

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ DSP ”

Γκάργκας Στυλιανός – Ζακόπουλος Αθανάσιος



Εξεταστική Επιτροπή: Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κώστας (Επιβλέπων)
Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος
Διδάσκων ΠΔ407 Κουτρούλης Ευτύχιος

Χανιά, Σεπτέμβριος 2003

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ DSP ”

Γκάργκας Στυλιανός – Ζακόπουλος Αθανάσιος

Εξεταστική Επιτροπή: Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κώστας (Επιβλέπων)
Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος
Διδάσκων ΠΔ407 Κουτρούλης Ευτύχιος

Χανιά, Σεπτέμβριος 2003

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον Καθηγητή κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης τον Καθηγητή κ. Σταυρακάκη Γεώργιο για τη συμμετοχή του στην επιτροπή και ιδιαιτέρως τον Δρ. Κουτρούλη Ευτύχιο για την πολύτιμη καθοδήγησή του. Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους μεταπτυχιακούς φοιτητές για τις συμβουλές τους.

Περίληψη

Στην διπλωματική αυτή σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένας φωτοβολταϊκός εξομοιωτής που αποτελείται από τροφοδοσία ελεγχόμενη από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μέσω των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιούνται με τον εξομοιωτή, προκύπτουν χαρακτηριστικές καμπύλες του ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την τάση εξόδου φωτοβολταϊκών πλαισίων σε πραγματικό χρόνο, κάτω από επιθυμητές συνθήκες εξομοίωσης. Το σύστημα αποτελείται από το ηλεκτρονικό κύκλωμα ενός buck converter, το D.Module.C31.eco DSK, που διαθέτει τον επεξεργαστή DSP TMS320C31, τροφοδοσία συνεχούς τάσης(d.c.), τον TLV2548 ADC μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, ηλεκτρονικό υπολογιστή και ανάλογο software έλεγχου.

Ο μετατροπέας ισχύος ελέγχεται από το D.Module.C31.eco και τον DSP επεξεργαστή TMS320C31, χρησιμοποιώντας την ανάδραση της τάσης και του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα ισχύος, την τιμή των οποίων υπολογίζει ο μετατροπέας ADC TLV2548, έτσι ώστε ο εξομοιωτής να συγκλίνει στην πραγματική τιμή λειτουργίας για το συνδεδεμένο φορτίο. Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης συμπίπτουν με τα θεωρητικά αποτελέσματα σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Το κύριο πλεονέκτημα της εξομοίωσης αυτής είναι η ικανότητα εξομοίωσης διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών κάτω από διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας πραγματικά φορτία. Ο εξομοιωτής αυτός είναι μία πολύ οικονομική, αποδοτική και αξιόπιστη λύση πειραματικού ελέγχου λειτουργίας φωτοβολταϊκών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Δομή της διπλωματικής	3

2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

2.1	ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	
2.1.1	Εισαγωγή	4
2.1.2	Μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	4
2.1.2.1	Τα φωτοβολταϊκά	5
2.1.2.2	Εφαρμογές φωτοβολταϊκών	6
2.1.2.3	Συστήματα με μπαταρίες	6
2.1.2.4	Φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο με τον οργανισμό κοινής οφέλειας	7
2.1.2.5	Υβριδικά συστήματα	8
2.1.3	Παραδείγματα φωτοβολταϊκών εφαρμογών	9
2.1.4	Απόδοση φωτοβολταϊκών	10
2.2	ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	
2.2.1	Εισαγωγή	11
2.2.2	Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας	12
2.2.3	Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γής	13
2.2.4	Συμβατικές ακτινοβολίες και ακτινοβολία ενός ήλιου	13
2.2.5	Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους	15
2.2.6	Προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων και βέλτιστη κλίση	16
2.2.7	Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια	18
2.3	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	
2.3.1	Εισαγωγή	19
2.3.2	Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού στοιχείου	20
2.3.3	Φωτοβολταϊκά πλαίσια	23
2.3.3.1	Εισαγωγή	23
2.3.3.2	Χαρακτηριστικά λειτουργίας των φ/β πλαισίων	23
2.3.3.3	Υπολογισμός ισχύος πλαισίων σε οποιοσδήποτε συνθήκες	25

3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ DSP

3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΕΣ DSP	28
3.1.1	Εισαγωγή	28
3.1.2	Γλώσσες Προγραμματισμού DSP	30

3.1.3	Εταιρίες κατασκευής DSP	31
3.2	Η ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΩΝ TMS320C3x	33
3.2.1	Εισαγωγή	33
3.2.2	Επεξεργαστές TMS320C3X	33
3.2.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά	35
3.2.4	Αρχιτεκτονική	36
3.2.5	Κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU)	38
3.2.6	Βασικό αρχείο καταχωρητών της CPU	39
3.3	Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ DSP	43
3.3.1	Οι λειτουργίες που επιτελεί το DSP	43
3.3.2	Περιγραφή Timer	45
3.3.3	Περιγραφή I/O Flag	48
3.3.4	Περιγραφή σειριακής θύρας	48
3.3.4.1	Χρονισμός σειριακής θύρας	59
3.3.4.2	Λειτουργία σειριακής θύρας	60
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ	
4.1	Εισαγωγή	61
4.2	Μετατροπές Υποβιβασμού Τάσης	61
4.2.1	Περιγραφή του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης	58
4.2.2	Συνεχής Αγωγή του Ρεύματος	64
4.2.3	Κυμάτωση της Τάσης Εξόδου	67
4.3	Ο ADC μετατροπές TLV2548	69
4.3.1	Περιγραφή	69
4.3.2	ADC και DSP Interface και Configuration	68
4.3.2.1	Περιγραφή Hardware Interface	71
4.3.2.2	ADC Configuration	73
4.3.2.3	Έλεγχος και χρονισμός του μετατροπέα ADC	75
4.3.3	Λειτουργία συστήματος ADC - DSP	76
4.4	Περιγραφή και σχηματικό του κυκλώματος του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού	77
5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	
5.1	Εισαγωγή	79
5.2	Ανάλυση χρήσης των εργαλείων δημιουργίας τελικού κώδικα προγραμματισμού του μικροεπεξεργαστή DSP	80
5.3	Επεξήγηση Αλγορίθμου – Flow Chart	85
5.4	Παρουσίαση του κώδικα	92
6	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	
6.1	Εισαγωγή	102
6.2	Interface του συστήματος του εξομοιωτή	102
6.3	Τύποι φωτοβολταϊκών προς εξομοίωση	105
6.4	Χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος εξομοίωσης	109

6.5	Χαρακτηριστικές καμπύλες εξόδου τάσης – ρεύματος	110
6.6	Τάση τροφοδοσίας του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού	114
6.7	Βαθμός απόδοσης του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού	114
6.8	Συσσωρευτής μολύβδου-οξέος ως φορτίο του συστήματος εξομοίωσης	117
7	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ	118
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	120

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 Εισαγωγή

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες των φωτοβολταϊκών μπορούν να μοντελοποιηθούν θεωρητικά. Υφίσταται όμως η ανάγκη της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων μέσω πειραματισμών με διάφορα φορτία, όπως για παράδειγμα ωμικά, συσσωρευτές (μπαταρίες), μετατροπείς συνεχούς τάσης (d.c.), και συνδεδεμένα φορτία μέσω inverter. Για τις ανάγκες κάθε τέτοιου φορτίου μπορεί να χρειαστεί να δοκιμαστούν διαφορετικοί τύποι και μεγέθη φωτοβολταϊκών.

Οι δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες είναι δαπανηρές, χρονοβόρες και εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες. Επίσης στην περιοχή των δοκιμών πρέπει να παρέχεται επαρκής ασφάλεια και προστασία από τα καιρικά φαινόμενα. Τέλος μπορεί να προκύψουν καθυστερήσεις στις δοκιμές, εξαιτίας κακών καιρικών συνθηκών και βλαβών του συστήματος. Ο φωτοβολταϊκός εξομοιωτής χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση όλων αυτών των προβλημάτων.

Διάφορες μέθοδοι εξομοίωσης φωτοβολταϊκών έχουν παρουσιαστεί κατά το παρελθόν. Μερικά από τα συστήματα που έχουν προταθεί στηρίζονται σε :

- α) τροποποίηση της πηγής τάσης έτσι ώστε η εσωτερική της αντίσταση να αλλάζει εκθετικά σε σχέση με το ρεύμα
- β) ενίσχυση της τάσης και του ρεύματος ενός ηλιακού κυττάρου και
- γ) υλοποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας χρησιμοποιώντας μία σταθερή πηγή ρεύματος και ένα κύκλωμα διόδου - αντίστασης .

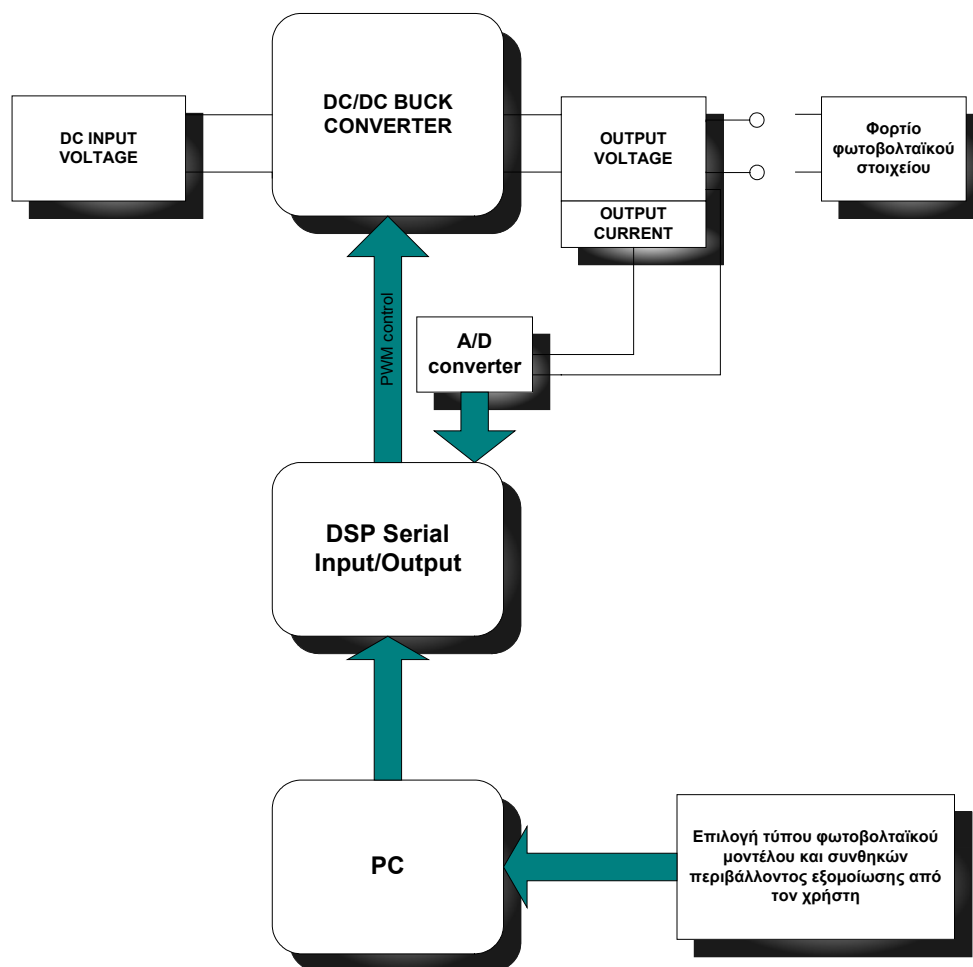
Τέτοιοι εξομοιωτές παρουσιάζουν κάποια χρησιμότητα. Παρόλα αυτά η περιορισμένη δυνατότητα τους να εξομοιώνουν αποτελεσματικά κάποιο

φωτοβολταϊκό κάτω από συγκεκριμένες παραμέτρους και για συγκεκριμένες εισόδους είναι ένα σοβαρό μειονέκτημα το οποίο έχει διαπιστωθεί .

Η διπλωματική αυτή περιγράφει την ανάπτυξη των hardware και software στοιχείων ενός εξομοιωτή φωτοβολταϊκών, ελεγχόμενου από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το σύστημα αποτελείται από το ηλεκτρονικό κύκλωμα ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (buck converter), το D.Module.C31.eco DSK, που διαθέτει τον επεξεργαστή DSP TMS320C31, τροφοδοσία συνεχούς τάσης(d.c.), τον TLV2548 ADC μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, ηλεκτρονικό υπολογιστή και ανάλογο software έλεγχου.

Το σύστημα ελέγχεται από το D.Module.C31.eco και τον DSP επεξεργαστή TMS320C31, χρησιμοποιώντας για ανάδραση την τάση και το ρεύμα εξόδου, την τιμή των οποίων υπολογίζει ο μετατροπέας ADC TLV2548, έτσι ώστε ο εξομοιωτής να συγκλίνει στην πραγματική τιμή λειτουργίας για το συνδεδεμένο φορτίο.

Το block diagram του συστήματος που αναπτύχθηκε είναι το εξής :



Σχ. 1.1 Εξομοιωτής φωτοβολταϊκού στοιχείου

1.2 Δομή της διπλωματικής

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της φωτοβολταϊκής μετατροπής. Περιγράφονται βασικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και γίνεται μία εισαγωγή στα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τις εφαρμογές τους. Επίσης αναλύεται το θεωρητικό μοντέλο των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή της οικογένειας επεξεργαστών TMS320C3x. Παρουσιάζεται ο επεξεργαστής TMS320C31, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία και αναλύονται οι λειτουργίες που επιτελεί.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των επιμέρους υποσυστημάτων του συνολικού συστήματος εξομοίωσης φωτοβολταϊκών. Εξηγείται αναλυτικά η λειτουργία του κάθε υποσυστήματος και ο τρόπος με τον οποίο αυτές οι λειτουργίες συνδυάζονται μεταξύ τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται εκτενώς ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα. Επίσης περιγράφεται η χρήση των εργαλείων προγραμματισμού του DSP επεξεργαστή.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τους τύπους των φωτοβολταϊκών που εξομοιώθηκαν και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και οι μετρήσεις.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα, τις επεκτάσεις και τις πιθανές μελλοντικές βελτιώσεις του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

2.1 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1.1 Εισαγωγή

Νέες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συναντιούνται σε πολλές μορφές. Αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική, πλημμύρες και κύματα, τεχνολογίες βιομάζας, γεωθερμική και άλλες παρουσιάζουν ένα δυναμικό θεωρητικά απεριόριστο. Μερικές από τις παραπάνω πηγές είναι τεχνικά δύσκολο και δαπανηρό για να χρησιμοποιηθούν, άλλες έχουν περιορισμένες εφαρμογές (κυρίως χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρισμού). Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιορίζεται στην σύγχρονη κοινωνία, αλλά το δυναμικό που διαθέτουν για μελλοντική χρήση είναι τεράστιο και πιθανότατα οι μορφές αυτές ενέργειας να αντικαταστήσουν τα ορυκτά καύσιμα κατά την διάρκεια του 21ου αιώνα και μετά.

2.1.2 Μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας είναι η υδροηλεκτρική, χρήσιμη για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Άλλες μορφές ηλεκτρικής ενέργειας :

α) Ηλιακή ενέργεια, χρησιμοποιείται για θέρμανση νερού και παραγωγή ενέργειας μέσω της χρήσης φωτοβολταϊκών κυττάρων

β) Γεωθερμική ενέργεια

γ) Αιολική ενέργεια

δ) Παλιρροιακή ενέργεια

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια είναι σχεδόν μη-εξαντλήσιμες. Επίσης, οι περισσότερες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επιφέρουν μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις συγκριτικά με αυτές των ορυκτών καυσίμων ή της πυρηνικής ενέργειας. Είναι ενδογενείς και μπορούν έτσι να συνεισφέρουν στην μείωση των εισαγωγών ενέργειας και στην αύξηση της ασφάλειας στην παροχή.

2.1.2.1 Τα φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά (ή PV) στοιχεία μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρισμό. Η λέξη βολτ προέρχεται από τον *Alessandro Volta* ο οποίος ήταν ένας από τους πρωτοπόρους στην μελέτη του ηλεκτρισμού. Ονομάζονται συχνά και ηλιακές κυψέλες και είναι ήδη ένα σημαντικό αντικείμενο του ενεργειακού τομέα. Τις πιο απλές εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας τις συναντούμε στους υπολογιστές τσέπης και στα ρολόγια χειρός. Πιο σύνθετα συστήματα μας βοηθούν να αντλούμε νερό, να δίνουμε ηλεκτρικό ρεύμα σε απομακρυσμένους τηλεπικοινωνιακούς σταθμούς, καθώς και να φωτίζουμε σπίτια και να λειτουργούμε οικιακές συσκευές. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η πιο οικονομική μορφή ηλεκτρισμού για να καταφέρνουμε τα παραπάνω.

2.1.2.2 Εφαρμογές φωτοβολταϊκών

Σήμερα η ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκά συστήματα εξυπηρετεί ανθρώπους στις πιο απομακρυσμένες περιοχές στον πλανήτη μας όπως και στα κέντρα των πόλεων. Οι εφαρμογές των φωτοβολταϊκών μπορούν να χωρισθούν στις παρακάτω κατηγορίες :

- ❑ Απλό ή ανεξάρτητο φωτοβολταϊκό σύστημα
- ❑ Φωτοβολταϊκό σύστημα με αποθήκευση σε μπαταρίες
- ❑ Φωτοβολταϊκό σύστημα διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο (ΔΕΗ)
- ❑ Φωτοβολταϊκό σύστημα σε επίπεδο εργοστασίου παραγωγής ενέργειας
- ❑ Υβριδικά συστήματα

Η ενέργεια παράγεται όπου και όταν χρειάζεται και το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι απλό σε όλα του τα στάδια - από την καλωδίωση, την αποθήκευση του έως και τα κέντρα ελέγχου του. Τα μικρά συστήματα (έως 500W) έχουν χαμηλό βάρος και είναι πολύ εύκολα στην μεταφορά και στην εγκατάστασή τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις η εγκατάσταση ενός συστήματος διαρκεί μερικές ώρες. Ένα παράδειγμα είναι οι αντλίες νερού που απαιτούν συχνή συντήρηση, ενώ το φωτοβολταϊκό σύστημα που τις τροφοδοτεί με ηλεκτρικό απαιτεί μόνο ένα περιοδικό έλεγχο της κατάστασής του και καθαρισμό.

2.1.2.3 Συστήματα με μπαταρίες

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα με μπαταρίες είναι μία πολύ αξιόπιστη λύση για την ηλεκτροδότηση ενός χώρου ή μηχανήματος 24 ώρες το 24ωρο, με βροχή ή λιακάδα. Χρησιμοποιούνται σε όλο τον κόσμο για να μας δίνουν φως, να προμηθεύουν ηλεκτρικό τις οικιακές συσκευές, διακόπτες, τηλέφωνα, ακόμα και μηχανολογικό εξοπλισμό βαρέως τύπου. Κατά την διάρκεια της ημέρας τα στοιχεία συλλέγουν ηλιακό φως, το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό ρεύμα και το αποθηκεύουν στις μπαταρίες. Έτσι είναι δυνατή ανά πάσα

στιγμή η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μπαταρίες. Μεσολαβεί μία συσκευή που ονομάζεται "ρυθμιστής φόρτισης" η οποία φροντίζει να φορτίζονται σωστά οι μπαταρίες και επιμηκύνει την διάρκεια ζωής τους, προστατεύοντάς τις από υπερφόρτιση ή από την ολική τους αποφόρτιση. Οι μπαταρίες είναι χρήσιμες στις περισσότερες περιπτώσεις αλλά απαιτούν μία περιοδική συντήρηση. Μοιάζουν με τις μπαταρίες των αυτοκινήτων, τα υγρά τους πρέπει να ελέγχονται περιοδικά και πρέπει να προστατεύονται από υπερβολικά χαμηλές θερμοκρασίες. Η ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που μπορεί να απαιτηθεί από αυτές μετά την δύση του ήλιου ή σε συννεφιασμένο καιρό, καθορίζεται από την παραγωγή των φωτοβολταϊκών στοιχείων και το είδος/ποσότητα των μπαταριών. Η πρόσθεση επιπλέον μπαταριών και στοιχείων ανεβάζει το κόστος, για αυτό τον λόγο πρέπει να γίνεται καλή μελέτη των ενεργειακών αναγκών πριν την εγκατάσταση του συστήματος για τον ορισμό του αποδοτικότερου μεγέθους του συστήματος. Εάν οι ανάγκες σε ενέργεια αλλάξουν, η προσθήκη και άλλων μερών του συστήματος είναι εφικτή και απλή.

2.1.2.4 Φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο με τον οργανισμό κοινής ωφελείας

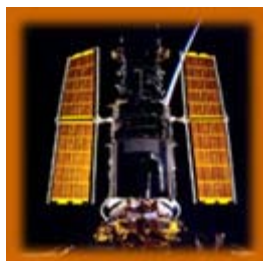
Σε μέρη όπου ήδη υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα είναι εφικτή η σύνδεσή του με το φωτοβολταϊκό μας σύστημα, συμπληρώνοντας έτσι τις ανάγκες μας σε ενέργεια και αντικαθιστώντας την χρήση των μπαταριών. Πολλοί ιδιοκτήτες σπιτιών χρησιμοποιούν και τις δύο πηγές ηλεκτρισμού, μειώνοντας έτσι τον λογαριασμό του ηλεκτρικού. Ικανοποιούνται επίσης από το γεγονός ότι δεν μολύνουν το περιβάλλον. Ένας χρήστης φωτοβολταϊκού συστήματος που είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο μπορεί επίσης να πουλήσει ρεύμα στην ΔΕΗ. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας ένα μετρητή μεταξύ του συστήματος και του δικτύου. Όταν χρησιμοποιεί λιγότερο ρεύμα από αυτό που του παρέχει το φωτοβολταϊκό σύστημα το πλεόνασμα διοχετεύεται (ή πωλείται) στο δίκτυο. Στον επόμενο λογαριασμό ηλεκτρικού παρουσιάζεται η πίστωση από την

πώληση του ηλεκτρικού ρεύματος. Για να γίνει αυτό εφικτό χρειάζεται ένας εγκεκριμένος μετατροπέας που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγει το φωτοβολταϊκό σύστημα στο εναλλασσόμενο του δικτύου εξισορροπώντας την τάση, την συχνότητα και την ποιότητά του με ακρίβεια. Σε περίπτωση πτώσης της τάσης του δικτύου, αυτόματοι διακόπτες ασφαλείας αποσυνδέουν το φωτοβολταϊκό σύστημα από αυτό.

2.1.2.5 Υβριδικά συστήματα

Συνδιάζουν ηλεκτρικό ρεύμα που προέρχεται από νηζελογεννήτριες, ανεμογεννήτριες, μικρές υδροηλεκτρικές γεννήτριες και φωτοβολταϊκά συστήματα, ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες που υπάρχουν, αξιοποιώντας τα γεωγραφικά πλεονεκτήματα της περιοχής. Είναι ιδανικά συστήματα για εφαρμογές σε απομακρυσμένες τοποθεσίες όπως τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί καί αναμεταδότες, στρατιωτικές εγκαταστάσεις και παραμεθόρια χωριά. Απαραίτητη γνώση για την εγκατάσταση ενός υβριδικού συστήματος είναι η ζήτηση σε ηλεκτρικό ρεύμα όπως και τα γεωγραφικά και τοπολογικά πλεονεκτήματα, οπότε πρέπει να καταμετρηθεί η ηλιακή ενέργεια, ο άνεμος και άλλες πιθανές πηγές σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Αυτή η καταμέτρηση θα αποτελέσει την βάση για τον σχεδιασμό ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που καλύπτει σε όσον το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος τις ανάγκες σε ηλεκτρικό ρεύμα της εγκατάστασης ή της κοινότητας.

2.1.3 Παραδείγματα φωτοβολταϊκών εφαρμογών



Σχ. 1

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία χρησιμοποιούνται με αξιοπιστία στη Γη όπως και στο διάστημα. Το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble στην φωτογραφία, όπως και όλοι σχεδόν οι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι βασίζονται στην φωτοβολταϊκή τεχνολογία για τις ανάγκες τους σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχ. 2

Μία από τις πιο απλές εφαρμογές της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι οι φανοστάτες των δρόμων. Τα στοιχεία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια κατά την διάρκεια της ημέρας η οποία αποθηκεύεται σε μπαταρίες για να χρησιμοποιηθεί το βράδυ.



Σχ. 3

Άλλη εφαρμογή αποτελεί ο σταθμός επαναφόρτισης οχημάτων που παρουσιάζεται στην παραπάνω φωτογραφία. Ο σταθμός παίρνει ενέργεια από μία συστοιχία φωτοβολταϊκών στοιχείων που είναι συνδεδεμένη και με το επίγειο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν τα οχήματα δεν χρειάζονται επαναφόρτιση η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενέργεια διατίθεται στο ηλεκτρικό δίκτυο.

2.1.4 Απόδοση φωτοβολταϊκών

Η μέγιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους κυμαίνεται από 7% (ηλιακά στοιχεία άμορφου πυριτίου) έως 12-15% (ηλιακά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου). Το σημαντικό είναι ότι η ενέργεια που παράγεται με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατό να αποθηκευτεί σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές (μπαταρίες). Έτσι έχουμε ενέργεια ανεξάντλητη, ανανεώσιμη, φθηνή και κυρίως "καθαρή".[1]

Τα κύρια πλεονεκτήματα από τη χρήση των φωτοβολταϊκών είναι τα εξής:

- ❑ Μηδενική ρύπανση,
- ❑ Αθόρυβη λειτουργία,
- ❑ Αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής και
- ❑ Ενέργεια απεξαρτημένη από τροφοδοσία καυσίμων (μπαταρίες)

Αντίθετα, τα βασικά μειονεκτήματα από τη χρήση των φωτοβολταϊκών είναι τα εξής:

- ❑ Υψηλό κόστος κατασκευής
- ❑ Προβλήματα χώρου στην εγκατάσταση λόγω μεγάλης επιφάνειας

2.2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2.2.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας (solar irradiation) προέρχεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του ήλιου. Σαν αποτέλεσμα των αντιδράσεων αυτών μεγάλες ποσότητες υδρογόνου μετατρέπονται σε ήλιο με τη σύγχρονη απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και με συνέπεια την ελάττωση της μάζας του ήλιου με ένα ρυθμό 4.000.000 τόνους το δευτερόλεπτο. Σ' αυτά τα ποσά ενέργειας που έφτασαν στη γη κατά το παρελθόν οφείλεται και η δημιουργία όλων των ποσοτήτων πετρελαίου και άνθρακα που υπάρχουν στο εσωτερικό της γης.

Αν μελετήσει κανείς το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας θα δει ότι εκτείνεται σε όλα τα μήκη κύματος. Αναλυτικότερα, το 44% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας ανήκει στο ορατό φάσμα (400 έως 700 nm), το 50% στο υπέρυθρο (>700 nm) και το υπόλοιπο 6% στο υπεριώδες (<400 nm). Από το σύνολο μηκών κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας μόνο το 75% μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προκαλέσει ηλεκτρικό ρεύμα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Αυτό το ποσοστό περιλαμβάνει μικρά μήκη κύματος (μεγάλες συχνότητες) δηλαδή μεγάλες ενέργειες φωτονίων.

Εκτός από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ο ήλιος εκπέμπει και μια ασθενή σωματιδιακή ακτινοβολία που αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, κυρίως πρωτόνια και ηλεκτρόνια, και ονομάζεται ηλιακός άνεμος. Ο ηλιακός άνεμος δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον από πλευράς ενεργειακής εκμετάλλευσης.

2.2.2 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

Ένα μέγεθος που έχει μεγάλη σημασία για την αποτελεσματικότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Σαν ένταση B της ηλιακής ακτινοβολίας ορίζεται το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε 1 m^2 επιφάνειας σε 1 sec με βάση τον τύπο:

$$B = \frac{E}{S \cdot t} = \frac{P}{S} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.1)$$

όπου : E : η ενέργεια,

P : η ισχύς που προσπίπτει στην επιφάνεια

S : το εμβαδόν επιφανείας και

t : ο χρόνος

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα σημεία μεταξύ του ηλίου και της επιφάνειας της γης βρίσκεται από τον τύπο :

$$B_r = \frac{P_o}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

όπου : P_o : η ισχύς που εκπέμπεται από τον ήλιο

$4\pi r^2$: το εμβαδόν της εσωτερικής επιφάνειας νοητής σφαίρας

r : η ακτίνα της νοητής σφαίρας.

Η ένταση, δηλαδή, ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από τον ήλιο. Στην αρχή της ατμόσφαιρας της γης η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι:

$$B_R = \frac{P_o}{4\pi R^2} \quad (2.3)$$

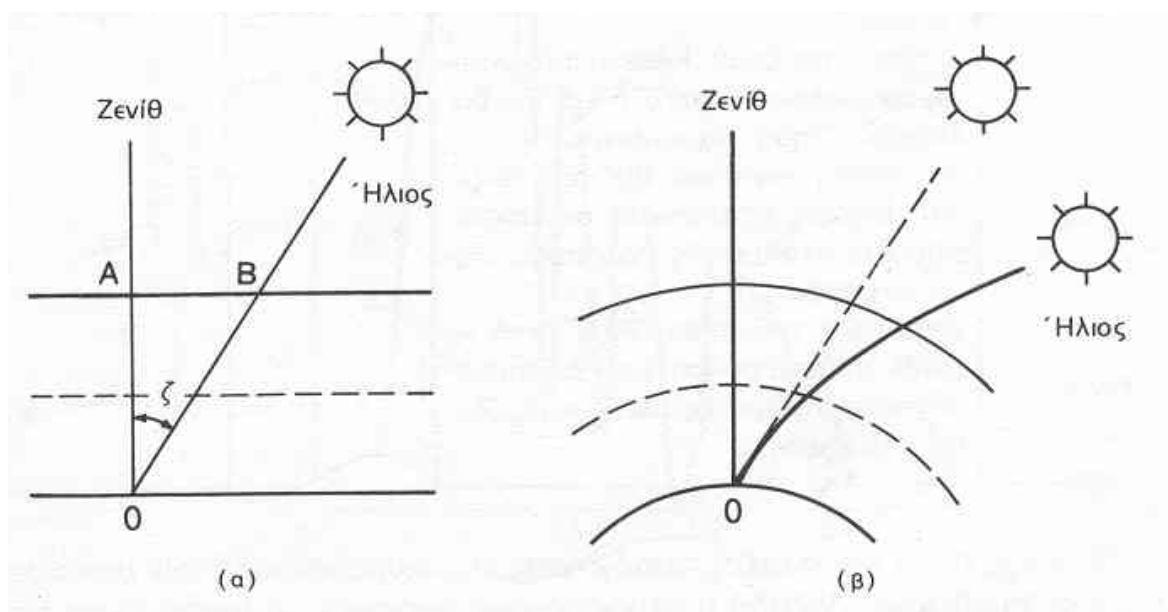
όπου : R : η απόσταση ήλιου-γης.

2.2.3 Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται συνεχώς καθώς απομακρύνεται από τον ήλιο. Αυτό υποδηλώνει η σχέση 2.2. Έτσι, όπως γίνεται αντιληπτό, η γεωγραφική θέση και το υψόμετρο ενός τόπου επηρεάζουν άμεσα την ηλιακή ενέργεια που τελικά φτάνει σ' αυτόν. Η μείωση εξαρτάται ακόμα από τη σύσταση του ατμοσφαιρικού στρώματος της γης, όπου λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της απορρόφησης. Το όζον, το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα αλλά και οι υδρατμοί απορροφούν ποσά ηλιακής ενέργειας σε διαφορετικά μήκη κύματος συμβάλλοντας έτσι στη μείωση της έντασης. Μέσα στην ατμόσφαιρα έντονο είναι επίσης το φαινόμενο της διάχυσης του φωτός. Όλη η ενέργεια δεν έρχεται υπό τη μορφή δέσμης ακτίνων αλλά κάποιο ποσοστό της σκεδάζεται ή και ανακλάται. [2]

2.2.4 Συμβατικές ηλιακές ακτινοβολίες και ακτινοβολία ενός ήλιου

Πέρα από τους παραπάνω παράγοντες που αναφέρθηκαν, η τελική μορφή και η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τη θέση του ήλιου στον ουρανό. 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 2.1). 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. [2]



Σχήμα 2.1 Εξάρτηση AM από τη θέση του ήλιου

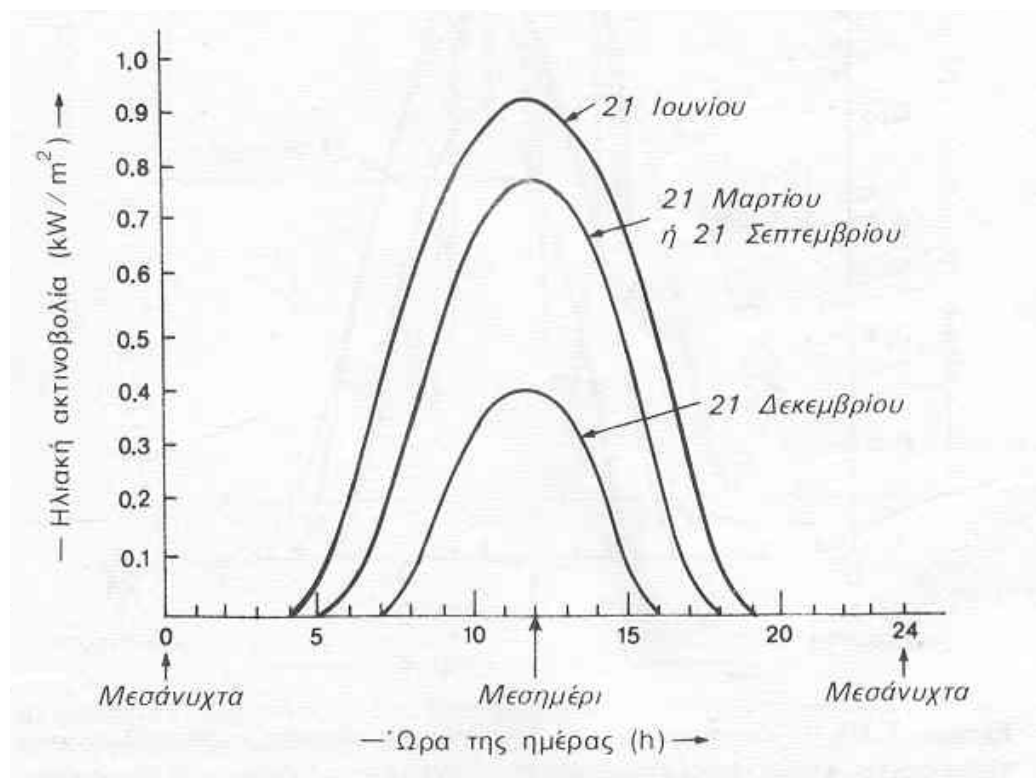
Στο Σχήμα 2.1α η ατμόσφαιρα θεωρείται επίπεδη και εκτείνεται άπειρα. Εξ ορισμού είναι $AM = OB/OA = 1/\cos\zeta$. Στο Σχήμα 2.1β φαίνεται η πραγματική διαμόρφωση της ατμόσφαιρας καθώς και η ατμοσφαιρική διάθλαση. Συγκεκριμένα, ως $AM1$ συμβολίζεται η συνθήκη για τη θέση του ήλιου στην κατακόρυφο, στο ζενίθ, που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Όμοια, ως $AM1,5$ συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία 45° από το ζενίθ, ως $AM2$ με τον ήλιο σε γωνία 60° κ.λ.π. Το μηδέν της κλίμακας ($AM0$) συμβολίζει 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.

