



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση και υλοποίηση συστήματος μέγιστης μεταφοράς ισχύος από θερμοηλεκτρική γεννήτρια για τη φόρτιση μπαταρίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΤΡΙΔΗ ΜΑΡΙΝΑ

Επιβλέπων : Πάυλος-Πέτρος Σωτηριάδης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



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

Σχεδίαση και υλοποίηση συστήματος μέγιστης μεταφοράς ισχύος από θερμοηλεκτρική γεννήτρια για τη φόρτιση μπαταρίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΤΡΙΔΗ ΜΑΡΙΝΑ

Επιβλέπων : Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη 18^η Οκτωβρίου 2016.

(Υπογραφή)

.....
Πέτρος-Παύλος Σωτηριάδης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

(Υπογραφή)

.....

ΠΕΤΡΙΔΗ ΜΑΡΙΝΑ

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

© 2016 – All rights reserved

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζει και αναλύει την τεχνολογία των θερμοηλεκτρικών στοιχείων κατά τη λειτουργία τους ως γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός είναι η σχεδίαση κυκλώματος για τον εντοπισμό του βέλτιστου σημείου λειτουργίας της γεννήτριας, με στόχο τη φόρτιση μίας μπαταρίας λιθίου με τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Η βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος γίνεται με τη χρήση μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Ο ρόλος του μετατροπέα είναι να κάνει την προσαρμογή φορτίου, ελέγχοντας το duty cycle, ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη μεταφορά ισχύος.

Αρχικά, υλοποιείται το κύκλωμα του θερμοηλεκτρικού μοντέλου στο SPICE, ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα το μοντέλο μας και να επαληθεύσουμε τη χρήση του ισοδύναμου Thevenin που χρησιμοποιήθηκε μετέπειτα στις αναλύσεις μας. Έπειτα, επιλέγεται η μέθοδος βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί και γίνεται η σχεδίαση του μετατροπέα στο SPICE. Τέλος, γίνεται η σχεδίαση του κυκλώματος για κατασκευή πλακέτας με τη χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Λέξεις κλειδιά:<<θερμοηλεκτρικό στοιχείο, θερμοηλεκτρική γεννήτρια, κυκλωματικό μοντέλο, μετατροπέας ανύψωσης τάσης, βελτιστοποίηση, μέγιστη μεταφορά ισχύος, μέθοδος ανοιχτοκύκλωσης, SPICE>>

Abstract

This thesis, presents and analyses the technology of thermoelectric modules, for power generation purposes. The aim is to design a circuit able to achieve the optimal operating point, in order to charge a lithium battery with maximum available power. For the optimization of system performance, load adjustments by controlling the duty cycle of the boost converter have been employed, in order to ensure maximum power transfer.

Initially, a thermoelectric model in SPICE software was implemented, in order to understand our model and to verify the use of Thévenin equivalent circuit, used latter in our circuits. Afterwards, we have chosen the appropriate maximum power point tracking method and designed the circuit of the boost converter on SPICE tool. Finally, the circuit for the board construction was designed, using integrated circuits.

Keywords: <<thermoelectric module, thermoelectric generator, thermoelectric model, boost converter, maximum power point tracking, optimization, open-circuit method, SPICE>>

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους εκείνους που με τη βοήθειά τους, την υπομονή τους, αλλά και την πολύτιμη συμπαράστασή τους, συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω κατ' αρχήν, τον υπεύθυνο καθηγητή μου, κύριο Παύλο-Πέτρο Σωτηριάδη, ο οποίος με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε την ευκαιρία να γίνω μέλος της ομάδας του εργαστηρίου ηλεκτρονικής. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον υποψήφιο διδάκτορα Νεοκλή Χατζηγεωργίου για την επίβλεψη και την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και στον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτριο Κοσσυβάκη για τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις του. Ακόμα, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου με τους οποίους δουλέψαμε μαζί όλο αυτό τον καιρό και ιδιαίτερα στον Κωνσταντίνο Παπαφώτη για την ανιδιοτελή βοήθειά του, όποτε τη χρειάστηκα.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στους φίλους μου. Η στήριξη και η κατανόησή τους ήταν πολύτιμη έως και καθοριστική, ώστε να ανταπεξέλθω στις απαιτήσεις που είχε η εργασία αυτή.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----|
| Περίληψη | i |
| Abstract..... | iii |
| Περιεχόμενα | vii |
| Εισαγωγή..... | 1 |
| Κεφάλαιο 1. Θερμοηλεκτρικό στοιχείο | 3 |
| 1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα | 3 |
| 1.2 Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο | 3 |
| 1.2.1 Εισαγωγή στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο | 3 |
| 1.2.2 Ιστορική Αναδρομή..... | 4 |
| 1.2.3 Λειτουργία θερμοηλεκτρικής συσκευής | 5 |
| 1.2.4 Καμπύλες λειτουργίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας: | 6 |
| 1.3 Εφαρμογές των θερμοηλεκτρικών γεννητριών..... | 9 |
| Κεφάλαιο 2. | 13 |
| Μοντέλο Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας..... | 13 |
| 2.1 Φυσικά φαινόμενα από τα οποία εξαρτάται το θερμοηλεκτρικό | 13 |
| 2.1.1 Η μετάδοση της θερμότητας | 13 |
| 2.1.2 Η θερμότητα Joule | 14 |
| 2.1.3 Το φαινόμενο Peltier | 14 |
| 2.1.4 Το φαινόμενο Seebeck..... | 14 |
| 2.1.5 Το φαινόμενο Thomson..... | 14 |
| 2.2 Εξισώσεις ισοδύναμου κυκλώματος θερμοηλεκτρικού | 15 |
| 2.3 Εξισώσεις παραμέτρων θερμοηλεκτρικού | 16 |
| 2.4 Υλοποίηση του μοντέλου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στο SPICE | 17 |
| 2.4.1 Ανεξάρτητες Μεταβλητές | 18 |
| 2.4.2 Παράμετροι συντελεστών θερμοηλεκτρικού | 18 |
| 2.4.3 Το θερμικό και το ηλεκτρικό μοντέλο | 22 |
| 2.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης και σύγκριση με θεωρητικές τιμές | 22 |
| Κεφάλαιο 3. Σύστημα Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος..... | 27 |
| 3.1 Παρουσίαση μεθόδων βελτιστοποίησης | 27 |
| 3.1.1 Περιγραφή μεθόδων..... | 27 |
| 3.1.2 Επιλογή μεθόδου | 28 |
| 3.2 Διακοπτικά τροφοδοτικά ανύψωσης τάσης..... | 29 |

| | | |
|-------------|---|----|
| 3.2.1 | Εισαγωγή..... | 29 |
| 3.2.2 | Παρουσίαση dc-dc μετατροπέα ανύψωσης τάσης | 29 |
| 3.3 | Σχεδίαση μετατροπέα ανύψωσης τάσης στο SPICE | 33 |
| 3.3.1 | Επιλογή στοιχείων διάταξης boost στο SPICE | 33 |
| 3.3.2 | Παρουσίαση κυκλωμάτων στο SPICE | 35 |
| 3.3.3 | Προσομοίωση-Αποτελέσματα | 37 |
| Κεφάλαιο 4. | Κατασκευή πλακέτας | 41 |
| 4.1 | Σχεδίαση κυκλώματος | 41 |
| 4.1.1 | Μετατροπέας συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση (Boostconverter) | 43 |
| 4.1.2 | Βοηθητικά κυκλώματα..... | 43 |
| 4.1.3 | Κύκλωμα βελτιστοποίησης..... | 43 |
| 4.1.4 | Φορτιστήςμπαταρίας..... | 45 |
| 4.2 | Πειραματική διάταξη και μετρήσεις (κάνε και μια μικρή εισαγωγή, για ποιο λόγο έκανες το πείραμα)..... | 45 |
| 4.2.1 | Εργαστηριακές μετρήσεις τάσης ανοιχτούκλωσης θερμοηλεκτρικού | 46 |
| 4.2.2 | Εργαστηριακές μετρήσεις του ηλεκτρικού κυκλώματοςμε τροφοδότηση από τροφοδοτικό | 47 |
| 4.2.3 | Εργαστηριακές μετρήσεις του ηλεκτρικού κυκλώματος με τροφοδότηση από το θερμοηλεκτρικό | 52 |
| 4.2.4 | Συμπεράσματα..... | 57 |
| | Βιβλιογραφία | 59 |

Εισαγωγή

Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις, είναι διατάξεις στερεάς κατάστασης που χρησιμοποιούνται σε ολοένα και μεγαλύτερο αριθμό εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται τόσο σε εξειδικευμένες εφαρμογές ψύξης, καθώς επίσης και ως γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, λόγω της ικανότητάς τους να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμική και το αντίστροφο. Με δεδομένη την επιτακτική ανάγκη για την ανάπτυξη εναλλακτικών τεχνολογιών εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι βέβαιο ότι μπορούν να έχουν στο άμεσο μέλλον σημαντικότερες εφαρμογές όσον αφορά τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι αξιόπιστες πηγές τροφοδοσίας και μπορούν να λειτουργήσουν υπό ακραίες συνθήκες. Επίσης, έχουν μικρές απαιτήσεις συντήρησης, αφού δεν διαθέτουν κινητά μέρη. Ακόμα, έχουν μηδενική εκπομπή ρύπων και εξαιρετικά μεγάλο χρόνο ζωής. Τέλος, έχουν μικρό βάρος και μέγεθος, πράγμα που σε συνδυασμό και με τα άλλα πλεονεκτήματά τους, επιτρέπει την εφαρμογή τους ακόμα και σε ιδιαίτερα εξειδικευμένες και απαιτητικές εφαρμογές.

Το μεγάλο μειονέκτημα της τεχνολογίας αυτής, είναι η πολύ χαμηλή απόδοση που δεν ξεπερνά το 10%. Για να πετύχουμε αυτή την απόδοση, πρέπει να «ταιριάζουμε» το φορτίο, ώστε να πετύχουμε μέγιστη μεταφορά ισχύος. Το θερμοηλεκτρικό στοιχείο όμως, παρουσιάζει διαφορετική εσωτερική αντίσταση, καθώς μεταβάλλονται οι θερμοκρασίες θερμής και κρύας πλευράς. Για το λόγο αυτό, χρειάζεται να παρεμβάλουμε ένα μετατροπέα ισχύος συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση μεταξύ του θερμοστοιχείου και του φορτίου, ο οποίος θα κάνει συνεχή προσαρμογή του φορτίου.

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες μπορούν να ενσωματωθούν ένα μεγάλο εύρος διατάξεων, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, σχεδιάστηκε ένα σύστημα μέγιστης μεταφοράς ενέργειας από μία μόνο θερμοηλεκτρική συσκευή μέγιστης ισχύος 3,5Watts, με σκοπό τη φόρτιση μίας μπαταρίας.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να καταλήξουμε σε μία κατασκευή μικρού μεγέθους και κόστους. Με τη συσκευή αυτή θα μπορούσαμε να τροφοδοτήσουμε συσκευές χαμηλής ισχύος.

Μία τέτοια συσκευή είναι κατά κύριο λόγο μία συσκευή τηλεμετρίας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου έχουμε μεγάλες θερμοκρασίες, για την αυτόνομη λειτουργία της συσκευής, χωρίς να χρειάζονται άλλα καλώδια για την τροφοδοσία της. Για παράδειγμα, σε ένα server room, όπου υπάρχει εισαγωγή κρύου νερού για τη ψύξη των μηχανημάτων και εξαγωγή ζεστού νερού. Η διαφορά θερμοκρασίας αυτή μπορεί να φορτίσει την μπαταρία ώστε να τροφοδοτείται μία συσκευή τηλεμετρίας για αποστολή πληροφοριών όπως θερμοκρασίας, υγρασίας, καπνού, εντοπισμού αερίων κλπ. Ένα άλλο παράδειγμα είναι στα εργοστάσια που διαθέτουν λέβητες. Μπορεί να τοποθετηθούν τέτοια συστήματα για να παρακολουθούν τα αέρια της καύσης, την κατανομή της θερμοκρασίας στην καπνοδόχο κλπ.

Κεφάλαιο 1. Θερμοηλεκτρικό στοιχείο

1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα

Το ενεργειακό πρόβλημα αρχίζει με τη βιομηχανική επανάσταση, αφότου δηλαδή τα ορυκτά καύσιμα-φυσικοί πόροι της γης έγιναν οι κύριες μορφές ενέργειας για την ανθρώπινη κοινωνία.

Με την καύση των ορυκτών καυσίμων όπως του άνθρακα, του πετρελαίου, του φυσικού αερίου κλπ. και την έκλυση στην ατμόσφαιρα μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα, εμφανίζεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου που υπερθερμαίνει τον πλανήτη και προκαλεί τις παρατηρούμενες ήδη σήμερα κλιματικές αλλαγές. Η ρύπανση της ατμόσφαιρας, παράλληλα με τα δύο αυτά αέρια και με τα στερεά αιωρούμενα σωματίδια τα οποία επίσης εκλύονται κατά την καύση, ή και από άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες, επιδρούν αρνητικά στη ζωή και την παρουσία πολλών ειδών της χλωρίδας και της πανίδας της γης.

Το πρόβλημα όμως δεν είναι μόνο οικολογικό, καθώς η συνεχής-αυξανόμενη χρήση των συμβατικών ενεργειακών πηγών, έχουν σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό των ποσοτήτων διάθεσής τους, αφού αργά ή γρήγορα θα εξαντληθούν.

Το παγκόσμιο αυτό πρόβλημα μέρα με τη μέρα εντείνεται, ενώ παράλληλα οι ενεργειακές ανάγκες συνεχώς αυξάνονται. Δεδομένου ότι ο περιορισμός χρήσης τους δεν μπορεί να θεωρείται βιώσιμη λύση, η ανθρωπότητα θα πρέπει να στραφεί σε άλλους τρόπους μείωσης της χρήσης των ορυκτών καυσίμων. Έχει δημιουργηθεί λοιπόν η ανάγκη για εξεύρεση εναλλακτικών μορφών ενέργειας, καθώς και τεχνολογιών για μέγιστη εξοικονόμηση της ενέργειας, δηλαδή την ελαχιστοποίηση των απωλειών του εκάστοτε συστήματος. Σήμερα, ένα ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνεται προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές όπως είναι η ηλιακή, η αιολική, η υδραυλική, η γεωθερμική, η ενέργεια από τα κύματα της θάλασσας και η θερμική ενέργεια. Στην παρούσα εργασία αυτή, θα ασχοληθούμε με την εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας με στόχο την ηλεκτροπαραγωγή.

1.2 Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

1.2.1 Εισαγωγή στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

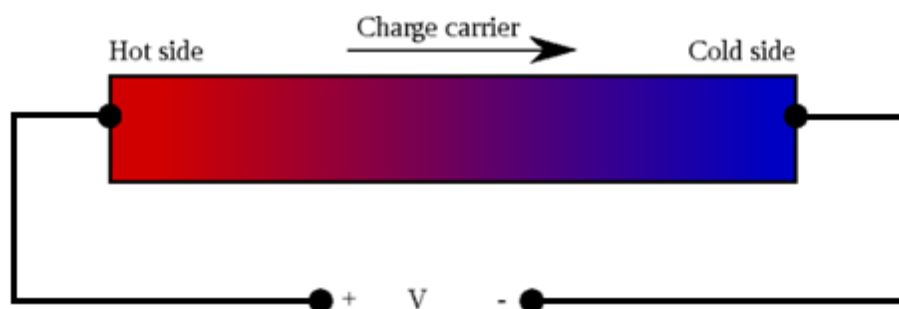
Το μεγαλύτερο μέρος απωλειών πολλών διεργασιών, εκπέμπεται υπό τη μορφή θερμότητας. Η χαμένη θερμική ενέργεια μπορεί να προέρχεται από μηχανές καύσης των μέσων μεταφοράς ή των εργοστασίων, από μηχανές παραγωγής ή μετατροπής της ενέργειας, κτλ. Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια θερμαίνει μεταλλικές επιφάνειες όπως είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ ή τα κοντέινερ, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μεγάλες αντλίες θερμικής ενέργειας. Αυτή η μορφή ενέργειας είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί, να μετατραπεί ή να αποθηκευτεί, αλλά υπάρχει άφθονη στο περιβάλλον γι' αυτό και αξίζει να μελετηθεί, ώστε να βρεθούν τρόποι αξιοποίησής της. Μέχρι τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, ο μοναδικός τρόπος εκμετάλλευσης

της θερμικής ενέργειας ήταν η θέρμανση νερού ή άλλου ρευστού, για απευθείας χρήση του ή για τη θέρμανση κάποιου χώρου.

Εμείς, θα μελετήσουμε μια τεχνολογία η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιπτώσεις όπου υπάρχει διαθέσιμη θερμική ενέργεια η οποία υπό άλλες συνθήκες θα έμενε ανεκμετάλλευτη. Τα θερμοστοιχεία, είναι μία τεχνολογία η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελούν το μέσο εκμετάλλευσης των θερμικών απωλειών.

1.2.2 Ιστορική Αναδρομή

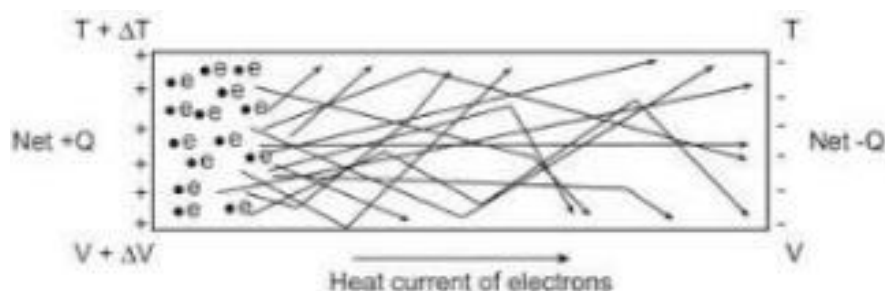
Το 1821, ο Thomas Johann Seebeck διαπίστωσε ότι ένα κύκλωμα κατασκευασμένο από δύο ανόμοια μέταλλα με κόμβους σε διαφορετικές θερμοκρασίες, εκτρέπει το μαγνήτη μιας πυξίδας. Ο Seebeck αρχικά πίστευε ότι αυτό οφείλεται στο μαγνητισμό που προκαλείται από τη διαφορά θερμοκρασίας και υπέθεσε ότι μπορεί να σχετίζεται με το μαγνητικό πεδίο της Γης. Ωστόσο, αυτό προκαλείται από το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο παράγεται και το οποίο σύμφωνα με το νόμο του Ampère εκτρέπει το μαγνήτη. Πιο συγκεκριμένα, η διαφορά θερμοκρασίας δημιουργεί διαφορά δυναμικού η οποία προκαλεί την ροή ρεύματος σε κλειστό κύκλωμα. Η τάση που παράγεται είναι ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο κόμβων και η σταθερά η οποία συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη ονομάζεται συντελεστής Seebeck.



Σχήμα 1.1: Φαινόμενο Seebeck

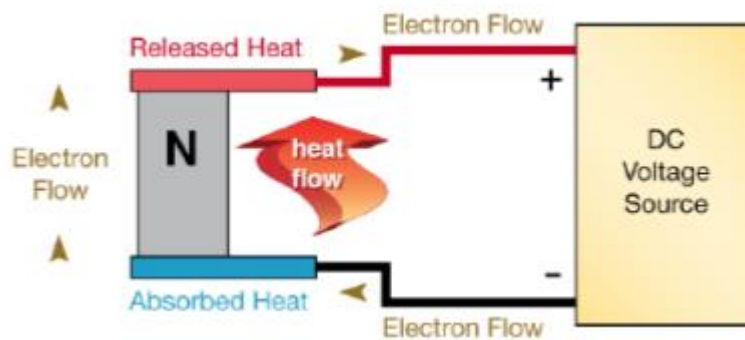
Το 1851 ο Gustav Magnus ανακάλυψε ότι η τάση Seebeck δεν εξαρτάται από την κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος των μετάλλων μεταξύ των κόμβων, αλλά από τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε αυτά.

Πρακτικά, αυτό που συμβαίνει είναι ότι τα ηλεκτρόνια από τη θερμή περιοχή του μετάλλου, έχουν περισσότερη ενέργεια, άρα και μεγαλύτερες ταχύτητες, συγκριτικά μ' αυτά στην ψυχρή. Έτσι, παρατηρείται διάχυση ηλεκτρονίων από τη θερμή περιοχή στην ψυχρή, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση ηλεκτρονίων στην ψυχρή περιοχή και τη δημιουργία απογυμνωμένων θετικών μεταλλικών ιόντων στην θερμή. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στη δημιουργία δυναμικού το οποίο τελικά θα πάρει τιμή ικανή να εμποδίσει οποιαδήποτε περαιτέρω μετατόπιση ηλεκτρονίων.



Σχήμα 1.2: Κίνηση ηλεκτρονίων λόγω διαφοράς θερμοκρασίας

Το 1834 ένας Γάλλος ωρολογοποιός και ερασιτέχνης φυσικός, ο Jean Peltier καθώς έκανε μελέτες πάνω στο φαινόμενο Seebeck παρατήρησε το αντίθετο φαινόμενο, δηλαδή την απορρόφηση θερμότητας από μια επαφή και αποβολή θερμότητας από μια δεύτερη επαφή κατά την επίδραση διαφοράς δυναμικού.



Σχήμα 1.3:Φαινόμενο Peltier

Το 1838, ο Lenz έδειξε ότι ανάλογα με την κατεύθυνση του ρεύματος, η θερμότητα μπορεί είτε να απομακρυνθεί από το σημείο επαφής των δύο μετάλλων, παγώνοντας νερό, είτε να παραχθεί μετατρέποντας τον πάγο σε νερό.

Την μελέτη των θερμοηλεκτρικών φαινομένων ολοκλήρωσε ο William Thomson. Αφού πρώτα συσχέτισε τα δύο φαινόμενα, το 1851 θεμελίωσε το τρίτο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο που αφορούσε την έκλυση ή την απορρόφηση θερμότητας από ένα υλικό όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα.

Το 1949 ο Abram Fedorovich Ioffe ανέπτυξε τη σύγχρονη θεωρία του θερμοηλεκτρισμού χρησιμοποιώντας την έννοια του «Συντελεστή κέρδους» ZT. Ο Ioffe προώθησε επίσης τη χρήση των ημιαγωγών στη θερμοηλεκτρική μετατροπή και κατέληξε ότι οι ημιαγωγοί έχουν υψηλότερο θερμοηλεκτρικό συντελεστή κέρδους. Οι πιο γνωστοί ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται είναι το τελλουριούχο βισμούθιο (Bi_2Te_3) για θερμοκρασίες δωματίου (μέχρι 450K), ο τελλουριούχος μόλυβδος (PbTe) για θερμοκρασίες μέχρι 850K και το γερμάνιο του πυριτίου (SiGe) για θερμοκρασίες μέχρι 1300K.

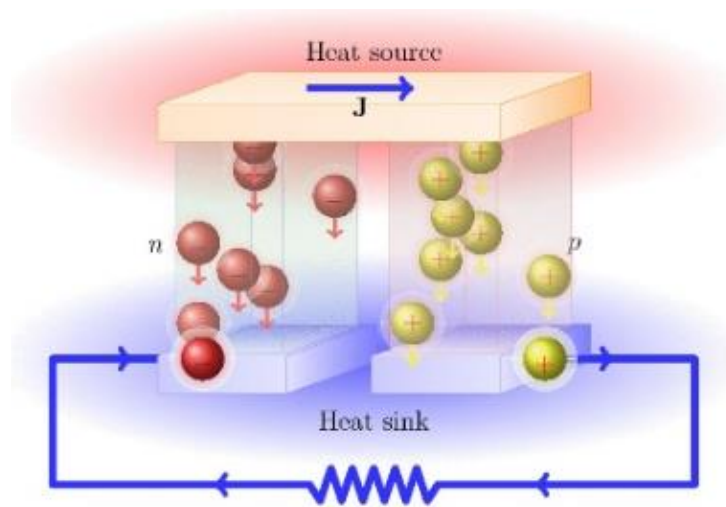
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την θερμοηλεκτρική τεχνολογία ήρθε και πάλι στην επιφάνεια τη δεκαετία του '90, λόγω του ενεργειακού προβλήματος που οδήγησε στην στροφή προς εναλλακτικές πηγές ενέργειας, αλλά και λόγω της μεγαλύτερης δυνατότητας επεξεργασίας και κατασκευής υλικών. Ο συντελεστής κέρδους αυξήθηκε στο 10% σε εργαστηριακό επίπεδο και οι χρήσεις της τεχνολογίας αυτής ολοένα και αυξάνεται.

1.2.3 Λειτουργία θερμοηλεκτρικής συσκευής

Ένας ημιαγωγός όταν είναι νοθευμένος θετικά ή αρνητικά, γίνεται αγωγίμος όταν διεγερθούν οι ελεύθερες οπές ή τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που έχει. Σύμφωνα με το Seebeck, η διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα του είναι ικανή εκτός από το να μεταφέρει θερμική ενέργεια από τη θερμότερη στη ψυχρότερη πλευρά, να μεταφέρει ταυτόχρονα και ηλεκτρικούς φορείς προς την ίδια κατεύθυνση. Έτσι, δημιουργείται διαφορά δυναμικού στα άκρα του ημιαγωγού και όταν κλείσει το κύκλωμα, διαρρέεται από ρεύμα.

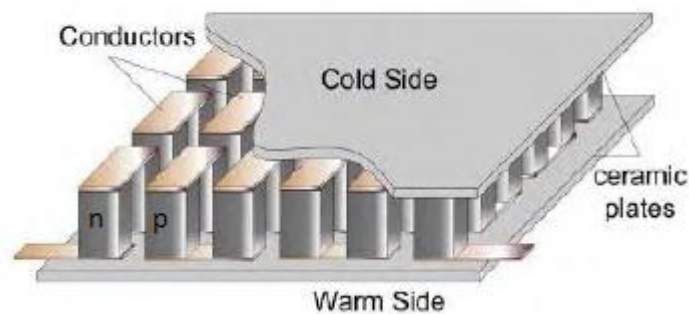
Το πρόβλημα που προκύπτει στην περίπτωση όπου ο αγωγός που κλείνει το κύκλωμα είναι πανομοιότυπος με το πρώτο αγωγό, είναι ότι η ροή της θερμικής ενέργειας θα δημιουργήσει ένα δυναμικό για την ίση μετακίνηση φορέων φορτίου στους δύο αγωγούς. Επιπλέον, το

δυναμικό για ροή ρεύματος σε έναν αγωγό είναι σε πλήρη αντίθεση με αυτήν στον άλλο αγωγό. Για το λόγο αυτό, ο δεύτερος αγωγός πρέπει να είναι διαφορετικού τύπου.



Σχήμα 1.4: Ροή ρεύματος στους ημιαγωγούς

Τα θερμοζεύγη, τα συνδέουμε σε σειρά και τα τοποθετούμε ανάμεσα σε δύο κεραμικές πλάκες, οι οποίες αποτελούν τη θερμή και τη ψυχρή πλευρά του θερμοηλεκτρικού στοιχείου.

