



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ
ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ

ΜΕΛΕΤΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ

Μαρία Ταϊπλιάδου

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Υπεύθυνος
Βάβουλας Αλέξανδρος
Ε.ΔΙ.Π.

Λαμία, 2017



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ
ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ**

Μαρία Ταϊπλιάδου

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων
Βάβουλας Αλέξανδρος
Ε.ΔΙ.Π.

Λαμία, 2017

Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσιάσή τους ως δική μου εργασία.
3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια
4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία:/...../20.....

Ο – Η Δηλ.

(Υπογραφή)

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.

**ΜΕΛΕΤΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ**

Μαρία Ταϊπλιάδου

Τριμελής Επιτροπή:

Βάβουλας Αλέξανδρος, Ε.ΔΙ.Π. (επιβλέπων)

Σανδαλίδης Χαρίλαος, Επίκουρος Καθηγητής

Δελήμπασης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής

Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία προτείνεται ένα βελτιωμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο μπορεί να βρει εφαρμογή στα συστήματα επικοινωνίας ορατού φωτός. Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιεί το ισοδύναμο μοντέλο δύο διόδων ενός φωτοβολταϊκού πάνελ ως δέκτη, αντί μιας φωτοδίοδου.

Αρχικά αναλύονται οι βασικές αρχές των ημιαγωγών, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο καθώς και η δομή ενός τυπικού φωτοβολταϊκού συστήματος. Αναλύονται τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και μεγέθη της ηλιακής κυψελίδας και παρουσιάζονται μερικά ισοδύναμα κυκλώματα που μοντελοποιούν τη λειτουργία της. Στη συνέχεια εξηγούμε τι ορίζεται ως σύστημα επικοινωνίας ορατού φωτός και αναφερόμαστε στα μέρη από τα οποία αποτελείται, δηλαδή στην πηγή φωτός που είναι μία δίοδος εκπομπής φωτός και στον οπτικό ανιχνευτή, που είναι μία φωτοδίοδος.

Έπειτα παραθέτουμε την ανάλυση και εφαρμογή μεθόδων για την εξαγωγή παραμέτρων των κυκλωμάτων απλής και διπλής δίοδου για συλλογή ενέργειας. Στο επόμενο κεφάλαιο επεκτείνουμε στην ανάλυση και εφαρμογή μεθόδων για την εξαγωγή παραμέτρων των κυκλωμάτων απλής και διπλής δίοδου για μεταφορά πληροφορίας, χρησιμοποιώντας ως δέκτες τα AC ισοδύναμα μοντέλα απλής και διπλής δίοδου για συλλογή ενέργειας. Τέλος, παραθέτουμε τα αποτελέσματα που έχουμε συλλέξει από τα δύο προηγούμενα κεφάλαια με την παρουσίαση των κυκλωμάτων απλής και διπλής δίοδου για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μεταφορά πληροφορίας.

Λέξεις κλειδιά:

Ημιαγωγός, φωτοβολταϊκό φαινόμενο, φωτοβολταϊκό σύστημα, ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ηλιακής κυψελίδας, ισοδύναμο κύκλωμα, επικοινωνία ορατού φωτός, δίοδος εκπομπής φωτός, φωτοδίοδος, μοντέλο απλής δίοδου, μοντέλο διπλής δίοδου, συλλογή ενέργειας, μεταφορά πληροφορίας.

Abstract

This paper proposes an improved electronic circuit that can be applied in visible light communication systems. This circuit uses the equivalent two diode model of a photovoltaic panel as a receiver, instead of a photodiode.

Initially, the basic principles of semiconductors, the photovoltaic effect as well as the structure of a typical photovoltaic system, are analyzed. The basic electrical characteristics and parameters of the solar cell are analyzed and some equivalent circuits modeling the function of the solar cell are presented. We then explain what is defined as a visible light communication system and we refer to the parts it consists of, namely the light source that is a light emitting diode and the optical detector, which is a photodiode.

We then describe the analysis and implementation of methods for extracting parameters of the one and two diode models for energy harvesting. In the next chapter we extend into the analysis and implementation of methods for extracting parameters of one and two diode models for communication, using the AC equivalent of the one and two diode models for energy harvesting as a receiver. Finally, we list the results we have gathered from the previous two chapters with the presentation of one and two diode models for simultaneous energy harvesting and communication.

Keywords:

Semiconductor, photovoltaic effect, photovoltaic system, electrical characteristics of the solar cell, equivalent circuit, visible light communication, light emitting diode, photodiode, one diode model, two diode model, energy harvesting, communication.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1 Ορισμός του προβλήματος.....	15
1.2 Συνεισφορά της πτυχιακής.....	16
2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	17
2.1 Περιγραφή της διόδου.....	17
2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	21
2.3 Δομή Φωτοβολταϊκού συστήματος.....	24
2.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ηλιακής κυψελίδας.....	26
2.5 Ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα.....	30
3. ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΟΡΑΤΟΥ ΦΩΤΟΣ	32
3.1 Εισαγωγή.....	32
3.2 Λειτουργία και διάταξη συστήματος VLC.....	34
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ PV ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	38
4.1 Εισαγωγή.....	38
4.2 Μοντέλο απλής διόδου.....	39
4.3 Μοντέλο διπλής διόδου.....	45
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ PV ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ	54
5.1 Εισαγωγή.....	54
5.2 Μοντέλο απλής διόδου.....	54
5.3 Μοντέλο διπλής διόδου.....	62
6. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ PV ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ	70
6.1 Εισαγωγή.....	70
6.2 Μοντέλο απλής διόδου.....	70
6.3 Μοντέλο διπλής διόδου.....	74
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	78
7.1 Συμπεράσματα.....	78
7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις.....	78
8. ΑΝΑΦΟΡΕΣ	80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	83

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Κυκλωματικό σύμβολο της διόδου	18
Σχήμα 2: Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) της διόδου	21
Σχήμα 3: Μοντέλο ενεργειακών ζωνών για έναν ημιαγωγό.....	22
Σχήμα 4: Φωτοβολταϊκές συνθέσεις	24
Σχήμα 5: Δομή ηλιακής κυψελίδας.....	25
Σχήμα 6: PV μοντέλο απλής διόδου.....	26
Σχήμα 7: Η χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) και η καμπύλη ισχύος (P-V) της ηλιακής κυψελίδας.....	28
Σχήμα 8: Η επίδραση της ακτινοβολίας (αριστερά) και της θερμοκρασίας (δεξιά) στην χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) της ηλιακής κυψελίδας.	28
Σχήμα 9: Η επίδραση της αντίστασης R_S (αριστερά) και της αντίστασης R_{SH} (δεξιά) στην χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) της ηλιακής κυψελίδας.	29
Σχήμα 10: Το φάσμα της Ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	33
Σχήμα 11: Λειτουργία διόδου εκπομπής φωτός.....	35
Σχήμα 12: PV μοντέλο απλής διόδου για συλλογή ενέργειας	39
Σχήμα 13: Εύρεση σημείου τομής των γραφικών παραστάσεων	43
Σχήμα 14. Εύρεση σημείου τομής των γραφικών παραστάσεων	44
Σχήμα 15. PV μοντέλο διπλής διόδου για συλλογή ενέργειας	45
Σχήμα 16: PV μοντέλο απλής διόδου για μετάδοση πληροφορίας.....	54
Σχήμα 17: Μοντέλο με ισοδύναμο Thevenin για μετάδοση πληροφορίας	55
Σχήμα 18: Συχνотική απόκριση ηλιακού πάνελ, για $C_0 = 1 \mu\text{F}$	56
Σχήμα 19: Συχνотική απόκριση ηλιακού πάνελ, για $C_0 = 100 \text{ nF}$	56
Σχήμα 20: Συχνотική απόκριση μοντέλου.....	58
Σχήμα 21: Fitting συχνотικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων	58
Σχήμα 22: Συχνотική απόκριση μοντέλου.....	59
Σχήμα 23: Fitting συχνотικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων	59
Σχήμα 24: Συχνотική απόκριση μοντέλου.....	60
Σχήμα 25: Fitting συχνотικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων	60
Σχήμα 26: Συχνотική απόκριση μοντέλου.....	61
Σχήμα 27: Fitting συχνотικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων	61
Σχήμα 28: PV μοντέλο διπλής διόδου για μετάδοση πληροφορίας.....	62

Σχήμα 29: Μοντέλο με ισοδύναμο Thevenin για μετάδοση πληροφορίας	63
Σχήμα 30: Συχνοτική απόκριση μοντέλου.....	65
Σχήμα 31: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων	66
Σχήμα 32: Συχνοτική απόκριση μοντέλου.....	66
Σχήμα 33: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων	67
Σχήμα 34: Συχνοτική απόκριση μοντέλου.....	67
Σχήμα 35: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων	68
Σχήμα 36: Συχνοτική απόκριση μοντέλου.....	68
Σχήμα 37: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων	69
Σχήμα 38: PV μοντέλο απλής διόδου για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μετάδοση πληροφορίας.....	70
Σχήμα 39: Μοντέλο με ισοδύναμο Thevenin για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μετάδοση πληροφορίας.....	71
Σχήμα 40: Συχνοτική απόκριση ηλιακού πάνελ, για $C_0 = 1 \mu\text{F}$	72
Σχήμα 41: Συχνοτική απόκριση ηλιακού πάνελ, για $C_0 = 100 \text{ nF}$	72
Σχήμα 42: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων	73
Σχήμα 43: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων	73
Σχήμα 44: PV μοντέλο διπλής διόδου για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μετάδοση πληροφορίας.....	74
Σχήμα 45: Μοντέλο με ισοδύναμο Thevenin για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μετάδοση πληροφορίας.....	75
Σχήμα 46: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων	76
Σχήμα 47: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων	76

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Κατάλογος ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων.....	30
Πίνακας 2: Το ορατό φάσμα.....	33
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά πάνελ TSM-225PC05.....	42
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά πάνελ AP-7105/A-75A	43
Πίνακας 5: Κυκλώματα για συλλογή ενέργειας απλής διόδου.....	44
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά πάνελ Kyocera KD245GH-4FB2	51
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά πάνελ Sanyo HIT-240 HDE4	52
Πίνακας 8: Κυκλώματα για συλλογή ενέργειας διπλής διόδου	52
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά πάνελ BP Solar SX 305M	57
Πίνακας 10: Κυκλώματα για μεταφορά πληροφορίας απλής διόδου για το μοντέλο πάνελ BP Solar SX 305M.....	61
Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά πάνελ BP Solar SX 305M	64
Πίνακας 12: Κυκλώματα για μεταφορά πληροφορίας διπλής διόδου για το μοντέλο πάνελ BP Solar SX 305M.....	69
Πίνακας 13: Κυκλώματα απλής διόδου για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μεταφορά πληροφορίας για το μοντέλο πάνελ BP Solar SX 305M.....	74
Πίνακας 14: Κυκλώματα διπλής διόδου για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μεταφορά πληροφορίας για το μοντέλο πάνελ BP Solar SX 305M.....	77

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ορισμός του προβλήματος

Η ασύρματη μεταφορά δεδομένων έχει καταστεί βασική ανάγκη στην ιδιωτική και επαγγελματική μας ζωή. Υπάρχουν περισσότερα από 7 δισεκατομμύρια smartphones που χρησιμοποιούνται κυρίως για προσωπική επικοινωνία, ενώ ραγδαία αύξηση παρατηρείται και στον αριθμό των φορητών συσκευών, όπως τα έξυπνα ρολόγια, οι συσκευές παρακολούθησης υγείας και τα ψηφιακά γυαλιά [1]. Στο μέλλον, θα υπάρχουν επίσης 100 δισεκατομμύρια συσκευές Internet-of-Things (IoT) που θα στηρίξουν τα έξυπνα σπίτια και τις έξυπνες πόλεις. Έτσι, ο σύγχρονος άνθρωπος μέσω της εξέλιξης της τεχνολογίας, αναζητά συνεχώς πιο αποδοτικά συστήματα για πιο γρήγορη και αξιόπιστη ανταλλαγή πληροφορίας.

Προς το παρόν, όλες αυτές οι ψηφιακές ασύρματες υπηρεσίες χρησιμοποιούν το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων (radiofrequency – RF) που αποτελεί μέρος του ευρύτερου ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ωστόσο, οι ζώνες χαμηλότερης συχνότητας που είναι οι πιο εύχρηστες και έχουν τις επιθυμητές ιδιότητες διάδοσης είναι ήδη κατειλημμένες για πολυάριθμες χρήσεις. Κατά συνέπεια, υπάρχουν ελάχιστοι εφεδρικοί πόροι για την υποστήριξη της εκθετικής αύξησης της ζήτησης που θα προκύψει στα επόμενα χρόνια.

Τα συστήματα επικοινωνιών ορατού φωτός (Visible Light Communications – VLC), τα οποία χρησιμοποιούν το οπτικό φάσμα ως μέσο μετάδοσης της πληροφορίας, αποτελούν ένα εξαιρετικά ελκυστικό μέσο για ασύρματες επικοινωνίες. Η βασική αρχή των VLC είναι μία φωτοδίοδος (δέκτης) η οποία μετατρέπει το οπτικό σήμα από μια LED (πομπός) σε ηλεκτρικό σήμα. Το οπτικό φάσμα προσφέρει ένα εύρος ζώνης που είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από αυτό που προσφέρει το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων, ενώ ταυτόχρονα είναι εξαιρετικά φιλικό προς το περιβάλλον. Με την τεχνολογία αυτή λοιπόν θα μπορούσαμε να αντιμετωπίσουμε επαρκώς τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις που προκύπτουν στις ασύρματες επικοινωνίες.

Παράλληλα, ο σύγχρονος άνθρωπος έχει να αντιμετωπίσει ένα ακόμη πιο κρίσιμο ζήτημα, την ενεργειακή κρίση. Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος σε συνδυασμό με τη μείωση των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων και τις δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον από την εκτεταμένη χρήση τους, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον στην εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Έτσι, ένας ακόμη τομέας της τεχνολογίας ο οποίος εξελίσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια, είναι η φωτοβολταϊκή τεχνολογία, καθώς

μέσω αυτής καθίσταται δυνατή η εκμετάλλευση της φωτεινής ενέργειας του ήλιου, κατά τον ίδιο τρόπο που μία φωτοδίοδος μετατρέπει τη φωτεινή ενέργεια του LED σε ηλεκτρική.

Τι θα γινόταν λοιπόν αν μπορούσαμε να έχουμε μια τεχνολογία η οποία θα ανταποκρίνεται και στις δύο ανάγκες που αναφέραμε προηγουμένως; Αυτό θα μπορούσε να γίνει πραγματικότητα αν σε ένα τυπικό VLC σύστημα αντικαταστήσουμε τη φωτοδίοδο με ένα ηλιακό πάνελ. Το βασικό πλεονέκτημα της εφαρμογής αυτής είναι το γεγονός ότι δεν χρειαζόμαστε πια επιπλέον ισχύ ώστε να λειτουργήσει ο δέκτης μας. Αυτό που τελικά θα προκύψει είναι μια ζεύξη, μέσω της οποίας μπορούμε να πετύχουμε μεταφορά πληροφορίας, από μία απλή λάμπα LED, και ταυτόχρονα τη φόρτιση της εκάστοτε συσκευής.

1.2 Συνεισφορά της πτυχιακής

Σε αυτή την εργασία, διερευνάμε τα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού κυκλώματος που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πάνελ ως δέκτη σε ένα VLC σύστημα. Δηλαδή, το φωτοβολταϊκό πάνελ έχει διπλή ιδιότητα καθώς όχι μόνο λαμβάνει το διαμορφωμένο οπτικό σήμα που εκπέμπεται από τον πομπό αλλά συλλέγει και ενέργεια προκειμένου να τη χρησιμοποιήσει για τη φόρτιση κάποιας συσκευής.

Το πρώτο κύκλωμα με την παραπάνω λειτουργία παρουσιάστηκε από στην εργασία [2], χρησιμοποιώντας το φωτοβολταϊκό μοντέλο απλής διόδου ως δέκτη. Στην παρούσα εργασία κατασκευάζουμε ένα κύκλωμα για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μετάδοση πληροφορίας χρησιμοποιώντας ως δέκτη το μοντέλο διπλής διόδου, το οποίο θα μπορούσαμε να πούμε ότι αποτελεί μία πιο βελτιωμένη έκδοχή του κυκλώματος απλής διόδου, καθώς ενσωματώνει ένα επιπλέον φυσικό χαρακτηριστικό της φωτοβολταϊκής κυψελίδας.

Αφού πρώτα αναλύσουμε τα κυκλώματα απλής και διπλής διόδου για συλλογή ενέργειας, καθώς και κάποιες ενδεικτικές μεθόδους για την εξαγωγή παραμέτρων των μοντέλων αυτών, προχωρούμε στην ανάλυση του κυκλώματος που παρουσιάζεται στην [2] , απλής διόδου, για μεταφορά πληροφορίας. Εξηγούμε τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να βρούμε τιμές για τις παραμέτρους του κυκλώματος αυτού και έπειτα συνεχίζουμε βρίσκοντας τιμές για τις παραμέτρους του αντίστοιχου κυκλώματος διπλής διόδου. Τέλος, αφού παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που υπολογίσαμε για το κύκλωμα που έχει προταθεί στην [2] για την ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μεταφορά πληροφορίας, προτείνουμε το αντίστοιχο κύκλωμα διπλής διόδου και παραθέτουμε τις τιμές των παραμέτρων που έχουμε υπολογίσει για αυτό.

2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Ο όρος "Φωτοβολταϊκό" προέρχεται από την ελληνική λέξη "φως" και τη μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής τάσης (Volt), του συστήματος SI. Ο όρος "Φωτοβολταϊκή τεχνολογία" περιγράφει τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από το φως καλείται φωτοβολταϊκό φαινόμενο και ανακαλύφθηκε από τον Alexandre-Edmond Becquerel το 1839. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο βασίζεται στη λειτουργία μιας διόδου, δηλαδή μιας επαφής p-n. Οπότε πριν μιλήσουμε για αυτό, θα πρέπει πρώτα να εξηγήσουμε τις βασικές αρχές μιας διόδου.

2.1 Περιγραφή της διόδου

2.1.1 Ημιαγωγοί

Ιστορικά, το γερμάνιο ήταν ένα από τα πρώτα υλικά ημιαγωγών που χρησιμοποιήθηκαν. Γρήγορα όμως τη θέση του πήρε το πυρίτιο, που σήμερα είναι το πιο διαδεδομένο ημιαγωγικό υλικό [3]. Παρόλο που το γερμάνιο χρησιμοποιείται ακόμα σε κάποιες εφαρμογές, εκτός από το πυρίτιο, σήμερα συναντάμε επίσης και το αρσενιούχο γάλιο και το φωσφίδιο του ινδίου. Τα σύνθετα αυτά ημιαγωγικά υλικά, είναι τα πιο σημαντικά υλικά για εφαρμογές οπτοηλεκτρονικής που περιλαμβάνουν τις διόδους εκπομπής φωτός (Light emitting diode – LED), τα laser και τους φωτοανιχνευτές.

Τα πραγματικά πλεονεκτήματα των ημιαγωγών φαίνονται όταν προστεθούν προσμίξεις στο υλικό, σε πολύ μικρές αλλά πολύ καλά ελεγχόμενες ποσότητες. Η διαδικασία αυτή λέγεται εμπλουτισμός με προσμίξεις, ή απλά εμπλουτισμός, και το υλικό που προκύπτει λέγεται εμπλουτισμένος ημιαγωγός. Για την περιγραφή των προσμίξεων θα αναφερθούμε στο πυρίτιο, το οποίο έχει τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα.

i. Προσμίξεις Δοτών

Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τις προσμίξεις δοτών στο πυρίτιο έχουν πέντε ηλεκτρόνια σθένους στην εξωτερική τους στοιβάδα και συνήθως είναι ο φώσφορος, το αρσενικό και το αντιμόνιο. Όταν ένα άτομο δότης αντικαθιστά ένα άτομο πυριτίου στην κρυσταλλική δομή, τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας συμμετέχουν στη δομή του ομοιοπολικού δεσμού. Μια πολύ μικρή θερμική ενέργεια απαιτείται ώστε το επιπλέον ηλεκτρόνιο να ελευθερωθεί για αγωγή. Έτσι, σε θερμοκρασία δωματίου, κάθε

άτομο δότη συνεισφέρει ένα ηλεκτρόνιο αγωγής, δηλαδή ένα φορτίο $-q$. Κάθε άτομο δότη που ιονίζεται ελευθερώνοντας ένα ηλεκτρόνιο, θα έχει καθαρό φορτίο $+q$ και αντιπροσωπεύει ένα ακίνητο, σταθερής τιμής φορτίο στην κρυσταλλική δομή.

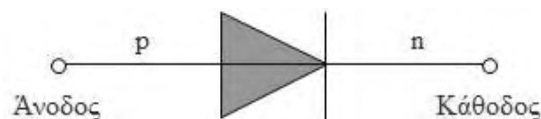
ii. Προσμίξεις Δεκτών

Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τις προσμίξεις δοτών στο πυρίτιο έχουν τρία ηλεκτρόνια σθένους στην εξωτερική τους στοιβάδα και το στοιχείο που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το βόριο. Επειδή το βόριο έχει μόνο τρία διαθέσιμα ηλεκτρόνια για τη δομή του ομοιοπολικού δεσμού, προκύπτει ένα κενό. Φυσικά, είναι πολύ εύκολο για ένα γειτονικό ηλεκτρόνιο να συμπληρώσει αυτό το κενό, αφήνοντας πίσω του ένα άλλο κενό, στη δομή του δεσμού. Το κινητό αυτό κενό, αντιπροσωπεύει μία οπή η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σωματίδιο με φορτίο $+q$. Τότε, κάθε άτομο βορίου που ιονίζεται δεχόμενο ένα ηλεκτρόνιο θα έχει καθαρό φορτίο $-q$, το οποίο είναι ακίνητο στην κρυσταλλική δομή.

Η πυκνότητα ηλεκτρονίων στους ημιαγωγούς, συμβολίζεται ως n (ηλεκτρόνια / cm^3), ενώ η πυκνότητα οπών συμβολίζεται ως p (οπές / cm^3). Στο αμιγές πυρίτιο ισχύει $n = p$. Στο υλικό με προσμίξεις, οι συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών δεν είναι πια ίσες. Αν ισχύει $n > p$, τότε το υλικό αναφέρεται ως τύπου n , ενώ αν ισχύει $p > n$, το υλικό αναφέρεται ως τύπου p . Ο φορέας με το μεγαλύτερο πληθυσμό είναι ο φορέας πλειονότητας, ενώ ο φορέας με τον μικρότερο πληθυσμό είναι ο φορέας μειονότητας.

2.1.2 Επαφή $p-n$

Η διάοδος επαφής $p-n$ σχηματίζεται με την κατασκευή μιας περιοχής ημιαγωγού τύπου p σε στενή επαφή με μια περιοχή ημιαγωγού τύπου n . Το σημείο της ένωσης ονομάζεται μεταλλουργική επαφή. Η περιοχή τύπου p αναφέρεται επίσης και ως άνοδος της διάόδου, ενώ η περιοχή τύπου n αναφέρεται ως κάθοδος της διάόδου. Στο Σχ. 1 δίνεται το κυκλωματικό σύμβολο της διάόδου. Το βέλος δείχνει προς τη θετική διεύθυνση ροής ρεύματος διαμέσου της διάόδου.



Σχήμα 1: Κυκλωματικό σύμβολο της διάόδου

Οι κινούμενες οπές έχουν την τάση για διάχυση, από την πλευρά μεγάλης συγκέντρωσης σε αυτήν με τη μικρή συγκέντρωση, δηλαδή, από την περιοχή τύπου p προς την περιοχή τύπου n και αντίστοιχα τα κινούμενα ηλεκτρόνια έχουν την τάση για διάχυση από την περιοχή τύπου

n προς την περιοχή τύπου p. Η ανταγωνιστική διεργασία που υπάρχει ώστε να αντισταθμίζεται το ρεύμα διάχυσης, είναι το ρεύμα ολίσθησης. Καθώς οι κινούμενες οπές μετακινούνται έξω από την πλευρά τύπου p, αφήνουν πίσω τους αμετακίνητα αρνητικά φορτισμένα άτομα δέκτες. Αντίστοιχα τα κινούμενα ηλεκτρόνια αφήνουν πίσω τους αμετακίνητα θετικά φορτισμένα άτομα δότες. Κατ' αυτόν τον τρόπο, δύο περιοχές φορτίων χώρου σχηματίζονται εκατέρωθεν της μεταλλουργικής επαφής, χωρίς κινητούς φορείς. Οι περιοχές αυτές σχηματίζουν την περιοχή αραίωσης, η οποία συνοδεύεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο E. Τα φορτισμένα σωματίδια κινούνται σε απόκριση αυτού του ηλεκτρικού πεδίου δημιουργώντας το ρεύμα ολίσθησης. Η διάχυση των οπών αντισταθμίζεται ακριβώς από την ολίσθηση των οπών και η διάχυση των ηλεκτρονίων αντισταθμίζεται ακριβώς από την ολίσθηση των ηλεκτρονίων. Έτσι αποκαθίσταται μια δυναμική ισορροπία στην περιοχή της επαφής.

2.1.3 Πόλωση της διόδου

i. Ορθή Πόλωση

Όταν εφαρμόζουμε την εξωτερική τάση κατά την ορθή φορά, δηλαδή αν συνδέσουμε τον θετικό πόλο της πηγής τάσης με την άνοδο της διόδου και τον αρνητικό πόλο της πηγής τάσης με την κάθοδο της διόδου, τότε λέμε ότι έχουμε ορθή πόλωση. Τότε, η συγκέντρωση οπών στην περιοχή τύπου p αυξάνει και ορισμένες οπές αποκτούν αρκετή κινητική ενέργεια ώστε υπερπηδούν τον φραγμό και εισέρχονται στην περιοχή τύπου n. Κατά τον ίδιο τρόπο εισέρχονται τα ηλεκτρόνια στην περιοχή τύπου p. Όσο αυξάνει η εξωτερική τάση τόσο η περιοχή αραίωσης στενεύει, μέχρι που μηδενίζεται και τότε έχουμε ροή ρεύματος, με φορά από την άνοδο προς την κάθοδο.

ii. Ανάστροφη Πόλωση

Όταν εφαρμόζουμε την εξωτερική τάση κατά την ανάστροφη φορά, δηλαδή αν συνδέσουμε τον θετικό πόλο της πηγής τάσης με την κάθοδο της διόδου και τον αρνητικό πόλο της πηγής τάσης με την άνοδο της διόδου, τότε λέμε ότι έχουμε ανάστροφη πόλωση. Τότε τα θετικά φορτία πηγής συνδέονται με τα ηλεκτρόνια στην περιοχή τύπου n και τα αρνητικά φορτία της πηγής συνδέονται με τις οπές, στην περιοχή τύπου p. Έτσι η περιοχή αραίωσης αυξάνει, αφού προκύπτουν όλο και περισσότερα απογυμνωμένα θετικά και αρνητικά ιόντα. Τότε λέμε ότι η διόδος δεν διαρρέεται από ρεύμα. Στην πραγματικότητα όμως, υπάρχουν κάποια ηλεκτρόνια με μεγάλη κινητική ενέργεια, τα οποία προκύπτουν από τη διάσπαση των δεσμών των ατόμων του ημιαγωγού, που υπερπηδούν και τη νέα περιοχή αραίωσης. Έτσι προκύπτει ένα πολύ μικρό ρεύμα (της τάξης των μA) το οποίο ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα κόρου της

διόδου. Το ρεύμα αυτό μπορεί να αυξηθεί με την παροχή εξωτερικής ενέργειας, όπως θερμική, ηλεκτρική ή φωτεινή.