Η ηλιακή ακτινοβολία $AM1.5$ έχει πυκνότητα 935W/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.λ.π.) ένα μεγάλο μέρος από τις περισσότερες κατοικημένες και αναπτυγμένες περιοχές της γης. Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα ισχύος στρογγυλεύεται στα 1000W/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. [2]

2.2.5 Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους

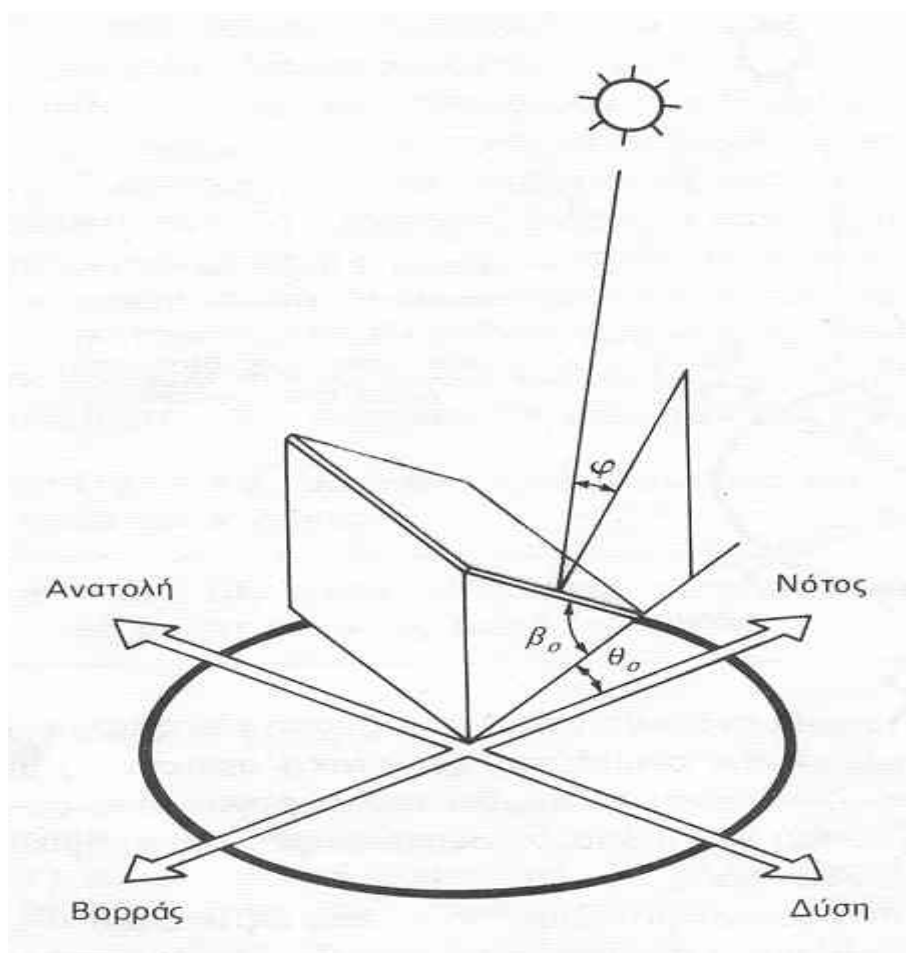
Όπως ήδη έχει γίνει αντιληπτό η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις από εποχή σε εποχή λόγω της κίνησης της γης γύρω από τον ήλιο. Στο Σχήμα 2.2 δείχνεται η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας μέρας για τρεις διαφορετικές ημερομηνίες. Χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η τιμή της μέγιστης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ένταση αιχμής), που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, το οποίο δεν είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι. Π.χ. στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12.25' τον χειμώνα, και 13.25' το καλοκαίρι.[2]



Σχήμα 2.2 Διακύμανση ηλ. ακτινοβολίας σε ορ. επίπεδο κατά τη διάρκεια φωτεινών ωρών για τρεις διαφορετικές ημερομηνίες

2.2.6 Προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων και βέλτιστη κλίση

Ο προσανατολισμός των φ/β πλαισίων καθώς και η κλίση τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο είναι δυο πολύ κρίσιμες επιλογές για ένα σύστημα ενέργειας που εκμεταλλεύεται τη φ/β μετατροπή. Τα δυο μεγέθη που περιγράφουν τον προσανατολισμό και την κλίση του συλλέκτη είναι η αζιμούθια γωνία θ_o και η γωνία κλίσης β_o . Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζονται αυτά τα μεγέθη.



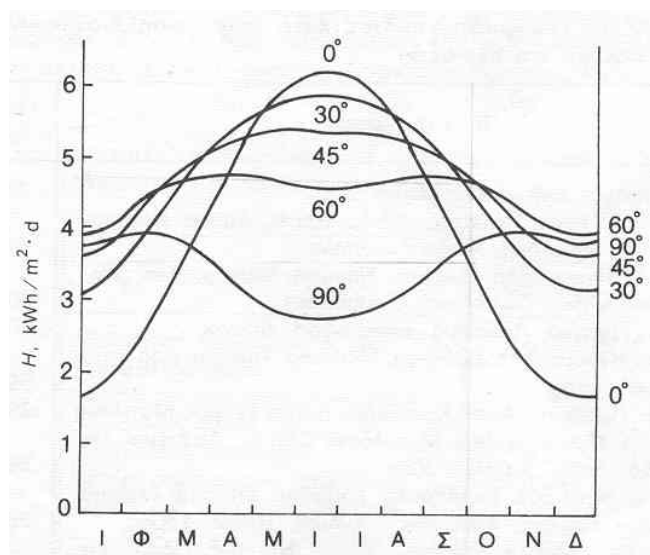
Σχήμα 2.3 Η κλίση β_o και η αζιμούθια γωνία ενός επίπεδου συλλέκτη

Η κλίση του συλλέκτη (β_o) είναι η διέδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα. Δείχνει την κλίση του

συλλέκτη και μπορεί να πάρει τιμές από 0 μέχρι 180° . Για γωνίες $\beta_o > 90^\circ$ το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω.

Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη θ_o 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 επιφάνεια 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. Πρέπει λοιπόν να επιλεγεί μια σταθερή κλίση που να μειώνει όσο το δυνατό περισσότερο τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η κλίση αυτή δεν είναι άλλη από τη γεωγραφική παράλληλο του τόπου. Για κάθε εποχή βέβαια υπάρχει και διαφορετική βέλτιστη κλίση (Σχ. 2.4). Έτσι αν επιδιώκεται το σύστημα να παράγει όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια επιλέγονται οι κατάλληλες κλίσεις για κάθε εποχή. Μια κλίση επιλέγεται 10 με 15 μοίρες μικρότερη από την παράλληλο του τόπου και χρησιμοποιείται το καλοκαίρι και μια άλλη 10 με 15 μοίρες μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου και χρησιμοποιείται τον χειμώνα. Για το βόρειο ημισφαίριο, τέλος, η αζιμούθια γωνία λαμβάνεται ίση με 0° . [2]



Σχήμα 2.4 Διακύμανση ακτινοβολίας σε επιφάνεια διαφόρων κλίσεων σε τόπο με παράλληλο 45 μοιρών

2.2.7 Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια

Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά το στρώμα της γήινης ατμόσφαιρας υφίσταται την επίδραση ενός συνόλου παραγόντων. Κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες όπως οι νεφώσεις αντανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ άλλοι όπως το όζον ή το οξυγόνο την απορροφούν. Παράγοντες όπως σταγονίδια νερού ή σκόνη οδηγεί στη διασπορά της ακτινοβολίας ενώ τελικά όταν φτάσει στο έδαφος ένα μέρος της θα απορροφηθεί και το υπόλοιπο θα ανακλαστεί πίσω. Όπως γίνεται κατανοητό το σύνολο των παραπάνω επιδράσεων αποσυνθέτει την ηλιακή ακτινοβολία σε διάφορες συνιστώσες : (1) direct radiation, είναι η ακτινοβολία που έρχεται απευθείας από τον ήλιο, (2) diffuse radiation, η ακτινοβολία που συνίσταται από ακτίνες που έρχονται από τον ουρανό όχι όμως απευθείας από τον ήλιο (δε περιλαμβάνονται δηλαδή ανακλάσεις από τη γη) και (3) albedo radiation, είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από ανακλάσεις του εδάφους. Προφανώς η συνολική ακτινοβολία (global radiation) είναι το άθροισμα των παραπάνω συνιστωσών.[2]

2.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

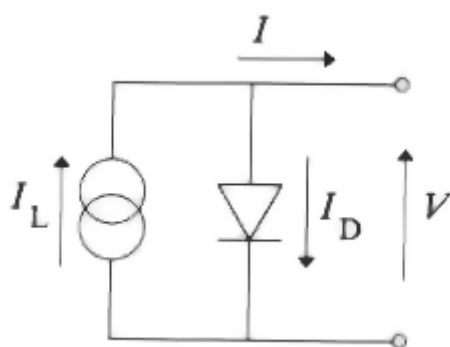
2.3.1 Εισαγωγή

Η μετατροπή της ενέργειας που μεταφέρεται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα φυσικό φαινόμενο γνωστό ως **φωτοβολταϊκή μετατροπή**. Αναμφίβολα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (solar cells) αποτελούν το σημαντικότερο είδος συσκευών που χρησιμοποιούνται για αυτή τη μετατροπή. Ενώ αρχικά χρησιμοποιήθηκαν μόνο σε διαστημικές εφαρμογές λόγω του πολύ υψηλού τους κόστους, τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να γίνεται ευρεία η χρήση τους σε πολλές εφαρμογές. Ουσιαστικά πρόκειται για διόδους ημιαγωγών σε μορφή δίσκου που καθώς δέχονται στην επιφάνειά τους το ηλιακό φως εκδηλώνουν μια διαφορά δυναμικού. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την προσπίπτουσα ακτινοβολία μπορούν να δώσουν τάση από 0.5 ως 1 Volt και πυκνότητα ρεύματος 20 με 40 mA/cm². Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή τη μορφή ή να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα ή ακόμα και να αποθηκευτεί για να χρησιμοποιηθεί αργότερα.

Ο Becquerel παρατήρησε πρώτος το φαινόμενο της φωτοβολταϊκής μετατροπής το 1839 σε ηλεκτροχημικά στοιχεία (electrochemical cells), αλλά το 1954 οι Chapin, Fuller και Pearson έφτιαξαν το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο.[3]

2.3.2 Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5. Όπως φαίνεται, αποτελείται από μια πηγή ρεύματος I_L (το ρεύμα που δημιουργείται από το ηλιακό φως) και από μια δίοδο με ρεύμα I_D παράλληλα τοποθετημένη στη πηγή ρεύματος.



Σχήμα 2.5 Το κύκλωμα του ιδανικού φ/β στοιχείου

Το ρεύμα I που διαρρέει το στοιχείο είναι :

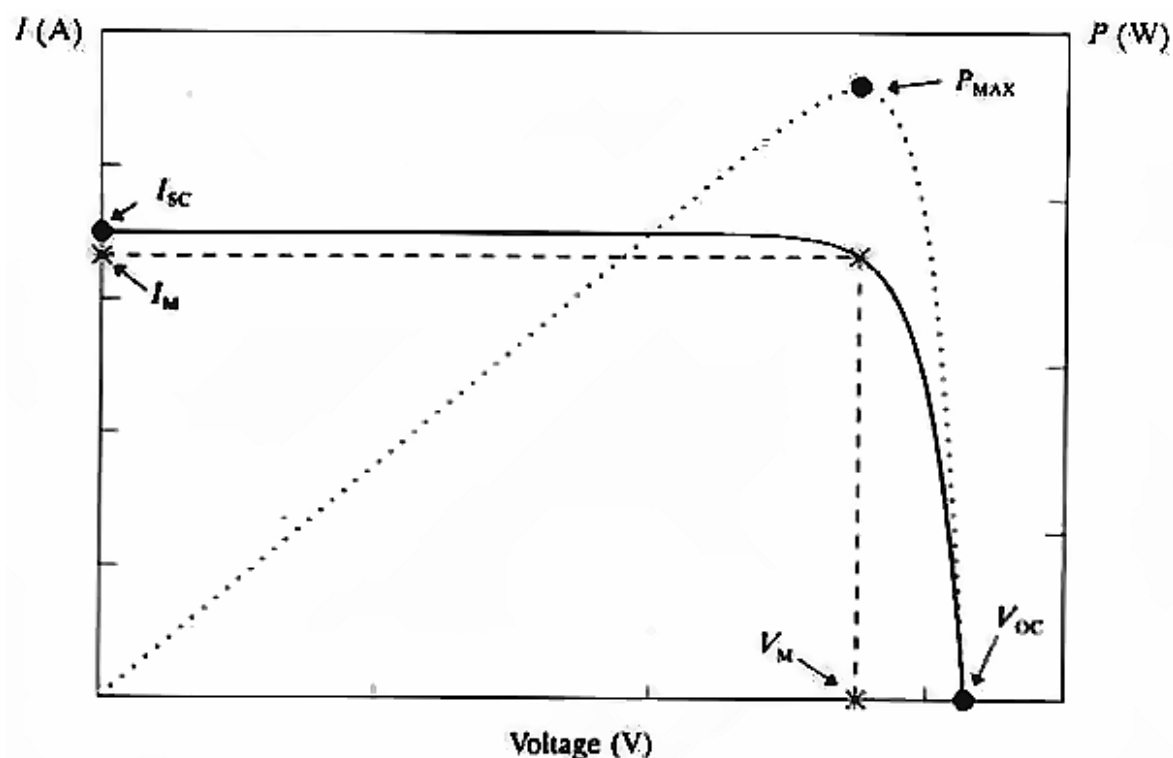
$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{eV}{mkT}} - 1 \right) \quad (2.26)$$

όπου I_0 είναι το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης, e το φορτίο του ηλεκτρονίου, V η τάση στα άκρα του στοιχείου, k η σταθερά Boltzmann, T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin και m ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου ($1 \leq m \leq 2$). Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Το ρεύμα για το οποίο είναι $V=0$ ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης και είναι :

$$I_{sc} = I(V=0) = I_L \quad (2.27)$$

Η τάση για την οποία ισχύει $I=0$ ονομάζεται τάση ανοιχτοκύκλωσης και δίνεται από τη σχέση :

$$V_{oc} = m \frac{kT}{e} \ln \left[\frac{I_L}{I_0} + 1 \right] \quad (2.28)$$



Σχήμα 2.11 Χαρακτηριστική I-V του φ/β στοιχείου

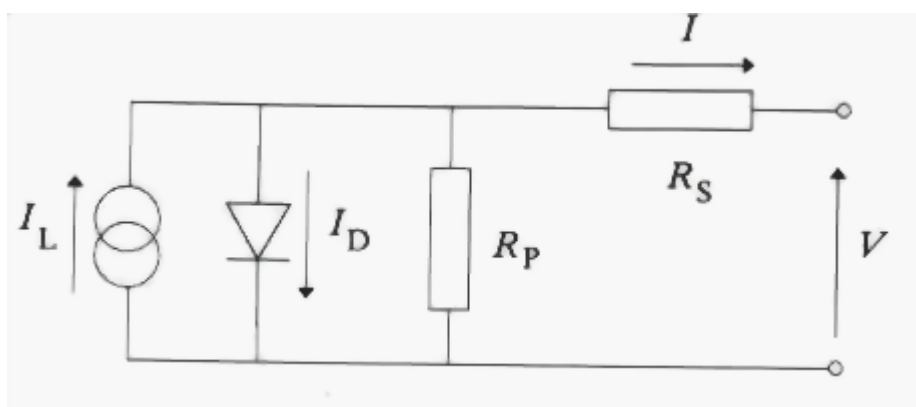
Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς στο Σχήμα 2.11 απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή και η ισχύς του στοιχείου συναρτήσει της τάσης. Υπάρχει ένα σημείο (V_m, I_m) στο οποίο η ισχύς μεγιστοποιείται. Το σημείο αυτό ονομάζεται μέγιστο σημείο ισχύος (maximum power point, MPP). Ως συντελεστής πλήρωσης (Fill Factor) ονομάζεται το πηλίκο :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.29)$$

Όσο πιο απότομη είναι η χαρακτηριστική του στοιχείου τόσο πιο κοντά θα είναι το FF στη μονάδα. (Τότε το εμβαδόν του ορθογωνίου που ισούται με $I_m V_m$ θα είναι πιο κοντά στο εμβαδόν του ορθογωνίου $I_{sc} V_{oc}$). Ο FF δίνει ένα ποιοτικό μέτρο της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης. Παίρνει τιμές συνήθως από 0.7 ως 0.8. Η ενεργειακή απόδοση ενός φ/β στοιχείου ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί στο φορτίο προς την ισχύ που παράγεται από το στοιχείο (την ισχύ δηλαδή που αντιστοιχεί στο ρεύμα I_L):

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_L} \quad (2.30)$$

Στην πραγματικότητα βέβαια το παραπάνω ιδανικό μοντέλο δε χρησιμοποιείται. Ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο απεικονίζεται στο Σχήμα 2.12. Ουσιαστικά είναι το ίδιο με το ιδανικό μοντέλο αλλά έχουν προστεθεί δυο αντιστάσεις, μια παράλληλα με τη δίοδο και μια σε σειρά με το υπόλοιπο μοντέλο. Η χρήση αυτών των αντιστάσεων γίνεται για να καλυφθούν διάφορα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο στοιχείο σε επίπεδο ημιαγωγών. Αν και τα φαινόμενα αυτά είναι κατανεμημένα και δε μπορούν εν γένει να αναπαρασταθούν με αντιστάσεις σταθερής τιμής, οι χρήσεις των σταθερών αντιστατών R_s και R_p είναι αποδεκτή από πρακτικής άποψης.



Σχήμα 2.12 Το κύκλωμα ενός πραγματικού φ/β στοιχείου

Αν συμπεριληφθούν στην 2.26 οι αντιστάτες R_s και R_p τότε το ρεύμα του στοιχείου θα δίνεται από τη σχέση :

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \frac{e(V + IR_s)}{mkT} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.31)$$

Κατά την εφαρμογή της εξίσωσης 2.31 είναι αποδεκτό όπως έχει παρατηρηθεί να γίνουν οι παρακάτω παραδοχές : Η επίδραση της R_p είναι αμελητέα (η R_p είναι δηλαδή αρκετά μεγάλη), το ρεύμα I_L είναι ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης και πάντα ισχύει η σχέση $\exp(e(V + IR_s)/mkT) \gg 1$. Με αυτές τις παραδοχές το ρεύμα του στοιχείου γίνεται :

$$I = I_{sc} \left[1 - \exp \left(\frac{V - V_{oc} + IR_s}{V_t} \right) \right] \quad (2.32)$$

όπου

$$V_t = \frac{mkT}{e} \quad (2.33)$$

Από την εξίσωση 2.32 προκύπτει το εξής παράδοξο. Αν θέσουμε $V = 0$ τότε δεν ισχύει $I = I_{sc}$ όπως θα περίμενε κανείς. Έχει παρατηρηθεί όμως ότι εν γένει ισχύει $V_{oc} \gg IR_s$ οπότε τελικά ισχύει $I = I_{sc}$.

2.3.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

2.3.3.1 Εισαγωγή

Επειδή τα φ/β στοιχεία δίνουν στην έξοδό τους μικρή τάση (0.5 – 1 Volt) οι κατασκευαστές παρέχουν φ/β στοιχεία σε διατάξεις με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Αυτές οι διατάξεις ονομάζονται φ/β πλαίσια (modules) και περιλαμβάνουν κάποιο αριθμό φ/β στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά μεταξύ τους. Τα στοιχεία στηρίζονται με κολλητική ουσία πάνω σε ανθεκτικό φύλλο μετάλλου ή πλαστικού που αποτελεί την πλάτη του πλαισίου. Η εμπρός όψη καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή πλαστικού. Τα φ/β πλαίσια αποτελούν τα κύρια δομικά στοιχεία ενός φ/β συστήματος.

2.2.3.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας των φ/β πλαισίων

Ας θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα πλαίσιο που αποτελείται από N_p ομάδες φ/β στοιχείων παράλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους. Κάθε τέτοια ομάδα έστω ότι αποτελείται από N_s στοιχεία σε σειρά. Η συνολική τάση και το συνολικό ρεύμα εξόδου του πλαισίου είναι προφανές ότι θα δίνεται από τις σχέσεις :

$$I_M = I_{N_p} \quad (2.34)$$

και

$$V_M = V N_s \quad (2.35)$$

όπου I είναι το ρεύμα που διαρρέει κάθε στοιχείο και V είναι η τάση κάθε στοιχείου. Ακόμη το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SCM} και η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OCM} είναι :

$$I_{SCM} = I_{sc} N_p \quad (2.36)$$

$$V_{OCM} = V_{oc} N_s \quad (2.37)$$

όπου I_{sc} και V_{oc} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτοκύκλωσης κάθε στοιχείου του πλαισίου. Έτσι σύμφωνα με τις Εξ. (2.34),(2.35),(2.36),(2.37) και (2.32) το ρεύμα του πλαισίου δίνεται από τη σχέση :

$$I_M = I_{SCM} \left(1 - \exp \left(\frac{(V_M - V_{OCM} + I_M R_{SM})}{N_s V_t} \right) \right) \quad (2.38)$$

όπου

$$R_{SM} = \frac{R_s N_s}{N_p} \quad (2.39)$$

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής και καθώς και λόγω του ότι τόσο η εξίσωση (2.38) όσο και η (2.32) περιλαμβάνουν το ρεύμα και στα δυο μέλη, για τους θεωρητικούς μας υπολογισμούς στο κομμάτι του software ελέγχου χρησιμοποιούμε τη σχέση της τάσεως ως προς το ρεύμα η οποία προκύπτει από την εξίσωση (2.38) και είναι η εξής :

$$V_M = V_{OCM} - I_M R_{SM} + N_s V_t \ln \left(1 - \frac{I_M}{I_{SCM}} \right) \quad (2.40)$$

Ένα σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι η nominal cell operating temperature (NCOT). Η NCOT εκφράζει τη θερμοκρασία των στοιχείων των πλαισίων υπό τις εξής συνθήκες : ακτινοβολία 800 W/m^2 , AM 1.5, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και ταχύτητα ανέμου 1 m/s . Η NCOT παίρνει τιμές από 42 έως 46°C . Όταν ο κατασκευαστής δε δίνει την τιμή NCOT μια λογική τιμή που μπορεί να χρησιμοποιείται είναι 44°C .

Οι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών πλαισίων παρέχουν τουλάχιστον τα παρακάτω μεγέθη μαζί με τα πλαίσια : τη μέγιστη ισχύ εξόδου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης και την τάση ανοιχτοκύκλωσης. Οι παραπάνω τιμές έχουν μετρηθεί για τις εξής συνθήκες : ακτινοβολία 1000 W/m^2 , AM 1.5 και θερμοκρασία στοιχείων 25°C . [3]

2.3.3.3 Υπολογισμός ισχύος πλαισίων σε οποιεσδήποτε συνθήκες

Πολύ συχνά είναι αναγκαίο να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου ενός πλαισίου για συνθήκες διαφορετικές από αυτές που δίνει ο κατασκευαστής. Ειδικότερα είναι επιθυμητό να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς εξόδου ενός πλαισίου σε ορισμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος μπορούν να εφαρμοστούν οι παρακάτω απλοί αλλά ικανοποιητικά ακριβείς κανόνες.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός στοιχείου στις εκάστοτε συνθήκες δίνεται από τη σχέση :

$$I_{sc} = C_1 G \quad (2.41)$$

όπου G είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία και η σταθερά C_1 δίνεται από τη :

$$C_1 = \frac{I_{sc}(1000 \text{ W/m}^2)}{1000} \quad (\text{Am}^2/\text{W}) \quad (2.42)$$

Η τάση ανοιχτοκύκλωσης κάθε ϕ/β στοιχείου μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία στοιχείων με ρυθμό :

$$\frac{dV_{oc}}{dT_c} = -2.3 \text{ mV}/^\circ\text{C} \quad (2.43)$$

Η θερμοκρασία των στοιχείων του πλαισίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος T_a σύμφωνα με τη σχέση :

$$T_c - T_a = C_2 G \quad (2.44)$$

όπου

$$C_2 = \frac{NCOT - 20}{800} \quad (^\circ\text{Cm}^2/\text{W}) \quad (2.45)$$

Τέλος η αντίσταση R_s των στοιχείων των πλαισίων δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες και δίνεται από τη σχέση :

$$R_s = \left(1 - \frac{FF}{FF_o} \right) \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.46)$$

όπου τα FF και FF_o συνδέονται με τον εξής εμπειρικό τύπο :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} = FF_o (1 - r_s) \quad (2.47)$$

Το r_s προκύπτει από τη σχέση :

$$r_s = \frac{R_s}{V_{oc}/I_{sc}} \quad (2.48)$$

και το FF_o από την :

$$FF_o = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \quad (2.49)$$

Γνωρίζοντας τη μέγιστη ισχύ εξόδου στις standard συνθήκες, P_{Mm} που μας δίνουν οι κατασκευαστές καθώς και τις τιμές N_p και N_s προκύπτει εύκολα η μέγιστη ισχύ ενός στοιχείου σε standard συνθήκες :

$$P_m = \frac{P_{Mm}}{N_s N_p} \quad (2.50)$$

Επίσης από τις σχέσεις (2.36) και (2.37) μπορούμε να πάρουμε τα I_{sc} και V_{oc} στοιχείων. Επίσης υπολογίζεται η εξής ποσότητα :

$$v_{oc} = \frac{eV_{oc}}{mkT} \quad (2.51)$$

Συνήθως λαμβάνουμε $m=1$. Πρέπει πάντα να ισχύει $v_{oc} > 15$, διαφορετικά η μέθοδος που ακολουθείται δεν έχει ισχύ. Από την 2.46 λύνουμε ως προς r_s . Το r_s πάντα πρέπει να είναι μικρότερο από 0.4 αλλιώς η μέθοδός μας δε μπορεί να εφαρμοστεί. Το R_s προκύπτει εύκολα από τον τύπο 2.45 και θεωρούμε ότι δεν αλλάζει με τις συνθήκες. Εν συνεχεία εφαρμόζονται οι σχέσεις (2.40), (2.41), (2.42), (2.43) και (2.44) από τις οποίες προκύπτουν οι νέες τιμές των I_{sc} και V_{sc} καθώς και η τιμή T_a . Το V_t υπολογίζεται εκ νέου σύμφωνα με την τιμή T_a και κατόπιν μέσω των σχέσεων (2.46), (2.47) και (2.48) εύκολα προκύπτει το γινόμενο $I_m \cdot V_m$ δηλαδή η ζητούμενη μέγιστη τιμή

της ισχύος στοιχείου P_m στις υπάρχουσες συνθήκες. Έχοντας υπολογίσει το P_m η μέγιστη ισχύς του πλαισίου (panel) πολύ εύκολα υπολογίζεται μέσω της :

$$P_{Mm} = N_s N_p P_m \quad (2.52)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ DSP

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΕΣ DSP

3.1.1 Εισαγωγή

Οι επεξεργαστές ψηφιακού σήματος χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου τα αναλογικά ηλεκτρονικά είναι δύσκολο ή και αδύνατο να ανταπεξέλθουν. Αναγνώριση φωνής, σύνθεση φωνής, υπολογισμός γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT), επεξεργασία εικόνας, κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση φωνής, τεχνητή όραση, ρομποτική, είναι μερικές σύγχρονες εφαρμογές που αποτελούν ένα μικρό κομμάτι του πεδίου εφαρμογής των επεξεργαστών DSP.

Τα συστήματα επεξεργαστών DSP έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα αναλογικά συστήματα:

- ❑ Τα συστήματα DSP επηρεάζονται λιγότερο από τις συνθήκες του περιβάλλοντος

Τα ψηφιακά συστήματα είναι, από την φύση τους, συνειδητά λιγότερο ευαίσθητα στις κλιματολογικές συνθήκες από τα αναλογικά συστήματα. Για παράδειγμα η συμπεριφορά ενός αναλογικού κυκλώματος εξαρτάται από την θερμοκρασία ενώ ένα ψηφιακό σύστημα αποκρίνεται το ίδιο είτε τοποθετηθεί στο χιόνι είτε στην έρημο.

❑ **Τα συστήματα DSP επηρεάζονται λιγότερο από τις ανοχές των υλικών**

Τα αναλογικά εξαρτήματα είναι κατασκευασμένα με καθορισμένες ανοχές, για παράδειγμα μία αντίσταση πέρα από την ονομαστική της τιμή έχει και κάποια ανοχή. Η ολική απόκριση ενός αναλογικού συστήματος εξαρτάται από τις πραγματικές τιμές όλων των αναλογικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται. Σαν αποτέλεσμα δύο αναλογικά συστήματα της ίδιας σχεδίασης θα έχουν ελαφρώς διαφορετικές αποκρίσεις εξαιτίας των λίγο διαφορετικών τιμών των εξαρτημάτων. Αντίθετα, σωστά κατασκευασμένα ψηφιακά συστήματα, για τις ίδιες εισόδους, έχουν πάντα τις ίδιες αποκρίσεις.

❑ **Τα συστήματα DSP μπορούν να επαναπρογραμματιστούν**

Τα ψηφιακά συστήματα που στηρίζονται σε προγραμματιζόμενους επεξεργαστές, μπορούν να επαναπρογραμματιστούν έτσι ώστε να επιτελέσουν άλλες λειτουργίες. Αυτό για να επιτευχθεί με ένα αναλογικό σύστημα θα πρέπει να τοποθετηθούν νέα εξαρτήματα στην θέση άλλων έτσι ώστε να επιτελέσει κάποιο άλλο σκοπό.

❑ **Τα συστήματα DSP μπορούν να επιτελούν πολλές λειτουργίες παράλληλα με την ίδια πολυπλοκότητα**

Τα αναλογικά συστήματα εκτελούν διακριτές λειτουργίες και συνήθως σειριακά. Για να εκτελέσουν πολλές λειτουργίες παράλληλα πρέπει αφενός να αλλάχθει το hardware, αφετέρου να αυξηθεί η πολυπλοκότητα του κυκλώματος. Αντιθέτως ένα DSP μπορεί να εκτελεί πολλές διακριτές λειτουργίες παράλληλα κάνοντας χρήση του ίδιου υλικού, για παράδειγμα είναι δυνατός ο προγραμματισμός ενός DSP, έτσι ώστε να υλοποιεί PWM και

παράλληλα να υπολογίζει τον FFT ενός σήματος ή να προσδιορίζει το φορτίο για την βέλτιστη λειτουργία κάποιου φωτοβολταϊκού.

3.1.2 Γλώσσες Προγραμματισμού DSP

Οι δύο πιο διαδεδομένες γλώσσες για τον προγραμματισμό ενός επεξεργαστή DSP είναι η γλώσσα μηχανής (assembly) και η γλώσσα C.

Η γλώσσα μηχανής παράγει γρήγορους και αποδοτικότερους κώδικες, ωστόσο είναι δύσχρηστη και δεν προσφέρει ευελιξία. Είναι ικανή να αξιοποιεί τον παραλληλισμό και πολλά εξειδικευμένα χαρακτηριστικά του επεξεργαστή, με αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση του επεξεργαστή. Ωστόσο συνήθως είναι προτιμότερη η χρήση της C διότι είναι πιο εύκολη, πιο εύχρηστη, πιο διαδεδομένη και επιτρέπει την αλλαγή παραμέτρων, όπως κατηγορία επεξεργαστή – κατασκευαστή, χωρίς μεγάλες αλλαγές στην σχεδίαση.