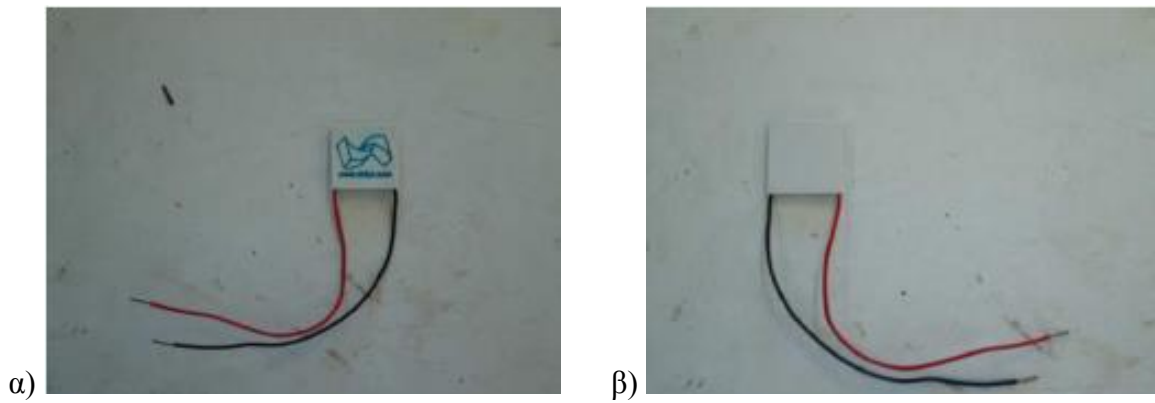


Σχήμα 1.5: Μορφή θερμοηλεκτρικού

Για κάθε διάταξη ανάλογα με τη ζητούμενη τάση και το ζητούμενο ρεύμα τοποθετούμε τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία σε σειρά ή παράλληλα για αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

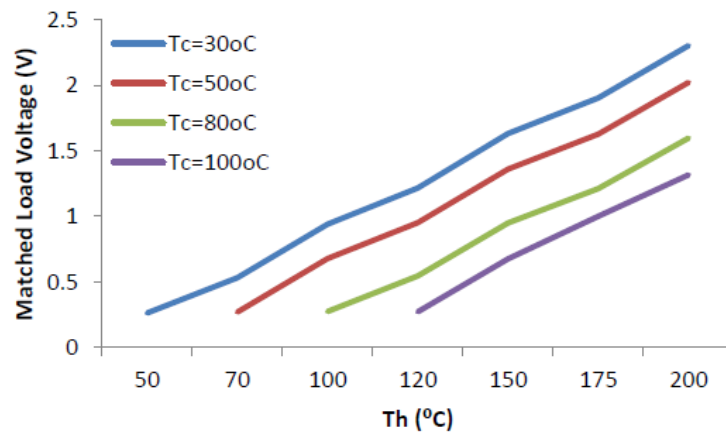
1.2.4 Καμπύλες λειτουργίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας:

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί η συμπεριφορά μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Οι καμπύλες που εξάγονται από τη μελέτη όλων των θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι πανομοιότυπες ως προς την μορφή τους. Στην εργασία αυτή, τυπικά θα εξετάσουμε τις καμπύλες λειτουργίας από το φύλλο προδιαγραφών (datasheet) του θερμοηλεκτρικού στοιχείου που χρησιμοποιήσαμε (GM200-71-14-16).

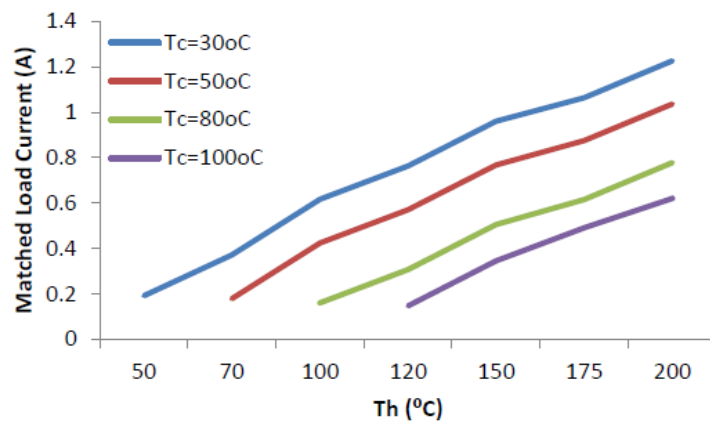


Σχήμα 1.6: Φωτογραφία GM200-71-14-16, α) Θερμή πλευρά T_H και β) Κρύα πλευρά T_C

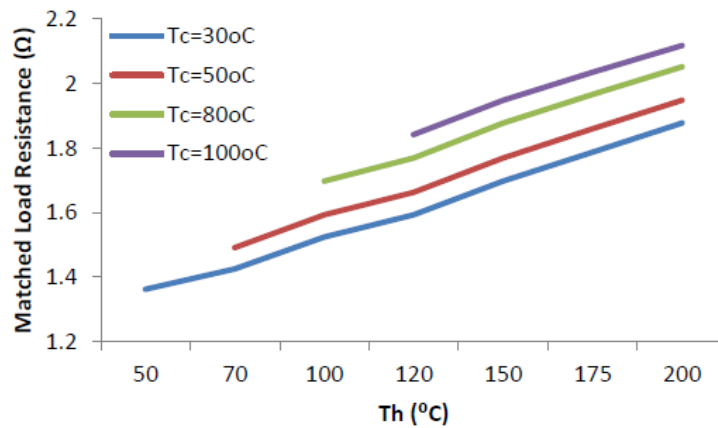
Στα διαγράμματα που ακολουθούν θα δούμε τη συμπεριφορά της γεννήτριας σε προσαρμοσμένο φορτίο, δηλαδή στο σημείο βέλτιστης λειτουργίας της, συναρτήσει της θερμοκρασίας της θερμής πλευράς, με σταθερή θερμοκρασία της κρύας πλευράς.



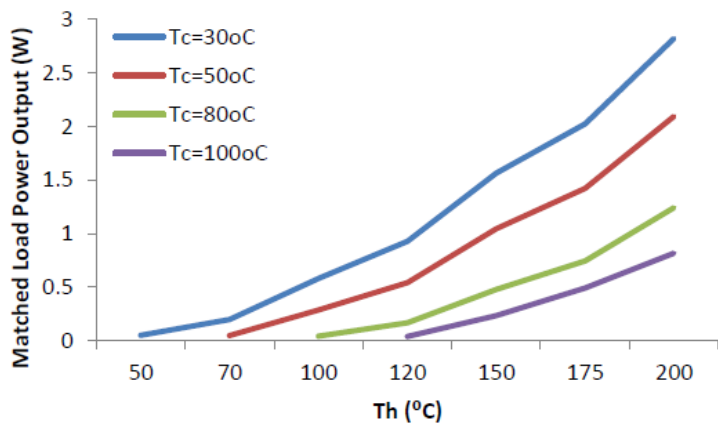
Σχήμα 1.7: Διάγραμμα τάσης με προσαρμοσμένο φορτίο συναρτήσει της θερμοκρασίας της θερμής πλευράς



Σχήμα 1.8: Διάγραμμα ρεύματος με προσαρμοσμένο φορτίο συναρτήσει της θερμοκρασίας της θερμής πλευράς



Σχήμα 1.9: Διάγραμμα αντίστασης προσαρμοσμένου φορτίου συναρτήσει της θερμοκρασίας της θερμής πλευράς



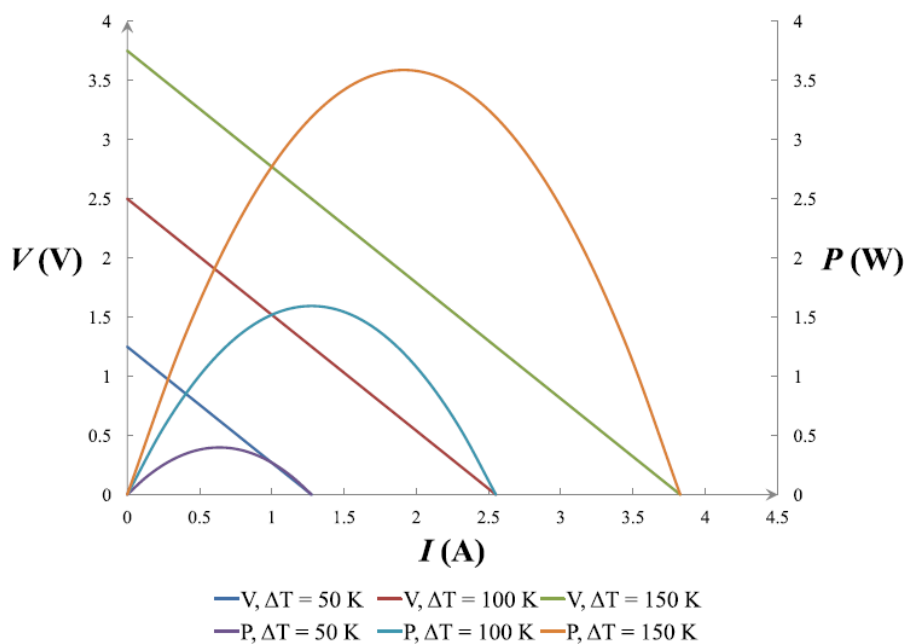
Σχήμα 1.10: Διάγραμμα ισχύος με προσαρμοσμένο φορτίο συναρτήσει της θερμοκρασίας της θερμής πλευράς

Αρχικά, στο διάγραμμα του σχήματος 1.6, βλέπουμε την εξάρτηση της τάσης από τη θερμοκρασία. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η T_H για σταθερή T_C αυξάνεται και η τάση στο προσαρμοσμένο φορτίο. Η τάση επίσης αυξάνεται και με τη μείωση της T_C δεδομένου ότι η ζεστή πλευρά παραμένει σταθερή. Οι παρατηρήσεις αυτές, επιβεβαιώνουν τη θεωρία που λέει ότι η τάση του θερμοηλεκτρικού εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας και όχι από την απόλυτη θερμοκρασία κάποιας πλευράς.

Στο διάγραμμα του σχήματος 1.7, φαίνεται το ρεύμα συναρτήσει της θερμοκρασίας T_H . Παρατηρείται ίδια συμπεριφορά με την τάση, το ρεύμα δηλαδή να αυξάνεται με την αύξηση της T_H για σταθερή θερμοκρασία κρύας πλευράς.

Στο σχήμα 1.8, βλέπουμε την εξάρτηση του προσαρμοσμένου φορτίου ως προς τις θερμοκρασίες T_H και T_C . Το προσαρμοσμένο φορτίο ισούται με την εσωτερική αντίσταση του θερμοηλεκτρικού. Έτσι συμπεραίνουμε ότι η εσωτερική αντίσταση δεν είναι σταθερή, αλλά αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία στη θερμή πλευρά, αλλά και όσο αυξάνεται η θερμοκρασία στην κρύα πλευρά.

Όπως ήταν αναμενόμενο, στο διάγραμμα του σχήματος 1.9 βλέπουμε την ισχύ να αυξάνεται όσο αυξάνεται και η διαφορά θερμοκρασίας.



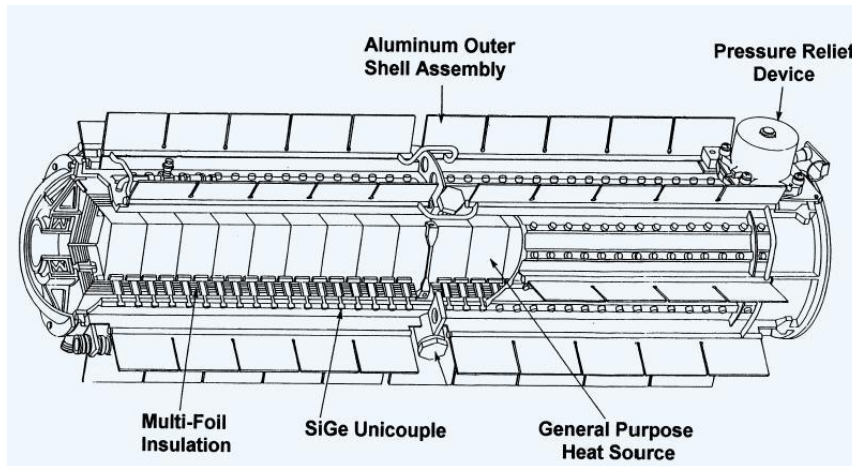
Σχήμα 1.11: Διάγραμμα τάσης συναρτήσει του ρεύματος και ισχύος συναρτήσει του ρεύματος για διαφορετικές διαφορές θερμοκρασίας

Στη συνέχεια, στο σχήμα 1.10, δίνονται οι καμπύλες τάσης και ισχύος συναρτήσει του ρεύματος. Αρχικά, από τη χαρακτηριστική τάσης ως προς το ρεύμα παρατηρούμε τη γραμμική συμπεριφορά της τάσης, η οποία όσο μειώνεται, αυξάνεται το ρεύμα και έτσι προκύπτει το μοντέλο της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, δηλαδή μία πηγή τάσης σε σειρά με μία αντίσταση. Από τη χαρακτηριστική ισχύος ως προς το ρεύμα, βλέπουμε ότι υπάρχει ένα σημείο μέγιστης ισχύος. Ακόμα, είναι εμφανές ότι το μέγιστο αυτό μεταβάλλεται όσο μεταβάλλεται και η διαφορά θερμοκρασίας. Το σχήμα αυτό παρέχει πολύ σημαντική πληροφορία, αφού μέσα από αυτό θα βρούμε τον τρόπο να βελτιστοποιήσουμε την απόδοση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

1.3 Εφαρμογές των θερμοηλεκτρικών γεννητριών

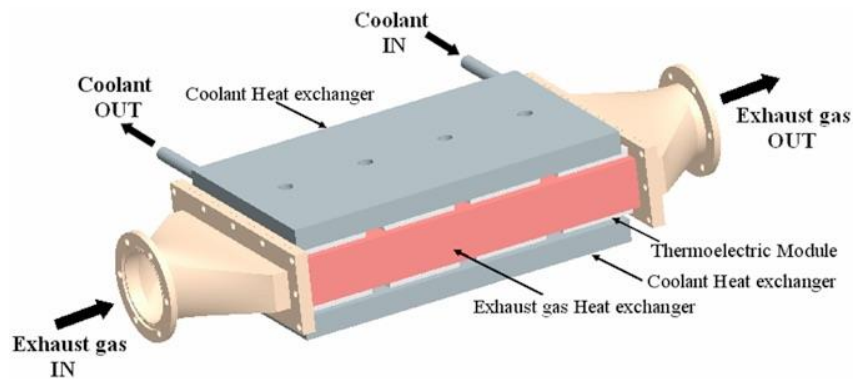
Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται σε πολλές και διαφορετικές διατάξεις. Εκτός από το γεγονός ότι είναι φιλικές προς το περιβάλλον, το γεγονός ότι δεν έχουν κινούμενα μέρη, τους δίνει ένα σοβαρό πλεονέκτημα σε σχέση με τις μηχανές μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα, οι γεννήτριες αυτές δε χρειάζονται ιδιαίτερη συντήρηση και έχουν μεγάλο χρόνο ζωής, ενώ ταυτόχρονα είναι αξιόπιστες ακόμα και σε ακραίες καιρικές ή άλλες συνθήκες. Έτσι οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι ιδανικές οπουδήποτε έχουμε εκπομπή θερμικής ενέργειας, σε απομακρυσμένες περιοχές, στις βουνοκορφές, μέσα στον ωκεανό, ακόμα και στο διάστημα.

Αρχίζοντας από το διάστημα, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες λειτουργούν σαν πηγή τροφοδοσίας πολλών διαστημικών εφαρμογών. Για παράδειγμα, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες με χρήση ραδιοϊσοτόπων (RTG) έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες διαστημικές αποστολές, όπως την Apollo, την Pioneer, την Viking, την Voyager, την Galileo και την Cassini. Για παράδειγμα στην αποστολή Voyager η οποία έχει ξεκινήσει από το 1977, υπολογίζεται ότι θα στηρίζει κάποιες από τις λειτουργίες της σε RTG μέχρι και το 2025.



Σχήμα 1.12: Radioisotope Thermoelectric Generator

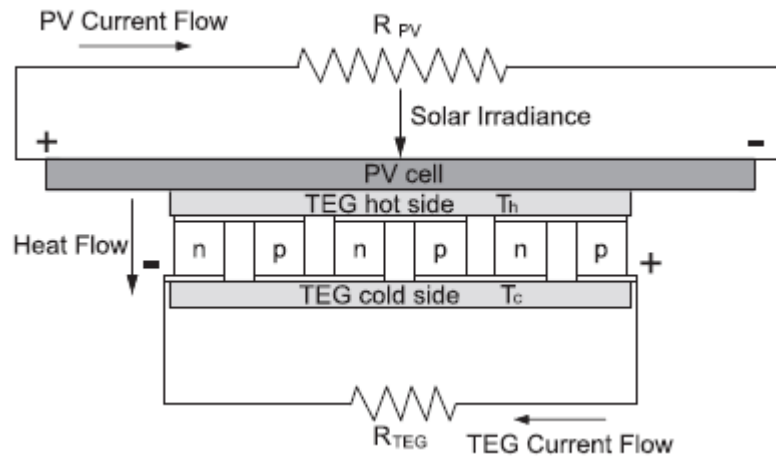
Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται επίσης στις εξατμίσεις, π.χ. των αυτοκινήτων της Ford και της BMW, με σκοπό την κάλυψη μέρους των ηλεκτρικών αναγκών μειώνοντας το έργο της ηλεκτρογεννήτριας και κατ' επέκταση του κινητήρα εσωτερικής καύσης.



Σχήμα 1.13: Τοπολογία TEG σε μία εξατμίση

Ακόμα, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις σαν εφεδρική πηγή. Για παράδειγμα, μία εφαρμογή είναι σε συνδυασμό με τα φωτοβολταϊκά που φορτίζουν μία μπαταρία. Όταν η μπαταρία πέσει κάτω από το βάθος εκφόρτισης, καθώς αυτά δεν είναι ικανά να τη φορτίσουν, ένας αισθητήρας ξεκινά τη λειτουργία των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Η θερμότητα μπορεί να παραχθεί από μία φλόγα χαμηλής πίεσης που τροφοδοτείται από προπάνιο ή φυσικό αέριο.

Επίσης, μία άλλη εφαρμογή σε συνδυασμό με τα φωτοβολταϊκά είναι το υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών και θερμοηλεκτρικών. Στην περίπτωση αυτή, τα θερμοηλεκτρικά είναι κολλημένα στην πίσω πλευρά των φωτοβολταϊκών κυψελών, η οποία ως γνωστό έχει πολύ υψηλή θερμοκρασία. Τα θερμοηλεκτρικά λειτουργούν σαν δεύτερη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας παράλληλα με τα φωτοβολταϊκά. Ταυτόχρονα, λόγω της ψήκτρας που μπαίνει στην κρύα πλευρά των θερμοηλεκτρικών, κατεβαίνει η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών συστοιχιών, γεγονός που αυξάνει την απόδοσή τους, αφού ως γνωστόν η υψηλή θερμοκρασία είναι μεγάλος εχθρός της καλής απόδοσης των φωτοβολταϊκών. Τα συστήματα αυτά έχουν έως και 30% καλύτερη απόδοση από τα κοινά φωτοβολταϊκά συστήματα.



Σχήμα 1.14: Σχηματικό υβριδικού φωτοβολταϊκού-θερμοηλεκτρικού συστήματος

Στο βυθό του ωκεανού, η ηλεκτρική ενέργεια χρειάζεται για να τροφοδοτούνται αισθητήρες στις γεωλογικές μελέτες που αφορούν τους ωκεανούς. Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι οι πλέον κατάλληλες για την τροφοδότηση μέσα στον ωκεανό. Η μεγάλη ανθεκτικότητα και ο χαμηλός ρυθμός διάβρωσης είναι τα κύρια πλεονεκτήματα, τα οποία σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα τις κάνουν ιδανικές για τη χρήση αυτή. Η διαφορά θερμοκρασίας δημιουργείται από το κρύο νερό στην κρύα πλευρά, ενώ στη θερμή πλευρά μπορεί να έχουμε ζεστά νερά από υδροθερμικές αναβλύσεις ή από διάτρητα γεωθερμικά πηγάδια.
[1-7]

Κεφάλαιο 2. Μοντέλο

Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας

Όπως είδαμε και στο πρώτο κεφάλαιο, τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας (Seebeck modules), αλλά και σαν ψυκτικά (Peltiermodules). Στο κεφάλαιο αυτό, θα μελετήσουμε το θερμικό μοντέλο του θερμοηλεκτρικού στοιχείου, ώστε να γίνει η προσομοίωσή του στο SPICE και να το εντάξουμε στο υπόλοιπο κύκλωμα.

2.1 Φυσικά φαινόμενα από τα οποία εξαρτάται το θερμοηλεκτρικό

Για να μοντελοποιήσουμε το θερμοηλεκτρικό ζεύγος, θα πρέπει πρώτα να δούμε πως συμπεριφέρεται. Υπάρχουν πέντε φυσικά φαινόμενα που κυριαρχούν στη θερμοηλεκτρική μετατροπή ενέργειας. Τα φαινόμενα που το διέπουν είναι:

1. Η μετάδοση της θερμότητας
2. Η θερμότητα Joule
3. Το φαινόμενο Peltier
4. Το φαινόμενο Seebeck
5. και το φαινόμενο Thomson.

Στη συνέχεια αναπτύσσονται και αναλύονται οι σχέσεις από τις οποίες εξαρτώνται το καθένα ξεχωριστά.

2.1.1 Η μετάδοση της θερμότητας

Το πρώτο φυσικό φαινόμενο είναι η μετάδοση της θερμότητας η οποία καθορίζεται από τη θερμική αγωγιμότητα και τη γεωμετρία του στοιχείου. Η μετάδοση της θερμότητας περιγράφεται από τη σταθερά k (W/Km) και δίνεται από την εξίσωση Fourier. Κάθε θερμικό ζεύγος έχει θερμική αντίσταση Θ (K/W):

$$\Theta = \frac{1}{k} \frac{h}{A} (2.1)$$

$$T = \Theta q (2.2)$$

Όπου h το ύψος του κάθε στοιχείου σε m,

A το εμβαδόν της επιφάνειας του στοιχείου σε m^2 ,

T η θερμοκρασία σε K,

και q η θερμότητα σε W

2.1.2 Η θερμότητα Joule

Η θερμότητα Joule q_j (W) είναι η παραγωγή της θερμότητας στα ωμικά στοιχεία ανά μονάδα χρόνου. Η ηλεκτρική αντίσταση R (Ω) του κάθε ζεύγους είναι:

$$R = \rho \frac{l}{A} (2.3)$$

$$q_j = I^2 R (2.4)$$

Όπου ρ η ειδική αντίσταση σε $\Omega \cdot m$,
και I το ηλεκτρικό ρεύμα σε A.

2.1.3 Το φαινόμενο Peltier

Το φαινόμενο Peltier είναι η διαδικασία κατά την οποία γίνεται η απορρόφηση ή η έκκλιση της θερμότητας από τη σύνδεση δύο διαφορετικών αγώγιμων υλικών, όταν το ρεύμα περνάει μέσα από αυτά, δηλαδή λειτουργεί σαν αντλία θερμότητας. Η θερμότητα q_p που απορροφάται ή απάγεται είναι:

$$q_p = \pi I (2.5)$$

Όπου π ο συντελεστής Peltier που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο ζεύγος υλικών σε V.

2.1.4 Το φαινόμενο Seebeck

Το φαινόμενο Seebeck είναι η διαδικασία κατά την οποία παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, μέσω της θέρμανσης ή της ψύξης της επαφής των δύο διαφορετικών υλικών (η αντίθετη διαδικασία με το φαινόμενο Peltier). Η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται μεταξύ των δύο επαφών είναι:

$$V = \pi_e - \pi_a = a(T_e - T_a) = a\Delta T (2.6)$$

$$\pi = \alpha T (2.7)$$

Όπου α ο συντελεστής Seebeck σε V/K ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε υλικό,
 $\pi_{a/e}$ το δυναμικό του κόμβου απορρόφησης ή απαγωγής και
 $T_{a/e}$ η θερμοκρασία που απορροφάται ή απάγεται.

2.1.5 Το φαινόμενο Thomson

Τέλος, το φαινόμενο Thomson περιγράφει την παραγωγή ή την απορρόφηση θερμότητας κατά τη ροή ρεύματος μέσα από ένα ομογενές αγώγιμο υλικό και περιγράφεται από το συντελεστή Thomson τ :

$$\frac{dQ}{dT} = \tau \Delta T (2.8)$$

Η επίδραση του φαινομένου Thomson είναι πολύ μικρή γι' αυτό και θα το αγνοήσουμε.

2.2 Εξισώσεις ισοδύναμου κυκλώματος θερμοηλεκτρικού

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, εξάγονται οι παρακάτω σχέσεις, που περιγράφουν τη θερμική ισχύ που απορροφάται q_a και που εκπέμπεται q_e αντίστοιχα:

$$q_a = \frac{\Delta T}{\theta_m} + \alpha_m T_a I - \frac{I^2 R_m}{2} \quad (2.9)$$

$$q_e = \frac{\Delta T}{\theta_m} + \alpha_m T_e I + \frac{I^2 R_m}{2} \quad (2.10)$$

Όπου $\alpha_m = N\alpha$,

$$R_m = NR,$$

$$\theta_m = N\theta \text{ και}$$

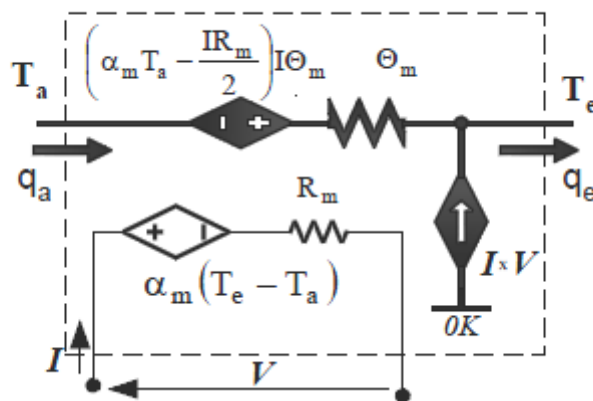
N ο αριθμός των ζευγών του θερμοηλεκτρικού.

T_a και T_e είναι η θερμοκρασία απορρόφησης και εκπομπής αντίστοιχα και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας σε K.

Σύμφωνα με το φαινόμενο Seebeck, όσον αφορά το ηλεκτρικό μέρος, το ηλεκτρικό δυναμικό V που εμφανίζεται στα άκρα του θερμοηλεκτρικού εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας και το συντελεστή Seebeck, είναι:

$$V = \alpha_m \Delta T \quad (2.11)$$

Το ισοδύναμο μοντέλο TEC (ψυκτικού) είναι το παρακάτω όπως το βρίσκουμε από τη βιβλιογραφία:



Σχήμα 2.0.1: Ισοδύναμο μοντέλο TEC [8]

Έντονα μαυρισμένα φαίνονται τα θερμικά στοιχεία του ψυκτικού, ενώ με λεπτές γραμμές φαίνεται το ισοδύναμο Thevenin. Το κύκλωμα για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια TEG είναι το ίδιο, όπως θα αποδειχτεί και στη συνέχεια, με τη διαφορά ότι η ισχύς του θερμικού μοντέλου προκαλεί την ηλεκτρική ισχύ.

2.3 Εξισώσεις παραμέτρων θερμοηλεκτρικού

Η μοντελοποίηση έγινε για το θερμοηλεκτρικό GM200-71-14-16. Από το datasheet του στοιχείου μας βρίσκουμε τις σχέσεις που περιγράφουν τις σταθερές για τον ημιαγωγό τύπου n και τύπου p. Οι ημιαγωγοί αποτελούνται από τελλούριο βισμούθιο (Bi₂Te₃) και οι παρακάτω εξισώσεις μεταβάλλονται ανάλογα με τις προσμίξεις των ημιαγωγών.

Οι παράμετροι, που εξαρτώνται από τη μέση θερμοκρασία της κρύας και της θερμής πλευράς,

$$T = T_{\mu\epsilon\sigma\sigma} = \frac{T_a + T_e}{2} \quad (2.12)$$

είναι οι εξής:

Η θερμική αγωγιμότητα:

$$k_n = (0.0000334545T^2 - 0.023350303T + 5.606333) \frac{W}{mK} \quad (2.13)$$

$$k_p = (0.0000361558T^2 - 0.02651342T + 6.22162) \frac{W}{mK} \quad (2.14)$$

Η θερμική αντίσταση ολόκληρου του θερμοηλεκτρικού προκύπτει από την παράλληλη σύνδεση των θερμικών αντιστάσεων των ημιαγωγών και είναι:

$$\theta_m = [N(k_n + k_p) \frac{A}{h}]^{-1} \quad (2.15)$$

Η σταθερά Seebeck:

$$a_n = (0.001530736T^2 - 1.08058874T - 28.338095) \times 10^{-6} \frac{V}{K} \quad (2.15)$$

$$a_p = (-0.003638095T^2 + 2.74380952T - 296.214286) \times 10^{-6} \frac{V}{K} \quad (2.16)$$

Η σταθερά Seebeck προκύπτει από την αφαίρεση των απόλυτων τιμών του ημιαγωγού τύπου n από τις τιμές των ημιαγωγών τύπου p:

$$\alpha_m = N(a_p - a_n) \quad (2.17)$$

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα:

$$\sigma_n = (0.01057143T^2 - 10.16048T + 3113.71429) \times 10^2 \frac{S}{m} \quad (2.18)$$

$$\sigma_p = (0.015601732T^2 - 15.708052T + 4466.38095) \times 10^2 \frac{S}{m} \quad (2.19)$$

Η ηλεκτρική αντίσταση προκύπτει από τη σε σειρά σύνδεση των ημιαγωγών και είναι:

$$R_{m1} = N[(\sigma_n + \sigma_p) \frac{A}{h}]^{-1} \quad (2.20)$$

Για την ηλεκτρική αντίσταση πρέπει να λάβουμε υπόψιν και τις συνδέσεις. Παρατηρώντας τις καμπύλες που δίνονται από τον κατασκευαστή για την εσωτερική αντίσταση, βλέπουμε ότι η απόκλιση από τους δικούς μας υπολογισμούς είναι $0,3\Omega$ για κάθε θερμοκρασία. Οπότε θεωρούμε ότι η συνολική ηλεκτρική αντίσταση είναι:

$$R_m = N[(\sigma_n + \sigma_p) \frac{A}{h}]^{-1} + R_{\sigma\sigma\sigma\delta} \quad (2.21)$$

Ο λόγος $\frac{A}{h}$ που βλέπουμε στη θερμική αντίσταση καθώς και στην ηλεκτρική αντίσταση προκύπτει από τον τύπο $\rho = (R * \frac{A}{h})^{-1}$, όπου A η διατομή και h το ύψος του κάθε θερμοστοιχείου.

