλα θα κυριαρχούν σε εξειδικευμένους τομείς, όπως οι διαστημικές εφαρμογές, η ηλεκτροδότηση νησιών, και γεωγραφικά απομονωμένων εγκαταστάσεων, η ηλεκτροκίνηση κ.λπ.

Χώρα	Στόχος	Κίνητρα
ΕΥΡΩΠΗ		
Αυστρία	4% του πωλούμενου ηλεκτρισμού θα προέρχεται από ΑΠΕ ως το 2007	Ενίσχυση κιλοβατώρας (0,47-0,60 €/kWh) με δεκατριετή εγγύηση. Έκπτωση φόρου σε επενδυτές για εγκατάσταση Φ/Β.
Βρετανία	70.000 Ηλιακές Στέγες	Επιδότηση αγοράς και εγκατάστασης (40-65% της αξίας του συστήματος).
Γαλλία		Ενίσχυση κιλοβατώρας (0,15-0,3 €/kWh) με εικοσαετή εγγύηση. Επιδότηση αγοράς και εγκατάστασης (4.600 €/KW).
Γερμανία	1.000 MW (έχει προταθεί νέος στόχος για 1 εκατομμύριο φωτοβολταϊκά συστήματα)	Ενίσχυση κιλοβατώρας (0,434-0.64 €/kWh) με εικοσαετή εγγύηση.
Ελβετία		Διάφορα προγράμματα ανά Καντόνι (π.χ. ενίσχυση κιλοβατώρας 0,6 €/kWh, Χρηματιστήριο Ηλιακής Ενέργειας, κ.λπ).
Ελλάδα	15 MW ως το 2010 (Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την Κλιματική Αλλαγή)	Επιδότηση αγοράς και εγκατάστασης (40-50% της αξίας του συστήματος), αλλά μόνο για εμπορικές εφαρμογές. Δεν υπάρχει επιδότηση για κατοικίες. Αγορά ηλιακής κιλοβατώρας με 0,06-0,08 €/kWh.
Ισπανία	135 MW ως το 2010	Ενίσχυση κιλοβατώρας (0,21-0,4 €/kWh). Επιδότηση αγοράς και εγκατάστασης (2.070-2.250 €/KW).
Ιταλία	10.000 Ηλιακές Στέγες (50 MW)	Επιδότηση αγοράς και εγκατάστασης (70% της αξίας του συστήματος).
Κύπρος		Ενίσχυση κιλοβατώρας (0,26 €/kWh). Επιδότηση αγοράς και εγκατάστασης (40% της αξίας του συστήματος).
Λουξεμβούργο		Ενίσχυση κιλοβατώρας (0,55 €/kWh) με εικοσαετή εγγύηση. Επιδότηση αγοράς και εγκατάστασης (50% της αξίας του συστήματος).
Ολλανδία	300 MW ως το 2010 1.400 MW ως το 2020	Επιδότηση αγοράς και εγκατάστασης (30-70% της αξίας του συστήματος, μέσος όρος επιδότησης 55%). Αγορά ηλιακής κιλοβατώρας με 0,068 €/kWh.

Πίνακας 2.2: Πολιτικές ενίσχυσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε χώρες της Ε.Ε

ΑΛΛΕΣ ΧΩΡΕΣ		
Χώρα	Στόχος	Κίνητρα
Αυστραλία		Επιδότηση αγοράς και εγκατάστασης (50% της αξίας του συστήματος). Το πρόγραμμα χρηματοδοτείται από τη φορολόγηση του ρυπογόνου ντίζελ.
ΗΠΑ	1 εκατομμύριο Ηλιακές Στέγες	Έκπτωση φόρου (10%) για εμπορικές εφαρμογές. Επιδότηση 4.500 \$/KW ή 50% της αξίας του συστήματος (Καλιφόρνια). Net-metering (συμψηφισμός πωλούμενης-αγοραζόμενης κιλοβατώρας).
Ιαπωνία	4.820 MW ως το 2010	Επιδότηση αγοράς και εγκατάστασης (ξεκίνησε με 50% της αξίας του συστήματος και μειωνόταν σταδιακά καθώς έπεφτε το κόστος των συστημάτων). Ειδικά για τα εμπορικά κτίρια, το ύψος της επιδότησης ήταν ίσο με τα 2/3 της αξίας του συστήματος. Φορολογικά κίνητρα (π.χ. μειωμένος φόρος ιδιοκτησίας, φοροαπαλλαγές). Δημιουργία Ταμείου Πράσινης Ενέργειας για χρηματοδότηση σχετικών προγραμμάτων.
Ταϊλάνδη		Επιδότηση αγοράς και εγκατάστασης (50% της αξίας του συστήματος).

Πίνακας 2.3: Πολιτικές ενίσχυσης των φωτοβολταϊκών σε διάφορες χώρες

2.4 Η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών εφαρμογών.

Η φωτοβολταϊκή μετατροπή είναι μια πολύ πρόσφατη τεχνολογική ανακάλυψη που βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της ανάπτυξης της. Όπως όμως δείχνεται στον πίνακα 2.4 το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι γνωστό από τον περασμένο αιώνα. Ήδη το 1891, που είχε αρχίσει να γίνεται αισθητή η μόλυνση του περιβάλλοντος στις βιομηχανικές πόλεις, ο R. Appleyard έγραψε ότι είχε την ελπίδα ότι κάποτε

" Ο ήλιος δεν θα σκορπάει άσκοπα την ενέργεια του στο διάστημα, αλλά με τη χρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών στοιχείων η ενέργεια αυτή θα συγκεντρώνεται σε ηλεκτρικές αποθήκες, και έτσι θα καταργηθούν οι ατμομηχανές και θα απαλλαγεί η ατμόσφαιρα από τον καπνό ".

Εκείνη την εποχή το κυριότερο καύσιμο ήταν το κάρβουνο, αφού δεν είχε αρχίσει ακόμη η μαζική χρήση του πετρελαίου. Ήταν λοιπόν νωρίς για να προβλέψει ο Appleyard την υποκατάσταση και αυτής της ρυπογόνου ενεργειακής πηγής από την ηλιακή ακτινοβολία.

Η μεγάλη όμως ώθηση προς τις πρακτικές εφαρμογές της φωτοβολταϊκής μετατροπής δόθηκε με την πραγματοποίηση ορισμένων κρίσιμων τεχνολογικών προόδων, όπως η παρασκευή καθαρού πυριτίου με τη μέθοδο της τηγμένης ζώνης (1952) και ο σχηματισμός διόδων πυριτίου με διάχυση προσμίξεων (1954), που οδήγησαν τελικά στην κατασκευή ηλιακών στοιχείων σημαντικής απόδοσης (6%) το 1954 και ακόμη μεγαλύτερης (14%) το 1972. Πάντως, η αξιοπιστία τους είχε ήδη αποδειχτεί πολύ νωρίτερα, όταν τα πρώτα ηλιακά στοιχεία πυριτίου που τοποθετήθηκαν στον τεχνητό ερευνητικό δορυφόρο Vanguard I τον Μάρτη του 1958, όχι μόνον πέτυχαν να τροφοδοτήσουν με ηλεκτρική ενέργεια τον πομπό του στην προβλεπόμενη ολιγόμηνη διάρκεια του προγράμματος, αλλά εξακολούθησαν να λειτουργούν χωρίς προβλήματα επί έξι συνολικά χρόνια και μάλιστα στο πολύ εχθρικό διαστημικό περιβάλλον, με την έντονη κοσμική ακτινοβολία. Έτσι, από το 1969 και ύστερα όλοι οι τεχνητοί δορυφόροι και τα άλλα διαστημικά οχήματα, είναι εξοπλισμένα με ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Αφού διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρχε πρόβλημα ως προς την λειτουργικότητα και τη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων, ως κριτήρια για την αξιολόγηση τους παίρνονται αποκλειστικά η απόδοση και το κόστος τους.

Ως συντελεστής της απόδοσης μετατροπής (η) ή απλούστερα ως απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του.

- 1839 Παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε μεταλλικά ηλεκτρόδια (Pt, Ag) βυθισμένα σε ηλεκτρολύτες (Becquerel).
- 1937 Κατασκευή ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου από PbS (Fischer και Godden).
- 1939 Κατασκευή ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου από Se, με απόδοση 1% (Ohl).
- 1941 Κατασκευή ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου από Si (Ohl).
- 1952 Ανακάλυψη της μεθόδου της τηγμένης ζώνης για την Παρασκευή στερεών πολύ μεγάλης καθαρότητας (Pfann).
- 1953 Ανακάλυψη της μεθόδου σχηματισμού ενώσεων p – n με διάχυση προσμίξεων (Fuller).
- 1954 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Si με σχηματισμό ένωσης p – n με διάχυση προσμίξεων και με απόδοση 6% (Fyller, Pearson και Chapin).
- 1956 Εμπορική παραγωγή ηλιακών στοιχείων (Εταιρία Hoffman).
- 1958 Εκτόξευση του αμερικάνικου τεχνητού δορυφόρου Vanguard I, εξοπλισμένου με 6 μικρά στοιχεία Si, ισχύος 5 mW, ως βοηθητική ενεργειακή πηγή.
- 1958 Εκτόξευση σοβιετικού τεχνητού δορυφόρου με αποκλειστική τροφοδότηση από ηλιακά στοιχεία.
- 1959 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από CdS, με απόδοση 5% (Hammond).
- 1972 Κατασκευή του «ιώδους» ηλιακού στοιχείου Si, με απόδοση 14% (Lindmayer και Allison).
- 1976 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από άμορφο Si, με απόδοση 0,01% (Carison και Wronski).
- 1977 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από GaAs, με απόδοση 16% (Kameth).
- 1981 Πτήση πάνω από τη Μάγχη του αεροπλάνου Solar Challenger, εξοπλισμένου με 16.128 ηλιακά στοιχεία Si, ισχύος 2,7 kW.
- 1983 Έναρξη εμπορικής λειτουργίας του φωτοβολταϊκού σταθμού της Βικτροβιλ, ισχύος 1MW.
- 1984 Έναρξη βιομηχανικής παραγωγής ηλιακών στοιχείων από άμορφο πυρίτιο με απόδοση 5%.

Πίνακας 2.4: Οι κυριότεροι σταθμοί στην εξέλιξη της φωτοβολταϊκής μετατροπής

Η απόδοση των ηλιακών στοιχείων δεν είναι σταθερή αλλά όπως θα δούμε παρακάτω μεταβάλλεται σημαντικά με το φόρτο του κυκλώματος, καθώς και από άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η μορφή της ακτινοβολίας.

Για την εκτίμηση του κόστους των ηλιακών στοιχείων χρησιμοποιείται συμβατικά ο όρος Watt αιχμής (W_p peak watt) που είναι η απαιτούμενη επιφάνεια του στοιχείου για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 1 W όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 kW/m^2 π.χ κόστος ηλιακού στοιχείου 6 €/Wp, σημαίνει ότι το κόστος κατασκευής ενός ή περισσότερων ηλιακών στοιχείων με τόση συνολική επιφάνεια ώστε να παράγουν ηλεκτρική ισχύ 1 W, όταν εκτεθούν σε κάθετη ακτινοβολία πυκνότητας 1 kW ανά m^2 , είναι 6 €.

Με τη συνεχή πρόοδο που παρατηρείται στην περιοχή της φωτοβολταϊκής μετατροπής, η απόδοση των ηλιακών στοιχείων παρουσιάζει μια σταθερή αύξηση και πλησιάζει προς τη μέγιστη θεωρητική της τιμή, η οποία ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο ημιαγωγό και τη μορφή της ακτινοβολίας δεν μπορεί να αξιοποιηθεί, όπως θα δούμε παρακάτω, κυρίως λόγω της μεγάλης ενεργειακής κατανομής των φωτονίων του ηλιακού φάσματος.

Όμοια, το κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στις πρώτες διαστημικές εφαρμογές ήταν πολύ υψηλό, περίπου \$ 1000/Wp το 1956. Στη συνέχεια, όμως με την αύξηση της παραγωγής και τη βελτίωση της τεχνολογίας, πραγματοποιήθηκε ραγδαία μείωση του κόστους, δείχνεται στον πίνακα 2.5.

Έτος	Κόστος ανά Wp
1956	\$1000
1960	400
1970	100
1975	40
1980	15
1985	10

Πίνακας 2.5: Η εξέλιξη του κόστους των ηλιακών στοιχείων πυριτίου.

Έτσι έγινε δυνατό, εκτός από τις διαστημικές να αρχίσουν σταδιακά και επίγειες εφαρμογές της φωτοβολταϊκής μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας όπως η ηλεκτρική τροφοδότηση μικροσυσκευών (ρολόγια, υπολογιστές τσέπης, ραδιόφωνα) και απομονωμένων εγκαταστάσεων (τηλεπικοινωνιακοί αναμεταδότες, σηματοδότες, φάροι, αγροτικές αντλίες νερού, συστήματα καθοδικής προστασίας χαλύβδινων σωληνώσεων, εξαεριστήρες αποθηκευτικών χώρων, φόρτιση συσσωρευτών μικρών σκαφών και η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξοχικά σπίτια ή ακόμα και σε ολόκληρους οικισμούς, κυρίως σε νησιά, έρημους και γενικά σε περιοχές που δεν εξυπηρετούνται από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ο μεγαλύτερος φωτοβολταϊκός σταθμός 2 MW, βρίσκεται στην Καλιφόρνια - περιοχή που έχει μεγάλη παράδοση στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας -, τροφοδοτώντας το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Άλλοι μικρότεροι φωτοβολταϊκοί σταθμοί υπάρχουν επίσης σε δεκάδες αναπτυσσόμενες ή αναπτυσσόμενες χώρες.

Στην Ελλάδα, που λόγω της ευνοϊκής γεωγραφικής θέσης και του κλίματος, ιδίως στις νοτιότερες περιοχές της, δέχεται αρκετά σημαντική ηλιακή ακτινοβολία σχήμα 2.2 (περίπου 4600 MJ/m^2 ετησίως κατά μέσο όρο σε σύγκριση με 8000 MJ/m^2 στις τροπικές και 2200 MJ/m^2 κοντά στις αρκτικές περιοχές).



Σχήμα 2.2: Το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας.

Η κατασκευή των περισσότερων από τους αρκετά μεγάλους φωτοβολταϊκούς σταθμούς έχει γίνει με οικονομική ενίσχυση από τις κυβερνήσεις των αντίστοιχων χωρών, από διεθνείς οργανισμούς, ερευνητικά ιδρύματα ή βιομηχανίες, για κοινωνικούς λόγους ή για την απόκτηση εμπειρίας. Εξάλλου είναι φανερό ότι για να συναγωνιστεί η φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, με οικονομικά κριτήρια, τις συμβατικές πηγές ηλεκτρισμού σε μεγάλη κλίμακα (κίνηση αυτοκινήτων, τροφοδότηση βιομηχανιών και αστικών περιοχών κ.λπ.) θα πρέπει να προηγηθεί σημαντική παραπέρα μείωση του κόστους των ηλιακών στοιχείων, καθώς και των άλλων εξαρτημάτων των φωτοβολταϊκών συστημάτων (συσσωρευτές αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, ρυθμιστές, μετατροπείς κ.λπ.). Θα πρέπει όμως επίσης να αλλάξει ριζικά η τεχνολογία κατασκευής των ηλιακών στοιχείων. Αυτό γίνεται φανερό με τον παρακάτω απλό συλλογισμό.

Το προϊόν των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ενέργεια. Επομένως ένα λογικό κριτήριο για την σκοπιμότητα επιλογής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ο σύντομος χρόνος ανταπόδοσης της ενέργειας που καταναλώθηκε για την κατασκευή του. Οι γνωστές όμως σήμερα τεχνολογικές μέθοδοι κατασκευής φωτοβολταϊκών ηλιακών στοιχείων, είναι πολύ ενεργοβόρες. Δηλαδή υπολογίζεται ότι ένα φωτοβολταϊκό σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί συνεχώς επί 5 περίπου χρόνια τουλάχιστον για να παραχθεί η ποσότητα της ενέργειας που καταναλώθηκε για τη μεταλλουργική παραγωγή του απαιτούμενου πυριτίου (η αναφορά γίνεται για ηλιακά στοιχεία κατασκευασμένα από μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πυρίτιο), τον καθαρισμό του και τη διαμόρφωση του σε ηλιακά στοιχεία. Η ουσιαστική παραγωγικά νεκρή αυτή χρονική διάρκεια της αποπληρωμής του ενεργειακού χρέους του συστήματος, είναι καταρχήν πολύ μεγάλη για να δικαιολογηθεί σήμερα η γενική χρήση της φωτοβολταϊκής μετατροπής σε όλες τις ενεργειακές εφαρμογές. Έτσι, και μέχρι την ανάπτυξη των νέων κατασκευαστικών συστημάτων περιορίζεται συνήθως σε ειδικότερες εφαρμογές, όπως αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω.

3. Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

3.1 Η ηλιακή ενέργεια

Η διαμόρφωση του φάσματος του φωτός που εκπέμπει ο ήλιος προσομοιάζεται συνήθως με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας περίπου 5800 K. Η προσέγγιση αυτή αν και καλή για μελέτες θερμικών εφαρμογών της ηλιακής ακτινοβολίας στις μελέτες φωτοβολταϊκής μετατροπής θα παρουσιάσει μεγάλο σφάλμα αφού αυτή καθορίζεται από τη φωτονική σύσταση της ακτινοβολίας επειδή η δυνατότητα απορρόφησης των φωτονίων της ακτινοβολίας από έναν ημιαγωγό (από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το φωτοβολταϊκό στοιχείο) εξαρτάται ουσιαστικά από τη σύγκριση της τιμής της ενέργειάς τους σε σχέση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού.

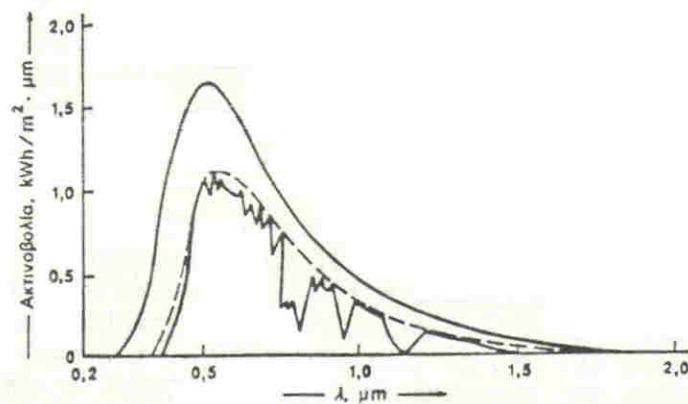
Ο ήλιος ως γνωστό εκπέμπει δύο ειδών ακτινοβολίες.

α) την ηλεκτρομαγνητική και

β) μια ασθενή σωματιδιακή ακτινοβολία, που αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, κυρίως ηλεκτρόνια και πρωτόνια και ονομάζεται ηλιακός άνεμος.

Πάντως το δεύτερο είδος δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον από πλευράς ενεργειακής εκμετάλλευσης. Η ανάγκη για τη λεπτομερειακή εξέταση της φασματικής σύστασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές γίνεται φανερή στο σχήμα 3.1 που δείχνει τη μεγάλη διαφοροποίηση του πραγματικού φάσματος του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της γης, σε σχέση με την προσέγγιση που αναφέραμε παραπάνω.

Ενδεικτική άλλωστε της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία είναι η εξάρτηση της έντασής της από το υψόμετρο της τοποθεσίας της γης, που δέχεται την ακτινοβολία Έτσι έχει μετρηθεί ότι ενώ στη στάθμη της θάλασσας η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει μέχρι περίπου $900 - 1000 \text{ W/m}^2$, η τιμή της αυξάνεται κατά περίπου 7 W/m^2 για κάθε 100 m ύψους της τοποθεσίας, επειδή μειώνεται αντίστοιχα το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας που διασχίζουν οι ηλιακές ακτίνες.

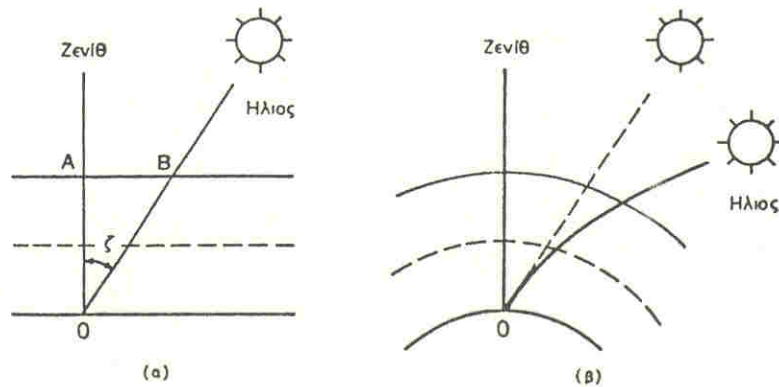


Σχήμα 3.1: Το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην εκπομπή μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5800 K (εξωτερική συνεχής γραμμή), το φάσμα της ίδιας πηγής ύστερα από απορροφήσεις από το όζον και από σκεδάσεις από τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας (ασυνεχής γραμμή), και το πραγματικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης σε συνθήκες μέτριας υγρασίας (εσωτερική συνεχής γραμμή).

3.2 Οι συμβατικές ηλιακές ακτινοβολίες

Πέρα από τη γεωγραφική θέση και το υψόμετρο, η τελική μορφή και η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες, και κυρίως τη θέση του ήλιου στον ουρανό και την περιεκτικότητα της υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Συμβατικά, το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα μέχρι τη στάθμη της θάλασσας, που είναι άμεση συνέπεια της θέσης του ήλιου, χαρακτηρίζεται από μία κλίμακα μάζας αέρα AM (air mass, ονομάζεται επίσης οπτική αέρια μάζα) βαθμολογημένης με την τέμνουσα (το αντίστροφο του συνημίτονου) της ζενιθιακής απόστασης (ζ), δηλαδή της γωνίας ανάμεσα στη θέση του ήλιου και στην κατακόρυφο (Σχήμα 3.2). Δηλαδή η κλίμακα της μάζας αέρα δείχνει ουσιαστικά πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της.

Συγκεκριμένα, ως AM1 συμβολίζεται η συνθήκη για τη θέση του ήλιου στην κατακόρυφο, στο ζενίθ, που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της ηλιακής διαδρομής ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία 45° από το ζενίθ, ως AM2 με τον ήλιο σε γωνία 60° κ.λπ.



Σχήμα 3.2: Η εξάρτηση της κλίμακας μάζας (AM) από τη θέση του ήλιου. (α) Απλοποιημένη απεικόνιση με την ατμόσφαιρα να έχει επίπεδη ανάπτυξη σε άπειρη έκταση. Εξ ορισμού είναι $AM = OB/OA = 1/\cos \zeta$. (β) Η πραγματική διαμόρφωση της γήινης ατμόσφαιρας, με τα στρώματά της να ορίζονται από σφαιρικές επιφάνειες, και η αντίστοιχη ατμοσφαιρική διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της μέσα από τα στρώματα αυτά.

Το μηδέν της κλίμακας (AM0) συμβολίζεται την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που να απέχει όση είναι η μέση απόσταση της γης από τον ήλιο. Στον πίνακα 3.1 γράφονται οι πυκνότητες της ισχύος και η μέση ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες πρότυπες συνθήκες στην κλίμακα μάζας αέρα. Πάντως, η παραπάνω προτυποποίηση δεν είναι πάρα πολύ αυστηρή. Έτσι π.χ. εκτός από τις τιμές του πίνακα, η AM0 αναφέρεται επίσης ως 1353 W/m^2 , ή AM2 ως 740 W/m^2 κ.λπ.

Ο άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας της διαμόρφωσης των μετεωρολογικών συνθηκών, δηλαδή η ατμοσφαιρική υγρασία, χαρακτηρίζεται από το ύψος της στήλης του νερού (μετρημένης σε cm), που σχηματίζεται από την υποθετική συμπύκνωση του συνόλου των υδρατμών της ατμόσφαιρας, στον συγκεκριμένο τόπο και χρόνο.

Πάντως, έτσι και αλλιώς, το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας συγκεντρώνεται στη φασματική περιοχή του κυανού και του πράσινου, και ειδικότερα σε μήκη κύματος από 0,45 μέχρι 0,6 μm, που αντιστοιχεί σε φωτόνια ενέργειας περίπου 2,1 - 2,8 eV. Για την αντιστοιχία μήκους κύματος και ενέργειας των φωτονίων, *υπενθυμίζεται* ότι από τη σχέση $\nu = c/\lambda$, που συνδέει τη συχνότητα ν και το μήκος κύματος λ μιας ακτινοβολίας με την ταχύτητα του φωτός c

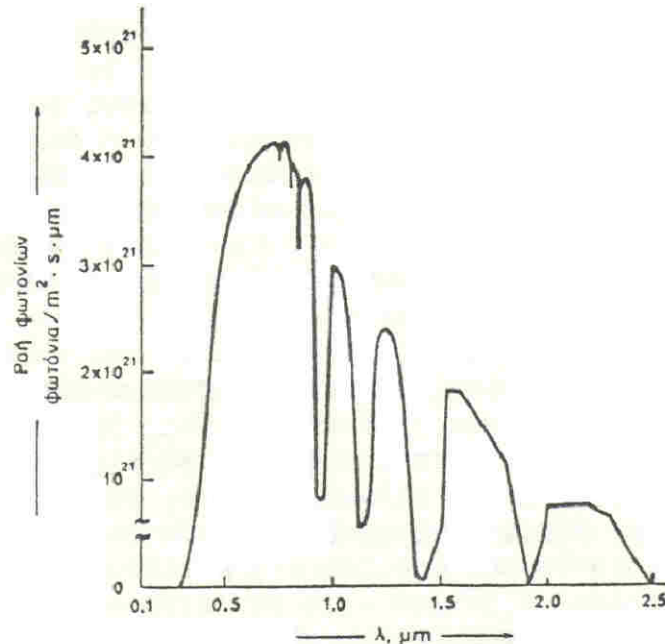
βρίσκουμε ότι η ενέργεια του φωτονίου $h\nu$, σε eV, συνδέεται με το αντίστοιχο μήκος της ακτινοβολίας λ με μm με τη σχέση $h\nu = 1,238/\lambda$.

Τιμή μάζας αέρα	Συμβατικές συνθήκες	Ισχύς W/m^2	Μέση ενέργεια των φωτονίων
AM0	Στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα	1363-1375	1,48
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	960	1,42
AM2	Απόσταση του ηλίου 60° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	880	1,38
AM3	Απόσταση του ηλίου $70,5^\circ$ από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	750	1,21

Πίνακας 3.1: Οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα (Air Mass).

3.3 Η ακτινοβολία του "ενός ήλιου"

Το σχήμα 3.3 δείχνει τη ροή των φωτονίων που αντιστοιχεί στα διάφορα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας AM 1,5, όταν φτάνει στη γη, στη στάθμη της θάλασσας.



Σχήμα 3.3: Η συμβατική φωτονική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες AM 1,5

Η καμπύλη έχει βγει υπολογιστικά, δηλαδή έχουν αφαιρεθεί από το διαστημικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας τα φωτόνια που εκτιμήθηκε ότι απορροφούνται ή σκεδάζονται από το όζον, τους υδρατμούς και τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας.

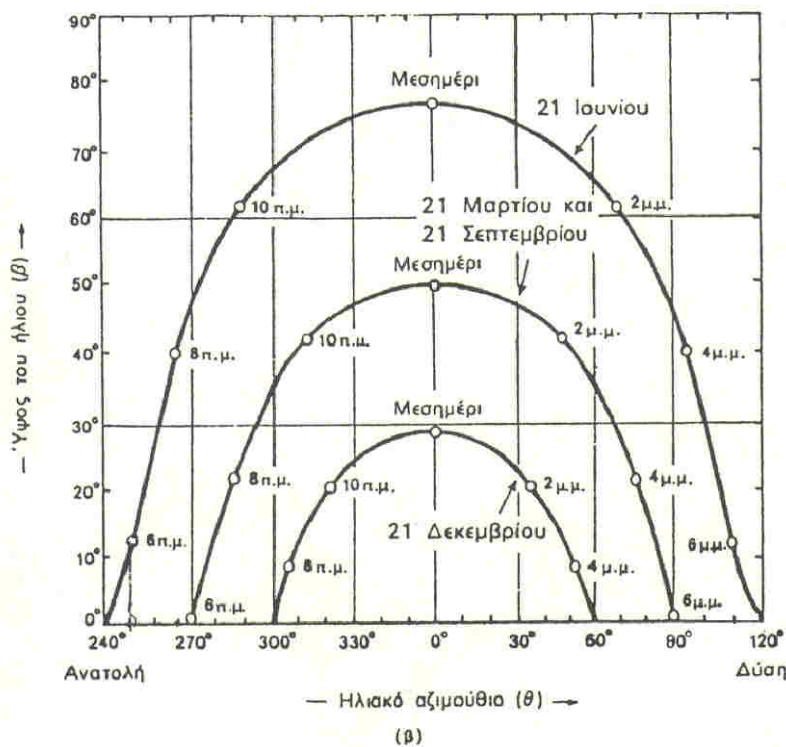
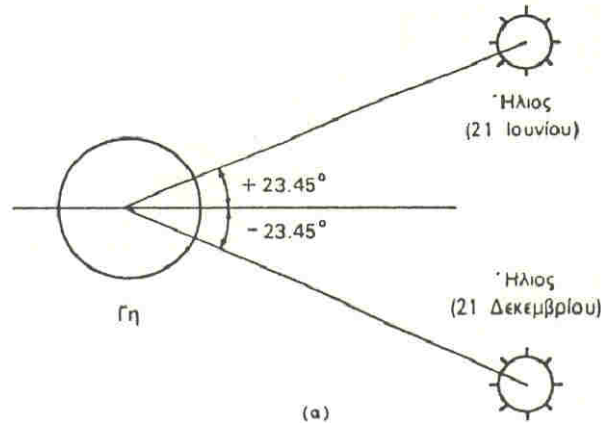
Η ηλιακή ακτινοβολία AM1,5 έχει πυκνότητα 935 W/m^2 και αποτελεί χονδρικά μια αρκετά αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέσης μέγιστης ισχύος που περίπου δέχεται σε επιφάνεια κάθετη προς την ακτινοβολία και στις ευνοϊκότερες δυνατές συνθήκες αιχμής (καλοκαίρι, μεσημέρι, καθαρός ουρανός κ.λπ.) ένα μεγάλο μέρος από τις περισσότερο κατοικημένες και αναπτυγμένες περιοχές της γης. Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα ισχύος στρογγυλεύεται στα 1000 W/m^2 , ονομάζεται συμβατικά **ακτινοβολία ενός ήλιου** (ή ενός πλήρους ήλιου) και παίρνεται συχνά σαν βάση σύγκρισης της ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η μονάδα αυτή χρησιμοποιείται επίσης για την αναφορά της ισχύος αιχμής των φωτοβολταϊκών διατάξεων, καθώς και για την πυκνότητα της ακτινοβολίας στις συγκεντρωτικές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν φακούς ή κάτοπτρα. Π.χ η συγκεντρωμένη δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας με πυκνότητα ισχύος 100000 W/m^2 ονομάζεται "100 ήλιοι".

Οι συνθήκες AM0 και AM1 χρησιμοποιούνται συχνά ως πρότυπες για τον έλεγχο και την αξιολόγηση των ηλιακών στοιχείων που προορίζονται για διαστημικές και επίγειες εφαρμογές, αντίστοιχα. Για αντικειμενικές συγκρίσεις είναι απαραίτητο να γίνεται σαφής αναφορά των συνθηκών διεξαγωγής των μετρήσεων, διότι οι ιδιότητες των ηλιακών στοιχείων, και γενικότερα η απόδοση τους επηρεάζονται σημαντικά από τη μορφή της ακτινοβολίας που δέχονται. Π.χ. από τις δύο παραπάνω συνθήκες, η AM2 δίνει μεγαλύτερη απόδοση στα ηλιακά στοιχεία πυριτίου από όσο η AM0, διότι ένα μεγάλο μέρος από τα φωτόνια από την υπεριώδη και την υπέρυθρο περιοχή της ακτινοβολίας που όπως δείχθηκε στο σχήμα 3.1 έχουν αφαιρεθεί από τη AM2, έχουν σχετικά μικρή μόνο συμβουλή ή είναι εντελώς άχρηστα για φωτοβολταϊκή μετατροπή με πυρίτιο. Συγκεκριμένα η ενέργεια των φωτονίων της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου, ενώ η ενέργεια των περισσότερων φωτονίων της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι μικρότερη από αυτό. Επομένως στην πρώτη περίπτωση, ένα μικρό μόνο μέρος της ενέργειας των φωτονίων αξιοποιείται για τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Επίσης, στην δεύτερη περίπτωση, δηλαδή για το μεγαλύτερο μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας, η ενέργεια των φωτονίων δεν επαρκεί για τη διέγερση των ηλεκτρονίων σθένους του πυριτίου και τη μεταφορά τους στη ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι η απόδοση ενός κοινού ηλιακού στοιχείου πυριτίου καλής ποιότητας, μπορεί να είναι 16% σε συνθήκες AM2 ενώ σε συνθήκες AM0 δεν ξεπερνά το 11,5%

3.4 Οι διακυμάνσεις της προσπίπτουσας σε ένα τόπο ηλιακής ενέργειας

3.4.1 Ηλιακή γεωμετρία

Όπως αντιλαμβανόμαστε η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας και η φωτονική της σύσταση παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ανάλογα με την ώρα, την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία, σε αιωρούμενα σωματίδια και σε άλλα συστατικά . Επίσης επηρεάζεται σε αξιόλογο βαθμό και από άλλους προβλεπόμενους ή απρόβλεπτους παράγοντες όπως οι ηλιακές κηλίδες και εκρήξεις, η ατμοσφαιρική ρύπανση κ.λπ.



Σχήμα 3.4: Η μεταβολή της απόκλισης και η επίδραση της στην τροχιά του ήλιου στον ουρανό. α) Η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και το χειμερινό ηλιοστάσιο. β) Παράδειγμα των αντίστοιχων τροχιών που διαγράφει ο ήλιος στη διάρκεια της ημέρας, κατά τα ηλιοστάσια καθώς και τις ισημερίες, σε τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος βόρειο 38° , όπως η Αθήνα. Οι ενδείξεις του μεσημεριού και των ωρών της ημέρας είναι σε ηλιακές τιμές.

Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια μιας χρονιάς, η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της

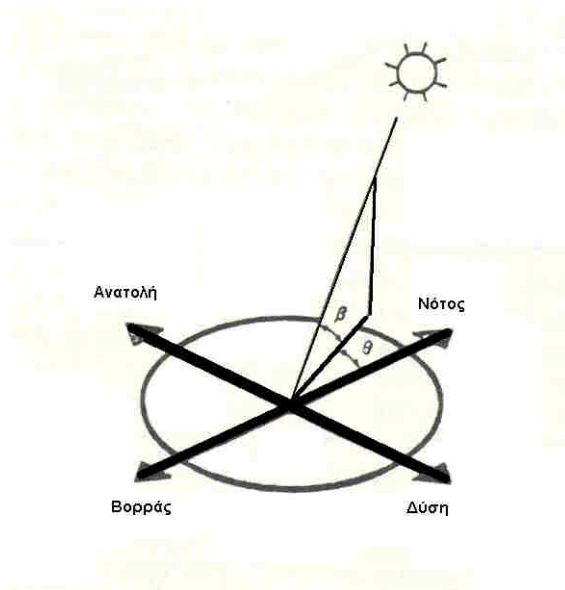
απόκλισης (δ), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, και στο επίπεδο του ισημερινού (σχήμα 3.4) Οι τιμές της απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο. Οι ακραίες της τιμές είναι $+ 23,45^{\circ}$ στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο) και $- 23,45^{\circ}$ στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο).

Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους είναι ότι οι κυκλικές τροχιές που διαγράφονται βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερη ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ τον χειμώνα συμβαίνει το αντίθετο. Παράλληλα, διαμορφώνονται οι αντίστοιχες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες εποχές του έτους. Ιδιαίτερα χρήσιμα μεγέθη για τη γενική εκτίμηση της καθημερινής και της εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σε ένα τόπο, είναι η θεωρητική ηλιοφάνεια, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, καθώς και η μέση πραγματική ηλιοφάνεια που δείχνει τον μέσο όρο των ωρών που ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα. Επίσης, αριθμός των ηλιοφεγγών ημερών, στη διάρκεια των οποίων ο ήλιος δεν καλύπτεται καθόλου από σύννεφα, καθώς και των ανήλιων ημερών, που ο ήλιος καλύπτεται από σύννεφα σε ολόκληρο το διάστημα της ημέρας.

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες: το ύψος του ήλιου (β) είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στον ορίζοντα (σχήμα 3.5).

Αντί για το ύψος, χρησιμοποιείται επίσης συχνά η συμπληρωματική της γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, που όπως είδαμε ονομάζεται ζενιθιακή απόσταση (ή ζενιθιακή γωνία) του ήλιου. Ζενίθ είναι το σημείο του ουρανού που συναντά η κατακόρυφος ενός τόπου.

Η δεύτερη χαρακτηριστική γωνία του ήλιου, το ηλιακό αζιμούθιο (θ) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά - νότου. Προς τα δεξιά από τον νότο, το ηλιακό αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές, και προς τα αριστερά αρνητικές. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό.



Σχήμα 3.5: Οι γωνίες του ύψους (β) και του αζιμούθιου (θ), που περιγράφουν κάθε στιγμή τη θέση του ήλιου στον ουρανό.