Οι εταιρίες κατασκευής επεξεργαστών DSP παρέχουν προγράμματα για την μετατροπή κωδίκων C σε Assembly, δίνοντας την ευχέρεια στον προγραμματιστή να επέμβει και να βελτιστοποιήσει τον κώδικα σε επίπεδο μηχανής. Επίσης στην αγορά και στο διαδίκτυο κάθε εταιρεία κυκλοφορεί κάποιο δικό της λογισμικό έτσι ώστε να δημιουργείται ένα περιβάλλον εργασίας με την βοήθεια του οποίου ο προγραμματιστής να μπορεί να προσομοιώσει, να προγραμματίσει και να αποσφαλματώσει το πρόγραμμα του. Παράδειγμα τέτοιου λογισμικού είναι τα TMS320C3x4x Code Generation Tools και το περιβάλλον εργασίας Code Composer Studio της εταιρίας κατασκευής επεξεργαστών DSP Texas Instruments. Τα TMS320C3x4x Code Generation Tools Version 5.10 χρησιμοποιήθηκαν για τον προγραμματισμό του συστήματος DSP σε αυτή την διπλωματική.

3.1.3 Εταιρίες κατασκευής DSP

Οι κυριότερες εταιρίες κατασκευής μικροεπεξεργαστών DSP, είναι οι Texas Instruments, Motorola, Xilinx και Analog Devices. Χαρακτηριστικά κάθε εταιρίας είναι η τιμή, η διαθεσιμότητα, η τεχνική υποστήριξη, η πολιτική πωλήσεων και το λογισμικό που παρέχουν. Κύριοι ανταγωνιστές είναι η Motorola, η Analog Devices και η Texas Instruments. Η πρώτη κρατάει τα σκήπτρα στην αγορά DSP's ενώ η τρίτη συνεχώς κερδίζει έδαφος κυρίως λόγω της καλύτερης τεχνικής υποστήριξης και του καλύτερου λογισμικού που παρέχει. Η Xilinx εξειδικεύεται περισσότερο στην κατασκευή FPGA's και CPLD's. Να σημειωθεί ότι η Texas Instruments και η Analog Devices έχουν ξεφύγει από τα απαρχαιωμένα περιβάλλοντα ανάπτυξης εφαρμογών σε MSDos και προσφέρουν πλέον γραφικό περιβάλλον σε Windows (Code Composer και Visual C++ αντίστοιχα).

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τις κυριότερες εταιρίες. Φαίνεται μία μικρή υπεροχή της Motorola και Analog Devices στους επεξεργαστές σταθερής υποδιαστολής (Fixed Point) και των Texas Instruments σε μικροεπεξεργαστές σταθερής υποδιαστολής (Floating Point). Αυτές οι τρεις εταιρίες κατέχουν το συντριπτικό μερίδιο στην αγορά.

Πίνακας 3.1. Ενδεικτικός συγκριτικός πίνακας με επεξεργαστές ψηφιακού σήματος από τις κυρίαρχουσες εταιρίες κατασκευής DSP's.					
COMPANY	MODEL	TYPE	FREQ.	DATA WIDTH	SPEED
			(MHz)		(MIPS)
Texas Instruments	TMS320C15	Fixed	5	16	5,000
	TMS320C25	Fixed	40	16	10,000
	TMS320C31	Floating	33	32	16,667
	TMS320C32-60	Floating	60	32	30,000
	TMS320VC33-120	Floating	60	32	60,000
	TMS320VC33-150	Floating	75	32	75,000
	TMS320C40-60	Floating	60	32	30,000
	TMS320C44-60	Floating	60	32	30,000
	TMS320C54	Fixed	47,5	16	100,000
	TMS320C62	Fixed	150	16	1200,000
	TMS320C6211-167	Fixed	167	16	1333,000
	TMS320C6713-225	Floating	225	32	1800,000
	TMS320C82	Floating	80	32	1500,000
Xilinx	C32025	Fixed	40	16	10,000
Motorola	DSP56301	Fixed	100	24	100,000
	DSP56311	Fixed	150	24	255,000
	DSP56852	Fixed	120	16	120,000
	MSC8101	Floating	300	32	1200,000
Analog Devices	ADSP21535	Fixed	300	16	600,000
	ADSP2186	Fixed	80	16	80,000

Τα παραπάνω στοιχεία (DSP's) είναι ενδεικτικά και σαφώς εξυπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς (εφαρμογές επεξεργασίας σήματος σε πραγματικό χρόνο, επεξεργασίας εικόνας, τηλεπικοινωνίες και εφαρμογές δικτύων κτλ.), άρα δεν είναι όλα κατάλληλα για εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος.

3.2 Η ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΩΝ TMS320C3x

3.2.1 Εισαγωγή

Η γενιά Ψηφιακών Επεξεργαστών Σήματος (DSP) TMS320C3x ανήκει στην οικογένεια TMS320, υλοποιούνται με ένα chip DSP και είναι υψηλής απόδοσης κυκλώματα CMOS, 32-bit κινητής υποδιαστολής. Η γενιά C3x ολοκληρώνει τον έλεγχο συστήματος και τις μαθηματικές συναρτήσεις σε έναν ελεγκτή. Η ολοκλήρωση του συστήματος επιτρέπει την γρήγορη και εύκολη μεταφορά δεδομένων και την υψηλής ταχύτητας επεξεργασία αριθμών. Η επεκταμένη χρήση διαύλου και η ισχυρή ομάδα εντολών, παρέχουν στις συσκευές ταχύτητα και ευελιξία να εκτελούν έως και 60 εκατομμύρια λειτουργίες κινητής υποδιαστολής το δευτερόλεπτο (Million Floating Point Operations per Second- MFLOPS). Οι συσκευές επιπλέον φέρουν το χαρακτηριστικό του υψηλού βαθμού παραλληλισμού, ο οποίος επιτρέπει στους χρήστες να εκτελούν έως και έντεκα λειτουργίες με μία μόνο εντολή.

3.2.2 Επεξεργαστές TMS320C3X

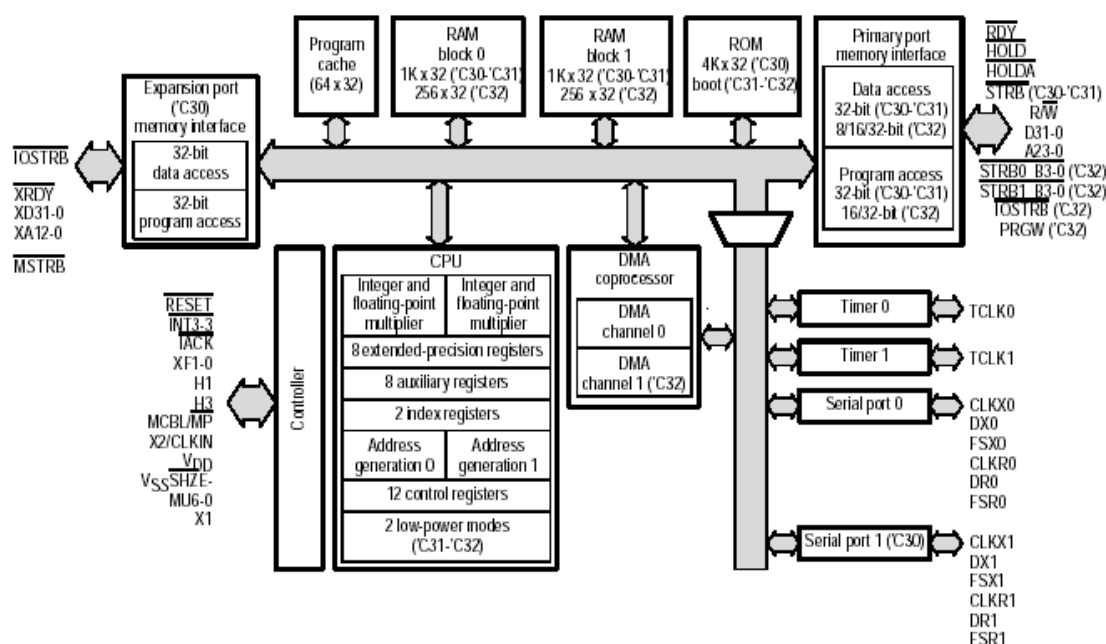
Η οικογένεια C3x αποτελείται από τα μέλη TMS320C30, TMS320C31, TMS320LC31 και TMS320C32. Οι TMS320C30, TMS320C31, TMS320LC31 και TMS320C32 μπορούν να εκτελέσουν παράλληλα πολλαπλασιασμό και λειτουργίες Αριθμητικής και Λογικής Μονάδας (Arithmetic and Logic Unit-ALU) με ακεραίους ή κινητής υποδιαστολής αριθμούς σε έναν κύκλο επεξεργασίας. Ο επεξεργαστής έχει επιπλέον τα παρακάτω χαρακτηριστικά, τα οποία του προσδίδουν υψηλή απόδοση και ευχρηστία:

- Αρχείο καταχωρητών γενικής χρήσης,
- Κρυφή μνήμη προγράμματος,

- Βοηθητικούς καταχωρητές αριθμητικών μονάδων (Auxiliary Register Arithmetic Units-ARAU),
- Εσωτερικές μνήμες διπλής πρόσβασης,
- Ένα κανάλι άμεσης πρόσβασης μνήμης (Direct Memory Access-DMA) -δύο στον TMS320C32- που υποστηρίζει ταυτόχρονη είσοδο/έξοδο δεδομένων και
- Μικρό Κύκλο Μηχανής.

Οι γενικής χρήσεως εφαρμογές αναβαθμίζονται ιδιαίτερα από το μεγάλο χώρο διευθύνσεων, με το interface του πολυεπεξεργαστή, από τις καταστάσεις αναμονής που παράγονται είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά, καθώς και δύο θύρες εξωτερικού interface -μία στον TMS320C31 και TMS320C32- , δύο χρονομετρητές (timers) , δύο σειριακές θύρες (serial-ports) -μία στον TMS320C31 και TMS320C32-, και τέλος με τη δομή πολλαπλών διακοπών. Η γενιά TMS320C3x υποστηρίζει μία μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Οι γλώσσες υψηλού επιπέδου προγραμματισμού μπορούν να υλοποιηθούν πιο εύκολα, μέσω μιας αρχιτεκτονικής βασιζόμενης σε καταχωρητές, μεγάλο χώρο διευθύνσεων, τρόπους λειτουργίας ισχυρής διευθυνσιοδότησης, ευέλικτο σύνολο εντολών και τέλος πολύ καλά υποστηριζόμενη αριθμητική κινητής υποδιαστολής.

Παρουσιάζεται ένα μπλοκ διάγραμμα των TMS320C3x :



Σχήμα 3.1

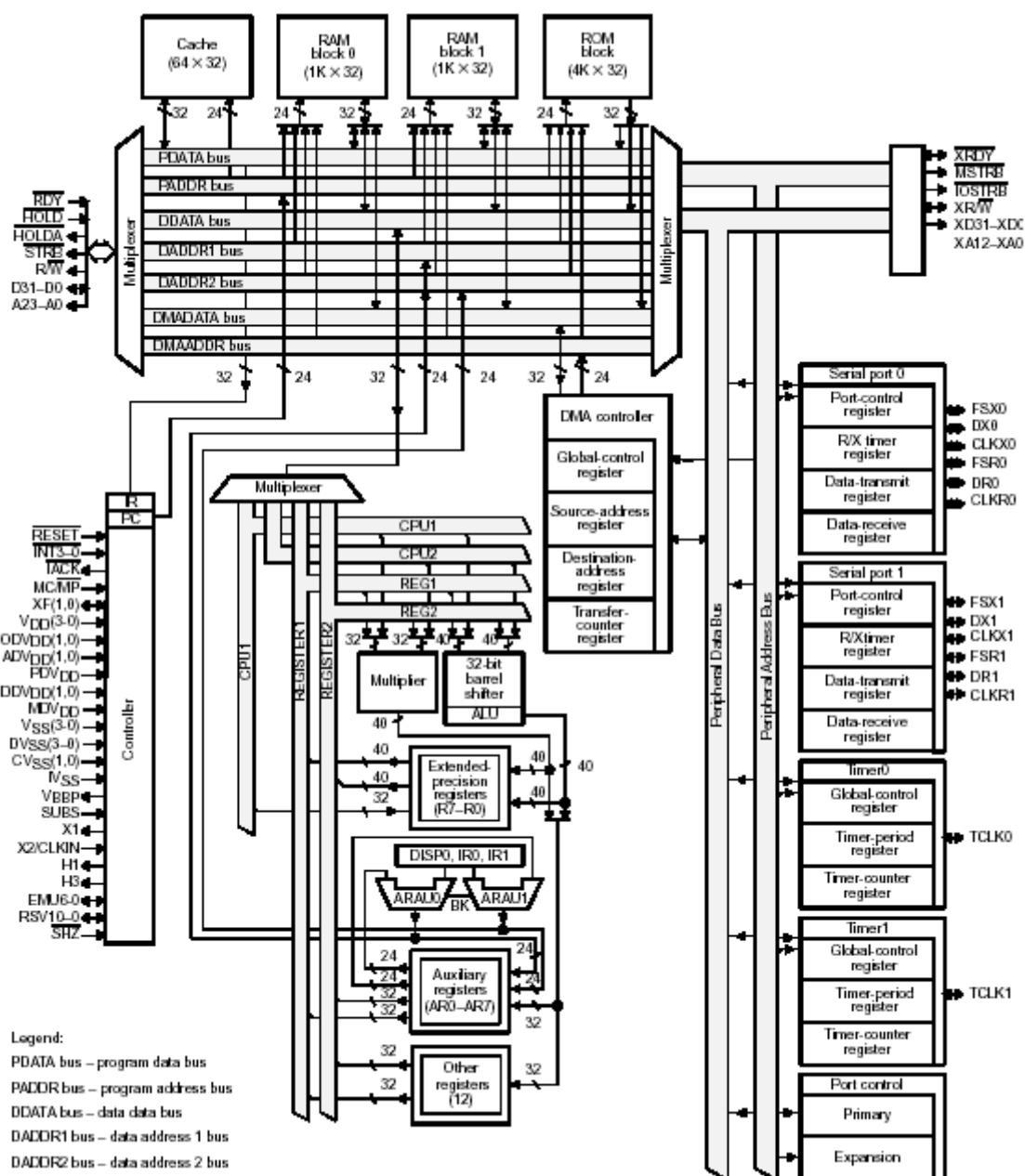
3.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Ο TMS320C3x είναι ένας επεξεργαστής 32-bit κινητής υποδιαστολής κατασκευασμένος στα 0.7-μm με τριών επιπέδων μεταλλική CMOS τεχνολογία. Η εσωτερική χρήση διαύλου και η ειδική ομάδα εντολών DSP έχουν τη δυνατότητα και την ευελιξία για την εκτέλεση έως και 50 MFLOPS (million floating-point operations per second). Ο TMS320C3x βελτιστοποιεί την ταχύτητα με την υλοποίηση συναρτήσεων σε hardware, σε αντίθεση με άλλους επεξεργαστές που τις υλοποιούν σε software. Αυτή η προσέγγιση ως προς το hardware παρέχει επιδόσεις, οι οποίες δεν ήταν προηγουμένως διαθέσιμες σε ένα chip. Ο TMS320C3x μπορεί να εκτελέσει παράλληλα πολλαπλασιασμούς και λειτουργίες ALU με ακεραίους ή κινητής υποδιαστολής αριθμούς σε έναν κύκλο. Κάθε επεξεργαστής διαθέτει ένα αρχείο καταχωρητών γενικής χρήσης, μία κρυφή μνήμη προγράμματος, ARAUs, εσωτερικές μνήμες διπλής πρόσβασης, ένα κανάλι DMA που υποστηρίζει ταυτόχρονα I/O, και μικρό κύκλο ρολογιού. Η υψηλή απόδοση και η ευχρηστία του είναι αποτέλεσμα αυτών των χαρακτηριστικών. Γενικού σκοπού εφαρμογές αναβαθμίζονται ιδιαίτερα από το μεγάλο χώρο διευθύνσεων, το interface του επεξεργαστή, από εξωτερικά ή εσωτερικά παραγόμενες καταστάσεις αναμονής, τις δύο θύρες εξωτερικής επικοινωνίας,

δύο χρονομετρητές (timers), σειριακές θύρες και από την χρήση πολλαπλών interrupts.

3.2.4 Αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική των TMS320C3x ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του συστήματος, οι οποίες βασίζονται σε πολύπλοκους αριθμητικούς αλγόριθμους. Οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμοποιούν τις δυνατότητες του hardware αλλά και του software. Η υψηλή απόδοση επιτυγχάνεται με τις αριθμητικές μονάδες κινητής υποδιαστολής υψηλής ακρίβειας και δυναμικού εύρους, με τη μεγάλη μνήμη πάνω στο chip, με μεγάλου βαθμού παραλληλισμό και τέλος με τον ελεγκτή DMA. Παρακάτω παρατίθεται το μπλοκ διάγραμμα του TMS320C31.



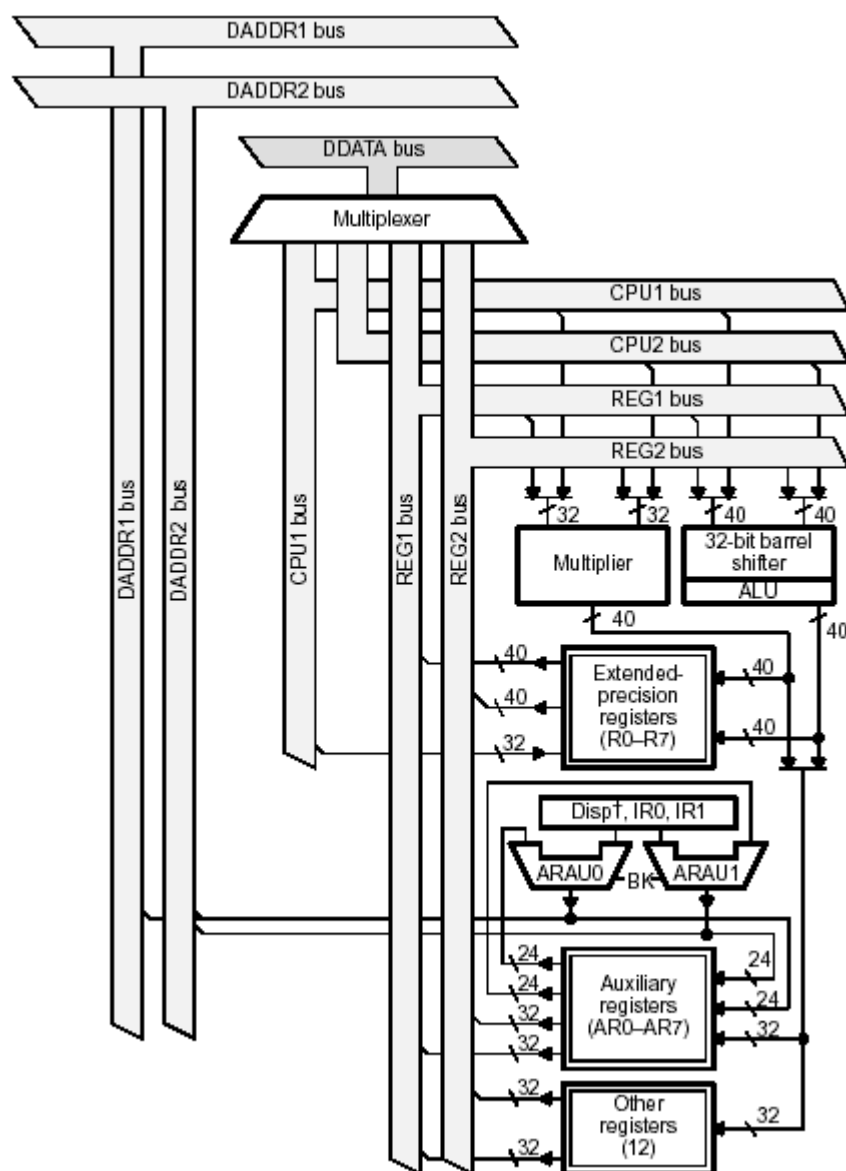
Σχήμα 3.2

3.2.5 Κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU)

Οι επεξεργαστές TMS320C3x (TMS320C30, TMS320C31, και TMS320C32) έχουν αρχιτεκτονική CPU, η οποία βασίζεται σε καταχωρητές. Η CPU αποτελείται από τα παρακάτω εξαρτήματα:

- Πολλαπλασιαστή κινητής υποδιαστολής/ακεραίων ,
- Αριθμητική και λογική μονάδα (ALU),
- Ολισθητή 32-bit,
- Εσωτερικούς διαύλους (CPU1/CPU2 και REG1/REG2),
- Βοηθητικούς καταχωρητές αριθμητικών μονάδων (ARAUs) και
- Αρχείο καταχωρητών CPU

Ακολουθεί σχηματικό της CPU.



Σχήμα 3.3

3.2.6 Βασικό αρχείο καταχωρητών της CPU

Η γενιά των TMS320C3x παρέχει 28 καταχωρητές σε ένα αρχείο πολλαπλών θυρών, το οποίο ένα στενά συνδεδεμένο με την CPU. Ο πίνακας που παρατίθεται παρακάτω αναφέρει τα ονόματα των καταχωρητών και τις λειτουργίες. Όλοι οι βασικοί καταχωρητές μπορούν να λειτουργήσουν με έναν πολλαπλασιαστή και μία ALU, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως

καταχωρητές γενικού σκοπού. Οι καταχωρητές περιλαμβάνουν επιπλέον κάποιες ειδικές λειτουργίες. Για παράδειγμα, οι οκτώ καταχωρητές επεκταμένης ακρίβειας, είναι κατάλληλοι για την τήρηση των αποτελεσμάτων κινητής υποδιαστολής. Οι οκτώ βοηθητικοί καταχωρητές υποστηρίζουν μία ποικιλία τρόπων έμεσης διευθυνσιοδότησης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καταχωρητές γενικού σκοπού 32-bit ακεραίων. Οι υπόλοιποι καταχωρητές παρέχουν λειτουργίες διευθυνσιοδότησης, διαχείρισης στοίβας, κατάστασης επεξεργαστή, interrupts και επαναλήψεις μπλοκ.

Πίνακας 3.2.Βασικοί Καταχωρητές

Όνομα Καταχωρητή	Αντιστοιχιζόμενη Λειτουργία
R0	Επεκταμένης ακρίβειας καταχωρητής 0
R1	Επεκταμένης ακρίβειας καταχωρητής 1
R2	Επεκταμένης ακρίβειας καταχωρητής 2
R3	Επεκταμένης ακρίβειας καταχωρητής 3
R4	Επεκταμένης ακρίβειας καταχωρητής 4
R5	Επεκταμένης ακρίβειας καταχωρητής 5
R6	Επεκταμένης ακρίβειας καταχωρητής 6
R7	Επεκταμένης ακρίβειας καταχωρητής 7
AR0	Βοηθητικός καταχωρητής 0
AR1	Βοηθητικός καταχωρητής 1
AR2	Βοηθητικός καταχωρητής 2
AR3	Βοηθητικός καταχωρητής 3
AR4	Βοηθητικός καταχωρητής 4
AR5	Βοηθητικός καταχωρητής 5
AR6	Βοηθητικός καταχωρητής 6
AR7	Βοηθητικός καταχωρητής 7
DP	Δείκτης Σελίδας Δεδομένων (Data Page Pointer)
IR0	Καταχωρητής Δείκτη 0
IR1	Καταχωρητής Δείκτη 1
BK	Καταχωρητής μεγέθους μπλοκ
SP	Δείκτης Στοιβάς συστήματος
ST	Καταχωρητής Κατάστασης
IE	Καταχωρητής CPU/DMA ενεργοποίησης interrupts
IF	Flag διακοπής CPU
IOF	I/O Flag
RS	Διεύθυνση Εκκίνησης Επανάληψης
RE	Διεύθυνση Τέλους Επανάληψης
RC	Μετρητής Επαναλήψεων

Οι καταχωρητές επεκταμένης ακρίβειας (R7-R0) μπορούν να αποθηκεύσουν και να υποστηρίξουν λειτουργίες 32 bit ακεραίων και 40 bit κινητής υποδιαστολής. Κάθε εντολή που υποθέτει ότι οι αριθμοί είναι κινητής υποδιαστολής χρησιμοποιεί 39-0 bits. Εάν οι ακέραιοι είναι προσημασμένοι ή όχι, μόνο 31-0 χρησιμοποιούνται, τα bits 39-32 παραμένουν αναλοίωτα.

Οι βοηθητικοί καταχωρητές 32 bit (AR7-AR0) είναι προσβάσιμοι από τη CPU και μεταβάλλονται από τις δύο ARAU. Η βασική συνάρτηση των βοηθητικών καταχωρητών είναι η παραγωγή διευθύνσεων 24 bit. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως μετρητές επαναλήψεων βρόχων ή ως καταχωρητές 32 bit γενικής χρήσεως, οι οποίοι μεταβάλλονται από τον πολλαπλασιαστή και από την ALU.

Ο δείκτης σελίδας δεδομένων (DP) είναι ένας καταχωρητής 32 bit. Τα τελευταία λιγότερο σημαντικά bit (LSBs) του δείκτη σελίδας δεδομένων χρησιμοποιούνται από την άμεση διευθυνσιοδότηση, ως δείκτης σε μία σελίδα δεδομένων που διευθυνσιοδοτείται. Οι σελίδες των δεδομένων έχουν μήκος 64K λέξεων, με σύνολο 256 σελίδων. Οι καταχωρητές δεικτών (IR0,IR1) των 32 bit, περιέχουν την τιμή που χρησιμοποιείται από την ARAU για τον υπολογισμό μιας διεύθυνσης με δείκτη. Η ARAU χρησιμοποιεί καταχωρητές μεγέθους μπλοκ 32 bit με κυκλική διευθυνσιοδότηση για να καθορίσει το μέγεθος του μπλοκ δεδομένων. Ο δείκτης στοίβας του συστήματος (SP) είναι ένας καταχωρητής 32 bit και περιέχει τη διεύθυνση της κορυφής της στοίβας. Ο δείκτης στοίβας πάντα δείχνει στο τελευταίο στοιχείο που εισήχθη στην στοίβα. Μία αποθήκευση στη στοίβα (push) προκαλεί μία αύξηση ενώ μία ανάκτηση προκαλεί μία μείωση στον δείκτη της στοίβας συστήματος.

Ο καταχωρητής κατάστασης (ST) περιέχει γενικές πληροφορίες, οι οποίες σχετίζονται στην κατάσταση της CPU. Οι λειτουργίες/πράξεις συνήθως θέτουν τα flags του καταχωρητή κατάστασης, σύμφωνα με το κατά πόσον το αποτέλεσμα είναι 0, αρνητικό κ.τ.λ. Οι λειτουργίες περιλαμβάνουν φόρτωση και αποθήκευση στον καταχωρητή. Ο καταχωρητής ενεργοποίησης των interrupts CPU/DMA είναι ένας καταχωρητής 32 bit. Τα bits ενεργοποίησης των interrupts της CPU βρίσκονται στις θέσεις 10-0, ενώ της DMA στις 26-16.

Ένα bit με τιμή 1 στον καταχωρητή ενεργοποίησης των interrupts CPU/DMA ενεργοποιεί το αντίστοιχο interrupt , ενώ με τιμή 0 το απενεργοποιεί.

Ο καταχωρητής interrupt flag της CPU (IF) είναι επίσης ένας καταχωρητής 32 bit. Η τιμή 1 σε κάποιο bit υποδεικνύει ότι το αντίστοιχο interrupt έχει γίνει set, ενώ η τιμή 0 το αντίθετο. Ο καταχωρητής flag I/O (IOF) ελέγχει τη λειτουργία των εξωτερικών ακροδεκτών XF0 και XF1. Αυτοί οι ακροδέκτες μπορούν να τεθούν για είσοδο ή έξοδο και επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάγνωση ή εγγραφή. Ο μετρητής επαναλήψεων (RC) είναι ένας καταχωρητής 32 bit που καθορίζει το πλήθος των επαναλήψεων ενός μπλοκ κώδικα, όταν εκτελείται ένα μπλοκ επαναλήψεων. Όταν ο επεξεργαστής λειτουργεί με τη μέθοδο επανάληψης, ο καταχωρητής διεύθυνσης εκκίνησης επανάληψης των 32 bit (RS) περιέχει τη διεύθυνση εκκίνησης του μπλοκ προγράμματος επανάληψης στη μνήμη, και ο καταχωρητής τελευταίας διεύθυνσης των 32 bit περιλαμβάνει την τελευταία διεύθυνση του μπλοκ επανάληψης στη μνήμη. Ο καταχωρητής προγράμματος (PC) είναι ένας καταχωρητής 32 bit και περιέχει τη διεύθυνση της επόμενης προς εκτέλεση εντολής . Αν και αυτός ο καταχωρητής δεν αποτελεί μέρος του αρχείου καταχωρητών CPU , είναι ένας καταχωρητής που μεταβάλλεται με εντολές που αλλάζουν τη ροή εκτέλεσης του προγράμματος. Ο καταχωρητής εντολών (IR) είναι ένας καταχωρητής 32 bit και περιέχει την εκτελέσιμη εντολή κατά τη διάρκεια αποκωδικοποίησης της εντολής. Αυτός ο καταχωρητής χρησιμοποιείται από το κύκλωμα ελέγχου αποκωδικοποίησης εντολής και δεν είναι προσβάσιμος από τη CPU.

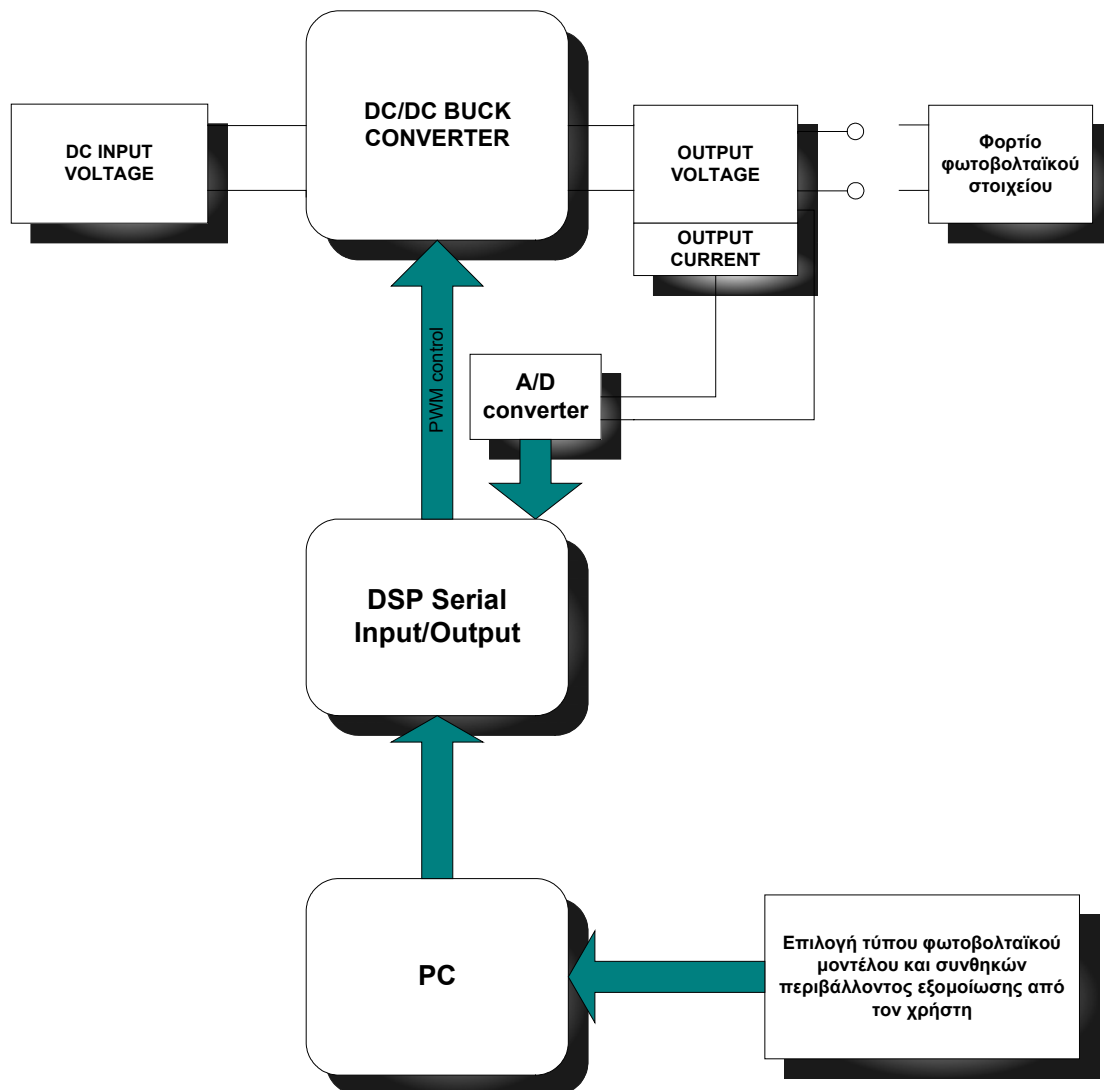
3.3 Η λειτουργικότητα του υποσυστήματος DSP

3.3.1 Οι λειτουργίες που επιτελεί το DSP

Η χρήση του DSP κρίνεται επιτακτική στην συγκεκριμένη εφαρμογή διότι χρειάζεται μεγάλη συχνότητα λειτουργίας του Timer και οποιαδήποτε αντικατάστατη του με κάποιο άλλο εργαλείο (μικροελεγκτή ή συγκριτές και τελεστικούς ενισχυτές) θα αύξανε την πολυπλοκότητα του συστήματος ενώ πιθανόν να υπήρχαν προβλήματα χρονισμού. Με την χρήση του DSP δεν αντιμετωπίστηκαν ιδιαίτερα προβλήματα χρονισμού καθώς το hardware (timers, άλλα περιφερειακά) που χρησιμοποιήθηκε χρονιζόταν εσωτερικά από τον πυρήνα του DSP. Επιπλέον αποφεύχθει η χρήση εξωτερικού υλικού (εξωτερική μνήμη ή πολυταλαντωτές για την δημιουργία της περιοδικών κυματομορφών). Ο Timer στο πρόγραμμα ελέγχου του συστήματος χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή μιας παλμοσειράς εξόδου PWM στα 40 kHz με μεταβλητό duty cycle που είναι μεταβαλλόμενο και καθορίζεται κάθε φορά από τον αλγόριθμο του προγράμματος.