2.1.4 Χαρακτηριστική εξίσωση και χαρακτηριστική καμπύλη της διόδου

Εφαρμόζοντας μια τάση V_D στα άκρα της διόδου, η εξίσωση που παρέχει το μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της λειτουργίας της διόδου δίνεται ως:

$$I_D = I_S \left[\exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) - 1 \right] = I_S \left[\exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (1.)$$

όπου I_D το ολικό ρεύμα της διόδου (A)

I_S το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου (A)

V_D η τάση που εφαρμόζεται στη δίοδο (V)

n ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου

q το φορτίο ενός ηλεκτρονίου (1.6×10^{-19} C)

k η σταθερά του Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)

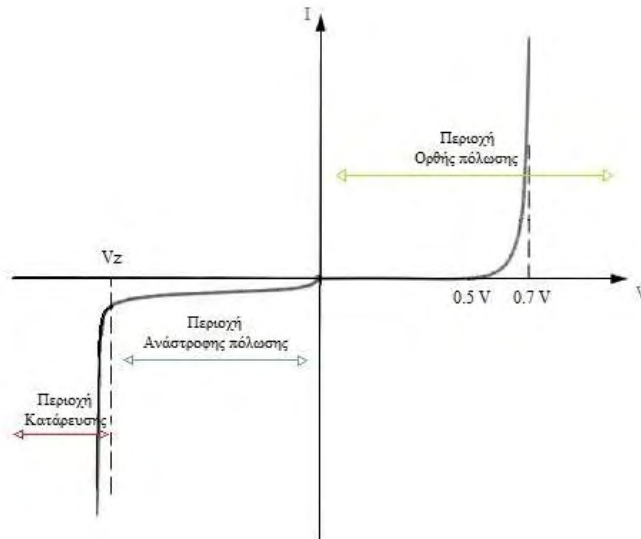
T η απόλυτη θερμοκρασία (K)

$V_T = \frac{kT}{q}$ η θερμική τάση (V)

Το ανάστροφο ρεύμα κόρου βρίσκεται τυπικά στην κλίμακα $10^{-18} \text{A} \leq I_S \leq 10^{-9} \text{A}$. Η παράμετρος n είναι ίση με τη μονάδα για μία ιδανική δίοδο, ενώ για τις περισσότερες διόδους πυριτίου παίρνει τιμές από 1 μέχρι 1.1. Ωστόσο, για διόδους που λειτουργούν σε μεγάλες πυκνότητες ρεύματος, η παράμετρος n μπορεί να προσεγγίσει μια τιμή ίση με 2. Τέλος, η θερμική τάση, σε θερμοκρασία δωματίου, μπορούμε να υποθέσουμε ότι παίρνει την τιμή 0.025 V.

Το μαθηματικό αυτό μοντέλο είναι χρησιμο για την κατανόηση της συμπεριφοράς των διόδων καθώς επίσης αποτελεί μία αρκετά ακριβή πρόβλεψη της χαρακτηριστικής I-V της διόδου επαφής p-n.

Τα σημαντικότερα σημεία της I-V χαρακτηριστικής καμπύλης της διόδου φαίνονται στο Σχ. 2. Η χαρακτηριστική της διόδου σίγουρα δεν είναι γραμμική. Για τάσεις μικρότερες του μηδενός, η δίοδος λειτουργεί με ανάστροφη πόλωση. Τότε, διαρρέεται από το ανάστροφο ρεύμα κόρου, το οποίο είναι τόσο μικρό, ώστε θεωρούμε πως η δίοδος βρίσκεται σε μη αγωγίμη κατάσταση. Καθώς η τάση αυξάνεται πάνω από το μηδέν, το ρεύμα παραμένει σχεδόν μηδενικό, μέχρι η τάση να υπερβεί τα 0.5 μέχρι 0.7 V περίπου. Στο σημείο αυτό σημειώνεται απότομη αύξηση του ρεύματος και η τάση στα άκρα της διόδου γίνεται σχεδόν ανεξάρτητη από το ρεύμα. Τότε θεωρούμε πως η δίοδος λειτουργεί σε ορθή πόλωση.



Σχήμα 2: Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) της διόδου

2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

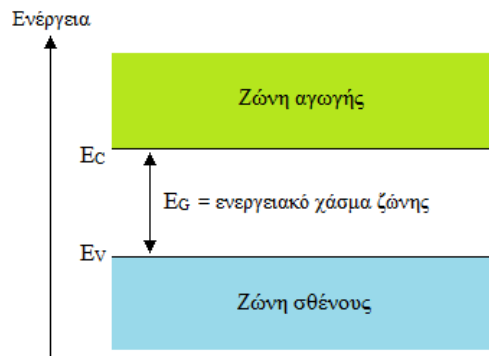
2.2.1 Μετατροπή φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική

Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων βασίζονται στις ιδιότητες των ημιαγωγών. Όταν μία φωτεινή δέσμη προσπίπτει πάνω σε μία επιφάνεια, κάποιο μέρος της ανακλάται, κάποιο απορροφάται ενώ κάποιο μέρος της δέσμης, διαπερνά το υλικό [4]. Η ανάκλαση και η διάδοση διαμέσου του υλικού, ισοδυναμούν με απώλειες, για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Η απορρόφηση του φωτός συνεπάγεται την μετατροπή του σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, συνήθως θερμική. Οι ημιαγωγοί όμως, όπως θα δούμε, έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στην κρυσταλλική δομή ενός ημιαγωγού υπάρχουν δύο επιτρεπόμενες ενεργειακές καταστάσεις, για τα ηλεκτρόνια που περιβάλλουν τα άτομα [3]. Οι καταστάσεις αυτές, όπως φαίνεται στο Σχ. 3, είναι η ζώνη σθένους και η ζώνη αγωγιμότητας. Η ενέργεια E_V αντιστοιχεί στην μέγιστη επιτρεπόμενη ενέργεια για ένα ηλεκτρόνιο σθένους, ενώ η ενέργεια E_C αντιστοιχεί στην ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να έχει ένα ηλεκτρόνιο, ώστε να βρίσκεται στη ζώνη αγωγιμότητας. Υπάρχουν ωστόσο και μη επιτρεπτές τιμές ενέργειας για τα ηλεκτρόνια, και αυτές βρίσκονται μεταξύ των E_V και E_C . Η ενέργεια E_G αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ E_V και E_C και ονομάζεται ενέργεια χάσματος ζώνης.

Η ενέργεια E_G ουσιαστικά, είναι αυτή που απαιτείται ώστε ένα ηλεκτρόνιο να μεταβεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγής. Ωστόσο, σε έναν ημιαγωγό με προσμίξεις, τα άτομα δότες

εισάγουν νέα ενεργειακά επίπεδα μέσα στο ενεργειακό χάσμα ζώνης. Πιο συγκεκριμένα, τα επιπλέον ηλεκτρόνια των δοτών θα βρίσκονται σε ένα ενεργειακό επίπεδο πολύ κοντά στη ζώνη αγωγής, οπότε αυτά χρειάζονται μία πολύ μικρή ποσότητα ενέργειας ώστε να ελευθερωθούν για αγωγή.



Σχήμα 3: Μοντέλο ενεργειακών ζωνών για έναν ημιαγωγό

Όταν ένα φωτόνιο λοιπόν απορροφάται από το υλικό, τότε θα έχουμε φωτοδιέγερση. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι το φωτόνιο δίνει κινητική ενέργεια σε ένα από τα ηλεκτρόνια που συμμετέχουν στους ομοιοπολικούς δεσμούς. Αν η ενέργεια αυτή είναι αρκετή, τότε το ηλεκτρόνιο ελευθερώνεται από τον ομοιοπολικό δεσμό, και προκύπτει ένα ζευγάρι ηλεκτρονίου-οπής.

Αυτό όμως που τελικά θα καθορίσει το πώς αλληλεπιδρά ένα φωτόνιο με τον ημιαγωγό είναι η ενέργεια του, E_{PH} [5].

- Αν $E_{PH} < E_G$, τότε το φωτόνιο είτε ανακλάται είτε διαπερνά τον κρύσταλλο.
- Αν $E_{PH} = E_G$ τότε το φωτόνιο απορροφάται και ένα ηλεκτρόνιο αποκτά αρκετή ενέργεια ώστε μεταβαίνει στη ζώνη αγωγιμότητας.
- Αν $E_{PH} > E_G$, τότε το φωτόνιο απορροφάται και ένα ηλεκτρόνιο αποκτά αρκετή ενέργεια ώστε μεταβαίνει στη ζώνη αγωγιμότητας, ενώ η επιπλέον ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα.

Η φωτοδιέγερση ωστόσο δεν αρκεί για να έχουμε παραγωγή ρεύματος. Όσο τα ηλεκτρόνια κινούνται πιο ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο, η ενέργεια που έχουν αποκτήσει μπορεί πολύ εύκολα να χαθεί, εξαιτίας της άτακτης σύγκρουσης τους με άλλα άτομα. Οπότε τελικά τα ηλεκτρόνια θα επιστρέψουν σε προηγούμενη ενεργειακή κατάσταση. Συνήθως όμως τα φωτοβολταϊκά κύτταρα έχουν τέτοια κατασκευή ώστε η φωτοδιέγερση να συμβαίνει κοντά στην επαφή p-n. Στην περιοχή αυτή, όπως είδαμε στην υποενότητα 2.1.2, υπάρχει ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο ουσιαστικά "κατευθύνει" τα ηλεκτρόνια, από την n προς την p πλευρά. Έτσι, τα ηλεκτρόνια αυτά θα συμμετέχουν στο ρεύμα ολίσθησης. Ταυτόχρονα, αυτό

το ηλεκτρικό πεδίο, εμποδίζει τη διέλευση των οπών από την p προς την n πλευρά του ημιαγωγού. Με αυτόν τον μηχανισμό, οι ελεύθεροι φορείς που προκύπτουν από τη φωτοδιέγερση, δεχόμενοι το ηλεκτρικό αυτό πεδίο, διαχωρίζονται. Όσο συνεχίζεται η απορρόφηση φωτονίων, τόσο μεγαλώνει το ρεύμα ολίσθησης, ενώ παράλληλα θα αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρονίων στην περιοχή τύπου n και ο αριθμός των οπών στην περιοχή τύπου p . Τελικά λόγω αυτής της συσσώρευσης φορτίου στα δύο τμήματα δημιουργείται διαφορά δυναμικού, οπότε ο ημιαγωγός επαφής p - n λειτουργεί πια σαν πηγή τάσεως.

2.2.2 Ηλιακή ενέργεια

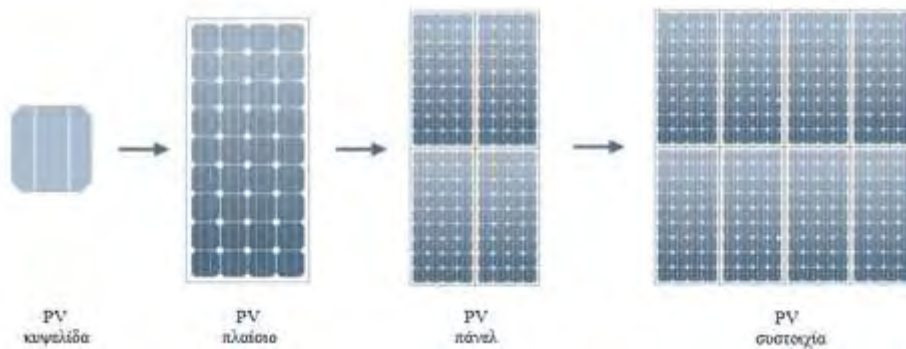
Η έντονη περιβαλλοντική και ενεργειακή κρίση είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που έχει να αντιμετωπίσει ο άνθρωπος στη σημερινή εποχή. Η αναζήτηση της λύσης αυτού του προβλήματος έχει οδηγήσει στην τεχνολογική ανάπτυξη γύρω από την εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μία από αυτές και ίσως η πιο αποδοτική είναι η ηλιακή ενέργεια. Εδώ βρίσκουν εφαρμογή και τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν την φωτεινή ενέργεια του ήλιου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί στην εκμετάλλευσή της. Επιπλέον, η διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι φιλική προς το περιβάλλον, καθώς δεν προκαλεί ρύπανση ούτε θόρυβο.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα του ηλιακού φωτός αποτελείται κυρίως από την περιοχή του ορατού φωτός και αυτή κοντά στο υπέρυθρο φως, και από μία μικρή περιοχή του υπεριώδους. Ενώ η ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην ανώτερη ατμόσφαιρα της γης είναι σχετικά σταθερή (συνολικά 174 PetaWatts), η ακτινοβολία που εισέρχεται σε αυτή και τελικά προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης ποικίλλει σημαντικά λόγω των αλληλεπιδράσεων με την ατμόσφαιρα (απορρόφηση από το όζον τους υδρατμούς το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα και σκέδαση από τα μόρια του αέρα, τη σκόνη και τους ρύπους), του γεωγραφικού πλάτους της θέσης, της εποχής του χρόνου και της ώρας της ημέρας [6].

Τα παραπάνω έχουν πολλές επιπτώσεις στην λαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Οι επιπτώσεις αυτές περιλαμβάνουν μεταβολές στη συνολική ισχύ που λαμβάνεται, στο φασματικό περιεχόμενο του φωτός και τη γωνία από την οποία το φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια. Ωστόσο, ο βασικότερος παράγοντας που επηρεάζει δραματικά τη μεταβλητότητα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η τοποθεσία. Αυτό οφείλεται τόσο σε τοπικές επιδράσεις, όπως σύννεφα και εποχιακές διακυμάνσεις, καθώς και σε άλλα φαινόμενα όπως η διάρκεια της ημέρας σε ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος. Παρ' όλα αυτά, το ποσό ενέργειας που

παίρνουμε από την ηλιακή ακτινοβολία, είναι τεράστιο. Πιο συγκεκριμένα, η ποσότητα ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης κάθε ώρα είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα ενέργειας που χρησιμοποιείται από τον πληθυσμό της Γης σε ένα ολόκληρο έτος.

2.3 Δομή Φωτοβολταϊκού συστήματος



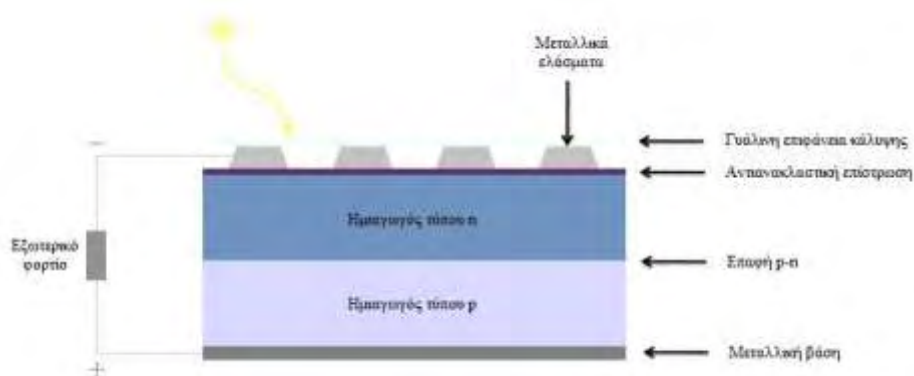
Σχήμα 4: Φωτοβολταϊκές συνθέσεις

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ένα φορτίο και ένα καλώδιο σύνδεσης. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module), αποτελεί το βασικότερο στοιχείο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από πολλές φωτοβολταϊκές κυψελίδες συνδεδεμένες παράλληλα για την αύξηση του ρεύματος και σε σειρά για την παραγωγή υψηλότερης τάσης [7]. Το φωτοβολταϊκό πάνελ (PV panel) μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα χωριστά πλαίσια σε κοινή συσκευασία και κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους. Έπειτα, με την κοινή σύνδεση, είτε σε σειρά είτε παράλληλα, πολλών επιμέρους πλαισίων ή πάνελ, σχηματίζονται ακόμα μεγαλύτερες μονάδες γνωστές ως φωτοβολταϊκές συστοιχίες (PV array). Όταν πρόκειται για εγκαταστάσεις με υψηλές απαιτήσεις ως προς την ποσότητα της ηλεκτρικής ισχύος, τότε χρησιμοποιούνται τα φωτοβολταϊκά συγκροτήματα (PV array field), τα οποία αποτελούνται από πολλές συστοιχίες συνδεδεμένες μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4, είναι δυνατή η κλιμάκωση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο ανταποκρίνεται σε διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις.

2.3.1 Ηλιακές κυψελίδες

Μία ηλιακή κυψελίδα (solar cell) είναι μια ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει την φωτεινή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική, με εφαρμογή του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Οι ηλιακές κυψελίδες χαρακτηρίζονται ως φωτοβολταϊκές, ανεξάρτητα από το αν η πηγή είναι ο ήλιος ή

κάποιο τεχνητό φως. Χρησιμοποιούνται ως φωτοανιχνευτές ανιχνεύοντας φως ή άλλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κοντά στο ορατό φάσμα ή μετρώντας την ένταση του φωτός. Τα βασικά μέρη μιας ηλιακής κυψελίδας φαίνονται και στο Σχ. 5.



Σχήμα 5: Δομή ηλιακής κυψελίδας

Η λειτουργία μιας ηλιακής κυψελίδας περιλαμβάνει τέσσερα βασικά βήματα:

1. Την απορρόφηση του φωτός, και τη δημιουργία φορέων.
2. Τη συλλογή των φωτο-παραγόμενων φορέων για την δημιουργία ρεύματος.
3. Την δημιουργία μιας μεγάλης τάσης σε ολόκληρη την ηλιακή κυψέλη.
4. Την διάχυση της ισχύος στο φορτίο και στις παρασιτικές αντιστάσεις.

2.3.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

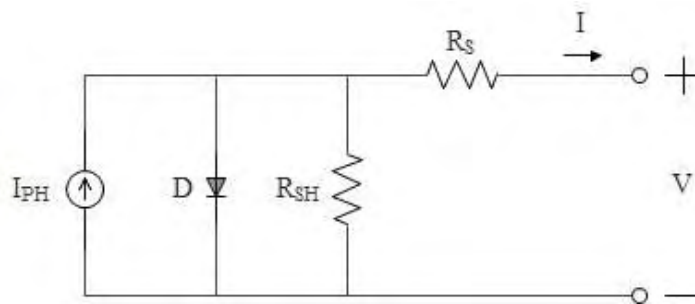
Επειδή η ενέργεια που παράγεται από μια φωτοβολταϊκή κυψελίδα είναι περιορισμένη, πολλές φωτοβολταϊκές κυψελίδες συνδέονται μεταξύ τους ηλεκτρονικά, σχηματίζοντας έτσι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Για την ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου, πρέπει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των κυψελίδων να είναι όμοια, συνεπώς οι φωτοβολταϊκές κυψελίδες πρέπει να είναι όμοιες [7].

Για να γίνει εφικτή η λειτουργία του πλαισίου, είναι σημαντικό να προστατεύονται οι φωτοβολταϊκές κυψελίδες από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό, οι φωτοβολταϊκές κυψελίδες ενθυλακώνονται από το συμπτυκνωμένο υλικό EVA, το οποίο εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. Η σύνθεση αυτή περιλαμβάνει συνήθως από δυο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικού, ή εξ ολοκλήρου από πλαστικό. Τα είδη των γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, χρωματισμένα και αντανεκλούν την θερμότητα. Οι δύο βασικοί σκοποί της εγκαθούλωσης είναι η πρόληψη της μηχανικής βλάβης των ηλιακών κυψελίδων και η αποτροπή της διαβρώσεως των ηλεκτρικών επαφών από το νερό ή τους υδρατμούς.

2.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ηλιακής κυψελίδας

2.4.1 Βασικές παράμετροι και χαρακτηριστικά μεγέθη μοντέλου ηλιακής κυψελίδας¹

Η ανάπτυξη ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων για τη μοντελοποίηση μιας ηλιακής κυψελίδας μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην ανάλυση και προσομοίωση των χαρακτηριστικών της καθώς και στη διαδικασία σχεδίασης, κατασκευής και ελέγχου λειτουργίας της. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στην επόμενη ενότητα. Το πιο απλό μοντέλο που χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία είναι το μοντέλο απλής διόδου (One Diode Model – ODM), το οποίο φαίνεται στο Σχ. 6.



Σχήμα 6: PV μοντέλο απλής διόδου

Η διάδος D είναι ουσιαστικά το στοιχείο που προσομοιώνει τη λειτουργία της ηλιακής κυψελίδας, η πηγή ρεύματος I_{PH} συμβολίζει το φωτο-παραγόμενο ρεύμα και οι αντιστάσεις μοντελοποιούν τις παρασιτικές αντιστάσεις που παρουσιάζονται κατά μήκος του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Ένα τυπικό μοντέλο ηλιακής κυψελίδας, χαρακτηρίζεται από τα εξής μεγέθη [8]:

- i. Τάση ανοικτού κυκλώματος (open circuit voltage) V_{OC}

Η V_{OC} , είναι η μέγιστη τάση που παρουσιάζει μία ηλιακή κυψελίδα και αυτό συμβαίνει όταν έχουμε μηδενικό ρεύμα. Η V_{OC} εξαρτάται από το ρεύμα κόρου του ηλιακού στοιχείου και το φωτο-παραγόμενο ρεύμα. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι ένα μέτρο της ποσότητας του ανασυνδυασμού στη συσκευή.

- ii. Ρεύμα βραχυκυκλώματος (short circuit current) I_{SC}

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος προκύπτει όταν η τάση στην έξοδο είναι μηδενική (δηλ. όταν η ηλιακή κυψελίδα είναι βραχυκυκλωμένη). Το ρεύμα βραχυκυκλώματος εξαρτάται έντονα από την ακτινοβολία, αφού οφείλεται στη δημιουργία και συλλογή φωτο-παραγόμενων φορέων.

¹ Στη συνέχεια του κειμένου οι όροι ηλιακή κυψελίδα και φωτοβολταϊκή κυψελίδα χρησιμοποιούνται χωρίς διάκριση.

Για μια ιδανική ηλιακή κυψελίδα, το ρεύμα βραχυκυκλώματος και το φωτο-παραγόμενο ρεύμα είναι ίσα. Συνεπώς, το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να αντληθεί από μια ηλιακή κυψελίδα.

Το I_{PH} είναι το φωτο-παραγόμενο ρεύμα και είναι ο όρος που πρέπει να χρησιμοποιείται στην χαρακτηριστική εξίσωση. Σε συνθήκες βραχυκυκλώματος, το εξωτερικά μετρούμενο ρεύμα είναι το I_{SC} . Δεδομένου ότι το I_{SC} είναι συνήθως ίσο με το I_{PH} , τα δύο χρησιμοποιούνται εναλλακτικά για απλότητα και η εξίσωση της ηλιακής κυψελίδας γράφεται με I_{SC} στη θέση του I_{PH} . Στην περίπτωση όπου η σειριακή αντίσταση είναι πολύ μεγάλη, το I_{SC} είναι μικρότερο από το I_{PH} και τότε η γραφή της εξίσωσης με I_{SC} είναι λανθασμένη.

iii. Μέγιστη ισχύς P_m και Συντελεστής πλήρωσης (fill factor) FF

Η ισχύς που παράγεται από την ηλιακή κυψελίδα μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση $P = VI$. Στη μέγιστη ισχύ έχουμε την τάση μέγιστης ισχύος και το ρεύμα μέγιστης ισχύος τα οποία συμβολίζονται με I_m και V_m αντίστοιχα, οπότε η μέγιστη ισχύς δίνεται από τη σχέση $P_m = V_m I_m$.

Το παραλληλόγραμμο με πλευρές I_m και V_m έχει εμβαδό ίσο με τη μέγιστη ισχύ της ηλιακής κυψελίδας. Το παραλληλόγραμμο με πλευρές I_{SC} και V_{oc} μπορούμε να πούμε ότι περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά μια ηλιακής κυψελίδας. Το πηλίκο των δύο εμβαδών είναι ο συντελεστής πλήρωσης ο οποίος αποτελεί μέτρο για την ποιότητα μιας ηλιακής κυψελίδας.

iv. Σειριακή αντίσταση (series resistance) R_S

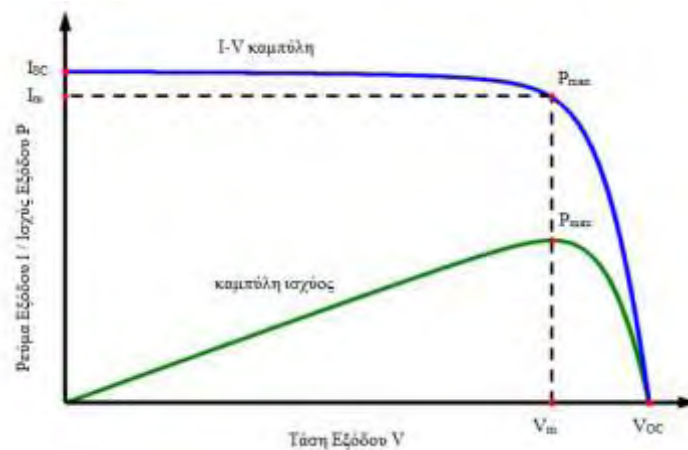
Η σειριακή αντίσταση στο μοντέλο της ηλιακής κυψελίδας μοντελοποιεί τις εξής τρεις καταστάσεις: την κίνηση του ρεύματος μέσω του πομπού και της βάσης της ηλιακής κυψελίδας, την αντίσταση επαφής μεταξύ της μεταλλικής επαφής και του πυριτίου, την αντίσταση των άνω και πίσω μεταλλικών επαφών. Ωστόσο, η κύρια επίδραση της σειριακής αντίστασης είναι η μείωση του FF, αν και υπερβολικά υψηλές τιμές μπορούν επίσης να μειώσουν το ρεύμα βραχυκυκλώματος.

v. Παράλληλη αντίσταση (shunt resistance) R_{SH}

Η παράλληλη αντίσταση R_{SH} μοντελοποιεί απώλειες που οφείλονται στην κατασκευή της ηλιακής κυψελίδας. Οι απώλειες αυτές αφορούν κυρίως κάποιες διαρροές ρεύματος που σημειώνονται στην ηλιακή κυψελίδα, οι οποίες προκαλούν απώλειες στην ισχύ εξόδου. Ενώ για την ιδανική κυψελίδα η R_{SH} είναι άπειρη, στην πραγματικότητα η παράλληλη αντίσταση παρέχει μια εναλλακτική διαδρομή για το φωτο-παραγόμενο ρεύμα, προκαλώντας έτσι απώλειες στην ισχύ εξόδου. Η επίδραση αυτή είναι ιδιαίτερα σοβαρή σε χαμηλά επίπεδα φωτός, καθώς τότε παρέχεται μικρότερη ποσότητα φωτο-παραγόμενου ρεύματος.

2.4.2 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) μοντέλου ηλιακής κυψελίδας

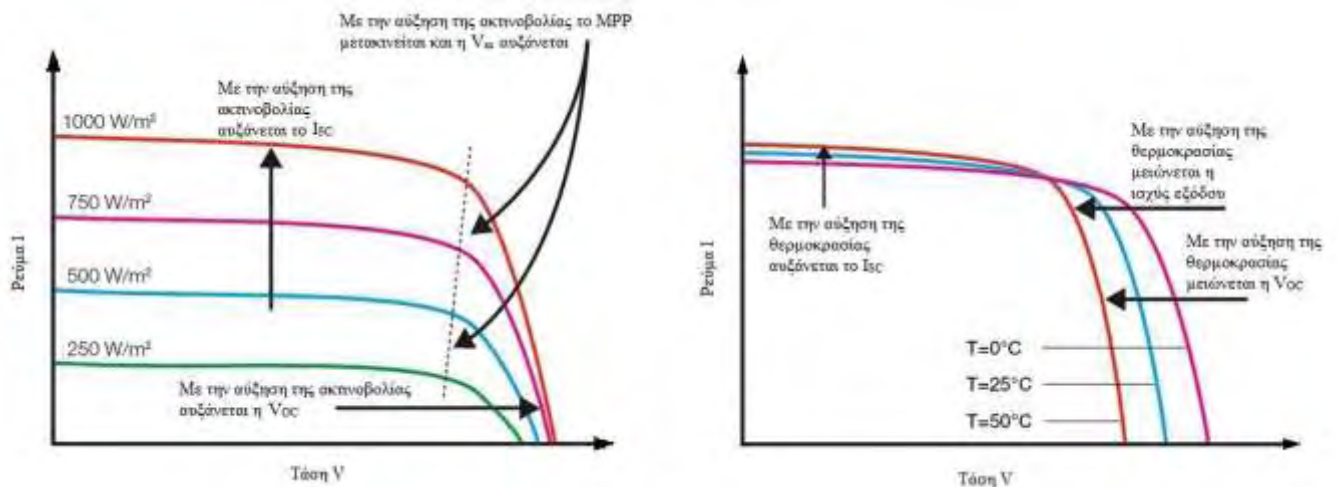
Η χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) της ηλιακής κυψελίδας αποτελεί ουσιαστικά την υπέρθεση της χαρακτηριστικής καμπύλης της διόδου με το φωτο-παραγόμενο ρεύμα [5]. Δηλαδή, η χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) για μια ηλιακή κυψελίδα σε συνθήκες σκότους, ταυτίζεται με αυτή μιας απλής διόδου. Η χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) της ηλιακής κυψελίδας φαίνεται στο Σχ. 7, καθώς και η καμπύλη της ισχύος (P-V). Στο ίδιο σχήμα μπορούμε επίσης να δούμε τα μεγέθη που αναλύθηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 7: Η χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) και η καμπύλη ισχύος (P-V) της ηλιακής κυψελίδας.