2.4 Υλοποίηση του μοντέλου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στο SPICE

Αρχικά, για την υλοποίηση του μοντέλου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, θα πρέπει να μετατρέψουμε τις θερμικές παραμέτρους σε ηλεκτρικές, ώστε να μπορέσουμε να προσομοιώσουμε το θερμικό μοντέλο μαζί με το ηλεκτρικό. Είναι γνωστή από τη βιβλιογραφία η αντιστοιχία μεταξύ φυσικών μεγεθών που παρατίθεται στον ακόλουθο πίνακα.

| Θερμική παράμετρος | Ηλεκτρική παράμετρος |
|-----------------------------|-------------------------------|
| Q: Ροή Θερμότητας | I: Ροή Ρεύματος |
| T: Θερμοκρασία | V: Τάση |
| R: Θερμική Αντίσταση | R: Ηλεκτρική Αντίσταση |

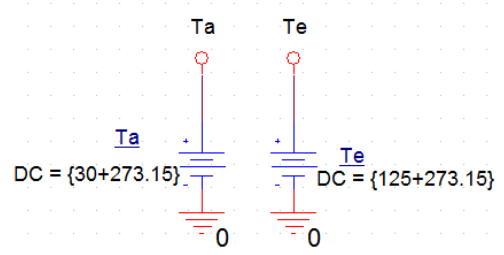
Πίνακας 2. 1:Αντιστοιχία θερμικών παραμέτρων με ηλεκτρικές

Χρησιμοποιήσαμε το SPICE ώστε να υλοποιήσουμε το μοντέλο του θερμοηλεκτρικού στο ηλεκτρικό ανάλογό του. Η υλοποίηση περιέχει τρία μέρη:

1. Ανεξάρτητες μεταβλητές
2. Παράμετροι συντελεστών θερμοηλεκτρικού
3. Το θερμικό και το ηλεκτρικό μοντέλο

2.4.1 Ανεξάρτητες Μεταβλητές

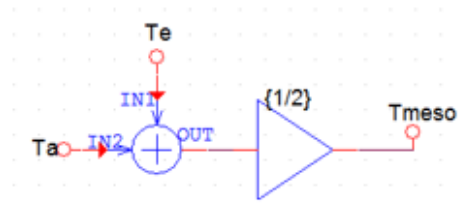
Αρχικά, υλοποιήσαμε τις ανεξάρτητες μεταβλητές, που στην περίπτωση μας είναι οι θερμοκρασίες της θερμής και της ψυχρής πλευράς του θερμοηλεκτρικού στοιχείου και ουσιαστικά είναι οι είσοδοι του μοντέλου μας.



Σχήμα2.0.2: Διάταξη προσομοίωσης θερμοκρασιών στο SPICE

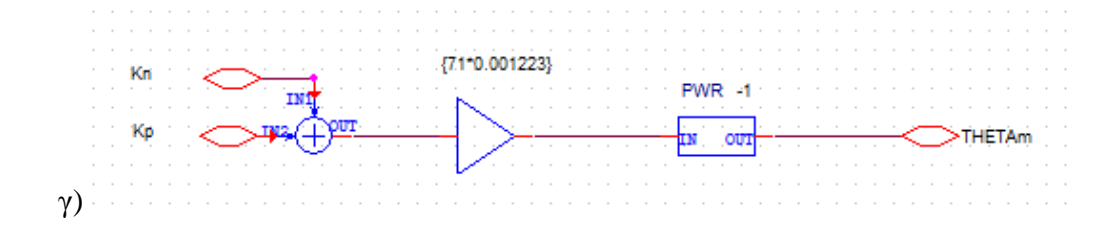
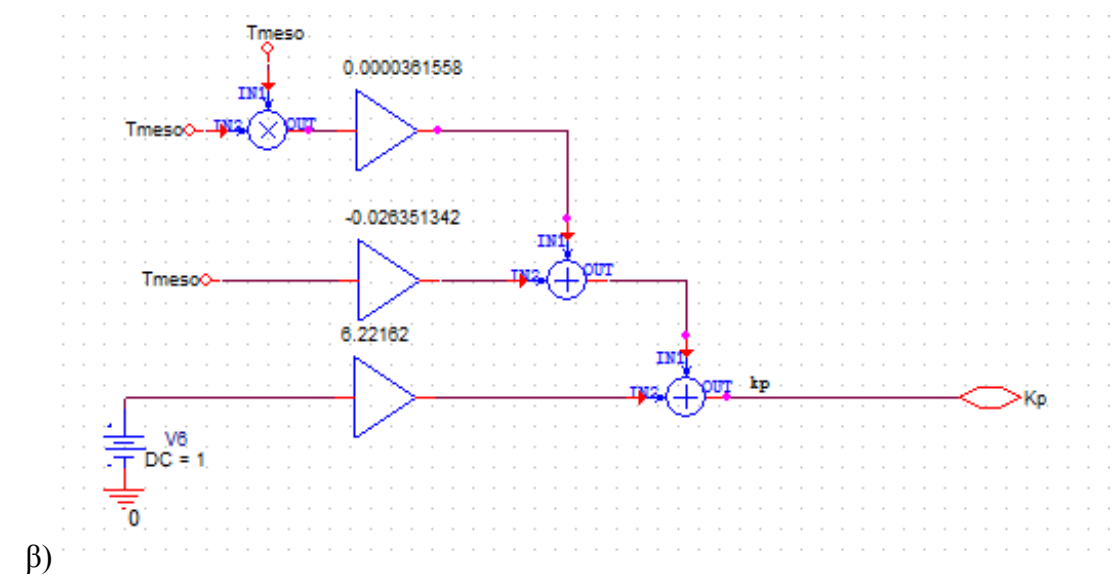
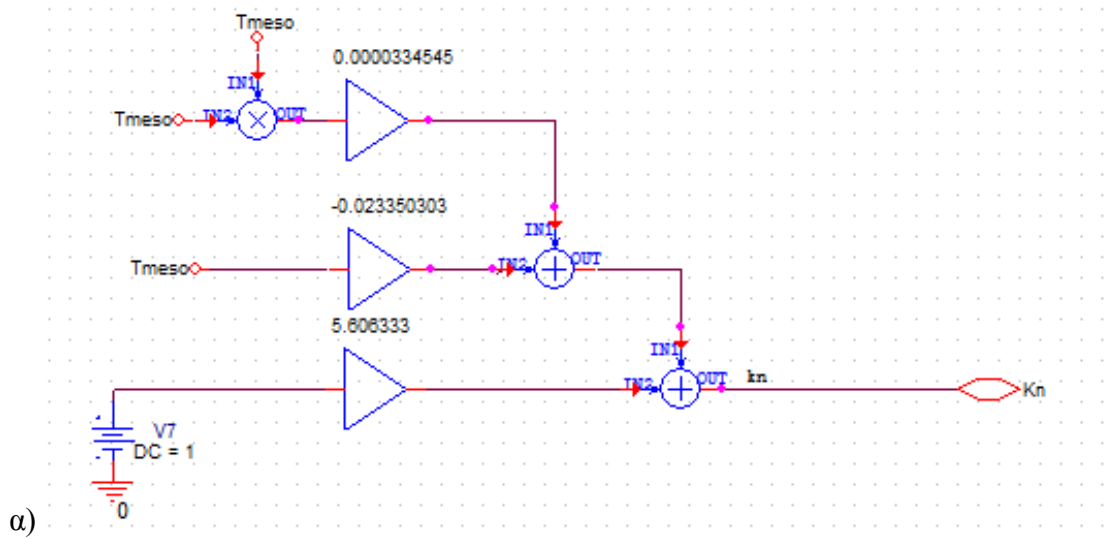
2.4.2 Παράμετροι συντελεστών θερμοηλεκτρικού

Στη συνέχεια θα εξάγουμε μία μία τις παραμέτρους του θερμοηλεκτρικού στοιχείου μας. Είναι απαραίτητο αρχικά, να παράξουμε το $T_{\text{μέσο}}$, το οποίο προκύπτει από τον τύπο (2.12). Η υλοποίησή του φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα:

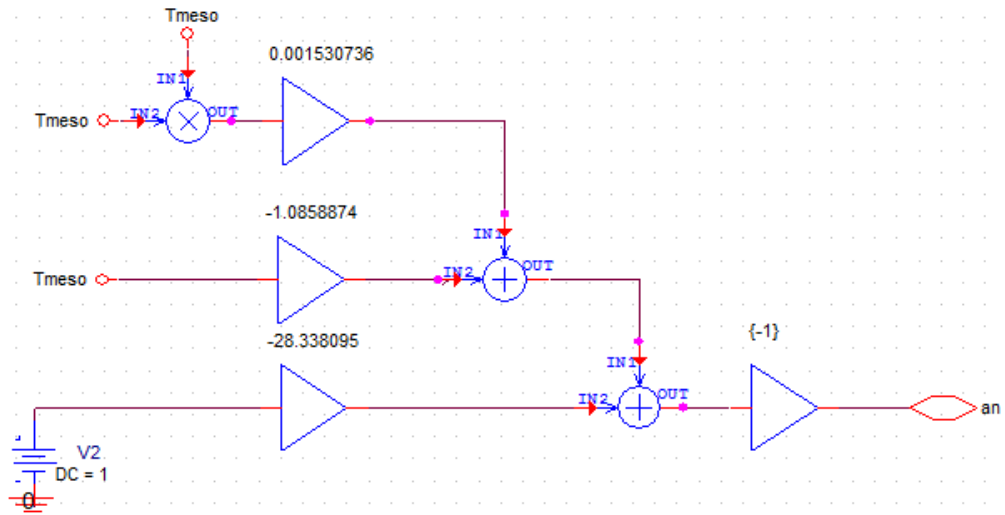


Σχήμα 2.0.3: Διάταξη προσομοίωσης μέσης θερμοκρασίας στο SPICE

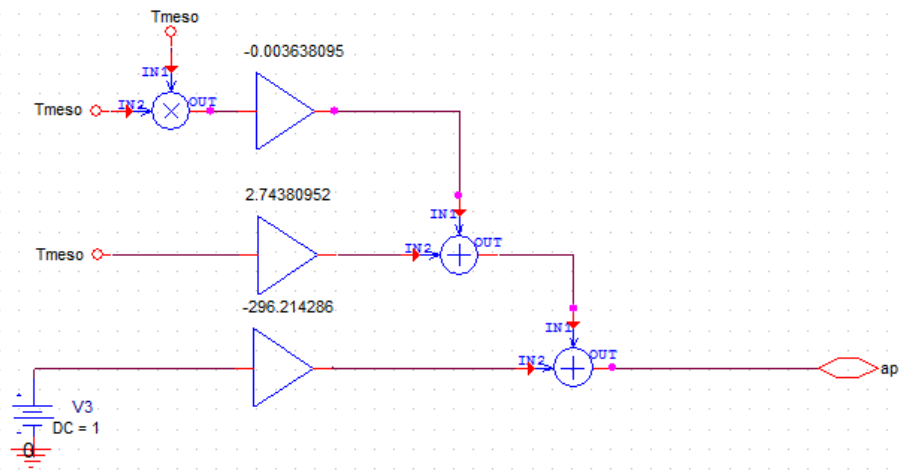
Για την υλοποίηση των εξισώσεων (2.13-2.21) των παραμέτρων του θερμοηλεκτρικού στο SPICE, χρησιμοποιούμε πηγές τάσης. Η υλοποίηση αυτή φαίνεται στα σχήματα 2.4-2.6



Σχήμα 2.4: α) Διάταξη προσομοίωσης k_n στο SPICE, β) Διάταξη προσομοίωσης k_p στο SPICE και γ) Διάταξη προσομοίωσης Θ_m στο SPICE



α)

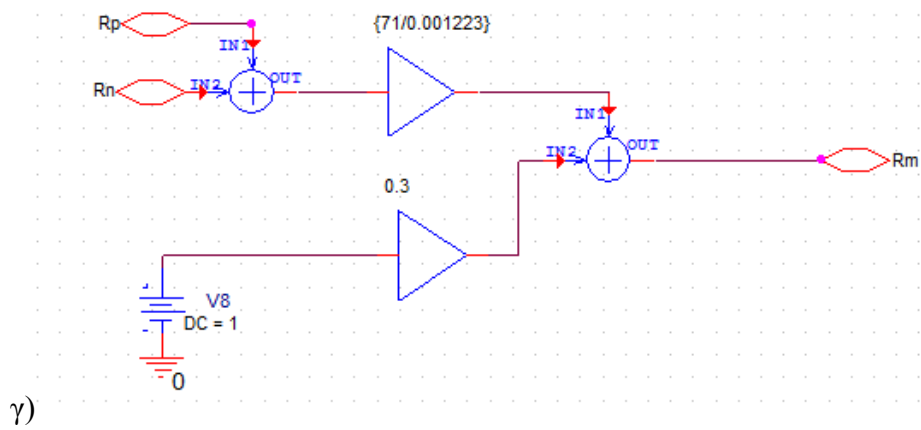
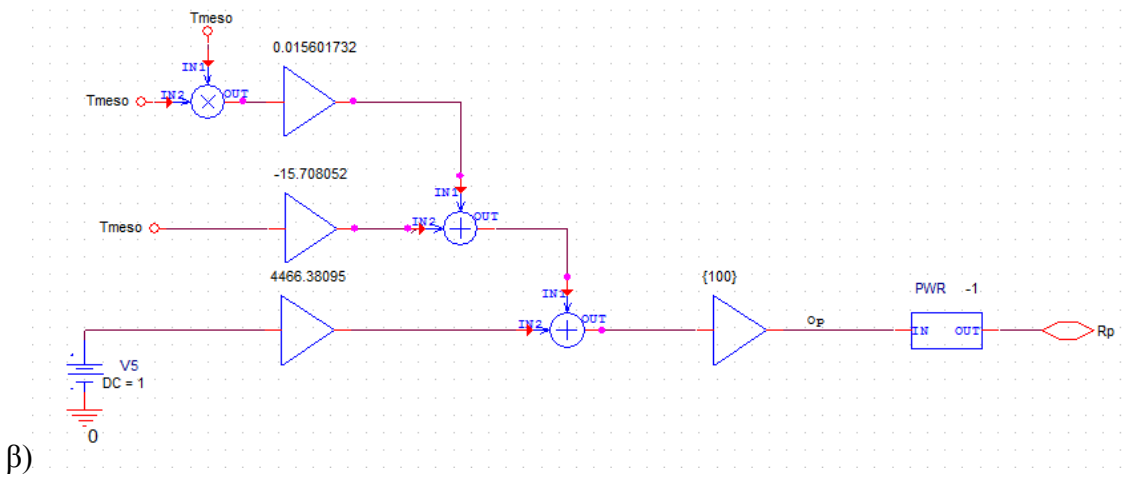
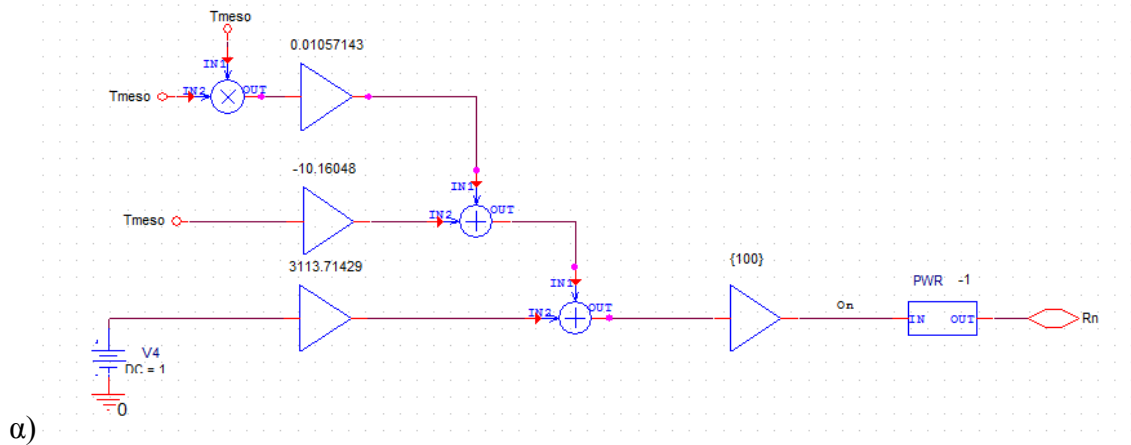


β)



γ)

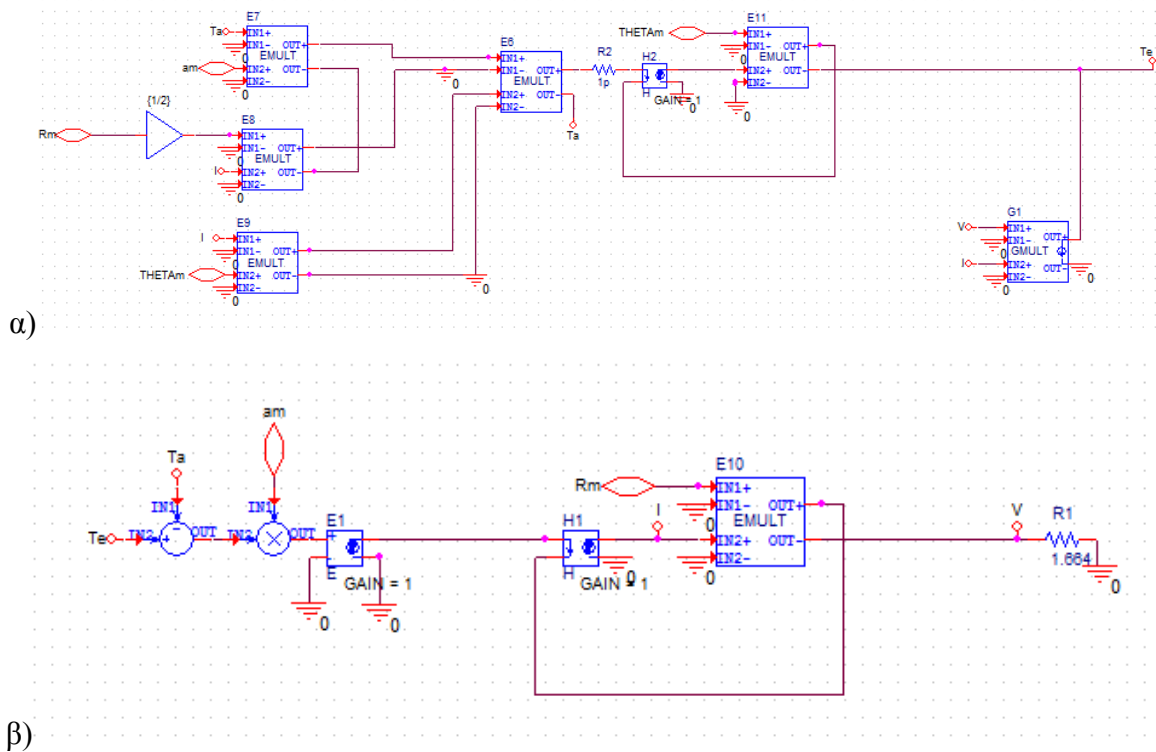
Σχήμα 2.5: α) Διάταξη προσομοίωσης a_n στο SPICE, β) Διάταξη προσομοίωσης a_p στο SPICE και γ) Διάταξη προσομοίωσης a_m στο SPICE



Σχήμα 2.6: α) Διάταξη προσομοίωσης R_n στο SPICE, β) Διάταξη προσομοίωσης R_p στο SPICE και γ) Διάταξη προσομοίωσης R_m στο SPICE

2.4.3 Το θερμικό και το ηλεκτρικό μοντέλο

Τέλος, έγινε η μοντελοποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος του θερμοηλεκτρικού που φαίνεται στα σχήματα 2.7. Οι τιμές των αντιστάσεων, όπως είδαμε πιο πάνω, είναι υπό τη μορφή τάσης. Για το λόγο αυτό, στα κυκλώματά μας τις αναπαριστούμε σαν πτώση τάσης.



Σχήμα 2.7: α) Διάταξη προσομοίωσης θερμικού μοντέλου θερμοηλεκτρικού στο SPICE και β) Διάταξη προσομοίωσης ηλεκτρικού μοντέλου θερμοηλεκτρικού στο SPICE

Μέσω του παραπάνω κυκλώματος, είμαστε τώρα σε θέση να υπολογίσουμε την ισχύ, αλλά και όποια παράμετρο του κυκλώματος θέλουμε, για κάθε συνδυασμό ζευγών θερμοκρασίας κρύας και θερμής πλευράς και με τη σύνδεση οπουδήποτε φορτίου στην έξοδο.

2.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης και σύγκριση με θεωρητικές τιμές

Αρχικά, παραθέτονται οι εξισώσεις που προκύπτουν οι θεωρητικές τιμές που αφορούν τη θερμοηλεκτρική μας γεννήτρια. Στη συνέχεια συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που πήραμε από την προσομοίωση στο SPICE, με τα αποτελέσματα των θεωρητικών υπολογισμών.

Από το Seebeck effect η τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι:

$$V_{oc} = \alpha_m \Delta T \quad (2.22)$$

Διαιρώντας με την εσωτερική αντίσταση προκύπτει το ρεύμα βραχυκύκλωσης:

$$I_{sc} = \frac{V_{oc}}{R_m} \quad (2.23)$$

Η βέλτιστη ισχύς, όπως θα δούμε στις μεθόδους βελτιστοποίησης στο επόμενο κεφάλαιο, προκύπτει όταν:

$$V_{out} = \frac{V_{oc}}{2} \quad (2.24)$$

$$\text{και } I_{out} = \frac{I_{sc}}{2} \quad (2.25)$$

Οπότε η ισχύς είναι:

$$P_{out} = V_{out}I_{out} = \frac{V_{oc}I_{sc}}{4} \quad (2.26)$$

Η σύγκριση των θεωρητικών τιμών με τις τιμές που παίρνουμε από τις προσομοιώσεις φαίνονται στους πιο κάτω πίνακες. Στην εργασία αυτή παρατίθενται οι μετρήσεις για θερμοκρασία κρύας πλευράς σταθερή, ίση με 30°C, και μεταβαλλόμενη τη θερμοκρασία ζεστής πλευράς. Ο πίνακας 2.2 παρουσιάζει τις τιμές των θερμικών παραμέτρων. Στους επόμενους πίνακες 2.3-2.6 φαίνονται οι τιμές που πήραμε από την προσομοίωση του θερμικού μοντέλου και οι θεωρητικές τιμές που υπολογίστηκαν από τους παραπάνω τύπους (2.22-2.26), καθώς και οι γραφικές τους παραστάσεις. Όπως παρατηρούμε, το σφάλμα των προσομοιώσεων δεν ξεπερνά το 1%, το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$E(\%) = \frac{X-X'}{X},$$

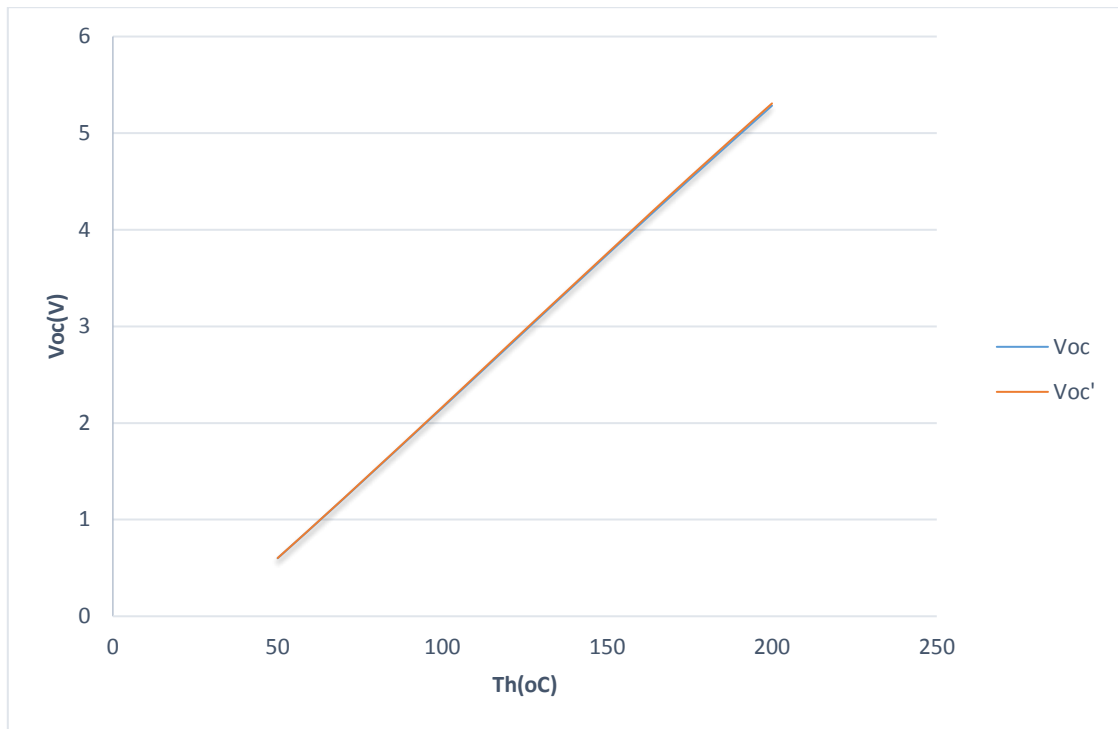
Όπου X η θεωρητική τιμή και X' η τιμή που παίρνουμε από τις προσομοιώσεις.

| Tc(°C) | Th(°C) | ΔT(°C) | Θm(K/W) | am(V/K) | Rm(Ω) |
|--------|--------|--------|---------|----------|-------|
| 30 | 50 | 20 | 3,728 | 0,030023 | 1,439 |
| | 70 | 40 | 3,795 | 0,030403 | 1,491 |
| | 100 | 70 | 3,865 | 0,030836 | 1,574 |
| | 120 | 90 | 3,890 | 0,031033 | 1,631 |
| | 150 | 120 | 3,893 | 0,03119 | 1,719 |
| | 175 | 145 | 3,866 | 0,03119 | 1,790 |
| | 200 | 170 | 3,810 | 0,031086 | 1,868 |

Πίνακας 2.2: Παράμετροι θερμοηλεκτρικού

| Tc(°C) | Th(°C) | ΔT(°C) | Voc(V) (Θεωρία) | Voc(V) (Προσομοίωση) | E(%) |
|--------|--------|--------|--------------------|-------------------------|-------|
| 30 | 50 | 20 | 0,60 | 0,603 | -0,38 |
| | 70 | 40 | 1,216 | 1,220 | -0,31 |
| | 100 | 70 | 2,160 | 2,167 | -0,39 |
| | 120 | 90 | 2,793 | 2,805 | -0,43 |
| | 150 | 120 | 3,743 | 3,756 | -0,35 |
| | 175 | 145 | 4,522 | 4,544 | -0,47 |
| | 200 | 170 | 5,285 | 5,308 | -0,44 |