Επίσης το DSP αναλαμβάνει τον ρόλο του ελέγχου της τάσης και του ρεύματος εξόδου. Πραγματοποιεί το interface με τον ADC, μέσω της σειριακής του θύρας για την αποστολή και την λήψη δεδομένων. Ο ADC μετράει την πραγματική τιμή του ρεύματος και της τάσης στη έξοδο του κυκλώματος, σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου λειτουργίας και το DSP μέσω κατάλληλου κώδικα αποκωδικοποιεί τις τιμές αυτές και ελέγχει αν η θεωρητική τιμή της τάσης εξόδου έγινε ίδια με την πραγματική.

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ξανά το block diagram του συστήματος που αναπτύχθηκε για την καλύτερη κατανόηση των λειτουργιών που επιτελεί το DSP:



Σχήμα 3.4
Μπλοκ διάγραμμα του συστήματος που αναπτύχθηκε

Μέσω μαθηματικών υπολογισμών που πραγματοποιούνται στην ALU του DSP υπολογίζονται οι θεωρητικές τιμές της τάσης εξόδου σε συνάρτηση με το ρεύμα εξόδου και όταν τελικά η τάση εξόδου γίνει ίση με την θεωρητική για συγκεκριμένη τιμή ρεύματος, μετρημένη στην έξοδο του κυκλώματος μέσω του ADC, τότε το πρόγραμμα τερματίζεται, όπως επιτάσει και ο αλγόριθμος λειτουργίας του.

Τέλος μέσω της UART του DSP και κατάλληλου interface πραγματοποιείται η επικοινωνία με τον υπολογιστή με μεταφορά δεδομένων μέσω της σειριακής θύρας (COM).

Καταγράφοντας το hardware από το DSP που χρησιμοποιήθηκε έχουμε:

- ❑ Timer_0 : παραγωγή παλμοσειράς εξόδου.
- ❑ I/O Flag_0 : χρησιμοποιείται ως boolean μεταβλητή.
- ❑ Serial Port : χρησιμοποιείται για το interface με τον ADC.
- ❑ ALU : για τους υπολογισμούς του προβλήματος.

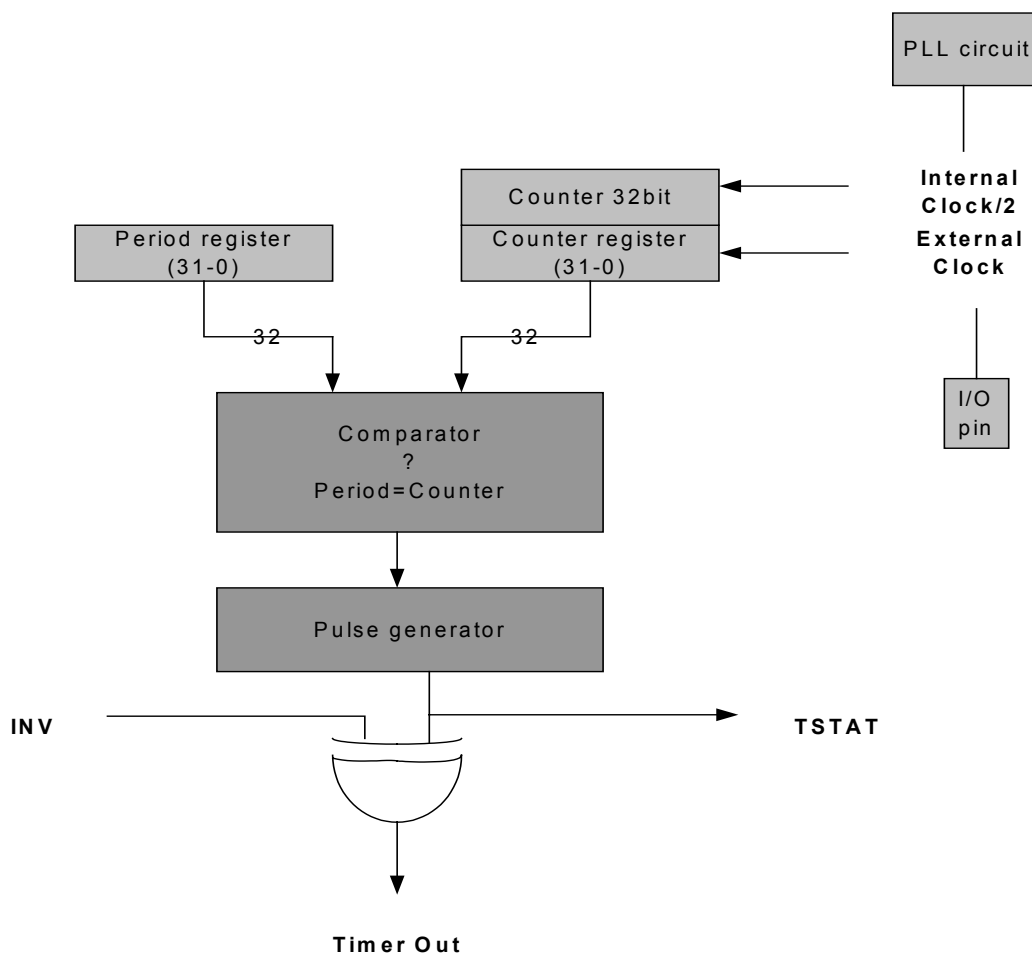
Επίσης έγινε χρήση της software υλοποίησης της UART για την αποστολή και λήψη δεδομένων από και προς το τερματικό.

3.3.2 Περιγραφή Timer

Οι timers του TMS320VC31 είναι 32bit μετρητές χρόνου / γεγονότων. Έχουν δύο mode λειτουργίας και είναι δυνατόν να χρονιστούν εσωτερικά ή εξωτερικά. Αν ο timer χρησιμοποιηθεί σαν μετρητής χρόνου μπορεί να παράγει εσωτερικά interrupts. Κάθε timer έχει έναν ακροδέκτη εισόδου/εξόδου (I/O pin) έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ρολόι εισόδου στον timer, σαν έξοδος σήματος από ρολόι, ή σαν ακροδέκτης γενικού σκοπού (general-purpose I/O pin).

Παρακάτω παρατίθεται ένα μπλοκ διάγραμμα του timer. Η τιμή του counter register συγκρίνεται με την τιμή του period register. Αν είναι ίδιες τότε

ο counter register μηδενίζεται και ενεργοποιείται ο pulse generator παράγοντας έναν παλμό ανάλογα με το mode που έχουμε επιλέξει.



Σχήμα 3.5
Μπλοκ διάγραμμα του timer

Για τον έλεγχο του timer έχουμε την δυνατότητα να γράψουμε σε τρεις καταχωρητές:

Global Control Register

Είναι ένας 32-bit καταχωρητής και αντιστοιχίζεται στην διεύθυνση 808020h και 808030h. Ο καταχωρητής γενικού ελέγχου καθορίζει το είδος λειτουργίας του timer, επιβλέπει την κατάσταση του και καθορίζει την λειτουργία του I/O pin. Τα σημαντικότερα bits που αξίζει να αναφερθούν είναι το bit_0 (FUNC) το οποίο καθορίζει αν το Pin εξόδου λειτουργεί σαν θύρα I/O ή ακροδέκτη μετρητή, το bit_6 (GO) το οποίο μηδενίζει και ξεκινά τον μετρητή χρόνου, το bit_7 (HLD') το οποίο σταματά τον μετρητή χρόνου, το bit_8 (C/P') το οποίο καθορίζει το mode λειτουργίας του timer και το bit_9 (CLKSRC) το οποίο καθορίζει αν ο μετρητής θα αυξάνει με βάση την συχνότητα του εσωτερικού ρολογιού ή εξωτερικού ρολογιού.

Period Register

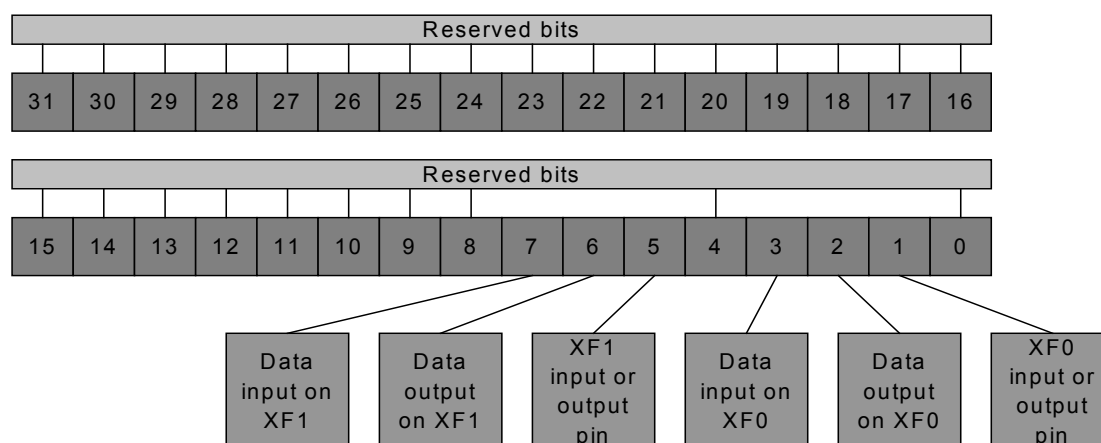
Ο καταχωρητής περιόδου καθορίζει την συχνότητα του μετρητή. Είναι και αυτός 32-bit και αντιστοιχίζεται στην διεύθυνση 808028h (timer0) και 808038h (timer1). Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει είναι η 0FFFFFFFFh.

Counter Register

Είναι και αυτός 32-bit και αντιστοιχίζεται στην διεύθυνση 808024h (timer0) και 808034h (timer1). Περιέχει την τρέχουσα τιμή του αυξανόμενου μετρητή. Μπορεί να μηδενιστεί και προκαλεί ένα εσωτερικό interrupt όταν η τιμή του εξισωθεί με την τιμή του καταχωρητή περιόδου.

3.3.3 Περιγραφή I/O Flag

Το I/O flag είναι ουσιαστικά ένας 32-bit καταχωρητής ο οποίος ελέγχει την λειτουργία των εξωτερικών pin XF0 και XF1. Αυτοί οι ακροδέκτες μπορούν να οριστούν σαν είσοδοι ή έξοδοι. Επίσης μπορούν να διαβαστούν και να γραφτούν. Παρακάτω δίνεται ένα διάγραμμα με τα πεδία και τα ονόματα των bits από τα οποία αποτελείται ο καταχωρητής. Τα πρώτα 1,2,3,5,6,7 bits έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον ενώ τα υπόλοιπα είναι δεσμευμένα.



Σχήμα 3.6

Διάγραμμα με τα πεδία bits του IOF register

3.3.4 Περιγραφή σειριακής θύρας

Το TMS320C31 DSP διαθέτει μία σειριακή θύρα αποστολής και λήψης δεδομένων. Η σειριακή θύρα του TMS320C31 επιτρέπει την εύκολη επικοινωνία με τα περισσότερα τσιπ σειριακού interface που πραγματοποιούν A/D μετατροπή. Η σειριακή θύρα μπορεί να διαμορφωθεί για να μεταφέρει 8

..16 ..24, ή 32 bits δεδομένων ανά λέξη ταυτόχρονα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Το ρολόι για τη σειριακή θύρα μπορεί να παρασχεθεί εξωτερικά, ή μπορεί να δημιουργηθεί εσωτερικά μέσω του timer της σειριακής θύρας και των period registers.

Η σειριακή θύρα χρησιμοποιείται στην περίπτωση μας για να διαβιβάσει και λάβει δεδομένα μεταξύ του DSP και του ADC, και στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά στον τρόπο που το DSP επικοινωνεί με τον ADC. Η σειριακή θύρα του DSP απαιτεί λίγο περισσότερο χρόνο για το initialization και το configuration σε σχέση με τους data converters. Παρακάτω επεξηγείται το σειριακό interface. Έξι γραμμές ελέγχου από το DSP χρησιμοποιούνται για το interface με τους data converters:

CLKX Transmit clock , είσοδος ή έξοδος

Αυτό το σήμα χρονίζει τα δεδομένα που μεταδίδονται από τον transmit shift register (XSR) στο data transmit (DX) pin (DX). Η σειριακή θύρα μπορεί να προγραμματισθεί ώστε να παράγει εσωτερικά ρολόι ή να δεχτεί εξωτερικό. Εάν η σειριακή προγραμματισθεί για να παραγάγει το ρολόι, το CLKX γίνεται έξοδος, που παρέχει το ρολόι για το σειριακό interface.

Εάν η σειριακή προγραμματισθεί για να δεχτεί εξωτερικό ρολόι, το CLKX γίνεται είσοδος, που λαμβάνει το εξωτερικό σήμα ρολογιού.

FSX Transmit frame synchronization , είσοδος ή έξοδος

Το σήμα FSX δείχνει την έναρξη μιας μεταφοράς δεδομένων . Η σειριακή μπορεί να προγραμματισθεί για εσωτερική frame-sync παραγωγή ή για να δεχτεί εξωτερικό frame-sync σήμα. Εάν η σειριακή προγραμματισθεί για να παραγάγει το frame-sync εσωτερικά , το FSX γίνεται έξοδος . Εάν το σειριακή θύρα προγραμματισθεί για να δεχτεί εξωτερικό frame-sync παλμό, αυτό το pin γίνεται είσοδος.

DX Serial data transmit

Το DX μεταδίδει τα υπάρχοντα δεδομένα από τον transmit shift register (XSR).

CLKR Receive clock input

Το CLKR πάντα δέχεται ένα εξωτερικό ρολόι για να χρονίζει τα δεδομένα από το data receive (DR) pin στον receive shift register (RSR).

FSR Receive frame synchronization input

Το FSR λαμβάνει πάντα ένα εξωτερικό frame-sync παλμό για να αρχίσει την υποδοχή δεδομένων στην αρχή ενός frame.

DR Serial data receive

Ο DR λαμβάνει τα υπάρχοντα δεδομένα, τα οποία χρονίζονται στον receive shift register (RSR).

Εκτός από αυτές τις έξι γραμμές ελέγχου, υπάρχουν control, shift και buffer registers που είναι όλοι εύρους 32 Bits. Κάθε ένας από αυτούς τους registers, εκτός από τους δύο shift registers (XSR and RSR), βρίσκονται σε συγκεκριμένη διεύθυνσή στη μνήμη. Ο πίνακας 1 παρουσιάζει τα ονόματα των registers και τις αντίστοιχες διευθύνσεις τους, καθώς και τις τιμές που χρησιμοποιούνται για το configuration.

Πίνακας 3.3. Registers που σχετίζονται με τη Σειριακή θύρα		
REGISTER NAME	ADDRESS(HEX)	VALUE(HEX)
Serial-port global control register	808040	0C140044
FSX/DX/CLKX port control	808042	00000111
FSR/DR/CLKR port control	808043	00000111
Receive/transmit timer-control	808044	000001CF
Receive/transmit timer counter	808045	00000000
Receive/transmit timer period	808046	00020002
Data-transmit (DXR)	808048	Variable
Data-Receive(DRR)	80804C	Variable

Serial-Port Global Control Register

Η βασική λειτουργία είναι να καθορίσει πώς ο serial-port global control register (GCR) ελέγχει τη λειτουργία της σειριακής θύρας και καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας της. Η φυσική δομή του serial-port global control register παρουσιάζεται στο σχήμα 2, ενώ οι λειτουργίες των σημαντικότερων serial-port global control bits περιγράφονται στον πίνακα 2. Ο serial-port GCR βρίσκεται στη θέση μνήμης 808040h και αναφέρεται ως η διεύθυνση βάσης του serial-port.

Serial-Port Global Control Register (Upper Word)																
Bit	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Name					RRESET	XRESET	RINT	RTINT	XINT	XTINT	RLEN		XLEN		FSRP	FSXP
Type	X	X	X	X	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Default	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Serial-Port Global Control Register (Lower Word)																
Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	DRP	DXP	CLKRP	CLKXP	RFSM	XFSM	RVAREN	XVAREN	RCLK SRCE	XCLK SRCE	HS	RSR FULL	XSR EMPTY	FSXOUT	XRDY	RRDY
Type	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R	R
Default	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Σχήμα 3.7
Serial-Port Global Control Register

Σημείωση : 1. R = read, W = write 2. X = δεσμευμένο bit, διαβάζεται ως 0

Πίνακας 3.4. Serial-Port Global Control Register Definition

BIT	ΟΝΟΜΑ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
0	RRDY	RECEIVER READY (όταν είναι 1,ο DRR έχει νέα δεδομένα και είναι έτοιμος να διαβαστεί και όταν είναι 0,ο DRR δεν έχει νέα δεδομένα)
1	XRDY	TRANSMITTER READY (όταν είναι 1,ο DXR έχει γράψει το τελευταίο bit δεδομένων στον XSRκαι είναι έτοιμος για καινούργια δεδομένα και όταν είναι 0, ο DXR δεν έχει γράψει το τελευταίο bit δεδομένων στον XSRκαι δεν είναι έτοιμος για καινούργια δεδομένα)
2	FSXOUT	TRANSMIT FRAME SYNC (όταν είναι 1, ο FSXπρογραμματίζεται ως είσοδος και όταν είναι 0, ο FSXπρογραμματίζεται ως έξοδος)
6	XCLK	TRANSMIT CLOCK SOURCE (όταν είναι 1, χρησιμοποιείται το εσωτερικό ρολόι μετάδοσης και όταν είναι 0, χρησιμοποιείται το εξωτερικό ρολόι μετάδοσης)
7	RCLK	RECEIVE CLOCK SOURCE (όταν είναι 1, χρησιμοποιείται το εσωτερικό ρολόι μετάδοσης και όταν είναι 0, χρησιμοποιείται το εξωτερικό ρολόι μετάδοσης)
8	XVAREN	TRANSMIT DATA RATE MODE(όταν είναι 1,το data rate είναι μεταβλητό και ο FSX μένει 1 μέχρι να μεταδοθούν όλα τα bits και όταν είναι 0 το data rate είναι προκαθορισμένο και ο FSX μένει 1 για τουλάχιστον έναν κύκλο XCLK)
9	RVAREN	RECEIVE DATA RATE MODE(όταν είναι 1,το data rate είναι μεταβλητό και ο FSR μένει 1 μέχρι να μεταδοθούν όλα τα bits και όταν είναι 0 το data rate είναι προκαθορισμένο και ο FSR μένει 1 για τουλάχιστον έναν κύκλο RCLK)
10	XFSM	TRANSMIT FRAME SYNC MODE (όταν είναι 1, η λειτουργία είναι συνεχής και ο FSX ενεργοποιείται μόνο στην αρχή της πρώτης λέξης ενός block που θα μεταδοθεί και όταν είναι 0 η λειτουργία είναι η standard και ο FSX ενεργοποιείται σε κάθε μεταφορά λέξης)
11	RFSM	RECEIVE FRAME SYNC MODE (όταν είναι 1, η λειτουργία είναι συνεχής και ο FSR ενεργοποιείται μόνο στην αρχή της πρώτης λέξης ενός block που θα ληφθεί και όταν είναι 0 η λειτουργία είναι η standard και ο FSR ενεργοποιείται σε κάθε λήψη λέξης)

Πίνακας 3.4. Serial-Port Global Control Register Definition

BIT	ΟΝΟΜΑ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
18,19	XLEN	XLEN TRANSMIT WORD LENGTH (8/16/24/32)
20,21	RLEN	RLEN RECEIVE WORD LENGTH (8/16/24/32)
22	XTINT	TRANSMIT TIMER INTERRUPT ENABLE (όταν είναι 1, το transmit timer interrupt ενεργοποιείται και όταν είναι 0 το transmit timer interrupt απενεργοποιείται)
23	XINT	TRANSMIT INTERRUPT ENABLE (όταν είναι 1, το transmit interrupt is enabled ενεργοποιείται και όταν είναι 0 το transmit interrupt is απενεργοποιείται)
24	RTINT	RECEIVE TIMER INTERRUPT ENABLE (όταν είναι 1, το receive timer interrupt ενεργοποιείται και όταν είναι 0 το receive timer interrupt is disabled απενεργοποιείται)
25	RINT	RECEIVE INTERRUPT ENABLE (όταν είναι 1, το receive interrupt ενεργοποιείται και όταν είναι 0 το receive interrupt απενεργοποιείται)
26	XRESET	TRANSMIT RESET (όταν είναι 1, το transmit κομμάτι της σειριακής θύρας παύει να είναι reset και όταν είναι 0 το transmit κομμάτι της σειριακής θύρας είναι reset)
27	RRESET	RECEIVE RESET (όταν είναι 1, το receive κομμάτι της σειριακής θύρας παύει να είναι reset και όταν είναι 0 το receive κομμάτι της σειριακής θύρας είναι reset)
28-31	Δεσμευμένα bits	Διαβάζονται ως 0

Στο πρόγραμμα που υλοποιείται για τον έλεγχο του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού :

- ❑ Το FSX pin προγραμματίζεται ως pin εξόδου,
- ❑ Το Handshake mode είναι εκτός λειτουργίας,
- ❑ Χρησιμοποιείται το Internal transmit clock,
- ❑ Χρησιμοποιείται το External receive clock,
- ❑ Επιλέγεται σταθερό data rate κατά το Receive και το transmit,
- ❑ Ως Receive και transmit frame sync mode επιλέγεται η standard , όπου κάθε λέξη διαβιβάζεται ή λαμβάνεται έχει έναν σχετικό associated sync pulse,

- ❑ Οι πολικότητες CLKX και CLKR επιλέγονται ως active-high,
- ❑ Οι πολικότητες DX και DR επιλέγονται ως active-high,
- ❑ Οι πολικότητες FSX και FSR επιλέγονται ως active-high,
- ❑ Το μήκος των λέξεων που γίνονται Transmit ή receive είναι 16 bits,
- ❑ Τα interrupt του Transmit και του receive timer είναι εκτός λειτουργίας και
- ❑ Το Receive και το transmit σετάρονται έτσι ώστε να μην βρίσκεται το σειριακή θύρα σε reset λειτουργία

FSX/DX/CLKX Port-Control Register

Ο 32-bit αυτός register ελέγχει τη λειτουργία των FSX, DX, και CLKX ακροδεκτών (pins) της σειριακή θύρας.

Η λειτουργία του κάθε ακροδέκτη περιγράφεται από τέσσερα bits ως εξής :

- ❑ Bit 0, FUNC: Function. Γενικής χρήσης I/O ακροδέκτης εάν είναι 0 , ακροδέκτες σειριακής θύρας εάν είναι 1.
- ❑ Bit 1, I/O : Input/output. Γενικής χρήσης ακροδέκτης εισόδου εάν είναι 0 , γενικής χρήσης ακροδέκτης εξόδου εάν είναι 1.
- ❑ Bit 2, DATOUT: Έξοδος δεδομένων από τον ακροδέκτη εάν επιλέγεται ως γενικής χρήσης ακροδέκτης εξόδου.
- ❑ Bit3, DATIN: Είσοδος δεδομένων στο ακροδέκτες εάν επιλέγεται ως γενικής χρήσης ακροδέκτης εισόδου.

Επομένως, τα bits [3:0] περιγράφουν τη χρήση του ακροδέκτη CLKX, τα bits [7:4] περιγράφουν τη χρήση του ακροδέκτη DX, και τα bits [11:8] περιγράφουν τη χρήση του ακροδέκτη FSX. Το υπόλοιπο των bits [31:12] είναι δεσμευμένο και του δίνεται η τιμή μηδέν. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 4.

Έτσι, η τιμή 0111h περιγράφει τους transmit ακροδέκτες που θα θεωρούνται ως ακροδέκτες της σειριακής θύρας.

FSX/DX/CLKX Port-Control Register														
Bit	31-16	15-12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	—	—	FSX DATIN	FSX DATOUT	FSX I/O	FSX FUNC	DX DATIN	DX DATOUT	DX I/O	DX FUNC	CLKX DATIN	CLKX DATOUT	CLKX I/O	CLKX FUNC
Type	X	X	R	R/W	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W
Default	0	0	0 or 1	0	0	0	0 or 1	0	0	0	0 or 1	0	0	0

Σχήμα 3.8
FSX/DX/CLKX Port-Control Register

Receive/Transmit Timer-Control Register

Ο 32-bit αυτός receive/transmit timer-control register περιέχει τα κομμάτια ελέγχου για τους timers της σειριακής θύρα. Στο reset, όλα τα bits τίθενται μηδέν. Τα bits [5:0] ελέγχουν το χρονόμετρο του transmitter ενώ τα bits [11:6] ελέγχουν το χρονόμετρο του receiver. Τα bits 4 και 10 είναι δεσμευμένα bits και δεν έχουν καμία επίδραση στον receive/transmittimer-control register. Στον πίνακα 3 και στο σχήμα 8 βλέπουμε τους ορισμούς των bits.

Πίνακας 3.5. Ορισμός των σημαντικών Bits του Receive/Transmit Timer-Control Register

BIT	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
0	Transmit timer counter restart (XGO)	Κάνει Reset και ξεκινά τον transmit timer counter.
1	Transmit counter hold signal (XHLD)	Κρατάει τον counter. Όταν είναι 0, ο counter απενεργοποιείται και μένει στην ίδια κατάσταση. Όταν είναι 1, ο εσωτερικός counter κρατιέται επίσης έτσι ώστε ο counter να συνεχίσει από την τιμή που είχε μείνει.
2	Transmit clock/pulse mode control (XC/P)	Όταν είναι 1, διαλέγεται η λειτουργία clock και η έξοδος έχει 50% duty cycle. Όταν είναι 0, διαλέγεται η λειτουργία pulse και η έξοδος είναι σηκωμένη για έναν κύκλο CLKOUT κατά τη διάρκεια της κάθε περιόδου του timer.
3	Transmit clock source (XCLKSRC)	Όταν είναι 1, εσωτερικό clock με συχνότητα ίση με τη μισή του CLKOUT χρησιμοποιείται για να αυξήσει τον counter. Όταν είναι 0, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σήμα από το CLKX pin για να αυξήσει τον counter.
6	Receive timer counter (RGO)	Κάνει Reset και ξεκινά τον receive counter.
7	Receive counter hold signal (RHLD)	Κρατάει τον counter. Όταν είναι 0, ο counter απενεργοποιείται και μένει στην ίδια κατάσταση. Όταν είναι 1, ο εσωτερικός counter κρατιέται επίσης έτσι ώστε ο counter να συνεχίσει από την τιμή που είχε μείνει.
8	Receive clock/pulse mode control (RC/P)	Όταν είναι 1, διαλέγεται η λειτουργία clock και η έξοδος έχει 50% duty cycle. Όταν είναι 0, διαλέγεται η λειτουργία pulse και η έξοδος είναι σηκωμένη για έναν κύκλο CLKOUT κατά τη διάρκεια της κάθε περιόδου του timer.
9	Receive timer clock source (RCLKSRC)	Όταν είναι 1, εσωτερικό clock με συχνότητα ίση με τη μισή του CLKOUT χρησιμοποιείται για να αυξήσει τον counter. Όταν είναι 0, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σήμα από το CLKR pin για να αυξήσει τον counter.

Receive/Transmit Timer-Control Register														
Bit	31-16	15-12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	—	—	RSTAT	—	RCLKSRC	RC/P	RHLD	RGO	XSTAT	—	XCLKSRC	XC/P	XHLD	RGO
Type	X	X	R	X	R/W	R/W	R	R/W	R	X	R/W	R/W	R/W	R/W
Default			0		0	0	0	0	0		0	0	0	0

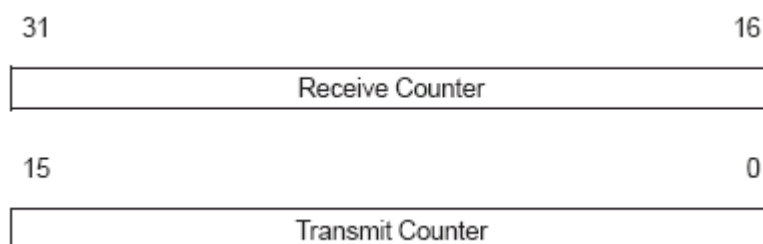
Σχήμα 3.9
Receive/Transmit Timer-Control Register

Η τιμή 01CFh προγραμματίζει τη σειριακή θύρα του DSP ως εξής:

- ❑ R/X .Το χρονόμετρο δεν είναι held. Ο μετρητής μηδενίζεται και αρχίζει να αυξάνει στην επόμενη rising edge του ρολογιού.
- ❑ Ο εσωτερικός μετρητής διαιρεμένος κατά δύο γίνεται επίσης held έτσι ώστε ο μετρητής να συνεχίσει από όπου αφέθηκε.
- ❑ Επιλέγεται Clock mode.
- ❑ Η εσωτερική πηγή ρολογιών χρησιμοποιείται για το ρολόι transmit (η συχνότητα συζητείται στην παράγραφο 3.2.7).
- ❑ Η εξωτερική πηγή ρολογιών χρησιμοποιείται για το ρολόι receive (το CLKX είναι ενωμένο στο CLKR).

Receive/Transmit Timer-Counter Register

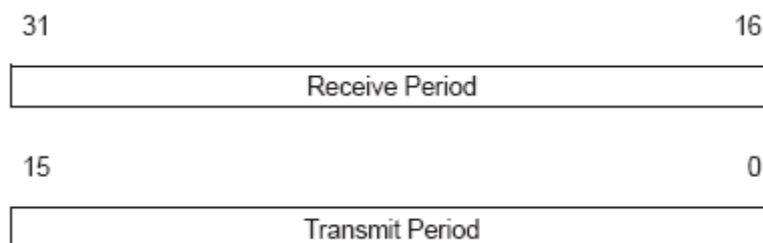
Ο 32-bit αυτός receive/transmit timer-counter register (μαζί με τον timer-period register που συζητείται στην παράγραφο 3.2.6) καθορίζει τη συχνότητα των χρονομέτρων. Οι μετρητές καθαρίζονται σε μηδέν όποτε φτάνουν στην τιμή period register, ή κατά το reset. Τα Bits [15:0] είναι για τον μετρητή του transmit timer, και τα Bits [31:16] είναι για τον μετρητή του receive timer-counter (σχήμα 9).



Σχήμα 3.10
Receive/Transmit Timer-Counter Register

Receive/Transmit Timer-Period Register

Ο receive/transmit timer-period register καθορίζει την περίοδο του χρονομέτρου και κατά το reset παίρνει την τιμή μηδέν. Τα bits [15:0] καθορίζουν την περίοδο του transmit timer, και τα bits [31:16] καθορίζουν την περίοδο του receive timer (σχήμα 10).



Σχήμα 3.11
Receive/Transmit Timer-Period Register

3.3.4.1 Χρονισμός σειριακής θύρας

Αν και οι receive και transmit timers μπορούν να προγραμματισθούν για διαφορετικές τιμές, η ορθή πρακτική είναι να συγχρονιστούν και οι δύο στην ίδια τιμή για την αποφυγή προβλημάτων. Ο τύπος για τον υπολογισμό της συχνότητας του ρολογιού της σειριακής θύρας με εσωτερικά παραγμένο ρολόι εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας των χρονομέτρων της σειριακής θύρας.

Εάν το χρονόμετρο διαμορφώνεται για τη λειτουργία pulse-mode ισχύει :

$$f_{(PULSE\ MODE)} = f_{(TIMER\ CLOCK)} / \text{period register}$$

Εάν το χρονόμετρο διαμορφώνεται για τη λειτουργία clock-mode ισχύει :

$$f_{(CLOCK\ MODE)} = f_{(TIMER\ CLOCK)} / (2 * \text{period register})$$

Όπου : $f_{(TIMER\ CLOCK)} = f_{(H1)} / 2$, η μέγιστη συχνότητα για εσωτερικά παραγόμενο ρολόι

και $f_{(TIMER\ CLOCK)} = f_{(H1)} / 2.6$, η μέγιστη συχνότητα για εξωτερικά παραγόμενο ρολόι σειριακής θύρας

και τελικά $f_{(H1)} = f_{(SYSTEM\ CLOCK)} / 2$.

3.3.4.2 Λειτουργία σειριακής θύρας

Κατά τη διάρκεια της transmit λειτουργίας, η CPU φορτώνει τα δεδομένα που θα γίνουν transmit στον data transmit register (DXR), ο DXR φορτώνει έπειτα τη λέξη στον transmit shift register (XSR), και τα bits γίνονται shift προς τα έξω. Η λέξη δεν φορτώνεται στο XSR έως ότου αυτός είναι κενός. Μόλις φορτωθεί ο DXR στον XSR, το bit XRDY γίνεται set, που σημαίνει ότι ο (DXR) είναι έτοιμος να λάβει την επόμενη λέξη. Η rising edge του σήματος XRDY κάνει set το XINT0 bit στον interrupt flag (IF) register, υπό την προϋπόθεση ότι το transmit interrupt enable bit (XINT) στον global control register της σειριακής θύρας και το CPU serial-port 0 transmit interrupt enable (EXINT0) bit στον interrupt enable (IE) register έχουν γίνει set.