Κάποιοι παράγοντες που επηρεάζουν την χαρακτηριστική καμπύλη της ηλιακής κυψελίδας είναι η ακτινοβολία, η θερμοκρασία και οι παρασιτικές αντιστάσεις [8] [9].

i. Ακτινοβολία και θερμοκρασία

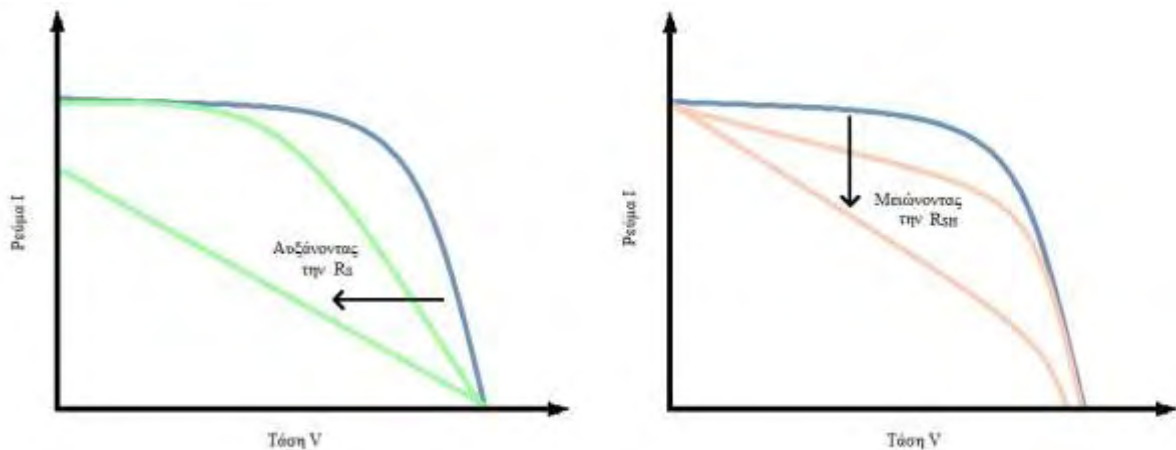


Σχήμα 8: Η επίδραση της ακτινοβολίας (αριστερά) και της θερμοκρασίας (δεξιά) στην χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) της ηλιακής κυψελίδας.

Η ένταση της ακτινοβολίας, όπως μπορούμε να δούμε στο Σχ. 8, επηρεάζει έντονα την ένταση του ρεύματος που παρέχεται στο κύκλωμα, καθώς τα δύο αυτά μεγέθη είναι μεταξύ τους ανάλογα. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος I_{SC} μεταβάλλεται γραμμικά με την ακτινοβολία, ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} μένει σχεδόν σταθερή στις μεταβολές της ακτινοβολίας για μεγάλες σχετικά τιμές ακτινοβολίας.

Η θερμοκρασία επηρεάζει ισχυρότερα την τάση από το ρεύμα, όπως φαίνεται στο Σχ. 8. Πιο συγκεκριμένα, η V_{OC} μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, κάτι το οποίο πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τον σχεδιασμό μιας ηλιακής κυψελίδας. Στο I_{SC} παρατηρείται μία αμυδρή αύξηση. Τέλος, με την αύξηση της θερμοκρασίας, μειώνεται σημαντικά και η συνολική ισχύς.

ii. Σειριακή και παράλληλη αντίσταση



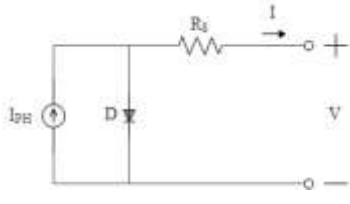
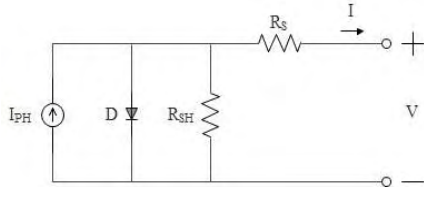
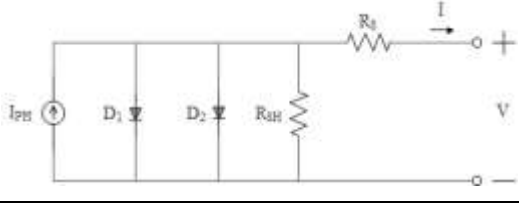
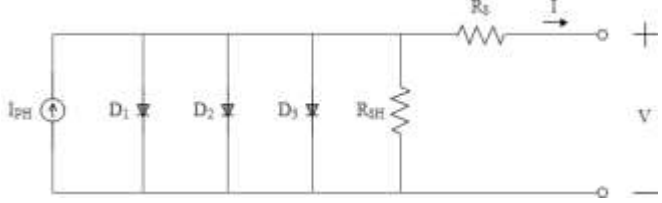
Σχήμα 9: Η επίδραση της αντίστασης R_S (αριστερά) και της αντίστασης R_{SH} (δεξιά) στην χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) της ηλιακής κυψελίδας.

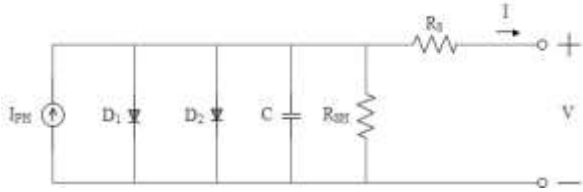
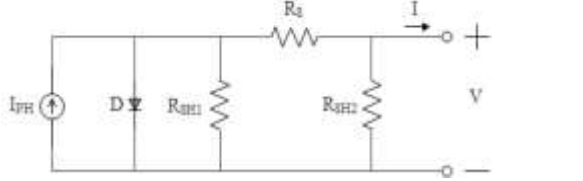
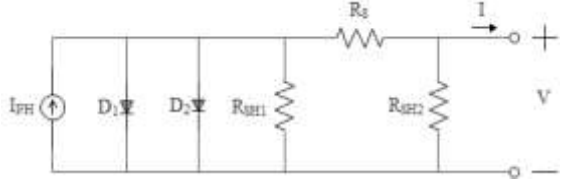
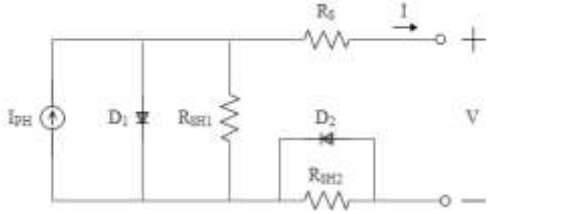
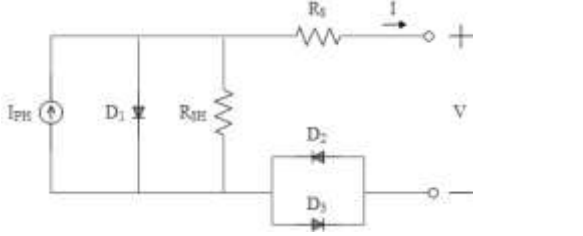
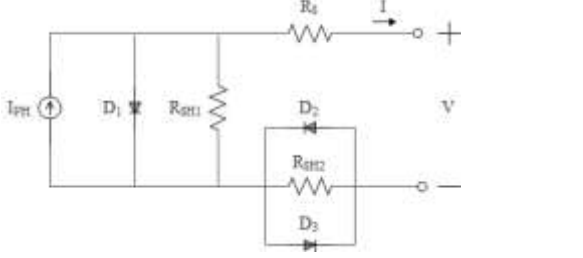
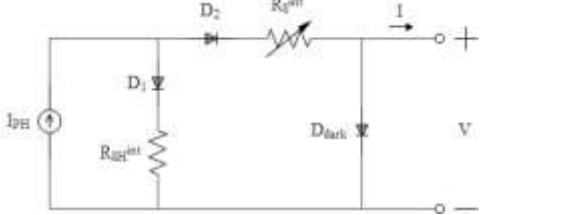
Η χαρακτηριστική καμπύλη μιας ηλιακής κυψελίδας μετατοπίζεται σημαντικά με αλλαγές στις τιμές των παρασιτικών αντιστάσεων του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος. Αυξάνοντας την τιμή της R_S προκαλείται μείωση του ρεύματος ενώ μειώνοντας την τιμή της R_{SH} αντίστασης προκαλείται μείωση της τάσης, όπως φαίνεται στο Σχ 9. Είναι προφανές λοιπόν, ότι οι τιμές των αντιστάσεων R_S και R_{SH} επηρεάζουν έντονα τη διαμόρφωση της χαρακτηριστικής καμπύλης με αποτέλεσμα να αλλάζει και το εμβαδόν $V_m \times I_m$ από το οποίο εξαρτάται ο συντελεστής πλήρωσης FF.

2.5 Ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πιο περίπλοκα μοντέλα από το ODM στην προσπάθεια ενσωμάτωσης και άλλων φυσικών χαρακτηριστικών της φωτοβολταϊκής κυψελίδας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται σταδιακά και ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων που πρέπει να εκτιμηθούν από τα φύλλα δεδομένων (datasheet) του κατασκευαστή. Παρακάτω παραθέτουμε έναν πίνακα με κυκλώματα που έχουν προταθεί για την προσομοίωση της λειτουργίας μιας φωτοβολταϊκής κυψελίδας, μαζί με τις άγνωστες παραμέτρους για κάθε ένα από αυτά. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο κατάλογος αυτός είναι ενδεικτικός και όχι εξαντλητικός.

Πίνακας 1: Κατάλογος ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων

α/α	Ισοδύναμο κύκλωμα	Άγνωστες παράμετροι	Αναφορά
1		I_{PH}, I_0, R_S	[10]
2		I_{PH}, I_0, R_S, R_{SH}	[10]
3		$I_{PH}, I_{01}, I_{02}, R_S, R_{SH}$	[10]
4		$I_{PH}, I_{01}, I_{02}, I_{03}, R_S, R_{SH}$	[10]

a/a	Ισοδύναμο κύκλωμα	Άγνωστες παράμετροι	Αναφορά
5		$I_{PH}, I_{01}, I_{02}, C, R_S, R_{SH}$	[11]
6		$I_{PH}, I_0, R_S, R_{SH1}, R_{SH2}$	[12]
7		$I_{PH}, I_{01}, I_{02}, R_S, R_{SH1}, R_{SH2}$	[12]
8		$I_{PH}, I_{01}, I_{02}, R_S, R_{SH1}, R_{SH2}$	[13]
9		$I_{PH}, I_{01}, I_{02}, R_S, R_{SH}$	[14]
10		$I_{PH}, I_{01}, I_{02}, I_{03}, R_S, R_{SH1}, R_{SH2}$	[13]
11		$I_{PH}, I_{01}, I_{02}, I_{0d}, R_S^{int}, R_{SH}^{int}$	[15]

3. ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΟΡΑΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

3.1 Εισαγωγή

Οι τεχνολογίες RF και οπτικών ινών αποτελούσαν για αρκετά χρόνια τις βασικές επιλογές για την υποστήριξη υψίρρυθμων επικοινωνιών. Ωστόσο, ο συνωστισμός του ραδιοφάσματος και το υψηλό κόστος εγκατάστασης/συντήρησης/αναβάθμισης που έχουν αντίστοιχα οι δυο αυτές τεχνολογίες οδήγησε στην έρευνα για εναλλακτικές λύσεις.

Αποτέλεσμα αυτής της συνεχούς αναζήτησης είναι η ανάπτυξη του συστήματος VLC που αποτελεί μια σημαντική και συνεχώς εξελισσόμενη κατηγορία των ασύρματων οπτικών τεχνολογιών (Optical Wireless Communications – OWC).

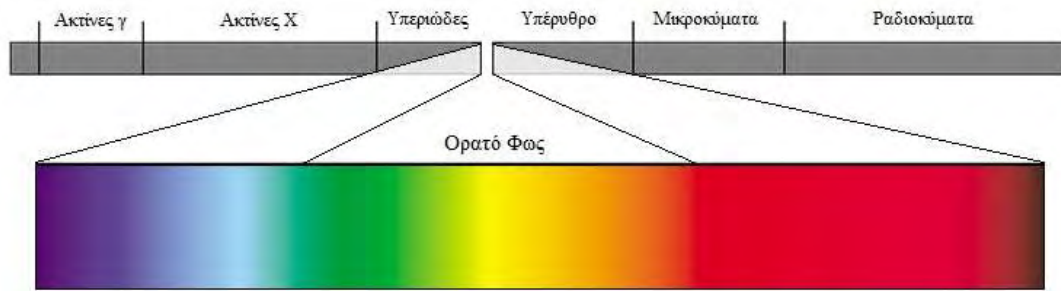
Μερικά από τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι VLC τεχνολογίες, είναι [16]:

- Το ορατό φως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελεύθερα, εφόσον δεν υπάρχουν περιορισμοί για τη χρήση του ορατού φωτός σε εσωτερικές εφαρμογές.
- Ενώ οι RF επικοινωνίες επιτυγχάνουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μερικών εκατοντάδων Mbps, οι VLC παρέχουν ρυθμούς μετάδοσης από 600 Mbps έως και μερικά Gbps, αν οι συνθήκες επικοινωνίας είναι ευνοϊκές.
- Το δυνατό εύρος ζώνης επικοινωνίας του ορατού φωτός (περίπου 400 THz) είναι ασύγκριτα μεγαλύτερο από το συμβατικό εύρος ζώνης των ραδιοσυχνοτήτων.
- Η ασφάλεια της επικοινωνίας μπορεί εύκολα να διατηρηθεί μεταξύ των χώρων, επειδή το ορατό φως μπλοκάρεται από τους τοίχους.
- Η κατάσταση της λειτουργίας VLC μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί επειδή μπορούμε να δούμε το ίδιο το ορατό φως.
- Καθώς μια πηγή ορατού φωτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για φωτισμό όσο και για επικοινωνία, εξοικονομείται η επιπλέον ισχύς που απαιτείται στην επικοινωνία RF.
- Τέλος, η εγκατάσταση τους είναι πολύ εύκολη και έχει ελάχιστες δαπάνες.

3.1.1 Το Ορατό φως

Το ορατό φως αποτελεί ένα πολύ συγκεκριμένο είδος ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και έχει την ιδιότητα να διασχίζει πολύ εύκολα την καθαρή ατμόσφαιρα χωρίς να υφίσταται απορρόφηση. Οι πηγές ακτινοβολίας ορατού φωτός είναι πολλές και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις φυσικές και τις τεχνητές [17]. Παραδείγματα φυσικών πηγών είναι ο ήλιος

και οι παρόμοιοι αστέρες, ενώ παραδείγματα τεχνητών πηγών αποτελούν οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και φθορισμού, και τα laser.



Σχήμα 10: Το φάσμα της Ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η ζώνη του ορατού φωτός, όπως μπορούμε να δούμε στο Σχ. 10, βρίσκεται ανάμεσα στο υπέρυθρο και το υπεριώδες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και είναι η ζώνη εκείνη στην οποία είναι ευαίσθητο το αισθητήριο της όρασης των ζωντανών οργανισμών [18]. Το ορατό φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες τις οποίες το ανθρώπινο μάτι τις αντιλαμβάνεται ως διαφορετικά χρώματα. Τα μήκη κύματος είναι περίπου από 400 nm (ιώδες) έως 700 nm (ερυθρό). Οι περιοχές των χρωμάτων στο ορατό φάσμα φαίνονται ενδεικτικά στον παρακάτω πίνακα. Τα όρια μεταξύ των ζωνών είναι κάπως αυθαίρετα.

Πίνακας 2: Το ορατό φάσμα

Χρώμα	Μήκος κύματος λ (nm)	Συχνότητα f (THz)
Ιώδες	400 έως 440	680 έως 750
Κυανό	440 έως 500	600 έως 680
Πράσινο	500 έως 560	535 έως 600
Κίτρινο	560 έως 590	510 έως 535
Πορτοκαλί	590 έως 630	476 έως 510
Ερυθρό	630 έως 700	429 έως 476

3.1.2 Περιγραφή VLC συστήματος

Το σύστημα VLC αναπτύχθηκε ραγδαία την τελευταία δεκαετία. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά του, είναι ότι καλύπτει ταυτόχρονα τις ανάγκες για φωτισμό και για μεταφορά πληροφορίας σε υψηλές ταχύτητες, που προκύπτουν σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους.

Όπως σε όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα έτσι και στις επικοινωνίες ορατού φωτός είναι απαραίτητα ένας πομπός, ένας δέκτης και ένα μέσο διάδοσης του σήματος. Η λειτουργία ενός VLC συστήματος, βασίζεται στην οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Ως πομπός

χρησιμοποιείται μία πηγή ακτίνων φωτός χαμηλής ενέργειας, με κατεύθυνση προς τον δέκτη. Ο δέκτης υλοποιείται με ένα οπτικό σύστημα το οποίο εστιάζει την διαδιδόμενη δέσμη φωτός πάνω σε έναν φωτοανιχνευτή [19]. Εάν χρησιμοποιηθεί ένας πομποδέκτης στη θέση του πομπού και ένας στη θέση του δέκτη, τότε καθίσταται εφικτή η αμφίδρομη επικοινωνία στη ζεύξη.

3.2 Λειτουργία και διάταξη συστήματος VLC

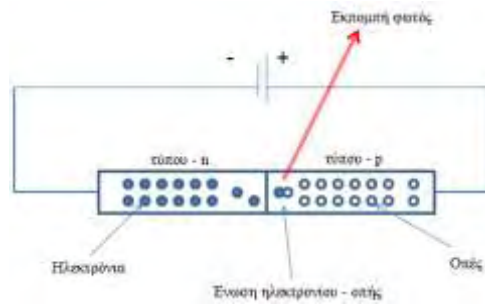
Το VLC είναι ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, όπου πομπός είναι μία λάμπα, συνήθως τύπου LED, δέκτης είναι μία ή και περισσότερες φωτοδίοδοι ενώ ο ατμοσφαιρικός αέρας αποτελεί το κανάλι.

Για την αποστολή δεδομένων σε ένα σύστημα VLC η λάμπα LED αναβοσβήνει, σύμφωνα με τα bits της ροής, με πάρα πολύ γρήγορο ρυθμό. Κάθε φορά που βρίσκεται στην κατάσταση “ON” στέλνει το δυαδικό 1, ενώ κάθε φορά που βρίσκεται στην κατάσταση “OFF” στέλνει το δυαδικό 0 [20]. Ωστόσο στην πραγματικότητα η LED δεν ανάβει ή σβήνει [16]. Η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη πραγματοποιείται με αυξομειώσεις της έντασης του φωτός, οι οποίες προφανώς δεν πρέπει να γίνονται αντιληπτές, εφόσον θέλουμε το VLC να λύνει και το πρόβλημα του φωτισμού. Κάτι τέτοιο βέβαια δεν μπορεί να συμβεί, καθώς η διάρκεια του παλμού είναι τόσο μικρή, ώστε το ανθρώπινο μάτι δεν είναι ικανό να ξεχωρίσει δύο διαφορετικές καταστάσεις. Η διάρκεια του παλμού εξαρτάται επίσης από την ταχύτητα αποστολής δεδομένων που επιθυμούμε.

3.2.1 Πομπός - Πηγή Φωτός

Η πηγή φωτός που έχει επικρατήσει και χρησιμοποιείται ευρέως στα συστήματα VLC, είναι η LED. Ο κύριος λόγος είναι ότι έπειτα από διαμόρφωση, οι λάμπες LED έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία στη μεταφορά δεδομένων [19]. Αυτό οφείλεται στην υψηλή ταχύτητα απόκρισης που παρουσιάζουν, γεγονός που τις καθιστά ασύγκριτα πιο αποδοτικές από οποιοδήποτε άλλο τύπο φωτισμού. Οι λάμπες LED είναι επίσης εξαιρετικά φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς δεν περιέχουν υδράργυρο και χαρακτηρίζονται από πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας και μεγάλο χρόνο ζωής [21].

Η LED είναι μία δίοδος, δηλαδή αποτελείται από έναν ημιαγωγό τύπου p σε επαφή με έναν ημιαγωγό τύπου n.



Σχήμα 11: Λειτουργία διόδου εκπομπής φωτός

Στις διόδους εκπομπής φωτός, όταν τα ηλεκτρόνια από την πλευρά τύπου n ενωθούν με τις οπές από την πλευρά τύπου p, τότε χάνουν ενέργεια με τη μορφή φωτονίων [3], όπως φαίνεται στο Σχ. 11. Η συχνότητα εκπομπής του φωτονίου εξαρτάται από την ποσότητα της ενέργειας που απελευθερώνεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η απελευθέρωση ενέργειας, τόσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα στην οποία εκπέμπεται το φωτόνιο. Αν η συχνότητα ανήκει στο ορατό φάσμα, τότε βλέπουμε το φως να εκπέμπεται από τη LED. Η συχνότητα, άρα το μήκος κύματος και επομένως το χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός, εξαρτάται λοιπόν από την ποσότητα της ενέργειας.

Η διαφορά της διόδου εκπομπής φωτός με την απλή δίοδο, είναι στο υλικό κατασκευής τους. Στις απλές διόδους πυριτίου και γερμανίου, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας απελευθερώνεται με τη μορφή θερμότητας και η ποσότητα του εκπεμπόμενου φωτός είναι πολύ μικρή. Ωστόσο, σε υλικά όπως το αρσενικό, το γάλλιο και τον φώσφορο τα εκπεμπόμενα φωτόνια έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να παράγουν έντονο ορατό φως. Έπειτα, ανάλογα με το υλικό, η συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτονίου μπορεί να ανήκει επίσης στο υπεριώδες ή υπέρυθρο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Υπάρχουν δύο τύποι LED, οι LEDs που αποτελούνται από ένα Blue chip, με επίστρωση κίτρινου φωσφόρου και οι LEDs που αποτελούνται από τρία μεμονωμένα chips, ένα κόκκινο, ένα πράσινο και ένα μπλε (RGB), των οποίων η έξοδος αναμιγνύεται με ακρίβεια προκειμένου να δημιουργηθεί λευκό φως [2] [22] [23].

Στον πρώτο τύπο LED έχουμε μειωμένο εύρος ζώνης διαμόρφωσης, λόγω της χαμηλής ταχύτητας απόκρισης του κίτρινου φωσφόρου, περιορίζοντας έτσι την χωρητικότητα μετάδοσης του VLC [19]. Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό, χρησιμοποιείται ένα μπλε φίλτρο στενής ζώνης στον δέκτη, ώστε να εξαλειφθεί η συνιστώσα κίτρινου φωτός, με αργή απόκριση. Χρησιμοποιώντας λευκό LED με επικάλυψη φωσφόρου με αυτή την τεχνική, έχει επιτευχθεί ρυθμός δεδομένων 1 Gbps. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιείται το μπλε φίλτρο, δεν ενισχύεται το "πρακτικό" εύρος ζώνης διαμόρφωσης LED [22]. Αυξάνεται μόνο το

"κανονικοποιημένο" εύρος ζώνης, σε βάρος της πτώσης της οπτικής ισχύος που σημειώνεται (εφόσον αφαιρείται η συνιστώσα του κίτρινου φωτός). Επομένως, ένα Multi-chip white LED, δηλαδή ένα RGB LED, θα μπορούσε να προσφέρει μια καλύτερη λύση για VLC με υψηλό ρυθμό δεδομένων. Έχει αναφερθεί ρυθμός δεδομένων 3,4 Gbps με λευκό RGB LED [23]. Επίσης, στα συστήματα VLC, ενδείκνυται η χρήση του RGB LED καθώς, το γεγονός ότι μπορούμε να ρυθμίσουμε το ποσοστό συμμετοχής κάθε βασικού χρώματος, μας δίνει την δυνατότητα να ορίσουμε επακριβώς το επιθυμητό μήκος κύματος του παραγόμενου φωτός και ακόμη επιτρέπει την αποστολή διαφορετικών δεδομένων σε κάθε συσκευή [19]. Επιπλέον, τα RGB LED προσφέρουν τη δυνατότητα για πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM), η οποία αυξάνει περαιτέρω τη συνολική χωρητικότητα μετάδοσης [23].

3.2.2 Δέκτης - Οπτικός ανιχνευτής ή Φωτοανιχνευτής

Η απόδοση οποιουδήποτε συστήματος επικοινωνιών αξιολογείται στο δέκτη. Άρα ο οπτικός ανιχνευτής αποτελεί ίσως το πιο κρίσιμο στοιχείο ενός συστήματος οπτικών επικοινωνιών. Ο δέκτης σε ένα VLC σύστημα αποτελείται από ένα οπτικό στοιχείο το οποίο συλλέγει και συγκεντρώνει την ακτινοβολία πάνω στον φωτοανιχνευτή ο οποίος μετατρέπει τη δέσμη σε φωτο-ρεύμα. Έπειτα το ρεύμα μετατρέπεται στο αντίστοιχο σήμα τάσης από έναν ενισχυτή διαεμπέδησης (transimpedance amplifier – TIA). Μετά από αυτό το σήμα ενισχύεται, φιλτράρεται και τα δεδομένα ανακτώνται από τη διαδικασία αποδιαμόρφωσης [19] [24].

Ένας φωτοανιχνευτής λειτουργεί μετατρέποντας τα οπτικά σήματα που προσπίπτουν στην ένωση μιας διόδου, σε τάση ή ρεύμα. Η απορρόφηση των φωτονίων γίνεται μέσω ενός παραθύρου φωτισμού με μια αντιανακλαστική επίστρωση, που βρίσκεται στην ένωση της διόδου [25]. Τα φωτόνια που απορροφώνται δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών στην περιοχή αραίωσης. Παραδείγματα φωτοανιχνευτών είναι οι φωτοδιόδοι και τα φωτοτρανζίστορ. Άλλες οπτικές συσκευές παρόμοιες με τους φωτοανιχνευτές είναι τα ηλιακά κύτταρα που απορροφούν επίσης το φως και το μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ο δέκτης σε ένα VLC σύστημα, είναι συνήθως μία φωτοδίοδος (photodiode – PD). Οι φωτοδιόδοι βασίζουν τη λειτουργία τους στην δημιουργία φορέων αντί για την απαλοιφή ηλεκτρονίων και οπών διαμέσου επανασύνδεσης, όπως γίνεται στην περίπτωση της διόδου φωτο-εκπομπής ή LED [3]. Αν η περιοχή αραίωσης μιας διόδου επαφής p-n φωτιστεί με φως αρκετά μεγάλης συχνότητας, τα φωτόνια μπορούν να δώσουν αρκετή ενέργεια ώστε να κάνουν τα ηλεκτρόνια να υπερπηδήσουν το ενεργειακό φράγμα του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ζευγών οπών-ηλεκτρονίων. Για να προκύψει απορρόφηση

φωτονίων, τα προσπίπτοντα φωτόνια πρέπει να έχουν ενέργεια η οποία να υπερβαίνει αυτή του ενεργειακού φράγματος του ημιαγωγού. Η απορρόφηση φωτονίων προκαλεί τη ροή ενός επιπλέον ρεύματος διαμέσου της επαφής p-n. Η ροή αυτή μπορεί να παρασταθεί σαν μοντέλο, από μια πηγή ρεύματος i_{RH} παράλληλα με τη δίοδο επαφής p-n.

Οι φωτοδιόδοι που χρησιμοποιούνται στο σύστημα VLC είναι η φωτοδίοδος πυριτίου, η φωτοδίοδος PIN και η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας. Η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας έχει υψηλότερο κέρδος από μια φωτοδίοδο PIN, έχει όμως υψηλό κόστος [16].