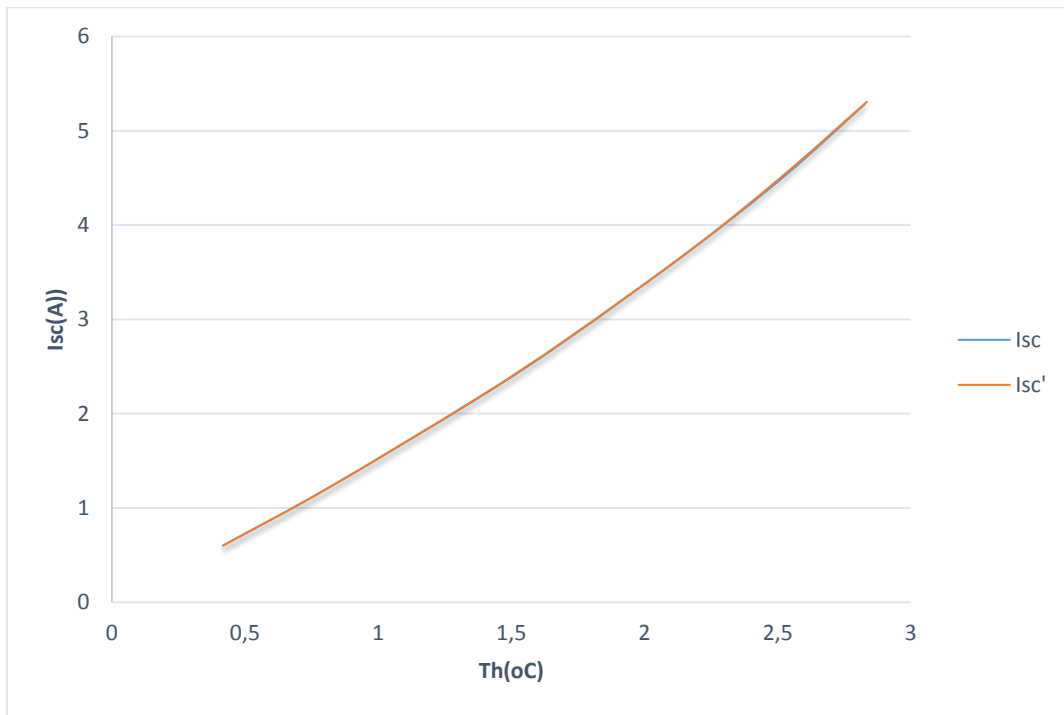
Πίνακας 2.3: Τάση ανοιχτοκύκλωσης θερμοηλεκτρικού από την προσομοίωση στο SPICE



Σχήμα 2.8: Διάγραμμα τάσεων ανοιχτοκύκλωσης συναρτήσει της θερμοκρασίας θερμής πλευράς

| Tc(°C) | Th(°C) | ΔT(°C) | I _{sc} (A) | I _{sc} (A) | E(%) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-------|
| | | | (Θεωρία) | (Προσομοίωση) | |
| 30 | 50 | 20 | 0,417 | 0,418 | -0,08 |
| | 70 | 40 | 0,816 | 0,816 | -0,09 |
| | 100 | 70 | 1,372 | 1,373 | -0,09 |
| | 120 | 90 | 1,713 | 1,715 | -0,13 |
| | 150 | 120 | 2,178 | 2,182 | -0,19 |
| | 175 | 145 | 2,527 | 2,528 | -0,04 |
| | 200 | 170 | 2,828 | 2,835 | -0,23 |

Πίνακας 2.4: Ρεύμα βραχυκύκλωσης θερμοηλεκτρικού από την προσομοίωση στο SPICE



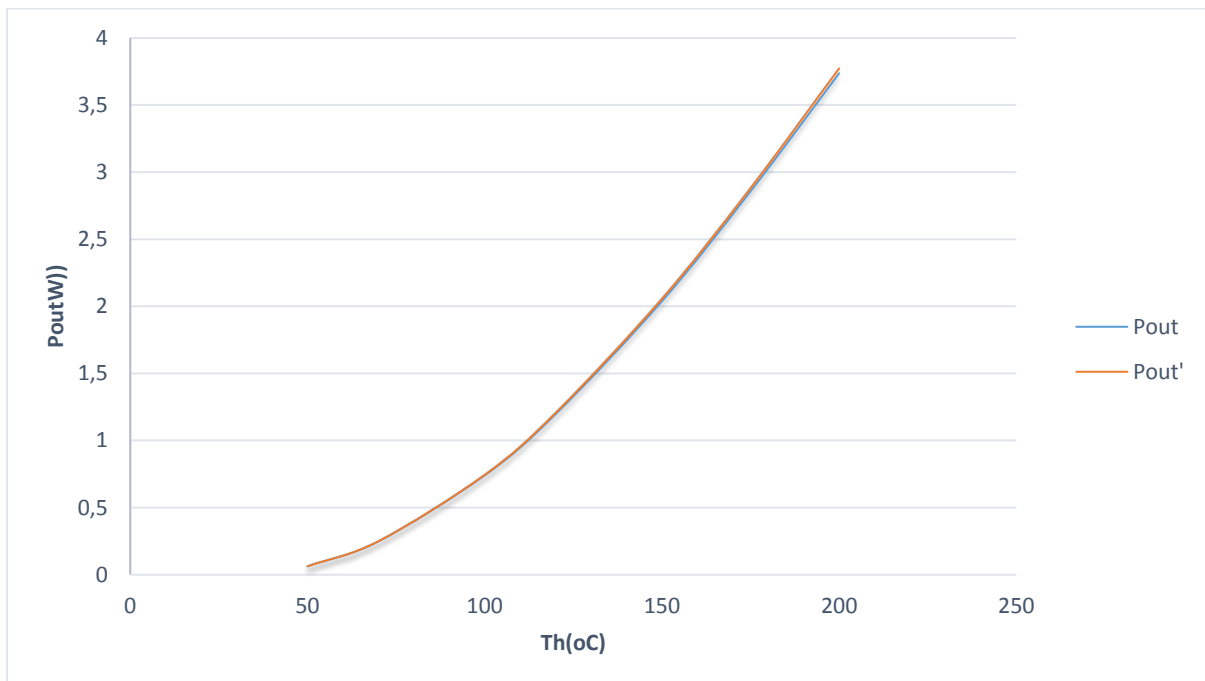
Σχήμα 2.9: Διάγραμμα ρευμάτων βραχυκύκλωσης συναρτήσει της θερμοκρασίας θερμής πλευράς

| $T_c(^{\circ}\text{C})$ | $T_h(^{\circ}\text{C})$ | $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ | $V_{out}(\text{V})$ (Θεωρία) | $V_{out}(\text{V})$ (Προσομοίωση) | $E(\%)$ | $I_{out}(\text{A})$ (Θεωρία) | $I_{sc}(\text{A})$ (Προσομοίωση) | $E(\%)$ |
|-------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------|---------------------------------|-------------------------------------|---------|
| 30 | 50 | 20 | 0,3 | 0,301 | -0,39 | 0,209 | 0,210 | -0,43 |
| | 70 | 40 | 0,608 | 0,611 | -0,40 | 0,408 | 0,410 | -0,45 |
| | 100 | 70 | 1,079 | 1,082 | -0,25 | 0,686 | 0,689 | -0,41 |
| | 120 | 90 | 1,396 | 1,403 | -0,47 | 0,856 | 0,860 | -0,43 |
| | 150 | 120 | 1,871 | 1,880 | -0,46 | 1,089 | 1,094 | -0,46 |
| | 175 | 145 | 2,261 | 2,272 | -0,47 | 1,263 | 1,268 | -0,35 |
| | 200 | 170 | 2,642 | 2,655 | -0,48 | 1,414 | 1,421 | -0,47 |

Πίνακας 2. 5: Τάση και ρεύμα εξόδου θερμοηλεκτρικού με προσαρμοσμένο από την προσομοίωση στο SPICE

| $T_c(^{\circ}C)$ | $T_h(^{\circ}C)$ | $\Delta T(^{\circ}C)$ | $P_{out}(W)$ (Θεωρία) | $P_{out}(W)$ (Προσομοίωση) | $\epsilon(\%)$ |
|------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------|
| 30 | 50 | 20 | 0,063 | 0,063 | -0,82 |
| | 70 | 40 | 0,248 | 0,250 | -0,85 |
| | 100 | 70 | 0,740 | 0,745 | -0,67 |
| | 120 | 90 | 1,196 | 1,207 | -0,90 |
| | 150 | 120 | 2,038 | 2,057 | -0,92 |
| | 175 | 145 | 2,857 | 2,881 | -0,83 |
| | 200 | 170 | 3,737 | 3,773 | -0,96 |

Πίνακας 2.6: Ισχύς θερμοηλεκτρικού με προσαρμοσμένο φορτίο από την προσομοίωση στο SPICE



Σχήμα 2.10: Διάγραμμα ισχύος θερμοηλεκτρικού με προσαρμοσμένο φορτίο

[8-12]

Κεφάλαιο 3. Σύστημα Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος

Όπως είδαμε στο πρώτο κεφάλαιο, το ενεργειακό πρόβλημα γέννησε την ανάγκη να στραφούμε σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ταυτόχρονα όμως, χρειαζόμαστε συστήματα που να ελαχιστοποιούν τις απώλειες κατά τη μετατροπή της ενέργειας σε ηλεκτρική, βελτιώνοντας έτσι την απόδοσή τους.

Όσον αφορά τα θερμοηλεκτρικά, έχουμε δει ότι το μοναδικό αλλά μεγάλο μειονέκτημά τους είναι η χαμηλή τους απόδοση. Όπως είπαμε και προηγουμένως, για να φτάσουμε το 10%, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα σύστημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος, το οποίο αναγκάζει το θερμοηλεκτρικό να λειτουργεί στο βέλτιστο σημείο απόδοσης.

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το θερμοηλεκτρικό μπορούμε να το μελετήσουμε και με το ισοδύναμο Thevenin, δηλαδή σαν μία πηγή τάσης με μία αντίσταση σε σειρά. Σύμφωνα με το θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος, για να έχουμε μέγιστη μεταφορά ισχύος, χρειάζεται να γίνει προσαρμογή του φορτίου. Κοιτώντας τις καμπύλες λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού στο πρώτο κεφάλαιο, παρατηρούμε ότι η εσωτερική αντίσταση του φορτίου δεν είναι σταθερή σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Μελετώντας τις καμπύλες αυτές, προκύπτουν διάφορες μέθοδοι για τον εντοπισμό του βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Τέτοιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται εδώ και πολλά χρόνια σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος για τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες.

Για να γίνει η προσαρμογή του φορτίου χρησιμοποιούνται μετατροπείς τάσης. Στο κεφάλαιο αυτό θα επιλέξουμε τη μέθοδο βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιήσουμε και στη συνέχεια και θα σχεδιάσουμε στο SPICE το μετατροπέα ισχύος.

3.1 Παρουσίαση μεθόδων βελτιστοποίησης

3.1.1 Περιγραφή μεθόδων

Στη βιβλιογραφία έχουν βρεθεί τέσσερις μέθοδοι βελτιστοποίησης. Αυτές είναι οι εξής:

1. Η μέθοδος τάσης ανοιχτοκύκλωσης (ή open-circuit voltage method, V_{oc})
2. Η μέθοδος ρεύματος βραχυκύκλωσης (ή short-circuit current method, I_{sc})
3. Η μέθοδος Perturb & Observe (P&O)
4. Και η μέθοδος Incremental Conductance (INC)

Αν παρατηρήσει κανείς τη χαρακτηριστική V-I στο σχήμα 1.10 της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, θα δει ότι είναι γραμμική. Στο ίδιο σχήμα, φαίνεται και η χαρακτηριστική P-V. Η μέγιστη ισχύς εμφανίζεται στη μέση των V_{oc} και I_{sc} .

$$V_{pmax} = k_1 V_{oc} (3.1)$$

$$I_{pmax} = k_2 I_{sc} (3.2)$$

Όπου $k_1=k_2=0,5$.

Οι σχέσεις αυτές ισχύουν για όλες τις διαφορές θερμοκρασίας. Όσον αφορά λοιπόν τις δύο πρώτες μεθόδους, αρκεί μόνο να μετριέται η τάση ανοιχτοκύκλωσης ή το ρεύμα βραχυκύκλωσης, ώστε μέσω του μετατροπέα ισχύος να επιτυγχάνουμε τη βέλτιστη λειτουργία.

Όσο αφορά τη μέθοδο P&O, δουλεύει όπως η ανθρώπινη σκέψη. Αυτό που κάνει είναι να μεταβάλλει ελαφρώς ή την τάση ή το ρεύμα ή το duty cycle, παρατηρώντας κάθε φορά αν αυξήθηκε ή όχι η ισχύς, η οποία έχει παραβολική συμπεριφορά (Σχήμα1.10). Αν για παράδειγμα καθώς αυξανόταν το ρεύμα, αυξανόταν και η ισχύς, στο επόμενο βήμα θα προχωρούσε σε αύξηση του ρεύματος, αν μειωνόταν η ισχύς τότε στο επόμενο βήμα θα προχωρούσε σε μείωση του ρεύματος.

Τέλος, η μέθοδος INC μοιάζει με τη λογική της προηγούμενης. Γίνεται μεταβολή τάσης και στη συνέχεια σύγκριση αποτελεσμάτων. Μόνο που στην περίπτωση αυτή το κριτήριο εύρεσης του βέλτιστου σημείου λειτουργίας είναι ο μηδενισμός της κλίσης της καμπύλης P-V. Για την κατανόηση της λειτουργίας της μεθόδου αυτής θα βοηθήσουν οι ακόλουθοι τύποι:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{dI}{dV} V + I (3.3)$$

- ⇒ Αν $\frac{dP}{dV} = 0$, τότε βρισκόμαστε στο σημείο βέλτιστης ισχύος
- ⇒ Αν $\frac{dP}{dV} > 0$, τότε η τάση πρέπει να αυξηθεί
- ⇒ Αν $\frac{dP}{dV} < 0$, τότε η τάση πρέπει να μειωθεί

3.1.2 Επιλογή μεθόδου

Στις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες καλύτερη μέθοδος θεωρείται η μέθοδος τάσης ανοιχτοκύκλωσης, εν αντιθέσει με τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες. Αρχικά, η V-I χαρακτηριστική του θερμοηλεκτρικού είναι σχεδόν γραμμική, οπότε ο συντελεστής k_1 είναι σταθερός, και ίσος με 0,5. Η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν μεταβάλλεται γρήγορα ή απότομα όπως στις άλλες περιπτώσεις. Έτσι η συχνότητα ανοιχτοκύκλωσης ή βραχυκύκλωσης είναι μεγάλη, άρα και ο μηδενισμός της ισχύος είναι σχεδόν αμελητέος. Ακόμα, οι μέθοδοι P&O και INC, υπερτερούν στις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, λόγω της ευαισθησίας που έχουν στο θόρυβο. Στην περίπτωση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, λόγω της μεγάλης ειδικής θερμοχωρητικότητας των πλακών, κατά τη μέτρηση των V_{oc} και I_{sc} δεν παρατηρούνται ταλαντώσεις. Επίσης, με τις μεθόδους αυτές, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας δεν κινδυνεύει να παγιδευτεί σε ένα τοπικό μέγιστο.

Το μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι το γεγονός ότι αν γίνει κάποια λάθος μέτρηση, το λάθος θα διορθωθεί στην επόμενη μέτρηση η οποία δεν θα γίνει σύντομα, εφόσον η συχνότητα ανοιχτοκύκλωσης είναι μικρή.

Τέλος, η μέθοδος τάσης ανοιχτοκύκλωσης υπερτερεί της μεθόδου ρεύματος βραχυκύκλωσης. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, ευνοείται η ροή θερμότητας από τη ζεστή πλάκα στην κρύα και κατά συνέπεια μειώνεται η διαφορά θερμοκρασίας. Επίσης, δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί

απόλυτο βραχυκύκλωμα άρα η μέτρηση υπό προϋποθέσεις μπορεί να καταστεί προβληματική και επιπλέον, το κόστος του διαιρέτη τάσης είναι μικρότερο από το μετρητή του ρεύματος.

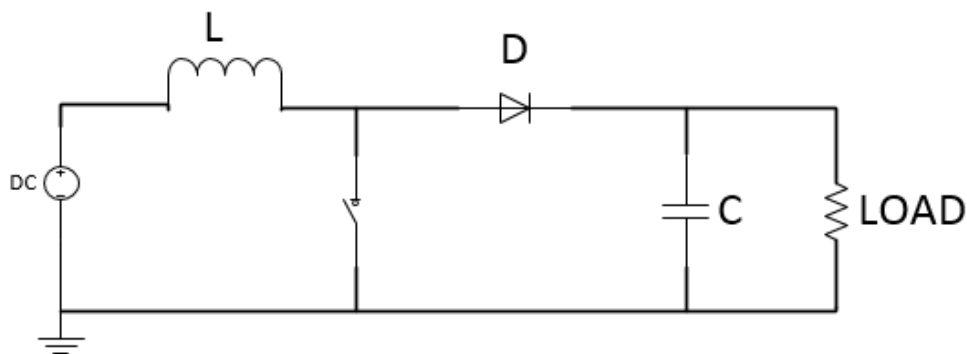
Στη σχεδίαση που πραγματοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε η μέθοδος ανοιχτοκύκλωσης, αφού στη σχεδίασή μας στο SPICE θα χρειαστούμε απλά ένα διακόπτη ανάμεσα στο θερμοηλεκτρικό και τον μετατροπέα, ένα διαιρέτη τάσης και ένα απλό κύκλωμα, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Στην υλοποίηση της πλακέτας θα χρειαστούμε ένα αντίστοιχο κύκλωμα, το οποίο θα μελετήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο. [13-16]

3.2 Διακοπτικά τροφοδοτικά ανύψωσης τάσης

3.2.1 Εισαγωγή

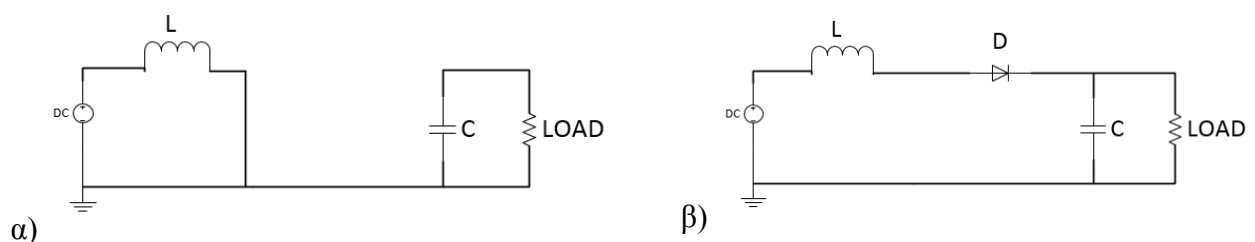
Όπως αναφέραμε προηγουμένως, απαιτείται να χρησιμοποιηθεί ένας μετατροπέας ισχύος για να γίνει η προσαρμογή του φορτίου, ώστε να έχουμε μέγιστη μεταφορά ισχύος. Επειδή το κύκλωμά μας λειτουργεί σε πολύ χαμηλές τάσεις, επιλέγεται ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost converter), ώστε στην έξοδό του να παίρνουμε υψηλότερη τάση, αφού για τη φόρτιση της μπαταρίας χρειαζόμαστε τουλάχιστον 4,2V.

3.2.2 Παρουσίαση dc-dc μετατροπέα ανύψωσης τάσης



Σχήμα 3.1: Κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Στο πιο πάνω σχήμα, φαίνεται το κύκλωμα του μετατροπέα ανύψωσης τάσης στην πιο απλή του μορφή. Η θέση του διακόπτη καθορίζει τη φάση που θα βρίσκεται το κύκλωμα, ενώ ο χρόνος που θα είναι κλειστός ή ανοιχτός (duty cycle) καθορίζει την τάση και το ρεύμα εξόδου του κυκλώματος. Οι δύο καταστάσεις που βρίσκεται το κύκλωμα είναι:



Σχήμα 3.2: Ισοδύναμο κύκλωμα boost όταν α) ο διακόπτης είναι κλειστός και β) ο διακόπτης είναι ανοιχτός

Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, το πηνίο βραχυκυκλώνεται στη γη και η δίοδος πολώνεται ανάστροφα, απομονώνοντας έτσι την έξοδο. Η πηγή τάσης φορτίζει το πηνίο και δημιουργείται διαφορά δυναμικού ίση με την τιμή τάσης της πηγής στα άκρα του πηνίου. Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, το πηνίο λειτουργεί σαν δεύτερη πηγή τάσης. Η πηγή και το πηνίο φορτίζουν τον πυκνωτή και το φορτίο, μέχρι να κλείσει ξανά ο διακόπτης. Όσο ο διακόπτης είναι κλειστός και βρισκόμαστε στην πρώτη κατάσταση, το φορτίο τροφοδοτείται από τον πυκνωτή. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, όσο μεγαλύτερος είναι ο πυκνωτής, τόσο πιο σταθερή είναι η τάση στην έξοδο.

Παρατηρώντας τα πιο πάνω σχήματα, προκύπτουν οι πιο κάτω σχέσεις όσον αφορά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του μετατροπέα:

Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η τάση και το ρεύμα του πηνίου είναι:

$$V_L(t) = \frac{L di_L(t)}{dt} = V_{in} \quad (3.1)$$

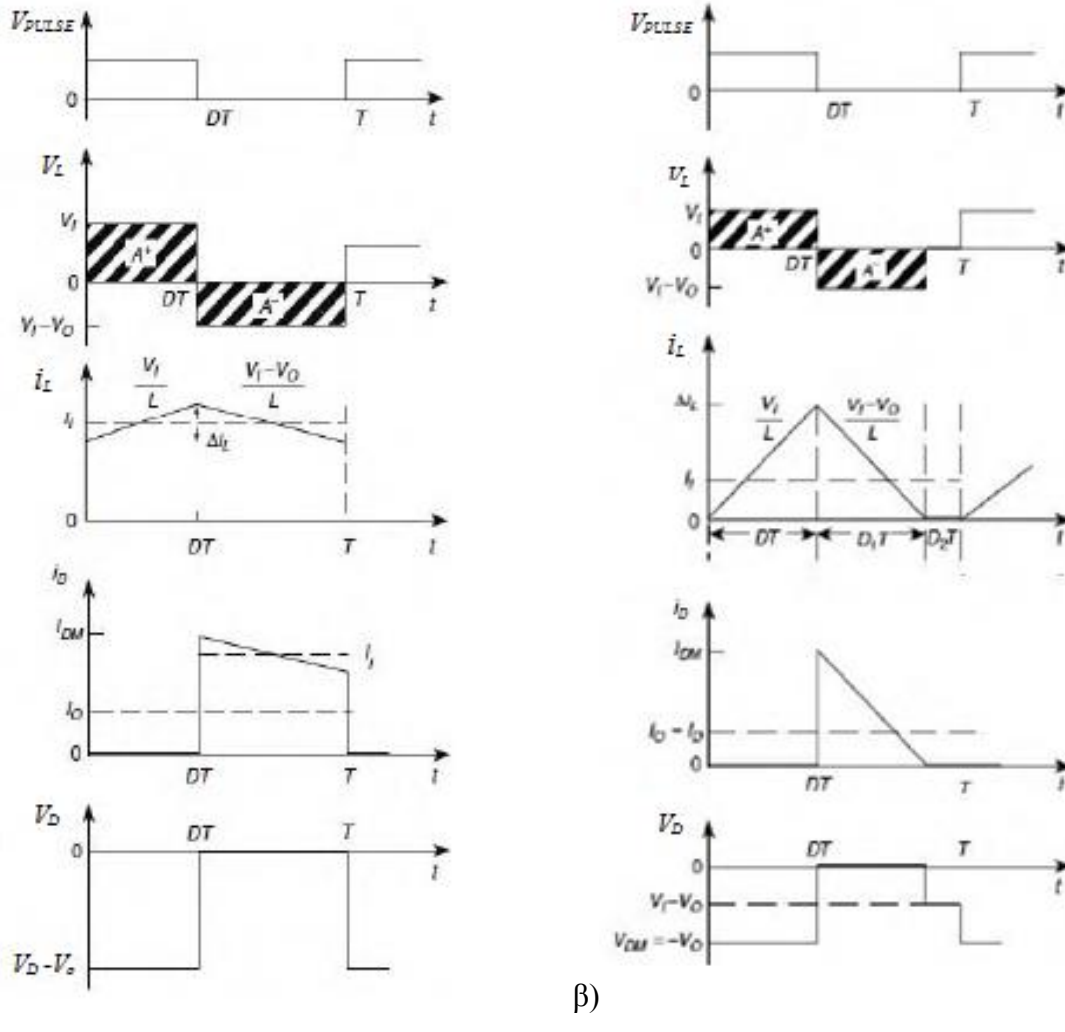
$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{t_1}^t V_{in} dt + i_L(t_1) \quad (3.2)$$

Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, η τάση και το ρεύμα του πηνίου είναι:

$$V_L(t) = \frac{L di_L(t)}{dt} = V_{in} - V_o \quad (3.3)$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{t_2}^t V_{in} - V_o(t) dt + i_L(t_2) \quad (3.4)$$

Η λειτουργία των μετατροπέων συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση χωρίζονται στη λειτουργία συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής ρεύματος. Τις δύο αυτές καταστάσεις θα μελετήσουμε στη συνέχεια.



Σχήμα 3.3:Κυματομορφές μετατροπέα ανύψωσης όταν α)το πηνίο είναι συνεχές και β) όταν το πηνίο είναι ασυνεχές

3.2.2.1 Λειτουργία συνεχούς αγωγής ρεύματος

Αφού θεωρούμε ιδανικό το κύκλωμα χωρίς απώλειες, το ρεύμα είναι ίδιο στην αρχή και στο τέλος της κάθε περιόδου. Έτσι προκύπτει η σχέση:

$$\frac{V_{in}}{L} \delta T - \frac{V_o - V_{in}}{L} (1 - \delta) T = 0 \quad (3.5)$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - \delta} \quad (3.6)$$

Όπου δ , το ποσοστό της περιόδου που ο διακόπτης είναι κλειστός (duty cycle).

Εφόσον η ισχύς είναι σταθερή, καταλήγουμε στην εξής σχέση:

$$\frac{I_o}{I_{in}} = 1 - \delta \quad (3.7)$$

Από τις κυματομορφές του σχήματος 3.3, βλέπουμε ότι:

$$I_{L,max} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3.8)$$

$$I_{L,min} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3.8)$$

$$\Delta I_L = \frac{V_{in}}{L} \delta T \quad (3.9)$$

Προφανώς για να είναι το ρεύμα πηνίου στη συνεχή λειτουργία, πρέπει να ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$I_L > \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3.10)$$

3.2.2.2 Λειτουργία ασυνεχούς αγωγής ρεύματος

Στην ασυνεχή αγωγή υπάρχουν διαστήματα που το ρεύμα του πηνίου μηδενίζεται, δηλαδή

$$I_{L,min} = 0 \quad (3.11)$$

$$\text{και } \delta_1 + \delta_2 < 1 \quad (3.12)$$

Η μέση τιμή στα άκρα του πηνίου είναι ίση με το μηδέν. Από του τύπους (3.1)-(3.4) προκύπτει:

$$\frac{V_{in}}{L} \delta_1 T - \frac{V_o - V_{in}}{L} \delta_2 T = 0 \quad (3.13)$$

Επομένως, καταλήγουμε στη σχέση:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\delta_2} \quad (3.14)$$

Από την κυματομορφή του ρεύματος του πηνίου, προκύπτει ότι:

$$\Delta I_L = \frac{V_{in}}{L} \delta_1 T \quad (3.15)$$

3.2.2.3 Οριακή κατάσταση λειτουργίας

Το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς λειτουργίας του πηνίου, είναι όταν το ρεύμα του πηνίου μηδενιστεί στιγμιαία. Δηλαδή έχουμε:

$$\delta = \delta_1 \quad (3.16)$$

$$\text{και } 1 - \delta = \delta_2 \quad (3.16)$$

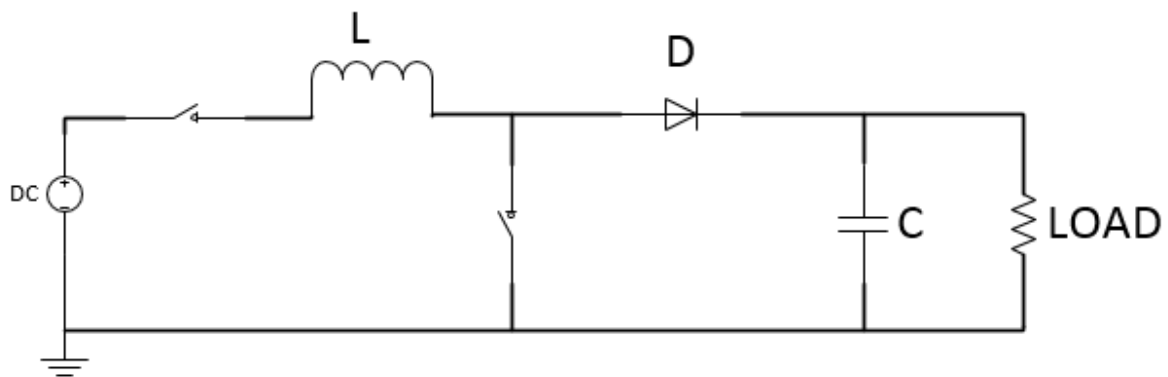
Τότε η σχέση (3.9) ταυτίζεται με την (3.15) και ισχύει η σχέση:

$$I_L = \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3.17)$$

Έτσι, προκύπτει η πιο κάτω σχέση για το όριο λειτουργίας:

$$I_{L,B} = \frac{V_{in}}{2L} \delta T \quad (3.18)$$

3.3 Σχεδίαση μετατροπέα ανύψωσης τάσης στο SPICE



Σχήμα 3.4: Κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης τάσης με διακόπτη ανοιχτοκύκλωσης στην είσοδο

Για την υλοποίηση του μετατροπέα του κυκλώματός μας, θα παρεμβάλουμε ένα διακόπτη στην έξοδο της πηγής μας, ώστε όταν ανοίγει να παίρνουμε την τάση ανοιχτοκύκλωσης του θερμοηλεκτρικού. Το υπόλοιπο κύκλωμα δουλεύει κανονικά, όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Πιο κάτω θα γίνει η επιλογή των στοιχείων και η σχεδίαση στο SPICE, ώστε να δείξουμε ότι η λογική της χρήσης του μετατροπέα για να γίνει η βελτιστοποίηση που θέλουμε είναι σωστή.[17-18]

3.3.1 Επιλογή στοιχείων διάταξης boost στο SPICE

Η επιλογή των στοιχείων της διάταξης θα γίνουν με βάση τις τιμές λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού μας. Δηλαδή, να ξεκινάει η λειτουργία του από όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές τάσης για μικρές διαφορές θερμοκρασίας και να αντέχει στη λειτουργία της μέγιστης διαφοράς θερμοκρασίας. Οι μέγιστες τιμές βέλτιστης λειτουργίας είναι για τάση στα 2,6V και ρεύμα στα 1,4A. Τα στοιχεία μας όμως πρέπει να αντέχουν τις μέγιστες τιμές που μπορεί να λειτουργήσει το θερμοηλεκτρικό, δηλαδή την τάση ανοιχτοκύκλωσης που είναι στα 5,2V και το ρεύμα βραχυκύκλωσης στα 2,8A. Οι ονομαστικές τιμές που επιλέχθηκαν είναι για 96°C και είναι:

$$V_n = 1.5V(3.19)$$

$$I_n = 0.91A(3.20)$$

$$\text{και } R_m = 1,65\Omega(3.21)$$

3.3.1.1 Πηνίο

Το πηνίο θέλουμε να είναι όσο πιο μικρό γίνεται, παραμένοντας όμως σε συνεχή αγωγή ρεύματος και επιπλέον λειτουργώντας σε όσο το δυνατόν μικρότερες διαφορές θερμοκρασίας. Το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς λειτουργίας το είδαμε προηγουμένως στον τύπο ().