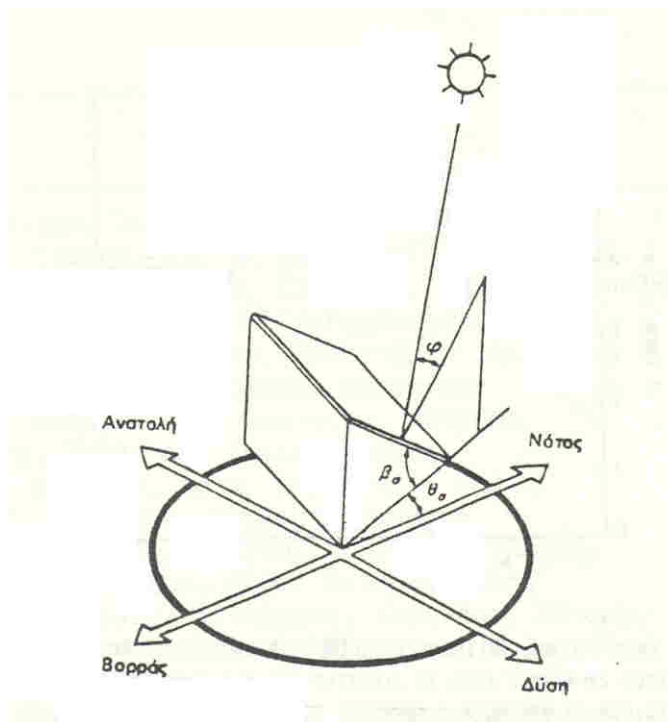
3.4.2 Ο προσανατολισμός του συλλέκτη

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επιπέδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από δύο γωνίες: την κλίση και την αζιμούθια γωνία (σχήμα 3.6).. **Κλίση του συλλέκτη (β_{σ})** είναι η δίεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα. Δείχνει πόσο γέρνει ο συλλέκτης και μπορεί να πάρει τιμές από 0 μέχρι 180°. Για γωνίες $\beta_{\sigma} > 90^{\circ}$ το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω.

Η **αζιμούθια γωνία** του συλλέκτη (θ_{σ}) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά - νότου. Παίρνει τιμές από -180° μέχρι $+180^{\circ}$. Η γωνία -180° (που συμπίπτει με την $+180^{\circ}$) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς τον βορρά, η γωνία -90° προς την ανατολή, η γωνία 0° προς τον νότο και η γωνία $+90^{\circ}$ προς τη δύση.

Προφανώς, η **πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε έναν επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνειά του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση**

της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης (φ) είναι 0° . Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας.

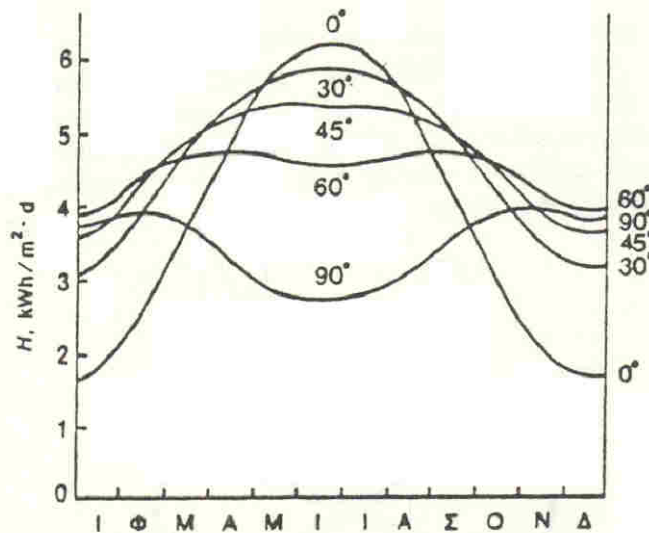


Σχήμα 3.6: Η κλίση (β_σ) και η αζιμούθια γωνία (θ_σ), που χαρακτηρίζουν τον προσδιορισμό ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη στην επιφάνεια της γης.

Προφανώς, η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε έναν επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνειά του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης (φ) είναι 0° . Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας.

3.4.3 Η βέλτιστη κλίση

Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, κατά τη διάρκεια του έτους.



Σχήμα 3.7: Οι πιο πάνω καμπύλες μας δείχνουν την εξάρτηση της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας H , που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια κατά τη διάρκεια των διαφόρων μηνών του έτους, σε συνάρτηση με την κλίση της. Το γεωγραφικό πλάτος που πάρθηκαν οι πιο πάνω μετρήσεις είναι 45° και πάνω στις καμπύλες σημειώνεται οι κλίσεις του συλλέκτη σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.

Η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας συνδέεται με τις άλλες γωνίες της ηλιακής γεωμετρίας, που αναφέρθηκαν παραπάνω, με τη σχέση:

$$\text{συν}\varphi = \text{συν}\beta \text{ ημ}\beta_{\sigma} \text{ συν}(\theta_{\sigma} - \theta) + \text{ημ}\beta \text{ συν}\beta_{\sigma}$$

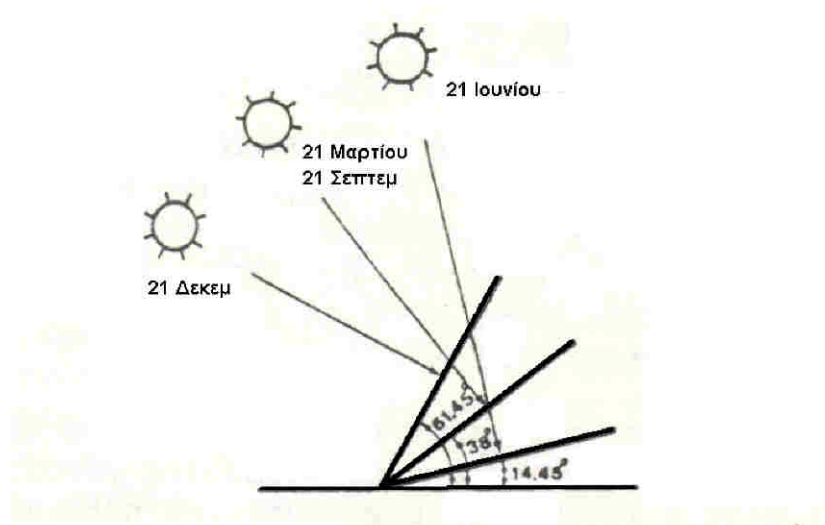
Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, και η αζιμούθια γωνία είναι 0° (προς το νότο). Αλλά λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή (σχήμα 3.7).

Έτσι, αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατό περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου 10° ως 15° μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ για τον χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου 10° ως 15° μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου. Στο σχήμα 3.8 δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις χαρακτηριστικότερες ημερομηνίες του έτους.

Επίσης, στον πίνακα 3.1 δίνονται τα γεωμετρικά πλάτη διαφόρων ελληνικών περιοχών, για την επιλογή της σωστής κλίσης του ηλιακού συλλέκτη. Υπάρχουν και εφαρμογές, όπου κρίνεται

σκόπιμη η αναπροσαρμογή της κλίσης του συλλέκτη δύο ή περισσότερες φορές κατά τη διάρκεια του έτους, ώστε να παρακολουθεί κάπως την απόκλιση του ήλιου.

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για τις άλλες, από ενεργειακή άποψη λιγότερο σημαντικές μορφές της ηλιακής ενέργειας, ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου. Έτσι, όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυσης ακτινοβολίας από τον ουρανό.



Σχήμα 3.8: Η βέλτιστη θέση ενός ηλιακού συλλέκτη στο θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό (21 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο και στην εαρινή (21 Μαρτίου) και τη φθινοπωρινή (21 Σεπτεμβρίου) ισημερία, σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος 38° , όπως η Αθήνα. Τα ύψη του ήλιου που εικονίζονται αφορούν στα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια.

Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι περίπου 10 - 15 % μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους.

Πόλη ή περιοχή	Γεωγραφικό πλάτος
Σιδηρόκαστρο, Διδυμότειχο, Ορεσιτιάδα	41 ⁰ 30'
Φλώρινα, Έδεσσα, Γιαννιτσά, Κιλκίς, Σέρρες, Δράμα, Καβάλα, Ξάνθη, Κομοτηνή, Αλεξανδρούπολη	41 ⁰
Καστοριά, Πτολεμαΐδα, Κοζάνη, Νάουσα, Βέροια, Κατερίνη, Θεσσαλονίκη, Πολύγυρος, Σαμοθράκη	40 ⁰ 30'
Κόνιτσα, Γρεβενά, Λιτόχωρο, Κασσάνδρα, Λήμνος	40 ⁰
Κέρκυρα, Ηγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Λάρισα, Βόλος	39 ⁰ 30'
Λευκάδα, Πρέβεζα, Άρτα, Καρπενήσι, Λαμία, Σκύρος, Μυτιλήνη, <u>Βούλιστα Παναγιά</u>	39 ⁰
Κεφαλληνία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγγι, Πάτρα, Αμφισσα, Λιβαδειά, Θήβα, Χαλκίδα, Χίος	38 ⁰ 30'
Ζάκυνθος, Αμαλιάδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα, Ραφήνα, Κάρυστος, Άνδρος, Ικαρία, Σάμος	38 ⁰
Πύργος, Μεγαλόπολη, Τρίπολη, Άργος, Ναύπλιο, Πόρος, Σύρος, Πάτμος	37 ⁰ 30'
Πύλος, Καλαμάτα, Σπάρτη, Πάτμος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	37 ⁰
Γύθειο, Μήλος, Σαντορίνη, Ρόδος	36 ⁰ 30'
Κύθηρα, Καστελόριζο	36 ⁰
Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Κάσσος, Κάρπαθος, Χώρα Σφακίων, Ιεράπετρα, Αγ. Νικόλαος Κρήτης, Κύπρος	35 ⁰ 30'
	35 ⁰

Πίνακας 3.2: Γεωγραφικό πλάτος (κατά προσέγγιση) διαφόρων ελληνικών πόλεων και περιοχών.

Έτσι, ο συλλέκτης αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερα τη διάχυτη ακτινοβολία.

Η ποσότητα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία. Η ικανότητα της ανάκλασης εκφράζεται από ένα συντελεστή που κυμαίνεται από 0, για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας, μέχρι 1 για πλήρη ανάκλαση. Στον πίνακα 3.2 δίνονται ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης για ορισμένα από τα είδη επιφανειών που συμβαίνει να έχει το περιβάλλον στις περιοχές, όπου τοποθετούνται οι ηλιακοί συλλέκτες.

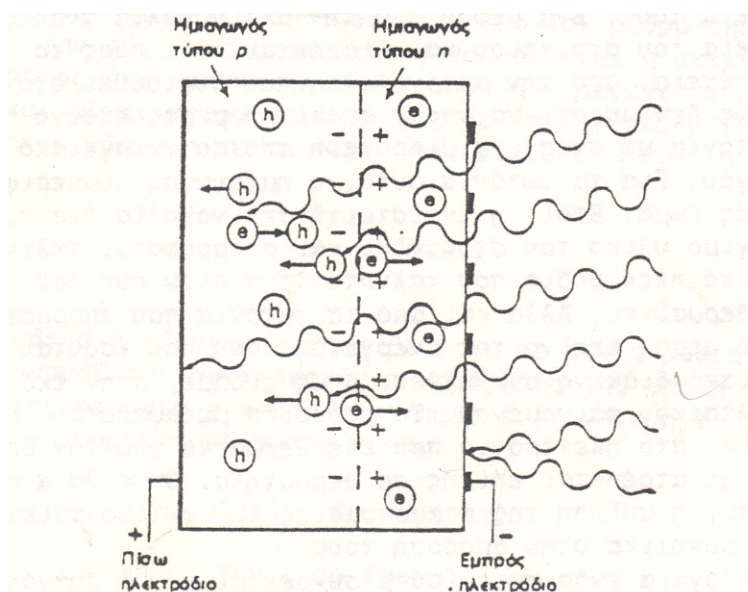
Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Επιφάνεια νερού, Θάλασσα	0,05
Ασφαλτόστρωμα	0,07
Αγρός με σκοτεινόχρωμο χώμα	0,08
Πράσινος αγρός	0,15
Βραχώδης επιφάνεια	0,20
Επιφάνεια παλιού τσιμέντου	0,24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου ή χρωματισμένη με ανοιχτό χρώμα	0,30
Χιόνι	0,60

Πίνακας 3.2: Παραδείγματα τιμών του συντελεστή ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας

4. Η ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

4.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p - n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου) που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο.



Σχήμα 4.1: Ο μηχανισμός της εκδήλωσης του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο. Τα φωτόνια της ακτινοβολίας, που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός του όψη, τύπου n στο παράδειγμα του σχήματος, παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, e^-) ή προς τα πίσω (οι οπές, h^+), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται. Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου, ενώ ένα άλλο μέρος της διέρχεται από το στοιχείο χωρίς να απορροφηθεί, μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο.

Δημιουργείται έτσι όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα απ' τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης $p - n$ οπότε θα δεχτούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού της πεδίου.

Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p , με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Η εκδήλωση της διασποράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων p και n μιας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός ηλιακού στοιχείου, αλλά και κάθε φωτοβολταϊκής διάταξης, μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους άλλων ειδών. Π.χ. από διόδους ετεροενώσεων $p - n$ διαφορετικών ημιαγωγών ή από διόδους Schottky που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.

4.2 Η Απορρόφηση της Ακτινοβολίας στα Φωτοβολταϊκά Στοιχεία.

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, προφανώς δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος εκείνο που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα. Έτσι, η αντίστοιχη ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το ημιαγωγίμο υλικό του

στοιχείου και απορροφάται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του, με αποτέλεσμα να το θερμαίνει. Αλλά και από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο το μέρος εκείνο της ενέργειάς τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλλει, όπως είδαμε, στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υπόλοιπο μεταφέρεται, σαν κινητική ενέργεια, στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από τον δεσμό, και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα. Όπως θα αναλυθεί όμως παρακάτω, η αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιδρά αρνητικά στην απόδοσή τους.

Η ενέργεια ενός φωτονίου E συνδέεται με τη συχνότητα της ακτινοβολίας ν και με το μήκος κύματος λ με τις σχέσεις :

$$E = h.\nu = \frac{h.c}{\lambda} \quad (4.1)$$

όπου

h η σταθερά δράσης του Planck ίση με $6.3 \cdot 10^{-34}$ Js και

c η ταχύτητα του φωτός ίση με $3 \cdot 10^8$ m/s

Επομένως, αν το ενεργειακό διάκενο είναι σε μονάδες ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και το μήκος κύματος σε μικρόμετρα (μm), τότε το μέγιστο χρησιμοποιήσιμο μήκος κύματος ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό, ενεργειακού διακενου E_g , θα είναι:

$$\lambda_g = \frac{h.c}{E_g} \quad (4.2)$$

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού διεισδύει μια μονοχρωματική δέσμη ακτινοβολίας από όμοια φωτόνια ενέργειας $h\nu$, που έχει ροή (ή ένταση ή πυκνότητα ισχύος - είδαμε ότι η ορολογία είναι ανεκτική) ίση με H μονάδες ισχύος ανά μονάδα επιφανείας. Η ροή των φωτονίων (Φ), δηλαδή το πλήθος των φωτονίων ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου, θα είναι:

$$\Phi = \frac{H}{h\nu} = \frac{H.\lambda}{h.c} \quad (4.3)$$

Βλέπουμε ότι για σταθερή ένταση H , η ροή Φ είναι αντίστροφα ανάλογη με την ενέργεια των φωτονίων ή αυξάνει γραμμικά με το λ .

Ας συμβολίσουμε, στη συνέχεια με Φ_0 την αρχική τιμή της ροής των φωτονίων στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού, με χ την απόσταση που διανύει η ακτινοβολία μέσα στον ημιαγωγό, αρχίζοντας από την επιφάνειά του, και $\Phi(\chi)$ την τομή της ροής των φωτονίων (δηλαδή το πλήθος των φωτονίων που δεν έχουν ακόμα απορροφηθεί) στο βάθος αυτό. Η ευκολία με την οποία πραγματοποιείται η απορρόφηση των φωτονίων, που είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα για τη χρησιμοποίηση του ημιαγωγού ως υλικού κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα δίνεται από τον ρυθμό της μεταβολής της Φ με την αύξηση της απόστασης που διανύει η ακτινοβολία. Ο ρυθμός αυτός έχει αρνητική τιμή, αφού η Φ μειώνεται με την αύξηση του χ , και είναι προφανώς ανάλογος με η συγκεκριμένη τιμή της Φ στο βάθος χ , δηλαδή με τη $\Phi(\chi)$. Θα ισχύει επομένως η σχέση:

$$\frac{-d\Phi}{d\chi} = \alpha \cdot \Phi(\chi) \quad (4.4)$$

και η σταθερά αναλογίας α , που δίνεται σε αντίστροφες μονάδες μήκους, ονομάζεται *συντελεστής απορρόφησης* της υπόψη ακτινοβολίας.

Δοθέντος ότι για $\chi = 0$ η $\Phi(\chi)$ παίρνει την τιμή Φ_0 , η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης είναι:

$$\Phi(\chi) = \Phi_0 \exp(-\alpha\chi) \quad (4.5)$$

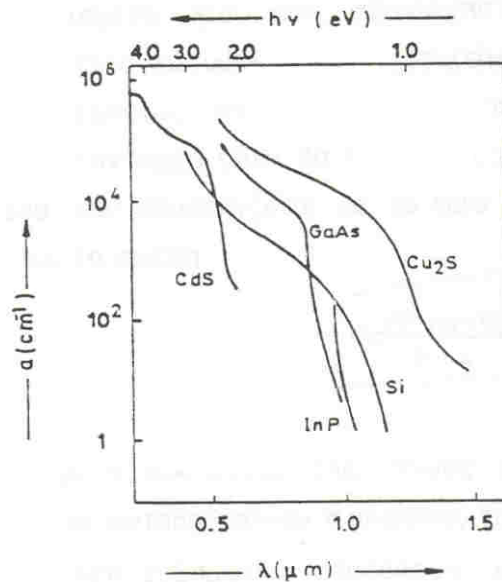
που ονομάζεται νόμος του Μπερ (Beer).

Στη συνέχεια βρίσκουμε εύκολα ότι:

$$\frac{-d\Phi}{d\chi} = \alpha \cdot \Phi_0 \exp(-\alpha\chi) \quad (4.6)$$

δηλαδή ότι ο ρυθμός της απορρόφησης των φωτονίων, επομένως και της δημιουργίας των φορέων από την ακτινοβολία που δέχεται ο ημιαγωγός, είναι μεγαλύτερος κοντά στην επιφάνεια του και εξασθενίζει εκθετικά με την απόσταση από αυτή.

Όπως δείχνει και το σχήμα 4.2 η τιμή του συντελεστή απορρόφησης μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.2: Η μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης (α) σε συνάρτηση με το μήκος κύματος (λ) ή την ενέργεια των φωτονίων ($h\nu$) της ακτινοβολίας, για τους κυριότερους ημιαγωγούς των φωτοβολταϊκών διατάξεων

Συγκεκριμένα, μηδενίζεται όταν το λ υπερβαίνει το λ_g του ημιαγωγού, αφού για αυτά τα μήκη κύματος δεν πραγματοποιείται καμιά απορρόφηση φωτονίων. Αντίθετα, παίρνει μεγάλες τιμές προς την πλευρά των μικρών μηκών κύματος, που σημαίνει ότι η απορρόφηση πρακτικά όλων των αντίστοιχων φωτονίων γίνεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού.

4.3 Η Δημιουργία του Φωτορεύματος.

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο (για απλούστευση, γράφεται συνήθως φ/β στοιχείο) δέχεται μια κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα I_{ϕ} , που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Π.χ. ας υποθέσουμε ότι έχουν εξασφαλιστεί οι δύο βασικές προϋποθέσεις για ένα καλό φωτοβολταϊκό στοιχείο, δηλαδή η ένωση p - n να βρίσκεται σε κατάλληλη απόσταση από την όψη του στοιχείου και η μέση

διάρκεια ζωής των φορέων μειονότητας στον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο, να είναι αρκετά μεγάλη. Τότε, για την πυκνότητα του φωτορεύματος, ισχύει ικανοποιητικά η σχέση:

$$I_{\Phi} = e \cdot g \cdot (L_n + L_p) \quad (4.7)$$

- όπου
- e είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο,
 - g είναι ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών φορέων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας (πλήθος ζευγών ηλεκτρονίων - οπών ανά μονάδα χρόνου και μονάδα όγκου του ημιαγωγού) και
 - L_n είναι το μέσο μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων
 - L_p είναι το μέσο μήκος διάχυσης των οπών

Ένα χρήσιμο μέγεθος για τον υπολογισμό του φωτορεύματος είναι η φασματική απόκριση S (ή απόδοση συλλογής ή κβαντική απόδοση), που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, σε σχέση με τη φωτονική ροή Φ , δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου. Για ακτινοβολία μήκους κύματος λ , η φασματική απόκριση $S(\lambda)$ θα είναι:

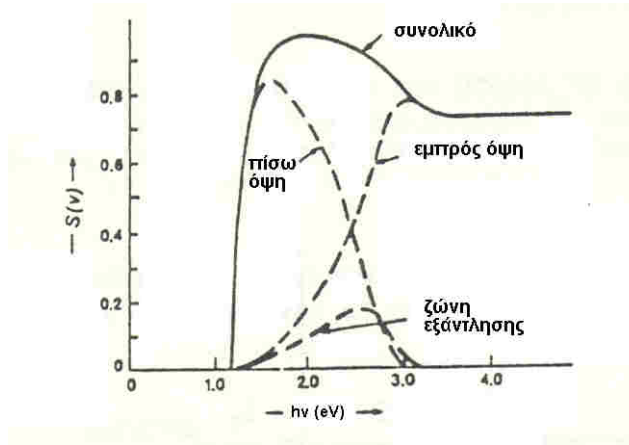
$$S(\lambda) = \frac{I_{\Phi}(\lambda)}{e \cdot \Phi(\lambda)} \quad (4.8)$$

όπου $\Phi(\lambda)$ είναι το πλήθος των φωτονίων με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος από λ μέχρι $\lambda + d\lambda$, και επομένως το συνολικό φωτόρευμα του στοιχείου, όταν δέχεται πολυχρωματική ακτινοβολία, θα είναι:

$$I_{\Phi} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \quad (4.9)$$

Η τιμή της φασματικής απόκρισης, και επομένως του φωτορεύματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, εξαρτάται από πολλούς κατασκευαστικούς παράγοντες, όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης και το πάχος του ημιαγωγού, το πλήθος των επανασυνδέσεων των φορέων κλπ. Στο σχήμα 4.3 δείχνεται η

μεταβολή της φασματικής απόκρισης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου του εμπορίου, σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται.



Σχήμα 4.3: Η μεταβολή της φασματικής απόκρισης $S(\nu)$ σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας, στις 3 περιοχές ενός φωτοβολταϊκού ηλιακού στοιχείου πυριτίου: εμπρός όψη τύπου n, ζώνη εξάντλησης και πίσω όψη τύπου p.

Όταν το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου δεν είναι αμελητέο, η παραπάνω σχέση γράφεται:

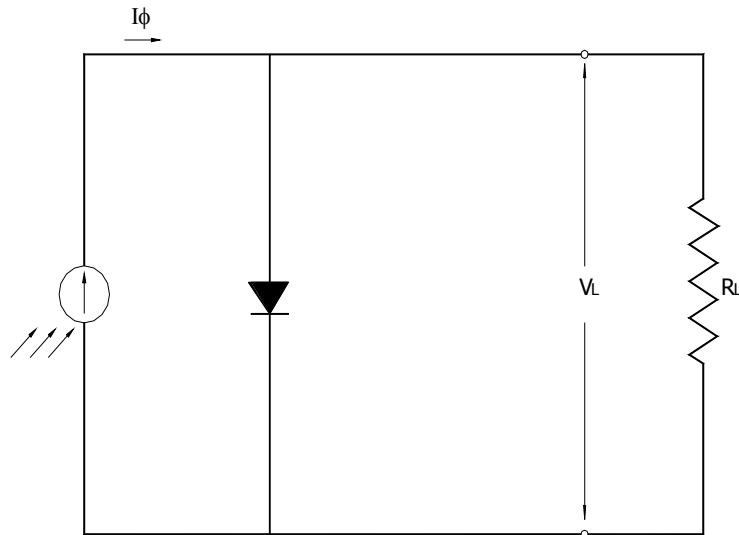
$$I_{\Phi} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda) [1 - R(\lambda)] \Phi(\lambda) d(\lambda) \quad (4.10)$$

όπου $R(\lambda)$ είναι ο δείκτης ανάκλασης για την ακτινοβολία μήκους κύματος λ .

4.4 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

4.4.1 Πρώτη Προσέγγιση

Για να προχωρήσουμε σε μία πρώτη εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούμε να το θεωρήσουμε ότι αποτελεί μία πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο, και ότι περιγράφεται από το πολύ απλοποιημένο διάγραμμα του σχήματος 4.4.



Σχήμα 4.4: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση, που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα. Δηλαδή, σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω θα ισχύει η σχέση:

$$I_{\varphi} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right) - 1 \right] \quad (4.11)$$

από την οποία βρίσκουμε ότι η τιμή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης του στοιχείου V_{cc} (από την αγγλική έκφραση open - circuit voltage) θα είναι:

$$V_{cc} = \frac{\gamma kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{\varphi}}{I_0} - 1\right) \quad (4.12)$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η τιμή του I_{φ} είναι πολύ μεγαλύτερη από του I_0 και επομένως η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί στη:

$$V_{cc} = \frac{\gamma k T}{e} \cdot \ln \frac{I_{\phi}}{I_0} \quad (4.13)$$

που δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος σε συνάρτηση με το φωτόρρευμα, δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Από τις σχέσεις για το I_0 , που είναι γνωστές από τη θεωρία της επαφής p - n, μπορούμε να βρούμε την εξάρτηση της V_{cc} από τις διάφορες ιδιότητες του ημιαγωγού, όπως το ενεργειακό διάκενο E_g , η ενδογενής συγκέντρωση των φορέων n_i , οι συγκεντρώσεις των προσμίξεων N_A και N_D κλπ.

Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα I_{sc} (από την αγγλική έκφραση short - circuit current) θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρρευμα:

$$I_{sc} = I_{\phi} \quad (4.14)$$

Όταν όμως το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R_L (από την αγγλική έκφραση load resistance), το ρεύμα θα πάρει μία μικρότερη τιμή I_L που βρίσκεται με τη λύση της εξίσωσης:

$$I_L = I_{\phi} - I_0 \left[\exp\left(\frac{e \cdot I_L \cdot R_L}{\gamma \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (4.15)$$

Προφανώς θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης (δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος) για την οποία η ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο θα γίνεται μέγιστη. Στις συνθήκες αυτές, θα αντιστοιχεί μια βέλτιστη τάση V_m , που δίνεται από τη λύση της εξίσωσης:

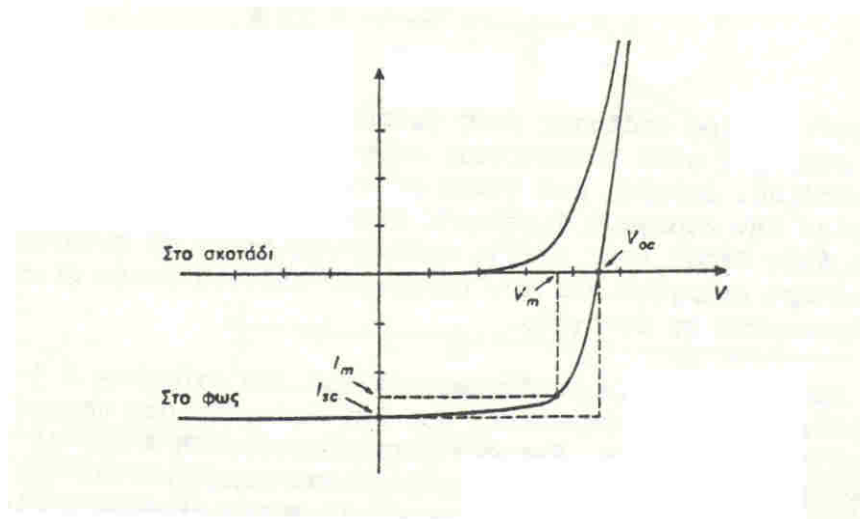
$$\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1 = \left(1 + \frac{e \cdot V_m}{\gamma \cdot k \cdot T} \right) \exp\left(\frac{e \cdot V_m}{\gamma \cdot k \cdot T}\right) \quad (4.16)$$

4.4.2 Ο συντελεστής πλήρωσης.

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος $P_m = I_m \xi V_m$ προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης I_{sc} και της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης V_{oc} ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, ονομάζεται **συντελεστής πλήρωσης FF** (από την αγγλική έκφραση fill factor) Δηλαδή:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (4.17)$$

Στο διάγραμμα του σχήματος 4.5, ο FF δίνεται από το λόγο του εμβαδόν του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ του στοιχείου, σε συνθήκες ακτινοβολήσης, προς το εμβαδόν που ορίζεται από τις τιμές I_{sc} και V_{oc} .



Σχήμα 4.5: Η χαρακτηριστική καμπύλη έντασης (I) - τάσης (V) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως. Διακρίνονται τα δύο ορθογώνια που ο λόγος των εμβαδών τους καθορίζει την τιμή του συντελεστή πλήρωσης. Στο διάγραμμα, δεν δείχνεται το ανάστροφο ρεύμα κόρου, λόγω της ασήμαντα μικρής τιμής του, σε σύγκριση με το φωτόρευμα του στοιχείου.

Οι τρεις παραπάνω παράμετροι, δηλαδή ο FF, η I_{sc} και η V_{oc} είναι τα κυριότερα μεγέθη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους. Επιστρέφοντας στον συντελεστή απόδοσης των στοιχείων η , που αναφέραμε στην αρχή, μπορούμε τώρα να τον ορίσουμε με τη σχέση:

$$n = \frac{P_m}{H \times A} = \frac{I_m \times C_m}{H \times A} = \frac{FF \times I_{SC} \times V_{OC}}{H \times A} \quad (4.18)$$

όπου H είναι η ένταση (πυκνότητα της ισχύος) της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, εμβαδού A .

Όπως βλέπουμε, για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων, επιδιώκεται οι τιμές των FF , I_{SC} και V_{OC} να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.

Προφανώς θα ισχύει και η σχέση :

$$n = \frac{\Phi(E_g) V_m}{\Phi \cdot E_\mu} \quad (4.19)$$

όπου $\Phi(E_g)$ είναι η ροή των φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, Φ είναι η συνολική φωτονική ροή στην ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείου, και

E_μ είναι η μέση ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας.

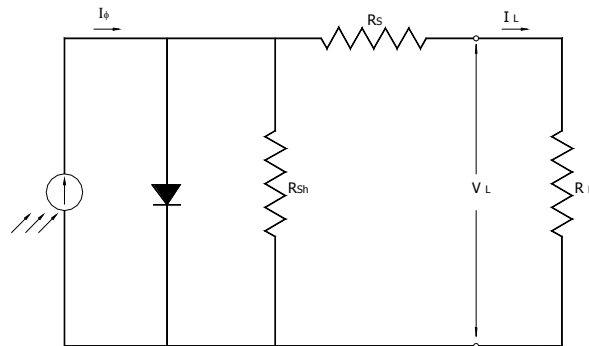
Στην ηλιακή ακτινοβολία, περίπου τα $2/3$ των φωτονίων έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου (περίπου $1,1$ eV). Επίσης, η V_m των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου ίσο με το $1/3$ της E_μ της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως βρίσκουμε πρόχειρα ότι η θεωρητική απόδοση των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου :

$$n = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} = 22\%$$

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τη σύσταση της ακτινοβολίας. Δηλαδή, μια δέσμη ακτινοβολίας θα προκαλέσει σε ένα στοιχείου την παραγωγή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με μια άλλη δέσμη ίσης ισχύος αλλά πλουσιότερη σε φωτόνια με ευνοϊκότερη ενέργεια για τον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο.

4.4.3 Δεύτερη Προσέγγιση.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.4 περιγράφει ιδανικές συνθήκες, που δεν υπάρχουν στα πραγματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Μια σωστότερη προσέγγιση αποτελεί το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.6 διότι περιέχει και τις αναπόφευκτες αντιστάσεις R_S (από την αγγλική έκφραση series resistance) που παρεμβάλλονται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό (κυρίως στο εμπρός επιφανειακό στρώμα του) και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Ακόμα επειδή η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, αφού λόγω επίσης αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων περιέχει και την παράλληλη αντίσταση R_{Sh} (από την αγγλική έκφραση shunt resistance). Συνήθως, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία του εμπορίου η R_S είναι μικρότερη από 5 Ω και η R_{Sh} είναι μεγαλύτερη από 500 Ω . Πάντως επηρεάζουν αισθητά την τιμή της τάσης V_L και του ρεύματος I_L που διαρρέει το φορτίο του κυκλώματος



Σχήμα 4.6: Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, που περιλαμβάνει τις αντιστάσεις σειράς R_S , καθώς και τις παράλληλες αντιστάσεις R_{Sh} .

R_L , αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της απόδοσης του στοιχείου. Στην περίπτωση αυτή ισχύει η σχέση:

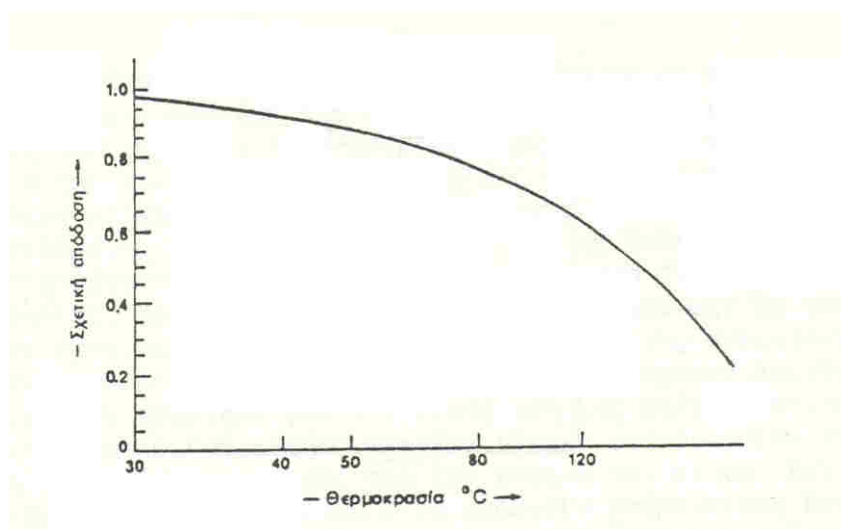
$$I_L \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = I_\phi - I_0 \left[\exp \left(\frac{e(V_L - I_L)R_s}{\gamma k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_L}{R_{sh}} \quad (4.20)$$

Εκτός από τις αντιστάσεις R_S και R_{Sh} , ένας άλλος παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η θερμοκρασία τους. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της V_{OC} και του FF. Παράλληλα μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου (σχήμα 4.7).

Αν ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με μια συμβατική θερμοκρασία (π.χ. $20^{\circ}C$) είναι η , η τιμή του σε μια διαφορετική θερμοκρασία θ θα είναι:

$$\eta_{\theta} = \eta \times \sigma_{\theta} \quad (4.21)$$

όπου σ_{θ} είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης.



Σχήμα 4.7: Τυπική καμπύλη της μεταβολής της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους. Η κλίμακα του άξονα των τεταγμένων δίνει το ποσοστό της απόδοσης του στοιχείου σε σχέση με την απόδοση του στη συμβατική θερμοκρασία $20^{\circ}C$. Η κλίμακα της θερμοκρασίας στον άξονα των τεταγμένων είναι λογαριθμική.

Στη συμβατική θερμοκρασία, ο σ_h είναι ίσος με τη μονάδα, και μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας, για τα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου.

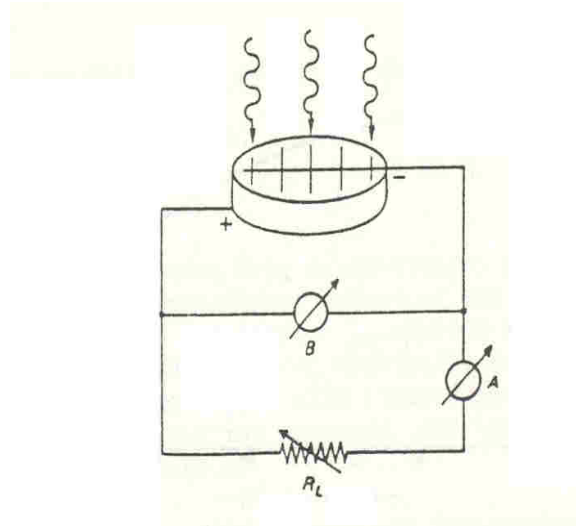
4.5 Η αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων

4.5.1 Σταθερές Συνθήκες

Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Δηλαδή, σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές (συσσωρευτές, ξηρά στοιχεία, ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, μεγάλα δίκτυα διανομής), οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά (και μη γραμμικά) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή.

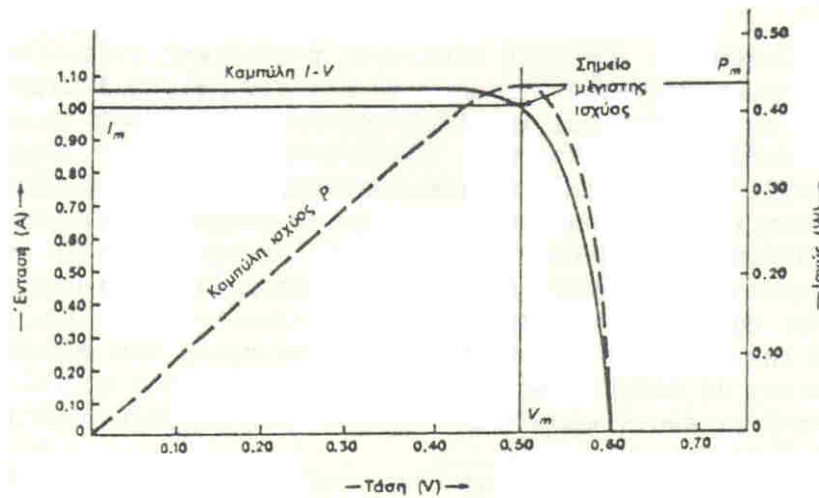
Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ας εξετάσουμε τη συμπεριφορά του όταν οι πόλοι του συνδεθούν με ένα κύκλωμα που περιέχει μια μεταβλητή αντίσταση (σχήμα 4.8).