Ένα πρόβλημα που προκύπτει στα συστήματα VLC, είναι το φως που μπορεί να υπάρχει στο περιβάλλον όπου γίνεται η εγκατάσταση. Το φως αυτό μπορεί να είναι σε μήκη κύματος όμοια με αυτά του οπτικού σήματος, κι έτσι κατά την ανίχνευση θα αποτελέσει ένα είδος θορύβου. Για να αντιμετωπιστεί το θέμα αυτό, τοποθετούνται στον φωτοανιχνευτή λεπτές στρώσεις διηλεκτρικού, οι οποίες λειτουργούν σαν bandpass φίλτρο [20]. Έτσι το οπτικό σήμα που λαμβάνεται θα έχει μια πολύ συγκεκριμένη συχνότητα, τη συχνότητα εκπομπής. Ένας δεύτερος τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, κρύβεται στην ιδιότητα του Multi-chip white LED, το οποίο αναλύσαμε παραπάνω, να εκπέμπει διάφορες εκδοχές του λευκού φωτός, μεταβάλλοντας το ποσοστό που συμμετέχει κάθε ένα από τα τρία βασικά χρώματα στη δέσμη. Αυτή η ιδιότητα, χρησιμοποιείται με ακόμη έναν τρόπο, για την βελτίωση της οπτικής ζεύξης. Κάθε φωτοδίοδος, με βάση την κατασκευή της, αποκρίνεται καλύτερα σε κάποια συγκεκριμένη συχνότητα. Έτσι, με αυτό ως δεδομένο, ρυθμίζουμε την συχνότητα εκπομπής του LED, στην συχνότητα βέλτιστης απόκρισης της φωτοδίοδου.

Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα αυτών των φωτοανιχνευτών είναι ότι απαιτούν εξωτερική ισχύ για λειτουργία. Αυτό το μειονέκτημα θα μπορούσε να ξεπεραστεί χρησιμοποιώντας ένα φωτοβολταϊκό πάνελ αντί της φωτοδίοδου. Το φωτοβολταϊκό πάνελ μπορεί να μετατρέψει απευθείας το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό χωρίς την ανάγκη εξωτερικής τροφοδοσίας. Η χρήση ενός ηλιακού πάνελ αντί μιας συμβατικής φωτοδίοδου απλοποιεί περαιτέρω το κύκλωμα του δέκτη, αφαιρώντας την ανάγκη για ενισχυτή ΤΙΑ [2].

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ PV ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Η μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών κυψελίδων που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για συλλογή ενέργειας με ηλεκτρικά κυκλώματα μιας διόδου (One Diode Model – ODM) και δύο διόδων (Two Diode Model – TDM) έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία. Στις εργασίες [26], [27] και [28] παρουσιάζονται με συστηματικό τρόπο πολλές από τις μεθόδους που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων τους. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία υιοθετήθηκαν:

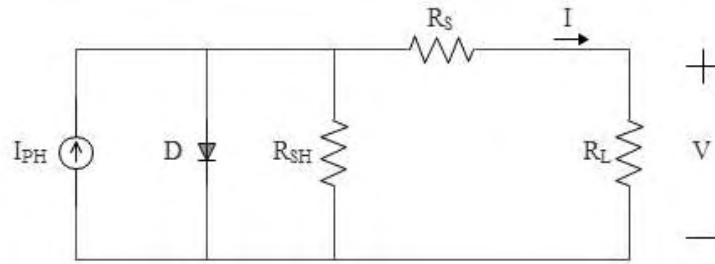
- Για το ODM η προσέγγιση που παρουσιάζεται στην εργασία [29] και η οποία δεν χρησιμοποιεί καμία απλοποίηση ή υπόθεση αλλά μόνο τα στοιχεία που δίνονται από τα datasheet του κατασκευαστή.
- Για το TDM η προσέγγιση που παρουσιάζεται στην εργασία [30] και η οποία χρησιμοποιεί τρία χαρακτηριστικά σημεία της I-V καμπύλης (το σημείο ανοιχτού κυκλώματος, το σημείο βραχυκυκλώματος και το σημείο μέγιστης ισχύος) για την εκτίμηση των παραμέτρων του.

Σημειώνεται ότι η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για την μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών κυψελίδων που χρησιμοποιούνται τόσο για συλλογή ενέργειας όσο και μεταφορά πληροφορίας καθώς μέσω αυτής θα υπολογιστούν κάποιες από τις άγνωστες παραμέτρους.

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση και εφαρμογή των μεθόδων αυτών, κάτι που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η μόνη διαφορά ανάμεσα στο ODM και το TDM είναι πως στο TDM μοντελοποιείται ένα επιπλέον φυσικό χαρακτηριστικό της ηλιακής κυψελίδας. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της πρώτης διόδου προσομοιώνεται ο ανασυνδιασμός φορτίων στην περιοχή εκπομπής και στη μαζική περιοχή (bulk region), ενώ μέσω της δεύτερης διόδου προσομοιώνεται ο ανασυνδιασμός στην περιοχή χωρικού φορτίου της ηλιακής κυψελίδας. Έτσι, στο μοντέλο απλής διόδου τυπικά αγνοείται ο ανασυνδιασμός στην περιοχή χωρικού φορτίου, αφού μόνο μία διάδος προστίθεται στο ισοδύναμο κύκλωμα [31]. Οπότε, θα μπορούσαμε να πούμε ότι το μοντέλο διπλής διόδου, σε σύγκριση με το μοντέλο απλής διόδου, προσφέρει ένα πιο λεπτομερές και κατά συνέπεια, πιο ακριβές ισοδύναμο κύκλωμα για την ηλιακή κυψελίδα.

4.2 Μοντέλο απλής διόδου

4.2.1. Ανάλυση κυκλώματος



Σχήμα 12: PV μοντέλο απλής διόδου για συλλογή ενέργειας

Η χαρακτηριστική εξίσωση ρεύματος-τάσης (I-V) εξόδου, για το μοντέλο απλής διόδου δίνεται από:

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{V_t m}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.)$$

όπου $V = IR_L$

Με V_t συμβολίζεται η θερμική τάση, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$V_t = \frac{N_s k T}{q} \quad (3.)$$

όπου, N_s ο αριθμός των σειριακά συνδεδεμένων PV κυψελίδων στο πάνελ, k η σταθερά Boltzmann (ίση με $1.380065 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kgs}^{-2} \text{ K}^{-1}$), T η θερμοκρασία του πάνελ και q το ηλεκτρικό φορτίο ενός ηλεκτρονίου (ίσο με $1.602176 \times 10^{-19} \text{ C}$)

Υπάρχουν πέντε άγνωστες παράμετροι στην (2). Αυτές είναι το φωτορεύμα I_{ph} , το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου I_{sat} , ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου m , η αντίσταση σειράς R_s και η παράλληλη αντίσταση R_{sh} .

Κύριος στόχος μας είναι να προσδιορίσουμε τις πέντε αυτές παραμέτρους, μόνο με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα των datasheets των φωτοβολταϊκών μοντέλων. Οι πληροφορίες των datasheets παρέχονται για συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που ονομάζονται τυπικές συνθήκες δοκιμής (Standard Test Condition - STC). Στις STC, το επίπεδο ακτινοβολίας είναι 1 kW/m^2 και η θερμοκρασία είναι στους 25° C . Τα διαθέσιμα δεδομένα στα datasheets του κατασκευαστή είναι: η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} , το ρεύμα βραχυκυκλώματος I_{sc} , η τάση V_m και το ρεύμα I_m στο σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point - MPP), τα οποία συνθέτουν τρία σημαντικά σημεία, τα οποία μπορούμε να δούμε στην (I-V) χαρακτηριστική καμπύλη του ODM. Αυτά είναι το σημείο

βραχυκυκλώματος $(0, I_{sc})$, το σημείο ανοιχτού κυκλώματος $(V_{oc}, 0)$, και το σημείο μέγιστης ισχύος (V_m, I_m) .

Υπολογίζοντας την (2) στο σημείο βραχυκυκλώματος, δηλ. για $V = 0$ και $I = I_{sc}$, προκύπτει:

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{V_t m}\right) - 1 \right] - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \quad (4.)$$

Υπολογίζοντας την (2) στο σημείο ανοιχτού κυκλώματος, δηλ. για $V = V_{oc}$ και $I = 0$, προκύπτει:

$$0 = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t m}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (5.)$$

Στη συνέχεια λύνοντας τις (4) και (5) ως προς I_{ph} :

$$I_{ph} = I_{sc} + I_{sat} \left[\exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{V_t m}\right) - 1 \right] - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \quad (6.)$$

$$I_{ph} = I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t m}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (7.)$$

και μετά εξισώνοντας τις (6), (7) και επιλύοντας ως προς I_{sat} , προκύπτει:

$$I_{sat} = \frac{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t m}\right) - \exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{V_t m}\right)} \quad (8.)$$

Έπειτα αντικαθιστώντας στην (6) το I_{sat} από την (8), προκύπτει:

$$I_{ph} = \frac{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) I_{sc} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t m}\right) - 1 \right] + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \left[1 - \exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{V_t m}\right) \right]}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t m}\right) - \exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{V_t m}\right)} \quad (9.)$$

Αν τώρα υπολογιστεί η (2) για το σημείο μέγιστης ισχύος, δηλ. για $V = V_m$ και $I = I_m$, και αντικατασταθούν οι ποσότητες I_{sat} και I_{ph} από τις (8) και (9) αντίστοιχα, προκύπτει:

$$I_m = \frac{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) I_{sc} (A - B) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} B}{A} - \frac{V_m + I_m R_s}{R_{sh}} \quad (10.)$$

Όπου

$$A = \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t m}\right) - \exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{V_t m}\right) \quad (11.)$$

$$B = \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{V_t m}\right) - \exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{V_t m}\right) \quad (12.)$$

Λύνοντας την (10) ως προς R_{sh} , προκύπτει:

$$R_{sh} = \frac{R_s(I_{sc} - I_m) - V_m - (R_s I_{sc} - V_{oc}) \frac{B}{A}}{I_m - I_{sc} \left[1 - \frac{B}{A}\right]} \quad (13.)$$

Μια άλλη ανεξάρτητη εξίσωση μπορεί να προκύψει παρατηρώντας ότι στο *MPP*, ο ρυθμός μεταβολής της ισχύος σε σχέση με την τάση εξόδου είναι μηδέν. Μαθηματικά,

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{MPP} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = 0 \Rightarrow \left. \frac{dI}{dV} \right|_{MPP} = -\frac{I_m}{V_m} \quad (14.)$$

Για το $\frac{dI}{dV}$, αν γραφεί η (2) στη μορφή $f(I, V) = 0$ και στη συνέχεια υπολογιστεί η παράγωγος χρησιμοποιώντας τον κανόνα της αλυσίδας, προκύπτει:

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\frac{-1}{V_t m} \left(\frac{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{A} \right) \exp\left(\frac{V + IR_s}{V_{th} m}\right) - \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{R_s}{V_t m} \left(\frac{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{A} \right) \exp\left(\frac{V + IR_s}{V_t m}\right) - \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (15.)$$

Υπολογίζοντας την (15) για το σημείο μέγιστης ισχύος, και αντικαθιστώντας από την (14) προκύπτει:

$$I_m - \frac{V_m \left[\left(\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \frac{C}{A} + \frac{1}{R_{sh}} \right]}{1 + R_s \left(\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \frac{C}{A} + \frac{R_s}{R_{sh}}} = 0 \quad (16.)$$

όπου

$$C = \frac{\exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{V_t m}\right)}{V_t m} \quad (17.)$$

Λύνοντας την (16) ως προς R_{sh} προκύπτει:

$$R_{sh} = \frac{(V_m - I_m R_s) + (R_s I_{sc} - V_{oc})(V_m - I_m R_s) \frac{C}{A}}{I_m + I_{sc} (I_m R_s - V_m) \frac{C}{A}} \quad (18.)$$

Πριν ξεκινήσουμε την διαδικασία υπολογισμού, πρέπει να γίνουν γνωστές κάποιες συνθήκες. Αυτές αφορούν τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή που μπορούν να πάρουν οι παράμετροι R_s και R_{sh} .

Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή για την R_s , δίνονται από:

$$R_{s,min} = 0 \quad (19.)$$

$$R_{s,max} = \frac{V_{oc} - V_m}{I_m} \quad (20.)$$

Οπότε οι έγκυρες τιμές για την R_s βρίσκονται στο εύρος που δίνεται από τις (19) και (20). Τέλος, η τιμή της R_{sh} δεν θα πρέπει να ξεπερνάει την ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει η παράλληλη αντίσταση, η οποία δίνεται από:

$$R_{sh,min} = \frac{V_m}{I_{sc} - I_m} \quad (21.)$$

4.2.2 Μέθοδος υπολογισμού τιμών

1. Αρχικά βρίσκουμε $R_{s,max}$ από την (21).
2. Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε τις (13) και (18) οι οποίες είναι συναρτήσεις της R_{sh} ως προς R_s . Αν φτιάξουμε τις γραφικές τους παραστάσεις, για R_s στο εύρος $0 \leq R_s \leq R_{s,max}$, τότε το σημείο τομής τους θα μας δώσει την ζητούμενη τιμή της R_s για την οποία οι δύο συναρτήσεις της R_{sh} έχουν την ίδια τιμή.
3. Υπολογίζουμε την τιμή της R_{sh} , είτε από την (13) είτε από την (18), με δεδομένη την τιμή της R_s που βρήκαμε στο προηγούμενο βήμα.
4. Τέλος υπολογίζουμε I_{sat} από την (8) και I_{ph} από την (9).

4.2.3 Εφαρμογή

Στην παρακάτω διαδικασία χρησιμοποιούνται τα μοντέλα πάνελ TSM-225PC05 [32] και AP-7105/A-75A [33]. Τα δεδομένα που θα χρειαστούμε για να ξεκινήσουμε τους υπολογισμούς, περιλαμβάνουν τις παραμέτρους V_m , I_m , V_{oc} και I_{sc} των οποίων τις τιμές θα πάρουμε από τα αντίστοιχα datasheets, που δίνονται παρακάτω.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εφόσον βρισκόμαστε σε STC, η θερμοκρασία πάνελ θα είναι $T = 298^\circ \text{K}$.

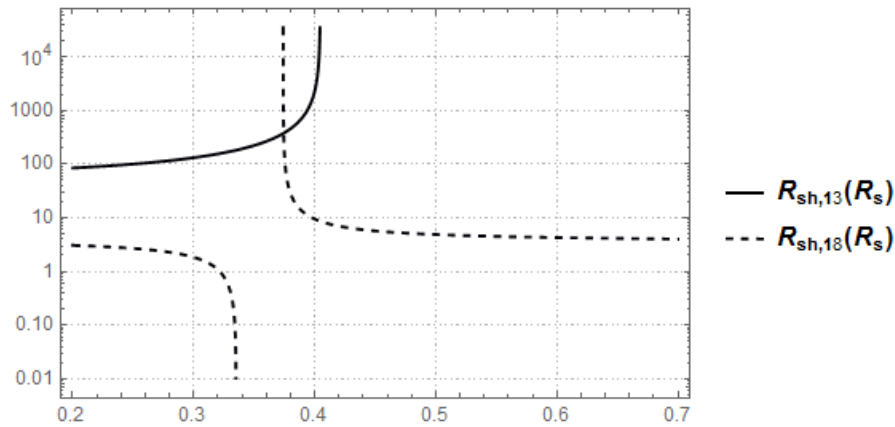
A) Μοντέλο TSM-225PC05

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά πάνελ TSM-225PC05

Ηλεκτρονικά δεδομένα	Τιμές σε STC
Τάση Μέγιστης Ισχύος - V_m	29.4 V
Ρεύμα Μέγιστης Ισχύος - I_m	7.66 A
Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος - V_{oc}	36.9 V
Ρεύμα Βραχυκυκλώματος - I_{sc}	8.2 A

Έπειτα, δίνεται ότι ο αριθμός των συνδεδεμένων σε σειρά κυψελίδων είναι $N_s = 60$, $m = 1.05$.

1. $R_{s,max} = 0.98 \Omega$
2. $R_s = 0.374 \Omega$.



Σχήμα 13: Εύρεση σημείου τομής των γραφικών παραστάσεων

3. $R_{sh} = 380 \Omega$.
4. $I_{sat} = 1.00804 \times 10^{-9} \text{ A}$, $I_{ph} = 8.208 \text{ A}$.

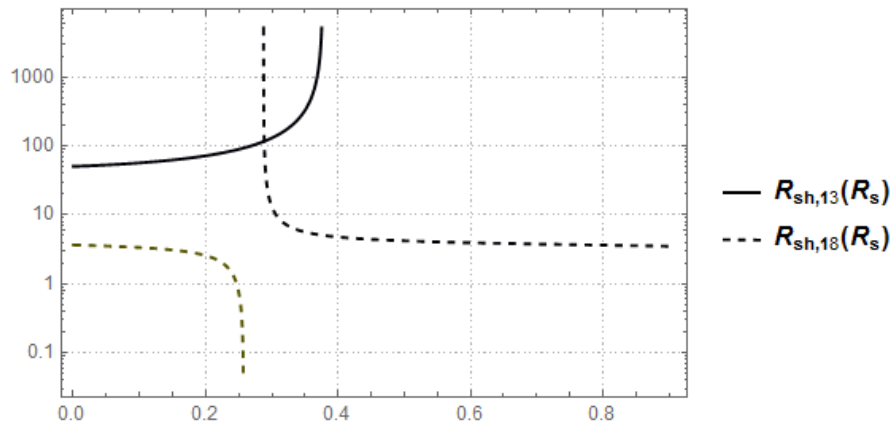
B) Μοντέλο AP-7105/A-75A

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά πάνελ AP-7105/A-75A

Ηλεκτρονικά δεδομένα	Τιμές σε STC
Τάση Μέγιστης Ισχύος - V_m	17 V
Ρεύμα Μέγιστης Ισχύος - I_m	4.4 A
Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος - V_{oc}	21 V
Ρεύμα Βραχυκυκλώματος - I_{sc}	4.8 A

Δίνεται ότι ο αριθμός των συνδεδεμένων σε σειρά κυττάρων είναι $N_s = 36$, $m = 1.02$.

1. $R_{s,max} = 0.91 \Omega$
2. $R_s = 0.288 \Omega$



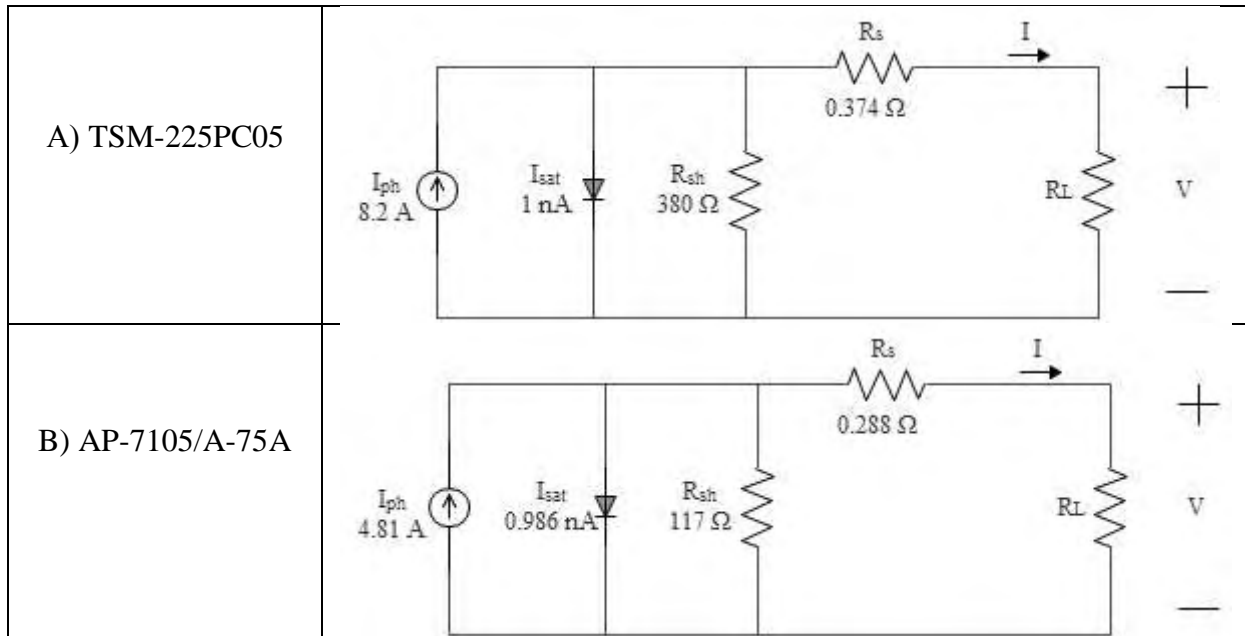
Σχήμα 14. Εύρεση σημείου τομής των γραφικών παραστάσεων

3. $R_{sh} = 117 \Omega$.

4. $I_{sat} = 9.86 \times 10^{-10} \text{ A}$, $I_{ph} = 4.81 \text{ A}$.

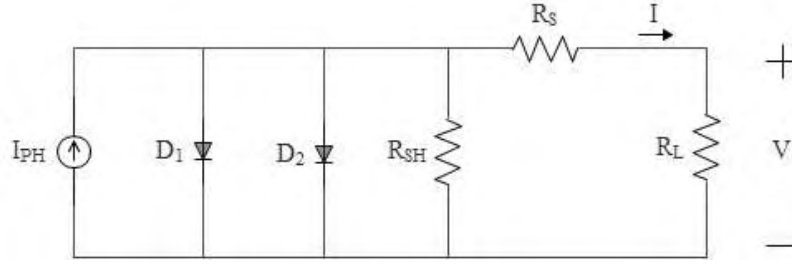
Στον Πίνακα 5 μπορούμε να δούμε τα κυκλώματα που προκύπτουν για τα παραπάνω αποτελέσματα.

Πίνακας 5: Κυκλώματα για συλλογή ενέργειας απλής διόδου



4.3 Μοντέλο διπλής διόδου

4.3.1. Ανάλυση κυκλώματος



Σχήμα 15. PV μοντέλο διπλής διόδου για συλλογή ενέργειας

Η (I-V) χαρακτηριστική εξίσωση εξόδου, για το μοντέλο διπλής διόδου, δίνεται από:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{m_1 V_t}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{m_2 V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (22.)$$

όπου $V = IR_L$

Με V_t συμβολίζεται η θερμοκή τάση, η οποία δίνεται από:

$$V_t = \frac{N_s k T}{q} \quad (23.)$$

Στην (22) υπάρχουν επτά άγνωστες παράμετροι. Αυτές είναι το φωτορεύμα I_{ph} , το ανάστροφο ρεύμα κόρου I_{s1} της διόδου D_1 (ρεύμα που προκύπτει λόγω του μηχανισμού διάχυσης), το ανάστροφο ρεύμα κόρου I_{s2} της διόδου D_2 (ρεύμα που προκύπτει λόγω του ανασυνδυασμού φορέων στην περιοχή χωρικού φορτίου), οι συντελεστές ιδανικότητας των διόδων m_1 (για το ρεύμα διάχυσης) και m_2 (για το ρεύμα ανασυνδυασμού), η αντίσταση σειράς R_s και η παράλληλη αντίσταση R_{sh} . Οι παράμετροι που συνθέτουν την θερμοκή τάση είναι γνωστοί, όπως και στο μοντέλο απλής διόδου, που περιγράφηκε παραπάνω.

Για να μειωθεί η πολυπλοκότητα των υπολογισμών, οι τιμές των συντελεστών ιδανικότητας προσεγγίζονται συνήθως ως $m_1 = 1$ και $m_2 = 2$ με σχετική ακρίβεια, που βασίζεται στη θεωρία διάχυσης του Shockley.

Έτσι, η (22) ξαναγράφεται ως:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{1V_t}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{2V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (24.)$$

Οπότε ο αριθμός των παραμέτρων έχει μειωθεί στις πέντε.

Η (22) μπορεί τώρα να υπολογιστεί στα τρία σημεία της χαρακτηριστικής (I-V) καμπύλης.

Υπολογίζοντας την (22) για το σημείο ανοιχτού κυκλώματος, δηλ. για $V = V_{oc}$ και $I = 0$, προκύπτει:

$$0 = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (25.)$$

Υπολογίζοντας την (22) για το σημείο βραχυκυκλώματος, δηλαδή για $V = 0$ και $I = I_{sc}$, προκύπτει:

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{2V_t}\right) - 1 \right] - \frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}} \quad (26.)$$

Υπολογίζοντας την (22) για το σημείο μέγιστης ισχύος, δηλ. για $V = V_{mpp}$ και $I = I_{mpp}$, προκύπτει:

$$I_m = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{V_t}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{2V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_m + R_s I_m}{R_{sh}} \quad (27.)$$

Η ισχύς που μεταφέρεται σε κάθε σημείο της (I-V) καμπύλης της φωτοβολταϊκής μονάδας δίνεται από τη σχέση:

$$P = VI \quad (28.)$$

Στη συνέχεια, αν διαφοριστεί η (28) ως προς το V προκύπτει:

$$\frac{dP}{dV} = \left(\frac{dI}{dV}\right)V + I \quad (29.)$$

Η παράγωγος της ισχύος ως προς την τάση στο MPP είναι μηδέν, δηλαδή $\left.\frac{dP}{dV}\right|_{MPP} = 0$. Οπότε από την (29) προκύπτει:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I_m}{V_m} \quad (30.)$$

Έπειτα, για τον όρο $\frac{dI}{dV}$, διαφορίζουμε την (22) ως προς V :

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dV} = & -\frac{I_{s1}}{V_t} \left(1 + R_s \frac{dI}{dV}\right) \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - \frac{I_{s2}}{2V_t} \left(1 + R_s \frac{dI}{dV}\right) \exp\left(\frac{V + R_s I}{2V_t}\right) \\ & - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 + R_s \frac{dI}{dV}\right) \end{aligned} \quad (31.)$$

Αντικαθιστώντας την (31) στην (30) προκύπτει:

$$\begin{aligned} \frac{I_m}{V_m} = & \frac{I_{s1}}{V_t} \left(1 - R_s \frac{I_m}{V_m}\right) \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{V_t}\right) + \frac{I_{s2}}{2N_s V_t} \left(1 - R_s \frac{I_m}{V_m}\right) \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{2V_t}\right) \\ & + \frac{1}{R_{sh}} \left(1 - R_s \frac{I_m}{V_m}\right) \end{aligned} \quad (32.)$$

Η (25) μπορεί να γραφεί:

$$I_{ph} = \frac{V_{oc}}{R_{sh}} + I_{s1} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - 1 \right] + I_{s2} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - 1 \right] \quad (33.)$$

Αντικαθιστώντας την (33) στις (26) και (27), προκύπτουν αντίστοιχα:

$$I_{sc} = I_{s1} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t}\right) \right] + I_{s2} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{2V_t}\right) \right] + \frac{V_{oc} - R_s I_{sc}}{R_{sh}} \quad (34.)$$

$$I_m \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = I_{s1} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{V_t}\right) \right] + I_{s2} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{2V_t}\right) \right] + \frac{V_{oc} - V_m}{R_{sh}} \quad (35.)$$

Οι εξισώσεις (32), (34), και (35) είναι τρεις ανεξάρτητες εξισώσεις, με τέσσερις άγνωστες παραμέτρους R_s , R_{sh} , I_{s1} και I_{s2} . Οπότε χρειαζόμαστε άλλη μία εξίσωση.

Στο σημείο βραχυκυκλώματος της (I-V) καμπύλης, ισχύουν $I = I_{sc}$, $V = 0$ και $\frac{dI}{dV}|_{V=0} = \frac{1}{R_{sho}}$. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην (31) και έπειτα από μαθηματικές πράξεις, προκύπτει:

$$(R_{sho} - R_s) \left[\frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_{s1}}{V_t} \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t}\right) + \frac{I_{s2}}{2N_s V_t} \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{2V_t}\right) \right] - 1 = 0 \quad (36.)$$

Αν ακολουθήσουμε τις προσεγγίσεις R_{sho} , $R_{sh} \gg R_s$, και $\frac{I_{s1}}{V_t} \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t}\right)$, $\frac{I_{s2}}{2N_s V_t} \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{2V_t}\right) \ll \frac{1}{R_{sh}}$, από την (36) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι: $R_{sho} \approx R_{sh}$. Οπότε η (36) ξαναγράφεται:

$$(R_{sh} - R_s) \left[\frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_{s1}}{V_t} \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t}\right) + \frac{I_{s2}}{2V_t} \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{2V_t}\right) \right] - 1 = 0 \quad (37.)$$

Για φωτοβολταϊκές μονάδες, είναι επίσης έγκυρες οι προσεγγίσεις: $\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) \gg \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t}\right)$ και $\exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) \gg \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{2V_t}\right)$.