Για $I_{L,B}=0,1A$, $f=50kHz$ και ονομαστική τάση λειτουργίας 1,5V με duty cycle 50% έχουμε:

$$I_{L,B} = \frac{V_{in}}{2Lf} \delta$$

$$\Rightarrow L = \frac{V_{in}}{2I_{L,B}f} \delta$$

$$\Rightarrow L = 75\mu\text{H} \quad (3.22)$$

3.3.1.2 Πυκνωτής εισόδου

Ο ρόλος του πυκνωτή στην είσοδο του μετατροπέα μας, είναι να εξομαλύνει την τάση και κατά συνέπεια το ρεύμα που περνάει από το θερμοηλεκτρικό και από τον διακόπτη ανοιχτοκύκλωσης.

Από τον τύπο του πυκνωτή

$$I_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad (3.23)$$

Και με βάση τις ονομαστικές τιμές και για διακύμανση 200mV, έχουμε:

$$C_{in} = \frac{I_{in}T}{2\Delta V_{in}} = 40\mu\text{F}$$

3.3.1.3 Πυκνωτής εξόδου

Ο πυκνωτής εξόδου τοποθετείται για την φόρτιση του φορτίου όσο ο διακόπτης του μετατροπέα είναι κλειστός. Ο πυκνωτής αυτός, θέλουμε να μην εκφορτίζεται ώστε να διατηρεί όσο το δυνατόν πιο σταθερή την τάση εξόδου.

Όπως κάναμε προηγουμένως και για ρεύμα εξόδου το μισό του ονομαστικού ρεύματος εισόδου (για 50% duty cycle και θεωρώντας ιδανική κατάσταση από τον τύπο (3.7)), έχουμε:

$$C_{out} = \frac{I_{out}T}{2\Delta V_{in}} = 20\mu\text{F}$$

3.3.1.4 Φορτίο

Όσον αφορά την προσομοίωση, θα τοποθετήσουμε μία αντίσταση σε ρόλο φορτίου. Για ονομαστικές τιμές τάσης και ρεύματος και 50% duty cycle, έχουμε τυπικά

$$R_{LOAD} = \frac{V_{out}}{I_{out}} = \frac{3\text{V}}{0.45\text{A}} \approx 7\Omega$$

3.3.1.5 Διακόπτες

Στην πράξη, στη θέση των διακοπών θα τοποθετηθούν MOSFET. Για την προσομοίωση βάλουμε διακόπτες με εσωτερική αντίσταση 1,8mΩ.

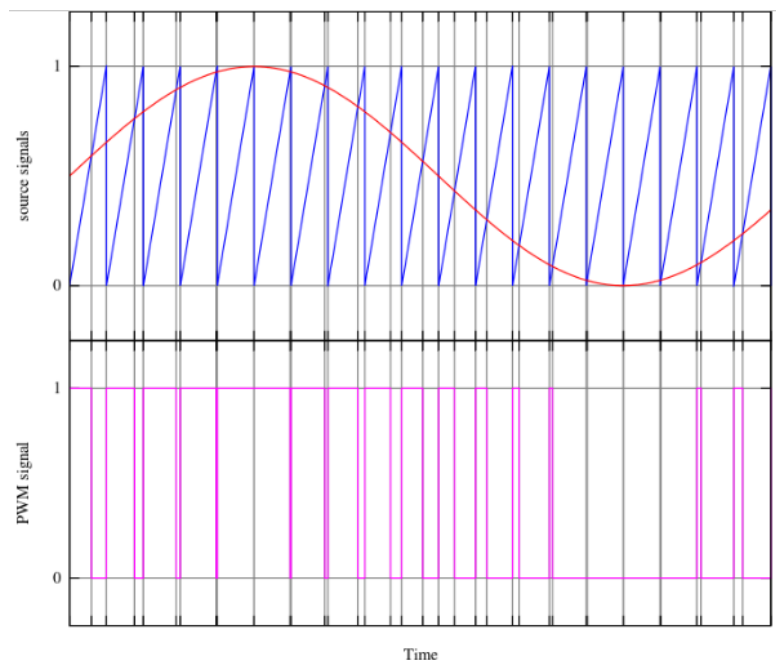
3.3.1.6 Δίοδος

Η δίοδος πρέπει να αντέχει ρεύματα τουλάχιστον 4A και να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη πτώση τάσης. Μετά από δοκιμές καταλληλότερη βρέθηκε η δίοδος Schottky. Για την προσομοίωσή μας επιλέχθηκε η δίοδος DRSX301L-30.

3.3.2 Παρουσίαση κυκλωμάτων στο SPICE

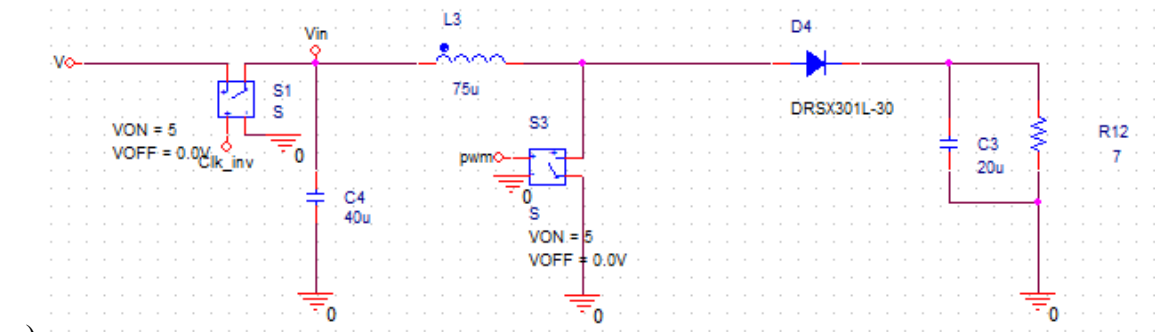
Για την μέτρηση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} βάλαμε ένα διακόπτη ανάμεσα στο θερμοηλεκτρικό και το μετατροπέα (σχήμα 3.6.α). Ο διακόπτης κλείνει όταν πάρει θετικό παλμό. Ο παλμός δημιουργείται από ένα ρολόι 555. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.6β, μέσω ενός αντιστροφέα 7404, δημιουργούμε τον αντίστροφο παλμό, ώστε όσο το κύκλωμα είναι ανοιχτοκυκλωμένο, η τάση ανοιχτοκύκλωσης του θερμοηλεκτρικού φορτίζει ένα πυκνωτή. Ο πυκνωτής αυτός, ο οποίος έχει το ρόλο του δειγματολήπτη (sample and hold), κρατάει την τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, όσο το κύκλωμα θα βρίσκεται στην κανονική του λειτουργία και φαίνεται στο σχήμα 3.6γ. Η τιμή αυτή, μέσω ενός διαιρέτη τάσης (διά δύο) πάει στο PWM. Ο ρόλος του PWM ελεγκτή είναι να κάνει την τάση εξόδου του θερμοηλεκτρικού ίση με τη μισή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του. Έτσι, είμαστε σε θέση να παίρνουμε από το θερμοηλεκτρικό τη μέγιστη δυνατή ισχύ, για κάθε διαφορά θερμοκρασίας.

Στο κύκλωμά μας, η τεχνική PWM φαίνεται στο σχήμα 3.6δ. Αρχικά, συγκρίνεται η μισή τάση ανοιχτοκύκλωσης με την τάση λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού μας. Το σφάλμα της σύγκρισης αυτής ενισχύεται και συγκρίνεται με μία πριονωτή κυματομορφή. Αντίστοιχη κατάσταση είναι αυτή που βλέπουμε στο πιο κάτω σχήμα 3.5. Όταν, το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από την πριονωτή κυματομορφή, τότε στην έξοδο του PWM έχουμε θετικό παλμό. Όταν συμβαίνει το αντίθετο, το σήμα μας έχει μηδενική τιμή. Ο παλμός αυτός οδηγεί το διακόπτη του μετατροπέα μας και με αυτό τον τρόπο προσαρμόζει το φορτίο.

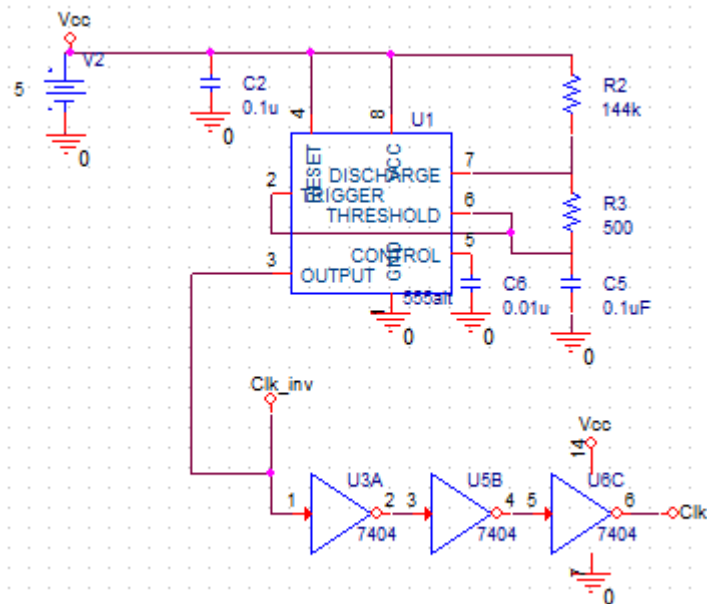


Σχήμα 3.5:Κυματομορφές μεθόδου διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM)

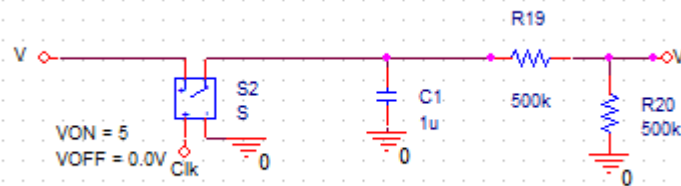
Το κύκλωμα που σχεδιάσαμε στο SPICE είναι το ακόλουθο:



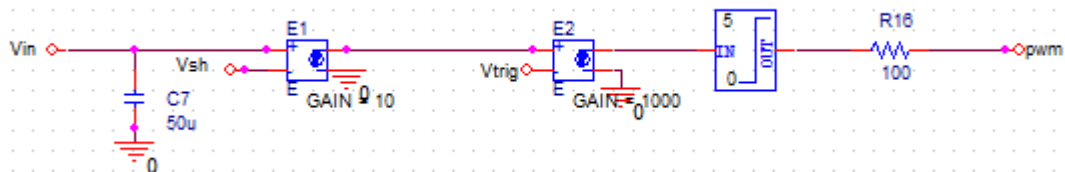
α)



β)



γ)

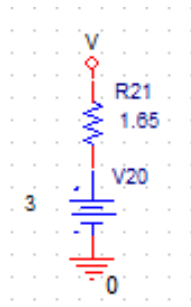


δ)

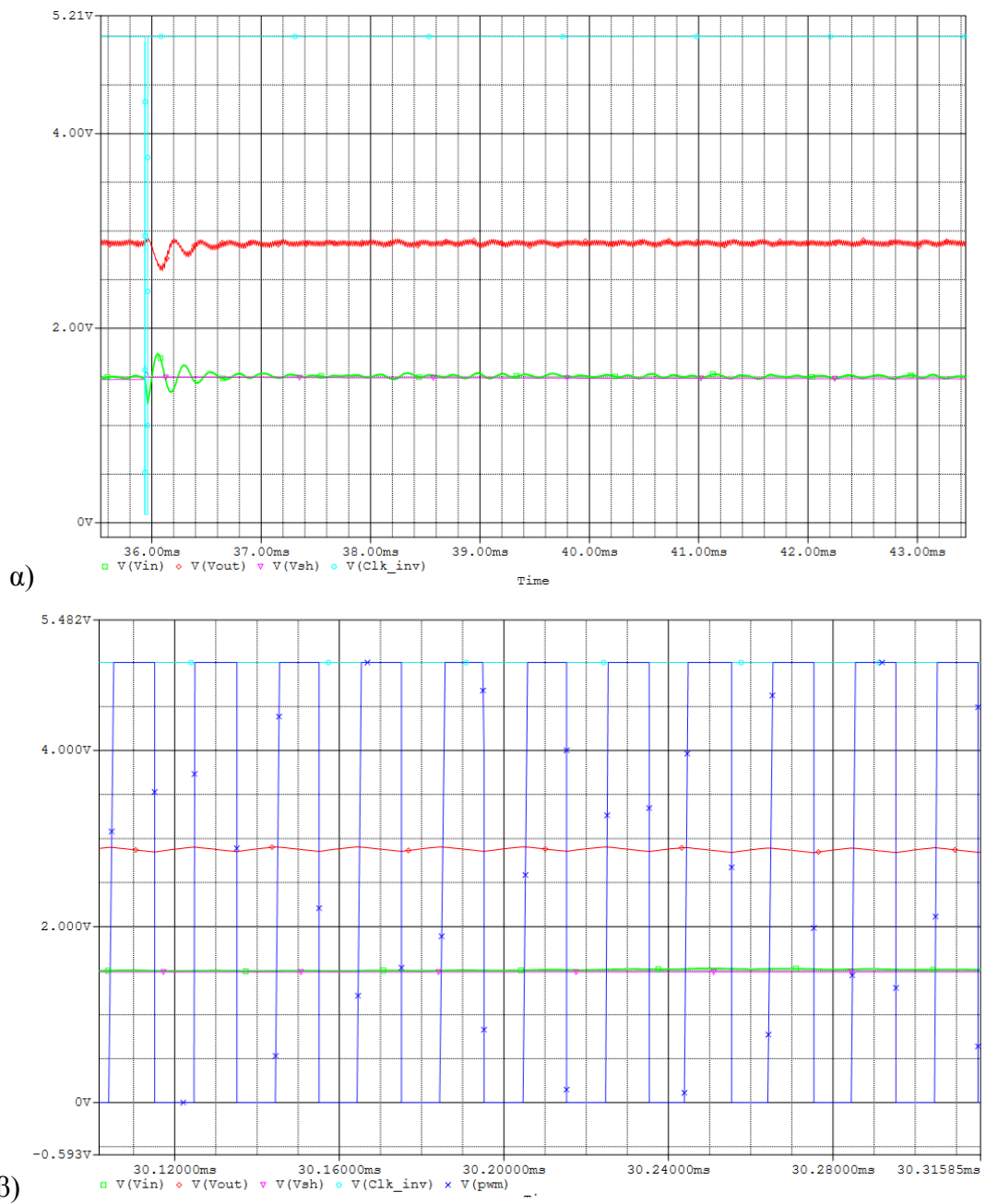
Σχήμα 3.6: Κύκλωμα μέγιστης μεταφοράς ισχύος με τη μέθοδο ανοιχτοκύκλωσης
 α)Κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης τάσης, β)Ρολόι και αντιστροφέας,
 γ)Sample and Holdκαι δ)PWM

3.3.3 Προσομοίωση-Αποτελέσματα

Η πρώτη προσομοίωση έγινε με είσοδο το ισodύναμο Thévenin του θερμοηλεκτρικού.

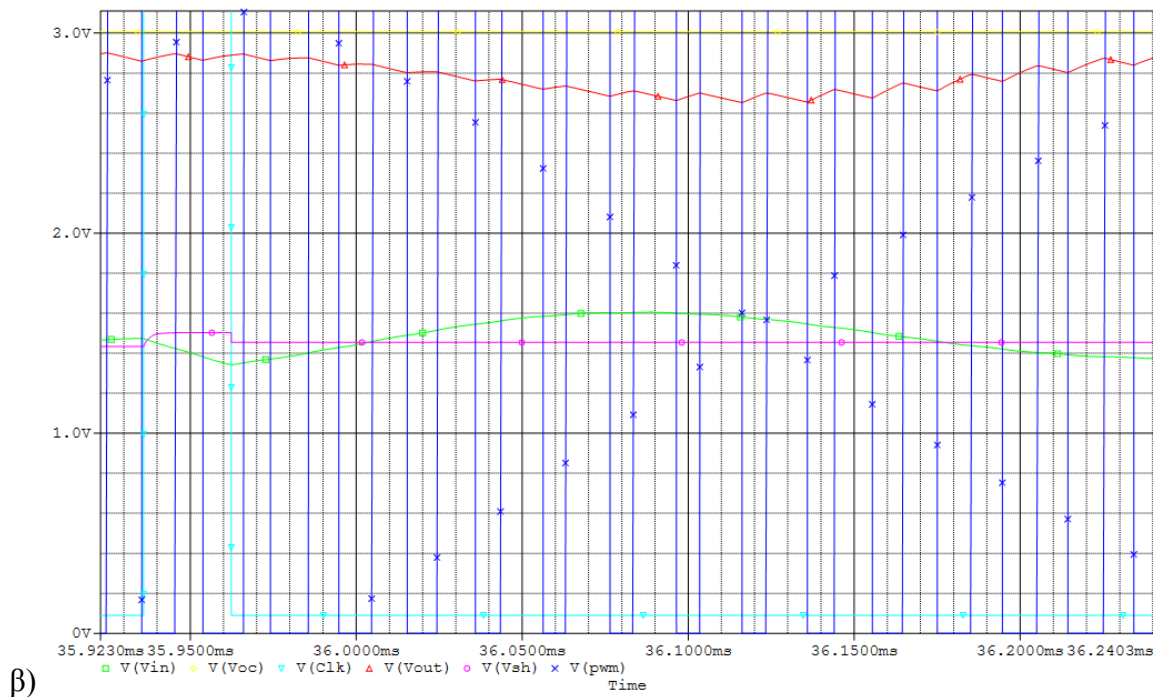
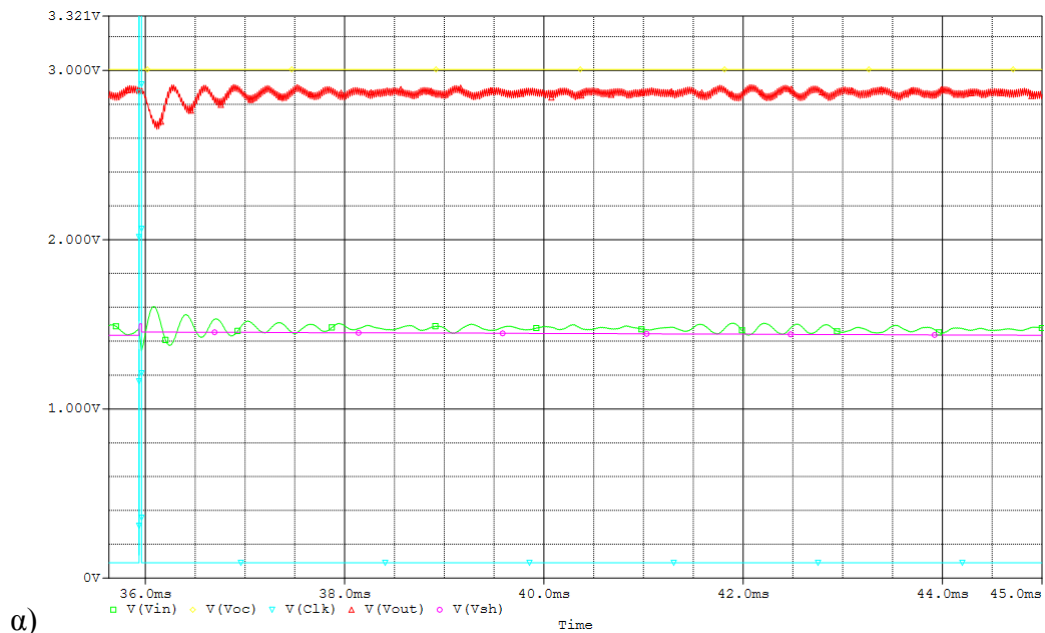


Σχήμα 3.7:ΙσοδύναμοThévenin θερμοηλεκτρικού στο SPICE



Σχήμα 3.8:Κυματομορφές μετατροπέα ανύψωσης τάσης συνδεδεμένου με το ισodύναμο Thévenin του θερμοηλεκτρικού

Ακολούθως, η προσομοίωση του κυκλώματός μας έγινε σε σύνδεση με το θερμικό μοντέλο του θερμοηλεκτρικού που σχεδιάσαμε στο SPICE στο δεύτερο κεφάλαιο.



Σχήμα 3.9:Κυματομορφές μετατροπέα ανύψωσης τάσης συνδεδεμένου με το θερμικό μοντέλο του θερμοηλεκτρικού

Εδώ, φαίνονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας ($T_c=30^{\circ}\text{C}$ και $T_h=126^{\circ}\text{C}$). Όπως θα δούμε στις καμπύλες των σχημάτων 3.8β και 3.9.β, η περίοδος της κυμάτωσης της τάσης εξαρτάται από τους παλμούς του PWM.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα. Η εσωτερική αντίσταση του ισοδύναμου κυκλώματος που προσομοιώσαμε, αλλάζει με βάση τον θεωρητικό υπολογισμό, όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2.

| $T_c(^{\circ}C)$ | $T_h(^{\circ}C)$ | $\Delta T(^{\circ}C)$ | $V_{oc}(V)$ | $R_m(\Omega)$ | $V_{in}(V)$ | $V_{out}(V)$ | $I_{in}(A)$ | $I_{out}(A)$ | $P_{in}(W)$ | $P_{out}(W)$ | $\eta(\%)$ |
|------------------|------------------|-----------------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|
| 30 | 50 | 20 | 0,6 | 1,44 | 0,34 | 0,53 | 0,17 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,73 |
| | 70 | 40 | 1,2 | 1,49 | 0,63 | 1,14 | 0,37 | 0,16 | 0,23 | 0,18 | 0,78 |
| | 100 | 70 | 2,2 | 1,57 | 1,10 | 2,13 | 0,68 | 0,30 | 0,75 | 0,64 | 0,85 |
| | 120 | 90 | 2,8 | 1,63 | 1,38 | 2,69 | 0,84 | 0,39 | 1,16 | 1,05 | 0,91 |
| | 150 | 120 | 3,7 | 1,72 | 1,80 | 3,45 | 1,05 | 0,50 | 1,89 | 1,72 | 0,91 |
| | 175 | 145 | 4,5 | 1,79 | 2,20 | 4,20 | 1,20 | 0,60 | 2,64 | 2,52 | 0,95 |
| | 200 | 170 | 5,3 | 1,87 | 2,50 | 4,86 | 1,43 | 0,70 | 3,58 | 3,40 | 0,95 |

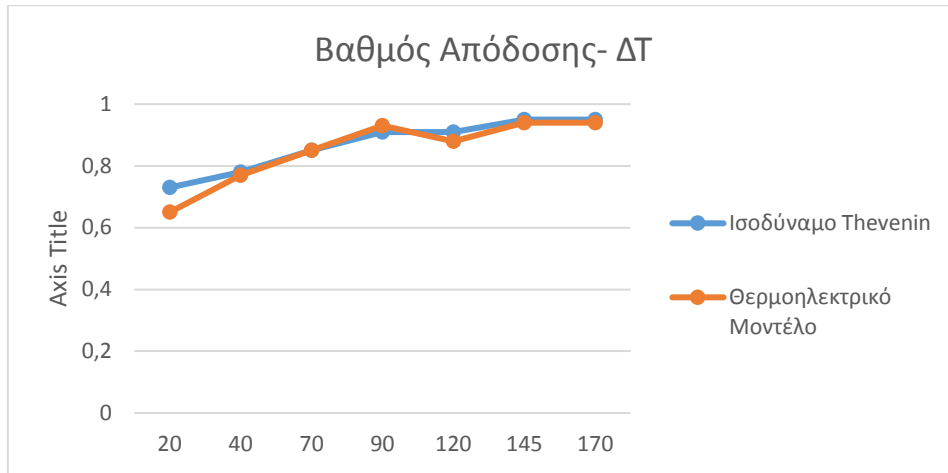
Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης μετατροπέα ανύψωσης τάσης συνδεδεμένου με το ισοδύναμο Thévenin του θερμοηλεκτρικού

| $T_c(^{\circ}C)$ | $T_h(^{\circ}C)$ | $\Delta T(^{\circ}C)$ | $V_{oc}(V)$ | $V_{in}(V)$ | $V_{out}(V)$ | $I_{in}(A)$ | $I_{out}(A)$ | $P_{in}(W)$ | $P_{out}(W)$ | $\eta(\%)$ |
|------------------|------------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|
| 30 | 50 | 20 | 0,6 | 0,35 | 0,54 | 0,18 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,65 |
| | 70 | 40 | 1,2 | 0,64 | 1,18 | 0,40 | 0,17 | 0,26 | 0,20 | 0,77 |
| | 100 | 70 | 2,2 | 1,10 | 2,12 | 0,69 | 0,30 | 0,76 | 0,64 | 0,85 |
| | 120 | 90 | 2,8 | 1,38 | 2,75 | 0,84 | 0,39 | 1,17 | 1,08 | 0,93 |
| | 150 | 120 | 3,7 | 1,86 | 3,60 | 1,13 | 0,51 | 2,11 | 1,85 | 0,88 |
| | 175 | 145 | 4,5 | 2,22 | 4,31 | 1,27 | 0,61 | 2,82 | 2,66 | 0,94 |
| | 200 | 170 | 5,3 | 2,58 | 4,95 | 1,44 | 0,70 | 3,73 | 3,51 | 0,94 |

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης μετατροπέα ανύψωσης τάσης συνδεδεμένου με το θερμικό μοντέλο του θερμοηλεκτρικού

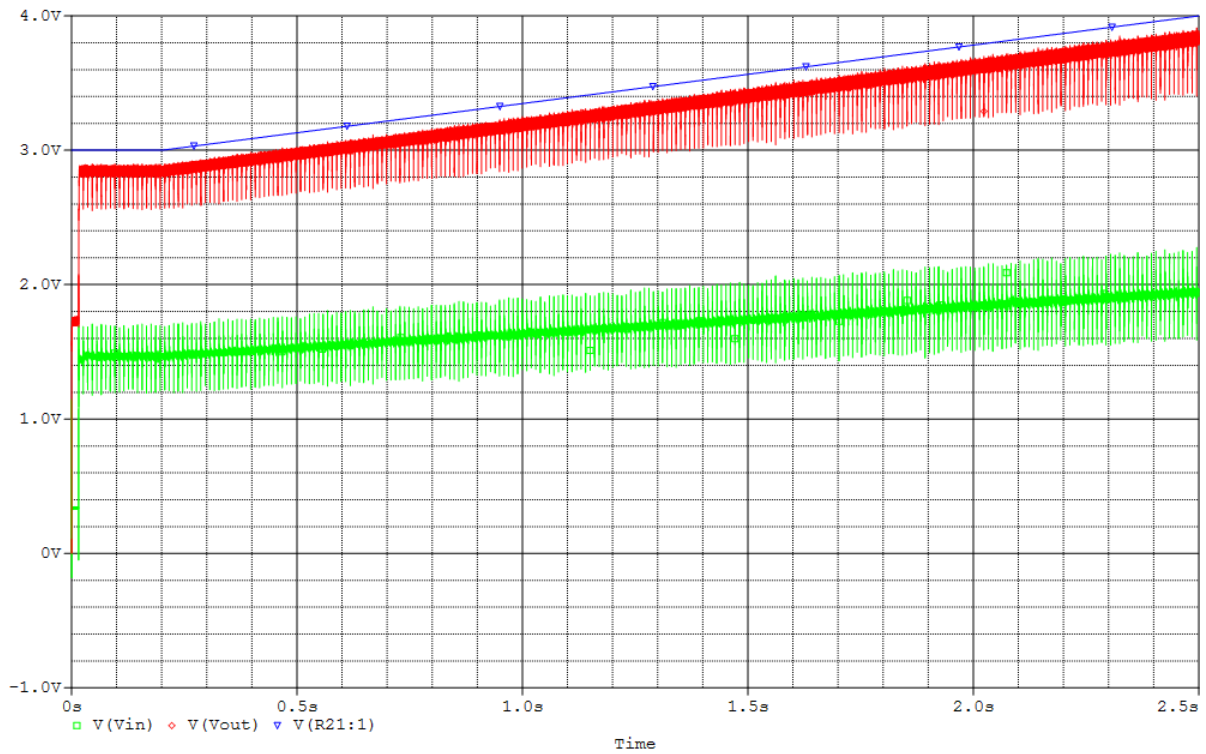
Παρατηρώντας τους δύο πίνακες, βλέπουμε αρχικά ότι η τάση λειτουργίας του κυκλώματος V_{in} είναι κοντά στη μισή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} . Επίσης, συγκρίνοντας τους δύο πίνακες, βλέπουμε ότι οι τιμές είναι πολύ κοντά.