Κατά τη διάρκεια της receive λειτουργίας, η CPU διαβάζει τα λαμβανόμενα δεδομένα από τον data receive register (DRR). Όταν εισέρχονται σειριακά δεδομένα (όπως τα δεδομένα που αποστέλει ο ADC), ο receive shift register (RSR) λαμβάνει τα δεδομένα. Όταν ο καθορισμένος αριθμός bits γίνεται shift προς τα μέσα, ο DRR φορτώνεται από τον RSR, και το status bit RRDY γίνεται set, το οποίο διευκρινίζει ότι υπάρχουν νέα δεδομένα έτοιμα να διαβαστούν από τον DRR. Εάν ο DRR δεν έχει διαβαστεί ακόμα και το RSR είναι πλήρες, ο receiver είναι παγωμένος. Οποιοδήποτε νέο δεδομένο μπαίνει στο DRR αγνοείται έως ότου διαβάζεται το DRR. Ο RSR δεν πανωγράφει τον DRR, επομένως ο DRR πρέπει να διαβαστεί για να επιτρέψει την ύπαρξη νέων δεδομένων στον RSR που θα μεταφερθούν στο DRR. Η rising edge του σήματος RRDY κάνει set το bit RINT0 στον interrupt flag (IF) register, υπό την προϋπόθεση ότι το receive interrupt enable bit (RINT) του global control register της σειριακής θύρας και το CPU serial port 0 receive interrupt enable (ERINT0) bit στον interrupt enable (IE) register έχουν γίνει set.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ

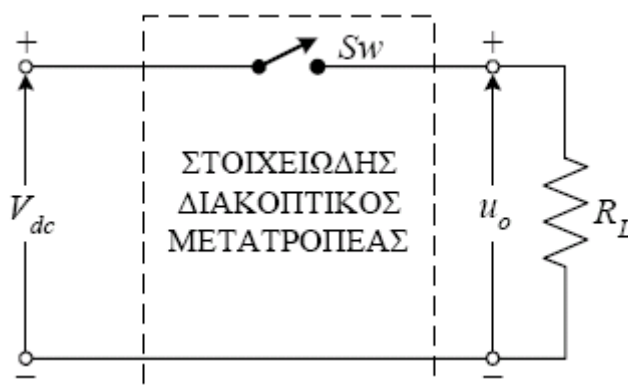
4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα επιμέρους υποσυστήματα του συστήματος εξομοίωσης και οι λειτουργίες που επιτελούν, εκτός του υποσυστήματος DSP του οποίου η λειτουργικότητα έχει αναφερθεί εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο.

4.2 Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης

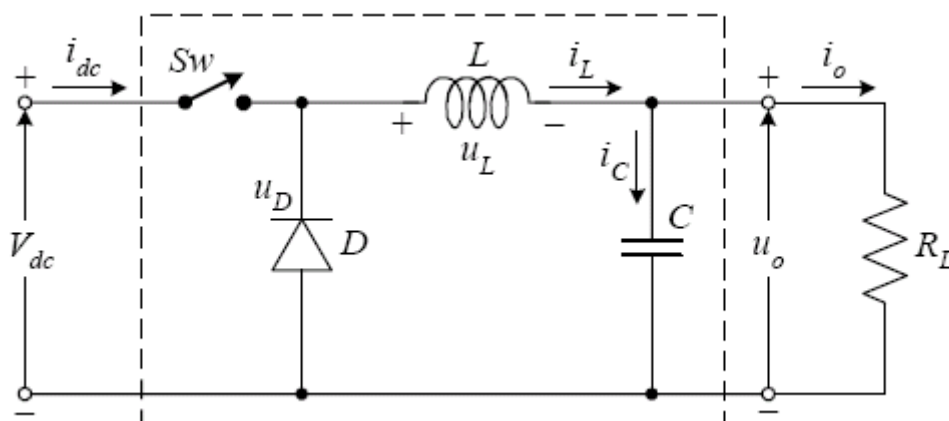
4.2.1 Περιγραφή του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Στην παρούσα διπλωματική υλοποιήθηκε σαν κύριο μέρος του συστήματος του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού, ένας μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (buck ή step down converter) για να υποβιβαστεί η τάση εισόδου που παρέχεται από το τροφοδοτικό και να προκύψουν οι επιθυμητές τάσεις εξόδου, ρυθμίζοντας κατάλληλα το duty cycle λειτουργίας του μετατροπέα.



Σχήμα 4.1 Στοιχειώδης μετατροπέας συνεχούς ρεύματος

Ο στοιχειώδης μετατροπέας του σχήματος 4.1 είναι ένας μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης. Όμως, το κύκλωμα αυτό έχει δύο σημαντικά μειονεκτήματα. Η στιγμιαία τάση εξόδου του μετατροπέα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται από το μηδέν έως την τάση εισόδου V_{dc} . Η διακύμανση της τάσης εξόδου δεν είναι αποδεκτή στις εφαρμογές των διακοπτικών τροφοδοτικών όπου, απαιτείται μια χρονικά αμετάβλητη τάση εξόδου. Το πρόβλημα της διακύμανσης της τάσης εξόδου λύνεται με τη χρήση ενός βαθυπερατού LC φίλτρου. Η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου επιλέγεται πολύ μικρότερη της συχνότητας μετάβασης του διακόπτη. Έτσι, το φίλτρο αποκόπτει από την παλμική κυματομορφή τη συχνότητα μετάβασης και τις αρμονικές της, επιτρέποντας τη διέλευση στην έξοδο μόνο της συνεχούς συνιστώσας (μέσης τιμής) V_o . Το δεύτερο μειονέκτημα του στοιχειώδη μετατροπέα εμφανίζεται όταν το φορτίο έχει επαγωγική συμπεριφορά, όπως συνήθως συμβαίνει στις πρακτικές εφαρμογές. Τότε, η αποθηκευμένη ενέργεια στην επαγωγή του φορτίου προκαλεί υπερτάσεις στα άκρα του διακόπτη κατά τη σβέση του. Το πρόβλημα των υπερτάσεων αντιμετωπίζεται με την τοποθέτηση μιας διόδου ελεύθερης ροής παράλληλα με το φορτίο.



Σχήμα 4.2 Κυκλωματική δομή του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Εισάγοντας τη διόδο ελεύθερης ροής και το βαθυπερατό LC φίλτρο στο μετατροπέα του σχήματος 4.1, προκύπτει ο πρακτικός μετατροπέας υποβιβασμού τάσης του σχήματος 4.2. Στο χρονικό διάστημα που ο διακόπτης είναι κλειστός η πηγή εισόδου παρέχει ενέργεια στο πηνίο και το φορτίο, ενώ η διόδος ελεύθερης ροής είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν άγει. Κατά τη σβέση του διακόπτη το ρεύμα της επαγωγής κυκλοφορεί μέσω της διόδου. Όταν το ρεύμα ρέει στην επαγωγή σε όλο το διάστημα αποκοπής του διακόπτη, λέμε ότι ο μετατροπέας λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος (continuous conduction mode). Αν το ρεύμα του πηνίου δεν ρέει σε όλη την περίοδο λειτουργίας T_s , αλλά μηδενίζεται στο διάστημα αποκοπής του διακόπτη, ο μετατροπέας λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή του ρεύματος (discontinuous conduction mode). Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τους δύο τρόπους λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Η ανάλυση του μετατροπέα θα γίνει στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας. Την ανάλυση στην κατάσταση ισορροπίας θα ακολουθήσουμε στη μελέτη όλων των μετατροπέων. Στην ισορροπία, οι κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων επαναλαμβάνονται όμοιες σε κάθε περίοδο λειτουργίας T_s . Ακόμη, οι διακόπτες των μετατροπέων θεωρούνται ιδανικοί, δηλαδή με μηδενική αντίσταση αγωγιμότητας και μηδενικούς χρόνους έναυσης και σβέσης. Στο κυκλωματικό σύμβολο των διακοπών, το βέλος δείχνει την επιτρεπόμενη φορά του ρεύματος μέσω του πραγματικού πλήρως ελεγχόμενου διακόπτη (διπολικό transistor ή MOSFET).

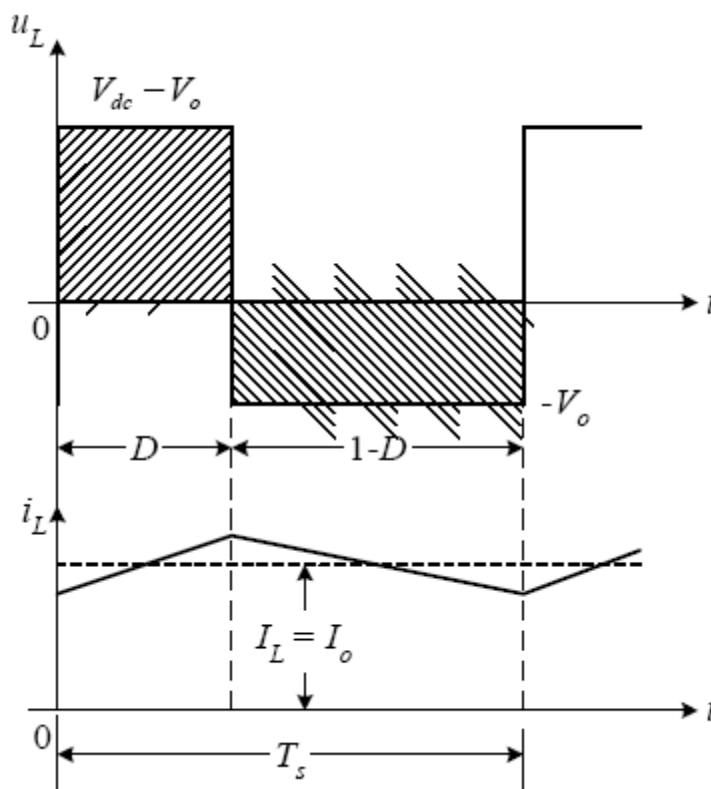
4.2.2 Συνεχής Αγωγή του Ρεύματος

Ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης (σχήμα 4.2) λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος, όταν το ρεύμα ρέει συνεχώς μέσω του πηνίου L σ' όλη την περίοδο λειτουργίας T_s , δηλαδή $i_L > 0$. Στην περίπτωση αυτή οι κυματομορφές της τάσης στα άκρα της διόδου, της τάσης και του ρεύματος στο πηνίο, παρουσιάζονται στο σχήμα 4.3. Η τάση στα άκρα της επαγωγής είναι ίση με $V_{dc} - V_o$ στο διάστημα αγωγής του διακόπτη. Ο διακόπτης άγει για χρόνο ίσο με $t_{on} = DT_s$ και βρίσκεται σε αποκοπή για χρονικό διάστημα

$t_{off} = (1-D)T_s$. Στο διάστημα αποκοπής του διακόπτη το ρεύμα του πηνίου i_L ρέει μέσω της διόδου ελεύθερης ροής. Το ρεύμα i_L μειώνεται γραμμικά και η τάση του πηνίου είναι ίση με την τάση εξόδου $-V_o$. Επειδή η επαγωγή δεν καταναλώνει ενεργό ισχύ, η μέση τιμή της τάσης u_L πρέπει να είναι μηδέν. Επομένως, από την ισότητα των εμβαδών της τάσης u_L στο σχήμα 4.3 έχουμε

$$(V_{dc} - V_o) DT_s = V_o (1-D) T_s \quad (4.1)$$

Από την Εξ. (4.1) προκύπτει ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου.



Σχήμα 4.3 Κυματομορφές στο μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, όταν λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = D \quad (4.2)$$

Από την Εξ. (4.2) είναι φανερό ότι κατά τη λειτουργία με συνεχή αγωγή του ρεύματος, η τάση εξόδου εξαρτάται μόνο από το duty cycle και είναι ανεξάρτητη από το ρεύμα του φορτίου I_o . Ακόμη, η τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με το duty cycle. Καθώς τα στοιχεία του μετατροπέα θεωρούνται ιδανικά, η ισχύς εισόδου είναι ίση με την ισχύ εξόδου. Επομένως,

$$V_{dc} I_{dc} = V_o I_o \quad (4.3)$$

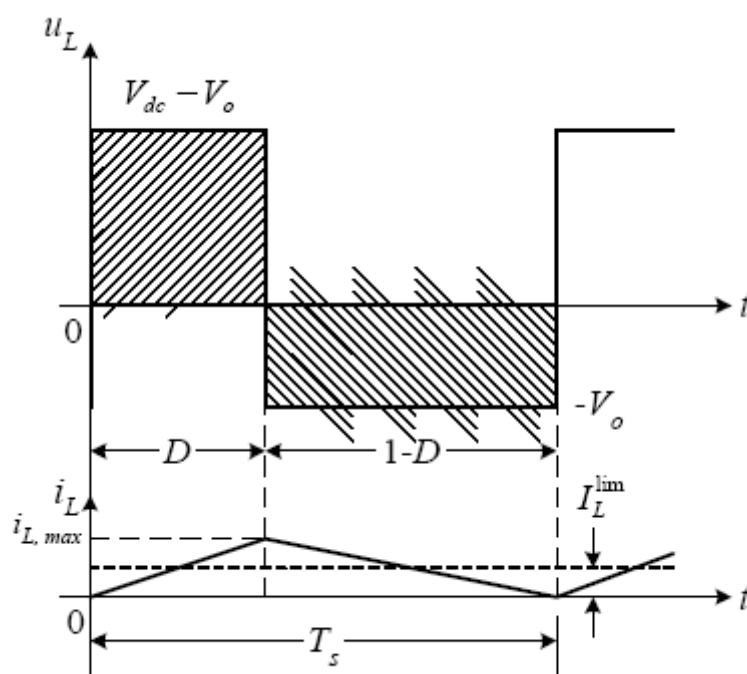
από την οποία έχουμε :

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{I_o} = D \quad (4.4)$$

Η Εξ. (4.4) δείχνει ότι ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης με συνεχή αγωγή ρεύματος, συμπεριφέρεται ως μετασχηματιστής συνεχούς

ρεύματος με ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενο λόγο μετασχηματισμού D . Το ρεύμα της επαγωγής L εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που απαιτεί το φορτίο. Καθώς η αντίσταση του φορτίου αυξάνει, το ρεύμα I_o μειώνεται. Το ρεύμα εξόδου I_o είναι ίσο με τη μέση τιμή του ρεύματος στο πηνίο, δηλαδή $I_L = I_o$. Επομένως, υπάρχει ένα όριο στη λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή του ρεύματος, στο οποίο οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στο πηνίο έχουν τη μορφή του σχήματος 4.4. Η μέση τιμή του ρεύματος στην επαγωγή, στο όριο της λειτουργίας είναι:

$$I_L^{\lim} = \frac{1}{2} i_{L,\max} = \frac{1}{2} \frac{1}{L} (V_{dc} - V_o) D T_s = \frac{V_{dc} T_s}{2L} (1-D) D = \frac{1}{2} \frac{1}{L} V_o (1-D) T_s \quad (4.5)$$



Σχήμα 4.4 Κυματομορφές του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, στο όριο της λειτουργίας με συνεχή αγωγή του ρεύματος

Όταν η τάση εισόδου V_{dc} είναι σταθερή και η τάση εξόδου V_o μεταβάλλεται, το ρεύμα I_L^{\lim} που εξασφαλίζει τη λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή του ρεύματος αποκτά τη μέγιστη τιμή του όταν $D = 0.5$

$$I_{L,\max}^{\lim} = \frac{V_{dc} T_s}{8L} \quad (4.6)$$

Αντίστοιχα, όταν η τάση εξόδου διατηρείται σταθερή και η τάση εισόδου μεταβάλλεται, το ρεύμα I_L^{lim} γίνεται μέγιστο όταν $D = 0$, οπότε από την Εξ. (4.5):

$$I_{L,\text{max}}^{\text{lim}} = \frac{V_o T_s}{2L} \quad (4.7)$$

4.2.3 Κυμάτωση της Τάσης Εξόδου

Σε έναν πρακτικό μετατροπέα, η τάση εξόδου V_o δεν είναι απόλυτα σταθερή, αλλά μεταβάλλεται γύρω από τη μέση τιμή της V_o . Η μεταβολή της τάσης εξόδου ονομάζεται κυμάτωση (ripple). Στο σχήμα 4.5 εικονίζεται η κυμάτωση της τάσης εξόδου, όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος. Για τον υπολογισμό της κυμάτωσης υποθέτουμε ότι, όλες οι αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος i_L ρέουν μέσω του πυκνωτή, ενώ η μέση τιμή του I_L διέρχεται από το ωμικό φορτίο. Η κυμάτωση της τάσης εξόδου οφείλεται στο μεταβαλλόμενο ρεύμα με μηδενική μέση τιμή που ρέει μέσω του πυκνωτή, σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_{\text{ripple}(p-p)} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{T_s}{2} \frac{\Delta I_L}{2} \quad (4.8)$$

Η διακύμανση του ρεύματος στην επαγωγή είναι:

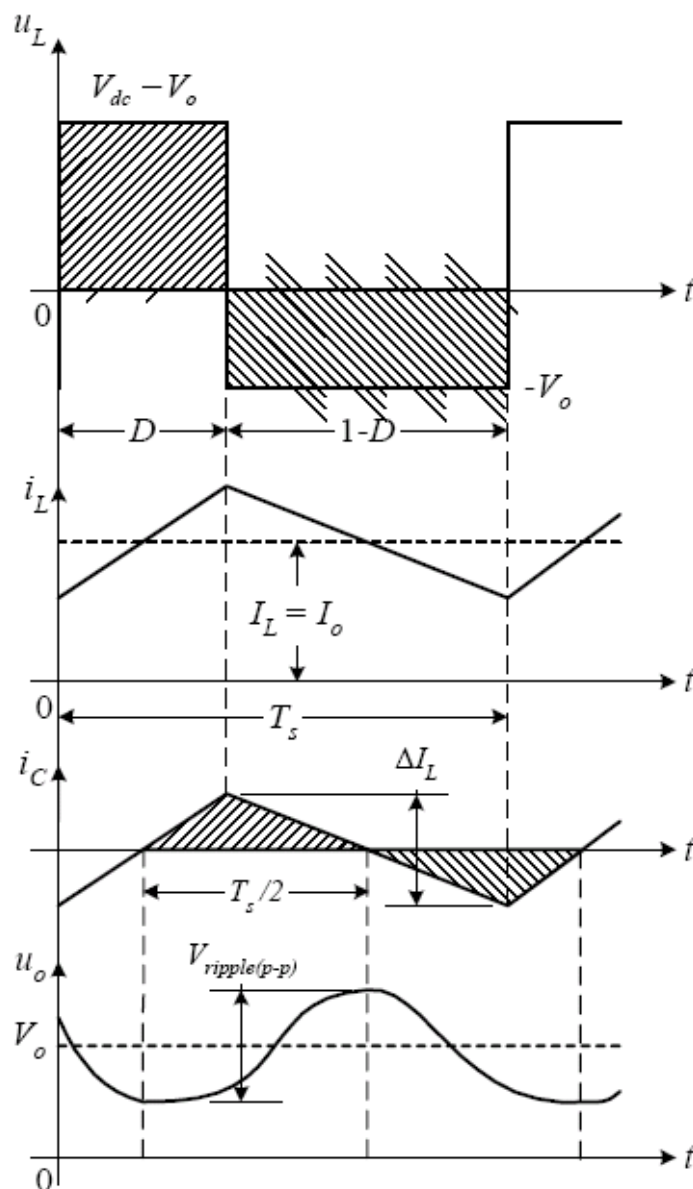
$$\Delta I_L = \frac{V_o(1-D)T_s}{L} \quad (4.9)$$

Η συχνότητα αποκοπής του LC φίλτρου είναι:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.10)$$

Αντικαθιστώντας τις Εξ. (4.9) και (4.10) στην (4.8) προκύπτει

$$V_{ripple(p-p)} = \frac{\pi^2}{2} V_o (1-D) \left(\frac{f_c}{f_s}\right)^2 \quad (4.11)$$



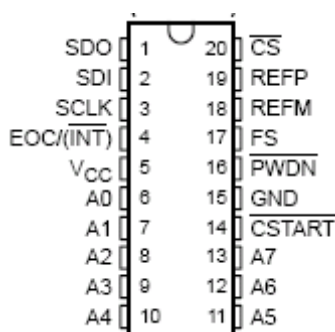
Σχήμα 4.5 Κυμάτωση της τάσης εξόδου όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος

Από την Εξ. (4.11) είναι φανερό ότι η κυμάτωση της τάσης εξόδου είναι τόσο μικρότερη, όσο μικρότερη είναι η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου, σε σχέση με τη συχνότητα μετάβασης f_s . Η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου είναι επιθυμητό να είναι υψηλή. Τότε, η αυτεπαγωγή του πηνίου και η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι μικρές. Επομένως, οι διαστάσεις του φίλτρου είναι περιορισμένες. Αυτό όμως επιβάλλει τη λειτουργία του διακόπτη σε υψηλές συχνότητες.

4.3 Ο ADC μετατροπέας TLV2548

4.3.1 Περιγραφή

Στη διπλωματική αυτή χρησιμοποιήθηκε ο TLV2548 μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC), για την μετατροπή των αναλογικών τάσεων και ρευμάτων της εξόδου του κυκλώματος σε ψηφιακά με σκοπό την είσοδο αυτών των δεδομένων στο DSP για επεξεργασία.



Σχήμα 4.6 Άποψη του TLV2548

Ο TLV2548 είναι ένας υψηλής απόδοσης, χαμηλής κατανάλωσης, δωδεκάμπιτος, CMOS μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό σήματος που λειτουργεί με τροφοδοσία 2.7V ως 5.5V. Η συσκευή αυτή έχει τρεις ψηφιακές εισόδους (επιλογή τσιπ (CS), σειριακό ρολόι εισόδου-εξόδου (SCLK), σειριακή

είσοδο δεδομένων (SDI)) και μια έξοδο (σειριακή έξοδο δεδομένων (SDO)) που παρέχει άμεσο interface τεσσάρων καλωδίων με τη σειριακή θύρα των περισσότερων δημοφιλών μικροεπεξεργαστών. Όταν διασυνδέεται με ένα DSP της Texas Instruments, όπως στην περίπτωση χρήσης του σε αυτή την διπλωματική, ένα σήμα frame sync (FS) χρησιμοποιείται για να δείξει την έναρξη ενός σειριακού frame δεδομένων.

Αυτή η συσκευή εκτός από τον A/D μετατροπέα ο οποίος είναι υψηλής ταχύτητας και εύκολος στον έλεγχο, έχει έναν αναλογικό, on-chip πολυπλέκτη που μπορεί να επιλέξει οποιαδήποτε αναλογική είσοδο ή μία από τις τρεις εσωτερικές self-test τάσεις. Η sample-and-hold λειτουργία αρχίζει αυτόματα μετά από την τέταρτη ακμή SCLK στην κανονική δειγματοληψία ή μπορεί να ελεγχθεί από έναν ειδικό ακροδέκτη, τον CSTART, για να επεκτείνει την περίοδο δειγματοληψίας στην εκτεταμένη δειγματοληψία. Η κανονική περίοδος δειγματοληψίας μπορεί επίσης να προγραμματιστεί ως μικρή (12 SCLKs) ή ως μεγάλη (24 SCLKs) για να προσαρμοστεί με τις απαιτήσεις των υψηλής απόδοσης επεξεργαστών σημάτων.

Ο TLV2548 έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με μικρή κατανάλωση ισχύος. Η λειτουργία αυτή ενισχύεται περαιτέρω με τους software/hardware/autopower-down λειτουργίες και τις προγραμματιζόμενες ταχύτητες μετατροπής (conversion). Το ρολόι μετατροπής (OSC) και η αναφορά (reference) είναι ενσωματωμένα. Ο μετατροπέας μπορεί να χρησιμοποιήσει το εξωτερικό SCLK ως πηγή του ρολογιού μετατροπής για να επιτύχει υψηλότερη ταχύτητα μετατροπής. Δύο διαφορετικές εσωτερικές τάσεις αναφοράς είναι διαθέσιμες. Μια προαιρετική εξωτερική αναφορά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να επιτύχει τη μέγιστη ευελιξία.

Ο TLV2548 είναι σχεδιασμένος για να λειτουργεί σε θερμοκρασίες από -40°C έως 85°C .

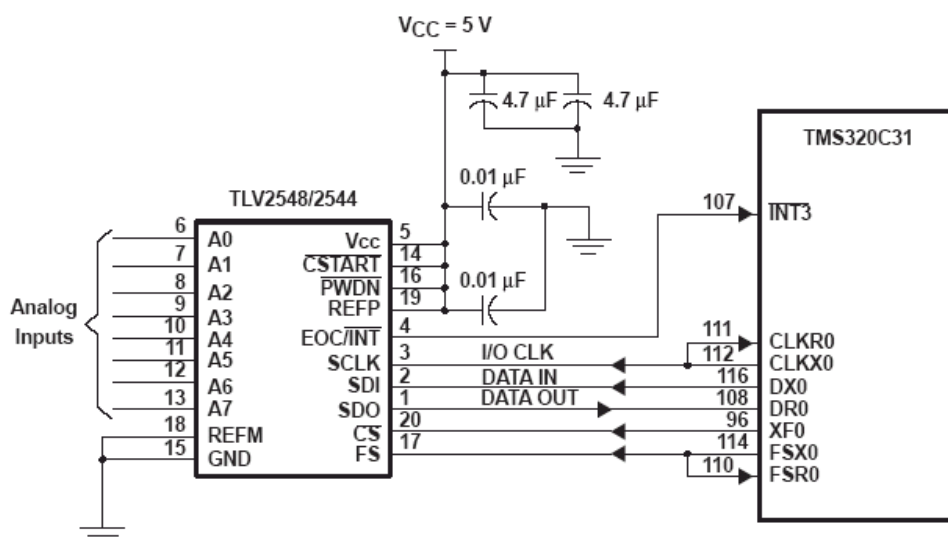
4.3.2 ADC και DSP Interface και Configuration

Η μεταφορά δεδομένων σε κανονική λειτουργία αποτελείται από μια εντολή από το DSP προς τον ADC για να αρχίσει το sample-and-convert. Ο ADC διακόπτει με interrupt το DSP μετά από έναν καθορισμένο χρόνο, κατά τη διάρκεια του οποίου το sample-and-convert ολοκληρώνεται, δηλώνοντας στο DSP ότι τα δεδομένα είναι έτοιμα να διαβαστούν.

Προτού να μπορέσουν να εκτελεσθούν όλες αυτές οι διαδικασίες, απαιτείται initialization και configuration και για τις δύο συσκευές για να λειτουργήσουν κατάλληλα.

4.3.2.1 Περιγραφή Hardware Interface

Το σχήμα 4.7 παρουσιάζει την pin-to-pin σύνδεση που επιτυγχάνει το interface μεταξύ του DSP και του TLV2548 ADC. Η σταθεροποιημένη 5V τροφοδοσία εφαρμόζεται στον VCC ακροδέκτη του ADC. Ένας πυκνωτής 4.7 μF κρατά σταθερή τη συνολική τροφοδοσία του κυκλώματος αποφεύγοντας οποιεσδήποτε σημαντικές αλλαγές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του ADC. Ο 0.01 μF (ή 0,1 μF) πυκνωτής επιτυγχάνει να μην υπάρχει κυματισμός στην τροφοδοσία του ADC, καθώς επίσης και στη θετική τάση αναφοράς REFP. Οι πυκνωτές bypass πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στους συγκεκριμένους ακροδέκτες.



Σχήμα 4.7 Hardware Interface μεταξύ TMS320C31 και TLV2548

- Το DSP επιλέγει τον ADC μέσω του ακροδέκτη εισόδου CS του ADC που ενώνεται με τον ακροδέκτη εξόδου XF του DSP.
- Το transmit clock του DSP, CLKX, παρέχει ένα σταθερό ρολόι στις εισόδους SCLK του ADC και receive clock, CLKR, του DSP.
- Η transmit frame-sync έξοδος, FSX, αρχικοποιεί κάθε μεταφορά δεδομένων με την αποστολή παλμών στην είσοδο του ADC, FS, καθώς επίσης και στην receive frame-sync είσοδο του DSP, FSR.
- Το DSP αρχικοποιεί τον ADC με τη μεταφορά μιας λέξης ελέγχου 4-bit από την DX έξοδό του, στην SDI είσοδο του ADC.
- Όταν η διαδικασία μετατροπής (conversion) τελειώσει, ο ADC παράγει ένα interrupt, το EOC/INT, που παρέχεται στην INT3 εισοδο του DSP για να αρχίσει το DSP την ανάγνωση των δεδομένων της μετατροπής.
- Ο ADC παρέχει το ψηφιακό αποτέλεσμα της μετατροπής από τον SDO ακροδέκτη, στον DR ακροδέκτη εισόδου του DSP.

4.3.2.2 ADC Configuration

Ο TLV2548 ADC κάνει transmit και receive τα δεδομένα μέσω ενός string 16-bit . Κατά το configuration του ADC, τα πρώτα 4 bits των δεδομένων (MSB) που διαβιβάζονται από το DSP χρησιμοποιούνται ως εντολή που καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας του ADC. Τα υπόλοιπα 12 bits των δεδομένων είναι ο configuration κώδικας που γράφεται στην ADC. Τα σύνολα των 4-bit εντολών για τον ADC συνοψίζονται στον πίνακα 4.1.

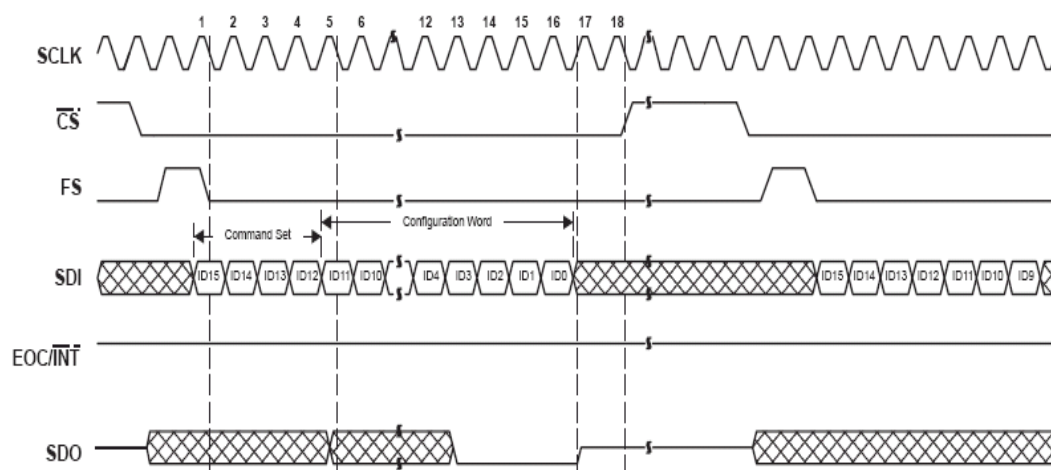
Πίνακας 4.1. TLV2548 Command Set (CMR)		
SDI BIT D[15:12]		ΕΝΤΟΛΗ TLV2548
BIN	HEX	
0000	0	Επιλογή αναλογικού καναλιού 0
0001	1	Επιλογή αναλογικού καναλιού 1
0010	2	Επιλογή αναλογικού καναλιού 2
0011	3	Επιλογή αναλογικού καναλιού 3
0100	4	Επιλογή αναλογικού καναλιού 4
0101	5	Επιλογή αναλογικού καναλιού 5
0110	6	Επιλογή αναλογικού καναλιού 6
0111	7	Επιλογή αναλογικού καναλιού 7
1000	8	Γίνεται τερματισμός λειτουργίας μέσω Software. Τα αναλογικά κυκλώματα καθώς και το κύκλωμα αναφοράς απενεργοποιούνται
1001	9	Διαβάζεται ο CFR register
1010	A	Διαβάζεται ο CFR register . Και αυτή η εντολή μπορεί να συμπεριληφθεί στο 12-bit κομμάτι δεδομένων του configuration mode.
1011	B	Επιλογή λειτουργίας Select self-test 1, Voltage = (REFP + REFM)/2
1100	C	Επιλογή λειτουργίας Select self-test 2, Voltage = REFM
1101	D	Επιλογή λειτουργίας Select self-test 3, Voltage = REFP

Οι εντολές γράφονται κανονικά στον ADC με τα υπόλοιπα 12 bits (D[11:0]) μηδέν, εκτός από όταν χρησιμοποιείται η εντολή Ah για τα bits D[15:12]. Όταν η εντολή Ah χρησιμοποιείται, τα ακόλουθα 12 bits (D[11:0]) πρέπει να είναι δεδομένα configuration. Οι ορισμοί των configuration bits παρατίθενται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2. Ορισμοί για τα σημαντικά Bit του Configuration Register του TLV2548	
SDI BIT	DEFINITION
D[15:12]	Όλα τα bit είναι 0 όταν ο CFR διαβάζεται και δεν προγραμματίζονται
D11	Επιλογή Reference : 0: Εξωτερικό 1: Εσωτερικό
D10	Επιλογή εσωτερικού reference voltage : 0: Internal ref = 4 V 1: Internal ref = 2 V
D9	Επιλογή περιόδου δειγματοληψίας στη λειτουργία του normal sampling (δεν παίζουν ρόλο στη λειτουργία του extended sampling) : 0: Μικρό sampling 12 SCLKs 1: Μεγάλο sampling 24 SCLKs
D[8:7]	Επιλογή ρολογιού : 00: Conversion clock = Internal OSC 01: Conversion clock = SCLK 10: Conversion clock = SCLK/4 11: Conversion clock = SCLK/2
D[6:5]	Επιλογή Conversion λειτουργίας 00: One-shot mode 01: Repeat mode 10: Sweep mode 11: Repeat sweep mode

4.3.2.3 Έλεγχος και χρονισμός του μετατροπέα ADC

Το FS είναι ενεργό σήμα του DSP που χρησιμοποιείται από τον ADC για να συγχρονίσει τη μεταφορά των δεδομένων. Η falling edge του FS είναι η έναρξη του κύκλου του ADC. Το δεδομένο εισόδου γίνεται shift in στην falling edge του SCLK, και το δεδομένο εξόδου αλλάζει στην rising edge του SCLK. Όπως έχει προαναφερθεί, τα πρώτα 4 bits είναι η εντολή που χρησιμοποιείται για να καθοριστεί ο τρόπος λειτουργίας του ADC. Εάν το σύνολο για τα bits D[15:12] της εντολής η οποία αρχίζει είναι Ah, τα ακόλουθα 12 bits των δεδομένων, D[11:0], χρησιμοποιούνται για να κάνουν configuration στον ADC. Το σχήμα 9 παρουσιάζει το διάγραμμα συγχρονισμού μιας μεταφοράς δεδομένων από το DSP στον ADC μέσω της σειριακής θύρας του DSP, για να γίνει configuration στον ADC. Κατά τη διάρκεια του κύκλου configuration, κανένας κύκλος conversion δεν αρχικοποιείται για διάβασμα ή για γράψιμο. Ένας κύκλος conversion αρχίζει μόνο αφού γίνει configured ο ADC σε μία από τις 4 λειτουργίες του (εμείς χρησιμοποιούμε single-shot).