Είδαμε παραπάνω ότι η τιμή της αντίστασης είναι μηδέν, δηλαδή στη βραχυκυκλωμένη κατάσταση, η ένταση του ρεύματος παίρνει τη μέγιστη τιμή I_{SC} , ενώ η τάση θα μηδενιστεί. Αντίθετα, όταν η τιμή της αντίστασης τείνει στο άπειρο, δηλαδή στην ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση, μηδενίζεται η ένταση του ρεύματος αλλά η τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή V_{CC} .



Σχήμα 4.8: Πειραματική διάταξη, με ένα βολτόμετρο (B), ένα αμπερόμετρο (A) και μια μεταβλητή αντίσταση (R_L), για τη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς, ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Επομένως, στη βραχυκυκλωμένη και στην ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση η ηλεκτρική ισχύς που παράγει το στοιχείο ($P = IV$) είναι μηδέν, αφού αντίστοιχα είναι μηδενική η τάση, στην πρώτη περίπτωση, και η ένταση του ρεύματος στη δεύτερη. Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης του κυκλώματος, ανάμεσα στις παραπάνω ακραίες καταστάσεις, η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές, όπως δείχνεται στο σχήμα 4.9. Παράλληλα, μεταβάλλεται ομαλά και η ισχύς που παράγει το στοιχείο, με μέγιστη P_m σε ένα ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης V_m και έντασης I_m . Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το ζεύγος αυτό καθορίζει, σε σχέση με το ζεύγος των τιμών V_{CC} και I_{SC} , τον συντελεστή απόδοσης του στοιχείου η . Επομένως από πρακτική άποψη, είναι πολύ σημαντικό ***η αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτείται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο να έχει κατάλληλη τιμή, ώστε στις συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας να παράγεται από το στοιχείο η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς.***

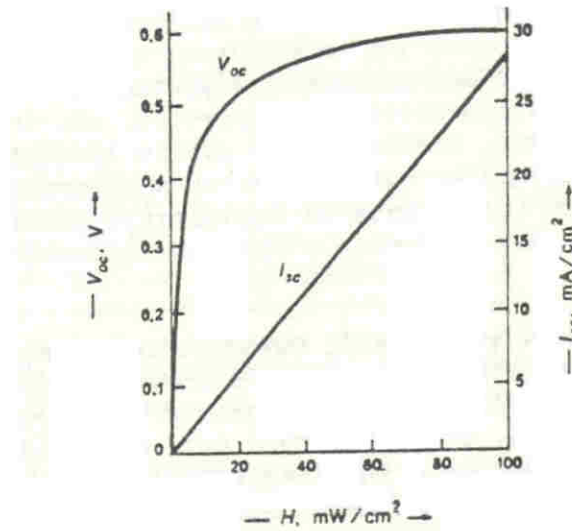


Σχήμα 4.9: Η συνεχής καμπύλη δείχνει ένα παράδειγμα της μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος (I) που παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου, σε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, και για μεταβαλλόμενη αντίσταση του κυκλώματος από μηδέν (όπου $V = 0$) μέχρι άπειρη (όπου $I = 0$). Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο (η κλίμακα της ισχύος είναι στον δεξιό άξονα του διαγράμματος). V_m και I_m είναι η τάση και η ένταση που αντιστοιχούν στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ P_m .

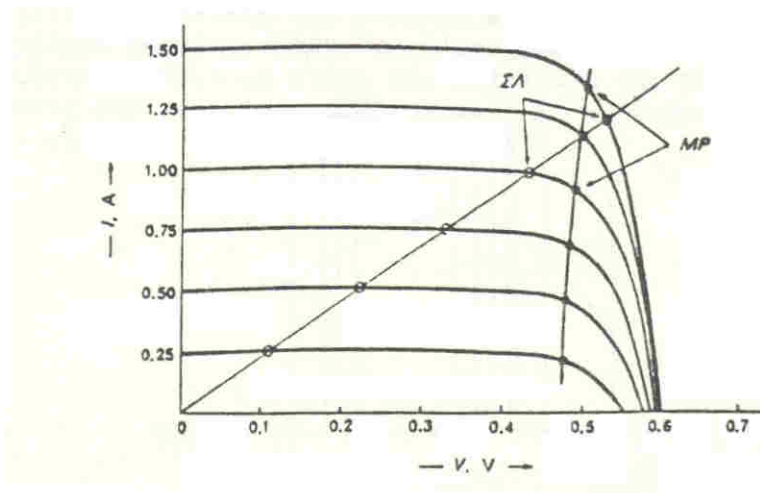
4.5.2 Μεταβαλλόμενες Συνθήκες

Τα παραπάνω αφορούν σε συνθήκες σταθερής ισχύος της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και σταθερής θερμοκρασίας του. Βλέπουμε όμως στο σχήμα 4.10 ότι η μεταβολή της πυκνότητας της ισχύος της ακτινοβολίας συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή της ανοικτοκυκλωμένης τάσης και της βραχυκυκλωμένης έντασης του ρεύματος από το μηδέν (για το σκοτάδι) μέχρι τις μέγιστες τιμές τους, για τη μέγιστη ένταση της ακτινοβολίας. Επίσης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται αισθητή μείωση της ανοικτοκυκλωμένης τάσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι θα δημιουργείται πρόβλημα για την διατήρηση της βελτιστοποίησης της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από ένα ηλιακό φωτοβολταϊκό στοιχείο κατά τη διάρκεια της ημέρας και των εποχών του έτους. Δεν είναι της στιγμής να το αναλύσουμε αλλά υπάρχουν ρυθμιστικές διατάξεις που

φέρνουν συνεχώς την τάση και την ένταση του στοιχείου, στο ευνοϊκό ζεύγος τιμών, για τις συγκεκριμένες, κάθε στιγμή συνθήκες.



Σχήμα 4.10: Η μεταβολή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης V_{OS} και της βραχυκυκλωμένης έντασης του ρεύματος I_{SC} ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου σε συνάρτηση με την ισχύ της ακτινοβολίας (H), που δέχεται ανά μονάδα της επιφάνειάς του.



Σχήμα 4.11: Η μετατόπιση των σημείων λειτουργίας (ΣΛ) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου και η απομάκρυνσή του από τα αντίστοιχα σημεία της μέγιστης ισχύος (MP) της καμπύλης έντασης (I) τάσης (V), για διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά και για σταθερή τιμή της αντίστασης του κυκλώματος

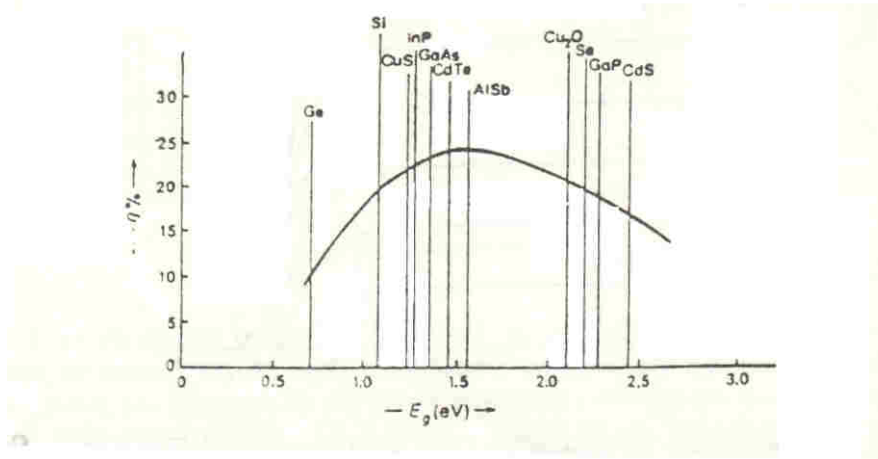
Στο σχήμα 4.11 βλέπουμε ότι για διαφορετικές πυκνότητες της ακτινοβολίας, σχηματίζεται μια οικογένεια μετατοπισμένων καμπυλών έντασης - τάσης. Είναι φανερό ότι π.χ. για την ακτινοβολία που δίνει $I_{SC} = 1,25 \text{ A}$ έχουμε περίπου $I_m = 1,1 \text{ A}$ και $V_m = 0,5 \text{ V}$ και επομένως η κατάλληλη αντίσταση του κυκλώματος για να παράγεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό στοιχείο του παραδείγματος είναι $R_L = V_m/I_m = 0.5/1.1 = 0.455 \Omega$. Η αντίσταση όμως αυτή βλέπουμε ότι είναι εντελώς ακατάλληλη για όλες τις άλλες συνθήκες ακτινοβολίας, αφού η ευθεία με κλίση 0.4555Ω τέμνει τις αντίστοιχες καμπύλες $I - V$ σε σημείο διαφορετικό από το σημείο της μέγιστης ισχύος.

Πάντως, σε κάθε περίπτωση, λόγω της πολύ μικρής τιμής του ανάστροφου ρεύματος κόρου I , η ένταση του ρεύματος που παρέχει στο κύκλωμα το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι πρακτικά ανάλογη προς την ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχεται, δηλαδή προς το γινόμενο της έντασης (της πυκνότητας ισχύος) της ακτινοβολίας επί το εμβαδόν της επιφανείας του. Επίσης, από τις διάφορες καμπύλες $I - V$ βλέπουμε ότι, με την μεταβολή της αντίστασης του κυκλώματος, η ένταση του ρεύματος παραμένει περίπου σταθερή η πυκνότητα της ακτινοβολίας. Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και η ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτώνται από τρεις μεταβλητούς παράγοντες: την ένταση της ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία του στοιχείου, και την αντίσταση του κυκλώματος. Προφανώς, στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων επιδιώκεται οι παράγοντες αυτοί να παίρνουν ευνοϊκές τιμές, ώστε να παράγεται η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς, όσο επιτρέπει ο συντελεστής απόδοσης των στοιχείων.

4.6 Αξιολόγηση των Ημιαγωγών για Ηλιακές Φωτοβολταϊκές Εφαρμογές.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένας ημιαγωγός μπορεί να απορροφήσει μόνο τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο. Και μάλιστα, από τα φωτόνια αυτά αξιοποιείται φωτοβολταϊκά το μέρος μόνο της ενέργειας τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια μετατρέπεται σε συνήθως ανεπιθύμητη θερμότητα. Επομένως, η τιμή του ενεργειακού διακένου των ημιαγωγών είναι ένα από τα κυριότερα κριτήρια που καθορίζουν την καταλληλότητα τους για να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Στο σχήμα 4.12 βλέπουμε λοιπόν ότι οι μεγαλύτερες

θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας (περίπου 25 %) μπορούν να πραγματοποιηθούν σε φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5 eV. Ένα άλλο πολύ σημαντικό κριτήριο είναι το είδος του ενεργειακού



Σχήμα 4.12: Η θεωρητική απόδοση (η) των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε συνάρτηση με το ενεργειακό διάκενο (E_g) του ημιαγωγού από τον οποίο είναι κατασκευασμένα. Άλλο θεωρητικοί υπολογισμοί δίνουν ελαφρά διαφορετικές τιμές για την απόδοση των ίδιων στοιχείων.

διακένου του ημιαγωγού, δηλαδή αν είναι άμεσο ή έμμεσο. Τα φωτόνια απορροφούνται ευκολότερα στους ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού διακένου και έτσι το φωτοβολταϊκό στοιχείο δεν χρειάζεται να έχει μεγάλο πάχος, με αποτέλεσμα να μπορεί να γίνει μεγάλη εξοικονόμηση υλικού.

Π.χ. στο αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) που είναι ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακένου, για να απορροφηθεί το 80 % των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο (1.43 eV), αρκεί στρώμα πάχους $1\mu\text{m}$, ενώ αντίστοιχα στο πυρίτιο (Si) χρειάζεται στρώμα πάχους περίπου $100\mu\text{m}$. Αυτό άλλωστε δείχθηκε και στο σχήμα 4.2 όπου είναι ότι ο συντελεστής απορρόφησης στο GaAs, για τα φωτόνια που μας ενδιαφέρουν, είναι 10 ή περισσότερες φορές μεγαλύτερος από του Si.

Άλλα σημαντικά κριτήρια για την αξιολόγηση των ημιαγωγών αλλά και των υπολοίπων υλικών κατασκευής των ηλιακών στοιχείων, είναι το κόστος της παραγωγής τους, η σταθερότητά τους στην επίδραση των εξωτερικών συνθηκών, και κυρίως της υγρασίας και της θερμότητας, η τοξικότητα των διαφόρων συστατικών, το ειδικό τους βάρος κ.λπ.

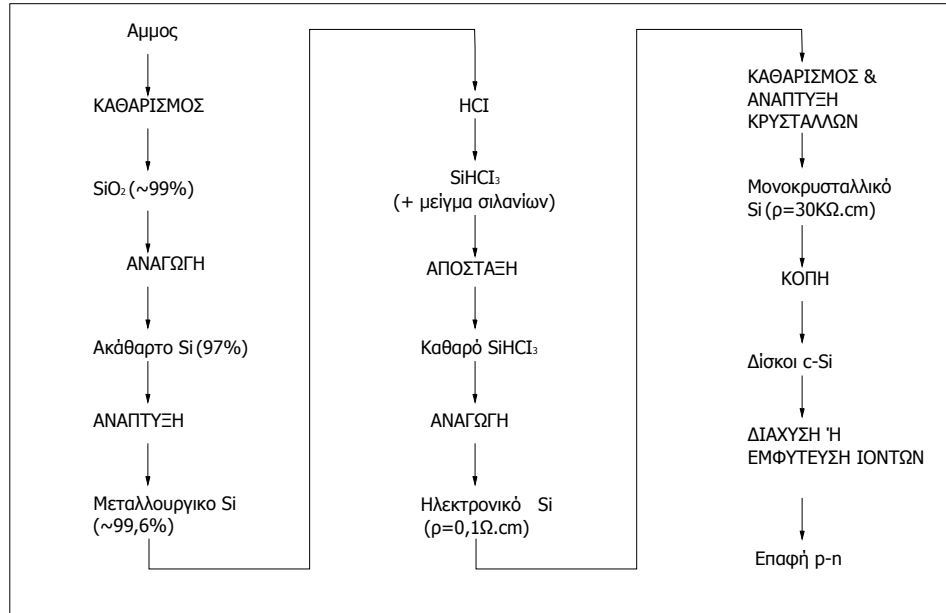
Όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, από τα πολλά ημιαγώγιμα υλικά που έχουν ως τώρα μελετηθεί για ηλιακή φωτοβολταϊκή μετατροπή, μεγάλη εφαρμογή έχει βρει μόνο το πυρίτιο, αν και άλλοι ημιαγωγοί έχουν δώσει καλύτερες αποδόσεις πίνακας 4.1.

Υλικό	Τύπος στοιχείου	Μέγιστη απόδοση σε ακτινοβολία AM1
n-Ga _{0.3} Al _{0.7} As/p-GaAs	Ομοιοένωση-ετεροδομή	24%
GaAs	Ομοιοένωση	22%
n-AlAs/p-GaAs	Ετεροένωση	18,5%
Si (μονοκρυσταλλικό)	Ομοιοένωση	18%
Si (πολυκρυσταλλικό)	Ομοιοένωση	16%
Au/Si ₃ N ₄ /p-Si	Σότκυ	10%
p-Cu _x S/n-CdS	Ετεροένωση	10%

Πίνακας 4.1: Οι μεγαλύτερες αποδόσεις φωτοβολταϊκής μετατροπής (πάνω από 10 %), που έχουν πραγματοποιηθεί με ηλιακά στοιχεία, σε εργαστηριακές συνθήκες.

4.6.1. Φωτοβολταϊκά στοιχεία Πυρίτιου

Το υλικό, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία των Φ/Β κυψελίδων, είναι το Πυρίτιο (Si), του οποίου οι διαδοχικές εργασίες καθαρισμού της πρώτης ύλης, της άμμου, παρουσιάζονται στο σχήμα 43. Στην άμμο, το πυρίτιο περιέχεται με τη μορφή του οξειδίου του πυρίτιου (SiO₂). Το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται από υψηλή καθαρότητα (99,999999 %).



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα ροής εργασιών παραγωγής ηλεκτρονικά καθαρού πυριτίου, με την μορφή κυλίνδρου, με πρώτη ύλη την άμμο.

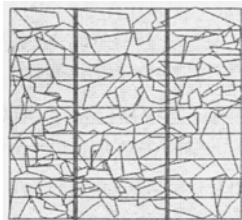
Τα Φ/Β στοιχεία Πυριτίου, διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο παρασκευής. Οι διαφορετικοί τύποι είναι οι εξής:

1. *Φ/Β στοιχεία κρυσταλλικού Πυριτίου (Single-crystal Silicon):* Το βασικό υλικό είναι μονοκρυσταλλικό. Το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (Wafer - 300 μm). Η απόδοση τους κυμαίνεται μεταξύ 13 έως 15%, ενώ τον τελευταίο καιρό διατίθενται και με αυξημένη και σταθερή απόδοση περίπου 16 %. Χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής. Χρώμα: Σκούρο μπλε.
2. *Φ/Β στοιχεία πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (Polycrystalline Silicon):* Δυνατότητα κατασκευής μεγάλων επιφανειών. Συνήθως κόβονται σε τετραγωνικής μορφής στοιχεία. Λεπτά επιστρώματα (10 έως 50 μm). Στην επιφάνειά της κυψελίδας, διακρίνονται οι διαφορετικές μονο-κρυσταλλικές περιοχές. Τα όριά τους αποτελούν θέσεις παγίδευσης των φορέων. Άρα, όσο μικρότερο το συνολικό μήκος των οριακών περιοχών μέσα στο δεδομένης διάστασης Φ/Β στοιχείο, τόσο καλύτερη η ηλεκτρική αγωγιμότητά τους. Συμπερασματικά, όσο μεγαλύτερες οι διαστάσεις των

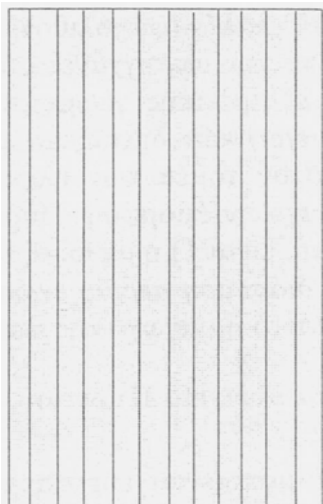
μονο-κρυσταλλικών περιοχών του πολύ-κρυσταλλικού Φ/Β στοιχείου, τόσο καλύτερη η ηλεκτρική μετατροπή (απόδοση) του φωτός, η οποία κυμαίνεται από 10% έως και 14% και χαρακτηρίζεται από χρονική σταθερότητα. Το κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονο-κρυσταλλικού πυριτίου. Το γαλάζιο χρώμα τους συμβάλλει στην δημιουργία μιας περισσότερο αποδεκτής αισθητικής και φυσικά στην πιο αρμονική ενσωμάτωση τους στις κατοικίες.

3. *Φ/Β στοιχεία ταινίας (Ribbon Silicon)*: Δημιουργία λεπτής ταινίας από τηγμένο υλικό. Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο με απόδοση περί το 13%. Μέθοδος υψηλού κόστους και προς το παρόν, περιορισμένης βιομηχανικής παραγωγής.

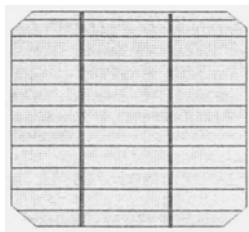
4. *Φ/Β στοιχεία άμορφου Πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon)*: Πολλά υποσχόμενη τεχνολογία λεπτών υμενίων (films), θεωρητικά πολύ χαμηλού κόστους παραγωγής. Απόδοση σήμερα σταθεροποιημένη περί το 10%. Σε σύνθετα Φ/Β στοιχεία, με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα για αύξηση αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος καθώς και Φ/Β στοιχεία από κράμα Πυριτίου με Άνθρακα και Γερμάνιο, τριών επαφών, a-SiGe (-1,4eV) a-SiC (1,85eV). Χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα δημιουργίας Φ/Β στοιχείων μεγάλων επιφανειών (Σχήμα 4.14).



Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο



Άμορφο Πυρίτιο



Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο

Σχήμα 4.14: Τα διάφορα είδη Φ/Β στοιχείων πυριτίου

4.6.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άλλων υλικών, λεπτών επιστρώσεων

Εκτός από τα Φ/Β στοιχεία Πυριτίου, λεπτής επίστρωσης (α -Si:H), τα οποία σήμερα αποτελούν τα περισσότερο διαδεδομένα στον κόσμο, εξ αιτίας των, πράγματι αξιόλογων χαρακτηριστικών τους, κατασκευάζονται Φ/Β στοιχεία από άλλα υλικά. Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει τα πιο σημαντικά απ' αυτά τα Φ/Β στοιχεία, το καθένα με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά του.

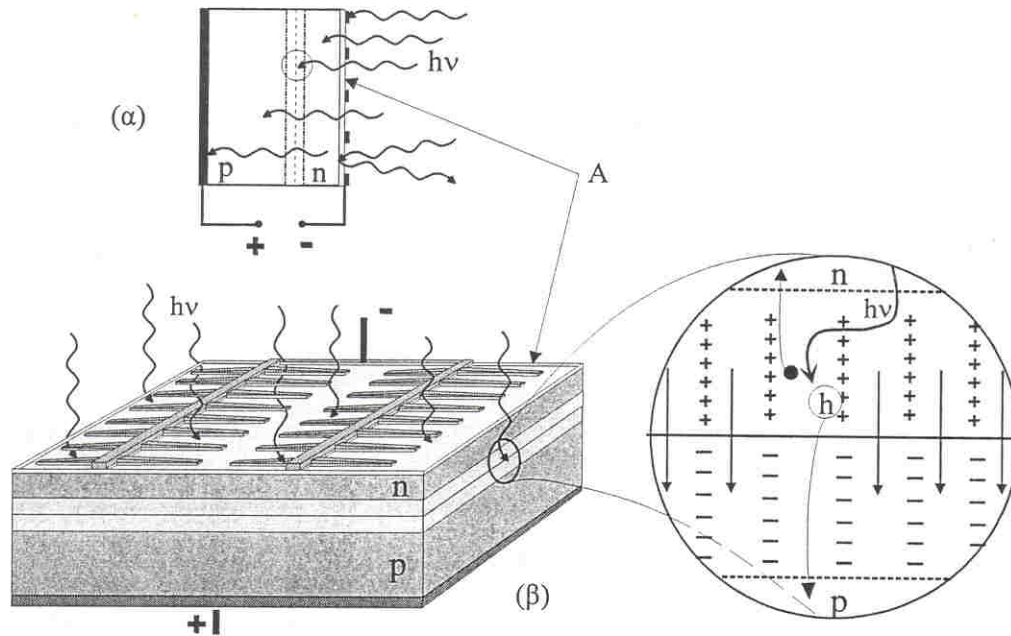
4.6.2.1 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες του Φ/Β στοιχείου. Αντιανακλαστική επίστρωση.

i. Η όψη του Φ/Β καλύπτεται από διαφανή ουσία (π.χ. SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Si_3N_4 , MgF_2), η οποία χαρακτηρίζεται από δείκτη διάθλασης τέτοιο ώστε, για μια περιοχή μηκών κύματος, συνήθως γύρω από τα 600 nm, κοντά στο μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας (480 nm), να ελαχιστοποιείται

η ανακλώμενη συνιστώσα του φωτός (Αντιανακλαστική επίστρωση).

ii. Το πάχος του Φ/Β στοιχείου περιορίζεται, στην ενεργή περιοχή του, στην οποία δηλαδή, η απορροφούμενη Η/Μ ακτινοβολία δίδει το Φ/Β φαινόμενο. Αυτή, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι η περιοχή απογύμνωσης αυξημένη κατά το άθροισμα των μηκών διάχυσης κατά Debye, για τα ηλεκτρόνια και τις οπές, στα τμήματα που αυτά αποτελούν φορείς μειονότητας, L_e και L_h .

iii. Τα μεταλλικά ηλεκτρόδια συλλογής των φορέων (Σχήμα 4.15(α)), πρέπει να βρίσκονται κοντά



Σχήμα 4.15: Δομή ενός τυπικού Φ/Β στοιχείου. α) Εγκάρσια τομή της κυψελίδας, όπου δείχνονται διάφορες θέσεις απορρόφησης φωτονίων καθώς επίσης τα διαδοχικά στρώματα, απ'τα οποία αποτελείται. Το ηλεκτρόδιο όψεως, το αντιανακλαστικό στρώμα, A, τα στρώματα n και p του ημιαγωγού και τέλος το ηλεκτρόδιο πίσω πλευράς. Δείχνονται επίσης οι διάφορες θέσεις πιθανής απορρόφησης – ανάκλασης των φωτονίων που προσπίπτουν σ'αυτή. β) Σχηματική παράσταση σε τρεις διαστάσεις, του Φ/Β στοιχείου. Το τμήμα μέσα στο μικρό κύκλο δείχνεται σε μεγέθυνση στον μεγάλο κύκλο. Σημειώνεται η απορρόφηση ενός φωτονίου μέσα στην περιοχή απογύμνωσης, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ηλεκτρονίου και μιας οπής, που ωθούνται, από το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής, προς τους χώρους όπου μπορούν να επιζήσουν, ως φορείς πλειονότητας, δημιουργώντας το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

στην ενεργή περιοχή. Το πίσω ηλεκτρόδιο καλύπτει όλη την έκταση του Φ/Β και συνήθως αποτελείται, για λόγους κόστους και βάρους της διάταξης, από σχετικά πυκνό λεπτό δικτυωτό μεταλλικό πλέγμα. Το πλέγμα, που τοποθετείται στην όψη πρόσπτωσης του φωτός, πρέπει να

έχει το σχήμα αραιής μεταλλικής σχάρας, με μορφή χτενιού ή σκελετού ψαριού, έτσι ώστε, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς να συλλέγονται απ' όλη την έκταση της επιφάνειας όψεως του Φ/Β στοιχείου, προκαλώντας, ταυτόχρονα, την ελάχιστη δυνατή μείωση στη διέλευση του φωτός (μείωση περίπου 5 - 10%). Η BP SOLAR πρότεινε το 1997 ειδικό τρόπο δημιουργίας μεταλλικών ηλεκτροδίων όψεως, που μειώνει σε 2% την «σκίαση» του Φ/Β στοιχείου. Συνήθως, η διατομή των τελικών μεταλλικών απολήξεων αυξάνει προς την κατεύθυνση του κεντρικού ηλεκτροδίου, επειδή προς αυτή την κατεύθυνση αυξάνει το συλλεγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

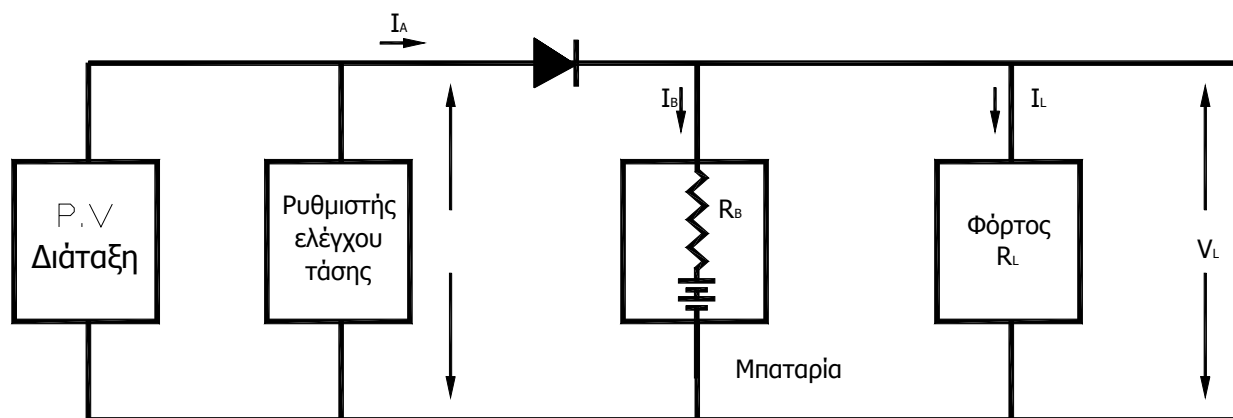
Πολύ σημαντικές προοπτικές για σύντομη ανάπτυξη έχουν επίσης το θειούχο γάλλιο λόγω μεγάλης απόδοσης. Πάντως η ερευνητική αναζήτηση συνεχίζεται έντονη με στόχο την ανακάλυψη και άλλων υλικών, ίσως οργανικής σύστασης, που ενδεχομένως να συνδυάζουν χαμηλό κόστος, εύκολη εφαρμογή και αξιόλογη απόδοση.

5. ΦΟΡΤΙΣΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

5.1 Μαθηματική διερεύνηση των καταστάσεων λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με την παρουσία μπαταρίας

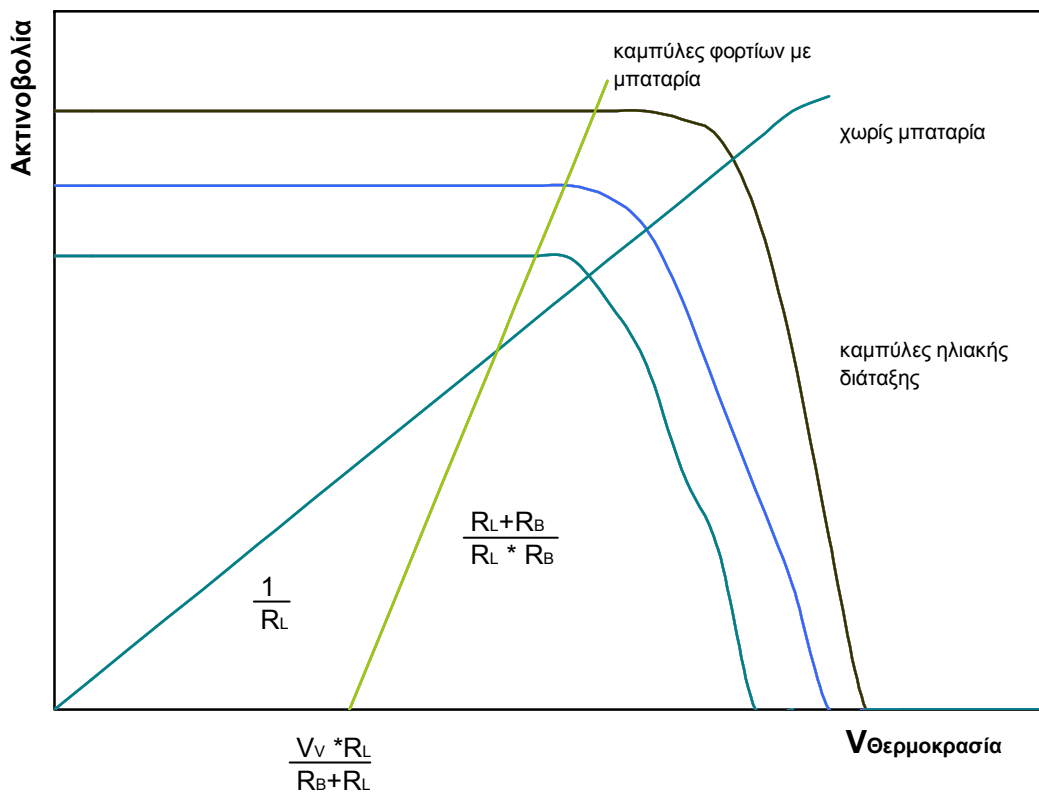
Ένα απλό αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος αποτελείται από ένα σύστημα ηλιακών κυψελίδων, μια μπαταρία φόρτισης, ένα ρυθμιστή ελέγχου τάσης μια δίοδο αποκλεισμού και ένα φόρτο. Ο ρυθμιστής ελέγχου τάσης ρυθμίζει την τάση της διάταξης συνδέοντας και αποσυνδέοντας μια σειρά καλωδίων στην ηλιακή γεννήτρια.

Η δίοδος ελέγχει τη διεύθυνση της ενέργειας ανάμεσα στη γεννήτρια και το υπόλοιπο σύστημα για να αποφεύγεται η εκφόρτιση της μπαταρίας διαμέσου της γεννήτριας με επακόλουθο το χάσιμο της ενέργειας και ακόμα την καταστροφή της διάταξης.



Σχήμα 5.1: Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα.

Το σύστημα λειτουργίας εξαρτάται βασικά από την ηλεκτρική αλληλεπίδραση της γεννήτριας, της μπαταρίας και του φορτίου που μπορούν να επεξηγηθούν χρησιμοποιώντας διάγραμμα τάσης – ρεύματος. Το σχήμα 5.1 δείχνει I – V χαρακτηριστικά της διάταξης με τις απαραίτητες ευθείες φόρτου για απλές αντιστάσεις φόρτου. Το σημείο λειτουργίας του συστήματος βρίσκεται από την I – V καμπύλη και την ευθεία φόρτου (είναι το σημείο τομής τους). Το ρεύμα της φωτοβολταϊκής γεννήτριας είναι ανάλογο της ακτινοβολίας και η τάση εξαρτάται από την θερμοκρασία της διάταξης και λιγότερο από την ακτινοβολία. Η ισχύς εξόδου της διάταξης ανέρχεται από την τιμή 0 της V(I) σε ένα μέγισμου της καμπύλης στο «γόνατο» της καμπύλης.



σχήμα 5.2: I – V χαρακτηριστική αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

Έτσι εάν η λειτουργία της διάταξης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, πρέπει να λειτουργεί όσο το δυνατόν κοντύτερα στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Για να καταλάβουμε καλύτερα τα αποτελέσματα της μπαταρίας ας δούμε πρώτα με μαθηματικό τόπο την ροή ενέργειας. Με απουσία του ρυθμιστή ελέγχου τάσης η ενέργεια από το απλό μοντέλο του σχήματος 5.1 μπορεί να απεικονισθεί από τις παρακάτω τρεις καταστάσεις:

1. Φόρτιση μπαταρίας

$$V_L = V_A - V_D = V_B + I_B \cdot R_B \quad I_A > 0 \quad I_B > 0 \quad V_A > V_B$$

2. Εκφόρτιση μπαταρίας και ισχύς από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια

$$V_L = V_A - V_D = V_B - (|I_B| \cdot R_B)$$

$$I_A > 0 \quad I_B < 0 \quad \text{και} \quad V_A > V_B > R_L \cdot V_B / R_L + R_B$$

3. Εκφόρτιση μπαταρίας και όχι ισχύς από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια

$$V_L = V_B - (|I_B| \cdot R_B) = R_L \cdot V_B / R_L + R_B$$

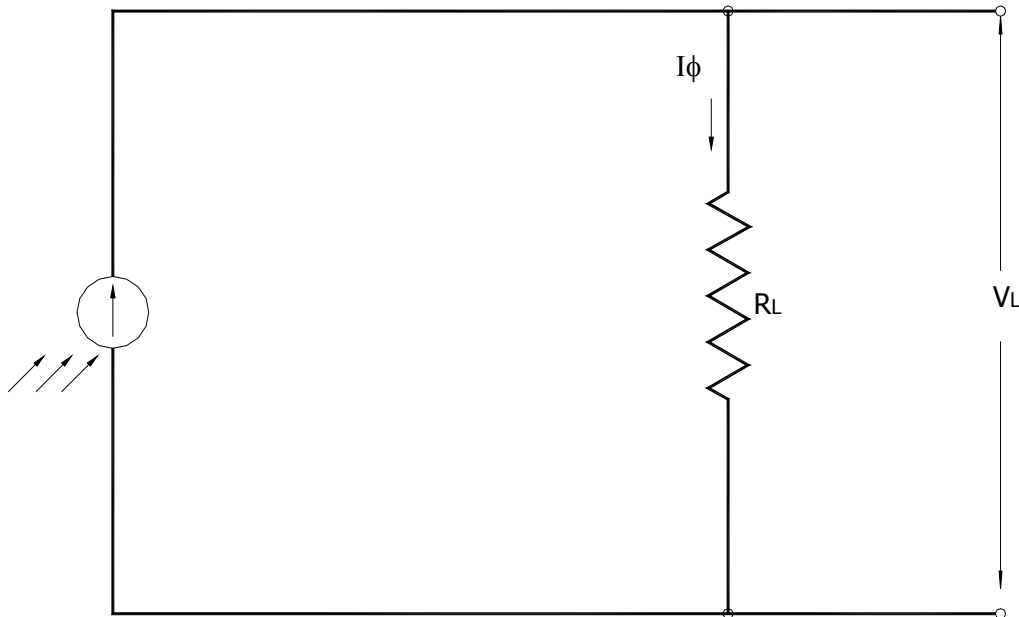
$$I_A = 0 \quad I_B < 0 \quad \text{και} \quad V_A > V_B < R_L \cdot V_B / R_L + R_B$$

Οι παραπάνω εξισώσεις περιγράφουν σε γενικές γραμμές τη ροή ενέργειας σε ένα απλό αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα όμοιο μ' αυτό του σχήματος 5.1. Όταν οι τάσεις είναι μεγάλες όπως ας πούμε 120 V_{dc} ή μεγαλύτερες, τότε η πτώση τάσης στη δίοδο είναι σχετικά μικρή και μπορεί να αγνοηθεί σε κάθε περαιτέρω ανάλυση.

Το σημείο λειτουργίας V_L εξαρτάται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια, τη μπαταρία και το φόρτο. Η παρουσία και τα αποτελέσματα θα γίνουν παρακάτω.

5.2 Ανάλυση του ηλεκτρικού κυκλώματος σε ένα απλό αυτόνομο Φ/Β σύστημα.