Ο βαθμός απόδοσης φαίνεται στο πιο κάτω διάγραμμα. Ο λόγος που ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση των τιμών της τάσης και του ρεύματος, είναι επειδή στο κύκλωμά μας επικρατούν οι διακοπτικές απώλειες και όχι οι ωμικές απώλειες.



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα βαθμού απόδοσης μετατροπέα συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας στο *Srize*

Τέλος, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του σχήματος 3.10, όπου μεταβάλλεται η τάση του θερμοηλεκτρικού. Βλέπουμε ότι η τάση λειτουργίας του μετατροπέα ακολουθεί την τάση της πηγής, με λόγο 1/2.

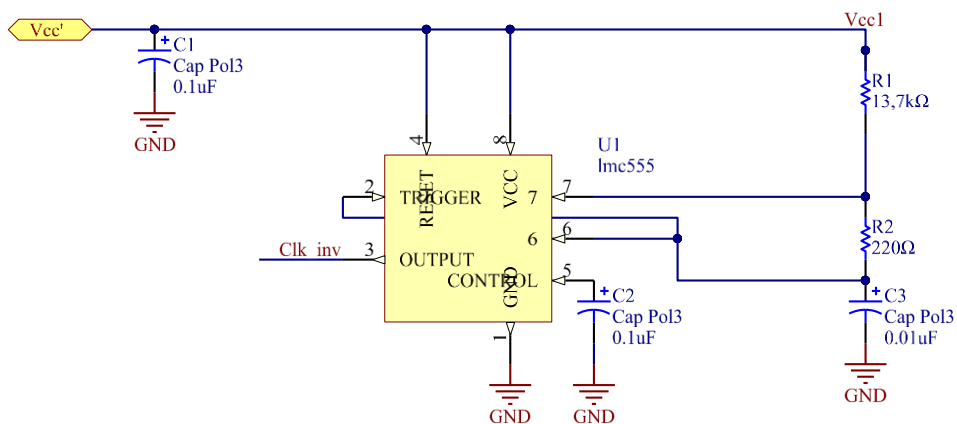
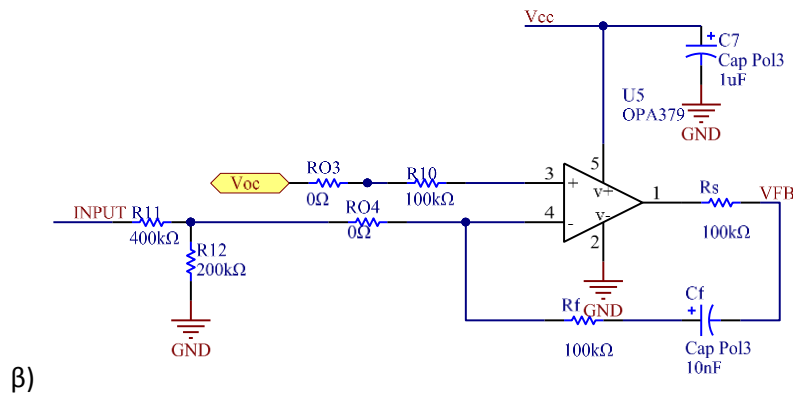
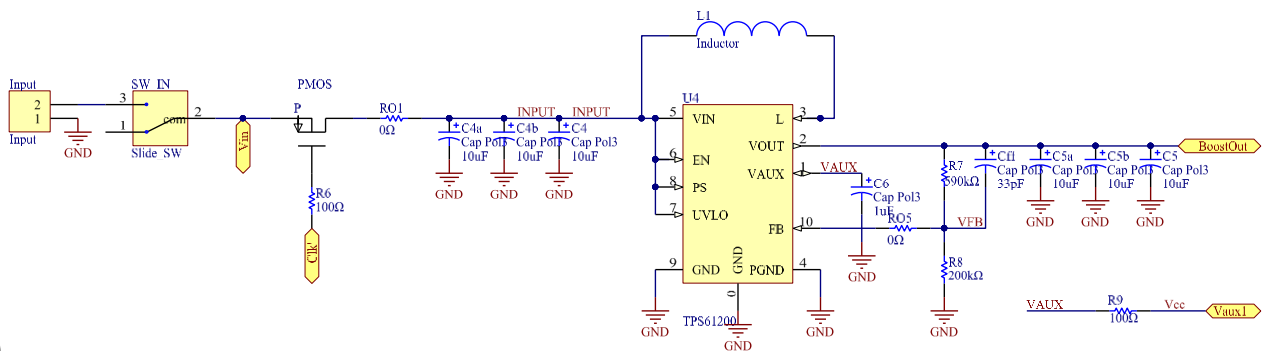


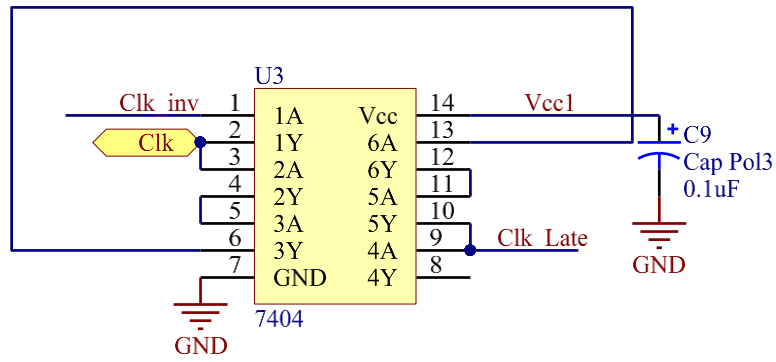
Σχήμα 3.11: Κυματομορφές μετατροπέα αύξησης τάσης συνδεδεμένου με το ισοδύναμο Thévenin του θερμοηλεκτρικού, με αυξανόμενη τάση εισόδου

Κεφάλαιο 4. Κατασκευή πλάκέτας

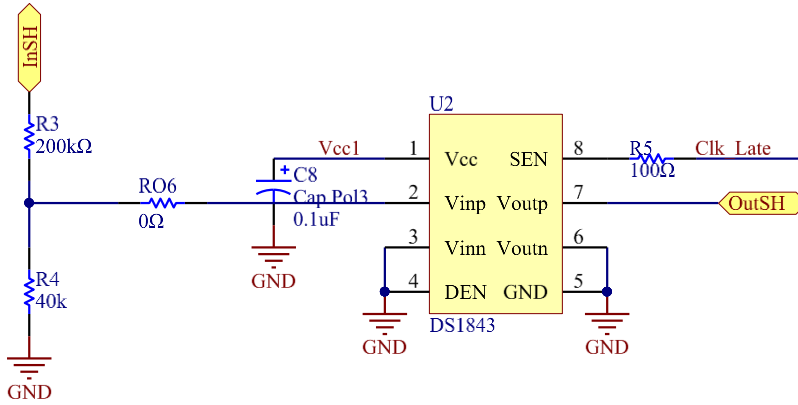
4.1 Σχεδίαση κυκλώματος

Η σχεδίαση της πλάκέτας θα βασιστεί στη λογική που χρησιμοποιήσαμε στο SPICE, χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένα κυκλώματα που βρήκαμε στην αγορά. Πιο κάτω παρουσιάζονται τα κυκλώματα που υλοποιούν τη σχεδιάσή μας.

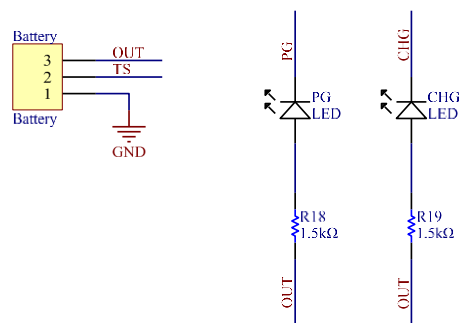
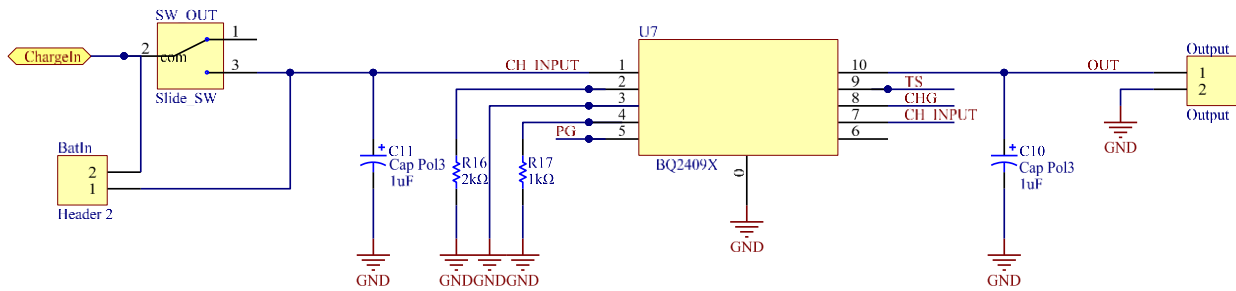




δ)



ε)



στ)

Σχήμα 4.1: Σχεδίαση κυκλώματος στο Altium:
 α) μετατροπέας ανύψωσης τάσης, β) κύκλωμα βελτιστοποίησης, γ) ρολόι 555
 δ) αντιστροφέας, ε) δειγματολήπτης και στ) φορτιστής μπαταρίας

4.1.1 Μετατροπέας συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση (Boost converter)

Στη διάταξή μας, θα χρησιμοποιήσουμε το ολοκληρωμένο TPS61200, το οποίο είναι ένας μετατροπέας boost. Το ολοκληρωμένο αυτό, μας δίνει τη δυνατότητα να ελέγξουμε την είσοδό του, μέσω του ακροδέκτη FB. Όταν η τάση στον ακροδέκτη αυτό είναι 0,5V, τότε η κατάσταση που βρίσκεται το κύκλωμά μας είναι αυτή που θέλουμε. Όταν δεν είναι, κάνει έλεγχο PWM ώστε να τη ρυθμίσει. Έτσι, θα μπορέσουμε να κάνουμε τη βελτιστοποίηση που θέλουμε, ελέγχοντας την τάση και το ρεύμα που θα τραβάει το κύκλωμα από το θερμοηλεκτρικό. Ακόμα, ο ακροδέκτης V_{AUX} έχει ανυψωμένη τάση από πολύ χαμηλή τάση εισόδου και είναι κατάλληλος για την τροφοδοσία βοηθητικών κυκλωμάτων.

4.1.2 Βοηθητικά κυκλώματα

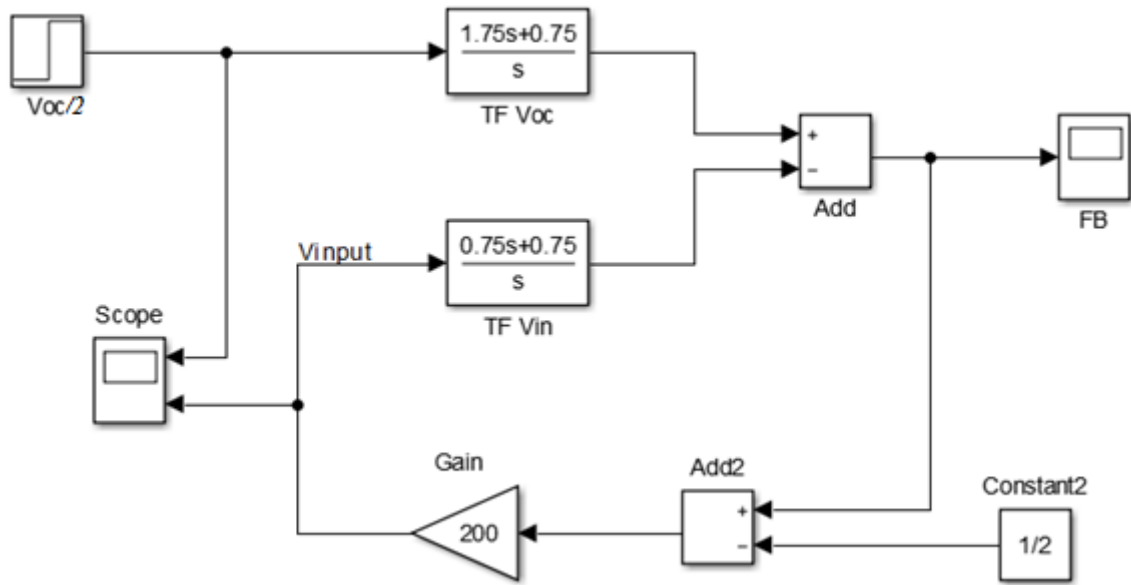
Για τα βοηθητικά κυκλώματα του κυκλώματος βελτιστοποίησης θα στηριχτούμε στη λογική που είδαμε στο υποκεφάλαιο 3.3.3.

Στην έξοδο του θερμοηλεκτρικού, τοποθετούμε ένα PMOS, το MCH3383, το οποίο θα ανοιχτοκυκλώνει το κύκλωμα, όταν έχει μηδενικό παλμό στην πύλη του. Θα χρησιμοποιήσουμε τον LMC555 για τη δημιουργία των παλμών. Το CD74AC04 κάνει αντιστροφή των παλμών και το ds1843 κάνει τη δειγματοληψία. Ο δειγματολήπτης που χρησιμοποιήσαμε, δέχεται μέχρι 1V στην είσοδό του. Για το λόγο αυτό χρειάστηκε να βάλουμε ένα διαιρέτη τάσης από την τάση ανοιχτοκύκλωσης στην είσοδο του ολοκληρωμένου. Έτσι, στην έξοδο του ολοκληρωμένου έχουμε $V_{oc}/6$.

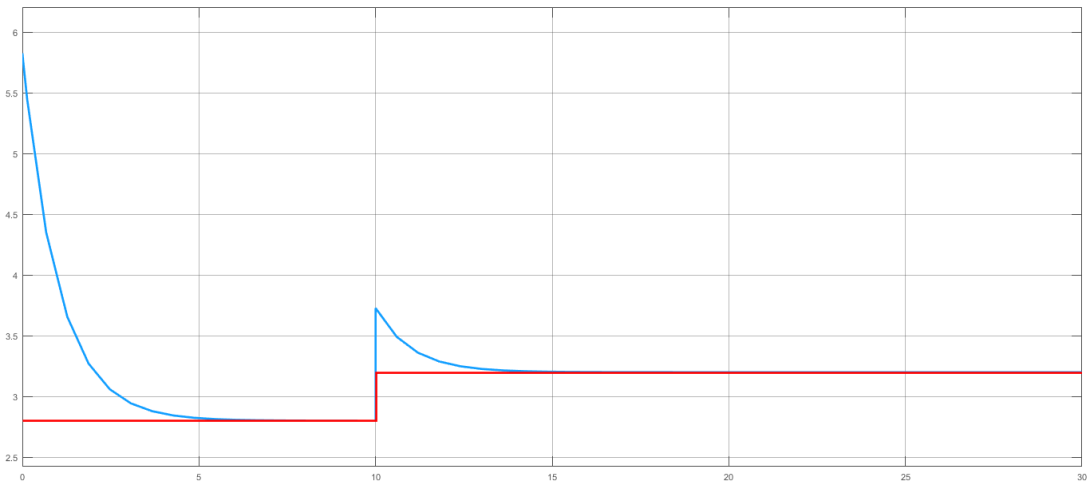
4.1.3 Κύκλωμα βελτιστοποίησης

Όπως είπαμε προηγουμένως, η βελτιστοποίηση γίνεται μέσω του κυκλώματος PWM που υπάρχει στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης, από την είσοδο FB. Ο τελεστικός ενισχυτής OPA379, κάνει τη σύγκριση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης με την τάση λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού. Αφού η τάση στην έξοδο του δειγματολήπτη είναι διαιρεμένη διά έξι, διαιρούμε και την τάση κανονικής λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού δια τρία (καθώς θέλουμε η τάση κανονικής λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας να είναι η μισή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης της). Αυτές οι δύο τιμές συγκρίνονται στον τελεστικό, και μέσω του ολοκληρωτή, το FB «βλέπει» το σφάλμα και το διορθώνει. Το σύστημα που σχεδιάσαμε φαίνεται παρακάτω σε σχεδίαση στη MATLAB.

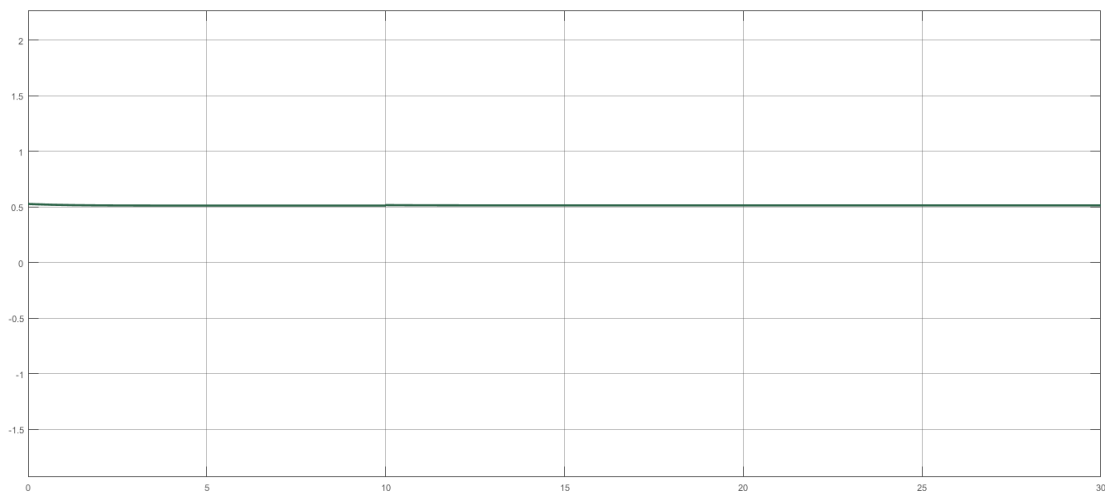
Όπως βλέπουμε στο σχήμα 4,3 η τάση λειτουργίας του κυκλώματος (μπλε καμπύλη) γίνεται ίση με την τάση ανοιχτοκύκλωσης (κόκκινη καμπύλη) που είναι οι δύο είσοδοι του συστήματος. Ακόμα, στο σχήμα 4.4, βλέπουμε ότι η τάση που πάει στο FB γίνεται ίση με 0,5.



Σχήμα 4.2: Σύστημα βελτιστοποίησης στο Matlab



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα αποτελέσματος προσομοίωσης τάσης ανοιχτοκύκλωσης και τάσης λειτουργίας κυκλώματος στη Matlab



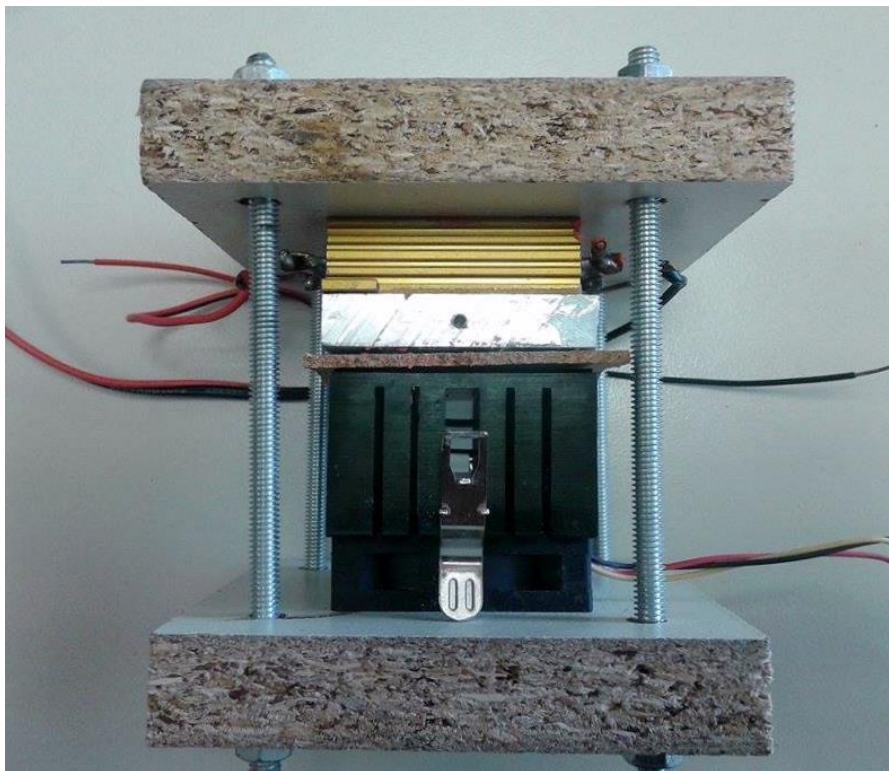
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα αποτελέσματος προσομοίωσης τάσης FB στη Matlab

4.1.4 Φορτιστής μπαταρίας

Για τη φόρτιση της μπαταρίας χρησιμοποιούμε το ολοκληρωμένο BQ24090. Χρησιμοποιήσαμε φορτιστή ανάμεσα στον boost και τη μπαταρία κυρίως για προστασία από υπέρταση και υπερένταση της μπαταρίας. Ακόμα, ο φορτιστής ρυθμίζει και σταθεροποιεί το ρεύμα και την τάση φόρτισης της μπαταρίας. Επιπλέον, ο φορτιστής αυτός ελέγχει τη θερμοκρασία της μπαταρίας και την προστατεύει από υπερθέρμανση. Τέλος, διαθέτει ενδεικτικές λυχνίες, που υποδεικνύουν τη λειτουργία του φορτιστή.

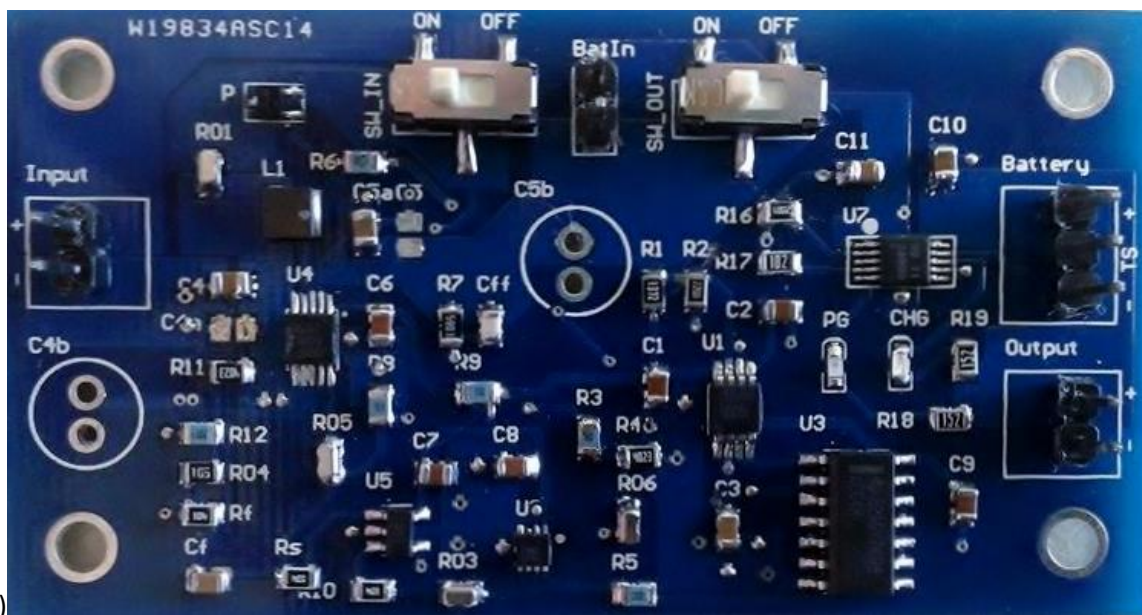
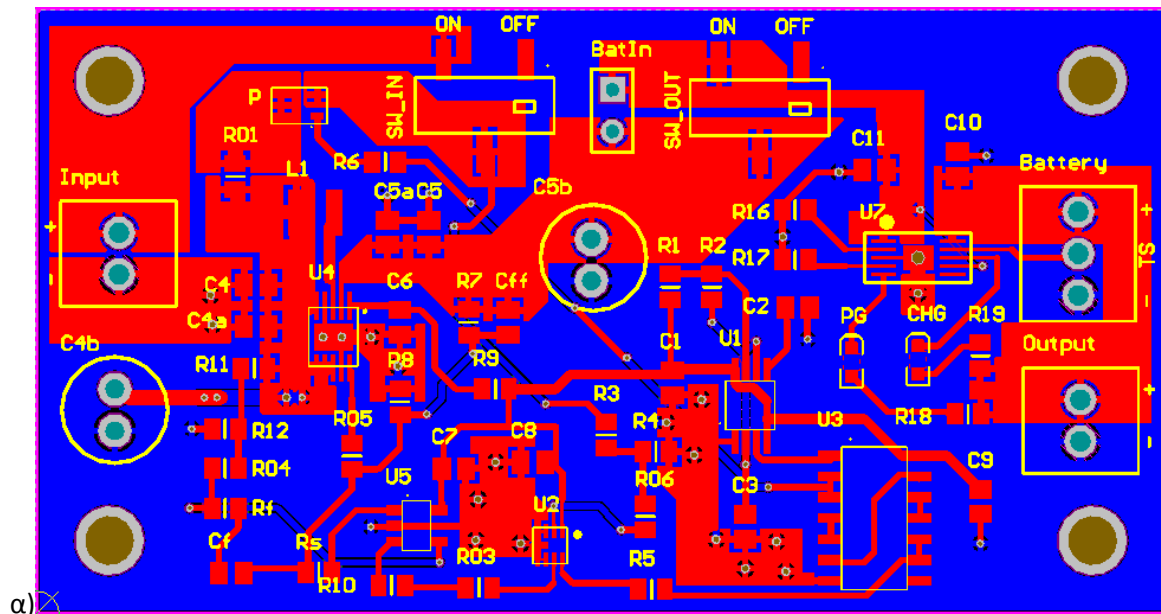
4.2 Πειραματική διάταξη και μετρήσεις

Για να δημιουργήσουμε τη θερμή πλευρά του θερμοηλεκτρικού, χρησιμοποιήσαμε δύο αντιστάσεις ισχύος συνδεδεμένες παράλληλα, πάνω σε πλάκα αλουμινίου ώστε να κατανέμεται ομοιόμορφα η θερμοκρασία πάνω στο θερμοηλεκτρικό. Στην κρύα πλευρά, βάλαμε μία ψήκτρα με ανεμιστήρα. Ανάμεσα στην πλάκα του αλουμινίου και τη ψήκτρα βάλαμε φελλό για θερμική απομόνωση μεταξύ κρύας και ζεστής πλευράς. Η συνολική πειραματική διάταξη απεικονίζεται στην πιο κάτω φωτογραφία.