Οπότε η (34) μπορεί να ξαναγραφεί ως:

$$I_{sc} = I_{s1} \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) + I_{s2} \exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) + \frac{V_{oc} - R_s I_{sc}}{R_{sh}} \quad (38.)$$

Αν τώρα, λυθούν ως προς I_{s2} οι (38) και (35), εξισωθεί το αποτέλεσμα και λυθεί αυτό ως προς I_{s1} θα προκύψει:

$$I_{s1} = \frac{a \exp\left(-\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - b \exp\left(-\frac{V_m + R_s I_m}{2V_t}\right)}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{2V_t}\right)} \quad (39.)$$

Αντίστοιχα, αν λυθούν ως προς I_{s1} οι (38) και (35), εξισωθεί το αποτέλεσμα και λυθεί αυτό ως προς I_{s2} θα προκύψει:

$$I_{s2} = \frac{a \exp\left(-\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - b \exp\left(-\frac{V_m + R_s I_m}{V_t}\right)}{\exp\left(-\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - \exp\left(-\frac{V_m + R_s I_m}{2V_t}\right)} \quad (40.)$$

όπου, $a = \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$ και $b = \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) (I_{sc} - I_m) - \frac{V_m}{R_{sh}}$

Αντικαθιστώντας τις (39) και (40) στις (32), (37) προκύπτουν αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{R_{sh}} \left(1 - \frac{R_s I_m}{V_m}\right) - \frac{I_m}{V_m} \right] \left[2 - \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m - R_s I_m}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_m - V_{oc} + R_s I_m}{2V_t}\right) \right] \\ & + \frac{1}{V_t} \left(1 - \frac{R_s I_m}{V_m}\right) \left[-\left(\frac{a}{2} + b\right) \exp\left(\frac{-V_{oc} + V_m + R_s I_m}{2V_t}\right) \right. \\ & \left. + \frac{a}{2} \exp\left(\frac{-V_{oc} + V_m + R_s I_m}{V_t}\right) - \frac{b}{2} \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m - R_s I_m}{2V_t}\right) + \frac{3b}{2} \right] = 0 \end{aligned} \quad (41.)$$

$$\begin{aligned} & \frac{R_{sh} - R_s}{V_t} \left[a \exp\left(\frac{R_s I_{sc} - V_{oc}}{V_t}\right) - (a + b) \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t} - \frac{V_m + V_{oc} + R_s I_m}{2V_t}\right) \right. \\ & \left. + b \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t} - \frac{V_m + R_s I_m}{V_t}\right) + \frac{a}{2} \exp\left(\frac{R_s I_{sc} - V_{oc}}{2V_t}\right) \right. \\ & \left. - \frac{b}{2} \exp\left(\frac{V_{oc} + R_s I_{sc}}{2V_t} - \frac{V_m + R_s I_m}{V_t}\right) - \frac{a}{2} \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m + R_s I_{sc}}{2V_t} - \frac{V_{oc}}{V_t}\right) \right. \\ & \left. + \frac{b}{2} \exp\left(\frac{R_s I_{sc} - V_m - R_s I_m}{2V_t}\right) \right] \\ & - \frac{R_s}{R_{sh}} \left[2 - \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m - R_s I_m}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_m - V_{oc} + R_s I_m}{2V_t}\right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (42.)$$

Οι (41) και (42) είναι μη γραμμικές εξισώσεις με μόνο δύο άγνωστες παραμέτρους R_s και R_{sh} . Για να λυθούν οι εξισώσεις αυτές αριθμητικά, είναι απαραίτητες κάποιες τιμές αρχικοποίησης.

Θεωρώντας $R_{sh} \gg R_s$, η παράσταση $1 + \frac{R_s}{R_{sh}}$ προσεγγίζεται στο 1. Επιπλέον, σύμφωνα με τις τυπικές διαθέσιμες τιμές για τις παραμέτρους του φωτοβολταϊκού μοντέλου, είναι έγκυρες οι προσεγγίσεις $I_{sc} \gg \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$, $I_{sc} - I_m \gg \frac{V_m}{R_{sh}}$.

Σύμφωνα με αυτές τις λογικές υποθέσεις, ο όρος $a = \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$ προσεγγίζεται σε $a = I_{sc}$ και ο όρος $b = \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) (I_{sc} - I_m) - \frac{V_m}{R_{sh}}$ προσεγγίζεται σε $b = (I_{sc} - I_m)$. Έτσι οι όροι αυτοί γίνονται ανεξάρτητοι των R_s και R_{sh} . Επίσης ο όρος $\frac{1}{R_{sh}} \left(1 - \frac{R_s I_m}{V_m}\right) - \frac{I_m}{V_m}$, στην (41), προσεγγίζεται σε $-\frac{I_m}{V_m}$.

Σύμφωνα με τις απλοποιήσεις αυτές, οι (39), (40) ξαναγράφονται ως:

$$I_{s1} = \frac{I_{sc} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - (I_{sc} - I_m) \exp\left(-\frac{V_m + R_s I_m}{2V_t}\right)}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{2V_t}\right)} \quad (43.)$$

$$I_{s2} = \frac{I_{sc} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - (I_{sc} - I_m) \exp\left(-\frac{V_m + R_s I_m}{V_t}\right)}{\exp\left(-\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - \exp\left(-\frac{V_m + R_s I_m}{2V_t}\right)} \quad (44.)$$

και η (41) ξαναγράφεται ως:

$$\begin{aligned} & -\frac{I_m}{V_m} \left[2 - \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m - R_s I_m}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_m - V_{oc} + R_s I_m}{2V_t}\right) \right] \\ & + \frac{1}{V_t} \left(1 - \frac{R_s I_m}{V_m} \right) \left[-\left(\frac{3I_{sc}}{2} - I_m\right) \exp\left(\frac{-V_{oc} + V_m + R_s I_m}{2V_t}\right) \right. \\ & \quad \left. + \frac{I_{sc}}{2} \exp\left(\frac{-V_{oc} + V_m + R_s I_m}{V_t}\right) \right. \\ & \quad \left. - \frac{(I_{sc} - I_m)}{2} \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m - R_s I_m}{2V_t}\right) + \frac{3(I_{sc} - I_m)}{2} \right] = 0 \end{aligned} \quad (45.)$$

Χρησιμοποιούμε το ανάπτυγμα Taylor της εκθετικής συνάρτησης, ώστε να μετατρέψουμε τους εκθετικούς όρους της (45) σε πολωνυμικούς. Οι εκθετικοί όροι που εμφανίζονται στη (45) είναι οι $\exp\left(\frac{V_{oc}-V_m-R_s I_m}{2V_t}\right)$, $\exp\left(\frac{V_m-V_{oc}+R_s I_m}{2V_t}\right)$ και $\exp\left(\frac{-V_{oc}+V_m+R_s I_m}{V_t}\right)$ τους οποίους ξαναγράφω στη μορφή $\exp\left(\frac{V_{oc}-V_m}{2V_t}\right) \exp\left(-\frac{R_s I_m}{2V_t}\right)$, $\exp\left(\frac{V_m-V_{oc}}{2V_t}\right) \exp\left(\frac{R_s I_m}{2V_t}\right)$ και $\exp\left(\frac{V_m-V_{oc}}{V_t}\right) \exp\left(\frac{R_s I_m}{V_t}\right)$ αντίστοιχα. Τέλος, αντικαθιστούμε στην (45) τα εκθετικά που περιέχουν R_s , μία με τους δύο πρώτους όρους, μία με τους τρεις πρώτους όρους και μία με τους τέσσερις πρώτους όρους του αναπτύγματος Taylor, δηλαδή,

$$\begin{aligned} \exp(kR_s) &= 1 + kR_s \\ \exp(kR_s) &= 1 + kR_s + \frac{k^2 R_s^2}{2} \\ \exp(kR_s) &= 1 + kR_s + \frac{k^2 R_s^2}{2} + \frac{k^3 R_s^3}{6} \end{aligned} \quad (46.)$$

και έτσι προκύπτουν αντίστοιχα οι παρακάτω πολωνυμικές εξισώσεις:

$$\begin{aligned} A_2 R_s^2 + B_2 R_s + C_2 &= 0 \\ A_3 R_s^3 + B_3 R_s^2 + C_3 R_s + D_3 &= 0 \\ A_4 R_s^4 + B_4 R_s^3 + C_4 R_s^2 + D_4 R_s + E_4 &= 0 \end{aligned} \quad (47.)$$

Οι συντελεστές A_i , B_i , C_i , $i \in \{2, 3, 4\}$, D_3 , D_4 , E_4 παρέχονται στο παράρτημα. Κατά τον υπολογισμό των συντελεστών, αν συγκριθούν τα αποτελέσματα, είναι φανερό πως:

$$\begin{aligned}
E_4 &= D_3 = C_2 \\
D_4 &= C_3 = B_2 \\
C_4 &= B_3
\end{aligned} \tag{48.}$$

Μετά την αναλυτική επίλυση των (47) και την επίτευξη μιας εφικτής λύσης για την R_s , μπορούμε να την αντικαταστήσουμε στις (43) και (44) και να υπολογίσουμε τα ρεύματα κόρου I_{s1} και I_{s2} . Έπειτα μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της R_{sh} , από την (37), αφού η τελευταία ξαναγραφεί στην παρακάτω μορφή:

$$R_{sh}(R_{sh} - R_s) \left[\frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_{s1}}{V_t} \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t}\right) + \frac{I_{s2}}{2V_t} \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{2V_t}\right) \right] - R_s = 0 \tag{49.}$$

Εφόσον μπορούμε να υποθέσουμε ότι $R_{sh} \gg R_s$, από την (49) προκύπτει:

$$R_{sh} = \sqrt{\frac{R_s}{\frac{I_{s1}}{V_t} \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t}\right) + \frac{I_{s2}}{2V_t} \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{2V_t}\right)}} \tag{50.}$$

Σημειώστε ότι στις εξισώσεις (32), (34), (35), και (37) ή (41), (42), εξαλείφεται η παράμετρος I_{ph} και επομένως δεν χρειάζεται αρχική τιμή. Ωστόσο, μπορεί κανείς να βρει μια καλή εκτίμηση αυτής της παραμέτρου μέσω της (26).

$$I_{ph} = I_{sc} + I_{s1} \left[\exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t}\right) - 1 \right] + I_{s2} \left[\exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{2V_t}\right) - 1 \right] + \frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}} \tag{51.}$$

4.3.2 Μέθοδος υπολογισμού

1. Αρχικά υπολογίζουμε τους συντελεστές $A_2, B_2, C_2, A_3, B_3, A_4, B_4$ και στη συνέχεια λύνουμε τις εξισώσεις (47).
2. Αφού, από το βήμα 1, έχουμε προσεγγίσει μια τιμή για την R_s , την αντικαθιστούμε, αρχικά στις εξισώσεις (43) και (44), από τις οποίες παίρνουμε τιμές για τις παραμέτρους I_{s1} και I_{s2} και έπειτα, στην (50), μαζί με τις τιμές που βρήκαμε για τις I_{s1} και I_{s2} , ώστε να προσεγγίσουμε μία λύση για την R_{sh} .
3. Οι τιμές που έχουμε βρεί στα βήματα 1 και 2 αποτελούν προσεγγιστικές αναλυτικές λύσεις και ταυτόχρονα, είναι κατάλληλα σημεία αρχικοποίησης για τις μη γραμμικές εξισώσεις (41) και (42). Από την επίλυση των τελευταίων, για τις παραπάνω αρχικές τιμές, προκύπτουν οι αριθμητικές λύσεις των παραμέτρων R_s και R_{sh} .
4. Αντικαθιστώντας τις αριθμητικές λύσεις των παραμέτρων R_s και R_{sh} στις εξισώσεις (39) και (40), βρίσκουμε αριθμητικές λύσεις και για τις παραμέτρους I_{s1} και I_{s2} .
5. Τέλος, εφόσον το I_{sc} είναι πολύ μεγαλύτερο από τους άλλους όρους στο δεξί μέρος της (51), υπολογίζεται ότι ισχύει $I_{ph} = I_{sc}$.

4.3.1 Εφαρμογή

Για την παρακάτω διαδικασία θα χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικά μοντέλα πάνελ, το Kyocera KD245GH-4FB2 [34] και το Sanyo HIT-240 HDE4 [35]. Τα δεδομένα που θα χρειαστούμε για να ξεκινήσουμε τους υπολογισμούς περιλαμβάνουν τις παραμέτρους V_m , I_m , V_{oc} και I_{sc} των οποίων τις τιμές θα πάρουμε από τα αντίστοιχα datasheets, που δίνονται παρακάτω.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εφόσον βρισκόμαστε σε STC (Standard Test Conditions), η θερμοκρασία πάνελ θα είναι $T = 298^\circ\text{K}$.

A) Μοντέλο Kyocera KD245GH-4FB2

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά πάνελ Kyocera KD245GH-4FB2

Ηλεκτρονικά δεδομένα	Τιμές σε STC
Τάση Μέγιστης Ισχύος - V_m	29.8 V
Ρεύμα Μέγιστης Ισχύος - I_m	8.23 A
Τάση Ανοικτού Κυκλώματος - V_{oc}	36.9 V
Ρεύμα Βραχυκυκλώματος - I_{sc}	8.91 A

Έπειτα, δίνεται ότι ο αριθμός των συνδεδεμένων σε σειρά κυττάρων είναι $N_s = 60$.

Προσεγγιστικές Αναλυτικές λύσεις:

1. $R_s = 0.194 \Omega$
2. $I_{s1} = 2.34 \times 10^{-10} \text{ A}$, $I_{s2} = 19 \times 10^{-6} \text{ A}$
 $R_{sh} = 132 \Omega$

Αριθμητικές λύσεις:

3. $R_s = 0.287 \Omega$, $R_{sh} = 272 \Omega$
4. $I_{s1} = 3 \times 10^{-10} \text{ A}$, $I_{s2} = 6 \times 10^{-6} \text{ A}$
5. $I_{ph} = 8.91 \text{ A}$

B) Μοντέλο Sanyo HIT-240 HDE4

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά πάνελ Sanyo HIT-240 HDE4

Ηλεκτρονικά δεδομένα	Τιμές σε STC
Τάση Μέγιστης Ισχύος - V_m	35.5 V
Ρεύμα Μέγιστης Ισχύος - I_m	6.77 A
Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος - V_{oc}	43.6 V
Ρεύμα Βραχυκυκλώματος - I_{sc}	7.37 A

Δίνεται ότι ο αριθμός των συνδεδεμένων σε σειρά κυττάρων είναι $N_s = 60$.

Προσεγγιστικές Αναλυτικές λύσεις:

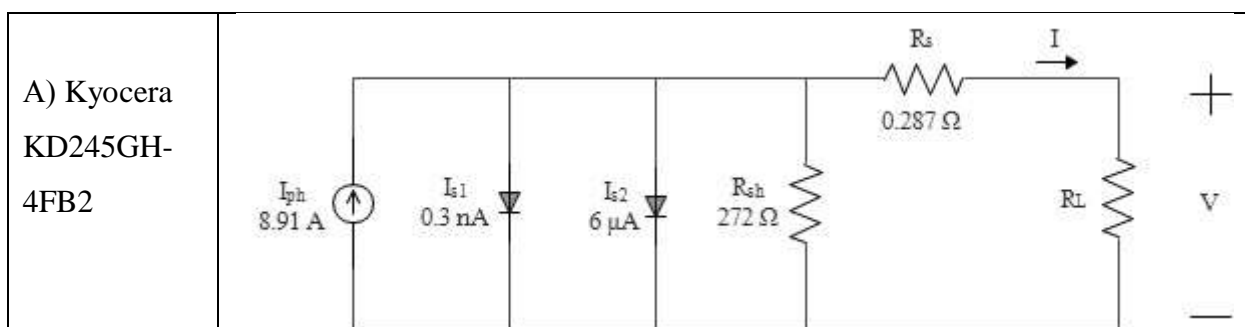
1. $R_s = 0.0668 \Omega$
2. $I_{s1} = 2.6 \times 10^{-13} \text{ A}$, $I_{s2} = 4.9 \times 10^{-6} \text{ A}$
 $R_{sh} = 208 \Omega$

Αριθμητικές λύσεις:

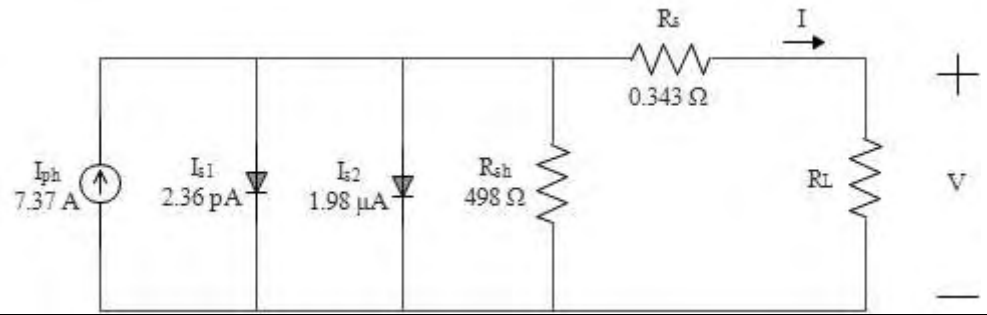
3. $R_s = 0.343 \Omega$, $R_{sh} = 498 \Omega$
4. $I_{s1} = 2.36 \times 10^{-12} \text{ A}$, $I_{s2} = 1.98 \times 10^{-6} \text{ A}$
5. $I_{ph} = 7.37 \text{ A}$

Στον Πίνακα 8 μπορούμε να δούμε τα κυκλώματα που προκύπτουν για τα παραπάνω αποτελέσματα.

Πίνακας 8: Κυκλώματα για συλλογή ενέργειας διπλής διόδου



B) Sanyo
HIT-240
HDE4



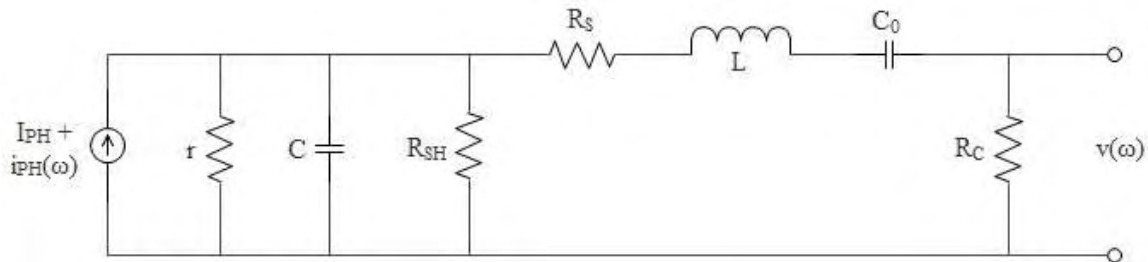
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ PV ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

5.1 Εισαγωγή

Η μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών κυψελίδων που χρησιμοποιούνται για την λήψη πληροφορίας έχει σημαντικές διαφορές από την προηγούμενη περίπτωση καθώς τώρα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά του σήματος που μεταφέρει το οπτικό φέρον. Με άλλα λόγια, ενώ στην πρώτη περίπτωση μας ενδιέφερε η συνεχής (DC) συνιστώσα του σήματος, καθώς μόνο αυτή υπήρχε, τώρα μας ενδιαφέρει η εναλλασσόμενη (AC) συνιστώσα του. Η πρώτη προσπάθεια προς αυτή την κατεύθυνση έγινε στην εργασία [2] και αφορούσε το ODM. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε την ίδια μεθοδολογία προκειμένου να επεκτείνουμε τη μελέτη στο TDM.

5.2 Μοντέλο απλής διόδου

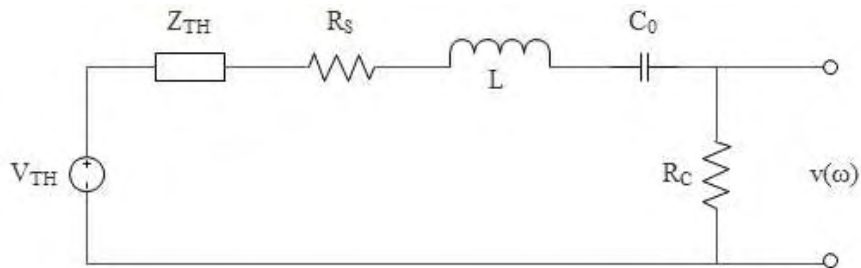
5.2.1 Ανάλυση κυκλώματος



Σχήμα 16: PV μοντέλο απλής διόδου για μετάδοση πληροφορίας

Για να μοντελοποιηθεί η μετάδοση πληροφορίας με τη χρήση ηλιακού πάνελ, είναι απαραίτητη μία τροποποίηση του μοντέλου απλής διόδου για συλλογή ενέργειας, ώστε αυτό να προσομοιώνει τα AC χαρακτηριστικά της συσκευής. Όπως φαίνεται στο Σχ. 16, η διόδος αντικαθίσταται από την ισοδύναμη αντίσταση μικρού σήματος r και εισάγεται ένας πυκνωτής C παράλληλα με την αντίσταση R_{sh} , προκειμένου να συλλάβει τα εσωτερικά χωρητικά αποτελέσματα της ηλιακής κυψελίδας. Επίσης προστίθεται ένα πηνίο L σε σειρά, το οποίο μοντελοποιεί την αυτεπαγωγή των συνδέσεων καλωδίων, αν υπάρχουν. Δεδομένου ότι μόνο η AC συνιστώσα του φωτο-παραγόμενου ρεύματος $i_{ph}(\omega)$ χρησιμοποιείται για την επικοινωνία, προστίθεται ένας πυκνωτής C_0 , πριν από την αντίσταση φορτίου R_c , ώστε να μπλοκάρει την DC συνιστώσα του σήματος. Το σήμα πληροφορίας αντιπροσωπεύεται από την τάση στα άκρα της αντίστασης φορτίου R_c .

Χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο Thevenin, για το τμήμα του κυκλώματος του Σχ. 16, που περιλαμβάνει την πηγή ρεύματος $I_{ph} + i_{ph}(\omega)$, την αντίσταση r , τον πυκνωτή C και την αντίσταση R_{sh} , προκύπτει το παρακάτω κύκλωμα:



Σχήμα 17: Μοντέλο με ισοδύναμο Thevenin για μετάδοση πληροφορίας

Έπειτα, η συχνοτική απόκριση του νέου κυκλώματος δίνεται από:

$$\frac{v(\omega)}{V_{TH}(\omega)} = \frac{R_C}{Z_{TH} + R_s + (i\omega L) + \frac{1}{i\omega C_0} + R_C} \quad (52.)$$

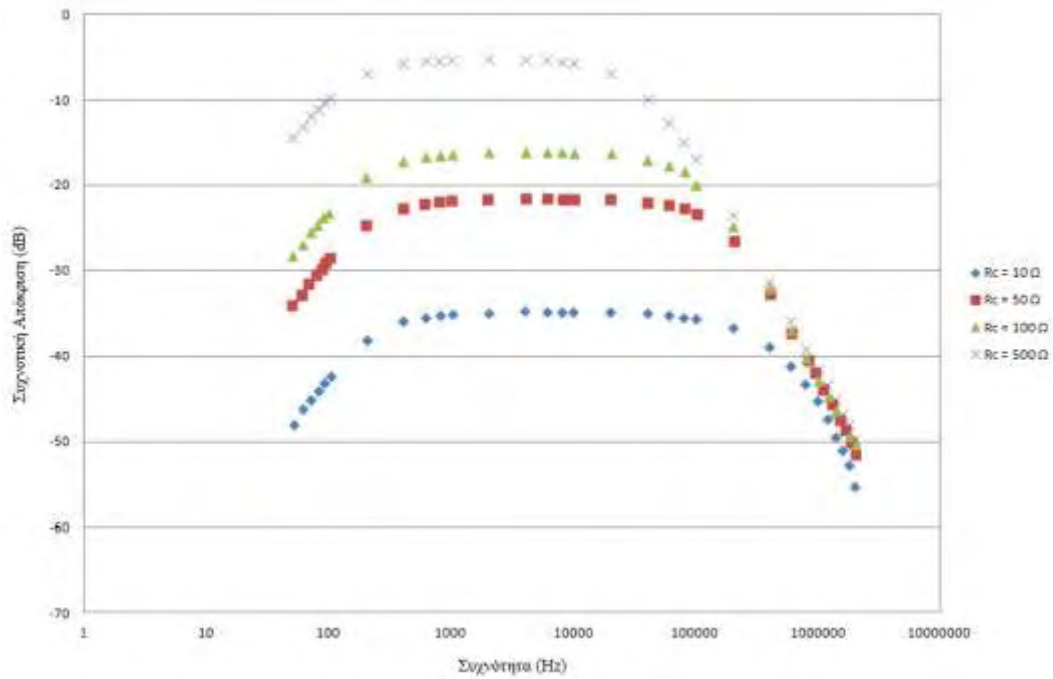
όπου $Z_{TH} = \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{i\omega C} + \frac{1}{R_{sh}}}$

Υπάρχουν επτά άγνωστες παράμετροι στην (52). Αυτές είναι:

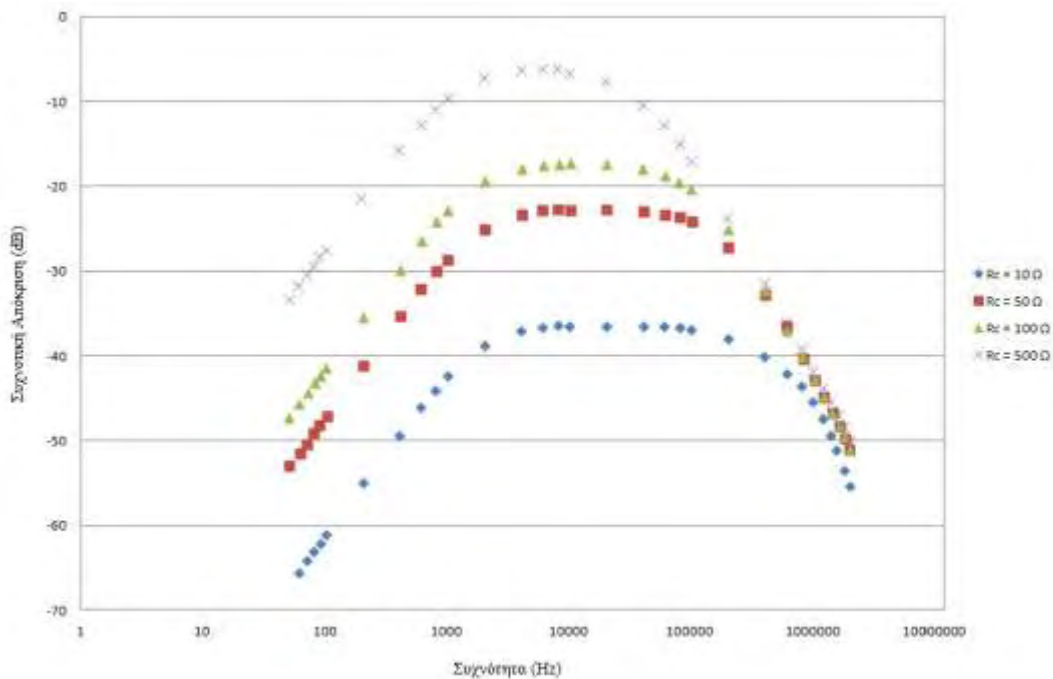
- η αντίσταση μικρού σήματος r ,
- η χωρητικότητα C του πυκνωτή,
- η παράλληλη αντίσταση R_{sh} ,
- η αντίσταση σειράς R_s ,
- η αυτεπαγωγή L του πηνίου,
- η χωρητικότητα C_0 του πυκνωτή και
- η αντίσταση φορτίου R_C .

Για τις παραμέτρους R_{sh} και R_s , οι τιμές υπολογίζονται από το μοντέλο απλής διόδου για συλλογή ενέργειας, που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 4.2. Οπότε οι άγνωστες παράμετροι μειώνονται στις πέντε.

Για την προσέγγιση των άγνωστων παραμέτρων θα χρησιμοποιήσουμε μετρήσεις της συχνοτικής απόκρισης του ηλιακού πάνελ, για $C_0 = 1\mu\text{F}$ (Σχ. 18) και $C_0 = 100\text{ nF}$ (Σχ. 19), για R_C στο εύρος από $10\ \Omega$ έως $500\ \Omega$. Έτσι, δημιουργώντας τις υποθέσεις αυτές για τις παραμέτρους C_0 , R_C , οι άγνωστες παράμετροι για τις οποίες θα αναζητήσουμε τελικά τιμές είναι οι r , C και L .