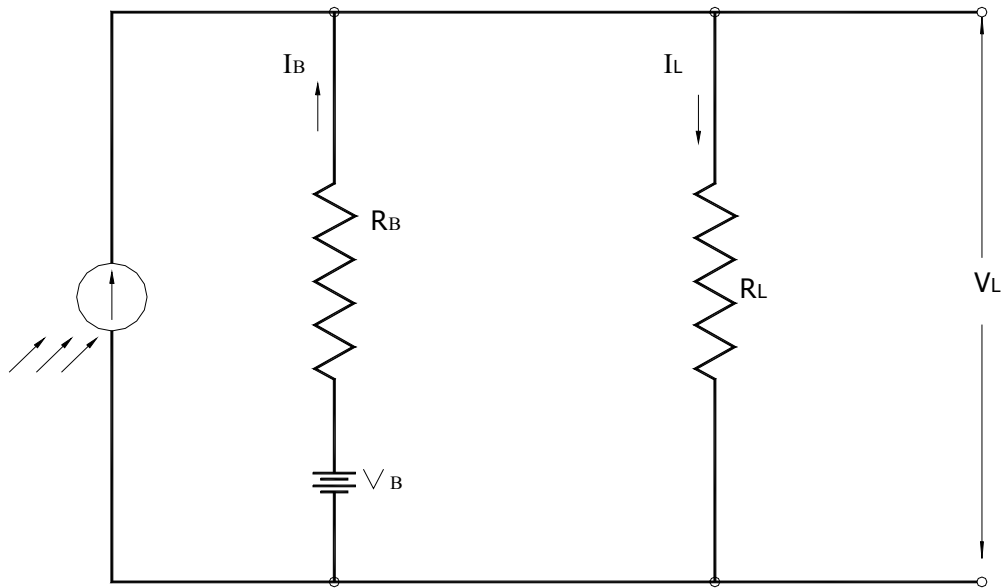
Εάν δεν υπάρχει μπαταρία, ο ρυθμιστής τάσης και η διόδος παρεμπόδισης, ένα απλό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα από το απλό σύστημα του σχήματος 5.1 δείχνεται στο σχήμα 5.3



σχήμα 5.3 : Ισοδύναμο κύκλωμα από ένα SAPV χωρίς μπαταρία.

Η ανάλυση του κυκλώματος μας λέει ότι εάν δεν υπάρχει μπαταρία στο σύστημα η ευθεία φόρτου περνάει από την αρχή και έχει κλίση $1/ R_L$ όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.

Ένα απλό ισοδύναμο κύκλωμα όταν η μπαταρία είναι παρούσα φαίνεται στο σχήμα 5.4



σχήμα 5.4 : Ισοδύναμο SAPV κύκλωμα.

Γι' αυτή τη διαμόρφωση του SAPV έχουμε τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_L = I_A + I_B \quad V_L = V_B - I_B \cdot R_B \quad I_L = V_L / R_L$$

Η ευθεία φόρτου μπορεί εύκολα να καθοριστεί από τις παραπάνω εξισώσεις και βρίσκεται να είναι:

$$I_L = \left(\frac{R_B + R_L}{R_B \cdot R_L} \right) \cdot V_B$$

με κλίση

$$\frac{R_B + R_L}{R_B \cdot R_L}$$

Πρέπει ακόμα να σκεφτούμε τα αποτελέσματα της αύξησης ή μείωσης στην ισχύ εξόδου του συστήματος . Η παρουσία της μπαταρίας παίζει επίσης σπουδαίο ρόλο σε τέτοια ανάλυση. Μια προκαταρκτική μαθηματική επεξεργασία μας δίνει ότι όσο πιο απότομη είναι η κλίση της

ευθείας φόρτου, τόσο λιγότερο είναι τα αποτελέσματα στο επίπεδο του ρεύματος το οποίο προκαλείται από την αλλαγή στην ένταση της ακτινοβολίας στο σημείο λειτουργίας και επομένως σε ολόκληρο το σύστημα .

Ένα ενδιαφέρον τελικό αποτέλεσμα είναι: Για ένα δοσμένο φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος εάν το ρεύμα εξόδου I αλλάζει εξαιτίας της ακτινοβολίας η τάση εξόδου του συστήματος V_{out} με μπαταρία αλλάζει λιγότερο από σύστημα χωρίς μπαταρία.

5.3. Ρυθμιστής φόρτισης

Οι τεχνικές με τις οποίες οι μπαταρίες φορτίζονται μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι πολλές. Ο πιο απλός και λιγότερο ακριβός τρόπος είναι η κατευθείαν σύνδεση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας με την μπαταρία.

Αυτή είναι μία μέθοδος που τα αποτελέσματά της "κοστίζουν ακριβά" γιατί το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί σαν μονοπάτι στο οποίο διαχέεται η ενέργεια και έτσι η μπαταρία μπορεί να ξεφορτιστεί σταδιακά κατά τη διάρκεια της νύχτας από την ενέργεια που έχει συσσωρευτεί την προηγούμενη μέρα.

Για να αποφευχθεί αυτή η διαρροή, συνδέεται μία δίοδος παρεμπόδισης ανάμεσα στο Φ/Β σύστημα και την μπαταρία. Έτσι πετυχαίνουμε να φορτίζουμε από το Φ/Β την μπαταρία την ημέρα και με τη δίοδο εμποδίζουμε την διαρροή τη νύχτα.

Αλλά παρ' όλα αυτά η χρήση ρυθμιστών (regulators) είναι απαραίτητη. Ρυθμιστής λέγεται το σύστημα που καθορίζει τη μέγιστη τάση που φορτίζεται η μπαταρία και που συνήθως δίνεται από τον κατασκευαστή της .

Εάν η ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας ήταν σταθερή οι ρυθμιστές δεν θα χρειάζονται. Αλλά παράγοντες όπως ο καιρός, οι εποχιακές διαφορές, οι συννεφίες και οι αλλαγές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος τείνουν να κάνουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα περισσότερο δυναμικές πηγές ενέργειας. Ας υποθέσουμε ότι ένα φωτοβολταϊκό σύστημα υπολογίζεται για χειμερινές συνθήκες όπου η ακτινοβολία είναι 50% λιγότερη από τις τιμές του καλοκαιριού. Τότε κατά τους καλοκαιρινούς μήνες θα παράγεται ένα σημαντικά μεγαλύτερο ποσό ενέργειας.

Αν αυτή η αύξηση της ενέργειας δεν διοχετευτεί σ' ένα πρόσθετο φόρτο τότε μπορεί να προκληθεί σημαντικά μεγάλη ζημιά στη μπαταρία. Όταν τα φωτοβολταϊκά παράγουν περισσότερη ενέργεια σ' ένα 24ωρο απ' όσο έχει υπολογιστεί, τότε οι μπαταρίες μπορεί σε κάποιο πρωινό να φτάσουν στο μέγιστο σημείο φόρτισης. Το μεσημέρι η υπερβολική ενέργεια απ' τα φωτοβολταϊκά θα προκαλέσουν στις μπαταρίες υπερφόρτωση. Αποτέλεσμα αυτού είναι να έχω υπερβολική εξαέρωση και ταυτόχρονα την απώλεια του ηλεκτρολύτη.

Επίσης άλλα φυσιολογικά αποτελέσματα είναι το στράβωμα των ηλεκτροδίων ή την καταστροφή της επίστρωσης των πλακών.

Άρα λοιπόν σ' ένα φωτοβολταϊκό σύστημα όπου οι συνθήκες φόρτισης είναι απρόβλεπτες και όταν είναι ρυθμισμένο να λειτουργεί είτε σε συνθήκες με μέση ηλιοφάνεια ή πολύ ηλιοφάνεια

και σε διαφορετικές εποχές οι ρυθμιστές είναι απαραίτητοι για να προστατεύουν τις μπαταρίες.

5.3.1. Είδη ρυθμιστών

Είδαμε λοιπόν ότι η χρησιμοποίηση ρυθμιστών είναι απαραίτητη για την ασφαλή λειτουργία των μπαταριών.

Το να επιλέξουμε τον κατάλληλο ρυθμιστή είναι ένα αρκετά πολύπλοκο θέμα και πρέπει να λάβουμε υπόψη μας πολλούς παράγοντες. Ο ρυθμιστής γενικά είναι ένα σύστημα μηχανικό ή ηλεκτρικό που σκοπό έχει να προστατεύσει από υπερβολική φόρτιση την μπαταρία και ταυτόχρονα να πετυχαίνουμε το μέγιστο σημείο φόρτισης γι' αυτή τη μπαταρία. Εκτός από αυτά όμως μπορούμε να πετύχουμε και άλλα πράγματα όπως έργο παροχής ισχύος στο φόρτο, ένταση βλάβης.

Γενικά χρησιμοποιούμε δύο τεχνικές για να πετύχουμε τον έλεγχο του φωτοβολταϊκού συστήματος με

- ηλεκτρονόμους (relay regulators) και
- ηλεκτρονικούς ρυθμιστές (solid state regulators).

Η μελέτη των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του κάθε τύπου σε συσχέτισμό με τις απαιτήσεις της εφαρμογής που το θέλουμε, θα μας οδηγήσουν στη σωστή εκλογή.

5.3.2. Μελέτη δύο ειδικών τύπων

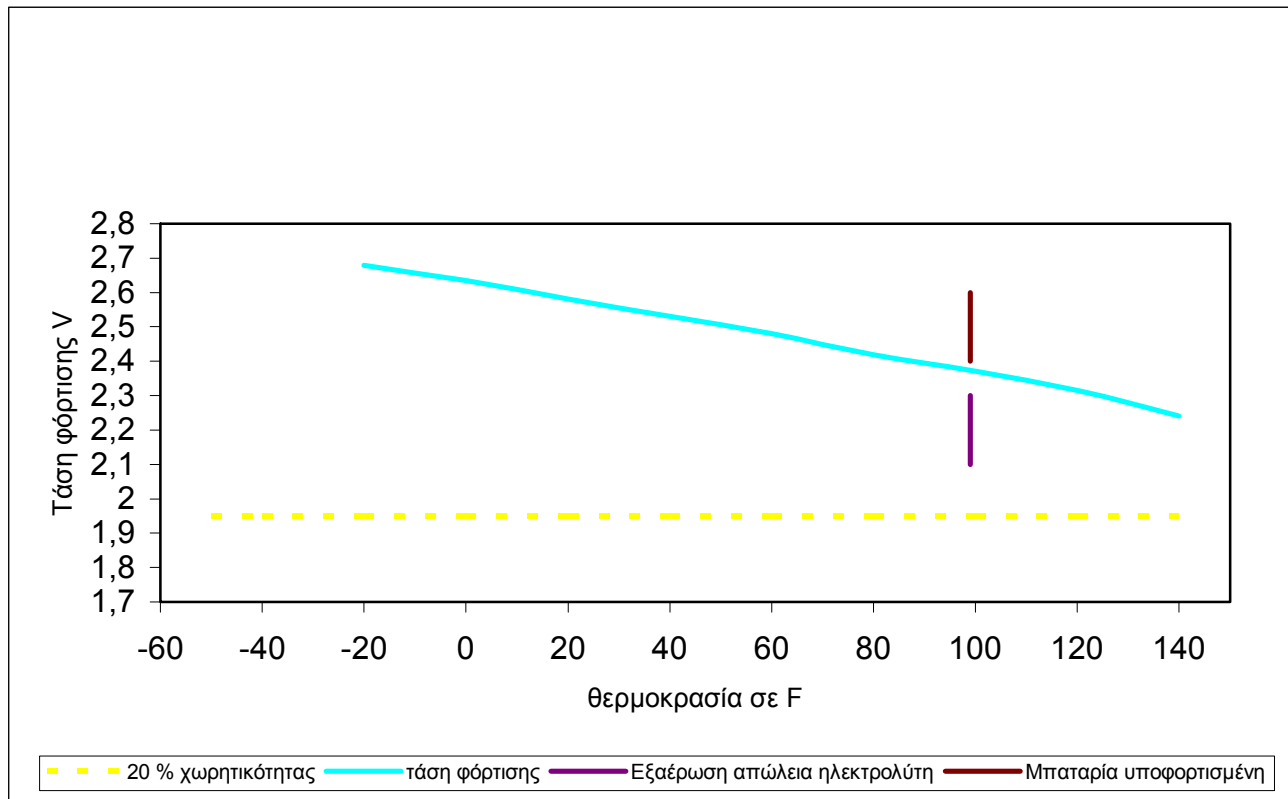
5.3.2.1. Κύριο κύκλωμα ελέγχου ρυθμιστή φόρτισης

Ανήκει στην κατηγορία ρυθμιστών με παλμούς βραχυκύκλωσης (switching shunt). Αυτή η κατηγορία ρυθμιστών έχει ενσωματωμένο ένα αισθητήρα θερμοκρασίας για να εξασφαλίζει όσο το δυνατό καλύτερα την φόρτιση της μπαταρίας σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας της μπαταρίας. Πολλοί τύποι μπαταριών χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα και καθένας έχει κάποια τιμή πλήρους φόρτισης που εξαρτάται από την θερμοκρασία της μπαταρίας.

Αποτυχία στη φόρτιση της μπαταρίας σύμφωνα με τη θερμοκρασία της μπορεί να προκαλέσει σοβαρά αποτελέσματα στον χρόνο ζωής της μπαταρίας - και στο σημείο φόρτισης-εκφόρτισης.

Ο ρυθμιστής παλμών βραχυκύκλωσης πλεονεκτεί σε όλες τις Φ/Β γεννήτριες. Μόλις οι ακροδέκτες εξόδου της φωτοβολταϊκής μονάδας βραχυκυκλωθούν, η τάση εκεί γίνεται μηδέν και το ρεύμα στη φωτοβολταϊκή μονάδα γίνεται μέγιστο. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{cs}) είναι για κάθε φωτοβολταϊκή μονάδα μία γνωστή παράμετρος και απαραίτητη.

Όταν η μπαταρία φτάσει στην κατάσταση πλήρους φόρτισης η τάση στα άκρα της θα είναι, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5.

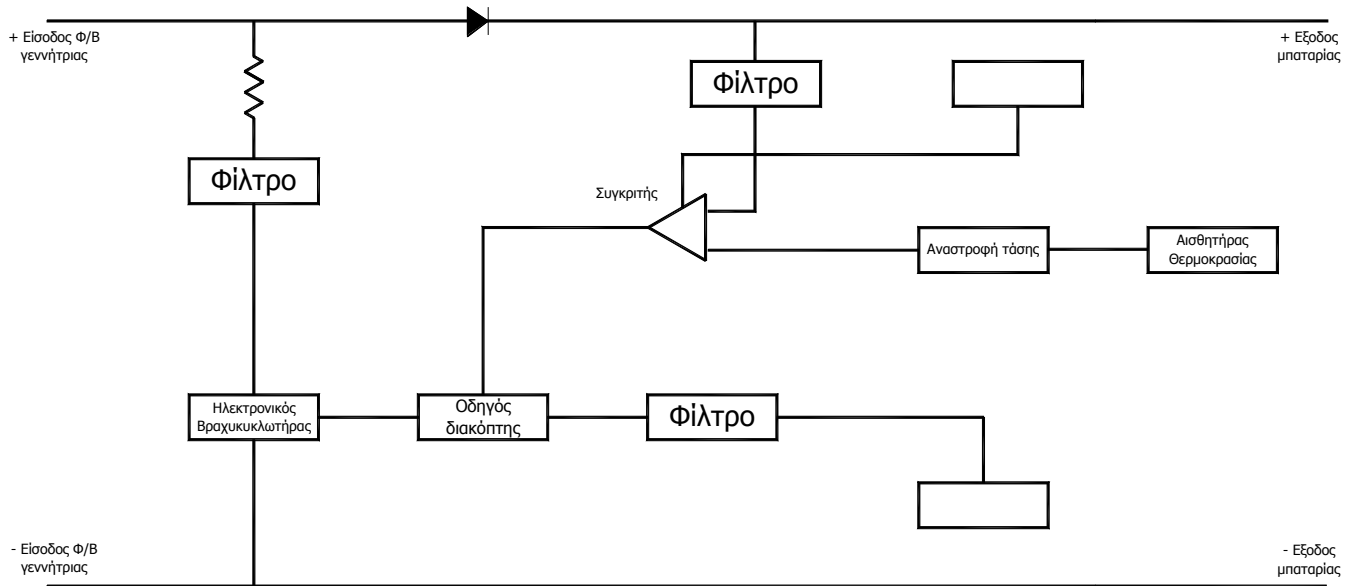


σχήμα 5.5 : Τάση φόρτισης ανά κυψελίδα σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Για να αποφύγουμε την υπερφόρτωση που έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια του ηλεκτρολύτη ο κύριος ρυθμιστής φόρτισης ανοίγει μία ακίνητη μονάδα διακόπτη η οποία φαίνεται στο σχήμα 5.6.

Αυτό προκαλεί το ρεύμα εξόδου από τη Φ/Β μονάδα να βραχυκυκλώνεται με τη γη. Η έξοδος της φωτοβολταϊκής μονάδας μειώνεται στο ρεύμα του βραχυκυκλωμένου κυκλώματος (I_{sc}). Η τάση εξόδου πέφτει στην τάση κόρου της ακίνητης μονάδας με ρόλο διακόπτη. Η ισχύς

που διασκορπίζεται και χάνεται είναι επομένως αμελητέα συγκρινόμενη με εκείνη που θα χανόταν εάν δεν υπήρχε ο κύριος ρυθμιστής.



σχήμα 5.6 : Σχηματικό διάγραμμα κύριου ρυθμιστή.

Έτσι εξασφαλίζει ψύξη και πιο θετική λειτουργία.

Ο αισθητήρας θερμοκρασίας του κύριου ρυθμιστή επιτρέπει ακριβή επανόρθωση της τελικής τάσης φόρτισης της μπαταρίας.

5.3.2.2 Ηλεκτρονικοί ρυθμιστές (solid state regulators)

Πολλά συστήματα απαιτούν την χρήση ρυθμιστών με όχι κινούμενα μέρη. Εδώ προφανώς τα συστήματα που περιγράψαμε δεν κάνουν. Σ' αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ρυθμιστής με ακίνητα μέρη. Υπάρχουν τρεις τύποι: σειράς, βραχυκυκλώσεις και παλμών

Στον πρώτο τύπο ένα τρανζίστορ ισχύος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής του ρεύματος στη διάταξη. Όπως και στον τύπο των ηλεκτρονόμων μια μονάδα δύο θέσεων προστατεύει την πιο αποδοτική μονάδα φόρτισης.

Στον δεύτερο τύπο οι ρυθμιστές λειτουργούν εκτρέποντας τις διατάξεις ισχύος μακριά από τις μπαταρίες μόλις οι μπαταρίες φορτιστούν εντελώς. Αυτή η εκτροπή συνήθως πραγματοποιείται:

- 1) γειώνοντας την διάταξη από την πλευρά που είναι η δίοδος παρεμπόδισης,
- 2) προκαλώντας την διασκόρπιση της ισχύος σαν θερμοκρασία στο βραχυκυκλωμένο τρανζίστορ.

Για να αποφύγουμε την εξαέρωση οι ρυθμιστές βραχυκύκλωσης συνήθως ρυθμίζονται να σταματούν μόλις κάτω από το σημείο εξαέρωσης. Δυστυχώς αυτό μπορεί να επιτρέψει τη δημιουργία στρωμάτωσης σε μεγάλες μπαταρίες και έτσι μπορεί να σταματάει η φόρτιση προτού οι μπαταρίες φορτιστούν εντελώς. Είναι επομένως σπουδαίο να διαλέξουμε την τάση αποκοπής προσεκτικά και σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

Ο τρίτος τέλος τύπος φορτίζει τα συστήματα μπαταριών με γρήγορα ανοικτο-κλεισίματα της ολοκληρωμένης μονάδας εξόδου της μπαταρίας. Για αφόρτιστες μπαταρίες το στοιχείο ανοικτο-κλεισίματος είναι ανοικτό για περισσότερο χρόνο απ' ότι κλειστό. Όσο η κατάσταση φόρτισης αυξάνει, το ρεύμα στη διάταξη μικραίνει Σ' αυτή την κατάσταση μία προσεκτική μονάδα ελέγχου φόρτισης χρησιμοποιείται

5.3.2.3. Ρυθμιστές με ηλεκτρονόμους

Αυτός ο τύπος χρησιμοποιεί ηλεκτρονόμους για να ελέγχει τη ροή του ρεύματος από τη Φ/Β μονάδα. Τυπικά λειτουργεί ως εξής:

Όταν ο ήλιος ανατέλλει το πρωί ο ηλεκτρονόμος κλείνει κύκλωμα με τη φωτοβολταϊκή μονάδα απ' ευθείας με την μπαταρία. Η συνδεσμολογία των ηλεκτρονόμων γίνεται εν σειρά γι' αυτό και λέγεται εν σειρά ρυθμιστές (series regulators).

Φορτίζοντας την μπαταρία φτάνουμε στην τελική τάση. Χρησιμοποιώντας πληροφορίες που δίνει ο κατασκευαστής της μπαταρίας είναι δυνατό να προσεγγίσουμε την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας για ένα δοσμένο ρυθμό φόρτισης. Έτσι κανονίζοντας την τελική τάση της μπαταρίας ο ρυθμιστής μπορεί να αποφασίζει πότε να σταματάει και πότε να αρχίζει τη ροή του ρεύματος. Συνήθως η τάση στην οποία σταματάει η φόρτιση είναι λίγο παραπάνω από το σημείο που αρχίζει ο βρασμός του ηλεκτρολύτη. Αυτή η ελαφριά εξαέρωση θα προκαλέσει ένα ανακάτωμα του ηλεκτρολύτη που προστατεύει από την στρωμάτωση των πλακών, που έχει σαν

αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας.

Οι πιο πολλοί ρυθμιστές με ηλεκτρονόμους ενσωματώνουν και ένα δεύτερο ρυθμιστή τον ρυθμιστή πλήρους φόρτισης για να πετύχουν την τελική φόρτιση της μπαταρίας.

Αυτό είναι απαραίτητο γιατί 100% φόρτιση δεν επιτυγχάνεται ποτέ μόλις ανοίξει ο ρυθμιστής.

Κατά το τέλος της φόρτισης η τελική τάση της μπαταρίας αρχίζει να αυτοεκφορτίζεται και δεν μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη κατάσταση φόρτισης. Ο ρυθμιστής πλήρους φόρτισης θα προμηθεύσει τα υπόλοιπα λίγα αμπερώρια για την πλήρη φόρτιση

Μια σπουδαία επίσης δυνατότητα που προσφέρει είναι ο ορθολογισμός παροχής ισχύος (load management) Αυτό κάνει το εξής:

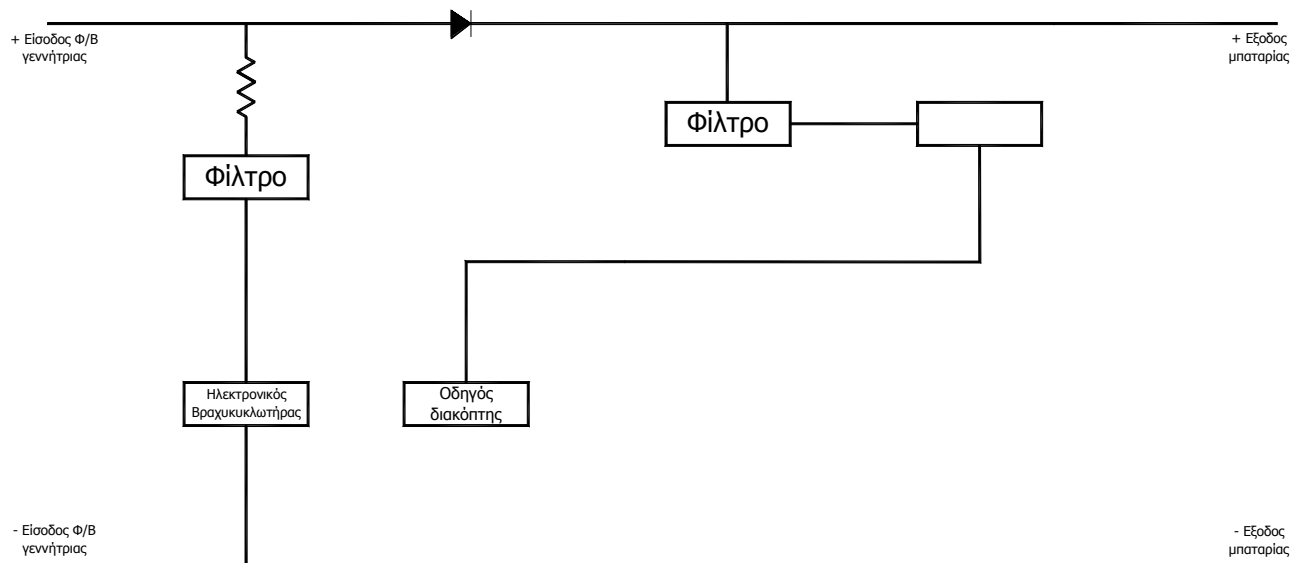
Αν η τάση της μπαταρίας περάσει από μία ελάχιστη τιμή και συνεχίσει να τραβάει ρεύμα αυτή εκφορτίζεται επικίνδυνα και υπάρχει κίνδυνος βλάβης της μπαταρίας. Γι' αυτό αποσυνδέεται ο φόρτος από την μπαταρία. Η αποσύνδεση γίνεται με το άνοιγμα ενός ηλεκτρονόμου που τοποθετείται ανάμεσα στο φόρτο και την μπαταρία συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η επανόρθωση θερμοκρασίας από τον κύριο ρυθμιστή είναι ρυθμισμένη για τον τύπο της μπαταρίας και για κατάσταση λειτουργίας της μπαταρίας.

Η δίοδος παρεμπόδισης (Σχήμα 5.6) χρησιμοποιείται για να προφυλάσσει την μπαταρία από την εκφόρτιση μέσα στην φωτοβολταϊκή μονάδα

1. κατά τη νύχτα,
2. όταν ο διακόπτης γειώνει το ρεύμα της διάταξης.

5.3.2.4. Κύκλωμα – σκλάβος ρυθμιστή φόρτισης

Το σχήμα 5.7 δείχνει τη διάταξη σ' ένα ρυθμιστή «σκλάβος». Η δίοδος παρεμπόδισης, η ακίνητη μονάδα διακόπτη και η παροδική προστασία κυκλώματος είναι τα ίδια με τον κύριο ρυθμιστή. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας, the voltage sensing και η προαιρετική ασφάλεια δεν είναι αντιγραμμένα στους ρυθμιστές «σκλάβους». Όταν ο κύριος ρυθμιστής αποφασίσει ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη θα ανοίξει το δικό του διακόπτη και ταυτόχρονα προκαλεί να



σχήμα 5.7 : Σχηματικό διάγραμμα σκάβου ρυθμιστή.

ανοιχτεί και ο διακόπτη του ρυθμιστή «σκάβου». Οποιοσδήποτε αριθμός από ρυθμιστές «σκάβους» μπορούν να ελεγχθούν από ένα κύριο ρυθμιστή σε μια φωτοβολταϊκή μονάδα.

5.3.3 Σύγκριση των δύο τύπων ρυθμιστών (με ηλεκτρονόμο – ηλεκτρονικοί)

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ρυθμιστών με ηλεκτρονόμους είναι :

1. το χαμηλό κόστος σε €/watt
2. Εξαιρετικά υψηλές επιδόσεις. Σαν παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε ότι ένας ρυθμιστής ελέγχου των 30 Amp μπορεί να υπολογίσει και 100 mA ρεύματος έχοντας σαν αποτέλεσμα το ικανοποιητικό ποσοστό 99,7 %.

Το κυριότερο μειονέκτημα είναι ότι επειδή αποτελούνται και από ένα κινούμενο μέρος οι επαφές μπορούν να αλλοιωθούν.

Για τους ηλεκτρονικούς μπορούμε να πούμε ότι εμφανίζουν προβλήματα στις υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Γι ' αυτό και προτιμούνται μόνο για χαμηλής ισχύος συστήματα

(λιγότερο από 80 Watt). Για μεγαλύτερης ισχύος συστήματα χρησιμοποιούνται οι ρυθμιστές με παλμούς (π.χ κύριος ρυθμιστής) εξ αιτίας της μικρής διάχυσης.

3.4. Πρακτικά κυκλώματα

3.4.1. Γενικά

Πριν προχωρήσουμε στην μελέτη των ηλεκτρονικών ρυθμιστών ας μελετήσουμε ένα απλούστερο. Στις μικρές εφαρμογές η απουσία ηλεκτρονικών ρυθμιστών μπορεί να φέρει στον χρήστη υψηλότερη αξιοπιστία, μεγαλύτερη απλούστευση και χαμηλότερο κόστος,

Από την άλλη, η τελική τάση μπορεί να κανονίζεται από την ίδια την Φ/Β γεννήτρια, χωρίς εξωτερικές παρεμβάσεις. Είναι ικανοποιητικό γεγονός ότι η $I(V)$ χαρακτηριστική μίας Φ/Β γεννήτριας που αποτελείται από 32 Φ/Κ πυριτίου ταιριάζει πολύ καλά με την χαρακτηριστικά φόρτιση της μπαταρίας, επειδή:

- συμπεριφέρεται σαν πηγή ρεύματος για χαμηλές τάσεις,
- συμπεριφέρεται σαν πηγή για υψηλές τάσεις.
- μειώνεται το ρεύμα καθώς αυξάνει η τάση.
- μειώνεται η τάση καθώς αυξάνει η θερμοκρασία.

Γι' αυτό μερικοί κατασκευαστές έχουν μειώσει τον αριθμό των Φ/Κ ή έχουν αλλάξει την αντίσταση (resistivity) για να πετύχουν το σημείο μέγιστης ισχύος κοντύτερα στο σημείο λειτουργίας. λειτουργίας.

Ο Grace Photon πρότεινε μία απλή και αληθινή λύση. Αυτοελεγχόμενη Φ/Β γεννήτρια από 32 Φ/Κ πυριτίου, μια δίοδο zener με την ψήκτρα της, μία δίοδο παρεμπόδισης και μία εξωτερική αντίσταση - όλα ενσωματωμένα σε κομμάτι πυριτίου. Η Φ/Β γεννήτρια έχει ένα λόγο $V_{pm}/V_{oc} = 0,91$ όπου V_{pm} είναι η τάση σημείου μέγιστης φόρτισης και V_{oc} η τάση ανοικτού κυκλώματος. Αυτός είναι κατάλληλος για φόρτιση μπαταριών μολύβδου-οξέος και δίνει ρεύμα αμετάβλητο για μεταβολές Θερμοκρασίας μέχρι 30°C . Για την περίπτωση των τροπικών και υποτροπικών περιοχών αυξάνει τις Φ/Κ σε 34 και τότε είναι κατάλληλο για θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι 50°C .

3.4.2. Κατάλληλες συνθήκες για φόρτιση μπαταριών μολύβδου- οξέως

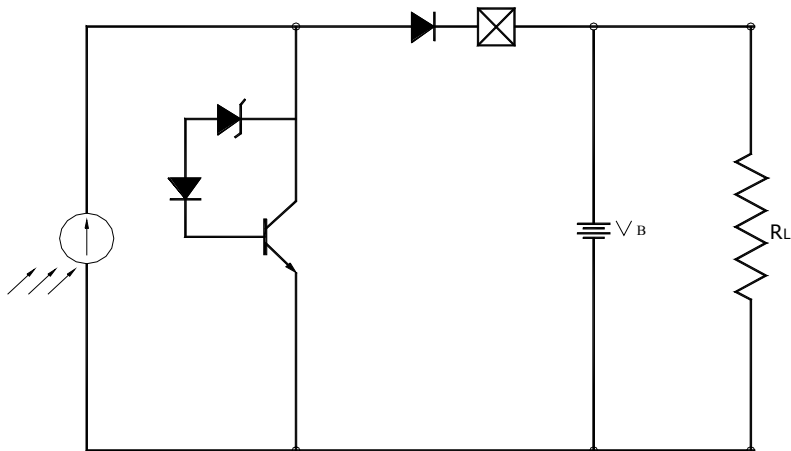
Γενικά οι χρήστες θέλουν να έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής στις μπαταρίες σε συνδυασμό με τον μεγαλύτερο κύκλο. Γι' αυτό γενικά οι ρυθμιστές πρέπει να έχουν :

- τελική τάση περίπου στα 14,5V για να αποφεύγονται φαινόμενα στρωματώσεως και εξαερώσεως του ηλεκτρολύτη.
- Ελεγχόμενη ροή από το 13,3V μ' ένα ασθενικό ρεύμα.
- Ελεγχόμενη εκφόρτιση στα 11,1 V με την αποσύνδεση της: μπαταρίας.

Για μερικές απλές περιπτώσεις όπου το κόστος του ρυθμιστή δεν καθορίζεται, ένα από ηλεκτρονικό κύκλωμα είναι αρκετό. Αυτό αποτελείται από μαγνητικούς ηλεκτρονόμους που ανοίγουν το κύκλωμα όταν η τάση της μπαταρίας φτάσει στα 10,5 V και κλείνουν στα 13,2V. Δηλαδή ο λόγος ανάμεσα στο αριστοποιημένο σημείο φόρτισης και στο τελικό είναι $13,2/14,5 = 0,91$. Έτσι μία καλή Φ/Β γεννήτρια με χαμηλή εσωτερική αντίσταση δεν έχει λόγο ο V_{pm}/V_{oc} μεγαλύτερο του 0,80, που δεν συγκρίνεται με τον λόγο των μπαταριών.

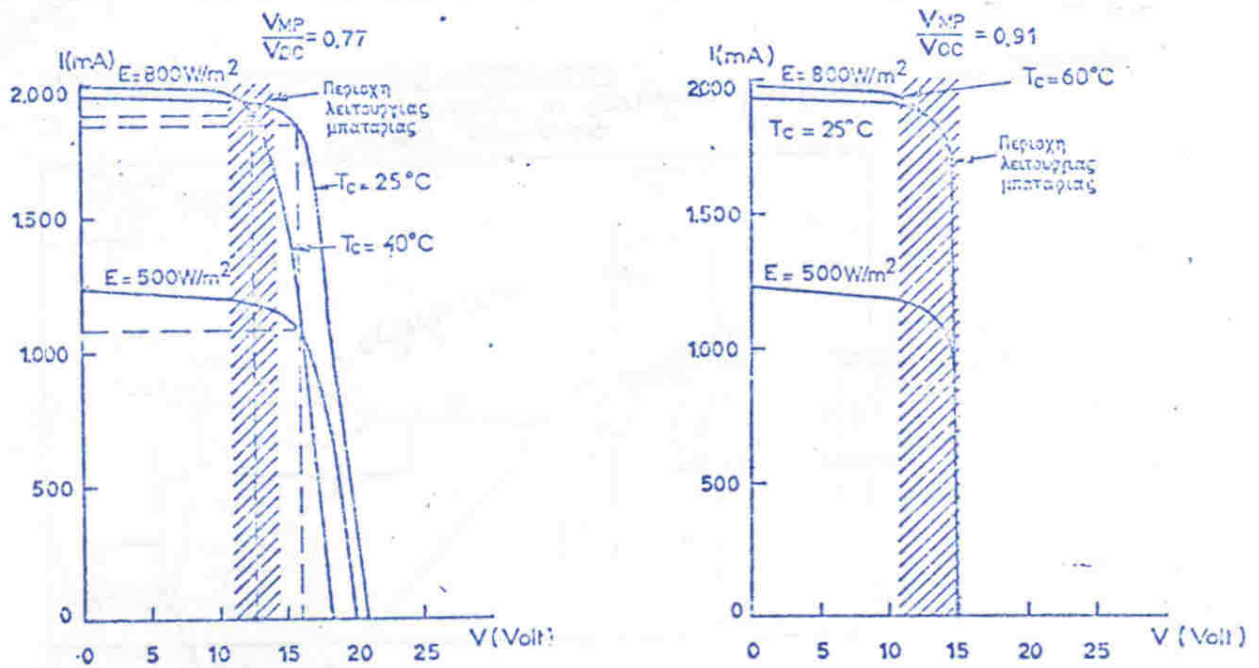
Σ' αυτά δεν πρέπει να υπολογίσω ότι συντελεστής θερμοκρασίας μιας 12V μπαταρίας είναι τυπικά $- 36m V/^{\circ}C$ και της Φ/Β γεννήτριας $- 72mV /^{\circ}C$, δηλαδή διπλάσιος. Και επίσης οι μπαταρίες και τα Φ/Β δεν βρίσκονται ποτέ κάτω από τις ίδιες θερμοκρασιακές συνθήκες.

Η αυτοελεγχόμενη γεννήτρια αποτελείται από 32 Φ/Κ και μία Zener 14v /50W συνδεδεμένη παράλληλα με την ψήκτρα, το οποίο λειτουργεί σε κατάσταση υπερχείλισης μόλις η μπαταρία φτάσει τα 13,2V. Περιέχει βέβαια και μία δίοδο παρεμπόδισης Schottky με χαμηλή απώλεια τάσης και μία ασφάλεια σε σειρά δια προστασία του χρήστη από ανάστροφη σύνδεση της μπαταρίας. Η Zener λειτουργεί επίσης σαν δίοδος προστασίας εν παραλλήλω από τη "ζεστή κηλίδα" (hot spot) φαινόμενα (σχήμα 5.8.)



σχήμα 5.8 : Ηλεκτρονικό κύκλωμα απλού φορτιστή.

Η χαρακτηριστική $I(V)$ του GA 32 φαίνεται στο σχήμα 5.9β σε σχέση με το κλασσικό GA 36 των 34 Φ/Κ (σχήμα 5.9α.).



σχήμα 5.9 : Χαρακτηριστική (I – V) των GA 36 & GA 32 .

Τα παρακάτω πλεονεκτήματα είναι προφανή:

- δεν έχω εξάρτηση της τάσης από την θερμοκρασία μέχρι και 30°C για το GA 32 και μέχρι 50°C για το GA 34 και αυτό γιατί η Zener έχει θερμοκρασιακό συντελεστή +0,9mV/°C που είναι αρκετά ασήμαντος.
- η κλήση της Zener προστίθεται στην πτώση τάσης της διόδου παρεμπόδισης και δίνει λόγο της μπαταρίας.