Σχήμα 4.5: Πειραματική διάταξη θερμοηλεκτρικού στοιχείου

Η πλακέτα που σχεδιάσαμε φαίνεται πιο κάτω:



Σχήμα 4.6:α)Σχεδίαση PCB layerστο Altium και β) Φωτογραφία πλακέτας

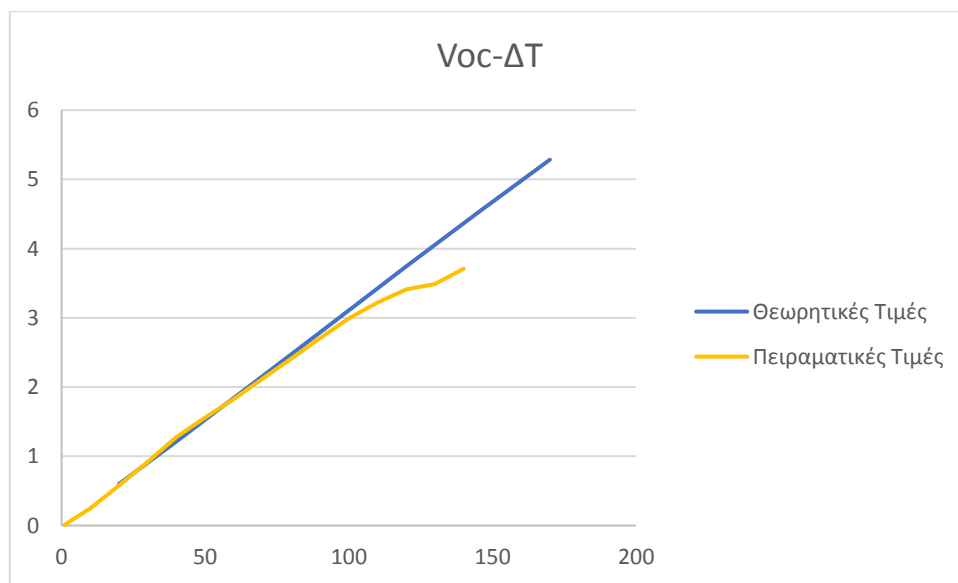
Στη συνέχεια θα δούμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων, έτσι όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο.

4.2.1 Εργαστηριακές μετρήσεις τάσης ανοιχτοκύκλωσης θερμοηλεκτρικού

Στον πιο κάτω πίνακα βλέπουμε τις τιμές της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του θερμοηλεκτρικού, και στη συνέχεια, ένα γράφημα που τις συγκρίνει με τις τιμές της θεωρίας, που είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο, οι οποίες φαίνονται να είναι πολύ κοντά.

| $T_c(^{\circ}C)$ | $T_H(^{\circ}C)$ | $\Delta T(^{\circ}C)$ | $V_{oc}(V)$ |
|------------------|------------------|-----------------------|-------------|
| 26 | 27 | 1 | 0,007 |
| 27 | 30 | 3 | 0,065 |
| 27 | 37 | 10 | 0,25 |
| 28 | 48 | 20 | 0,58 |
| 29 | 59 | 30 | 0,92 |
| 30 | 70 | 40 | 1,28 |
| 32 | 82 | 50 | 1,56 |
| 34 | 94 | 60 | 1,83 |
| 36 | 106 | 70 | 2,12 |
| 37 | 117 | 80 | 2,41 |
| 37 | 127 | 90 | 2,71 |
| 38 | 138 | 100 | 2,99 |
| 40 | 150 | 110 | 3,22 |
| 42 | 162 | 120 | 3,41 |
| 44 | 174 | 130 | 3,49 |
| 46 | 186 | 140 | 3,71 |

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις τάσης ανοιχτοκύκλωσης του θερμοηλεκτρικού



Σχήμα 4.7: Πειραματικό και θεωρητικό διάγραμμα τάσης ανοιχτοκύκλωσης συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας

4.2.2 Εργαστηριακές μετρήσεις του ηλεκτρικού κυκλώματος με τροφοδότηση από τροφοδοτικό

Αρχικά, συνδέσαμε την πλακέτα με ένα τροφοδοτικό σε σειρά με μία αντίσταση 1,6Ω, δημιουργώντας έτσι το ισοδύναμο Thevenin του θερμοηλεκτρικού μας, ώστε να δούμε αν συμπεριφέρεται σωστά.

Για να επιλέξουμε τι όριο ρεύματος θα βάλουμε στην μπαταρία, κάναμε τις μετρήσεις για $R_{16}=4k\Omega$ και $2k\Omega$. Η αντίσταση αυτή, καθορίζει το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να φορτίζει η μπαταρία. Οι μετρήσεις που πήραμε παρουσιάζονται στους πιο κάτω πίνακες:

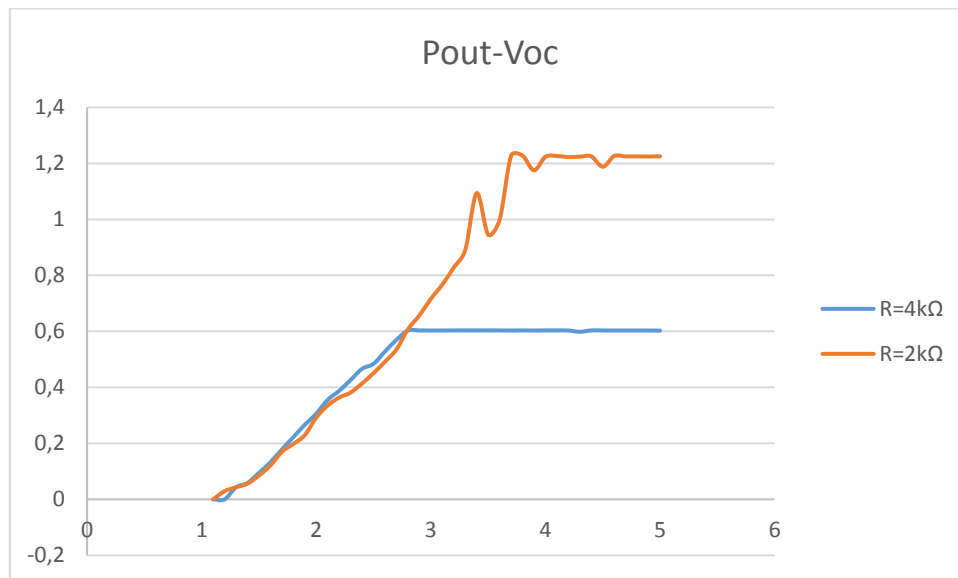
| Voc(V) | Vin(V) | Iin(mA) | Ibat(mA) | Vout(V) | Pin(W) | Pout(W) | N |
|--------|--------|---------|----------|---------|--------|---------|-------|
| 1,1 | 1,1 | 11 | 0 | 0 | 0,012 | 0 | 0 |
| 1,2 | 1,2 | 14 | 0 | 0 | 0,017 | 0 | 0 |
| 1,3 | 0,8 | 229 | 10 | 4,3 | 0,183 | 0,043 | 0,23 |
| 1,4 | 0,85 | 252 | 13 | 4,5 | 0,214 | 0,058 | 0,27 |
| 1,5 | 0,8 | 301 | 21 | 4,5 | 0,241 | 0,094 | 0,39 |
| 1,6 | 0,85 | 331 | 29,5 | 4,5 | 0,281 | 0,133 | 0,47 |
| 1,7 | 0,9 | 365 | 39,6 | 4,5 | 0,328 | 0,178 | 0,54 |
| 1,8 | 1 | 390 | 49,4 | 4,5 | 0,390 | 0,222 | 0,57 |
| 1,9 | 1,05 | 423 | 59,2 | 4,5 | 0,444 | 0,266 | 0,60 |
| 2 | 1,1 | 450 | 68 | 4,5 | 0,495 | 0,306 | 0,62 |
| 2,1 | 1,12 | 476 | 79 | 4,5 | 0,533 | 0,355 | 0,67 |
| 2,2 | 1,15 | 500 | 86,1 | 4,5 | 0,575 | 0,387 | 0,67 |
| 2,3 | 1,2 | 520 | 94,8 | 4,5 | 0,624 | 0,427 | 0,68 |
| 2,4 | 1,25 | 547 | 103,6 | 4,5 | 0,683 | 0,466 | 0,68 |
| 2,5 | 1,3 | 529 | 107,6 | 4,5 | 0,687 | 0,484 | 0,70 |
| 2,6 | 1,3 | 553 | 117,4 | 4,5 | 0,719 | 0,528 | 0,73 |
| 2,7 | 1,35 | 577 | 126,6 | 4,5 | 0,779 | 0,570 | 0,73 |
| 2,8 | 1,5 | 599 | 133 | 4,5 | 0,898 | 0,598 | 0,67 |
| 2,9 | 1,9 | 479 | 134,1 | 4,5 | 0,910 | 0,603 | 0,66 |
| 3 | 2,1 | 418 | 134,1 | 4,5 | 0,878 | 0,603 | 0,69 |
| 3,1 | 2,3 | 382 | 134,1 | 4,5 | 0,877 | 0,603 | 0,691 |
| 3,2 | 2,5 | 350 | 134,1 | 4,5 | 0,875 | 0,603 | 0,69 |
| 3,3 | 2,6 | 336 | 134,1 | 4,5 | 0,874 | 0,603 | 0,69 |
| 3,4 | 2,8 | 318 | 134,1 | 4,5 | 0,890 | 0,603 | 0,68 |
| 3,5 | 2,9 | 303 | 134,1 | 4,5 | 0,878 | 0,603 | 0,69 |
| 3,6 | 3 | 296 | 134,1 | 4,5 | 0,888 | 0,603 | 0,68 |
| 3,7 | 3,2 | 295 | 134,05 | 4,5 | 0,944 | 0,603 | 0,64 |
| 3,8 | 3,3 | 294 | 134,03 | 4,5 | 0,970 | 0,603 | 0,62 |
| 3,9 | 3,45 | 283 | 134,01 | 4,5 | 0,976 | 0,603 | 0,62 |
| 4 | 3,5 | 286 | 134 | 4,5 | 1,001 | 0,603 | 0,60 |
| 4,1 | 3,7 | 277 | 133,91 | 4,5 | 1,025 | 0,602 | 0,59 |
| 4,2 | 3,8 | 252 | 134,02 | 4,5 | 0,957 | 0,603 | 0,63 |
| 4,3 | 3,8 | 232 | 134,09 | 4,5 | 0,881 | 0,603 | 0,68 |
| 4,4 | 3,9 | 230 | 133,98 | 4,5 | 0,897 | 0,602 | 0,67 |
| 4,5 | 4 | 221 | 134,01 | 4,5 | 0,884 | 0,603 | 0,68 |
| 4,6 | 4,1 | 215 | 134,01 | 4,5 | 0,881 | 0,603 | 0,68 |
| 4,7 | 4,3 | 201 | 134 | 4,5 | 0,864 | 0,603 | 0,70 |
| 4,8 | 4,4 | 195 | 134,05 | 4,5 | 0,858 | 0,603 | 0,70 |
| 4,9 | 4,5 | 193 | 134,02 | 4,5 | 0,868 | 0,603 | 0,69 |
| 5 | 4,8 | 170 | 134,01 | 4,5 | 0,816 | 0,603 | 0,74 |

Πίνακας 4.2: Μετρήσεις ηλεκτρικού κυκλώματος με τροφοδοσία από το τροφοδοτικό και $R_{16}=4k\Omega$

| Voc(V) | Vin(v) | Iin(mA) | Ibat(mA) | Vout(V) | Pin(W) | Pout(W) | H |
|--------|--------|---------|----------|---------|--------|---------|------|
| 1,1 | 1,1 | 13 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 |
| 1,2 | 0,8 | 220 | 6,5 | 4,5 | 0,17 | 0,03 | 0,16 |
| 1,3 | 0,85 | 249 | 9,6 | 4,5 | 0,21 | 0,04 | 0,20 |
| 1,4 | 0,9 | 276 | 12,4 | 4,5 | 0,24 | 0,05 | 0,22 |
| 1,5 | 0,93 | 321 | 18,9 | 4,5 | 0,30 | 0,08 | 0,28 |
| 1,6 | 0,97 | 358 | 26,9 | 4,5 | 0,34 | 0,12 | 0,35 |
| 1,7 | 1 | 394 | 37,7 | 4,5 | 0,39 | 0,17 | 0,43 |
| 1,8 | 1,05 | 423 | 44 | 4,5 | 0,44 | 0,20 | 0,44 |
| 1,9 | 1 | 448 | 51 | 4,5 | 0,45 | 0,23 | 0,51 |
| 2 | 1,05 | 483 | 64,9 | 4,5 | 0,51 | 0,29 | 0,57 |
| 2,1 | 1,1 | 509 | 74,6 | 4,5 | 0,56 | 0,34 | 0,60 |
| 2,2 | 1,15 | 535 | 80,8 | 4,5 | 0,61 | 0,36 | 0,59 |
| 2,3 | 1,2 | 557 | 84,8 | 4,5 | 0,67 | 0,38 | 0,57 |
| 2,4 | 1,25 | 570 | 92 | 4,5 | 0,71 | 0,41 | 0,58 |
| 2,5 | 1,3 | 603 | 100,2 | 4,5 | 0,78 | 0,45 | 0,57 |
| 2,6 | 1,3 | 628 | 109,3 | 4,5 | 0,81 | 0,49 | 0,60 |
| 2,7 | 1,35 | 652 | 119 | 4,5 | 0,88 | 0,53 | 0,61 |
| 2,8 | 1,4 | 699 | 135 | 4,5 | 0,98 | 0,61 | 0,62 |
| 2,9 | 1,5 | 720 | 146 | 4,5 | 1,08 | 0,66 | 0,61 |
| 3 | 1,5 | 721 | 159,2 | 4,5 | 1,08 | 0,72 | 0,66 |
| 3,1 | 1,55 | 776 | 170,5 | 4,5 | 1,20 | 0,77 | 0,64 |
| 3,2 | 1,6 | 803 | 184 | 4,5 | 1,28 | 0,83 | 0,64 |
| 3,3 | 1,7 | 828 | 198 | 4,5 | 1,41 | 0,89 | 0,63 |
| 3,4 | 1,8 | 848 | 210 | 4,5 | 1,53 | 0,94 | 0,62 |
| 3,5 | 1,8 | 870 | 222 | 4,5 | 1,56 | 1,00 | 0,64 |
| 3,6 | 1,7 | 888 | 243 | 4,5 | 1,51 | 1,09 | 0,72 |
| 3,7 | 1,8 | 927 | 261,2 | 4,5 | 1,67 | 1,17 | 0,70 |
| 3,8 | 1,95 | 948 | 264 | 4,5 | 1,85 | 1,19 | 0,64 |
| 3,9 | 2,6 | 711 | 272,5 | 4,5 | 1,85 | 1,23 | 0,66 |
| 4 | 2,7 | 657 | 272,5 | 4,5 | 1,77 | 1,23 | 0,69 |
| 4,1 | 3,2 | 629 | 272,3 | 4,5 | 2,01 | 1,22 | 0,61 |
| 4,2 | 3,2 | 608 | 272,1 | 4,5 | 1,94 | 1,22 | 0,63 |
| 4,3 | 3,3 | 574 | 272,2 | 4,5 | 1,89 | 1,22 | 0,65 |
| 4,4 | 3,4 | 548 | 272,2 | 4,5 | 1,86 | 1,22 | 0,66 |
| 4,5 | 3,6 | 511 | 272,2 | 4,5 | 1,84 | 1,22 | 0,67 |
| 4,6 | 3,7 | 490 | 272 | 4,5 | 1,81 | 1,22 | 0,68 |
| 4,7 | 3,8 | 469 | 271,7 | 4,5 | 1,78 | 1,22 | 0,69 |
| 4,8 | 4 | 436 | 271,9 | 4,5 | 1,74 | 1,22 | 0,70 |
| 4,9 | 4,2 | 397 | 272,8 | 4,5 | 1,66 | 1,23 | 0,74 |
| 5 | 4,3 | 382 | 272,7 | 4,5 | 1,64 | 1,23 | 0,75 |

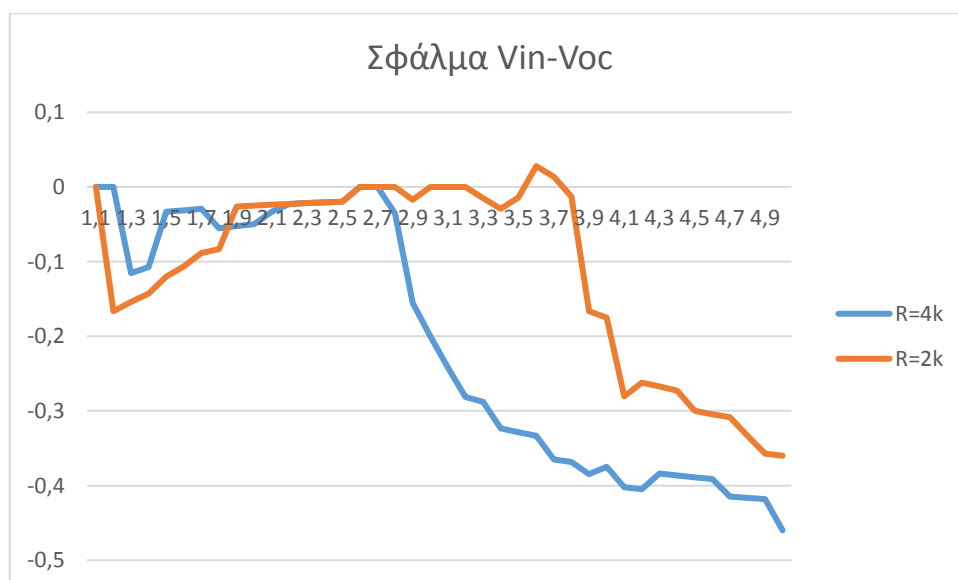
Πίνακας 4.3: Μετρήσεις ηλεκτρικού κυκλώματος με τροφοδοσία από το τροφοδοτικό και $R_{16}=2k\Omega$

Η μπαταρία ξεκινάει να φορτίζεται όταν η τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι στα 1,3V στην πρώτη περίπτωση και 1,2Vστη δεύτερη, που αντιστοιχούν σε περίπου 40°C διαφορά θερμοκρασίας.



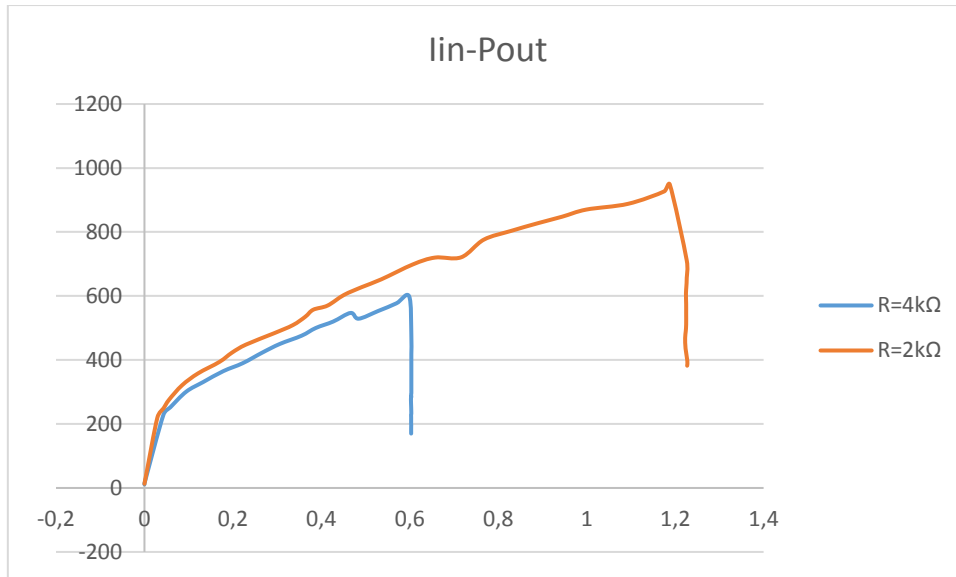
Σχήμα 4.8: : Διάγραμμα ισχύος εξόδου συναρτήσει της τάσης ανοιχτοκύκλωσης

Όπως βλέπουμε το κύκλωμά μας κάνει το ζητούμενο. Η τάση εισόδου είναι κοντά στη μισή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, για το εύρος μετρήσεων προτού η μπαταρία αρχίσει να φορτίζεται με το μέγιστο ρεύμα φόρτισης. Το σφάλμα της τάσης λειτουργίας που προκύπτει ως προς τη μισή τάση ανοιχτοκύκλωσης φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



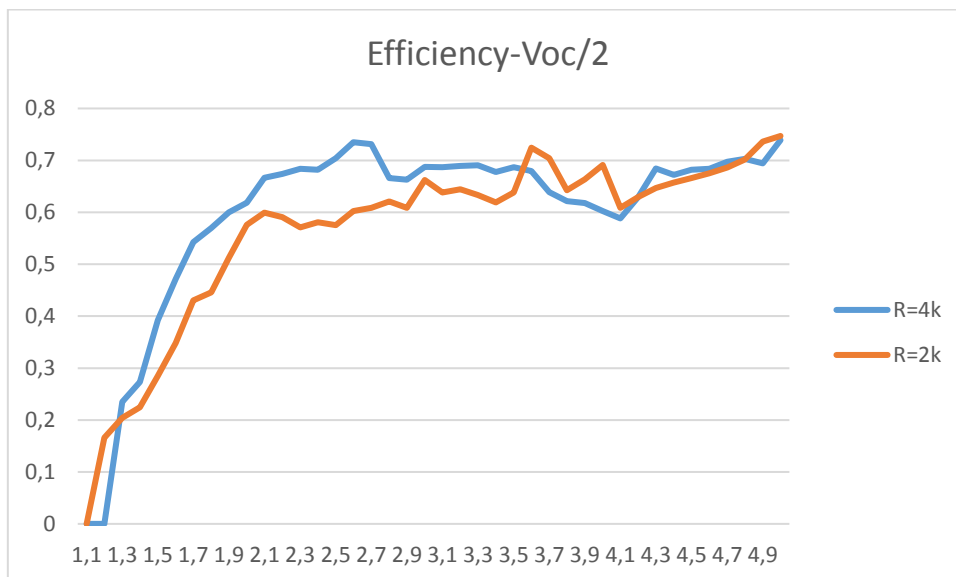
Σχήμα 4.9: : Διάγραμμα σφάλματος τάσης λειτουργίας κυκλώματος συναρτήσει της τάσης ανοιχτοκύκλωσης

Όταν η μπαταρία φορτίζεται με το μέγιστο ρεύμα φόρτισης, το ρεύμα και η τάση εξόδου του μετατροπέα μένουν σταθερά. Αφού αυξάνεται η τάση ανοιχτοκύκλωσης, το ρεύμα πρέπει να μειωθεί. Έτσι σταματάει να γίνεται η λειτουργία της βελτιστοποίησης και αυξάνεται το σφάλμα.



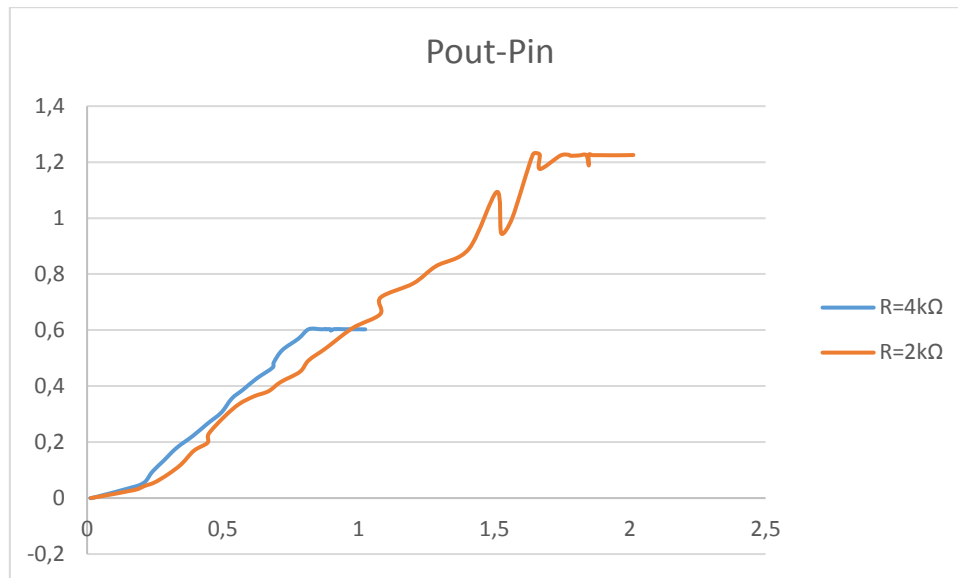
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα του ρεύματος εισόδου του κυκλώματος συναρτήσει της ισχύος εξόδου

Ο βαθμός απόδοσης συναρτήσει της τάσης ανοιχτοκύκλωσης φαίνεται στο πιο κάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα βαθμού απόδοσης του κυκλώματος συναρτήσει της τάσης ανοιχτοκύκλωσης

Ακολούθως φαίνεται το διάγραμμα της ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος εισόδου. Βλέπουμε ότι η ισχύς εξόδου αυξάνεται γραμμικά με την ισχύ εισόδου. Όταν η μπαταρία φορτίζεται με το μέγιστο ρεύμα φόρτισης, η έξοδος μένει σταθερή.



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου του κυκλώματος συναρτήσει της ισχύος εισόδου

Στα δύο προηγούμενα διαγράμματα βλέπουμε ότι ο βαθμός απόδοσης για $R_{16}=4k\Omega$ είναι λίγο καλύτερος. Παρ' όλα αυτά, θα επιλέξουμε $R_{16}=2k\Omega$, αφού στην πρώτη περίπτωση το μέγιστο ρεύμα φόρτισης είναι 134mA και στη δεύτερη περίπτωση 272mA και έτσι στη δεύτερη περίπτωση πετυχαίνουμε καλύτερη ισχύ.