Σχήμα 18: Συχνωτική απόκριση ηλιακού πάνελ, για $C_0 = 1 \mu\text{F}$



Σχήμα 19: Συχνωτική απόκριση ηλιακού πάνελ, για $C_0 = 100 \text{ nF}$

5.2.2 Μέθοδος υπολογισμού τιμών

1. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Levenberg–Marquardt, βρίσκουμε αριθμητικές τιμές για τις παραμέτρους r , C και L , ώστε η εξίσωση (52), ως συνάρτηση του ω , να έχει το βέλτιστο fitting στα δεδομένα που πήραμε από τις μετρήσεις στα Σχ. 18 και Σχ. 19.

2. Αντικαθιστώντας στην (52) όλες τις τιμές που έχουμε υπολογίσει, κατασκευάζουμε τη γραφική παράσταση της συχνοτικής απόκρισης της (52) σε dB ως προς τη συχνότητα.
3. Τέλος, επαληθεύουμε την ορθότητα των παραπάνω προσεγγίσεων, με τον υπολογισμό του συντελεστή προσδιορισμού R^2 . Ο συντελεστής προσδιορισμού παίρνει τιμές στο κλειστό διάστημα $[0, 1]$. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή του συντελεστή, τόσο καλύτερο fitting έχουμε, δηλαδή, η γραφική παράσταση που κατασκευάσαμε στο βήμα 2 συμπίπτει σημαντικά με τα σημεία των μετρήσεων, που πήραμε από τα Σχ. 18 και Σχ. 19.

5.2.3 Εφαρμογή

Για την παρακάτω διαδικασία χρησιμοποιείται το μοντέλο πάνελ BP Solar SX 305M [36]. Τα δεδομένα που θα χρειαστούμε για να ξεκινήσουμε τους υπολογισμούς, περιλαμβάνουν τις παραμέτρους V_m , I_m , V_{oc} και I_{sc} των οποίων τις τιμές θα πάρουμε από το datasheet, που δίνεται στον Πίνακα 9.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εφόσον βρισκόμαστε σε STC (Standard Test Conditions), η θερμοκρασία πάνελ θα είναι $T = 298^\circ \text{K}$.

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά πάνελ BP Solar SX 305M

Ηλεκτρονικά δεδομένα	Τιμές σε STC
Τάση Μέγιστης Ισχύος - V_m	16.5 V
Ρεύμα Μέγιστης Ισχύος - I_m	0.27 A
Τάση Ανοικτού Κυκλώματος - V_{oc}	20.5 V
Ρεύμα Βραχυκυκλώματος - I_{sc}	0.3 A

Έπειτα, δίνεται ότι ο αριθμός των συνδεδεμένων σε σειρά κυψελίδων είναι $N_s = 36$, $m = 1.6$. Με τα στοιχεία αυτά και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.2, για τον καθορισμό των παραμέτρων του μοντέλου απλής διόδου για συλλογή ενέργειας, βρίσκουμε $R_s = 1 \Omega$, $R_{sh} = 3 \text{ k}\Omega$ και $I_{ph} = 0.3 \text{ A}$.

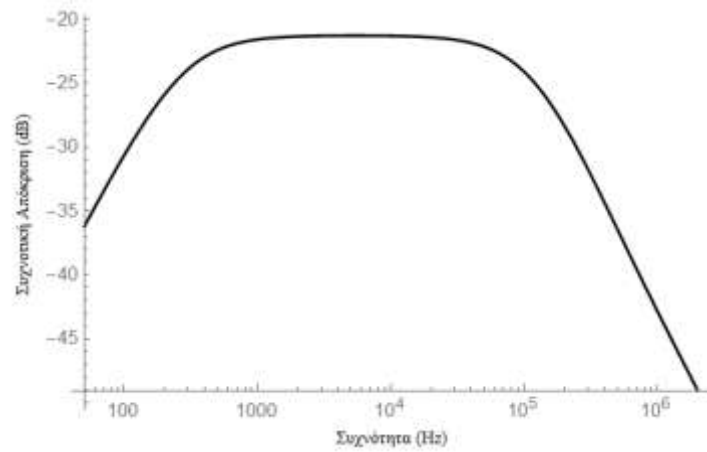
- i. Υπολογισμός παραμέτρων για $C_0 = 1 \mu\text{F}$ και $R_C = 50 \Omega$:

1. $r = 642.37 \Omega$

$$C = 7.5 \times 10^{-10} \text{ F}$$

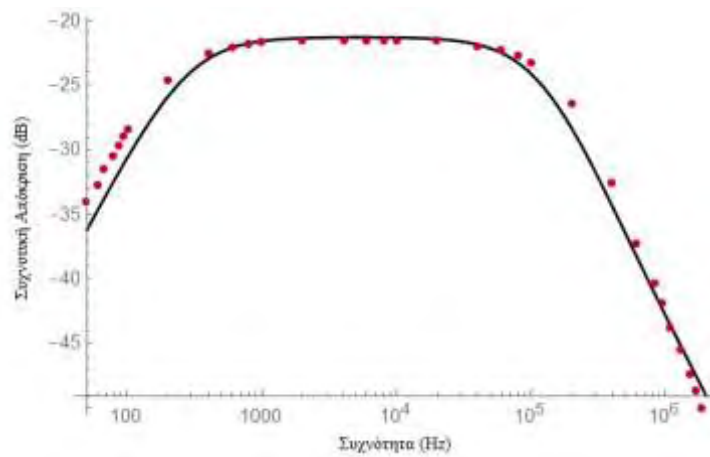
$$L = 0.00114 \text{ H}$$

2.



Σχήμα 20: Συχνωτική απόκριση μοντέλου

3. $R^2 = 0.997$



Σχήμα 21: Fitting συχνωτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων

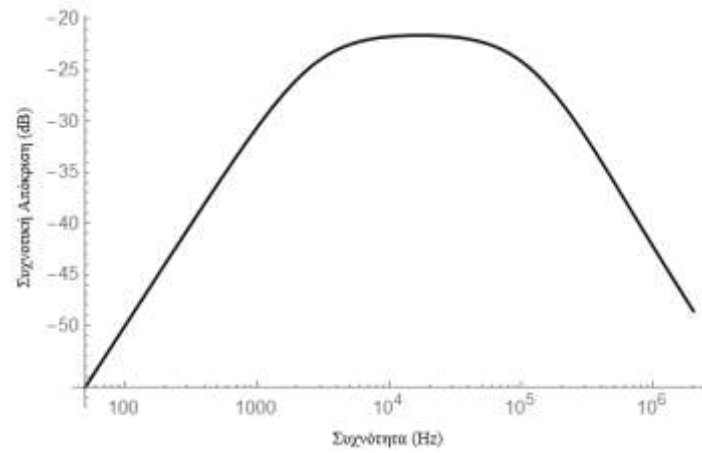
ii. Υπολογισμός παραμέτρων για $C_0 = 100 \text{ nF}$ και $R_C = 50 \Omega$:

1. $r = 672.5 \Omega$

$C = 5.7 \times 10^{-10} \text{ F}$

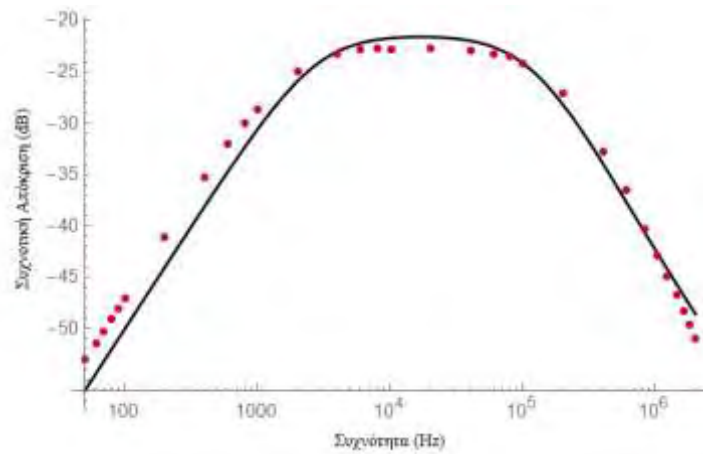
$L = 0.00108 \text{ H}$

2.



Σχήμα 22: Συχνωτική απόκριση μοντέλου

3. $R^2 = 0.997$



Σχήμα 23: Fitting συχνωτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων

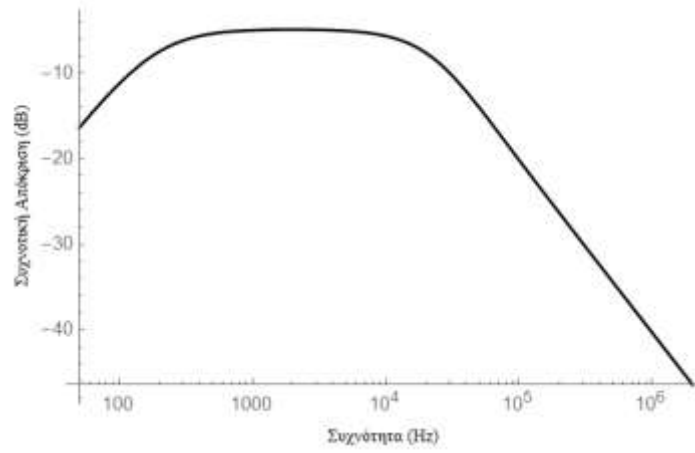
iii. Υπολογισμός παραμέτρων για $C_0 = 1\mu\text{F}$ και $R_C = 500\ \Omega$:

1. $r = 438.26\ \Omega$

$$C = 9.55 \times 10^{-9}\ \text{F}$$

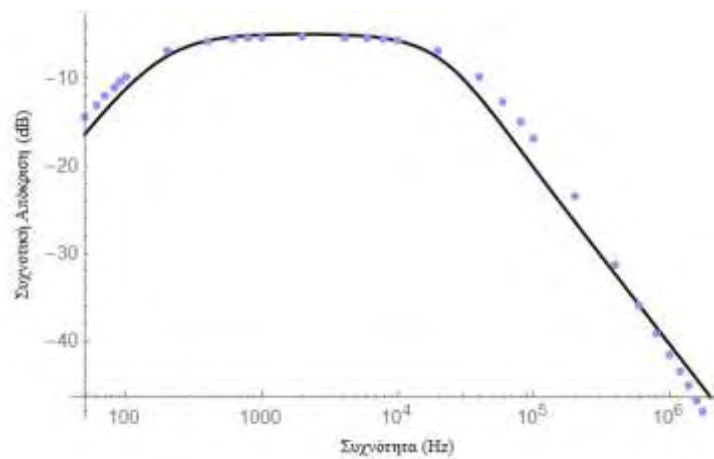
$$L = 0.0083\ \text{H}$$

2.



Σχήμα 24: Συχνοτική απόκριση μοντέλου

3. $R^2 = 0.994$



Σχήμα 25: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων

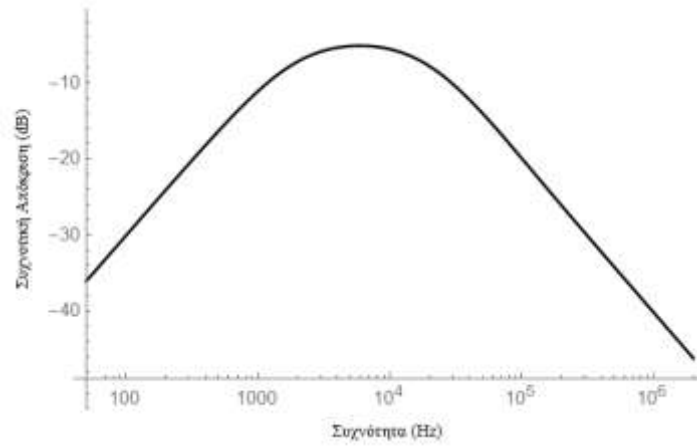
vi. Υπολογισμός παραμέτρων για $C_0 = 100 \text{ nF}$ και $R_C = 500 \Omega$:

1. $r = 462.45 \Omega$

$$C = 4.8 \times 10^{-9} \text{ F}$$

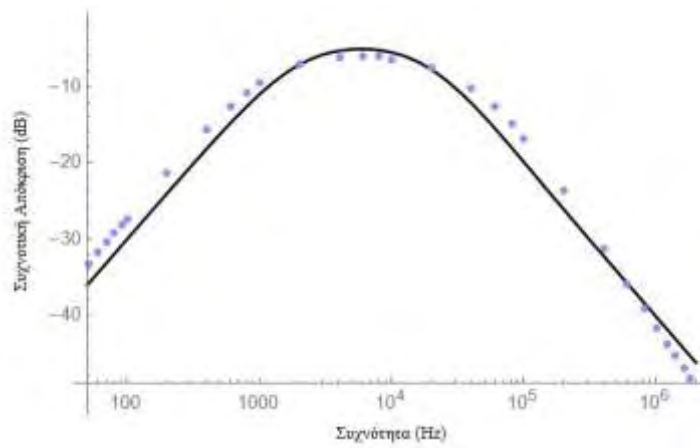
$$L = 0.0082 \text{ H}$$

2.



Σχήμα 26: Συχνωτική απόκριση μοντέλου

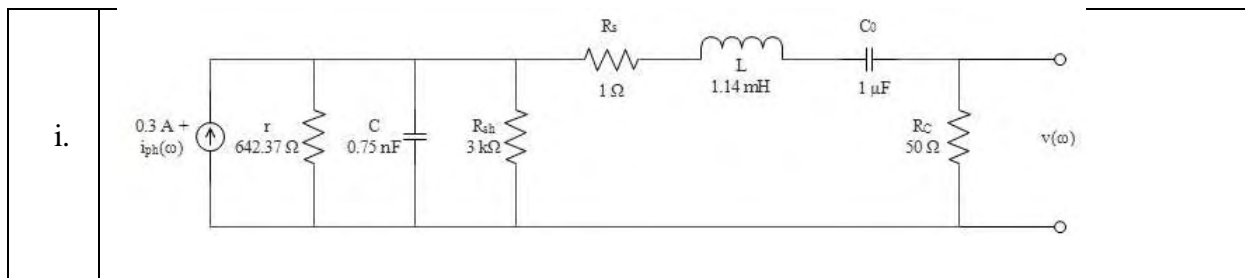
3. $R^2 = 0.995$

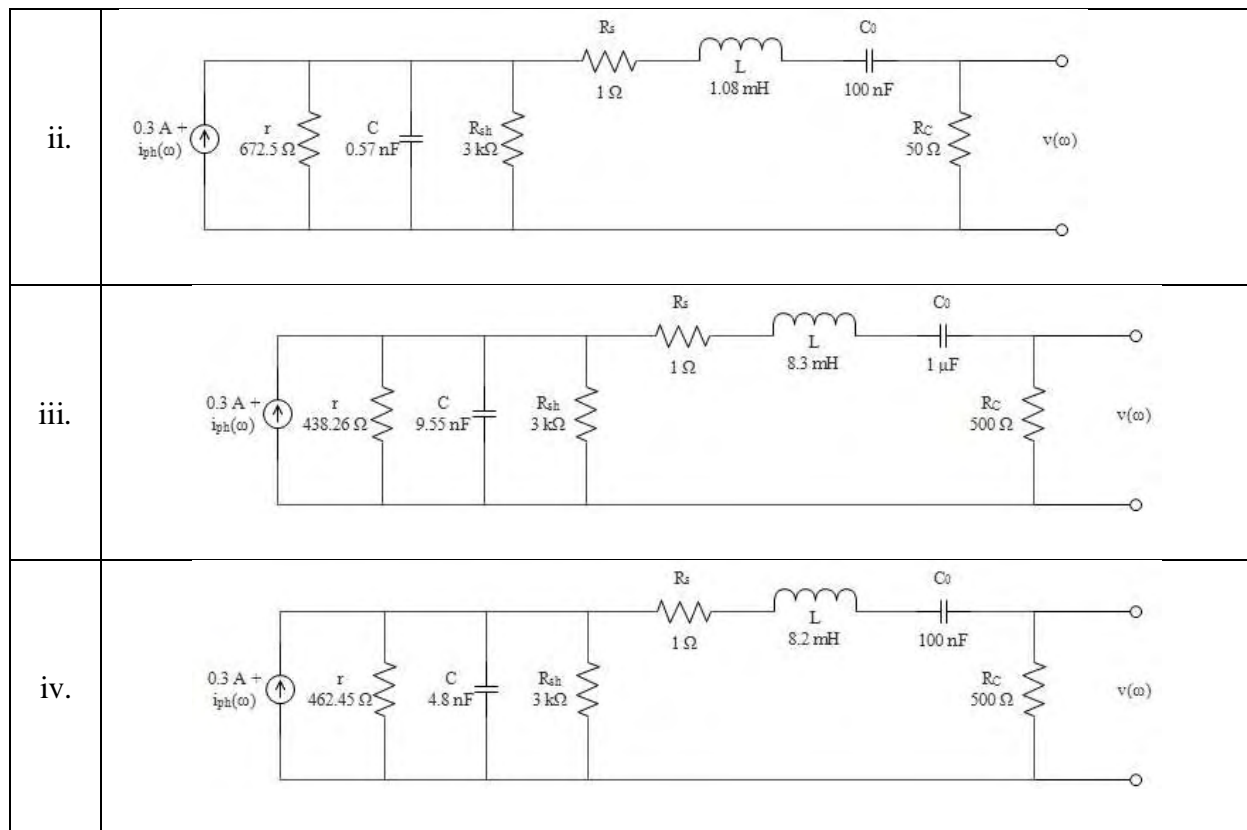


Σχήμα 27: Fitting συχνωτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων

Στον Πίνακα 10 μπορούμε να δούμε τα κυκλώματα που προκύπτουν για τα παραπάνω αποτελέσματα.

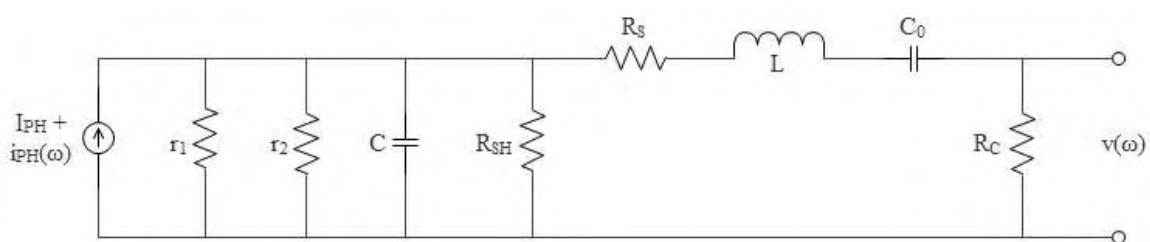
Πίνακας 10: Κυκλώματα για μεταφορά πληροφορίας απλής διόδου για το μοντέλο πάνελ BP Solar SX 305M





5.3 Μοντέλο διπλής διόδου

5.3.1 Ανάλυση κυκλώματος

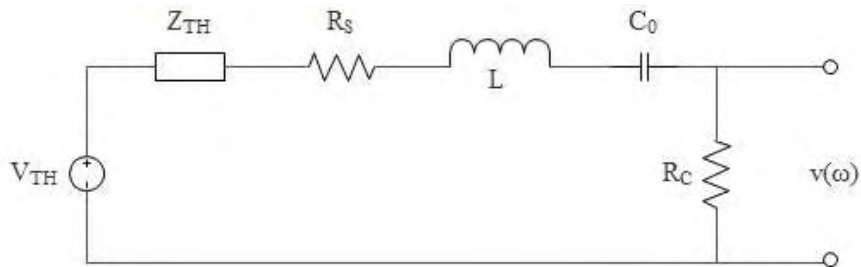


Σχήμα 28: PV μοντέλο διπλής διόδου για μετάδοση πληροφορίας

Για να μοντελοποιηθεί η μετάδοση πληροφορίας με τη χρήση ηλιακού πάνελ, είναι απαραίτητη μία τροποποίηση του μοντέλου διπλής διόδου για συλλογή ενέργειας, ώστε αυτό να προσομοιώνει τα AC χαρακτηριστικά της συσκευής. Όπως φαίνεται στο Σχ. 28, η διόδος D_1 αντικαθίσταται από την ισοδύναμη αντίσταση μικρού σήματος r_1 και η διόδος D_2 αντικαθίσταται από την ισοδύναμη αντίσταση μικρού σήματος r_2 . Παράλληλα με την αντίσταση R_{sh} , εισάγεται ένας πυκνωτής C , προκειμένου να συλλάβει τα εσωτερικά

χωρητικά αποτελέσματα της ηλιακής κυψελίδας. Επίσης προστίθεται ένα πηνίο L σε σειρά, το οποίο μοντελοποιεί την αυτεπαγωγή των τυχόν συνδέσεων καλωδίων στο ηλιακό πάνελ. Δεδομένου ότι μόνο η AC συνιστώσα του φωτο-παραγόμενου ρεύματος $i_{ph}(\omega)$ χρησιμοποιείται για την επικοινωνία, προστίθεται ένας πυκνωτής C_0 , πριν από την αντίσταση φορτίου R_c , ώστε να μπλοκάρει την DC συνιστώσα του σήματος. Το σήμα πληροφορίας αντιπροσωπεύεται από την τάση στα άκρα της αντίστασης φορτίου R_c .

Χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο Thevenin, για το τμήμα του κυκλώματος του Σχ. 28, που περιλαμβάνει την πηγή ρεύματος $I_{ph} + i_{ph}(\omega)$, τις αντιστάσεις μικρού σήματος r_1 και r_2 , τον πυκνωτή C και την αντίσταση R_{sh} , προκύπτει το παρακάτω κύκλωμα:



Σχήμα 29: Μοντέλο με ισοδύναμο Thevenin για μετάδοση πληροφορίας

Έπειτα, η συχνοτική απόκριση του νέου κυκλώματος δίνεται από:

$$\frac{v(\omega)}{V_{TH}(\omega)} = \frac{R_c}{Z_{TH} + R_s + (i\omega L) + \frac{1}{i\omega C_0} + R_c} \quad (53.)$$

όπου $Z_{TH} = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{i\omega C} + \frac{1}{R_{sh}}}$

Υπάρχουν οκτώ άγνωστες παράμετροι στην (53). Αυτές είναι:

- οι αντιστάσεις μικρού σήματος r_1 και r_2 ,
- η χωρητικότητα C του πυκνωτή,
- η παράλληλη αντίσταση R_{sh} ,
- η αντίσταση σειράς R_s ,
- η αυτεπαγωγή L του πηνίου,
- η χωρητικότητα C_0 του πυκνωτή και
- η αντίσταση φορτίου R_c

Για τις παραμέτρους R_{sh} και R_s , οι τιμές υπολογίζονται από το μοντέλο διπλής διόδου για συλλογή ενέργειας, που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 4.3. Οπότε οι άγνωστες παράμετροι μειώνονται στις πέντε.

Για την προσέγγιση των άγνωστων παραμέτρων θα χρησιμοποιήσουμε μετρήσεις της συχνοτικής απόκρισης του ηλιακού πάνελ, για $C_0 = 1\mu\text{F}$ (Σχ. 18) και $C_0 = 100\text{ nF}$ (Σχ. 19), για R_C στο εύρος από $10\ \Omega$ έως $500\ \Omega$. Έτσι, δημιουργώντας τις υποθέσεις αυτές για τις παραμέτρους C_0, R_C , οι άγνωστες παράμετροι για τις οποίες θα αναζητήσουμε τελικά τιμές είναι οι r_1, r_2, C και L .

5.3.2 Μέθοδος υπολογισμού τιμών

1. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Levenberg–Marquardt, βρίσκουμε αριθμητικές τιμές για τις παραμέτρους r_1, r_2, C και L , ώστε η εξίσωση (53), ως συνάρτηση του ω , να έχει το βέλτιστο fitting στα δεδομένα που πήραμε από τις μετρήσεις στα Σχ. 18 και Σχ. 19.
2. Αντικαθιστώντας στην (53) όλες τις τιμές που έχουμε υπολογίσει, κατασκευάζουμε τη γραφική παράσταση της συχνοτικής απόκρισης της (53) σε dB ως προς τη συχνότητα.
3. Τέλος, επαληθεύουμε την ορθότητα των παραπάνω προσεγγίσεων, με τον υπολογισμό του συντελεστή προσδιορισμού R^2 . Ο συντελεστής προσδιορισμού παίρνει τιμές στο κλειστό διάστημα $[0, 1]$. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή του συντελεστή, τόσο καλύτερο fitting έχουμε, δηλαδή, η γραφική παράσταση που κατασκευάσαμε στο βήμα 2 συμπίπτει σημαντικά με τα σημεία των μετρήσεων, που πήραμε από τα Σχ. 18 και Σχ. 19.

5.3.3 Εφαρμογή

Για την παρακάτω διαδικασία χρησιμοποιείται το μοντέλο πάνελ BP Solar SX 305M [36]. Τα δεδομένα που θα χρειαστούμε για να ξεκινήσουμε τους υπολογισμούς, περιλαμβάνουν τις παραμέτρους V_m, I_m, V_{oc} και I_{sc} των οποίων τις τιμές θα πάρουμε από το datasheet, που δίνεται στον Πίνακα 11.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εφόσον βρισκόμαστε σε STC (Standard Test Conditions), η θερμοκρασία πάνελ θα είναι $T = 298^\circ\text{ K}$.

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά πάνελ BP Solar SX 305M

Ηλεκτρονικά δεδομένα	Τιμές σε STC
Τάση Μέγιστης Ισχύος - V_m	16.5 V
Ρεύμα Μέγιστης Ισχύος - I_m	0.27 A
Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος - V_{oc}	20.5 V
Ρεύμα Βραχυκυκλώματος - I_{sc}	0.3 A

Έπειτα, δίνεται ότι ο αριθμός των συνδεδεμένων σε σειρά κυψελίδων είναι $N_s = 36$, $m_1 = 1$ και $m_2 = 2$. Με τα στοιχεία αυτά και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.3, για τον καθορισμό των παραμέτρων του μοντέλου διπλής διόδου για συλλογή ενέργειας, βρίσκουμε $R_s = 4 \Omega$, $R_{sh} = 2.3 \text{ k}\Omega$ και $I_{ph} = I_{sc} = 0.3 \text{ A}$.

i. Υπολογισμός παραμέτρων για $C_0 = 1 \mu\text{F}$ και $R_C = 50 \Omega$:

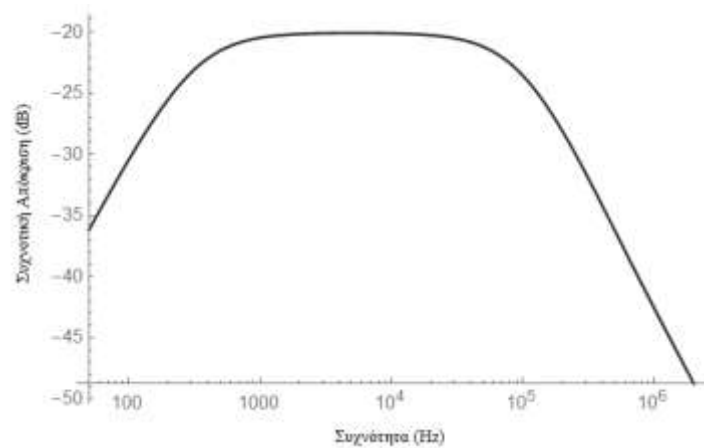
1. $r_1 = 257294.57 \Omega$

$r_2 = 560.9 \Omega$

$C = 8.92 \times 10^{-10} \text{ F}$

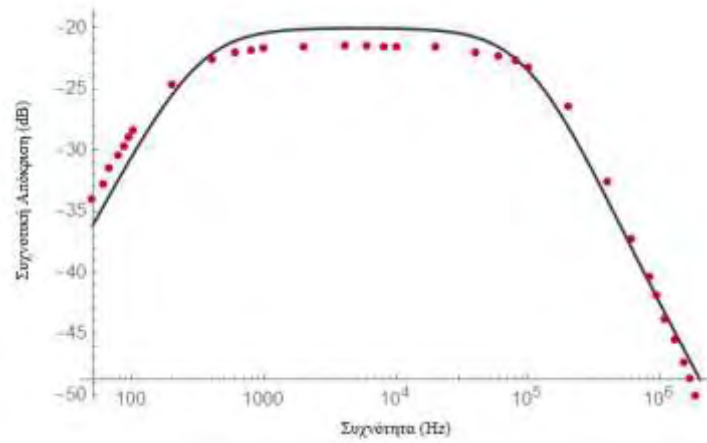
$L = 0.00110 \text{ H}$

2.