Ο συνεχής αυτοέλεγχος είναι προτιμότερος από τον ηλεκτρονικό περιοδικώς διακοπτόμενο.

6 ΠΑΛΜΙΚΟΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΕΣ

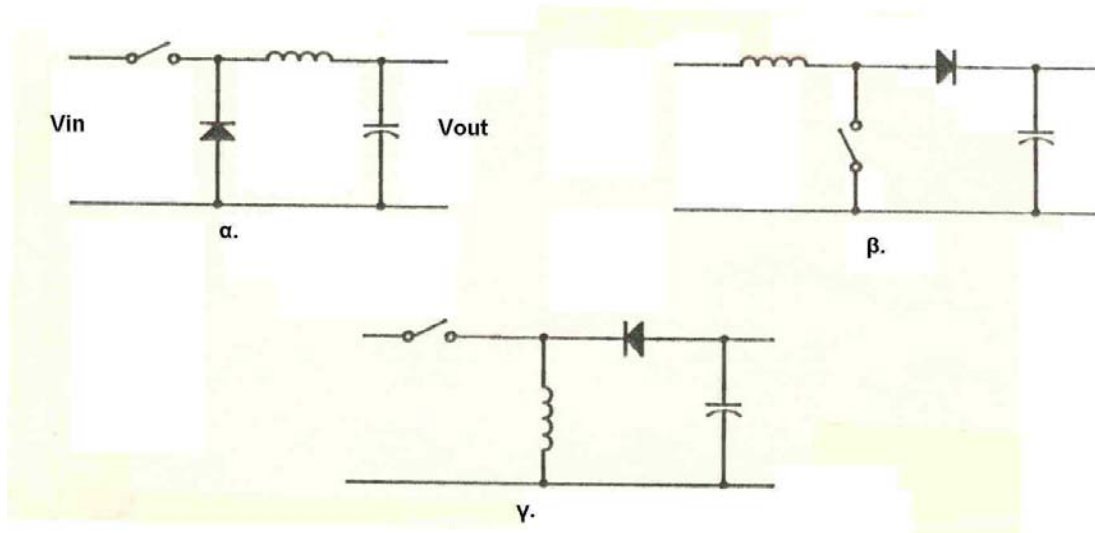
Η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερή αλλά κυμαίνεται ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας από 0 V στο σκοτάδι έως 21 V στην περίπτωση που δεν έχουμε φορτίο. Συνήθως η τάση που μας δίνει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο όταν αποδίδει την μέγιστη ισχύς του είναι στην «γειτονιά» των 17 V την οποία πρέπει να προσαρμόσουμε στην τάση φόρτισης της μπαταρίας 13,6 V για την ασφαλή φόρτισή της. Όμως η ενέργεια που έχουμε στη διάθεσή μας είναι περιορισμένη πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάποια διάταξη που ο βαθμός απόδοσής της να είναι πολύ υψηλός. Έτσι χρησιμοποιήσαμε παλμικούς σταθεροποιητές γι' αυτή τη δουλειά.

6.1 Εισαγωγή

Ένα μειονέκτημα των γραμμικών σταθεροποιητών είναι ότι το τρανζίστορ ελέγχου άγει συνεχώς και συνήθως καταναλώνει πολύ ισχύ σε μορφή θερμότητας, με αποτέλεσμα η απόδοση ισχύος του σταθεροποιητή να είναι χαμηλή. Σε εφαρμογές που θέλουμε να αυξήσουμε την απόδοση (η) θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε με παλμικούς τύπους σταθεροποιητών. Το στοιχείο ελέγχου (τρανζίστορ) στους παλμικούς σταθεροποιητές βρίσκεται είτε σε κατάσταση κόρου (άγει) είτε σε κατάσταση αποκοπής, και στις δύο καταστάσεις το τρανζίστορ ελέγχου καταναλώνει πολύ λίγη ισχύ. Όταν το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή κόρου το ρεύμα που διαρρέει το τρανζίστορ είναι μεγάλης έντασης αλλά η τάση (V_{CE}) μεταξύ συλλέκτη - εκπομπού είναι πολύ μικρή και η ισχύς ($P = I_C \times V_{CE}$) που καταναλώνει το τρανζίστορ είναι πολύ μικρή επίσης όταν το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή αποκοπής παρόλο που η τάση V_{CE} είναι αρκετά μεγάλη το ρεύμα που διαρρέει το τρανζίστορ είναι πάρα πολύ μικρό και έτσι η ισχύς που καταναλώνει το τρανζίστορ είναι πολύ μικρή.

6.2 Βασικές συνδεσμολογίες

Υπάρχουν τρεις βασικές συνδεσμολογίες παλμικών σταθεροποιητών (σχήμα 6.1)



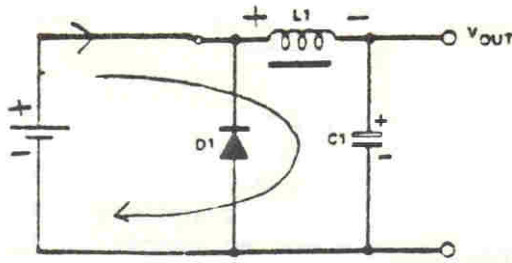
Σχήμα 6.1: Οι βασικές συνδεσμολογίες των παλμικών σταθεροποιητών. (α) υποβιβασμού τάσης (step -down). (β) ανύψωσης τάσης (step - up). (γ) αντιστροφής τάσης (inverter).

Σε πρακτικά κυκλώματα ο μηχανικός διακόπτης των βασικών παλμικών σταθεροποιητών αντικαθίσταται από ένα ηλεκτρονικό διακόπτη, όπως π.χ. ένα διπολικό τρανζίστορ ισχύος, FET, ή MOSFET. Επίσης ο χρόνος κατά τον οποίο ο διακόπτης παραμένει κλειστός ρυθμίζεται με κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα που θα περιγράψουμε.

Θα εξετάσουμε τώρα τον τρόπο λειτουργίας του παλμικού σταθεροποιητή υποβιβασμού τάσης που μας ενδιαφέρει.

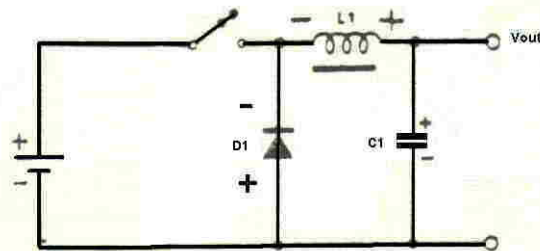
6.3 Λειτουργία παλμικού σταθεροποιητή υποβιβασμού τάσης

Όταν ο διακόπτης κλείσει (σχήμα 6.2) η τάση V_{IN} εφαρμόζεται στην είσοδο του παλμικού σταθεροποιητή και το ρεύμα το οποίο ρέει στο πηνίο αρχίζει να αυξάνεται, ενώ ταυτόχρονα φορτίζει τον πυκνωτή. Παρατηρούμε ότι η δίοδος βρίσκεται ανάστροφα πολωμένη. Όταν τώρα ανοίξει ο διακόπτης το μαγνητικό πεδίο του πηνίου καταρρέει και δημιουργεί μια ηλεκτρεγερτική



Σχήμα 6.2: Η λειτουργία του παλμικού σταθεροποιητή υποβιβασμού τάσης. Σημειώνεται ο δρόμος του ρεύματος όταν ο διακόπτης είναι κλειστός.

δύναμη (τάσης) στα άκρα του όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Η λειτουργία του παλμικού σταθεροποιητή υποβιβασμού τάσης. Σημειώνεται ο δρόμος του ρεύματος όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός.

Η τάση αυτή συνεχίζει την παροχή ρεύματος στο κύκλωμα. Δίχως την δίοδο, η ηλεκτρεγερτική δύναμη στα άκρα του πηνίου, λόγω της αρκετά μεγάλης αρχικής της τιμής, θα μπορούσε να δημιουργήσει ένα σπινθήρα στα άκρα του διακόπτη και να προκαλέσει την καταστροφή. Είναι φανερό, ότι όσο πιο πολύ χρόνο ο διακόπτης παραμένει κλειστός τόσο πιο μεγάλη είναι η τάση στα άκρα του πυκνωτή. Δηλαδή η τάση εξόδου του παλμικού σταθεροποιητή μπορεί να μεταβληθεί ρυθμίζοντας τον χρόνο που ο διακόπτης παραμένει κλειστός.

Τα παλμικά τροφοδοτικά λειτουργούν συνήθως σε συχνότητες (δηλαδή η συχνότητα μεταγωγής του διακόπτη) από 20 KHz έως 100 KHz

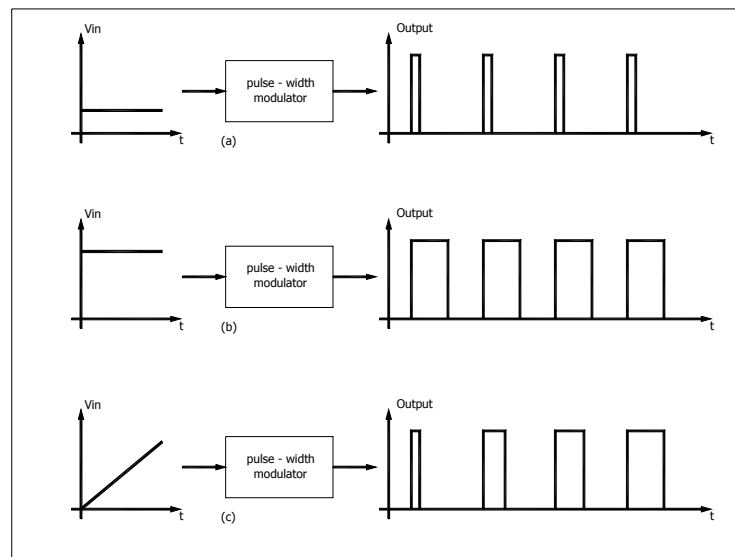
Η υψηλή συχνότητα λειτουργίας είναι απαραίτητη γιατί στις υψηλές συχνότητες τα στοιχεία που αποτελούν το φίλτρο εξομάλυνσης L και C έχουν μικρές τιμές και έτσι δεν είναι ογκώδη ενώ το κόστος τους είναι σχετικά μικρό. Ωστόσο η μεταγωγή υψηλής έντασης ρευμάτων σε αρκετά υψηλές συχνότητες δημιουργεί μεγάλης έντασης μαγνητικά πεδία τα οποία επάγουν τάσεις

θορύβου στους κοντινούς αγωγούς. Αυτή η δημιουργία της ονομαζόμενης ηλεκτρομαγνητικής - παρεμβολής (electromagnetic interference, EMI) είναι ένα μειονέκτημα των παλμικών τροφοδοτικών συστημάτων και για αυτό το λόγο απαιτούν καλή θωράκιση. Επίσης υπάρχει ένας περιορισμός στην συχνότητα μεταγωγής λόγω αδυναμίας των τρανζίστορ ισχύος να μετάγουν ρεύματα σε μεγάλες συχνότητες. Πολλά μοντέρνα παλμικά τροφοδοτικά χρησιμοποιούν διακοπτικά στοιχεία MOSFET τεχνολογίας αντί διπολικά τρανζίστορ, επειδή έχουν την ικανότητα να μετάγουν ρεύματα μεγάλης έντασης σε υψηλές ταχύτητες.

6.4 Παλμικός διαμορφωτής διάρκειας παλμών.

Το κύριο μέρος ενός παλμικού τροφοδοτικού είναι ο παλμικός διαμορφωτής διάρκειας παλμών (Pulse width modulator, PWM). Ο PWM παράγει μια σειρά από ορθογώνιους παλμούς των οποίων η διάρκεια (μήκος) είναι ανάλογο με την τάση εισόδου που εφαρμόζεται στην είσοδό του: Δηλαδή όσο πιο μεγάλη είναι η τάση που εφαρμόζεται στην είσοδο του PWM τόσο πιο μεγάλο είναι το εύρος των παλμών.

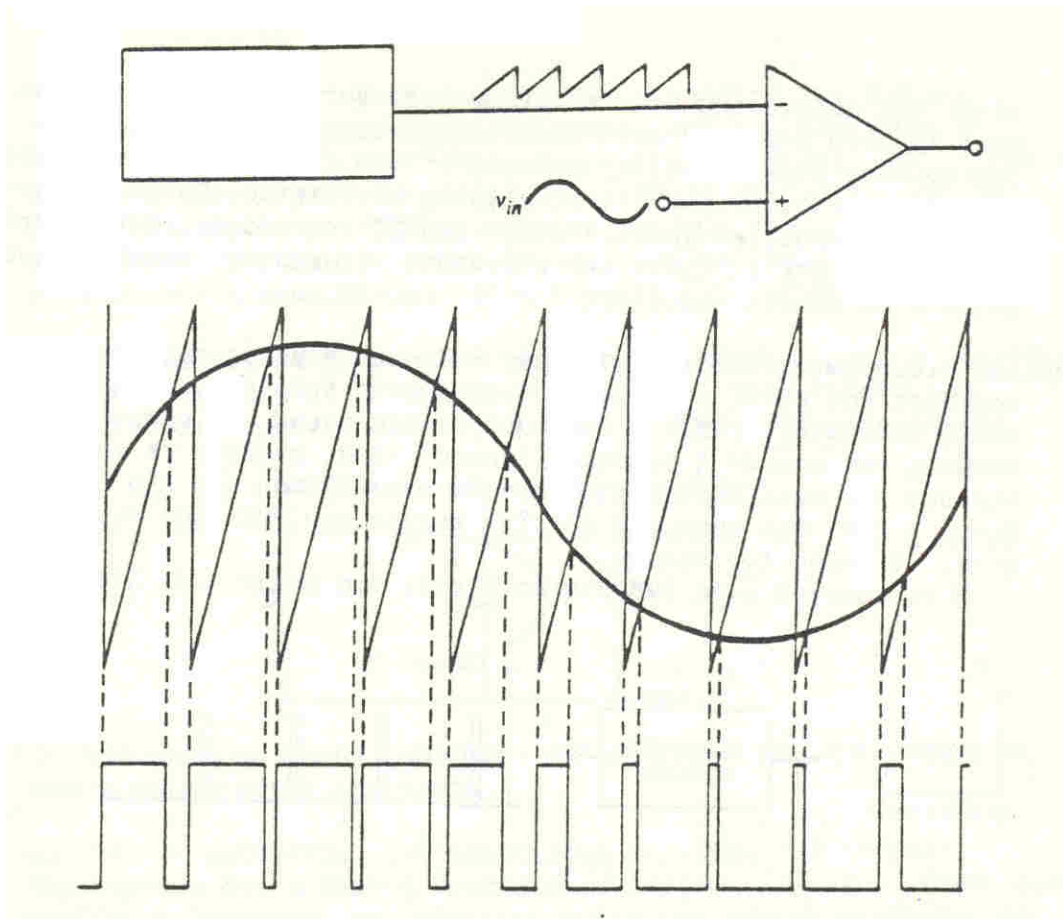
Η λειτουργία ενός PWM απεικονίζεται στο σχήμα 6.4. Στο σχήμα 6.4α η διάρκεια των παλμών



Σχήμα 6.4: Η ακολουθία των παλμών εξόδου ενός PWM σε σχέση με την τάση εξόδου

είναι μικρή επειδή η τάση εισόδου στον PWM είναι μικρή, στο σχήμα 6.4β η διάρκεια των παλμών είναι μεγαλύτερη από αυτή του σχήματος 6.4α επειδή η τάση εισόδου είναι μεγαλύτερη, και στο σχήμα 6.4γ, η διάρκεια των παλμών αυξάνεται καθώς η τάση εισόδου αυξάνεται. Για την δημιουργία μιας περιοδικής αλληλουχίας παλμών, ο PWM πρέπει να περιλαμβάνει ένα ταλαντωτή.

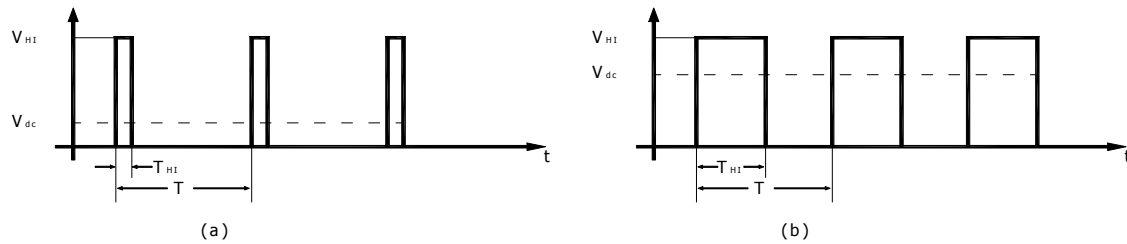
Στο σχήμα 6.5 φαίνεται πως ένας PWM μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας ένα συγκριτή τάσης ο οποίος οδηγείται από μια τάση πριονωτής κυματομορφής.



Σχήμα 6.5: Ένας PWM αποτελούμενος από ένα συγκριτή τάσης που οδηγείται από μια γεννήτρια πριονωτής κυματομορφής

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 6.6 η μέση ή συνεχής (dc) τιμή μιας σειράς παλμών είναι ευθέως ανάλογη με τον κύκλο δραστηριότητας και δίνεται από τη σχέση:

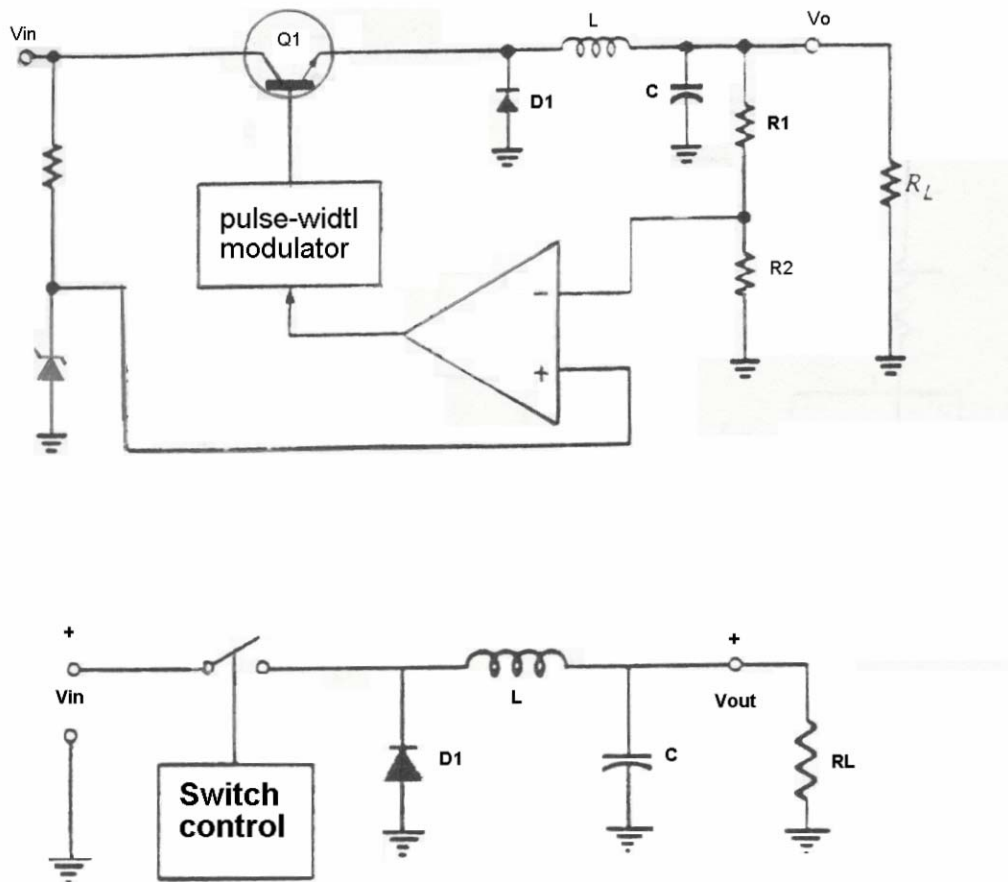
$$V_{DC} = V_{HT} \left(\frac{T_{HT}}{T} \right)$$



Σχήμα 6.6: Η μέση DC τάση μιας σειράς παλμών είναι ανάλογη με το duty cycle

6.5 Κυκλώματα παλμικών τροφοδοτικών

Τα παλμικά τροφοδοτικά χρησιμοποιούν ένα τρανζίστορ για διακόπτη και για την μεταγωγή του



Σχήμα 6.7: Παλμικός σταθεροποιητής υποβιβασμού τάσης

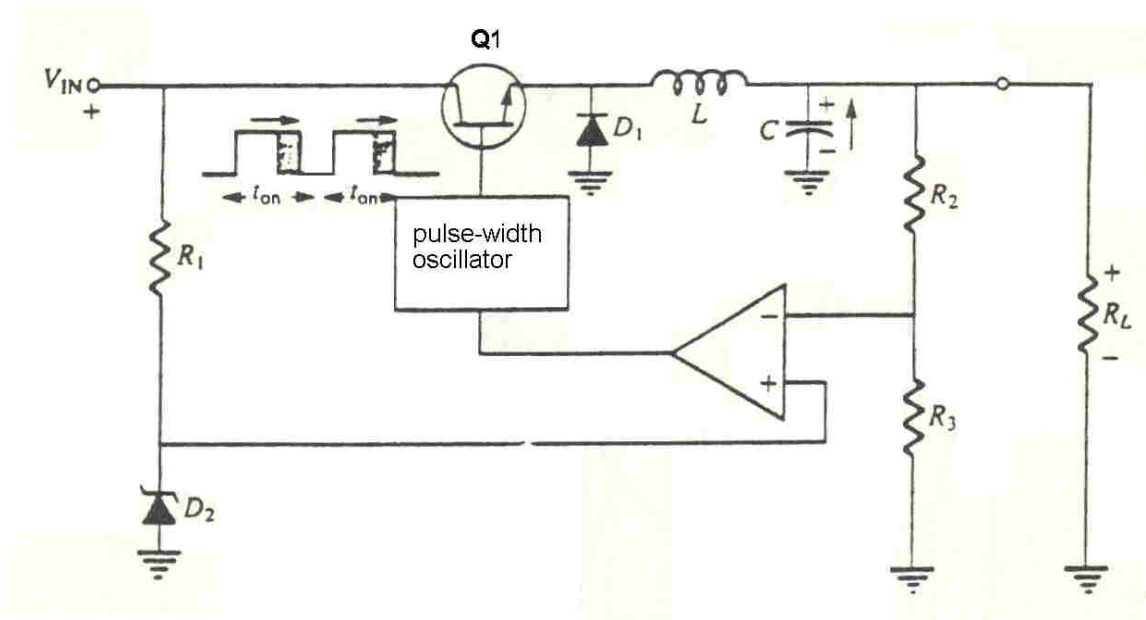
χρησιμοποιείται ένας PWM, που δημιουργεί μια σειρά παλμών των οποίων ο κύκλος δραστηριότητας ρυθμίζεται αυτόματα όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω και σταθεροποιεί την τάση εξόδου του τροφοδοτικού.

Στο σχήμα 6.7 φαίνεται ένας παλμικός σταθεροποιητής υποβιβασμού τάσης. Παρατηρήστε ότι αντί για ένα μηχανικό διακόπτη χρησιμοποιούμε ένα τρανζίστορ οδηγούμενο από ένα PWM.

Είναι φανερό ότι όταν η τάση στην έξοδο του PWM είναι υψηλή το τρανζίστορ άγει και εργάζεται στην περιοχή κόρου, δηλαδή το τρανζίστορ παρουσιάζει πολύ μικρή αντίσταση και διαρρέετε από ένα ρεύμα μεγάλης έντασης, στην περίπτωση αυτή το τρανζίστορ ενεργεί σαν ένας κλειστός διακόπτης. Όταν τώρα η τάση στην έξοδο του PWM είναι χαμηλή (0 V) το τρανζίστορ δεν άγει και αντιστοιχεί σε ένα ανοικτό διακόπτη.

Επίσης η τιμή της τάσης στην έξοδο του σταθεροποιητή εξαρτάται από τον κύκλο δραστηριότητας δηλαδή τον χρόνο που το τρανζίστορ άγει. Το κύκλωμα λειτουργεί ως εξής: Η έξοδος του PWM οδηγεί το τρανζίστορ Q_1 . Όταν η έξοδος του PWM έχει υψηλή τιμή το Q_1 άγει και βρίσκεται στην κατάσταση κόρου. Όταν η έξοδος του PWM έχει χαμηλή τιμή το Q_1 δεν άγει και βρίσκεται στην κατάσταση αποκοπής. Έτσι το ρεύμα που διαρρέει το Q_1 είναι μια σειρά από παλμούς οι οποίοι έχουν τον ίδιο κύκλο δραστηριότητας όπως οι παλμοί στην έξοδο του PWM. Όπως και στα κυκλώματα των γραμμικών σταθεροποιητών η zener δίοδος παρέχει μια τάση ανατροφοδότησης που λαμβάνουμε από τον διαιρέτη τάσης $R_1 - R_2$.

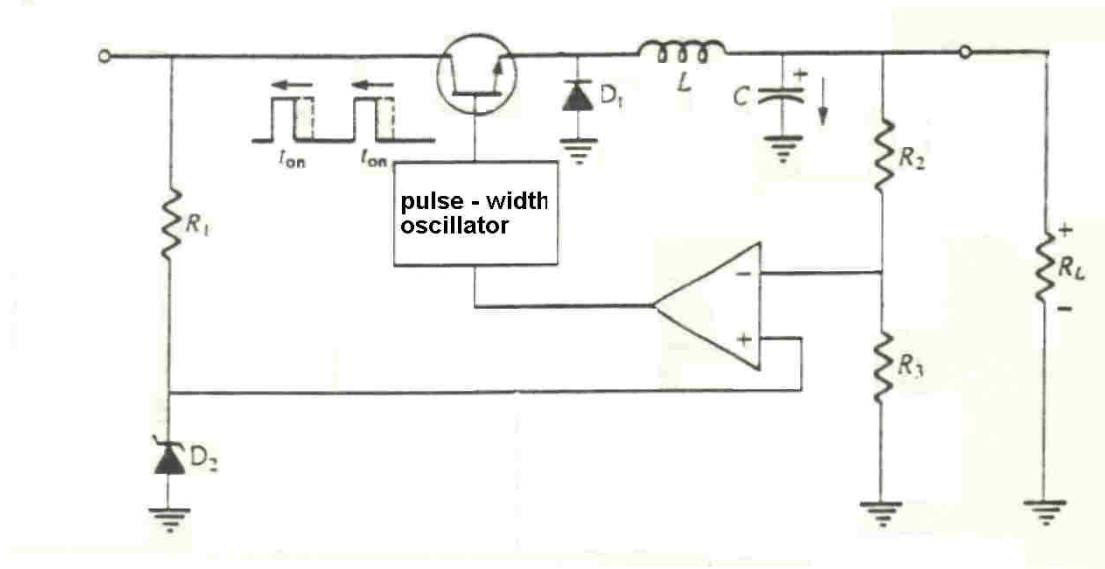
Εάν η τάση εξόδου V_o τείνει να μειωθεί, τότε η τάση εξόδου του τελεστικού ενισχυτή αυξάνεται και έτσι μια μεγαλύτερη τάση εφαρμόζεται στην είσοδο του PWM. Συνεπώς ο PWM δημιουργεί μια σειρά παλμών με μεγαλύτερο κύκλο δραστηριότητας. Έτσι ο χρόνος κατά τον οποίο το Q_1 άγει, καθώς και ο χρόνος φόρτισης του πυκνωτή C αυξάνεται δηλαδή η τάση εξόδου αυξάνεται και αντισταθμίζει την αρχική μείωση της τάσης εξόδου (σχ.6.8)



Σχήμα 6.8: Με τη μείωση της τάσης εξόδου ο PWM αυξάνει τον κύκλο δραστηριότητας των παλμών οδήγησης του τρανζίστορ εξόδου επαναφέροντας σε ισορροπία το σύστημα

Όταν η τάση εξόδου του σταθεροποιητή προσπαθεί να αυξηθεί, η τάση εξόδου του τελεστικού ενισχυτή μειώνεται, ο κύκλος δραστηριότητας του PWM μειώνεται και ο χρόνος που το

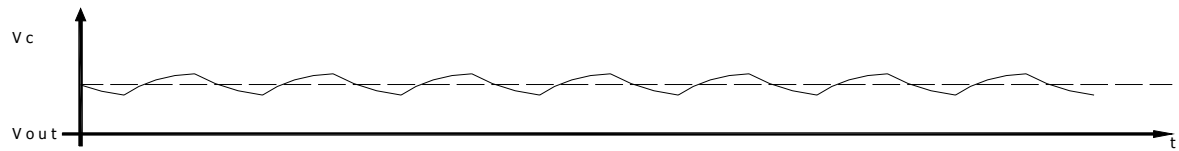
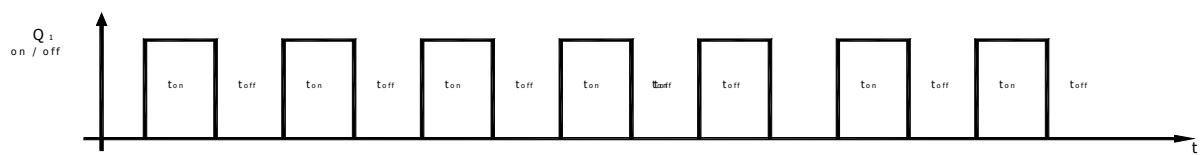
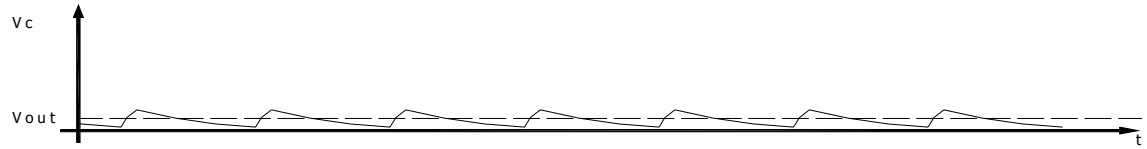
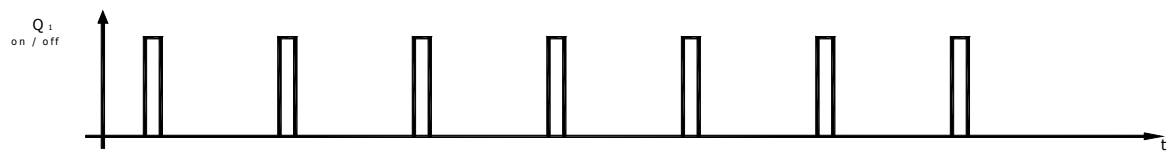
τρανζίστορ Q_1 άγει ελαττώνεται. Έτσι ο πυκνωτής εκφορτίζεται αρκετά και επαναφέρει την τάση εξόδου στην αρχική σταθερή τιμή της (σχήμα 6.9).

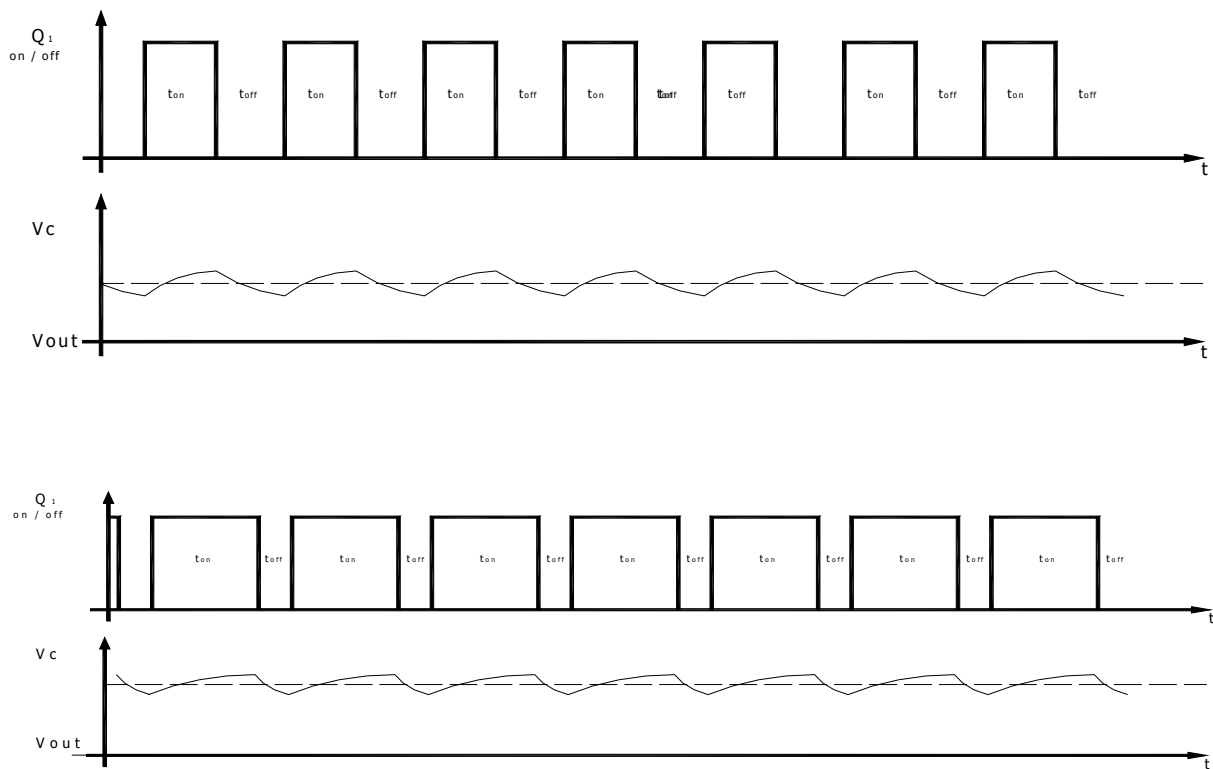


Σχήμα 6.9: Η αύξηση της τάσης εξόδου ο PWM μειώνει τον κύκλο δραστηριότητας των παλμών οδήγησης του τρανζίστορ.

Το πηνίο L και ο πυκνωτής C αποτελούν ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων, το οποίο εξομαλύνει την τάση εξόδου του σταθεροποιητή. Στο σχήμα 6.10 φαίνονται οι κυματομορφές του παλμικού σταθεροποιητή. Η τάση εξόδου δίνεται από την σχέση:

$$V_o = \left(\frac{t_{ON}}{T} \right) \cdot V_{IN}$$





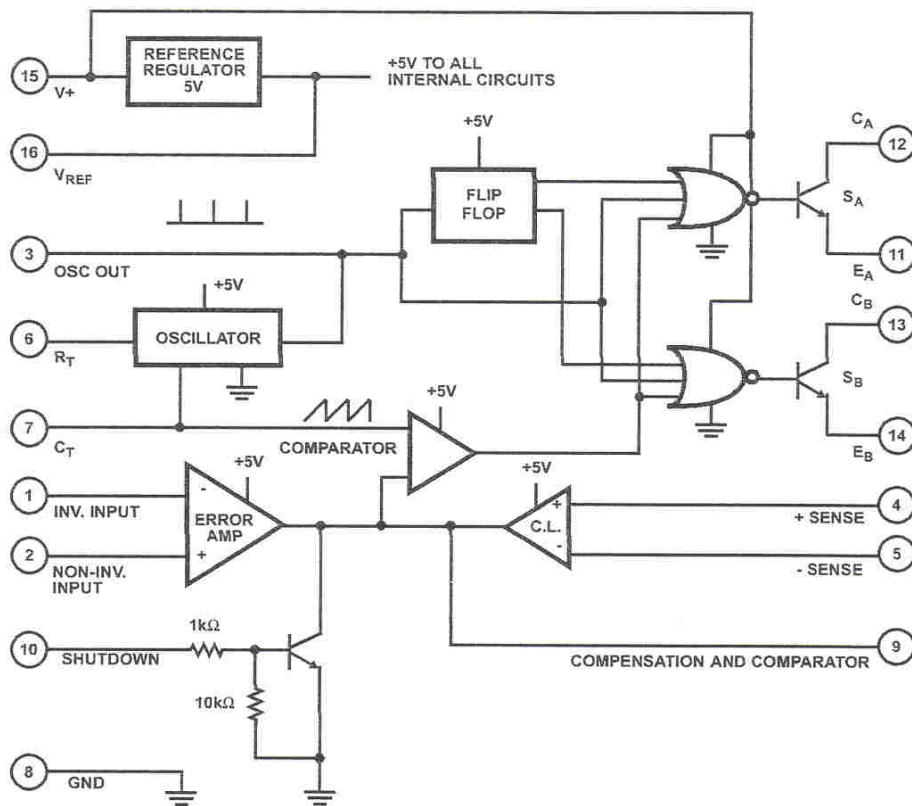
Σχήμα 6.10: Οι κυματομορφές της τάσης εξόδου σε σχέση με τον κύκλο δραστηριότητας των παλμών οδήγησης του τρανζίστορ ισχύος

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τη λειτουργία του IC CA 3524 της HARRIS semiconductor το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ρυθμιζόμενων power supply inverter ή switching regulator. Από το block διάγραμμα του IC που φαίνεται στο σχήμα 6.11 μπορούμε να δούμε ότι το CA 3524E περιέχει όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τον έλεγχο σχεδόν κάθε κυκλώματος διακόπτη μέχρι συχνότητες switching του τρανζίστορ ισχύος 200 KHz. Συγκεκριμένα περιλαμβάνει τάση αναφοράς 5V με μέγιστη απόκλιση 1%, ενισχυτή σφάλματος (error amplifier), ταλαντωτή προγραμματιζόμενης συχνότητας (oscillator), διαμορφωτή εύρους παλμών (pulse width modulator), flip-flop, λογικό κύκλωμα, διπλούς εναλλασσόμενους διακόπτες εξόδου, και κυκλώματα περιορισμού ρεύματος (current limit circuit) και διακοπής λειτουργίας (shut-down circuitry).