Σχήμα 4.8. Configuration για τον ADC (εγγραφή στον CFR)

4.3.3 Λειτουργία συστήματος ADC - DSP

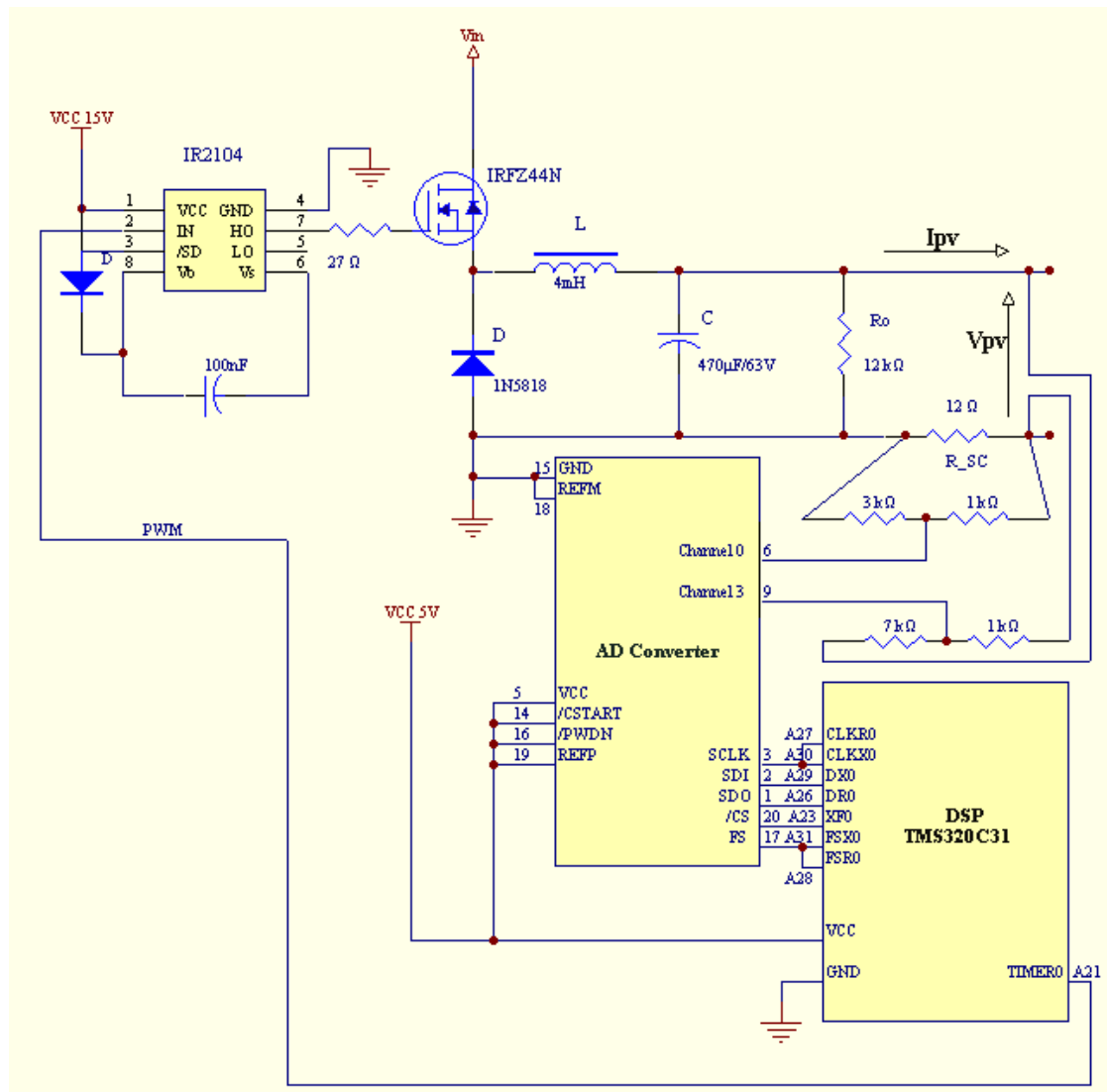
Μόλις διαμορφωθούν κατάλληλα το DSP και ο ADC, μπορεί να αρχίσει η μεταφορά δεδομένων. Η έναρξη του κύκλου καθορίζεται από το σήμα FS (Σχήμα 4.8). Ο TLV2548 ADC έχει τέσσερις διαφορετικούς τρόπους conversion, που λειτουργούν ελαφρώς διαφορετικά ο ένας από τον άλλον, ανάλογα με το πώς ο μετατροπέας εκτελεί τη δειγματοληψία.

Σε μια μεταφορά των δεδομένων εισόδου, το πρώτο bit (MSB) των δεδομένων αναμένεται μετά από το falling edge του FS, και όλα τα ακόλουθα bits γίνονται shift in στην falling edge του SCLK. Για τα δεδομένα εξόδου, το πρώτο bit (MSB) των δεδομένων παρουσιάζεται στον ακροδέκτη SDO αφότου ανιχνευθεί η falling edge του CS, ενώ το FS είναι στη γείωση. Για σωστά αποτελέσματα, το δεδομένο αλλάζει στην rising edge του SCLK και είναι διαθέσιμο στην falling edge του SCLK.

4.4 Περιγραφή και σχηματικό του κυκλώματος του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού

Για την τροφοδοσία του κυκλώματος χρησιμοποιείται γεννήτρια συνεχούς τάσης. Η τιμή της τάσης αυτής επιλέγεται κάθε φορά ανάλογα με την τάση ανοιχτοκύκλωσης του προς εξομοίωση φωτοβολταϊκού. Επίσης απαραίτητη είναι και η τροφοδοσία με συνεχή τάση 10V μέχρι 20V, του driver του MOSFET. Προτεινόμενη τιμή για την τάση αυτή, η οποία είναι και η τάση κατά την οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της παρούσας διπλωματικής, είναι τα 15V(d.c.).

Για τον ρόλο του διακόπτη του buck converter χρησιμοποιείται το MOSFET ισχύος IRFZ44N, της εταιρίας International Rectifier, που οδηγείται από τον driver IR2104. Ο driver παρέχει την απαιτούμενη τάση έναυσης στην πύλη του MOSFET ισχύος, με είσοδό του την PWM παλμοσειρά που παράγεται από το DSP. Το υπόλοιπο κύκλωμα του buck converter ακολουθεί την κλασική συνδεσμολογία ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος είναι το εξής :



Σχήμα 4.9. Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

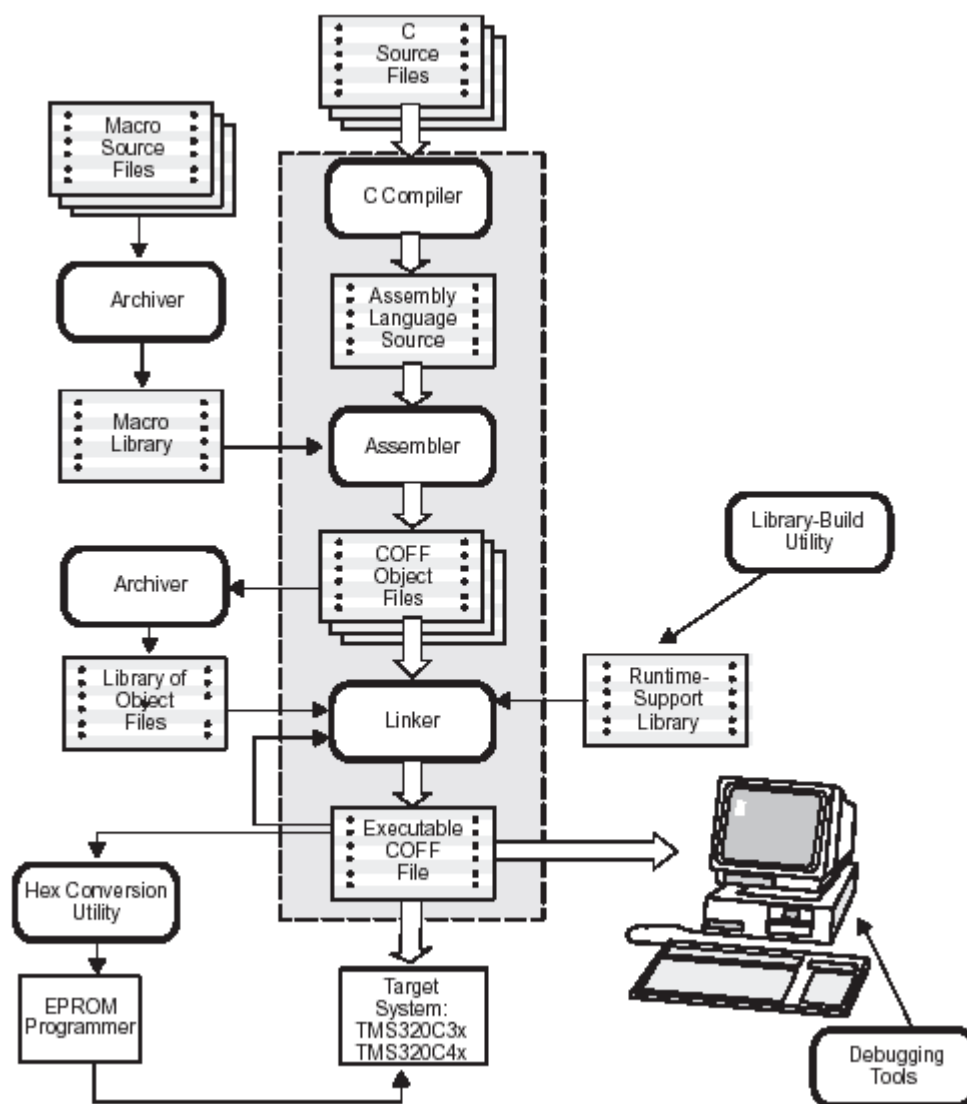
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

5.1 Εισαγωγή

Στην προηγούμενη ενότητα δόθηκαν κάποια στοιχεία για την λειτουργικότητα του DSP και το υλικό (hardware) που χρησιμοποιήθηκε. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η ουσιαστική προσέγγιση για την κατανόηση του κώδικα του προγράμματος που αναπτύχθηκε. Επιπλέον από την μελέτη αυτού του κεφαλαίου ο αναγνώστης, αφενός καταλαβαίνει την δυναμική που μπορεί να παρέχει ένας επεξεργαστής DSP σε οποιαδήποτε εφαρμογή, αφετέρου δικαιολογείται η ύπαρξη του DSP στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Έγινε μεγάλη προσπάθεια να βελτιστοποιηθεί ο αλγόριθμος έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν λιγότεροι πόροι από τον μικροεπεξεργαστή DSP. Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας εγκαταλείφθηκε η αρχική ιδέα να γραφεί ο κώδικας μόνο σε Assembly καθώς η γλώσσα μηχανής είναι γενικά δύσχρηστη. Έτσι η ανάγκη ανάπτυξης κώδικα σε γλώσσα C κρίθηκε απαραίτητη ειδικά σε κάποια ευάλωτα σημεία, όπως εν παραδείγματι στον έλεγχο και προγραμματισμό των timers ή στη προεγκατάσταση του IOF register, την υλοποίηση της σειριακής επικοινωνίας και στο interface μεταξύ DSP και ADC. Τελικά τα TMS320C3x4x Code Generation Tools Version 5.10 χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του κώδικα C και τον προγραμματισμό του συστήματος DSP.

5.2 Ανάλυση χρήσης των εργαλείων δημιουργίας τελικού κώδικα προγραμματισμού του μικροεπεξεργαστή DSP

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η ροή της διαδικασίας δημιουργίας του hex αρχείου, που απαιτείται για τον προγραμματισμό της flash μνήμης του μικροεπεξεργαστή DSP. Το γραμμοσκιασμένο μέρος του διαγράμματος παρουσιάζει την βασική πορεία υλοποίησης. Τα υπόλοιπα μέρη είναι προαιρετικά.



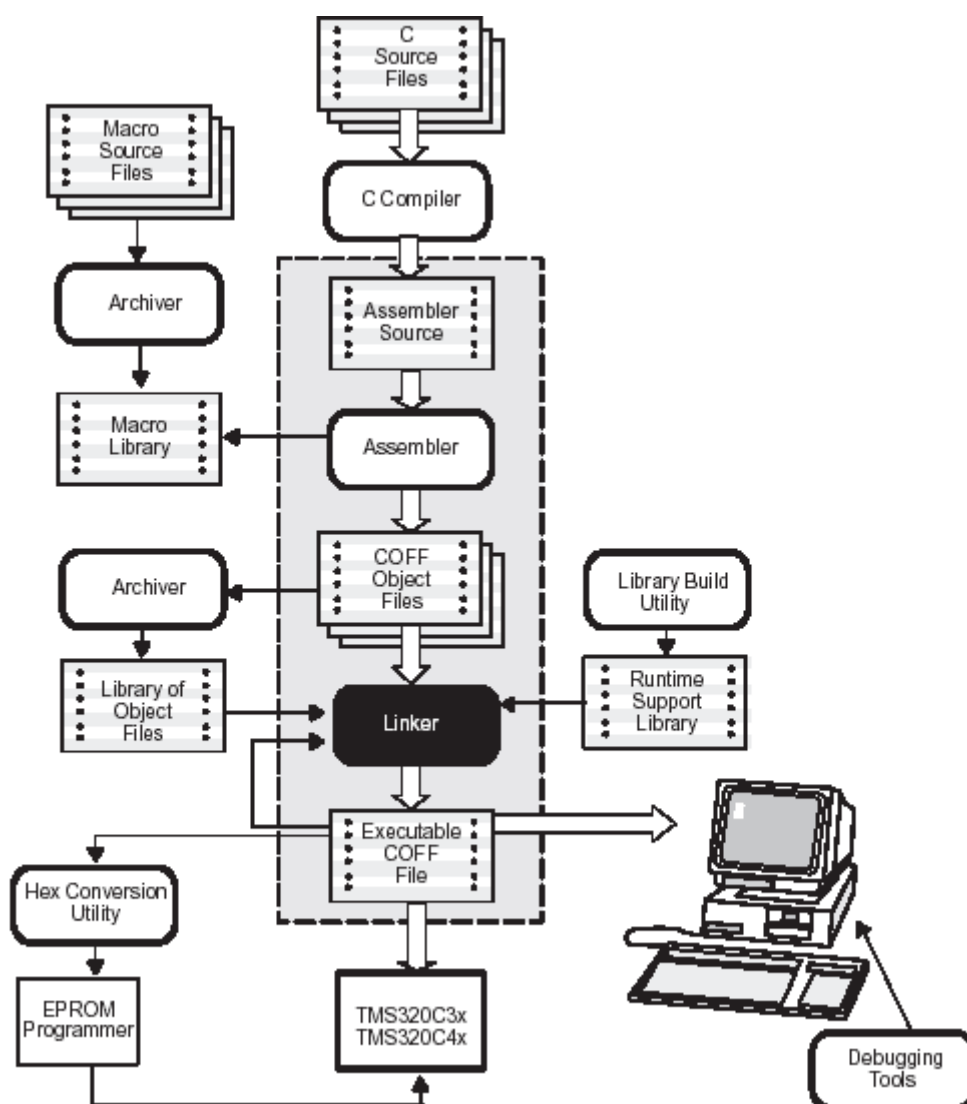
Σχήμα 5.1

- ❑ Ο **C compiler** δέχεται C πηγαίο κώδικα και τον μετατρέπει σε TMS320C3x κώδικα assembly.
- ❑ Ο **assembler** μετατρέπει αρχεία assembly σε object αρχεία γλώσσας μηχανής.
- ❑ Ο **linker** συνδυάζει τα object αρχεία σε ένα εκτελέσιμο αρχείο.
- ❑ Ο **hex converter** μετατρέπει ένα εκτελέσιμο αρχείο εξόδου του linker σε αρχείο hex

Οι λειτουργίες του compiler και assembler λαμβάνουν χώρα μέσω του προγράμματος-εργαλείου **cl30**. Μετά την εκτέλεση του cl30 έχει δημιουργηθεί ένα object αρχείο. Ένα παράδειγμα της εκτέλεσης του cl30 για την μετατροπή του C πηγαίου κώδικα, με όνομα αρχείου source.c , σε object αρχείο source.obj , είναι σε γραμμή εντολών DOS :

cl30.exe -g -v31 -as source.c

Στο σημείο αυτό έχει δημιουργηθεί το object αρχείο **source.obj** . Το επόμενο βήμα είναι η εκτέλεση του προγράμματος **lnk30** για την δημιουργία του εκτελέσιμου COFF object αρχείου. Ο ρόλος του linker σχηματικά περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα :



Σχήμα 5.2

Ένα παράδειγμα της εκτέλεσης του Ink30 για την μετατροπή του object αρχείου source.obj σε εκτελέσιμο αρχείο με όνομα source.out, είναι σε γραμμή εντολών DOS :

```
Ink30.exe timer.obj -c -x -stack 0x40 -heap 0 -l rts30.lib -m source.map -o source.out
```

Είναι δυνατή η είσοδος των παραμέτρων του linker μέσω ενός αρχείου εντολών. Η γραμμή εντολών DOS τότε έχει ως εξής :

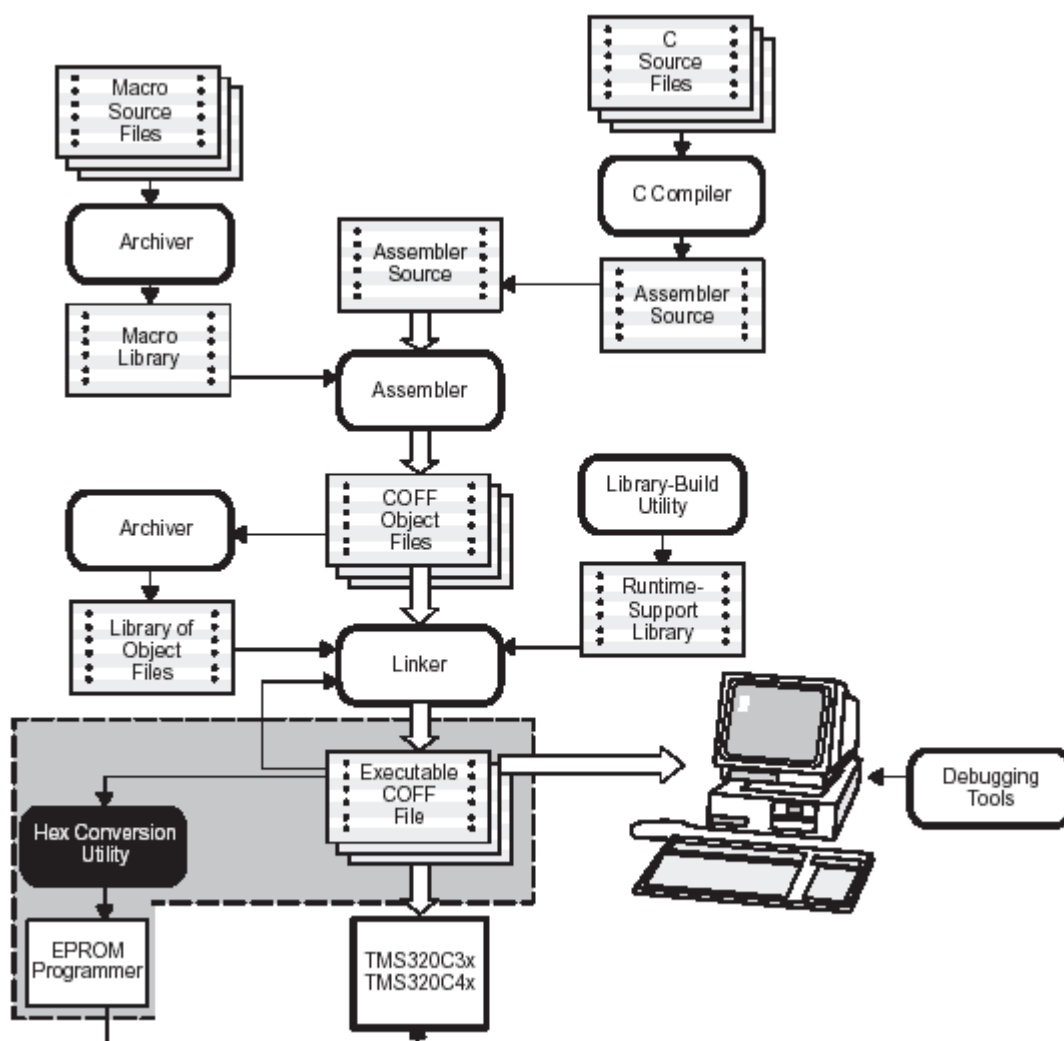
Ink30 linker.cmd

Το αρχείο εντολών linker.cmd θα περιέχει σε αυτή την περίπτωση τις παραμέτρους της γραμμής εντολών :

linker.cmd

```
timer.obj  
-c  
-x  
-stack 0x40  
-heap 0  
-l rts30.lib  
-m source.map  
-o source.out
```

Σε αυτό το σημείο και αφού έχει δημιουργηθεί το εκτελέσιμο αρχείο με όνομα source.out , για να δημιουργηθεί το hex αρχείο που απαιτείται για τον προγραμματισμό της flash μνήμης του μικροεπεξεργαστή DSP, απαιτείται η εκτέλεση του προγράμματος-εργαλείου **hex30**. Ο ρόλος του hex30 σχηματικά περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα :



Σχήμα 5.3

Το **hex30** μετατρέπει ένα εκτελέσιμο αρχείο εξόδου του linker με όνομα για παράδειγμα `source.out` , σε αρχείο hex με όνομα `source.hex` , με την γραμμή εντολών DOS :

hex30.exe source2hex.cmd

Το αρχείο εντολών `source2hex.cmd` θα περιέχει τις παραμέτρους της γραμμής εντολών :

source2hex.cmd

```

timer.obj
-c
-x
-stack 0x40
-heap 0
-l rts30.lib
-m source.map
-o source.out
  
```

Στο τέλος αυτής της διαδικασίας έχει δημιουργηθεί το hex αρχείο που απαιτείται για τον προγραμματισμό της flash μνήμης του μικροεπεξεργαστή DSP. Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι της εταιρίας **Texas Instruments**, Code Generation Tools for TMS320C3x/C4x DSP Compiler/Assembler/Linker Version 5.10 .

5.3 Επεξήγηση Αλγορίθμου – Flow Chart

Η φιλοσοφία στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε είναι να προγραμματιστούν σωστά οι timers ώστε να παραχθούν τα κατάλληλα σήματα εισόδου του υποσυστήματος ισχύος. Επίσης καίριο σημείο του προγράμματος είναι και η σωστή αρχικοποίηση της σειριακής θύρας του DSP καθώς και η αρχικοποίηση και ο προγραμματισμός του ADC για τη σωστή μεταξύ τους επικοινωνία. Τέλος σημαντικό ρόλο παίζει ο σωστός υπολογισμός της θεωρητικής τάσης εξόδου σε συνάρτηση με το ρεύμα εξόδου, καθώς και ο αλγόριθμος ελέγχου της πραγματικής τάσης εξόδου για τον τερματισμό του προγράμματος. Παρακάτω δίνεται αναλυτικά το πρόγραμμα ενώ παρουσιάζονται κάποια βοηθητικά στοιχεία του για καλύτερη κατανόηση.

Πριν αρχίσει η λεπτομερής ανάλυση του αλγορίθμου κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά σε κάποιες μεταβλητές και συναρτήσεις και τον λόγο που αυτές χρησιμοποιήθηκαν.

- Μεταβλητές που καθορίζουν το duty cycle της PWM και κατά συνέπεια τους χρόνους t_{on} και t_{off} του MOSFET που λειτουργεί ως διακόπτης του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης :
 - pwm_high : Καθορίζει το t_{on} του MOSFET
 - pwm_low : Καθορίζει το t_{off} του MOSFET
 - cnt : Όσο η μεταβλητή cnt αυξάνει, τόσο αυξάνει και το duty cycle

- Μεταβλητές που περιέχουν τις παραμέτρους για τον υπολογισμό της θεωρητικής χαρακτηριστικής συνάρτησης τάσεως-ρεύματος φωτοβολταϊκού :
 - Isc : Ρεύμα βραχυκύκλωσης στις κανονικές συνθήκες σε Ampere
 - Voc : Τάση ανοικτοκύκλωσης στις κανονικές συνθήκες σε Volt
 - NCOT : Ονομαστική Θερμοκρασία Λειτουργίας Κελιού σε °C
(Nominal Cell Operating Temperature)
 - Pm : Μέγιστη ισχύς σε Watt
 - m : Συντελεστής ιδανικότητας της διόδου
($1 \leq m \leq 2$)
 - Nr : Ομάδες φωτοβολταϊκών στοιχείων παράλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους
 - Ns : Ομάδες φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων μεταξύ τους σε σειρά

- Μεταβλητές που περιέχουν τις θεωρητικές ή πραγματικές τιμές τις τάσης και του ρεύματος που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα :
 - I_{pvr} : Πραγματική τιμή ρεύματος φωτοβολταϊκού
 - V_{pvr} : Πραγματική τιμή τάσης φωτοβολταϊκού
 - V_{pvt} : Θεωρητική τιμή τάσης φωτοβολταϊκού
 - V_{ref} : Τιμή τάσης αναφοράς ADC
 - V_{Rsc} : Πραγματική τιμή τάσης πάνω στην αντίσταση R_{sc}
 - V_{stop} : Τιμή της τάσης που θα τερματιστεί το πρόγραμμα όταν $V_{pvr} \geq ((V_{stop})/dividerV)$

- `Install_interrupt()` : η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται για να ενεργοποιεί ή να απενεργοποιεί τα interrupts και διαχειρίζεται τις ρουτίνες διαχείρισης των interrupts.

- `Set_ST ()` : διαχειρίζεται το GIE bit το οποίο ενεργοποιεί ή να απενεργοποιεί τα interrupts.

- `Init_module ()` : αρχικοποιεί το module (μικροεπεξεργαστής, μνήμες, A/D και D/A convertes) ενώ όλα τα περιφερειακά του μικροεπεξεργαστή (Timers, Serial Port, DMA Controller) γίνονται reset

- `Init_uart ()` : Υλοποιεί τη software αρχικοποίηση της UART του DSP

Παρακάτω δίνεται ο αλγόριθμος του προγράμματος σε στάδια.

Βήμα 1^ο

Αρχικοποιείται το DSP .Συγκεκριμένα αρχικοποιείται το module και η UART. Επίσης εγκαθίστώνται οι ρουτίνες εξυπηρέτησης των interrupts των περιφερειακών του DSP.

Βήμα 2^ο

Πραγματοποιείται μέσω της σειριακής θύρας η σειριακή επικοινωνία του DSP με τον υπολογιστή. Ο υπολογιστής στέλνει από τερματικό τις παραμέτρους (I_{sc} , V_{oc} , $NCOT$, P_m , m , N_p , N_s) και τις εισόδους (G , T_a) της προσομοίωσης σε ASCII μορφή και το DSP διαβάζει τα δεδομένα αυτά και τα μετατρέπει σε float αριθμούς.

Βήμα 3^ο

Υπολογίζονται οι συντελεστές V_t , I_{scG} , V_{ocG} , R_{sG} της χαρακτηριστικής εξίσωσης της θεωρητικής τάσης

Βήμα 4^ο

Απενεργοποίηση της UART, εγκατάσταση του interrupt του Timer_0 και προγραμματισμός του Timer_0 και της σειριακής θύρας του DSP. Επίσης προεγκατάσταση του IOF και αρχικοποίηση του ADC

Βήμα 5^ο

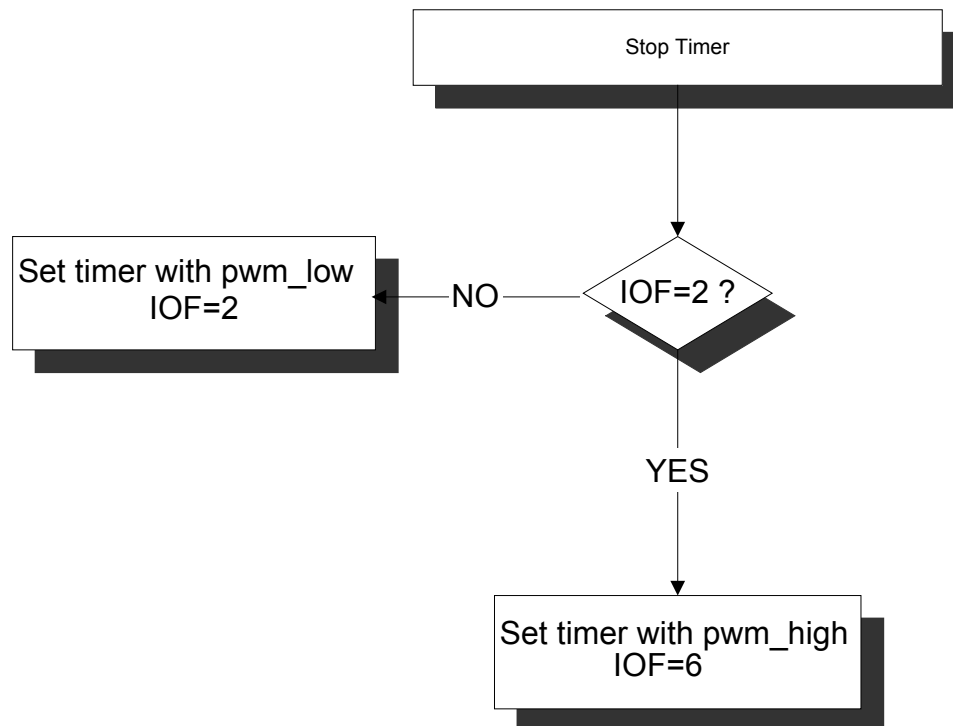
Σύγκριση της πραγματικής τιμής της τάσης εξόδου του κυκλώματος με την τιμή V_{stop} , η οποία είναι η τιμή που θα έπρεπε να έχει θεωρητικά η έξοδος. Για τη σύγκριση αυτή υλοποιείται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος ελέγχου σε κάθε επανάληψη του οποίου ο ADC δειγματοληπτεί δύο

τάσεις του κυκλώματος έτσι ώστε να υπολογίζονται κάθε φορά τα I_{pnr} , V_{pnr} και V_{pnt} . Οι τάσεις αυτές πριν μετρηθούν από τον ADC περνούν από διαιρέτες τάσης που τις υποβιβάζουν κατά $dividerI$ και $dividerV$ αντίστοιχα έτσι ώστε να είναι μέσα στα πλαίσια λειτουργίας του μετατροπέα. Σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου η μεταβλητή cnt αυξάνεται κατά 1 προκαλώντας έτσι αύξηση στο duty cycle της PWM κατά 0,3% περίπου κάθε φορά. Με τον τρόπο αυτό μεγαλώνουμε σε κάθε loop την τάση εξόδου μέχρι αυτή να πάρει την επιθυμητή τιμή. Όσο η συνθήκη της σύγκρισης είναι αληθής, το πρόγραμμα εκτελεί συνεχώς το βήμα 5. Αλλιώς περνάει στο βήμα 6 που είναι και το τέλος του προγράμματος.