Σχήμα 30: Συχνотική απόκριση μοντέλου

3. $R^2 = 0.998$



Σχήμα 31: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων

ii. Υπολογισμός παραμέτρων για $C_0 = 100 \text{ nF}$ και $R_C = 50 \Omega$:

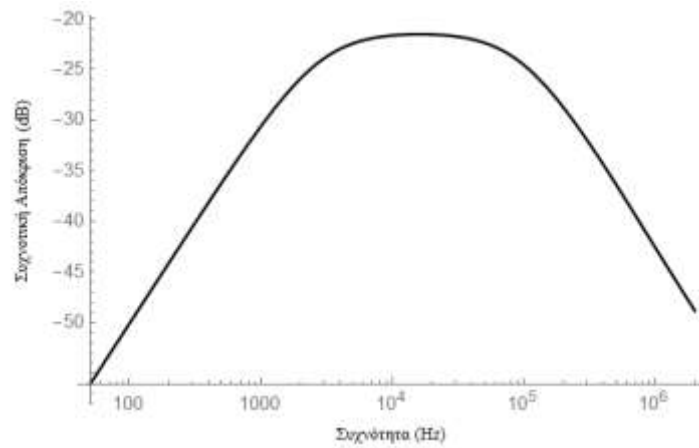
1. $r_1 = 6712.2 \Omega$

$r_2 = 793.97 \Omega$

$C = 4.1 \times 10^{-10} \text{ F}$

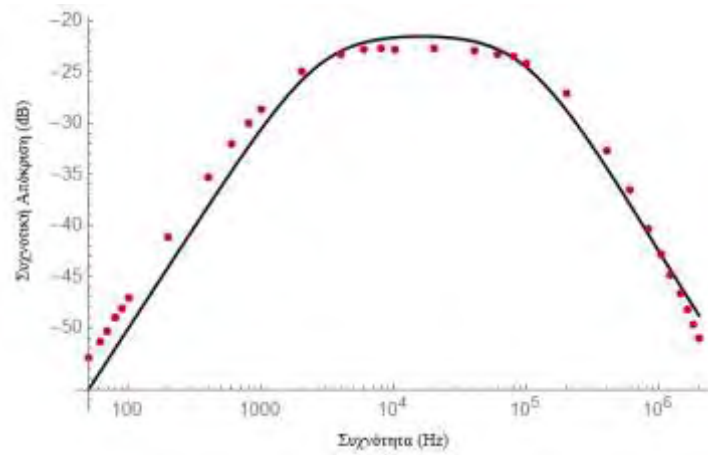
$L = 0.00111 \text{ H}$

2.



Σχήμα 32: Συχνοτική απόκριση μοντέλου

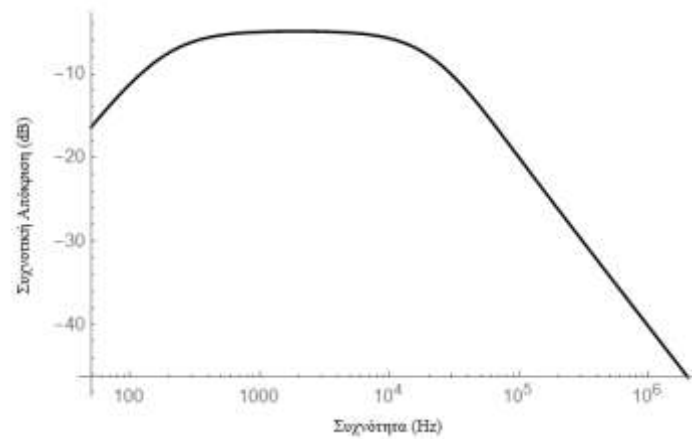
3. $R^2 = 0.994$



Σχήμα 33: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων

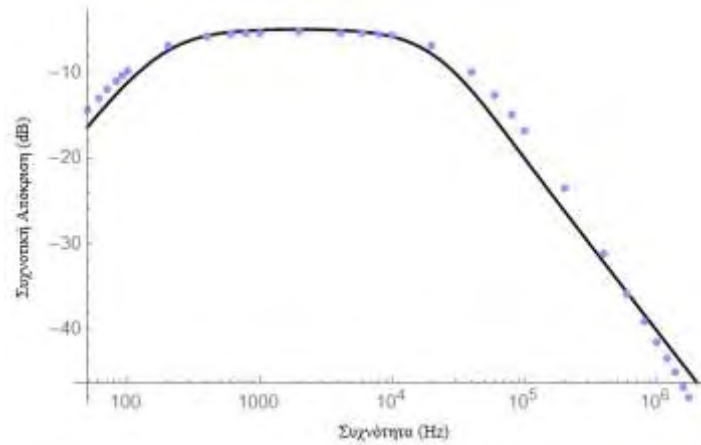
iii. Υπολογισμός παραμέτρων για $C_0 = 1\mu\text{F}$ και $R_C = 500\ \Omega$:

1. $r_1 = 14149.15\ \Omega$
 $r_2 = 468.87\ \Omega$
 $C = 7.61 \times 10^{-9}\ \text{F}$
 $L = 0.0082\ \text{H}$
- 2.



Σχήμα 34: Συχνοτική απόκριση μοντέλου

3. $R^2 = 0.994$

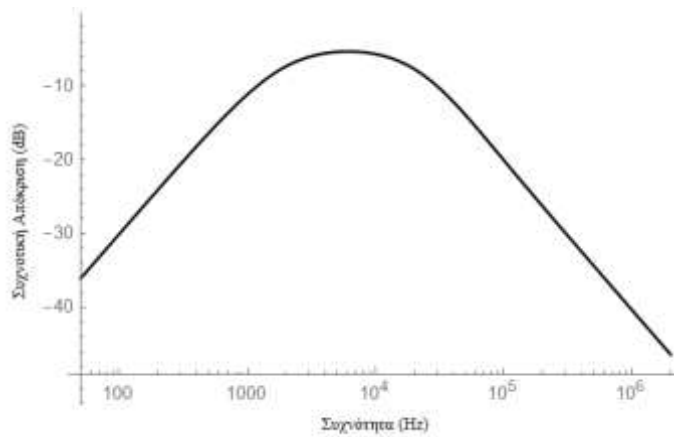


Σχήμα 35: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων

iv. Υπολογισμός παραμέτρων για $C_0 = 100 \text{ nF}$ και $R_C = 500 \Omega$:

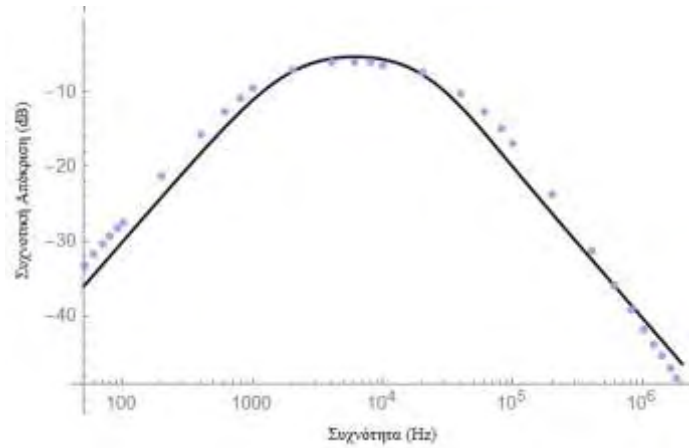
1. $r_1 = 16252.4 \Omega$
 $r_2 = 540.34 \Omega$
 $C = 6.4 \times 10^{-9} \text{ F}$
 $L = 0.0083 \text{ H}$

2.



Σχήμα 36: Συχνοτική απόκριση μοντέλου

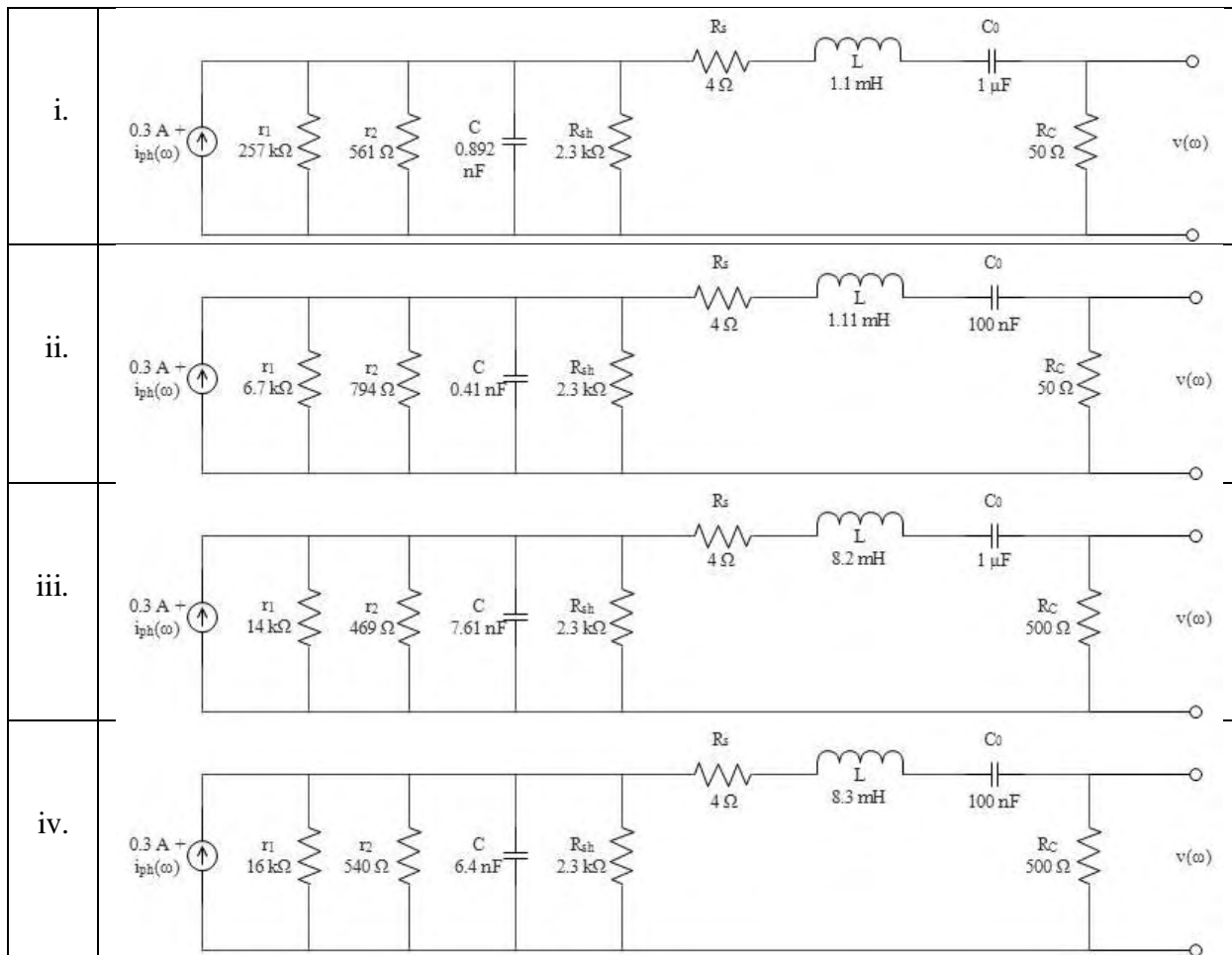
3. $R^2 = 0.993$



Σχήμα 37: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων

Στον Πίνακα 12 μπορούμε να δούμε τα κυκλώματα που προκύπτουν για τα παραπάνω αποτελέσματα.

Πίνακας 12: Κυκλώματα για μεταφορά πληροφορίας διπλής διόδου για το μοντέλο πάνελ BP Solar SX 305M

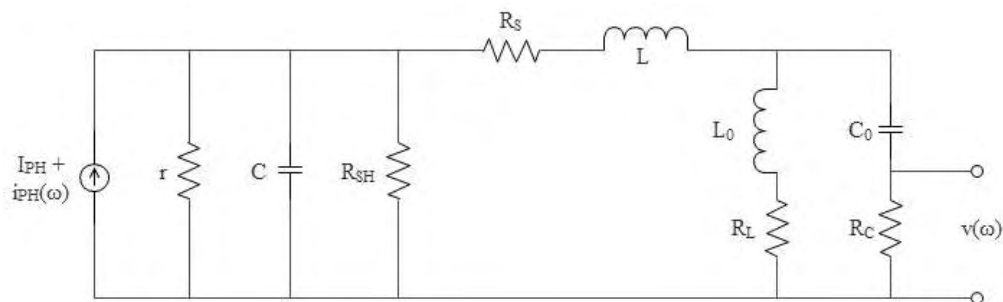


6. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ PV ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

6.1 Εισαγωγή

Τα δυο προαναφερθέντα μοντέλα μπορούν να συνδυαστούν προκειμένου να κατασκευαστεί ένα γενικευμένο ηλεκτρικό ισοδύναμο που θα μοντελοποιεί τη λειτουργία φωτοβολταϊκών κυψελίδων που χρησιμοποιούνται τόσο για συλλογή ενέργειας όσο και για μεταφορά πληροφορίας. Ένα τέτοιο γενικευμένο μοντέλο έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς η συνάρτηση μεταφοράς του θα αποτελέσει μέρος της απολαβής του τηλεπικοινωνιακού καναλιού του VLC συστήματος [2]. Επομένως όσο πιο ακριβές είναι το τελικό γενικευμένο μοντέλο και όσο περισσότερα φυσικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών κυψελίδων περιλαμβάνει τόσο καλύτερη εκτίμηση των επιδόσεων του VLC συστήματος μπορεί να γίνει.

6.2 Μοντέλο απλής διόδου

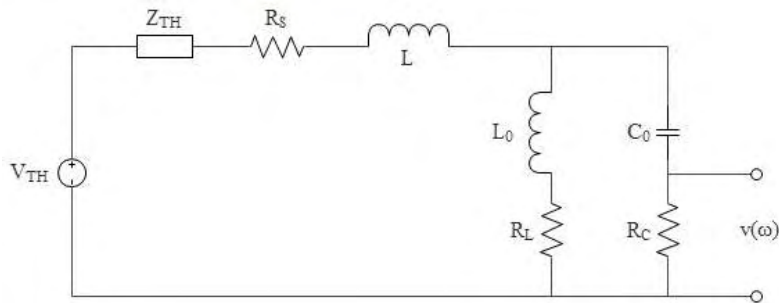


Σχήμα 38: PV μοντέλο απλής διόδου για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μετάδοση πληροφορίας

Για την ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μεταφορά πληροφορίας μέσω ενός φωτοβολταϊκού μοντέλου απλής διόδου, έχει προταθεί το κύκλωμα που φαίνεται στο Σχ. 38. Η αντίσταση φορτίου R_C και ο πυκνωτής C_0 αποτελούν τον κλάδο μεταφορά πληροφορίας. Παράλληλα με τον κλάδο μετάδοσης πληροφορίας προστίθεται ο κλάδος για συλλογή ενέργειας. Ο κλάδος για τη συλλογή ενέργειας αποτελείται από ένα πηνίο L_0 και μια αντίσταση R_L , η οποία προσομοιώνει τη λειτουργία μιας μπαταρίας. Το πηνίο L_0 χρησιμοποιείται για την εξασθένηση του AC σήματος, αφαιρώντας έτσι τις διακυμάνσεις από το DC σήμα, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει το κέρδος στο σήμα πληροφορίας. Το φωτο-παραγόμενο ρεύμα αποτελείται τόσο από τη DC όσο και από την AC συνιστώσα του σήματος, δηλ. I_{ph} και $i_{ph}(\omega)$ αντίστοιχα. Η DC συνιστώσα I_{ph} μπλοκάρεται από τον

πυκνωτή C_0 και διέρχεται μόνο από τον κλάδο συλλογής ενέργειας. Η AC συνιστώσα $i_{ph}(\omega)$ διέρχεται και από τους δύο κλάδους. Ωστόσο, στον κλάδο για τη συλλογή ενέργειας, έχει εξασθενήσει αρκετά εξαιτίας του πηνίου L_0 . Επομένως, το μεγαλύτερο μέρος της AC συνιστώσας διέρχεται από τον κλάδο για μετάδοση πληροφορίας, με την προϋπόθεση ότι τα L_0 και R_L είναι αρκετά μεγάλα σε σύγκριση με τα $1/C_0$ και R_C .

Χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο Thevenin, για το τμήμα του κυκλώματος του Σχ. 38, που περιλαμβάνει την πηγή ρεύματος $I_{ph} + i_{ph}(\omega)$, την αντίσταση r , τον πυκνωτή C και την αντίσταση R_{sh} , προκύπτει το παρακάτω κύκλωμα:



Σχήμα 39: Μοντέλο με ισοδύναμο Thevenin για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μετάδοση πληροφορίας

Έπειτα, η συχνοτική απόκριση του νέου κυκλώματος δίνεται από:

$$\frac{v(\omega)}{V_{TH}(\omega)} = \frac{R_C}{R_C + \frac{1}{i\omega C_0}} \frac{Z_0}{Z_{TH} + R_S + (i\omega L) + Z_0} \quad (54.)$$

όπου $Z_{TH} = \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{i\omega C} + R_{sh}}$ είναι η σύνθετη αντίσταση Thevenin και $Z_0 = \frac{1}{\frac{1}{(i\omega L_0) + R_L} + \frac{1}{i\omega C_0} + R_C}$

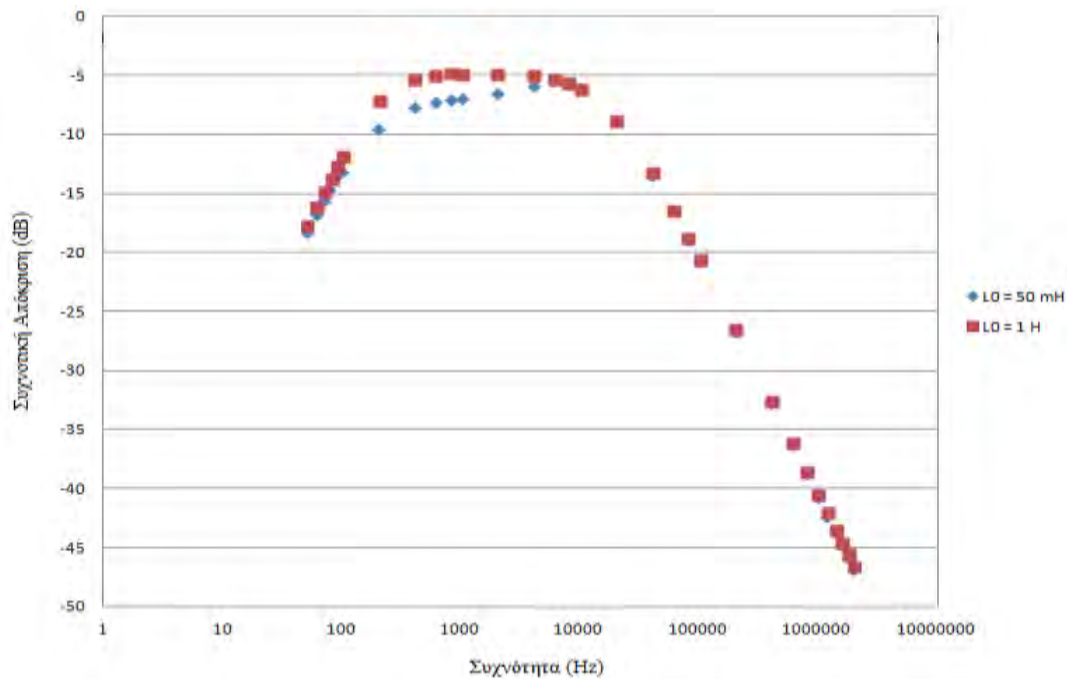
Στην (54) υπάρχουν εννέα παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν. Αυτές είναι:

- η αντίσταση μικρού σήματος r ,
- η χωρητικότητα C , του πυκνωτή
- η παράλληλη αντίσταση R_{sh} ,
- η αντίσταση σειράς R_S ,
- η αυτεπαγωγή L του πηνίου,
- η αυτεπαγωγή L_0 του πηνίου,
- η αντίσταση R_L ,
- η χωρητικότητα C_0 του πυκνωτή και
- η αντίσταση φορτίου R_C .

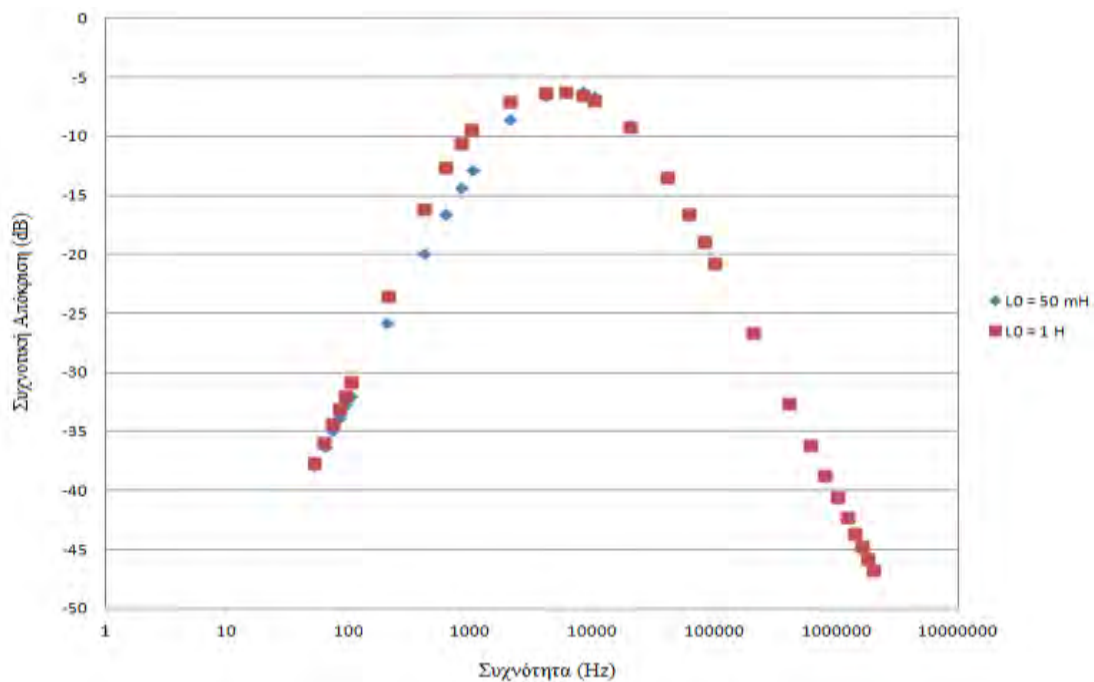
Οι τιμές των παραμέτρων R_{sh} και R_S , υπολογίζονται από το μοντέλο απλής διόδου για συλλογή ενέργειας, που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 4.2, ενώ οι τιμές των παραμέτρων r , C και

L , υπολογίζονται από το μοντέλο απλής διόδου για μεταφορά πληροφορίας, που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 5.2.

Έπειτα, για τις παραμέτρους που αποτελούν τον κλάδο συλλογής ενέργειας και τον κλάδο μετάδοσης πληροφορίας θα θεωρήσουμε τις τιμές $L_0 = 50 \text{ mH} - 1 \text{ H}$, $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ και $C_0 = 1 \mu\text{F} - 100 \text{ nF}$, $R_C = 500 \Omega$ αντίστοιχα. Οι μετρήσεις που παίρνουμε για τις παραπάνω τιμές δίνονται στα Σχ. 40 και Σχ. 41.



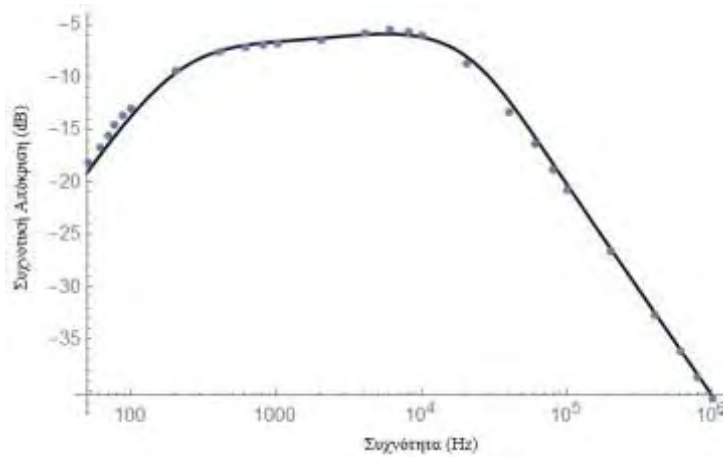
Σχήμα 40: Συχνотική απόκριση ηλιακού πάνελ, για $C_0 = 1 \mu\text{F}$



Σχήμα 41: Συχνотική απόκριση ηλιακού πάνελ, για $C_0 = 100 \text{ nF}$

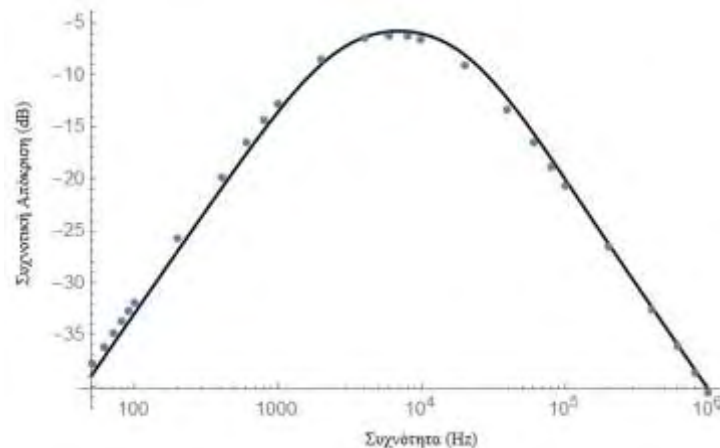
Τέλος, αν αντικαταστήσουμε στην (54) τις τιμές των παραμέτρων που έχουμε υπολογίσει σε προηγούμενα κεφάλαια, μπορούμε να κατασκευάσουμε τη γραφική παράσταση της (54) ως προς τη συχνότητα, ώστε να διαπιστώσουμε αν έχουμε καλό fitting στα δεδομένα των Σχ. 40 και Σχ. 41.