Ο ταλαντωτής του CA 3524E χρησιμοποιεί μια εξωτερική αντίσταση R_T για να τροφοδοτήσει με σταθερό ρεύμα φόρτισης έναν επίσης εξωτερικό πυκνωτή C_T . Αν και αυτή η διαμόρφωση απαιτεί περισσότερο ρεύμα από ότι θα απαιτούσε ένα RC κύκλωμα σε σειρά, μας δίνει μια γραμμική τάση στον πυκνωτή C_T η οποία χρησιμεύει σαν χρονικά εξαρτώμενη αναφορά για τον συγκριτή (PWM). Το ρεύμα φόρτισης είναι ίσο με $3,6V/R_T$ και η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 30μΑ και 2mA. Η τιμή της R_T μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 1,8KΩ και 100KΩ.

CA1524, CA2524, CA3524

Functional Block Diagram



Σχήμα 6.11: Το block diagram του ολοκληρωμένου κυκλώματος 3524 E

Η τιμή του C_T επίσης έχει όρια (1 - 100nF) καθώς ο χρόνος εκφόρτισης του πυκνωτή προσδιορίζει το εύρος των παλμών του ταλαντωτή. Η συχνότητα του ταλαντωτή είναι περίπου ίση με:

$$f = \frac{1}{R_T \cdot C_T}$$

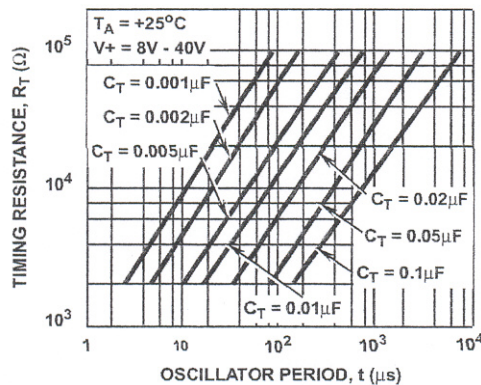
όπου

R_T σε ohms,

C_T σε mF και

f σε MHz.

Στο σχήμα 6.11 μπορούμε να δούμε την αναλογία των τιμών R_T και C_T για μικρότερο ποσοστιαίο σφάλμα της συχνότητας λειτουργίας f.



Σχήμα 6.12: Η σχέση τιμών της αντίστασης και του πυκνωτή χρονισμού για το μικρότερο σφάλμα της συχνότητας του ταλαντωτή

Η άλλη είσοδος του Pulse Width Modulator τροφοδοτείται από το σήμα εξόδου του ενισχυτή σφάλματος που συγκρίνεται με την γραμμική μεταβολή της τάσης αναφοράς του πυκνωτή, και το αποτέλεσμα μετατρέπεται σε τετραγωνικούς παλμούς κάποιου εύρους που στη συνέχεια τροφοδοτούν μέσω δύο πυλών NOR και υπό τον έλεγχο ενός flip - flop τα δύο τρανζίστορ ελέγχου - τα οποία έχουν δυνατότητα τροφοδοσίας σε ρεύμα 100 mA το καθένα. Το flip - flop που παίρνει χρονισμό «clock» από τον ταλαντωτή μας εξασφαλίζει από την πιθανότητα στην

οποία τα τρανζίστορ εξόδου του κυκλώματος δεν θα συγχρονιστούν ποτέ κατά τη διάρκεια του χρόνου μεταγωγής. Είναι σημαντικό επίσης να σημειώσουμε ότι με συνδέοντας παράλληλα τα δύο τρανζίστορ εξόδου το εύρος λειτουργίας των παλμών που τροφοδοτούν το τρανζίστορ ισχύος του σταθεροποιητή κυμαίνεται από 0 - 90 % ενώ η συχνότητα του switching είναι ίση με τη συχνότητα του ταλαντωτή. Στην περίπτωση που δεν παραλληλιστούν τα τρανζίστορ το duty cycle για καθένα από αυτά κυμαίνεται από 0 - 45 % και η συχνότητα του switching σ' αυτή τη διαμόρφωση είναι η μισή από τη συχνότητα του ταλαντωτή.

Το ολοκληρωμένο 3524 περιλαμβάνει όπως είπαμε και μια τάση αναφοράς 5 V που χρησιμεύει σε δύο πράγματα. Το πρώτο είναι σαν τάση αναφοράς για τον έλεγχο της τάσης εξόδου και το δεύτερο για την τροφοδοσία των εσωτερικών λογικών κυκλωμάτων του ολοκληρωμένου. Επίσης από το pin 16 που είναι η έξοδος της τάσης αναφοράς μπορούμε να τροφοδοτήσουμε εξωτερικά κυκλώματα ισχύος 250 mW (50 mA).

Μια τάση πόλωσης που προέρχεται από την τάση αναφοράς μέσω ενός διαιρέτη συνδέεται με τη μια είσοδο του error amplifier και δίνει την αναφορά για τη σύγκριση. Η άλλη είσοδος του ενισχυτή σφάλματος μέσω μιας ανάδρασης από την έξοδο με τον κατάλληλο διαιρέτη τάσης ή άλλου κυκλώματος φέρνει στο ολοκληρωμένο κύκλωμα το σήμα εκείνο - τάση ίση με τη σταθερή τάση της πολωμένης εισόδου όταν στην έξοδο έχουμε την επιθυμούμενη τιμή - για τον έλεγχο της τάσης εξόδου.

Το κύκλωμα του error amplifier έχει δύο διαμορφώσεις λειτουργίας:

1) Πολώνοντας με σταθερή τάση (V+) τη μη αναστρέφουσα είσοδο του error amplifier και τοποθετώντας την τάση ανάδρασης από την έξοδο στην αναστρέφουσα είσοδο τότε αν η τιμή της τάσης στην αναστρέφουσα υπερβεί την τιμή της (V+) η τάση εξόδου του error amplifier μειώνεται και αντίστοιχα μειώνεται και το εύρος των παλμών εξόδου, ενώ αν αντίθετα η τιμή της τάσης ανάδρασης μειωθεί σε σχέση με την (V+) τότε η τάση εξόδου του error amplifier αυξάνεται και αντίστοιχα αυξάνεται και το εύρος των παλμών εξόδου.

2) Ενώ αν πολώσουμε σταθερή τάση (V-) την αναστρέφουσα είσοδο και τοποθετήσουμε την ανάδραση στη μη αναστρέφουσα τότε αν η τιμή της τάσης στη μη αναστρέφουσα υπερβεί την τιμή της (V-) η τάση εξόδου του error amplifier αυξάνεται και αντίστοιχα αυξάνεται και το εύρος των παλμών εξόδου ενώ αν αντίθετα η τιμή της τάσης ανάδρασης μειωθεί σε σχέση με την (V-)

τότε η τάση εξόδου του error amplifier μειώνεται και αντίστοιχα μειώνεται και το εύρος των παλμών εξόδου.

Έτσι έχουμε τη δυνατότητα να οδηγήσουμε τον παλμοσταθεροποιητή με αρνητική ή θετική λογική.

Το κύκλωμα περιορισμού ρεύματος κάνει περίπου την ίδια δουλειά με αυτή του error amplifier. Πιο συγκεκριμένα συνδέοντας τις δύο εισόδους του κυκλώματος στα άκρα μιας αντίστασης R_s που είναι σε σειρά με την έξοδο έχουμε το κατάλληλο σήμα (πτώση τάσης) για τον έλεγχο του ρεύματος εξόδου. Μόλις αυτή η τάση πάρει μια τιμή μεγαλύτερη από το όριο του current limit το κύκλωμα μέσω του PWM μειώνει το duty cycle των παλμών οδήγησης του τρανζίστορ ισχύος και επομένως και το ρεύμα εξόδου ώστε το κύκλωμα να επανέλθει σε ισορροπία. Το συγκεκριμένο κύκλωμα όμως έχει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Το πρώτο από αυτά είναι ότι η τάση εισόδου έχει μέγιστο όριο τα 220 mV. Επίσης το όριο της συχνότητας λειτουργία του κυκλώματος είναι τα 300 Hz. Από τα χαρακτηριστικά του ολοκληρωμένου βλέπουμε ότι το ρεύμα που διαρρέει τα κυκλώματα του current limit κυμαίνεται από 0 - 150 μA περιορίζοντας έτσι την αντίσταση R_s σε τιμές μικρότερες από 50 Ω .

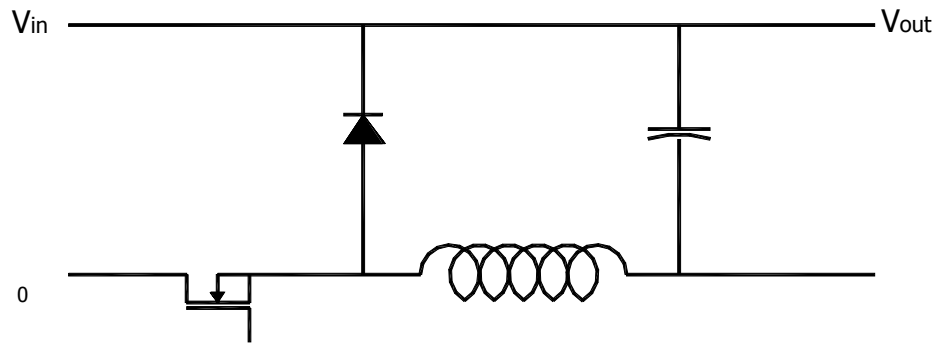
Τέλος το κύκλωμα διακοπής λειτουργίας από το pin 10 μας δίνει τη δυνατότητα με ένα σήμα να θέσουμε τον παλμοσταθεροποιητή εκτός λειτουργίας (κάτι ανάλογο με το reset διαφόρων ολοκληρωμένων).

6.6 Αναλύοντας τη λειτουργία των σταθεροποιητών που χρησιμοποιούμε

Ο τύπος του παλμικού σταθεροποιητή τάσης που χρησιμοποιούμε έχει κάποιες ιδιαιτερότητες σε σχέση με τα κλασικά συστήματα down converter περιγράφηκαν παραπάνω.

Οι ιδιαιτερότητες προέρχονται βασικά από το γεγονός ότι το κύκλωμα ελέγχου (συγκεκριμένα το κύκλωμα ανάδρασης) των step-down παλμικών σταθεροποιητών είναι πιο απλό όταν για διακοπτικό ισχύος χρησιμοποιείται τρανζίστορ τύπου pnp από ότι όταν χρησιμοποιείται τρανζίστορ τύπου npn ή αν πρόκειται για διακοπτικό στοιχείο τύπου MOSFET, τύπου p-channel από ένα τύπου n-channel. Όμως όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο που αναλύονται τα MOSFET τα τύπου p-channel τείνουν να εξαφανιστούν από την αγορά λόγω των καλύτερων χαρακτηριστικών λειτουργίας και του μικρότερου μεγέθους των MOSFET n-channel και έτσι το

διακοπτικό μας ανήκει σε αυτή την κατηγορία παρά τα επιμέρους προβλήματα στη σχεδίαση που παρουσιάστηκαν.



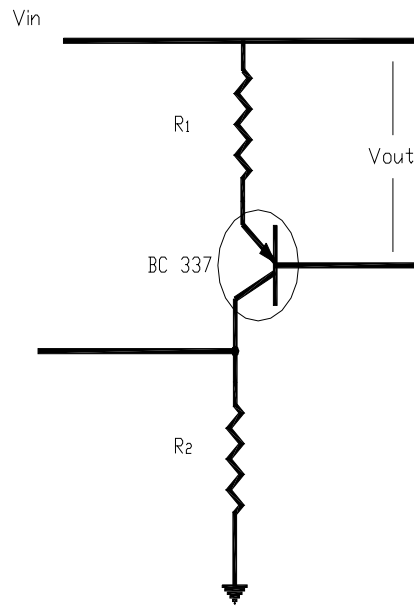
Σχήμα 6.13: Το κυκλωματικό διάγραμμα των παλμικών σταθεροποιητών που χρησιμοποιούμε.

6.6.1 Απλός φορτιστής μπαταρίας

Όπως βλέπουμε και στο βασικό σχέδιο του παλμοσταθεροποιητή στην ουσία «κατεβάζουμε» την τάση εισόδου V_{in} σε μια τέτοια τιμή τάσης V_2 που η διαφορά τους να μας δίνει την επιθυμητή τιμή τάσης εξόδου, αλλά έτσι δημιουργείται ένα νέο πρόβλημα αφού ο error amplifier, του ολοκληρωμένου κυκλώματος CA 3524E που χρησιμοποιούμε για τον έλεγχο του τρανζίστορ ισχύος, απαιτεί - για την ομαλή λειτουργία του - οι αναφορές των τάσεων στις δύο εισόδους του να είναι ως προς το κοινό GND, και όπως καταλαβαίνουμε μπορούμε μόνο να σταθεροποιήσουμε την διαφορά $V_2 - 0$ και όχι την $V_{out} = V_{in} - V_2$ που αλλάζει με την μεταβολή της V_{in} .

Η τάση εισόδου V_{in} θα έχει την τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού panel (που ως γνωστό μεταβάλλεται από 0 - 21 V ανάλογα με την ηλιοφάνεια και το φορτίο) τότε είναι φανερό χρειαζόμαστε ένα παλμοτροφοδοτικό στο οποίο η τάση εξόδου του θα είναι ανεξάρτητη από τις

οποιοσδήποτε μεταβολές της τάσης εισόδου του οπότε σχεδιάσαμε το εξής κύκλωμα συγκριτή που μας δίνει αυτό το αποτέλεσμα.



Σχήμα 6.14: Κύκλωμα σύγκρισης (ανάδρασης) για τη σταθεροποίηση της τάσης εξόδου.

Το κύκλωμα στηρίζεται στην ιδιότητα κατά την οποία όταν μια από τις δύο εισόδους (ανάλογα με την λογική του κυκλώματος) του error amplifier του IC CA 3524E τροφοδοτείται από μια σταθερή τάση (V) που προέρχεται από διαίρεση της Vref με κάποιο λόγο, η τάση στην άλλη είσοδο του ενισχυτή σφάλματος, που θα προέρχεται από ένα σύστημα ανάδρασης όταν η τάση εξόδου είναι αυτή που θέλουμε, πρέπει να είναι ίση με την τάση πόλωση της πρώτης εισόδου.

Η τάση ανάμεσα στην βάση του τρανζίστορ Q_2 και στην V_{in} είναι όπως βλέπουμε η V_{out} έτσι η τάση στα άκρα της R_1 θα ισούται με

$$V_1 = V_{out} - 0,6 \text{ V}$$

όπου 0,6 V είναι η πτώση τάσης πάνω στην επαφή εκπομπού και βάσης του τρανζίστορ Q_2 .

Επομένως το ρεύμα I που διαρρέει την αντίσταση R_1 είναι

$$I = \frac{V_{out} - 0.6}{R_1}$$

που όπως είναι φανερό είναι ίσο με το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση R_2 η τάση στα άκρα της οποίας είναι

$$V_2 = I \cdot R_2 = \frac{V_{out} - 0.6}{R_1} \cdot R_2$$

Αυτή είναι η τάση (V_2) που οδηγούμε στην αναστρέφουσα είσοδο του error amplifier και θα πρέπει να βρούμε τον λόγο των αντιστάσεων R_1 , R_2 για τον οποίο η τάση V_2 θα είναι ίση με την αυτή που πολώνει την μη αναστρέφουσα είσοδο (V_+) όταν η τάση εξόδου είναι η επιθυμούμενη V_{out} .

Ο λόγος των αντιστάσεων $R_1 = 10K$ και $R_2 = 4.7K$ στην θετική είσοδο του error amplifier μας δίνει τάση πόλωσης ίση με

$$V_+ = V_{ref} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5V \cdot \frac{4,7k\Omega}{14,7k\Omega} = 1.6V$$

Επομένως αυτή θα πρέπει να είναι η τάση στην αναστρέφουσα είσοδο για να δημιουργηθεί σημείο αναφοράς (το εύρος των παλμών εξόδου σ' αυτό το σημείο θα είναι V_{out}/V_{in} %) για τη λειτουργία του PWM.

Για να τροφοδοτήσουμε με τάση V_2 την αναστρέφουσα είσοδο του error amplifier ο λόγος των R_1/R_2 πρέπει να είναι τέτοιος ώστε για έξοδο 13,9 Volt η τάση V_2 να ισούται με 1,60 volt.

$$V_2 = \frac{V_{out} - 0.6}{R_1} \cdot R_2 = \frac{13.9 - 0.6}{R_1} \cdot R_2 \Rightarrow 1.6V = \frac{13.3V}{R_1} \cdot R_2 \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = 8.3125 \Rightarrow R_1 = 8.3125 \cdot R_2$$

έστω για

$$R_2 = 1.2k\Omega \Rightarrow R_1 = 8.3125 \cdot 1.2k \Rightarrow R_1 = 9.975\Omega$$

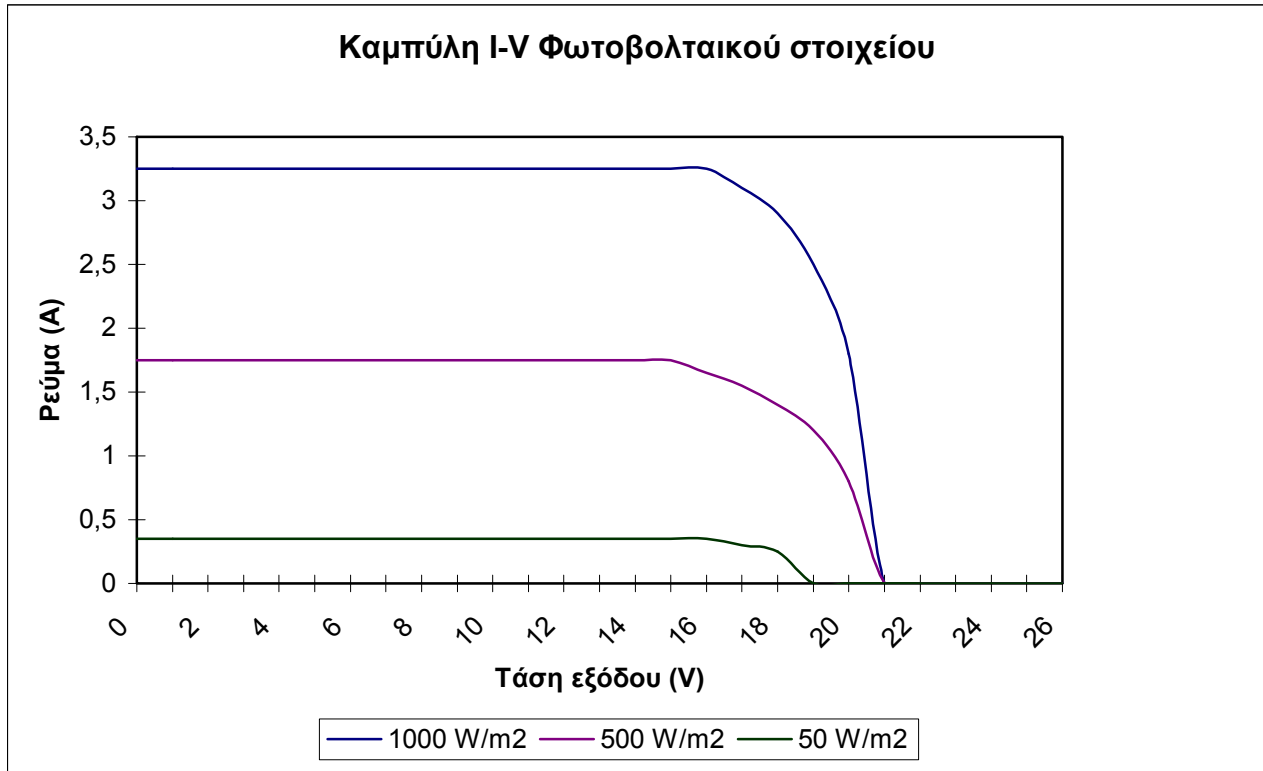
Ας δούμε τώρα πως λειτουργεί το κύκλωμα και αν για οποιαδήποτε μεταβολή της τάσης εισόδου η τιμή της τάσης εξόδου να παραμένει σταθερή. Όπως είπαμε για τάση εξόδου 13,90 V το εύρος

των παλμών εξόδου θα είναι $V_{out} / V_{in} \%$. Ας υποθέσουμε ότι ξαφνικά το φορτίο μειώνεται και η τάση εξόδου παίρνει μια τιμή μεγαλύτερη από 13,9 V. Η αντίδραση του σταθεροποιητή ποια θα είναι; Από τη σχέση βλέπουμε ότι αφού ο αριθμητής του κλάσματος μεγαλώνει, θα μεγαλώσει και η τιμή του ρεύματος I επομένως και η τάση V_2 , με αποτέλεσμα η έξοδος του error amplifier να πάρει μικρότερη τιμή οπότε ο συγκριτής (PWM) θα δώσει παλμούς με εύρος μικρότερο από $V_{out}/V_{in} \%$ ώστε να επαναφέρει την τάση στην επιθυμούμενη τιμή.

Αν τώρα η τάση εξόδου μειωθεί, το ρεύμα I θα γίνει μικρότερο και μαζί θα μικρύνει και η τάση V_2 επομένως η έξοδος του error amplifier θα πάρει μεγαλύτερη τιμή και οι παλμοί εξόδου τώρα θα εμφανιστούν με duty cycle μεγαλύτερο από $V_{out}/V_{in} \%$.

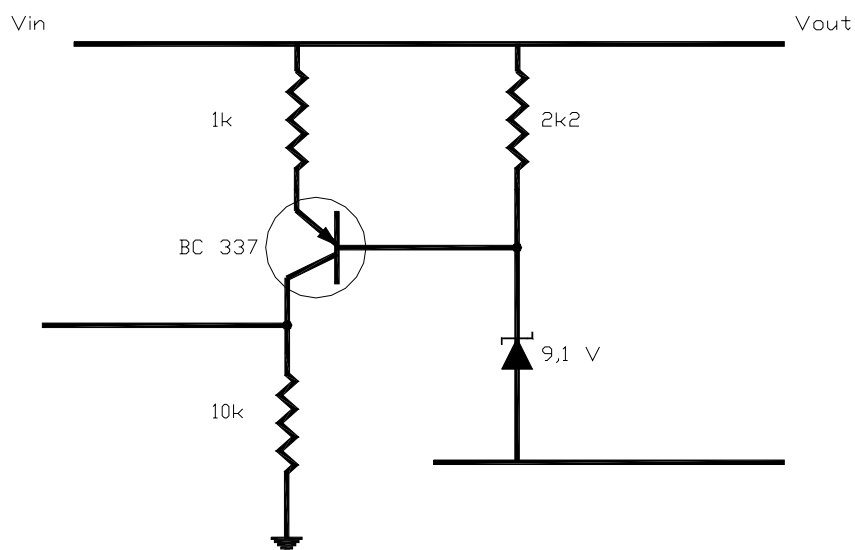
6.6.2 Φορτιστής μπαταρίας με έλεγχο του σημείου μέγιστης ισχύος

Ο **φορτιστής μπαταρίας** που σχεδιάσαμε σαν τάση εισόδου θα έχει την τάση εξόδου από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία ισχύος 55 W. Θα μπορούσαμε ακολουθώντας τον ίδιο δρόμο με τον πιο πάνω μετατροπέα χρησιμοποιώντας δηλαδή το κύκλωμα του συγκριτή με το τρανζίστορ και τον error amplifier να σταθεροποιήσουμε την τάση εξόδου σε μια τιμή ικανή για τη φόρτιση της μπαταρίας (13,9 V) όμως όπως παρατηρούμε και στο πιο κάτω σχήμα η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού είναι η μέγιστη όταν η τάση εξόδου του είναι στα 17,4 V. Έτσι σκεφτήκαμε αν υπάρχει τρόπος να κρατήσουμε την τάση εισόδου στο φορτιστή στην τιμή που μας δίνει τη μέγιστη ισχύ ενώ ταυτόχρονα θα φορτίζουμε την μπαταρία με την κανονική τάση φόρτισης, κερδίζοντας έτσι στην απόδοση του συστήματος. Κοιτάζοντας το manual του CA 3524E είδαμε ότι υπάρχει και η δυνατότητα περιορισμού ρεύματος για την έξοδο και έτσι σκεφτήκαμε μια τροποποίηση της λειτουργίας του με την οποία θα σταθεροποιεί την τάση εξόδου ενώ θα χρησιμοποιήσουμε τον error amplifier για να κρατήσουμε την τάση εισόδου σε τιμές μεγαλύτερες από 17,4 V.



Σχήμα 6.15: Η καμπύλη I-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου που χρησιμοποιούμε.

Έτσι σχεδιάσαμε το κύκλωμα του σχήματος το οποίο λειτουργεί ως εξής: Μόλις η τάση εξόδου υπερβεί την τιμή της διόδου zener και αυτή αρχίσει να άγει τότε η βάση του τρανζίστορ πολώνεται με την τάση της zener και αυτό άγει. Όμως τότε ένα ρεύμα I διάμεσο των R_1 και R_3 βρίσκει διάδρομο προς τη γη. Περνώντας όμως από την R_3 δημιουργεί μια πτώση τάσης πάνω της που πολώνει τη μη αναστρέφουσα είσοδο του current limit το κύκλωμα του οποίου έχει την ιδιότητα όταν η τάση στα άκρα του αυξηθεί και φτάσει την τιμή του ορίου μηδενίζει την είσοδο του συγκριτή (PWM), αυτός στη συνέχεια μειώνει το duty cycle του διακοπτικού, η τάση εξόδου μειώνεται και η δίοδος zener σταματάει να άγει με αποτέλεσμα το τρανζίστορ να φτάσει στην αποκοπή. Τότε καθώς το ρεύμα I δεν βρίσκει δίοδο προς τη γη η πτώση τάσης στα άκρα της R_3 μηδενίζεται και ο συγκριτής αυξάνει το duty cycle του διακοπτικού και επομένως η τάση εξόδου αυξάνει μέχρι η δίοδος zener να αρχίζει πάλι να άγει και αυτός ο κύκλος επαναλαμβάνεται συνέχεια.



Σχήμα 6.16: Κύκλωμα σταθεροποίησης της τάσης εξόδου μέσω του κυκλώματος current limit.

Για να κρατήσουμε τώρα την τάση εισόδου σε τιμή μεγαλύτερη, για μικρά φορτία, ή ίση, για μεγαλύτερα, με 17,4 V όπως είπαμε θα χρησιμοποιήσουμε τον error amplifier. Πολώνουμε την αναστρέφουσα είσοδο του error amplifier με κάποια τάση από τη διαίρεση της V_{ref} και με ένα άλλο διαιρέτη τάσης από την τάση εισόδου πολώνουμε την μη αναστρέφουσα είσοδο του error amplifier. Οι αντιστάσεις του δεύτερου διαιρέτη πρέπει να έχουν τον κατάλληλο λόγο ώστε όταν στην είσοδο έχουμε 17,4 V η τάση που θα τροφοδοτεί την μη αναστρέφουσα είσοδο να είναι η ίδια με την σταθερή τάση πόλωσης της άλλης εισόδου. Έτσι όταν η τάση εισόδου του φορτιστή τείνει να πέσει κάτω από αυτή την τιμή η έξοδος του error amplifier μειώνεται και ο συγκριτής θα μειώσει το duty cycle έτσι ώστε να επανέλθει το σύστημα σε ισορροπία (να μην πέσει η τάση εισόδου κάτω από το όριο των 17,4 V) μειώνοντας το ρεύμα εξόδου.

6.7 Υπολογισμός των επιμέρους εξαρτημάτων των σταθεροποιητών

Θα πρέπει να υπολογίσουμε τα στοιχεία ισχύος των σταθεροποιητών. Οι τιμές για το πηνίο και τον πυκνωτή εξομάλυνσης δίνονται από τους ακόλουθους τύπους

$$L = \frac{V_{out}}{\Delta I} \cdot \frac{T}{2}$$

$$C = \frac{I}{\Delta V_{out}} \cdot \frac{T}{2}$$

όπου

V_{out} = η τάση στα άκρα του πυκνωτή

ΔV_{out} = η μέγιστη κυμάτωση της τάσης εξόδου

I = το ρεύμα εξόδου

ΔI = η μέγιστη μεταβολή του ρεύματος στο πηνίο

T = η περίοδος του switching

6.7.1 Υπολογίζοντας το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει την *free - wheeling diode*

Όπως έχουμε αναφέρει η *free - wheeling* δίοδος είναι το μονοπάτι από το οποίο το ρεύμα κλείνει κύκλο όταν το switching τρανζίστορ είναι σε αποκοπή. Η δίοδος πρέπει να τη δυνατότητα αντοχής σε ρεύμα τουλάχιστο ίση με το ρεύμα εξόδου κατά τη διάρκεια της περιόδου που το διακοπτικό άγει.

Η ελάχιστη τιμή του ρεύματος που διαρρέει τη δίοδο όταν αυτή άγει πρέπει να ισούται:

$$I_{FM} = \frac{2I_{out}}{1 - \delta_{max}}$$

όπου δ_{max} είναι το μέγιστο duty cycle του μετατροπέα.

6.7.2 Υπολογίζοντας τα χαρακτηριστικά του switching διακοπτικού.

Το switching διακοπτικό που χρησιμοποιείται σε down converters πρέπει να εκλεγεί ώστε να αντέχει τη μέγιστη ανάστροφη τάση όταν είναι σε αποκοπή και το μέγιστο ρεύμα όταν άγει. Η μέγιστη ανάστροφη τάση όταν το διακοπτικό είναι σε αποκοπή ισούται με

$$V_{CE} = \frac{V_{in}}{1 - \delta_{max}}$$

Όπου δ_{max} είναι το μέγιστο duty cycle του μετατροπέα.

Ενώ το μέγιστο ρεύμα ισούται με το ρεύμα εξόδου.

Φορτιστής μπαταρίας

Η αυτεπαγωγή του πηνίου πρέπει να είναι τουλάχιστο

$$L = \frac{V_{out}}{\Delta I} \cdot \frac{T}{2} \Rightarrow L = \frac{3,2}{0,11} \cdot \frac{10\mu s}{2} \Rightarrow L = 106\mu H$$

Η αυτεπαγωγή του πηνίου που τυλίξαμε είναι περίπου 550μH.

Η χωρητικότητα του πυκνωτή εξόδου θα είναι

$$C = \frac{1}{\Delta V_{out}} \cdot \frac{T}{2} \Rightarrow C = \frac{1,5}{0,01 \cdot 3,2} \cdot \frac{10\mu s}{2} \Rightarrow C = 234,5\mu F$$

Η πιο κοντινή τυποποιημένη τιμή εμπορίου είναι 330 μF

Η ελάχιστη τιμή του ρεύματος που διαρρέει τη free - wheeling δίοδο όταν αυτή άγει ισούται με:

$$I_{FM} = \frac{2I_{out}}{1 - \delta_{max}} \Rightarrow I_{FM} = \frac{2 \cdot 1,5}{1 - 0,24} = 4A$$

Τοποθετήσαμε ένα ζεύγος διόδων Schottky παράλληλα με ικανότητα ρεύματος 15 A η καθεμία.

Η μέγιστη ανάστροφη τάση στα άκρα του διακοπτικού όταν αυτό είναι σε αποκοπή ισούται με

$$V_{CE} = \frac{V_{in}}{1 - \delta_{\max}} \Rightarrow V_{CE} = \frac{13,6}{1 - 0,24} = 17,89V$$

Ενώ το μέγιστο ρεύμα ισούται με το ρεύμα εξόδου δηλαδή 0,75 A.

Το διακοπτικό που χρησιμοποιήσαμε είναι τύπου MOSFET RFP 10N15 n - channel με ικανότητα οδήγησης 10 A και 150 V.

7. ΤΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

7.1 Εισαγωγή

Το τρανζίστορ φαινομένου πεδίου ή απλά το FET (Field-Effect-Transistor) είναι μια ημιαγωγική συσκευή με τρεις ακροδέκτες που χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε ψηφιακά και αναλογικά κυκλώματα. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων συσκευών, το MOSFET και το JFET, που είναι τα ακρωνύμια των όρων τρανζίστορ "ημιαγωγού οξειδίου μετάλλου" (Metal Oxide Semiconductor) και τρανζίστορ "φαινομένου επαφής" (Junction Field-Effect), αντίστοιχα.

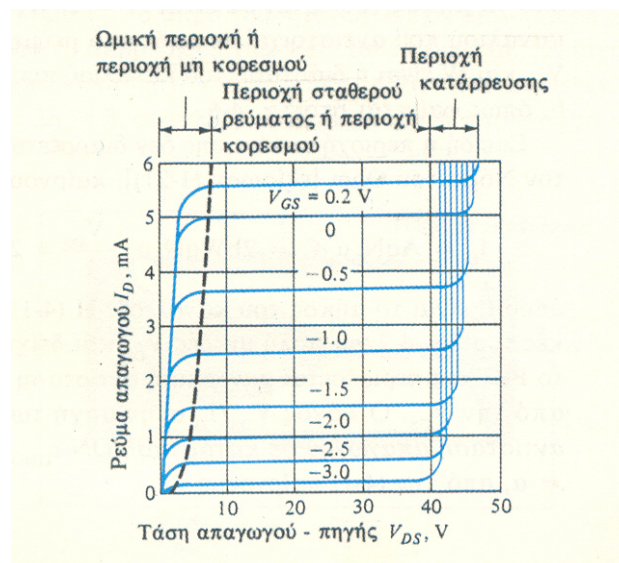
Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του FET είναι, ότι συχνά είναι απλούστερο να κατασκευαστεί και ότι καταλαμβάνει μικρότερο χώρο πάνω σε ένα τσιπ απ' ό,τι ένα BJT (διπολικό τρανζίστορ επαφής). Έτσι η πυκνότητα εξαρτημάτων που προκύπτει μπορεί να είναι εξαιρετικά μεγάλη, συχνά να ξεπερνά τα 100.000 MOSFET ανά τσιπ. Μια δεύτερη επιθυμητή ιδιότητα είναι ότι συσκευές MOS μπορούν να συνδεθούν σαν αντιστάσεις και πυκνωτές. Αυτό επιτρέπει την σχεδίαση συστημάτων που αποτελούνται αποκλειστικά από MOSFET και όχι από άλλα εξαρτήματα. Η εκμετάλλευση των ιδιοτήτων αυτών κάνει το MOSFET την κυρίαρχη συσκευή σε συστήματα πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (VLSI, Very Large Scale Integration). Δύο από τις ιδιότητες των JFET, που χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα επεξεργασίας σημάτων, είναι η μεγάλη αντίσταση εισόδου και ο χαμηλός θόρυβος.

7.2 Το MOSFET ενίσχυσης

Σε ένα τρανζίστορ JFET, το δραστικό μέγεθος του καναλιού ελέγχεται από το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στο κανάλι μέσω της επαφής p-n. Χρησιμοποιώντας ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο πύλης που χωρίζεται μ' ένα στρώμα οξειδίου από το κανάλι του ημιαγωγού, λαμβάνεται μια βασικά διαφορετική συσκευή φαινομένου πεδίου. Αυτή η διάταξη μετάλλου - οξειδίου - ημιαγωγού (MOS) επιτρέπει τον έλεγχο των ιδιοτήτων του ημιαγωγού από ένα ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται, όταν εφαρμοστεί μια τάση μεταξύ της πύλης και του σώματος του ημιαγωγού και που μεταδίδεται μέσα από το στρώμα του οξειδίου. Μια τέτοια διάταξη ονομάζεται

τρανζίστορ MOSFET ή απλά τρανζίστορ MOS. Η σπουδαιότητα του έχει αναβαθμιστεί από το γεγονός ότι περισσότερα IC κατασκευάζονται με στοιχεία MOS παρά με οποιοδήποτε άλλο είδος ημιαγωγικής συσκευής.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες τρανζίστορ MOS. Το MOSFET εκκένωσης έχει συμπεριφορά παρόμοια με του JFET. Σε τάση πύλης ίση με μηδέν και σταθερή τάση απαγωγού, το ρεύμα είναι μέγιστο και ύστερα ελαττώνεται όταν εφαρμόζεται δυναμικό πύλης (με κατάλληλη πολικότητα) όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1.

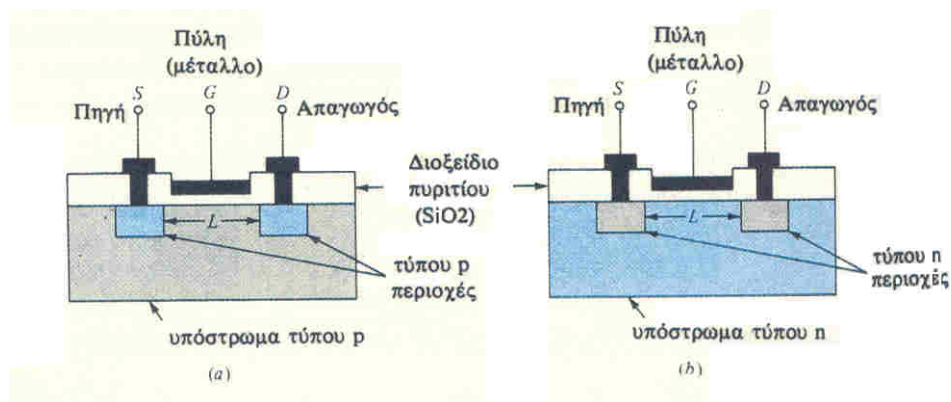


Σχήμα 7.1: Χαρακτηριστικές εξόδου ενός MOSFET καναλιού n τύπου.

Το δεύτερο είδος συσκευής, που ονομάζεται MOSFET ενίσχυσης, δεν εφαρμόζεται ρεύμα σε τάση πύλης ίση με μηδέν και η τιμή του ρεύματος εξόδου ελαττώνεται, όταν αυξάνεται η τιμή του δυναμικού πύλης. Και τα δύο είδη υπάρχουν είτε σε κανάλι p είτε σε κανάλι n. Στο τμήμα αυτό θα ασχοληθούμε με τις ιδιότητες του τύπου ενίσχυσης καναλιού n που μας ενδιαφέρει.

7.3 Η δομή του MOS ενίσχυσης.