Βήμα 6^ο

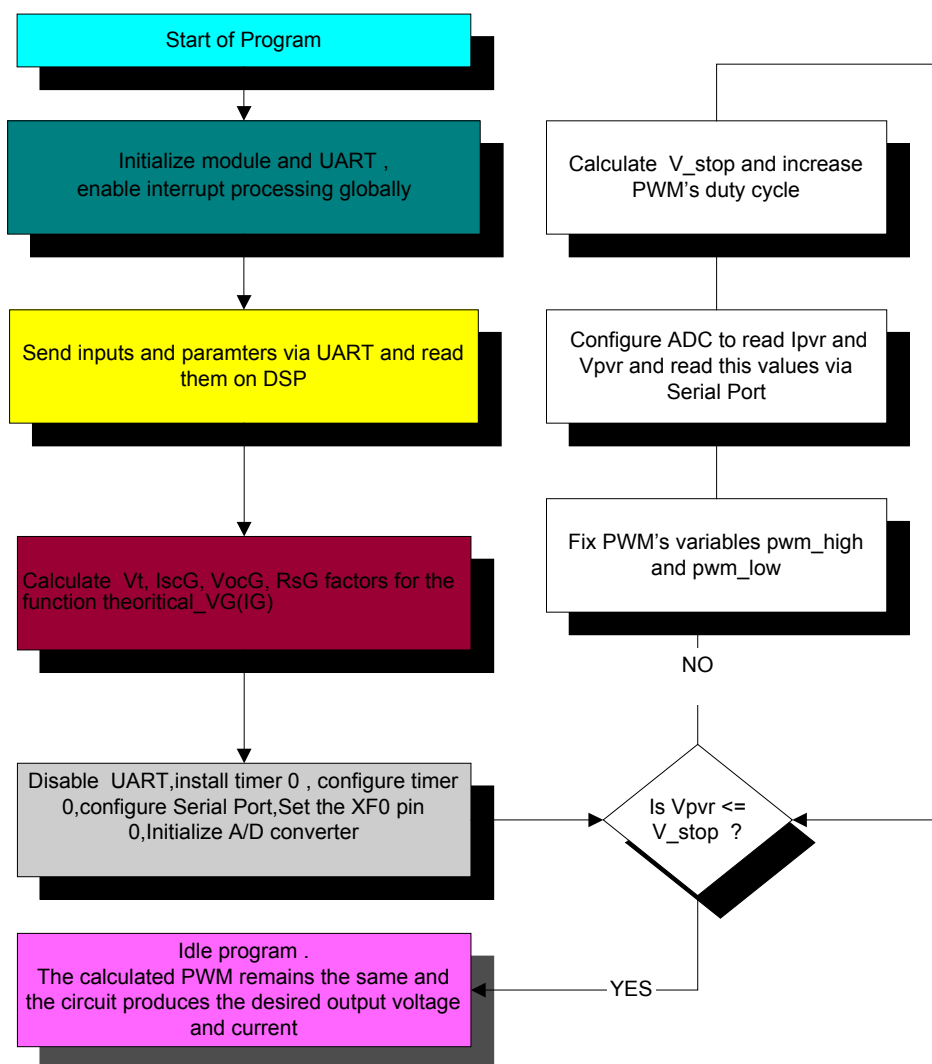
Το πρόγραμμα παραμένει στην ίδια κατάσταση παράγοντας μία σταθερή PWM έτσι ώστε να παράγεται στην έξοδο του κυκλώματος η επιθυμητή ισχύς.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα Flow Chart για τις υλοποιήσεις των συναρτήσεων του interrupt του Timer0 αλλά και της main:



Σχήμα 5.4

Διάγραμμα FLOW-CHART του αλγορίθμου του interrupt του Timer0



- Βήμα 1° : Πράσινο
- Βήμα 2 ° : Κίτρινο
- Βήμα 3 ° : Κόκκινο
- Βήμα 4° : Γκρι
- Βήμα 5° : Άσπρο
- Βήμα 6° : Ροζ

Σχήμα 5.5

Διάγραμμα FLOW-CHART του αλγορίθμου του interrupt της main(). Κάθε χρώμα στα κουτιά αντιπροσωπεύει ενέργεια που έγινε σε συγκεκριμένο βήμα.

5.4 Παρουσίαση του κώδικα

Παρακάτω παρουσιάζονται εν συντομία κάποια κρίσιμα κομμάτια κώδικα. Αυτά τα κομμάτια κώδικα πραγματεύονται την διαχείριση των περιφερειακών του DSP και υλοποίηση κάποιων χρήσιμων συναρτήσεων.

- Ο κώδικας που ακολουθεί υλοποιεί τη συνάρτηση που στέλνει ένα string χαρακτήρων από το Serial Port του DSP στον υπολογιστή .

```
void send_string ( char *s )
/*****
function void send_string (char *s)
transmit a string via UART / RS232 port
Parameter *s pointer to string
Returns -
Calls BIOS function send_char

*****/

{
    int i = 0;
    char c;

    while ( (c = s[i++]) != '\0' )
        while ( ! send_char (c) ) ;
}
```

- Ο κώδικας που ακολουθεί υλοποιεί τη συνάρτηση που λαμβάνει string χαρακτήρων από τον υπολογιστή και τα αποστέλλει στο Serial Port του DSP . Η συνάρτηση αυτή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να διορθώσει κάποιο λάθος χαρακτήρα που τυχόν έχει εισάγει μέσω του πλήκτρου backspace .

```

char *receive_string (char *str)
/*****/
receive and retransmit a string via the UART
parameter: str - string
returns : -
calls : BIOS function receive_char
        BIOS function send_char
        BIOS function watchdog_trigger
/*****/
{
    register int i;
    register char data;
    i = 0;
    data = '\0';

    while (data != '\r')
    {
        while ( (data = receive_char ()) == -1 ) watchdog_trigger();
        switch (data)
        {
            case '\n':
                break;
            case '\r':
                str[i] = '\0';    /* convert to C-string */
                while ( ! send_char ('\n') ) ;
                while ( ! send_char ('\r') ) ;
                break;
            case '\b':
                if (i > 0)
                    i--;
                while ( ! send_char ('\b') ) ;
                break;
            default:
                str[i++] = data;
                while ( ! send_char (data) ) ;
                break;
        }
    }
    return (str);
}

```

- Ο κώδικας που ακολουθεί υλοποιεί τη συνάρτηση για τον θεωρητικό υπολογισμό και επιστροφή της τάσης εξόδου του κυκλώματος μέσω της χαρακτηριστικής εξίσωσης τάσεως-ρεύματος φωτοβολταϊκού .

```

float theoretical_VG(float IG)
{
    if(IG==IscG)
        VG=0;
    else
        VG=VocG -(IG*RsG)+(Ns*Vt*log(1-(IG/IscG)));
    return(VG);
}

```

- Ο κώδικας που ακολουθεί υλοποιεί την ρουτίνα εξυπηρέτησης του interrupt για τον Timer_0. Η συνάρτηση λειτουργεί ως εξής :

Κάθε φορά που εκτελείται το interrupt σετάρεται ο Timer_0. Με την αρχικοποίηση που γίνεται στον global-control register ο timer λειτουργεί ως I/O ακροδέκτης γενικού σκοπού (FUNC=0). Όταν το DATOUT είναι 0 ο ακροδέκτης εξόδου του timer είναι και αυτός 0, ενώ όταν το DATOUT είναι 1 ο ακροδέκτης εξόδου του timer είναι 1. Επίσης το άθροισμα των *pwm_low* και *pwm_high* ισούται με την περίοδο της PWM. Η περίοδος αυτή επιλέγεται να είναι σταθερή και τέτοια ώστε η συχνότητα της PWM να είναι 40 kHz.

Έτσι λοιπόν την μία φορά που τρέχει ο timer με περίοδο *pwm_low* μας βγάζει στην έξοδό του 0 ,ενώ την επόμενη που τρέχει με περίοδο *pwm_high* μας βγάζει στην έξοδό του 1. ο Αυτό θα επαναλαμβάνεται συνεχώς καθώς ο timer μέσα στο interrupt σετάρει κάθε φορά τον εαυτό του . Το ότι ο Timer_0 σετάρεται με διαφορετική περίοδο κάθε φορά είναι αποτέλεσμα του register IOF που στο πρόγραμμα χρησιμοποιείται ως Boolean μεταβλητή , στη μία κατάσταση της οποίας ο Timer_0 έχει περίοδο *pwm_high* και στην άλλη κατάσταση έχει περίοδο *pwm_low*. Με τον τρόπο αυτό καταφέρνουμε να έχουμε την επιθυμητή παλμοσειρά PWM, με συχνότητα και duty cycle που εμείς θέλουμε και ταυτόχρονα καταναλώνουμε όσο το δυνατόν λιγότερους πόρους από το DSP .

```
void c_int09 (void) /*executed when timer0 expires*/
{
    TIMER_ADDR(0)->gcontrol = 0;
    if (IOF & 4 )
    {
        TIMER_ADDR(0)->period = pwm_low;
        IOF = 2;
        TIMER_ADDR(0)->gcontrol= GO | HLD_ | I_O | CP_ | CLKSRC;
    }
    else
    {
        TIMER_ADDR(0)->period = pwm_high;
        IOF = 6;
        TIMER_ADDR(0)->gcontrol= GO | HLD_ | I_O | DATOUT | CP_ |
        CLKSRC;
    }
}
```

- Στη συνέχεια παρουσιάζεται το κομμάτι που αποτελεί το κυρίως μέρος του κώδικα. Σε αυτό συνοπτικά λαμβάνουν χώρα τα εξής :

- Αρχικοποίηση του DSP
- Εγκατάσταση των ρουτινών εξυπηρέτησης των interrupts των περιφερειακών του DSP.
- Σειριακή επικοινωνία του DSP με τον υπολογιστή μέσω της σειριακής θύρας
- Υπολογισμός των συντελεστών της χαρακτηριστικής εξίσωσης για τον υπολογισμό της θεωρητικής τάσης
- Εγκατάσταση του interrupt του Timer_0 του DSP
- Προγραμματισμός του Timer_0 του DSP
- Προγραμματισμός της σειριακής θύρας του DSP
- Προεγκατάσταση του IOF
- Αρχικοποίηση και προγραμματισμός του ADC

- Υλοποίηση αλγορίθμου ελέγχου με σκοπό στο τέλος του προγράμματος να παίρνονται στην έξοδο του κυκλώματος οι επιθυμητές τιμές τάσης και ρεύματος

```

/*****
Main Program
*****/

void main (void)
{

/*****
locals
*****/

uart_init_struct std_cfg = {9600, 8, 'N', 1, 'X', 0x11, 0x13};
int i;
char s[80];

/*****
Initialization of the module and the UART
*****/

init_module (MCBL);
init_uart (std_cfg); /* Compiler < Rev.5 require (&std_cfg) */

/*****
if everything is initialized, enable interrupt processing globally
*****/

__set_ST (GIE);

/*****
Inputs and Parametres for the Theoretical Model are read here from
the terminal via the serial port as ASCII characters ,and their
values are converted into float numbers
*****/

receive_string (s);
Ta=atof(s);

receive_string (s);
G=atof(s);

receive_string (s);
Isc=atof(s);

```

```

    receive_string (s);
    Voc=atof(s);

    receive_string (s);
    NCOT=atof(s);

    receive_string (s);
    Pm=atof(s);

    receive_string (s);
    m=atof(s);

    receive_string (s);
    Np=atof(s);

    receive_string (s);
    Ns=atof(s);

    /*****
    All the coefficients for the mathematic equation of the Vout are being
    calculated in this part of the code
    *****/
    Vt=m*0.0248;
    Voc=Voc/34;
    v_oc=Voc/Vt;
    FFo=(v_oc-log(v_oc+0.72))/(v_oc+1);
    Pm=Pm/34;
    FF=Pm/(Voc*Isc);
    r_s=1-(FF/FFo);
    Rs=r_s*Voc/Isc;
    C2=(NCOT-20)/800;
    Tc_25=C2*G+25;
    Tc=C2*G+Ta;
    C1=Isc/1000;
    Isc=C1*G;
    Voc=Voc-0.0023*(Tc-Tc_25);
    Vt=(m*0.025*(273+Tc))/300;

    IscG=Isc*Np;
    VocG=Voc*Ns;
    RsG=Rs*(Ns/Np);

    /*****
    Program waits until UART transmitter shift register is empty,
    disables the UART related interrupts (TIMER0, TIMER1 and INT3),
    and disables the RS232 receiver and transmitter, since we want to
    use the XF0 and XF1 pins:
    *****/

```



```

while (get_uart_tx_status() != -1) ;
    IE &= ~0x0C08;
    clr_module_cfg (RXEN | TXEN);

/*****
    installs timer 0 interrupt handler
    *****/
install_interrupt (SIG_TINT0, c_int09);

/*****
    configures timer 0 to generate a square wave on TIMER0 pin
    and generates interrupts
    *****/
TIMER_ADDR(0)->gcontrol = 0;          /* stop timer */
TIMER_ADDR(0)->period = cnt;          /* Timer is clocked */
TIMER_ADDR(0)->gcontrol =
    GO
    | HLD_          /* start timer */
    | I_O           /*timer is configured
                    as an I/O pin*/
    | CP_           /* clock mode */
    | CLKSRC;       /* internal clock */

/*****
configure Serial Port
*****/
SERIAL_PORT_ADDR(0)->gcontrol = 0;          /* halt serial port*/
SERIAL_PORT_ADDR(0)->s_x_control = 0x00000111;
SERIAL_PORT_ADDR(0)->s_r_control = 0x00000111;
SERIAL_PORT_ADDR(0)->s_rxt_control = 0x0000010C;
                                          /* configure, but do not start*/
SERIAL_PORT_ADDR(0)->s_rxt_period = 0x00020002;
SERIAL_PORT_ADDR(0)->s_rxt_counter = 0;
SERIAL_PORT_ADDR(0)->s_rxt_control = 0x000001CF;
                                          /* start serial port timer*/
SERIAL_PORT_ADDR(0)->gcontrol = 0x0C140044;

/*****
Set the XF0 pin 0
*****/
IOF=2;

```

```

/*****
Initialize A/D converter and perform a dummy read
*****/
SERIAL_PORT_ADDR(0)->x_data =0xA000;
dm=SERIAL_PORT_ADDR(0)->r_data;
delay(1);

/*****
Start of the control algorithm
*****/
while( Vpvr <= ((V_stop)/dividerV) )
{

    /*****
    pwm_high and pwm_low are being modified so
    as to produce the desired PWM with constant
    frequency 40 kHz
    *****/
    pwm_high = cnt;
    pwm_low = 338 - pwm_high;
    delay(100);

    for(i=0;i<2;i++)
    {

/*****
Configure A/D converter and perform a dummy read
*****/
SERIAL_PORT_ADDR(0)->x_data =0xA800;
dm=SERIAL_PORT_ADDR(0)->r_data;
delay(1);

/*****
Select analog channel 0 from A/D converter
and read conversion data from this channel
*****/
SERIAL_PORT_ADDR(0)->x_data = 0x0000;
data=SERIAL_PORT_ADDR(0)->r_data;
delay(1);
}

/*****
Convert the 12-bit output of the A/D converter into
a float number so as to result lpvr
*****/
d = data & 0xFFF0;

```

```

d = d >> 4;
f4 = ((float)d/4095)*4;
V_Rsc=f4;
Ipvr = (V_Rsc*dividerl + 0.2)/Rsc;

/*Calculation of the theoritical Vpvt ,correspond to the resulted Ipvr */
Vpvt=theoritical_VG(Ipvr);
delay(100);

```

```

for(i=0;i<2;i++)
{

    /******
    Configure A/D converter and perform a dummy
    read
    *****/
    SERIAL_PORT_ADDR(0)->x_data = 0xA800;
    dm=SERIAL_PORT_ADDR(0)->r_data;
    delay(1);

    /******
    Select analog channel 3 from A/D converter
    and read conversion data from this channel
    *****/
    SERIAL_PORT_ADDR(0)->x_data = 0x3000;
    data2=SERIAL_PORT_ADDR(0)->r_data;
    delay(1);
}

/******
Convert the 12-bit output of the A/D converter into
a float number so as to result Vpvr
*****/
d = data2 & 0xFFF0;
d = d >> 4;
f = ((float)d/4095)*4;
Vpvr=f;

/******
Calculation of V_stop that depends from the values of
Vpvt and V_Rsc
*****/
V_stop = Vpvt + V_Rsc*dividerl + 0.2 - 0.4;

```

```
        delay(10);

        cnt=cnt+1;  /* cnt is increment in every loop resulting an
                    increment of PWM's duty cycle */

    }

    /*****
    Since loop has now ended cnt has to take its last value
    and PWM has to be refixed
    *****/
    cnt=cnt-1;
    pwm_high = cnt;
    pwm_low = 338 - pwm_high;
    delay(1);

    /*****
    now the program stays idle forever so as to keep the
    desired output voltage and current that has been
    produced at the output of the circuit
    *****/
    for(;;);

}
```

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

6.1 Εισαγωγή

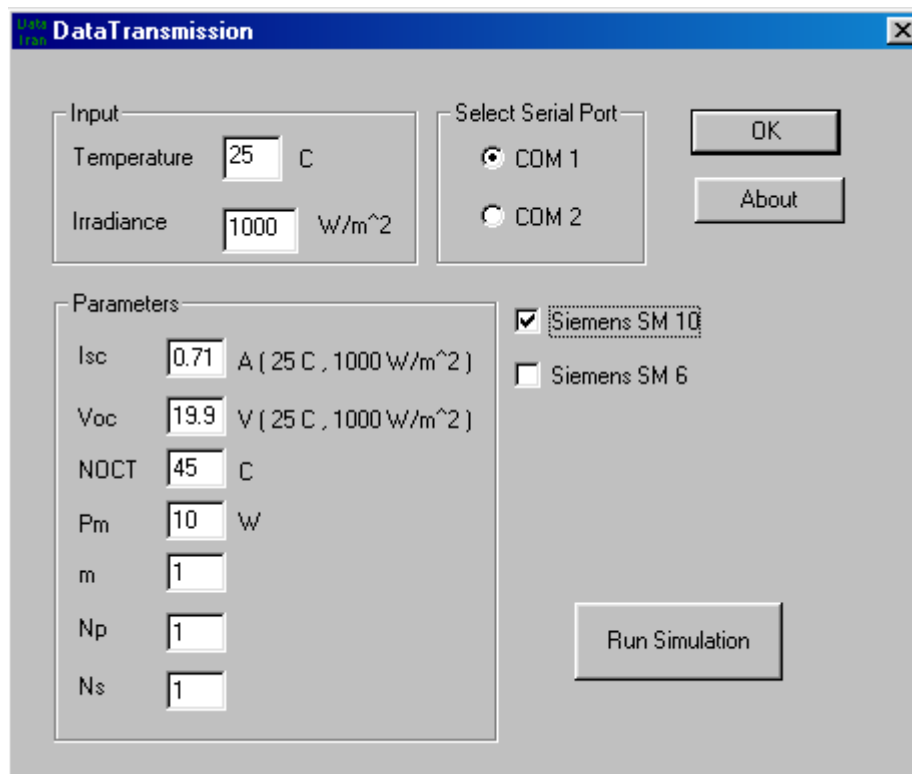
Στην διπλωματική αυτή σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένας φωτοβολταϊκός εξομοιωτής που αποτελείται από τροφοδοσία ελεγχόμενη από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μέσω των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιούνται με τον εξομοιωτή, προκύπτουν χαρακτηριστικές καμπύλες του ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την τάση εξόδου φωτοβολταϊκών πλαισίων σε πραγματικό χρόνο, για συγκεκριμένες συνθήκες εξομοίωσης, τις οποίες ο χρήστης επιλέγει μέσω του προγράμματος ελέγχου του συστήματος από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

6.2 Interface του συστήματος του εξομοιωτή

Για την επικοινωνία και τον έλεγχο του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή, υλοποιήθηκε πρόγραμμα-interface σε γραφικό περιβάλλον. Ανάμεσα στις επιλογές του διακρίνονται αυτές της επιλογής σειριακής θύρας (COM1-COM2) στην οποία είναι συνδεδεμένο το σύστημα εξομοίωσης, και η επιλογή του τύπου του προς εξομοίωση φωτοβολταϊκού (Siemens SM10 – SM6).

Στα πεδία της περιοχής εισόδου (Input), αναγράφονται η τιμή θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ακτινοβολίας στις κανονικές συνθήκες για το φωτοβολταϊκό της επιλογής μας. Είναι δυνατή η αλλαγή αυτών των τιμών από τον χρήστη με τις εκάστοτε επιθυμητές συνθήκες εξομοίωσης.

Στα πεδία της περιοχής των παραμέτρων (Parameters), αναγράφονται η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{SC} , η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} , η nominal cell operating temperature $NOCT$, η μέγιστη ισχύς P_m του φωτοβολταϊκού, η σταθερά m , η τιμή N_p των παράλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους στοιχείων και η τιμή N_s των σε σειρά στοιχείων.



Σχ. 6.1 Interface του συστήματος εξομοίωσης

Η επιλογή του τύπου του προς εξομοίωση φωτοβολταϊκού (Siemens SM10 – SM6) έχει το πλεονέκτημα να είναι δυνατή η αλλαγή μόνο των τιμών των εισόδων και παραμέτρων που διαφοροποιούνται από τις προκαθορισμένες τιμές στις κανονικές συνθήκες. Έτσι, για παράδειγμα, για την επιλογή της προσομοίωσης του φωτοβολταϊκού Siemens SM6 σε συνθήκες $T_C = 45^\circ\text{C}$ και $G = 800\text{ W/m}^2$, αρχικά επιλέγεται ο τύπος SM6 :

DataTransmission

Input
 Temperature: 25 C
 Irradiance: 1000 W/m²

Select Serial Port
☒ COM 1
☐ COM 2

Parameters
 Isc: 0.42 A (25 C , 1000 W/m²)
 Voc: 19.5 V (25 C , 1000 W/m²)
 NOCT: 45 C
 Pm: 6 W
 m: 1
 Np: 1
 Ns: 1

☐ Siemens SM 10
☒ Siemens SM 6

OK
 About
 Run Simulation

Έτσι έχουν επιλεχθεί οι κανονικές συνθήκες για τις παραμέτρους του συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού. Το μόνο που απαιτείται για την προσομοίωση σε συνθήκες $T_c = 45^\circ\text{C}$ και $G = 800\text{ W/m}^2$, είναι η αλλαγή μόνο αυτών των δύο εισόδων από τον χρήστη :

DataTransmission

Input
 Temperature: 45 C
 Irradiance: 800 W/m²

Select Serial Port
☒ COM 1
☐ COM 2

Parameters
 Isc: 0.42 A (25 C , 1000 W/m²)
 Voc: 19.5 V (25 C , 1000 W/m²)
 NOCT: 45 C
 Pm: 6 W
 m: 1
 Np: 1
 Ns: 1

☐ Siemens SM 10
☒ Siemens SM 6

OK
 About
 Run Simulation

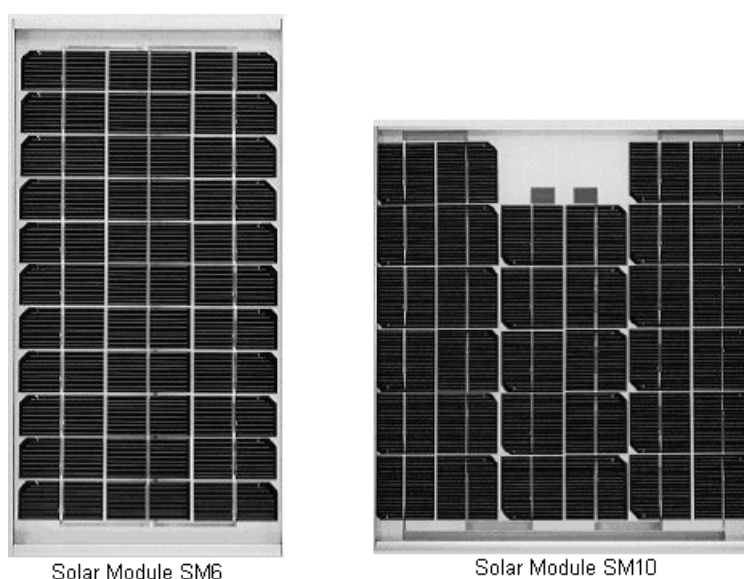
Με την επιλογή του **Run Simulation** αρχίζει η εκτέλεση της προσομοίωσης.

Το interface έχει υλοποιηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού C++, σε Visual Studio 6 και χρησιμοποιεί κλάσεις που παρέχουν τα ActiveX Mscmm32.ocx και comdlg32.ocx .

Το εκτελέσιμο αρχείο του interface εγκαθίσταται μέσω εκτελέσιμου αρχείου εγκατάστασης (setup). Κατά την εγκατάστασή του στον υπολογιστή εγκαθίστανται και οι απαραίτητες δυναμικές βιβλιοθήκες (dll). Το interface μπορεί να εγκατασταθεί κανονικά σε λειτουργικά συστήματα : Windows 98/Me/2000/XP.

6.3 Τύποι φωτοβολταϊκών προς εξομοίωση

Ο φωτοβολταϊκός εξομοιωτής που υλοποιήθηκε, δοκιμάστηκε πειραματικά στην προσομοίωση των φωτοβολταϊκών Siemens – Solar module SM10 και Siemens – Solar module SM6. Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για διάφορα πραγματικά ωμικά φορτία, με τιμές αντίστασης από 0 μέχρι 1000 Ω. Επίσης υλοποιήθηκε και κύκλωμα φόρτισης συσσωρευτή (μπαταρίας), που αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση φορτίου φωτοβολταϊκού.



Σχήμα 6.2 Φωτογραφίες των solar modules SM10 και SM6.

Τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών αυτών συνοψίζονται σχηματικά ως εξής :

Solar module	
Model:	SM10
Rated power:	10 Watts
Limited warranty:	10 Years

Solar module SM10	
Electrical parameters	
Maximum power rating P_{max} [W _p] ¹⁾	10
Rated current I_{MPP}	0.61
Rated voltage V_{MPP} [V]	16.3
Short circuit current I_{sc} [A]	0.71
Open circuit voltage V_{oc} [V]	19.9
Thermal parameters	
NOCT ²⁾ [°C]	45±2
Temp. coefficient: short-circuit current	1.2 mA / °C
Temp. coefficient: open-circuit voltage	-0.077 V / °C
Qualification test parameters ⁴⁾	
Temperature cycling range [°C]	-40 to +85
Humidity freeze, Damp heat [%RH]	85
Maximum system voltage [V]	25
Wind Loading PSF [M/m ²]	50 [2400]
Maximum distortion ³⁾ [°]	1.2
Hailstone impact Inches [mm]	1.0 [25]
MPH [m/s]	52 [v=23]
Weight Pounds [kg]	3.7 [1.8]

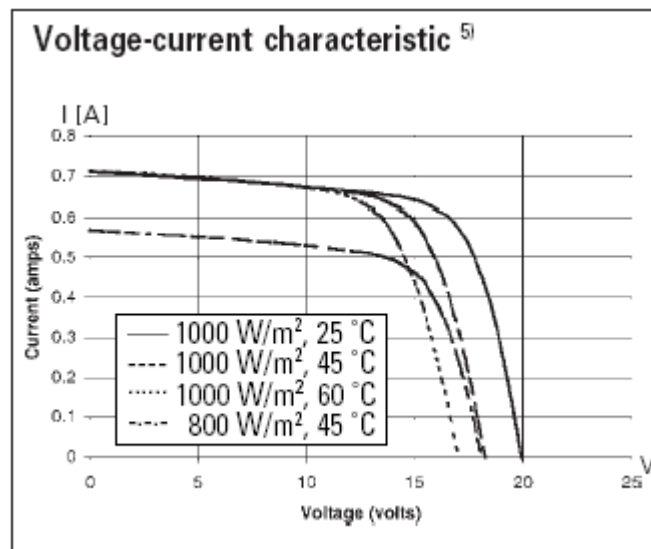
Σχήμα 6.3 Χαρακτηριστικά του solar module SM10

Solar module	
Model:	SM6
Rated power:	6 Watts
Limited warranty:	10 Years

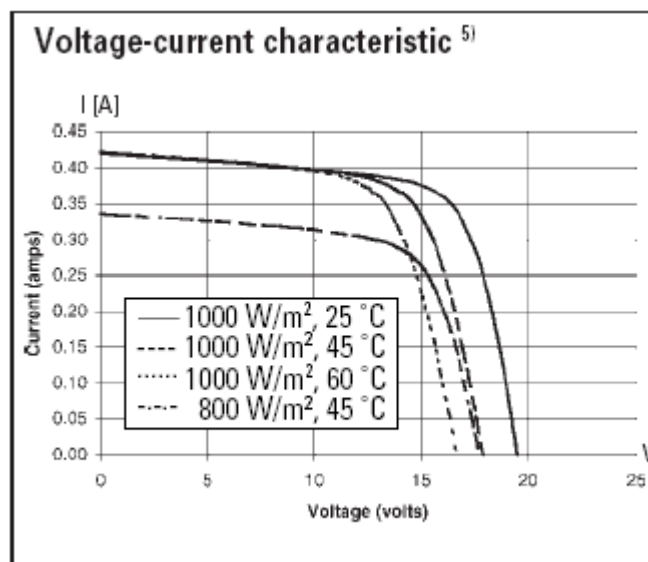
Solar module SM6		
Electrical parameters		
Maximum power rating P_{\max}	[W _p] ¹⁾	6
Rated current I_{MPP}	[A]	0.39
Rated voltage V_{MPP}	[V]	15.0
Short circuit current I_{sc}	[A]	0.42
Open circuit voltage V_{oc}	[V]	19.5
Thermal parameters		
NOCT ²⁾	[°C]	45±2
Temp. coefficient: short-circuit current		1.2 mA / °C
Temp. coefficient: open-circuit voltage		-0.077 V / °C
Qualification test parameters ⁴⁾		
Temperature cycling range	[°C]	-40 to +85
Humidity freeze, Damp heat	[% RH]	85
Maximum system voltage	[V]	25
Wind loading PSF	[N/m ²]	50 [2400]
Maximum distortion ³⁾	[°]	1.2
Hailstone impact	Inches [mm]	1.0 [25]
	MPH [m/s]	52 [v=23]
Weight	Pounds [kg]	2.2 [1.0]

Σχήμα 6.4 Χαρακτηριστικά του solar module SM6

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-ρεύματος όπως αυτές δίνονται από τον κατασκευαστή είναι οι εξής:



Σχήμα 6.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-ρεύματος για το SM10



Σχήμα 6.6 Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-ρεύματος για το SM6

6.4 Χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος εξομοίωσης

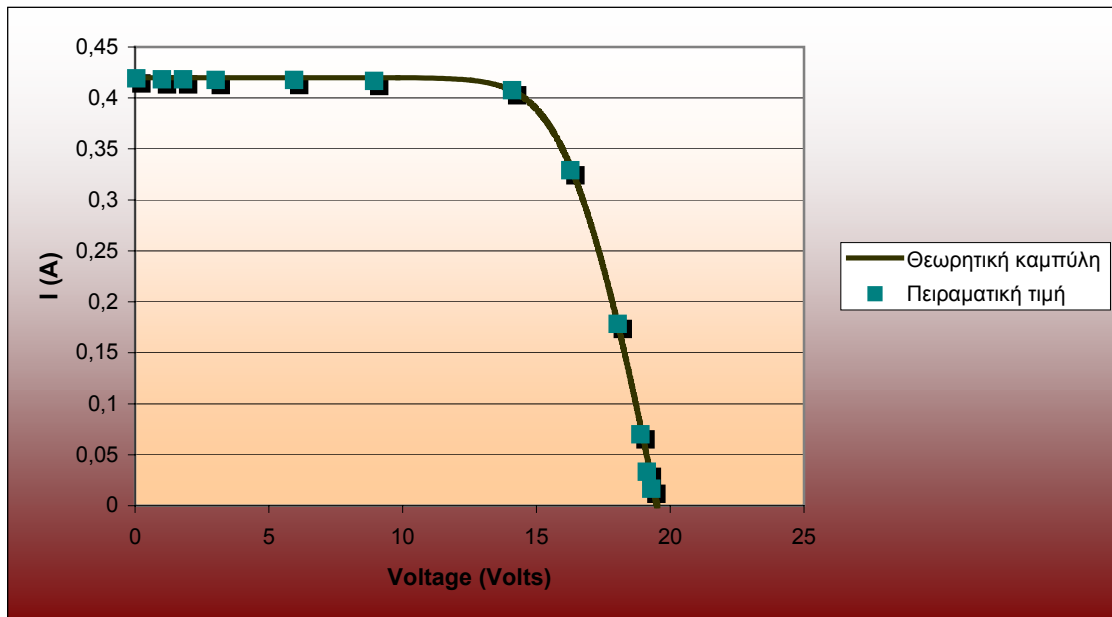
Ο εξομοιωτής φωτοβολταϊκού έχει σαν κύριο μέρος της υλοποίησης του έναν buck converter, του οποίου η τάση τροφοδοσίας V_{in} μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή. Η τιμή αυτή επιλέγεται ανάλογα με την τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του φωτοβολταϊκού που θα εξομοιωθεί. Για τους τύπους των φωτοβολταϊκών Siemens – Solar module SM10 και SM6 κρίθηκε σαν κατάλληλη τιμή της τάσης εισόδου, η $V_{in} = 30V$ (με τάση τροφοδοσίας του driver του MOSFET $V_{CC} = 15V$). Τα δύο αυτά φωτοβολταϊκά έχουν σαν μέγιστη τάση εξόδου τους, την τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} , που έχει τιμή $V_{oc} = 19.9V$ και $V_{oc} = 19.5V$ για το SM10 και το SM6 αντίστοιχα. Η διαφορά της τιμής της τάσης τροφοδοσίας σε σχέση με την τιμή της επιθυμητής μέγιστης τάσης εξόδου του εξομοιωτή δεν είναι πολύ μικρή. Αυτό είναι σκόπιμο, για τον λόγο ότι αποδεικνύεται πειραματικά πως με τον τρόπο αυτόν εξασφαλίζεται ακρίβεια και αξιοπιστία στην εκάστοτε τιμή της επιθυμητής τάσης εξόδου του εξομοιωτή. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα δικαιολογείται και από την παρατήρηση ότι όσο συγκλίνουν οι τιμές των τάσεων εισόδου και εξόδου του συστήματος εξομοίωσης, τόσο μεγαλύτερο duty cycle της PWM κυματομορφής απαιτείται, οδηγώντας το σύστημα ελέγχου να λειτουργεί σε οριακά επίπεδα και να αυξάνεται η πιθανότητα ανακρίβειας των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια παρατείνονται χαρακτηριστικές καμπύλες του ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την τάση εξόδου, του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού, για διάφορες συνθήκες λειτουργίας και ωμικά φορτία, με τιμές αντίστασης από 0 μέχρι 1000 Ω . Στα διαγράμματα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές της τάσης για κάθε φορτίο πάνω στην θεωρητική χαρακτηριστική καμπύλη του φωτοβολταϊκού για τις συγκεκριμένες συνθήκες.