- i. Για $R_s = 1 \Omega$, $R_{sh} = 3 \text{ k}\Omega$, $r = 438 \Omega$, $C = 9.55 \times 10^{-9} \text{ F}$, $L = 0.0083 \text{ H}$,
 $L_0 = 50 \text{ mH}$, $R_L = 1 \text{ k}\Omega$, $C_0 = 10^{-6} \text{ F}$, $R_C = 500 \Omega$



Σχήμα 42: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων

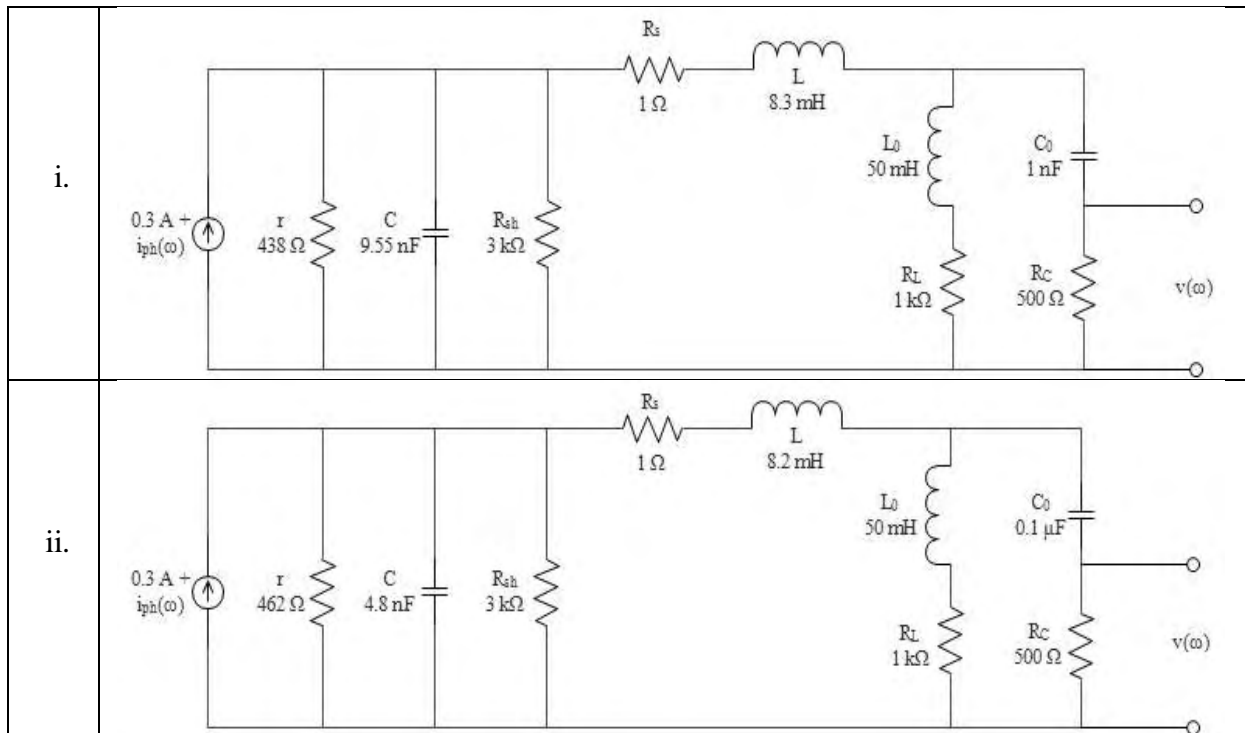
- ii. Για $R_s = 1 \Omega$, $R_{sh} = 3 \text{ k}\Omega$, $r = 462 \Omega$, $C = 4.8 \times 10^{-9} \text{ F}$, $L = 0.0082 \text{ H}$,
 $L_0 = 50 \text{ mH}$, $R_L = 1 \text{ k}\Omega$, $C_0 = 10^{-7} \text{ F}$, $R_C = 500 \Omega$



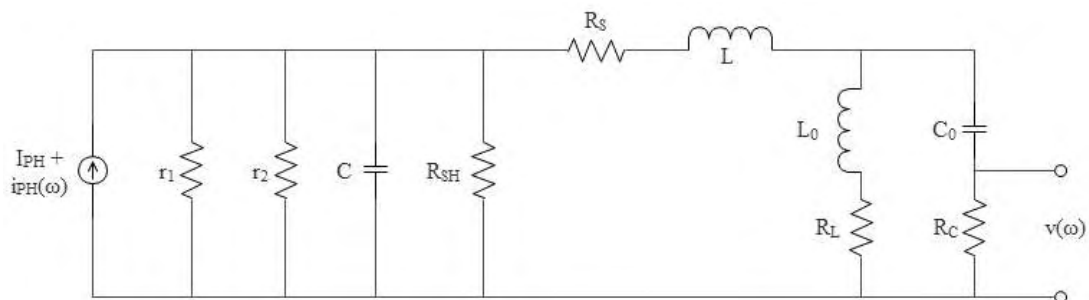
Σχήμα 43: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων

Στον Πίνακα 13 μπορούμε να δούμε τα κυκλώματα που προκύπτουν για τα παραπάνω αποτελέσματα.

Πίνακας 13: Κυκλώματα απλής διόδου για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μεταφορά πληροφορίας για το μοντέλο πάνελ BP Solar SX 305M



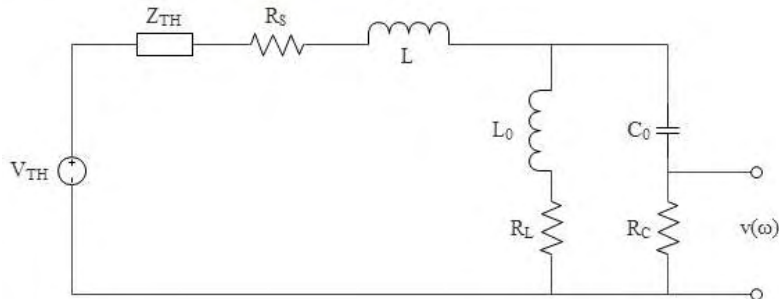
6.3 Μοντέλο διπλής διόδου



Σχήμα 44: PV μοντέλο διπλής διόδου για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μετάδοση πληροφορίας

Για την ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μετάδοση πληροφορίας μέσω ενός φωτοβολταϊκού μοντέλου διπλής διόδου, προτείνεται το κύκλωμα που φαίνεται στο Σχ. 44. Ο κλάδος μετάδοσης πληροφορίας αποτελείται από την αντίσταση φορτίου R_C και τον πυκνωτή C_0 ενώ ο κλάδος για συλλογή ενέργειας αποτελείται από το πηνίο L_0 και την αντίσταση R_L .

Χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο Thevenin, για το τμήμα του κυκλώματος του Σχ. 44, που περιλαμβάνει την πηγή ρεύματος $I_{ph} + i_{ph}(\omega)$, την αντίσταση r , τον πυκνωτή C και την αντίσταση R_{sh} , προκύπτει το παρακάτω κύκλωμα:



Σχήμα 45: Μοντέλο με ισοδύναμο Thevenin για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μετάδοση πληροφορίας

Έπειτα, η συχνοτική απόκριση του νέου κυκλώματος δίνεται από:

$$\frac{v(\omega)}{V_{TH}(\omega)} = \frac{R_C}{R_C + \frac{1}{i\omega C_0}} \frac{Z_0}{Z_{TH} + R_S + (i\omega L) + Z_0} \quad (55.)$$

$$\text{όπου } Z_{TH} = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{i\omega C} + \frac{1}{R_{sh}}}, \quad Z_0 = \frac{1}{\frac{1}{(i\omega L_0) + R_L} + \frac{1}{i\omega C_0 + R_C}}$$

Στην (55) υπάρχουν δέκα παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν. Αυτές είναι:

- οι αντιστάσεις μικρού σήματος r_1, r_2 ,
- η χωρητικότητα C του πυκνωτή,
- η παράλληλη αντίσταση R_{sh} ,
- η αντίσταση σειράς R_S ,
- η αυτεπαγωγή L του πηνίου,
- η αυτεπαγωγή L_0 του πηνίου,
- η αντίσταση R_L ,
- η χωρητικότητα C_0 του πυκνωτή και
- η αντίσταση φορτίου R_C

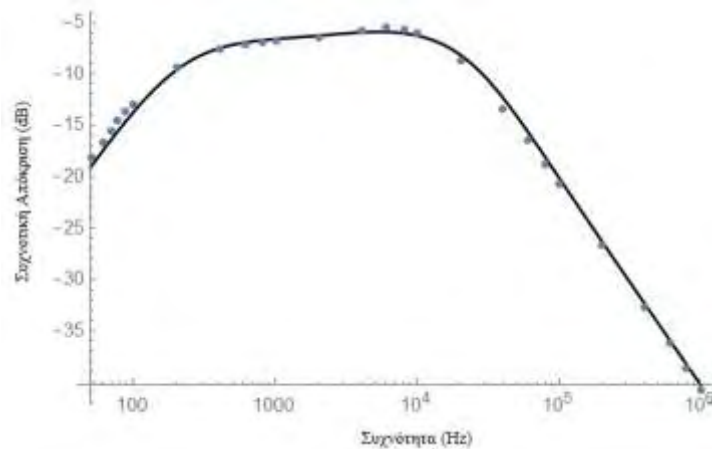
Οι τιμές των παραμέτρων R_{sh} και R_S , υπολογίζονται από το μοντέλο διπλής διόδου για συλλογή ενέργειας, που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 4.3, ενώ οι τιμές των παραμέτρων r_1, r_2, C και L , υπολογίζονται από το μοντέλο διπλής διόδου για μετάδοση πληροφορίας, που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 5.3.

Έπειτα, για τις παραμέτρους που αποτελούν τον κλάδο συλλογής ενέργειας και τον κλάδο μετάδοσης πληροφορίας θα θεωρήσουμε τις τιμές $L_0 = 50 \text{ mH} - 1 \text{ H}$, $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ και

$C_0 = 1\mu\text{F} - 100\text{ nF}$, $R_C = 500\ \Omega$ αντίστοιχα. Οι μετρήσεις που παίρνουμε για τις παραπάνω τιμές δίνονται στα Σχ. 40 και Σχ. 41.

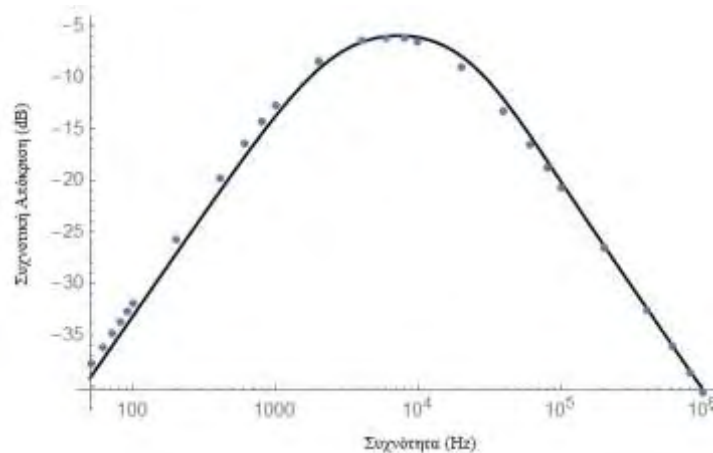
Τέλος, αν αντικαταστήσουμε στην (1) τις τιμές των παραμέτρων που έχουμε υπολογίσει σε προηγούμενα κεφάλαια, μπορούμε να κατασκευάζουμε τη γραφική παράσταση της (1) ως προς τη συχνότητα, ώστε να διαπιστώσουμε αν έχουμε καλό fitting στα δεδομένα των Σχ. 40 και Σχ. 41.

- i. Για $R_S = 4\ \Omega$, $R_{Sh} = 2.3\ \text{k}\Omega$, $r_1 = 14\ \text{k}\Omega$, $r_2 = 469\ \Omega$, $C = 7.6 \times 10^{-9}\ \text{F}$, $L = 0.0082\ \text{H}$, $L_0 = 50\ \text{mH}$, $R_L = 1\ \text{k}\Omega$, $C_0 = 10^{-6}\ \text{F}$, $R_C = 500\ \Omega$



Σχήμα 46: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων

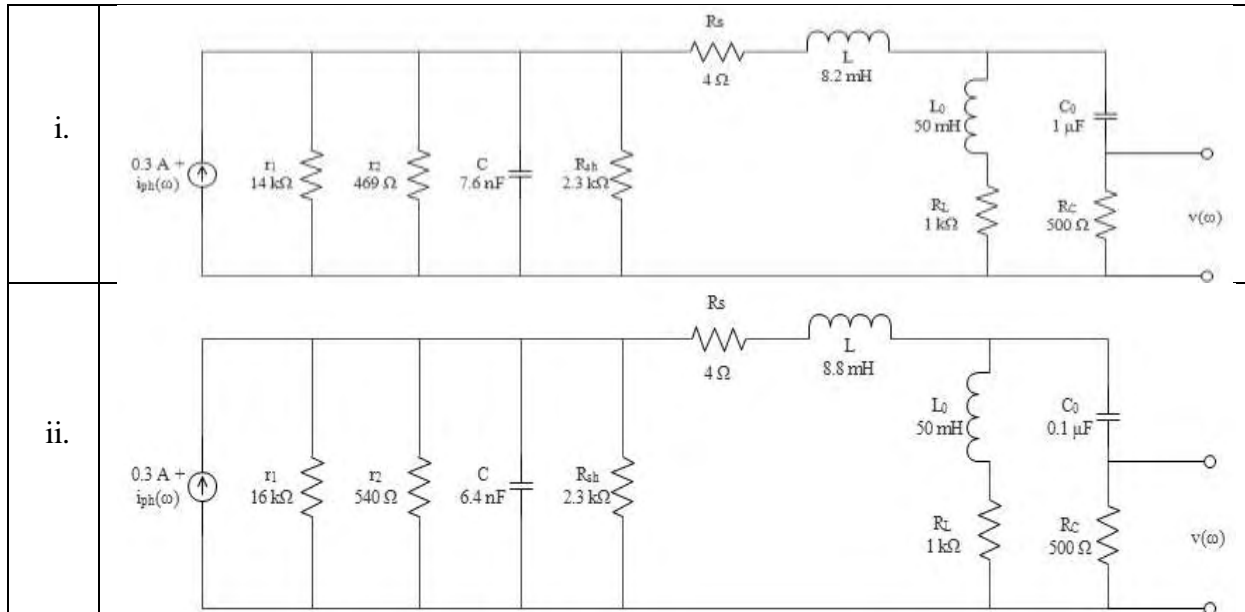
- ii. Για $R_S = 4\ \Omega$, $R_{Sh} = 2.3\ \text{k}\Omega$, $r_1 = 16\ \text{k}\Omega$, $r_2 = 540\ \Omega$, $C = 6.4 \times 10^{-9}\ \text{F}$, $L = 0.0088\ \text{H}$, $L_0 = 50\ \text{mH}$, $R_L = 1\ \text{k}\Omega$, $C_0 = 10^{-7}\ \text{F}$, $R_C = 500\ \Omega$



Σχήμα 47: Fitting συχνοτικής απόκρισης μοντέλου και μετρήσεων

Στον Πίνακα 14 μπορούμε να δούμε τα κυκλώματα που προκύπτουν για τα παραπάνω αποτελέσματα.

Πίνακας 14: Κυκλώματα διπλής διόδου για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μεταφορά πληροφορίας για το μοντέλο πάνελ BP Solar SX 305M



7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, η μελέτη αρχικά επικεντρώθηκε στην ανάλυση και εφαρμογή μεθόδων εξαγωγής παραμέτρων για τα μοντέλα απλής και διπλής διόδου για συλλογή ενέργειας. Στη συνέχεια, μελετήθηκαν τα αντίστοιχα AC ισοδύναμα μοντέλα, στα οποία αφού προστεθεί ένας κλάδος για τη λήψη του σήματος πληροφορίας, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για επικοινωνία όπως προτάθηκε στην εργασία [2]. Εάν στο τελευταίο κύκλωμα προστεθεί και ένας κλάδος, μέσω του οποίου πραγματοποιείται μόνο συλλογή ενέργειας, τότε το κύκλωμα αυτό θα έχει διπλή λειτουργία. Στην [2], η παραπάνω μελέτη πραγματοποιείται με τη χρήση του μοντέλου απλής διόδου για συλλογή ενέργειας, ενώ στην εργασία αυτή προτείνεται η χρήση του μοντέλου διπλής διόδου.

Όλες οι παράμετροι του DC μοντέλου, υπολογίζονται στο πρώτο βήμα, δηλαδή όταν μελετάμε αποκλειστικά το μοντέλο για συλλογή ενέργειας. Οι παράμετροι αυτές είναι το DC φωτορεύμα I_{PH} και οι παρασιτικές αντιστάσεις R_S , R_{SH} . Έπειτα, όταν μελετάμε το μοντέλο για μεταφορά πληροφορίας, οι παράμετροι που υπολογίσαμε προηγουμένως θεωρούνται γνωστές, οπότε προχωρούμε στον υπολογισμό των υπολοίπων. Τέλος, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματά μας στο μοντέλο για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μεταφορά πληροφορίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι για κάποιες από αυτές τις παραμέτρους (για παράδειγμα για τις αντιστάσεις φορτίου κάθε κλάδου) χρησιμοποιούμε απλώς κάποιες υποθέσεις, οι οποίες βέβαια βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα, διότι δεν υπάρχει λόγος να υπολογίσουμε εκ νέου κάποια τιμή για αυτές.

Είναι προφανές, ότι το πιο κρίσιμο κομμάτι του σχεδιασμού ενός τέτοιου μοντέλου είναι η επιλογή του κυκλώματος για συλλογή ενέργειας. Όπως έχουμε δει ενδεικτικά στο δεύτερο κεφάλαιο, έχουν προταθεί πολυάριθμα τέτοια κυκλώματα, με τα κυρίαρχα να είναι αυτό με τις δύο διόδους και τις δύο παρασιτικές αντιστάσεις και η πιο απλή μορφή του, το μοντέλο απλής διόδου. Ωστόσο η λίστα με τα προτεινόμενα κυκλώματα αναμένεται να ανανεώνεται διαρκώς στα επόμενα χρόνια, καθώς είναι πάρα πολλά τα φυσικά μεγέθη που μπορούν να ενσωματωθούν στο κύκλωμα με την προσθήκη ενός νέου στοιχείου.

Έπειτα, ένα θέμα μεγάλης σημασίας είναι η επιλογή κατάλληλης μεθόδου για την εξαγωγή παραμέτρων. Έχουν προταθεί και υπάρχουν στη βιβλιογραφία πολλές διαφορετικές μέθοδοι, κάθε μία με διαφορετική απόδοση και ακρίβεια, αλλά και με σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί, στη μέθοδο εξαγωγής παραμέτρων για το

μοντέλο διπλής διόδου, η επιλογή της σχέσης ανάμεσα στα δύο ρεύματα κόρου των διόδων. Σε κάποιες εργασίες τα δύο αυτά ρεύματα θεωρούνται ίσα πριν ξεκινήσει ο υπολογισμός τους. Ωστόσο πολλοί ερευνητές υποστηρίζουν πως μια τέτοια υπόθεση είναι τουλάχιστον ανακριβής και ότι γενικά το I_{s2} είναι στην πραγματικότητα τρεις με τέσσερις φορές μεγαλύτερο από το I_{s1} [37].

Τέλος, κατά την AC ανάλυση, δηλαδή όταν μελετάται η εξαγωγή παραμέτρων των μοντέλων για μεταφορά πληροφορίας και για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μεταφορά πληροφορίας, χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο μέθοδοι fitting. Μέσω των μεθόδων αυτών και έπειτα από πολλές επαναλήψεις διαφορετικών αρχικών προσεγγίσεων, στόχος μας είναι να καταλήξουμε σε ένα αποτέλεσμα σχεδόν όμοιο με αυτό των μετρήσεων που έχουμε στη διάθεση μας. Η εύρεση κατάλληλων αρχικών προσεγγίσεων μπορεί να αποβεί εξαιρετικά χρονοβόρα, ωστόσο η μέθοδος αυτή είναι συνήθως αρκετά αποδοτική.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Οι επεκτάσεις της εργασίας αυτής είναι πολλές και αφορούν τα ισοδύναμα κυκλώματα, τις μεθόδους υπολογισμού των παραμέτρων τους όσο και την μελέτη του VLC κυκλώματος. Πιο αναλυτικά, μία επέκταση αυτής της εργασίας θα μπορούσε να αποτελέσει σίγουρα η επιλογή οποιουδήποτε άλλου κυκλώματος στη θέση του μοντέλου για συλλογή ενέργειας. Επίσης θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί αναζήτηση για επιπλέον κυκλώματα, εκτός της λίστας που παρατίθεται σε αυτήν την εργασία και η μελέτη των παραμέτρων που αυτά ενσωματώνουν.

Ένα ακόμη πεδίο για περαιτέρω έρευνα αποτελεί αυτό των αλγορίθμων που αφορούν στην εξαγωγή τιμών για τις παραμέτρους ενός τέτοιου κυκλώματος, καθώς επίσης και άλλων αριθμητικών μεθόδων για εφαρμογή στην AC ανάλυση.

Επιπλέον, για την παρούσα εργασία θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί η μελέτη της συχνοτικής απόκρισης του κυκλώματος για ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας και μεταφορά πληροφορίας λαμβάνοντας υπόψη τη συνάρτηση μεταφοράς του τελικού κυκλώματος.

8. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Harald Haas, Cheng Chen, and Dominic O'Brien, "A guide to wireless networking by light," *Progress in Quantum Electronics*, 2017.
- [2] Z. Wang, D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, "On the Design of a Solar-Panel Receiver for Optical Wireless Communications With Simultaneous Energy Harvesting," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 8, pp. 1612-1623, Aug. 2015.
- [3] Richard C. Jaeger, *Microelectronic Circuit Design.*: The McGraw-Hill Companies, 1997.
- [4] Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich, "Photons in semiconductors," in *Fundamentals of Photonics.*: John Wiley & Sons, 1991.
- [5] Christophe Ballif et al., *Thin-Film Silicon Solar Cells*, Arvind Victor Shah, Ed.: CRC Press, 2010.
- [6] World Energy Resources study group, "Solar," in *World Energy Resources: 2013 Survey.*: World Energy Council, 2013, ch. 8.
- [7] Hoe-Gil Lee, "Optimal Design of Solar Photovoltaic Systems," University of Miami, Coral Gables, Florida, Dissertation Aug 2015.
- [8] Thomas Dittrich, *Materials Concepts for Solar Cells.*: World Scientific Publishing Company, 2014.
- [9] M. Azzouzi, D. Popescu, and M. Bouchahdane, "Modeling of Electrical Characteristics of Photovoltaic Cell Considering Single," *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 4, no. 6, Nov. 2016.
- [10] Md. Nazmul Islam Sarkar, "Effect of various model parameters on solar photovoltaic cell simulation: a SPICE analysis," *Renewables: Wind, Water, and Solar*, vol. 3, no. 1, Aug. 2016.
- [11] S. Vignati, "Solutions for indoor light energy harvesting," KTH, School of Information and Communication Technology , Master's thesis 2012.
- [12] Elisa Sesa, "A Novel Electrical Model for Organic Photovoltaic Cells," School of Mathematical and Physical Sciences , UON, Doctoral dissertation 2013.
- [13] Fernando De Castro, Antonino Laudani, Francesco Riganti Fulginei, and Alessandro Salvini, "An in-depth analysis of the modelling of organic solar cells using multiple-diode circuits," *Solar Energy*, vol. 135, pp. 590-597, 2016.

- [14] F. J. Garcia-Sanchez, D. Lugo-Muoz, J. Muci, and A. Ortiz-Conde, "Lumped Parameter Modeling of Organic Solar Cells' S-shaped I–V Characteristics," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, no. 1, pp. 330 - 335, Jan. 2013.
- [15] B. Mazhari, "An improved solar cell circuit model for organic solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 7, pp. 1021-1033, May 2006.
- [16] Latif Ullah Khan, "Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges," *Communications and Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 78-88, May 2017.
- [17] Linda J. Vandergriff, "Nature and Properties of Light," in *Fundamentals of Photonics*, Chandra Roychoudhuri, Ed.: SPIE Press, May 2008, p. 418.
- [18] Hugh D. Young, *University Physics*, 8th ed.: Addison-Wesley, 1994, vol. 2.
- [19] D. C. O'Brien et al., "Visible light communications: Challenges and possibilities," in *2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Cannes, 2008, pp. 1-5.
- [20] Toshihiko Komine and Masao Nakagawa, "Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, Feb. 2004.
- [21] Pokpoom Chanthosot, Vittaya Tipsuwanporn, Viriya Krongratana, and Thanaporn Lilawatthanun, "The Indoor Use Development for Visible Light Communication," in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2015*, vol. 1, San Francisco, Oct 2015.
- [22] Jiun-Yu Sung, Chi-Wai Chow, and Chien-Hung Yeh, "Is blue optical filter necessary in high speed phosphor-based white light LED visible light communications," *Optics Express*, vol. 22, no. 17, pp. 20646-20651, Aug. 2014.
- [23] G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, and E. Ciaramella, "3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED," *Optics Express*, vol. 20, no. 26, Dec 2012.
- [24] Iskandar Slaiman, Nor Hisham B. Hamid, and Tang Tong Boon, "Optical Wireless Communications Through Visible Light Leds: An Overview," *Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, no. 3, pp. 1152-1156, March 2014.
- [25] Joseph S. Braley, "Photodetectors," *Electrical Engineering Materials*, University of Rhode island, 2008.

- [26] Ali M. Humada, Mojgan Hojabri, Saad Mekhilef, and Hussein M. Hamada, "Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 494-509, April 2016.
- [27] Vincenzo Franzitta, Aldo Orioli, and Alessandra Di Gangi, "Assessment of the usability and accuracy of two-diode models for photovoltaic modules," *Energies*, vol. 10, no. 4, Jan. 2017.
- [28] Samkeliso Shongwe and Moin Hanif, "Comparative Analysis of Different Single-Diode PV Modeling Methods," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, no. 3, May 2015.
- [29] H. A. B. Siddique, P. Xu, and R. W. De Doncker, "Parameter extraction algorithm for one-diode model of PV panels based on datasheet values," in *2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Alghero, 2013, pp. 7-13.
- [30] Mohammad Hejri, Hossein Mokhtari, Mohammad Reza Azizian, Mehrdad Ghandhari, and Lennart Soder, "On the Parameter Extraction of a Five-Parameter Double-Diode Model of Photovoltaic Cells and Modules," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 3, May 2014.
- [31] Chetan Singh Solanki, *SOLAR PHOTOVOLTAICS, Fundamentals, Technologies and Application.*: PHI Learning Pvt. Ltd., 2015.
- [32] Trina Solar, "TSM-PC05 The Universal Solution," TSM-225PC05, July 2011.
- [33] GE Energy, "AP-7105 Solar Panel," AP-7105/AP-75.
- [34] Kyosera Solar, "Kyocera KD245GH-4FB2," KD245GH-4FB2.
- [35] IBC Solar, "Sanyo Hybrid Solar Modules," Sanyo HIT-240HDE4 , June 2010.
- [36] bp solar, "SX 305, 5 Watt Photovoltaic Module ," SX 305.
- [37] Sudhanshu Gupta, Harpal Tiwari, Manoj Fozdar, and Vinay Chandna, "Development of a Two Diode Model for Photovoltaic Modules Suitable for use in Simulation Studies," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Shanghai, 2012.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

$$A_2 = \frac{I_m^2}{2V_t^2 V_m} \left[\left(b + \frac{a}{2} \right) \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{2V_t}\right) - a \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{V_t}\right) - \frac{b}{2} \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m}{2V_t}\right) \right] \quad (56.)$$

$$B_2 = \frac{I_m^2}{2V_t V_m} \left[\exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{2V_t}\right) - \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m}{2V_t}\right) \right] \\ - \frac{I_m}{V_t} \left(b + \frac{a}{2} \right) \left(\frac{1}{2V_t} - \frac{1}{V_m} \right) \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{2V_t}\right) + \frac{a I_m}{2V_t} \left(\frac{1}{V_t} - \frac{1}{V_m} \right) \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{V_t}\right) \\ + \frac{b I_m}{2V_t} \left(\frac{1}{2V_t} + \frac{1}{V_m} \right) \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m}{2V_t}\right) - \frac{3b I_m}{2V_t V_m} \quad (57.)$$

$$C_2 = -\frac{2I_m}{V_m} + \frac{3b}{2V_t} + \left(\frac{I_m}{V_m} - \frac{1}{V_t} \left(b + \frac{a}{2} \right) \right) \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{2V_t}\right) \\ + \left(\frac{I_m}{V_m} - \frac{b}{2V_t} \right) \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m}{2V_t}\right) + \frac{a}{2V_t} \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{V_t}\right) \quad (58.)$$

$$A_3 = \frac{I_m^3}{8V_t^3 V_m} \left(b + \frac{a}{2} \right) \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{2V_t}\right) - \frac{a I_m^3}{4V_t^3 V_m} \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{V_t}\right) \\ + \frac{b I_m^3}{16V_t^3 V_m} \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m}{2V_t}\right) \quad (59.)$$

$$B_3 = \frac{I_m^3}{8V_t^2 V_m} \left[\exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{2V_t}\right) + \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m}{2V_t}\right) \right] \\ - \frac{I_m^2}{2V_t^2} \left(b + \frac{a}{2} \right) \left(\frac{1}{4V_t} - \frac{1}{V_m} \right) \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{2V_t}\right) + \frac{a I_m^2}{2V_t^2} \left(\frac{1}{2V_t} - \frac{1}{V_m} \right) \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{V_t}\right) \\ - \frac{b I_m^2}{4V_t^2} \left(\frac{1}{4V_t} + \frac{1}{V_m} \right) \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m}{2V_t}\right) \quad (60.)$$

$$A_4 = \frac{I_m^4}{96V_t^4 V_m} \left[(a + 2b) \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{2V_t}\right) - b \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m}{2V_t}\right) \right] \\ - \frac{a I_m^4}{12V_t^4 V_m} \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{V_t}\right) \quad (61.)$$

$$B_4 = \frac{I_m^4}{48V_t^3 V_m} \left[\exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{2V_t}\right) + \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m}{2V_t}\right) \right] \quad (62.)$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{I_m^3}{8V_t^3} \left(b + \frac{a}{2} \right) \left(\frac{1}{6V_t} - \frac{1}{V_m} \right) \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{2V_t} \right) + \frac{bI_m^3}{16V_t^3} \left(\frac{1}{6V_t} + \frac{1}{V_m} \right) \exp\left(\frac{V_{oc} - V_m}{2V_t} \right) \\
& \quad + \frac{aI_m^3}{4V_t^3} \left(\frac{1}{3V_t} - \frac{1}{V_m} \right) \exp\left(\frac{V_m - V_{oc}}{V_t} \right)
\end{aligned}$$