Στο σχήμα 7.2α φαίνεται μια απλοποιημένη μορφή της δομής ενός MOSFET ενίσχυσης καναλιού p και στο σχήμα 7.2β μιας συσκευής καναλιού n. Οι συσκευές που φαίνονται στο σχήμα 7.2 συνήθως ονομάζονται τρανζίστορ NMOS και PMOS.



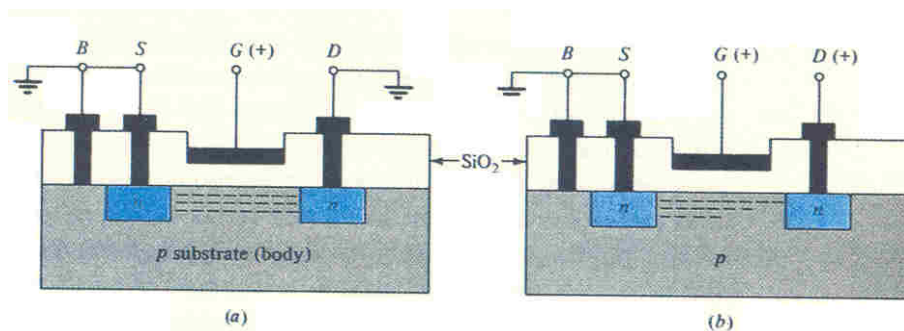
Σχήμα 7.2: Δομές ενίσχυσης MOSFET : α) καναλιού n και β) καναλιού p

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.2α, οι δύο περιοχές τύπου n που είναι ενσωματωμένες στο υπόστρωμα τύπου p (στο σώμα) είναι τα ηλεκτρόδια πηγής και απαγωγού. Η περιοχή μεταξύ πηγής και απαγωγού είναι το κανάλι, που καλύπτεται από ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου πυριτίου (SiO_2). Η πύλη σχηματίζεται από το μεταλλικό ηλεκτρόδιο που τοποθετείται πάνω στο στρώμα οξειδίου. Σήμερα, η τεχνολογία κατασκευής MOSFET χρησιμοποιεί ένα αγώγιμο στρώμα από πολυπυρίτιο για πύλη, αντί για την μεταλλική πύλη που φαίνεται στο σχήμα 7.2. Όμως, οι φυσικές αρχές που διέπουν την λειτουργία του MOSFET είναι οι ίδιες και για τα δύο είδη πύλης. Η μεταλλική περιοχή πύλης, σε συνδυασμό με το μονωτικό διηλεκτρικό στρώμα οξειδίου και το κανάλι ημιαγωγού, σχηματίζουν έναν πυκνωτή με παράλληλους οπλισμούς. Το μονωτικό στρώμα διοξειδίου πυριτίου είναι η αιτία για την οποία η συσκευή αυτή ονομάζεται και FET μονωμένης πύλης (insulated -gate FET, IGFET). Το στρώμα αυτό δημιουργεί μια εξαιρετικά μεγάλη αντίσταση εισόδου (10^{10} μέχρι $10^{15} \Omega$) στο MOSFET.

7.4 Φυσική συμπεριφορά του MOSFET ενίσχυσης

Στο σχήμα 7.3α φαίνεται ένα τρανζίστορ NMOS όπου είναι γειωμένα η πηγή και το υπόστρωμα και η τάση απαγωγού - πηγής V_{DS} είναι στο μηδέν. Η θετική τάση που εφαρμόζεται στην πύλη δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο με κατεύθυνση κάθετη μέσα στο κανάλι. Το πεδίο αυτό τελειώνει σε "επαγόμενα" αρνητικά φορτία κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού, όπως φαίνεται στο

σχήμα 7.3α. Επειδή το υπόστρωμα τύπου p περιέχει πολύ λίγα ηλεκτρόνια, τα θετικά επιφανειακά φορτία είναι κυρίως ηλεκτρόνια από την πηγή και τον απαγωγό τύπου n είναι φορείς μειονότητας, σχηματίζουν ένα "στρώμα αναστροφής". Ένα τέτοιο στρώμα αναστροφής θα σχηματιστεί μόνον αν η V_{GS} ξεπεράσει μια στάθμη κατωφλίου V_T , αυξάνει ο αριθμός των επαγόμενων αρνητικών φορτίων στον ημιαγωγό. Κατά συνέπεια, αυξάνει η αγωγιμότητα του καναλιού. Η εφαρμογή θετικού δυναμικού μεταξύ απαγωγού και πηγής παράγει ένα ρεύμα στο επαγόμενο κανάλι μεταξύ απαγωγού και πηγής. Έτσι, το ρεύμα απαγωγού ενισχύεται από τη θετική τάση πύλης και η συσκευή ονομάζεται MOSFET ενίσχυσης.



Σχήμα 7.3: Πολωμένο τρανζίστορ NMOS όπου φαίνεται το επαγόμενο κανάλι με (α) $V_{DS} = 0$ και $V_{GS} > 0$.

Ας θεωρήσουμε τώρα την περίπτωση όπου η V_{DS} αυξάνεται από το μηδέν κρατώντας την V_{GS} σε μια σταθερή θετική τιμή μεγαλύτερη από V_T (δηλαδή $V_{GS} - V_T > 0$). Για μικρές τιμές της V_{DS} ($V_{DS} < V_{GS} - V_T$), μια αύξηση της V_{DS} συνοδεύεται από αύξηση του ρεύματος απαγωγού I_D . Η συμπεριφορά του MOSFET είναι συμπεριφορά αντίστασης και η περιοχή αυτή ονομάζεται ωμική περιοχή. Καθώς αυξάνει η V_{DS} , η πτώση κατά μήκος του καναλιού αυξάνει σε τιμή και έτσι ελαττώνεται η τάση $V_{GD} = V_{DS} - V_{GS}$ στα άκρα του οξειδίου πύλης στην πλευρά απαγωγού του καναλιού. Αυτή η μικρότερη διαφορά δυναμικού ελαττώνει την τιμή του πεδίου κατά μήκος του άκρου απαγωγού του διηλεκτρικού, με αποτέλεσμα λιγότερα φορτία αναστροφής στο τμήμα αυτό του επαγόμενου καναλιού. Το κανάλι "διατρύεται" και το I_D αυξάνει πολύ πιο αργά σε σχέση με τις αυξήσεις της V_{DS} απ' ό,τι στην ωμική περιοχή κοντά στην αρχή των αξόνων. Στην ιδανική περίπτωση, πετυχαίνεται μια διάτρηση, επιπλέον αύξηση της V_{DS} δεν προκαλεί μεταβολή του I_D

και υπάρχει κορεσμός ρεύματος. Αυτή η περιοχή κορεσμού έχει παρόμοια φύση με τον κορεσμό ταχύτητας του JFET. Η τιμή του I_D στον κορεσμό εξαρτάται από την τιμή της V_{GS} . Αύξηση της $V_{GS} > V_T$ έχει αποτέλεσμα αυξημένες τιμές κορεσμού του I_D .

7.5 Χαρακτηριστικές του MOSFET ενίσχυσης

Οι καμπύλες των χαρακτηριστικών $V - I$ επειδή αλλάζουν για κάθε MOSFET θα δοθούν στο τέλος του κεφαλαίου που αναλύει τα MOSFET για το συγκεκριμένο τρανζίστορ που χρησιμοποιούμε.

7.6 Αναλυτικές εκφράσεις των χαρακτηριστικών $V - I$.

Μεταξύ πηγής και απαγωγού υπάρχει ένα κανάλι αναστροφής, με $V_{DS} = 0$, μόνο αν $V_{GS} > V_T$. Για $V_{GS} < V_T$, δεν υπάρχουν ευκίνητοι φορείς στο άκρο του απαγωγού του καναλιού και $I_D = 0$. Έτσι σε ένα JFET η V_T είναι ανάλογη με την τάση διάτρησης. Οι συνθήκες $V_{GS} < V_T$ και $I_D = 0$ σημαίνουν ότι το MOSFET είναι σε αποκοπή κι αντιστοιχεί σε ανοικτό διακόπτη.

7.7 Ωμική Περιοχή

Όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο τμήμα, για $V_{GS} > V_T$, αγωγιμότητα του καναλιού στην ωμική περιοχή (που ονομάζεται και περιοχή μη κορεσμού ή περιοχή τριόδου) ελέγχεται από την V_{DS} . Ακριβέστερα, η ωμική περιοχή ορίζεται από την $V_{GS} - V_T > V_{DS}$ (ή από την $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS} > V_T$). Η θεωρητική ανάλυση της ωμικής περιοχής οδηγεί στο αποτέλεσμα, ότι η χαρακτηριστική απαγωγού δίνεται από την

$$I_D = k \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot \left[2 \cdot (V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} \cdot V_{DS}^2\right] \quad (6.1)$$

όπου L είναι το μήκος του καναλιού,

W το πλάτος του καναλιού (κάθετο στην κατεύθυνση του L) και

k η παράμετρος σε $\mu A/V^2$.

Η παράμετρος k ισούται με $:\mu_n \frac{C_o}{2}$

όπου μ_n είναι η ευκινησία των ηλεκτρονίων και

C_o είναι η χωρητικότητα της πύλης ανά μονάδα επιφανείας (και ίση με ϵ/Tox , δηλαδή τον λόγο της επιδεκτικότητας και του πάχους του στρώματος οξειδίου).

Ας σημειωθεί, ότι η V_T εξαρτάται και από την C_o καθώς και από τις πυκνότητες προσμίξεων του απαγωγού και της πηγής τύπου n και του υποστρώματος p .

7.8 Περιοχή κορεσμού

Στην ιδανική περίπτωση, το I_D είναι σταθερό και ανεξάρτητο V_{DS} στην περιοχή κορεσμού για την οποία $V_{GS} - V_T < V_{DS}$ (αλλά μεγαλύτερη από μηδέν). Η τιμή του I_D εξαρτάται μόνο από την δραστική τάση ελέγχου $V_{GS} - V_T$ και δίνεται από την

$$I_D = k \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot (V_{GS} - V_T)^2 = I_{DS} \quad (6.2)$$

όπου ο δείκτης S που έχει τεθεί στο I_D δείχνει ότι ασχολούμαστε με το ρεύμα απαγωγού στην κορεσμού.

Η διαχωριστική γραμμή μεταξύ της ωμικής περιοχής και της περιοχής κορεσμού δίνεται από την $V_{GS} - V_T = V_{DS}$. Αν αυτή η τιμή της V_{DS} αντικατασταθεί στην 1 έχουμε την 2. Η καμπύλη με την διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 7.4 που δείχνει το όριο μεταξύ ωμικής περιοχής και περιοχής κορεσμού, δίνεται από την

$$I_D = k \cdot \left(\frac{W}{6L}\right) \cdot V_{DS}^2 = I \quad (6.3)$$

Αξίζουν μερικές παρατηρήσεις για τις εκφράσεις στις (7.1) και (7.2). Πρώτη παρατήρηση, ο λόγος μορφής W/L είναι μια σημαντική παράμετρος της σχεδίασης, γιατί λειτουργεί σαν συντελεστής κλίμακας για το ρεύμα απαγωγού. Έτσι δύο (ή περισσότερα) MOSFET με τη ίδια τιμή V_T αλλά με διαφορετικές ικανότητες ρεύματος, μπορούν να κατασκευαστούν πάνω στο ίδιο

τσιπ χρησιμοποιώντας δύο (ή περισσότερες) τιμές του λόγου W/L . Δεύτερη παρατήρηση, η παράμετρος k έχει συνηθισμένες τιμές που βρίσκονται στην περιοχή μεταξύ 10 και 50 $\mu A/V^2$ στις σημερινές διαδικασίες παραγωγής εμπορικών NMOS. Έτσι, έχουμε μεγάλες τιμές του I_D (αρκετά mA) μόνο σε συσκευές με μεγάλους λόγους W/L , δηλαδή σε συσκευές με μεγάλη επιφάνεια.

Οι χαρακτηριστικές στο σχήμα 7.4 παίρνονται από την (7.4) και την (7.5) για MOSFET ενίσχυσης καναλιού η με $k = 20 \mu A/V^2$, $W/L = 1$ και $V_T = 2 V$. Η διαχωριστική γραμμή μεταξύ της ωμικής περιοχής και της περιοχής κορεσμού, που φαίνεται στο 7.4, λαμβάνεται σχεδιάζοντας την παραβολή της 7.5. Ας σημειωθεί, ότι αν ο λόγος W/L πολλαπλασιαστεί επί έναν συντελεστή F , τότε και το I_D πολλαπλασιάζεται επί F για το ίδιο ζεύγος τιμών V_{DS} και V_{GS} .

Η χαρακτηριστική μεταφοράς του MOSFET είναι η καμπύλη $I_D - V_{GS}$ για σταθερή V_{DS} στην περιοχή κορεσμού. Η καμπύλη του σχήματος 7.5 είναι χαρακτηριστική μεταφοράς για το MOSFET του σχήματος 7.4.

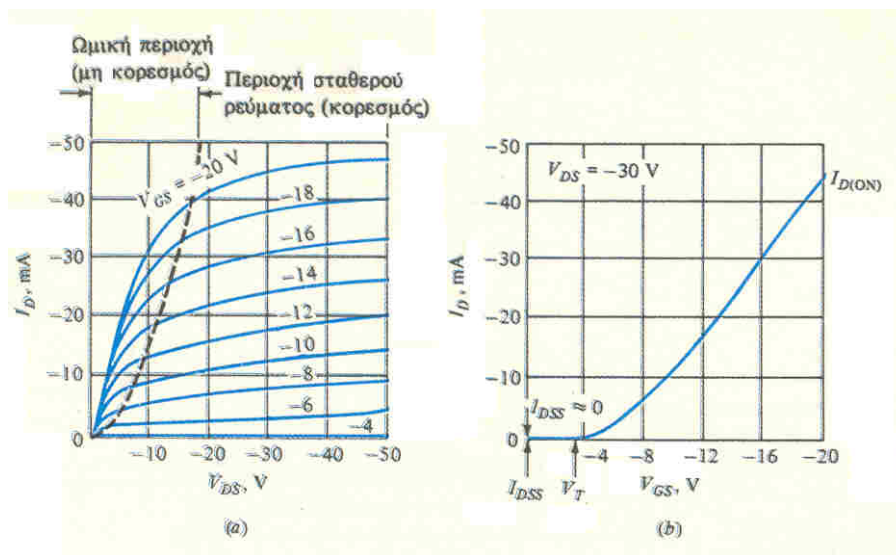
Οι χαρακτηριστικές του σχήματος 7.4 ισχύουν για ιδανικό MOSFET. Στην πραγματικότητα το I_D αυξάνει ελάχιστα όταν αυξάνεται η V_{DS} στην περιοχή κορεσμού. Η αιτία είναι η "διαμόρφωση μήκους καναλιού", που είναι φαινόμενο ανάλογο με την διαμόρφωση πλάτους βάσης στο BJT. Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.6, αν οι πραγματικές χαρακτηριστικές προεκταθούν στο δεύτερο τεταρτημόριο, συναντώνται όλες στο σημείο $V_{DS} = -1/\lambda$. Εξαιτίας της ομοιότητας με το φαινόμενο Early στα BJT, η ποσότητα $1/\lambda$ ονομάζεται και τάση Early. Οι συνηθισμένες τιμές του λ είναι μεταξύ 0,01 μέχρι 0,03 V^{-1} . Για να λάβει υπόψη την διαμόρφωση μήκους καναλιού, η 5 τροποποιείται κατά τον παράγοντα $(1 + \lambda V_{DS})$, όπως φαίνεται στην σχέση (7.4)

$$I_D = k \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot (V_{GS} - V_T)^2 \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}) \quad (6.4)$$

Ο παράγοντας $(1 + \lambda V_{DS})$, συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη στα ψηφιακά κυκλώματα, αλλά στα αναλογικά κυκλώματα μπορεί να είναι σημαντικός.

7.9 Χαρακτηριστικές των MOSFET ενίσχυσης καναλιού p

Το τρανζίστορ PMOS, που φαίνεται στο 7.2 αποτελείται από δύο περιοχές τύπου p σε ένα υπόστρωμα τύπου n. Η αρχή λειτουργίας ενός MOSFET ενίσχυσης καναλιού p είναι η ίδια με την αρχή λειτουργίας των συσκευών NMOS. Ισχύουν οι (7.1) και (7.4) αφού παρατηρήσουμε, ότι όλες οι πολικότητες τάσεων και οι κατευθύνσεις ρευμάτων σε μια συσκευή PMOS είναι αντίθετες από τις αντίστοιχες ποσότητες στα τρανζίστορ NMOS. Ακόμη, στον υπολογισμό της παραμέτρου k , το μ_n αντικαθίσταται από την ευκινησία οπών μ_p .



Σχήμα 7.4: (α) Χαρακτηριστικές απαγωγού και (β) χαρακτηριστική μεταφοράς για $V_{DS} = -30$ V ενός PMOS.

Στο σχήμα 7.4α φαίνονται οι χαρακτηριστικές ενός διακριτού τρανζίστορ PMOS και στο σχήμα 7.4β η χαρακτηριστική μεταφοράς. Παρατηρήστε, ότι το γενικό σχήμα των καμπυλών αυτών είναι παρόμοιο με το σχήμα των χαρακτηριστικών του NMOS στο σχήμα 7.1. Παρατηρήστε όμως και τις διαφορές στις στάθμες ρεύματος και τάσης των συσκευών αυτών. Στην κατασκευή των διακριτών MOSFET, οι διαστάσεις μπορούν να γίνουν μεγαλύτερες απ' ό,τι στα ολοκληρωμένα MOSFET. Έτσι παίρνουμε διακριτά τρανζίστορ MOS με μεγαλύτερες δυνατότητες ρεύματος, που μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγαλύτερες εφαρμοζόμενες τάσεις.

7.10 Σύγκριση των τρανζίστορ PMOS και NMOS

Ιστορικά, τα τρανζίστορ ενίσχυσης καναλιού p χρησιμοποιήθηκαν πρώτα στα συστήματα MOS, γιατί παράγονταν ευκολότερα με μεγαλύτερες ποσότητες και αξιοπιστία από ότι οι συσκευές καναλιού n. Οι βελτιώσεις στις κατασκευαστικές μεθόδους οδήγησαν στην κυριαρχία των τρανζίστορ NMOS και - με εξαίρεση την τεχνολογία CMOS - έχουν σχεδόν καταργήσει τις συσκευές PMOS. Οι αιτίες περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.

Η ευκινησία οπών στο πυρίτιο σε κανονικές εντάσεις πεδίου είναι περίπου $500 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{sec})$. Η ευκινησία ηλεκτρονίων, εξ' άλλου είναι περίπου $1300 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{sec})$. Έτσι, για συσκευές με τις ίδιες διαστάσεις

1. το ρεύμα στο τρανζίστορ PMOS είναι μικρότερο από το μισό του ρεύματος σε συσκευή NMOS και
2. η αντίσταση ON ενός MOSFET καναλιού p είναι σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση ενός MOSFET καναλιού n.

Με άλλα λόγια, για να πετύχουμε ίδιες τιμές ρεύματος και αντίστασης ON, όπως σε ένα τρανζίστορ NMOS, θα πρέπει να αυξηθεί ο λόγος W/L της συσκευής PMOS, ώστε να λάβει υπόψη την μικρότερη ευκινησία οπών. Αυτό σημαίνει, ότι οι συσκευές PMOS χρειάζονται σχεδόν τριπλάσια επιφάνεια από τα αντίστοιχα τρανζίστορ NMOS. Έτσι τα κυκλώματα NMOS είναι μικρότερα από τα κυκλώματα PMOS με την ίδια πολυπλοκότητα. Ακόμη η μεγαλύτερη πυκνότητα συσκευασίας του MOS καναλιού n το κάνει ταχύτερο σε εφαρμογές μεταγωγής λόγω των μικρότερων επιφανειών επαφής. Η ταχύτητα λειτουργίας περιορίζεται κυρίως από τις εσωτερικές σταθερές χρόνου RC και η χωρητικότητα είναι ανάλογη με τις διατομές της επαφής. Έτσι, για τους λόγους που αναφέρονται στην παράγραφο αυτή, στα κυκλώματα χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά οι συσκευές NMOS.

7.11 Δίοδος φράγματος SCHOTTKY.

Η δίοδος που σχηματίζεται από ένα μέταλλο και έναν εξωγενή ημιαγωγό μπορεί να είναι είτε ανορθωτική είτε ωμική. Εξαιτίας των διαφορών στις συγκεντρώσεις φορέων στα δύο υλικά, υπάρχει ένα φράγμα δυναμικού. Οι ωμικές επαφές, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή

συνδέσεων στις ημιαγωγίμες συσκευές, υπάρχουν όταν υπάρχει φροντίδα να εξαφανιστεί η επίδραση του φράγματος. Μια τέτοια περίπτωση είναι της επαφής μεταξύ αλουμινίου και πυριτίου με πολλές προσμίξεις που χρησιμοποιείται στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Όταν, όμως χρησιμοποιείται πυρίτιο με λίγες προσμίξεις (ή αρσενικούχο γάλλιο), η επαφή αλουμινίου - πυριτίου κάνει ανόρθωση και οι συσκευές που σχηματίζονται με τον τρόπο αυτό ονομάζονται δίοδοι φράγματος Schottky ή απλά δίοδοι Schottky.

Στο σχήμα 7.5 που ακολουθεί φαίνεται μια σύγκριση της χαρακτηριστικής μίας διόδου Schottky και μιας διόδου επαφής πυριτίου. Παρατηρούμε ότι οι χαρακτηριστικές έχουν παρόμοιο σχήμα, πράγμα που σημαίνει ότι η σχέση :

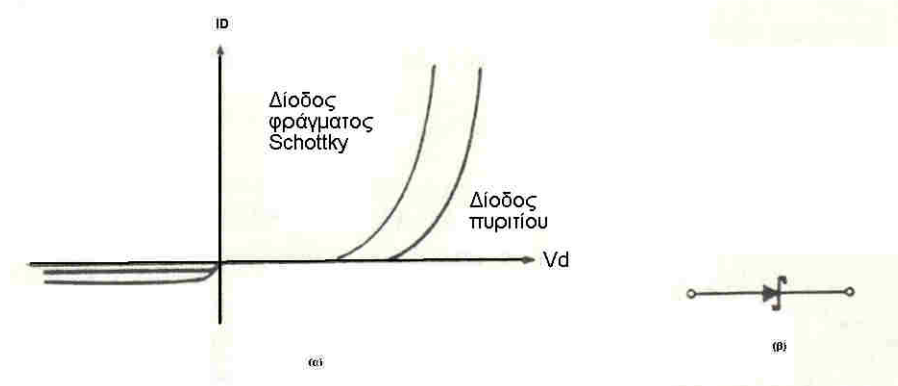
$$I_D = I_s \left(\frac{eV_D}{nV_T} - 1 \right) A$$

ισχύει και για την συμπεριφορά της διόδου Schottky. Ακόμη, παρατηρούνται δύο βασικές διαφορές μεταξύ των δύο χαρακτηριστικών:

- 1) η τάση αποκοπής V_G είναι μικρότερη και
- 2) το ρεύμα ανάστροφου κορεσμού είναι μεγαλύτερο στην δίοδο Schottky.

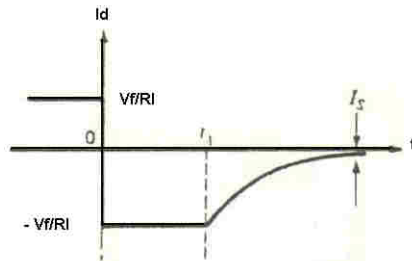
Και οι δύο ιδιότητες είναι αποτέλεσμα της μεγάλης συγκέντρωσης ηλεκτρονίων στο μέταλλο. Αφού υπάρχει μεγαλύτερος διαθέσιμος αριθμός φορέων τα αντίστοιχα ρεύματα λαμβάνονται σε μικρότερες τάσεις. Με τον ίδιο τρόπο, αυτός ο αριθμός φορέων δίνει μεγαλύτερα ρεύματα κορεσμού.

Η βασική χρήση των διόδων Schottky στα IC οφείλεται στο ότι μετάγονται ταχύτερα από ότι η



Σχήμα 7.5: Δίοδος φράγματος Schottky (α) χαρακτηριστική και (β) κυκλωματικό σύμβολο

δίοδος επαφής. Επειδή είναι συσκευή φορέων πλειονότητας (θυμηθείτε ότι στα μέταλλα δεν υπάρχουν φορείς μειονότητας), ο χρόνος αποθήκευσης είναι αμελητέος και ο χρόνος ανάστροφης επαναφοράς περιλαμβάνει μόνο το χρόνο μετάβασης που φαίνεται στο σχήμα 7.6.

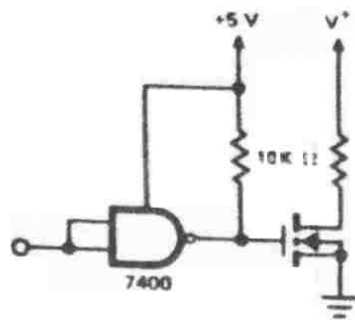
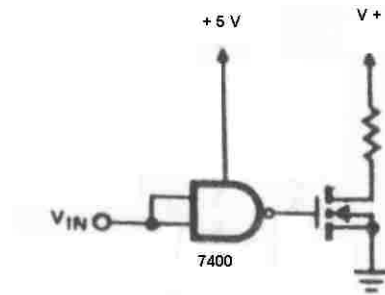


Σχήμα 7.6: Χρόνος μετάβασης της διόδου Schottky

7.12 ΟΔΗΓΩΝΤΑΣ MOSFET ΙΣΧΥΟΣ

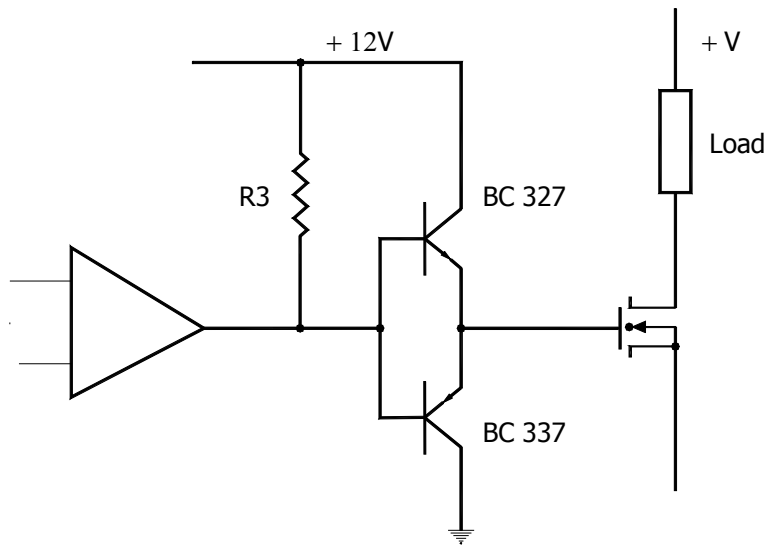
7.12.1 Οδήγηση MOSFET από TTL.

Ένα MOSFET μπορεί να οδηγηθεί απ' ευθείας από TTL gates (σχήμα 7.7α). Επειδή όμως η τάση εξόδου των TTL είναι χαμηλή, το ρεύμα εξόδου του MOSFET θα περιοριστεί και αυτό σε κάποια τιμή μικρότερη από τη μέγιστη που μπορεί να ελέγχει όταν οδηγείται κανονικά γιατί το τρανζίστορ μένει για μεγάλο χρόνο στη γραμμική περιοχή της μεταβολής του πριν έρθει στον κόρο. Βέβαια μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη διάταξη του σχήματος 7.7β στην οποία μια pull-up αντίσταση αυξάνει το ρεύμα τροφοδοσίας του MOSFET αλλά παραμένει ακόμη το μειονέκτημα της χαμηλής τάσης οδήγησης.



Σχήμα 7.7: α) Οδήγηση MOSFET κατευθείαν από πύλη TTL β) με τη χρησιμοποίηση μιας pull-up αντίστασης

Έτσι για να οδηγήσουμε σωστά ένα MOSFET από μια πύλη TTL χρειαζόμαστε ένα κύκλωμα ενίσχυσης το οποίο θα μπορεί να παρέχει πολύ γρήγορη ροή ρεύματος και να μειώνει την χωρητικότητα της πύλης. Ένα τέτοιο απλό κύκλωμα είναι ένα συμπληρωματικός ενισχυτής ακόλουθος εκπομπού όπως φαίνεται στο σχήμα 7.8.



Σχήμα 7.8: Ένας ενισχυτής emitter - follower ανάμεσα στο TTL και στο MOSFET μειώνει τους χρόνους ανόδου και καθόδου των παλμών οδήγησης. Αυτά τα τρανζίστορ πρέπει να έχουν υψηλό κέρδος και εύρος λειτουργίας.

Τα τρανζίστορ Q_1 και Q_2 πρέπει να έχουν μεγάλο κέρδος σε υψηλά ρεύματα και την ικανότητα να παρέχουν το απαιτούμενο ρεύμα για το φαινόμενο Miller όταν το διακοπτικό ανοιγοκλείνει.

Οι ακόλουθες ισότητες μας δίνουν τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τα ρεύματα που διαρρέουν το κάθε τρανζίστορ ενίσχυσης τη στιγμή που το Q_1 άγει και το Q_2 βρίσκεται σε αποκοπή. Το ρεύμα φορτίου I_{charge} δίνεται από τον τύπο

$$I_{charge} = \frac{C_{GS} \cdot V_{GS}}{t_r} \quad \text{και} \quad C_{GS} = C_{iss} - C_{rss}$$

όπου C_{GS} = η χωρητικότητα μεταξύ gate και source

C_{iss} = η χωρητικότητα εισόδου

C_{rss} = η χωρητικότητα αντίθετης μεταφοράς

V_{GS} = η τάση μεταξύ gate και source

t_r = ο χρόνος ανόδου του παλμού εισόδου

Αν υποθέσουμε ότι η ανάμεσα σε gate και drain χωρητικότητα εκφορτίζεται στο ίδιο χρόνο τότε $t_r = t_f$ και το ρεύμα εκφόρτισης θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$I_{dis} = \frac{C_{rss} V_{DS}}{t_f}$$

όπου V_{DS} είναι η τάση ανάμεσα σε άνοδο και κάθοδο (σε volt)

Για να υπολογίσουμε την ισχύ που καταναλώνεται πάνω σε καθένα από τα τρανζίστορ ακολουθούμε τον επόμενο τύπο

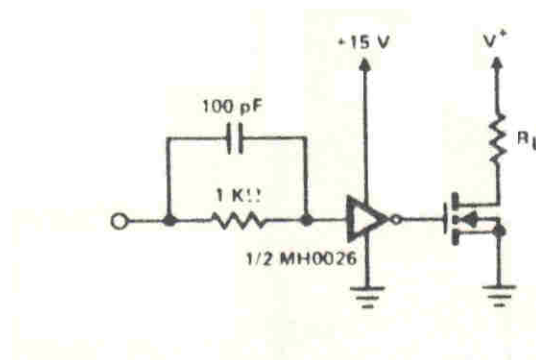
$$P = V_{CE} \cdot I_C \cdot t_r \cdot f$$

όπου V_{CE} = η τάση μεταξύ συλλέκτη - εκπομπού (τάση κορεσμού), V

I_C = το ρεύμα συλλέκτη, A

f = η συχνότητα switching του τρανζίστορ, KHz

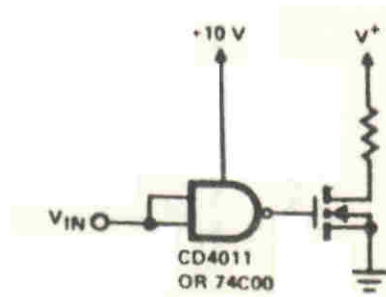
Ένας άλλος τρόπος οδήγησης ενός MOSFET από μια πύλη TTL είναι με την τοποθέτηση ανάμεσα στην πύλη και στο MOSFET ενός ενισχυτή υψηλών ρευμάτων όπως στο σχήμα 7.9



Σχήμα 7.9: Ένας συμπληρωματικός ενισχυτής υψηλών ρευμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσαρμογή της τάσης TTL σε επίπεδο MOSFET, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά τους χρόνους switching.

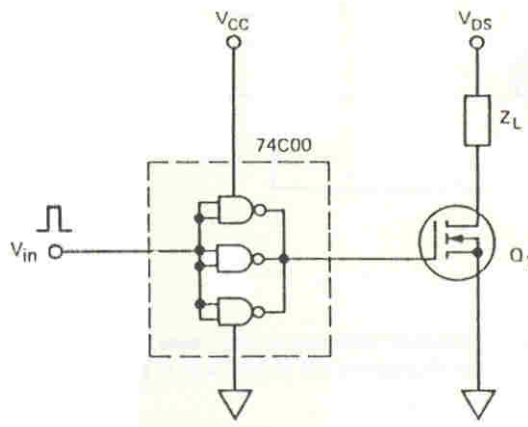
7.12.2 Οδήγηση MOSFET από πύλες CMOS

Επειδή το MOSFET όπως είδαμε έχουν πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου, μπορούν να οδηγηθούν κατευθείαν από πύλες CMOS όπως φαίνεται στο σχήμα 7.10.



Σχήμα 7.10: Οδηγώντας ένα MOSFET από μια πύλη CMOS

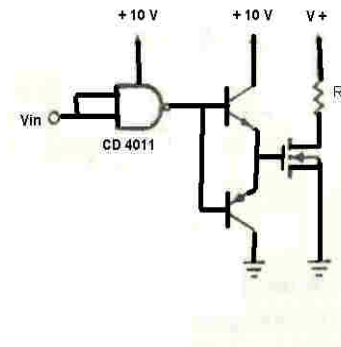
Αυτή η διαμόρφωση μας δίνει καλή απόδοση αν οι χρόνοι μεταγωγής του MOSFET είναι της τάξης των 60 ns ή μεγαλύτεροι και αυτό οφείλεται στο περιορισμένο ρεύμα με το οποίο τροφοδοτεί η πύλη το MOSFET. Αν χρειαζόμαστε γρηγορότερη μεταγωγή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε περισσότερες από μία πύλες CMOS παράλληλα μεταξύ τους όπως φαίνεται στο 7.11 ώστε να αυξηθεί το διαθέσιμο στην χωρητικότητα εισόδου του MOSFET ρεύμα.



Σχήμα 7.11: Για να αυξηθεί η ταχύτητα switching του MOSFET περισσότερες από μια πύλες CMOS μπορούν να παραλληλιστούν δίνοντας μεγαλύτερο ρεύμα στην gate του MOSFET.

Αν δεν υπάρχουν διαθέσιμες άλλες πύλες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν emitter follower buffer όπως του σχήματος 7.10, κύκλωμα (σχήμα 7.12) το οποίο πολλαπλασιάζει το ρεύμα της πύλης με το β των διπολικών τρανζίστορ. Επειδή δεν έχουμε πια καθυστέρηση στους χρόνους

μεταγωγής, το όριο του switching εξαρτάται από το όριο συχνότητας της πύλης ή των τρανζίστορ, όποιο έρθει πρώτα.

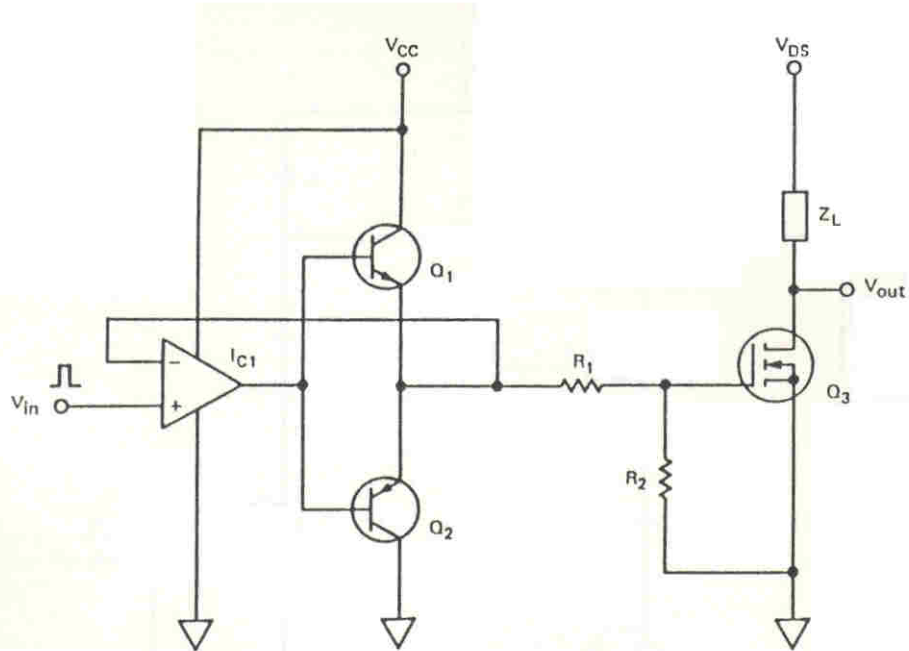


Σχήμα 7.12: Ένα κύκλωμα ενίσχυσης σε ακολουθία εκπομπού μειώνει τους χρόνους ανόδου και καθόδου των παλμών εισόδου

7.12.3 Οδήγηση MOSFET από γραμμικά κυκλώματα

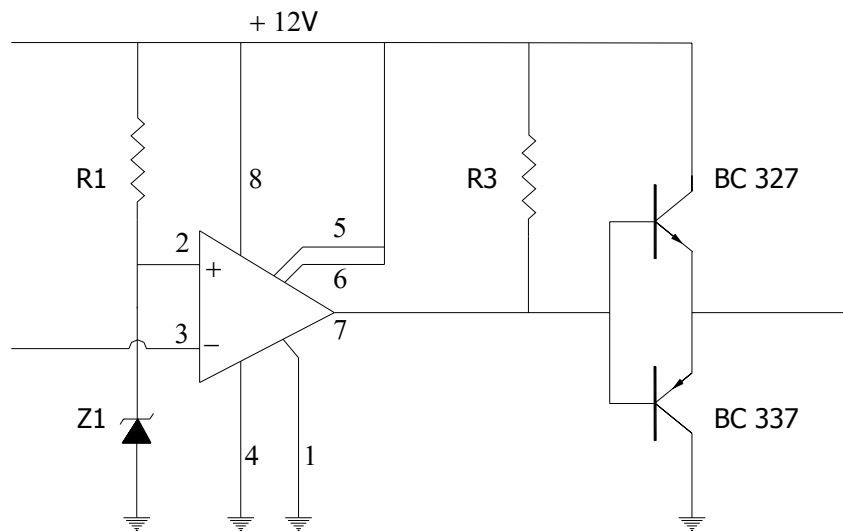
Είναι εύκολα κατανοητό ότι ένα MOSFET μπορεί να οδηγηθεί κατευθείαν από την έξοδο ενός τελεστικού ενισχυτή, καθώς ένας τελεστικός ενισχυτής ισχύος μας δίνει την δυνατότητα οδήγησης με μεγάλα ρεύματα. Τα όρια του κυκλώματος μειώνονται, καθώς ο χαμηλός ρυθμός απόκρισης των τελεστικών ενισχυτών ισχύος περιορίζει την συχνότητα του switching σε τιμή μικρότερη από 25 ΚΗΖ.