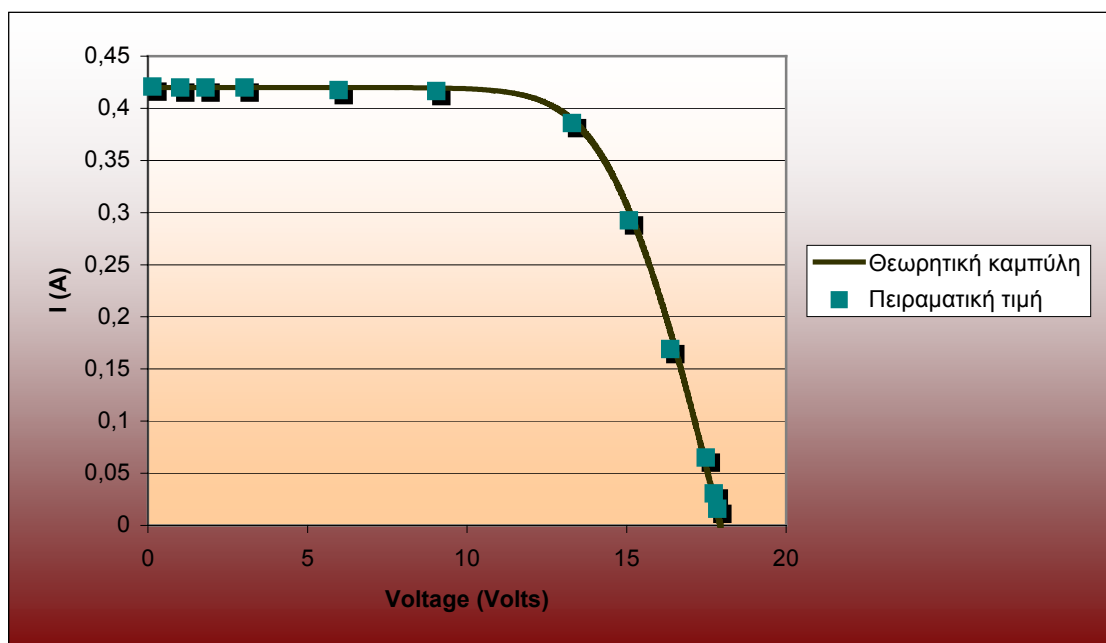
6.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες εξόδου τάσης – ρεύματος

Siemens – Solar module SM6

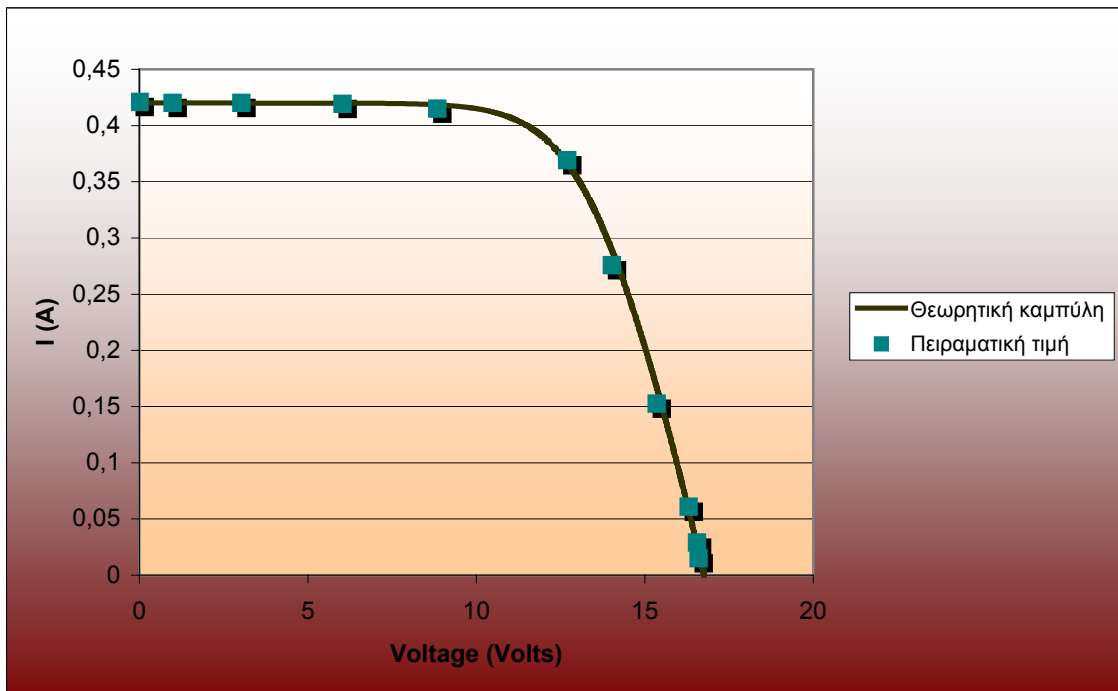
- Για τις κανονικές συνθήκες, $T_c = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $G = 1000\text{ W/m}^2$, η χαρακτηριστική καμπύλη του ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την τάση εξόδου, του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού, είναι η εξής:



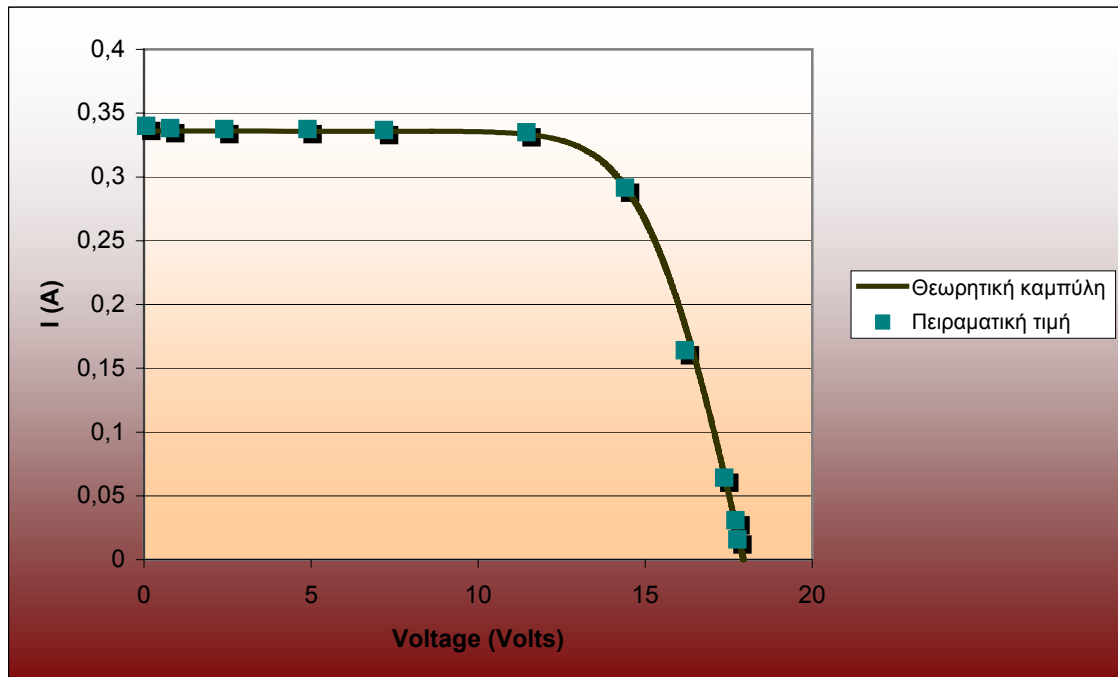
- Για συνθήκες, $T_c = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $G = 1000\text{ W/m}^2$, η χαρακτηριστική καμπύλη του ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την τάση εξόδου, είναι η εξής:



- Για συνθήκες, $T_c = 60\text{ }^\circ\text{C}$ και $G = 1000\text{ W/m}^2$, η χαρακτηριστική καμπύλη που προκύπτει, είναι η εξής:

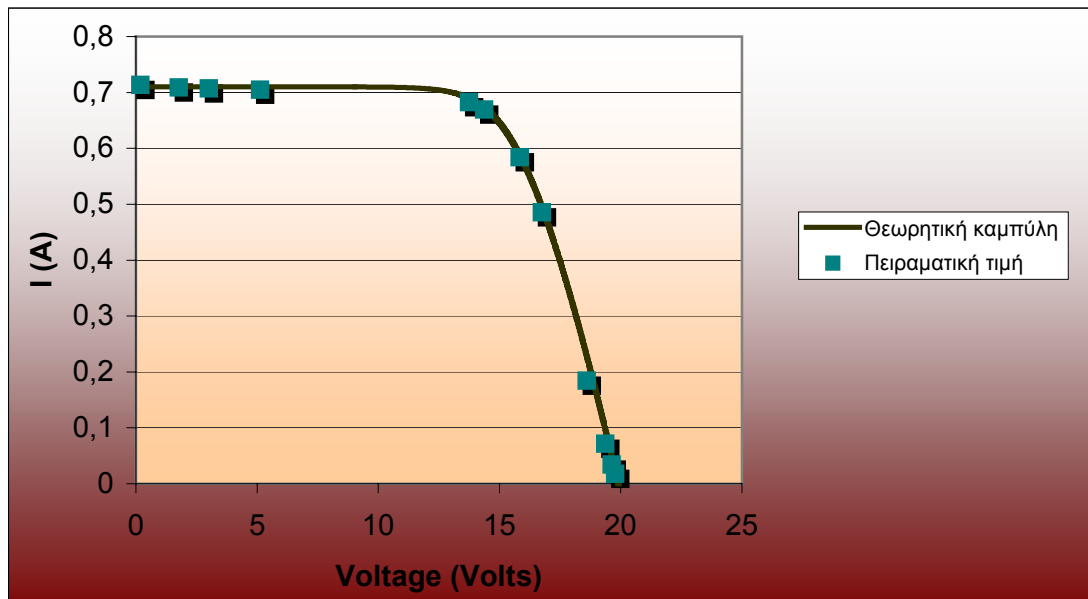


- Για συνθήκες, $T_c = 45\text{ }^\circ\text{C}$ και $G = 800\text{ W/m}^2$, η χαρακτηριστική καμπύλη του ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την τάση εξόδου, είναι η εξής:

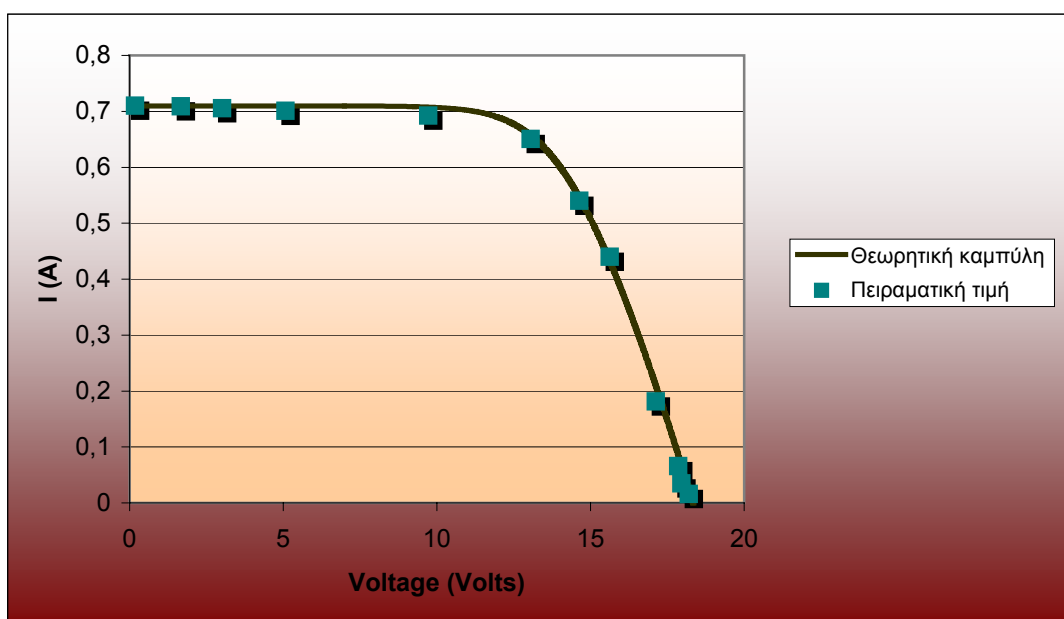


Siemens – Solar module SM10

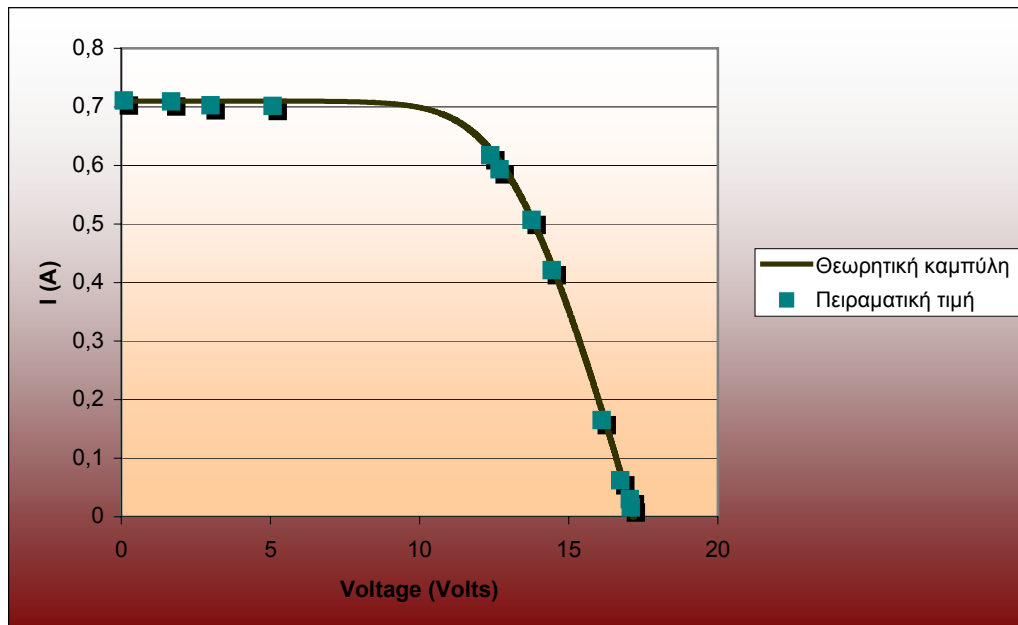
- Για τις κανονικές συνθήκες, $T_c = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $G = 1000\text{ W/m}^2$, η χαρακτηριστική καμπύλη του ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την τάση εξόδου, του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού, είναι η εξής:



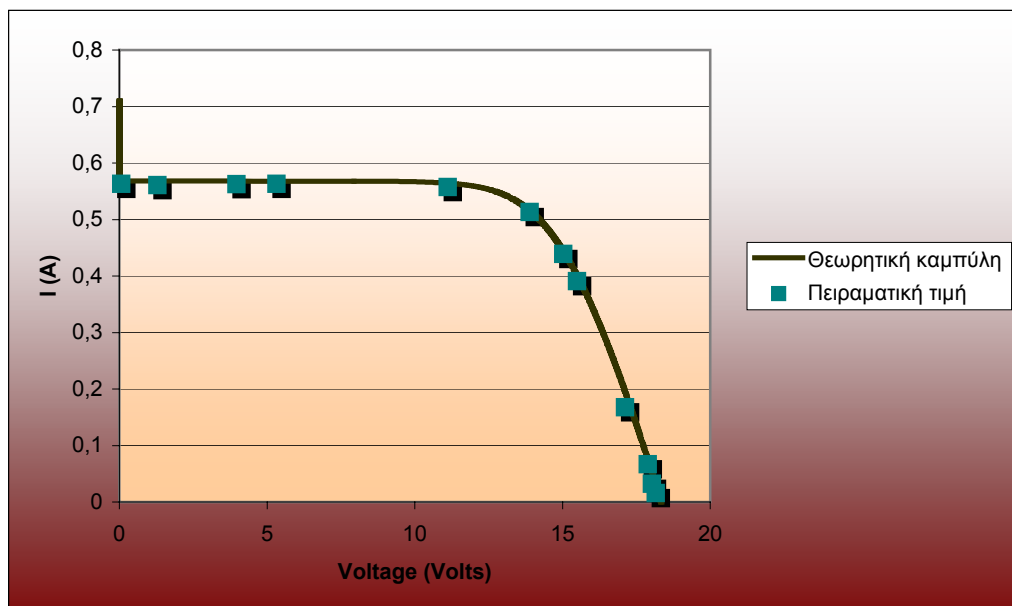
- Για συνθήκες, $T_c = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $G = 1000\text{ W/m}^2$, η χαρακτηριστική καμπύλη του ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την τάση εξόδου, είναι η εξής:



- Για συνθήκες λειτουργίας, $T_c = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $G = 1000\text{ W/m}^2$, η χαρακτηριστική καμπύλη που προκύπτει, είναι η εξής:



- Για συνθήκες, $T_c = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $G = 800\text{ W/m}^2$, η χαρακτηριστική καμπύλη του ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την τάση εξόδου του εξομοιωτή, είναι η εξής:



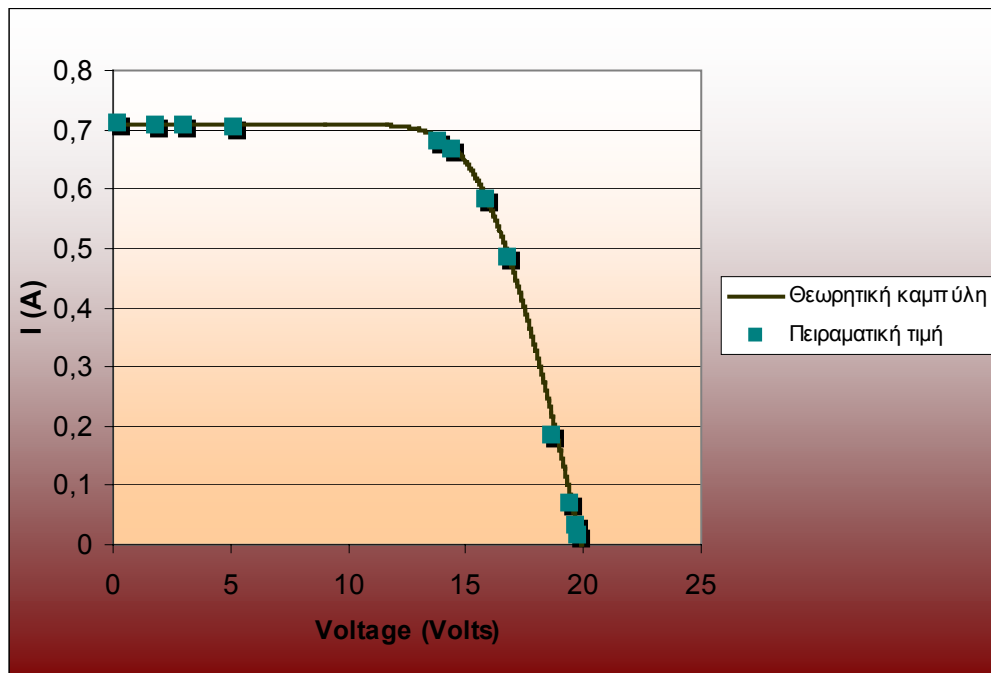
6.6 Τάση τροφοδοσίας του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού

Ο εξομοιωτής φωτοβολταϊκού έχει σαν κύριο μέρος της υλοποίησης του έναν buck converter, του οποίου η τάση τροφοδοσίας V_{in} μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή. Η τιμή αυτή επιλέγεται ανάλογα με την τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του φωτοβολταϊκού που θα εξομοιωθεί.

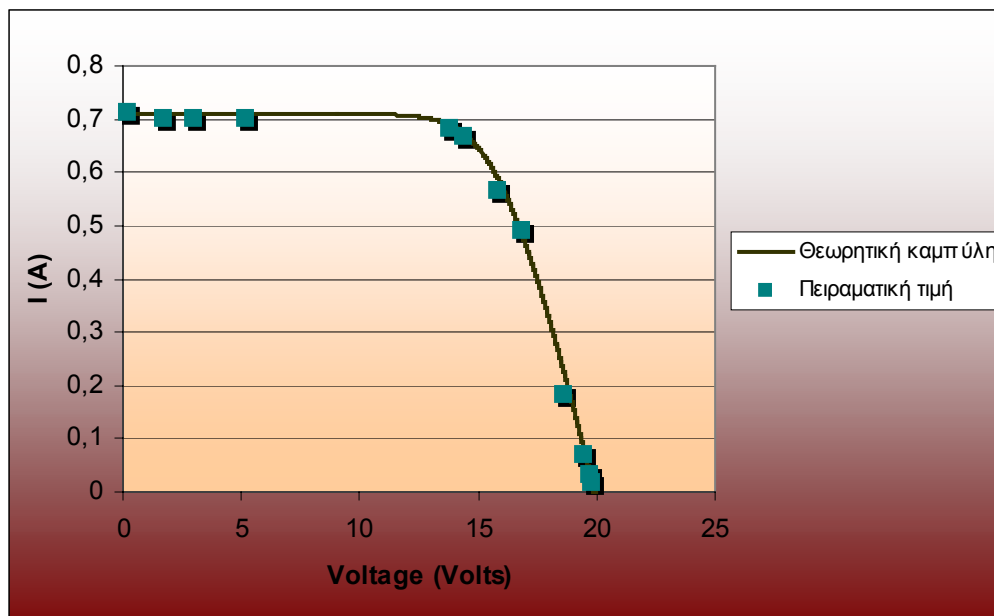
Η τιμή της προτεινόμενης ελάχιστης τάσης τροφοδοσίας του συστήματος του εξομοιωτή, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ορθή λειτουργία του, για την εξομοίωση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών Siemens Solar module SM10 και SM6, είναι 30V(d.c.). Το σύστημα, όπως ήταν αναμενόμενο, μπορεί να λειτουργεί αμετάβλητα και το ίδιο αποδοτικά για μεγαλύτερες τιμές της τάσης τροφοδοσίας. Αυτό επιβεβαιώνεται και πειραματικά, με μετρήσεις για τις ίδιες συνθήκες εξομοίωσης και τάσεις εισόδου : $V_{in} = 30V$ και $V_{in} = 40V$.

- ο Για την προσομοίωση του φωτοβολταϊκού Siemens SM10, στις κανονικές συνθήκες, $T_c = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $G = 1000\text{ W/m}^2$, οι χαρακτηριστικές καμπύλες του ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την τάση εξόδου, του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού για διάφορες τιμές φορτίου, είναι οι εξής:

□ Χαρακτηριστική καμπύλη για τάση εισόδου $V_{in} = 30V$



□ Χαρακτηριστική καμπύλη για τάση εισόδου $V_{in} = 40V$



Όπως φαίνεται από την σύγκριση των δύο γραφικών παραστάσεων, τα πειραματικά αποτελέσματα της λειτουργίας του συστήματος του εξομοιωτή για τις δύο διαφορετικές τάσεις εισόδου, παρουσιάζουν πλήρη ομοιότητα. Το ίδιο

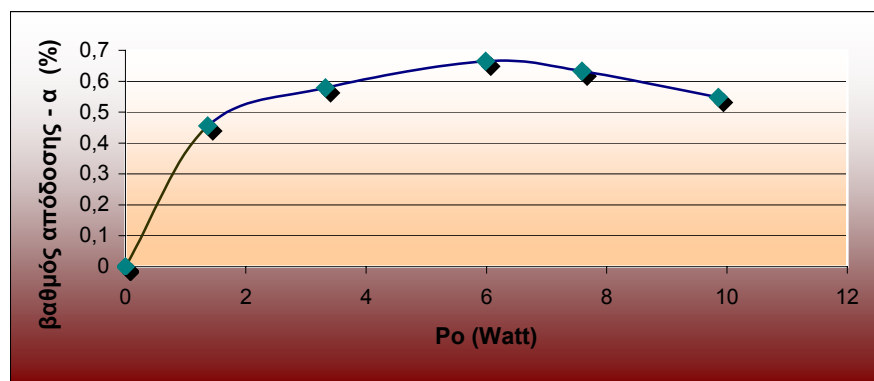
συμπέρασμα θα προέκυπτε και για κάθε άλλη τιμή τάσης τροφοδοσίας, μεγαλύτερης των 30V(d.c.).

6.7 Βαθμός απόδοσης του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού

Προσομοιώνουμε το φωτοβολταϊκό Siemens SM10, στις κανονικές συνθήκες, $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$ και $G = 1000\text{ W/m}^2$, και με τάση τροφοδοσίας του buck converter $V_{in} = 30\text{V}$. Για διάφορες τιμές της αντίστασης φορτίου R_L , υπολογίζουμε πειραματικά την ισχύ εισόδου, την ισχύ εξόδου και τον βαθμό απόδοσης της διάταξης, από τις σχέσεις :

$$P = V \cdot I \quad \text{και} \quad \alpha = P_o / P_{in}$$

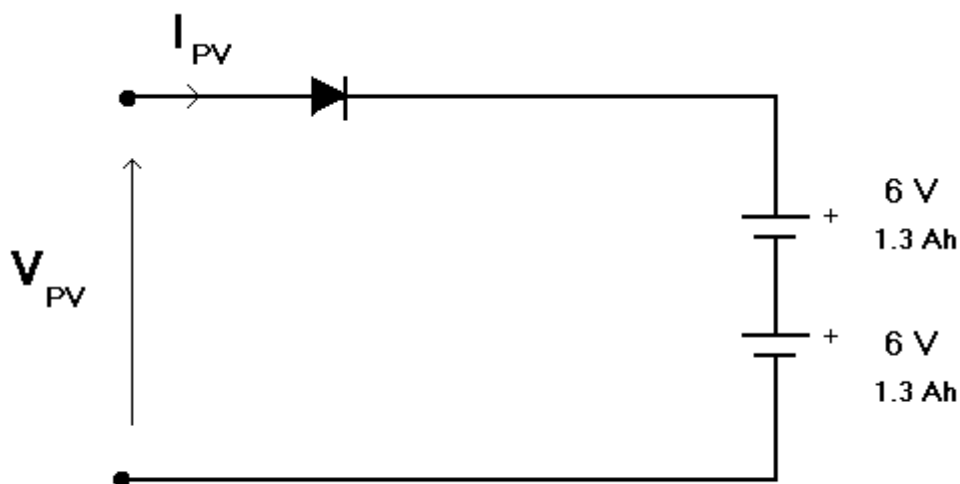
Η γραφική παράσταση του βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου του εξομοιωτή, είναι η εξής :



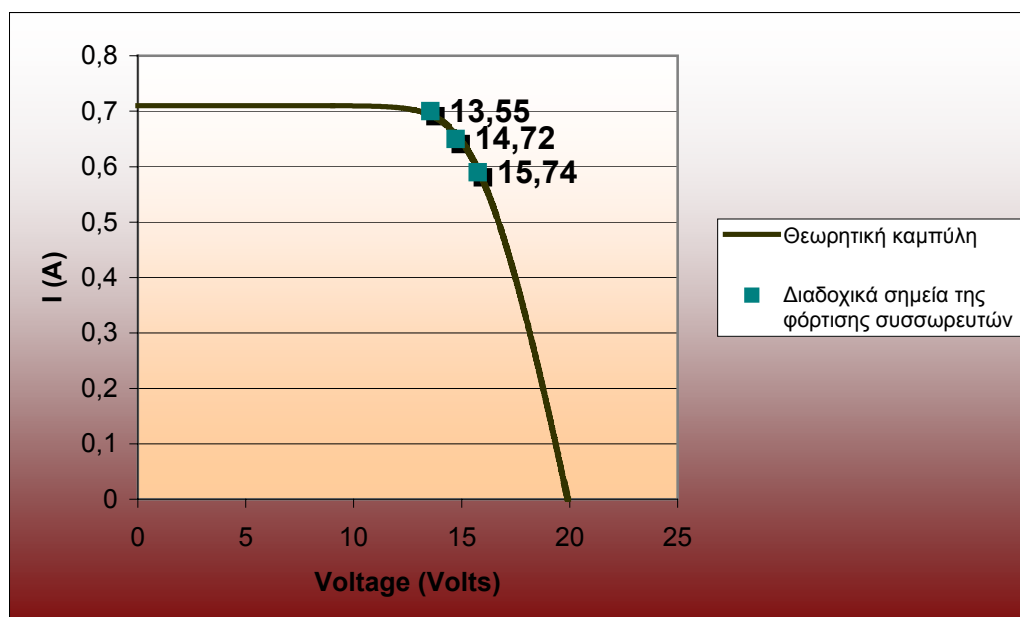
Από την γραφική παράσταση παρατηρείται ότι ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα και είναι δυνατό να αυξηθεί περισσότερο, μειώνοντας την τάση τροφοδοσίας του buck converter του εξομοιωτή.

6.8 Συσσωρευτής μολύβδου - οξέος ως φορτίο του συστήματος εξομοίωσης

Χαρακτηριστική περίπτωση φορτίου του φωτοβολταϊκού είναι το κύκλωμα φόρτισης συσσωρευτή. Μια κατάλληλη συνδεσμολογία είναι αυτή που ακολουθεί, στην οποία δύο συσσωρευτές μολύβδου – οξέος συνδέονται σε σειρά με δίοδο.



Πειραματικές τιμές του ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την τάση εξόδου, του εξομοιωτή φωτοβολταϊκού για τις κανονικές συνθήκες, $T_C = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $G = 1000\text{ W/m}^2$, και για το Siemens SM10, παρουσιάζονται σε συνδυασμό με την θεωρητική χαρακτηριστική καμπύλη του φωτοβολταϊκού :



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ - ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες των φωτοβολταϊκών μπορούν να μοντελοποιηθούν θεωρητικά. Υφίσταται όμως η ανάγκη της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων μέσω πειραματισμών με διάφορα φορτία, όπως για παράδειγμα ωμικά, συσσωρευτές (μπαταρίες), μετατροπείς συνεχούς τάσης (d.c.), και συνδεδεμένα φορτία μέσω inverter. Για τις ανάγκες κάθε τέτοιου φορτίου μπορεί να χρειαστεί να δοκιμαστούν διαφορετικοί τύποι και μεγέθη φωτοβολταϊκών.

Οι δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες είναι δαπανηρές, χρονοβόρες και εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες. Επίσης στην περιοχή των δοκιμών πρέπει να παρέχεται επαρκής ασφάλεια και προστασία από τα καιρικά φαινόμενα. Τέλος μπορεί να προκύψουν καθυστερήσεις στις δοκιμές, εξαιτίας κακών καιρικών συνθηκών και βλαβών του συστήματος. Ο φωτοβολταϊκός εξομοιωτής χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση όλων αυτών των προβλημάτων.

Το σύστημα που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική διαθέτει σαν βασικό μέρος του έναν μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (buck converter). Μετατροπή του συστήματος θα μπορούσε να αποτελέσει η αντικατάσταση αυτού του μετατροπέα με έναν μετατροπέα ανύψωσης τάσης (boost converter). Έτσι η τάση εξόδου του συστήματος, για ίδιες τιμές τάσης εισόδου, θα είναι μεγαλύτερη. Το αποτέλεσμα που θα προκύψει από την μετατροπή αυτή είναι η δυνατότητα εξομοίωσης φωτοβολταϊκών με μεγαλύτερη τάση ανοιχτοκύκλωσης.

Σημαντική επέκταση του συστήματος μπορεί να αποτελέσει και η χρήση του για εξομοίωση ανεμογεννητριών. Σε αυτή την περίπτωση δεν απαιτούνται μεγάλες αλλαγές στα διάφορα μέρη του συστήματος, εκτός από την ανάπτυξη

του σχετικού αλγορίθμου για τον προγραμματισμό του επεξεργαστή DSP με το κατάλληλο θεωρητικό μοντέλο εξομοίωσης ανεμογεννητριών.

Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης συμπίπτουν με τα θεωρητικά αποτελέσματα σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η ικανότητα εξομοίωσης διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών κάτω από διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας, χρησιμοποιώντας πραγματικά φορτία. Οι αλλαγές που απαιτούνται, σε ορισμένες περιπτώσεις, αφορούν την αλλαγή των διαιρετών τάσης με μεγαλύτερους και την αύξηση της τιμής της τάσης εισόδου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εξομοίωση τύπων φωτοβολταϊκών με μεγαλύτερη τάση ανοιχτοκύκλωσης. Ο εξομοιωτής αυτός είναι μία πολύ οικονομική, αποδοτική και αξιόπιστη λύση πειραματικού ελέγχου λειτουργίας φωτοβολταϊκών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αυτόνομες εφαρμογές ηλιακής ενέργειας μικρού και μεσαίου μεγέθους, Μαλαμής Β, Αθήνα 1999 [Book]
2. Solar Electricity. Engineering of Photovoltaic Systems, Eduardo Lorenzo [Book]
3. Φωτοβολταϊκή Μετατροπή, Κ. Καγκαράκης [Book]
4. Power Electronics, Mohan & Undeland & Robbins, John Wiley & Sons Inc, [Book]
5. TMS320C3x User's Guide, Texas Instruments, SPRU031D [Book]
6. Interfacing the TLV2544/TLV2548 ADC to the TMS320C31 DSP, Texas Instruments, SLAA101[Appl.Note]
7. TLV2548, Texas Instruments, [Datasheet]

Διευθύνσεις στο διαδίκτυο

- Texas Instruments, www.ti.com
- DsignT, www.dsignt.de
- Spectrum Digital, www.spectrumdigital.com
- Siemens, www.siemenssolar.co.uk
- International Rectifier, www.irf.com
- National Semiconductor, www.national.com