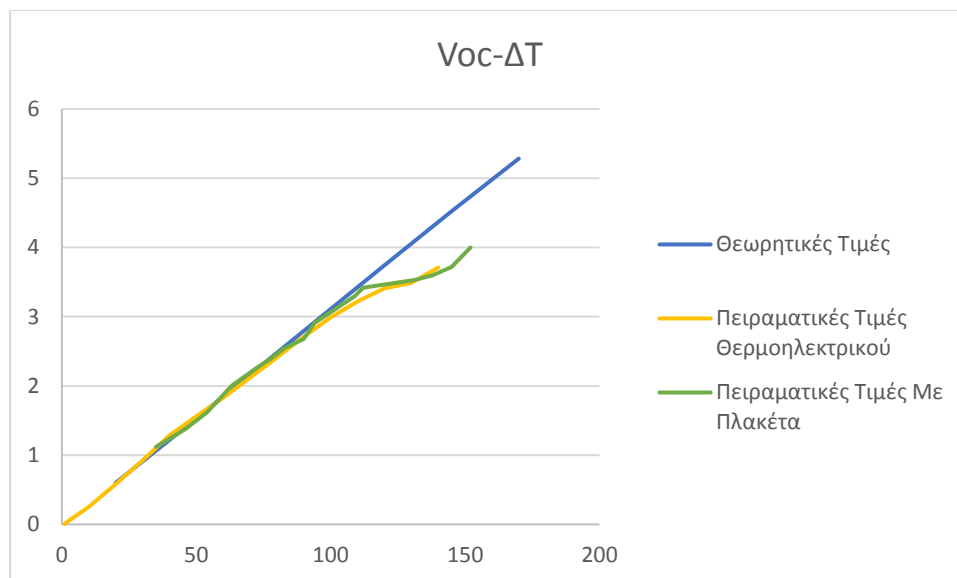
4.2.3 Εργαστηριακές μετρήσεις του ηλεκτρικού κυκλώματος με τροφοδότηση από το θερμοηλεκτρικό

Στη συνέχεια συνδέσαμε την πλακέτα στο θερμοηλεκτρικό. Ο πίνακας μετρήσεων και αποτελεσμάτων φαίνεται πιο κάτω.

| T_c ($^{\circ}C$) | T_H ($^{\circ}C$) | ΔT ($^{\circ}C$) | V_{oc} (V) | V_{in} (V) | I_{in} (mA) | I_{bat} (mA) | V_{out} (V) | P_{in} (W) | P_{out} (W) | η |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|--------|
| 23 | 58 | 35 | 1,12 | 0,78 | 140 | 0,65 | 4,5 | 0,11 | 0,00 | 0,03 |
| 19 | 65 | 46 | 1,38 | 0,87 | 199 | 6,5 | 4,5 | 0,17 | 0,03 | 0,17 |
| 20 | 74 | 54 | 1,62 | 0,98 | 230 | 11 | 4,5 | 0,23 | 0,05 | 0,22 |
| 18 | 81 | 63 | 2 | 1 | 330 | 36 | 4,5 | 0,33 | 0,16 | 0,49 |
| 19 | 91 | 72 | 2,25 | 1,1 | 390 | 57 | 4,5 | 0,43 | 0,26 | 0,60 |
| 21 | 99 | 78 | 2,4 | 1,17 | 415 | 70 | 4,5 | 0,49 | 0,32 | 0,65 |
| 22 | 105 | 83 | 2,55 | 1,25 | 425 | 75,5 | 4,5 | 0,53 | 0,34 | 0,64 |
| 20 | 110 | 90 | 2,68 | 1,28 | 430 | 83,3 | 4,5 | 0,55 | 0,37 | 0,68 |
| 26 | 120 | 94 | 2,91 | 1,41 | 495 | 103,4 | 4,5 | 0,70 | 0,47 | 0,67 |
| 26 | 135 | 109 | 3,3 | 1,6 | 540 | 123,5 | 4,5 | 0,86 | 0,56 | 0,64 |
| 27 | 139 | 112 | 3,42 | 1,71 | 570 | 134,9 | 4,5 | 0,97 | 0,61 | 0,62 |
| 27 | 158 | 131 | 3,53 | 1,78 | 580 | 147 | 4,5 | 1,03 | 0,66 | 0,64 |
| 29 | 167 | 138 | 3,6 | 1,85 | 590 | 156,5 | 4,5 | 1,09 | 0,70 | 0,65 |
| 32 | 177 | 145 | 3,72 | 1,88 | 600 | 163,2 | 4,5 | 1,13 | 0,73 | 0,65 |
| 32 | 184 | 152 | 4 | 1,95 | 614 | 170,1 | 4,5 | 1,20 | 0,77 | 0,64 |

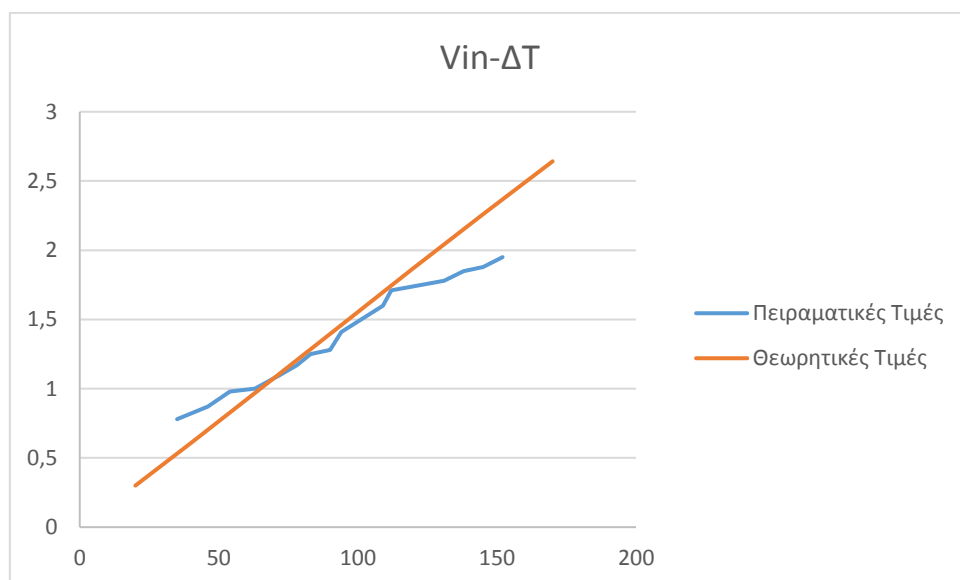
Πίνακας 4.4: Μετρήσεις ηλεκτρικού κυκλώματος με τροφοδοσία από το θερμοηλεκτρικό

Αρχικά, κάνουμε μία σύγκριση των τιμών της τάσης ανοιχτοκύκλωσης ως προς τη διαφορά θερμοκρασίας με τις θεωρητικές τιμές που υπολογίσαμε στο δεύτερο κεφάλαιο και φαίνονται στον πίνακα 2.3, καθώς και με τις τιμές που πήραμε στον πίνακα 4.1. Παρατηρούμε ότι οι τιμές που πήραμε είναι πολύ κοντά στις θεωρητικές, μέχρι τους 120°C διαφορά θερμοκρασίας. Μετά, μέχρι τους 150°C διαφορά θερμοκρασίας, παρατηρείται μία σημαντική απόκλιση.



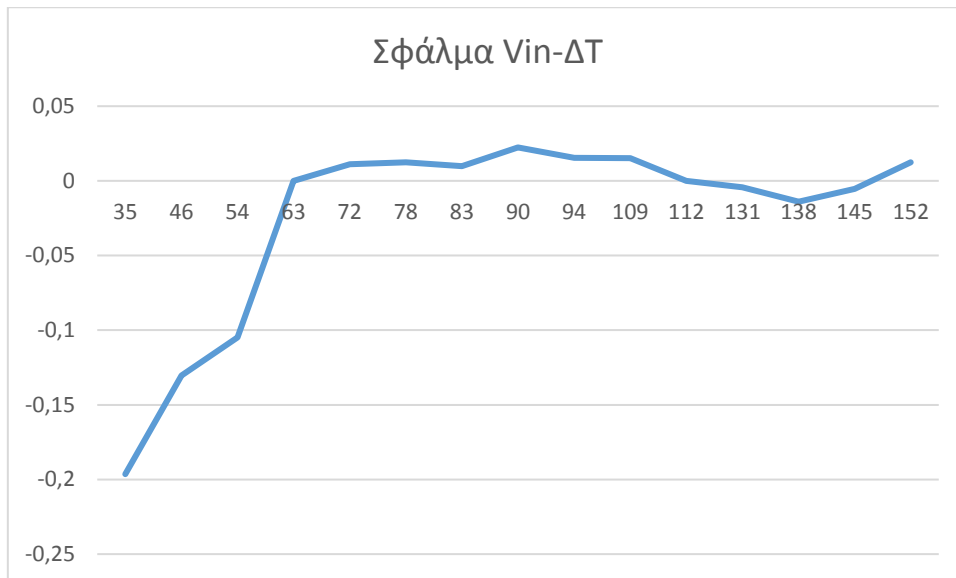
Σχήμα 4.13: Πειραματικά διαγράμματα και θεωρητικό διάγραμμα τάσης ανοιχτοκύκλωσης συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας

Στη συνέχεια παρατηρούμε την τάση λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού, η οποία είναι πολύ κοντά στις θεωρητικές μας τιμές, κυρίως για το εύρος 50-120°C διαφορά θερμοκρασίας.



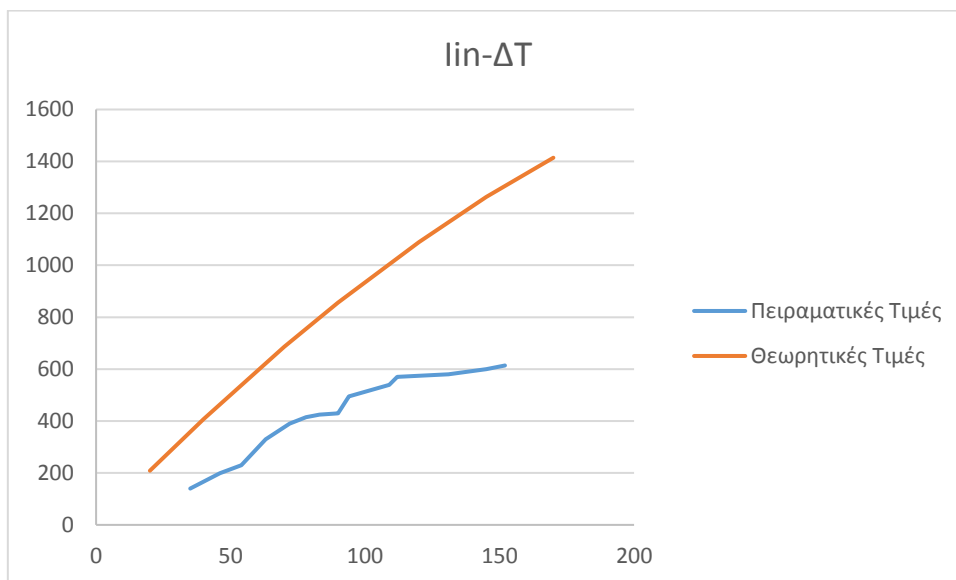
Σχήμα 4.14: Πειραματικό και θεωρητικό διάγραμμα τάσης λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας

Αν υπολογίσουμε το σφάλμα την τάσης λειτουργίας ως προς τη μισή τάση ανοιχτοκύκλωσης που μετρήσαμε, παρατηρούμε ότι το σφάλμα είναι πολύ κοντά στο μηδέν, αν εξαιρέσουμε τις χαμηλές διαφορές θερμοκρασίας.



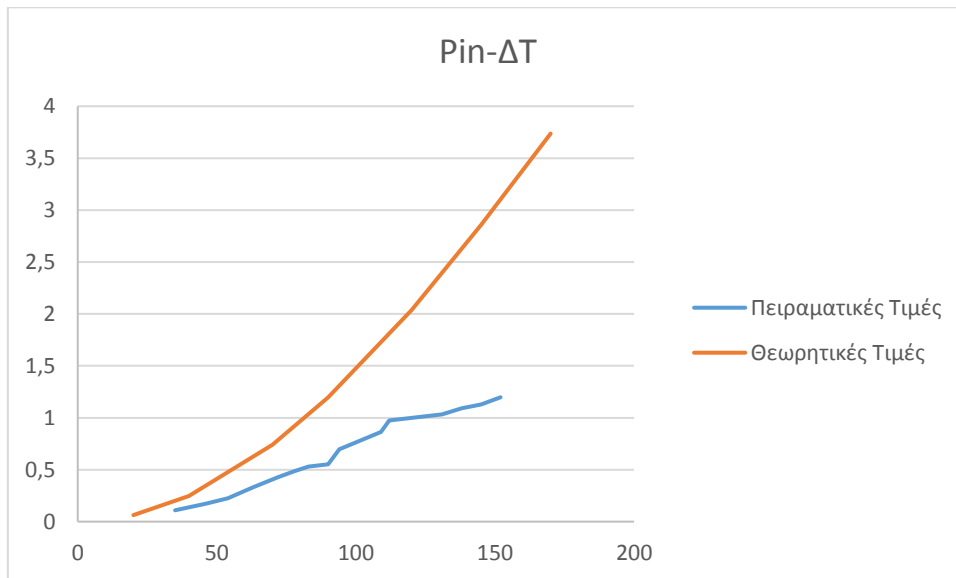
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα σφάλματος τάσης λειτουργίας θερμοηλεκτρικού ως προς τη μισή τάση ανοιχτοκύκλωσης συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας

Πιο κάτω, φαίνεται το ρεύμα λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρούμε σημαντικές αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές.



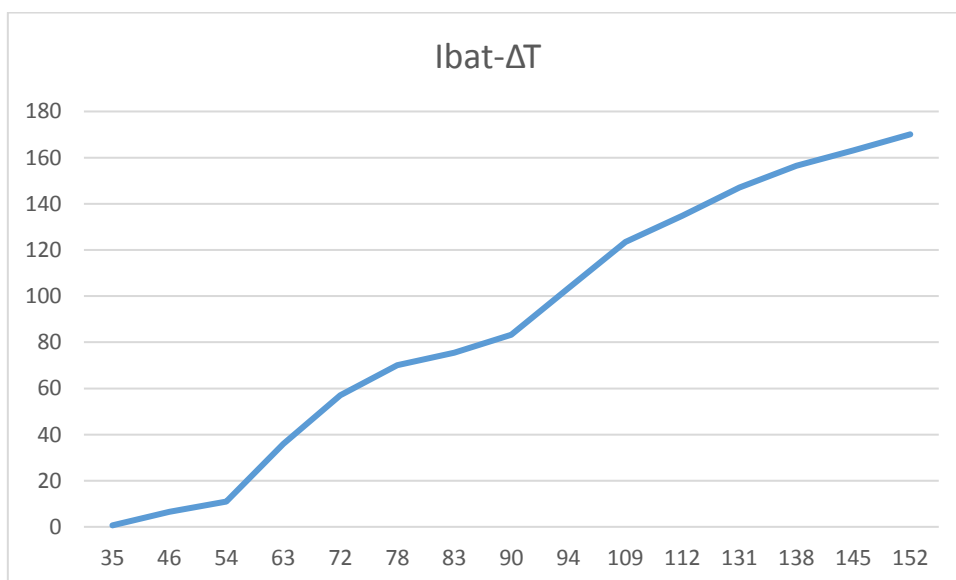
Σχήμα 4.16: Πειραματικό και θεωρητικό διάγραμμα ρεύματος λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας

Στη συνέχεια, βλέπουμε το διάγραμμα της ισχύος του θερμοηλεκτρικού μας σε σύγκριση με τις θεωρητικές τιμές βέλτιστης ισχύος, όπως υπολογίστηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Όπως ήταν αναμενόμενο από το προηγούμενο διάγραμμα του ρεύματος, η ισχύς που μετρήσαμε στο πείραμά μας είναι μικρότερη της επιθυμητής. Ακόμα, σε μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας, παρατηρήθηκε και μία μείωση στις τιμές της τάσης λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού μας, γι' αυτό και βλέπουμε τόσο μεγάλη απόκλιση.

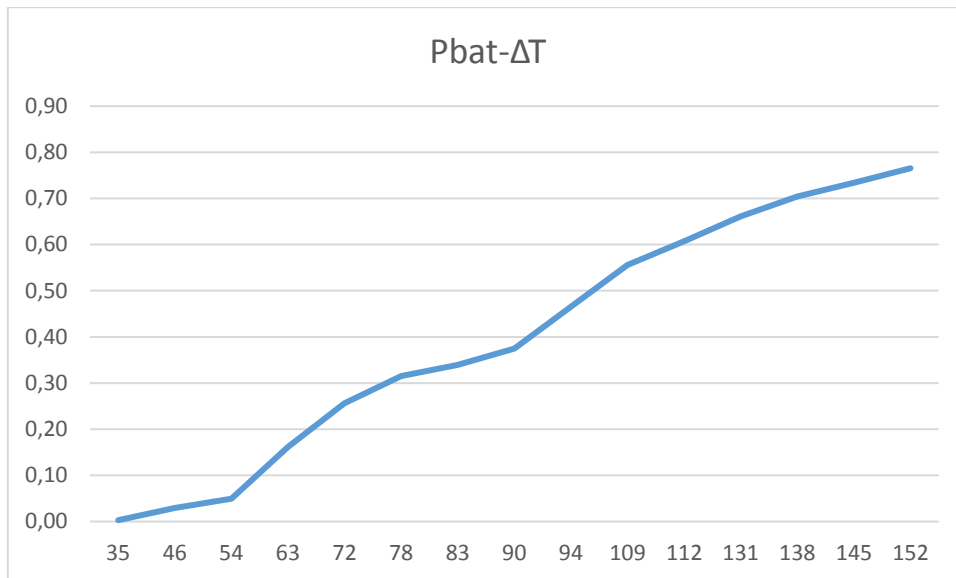


Σχήμα 4.17: Πειραματικό και θεωρητικό διάγραμμα ισχύος του θερμοηλεκτρικού συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα που αφορούν το ρεύμα και την ισχύ εξόδου του κυκλώματός μας, την ενέργεια δηλαδή που απορροφά η μπαταρία.

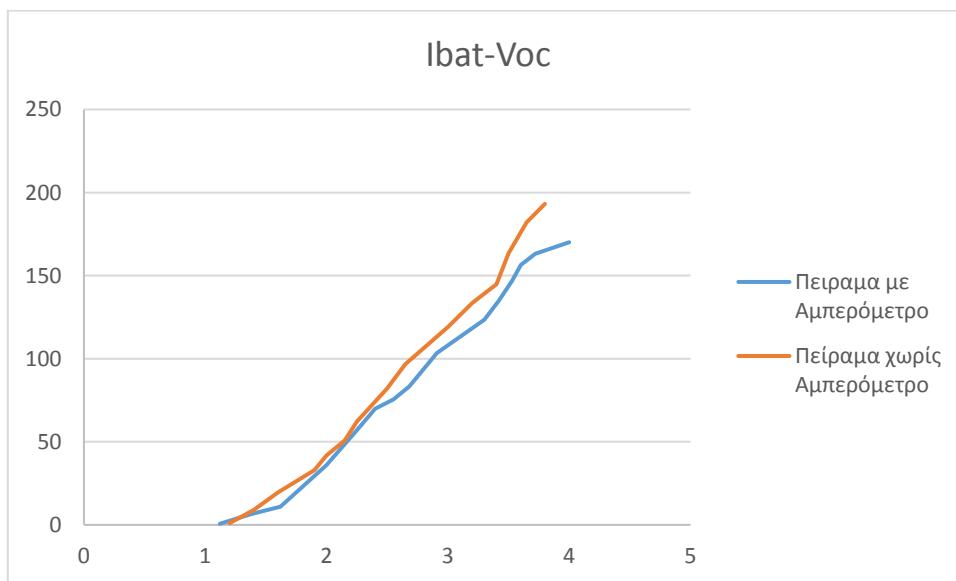


Σχήμα 4.18: Διάγραμμα ρεύματος φόρτισης της μπαταρίας συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας



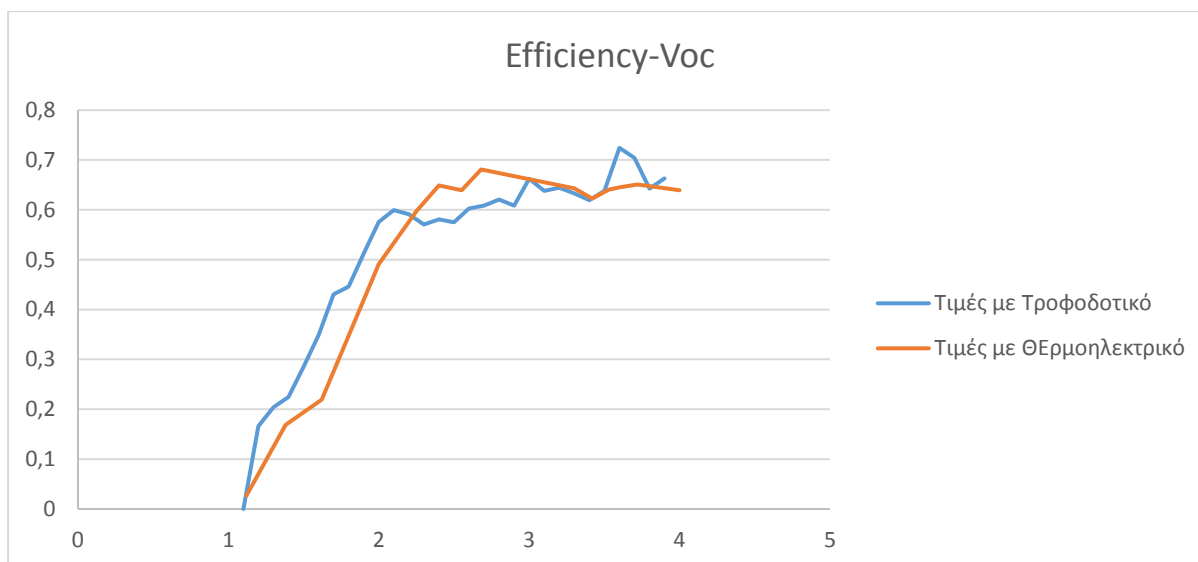
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα ισχύος φόρτισης της μπαταρίας συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας

Το επόμενο διάγραμμα δείχνει το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας σε σύνδεση του θερμοηλεκτρικού κατ' ευθείαν στην πλακέτα, χωρίς την παρέμβαση του αμπερομέτρου και των καλωδίων. Βλέπουμε ότι το ρεύμα φόρτισης σε αυτή την περίπτωση είναι σαφώς μεγαλύτερο από την προηγούμενη.



Σχήμα 4.20: Διάγραμμα ρεύματος φόρτισης της μπαταρίας συναρτήσει της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, στην περίπτωση σύνδεσης θερμοηλεκτρικού κατ' ευθείαν στην πλακέτα και στην περίπτωση παρεμβολής του αμπερομέτρου

Στο επόμενο διάγραμμα, φαίνεται ο βαθμός απόδοσης του κυκλώματος που σχεδιάσαμε, όπως μετρήθηκε σε σύνδεση με το τροφοδοτικό και σε σύνδεση με το θερμοηλεκτρικό, ως προς την τάση ανοιχτοκύκλωσης.



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα βαθμού απόδοσης του κυκλώματος συναρτήσει της τάσης ανοιχτοκύκλωσης

4.2.4 Συμπεράσματα

Όπως βλέπουμε, τόσο οι μετρήσεις με το τροφοδοτικό όσο και οι μετρήσεις με το θερμοηλεκτρικό δείχνουν ότι η μέθοδος βελτιστοποίησης λειτουργεί με ορθό τρόπο, αφού η τάση λειτουργίας του κυκλώματός μας είναι ίση περίπου με τη μισή τάση ανοιχτοκύκλωσης.

Παρά ταύτα, οι μετρήσεις μας έχουν σημαντικές αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές. Η πτώση τάσης που προκαλούν τα καλώδια και το αμπερόμετρο από το θερμοηλεκτρικό μέχρι το κύκλωμα της πλακέτας, επιφέρουν μεγάλο σφάλμα στη βελτιστοποίηση που γίνεται. Το κύκλωμά μας θεωρεί τάση λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού μία μικρότερη τάση από την πραγματική, οπότε το θερμοηλεκτρικό τελικά έχει τάση λειτουργίας μεγαλύτερη από τη βέλτιστη και ρεύμα λειτουργίας μικρότερο από το επιθυμητό. Αυτό, συνεπάγεται ότι κατά την εκτέλεση του πειράματός μας, το θερμοηλεκτρικό δεν μπορούσε να λειτουργήσει στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας του, γι' αυτό και έχουμε μεγάλες αποκλίσεις στο ρεύμα και στην ισχύ του θερμοηλεκτρικού, σε σύγκριση με τις θεωρητικές τιμές.

Σφάλματα όσον αφορά τις μετρήσεις που πήραμε, είχαμε λόγω των επαγωγικών φαινομένων που δημιουργούσαν τα καλώδια. Ακόμα, η κβάντιση του παλμογράφου, καθώς και η διακοπτική λειτουργία του ρεύματος λόγω του μετατροπέα μας, καθιστούν δύσκολη την ακριβή μέτρηση των τάσεων στον παλμογράφο. Επιπλέον, τα θερμοζεύγη που χρησιμοποιήσαμε για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των δύο πλακών, ήταν χαμηλής ακρίβειας. Οι λανθασμένες μετρήσεις θερμοκρασιών, προκαλούν σημαντικά σφάλματα στη σύγκριση των μετρήσεών μας με τις θεωρητικές τιμές.

Εφόσον το πείραμα διεξαχθεί σε καλύτερες συνθήκες, θα είναι σίγουρα καλύτερη η εξαγωγή συμπερασμάτων, ως προς τη λειτουργικότητα της σχεδιάσής μας. Αρχικά, με καλύτερα μετρητικά μηχανήματα, θα αποφευχθούν μεγάλες αποκλίσεις από τις τιμές που θα μετράμε.

Για παράδειγμα, αντί για παλμογράφο, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα καταγραφέα τάσεων ή ρευμάτων 16bit και καλύτερης ακρίβειας θερμοζεύγη.

Επίσης, θα μπορούσαμε να μετρήσουμε το ρεύμα παρεμβάλλοντας μία μικρή αντίσταση μεταξύ του θερμοηλεκτρικού και της πλακέτας. Με τον τρόπο αυτό θα αποφεύγαμε τα επαγωγικά φαινόμενα που προσθέτουν τα καλώδια, θα είχαμε πολύ καλύτερη εικόνα σε ότι αφορά το ρεύμα και θα μπορούσαμε να συνυπολογίσουμε το σφάλμα που προσθέτει η μέτρησή μας.

Ακόμα, θα ήταν σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί υδρόψυξη, ώστε να έχουμε σταθερή θερμοκρασία κρύας πλευράς. Έπειτα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν αντιστάσεις ισχύος που να αντέχουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Έτσι, θα είχαμε αποτελέσματα για μεγαλύτερο εύρος διαφοράς θερμοκρασίας.

Τελικά, συμπεραίνουμε ότι το κύκλωμά μας ανταποκρίνεται στην απαιτούμενη εργασία. Η τάση λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι η μισή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και η μπαταρία φορτίζεται με ικανοποιητικό ρεύμα, ώστε να μπορεί να τροφοδοτεί συσκευές χαμηλής ισχύος.

Με σύνδεση του θερμοηλεκτρικού κατευθείαν στην πλακέτα, θεωρούμε ότι το κύκλωμά μας θα τραβάει τη μέγιστη δυνατή ισχύ από το θερμοηλεκτρικό, ανάλογα με τις απαιτήσεις της μπαταρίας. Ακόμα, το διάγραμμα του σχήματος 4.17, δείχνει το βαθμό απόδοσης του κυκλώματός μας. Συγκρίνοντας την απόδοση που πετύχαμε με τις καμπύλες απόδοσης του μετατροπέα που δίνονται από τον κατασκευαστή, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο μετατροπέας λειτουργεί για μεγάλο εύρος τιμών στο βέλτιστο της απόδοσής του.

Βιβλιογραφία

- [1] Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source, David Michael Rowe, International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Vol. 1, no. 1 (November 2006)
- [2] Rowe D. Thermoelectrics, an environmentally-friendly source of electrical power. Renew Energy 1999;16(1-4):1251-6
- [3] Ismail BI, Ahmed WH. Thermoelectric power generation using waste-heat energy as an alternative green technology. Recent Patents Electr Electron Eng 2009; 2(1):27-39
- [4] Evaluation of thermoelectric modules for power generation, D. M. Rowe, Gao Min, Journal of Power Sources, Volume 73, Issue 2, 15 June 1998, Pages 193-198
- [5] Photovoltaic-thermoelectric hybrid systems: A general optimization methodology, D. Kraemer, L. Hu, A. Muto, X. Chen, and M. Chiesa, Received 15 April 2008; accepted 29 May 2008, published, online 17 June 2008
- [6] Experimental analysis and performance evaluation of a tandem photovoltaic–thermoelectric hybrid system, D.N. Kossyvakis, G.D. Voutsinas, E.V. Hristoforou, Energy Conversion and Management 117 (2016) 490–500, Elsevier
- [7] Computational Analysis of a Thermoelectric Generator for Waste-Heat Harvesting in Wearable Systems, D. N. Kossyvakis, S. G. Vassiliadis, C. G. Vossou, E. E. Mangiorou, S. M. Potirakis & E. V. Hristoforou, Journal of Electronic Materials, DOI 10.1007/s11664-016-4452-2
- [8] Spice compatible equivalent circuit of the energy conversion processes in thermoelectric modules, Simon Lineykin and Sam Ben-Yaakov, Published, 23rd IEEE Israel Convention, pp. 346-349, Tel-Aviv, 2004 paper3.pdf
- [9] Peltier Thermoelectric Modules Modeling and Evaluation, Chakib Alaoui, International Journal of Engineering (IJE), Volume (5) Issue (1) 2011
- [10] Lumped and Distributed Parameter SPICE Models of TE Devices Considering Temperature Dependent Material Properties, D. Mitrani, J. Salazar, A. Turó, M. J. García, and J. A. Chávez, EDA Publishing/THERMINIC 2007, ISBN: 978-2-35500-002-7
- [11] Application Note, Tellurex Corporation—Frequently Asked Questions About Our Power Generation Technology
- [12] Computational and experimental analysis of a commercially available Seebeck module, D.N. Kossyvakis, C.G. Vossou, C.G. Provatidis, E.V. Hristoforou, Renewable Energy 74 (2015) 1-10, Elsevier
- [13] Application of a DC-DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators, Hayati Mamur, Rasit Ahiska, Energy Conversion and Management 97 (2015) 265–272
- [14] Maximum Power Point Tracking Converter Based on the Open-Circuit Voltage Method for Thermoelectric Generators, Andrea Montecucco and Andrew R. Knox, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 30, NO. 2, FEBRUARY 2015

- [15] Comparative Study of MPPT Algorithms for Thermoelectric Generators, Panagiotis G. Chatzidakis, Georgios C. Christidis and Emmanuel C. Tatakis
- [16] Steady State Reliability of Maximum Power Point Tracking Algorithms used with Thermoelectric Generator, Ian Laird, 2013 IEEE
- [17] Ηλεκτρονικά Ισχύος, Στέφανος Μανιάς, Εκδόσεις Συμεών, ISBN: 978-960-9400-40-4
- [18] Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος, Ανάλυση Σχεδίαση και Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Μετατροπέων Ισχύος, Mohan Undeland Robbins, Εκδόσεις Τζιόλα