Για να βελτιώσουμε το εύρος λειτουργίας και το ρυθμό απόκρισης κάνοντας δηλαδή χρήσιμο ένα τελεστικό ενισχυτή για την οδήγηση ενός MOSFET χρησιμοποιούμε έναν ενισχυτή ακόλουθο εκπομπού. Ένα τυπικό κύκλωμα οδήγησης που χρησιμοποιεί έναν τελεστικό ενισχυτή φαίνεται στο σχήμα 7.13.



Σχήμα 7.13: Μια τυπική εφαρμογή ενός απλού ελεγχόμενου από τελεστικό ενισχυτή κυκλώματος ακολουθητή εκπομπού για την οδήγηση ενός MOSFET

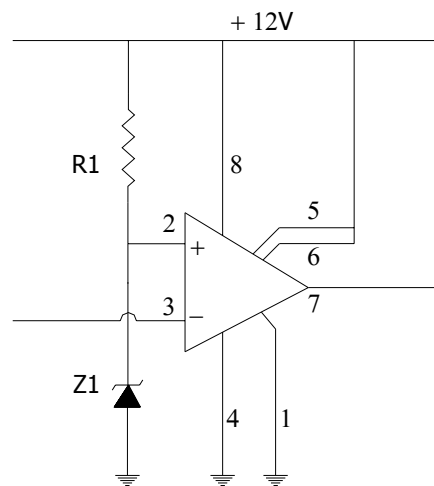
Ενα βελτιωμένο κύκλωμα οδήγησης MOSFET ισχύος είναι το ακόλουθο



Σχήμα 7.14: Κύκλωμα οδήγησης MOSFET ελεγχόμενο από συγκριτή

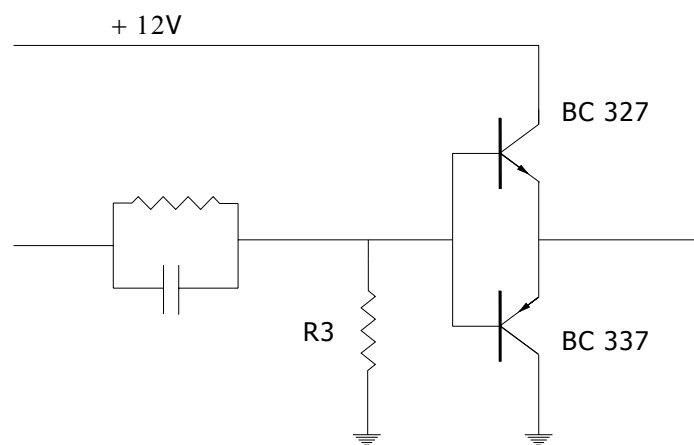
Όπως βλέπουμε στο σχήμα 7.14 έχει προστεθεί ένας συγκριτής στην είσοδο του emitter follower ενισχυτή. Έτσι έχουμε το πλεονέκτημα της οδήγησης του διακοπτικού από οποιαδήποτε σχεδόν τάση - στα όρια βέβαια του common mode του συγκριτή - με θετική ή αρνητική λογική ανάλογα σε ποια είσοδο έχουμε βάλει την τάση αναφοράς. Το κύκλωμα έχει ακόμη ένα πλεονέκτημα. Αν το σήμα οδήγησης στην είσοδο του συγκριτή είναι "αναποφάσιστο" - μικρό slew rate - ο συγκριτής διορθώνει τα πράγματα δίνοντας μόνο χαμηλού ή υψηλού δυναμικού έξοδο επιτρέποντας έτσι στο MOSFET να λειτουργεί στη αποκοπή ή στον κόρο με αποτέλεσμα να μην έχουμε άσκοπες απώλειες πάνω στο διακοπτικό.

Για να εξαλείψουμε τώρα την περίπτωση στην οποία η τάση εισόδου να είναι έξω από το όριο του common mode του συγκριτή τοποθετούμε (σχήμα 7.15) μια δίοδο zener στη θετική είσοδο του συγκριτή ώστε αν η τάση εισόδου είναι μικρότερη από τη τάση που άγει η zener η θετική είσοδο του συγκριτή μένει στο μηδέν η αρνητική είσοδος φυσικά δεν μπορεί να πάρει μικρότερη τιμή από τη θετική και η έξοδος του συγκριτή είναι μηδέν. Όταν η τάση στη θετική είσοδο είναι μεγαλύτερη από αυτή της διόδου zener ο συγκριτής δίνει υψηλό δυναμικό στην έξοδό του. Μια άλλη παραλλαγή του συστήματος είναι αντί να χρησιμοποιήσουμε δίοδο zener για την πόλωση



Σχήμα 7.15: Η τοποθέτηση μιας διόδου zener μπορούμε - απόλυτα πια να οδηγήσουμε ένα MOSFET από οποιαδήποτε σχεδόν τάση.

της μίας εισόδου του συγκριτή με κάποια σταθερή τάση να τοποθετήσουμε στη θέση της ένα διαιρέτη τάσης με δύο αντιστάσεις ώστε να έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα. Στη δική μας περίπτωση ο τρόπος οδήγησης του MOSFET - από την έξοδο ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος PWM - μας εξασφαλίζει ότι το διακοπτικό δεν θα λειτουργεί στη γραμμική περιοχή του οπότε χρειαζόμαστε μόνο ένα κύκλωμα που θα ενισχύει το ρεύμα εξόδου του IC (100 mA) και που θα μειώνει τους χρόνους μεταγωγής από τη μια κατάσταση στην άλλη. Έτσι χάρη της απλότητας - όχι όμως σε βάρος της απόδοσης του κυκλώματος - το κύκλωμα οδήγησης που χρησιμοποιήσαμε αποτελείται από έναν ενισχυτή με δύο τρανζίστορ σε συνδεσμολογία emitter follower ο οποίος οδηγείται από την έξοδο του IC μέσω μιας αντίστασης R παράλληλης με ένα πυκνωτή C. Το κύκλωμα αυτό (R//C) σαν σκοπό έχει να βοηθάει στο κλείσιμο κυρίως της επαφής των τρανζίστορ του ενισχυτή.



Σχήμα 7.16: Ένα κύκλωμα (R//C) συνδεδεμένο σε σειρά με τη βάση ενός τρανζίστορ το βοηθάει να κλείνει γρηγορότερα.

Η λειτουργία του είναι η ακόλουθη: όταν η έξοδος του IC είναι High level ο πυκνωτής φορτίζεται με την πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση ώστε όταν η έξοδος του IC γίνει Low η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί πάνω στον πυκνωτή να δίνει στη βάση των τρανζίστορ μια αρνητική τάση που τα αναγκάζει να κλείνουν πιο γρήγορα. Φυσικά επειδή αυτή η αρνητική τάση δεν μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές γιατί θα καταστρέψει τα τρανζίστορ υπάρχει ένα όριο για την χωρητικότητα

του πυκνωτή που πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,1 - 10 nF. Η σταθερά χρόνου αυτού του συστήματος πρέπει να είναι ίση με τη συχνότητα που αλλάζει κατάσταση το διακοπτικό δηλαδή

$$\tau = RC = \frac{1}{f}$$

7.13 Υπολογισμός των στοιχείων οδήγησης του DC - DC converter

Ο φορτιστής μπαταρίας θα πρέπει να κάνει δύο δουλειές πρώτα να φορτίζει την μπαταρία με σταθερή τάση και δεύτερο να κρατάει τη φωτοβολταϊκή συστοιχία στο σημείο της μέγιστης λειτουργίας της. Για να επιτύχουμε όμως και τους δύο στόχους από έναν μετατροπέα DC - DC αναγκαστήκαμε να αντιστρέψουμε την λογική λειτουργίας του Pulse Width Modulator και για την δουλειά αυτή χρησιμοποιήσαμε ένα συγκριτή το IC LM 311 για την αναστροφή της λογικής του CA 3524E που την έξοδό του οδηγούμε στη συνέχεια σε ένα κύκλωμα emitter follower ενισχυτή. Έχουμε τροφοδοτήσει τα ολοκληρωμένα κυκλώματα του συστήματος από την έξοδο ενός fixed voltage regulator MC 7812 για λόγους που αναλύονται σε άλλο μέρος της εργασίας. Έτσι πολώσαμε τη μη αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή με μια σταθερή τάση 2 V με τη χρησιμοποίηση ενός διαιρέτη τάσης με λόγο 10 : 2 δίνοντας αρνητική λογική στους παλμούς του PWM.

Ας υπολογίσουμε τώρα την ισχύ και τα ρεύματα που διαρρέουν το κάθε τρανζίστορ ενίσχυσης τη στιγμή που το Q_1 άγει και το Q_2 βρίσκεται σε αποκοπή από τις σχέσεις .

Από τον πίνακα με τα χαρακτηριστικά του RFP 10N15 MOSFET n-channel που χρησιμοποιούμε βρίσκουμε

$$C_{iss} = 850 \text{ pF}$$

$$C_{rss} = 100 \text{ pF}$$

$$V_{GS} = 16.8 \text{ V}$$

$$t_r = 40 \text{ nsec}$$

Επειδή η χωρητικότητα μεταξύ gate και source του MOSFET ισούται με

$$C_{GS} = C_{iss} - C_{rss}$$

η σχέση που μας δίνει το ρεύμα φόρτισης που πρέπει να παρέχει στο MOSFET το κύκλωμα του ενισχυτή γίνεται

$$I_{charge} = \frac{(C_{iss} - C_{rss})V_{GS}}{t_r} \Rightarrow I_{charge} = \frac{(850 - 100)pF \cdot 12V}{40n\text{ sec}} \Rightarrow I_{charge} = 225mA$$

Αντίστοιχα το ρεύμα εκφόρτισης δίνεται από την σχέση (7.7)

Η τάση V_{DS} ισούται με $(16,8 - 13,2\text{ V}) = 3,6\text{ V}$ επομένως έχουμε

$$I_{dis} = \frac{C_{rss} \cdot V_{DS}}{t_f} \Rightarrow I_{dis} = \frac{100pF \cdot 3,6V}{40n\text{ sec}} \Rightarrow I_{dis} = 9mA$$

Η ισχύ που καταναλώνεται πάνω στα τρανζίστορ δίνεται από τον τύπο (7.8)

$$P = V_{CE} \cdot I_C \cdot t_r \cdot f \Rightarrow P = 1V \cdot (225 + 9)mA \cdot 40n\text{ sec} \cdot 100KHz \Rightarrow P = 0,936mW$$

Με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις ισχύος και ρεύματος διαλέξαμε σαν τα τρανζίστορ που θα αποτελούν τον ενισχυτή τα BC 337, BC 327 που τα χαρακτηριστικά βλέπουμε στον πιο κάτω πίνακα.

	V_{CE} V	I_C A	P mW	f MHz	h_{FE}
BC 327 (pnp)	50	0,8	650	100	180
BC 337 (npn)	50	0,8	659	100	180

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά λειτουργίας των τρανζίστορ BC 327, BC 337 που απαρτίζουν τον emitter follower buffer.

Οι τιμή της αντίστασης R - στο κύκλωμα που βοηθάει τα τρανζίστορ να φτάνουν πιο γρήγορα στην αποκοπή με δεδομένα την συχνότητα του switching που είναι 100 KHz και το γεγονός ότι μπορούμε να πάρουμε αυθαίρετα μια τιμή για τον πυκνωτή C μέσα στα όρια που ορίζει η λειτουργία του έστω σε $C = 2,2\text{ nF}$ - θα ισούται

$$\tau = RC = f \Rightarrow R = \frac{f}{C} \Rightarrow R = \frac{10\mu\text{sec}}{2,2\text{nF}} \Rightarrow R = 4,5\text{K}\Omega$$

7.14 Κυκλώματα προστασίας των εξαρτημάτων switching τροφοδοτικών

7.14.1 Κύκλωμα προστασίας διόδων Schottky.

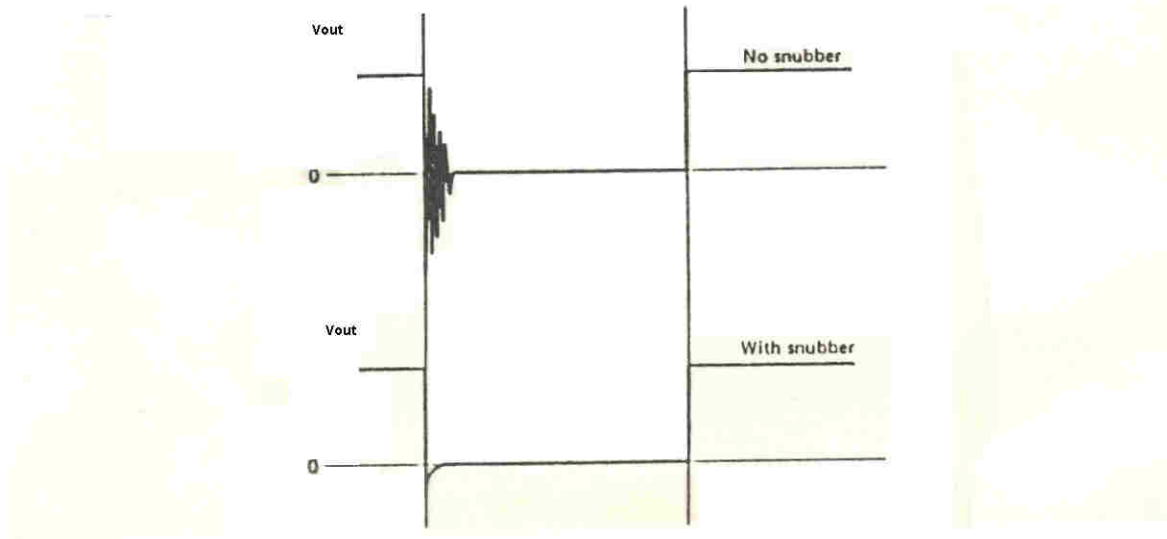
Δυστυχώς στη διάρκεια του χρόνου που το διακοπτικό είναι κλειστό παρατηρούμε στην κυματομορφή της διόδου Schottky μια ταλάντωση στην αλλαγή κατάστασης από 1 σε 0, και την ύπαρξη υψηλών κορυφών τάσης στον ίδιο σημείο. Η τιμή της τάσης που μπορούν να φτάσουν αυτές οι κορυφές είναι αρκετά μεγάλη και μπορεί να υπερβεί την ικανότητα blocking των διόδων με κίνδυνο καταστροφής τους κατά τη διάρκεια της OFF περιόδου. Η πρόσθεση και εδώ ενός κυκλώματος RC snubber networks (σχήμα 7.17) μπορεί να καταστείλει την ταλάντωση και να μειώσει τις κορυφές της τάσης πάνω στη δίοδο. Υπάρχει βέβαια και μια πιο απλή λύση να βάλουμε δηλαδή μια δίοδο zener παράλληλα με τη Schottky ώστε να μειώνει τις κορυφές της τάσης σε ασφαλή για τη δίοδο επίπεδα. Όμως αν και αυτή η διάταξη έχει καλά αποτελέσματα ο μεγάλος χρόνος ανάκτησης της zener συνήθως παράγει μεγάλο θόρυβο στην έξοδο, ειδικά σε μεγάλες συχνότητες switching, ο οποίος μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα.

Η σταθερά χρόνου $\tau = RC$ πρέπει να ισούται με το χρόνο που χρειάζεται η δίοδος να αλλάξει κατάσταση από το 1 στο 0 (που συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 0,5 μs). Η τιμή της αντίστασης R δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R = \frac{2V_{in}}{I_o}$$

όπου V_{in} η τάση εισόδου του μετατροπέα

I_o το ρεύμα εξόδου



Σχήμα 7.17: Το σχήμα (α) δείχνει μια κυματομορφή στην οποία παρατηρούμε μια ταλάντωση κατά τη διάρκεια που η δίοδος Schottky σταματάει να άγει, ενώ στο (β) βλέπουμε την κυματομορφή στο ίδιο εξάρτημα μετά τη πρόσθεση ενός RC snubber.

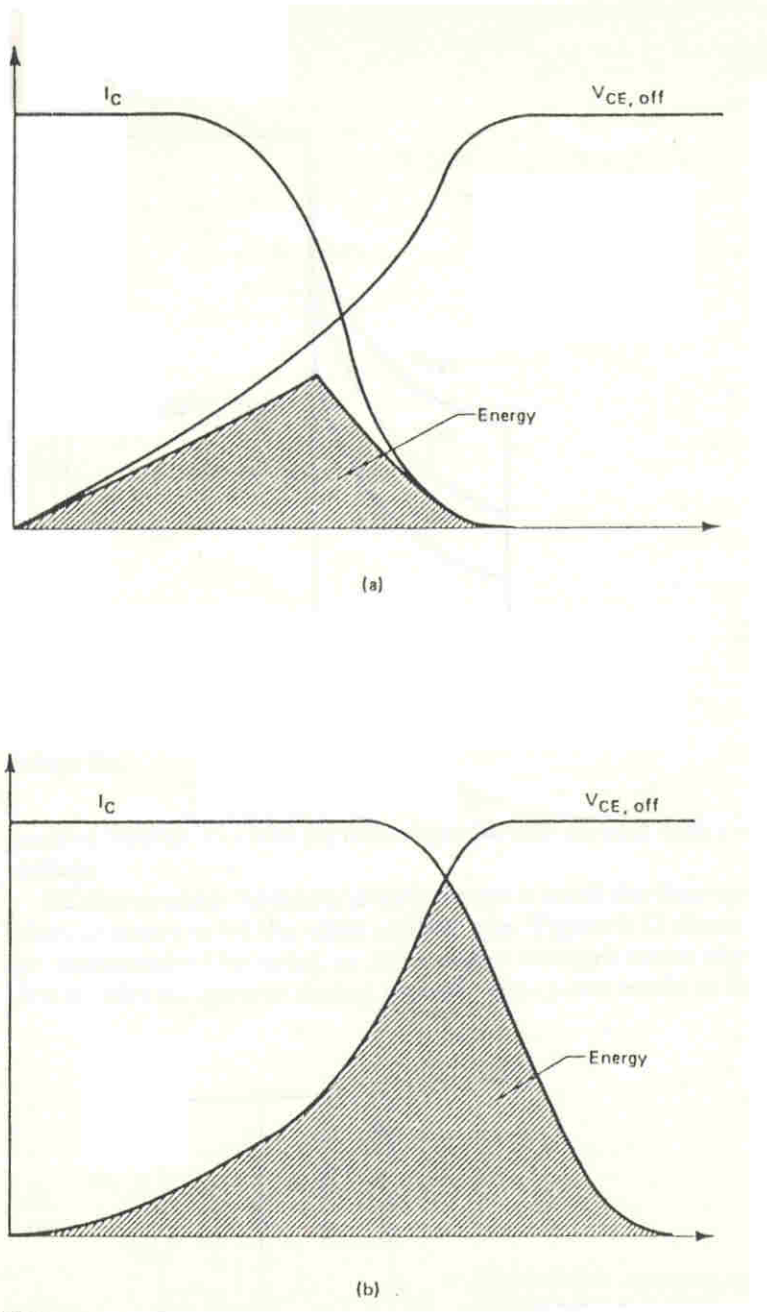
Η ισχύς που καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση ισούται με

$$P_R = \frac{1}{2} C V_{in}^2 f$$

όπου f η συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα

7.14.2 Κυκλώματα προστασίας MOSFET Ισχύος.

Όταν χρησιμοποιούμε MOSFET ισχύος και μάλιστα με συχνότητα switching αρκετά μεγάλη είναι φυσικό πάνω στο διακοπτικό μας να καταναλώνεται ισχύ αρκετή ικανή να το θερμάνει και επομένως να αλλοιωθούν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του μειώνοντας έτσι την ισχύ που μπορεί να διαχειρίζεται. Το πρόβλημα δεν λύνεται εντελώς με την χρησιμοποίηση PWM για την οδήγησή του και από το σχήμα 7.18 βλέπουμε ότι αυτή ισχύς εξαρτάται από το είδος του φορτίου.



Σχήμα 7.18: Οι παραπάνω καμπύλες μας δείχνουν τα turn-off χαρακτηριστικά ενός τρανζίστορ ισχύος για ωμικό (α) και επαγωγικό (β) φορτίο. Το εμβαδόν των σκιαγραφημένων περιοχών κάθε καμπύλης ισούται με την απώλεια ενέργειας πάνω στο διακοπτικό.

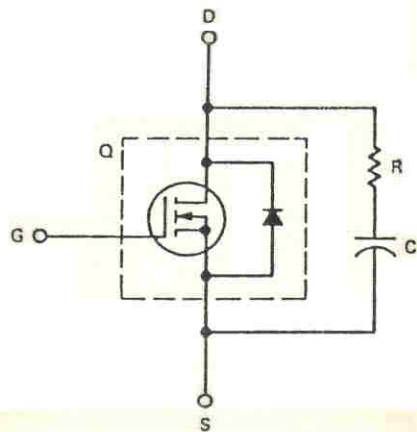
Είναι λοιπόν φανερή η ανάγκη να χρησιμοποιηθεί ένα κύκλωμα το οποίο θα απαλλάσσει το MOSFET από την κατανάλωση ισχύος πάνω του. Μια λύση είναι η πρόσθεση παράλληλα με το

MOSFET ισχύος ενός RC network snubber. Υπάρχουν δύο κύριοι λόγοι που δικαιολογούν αυτή την κίνηση.

- 1) Το RC snubber μεταβάλλει την καμπύλη φορτίου του MOSFET αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του στο μέγιστο
- 2) Το RC snubber καταναλώνει την περισσευούμενη turn off ενέργεια η οποία υπό άλλες συνθήκες θα έπρεπε να καταναλωθεί πάνω στο διακοπτικό με τις γνωστές συνέπειες.

Έτσι η φόρτιση πάνω στο τρανζίστορ ελαχιστοποιείται και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του στοιχείου διακοπής.

Είναι επίσης πολύ ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι χρησιμοποιώντας MOSFET η δίοδος διαφυγής των επαγωγών (leakage inductance commutating diode) η οποία τοποθετείται παράλληλα με το διακοπτικό και το προστατεύει αφού επιστρέφει την επαγωγική ενέργεια στην πηγή τροφοδοσίας, δεν είναι απαραίτητο να τοποθετείται εξωτερικά γιατί όλοι οι κατασκευαστές MOSFET ισχύος την τοποθετούν μέσα στο καλούπι του διακοπτικού. Στο σχήμα 7.19 φαίνεται



Σχήμα 7.19: Εδώ βλέπουμε ένα κύκλωμα που χρησιμοποιεί ένα MOSFET ισχύος σαν διακόπτη και παρατηρούμε την έμφυτη δίοδο διαφυγής των αυπεπαγωγών. Το RC snubber network χρησιμεύει για να κρατάει τις κορυφές της τάσης σε τιμές μικρότερες από την τάση διάσπασης της επαφής drain - source.

ένα κύκλωμα διακόπτη που χρησιμοποιεί ένα MOSFET ισχύος να έχει μια έμφυτη δίοδο και ένα RC snubber. Το κύκλωμα εργάζεται ως εξής: Ο πυκνωτής φορτίζεται με την τάση των άκρων του διακοπτικού όταν το MOSFET είναι σε αποκοπή παίρνοντας την ενέργεια που θα

καταναλωνόταν πάνω στο διακοπτικό με την μορφή θερμότητας, και εκφορτίζεται διαμέσω της αντίστασης R στον χρόνο που το MOSFET άγει. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι αν και το RC snubber networks καταναλώνει πραγματικά αρκετά μεγάλη ισχύ, η οποία θα έπρεπε να καταναλωθεί πάνω το τρανζίστορ αν δεν υπήρχε το snubber ο συντελεστής απόδοσης του κυκλώματος σε μειώνεται - το αντίθετο μάλιστα - γιατί το διακοπτικό δουλεύει υπό πολύ καλές συνθήκες λειτουργίας. Στη συνέχεια ακολουθούν τρόποι υπολογισμού των στοιχείων ενός RC snubber, σε σχέση με την τάση το ρεύμα τη συχνότητα και το duty cycle του στοιχείου διακοπής. Στο σχήμα 7.18 είδαμε το πόσο καταπονείται το διακοπτικό όταν οδηγεί επαγωγικό φορτίο και ότι η ενέργεια που καταναλώνεται πάνω του κατά τη διάρκεια του χρόνου που αυτό είναι βρισκείται σε αποκοπή ισούται με το εμβαδόν της σκιαγραφημένης περιοχής άρα

$$E = \frac{C \cdot V_{CE}^2}{2} = \frac{I_C \cdot V_{CE} \cdot (t_r + t_f)}{V_{CF}}$$

όπου

I_C = το μέγιστο ρεύμα συλλέκτη, A

V_{CE} = η μέση τάση στα άκρα του διακοπτικού, V

t_r = ο μέγιστος χρόνος ανόδου της τάσης στο συλλέκτη, μs

t_f = ο μέγιστος χρόνος καθόδου του ρεύματος στο συλλέκτη, μs

Έτσι η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι:

$$C = \frac{I_C \cdot (t_r + t_f)}{V_{CF}}$$

Όπως προαναφέραμε ο πυκνωτής C φορτίζεται στη διάρκεια του χρόνου που το τρανζίστορ είναι αποκοπή, και εκφορτίζεται διαμέσω της αντίστασης R όταν το διακοπτικό άγει (στο χρόνο t_{on}). Η η τάση στα άκρα του δίνεται από τον τύπο

$$V_C = V_{ce} \cdot \exp^{-\left(\frac{t_{on}}{RC}\right)}$$

Για να εξασφαλίσουμε ότι η πλήρη φόρτιση του πυκνωτή θα έχει τελειώσει πριν το όριο του χρόνου turn - off με τάση φόρτισης κοντά στη V_{CE} , πρέπει να διαλέξουμε τη σταθερά χρόνου RC έτσι ώστε η έκφραση $\exp -(t_{on}/RC)$ να προσεγγίζει την τιμή αυτή. Με τον ίδιο τρόπο, πρέπει επίσης να διαλέξουμε τη σταθερά RC ώστε ο πυκνωτής να εκφορτίζεται στο τέλος της περιόδου που το τρανζίστορ άγει.

Από τη βασική θεωρία των κυκλωμάτων RC ξέρουμε ότι για να εκφορτιστεί πλήρως ένας πυκνωτής μέσω μιας αντίστασης απαιτούνται τουλάχιστον 5 σταθερές χρόνου (5τ , $\tau = RC$). Όμως επειδή οι χρόνοι on και off του τρανζίστορ δεν είναι σταθεροί επειδή ο PWM τους αναπροσαρμόζει συνέχεια στις απαιτήσεις φορτίου της εξόδου θα υποθέσουμε ότι σε τρεις σταθερές χρόνου ο πυκνωτής πρέπει να έχει εκφορτιστεί και επειδή έχουμε down converter ($t_{on} < t_{off}$) σαν όριο χρόνου θα χρησιμοποιήσουμε τον χρόνο που το τρανζίστορ άγει (t_{on}).

$$t_{on} = 3 \cdot R \cdot C \Rightarrow R = \frac{t_{on}}{3 \cdot C}$$

Αφού τώρα γνωρίζουμε την τιμή της αντίστασης εκφόρτισης R πρέπει να ελέγξουμε αν το ρεύμα εκφόρτισης του πυκνωτή είναι μεγάλο και αν ναι, να το περιορίσουμε στο $0,25 I_c$ σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$I_{dis} = \frac{V_{CE}}{R}$$

Αν η αντίσταση είναι μικρή και $I_{dis} > 0,25 I_c$ τότε αυθαίρετα η τιμή της αντίστασης πρέπει να αυξηθεί ώστε να καλύπτει και αυτή τη σχέση.

Τέλος η μέγιστη ισχύς που καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$P_R = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{in}^2 \cdot f$$

όπου f είναι η συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα σε KHz.

7.15 Υπολογισμός κυκλωμάτων προστασίας εξαρτημάτων switching τροφοδοτικών

7.15.1 Κύκλωμα προστασίας διόδων Schottky

Η σταθερά χρόνου $\tau = RC$ των στοιχείων που απαρτίζουν το RC snubber network όπως είδαμε πρέπει να ισούται με το χρόνο που χρειάζεται η διάδος να αλλάξει κατάσταση από το 1 στο 0. Η τιμή της αντίστασης R δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R = \frac{2 \cdot V_{in}}{I_o} \Rightarrow R = \frac{2 \cdot 21}{0.75} \Rightarrow R = 56\Omega$$

Όπως ξέρουμε η σταθερά χρόνου τ για διόδους Schottky συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 0,5 μs επομένως

$$\tau = R \cdot C \Rightarrow C = \frac{\tau}{R} \Rightarrow C = 10nF$$

Η ισχύς που καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση ισούται με

$$P_R = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{in}^2 \cdot f \Rightarrow P_R = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot (20)^2 \cdot 100 \Rightarrow P_R = 200mW$$

7.15.1 Κύκλωμα προστασίας MOSFET Ισχύος

Θα υπολογίσουμε τώρα τις τιμές του πυκνωτή και της αντίστασης του RC snubber network που τοποθετήσαμε παράλληλα με την επαφή του MOSFET.

Από τη σχέση η τιμή του πυκνωτή ισούται με

$$C = \frac{I_C \cdot (t_r + t_f)}{V_{CF}}$$

και επειδή $I_C = 0,75 A$, $V_{CE} = 20 V$, $t_r = 0,15 \mu s$, $t_f = 0,08 ms$

Θεωρήσαμε τη $V_{CE} = 20 \text{ V}$ γιατί αυτή είναι η μέση τιμή της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού στην οποία η ένταση του ρεύματος εισόδου στον φορτιστή είναι 0,5 A και το ρεύμα εξόδου 0,5 _ 1,5 = 0,75 A (όπου 1,5 ο λόγος μετασχηματισμού της τάσης 20/13,6) επομένως

$$C = \frac{I_C \cdot (t_r + t_f)}{V_{CF}} \Rightarrow C = \frac{0.75 \cdot (0.15 + 0.08)}{20} \Rightarrow C = \frac{0.1725}{20} \Rightarrow C = 8.6nF$$

Η πιο κοντινή τυποποιημένη τιμή πυκνωτή στο εμπόριο είναι 10 nF.

Η σχέση μεταξύ πυκνωτή και αντίστασης είναι

$$t_{on} = 3 \cdot R \cdot C \Rightarrow R = \frac{t_{on}}{3 \cdot C} \Rightarrow R = \frac{6.4\mu s}{3 \cdot 10nF} \Rightarrow R = 231\Omega$$

Η πιο κοντινή τυποποιημένη τιμή αντίστασης στο εμπόριο είναι 220Ω.

Αφού τώρα πρέπει να ελέγξουμε αν το ρεύμα εκφόρτισης του πυκνωτή είναι μεγάλο και αν ναι, να το περιορίσουμε στο 0,25 I_c.

$$I_{dis} = \frac{V_{CE}}{R} \Rightarrow I_{dis} = \frac{20}{220} \Rightarrow I_{dis} = 0.095A$$

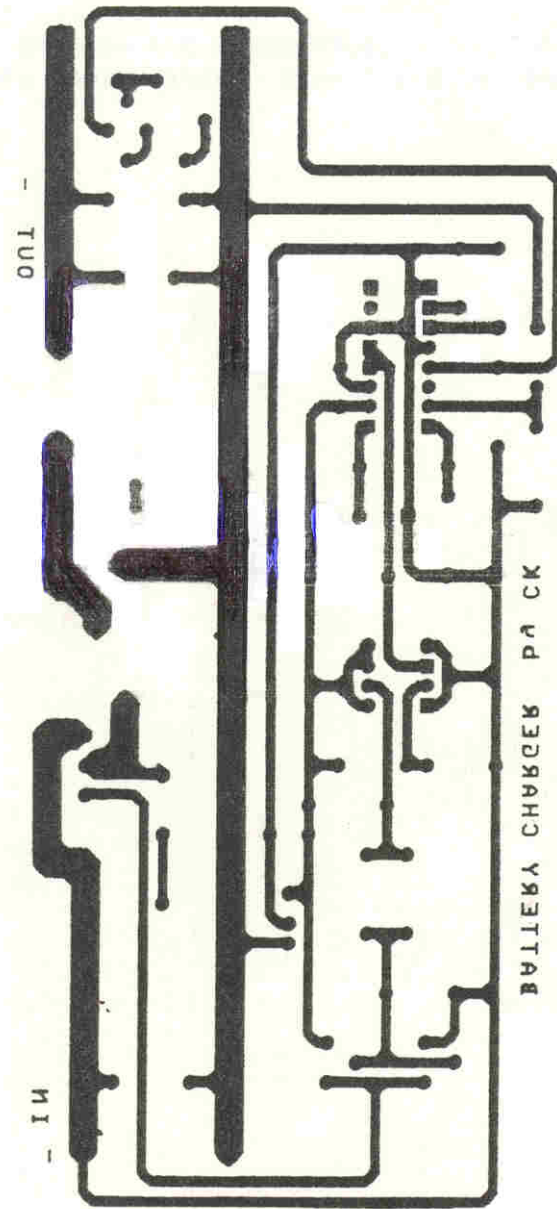
Τιμή για την οποία δεν ισχύει η σχέση $I_{dis} > 0,25 I_c = 0,188 \text{ A}$ Επομένως εκλέγουμε μια μεγαλύτερη τιμή αντίστασης $R = 430 \Omega$ για την οποία η παραπάνω σχέση ισχύει γιατί

$$I_{dis} = \frac{V_{CE}}{R} \Rightarrow I_{dis} = \frac{20}{430} \Rightarrow I_{dis} = 0.186A$$

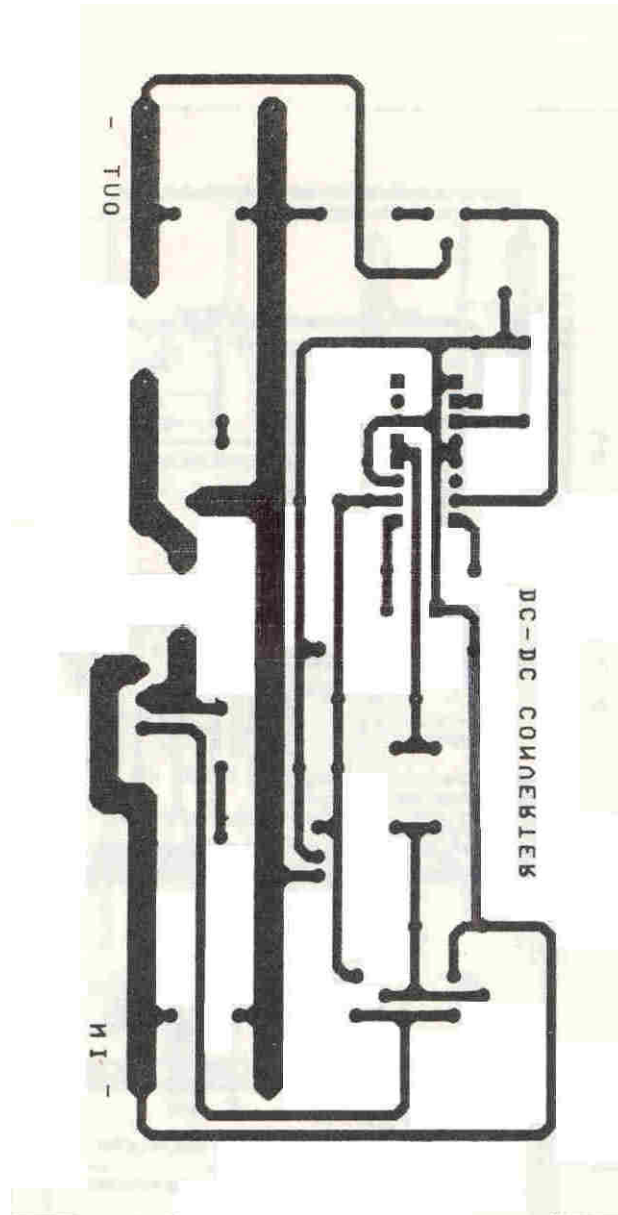
Η μέγιστη ισχύς που καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$P_R = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{in}^2 \cdot f \Rightarrow P_R = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot (20)^2 \cdot 100 \Rightarrow P_R = 200mW$$

Έτσι εκλέγουμε μια αντίσταση 430 Ω και ισχύος 250 mW.



Σχήμα 7.20: Το τυπωμένο κύκλωμα του φορτιστή μπαταρίας



Σχήμα 7.21: Το τυπωμένο κύκλωμα του απλού φορτιστή μπαταρίας

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. High – Frequency switching power supplies: Theory and design
George Chryssis
2. Design of solid state power supplies
Eugene R. Hnaket
3. Hexfet designer's Manual
International Rectifier
4. Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία – Ημιαγωγοί 2
Κ. Καγκιράκη
5. Μικροηλεκτρονική
Jacob Millman - Arvin Grabel
6. Σημειώσεις Μαθήματος «Φωτοβολταϊκά Συστήματα»
Ι. Φραγκιαδάκης
7. Σημειώσεις «Αιολικά και Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα» σεμιναρίου ΕΛΚΕΠΑ.